V-5　計算機プログラム（解析コード）の概要

目次

V-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＭＳＣ ＮＡＳＴＲＡＮ
V-5-2　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＹＮＡ２Ｅ
V-5-3　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＡＰ-Ⅳ
V-5-4　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＨＩＳＡＰ及びＮＳＡＦＥ
V-5-5　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＢＡＱＵＳ
V-5-6　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＱＡＤ－ＣＧＧＰ２Ｒ
V-5-7　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＯＲＩＧＥＮ２
V-5-8　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＣＡＬＥ
V-5-9　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＯＮＢＯＳ
V-5-10　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＬＩＰ
V-5-11　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＮＩＳＮ
V-5-12　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｇ３３－ＧＰ２Ｒ
V-5-13　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＭＡＡＰ
V-5-14　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＧＯＴＨＩＣ
V-5-15　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＧＲＩＭＰ２
V-5-16　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＶＫ４６３
V-5-17　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＫＳＨＡＫＥ
V-5-18　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＡＣ３Ｎ
V-5-19　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＰＲＩＮＴ
V-5-20　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｍｉｃｒｏＳＨＡＫＥ/３Ｄ
V-5-21　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＯＲＡ２Ｄ
V-5-22　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＨＡＫＥ
V-5-23　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＬＰＩＬＥＳＰ
V-5-24　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＵＰＰ４
V-5-25　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｋ－ＳＨＡＫＥ
V-5-26　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｆａｐｐａｓｅ
V-5-27　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＫＡＮＳＡＳ２
V-5-28　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＣＯＮＤＳＬＩＰ
V-5-29　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＴＡＲ－ＣＤ
V-5-30　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｆｌｕｅｎｔ
V-5-31　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＯＰＳ
V-5-32　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＬＳ－ＤＹＮＡ
V-5-33　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＯＬＶＥＲ
V-5-34　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＶＩＡＮＡ
V-5-35　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡｕｔｏＰＩＰＥ
V-5-36　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＴＡＡＤ．Ｐｒｏ
V-5-37　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＰＥＧＡ

V-5-38　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＣＡＲＣ
V-5-39　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｅｎｇｉｎｅｅｒ‘ｓ　Ｓｔｕｄｉｏ
V-5-40　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＲＡＭＥ（面内）
V-5-41　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＲＥＭＩＮＧ
V-5-42　計算機プログラム（解析コード）の概要
・波形処理プログラム ｋ－ＷＡＶＥ ｆｏｒ Ｗｉｎｄｏｗｓ
V-5-43　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＲＣ断面計算
V-5-44　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＲＥＳＰ－Ｔ
V-5-45　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＤＡＰ Ⅲ
V-5-46　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＵＣ－ｗｉｎ/Ｓｅｃｔｉｏｎ
V-5-47　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＭＳＡＰ（配管）
V-5-48　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＮＳＹＳ
V-5-49　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＸ ＮＡＳＴＲＡＮ
V-5-50　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ Ｓｅｃｔｉｏｎ
V-5-51　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ Ｓｐｌｉｃｅ
V-5-52　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ Ｒｉｂｃｈｅｃｋ
V-5-53　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＳＨＳＤ２－Ｂ
V-5-54　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＡＣＦ
V-5-55　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＯＲＴ
V-5-56　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＰＡＮ２０００
V-5-57　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＵＲＳＴ
V-5-58　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＢＳＰＡＮ２
V-5-59　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｓｏｉｌ Ｐｌｕｓ
V-5-60　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳｕｐｅｒＦＬＵＳＨ/３Ｄ
V-5-61　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｍｉｄａｓ ｉＧｅｎ
V-5-62　計算機プログラム（解析コード）の概要
・Ｓｅｉｓｍｉｃ Ａｎａｌｙｓｉｓ Ｓｙｓｔｅｍ（ＳＡＳ）
V-5-63　計算機プログラム（解析コード）の概要
・Ｆｉｒｅ Ｄｙｎａｍｉｃｓ Ｔｏｏｌｓ（ＦＤＴｓ）

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（1/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-1-1-2-3-2	竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定	資料番号	Ⅴ-5-9				
		コード名	TONBOS				
Ⅴ-1-1-6 別添 1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-1-1-6 別添 4	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	資料番号	Ⅴ-5-6	Ⅴ-5-7	Ⅴ-5-11	Ⅴ-5-12	Ⅴ-5-13
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	MAAP
Ⅴ-1-1-7	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-63				
		コード名	Fire Dynamics Tools (FDTs)				
Ⅴ-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-3	Ⅴ-5-29	Ⅴ-5-30	Ⅴ-5-35	
		コード名	SAP-Ⅳ	STAR-CD	Fluent	AutoPIPE	
Ⅴ-1-1-8-4	溢水影響に関する評価	資料番号	Ⅴ-5-14				
		コード名	GOTHIC				
Ⅴ-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-31	Ⅴ-5-53	Ⅴ-5-55		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	DORT		
Ⅴ-1-3-2	燃料取扱設備，新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-8				
		コード名	SCALE				
Ⅴ-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-7				
		コード名	ORIGEN2				
Ⅴ-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-6	Ⅴ-5-7			
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2			
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-6	Ⅴ-5-7	Ⅴ-5-11	Ⅴ-5-12	Ⅴ-5-13
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	MAAP

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-5	Ⅴ-5-6	Ⅴ-5-7	Ⅴ-5-11
		コード名	MSC NASTRAN	ABAQUS	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN
		資料番号	Ⅴ-5-12	Ⅴ-5-13			
		コード名	G33-GP2R	MAAP			
Ⅴ-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-13	Ⅴ-5-14			
		コード名	MAAP	GOTHIC			
Ⅴ-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	資料番号	Ⅴ-5-6	Ⅴ-5-7	Ⅴ-5-11	Ⅴ-5-12	
		コード名	QAD-CGGP2R	ORIGEN2	ANISN	G33-GP2R	
Ⅴ-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	資料番号	Ⅴ-5-34	Ⅴ-5-62		Ⅴ-5-42	
		コード名	VIANA	Seismic Analysis System（ＳＡＳ）		波形処理プログラム k-WAVE for Windows (k-WAVE)	
Ⅴ-2-1-12-1	配管及び支持構造物の耐震計算について	資料番号	Ⅴ-5-56				
		コード名	SPAN2000				
Ⅴ-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-15	Ⅴ-5-16	Ⅴ-5-17	Ⅴ-5-18	
		コード名	GRIMP2	NVK463	KSHAKE	DAC3N	
Ⅴ-2-2-2-1	原子炉建屋地下排水設備設置位置の地盤応答	資料番号	Ⅴ-5-17				
		コード名	KSHAKE				
Ⅴ-2-2-2-7	原子炉建屋地下排水設備排水シャフトの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-41	Ⅴ-5-43		
		コード名	k-SHAKE	FREMING	RC 断面計算		
Ⅴ-2-2-2-9	原子炉建屋地下排水設備集水管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-41				
		コード名	FREMING				
Ⅴ-2-2-3	原子炉建屋の基礎の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-19	Ⅴ-5-20	Ⅴ-5-21		
		コード名	SPRINT	microSHAKE/3D	NORA2D		
Ⅴ-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-38	Ⅴ-5-45	
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	SCARC	TDAP Ⅲ	
Ⅴ-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-39		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
Ⅴ-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25		
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE		
Ⅴ-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-2	Ⅴ-5-17	Ⅴ-5-37		
		コード名	DYNA2E	KSHAKE	PEGA		

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-10	V-5-59		
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	SoilPlus		
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算		
V-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	資料番号	V-5-22	V-5-23	V-5-24		
		コード名	SHAKE	TLPILESP	NUPP4		
V-2-2-15-1	主排気筒の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-15-2	主排気筒の基礎の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	資料番号	V-5-22	V-5-23	V-5-26		
		コード名	SHAKE	TLPILESP	fappase		
V-2-2-17	非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-27				
		コード名	KANSAS2				
V-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	資料番号	V-5-17	V-5-59			
		コード名	KSHAKE	SoilPlus			
V-2-2-19	格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算		
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
Ⅴ-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-20			
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D			
Ⅴ-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-20	Ⅴ-5-45		
		コード名	FLIP	microSHAKE/3D	TDAP Ⅲ		
Ⅴ-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
Ⅴ-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-40	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-45
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FRAME（面内）	RC断面計算	TDAP Ⅲ
Ⅴ-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-40	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-45
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FRAME（面内）	RC断面計算	TDAP Ⅲ
Ⅴ-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算		
Ⅴ-2-2-32	ＳＡ用海水ピットの地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-39	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC断面計算	UC-win/Section
Ⅴ-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-41	Ⅴ-5-43
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE	FREMING	RC断面計算
Ⅴ-2-2-36	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC断面計算	RESP-T	

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
Ⅴ-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-46	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	UC-win/Section	
Ⅴ-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-41	Ⅴ-5-43	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FREMING	RC 断面計算	
Ⅴ-2-3-2	炉心，原子炉圧力容器及び原子炉内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	資料番号	Ⅴ-5-2				
		コード名	DYNA2E				
Ⅴ-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-57	Ⅴ-5-58			
		コード名	FURST	BSPAN2			
Ⅴ-2-3-3-2-3	シュラウドサポートの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-53				
		コード名	ASHSD2-B				
Ⅴ-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その１）	資料番号	Ⅴ-5-31	Ⅴ-5-53	Ⅴ-5-54		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	TACF		
Ⅴ-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その２）	資料番号	Ⅴ-5-31	Ⅴ-5-53	Ⅴ-5-54		
		コード名	NOPS	ASHSD2-B	TACF		
Ⅴ-2-3-4-2-3	制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-2-4	差圧検出・ほう酸水注入管（ティーより N10 ノズルまでの外管）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-3	気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-3-4-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-3-4-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-6	給水スパージャの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスパージャの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-8	残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-3-4-3-9	高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-10	差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-3-4-3-11	中性子計測案内管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-4-2-1	使用済燃料プールの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
Ⅴ-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-3-1-2	バスケットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-3-1-5	二次蓋の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-3-2-5	二次蓋の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-2-4-2-4	使用済燃料プール温度（ＳＡ）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-4-2-5	使用済燃料プール水位・温度（ＳＡ広域）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-48				
		コード名	ANSYS				
Ⅴ-2-4-3-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4	Ⅴ-5-35	Ⅴ-5-36		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD.Pro		
Ⅴ-2-4-3-3-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-3-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
Ⅴ-2-5-4-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-4-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-5-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-5-4-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
Ⅴ-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-35	Ⅴ-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD.Pro			
Ⅴ-2-5-5-6-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
Ⅴ-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-6-1-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書（原子炉隔離時冷却系）	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-5-7-1-1	残留熱除去系海水系ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4	Ⅴ-5-35	Ⅴ-5-36		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD.Pro		
Ⅴ-2-5-7-2-1	緊急用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-5-7-2-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-6-3-2-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
Ⅴ-2-6-3-2-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-2-6-5-1	起動領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
Ⅴ-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
Ⅴ-2-6-5-6	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-7	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-8	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-9	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-10	代替循環冷却系原子炉注水流量の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-14	原子炉隔離時冷却系系統流量の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-19	原子炉圧力（ＳＡ）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				
Ⅴ-2-6-5-23	原子炉水位（ＳＡ広帯域）の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	NSAFE				

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-6-5-25	ドライウェル圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-26	サプレッション・チェンバ圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-34	格納容器下部水温の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-38	低圧代替注水系格納容器スプレイ流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-39	低圧代替注水系格納容器下部注水流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-40	代替循環冷却系格納容器スプレイ流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-41	サプレッション・プール水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-42	格納容器下部水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-5-43	原子炉建屋水素濃度の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-6-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-6-6-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
V-2-6-7-2-2	屋外アンテナ（中央制御室）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-3	衛星電話設備用通信機器収納ラック（中央制御室）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-5	屋外アンテナ（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-2-6	衛星電話設備用通信機器収納ラック（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-6-7-6	統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-6-7-11	フィルタ装置入口水素濃度の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-6-7-12	静的触媒式水素再結合器動作監視装置の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-13	フィルタ装置水位の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-14	フィルタ装置圧力の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-6-7-16	残留熱除去系海水系系統流量の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-7-2-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-2-7-2-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-2-7-2-5	非常用ガス処理系排気筒の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-8-2-1	主蒸気管放射線モニタの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-2-2	格納容器雰囲気放射線モニタ（D／W）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-8-2-3	格納容器雰囲気放射線モニタ（S／C）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-2-7	耐圧強化ベント系放射線モニタの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-3-1-1	中央制御室換気系ダクトの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	NSAFE				
V-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-8-3-3-1	緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
V-2-8-3-3-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-33				
		コード名	SOLVER				
V-2-8-3-4-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
V-2-9-2-1	原子炉格納容器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-9-2-2	原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-3	上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-4	下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-6	機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-7	所員用エアロックの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-8	サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-9	配管貫通部の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-2-10	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-2				
		コード名	DYNA2E				
Ⅴ-2-9-3-2	原子炉建屋大物搬入口の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-3-4	原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-4-1	ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-4-2	ベント管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-4-3-1	格納容器スプレイヘッダの耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-35	Ⅴ-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD.Pro			
Ⅴ-2-9-4-3-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-35	Ⅴ-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD.Pro			

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-9-4-3-5-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	資料番号	V-5-4	V-5-4			
		コード名	HISAP	NSAFE			
V-2-9-5-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-5-2-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-5-2-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-9-5-3-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-5-4-2	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-5-5-1	静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36	V-5-47		
		コード名	AutoPIPE	STAAD.Pro	MSAP（配管）		
V-2-9-6-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD.Pro		
V-2-10-1-2-2	非常用ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-10-1-2-3	非常用ディーゼル発電機燃料油デイタンクの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-10-1-2-7	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	V-5-47	
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD.Pro	MSAP（配管）	
V-2-10-1-3-2	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-10-1-3-3	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料油デイタンクの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-10-1-3-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-36	V-5-47	
		コード名	HISAP	AutoPIPE	STAAD.Pro	MSAP（配管）	
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-35	V-5-36			
		コード名	AutoPIPE	STAAD.Pro			
V-2-10-1-5-6	緊急時対策所用発電機制御盤の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-10-1-7-17	常設代替高圧電源装置遠隔操作盤の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-43	V-5-45	V-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	TDAP Ⅲ	UC-win/Section
		資料番号	V-5-50	V-5-51	V-5-52		
		コード名	APOLLO SuperDesigner Section	APOLLO SuperDesigner Splice	APOLLO SuperDesigner Ribcheck		
V-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39	V-5-43	V-5-46
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC 断面計算	UC-win/Section
V-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
V-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25	V-5-39		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio		
V-2-11-2-1	燃料取替機の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
V-2-11-2-2	原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-5				
		コード名	ABAQUS				
V-2-11-2-3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-28				
		コード名	CONDSLIP				
V-2-11-2-4	チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-2-11-2-8	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-3				
		コード名	SAP-Ⅳ				
V-2-11-2-9	ウォータレグシールライン（残留熱除去系，高圧炉心スプレイ系及び低圧炉心スプレイ系）の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-2-11-2-10	格納容器機器ドレンサンプの耐震性についての計算書	資料番号	V-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
V-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-39	V-5-43		
		コード名	MSC NASTRAN	Engineer's Studio	RC断面計算		
V-2-11-2-12	中央制御室天井照明の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-15	V-5-16	V-5-17	V-5-18	
		コード名	GRIMP2	NVK463	KSHAKE	DAC3N	
V-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-17	V-5-44	V-5-60		
		コード名	KSHAKE	RESP-T	SuperFLUSH/3D		
V-2-11-2-15	使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-10	V-5-25			
		コード名	FLIP	k-SHAKE			
V-2-11-2-18	原子炉建屋外側ブローアウトパネル防護対策施設の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添 1-4	ハロンボンベ設備の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添 1-5	ハロンガス供給選択弁の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添 1-7	二酸化炭素ボンベ設備の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添 1-8	二酸化炭素供給選択弁の耐震計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-2-別添 1-10	ガス供給配管の耐震計算書	資料番号	V-5-3	V-5-35	V-5-36		
		コード名	SAP-Ⅳ	AutoPIPE	STAAD.Pro		
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	資料番号	V-5-1	V-5-3	V-5-4	V-5-35	
		コード名	MSC NASTRAN	SAP-Ⅳ	HISAP	AutoPIPE	
V-2-別添 3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所等における入力地震動	資料番号	V-5-25				
		コード名	k-SHAKE				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-2-別添 3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-5	Ⅴ-5-49			
		コード名	ABAQUS	NX NASTRAN			
Ⅴ-2-別添 3-5	可搬型重大事故等対処設備のうちその他設備の耐震性についての計算書	資料番号	Ⅴ-5-49				
		コード名	NX NASTRAN				
Ⅴ-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-31	Ⅴ-5-53			
		コード名	NOPS	ASHSD2-B			
Ⅴ-3-4-2-1-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-4-2-2-2	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4	Ⅴ-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
Ⅴ-3-4-2-3-4	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP (配管)				
Ⅴ-3-5-1-1-2	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-2-1-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-3-1-2	残留熱除去系ポンプの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-3-1-6	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-3-1-7	ストレーナ部ティーの応力計算書（残留熱除去系）	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-3-2-2	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-4-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-4-1-5	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-4-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-4-2-5	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-4-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-3-5-4-3-2	ストレーナ部ティーの応力計算書（原子炉隔離時冷却系）	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-5-4-4-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-3-5-4-5-5	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
Ⅴ-3-5-4-6-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-3-5-5-1-4	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-5-6-1-4	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4	Ⅴ-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
Ⅴ-3-5-6-2-4	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-6-1-1-5	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-6-3-1-2	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-6-3-2-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-6-3-3-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-3-7-1-2-2	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-4				
		コード名	HISAP				
Ⅴ-3-8-1-2-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-3-8-1-3-4	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-33				
		コード名	SOLVER				
Ⅴ-3-8-1-4-3	管の応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
Ⅴ-3-9-1-1-2	ドライウェルトップヘッドの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-9-1-1-4	ドライウェル本体及びサプレッション・チェンバ本体の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-9-1-1-7	原子炉格納容器底部コンクリートマットの強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				

目録番号	目録名称	適用コード名					
V-3-9-1-2-2	機器搬入用ハッチの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-3-2	所員用エアロックの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-3-4	サプレッション・チェンバアクセスハッチの強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-4-1	原子炉格納容器貫通部の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-1-4-3	電気配線貫通部の強度計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-2-2-1-2	格納容器スプレイヘッダの応力計算書	資料番号	V-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
V-3-9-2-2-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-3-9-2-2-3-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-47				
		コード名	MSAP（配管）				
V-3-9-2-2-4-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35				
		コード名	AutoPIPE				
V-3-9-2-2-5-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-2-5-4	付属設備の管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-2-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-35	V-5-47			
		コード名	AutoPIPE	MSAP（配管）			
V-3-9-2-4-1-3	管の応力計算書	資料番号	V-5-4				
		コード名	HISAP				
V-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35			
		コード名	HISAP	AutoPIPE			
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-47		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	MSAP（配管）		
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	資料番号	V-5-4	V-5-35	V-5-47		
		コード名	HISAP	AutoPIPE	MSAP（配管）		

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-3-別添 1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-27	Ⅴ-5-32	Ⅴ-5-61		
		コード名	KANSAS2	LS-DYNA	midas iGen		
Ⅴ-3-別添 1-1-4	主排気筒の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-別添 1-1-8	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-別添 1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-39	Ⅴ-5-43			
		コード名	Engineer's Studio	RC 断面計算			
Ⅴ-3-別添 1-2-1-2	防護鋼板の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-32				
		コード名	LS-DYNA				
Ⅴ-3-別添 1-2-1-3	架構の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-32			
		コード名	MSC NASTRAN	LS-DYNA			
Ⅴ-3-別添 2-1-5	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1				
		コード名	MSC NASTRAN				
Ⅴ-3-別添 2-1-7	建屋の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-2			
		コード名	MSC NASTRAN	DYNA2E			
Ⅴ-3-別添 2-2-1	防護対策施設の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-5				
		コード名	ABAQUS				
Ⅴ-3-別添 3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-39	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-50
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC 断面計算	APOLLO SuperDesigner Section
		資料番号	Ⅴ-5-51	Ⅴ-5-52			
		コード名	APOLLO SuperDesigner Splice	APOLLO SuperDesigner Ribcheck			
Ⅴ-3-別添 3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-39	Ⅴ-5-43	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	Engineer's Studio	RC 断面計算	
Ⅴ-3-別添 3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-1	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-41	Ⅴ-5-43
		コード名	MSC NASTRAN	FLIP	k-SHAKE	FREMING	RC 断面計算
Ⅴ-3-別添 3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	
Ⅴ-3-別添 3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	
Ⅴ-3-別添 3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-43	Ⅴ-5-44	
		コード名	FLIP	k-SHAKE	RC 断面計算	RESP-T	

計算機プログラム（解析コード）を適用している添付書類（19/19）

目録番号	目録名称	適用コード名					
Ⅴ-3-別添 3-2-9	貯留堰の強度計算書	資料番号	Ⅴ-5-10	Ⅴ-5-25	Ⅴ-5-41		
		コード名	FLIP	k-SHAKE	FREMING		
Ⅴ-3-別添 6-2	シュラウドサポートの応力計算書	資料番号	Ⅴ-5-53				
		コード名	ASHSD2-B				

Ⅴ-5-1　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＭＳＣ　ＮＡＳＴＲＡＮ

目次

1.　はじめに　…… 1
1.1　使用状況一覧…… 2
2　解析コードの概要…… 6
2.1　MSC NASTRAN　Ver.2018.0.1…… 6
2.2　MSC NASTRAN　Ver.2016.1.1…… 8
2.3　MSC NASTRAN　Ver.2013.1.1, Ver.2013, Ver.2012.2.0, Ver.2008.0.4,
Ver.2008.0.0, Ver.2006r1, Ver.2005…… 10
2.4　MSC NASTRAN　Ver.2008r1…… 12

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSC NASTRANについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver.2018.0.1
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver.2018.0.1
Ⅴ-2-2-3	原子炉建屋の基礎の耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-2-19	格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-4-2-1	使用済燃料プールの耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-9-2-2	原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-9-3-4	原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-3-9-1-1-7	原子炉格納容器底部コンクリートマットの強度計算書	Ver.2016.1.1
Ⅴ-2-2-15-2	主排気筒の基礎の耐震性についての計算書	Ver.2013.1.1
Ⅴ-2-6-7-11	フィルタ装置入口水素濃度の耐震性についての計算書	Ver.2013.1.1
Ⅴ-2-9-3-2	原子炉建屋大物搬入口の耐震性についての計算書	Ver.2013.1.1
Ⅴ-2-9-5-2-4	ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書	Ver.2013.1.1
Ⅴ-2-11-2-12	中央制御室天井照明の耐震性についての計算書	Ver.2013.1.1
Ⅴ-1-2-1	原子炉本体の基礎に関する説明書	Ver.2013
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver.2013
Ⅴ-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-3-4-2-4	差圧検出・ほう酸水注入管（ティーよりN10ノズルまでの外管）の耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-3-4-3-9	高圧及び低圧炉心スプレイ配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-3-4-3-10	差圧検出・ほう酸水注入管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-3-4-3-11	中性子計測案内管の耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-9-4-1	ダイヤフラム・フロアの耐震性についての計算書	Ver.2013
Ⅴ-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver.2012.2.0
Ⅴ-2-11-2-18	原子炉建屋外側ブローアウトパネル防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver.2012.2.0

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-別添2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	Ver.2012.2.0
Ⅴ-3-別添1-1-8	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	Ver.2012.2.0
Ⅴ-3-別添1-2-1-3	架構の強度計算書	Ver.2012.2.0
Ⅴ-3-別添2-1-5	ディーゼル発電機吸気口の強度計算書	Ver.2012.2.0
Ⅴ-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver.2008r1
Ⅴ-2-11-2-15	使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の耐震性についての計算書	Ver.2008r1
Ⅴ-3-別添2-1-7	建屋の強度計算書	Ver.2008r1
Ⅴ-2-10-1-5-6	緊急時対策所用発電機制御盤の耐震性についての計算書	Ver.2008.0.4
Ⅴ-2-10-1-7-17	常設代替高圧電源装置遠隔操作盤の耐震性についての計算書	Ver.2008.0.4
Ⅴ-2-2-15-1	主排気筒の耐震性についての計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-7-2-5	非常用ガス処理系排気筒の耐震性についての計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-別添1-4	ハロンボンベ設備の耐震計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-別添1-5	ハロンガス供給選択弁の耐震計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-別添1-7	二酸化炭素ボンベ設備の耐震計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-別添1-8	二酸化炭素供給選択弁の耐震計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-3-別添1-1-4	主排気筒の強度計算書	Ver.2008.0.0
Ⅴ-2-5-4-1-2	残留熱除去系ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-5-5-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-5-5-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-5-7-1-1	残留熱除去系海水系ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-5-7-2-1	緊急用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-10-1-2-7	非常用ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-10-1-3-6	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプの耐震性についての計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-2-別添2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	Ver.2006r1

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-3-5-3-1-2	残留熱除去系ポンプの強度計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-3-5-4-1-1	高圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-3-5-4-2-1	低圧炉心スプレイ系ポンプの強度計算書	Ver.2006r1
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver.2005
Ⅴ-2-3-4-2-3	制御棒駆動機構ハウジング支持金具の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-3-4-3-5	ジェットポンプの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-3-4-3-6	給水スパージャの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-3-4-3-7	高圧及び低圧炉心スプレイスパージャの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-3-4-3-8	残留熱除去系配管（原子炉圧力容器内部）の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-5-4-1-3	残留熱除去系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-5-4-1-5	ストレーナ部ティーの耐震計算書（残留熱除去系）	Ver.2005
Ⅴ-2-5-5-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-5-6-1-4	ストレーナ部ティーの耐震計算書（原子炉隔離時冷却系）	Ver.2005
Ⅴ-2-8-2-2	格納容器雰囲気放射線モニタ（D／W）の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-1	原子炉格納容器の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-3	上部シアラグ及びスタビライザの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-4	下部シアラグ及びダイヤフラムブラケットの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-6	機器搬入用ハッチの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-7	所員用エアロックの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-8	サプレッション・チェンバアクセスハッチの耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-9	配管貫通部の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-2-10	電気配線貫通部の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-4-2	ベント管の耐震性についての計算書	Ver.2005
Ⅴ-2-9-4-3-1	格納容器スプレイヘッダの耐震性についての計算書	Ver.2005

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-3-5-3-1-3	残留熱除去系ストレーナの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-5-3-1-7	ストレーナ部ティーの応力計算書（残留熱除去系）	Ver.2005
Ⅴ-3-5-4-3-1	原子炉隔離時冷却系ストレーナの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-5-4-3-2	ストレーナ部ティーの応力計算書（原子炉隔離時冷却系）	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-1-2	ドライウェルトップヘッドの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-1-4	ドライウェル本体及びサプレッション・チェンバ本体の強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-2-2	機器搬入用ハッチの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-3-2	所員用エアロックの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-3-4	サプレッション・チェンバアクセスハッチの強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-4-1	原子炉格納容器貫通部の強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-1-4-3	電気配線貫通部の強度計算書	Ver.2005
Ⅴ-3-9-2-2-1-2	格納容器スプレイヘッダの応力計算書	Ver.2005

2　解析コードの概要

2.1　MSC NASTRAN　Ver.2018.0.1

コード名 / 項目	MSC NASTRAN
使用目的	２次元有限要素法（はり，シェルモデル）による静的解析
開発機関	MSC. Software Corporation
開発時期	1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン	Ver. 2018.0.1
コードの概要	MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	本解析コードは，緊急用海水ポンプピット及び防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））における２次元有限要素法（はり，シェルモデル）による静的解析で使用している。 【検証(Verification)】 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認(Validation)】 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・九州電力株式会社の「玄海原子力発電所第４号機」において，原子炉周辺建屋及びその他の建物・構築物の静的応力解析に本解析コード（Ver.2008r1）が使用された実績がある。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・既工事計画で妥当性確認を行ったのは，はり要素，シェル要素及びソリッド要素を用いた３次元有限要素法によるモデルであり，今回実施する２次元有限要素法（はり要素，ソリッド要素）による静的解析と理論的には類似であることから，上述した妥当性確認が２次元静的解析にも展開できる。 ・本解析コードの適用制限として使用要素数があるが，使用した要素数は適用制限以下であり，今回の解析に使用することは妥当である。

2.2 MSC NASTRAN Ver.2016.1.1

コード名 項目	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	2016.1.1
コードの概要	MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築,土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，原子炉建屋の使用済燃料プール，基礎盤及び原子炉格納容器底部コンクリートマット，緊急時対策所建屋,格納容器圧力逃がし装置格納槽の応力解析に使用している。また，原子炉格納容器底部コンクリートマットの温度分布解析に使用している。 【検証(Verification)】 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認(Validation)】 ・関西電力大飯発電所3号機工事計画認可申請書の資料13（耐震性に関する説明書）において，原子炉格納容器，原子炉格納施設の基礎，燃料取扱室上屋の3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析に使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，3次元有限要素法による応力解析及び温度分布解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.3 MSC NASTRAN Ver.2013.1.1, Ver.2013, Ver.2012.2.0, Ver.2008.0.4, Ver.2008.0.0, Ver.2006r1, Ver.2005

項目＼コード名		MSC NASTRAN
使用目的	Ver.2013.1.1	3次元有限要素法(はリモデル及びシェルモデル)による固有値解析及び応力解析
	Ver.2013	2次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による地震応答解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による応力解析
	Ver.2012.2.0	3次元有限要素法(はりモデル及びシェルモデル)による固有値解析及び応力解析
	Ver.2008.0.4	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
	Ver.2008.0.0	はりモデルによる固有値解析及び応力解析
	Ver.2006r1	はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法（ソリッド要素）による応力計算
	Ver.2005	はりモデルによる固有値解析，地震応答解析及び応力解析 3次元有限要素法(シェルモデル)による応力解析
開発機関		MSC Software Corporation
開発時期		1971年（一般商業用リリース）
使用したバージョン		Ver.2013.1.1, Ver.2013, Ver.2012.2.0, Ver.2008.0.4, Ver.2008.0.0, Ver.2006r1, Ver.2005
コードの概要		MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることが出来る体系について，本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，土木及び建築などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.4 MSC NASTRAN Ver.2008r1

コード名 / 項目	MSC NASTRAN
使用目的	3次元有限要素法による応力解析
開発機関	MSC Software Corporation
開発時期	1971年（一般商用リリース）
使用したバージョン	Ver.2008r1
コードの概要	MSC NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的として開発された，有限要素法による構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築,土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の3次元有限要素法による静的応力解析及び動的応力解析に使用している。 【検証(Verification)】 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 ・関西電力大飯発電所3号機工事計画認可申請書の資料13（耐震性に関する説明書）において，原子炉格納容器，原子炉格納施設の基礎，燃料取扱室上屋の3次元有限要素法による応力解析に使用された実績がある。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，3次元有限要素法による応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-2　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＹＮＡ２Ｅ

目次

1.　はじめに…… 1
1.1　使用状況一覧…… 2
2　解析コードの概要…… 3
2.1　DYNA2E　Ver.7.2.48…… 3
2.2　DYNA2E　Ver. 8.0.4…… 5
3.　DYNA2E　Ver. 8.0.4の解析手法について…… 7
3.1　一般事項…… 7
3.2　解析コードの特徴…… 7
3.3　解析手法…… 8
3.4　解析フローチャート…… 14
3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）…… 15

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DYNA2Eについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	8.0.4
Ⅴ-2-9-3-1	原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書	8.0.4
Ⅴ-3-別添 2-1-7	建屋の強度計算書	8.0.4
Ⅴ-2-3-2	炉心，原子炉圧力容器及び圧力容器内部構造物並びに原子炉格納容器及び原子炉本体の基礎の地震応答計算書	7.2.48

2　解析コードの概要

2.1　DYNA2E　Ver.7.2.48

コード名 / 項目	DYNA2E
使用目的	固有値解析，応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年（センチュリリサーチセンタ株式会社） 2007年（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）
使用したバージョン	Ver.7.2.48
コードの概要	DYNA2E（以下「本解析コード」という。）は，土木・建築分野における骨組み*解析を対象として開発された，市販されている汎用構造計算機プログラムである。 本解析コードは，土木・建築分野における2次元／3次元応答解析コードであり，固有値解析並びに静的解析（線形）及び動的解析（線形，非線形）による応答解析が可能である。 以下に示す構造に対し，3種類の解析を行うことができる。 ＜構　造＞ 1.　2次元骨組み構造 2.　3次元骨組み構造 ＜解　析＞ 1.　固有値解析 2.　静的解析（線形） 3.　動的解析（線形，非線形） 注記　＊：本解析コードでは，主に曲げせん断はり要素を適用する構造のことをいう。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・一本棒の曲げせん断型モデルについて，本解析コード及び別解析コードMSC NASTRANを用いて得られた結果を比較して検討し，本解析コードによる解析結果が妥当であることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・検証の内容のとおり，固有値解析及び応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・[redacted]第2回工事計画認可申請書のⅣ-2-4（原子炉本体の基礎の地震応答計算書）において，動的解

	析に使用された実績がある。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更がおこなわれていないことを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する固有値解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2 DYNA2E Ver. 8.0.4

コード名 / 項目	DYNA2E
使用目的	3次元有限要素法による応力解析，地震応答解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	1972年（センチュリリサーチセンタ株式会社） 2007年（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社））
使用したバージョン	Ver. 8.0.4
コードの概要	DYNA2E（以下「本解析コード」という。）は，土木・建築分野における骨組解析を対象として開発された，市販されている汎用構造解析コードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，原子炉建屋の屋根トラスの弾塑性応力解析に使用している。屋根トラスの応力解析では，部材をはり要素などでモデル化し，部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して修正若林モデルによる履歴特性を設定している。また，緊急時対策所建屋については地震応答解析に使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・谷口らの論文および若林らの論文に示される式から算定した履歴曲線と解析結果が一致することを確認している。 ・応答解析については，別の妥当性が確認されている解析コードによる解析結果と一致することを確認している。 ・本解析コードを用いた3次元有限要素法による応力解析結果と理論解の比較を行い，両者が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，非線形挙動及び応力解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・[redacted]第2回工事計画認可申請書のⅣ-2-3（原子炉格納容器及び原子炉建屋の地震応答計算書）において，動的解析に使用された実績がある。

	・地震応答解析に対して，九州電力株式会社川内原子力発電所第１号機第1回工事計画認可申請書の3-16-1（原子炉格納施設の地震応答解析）において，動的解析に使用された実績があるTDAPⅢを用いた解析解と，本解析コードによる解析解を比較した結果，双方の解が一致していることを確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素，応力解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.　DYNA2E　Ver.8.0.4の解析手法について

3.1　一般事項

DYNA2Eは，伊藤忠テクノソリューションズ株式会社が開発したプログラムであり，市販の解析コードである。DYNA2Eは，原子炉建屋の屋根トラスについての3次元有限要素法による弾塑性応力解析及び緊急時対策所建屋についての質点系地盤連成モデルによる応答解析に使用している。

3.2　解析コードの特徴

DYNA2Eは，汎用構造計算機プログラムであり，ここでは，屋根トラスの応力解析及び緊急時対策所建屋の応答解析に関連する主な特徴を以下に示す。

・ばね要素やはり要素などでモデル化した，骨組系の固有値解析，静的解析及び動的解析を行う。
・質量は，集中質量もしくは分布質量として評価する。
・要素に非線形特性を設定し，非線形解析を行うことができる。
・ひずみエネルギ比例型もしくはレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
・固有値解析は，ハウスホルダー法もしくはサブスペース法による。
・応答解析は，時間領域の直接積分法による。

3.3　解析手法

a.　系の剛性マトリクス

図3-1に示す均質等断面のはりについて，断面形の不変，断面の平面保持及び微小変形を仮定すると，要素座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクスK_eは以下のように表される。

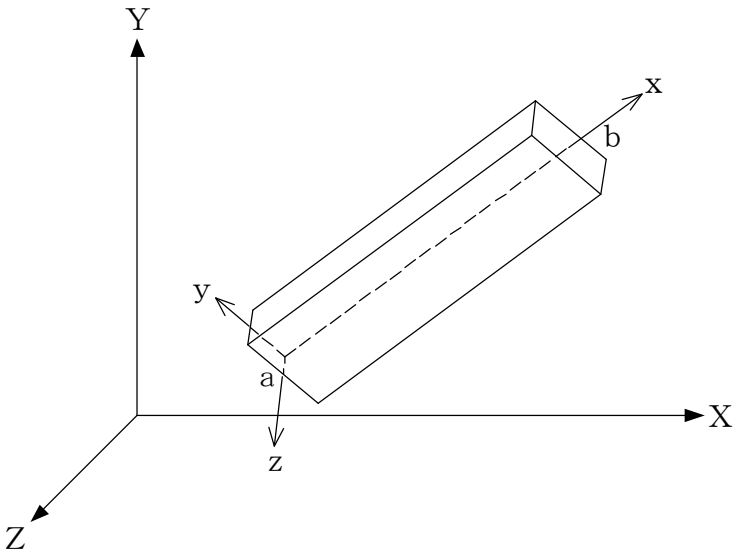


図3-1　はり要素と座標系

$$K_e = \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \tag{3-1}$$

ただし,

$$K_{aa} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & \text{Sym.} & \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

$$K_{ba} = \begin{bmatrix} -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(2-\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

$$K_{bb} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & & & & & \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\phi_y)} & & & \text{Sym.} & \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\phi_z)} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & & \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\phi_z)} & 0 & \frac{(4+\phi_z)EI_y}{L(1+\phi_z)} & \\ 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\phi_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_z}{L(1+\phi_y)} \end{bmatrix}$$

$K_{ab}=K_{ba}^{\top}$　（$^{\top}$はマトリクスの転置を表す）

$$\phi_y = \frac{12EI_y}{GAs_zL^2} \quad , \quad \phi_z = \frac{12EI_z}{GAs_yL^2}$$

ここで,

E　：ヤング係数

G　：せん断弾性係数

L　：材長

A　：断面積

As_y　：要素y軸方向のせん断断面積

As_z　：要素z軸方向のせん断断面積

I_z　：要素z軸まわりの断面2次モーメント

I_y　：要素y軸まわりの断面2次モーメント

J　：断面ねじりモーメント

要素座標系で表される剛性マトリクスを全体座標系に変換する。図3-2に示す要素座標系と全体座標系の関係は以下のように表される。

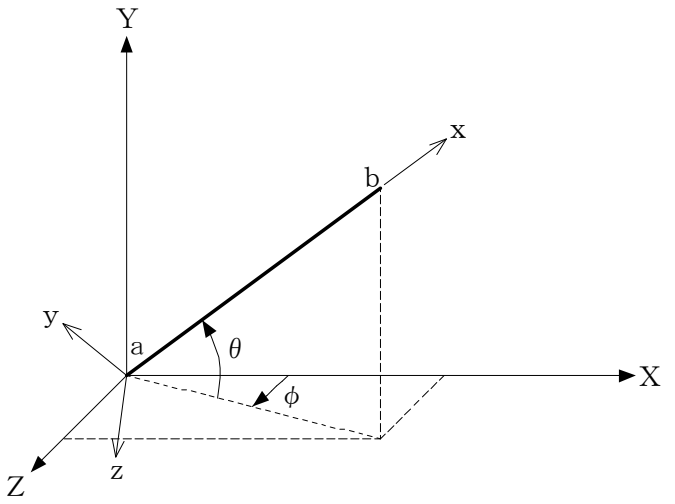


図3-2　要素座標系と全体座標系

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = t \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \tag{3-2}$$

ただし,

$$t = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

全体座標系における材端の力と変位の関係を示す剛性マトリクスKは，要素座標系での剛性マトリクスK_e及び座標変換マトリクスTを用いて以下のように表される。

$$K = T^{-1} K_e T \tag{3-3}$$

ただし，

$$T = \begin{bmatrix} t & & & \\ & t & & \\ & & t & \\ & & & t \end{bmatrix}$$

全部材の剛性マトリクスを重ね合わせることで，系全体の剛性マトリクスを求めることができる。

b. 非線形解析

増分形式の運動方程式は，変位増分Δu及び荷重増分Δfを用いて以下のように表される。

$$[M]\{\Delta \ddot{u}\} + [C]\{\Delta \dot{u}\} + [K]\{\Delta u\} = \{\Delta f\} \tag{3-4}$$

ここで，

[M] ：質量マトリクス

[C] ：減衰マトリクス

[K] ：剛性マトリクス

非線形解析では，剛性マトリクスが荷重の増加に伴い変化するため，各ステップにおいて剛性マトリクスを更新し，応答を求めている。例として，図3-3に示すように，ステップnの応答が線形範囲にあり，ステップ(n+1)において応答が線形範囲を超過した場合には，変位増分Δuはステップnにおける剛性マトリクスK_0及び荷重増分Δfに基づき算出する。次ステップの応答は，変位$u_{(n+1)}$に基づく接線剛性マトリクスK_t及び荷重と応力の不釣り合いである残差荷重Rを用いて，以下に示す運動方程式から求める。

$$[M]\{\Delta \ddot{u}\} + [C]\{\Delta \dot{u}\} + [K_t]\{\Delta u\} = \{f\} + \{R\} \tag{3-5}$$

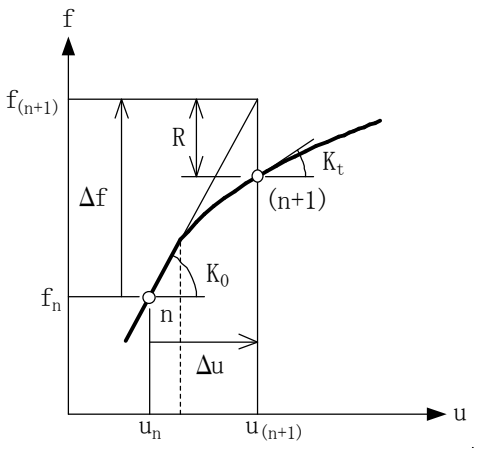


図3-3　非線形解析の概念

c. 修正若林モデル

屋根トラスの応答解析においては，部材の圧縮座屈による非線形挙動に対して，谷口らの論文（文献1）に示される修正若林モデルによる履歴特性を設定している。修正若林モデルは，若林らの論文（文献2）に示される履歴特性を基に，繰返し載荷による初期座屈以降の耐力低下を，圧縮側累積塑性ひずみの関数として以下の式で評価するモデルである。

$$n/n_0 = 1/(\overline{\zeta} - P_n)^{1/6} \quad \leqq 1 \qquad (3\text{-}6)$$

ただし，

$$n = N/Ny$$

$$P_n = (n_E^2/4) - 5$$

$$n_E = \pi^2 E/(\lambda_e^2 \sigma_y)$$

ここで，

N　：軸力

Ny　：降伏軸力

n_0　：無次元化初期座屈耐力（鋼構造設計基準）

$\overline{\zeta}$　：無次元化圧縮側累積塑性ひずみ

E　：鋼材のヤング係数

λ_e　：有効細長比

σ_y　：鋼材の降伏応力度

(3-6)式による座屈耐力低下曲線を図3-4に示す。また，若林モデルと修正若林モデルの履歴特性を図3-5に示す。

文献1：谷口元 他：鉄骨X型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集，B Vol.37B，pp.303-316，1991

文献2：若林實 他：鉄骨筋違の履歴特性の定式化（その１），日本建築学会論文報告集，第316号，pp.18-24，1982

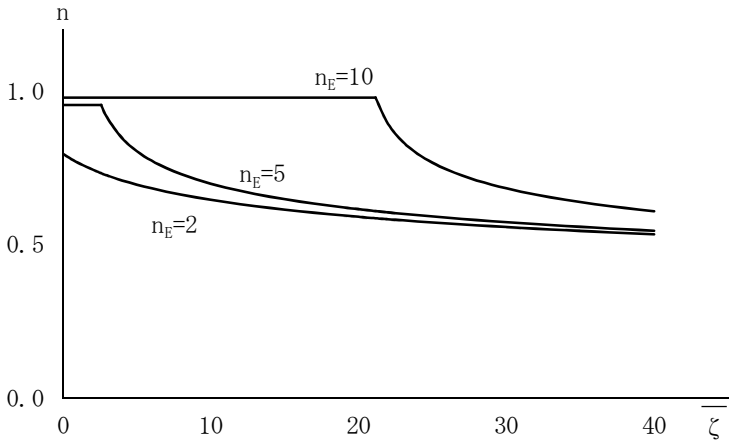
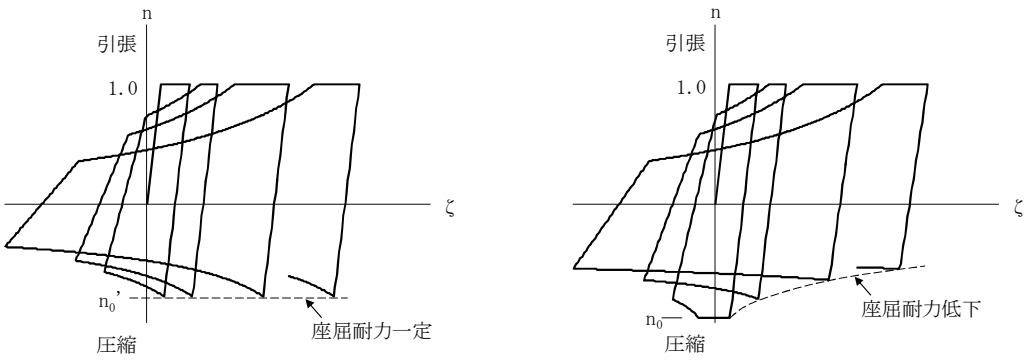


図3-4　修正若林モデルによる座屈耐力低下曲線



(a)若林モデル　　(b)修正若林モデル

図3-5　若林モデルと修正若林モデルの履歴特性

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-6に示す。

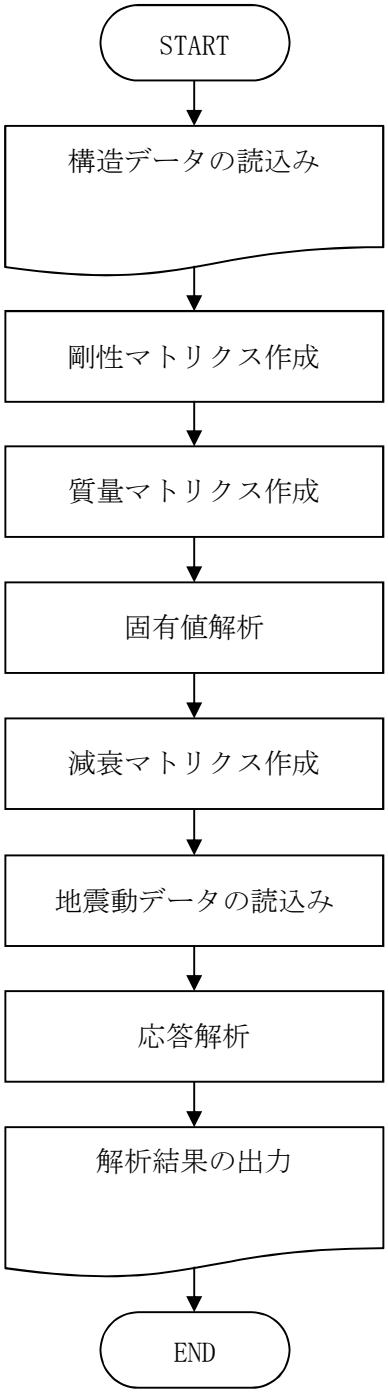


図3-6　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

a.　文献との比較による検証

以下に示す条件について履歴曲線を算定し，谷口らの論文及び若林らの論文の式から算定した履歴曲線との比較を行う。

・オイラー荷重と降伏軸力の比n_Eは5.0とする。

・変形サイクルは引張降伏ひずみの比率に対して±3→±5→±10→＋15→0とする。

履歴曲線の比較結果を図3-7に示す。

図より，DYNA2Eの結果は鈴木らの谷口らの論文及び若林らの論文による結果と一致していることが確認できる。

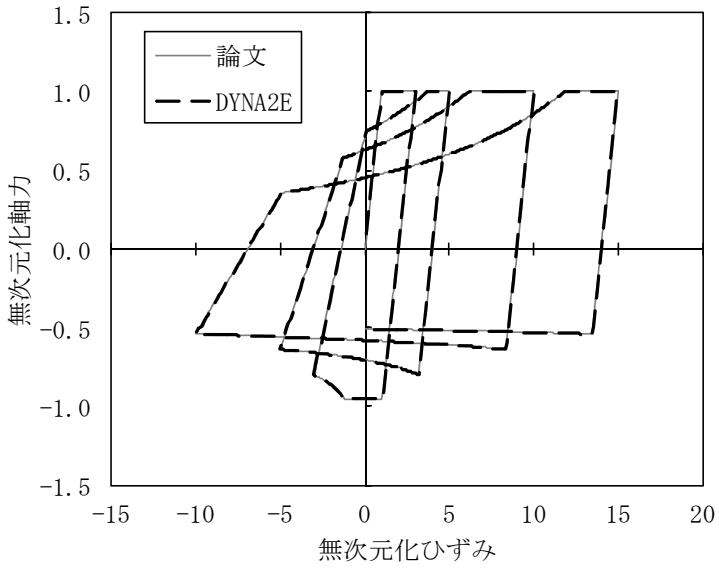


図3-7　解析結果の比較

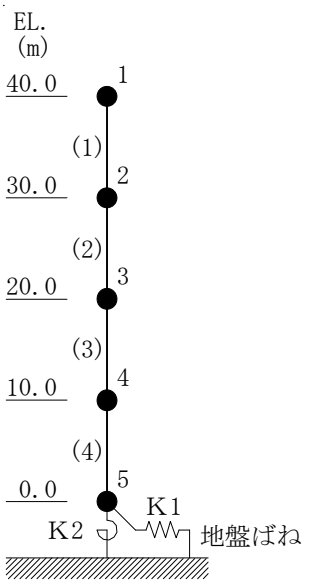
b. 他コードとの比較による検証

緊急時対策所建屋の地震応答解析に使用しているDYNA2Eは，例題に対して，市販されている汎用構造計算機プログラム「TDAPⅢ Ver.3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーク情報システム）との比較を行う。なお，「TDAPⅢ ver.3.05」は，九州電力株式会社川内原子力発電所第1号機の工事計画で実積があり，比較には異なるバージョンを使用するが，バージョンの差異により今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。

解析モデルの諸元を表3-1～表3-4に，検討に用いる入力地震動を図3-8に，解析結果の比較を図3-9に示す。

図より，DYNA2Eの結果はTDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表3-1　解析モデル諸元



( )内は要素番号を示す。

EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 Ig ($\times 10^6$kN･m^2)	せん断断面積 As (m^2)	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ I (m^4)
40.0	150000	3.0		
30.0	200000	4.0	100	20000
20.0	250000	5.0	150	30000
10.0	300000	6.0	200	40000
0.0	400000	8.0	250	50000

表3-2　材料定数

ヤング係数 E (N/mm^2)	せん断弾性係数 G (N/mm^2)	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表3-3（1／2）　復元力特性（τ－γ関係）

要素番号	τ_1 (N/mm^2)	τ_2 (N/mm^2)	τ_3 (N/mm^2)	γ_1 ($\times10^{-3}$)	γ_2 ($\times10^{-3}$)	γ_3 ($\times10^{-3}$)
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表3-3（2／2）　復元力特性（M－φ関係）

要素番号	M_1 ($\times10^6$kN･m)	M_2 ($\times10^6$kN･m)	M_3 ($\times10^6$kN･m)	ϕ_1 ($\times10^{-6}$1/m)	ϕ_2 ($\times10^{-6}$1/m)	ϕ_3 ($\times10^{-6}$1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表3-4　地盤のばね定数と減衰係数

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C	減衰係数 C_C
K1	5	底面・並進	4.0×10^{70}　kN/m	1.0×10^{6}　kN･s/m
K2	5	底面・回転	3.0×10^{10}　kN･m/rad	3.0×10^{8}　kN･m･s/rad

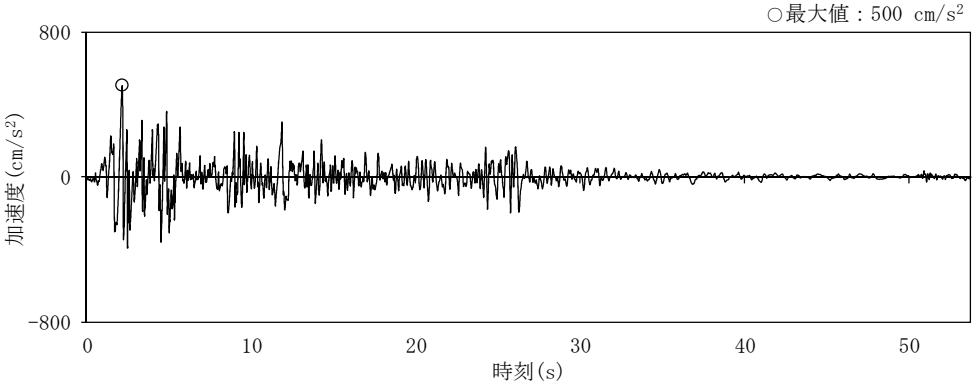
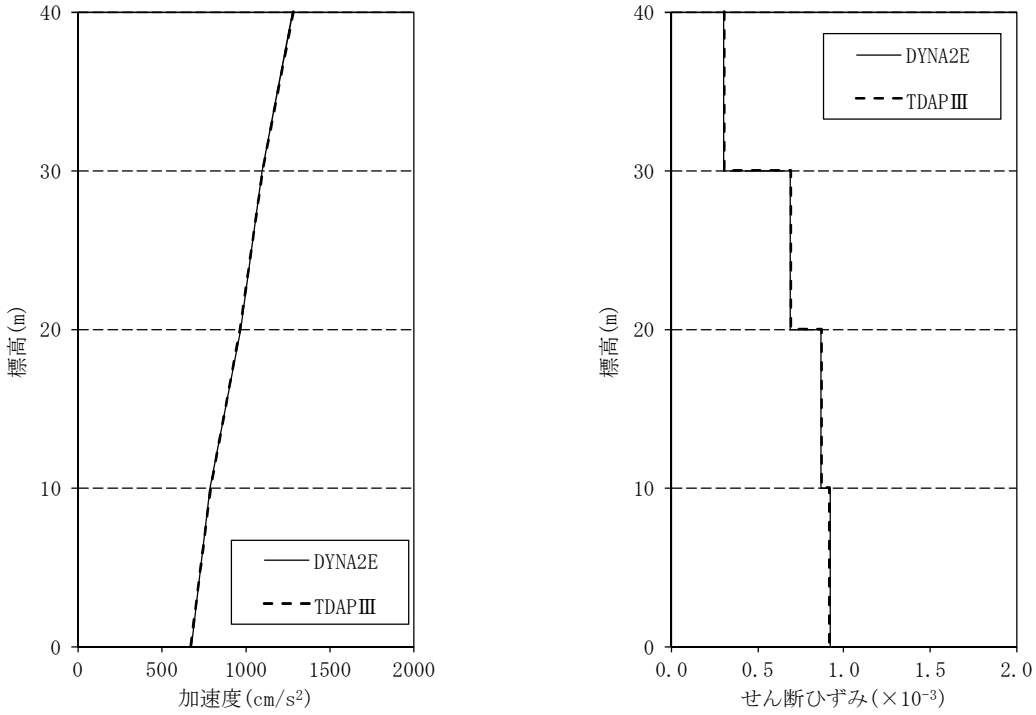


図3－8　入力地震動



(a) 加速度　　(b) せん断ひずみ

図3-9　解析結果の比較（最大応答分布）

c. 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の屋根トラス及び緊急時対策所建屋の応答解析にDYNA2Eを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，非線形挙動及び応力解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

Ⅴ-5-3　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＡＰ-Ⅳ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 SAP-Ⅳ CNDYN Ver.4.1 ……3
2.2 SAP-Ⅳ Ver.1.00 ……4
2.3 SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0 rev.3 ……5
3. SAP-Ⅳ Ver.1.00の解析手法について……6
3.1 一般事項……6
3.2 解析コードの特徴……6
3.3 解析手法……6
3.4 解析フローチャート……8
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……9
4. SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0 rev.3の解析手法について……12
4.1 一般事項……12
4.2 解析コードの特徴……12
4.3 解析手法……12
4.4 解析フローチャート……14
4.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……15

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SAP-Ⅳについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-4-2-2	使用済燃料貯蔵ラックの耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-5-4-1-1	残留熱除去系熱交換器の耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-6-3-2-1	水圧制御ユニットの耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-6-5-1	起動領域計装の耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-6-5-2	出力領域計装の耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-11-2-1	燃料取替機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-11-2-4	チャンネル着脱機の耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-11-2-8	制御棒貯蔵ハンガの耐震性についての計算書	CNDYN Ver.4.1
Ⅴ-2-8-3-3-1	緊急時対策所換気系ダクトの耐震性についての計算書	Ver.1.00
Ⅴ-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	(統合版)Ver.8.0 rev.3
Ⅴ-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	(統合版)Ver.8.0 rev.3
Ⅴ-2-別添2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	(統合版)Ver.8.0 rev.3

2. 解析コードの概要

2.1 SAP-Ⅳ CNDYN Ver.4.1

コード名 / 項目	SAP-Ⅳ
使用目的	3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析 3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析
開発機関	[redacted]
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学）[redacted]
使用したバージョン	CNDYN Ver.4.1
コードの概要	SAP-Ⅳ CNDYN Ver.4.1（以下「本解析コード」という。）は，カリフォルニア大学が開発したSAP-Ⅳをベースに[redacted]ある。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して，有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので，主として，機器の固有値計算並びに自重，運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。 本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・両持ちはりの単純支持円筒モデルについて，本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・平板のモデルについて，シェルモデルによる固有値解析及び応力解析を行い,本解析コードによる解析結果と理論解とを比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について、開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・本解析コードのマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェルモデル）による固有値解析及び応力解析並びに3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素及び解析については，既工事計画において使用された実績がある。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

2.2　SAP-Ⅳ　Ver.1.00

コード名 / 項目	SAP-Ⅳ
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	[redacted]
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [redacted]
使用したバージョン	Ver.1.00
コードの概要	SAP-Ⅳ Ver.1.00（以下「本解析コード」という。）は，カリフォルニア大学が開発したSAP-Ⅳをベースに[redacted]ある。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して，有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので，主として，機器の固有値計算並びに自重，運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。 本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され，入力データと一致することを確認している。 ・片持ちばりの自重による固定端モーメント及び自由端たわみ，固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・原子力産業界において，工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

2.3 SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0 rev.3

コード名 / 項目	SAP-Ⅳ
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ソフトウェアセンター
開発時期	1973年（米国カリフォルニア大学） [redacted]年（株式会社ソフトウェアセンター）
使用したバージョン	（統合版）Ver.8.0 rev3
コードの概要	SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0 Rev.3（以下「本解析コード」という。）は，カリフォルニア大学が開発したSAP-Ⅳをベースに，プリポストプログラムの追加を目的としてソフトウェアセンターがカスタマイズした計算機プログラムである。任意形状の3次元モデル（主にはり要素及びシェル要素）に対して，有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行うもので，主として，機器の固有値計算並びに自重，運転時荷重及び地震力による応力計算等に用いる。 本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・入力されたデータはインプットデータとして解析結果とともに出力され，入力データと一致することを確認している。 ・両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ，固有振動数を本解析コードの静的解析結果及び固有値解析結果と理論解を比較して検討し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・原子力産業界において，工認申請範囲外の管及び支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

3.　SAP-Ⅳ Ver.1.00 の解析手法について

3.1　一般事項

本書は，米国カリフォルニア大学において開発された SAP-Ⅳをベースとして，[redacted]汎用解析コード SAP-Ⅳ Ver.1.00（以下「SAP-Ⅳ」という。）の説明書である。

本解析コードは，有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので，主として，機器・配管系の自重，運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

3.2　解析コードの特徴

SAP-Ⅳは，有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用の計算機プログラムである。

主な特徴を下記に示す。

・2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
・モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
・静的解析後に，同じモデルを使い，解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

3.3　解析手法

3.3.1　静的解析

要素の平衡方程式を組み立て，構造物全体に対して次の平衡方程式を作り，これを解く。

$$Ku = R$$

ここで，

K：剛性マトリックス
u：変位ベクトル
R：荷重ベクトル

計算された節点の変位から，要素の変形及び要素の応力を求める。

3.3.2　動的解析

(1)　固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K\phi = \omega^2 M\phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

ϕ：固有ベクトル

ω：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い，剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

(2)　動的応答解析

動的応答解析においては，次の方程式を用いる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R(t)$$

ここで，

M：質量マトリックス

$\ddot{u}$：加速度ベクトル

$\dot{u}$：速度ベクトル

u：変位ベクトル

C：減衰マトリックス

K：剛性マトリックス

R(t)：時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて，モーダル解析法による時刻歴応答解析，直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

3.4　解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

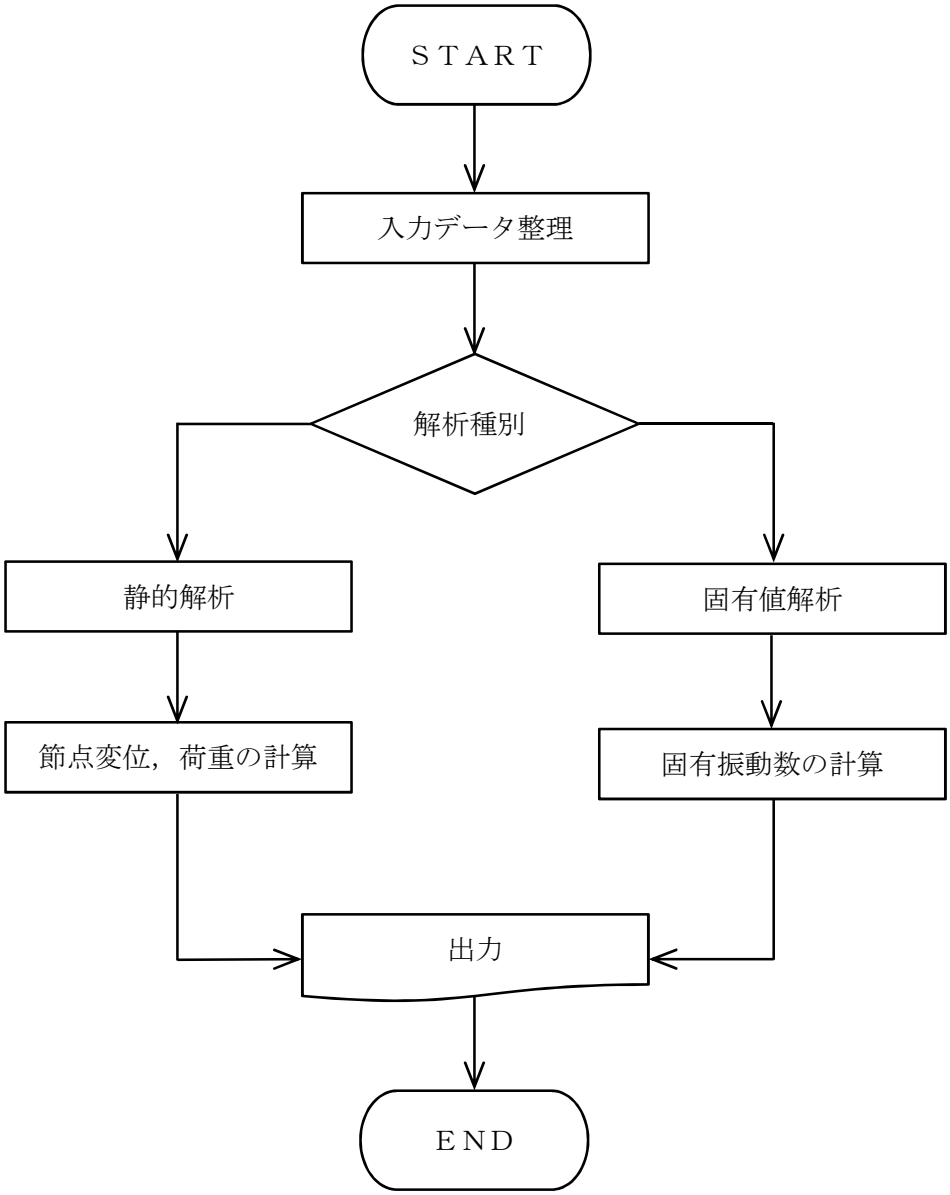


図3-1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

3.5.1　検証（Verification）

今回の解析に用いた解析コードSAP-Ⅳの検証として，SAP-Ⅳによる解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

(1)　解析ケース

表3-1に示す2ケースについて解析を行い，理論解と比較する。

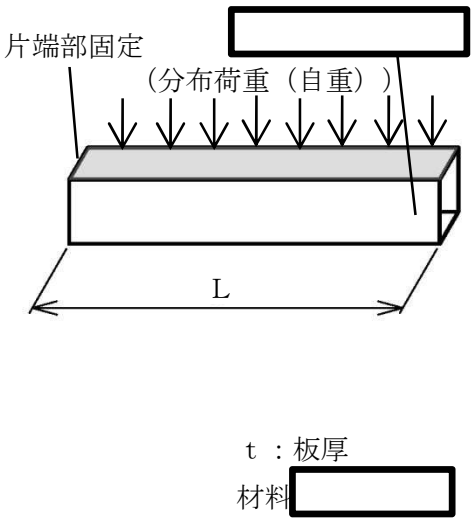
表3-1　検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	片持ちばりの自重による固定端モーメント及び自由端たわみ	はり要素	角形鋼管，一様密度
2	固有値解析	片持ちばりの固有振動数		

(2)　解析条件

使用状況一覧における支持構造物の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図3-2に解析条件を，図3-3に解析モデルを示す。



長さ	L		(mm)
断面形状	－		(mm)
断面積	A		(mm^2)
有効せん断断面積	As		(mm^2)
断面二次モーメント	I		(mm^4)
縦弾性係数	E		(N/mm^2)
横弾性係数	G		(N/mm^2)
質量密度	ρ		(ton/mm^3)
ポアソン比	ν		(-)
重力加速度	g	9.80665	(m/s^2)

図3-2　解析条件

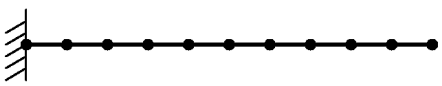


図3-3　解析モデル（使用要素：はり要素）

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較（ケース1）

表 3-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 3-2 に示すとおり，解析結果と理論解は一致しており，解析コード SAP-Ⅳが検証されていることを確認した。

表 3-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
M_{max} （固定端モーメント）			
δ_{max} （自由端たわみ）			
σ （発生応力）			

注記＊：理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max} = \frac{w \cdot L^2}{2} \quad , \quad w = \rho \cdot A \cdot g \cdot 1000$$ （出典：機械工学便覧）

$$\delta_{max} = \delta + \delta'$$

δ ：曲げ応力によるたわみ

$$\delta = \frac{w \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I}$$ （出典：機械工学便覧）

δ' ：せん断応力によるたわみ

$$\frac{d\delta'}{dx} = k \frac{Q}{A \cdot G}$$

ここで，Q ：せん断力

k ：形状係数

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x{}^2 + 3\tau_{xy}{}^2}$$ （出典：設計・建設規格）

b. 解析結果と理論解との比較（ケース2）

表 3-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 3-3 に示すとおり，解析結果を理論解は一致しており，解析コード SAP-Ⅳが検証されていることを確認した。

表 3-3　解析結果と理論解の比較

（単位：Hz）

次数	理論解*	解析結果	誤差

注記＊：理論解は下記の式で計算する。（出典：機械工学便覧）

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{A \cdot \rho}}$$

3.5.2　妥当性確認（Validation）

本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。

- 本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。
- 原子力産業界において，工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードが使用された実績があることを確認している。
- 今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途，適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。
- 開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する 3 次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

3.5.3　評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より，本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。

4.　SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0　rev.3 の解析手法について

4.1　一般事項

本書は，米国カリフォルニア大学において開発された SAP-Ⅳをベースに，プリポストプログラムの追加を目的として，[redacted]年から株式会社ソフトウェアセンターによりカスタマイズされた汎用解析コード SAP-Ⅳ（統合版）Ver.8.0　rev.3（以下「SAP-Ⅳ」という）の説明書である。

本解析コードは，有限要素法を用いて任意形状の 3 次元モデルの静的解析及び動的解析を行うもので，主として，機器・配管系の自重，運転時荷重及び地震力による応力計算に用いる。

4.2　解析コードの特徴

SAP-Ⅳは，有限要素法を用いて静的解析及び動的解析を行う 3 次元構造解析用のプログラムである。

主な特徴を下記に示す。

・2 次元及び 3 次元有限要素プログラムである。
・モデル要素として九種類の要素を扱うことができる。
・静的解析後に，同じモデルを使い，解析条件及び荷重条件を変更し動的解析を行うことができる。

4.3　解析手法

4.3.1　静的解析

要素の平衡方程式を組み立て，構造物全体に対して次の平衡方程式を作り，これを解く。

$$Ku = R$$

ここで，

K：剛性マトリックス
u：変位ベクトル
R：荷重ベクトル

計算された節点の変位から，要素の変形及び要素の応力を求める。

4.3.2　動的解析

(1)　固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K\phi = \omega^2 M\phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

ϕ：固有ベクトル

ω：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，剛性マトリックスと質量マトリックスが小さい場合にはデターミナント法を用い，剛性マトリックスと質量マトリックスが大きい場合はサブスペース反復法が用いられる。

(2)　動的応答解析

動的応答解析においては，次の方程式を用いる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = R(t)$$

ここで，

M：質量マトリックス

$\ddot{u}$：加速度ベクトル

$\dot{u}$：速度ベクトル

u：変位ベクトル

C：減衰マトリックス

K：剛性マトリックス

R(t)：時刻歴の外荷重ベクトル

上記方程式を用いて，モーダル解析法による時刻歴応答解析，直接積分法による時刻歴応答解析ができる。

4.4　解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 4-1 に示す。

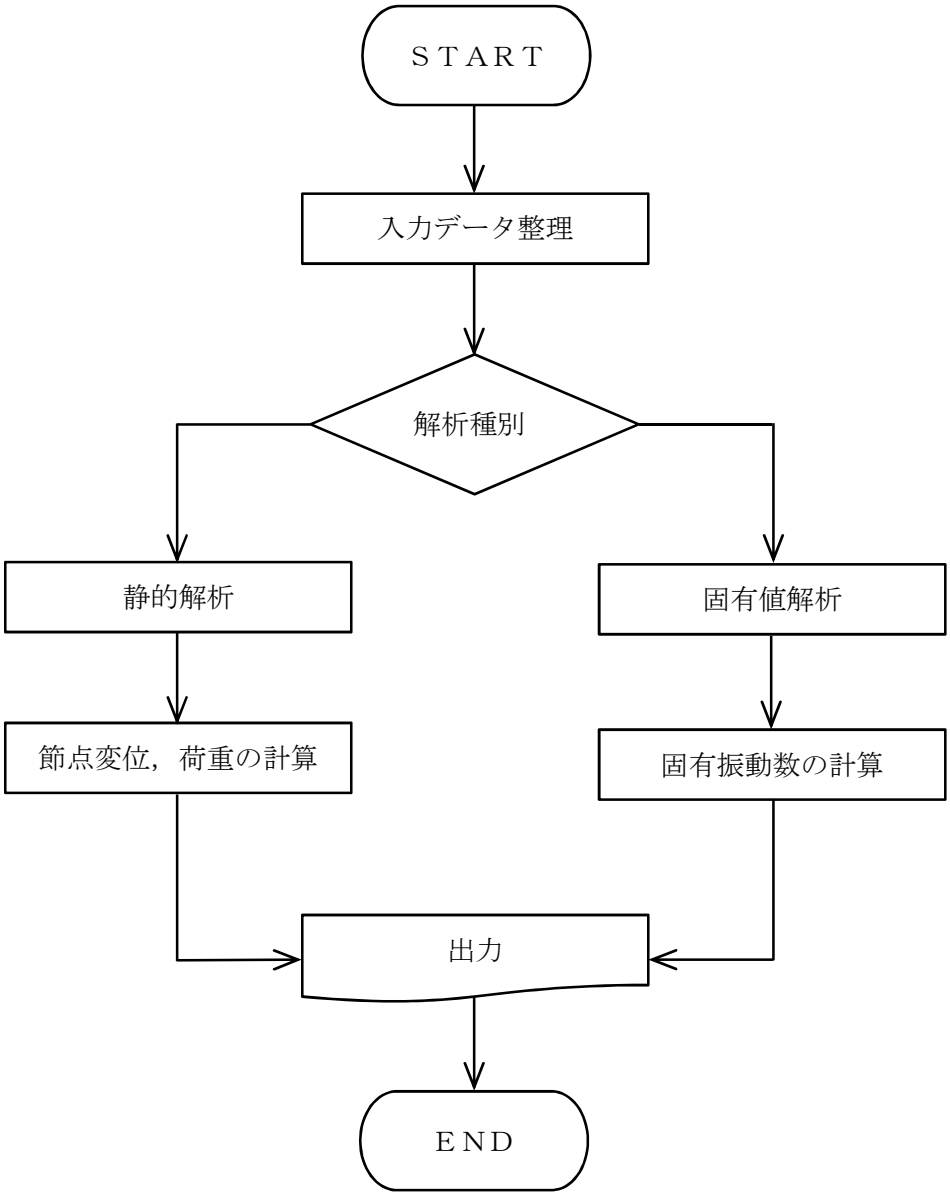


図4-1　解析フローチャート

4.5　検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

4.5.1　検証（Verification）

今回の解析に用いた解析コードSAP-Ⅳの検証として，SAP-Ⅳによる解析結果と理論式より算定する理論解との比較検証を行う。

(1)　解析ケース

表4-1に示す2ケースについて解析を行い，理論解と比較する。

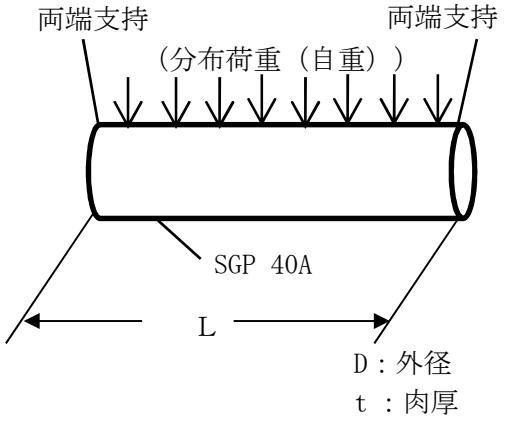
表4-1　検証ケース

ケース	解析種別	内容	要素	条件
1	静的解析	両端単純支持ばりの自重による中央部のモーメント及びたわみ	はり要素	鋼管，一様密度
2	固有値解析	両端単純支持ばりの固有振動数		

(2)　解析条件

使用状況一覧における管の代表的な部材を使用した解析モデルを使用する。

図4-2に解析条件を，図4-3に解析モデルを示す。



長さ	L	5000	(mm)
断面形状	-	D=48.6 t=3.5	(mm)
断面二次モーメント	I	1.268426×10^{5}	(mm^4)
縦弾性係数	E	2.03×10^{5}	(N/mm^2)
重力加速度	g	9.80665	(m/s^2)
分布荷重	w	0.03815	(N/mm)
ポアソン比	ν	0.3	(-)
横弾性係数	G	78077	(N/mm^2)

図4-2　解析条件

図4-3　解析モデル（使用要素：はり要素）

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較（ケース1）

表 4-2 に解析結果と理論解との比較結果を示す。表 4-2 に示すとおり，解析結果と理論解は一致しており，解析コード SAP-Ⅳが検証されていることが確認された。

表 4-2 解析結果と理論解の比較

比較項目	理論解*	解析結果	誤差
M_{max} （中央曲げモーメント）	1.1922×10^{5} N・mm	1.1922×10^{5} N・mm	0.00 %
δ_{max} （中央たわみ）	12.063 mm	12.064 mm	0.01 %

注記 ＊：理論解は下記の式で計算する。

$$M_{max}=\frac{w\cdot L^{2}}{8}$$ （出典：機械工学便覧）

$$\delta_{max}=\delta+\delta'$$

δ ：曲げ応力によるたわみ

$$\delta=\frac{5w\cdot L^{4}}{384\cdot E\cdot I}$$ （出典：機械工学便覧）

δ' ：せん断応力によるたわみ

$$\delta'=\frac{1}{\kappa\cdot A\cdot G}\int_{0}^{\frac{L}{2}}Q\,dx$$ （出典：機械工学便覧）

$$=\frac{w\cdot L}{4\cdot A\cdot G}$$

ここで，Q：せん断力

κ ：形状係数（＝0.5） （出典：構造力学公式集）

b. 解析結果と理論解との比較（ケース2）

表 4-3 に解析結果と理論解の固有振動数の比較結果を示す。表 4-3 に示すとおり，解析結果と理論解は一致しており，解析コード SAP-Ⅳが検証されていることが確認された。

表 4-3　解析結果と理論解の比較

（単位：Hz）

次数	理論解*	解析結果	誤差
1次	5.112	5.111	-0.02 %

注記　＊：理論解は下記の式で計算する。（出典：機械工学便覧）
なお，解析結果は曲げ及びせん断による変位を考慮しているが，せん断による変位が曲げによる変位に比べて小さいことから，理論解については，せん断による変位を無視して，曲げによる変位のみを考慮する。

$$f = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{w_1}} \quad , \quad w_1 = w \cdot 1000 / g$$

ここに，　$\lambda = \pi$

4.5.2　妥当性確認（Validation）

本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。

・本解析コードは，機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

・原子力産業界において，工認申請範囲外の支持構造物に対する耐震性評価に本解析コードの使用実績があることを確認している。

・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析及び静的解析という解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。

・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

4.5.3　評価結果

4.5.1 及び 4.5.2 より，本解析コードを使用目的に示す固有値解析及び応力解析に用いることは妥当である。

Ⅴ-5-4　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＨＩＳＡＰ及びＮＳＡＦＥ

目次

1.　はじめに……1
1.1　使用状況一覧……2
2.　解析コードの概要……5
2.1　HISAP Ver.52……5
2.2　NSAFE Ver.5……6

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）HISAP及びNSAFEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-2-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-3-1-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-3-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-3-3-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-4-1-4	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-4-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-5-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-5-2-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-6-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-7-2-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-5-8-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-6-3-2-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-6-4-1-3	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-6-6-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-6-6-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-7-2-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-4-3-5-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-5-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-5-2-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-5-3-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-5-4-2	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-6-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-11-2-9	ウォータレグシールライン（残留熱除去系，高圧炉心スプレイ系及び低圧炉心スプレイ系）の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-2-別添 2-2	溢水源としない耐震 B，C クラス機器の耐震性についての計算書	HISAP Ver.52
V-3-4-2-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver.52
V-3-4-2-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-3-5-1-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-2-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-3-1-6	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-3-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-4-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-4-2-5	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-5-1-4	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-6-1-4	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-5-6-2-4	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-6-1-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-6-3-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-6-3-2-3	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-7-1-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-2-5-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-2-5-4	付属設備の管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-3-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-3-2-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-4-1-3	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	HISAP Ver.52
Ⅴ-2-4-2-4	使用済燃料プール温度（ＳＡ）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-6	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-7	低圧代替注水系原子炉注水流量（常設ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-8	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-9	低圧代替注水系原子炉注水流量（可搬ライン狭帯域用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-10	代替循環冷却系原子炉注水流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-6-5-14	原子炉隔離時冷却系系統流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-19	原子炉圧力（ＳＡ）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-23	原子炉水位（ＳＡ広帯域）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-25	ドライウェル圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-26	サプレッション・チェンバ圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-34	格納容器下部水温の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-38	低圧代替注水系格納容器スプレイ流量（可搬ライン用）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-39	低圧代替注水系格納容器下部注水流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-40	代替循環冷却系格納容器スプレイ流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-41	サプレッション・プール水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-42	格納容器下部水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-5-43	原子炉建屋水素濃度の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-7-12	静的触媒式水素再結合器動作監視装置の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-7-13	フィルタ装置水位の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-7-14	フィルタ装置圧力の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-6-7-16	残留熱除去系海水系系統流量の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-8-2-1	主蒸気管放射線モニタの耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-8-2-3	格納容器雰囲気放射線モニタ（Ｓ／Ｃ）の耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-8-2-7	耐圧強化ベント系放射線モニタの耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-8-3-1-1	中央制御室換気系ダクトの耐震性についての計算書	NSAFE Ver.5
Ⅴ-2-9-4-3-5-2	付属設備の耐震性の計算書	NSAFE Ver.5

2. 解析コードの概要

2.1 HISAP Ver.52

コード名 / 項目	HISAP
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による管の固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社日立製作所
開発時期	1978年
使用したバージョン	HISAP Ver.52
コードの概要	HISAP（以下「本解析コード」という。）は，配管の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コード[redacted]をメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。 任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。 原子力の分野における使用実績を有している。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	【検証（Verification）】 [redacted] 【妥当性確認（Validation）】 [redacted]

2.2 NSAFE Ver.5

コード名 / 項目	NSAFE
使用目的	3次元有限要素法（はりモデル）による支持構造物の固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社日立プラントコンストラクション
開発時期	1982年
使用したバージョン	NSAFE Ver.5
コードの概要	NSAFE（以下「本解析コード」という。）は，支持構造物の強度解析を目的として開発された計算機プログラムである。本解析コードは，汎用構造解析コード[redacted]をメインプログラムとし，応力評価プログラム及びそれらのインターフェイスプログラムのサブプログラムから成る。 任意の1次元，2次元あるいは3次元形状に対し，静的解析，動的解析を行うことが可能で，反力・モーメント・応力，固有値・刺激係数等の算出が可能である。 原子力の分野における使用実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 [redacted] 【妥当性確認（Validation）】 [redacted]

Ⅴ-5-5　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＢＡＱＵＳ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 ABAQUS Ver.6.14-3……3
2.2 ABAQUS Ver.6.12-1……4
2.3 ABAQUS Ver.6.11-2……5
2.4 ABAQUS Ver.6.11-1, Ver6.4-1……6
2.5 ABAQUS Ver.6.5-4……7
2.6 ABAQUS Ver.6.4-4……9
3. ABAQUS Ver.6.12-1の解析手法について……10
3.1 一般事項……10
3.2 解析コードの特徴……10
3.3 解析手法……11
3.4 解析フローチャート……12
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……13

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ABAQUSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.14-3
Ⅴ-2-4-2-3-1-2	バスケットの耐震性についての計算書	Ver.6.14-3
Ⅴ-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.14-3
Ⅴ-2-6-7-6	統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナの耐震性についての計算書	Ver.6.12-1
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver.6.11-2
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver.6.11-1
Ⅴ-2-3-4-3-3	気水分離器及びスタンドパイプの耐震性についての計算書	Ver.6.11-1
Ⅴ-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.11-1
Ⅴ-2-10-1-2-2	非常用ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-10-1-2-3	非常用ディーゼル発電機燃料油デイタンクの耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-10-1-3-2	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機空気だめの耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-10-1-3-3	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機燃料油デイタンクの耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-11-2-2	原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-別添3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書	Ver.6.5-4
Ⅴ-2-3-4-3-4	シュラウドヘッドの耐震性についての計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-2-4-2-3-1-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-2-4-2-3-1-5	二次蓋の耐震性についての計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-2-4-2-3-2-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-2-4-2-3-2-5	二次蓋の耐震性についての計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-3-別添2-2-1	防護対策施設の強度計算書	Ver.6.4-4
Ⅴ-2-4-2-3-3-1	キャスク容器の耐震性についての計算書	Ver.6.4-1

2　解析コードの概要

2.1　ABAQUS Ver.6.14-3

コード名 / 項目	ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver.6.14-3
コードの概要	ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素，連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，解析については，既工事計画で使用された実績がある。

2.2　ABAQUS Ver.6.12-1

コード名 / 項目	ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（はり要素，シェル要素及びソリッド要素）による固有値解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt，Karlsson and Sorensen,Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver.6.12-1
コードの概要	ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt，Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素,連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・片持ちはりの自由振動問題を対象に，はり要素モデル及びソリッド要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・球殻の自由振動問題を対象に，シェル要素モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・ばねー質量系の振動問題を対象に，一質点の集中質量モデルの解析結果が，理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち，はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。

2.3　ABAQUS Ver.6.11-2

コード名 / 項目	ABAQUS
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年（Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン	Ver.6.11-2
コードの概要	ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素,連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル及び軸対称モデル）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を持ち，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

2.4　ABAQUS Ver.6.11-1，Ver.6.4-1

項目＼コード名		ABAQUS
使用目的	Ver.6.11-1	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算 3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析 3次元有限要素法（ソリッド,シェル及びはりモデル）による応力解析
	Ver.6.4-1	2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布計算
開発機関		ダッソー・システムズ株式会社（Ver.6.11-1） Hibbitt，Karlsson and Sorensen,Inc（Ver.6.4-1）
開発時期		1978年（Hibbitt，Karlsson and Sorensen,Inc） 2005年（ダッソー・システムズ株式会社）
使用したバージョン		Ver.6.11-1，Ver.6.4-1
コードの概要		ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt，Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発され，ダッソー・システムズ社に引き継がれた有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素,連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）		【検証（Verification)】 ・本解析コードを用いた解析結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation)】 ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を持ち，妥当性は十分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッド要素）による弾塑性解析，3次元有限要素法（ソリッド,シェル及びはりモデル）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による温度分布解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

2.5　ABAQUS Ver.6.5-4

コード名 / 項目	ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析 はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析 3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver.6.5-4
コードの概要	ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素,連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification)】 ・本解析コードによる地震応答計算結果と振動試験結果を比較して，検証*が実施され，本解析コードが検証されたものであることを確認した。 注記＊：独立行政法人　原子力安全基盤機構「平成19年度　原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査」 動的上下動耐震試験（クレーン類）に係る報告書 ・今回使用する適用要素（シェル要素及びはり要素）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（シェル要素）による応力解析，はりモデルによる固有値解析及び地震応答解析及び3次元有限要素法（シェル要素，はり要素）による固有値解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

2.6　ABAQUS Ver.6.4-4

コード名 / 項目	ABAQUS
使用目的	3次元有限要素法（ソリッドモデル及びシェルモデル）による応力解析 3次元有限要素法（はり要素）による応力解析 2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析
開発機関	Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver.6.4-4
コードの概要	ABAQUS（以下「本解析コード」という。）は，米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen,Inc（HKS社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用の汎用計算機プログラムである。 適用モデルは1次元～3次元の任意形状の構造要素,連続体要素について取り扱うことが可能であり，静的応力解析，動的応力解析，熱応力解析，伝熱解析，座屈解析等の機能を有している。特に非線形解析が容易に行えることが特徴であり，境界条件として，熱流速，温度，加速度等を取り扱うことができる。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野で利用されている実績を持つ。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification)】 ・今回使用する適用モデル（ソリッドモデル，シェルモデル，はり要素及び軸対称モデル）について，解析結果が理論モデルによる理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation)】 ・本解析コードは数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を持ち，妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（ソリッドモデル，シェルモデル及びはり要素）による応力解析及び2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析，温度分布解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・使用する解析モデルは，既工事計画及び耐震評価にて実績のある関連規格及び文献を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。

3.　ABAQUS Ver.6.12-1の解析手法について

3.1　一般事項

ABAQUSは有限要素法による汎用非線形構造計算機プログラムである。材料非線形性，接触問題を含む幾何学的非線形性を考慮した構造物の静的応力変形解析や動的解析，熱伝導解析，音響解析機能等が提供されている。また，各分野特有の連成問題（熱応力，構造－流体連成等）も解析可能である。今回は統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値の算出に用いている。

3.2　解析コードの特徴

ABAQUSの主な特徴を以下に示す。

・非線形構造問題（材料，幾何非線形）に必要な機能が充実している。
・数多くの要素，材料構成則が提供されており，多様な構造物のモデル化が可能である。
・連成問題が解析可能である。

3.3 解析手法

統合原子力防災ネットワーク設備衛星アンテナに対する固有値解析手法を3.3.1に示す。

3.3.1 動的解析

(1) 固有値解析

次の固有値方程式を解いて，固有振動数と振動モードを求める。

$$K\phi = \omega^2 M\phi$$

ここで，

K：剛性マトリックス

ϕ：固有ベクトル

ω：固有振動数

M：質量マトリックス

上記方程式の解法として，ABAQUS Ver.6.12-1においては，Lanczos法，自動マルチレベル部分構造（AMS）法及びサブスペースイテレーション法が用意されている。

3.4　解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 3-1 に示す。

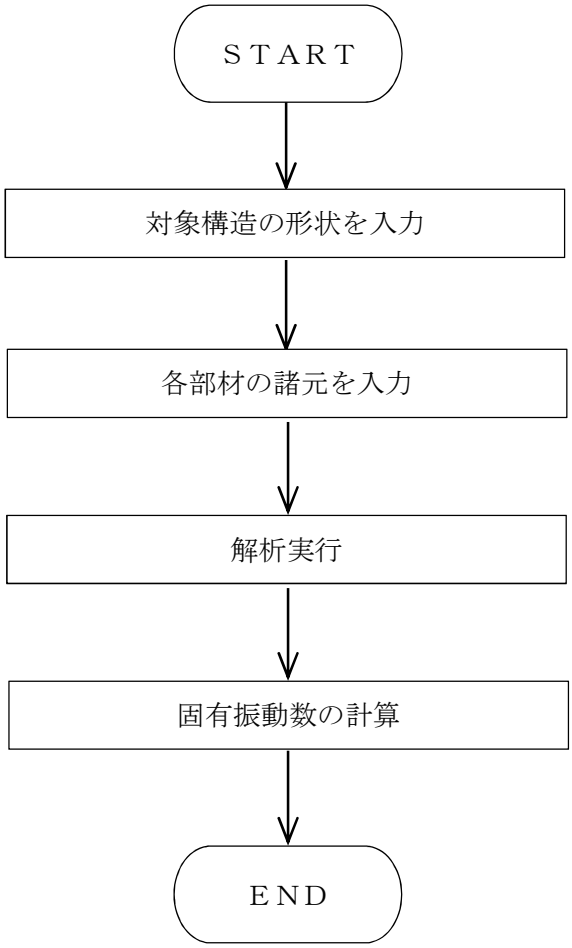


図3-1　解析フローチャート

3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

3.5.1 検証（Verification）

今回の解析に用いた解析コードABAQUS Ver.6.12-1の検証として，ABAQUS Ver.6.12-1による解析結果と理論式による理論解との比較検証を行う。

(1) 解析ケース

表3－1に示す1ケースについて解析を行い，理論解と比較する。

表3－1 検証ケース

解析種別	内容	要素	条件
固有値解析	片持ちはりの固有振動数	6面体ソリッド要素	一様密度

(2) 解析条件

ABAQUS Benchmark Manualに記載の片持ちはりの例題を使用する。

図3－2に概念図及び解析条件を，図3－3に解析モデルを示す。

概念図

半径	r		in
直径	d		in
長さ	L		in
縦弾性係数	E		lb/in^2
質量密度	ρ		$lb\text{-}s^2/in^4$
断面積	A		in^2
断面二次モーメント	I		in^4

図3－2 概念図及び解析条件

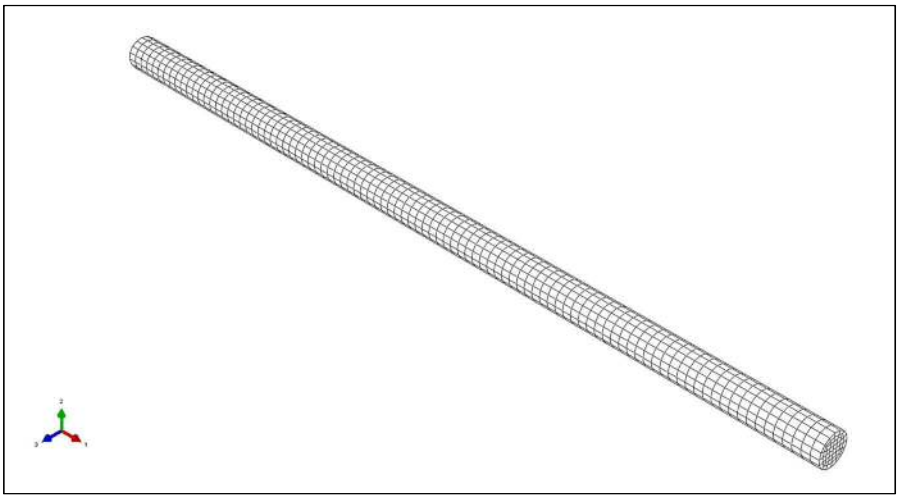


図3－3 解析モデル（使用要素：6面体ソリッド要素）

(3) 解析結果

a. 解析結果と理論解との比較

表3－2に解析結果と理論解との比較結果を示す。表3－2に示すとおり，解析結果と理論解は一致しており，解析コードABAQUS Ver.6.12-1が検証されていることを確認した。

表3－2 解析結果と理論解の比較

（単位：Hz）

次数	理論解*	解析結果	誤差
1次			
2次			
3次			

注記＊：理論解は下記の式で計算する。（出典：機械工学便覧）

$$f = \frac{\lambda^2}{2\cdot\pi\cdot L^2}\sqrt{\frac{E\cdot I}{A\cdot\rho}}$$

3.5.2　妥当性確認（Validation）

本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。

・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。

・本解析コードは，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素のうち，はり要素及びシェル要素については既工事計画で使用された実績がある。

3.5.3　評価結果

3.5.1 及び 3.5.2 より，本解析コードを使用状況一覧に示す解析に用いることは妥当である。

Ⅴ-5-6　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＱＡＤ－ＣＧＧＰ２Ｒ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）QAD-CGGP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	1.04
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.04
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.04
Ⅴ-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.04
Ⅴ-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	1.04

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	QAD-CGGP2R
使用目的	燃料プール水深の遮蔽計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期　1967年）
使用したバージョン	1.04
コードの概要	QAD-CGGP2R（以下「本解析コード」という。）は，米国ロスアラモス国立研究所で開発されたガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし，旧日本原子力研究所がＩＣＲＰ1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて，実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。 本解析コードは，線源を直方体，円筒，球の形状に構成でき，任意の遮蔽体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは，線量率評価を実施するコードであり，計算に必要な主な条件は線源条件，遮蔽体条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり，使用目的に記載する評価に適用可能である。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・JRR-4散乱実験室でのコンクリート透過実験の実験値（「原子力第1船遮蔽効果確認実験報告書」JNS-4（日本原子力船開発事業団，1967））と計算値を比較した。実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ，遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。 ・実験値と計算値を比較した結果，概ね一致していることを確認している。

	・上記妥当性確認では，実験孔からのガンマ線を遮蔽体に入射させ，遮蔽体透過後のガンマ線の線量率の実験値と本解析コードによる計算値を比較している。 ・今回の燃料プール水深の遮蔽計算では，上記妥当性確認における実験体系と同様に，ガンマ線の遮蔽体透過後の線量率を計算する。 ・今回の燃料プール水深の遮蔽計算は上記妥当性確認内容と合致している。 ・また，原子力発電所放射線遮へい設計規程（ＪＥＡＣ４６１５－2008）（日本電気協会　原子力規格委員会　平成20年6月）では，事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コードとして，QADコードが挙げられている。

Ⅴ-5-7　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＯＲＩＧＥＮ２

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ORIGEN2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-3-4	使用済燃料貯蔵槽の冷却能力に関する説明書	2.2
Ⅴ-1-3-5	使用済燃料貯蔵槽の水深の遮蔽能力に関する説明書	2.2
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	2.2
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	2.2
Ⅴ-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	2.2
Ⅴ-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	2.2

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	ORIGEN2
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の崩壊熱評価 制御棒の線源強度計算 中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（ＯＲＮＬ）
開発時期	1980年
使用したバージョン	2.2
コードの概要	ORIGEN2（以下「本解析コード」という。）は，使用済燃料等の核種生成量，崩壊熱量並びに中性子及びガンマ線の線源強度を評価するためにＯＲＮＬで開発され公開された燃焼計算コードであり，原子力発電所施設，再処理施設，廃棄物処理施設等幅広く設計に利用されている。 また，国内の最新の使用済燃料についての評価精度向上を目指し，日本原子力研究所シグマ委員会核種生成量評価ワーキンググループにおいてJENDL核データセットに基づくORIGEN2用ライブラリが作成され，公開されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・計算機能が適正であることは，コード配布時に同梱されたサンプル問題の再現により確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは，燃焼計算によって得られた核種生成量から炉心内蔵量等を評価するコードであり，計算に必要な主な条件は組成，照射条件，核データライブラリである。 これら評価条件が与えられれば評価は可能であり，本解析コードは使用目的に記載する評価に適用可能である。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・米国原子力学会（ANS）のNuclear Technology vol.62 （1983年9月）の「ORIGEN2 :A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristic of Nuclear Materials」において，ANS標準崩壊熱との比較及び使用済燃料中のウラン，プルトニウム，アメリシウムなどの組成の実測値との比較により妥当性の確認を行っている。

	・日本原子力研究所シグマ委員会にて開発されたORLIBJライブラリについては,「JENDL-3.3に基づくORIGEN2用ライブラリ:ORLIBJ33」JAERI-Data/Code 2004-015(2004年11月)等において,核種生成量について照射後試験結果と,本解析コードによる計算値を比較することで妥当性の確認を行っている。 ・今回の使用目的に記載する評価は上記妥当性確認内容と合致しており,本解析コードの使用は妥当である。

Ⅴ-5-8　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＣＡＬＥ

目次

1.　はじめに……………………………………………………………… 1
1.1　使用状況一覧………………………………………………………… 2
2.　解析コードの概要…………………………………………………… 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SCALEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-3-2	燃料取扱設備，新燃料貯蔵設備及び使用済燃料貯蔵設備の核燃料物質が臨界に達しないことに関する説明書	6.0 KENOV．a

2. 解析コードの概要

項目＼コード名	SCALE
使用目的	使用済燃料貯蔵設備の未臨界性評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（ＯＲＮＬ）
開発時期	2009年
使用したバージョン	SCALE6.0 KENOⅤ.a
コードの概要	SCALE（以下「本解析コード」という。）は核燃料物質，構造材等の幾何形状等を入力とし，中性子の飛程を乱数を使用して確率的に計算し，各中性子が吸収されて消滅するか，体系外に漏れるまでの反応過程で発生する核分裂中性子数を計算し，これらの比から実効増倍率を求めるものである。このため，計算体系が3次元の複雑な形状でも精度の高い計算ができる。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 米国ＰＮＬ*1で行われた臨界実験を対象としたベンチマーク解析※を実施し，計算精度を検証し，解析解と理論解が一致していることを確認している。 具体的には，上記臨界試験体系のうち，非均質ケース16ケースについて，本解析コードを用いて実効増倍率を算出し，当該データをヒストグラム化後統計処理することで，平均値，バイアス，$\sigma_{95\text{-}95}$等を得た。 ・バイアス：実験値と計算値の平均的なずれ ・$\sigma_{95\text{-}95}$：95 %信頼度－95 %確率の計算の不確かさ 【妥当性確認（Validation）】 ※ベンチマーク解析 ベンチマーク解析の対象としたPNL-3602実験結果は，国内BWRの燃料貯蔵設備と同様に，中性子吸収材，板厚，水ギャップ幅，燃料対減速材比及び燃料濃縮度など，臨界解析で重要と考えられる要因に関し，数種類の異なる体系で実施されている。また，臨界実験に用いられた燃料仕様は，金属キャスク燃料や燃料ラックの臨界評価に用いている燃料仕様と同程度であり，ベンチマーク試験として妥当と考えられる。なお，本検証については，米国オークリッジ国立研究所で行われたベンチマーク解析*2が参考になる。

注記　＊1：Pacific Northwest National Laboratory

＊2：J.J. Lichtenwalter, S.M. Bowman, M.D. DeHart, and C.M Hopper, ″Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages″, NUREG/CR-6361 ORNL/TM-13211, 1997年3月

Ⅴ-5-9　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＯＮＢＯＳ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 TONBOS Ver.3 の特徴 ……4
3. 解析手法……4
3.1 基礎方程式……4
3.2 物体の運動方程式の時間積分法……6
3.3 評価条件……7
3.4 解析条件……8
4. 解析フローチャート……9
5. 解析コードの検証……10
5.1 フジタスケールとの比較……10
5.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例……10
5.3 佐呂間竜巻での車両飛散事例……12
6. 妥当性確認……18
7. 参考文献……18

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TONBOSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-2-3-2	竜巻の影響を考慮する施設及び固縛対象物の選定	Ver.3

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	TONBOS
使用目的	竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価
開発機関	一般財団法人 電力中央研究所
開発時期	2013年
使用したバージョン	Ver.3
コードの概要	TONBOS（以下，「本解析コード」という。）は，一般財団法人電力中央研究所にて開発・保守されているプログラムである。 空気中の物体が受ける抗力，揚力による運動を計算することで，竜巻による風速場の中での飛来物の飛散軌跡を評価することができる解析コードであり，物体の飛散距離等の算出が可能である。 仮定する風速場は，地上付近で，竜巻の中心に向かう流れを考慮した3次元の風速成分を持つフジタモデルDBT-77（DBT:Design Basis Tornado）とする。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・自動車の飛散解析において，フジタスケールの各スケールに対応する被災状況とおおむね合致した結果が得られた。 ・パイプの飛散解析において，Grand Gulf 原子力発電所への竜巻襲来事例とおおむね合致した結果が得られた。 ・自動車及びトラックの飛散解析において，佐呂間竜巻での車両飛散事例とおおむね一致した結果を得られた。 【妥当性確認（Validation）】 TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは次のとおり妥当である。 ・本解析コードは，竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり，使用目的が合致している。 ・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

2.1　TONBOS Ver.3 の特徴

「TONBOS」は，竜巻の風速場としてフジタモデルDBT-77（DBT:Design Basis Tornado）を用い，その風速場が水平方向に移動するものとして定め，かつ物体を質点系モデルとして，物体が流体中において抗力，揚力及び重力を受けて運動する軌跡に対する運動方程式を解くことにより，物体の飛散距離，飛散高さ及び飛散速度（以下，「飛散距離等」という。）を算定する解析コードである。

3.　解析手法

3.1　基礎方程式

(1)　竜巻の風速場

フジタモデルDBT-77 における接線風速等の関係式については，Fujita Work Book[(1)]と同様に以下の式で定義する。

無次元座標　$r = R/R_m$　　$z = Z/H_i$

接線風速　$V_\theta = F_r(r) F_h(z) V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r<1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \qquad F_h(z) = \begin{cases} z^{k0} & (z<1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速

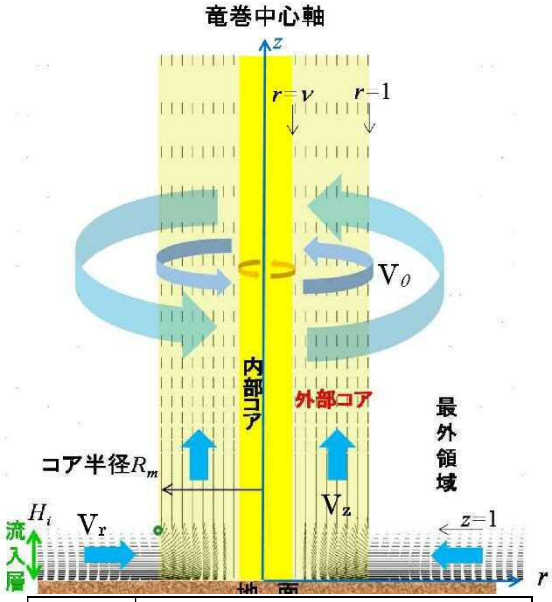
$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \dfrac{V_\theta \tan\alpha_0}{1-v^2}\left(1-\dfrac{v^2}{r^2}\right) & (v<r<1) \\ V_\theta \tan\alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan\alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z<1) \\ B\{1-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \dfrac{3}{28}\dfrac{\eta V_m}{1-v^2} A\left(16z^{\frac{7}{6}} - 7z^{\frac{8}{3}}\right) & (z<1) \\ \dfrac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)}\{2-\exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

k_0, k, v, η，A, Bは定数



V_θ	接線方向風速
V_r	半径方向風速（内向きが正）
V_z	上昇風速
V_m	最大接線風速
R_m	外部コア半径

図3-1　フジタモデルDBT-77の概要

また，上記以外の定数として，内部コアの半径R_vと外部コアの半径R_mの比$v = R_v / R_m$，流入層高さH_i，その他定数k_0，k，A，B についても，Fujita Work Book[(1)]に基づく以下の式及び値を用いる。

内部コア半径と外部コア半径の比　$v = 0.9 - 0.7\exp(-0.005R_m)$　(1)

流入層高さ　$H_i = \eta R_m$　ここで　$\eta = 0.55(1-v^2)$　(2)

その他定数　$k_0 = 1/6$，$k = 0.03$，$A = 0.75$，$B = 0.0217$　(3)

時刻t＝0 で竜巻中心は原点に位置するものとし，竜巻の風速場は物体の影響を受けないと仮定すると，時刻t における竜巻の風速ベクトルV_w の各風速成分（u,v,w）は以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_r\cos\theta - V_\theta\sin\theta \\ V_r\sin\theta + V_\theta\sin\theta \\ V_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{tr} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで，V_{tr} はx軸方向の竜巻の移動速度，θ は竜巻中心と各点を結ぶ線分がx軸となす角であり，竜巻中心からの距離rは以下で定義されるものである。

$$r = \sqrt{(x - V_{tr}t)^2 + y^2} \quad (5)$$

なお，静止する観測者からみた最大水平風速V_D は，x軸方向の竜巻の移動速度V_{tr}をV_mに加えた以下で計算される。

$$V_D = V_m + V_{tr} \quad (6)$$

(2) 物体の運動

物体の運動は，既往研究[(2)～(6)]と同様に方向性がない平均的な抗力（抗力係数一定）と重力のみが外力として作用するものとした。ただし，地表付近では地面の存在により流れが非対称になること（地面効果）による揚力加速度L を考慮した。この場合，物体の空中での運動方程式は以下のようになる。

$$\frac{dV_M}{dt} = \frac{\rho}{2}\frac{C_D A}{m}\left|V_W - V_M\right|(V_W - V_M) - (g - L)k \quad (7)$$

ここで，各変数は以下で定義する。

V_M：物体の速度ベクトル

V_W：風速ベクトル（フジタモデルでの風速場と移動速度の和）

ρ ：空気密度

C_DA：物体の各方向の抗力係数と見附面積の積の平均値

m：物体の質量

g：重力加速度

k：鉛直上向きの単位ベクトル

また，揚力加速度ℓは，既往の風洞実験の結果[(7) (8)]を考慮して，高さdの物体にかかる揚力が，物体底面が地面から3dの高度であるときに消滅するものとした。具体的には，地面からzの距離（高度）にある物体に作用する揚力加速度Lを以下の関数形でモデル化する。

（Z：物体底面の高度（=z-d/2））

$$L = \frac{1}{2}\rho \frac{C_D A}{m} \left| V_W - V_M \right|_{x,y}^2 f(Z/d) \tag{8}$$

ここでf(Z/d)は，既往の風洞実験の結果[7]を参考に，以下で定義する。

$$f(Z/d) = \begin{cases} \{1-(z/3d)\} / \{1+(Z/d)\} & 0 \le Z \le 3d \\ 0 & 3d < Z \end{cases} \tag{9}$$

3.2　物体の運動方程式の時間積分法

時刻t における竜巻の風速ベクトルV_w＝(u,v,w)は式(4)で与えられるため，式(7)を時間積分することによって，物体の速度と位置の時刻歴を求めることができる。一定加速度法では，時刻τから時刻τ＋⊿τにおける加速度が一定と仮定する。つまり，

$$\frac{dV_M(t)}{dt} = A(\tau) \tag{10}$$

ここで，加速度ベクトルA(τ)は以下を表す。

$$A(\tau) = \frac{\rho}{2}\frac{C_D A}{m} \left| V_W(\tau) - V_M(\tau) \right| \{V_W(\tau) - V_M(\tau)\} - (g - L)k \tag{11}$$

式(11)を時間積分すると，以下を得る。

$$V_M(t) = V_M(\tau) + A(\tau)(t - \tau) \tag{12}$$

さらに式(12)を時間積分すると，以下の物体位置X_M (t)を得る。

$$X_M(t) = X_M(\tau) + V_M(\tau)(t - \tau) + \frac{A(\tau)}{2}(t - \tau)^2 \tag{13}$$

従って，時刻t＝τ＋⊿τにおける物体の速度と位置は以下で与えられる。

$$V_M(t + \Delta\tau) = V_M(\tau) + A(\tau)\Delta\tau \tag{14}$$

$$X_M(t + \Delta\tau) = X_M(\tau) + V_M(\tau)\Delta\tau + \frac{A(\tau)\Delta\tau^2}{2} \tag{15}$$

式(14)，(15)の右辺は時刻t＝τにおける既知の速度・位置の関数であるため，陽解法として時間積分を実施する。

3.3　評価条件

以下の初期条件を設定する。

・竜巻の風速場（図3-2）

・竜巻の最大水平風速（V_m）が85 m/sとなる風速場を設定する。

・竜巻の移動速度（V_{tr}）は15 m/sとする。

・竜巻風速半径（外部コア半径：R_m）は30 mとする。

初期高さ（物体の設置高さ。地面設置の場合は初期高さ0 m）に51×51 個の物体を配置する。

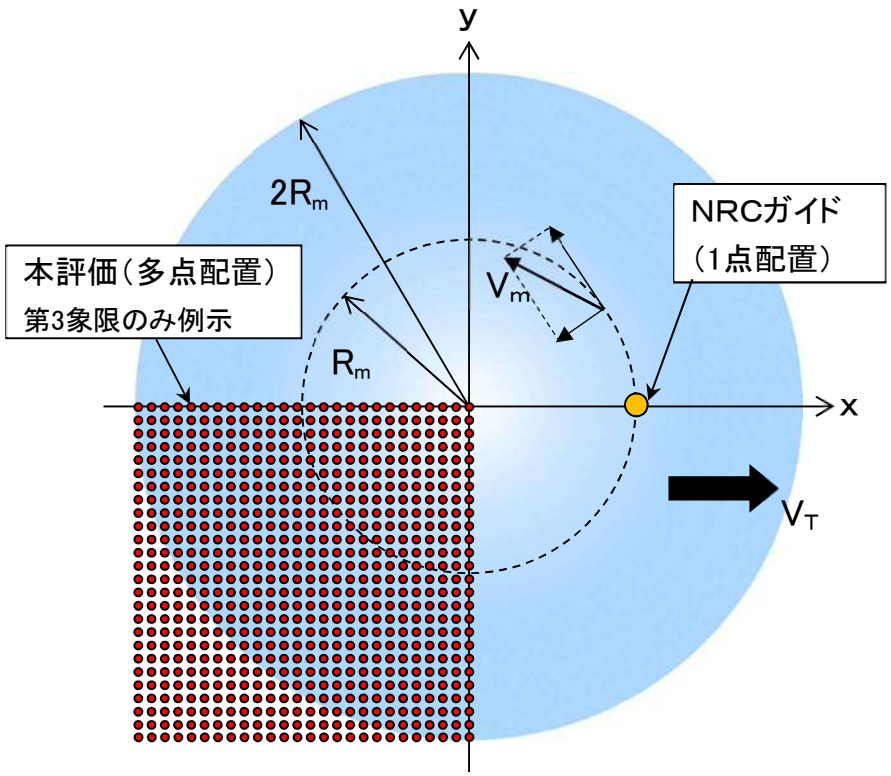


図3-2 竜巻の風速場及び初期物体配置

・飛散距離等

図3-3に示すとおり，飛散距離は初期位置からの距離とし，物体が地表面に落ちた場合は，それ以上移動しないものとする。飛散高さは，初期高さからの相対高さとする。

2601（51×51）個の算出結果のうち，飛散距離，飛散高さ及び飛散速度の最大値を，解析結果として採用する。

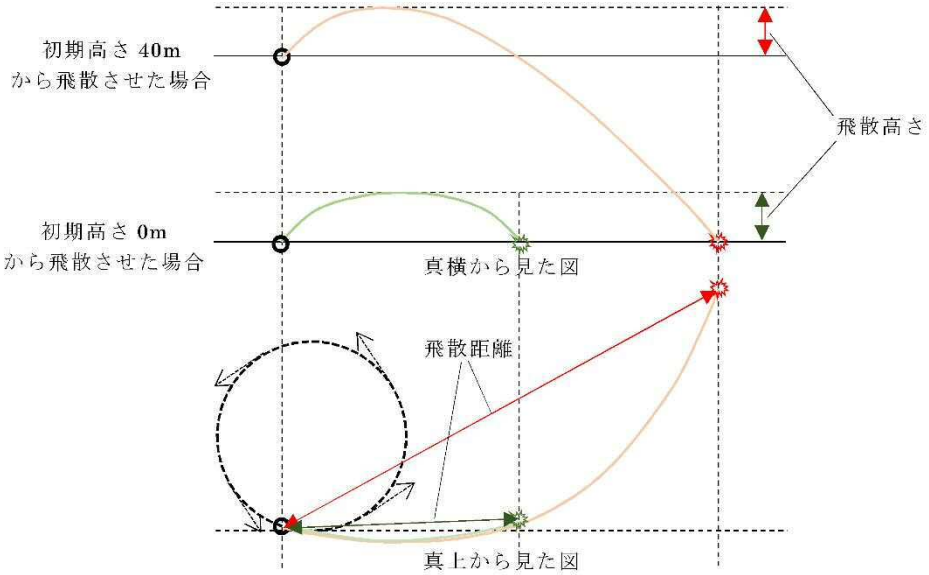


図3-3 飛散距離及び飛散高さ

3.4 解析条件

解析は以下の条件で実施することとする。

・竜巻の最大風速：100 m/sとする。
・竜巻の最大接線風速：最大風速との比が0.85となる85 m/sとする。
・竜巻中心の移動速度：最大風速との比が0.15となる15 m/sとする。
・竜巻の最大接線風速半径：30mとする。
・空力パラメータ：制限なし
・解析時間刻み：0.01 秒以下
・重力加速度，空気密度：それぞれ9.80665 m/s^2，1.22 kg/m^3とする。

4. 解析フローチャート

図4-1に解析フローチャートを示す。

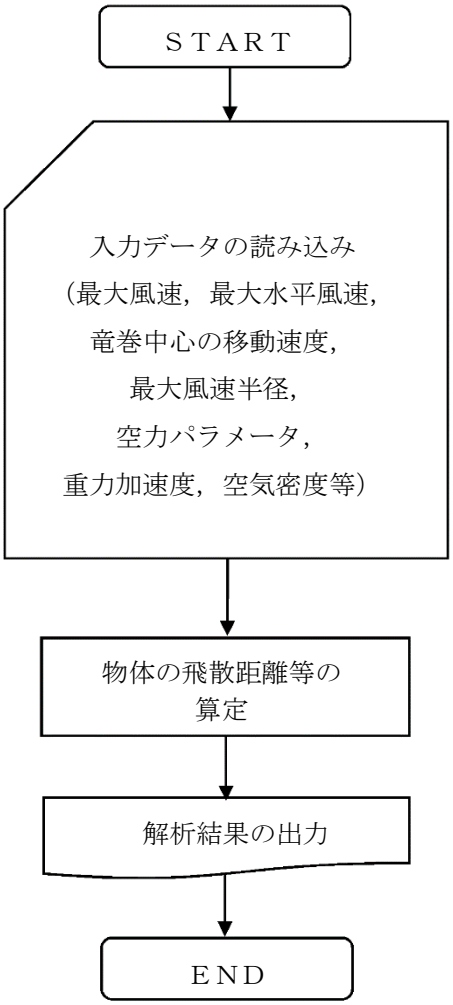


図4-1　解析フローチャート

5. 解析コードの検証

5.1 フジタスケールとの比較

フジタスケールは，竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から，当時の竜巻風速を推定するために考案された指標である。このフジタスケールで示されている自動車の被災状況を表5-1に示す。

ここで，TONBOSによって，各スケールに対応する最大風速(69 m/s，92 m/s，116 m/s)における，フジタモデルによる自動車の飛散解析を行った結果を表5-2に示す。

TONBOSによる自動車の飛散解析結果は，各スケールに対応する自動車の被災状況とおおむね合致していると考えられる。

表5-1 フジタスケールで示されている自動車の被災状況

フジタスケール	風速 [m/s]	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway （自動車が道路からそれる）
F3	70-92	cars lifted off the ground （自動車が地面から浮上する）
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances （自動車がある距離を飛ばされる，又はかなりの距離を転がる）

表5-2 TONBOSによる自動車の飛散解析結果（C_DA/m=0.0052 m^2/kg）(9)

フジタスケール	最大水平風速 [m/s]	竜巻接線風速 [m/s]	竜巻移動速度 [m/s]	計算結果		
				飛散速度 [m/s]	飛散距離 [m]	飛散高さ [m]
F2	69	59	10	1.0	1.4	0
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

5.2 米国 Grand Gulf 原子力発電所への竜巻来襲事例

1978年4月17日に，米国のミシシッピー州にて建設中のGrand Gulf原子力発電所にF3の竜巻が来襲した。主な被害として，建設中の冷却塔内部に設置されていたコンクリート流し込み用のクレーンが倒壊し，冷却塔の一部が破損したことが挙げられる。また，竜巻によりトレーラーが台から剥がれ移動したことや，直径8～10インチの木が折れた事例等も確認されており，図5-1は，竜巻による物体の飛散状況が定量的に分かる事例として，資材置場のパイプの飛散状況を示したものである。なお，通過時の竜巻規模はF2 であったと考えられている。このパイプはコンクリート・石綿製で，長さは8フィート，直径（内径）は8インチであった。このパイプの飛散状況に対して，TONBOS を用いた再現解析を行った。その計算条件は過去の記録に基づき表5-3のとおりとする。

図5-1 Grand Gulf原子力発電所の資材置場におけるパイプの散乱状況[10]

被害状況	・パイプを収納した木箱（一部は二段重ね）は浮上せずに転倒し，パイプが周辺7 m～9 mに散乱 （Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft. The pipe joints are 8 in. dia x 8 ft long.[24]）

表5-3　Grand Gulf原子力発電所の竜巻によるパイプ飛散の再現解析の計算条件[9]

竜巻条件	竜巻の最大風速	67 m/s
	最大接線風速	53.6 m/s
	移動速度	13.4 m/s
	コア半径	45.7 m/s
飛来物条件	直径（外径）	9 inch（0.2286 m）
	高さ	0.229 m
	密度	1700 kg/m^3
	飛行定数C_DA/m	0.0080 m^2/kg
初期配置	・物体個数51×51 個，竜巻半径の4 倍を一辺とする正方形内（x，y=[-2Rm，+2Rm]）に等間隔配置 ・設置高さ1 m（パイプが収納されていた木箱が2 段重ねで配置されていた状況を想定。）	

計算結果を表5-4に示す。TONBOSによるパイプの飛散解析の結果は，パイプがほとんど飛散せず，木箱が倒れた影響で散乱したと思われる状況とおおむね合致している。

表5-4　Grand Gulf原子力発電所のパイプの再現解析結果[9]

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果（フジタモデル）		
		飛散距離	飛散高さ*1	最大水平速度
フジタモデル	1 m	1.2 m	0.0 m	4.9 m/s

注記　*1：初期物体高さからの飛散高さ。

5.3　佐呂間竜巻での車両飛散事例

2006年11月7日に北海道網走支庁佐呂間町に発生した竜巻（以下「佐呂間竜巻」という。）により，4tトラックが約40 m移動したことが報告されている[11]。被災状況を図5-2に示す。この事例では被災時に4tトラックに乗員2名が乗車しており，4tトラックの初期位置と移動位置が分かっている（図5-2左上画像の②）。また，4tトラックの他に2 台の自動車（図5-2左上画像の③と⑥）について，初期位置と被災後の移動位置が分かっている。このように竜巻被災前後で車両等の位置が明確になっている事例は極めてまれである。なお，竜巻飛来物の再現計算は，竜巻が頻発する米国でもほとんど実施されていない。この理由としては，来襲した実際の竜巻特性を精度よく計測・推測することが困難であることや自動車等の移動前後の位置が不明確な場合が多いことが挙げられる。

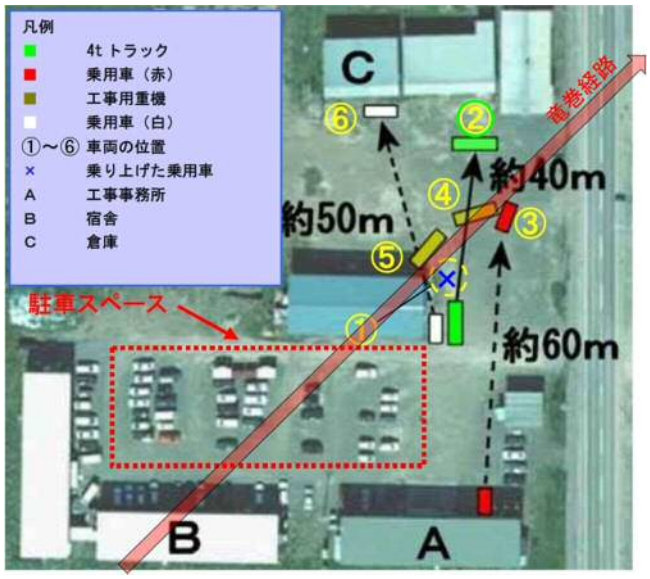


図5-2 佐呂間竜巻(2006.11.7)による被災状況（工事事務所敷地内の車両被災）
（文献(11)の写真に竜巻被害の方向を ➡ で加筆）

ここでは，TONBOSによるフジタモデルを風速場として用いた車両（4tトラック及び乗用車）の飛散解析を行い，実際の被害状況と比べて妥当な結果となるかどうかの確認を行う。

方法としては，下記の2通りとする。

(a) 竜巻特性や飛来物（4tトラック及び乗用車）の状況を現実的に設定した場合の再現解析

(b) 東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証

(a) 竜巻特性や飛来物の状況を現実的に設定した場合の再現解析

（ｉ） 4tトラックの再現解析

再現解析の条件として，入手可能なデータ[11][12]に基づき，合理的と考えられる竜巻特性条件と飛来物（4tトラック）の条件を表5-5のように設定する。初期配置の条件として，配置個数は１個とし，竜巻が遠方から近づく状況設定としている。また，風速60 m/s以下では浮上しない設定となっている。その上で，竜巻との距離を合理的な範囲で変化させ，佐呂間竜巻の再現性を確認する。

車両と竜巻中心との距離を18 m，20 m，22 m とした場合の解析結果を表5-6及び図5-3に示す。車両の軌跡は竜巻中心との相対位置関係に敏感であるが，各ケースとも飛散方向が実際の移動方向とおおむね合致しており，特に車両と竜巻中心との距離を20 m としたケース2では飛散距離もほぼ正確に再現されている。このように，TONBOSによる4tトラックの飛散解析の結果で，物体が地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることが確認できる。

表5-5 佐呂間竜巻の4tトラックの再現解析の計算条件[9]

竜巻条件	竜巻の最大風速		92 m/s
	最大接線風速		70 m/s
	移動速度		22 m/s
	コア半径		20 m
飛来物条件	車種不明のため，三菱ふそうPA-FK71Dの仕様を採用	車両長さ	8.1 m
		車両幅	2.24 m
		車両高さ	2.5 m
		車両質量	4000 kg
	飛行定数C_DA/m		0.0056 m^2/kg
初期配置	・物体個数：1台 ・竜巻は遠方から物体に近づくが，風速60 m/s 以下では浮上しない ・設置高さ0 m		

表5-6 佐呂間竜巻での4tトラックの再現解析結果[9]

解析ケース	車両と竜巻中心との距離	計算結果（フジタモデル）		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	45.4 m	2.8 m	25.8 m/s
2	20 m	35.5 m	2.3 m	22.2 m/s
3	18 m	25.9 m	1.7 m	18.8 m/s

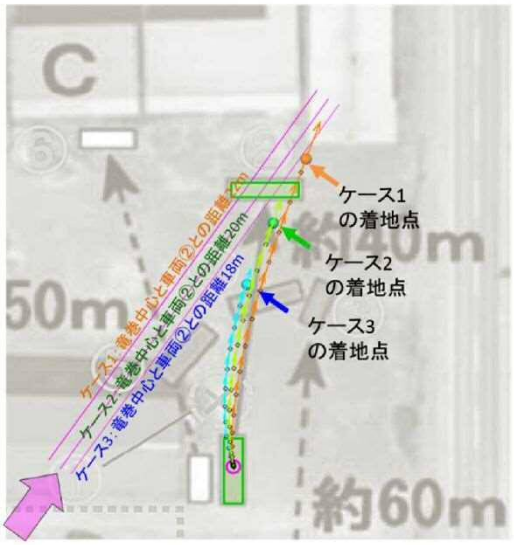


図5-3 TONBOSによるトラック飛散の再現解析結果[9]

（ⅱ）乗用車の再現解析

乗用車（白）（図5-2の⑥）の被災事例を対象として，物体を1点初期配置した条件で最大水平速度等を計算する。

乗用車（白）の計算条件について，表5-7に示す。

表5-7 佐呂間竜巻の乗用車（白）の再現解析の計算条件

竜巻条件	表5-5と同様		
飛来物条件	乗用車（白） （トヨタカローラを仮定）	車両長さ	4.4 m
		車両幅	1.7 m
		車両高さ	1.5 m
	飛行定数C_DA/m		0.0097 m^2/kg
初期配置	・物体個数：1台 ・竜巻は遠方から物体に近づくが，風速60 m/s 以下では浮上しない ・設置高さ0 m		

乗用車（白）と竜巻中心との距離を18 m，20 m及び22 mとした場合の解析結果を表5-8及び図5-4に示す。飛散距離についてはケース1 でおおむね合致している。

飛散方向については，飛び出し方向はおおむね合致しているものの，最終的な着地点には多少のずれが生じている。これは乗用車（白）が建物に近接して駐車していたため，この建物の倒壊の影響を受けて飛散方向のずれが生じたものと推定される。

なお，赤い乗用車（図5-2の③）について評価した場合は，竜巻中心との距離が大きいため飛散しない解析結果となる。ただし，実際には，赤い乗用車は全壊・飛散したプレハブ建物（軽量鉄骨造２階建て，図5-2のA）のすぐ下流側に駐車しており，そのがれきの影響を受けて一緒に移動したものと考えられる。

表5-8 佐呂間竜巻での乗用車（白）の再現解析結果

解析ケース	乗用車（白）と竜巻中心との距離	計算結果（フジタモデル）		
		飛散距離	飛散高さ	最大水平速度
1	22 m	51.9 m	3.6 m	28.9 m/s
2	20 m	43.5 m	3.4 m	24.7 m/s
3	18 m	34.7 m	2.9 m	21.1 m/s

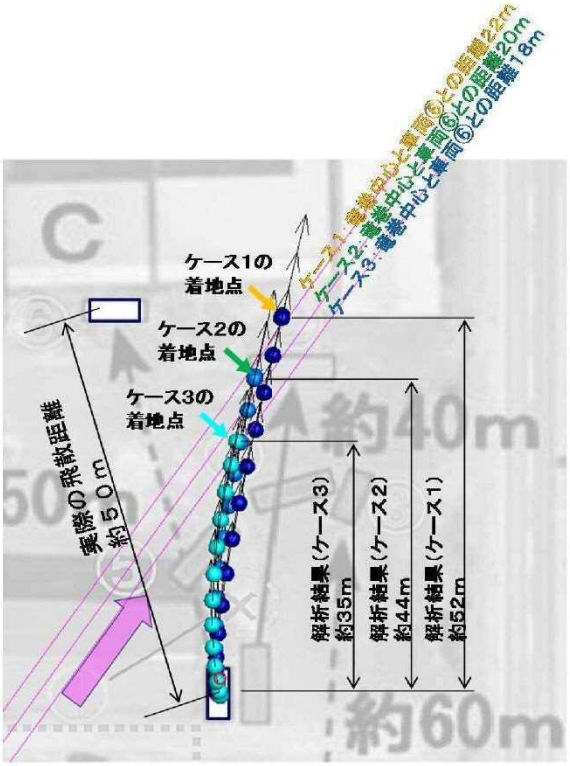


図5-4 TONBOSによる乗用車（白）飛散の再現解析結果

(b)　東海第二発電所に適用する飛散解析手法による検証[13]

ここでは，東海第二発電所に適用する飛散解析手法の竜巻条件・物体初期配置条件で前述の佐呂間竜巻における4tトラック及び乗用車（白）の被災事例を評価し，佐呂間竜巻での実際の被災状況（移動距離等）との結果を比較する。

（ｉ）　4tトラックの飛散解析

計算条件について表5-9に示す。竜巻条件としては，設計竜巻の最大風速を92 m/s とし，その他の特性量については，ガイドに例示されている方法に従い，移動速度V_tを14 m/s（最大風速の15 %），竜巻コア半径Rm を30 m とする。

表5-9　東海第二発電所に適用する飛散解析手法の計算条件

竜巻条件	設計竜巻風速	92 m/s
	最大接線風速	78 m/s
	移動速度	14 m/s
	コア半径	30 m
飛来物条件	表5-5と同様	
初期配置	・物体個数51×51 個，竜巻半径の4 倍を一辺とする正方形内（x，y=[-2Rm，+2Rm]）に等間隔配置 ・設置高さ0m	

表5-10に実際の被災状況と，東海第二発電所に適用する飛散解析手法の結果の比較を示す。また，図5-5に被災後の4tトラックの状況を示す。

TONBOSによる飛散評価結果として，4tトラックの最大飛散速度は36 m/s，最大飛散高さは3.6 m，最大飛散距離は63.4 m となる。

実際の4tトラック飛散距離は約40 mであり，TONBOSによる飛散距離の評価結果はこれを上回る。また，飛散高さや最大水平速度については，直接の比較はできないものの，4tトラックの乗員2 名が存命であったこと，被災後の4tトラックがほぼ元の外形をとどめていること等から，東海第二発電所に適用する飛散解析手法で飛散解析をした場合でも，実際の被災状況と比較して妥当な結果となるものと考えられる。

表5-10　実際の被災状況と「東海第二発電所の飛散解析手法」との結果の比較
（4tトラックの場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*1	最大水平速度
フジタモデル （地上）	63.4 m	3.6 m	36.0 m/s （毎時130 km）
実際の被害状況	約40 m	乗員2名が幸いにも存命で救出され，搬送先の病院で聞き取り調査に応じており(11)，トラックが地面から3.6 m以上の高所から落下したとは考えにくい。	被災後もほぼ元の外形をとどめていることが示されており(11)，実際の飛散速度は本解析で得られた最大速度（約130 km/h）を超える飛散速度であったとは考えにくい。

注記　＊1：初期物体高さからの飛散（浮上）高さ

図5-5 竜巻による被災後の4tトラックの様子(12)(14)

（ⅱ）　乗用車（白）の飛散解析

4tトラックの場合と同様に，東海第二発電所に適用する飛散解析手法で乗用車（白）の飛散解析を行った場合の結果を表5-11に示す。

乗用車（白）の場合も，TONBOSによる評価が実際の被災状況を包含する結果となっている。

表5-11　実際の被災状況と「東海第二発電所の飛散解析手法」との結果の比較
（白い乗用車の場合）

風速場モデル	飛散距離	飛散高さ*1	最大水平速度
フジタモデル （地上）	82.3 m	4.2 m	44.1 m/s
実際の被災状況	約50 m	－	－

注記　＊1：初期物体高さからの飛散高さ。

NT2 補③ V-5-9 R4

6. 妥当性確認

TONBOSを竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価に使用することは，次のとおり妥当である。

・本解析コードは，竜巻により発生する飛来物の飛散距離等の評価を目的に開発されたコードであり，使用目的が合致している。

・評価は妥当性を確認している範囲内で行うようにしている。

7. 参考文献

(1) Fujita, T. T., Workbook of tornadoes and high winds for engineering applications, U. Chicago, 1978

(2) Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976.

