

東海第二発電所 設計及び工事計画に係る説明資料 (防潮堤（鋼製防護壁）の構造変更)

2026年8月27日
日本原子力発電株式会社

目 次

1. 概要	3
(1) 構造変更に至った経緯	4
(2) 審査の流れ	7
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討	8
(1) はじめに	9
(2) 耐震評価	11
(3) 耐津波評価	21
(4) 地中連続壁部の残置影響評価	32
(5) 止水機構	42
(6) まとめ	44
3. 工事管理の改善と再発防止に向けた取組み	45
4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容	47

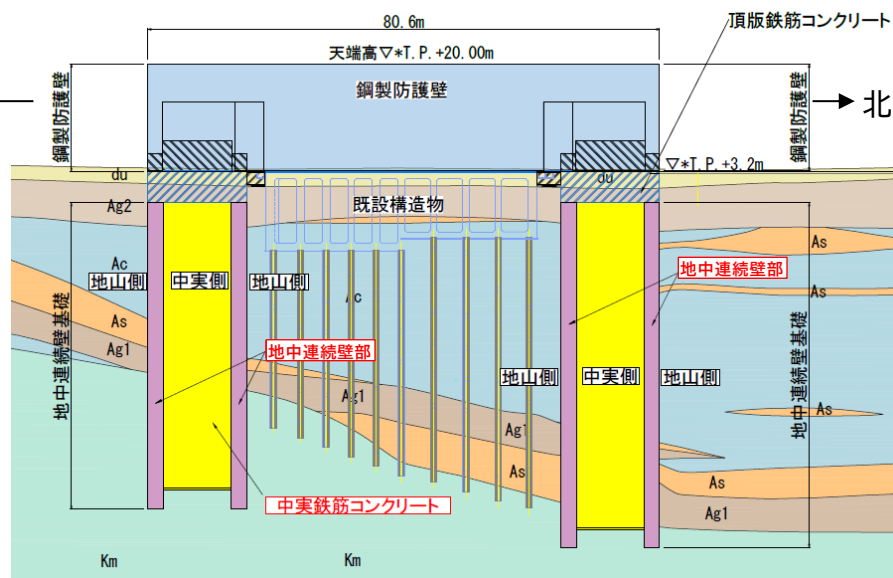
1. 概要

- (1) 構造変更に至った経緯
- (2) 審査の流れ

1. 概要

(1) 構造変更に至った経緯 (1/3)

- 東海第二発電所の防潮堤のうち防潮堤（鋼製防護壁）は、敷地の東側の東海港に面した位置に設置する。2018年10月認可の工事計画では、既設構造物の南北両側に地中連続壁基礎を岩盤まで設置し、その上部に既設構造物を跨ぐように鋼製防護壁を設置する計画としていた。
- 工事は2019年9月に開始し、地中連続壁部を構築した後、その内部（中実側）を掘削するとともに、中実鉄筋コンクリートと地中連続壁部を一体化させながら基礎を構築する計画であった。しかし、地中連続壁部の施工中及び中実側の掘削中に、地中連続壁部の不具合事象※1を確認した。
- このため、防潮堤の構造の見直し（設計変更）について、2024年2月に工事計画変更認可申請※2を行った。



防潮堤（鋼製防護壁）【2018年10月認可の工事計画】

時系列	内容
2018年10月	重大事故等対処施設の工事計画認可 平成30年10月18日付け原規規発第1810181号
2019年9月	工事開始
2022年3月 ～2023年3月	地中連続壁部の施工中のトラブル発生 (溝壁の崩壊, 鉄筋の高止まり等)
2023年6月	不具合の確認 (南基礎)
2023年8月	不具合の確認 (北基礎)
2024年2月	重大事故等対処施設の設計及び工事計画変更認可申請 (補正申請: 防潮堤の設計変更の追加)
2024年3月 ～2024年8月	審査会合 (第1240回, 第1259回, 第1280回)
2024年8月	重大事故等対処施設の設計及び工事計画変更認可申請 (2024年2月申請の分割: 防潮堤の工事計画を他の審査案件から分割)
2024年12月 ～2026年4月	審査会合 (第1309回, 第1329回, 第1360回, 第1376回, 第1407回)

※1 中実側の掘削を実施したところ、地中連続壁部の中実側の壁面の一部において、**コンクリート未充填及び鉄筋の変形等（鉄筋の変形、脱落、欠損）**を確認した。また、その後の調査で地中連続壁部の地山側においてもコンクリート未充填を確認した（2023年6月～2024年5月）。地中連続壁部の施工中、北基礎の地中連続壁部の南西側角部において、**鉄筋かごが計画深度まで建込みできない事象（高止まり事象）**が発生した（2023年3月）。

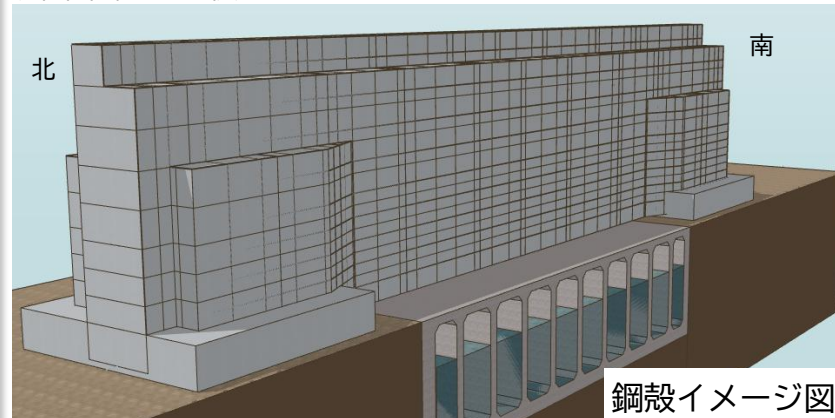
※2 地中連続壁部は基礎として使用するものの、地中連続壁部の不具合が想定される範囲のコンクリートや鉄筋を構造部材として使用しない設計とする変更認可申請を行った。

1. 概要

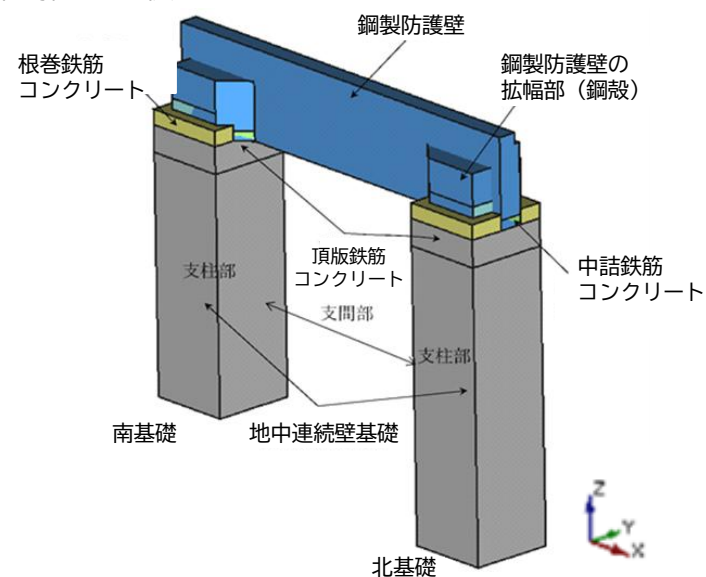
(1) 構造変更に至った経緯 (2/3)



注記) 陸側からの視点



注記) 海側からの視点

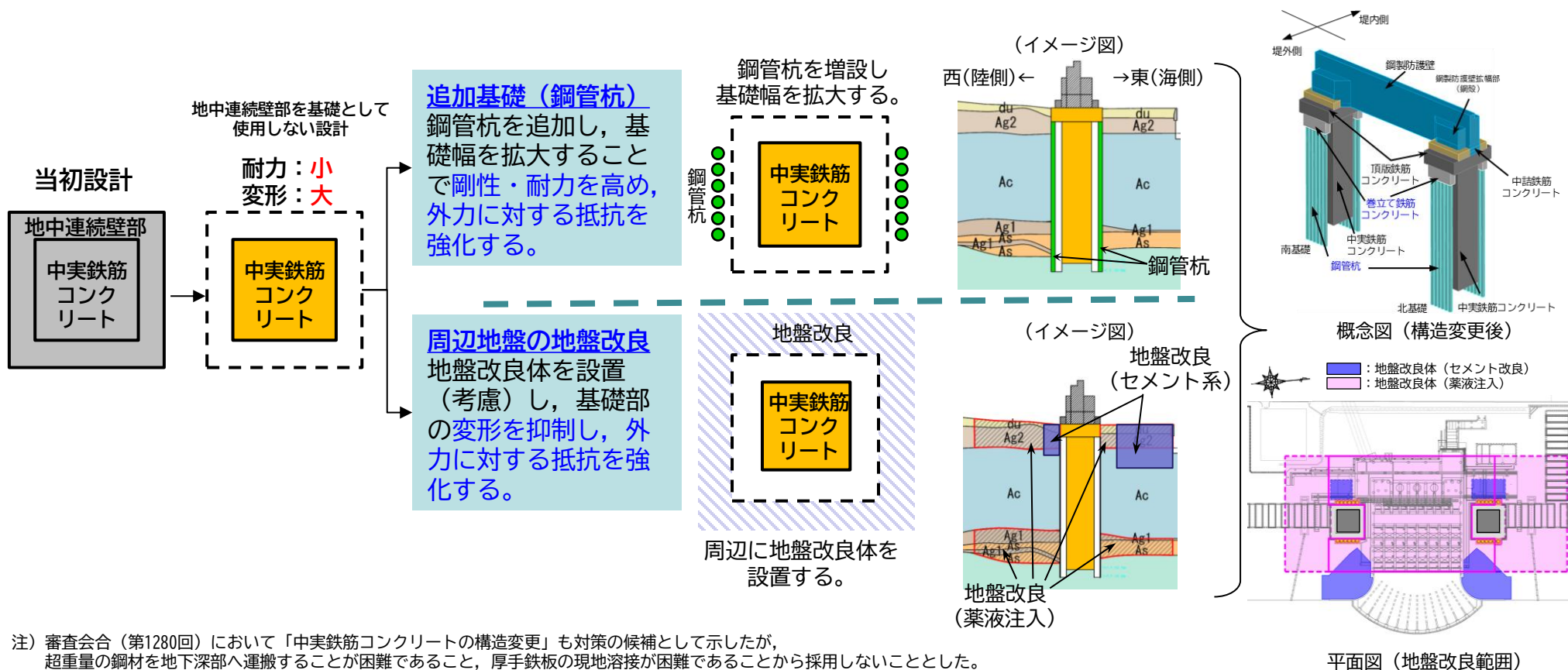


防潮堤 (鋼製防護壁) 構造概要図 (既工認時)

1. 概要

(1) 構造変更に至った経緯 (3/3)

- 地中連続壁部の不具合事象を確認したため、当該不具合の状況を調査したが、その全容を把握できなかった。このため、不具合が生じた地中連続壁部は残置するが、基礎として使用しない設計に変更することを説明した（審査会合（第1259回，第1280回））。
- 地中連続壁部を基礎として使用しない設計とすることにより、防潮堤基礎の剛性・耐力が確保できないため、その対策として「追加基礎（鋼管杭）」及び「周辺地盤の地盤改良」を取り入れた構造に変更し、支配的な津波荷重に対して抵抗を期待する構造とすることを説明した（審査会合（第1309回））。



(2) 審査の流れ

前回の審査会合（第1407回）では、STEP 4で説明する内容のうち「追加基礎・地盤改良による周辺施設への影響評価」及び「施工性・検査の確認結果」を説明した。今回はSTEP 4のうち、残りの「耐震・耐津波評価の結果」及び「地中連続壁部の残置影響評価の結果」について説明する。

審査会合（第1309回）

審査会合（第1329回）

審査会合（第1360回及び第1376回）

STEP 1**●構造変更案の概要**

- 構造変更案の概要（追加基礎・地盤改良の追加）
- 今後の説明の流れ

STEP 2**●基本方針の設定※1****【耐震・耐津波評価】の基本方針**

- 要求性能と設計評価方針
- 検討モデル（鋼管杭、地盤改良、頂版鉄筋コンクリート、地盤バネ、群杭の扱い等）
- 評価フロー、評価項目
- STEP3で示す耐震評価に係る構造成立性の評価方法

【影響評価】の基本方針

- 地中連続壁の残置影響に係る評価ロジック、評価条件、評価方針及び保守性の整理
- 追加基礎・地盤改良による周辺施設への影響に係る評価項目、評価方法、周辺施設の詳細情報

【施工性・検査】の基本方針

- 追加基礎・地盤改良の施工方法と設計への反映事項の整理
- 品質確保のための検査項目（品質管理目標）
- 地盤改良（薬液注入）の性能目標、物性値

●構造成立性の見通し**【耐津波評価】の結果※2**

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による各部の照査

STEP 3**●構造成立性****【耐震・耐津波評価】の結果**

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による各部の照査

【影響評価】の結果

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による地中連続壁の残置影響評価

審査会合（第1407回及び今回）

STEP 4**●詳細検討結果**

今回説明

【耐震・耐津波評価】の結果

- 全解析ケースによる各部の照査

【影響評価】の結果

- 地中連続壁部の残置影響評価
- 追加基礎・地盤改良による周辺施設への影響評価

【施工性・検査】の確認結果

- 地盤改良物性値（ばらつき、液状化強度）に係る試験確認

※1 STEP2で設定した基本方針に基づき構造成立性の見通しの確認（STEP2, 3）、詳細検討（STEP4）を実施する。

※2 構造変更する基礎に対して、最も厳しい荷重条件である耐津波時（津波と余震の重畳時）を代表ケースとして見通しを確認する。

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

- (1) はじめに
- (2) 耐震評価
- (3) 耐津波評価
- (4) 地中連続壁部の残置影響評価
- (5) 止水機構
- (6) まとめ

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（１）はじめに 既工認※との構造比較

審査会合（第1329回）資料
を一部変更

防潮堤（鋼製防護壁）における既工認からの構造変更は以下のとおり

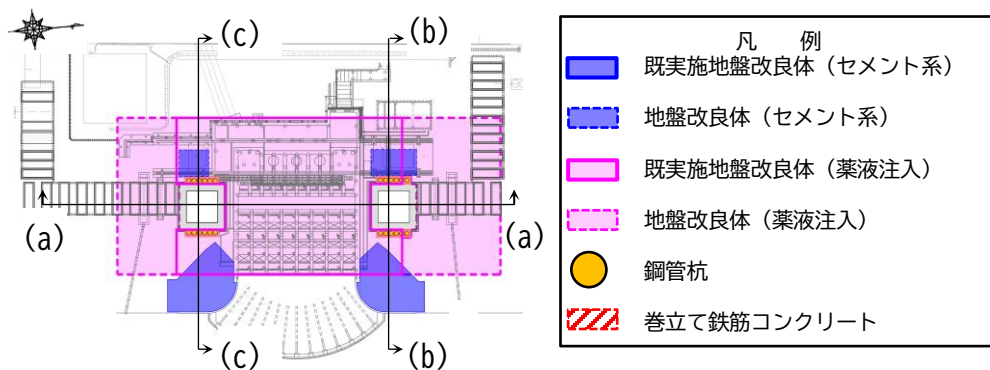
青字は、既工認から変更した箇所

	既工認	構造変更（工認設計モデル）
概略図		
上部工	・鋼製防護壁 ・中詰鉄筋コンクリート ・根巻鉄筋コンクリート ・止水ジョイント部	同左
接合部	・アンカーボルト	同左
下部工	・頂版鉄筋コンクリート ・地中連続壁基礎（A. 中実鉄筋コンクリートとC. 地中連続壁をジベル鉄筋により一体化した構造）	・頂版鉄筋コンクリート ・複合基礎（A. 中実鉄筋コンクリート， B. 鋼管杭， D. 巻立て鉄筋コンクリート） ・C. 地中連続壁部は構造部材として考慮しない
周辺地盤	第四系（地盤改良なし）	第四系（地盤改良あり）
基礎地盤	久米層（岩盤）	同左

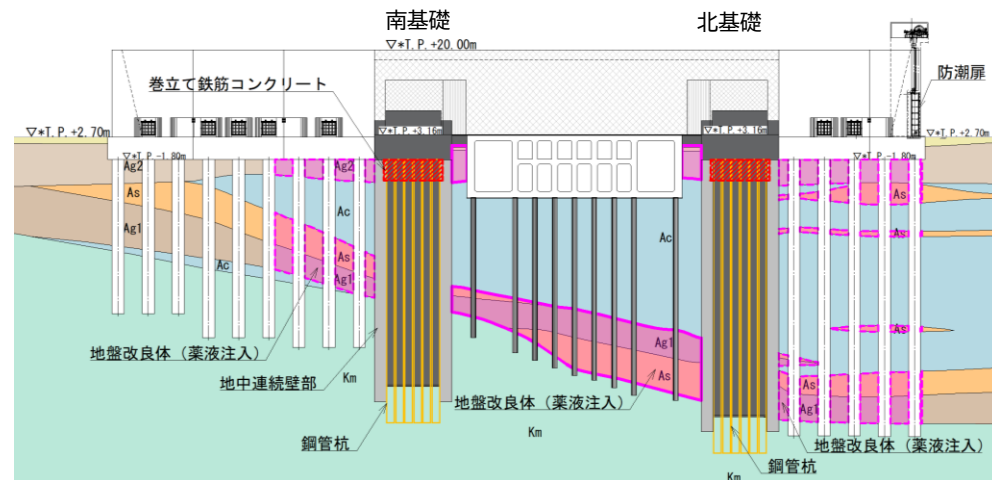
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