(3) Maruyama, T., Simulation of flying debris using a numerically generated tornado-like vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.99(4), pp.249-256, 2011.

(4) 東京工芸大学（2011）：平成21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究，独立行政法人原子力安全基盤機構

(5) U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.76: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1, March 2007.

(6) 丸山敬，数値的に生成された竜巻状の渦の性質，平成２１年度京都大学防災研究所研究発表要旨

(7) EPRI, Wind field and trajectory models for tornado-propelled objects, report NP-2898, 1978.

(8) Lei, C., Cheng, L. and Kavanagh, K., Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.80, pp.263-286, 1999.

(9) 日本保全学会　原子力規制関連事項検討会，　2015：軽水型原子力発電所の竜巻影響評価における設計竜巻風速および飛来物速度の設定に関するガイドライン(JSM-NRE-009)

(10) Fujita, T. T., and J. R. McDonald, Tornado damage at the Grand Gulf, Mississippi nuclear power plant site: Aerial and ground surveys, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-0383, 1978.

(11) 札幌管区気象台:平成18年11月7日から9日に北海道(佐呂間町他)で発生した竜巻等の突風.災害時気象調査報告，災害時自然現象報告書，2006年第1号,2006.

(12) 奥田泰雄,喜々津仁密,村上知徳,2006年佐呂間町竜巻被害調査報告.建築研究所災害調査,46，2006.

(13) 江口譲，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法　(Fujita の竜巻モデルを用いた数値解析コードの妥当性確認），日本機械学会論文集，　Vol.81，No.823，2015.

(14) 土木学会　平成18年11月北海道佐呂間町竜巻緊急災害調査報告書

Ⅴ-5-10　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＬＩＰ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 4
3. 解析理論 ····· 6
3.1 支配方程式 ····· 6
3.2 構成則 ····· 13
4. 解析フローチャート ····· 16
5. FLIPの変更履歴 ····· 17
6. 本解析で使用する要素の概要 ····· 20
6.1 線形はり要素 ····· 20
6.2 線形平面要素 ····· 27
6.3 非線形はり要素 ····· 28
6.4 非線形ばね要素 ····· 31
6.5 ジョイント要素 ····· 35
6.6 流体要素、流体-構造連成要素 ····· 41
6.7 粘性要素(側方地盤境界、底面地盤境界) ····· 43
6.8 節点集中質量要素 ····· 45
6.9 修正武田モデル ····· 46
6.10 杭-地盤相互作用ばねモデル ····· 48
7. 線形はり要素の検証 ····· 53
7.1 概要 ····· 53
7.2 例題 ····· 53
7.3 検証結果 ····· 54
8. 修正武田モデルの検証 ····· 55
8.1 概要 ····· 55
8.2 例題 ····· 55
8.3 例題結果（検証結果） ····· 56
8.4 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響（取水構造物の耐震安全評価に関する参考資料) ····· 60
9. 杭-地盤相互作用ばねモデルの検証 ····· 63
9.1 概要 ····· 63
9.2 杭と周辺地盤の相互作用 ····· 63
9.3 解析結果 ····· 64

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＦＬＩＰについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
V-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2

Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答解析	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-32	ＳＡ用海水ピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-36	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 7.3.0_2
Ⅴ-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 7.3.0_2

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	FLIP
使用目的	２次元有限要素法による地震応答解析（有効応力法）
開発機関	FLIPコンソーシアム
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver. 7.3.0_2
コードの概要	FLIP（Finite element analysis of Liquefaction Program）は，1988年に運輸省港湾技術研究所（現：港湾航空技術研究所）において開発された平面ひずみ状態を対象とする有効応力解析法に基づく，２次元地震応答解析プログラムである。 FLIPの主な特徴として，以下の項目を挙げることができる。 ①有限要素法に基づくプログラムである。 ②平面ひずみ状態を解析対象とする。 ③地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析を行い，部材の断面力や変形量を計算する。 ④土の応力－ひずみモデルとしてマルチスプリング・モデルを採用している。 ⑤有効応力の変化は有効応力法により考慮する。そのために必要な過剰間隙水圧算定モデルとして井合モデルを用いている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は，以下のとおりである。 ・マニュアルに記載された例題の提示解と本解析コードによる解析解との比較を実施し，解析解が提示解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードは港湾施設の設計に用いられる「港湾施設の技術上の基準・同解説（2007）（日本港湾協会）」において，港湾施設に対して適用性が確認されている解析コードとして扱われており，今回の解析に使用することは妥当である。 ・関西電力株式会社の「高浜原子力発電所第４号機」において，防潮堤，防潮扉，屋外排水路逆流防止設備，放水ピット止水板の地震応

	答解析に本コード（Ver.7.2.3.4）が使用された実績があり，杭以外の構造の施設に適用性があるということは，高浜4号で既に検証されている。 ・バージョン更新により導入された杭軸方向の「杭-地盤相互作用ばね要素」は，他プラントの既工事計画で使用されたバージョン（Ver.7.2.3_4）での杭軸方向のジョイント要素と名称は異なるものの実質の構成式としては同じであるが，本工事計画において使用するバージョン（Ver.7.3.0_2）と他プラントの既工事計画で使用されたバージョン（Ver.7.2.3_4）との解析結果の比較を行い，解析結果が等しいことを確認した。なお，杭軸直交方向の杭－地盤相互作用ばねは、Ver.7.3.0_2 と Ver.7.2.3_4 で名称も構成式も同じである。 ・本工事計画の取水構造物で使用する RC の修正武田モデルについて，改めてその機能の検証および妥当性について確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する地震応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析理論

3.1 支配方程式

3.1.1 運動方程式及び水流の収支バランス式

Zienkiewiczらに従い，間隙水で満たされた多孔質体の運動方程式および水流の収支バランスを表す式を次のようにおく（u-p formulation）。

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i \tag{3-1-1}$$

$$\left(k_{ij}p_{,j}\right)_{,i} - \dot{\varepsilon}_{ii} - \left(k_{ij}\rho_f g_j\right)_{,i} = -\left(k_{ij}\rho_f \ddot{u}_j\right)_{,i} + n\dot{p}/K_f \tag{3-1-2}$$

ここで，

σ_{ij}	全応力（対称テンソル）
ρ	密度（土と水の複合物としての密度）
g_i	重力加速度ベクトル
u_i	土骨格の変位ベクトル
k_{ij}	透水係数（対称テンソル）
p	間隙水圧
ε_{ij}	土骨格のひずみ（対称テンソル）
ρ_f	間隙水の密度
n	間隙率
K_f	間隙水の体積弾性係数

である。

また，以下に示す関係がある。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p \quad \text{（有効応力原理）} \tag{3-1-3}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \quad \text{（微小ひずみテンソル）} \tag{3-1-4}$$

ここで，σ'_{ij}は有効応力，δ_{ij}はクロネッカーのデルタである。

なお，本定式化では，ひずみと応力に関しては，収縮・圧縮を負，伸張・引張を正とする。ただし，間隙水圧に関しては，圧縮を正とする。

3.1.2 境界条件と初期条件

式(3-1-1)(3-1-2)に対し，次に示す4種の境界条件を考える。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \partial\Omega_u \tag{3-1-5}$$

$$t_i = \sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \tag{3-1-6}$$

$$p = \bar{p} \quad \text{on } \partial\Omega_p \tag{3-1-7}$$

$$q = -\dot{w}_j n_j = k_{ij}\left(p_{,i} - \rho_f g_i + \rho_f \ddot{u}_i\right)n_j = \bar{q} \quad \text{on } \partial\Omega_q \tag{3-1-8}$$

ここで，

$\bar{u}_i$	$\partial\Omega_u$境界上で規定される変位
$\bar{t}_i$	$\partial\Omega_\sigma$境界上で規定される表面力
$\bar{p}$	$\partial\Omega_p$境界上で規定される間隙水圧
$\bar{q}$	$\partial\Omega_q$境界上で規定される間隙水流入量
$\dot{w}_i$	間隙水の骨格に対する相対速度（断面平均）

なお，$\partial\Omega_u$境界と$\partial\Omega_\sigma$境界を合わせたものが，対象領域Ωの全表面$\partial\Omega$に等しい。また，

$\partial\Omega_u$境界と$\partial\Omega_\sigma$境界の共通部分はない。$\partial\Omega_p$境界と$\partial\Omega_q$境界についても同様である。

一方，初期条件は領域Ωの各点において，次のように与えられるものとする。

$$u_i = \dot{u}_i = \ddot{u}_i = 0 \tag{3-1-9}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{st} = \sigma'^{st}_{ij} - \delta_{ij} p^{st} \tag{3-1-10}$$

$$p = p^{st} \tag{3-1-11}$$

$$\dot{p} = 0 \tag{3-1-12}$$

特に，境界上では以下のように与えられるものとする。

$$u_i = \bar{u}_i^{st} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \tag{3-1-13}$$

$$t_i^{st} = \sigma_{ij}^{st} n_j = \bar{t}_i^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_\sigma \tag{3-1-14}$$

$$p = \bar{p}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_p \tag{3-1-15}$$

$$q = k_{ij}\left(p_{,i}^{st} - \rho_f g_i\right) n_j = \bar{q}^{st} \quad \text{on } \partial\Omega_q \tag{3-1-16}$$

これ以降，初期条件により示される系の状態を基準状態と呼ぶことにする。基準状態では，式(3-1-1)は，

$$\sigma_{ij,j}^{st} + \rho g_i = 0 \tag{3-1-17}$$

となる。式(3-1-17)を用い，式(3-1-1)からρg_iの項を消去すると，次式を得る。

$$\left(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}\right)_{,j} = \rho \ddot{u}_i \tag{3-1-18}$$

また，基準状態では，式(3-1-2)は，

$$\left(k_{ij} p_{,j}^{st}\right)_{,i} - \left(k_{ij}\rho_f g_j\right)_{,i} = 0 \tag{3-1-19}$$

となる。式(3-1-19)を用い，式(3-1-2)から重力加速度g_iを含む項を消去すると，次式を得る。

$$\left(k_{ij}\left(p_{,j} - p_{,j}^{st}\right)\right)_{,i} - \dot{\varepsilon}_{ii} = -\left(k_{ij}\rho_f \ddot{u}_j\right)_{,i} + n\dot{p}/K_f \tag{3-1-20}$$

以後，式(3-1-18)及び式(3-1-20)を用いて，有限要素法に基づく定式化を行う。

3.1.3 運動方程式の離散化

式(3-1-18)に示す運動方程式は，任意の試行関数（重み関数）ϕ_iを用いて，以下のとおり書くことができる。

$$\int_\Omega \phi_i \left(\left(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}\right)_{,j} - \rho\ddot{u}_i\right) dv + \int_{\partial\Omega_u} \phi_i(\bar{u}_i - u_i) ds + \int_{\partial\Omega_\sigma} \phi_i\left(\bar{t}_i - \sigma_{ij} n_j\right) ds = 0 \tag{3-1-21}$$

ここで，

$$\phi_i = 0 \quad \text{on } \partial\Omega_u \tag{3-1-22}$$

とすると，式(3-1-21)は，

$$\int_\Omega \phi_i \left(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}\right)_{,j} dv - \int_\Omega \rho\phi_i \ddot{u}_i dv + \int_{\partial\Omega} \phi_i\left(\bar{t}_i - \sigma_{ij} n_j\right) ds = 0 \tag{3-1-23}$$

となる。式(3-1-23)の左辺第1項は，Gaussの定理を用いると，

$$\int_{\Omega} \phi_i(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} dv = \int_{\partial\Omega} \phi_i(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) n_j ds - \int_{\Omega} \phi_{i,j}(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv \tag{3-1-24}$$

と表され，これを式(3-1-23)に代入すると次式を得る。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j}(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho\phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i(\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) ds = 0 \tag{3-1-25}$$

式(3-1-25)によれば，表面力としては，基準状態における表面力からの増力のみを考慮すればよいことがわかる。この増加分を$\bar{t}_i^*$で表すことにする。すなわち，

$$\bar{t}_i^* = (\bar{t}_i - \bar{t}_i^{st}) \tag{3-1-26}$$

より，式(3-1-25)は以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} \phi_{i,j}(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho\phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \tag{3-1-27}$$

ここで，応力の対称性を用いると，

$$\int_{\Omega} \frac{1}{2}(\phi_{i,j} + \phi_{j,i})(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st}) dv + \int_{\Omega} \rho\phi_i \ddot{u}_i dv - \int_{\partial\Omega} \phi_i \bar{t}_i^* ds = 0 \tag{3-1-28}$$

となり，さらに，次式のように書くことができる。

$$\int_{\Omega} (\boldsymbol{L\phi})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho\boldsymbol{\phi}^T \ddot{\boldsymbol{u}} dv - \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\phi}^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds = 0 \tag{3-1-29}$$

ここで，

$$\boldsymbol{L}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \tag{3-1-30}$$

$$\boldsymbol{\sigma}^T = (\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{zx}) \tag{3-1-31}$$

$$(\boldsymbol{\sigma}_{st})^T = (\sigma_{xx}^{st} \quad \sigma_{yy}^{st} \quad \sigma_{zz}^{st} \quad \sigma_{xy}^{st} \quad \sigma_{yz}^{st} \quad \sigma_{zx}^{st}) \tag{3-1-32}$$

$$\boldsymbol{u}^T = (u_x \quad u_y \quad u_z) \tag{3-1-33}$$

$$\boldsymbol{\phi}^T = (\phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z) \tag{3-1-34}$$

$$(\bar{\boldsymbol{t}}^*)^T = (\bar{t}_x^* \quad \bar{t}_y^* \quad \bar{t}_z^*) \tag{3-1-35}$$

である。

ここで，試行関数$\boldsymbol{\phi}$は任意であるので，試行関数として仮想変位$\delta\boldsymbol{u}$を採用すると，式(3-1-29)より以下のような仮想仕事の原理が導かれる。

$$\int_{\Omega} (\boldsymbol{L}\delta\boldsymbol{u})^T (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_{st}) dv + \int_{\Omega} \rho(\delta\boldsymbol{u})^T \ddot{\boldsymbol{u}} dv - \int_{\partial\Omega} (\delta\boldsymbol{u})^T \bar{\boldsymbol{t}}^* ds = 0 \tag{3-1-36}$$

NT2 補① V-5-10 R2

さらに，以下のとおり書ける。

$$\int_{\Omega}(\delta\boldsymbol{\varepsilon})^{T}(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\sigma}_{st})dv+\int_{\Omega}\rho(\delta\boldsymbol{u})^{T}\ddot{\boldsymbol{u}}dv-\int_{\partial\Omega}(\delta\boldsymbol{u})^{T}\bar{\boldsymbol{t}}^{*}ds=0 \tag{3-1-37}$$

ここで，

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{T}=(\varepsilon_{xx}\quad\varepsilon_{yy}\quad\varepsilon_{zz}\quad\gamma_{xy}\quad\gamma_{yz}\quad\gamma_{zx}) \tag{3-1-38}$$

とする。なお，$\gamma_{ij}=2\varepsilon_{ij}\ (i\neq j)$は工学ひずみである。

続いて，式(3-1-36)に示す運動方程式の離散化を行う。すなわち，変位などを補間関数H，節点変位ベクトル$\underline{\boldsymbol{u}}$などを用いて，以下のように表す。

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{H}\underline{\boldsymbol{u}} \tag{3-1-39}$$

$$\ddot{\boldsymbol{u}}=\boldsymbol{H}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}} \tag{3-1-40}$$

ここで，２次元の場合，

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & 0 & \cdots & h_N & 0\\ 0 & h_1 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & \cdots & 0 & h_N\end{bmatrix} \tag{3-1-41}$$

$$\underline{\boldsymbol{u}}^{T}=\begin{bmatrix}u_x^1 & u_y^1 & u_x^2 & u_y^2 & u_x^3 & u_y^3 & \cdots & u_x^N & u_y^N\end{bmatrix} \tag{3-1-42}$$

となる。なお，Nは1要素あたりの節点数である。

さらに，ひずみベクトル$\boldsymbol{\varepsilon}$は次のように表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{u}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{H}\underline{\boldsymbol{u}}=\boldsymbol{B}\underline{\boldsymbol{u}} \tag{3-1-43}$$

ここで，$\boldsymbol{B}$は節点変位－ひずみ変換マトリクスであり，次の関係がある。

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{H} \tag{3-1-44}$$

これより，式(3-1-36)に示す運動方程式が，以下のように離散化される。

$$\int_{\Omega}\left(\boldsymbol{B}\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\sigma}_{st})dv+\int_{\Omega}\rho\left(\boldsymbol{H}\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}\boldsymbol{H}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}dv-\int_{\partial\Omega}\left(\boldsymbol{H}\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}\bar{\boldsymbol{t}}^{*}ds \tag{3-1-45}$$

$$=\left(\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^{T}(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\sigma}_{st})dv+\left(\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}\int_{\Omega}\rho\boldsymbol{H}^{T}\boldsymbol{H}dv\,\ddot{\boldsymbol{u}}-\left(\delta\underline{\boldsymbol{u}}\right)^{T}\int_{\partial\Omega}\boldsymbol{H}^{T}\bar{\boldsymbol{t}}^{*}ds=0$$

式(3-1-45)は，任意の仮想変位に対して成立するので，

$$\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^{T}(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\sigma}_{st})dv+\boldsymbol{M}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}=\boldsymbol{t}^{*} \tag{3-1-46}$$

となる。ここで，

$$\boldsymbol{M}=\int_{\Omega}\rho\boldsymbol{H}^{T}\boldsymbol{H}dv \tag{3-1-47}$$

$$\boldsymbol{t}^{*}=\int_{\partial\Omega}\boldsymbol{H}^{T}\bar{\boldsymbol{t}}^{*}ds \tag{3-1-48}$$

であり，２次元の場合，

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\frac{\partial h_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial x} & 0 & \cdots & \frac{\partial h_N}{\partial x} & 0\\ 0 & \frac{\partial h_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \cdots & 0 & \frac{\partial h_N}{\partial y}\\ \frac{\partial h_1}{\partial y} & \frac{\partial h_1}{\partial x} & \frac{\partial h_2}{\partial y} & \frac{\partial h_2}{\partial x} & \frac{\partial h_3}{\partial y} & \frac{\partial h_3}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial h_N}{\partial y} & \frac{\partial h_N}{\partial x}\end{bmatrix} \tag{3-1-49}$$

となる。

なお，式(3-1-46)からは，$\partial\Omega_u$境界上の自由度に対する式は落ちているものとする。

3.1.4 有効応力・相対変位を用いた運動方程式

式(3-1-3)に示す有効応力原理より，式(3-4-46)は有効応力を用いて以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'dv+\boldsymbol{M}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}=\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'_{st}dv+\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\hat{\boldsymbol{m}}(p-p^{st})dv+\boldsymbol{t}^* \tag{3-1-50}$$

ここで，

$$\hat{\boldsymbol{m}}^T=(1\quad 1\quad 1\quad 0\quad 0\quad 0) \tag{3-1-51}$$

$$\boldsymbol{\sigma}'^T=(\sigma'_{xx}\quad \sigma'_{yy}\quad \sigma'_{zz}\quad \sigma'_{xy}\quad \sigma'_{yz}\quad \sigma'_{zx}) \tag{3-1-52}$$

$$(\boldsymbol{\sigma}'_{st})^T=\left(\sigma'^{st}_{xx}\quad \sigma'^{st}_{yy}\quad \sigma'^{st}_{zz}\quad \sigma'^{st}_{xy}\quad \sigma'^{st}_{yz}\quad \sigma'^{st}_{zx}\right) \tag{3-1-53}$$

ここで，間隙水圧を，節点における間隙水圧の値を用いて，以下のように離散化する。

$$p=\hat{\boldsymbol{H}}\underline{\boldsymbol{p}} \tag{3-1-54}$$

ここで，補間関数$\hat{\boldsymbol{H}}$は以下のとおり。

$$\hat{\boldsymbol{H}}=[\hat{h}_1\quad \hat{h}_2\quad \hat{h}_3\quad \cdots\quad \hat{h}_N] \tag{3-1-55}$$

式(3-1-54)を式(3-1-50)に適用すると，運動方程式は，減衰項も考慮して次のようになる。

$$\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'dv+\boldsymbol{C}\underline{\dot{\boldsymbol{u}}}+\boldsymbol{M}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}=\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'_{st}dv+\boldsymbol{Q}\underline{\boldsymbol{p}}^*+\boldsymbol{t}^* \tag{3-1-56}$$

ここで，Cは減衰マトリクス，また，

$$\underline{\boldsymbol{p}}^*=\underline{\boldsymbol{p}}-\underline{\boldsymbol{p}}_{st} \tag{3-1-57}$$

$$\boldsymbol{Q}=\int_{\Omega}\boldsymbol{B}^T\hat{\boldsymbol{m}}\hat{\boldsymbol{H}}dv \tag{3-1-58}$$

である。

さらに，基盤に一様に入射する地震動加速度$\ddot{u}_g$に対する応答を求めるために，節点変位を基盤の変位とそれに対する相対変位に分離する。すなわち，

$$\underline{\boldsymbol{u}}=\underline{\boldsymbol{u}}_r+u_g\boldsymbol{I} \tag{3-1-59}$$

ここで，

$\underline{\boldsymbol{u}_r}$　　相対変位ベクトル

u_g　　基盤の変位（いずれかの座標軸の方向の変位）

$\boldsymbol{I}$　　加振方向の自由度成分に1，その他に0を割り当てたベクトル

式(3-1-59)を式(3-1-56)に代入すると，次式を得る。

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \boldsymbol{C}\dot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r + \boldsymbol{M}\ddot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r = -\ddot{u}_g \boldsymbol{M}\boldsymbol{I} + \int_{\Omega} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \boldsymbol{Q}\underline{\boldsymbol{p}}^* + \boldsymbol{t}^* \tag{3-1-60}$$

なお，Iは平行移動を表すベクトルであるから，次式が成り立つ。

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{I} = 0, \qquad \boldsymbol{C}\boldsymbol{I} = 0 \tag{3-1-61}$$

ひずみベクトル$\boldsymbol{\varepsilon}$は，式(3-1-43)(3-1-59)(3-1-61)より，$\underline{\boldsymbol{u}}$でも$\underline{\boldsymbol{u}}_r$でも同様に，以下のようにして求められる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{B}\underline{\boldsymbol{u}} = \boldsymbol{B}\underline{\boldsymbol{u}}_r \tag{3-1-62}$$

有効応力ではなく全応力で取り扱うべき要素が他にあれば，式(3-1-60)は次のようになる。

$$\int \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \boldsymbol{C}\dot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r + \boldsymbol{M}\ddot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r \tag{3-1-63}$$

$$= -\ddot{u}_g \boldsymbol{M}\boldsymbol{I} + \int_{\Omega_1} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \boldsymbol{Q}\underline{\boldsymbol{p}}^* + \boldsymbol{t}^*$$

上式では，全領域Ωを，有効応力により定式化される要素の存在する領域Ω_1と，全応力に基づく要素の存在する領域Ω_2に分離した。

さらに，相対変位ベクトル$\underline{\boldsymbol{u}}_r$を，非拘束自由度$\underline{\boldsymbol{u}}_r^f$と拘束自由度$\underline{\boldsymbol{u}}_r^c$（$\partial\Omega_u$境界上の自由度）に分け，また，行列**C,M**もこれに応じて区分する。すなわち，

$$\underline{\boldsymbol{u}}_r = \begin{bmatrix} \underline{\boldsymbol{u}}_r^f \\ \underline{\boldsymbol{u}}_r^c \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{C} = [\boldsymbol{C}^f \quad \boldsymbol{C}^c], \quad \boldsymbol{M} = [\boldsymbol{M}^f \quad \boldsymbol{M}^c] \tag{3-1-64}$$

すると，離散化された運動方程式(3-1-63)は，以下のように書くことができる。

$$\int_{\Omega_1} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv + \boldsymbol{C}^f \dot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r^f + \boldsymbol{M}^f \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r^f \tag{3-1-65}$$

$$= -\ddot{u}_g \boldsymbol{M}\boldsymbol{I} - C^c \dot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r^c - \boldsymbol{M}^c \ddot{\underline{\boldsymbol{u}}}_r^c + \int_{\Omega_1} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \boldsymbol{Q}\underline{\boldsymbol{p}}^* + \boldsymbol{t}^*$$

3.1.5　非排水の場合の運動方程式

間隙水が非排水条件にあると仮定した場合，式(3-1-2)において$k_{ii} = 0$とおくことにより，次式を得る。

$$\dot{p} = -\frac{K_f}{n}\dot{\varepsilon}_{ii} \tag{3-1-66}$$

これを時間tに関して積分し，式(3-1-9)(3-1-11)に示す初期条件を考慮すると，

$$p^* \equiv p - p^{st} = -\frac{K_f}{n}\varepsilon_{ii} \tag{3-1-67}$$

となる。上式を式(3-1-50)に代入すると，式(3-1-60)に代えて次式を得る。

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}' dv + \widehat{\boldsymbol{A}}\underline{\boldsymbol{u}}_r + \boldsymbol{C}\underline{\dot{\boldsymbol{u}}}_r + \boldsymbol{M}\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}_r = -\ddot{u}_g\boldsymbol{M}\boldsymbol{I} + \int_{\Omega} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \boldsymbol{t}^* \tag{3-1-68}$$

ここで,

$$\widehat{\boldsymbol{A}} = \int_{\Omega} \frac{K_f}{n}\boldsymbol{B}^T\widehat{\boldsymbol{m}}\widehat{\boldsymbol{m}}^T\boldsymbol{B} dv \tag{3-1-69}$$

あるいは，式(3-1-65)に対応して次式を得る。

$$\begin{aligned}&\int_{\Omega_1} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}' dv + \int_{\Omega_2} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma} dv + \widehat{\boldsymbol{A}}\underline{\boldsymbol{u}}_r + \boldsymbol{C}^f\underline{\dot{\boldsymbol{u}}}_r^f + \boldsymbol{M}^f\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}_r^f \\ &= -\ddot{u}_g\boldsymbol{M}\boldsymbol{I} - \boldsymbol{C}^c\underline{\dot{\boldsymbol{u}}}_r^c - \boldsymbol{M}^c\underline{\ddot{\boldsymbol{u}}}_r^c + \int_{\Omega_1} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}'_{st} dv + \int_{\Omega_2} \boldsymbol{B}^T\boldsymbol{\sigma}_{st} dv + \boldsymbol{t}^*\end{aligned} \tag{3-1-65}$$

3.2　構成則

FLIPでは，前述のとおり，せん断応力ーせん断歪関係には，主応力軸の回転が自然に考慮される，東畑・石原(1985)によるマルチスプリング・モデルを採用し，過剰間隙水圧の発生のモデルとしては，井合のモデルを採用している。

このマルチスプリング・モデルは，図3-1に示すように任意方向のせん断面に対して仮想的な単純せん断が発生するものとし，これらのせん断面に対して双曲線モデルを適用するものである。FLIPでは，双曲線モデルにおけるMasing則を修正し，履歴ループの大きさを任意に調節可能なように拡張したモデルを使用している。このモデルの特徴は以下のとおりである。

(1) 排水条件におけるせん断応力ーせん断歪の履歴ループ特性（いわゆる歪依存カーブ）は，既往の試験データとよく適合する。
(2) 主応力の回転が自然に（つまり新たなパラメータを導入しなくても）考慮される。
(3) 材料としての異方性が導入しやすい形となっている。

他方，過剰間隙水圧発生モデルでは，累積塑性せん断仕事に基づいて，液状化の進展に伴う過剰間隙水圧の上昇，有効応力の減少及びせん断剛性の低下等を，以下に示す手順で評価する。

① 地震力の作用により土の各部分はせん断変形するが，その際の塑性せん断仕事を累積したものが液状化の進展の程度を表す指標になりうると考えられる。井合モデルでは，この累積塑性せん断仕事から，図 3-2 に示す液状化の進展の程度を表す「液状化フロントパラメータ S_0」を求める，S_0 が定まれば，図中の液状化フロント(Liquefaction Front)が所定の式により与えられる。なお，図 3-2 は等方圧密後に全拘束圧力一定の条件下で準静的に繰り返しせん断を行う液状化試験において得られる有効応力経路を模式的に描いたものであり，液状化フロントは液状化の進行のある局面における可能な応力経路を示す。

② 図 3-2 に示すように，液状化フロントとせん断応力比$\mathrm{r}(=q/(-\sigma_{m0'}))$から，前述の液状化試験の条件下においては$\sigma_{m'}/\sigma_{m0'}$に一致する状態変数 S(図 3-2 の横軸の値)を求める。なお，せん断応力比 r は，進行中の地震応答解析の現時刻における最大せん断応力 q と地震応答解析開始時点の平均有効応力$\sigma_{m0'}$から算定する。液状化試験では$\sigma_{m0'}$は等方圧密後の平均有効応力，$\sigma_{m'}$は試験中の任意の時点における平均有効応力を表す。

③ 前述の液状化試験の条件下で考えると，$(1-\mathrm{S})\,\sigma_{m0'}$ は過剰間隙水圧 u に等しく，また，全体積の変化により定まる。一方，平均有効応力と体積弾性歪に関する構成則を導入すれば，平均有効応力$\sigma_{m'}(=\mathrm{S}\sigma_{m0'})$に基づき体積弾性歪を算定することができる。したがって，過剰間隙水圧から算定される全体積歪から体積弾性歪を引くと体積塑性歪ε_{mp}が得られる。この体積塑性歪は，上記液状化試験の条件下で得られるもので，２次元地震応答解析ではこの条件は成立しないが，その場合でも，この方法で見積もった体積塑性歪が

生じるものと考える。

④ 前述の平均有効応力と体積弾性歪の関係に対して，③で求めた体積塑性歪ε_{mp}を考慮すれば，全体積歪と平均有効応力との間の関係を得る。２次元の地震応答解析の際には，全体積歪は地盤要素の節点変位から直ちに計算することが可能で，これにより平均有効応力$\sigma_{m'}$を評価することができる。また，過剰間隙水圧比は$(1-\sigma_{m'}/\sigma_{m0'})$により算定する。なお，$\sigma_{m0'}$は地震応答解析開始時点の平均有効応力である。

⑤ 上記④で求めた有効応力$\sigma_{m'}$に応じてせん断強度及び初期せん断剛性を算定し直すのが普通であるが，FLIP では②で求めた状態変数 S に応じてマルチスプリング・モデルのせん断強度等を直接低減させる。これによりマルチスプリング・モデルの各スプリングが従う双曲線モデルの骨格曲線は図 3-3 に示すように変化する。

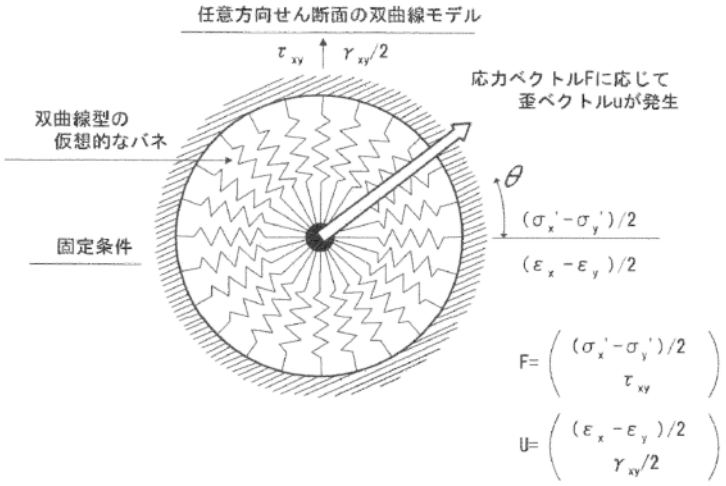


図3-1　マルチスプリング・モデル

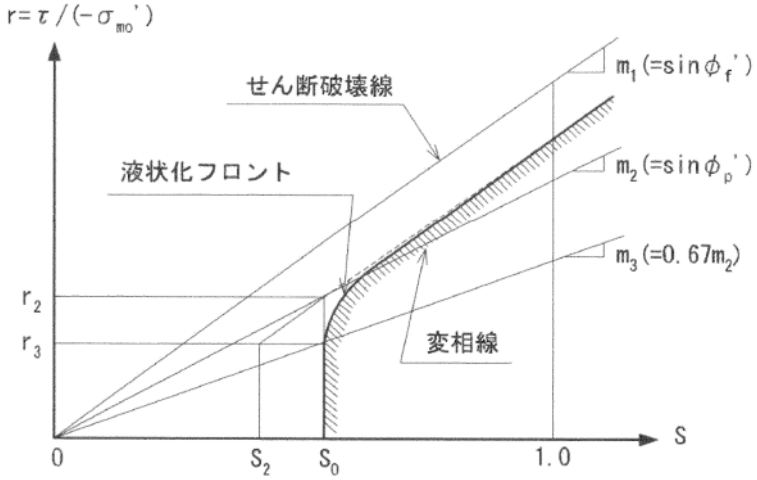


図3-2　過剰間隙水圧モデルの概念図

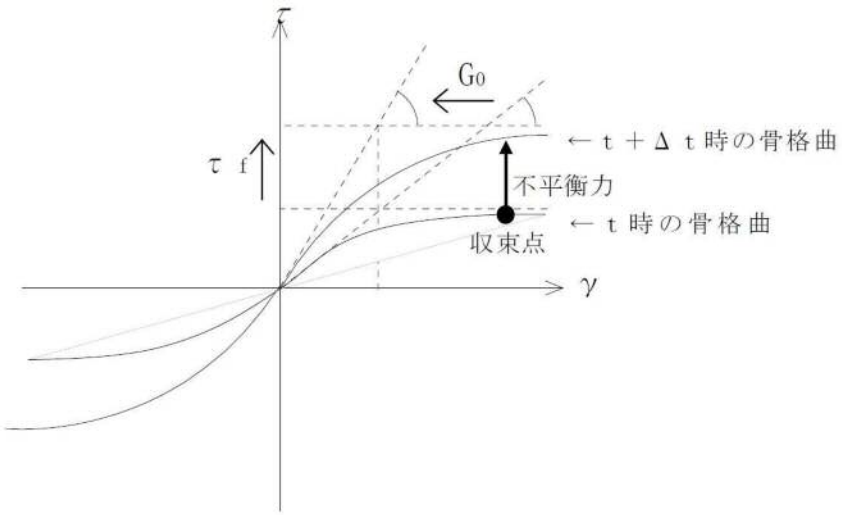


図3-3　双曲線モデルの骨格曲線の液状化による変化（模式図）

4. 解析フローチャート

解析フローチャートを図4-1に示す。

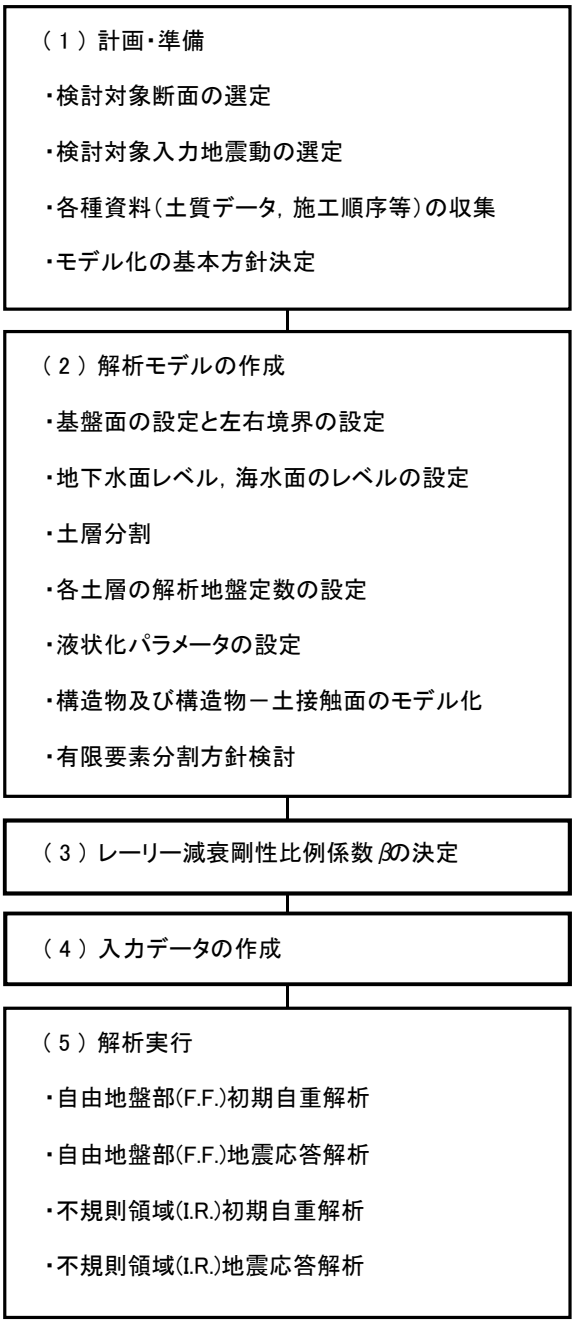


図4-1　解析フローチャート

5. FLIPの変更履歴

関西電力株式会社の「高浜原子力発電所第４号機」において，防潮堤，防潮扉，屋外排水路逆流防止設備，放水ピット止水板の地震応答解析に本コード（Ver.7.2.3_4）が使用された実績がある。一方，東海第二発電所ではFLIP Ver.7.3.0_2を使用する。そこで，FLIP Ver.7.2.3_4からFLIP Ver.7.3.0_2までの改訂履歴を表5-1～表5-3に示す。

表5-1　FLIP Ver.7.2.3版からFLIP Ver.7.2.3_5版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での使用の有無
カクテルグラスモデル要素	①qusのデフォルト値を10000(kPa)から0(Sus法を使用しない)に変更した。	FLIP Ver.7.2.3_3	無
非線形はり要素	①非線形はり要素(IEL=16)に内蔵のトリリニアモデルのM～φ関係に軸力依存性を導入した。 ※現行方式では，M～φ関係の初期勾配が変わってしまうため，FLIP Ver.7.3.0で改善予定とし，FLIP Ver.7.3.0_2では改善済みとなった。	FLIP Ver.7.2.3_4	無
バグ対応	①FLIP Ver.7.2.3に存在していた，多段階解析の際のジョイント要素の不具合を修正した。	FLIP Ver.7.2.3_2	
	②マルチスプリング要素のIS12(履歴減衰算定法選択SW)を1と設定した場合の，多重せん断ばねの伸びの最大値算定ルーチンをFLIP Ver.7.2.2相当へ戻した。(修正が不適切だったため)	FLIP Ver.7.2.3_3	
	④非線形はり要素(IEL=16)で，IAX=1～4の場合で，Ny+とNy-が異なる場合に，両者を取り違えていたバグに対応した。	FLIP Ver.7.2.3_4	
	⑤非線形はり要素(IEL=16)にて，H形鋼の弱軸回りの全塑性モーメントの軸力依存性を考慮する場合に(IAX=4)，全塑性モーメントが正しく算定されないというバグに対応した。	FLIP Ver.7.2.3_5	

ここで，カクテルグラスモデル要素は不使用であるため，検証対象外である。非線形はり要素についても軸力依存型のトリリニアモデルは不使用であるため，検証対象外となる。

表5-2　FLIP Ver.7.2.3_5版からFLIP Ver.7.3.0版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での使用の有無
非線形はり要素	①非線形はり要素(IEL=16)に内蔵のトリリニアモデルのM～φ関係に軸力依存性を導入したが(FLIP Ver.7.2.3_4)，導入した方式では，M～φ関係の初期勾配が変わってしまうため，現行方式を改善した。	FLIP Ver.7.3.0	無
非線形ばね要素	①非線形ばね要素(IEL=17)の軸方向ばねの種類として，杭先端ばね用双曲線モデルをFLIP Ver.7.1.9-6-2_5に追加したが，これをFLIP Ver7.3.0に移植した。その際，一旦引き抜かれて，再度押し込まれた場合に，ばね力が再び発揮される位置を，今までは，最初に押し込みが始まった位置としていたが，押し込み→引抜きの最後にばねが切れた位置を指定することも可能にした。	FLIP Ver.7.3.0	無
杭－地盤相互作用ばね要素	①杭－地盤相互作用ばね要素(IEL=18)に，Ver.7.2.3_4に実装されているジョイント要素の杭軸方向の特性と同様の非線形特性を有する「杭－地盤相互作用ばね」という名称の非線形ばねを生成する機能をFLIP Ver.7.1.9-6-2_4からFLIP Ver.7.3.0に移植した。	FLIP Ver.7.1.9-6-2_4	有
出力関係	①各出力データに記載の時刻表示は，長期間の圧密解析後の地震応答解析等に対応するため，F15.4に変更した。 ②要素タイプごとに出力する諸量を見直した。これに伴い，要素出力成分の成分番号が変更になっているものがある。時刻歴データ(#21，#24)における流体領域の動水圧時刻歴のタイプ番号が変更になっている。また，要素履歴データ(#23，#25)のタイプ番号が一部変更になっている。 ③固有ベクトルファイルの機番を#35から#69へ変更した。	FLIP Ver.7.3.0	

ここで，非線形はり要素は前頁で示したように不使用であるため，検証対象外である。非線形ばね要素については，杭先端で使用しているものの，使用しているのはユーザー定義のモデルであり，双曲線モデルではないため，検証対象外である。杭－地盤相互作用ばね要素については，他プラントの既工事計画で使用していないため，検証が必要となる。

表5-3　FLIP Ver.7.3.0版からFLIP Ver.7.3.0_2版への改訂内容

改訂項目	内容	実装版	東海第二での使用の有無
非線形はり要素	①非線形はり要素で，IHT=4(トリリニア軸力依存)の場合に，軸力変動に応じたトリリニア曲線を追跡する処理に問題があったため，これを修正した。 ②FLIP Ver.7.3.0を作成した際に，非線形はり要素で，IHT=2(バイリニア)かつ302≦IAX≦324の場合，(Mp-N)ダイアグラムの解釈が正しく行われていなかったことに対して，Ver.7.3.0_2ではこれを修正した。	FLIP Ver.7.3.0_2	無
杭－地盤相互作用ばね要素	①FLIP Ver.7.3.0で，マルチスプリング要素対応の杭－地盤相互作用ばね要素の処理方法を指定する「MODESW」の入力を廃止したが，内部的に残しておいた変数MODESWと新設したパラメータ(KILLJ)の記憶域が重複していたため，MODESWがKILLJの値により変化してしまっていた。そこでMODESWの記憶域を解放して，常に，MODESW=0になるよう改めた(従来からの相互作用ばねの挙動)。なお，FLIP Ver.7.2.3版では，MODESWは0か1の値を取り得たが，どちらにしても，応答にはほとんど差が無い。	FLIP Ver.7.3.0_2	有
入力関係	①DIST命令で分布流入量を指定した場合に，それを節点流入量に変換する処理に誤りがあったものを修正した。	FLIP Ver.7.3.0_2	
出力関係	①間隙水要素(非排水条件)の過剰間隙水圧を応力ファイル(#36)に出力可能にした。	FLIP Ver.7.3.0_2	

ここで，非線形はり要素のIHT=4，IHT=2は不使用のため，検証対象外である。杭－地盤相互作用ばね要素の変更については，前頁と同様に検証を行う。ただし，FLIPコンソーシアムによれば応答にほとんど差が無いと示されている。

以上から，他プラントの既工事計画で使用していない検証を行うべき機能としては，杭－地盤相互作用ばねの鉛直成分である杭－地盤間の摩擦を表現する非線形ばねを生成する機能が対象となる。

6. 本解析で使用する要素の概要

FLIPには種々の要素が用意されている、そのうち3.2章で述べたマルチスプリング要素及び間隙水要素以外では以下の要素を用いている。

6.1　線形はり要素

線形はり要素は、構造物や杭等の構造物をモデル化する場合に用いる場合が多い。FLIPでは、2次元のアイソパラメトリック要素が用意されている。以下にその定式化について記載する。

※以下は「FLIP研究会14年間の検討成果のまとめ」より

右図に示すように２ないし３節点のまっすぐなはり要素を考え、これに対し要素座表系 x′y′ を導入する。節点 i の要素座標は x_i' となる。

この要素は、１節点当り並進２自由度、回転１自由度を持ち、要素座標系では、これらは図に示したように u_i'、v_i'、θ_i' となる。

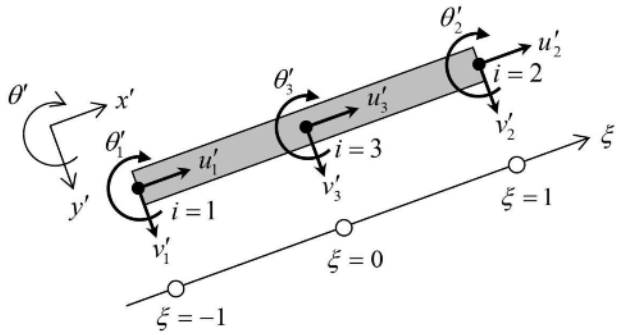


図 4-1-1　アイソパラメトリックはり

自然座標 ξ および補間関数 $h_i(\xi)$ を導入し、要素の中立軸上の任意の位置 x′、および当該位置 x′ における変位 u'、v'、θ' は次のように表される。

$$\left.\begin{aligned} x' &= \sum_i h_i(\xi) x_i' \\ u' &= \sum_i h_i(\xi) u_i' \\ v' &= \sum_i h_i(\xi) v_i' \\ \theta' &= \sum_i h_i(\xi) \theta_i' \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}1\text{-}1)$$

変位 u'、v'、θ' に関する補間式をまとめると、以下のように表される。

$$\{u'\} = H\{U'\} \quad (4\text{-}1\text{-}2)$$

ここに、

$$\{u'\}^T = \begin{pmatrix} u' & v' & \theta' \end{pmatrix} \quad (4\text{-}1\text{-}3)$$

$$\{U\}^T = \begin{pmatrix} u_1' & v_1' & \theta_1' & u_2' & v_2' & \theta_2' & u_3' & v_3' & \theta_3' \end{pmatrix} \quad (4\text{-}1\text{-}4)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & & & h_2 & & & h_3 & & \\ & h_1 & & & h_2 & & & h_3 & \\ & & h_1 & & & h_2 & & & h_3 \end{bmatrix} \quad (4\text{-}1\text{-}5)$$

なお、補間関数とその導関数は、３節点要素の場合は次のように与えられる。

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= -\frac{1}{2}\xi(1-\xi) \quad , \quad \frac{\partial h_1}{\partial \xi} = \xi - \frac{1}{2} \\ h_2 &= \frac{1}{2}\xi(1+\xi) \quad , \quad \frac{\partial h_2}{\partial \xi} = \xi + \frac{1}{2} \\ h_3 &= (1-\xi)(1+\xi) \quad , \quad \frac{\partial h_3}{\partial \xi} = -2\xi \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}1\text{-}6)$$

また、２節点要素の場合は次のように与えられる。

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= \frac{1}{2}(1-\xi) \quad , \quad \frac{\partial h_1}{\partial \xi} = -\frac{1}{2} \\ h_2 &= \frac{1}{2}(1+\xi) \quad , \quad \frac{\partial h_2}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}1\text{-}7)$$

ここで、はり要素の変形は、図 4-1-2に示すように、変形前に中立軸に対して垂直な線は、変形後も直線を保つと仮定するが、その直線は変形後の中立軸に対する法線と一致する必要はない。このような方法でせん断変形を考慮するはり要素は、Timoshenko のはり理論に基づくものであるが、これを有限要素法に組み込まれるアイソパラメトリック要素に拡張するため，ここでは「アイソパラメトリックはり要素」と呼ぶ。

このような変形に対する要素のひずみベクトル$\{\varepsilon\}$は、次のように表される。

$$\{\varepsilon\}^T = (\varepsilon' \quad \phi' \quad \gamma') \quad (4\text{-}1\text{-}8)$$

ここに、

$$\varepsilon' = \frac{\partial u'}{\partial x'} = \sum_i \frac{\partial h_i}{\partial x'} u_i' \quad \text{（軸ひずみ）} \quad (4\text{-}1\text{-}9)$$

$$\phi' = \frac{\partial \theta'}{\partial x'} = \sum_i \frac{\partial h_i}{\partial x'} \theta_i' \quad \text{（曲率）} \quad (4\text{-}1\text{-}10)$$

$$\gamma' = \theta' - \frac{\partial v'}{\partial x'} = \sum_i h_i \theta_i' - \sum \frac{\partial h_i}{\partial x'} v_i' \quad \text{（せん断角）} \quad 4\text{-}1\text{-}11$$

また、このひずみベクトル$\{\varepsilon\}$は、節点変位ベクトル$\{U'\}$と次のように関連づけることができる。

$$\{\varepsilon\} = B\{U'\} \quad (4\text{-}1\text{-}12)$$

但し、

$$B=\left[\begin{array}{cc|cc|cc} \dfrac{\partial h_1}{\partial x'} & & \dfrac{\partial h_2}{\partial x'} & & \dfrac{\partial h_3}{\partial x'} & \\ & \dfrac{\partial h_1}{\partial x'} & & \dfrac{\partial h_2}{\partial x'} & & \dfrac{\partial h_3}{\partial x'} \\ -\dfrac{\partial h_1}{\partial x'} & h_1 & -\dfrac{\partial h_2}{\partial x'} & h_2 & -\dfrac{\partial h_3}{\partial x'} & h_3 \end{array}\right] \qquad (4\text{-}1\text{-}13)$$

ここに、

$$\frac{\partial h_i}{\partial x'}=\frac{\partial h_i}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial x'}=\frac{\partial h_i}{\partial \xi}\Bigg/\left(\sum_k \frac{\partial h_k}{\partial \xi}x'_k\right) \qquad (4\text{-}1\text{-}14)$$

これに対し、応力$\{\sigma\}$は、次式で表される。

$$\{\sigma\}^T=\left(\sigma' \quad M' \quad \tau'\right) \qquad (4\text{-}1\text{-}15)$$

ここに、σ'は軸力、M'はモーメント、τ'はせん断力であり、力の向きは図 4-1-3に従う。

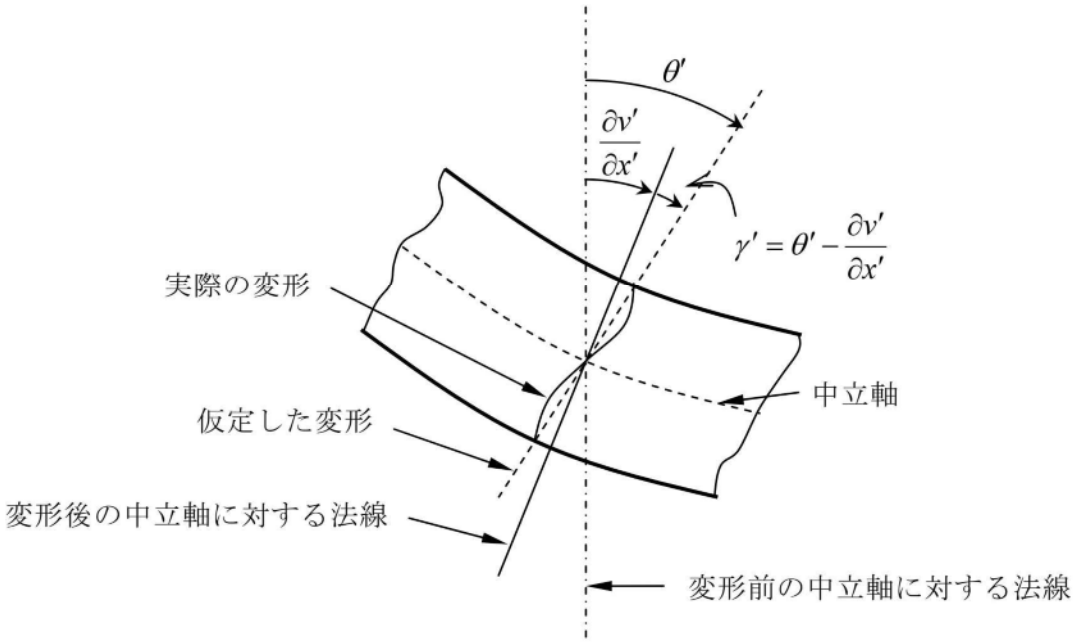


図 4-1-2　アイソパラメトリックはりの変形

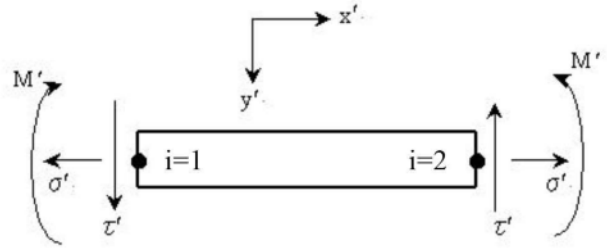


図 4-1-3　力とモーメントの向き

応力$\{\sigma\}$とひずみ$\{\varepsilon\}$の関係は、次式で表される。

$$\{\sigma\}=D\{\varepsilon\} \tag{4-1-16}$$

又は、

$$\begin{Bmatrix}\sigma'\\ M'\\ \tau'\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}EA & & \\ & EI_{Z'} & \\ & & GA_y\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon'\\ \phi'\\ \gamma'\end{Bmatrix} \tag{4-1-17}$$

ここに、

E　：ヤング率

A　：断面積

$I_{Z'}$：（Z′軸まわりの）断面２次モーメント

G　：せん断剛性

A_y：せん断有効面積

さて、はり要素に慣性力および節点集中力が付いている場合、ハミルトンの原理より次式を得る。

$$\int\delta\{\varepsilon\}^T\{\sigma\}dx'+\iint\delta\{\tilde{u}'\}^T\rho\{\ddot{\tilde{u}}'\}dx'dy'-\delta\{U\}^T\{F'\}=0 \tag{4-1-18}$$

ここで、δは仮想変位又はこれに応ずる仮想ひずみを表す。また、$\{F\}$は節点集中力を、$\{\tilde{u}'\}$は要素中の任意の位置（中立軸上とは限らない）における変位を表す。すなわち、

$$\{F\}^T=\begin{pmatrix}p_1' & q_1' & m_1' & p_2' & q_2' & m_2' & p_3' & q_3' & m_3'\end{pmatrix} \tag{4-1-19}$$

$$\{\tilde{u}'\}^T=\begin{pmatrix}\tilde{u}' & \tilde{v}'\end{pmatrix} \tag{4-1-20}$$

なお、p_i'、q_i'、m_i'は節点iに働くx'方向並進力、y'方向並進力、θ'方向モーメントを表す。また$\{\tilde{u}'\}$は中立軸上の値を用いて、

$$\begin{Bmatrix} \tilde{u}' \\ \tilde{v}' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u' \\ v' \\ \theta' \end{Bmatrix} \tag{4-1-21}$$

あるいは、ベクトル記号を用いて、

$$\{\tilde{u}'\} = S\{u'\} \tag{4-1-22}$$

と書ける。

式(4-1-18)は、以下のように書き換えることができる。

$$\delta\{U'\}^T \left(K'\{U'\} + M'\{\ddot{U}'\} - \{F'\}\right) = 0 \tag{4-1-23}$$

ここに、K'は要素剛性行列で、

$$K' = \int B^T DB \, dx' = \int_{-1}^{1} B^T DB \frac{\partial x'}{\partial \xi} d\xi \tag{4-1-24}$$

また、M'は要素質量行列で、

$$M' = \iint \rho H^T S^T SH \, dx'dy' \tag{4-1-25}$$

$$= \int \rho H^T \mathsf{S} \; H \, dx' \tag{4-1-26}$$

但し、

$$\mathsf{S} = \int S^T S \, dy' \tag{4-1-27}$$

$$= \int \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y' \\ 0 & 1 & 0 \\ -y' & 0 & y'^2 \end{bmatrix} dy' \tag{4-1-28}$$

$$= \begin{bmatrix} A & & \\ & A & \\ & & I_{z'} \end{bmatrix} \tag{4-1-29}$$

ここで、Aはz'方向単位巾当りの断面積、$I_{z'}$はz'軸まわりの断面２次モーメントを表す。集中質量マトリクスを求める場合は、式(4-1-26)の計算において、補関関数h_iを次のようにおく。

$$
\begin{aligned}
h_1 &= 1 \quad (-1 \le \xi \le -k) \\
&= 0 \quad (\text{その他}) \\
h_2 &= 1 \quad (k \le \xi \le 1) \\
&= 0 \quad (\text{その他}) \\
h_3 &= 1 \quad (-k \le \xi \le k) \\
&= 0 \quad (\text{その他})
\end{aligned}
\tag{4-1-30}
$$

ここに、k は

$$
k = \begin{cases} 0 & (2\text{節点要素の場合}) \\ \dfrac{1}{2} & (3\text{節点要素の場合}) \end{cases}
\tag{4-1-31}
$$

この補間関数を用いると、$\int h_i h_j \, dx'$ は次のように求まる。

$$
\int h_i h_j \, dx' = 0 \qquad (i \neq j)
\tag{4-1-32}
$$

$$
\int h_1^{\,2} \, dx' = \int_{-1}^{-k} \frac{\partial x'}{\partial \xi} \, d\xi
\tag{4-1-33}
$$

$$
\int h_2^{\,2} \, dx' = \int_{k}^{1} \frac{\partial x'}{\partial \xi} \, d\xi
\tag{4-1-34}
$$

$$
\int h_3^{\,2} \, dx' = \int_{-k}^{k} \frac{\partial x'}{\partial \xi} \, d\xi
\tag{4-1-35}
$$

なお、

$$
\int_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial x'}{\partial \xi} \, d\xi = \left(\frac{\beta^2}{2} - \frac{\alpha^2}{2} \right) \left(x_1' + x_2' - 2x_3' \right) - \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \left(x_2' - x_1' \right)
$$

(3節点要素の場合) (4-1-36)

$$
\int_{\alpha}^{\beta} \frac{\partial x'}{\partial \xi} \, d\xi = \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \left(x_2' - x_1' \right) \qquad (2\text{節点要素の場合})
\tag{4-1-37}
$$

全体座標系と要素座標系の関係は右図のとおりであり、両座標系の間のベクトルの変換は次式による。

$$\{U'\}=T\{U\} \qquad (4\text{-}1\text{-}38)$$

$$\{F'\}=T\{F\} \qquad (4\text{-}1\text{-}39)$$

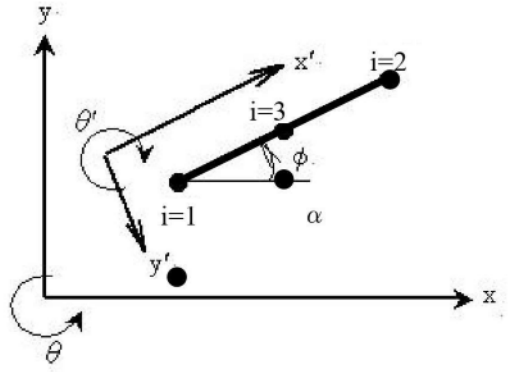


図 4-1-4　座標系

但し、$\{U\}$、$\{F\}$は全体座標系による節点変位、節点集中力を成分とするベクトルである。また、座標変換マトリクスTは次のように表される。

$$T=\left[\begin{array}{ccc:ccc:ccc} c & s & 0 & & & & & & \\ s & -c & 0 & & 0 & & & 0 & \\ 0 & 0 & -1 & & & & & & \\ \hdashline & & & c & s & 0 & & & \\ & 0 & & s & -c & 0 & & 0 & \\ & & & 0 & 0 & -1 & & & \\ \hdashline & & & & & & c & s & 0 \\ & 0 & & & & & s & -c & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & -1 \end{array}\right] \qquad (4\text{-}1\text{-}40)$$

$$(c \equiv \cos\alpha \ , \ s \equiv \sin\alpha)$$

さらに、全体座標系のもとでの要素剛性行列Kは、

$$K = T^T K' T \qquad (4\text{-}1\text{-}41)$$

となる。要素質量行列Mについても同様に、

$$M = T^T M' T \qquad (4\text{-}1\text{-}42)$$

となる。

6.2　線形平面要素

線形平面要素は、地盤等をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

平面ひずみ状態における線形平面要素の応力～ひずみ関係は次式で表される[3)]。

$$\{\varepsilon\} = D\{\sigma\} \tag{4-2-1}$$

但し、

$$\{\varepsilon\}^T = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{（ひずみ）} \tag{4-2-2}$$

$$\{\sigma\}^T = \begin{pmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad \text{（応力）} \tag{4-2-3}$$

$$D = \begin{bmatrix} \dfrac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \dfrac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \\ \dfrac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \dfrac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \\ & & \dfrac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \tag{4-2-4}$$

ここに、Eはヤング率、νはポアソン比である。

なお、要素形状はマルチスプリング要素と同じ４節点アイソパラメトリック要素を用いている。また、中間節点を持つ８節点アイソパラメトリック要素も組み込まれてはいるが、実用には４節点アイソパラメトリック要素のみで十分である。

6.3　非線形はり要素

非線形はり要素は、構造物等をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

非線形はり要素は、線形はりのアイソパラメトリックはり要素を拡張し、$M \sim \phi$関係を規定する曲げ剛性（式(4-1-17)におけるEI_z）に関して材料非線形性を考慮したものである。軸剛性およびせん断剛性に関しては線形のままである。

本非線形はり要素が扱える非線形特性には、骨格曲線としてバイリニアとトリリニアの２種類があり、履歴曲線としてはMasing則を適用している。また、バイリニアについては曲げの向きに関する第一折れ点の非対称性を考慮でき、さらに、軸力の影響による第一折れ点の変化も考慮できる。

（１）バイリニアモデル

図 4-4-1にバイリニアモデルの履歴曲線を示す。図中、EI_0は線形弾性時の曲げ剛性、EI_2は第一折れ点以降の勾配、ϕ_pは第一折れ点の曲率、M_pは第一折れ点の曲げモーメントで、これらのうちEI_0、EI_2、M_pはバイリニアモデルを規定するのに必要な最小限のパラメータである。ϕ_pおよびM_pは、鋼材を対象とした場合の全塑性時に相当するが、モデル化に応じて降伏時に対応させてもよい。また、ＲＣ部材を対象にする場合は、モデル化に応じて第一折れ点をひび割れ時、降伏時、または終局時に対応させる。

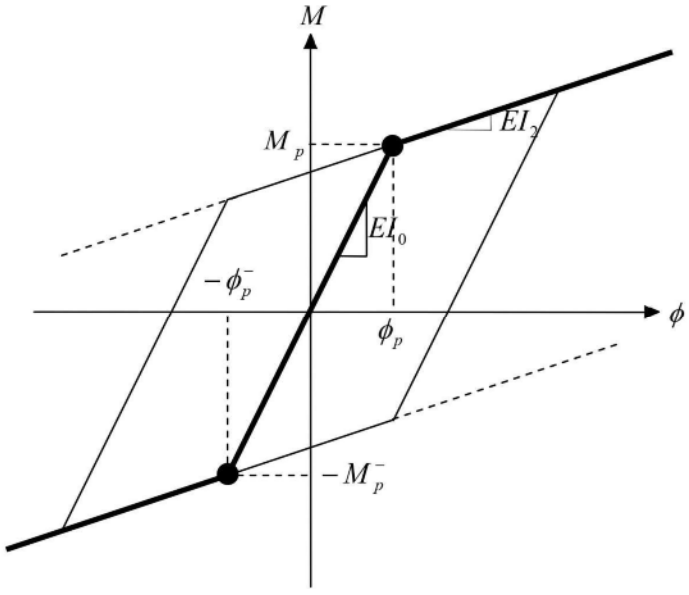


図 4-4-1　バイリニアモデル

ϕ_p^-およびM_p^-は、曲げの方向に関して非対称な場合に必要となるパラメータであるが、入力を要求されるパラメータはM_p^-のみで、ϕ_p^-はM_p^-とEI_0からプログラム内部で設定される。

バイリニアモデルにおいては、発生軸力に応じて第一折れ点の曲げモーメント（鋼材の場合の全塑性モーメントに対応）の影響を考慮できる。長方形断面および鋼管断面の場合は、次式に示す軸力による全塑性曲げモーメントの低減式[4)]がプログラム内部に組み込まれている。

$$M_{pc} = M_p \left\{ 1 - \left(\frac{N}{N_y} \right)^2 \right\} \qquad \text{（長方形断面）} \qquad (4\text{-}4\text{-}1)$$

$$M_{pc} = M_p \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{N}{N_y} \right) \qquad \text{（鋼管断面）} \qquad (4\text{-}4\text{-}2)$$

ここに、M_{pc} は低減後の全塑性曲げモーメント、N_y は降伏軸方向力である。

また、図 4-4-2に示すようなM－N関係を定義することにより、発生軸力に応じた全塑性曲げモーメントの低減が可能である。

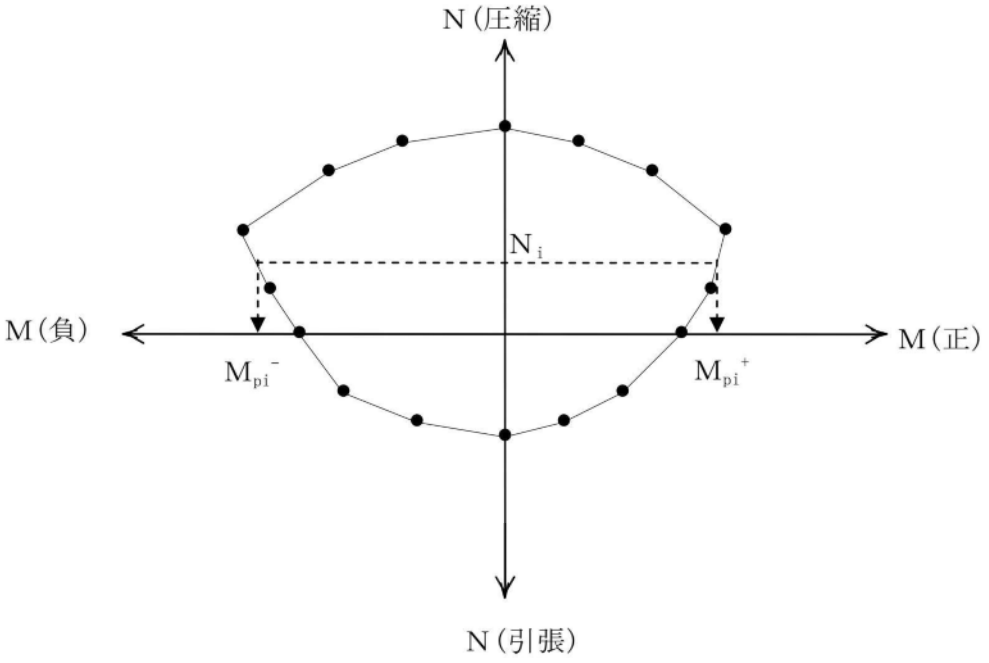


図 4-4-2　M－N関係の定義

（２）トリリニアモデル

図 4-4-3にトリリニアモデルの履歴曲線を示す。図中、EI_0は線形弾性時の曲げ剛性、EI_1は第一折れ点から第二折れ点間の勾配、EI_2は第二折れ点以降の勾配、M_yは第一折れ点の曲げモーメント、M_pは第二折れ点の曲げモーメントで、これらはトリリニアモデルを規定するのに必要となるパラメータである。ϕ_yおよびϕ_pは、与えられたパラメータ（EI_0、EI_1、M_y、M_p）からプログラム内部で設定される。M_yおよびM_pは、それぞれ鋼材を対象とした場合の降伏時および全塑性時に相当する。また、ＲＣ部材を対象にする場合は、モデル化に応じて第一折れ点をひび割れ時に、第二折れ点を降伏時に対応させるか、または、第一折れ点を降伏時に、第二折れ点を終局時に対応させる。

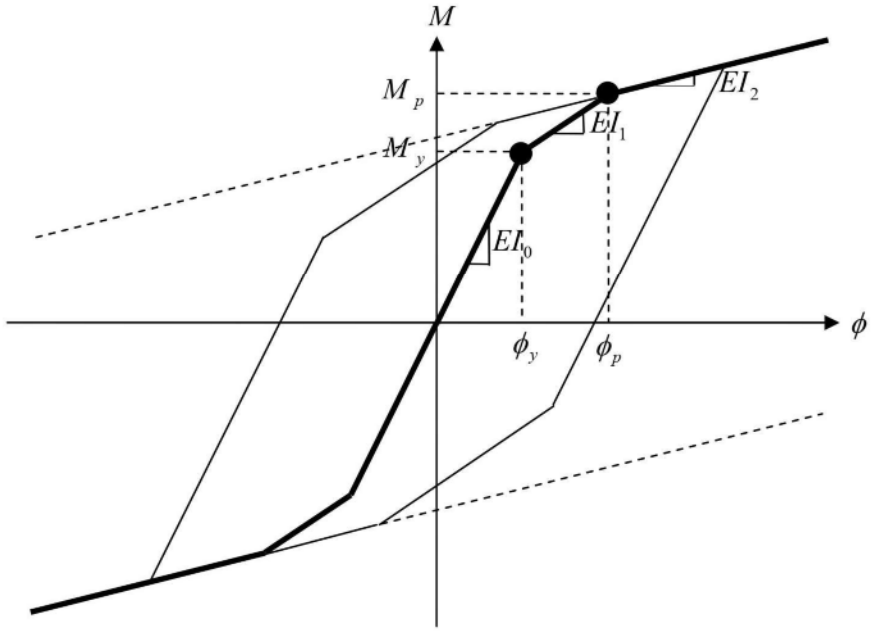


図 4-4-3　トリリニアモデル

6.4　非線形ばね要素

非線形ばね要素は、地盤-構造物間の接合等をモデル化する場合に用いる場合が多い。以下にその定式化について記載する。

（１）非線形ばねの定式化

非線形ばね要素は、図 4-5-1に示すように、任意方向の２節点間を軸方向ばね、せん断方向ばね、および回転ばねで結んだものであり、各々のばねに対して個別に各種非線形性を考慮できる。なお、線形ばね要素では直接全体座標系のばねを定義していたが、非線形ばねではそのままでは入力が煩雑になってしまうため、任意方向のばねを考慮できるように局所座標系 $n\ s$ を導入している。

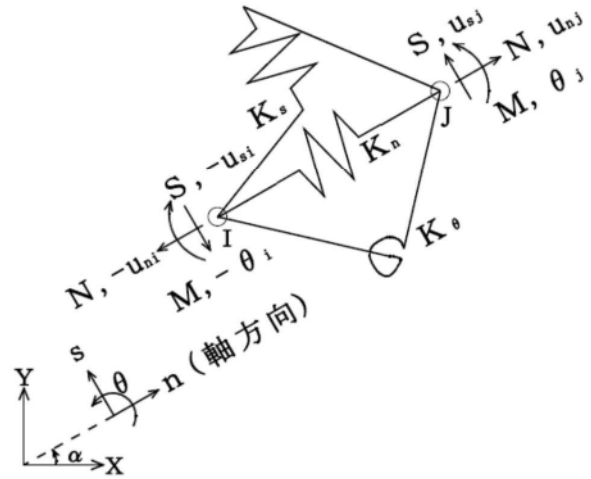


図 4-5-1　非線形ばね

局所座標系 $n\ s$ における力～変位関係は次式で表される。

$$\{f'\} = K''\{du\} \tag{4-5-1}$$

但し、

$$\{f'\}^T = \begin{pmatrix} N & S & M \end{pmatrix} \tag{4-5-2}$$

$$\{du\}^T = \begin{pmatrix} u_n^j - u_n^i & u_s^j - u_s^i & \theta^j - \theta^i \end{pmatrix} \tag{4-5-3}$$

$$K'' = \begin{bmatrix} K_n & & \\ & K_s & \\ & & K_\theta \end{bmatrix} \tag{4-5-4}$$

ここに、K_n は軸方向ばね定数、K_s はせん断方向ばね定数、K_θ は回転ばね定数である。

ここで、非線形要素に関する変位ベクトルを以下のように並び替えれば、

$$\{u\}^T = \begin{pmatrix} u_n^i & u_s^i & \theta^i & u_n^j & u_s^j & \theta^j \end{pmatrix} \tag{4-5-5}$$

力～変位関係は次のように表される。

$$\{f\} = K'\{u\} \tag{4-5-6}$$

但し、

$$\{f\}^T = \begin{pmatrix} -N & -S & -M & N & S & M \end{pmatrix} \tag{4-5-7}$$

$$K' = \begin{bmatrix} K_n & & & -K_n & & \\ & K_s & & & -K_s & \\ & & K_\theta & & & -K_\theta \\ -K_n & & & K_n & & \\ & -K_s & & & K_s & \\ & & -K_\theta & & & K_\theta \end{bmatrix} \tag{4-5-8}$$

また、局所座標系$n\ s$から全体座標系への座標変換マトリクスは次式で表される。

$$T = \left[\begin{array}{cc:cc:cc} c & -s & & & & \\ s & c & & 0 & & \\ \hdashline & & 1 & & & \\ \hdashline & & & c & -s & \\ & 0 & & s & c & \\ \hdashline & & & & & 1 \end{array}\right] \tag{4-5-9}$$

$$(c \equiv \cos\alpha \ , \ s \equiv \sin\alpha)$$

したがって、全体座標系における要素剛性行列Kは、以下のようになる。

$$K = T^T K' T \tag{4-5-10}$$

（２）非線形特性

軸方向ばね、せん断方向ばね、回転方向ばねのそれぞれについて、独立して以下の３種類の非線形特性を考慮できる。

① 非線形弾性

② バイリニアモデル

③ トリリニアモデル

(a) 非線形弾性

非線形弾性は、図 4-5-2に示すような利用者が定義した骨格曲線の上を動くのみで履歴曲線は描かない。なお、利用者が定義するパラメータは、骨格曲線の折れ点（du_i、P_i）であり、曲線の勾配（K_i）はプログラム内部で計算される。また、一番外側の入力点（図 4-5-2を例にとれば、点（du_1、P_1）と点（du_6、P_6））より外側の骨格曲線は外挿される。

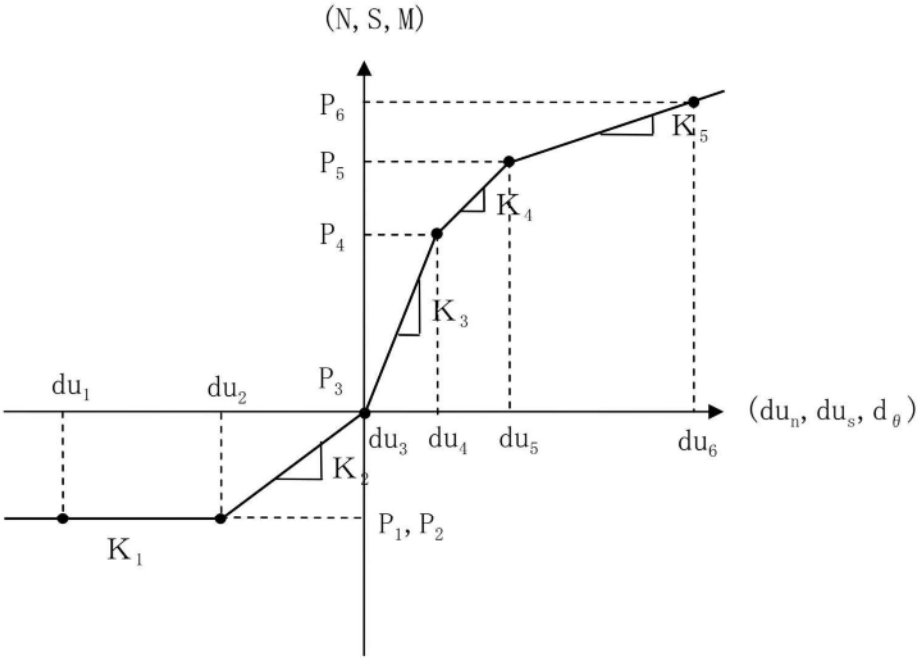


図 4-5-2　非線形弾性

(b)バイリニアモデル

バイリニアモデルの骨格曲線は、図 4-5-3に示すように、K_0、K_1、P_1の３つのパラメータで規定され、履歴曲線は Masing 則に従う。

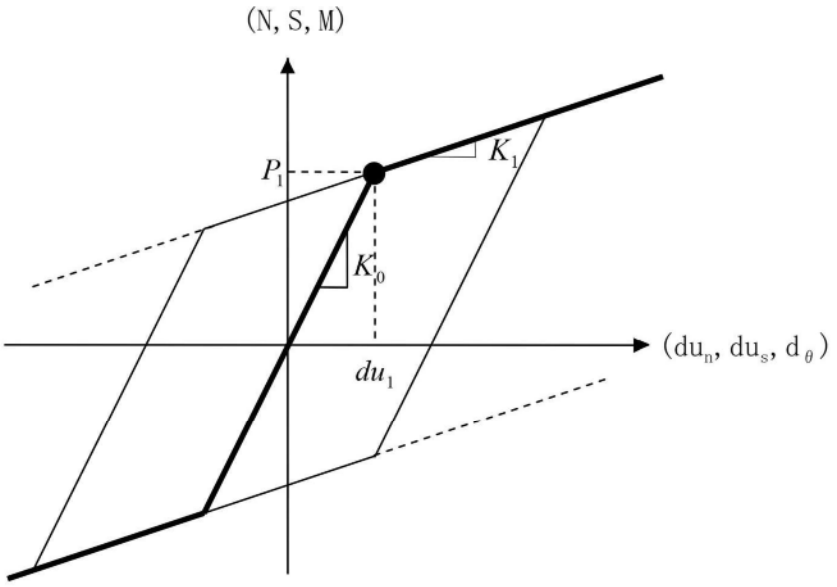


図 4-5-3　バイリニアモデル

(c)トリリニアモデル

トリリニアモデルの骨格曲線は、図 4-5-4に示すように、K_0、K_1、K_2、P_1、P_2の５つのパラメータで規定され、履歴曲線は Masing 則に従う。

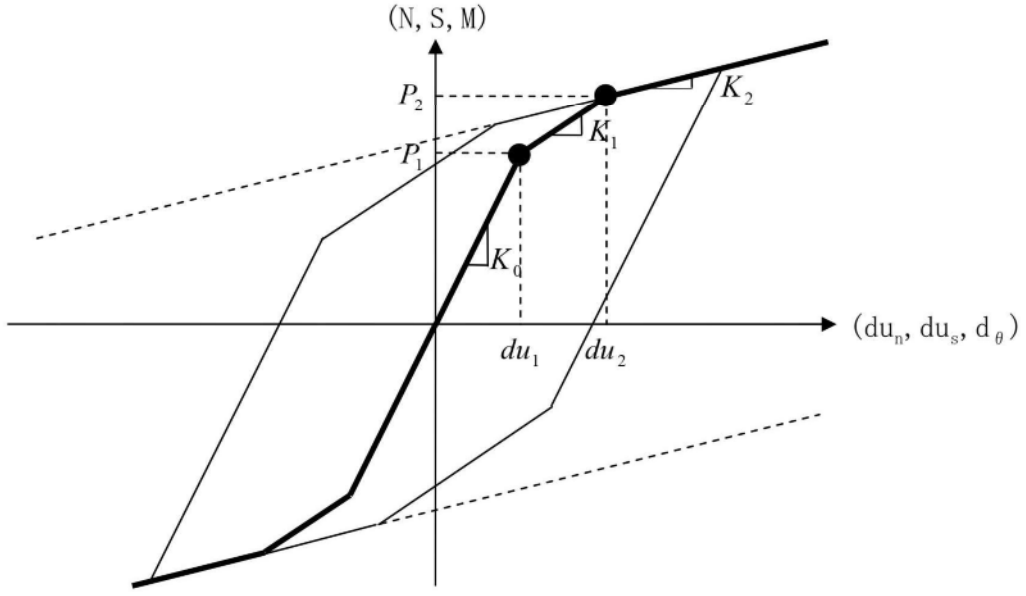


図 4-5-4　トリリニアモデル

6.5　ジョイント要素

ジョイント要素は、地盤-構造物間の接合等をモデル化する事が多い。以下にその定式化について記載する。

引張に対しては分離し、せん断に対してはすべり、圧縮に対しては力を伝達するような不連続面を表すため、右図に示すような４節点２次元ジョイント要素を考える。

この要素については、以下に示すように２通りの定式化が行なわれている。

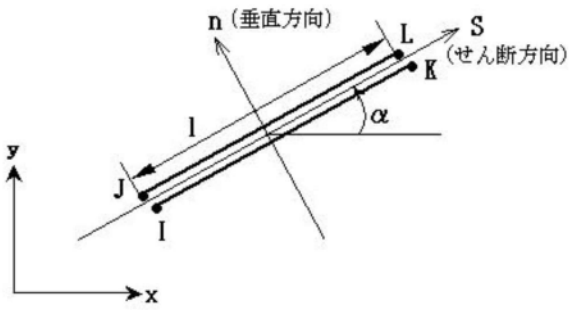


図 4-6-1　４節点ジョイント要素

（１）Goodman による定式化[5)]

要素座標系 s 方向の節点変位をμ_I、μ_J、μ_K、μ_Lで表し、又、n 方向のそれをυ_I、υ_J、υ_K、υ_Lで表す。節点変位ベクトル$\{U'\}$を次のように定義する。

$$\{U'\}^T = (\mu_I, \upsilon_I, \mu_J, \upsilon_J, \mu_K, \upsilon_K, \mu_L, \upsilon_L) \qquad (4\text{-}6\text{-}1)$$

さらに、ひずみ$\{\varepsilon\}$を次のように定義する。

$$\{\varepsilon\}^T = (\gamma, \varepsilon, \omega) \qquad (4\text{-}6\text{-}2)$$

但し、

$$\gamma = \frac{\mu_J + \mu_L}{2} - \frac{\mu_I + \mu_K}{2} \quad （せん断方向平均変位差） \qquad (4\text{-}6\text{-}3)$$

$$\varepsilon = \frac{\upsilon_J + \upsilon_L}{2} - \frac{\upsilon_I + \upsilon_K}{2} \quad （垂直方向平均変位差） \qquad (4\text{-}6\text{-}4)$$

$$\omega = \frac{\upsilon_L - \upsilon_K}{\ell} - \frac{\upsilon_J - \upsilon_I}{\ell} \quad （開き角） \qquad (4\text{-}6\text{-}5)$$

ひずみと節点変位ベクトルとの間の関係は、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon\} = L_0\{U'\} \qquad (4\text{-}6\text{-}6)$$

但し、

$$L_0 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{\ell} & 0 & -\frac{1}{\ell} & 0 & -\frac{1}{\ell} & 0 & \frac{1}{\ell} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}6\text{-}7)$$

次に、ジョイント要素の応力を次のように定義する。

$$\{\sigma\}^T = (\tau_{ns}, \sigma_n, M_o) \tag{4-6-8}$$

但し、

$$\tau_{ns} = \frac{1}{\ell}(F_{sJ} + F_{sL}) \qquad \text{（せん断応力）} \tag{4-6-9}$$

$$\sigma_n = \frac{1}{\ell}(F_{nJ} + F_{nL}) \qquad \text{（垂直応力）} \tag{4-6-10}$$

$$M_o = \frac{l}{2}(F_{nL} + F_{nJ}) \qquad \text{（モーメント）} \tag{4-6-11}$$

なお、Fは節点力を表し、第１の添字が方向を、第２の添字が節点を表す。なお、節点ベクトル$\{F'\}$を次により定義する。

$$\{F'\}^T = (F_{sI}, F_{nI}, F_{sJ}, F_{sI}, F_{nJ}, F_{sK}, F_{nK}, F_{sL}, F_{nL}) \tag{4-6-12}$$

応力と節点ベクトルとの間には、次の関係がある。

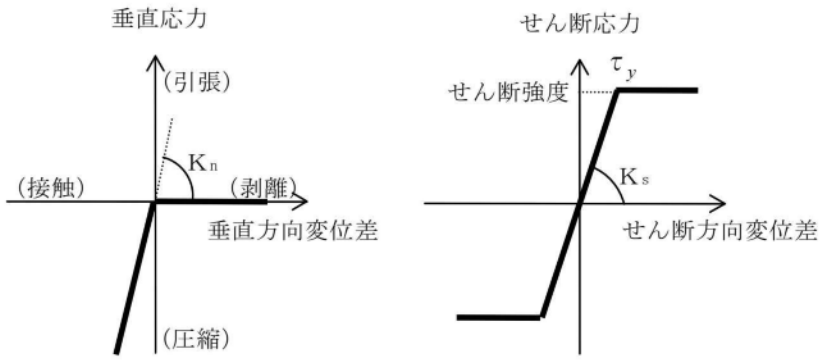
$$\{F'\} = B\{\sigma\} \tag{4-6-13}$$

但し、

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l}{2} & \frac{1}{\ell} \\ \frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{2} & -\frac{1}{\ell} \\ -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{l}{2} & -\frac{1}{\ell} \\ -\frac{l}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{2} & \frac{1}{\ell} \end{bmatrix} \tag{4-6-14}$$

又、上式の導出に際しては、$F_{sI} = -F_{sJ}$などの関係を用いた。

応力－ひずみ関係は、次図に示すように与える。



(a) 垂直方向　　(b) 平行な方向

図 4-6-2　応力－ひずみ関係

なお、降伏せん断応力τ_yは、次式で与えられるものとする。

$$\left.\begin{aligned} \tau_y &= C_J - \sigma_n \tan\phi_J \qquad (\varepsilon \le 0\text{の時}) \\ &= 0 \qquad\qquad\qquad\quad (\varepsilon > 0\text{の時}) \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}6\text{-}15)$$

ここに、C_Jはジョイントの粘着力、ϕ_Jはジョイントの摩擦角を表す。さらに、モーメントM_oと開き角ωとの間の関係は、

$$\left.\begin{aligned} M_o &= \frac{1}{4}\ell^3 K_n \omega \qquad (\varepsilon \le 0\text{の時}) \\ &= 0 \qquad\qquad\quad (\varepsilon > 0\text{の時}) \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}6\text{-}16)$$

で与えられるものとする。

以上の関係を用いると、節点変位ベクトルに対する節点力ベクトルを、次に示す手順に従って求めることが出来る。

$$\{U\} \longrightarrow \{U'\} \longrightarrow \{\varepsilon\} \longrightarrow \{\sigma\} \longrightarrow \{F'\} \longrightarrow \{F\}$$

座標変換　　式(4-6-6)　　図 4-6-2 式(4-6-8)　　式(4-6-13)　　座標変換

但し、$\{U\}$および$\{F\}$は、全体座標系による成分から成るベクトルを表す。

次に、接線剛性行列K'を求める。K'は、

$$K' = \frac{\partial\{F'\}}{\partial\{U'\}} = BCL_o \qquad (4\text{-}6\text{-}17)$$

と表すことができる。但し、Cは次式で与えられる。

$$C=\frac{\partial\{\sigma\}}{\partial\{\varepsilon\}}=\begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & k_n & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4}\ell^3 k_n \end{bmatrix} \tag{4-6-18}$$

又、k_s、k_nは次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned} k_s &= \frac{\partial \tau_{ns}}{\partial \gamma} = K_s && (|\tau_{ns}| < \tau_y \text{の時}) \\ &= 0 && (|\tau_{ns}| = \tau_y \text{の時}) \end{aligned}\right\} \tag{4-6-19}$$

$$\left.\begin{aligned} k_n &= \frac{d\sigma_n}{d\varepsilon} = K_n && (\varepsilon \le 0 \text{の時}) \\ &= 0 && (\varepsilon > 0 \text{の時}) \end{aligned}\right\} \tag{4-6-20}$$

接線剛性行列は、式(4-6-17)の行列の乗算を行なうと、次のように求められる。

$$K' = \frac{1}{4}\ell \left[\begin{array}{cccc|cccc} k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 2k_n & 0 & -2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -2k_n & 0 & 2k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_n & 0 & -2k_n \\ -k_s & 0 & k_s & 0 & -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_n & 0 & 2k_n \end{array}\right] \tag{4-6-21}$$

節点変位ベクトルおよび節点力ベクトルは、全体座標系と要素座標系との間で、それぞれ次のような変換を受ける。

$$\{U'\} = T\{U\} \tag{4-6-22}$$

$$\{F'\} = T\{F\} \tag{4-6-23}$$

但し、

$$T = \begin{bmatrix} c & s & & & & & & \\ -s & c & & & & & & \\ & & c & s & & & & \\ & & -s & c & & & & \\ & & & & c & s & & \\ & & & & -s & c & & \\ & & & & & & c & s \\ & & & & & & -s & c \end{bmatrix} \quad c \equiv \cos\alpha \quad , \quad s \equiv \sin\alpha \tag{4-6-24}$$

この変換行列を用いると、全体座標系における接線剛性行列Kは、

$$K = T^T K' T \tag{4-6-25}$$

として求まる。

（２）非線形ばねを用いた定式化

右図に示すように、向かい合う２節点を直交する２本の非線形ばねで結び、それが２組あるようなモデルを考える。図のI、J節点を結ぶばねは、要素の左半分を、又、K、L 節点間を結ぶばねは右半分を代表するものとし、I、J節点の自由度とK、L 節点の自由度の間には連成を考えない。

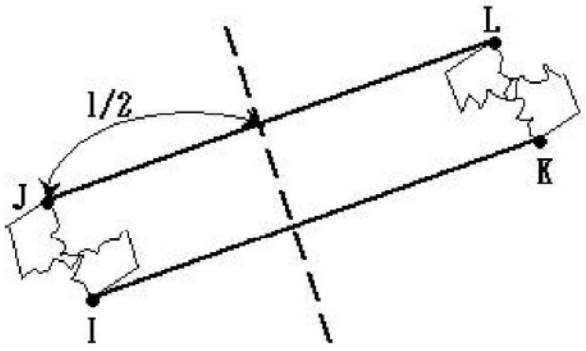


図 4-6-3　非線形ばねを用いたジョイント要素

以下では、図のI、J節点側のみを考えることにするが、K、L 節点の方もまったく同様に取り扱うことが出来る。

式(4-6-1)および式(4-6-2)に対応して、節点変位ベクトル$\{U'\}$およびひずみ$\{\varepsilon\}$を次のように定義する。

$$\{U'\}^T = (\mu_I, \upsilon_I, \mu_J, \upsilon_J) \tag{4-6-26}$$

$$\{\varepsilon\}^T = (\gamma, \varepsilon) \tag{4-6-27}$$

但し、

$$\gamma = \mu_J - \mu_I \qquad \text{（せん断方向変位差）} \tag{4-6-28}$$

$$\varepsilon = \upsilon_J - \upsilon_I \qquad \text{（垂直方向変位差）} \tag{4-6-29}$$

又、$\{\varepsilon\}$と$\{U'\}$との関係は、次式で与えられる。

$$\{\varepsilon\} = L_0 \{U'\} \tag{4-6-30}$$

さらに、節点力ベクトル$\{F'\}$と応力ベクトル$\{\sigma\}$を、

$$\{F'\}^T = (F_{sI}, F_{nI}, F_{sJ}, F_{nJ}) \tag{4-6-31}$$

$$\{\sigma\}=(\tau_{ns},\sigma_n) \tag{4-6-32}$$

と定義すると、両者の間には、式(4-6-13)と同様、次の関係がある。

$$\{F'\}=B\{\sigma\} \tag{4-6-33}$$

但し、

$$B=\begin{bmatrix} -\frac{\ell}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\ell}{2} \\ \frac{\ell}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\ell}{2} \end{bmatrix} \tag{4-6-34}$$

また、ひずみ－応力関係は、図 4-6-2に示すように与える。

以上の関係を用いると、節点変位ベクトルに対する節点力ベクトルを求めることができる。

次に、接線剛性行列K'は、式(4-6-17)と同様、

$$K'=\frac{\partial\{F'\}}{\partial\{U'\}}=BCL_0 \tag{4-6-35}$$

と表すことができる。但し、ここではCは次のようになる。

$$C=\frac{\partial\{\sigma\}}{\partial\{\varepsilon\}}=\begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \tag{4-6-36}$$

式 4-6-35 の乗算を行なうと、接線剛性行列は次式で表される。

$$K'=\frac{\ell}{2}\begin{bmatrix} k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & k_n & 0 & -k_n \\ -k_s & 0 & k_s & 0 \\ 0 & -k_n & 0 & k_n \end{bmatrix} \tag{4-6-37}$$

あるいは、全体座標系では次のようになる。

$$K=\frac{\ell}{2}\begin{bmatrix} c^2k_s+s^2k_n & csk_s-csk_n & -c^2k_s-s^2k_n & -csk_s+csk_n \\ & s^2k_s+c^2k_n & -csk_s+csk_n & -s^2k_s-c^2k_n \\ \text{Symmetric} & & c^2k_s+s^2k_n & csk_s-csk_n \\ & & & s^2k_s+c^2k_n \end{bmatrix} \tag{4-6-38}$$

$$(c\equiv\cos\alpha \quad , \quad s\equiv\sin\alpha)$$

6.6　流体要素と流体-構造連成面要素

流体要素及び流体-構造連成面要素は、海水や海水-護岸構造物間の接続をモデル化する場合に用いる事が多い。以下にその定式化について記載する。

（1）動水圧に関する定式化[6)]

流体領域は、非圧縮の波動方程式に支配されるものとし、有限要素法による定式化を行なって付加質量マトリックスを求める。この付加質量マトリックスは、運動方程式における質量マトリクスに含まれるものとする。また、荷重項にも、付加質量マトリックスの寄与が含まれるものとする。

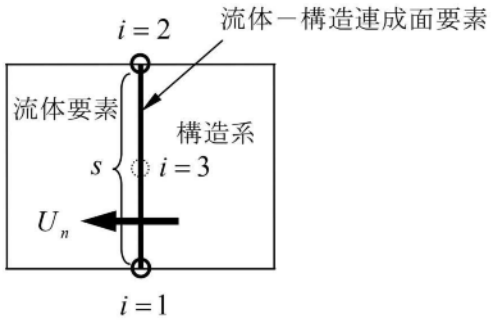


図 4-7-1　流体要素と流体構造連成面要素

圧縮性流体が微小振幅の運動するとき、発生する圧力分布 p の支配方程式は、２次元においては次式で表される。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}-\frac{1}{\bar{c}^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=0 \qquad (4\text{-}7\text{-}1)$$

ここに、$\bar{c}$ は音波の速度を表し、粘性による減衰項は省略してある。また、境界が固体で運動している場合は次式で与えられる。

$$\frac{\partial p}{\partial n}=-\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}(U_n) \qquad (4\text{-}7\text{-}2)$$

ここに、ρ は流体の密度、U_n は変位の法線方向成分を表す。

この連成問題において、非圧縮性流体（$\bar{c}=\infty$）を仮定し、流体領域を有限要素に分割すれば、次式に示す離散化方程式が導かれる。

$$G\{p\}+S\{\ddot{u}\}=0 \qquad (4\text{-}7\text{-}3)$$

ここに、G は動水圧に関するマトリクス、S は流体と構造物の境界面に関するマトリクスで次式で表される。

$$S=\int_s H^T\rho\overline{H}ds \qquad (4\text{-}7\text{-}4)$$

ここに、H は圧力分布を定義する形状関数で、$\overline{H}$ は構造系の変位ベクトルと境界面の法線方向の変位を関係づける形状関数（次式参照）、s は流体と構造物の境界面を表す。

$$\{U_n\}=\overline{H}\{u\} \qquad (4\text{-}7\text{-}5)$$

式 4-7-3 より、境界面における圧力 $\{p\}$（動水圧）は直接解け、次式の通りになる。

$$\{p\} = -G^{-1}S\{\ddot{u}\} \tag{4-7-6}$$

一方、構造系における有限要素の離散化方程式は次式のように表すことができる。

$$M\{\ddot{u}\} + C\{\dot{u}\} + K\{u\} + \{\bar{f}_s\} + \{r\} = 0 \tag{4-7-7}$$

ここで、外力項は構造系において独立に指定される外力項$\{r\}$と境界流体圧力（動水圧）による項$\{\bar{f}_s\}$とに分解してある。仮想仕事の原理から、後者は次式で与えられる。

$$\{\bar{f}_s\} = \int_s \overline{H}^T p ds = \frac{1}{\rho} S^T \{p\} \tag{4-7-8}$$

この式に式(4-7-6)を代入すると、次式が得られる。

$$\{\bar{f}_s\} = -\frac{1}{\rho} S^T G^{-1} S\{\ddot{u}\} \tag{4-7-9}$$

したがって、次式に示す質量マトリクスが付加質量マトリクスとして運動方程式に含まれる。

$$-\frac{1}{\rho} S^T G^{-1} S \tag{4-7-10}$$

なお、運動方程式が解かれれば、動水圧は式(4-7-6)より求められる。

6.7　粘性要素（側方地盤要素・底面地盤要素）

粘性要素（側方地盤要素・底面地盤要素）は、地盤の半無限性を模擬するための要素である。以下にその定式化について記載する。

（１）側方地盤要素（側方粘性境界要素）

構造系の側面に側方地盤要素を定義すると、側方粘性境界とみなされ、当該境界に次の表面力が付く。

$$\overline{T}_x^* = -\rho V_p \left(\dot{U}_x^s - \dot{U}_x^f \right) \tag{4-8-1}$$

$$\overline{T}_y^* = -\rho V_s \left(\dot{U}_y^s - \dot{U}_y^f \right) \tag{4-8-2}$$

但し、ρ、V_s、V_pは側方無限地盤の密度、s 波速度、p 波速度を表す。又$\dot{U}_x^s$、$\dot{U}_y^s$は構造系側面の（相対）速度、$\dot{U}_x^f$、$\dot{U}_y^f$は free field の（相対）速度。

これらの表面力は離散化された運動方程式において次式に示す減衰項と荷重項に付加される。

$$C_s \left(\{\dot{U}\}_r - \{\dot{U}\}_r^f \right) \tag{4-8-3}$$

但し、

$$C_s = \int_{側面} H^T \begin{bmatrix} \rho V_p & \\ & \rho V_s \end{bmatrix} H \, d\Gamma \tag{4-8-4}$$

$\{\dot{U}\}_r^f$は free field の相対節点速度を表す。また、$C_s\{\dot{U}\}_r$が減衰項に、$+C_s\{\dot{U}\}_r^f$が荷重項になる。

（２）下方地盤要素（底面粘性境界要素）

構造系の側面に下方地盤要素を定義すると、底面粘性境界とみなされ、当該境界に次の表面力が付く。

$$\overline{T}_x^* = -\tau_{yx} = -\rho V_s \dot{U}_x^b \tag{4-8-5}$$

$$\overline{T}_y^* = -\sigma_y = -\rho V_p \dot{U}_y^b \tag{4-8-6}$$

但し、ρ、V_s、V_pは下方無限地盤の密度、s 波速度、p 波速度を表す。又、$\dot{U}_x^b$、$\dot{U}_y^b$は構造系底面の基盤に対する相対速度である。

下方粘性境界の表面力は、離散化された運動方程式において次式に示す減衰項に付加される。

$$C_b \{\dot{U}\}_r \tag{4-8-7}$$

但し、

$$C_b = \int_{底面} H^T \begin{bmatrix} \rho V_s & \\ & \rho V_p \end{bmatrix} H \, d\Gamma \qquad (4\text{-}8\text{-}8)$$

6.8　節点集中質量要素

節点集中質量要素は、載荷される物体の質量を慣性力として模擬するための要素である。以下にその定式化について記載する。

節点集中質量要素は、図 4-9-1に示すように、一つの節点（i）上に並進２成分と回転成分の計３成分の質量を定義し、節点にかかる慣性力を考慮する。

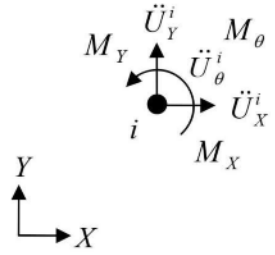


図 4-9-1　節点集中質量要素

節点集中質量要素を定義した節点i上に生じる慣性力は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} F_{MX}^i \\ F_{MY}^i \\ F_{M\theta}^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M_X & & \\ & M_Y & \\ & & M_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U}_X^i \\ \ddot{U}_Y^i \\ \ddot{U}_\theta^i \end{Bmatrix} \qquad (4\text{-}9\text{-}1)$$

ここに、M_Xは水平方向で考慮する質量、M_Yは鉛直方向で考慮する質量、M_θは回転方向で考慮する質量である。

したがって、次式に示す質量マトリクスM_{add}が離散化された運動方程式の慣性項に該当する自由度に対して付加される。

$$M_{add} = \begin{bmatrix} M_X & & \\ & M_Y & \\ & & M_\theta \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}9\text{-}2)$$

6.9　修正武田モデル

修正武田モデルは,鉄筋コンクリート部材等を対象とする非線形はり要素の構成則である。特に鉄筋コンクリート部材に用いる場合には，鉄筋の配置が非対称になる場合もあることから，曲げの方向により非対称となるM～φ関係を設定できる修正武田モデルを適用している。なお，軸力～軸ひずみ関係やせん断力～せん断角関係は線形である。

以下に修正武田モデルの挙動を示す履歴のルールを記載する。

①　骨格曲線（図 6-1 点線）は tri-linear である。

②　これまでの最大変形点における δ を δ_{max}（正側），δ_{min}（負側）とする。δ が線形領域（$-\delta_c^- < \delta_{min}$ かつ $\delta_c^+ > \delta_{max}$）から初めて δ_c^+を超えた，もしくは$-\delta_c^-$を下回った場合,反対側の δ_{max}，あるいは δ_{min} は$-\delta_c^-$，あるいは δ_c^+へ遷移する。また，δ がひび割れ領域（$-\delta_y^- < \delta_{min}$ かつ $\delta_y^+ > \delta_{max}$）から初めて δ_y^+を超えた，もしくは$-\delta_y^-$を下回った場合，反対側の δ_{min}，δ_{max} はそれぞれ$-\delta_y^-$，δ_y^+へ遷移する。なお，最大変形点は常に骨格曲線上に存在する。

③　線形領域から δ が初めて δ_c^+を超えた，もしくは$-\delta_c^-$を下回った場合，またはこれまでの最大変形点 δ_{max} を超えた，もしくは δ_{min} を下回った場合には骨格曲線上を進む。線形領域の外側において荷重 P が載荷から除荷へと移行した場合は，戻り点から復元力が 0 になるまで K_r^+，あるいは K_r^-で戻り，δ 軸上から反対側の今までの最大変形点を目指す。ここで K_r^+，K_r^-はそれぞれ次式によって定義される。

$$K_r^+ = K_e \cdot \left|\frac{\delta_{max}}{\delta_c^+}\right|^{-\beta^+} \qquad K_r^- = K_e \cdot \left|\frac{\delta_{min}}{\delta_c^-}\right|^{-\beta^-}$$

ここで，K_e：第一勾配　β^+：正側入力係数　β^-：負側入力係数
デフォルトでは $\beta^+ = \beta^- = 0.4$

④　復元力 0 の点から最大変形点に向かう直線上から戻る場合も復元力が 0 になるまでは K_r^+または K_r^-で戻り，その後反対側の今までの最大変形点を目指す。

上記のルールの図化したものを次項に示す。

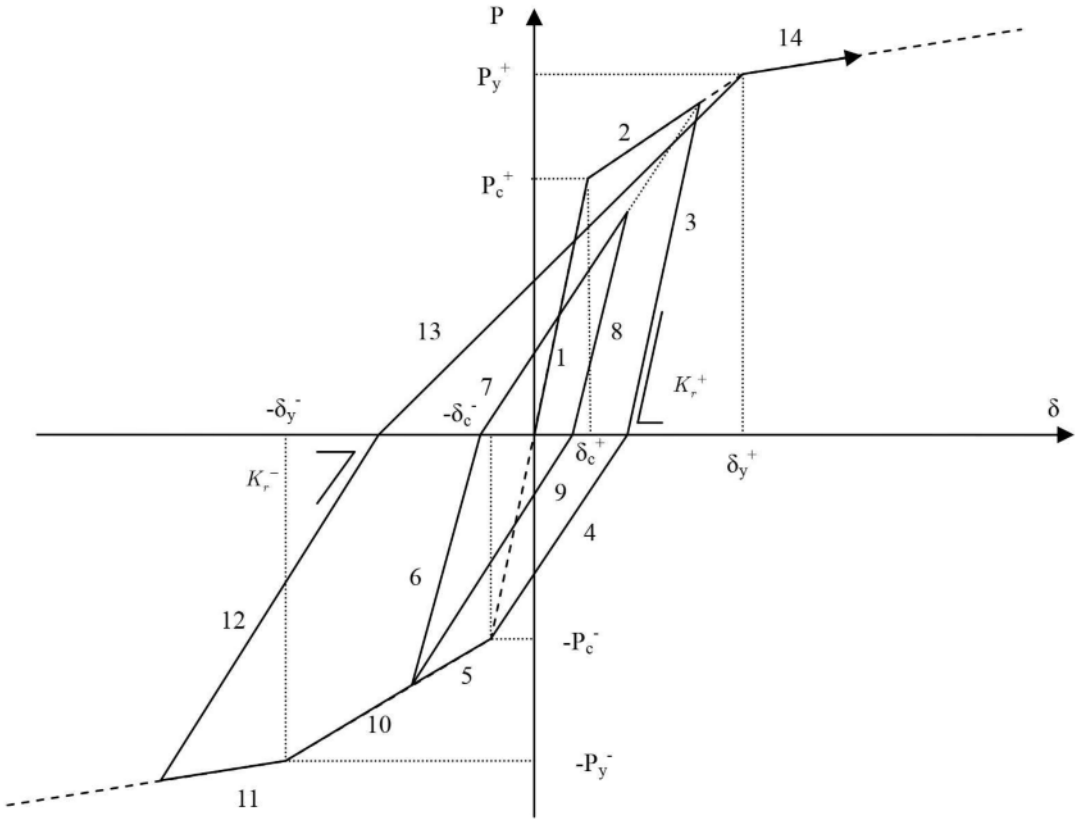


図6-1　修正武田モデル

＜6.9 修正武田モデルの参考文献＞

1) FLIP ROSE（Ver.7.3.0_2）取扱説明書
2) 武田寿一：鉄筋コンクリート建物の動的計算,コンクリートジャーナル,Vol.12,No.8,1974.8.
3) 土木学会コンクリート委員会編：2002年制定 コンクリート標準示方書[耐震性能照査編]（Ⅲ.改訂資料）,2002.12.

6.10　杭－地盤相互作用ばねモデル

杭基礎構造物－地盤系の耐震解析を２次元一体解析として行うには，既往検討[1)-6)]で評価した，杭－地盤相互作用ばねの特性を持つばね要素（以下，杭－地盤相互作用ばね要素）により，杭モデルと２次元地盤モデルを接続する。まず，奥行き方向幅が杭間隔に等しい２次元地盤モデルと奥行き方向に等間隔に配置された杭群中の杭径Dの杭1本分のモデルを用意する。地盤要素にはマルチスプリング要素を適用し，杭は線形または非線形のはり要素でモデル化する。杭節点と対応する２次元地盤モデルの地盤節点の水平方向並進自由度を，図6-4に示すように，杭－地盤相互作用ばね要素により接続する。

このような２次元一体解析のモデルにおいて，杭－地盤相互作用ばね要素は以下に示すように動作する。

① 杭の循環境界に対する相対変位 u を算定する。なお，循環境界変位として，一体解析モデルを構成する地盤モデルの対応する節点変位を参照する。

② 相対変位 u から，次式を用いて，対応するせん断ひずみγを評価する。

$\gamma = u / (D \times \beta_p)$

なお，β_pは，土質，不飽和・飽和などの土の状態，杭間隔，荷重レベル（荷重片振幅／破綻荷重＝せん断応力片振幅／初期せん断強度）及び液状化フロントパラメータS_0に応じて，図6-3から定める。

③ 杭近傍の土要素を参照して，その変形特性を決めるパラメータと土の状態（主に，有効拘束圧と液状化フロントパラメータ S_0）に基づいて，砂の構成則と同様のせん断応力－せん断ひずみ関係を設定し，せん断ひずみγを与えてせん断応力τを算定する。

④ せん断応力 τ から，次式を用いて，ばね力 F を評価する。

$F = (L \times D \times \alpha_p) \times \tau$

なお，α_pは応力－荷重変換係数で，杭間隔と単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度τ_{m0}）の分布（図6-3）より定まる11.5～12.6の範囲の値である。

上記②において，液状化を考慮する場合に，ひずみ－変位変換係数β_pの値を決めるには，近傍土要素の液状化フロントパラメータS_0の値を参照する必要がある。あるS_0の値に対しては，β_pは概ね一定値を取るので，定数とするか，過去に経験した最大の荷重レベルを適用することが考えられる。図6-5は，杭間隔5Dの場合の飽和砂（N_{65}=10，σ_{m0}'=98kPa，S_0=1.0，0.5，0.05，0.005）を対象とした水平断面モデルによる繰り返し載荷解析で得られた荷重片振幅－最大相対変位関係と過剰間隙水圧モデルに基づいて設定したせん断応力τ－せん断ひずみγ関係から設定した荷重－変位関係を比較したものである。過剰間隙水圧モデルに基づき設定した関係では，荷重＝12.6×τ，変位＝1.5×γ（S_0=1.0，0.5），または，変位＝1.63×γ（S_0=0.05，0.005）とした。ひずみ－変位変換係数β_pは荷重レベルに依存して変化する量だが，このように，荷重レベルによらない定数と置いても，全体系の解析結果をよく説明するので，このような取扱いでもよい。

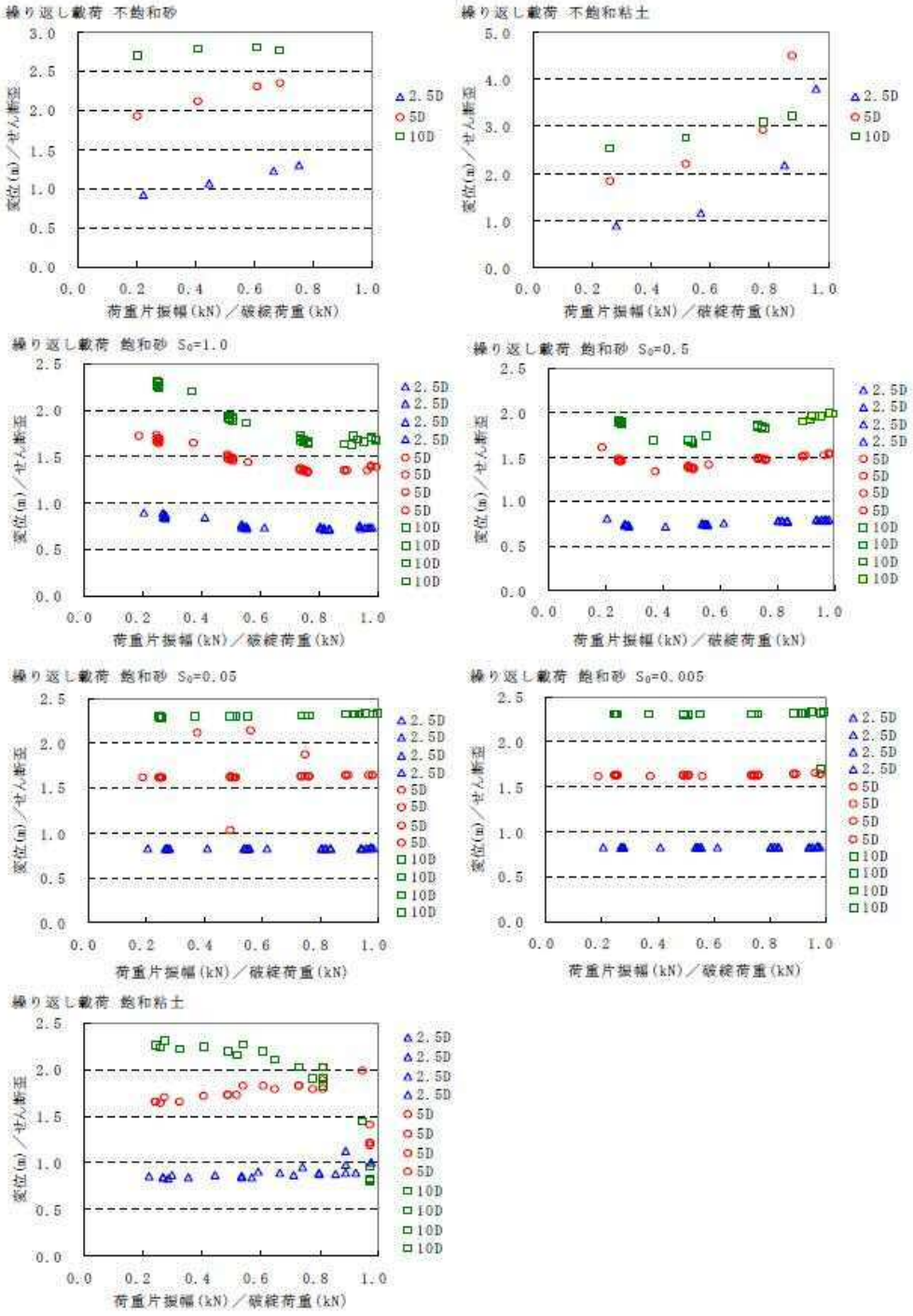


図 6-2　循環境界基準の相対変位振幅と要素シミュレーションのせん断ひずみ振幅の比を求めるためのチャート

※ 破綻荷重で正規化した荷重片振幅と杭間隔の関数として表示。
なお，破綻荷重＝12.6（2.5Dの場合は11.5）×τ_{m0}

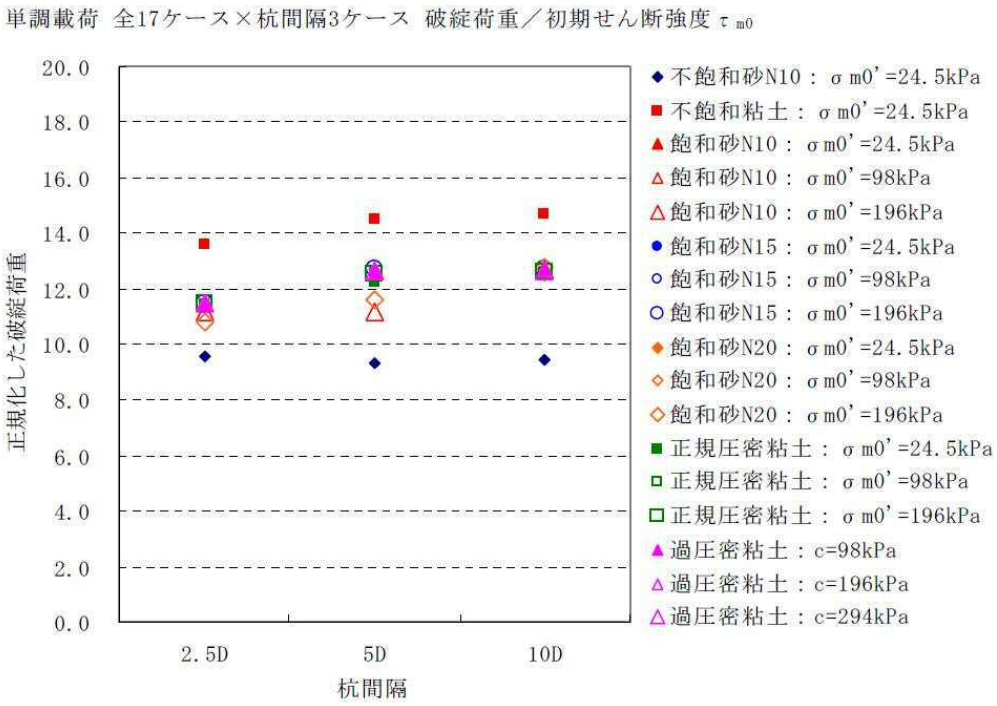


図 6-3　単調載荷時の（破綻荷重／初期せん断強度 τ_{m0}）の分布

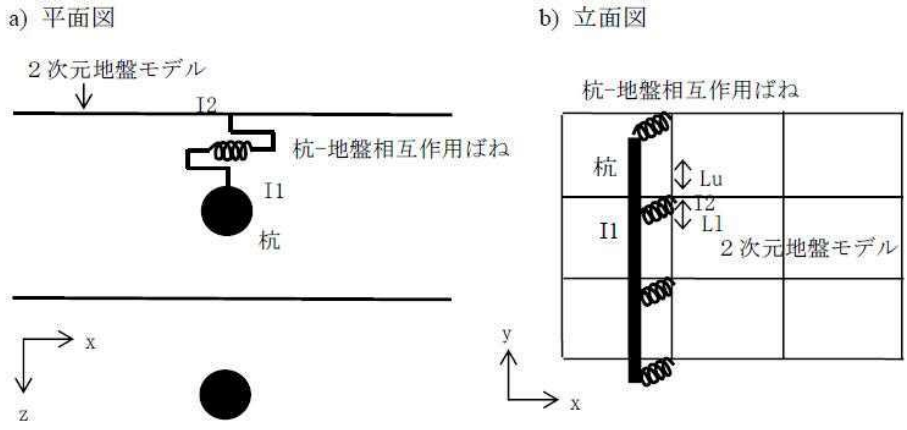


図 6-4　杭－地盤相互作用ばねによる２次元一体解析の杭モデルと地盤モデルの連結方法
（模式図）

※I1は杭－地盤相互作用ばね要素の杭側節点，I2は地盤側節点，Luはばねの上側配長（隣接する上側のばねまでの半分の長さ），L1はばねの下側支配長を表す。

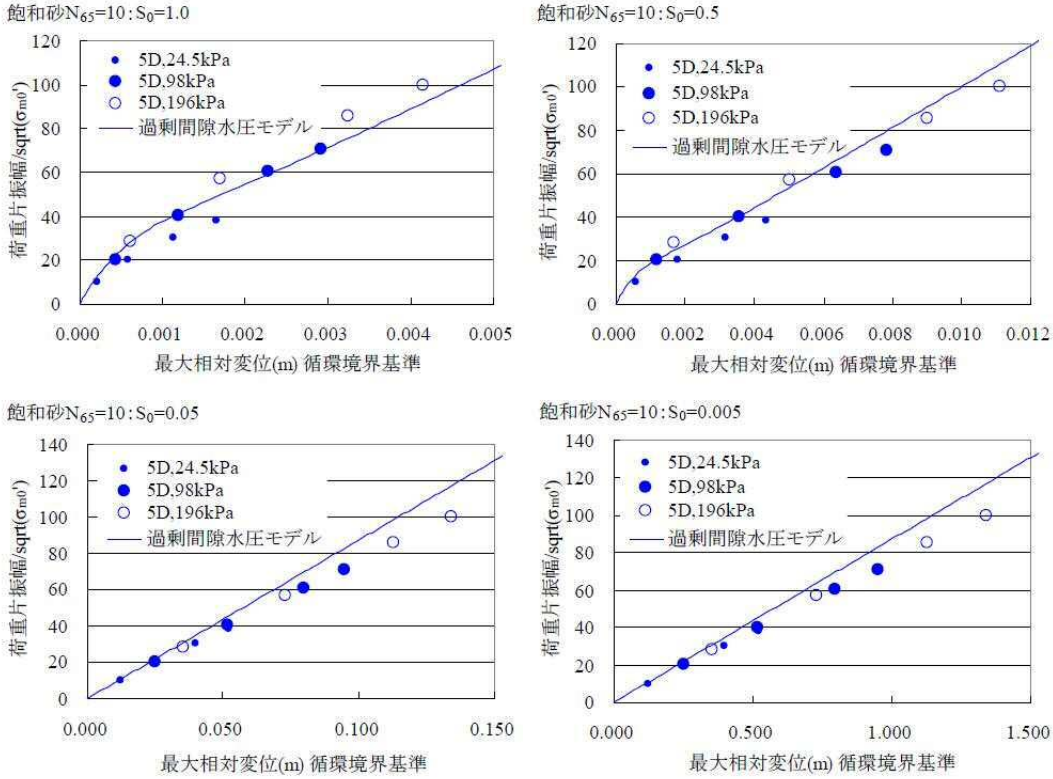


図 6-5　飽和砂（5D，N_{65}=10，$\sigma_{m0'}$=98kPa，S_0=1.0，0.5，0.05，0.005）：
荷重片振幅－最大相対変位の関係と過剰間隙水圧モデル他に基づいて求めた関係の比較

※1 過剰間隙水圧モデルによる曲線は，τとS_0からせん断強度τ_fと初期せん断剛性G0を求めて，双曲線関係に基づくせん断応力τ－せん断ひずみγ関係を設定し，それを荷重－変位関係に置き換えたもの。

置き換えは，荷重=12.6×τ，変位=1.5（または1.63）×γとした。

※2 全体系で解いた解が，大きな荷重では，過剰間隙水圧モデルによる曲線の下側に来るのは，荷重ステップ間隔の増大による精度低下によるものと思われる。また，変位－ひずみ変換係数は，荷重片振幅に依存する量だが，このように定数と置いても，全体系の解析結果をよく説明する。

＜6.10 杭-地盤相互作用ばねの参考文献＞

1) 三輪滋，小堤治，溜幸生，岡由剛，一井康二，井合進，田河祥一：２次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭－地盤系の相互作用の検討，第38 回地盤工学研究発表会，2003.