(1) はじめに : 防潮堤（鋼製防護壁）の構造概要

審査会合（第1329回）資料
を一部変更

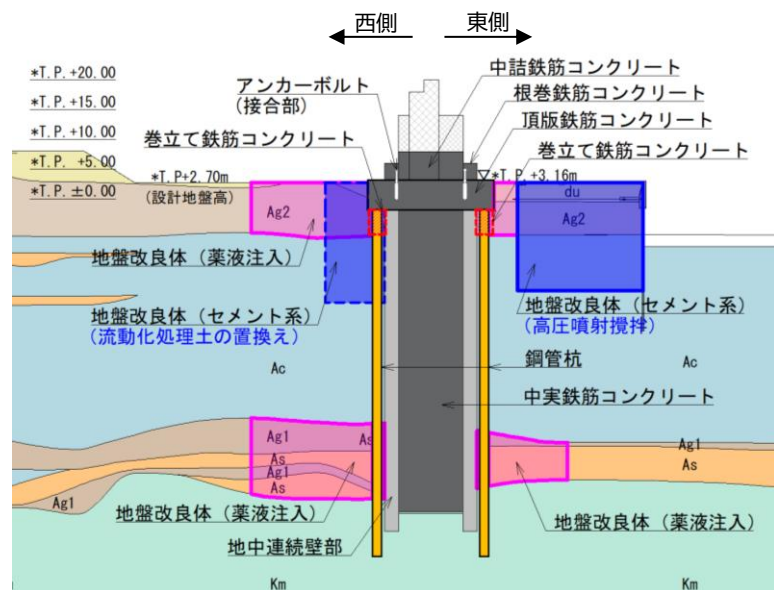


断面位置図

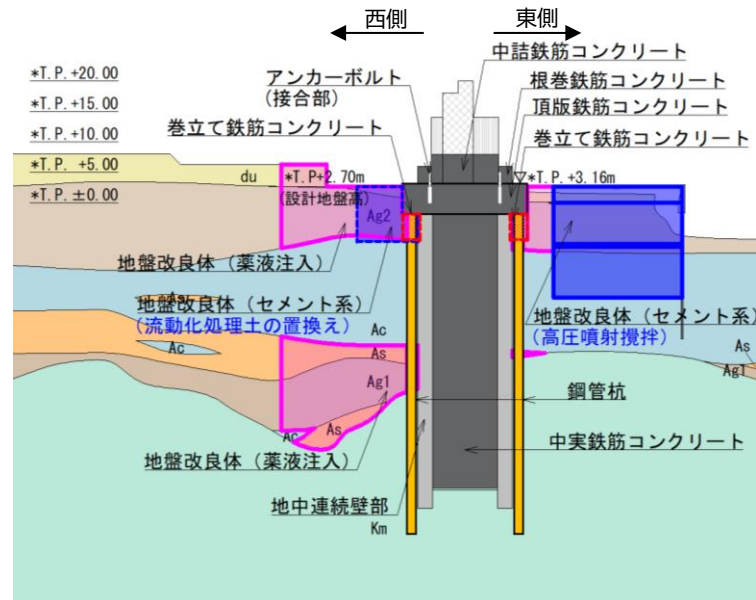


(a)-(a)断面図

（鋼管杭は「投影」して記載）



(b)-(b)断面図



(c)-(c)断面図

（2）耐震評価 ：STEP4での実施概要（STEP3との相違）

- STEP3（構造成立性検討）では、変更した構造の成立性を見通しを得るため、既工認結果から評価が厳しいと想定される代表的な地震動及び地盤ケース（地盤剛性）による主要な部位の照査を実施
- STEP4（詳細検討）では、構造変更を含む防潮堤全体の基準適合性を確認するため、既工認と同じ方針に基づき、全ての地震動及び地盤ケース（地盤剛性）による全ての部位の照査を実施
- その他の設計方針（評価フローや解析モデル等）については、STEP3とSTEP4で相違なし

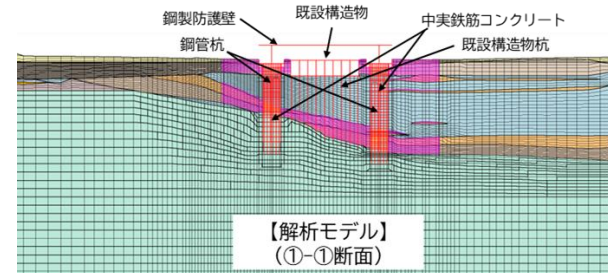
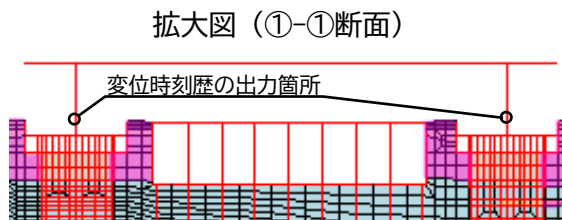
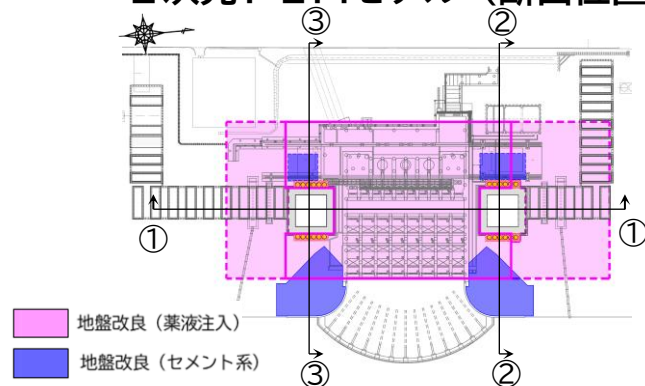
STEP3とSTEP4の主な設計方針の比較

主な設計方針	STEP3	STEP4
解析モデル	既工認のモデルに構造変更を反映	同左
評価対象地震動	代表地震動のみ（ S_s -D1）	S_s 全波（既工認と同じ）
地盤ケース（地盤剛性）	既工認結果から厳しいと思われる代表ケースを選定（地盤ケース③）	全ての地盤ケースを考慮（既工認と同じ）
評価対象部位	主要な部位のみ	全ての部位

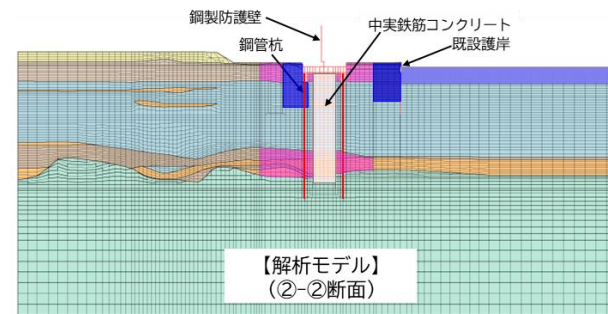
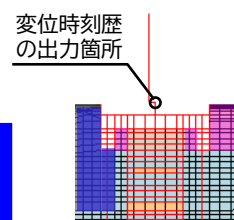
(2) 耐震評価 : 解析モデル

- 耐震評価においてはSTEP3と同様、鋼製防護壁基礎を2次元FEMモデルで、鋼製防護壁を3次元モデルで評価している
- なお、構造変更として追加する鋼管杭（巻立て鉄筋コンクリート含む）、地盤改良体（既実施分を含むセメント系及び薬液注入）については、2次元FEMモデルに反映している

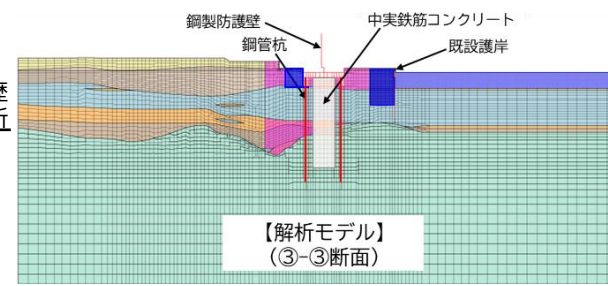
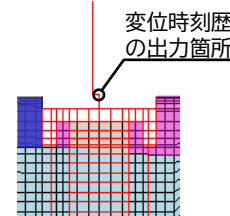
2次元FEMモデル（鋼製防護壁基礎）



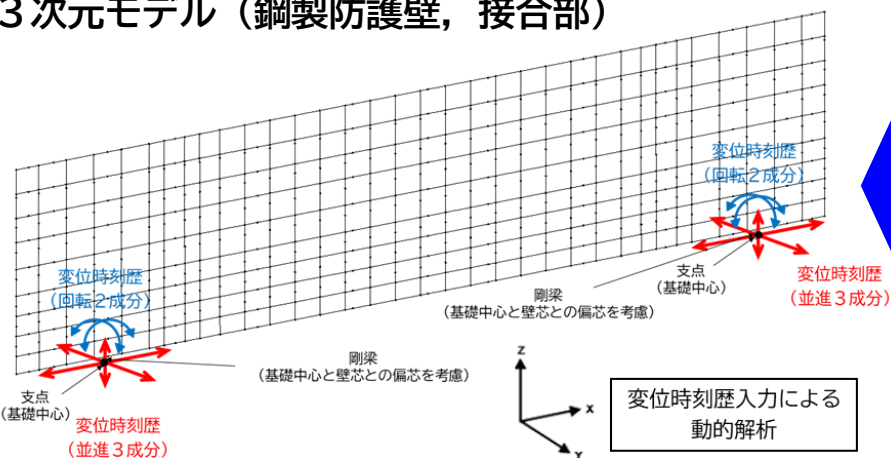
扩大图 (②-②断面)



扩大图 (③-③断面)



3次元モデル（鋼製防護壁，接合部）



基礎天端
の変位
時刻歴を
入力

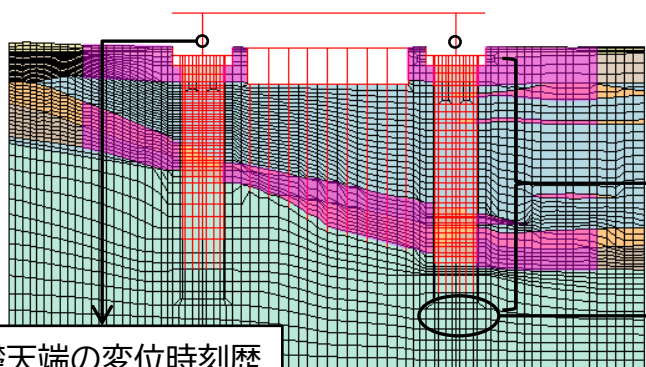
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（2）耐震評価：評価方法の概要

基準地震動 S_s

↓入力

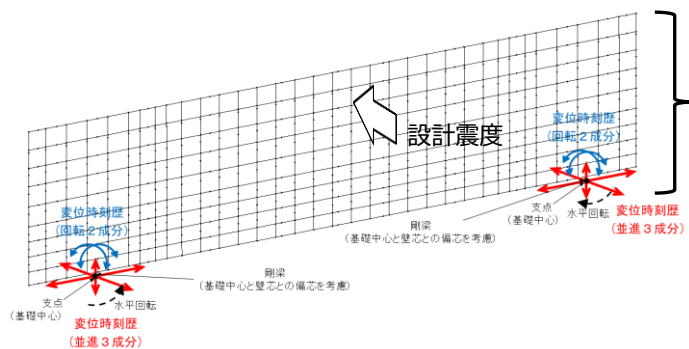
2次元有効応力解析（①-①断面を例示）



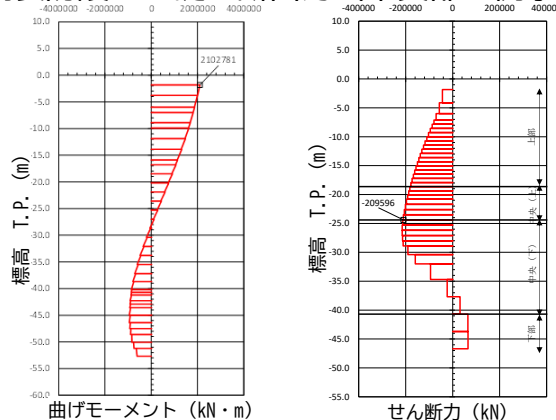
基礎天端の変位時刻歴
及び設計震度

↓入力

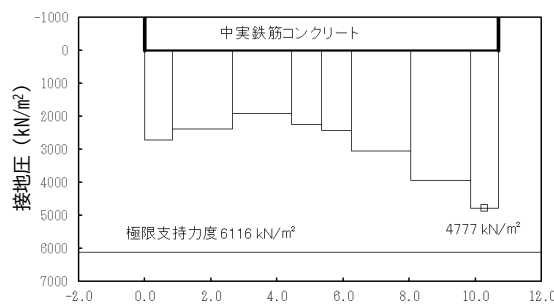
3次元動的フレーム解析



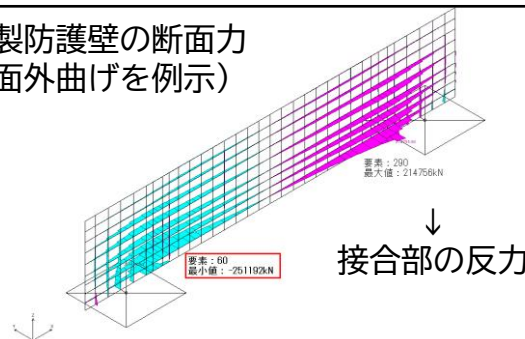
鋼製防護壁基礎の断面力（中実部を例示）



基礎地盤の接地圧（中実鉄筋コンクリート



鋼製防護壁の断面力
（面外曲げを例示）



鋼製防護壁基礎の耐震評価

【曲げ】

各部位の発生断面力からコンクリートの圧縮応力度、鉄筋の引張応力度を算出し、許容限界と比較する

【せん断】

各部位の発生断面力(せん断力)と許容限界を比較する

地盤の支持性能評価

基礎地盤の接地圧と許容限界を比較する

鋼製防護壁の耐震評価

【曲げ・せん断】

各部位の発生断面力から直応力度、せん断応力度、合成応力度を算出し、許容限界と比較する

接合部の耐震評価

【曲げ・せん断・水平回転】

接合部反力から各部位の発生応力度等を算出し、許容限界と比較する

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（2）耐震評価：評価対象地震動及び地盤ケース（地盤剛性）

既工認と同じ下記の手法により地震動と地盤のばらつきを考慮

- 基本となる地盤ケース（①）に対して，地震動 S_s 全波（12波）を用いた評価を実施
- 最大照査値を示した地震動 S_s を用いて，他の地盤ケース（②～⑥）に対して評価を実施

地盤ケース (地盤剛性)		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)	② 地盤物性のばらつきを 考慮(+1 σ)した解析 ケース	③ 地盤物性のばらつきを 考慮(-1 σ)した解析 ケース	④ 地盤を強制的に液状化 させることを仮定した 解析ケース	⑤ 原地盤において非液状 化の条件を仮定した解 析ケース	⑥ 地盤物性のばらつきを 考慮(+1 σ)して非液 状化の条件を仮定した 解析ケース
液状化強度特性 の設定		原地盤に基づく液状化 強度特性(標準偏差を 考慮)	原地盤に基づく液状化 強度特性(標準偏差を 考慮)	原地盤に基づく液状化 強度特性(標準偏差を 考慮)	敷地に存在しない豊浦 標準砂の液状化強度特 性	液状化パラメータを非 適用	液状化パラメータを非 適用
STEP4	基準地震動 ※1	S_s -D1	地盤ケース ①に対し 全波(12波) を評価 → 【最大値について】 ・鋼製防護壁基礎及び基礎地盤に対しては各評価対象部位の“最大照査値” ・鋼製防護壁及び接合部に対しては，南北基礎天端の“最大相対変位”				
		S_s -11					
		S_s -12					
		S_s -13					
		S_s -14					
		S_s -21					
		S_s -22					
		S_s -31					
STEP3		S_s -D1		最厳ケース※3 想定として選定			

※1 S_s -D1については水平・上下の位相反転（計4波）を， S_s -31については水平の位相反転（計2波）を考慮する

※2 曲げ・せん断各々について地震動を選定する（曲げとせん断とで同じ地震動が選定される場合もある）

※3 周辺地盤の地盤改良体（薬液注入）の効果や既工認の評価結果に基づき，耐震評価が最も厳しくなると想定した代表1ケースを選定

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（2）耐震評価 ：評価対象部位

- STEP3では**主要な部位**の照査のみを実施
- STEP4では**全ての部位**の照査を実施

耐震評価における評価対象部位一覧及びSTEP3との比較

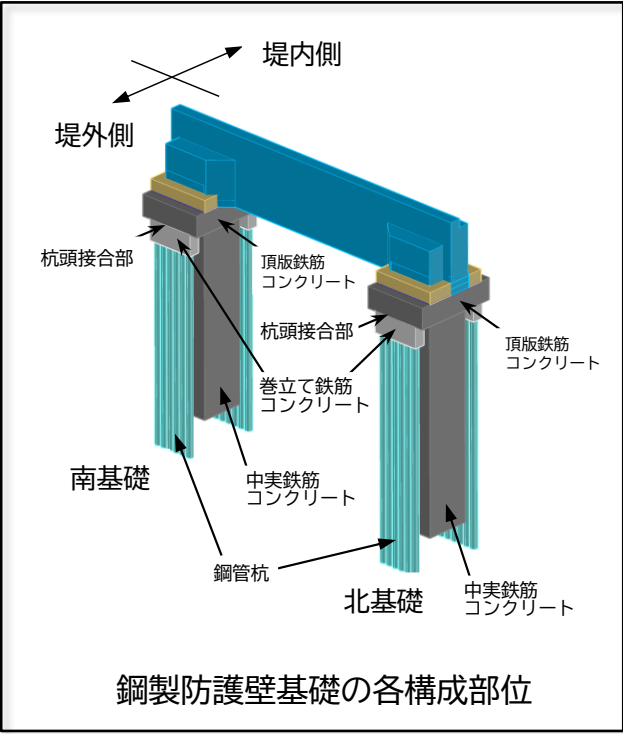
区分	評価対象部位		耐震評価		備考
			STEP3	STEP4	
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート		○	○	
	鋼管杭		○	○	
	巻立て鉄筋コンクリート		○	○	
	杭頭接合部		○	○	
	頂版鉄筋コンクリート		○	○	
鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材	△	○	△：STEP3では、南北基礎の最大相対変位が既工認を下回ることをもって健全性を確認した
		補剛材	—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
		添接板	—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	止水ジョイント		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	止水機構		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
接合部	アンカーボルト		△	○	△：STEP3では、南北基礎の最大相対変位が既工認を下回ることをもって健全性を確認した
	ベースプレート		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	中詰め鉄筋コンクリート		△	○	△：STEP3では、南北基礎の最大相対変位が既工認を下回ることをもって健全性を確認した
地盤	基礎地盤	中実部	○	○	
		鋼管杭部	○	○	
	地盤改良（セメント改良）		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
（2）耐震評価 ： 評価結果（鋼製防護壁基礎）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