2) 森田年一，井合進，Hanlong Liu，一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラムFLIP において必要な各種パラメタ簡易設定法，港湾技研資料，No.869，1997.

3) Towhata,I. and Ishihara,K.：Modelling Soil Behavior under Principal Stress Axes Rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp. 523-530, 1985.

4) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.：Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.

5) 小堤治，溜幸生，岡由剛，一井康二，井合進，梅木康之： 2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化，第38 回地盤工学研究発表会，2003.

6) 小堤治，溜幸生，岡由剛，井合進，梅木康之： 2 次元有効応力解析における杭と液状化地盤の動的相互作用のモデル化，第58 回土木学会年次学術講演会，2003.

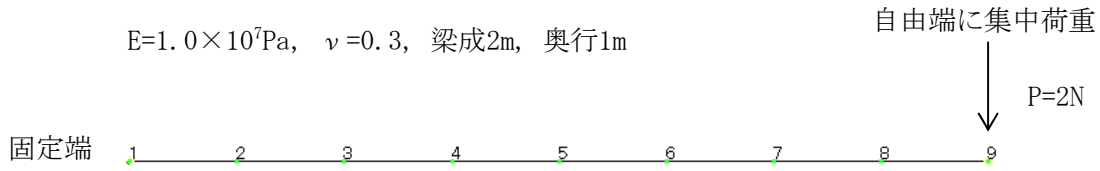
7. 線形はり要素の検証

7.1 概要

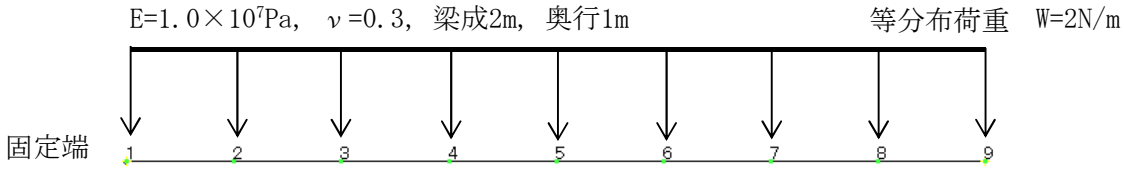
6章で説明した基本的な要素を代表して構造物や杭等のモデル化で使用している線形はり要素について，簡易なモデルを用いて検証を実施し応答結果が妥当であることを確認した。

7.2 例題

下図に示す梁長8mを8分割した単純梁のモデルを作成し，理論解と比較することで応答結果が妥当であることを確認した。荷重としては自由端への集中荷重P=2N及び梁全体への等分布荷重W=2N/mを設定し，たわみ分布及び曲げモーメント分布を理論解と比較した。



(a)集中荷重



(b) 等分布荷重

図 7-1 例題で設定したモデル及びパラメータ

また，片持梁のたわみδと曲げモーメントMの理論解は梁長をL，ヤング率をE，断面2次モーメントをIとし，固定端からの距離をxとして次式から与えられる。

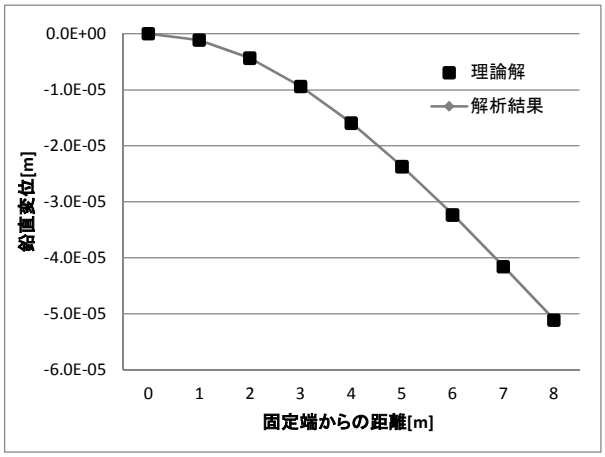
集中荷重P載荷時の理論解: $\delta(x) = -\frac{P}{EI}\left(\frac{x^3}{6} - L\frac{x^2}{2}\right)$ $M(x) = -P(L-x)$

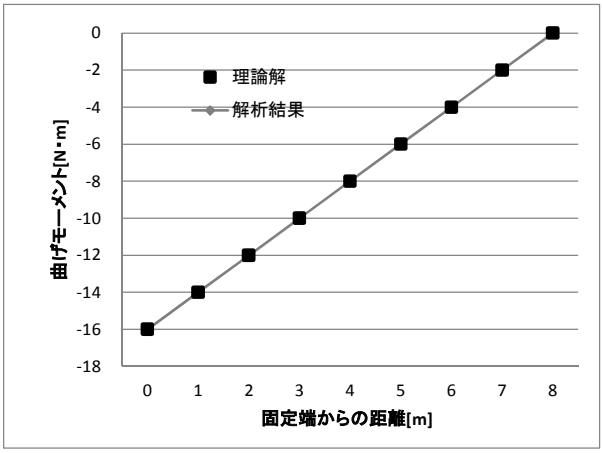
等分布荷重W載荷時の理論解 : $\delta(x) = -\frac{W}{2EI}\left(\frac{x^4}{12} - L\frac{x^3}{3} + L^2\frac{x^2}{2}\right)$ $M(x) = -W\frac{(L-x)^2}{2}$

7.3　検証結果

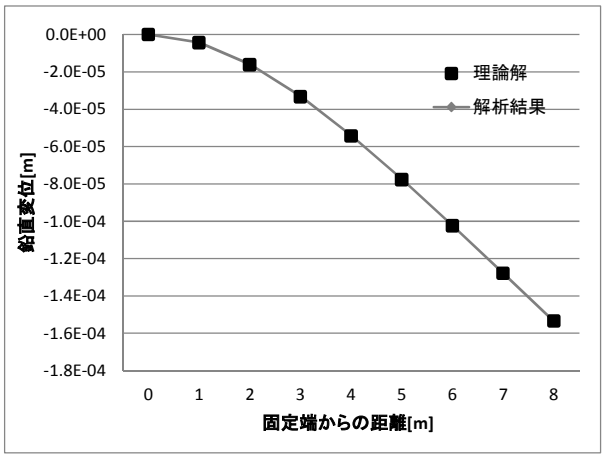
以下に集中荷重及び分布荷重を与えた場合の理論解とたわみ分布及び曲げモーメントの分布の解析結果との比較結果を示す。

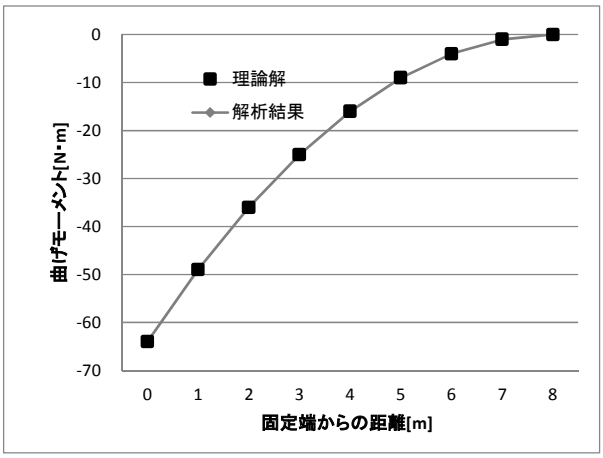
下図に示す通り，理論解と概ね一致を示しており応答結果が妥当であることを確認した。





(a) 集中荷重





(b) 等分布荷重

図7-2　理論解と解析結果の比較

8.　修正武田モデルの検証

8.1　概要

修正武田モデルについては，簡易なモデルにてテスト例題解析を実施し，理論値と比較した検証記録がFLIP Ver.7.3.0_2のマニュアルに記載されている。テスト例題及びそのテスト例題結果を検証記録とする。

8.2　例題

以下に例題を記載する。

(5) テスト例題

図 11.1-2のような2節点1要素からなる非線形はり要素に対して、節点①の全自由度を拘束し、節点②に節点集中力 F_x を作用させ、要素中央の M-φ 関係を計算した。使用したパラメータを表 11.1-1に示す。ただし、表 11.1-1右側の非対称モデルパラメータ(iasym = 1)はテスト例題 6 のみに使用し、そのほかのテスト例題はすべて対称モデル(iasym = 0)とする。以下にテスト例題の結果について示す。

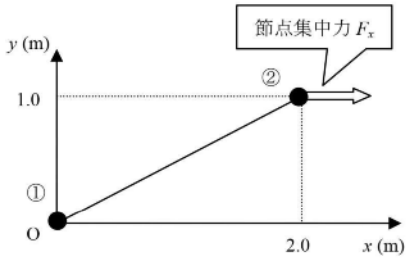


図 11.1-2 テスト例題

表 11.1-1　テスト例題に使用したパラメータ

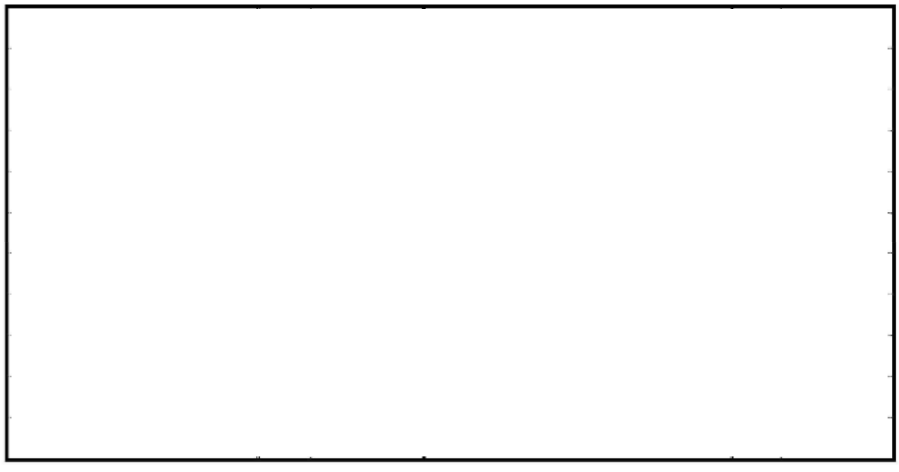


図8-1　例題で設定したモデル及びパラメータ

※FLIP ROSE（Ver.7.3.0_2）取扱説明書より

8.3　例題結果（検証結果）

以下に8つのテスト例題結果を示す。

※以下FLIP ROSE（Ver.7.3.0_2）取扱説明書より

a)　**テスト例題 1(対称:トリリニア試験)**

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力を 30kN まで段階的に作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-3に結果を示す。

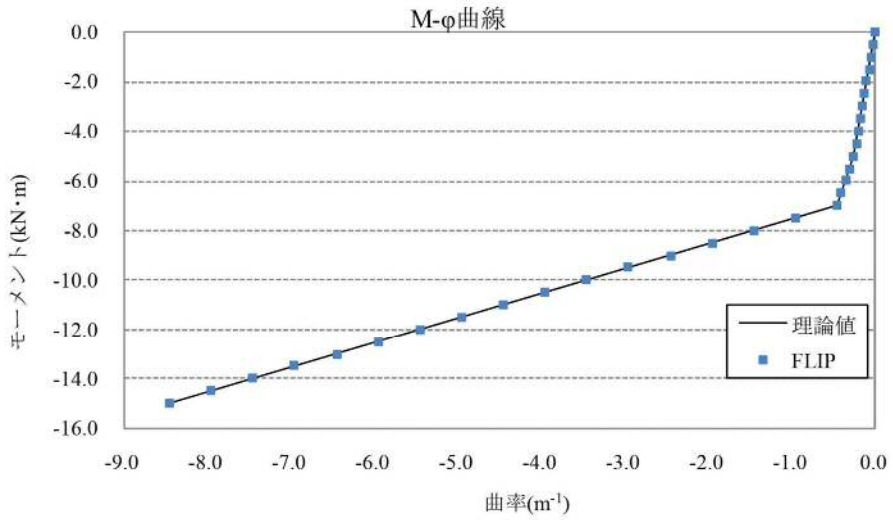


図 11.1-3　テスト例題 1(対称:トリリニア試験)の結果　M-ϕ関係

b)　**テスト例題 2(対称:線形領域)**

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力 $F_x = 9.0\sin(\pi t/10)$を $t = 0$~70(s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-4に結果を示す。

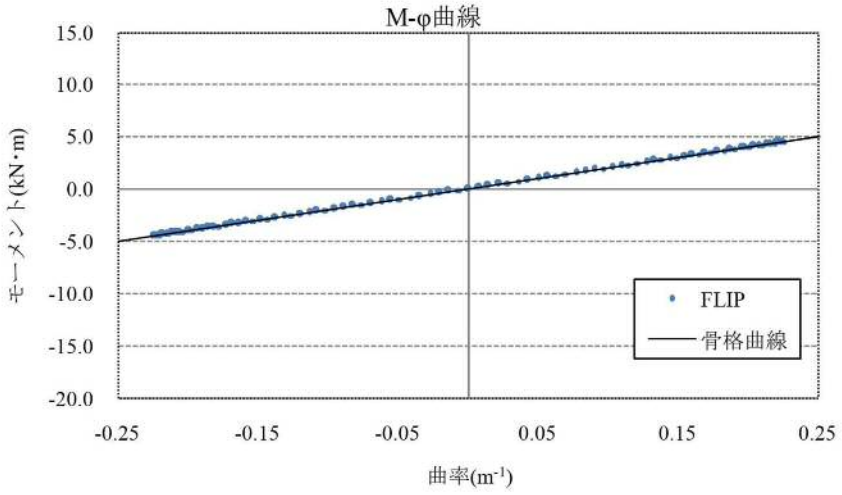


図 11.1-4　テスト例題 2(対称:線形領域)の結果　M-ϕ関係

図8-2　テスト例題1及び2

c)　テスト例題 3(対称:第一折れ点を超える)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力 F_x = 12.0sin(πt/30)を t = 0~50(s)まで作用させ、M-φ関係を解析した。図 11.1-5に結果を示す。

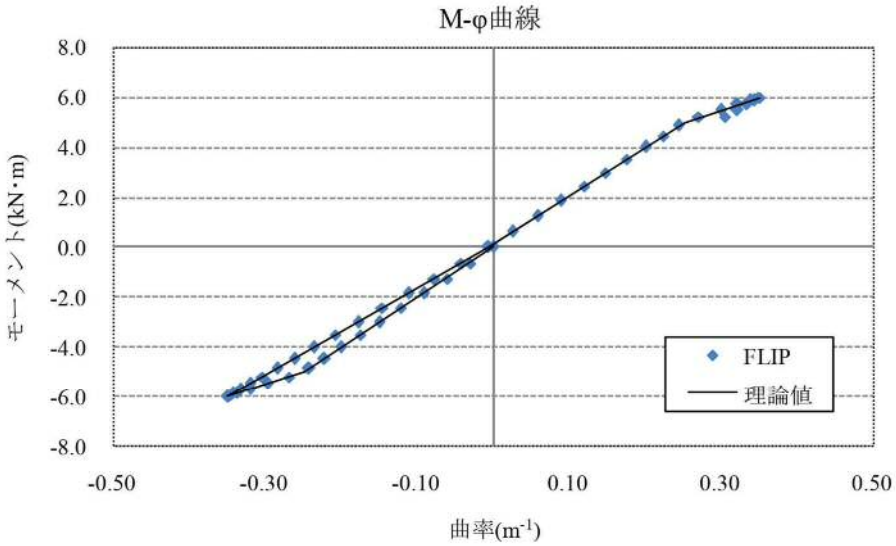


図 11.1-5　テスト例題 3(対称:第一折れ点を超える)の結果　M-ϕ関係

d)　テスト例題 4(対称:第二折れ点を超える)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力 F_x = 30.0sin(πt/20)を t = 0~70(s)まで作用させ、M-φ関係を解析した。図 11.1-6に結果を示す。

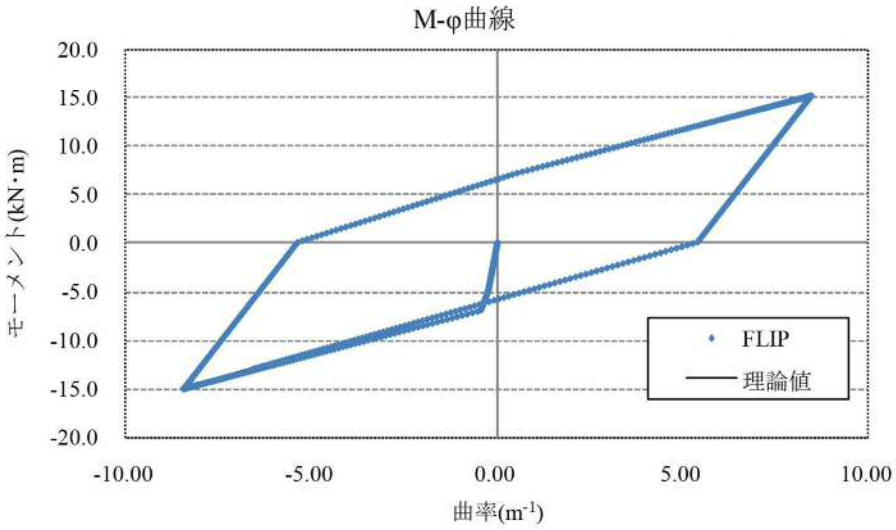


図 11.1-6　テスト例題 4(対称:第二折れ点を超える)の結果　M-ϕ関係

図8-3　テスト例題3及び4

e)　テスト例題 5(対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力 $F_x = 0.1\,t + 25.0\,\sin(\pi t/10)$ を $t = 0$~70(s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-7に結果を示す。

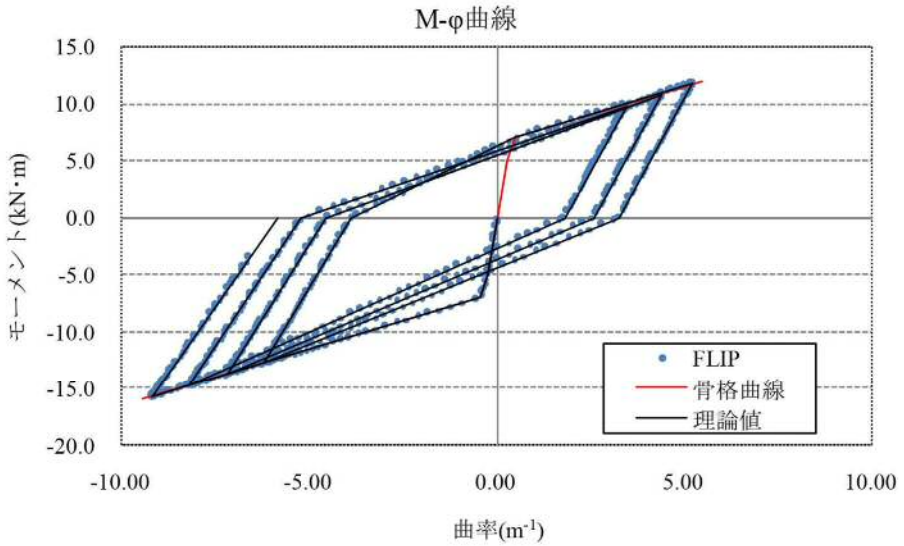


図 11.1-7　テスト例題 5(対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)の結果　M-φ関係

f)　テスト例題 6(非対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力 $F_x = 0.05\,t + 25.0\,\sin(\pi t/10)$ を $t = 0$~70(s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-8に結果を示す。

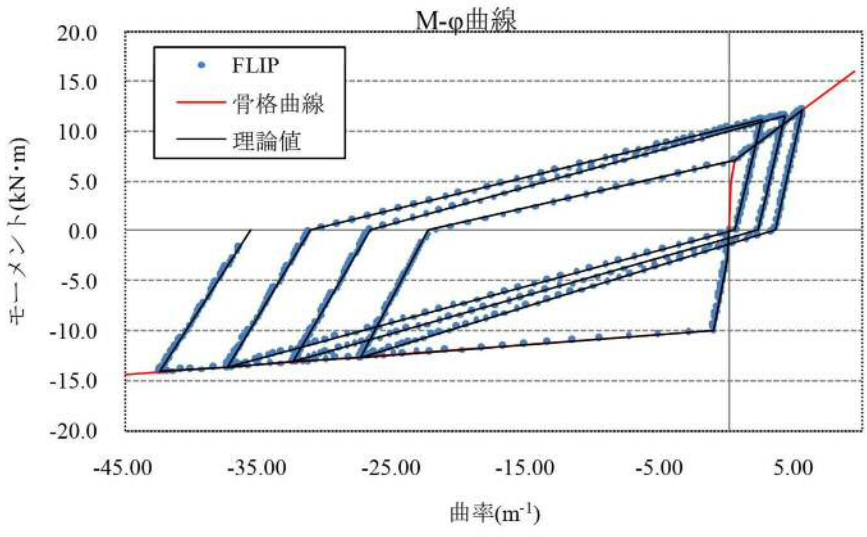


図 11.1-8　テスト例題 6(非対称:第二折れ点を超え、最大変形点を更新)の結果　M-φ関係

図8-4　テスト例題5及び6

g)　テスト例題 7(対称：第一折れ点を超え、除荷中に反転)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力$F_x = 0.1\,t + 12.0\,\sin(\pi t/30)$を$t = 0$~60(s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-9に結果を示す。ただし、図をわかりやすくするため、第二勾配を 0.1、第三勾配を 0.01 とした。

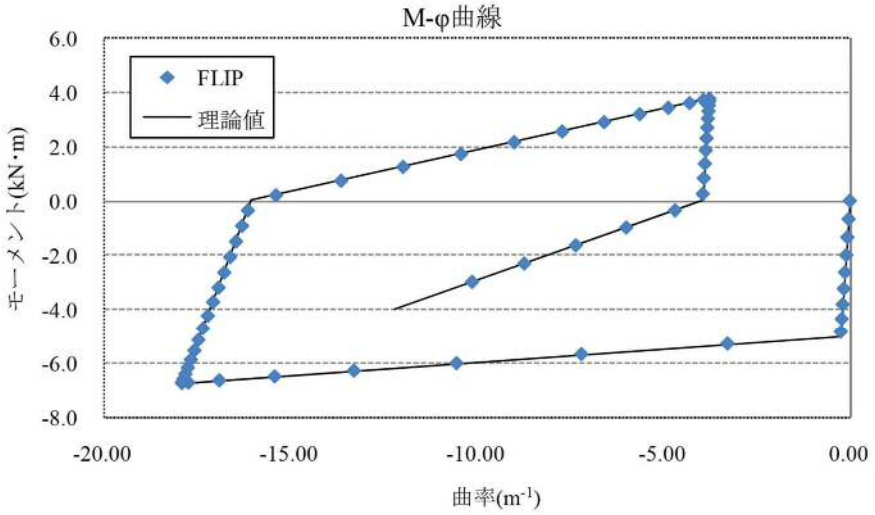


図 11.1-9　テスト例題 7(対称：第一折れ点を超え、除荷中に反転)の結果　M-φ関係

h)　テスト例題 8(対称：第二折れ点を超え、除荷中に反転)

図 11.1-2のはり要素に対して、節点集中力$F_x = 0.1\,t + 13.0\,\sin(\pi t/30)$を$t = 0$~60(s)まで作用させ、M-φ 関係を解析した。図 11.1-10に結果を示す。ただし、図をわかりやすくするため、第二勾配を 0.1、第三勾配を 0.01 とした。

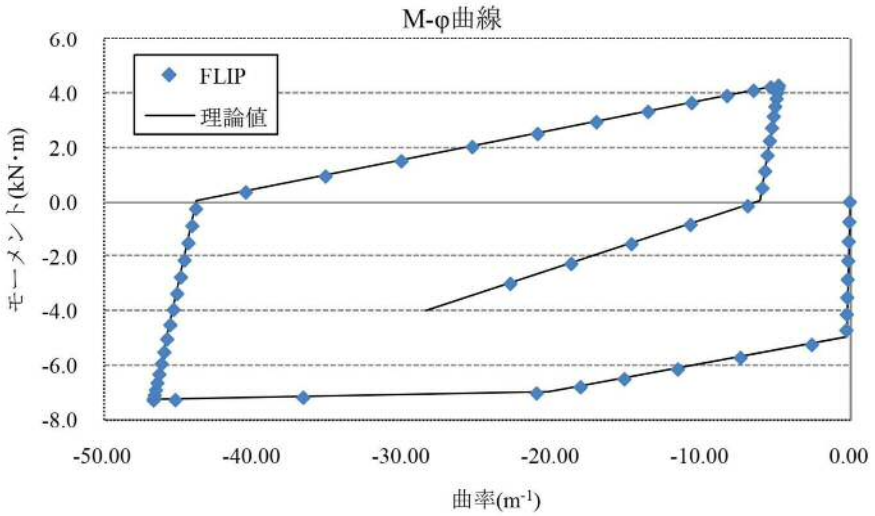


図 11.1-10　テスト例題 8(対称：第二折れ点を超え、除荷中に反転)の結果　M-φ関係

図8-5　テスト例題7及び8

8.4　軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響（取水構造物の耐震安全評価に関する参考資料）

取水構造物の地震応答解析では，鉄筋コンクリート部材及び鋼管杭を非線形はり要素にてモデル化している。この非線形特性として，鉄筋コンクリート部材における非線形特性（M-φ関係）にトリリニアモデル（修正武田モデル）を，鋼管杭における非線形特性（M-φ関係）にバイリニアモデルを適用しているが，有効応力解析コード「FLIP　Ver.　7.3.0_2」における当該非線形特性では，地震時における部材の軸力は一定とされる。

よって，本項では，基準地震動Ｓ$_s$を入力とした地震応答解析による各部材の軸力及び曲げモーメントの変動範囲を踏まえた上で，それが部材の非線形特性に与える影響を検討し，取水構造物の耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP　Ver.　7.3.0_2」の当該非線形特性を用いることの妥当性を検討する。

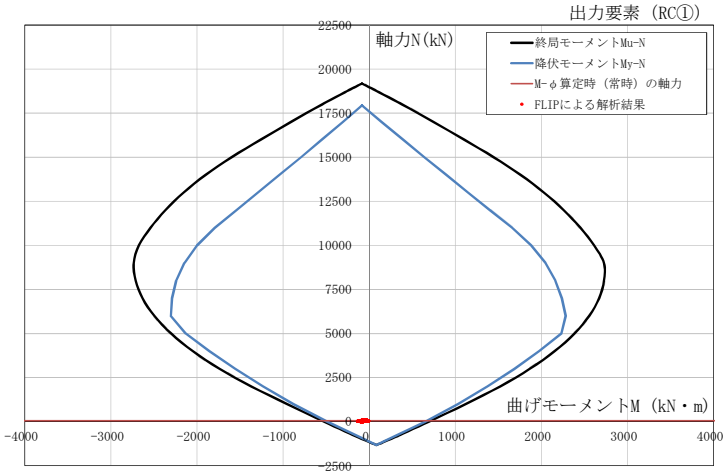
部材の軸力変動範囲を確認するための解析ケースを以下に示す。

・入力地震動：Ｓ$_s$－Ｄ１（Ｈ＋，Ｖ＋）
・検討ケース：①原地盤に基づく液状化強度特性を用いた解析ケース（基本ケース）
・解析断面：④－④断面（取水ピット区間）
・確認対象部材：図8-6に示す通り。

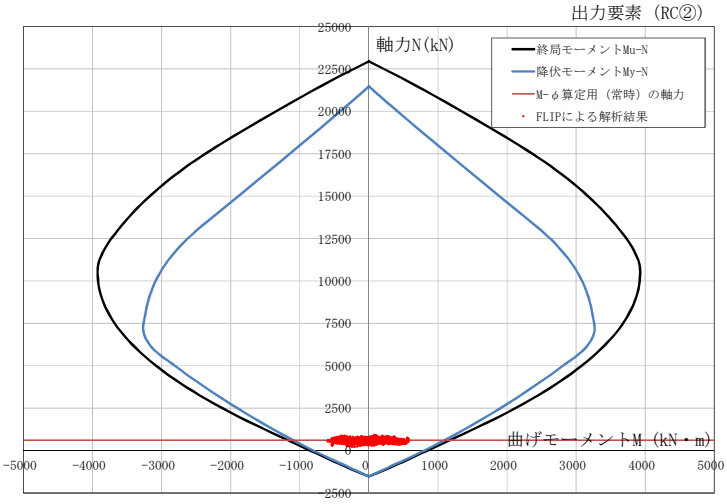
図8-6　軸力及び曲げモーメントの変動範囲の確認対象部材

図8-7にて，鉄筋コンクリート部材における軸力及び曲げモーメントの変動範囲と，当該部材のM_u（終局モーメント）－N（軸力）関係及びM_y（降伏モーメント）－N（軸力）関係を比較した。また，同図には，FLIPにて非線形特性として用いられているM_u及びM_yの設定根拠である常時応力解析による当該部材の軸力をプロットしている。

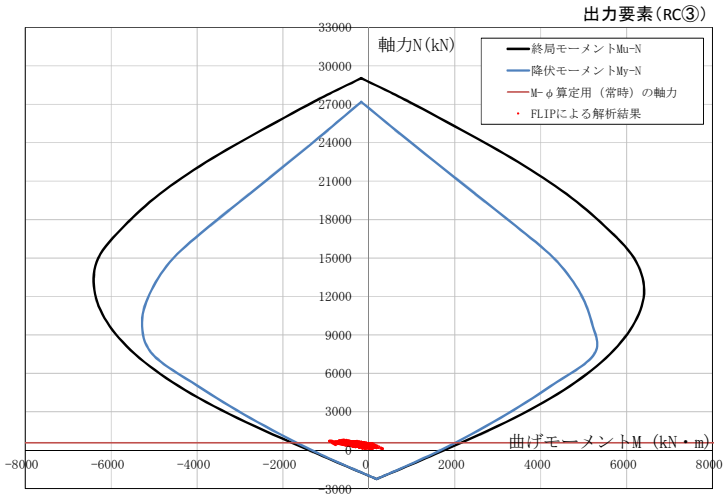
基準地震動Ｓ$_s$による応答結果によると，地震時の鉄筋コンクリート部材における軸力の変動範囲は限定的であり，概ね常時応力解析における軸力と同等の範囲に収まっている。また，部材に発生する曲げモーメントはM_y（降伏モーメント）以下であり，概ね弾性範囲内に収まっている。以上より，鉄筋コンクリート部材において，軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響は軽微であり，耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP　Ver.7.3.0_2」の当該非線形特性を用いることは妥当である。



（RC①）



（RC②）



（RC③）

図8-7　基準地震動Ｓ$_s$による取水構造物の部材の応答範囲

また，同様の地震応答解析結果を参照し，鋼管杭における軸力変動範囲を把握した上で，その変動が非線形特性（バイリニアモデル）におけるM_p（全塑性モーメント）にどの程度影響するかを検討した。

基準地震動Ｓ$_s$による地震応答解析により，図8-6に示す鋼管杭要素にて得られた最大発生軸力N_{max}及び最小発生軸力N_{min}を用いて，M_p（全塑性モーメント）を算定し，バイリニアモデルを設定した。各軸力におけるバイリ二アモデルの比較を図8-8に示す。

いずれの軸力においても，M_p（全塑性モーメント）に有意な差は無いことから，鋼管杭において，軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響は軽微であり，耐震評価において軸力が一定とされる有効応力解析コード「FLIP　Ver.7.3.0_2」の当該非線形特性を用いることは妥当である。

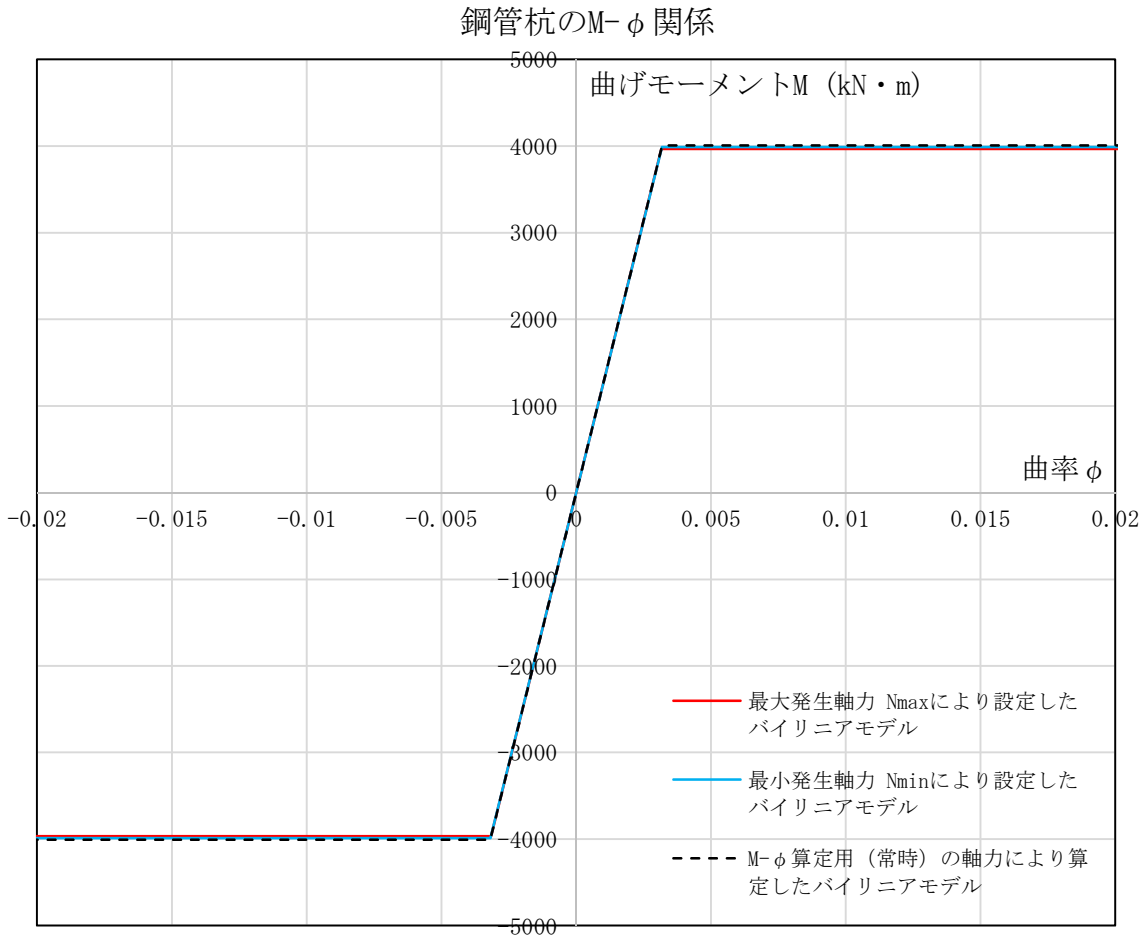


図8-8　鋼管杭の発生軸力により設定したバイリニアモデル

9. 杭-地盤相互作用ばねモデルの検証

9.1 概要

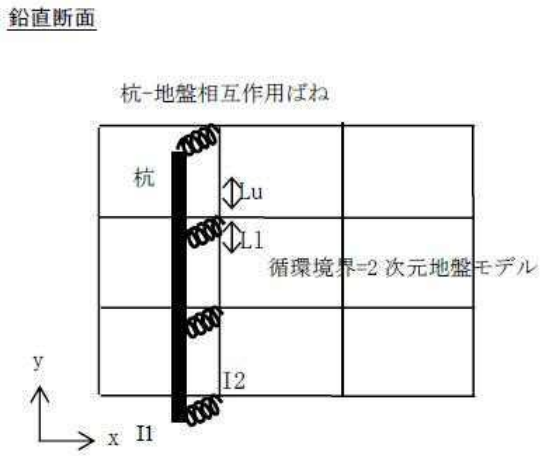
東海第二発電所の有効応力解析にはFLIP Ver.7.3.0_2を用いる。他プラントの既工事計画で使用されたバージョン（Ver.7.2.3_4）との主な変更点は，杭－地盤相互作用ばね要素の導入である。そこで，FLIP Ver.7.3.0_2とVer.7.2.3_4を用いて，杭－地盤相互作用ばね要素の検証及び妥当性確認を行った。

9.2 杭と周辺地盤との相互作用

杭と周辺地盤との相互作用として，Ver.7.3.0_2では杭－地盤相互作用ばね要素を用いる。また，Ver.7.2.3_4ではジョイント要素を用いるものとする。両者の設定方法を以下に述べる。

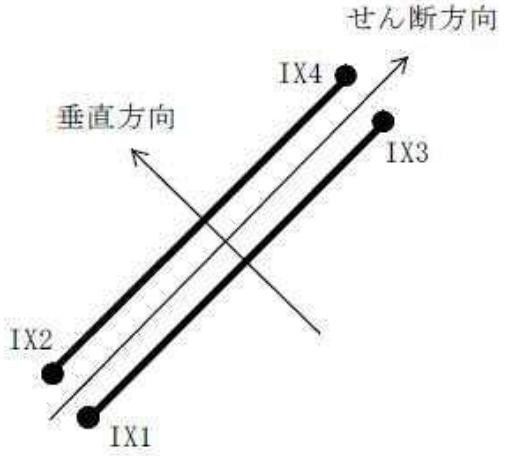
a) 杭－地盤相互作用ばね要素の支配長

杭－地盤相互作用ばね要素は，その上側支配長Luと下側支配長L1を自動的に決定する。I1節点（杭側節点）に接続するはり要素を上方に辿り，次の杭－地盤相互作用ばね要素が接続する節点までの距離の半分を上側支配長Luとする。そのような節点が無い場合はLu=0とする。同様に，下側支配長L1も算定する。



b) ジョイント要素の配置

ジョイント要素は，土（マルチスプリング要素等またはマルチスプリング要素等＋間隙水要素）と矢板（線形はり要素）やケーソン（線形平面要素）等の構造物の接触面上（節点間）に置いて，その間の滑り・剥離を表現するのに用いる。



9.3　解析結果

比較対象：鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤

Ver.7.3.0_2の杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素とVer.7.2.3_4の杭軸方向のジョイント要素は，名称は異なるものの実質の構成式としては同じである。また，杭軸直角方向についてはVer.7.3.0_2とVer.7.2.3_4で杭軸直交方向の杭－地盤相互作用ばねは名称も構成式も同じである。

Ver.7.3.0_2とVer.7.2.3_4により加速度の解析結果の比較を行い，解析結果が同等であることを確認した。Ver.7.3.0_2では杭－地盤相互作用ばね要素，Ver.7.2.3_4ではVer.7.3.0_2の杭－地盤相互作用ばね要素に相当するVer.7.2.3_4の杭軸方向のジョイント要素を用いた。

Ver.7.3.0_2での杭軸方向の杭－地盤相互作用ばねのばね定数は，数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きな値として，表9-1のとおり設定した。また，図9-1に杭－地盤相互作用ばねの力学的特性を示す。Ver.7.2.3_4で設定したVer.7.3.0_2の杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素に相当するVer.7.2.3_4の杭軸方向のジョイント要素の力学的特性も表9-1のとおり設定した。

図9-2に加速度の出力節点の位置図を示す。水平方向加速度の比較を図9-3に，鉛直方向加速度の比較結果を図9-4に示す。

杭軸方向については，Ver.7.3.0_2では杭軸方向の杭－地盤相互作用ばね要素，Ver.7.2.3_4では杭軸方向のジョイント要素を用い，杭軸直交方向については，Ver.7.3.0_2及びVer.7.2.3_4において同じ杭－地盤相互作用ばねを使用して加速度の解析結果を比較した。その結果，図9-3及び図9-4に示す通り解析結果が一致している。ゆえにVer.7.3.0_2及びVer.7.2.3_4において，杭軸方向及び杭軸直交方向の杭と地盤の相互作用に関する解析は同等の解析結果を与えるものであり，杭と地盤の相互作用の処理について両バージョンによる実質的な差異はない。

表9-1　杭－地盤相互作用ばねのばね定数

	せん断剛性k_s (kN/m^3)
杭軸方向	1.0×10^6

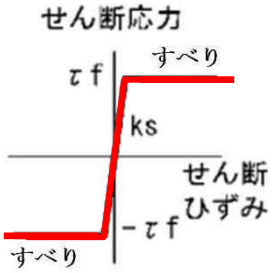


図9-1　杭－地盤相互作用ばね（杭軸方向）の力学的特性

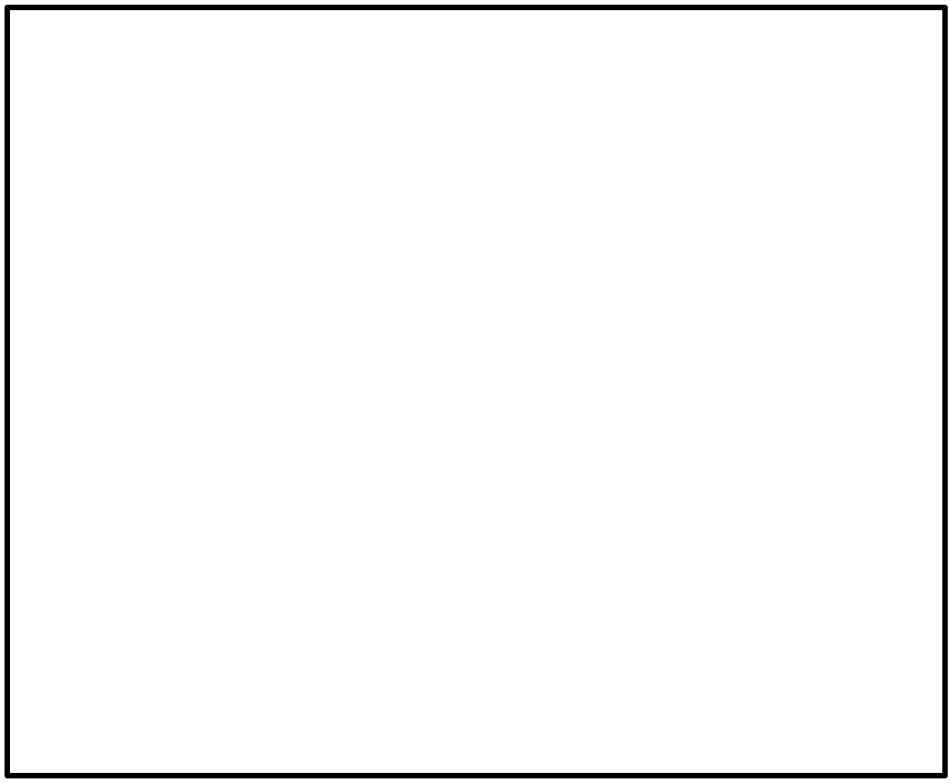
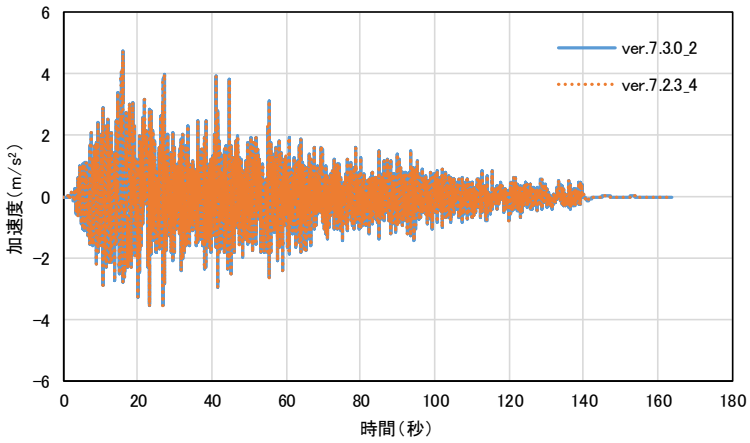


図 9-2　出力節点の位置図

杭天端（T.P.+19.5 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	15.886	4.7395
ver.7.2.3_4	15.886	4.7395

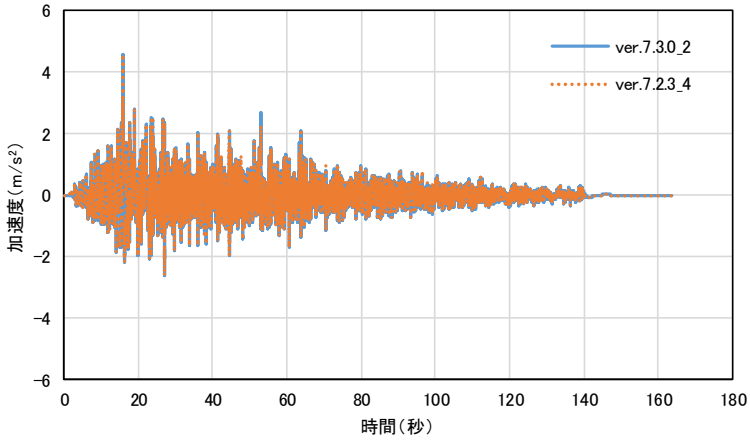
	time	min
ver.7.3.0_2	23.344	−3.5541
ver.7.2.3_4	23.344	−3.5541



地表面（T.P.+4.0 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	15.842	4.5983
ver.7.2.3_4	15.842	4.5983

	time	min
ver.7.3.0_2	26.996	−2.5954
ver.7.2.3_4	26.996	−2.5855



杭先端（T.P.−36.0 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	44.568	4.8849
ver.7.2.3_4	44.568	4.8919

	time	min
ver.7.3.0_2	26.608	−6.0777
ver.7.2.3_4	26.608	−6.0778

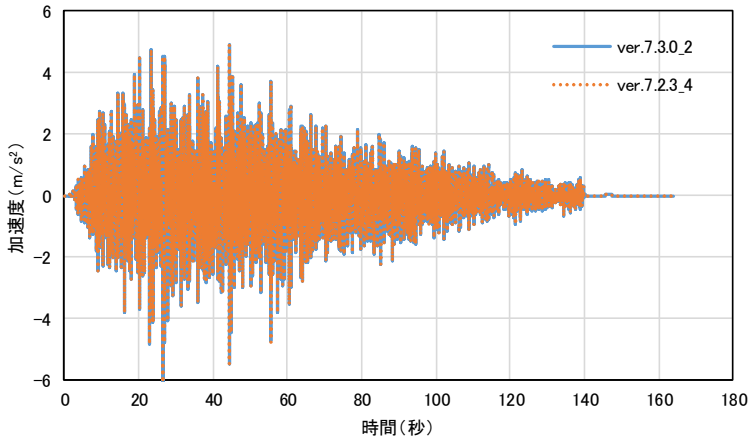
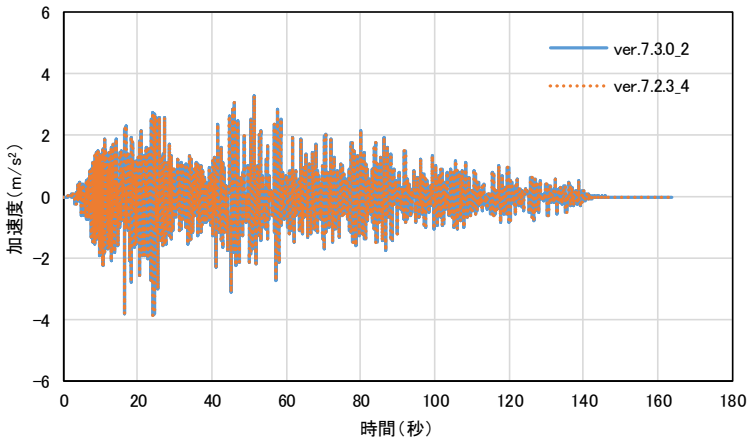


図 9-3　水平方向加速度（m/s^2）

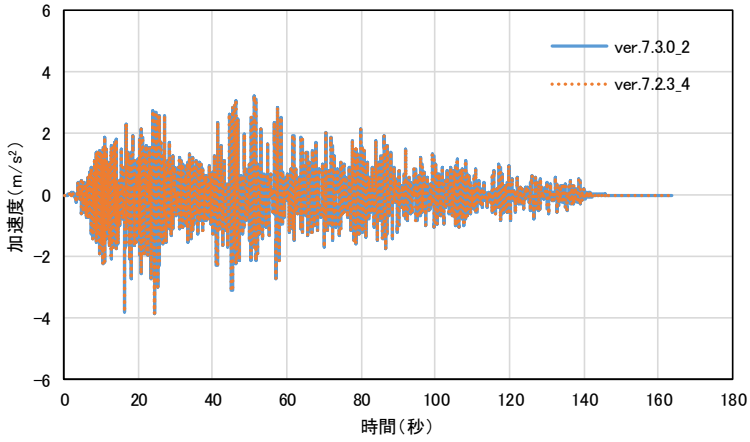
杭天端（T.P.+19.5 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	51.428	3.2547
ver.7.2.3_4	51.428	3.2547
	time	min
ver.7.3.0_2	24.288	−3.8742
ver.7.2.3_4	24.288	−3.8742



地表面（T.P.+4.0 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	51.428	3.2481
ver.7.2.3_4	51.428	3.2481
	time	min
ver.7.3.0_2	24.288	−3.8661
ver.7.2.3_4	24.288	−3.8661



杭先端（T.P.−36.0 m）

	time	max
ver.7.3.0_2	51.442	3.2275
ver.7.2.3_4	51.442	3.2275
	time	min
ver.7.3.0_2	24.288	−3.8163
ver.7.2.3_4	24.288	−3.8163

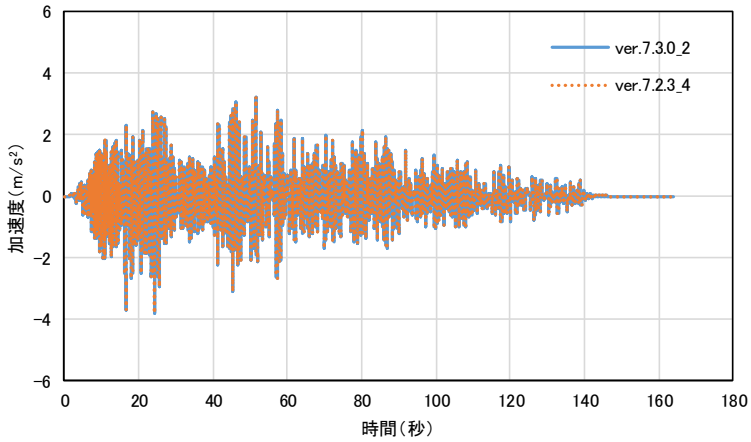


図 9-4　鉛直方向加速度（m/s^2）

Ⅴ-5-11　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＮＩＳＮ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ANISNについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	ANISN-JR
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	ANISN-JR
Ⅴ-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	ANISN-JR
Ⅴ-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	ANISN-JR

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	ANISN
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	米国オークリッジ国立研究所（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	1977年（初版開発時期1967年）
使用したバージョン	ANISN-JR
コードの概要	ANISN（以下「本解析コード」という。）は，米国オークリッジ国立研究所で開発された，1次元多群輸送方程式を離散座標Sn法で解く計算プログラムである。本解析コードの計算形状は，1次元形状（球，無限平板，無限円筒）であり，中性子及びガンマ線の輸送問題等を解くことができる。本解析コードでは，計算形状内での中性子及びガンマ線の線束が計算され，線量率換算係数又はカーマ係数を乗じることにより，線量率又は発熱量を算出することができる。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本解析コードは，線量率評価を実施するコードであり，計算に必要な主な条件は線源条件，幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり，使用目的に記載する評価に適用可能である。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・スカイシャインガンマ線について，固体廃棄物貯蔵庫を線源とした線量評価が，ANISNコードとG33コードの結合計算法によって実施されている。 ・この固体廃棄物貯蔵庫での測定値と計算値の比較の詳細が，原子力施設散乱放射線挙動専門委員会の成果報告会（昭和54年9月，財団法人　原子力安全研究協会）*に示されている。 ・測定値と計算値を比較した結果，概ね一致していることを確認している。

	・今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は,上記妥当性確認内容と合致している。 ・また，原子力発電所放射線遮へい設計規程（ＪＥＡＣ４６１５－2008）（日本電気協会　原子力規格委員会　平成20年6月）では，事故時の中央制御室遮蔽のための輸送計算コードとして，ANISNコードが挙げられている。

注記　＊：「ガンマ線スカイサンシャインの線量評価に関する研究」成果報告会・予稿集（昭和54年9月　財団法人　原子力安全研究協会）

Ⅴ-5-12　計算機プログラム（解析コード）の概要
・Ｇ３３－ＧＰ２Ｒ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）G33-GP2Rについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	1.00
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	1.00
Ⅴ-1-9-3-2	緊急時対策所の居住性に関する説明書	1.00
Ⅴ-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	1.00

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	G33-GP2R
使用目的	中央制御室及び緊急時対策所の居住性に係る被ばく評価 ベント実施に伴う作業等の作業員の被ばく評価
開発機関	日本原子力研究開発機構（（財）高度情報科学研究機構）
開発時期	2001年（初版開発時期　1964年）
使用したバージョン	1.00
コードの概要	G33-GP2R（以下「本解析コード」という。）は，Los Alamos Scientific Laboratoryで開発されたガンマ線多群散乱計算プログラム「G33」をベースとし，旧日本原子力研究所がＩＣＲＰ1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて，実効線量を計算できるように改良した最新バージョンである。 本計算機プログラムは，点等方線源からの一回散乱を計算する。散乱は，クライン－仁科の式に基づき計算する。散乱が起こる領域は直角，球，円筒座標により指定し，遮蔽体は平板，球，円筒又は二次曲面により入力することができる。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本計算機プログラムの検証の内容は，以下のとおりである。 ・計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本計算機プログラムの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 ・本計算機プログラムは，線量率評価を実施するコードであり，計算に必要な主な条件は線源条件，幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば線量率評価は可能であり，使用目的に記載する評価に適用可能である。 【妥当性確認（Validation）】 本計算機プログラムの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・スカイシャインガンマ線について，米国Radiation Research Associates（RRA）が1977年に米国カンザス州立大学において^{60}Co線源を用いたベンチマーク試験を実施している。 ・このRRAでの実験値と計算値を比較の詳細が，ガンマ線遮蔽設計ハンドブック（1988年1月，社団法人　日本原子力学会）に示されている。

	・その結果は，天井遮蔽がないケースでは計算値は実験値とよい一致を示しているが，天井遮蔽があるケースでは，計算値は実験値を過小評価となっている。 ・この原因は，G33コードが天井透過中の散乱成分を考慮してないためであり，この成分を考慮するため，天井遮蔽までをANISNコードで計算することを推奨している。今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価では，この計算手法を採用している。 ・今回の重大事故等時における中央制御室のスカイシャインガンマ線線量評価は，上記妥当性確認内容と合致している。 ・また，原子力発電所放射線遮へい設計規程（ＪＥＡＣ４６１５－2008）（日本電気協会　原子力規格委員会　平成20年6月）では，事故時の中央制御室遮蔽のための点減衰核積分コード／散乱線計算コードとして，QADコード／G33コードが挙げられている。

Ⅴ-5-13　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＭＡＡＰ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MAAPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

なお，MAAPコードの詳細は，東海第二発電所原子炉設置変更許可申請書添付書類十「追補2.Ⅲ重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて」に示している。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-7-3	中央制御室の居住性に関する説明書	Ver.4
Ⅴ-1-8-1	原子炉格納施設の設計条件に関する説明書	Ver.4
Ⅴ-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver.4
Ⅴ-1-1-6	ブローアウトパネル関連設備の設計方針	Ver.4

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	MAAP
使用目的	シビアアクシデント解析 （シビアアクシデント時の格納容器圧力逃がし装置による水素排出性能解析及びソースターム解析）
開発機関	EPRI
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver.4
コードの概要	MAAP（Modular Accident Analysis Program）コードは，米国産業界が実施したIDCOR（Industry Degraded Core Rulemaking）プログラムにおいて，1980年代の初めに米国FAI社（Fauske & Associates, LLC.）によって開発されたコードであり，プログラムの完了に伴い，所有権が米国EPRI（Electric Power Research Institute）に移管され，EPRIを中心としたMUG（MAAP User's Group）のもとで保守及び改良が進められている。MAAPコードは，軽水炉のシビアアクシデント時の原子炉圧力容器，原子炉格納容器及び原子炉建屋内の熱水力／核分裂生成物（FP）の放出・移行挙動を同時に一貫して解析できることに特徴があり，PRAやシビアアクシデントマネジメントの策定等において，米国を始め，世界的に広く利用されている。 MAAPは，シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し，炉心，原子炉圧力容器，原子炉格納容器内で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに，工学的安全施設や炉心損傷防止対策あるいは格納容器破損防止対策で想定する各種の機器についてのモデルを備えている。また，FPに関する物理現象をモデル化しており，事故時に炉心溶融に伴って原子炉圧力容器や原子炉格納容器内に放出されるFPの挙動についても取り扱うことが可能である。このように，広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり，シビアアクシデントで想定される種々の事故シーケンスについて，起因事象から安定した状態，あるいは過圧・過温により原子炉格納容器健全性が失われる状態まで計算が可能であることが特徴である。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	MAAPコードはシビアアクシデントを評価するための総合システム解析コンピュータ・コードであり，原子炉圧力容器，再循環ポンプ等を含む原子炉冷却材圧力バウンダリ全体及び原子炉格納容器における水，水蒸気，水素，FP，溶融炉心等の挙動の評価並びに格納容器圧力逃がし装置による水素排出評価に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・米国プラントのSBO事象に関するユーザーズマニュアルの例題を実施して，解析解が開発元の結果を再現していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・炉心損傷事象に関する国際的な標準問題であるTMI事故を模擬した解析結果が事故データと比較し，概ね一致するため，シビアアクシデント時の炉内の挙動や運転員操作を含む現象モデル全般が妥当であることを確認している。 ・HDR炉における実機スケール水素混合実験に対する実機解析を実施し，実機データと概ね一致するため，原子炉格納容器内の伝熱，流動（水素ガス挙動を含む）に関する現象モデルが妥当であることを確認している。 ・溶融燃料あるいは融体金属とコンクリートの相互作用に関するACE実験及びSURC実験を模擬した実験解析を実施。溶融炉心の温度とコンクリート侵食深さの時間変化について，実験データと概ね一致している結果が得られることを確認している。 ・シビアアクシデント時の全体挙動，原子炉格納容器内の水素ガスの挙動，溶融炉心とコンクリートの相互作用による水素発生の妥当性を確認しているため，MAAPコードは水素濃度評価へ適用できる。 ・米国NRCで整備されたNUREG-1465における原子炉格納容器内ソースタームとMAAPコードにおける解析結果の比較を行い，NUREG-1465のソースタームとほぼ同等であることを確認しているため，MAAPコードはソースターム評価へ適用できる。

Ⅴ-5-14　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＧＯＴＨＩＣ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GOTHICについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-1-8-4	溢水影響に関する評価	Ver.8.1
Ⅴ-1-8-2	原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書	Ver.8.1

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	GOTHIC
使用目的	蒸気拡散解析 （高エネルギー配管破損時の蒸気拡散影響評価） シビアアクシデント解析 （シビアアクシデント時の原子炉建屋原子炉棟内における水素分布評価及び水素処理設備による水素濃度低減性能解析）
開発機関	Numerical Application Inc.（販売元はEPRI）
開発時期	1989年
使用したバージョン	Ver.8.1
コードの概要	Electric Power Research Insuituteにより開発された汎用熱流体解析コードである。本解析コードは，気相，液体連続相及び液体分散相(液滴)の3相について，各々，質量，運動量及びエネルギーの3保存式を解く，完全3流体（9保存式）解析コードである。 各相間の質量，運動量及びエネルギーの移動は，構成式で表され，これにより，凝縮・沸騰現象や，凝縮した液体によって随伴される気相の流れ等，複雑な混相流現象を模擬することができる。また，ファン・水素再結合器等の機器モデルが組み込まれており，これらの機器の作動及び制御を模擬できる。 このような基本構成により，原子炉建物内における気液混相の熱流動を取り扱うことができる。GOTHICは，主に米国において設計基準事故を想定した原子炉格納容器の設計や環境条件，シビアアクシデント時の水素分布解析などに豊富な使用実績がある。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	今回の解析は，高エネルギー配管破損時の蒸気拡散影響評価及びシビアアクシデント時の原子炉建屋原子炉棟内における静的触媒式水素再結合装置の水素濃度低減性能評価に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・コードのサンプル問題を実行し，ユーザーマニュアルに示される同一問題の結果と比較を行い，解析解がそれを再現していることを確認している。 ・1次元熱伝導の理論解に対する解析解が再現していることを確認している。

	・本解析コードの適用制限について，蒸気表・各種相関式・物性範囲及び数値計算手法上の制約に対し問題ないことを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・実機プラントに対する上記の目的に対しては，検証内容が事故時の状況，機器設備の作動状況，物理現象の模擬などに対し適用可能な範囲にあることを確認している。 ・静的触媒式水素再結合装置作動時に見られる重要な物理現象の個別効果及び，それらを重ね合わせた総合効果の再現性を確認している。 ・NUPEC試験など，実機解析の再現能力，適用範囲と不確かさを考慮したうえで，上記目的に対する保守性を有している。

Ⅴ-5-15　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＧＲＩＭＰ２

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. GRIMP2の解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……6
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）GRIMP2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-1 Ⅴ-2-11-2-13	原子炉建屋の地震応答計算書 タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver.2.5 Ver.2.5

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	GRIMP2
使用目的	地震応答解析モデルにおける基礎底面地盤ばねの算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1988年
使用したバージョン	Ver.2.5
コードの概要	GRIMP2（以下「本解析コード」という。）は，振動アドミッタンス理論により，基礎の水平，上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	GRIMP2は，原子炉建屋及びタービン建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・GRIMP2を用いて評価した基礎底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねが文献*と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 注記　＊：日本建築学会，入門・建物と地盤との動的相互作用，技報堂出版，pp.337-350，1996 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，基礎底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における底面地盤ばねの算定にGRIMP2を使用することは，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

3. GRIMP2の解析手法について

3.1 一般事項

GRIMP2は，振動アドミッタンス理論により，基礎の水平，上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。GRIMP2は，原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

GRIMP2の主な特徴を以下に示す。

・点加振解に基づき，基礎下の応力分布を仮定した場合の円形基礎及び矩形基礎の底面地盤ばねを求めることができる。
・基礎分割法を用いて，点加振解及び等分布加振解に基づき，基礎下の変位分布を仮定した場合の矩形基礎の底面地盤ばねを求めることができる。

3.3 解析手法

一般に地盤上の基礎面に動的な力$Pe^{i\omega t}$を加えた場合，それに応じる変位wは以下の式で表せる。

$$w = \frac{Pe^{i\omega t}}{K_f}\{g_1(\omega) - ig_2(\omega)\} \qquad (3.3\text{-}1)$$

ここで，

K_f ：静的剛性

この比例係数$\{g_1(\omega)-ig_2(\omega)\}$を田治見は振動アドミッタンスと名付けた。

ここで，基礎下の応力分布を仮定し，点加振解を基礎面について積分することで，加振力と基礎の代表変位を用いて基礎の動的地盤ばねを評価できる。

一方で，基礎下の応力分布を仮定せず変位分布を仮定する場合には，図3-1に示すように基礎を複数の要素に分割し，各要素の加振力と変位の関係から基礎の動的地盤ばねを評価できる。

要素iに荷重P_iを加えた時の要素jの変位をu_jとすると次のような関係が得られる。

$$\{u_j\} = [d_{ij}]\{P_i\} \qquad (3.3\text{-}2)$$

ここで，$[d_{ij}]$は，地盤の柔性マトリクスで，非対角項については点加振解から算定する。また，対角項については，加振点と変位の算定点が一致することから点加振解は発散するため，要素内に一様な応力が作用したときの中心点変位を用いて算定する。

柔性マトリクス$[d_{ij}]$の逆マトリクス$[K_{ij}]$は剛性マトリクスとなるため，次のような関係が得られる。

$$\{P_i\} = [K_{ij}]\{u_j\} \qquad (3.3\text{-}3)$$

各要素の変位$\{u_j\}$を仮定し，(3.2-3)式に代入すると各要素の反力$\{P_i\}$が得られ，反力の合計と基礎の変位を用いて基礎の動的地盤ばねを評価できる。

なお，具体的な数値計算法は吉田の論文*1に基づいている。

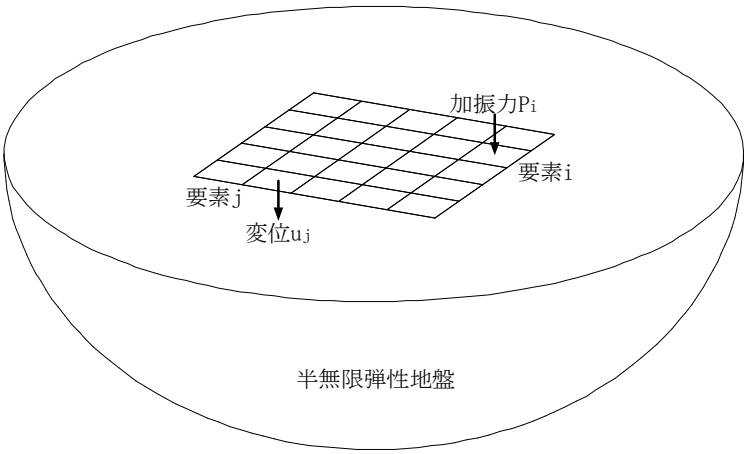


図3-1　基礎の分割

注記　＊1：吉田一博：半無限弾性地盤上の矩形基礎の各種の動的地盤ばねについて，日本建築学会構造系論文集，第457号，pp. 19-28，1994

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。

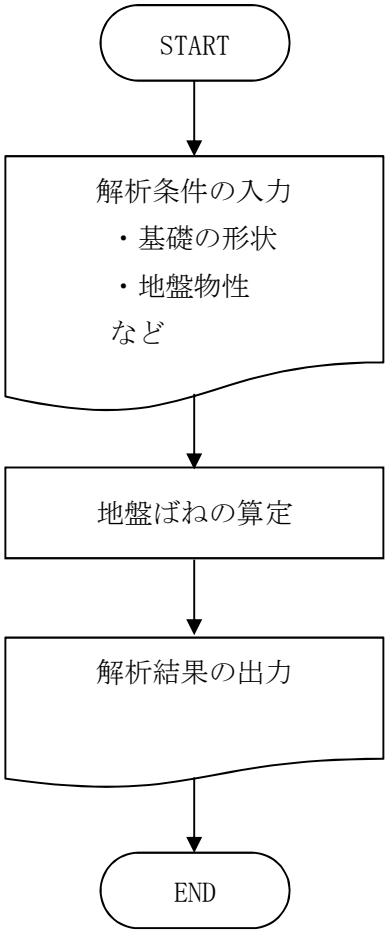


図3-2　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

3.5.1　文献との比較による検証

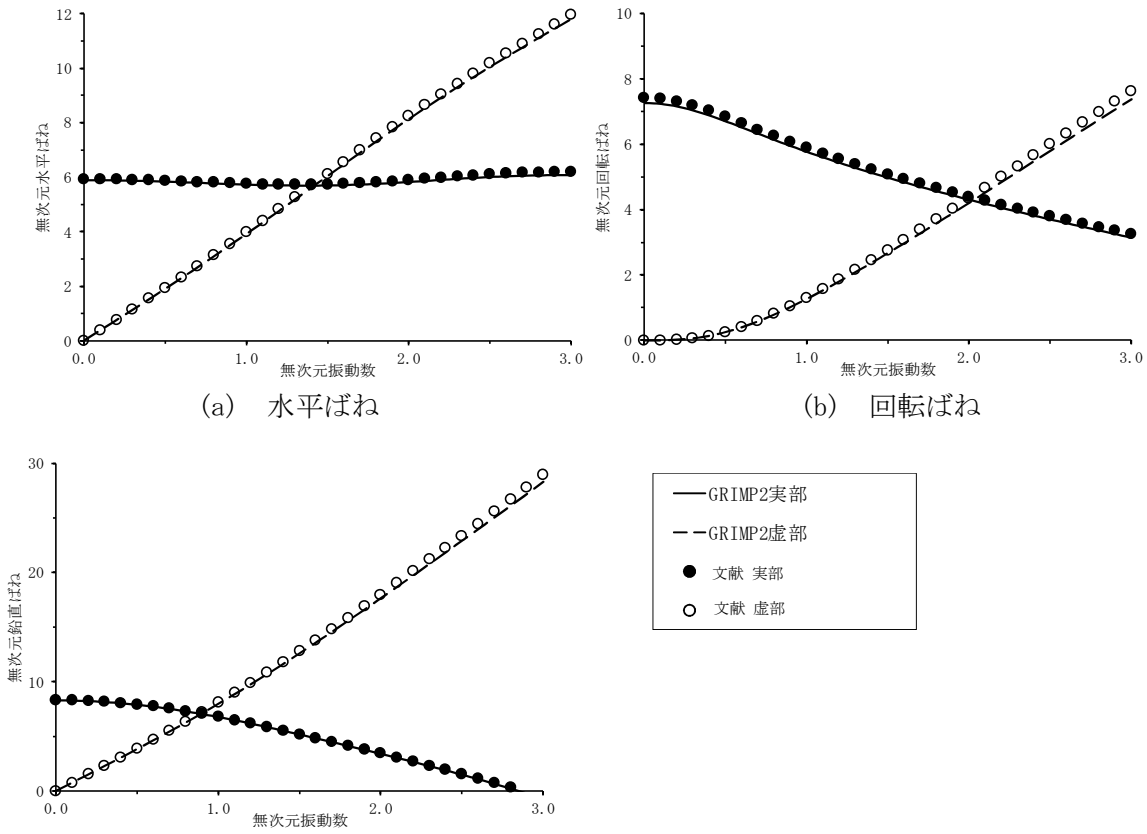
以下に示す条件について地盤ばねを評価し，文献*2との比較を行う。

・地盤のポアソン比は0.45，材料減衰定数は0.00とする。

・基礎は剛とし，分割数は20×20とする。

地盤ばねの比較結果を図3-3に示す。

図より，GRIMP2の結果は文献*2による計算結果と良い一致を示しており，GRIMP2が底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねを正しく評価していることが確認できる。



(a)　水平ばね　　(b)　回転ばね

(c)　鉛直ばね

図3-3　解析結果の比較

3.5.1　使用内容に対する妥当性

原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における底面地盤ばねの算定にGRIMP2を使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

注記　＊2：日本建築学会，入門・建物と地盤との動的相互作用，技報堂出版，pp.337-350，1996

Ｖ-5-16　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＶＫ４６３

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. NVK463の解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……5
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……6

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NVK463について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver.1.0
Ⅴ-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver.1.0

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	NVK463
使用目的	水平方向の地震応答解析モデルにおける側面地盤ばねの算定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver.1.0
コードの概要	NVK463（以下「本解析コード」という。）は，Novakの論文*に基づき，水平，上下，回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	NVK463は，原子炉建屋及びタービン建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・NVK463を用いて評価した建屋側面地盤の水平ばねがNovakの論文の結果とよく一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，建屋側面地盤の水平ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析における側面地盤ばねの算定にNVK463を使用することは，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

注記 ＊：Milos Novak et al.：Dynamic Soil Reaction for Plane Strain Case, Proc. ASCE, Vol.104, No.EM4 pp.953-959, 1978

3. NVK463の解析手法について

3.1 一般事項

NVK463は，Novakの論文に基づき，水平，上下，回転及びねじれに対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。NVK463は，原子炉建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの建屋埋込み部分の側面地盤ばねを評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

NVK463の主な特徴を以下に示す。

・平面ひずみを仮定した全無限地盤にある円形基礎の側面地盤ばねを算定できる。

・円形基礎は剛体として扱う。

3.3 解析手法

円形基礎の側面と接する地盤に対する水平，上下，回転及びねじれ加振した場合の力－変形関係から建屋の側面地盤ばねを算定する方法である。

今回評価対象とした建屋側面地盤の水平ばねは，0次と1次の変形ベッセル関数を用いて，以下の式で評価される。

$$K_u^j = -\pi H_j G_j a_0^2 \frac{4K_1(b_0^*)K_1(a_0^*)+a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*)+b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)}{b_0^*K_0(b_0^*)K_1(a_0^*)+a_0^*K_1(b_0^*)K_0(a_0^*)+b_0^*a_0^*K_0(b_0^*)K_0(a_0^*)} \quad (3.3\text{-}1)$$

ここで，

π ：円周率

H_j ：建物質点 j の支配高さ

G_j ：建物質点 j の支配高さにおける地下部外壁に接する地盤のせん断弾性係数

$a_0 = \omega r_0 / V_s$ （等価円置換の無次元振動数）

$r_0 = \sqrt{B_x B_y / \pi}$ （等価円半径）　ω ：円振動数

V_s ：地下部外壁に接する地盤のS波速度

B_x，B_y ：建物の辺長

$K_0(\ )$，$K_1(\ )$ ：それぞれ0次と1次の変形ベッセル関数

$a_0^* = \dfrac{a_0}{\sqrt{1 + i \cdot 2h_j}} \cdot i$ ，$b_0^* = a_0^* / \eta_j$，$\eta_j = \sqrt{2(1-\nu_j)/(1-2\nu_j)}$

h_j，ν_j ：地下部外壁に接する地盤のそれぞれ減衰定数とポアソン比

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

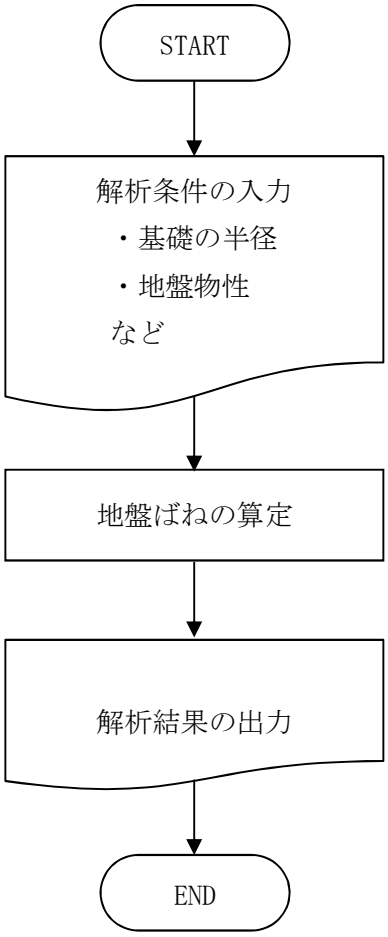


図3-1　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

3.5.1　文献との比較による検証

Novakの論文に記載されている水平ばねの評価結果を再現し，Novakの論文に記載されている結果との比較を行う。

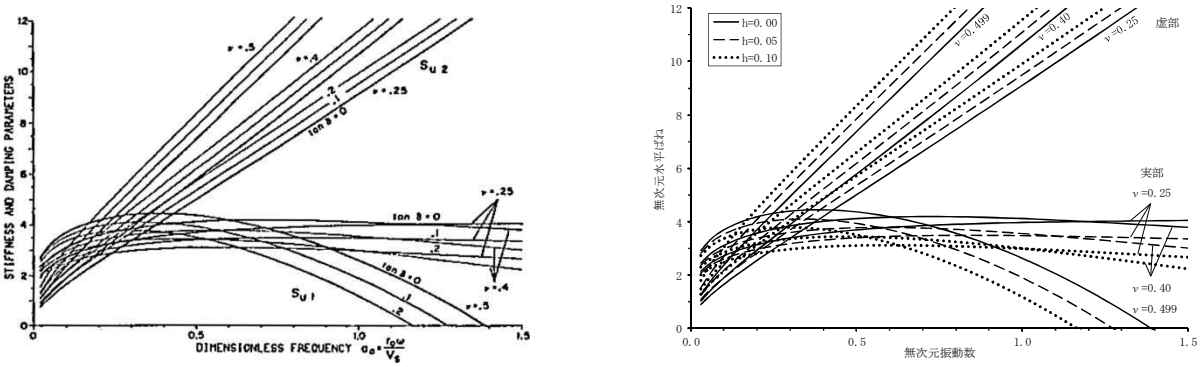
NVK463での解析条件は以下とする。

・地盤のポアソン比は0.25，0.40，0.499の3ケースとする。

・地盤の材料減衰定数は0.00，0.05，0.10の3ケースとする。

水平ばねの比較結果を図3-2に示す。

図より，NVK463の結果はNovakの論文による結果と良い一致を示しており，NVK463が建屋側面地盤の水平ばねを正しく評価していることが確認できる。



(a)　Novakの論文　　(b)　NVK463

図3-2　解析結果の比較（水平ばね）

3.5.2　使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における側面地盤ばねの算定にNVK463を使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，側面地盤の水平ばねの算定について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-17　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＫＳＨＡＫＥ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. KSHAKEの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……6
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）KSHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	Ver.2
Ⅴ-2-2-2-1	原子炉建屋地下排水設備設置位置の地盤応答	Ver.2
Ⅴ-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	Ver.2
Ⅴ-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	Ver.2
Ⅴ-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	Ver.2
Ⅴ-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver.2

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	KSHAKE
使用目的	入力地震動の策定
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver.2
コードの概要	KSHAKE（以下「本解析コード」という。）は，米国カリフォルニア大学から発表されたSHAKEを基本に開発したプログラムで，一次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数及び時刻歴応答波形を計算するプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	KSHAKEは，原子炉建屋，原子炉建屋地下排水設備，緊急時対策所建屋，格納容器圧力逃がし装置格納槽，タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定において，基準地震動S_s及び弾性設計用地震動S_dに対する地盤の応答を評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・KSHAKEを用いて評価した弾性地盤の増幅特性が理論解と一致することを確認している。 ・既工事計画において実績のある別コード（microSHAKE）による解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，地盤の応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子炉建屋，緊急時対策所建屋，格納容器圧力逃がし装置格納槽，タービン建屋及びサービス建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKEを使用することは，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

3.　KSHAKEの解析手法について

3.1　一般事項

KSHAKEは，米国カリフォルニア大学バークレイ校でSchnabelとLysmerらにより開発されたSHAKEを基本に開発したプログラムである。KSHAKEは，水平方向に半無限に広がりのある，均質，粘弾性のいくつかの層からなる土層でのせん断波の縦方向伝播に対する応答計算を行う。

3.2　解析コードの特徴

KSHAKEの主な特徴を以下に示す。

・一次元重複反射理論に基づき，多層地盤の地震応答解析を行う。

・地盤の非線形性は，ひずみ依存特性として等価線形法により考慮する。

・鉛直動については，Ｓ波速度V_sをＰ波速度V_pとして定義することで対応できる。

3.3　解析手法

図3-1に示す線形粘弾性体を通過するせん断波の伝播は，水平変位u=u(x，t)による以下の式で表される。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \cdot \partial t} \qquad (3.3\text{-}1)$$

ここで，

ρ　：単位体積質量

G　：せん断弾性係数

η　：粘性係数

振動数ω に対し，調和振動は次のように表せる。

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t} \qquad (3.3\text{-}2)$$

(3.3-2)式は，振動数ω の調和振動に対する波動方程式の解として与えられる。

$$u(x,t) = E \cdot e^{i(kx+\omega t)} + F \cdot e^{-i(kx+\omega t)} \qquad (3.3\text{-}3)$$

ここで，右辺第1項は上昇波，第2項は下降波を示している。また，kは複素波数と呼ばれ，下式を満足するものである。

$$k^2 = \frac{\rho\ \omega^2}{G + i\omega\ \eta} = \frac{\rho\ \omega^2}{G^*} \qquad (3.3\text{-}4)$$

ここで，任意のm層と(m+1)層の変位とせん断応力の連続性を考え，さらに自由面では$\tau = 0$の境界条件を導入して，次のような関係が得られる。

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \qquad (3.3\text{-}5)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \qquad (3.3\text{-}6)$$

伝達関数e_m及びf_mは，$E_1=F_1=1$に対する倍率であり，$E_1=F_1=1$を上式に代入することで求まる。

他の伝達関数は，e_m及びf_mから得られる。n層及びm層表面での変位を関係付ける伝達関数$A_{n,m}$を次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \qquad (3.3\text{-}7)$$

これらの式より，伝達関数A(ω)は，系のいかなる2つの層の間においても定めることができる。

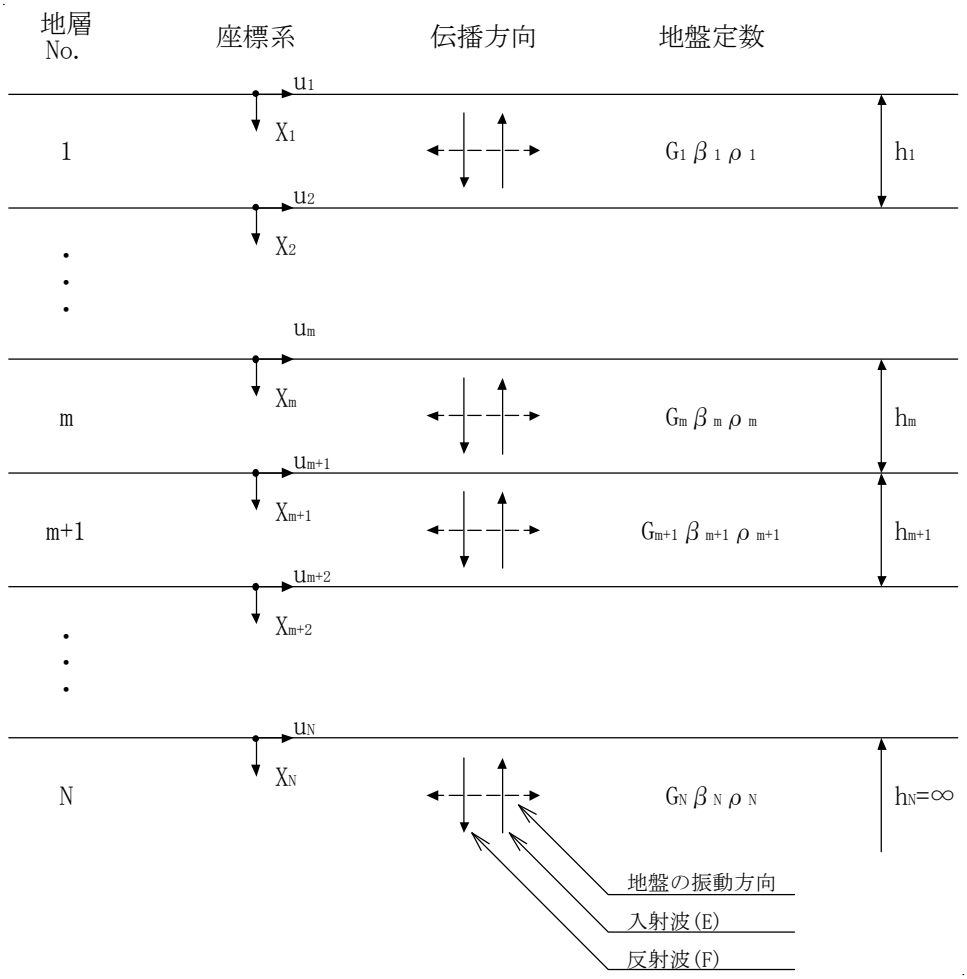


図3-1　1次元地盤モデル

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

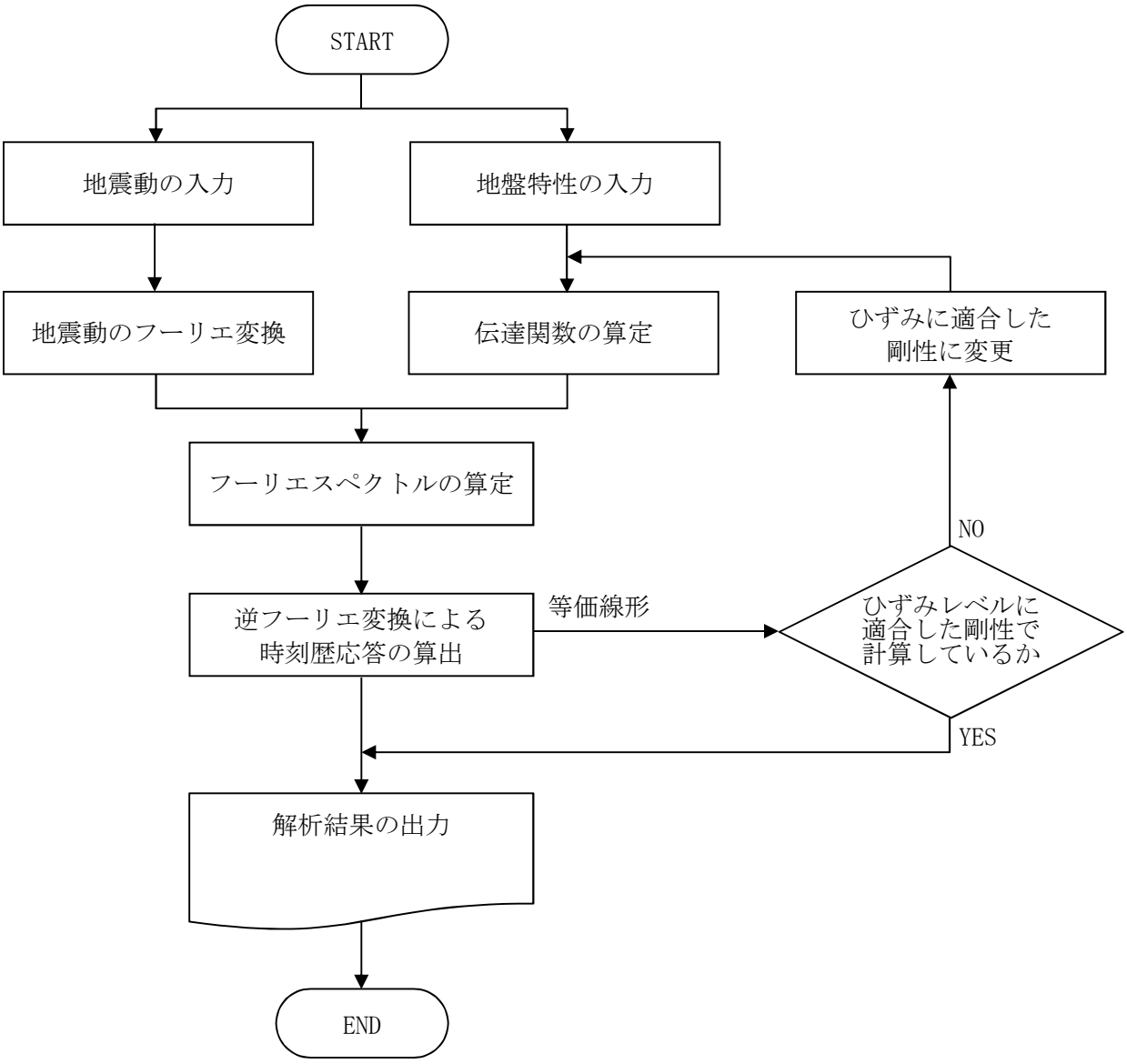


図3-2　解析フローチャート

NT2 補③ V-5-17 R0

3.5　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

3.5.1　理論解との比較による検証

2層地盤モデルについて，一次元重複反射理論に基づく伝達関数の理論解との比較を行う。比較は第2層上面のはぎとり波($2E_2$)に対する地表面波(E_1+F_1)の伝達関数とし，理論解は以下の式で表される。

$$\frac{e_1(\omega)+f_1(\omega)}{2e_2(\omega)}=\frac{1}{\cosh(ikh)+\alpha\sinh(ikh)} \tag{3.5-1}$$

ただし，

$$k=\sqrt{\frac{\rho_1}{G_1^*}}\,\omega$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{\rho_1 G_1^*}{\rho_2 G_2^*}}$$

$$G_1^*=\rho_1 Vs_1^{\,2}(1-2\beta_1^{\,2}+2i\,\beta_1\sqrt{1-\beta_1})$$

$$G_2^*=\rho_2 Vs_2^{\,2}(1-2\beta_2^{\,2}+2i\,\beta_2\sqrt{1-\beta_2})$$

ここで，

ρ_1，　ρ_2	：第1層，第2層の単位体積質量
Vs_1，Vs_2	：第1層，第2層のせん断波速度
h	：第1層の層厚
β_1，　β_2	：第1層，第2層の減衰定数

検討地盤モデルを図3-3に，理論解との伝達関数の比較結果を図3-4に示す。

図より，KSHAKEの結果は理論解と一致しており，KSHAKEが伝達関数を正しく評価していることが確認できる。

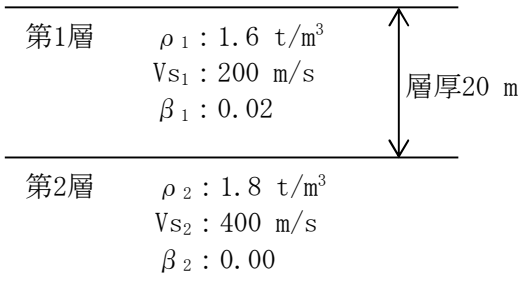
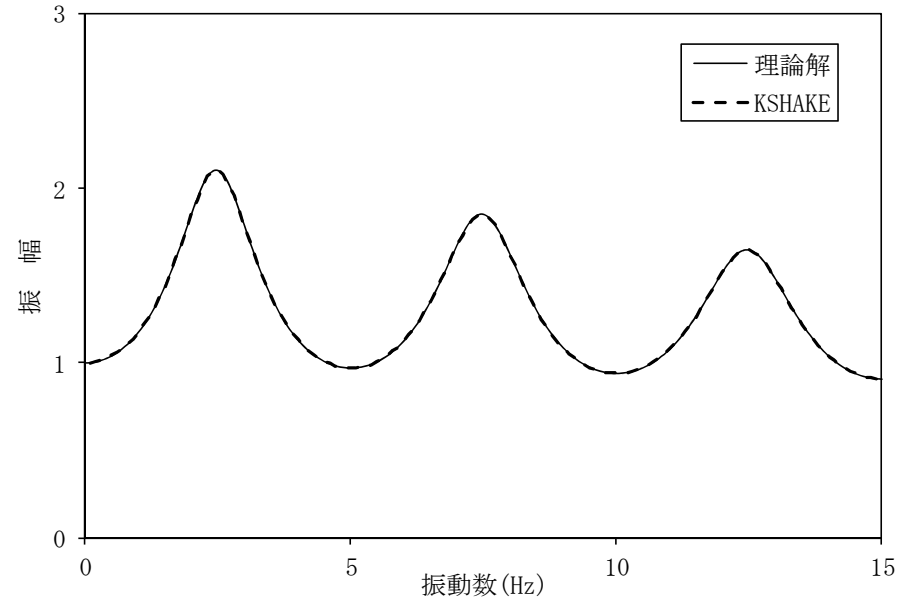


図3-3　検討地盤モデル



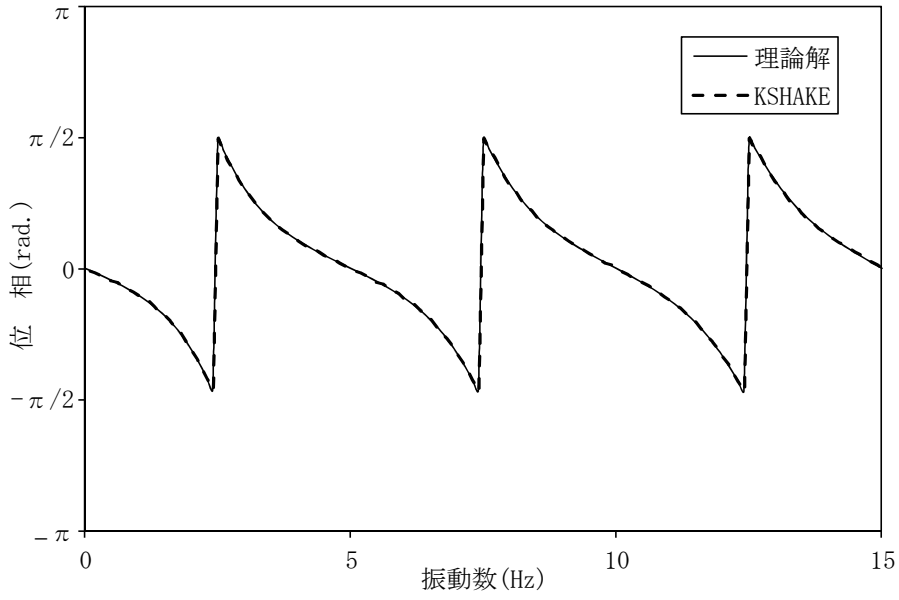


図3-4　理論解との伝達関数の比較

3.5.2　他コードとの比較による検証

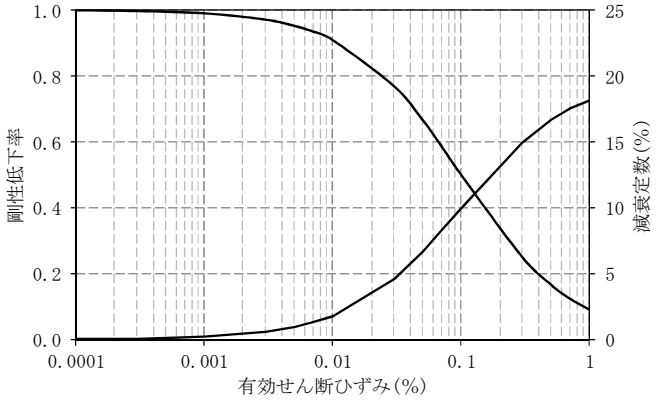
最下層を半無限体とした3層地盤モデルについて，市販されている1次元地盤の等価線形解析コード「microSHAKE/3D ver.2.3.0.327」（株式会社地震工学研究所）との比較を行う。なお，「microSHAKE ver.3.1.0」は，川内原子力発電所第1号機の工事計画で実積があり，比較には異なるバージョンを使用するが，バージョンの差異により今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。

検討地盤モデルを表3-1に，ひずみ依存特性を図3-5に，検討に用いる入力地震動(2E波)を図3-6に，解析結果の比較を図3-7に示す。

図より，KSHAKEの結果はmicroSHAKEによる結果と一致していることが確認できる。

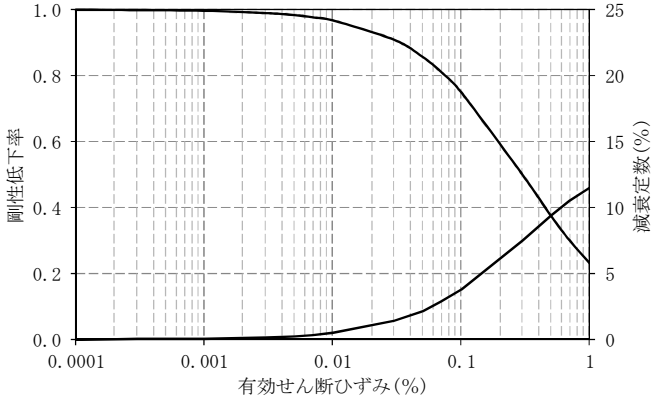
表3-1　検討地盤モデル

標高 (m)	区　分	層厚 (m)	単位体積質量 (t/m^3)	せん断波速度 (m/s)	減衰定数
0.0	第1層	2.0	1.6	200	0.02
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
		2.0			
-20.0	第2層	5.0	1.8	400	0.02
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
		5.0			
-70.0	基　盤	—	2.0	700	0.00



有効せん断ひずみ (%)	剛性低下率	等価減衰定数 (%)
0.0001	0.999	0.02
0.0003	0.997	0.06
0.001	0.990	0.20
0.003	0.971	0.58
0.005	0.952	0.96
0.007	0.935	1.30
0.01	0.909	1.82
0.03	0.769	4.62
0.05	0.667	6.66
0.07	0.588	8.24
0.1	0.500	10.00
0.3	0.250	15.00
0.5	0.167	16.66
0.7	0.125	17.50
1	0.091	18.18

図3-5 (1／2)　ひずみ依存特性 (第1層)



有効せん断ひずみ (%)	剛性低下率	等価減衰定数 (%)
0.0001	1.000	0.00
0.0003	0.999	0.02
0.001	0.997	0.05
0.003	0.990	0.15
0.005	0.984	0.24
0.007	0.977	0.35
0.01	0.968	0.48
0.03	0.909	1.37
0.05	0.857	2.15
0.07	0.811	2.84
0.1	0.750	3.75
0.3	0.500	7.50
0.5	0.375	9.38
0.7	0.300	10.50
1	0.231	11.54

図3-5 (2／2)　ひずみ依存特性 (第2層)

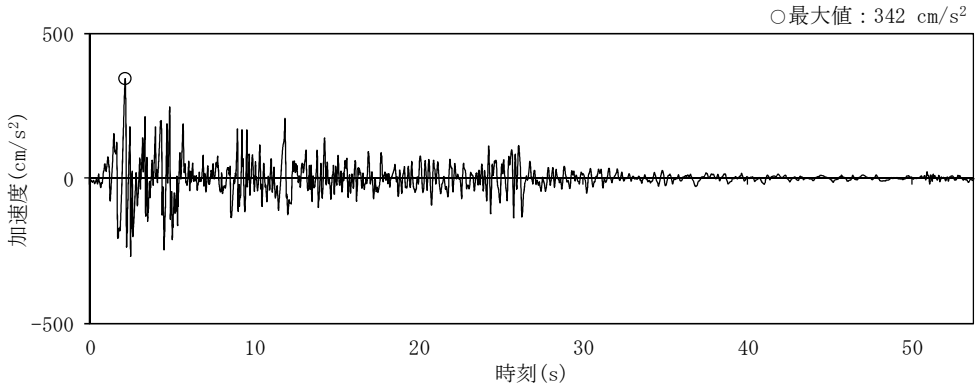
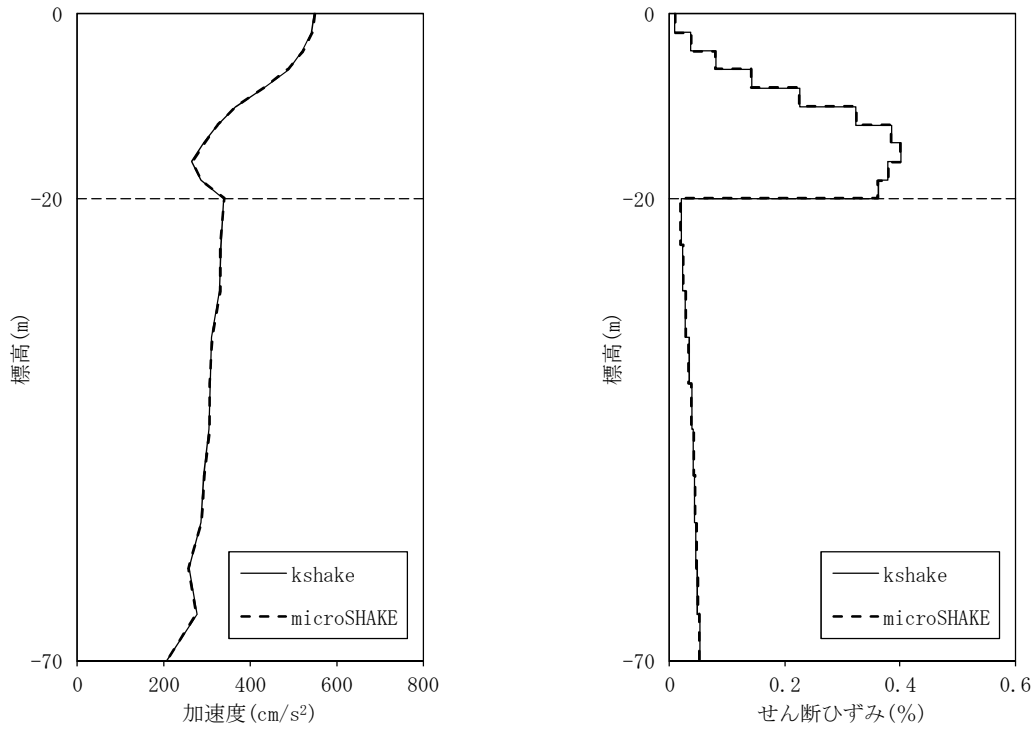


図3-6　入力地震動(2E波)



(a) 加速度　　(b) 有効せん断ひずみ

図3-7（1／2）　解析結果の比較（最大応答分布）

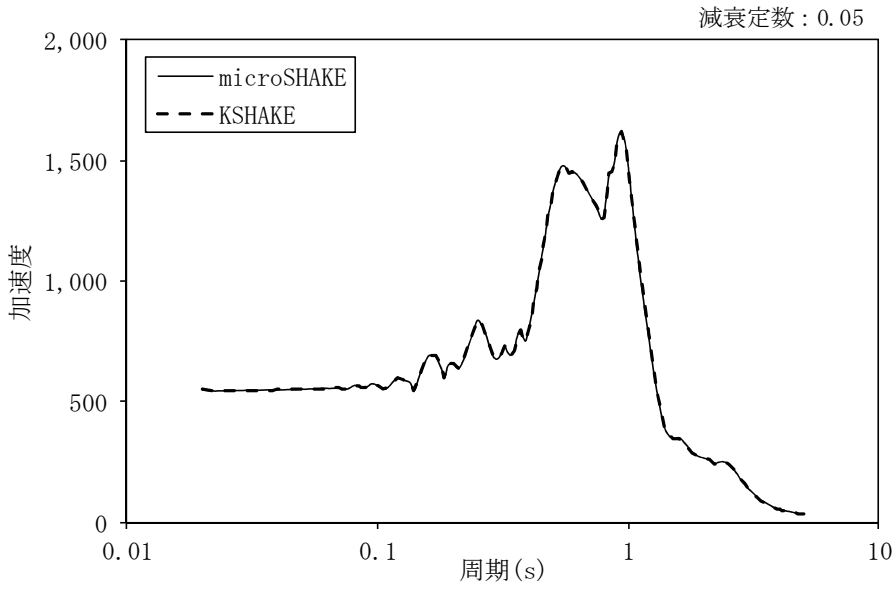


図3-7（2／2）　解析結果の比較（地表面加速度応答スペクトル）

3.5.3　使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析における入力地震動の策定にKSHAKEを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，地盤の応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。
・評価地盤を水平成層と仮定していることから，一次元重複反射理論の適用範囲である。

Ⅴ-5-18　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＡＣ３Ｎ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. DAC3Nの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……6
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）DAC3Nについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-1	原子炉建屋の地震応答計算書	V97
Ⅴ-2-11-2-13	タービン建屋の耐震性についての計算書	V97

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	DAC3N
使用目的	固有値解析及び弾塑性応答解析
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1997年
使用したバージョン	V97
コードの概要	DAC3N（以下「本解析コード」という。）は，ばね要素やはり要素などでモデル化された建屋地盤連成系モデルの固有値解析及び地震応答解析を行うプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	DAC3Nは，原子炉建屋及びタービン建屋について，基準地震動Ｓ$_s$及び弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する建屋の応答を評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・既工事計画において実績のある別コード（TDAPⅢ）による解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・原子炉建屋及びタービン建屋の地震応答解析にDAC3Nを使用することは本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

3. DAC3Nの解析手法について

3.1 一般事項

DAC3Nは，清水建設株式会社が開発したプログラムであり，時間領域における構造解析用解析コードである。DAC3Nは，原子炉建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

3.2 解析コードの特徴

DAC3Nの主な特徴を以下に示す。

・ばね要素やはり要素などでモデル化した，多質点系の応答解析を行う。
・質量は，集中質量として評価する。
・要素に非線形特性を設定し，非線形解析を行うことができる。
・ひずみエネルギ比例型及びレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
・固有値解析は，サブスペース法による。
・応答解析は，時間領域の直接積分法による。

3.3 解析手法

3.3.1 固有値解析

多自由度系の運動方程式は以下の式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{f\} \quad (3.3\text{-}1)$$

ここで，

[M] ：質量マトリクス
[C] ：減衰マトリクス
[K] ：剛性マトリクス
{ü} ：加速度ベクトル
{u̇} ：速度ベクトル
{u} ：変位ベクトル
{f} ：外力ベクトル

(3.3-1)式の外力ベクトルを{0}とし，減衰項を除いた自由振動を表す方程式は以下の式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \quad (3.3\text{-}2)$$

(3.3-2)式の変位{u}に調和振動を仮定すると次のような関係が得られる。

$$(-\omega_r{}^2[M]+[K])\{u_r\}=\{0\} \quad (3.3\text{-}3)$$

一般に，$\{u_r\}=\{0\}$ 以外の(3.3-3)式を満足する ω_r 及び $\{u_r\}$ を求めることを固有値問題と呼び，ω_r を固有値，$\{u_r\}$ を固有ベクトルという。

3.3.2　ひずみエネルギ比例型減衰

建屋の減衰は，各次の振動モードにおける部材のひずみエネルギに比例するものとして以下の式から設定する。

$$h_i = \frac{\sum_k h_0^j E_i^j}{\sum_k E_i^j} \tag{3.3-4}$$

ただし，

$$E_i^j = \frac{1}{2}\{\phi_i^j\}^T[k^j]\{\phi_i^j\}$$

ここで，

h_0^j　　：j部材の減衰定数

$[k^j]$　　：j部材の剛性マトリクス

$\{\phi_i^j\}$　　：i次の振動モードにおけるj部材の材端変位ベクトル

3.3.3　直接積分法

直接積分法はニューマークのβ法を用いる。nステップの変位$\{u_n\}$，速度$\{\dot{u}_n\}$及び加速度$\{\ddot{u}_n\}$　が既知の場合，次の(n+1)ステップの変位及び速度はβ及びγをパラメータとして，以下の式で表される。

$$\{\dot{u}_{(n+1)}\} = \{\dot{u}_n\} + (1-\gamma)\{\ddot{u}_n\} + \gamma\{\ddot{u}_{(n+1)}\} \tag{3.3-5}$$

$$\{u_{(n+1)}\} = \{u_n\} + \Delta t\{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2}\{\ddot{u}_n\} + \beta\,\Delta t^2(\{\ddot{u}_{(n+1)}\} - \{\ddot{u}_n\}) \tag{3.3-6}$$

(3.3-5)式及び(3.3-6)式を(3.3-1)式に代入し，$\{\dot{u}_{(n+1)}\}$及び$\{\ddot{u}_{(n+1)}\}$を消去すると，変位増分に対する次のような関係が得られる。

$$[\overline{K}](\{u_{(n+1)}\} - \{u_n\}) = \{\overline{f}\} \tag{3.3-7}$$

ただし，

$$[\overline{K}] = [K] + \frac{1}{\beta\,\Delta t^2}[M] + \frac{\gamma}{\beta\,\Delta t}[C]$$

$$\{\overline{f}\} = \{f_{(n+1)}\} - \{f_n\} + [M]\left(\frac{1}{\beta\,\Delta t}\{\dot{u}_n\} + \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}_n\}\right) + [C]\left\{\frac{\gamma}{\beta}\{\dot{u}_n\} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\Delta t\{\ddot{u}_n\}\right\}$$

(3.3-7)式から，(n+1)ステップの変位が得られ，速度及び加速度を得ることができる。

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

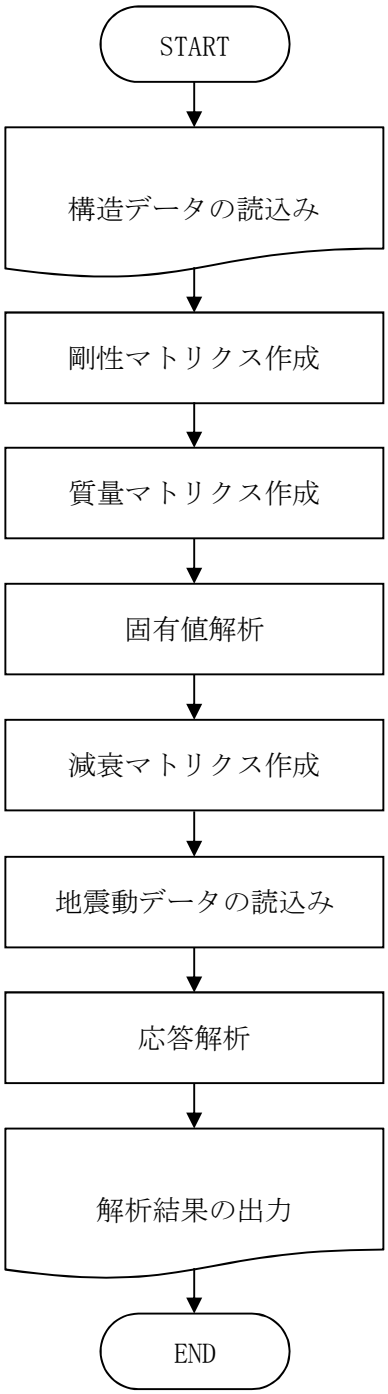


図3-1　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

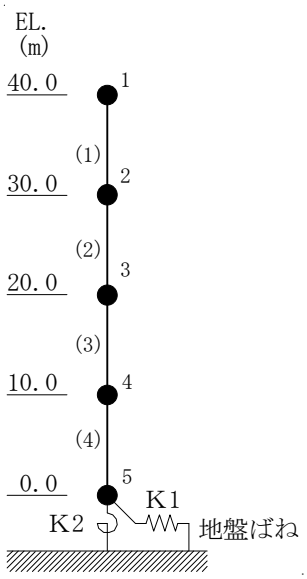
3.5.1　他コードとの比較による検証

例題に対して，市販されている汎用構造解析コード「TDAPⅢ Ver.3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーク情報システム）との比較を行う。なお，「TDAPⅢ Ver.3.09」は，既工事計画で使用実績がある。

解析モデルの諸元を表3-1～表3-4に，検討に用いる入力地震動を図3-2に，解析結果の比較を図3-3に示す。

図より，DAC3Nの結果はTDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表3-1　解析モデル諸元



EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 Ig ($\times 10^6$kN･m^2)	せん断断面積 As (m^2)	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ I (m^4)
40.0	150,000	3.0		
30.0	200,000	4.0	100	20,000
20.0	250,000	5.0	150	30,000
10.0	300,000	6.0	200	40,000
0.0	400,000	8.0	250	50,000

注：（　）内は要素番号を示す。

表3-2　材料定数

ヤング係数 E (N/mm^2)	せん断弾性係数 G (N/mm^2)	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表3-3（1／2）　復元力特性（$\tau - \gamma$関係）

要素番号	τ_1 (N/mm^2)	τ_2 (N/mm^2)	τ_3 (N/mm^2)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表3-3（2／2）　復元力特性（M－ϕ関係）

要素番号	M_1 ($\times 10^6$kN･m)	M_2 ($\times 10^6$kN･m)	M_3 ($\times 10^6$kN･m)	ϕ_1 ($\times 10^{-6}$1/m)	ϕ_2 ($\times 10^{-6}$1/m)	ϕ_3 ($\times 10^{-6}$1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表3-4　地盤のばね定数と減衰係数

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C	減衰係数 C_C
K1	5	底面・並進	4.0×10^{70}　kN/m	1.0×10^{6}　kN･s/m
K2	5	底面・回転	3.0×10^{10}　kN･m/rad	3.0×10^{8}　kN･m･s/rad

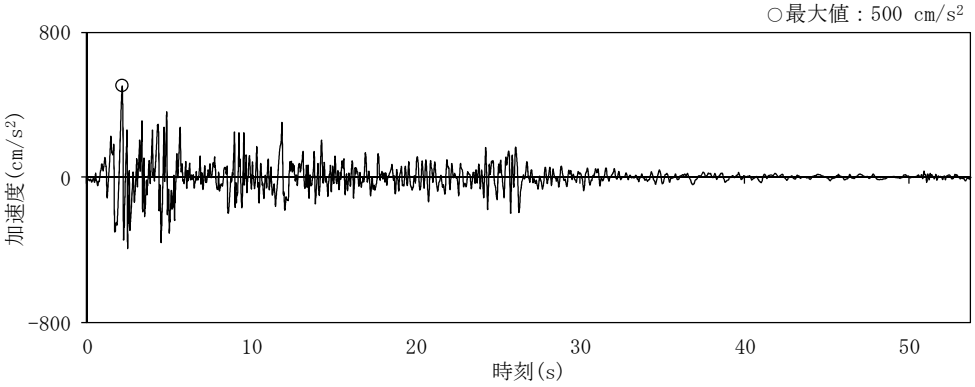
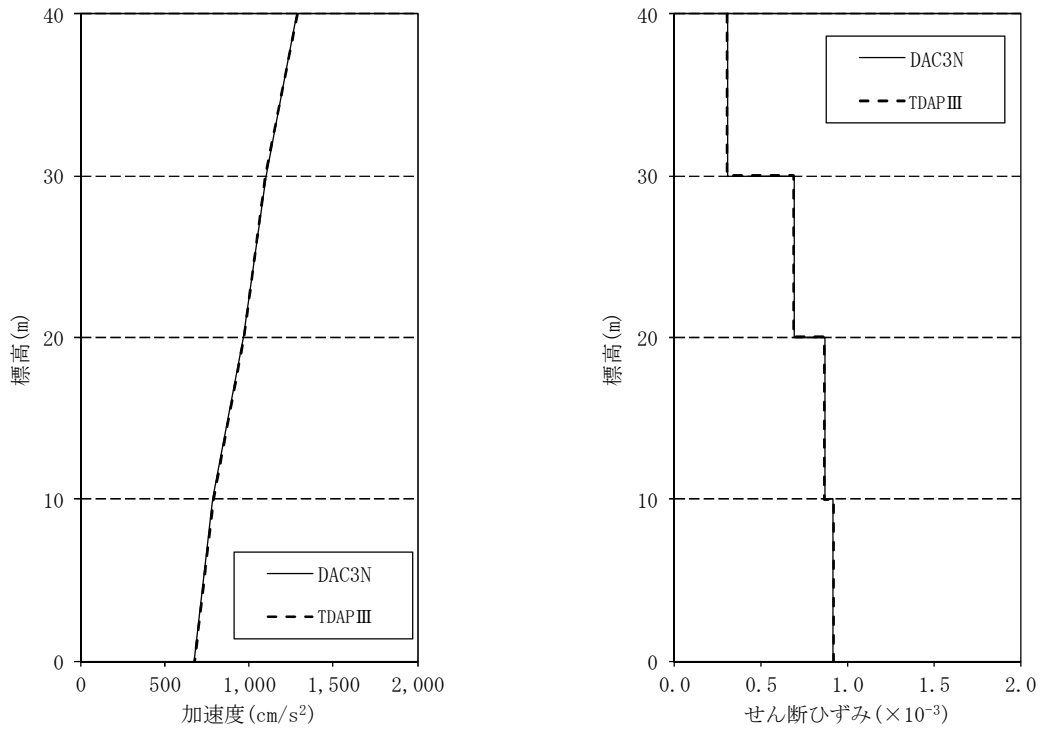


図3-2　入力地震動



(a) 加速度　　(b) せん断ひずみ

図3-3 解析結果の比較（最大応答分布）

3.5.2 使用内容に対する妥当性

原子炉建屋の地震応答解析にDAC3Nを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-19　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＰＲＩＮＴ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. SPRINTの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……5
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……6

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SPRINTについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	1997/7版

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	SPRINT
使用目的	杭基礎の有効入力動及び地盤ばねの算定
開発機関	株式会社大林組
開発時期	1988年
使用したバージョン	1997/7版
コードの概要	SPRINT（以下「本解析コード」という。）は，薄層要素法により，杭による拘束効果を考慮した有効入力動の計算並びに杭基礎の水平，上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	SPRINTは，使用済燃料乾式貯蔵建屋の有効入力動の計算並びに水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・SPRINTを用いて評価した有効入力動及び地盤インピーダンスが論文及び他解析コードの結果と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，有効入力動，基礎底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・日本原子力発電㈱ 東海第二発電所 使用済燃料乾式貯蔵設備工事に係る工事計画認可申請書のⅤ-2-3（使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書）において，有効入力動の計算並びに水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの基礎底面地盤ばねを評価するに使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，同プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

3. SPRINTの解析手法について

3.1 一般事項

SPRINTは，薄層要素法により，杭による拘束効果を考慮した有効入力動の計算並びに杭基礎の水平，上下及び回転に対する地盤の複素ばね剛性を振動数領域で計算するプログラムである。SPRINTは，薄層要素法により，杭基礎の伝達関数（有効基礎入力動）及び地盤ばねの評価に使用している。

3.2 解析コードの特徴

サブストラクチャー法による地盤・構造物動的相互作用解析コードSPRINTは，以下に示す特徴を有している。

- 薄層要素法を用いているため，成層地盤を取り扱うことが可能である。
- 薄層要素法を用いているため，水平方向の無限性が解析的に考慮されている。
- 精度の高いダッシュポット(Paraxial境界要素)を用いて，鉛直方向の半無限性を考慮している。
- 基礎の埋込みを考慮できる。
- 群杭の効果を考慮できる。
- 実体波の斜め入射を考慮できる。
- 対称条件を用いて計算速度を向上させている。

3.3 解析手法

3次元薄層要素法を用いている。

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

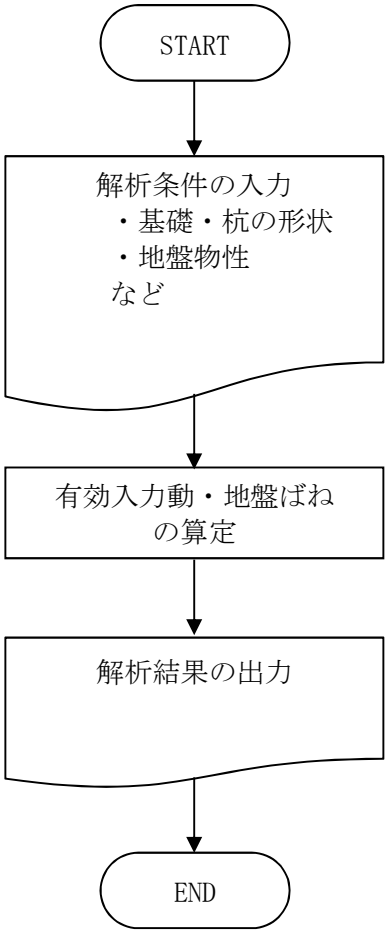


図3-1　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a.　文献，他解析コードとの比較による検証

既往の文献において，SPRINTとKayniaの手法との比較や上下方向点加振解の比較を実施した。また，社内別途解析コード「ABLE（動的有限要素法解析コード）」との比較を実施した。比較結果を図3-2～図3-4に示す。

有効入力動は，SPRINTとKayniaによる手法を比較した結果[*1*2*5]，両者は，定性的及び定量的によく一致している。

上下方向点加振解はHalpens等と，円形基礎のグランドコンプライアンスは庄等の結果と比較[*3*6*7]し，よく一致している。

また，SPRINTと軸対象ＦＥＭ解析コードABLEの結果も良好に一致している[*4]。

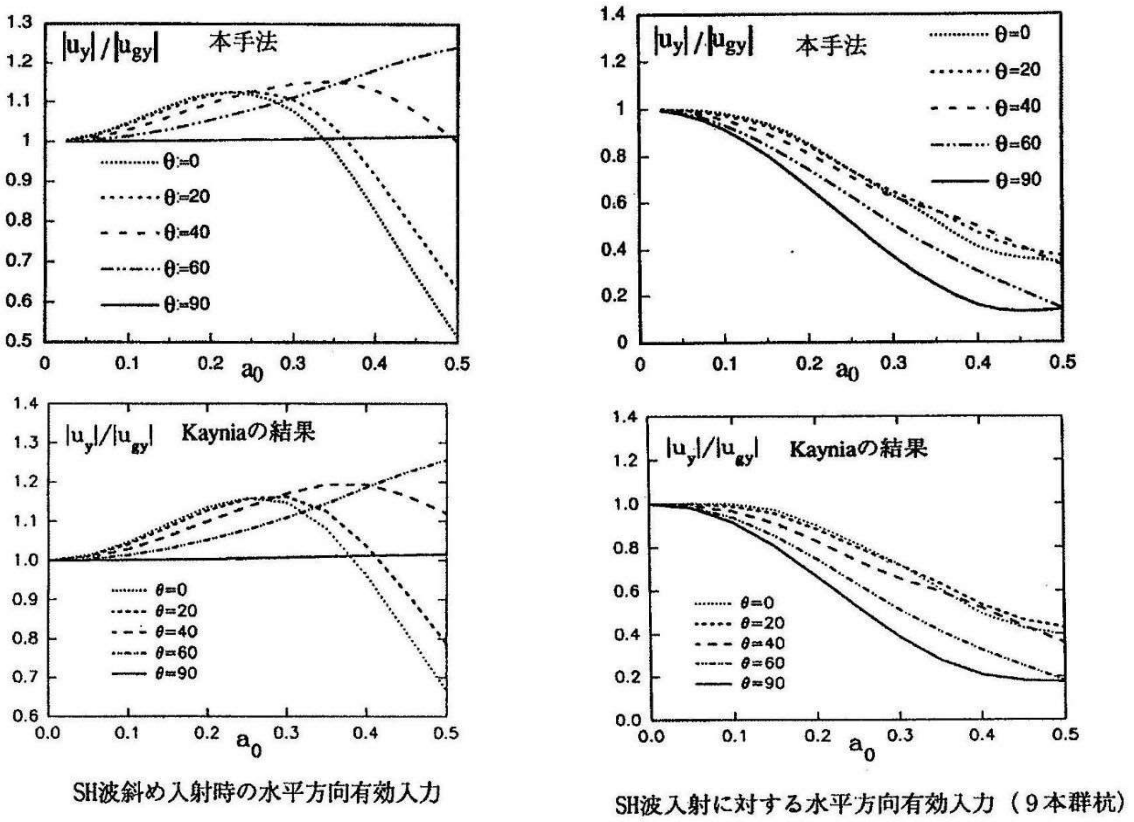


図3-2　有効入力動の比較[*1*2*5]

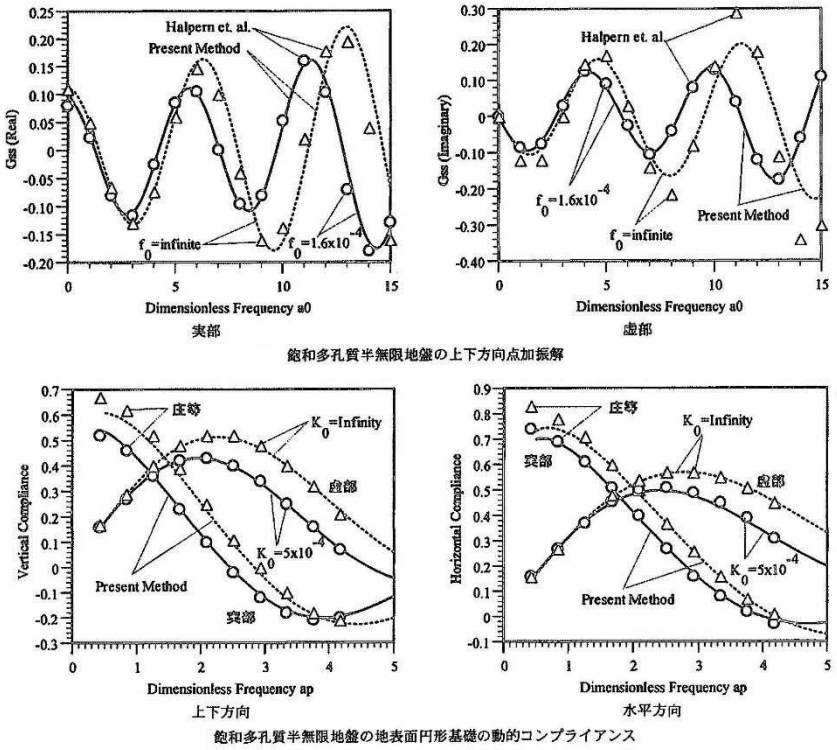


図 3-3　地盤ばねの比較*3*6*7

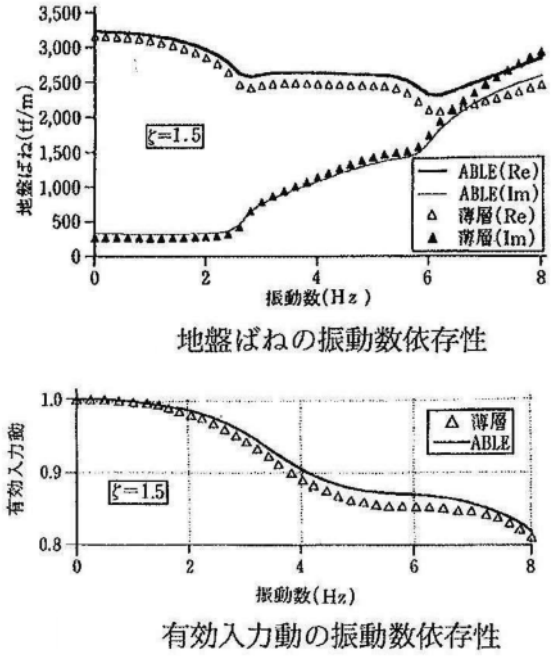


図 3-4　ＦＥＭとの比較*4

注記　＊1：高野他(1993)，サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析（その８）斜め入射実体波に対する有効入力の算定（単杭の場合），日本建築学会大会学術講演梗概集，2177

＊2：高野他(1993)，サブストラクチャー法を用いた群杭基礎の三次元地震応答解析（その８）斜め入射実体波に対する有効入力の算定（群杭の場合），日本建築学会大会学術講演梗概集，2178

＊3：高野他(1998)，飽和多孔質成層地盤の三次元薄層要素法による点加振解とその応用，日本建築学会構造系論文集，第504号，49-56，1998年2月

＊4：松田他(1994)，大規模群杭基礎の地震応答特性の解析，大林組技術研究所報No.48

＊5：A.M.Kaynia and M.Novak，”RESPONSE OF FOUNDATIONS TO RAYLEIGH WAVES AND DOBLIQUELY INCIDENT BODY WAVES”Earthquakeeng. struct. dyn. 21 (1992)

＊6：M. R. Halpern and P. Christiano ： Response of Poroelastic Half-space to Steadystate Harmonic Surface Tractions, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. Vol.10, pp.609・632,1986

＊7：庄健介，北村泰寿：半無限多孔質飽和弾性体上の円型基礎の動的コンプライアンス，構造工学論文集， Vol.34A,pp.855・864,1988.3

b.　他解析コードとの比較による検証

SPRINTより算出した地盤ばね及び地盤減衰と，既工事計画で実績のある地盤ばね算定コードVAにより算出した地盤ばね及び地盤減衰の比較検証を行う。

VAは質点系モデルにおける基礎底面地盤ばねを振動アドミッタンス理論により求める計算機コードである。振動アドミッタンス理論を用いているVAでは地盤を伝播する波動問題を水平方向・深さ方向ともに連続体の半無限地盤として波動方程式を満足する解を求めている。

薄層要素法を用いているSPRINTでは水平方向には連続体として，深さ方向には有限要素法的な離散化手法を組み合わせている。

薄層法と振動アドミッタンスを用いて，1層の一様な半無限地盤上にある40m×80mの剛基礎モデルの地盤インピーダンスを算出し，変位一様分布の加振条件により算出した縮合ばね値（地盤ばね及び地盤減衰）を比較する。なお，振動アドミッタンスの変位評価位置は要素中心である。

解析条件を表3-1に，解析モデル概念図を図3-5に，地盤インピーダンスを表3-2及び図3-6～図3-10に示す。

SPRINTとVAの結果は良好に一致している。

表3-1　解析条件

項目		値
基礎幅（m）	X方向	80
	Y方向	40
分割数（個）	X方向	10
	Y方向	5
せん断波速度Vs（m/s）		1400
粗密波速度Vp（m/s）		2914
ポアソン比		0.35
単位体積重量（kN/m^3）		20.0

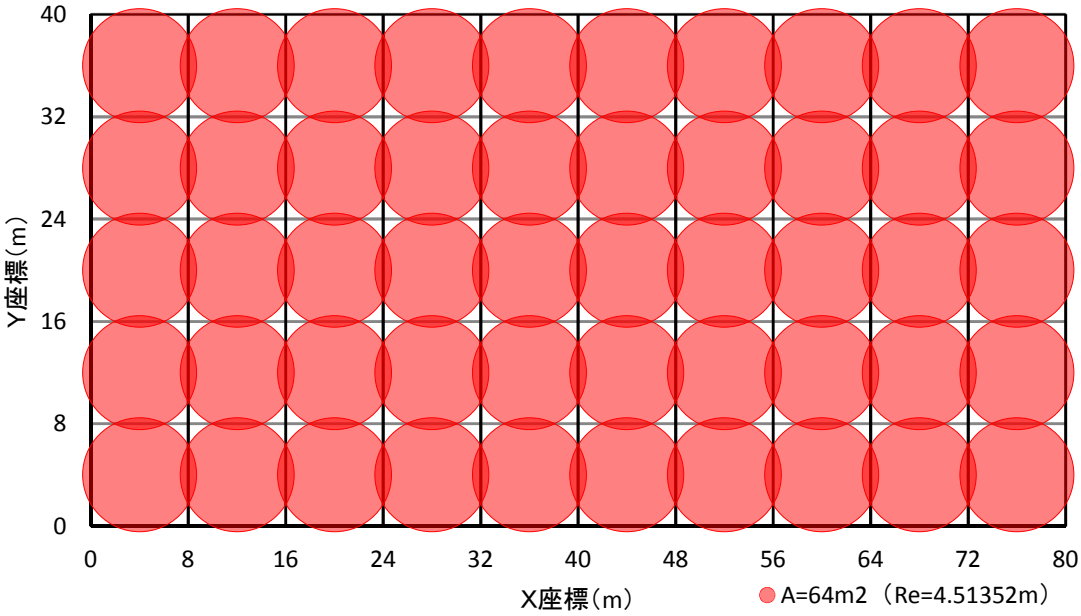


図3-5　SPRINT解析モデル概念図

表3-2　地盤インピーダンスの一覧

		SPRINT	VA	誤差
地盤剛性 kN/m	X	6.264×10^{8}	6.048×10^{8}	3.57%
	Y	6.743×10^{8}	6.460×10^{8}	4.38%
	Z	8.382×10^{8}	7.923×10^{8}	5.79%
地盤減衰* kN・s/m	X	8.312×10^{6}	7.861×10^{6}	5.74%
	Y	9.718×10^{6}	9.092×10^{6}	6.89%
	Z	1.556×10^{7}	1.523×10^{7}	2.17%

注記　＊：地盤減衰は10Hzの複素剛性値と原点との傾きを示している。

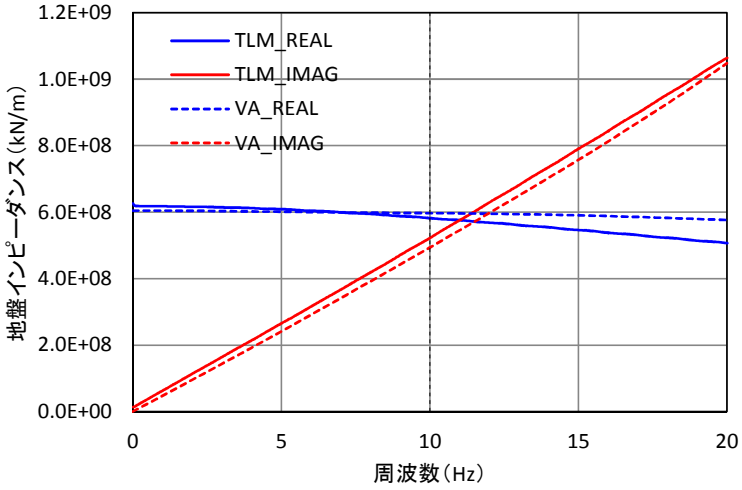


図3-6　X方向の地盤インピーダンス

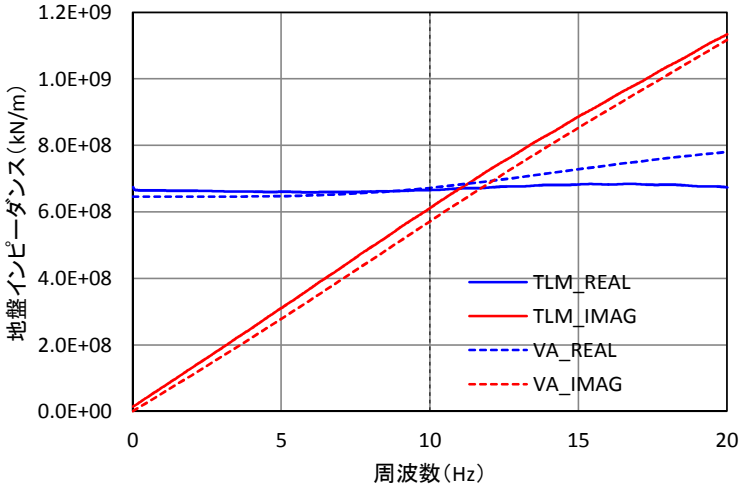


図3-7　Y方向の地盤インピーダンス

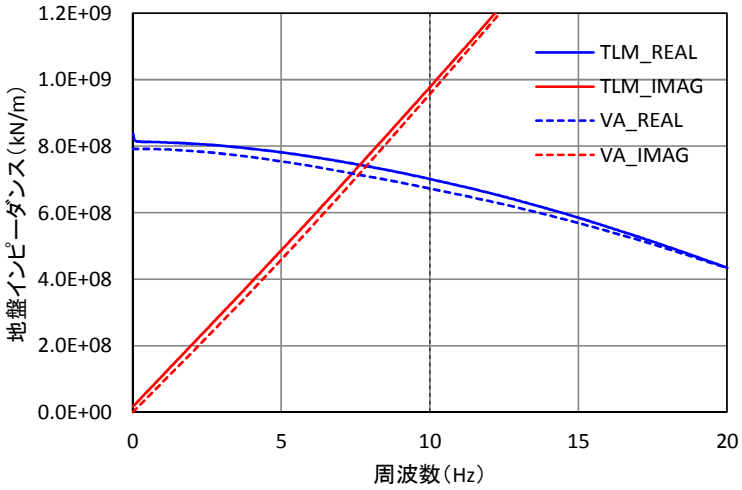


図3-8　Z方向の地盤インピーダンス

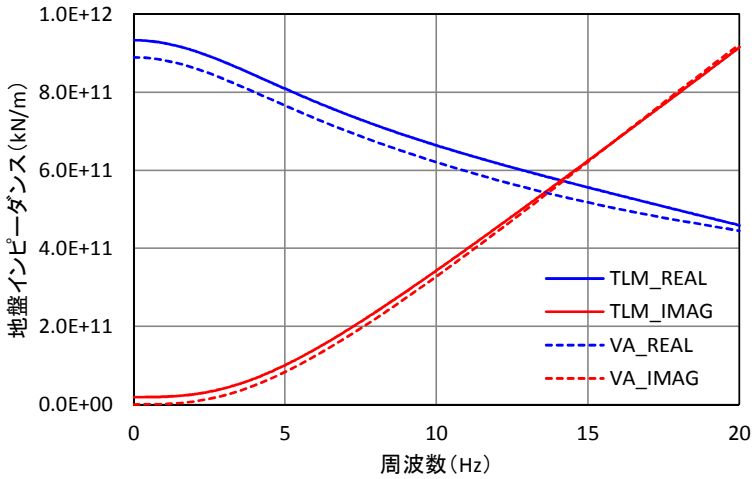


図3-9　Rx方向の地盤インピーダンス

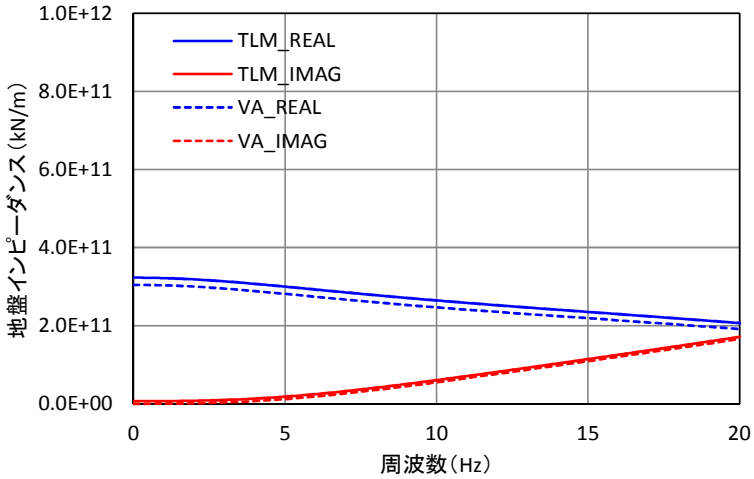


図3-10　Ry方向の地盤インピーダンス

c.　使用内容に対する妥当性

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析における有効入力動及び底面地盤ばねの算定にSPRINTを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，有効入力動，底面地盤の水平ばね，鉛直ばね及び回転ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-20　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ｍｉｃｒｏＳＨＡＫＥ／３Ｄ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 microSHAKE/3D Ver.2.2（建物・構築物関連）……3
2.2 microSHAKE/3D Ver.2.2.3.311（耐震・耐津波関連）……5

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）microSHAKE/3Dについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	Ver.2.2
Ⅴ-2-2-22-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の地震応答計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-22-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の地震応答計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-22-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の地震応答計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-22-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の地震応答計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-23-1	常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備の耐震性についての計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-23-2	常設代替高圧電源装置用カルバート（カルバート部）の耐震性についての計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-23-3	常設代替高圧電源装置用カルバート（トンネル部）の耐震性についての計算書	Ver.2.2.3.311
Ⅴ-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver.2.2.3.311

2.　解析コードの概要

2.1　microSHAKE/3D Ver.2.2（建物・構築物関連）

コード名 / 項目	microSHAKE/3D
使用目的	１次元地震応答解析（入力地震動算定）
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver.2.2
コードの概要	microSHAKE/3D（１次元波動伝播解析コード）は，重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり，地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。なお，本解析コードは，汎用解析コードである。 microSHAKE/3Dの主な特徴として，以下の①～③を挙げることができる。 ①１次元重複反射理論に基づくプログラムである。 ②地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。 ③鉛直動は，Ｓ波速度VsをＰ波速度Vpとして定義することで対応が可能である。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	microSHAKE/3Dは，使用済燃料乾式貯蔵建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における入力地震動の策定において，基準地震動Ｓ$_s$及び弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する自由地盤の応答を評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・microSHAKE/3Dについて，二層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と，１次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，地盤の応答解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・関西電力大飯発電所第3号機第2回工事計画認可申請書の資料13別

	添4(可搬型重大事故等対処設備の耐震設計書のうち屋外保管設備)にコード（Ver.2.0.1.179）が使用された実績がある。 ・今回の工認申請において使用するバージョンは，既工認において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素，応力解析及び応答解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2　microSHAKE/3D Ver.2.2.3.311（耐震・耐津波関連）

コード名 / 項目	microSHAKE/3D
使用目的	１次元地震応答解析（入力地震動算定）
開発機関	株式会社地震工学研究所
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver. 2.2.3.311
コードの概要	microSHAKE/3D（１次元波動伝播解析コード）は，重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能であり，地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。なお，本解析コードは，汎用解析コードである。 microSHAKE/3Dの主な特徴として，以下の①～③を挙げることができる。 ①１次元重複反射理論に基づくプログラムである。 ②地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮できる。 ③鉛直動は，Ｓ波速度VsをＰ波速度Vpとして定義することで対応が可能である。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	microSHAKE/3D Ver. 2.2.3.311は，常設代替高圧電源装置置場及び西側淡水貯水設備並びに常設代替高圧電源装置用カルバートの地震応答計算書及び耐震計算書における入力地震動の算定に使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は，以下のとおりである。 ・microSHAKE/3Dについて，二層のモデル地盤において地震応答解析を行った解析解と，１次元重複反射理論に基づく理論解が一致することを確認した。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下の通りである。 ・原子力産業界において，原子力発電所の土木構造物評価をはじめとする多数の解析に本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第３号機」において，可搬型重大事故等対処設備の耐震設計書のうち屋外保管設備に本コード（Ver.2.0.1.179）が使用された実績がある。

	・今回の工認申請において使用するバージョンは，既工認において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における地震応答解析を実施する際の入力地震動算定の使用用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-21　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＯＲＡ２Ｄ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. NORA2Dの解析手法について……5
3.1 一般事項……5
3.2 解析コードの特徴……5
3.3 解析手法……5
3.4 解析フローチャート……9
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……10

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NORA2Dについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-4	使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書	Ver.01.03.00

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	NORA2D
使用目的	固有値解析及び地震応答解析
開発機関	株式会社大林組
開発時期	1979年(初版)
使用したバージョン	Ver.01.03.00
コードの概要	・株式会社大林組が独自に開発したコードである。 ・NORA2D（以下「本解析コード」という。）は，2次元集中質点系モデルを対象に，地震応答解析を行う解析コードである。実固有値解析，線形応答解析の他，部材の材料非線形性及び基礎浮き上がり非線形性を考慮した非線形応答解析を行うことができる。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	NORA2D（Ver.01.03.00）は，使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析に使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・原子力産業界において，「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における事故を踏まえた大飯発電所3号機の安全性に関する総合評価（一次評価）の結果について（報告）」の地震応答解析に本解析コードが使用された実績がある。 ・地震応答解析に対して，原子力産業界において，多数の解析で使用実績のある「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）を用いた解析解と，本解析コードによる解析解を比較した結果，両者の解が概ね一致していることを確認している。 ・非線形性を考慮した地震応答解析に対して，原子産業界において，多数の解析で使用実績のある「Soil Plus」（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）を用いた解析解と，本解析コードによる解析解を比較した結果，両者の解が概ね一致していることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範

	囲内であることを確認している。

3.　NORA2Dの解析手法について

3.1　一般事項

NORA2Dは，株式会社大林組が開発したプログラムであり，時間領域における構造解析用解析コードである。NORA2Dは，使用済燃料乾式貯蔵建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

3.2　解析コードの特徴

本解析コードは，直接積分法の１つであるニューマークβ法（Newmark　β　method）により，非線形地震応答解析を行う解析コードである。主な特徴を以下に示す。

・2次元集中質点系モデルを対象とした解析コードである。
・建屋モデル化に用いるはり要素では，せん断剛性，曲げ剛性の各々に対して，独立した材料非線形性を与えることができる。
・地盤モデル化には，ダンパー付ばね要素の他，基礎浮き上がり非線形が考慮できる回転ばね要素が用意されている。
・減衰として，レーリー減衰，ひずみエネルギ比例型減衰等の適用が可能である。

3.3　解析手法

a.　運動方程式

$$[m]\{\ddot{u}\}+[c]\{\dot{u}\}+[k]\{u\}=-[m]\{\alpha\}\ddot{u}_0 \cdots\cdots (1)$$

ここに，

$[m]$　：質量マトリックス
$[c]$　：減衰マトリックス
$[k]$　：剛性マトリックス
$\{u\}$　：変位ベクトル
$\{\alpha\}$　：入力ベクトル（入力のある自由度:1，他:0）
$\ddot{u}_0$　：入力地震動の加速度

地盤ばねを考慮する質点を添字cで，それ以外の質点を添字sで表すと(1)式は次式となる。

$$\begin{bmatrix}M_s & 0\\ 0 & M_c\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{u}_s\\ \ddot{u}_c\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}C_{ss} & C_{sc}\\ C_{cs} & C_{cc}+C_c\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{u}_s\\ \dot{u}_c\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}K_{ss} & K_{sc}\\ K_{cs} & K_{cc}+K_c\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_s\\ u_c\end{Bmatrix}=-\begin{bmatrix}M_s & 0\\ 0 & M_c\end{bmatrix}\{\alpha\}\ddot{u}_0 \cdots (2)$$

ここで，

$$[m]=\begin{bmatrix}M_s & 0\\ 0 & M_c\end{bmatrix}$$

$$[c] = \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix}$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix}$$

$[K_c]$, $[C_c]$　：地盤ばねの剛性及び減衰マトリックス

b.　固有値の解法

(2)式において，外力項を$\{0\}$とし減衰項を除けば，(3)式に示す自由振動を表す方程式となる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_c \end{Bmatrix} = \{0\} \quad \cdots\cdots (3)$$

(3)式で変位$(u_s, u_c)^T$に調和振動を仮定すれば，(4)式が得られる。

$$\left(-\omega_i^2 \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} + K_c \end{bmatrix} \right) \{\phi_i\} = \{0\} \quad \cdots\cdots (4)$$

ここで，

ω_i　：i次の固有円振動数

$\{\phi_i\}$　：i次の固有モードベクトル

(4)式が固有モードベクトル$\{\phi_i\} \neq \{0\}$を満たす条件は固有値問題となり，(4)式を解くことにより固有値ω_iが得られる。

c. 減衰項の設定

本項では，系の粘性減衰に着目し，建物にはひずみエネルギ比例型減衰，地盤ばねには減衰係数を直接与えることを想定して，減衰項の設定について述べる。

地盤ばねに与える減衰を除いた建物のモード減衰定数h_iは，i次振動モードにおける各部材のひずみエネルギに比例するものとして次式で求める。

$$\mathrm{h}_i = \frac{\Sigma_j\left(\mathrm{h}^j \mathrm{E}_i^j\right)}{\Sigma_j \mathrm{E}_i^j} \cdots\cdots (5)$$

ここで，

h^j ： j部材の減衰定数

$$\mathrm{E}_i^j = \frac{1}{2}\left\{\phi_i^j\right\}^T \left[k^j\right]\left\{\phi_i^j\right\} \cdots\cdots (6)$$

ただし，

$\left[k^j\right]$ ： j部材の剛性マトリックス

$\left\{\phi_i^j\right\}$ ： i次振動モードにおけるj部材の材端変位ベクトル

建物の減衰マトリックスは，(5)式による各次モード減衰定数と固有モードベクトルより次式で求める。

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \left(\Sigma_i \{\phi_i\}\eta_i \{\phi_i\}^T\right) \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \cdots\cdots (7)$$

ここで，

$$\eta_i = \frac{2\mathrm{h}_i \omega_i}{\{\phi_i\}^T \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_c \end{bmatrix} \{\phi_i\}}$$

なお，地盤ばねの減衰は，C_cで表される内部粘性減衰として与えられるので，地盤-建物連成モデルの減衰マトリックスは，次式で与えられる。

$$[c] = \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sc} \\ C_{cs} & C_{cc} + C_c \end{bmatrix} \cdots\cdots (8)$$

d. 運動方程式の解法

本解析コードでは，直接積分法の１つであるニューマークβ法により，各時間ステップに対する運動方程式の解を順次求めていく。以下に，ニューマークβ法の概要を示す。

nステップの変位$\{u\}_{(n)}$，速度$\{\dot{u}\}_{(n)}$，加速度$\{\ddot{u}\}_{(n)}$が既知とすると，n+1ステップの変位，速度はβをパラメータとして(9)式のように表せる。

$$\{\dot{u}\}_{(n+1)} = \{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{1}{2}\left(\{\ddot{u}\}_{(n+1)} + \{\ddot{u}\}_{(n)}\right)$$
$$\{u\}_{(n+1)} = \{u\}_{(n)} + \{\dot{u}\}_{(n)}\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t^2 + \beta\{\ddot{u}\}_{(n+1)}\Delta t^2 \quad \cdots\cdots (9)$$

(9)式をn+1ステップの運動方程式(1)式に代入して$\{\dot{u}\}_{(n+1)}$及び$\{\ddot{u}\}_{(n+1)}$を消去することにより，変位増分$\{\Delta u\} = \{u\}_{(n+1)} - \{u\}_{(n)}$を以下のように求めることができる。

$$\{\Delta u\} = [\overline{K}]^{-1}\{\overline{\Delta \mathrm{P}}\} \cdots\cdots (10)$$

ここに，

$$[\overline{K}] = [k] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[c] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[m]$$

$$\{\overline{\Delta \mathrm{P}}\} = -[m]\{\alpha\}\Delta\ddot{u}_0 + [m]\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}\}_{(n)}\right) + [c]\left(\frac{1}{2\beta}\{\dot{u}\}_{(n)} + \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t\right)$$

$$\Delta\ddot{u}_0 = \ddot{u}_{0(n+1)} - \ddot{u}_{0(n)}$$

また，$\{\Delta\dot{u}\} = \{\dot{u}\}_{(n+1)} - \{\dot{u}\}_{(n)}$及び$\{\Delta\ddot{u}\} = \{\ddot{u}\}_{(n+1)} - \{\ddot{u}\}_{(n)}$は，(10)式の$\{\Delta u\}$を用いて次式のように表される。

$$\{\Delta\dot{u}\} = \frac{1}{2\beta\Delta t}\{\Delta u\} - \frac{1}{2\beta}\{\dot{u}\}_{(n)} - \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_{(n)}\Delta t \cdots\cdots (11)$$

$$\{\Delta\ddot{u}\} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\{\Delta u\} - \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_{(n)} - \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}\}_{(n)} \cdots\cdots (12)$$

このように，(10)～(12)式の手続きを繰り返すことにより，各時間ステップに対する運動方程式の解が順次求められることとなる。

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

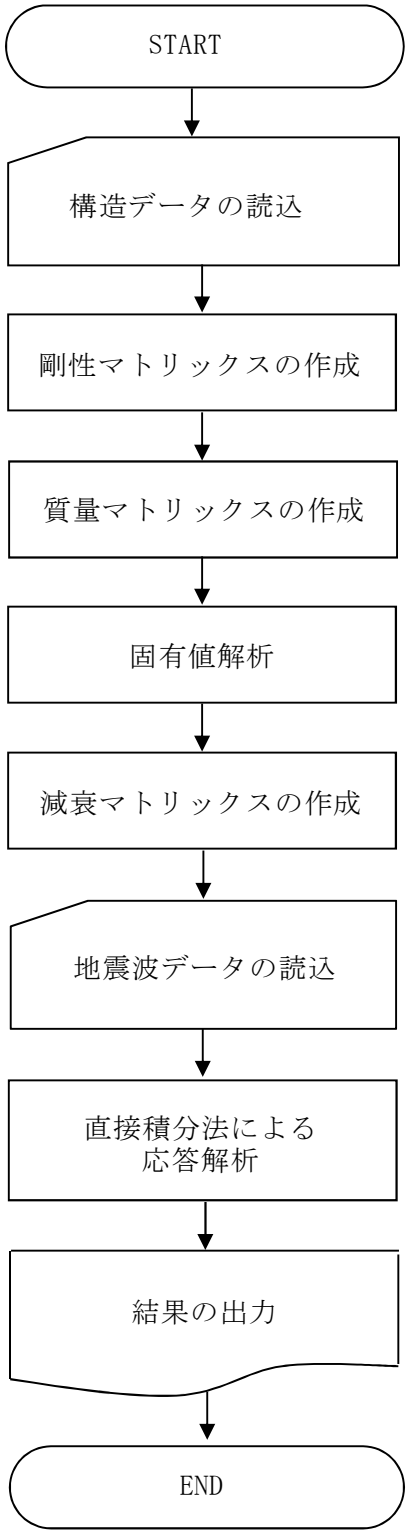


図3-1　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a.　検証(Verification)

本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。

b.　妥当性確認(Validation)

検証用の解析コードとして，原子力産業界において，多数の解析で使用実績のある「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）を用いた解析解と，NORA2Dによる解析解を比較した。

また，付着力を考慮した地震応答解析に対して，原子力産業界において，多数の解析で使用実績のある「Soil Plus」（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）を用いた解析解と，NORA2Dによる解析解を比較した。

(a)　「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）との比較

PWR型原子炉建屋モデルを模擬した質点系SR（スウェイ-ロッキング）モデルを対象に「TDAPⅢ」（株式会社アーク情報システム）を用いた解析解と，NORA2Dによる解析解を比較した。検証解析の主な内容は以下のとおりとする。

①固有値解析

質点系SRモデルの固有値解析を実施し，固有値（固有振動数），及びひずみエネルギ比例型減衰手法に基づくモード減衰定数について，NORA2DとTDAPⅢによる結果を比較する。

②線形応答解析

同上の質点系SRモデルに対して，線形応答解析を実施し，節点及び要素の最大応答値について，NORA2DとTDAPⅢによる結果を比較する。

なお，応答解析の時間刻みは0.002 秒とし，直接積分法による。建屋減衰はひずみエネルギ比例型減衰として減衰マトリックスを構成し，地盤の減衰については別途，当該自由度に地盤の減衰係数を足しこむことにより考慮する。

質点系SRモデルの概要図を図3-2に，建屋諸元について表3-1～表3-3に，地盤ばね諸元と浮上り非線形特性について表3-4及び図3-3に，入力地震動を図3-4に示す。

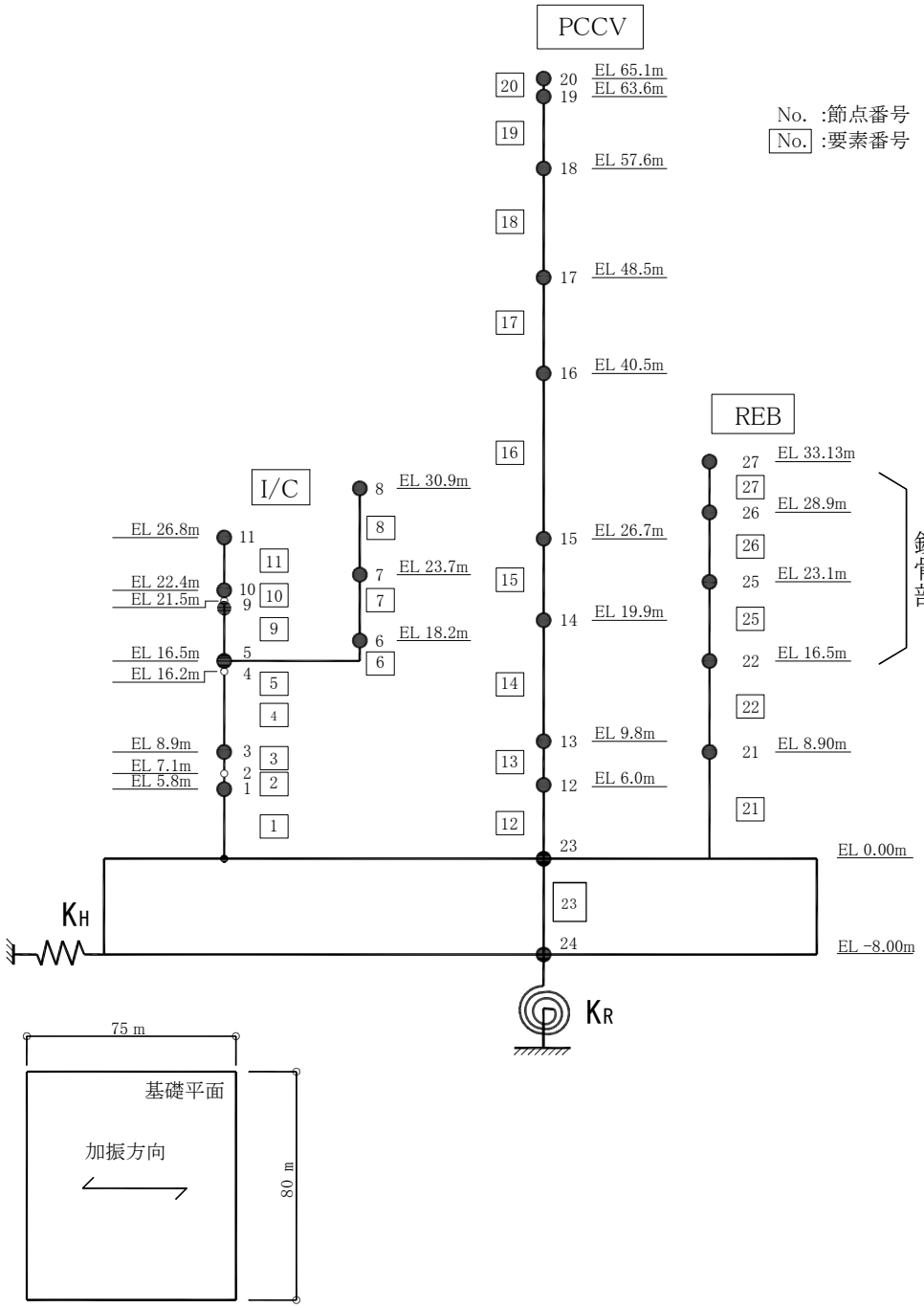


図3-2　PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデル

表3-1　PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの諸元（R/B）

建屋・構造物	質点番号	高さ EL.(m)	重量(tf)	回転慣性 ($\times 10^6$ tf/m^2)	要素番号	せん断断面積 (m^2)	断面2次モーメント (m^4)	軸断面積 (m^2)
内部コンクリート (I/C)	IC11	26.80	290		11	13	36	47
	IC10	22.40	475		10	13	36	47
	IC09	21.50	475		9	28	1000	91
	IC08	30.90	200		8	13	180	25
	IC07	23.70	440		7	13	180	25
	IC06	18.20	260	－	6	13	180	25
	IC05	16.50	5000		5	102	11500	203
	IC04	16.20	－		4	102	11500	203
	IC03	8.90	4600		3	134	15200	255
	IC02	7.10	－		2	130	15100	244
	IC01	5.80	3000		1	147	17400	277
			14740					
原子炉格納容器 (PCCV)	CV20	65.10	320		20	44	610	1.3
	CV19	63.60	1390		19	76	13480	8.4
	CV18	57.60	3020		18	76	29240	51
	CV17	48.50	3380		17	83	39780	160
	CV16	40.50	5930	－	16	90	44420	180
	CV15	26.70	4780		15	90	44420	180
	CV14	19.90	3920		14	90	44420	180
	CV13	9.80	3230		13	90	44420	180
	CV12	6.00	2280		12	90	44420	180
			28250					
周辺補機棟 REB	EB22	16.50	25100	16.0	22	460	230400	890
	EB21	8.90	31700	21.0	21	610	265600	1120
基礎版 BASE	BS23	0.00	78800	27.3	23	5,100	2810000	6000
	BS24	-8.00	57600	27.3				

表3-2　PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの諸元（鉄骨部）

建屋・構造物	質点番号	高さ EL.(m)	重量(tf)	回転慣性 ($\times 10^6$ t /m^2)	要素番号	せん断ばね定数(tf/cm)
燃料取扱棟 REB (鉄骨部)	FH27	33.129	200	－	27	6894
	FH26	28.90	140	－	26	6718
	FH25	23.10	170	－	25	5577

表3-3　PWR型原子炉建屋を模擬した質点系SRモデルの材料定数と減衰定数

	ヤング係数 E(tf/cm^2)	せん断剛性 G(tf/cm^2)	減衰定数 h(%)	設計基準強度 Fc(kg/cm^2)
原子炉格納容器（PCCV）	304 361	136 155	3	420 588
周辺補機棟，燃料取扱棟（REB） 内部コンクリート（I/C） 基礎版　(B/M)	270 318	116 136	5*	240 336

注記　＊：部材番号25，26，27のFH/B鉄骨部の減衰定数は2%

表3-4　地盤ばね定数と減衰係数

	ばね定数 Ks	減衰係数 Cs
水平	10.75×10^5 (tf/cm)	1.80×10^4 (tf･sec/cm)
回転	16.81×10^{12} (tf･cm/rad)	9.85×10^{10} (tf･cm･sec/rad)

注　：浮上り限界転倒モーメント：M = W･L/6 = 244,600tf･75m/6 = 3.06×10^6tf･cm/rad

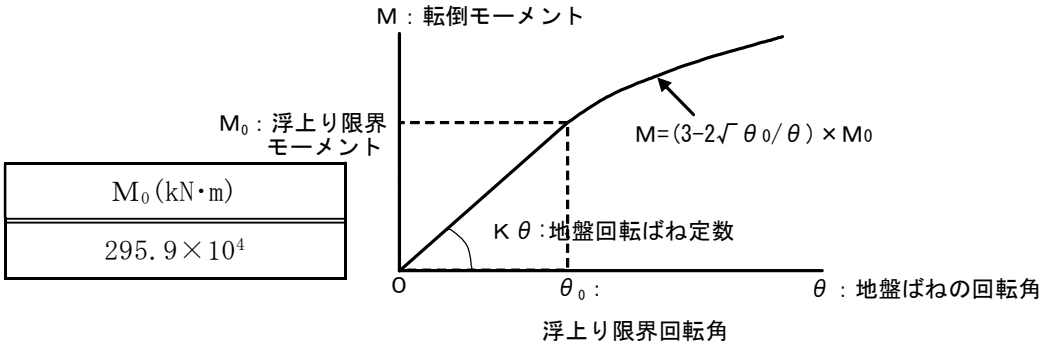
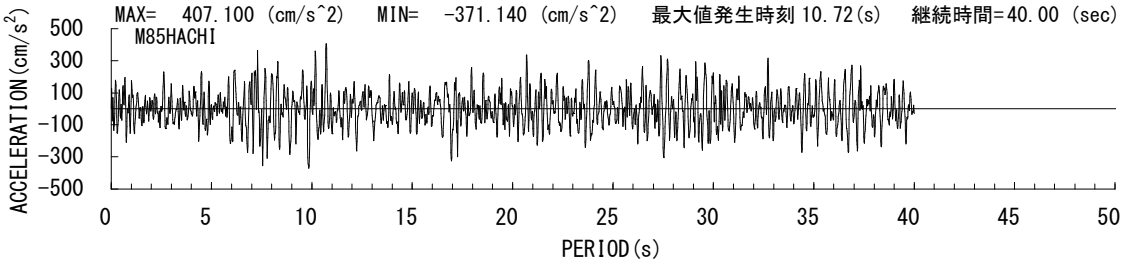
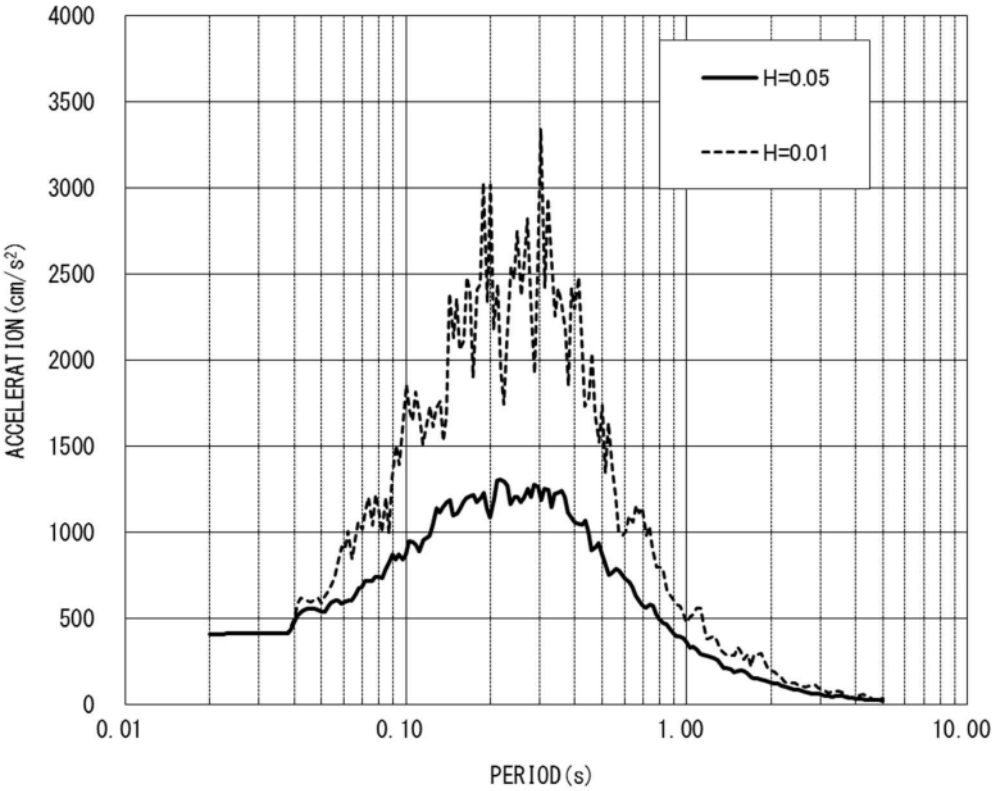


図3-3　地盤回転ばねの浮上り非線形特性



(a) 加速度時刻歴



(b) 応答スペクトル（減衰定数1%, 5%）

図3-4 入力地震動

ｲ. 固有値解析

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した固有値の比較を表3-5に示す。

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した固有値（固有振動数）とモード減衰定数について，両者の結果が同一となることを確認した。

表3-5　固有周期，固有振動数およびモード減衰定数による比較

次数	振動数(Hz)			モード減衰定数		
	NORA2D	TDAPⅢ	誤差比率	NORA2D	TDAPⅢ	誤差比率
1	4.99	4.99	0.00	0.0277	0.0277	0.00
2	9.56	9.56	0.00	0.0160	0.0160	0.00
3	13.0	13.0	0.00	0.0228	0.0228	0.00
4	13.9	13.9	0.00	0.0454	0.0454	0.00
5	15.9	15.9	0.00	0.0279	0.0279	0.00
6	17.0	17.0	0.00	0.0248	0.0248	0.00
7	19.9	19.9	0.00	0.0496	0.0496	0.00
8	24.2	24.2	0.00	0.0428	0.0428	0.00
9	28.1	28.1	0.00	0.0458	0.0458	0.00
10	28.7	28.7	0.00	0.0338	0.0338	0.00
11	35.2	35.2	0.00	0.0294	0.0294	0.00
12	37.4	37.4	0.00	0.0201	0.0201	0.00
13	40.1	40.1	0.00	0.0303	0.0303	0.00
14	42.7	42.7	0.00	0.0499	0.0499	0.00
15	44.5	44.5	0.00	0.0484	0.0484	0.00
16	49.9	49.9	0.00	0.0500	0.0500	0.00
17	50.4	50.4	0.00	0.0300	0.0300	0.00
18	54.4	54.4	0.00	0.0500	0.0500	0.00
19	57.5	57.5	0.00	0.0302	0.0302	0.00
20	58.1	58.1	0.00	0.0490	0.0490	0.00

ﾛ. 線形応答解析

NORA2DとTDAPⅢで算定した線形応答解析結果の比較を表3-6及び表3-7に示す。なお，比較は変位，速度，加速度，せん断力及びモーメントについて示している。

質点系SRモデルにおけるNORA2DとTDAPⅢで算定した各応答について，両者の結果がほぼ同一となることを確認した。

表3-6　節点の最大応答値（変位，速度，加速度）による比較（質点系SRモデル，線形応答解析）

(1) 水平変位

節点番号	NORA2D (cm)	TDAPⅢ (cm)	誤差 比率
1	0.1669	0.1669	0.00
2	0.1760	0.1760	0.00
3	0.1888	0.1888	0.00
4	0.2413	0.2413	0.00
5	0.2436	0.2436	0.00
6	0.2586	0.2586	0.00
7	0.3155	0.3155	0.00
8	0.3892	0.3892	0.00
9	0.2776	0.2776	0.00
10	0.2853	0.2853	0.00
11	0.3226	0.3226	0.00
12	0.2905	0.2905	0.00
13	0.4230	0.4230	0.00
14	0.8107	0.8107	0.00
15	1.086	1.086	0.00
16	1.639	1.639	0.00
17	1.930	1.930	0.00
18	2.231	2.231	0.00
19	2.399	2.399	0.00
20	2.437	2.437	0.00
21	0.1790	0.1790	0.00
22	0.2141	0.2141	0.00
23	0.1288	0.1288	0.00
24	0.1045	0.1045	0.00
25	0.3334	0.3334	0.00
26	0.4061	0.4061	0.00
27	0.4536	0.4536	0.00

(2) 水平速度

節点番号	NORA2D (cm/s)	TDAPⅢ (cm/s)	誤差 比率
1	5.260	5.261	0.00
2	5.640	5.642	0.00
3	6.180	6.179	0.00
4	9.070	9.067	0.00
5	9.200	9.196	0.00
6	10.26	10.26	0.00
7	14.63	14.63	0.00
8	20.41	20.41	0.00
9	11.17	11.17	0.00
10	11.64	11.64	0.00
11	13.99	13.99	0.00
12	8.330	8.327	0.00
13	11.57	11.57	0.00
14	22.01	22.01	0.00
15	30.37	30.37	0.00
16	47.50	47.50	0.00
17	56.59	56.59	0.00
18	65.99	65.99	0.00
19	71.20	71.20	0.00
20	72.40	72.40	0.00
21	5.140	5.142	0.00
22	6.260	6.265	0.00
23	3.720	3.724	0.00
24	2.980	2.979	0.00
25	16.74	16.74	0.00
26	24.38	24.38	0.00
27	29.11	29.11	0.00

(3) 絶対加速度

節点番号	NORA2D (cm/s2)	TDAPⅢ (cm/s2)	誤差 比率
1	523.2	523.2	0.00
2	540.9	540.9	0.00
3	565.9	565.9	0.00
4	712.0	712.0	0.00
5	719.6	719.6	0.00
6	781.5	781.5	0.00
7	1,051	1,051	0.00
8	1,423	1,423	0.00
9	838.0	838.0	0.00
10	867.6	867.6	0.00
11	1,015	1,014	0.00
12	538.1	538.1	0.00
13	599.6	599.6	0.00
14	887.5	887.5	0.00
15	1,123	1,123	0.00
16	1,585	1,585	0.00
17	1,822	1,822	0.00
18	2,126	2,126	0.00
19	2,302	2,302	0.00
20	2,343	2,343	0.00
21	531.4	531.4	0.00
22	593.8	593.8	0.00
23	451.5	451.5	0.00
24	433.0	433.0	0.00
25	1,256	1,256	0.00
26	1,816	1,816	0.00
27	2,166	2,166	0.00

表3-7　要素の最大応答値（せん断力，曲げモーメント）による比較（質点系SRモデル，線形応答解析）

(1) はり要素

要素番号	下端曲げモーメントM			せん断力S		
	NORA2D (kN・m)	TDAPⅢ (kN・m)	誤差 比率	NORA2D (kN)	TDAPⅢ (kN)	誤差 比率
1	1.376E+06	1.376E+06	0.00	9.445E+04	9.445E+04	0.00
2	8.297E+05	8.297E+05	0.00	8.052E+04	8.052E+04	0.00
3	7.250E+05	7.250E+05	0.00	8.051E+04	8.051E+04	0.00
4	5.800E+05	5.800E+05	0.00	5.624E+04	5.624E+04	0.00
5	1.700E+05	1.700E+05	0.00	5.623E+04	5.623E+04	0.00
6	7.849E+04	7.849E+04	0.00	9.461E+03	9.461E+03	0.00
7	6.220E+04	6.220E+04	0.00	7.450E+03	7.450E+03	0.00
8	2.092E+04	2.092E+04	0.00	2.840E+03	2.840E+03	0.00
9	7.510E+04	7.510E+04	0.00	1.103E+04	1.103E+04	0.00
10	1.979E+04	1.979E+04	0.00	7.058E+03	7.058E+03	0.00
11	1.325E+04	1.324E+04	0.00	2.941E+03	2.941E+03	0.00
12	1.512E+07	1.512E+07	0.00	3.705E+05	3.705E+05	0.00
13	1.290E+07	1.290E+07	0.00	3.608E+05	3.608E+05	0.00
14	1.153E+07	1.153E+07	0.00	3.433E+05	3.433E+05	0.00
15	8.061E+06	8.061E+06	0.00	3.087E+05	3.087E+05	0.00
16	6.000E+06	6.000E+06	0.00	2.552E+05	2.552E+05	0.00
17	2.507E+06	2.507E+06	0.00	1.645E+05	1.645E+05	0.00
18	1.191E+06	1.191E+06	0.00	1.035E+05	1.035E+05	0.00
19	2.484E+05	2.484E+05	0.00	3.944E+04	3.944E+04	0.00
20	1.148E+04	1.148E+04	0.00	7.484E+03	7.484E+03	0.00
21	5.213E+06	5.213E+06	0.00	3.233E+05	3.233E+05	0.00
22	1.884E+06	1.884E+06	0.00	1.552E+05	1.552E+05	0.00
23	2.604E+07	2.604E+07	0.00	1.035E+06	1.035E+06	0.00

(2) せん断バネ要素

要素番号	せん断ばね		
	NORA2D (kN)	TDAPⅢ (kN)	誤差 比率
25	9,073	9,073	0.00
26	6,922	6,922	0.00
27	4,360	4,360	0.00

(3) 地盤バネ要素

要素番号	地盤バネ		
	NORA2D (kN,kN・m)	TDAPⅢ (kN,kN・m)	誤差 比率
水平ばね	1.101E+06	1.101E+06	0.00
回転ばね	2.598E+07	2.598E+07	0.00

(4) 地盤粘性要素

要素番号	粘性要素		
	NORA2D (kN,kN・m)	TDAPⅢ (kN,kN・m)	誤差 比率
水平粘性	5.259E+05	5.259E+05	0.00
回転粘性	5.082E+06	5.082E+06	0.00

注　：(kN)は，水平ばね及び水平粘性に適用し，(kN・m)は，回転ばね及び回転粘性に適用する。

(b) 「Soil Plus」（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）との比較

地盤－建屋間の連成を考慮し，かつ基礎底面と地盤間の付着力を考慮した質点系モデルの地震応答解析に対して，「Soil Plus」（伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）を用いた解析解と，NORA2Dによる解析解を比較した。検証解析の主な内容は以下のとおりとする。

① 非線形応答解析

部材の材料非線形性および基礎浮上りによる幾何学的非線形性を考慮した地震応答解析を実施し，節点及び要素の最大応答値について，NORA2DとSoil Plusによる結果を比較する。なお，建屋基礎底面と地盤との間に付着力を考慮する。

NORA2Dにおける解析モデルは，地盤－建屋連成系を質点及び梁やばね等に置換したモデル（以下「質点系SRモデル」という。）とする。質点系SRモデルの解析モデル図を図3-5に，建屋モデルの諸元及び建屋モデルの材料定数と減衰定数を表3-8，表3-9に，地盤諸元と地盤回転ばねの浮上り非線形特性を表3-10，図3-6に，上部構造の復元力特性を表3-11，表3-12に示す。

なお，基礎浮上り非線形特性のモデル化，及び建屋の復元力特性は，ＪＥＡＧ４６０１*に従うものとする。NORA2Dにおける質点系SRモデルの地震応答解析の時間刻みは0.001 秒とし，直接積分法による。建屋減衰は歪エネルギ比例型減衰として減衰マトリックスを構成し，地盤の減衰については別途，当該自由度に地盤の減衰係数を足しこむことにより考慮する。

注記　＊：(社)日本電気協会 原子炉発電所耐震設計技術指針追補版（ＪＥＡＧ４６０１－1991）

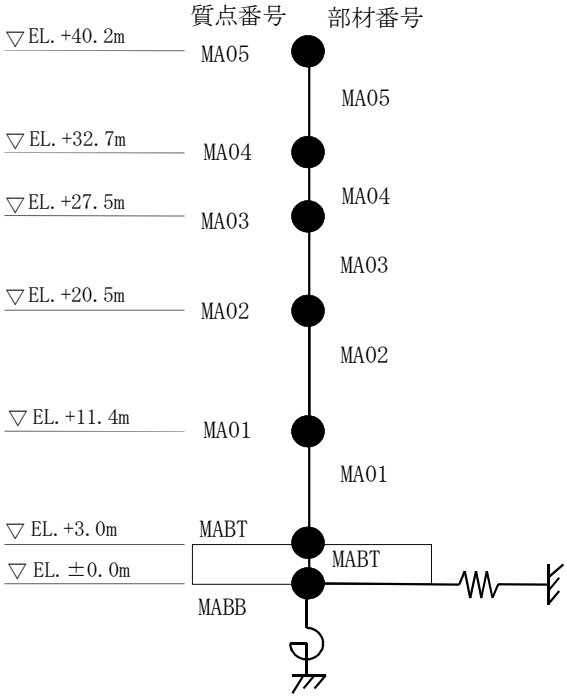


図3-5　質点系SRモデルの解析モデル図

表3-8　建屋モデルの諸元

質点番号	高さ EL. (m)	重量 W (t)	回転慣性 J_θ ($\times 10^4$ t・m^2)	部材番号	せん断断面積 As (m^2)	断面２次ﾓｰﾒﾝﾄ I ($\times 10^2$m^4)	軸断面積 A_N(m^2)
MA05	40.2	892.7	－	MA05	0.191	－	0.682
MA04	32.7	847.0	1.69	MA04	15.92	6.24	62.84
MA03	27.5	6,611.4	83.1	MA03	77.60	241.03	187.41
MA02	20.5	9,247.8	116.4	MA02	105.09	274.07	250.83
MA01	11.4	13,148.3	166.0	MA01	107.95	302.05	282.49
MABT	3.0	11,572.4	161.2	MABT	1,856.4	2,575.20	1,856.4
MABB	0.0	8,736.7	121.5				

表3-9　建屋モデルの材料定数と減衰定数

部位	ヤング係数 E ($\times 10^3$ kg/cm^2)	ポアソン比 ν	減衰定数 h(%)
RC 部	270	0.167	5.0
鉄骨部	2,100	0.3	2.0

表3-10　地盤諸元

並進		回転	
ばね定数 ($\times 10^5$t/cm)	減衰係数 ($\times 10^3$t・s/cm)	ばね定数 ($\times 10^{12}$t・cm/rad)	減衰係数 ($\times 10^9$t・cm・s/rad)
5.911	5.074	2.710	2.510

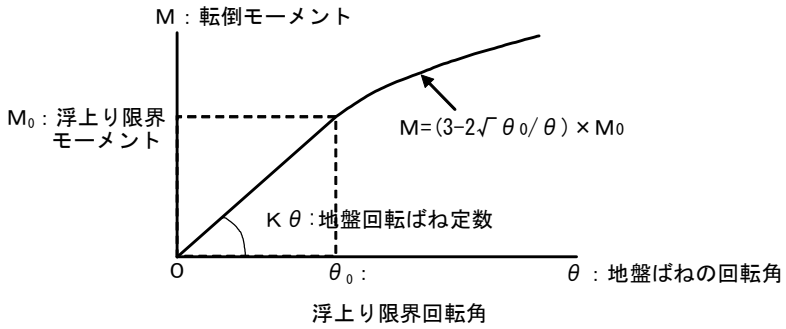


図3-6　地盤回転ばねの浮上り非線形特性

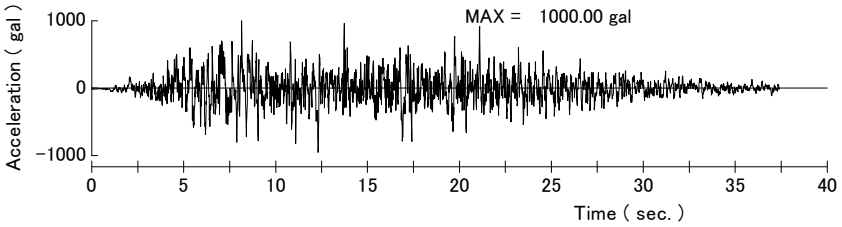
表3-11　上部構造の復元力特性（τ－γ関係）

部材	τ_1 (kg/cm^2)	γ_1 ($\times10^{-3}$)	τ_2 (kg/cm^2)	γ_2 ($\times10^{-3}$)	τ_3 (kg/cm^2)	γ_3 ($\times10^{-3}$)
MA04	19.47	0.17	26.29	0.50	55.79	4.00
MA03	19.56	0.17	26.41	0.51	60.20	4.00
MA02	20.35	0.18	27.48	0.53	59.48	4.00
MA01	21.34	0.18	28.81	0.55	60.05	4.00

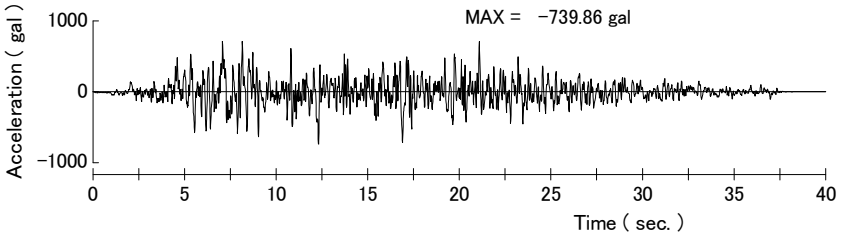
表3-12　上部構造の復元力特性（M－φ関係）

部材	M_1 ($\times10^4$t･m)	ϕ_1 ($\times10^{-6}$/m)	M_2 ($\times10^4$ t･m)	ϕ_2 ($\times10^{-6}$/m)	M_3 ($\times10^4$ t･m)	ϕ_3 ($\times10^{-6}$/m)
MA04	2.06	12.23	5.63	136.15	8.83	2723.10
MA03	32.68	5.02	62.18	51.43	89.82	1028.50
MA02	39.30	5.31	72.35	51.62	110.81	1032.50
MA01	45.69	5.60	88.13	53.11	139.26	1062.20

質点系SRモデルの地震応答解析では埋込みを考慮する。入力地震動については，2E波を解放基盤面（建屋底面位置）に定義し，建屋底面位置におけるE+F波及び切欠き力を求め，これを建屋へ入力する。入力地震動（加速度時刻歴）について図3-7に示す。



（a）2E波（解放基盤面）



（b）E+F波（建屋入力動）

図3-7　入力地震動（加速度時刻歴）

比較用の解析コード「Soil Plus」における解析モデルは，3次元FEM地盤-建屋モデル（以下，「3DFEMモデル」という。）とする。

3DFEMモデルの概念図を図3-8に，解析モデルを図3-9に示す。建屋は梁要素，基礎版は板要素，地盤はソリッド要素でモデル化する。基礎版節点と地盤節点をジョイント要素で連結し，浮上りを考慮する。

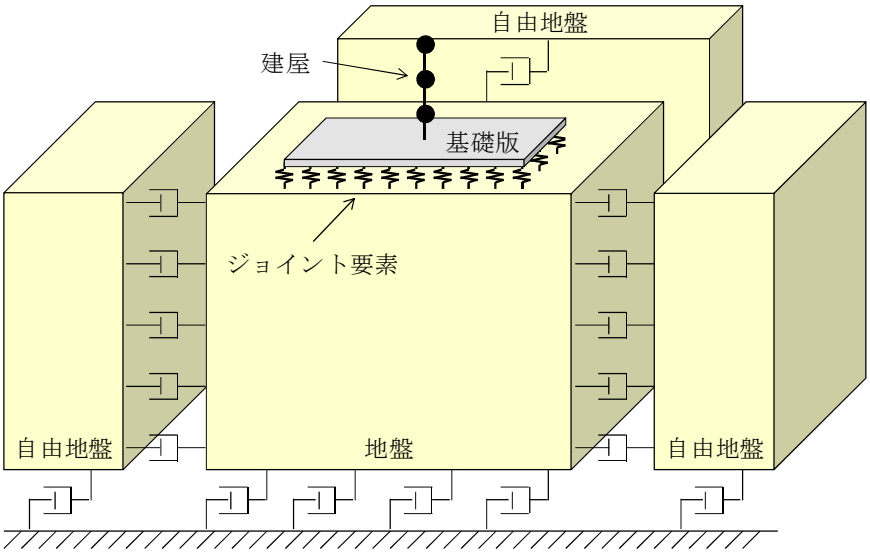


図3-8　3DFEMモデルの概念

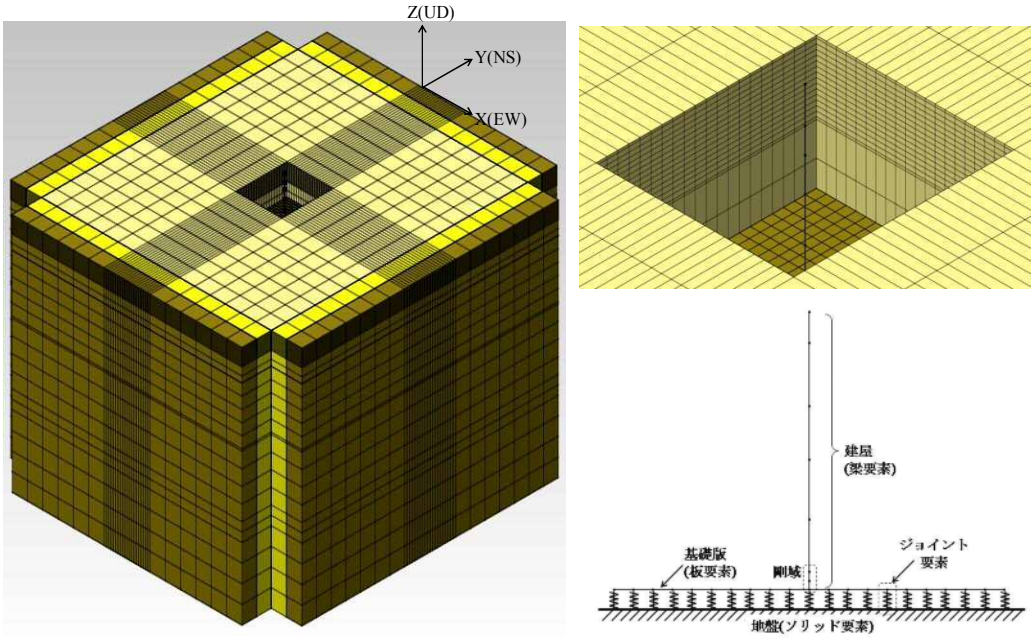


図3-9　解析モデル（3DFEMモデル）

3DFEMモデルの建屋諸元については表3-8及び表3-9に，建屋の復元力特性は表3-11及び表3-12に従う。なお，地震応答解析では，時間刻みを0.002 秒とする。

3DFEMモデルにおける自由地盤の重量は，地盤に比べ十分大きい値（地盤×10^6）を設定し，地盤と自由地盤をダッシュポットで繋ぎ，逸散減衰を表現する。また，減衰についてはRayleigh型減衰を用いる。

NORA2DとSoil Plusにおける建屋各部の最大応答値（加速度，変位）を表3-13，表3-14に示す。

建屋各部の応答は，やや応答差が現れるものの，両解析コードにおける非線形応答解析結果は概ね同一となることを確認した。

表3-13　建屋各部の最大応答値（加速度）

最大応答加速度（cm/s^2）			
質点	NORA2D	Soil Plus	誤差比率
MA05	4820	4665	0.03
MA04	2319	2319	0.00
MA03	1496	1576	0.05
MA02	1279	1283	0.00
MA01	1118	1092	0.02

表3-14　建屋各部の最大応答値（変位）

最大応答変位（cm）			
質点	NORA2D	Soil Plus	誤差比率
MA05	6.14	6.36	0.03
MA04	2.87	2.78	0.03
MA03	1.81	1.89	0.04
MA02	1.52	1.61	0.05
MA01	1.07	1.09	0.02

(c)　使用内容に対する妥当性

PWR型原子炉建屋モデルを模擬した2次元質点系SRモデルによる検証において，以下の結果が得られたことから，本解析コードを対象とする検討に用いることは妥当である。

・固有値解析結果について，他解析コードの計算結果と比較して同じ結果が得られることが確認できた。
・線形応答解析結果について，他解析コードの計算結果と比較してほぼ同一の結果が得られることが確認できた。
・部材の材料非線形性及び基礎浮き上がり非線形性を考慮した非線形応答解析結果について，他解析コードの計算結果と比較してほぼ同一の結果が得られることが確認できた。

Ⅴ-5-22　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＨＡＫＥ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. SHAKEの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……5
3.4 解析フローチャート……8
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……9

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	Ver.1.6.9
Ⅴ-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver.1.6.9

2. 解析コードの概要

項目＼コード名	SHAKE
使用目的	地盤応答解析（入力地震動評価）
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1971年
使用したバージョン	Ver.1.6.9
コードの概要	・SHAKE Ver.1.6.9（以下「本解析コード」という。）は，米国カルフォルニア州立大学から発表されたSHAKE（最新公開版は「SHAKE－91」である。）を基本に開発されたもので，1次元重複反射理論に基づく多層地盤の地震応答解析を行うプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。 ・地盤の各層における加速度，応力度，ひずみ度等の伝達関数及び応答波形が求められる。 ・地盤の等価線形解析を行うことが可能である。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	SHAKE Ver.1.6.9は，地震応答解析における入力地震動の策定において，基準地震動Ｓ$_s$に対する地盤応答を1次元重複反射理論に基づき評価するために使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・本解析コードによる弾性地盤の増幅特性の解析結果が公開文献*[1]の理論解（以下「理論解」という。）と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして使用していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。 ・本解析コードのベースとなった米国カルフォルニア州立大学から発表されたSHAKEは世界的に広く用いられており，その最新版であるSHAKE－91を用いた解析解と本解析コードの解析解を比較した結果，概ね一致していることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 注記 ＊1： 最新耐震構造解析 柴田明徳著 234頁，235頁 森北出版株式会社 第1版

3.　SHAKEの解析手法について

3.1　一般事項

本資料は，地盤応答解析を行う解析コードSHAKE Ver.1.6.9の概要である。

本解析コードは，日本国内の原子力施設の工事計画認可申請に多くの利用実績のある解析コードであり，地盤応答解析（入力地震動の評価）に用いる。

3.2　解析コードの特徴

本解析コードは，1次元重複反射理論に基づく弾性地盤応答解析ができる解析コードである。以下に，今回の解析に使用する弾性解析の機能を示す。

①1 次元波動論に基づき，多層地盤の地震応答解析を行う。

②解析結果として，地盤の各層における加速度，応力度，ひずみ度等の伝達関数及び応答波形が求められる。

③本解析コードは，次の仮定を設けて地震応答解析を行っている。

・地盤は，水平方向に半無限に広がっているものとする。(水平成層地盤)

・応答は，地震動が解析基盤から鉛直伝播により起こるものとする。

・地盤物性は，各層の単位体積重量，せん断波速度（又はせん断弾性係数），ポアソン比及び減衰定数を入力することで定義する。

④等価線形解析を行うことができる。

また，今回の解析における本解析コードのバージョン，件名，使用要素及び評価内容を表3.2-1に示す。なお，次に示す検証及び妥当性確認はVer.1.6.2で実施した結果である。本工事計画において使用するバージョンは，検証及び妥当性確認において記載されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

表3.2-1　使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver.1.6.9	・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構	－	地盤応答解析

3.3　解析手法

解析理論において，図3.3-1に示す線形粘弾性系を通過するせん断波による応答を考える。各層は，均質，等方性であり，厚さｈ，密度ρ，せん断弾性係数Ｇ及び臨界減衰比βで定義される。

図3.3-1に示される系を通過するせん断波の伝播は，水平変位ｕ＝ｕ（ｘ，ｔ）による以下の式で表わされる。

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=G\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\eta\frac{\partial^3 u}{\partial x^2\partial t} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，

η　：粘性係数

水平変位ｕ＝ｕ（ｘ，ｔ）を，以下の（2）式で表わされる振動数ωに対する調和振動と考える。

$$u(x,t)=U(x)\cdot e^{i\omega t} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，

ｉ：虚数単位

（2）式は，波動方程式の一般解として（3）式で表わされる。

$$u(x,t)=E\cdot e^{i(kx+\omega t)}+F\cdot e^{-i(kx-\omega t)} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$k=\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G+i\omega\eta}}=\sqrt{\frac{\rho\omega^2}{G^*}} \quad \cdots\cdots (4)$$

ここで，

Ｅ，Ｆ　：積分定数

Ｇ＊　　：複素剛性

（3）式の第一項は，Xのマイナス方向（上向き）に伝わる入射波を示し，第二項はXのプラス方向（下向き）に伝わる反射波を示している。

ここで，任意のm層と（m＋1）層の変位とせん断応力との連続性を考え，更に自由面ではせん断応力τ＝0の境界条件を導入し，以下関係を導く。

$$E_m=e_m(\omega)E_1 \quad \cdots\cdots (5)$$

$$F_m = f_m(\omega) F_1 \cdots\cdots (6)$$

伝達関数e_m及びf_mは，それぞれE_1及びF_1に対する倍率であり，$E_1 = F_1 = 1$を上式に代入すれば決まるものである。

他の伝達関数は，e_m及びf_mから得られ，n層及びm層表面での変位を関連づける伝達関数$A_{n,m}$は次のように定義する。

$$A_{n,m}(\omega) = u_m / u_n \cdots\cdots (7)$$

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \cdots\cdots (8)$$

これらの式より，伝達関数A（ω）は，系のいかなる2つの層の間においても定められる。

伝達関数が定まれば，複素フーリエ変換により入力動のフーリエスペクトルF（f）を求め，それに伝達関数A（f）を乗じてフーリエスペクトルR（f）を算定し，それを複素フーリエ逆変換することにより時刻歴応答が求まる。

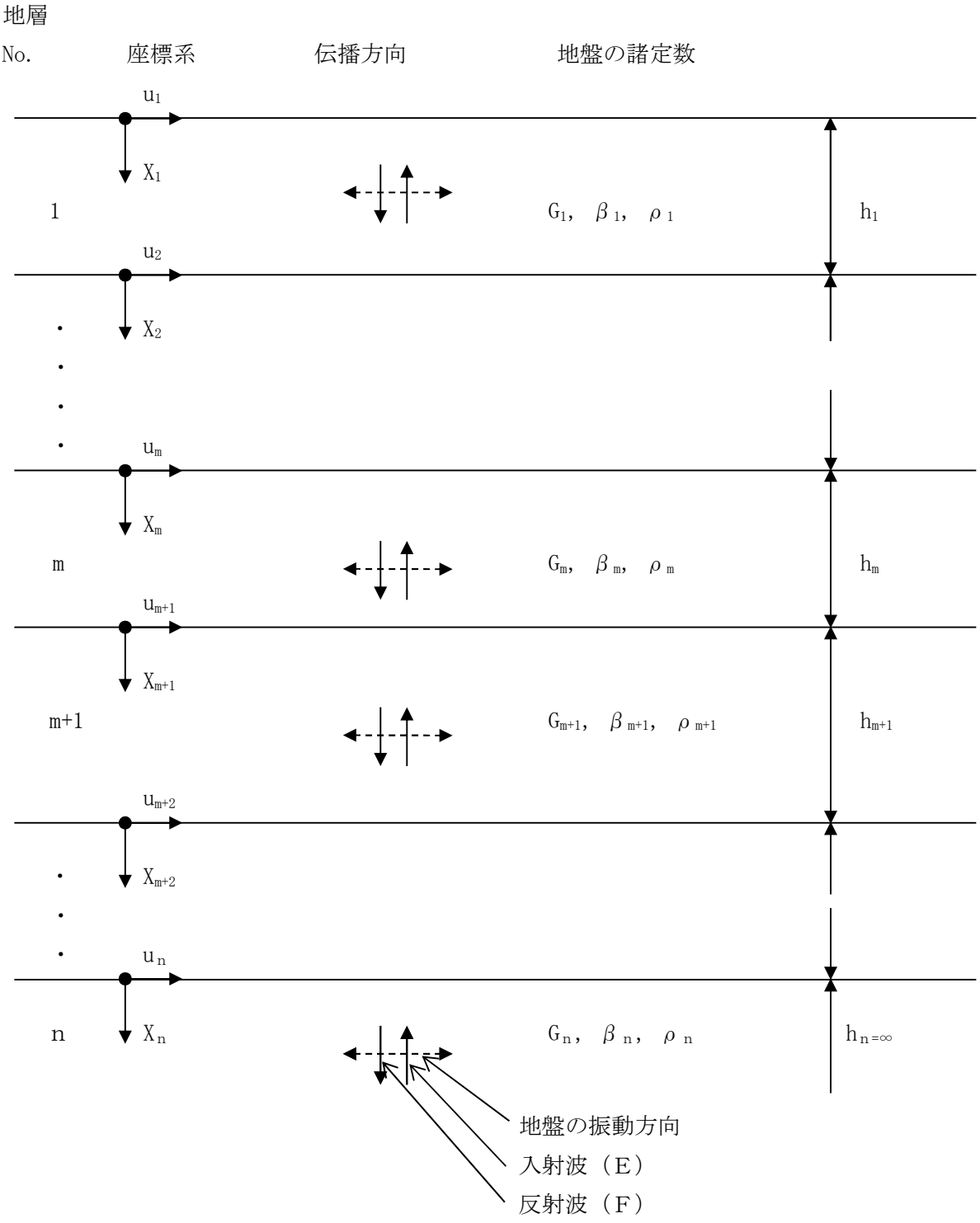
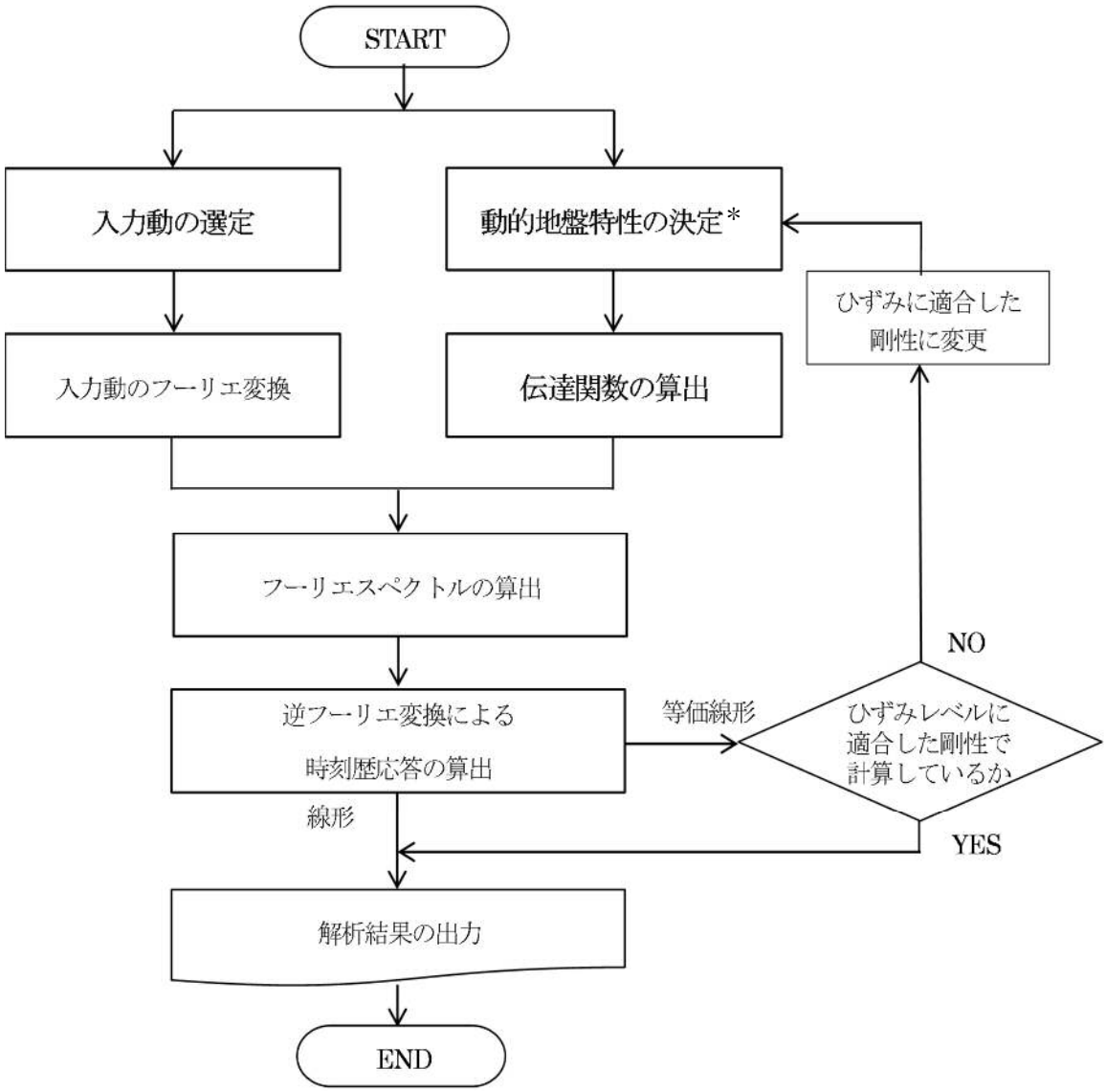


図 3.3-1　1 次元地盤の波動伝播

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1に示す。



注記　＊：入力データとして単位体積重量，せん断弾性係数及び等価線形法に用いるＧ－γ関係を選定する。

図3.4-1　解析フローチャート

NT2 補③ V-5-22 R0

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

本コードは，「3.3　解析手法」に示した一般性のある理論モデルに基づき構築された解析コードであり，「3.4　解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。本解析コードは，日本国内の数多くの原子力施設の工事計画認可申請における解析に使用された実績があるため，解析機能全般について十分な妥当性が確認されている。

こうした特徴を踏まえ，今回の解析機能に特化する形で，公開文献*1により求めた理論解（以下「理論解」という。）と本解析コードによる解析解を比較するとともに，複素応答と1次元重複反射理論に基づき構築された世界各国で用いられている類似解析コードであるSHAKE－91*2とのコードベンチマークにより，本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

注記　＊1：最新耐震構造解析　柴田明徳著　231頁，232頁　森北出版株式会社　第1版参照

＊2：ＳＨＡＫＥ－91は，米国カルフォルニア州立大学バークレイ校が有償配布している複素応答と重複反射理論に基づいた１次元地盤の等価線形解析コードであり，世界各国で広く用いられている「SHAKE」の最新バージョンである。

a.　検証（Verification）

(a)　検証方法

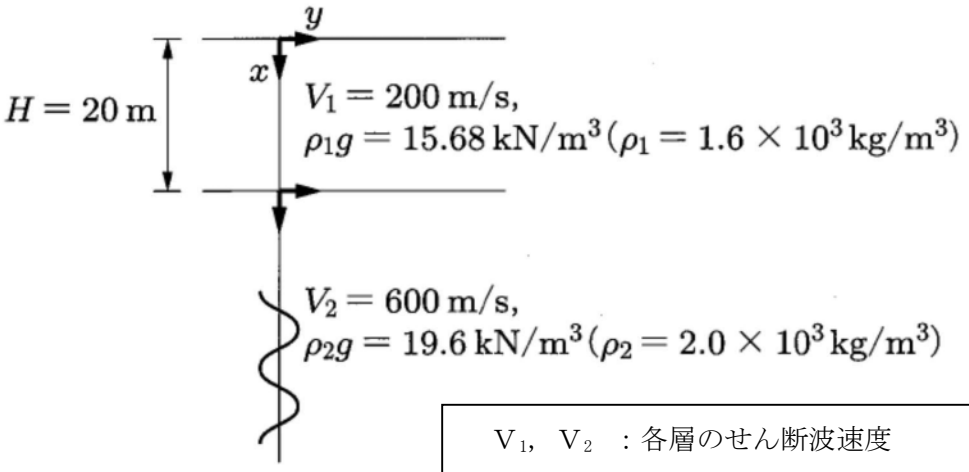
2層の弾性モデル地盤を対象として，本解析コードによる解析解と理論解による結果が一致することを確認する。

(b)　解析条件

解析条件及び解析モデルを図3.5-1に示す。地盤減衰は，履歴減衰として0％と5％の二種とする。

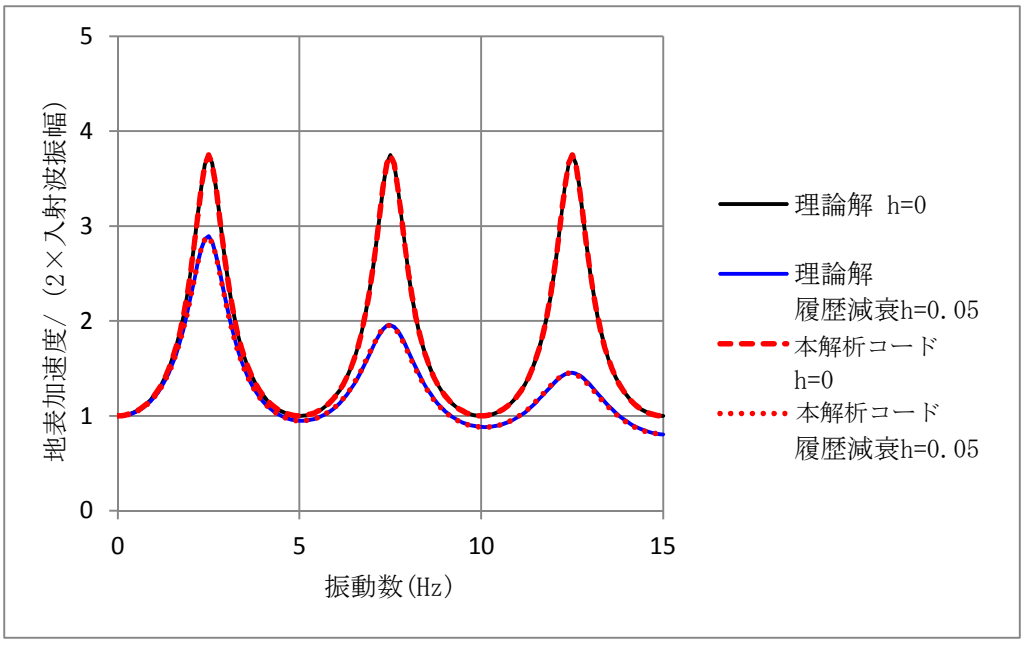
(c)　検証結果

本解析コードによる加速度伝達関数を理論解による加速度伝達関数と比較して図3.5-2及び表3.5-1に示す。本解析コードと理論解の解析結果は同一条件，同一手法による結果であり，両者は概ね一致していることから，本解析コードが正しく評価していることが確認できる。



V_1, V_2	：各層のせん断波速度
ρ_1, ρ_2	：各層の密度
g	：重力加速度　9.80 m/s^2
振動数	：0～15 Hz

図 3.5-1　解析条件及び解析モデル



地表面／基盤層

図3.5-2　本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較

表3.5-1　本解析コードと理論解による加速度伝達関数の比較

振動数(Hz)	h=0			h=0.05		
	理論解	本解析コード	理論解/本解析コード	理論解	本解析コード	理論解/本解析コード
0.0	1.0000	1.0000	1.000	1.0000	1.0000	1.000
0.5	1.0475	1.0475	1.000	1.0423	1.0425	1.000
1.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1962	1.1973	0.999
1.5	1.5971	1.5971	1.000	1.5385	1.5419	0.998
2.0	2.5015	2.5015	1.000	2.2363	2.2445	0.996
2.5	3.7500	3.7500	1.000	2.8930	2.8892	1.001
3.0	2.5015	2.5015	1.000	2.1532	2.1387	1.007
3.5	1.5971	1.5971	1.000	1.4802	1.4717	1.006
4.0	1.2135	1.2135	1.000	1.1510	1.1463	1.004
4.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9987	0.9964	1.002
5.0	1.0000	1.0000	1.000	0.9488	0.9484	1.000
5.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9789	0.9806	0.998
6.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0965	1.1012	0.996
6.5	1.5971	1.5971	1.000	1.3345	1.3438	0.993
7.0	2.5015	2.5015	1.000	1.7119	1.7237	0.993
7.5	3.7500	3.7500	1.000	1.9585	1.9534	1.003
8.0	2.5015	2.5015	1.000	1.6739	1.6546	1.012
8.5	1.5971	1.5971	1.000	1.2909	1.2766	1.011
9.0	1.2135	1.2135	1.000	1.0511	1.0427	1.008
9.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9271	0.9228	1.005
10.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8822	0.8811	1.001
10.5	1.0475	1.0475	1.000	0.9012	0.9033	0.998
11.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9849	0.9906	0.994
11.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1407	1.1502	0.992
12.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3456	1.3542	0.994
12.5	3.7500	3.7500	1.000	1.4534	1.4484	1.003
13.0	2.5015	2.5015	1.000	1.3230	1.3063	1.013
13.5	1.5971	1.5971	1.000	1.1052	1.0901	1.014
14.0	1.2135	1.2135	1.000	0.9400	0.9300	1.011
14.5	1.0475	1.0475	1.000	0.8443	0.8389	1.007
15.0	1.0000	1.0000	1.000	0.8060	0.8042	1.002

b. 妥当性確認（Validation）

(a) 妥当性確認方法

水平成層の弾性モデル地盤を対象として，本解析コードによる解析解と類似解析コードであるSHAKE－91（前述）による結果が一致することを確認する。

(b) 解析条件

解析の諸条件については，地盤モデル諸元を表3.5-2，地盤のひずみ依存特性を図3.5-3及び図3.5-4，入力地震動を図3.5-5に示す。

なお，地盤モデルは，SHAKE－91の例題に添付されている等価線形モデルであり，長さはfeet，重さはpounds，重力加速度は32.2 feet/s^2であることから，表3.5-2にはMKS単位系に変換した数値も併記している。

また，入力地震動はSHAKE－91の例題に添付されている地震波を0.1 g（gは重力加速度9.80665 m/s^2）に規準化したものを用いる。

(c) 妥当性確認結果

本解析コードとSHAKE－91による解析結果のうち，地盤の最大加速度分布を図3.5-6，地盤の等価せん断ひずみ分布を図3.5-7，地表の加速度応答スペクトルを図3.5-8に示す。

SHAKE－91の加速度出力（重量加速度単位）を重量加速度g＝9.80665 m/s^2を用いてcm/s^2に変換して比較する。

本解析コードとSHAKE－91の解析結果は同一条件，同一手法による結果であり，両者は概ね一致していることから，本解析コードが正しく評価していることが確認できる。

表3.5-2　地盤モデル諸元

区分	層厚 ft (m)	深度 ft (m)	湿潤単位体積重量 kpd／ft^3 (tonf/m^3)	せん断波速度 ft／s (m/s)	減衰定数
砂質土	5 (1.52402)	5 (1.52402)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	5 (1.52402)	10 (3.04804)	0.125 (2.00226)	900 (274.193)	0.05
	10 (3.04804)	20 (6.07608)	0.125 (2.00226)	900 (274.193)	0.05
	10 (3.04804)	30 (9.14412)	0.125 (2.00226)	950 (289.424)	0.05
粘性土	10 (3.04804)	40 (12.19216)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	10 (3.04804)	50 (15.24020)	0.125 (2.00226)	1000 (304.679)	0.05
	10 (3.04804)	60 (18.28824)	0.125 (2.00226)	1100 (335.139)	0.05
	10 (3.04804)	70 (21.33628)	0.125 (2.00226)	1100 (335.139)	0.05
砂質土	10 (3.04804)	80 (24.38432)	0.130 (2.08235)	1300 (396.083)	0.05
	10 (3.04804)	90 (27.43236)	0.130 (2.08235)	1300 (396.083)	0.05
	10 (3.04804)	100 (30.48040)	0.130 (2.08235)	1400 (426.549)	0.05
	10 (3.04804)	110 (33.52844)	0.130 (2.08235)	1400 (426.549)	0.05
	10 (3.04804)	120 (35.57648)	0.130 (2.08235)	1500 (457.022)	0.05
	10 (3.04804)	130 (39.62452)	0.130 (2.08235)	1500 (457.022)	0.05
	10 (3.04804)	140 (42.67256)	0.130 (2.08235)	1600 (487.476)	0.05
	10 (3.04804)	150 (45.72060)	0.130 (2.08235)	1800 (548.427)	0.05
基盤	—	—	0.140 (2.24253)	4000 (1218.712)	0.01

γ	粘性土G／G₀	γ	粘性土h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	1.000	0.0010	0.0080
0.0030	0.981	0.0030	0.0140
0.0100	0.941	0.0100	0.0280
0.0300	0.847	0.0300	0.0510
0.1000	0.656	0.1000	0.0980
0.3000	0.438	0.3000	0.1550
1.0000	0.238	1.0000	0.2100
3.0000	0.144	3.1600	0.2500
10.0000	0.110	10.0000	0.2800

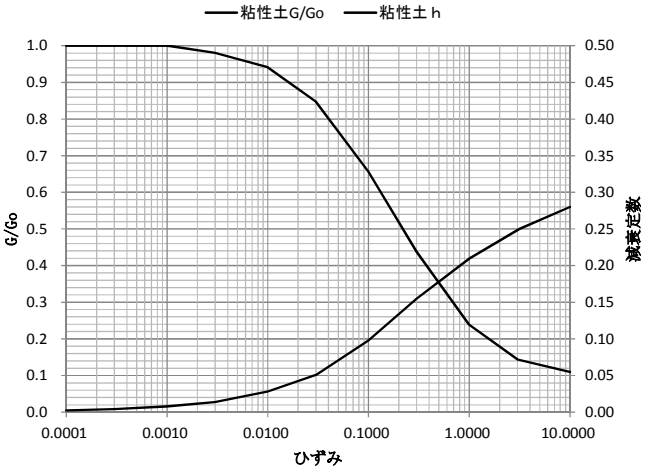


図3.5-3　粘性土のひずみ依存特性

γ	砂質土G／G₀	γ	砂質土h
0.0001	1.000	0.0001	0.0024
0.0003	1.000	0.0003	0.0042
0.0010	0.990	0.0010	0.0080
0.0030	0.960	0.0030	0.0140
0.0100	0.850	0.0100	0.0280
0.0300	0.640	0.0300	0.0510
0.1000	0.370	0.1000	0.0980
0.3000	0.180	0.3000	0.1550
1.0000	0.080	1.0000	0.2100
3.0000	0.050	3.0000	0.2500
10.0000	0.035	10.0000	0.2800

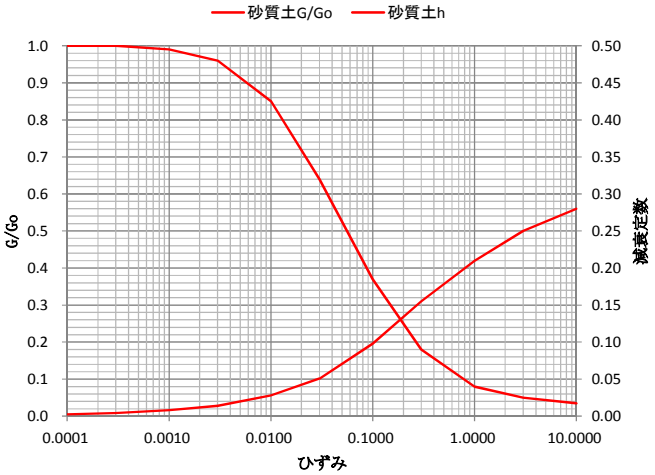


図3.5-4　砂質土のひずみ依存特性

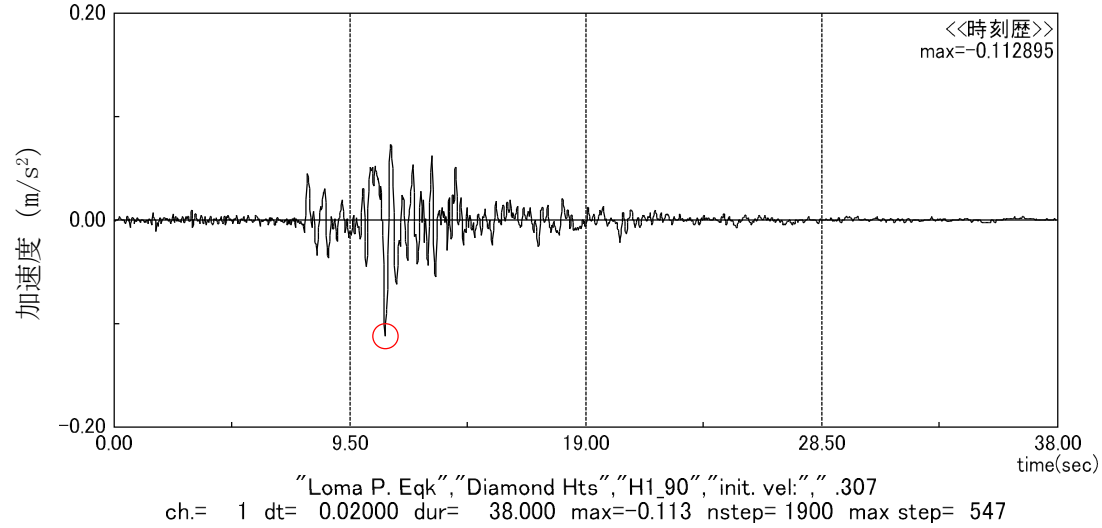


図3.5-5　入力地震動

深さ（ｆｔ）	ＳＨＡＫＥ－91 (G)	ＳＨＡＫＥ－91 (cm/s²)	本解析コード	SHAKE-91/本解析コード
0	0.19040	186.7	186.6	1.001
5	0.19006	186.4	186.3	1.001
10	0.18873	185.1	185.0	1.001
20	0.18258	179.0	179.0	1.000
30	0.17209	168.8	168.7	1.001
40	0.15947	156.4	156.4	1.000
50	0.14288	140.1	140.1	1.000
60	0.12653	124.1	124.1	1.000
70	0.11049	108.4	108.3	1.001
80	0.09839	96.5	96.5	1.000
90	0.08997	88.2	88.2	1.000
100	0.08268	81.1	81.1	1.000
110	0.08559	83.9	84.0	0.999
120	0.08546	83.8	83.8	1.000
130	0.08201	80.4	80.4	1.000
140	0.07769	76.2	76.2	1.000
150	0.07616	74.7	74.7	1.000

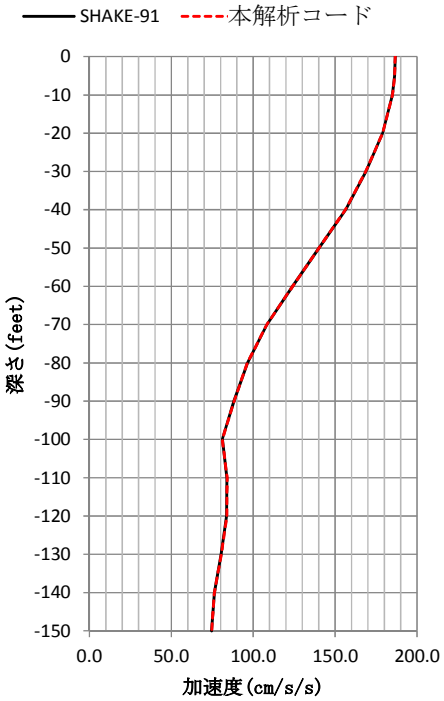


図3.5-6　地盤の最大加速度分布

深さ（ｆｔ）	ＳＨＡＫＥ－91 (G)	本解析コード (cm/s²)	SHAKE-91/本解析コード
0	0.000770	0.000772	0.997
5	0.002955	0.002954	1.000
10	0.006335	0.006338	1.000
20	0.009760	0.009762	1.000
30	0.010990	0.010989	1.000
40	0.014030	0.014032	1.000
50	0.013615	0.013618	1.000
60	0.015660	0.015662	1.000
70	0.013555	0.013548	1.001
80	0.015055	0.015041	1.001
90	0.013355	0.013348	1.001
100	0.014130	0.014117	1.001
110	0.012335	0.012326	1.001
120	0.012815	0.012806	1.001
130	0.011150	0.011146	1.000
140	0.008645	0.008646	1.000

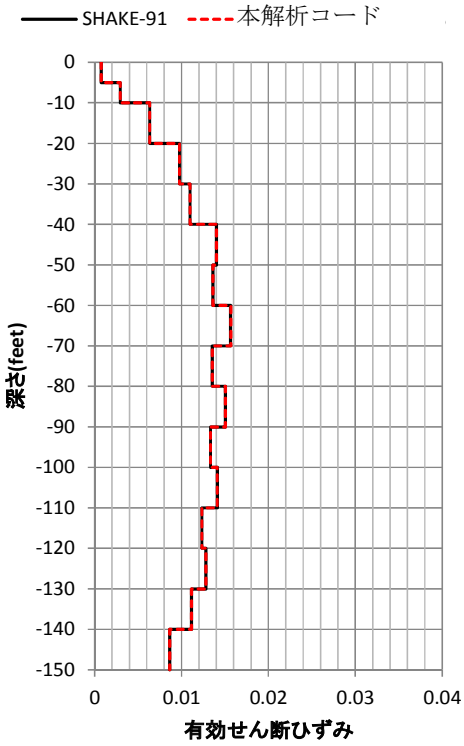


図3.5-7　地盤の等価せん断ひずみ

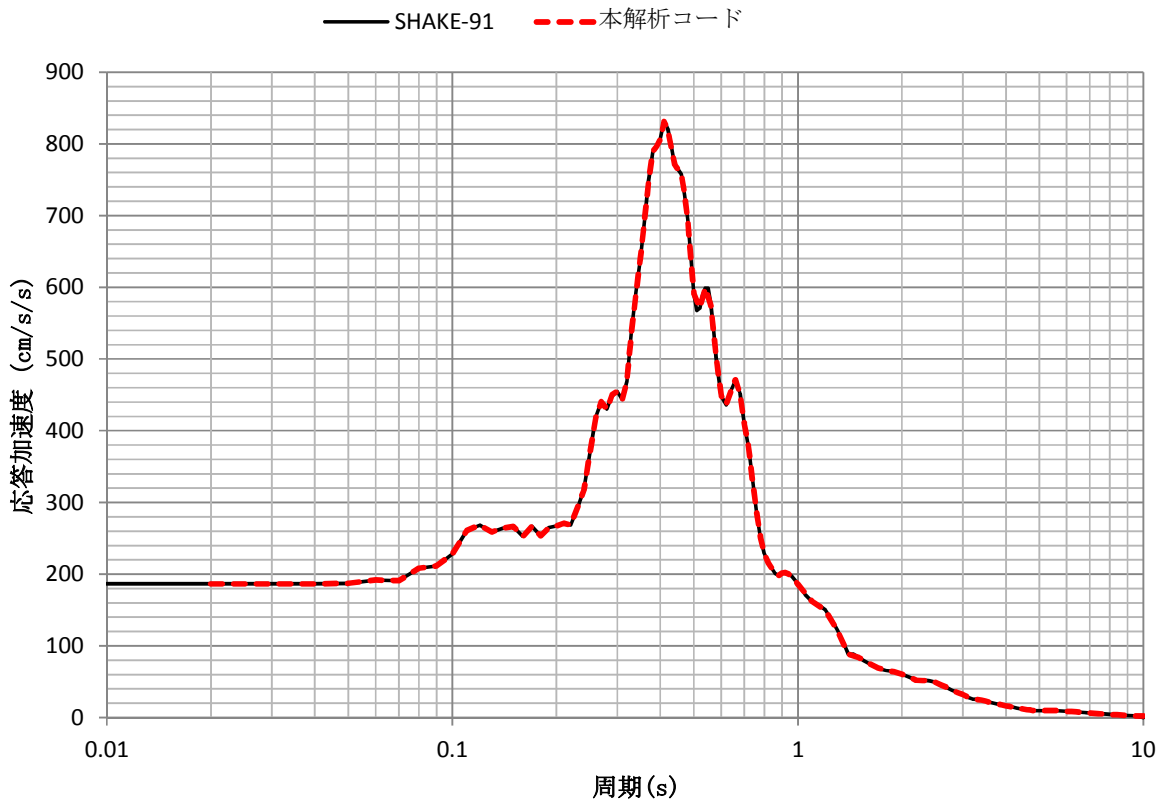


図3.5-8　地表の加速度応答スペクトル（h＝0.05）

c. 評価結果

以下の評価結果から，本解析コードを対象とする検討に用いることは妥当である。

・2層地盤の弾性モデル地盤を対象とした本解析コードの解析解が公開文献による理論解と概ね一致していることを確認できた。
・水平成層モデル地盤を対象とした本解析の解析解が，複素応答と1次元重複反射理論に基づき構築された類似解析コードであるSHAKE－91の解析解と概ね一致することを確認できた。

Ⅴ-5-23　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＬＰＩＬＥＳＰ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. TLPILESPの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 本解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……5
3.4 解析フローチャート……7
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……8

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TLPILESPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	Ver.2.3
Ⅴ-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver.2.3

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	TLPILESP
使用目的	群杭基礎の動的地盤ばねの算出
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1992年
使用したバージョン	Ver.2.3
コードの概要	TLPILESP（以下「本解析コード」という。）は，鹿島建設が自社開発したもので，薄層要素法に基づく群杭基礎の動的地盤ばねを算出するプログラムである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	本解析コードは，主排気筒の地震応答解析における群杭地盤ばねの算出に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証は以下のとおり実施している。 ・本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較し，概ね一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認は以下のとおりである。 ・検証の体系と今回の工事認可申請で使用する体系が同等であることから，本解析コードの解析結果と検証済解析コードの解析解の一致をもって，解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事認可申請で行う地震応答解析並びに基礎版の応力解析に用いる地盤ばねの用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.　TLPILESPの解析手法について

3.1　一般事項

本解析コードは，鹿島建設により開発されたプログラムである。本解析コードは，水平方向に半無限に広がりのある成層地盤上の群杭基礎の動的地盤ばねを算出することができる。

また，本解析コードは，主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構の動的地盤ばねの算定に使用している。

3.2　本解析コードの特徴

①半無限成層地盤の特性は，薄層要素法による加振解を用いており，成層地盤への適用が可能である。

②群杭効果を考慮した群杭基礎の動的地盤ばねが算定できる。また，2 本杭間の杭頭柔性の重ね合わせを用いているため，大規模群杭への適用が可能である。

③本解析コードは，薄層要素法を用いているため，地盤のモデル化において次の仮定を設けている。

・地盤各層は，弾性とし，水平方向に半無限に広がっているものとする。（水平成層地盤）

・分割した地盤各層内の変位分布は，線形と仮定する。

・地盤物性は，各層の単位体積重量，せん断波速度（又はせん断弾性係数），ポアソン比及び減衰定数を入力することで定義する。

④モデル下部境界は，半無限要素あるいはダッシュポット要素でモデル化する。

また,今回の解析における本解析コードのバージョン,件名,使用要素及び評価内容を表3.2-1に示す。

表3.2-1　使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver.2.3	・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構	－	地震応答解析モデルによる基礎底面地盤ばねの算定

3.3　解析手法

a.　基本方針

杭各部での変位を$\{u^p\}$，作用力を$\{f^p\}$として，杭－地盤連成系での力の釣り合いを（1）式のとおりに表す。

$$[K_{PS}]\{u^p\}=\{f^p\} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，剛性マトリクス$[K_{PS}]$は，図3.3-1及び（2）式に示すとおり，半無限成層地盤から得られる剛性マトリクス$[K_{SS}]$から，杭を土柱に置換した置換土柱の剛性マトリクス$[K_S]$を引く一方で，杭の剛性マトリクス$[K_P]$を足し合わせて算定する。

$$[K_{PS}]=[K_{SS}]-[K_S]+[K_P] \quad \cdots\cdots (2)$$

杭の剛性マトリクス$[K_P]$は，杭の曲げとせん断剛性をもとに定める。同様に，置換土柱の剛性マトリクス$[K_S]$も，土の物性値をもとに評価する。一方，$[K_{SS}]$は無限領域に対して評価する必要があり，以下のb.～d.に示す方法にて評価する。

地盤ばね算定にあたっては，杭頭位置に単位加振，すなわち，$\{f^p\}=\{e^{i\omega t},0,\cdots,0\}^T$を与えた時の杭頭変位$u^{top}$を求め，その逆数を地盤ばねとする。

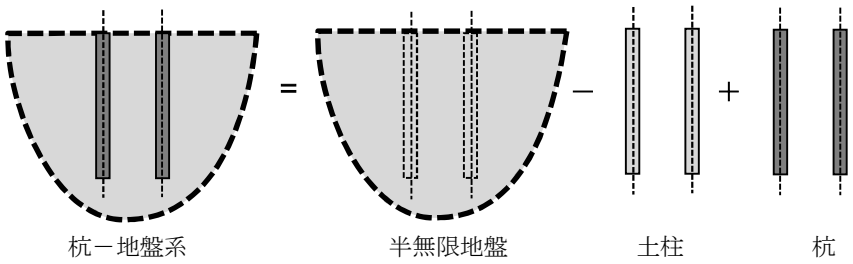


図 3.3-1　杭－地盤系の剛性マトリックス

b.　半無限成層地盤についての基礎方程式

上記の半無限成層地盤についての剛性$[K_{SS}]$を算定するにあたっては，まず，図3.3-2に示すように，半無限成層地盤の上層部は平行で複数の層からなると仮定する。また，各層においては，図3.3-3に示すとおりz軸を鉛直下方に向けて円筒座標(r,θ,z)を定め，円筒座標系での変位を(u_r,u_θ,u_z)と表わす。この時，水平方向に加振する場合，波数α，振動数ωとした波動方程式は（3）式となる。

$$\alpha^2(\lambda+2G)u_r-G\frac{d^2u_r}{dz^2}+\alpha(\lambda+G)\frac{du_z}{dz}-\omega^2\rho u_r=0$$

$$-\alpha(\lambda+G)\frac{du_r}{dz}+\alpha^2Gu_z-(\lambda+2G)\frac{d^2u_z}{dz^2}-\omega^2\rho u_z=0$$

$$\alpha^2Gu_\theta-G\frac{d^2u_\theta}{dz^2}-\omega^2\rho u_\theta=0 \quad \cdots\cdots (3)$$

ここで，λはヤング係数，Gはせん断弾性係数，ρは質量密度である。

なお，鉛直方向に加振する場合にも類似の方程式が誘導されるが，省略する。

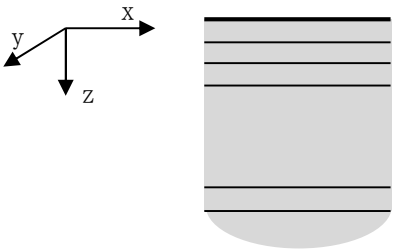


図 3.3-2　半無限成層地盤

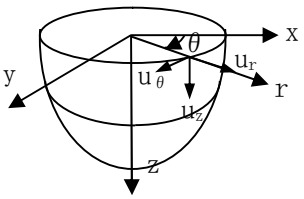


図 3.3-3　円筒座標系

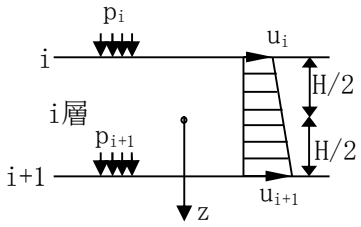


図 3.3-4　層要素

c.　半無限成層地盤の固有値解析

次に，ある層要素iについては図3.3-4に示すように層内の深さ方向の変位は線形に変化すると仮定する。この時，（3）式の偏微分方程式を離散化し，i層の上面，下面の変位を要素に持つベクトル $\{u^i\}=\{u_i, u_{i+1}\}^T$ についての代数方程式（4）を誘導することができる。

$$\left(\alpha^2[A^i]+\alpha[B^i]+[G^i]-\omega^2[M^i]\right)\{u^i\}=\{f^i\} \qquad \cdots\cdots (4)$$

ここで，$\left(\alpha^2[A^i]+\alpha[B^i]+[G^i]-\omega^2[M^i]\right)$は波数，振動数に依存した剛性マトリクス，$\{f^i\}=\{f_i, f_{i+1}\}^T$ はi層の上面，下面での表面力を要素に持つベクトル。

上記で誘導した要素の代数方程式を複数の要素について組み合わせると，次のような層分割した半無限成層地盤についての変位ベクトル$\{u^s\}$と表面力ベクトル$\{f^s\}$の関係式を得る。

$$\left(\alpha^2[A]+\alpha[B]+[G]-\omega^2[M]\right)\{u^s\}=\{f^s\} \qquad \cdots\cdots (5)$$

ここで，$\left(\alpha^2[A]+\alpha[B]+[G]-\omega^2[M]\right)$は波数，振動数に依存した，半無限地盤全体の剛性マトリクス。

$\{f^s\}=0$ として振動数ωごとに，波数αに対する複素固有値解析を実施し，固有値と固有ベクトルを計算する。地盤内の点を加振する解は，それらをもとに分解された固有モードの重ね合わせとして表す。

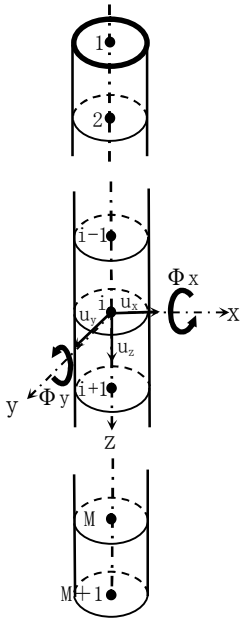


図 3.3-5　杭部分の離散化

d.　杭位置を加振した時の半無限地盤の剛性マトリクスの評価

円柱形の杭部分は図3.3-5に示すとおりに離散化する。杭位置の各部を加振した変位は，点加振時の変位を半径r_0の杭外周リング形状に沿って積分して算定する。また，杭が複数本ある場合を想定し，各杭位置を加振した時の各部の変位を算定し（6）式の通りに表す。また，それを（7）式のように変形し，剛性マトリクス$[K_{ss}]$を定める。

$$\{u^p\}=[D_{ss}]\{f^p\} \qquad \cdots\cdots (6)$$

$$\{f^p\}=[D_{ss}]^{-1}\{u^p\}=[K_{ss}]\{u^p\} \qquad \cdots\cdots (7)$$

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3.4-1に示す。

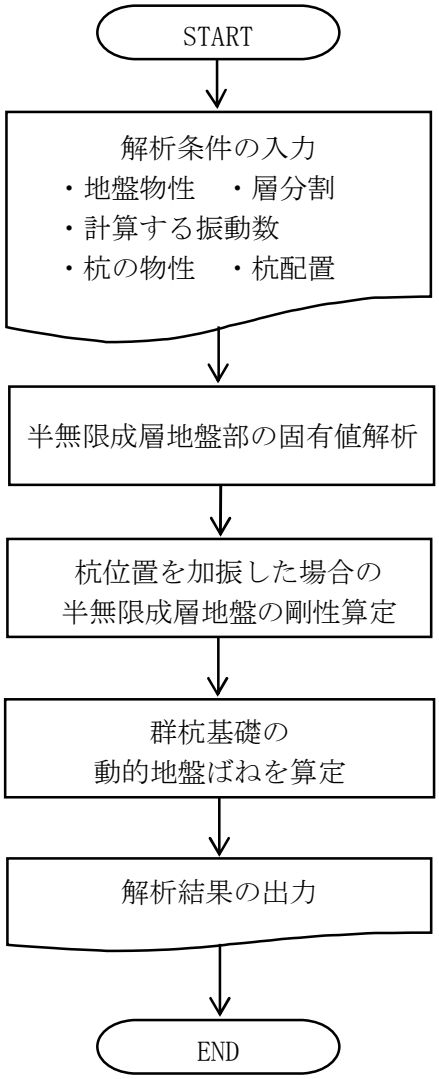


図3.4-1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

a.　検証（Verification）

本コードは，「3.3　解析手法」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。また，今回の工事計画認可申請で使用する解析機能は「3.3　解析手法」に示す一般性のあるモデルに基づき構築されている。

以上を踏まえ，今回使用する解析機能に特化する形で，本コードと日本建築学会の公開文献*1の結果を比較することにより，本コードの当該解析機能の適切さを確認した。

検証は，均質地盤を対象として，本コードの解析解と公開文献*1で示されている解析解の比較を行う。検証を行う解析モデル図及び解析諸元を図3.5-1に示す。

単杭及び群杭基礎の動的地盤ばねを算定し公開文献*1の結果と合わせて図3.5-2に示す。図3.5-2より両者は概ね一致しており，本コードが杭基礎の動的地盤ばねを正しく評価していることが確認できる。

注記　＊1：入門・建物と地盤との動的相互作用　174頁～175頁　(社)日本建築学会　1996年4月，第1版第1刷

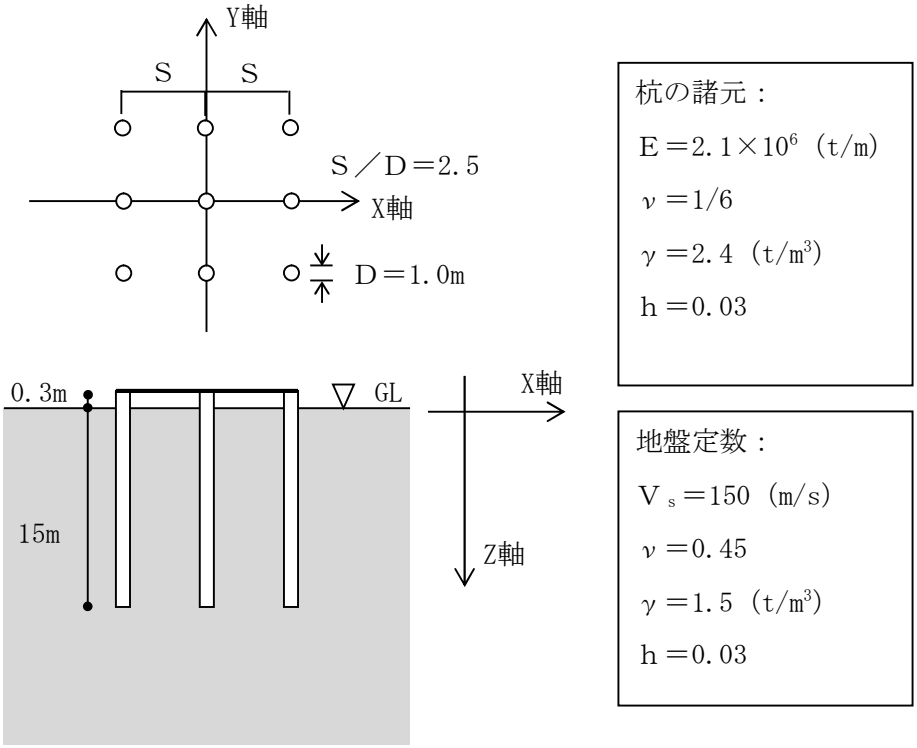


図3.5-1　解析モデル及び解析諸元

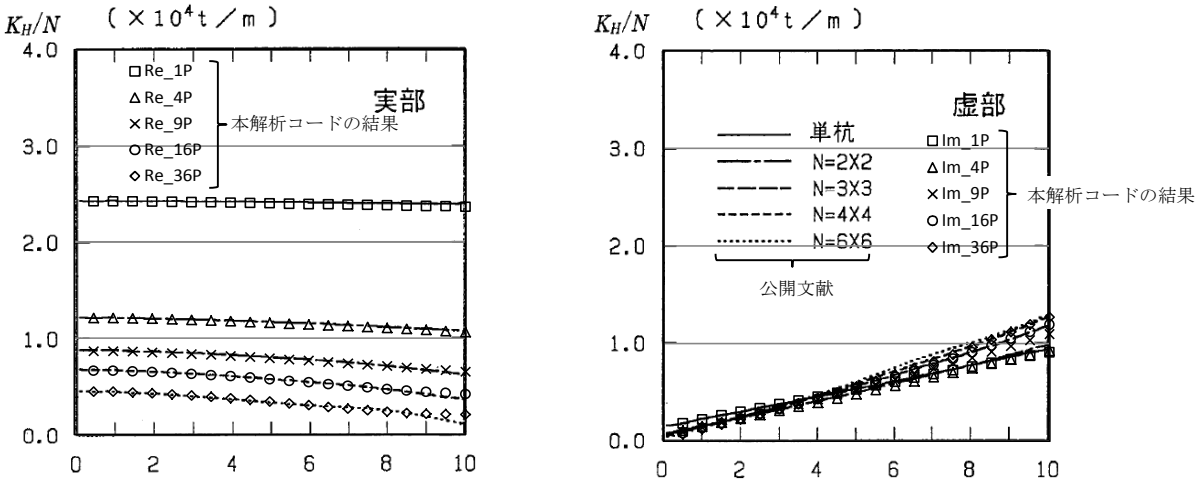


図3.5-2　公開文献*1の解析解とTLPILESPによる動的地盤ばねの比較

b.　妥当性確認（Validation）

本解析コードによる動的地盤ばね計算の機能について，弾性地盤の群杭基礎の動的地盤ばねの解析結果が公開文献による解析解と概ね一致していることを確認している。

また，上記に加えて，今回の工事認可申請で行う解析の用途及び適用範囲が，上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

c.　評価結果

本解析コードによる解析解と公開文献による解析結果を比較した結果，概ね一致していることが確認できたため，本解析に本解析コードを用いることは妥当である。

Ⅴ-5-24　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＵＰＰ４

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NUPP4について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-14	主排気筒の地震応答計算書	Ver.1.4.10

2. 解析コードの概要

項目＼コード名	NUPP4
使用目的	地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1967年
使用したバージョン	Ver.1.4.10
コードの概要	・NUPP4（以下「本解析コード」という。）は，原子力発電所建屋の地震応答解析用として開発された質点系モデルによる解析コードである。なお，本解析コードは，インハウスコードである。 ・静荷重（節点荷重），スペクトルモーダル解析及び動荷重（節点加振力，地震入力）を扱うことができる。 ・地震応答解析は，線形解析及び非線形解析を時間領域における数値積分により行うほか，線形解析を周波数領域で行うことが可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	NUPP4 Ver.1.4.10は，主排気筒の地震応答解析に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの適用は，以下のとおり妥当である。 ・本解析コードの前バージョンであるNUPP及びNUPPⅡ（以下「前バージョン」という。）は，日本国内の原子力施設における建築物の地震応答解析において数多くの工事計画認可申請に使用されており，十分な使用実績がある。 ・NUPPⅡは，東海第二発電所 工事計画届書（平成21年3月9日付）の耐震性に関する説明書において，主排気筒の地震応答解析に使用した実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと異なるが，本解析コードは使用計算機（OS）の変更に伴うカスタマイズを施したものであり解析に係る部分は前バージョンから変更していないため，前バージョン同様，信頼性があると判