鋼製防護壁基礎の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		発生値	許容限界	最大照査値※	地震動	地盤ケース（地盤剛性）
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	176	435.0	0.41	Ss-31	ケース①
		南基礎	せん断	堤軸方向せん断力(kN)	209596	262058	0.80	Ss-31	ケース④
	鋼管杭	北基礎	曲げ	堤軸直交方向圧縮応力度(N/mm ²)	226	442.5	0.52	Ss-31	ケース④
		北基礎	せん断	堤軸直交方向せん断応力度(N/mm ²)	13.5	255.0	0.06	Ss-D1	ケース①
	巻立て鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	102	600.0	0.17	Ss-31	ケース②
		北基礎	せん断	堤軸直交方向せん断力(kN)	1696	3771	0.45	Ss-D1	ケース①
	杭頭接合部	北基礎	仮想RC断面(RC)	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	150	600.0	0.25	Ss-31	ケース②
	頂版鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	338	435.0	0.78	Ss-31	ケース③
		南基礎	せん断	堤軸方向せん断力(kN)	40165	137690	0.30	Ss-31	ケース①



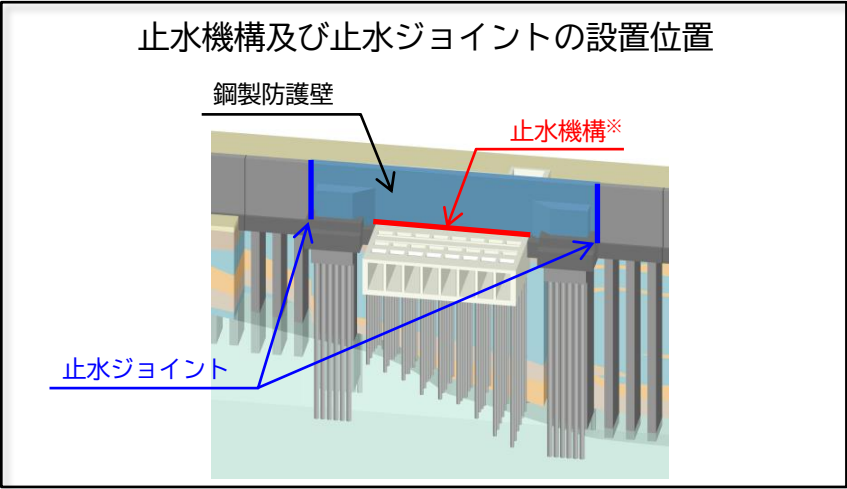
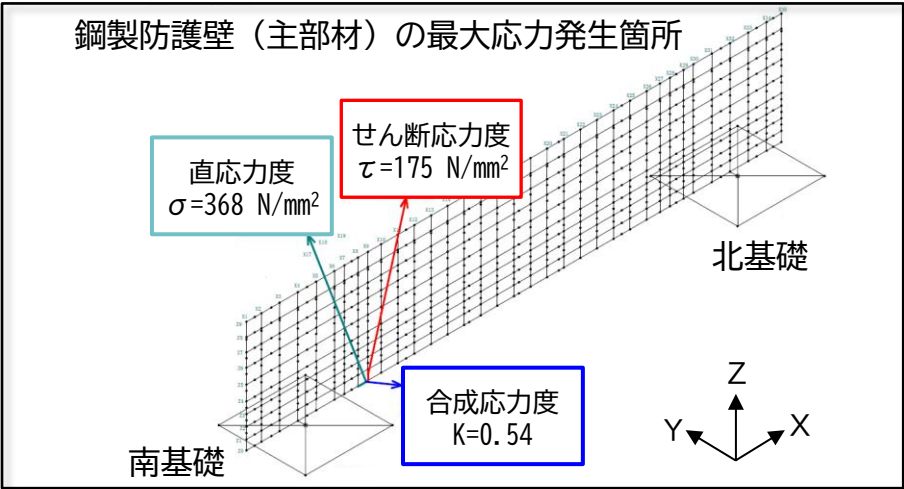
※ STEP3以降の設計進捗による中実鉄筋コンクリート（南基礎）のせん断補強筋追加及び頂版鉄筋コンクリート（南北基礎）の主筋の仕様変更を反映

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
（2）耐震評価 ： 評価結果（鋼製防護壁）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

鋼製防護壁の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力等の種類		発生値	許容限界	最大照査値	地震動	地盤ケース（地盤剛性）
鋼製防護壁	鋼製防護壁	左下図参照	主部材	直応力度(N/mm ²)	368	615	0.60	Ss-D1	ケース④
				せん断応力度(N/mm ²)	175	352.5	0.50	Ss-D1	ケース④
				合成応力度(－)	0.54	1.2	0.45	Ss-D1	ケース④
		－	補剛材	断面二次モーメント(cm ⁴)	26483	37137	0.72	－	－
		－	添接板	引張時断面積(cm ²)	70.3	270.3	0.27	－	－
				圧縮時断面積(cm ²)	67.5	373.9	0.19	－	－
	止水ジョイント	－	止水ジョイント部の変形量(m)		1.457	2.0	0.73	－	－
	止水機構	－	止水機構の耐震評価については、設計の入力条件である2次元有効応力解析から算出される基準地震動Ssの設計震度が既工認時の結果を全て下回ることから、既工認の結果に包絡される						



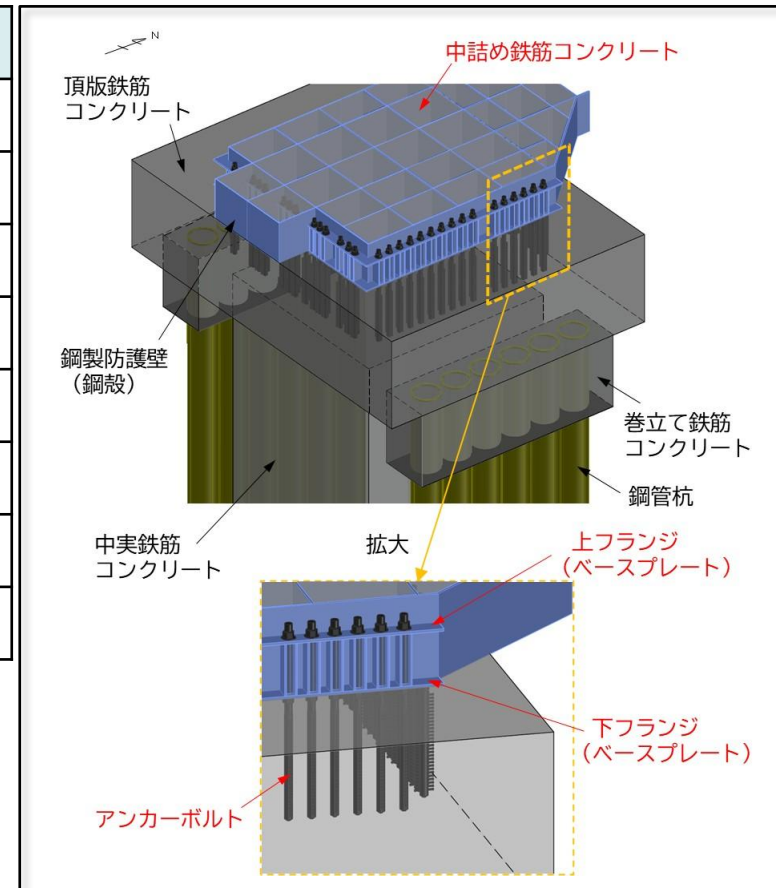
※詳細構造は、p42参照

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
 （2）耐震評価 ：評価結果（接合部）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

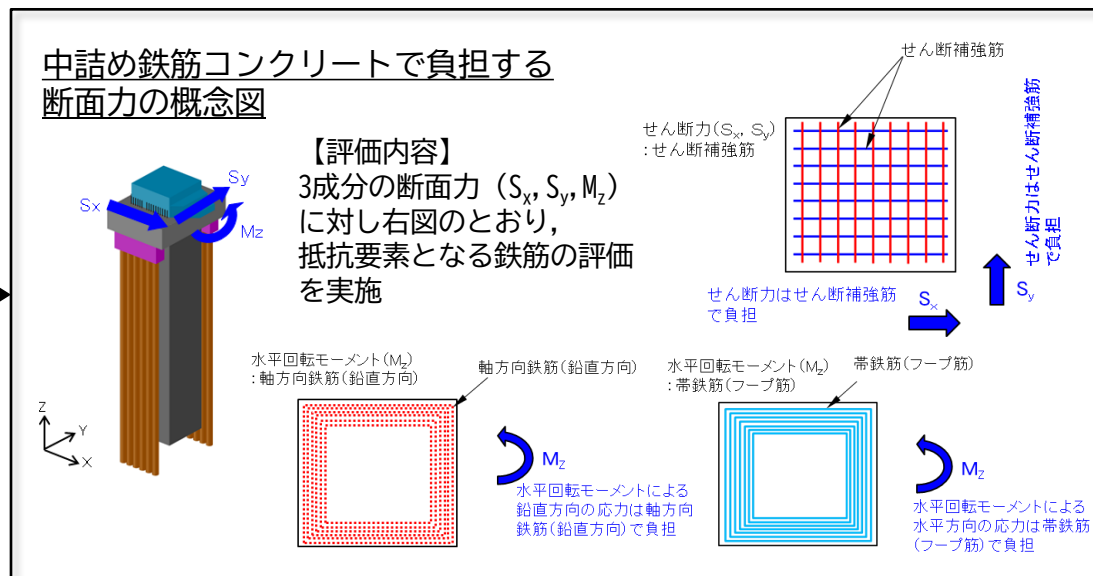
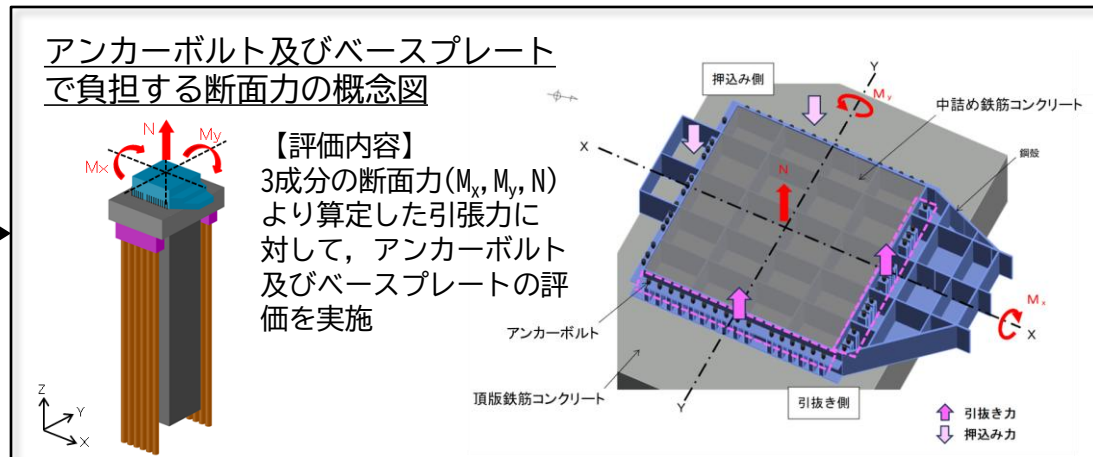
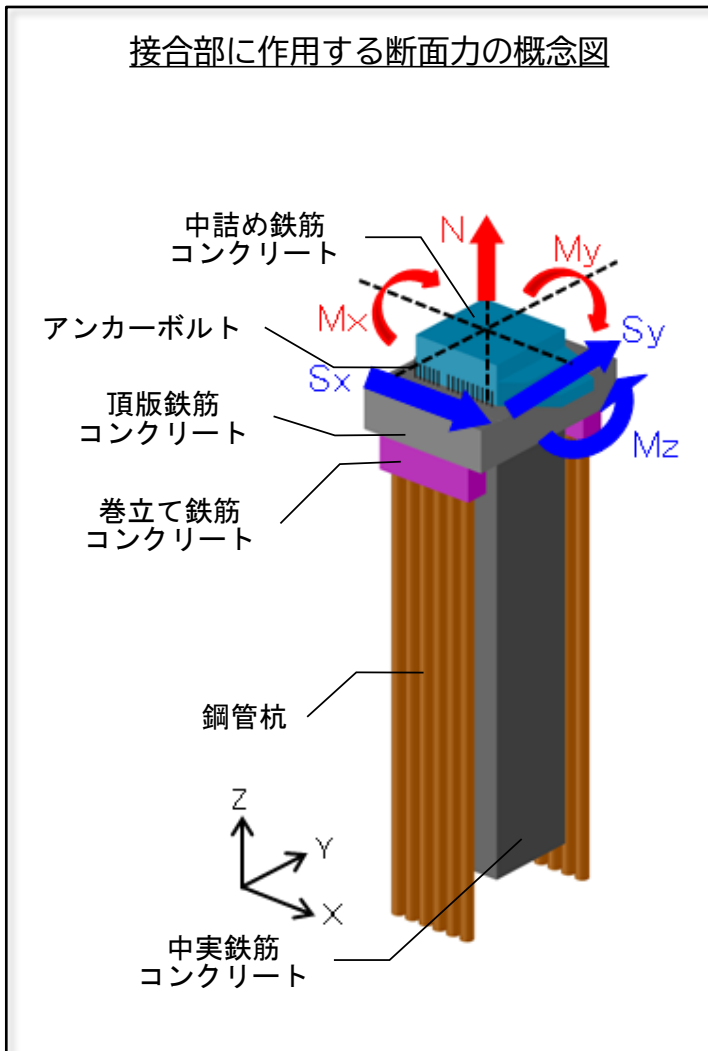
接合部の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力等の種類		発生値	許容限界	最大照査値	地震動	地盤ケース（地盤剛性）
接合部	アンカーボルト	北基礎	引張	引張応力度 (N/mm ²)	232	315.0	0.74	Ss-D1	ケース④
		北基礎	コーンせん断	コーンせん断応力度 (N/mm ²)	1.145	1.558	0.74	Ss-D1	ケース④
	ベースプレート	南基礎	軸圧縮応力度 (N/mm ²)		278	450	0.62	Ss-D1	ケース④
		南基礎	曲げ応力度 (N/mm ²)		94	355	0.27	Ss-D1	ケース④
		南基礎	せん断応力度 (N/mm ²)		66	260	0.26	Ss-D1	ケース④
		南基礎	合成応力度 (－)		0.101	1.2	0.09	Ss-D1	ケース④
	中詰め鉄筋コンクリート	南基礎	せん断	せん断力 (kN)	58042	221212	0.27	Ss-D1	ケース④
		南基礎	水平回転モーメント	水平鉄筋応力度 (N/mm ²)	185	435	0.43	Ss-D1	ケース④



（2）耐震評価 ：評価結果（接合部）に係る補足

前頁に示す接合部の耐震評価に関連して、各部位の断面力分担及び各断面力に対する評価内容を以下に示す
 なお、本頁に記載の内容は、後述する耐津波及び残置影響評価においても共通である



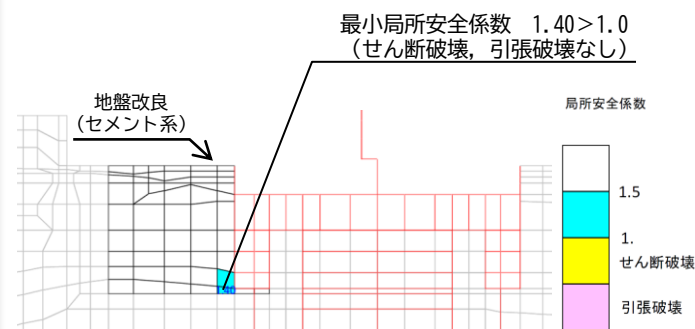
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（2）耐震評価 ：評価結果（地盤）

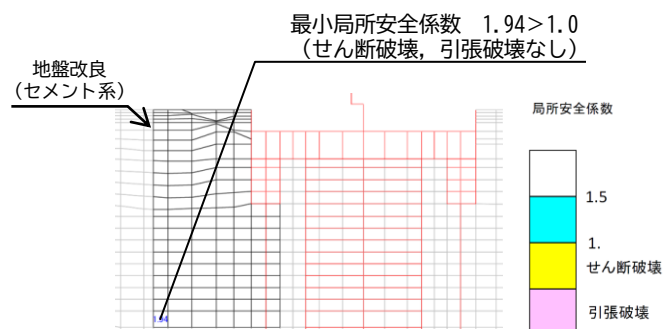
- 基礎地盤の接地圧は許容限界（極限支持力度）を下回ることを確認した
- 地盤改良（セメント系）は、地震時に破壊することがなく、側方抵抗として期待できる地盤であることを確認した

地盤の支持性能について確認し、その評価結果のうち最も厳しい値を下表に示す

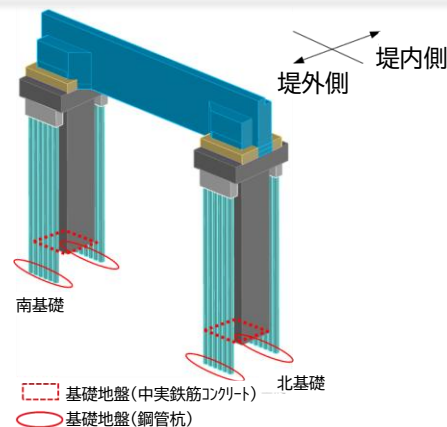
区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；接地圧		発生値	許容限界	地震動	地盤ケース（地盤剛性）
地盤	基礎地盤	中実鉄筋コンクリート	支持性能	北基礎 堤軸方向 接地圧 (kN/m ²)	4777	6116	Ss-31	ケース④
		鋼管杭	支持性能	南基礎 堤軸直交方向 接地圧 (kN/m ²)	4912	5039	Ss-D1	ケース④
	地盤改良（セメント系）	時刻歴最大のせん断応力に対して、局所安全係数が1.0を上回り、せん断破壊を示す要素は確認されなかった また、引張破壊している要素もないことを確認した						



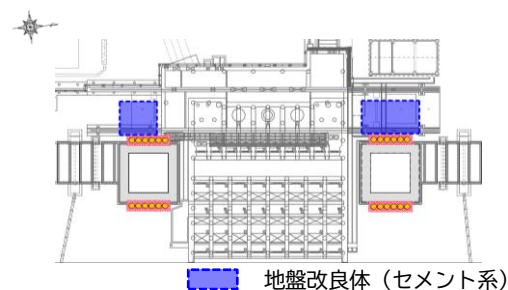
南基礎断面（東西方向）における
局所安全係数分布図（S_s-D1, ケース⑥）



北基礎断面（東西方向）における
局所安全係数分布図（S_s-31, ケース②）



地盤の接地圧算定位置図



地盤改良（セメント系）照査位置図

（3）耐津波評価 ：STEP4での実施概要（STEP3との相違）

- STEP3（構造成立性検討）では、変更した構造の成立性を見通しを得るため、相対的に大きな荷重条件となる「敷地に遡上する津波※1」に対し全ての地盤ケース(地盤バネ)による主要な部位の照査を実施
- STEP4（詳細検討）では、構造変更を含む防潮堤全体の基準適合性を確認するため、「敷地に遡上する津波」及び「基準津波」の双方に対し全ての地盤ケース(地盤バネ)による全ての部位の照査を実施
- 基礎地盤の支持性能について、STEP3では3次元フレームモデルによる暫定値を示したが、STEP4では2次元FEMモデルを用いたより精緻な解析を実施（既工認と同様）
- その他の設計方針（評価フロー等）については、STEP3とSTEP4で相違なし

STEP3とSTEP4の主な設計方針の比較

主な設計方針	STEP3	STEP4
解析モデル	- 既工認のモデルに構造変更を反映 - 基礎地盤の支持性能は3次元フレームモデルで評価	- 同左 - 基礎地盤の支持性能は2次元FEMモデルで精緻に評価
評価対象津波	敷地に遡上する津波	敷地に遡上する津波 及び 基準津波（既工認と同じ）
地盤ケース（地盤バネ※2）	全ての地盤バネを考慮（既工認と同じ）	同左
評価対象部位	主要な部位のみ	全ての部位

※1 確率論的リスク評価において、全炉心損傷頻度に対して、津波のリスクが有意となる津波（防潮堤前面においてT. P. +24mとなるように設定）

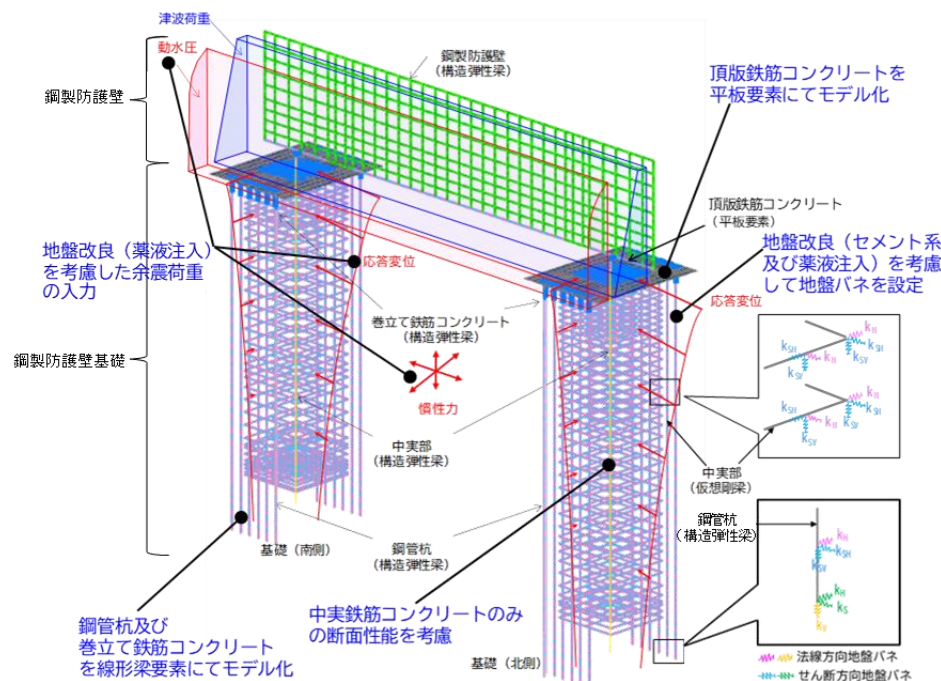
※2 地盤の評価においては地盤ケース（地盤剛性）①～⑥を実施

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（3）耐津波評価：解析モデル

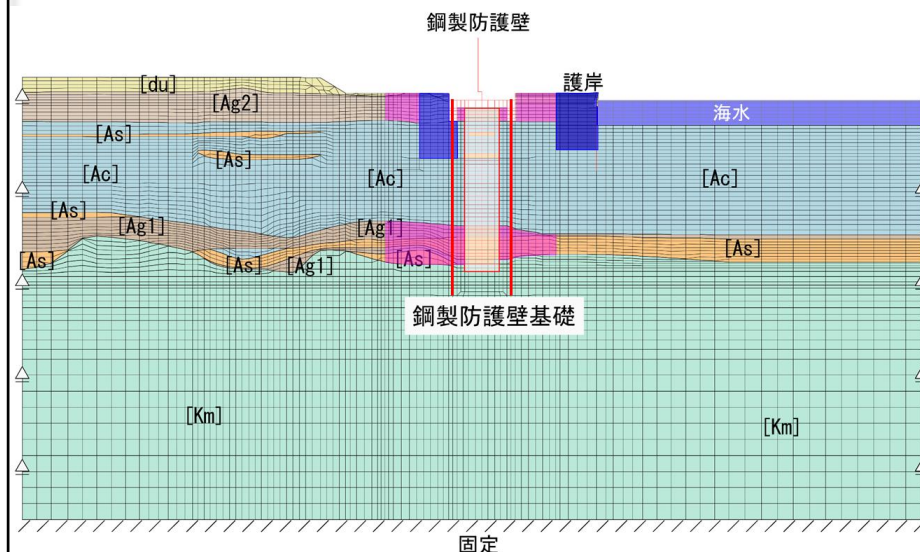
- 耐津波評価における解析モデルはSTEP3と同様，3次元フレームモデルから成る
- なお，構造変更として追加する鋼管杭（巻立て鉄筋コンクリート含む），地盤改良体（セメント系及び薬液注入）については，3次元フレームモデルに反映している
- STEP3の支持性能評価では，3次元フレームモデルによる暫定値を示したが，STEP4では既工認と同様，2次元FEMモデルを用いた，より精緻な解析を実施

3次元フレームモデル
（評価部位：鋼製防護壁基礎，鋼製防護壁，接合部）



【解析モデル（イメージ）図】（津波と余震の重畳時）

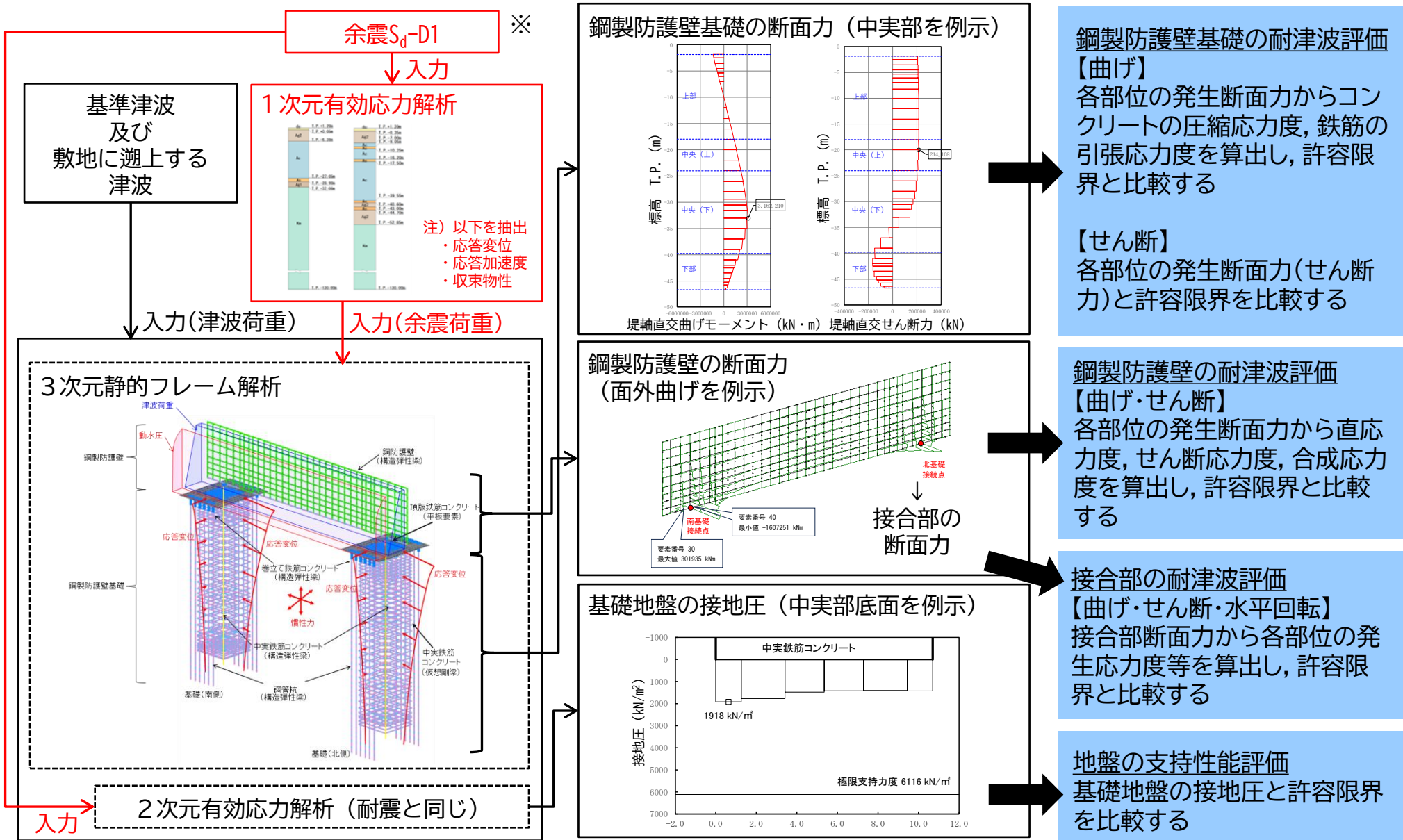
2次元FEMモデル
（評価部位：基礎地盤）



【解析モデル図】（基礎地盤の支持性能評価）

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（3）耐津波評価：評価方法の概要



（3）耐津波評価 ：評価対象津波及び地盤ケース（地盤バネ）

- ・ 既工認と同様，本震及び余震時における地盤のばらつきを考慮した上で，津波時には1～2，津波と余震の重畳時には3～5の地盤バネを設定（STEP3も同様）
- ・ STEP4では「敷地に遡上する津波」及び「基準津波」の双方について評価を実施

耐津波評価における検討ケース一覧

地盤ケース（地盤バネ）		地盤バネ定数	地盤バネの反力上限値	評価対象津波
津波時	地盤バネ1	初期せん断剛性から設定	ピーク強度（平均）から設定	「基準津波」 及び 「敷地に遡上する津波」
	地盤バネ2	静弾性係数から設定	残留強度(-1σ)から設定	
津波と余震 の重畳時	地盤バネ3	余震時収束剛性から設定 (地表面 <u>加速度最大</u>)	ピーク強度（平均）から設定	
	地盤バネ4	余震時収束剛性から設定 (地表面 <u>変位最大</u>)	同上	
	地盤バネ5	余震時収束剛性から設定 (<u>せん断ひずみ最大</u>)	同上	

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（3）耐津波評価 ：評価対象部位

- STEP3では主要な部位の照査のみを実施
- STEP4では全ての部位の照査を実施

耐津波評価における評価対象部位一覧及びSTEP3との比較

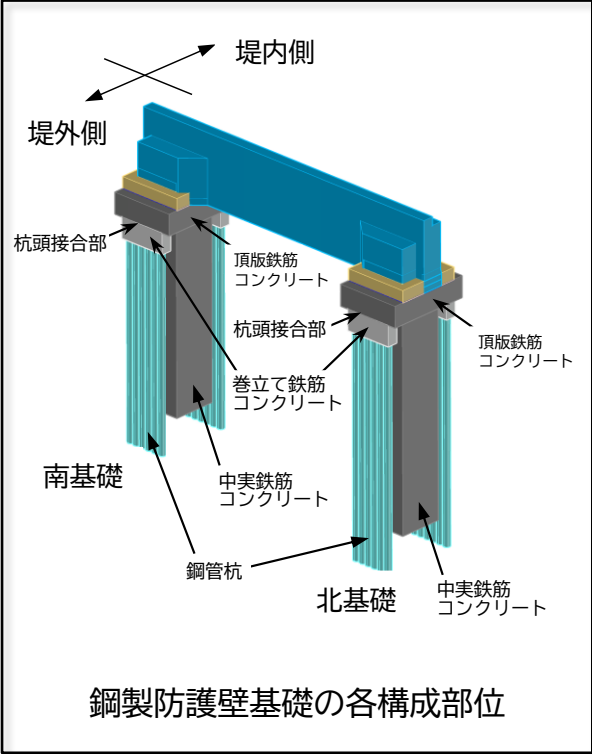
区分	評価対象部位		耐津波評価		備考
			STEP3	STEP4	
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート		○	○	
	鋼管杭		○	○	
	巻立て鉄筋コンクリート		○	○	
	杭頭接合部		○	○	
	頂版鉄筋コンクリート		○	○	
鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材	△	○	△：STEP3では、主部材の断面力が既工認を下回ることをもって健全性を確認した
		補剛材	—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
		添接板	—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	止水ジョイント		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	止水機構		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
接合部	アンカーボルト		○	○	
	ベースプレート		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略
	中詰め鉄筋コンクリート		○	○	
地盤	基礎地盤	中実部	△	○	△：STEP3では、3次元フレームモデルのバネ反力による暫定値を示した
		鋼管杭部	△	○	△：STEP3では、3次元フレームモデルのバネ反力による暫定値を示した
	地盤改良（セメント改良）		—	○	—：細部の評価につきSTEP3では省略

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
（3）耐津波評価：評価結果（鋼製防護壁基礎）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

鋼製防護壁基礎の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		発生値	許容限界	最大照査値※1,2	津波種別	地盤ケース（地盤バネ※3）
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	南基礎	曲げ	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	265.8	478.5	0.56	遡上津波	地盤バネ4
		南基礎	せん断	堤軸直交方向せん断力(kN)	214108	247591	0.87	遡上津波	地盤バネ4
	鋼管杭	北基礎	曲げ	曲げ応力度(N/mm ²)	452.4	500.0	0.91	遡上津波	地盤バネ4
		南基礎	せん断	せん断応力度(N/mm ²)	45.3	285.0	0.16	遡上津波	地盤バネ4
	巻立て鉄筋コンクリート※4	北基礎	曲げ	コンクリート圧縮応力度(N/mm ²)	25.5	32.0	0.80	遡上津波	地盤バネ2
		北基礎	せん断	堤軸直交方向せん断力(kN)	14028	14469	0.97	遡上津波	地盤バネ1
	杭頭接合部	南基礎	仮想RC断面(RC)	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	632.5	660.0	0.96	遡上津波	地盤バネ4
	頂版鉄筋コンクリート	南基礎	曲げ	堤軸方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	432.3	478.5	0.91	遡上津波	地盤バネ5
		南基礎	せん断	せん断力(kN)	29790	31712	0.94	遡上津波	地盤バネ5



※1 最大照査値が1.00に近接しているものを赤字で示す
なお、工認設計モデルでは、地中連続壁の質量をモデルに組み込むことにより、余震時に鋼製防護壁基礎に生じる慣性力が実際よりも大きく評価され保守的な結果となる

※2 STEP3以降の設計進捗による中実鉄筋コンクリート（南基礎）のせん断補強筋追加及び頂版鉄筋コンクリート（南北基礎）の主筋の仕様変更を反映

※3 地盤バネ1～2：津波時、地盤バネ3～5：津波と余震の重畳時

※4 STEP4の結果は、津波種別・地盤バネのいずれもSTEP3と同じだが、STEP3(第1360回審査会合)の最大照査値に記載誤りがあったため最大照査値を訂正した

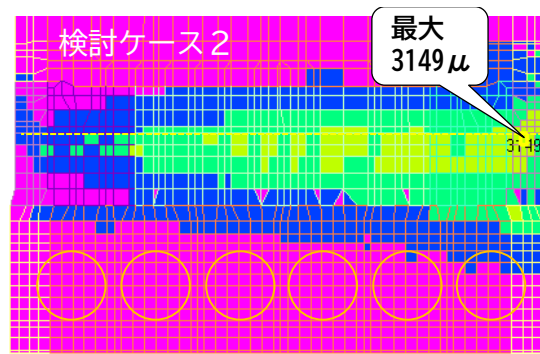
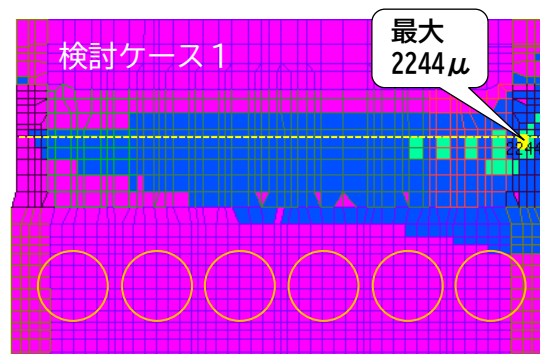
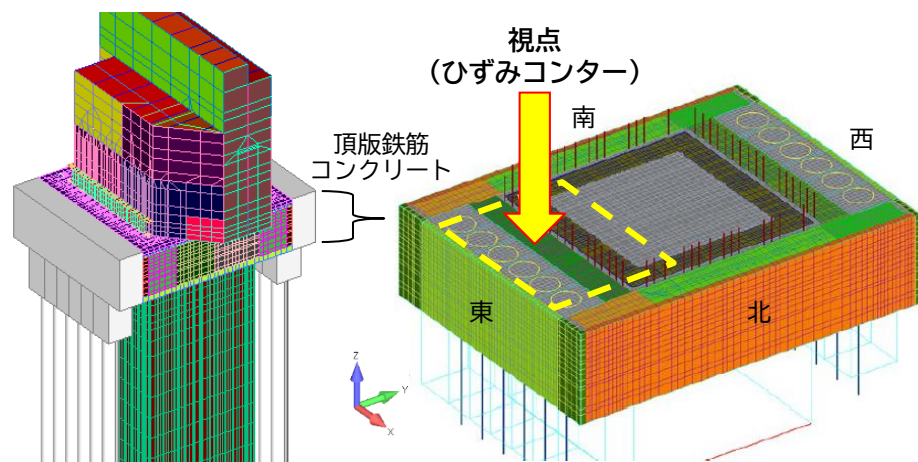
(3) 耐津波評価：評価結果（SD685のひずみレベルに係る詳細検討）