	断できる。 ・固有値解析，弾性地震応答解析については，既設工事認可申請時に確認されている(財)原子力工学試験センターの報告書*1による解析結果と概ね一致することを確認している。 ・弾塑性地震応答解析については，既設工事認可申請時に確認されている(財)原子力発電技術機構の報告書*2による解析結果と概ね一致することを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用は範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 注記　＊1：質点系モデルの線形動的解析プログラムの作成成果報告書 昭和56年7月 (財)原子力工学試験センター 原子力安全解析所 ＊2：質点系モデル解析コードSANLUMの保守に関する報告書 平成10年3月 (財)原子力発電技術機構 原子力安全解析所

Ⅴ-5-25　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｋ－ＳＨＡＫＥ

目次

1.　はじめに・・・1
 1.1　使用状況一覧・・・2
2.　解析コードの概要・・・4

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）k-SHAKEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-1-6-別添1	可搬型重大事故等対処設備の保管場所及びアクセスルート	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-2-7	原子炉建屋地下排水設備排水シャフトの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-6	取水構造物の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-8	屋外二重管の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-9	屋外二重管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-12	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-20	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-24	可搬型設備用軽油タンク基礎の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-26	常設低圧代替注水系ポンプ室の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-28	代替淡水貯槽の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-30	常設低圧代替注水系配管カルバートの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-32	ＳＡ用海水ピットの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-34	緊急用海水ポンプピットの地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-36	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-38-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の地震応答計算書	Ver. 6.2.0

Ⅴ-2-2-38-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の地震応答計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-2-2-2	防潮扉の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-2-4	構内排水路逆流防止設備の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-4-4-1	貯留堰の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-4-4-2	貯留堰取付護岸の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-11-2-16	土留鋼管矢板の耐震性についての計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-2-別添3-2	可搬型重大事故等対処設備の保管場所等における入力地震動	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 6.2.0
Ⅴ-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 6.2.0

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	k-SHAKE
使用目的	１次元地震応答解析（入力地震動算定）
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1997年
使用したバージョン	Ver. 6.2.0
コードの概要	k-SHAKE（１次元波動伝播解析コード）は，重複反射理論に基づく地盤の地震応答解析を行うことが可能な解析コードであり，地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮することができる。 k-SHAKEの主な特徴のうち，今回の使用目的に対して，以下の①～③を挙げることができる。 （主な特徴） ①１次元重複反射理論に基づくプログラムである。 ②地盤の非線形性はひずみ依存特性を用いて等価線形法により考慮する。 ③鉛直動は，Ｓ波速度V_sをＰ波速度V_pとして定義することで対応する。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・本解析コードによる二層のモデル地盤に対する地震応答解析結果と，１次元重複反射理論に基づく理論解が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認は，以下のとおりである。 ・原子力産業界において，原子力発電所の地盤・斜面評価をはじめとする多数の解析に本コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第３号機」において，海水ポンプ室周辺地盤かさ上げ部の地震応答解析（入力地震動算定）に本コード（Ver.5.0）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。

	・本工事計画における地震応答解析を実施する際の入力地震動算定の使用用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-26　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｆａｐｐａｓｅ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3
3. fappaseの解析手法について ····· 4
3.1 一般事項 ····· 4
3.2 解析コードの特徴 ····· 4
3.3 解析手法 ····· 5
3.4 解析フローチャート ····· 7
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation） ····· 8

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）fappaseについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-16	非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書	Ver.1.63

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	fappase
使用目的	地震応答解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2002年
使用したバージョン	Ver.1.63
コードの概要	・fappase（以下「本解析コード」という。）は，超高層建物の非線形地震応答解析用として開発されたインハウスコードである。 ・材料非線形モデルを数多くサポートしており超高層建物や免震建物の非線形地震応答解析による建築構造解析に利用実績があり,固有値解析，動的解析及び静的解析による応力等の算定が可能である。
検証(Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	本解析コードは，非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析に使用している。 【検証（Verification）】 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。 ・本解析コードを用いて，以下の内容を確認している。 ① 各部別内部粘性型減衰を用いた地震応答解析を別途検証済解析コードNUPP4による等価なダッシュポットを用いた解析と比較し，同一の解析結果が得られること。 ② 既往論文に示される1層1スパンX型ブレース（筋違）架構の載荷実験のシミュレーション解析を，本解析コードを用いて同様に実施し，既往論文におけるシミュレーション解析と概ね一致すること。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用は範囲が上述の妥当性確認の範囲内であること。

3.　fappase の解析手法について

3.1　一般事項

本資料は，地震応答解析を行う解析コード「fappase Ver.1.63」の概要を説明するものである。

本解析コードは，鹿島建設株式会社で開発した主に骨組構造を対象としたプログラムであり，時間領域における質点系モデルによる動的応答解析コードである。

また，本解析コードは，以下の構築物の線形地震応答解析に使用している。

・非常用ガス処理系配管支持架構

3.2　解析コードの特徴

①fappase の解析機能の一例を以下に示す。

・動的解析

・静的解析

・実固有値解析

②3 次元問題を対象として，はり要素，ばね要素，ダンパー要素，平板要素等が用意されており，原子力発電所建屋他の構造物解析に用いることができる。

③大規模問題も取り扱うために，入力データが簡素化されている。

④解析する座標及び拘束方法は，取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

⑤解析に用いる単位系は，SI 単位系に統一されている。

また，今回の解析における本解析コードのバージョン，件名，使用要素及び評価内容を表1に示す。なお,次に示す検証及び妥当性確認はVer.1.61で実施した結果である。本工事計画において使用するバージョンは，検証及び妥当性確認において記載されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

表1　使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver.1.63	・非常用ガス処理系配管支持架構	－	線形地震応答解析

3.3　解析手法

a.　運動方程式

多自由度系の運動方程式は一般に(1)式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F\} \quad \cdots\cdots (1)$$

ここで，

$[M]$　：質量マトリックス

$[C]$　：減衰マトリックス

$[K]$　：剛性マトリックス

$\{\ddot{u}\}$　：加速度ベクトル

$\{\dot{u}\}$　：速度ベクトル

$\{u\}$　：変位ベクトル

$\{F\}$　：荷重ベクトル

b.　固有値の解法

(1)式は，荷重ベクトルを{0}とし，減衰項を除けば，(2)式に示す自由振動を表す方程式となる。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \quad \cdots\cdots (2)$$

(2)式で変位$\{u\}$に調和振動を仮定すれば，(3)式が得られる。

$$(-\omega^2[M]+[K])\{u_r\}=\{0\} \quad \cdots\cdots (3)$$

(3)式が固有ベクトル$\{u_r\}\neq\{0\}$を満たす条件が固有値問題であり，(3)式を解くことにより固有値ω_rが得られる。

c. 減衰項の策定

各部別内部粘性型減衰の減衰項は，各部材の剛性マトリックス$[K_e]$に比例するものと定義し，以下のように表される。

$$[C]=\sum \beta_e [K_e] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4)$$

$$\beta_e = 2h_eT_e / 2\pi$$

ここで，

h_e：部材の減衰定数

T_e：部材の減衰マトリックスを定義する周期

d. 直接積分法による解法

直接積分法は，連立の微分方程式を直接積分するもので，時間をΔt毎に分割し，時間ステップごとに，順次解を求めていく。今回の解析で用いたNewmark－β法について以下に示す。

nステップの変位u_n，速度$\dot{u}_n$，加速度$\ddot{u}_n$が既知の場合，次のn+1ステップの変位，速度はβとδをパラメータとして(5)式のように表せる。

βとδは，Newmark－β法に使用される解析パラメータであり，Newmark－β法による積分が安定的に行われるためには，$\delta \geqq 1/2$，$\beta \geqq (1/2+\delta)^2/4$という条件がある。

$$\{\dot{u}\}_{(n+1)} = \{\dot{u}\}_{(n)} + \Delta t\left((1-\delta)\{\ddot{u}\}_{(n)} + \delta\{\ddot{u}\}_{(n+1)}\right)$$

$$\{u\}_{(n+1)} = \{u\}_{(n)} + \Delta t\{\dot{u}\}_{(n)} + \frac{\Delta t^2}{2}\{\ddot{u}\}_{(n)} + \beta\Delta t^2(\{\ddot{u}\}_{(n+1)} - \{\ddot{u}\}_{(n)}) \quad \cdots\cdots\cdots \quad (5)$$

(5)式をn＋1ステップの運動方程式(1)に代入して，$\{\dot{u}\}_{(n+1)}$，$\{\ddot{u}\}_{(n+1)}$を消去すれば以下の変位増分式になる。

$$\left([k]+\frac{1}{\beta\Delta t^2}[M]+\frac{\delta}{\beta\Delta t}[C]\right)\{\Delta u\} = \{\Delta F\} + [M]\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_n + \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}\}_n\right)$$
$$+[C]\left(\frac{\delta}{\beta}\{\dot{u}\}_n + (\frac{\delta}{2\beta}-1)\Delta t\{\ddot{u}\}_n\right) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

(6)式を解くと，n＋1ステップの変位増分が得られる。また，(5)式を用いてn＋1ステップの変位，速度及び加速度が得られる。

3.4　解析フローチャート

本解析コードの解析フローチャートを図 1 に示す。

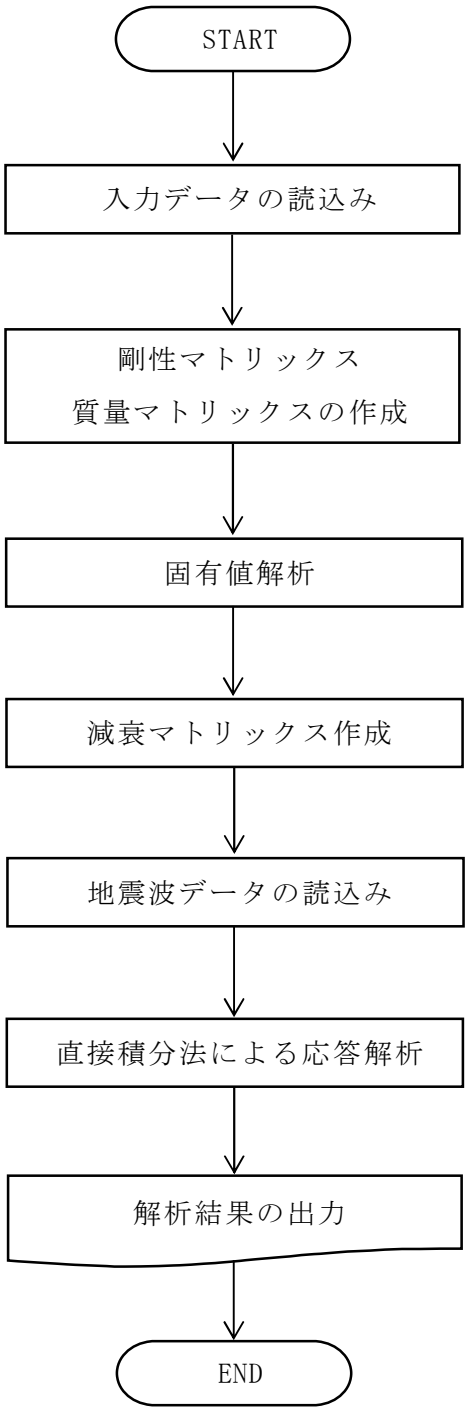


図1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

本解析コードは，「3.3　解析手法」に示した一般性のある理論モデルに基づき構築された解析コードであり，「3.4　解析フローチャート」に示したプログラム構造を持っている。本解析コードは，主に建築基準法適用外の国土交通大臣の評定物件である一般超高層建築物に多数の使用実績を有しており，解析機能全般について，十分妥当性が確認されている。

こうした特徴を踏まえ，今回の解析機能に特化する形で，下記の項目に対して本解析コードによる解析を実施し，本解析コードの解析機能の適切さを確認している。

①質点系モデルによる地震応答解析

②鉄骨ブレースの座屈現象の既往文献との比較

a.　検証（Verification）

本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。

b.　妥当性確認（Validation）

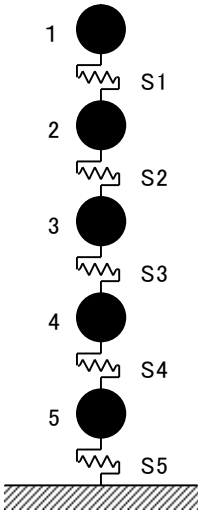
(a)　質点系モデルによる地震応答解析

イ．　妥当性確認方法

線形問題を対象に，減衰行列が一定の場合を検討する。本解析コードにて各部別内部粘性型減衰を用いた場合と,別途検証済解析コードNUPP4により等価なダッシュポットでモデル化した場合の時刻歴応答解析結果を比較し，本解析コードの妥当性を確認する。

ロ．　解析条件

解析モデルの概要を図2に，解析ケースを図3に示す。5質点をせん断ばねで連結した質点系モデルである。各質点の重量及び減衰定数，各要素の剛性，定義周期と減衰定数を図2中の表に示す。



質点番号	重量 (kN)
1～5	100.0

要素名称	剛性 (kN/m)	定義周期 (s)	減衰定数
S1	1.0×10^4	0.705	0.03
S2	1.0×10^4	0.705	0.03
S3	1.0×10^4	0.705	0.03
S4	1.0×10^4	0.705	0.05
S5	1.0×10^4	0.705	0.05

図2　解析モデルの概要

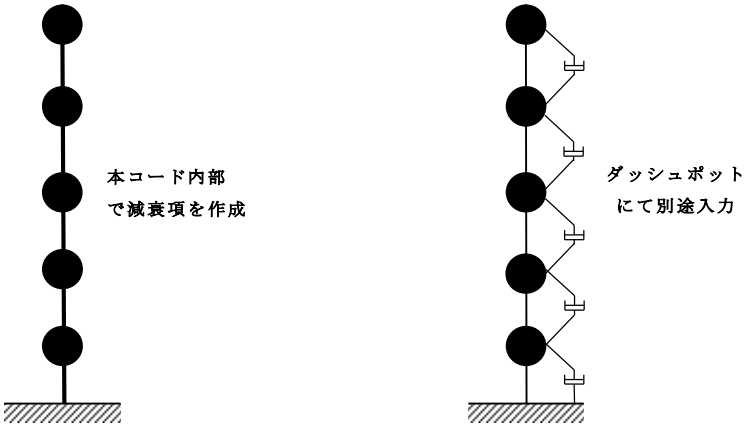


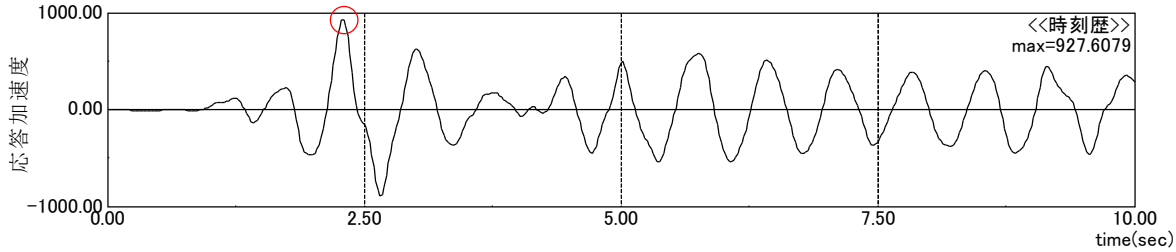
図3　解析ケース

ハ.　妥当性確認結果

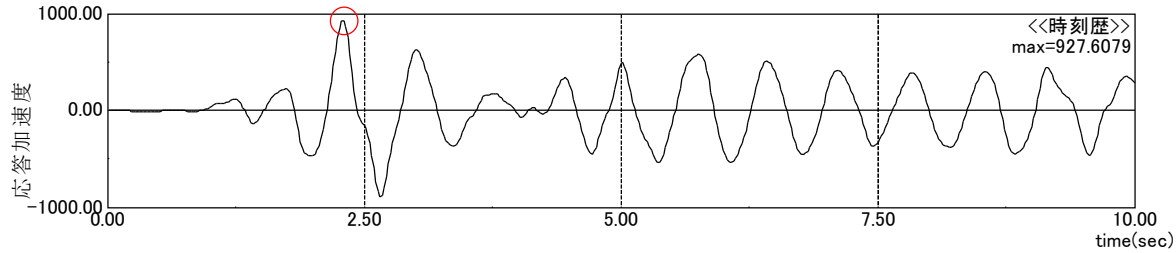
EL_CENTRO（NS）の原波を入力した場合の最大応答値一覧を表2に，質点１の絶対加速度時刻歴波形を図4に示す。最大応答値は合致している。また応答波形も同等である。以上より，本解析コードが応答を正しく評価していることが確認できる。

表2　最大応答値一覧

質点番号	絶対加速度（Gal）		相対変位（cm）	
	case1	case2	case1	case2
1	927.6	927.6	9.9121	9.9121
2	785.2	785.2	9.0042	9.0042
3	-590.1	-590.1	7.3710	7.3710
4	-542.0	-542.0	5.2358	5.2358
5	-358.9	-358.9	2.7453	2.7453
床面	341.7	341.7	0.0	0.0



case1



case2

図4　絶対加速度時刻歴波形（質点１）

(b)　鉄骨ブレースの座屈現象の既往文献との比較

イ．　妥当性確認方法

論文1では，1層1スパンX型ブレース架構の漸増繰返し載荷実験を，修正若林モデルにてシミュレーション解析している。

載荷実験における試験体概要を図5及び表3に示す。

載荷実験における加力サイクルは，漸増繰返し方式である。加力サイクルを図6に示す。

非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析の検証として，上記載荷実験のシミュレーション解析を論文1と同様に実施し,本解析コードにより評価した荷重－変形関係が論文1におけるシミュレーション解析結果及び載荷実験結果と概ね一致することを確認する。

ロ．　解析条件

解析モデルを図7に示す。柱及び梁は，はり要素，ブレースはロッド要素とする。柱及び梁の復元力特性は，塑性変形を材端における剛塑性ばねで考慮する材端剛塑性ばねモデルを用い，図8に示すTri-linear型の履歴特性で表し，ブレースの復元力特性は修正若林モデルとする。

ブレースについて，解析で設定する非線形パラメータは，①降伏軸力，②細長比，③無次元オイラー荷重，④座屈荷重のみで，いずれも，部材の材料特性及び幾何学的性状から一意に決まるものである。

柱，梁及びブレースの断面性能を表4，ブレースの非線形パラメータを表5，材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータを表6に示す。なお，文献1の解析条件に合わせて，剛域範囲（剛域長さ）を設定した。

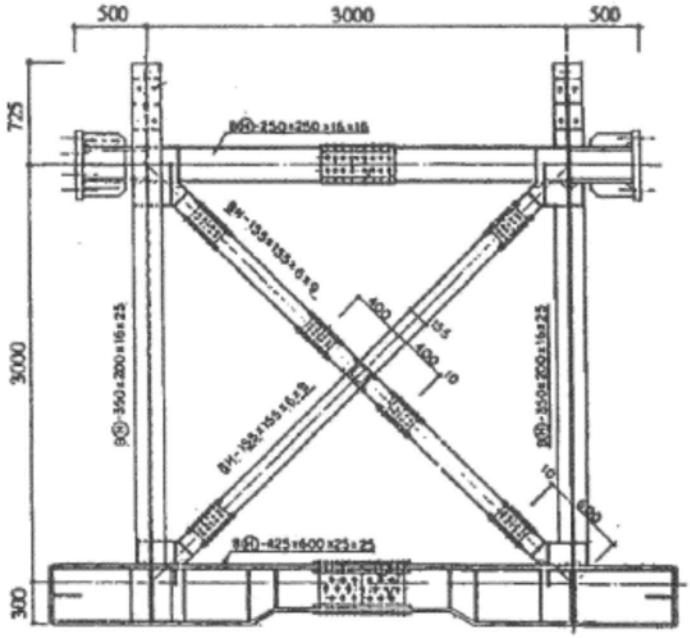


図5　試験体概要

表3　試験体概要

試験体名称	ブレース部材			継手形式	フレーム形状
	断面	細長比（λ）	フランジ幅厚比（b/tf）		
SKⅢ－60.9－B	H－155×155×6×9	60	9	ブラケット形式	高　さ：3m スパン：3m

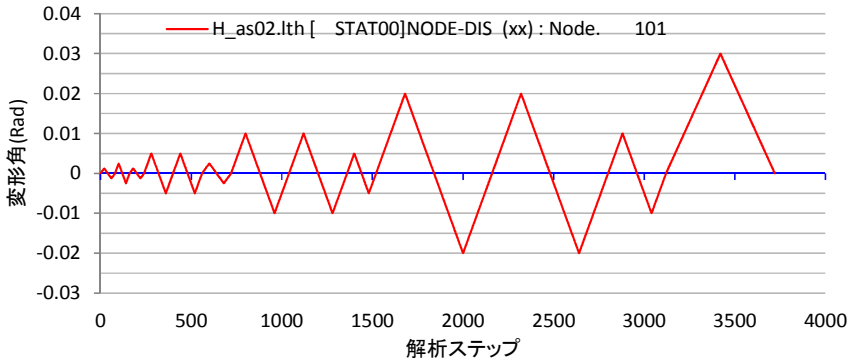


図6　加力サイクル

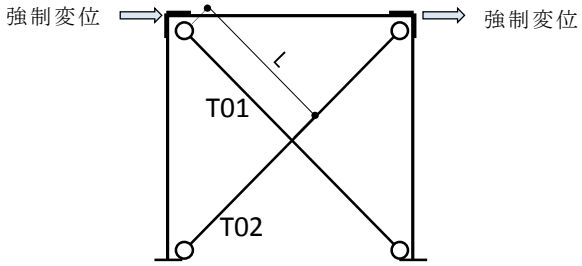
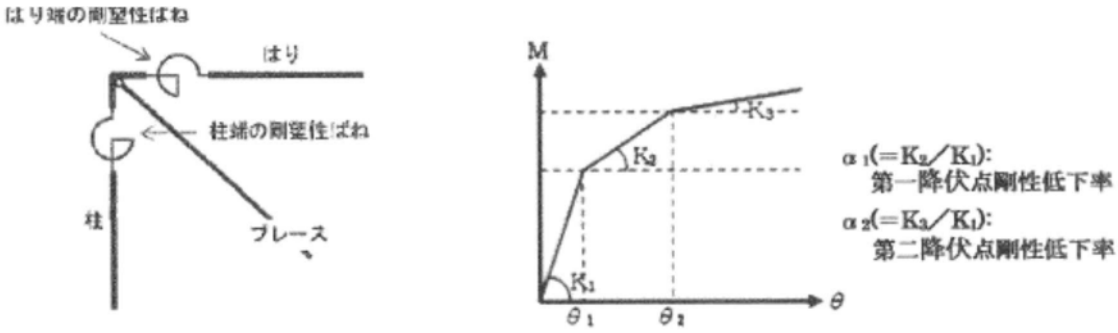


図7　解析モデル



（1）剛塑性ばね配置　　（2）履歴特性

図8　材端剛塑性ばねモデル

表4　柱，梁及びブレースの断面性能

	ヤング係数E (kN/m^2)	ポアソン比 ν	断面積 (m^2)	断面二次モーメント (m^4)
柱	2.05×10^{8}	0.3	1.48×10^{-2}	3.32×10^{-5}
梁	2.05×10^{8}	0.3	1.16×10^{-2}	1.24×10^{-4}
ブレース	2.05×10^{8}	0.3	3.59×10^{-3}	—

表5　ブレースの非線形パラメータ

降伏応力度 (kN/m^2)	降伏軸力 (kN)	細長比	無次元 オイラー荷重	座屈荷重 (kN)	圧縮側限界塑性変形 (m)
2.9×10^{5}	1,041.1	38.5	4.71	988	0.03

表6　材端剛塑性ばねモデルの非線形パラメータ

初期剛性K1 (kNm/rad)	第一降伏点 θ_1 (rad)	第一降伏点 剛性低下率 α_1	第二降伏点 θ_2 (rad)	第二降伏点 剛性低下率 α_2
2.374×10^{6}	5.000×10^{-5}	1.008×10^{-2}	4.310×10^{-3}	8.260×10^{4}

ハ．　妥当性確認結果

論文1における載荷実験結果及びシミュレーション解析を図9，本解析コードによるシミュレーション解析を図10に示す。

本解析コードによるシミュレーション解析結果は，論文1におけるシミュレーション解析結果と概ね一致している。また，本解析コードによるシミュレーション解析結果は，論文1における実験結果と概ね一致している。

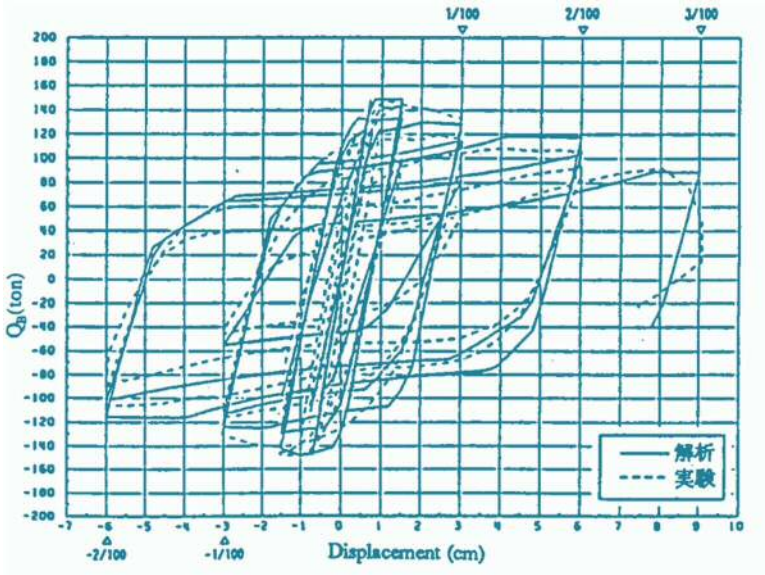


図9　論文1における載荷実験結果及びシミュレーション解析（荷重－変形関係）

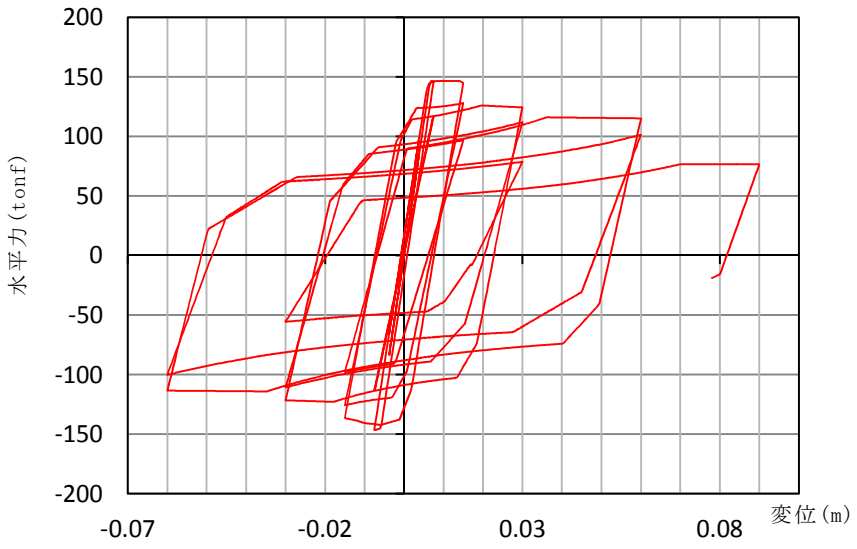


図10　本解析コードによるシミュレーション解析（荷重－変形関係）

(c) 評価結果

以上のとおり，本解析コードの解析機能について

・国内外の超高層建物において使用実績を有しており，建築基準法適用外の国土交通大臣の建物評定により解析機能全般について，妥当性は十分確認されている。

・今回の工事計画認可申請で使用する各部別内部粘性型減衰を本解析コードの内部計算と等価なダッシュポットを用いて解析し，両者が一致することを確認している。

・公開文献に示されている1層1スパンX型ブレース架構載荷実験シミュレーション解析を本解析コードにて実施し，解析結果を既往論文記載の結果と比較して，概ね一致することを確認している。

したがって，本解析コードの当該機能は適切である。

また，上記に加えて，使用マニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する解析手法による地震応答解析に，本解析コードが適用できることを確認している。

したがって，本解析コードを，非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答解析に使用することは，妥当である。

Ⅴ-5-27　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＫＡＮＳＡＳ２

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3
3. KANSAS2の解析手法について ····· 5
3.1 一般事項 ····· 5
3.2 解析コードの特徴 ····· 5
3.3 解析手法 ····· 6
3.4 解析フローチャート ····· 7
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation） ····· 8

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）KANSAS2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-17	非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書	Ver.6.01
Ⅴ-3-別添1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	Ver.6.01

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	KANSAS2
使用目的	応力解析
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	2004年
使用したバージョン	Ver.6.01
コードの概要	・KANSAS2（以下「本解析コード」という。）は，鹿島建設により開発された 3 次元骨組応力解析（面内ＦＥＭ要素含む。）のインハウスコードである。 ・本解析コードは，微小変位理論による変位法を用いて，3 次元平面骨組（面内ＦＥＭ要素含む。）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。
検証(Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	本解析コードは，非常用ガス処理系配管支持架構及び廃棄物処理建屋固体廃棄物搬出入設備（鉄骨造部）のうち鉄骨架構の梁・柱及びブレースの応力解析に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・構造力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，はり要素を用いた応力解析について，はり要素を用いた解析結果と文献*1による理論解の比較を行い，本解析コードによる解析解が文献の理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境については，解析マニュアルに記載された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下のとおりである。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果をもって，解析機能の妥当性も確認している。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。 注記　＊1：成岡昌夫，服部正他：コンピュータによる構造工学

	講座Ⅱ-1-B，日本鋼構造協会編，骨組構造解析，培風館，昭和46年6月，pp.20～33

3.　KANSAS2 の解析手法について

3.1　一般事項

本資料は，応力解析を行う解析コード「KANSAS2 Ver.6.01」の概要である。

本解析コードは，微小変位理論による変位法を用いて，3次元骨組モデルの断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。

3.2　解析コードの特徴

3 次元で構成された骨組モデルに対して，任意方向の荷重が積載された場合の解析を行う。

微小変位理論による変位法を用いて，3 次元平面骨組（面内ＦＥＭ要素含む。）の断面力・変位を算出するための構造解析プログラムである。

また，今回の解析における本解析コードのバージョン，件名，使用要素及び評価内容を表1に示す。

表1　使用件名

バージョン	件名	使用要素	評価内容
Ver.6.01	・非常用ガス処理系配管支持架構 ・廃棄物処理建屋固体廃棄物搬出入設備（鉄骨造部）のうち鉄骨架構	－	線形応力解析

3.3　解析手法

本解析コードの解析部分は微小変形理論に基づいており，節点変位を未知数とする多次元連立方程式を解くことによって所要の変位・断面力・反力を算出する。この連立方程式は，構造データから決定される剛性マトリックスと荷重データから決定される荷重ベクトルから構成される。

検討に用いた静的線形解析で使用する基本方程式は以下のとおり。

$$[K]\{U\}=\{P\} \cdots\cdots (1)$$

ここで，

$[K]$　：構造物の全体剛性マトリックス

$\{U\}$　：変位ベクトル

$\{P\}$　：荷重ベクトル

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図 1 に示す。

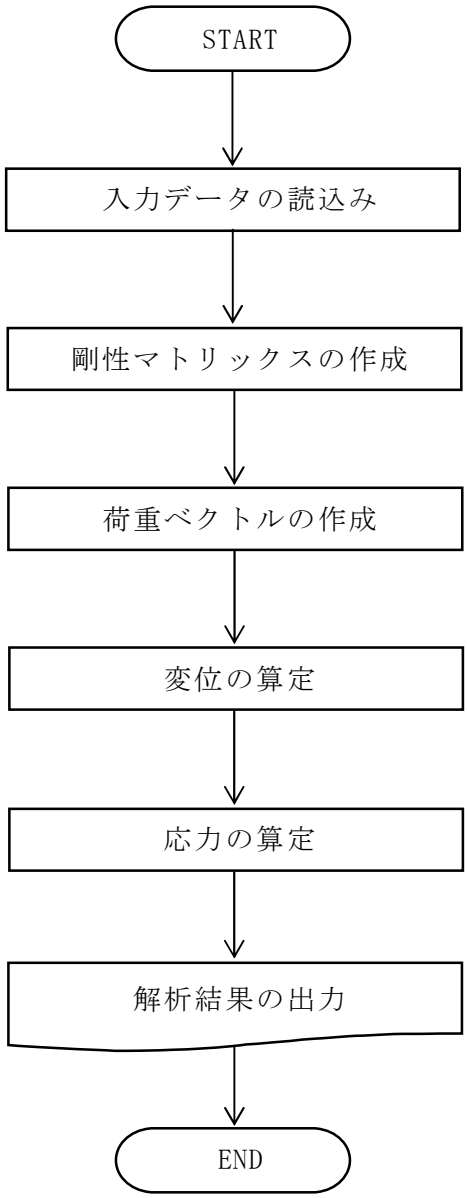


図1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

本解析コードは，「3.3　解析手法」に示した一般性を有する理論モデルそのままに構築されたものである。よって，解析解の適切さは，当該分野で公知の理論モデルに基づく文献による解析解をもって確認可能である。

a.　検証（Verification）

(a)　検証方法

本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。

b.　妥当性確認（Validation）

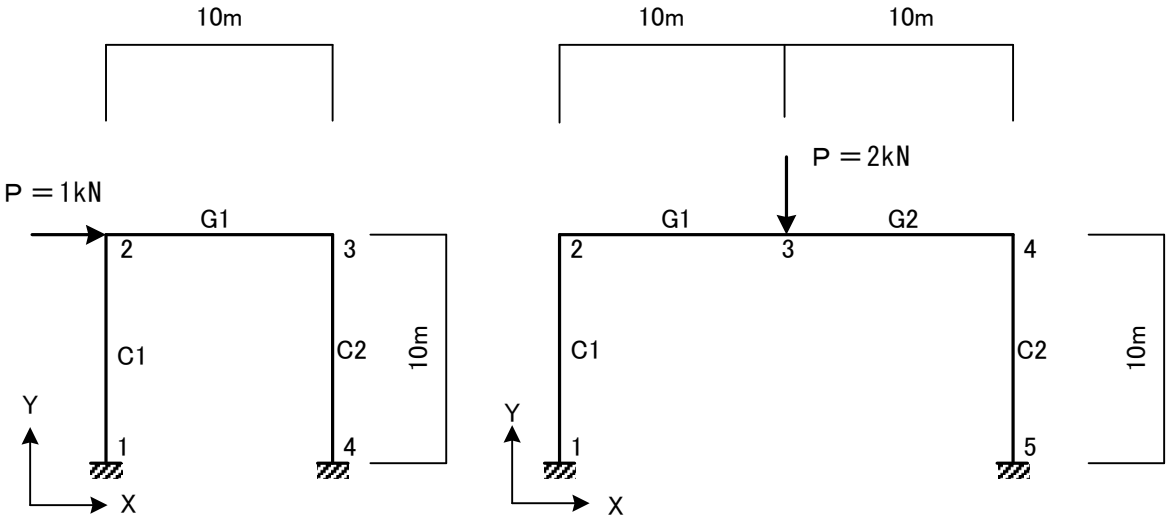
(a)　妥当性確認方法

本解析コードを用いてはり要素による応力解析を実施し，解析結果と文献*1の理論解の比較，検証を行う。

(b)　解析条件

評価対象は，図2及び表2に示す門型ラーメン架構の水平荷重及び鉛直荷重載荷時である。

なお，本解析コードの出力に合わせて，単位系はSI単位系，力はkN，長さはcmとしている。



(1)Ｈ1モデル（水平荷重）　　(2)Ｖ1モデル（鉛直荷重）

図2　解析モデル

表2　部材諸元

モデル	部材	断面2次 モーメント I （cm^4）	備考
H1	C1，C2	250,000	水平荷重
	G1	250,000	
V1	C1，C2	250,000	鉛直荷重
	G1，G2	500,000	

ヤング係数　Ｅ＝1 kN/cm^2

注記　＊1：成岡昌夫，服部正他：コンピュータによる構造工学講座Ⅱ-1-B，日本鋼構造協会編，骨組構造解析，培風館，昭和46年6月，pp.20～33

(c) 妥当性確認結果

イ. 水平荷重

文献*1によれば，水平荷重時の変位及び部材応力は撓角法により以下のように示されている。

$$u_2 = u_3 = (5/84)(P h^3 / E I) = 5/84 \times 1 \times 1000^3 / (1 \times 2.5 \times 10^5) = 238.0952$$

$$\theta_2 = \theta_3 = P h^2 / 28 E I = 1 \times 1000^2 / (28 \times 1 \times 2.5 \times 10^5) = 0.1428571$$

$$M_1 = (4/14) P h = 285.714$$

$$M_2 = (3/14) P h = 214.286$$

$$M_3 = (3/14) P h = 214.286$$

$$M_4 = (4/14) P h = 285.714$$

$$H_1 = H_2 = P/2 = 0.5$$

$$V_1 = (6/14) P = 0.428571$$

$$V_2 = (6/14) P = 0.428571$$

本解析コードと理論解の比較検証結果を表3に示す。検証の結果，本解析コードの解析結果は，理論式による結果と一致することを確認した。

表3 水平荷重時の解析結果の比較

項目		理論式	KANSAS2 Ver.6.01
変形	u_2 (cm)	238.0952	238.0952
	θ_2 (rad)	0.1428571	0.1428571
曲げモーメント (kN・cm)	M_1	285.714	285.714
	M_2	214.286	214.286
	M_3	214.286	214.286
	M_4	285.714	285.714
反力 (kN)	H_1	0.5	0.5
	H_2	0.5	0.5
	V_1	0.428571	0.428571
	V_2	0.428571	0.428571

ロ．　鉛直荷重

文献*1によれば，鉛直荷重時の変位及び部材応力は撓角法により以下のように示されている。

$$\theta_2 = P\ell^2 / 24EI = 2\times1000^2 / \left(24\times1\times2.5\times10^5\right) = 0.333333$$

$$v_3 = P\ell^3 / 24EI = 2\times1000^3 / \left(24\times1\times2.5\times10^5\right) = 333.333$$

$$v_2 = 0$$

$$u_2 = 0$$

$$M_1 = P\ell / 12 = 2\times1000 / 12 = 166.667$$

$$M_2 = P\ell / 6 = 2\times1000 / 6 = 333.333$$

$$M_3 = P\ell / 3 = 2\times1000 / 3 = 666.667$$

$$H_1 = P / 2 = 0.5$$

$$V_1 = P = 1$$

本解析コードと理論解の比較検証結果を表4に示す。検証の結果，本解析コードの解析結果は，理論式による結果と一致することを確認した。

表4　鉛直荷重時の解析結果の比較

項目		理論式	KANSAS2 Ver.6.01
変形	θ_2(rad)	0.333333	0.333333
	v_3(cm)	333.333	333.333
曲げモーメント (kN・cm)	M_1	166.667	166.667
	M_2	333.333	333.333
	M_3	666.667	666.667
反力 (kN)	H_1	0.5	0.5
	V_1	1.0	1.0

c.　評価結果

2次元骨組モデルによる断面力について，理論モデルによる理論解と比較し，解析解が理論解と一致することを確認した。

また，上記に加えて，今回の工事計画認可申請で行う解析の用途及び提供範囲が，上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

したがって，本解析コードを，静的応力解析に使用することは，妥当である。

Ⅴ-5-28　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＣＯＮＤＳＬＩＰ

目次

1. はじめに 1
1.1 使用状況一覧 2
2. 解析コードの概要 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）CONDSLIPについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1 使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-11-2-3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンの耐震性についての計算書	Ver.5

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	CONDSLIP
使用目的	3次元はりモデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力算定）
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver.5
コードの概要	CONDSLIP（以下「本解析コード」という。）は，クレーン等の走行構造物に対して，すべり・浮き上がり・衝突の非線形現象を含めた地震応答解析に用いられているコードである。 本解析コードを用いて，すべり・浮き上がり・衝突現象を含む非線形時刻歴応答解析を実施し，すべり量・浮き上がり量・衝突力等の非線形力を算出することで，構造各部の変位や部材力を算出する。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，上位クラス施設への波及的影響のおそれのある下位クラス施設である使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン等（以下「クレーン」という。）の地震応答解析に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証はVer.4について実施した。内容は次の通りである。 本解析では，クレーンをはり要素でモデル化している。クレーンのはり要素については，以下の通り，理論解との比較による検証を行い，計算機能が適正であることを確認している。 ・片持ちはりモデルに対して静的解析を行い，解析結果と理論解を比較し，誤差 1%以下で一致していることを確認している。 クレーン（車輪）とレールの接触面で生じる，すべり・浮き上がり・衝突等の非線形要素については，以下の通り，衝突要素試験による検証を行い，計算機能が適正であることを確認している。 ・衝突要素試験による地震応答検証試験での衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し，非線形挙動が一致していることを確認している。 ・上記の衝突要素試験による地震応答検証結果については，機械学会論文集に投稿掲載している(2004年9月号（第70巻第697号))。

検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認（Validation）】 本解析コードをクレーンの解析に用いることの妥当性について，以下の通り，クレーン供試模型による地震応答検証試験との比較を行い確認している。 ・クレーン供試模型を用いた地震応答検証試験によるすべり，浮上り，衝突事象の結果とそれらを考慮した解析モデルによる解析結果を比較し，非線形挙動は一致していることを確認している。 ・上記のクレーン供試模型による地震応答検証結果については，機械学会論文集に投稿掲載している（ 2004 年 9 月号（第 70 巻第 697 号））。 ・今回の解析には Ver.5 を用いているが，Ver.4 から Ver.5 へのバージョンアップにおいて，今回使用する解析機能に影響が生じていないことを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行う 3 次元はり要素モデルによる非線形時刻歴応答解析（部材力の算定）の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

Ｖ－5－29　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＴＡＲ－ＣＤ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. STAR-CD Ver.4.16.023の解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……5

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）STAR-CDについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver.4.16.023

2.　解析コードの概要

2.1　STAR-CD Ver.4.16.023

コード名 / 項目	STAR-CD
使用目的	3次元流動解析によるスロッシング評価
開発機関	シーメンス社
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver.4.16.023
コードの概要	STAR-CD（以下，「本解析コード」という）は，汎用流体解析用計算機プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，鉄道，自動車，機械，原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野の流体解析に広く利用されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・ 本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の流体解析に広く利用されていることを確認している。 ・ 試験結果と解析結果を比較し，検証されていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・ 本解析コードは，航空宇宙，鉄道，自動車，機械，原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。

3.　STAR-CD Ver.4.16.023 の解析手法について

3.1　一般事項

本書は，シーメンス社において開発された汎用流体解析コード STAR-CD の説明書である。

本解析コードは，VOF(Volume of Fluid)法を搭載した汎用流体解析コードである。VOF 法は，気液界面の変形を伴う 3 次元非定常流動現象を高精度で解析できる手法であり，スロッシング現象の把握に適している。

3.2　解析コードの特徴

本解析コードは，有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，鉄道，自動車，機械，原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野の流体解析に広く利用されている。

3.3　解析手法

STAR-CD で適用している VOF 法は，各計算セルに含まれる液体の体積率を流体体積率（VOF 値）で示し，この VOF 値の移流計算をする事で，気液界面の形状や変化を計算する。ある計算セルが液体（水）で満たされていれば VOF=1，気体（空気）で満たされていれば VOF=0 である。計算セル内に液体が部分的に存在している場合は，その割合に応じた VOF 値(0≦VOF≦1)が設定される。図 3-1 に計算セルの例を示す。

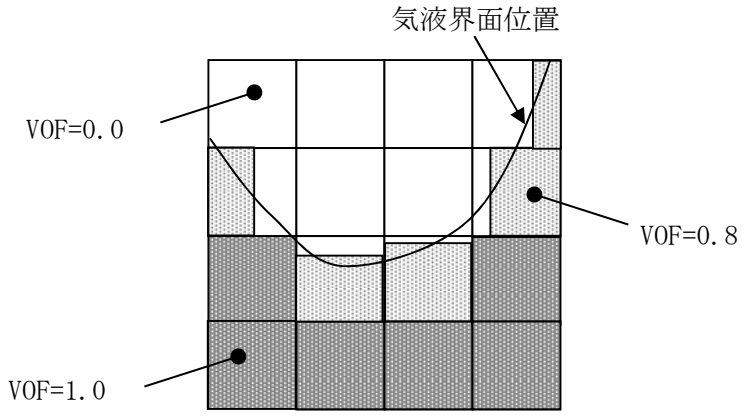


図3-1　計算セルの例

3.4　検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

3.4.1　検証（Verification）

本解析コードの検証として，矩形容器を用いた振動試験及び解析を実施し，波高及び溢水量を比較する。また，他の解析コードで解析を実施し，本解析コードの波高及び溢水量を比較する（出典：日本原子力学会 2017 年秋の大会 使用済燃料プールの地震時溢水量評価に用いる解析コードの検証)。

(1)　試験条件と試験体

試験条件を以下に示す。また，試験体を図3-2に示す。水位計にて時刻歴波高を計測する。

・入力波：正弦波加振

・計測装置を用いた測定項目：液面水位，台上の加速度

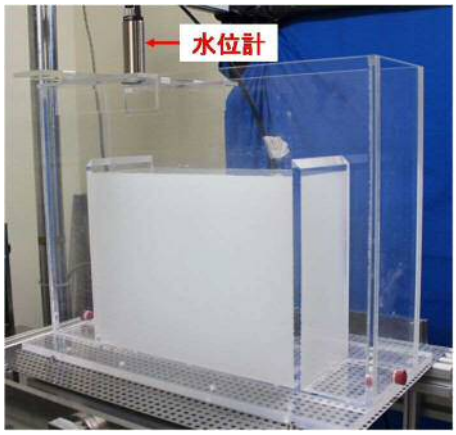


図3-2　試験体

(2)　試験と解析の比較

試験と解析の時刻歴波高を図3-3に示す。また，試験と解析の溢水量を表3-1に示す。本結果から，解析結果と試験結果はよく一致している。

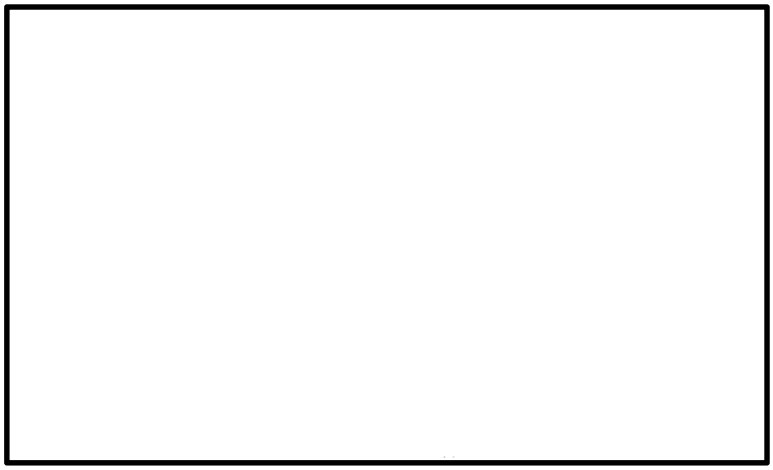


図3-3　試験と解析の時刻歴波高の結果

表 3-1　試験と解析の溢水量の結果

試験	212.4(cm^3)
解析	222.7(cm^3)

(3)　他コードとの比較

本解析コードと他コードを比較した波高を図3-4，溢水量を図3-5に示す。本結果から，他コードとの比較もよく一致している。

(2)(3)の結果から，本解析コードが検証されていることを確認した。

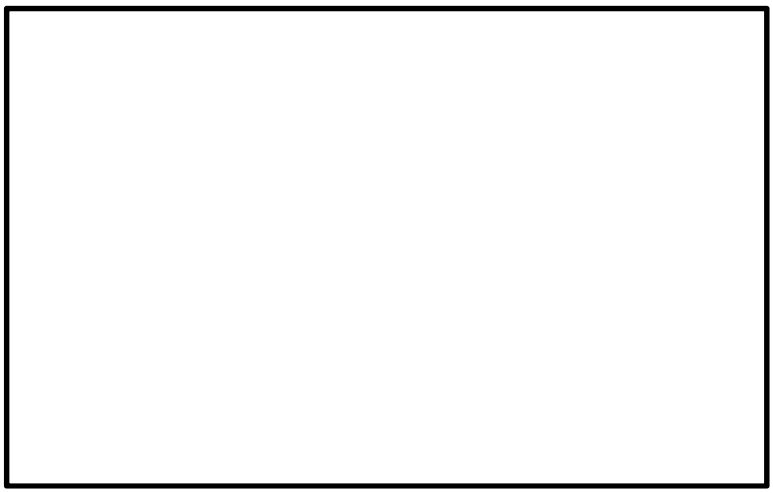


図 3-4　他コードとの比較（波高）

図 3-5　他コードとの比較（溢水量）

3.4.2　妥当性確認（Validation）

本解析コードの妥当性は，機械工学，土木工学，航空工学等の様々な分野における使用実績を有しており，十分に確認されている。

3.4.3　評価結果

3.4.1 及び 3.4.2 より，本解析コードを使用目的に示す溢水評価に用いることは妥当である。

Ｖ－5－30　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｆｌｕｅｎｔ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 Fluent Ver.16.0.0……3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Fluentについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver.16.0.0

2. 解析コードの概要

2.1 Fluent Ver.16.0.0

コード名 / 項目	Fluent
使用目的	流体解析
開発機関	ANSYS,Inc(アメリカ)
開発時期	2015年（初版開発時期 1983年）
使用したバージョン	Ver.16.0.0
計算機コードの概要	ANSYS Fluentは，CFD解析の初心者からエキスパートまで，幅広い要求に応える使いやすさと多くの機能を備える。有限体積法をベースとした非構造格子に対応するソルバを搭載しており，化学反応，燃焼，混相流などが取り扱える。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析プログラムであり，数多くの研究機関や企業において，様々な分野の流体解析に広く利用されていることを確認している。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と他の数値解法による結果を比較し，よく一致することを確認している。 ・本解析コードの製品開発，テスト，メンテナンス，サポートの各プロセスは，United States Nuclear Regulatory Commission（アメリカ合衆国原子力規制委員会）の品質要件を満たしている。 ・使用する解析モデルは，工事計画認可申請書を基に作成した評価モデルを採用していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，航空宇宙，自動車，化学などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・2次元ダムブレイク問題の解析結果と実験結果とを比較し，よく一致することを確認している。

別紙

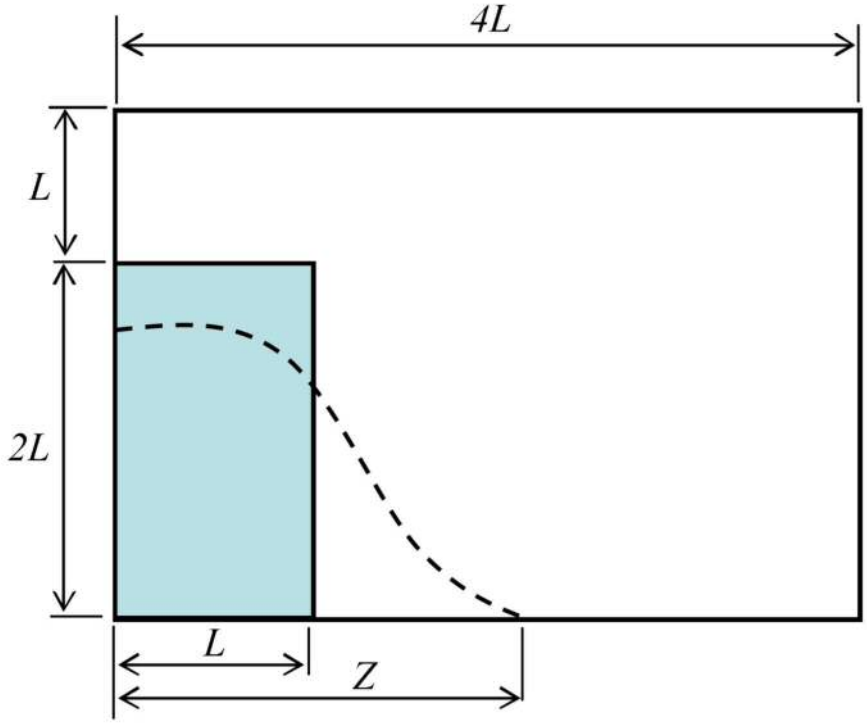
解析コード「Fluent(Ver.16.0.0)」の妥当性検証

1. 概要

使用プログラムFluent(Ver.16.0.0)の動作検証を実施するため，２次元ダムブレイク問題の模擬解析を行い，水面位置の時間変化を実験結果と比較する。

2. 対象問題

第１図に示すアスペクト比１：２の水柱（水色の領域）を初期条件として，時間の経過とともに第1図中破線のように水柱が崩れる問題に対して非定常解析を行う。L=0.5[m]とし，物性値は第1表に示す値を用いる。



第1図　解析対象

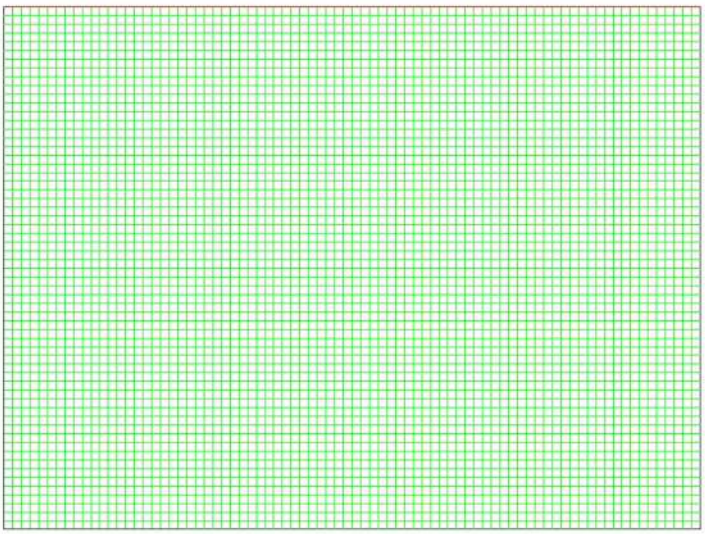
第1表　物性値

水	
密度［kg／m^3］	ρ_l=1000
粘性係数［Pa・s］	μ_l=1.0×10^{-3}
空気	
密度［kg／m^3］	ρ_l=1.0
粘性係数［Pa・s］	μ_l=1.8×10^{-5}

3.　解析モデルと解析条件

3.1　メッシュ分割

第2図にメッシュ分割図を示す。全域においてメッシュサイズを鉛直／水平方向とも0.025［m］(0.05L) とする。



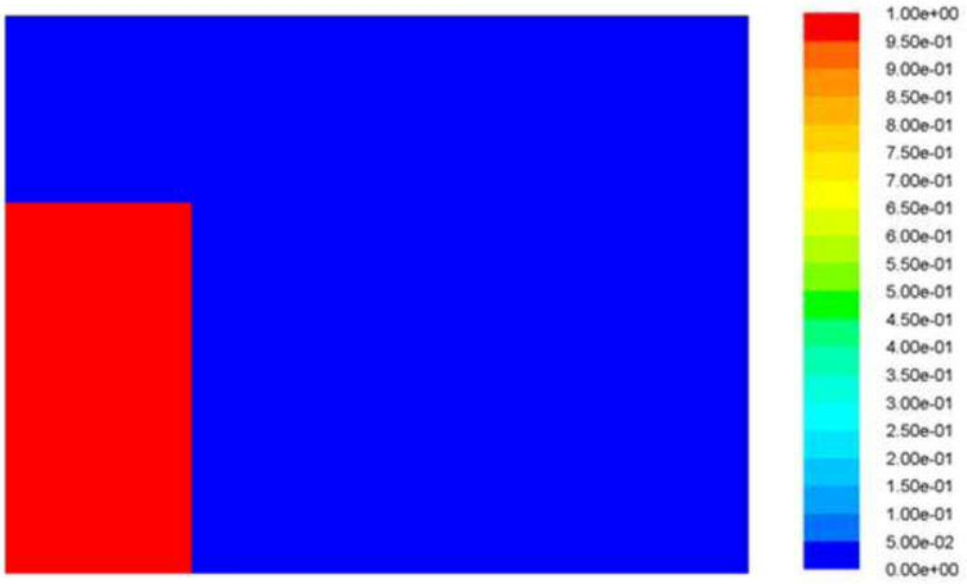
第2図　メッシュ分割図

3.2　流体のモデル化

水及び空気の２相流，かつ２相とも非圧縮性粘性流体としてモデル化する。２相の取り扱いについては，VOF法 (Volume Of Fluid 法) [1]を採用する。

3.3　初期条件

水柱の初期状態を模擬するために，第3図に示すような体積分率の初期条件を与える。流速及び圧力は，すべて0とする。なお，赤色は水を，青色は空気を，コンターレンジ途中の色(黄緑色等)は水と空気の混合状態を意味する。



第3図　体積分率分布（初期条件）

3.4　境界条件

メッシュモデル下面及び側面には，滑りなしの境界条件を与えた。また上面は圧力境界条件とする。

3.5　重力の取り扱い

鉛直下向きに1G（=9.8m／s^2）相当の体積力を与える。

3.6　時間積分

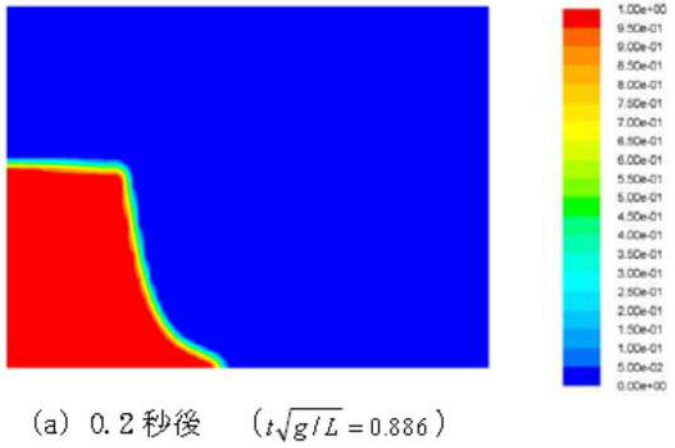
非定常計算における時間刻みは，0.01秒とし，100時間ステップ（=1.0秒間）の解析を行う。

4.　解析結果及びまとめ

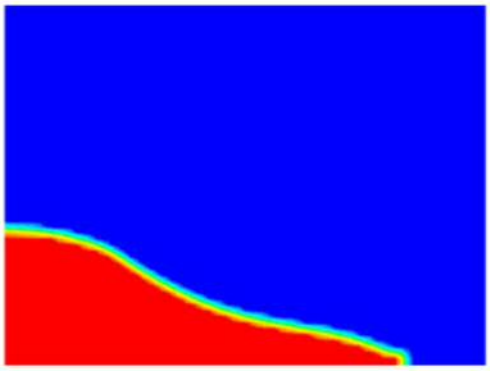
第4図に，体積分率分布を示す。ここで，図中のtは経過時刻[s]，gは重力加速度を示す。時間の経過に伴って水柱が崩壊し，モデル右側面に衝突した水流が壁面を伝って上昇している様子が分かる。また，自由表面の形状に関して，物理的に破たんしているような部分や，自由表面がぼやけるような現象は見られない。

実験結果[2]及び他の数値解法[3]との比較を，第5図及び第6図に示す。第5図は水の先端（右端）の位置の時間変化を，第6図はモデル左端における水面の高さの時間変化を無次元化して整理したグラフである。これらの図において，本解析結果は他の解法・コードで計算した結果とよ

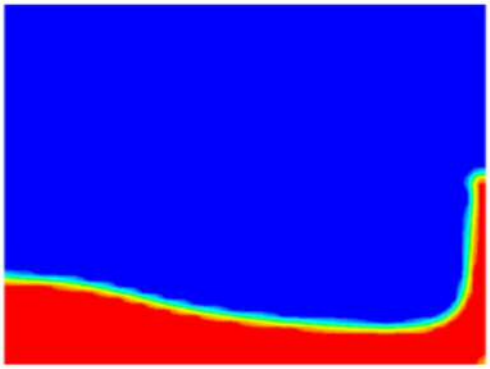
く一致している。第5図の水の先端位置の時間変化において，解析結果が実験結果と比べて先行する傾向があるが，これは実験においては水ダムのスリットの開放が有限時間で行われることの影響が大きいと思われる。



(a) 0.2 秒後　$(t\sqrt{g/L}=0.886)$

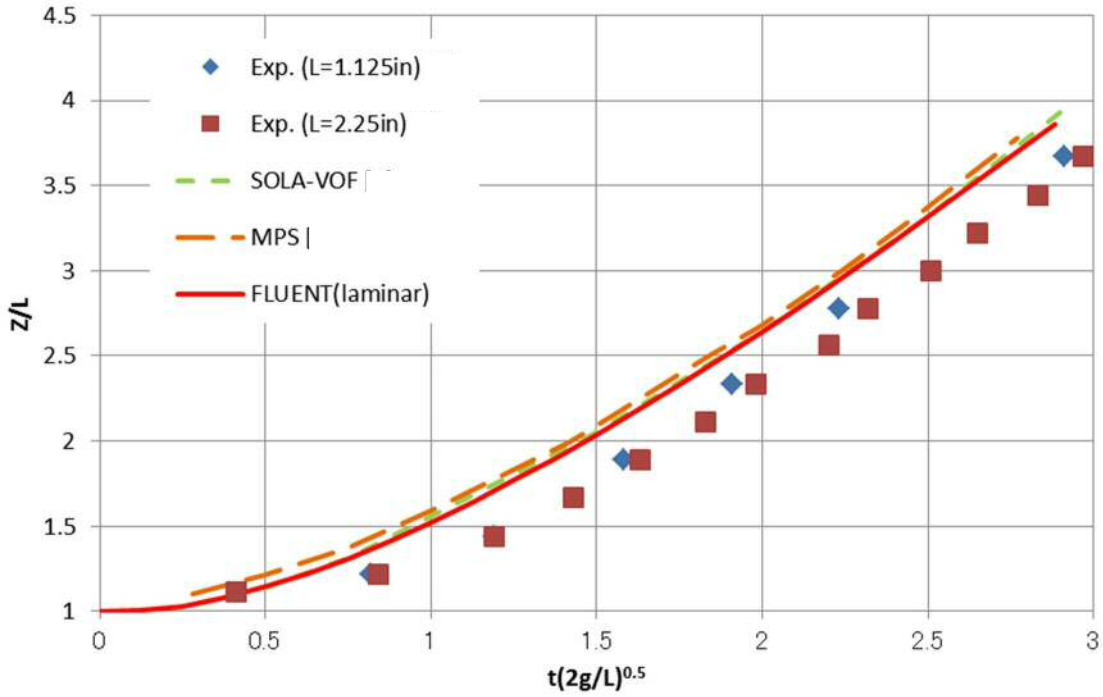


(b) 0.4 秒後　$(t\sqrt{g/L}=1.772)$

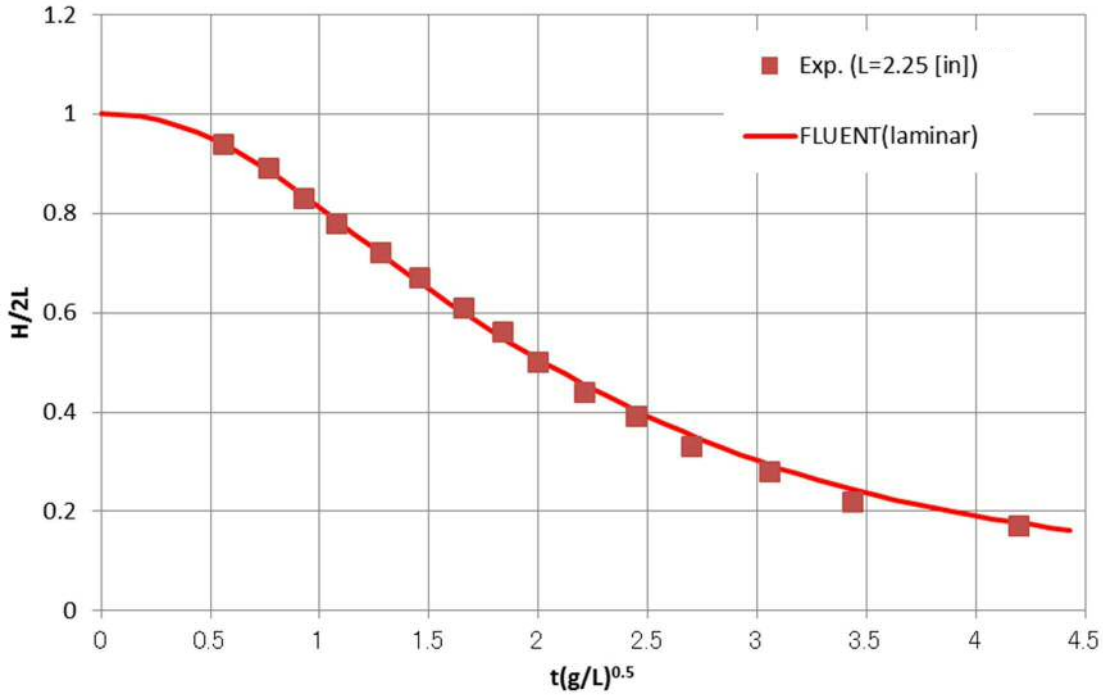


(c) 0.6 秒後　$(t\sqrt{g/L}=2.658)$

第4図　水面（体積分率分布）の変化



第5図　先端位置Zの時間変化



第6図　水柱高さHの時間変化

参考文献

[1] Hirt,C.W.and Nicholls, B.D.,: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries,J.Comput.Phys.,Vol39,pp.201-221,1981

[2] Martin,J.C. and Moyce, W.J.:PartIV. An Experimental Study of the Collapse of Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A,Mathematical and Physical Science, Vol.244,No.882,pp.312-324,1952

[3] 越塚誠一, 山川宏, 矢川元基, :数値流体力学（インテリジェント・エンジニアリング・シリーズ）, 培風館, 1997

NT2 補② V-5-30 ROE

Ⅴ-5-31　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＮＯＰＳ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＮＯＰＳについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧及び解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver.0
Ⅴ-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その１）	
（Ⅴ-2-3-4-1-2に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その２）	
（Ⅴ-2-3-4-1-3に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11，N12，N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	
（Ⅴ-3-3-1に含める）	胴板の強度計算書 主フランジ，上部鏡板及びスタッドボルトの強度計算書 下部鏡板の強度計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の強度計算書 中性子計測ハウジング貫通部の強度計算書 再循環水出口ノズル（N1）の強度計算書 再循環水入口ノズル（N2）の強度計算書 主蒸気ノズル（N3）の強度計算書 給水ノズル（N4）の強度計算書 炉心スプレイノズル（N5）の強度計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の強度計算書 ベントノズル（N7）の強度計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の強度計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の強度計算書 計装ノズル（N11，N12，N16）の強度計算書 ドレンノズル（N15）の強度計算書 低圧注水ノズル（N17）の強度計算書	Ver.0

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	ＮＯＰＳ
使用目的	シェル理論及びはり理論による応力計算
開発機関	バブコック日立(株)
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver.0
コードの概要	ＮＯＰＳ（以下「本解析コード」という。）は，原子炉圧力容器に対する評価を目的として，円筒殻及び球殻の構造不連続による効果を含まない一次応力を，シェル理論又ははり理論に基づいて計算するプログラムである。 荷重は，内圧，外圧及び外荷重を考慮できる。 原子炉圧力容器の円筒殻，球殻及びノズル等に内圧及び外圧によって生じる一次一般膜応力並びに外荷重によって生じる一次一般膜応力及び一次膜＋一次曲げ応力の計算を行う。 原子力の分野における使用実績を有している。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・代表的な検証用モデルに対し，本解析コードで計算される解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードのマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する応力計算に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・本解析コードは，これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており，妥当性は十分確認されている。

Ⅴ-5-32　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＬＳ－ＤＹＮＡ

目次

1.　はじめに・・ 1
1.1　使用状況一覧・・ 2
2.　解析コードの概要・・ 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＬＳ－ＤＹＮＡについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-3-別添1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	971
Ⅴ-3-別添1-2-1-2	防護鋼板の強度計算書	R9.2.0，971
Ⅴ-3-別添1-2-1-3	架構の強度計算書	R9.2.0，971

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	LS-DYNA
使用目的	3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）
開発機関	Livemore Software Technology Corporation
開発時期	1987年
使用したバージョン	Ver.971 Ver.R9.2.0
コードの概要	LS-DYNAは，Lawrence Livemore研究所により開発・公開された陽解法有限要素法DYNA3Dを基に開発された構造解析用の汎用市販コードである。 機械・土木建築その他広範な分野に及ぶ要素群，非線形モデルを多数サポートしており，国内外の宇宙航空，自動車，機械，建築，土木などの様々な分野において多くの利用実績があり，陽的時間積分を用いていることから，衝突問題など短時間の動的現象のシミュレーションに適している。また，大変形の非線形問題への適用が容易である点に特徴がある。 衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力，ひずみや加速度応答などを算出する。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	LS-DYNA Ver.971は，竜巻より防護すべき施設を内包する施設の屋根スラブの3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）に使用している。 LS-DYNA Ver.R9.2.0は，竜巻飛来物防護対策設備の3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・開発機構マニュアルにおいて提示している3次元有限要素法による衝突解析に関する例題解析を実施し，解析結果がマニュアルに記載された結果と一致することを確認している。 ・Norwegian University of Science and Technologyにより，シェル要素及びソリッド要素を用いた薄板鋼管の軸方向圧縮破壊試験のシミュレーション解析が行われており，解析結果と実験結果が概ね一致することを確認している。 ・本コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードは，国内外の宇宙航空，自動車，機械，建築，土木などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，本解析コードの適正な用途適用範囲を確認している。 ・本工事計画で行う3次元有限要素法（はり要素，シェル要素，ソリッド要素）による動的解析（衝突解析）の用途，適用範囲が上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer.971は，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンのうちVer.R9.2.0は，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素，3次元有限要素法による衝突解析（竜巻飛来物影響評価）の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-33　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＯＬＶＥＲ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SOLVERについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-8-3-3-2	管の耐震性についての計算書	Rev 02.05
Ⅴ-3-8-1-3-4	管の応力計算書	Rev 02.05

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	SOLVER
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析
開発機関	株式会社　東芝
開発時期	1988年
使用したバージョン	Rev 02.05
コードの概要	SOLVER（以下「本解析コード」という。）は構造物の静的及び動的解析のメインプログラムである「SAP」を基に作られている。「SAP」は，米カリフォルニア大学にて開発された計算機プログラムである。 任意の3次元形状に対し，有限要素法により静的解析，動的解析を行い，反力・モーメント・応力，固有振動数・刺激係数等の算出が可能である。 本解析コードは，原子力の配管設計において，多くの実績を有している。
検証（Verification）及び 妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 ・本解析コードと世界的に使用実績及びクライアント数の多い配管解析プログラムの一つである解析コード[redacted]による解析結果を比較し，結果が合致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，他プラントの既工事計画において使用実績があることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行うはりモデルの固有値解析，地震応答解析及び応力解析の使用目的に照らして，用途及び適用範囲が上述の妥当性確認範囲であることを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。

Ⅴ-5-34　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＶＩＡＮＡ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付資料において使用した計算機プログラム（解析コード）VIANAについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付資料を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	Ver.1.0

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	VIANA
使用目的	設計用床応答曲線作成
開発機関	株式会社　東芝
開発時期	1983年
使用したバージョン	Ver.1.0
コードの概要	VIANA（以下「本解析コード」という。）は，加速度時刻歴から床応答曲線を作成するプログラムであり，建物・構築物床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。 一定の固有周期および減衰定数を有する1質点系の，与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し，周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答曲線の包絡値を求め，また床応答曲線の拡幅を行う。 本解析コードは，設計用床応答曲線を作成するために開発したハウスコードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・理論解と本解析コードで作成した床応答曲線と比較し，一致していることを確認した。 ・拡幅機能については，±10%拡幅した算出値と，本解析コードで作成した算出値を比較し，一致していることを確認した。 ・包絡機能については，包絡した床応答曲線の最大値と，本解析コードで作成した算出値を比較し，一致していることを確認した。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本工事計画で使用する解析機能は，理論モデルをそのままコード化したものであり，妥当性は確認されている。 ・設計用床応答曲線を作成する際，入力とする時刻歴データの時間刻み幅，データの形式は，妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。

検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	・10%拡幅，時刻歴波の時間刻み，固有周期計算間隔は JEAG4601-1987 に従っており，妥当性は確認されている。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

Ⅴ-5-35　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡｕｔｏＰＩＰＥ

目次

1.　はじめに……1
1.1　使用状況一覧……2
2.　解析コードの概要……3
2.1 AutoPIPE　Ver.09.00.00.09……3
2.2 AutoPIPE　Ver.09.04.00.19……4

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）AutoPIPEについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver.09.00.00.09
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-4-2-2-2	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-5-4-5-5	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-5-6-1-4	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-9-2-2-2-2	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-9-2-2-4-2	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-9-2-5-1-2	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	Ver.09.00.00.09
V-1-1-8	発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書	Ver.09.04.00.19
V-2-7-2-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-7-2-3-1	管の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver.09.04.00.19
V-2-別添2-2	溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書	Ver.09.04.00.19

2.　解析コードの概要

2.1 AutoPIPE　Ver.09.00.00.09

コード名 / 項目	AutoPIPE
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1986年
使用したバージョン	Ver.09.00.00.09
コードの概要	AutoPIPE（以下「本解析コード」という。）は，静的及び動的荷重に対する配管の応力を解析することを目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法を用いて行うものである。 主な解析機能として，内圧・熱膨張・強制変位の線形の静的解析及び摩擦力等を考慮した非線形の静的解析，固有値解析・応答スペクトル解析等の動解析，そしてハンガーサポートの自動選定があり，本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「TRIFLEX」を用いて，代表的な配管検証用モデルに対し静的解析（自重・熱膨張）を行い拘束点反力・移動量の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，解析については，既工事計画で使用された実績があり，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2　AutoPIPE　Ver.09.04.00.19

コード名 / 項目	AutoPIPE
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，固有値解析及び応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1986年
使用したバージョン	Ver.09.04.00.19
コードの概要	AutoPIPE（以下「本解析コード」という。）は，静的及び動的荷重に対する配管の応力を解析することを目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法を用いて行うものである。 主な解析機能として，内圧・熱膨張・強制変位の線形の静的解析及び摩擦力等を考慮した非線形の静的解析，固有値解析・応答スペクトル解析等の動解析，そしてハンガーサポートの自動選定があり，本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の分野において，多くの実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「CAESAR Ⅱ」を用いて，代表的な配管検証用モデルに対し静的解析（自重・熱膨張）及び動的解析を行い拘束点反力・移動量の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，工業用配管システム設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，解析については，既工事計画で使用された実績があり，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-36　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＳＴＡＡＤ．Ｐｒｏ

目次

1.　はじめに……1
1.1　使用状況一覧……2
2.　解析コードの概要……3
2.1 STAAD.Pro　Ver.20.07.10.65……3
2.2 STAAD.Pro　Ver.20.07.11.50……4

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）STAAD.Proについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-5-5-5-2	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-5-7-1-3	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-9-4-3-2-1	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-9-4-3-4-1	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-9-7-1-1	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver.20.07.10.65
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.11.50
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.11.50
V-2-10-1-4-6	管の耐震性についての計算書	Ver.20.07.11.50
V-2-別添1-10	ガス供給配管の耐震計算書	Ver.20.07.11.50

2. 解析コードの概要

2.1 STAAD.Pro Ver.20.07.10.65

コード名 / 項目	STAAD.Pro
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，静的解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1985年
使用したバージョン	Ver.20.07.10.65
コードの概要	STAAD.Pro（以下「本解析コード」という。）は，3次元架構構造モデルの構造解析を目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法にて行うものである。 引張・圧縮・せん断などの一般的な静解析から，地震などの動解析までサポートしており，本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の分野で世界的に広く実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・材料力学に基づく計算手法を用いて，代表的な簡易骨組モデル「H形鋼材」及び「L形鋼材」に対し圧縮応力，曲げ応力，せん断応力計算を行い発生応力の計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，解析については，既工事計画で使用された実績があり，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2 STAAD.Pro　Ver.20.07.11.50

コード名 / 項目	STAAD.Pro
使用目的	有限要素法（はりモデル）による，応力解析
開発機関	株式会社ベントレー・システムズ
開発時期	1972年
使用したバージョン	Ver.20.07.11.50
コードの概要	STAAD.Pro（以下「本解析コード」という。）は，3次元架構構造モデルの構造解析を目的に，任意形状の3次元モデルの静的解析及び動的解析を有限要素法にて行うものである。 引張・圧縮・せん断などの一般的な静解析から，地震などの動解析までサポートしており，本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の分野で世界的に広く実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・世界的に使用実績の多いプログラムの1つである構造解析用解析コード「NASTRAN」を用いて，代表的な配管サポート検証用モデル対し静的解析（自重・熱膨張）を行い固有値解析・拘束点反力計算結果の比較を行い，両者の解析結果が一致していることにより計算結果の検証を行ったことを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，プラント設計及び，建築・土木工学等の様々な分野における使用実績を有しており，今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，解析については，既工事計画で使用された実績があり，妥当性は十分に確認されている。 ・検証の体系と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，検証結果を持って，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-37　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＰＥＧＡ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. PEGAの概要……3
3. PEGAの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……7
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……8

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）PEGAについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-10	緊急時対策所建屋の地震応答計算書	Ver.1

2. PEGAの概要

コード名 / 項目	PEGA
使用目的	地震応答解析モデルにおける群杭の水平,回転,上下の地盤ばねの算定。
開発機関	清水建設株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver.1
コードの概要	PEGA（以下「本解析コード」という。）は，均質又は成層地盤内における任意の杭配置や群杭効果を考慮した杭頭インピーダンスが求められる。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	PEGAは,緊急時対策所建屋の水平方向及び鉛直方向の地震応答解析における質点系モデルの杭基礎の地盤ばねを評価するために使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・PEGAを用いて評価した杭頭インピーダンスが公開文献の結果と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，杭頭インピーダンスについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. PEGAの解析手法について

3.1 一般事項

PEGAは，3次元薄層要素法により，群杭の杭頭インピーダンス（水平・回転・上下成分）を計算するプログラムである。PEGAは，緊急時対策所建屋の地震応答解析を行う際に入力データとして必要な杭基礎の地盤ばねの評価に使用している。

3.2 解析コードの特徴

PEGAの主な特徴を以下に示す。

・地盤は均質又は水平成層となる半無限地盤とする。
・杭配置は任意に設定できる。
・単杭および群杭の杭頭インピーダンス（水平・回転・上下成分）が算定できる。
・群杭効率の算定ができる。

3.3 解析手法

水平成層な半無限地盤内にN本からなる正方配列の群杭が存在する場合を考える。群杭全体系の運動方程式は次式で表わされる。

$$\{P\}=[S]\{u\} \quad \text{(式3.3-1)}$$

$$[S]=[K_P]-[K_P^G]+[A(i\omega)]^{-1}-\omega^2([M_P]-[M_P^G]) \quad \text{(式3.3-2)}$$

ここに，

$\{P\}$ ：杭の任意節点における節点加振力ベクトル（図3-1）

$\{u\}$ ：杭の任意節点における節点変位ベクトル（図3-1）

$[K_P]$ ：杭の剛性マトリックス

$[M_P]$ ：杭の質量マトリックス

$[K_P^G]$ ：杭と同体積土柱の排土剛性マトリックス

$[M_P^G]$ ：杭と同体積土柱の排土質量マトリックス

$[A(i\omega)]$ ：杭間の連成効果を表す影響係数マトリックス

ω ：加振円振動数

ここで,図3-1における杭頭節点i＝1とそれ以外の節点i＝2～nに式3-1を分けて次式のように書き直す。

$$\begin{Bmatrix} \{P\}_1 \\ \{P\}_{2-n} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [S]_{1,1} & [S]_{1,2-n} \\ [S]_{2-n,1} & [S]_{2-n,2-n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\}_1 \\ \{u\}_{2-n} \end{Bmatrix} \quad \text{(式3.3-3)}$$

杭頭柔性方程式は，第3－3式に$\{P\}_{2-n} = \{0\}$を代入した次式で与えられる。

$$\{u\}_1 = [\alpha]_{1,1} \{P\}_1 \quad \text{(式3.3-4)}$$

$$[\alpha]_{1,1}^{-1} = [S]_{1,1} - [S]_{1,2-n} [S]_{2-n,2-n}^{-1} [S]_{2-n,1} \quad \text{(式3.3-5)}$$

ここに，

$[\alpha]_{1,1}$　　：杭頭柔性マトリックス

次に，基礎の運動方程式は，基礎の運動をx方向並進成分，y方向回転成分，z方向上下成分の３自由度とすれば，次式で表せる。ここで，基礎は無質量剛基礎とする。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \\ F_z \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \delta_x \\ \phi_y \\ \delta_z \end{Bmatrix} \quad \text{(式3.3-6)}$$

ここに，

$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \\ F_z \end{Bmatrix}$　　：杭頭の加振力ベクトル

$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \phi_y \\ \delta_z \end{Bmatrix}$　　：杭頭の節点変位ベクトル

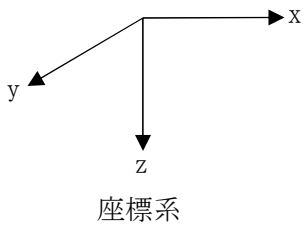
$[K]$　　：杭頭剛性マトリックス

杭頭剛性マトリックス$[K]$は，杭頭柔性マトリックス$[\alpha]_{1,1}$を用いて次式で表わされる。

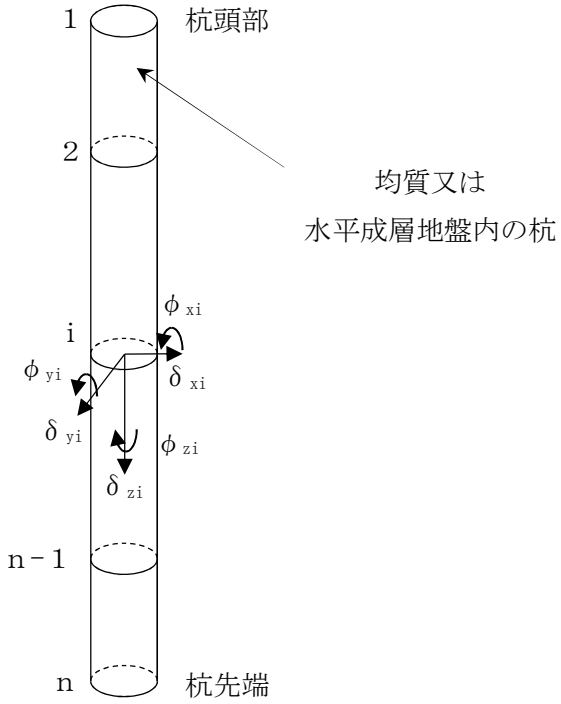
$$[K] = [T]^T [\alpha]_{1,1}^{-1} [T] \quad \text{(式3.3-7)}$$

ここに，

$[T]$　　：杭頭の変位拘束条件を与えるための変換マトリックス



座標系



δ_{xi}：i点のx方向変位

ϕ_{xi}：i点のx軸回りの回転角

δ_{yi}：i点のy方向変位

ϕ_{yi}：i点のy軸回りの回転角

δ_{zi}：i点のz方向変位

ϕ_{zi}：i点のz軸回りの回転角

図3-1　座標系と節点自由度

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

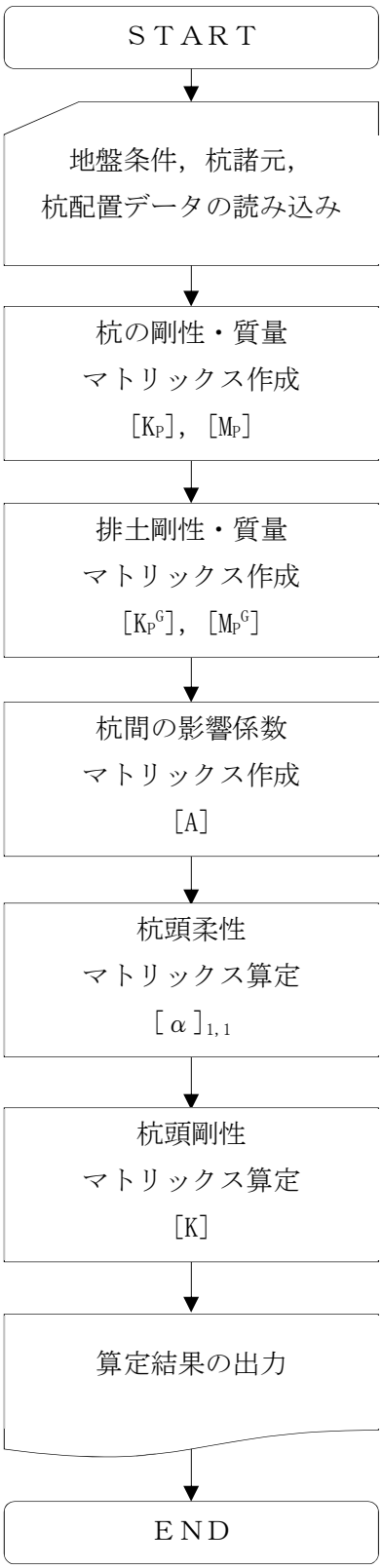


図3-2　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

(1)　公開文献との比較による検証

検証は,均質地盤を対象として,PEGAの解析解と公開文献*で示されている解析解の比較を行う。検証を行う解析モデル図及び解析諸元を図3-3に示す。

単杭及び群杭基礎の動的地盤ばねを算定し公開文献の結果と合わせて図3-4に示す。図3-4より両者は概ね一致しており,PEGAが杭基礎の動的ばねを正しく評価していることが確認できる。

注記　＊：　入門・建物と地盤との動的相互作用　174頁～175頁　（社）日本建築学会　1996年4月，第1版第1刷

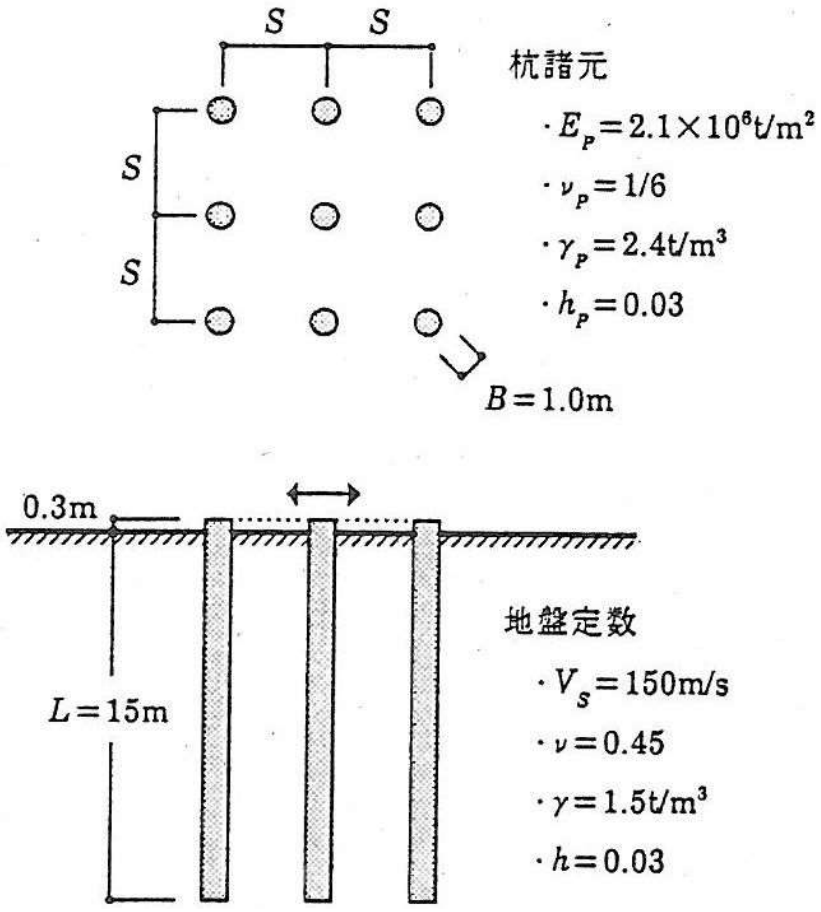


図3-3　解析モデル及び解析諸元

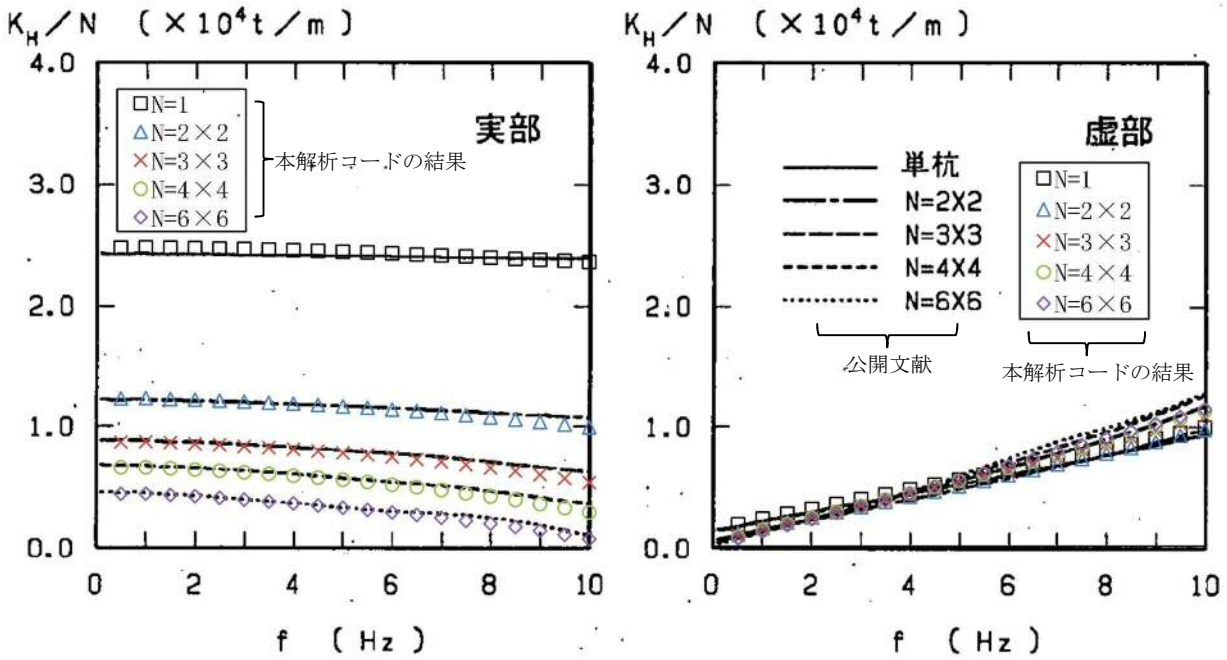


図3-4　公開文献*の解析解とPEGAによる動的地盤ばねの比較

注記　＊：　入門・建物と地盤との動的相互作用　174頁～175頁　（社）日本建築学会　1996年4月，第1版第1刷

(2)　使用内容に対する妥当性

緊急時対策所建屋の地震応答解析における杭基礎の地盤ばねの算定にPEGAを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，杭頭インピーダンスについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

Ⅴ-5-38　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＣＡＲＣ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. SCARCの概要……3
3. SCARCの解析手法について……5
3.1 一般事項……5
3.2 解析コードの特徴……5
3.3 解析手法……5
3.4 解析フローチャート……13
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……14

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SCARCについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	2014

2. SCARCの概要

コード名 / 項目	SCARC
使用目的	壁・床部材の断面算定
開発機関	大林組
開発時期	2014年
使用したバージョン	Ver. 2014 (2014.7) 選定理由：検証及び妥当性が確認された最新バージョンであるため
コードの概要	SCARC（以下「本解析コード」という。）は壁・床の面部材を対象に，FEM応力解析により得られた設計用断面力を用いて断面算定を行う解析コードである。 断面算定は，軸力-曲げモーメントについてはコンクリート・鉄筋の応力度やひずみを，また面内・面外せん断力については許容せん断力（又は許容せん断応力度）を算出し，それぞれの許容値に対する安全裕度を評価する。 断面算定式は，RC-N規準・RC規準及びCCV規格から，対象建屋や部材に応じて適宜選択することができる。なお，本解析コードは，インハウスコードである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，大林組の自社開発コードであり，使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁・床部材の断面算定で使用している。 【検証の内容】 本解析コードの検証内容は以下の通りである。 ・軸力-曲げモーメント，面内せん断力及び面外せん断力の各項目について，電算結果と理論解による結果と概ね一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認】 SCARCを断面算定に使用することは，次の通り妥当である。 ・九州電力玄海3号機工事計画認可申請書の資料3（耐震性に関する説明書）において，鉄筋コンクリート部材の断面算定に使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認してい

	る。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・検証内容のとおり，断面算定結果について検証していることから，断面算定評価の目的に照らして今回の計算に使用することは妥当である。

3. SCARCの解析手法について

3.1 一般事項

SCARC は壁・床の面部材を対象に，FEM 応力解析により得られた設計用断面力を用いて断面算定を行う解析コードである。

断面算定は，軸力-曲げモーメントについてはコンクリート・鉄筋の応力度やひずみを，また面内・面外せん断力については許容せん断力（又は許容せん断応力度）を算出し，それぞれの許容値に対する安全裕度を評価する。

断面算定式は，RC-N 規準・RC 規準及び CCV 規格から，対象建屋や部材に応じて適宜選択することができる。

3.2 解析コードの特徴

SCARC の主な特徴を以下に示す。

(1) 壁・床の面部材について，FEM応力解析より得られた設計用断面力を，単位幅あたりの断面力として断面算定を行う。

(2) 断面算定式は，RC-N規準・RC規準及びCCV規格から選択でき，材料の許容応力度は任意に設定できる。

(3) FEM応力解析結果を定形ファイル形式で取り込み，荷重組合せに応じた設計用断面力を算出し，各組合せケースに対する断面算定を一括して行うことが可能である。

3.3 解析手法

3.3.1 解析理論

断面算定は軸力-曲げモーメント，面内せん断及び面外せん断の3種類について行う。それぞれの概要を以下に記す。

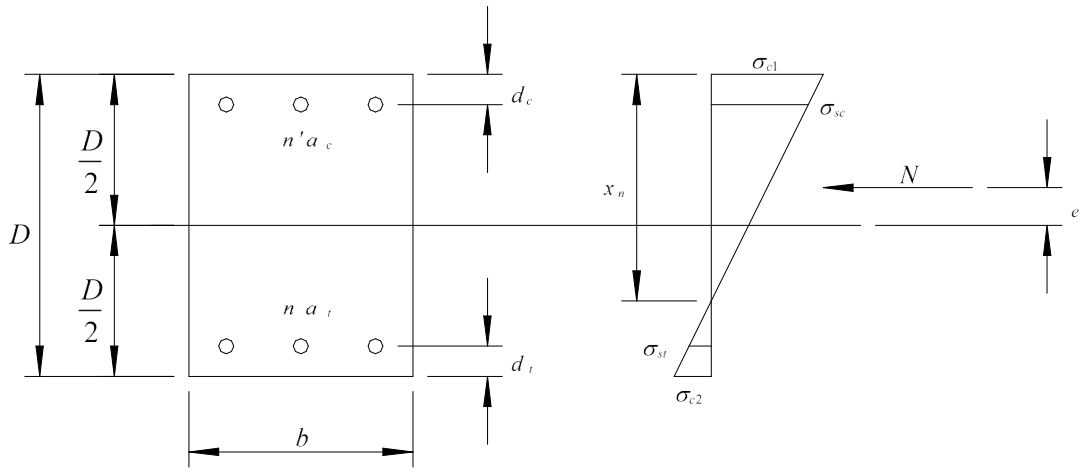
(1) 軸力-曲げモーメント

軸力-曲げモーメントについては，RC-N規準・RC規準及びCCV規格とも同じ理論であり，以下の仮定に基づいている。

a. 断面は曲げモーメントを受けた後も平面を保持し，コンクリート・鉄筋のひずみは中立軸からの距離に比例する。

b. コンクリートの引張強度は無視する。

軸力−曲げモーメントに関する理論の概要を以下に示す。なお，ここでは中立軸が断面内にある場合を示す。



b	：梁幅（単位幅）
D	：部材厚
n', n	：圧縮側及び引張側ヤング係数比
a_c, a_t	：圧縮鉄筋量及び引張鉄筋量
d_c	：圧縮縁から圧縮鉄筋重心位置までの距離
d_t	：引張縁から引張鉄筋重心位置までの距離
N	：軸力
e	：偏心距離（$e = M/N$，M：曲げモーメント）
σ_{c1}, σ_{c2}	：圧縮縁及び引張縁コンクリート応力度
σ_{sc}, σ_{st}	：圧縮鉄筋応力度及び引張鉄筋応力度
x_n	：圧縮縁から中立軸までの距離

有効等価断面の中立軸まわりの断面1次モーメントS_n及び断面2次モーメントI_nは，以下のように表される。

$$S_n = \left\{\frac{1}{2}{x_{n1}}^2 + n'p_c(x_{n1} - d_{c1}) - np_t(1 - d_{t1} - x_{n1})\right\}bD^2 \qquad (3.1\text{-}1)$$

$$I_n = \left\{\frac{1}{3}{x_{n1}}^3 + n'p_c(x_{n1} - d_{c1})^2 + np_t(1 - d_{t1} - x_{n1})^2\right\}bD^3 \qquad (3.1\text{-}2)$$

ここで，

$x_{n1} = x_n/D$
$d_{c1} = d_c/D$
$d_{t1} = d_t/D$
$p_c = a_c/b \cdot D$ ：圧縮鉄筋比
$p_t = a_t/b \cdot D$ ：引張鉄筋比

また，中立軸に関する式は以下となる。

$$x_n - \frac{D}{2} + e = \frac{I_n}{S_n} \qquad (3.1\text{-}3)$$

(3.1-1)，(3.1-2) 式を (3.1-3)式に代入すると，中立軸に関する次の3次方程式が求められる。

$$\frac{1}{6}{x_{n1}}^3 + \frac{1}{2}\left(e_1 - \frac{1}{2}\right){x_{n1}}^2 + (n' + n)p_g\left(g_{s1} + e_1 - \frac{1}{2}\right)x_{n1}$$

$$-\left\{n'p_c d_{c1}\left(e_1 - \frac{1}{2} + d_{c1}\right) + np_t(1 - d_{t1})\left(e_1 + \frac{1}{2} - d_{t1}\right)\right\} = 0 \qquad (3.1\text{-}4)$$

また，断面に作用する曲げモーメントMを，次式のように表すことができる。

$$M = Ne = \frac{\sigma_{c1}}{x_n}\left\{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right)S_n\right\} \qquad (3.1\text{-}5)$$

したがって，断面上縁のコンクリートの応力σ_{c1}・ひずみε_{c1}が以下のように求められる。

$$\sigma_{c1} = \frac{M \cdot x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right)S_n} \qquad (3.1\text{-}6)$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{M}{E_c} \cdot \frac{x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right)S_n} \qquad (3.1\text{-}7)$$

比例関係から，断面下縁のコンクリートの応力σ_{c2}・ひずみε_{c2}が以下のように求められる。

$$\sigma_{c2} = -\frac{M(D - x_n)}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right)S_n} \qquad (3.1\text{-}8)$$

$$\varepsilon_{c2} = -\frac{M}{E_c} \cdot \frac{D - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right)S_n} \qquad (3.1\text{-}9)$$

同様にして，鉄筋の応力・ひずみは以下のように求められる。

$$\varepsilon_{sc} = \frac{M}{E_c} \cdot \frac{x_n - d_c}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1\text{-}10)$$

$$\sigma_{sc} = Mn' \cdot \frac{x_n - d_c}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1\text{-}11)$$

$$\varepsilon_{st} = -\frac{M}{E_c} \cdot \frac{D - d_t - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1\text{-}12)$$

$$\sigma_{st} = -Mn \cdot \frac{D - d_t - x_n}{I_n + \left(\frac{D}{2} - x_n\right) S_n} \quad (3.1\text{-}13)$$

検定比は，これらのコンクリート・鉄筋応力度を許容応力度で除して算出する。

（圧縮コンクリート応力度 検定比）$= \sigma_{c1} / f_c$ (3.1-14)

（圧縮鉄筋応力度 検定比）$= \sigma_{sc} / {}_r f_c$ (3.1-15)

（引張鉄筋応力度 検定比）$= \sigma_{st} / f_t$ (3.1-16)

ここで

f_c ：コンクリートの圧縮許容応力度

${}_r f_c$ ：鉄筋の許容圧縮応力度

f_t ：鉄筋の許容引張応力度

(2) 面内せん断力

RC-N規準とCCV規格について，それぞれの断面算定の概要を示す。RC-N規準については短期を，CCV規格については荷重状態Ⅳを示す。なお，RC規準の面内せん断力の検討は，RC-N規準のものと同様であるため，省略する。

a. RC-N 規準

RC-N規準における短期許容面内せん断力は以下となる。

$$Q_A = \max(Q_1, Q_2) \quad (3.2\text{-}1)$$

$$Q_1 = t \cdot l \cdot f_s \quad (3.2\text{-}2)$$

$$Q_2 = \sum Q_w + \sum Q_c \quad (3.2\text{-}3)$$

$$Q_w = p_s \cdot t \cdot l' \cdot {}_sf_t \quad (3.2\text{-}4)$$

$$Q_c = bj\{\alpha f_s + 0.5\,{}_wf_t(p_w - 0.002)\} \quad (3.2\text{-}5)$$

ここで，

t ：部材厚
l ：部材の全せい
l' ：部材の内法長さ
b ：柱幅
j ：柱の応力中心間距離
f_s ：コンクリートの短期許容せん断応力度
${}_sf_t$ ：壁筋のせん断補強用短期許容引張応力度
${}_wf_t$ ：柱帯筋のせん断補強用短期許容引張応力度
p_s ：壁のせん断補強筋比
p_w ：柱の帯筋比
α ：拘束効果による割増係数で，α＝1.5とする。

断面算定は，（3.2-1）式により許容面内せん断力Q_A を算出し，以下により検定比を評価する。

$$(\text{面内せん断力に対する検定比}) = Q/Q_A \quad (3.2\text{-}6)$$

Q：設計用面内せん断力

b. CCV 規格

ここでは，プレストレストコンクリートの許容面内せん断応力度について記す。

CCV規格における許容面内せん断応力度は以下となる。

$$\tau_u = \min(\tau_{u1}, \tau_{u2}) \quad (3.2\text{-}7)$$

$$\tau_{u1} = 0.5\{(p_{t\varphi} f_y - \sigma_{p\varphi} - \sigma_{0\varphi}) + (p_{t\theta} f_y - \sigma_{p\theta} - \sigma_{0\theta})\} \quad (3.2\text{-}8)$$

$$\tau_{u2} = 1.25\sqrt{F_c} \quad (3.2\text{-}9)$$

ここで

$p_{t\varphi}$ ：子午線方向主筋の鉄筋比

$p_{t\theta}$ ：円周方向主筋の鉄筋比

$\sigma_{p\varphi}$ ：プレストレス荷重により生じる子午線方向の膜応力度

$\sigma_{p\theta}$ ：プレストレス荷重により生じる円周方向の膜応力度

$\sigma_{0\varphi}$ ：プレストレス荷重以外の外力により生じる子午線方向の膜応力度

$\sigma_{0\theta}$ ：プレストレス荷重以外の外力により生じる円周方向の膜応力度

f_y ：鉄筋の許容引張・圧縮応力度

F_c ：コンクリートの設計基準強度

断面算定は，（3.2-7）式より許容面内せん断応力度を算出し，以下により検定比を評価する。

$$(\text{面内せん断応力度に対する検定比}) = \tau / \tau_u \quad (3.2\text{-}10)$$

τ：設計用面内せん断応力度

(3) 面外せん断力

RC-N規準とCCV規格について，それぞれの断面算定の概要を示す。RC-N規準については短期を，CCV規格については荷重状態Ⅳを示す。なお，ここでは面材（壁・床）の面外せん断に関する理論を示すため，RC規準による面外せん断力の検討は省略する。

a. RC-N 規準

RC-N規準における面材の短期許容面外せん断力は以下となる。

・面外せん断補強筋がない場合

$$Q_A = bj\alpha f_s \qquad (3.3\text{-}1)$$

・面外せん断補強筋がある場合

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5\,{}_w f_t (p_w - 0.002)\} \qquad (3.3\text{-}2)$$

ここで，

b ：断面幅（単位幅）
j ：断面の応力中心間距離
α ：せん断スパン比による割増係数（$1 \leqq \alpha \leqq 2$）
f_s ：コンクリートの短期許容せん断応力度
${}_w f_t$ ：せん断補強筋の短期許容引張応力度
p_w ：せん断補強筋比

断面算定は，（3.3-1）・（3.3-2）式により許容面外せん断力を算出し，以下により検定比を評価する。

$$(\text{面外せん断力に対する検定比}) = Q/Q_A \qquad (3.3\text{-}3)$$

Q：設計用面外せん断力

b. CCV 規格

ここでは，シェル部の許容面外せん断応力度について記す。

CCV規格における許容面外せん断応力度は以下となる。

$$\tau_R = \min(\tau_{R1}, \tau_{R2}) \quad (3.3\text{-}4)$$

$$\tau_{R1} = \varphi\{0.1(p_t f_y - \sigma_0) + 0.5 p_w f_{wy} + 0.235\sqrt{F_c}\} \quad (3.3\text{-}5)$$

$$\tau_{R2} = 1.10\sqrt{F_c} \quad (3.3\text{-}6)$$

ここで

p_t ：主筋の鉄筋比

p_w ：面外せん断力に対する補強筋の鉄筋比

f_y ：主筋の許容引張・圧縮応力度

f_{wy} ：面外せん断補強筋の許容引張・圧縮応力度

σ_0 ：外力による子午線方向の膜応力度

F_c ：コンクリートの設計基準強度

φ ：低減係数（$0.58 \leqq \phi \leqq 1$）

断面算定は，（3.3-4）式により許容面外せん断応力度を算出し，以下により検定比を評価する。

$$(\text{面外せん断応力度に対する検定比}) = \tau/\tau_R \quad (3.3\text{-}7)$$

τ：設計用面外せん断応力度

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-1に示す。

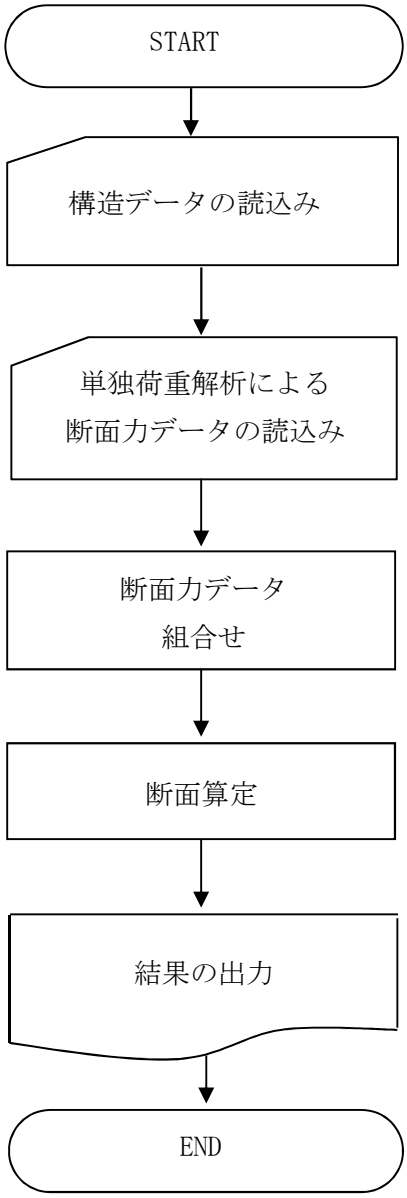


図 3-1　解析フローチャート

3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

(1) 理論解結果との比較による検証

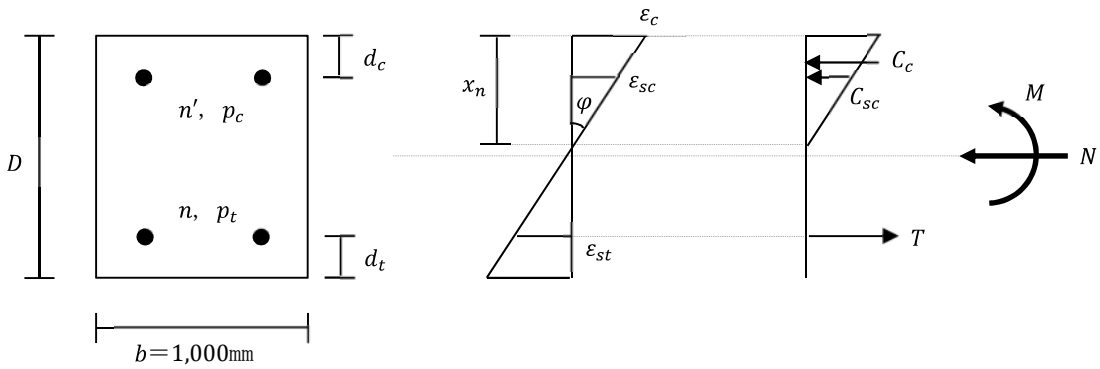
断面算定プログラムSCARCの妥当性を確認するため，SCARCでの結果と理論解による結果を比較する。検証は軸力-曲げモーメント，面内せん断力及び面外せん断力の3種類について行う。

a. 軸力-曲げモーメントに対する検証

軸力-曲げモーメントに関する検証は，まず断面とコンクリート及び鉄筋の応力度を設定し，その応力状態となる軸力・曲げモーメントを算出する。そして，算出した軸力・曲げモーメントを入力値としてSCARCにて計算し，出力されたコンクリート及び鉄筋の応力度と，最初に設定したものと比較することでSCARCの妥当性を確認する。

本検証において，SCARCはRC-N規準を適用した場合の結果を示す。軸力-曲げモーメントについては，計算方法はRC-N規準，RC規準及びCCV規格とも同じであるので，本検証結果で妥当性が示されれば，各規準・規格で適用できるものとなる。

断面・材料及び許容応力度は以下に示すものとする。



（断面形状）　（ひずみ分布）　（応力分布）

表 3-1　断面形状

部材せい	鉄筋重心位置		主筋比	
D (mm)	dc (mm)	dt (mm)	Pc (%)	Pt (%)
1,000	150	150	1.000	1.000

表 3-2　コンクリート諸元

ｺﾝｸﾘｰﾄ強度	ヤング係数	ヤング係数比	
Fc (N/mm^2)	Ec (N/mm^2)	圧縮側n’	引張側n
36	24,000	10	10

表 3-3　鉄筋の許容応力度

主筋	面外せん断補強筋
f_t (N/mm^2)	${}_wf_t$ (N/mm^2)
390	—

コンクリート及び鉄筋の応力度は以下より設定する。

曲率φ 及び中立軸深さ$X_n(=x_{n1}\cdot D)$ が定められれば，コンクリート及び鉄筋のひずみ・応力度は以下となる。

（ひずみ）

コンクリート圧縮縁ひずみ　$\varepsilon_c=\varphi\cdot x_{n1}\cdot D$

圧縮鉄筋ひずみ　$\varepsilon_{sc}=\varphi(x_{n1}-d_{c1})D$

引張鉄筋ひずみ　$\varepsilon_{st}=\varphi(1-x_{n1}-d_{t1})D$

（応力度）

コンクリート圧縮縁応力度　$\sigma_c=E_C\cdot\varphi\cdot x_{n1}\cdot D$

圧縮鉄筋応力度　$\sigma_{sc}=n'E_c\cdot\varphi(x_{n1}-d_{c1})D$

引張鉄筋応力度　$\sigma_{st}=nE_c\cdot\varphi(1-x_{n1}-d_{t1})D$

ここでは，曲率φ 及び中立軸深さ比 x_{n1} を以下として設定する。

曲率φ　＝2.00×10^{-6}（1/mm）

中立軸深さ比x_{n1}　＝0.45

この場合のコンクリート・鉄筋の応力度は以下となる。（なお，本検証では，これらの応力度とSCARC出力値を比較する。）

σ_c　＝ 24,000N/mm^2 ×2.00×10^{-6}/mm ×0.45 × 1,000mm

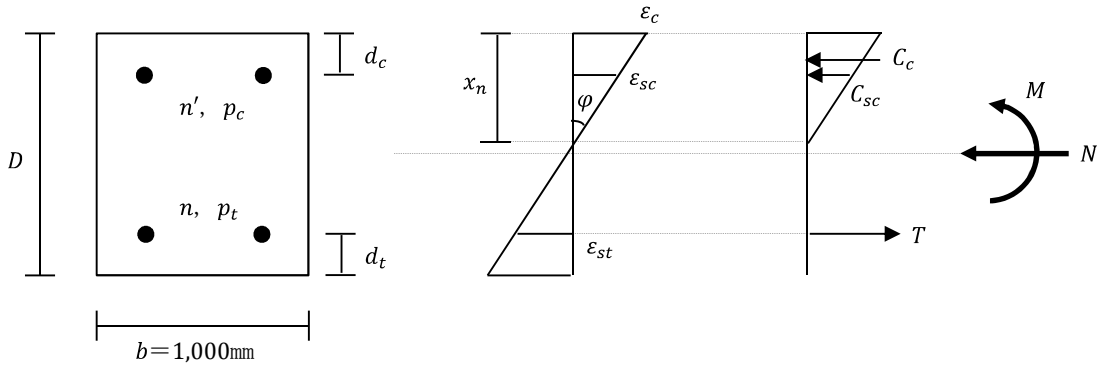
＝ 21.6N/mm^2

σ_{sc}　＝ 10×24,000N/mm^2 ×2.00×10^{-6}/mm×{0.45−(150mm / 1,000mm)}×1,000mm

＝ 144N/mm^2

σ_{st}　＝ 10×24,000N/mm^2×2.00×10^{-6}/mm×{1.0−0.45−(150mm / 1,000mm)}×1,000mm

＝ 192N/mm^2



（断面形状）　（ひずみ分布）　（応力分布）

また，軸力・曲げモーメントは以下となる。

C_c ＝ $\frac{1}{2} b \cdot x_{n1} D \cdot \sigma_{sc}$

＝ 1/2 ×1,000mm×0.45×1,000mm ×21.6N/mm^2 / 1,000

＝ 4,860kN（圧縮）

（作用位置：材芯より1/2×1,000mm － 1/3×0.45×1,000mm ＝ 350mm）

C_{sc} ＝ $p_c \cdot b \cdot D \cdot \sigma_{sc}$

＝ 1.0/100 ×1,000mm × 1,000mm ×144N/mm^2 /1,000

＝ 1,440kN（圧縮）

（作用位置：材芯より1/2×1,000mm -150mm ＝ 350mm）

T ＝ $p_t \cdot b \cdot D \cdot \sigma_{st}$

＝ 1.0/100 ×1,000mm × 1,000mm ×192N/mm^2 /1,000

＝ 1,920kN（引張）

（作用位置：材芯より1/2×1,000mm -150mm ＝ 350mm）

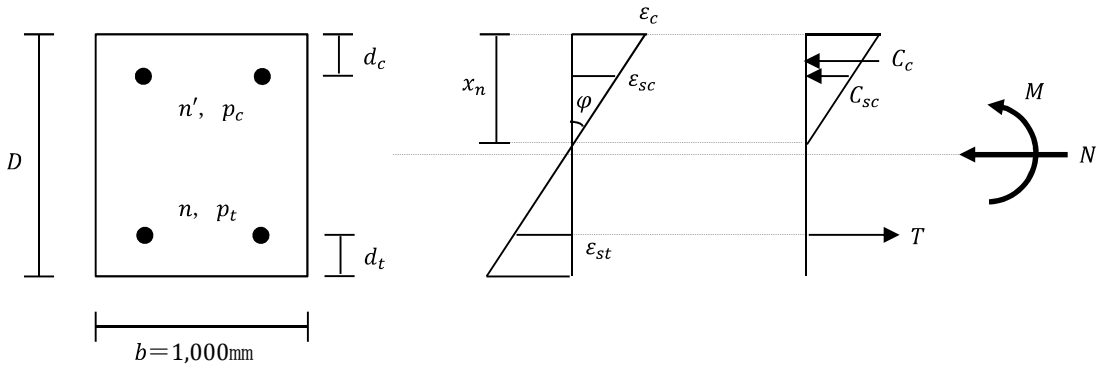
N ＝ $C_c + C_{sc} - T$

＝ 4,860kN + 1,440kN －1,920kN

＝ 4,380kN（圧縮力）

M ＝ 4,860kN×350mm/1,000 + 1,440kN×350mm/1,000 + 1,920kN×350mm/1,000

＝ 2,877kN・m



（断面形状）　（ひずみ分布）　（応力分布）

この軸力N及び曲げモーメントMを入力値として，SCARCでコンクリート・鉄筋応力度及び検定比を算出する。

なお，上記入力時におけるコンクリート圧縮縁・圧縮及び引張鉄筋の検定比は以下となり，これとSCARC結果とを比較する。

（コンクリート圧縮縁　検定比）＝ 21.6N/mm^2／(2/3×36N/mm^2) ＝ 0.9000

（圧縮鉄筋 検定比）＝ 144N/mm^2／390N/mm^2 ＝ 0.3692

（引張鉄筋 検定比）＝ 192N/mm^2／390N/mm^2 ＝ 0.4923

設定値とSCARC出力値の比較を以下に示す。

表 3-4　設定値と SCARC 結果の比較

(a) 応力度

	設定値	SCARC	誤差 (%)
ｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮縁応力度σc (N/mm^2)	21.6	21.6	0.0000
圧縮鉄筋応力度σsc (N/mm^2)	144	144	0.0000
引張鉄筋応力度σst (N/mm^2)	192	192	0.0000

(b) 検定比

	設定値	SCARC	誤差 (%)
ｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮縁　検定比	0.9000	0.9000	0.0000
圧縮鉄筋　検定比	0.3692	0.3692	0.0000
引張鉄筋　検定比	0.4923	0.4923	0.0000

以上より,軸力-曲げモーメントについて,SCARC結果は設定値と一致したため,SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(2)　面内せん断力に対する検証

面内せん断力に対する検証は，設定断面における許容せん断力（又は許容せん断応力度）及び検定比について，SCARC結果と理論解結果との比較にて行う。

a.　RC-N 規準

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重（短期）に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。

表 3-5　断面形状

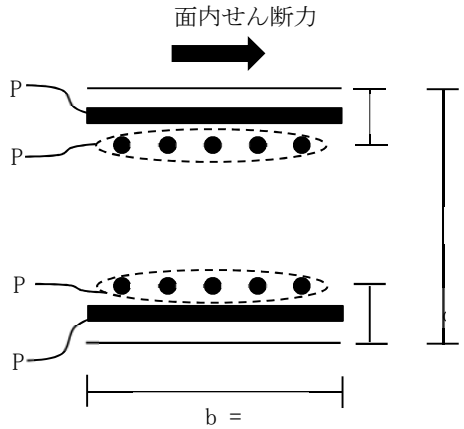
壁厚	鉄筋重心位置		X方向壁筋比		Y方向壁筋比	
t(mm)	dc(mm)	dt(mm)	Pc_X(%)	Pt_X(%)	Pc_Y(%)	Pt_Y(%)
1,000	100	100	0.570	0.570	0.570	0.570

表 3-6　コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

ｺﾝｸﾘｰﾄ強度 Fc(N/mm^2)	主筋　許容応力度 f_t (N/mm^2)
30	390

表 3-7　荷重条件

軸力 N(kN/m)	曲げﾓｰﾒﾝﾄ M(kN・m/m)	面内せん断力 Nxy(kN/m)	面外せん断力 Q(kN/m)
0	0	4000	0



理論解による許容面内せん断力及び検定比を算定する。

$$Q_A = \max(Q_1, Q_2)$$
$$Q_1 = t \cdot l \cdot f_s$$
$$Q_2 = \sum Q_w + \sum Q_c$$
$$Q_w = p_s \cdot t \cdot l' \cdot {}_sf_t$$
$$Q_c = bj\{\alpha f_s + 0.5\,{}_wf_t(p_w - 0.002)\}$$

t ＝ 1,000mm
l ＝ b ＝ 1,000mm
f_s ＝ 1.5 × min(0.49+30/100 , 30/30) ＝ 1.185N/mm^2
p_s ＝ Pc_X + Pt_X ＝ 0.570 + 0.570 ＝ 1.14%
l' ＝ b ＝ 1,000mm
${}_sf_t$ ＝ f_t ＝ 390 N/mm^2
Q_w ＝ 1.14/100 × 1,000mm × 1,000mm × 390N/mm^2 / 1000 ＝ 4,446kN
Q_c ＝ 0kN
Q_1 ＝ 1,000mm × 1,000mm × 1.185N/mm^2 / 1,000 ＝ 1,185kN
Q_2 ＝ Qw + Qc = 4,446kN
Q_A ＝ max(Q_1 , Q_2) ＝ 4,446kN
検定比 ＝ Q / Q_A ＝ 0.8997

SCARCによる計算結果と，理論解結果の比較を示す。

表 3-8　計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面内せん断力Q_A(kN)	4,446	4,446	0.0000
検定比	0.8997	0.8997	0.0000

以上より，RC-N規準を準用した場合の面内せん断力について，SCARC結果と理論解結果は一致したため，SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

b. CCV 規格

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重（荷重状態Ⅳ）に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。

表 3-9　断面形状

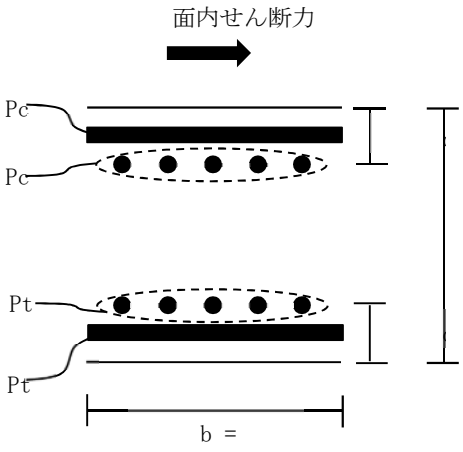
壁厚	鉄筋重心位置		円周方向壁筋比		子午線方向壁筋比	
t(mm)	dc(mm)	dt(mm)	Pc_θ (%)	Pt_θ (%)	Pc_φ (%)	Pt_φ (%)
1,100	205	305	0.431	0.727	0.889	0.889

表 3-10　コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

ｺﾝｸﾘｰﾄ強度	主筋
Fc(N/mm^2)	f_t (N/mm^2)
42	390

表 3-11　荷重条件

	軸力		曲げﾓｰﾒﾝﾄ	面内せん断力	面外せん断力
	円周方向	子午線方向	M(kN・m/m)	$N_{\phi\theta}$(kN/m)	Q(kN/m)
	N_θ(kN/m)	N_ϕ(kN/m)			
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ以外	-121	-8,712	0	3,886	0
ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ	-4,543	-5,016	0	-392	0
合計	-4,664	-13,728	0	3,494	0



理論解による許容面内せん断応力度及び検定比を算定する。

$$\tau_u = \min(\tau_{u1}, \tau_{u2})$$
$$\tau_{u1} = 0.5\{(p_{t\varphi} f_y - \sigma_{p\varphi} - \sigma_{0\varphi}) + (p_{t\theta} f_y - \sigma_{p\theta} - \sigma_{0\theta})\}$$
$$\tau_{u2} = 1.25\sqrt{F_c}$$

t ＝ 1,100mm

$p_{t\varphi}$ ＝ Pc_ϕ ＋ Pt_ϕ ＝ 0.889 ＋ 0.889 ＝ 1.778%

$\sigma_{p\varphi}$ ＝ −5,016kN × 1,000 / (1,100mm × 1,000mm) ＝ −4.56N/mm^2

$\sigma_{0\varphi}$ ＝ −8,712kN × 1,000 / (1,100mm × 1,000mm) ＝ −7.92N/mm^2 → 0.00N/mm^2

$p_{t\theta}$ ＝ Pc_θ ＋ Pt_θ ＝ 0.431 ＋ 0.727 ＝ 1.158%

$\sigma_{p\theta}$ ＝ −4,543kN × 1,000 / (1,100mm × 1,000mm) ＝ −4.13 N/mm^2

$\sigma_{0\theta}$ ＝ −121kN × 1,000 / (1,100mm × 1,000mm) ＝ −0.11 N/mm^2 → 0.00N/mm^2

f_y ＝ f_t ＝ 390 N/mm^2

F_c ＝ 42 N/mm^2

τ_{u1} ＝ 0.5×{ (1.778/100×390N/mm^2 −(−4.56N/mm^2) −(0.0N/mm^2))
＋ (1.158/100×390N/mm^2 −(−4.13N/mm^2) −(0.0N/mm^2))} ＝ 10.07N/mm^2

τ_{u2} ＝ 1.25×√42 ＝ 8.101N/mm^2

τ_u ＝ min(10.07N/mm^2 , 8.101N/mm^2) ＝ 8.101N/mm^2

Q ＝3,494kN

τ ＝3,494kN × 1,000 / (1,100mm ×1,000mm) ＝ 3.176N/mm^2

検定比 ＝ τ/τ_u ＝ 3.176N/mm^2 / 8.101N/mm^2 ＝ 0.3921

SCARCによる計算結果と，理論解結果の比較を示す。

表 3-12　計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面内せん断応力度 τu (N/mm^2)	8.101	8.101	0.0000
検定比	0.3921	0.3921	0.0000

以上より，CCV規格を準用した場合の面内せん断応力度について，SCARC結果と理論解結果は一致したため，SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(3)　面外せん断力に対する検証

面外せん断力に対する検証は，設定断面における許容せん断力（又は許容せん断応力度）及び検定比について，SCARC結果と理論解結果との比較にて行う。

a.　RC-N 規準

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。なお，応力は短期応力として行う。

表 3-13　断面形状

壁厚	鉄筋重心位置		X方向壁筋比		Y方向壁筋比		面外せん断補強筋比
t(mm)	dc(mm)	dt(mm)	Pc_X(%)	Pt_X(%)	Pc_Y(%)	Pt_Y(%)	Pw(%)
1,000	100	100	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000

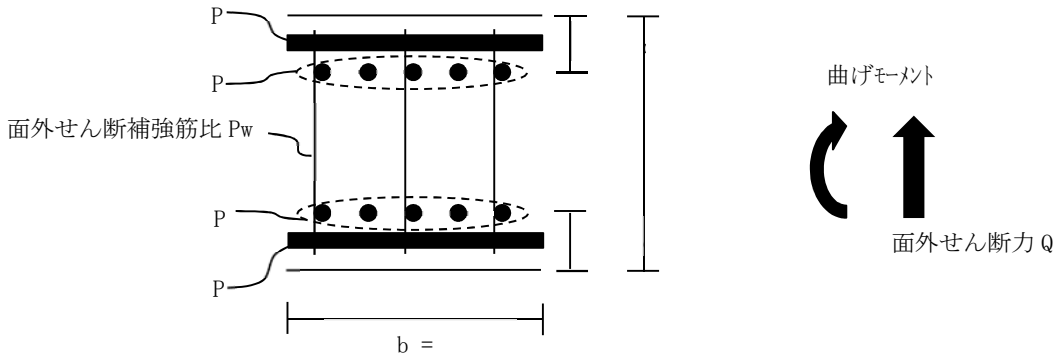
表 3-14　コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

ｺﾝｸﾘｰﾄ強度 Fc(N/mm^2)	面外せん断補強筋 許容応力度 $_wf_t$ (N/mm^2)
30	0

(Pw＝0%の場合の検討のため，$_wf_t$ = 0N/mm^2)

表 3-15　荷重条件

軸力 N(kN/m)	曲げﾓｰﾒﾝﾄ M(kN・m/m)	面内せん断力 Nxy(kN/m)	面外せん断力 Q(kN/m)
0	460	0	400



理論解による許容面外せん断力及び検定比を算定する。

・面外せん断補強筋がない場合

$$Q_A = bj\alpha f_s$$

・面外せん断補強筋がある場合

$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5_w f_t(p_w - 0.002)\}$$

b ＝ 1,000mm
D ＝ t ＝ 1,000mm
d_t ＝ 100mm
d ＝ 1,000mm － 100mm ＝ 900mm
j ＝ 7/8 × 900mm ＝ 787.5mm
M ＝ 460kN・m/m
Q ＝ 400kN/m
M/Qd ＝ 460kN・m/m / { 400kN/m × (900mm / 1,000)} ＝ 1.278
α ＝ 4 / (1.278 + 1) ＝1.756
f_s ＝ 1.5 × min(0.49+30/100 , 30/30) ＝ 1.185N/mm^2
p_w ＝ 0.0%
Q_A ＝ 1,000mm × 787.5mm × 1.756 × 1.185N/mm^2 / 1,000 ＝ 1,639kN
検定比 ＝ 400kN / 1,639kN ＝ 0.2441

SCARCによる計算結果と，理論解結果の比較を示す。

表 3-16　計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面外せん断力Q_A(kN)	1,639	1,639	0.0000
検定比	0.2441	0.2441	0.0000

以上より，RC-N規準を準用した場合の面外せん断力について，SCARC結果と理論解結果は一致したため，SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

b. CCV 規格

以下に示す壁断面，材料・許容応力度及び荷重に対して，SCARCと理論解による結果の比較を行う。なお，荷重状態Ⅳとして検討を行う。

表 3-17　断面形状

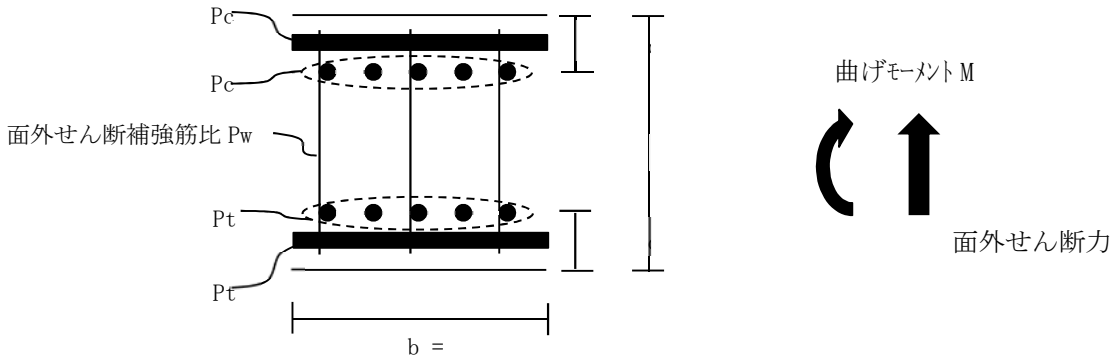
壁厚	鉄筋重心位置		円周方向壁筋比		子午線方向壁筋比		面外せん断補強筋比
t(mm)	dc(mm)	dt(mm)	Pc_θ(%)	Pt_θ(%)	Pc_φ(%)	Pt_φ(%)	Pw(%)
2,000	295	395	0.900	0.900	1.182	1.773	0.532

表 3-18　コンクリート強度及び鉄筋の許容応力度

ｺﾝｸﾘｰﾄ強度 Fc(N/mm^2)	主筋 許容応力度 f_t (N/mm^2)	面外せん断補強筋 許容応力度 $_wf_t$ (N/mm^2)
42	390	345

表 3-19　荷重条件

軸力 N(kN/m)	曲げﾓｰﾒﾝﾄ M(kN・m/m)	面内せん断力 Nxy(kN/m)	面外せん断力 Q(kN/m)
10,680	12,258	0	2,704



理論解による許容面外せん断応力度及び検定比を算定する。

$$\tau_R = \min(\tau_{R1}, \tau_{R2})$$
$$\tau_{R1} = \varphi\{0.1(p_t f_y - \sigma_0) + 0.5 p_w \cdot f_{wy} + 0.235\sqrt{F_c}\}$$
$$\tau_{R2} = 1.10\sqrt{F_c}$$

D ＝ t ＝ 2,000mm

d_t ＝ 395mm

p_t ＝ Pc_ϕ ＋ Pt_ϕ ＝ 1.182% ＋ 1.773% ＝ 2.955%

p_w ＝ 0.532%

f_y ＝ f_t ＝ 390N/mm^2

f_{wy} ＝ $_wf_t$ ＝ 345N/mm^2

F_c ＝ 42 N/mm^2

N ＝ 10,680kN

σ_0 ＝ 10,680kN × 1,000 / (2,000mm × 1,000mm) ＝ 5.34N/mm^2

M ＝ 12,258kN・m

Q ＝ 2,704kN

d ＝ 2,000mm － 395mm ＝ 1,605mm

M/Qd ＝ 12,258kN・m / { 2,704kN × (1,605mm / 1,000) } ＝ 2.824

φ ＝ 1 / √2.824 ＝0.5951

τ_{R1} ＝ 0.5951×{ 0.1×(2.955% / 100 ×390N/mm^2 －5.34)
＋ 0.5×0.532% / 100 ×345N/mm^2 ＋ 0.235×√42N/mm^2 } ＝ 1.820N/mm^2

τ_{R2} ＝ 1.10×√42N/mm^2 ＝ 7.129N/mm^2

τ_R ＝ min(τR1 , τR2) ＝ 1.820N/mm^2

τ ＝ 2,704kN × 1,000 / (2,000mm × 1,000mm) ＝ 1.352N/mm^2

検定比 ＝ 1.352N/mm^2 / 1.820N/mm^2 ＝ 0.7429

SCARCによる計算結果と，理論解結果の比較を示す。

表 3-20　計算結果の比較

	SCARC	理論解	誤差(%)
許容面外せん断応力度 τ_R (N/mm^2)	1.820	1.820	0.0000
検定比	0.7428	0.7429	0.0135

以上より，CCV規格を準用した場合の面外せん断応力度について，SCARC結果と理論解結果の誤差は微小であり，SCARCの計算結果は妥当であると判断できる。

(4)　使用に関する妥当性

SCARCを原子力施設の壁･床部材の断面算定に使用することは次のとおり妥当である。

・検証の内容のとおり，軸力-曲げモーメント，面内せん断力及び面外せん断力に対する断面算定結果は，理論解結果との比較により検証していることから，断面算定評価の目的に照らして今回の計算に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-39　計算機プログラム（解析コード）の概要
・Ｅｎｇｉｎｅｅｒ’ｓ　Ｓｔｕｄｉｏ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要（耐震・耐津波関連）……3
3. Engineer's Studioの解析手法について（耐震・耐津波関連）……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……10
3.5 検証(Verification)と妥当性(Validation)……11
4. 解析コードの概要（竜巻関連）……21
5. Engineer's Studioの解析手法について（竜巻関連）……22
5.1 一般事項……22
5.2 解析コードの特徴……22
5.3 解析手法……22
5.4 解析フローチャート……25
5.5 検証(Verification)と妥当性(Validation)……27

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Engineer's Studioについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補② V-5-39 R1

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-7	取水構造物の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-2-10-4-3	海水引込み管の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-2-10-4-5	緊急用海水取水管の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-3-別添1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 6.00.04
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 6.00.04

2. 解析コードの概要（耐震・耐津波関連）

コード名 / 項目	Engineer's Studio
使用目的	３次元有限要素法による静的解析
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.00.04
コードの概要	Engineer's Studio（以下「本解析コード」という。）は，３次元有限要素法（ＦＥＭ）解析を行う解析コードである。主な特徴は下記のとおりである。 ・土木建築構造物の部材を，1本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析を行い，断面力及び変位の算出を行う。 ・地盤の非線形性は，非線形バネ要素でモデル化することにより考慮する。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	本解析コードは，はり及び平板要素並びに非線形地盤バネを用いた静的解析による断面力及び変位の算定に使用されている。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・本解析コードによる単純梁，単純平板モデルに対する解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる非線形地盤バネの履歴が想定している骨格曲線と一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・検証内容のとおり，梁モデル，平板モデル，地盤バネについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.　Engineer’s Studioの解析手法について（耐震・耐津波関連）

3.1　一般事項

Engineer’s Studioは土木・建築構造物の部位を1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して，構造物の非線形挙動を解析できる３次元有限要素法（ＦＥＭ）解析プログラムである。Engineer’s Studioは，防潮堤躯体及び連続壁基礎の梁，板，非線形地盤バネモデルを用いた静的解析による断面力及び変位の算定に使用している。

3.2　解析コードの特徴

Engineer’s Studioの主な特徴を以下に示す。

・構造物を1本棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して，構造物の応答解析を行い，断面力及び変位の算出が可能である。

・地盤の非線形性は，バネ要素でモデル化することにより考慮することが可能である。

3.3　解析手法

(1)　弾性梁要素

弾性梁要素は2節点を直線で結ぶ要素であり，軸方向の伸縮変形と2節点の回転変位を含む相対変位によって生じる曲げと捻れ変形に対して弾性の復元力を持つ要素である。

2節点要素であるから，３次元空間内にある要素両端自由度は12であり，要素の剛体としての変位を拘束する自由度は6個必要であるから，差し引き6個の自由度が要素の弾性変形を表す要素端変形となる。この要素端変形と仕事の対をなす力が要素端力である。言い換えれば，要素端に働く3つの力の内，6個は要素変形を生じさせ，6個は要素を支持する支点反力を意味する。この静定な支点条件要素座標系の設定によって，要素端力と要素端変形が確定する。

要素座標系として単純支持あるいは片持ち支持など考えることができる。本解析では要素座標系内における幾何学的非線形を考慮しないため，非線形解析では要素内の幾何学的非線形性の度合いに応じて解が異なる。一方，線形解析では要素座標系の取り方に解は依存しない。要素内の変形において，その幾何学的非線形性の影響が小さい支持条件が解析上合理的と言えるから，定義する要素座標系は，単純支持の支点条件を採用する。したがって，6個の要素端変形を次のように定義し，図示すれば，図3-1のとおりである。

$$\Delta l,\ \theta_{x},\ \theta_{iy},\ \theta_{iz},\ \theta_{jy},\ \theta_{jz}$$

ここに，サフィックスｉ，ｊは要素両端を表す。なお，図中の$\theta_{ic}\ e_{ic}$と$\theta_{jc}\ e_{ic}$は，要素端の回転変形成分の合成ベクトルである。

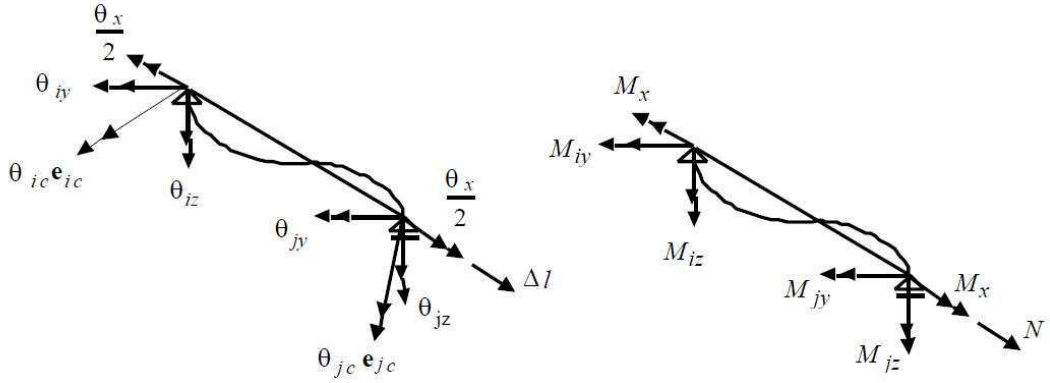


図3-1　要素端変形と要素端力

一方，要素端変形の仕事の対である要素端力は，要素両端を結ぶ弦方向の力N，弦回りの端モーメントM_x，両端それぞれにおいて弦に直交する2軸回りの端モーメントとなる。まとめれば，

$$N,\ M_x,\ M_{iy},\ M_{iz},\ M_{jy},\ M_{jz}$$

であり，これも図3-1に示すとおりである。

(2)　平板要素

Engineer's Studioで用いられているミンドリン平板要素は有限要素法（ＦＥＭ）について記載されている一般的な参考書を参照している。以降は主要な点だけを述べるが，理論の詳細は下記文献に基づいている。

参考文献（1）

Zienkiewicz,　O. C. and Taylor,　R. L. The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 1 The Basis. ISBN 0 7506 5049 4.