- ・ 頂版鉄筋コンクリートに用いている高強度鉄筋SD685の適用性を確認するに当たり、鉄筋近傍のひずみレベルを確認するため、3次元材料非線形解析（COM3）による評価を実施している
- ・ STEP3では、中実鉄筋コンクリートの最大照査値ケース（下表検討ケース1）の評価結果を示したが、STEP4ではより網羅的な評価を実施するため、頂版鉄筋コンクリートの最大照査値ケース（下表検討ケース2）について追加検討を実施した
- ・ その結果、頂版鉄筋コンクリート上面における鉄筋ひずみはSD685の許容ひずみ以下であること、また、部材の大部分においてひずみレベルが既工認において主鉄筋として用いたSD490の降伏ひずみ以下であることから、SD685の適用性に問題がないことを確認した

COM3における検討ケース一覧表

検討 ケース	津波 種別	余震荷重 組合せ係数			地盤 バネ
		X方向 (堤軸方向)	Y方向 (堤軸直交方向)	Z方向 (鉛直方向)	
ケース1 (STEP3)	敷地に 遡上する 津波	+1.0	+0.4	+0.4	地盤 バネ4
ケース2 (STEP4)		-0.4	+1.0※	+0.4	

※ 津波荷重と組合せ係数1.0の余震荷重の作用方向が同一となる検討ケース



各鉄筋の許容限界

使用 鉄筋	降伏 ひずみ	許容 ひずみ
SD685	3425 μ	3300 μ
SD490	2450 μ	2393 μ

+: 引張側
4000
3425
2450
1950
1000
0
-: 圧縮側



頂版鉄筋コンクリート上面東西（Y）方向の
軸方向鉄筋（SD685）のひずみコンター図

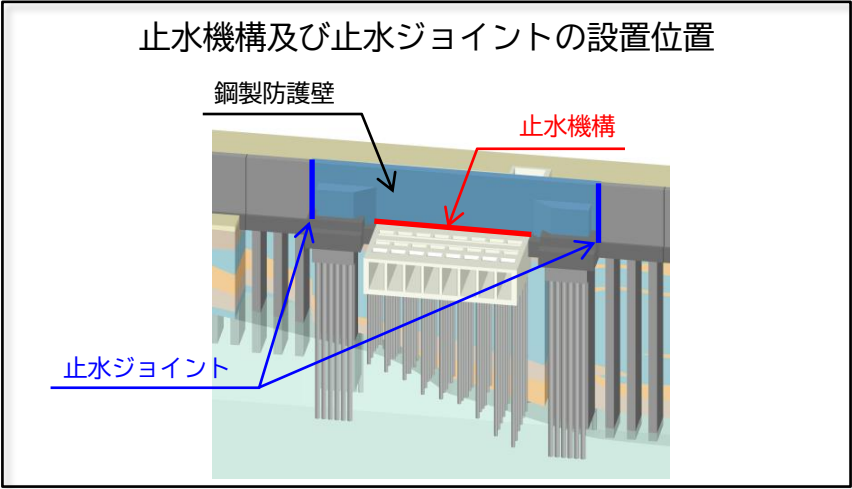
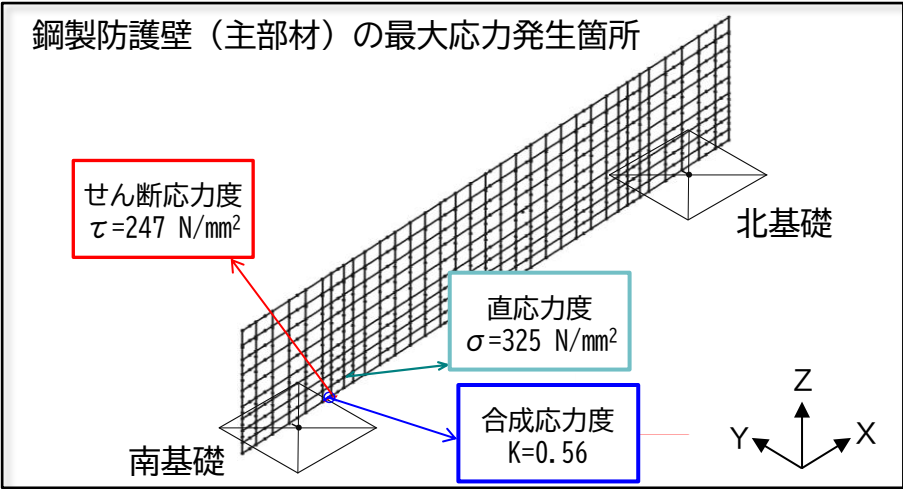
■ 最大ひずみ発生位置

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
(3) 耐津波評価：評価結果（鋼製防護壁）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

鋼製防護壁の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力等の種類	発生値	許容限界	最大照査値	津波種別	地盤ケース（地盤バネ※）
鋼製防護壁	鋼製防護壁	左下図参照	主部材 直応力度(N/mm ²)	324.6	697	0.47	遡上津波	地盤バネ5
			せん断応力度(N/mm ²)	246.6	399.5	0.62	遡上津波	地盤バネ5
			合成応力度(-)	0.56	1.2	0.47	遡上津波	地盤バネ5
		—	補剛材 断面二次モーメント(cm ⁴)	26483	37137	0.72	—	—
		—	添接板 引張時断面積(cm ²)	70.3	270.3	0.27	—	—
			圧縮時断面積(cm ²)	67.5	373.9	0.19	—	—
	止水ジョイント	—	止水ジョイント部の変形量(m)	1.059	2.0	0.53	—	—
	止水機構	—	止水機構の耐津波評価について、津波荷重は既工認から変更なく、余震荷重は設計の入力条件である2次元有効応力解析から算出されるSd-D1の設計震度が既工認時の結果を全て下回ることから、既工認の結果に包絡される					



※：地盤バネ1～2：津波時，地盤バネ3～5：津波と余震の重畳時

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

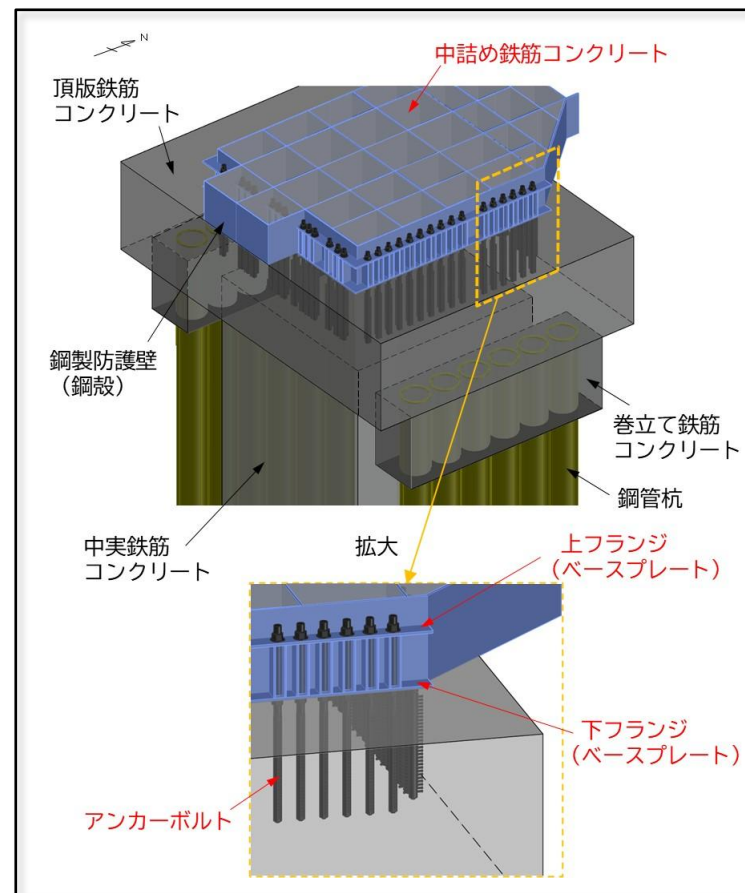
（3）耐津波評価：評価結果（接合部）

各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した

接合部の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

区分	評価対象 部位	照査 位置	照査項目；応力度及び断面 力等の種類		発生値	許容 限界	最大 照査値	津波 種別	地盤ケース (地盤バネ※)
接合部	アンカー ボルト	南基礎	引張	引張応力度 (N/mm ²)	216.2	355.0	0.61	遡上 津波	地盤バネ5
		南基礎	コーン せん断	コーンせん断 応力度(N/mm ²)	1.142	1.554	0.74	遡上 津波	地盤バネ5
	ベース プレート	南基礎	軸圧縮応力度 (N/mm ²)		163.3	450.0	0.37	遡上 津波	地盤バネ5
		南基礎	曲げ応力度 (N/mm ²)		46.0	355.0	0.13	遡上 津波	地盤バネ5
		南基礎	せん断応力度 (N/mm ²)		38.8	260.0	0.15	遡上 津波	地盤バネ5
		南基礎	合成応力度 (－)		0.036	1.20	0.04	遡上 津波	地盤バネ5
	中詰め 鉄筋 コンクリート	南基礎	せん断	せん断力(kN)	224237	252547	0.89	遡上 津波	地盤バネ5
		南基礎	水平回転 モーメント	水平鉄筋 応力度(N/mm ²)	331.4	478.5	0.70	遡上 津波	地盤バネ5

※ 地盤バネ1～2：津波時，地盤バネ3～5：津波と余震の重畳時



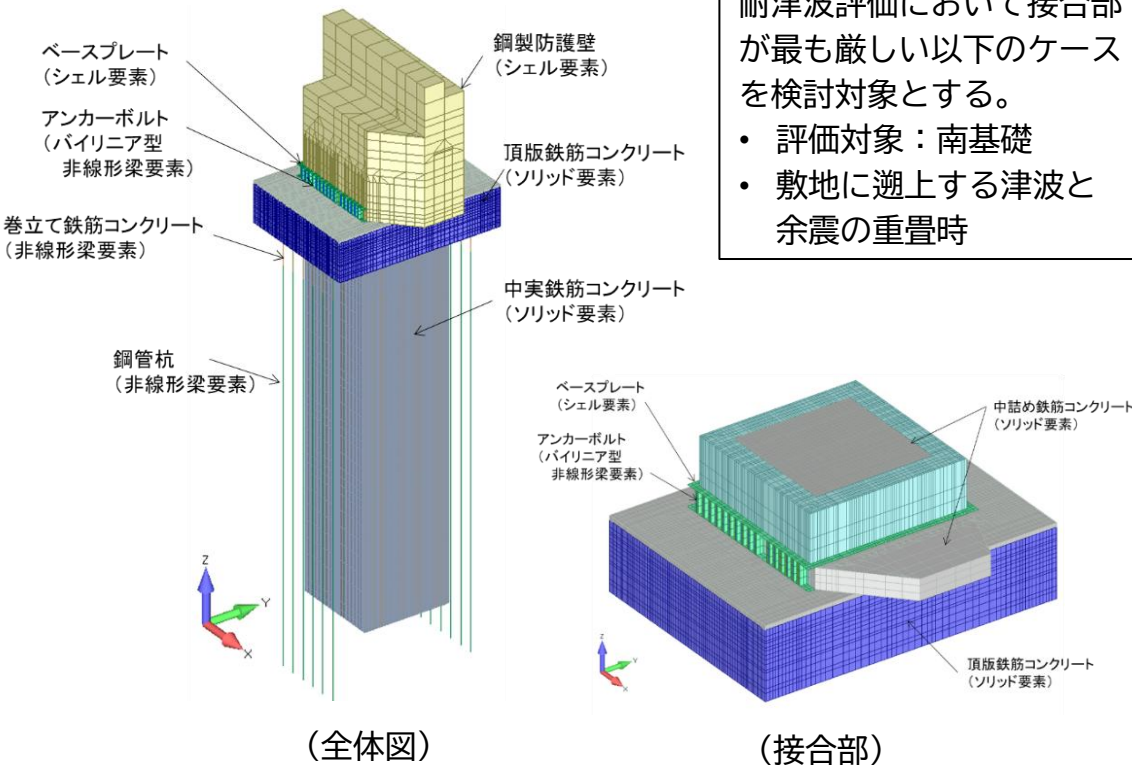
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（3）耐津波評価：評価結果（接合部）に係る補足

- 接合部に配置するアンカーボルトは、「鋼構造物設計基準（Ⅱ鋼製橋脚編，名古屋高速道路公社，平成15年10月）」に基づき設計している。当該基準は橋梁の設計を想定しているため，防潮堤に作用する津波荷重のような大規模な水平荷重に対する工認設計の妥当性を確認することを目的に，3次元材料非線形解析（COM3）による詳細評価を実施した。
- COM3による詳細評価の結果，アンカーボルトに発生する引張応力度が，許容限界以下であることを確認した。

耐津波評価において接合部が最も厳しい以下のケースを検討対象とする。

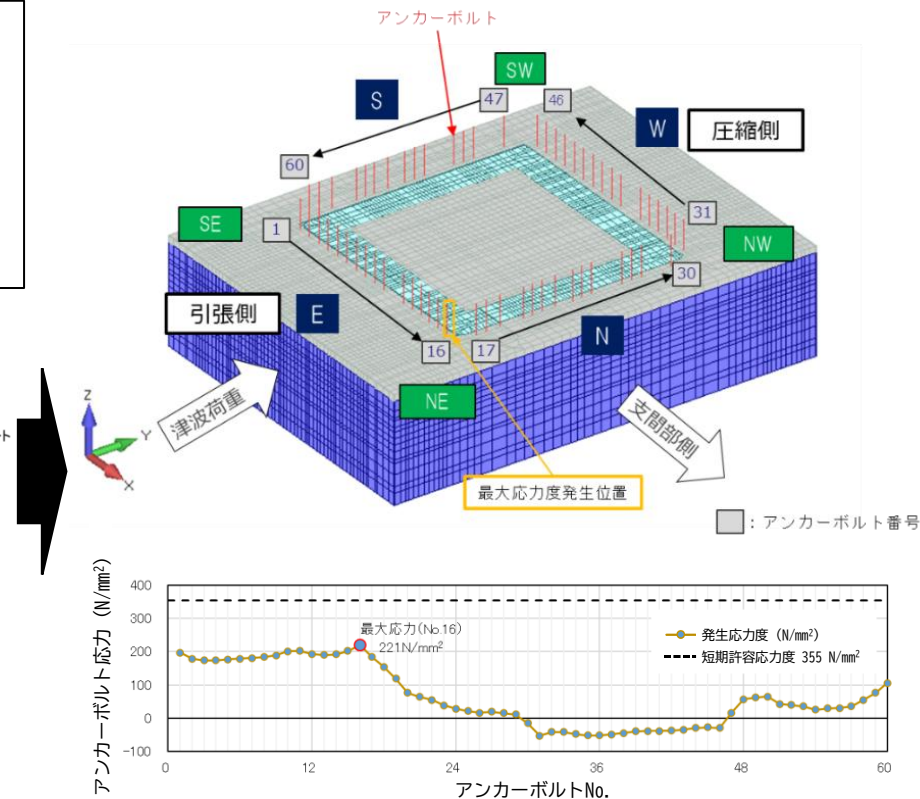
- 評価対象：南基礎
- 敷地に遡上する津波と余震の重畳時



（全体図）

（接合部）

3次元材料非線形解析（COM3）の解析モデル



COM3におけるアンカーボルトの評価結果

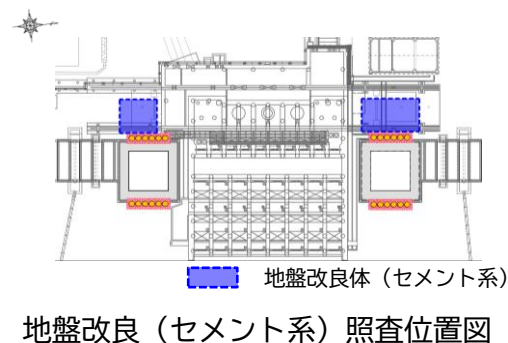
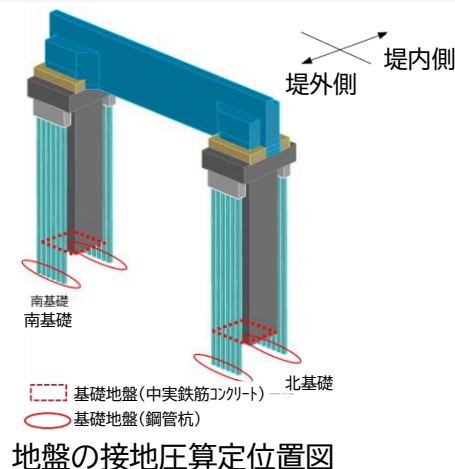
（3）耐津波評価：評価結果（地盤）

- 基礎地盤の接地圧について、STEP4では既工認と同様2次元静的FEM解析による精緻な解析を実施し、許容限界（極限支持力度）を下回ることを確認した
- 地盤改良（セメント系）は、津波荷重作用時においても内部すべりが発生することなく、側方抵抗として期待できる地盤であることを確認した