参考文献（2）

The Finite Element Method. Fifth Edition. 2000. Vol. 2 Solid Mechanics. ISBN 0 7506 5055 9.

Engineer's Studioの板要素は３次元の平板要素であり，要素は３次元空間に平面を仮定する。要素は節点により定義される。Engineer's Studioは4つの異なる，3節点三角形，6節点三角形，4節点四角形と8節点四角形の平板要素に対応している。6節点及び8節点の平板要素は「セレンディピティ型」要素として知られている要素に属しており，この名前は，要素で使用されている形状関数に起因する。（詳細は参考文献（1）　8.6章174ページを参照）

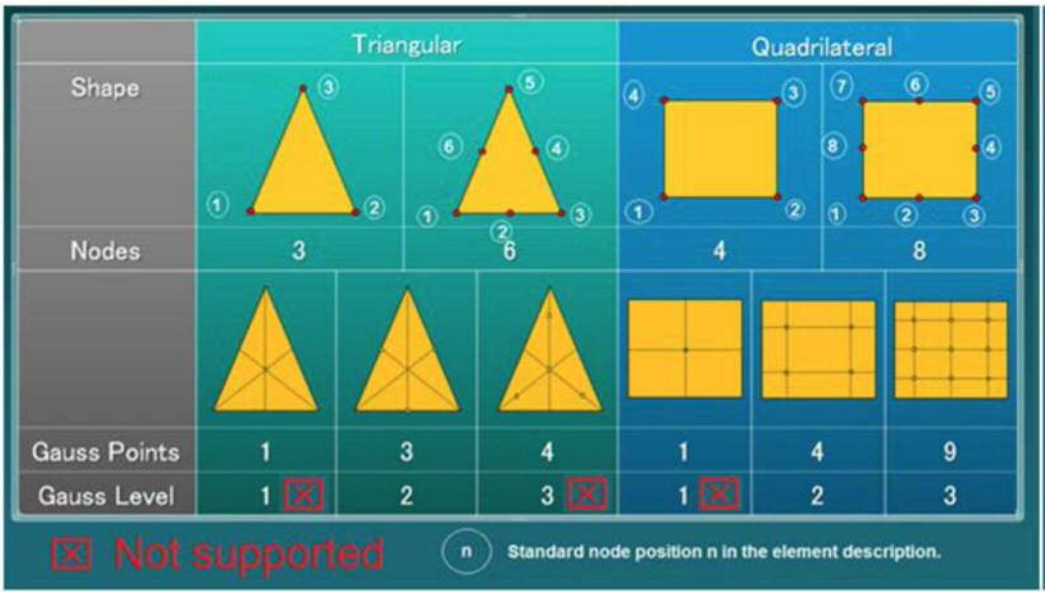


図3-2　平板要素のメッシュ要素

面内については，一般的な２次元平面応力モデルが適用される。（詳細は例えば，参考文献(1)の4章「平面応力と平面ひずみ」を参照）

面外については，せん断，曲げ成分両方を考慮する。面外の曲げは，平板要素の厚みから得られる面内層のひずみを積分したもので，面外せん断モデルは線形弾性であり，その値は要素の厚さを通して全ての層で積分することで得られる。

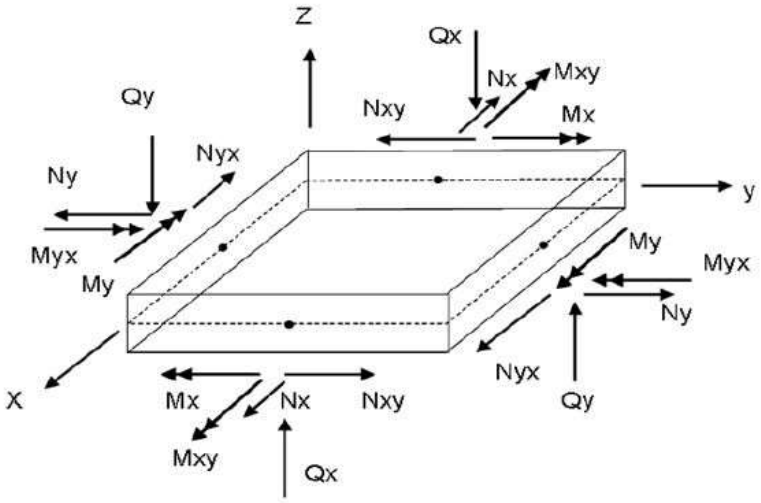


図3-3　平板要素断面力

(3)　地盤バネ

バネ要素は要素の長さがゼロあるいは無視できる要素に対して適用する。バネ要素両端に接続された2節点の変位から計算される要素両端の相対変位を要素変形と定義する。

図3-4には要素変形を明確にするため，並進変形と回転変形を分離して示している。

並進変形及び回転変形の成分を求めるために必要となる変位後の要素座標系は，次のように決定する。節点変位と共に回転する要素端ｉに設定された要素端座標系が，変位後の他端ｊ要素端座標系に一致する回転を求める。この回転の半回転をｉ端座標系に与えた回転後の座標系を要素座標系と定義する。並進変形の各成分は２節点を結ぶベクトルの要素座標軸成分であり，回転変形はｉ端座標系がｊ端座標系に一致する回転ベクトルを要素座標軸成分として求めたものになる。

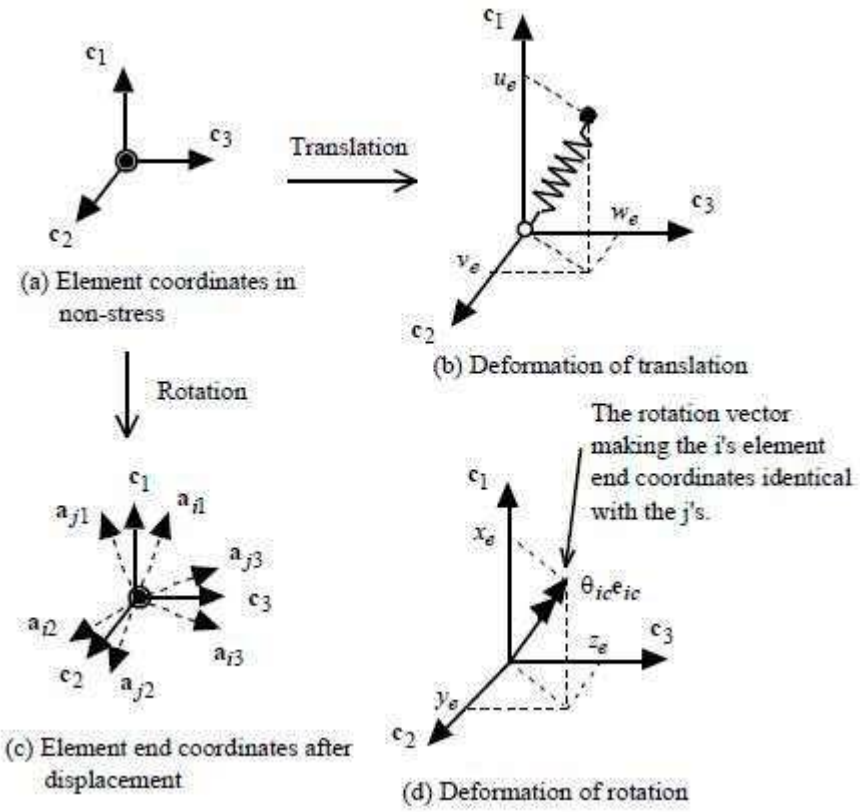


図3-4　バネ要素の要素変形と要素座標系

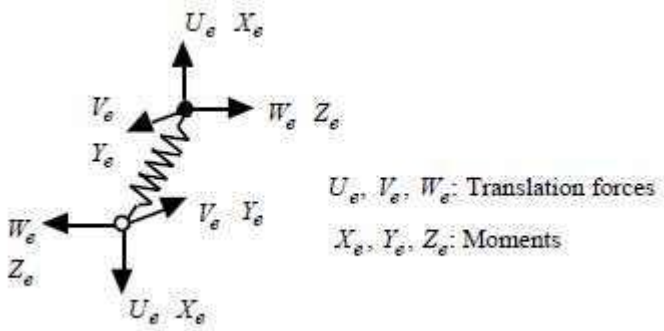


図3-5　バネ要素の要素端力

したがって，これら要素変形と仕事の対を成す要素端力は，図3-5に示すように，要素座標軸に平行であり要素両端で逆向きとなる3つの対をなす並進力と，要素座標軸周り両端逆向きの3対の端モーメントである。要素端に作用するそれぞれ6個の力の内，これら3並進力と3端モーメントの6つの力が独立である。要素端に作用する12の力の内，これら独立な端力を除く6つの力は3対の並進力に釣り合うべき端モーメントであることは明白であるが，これらの従属する力が要素両端にどのように作用するかは明確ではない。しかし，定義された要素座標系から厳密な適合条件により導かれる要素変形を節点変位により展開することによって，線形の適合条件が導かれるとともに，平衡条件式も同様に得ることができる。結果として，3並進力に釣り合うべき3つのモーメントを両端に均等に配分することにより生じる6つのモーメント（回転変形と対を成すモーメントとは異なるモーメント）が，従属な要素端力となる。

この要素座標系の大きな特徴は，バネ要素が接続される2節点の均等性が保証されることと，バネ要素長がゼロであっても幾何剛性が算出できる点にある。線要素に単純梁要素座標系を採用した場合，軸力をその要素長で割る幾何剛性が存在し，これ故に要素長ゼロが発生する要素に対しては単純梁要素座標系が適用できない。一方，片持ち梁要素座標系では幾何剛性にゼロ割は生じないものの，固定端側に接続される節点と自由端側に接続される節点では，要素内の幾何学的非線形を完全に取り入れない限り節点間の不均等性が現れ，片持ち梁要素座標系の与え方次第で解は異なることになる。ここで定義した要素座標系はこれらの問題点を解消できるものである。しかしながら，ゴム支承などのせん断変形が卓越し，要素長が確実に保証できる部材にこの要素座標系を適用した場合，せん断変形により見かけ上軸方向の圧縮変形が生じ，本来存在しない圧縮力を生み出すこととなり，実現象に対する精度の悪化は否めない。要素長ゼロの可能性が無い要素であれば，曲げ変形に加えてせん断変形を行う線要素として単純梁要素座標系を使用することが望ましい。本解析で使用するバネ要素においては，要素端力は仕事の対として対応する要素変形によってバネ定数から独立に決定されるものとし，他の要素変形との連成は無いものとする。要素変形と要素端力の関係は非弾性も可能とし，バネの復元力特性として，バイリニアあるいは一方向のみ復元力がバイリニアとなる非弾性性状を与えることができるものとする。

図3-6に示す2重節点（要素両端の変位が1つ以上の自由度について一致する節点）は，このバネ要素で設定するものとする。非線形解析においては，変位が一致する方向は節点変位と共に変化するため，厳密な適合条件から求めた変位後の要素座標系を使用して，2重節点における変位が一致する方向を確定する必要がある。

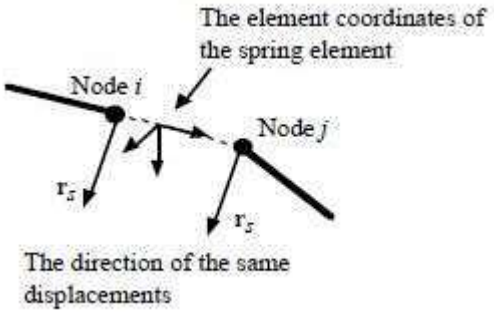

The element coordinates of
the spring element
Node i
Node j
r_z
r_z
The direction of the same
displacements

図3-6　2重節点

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-7に示す。

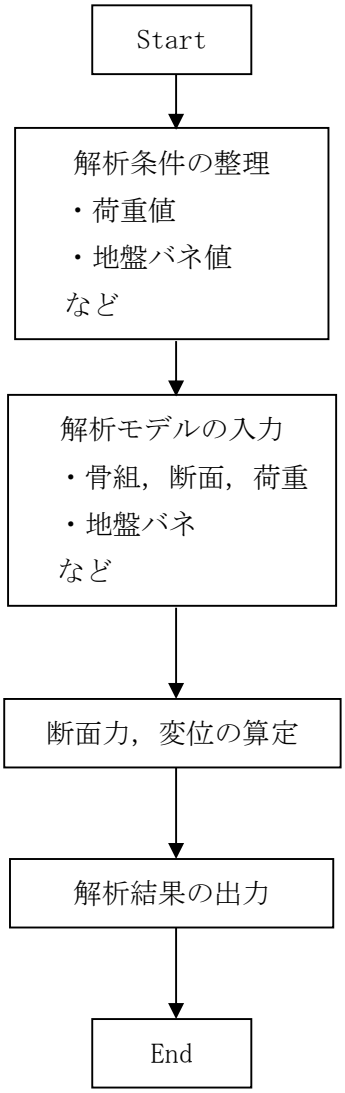


図3-7　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)と妥当性(Validation)

(1)　理論解との比較による検証

梁モデル及び平板モデルについては，単純梁，単純板の理論解と比較を行う。地盤バネについては，単純なモデルで地盤バネの履歴が想定している骨格曲線と一致しているかを確認し検証を行う。

a.　梁モデル

単純梁モデルに等分荷重を載荷した時の最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

解析モデルは図3-8に示すモデルとし，解析条件は下記のとおりとする。

・長さ Ｌ：10(m)

・ヤング係数 Ｅ：25000 N/mm^2 → 25000000 kN/m^2

・断面二次モーメント Ｉ：1 m^4

・等分布荷重 ｑ：10 kN/m

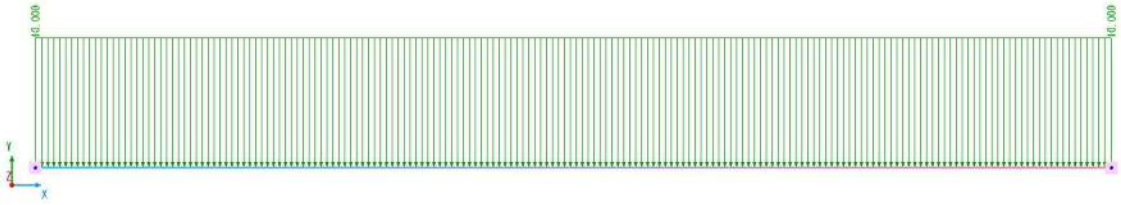


図3-8　解析モデル図(梁モデル)

この条件での最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解は，構造力学公式集より以下のとおりとなる。

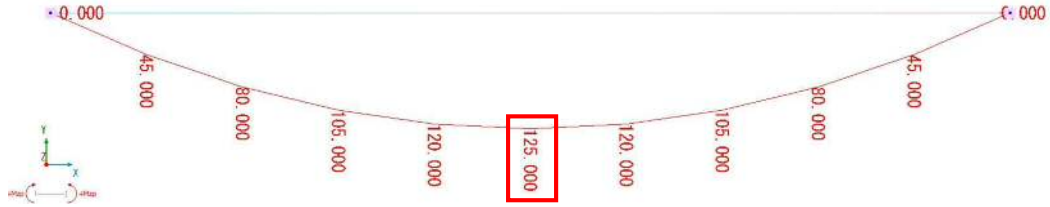
最大曲げモーメント $M_{max}=qL^2/8=(10\times10^2)/8=1000/8=125$ kN･m

最大せん断力 $S_{max}=qL/2=(10\times10)/2=50$ kN

最大たわみ $y_{max}=5qL^4/384EI=(5\times10\times10^4)/(384\times25000000\times1)=5.20833\times10^{-5}$ m

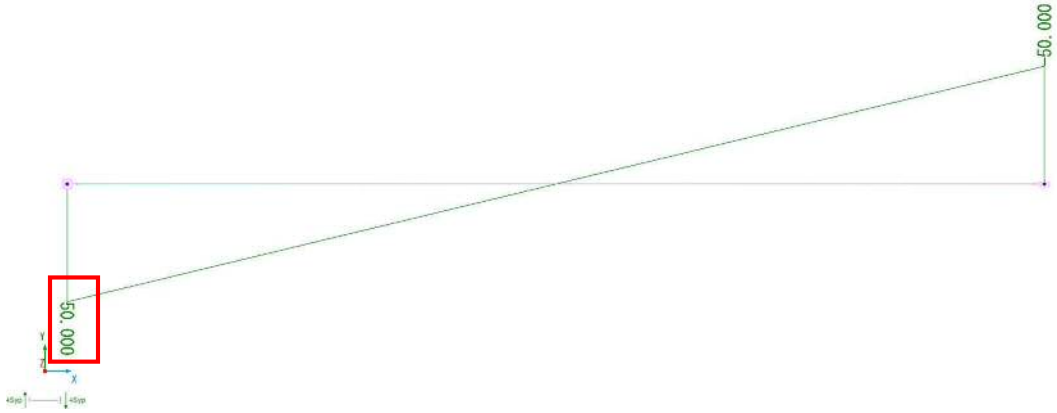
$=0.052083$ mm

Engineer's Studioの曲げモーメントの算出結果を図3-9に，せん断力の算出結果を図3-10に，たわみの算出結果を図3-11に示す。



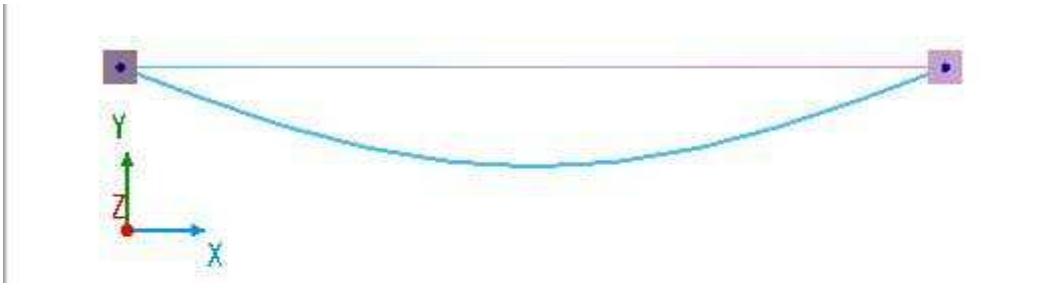
最大曲げモーメントM_{zpmax}＝125 kN･m

図3-9　曲げモーメントの算出結果



最大せん断力S_{ypmax}＝50 kN

図3-10　せん断力の算出結果



節点　フレーム要素

名称	ケース名	X (m)	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
1	分布荷重	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
1	分布荷重	1.000	0.000000	-0.016350	0.000000
1	分布荷重	2.000	0.000000	-0.030933	0.000000
1	分布荷重	3.000	0.000000	-0.042350	0.000000
1	分布荷重	4.000	0.000000	-0.049600	0.000000
1	分布荷重	5.000	0.000000	-0.052083	0.000000
1	分布荷重	6.000	0.000000	-0.049600	0.000000
1	分布荷重	7.000	0.000000	-0.042350	0.000000
1	分布荷重	8.000	0.000000	-0.030933	0.000000
1	分布荷重	9.000	0.000000	-0.016350	0.000000
1	分布荷重	10.000	0.000000	0.000000	0.000000

最大たわみ δ_{ymax}＝-0.052083 mm

図3-11　たわみの算出結果

表3-1　理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
最大曲げモーメント	(kN･m)	125	125	100.0%
最大せん断力	(kN)	50	50	100.0%
最大たわみ	(mm)	0.052083	－0.052083	100.0%

表3-1に理論解と解析結果の比較を示す。

最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみが理論解と解析結果で一致しており，断面力，変位が正しく算出されていることが確認できる。

b.　平板要素

4辺固定の単純板に等分布荷重を載荷した時の曲げモーメントの理論解と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

解析モデルは図3-12に示すモデルとし，解析条件は下記のとおりとする。

・長さ　a，b：4 m

・等分布荷重　p0：50 kN/m

・ポアソン比　ν　：0.3

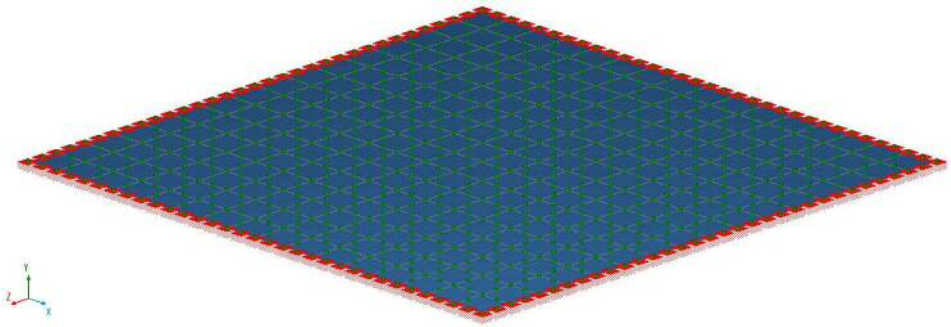


図3-12　解析モデル図（平板要素）

この条件での最大曲げモーメント，最大たわみの理論解は，構造力学公式集より以下のとおりとなる。

b／a＝4／4＝1.0より，端部のβ1＝-0.0513，中央部β2＝0.0231

端部曲げモーメントM1＝β1×p0×a^2＝-0.0513×50×4^2＝-41.04 kN･m

中央曲げモーメントM2＝β2×p0×a^2＝0.0231×50×4^2＝18.48 kN･m

Engineer's　Studioの端部及び中央部の曲げモーメントの結果を図3-13に示す。

端部曲げモーメントM_{x1}＝-40.07 kN･m

中央曲げモーメントM_{x2}＝18.48 kN･m

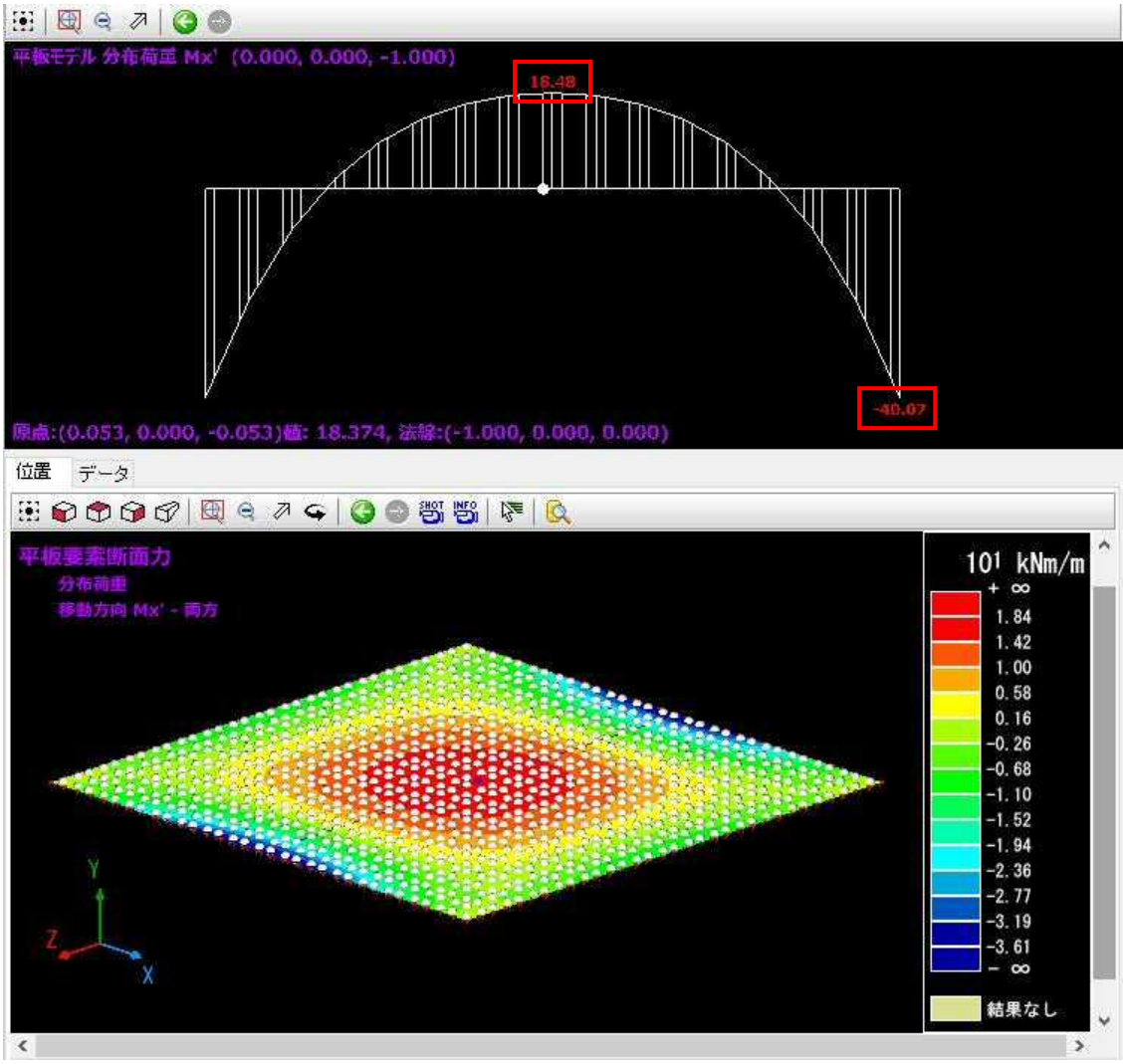


図3-13　曲げモーメントの算出結果

表3-2　理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
端部モーメント	(kN・m)	41.04	40.07	97.6%
中央モーメント	(kN・m)	18.48	18.48	100.0%

表3-2に理論解と解析結果の比較を示す。

曲げモーメントが理論解と解析結果でほぼ一致しており，断面力が正しく算出されていることが確認できる。

c.　地盤バネ

単純な地盤バネモデルに対して，増分荷重を載荷した時に，バネの応答履歴が想定している骨格曲線と一致しているか確認を行う。

・解析モデル

解析モデルは図3-14に示すモデルとし，解析条件は下記のとおりとする。なお，モデル図としてわかりやすくするため，バネ要素に長さを持たせているが，解析上の長さは無視して計算され，影響はない。

・バネの初期剛性　K1：100 kN/m → 0.1 kN/mm

・バネの二次剛性　K2：0 kN/m

・バネの降伏変位　δ1:-100 mm

・載荷荷重P：水平強制変位10 mmを20ステップ増分載荷。(最終変位＝10×20＝200 mm)

図3-14　解析モデル(地盤バネ)

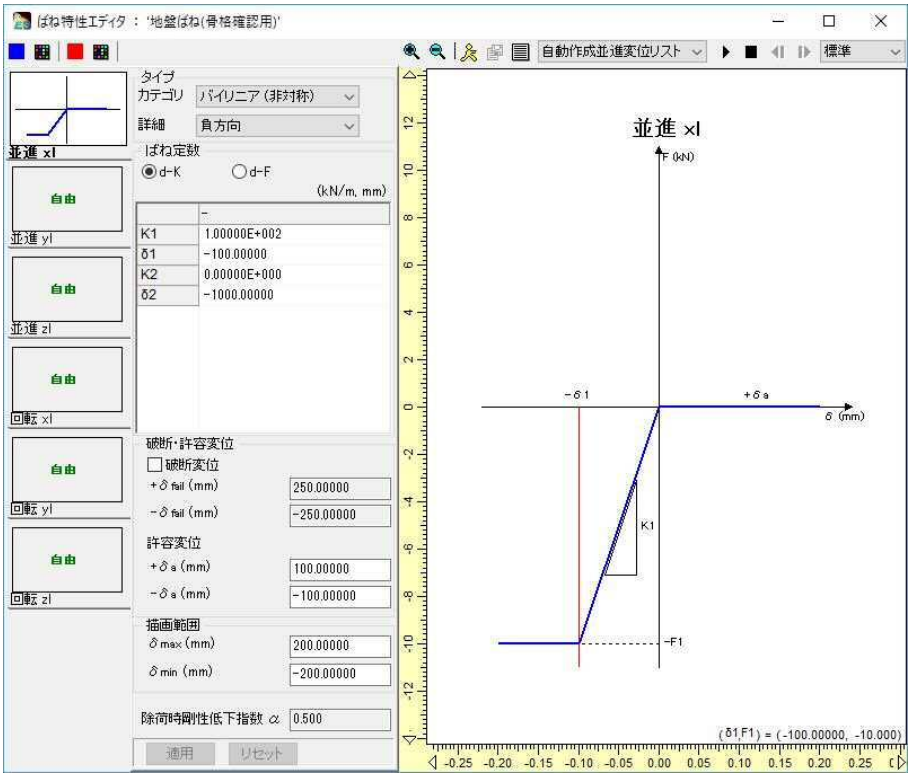


図3-15　バネの骨格曲線

図3-15にバネの骨格曲線を示す。この条件では，水平変位10 mmに対し，バネ反力は1 kNずつ増加し，降伏変位100 mm（100ステップ）以降の反力は変化しない。

骨格曲線と解析結果の比較を図 3-16 に示す。

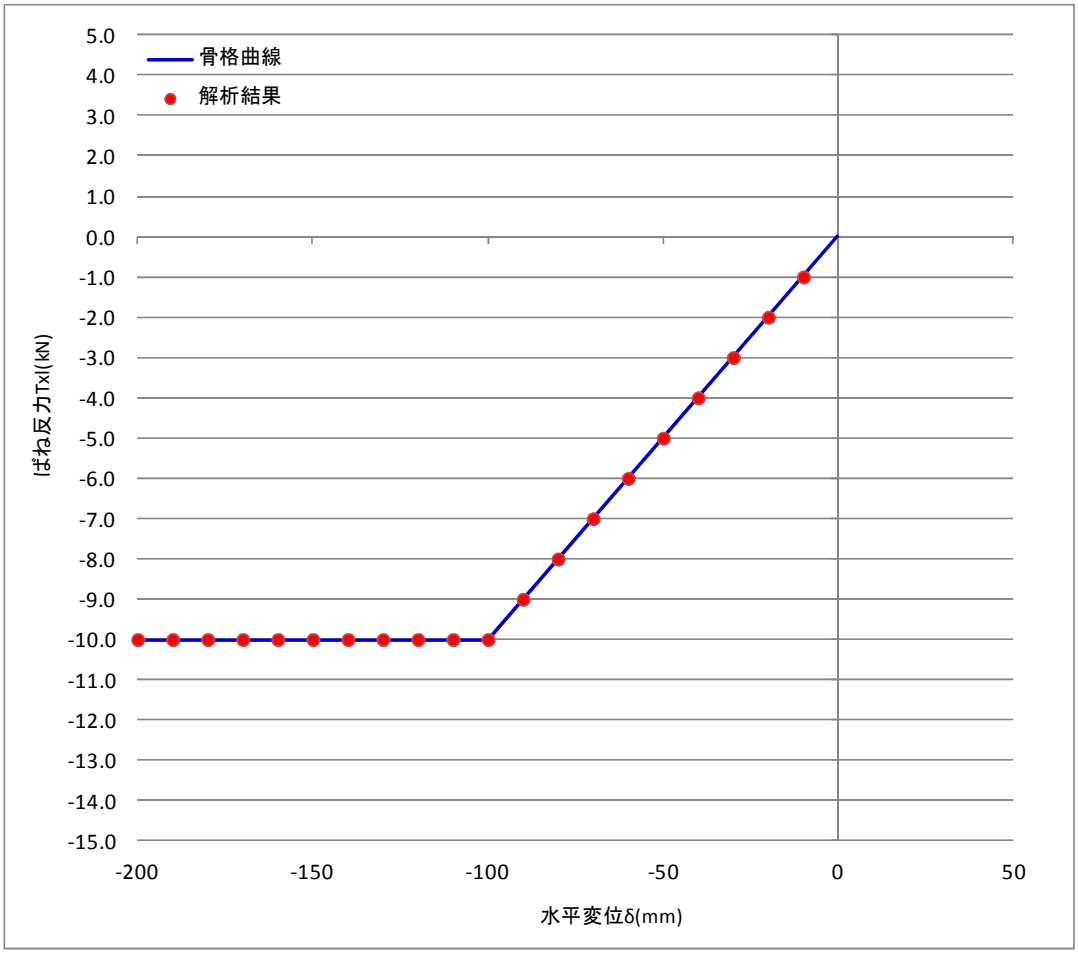


図3-16　骨格曲線と解析結果の比較結果

バネの応答履歴を図3-17に，数値解析結果を図3-18に示す。

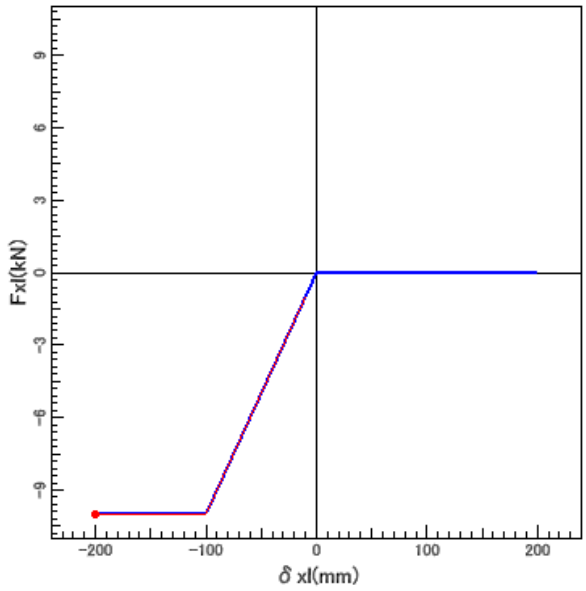
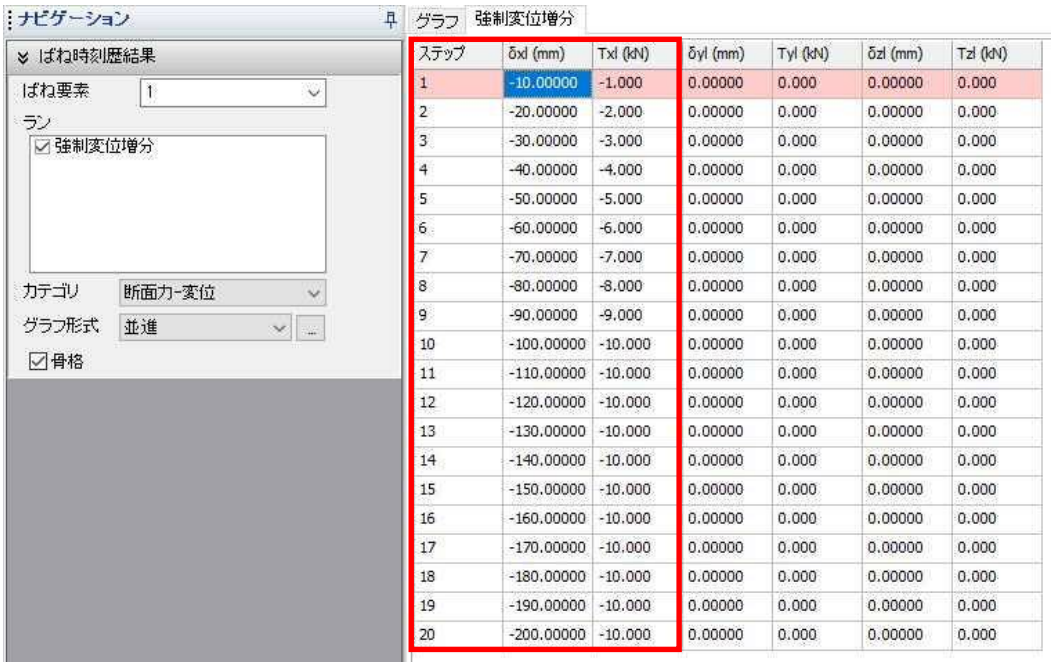


図3-17　バネの応答履歴



ステップ	δxl (mm)	Txl (kN)	δyl (mm)	Tyl (kN)	δzl (mm)	Tzl (kN)
1	-10.00000	-1.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
2	-20.00000	-2.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
3	-30.00000	-3.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
4	-40.00000	-4.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
5	-50.00000	-5.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
6	-60.00000	-6.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
7	-70.00000	-7.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
8	-80.00000	-8.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
9	-90.00000	-9.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
10	-100.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
11	-110.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
12	-120.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
13	-130.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
14	-140.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
15	-150.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
16	-160.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
17	-170.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
18	-180.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
19	-190.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000
20	-200.00000	-10.000	0.00000	0.000	0.00000	0.000

図3-18　数値解析結果

理論解と解析結果の比較を表3-3に示す。

表3-3　理論解と解析結果の比較

ステップ	水平変位			ばね反力		
	δxl(mm)			Fxl(kN)		
	理論解	解析結果	比率	理論解	解析結果	比率
1	-10.000	-10.000	100.0%	-1.000	-1.000	100.0%
2	-20.000	-20.000	100.0%	-2.000	-2.000	100.0%
3	-30.000	-30.000	100.0%	-3.000	-3.000	100.0%
4	-40.000	-40.000	100.0%	-4.000	-4.000	100.0%
5	-50.000	-50.000	100.0%	-5.000	-5.000	100.0%
6	-60.000	-60.000	100.0%	-6.000	-6.000	100.0%
7	-70.000	-70.000	100.0%	-7.000	-7.000	100.0%
8	-80.000	-80.000	100.0%	-8.000	-8.000	100.0%
9	-90.000	-90.000	100.0%	-9.000	-9.000	100.0%
10	-100.000	-100.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
11	-110.000	-110.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
12	-120.000	-120.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
13	-130.000	-130.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
14	-140.000	-140.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
15	-150.000	-150.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
16	-160.000	-160.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
17	-170.000	-170.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
18	-180.000	-180.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
19	-190.000	-190.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%
20	-200.000	-200.000	100.0%	-10.000	-10.000	100.0%

以上より，バネの応答履歴が想定している骨格曲線と一致していることが確認できる。

(2)　使用内容に対する妥当性

鉄筋コンクリート防潮壁，鋼製防護壁，海水引込み管及び緊急用海水取水管の梁，板及び非線形地盤バネモデルの地震応答解析における断面力及び変位の算定にEngineer's Studioを使用することは，次の通り検証されており，妥当である。

・検証の内容のとおり，梁モデル，平板モデル，地盤バネについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

4. 解析コードの概要（竜巻関連）

コード名 / 項目	Engineer's Studio
使用目的	３次元骨組みモデルによる断面力，変位並びに固有周期の算定
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver. 6.00.04
コードの概要	Engineer's Studio（以下「本解析コード」という。）は，３次元有限要素法（ＦＥＭ）解析を行う解析コードである。主な特徴は下記のとおりである。 ・土木建築構造物の部材を，1本の棒に見立てたはり要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析並びに固有値解析を行い，断面力及び変位並びに固有周期の算出を行う。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	本解析コードは，海水ポンプ室周りの竜巻防護施設の設計において，はり要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びにはり要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用されている。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・本解析コードによる単純はりモデルに対する応答解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる固有値解析結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・検証内容のとおり，はりモデル，固有値解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

5.　Engineer’s Studioの解析手法について（竜巻関連）

5.1　一般事項

Engineer’s Studioは土木・建築構造物の部位を1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して，構造物の非線形挙動を解析できる３次元有限要素法（ＦＥＭ）解析プログラムである。Engineer’s Studioは，梁要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びに梁要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用している。

5.2　解析コードの特徴

Engineer’s Studioの主な特徴を以下に示す。

・土木建築構造物の部材を，1本の棒に見立てた梁要素や平面的に連続した平板要素でモデル化して構造物の応答解析並びに固有値解析を行い,断面力及び変位並びに固有周期の算出。

5.3　解析手法

(1)　弾性梁要素

弾性梁要素は2節点を直線で結ぶ要素であり，軸方向の伸縮変形と2節点の回転変位を含む相対変位によって生じる曲げと捻れ変形に対して弾性の復元力を持つ要素である。

2節点要素であるから，３次元空間内にある要素両端自由度は12であり，要素の剛体としての変位を拘束する自由度は6個必要であるから，差し引き6個の自由度が要素の弾性変形を表す要素端変形となる。この要素端変形と仕事の対をなす力が要素端力である。言い換えれば，要素端に働く3つの力の内，6個は要素変形を生じさせ，6個は要素を支持する支点反力を意味する。この静定な支点条件要素座標系の設定によって，要素端力と要素端変形が確定する。

要素座標系として単純支持あるいは片持ち支持など考えることができる。本解析では要素座標系内における幾何学的非線形を考慮しないため，非線形解析では要素内の幾何学的非線形性の度合いに応じて解が異なる。一方，線形解析では要素座標系の取り方に解は依存しない。要素内の変形において，その幾何学的非線形性の影響が小さい支持条件が解析上合理的と言えるから，定義する要素座標系は，単純支持の支点条件を採用する。したがって，6個の要素端変形を次のように定義し，図示すれば，　図5-1のとおりである。

$$\Delta l,\ \theta_{x},\ \theta_{iy},\ \theta_{iz},\ \theta_{jy},\ \theta_{jz}$$

ここに，サフィックスｉ，ｊは要素両端を表す。なお，図中の$\theta_{ic}\ e_{ic}$と$\theta_{jc}\ e_{ic}$は，要素端の回転変形成分の合成ベクトルである。

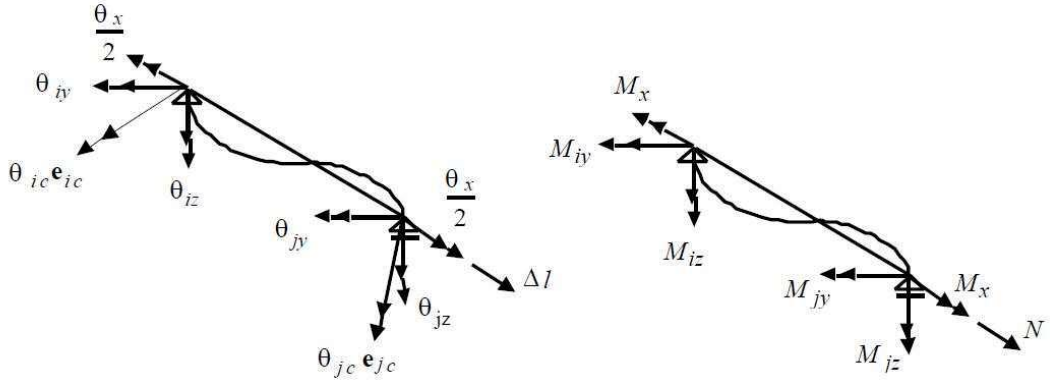


図5-1　要素端変形と要素端力

一方，要素端変形の仕事の対である要素端力は，要素両端を結ぶ弦方向の力N，弦回りの端モーメントM_x，両端それぞれにおいて弦に直交する2軸回りの端モーメントとなる。まとめれば，

$$N,\ M_x,\ M_{iy},\ M_{iz},\ M_{jy},\ M_{jz}$$

であり，これも図5-1に示すとおりである。

(2)　固有値解析

固有値解析では，減衰のない自由振動の運動方程式

$$[M]\{x''\}+[K]\{x\} = 0 \quad \cdots(1)$$

[M]：モデル全体の質量マトリクス

[K]：モデル全体の剛性マトリクス（初期剛性）

{x''}：節点の加速度ベクトル

{x}：節点の変位ベクトル

から出発して，以下のように固有値(固有振動数，固有モード)を求める。

式(1)の解を

$$\{x\} = \{X\}\cdot\exp(i\omega t)$$

ただし，

$$\{X\} = \{X1,\ X2,\ \ldots,\ Xn\}\hat{}T \quad (\hat{}Tは転置を意味する)$$

i　：虚数単位

t　：時間

ω　：固有円振動数で，固有振動数fとの関係は$\omega = 2\pi f$

とおくと，式(1)は

$$([K]-\omega\hat{}2\cdot[M])\cdot\{X\}=0 \quad \cdots(2)$$

となる。

これを満足する$\omega\hat{}2$と{X}を求める。{X}＝0は静止状態を表すので振動問題では興味がなく，

通常は{X}＝0以外の解を持つことを考える。そのためには係数行列の行列式がゼロでなければならない。

$$|[K]-\omega^2\cdot[M]|=0$$

これを解くと，n個の正根ω1^2，ω2^2，・・・ωn^2 が得られる（ω1＜ω2＜，・・・，＜ωn）。ωiを第i次の固有円振動数と呼ぶ。ωiを(2)式に代入して得られる方程式から{X}の各成分の比が求まる。

$$\{Xi\}=(X1i,\ X2i,\ \cdots Xni)^T$$

{Xi}を第i次の固有振動形または基準振動形と呼ぶ。
{Xi}は各成分の相対的な比率で構成される固有ベクトルなので一意的ではないが，特に次の条件を満たす{Xi}を{φi}で表し，正規化された基準振動形と呼ぶ。

$$\{\phi i\}^T\cdot[M]\cdot\{\phi i\}=1 \quad \cdots(3)$$

本プログラムにおいても，式(3)により正規化された固有ベクトル{φi}を算出し，それを用いて刺激係数を求めている。

5.4　解析フローチャート

応答解析の解析フローチャートを図5-2に,固有値解析の解析フローチャートを図5-3に示す。

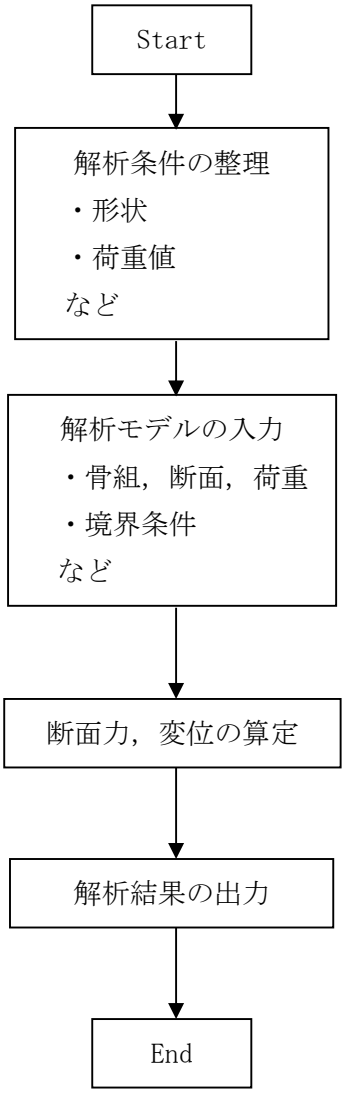


図5-2　解析フローチャート(応答解析)

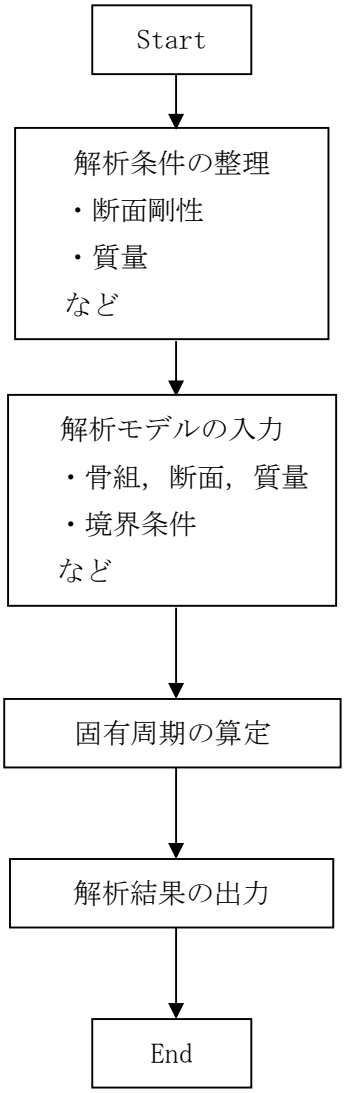


図5-3　解析フローチャート(固有値解析)

5.5　検証(Verification)と妥当性(Validation)

(1)　理論解との比較による検証

応答解析，固有値解析のそれぞれについて，単純梁の理論解との比較を行う。

a.　応答解析

単純梁モデルに等分荷重を載荷した時の最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

解析モデルは図5-4に示すモデルとし，解析条件は下記のとおりとする。

・長さ Ｌ：10(m)

・ヤング係数 Ｅ：25000 N/mm^2 → 25000000 kN/m^2

・断面二次モーメント Ｉ：1 m^4

・等分布荷重 ｑ：10 kN/m

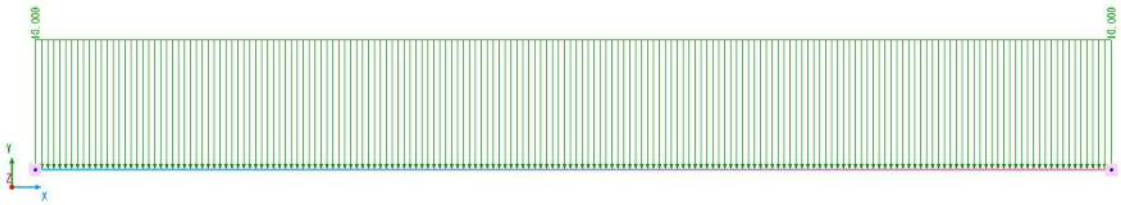


図5-4　解析モデル図(梁モデル)

この条件での最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみの理論解は，構造力学公式集より以下のとおりとなる。

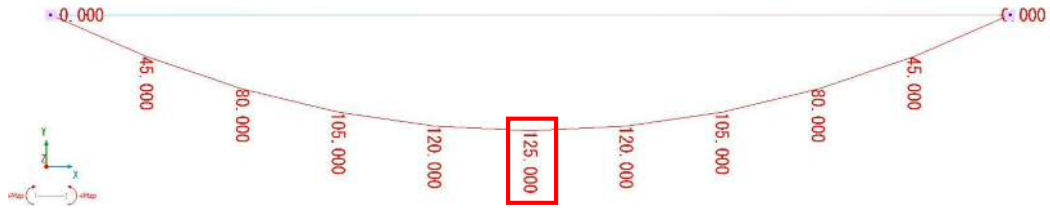
最大曲げモーメント $M_{max}=qL^2/8=(10\times10^2)/8=1000/8=125$ kN･m

最大せん断力 $S_{max}=qL/2=(10\times10)/2=50$ kN

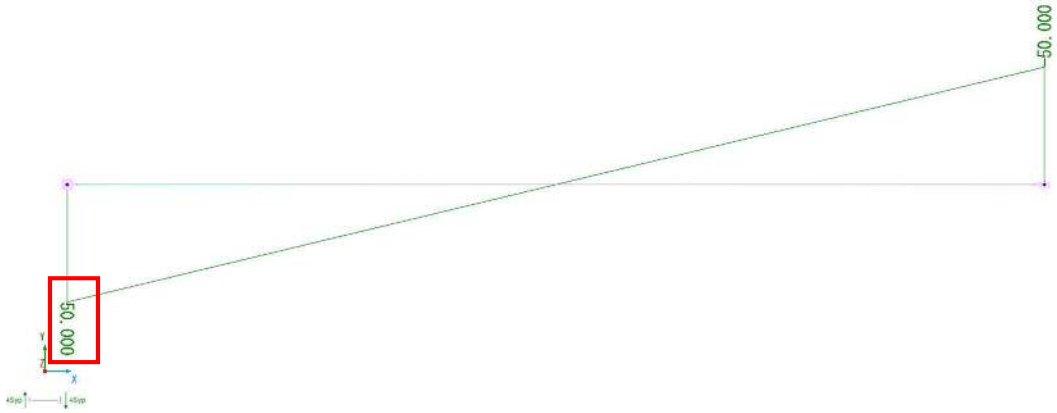
最大たわみ $y_{max}=5qL^4/384EI=(5\times10\times10^4)/(384\times25000000\times1)=5.20833\times10^{-5}$ m

$=0.052083$ mm

Engineer's Studioによる断面力の算出結果を図5-5に，たわみの算出結果を図5-6に示す。

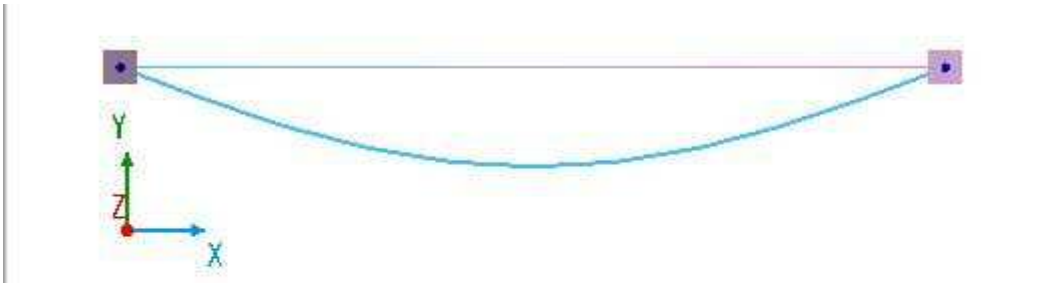


最大曲げモーメントM_{zpmax}＝125 kN･m



最大せん断力S_{ypmax}＝50 kN

図5-5　断面力の算出結果



節点　フレーム要素

名称	ケース名	X (m)	δX (mm)	δY (mm)	δZ (mm)
1	分布荷重	0.000	0.000000	0.000000	0.000000
1	分布荷重	1.000	0.000000	-0.016350	0.000000
1	分布荷重	2.000	0.000000	-0.030933	0.000000
1	分布荷重	3.000	0.000000	-0.042350	0.000000
1	分布荷重	4.000	0.000000	-0.049600	0.000000
1	分布荷重	5.000	0.000000	-0.052083	0.000000
1	分布荷重	6.000	0.000000	-0.049600	0.000000
1	分布荷重	7.000	0.000000	-0.042350	0.000000
1	分布荷重	8.000	0.000000	-0.030933	0.000000
1	分布荷重	9.000	0.000000	-0.016350	0.000000
1	分布荷重	10.000	0.000000	0.000000	0.000000

最大たわみ $\delta_{y_{max}}$ ＝-0.052083 mm

図5-6　たわみの算出結果

表5-1　理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
最大曲げモーメント	(kN･m)	125	125	100.0%
最大せん断力	(kN)	50	50	100.0%
最大たわみ	(mm)	0.052083	0.052083	100.0%

表5-1に理論解と解析結果の比較を示す。

最大曲げモーメント，最大せん断力，最大たわみが理論解と解析結果で一致しており，断面力，変位が正しく算出されていることが確認できる。

b.　固有値解析

単純梁モデルの固有値解析について，計算例と解析結果の比較を行う。

・解析モデル

参考とする計算例は「入門建設振動学　小坪 清眞著　1996年　森北出版(株)」とし，P13-14の第2章　1自由度系の自由振動　2.3振動方程式の解の例題2.2とする。

図5-7に示すような曲げ剛性EIが一定で長さLの両端支持ばりの中点に質量mのおもりが乗り，梁の質量はおもりの質量に比し無視できるとした場合，上下振動の固有周期は以下の式で求められる。

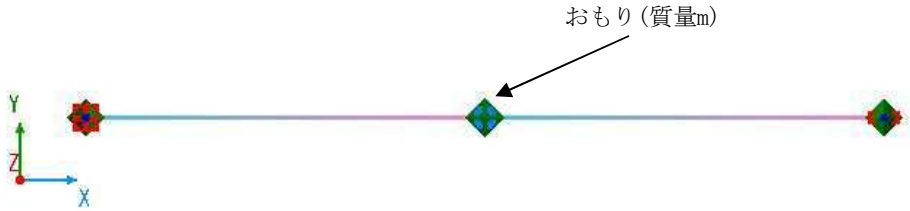


図5-7　解析モデル図(固有値解析)

固有円振動数　$n = \sqrt{\frac{ml^3}{48EL}}$

固有周期　　$T = \frac{2\pi}{n} = 2\pi\sqrt{\frac{ml^3}{48EI}}$

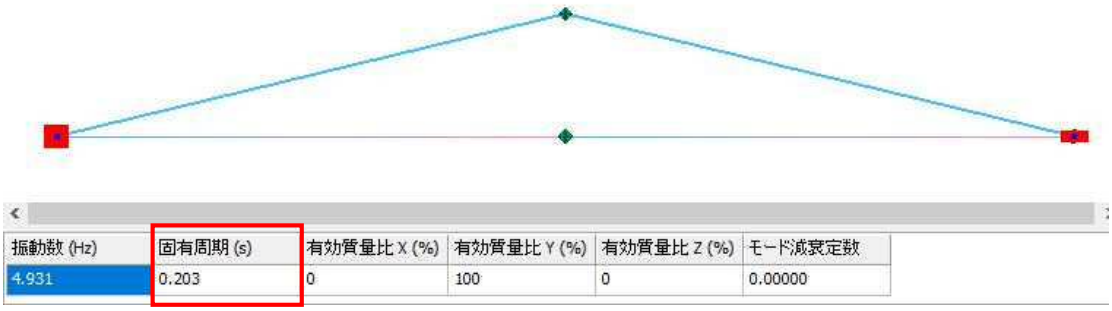
そこで，下記の解析条件で固有周期を求めて比較する。

・長さ　L：1.0(m)
・質量　m：100(ton)
・断面2次モーメント I：0.0001(m^4)
・ヤング係数 E：20000(N/mm^2)→20000000(kN/m^2)

条件を算出式へ代入すると，固有周期は下記の通りとなる。

$$T = 2 \times 3.141596 \times \sqrt{\frac{100 \times 1^3}{48 \times 20000000 \times 0.0001}} = 0.20278 \cong 0.203(s)$$

Engineer's　Studioの固有値解析結果を図5-8に示す。



振動数 (Hz)	固有周期 (s)	有効質量比 X (%)	有効質量比 Y (%)	有効質量比 Z (%)	モード減衰定数
4.931	0.203	0	100	0	0.00000

図5-8　固有値解析結果

表5-2　理論解と解析結果の比較

対象		理論解	解析結果	比率
固有周期	(s)	0.203	0.203	100.0%

表5-2に理論解と解析結果の比較を示す。

固有周期が理論解と解析結果で一致しており，固有値が正しく算出されていることが確認できる。

(2)　使用内容に対する妥当性

海水ポンプ室周りの竜巻防護施設の設計において，梁要素を用いた静的応答解析による断面力及び変位の算定並びに梁要素を用いた固有値解析による固有周期の算定に使用することは，次の通り検証されており妥当である。

・検証の内容のとおり，梁モデル，固有値解析について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

Ⅴ-5-40　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＲＡＭＥ（面内）

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）FRAME（面内）について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver.5.0.4
Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver.5.0.4

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	FRAME（面内）
使用目的	２次元骨組構造解析（断面力算出）
開発機関	株式会社 フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 5.0.4
コードの概要	（株）フォーラムエイトによって開発された，平面骨組構造解析の汎用市販コードである。 本解析コードは，微小変位理論による変位法を用いて，２次元平面骨組モデルの断面力・変位・反力を算出するための構造解析プログラムである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	FRAME（面内）は汎用市販コードであり，常設低圧代替注水系ポンプ室及び代替淡水貯槽の断面力算出に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。 ・今回の工認申請で使用する機能の検証として，材料力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，本解析コードを用いて静的解析を実施した解析解と，構造力学公式集に記載の理論式による理論解とを比較し，解析解と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードは，国内の建築・土木分野において使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・関西電力株式会社の「大飯原子力発電所第３号機」において，止水壁の平面骨組解析（断面力算出）に本コード（Ver.5.00）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。

	・本解析コードの理論は，一般的に認知されているものであり，今回の工認申請で使用する２次元骨組モデルによる断面力算定での適用は妥当である。 ・本工事計画における構造に対して行う断面力算定の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-41　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＲＥＭＩＮＧ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. FREMINGの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析理論……5
3.4 解析フローチャート……25
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……26

1. はじめに

本資料は，添付書類において用いた解析コードFREMINGについて説明するものである。

本解析コードを用いた添付書類を示す使用状況一覧に，解析コードの概要を以降にそれぞれ記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-2-7	原子炉建屋地下排水設備排水シャフトの耐震性についての計算書	Ver. 14.1B
Ⅴ-2-2-2-9	原子炉建屋地下排水設備集水管の耐震性についての計算書	Ver. 14.1B
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 14.1B
Ⅴ-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 14.1B
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 14.1B
Ⅴ-3-別添3-2-9	貯留堰の強度計算書	Ver. 14.1B

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	FREMING
使用目的	平面骨組解析（断面力算出）
開発機関	富士通エフ・アイ・ピー株式会社
開発時期	1995年
使用したバージョン	Ver. 14.1B
コードの概要	富士通エフ・アイ・ピー株式会社によって開発された，平面骨組構造解析の汎用市販コードである。 本解析コードは，平面骨組計算プログラムであり，平面構造物にモデル化できる構造物はすべて計算が可能である。 適用範囲として，橋梁，鉄塔，トンネル，及び共同溝などの土木構造物から，ビル，建屋など建築構造物の設計計算に利用可能である。 また，面内荷重及び面外荷重において，線形及び非線形解析が可能である。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	FREMING Ver. 14.1Bは，緊急用海水ポンプピット及び防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））並びに貯留堰の平面骨組解析（断面力算出）に用いている。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は，次の通りである。 ・材料力学分野における一般的知見によって解を求めることができる体系について，平面骨組解析モデルによる解析解（断面力）と理論解と比較し，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，次の通りである。 ・本解析コードは，国内の土木建築分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・本解析コードによる解析結果と，類似解析コードFRAME（面内）の解析結果を比較し，双方の解が一致することを確認している。 ・今回の工認申請で実施する骨組解析モデルによる断面力算出の用途，及び適用範囲が，上述の妥当性確認の範囲内にあることを確認している。

3. FREMINGの解析手法について

3.1 一般事項

本解析コードは，平面骨組解析用の解析コードである。今回は，緊急用海水ポンプピット及び防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））並びに貯留堰の骨組解析モデルの静的解析に用いている。

3.2 解析コードの特徴

FREMINGの主な特徴を以下に示す。

① バイリニア，トリリニアの材料非線形性を考慮可能である。

② RC矩形断面に対応したM―φ曲線のひび割れ等を計算するはり要素を設定可能である。

③ 荷重モデルでは，分布荷重，及び集中荷重を考慮することができる。

④ 地中構造物の耐震設計法として応答変位法に基づいて入力することができる。

3.3　解析理論

解析理論を以下に示す。

3.3.1　座標系

(1)　基準座標系

基準座標系は，解析すべき骨組構造物を定義する座標系であり，

・Ｙ軸　：鉛直上向きを正

・Ｘ軸　：Ｙ軸と直交する直線の右方向を正

とする。

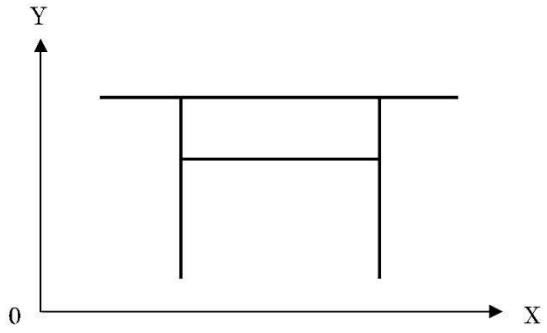


図3-1　基準座標系

(2)　部材座標系

部材座標系は，構造物を構成する各部材にそれぞれ設定する。梁部材は，

・ｘ軸　：部材を構成する節点ｉ - ｊのｉからｊへ向かう方向を正

・ｙ軸　：ｘ軸をｉ端基点で反時計廻り90°の方向を正

とする。

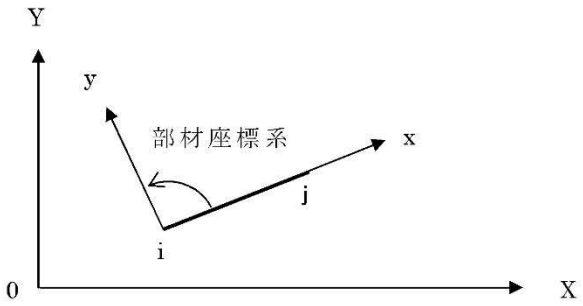


図3-2　梁部材座標系

バネ部材は，傾斜角を設定しない場合に基準座標系と一致する。
傾斜角を設定する場合は時計廻りの方向を正として設定する。

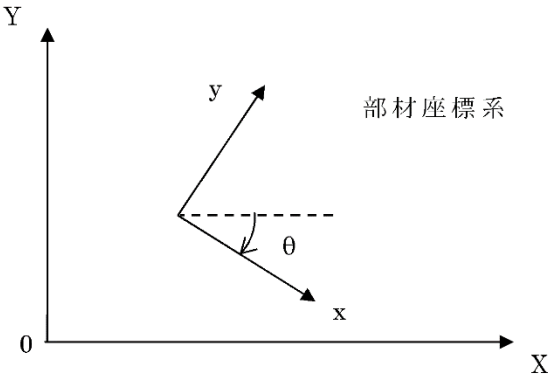


図3-3　バネ部材座標系

(3)　傾斜座標系

傾斜座標系は，傾斜支点に設定する。

設定方法は，入力データにおいて傾斜角（基準座標系に対して反時計廻りを正とした角度）を指示することにより行う。

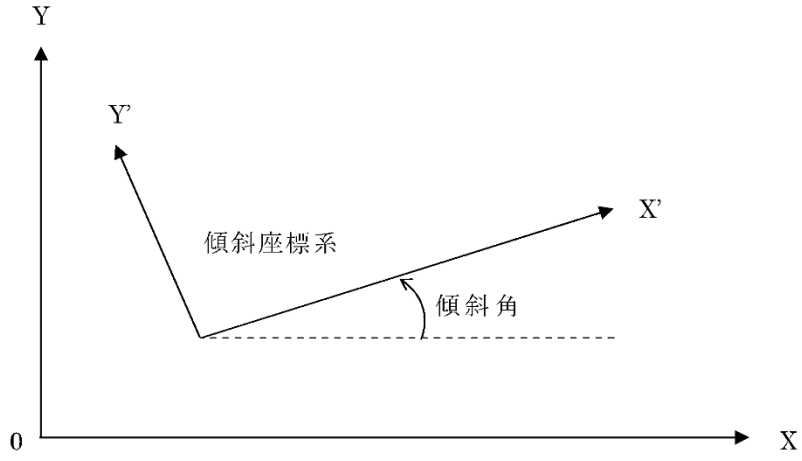


図3-4　傾斜座標系

3.3.2　要素剛性

(1)　材端変位，材端力

断面形状が一定の部材の力と変位の関係を式で表すと式（3.1）のようになる。

$$\{\bar{f}\}=[\bar{k}]\cdot\{\bar{d}\} \tag{3.1}$$

材端力

$$\{\bar{f}\}=\begin{Bmatrix} N_i \\ S_i \\ M_i \\ N_j \\ S_j \\ M_j \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

材端変位

$$\{\bar{d}\}=\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \\ u_j \\ v_j \\ \theta_j \end{Bmatrix} \tag{3.3}$$

ただし，

N_i ，　N_j　：ｘ軸方向力（軸力），ｘ軸廻りモーメント（ねじりモーメント）

S_i ，　S_j　：ｙ軸方向力（せん断力），ｚ軸方向力（せん断力）

M_i ，　M_j　：ｚ軸廻りのモーメント（曲げモーメント），
ｙ軸廻りのモーメント（曲げモーメント）

u_i ，　u_j　：ｘ軸方向の変位

v_i ，　v_j　：ｙ軸方向の変位

θ_i ，　θ_j　：ｚ軸廻りの回転角

(2) 梁要素

梁要素の要素剛性マトリックスを式（3.4）のように示す。

$$\left[\bar{k}\right]=\left[\begin{array}{ccc:ccc} \underline{EA/L} & 0 & 0 & \underline{-EA/L} & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ \hdashline \underline{-EA/L} & 0 & 0 & \underline{EA/L} & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{array}\right] \qquad (3.4)$$

面外は下線部分がＧＪ／Ｌとなる。

ただし，

Ｅ　：弾性係数　（kN/m^2）

Ｇ　：せん弾性係数　（kN/m^2）

Ａ　：断面積（m^2）

Ｉ　：ｚ軸（ｙ軸）廻り断面二次モーメント（m^4）

Ｊ　：ねじり定数（m^4）

(3)　スカラーバネ要素

スカラーバネ要素は，２節点間の節点成分ごとの結合が可能な要素である。たとえば，節点Ｉのｘ方向成分と，節点Ｊのｘ方向成分をスカラーバネ要素で結合できる。スカラーバネ要素は，かけられた外力に比例して変位する。

スカラーバネ要素を使用すると対応する剛性行列は，結合する自由度をｉとｊとすると，式（3.5）のようになる。

$$[\bar{k}]=\begin{bmatrix} & i & & j & \\ & \cdot & & \cdot & \\ & \cdot & & \cdot & \\ \cdots & k & \cdots & -k & \cdots \\ & \cdot & & & \\ & \cdot & & & \\ & \cdot & & & \\ \cdots & -k & \cdots & k & \cdots \\ & \cdot & & \cdot & \\ & \cdot & & \cdot & \end{bmatrix} \qquad (3.5)$$

ただし，

ｋ　　：バネ値　　（並進：(kN/m)，回転：(kN･m/rad.)）

(4)　初期張力（幾何剛性）

梁要素の初期張力（Ｆ）を考慮する場合，式（3.6）に示す剛性マトリックス$\bar{s}$を要素剛性マトリックス$\bar{k}$に付加する。

$$[\bar{s}]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 6F/5L & F/10 & 0 & -6F/5L & F/10 \\ & & 2LF/15 & 0 & -F/10 & -LF/30 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 6F/5L & -F/10 \\ & \text{Symmetric} & & & & 2LF/15 \end{bmatrix} \qquad (3.6)$$

ただし，

Ｆ　　：初期張力（kN）

Ｌ　　：梁の部材長（m）

(5) 弾性支承上梁

a. 部材軸方向

部材軸方向に力を受ける弾性支承上梁の剛性マトリックスを式（3.7）に，荷重項を式（3.8）に示す。

$$\left[\bar{k}\right]=\frac{EA\omega}{\sinh(\omega L)}\begin{bmatrix}\cosh(\omega L) & -1\\ -1 & \cosh(\omega L)\end{bmatrix} \tag{3.7}$$

$$\left[\bar{f}\right]=\begin{Bmatrix}-\frac{1}{\sinh(\omega L)}\int_0^L \sinh(\omega(L-\eta))\cdot P(\eta)\,d\eta\\ -\frac{1}{\sinh(\omega L)}\int_0^L \sinh(\omega\eta)\cdot P(\eta)\,d\eta\end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

ただし，

E　　：弾性係数（kN/m^2）

A　　：断面積（m^2）

L　　：部材長（m）

P（x）：分布荷重値（kN/m）

ω　　：$\sqrt{\frac{k}{EA}}$

k　　：地盤反力係数（kN/m^2）

注）面外解析では，考慮されない。

b.　部材軸直交方向

部材軸直交方向に力を受ける弾性支承上梁の剛性マトリックスを式（3.9）に，荷重項を式（3.10）に示す。

$$[k]=\begin{bmatrix} 4EI\beta^3\dfrac{sh\cdot ch+s\cdot c}{sh^2-s^2} & 2EI\beta^2\dfrac{sh^2+s^2}{sh^2-s^2} & -4EI\beta^3\dfrac{ch\cdot s+sh\cdot c}{sh^2-s^2} & 4EI\beta^2\dfrac{sh\cdot s}{sh^2-s^2} \\ 2EI\beta^2\dfrac{sh^2+s^2}{sh^2-s^2} & 2EI\beta\dfrac{sh\cdot ch-s\ c}{sh^2-s^2} & -4EI\beta^2\dfrac{sh\cdot s}{sh^2-s^2} & 2EI\beta\dfrac{ch\cdot s-sh\cdot c}{sh^2-s^2} \\ -4EI\beta^3\dfrac{ch\cdot s+sh\cdot c}{sh^2-s^2} & -4EI\beta^2\dfrac{sh\cdot s}{sh^2-s^2} & 4EI\beta^3\dfrac{sh\cdot ch+s\cdot c}{sh^2-s^2} & -2EI\beta^2\dfrac{sh^2+s^2}{sh^2-s^2} \\ 4EI\beta^2\dfrac{sh\cdot s}{sh^2-s^2} & 2EI\beta\dfrac{ch\cdot s-sh\cdot c}{sh^2-s^2} & -2EI\beta^2\dfrac{sh^2+s^2}{sh^2-s^2} & 2EI\beta^3\dfrac{sh\cdot ch-s\cdot c}{sh^2-s^2} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$[\bar{f}]=\begin{bmatrix} \dfrac{-1}{sh^2-s^2}\displaystyle\int_0^L[sh\cdot\{\cosh(\beta(L-\eta))\cdot\sin(\beta\eta)+\sinh(\beta(L-\eta))\cdot\cos(\beta\eta)\}- \\ \qquad s\cdot\{\cos(\beta(L-\eta))\cdot\sinh(\beta\eta)+\sin(\beta(L-\eta))\cdot\cosh(\beta\eta)\}]\cdot \\ \qquad P(\eta)\,d\eta \\ \dfrac{-1}{\beta(sh^2-s^2)}\displaystyle\int_0^L[sh\cdot\{\sinh(\beta(L-\eta))\cdot\sin(\beta\eta)-s\cdot\sin(\beta(L-\eta))\cdot\sinh(\beta\eta)\}\cdot \\ \qquad P(\eta)\,d\eta \\ \dfrac{-1}{sh^2-s^2}\displaystyle\int_0^L[sh\cdot\{\cosh(\beta\eta)\cdot\sin(\beta(L-\eta))+\sinh(\beta\eta)\cdot\cos(\beta(L-\eta))\}- \\ \qquad s\cdot\{\cos(\beta\eta)\cdot\sinh(\beta(L-\eta))+\sin(\beta\eta)\cdot\cosh(\beta(L-\eta))\}]\cdot \\ \qquad P(\eta)\,d\eta \\ \dfrac{1}{\beta(sh^2-s^2)}\displaystyle\int_0^L[sh\cdot\{\sinh(\beta\eta)\cdot\sin(\beta(L-\eta))-s\cdot\sin(\beta\eta)\cdot\sinh(\beta(L-\eta))\}\cdot \\ \qquad P(\eta)\,d\eta \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

ただし，

・ｃｈ＝ｃｏｓｈ（βＬ）
・ｓｈ＝ｓｉｎｈ（βＬ）
・ｓ＝ｓｉｎ（βＬ）
・ｃ＝ｃｏｓ（βＬ）
・Ｅ　　：弾性係数（kN/m²）
・Ｉ　　：断面二次モーメント（m⁴）
・Ｌ　　：部材長（m）
・ｋ　　：地盤反力係数（kN/m²）
・Ｐ（ｘ）：分布荷重値（kN/m）

・$\beta=\sqrt[4]{\dfrac{k}{4EI}}$

3.3.3　全体剛性

(1)　座標変換

部材座標系（ｘ，ｙ）と基準座標系（Ｘ，Ｙ）の座標変換マトリックスを［Ｔｅ］とすると，次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [Te] \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \tag{3.11}$$

ここに，

$$[Te] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

L_{ij}：方向余弦

式（3.12）を用いることにより，基準座標系での剛性マトリックス［ｋ］が求められる。

まず，基準座標系での変位ベクトルを｛ｄ｝，断面力を｛ｆ｝とすると，次式が成り立つ。

$$\{\bar{d}\} = [T] \cdot \{d\} \tag{3.13}$$

$$\{\bar{f}\} = [T] \cdot \{f\} \tag{3.14}$$

ここに　$[T] = \begin{bmatrix} Te & 0 \\ 0 & Te \end{bmatrix}$ (3.15)

式（3.1）に，(3.13)，(3.14）を代入すると

$$[T]\{f\} = [\bar{k}][T]\{d\}$$

$$\{f\} = [T]^T [\bar{k}][T]\{d\}$$

$$= [k]\{d\} \tag{3.16}$$

すなわち，基準座標系に関する剛性マトリックスは，式（3.17）で表す。

$$[k] = [T]^T [\bar{k}][T] \tag{3.17}$$

(2) 傾斜座標変換

基準座標系（X，Y）と傾斜座標系（X’，Y’）の座標変換マトリックスを［Ｔｅ’］とすると，次式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = [Te'] \begin{Bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{Bmatrix} \qquad (3.18)$$

ここに

$$[Te'] = \begin{Bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \qquad (3.19)$$

α＝傾斜角

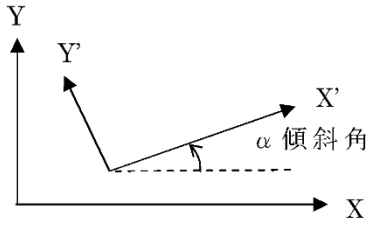


図3-5　傾斜座標系

式（3.18）を用いることにより，傾斜座標系での剛性マトリックス［ｋ’］が求められる。

まず，傾斜座標系での変位ベクトルを｛ｄ’｝，断面力を｛ｆ’｝とすると，次式が成り立つ。

$$\{d\} = [T'] \cdot \{d'\} \qquad (3.20)$$

$$\{f\} = [T'] \cdot \{f'\} \qquad (3.21)$$

ここに $[T'] = \begin{bmatrix} Te' & 0 \\ 0 & Te' \end{bmatrix}$ (3.22)

式（3.16）に，式（3.20），式（3.21）を代入すると

$$[T']\{f'\} = [k][T']\{d'\}$$

$$\{f'\} = [T']^T [k][T']\{d'\}$$

$$= [k']\{d'\} \qquad (3.23)$$

すなわち，傾斜座標系に関する剛性マトリックスは，式（3.24）で表す。

$$[k'] = [T']^T [k][T'] \qquad (3.24)$$

(3) 全体剛性マトリックス

構造物全体の｛U｝と力｛F｝を関連づける剛性方程式は，式（3.25）にて表す。

$$\{F\}=[K]\{U\} \tag{3.25}$$

ここで，

［K］：全体剛性マトリックス

この全体剛性マトリックスは，各部材ごとで求めた剛性マトリックスを重ね合わせることにより求められる。

3.3.4　荷重

(1)　等価節点力

a.　全面等分布荷重

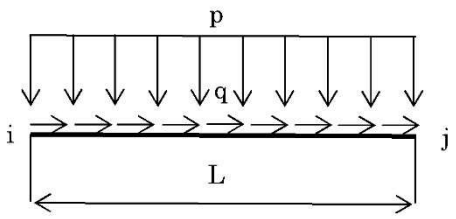


表3-1　満載分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{qL}{2}$	$-\frac{pL}{2}$	$-\frac{pL^2}{12}$
j端	$-\frac{qL}{2}$	$-\frac{pL}{2}$	$\frac{pL^2}{12}$

b.　全面不等分布荷重

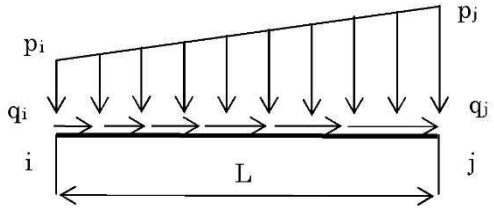


表3-2　直線分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{L(2qi+qj)}{6}$	$-\frac{L(7pi+3pj)}{20}$	$-\frac{L^2(3pi+2pj)}{60}$
j端	$-\frac{L(qi+2qj)}{6}$	$-\frac{L(3pi+7pj)}{20}$	$\frac{L^2(2pi+3pj)}{60}$

c.　部分等分布荷重

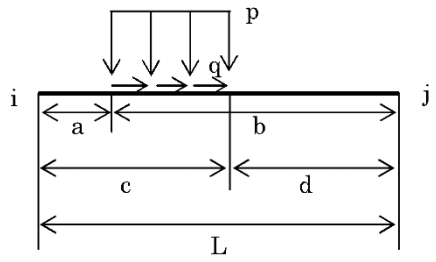


表3-3　等分布荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{q\left(b^2-d^2\right)}{2\,L}$	$\frac{-p}{2\,L^3}\cdot\left[2\,L\left(b^3-d^3\right)-\left(b^4-d^4\right)\right]$	$\frac{-p}{12\,L^2}\cdot\left[4\,L\left(b^3-d^3\right)-3\left(b^4-d^4\right)\right]$
j端	$-\frac{q\left(c^2-a^2\right)}{2\,L}$	$\frac{-p}{2\,L^3}\cdot\left[2\,L\left(c^3-a^3\right)-\left(c^4-a^4\right)\right]$	$\frac{p}{12\,L^2}\cdot\left[4\,L\left(c^3-a^3\right)-3\left(c^4-a^4\right)\right]$

d.　集中荷重

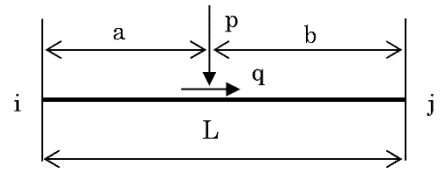


表3-4　集中荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$-\frac{qb}{L}$	$-\frac{pb^2(L+2a)}{L^3}$	$-\frac{pab^2}{L^2}$
j端	$-\frac{qa}{L}$	$-\frac{pa^2(L+2b)}{L^3}$	$\frac{pa^2b}{L^2}$

e.　集中モーメント荷重

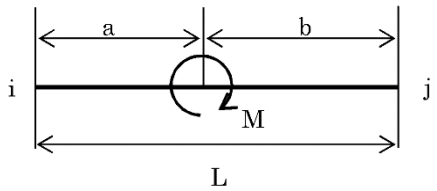


表3-5　集中モーメント荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	―――	$\frac{6Mab}{L^3}$	$\frac{Mb(2L-3b)}{L^2}$
j端	―――	$-\frac{6Mab}{L^3}$	$\frac{Ma(2L-3a)}{L^2}$

f. 温度上昇

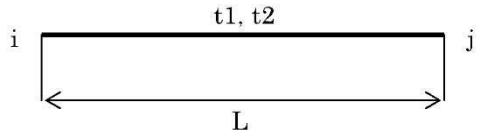


表3-6 温度荷重

	軸力	せん断力	モーメント
i端	$\alpha(t1+t2)/2 \cdot EA$	―――	$\alpha(t1-t2) \cdot hEI$
j端	$-\alpha(t1+t2)/2 \cdot EA$	―――	$-\alpha(t1-t2) \cdot hEI$

注）面外解析では考慮されない。

ただし，

α　：線膨張係数
E　：弾性係数　(kN/m^2)
A　：断面積　(m^2)
I　：断面二次モーメント (m^4)
h　：断面高さ　(m)
ｔ１：上面温度　(℃)
ｔ２：下面温度　(℃)

(2) 支点移動

図 3-6 のように，支点のあるものが移動した場合，次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ U_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R_0 \end{Bmatrix} \qquad (3.26)$$

ここで，

K_{11} ：構造物の全体剛性マトリックス

K_{12} ：支点移動を起こした方向のバネ定数を含む全体剛性マトリックスの列の要素

K_{21} ：K_{12}

K_{22} ：支点移動を起こした方向のバネ定数

U_0 ：支点の移動量

R_0 ：支点移動の作用外力

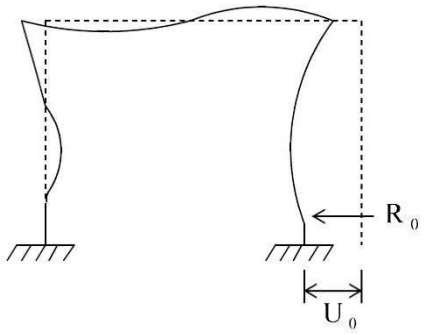


図3-6 支点移動のある場合

式（3.26）を展開し，支点移動を起こした方向のバネ定数を含む全体剛性マトリックスの列の要素に移動量をかけ，符号を変えて右辺に廻し荷重項とする。

$$K_{11} \cdot U + K_{12} \cdot U_0 = 0 \qquad (3.27)$$

$$K_{11} \cdot U = -K_{12} \cdot U_0 \qquad (3.28)$$

いま，K_{11}→［K］，U→｛U｝，$-K_{12} \cdot U_0$→｛F｝とすれば，式（3.28）は式（3.25）となる。

3.3.5　連立方程式の解法

(1)　コレスキー分解

式（3.25）にて表される連立方程式をＣｈｏｌｅｓｋｙ法で解き，節点の変位を求められる。

ここでは，以下のように剛性マトリックスをＬＤＬ^{T}分解して解く。

$$
\begin{aligned}
[K]\ \{U\} &= \{F\} \\
[L]\ [D]\ [L]^{T}\ \{U\} &= \{F\} \\
[D]\ [L]^{T}\ \{U\} &= \{L\}^{T}\ \{F\} \\
\{U\} &= [L]\ [D]^{-1}\ [L]^{T}\ \{F\}
\end{aligned}
\qquad (3.29)
$$

(2)　ノーテンション解析

a.　バネの非線形解析（ＮＯ－ＴＥＮＳＩＯＮ）

一般に，壁体の移動による土圧の変化は，下図に示すような非線形性を示す。

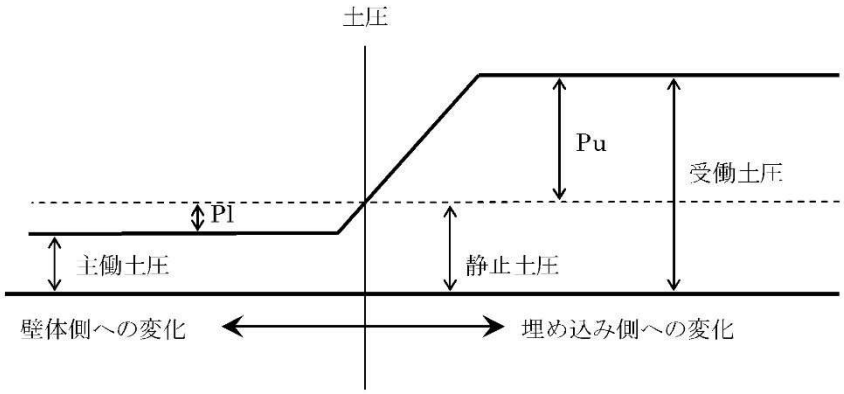


図3-7　土圧変化図

上図は，地中構造物が荷重を受けて変化しても，その変位がある一定以上になれば，土圧は変化しないことを示す。

本システムでは，節点に集中バネを配置し，静止土圧を基準としたところからのバネの反力（土圧増減量）を求めることができる。

b.　処理手順

①各節点の変位δを求める。

②極限値のチェックを行う。

（イ）　Ｐｌ≦Ｋ（δ－δ_G）≦Ｐｕのとき，何も行わない。

（ロ）　Ｋ（δ－δ_G）＜Ｐｌのとき，

Ｋ＝0.0とし，極限でおさえたバネ反力を荷重項に加える。

（ハ）　Ｋ（δ－δ_G）＞Ｐｕのとき，

Ｋ＝0.0とし，極限でおさえたバネ反力を荷重項に加える。

③収束判定

（イ）　一つでもバネがクリアーされていれば，①へ戻る。

（ロ）　すべての非線形バネが変化しなかった場合は処理終了。

（ハ）　すべての非線形バネがクリアーされた場合は処理中断。

(3) 応答変位法解析

骨組モデルを用いる応答変位法は，地震時に生じる地下構造物の応力を，地盤の変位を構造物に与えることによって静的に計算しようとする耐震設計法であり，当初線状地下構造物が地震によって軸直角方向に曲がったり，軸方向に伸びたり縮んだりする横断方向の動きに対する耐震計算法として用いられていた。

その後，比較的規模の大きい地下構造物や線状地下構造物の横断方向の耐震設計法として震度法に代わって用いられるようになった。

骨組モデルによる応答変位法の解析手順として

① 地震時の地盤変位，地盤剛性，せん断応力，加速度などを算出する。
② 骨組モデルを作成する。
③ 地盤剛性を用い地盤バネを算定する。
④ 地震時荷重を算定する。
⑤ 骨組モデルに地震時荷重を載荷して，地震による断面力を求める。

⑤を定式化すると以下のとおりに表すことができる。

$$\begin{bmatrix} K_{SS} & K_{SG} \\ \hline K_{GS} & K_{GG} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{array}{c} u_S \\ \hline u_G \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} F_S \\ \hline F_G \end{array} \right\} \tag{3.30}$$

ただし，

K_{SS} ：構造物の剛性，地盤～構造物間バネから成る剛性マトリックス
K_{SG}, K_{GS} ：地盤～構造物間バネから成る剛性マトリックス
K_{GG} ：地盤～構造物間バネを対角項にもつ剛性マトリックス
u_S ：構造物の変位ベクトル
u_G ：地盤の変位ベクトル
F_S ：構造物の外力ベクトル
F_G ：地盤の外力ベクトル

いま，この構造系には外力が作用しないとした場合，$F_S = F_G = 0$
地盤変位u_Gは既知であるから，

$$[K_{GG}] \cdot \{F_S\} + [K_{SG}] \cdot \{u_G\} = \{0\} \tag{3.31}$$

$$\{u_G\} = -[K_{GG}]^{-1} [K_{SG}] \cdot \{u_G\} \tag{3.32}$$

式（3.32）より，構造物の変位を求めることができる。

(4) 部材断面力，支点反力

$$\{f\}=[k]\{U\}-\{Pe\} \qquad (3.33)$$

ここで，

$$[k] = [\overline{k}][T]$$

$\{f\}$ ： 部材断面力
$\{U\}$ ： 基準座標系での節点変位
$[\overline{k}]$ ： 部材剛性マトリックス
$[T]$ ： 座標変換マトリックス
$\{Pe\}$ ： 内力（等分布荷重を受ける場合）

また，支点反力は，支点を構成する部材の断面力及び部材の重量を考慮して求める。

(5) 静的非線形解析

解析モデルを増分法で表すと次式のようになる。

ただし，増分 Δ は，荷重増分ピッチ内の計算を意味する。

$$K \cdot \Delta u = \Delta F \tag{3.34}$$

ここで,

K　　：荷重増分における構造物の剛性マトリックス

Δｕ　：構造物の変位増分

ΔＦ　：外力増分

式（3.34）を解くことにより，応答変位増分Δｕを求めることができる。しかし，外力増分ΔＦにおいて剛性Ｋが変化した場合，構造系には不平衡力ΔＦｒが生じることになる。

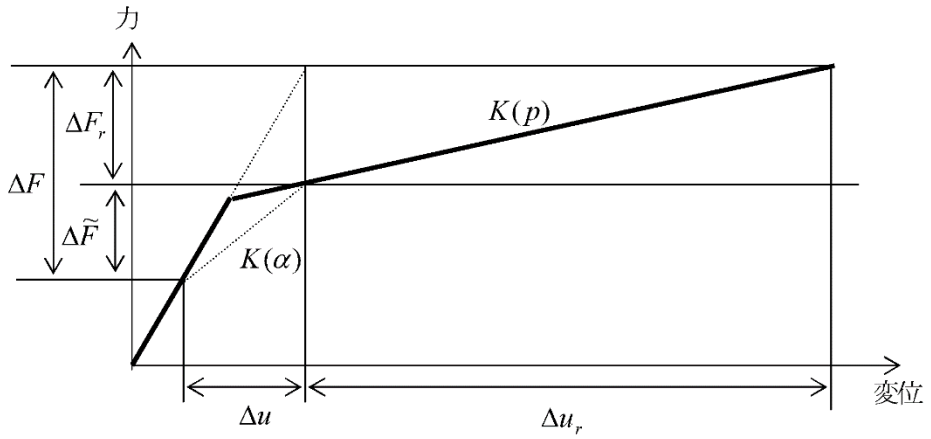


図3-8　力と変位の関係

$$\Delta F_r = \Delta F - \Delta \tilde{F} \tag{3.35}$$

ここで,

$$\Delta \tilde{F} = \tilde{K} \cdot \Delta u \tag{3.36}$$

$\tilde{K}$　　：修正された剛性マトリックス

ΔＦｒ　：不平衡力

$\Delta \tilde{F}$　：構造系内で実際に作用している外力増分による力

この不平衡力ΔＦｒを消去するために式（3.37）を用いて同様な計算をし，変位誤差が十分小さくなるまで繰り返し行い，誤差を消去していく。

$$\tilde{K} \cdot \Delta \tilde{u} = \Delta F_r \tag{3.37}$$

ここで,

$\Delta \tilde{u}$　：不平衡力ΔＦｒに相当する構造物変位増分

このようにして求めた$\Delta\tilde{u}$を累積し，構造物変位を求める。

$$\Delta u = \Delta u + \sum(\Delta\tilde{u}) \tag{3.38}$$

＜不平衡力（ΔF_r）計算時バネ値＞

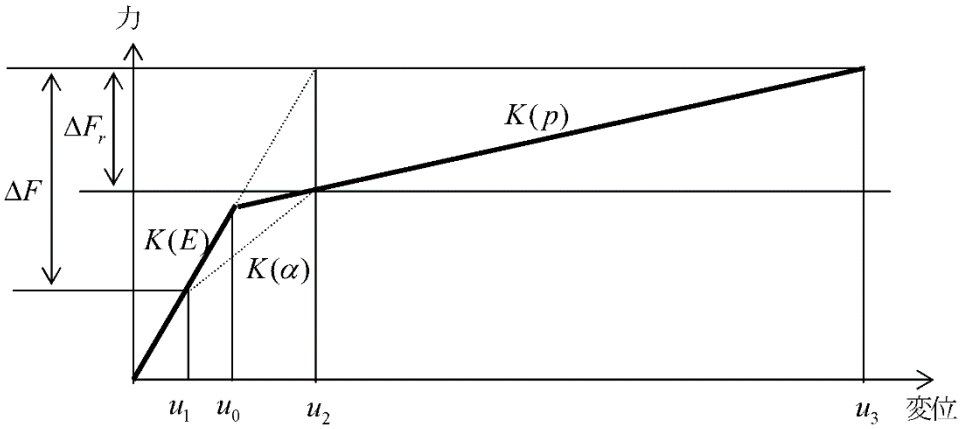


図3-9　力と変位の関係

式(3.36)で定義している$\tilde{K}$は，バネが変化した時の不平衡力(ΔF_r)を求めるための剛性である。

その時のバネ値K(α)を次のように定義する。

$$\alpha = \frac{u_0 - u_1}{u_2 - u_1} \tag{3.39}$$

$$K(\alpha) = \alpha \cdot K(E) + (1+\alpha) \cdot K(p) \tag{3.40}$$

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを以下に示す。

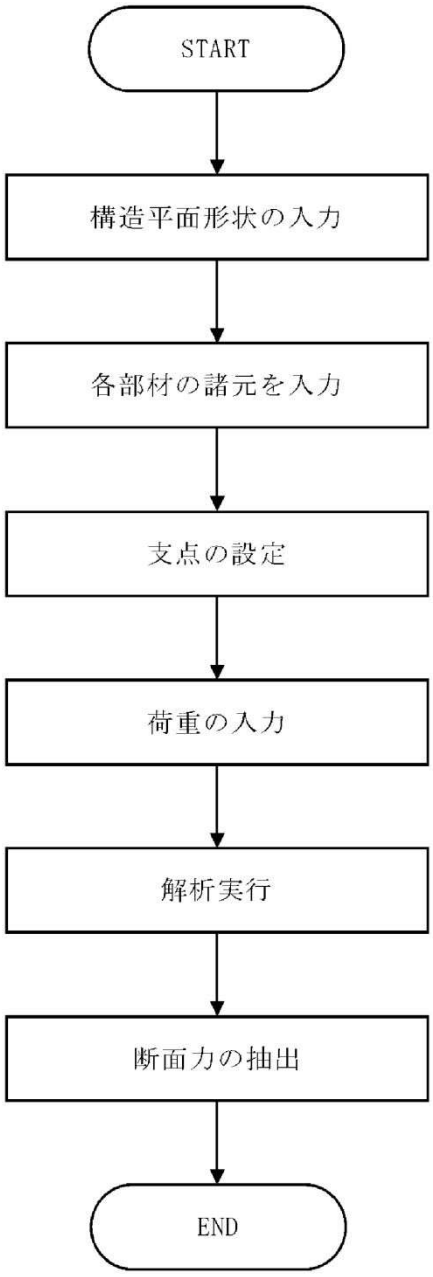


図3-10　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

本解析コードを今回の解析に用いるに当たり，検証として構造力学公式集（土木学会，1994）による理論解との比較を，また，妥当性確認として類似解析コードとの比較を実施した。その詳細な内容については以下のとおりとする。

3.5.1　検証（Verification）

単純はりを対象として，構造力学公式集に基づいた断面力及びたわみを算出し，FREMING との解析結果を比較することで検証を行った。その結果，構造力学公式集による理論値と本解析コードの解析結果は一致した。

(1)　単純はりの概要

L=10 m のスパンに設置した支点上に H 型鋼材（H-300×300×10×15）の単純はりを仮定する。作用荷重は，鉛直方向に w=10 kN/m の等分布荷重が載荷された状態を想定する。

なお，境界条件は，ピン支承及びローラー支承とする。

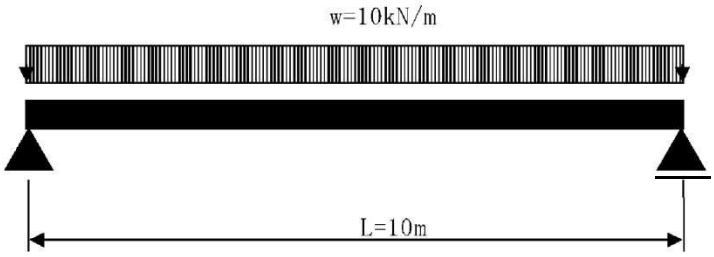


図3-11　検証に用いる単純はり

(2)　H型鋼材（H-300×300×10×15）の断面諸元

H 型鋼材(H-300×300×10×15)の断面諸元を以下に示す。

断面二次モーメント　　：I =0.000202（m^4）
ヤング係数　　：E =2.0×10^8（kN/m^2）

(3) 構造力学公式集に基づく理論解の算出

構造力学公式集に基づいて算出した，はりに作用する最大曲げモーメントM_{max}，最大せん断力Q_{max}，及び最大たわみδ_{max}を示す。

【最大曲げモーメント】

$$M_{\max}=\frac{wL^2}{8}=\frac{10\times10^2}{8}=125.0\,(\mathrm{kN\cdot m})$$

【最大せん断力】

$$Q_{\max}=\frac{wL}{2}=\frac{10\times10}{2}=50.0\,(\mathrm{kN})$$

【最大たわみ】

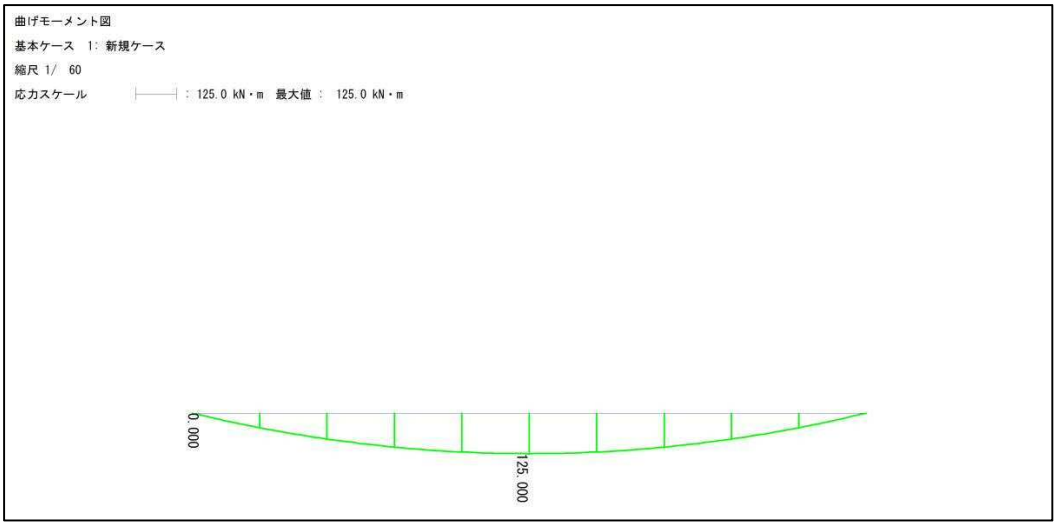
$$\delta_{\max}=\frac{5wL^4}{384EI}=\frac{5\times10\times10^4}{384\times2.0\times10^8\times0.00202}=0.003223(\mathrm{m})=3.223(\mathrm{cm})$$

(4) FREMINGによる解析結果

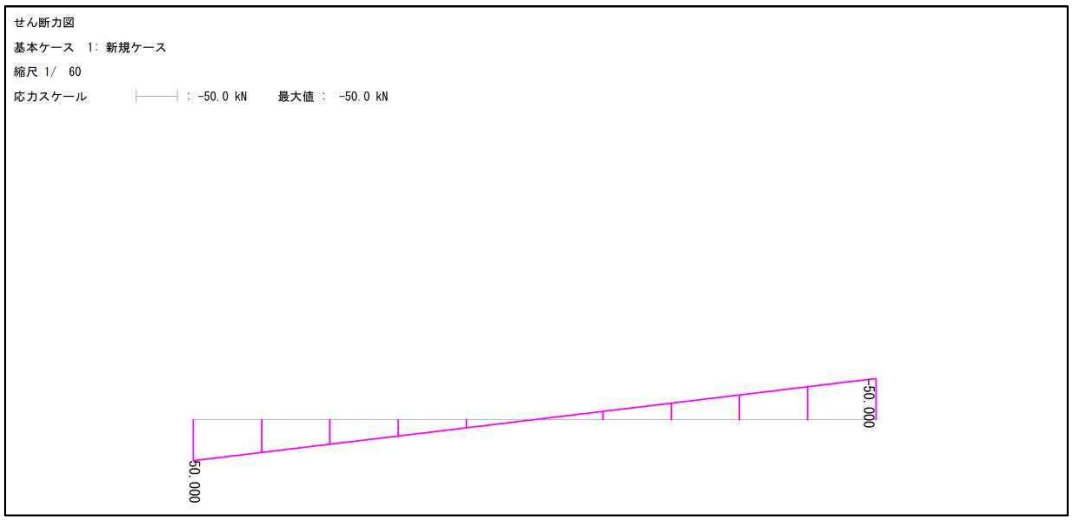
FREMING の解析結果を以下に示す。

表3-7 解析結果（FREMING）

構成節点	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	たわみ (cm)
1	0.0	50.0	0.000
2	45.0	40.0	1.012
3	80.0	30.0	1.914
4	105.0	20.0	2.621
5	120.0	10.0	3.069
6	125.0	0.0	3.223
7	120.0	-10.0	3.069
8	105.0	-20.0	2.621
9	80.0	-30.0	1.914
10	45.0	-40.0	1.012
11	0.0	-50.0	0.000
最大値	**125.0**	**50.0**	**3.223**



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

図3-12 断面力図

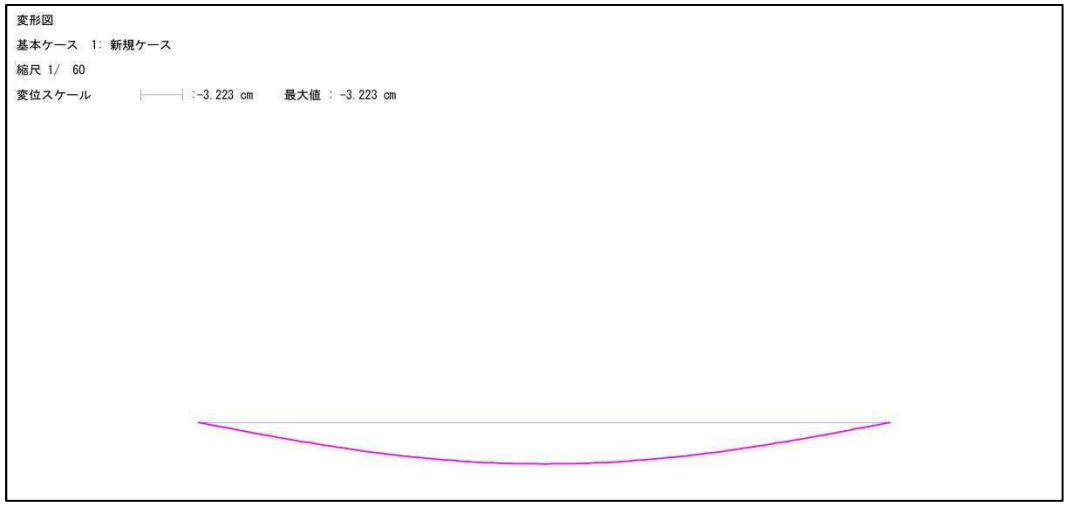
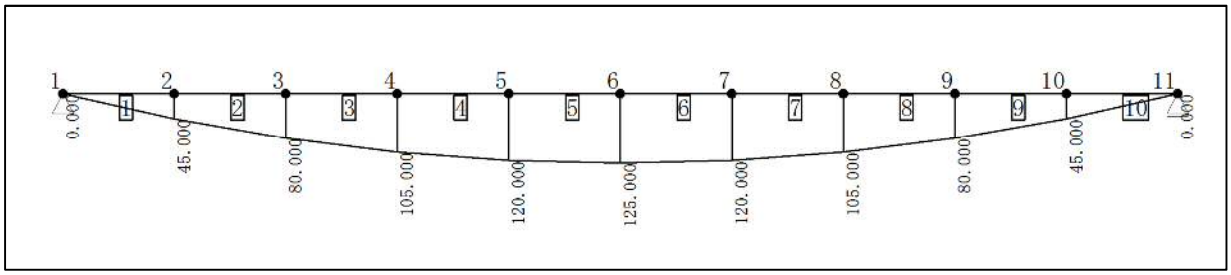


図3-13 変形図

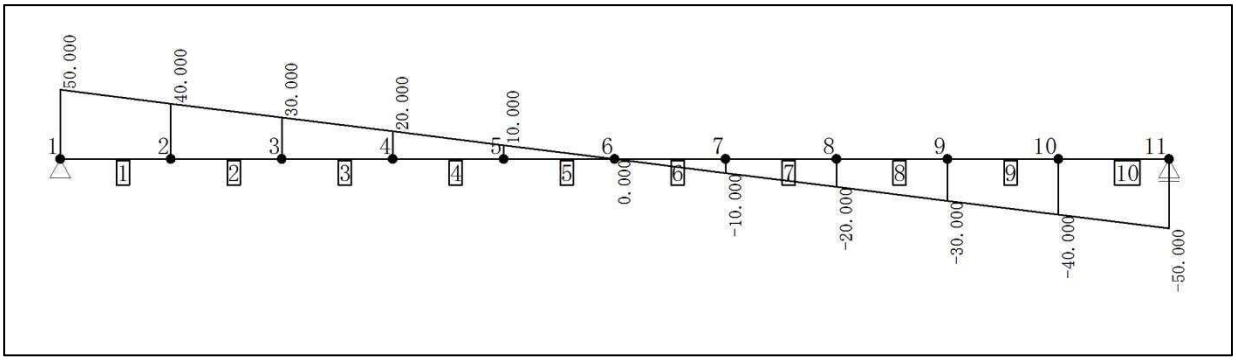
3.5.2　妥当性確認（Validation）

類似解析コードFRAME（面内）を用いた解析結果と比較し，本解析コードFREMINGの妥当性を確認する。

本解析コードFREMINGとFRAME（面内）の解析結果が一致することを確認した。



(a) 曲げモーメント



(b) せん断力

図3-14　断面力図

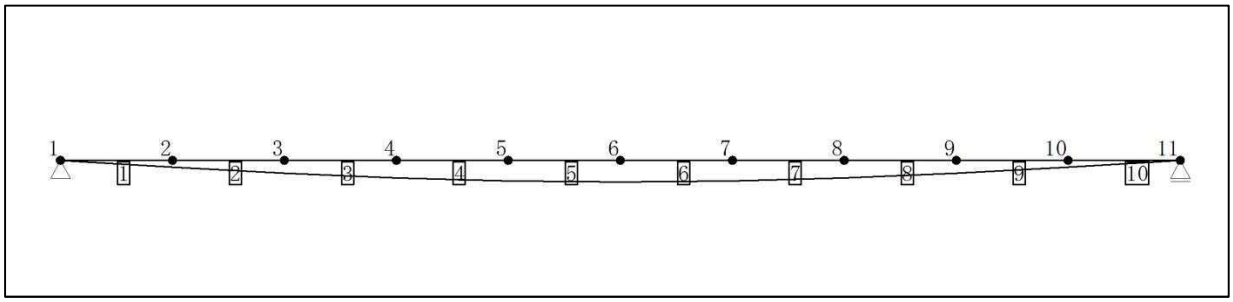


図3-15　変形図

表3-8　解析結果（FRAME（面内））

構成 節点	曲げ モーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	たわみ (cm)
1	0.0	50.0	0.000
2	45.0	40.0	1.012
3	80.0	30.0	1.914
4	105.0	20.0	2.621
5	120.0	10.0	3.069
6	125.0	0.0	3.223
7	120.0	-10.0	3.069
8	105.0	-20.0	2.621
9	80.0	-30.0	1.914
10	45.0	-40.0	1.012
11	0.0	-50.0	0.000
最大値	**125.0**	**50.0**	**3.223**

3.5.3　評価結果

表 3-9 に示すとおり，検証の結果，本解析コード FREMING の解析結果は，構造力学公式集による理論解，及び類似解析コード FRAME（面内）の解析結果と一致することを確認した。

以上より，本解析コード FREMING の解析結果は，応力度照査に用いる断面力において，構造力学公式集による計算結果と一致しており，類似解析コードとの整合性も良好である。したがって，本解析コードを構造物の断面力算定に適用することは妥当といえる。

表3-9　理論解と解析結果の比較

断面力	理論解 (構造力学公式集)	解析結果 (FREMING)	解析結果 (FRAME（面内）)
M_{max} (kN・m)	125.0	125.0	125.0
Q_{max} (kN)	50.0	50.0	50.0
δ_{max} (cm)	3.223	3.223	3.223

Ⅴ-5-42　計算機プログラム（解析コード）の概要
・波形処理プログラム k-WAVE for Windows

NT2 補③ Ⅴ-5-42 R0

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. 波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver.6.2.0の解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……6
3.5 検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）……7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）波形処理プログラム k-WAVE for Windowsについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補③ V-5-42 R0

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	6.2.0

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	波形処理プログラム k-WAVE for Windows
使用目的	設計用床応答曲線の作成
開発機関	（株）構造計画研究所
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver 6.2.0
コードの概要	波形処理プログラム k-WAVE for Windows（以下「本解析コード」という。）は，加速度時刻歴から床応答曲線を作成するプログラムであり，建物・構築物床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成することを目的とする。 一定の固有周期および減衰定数を有する1質点系の，与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算し，周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答曲線の包絡値を求め，また床応答曲線の拡幅を行う。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・別解析コード「Seismic Analysis System（ＳＡＳ）」により作成した設計用床応答曲線と本解析コードで作成した設計用床応答曲線とを比較し，一致していることを確認した。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であり，同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し，別解析コードSeismic Analysis System（ＳＡＳ）と本解析コードの結果を比較することで，妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際，入力とする時刻歴データの時間刻み幅，データの形式は，妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・10%拡幅，時刻歴波の時間刻み，固有周期計算間隔はＪＥＡＧ４６０１－1987に従っており，妥当性は確認されている。 ・今回の工事計画認可申請における使用用途及び使用方法に関して，上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.　波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver.6.2.0 の解析手法について

3.1　一般事項

本書は，建物・構築物の地震応答解析から算出される加速度時刻歴から床応答スペクトルを作成する解析コードである波形処理プログラム k-WAVE for Windows Ver6.2.0（以下「本解析コード」という。）の説明書である。

本解析コードは，一定の固有周期および減衰定数を有する 1 質点系の，与えられた加速度時刻歴に対する最大応答加速度を計算する。また，周期と減衰定数が同一の系で計算された複数の床応答スペクトルの包絡値を求め，拡幅した床応答曲線の作成を行う。

3.2　解析コードの特徴

本解析コードにおける 1 自由度系を用いた床応答スペクトルの作成は，ニガム法を用いることにより行う。

主な特徴を下記に示す。

・加速度時刻歴から周期及び減衰定数に応じた床応答スペクトルを作成する。
・複数の床応答スペクトルを包絡させた床応答スペクトルに対して拡幅した設計用床応答曲線を作成する。

3.3　解析手法

各床面での加速度時刻歴を入力とする1自由度系における応答について，減衰定数をパラメータとして以下ニガム法より算出する。

各質点における相対変位を x，固有円振動数を ω，減衰定数を h，地動の加速度時刻歴を $\ddot{y}(t)$ としたとき，系の運動方程式は，

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{y}(t) \qquad (1)式$$

と表される。 t は一定時間間隔 Δt ごとに与えられて， $\ddot{y}_i$ と $\ddot{y}_{i+1}$ の間を直線によって補間し，t_i を原点とするこの区間 t_i～t_{i+1} 内の局部的な時間を τ，$\Delta\ddot{y} = \ddot{y}_{i+1} - \ddot{y}_i$ とすれば，

$$\ddot{y}(t) = \frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t}\tau + \ddot{y}_i \qquad 0 \le \tau \le \Delta t$$

と表される。(1)式は区間的に

$$\ddot{x}(\tau) + 2h\omega\dot{x}(\tau) + \omega^2 x(\tau) = -\frac{\Delta\ddot{y}}{\Delta t}\tau - \ddot{y}_i \qquad 0 \le \tau \le \Delta t$$

となる。この非同次微分方程式を解いて，区間のはじめ時刻 t_i における初期条件

$$\tau = 0 : x = x_i, \quad \dot{x} = \dot{x}_i$$

を与えれば，区間の終わり $\tau=\Delta t$（時刻 $t_{i+1}=t_i+\Delta t$ ）における相対変位応答および相対速度応答は，次のような形で求まる。

$$\left.\begin{aligned} x_{i+1} &= A_{11}x_i + A_{12}\dot{x}_i + B_{11}\ddot{y}_i + B_{12}\ddot{y}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= A_{21}x_i + A_{22}\dot{x}_i + B_{21}\ddot{y}_i + B_{22}\ddot{y}_{i+1} \end{aligned}\right\} \quad (2)式$$

ここで， A ， B は， ω， h ， Δt が定まれば一意に定まる係数である。x_{i+1} ， $\dot{x}_{i+1}$ が定まれば，絶対加速度応答は(1)式より

$$(\ddot{x}+\ddot{y})_{i+1} = -(2h\omega\dot{x}_{i+1} + \omega^2 x_{i+1}) \qquad (3)式$$

によって求められる。したがって， $t=0$ における応答の初期値

$$x_1 = 0$$
$$\dot{x}_1 = -\ddot{y}_1\Delta t$$
$$(\ddot{x}+\ddot{y})_1 = 2h\omega\ddot{y}_1\Delta t$$

を与えれば，後は(2)式と(3)式によって，応答値が算出される。

3.4　解析フローチャート

本解析コードを用いた解析フローチャートを図 1 に示す。

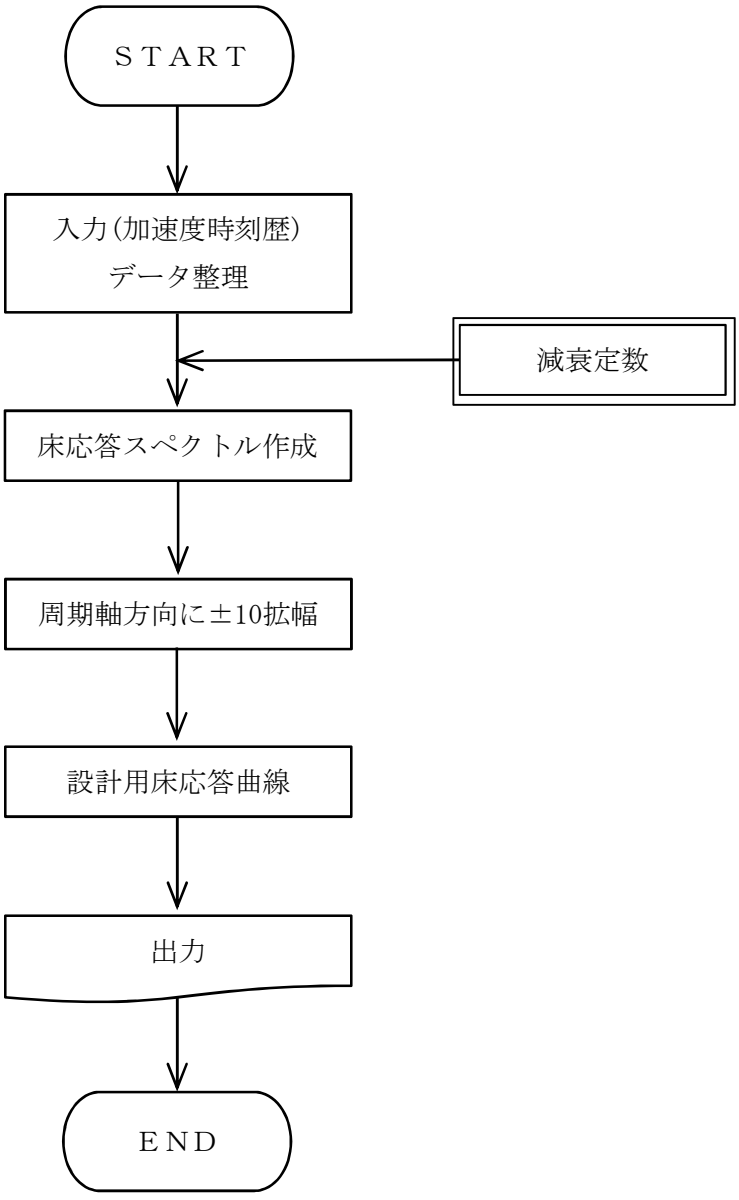


図1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）

3.5.1　検証（Verification）

(1) 検証の概要

別解析コードにて作成した床応答スペクトルを包絡,拡幅した設計用床応答曲線(検証用データ)と本解析コードで同様に作成した設計用床応答曲線（k-WAVEデータ）の加速度（震度）を比較することで，本解析コードの検証を行った。

表１　検証内容における比較項目

検証内容	比較項目
設計用床応答曲線	応答加速度（震度）

(2) 検証条件

東海第二発電所原子炉建屋地震応答解析結果から得られた基準地震動Ｓｓに対する加速度時刻歴を用いた。検証に用いた加速度時刻歴は，水平方向としてＮＳ方向及びＥＷ方向の質点1（EL.63.65m），質点6（EL.29.00m）及び質点11（EL.－4.00m）の応答を用いた。また，設計用床応答曲線の作成するための減衰定数は,機器･配管系の耐震計算に適用される0.5%,1.0%,2.0%及び5.0%とした。図2に水平方向の原子炉建屋地震応答解析モデルを示す。

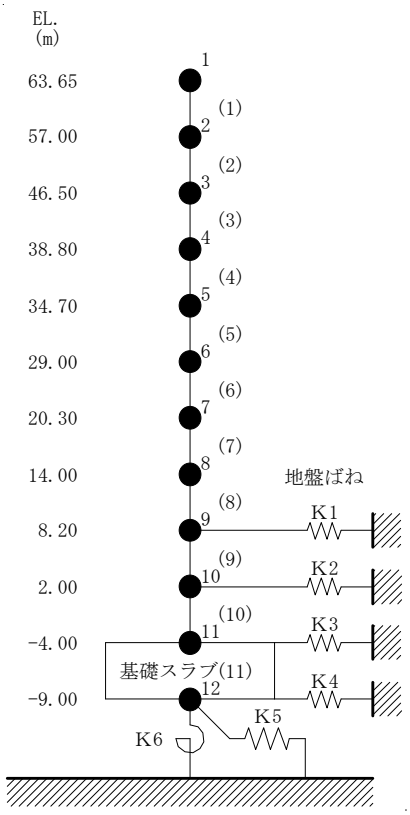


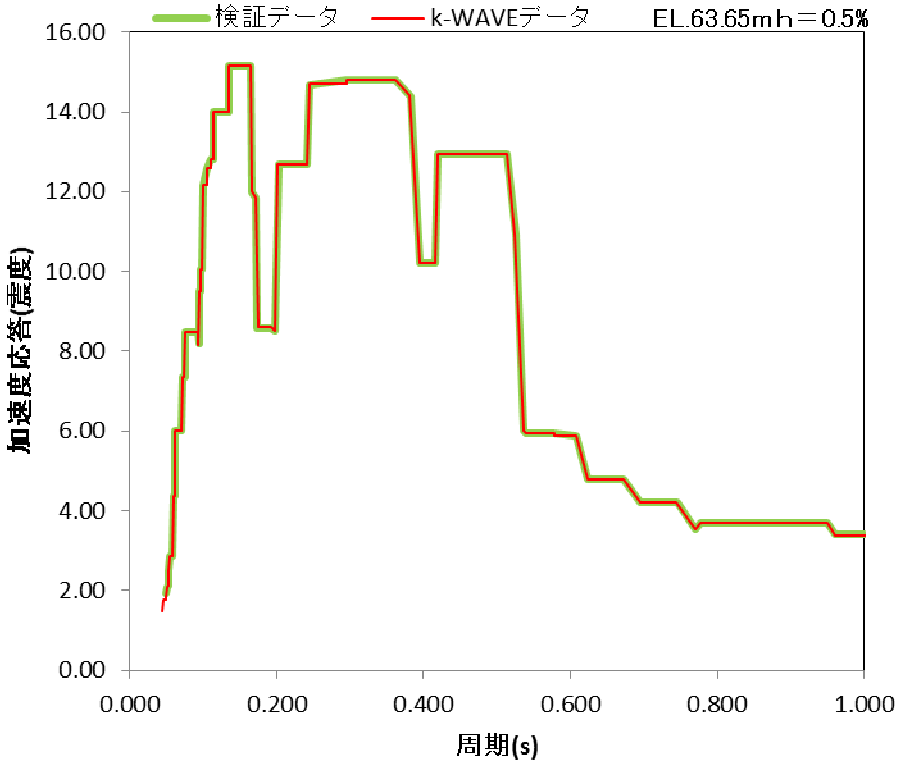
図2　原子炉建屋地震応答解析モデル（水平方向）

(3) 解析結果の比較

各検証条件のもと作成した設計用床応答曲線について，検証用データとk-WAVEデータとを比較した結果を図3～図5に示す

(5) 検証結果

前項に示す設計用床応答曲線（固有周期と応答加速度（震度））の比較結果のとおり，両者は一致しており，本解析コードを用いて得られた計算結果の妥当性を確認した。



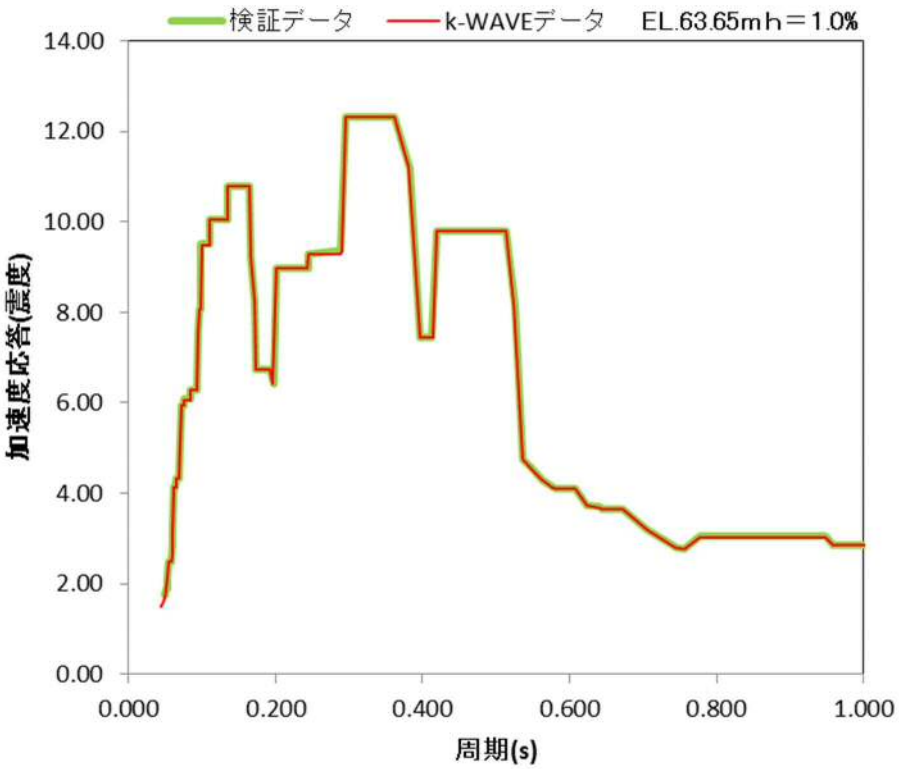


図 3(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.63.65m)

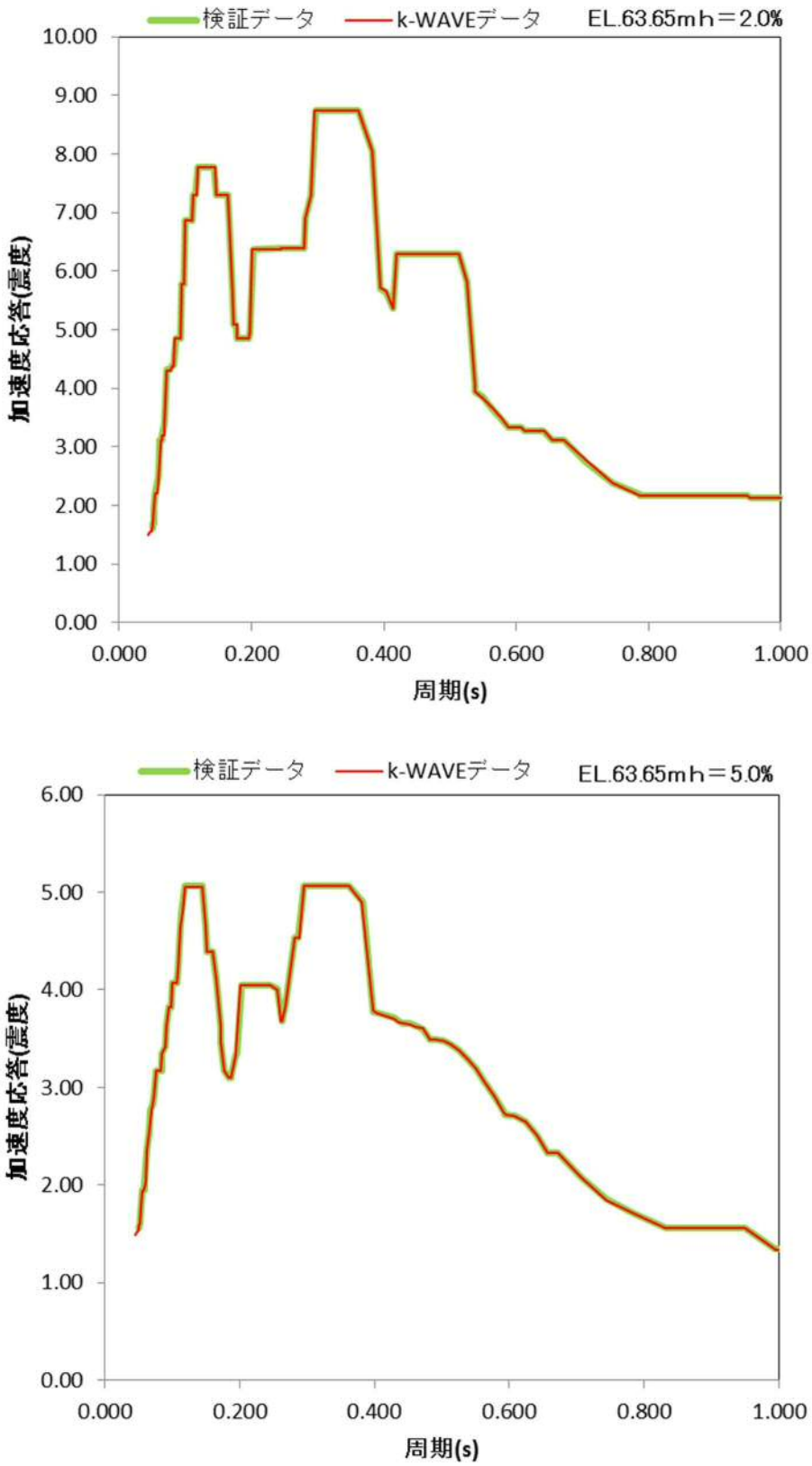
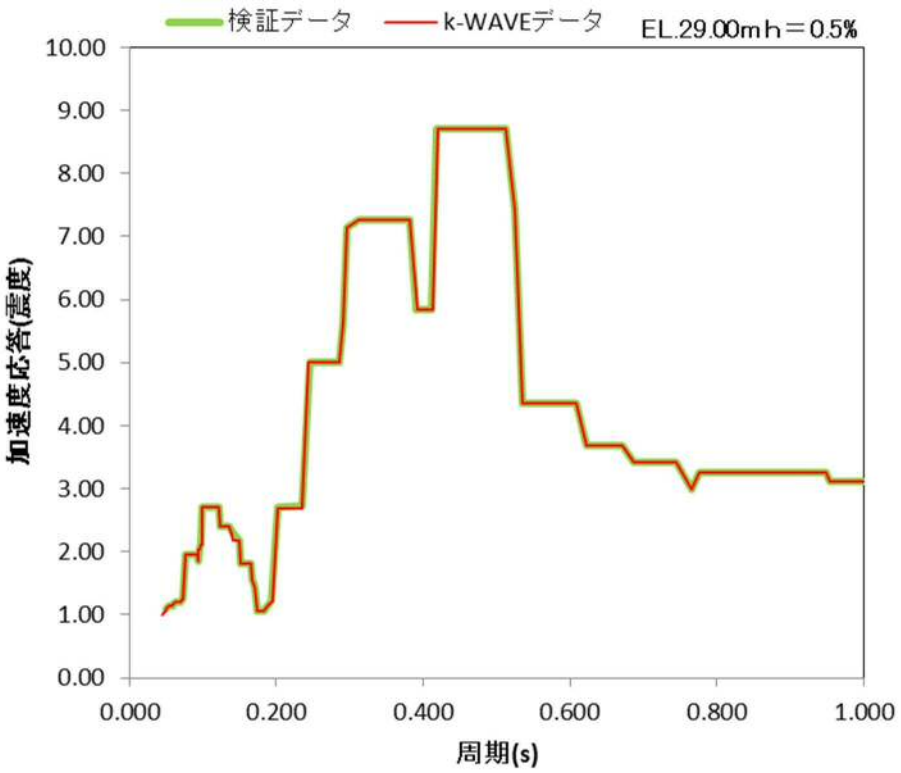


図 3(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.63.65m)



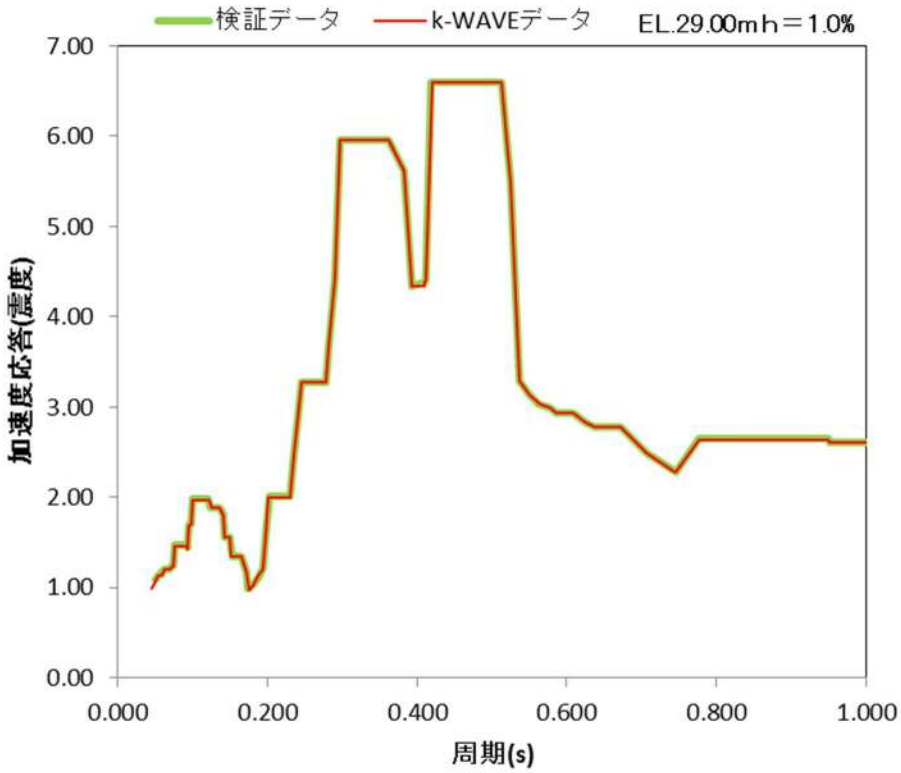


図 4(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.29.00m)

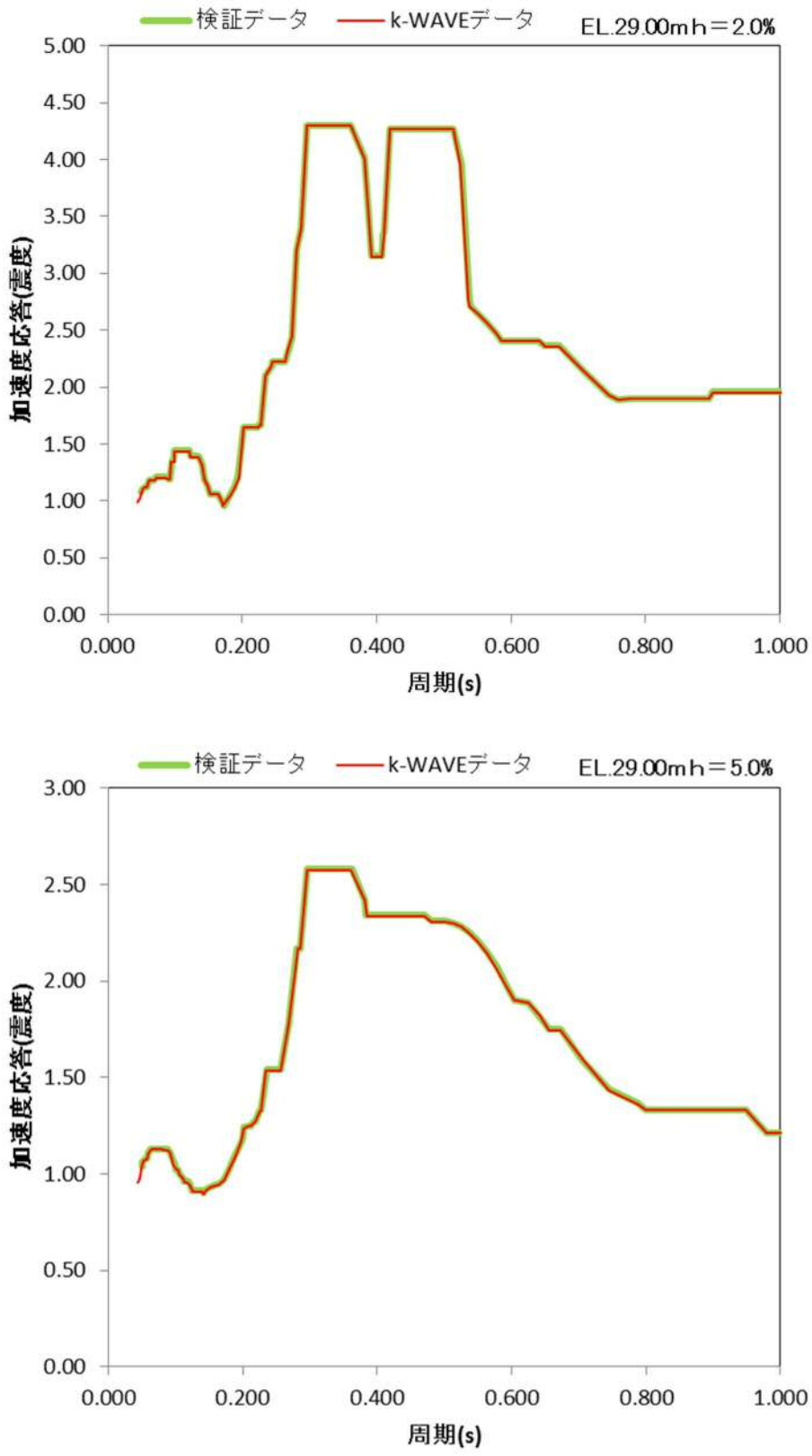


図 4(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.29.00m)

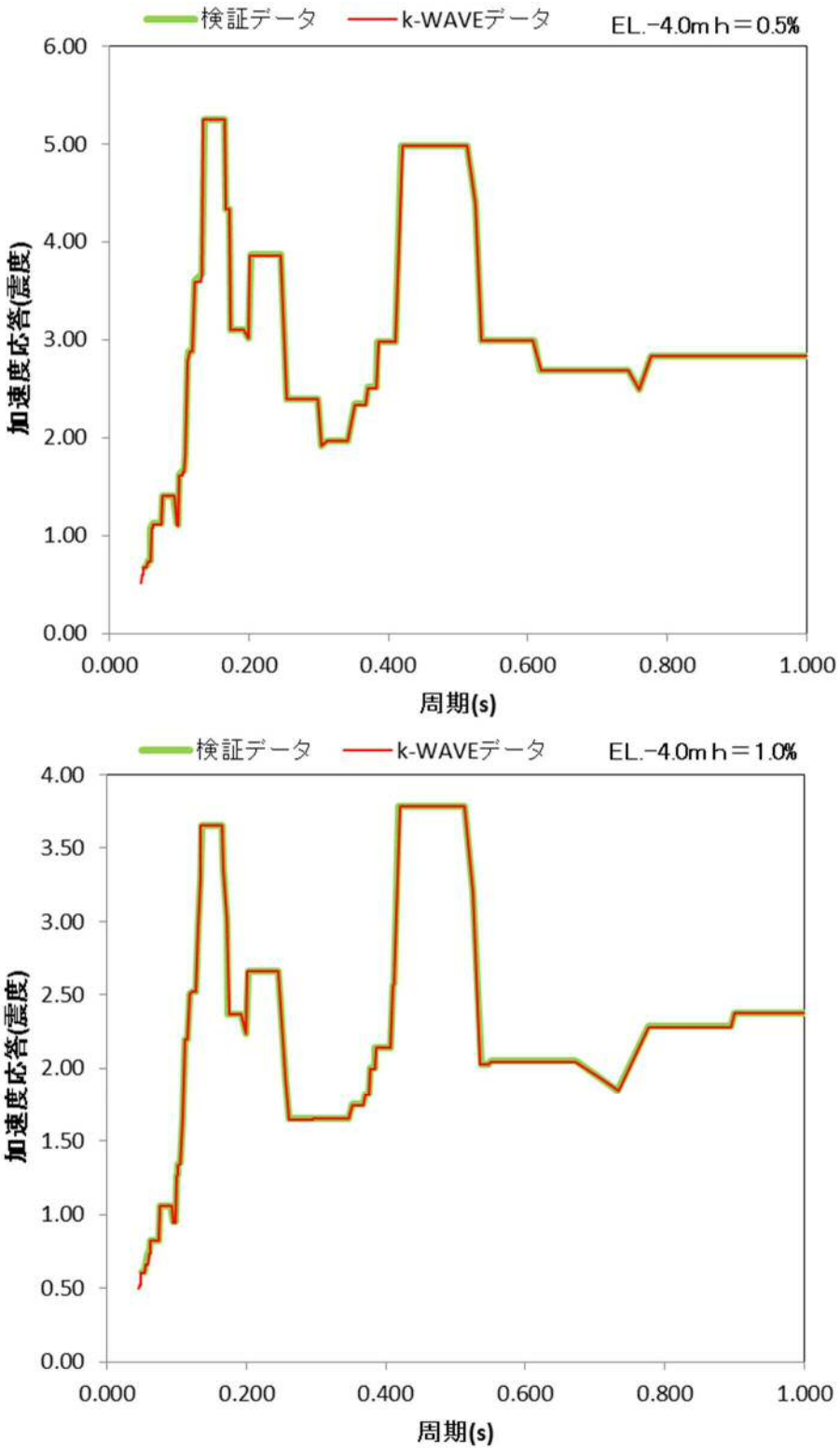


図 5(1) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.-4.00m)

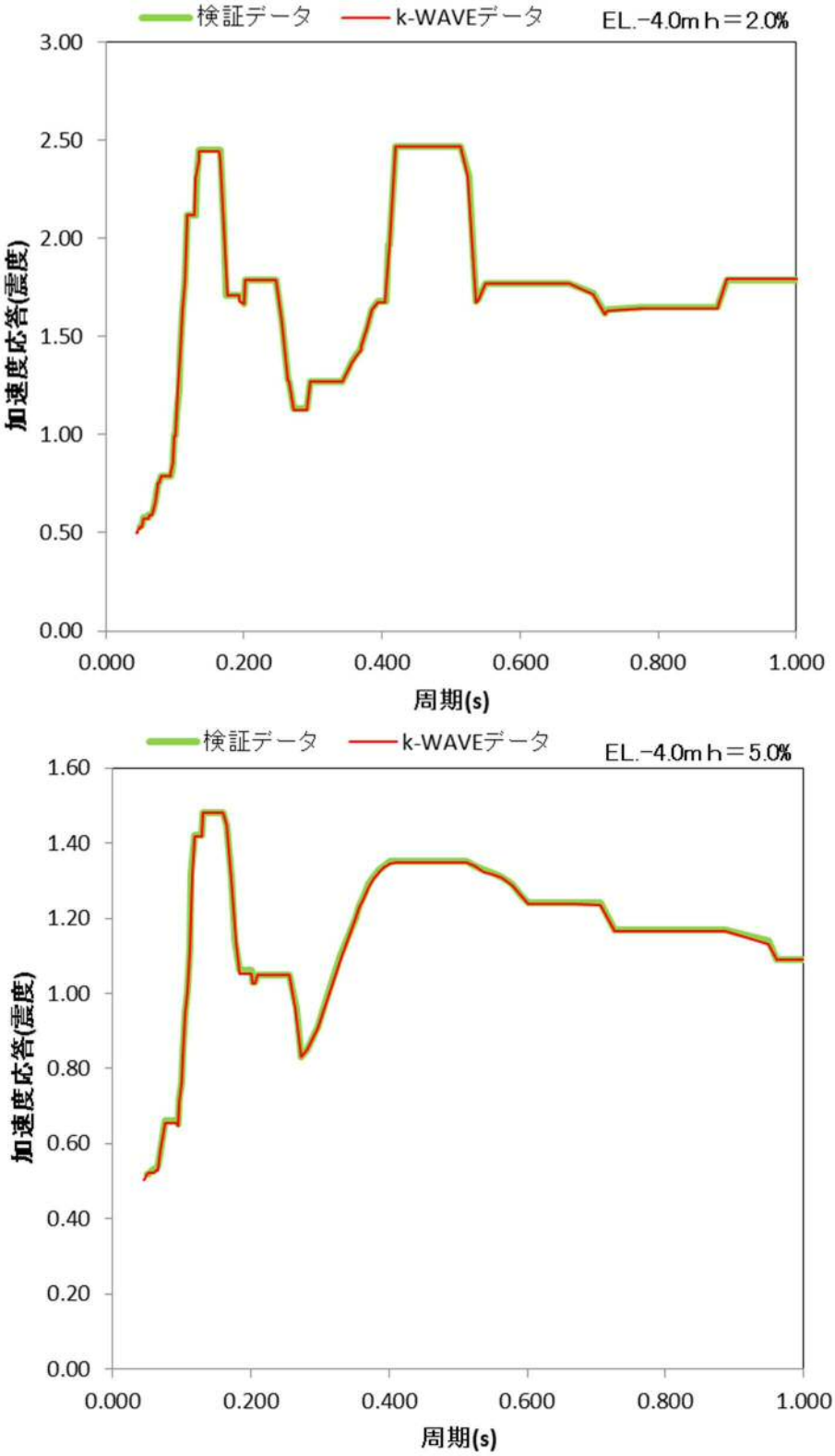


図 5(2) 検証用データと k-WAVE データとを比較した結果(EL.-4.00m)

3.5.2　妥当性確認（Validation）

本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。

・今回の工事計画で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であるため，同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し，別解析コードSeismic Analysis System（ＳＡＳ）と本解析コードの結果を比較することで，妥当性を確認している。

・設計用床応答曲線を作成する際，入力とする時刻歴データの時間刻み幅，データの形式は，上述の妥当性を確認している範囲内での使用である。

・10%拡幅，時刻歴波の時間刻み，固有周期計算間隔はＪＥＡＧ４６０１－1987に従っており，妥当性に問題はない。

3.5.3　評価結果

3.5.1及び3.5.2より，本解析コードを使用目的に示す設計用床応答曲線の作成に用いることは妥当である。

Ⅴ-5-43　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＲＣ断面計算

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）RC断面計算について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-2-7	原子炉建屋地下排水設備排水シャフトの耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-13	緊急時対策所用発電機燃料油貯蔵タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-21	格納容器圧力逃がし装置用配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-25	可搬型設備用軽油タンク基礎の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-31	常設低圧代替注水系配管カルバートの耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-35	緊急用海水ポンプピットの耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-2-39-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-2-11-2-11	海水ポンプエリア防護対策施設の耐震性についての計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添1-1-10-1	建屋及び構造物の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-1-2-2	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁（放水路エリア））の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 8.0.5
Ⅴ-3-別添3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 8.0.5

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	RC断面計算
使用目的	鉄筋コンクリートの応力度計算
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	1998年
使用したバージョン	Ver. 8.0.5
コードの概要	RC断面計算は，様々な断面形状を持つ鉄筋コンクリート断面に対する応力度計算用に開発された解析コードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，鉄筋コンクリート部材の応力解析で使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下の通りである。 ・本解析コードを用いた応力度解析解と，弾性理論に基づく理論式から求めた理論解を比較し，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・今回の解析に本解析コードを使用することの妥当性は，前述の検証の中で確認している。 ・九州電力株式会社の「玄海原子力発電所第３号機」において，海水管ダクト竪坑，海水戻り管竪坑，大容量空冷式発電機エリア基礎の鉄筋コンクリートの応力解析（断面照査）に本コード（Ver.5.02.04）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョン変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。 ・本工事計画における構造に適用する要素，応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ｖ-5-44　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＲＥＳＰ－Ｔ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3
2.1 RESP-T Ver. 5.1.3.4（耐震・耐津波関連） ····· 4
2.2 RESP-T Ver. 5.1.2.2（建物・構築物関連） ····· 4
3. 解析コードの検証(RESP-T Ver.5.1.3.4) ····· 5
3.1 検証方法 ····· 5
3.2 諸元 ····· 5
3.3 結果比較 ····· 11
4. 解析コードの検証(RESP-T Ver.5.1.2.2) ····· 13
4.1 RESP-T の解析手法について ····· 13

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）RESP-T について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-37	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 5.1.3.4
Ⅴ-3-別添 3-2-1-3	防潮堤（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）の強度計算書	Ver. 5.1.3.4
Ⅴ-3-別添 3-2-1-4	防潮扉の強度計算書	Ver. 5.1.3.4
Ⅴ-3-別添 3-2-3	構内排水路逆流防止設備の強度計算書	Ver. 5.1.3.4
Ⅴ-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	Ver. 5.1.2.2

2. 解析コードの概要

2.1 RESP-T Ver. 5.1.3.4（耐震・耐津波関連）

コード名 / 項目	RESP-T
使用目的	２次元はりモデルによる静的解析
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1989 年
使用したバージョン	Ver. 5.1.3.4
コードの概要	RESP-T（以下「本解析コード」という。）は，（株）構造計画研究所によって開発され保守されている建築・土木構造物等の構造解析用の汎用解析コードである。 建屋，機器及び配管を含む３次元構造物を，はり要素，配管要素，平面要素（面内要素）及びバネ要素に置換して，静的・動的非線形解析（応答解析を含む）を行うものである。なお，本解析コードは，汎用解析コードである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	RESP-T Ver. 5.1.3.4 は，鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の２次元フレームモデルを対象とした静的解析に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードによる解析解と，既工事計画において実績のある別コード（Femap with NX Nastran）による解析解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードは，建築，土木分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，本工事計画で使用する２次元はり要素による静的フレーム解析が本解析コードで適用できることを確認している。 ・本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが，開発機関から提示された範囲内であることを確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，使用する機能に変更はないことを確認している。

2.2　RESP-T　 Ver. 5.1.2.2（建物・構築物関連）

コード名 / 項目	RESP-T
使用目的	固有値解析及び弾塑性応答解析
開発機関	株式会社構造計画研究所
開発時期	1989 年
使用したバージョン	Ver.5.1.2.2
コードの概要	RESP-T（以下「本解析コード」という。）は,建築・土木構造物を対象とした静的解析及び時刻歴による地震応答解析を行う解析用プログラムである。建物の諸定数（せん断ばね，減衰定数，層高さ，質量等）を入力として,静的解析及びニューマークβ法を用いた地震応答解析を行うことができる。解析結果としては，加速度，変位，せん断力，曲げモーメント等が求められる。なお，本解析コードは，汎用解析コードである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	RESP-T は，サービス建屋の水平方向について，基準地震動Ｓ$_s$に対する建屋の応答を評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・既工事計画において実績のある別コード（TDAPⅢ）による解析結果と一致することを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容のとおり，弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから,解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。 ・地震応答解析に対して,川内原子力発電所１号機第１回工事計画認可申請書の 3-16-1（原子炉格納施設の地震応答解析）において，動的解析に使用された実績がある TDAPⅢを用いた解析解と，本コードによる解析解を比較した結果，双方の解が一致していることを確認した。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素,応力解析及び応答解析の使用目的に対し,使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3. 解析コードの検証(RESP-T Ver.5.1.3.4)

3.1 検証方法

RESP-T Ver 5.1.2 と Femap with NX Nastran Ver10.2 で２次元静的フレーム解析の結果を比較する。

3.2 諸元

3.2.1 検証モデル

２次元フレーム解析モデルを図 3-1 に示す。

モデル化の条件：

・T.P.+ 0.0 = EL.+ 0.0

・はり要素(線形)及び地盤バネ(非線形)を用いる。

・被覆コンクリートは剛性を考慮せず，荷重のみを節点荷重として入力する。

・鋼管内は地表面より上は空洞，地表面より下は周辺地盤が詰まっているものとし，その剛性は考慮しない。

・杭間は 2.3m とする。

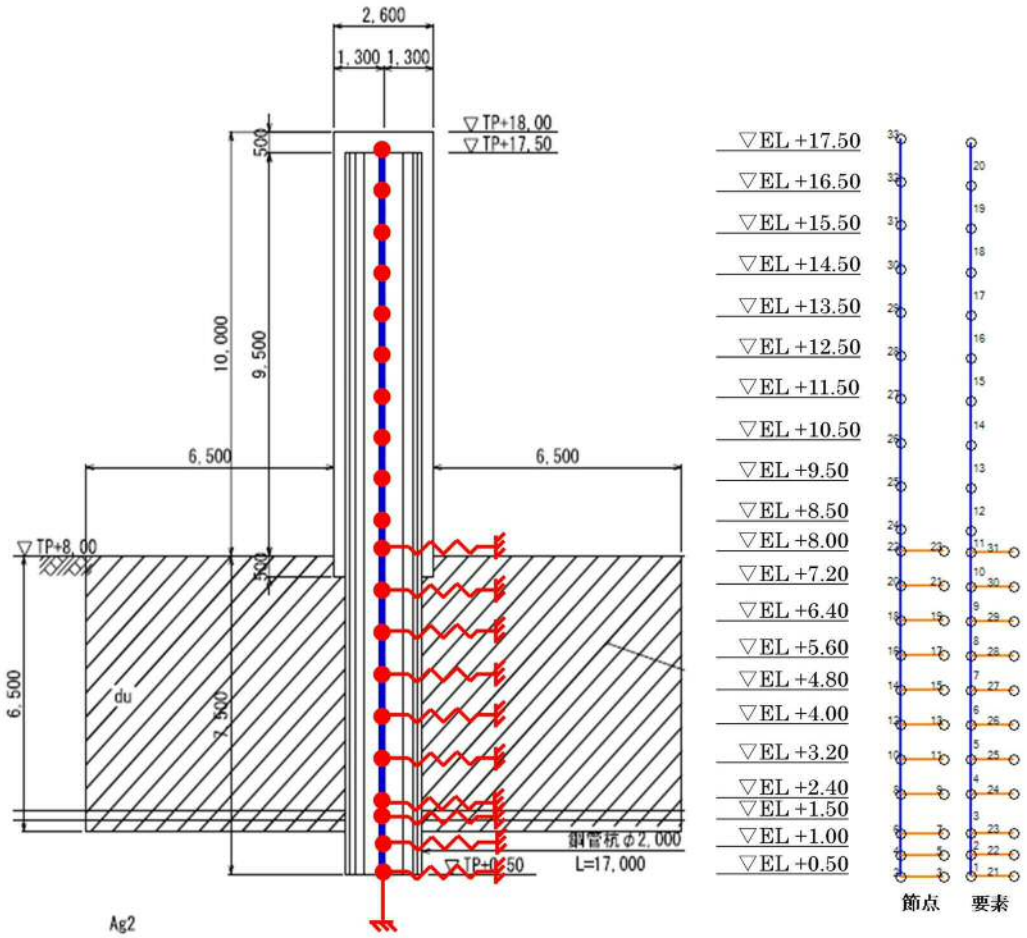


図 3-1　２次元フレーム解析モデル

3.2.2　検証ケース

検証ケースを表 3-1 に示す。

表 3-1　検証ケース

ケース	長期荷重		地震		津波	風	漂流物	動水圧	その他	地盤バネの評価		備考
	死荷重	積雪・降灰	本震	余震						算定法	上限値	
津波時	○	○			○		○		○	静的地盤バネ	ピーク強度より算定	津波遡上高さ T.P.+18.0m

3.2.3　入力荷重

(1)　長期荷重

a.　死荷重

死荷重は被覆コンクリート，鋼管及び杭体内の土の重量とし，各節点の節点荷重とする。

b.　積雪

積雪は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし，天端の節点の節点荷重とする。

c.　降灰

降灰は被覆コンクリートの水平面のみ作用するものとし，天端の節点の節点荷重とする。

長期荷重の節点荷重を表 3-2 に示す。

表 3-2　長期荷重の節点荷重

T.P. (m)	支配 長さ (m)	天端コン 節点荷重 (kN)	被覆コン 節点荷重 (kN)	鋼管 節点 荷重 (kN)	地盤 改良層 荷重 (kN)	Ag2 層 荷重 (kN)	積雪 節点 荷重 (kN)	降灰 節点 荷重 (kN)
17.50	0.50	-73.26	-34.77	-5.97	0.00	0.00	-3.83	-35.19
16.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
15.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
14.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
13.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
12.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
11.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
10.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
9.50	1.00	0.00	-69.54	-11.94	0.00	0.00	0.00	0.00
8.50	0.75	0.00	-52.16	-8.96	0.00	0.00	0.00	0.00
8.00	0.65	0.00	-52.16	-7.76	-23.89	0.00	0.00	0.00
7.20	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
6.40	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
5.60	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
4.80	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
4.00	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
3.20	0.80	0.00	0.00	-9.56	-47.78	0.00	0.00	0.00
2.40	0.85	0.00	0.00	-10.15	-50.77	0.00	0.00	0.00
1.50	0.70	0.00	0.00	-8.36	-26.88	-14.72	0.00	0.00
1.00	0.50	0.00	0.00	-8.96	0.00	-44.15	0.00	0.00
0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00

(2) 短期荷重

a. 設計波圧

各節点に作用する波圧は以下の計算により算出する。堤体外側から作用するものとする。

b. 漂流物

漂流物による荷重は道路橋示方書の式により算出する。堤体に対して最も厳しい評価とするため，津波が堤体高さまで遡上しているとし，上端の節点のみに漂流物の全荷重を被覆コンクリート面に垂直に作用させる。方向は堤外側からとする。

津波の節点荷重を表 3-3 に示す。

表 3-3　津波の節点荷重

T.P. (m)	支配長さ (m)	設計波圧 節点荷重 (kN)	漂流物 節点荷重 (kN)
17.50	0.50	127.78	180.00
16.50	1.00	151.01	0.00
15.50	1.00	174.24	0.00
14.50	1.00	197.47	0.00
13.50	1.00	220.70	0.00
12.50	1.00	243.94	0.00
11.50	1.00	267.17	0.00
10.50	1.00	290.40	0.00
9.50	1.00	313.63	0.00
8.50	0.75	250.47	0.00
8.00	0.65	86.39	0.00
7.20	0.80	0.00	0.00
6.40	0.80	0.00	0.00
5.60	0.80	0.00	0.00
4.80	0.80	0.00	0.00
4.00	0.80	0.00	0.00
3.20	0.80	0.00	0.00
2.40	0.85	0.00	0.00
1.50	0.70	0.00	0.00
1.00	0.50	0.00	0.00
0.50	0.25	0.00	0.00

3.2.4　地盤バネ

２次元静的フレーム解析に用いる地盤バネは「道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造物」の「9.6.2 地盤力反力係数」及び「12.10.4 断面力，杭頭反力及び変位の計算(2)の 2)」に従い水平方向地盤反力係数を求め，さらに「11.5.2 地盤反力の上限値」と同じく「12.10.4 断面力，杭頭反力及び変位の計算(2)の 2)」により上限値を設定するバイリニア型とする。

地盤バネを表 3-4，上限値を表 3-5 に示す。

表 3-4　地盤バネ

T.P. (m)	H (m)	E_0 (kN/m^2)	αE_0 (kN/m^2)	k_{H0} (kN/m^2)	$1/\beta$ (m)	k_H (kN/m^3)	k_h (kN/m)
8.00	0.40	300000	600000	2000000	2.882	420338	336271
7.20	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
6.40	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
5.60	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
4.80	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
4.00	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
3.20	0.80	300000	600000	2000000	2.882	420338	672541
2.40	0.85	300000	600000	2000000	2.882	420338	714575
1.50	0.70	67200	537600	1792000	2.971	372370	564490
1.00	0.50	67200	537600	1792000	2.971	372370	372370
0.50	0.25	－	－	－	－	－	186185

表 3-5　上限値

T.P. (m)	支配 長さ H (m)	粘着力 C (kN/m^2)	内部 摩擦角 ϕ (°)	地表面と 水平面の 角度 α (°)	杭と土 の 摩擦角 δE (°)	有効 上載圧 q (kN/m^2)	受動 土圧 係数 K_{EP}	水平地盤 反力度 Pu (kN/m^2)	係数 $\eta_p \alpha_p$	上限値 Ph (kN)
8.00	0.40	500.0	0.0	0.00	0.00	0.00	1.00	1016.00	1.50	1219.2
7.20	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	16.00	1.00	1032.00	1.50	2457.6
6.40	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	32.00	1.00	1048.00	1.50	2496.0
5.60	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	48.00	1.00	1064.00	1.50	2534.4
4.80	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	64.00	1.00	1080.00	1.50	2572.8
4.00	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	80.00	1.00	1096.00	1.50	2611.2
3.20	0.80	500.0	0.0	0.00	0.00	96.00	1.00	1112.00	1.50	2649.6
2.40	0.85	500.0	0.0	0.00	0.00	112.00	1.00	1130.00	1.50	2859.9
1.50	0.70	81.0	36.7	0.00	-6.12	130.00	4.96	1055.32	1.15	2317.0
1.00	0.50	81.0	36.7	0.00	-6.12	134.95	4.96	1079.88	1.15	1227.7
0.50	0.25	81.0	36.7	0.00	-6.12	139.89	4.96	1104.44	1.15	620.9

3.2.5　鋼管杭の物性

鋼管杭の物性を表 3-6 に示す。

表 3-6　鋼管杭の物性

【ϕ=2000mm, t=25mm】

管種 SKK490*1	外形 ϕ (mm)	長さ L (mm)	厚さ t (mm)	単位質量 w(kg/m)	ヤング係数*3 E(N/mm^2)
	2,000	17,000	25	1218	2.0×10^5
	断面積 A (m^2)	断面係数 Z (m^3)	断面 2 次ﾓｰﾒﾝﾄ I (m^4)	有効せん断 断面積 As*2 (m^2)	ﾎﾟｱｿﾝ比*3 ν
	$14,884\times10^{-5}$	726×10^{-4}	725×10^{-4}	$14,884\times10^{-5}$	0.30

注記　*1：JFE スチール株式会社 「JFE の鋼管杭」より

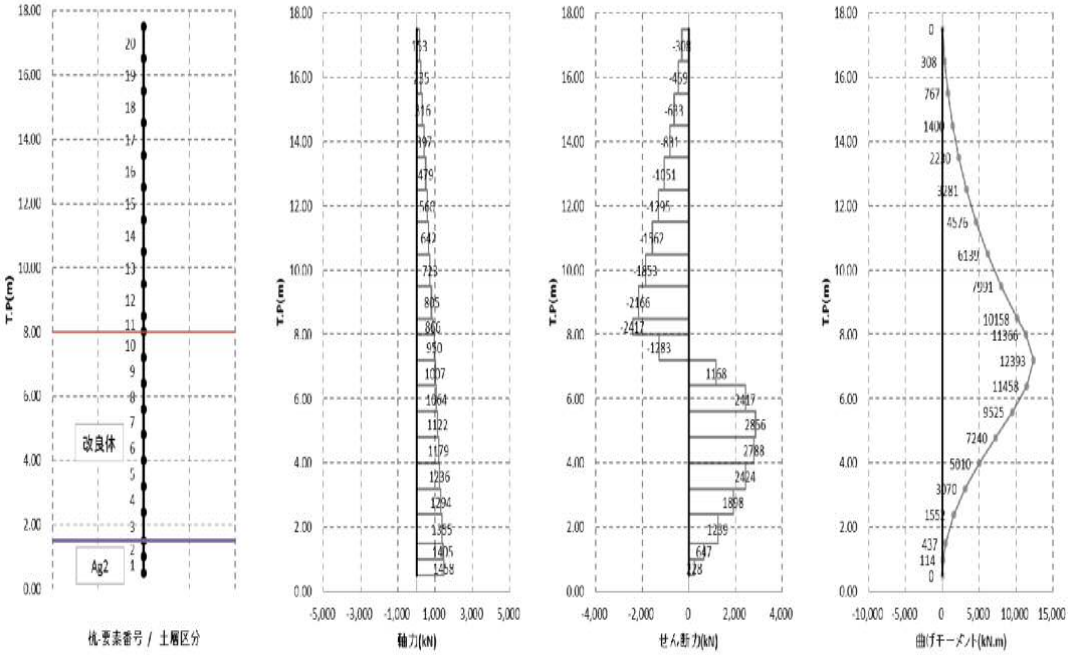
*2：有効せん断断面積比は 1.0 とした。

*3：「道路橋示方書・同解説 Ⅰ共通編」「3.3 設計計算に用いる物理定数」(P.86)より

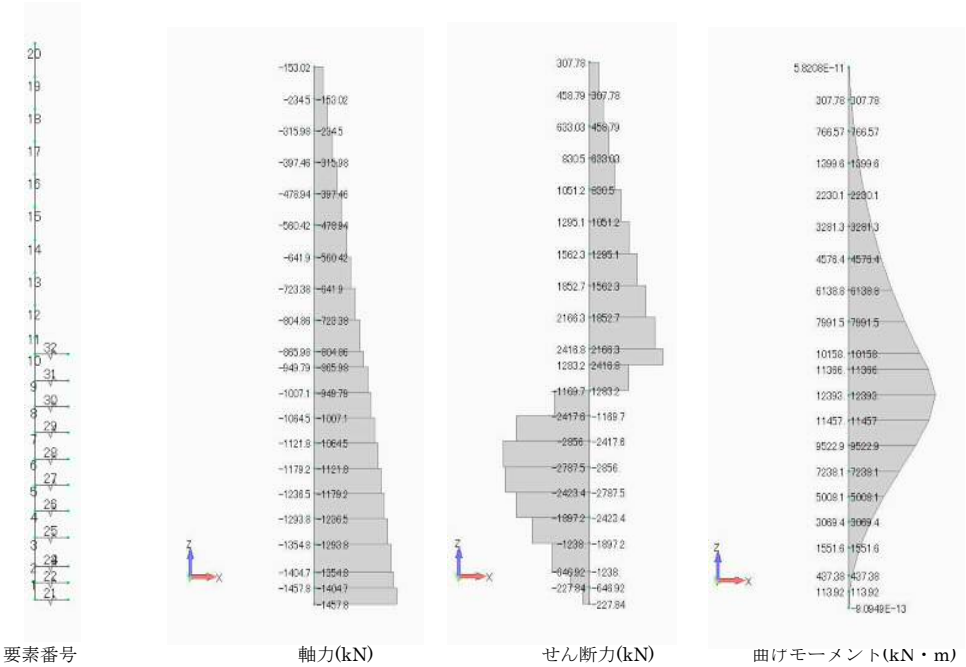
3.3　結果比較

3.3.1　断面力

断面力図を図 3-2，断面力の比較を表 3-7 に示す。



(1)　RESP-T



(2)　Femap with NX Nastran

図 3-2　断面力図

表 3-7　断面力の比較

要素番号	軸力(kN)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	1457.82	1457.82	0.00%
2	1404.71	1404.71	0.00%
3	1354.75	1354.75	0.00%
4	1293.83	1293.83	0.00%
5	1236.49	1236.49	0.00%
6	1179.15	1179.15	0.00%
7	1121.81	1121.81	0.00%
8	1064.47	1064.47	0.00%
9	1007.13	1007.13	0.00%
10	949.79	949.79	0.00%
11	865.98	865.98	0.00%
12	804.86	804.86	0.00%
13	723.38	723.38	0.00%
14	641.90	641.90	0.00%
15	560.42	560.42	0.00%
16	478.94	478.94	0.00%
17	397.46	397.46	0.00%
18	315.98	315.98	0.00%
19	234.50	234.50	0.00%
20	153.02	153.02	0.00%

要素番号	せん断力(kN)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	227.64	227.84	-0.09%
2	647.35	646.92	0.07%
3	1238.54	1238.04	0.04%
4	1897.66	1897.23	0.02%
5	2424.01	2423.40	0.03%
6	2787.84	2787.53	0.01%
7	2856.09	2856.02	0.00%
8	2416.78	2417.55	-0.03%
9	1168.30	1169.68	-0.12%
10	-1283.16	-1283.16	0.00%
11	-2416.81	-2416.81	0.00%
12	-2166.34	-2166.34	0.00%
13	-1852.71	-1852.71	0.00%
14	-1562.31	-1562.31	0.00%
15	-1295.14	-1295.14	0.00%
16	-1051.20	-1051.20	0.00%
17	-830.50	-830.50	0.00%
18	-633.03	-633.03	0.00%
19	-458.79	-458.79	0.00%
20	-307.78	-307.78	0.00%

要素番号	曲げモーメントI端　(kN･m)		
	RESP-T	NASTRAN	差異の比率
1	0.00	0.00	0.00%
2	-113.82	-113.92	-0.09%
3	-437.49	-437.38	0.03%
4	-1552.18	-1551.61	0.04%
5	-3070.31	-3069.39	0.03%
6	-5009.52	-5008.11	0.03%
7	-7239.79	-7238.13	0.02%
8	-9524.66	-9522.95	0.02%
9	-11458.10	-11456.99	0.01%
10	-12392.70	-12392.73	0.00%
11	-11366.20	-11366.21	0.00%
12	-10157.80	-10157.80	0.00%
13	-7991.46	-7991.46	0.00%
14	-6138.75	-6138.75	0.00%
15	-4576.44	-4576.44	0.00%
16	-3281.30	-3281.30	0.00%
17	-2230.10	-2230.10	0.00%
18	-1399.60	-1399.60	0.00%
19	-766.57	-766.57	0.00%
20	-307.78	-307.78	0.00%

4. 解析コードの検証(RESP-T Ver.5.1.2.2)

4.1 RESP-T の解析手法について

(1) 一般事項

RESP-T は，(株) 構造計画研究所が開発したプログラムであり，時間領域における構造解析用計算機コードである。RESP-T は，サービス建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの応答を評価するために使用している。

(2) 解析コードの特徴

RESP-T の主な特徴を以下に示す。

・ばね要素やはり要素などでモデル化した，多質点系の応答解析を行う。
・質量は，集中質量として評価する。
・要素に非線形特性を設定し，非線形解析を行うことができる。
・ひずみエネルギ比例型及びレーリー減衰型の減衰を用いることができる。
・固有値解析は，サブスペース法による。
・応答解析は，時間領域の直接積分法による。

(3) 解析手法

a. 固有値解析

多自由度系の運動方程式は以下の式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{f\} \qquad (4.1\text{-}1)$$

ここで，

[M] ：質量マトリクス
[C] ：減衰マトリクス
[K] ：剛性マトリクス
{ü} ：加速度ベクトル
{u̇} ：速度ベクトル
{u} ：変位ベクトル
{f} ：外力ベクトル

(4.1-1)式の荷重ベクトルを{0}とし，減衰項を除いた自由振動を表す方程式は以下の式で表される。

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \qquad (4.1\text{-}2)$$

(4.1-2)式の変位{u}に調和振動を仮定すると次のような関係が得られる。

$$(-\omega_r^2[M]+[K])\{\psi\}=\{0\} \qquad (4.1\text{-}3)$$

一般に，$\{u_r\}=\{0\}$ 以外の(4.1-3)式を満足する ω_r 及び $\{u_r\}$ を求めることを固有値問題と呼び，ω_r を固有値，$\{u_r\}$ を固有ベクトルという。

b. ひずみエネルギ比例型減衰

建屋の減衰は，各次の振動モードにおける部材のひずみエネルギに比例するものとして以下の式から設定する。

$$h_i = \frac{\sum_k h_0^j E_i^j}{\sum_k E_i^j} \tag{4.1-4}$$

ただし，

$$E_i^j = \frac{1}{2}\{\phi_i^j\}^T[k^j]\{\phi_i^j\}$$

ここで，

h_0^j ：j 部材の減衰定数

$[k^j]$ ：j 部材の剛性マトリクス

$\{\phi_i^j\}$ ：i 次の振動モードにおける j 部材の材端変位ベクトル

c. 直接積分法

直接積分法はニューマークのβ法を用いる。n ステップの変位$\{u_n\}$，速度$\{\dot{u}_n\}$及び加速度$\{\ddot{u}_n\}$が既知の場合，次の(n+1)ステップの変位及び速度はβ及びγをパラメータとして，以下の式で表される。

$$\{\dot{u}_{(n+1)}\} = \{\dot{u}_n\} + (1-\gamma)\{\ddot{u}_n\} + \gamma\{\ddot{u}_{(n+1)}\} \tag{4.1-5}$$

$$\{u_{(n+1)}\} = \{u_n\} + \Delta t\{\dot{u}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2}\{\ddot{u}_n\} + \beta\Delta t^2(\{\ddot{u}_{(n+1)}\} - \{\ddot{u}_n\}) \tag{4.1-6}$$

(4.1-5)式及び(4.1-6)式を(2.4.2-1)式に代入し，$\{\dot{u}_{(n+1)}\}$及び$\{\ddot{u}_{(n+1)}\}$を消去すると，変位増分に対する次のような関係が得られる。

$$[\bar{K}](\{u_{(n+1)}\} - \{u_n\}) = \{\bar{f}\} \tag{4.1-7}$$

ただし，

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M] + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}[C]$$

$$[\bar{f}] = \{f_{(n+1)}\} - \{f_n\} + [M]\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}_n\} + \frac{1}{2\beta}\{\ddot{u}_n\}\right) + [C]\left\{\frac{\gamma}{\beta}\{\dot{u}_n\} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\Delta t\{\ddot{u}_n\}\right\}$$

(4.1-7)式から，(n+1)ステップの変位が得られ，速度及び加速度を得ることができる。

(4)　解析フローチャート

解析フローチャートを図 4-1 に示す。

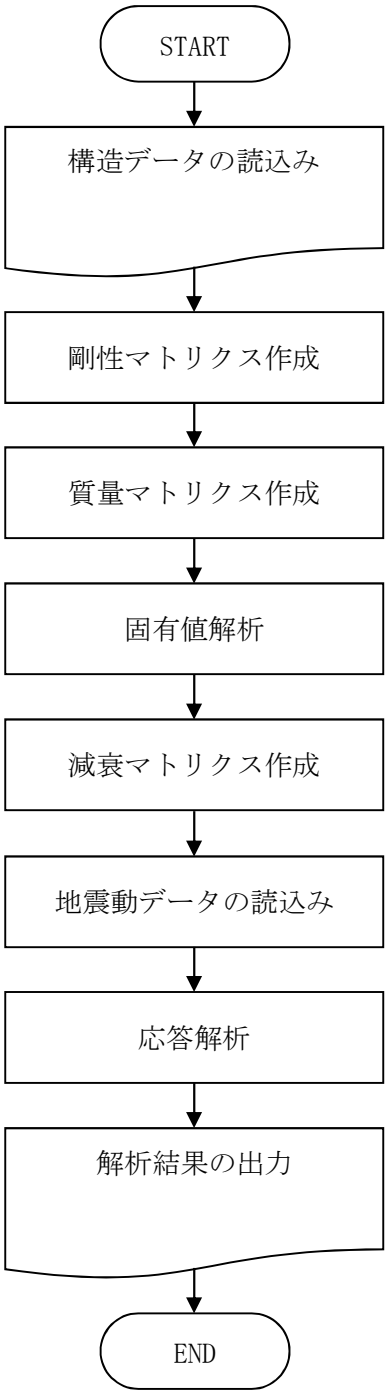


図 4-1　解析フローチャート

(5)　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

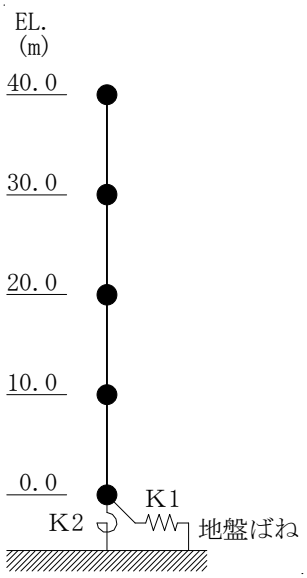
a.　他コードとの比較による検証

例題に対して，市販されている汎用構造解析プログラム「TDAPⅢ Ver.3.09」（大成建設株式会社／株式会社アーク情報システム）との比較を行う。なお，「TDAPⅢ ver.3.05」は，川内原子力発電所第1号機の工事計画で実績がある。

解析モデルの諸元を表 4-1～表 4-5 に，検討に用いる入力地震動を図 4-2 に，解析結果の比較を図 4-3 に示す。

図 4-3 より，RESP-T の結果は TDAPⅢによる結果と良い一致を示していることが確認できる。

表 4-1　解析モデル諸元



EL. (m)	重量 W (kN)	回転慣性重量 Ig ($\times 10^6$kN･m^2)	せん断断面積 As (m^2)	断面2次ﾓｰﾒﾝﾄ I (m^4)
40.0	150,000	3.0		
			100	20,000
30.0	200,000	4.0		
			150	30,000
20.0	250,000	5.0		
			200	40,000
10.0	300,000	6.0		
			250	50,000
0.0	400,000	8.0		

表 4-2　材料定数

ヤング係数 E (N/mm^2)	せん断弾性係数 G (N/mm^2)	減衰定数 h (%)
22100	9210	5

表 4-3　復元力特性（$\tau - \gamma$ 関係）

要素番号	τ_1 (N/mm^2)	τ_2 (N/mm^2)	τ_3 (N/mm^2)	γ_1 ($\times 10^{-3}$)	γ_2 ($\times 10^{-3}$)	γ_3 ($\times 10^{-3}$)
1	1.79	2.42	5.46	0.194	0.582	4.0
2	1.96	2.65	5.75	0.213	0.639	4.0
3	2.08	2.81	6.09	0.226	0.678	4.0
4	2.18	2.94	6.50	0.237	0.711	4.0

表 4-4　復元力特性（M－ϕ 関係）

要素番号	M_1 ($\times 10^6$kN･m)	M_2 ($\times 10^6$kN･m)	M_3 ($\times 10^6$kN･m)	ϕ_1 ($\times 10^{-6}$1/m)	ϕ_2 ($\times 10^{-6}$1/m)	ϕ_3 ($\times 10^{-6}$1/m)
1	2.29	5.74	9.40	5.18	46.0	415
2	4.06	10.8	17.0	6.12	48.0	350
3	6.11	16.9	26.1	6.91	49.4	312
4	8.46	24.0	36.6	7.66	50.7	286

表 4-5　地盤のばね定数と減衰係数

ばね番号	質点番号	地盤ばね成　分	ばね定数 K_C	減衰係数 C_C
K1	5	底面・並進	4.0×10^7　kN/m	1.0×10^6　kN･s/m
K2	5	底面・回転	3.0×10^{10}　kN･m/rad	3.0×10^8　kN･m･s/rad

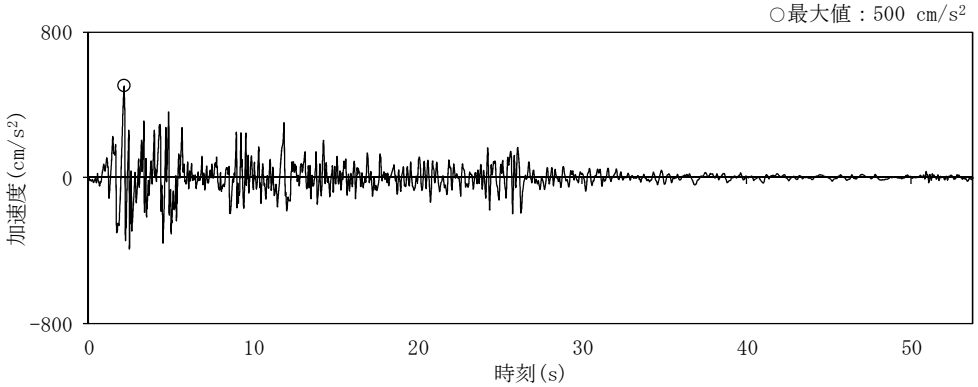
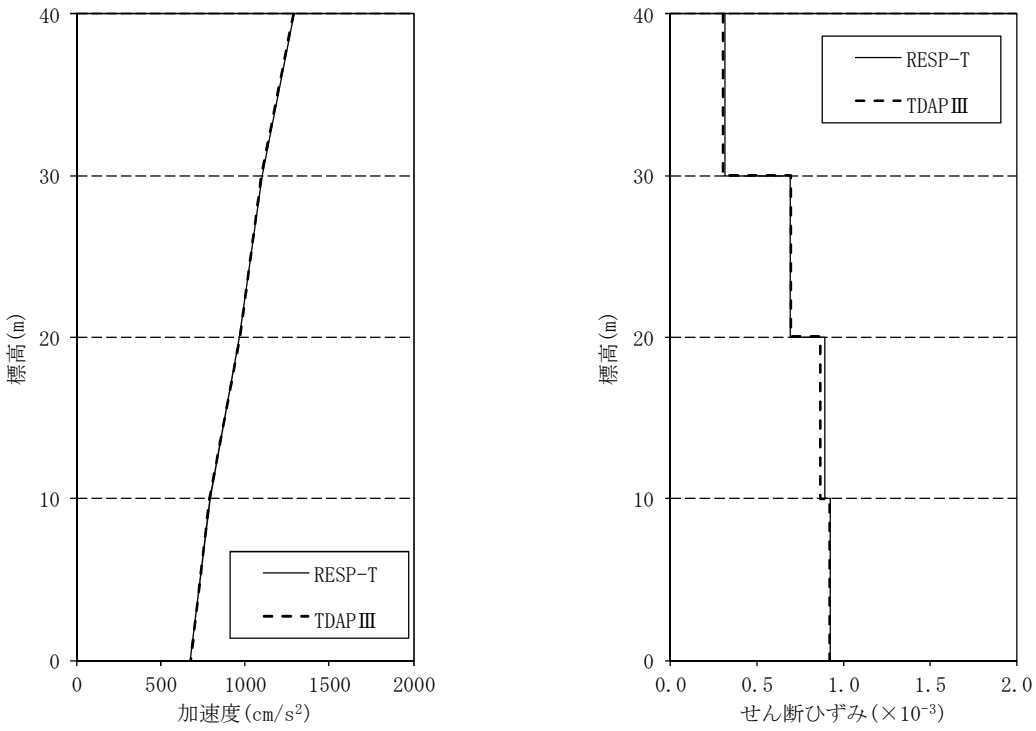


図 4-2　入力地震動



(a) 加速度　　(b) せん断ひずみ

図 4-3　解析結果の比較（最大応答分布）

b.　使用内容に対する妥当性

サービス建屋の地震応答解析に RESP-T を使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証しており，妥当である。

・検証の内容のとおり，弾塑性を考慮した多質点系の地震応答について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-45　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＤＡＰⅢ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
2.1 TDAPⅢ Ver. 3.07（建物・構築物関連）……3
2.2 TDAPⅢ Ver. 3.08（耐震・耐津波関連）……5
3. TDAPⅢの解析手法について（３次元骨組みモデルによる動的解析）……8
3.1 一般事項……8
3.2 解析コードの特徴……8
3.3 解析手法……8
3.4 解析フローチャート……10
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……11

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）TDAPⅢについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-5	使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書	Ver. 3.07
Ⅴ-2-2-23-4	常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の耐震性についての計算書	Ver. 3.08
Ⅴ-2-2-27	常設低圧代替注水系ポンプ室の耐震性についての計算書	Ver. 3.08
Ⅴ-2-2-29	代替淡水貯槽の耐震性についての計算書	Ver. 3.08
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 3.08

2.　解析コードの概要

2.1　TDAPⅢ　Ver. 3.07（建物・構築物関連）

コード名 / 項目	TDAPⅢ
使用目的	２次元骨組構造解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.07
コードの概要	TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は，2次元，3次元及び軸対称問題に対応可能で，静荷重，動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては，線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。 土木・建築分野の特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは,使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭の応力解析に使用している。 【検証の内容】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・構造力学分野における一般的知見により解を求めることができる体系について，2次元骨組構造解析の検証として，はり要素を用いた構造解析を行い，解析解が文献解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・九州電力玄海3号機工事計画認可申請書の添付資料3（耐震性に関する説明書）において，固有値解析及び弾塑性解析に使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画における構造に対し使用する要素，2次元有限要素法に

	よる応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

2.2　TDAPⅢ　Ver. 3.08（耐震・耐津波関連）

コード名 / 項目	TDAPⅢ
使用目的	静的応力解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は，2次元，3次元及び軸対称問題に対応可能で，静荷重，動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては，線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。 土木・建築分野の特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部），常設低圧代替注水系ポンプ室，代替淡水貯槽の静的応力解析に使用している。 【検証(Verification)】 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・橋梁・橋脚，地盤・構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・四国電力株式会社の「伊方原子力発電所第３号機」において，中央制御室遮へいの静的応力解析に本解析コード（Ver.3.05）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う静的応力解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

コード名 項目	TDAPⅢ
使用目的	２次元骨組構造解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は，2次元，3次元及び軸対称問題に対応可能で，静荷重，動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては，線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。 土木・建築分野の特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，常設代替高圧電源装置用カルバート（立坑部）の水平方向断面検討のための２次元骨組構造解析に使用している。 【検証(Verification)】 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・橋梁・橋脚，地盤・構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており，十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・九州電力株式会社の「川内原子力発電所第１号機」において，取水ピット，取水路，取水口，貯留堰，海水管ダクト竪坑部，海水管ダクト，海水ポンプエリア防護壁，防護堤の２次元骨組構造解析に本解析コード（Ver.3.01）が使用された実績がある。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。 ・本工事計画における構造に対して行う２次元骨組構造解析の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

コード名 項目	TDAPⅢ
使用目的	３次元骨組みモデルによる動的解析
開発機関	大成建設株式会社 株式会社アーク情報システム
開発時期	1994年
使用したバージョン	Ver. 3.08
コードの概要	TDAPⅢ（以下「本解析コード」という。）は，2次元，3次元及び軸対称問題に対応可能で，静荷重，動荷重の取り扱いができる構造解析の汎用解析コードである。動的解析においては，線形弾性解析及び材料非線形解析等を時間領域における数値積分により行う。 土木・建築分野の特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは,鋼製防護壁上部工の３次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。 【検証(Verification)】 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，別途，妥当性確認資料の中で確認している。 ・基礎位置に強制変位を与える動的解析手法における基礎位置での強制変位の入力値と応答値および固有値解析における支配的なモード図の形状と応答値が一致していることを確認している。 ・別の解析コード（Femap with NX NASTRAN（Ver10.3.1B））による応答値との比較を実施し，応答値の発生傾向が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・橋梁・橋脚，地盤・構造物連成，地中構造物等をはじめとする多数の解析において本解析コードが使用されており,十分な使用実績があるため，信頼性があると判断できる。 ・本工事計画における構造に対して行う地震応答解析の使用目的に対し,使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

3.　TDAPⅢの解析手法について（３次元骨組みモデルによる動的解析）

3.1　一般事項

TDAPⅢは，２次元及び３次元の有限要素解析を行う汎用プログラムである。土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素，非線形構成則の機能を有している。主として地盤・構造物練成系の地震応答解析を行うものであり，鋼製防護壁の３次元骨組みモデルによる動的解析に使用している。

3.2　解析コードの特徴

TDAPⅢは，土木・建築分野に特化した多種多様な構造要素や地盤要素，非線形構成則の機能を有する特徴を持つが，今回の使用目的に対しては以下の①～②の特徴を挙げることができる。

①２次元動的FEM解析を時間領域における数値積分により行う。

②線材要素を用いる。

3.3　解析手法

a.運動方程式

一般的に，多自由度系に対する離散化された運動方程式は式(3.3.1)のように表すことができる。

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{F\} \qquad (3.3.1)$$

ここで，

$[M]$ ：質量行列
$[C]$ ：減衰行列
$[K]$ ：剛性行列
$\{U\}$ ：絶対変位ベクトル
$\{\dot{U}\}$ ：絶対速度ベクトル
$\{\ddot{U}\}$ ：絶対加速度ベクトル
$\{F\}$ ：荷重ベクトル

出所：TDAPⅢ理論説明書

b.運動方程式の直接積分による解法

運動方程式(3.3.1)は，以下のようにニューマークベータ法により解く。

$$[M]\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}+[C]\{\dot{U}_{t+\triangle t}\}+[K]\{U_{t+\triangle t}\}=\{F_{t+\triangle t}\} \qquad (3.3.2)$$

を，

$$\{\dot{U}_{t+\triangle t}\}=\{\dot{U}_t\}+\left[(1-\delta)\{\ddot{U}_t\}+\delta\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}\right]\triangle t \qquad (3.3.3)$$

$$\{U_{t+\triangle t}\}=\{U_t\}+\{\dot{U}_t\}\triangle t+\left[\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\{\ddot{U}_t\}+\beta\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}\right]\triangle t^2 \qquad (3.3.4)$$

の仮定のもとに解く。ここで　$\delta \geqq 0.5, \beta \geqq 0.25(0.5+\delta)^2$

式(3.3.4)を $\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}$ について解き，これを式(3.3.3)に代入すると，

$$\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}=\left(1-\frac{\delta}{2\beta}\right)\{\ddot{U}\}\triangle t+\left(1-\frac{\delta}{\beta}\right)\{\dot{U}_t\}+\frac{\delta}{\beta\triangle t}\left(\{U_{t+\triangle t}\}-\{U_t\}\right)$$

$$\{\ddot{U}_{t+\triangle t}\}=\frac{1}{\beta\triangle t^2}\left[\{U_{t+\triangle t}\}-\{U_t\}-\{\dot{U}_t\}\triangle t-\frac{\triangle t^2}{2}\{\ddot{U}_t\}\right]+\{\ddot{U}_t\}$$

と書ける。これを式(3.3.2)に代入して $\{U_{t+\triangle t}\}$ に関する方程式としてまとめると，式(3.3.5)となる。

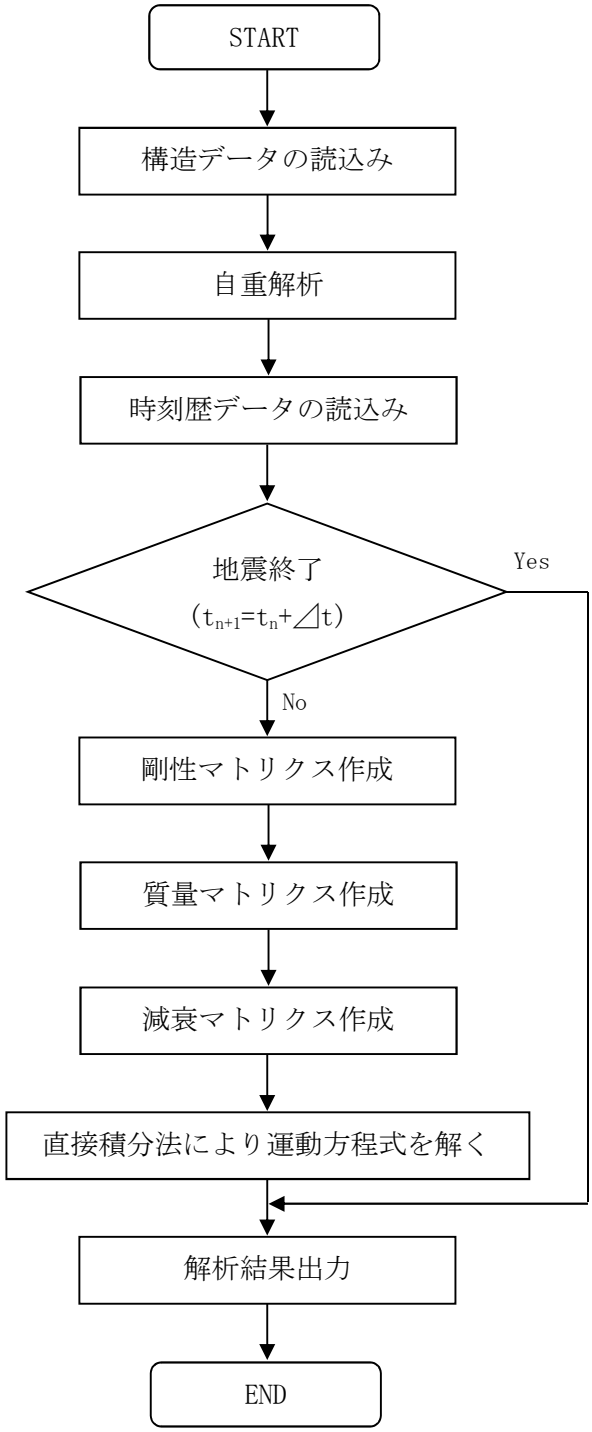
$$\left[[K_t]+\frac{1}{\beta\triangle t^2}[M]+\frac{\delta}{\beta\triangle t}[C_t]\right]\{U_{t+\triangle t}\}$$

$$=\{F_{t+\triangle t}\}+[M]\left[\frac{1}{\beta\triangle t^2}\{U_t\}+\frac{1}{\beta\triangle t}\{\dot{U}_t\}+\left(\frac{1}{2\beta}-1\right)\{\ddot{U}_t\}\right]+$$

$$[C]\left[\frac{\delta}{\beta\triangle t}\{U_t\}+\left(\frac{\delta}{\beta}-1\right)\{\dot{U}_t\}+\left(\frac{\delta}{2\beta}-1\right)\triangle t\{\ddot{U}_t\}\right] \qquad (3.3.5)$$

出所：TDAPⅢ理論説明書

3.4　解析フローチャート



3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

a.　基礎位置の入力値と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した３次元骨組みモデルにおいて，基礎位置の水平変位・鉛直変位・回転角の入力値に対して，解析結果の応答値の比較を実施する。

検証モデルを図3-1に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の２通り行い，表3-1，表3-2に示すとおり，いずれのケースも入力値と応答値が完全に一致していることを確認した。

図3-1　検証モデル

表3-1　壁軸方向加震 入力値と応答値の比較

		南基礎			北基礎		
		水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)
入力値	最大	0.218	0.010	0.00320	0.220	0.018	0.00267
	最小	-0.336	-0.056	-0.00405	-0.340	-0.044	-0.00362
応答値	最大	0.218	0.010	0.00320	0.220	0.018	0.00267
	最小	-0.336	-0.056	-0.00405	-0.340	-0.044	-0.00362
比　率 (応答値/入力値)	最大	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	最小	100%	100%	100%	100%	100%	100%

表3-2　壁直方向加震 入力値と応答値の比較

		南基礎			北基礎		
		水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)	水平変位 (m)	鉛直変位 (m)	回転角 (rad)
入力値	最大	0.174	0.018	0.00515	0.358	0.020	0.01118
	最小	-0.341	-0.047	-0.00217	-0.731	-0.050	-0.00420
応答値	最大	0.174	0.018	0.00515	0.358	0.020	0.01118
	最小	-0.341	-0.047	-0.00217	-0.731	-0.050	-0.00420
比　率 (応答値/入力値)	最大	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	最小	100%	100%	100%	100%	100%	100%

b.　変形性状の固有値解析モード図と応答値の比較による検証

鋼製防護壁をモデル化した３次元骨組みモデルにおいて，固有値解析の支配的なモード図の形状と解析結果の変形性状の比較を実施する。

検証モデルを図3-2に示す。加振方向は壁軸方向加震と壁直方向加震の２通り行う。動的解析は，基礎位置に強制変位を入力する手法のため基礎部の変形は大きいが，鋼製防護壁の変形性状は固有値解析のモード図と解析結果で同様であることを確認した。図3-3に壁軸方向加時震時の比較結果を，図3-4に壁直方向加震時の比較結果を示す。

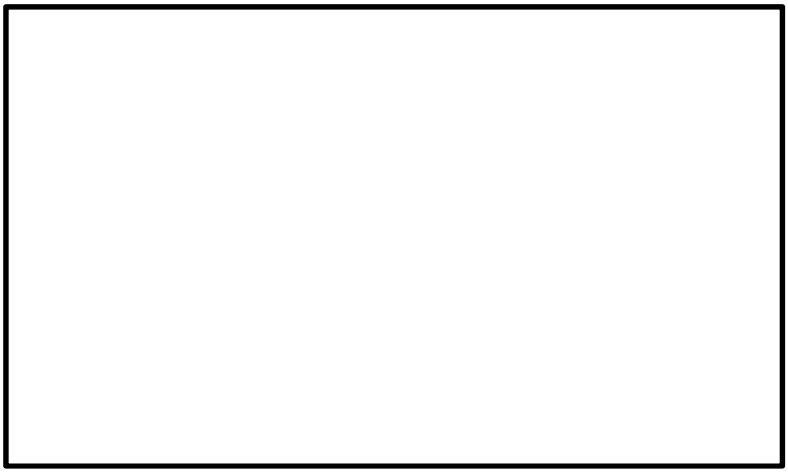


図3-2　検証モデル

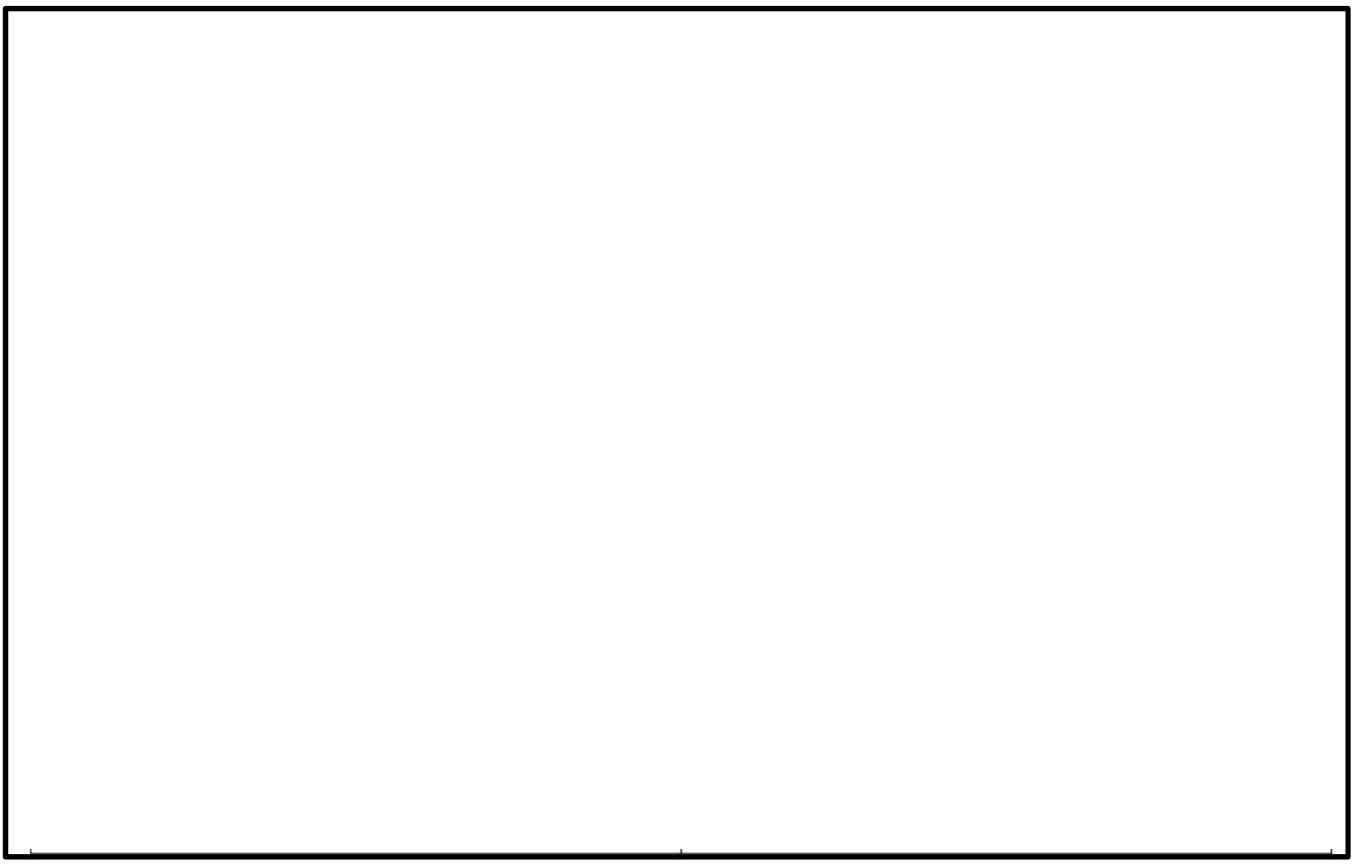


図3-3　壁軸方向加時震時の比較結果

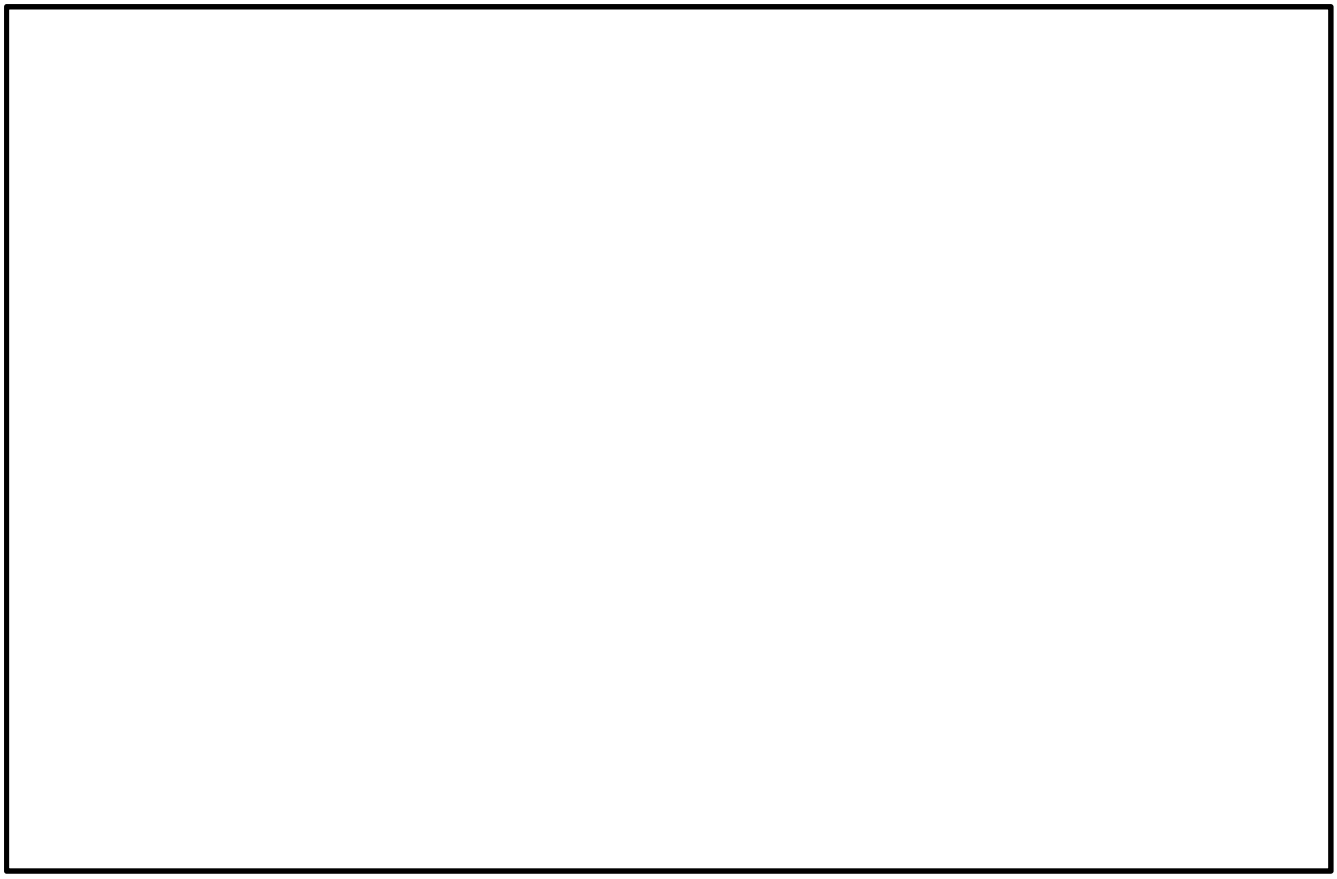


図3-4　壁直方向加時震時の比較結果

c. 他構造解析用汎用コード[Femap with NX NASTRAN]の応答値の比較による検証

NX NASTRANは，アメリカ航空宇宙局（NASA）の構造解析プログラムとして開発されたNASTRANが，1971年にThe MacNeal-Schwendler Co.（MSC社の前身）から商用版としてリリースされ，このコードをベースにUGS社（Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.の前身）がNX NASTRANとして継承，開発を続けている有限要素法による構造解析汎用コードである。

鋼製防護壁をモデル化した３次元骨組みモデルにおいて，TDAPⅢとFemap with NX NASTRANの二つの解析コードにおける時刻歴応答値の比較を実施する。使用した，Femap with NX NASTRANのバージョンは，「Ver10.3.1B日本語版（64bit）」である。

表3-3及び図3-5に検証モデルと比較を実施した応答値出力位置を示す。応答値の比較は，支間中央部下端と両基礎拡幅付け根下端で実施した。

表3-3　応答値出力位置

	支間中央部下端	南基礎 拡幅付け根下端	北基礎 拡幅付け根下端
変位出力　節点番号	180	10071	10286

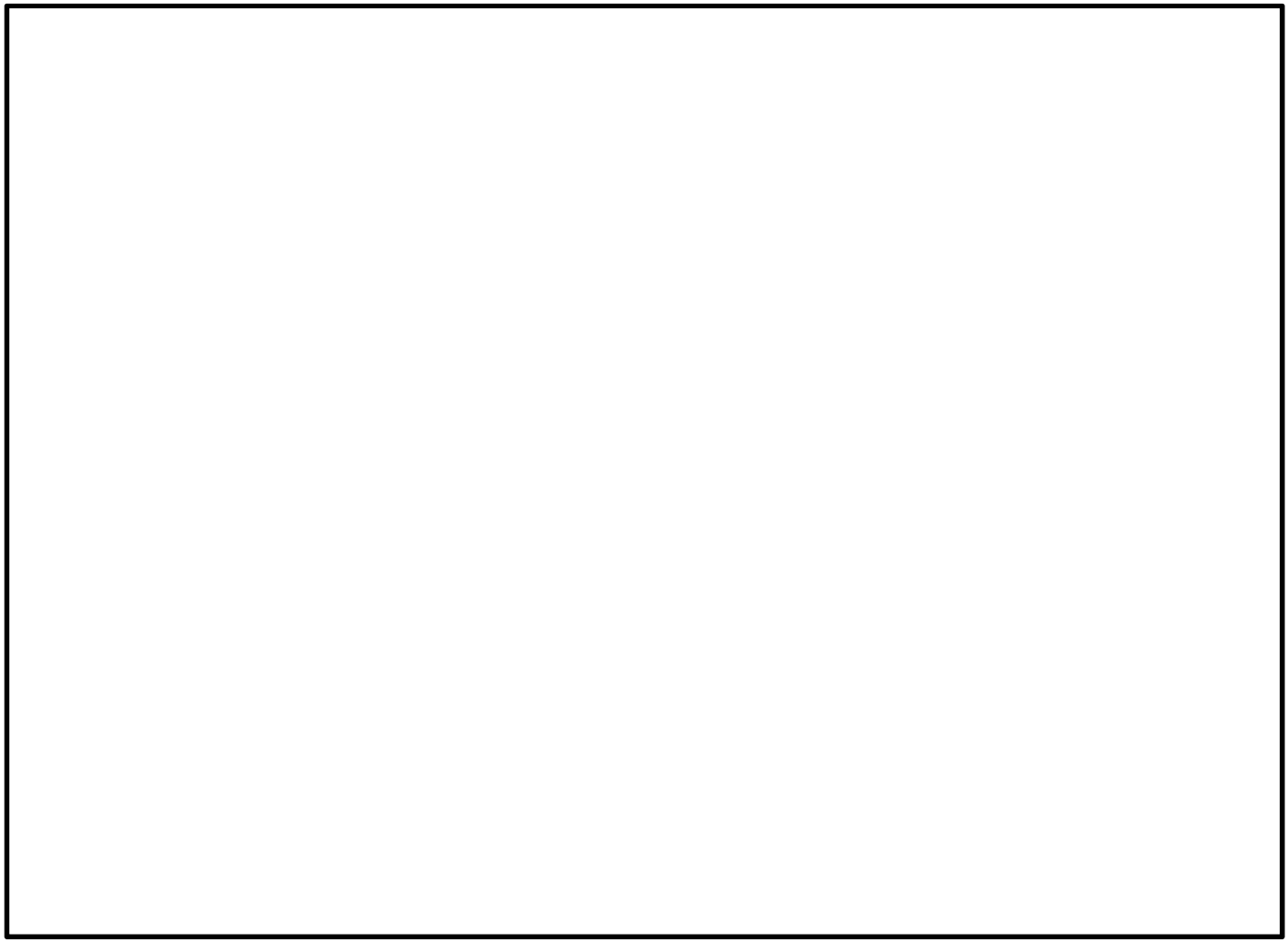


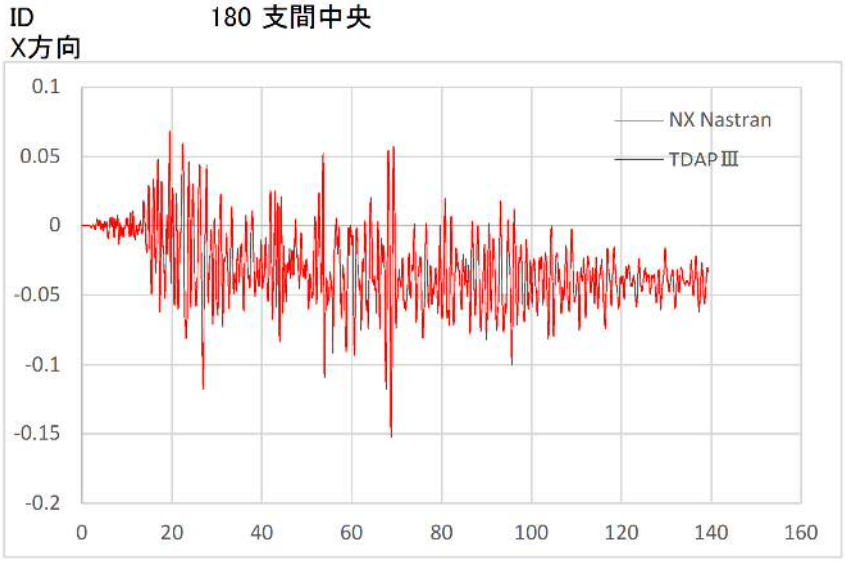
図3-5　検証モデル及び応答値出力位置

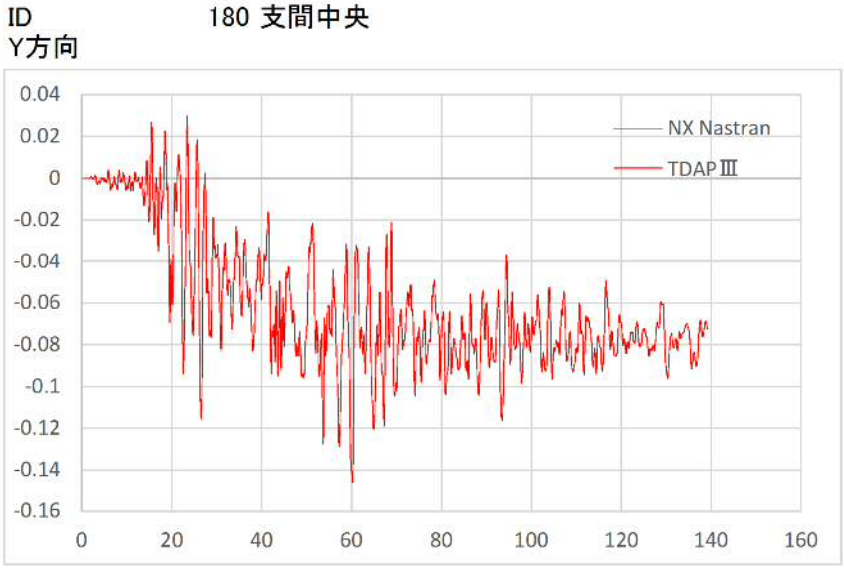
以下に，変形比較結果を示す。時刻歴変位の発生傾向がFemap with NX NASTRANとTDAPⅢで一致している。また，最大値及び最小値の比率も誤差がないことを確認した。

図3-6　節点180(支間中央)におけるX,Y,Z方向の時刻歴応答変位比較結果
図3-7　節点10071(南基礎側付け根)におけるX,Y,Z方向の時刻歴応答変位比較結果
図3-8　節点10286(北基礎側付け根)におけるX,Y,Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4　X,Y,Z方向の最大最小変位比較結果

変位比較





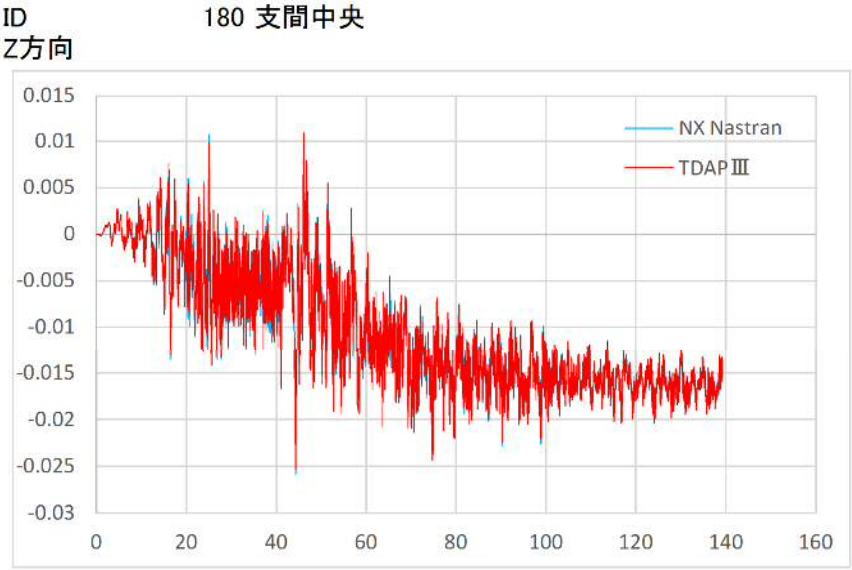
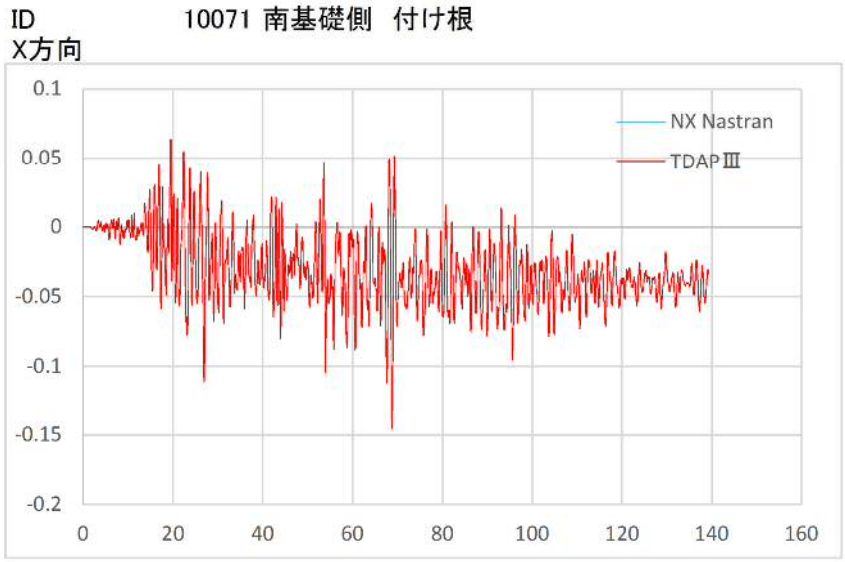
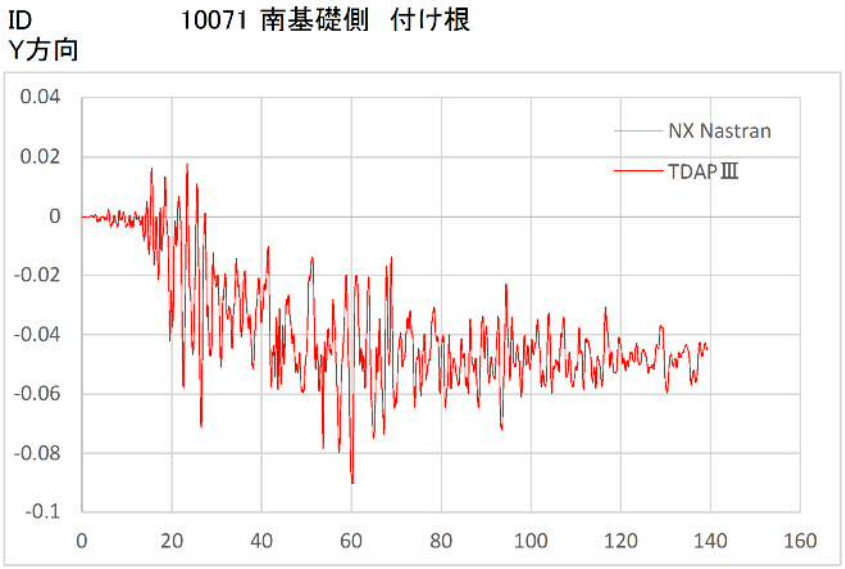


図3-6　節点180(支間中央)におけるX,Y,Z方向の時刻歴応答変位比較結果

変位比較





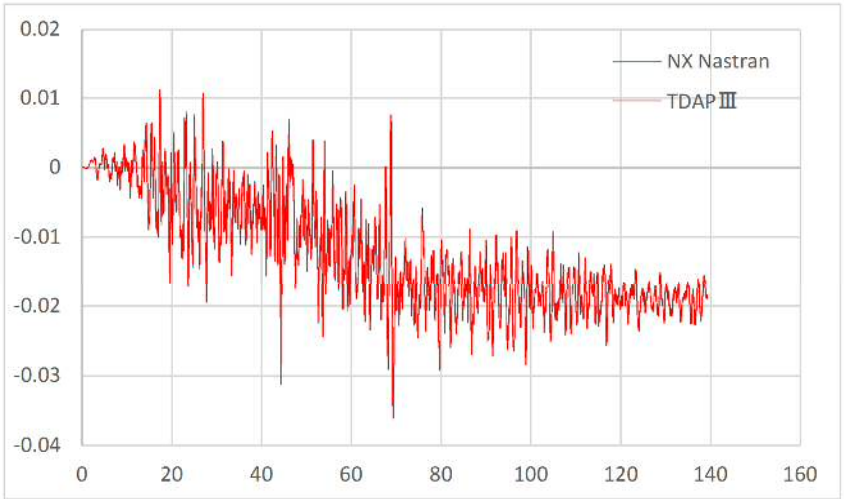


図3-7　節点10071（南基礎側付け根）におけるX, Y, Z方向の時刻歴応答変位比較結果

変位比較

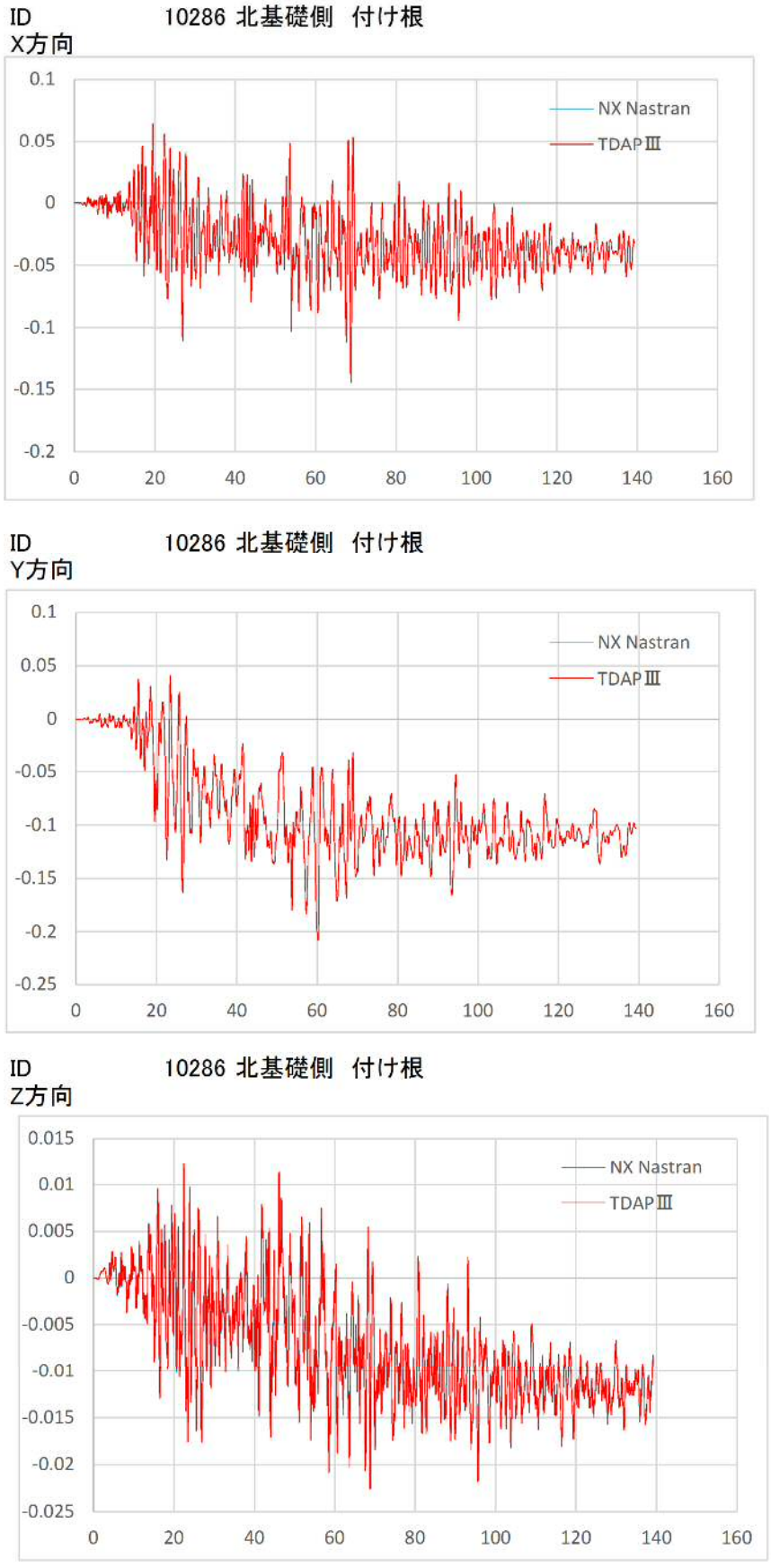


図3-8　節点10286(北基礎側付け根)におけるX,Y,Z方向の時刻歴応答変位比較結果

表3-4　X,Y,Z方向の最大最小変位比較結果

		節点；180 場所；支間中央		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAPⅢ	68 mm	30 mm	11 mm
	NX Nastran	68 mm	30 mm	11 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAPⅢ	−153 mm	−146 mm	−25 mm
	NX Nastran	−153 mm	−146 mm	−26 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	96%
		節点；10071 場所；南基礎側付け根		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAPⅢ	64 mm	18 mm	11 mm
	NX Nastran	64 mm	18 mm	11 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAPⅢ	−146 mm	−91 mm	−36 mm
	NX Nastran	−146 mm	−91 mm	−36 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	100%
		節点；10286 場所；北基礎側付け根		
		DX	DY	DZ
最大値	TDAPⅢ	64 mm	41 mm	12 mm
	NX Nastran	64 mm	41 mm	12 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	100%
最小値	TDAPⅢ	−145 mm	−208 mm	−23 mm
	NX Nastran	−145 mm	−208 mm	−23 mm
	比率(TDAPⅢ/NX Nastran)	100%	100%	100%

d.　使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の３次元骨組みモデルによる動的解析にTDAPⅢを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

・検証の内容のとおり，基礎位置の入力値と応答値の検証，固有値解析と動的解析の変形性状の比較による検証，他構造解析汎用コードとの応答値の比較による検証を行っていることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-46　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＵＣ－ｗｉｎ／Ｓｅｃｔｉｏｎ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. UC-win/Sectionの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……8
3.5 検証(Verification)と妥当性確認(Validation)……9

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）UC-win/Sectionについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補② V-5-46 R1

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-33	ＳＡ用海水ピットの耐震性についての計算書	Ver. 6.02.01
Ⅴ-2-2-39-1	防潮堤（鉄筋コンクリート防潮壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.02.01
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 6.02.01
Ⅴ-2-10-4-2	ＳＡ用海水ピット取水塔の耐震性についての計算書	Ver. 6.02.01

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	UC-win/Section
使用目的	鉄筋コンクリート断面の応力度照査
開発機関	株式会社フォーラムエイト
開発時期	2003年
使用したバージョン	Ver. 6.02.01
コードの概要	UC-win/Sectionは，鉄筋コンクリート断面の断面諸量，応力度計算，断面耐力算定を行う解析コードで，主な特徴は下記の通りである。 ・鉄筋の情報(位置，断面積)を1本毎に考慮でき，複鉄筋など配筋に忠実な断面計算が可能である。 ・任意形状に対して２軸曲げの計算が可能である。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	UC-win/Sectionは鋼製防護壁及び鉄筋コンクリート防潮壁の地中連続壁基礎並びにＳＡ用海水ピット及びＳＡ用海水ピット取水塔の応力度照査に使用されている。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証内容は，以下の通りである。 ・本解析コードによる複鉄筋の断面照査結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードによる２軸曲げの計算結果と理論解が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・検証の内容の通り，複鉄筋及び2軸曲げについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. UC-win/Sectionの解析手法について

3.1 一般事項

UC-win/Sectionは鉄筋コンクリート断面の断面諸量，応力度計算，断面耐力算定を行うことができるプログラムである。UC-win/Sectionは，地中連続壁基礎の応力度照査，耐力照査に使用している。

3.2 解析コードの特徴

UC-win/Sectionの主な特徴を以下に示す。

- 鉄筋の情報(位置，断面積)を1本毎に考慮でき，複鉄筋など配筋に忠実な断面計算が可能である。
- 任意形状に対して2軸曲げの計算が可能である。

3.3 解析手法

(1) 曲げ応力度

本プログラムでは2軸曲げ状態を基本として曲げ応力度の計算を行う。

- 計算上の仮定

1. 維ひずみは中立軸からの距離に比例する（平面保持の仮定）。
2. コンクリートと鉄筋のヤング係数比は15とする（デフォルト値）。鉄筋以外の材料のヤング係数は次式により算定される。

   Ei_design = Ei_input・ n ・(Ec_base / 200000) …式A

   ここで，

   Ei_design：応力度計算に使用するヤング係数（N/mm^2）

   Ei_input：材料～材料エディター～ で入力されているヤング係数（N/mm^2）

   Ec_base：コンクリートのヤング係数（N/mm^2）。設計基準強度が異なる複数のコンクリートが配置されている場合は，面積が最も大きいコンクリートのヤング係数を採用する。

   n：入力されたヤング係数比（通常は15）
3. コンクリート，鉄筋，鋼板，PC鋼材，炭素繊維シート，アラミド繊維シートは線形弾性体とする。
4. コンクリートの引張強度は無視する。
5. PC鋼材の圧縮側応力，炭素繊維（アラミド繊維）シートの圧縮側応力は無視する（応力がゼロ）。
6. 外ケーブルは平面保持に従うものとする。
7. 荷重の入力において与えられた軸力は断面図心に作用し，曲げモーメントは主軸（Zp，Yp）まわりに作用する。

8. 計算中の力の釣り合いを考える点は断面図心まわりとする。

・ 計算手順

1. 入力された軸力と曲げモーメントから中立軸の角度と図心での軸方向ひずみ及びひずみ平面の傾き（曲率）を仮定する。
2. ひずみ平面から各材料の応力分布を求める。
3. 応力を積分して断面内に発生する軸力と曲げモーメントを求める（内力の計算）。
4. 入力された軸力と曲げモーメントと内力が一致しているかどうかをチェックする。
5. 一致していなければ，再度中立軸の角度と図心での軸方向ひずみ及びひずみ平面の傾き（曲率）を仮定しなおす。
6. 1～5を収束するまで繰返して行う。
（鉄筋とPC鋼材は，点のデータとして１本ごとに考慮して計算。）

(2) 終局曲げモーメント

終局モーメントMuは，与えられた軸力N'と曲げモーメントMzp，Mypの合成方向の角度を中立軸角度として与え，その中立軸まわりに曲率を変化させて求める。

・ 計算上の仮定

1. 維ひずみは中立軸からの距離に比例する（平面保持の仮定）。
2. コンクリート，鉄筋，鋼板，PC鋼材の応力ひずみ曲線は断面に設定された曲げ計算用準拠基準の設定を使う。
3. コンクリートの引張強度は無視する。
4. 炭素繊維シート，アラミド繊維シートは線形弾性体とする。
5. PC鋼材の圧縮側応力，繊維シートの圧縮側応力は無視する（応力がゼロ）。
6. 終局ひずみ発生位置が与えられている場合はそれを考慮する。このとき，入力された位置より外側のコンクリート領域は圧縮力を分担しないものとみなす（応力がゼロ）。
7. PC鋼材のひずみは有効鋼材応力度σpeによる初期ひずみを考慮する。このときσpeによるコンクリートの初期ひずみは無視する。
8. 外ケーブルは平面保持に従わない。「σpe+Δσpe」によるひずみ値で一定とする。ここで，σpeは有効プレストレス応力，Δσpeは初降伏・終局モーメント計算用のプレストレス応力の増分。
9. 荷重の入力において与えられた軸力は断面図心に作用する。曲げモーメントは主

軸（zp，yp）まわりに作用する。

10. 計算中の力の釣り合いを考える点は断面図心まわりとする。

・ 終局曲げモーメントMuの算定

与えられた軸力N'と曲げモーメントMzpとMypを合成した方向（√（Mzp^2＋Myp^2））の２つを収束条件として終局モーメントMuをダイレクトに算定する。計算方法は下記「３次元相互作用図の作成」とほぼ同じ。ダイレクト計算が相互作用図作成時と異なる点は，次の２点である。

1. 軸力の分割点リスト（N1， N2， ・・・）を作成せずに与えられた軸力N'を使用する。
2. θを15度ずつ変化させるのではなく与えられたMzpとMypを合成した方向（√（Mzp^2＋Myp^2））の角度θを使用する。

・ ３次元Mu-N相互作用図の作成

断面の主軸Zp軸を起点として反時計まわりに角度θを考える。

1. 圧縮側にコンクリートの終局ひずみεcuを置く。
2. ひずみ平面を断面に平行なまま終局ひずみ点まで移動する。（これをB点とする）。そのときの応力分布を積分して求めた軸力が軸力の最大値となる。
3. 引張側に終局ひずみの規定がない場合は，プログラムは非常に大きなひずみ値を仮定する。引張側に終局ひずみの規定がある場合はそれを配置する。いずれの場合も引張側のひずみをA点とする。

   非常に大きなひずみ値を仮定した場合は，２次元／３次元相互作用図に，それを示す緑色が表示される。

   炭素・アラミド繊維シートの場合は，破断・剥離ひずみの小さいほうの値を終局ひずみとする（これをA点とします）。

   A点を通り，断面に平行なひずみ平面から応力度分布を求め，これを積分して軸力の最小値とする。
4. 上記で求めた最大軸力点と最小軸力点の間を約１５分割（N1， N2， ・・・，N15）する。このとき，各分割点が（１×10^n）または（2.5×10^n）または（5×10^n）の倍数になるように調整する。したがって，調整後は15分割よりも多く（あるいは少なく）なることがある。また，軸力がゼロの点も追加される。
5. 軸力N1でのモーメントを求めるために，ひずみ平面の傾きを仮定する。ひずみ平面の傾きはB点を支点にしてA点側に回転させ（曲率φ1），A点に到達するとその後はA点を支点にして回転する向き（曲率φ2）とする。
6. 仮定されたひずみ平面の傾き（曲率φ1またはφ2）から各材料の応力度分布を積分し，内力としての軸力とモーメントを計算する。

7. 与えられた軸力N1と内力として計算された軸力が一致するまで繰り返す。
8. 軸力が収束した時点でのモーメントを終局曲げモーメントMuとする。
9. 同様な計算をその他の軸力（N2, ・・・, N15）に対しても行う（上記5～8を繰り返す）。
10. 各軸力位置でのモーメントを結んで２次元Mu-N相互作用図（θ ＝0度）を作成する。
11. 同様な計算をその他の角度についても24回（θ ＝0, 15, 30, ・・・330度）行う（上記5～10）。
12. 各角度で得られた２次元Mu-N相互作用図を集めて３次元Mu-N相互作用図が完成する。