地盤の支持性能について確認し、その評価結果のうち最も厳しい値を下表に示す

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；接地圧		発生値	許容限界	安全率	津波種別	地盤ケース※
地盤	基礎地盤	中実鉄筋コンクリート	支持性能	北基礎 堤軸直交方向 接地圧(kN/m ²)	1918	6116	—	基準津波	ケース⑤
		鋼管杭	支持性能	北基礎 堤軸直交方向 接地圧(kN/m ²)	4338	5092	—	遡上津波	ケース③
	地盤改良(セメント系)	新設地盤改良	すべり	南基礎 堤軸直交方向 すべり(kN/m ²)	134.4	750	5.57	遡上津波	地盤バネ1

※ 基礎地盤については地盤ケース（地盤剛性）①～⑥で、地盤改良(セメント系)については地盤ケース（地盤バネ）1～5で評価を実施（地盤バネ1～2：津波時、地盤バネ3～5：津波と余震の重畳時）



（４）地中連続壁部の残置影響評価（耐震）：STEP4での実施概要（STEP3との相違）

- STEP3では**既工認結果**から評価が厳しいと想定される**代表的な地震動**及び**地盤ケース（地盤剛性）**による**主要な部位**の照査を実施
- STEP4では**工認設計モデルによる詳細設計の評価結果**を踏まえ、**評価対象部位毎に最も厳しい結果となる地震動**及び**地盤ケース（地盤剛性）**による**全ての部位**の照査を実施することで、地中連続壁部の残置による構造健全性への影響を網羅的に評価する

STEP3とSTEP4の主な設計方針の比較

主な設計方針	STEP3	STEP4
解析モデル	残置影響評価モデル※による地震応答解析で算出した断面力に対し、中実鉄筋コンクリートの部材断面のみで照査を実施	同左
評価対象地震動	代表地震動のみ（ S_s -D1）	工認設計モデルの評価結果を踏まえ、以下のとおり、地震動を設定 - 鋼製防護壁基礎，地盤 →S_s-31（①，③断面），S_s-D1（②断面） - 鋼製防護壁，接合部 →S_s-D1
地盤ケース（地盤剛性）	既工認結果から厳しいと思われるケースを選定（地盤ケース③）	工認設計モデルの評価結果を踏まえ、以下のとおり、地盤ケースを設定 - 鋼製防護壁基礎，地盤 →全ケース - 鋼製防護壁，接合部 →ケース④
評価対象部位	主要な部位のみ	全ての部位

※ 健全な地中連続壁部を仮定して最大限の発生断面力を算定し、中実鉄筋コンクリートのみで構造を成立させる保守的な設計モデル（詳細はp35）

（４）地中連続壁部の残置影響評価（耐津波）：STEP4での実施概要（STEP3との相違）

- STEP3では「敷地に遡上する津波」について代表的な地盤ケース(地盤バネ)による主要な部位の照査を実施
- STEP4では工認設計モデルによる詳細設計の評価結果を踏まえ、評価対象部位毎に最も厳しい結果となる津波種別と地盤ケース(地盤バネ)による全ての部位の照査を実施することで、地中連続壁部の残置による構造健全性への影響を網羅的に評価する

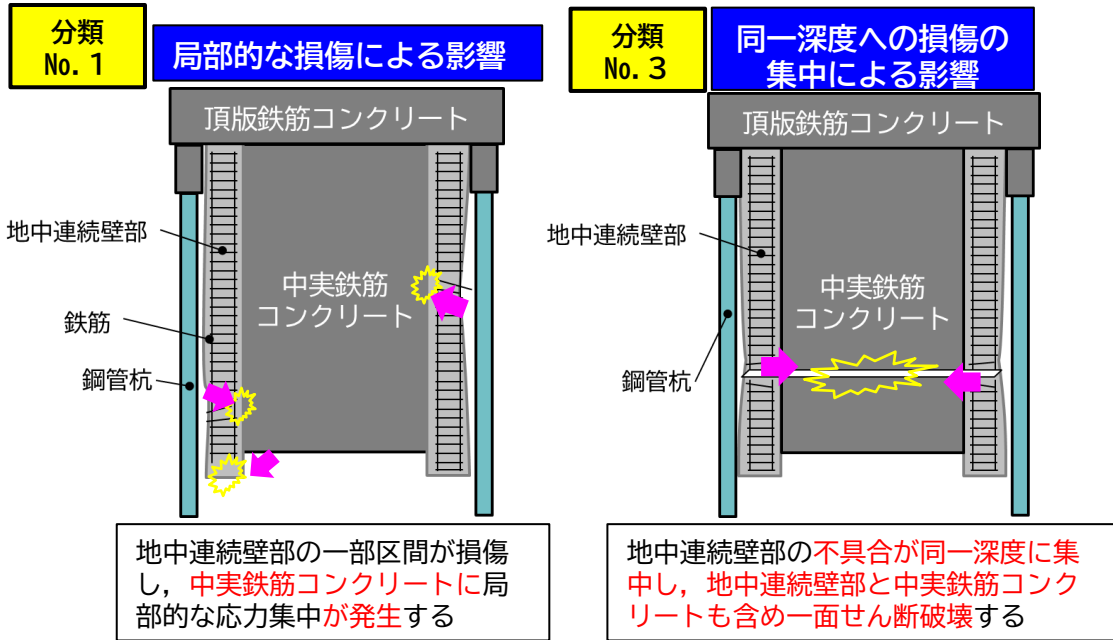
STEP3とSTEP4の主な設計方針の比較

主な設計方針	STEP3	STEP4
解析モデル	残置影響評価モデルにより算出した断面力に対し，中実鉄筋コンクリートの部材断面のみで照査を実施	同左
津波種別	敷地に遡上する津波	工認設計モデルの評価結果を踏まえ，以下のとおり，評価対象津波を設定 ・鋼製防護壁基礎，接合部，鋼製防護壁 →敷地に遡上する津波 ・地盤 →敷地に遡上する津波，基準津波
地盤ケース（地盤バネ※）	以下のとおり，代表的な地盤バネを設定 ・鋼製防護壁基礎 →地盤バネ 1～5 ・鋼製防護壁 →地盤バネ 5 ・接合部 →地盤バネ 5	工認設計モデルの評価結果を踏まえ，以下のとおり，地盤バネ等を設定 ・鋼製防護壁基礎 →地盤バネ 1～5 ・鋼製防護壁 →地盤バネ 5 ・接合部 →地盤バネ 3～5 ・地盤 →地盤ケース①～⑥
評価対象部位	主要な部位のみ	全ての部位

※ 地盤の評価においては地盤ケース（地盤剛性）①～⑥を実施

（４）地中連続壁部の残置影響評価 ： 残置影響評価方針

- 残置影響評価においては、地中連続壁部の施工時に確認された不具合事象に加え、将来的に想定すべき不具合事象を考慮した上で設計に影響を与え得る誘発事象を整理した
- 整理の結果、想定した誘発事象のうち分類No.1（局所的な損傷による影響）、分類No.3（同一深度への損傷の集中による影響）を設計上考慮すべき誘発事象として設定した



その他の誘発事象

- 分類 No. 2 大変形による影響** (Impact of large deformation):
 - 地中連続壁部及び周辺地盤の状況を踏まえ、地中連続壁部が単独で大変形し、隣接する鋼管杭等に接触して想定外の荷重が発生することはない
- 分類 No. 4 経年劣化の進展に関する影響** (Impact on the progress of aging):
 - 地中連続壁部の周辺環境や中実鉄筋コンクリートの被り厚等を踏まえ、経年劣化（中性化、塩害、凍害等）による影響はない
- 分類 No. 5 近傍工事への影響** (Impact on nearby construction):
 - 地中連続壁部の近傍工事である地盤改良体の設置や鋼管杭の打設について、その施工方法を踏まえ、露出した鉄筋等が問題となることはない

誘発事象による設計・施工影響の有無

- 地中連続壁部の強度・剛性に不均一性が生じることを想定して、これに伴う中実鉄筋コンクリートの発生断面力の変動を、設計上適切に考慮する必要がある
- 上述した強度・剛性の不均一による応力集中や損傷は、その発生位置及び程度に不確さがある
- このため、残置影響評価においては、不明確な応力集中及び損傷の影響を包絡できるよう、発生する断面力及び荷重を負担する部材に対して保守的な条件を設定する

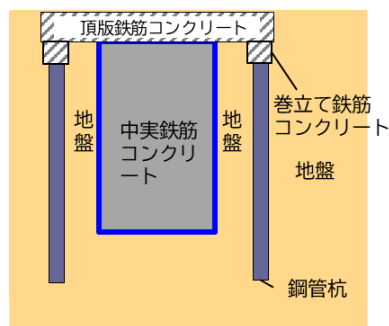
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（４）地中連続壁部の残置影響評価：残置影響評価モデル

- 残置影響評価モデルは、耐震及び耐津波評価ともにSTEP3で使用したものと同一であり、健全な地中連続壁部を仮定して最大限の発生断面力を算定し、中実鉄筋コンクリートのみで構造を成立させる保守的な設計モデルである
- また、地中連続壁部の強度・剛性の不均一性を網羅的に評価することを目的として、中実鉄筋コンクリートの曲げモーメントが概ね最大となる位置に強度・剛性低下の境界部を設定した評価（地中連続壁部を部分的に欠損させた「部分欠損モデル」による評価）も行う（STEP3と同じ）

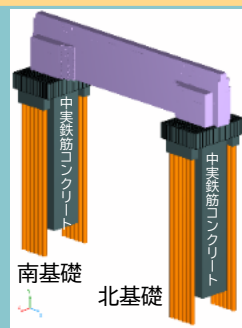
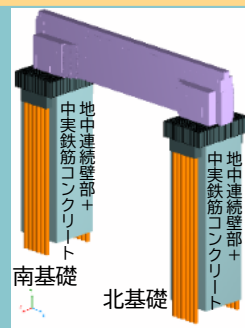
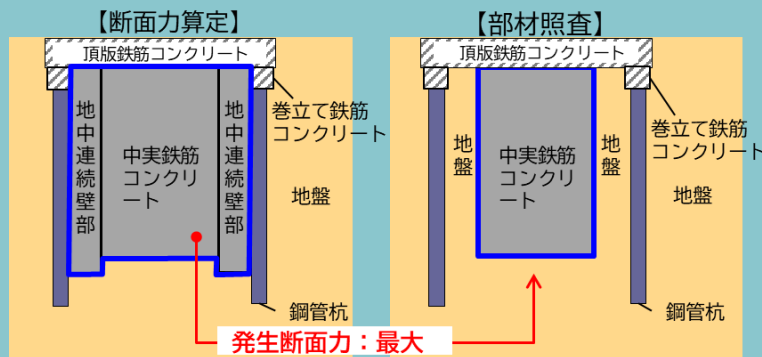
【工認設計モデル】

不具合のあった地中連続壁部を構造部材として考慮せず、強度・剛性の小さい地盤とした設計モデル



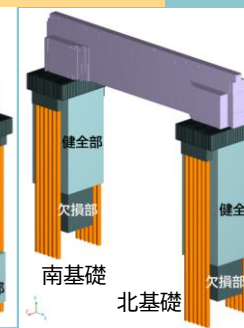
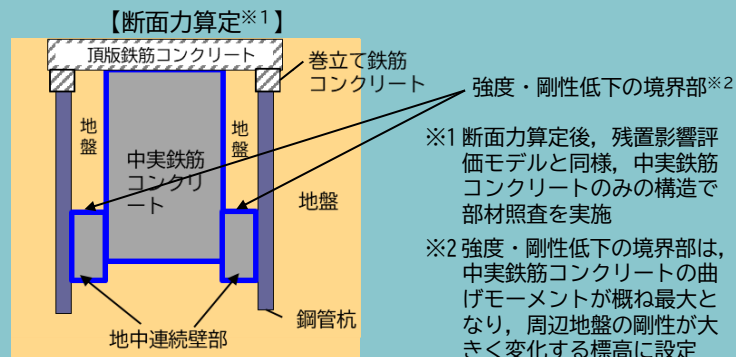
【残置影響評価モデル】

健全な地中連続壁部を仮定して最大限の発生断面力を算定し、中実鉄筋コンクリートのみで構造を成立させる保守的な設計モデル



【部分欠損モデル】

地中連続壁部の強度・剛性の不均一性を網羅的に評価するために、地中連続壁部の一部区間の強度と剛性を低下させたモデル（地盤と地中連続壁部を上下反転させた計2ケースを実施）



左：上部欠損モデル

右：下部欠損モデル

- ※1 断面力算定後、残置影響評価モデルと同様、中実鉄筋コンクリートのみの構造で部材照査を実施
- ※2 強度・剛性低下の境界部は、中実鉄筋コンクリートの曲げモーメントが概ね最大となり、周辺地盤の剛性が大きく変化する標高に設定

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（４）地中連続壁部の残置影響評価：残置影響評価の検討ケース

- 残置影響評価については、工認設計モデルにおいて評価した各検討ケースの評価結果を踏まえ、評価対象部位毎に最も厳しい結果となる検討ケース※¹を選定する

（耐震評価）

※¹：耐震評価：地震動と地盤ケース（地盤剛性）の組合せ， 耐津波評価：津波荷重と地盤ケース（地盤バネ）の組合せ

区分	地震動の選定	地盤ケース（地盤剛性）の選定
- 鋼製防護壁基礎 - 地盤	工認設計モデルにて解析断面毎に照査値が最大となる1波を選定することで、各評価対象部位に対し厳しいケースが包絡される ➤ ①-①断面，③-③断面：Ss-31 ➤ ②-②断面：Ss-D1	全地盤ケースを網羅的に実施 ➤ 各断面：地盤ケース①～⑥
- 鋼製防護壁 - 接合部	工認設計モデルにて南北の基礎間相対変位が最大となる1波を選定することで、各評価対象部位に対し厳しいケースが包絡される ➤ 3次元モデル：Ss-D1	工認設計モデルにて南北の基礎間相対変位が最大となる地盤ケースを選定することで、各評価対象部位に対し厳しいケースが包絡される ➤ 3次元モデル：地盤ケース④

（耐津波評価）

区分	津波荷重の選定	地盤ケース（地盤バネ※ ² ）の選定
鋼製防護壁基礎	工認設計モデルにて照査値が最大となる津波荷重を選定することで、各評価対象部位に対し厳しいケースが包絡される ➤ 3次元モデル：敷地に遡上する津波	全地盤バネを網羅的に実施 ➤ 3次元モデル：地盤バネ1～5
鋼製防護壁 (津波と余震の重畳時のみ)	同上	工認設計モデルにて照査値が最大となる地盤バネを選定することで、各評価対象部位に対し厳しいケースが包絡される ➤ 3次元モデル：地盤バネ5
接合部 (津波と余震の重畳時のみ)	同上	津波と余震の重畳時における全地盤バネを網羅的に実施 ➤ 3次元モデル：地盤バネ3～5
地盤 (津波と余震の重畳時のみ)	全津波荷重を網羅的に実施 ➤ ②-②断面，③-③断面：基準津波，敷地に遡上する津波	全地盤ケースを網羅的に実施 ➤ ②-②断面，③-③断面：地盤ケース①～⑥

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（４）地中連続壁部の残置影響評価：STEP4での評価対象部位

- STEP3では**主要な部位**の照査のみを実施
- STEP4では**全ての部位**を対象とし照査を実施

残置影響評価（耐震・耐津波）における評価対象部位一覧及びSTEP3との比較

区分	評価対象部位		耐震評価		耐津波評価		備考
			STEP3	STEP4	STEP3	STEP4	
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート		○	○	○	○	
	鋼管杭		○	○	○	○	
	巻立て鉄筋コンクリート		○	○	○	○	
	杭頭接合部		○	○	○	○	
	頂版鉄筋コンクリート		○	○	○	○	
鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材	△	○	△	○	△：STEP3では、南北基礎の最大相対変位（耐震評価）または、鋼製防護壁の断面力（耐津波評価）が既工認を下回ることをもって健全性を確認した —：細部の評価につきSTEP3では省略 (○)：下記の理由により健全性を確認した ・補剛材：主部材の仕様に応じて必要量が決定するものであり、当該仕様は工認設計モデルから変更がないため、評価結果は変わらず十分な裕度が確保できる ・添接板：主部材の発生断面力に応じて仕様が決定されるものであり、当該断面力は工認設計モデルと比較して有意な差がないため、十分な裕度が確保できる ・止水ジョイント：鋼製防護壁天端の変位量により照査を実施するものであり、基礎全体の剛性は工認設計モデルより大きく、変位は抑制されるため、裕度は向上する ・地盤改良：基礎から伝達される荷重により応力照査を実施するものであり、基礎全体の剛性が工認設計モデルより大きく向上することで、側方地盤改良体の発生応力が抑制されることから、裕度は向上する
		補剛材	—	(○)	—	(○)	
		添接板	—	(○)	—	(○)	
	止水ジョイント		—	(○)	—	(○)	
	止水機構		—	○	—	○	
接合部	アンカーボルト		△	○	○	○	
	ベースプレート		—	○	—	○	
	中詰め鉄筋コンクリート		△	○	○	○	
地盤	基礎地盤	中実部	—	○	—	○	
		鋼管杭部	—	○	—	○	
	地盤改良（セメント改良）		—	(○)	—	(○)	

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（４）地中連続壁部の残置影響評価（耐震）：評価結果（鋼製防護壁基礎）

- 鋼製防護壁基礎の各構造部材に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 部分欠損モデルにより局所的な応力集中を仮定した評価においては、残置影響評価を下回る結果となった