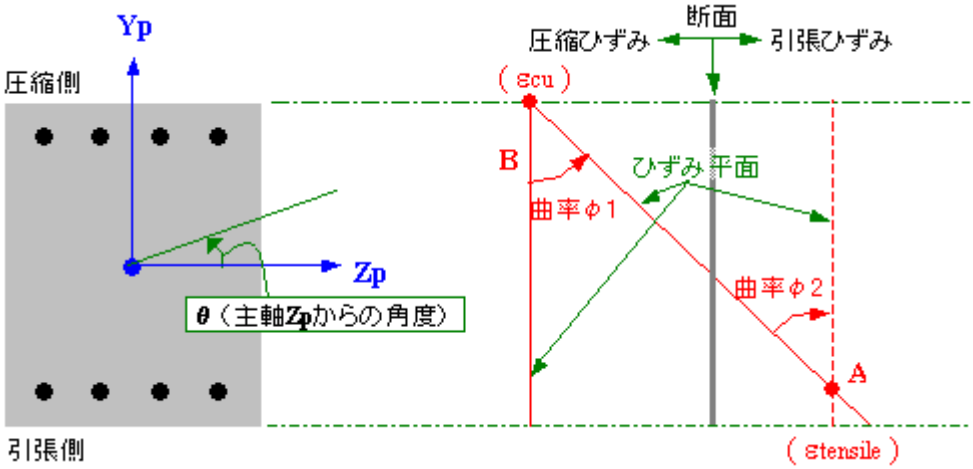


図3-1　３次元Mu-N相互作用図の作成

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

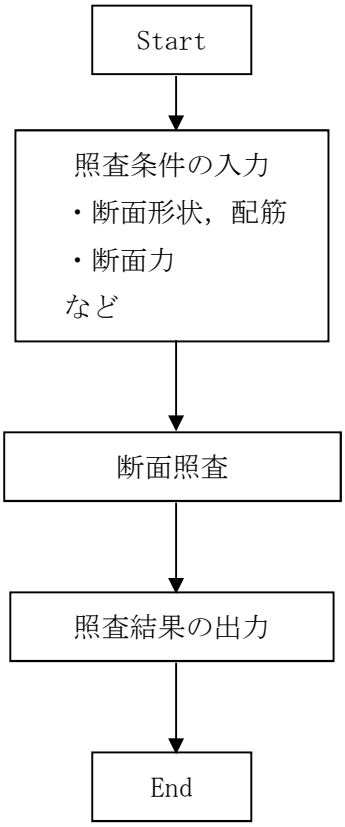


図3-2　解析フローチャート

3.5　検証(Verification)と妥当性確認(Validation)

3.5.1　理論解との比較による検証

複鉄筋の計算及び2軸曲げの計算について，理論解と比較を行う。

(1)　複鉄筋の計算

複鉄筋の断面における，コンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度について，計算例と解析結果の比較を行う。

(解析モデル)

参考とする計算例は「実務に役立つ鉄筋コンクリート設計計算入門　計算例で学ぶ許容応力度設計法と限界状態設計法　磯貝 忠著　2006年　(株)山海堂」とし，P123の「第II編　第2章　複鉄筋く形断面　2.4　断面力M，Nが与えられた場合(計算例5)」とする。

本計算例の解析条件は以下の通りである。解析モデルを図3-3に示す。

- コンクリートの設計基準強度　σck：24(N/mm^2)
- 鉄筋の強度：SD295A
- ヤング係数比 n：15
- 全幅 b：0.500(m)
- 全高 d：0.700(m)
- かぶり(上下共通) a：0.070(m)
- 配置鉄筋(上下共通)：D25×5本
- 軸力 N：200(kN)
- 曲げモーメント M：250(kN・m)

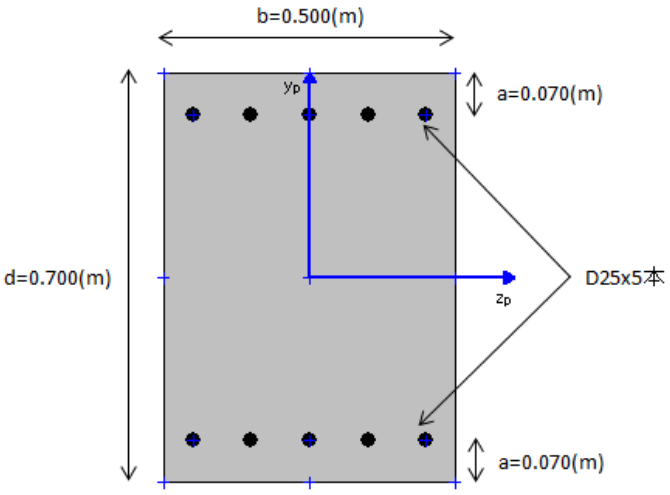


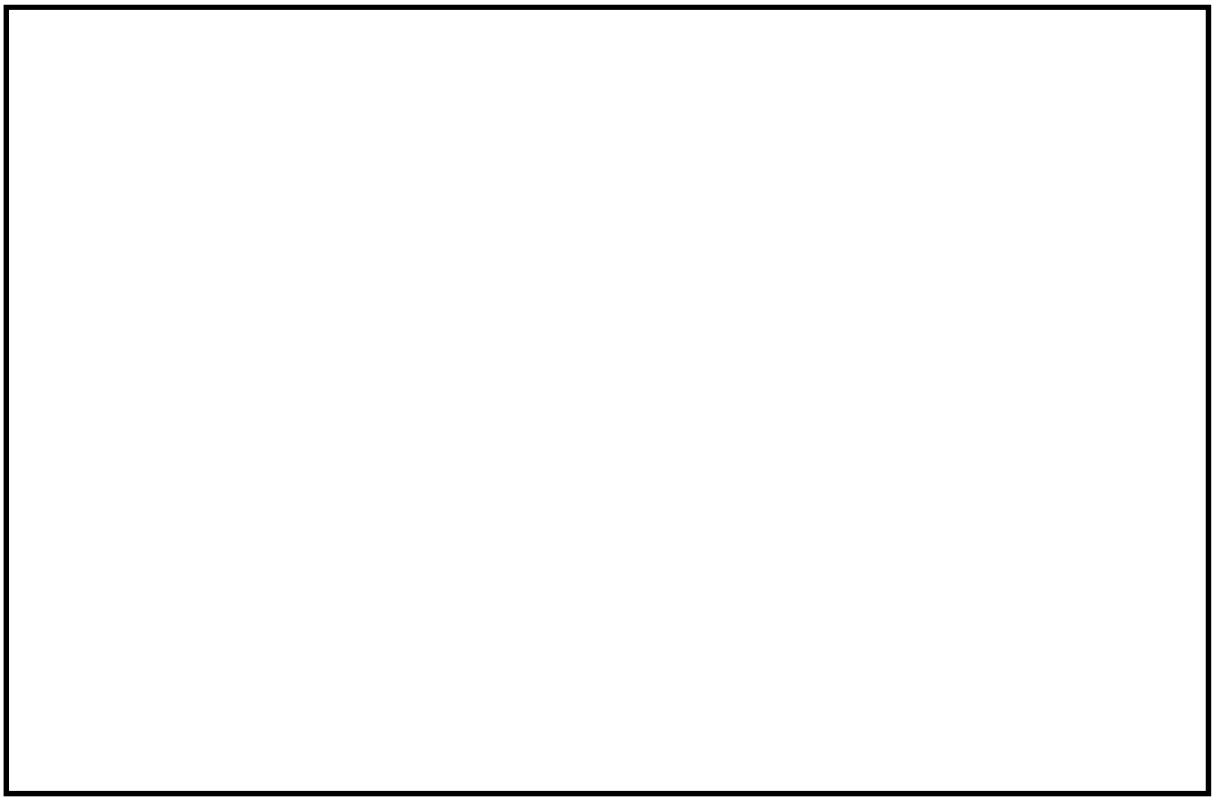
図3-3　解析モデル(複鉄筋)

この条件での計算例の応力度結果は下記の通りとなる。

コンクリートの応力度 σc=6.27(N/mm^2)

引張鉄筋の応力度 σs1=140.7(N/mm^2)

圧縮鉄筋の応力度 σs2=68.0(N/mm^2)



UC-win/Sectionのコンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度の解析結果を図3-4に示す。

OK	許容曲げ応力度の照査		
	σc (N/mm2)	σs (N/mm2)	σ's (N/mm2)
白 部材1			
白 着目点 1			
└ 応力度計算	6.18 < 8.00 OK	140.41 < 180.00 OK	66.74 < 180.00 OK

図3-4　解析結果

計算例と解析結果の比較を表3-1に示す。

表3-1　計算例と解析結果の比較

対象		計算例	解析結果	比率
コンクリートの応力度	(N/mm^2)	6.27	6.18	101.5%
鉄筋の引張応力度	(N/mm^2)	140.7	140.4	100.2%
鉄筋の圧縮応力度	(N/mm^2)	68.0	66.7	101.9%

コンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度が計算例と解析結果でほぼ一致しており，応力度の算出が正しく算出されていることが確認できる。

(2)　2軸曲げの計算

(1)の複鉄筋の計算で応力度が正しく算出できることが確認できた。2軸曲げに対し，単純な円形の断面の場合，曲げモーメントの載荷角度を変えても応力度の算出結果は変わらない。そこで2軸曲げについては，単純な円形の断面に対して，曲げモーメントの載荷角度を変化させた場合に，応力度の結果が変わらないことを確認する。

解析モデル(2軸曲げ)を図3-5に，曲げモーメントの載荷角度を図3-6に示す。

(解析モデル)

解析条件は以下の通りとする。

・コンクリートの設計基準強度　σck：24(N/mm^2)
・鉄筋の強度：SD295A
・ヤング係数比　n：15
・直径　D：1.000(m)
・かぶり(全周共通)　a：0.100(m)
・配置鉄筋：D16×36本
・基準曲げモーメント　M：100(kN・m)

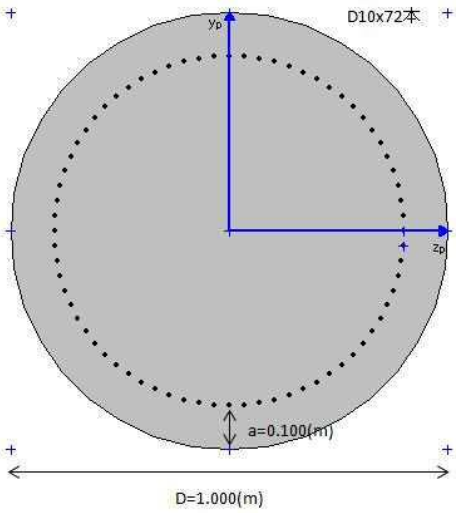


図3-5　解析モデル(2軸曲げ)

断面力としては，基準曲げモーメント100(kN・m)を載荷角度θ＝0度(=Mzpのみ)を基準として，30度，45度，60度，90度(=Mypのみ)と変化させる。

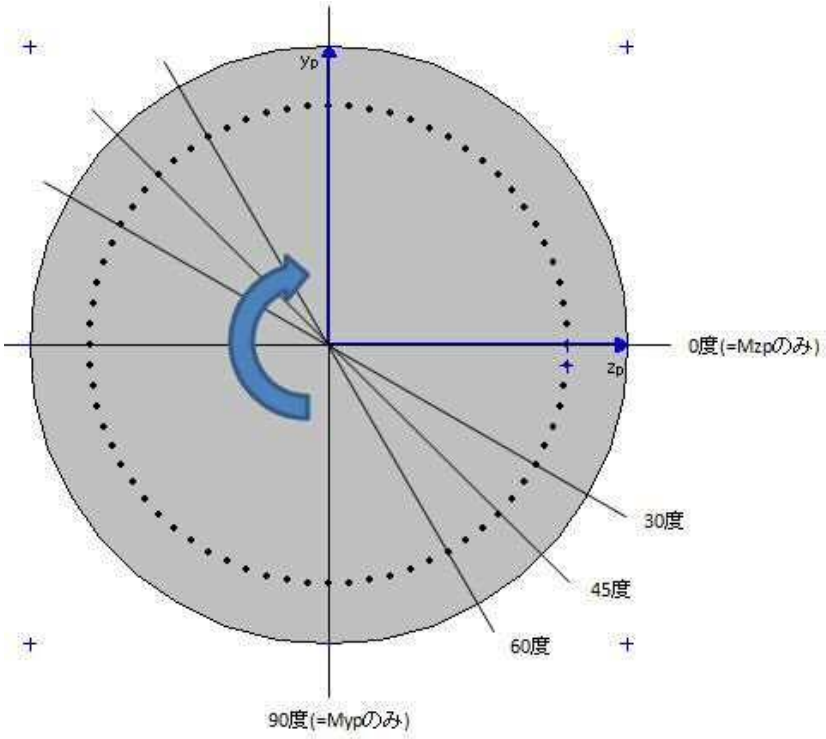


図3-6　曲げモーメントの載荷角度

各載荷角度θにおける曲げモーメントの値は下記のようになる。

Myp=100*cos(90-θ)

Mzp=100*sin(90-θ)

各載荷角度における曲げモーメントを表3-2に示す。

表3-2　各載荷角度における曲げモーメント

対象	角度（度）	Myp(kN・m)	Mzp(kN・m)
0度	0	0.000	100.000
30度	30	50.000	86.603
45度	45	70.711	70.711
60度	60	86.603	50.000
90度	90	100.000	0.000

UC-win/Sectionの各載荷角度のコンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度の結果は以下の通りである。

各載荷角度における解析結果を図3-7～図3-11に示す。

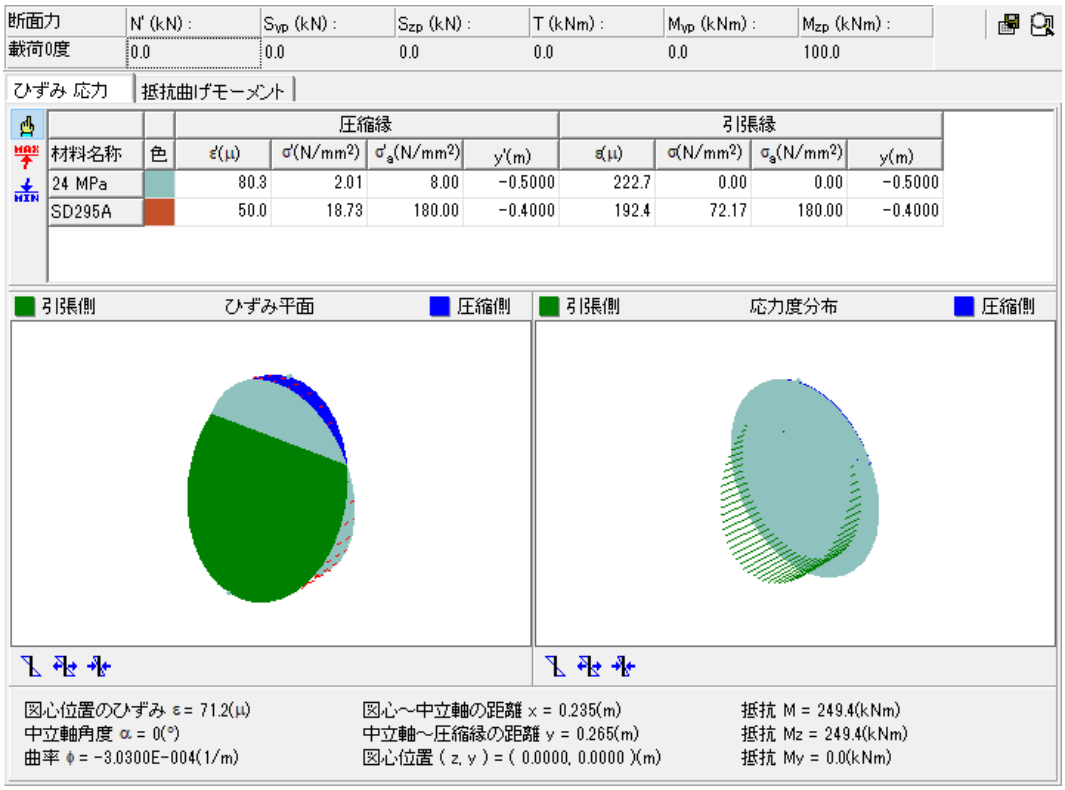


図3-7　解析結果(載荷角度0度)

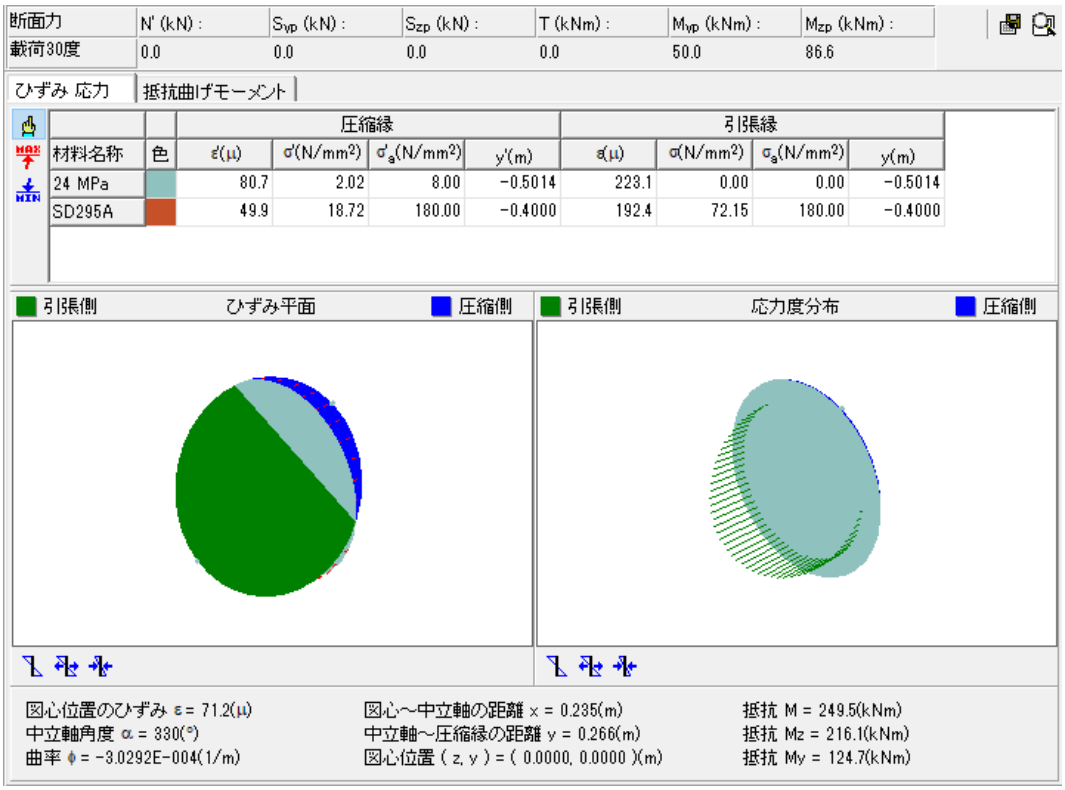


図3-8　解析結果(載荷角度30度)

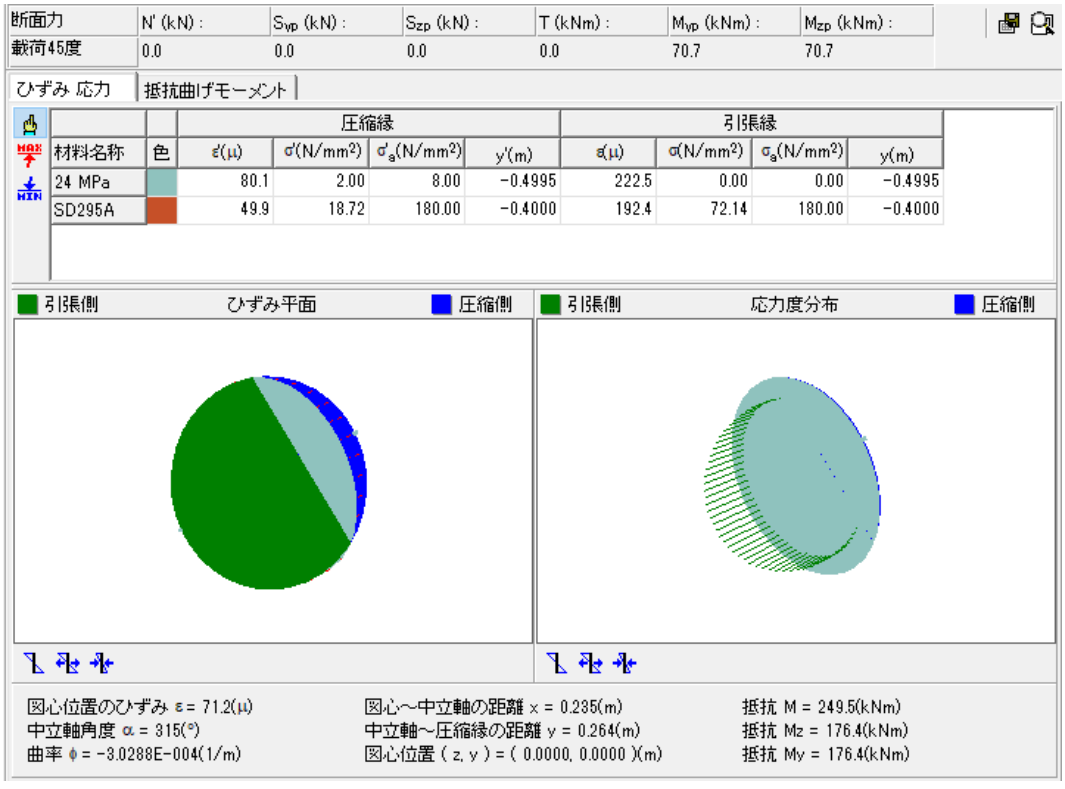


図3-9　解析結果(載荷角度45度)

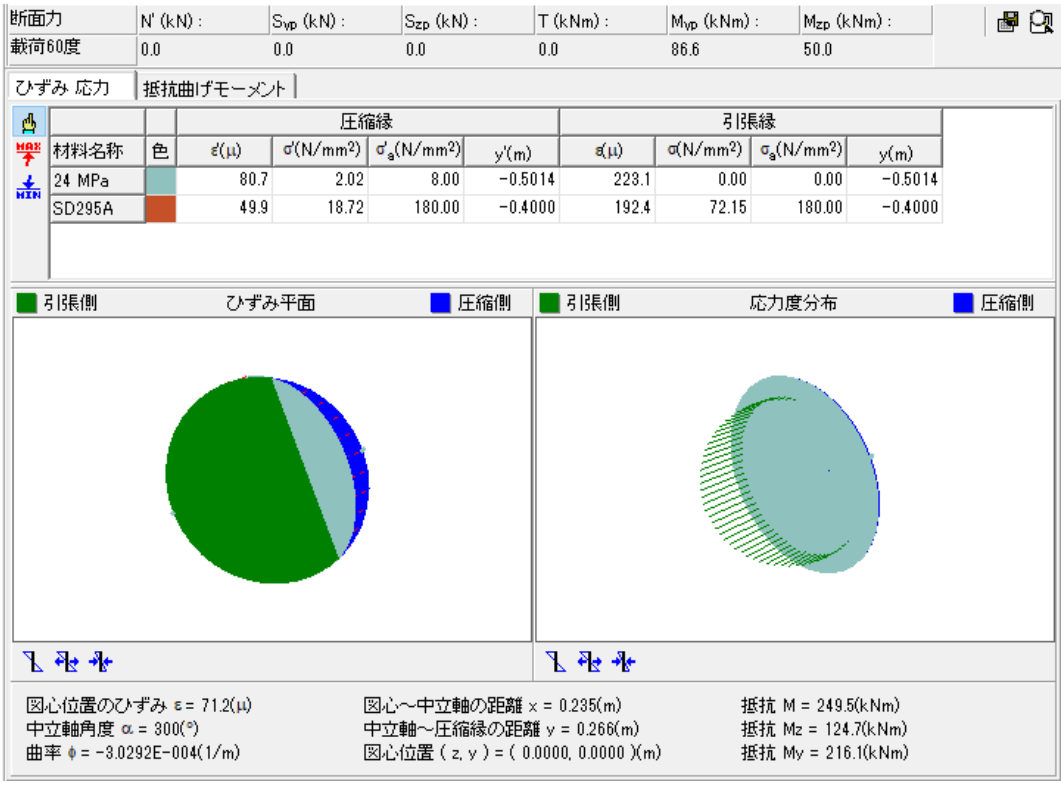


図3-10　解析結果(載荷角度60度)

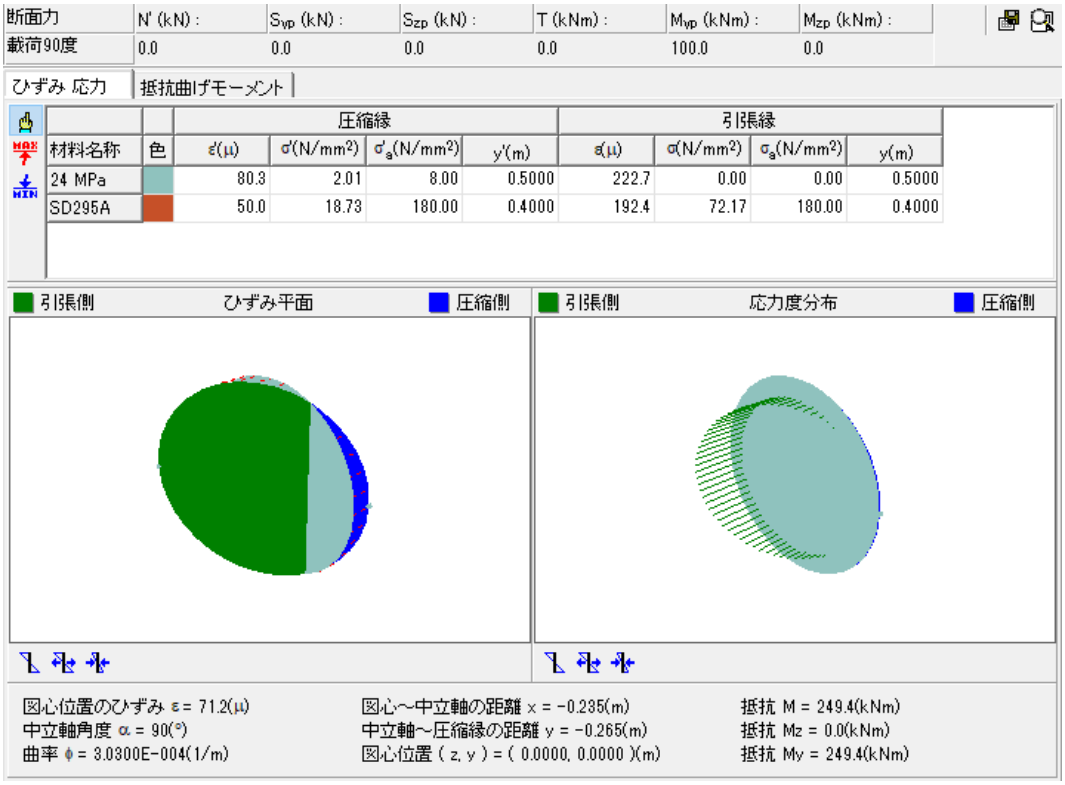


図3-11　解析結果(載荷角度90度)

以上の結果を整理すると表3-3の通りとなる。

表3-3　載荷角度0度を基準とした場合の各載荷角度の比率

対象	備考	コンクリートの応力度		鉄筋の引張応力度		鉄筋の圧縮応力度	
		解析結果	比率	解析結果	比率	解析結果	比率
0度	Mzp	2.01	100.0%	72.17	100.0%	18.73	100.0%
30度		2.02	100.5%	72.15	100.0%	18.72	99.9%
45度		2.00	99.5%	72.14	100.0%	18.72	99.9%
60度		2.02	100.5%	72.15	100.0%	18.72	99.9%
90度	Myp	2.01	100.0%	72.17	100.0%	18.73	100.0%

単純な円形断面について，コンクリートの応力度，引張鉄筋の応力度，圧縮鉄筋の応力度が各載荷角度によらず，ほぼ一致していることが確認できる。よって載荷角度が変化する2軸曲げについても，応力度が正しく算出されていることが確認できる。

3.5.2　使用内容に対する妥当性

以上より，複鉄筋の計算及び2軸曲げの計算について検証していることから，連続壁基礎の応力度照査，耐力照査に本解析コードを使用することは妥当である。

Ⅴ-5-47　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＭＳＡＰ（配管）

目次

1.　はじめに・・ 1
1.1　使用状況一覧・・・ 2
2.　解析コードの概要・・・ 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）MSAP（配管）について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補③ V-5-47 R1

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-4-3-3-3	管の耐震性についての計算書	
V-2-5-5-4-2	管の耐震性についての計算書	
V-2-5-5-6-2	管の耐震性についての計算書	
V-2-6-6-3-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-8-3-2-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-8-3-4-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-9-4-3-3-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-9-5-6-1	管の耐震性についての計算書	
V-2-10-1-2-9	管の耐震性についての計算書	
V-2-10-1-3-8	管の耐震性についての計算書	
V-3-4-2-3-4	管の応力計算書	
V-3-5-4-4-3	管の応力計算書	
V-3-5-4-6-3	管の応力計算書	
V-3-6-3-3-3	管の応力計算書	
V-3-8-1-2-3	管の応力計算書	
V-3-8-1-4-3	管の応力計算書	
V-3-9-2-2-3-2	管の応力計算書	
V-3-9-2-3-3-2	管の応力計算書	
V-3-10-1-1-1-5	管の応力計算書	
V-3-10-1-1-2-5	管の応力計算書	

2. 解析コードの概要

項目＼コード名	MSAP（配管）
使用目的	3次元有限要素法（はり要素）による 固有値解析，地震応答解析，構造解析，応力算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	
使用したバージョン	
コードの概要	強度及び耐震計算で使用している解析コードMSAP（配管）（以下「本解析コード」という。）は， 汎用コードである。 対話方式による入力及び構造解析の出力データを基に規格基準の算出式に従った評価が可能である。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 開発元より発行されている例題集の中で，モデル要素ごとに静的及び動的解析の例題に対して，解析結果と理論モデルによる理論解又は他の解析コードでの計算結果と一致していることを確認している。また，サンプルモデルに対する固有値解析結果が，理論計算と一致することを確認している。 ・対話方式により入力されたデータはインプットファイルとして出力され，入力データと一致していることを確認している。 ・入力データが正しく構造解析に受け渡されていること，構造解析データが正しく規格計算に受け渡されていることをそれぞれ確認している。 ・構造解析結果として出力されたデータを規格基準に従い，発生応力，疲労累積係数を算出しており，その過程が理論解を再現できることを確認している。 ・地震動の組合せ処理は，本解析コード内で処理しており，アウトプットファイルと理論計算結果が一致することを確認している。 ・本解析コードの適用制限として使用節点数・要素数があるが，適用範囲内であることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認（Validation）】 ・ＪＥＡＧ４６０１-1987 6.5.2項の加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの多質点3次元はりモデルによる解析の妥当性確認として， 確認している。 ・上記妥当性確認を行ったのは加圧水型原子力発電設備における1次冷却ループの3次元はりモデルであるが，1次冷却ループに含まれる1次冷却材管は今回解析する配管と幾何学的に類似しており，同様の3次元はりモデルを用いてモデル化している。 ・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（はり要素）による固有値解析，地震応答解析，構造解析，応力算出の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

Ⅴ-5-48　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＮＳＹＳ

NT2 補②Ⅴ-5-48 R3

目次

1.　はじめに…………………………………………………………………… 1
1.1　使用状況一覧………………………………………………………………… 2
2.　解析コードの概要…………………………………………………………… 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ANSYSについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-4-2-5	使用済燃料プール水位・温度（ＳＡ広域）の耐震性についての計算書	14.0

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	ANSYS
使用目的	3次元有限要素法（はり，シェル要素）による固有値解析，応力解析
開発機関	アンシス
開発時期	1970年
使用したバージョン	14.0（June 2012）
コードの概要	ANSYS（以下「本解析コード」という。）は，スワンソン・アナリシス・システムズ（現，アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。 本解析コードは，広範囲に亘る多目的有限要素法による計算機プログラムである。本解析コードは，構造，マルチフィジックス，流体，陽解法による動的，電磁界および流体力学のシミュレーションならびに解析を実施するものである。 本解析コードは，ISO9001およびASME NQA-1を取得し，アメリカ合衆国原子力規制委員会による10CFR Part 50ならびに10CFR21の要求を満たしており，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・本解析コードの検証は，開発元のリリースノートの例題集において，多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されており，理論解と解析解が一致していることを確認している。 ・本解析コードが適正であることは，コード配布時に同梱されたANSYS Mechanical APDL Verification Testing Packageにより確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発元から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・本解析コードは，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されていることを確認している。 ・本解析コードは，原子力分野では，原子炉設置（変更）許可申請書における応力解析等，これまで多くの構造解析に対し使用実績があることを確認している。

Ⅴ-5-49　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＮＸ ＮＡＳＴＲＡＮ

目次

1.　はじめに……1
1.1　使用状況一覧……2
2.　解析コードの概要……3
2.1　NX NASTRAN　Ver.9.1,Ver.8.1,Ver.6.1,Ver.5mp1……3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）NX NASTRANについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-6-7-2-2	屋外アンテナ（中央制御室）の耐震性についての計算書	Ver.9.1
Ⅴ-2-6-7-2-3	衛星電話設備用通信機器収納ラック（中央制御室）の耐震性についての計算書	Ver.9.1
Ⅴ-2-6-7-2-5	屋外アンテナ（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	Ver.9.1
Ⅴ-2-6-7-2-6	衛星電話設備用通信機器収納ラック（緊急時対策所）の耐震性についての計算書	Ver.9.1
Ⅴ-2-11-2-10	格納容器機器ドレンサンプの耐震性についての計算書	Ver.8.1
Ⅴ-2-9-5-5-1	静的触媒式水素再結合器の耐震性についての計算書	Ver.8.1
Ⅴ-2-別添3-5	可搬型重大事故等対処設備のうちその他設備の耐震性についての計算書	Ver.6.1
Ⅴ-2-別添3-4	可搬型重大事故等対処設備のうちボンベ設備の耐震性についての計算書	Ver.5mp1

NT2 補② Ⅴ-5-49 R2

2.　解析コードの概要

2.1　NX NASTRAN　Ver.9.1,Ver.8.1,Ver.6.1,Ver.5mp1

項目＼コード名		NX NASTRAN
使用目的	Ver.9.1	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び地震応答解析
	Ver.8.1	3次元有限要素法（シェルモデル及びビームモデル）による固有値解析及び地震応答解析
	Ver.6.1	3次元有限要素法（はりモデル及びシェルモデル）による固有値解析及び地震応答解析
	Ver.5mp1	3次元有限要素法（はりモデル）による固有値解析及び応力解析
開発機関		Siemens PLM(Product Lifecycle Management) Software Inc.
開発時期		1971年（The MacNeal-Schwendler Corporation） 2005年（Siemens PLM Software Inc.）
使用したバージョン		Ver.9.1,Ver.8.1,Ver.6.1,Ver.5mp1
コードの概要		NX NASTRAN（以下「本解析コード」という。）は，航空機の機体強度解析を目的としてThe MacNeal-Schwendler Corporationにより開発され，Siemens PLM Software Inc.に引き継がれた有限要素法による構造解析用の汎用プログラムであり，MSC NASTRANと同じ機能を持つ。 適用モデル（主にはり要素，シェル要素，ソリッド要素）に対して，静的解析（線形，非線形），動的解析（過渡応答解析，周波数応答解析），固有値解析，伝熱解析（温度分布解析），熱応力解析，線形座屈解析等の機能を有している。 数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，造船，機械，建築，土木など様々な分野の構造解析に使用されている。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）		【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・材料力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，3次元有限要素法（3次元シェル及びはりモデル）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・構造力学分野における一般的な知見により解を求めることができる体系について，シェル要素及びビーム要素を用いた固有値解析，応力解析の結果と理論モデルによる理論解の比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・本解析コードは，自動車，航空宇宙，防衛，重機，造船などの様々な分野における使用実績を有しており，妥当性は充分に確認されている。 ・今回の工事計画認可申請で行う動解析と類似するものとして，NX NASTRAN代理店である（株）エヌ・エス・ティが実施したタワークレーンの地震応答解析の事例がある。（（株）エヌ・エス・ティパンフレット） ・開発機関が提示するマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する3次元有限要素法（はりモデル，ビームモデル，シェルモデル）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析に本解析コードが適用できることを確認している。 ・検証の体制と今回の工事計画認可申請で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって，解析機能の妥当性も確認できる。 ・今回の工事計画認可申請で行う3次元有限要素法（3次元シェル，ビーム及びはりモデル）による固有値解析，地震応答解析及び応力解析の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

Ⅴ-5-50　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ　ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ　Ｓｅｃｔｉｏｎ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. APOLLO SuperDesigner Sectionの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……5
3.4 解析フローチャート……8
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation）……9

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）APOLLO SuperDesigner Sectionについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	APOLLO SuperDesigner Section
使用目的	鋼部材の断面剛性算出
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	APOLLO SuperDesigner Sectionは，曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて，垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し，各種適用許容応力度を用いて照査を行うプログラムである。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	APOLLO SuperDesigner Sectionは，静的解析及び動的解析により算定された格点位置での断面力に対して応力計算を行い，各部位での発生応力が許容値内に収まっているかを照査する際の断面剛性（ねじり剛性）の算出に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・APOLLO SuperDesigner Sectionを用いて算出した断面諸量(ねじり剛性)が，構造力学公式集によって算出した断面諸量（ねじり剛性）と一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性検証（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下の通りである。 ・検証の内容の通り，断面諸量計算結果について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3. APOLLO SuperDesigner Sectionの解析手法について

3.1 一般事項

APOLLO SuperDesigner Sectionは，曲げねじり理論によって算出した断面諸量を用いて，垂直応力度・せん断応力度・ねじり応力度を算出し，各種適用許容応力度を用いて照査を行うプログラムである。

3.2 解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Sectionの主な特徴を以下に示す。

断面形状

・基本断面形状は，ＲＣ箱桁，鋼床版箱桁，鋼床版Ｉ桁に対応しているが，追加プログラムとして梯形断面等の任意断面の適用が可能。
・鋼床版のデッキプレートは重ね継ぎ手にも対応している。
・鋼床版の左右張り出し部と上フランジで材質，板厚を各々指定可能。
・鋼床版の縦リブは任意の位置に複数種類の断面の設定が可能。

断面力

・3成分断面力，6成分断面力に対応している。
・鋼床版については架設系，完成系に対応している。

計算方法その他

・せん断力の計算において，トラフリブは等価なプレートに換算して算出する。
・トラフリブが有効幅内かの判断は，トラフリブの中心位置が有効幅内に入っているかで判断する。
・板厚が40㎜を超える場合には，以下の2通りの許容応力度算出方法が選択可能である。
　①道路橋示方書通りの許容応力度を使用する。
　②40㎜以下の板厚と同様の許容応力度算出式を使用する。
・部材の寸法の押さえとして，板厚の逃げ方向を以下の三種類から選択が可能。
　①中心押さえ
　②部材の定義した方向の左側押さえ
　③部材の定義した方向の右側押さえ
・縦リブ断面として①板リブ，②バルブプレート，③トラフリブの3種類が選択可能。

3.3　解析手法

3.3.1　断面諸量の計算方法

小松氏の「曲げねじり理論」により算出する。

1つの部材（フランジや腹板）を，意味がある点（腹板取り付け点，重心位置，有効幅位置など）で分割したものを「要素」とし，計算は1要素毎に計算し，その合計で求める。上フランジの要素分割例を図3-1に示す。

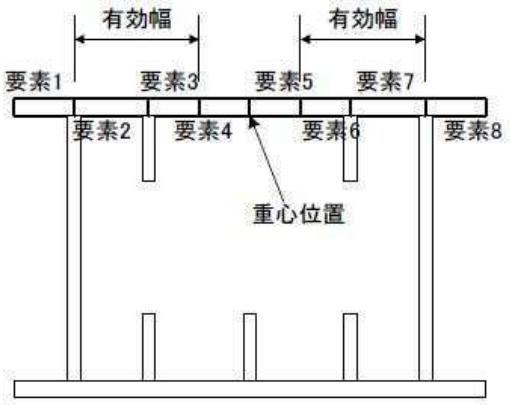


図3-1　上フランジの要素分割例

(1) 断面積および重心位置

$\Sigma A = \Sigma Bj \times Tj$　　ここに　j：各要素番号　B：幅　T：厚

曲率がある場合，

$A'j = Aj \diagup \rho j$　　ここに　ρj：各要素の中心点より平面曲率中心までの距離

重心位置（曲率がある場合）

$R0 = \Sigma Aj \diagup \Sigma A'j$

$Xc = R0 - R$

$Yc = (\Sigma(A'j \times Y'j)) \times R0 \diagup \Sigma Aj$

ここで　Y'j：基準軸から各要素の中心までの距離（Y方向の距離）

(2) 剛度

$Ix = R0 \times \Sigma[(Ix'j + Aj \times Yj^2) \diagup \rho j]$

$Iy = R0 \times \Sigma[(Iy'j + Aj \times Xj^2) \diagup \rho j]$

$Ixy = R0 \times \Sigma[(Ixy'j + Aj \times Yj \times Xj) \diagup \rho j]$

ここで　Ix',Iy',Ixy'：要素自身の断面二次モーメントと相乗モーメント

Xj,Yj：要素の重心位置座標

Ixyは相乗曲げモーメントを考慮する場合にのみ有効となる。

(3) ねじり関数，ねじり抵抗

1室の場合

・ねじり関数

$$qk = 1/R0 \times \Sigma[(Xe \times Ys - Xs \times Ye)j / \rho j^2] / \Sigma[Bj / (\rho j^3 \times Tj)]$$

ここで　Σ：閉断面を構成する要素の総和

R0：重心位置曲率半径

ρj：要素の重心位置の曲率半径

(Xs×Ys),(Xe×Ye)：要素の終始点座標

Bj：要素の長さ

Tj：要素の板厚

・ねじり抵抗

$$J = R0^2 \times qk \times \Sigma[(Xe \times Ys - Xs \times Ye)j / \rho j^2] + \Sigma Bj \times Tj / 3$$

閉断面区間　　開断面区間

3.3.2　応力度の計算方法

(1) 垂直応力度

軸力Nによる応力度

$\sigma n = (R / \rho) \times (N / A)$

面内曲げモーメントMxによる応力度

$\sigma mx = (R\_i / \rho) \times (Iy\_i \times y\_i - Ixy\_i \times x\_i) \times Mx / (Ix\_i \times Iy\_i - Ixy\_i^2)$

面外曲げモーメントMyによる応力度

$\sigma my = (R\_o / \rho) \times (Ix\_o \times x\_o - Ixy\_o \times y\_o) \times My / (Ix\_o \times Iy\_o - Ixy\_o^2)$

ここで，　ρ：照査位置の曲率半径

	総断面	面内有効断面	面外有効断面
重心位置（x軸）	xc	xc_i	xc_o
重心位置（y軸）	yc	yc_i	yc_o
重心位置から照査位置までの距離	x	x_i	x_o
	y	y_i	y_o
重心位置の曲率半径	R	R_i	R_o
断面積	A	A_i	A_o
x軸回りの断面二次モーメント	Ix	Ix_i	Ix_o
y軸回りの断面二次モーメント	Iy	Iy_i	Iy_o
相乗モーメント	Ixy	Ixy_i	Ixy_o
ねじり定数	J	-	-

(2) せん断応力度

$\tau = Sx \times qb / Tj$

(3) ねじり応力度

$\tau = T \times (J1/J) / (2 \times F \times Tj)$ 閉断面

$\tau = 3 \times T \times (J2/J) / (Bj \times Tj)$ 開断面

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-1 に示す。

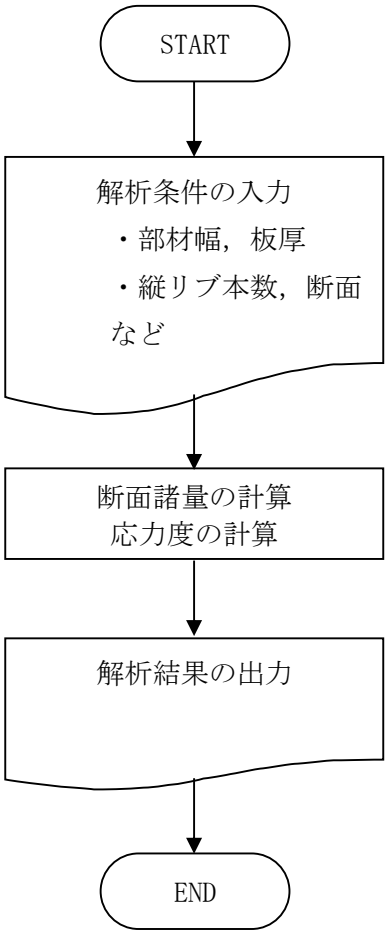


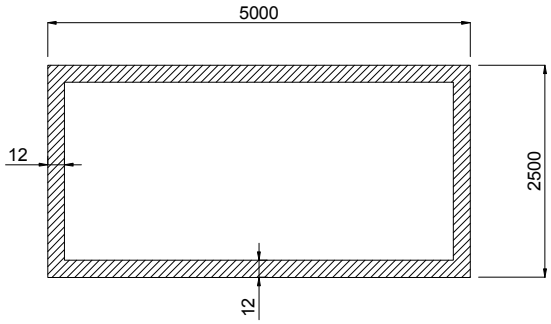
図3-1　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

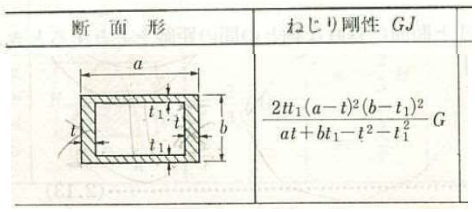
(1)　構造力学公式集により算出したねじり剛性比較による検証

以下に示す断面において構造力学公式集によりねじり剛性を算出し，プログラムの出力結果と比較する。

ねじり剛性算出対象断面



構造力学公式集により算出したねじり剛性



（構造力学公式集 P.46）

図3-2　ねじり剛性算出断面

構造力学公式集から算出するねじり剛性は以下のとおりである。

a ＝ 5000（㎜），b ＝ 2500（㎜），t1 ＝ 12（㎜），t ＝ 12（㎜）より，

J ＝ {2×12×12×(5000-12)^2 ×(2500－12)^2 }／(5000×12＋2500×12－12^2 －12^2)

＝ 494,419,499,500（㎜^{4}）

＝ 49,441,950（㎝^{4}）

APOLLO SuperDesigner Section出力結果を図3-3に示す。

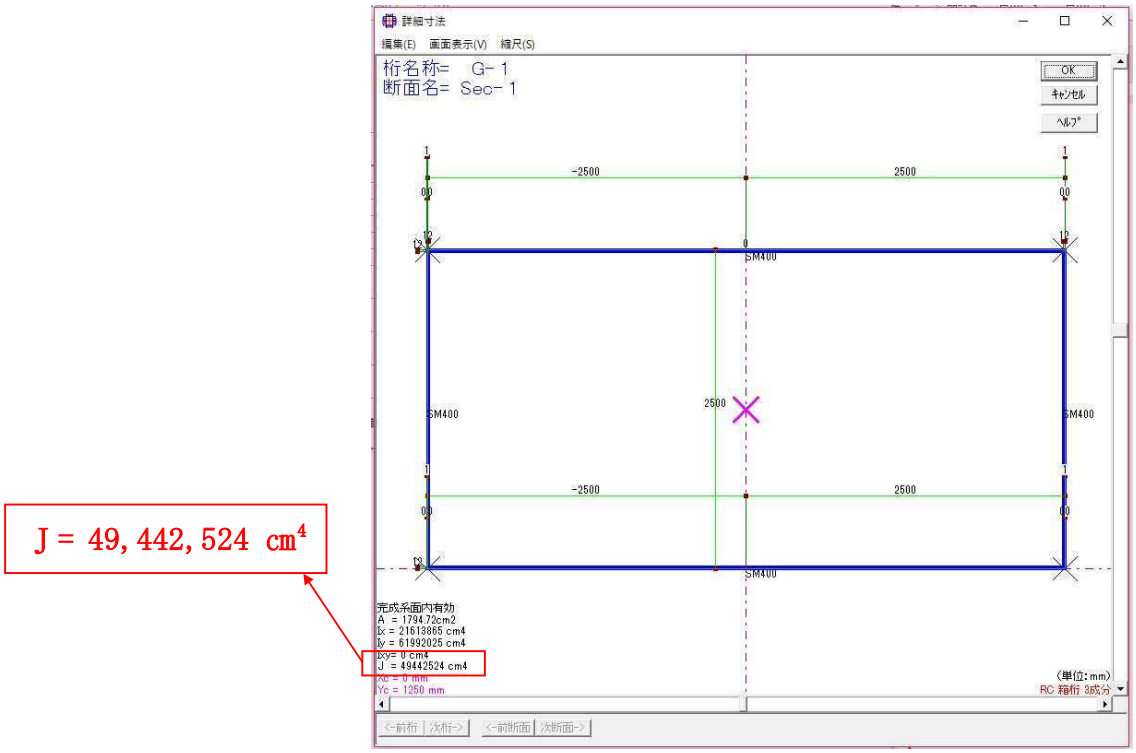


図3-3　APOLLO SuperDesigner Section出力結果

構造力学公式集より算出したねじり剛性とプログラムより算出したねじり剛性の比較を表3-1に示す。

表3-1　計算例と解析結果の比較

	計算例	解析結果	
	構造力学公式集	APOLLO SuperDesigner Section	比率
ねじれ剛性 J（cm^4）	49,441,950	49,442,524	99.999%

構造力学公式集の計算結果とAPOLLO SuperDesigner Sectionの出力結果が良く一致していることを確認しており，ねじれ剛性の算出が正しく実行できていることが確認できる。

(2)　使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の鋼部材の部材連結部の設計にAPOLLO SuperDesigner Sectionによって算出したねじれ剛性を使用することは，構造力学公式集による算出結果と検証を行った結果から今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-51　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ　ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ　Ｓｐｌｉｃｅ

NT2 補② Ⅴ-5-51 R1

目次

1. はじめに 1
1.1 使用状況一覧 2
2. 解析コードの概要 3
3. APOLLO SuperDesigner Spliceの解析手法について 4
3.1 一般事項 4
3.2 解析コードの特徴 4
3.3 解析手法 5
3.4 解析フローチャート 8
3.5 検証（Verification）と妥当性確認（Validation） 9

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）APOLLO SuperDesigner Spliceについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補② V-5-51 R1

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
V-3-別添3-1-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	APOLLO SuperDesigner Splice
使用目的	鋼部材連結部のボルト設計・添接板応力照査
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	本プログラムは，道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）「高力ボルト継手」に準拠した鋼構造連結部の摩擦接合による継手計算を行うものである。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・APOLLO SuperDesigner Splice を用いて算出した継手部における必要ボルト本数及び必要添接板厚が，道路橋示方書の規定により算出した必要ボルト本数及び必要添接板厚と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性検証（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下の通りである。 ・検証の内容の通り，添接計算結果について検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.　APOLLO SuperDesigner Spliceの解析手法について

3.1　一般事項

APOLLO SuperDesigner Spliceは，道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の「高力ボルト継手」に準拠した鋼構造連結部の継手計算を行うプログラムである。

3.2　解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Spliceの主な特徴を以下に示す。

・本プログラムの添接計算は，断面単位（鈑桁，箱桁など）ではなく，板単位（フランジ，腹板など）で行うため，ある程度任意の断面形状に対応している。(例外として，桁構造を想定したプログラムのため，トラス固有の添接計算方法などには対応していない)

・ボルト自動配置の方法は以下の方法に対応している。

①建設省方式　②道路公団大阪建設局方式　③YTI方式

それぞれの方法についてフランジ添接板を母材より5㎜小さくして自動配置する事が出来る。

・フランジ方式の計算方法は以下の方法に対応している。

①便覧方式（孔引き後の断面積で照査する方式)

②橋建方式（孔引き前の断面積で照査する方式)

・腹板の計算方法は以下の方法に対応している。

①通常方式（曲げモーメントとせん断力で計算する方法)

②簡易方式（せん断力のみで計算する方法)

・箱桁の縦リブの孔引き照査方法は以下の方法に対応している。

①縦リブ断面を母材に含めて照査する方法（縦リブの母材アップはしない考え方)

②縦リブ単独で計算する方法

・フランジ添接板の必要断面積の考え方は以下の方法に対応している。

①全添接板（両側）で必要断面積を満足する方法

②片側添接板で必要断面積の１／２を満足する方法

・腹板の添接計算を行う場合，一番端部のボルト作用力の一部をフランジに持たせた計算方法に対応している。

3.3　解析手法

摩擦接合は，高力ボルトで母材及び連結板を締付け，それらの間の摩擦力によって応力を伝達させるものである。高力ボルトに摩擦接合を採用する場合には，摩擦面のすべり及び母材又は連結板の降伏に対して安全となるように設計しなければならない。設計手法は「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（日本道路協会，平成14年3月）の「7.3　高力ボルト継手」に則る。

3.3.1　ボルトの許容力

摩擦接合のボルトの許容力は「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（日本道路協会，平成14年3月）の「3.2.3 溶接部及び接合用鋼材の許容応力度」の規定による。摩擦接合用高力ボルトの許容力を表3-1に示す。

表3-1　摩擦接合用高力ボルトの許容力（1ボルト1摩擦面あたり）

(b)接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布する場合

ボルトの等級 / ねじの呼び	F8T	F10T	S10T
M20	35	44	44
M22	44	54	54
M24	51	63	63

(kN)

3.3.2　摩擦接合用高力ボルトの設計

摩擦接合におけるボルトは，母材に作用する軸方向力，せん断力及び曲げモーメントに対して安全となるように設計しなければならない。全強の75 %の強度を持たせる場合は，これに相当する応力に対して安全となるように設計する。

垂直応力が作用する板を連結する場合には，各列のボルトが式（3.3.2-1）を満たすように設計する。ただし，垂直応力が均等に分布している場合は，式（3.3.2-2）を満たせばよい。ボルトに作用する力を図3-1に示す。

$$\rho_{pi} = \frac{P_i}{n_i} \leqq \rho_a \qquad (3.3.2\text{-}1)$$

$$\rho_p = \frac{P}{n} \leqq \rho_a \qquad (3.3.2\text{-}2)$$

ここに，ρ_{Pi}　：i 列目のボルト１本に作用する力（N）

ρ_P　：ボルト１本に作用する力（N）

Pi　：i 列目の接合線の片側にあるボルト郡に作用する力（N）

P　：接合線の片側にある全ボルトに作用する力（N）

ni　：i 列目の接合線の片側にあるボルト郡のボルト本数（本）

n　：接合線の片側にある全ボルトの全本数（本）

ρa　：ボルト１本あたりの許容力（N）

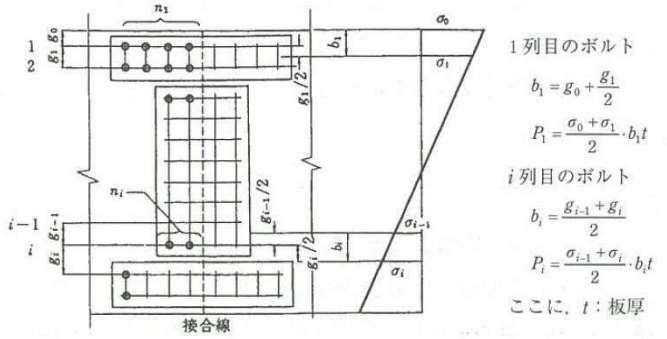


図3-1（1）　ボルトに作用する力（垂直応力の分布が均等でない場合）

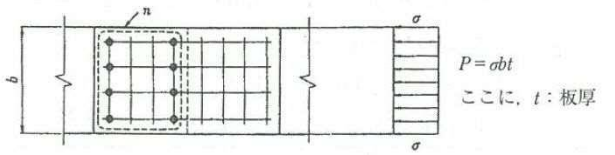


図3-1（2）　ボルトに作用する力（垂直応力の分布が均等な場合）

せん断力が作用する板を連結する場合は，式（3.3.2-3）を満たすように設計する。

$$\rho_s = \frac{S}{n} \leqq \rho_a \qquad (3.3.2\text{-}3)$$

ここに，ρ_s　：ボルト１本に作用する力（N）
S　：せん断力（N）
n　：接合線の片側にあるボルトの全本数（本）
ρ_a　：ボルト１本あたりの許容力（N）

3.3.3　連結板の設計

連結板は作用力に対して安全であると同時に，部材全体として必要な継手強度が得られるように設計しなければならない。

引張力が作用する板の連結板は，「3.3.4　純断面積」の計算に規定する純断面に生じる応力度が許容引張応力度以下となるように設計する。圧縮力が作用する板の連結板は，総断面に生じる応力度が「道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）・同解説」（日本道路協会，平成14年3月）の「3.2.1　構造用鋼材の許容応力度」に規定する許容圧縮応力度の上限値以下となるように設計する。

曲げモーメントが作用する板の連結板は，式（3.3.3-1）を満たすように設計する。

$$\sigma = \frac{M}{I} y \leqq \sigma_a \qquad (3.3.3\text{-}1)$$

ここに，σ　：連結板の縁端に生じる応力度（N/㎟）
M　：連結板に作用する曲げモーメント（N・㎜）
I　：中立軸に関する連結板の総断面の断面二次モーメント（㎜^{4}）
y　：中立軸から連結板の縁端までの距離（㎜）
σ_a　：道路橋示方書Ⅱ鋼橋編3.2.1に規定する許容応力度の上限値（N/㎟）

3.3.4　純断面積の計算

高力ボルトの継手部の設計にあたっては，継手部の断面積を適切に考慮しなければならない。

引張材の純断面積は次の各項により計算する。

1）純断面積は純幅と板厚との積とする。この場合，材片の純幅はその総幅からボルト孔により失われる幅を除いたものとする。

2）摩擦接合では，母材及び連結板の純断面応力度を照査する場合に用いる純断面積は1）の規定により計算される値の1.1倍まで割増してよい。ただし，総断面積を超えてはならない。

3）部材の純断面積を算定する場合のボルト孔の径は，ボルトの呼びに3㎜を加えたものとする。

4）千鳥にボルト締めされた材片の純幅は，純幅から考えている断面の最初のボルト孔についてその全幅を控除し，以下順次に式（3.3.4-1）のwを各ボルト孔について控除したものとする。

$$w = d - \frac{p^2}{4g}\,(\text{㎜}) \qquad (3.3.4\text{-}1)$$

ここに，d　：ボルト孔の直径（ボルトの呼び ＋3㎜）
p　：ボルトのピッチ（㎜）
g　：応力直角方向のボルト線間距離（㎜）

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。

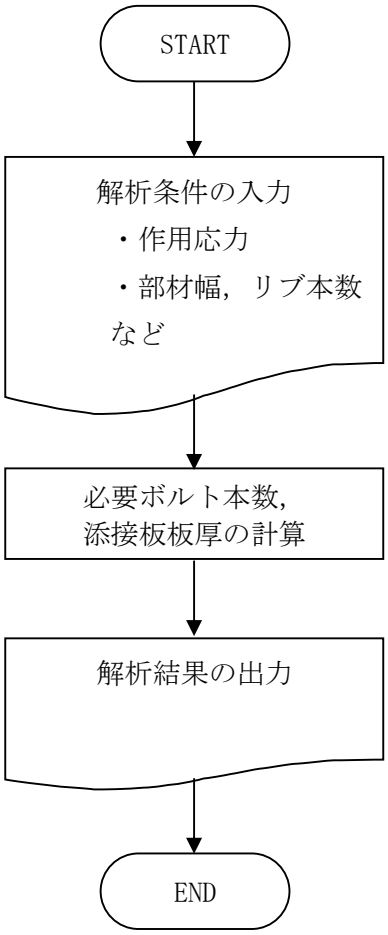


図3-2　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

a.　道路橋示方書の規定により算出した計算結果との比較による検証

以下に示す2通りの条件において添接計算を実施した結果の比較を行う。

・フランジ方式

1）計算条件

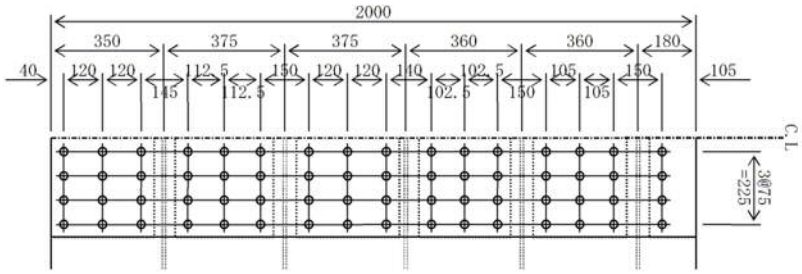
作用応力度　$\sigma_{tmax} = 36\ N/mm^2$, $\sigma_{cmax} = -36\ N/mm^2$

母材断面　　1-Flg PL 2000 × 20 (SM490Y)

4-Rib PL 230 × 22 (SM490Y)

フランジ及びリブのボルト配置を図3-3に示す。

フランジ



リブ

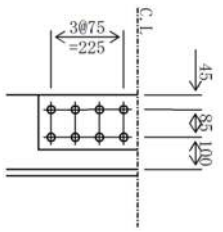


図3-3　フランジ及びリブのボルト配置図

2）設計応力

$0.75 \times 210 = 157.5\ N/mm^2 > 36\ N/mm^2$

作用応力度より全強の75%の方が大きいため，設計応力は全強の75%とする。

3）母材断面積

総断面積　フランジ　$2000 \times 20 = 40000\ mm^2$

リブ　$4 \times 230 \times 22 = 20240\ mm^2$

合計　$40000 + 20240 = 60240\ mm^2$

純断面積

フランジ　$35200\ mm^2$

$(40000 - (163 \times 25) \times 20) \times 1.1 = 35200\ mm^2 < 40000\ mm^2$

リブ　$17420\ mm^2$

$(20240 - 4 \times (2 \times 25) \times 22) \times 1.1 = 17424\ mm^2 < 20240\ mm^2$

合計　35200 ＋ 17424 ＝ 52624 ㎟

4）設計軸力

引張力　Pt　＝ 157.5 N/㎟ × 35200 ㎟ ／ 1.1 ＝ 5040000 N

Ptr ＝ 157.5 N/㎟ × 17424 ㎟ ／ 1.1 ＝ 2494800 N

圧縮力　Pc　＝ 157.5 N/㎟ × 40000 ㎟　　＝ 6300000 N

Pcr ＝ 157.5 N/㎟ × 20240 ㎟　　＝ 3187800 N

5）必要ボルト本数

フランジ　6300000 N ／ 108000 N ＝ 58.3 本 ＜ 64本使用　OK

リブ　　3187800 N ／ 108000 N ＝ 29.5 本 ＜ 32本使用　OK

6）添接板必要断面積

総断面積　フランジ　5040000／210／2 ＝ 12000 ㎟

リブ　　2494800／210　＝ 11880 ㎟

純断面積　フランジ　6300000／210／2 ＝ 15000 ㎟

リブ　　3187800／210　＝ 15180 ㎟

7）添接板厚と添接板照査

添接板厚

フランジ　親板 10㎜，子板 16㎜　　リブ 19㎜

添接板照査

フランジ親板

総断面積　2000 × 10 ＝ 20000 ㎟ ＝ 20000 ㎟　＞12000 ㎟　OK

純断面積　(20000 － (1×25) × 10) × 1.1 ＝ 17600㎟ ＜ 20000 ㎟

＝ 17600 ㎟ ＞15000 ㎟　OK

フランジ子板

総断面積

145 × 16 ＋ 290 × 16 ＋ 285 × 16 ＋ 2 × 320 × 16 ＋ 305 × 16

＝ 26640 ㎟ ＞ 12000 ㎟ OK

純断面積

1.1 × (145 × 16 － (1×25) × 16) ＝ 2112 ㎟ ＜ 2320 ㎟

1.1 × (290 × 16 － (3×25) × 16) ＝ 3784 ㎟ ＜ 4640 ㎟

1.1 × (285 × 16 － (3×25) × 16) ＝ 3696 ㎟ ＜ 4560 ㎟

1.1 × (2×320 × 16 － 2×(3×25) × 16) ＝ 8624 ㎟ ＜ 10240 ㎟

1.1 × (305 × 16 － (3×25) × 16) ＝ 4048 ㎟ ＜ 4880 ㎟

2112 ＋ 3784 + 3696 + 8624 + 4048 = 22264 ㎟ ＞ 15180 ㎟ OK

リブ

総断面積　8 × 165 × 19 ＝ 25080 ㎟ ＞ 11880 ㎟ OK

純断面積　(25080 － 8×(2×25) × 19) × 1.1 ＝ 19448㎟ ＜ 25080 ㎟

＝ 19448㎟＞ 15180 ㎟ OK

・ウェブ方式の計算条件

1）計算条件

作用応力度　σtmax ＝ 47 N/㎟, σcmax ＝ －47 N/㎟, τ ＝ 24 N/㎟

母材断面　　1-Web PL 4500 × 12 (SM490Y)

添接板断面　2-SPL PL 4380 × 9 (SM490Y)

2）設計応力及びボルト配置

0.75 × 210 ＝ 157.5 N/㎟ ＞ 47 N/㎟

作用応力度より全強の75%の方が大きいため，設計応力は全強の75%とする。

ボルト配置及び作用応力度を図3-4に示す。

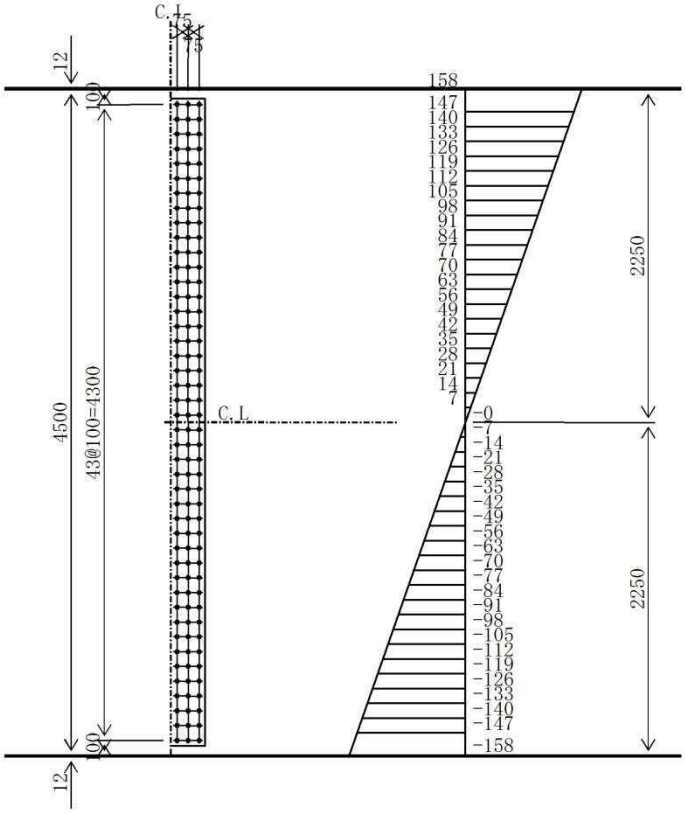


図3-4　ボルト配置及び作用応力度

3）必要ボルト本数

再下段のボルトで必要ボルト本数を計算する。

分担幅　　b ＝ 150 ㎜

設計応力度　　σL ＝ 158 N/㎟, σL-1 ＝ 147 N/㎟

分担力　　PL ＝ 150 × 12 × (157.5 + 147) ／ 2 = 274050 N

必要ボルト本数　N ＝ 274050 ／ 108000 ＝ 2.5 本＜ 3本使用　OK

4) せん断力の照査

総ボルト本数　$\Sigma N = 44 \times 3 = 132$ 本

ボルト1本あたりのせん断力

$$\rho s = 24 \times 4500 \times 12 \diagup 132 = 9818\ N < \rho a = 108000\ N$$ OK

合成応力の照査

$$\rho \kappa = \sqrt{((274050 \diagup 3)^2 + 9818^2)} = 91876\ N < \rho a = 108000\ N$$ OK

添接板の照査

ウェブの断面二次モーメント

$$Iw = 1/12 \times 12 \times 4500^3 = 9.1125 \times 10^{10}\ mm^4$$

ウェブの曲げモーメント

$$Mw = \sigma \times Iw \diagup y = 157.5 \times 9.1125 \times 10^{10} \diagup (4500/2) = 6.37875 \times 10^9\ Nmm$$

添接板の断面二次モーメント

$$Is = 1/12 \times 9 \times 4380^3 \times 2 = 1.26042 \times 10^{11}\ mm^4$$

添接板の曲げ応力度

$$\sigma s = 6.37875 \times 10^9 \diagup 1.26042 \times 10^{11} \times (4380 \diagup 2) = 111\ N/mm^2$$

$$< \sigma a = 210\ N/mm^2$$ OK

フランジ方式，ウェブ方式共に，(添付1) 及び (添付2) に示すAPOLLO SuperDesigner Spliceの出力結果と一致することを確認しており，添接計算が正しく実行できていることが確認できる。計算例と解析結果の比較を表3-2に示す。

表3-2　計算例と解析結果の比較

対　象					計算例	解析結果	比　率
フランジ方式	必要ボルト本数		フランジ	本	58.3	58.3	100%
			リブ	本	29.5	29.5	100%
	添接板必要断面積	総断面	フランジ	cm^2	120.0	120.0	100%
			リブ	cm^2	118.8	118.8	100%
		純断面	フランジ	cm^2	150.0	150.0	100%
			リブ	cm^2	151.8	151.8	100%
ウェブ方式	必用ボルト本数			本	2.5	2.5	100%
	ボルトせん断力			N	9,818	9,818	100%
	ボルト合成応力			N	91,876	91,876	100%
	添接板応力			N/mm^2	111	111	100%

b. 使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の鋼部材の部材連結部の設計にAPOLLO SuperDesigner Spliceを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

検証の内容のとおり，フランジ部材，腹板部材の添接計算の検証を行っていることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

(添付1) フランジ方式 APOLLO SuperDesigner Splice 出力結果

(a) 作用応力度

$\sigma tmax = 36\ N/mm^2$　　$0.75\sigma ta = 0.75 \times 210 = 158\ N/mm^2$

$\sigma cmax = -36\ N/mm^2$　　$0.75\sigma ca = 0.75 \times 210 = 158\ N/mm^2$

$\therefore \sigma c = 158\ N/mm^2$

(b) 母材総断面

1-FLG　　PL　2000×20　　Ag ＝ 400.0 cm^2　　(SM490Y)

4-RIB　　PL　 230×22　　Agr ＝ 202.4 cm^2　　(SM490Y)

$\Sigma Ag = Ag + Agr = 400.0 + 202.4 = 602.4\ cm^2$

(c) ボルト配置図

ボルト配置図を図3-5に示す。

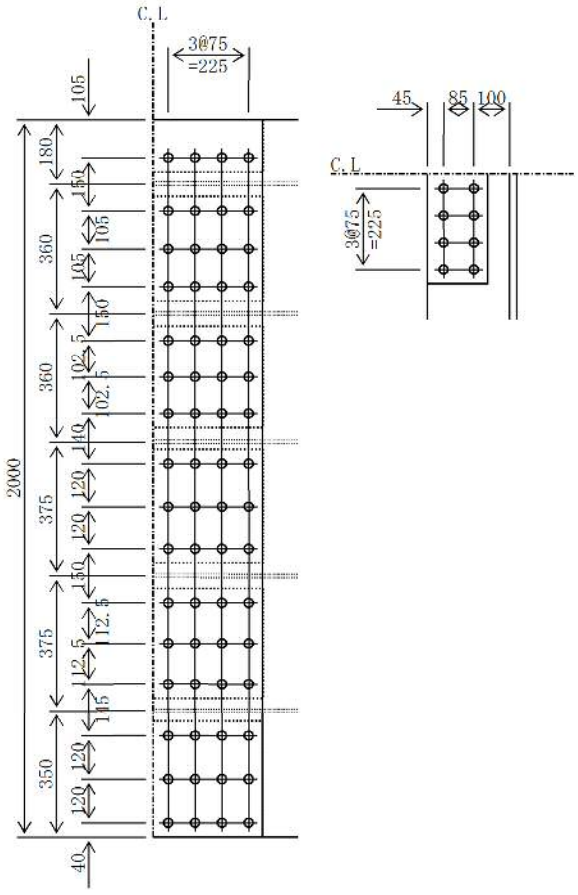


図3-5　ボルト配置及び作用応力度

(d) 母材断面の照査

1-FLG　　PL　2000×20　　A ＝ 400.0

(400 − (16×2.5) ×2.0) ×1.1 ＝ 352.0 ＜ 400.0　∴ An ＝ 352.0 cm^2

4-RIB　　PL　 230×22　　Ar ＝ 202.4

(202.4 − 4× (2×2.5) ×2.2) ×1.1 ＝ 174.2 ＜ 202.4　∴ Anr ＝ 174.2 cm^2

$\Sigma An = An + Anr = 352.0 + 174.2 = 526.2\ cm^2$

$\Sigma tn = \sigma tmax \times \Sigma Ag \ / \ \Sigma An = 36 \times 602.4 / 526.2 = 41\ N/mm^2$

$< \sigma a = 210\ N/mm^2$ OK

(e) 設計軸力

・母材 Pt ＝ 0.75σta×An／1.1 ＝ 158×35200／1.1＝5040000 N

＞σta×An ＝ 41×35200 ＝ 1450595 N

Pc ＝ σc×Ag ＝ 158×40000 ＝ 6300000 N

・リブ Ptr ＝ 0.75σta×Anr／1.1 ＝ 158×17424／1.1 ＝ 2494800 N

＞σtn×Anr ＝ 41×17424 ＝ 718045 N

Pcr ＝ σc×Agr ＝ 158×20240 ＝ 3187800 N

(f) 添接板必要断面積

・母材(片側) AnR = Pt / σa / 2 = 5040000 / 210 / 2 = 12000 mm^2 = 120.0 cm^2

AgR = Pc / σa / 2 = 6300000 / 210 / 2 = 15000 mm^2 = 150.0 cm^2

・リブ AnrR = Ptr / σa = 2494800 / 210 = 11880 mm^2 = 118.8 cm^2

AgrR = Pcr / σa = 3187800 / 210 = 15180 mm^2 = 151.8 cm^2

(g) 必要ボルト本数

・母材 n ＝ Pc／（108000×1.00）＝6300000／108000＝ 58.3本（64本使用）

・リブ nr ＝ Pcr／（108000×1.00）＝3187800／108000＝ 29.5本（4@8＝32本使用）

（高力ボルト S10T M22 2面許容摩擦力ρa＝108000 N 無機ジンク Nmax＝4.4本）

(h) 添接板の照査

	(SM490Y)	Ags(cm^2)	孔引き		Ans(cm^2)
1-SPL	PL 2000×10	(200.0 － (16×2.5) × 1.0) ×1.1＝176.0	＜	200.0	∴21.1
		＝AgR			＝AnR
1-SPL	PL 145×16	(23.2 － (1×2.5) × 1.6) ×1.1＝21.1	＜	23.2	∴21.1
1-SPL	PL 290×16	(46.4 － (3×2.5) × 1.6) ×1.1＝37.8	＜	46.4	∴37.8
1-SPL	PL 285×16	(45.6 － (3×2.5) × 1.6) ×1.1＝37.0	＜	45.6	∴37.0
2-SPL	PL 320×16	(102.4 －2×(3×2.5) ×1.6) ×1.1＝86.2	＜	102.4	∴86.2
1-SPL	PL 305×16	(48.8 － (3×2.5) × 1.6) ×1.1＝40.5	＜	48.8	∴40.5
		266.4			222.6
		＞AgrR			＞AnrR
8-SPL	PL 165×19	(250.8 － 8× (2×2.5) × 1.9) ×1.1＝192.3	＜	250.8	∴192.3
		＞AgrR			＞AnrR

(添付2) ウェブ方式 APOLLO SuperDesigner Splice 出力結果

(a) 作用応力度

1-WEB　　PL　4500×12　　A　＝　540.0 cm^2　　(SM490Y)

(b) 設計応力度

σU ＝　47 N/mm^2 ＜　$\sigma a \times 0.75$ ＝ 210 × 0.75 ＝ 158 N/mm^2

σL ＝　−47 N/mm^2 ＜　$\sigma a \times 0.75$ ＝ 210 × 0.75 ＝ 158 N/mm^2

σUn ＝　158 ×　47　／ 47 ＝ 158 N/mm^2

σLn ＝　158 N/mm^2

τ　＝　24 N/mm^2

(c) ボルト配置及び作用応力度

ボルト配置及び作用応力度を図3-6に示す。

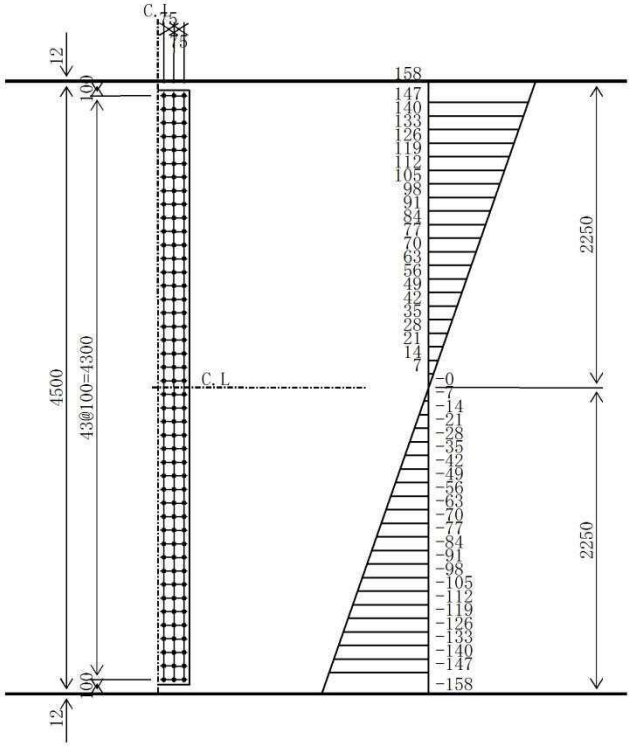


図3-6　ボルト配置及び作用応力度

(d) ボルトの応力度照査

44列目のボルト照査

分担幅　　b1 ＝　15.0 cm

分担する力の合計

P1　＝　150　×12×（147＋158）／　2　＝　274050 N

必要ボルト本数（使用ボルト本数）

N1　＝　274050 ／（108000 × 1.00）＝ 2.5本　（3本使用）

せん断力の照査

$\rho s = \tau \times A / 132 = 24 \times 54000 / 132 = 9818\ N > \rho a = 108000\ N$

合成応力の照査

$\rho c44 = \sqrt{((274050/3)^2 + 9818^2)} = 91876\ N > \rho a = 108000\ N$

(高力ボルト S10T M22 2面許容摩擦力　ρa ＝ 108000 N　無機ジンク Nmax ＝ 3本)

(e)　添接板の照査

2-SPL PL　4380　×　9　As ＝　788.4 cm^2 (SM490Y)

添接板の断面2次モーメント　　Is ＝ 12604151 cm^4 ＞Iw

腹板の断面2次モーメント　　Iw ＝　9112500 cm^4

腹板の受持つ曲げモーメント

$Mw = 158 \times 9112500 \times 10^4 / 2250 = 6379 \times 10^6\ N \cdot mm$

添接板の曲げモーメント

$\sigma sp = 6379 \times 10^6 / (12604151 \times 10^4) \times 2190 = 111\ N/mm^2 < \sigma a = 210\ N/mm^2$

Ⅴ-5-52　計算機プログラム（解析コード）の概要
・ＡＰＯＬＬＯ　ＳｕｐｅｒＤｅｓｉｇｎｅｒ　Ｒｉｂｃｈｅｃｋ

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. 解析コードの概要……3
3. APOLLO SuperDesigner Ribcheckの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 解析コードの特徴……4
3.3 解析手法……4
3.4 解析フローチャート……6
3.5 検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)……7

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）APOLLO SuperDesigner Ribcheckについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

NT2 補② V-5-52 R1

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-10-2-2-1	防潮堤（鋼製防護壁）の耐震性についての計算書	Ver. 10.11.0.3
Ⅴ-3-別添3-2-1-1	防潮堤（鋼製防護壁）の強度計算書	Ver. 10.11.0.3

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	APOLLO SuperDesigner Ribcheck
使用目的	鋼部材におけるリブの応力照査
開発機関	株式会社横河技術情報
開発時期	1996年
使用したバージョン	Ver. 10.11.0.3
コードの概要	本プログラムは，道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）に準拠した縦リブの剛性照査及び横リブ断面指定及び剛性照査を行うものである。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	APOLLO SuperDesigner Ribcheck は，鋼製防護壁の外面鋼板の剛性確保のために設けられている縦リブについて，道路橋示方書の規定に則り，必要剛度を確保できているかの確認に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下の通りである。 ・APOLLO SuperDesigner Ribcheck を用いて算出した縦リブの必要断面剛性と，道路橋示方書に規定されている必要剛性が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性検証（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下の通りである。 ・検証の内容の通り，道路橋示方書を満足するリブ剛性を確保できていることを照査できていることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.　APOLLO SuperDesigner Ribcheckの解析手法について

3.1　一般事項

APOLLO SuperDesigner Ribcheckは，「道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）」に準拠した縦リブの剛性照査及び横リブ断面指定並びに剛性照査を行うプログラムである。

3.2　解析コードの特徴

APOLLO SuperDesigner Ribcheckの主な特徴を以下に示す。

・本プログラムでは，指定した縦リブ断面に対する断面剛性照査に加えて，横リブの断面指定の有無が選択可能であり，指定した横リブ断面における剛性照査や，必要剛性を満たす最小の横リブ断面の推定も可能である。

3.3　解析手法

補剛板の補剛材は，「道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）（4.2.5）」に準じて下記式を満たすものとする。

縦リブの必要断面積

$$AL_{req} = b \times t \ / \ (\ 10 \ \times \ n \ )$$

縦リブの必要剛度

$$IL_{req} = b \times t^3 \ / \ 11 \times \gamma L_{req}$$

縦リブの必要剛比及び横リブの必要剛度

（$\alpha \leqq \alpha 0$ かつ横リブの剛度が Ic_{req}を満足する場合）

$$\gamma L_{req} = 4\alpha^2 n \times (t0/t)^2 \times (1+n \times \delta L) - (\alpha^2+1)^2/n \qquad (t \geqq t0)$$

$$\gamma L_{req} = -\ 4\alpha^2 n \times (1+n \times \delta L) - (\alpha^2+1)^2/n \qquad (t < t0)$$

ここに，横リブの必要剛度は，

$$Ic_{req} = (b \times t^3/11) \times \{(1+n \times \gamma L_{req})/(4 \times \alpha^3)\}$$

（上記以外の場合）

$$\gamma L_{req} = [\{2n^2 \times (t0/t)^2 \times (1+n \times \delta L) - 1\}^2 - 1]/n \qquad (t \geqq t0)$$

$$\gamma L_{req} = [\{2n^2 \times (1+n \times \delta L) \ - 1\}^2 - 1]/n \qquad (t < t0)$$

ここで，

t　：補剛板の板厚（㎜）

b　：補剛板の全幅（㎜）

a　：横リブ間隔（㎜）

n　：縦リブによって区切られるパネル数

α ：補剛板の縦横寸法比（＝ a/b）（図3-1参照）

α_0 ：限界縦横寸法比（$\sqrt[4]{(1+n\gamma L)}$）

δL ：縦リブ１個の断面積比（AL／bt）

γL ：縦リブの剛比（IL／(bt^3／11)）

t_0 ：板厚（㎜）（表3-1参照）

道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）表-4.2.6より

f ：応力勾配による係数（=1）

AL ：縦リブ１本の断面積（mm^2）

IL ：縦リブ１本の断面二次モーメント（mm^4）

Ic ：横リブ１本の断面二次モーメント（mm^4）

表3-1　板厚 t_0

鋼　種	SS400 SM400 SMA400W	SM490	SM490Y SM520 SMA490W	SM570 SMA570W
t_0	$\frac{b}{28fn}$	$\frac{b}{24fn}$	$\frac{b}{22fn}$	$\frac{b}{22fn}$

f：4.2.4 に規定する応力勾配による係数

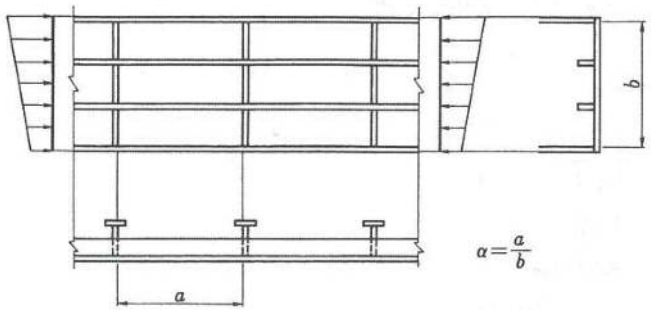


図3-1　補剛板の縦横寸法比α

3.4　解析フローチャート

解析フローチャートを図 3-2 に示す。

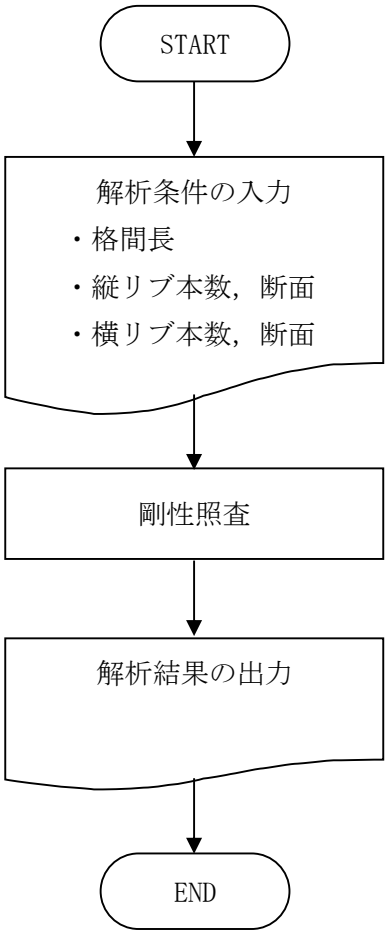


図3-2　解析フローチャート

3.5　検証（Verification）と妥当性確認（Validation）

a.　道路橋示方書の規定により算出した計算結果との比較による検証

1)　設計条件

設計条件を表3-2に示す。

表3-2　設計条件

		単位	
補剛板厚	t	mm	30
補剛板幅	b	mm	1460
横リブ間隔	a	mm	2800
縦リブによって区切られるパネル数	n		3
補剛板の縦横寸法比	α		1.918
限界縦横寸法比	α_0		3.239
縦リブ1個の断面比	δ L		0.143
縦リブの剛比	γ L		36.33
「道示Ⅱ・表-4.2.6」に示す板厚	t_0	mm	22.1
応力勾配による係数（＝1）	f		1
縦リブ1本の断面積	AL	mm^2	6250
縦リブ1本の断面二次モーメント	IL	mm^4	130208333
縦リブ断面幅	Br	mm	250
縦リブ断面板厚	tr	mm	25
補剛板材質			SM490Y

2)　剛度照査

$A = 250 \times 25 = 6250\ mm^2$

$I = (25 \times 250^3)/12 + (25 \times 250) \times (250/2)^2 = 130208333\ mm^4$

$\gamma = 130208333 / \{(1460 \times 30^3)/11\} = 36.33$

$\alpha = 1.918$, $\alpha_0 = 3.239$ より $\alpha \leqq \alpha 0$

$t = 30mm$, $t_0 = 22.1mm$ より $t \geqq t0$

従って，式(4.2.5)*より，

$\gamma L_{req} = 4 \times 1.918^2 \times 3 \times (22.1/30)^2 \times (1+3\times0.143) - (1.918^2+1)^2/3$

$= 26.976 < \gamma L_{req} = 36.33$　OK

$AL_{req} = 1460 \times 30 /(10\times3) = 1460\ mm^2 < AL = 6250\ mm^2$　OK

$IL_{req} = 1460 \times 30^3 \times 26.976/11 = 96672175\ mm^4 < IL = 130208333\ mm^4$　OK

注記　＊：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅱ鋼橋編）・同解説（日本道路協会，平成24年3月）の式（4.2.5）より

以下に添付する，APOLLO SuperDesigner Ribcheckの出力結果と一致することを確認しており，縦リブの剛性照査が正しく実行できていることが確認できる。

計算例と解析結果の比較を表3-3に示す。

表3-3　計算例と解析結果の比較

対　象			計算例	解析結果	比 率
断面積	cm^2	AL	62.50	62.50	100%
	cm^2	AL_{req}	14.60	14.60	100%
剛度	cm^4	IL	13021	13021	100%
	cm^4	IL_{req}	9667	9667	100%
剛比	－	γL	36.33	36.33	100%
	－	γ_{req}	26.976	26.976	100%

b.　使用内容に対する妥当性

鋼製防護壁の外面鋼板の剛性確保のために設けられている縦リブの剛性照査に，APOLLO SuperDesigner Ribcheckを使用することは，次の通り本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

・検証の内容の通り，縦リブの必要断面積と必要剛度の照査の検証を行っていることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

（添付）APOLLO SuperDesigner Ribcheck 出力結果

パネル長	：2800 mm	横リブ本数	： 0 本	横リブ間隔（a）	：2800 mm
補剛板材質	：SM490Y	補剛板幅（b）	：1460 mm	補剛板厚（ｔ）	： 30 mm
縦リブ本数	： 2本	縦リブ高	： 250 mm	縦リブ厚	： 25 mm

$AL = 25.0 \times 2.5 = 62.50\ cm^2$　　$IL = 25.0^3 \times 2.5 / 3 = 13021\ cm^4$

$\delta L = 62.5 / (146.0 \times 3.0) = 0.143$　　$\gamma L = 13021 / (146.0 \times 3.0^3 / 11) = 36.33$

$\alpha = 280.00 / 146.0 = 1.918$　　$\alpha_0 = \sqrt[4]{(1 + 3 \times 36.33)} = 3.239$

$t_0 = 146.0 / (22 \times 1.000 \times 3) = 2.21\ cm$　　$t = 3.0\ cm$

$\alpha \leqq \alpha_0$，$t \geqq t0$，なので「道示Ⅱ・式（4.2.5）」より

$\gamma L_{req} = 4 \times 1.918^2 \times 3 \times (2.2 / 3)^2 \times (1 + 3 \times 0.143) - (1.918^2 + 1)^2 / 3 = 26.976$

$AL_{req} = 146.0 \times 30 / (10 \times 3) = 14.60\ cm^2 < AL = 62.50\ cm^2$

$IL_{req} = 146.0 \times 30^3 \times 26.976 / 11 = 9667\ cm^4 < IL = 13021\ cm^4$

Ⅴ-5-53　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＡＳＨＳＤ２－Ｂ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＡＳＨＳＤ２－Ｂについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧及び解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	Ver.0
Ⅴ-2-3-3-2-3	シュラウドサポートの耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その１）	
（Ⅴ-2-3-4-1-2に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書 スカートの耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その２）	
（Ⅴ-2-3-4-1-3に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11，N12，N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-3-3-1	原子炉圧力容器の強度計算書	
（Ⅴ-3-3-1に含める）	主フランジ，上部鏡板及びスタッドボルトの強度計算書 下部鏡板の強度計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の強度計算書 中性子計測ハウジング貫通部の強度計算書 再循環水出口ノズル（N1）の強度計算書 再循環水入口ノズル（N2）の強度計算書 主蒸気ノズル（N3）の強度計算書 給水ノズル（N4）の強度計算書 炉心スプレイノズル（N5）の強度計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の強度計算書 ベントノズル（N7）の強度計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の強度計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の強度計算書 計装ノズル（N11，N12，N16）の強度計算書 ドレンノズル（N15）の強度計算書 低圧注水ノズル（N17）の強度計算書	Ver.0
Ⅴ-3-別添6-2	シュラウドサポートの応力計算書	Ver.0

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	ＡＳＨＳＤ２－Ｂ
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	米国カリフォルニア大学及びバブコック日立（株）
開発時期	1979年
使用したバージョン	Ver.0
コードの概要	ＡＳＨＳＤ２－Ｂ（以下「本解析コード」という。）は，原子炉圧力容器に対する評価を目的として，有限要素法により軸対称構造物の軸対称及び非軸対称荷重に対する応力を計算する汎用プログラムである。 荷重条件としては，内圧，差圧，軸力等の軸対称荷重のほか，水平力，曲げモーメント等非軸対称荷重を扱うことができる。 要素としてシェル要素，三角形要素及び四角形要素があり，任意の組合せで構造物をモデル化できる。 熱応力計算に当たっては，温度分布解析用解析コード（ＴＡＣＦ）の結果をファイルを介して自動的に取り込むことができる。 原子力の分野における使用実績を有している。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 ・内圧を受ける厚肉円筒の弾性解析と，理論解との比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードのマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する応力解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・本解析コードは，これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており，妥当性は十分確認されている。

Ⅴ-5-54　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＴＡＣＦ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＴＡＣＦについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧及び解析コードの概要を以降に記載する。

1．1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-3-4-1-2	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その１）	
（Ⅴ-2-3-4-1-2に含める）	下部鏡板の耐震性についての計算書 給水ノズル（N4）の耐震性についての計算書 スカートの耐震性についての計算書	Ver.0
Ⅴ-2-3-4-1-3	原子炉圧力容器の耐震性についての計算書（その２）	
（Ⅴ-2-3-4-1-3に含める）	胴板の耐震性についての計算書 制御棒駆動機構ハウジング貫通部の耐震性についての計算書 再循環水出口ノズル（N1）の耐震性についての計算書 再循環水入口ノズル（N2）の耐震性についての計算書 主蒸気ノズル（N3）の耐震性についての計算書 炉心スプレイノズル（N5）の耐震性についての計算書 差圧検出・ほう酸水注入管ノズル（N10）の耐震性についての計算書 低圧注水ノズル（N17）の耐震性についての計算書 上鏡スプレイノズル（N6）の耐震性についての計算書 ベントノズル（N7）の耐震性についての計算書 ジェットポンプ計測管貫通部ノズル（N8）の耐震性についての計算書 計装ノズル（N11，N12，N16）の耐震性についての計算書 ドレンノズル（N15）の耐震性についての計算書	Ver.0

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	ＴＡＣＦ
使用目的	2次元有限要素法（軸対称モデル）による応力解析
開発機関	バブコック日立(株)
開発時期	1982年
使用したバージョン	Ver.0
コードの概要	ＴＡＣＦ（以下「本解析コード」という。）は，原子炉圧力容器に対する評価を目的として，有限要素法により平面及び軸対称構造物の定常及び非定常温度分布を計算するプログラムである。 温度分布計算は，領域を小さなメッシュに分割し，各メッシュについての熱平衡方程式をたて，定常問題は弛緩法*により，非定常問題は微小時間でステップ毎の温度分布を順次求める方法による。 境界条件としては，強制対流熱伝達のほか，自然対流熱伝達，輻射熱伝達等の非線型熱伝達も扱うことができる。 要素として三角形要素及び四角形要素があり，任意の組合せで構造物をモデル化できる。 原子力の分野における使用実績を有している。 ＊：エネルギー最小化原理に基づく解法の一つで反復法ともいう。近似解を仮定し，それを修正する計算を反復することによって，真の解に収束させる手法である。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 ・平板の１次元熱伝導の温度分布解析と，理論解との比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードのマニュアルにより，今回の工事計画認可申請で使用する応力解析に，本解析コードが適用できることを確認している。 ・本解析コードは，これまで多くの既工事計画で使用実績を有しており，妥当性は十分確認されている。

Ⅴ-5-55　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＤＯＲＴ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＤＯＲＴについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-2-2	原子炉圧力容器の脆性破壊防止に関する説明書	ＤＯＯＲＳ３．２ａ版ＤＯＲＴ

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	ＤＯＲＴ
使用目的	遮蔽解析（原子炉圧力容器における中性子の放射線束分布解析）
開発機関	米国オークリッジ国立研究所
開発時期	1988年
使用したバージョン	ＤＯＯＲＳ３．２ａ版ＤＯＲＴ
コードの概要	ＤＯＲＴ（以下「本解析コード」という。）は，中性子及びガンマ線の物質中の挙動を評価することを目的として，2次元多群輸送方程式を離散座標Ｓｎ法で解く数値計算により米国オークリッジ国立研究所で開発された計算機プログラムである。 本解析コードの計算モデルは，2次元形状（平板（Ｘ－Ｙ体系），円柱（Ｒ－Ｚ体系，Ｒ－θ体系））であり，中性子及びガンマ線の輸送問題等を解くことができる。また，計算モデル内での中性子及びガンマ線の線束が計算され，線量率換算係数又はカーマ係数を乗じることにより，線量率又は発熱量を算出することができる。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・2次元輸送計算コードＤＯＲＴとＪＥＮＤＬ－３．３の組合せによる計算値については，ＪＮＤＣ（Japanese Nuclear Data Committe）においてベンチマーク実験との比較検証*が実施されており，鉄，クロム，ナトリウム等の透過放射線測定において，計算値が実験値と一致することを確認している。 注記　＊：Yamano N. et al., Integral Test of JENDL-3.3 with Shielding Benchmarks, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 2, p. 841-846 (Aug. 2002) ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・本解析コードは，原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており，通常運転時の原子炉周り遮蔽計算等の豊富な実績がある。 ・本解析コードは，中性子及びガンマ線の放射線束，線量率及び発熱量を算出することができるコードであり，計算に必要な主な条件は線源条件，幾何形状条件である。これら評価条件が与えられれば評価が可能であり，本解析コードは原子炉圧力容器における中性子の放射線束分布解析に適用可能であることを確認している。

Ⅴ-5-56　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＳＰＡＮ２０００

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）SPAN2000について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-1-12-1	配管及び支持構造物の耐震計算について	

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	SPAN2000
使用目的	等分布質量連続はりモデルによる耐震最大支持間隔算出
開発機関	三菱重工業株式会社
開発時期	[redacted]
使用したバージョン	[redacted]
コードの概要	SPAN2000（以下「本解析コード」という。）は，配管等の耐震設計に活用することを目的として三菱重工業株式会社が開発したものである。 配管直管部（一般部）について，発生応力，固有振動数等が許容値や制限値を超えない範囲における最大長さを標準支持間隔として求めることが可能であり，加圧水型原子力発電設備において，多くの使用実績を有している。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	配管を等分布質量連続はりでモデル化し，許容値や制限値を超えない範囲における最大の支持間隔を求めるために使用している。 【検証（Verification）】 ・等分布質量連続はりモデルによる配管直管部（一般部）の耐震最大支持間隔算出及びそれに発生する一次応力の算出について，入力データ[redacted]に対する応力算出結果において，解析解と理論モデルによる理論解との比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。また，固有振動数に関しても，上記検証において，解析解と理論解との比較を行い，解析解が理論解と一致することを確認している。 ・地震動の組合せ処理[redacted]に関しては，本解析コード内で処理しており，アウトプットファイルと理論計算結果が一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。

検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【妥当性確認(Validation）】 ・耐震最大支持間隔算出は，JEAG4601-1987 の定ピッチスパン法に従い等分布質量連続はりにモデル化している。 ・本解析コードは，配管系で使用される要素形状のうち直管部の支持間隔の算出，発生応力の算出に用いられる。今回の工事計画認可申請で行う支持間隔算出，発生応力算出の用途，適用範囲が，上述の妥当性確認範囲内になることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。

Ⅴ-5-57　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＦＵＲＳＴ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）FURSTについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver.5

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	FURST
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	ゼネラル・エレクトリック社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver.5
コードの概要	FURST（以下「本解析コード」という。）は，ゼネラル・エレクトリック社により開発された被覆管応力解析コードである。 本解析コードは，燃料被覆管温度，燃料棒内圧，炉心条件，燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し，被覆管の支持格子間及び支持格子接触部の応力評価をモンテカルロ法により統計的に実施する。地震時には，通常運転時及び過渡時に被覆管に発生する応力の他に，水平及び鉛直地震加速度により被覆管に発生する応力を考慮する。 本解析コードは，高燃焼度８×８燃料，９×９燃料及びＭＯＸ燃料の設計・許認可に適用された実績がある。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・被覆管の応力計算式（厚肉円筒）がコードに正しく組み込まれていることを別法計算により確認し，理論解と解析解が一致していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・コード検討会等規制機関による確認*1,*2,*3が実施されていることを確認している。

注記　＊1：沸騰水型原子力発電所　燃料の設計手法について（平成10年2月　株式会社日立製作所　HLR-033訂1）
＊2：沸騰水型原子力発電所　燃料の設計手法について（平成10年1月　株式会社東芝　TLR-045改訂1）
＊3：原子炉安全基準専門部会報告書，発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和63年5月12日 原子力安全委員会了承）

Ⅴ-5-58　計算機プログラム（解析コード）の概要・ＢＳＰＡＮ２

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）BSPAN2について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-3-3-1	燃料集合体の耐震性についての計算書	Ver.2.2

2.　解析コードの概要

項目＼コード名	BSPAN2
使用目的	弾性解析による被覆管応力解析
開発機関	原子燃料工業株式会社
開発時期	2011年
使用したバージョン	Ver.2.2（Mar. 2017）
コードの概要	BSPAN2（以下「本解析コード」という。）は，原子燃料工業株式会社により開発された被覆管応力解析コードである。 本解析コードは，軽水炉向け燃料棒について燃焼中に被覆管に発生する応力を評価し，応力設計比及び運転モードの変化により発生する応力振幅をモンテカルロ法により評価する解析コードBSPANに，耐震解析用の機能等を統合した改良コードである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は次のとおりである。 ・組み込み式は，実験値または文献等の根拠に基づくものであり，当該式の使用が適切であることを確認し，理論解と解析解が一致していることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は次のとおりである。 ・改良前のBSPANコードを電力合同プログラム点検にて確認している。 ・組み込み式が正しく反映されることを理論解と解析解が一致していることで確認している。 ・解析コードのバージョンアップ前後の比較により，燃料被覆管応力解析において既許認可の結果が再現することを確認している。

Ⅴ-5-59　計算機プログラム（解析コード）の概要・Ｓｏｉｌ　Ｐｌｕｓ

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Soil Plusについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-2-11	緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書	2015 Build3
Ⅴ-2-2-18	格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	2015 Build3

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	Soil Plus
使用目的	地震応答解析及び応力解析
開発機関	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
開発時期	2005年
使用したバージョン	2015 Build3
コードの概要	Soil Plus（以下「本解析コード」という。）は，2次元及び3次元の静的・浸透・耐震問題を考慮できる総合的な設計が可能な汎用解析コードである。 本解析コードは，土木・建築分野に特化した要素群，材料非線形モデルを数多くサポートしていることが特徴で，日本国内では，建設部門を中心として，官公庁，大学，民間問わず，多くの利用実績がある。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	Soil Plusは，緊急時対策所建屋の杭の応力解析及び格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答解析に使用している。 【検証(Verification)】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・本解析コードの計算機能が適正であることは，後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本工事計画において使用する2次元有限要素法による地震応答解析の検証として，実積ある解析コードと地震応答解析結果が一致することを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，開発機関から提示された要件を満足していることを確認している。 【妥当性確認(Validation)】 本解析コードの妥当性確認の内容は以下の通りである。 ・九州電力玄海発電所3号機工事計画認可申請書の添付書類3（耐震性に関する説明書）において，海水管ダクト竪坑及び海水戻り管竪坑の地震応答解析及び応力解析に使用された実績がある。 ・検証の体系と本工事計画で使用する体系が同等であることから，解析解と理論解の一致をもって解析機能の妥当性も確認している。 ・本工事計画において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと異なるが，バージョンの変更において解析機能に影響のある変更が行われていないことを確認している。

	・本工事計画において行う有限要素法による地震応答解析の使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-60　計算機プログラム（解析コード）の概要・SuperFLUSH/3D

目次

1. はじめに……1
1.1 使用状況一覧……2
2. SuperFLUSH/3D の概要……3
3. SuperFLUSH/3Dの解析手法について……4
3.1 一般事項……4
3.2 計算機プログラムの特徴……4
3.3 解析手法……5

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（計算機プログラム）SuperFLUSH/3Dについて説明するものである。

本計算機プログラムを使用した添付書類を示す使用状況一覧，計算機プログラムの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-2-11-2-14	サービス建屋の耐震性についての計算書	VER.3.0A01

2. SuperFLUSH/3D の概要

コード名 / 項目	SuperFLUSH/3D
使用目的	群杭基礎の動的地盤ばねの算出
開発機関	構造計画研究所
開発時期	1995年
使用したバージョン	VER.3.0A01
コードの概要	SuperFLUSH/3D（以下「本解析コード」という。）は，3次元地盤－構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。なお，本解析コードは，汎用解析コードである。
検証（Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	本解析コードは，サービス建屋の水平方向の地震応答解析における質点系地盤連成モデルの地盤ばねを評価するために使用している。 【検証(Verification)】 本計算機プログラムの検証の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードを用いて評価した単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねが公開文献※の結果と良い一致を示すことを確認している。 ・動作環境を満足する計算機にインストールして使用している。 ※入門・建物と地盤との動的相互作用，(社) 日本建築学会，pp.174-175，1996.4，第1版第1刷 【妥当性確認(Validation)】 本計算機プログラムの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・検証の内容のとおり，群杭基礎の地盤ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に適用することは妥当である。

3.　SuperFLUSH/3Dの解析手法について

3.1　一般事項

SuperFLUSH/3D は，３次元地盤－構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。SuperFLUSH/3D は，サービス建屋の地震応答解析を行う際に群杭基礎の地盤ばねの評価に使用している。

3.2　計算機プログラムの特徴

SuperFLUSH/３Dの主な特徴を以下に示す。

・地盤は3次元薄層要素法による成層自由地盤とする。

・杭配置は任意に設定できる。

・単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねを算定できる。

3.3　解析手法

3.3.1解析理論

水平成層な半無限地盤内に群杭が存在する場合を考える。群杭全体系の運動方程式は次式で表わされる。

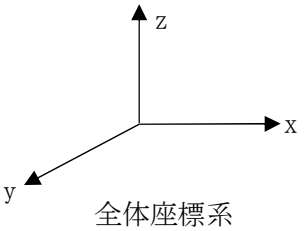
$$\{P\} = [S]\{u\} \quad \text{(式-1)}$$

$$[S] = [K_P] - [K_P^G] + [A(i\omega)]^{-1} - \omega^2([M_P] - [M_P^G]) \quad \text{(式-2)}$$

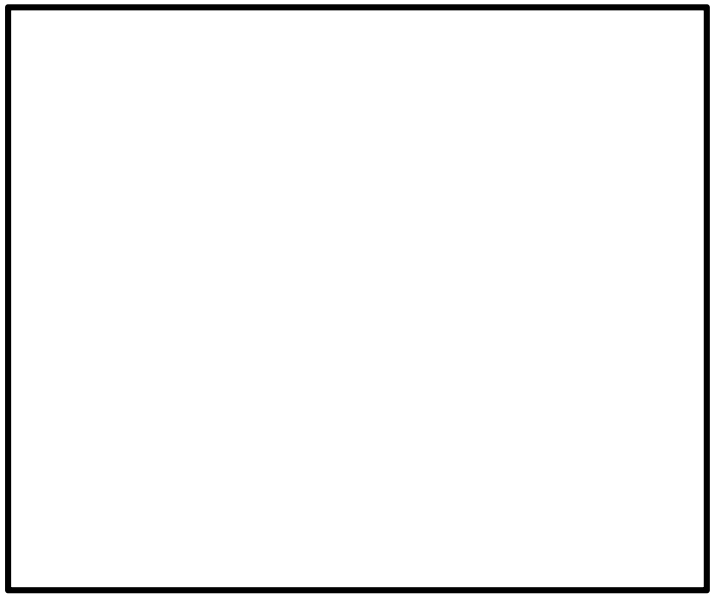
ここで,

$\{P\}$	：杭の任意節点における節点加振力ベクトル
$\{u\}$	：杭の任意節点における節点変位ベクトル
$[K_P]$	：杭の剛性マトリックス
$[M_P]$	：杭の質量マトリックス
$[K_P^G]$	：杭と同体積土柱の排土剛性マトリックス
$[M_P^G]$	：杭と同体積土柱の排土質量マトリックス
$[A(i\omega)]$	：杭間の連成効果を表す影響係数マトリックス
ω	：加振円振動数

座標系と節点自由度を図3-1に示す。



全体座標系



δ_{xi}：i点のx方向変位

ϕ_{xi}：i点のx軸回りの回転角

δ_{yi}：i点のy方向変位

ϕ_{yi}：i点のy軸回りの回転角

δ_{zi}：i点のz方向変位

ϕ_{zi}：i点のz軸回りの回転角

図3-1　座標系と節点自由度

3.3.2　解析フローチャート

解析フローチャートを図3-2に示す。

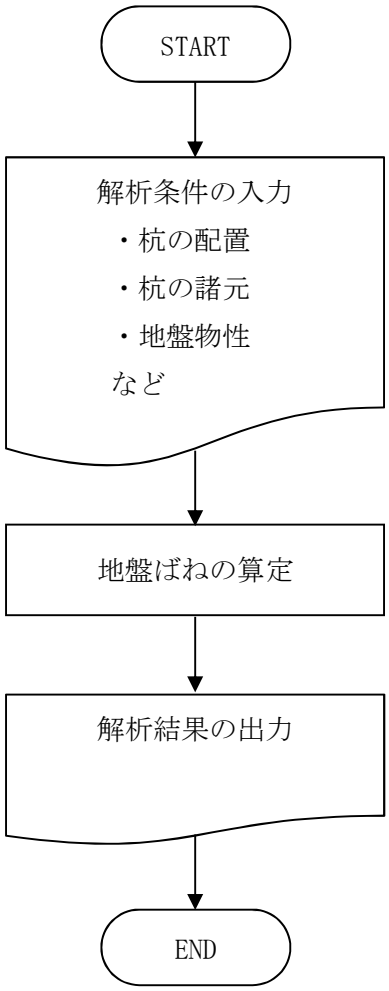


図3-2　解析フローチャート

3.3.3　検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)

a.　文献との比較による検証

公開文献*に記載されている図3-3に示す単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねの評価結果を再現し，公開論文に記載されている結果との比較を行う。

地盤ばねの比較結果を図3-4に示す。

図より，SuperFLUSH/3Dの結果は公開文献に記載されている結果と良い一致を示しており，SuperFLUSH/3Dが単杭もしくは群杭基礎の地盤ばねを正しく評価していることが確認できる。

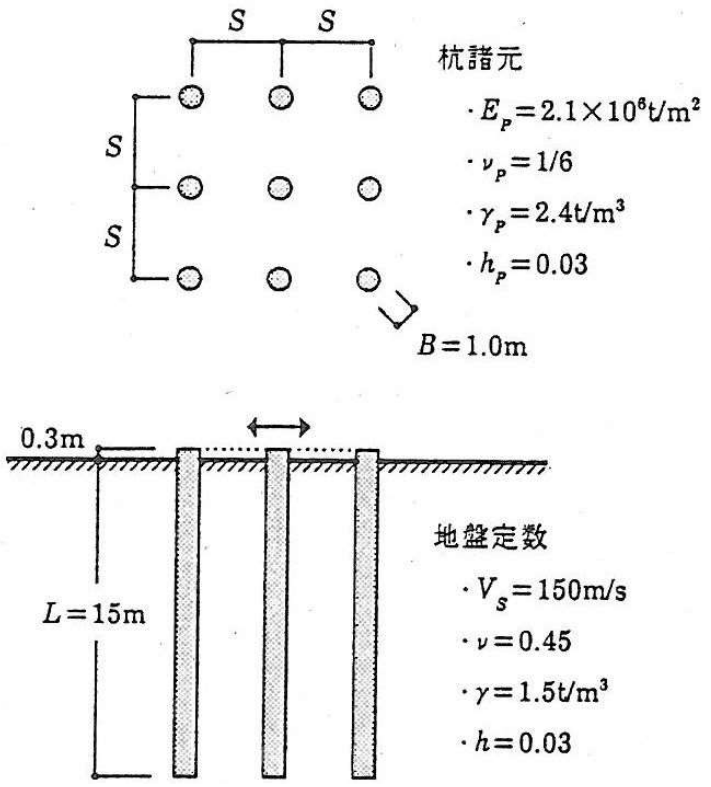
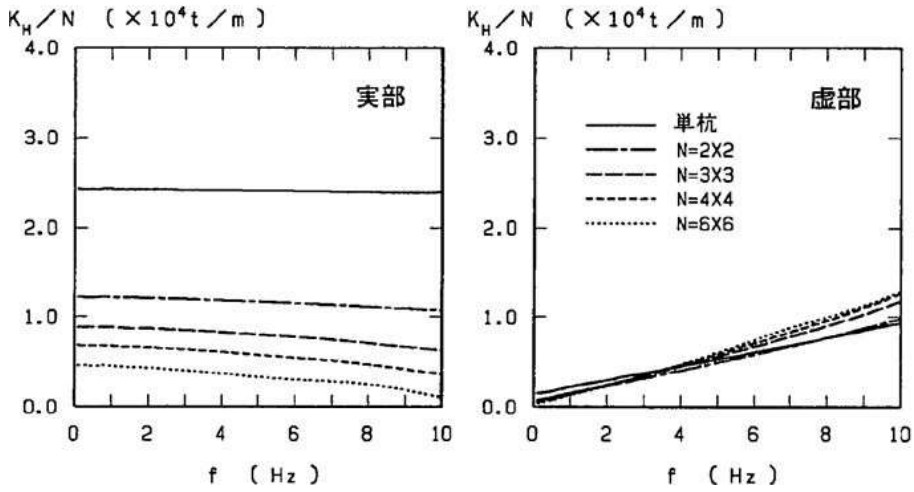
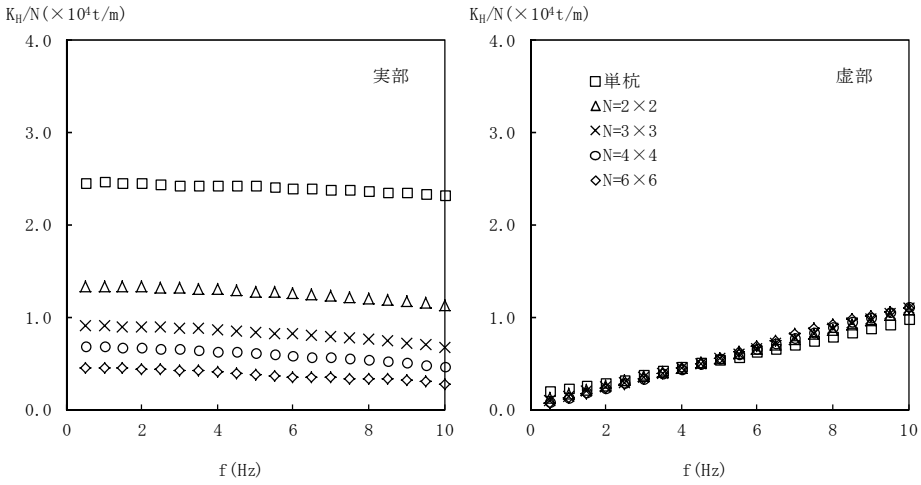


図3-3　解析モデル及び解析諸元

注記　＊：入門・建物と地盤との動的相互作用，（社）日本建築学会，pp.174-175，1996.4，第1版第1刷



(a)　公開文献



(b)　SuperFLUSH/3D

図3-4　解析結果の比較

b.　使用内容に対する妥当性

サービス建屋の地震応答解析における地盤ばねの算定にSuperFLUSH/3Dを使用することは，次のとおり，本解析の適用範囲に対して検証されており，妥当である。

・検証の内容のとおり，群杭基礎の地盤ばねについて検証していることから，解析の目的に照らして今回の解析に使用することは妥当である。

Ⅴ-5-61　計算機プログラム（解析コード）の概要・ｍｉｄａｓ　ｉＧｅｎ

目次

1. はじめに 1
1.1 使用状況一覧 2
2. 解析コードの概要 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ｍｉｄａｓ　ｉＧｅｎについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-3-別添1-1-1	竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書	860

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	midas iGen
使用目的	3次元はりモデルによる静的線形解析（竜巻影響評価）
開発機関	MIDAS IT
開発時期	1990年代前半
使用したバージョン	Ver.860
コードの概要	midas iGenは，任意形状構造物について，構造解析（静的解析，静的増分解析，免振・制振解析及び固有値解析等）を行うプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	midas iGen Ver.860は，原子炉建屋の鉄骨造躯体の3次元はりモデルによる静的線形解析（竜巻影響評価）に使用している。 【検証（Verification）】 本解析コードの検証の内容は以下のとおりである。 ・2層1スパンラーメンのモデルを対象に，midas iGenによる解析結果と，別計算機コード「汎用3次元構造解析コード(MSC NASTRAN Ver. 2016)（以下，「NASTRAN」という。）」による解析結果を比較し，両者の解析結果の差異が1%以下であり十分小さく，許容範囲内であることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 本解析コードの妥当性確認の内容は，以下のとおりである。 ・本解析コードは，国内外の主に建築分野における使用実績を有しており，妥当性は十分に確認されている。 ・旧バージョン（ver.810）が，九州電力株式会社川内原子力発電所1号機の工事計画認可申請書添付資料3において，海水ポンプエリア防護壁の地震応答解析に使用された実績があり，その後のバージョンの変更においては，本解析の使用範囲の結果に影響の無いことを確認している。 ・開発機関が提示するマニュアルにより，本解析コードの適正な用途適用範囲を確認している。 ・今回の工事計画認可申請で行う3次元はりモデルによる静的線形解析の用途，適用範囲が上述の妥当性確認範囲内にあることを確認している。

Ⅴ-5-62　計算機プログラム（解析コード）の概要
・Seismic Analysis System（ＳＡＳ）

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）ＳＡＳについて説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
V-2-1-7	設計用床応答曲線の作成方針	6.1.0

2.　解析コードの概要

コード名 / 項目	Seismic Analysis System（ＳＡＳ）
使用目的	設計用床応答曲線の作成
開発機関	日立ＧＥニュークリア・エナジー株式会社
開発時期	2009年
使用したバージョン	Ver6.1.0
コードの概要	Seismic Analysis System（ＳＡＳ）（以下「本解析コード」という。）は，耐震設計に使用する条件を作成することを目的に，地震波時刻歴データの波形書式の変換機能，地震波時刻歴データから床応答スペクトルを計算する機能，応答分布図や振動モード図の作成機能など，耐震解析用の計算機プログラムを統合したシステムである。このうち床応答スペクトル作成機能を，建屋床応答時刻歴から設計用床応答曲線を作成するために使用する。
検証（Verification）及び妥当性確認（Validation）	【検証（Verification）】 ・別解析コードDYNA2Eによる床応答スペクトルと本解析コードで作成した床応答スペクトルを比較し，一致していることを確認している。 ・本解析コードの運用環境について，動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 【妥当性確認（Validation）】 ・今回の工事計画認可申請で使用する機能は床応答スペクトルの作成機能であるため，同一の入力条件に対する1自由度系の最大応答加速度を固有周期毎に算定し，別解析コードDYNA2Eと本解析コードの結果を比較することで，妥当性を確認している。 ・設計用床応答曲線を作成する際，入力とする時刻歴データの時間刻み幅，データの形式は，上述の妥当性を確認している範囲内での使用であることを確認している。 ・10％拡幅，時刻歴波の時間刻み，固有周期計算間隔はＪＥＡＧ４６０１－1987に従っており，妥当性に問題はない。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における加速度応答スペクトル，時刻歴データに対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

Ⅴ-5-63　計算機プログラム（解析コード）の概要

・Ｆｉｒｅ Ｄｙｎａｍｉｃｓ Ｔｏｏｌｓ（ＦＤＴｓ）

NT2 補② Ⅴ-5-63 R0

目次

1. はじめに ····· 1
1.1 使用状況一覧 ····· 2
2. 解析コードの概要 ····· 3

1. はじめに

本資料は，添付書類において使用した計算機プログラム（解析コード）Fire Dynamics Tools (FDTs) について説明するものである。

本解析コードを使用した添付書類を示す使用状況一覧，解析コードの概要を以降に記載する。

1.1　使用状況一覧

使用添付書類		バージョン
Ⅴ-1-1-7	発電用原子炉施設の火災防護に関する説明書	Version 1805.1

2. 解析コードの概要

コード名 / 項目	Fire Dynamics Tools (FDTs)
使用目的	火炎の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層の各影響範囲（ZOI）の算出
開発機関	米国NRC
開発時期	2004年
使用したバージョン	Version 1805.1 (SI Units)
コードの概要	米国NRC（原子力規制委員会）によって開発された，フリーソフトウェアとして公開されている火災力学ツールであり，火災力学の理論式が表計算ソフト（Excel）に組み込まれたものである。
検証 （Verification） 及び 妥当性確認 （Validation）	【検証（Verification）】 ・Fire Dynamics Tools (FDTs) （以下「本解析コード」という。）による算出結果は，米国NRCにより，室内火災の実験結果との比較により，実証（NUREG-1824*1）されており，また，火災実証試験の結果と本解析コードにより簡易に算出された高温ガス温度を比較することで再現されていることを確認している。 ・本解析コードの使用に当たって，ダウンロードした際に不具合が発生していないことを確認するため，ダウンロードする計算機ごとに，NUREG-1805 Supplement1,Vol 1に示されるExample Problemの入力パラメータを本解析コード（表計算ソフト）に入力し，評価結果がExample Problemと一致することを確認している。 ・本解析コードは理論式が表計算ソフト（Excel）に組み込まれたツールであり，表計算ソフトの計算シートは，あらかじめ入力が指定されているセル以外のセルの変更ができないよう，パスワードにより保護されている。 ・なお，本解析コードは，表計算ソフトが使用可能なすべての計算機で解析可能であり，開発機関が開発時に使用したバージョン以上の表計算ソフトをインストールした計算機にて解析を実施している。

	【妥当性確認（Validation）】 ・「原子力発電所の内部火災影響評価ガイド」（以下「ガイド」という。）では，火炎の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層のZOIの算出に本解析コードを使用することが明記されており，本解析コードの適用に当たっては，NUREG-1805*2における火炎の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層の火災影響ごとに記載される使用上の考慮（Assumptions and Limitations）や，潤滑油等の漏えい火災の燃焼面積の算出方法等のガイドに記載されている評価手順を参照して，適切なパラメータの入力を実施することで，火災の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層のZOIを算出していることから，今回の解析に適用することは妥当である。 ・本解析コードによる算出結果は，米国NRCによって室内火災の実験試験との比較により，妥当性が実証（NUREG-1824*1）されており，また，火災実証試験の結果と本解析コードにより簡易に算出された高温ガス温度を比較することで再現されていることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請において使用するバージョンは，他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・今回の工事計画認可申請における構造に対し使用する要素，火炎の高さ，火炎プルーム，輻射及び高温ガス層の各影響範囲（ZOI）の算出の使用目的に対し，使用用途及び使用方法に関する適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

注記　＊1：NUREG-1824：Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications

＊2：NUREG-1805：Fire Dynamics Tools（FDTs）