鋼製防護壁基礎の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

①鋼製防護壁基礎

工認設計モデル								残置影響評価モデル		部分欠損モデル※4		
区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		最大※2 照査値	地震動	地盤ケース (地盤剛性)	最大※1,2 照査値	検討ケース	最大※2 照査値	検討ケース	欠損ケース
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.41	Ss-31	ケース①	(北) 0.40	Ss-31 ケース③	(南) 0.35	Ss-31 ケース④	欠損ケース1
		南基礎	せん断	堤軸方向せん断力(kN)	0.80	Ss-31	ケース④	(南) 0.99	Ss-31 ケース④	(南) 0.82	Ss-31 ケース④	欠損ケース2
	鋼管杭	北基礎	曲げ	堤軸直交方向圧縮応力度(N/mm ²)	0.52	Ss-31	ケース④	(北) 0.45	Ss-31 ケース④			
		北基礎	せん断	堤軸直交方向せん断応力度(N/mm ²)	0.06	Ss-D1	ケース①	(北) 0.06	Ss-31 ケース④			
	巻立て鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.17※3	Ss-31	ケース②	(南) 0.15※3	Ss-D1 ケース④			
		北基礎	せん断	堤軸直交方向せん断力(kN)	0.45	Ss-D1	ケース①	(北) 0.31	Ss-31 ケース④			
	杭頭接合部	北基礎	仮想RC断面(RC)	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.25	Ss-31	ケース②	(南) 0.20	Ss-D1 ケース④			
	頂版鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸直交方向鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.78	Ss-31	ケース③	(南) 0.47	Ss-D1 ケース②			
		南基礎	せん断	堤軸方向せん断力(kN)	0.30	Ss-31	ケース①	(南) 0.16	Ss-D1 ケース④			
											 欠損ケース1 欠損ケース2 部分欠損モデル	

※1 最大照査値が1.00に近接しているものを赤字で示す

※2 STEP3以降の設計進捗による中実鉄筋コンクリート（南基礎）のせん断補強筋追加及び頂版鉄筋コンクリート（南北基礎）の主筋の仕様変更を反映

※3 工認設計モデルでは最大照査値となったRC部の値を、残置影響モデルでは最大照査値となった鋼管杭部の値を掲載している

※4 本評価は、残置影響評価により有意な影響を受ける“中実鉄筋コンクリート”に対して実施する

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

(4) 地中連続壁部の残置影響評価（耐震）：評価結果（接合部，鋼製防護壁，地盤）

- 鋼製防護壁及び接合部の各構造部材に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 基礎地盤の接地圧は許容限界（極限支持力度）を下回っていることを確認した

鋼製防護壁，接合部及び地盤の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

②鋼製防護壁，接合部

工認設計モデル							残置影響評価モデル			
区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力等の種類		最大照査値	地震動	地盤ケース (地盤剛性)	最大照査値	検討ケース	
鋼製防護壁	鋼製防護壁	－	主部材	直応力度(N/mm ²)	0.60	Ss-D1	ケース④	0.62	Ss-D1, ケース④	
				せん断応力度(N/mm ²)	0.50	Ss-D1	ケース④	0.52	Ss-D1, ケース④	
				合成応力度(－)	0.45	Ss-D1	ケース④	0.48	Ss-D1, ケース④	
	止水機構	－	止水機構の耐震評価については、設計の入力条件である2次元有効応力解析から算出される基準地震動Ssの設計震度が既工認時の結果を全て下回ることから、既工認の結果に包絡される					同左		
接合部	アンカーボルト	北基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	0.74	Ss-D1	ケース④	(北)0.75	Ss-D1, ケース④	
		北基礎	コーンせん断	せん断応力度(N/mm ²)	0.74	Ss-D1	ケース④	(北)0.74	Ss-D1, ケース④	
	ベースプレート	南基礎	軸圧縮応力度 (N/mm ²)			0.62	Ss-D1	ケース④	(南)0.58	Ss-D1, ケース④
		南基礎	曲げ応力度 (N/mm ²)			0.27	Ss-D1	ケース④	(南)0.25	Ss-D1, ケース④
		南基礎	せん断応力度 (N/mm ²)			0.26	Ss-D1	ケース④	(南)0.24	Ss-D1, ケース④
		南基礎	合成応力度			0.09	Ss-D1	ケース④	(南)0.10	Ss-D1, ケース④
	中詰め鉄筋コンクリート	南基礎	せん断	せん断力(kN)	0.27	Ss-D1	ケース④	(南)0.40	Ss-D1, ケース④	
		南基礎	水平回転モーメント	水平鉄筋応力度(N/mm ²)	0.43	Ss-D1	ケース④	(南)0.44	Ss-D1, ケース④	

③地盤

工認設計モデル								残置影響評価モデル		
区分	評価対象 部位	照査位置	照査項目；接地圧		発生値	許容 限界	地震動	地盤ケース (地盤剛性)	発生値	検討 ケース
地盤	基礎 地盤	中実鉄筋コンクリート	支持性能	北基礎 堤軸方向 接地圧(kN/m ²)	4777	6116	Ss-31	ケース④	4533	Ss-31, ケース④
		鋼管杭		南基礎 堤軸直交方向 接地圧(kN/m ²)	4912	5039	Ss-D1	ケース④	4017	Ss-D1, ケース②

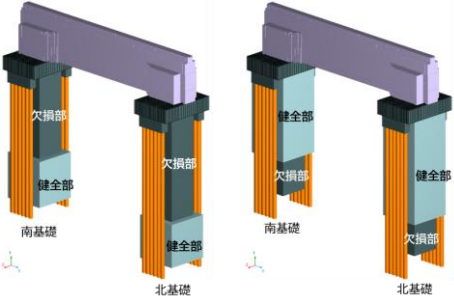
2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

（４）地中連続壁部の残置影響評価（耐津波）：評価結果（鋼製防護壁基礎）

- 各構造部材に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 部分欠損モデルにより局所的な応力集中を仮定した評価においては、残置影響評価を下回る結果となった

鋼製防護壁基礎の各評価対象部位の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

①鋼製防護壁基礎

工認設計モデル							残置影響評価モデル		部分欠損モデル※3			
区分	評価対象 部位	照査 位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		最大 照査値※1,2	津波種別	地盤ケース (地盤バネ)	最大 照査値※1,2	地盤ケース (地盤バネ)	最大 照査値※1,2	地盤ケース (地盤バネ)	欠損ケース
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋 コンクリート	南基礎	曲げ	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.56	遡上津波	地盤バネ4	(南) 0.90	地盤バネ4	(南) 0.69	地盤バネ4	欠損ケース2
		南基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断力(kN)	0.87	遡上津波	地盤バネ4	(南) 0.97	地盤バネ4	(南) 0.88	地盤バネ4	欠損ケース1
	鋼管杭	北基礎	曲げ	曲げ応力度(N/mm ²)	0.91	遡上津波	地盤バネ4	(北) 0.66	地盤バネ5		欠損ケース1	欠損ケース2
		南基礎	せん断	堤軸方向 せん断応力度(N/mm ²)	0.16	遡上津波	地盤バネ4	(南) 0.15	地盤バネ4			
	巻立て鉄筋 コンクリート	北基礎	曲げ	コンクリート 圧縮応力度(N/mm ²)	0.80	遡上津波	地盤バネ2	(北) 0.57	地盤バネ5			
		北基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断力(kN)	0.97	遡上津波	地盤バネ1	(北) 0.81	地盤バネ5			
	杭頭 接合部	南基礎	仮想RC断面 (RC)	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.96	遡上津波	地盤バネ4	(北) 0.78	地盤バネ5			
	頂版鉄筋 コンクリート	南基礎	曲げ	堤軸方向 鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.91	遡上津波	地盤バネ5	(北) 0.63	地盤バネ5			
		南基礎	せん断	せん断力(kN)	0.94	遡上津波	地盤バネ5	(北) 0.58	地盤バネ5			

※1 最大照査値が1.00に近接しているものを赤字で示す

※2 STEP3以降の設計進捗による中実鉄筋コンクリート（南基礎）のせん断補強筋追加及び頂版鉄筋コンクリート（南北基礎）の主筋の仕様変更を反映

※3 本評価は、残置影響評価により有意な影響を受ける“中実鉄筋コンクリート”に対して実施する

2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討
（4）地中連続壁部の残置影響評価（耐津波）：評価結果（鋼製防護壁，接合部，地盤）

- 鋼製防護壁及び接合部の各構造部材に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 基礎地盤の接地圧は許容限界（極限支持力度）を下回っていることを確認した

鋼製防護壁，接合部及び地盤の評価結果のうち最も厳しい値（最大照査値）を下表に示す

②鋼製防護壁，接合部

工認設計モデル							残置影響評価モデル		
区分	評価対象 部位	照査 位置	照査項目；応力度及び断面力等の種類		最大 照査値	津波種別	地盤ケース (地盤バネ)	最大 照査値	地盤ケース (地盤バネ)
鋼製防護壁	鋼製防護壁	－	主部材	直応力度(N/mm ²)	0.47	遡上津波	地盤バネ5	0.46	地盤バネ5
				せん断応力度(N/mm ²)	0.62	遡上津波	地盤バネ5	0.57	地盤バネ5
				合成応力度(－)	0.47	遡上津波	地盤バネ5	0.40	地盤バネ5
	止水機構	－	止水機構の耐津波評価について、津波荷重は既工認から変更なく、余震荷重は設計の入力条件である2次元有効応力解析から算出されるSd-D1の設計震度が既工認時の結果を全て下回ることから、既工認の結果に包絡される					余震の設計震度が既工認を僅かに上回るが設計上問題なし（p42参照）	
接合部	アンカー ボルト	南基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	0.61	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.59	地盤バネ5
		南基礎	コーンせん断	せん断応力度(N/mm ²)	0.74	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.73	地盤バネ5
	ベース プレート	南基礎	軸圧縮応力度（N/mm ² ）		0.37	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.36	地盤バネ5
		南基礎	曲げ応力度（N/mm ² ）		0.13	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.13	地盤バネ5
		南基礎	せん断応力度（N/mm ² ）		0.15	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.15	地盤バネ5
		南基礎	合成応力度		0.04	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.03	地盤バネ5
	中詰め鉄筋 コンクリート	南基礎	せん断	せん断力(kN)	0.89	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.87	地盤バネ5
		南基礎	水平回転モーメント	水平鉄筋応力度(N/mm ²)	0.70	遡上津波	地盤バネ5	(南)0.68	地盤バネ5

③地盤

工認設計モデル								残置影響評価モデル		
区分	評価対象 部位	照査 位置	照査項目；接地圧		発生値	許容 限界	津波 種別	地盤ケース (地盤剛性)	発生値	検討ケース
地盤	基礎 地盤	中実鉄筋コンクリート	支持性能	北基礎 堤軸直交方向 接地圧(kN/m ²)	1918	6116	基準津波	ケース⑤	2869	基準津波, ケース③
		鋼管杭		北基礎 堤軸直交方向 接地圧(kN/m ²)	4338	5092	遡上津波	ケース③	4657	遡上津波, ケース③

(5) 止水機構：静的評価

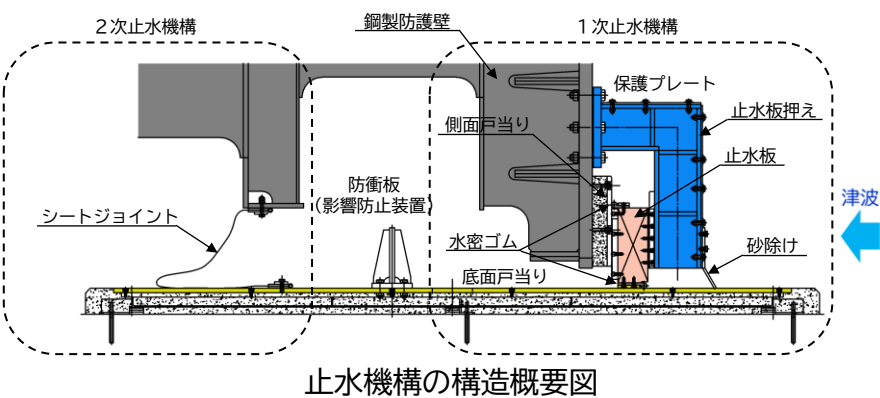
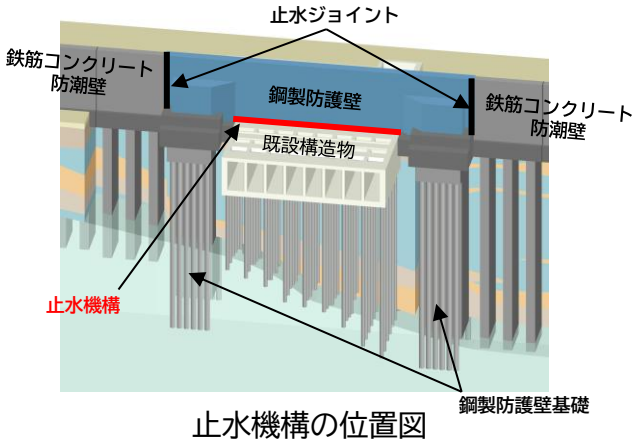
- 止水機構は鋼製防護壁に間接支持されており、防潮堤（鋼製防護壁）の構造変更により地震時及び余震時の設計震度に変更となることから、設計震度について既工認との大小関係を確認した上で、既工認を上回る場合は部材照査を実施する方針とする
- 残置影響評価によりEW方向の設計震度（余震時）が既工認を上回る結果となったため、止水機構の部材照査を実施
- 設計震度（余震時）及び津波荷重（敷地に遡上する津波）を考慮した評価により、止水機構の各部位の発生応力度が許容限界を下回っていることを確認した

防潮堤（鋼製防護壁）の構造変更を考慮した設計震度(1.2×ZPAによる震度)

		水平方向		鉛直方向
		NS方向	EW方向	
本震時 (基準地震動Ss)	既工認モデル	3.10	3.85	5.50
	工認設計モデル	2.88	3.66	5.38
	残置影響評価モデル	2.79	3.49	5.22
余震時 (Sd-D1)	既工認モデル	1.34	1.93	1.78
	工認設計モデル	1.30	1.78	1.74
	残置影響評価モデル	1.34	1.99※	1.72

※赤字：既工認を上回る設計震度

区分	構成部位	照査項目	最大照査値	
			既工認	残置影響評価
止水機構	止水板	本体：せん断	0.08	0.09
	保護プレート	正面部材：曲げ	0.60	0.61
		正面部材：せん断	0.30	0.31
	防衝板	取付けボルト：せん断	0.61	0.62
	シートジョイント	シート：引張	0.72	0.74

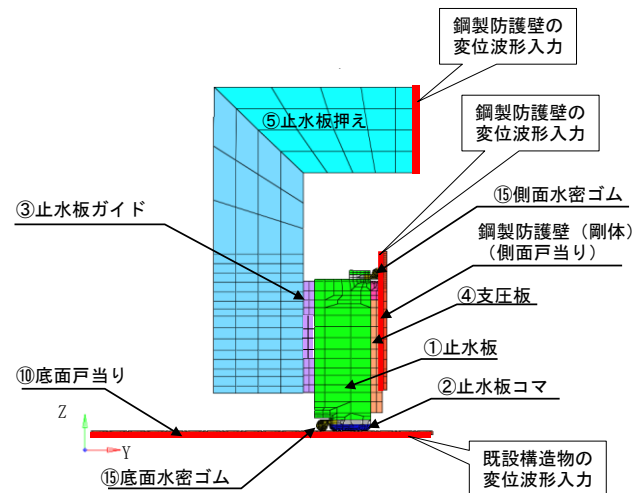


2. 構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）の設計検討

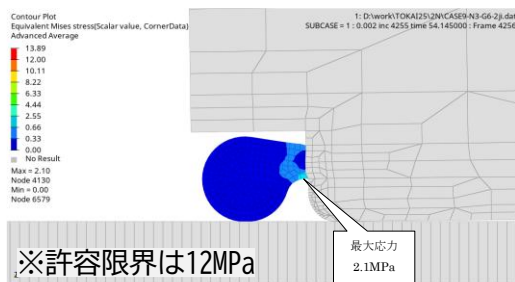
(5) 止水機構：動的評価

- 1次止水機構に対しては、前頁に示す静的解析に加え、超弾性体である水密ゴムの地震時の接触挙動を精緻に把握するため2次元動的解析を実施した。また、止水板は固定されておらず地震時に複雑な挙動を示すため、止水板と接するその他の部材を含めて3次元動的解析を実施した。
- 2次元及び3次元動的解析の結果、1次止水機構の各部位の発生応力が許容限界を下回っていることを確認した。

2次元動的解析モデルと評価結果



2次元動的解析モデル

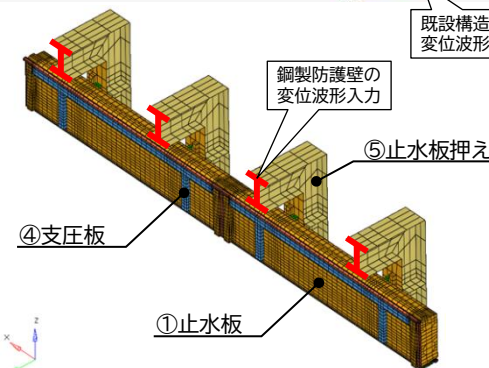
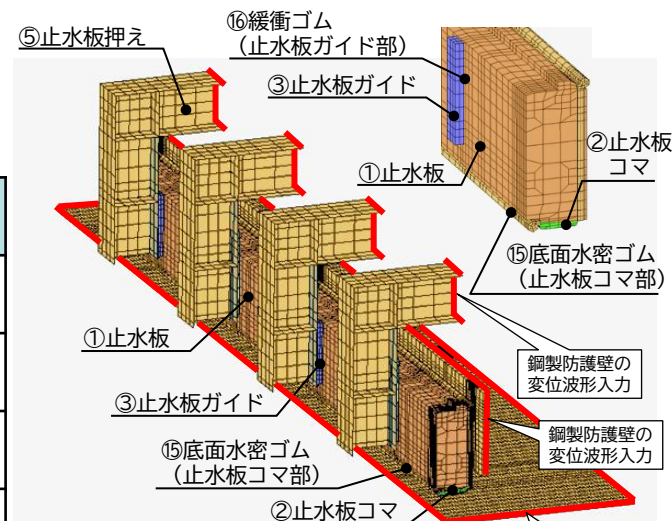


水密ゴム(下部)の評価結果

3次元動的解析モデルと評価結果

3次元動的解析による応力照査結果

対象部位	発生応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	照査値
①止水板	2.2	300	0.01
②止水板コマ	66.9	228	0.30
③止水板ガイド	47.4	337	0.15
④支圧板	10.0	38	0.27
⑤止水板押え	85.4	382	0.23
①⑤底面水密ゴム (止水板コマ部)	0.3	12	0.03
①⑥緩衝ゴム (止水板ガイド部)	2.0	12	0.17



3次元動的解析モデル

（6）まとめ

○耐震及び耐津波評価結果

- STEP4の詳細検討において、全ての検討ケース及び評価対象部位に対する評価を実施した結果、構造変更を行った防潮堤（鋼製防護壁）及び当該防潮堤に支持される止水機構は、基準地震動 S_s による地震力、基準津波及び敷地に遡上する津波による津波荷重、並びに津波荷重と余震の重畳を考慮した荷重に対して、構造健全性及び止水性が確保される設計であることを確認した
- 加えて、STEP4の詳細検討結果に対し、残置する地中連続壁部による影響を保守的に考慮しても、構造健全性及び止水性に対する影響が無いことを併せて確認した

○STEP3（構造成立性検討）からの設計進捗

- 代表的な設計条件（検討ケース、評価対象部位）での評価により構造成立性の見通しを得たSTEP3に対し、STEP4の詳細検討では、耐震及び耐津波設計として実施すべき全ての設計条件（検討ケース、評価対象部位）に対する評価を網羅的に実施した
- その結果、中実鉄筋コンクリート（南基礎）のせん断補強筋を部分的に追加するとともに、頂版鉄筋コンクリート（南北基礎）の一部主筋の仕様をSD490から、より強度の高いSD685に変更した

以上より、構造変更後の防潮堤（鋼製防護壁）は、STEP4（詳細検討）で設定した構造仕様において、津波防護施設としての要求機能を維持できることを確認した

3. 工事管理の改善と再発防止に向けた取組み

3. 工事管理の改善と再発防止に向けた取り組み

- ◆ 当社は、本不具合事象を当社の工事管理に起因する問題として重く受け止めている
- ◆ 本不具合に端を発し、設工認の変更に至ったことの重大性を踏まえ、異常兆候の発見及び情報共有が不十分だったと認識し、現場実態をより正確に把握する観点から、従来の工事管理・品質管理※1に加え、経営として責任あるリーダーシップの下、以下の改善を徹底する

発電所全体での取り組み

異常兆候の早期発見に向けた改善

- ・ 協力会社を含めたCondition Report（C R）活動を一層活性化する
 - 全ての現場作業員へC R活動の目的・方法を定期的に周知する
 - 当社監理員が今以上に現場に関与し、現場作業員から直接、気付きや懸念を聞き取る

発電所において管理実績の少ない工事への新たな取り組み

作業報告の場への参加による情報収集の強化

- ・ 施工会社の作業報告の場に当社監理員が参加し、工事の実施状況を確認するとともに、計画との差異や懸念事項を把握し、改善の要否を判断する
- ・ 収集した情報をC R活動に確実につなぎ、是正対応へ反映する

現場観察・作業観察※2による現場の改善

- ・ 当社監理員等による工事現場の観察（現場作業員の振舞いや現場状態の観察）を強化し、現場の弱点や課題を早期に発見することにより現場の改善につなげる

※1 協力会社からの作業進捗等の聞取り、書類確認・現場立会による工事品質の確認

※2 発電所では、上位職者が現場での行動観察を通じてパフォーマンスの課題を抽出し、改善につなげる活動を従来から実施している

発電所において、発電所長のリーダーシップの下、同様の不具合を二度と生じさせないという決意で、これらの取り組みを強力に推進する

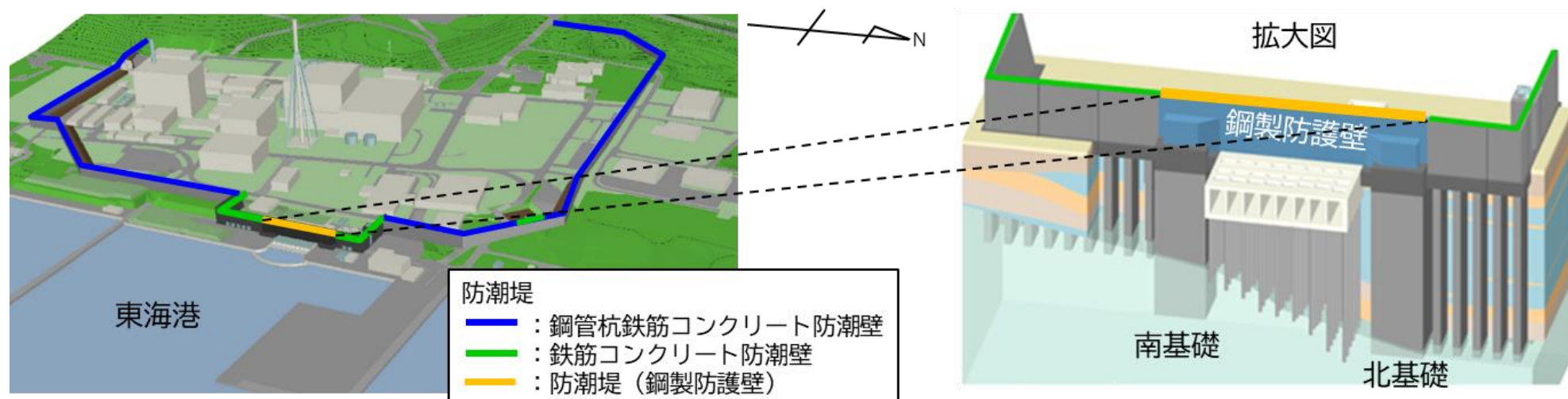
4. 参考

防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（１）防潮堤（鋼製防護壁）の構造変更に至った経緯（1/2）

- 東海第二発電所では、敷地への津波の流入を防止するため、敷地を取り囲む形で防潮堤を設置する計画であり、2018年10月に工事計画認可を取得した。防潮堤の内、防潮堤（鋼製防護壁）は、既設構造物の南北両側に地中連続壁基礎を岩盤まで設置し、その上部に既設構造物を跨ぐように鋼製防護壁を設置するものである。
- 工事は2019年9月に開始し、地中連続壁部を構築した後、その内部（中実側）を掘削するとともに、中実鉄筋コンクリートと地中連続壁部を一体化させながら基礎を構築する計画であった。しかし、地中連続壁部の施工中及び中実側の掘削中に、地中連続壁部の不具合事象を確認した（不具合事象は「（２）不具合事象の概要」参照）。
- このため、防潮堤の構造の見直し（設計変更）について、2024年2月に工事計画変更認可申請※を行った。
※地中連続壁部は基礎として使用するものの、地中連続壁部の不具合が想定される範囲の一部のコンクリートや鉄筋を構造部材として使用しない設計とする変更認可申請を行った。
- その後、審査の過程において、不具合の全容が確認できない地中連続壁部は残置し、基礎として使用しない方針に変更するとともに、「追加基礎（鋼管杭）」及び「周辺地盤の地盤改良」を取り入れた構造に変更し、当該構造で津波防護施設としての要求機能を満足できることを確認した。



4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

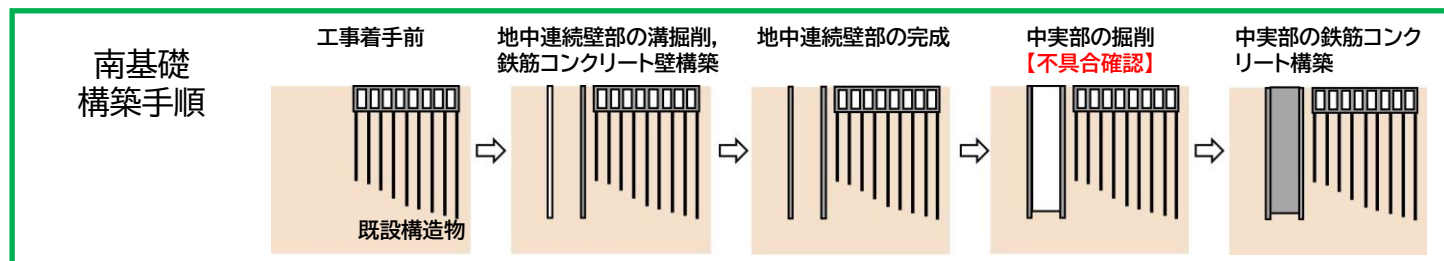
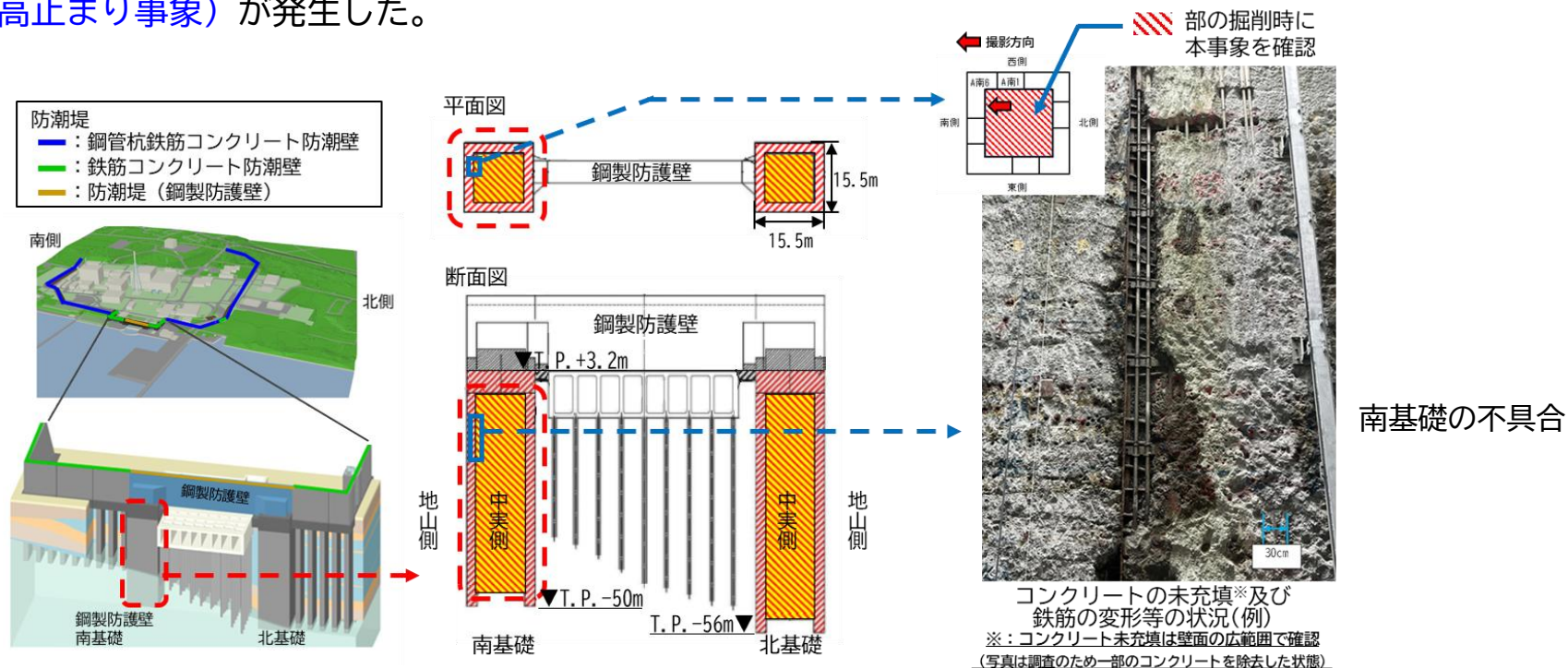
（１）防潮堤（鋼製防護壁）の構造変更に至った経緯（2/2）

時系列	内容	備考
2018年10月	重大事故等対処施設の工事計画認可 平成30年10月18日付け原規規発第1810181号	当初の防潮堤（鋼製防護壁）を含む工事計画の認可
2019年9月	工事開始	
2022年3月～ 2023年3月	地中連続壁部の施工中のトラブル発生 （溝壁の崩壊，鉄筋の高止まり等）	
2023年6月	不具合の確認（南基礎の中実側掘削完了）	
2023年8月	不具合の確認（北基礎の中実側掘削完了）	
2024年2月	重大事故等対処施設の設計及び工事計画変更認可申請	補正申請（防潮堤の設計変更の追加） 地中連続壁部は基礎として使用するものの，地中連続壁部の不具合が想定される範囲の一部のコンクリートや鉄筋を構造部材として使用しない設計とする変更認可申請
2024年3月	審査会合（第1240回）：不具合事象の概要と対策	
2024年6月	審査会合（第1259回）：不具合事象の全容	
2024年8月	審査会合（第1280回）：不具合事象に対する対応方針	地中連続壁部を基礎として使用しない方針の説明
2024年8月	重大事故等対処施設の設計及び工事計画変更認可申請	2024年2月申請の分割（防潮堤の工事計画を他の審査案件から分割）
2024年12月	審査会合（第1309回）：構造変更案の概要	「追加基礎（鋼管杭）」及び「周辺地盤の地盤改良」を取り入れた構造に変更する方針を説明
2025年3月	審査会合（第1329回）：基本方針の設定	
2025年9月	審査会合（第1360回）：構造成立性（見通し）	耐震・耐津波・残置影響の評価結果（見通し）の説明
2025年12月	審査会合（第1376回）：構造成立性（見通し）	高強度鉄筋SD685の適用性，工事計画の実現性等の説明
2026年4月	審査会合（第1407回）：詳細検討結果	周辺施設・設備への影響評価，施工計画及び品質管理方法の説明
2026年8月	審査会合：詳細検討結果	耐震・耐津波・残置影響の評価結果（詳細検討結果）の説明

4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

(2) 不具合事象の概要

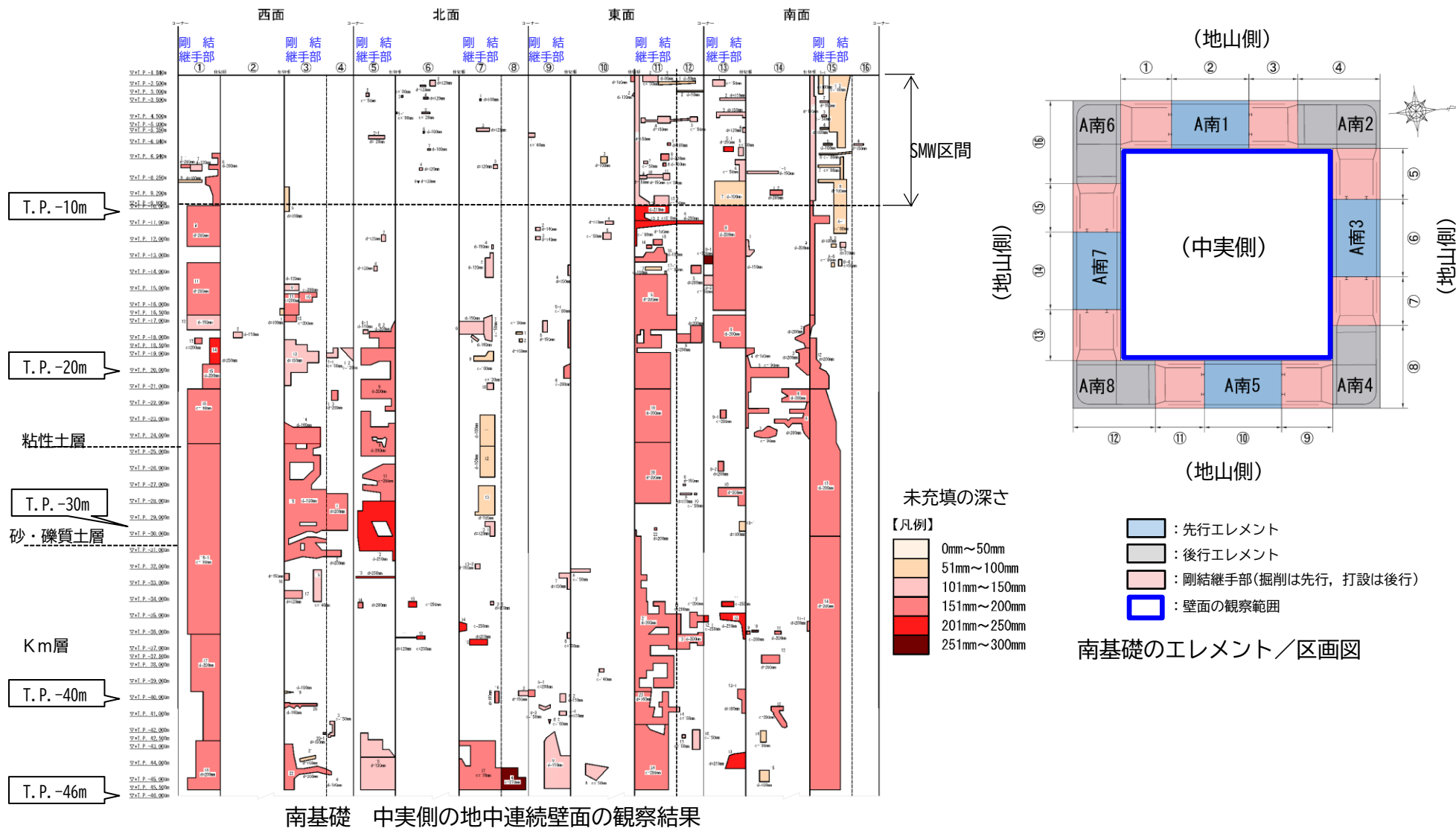
- 南基礎及び北基礎の中実側の掘削を実施したところ、地中連続壁部の中実側の壁面の一部において、**コンクリート未充填及び鉄筋の変形等（鉄筋の変形、脱落、欠損）**を確認した。また、その後の調査で地中連続壁の地山側においてもコンクリート未充填を確認した。
- また、地中連続壁の施工中には、北基礎の地中連続壁の南西側角部において、**鉄筋かごが計画深度まで建込みできない事象（高止まり事象）**が発生した。



4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（2）不具合事象の概要（コンクリートの未充填）

- 南基礎の中実側からの観察により、地中連続壁部にコンクリートの未充填（未充填の状況によっては鉄筋の露出）が発生していることを確認した。以下に未充填部の壁面状態を示す。



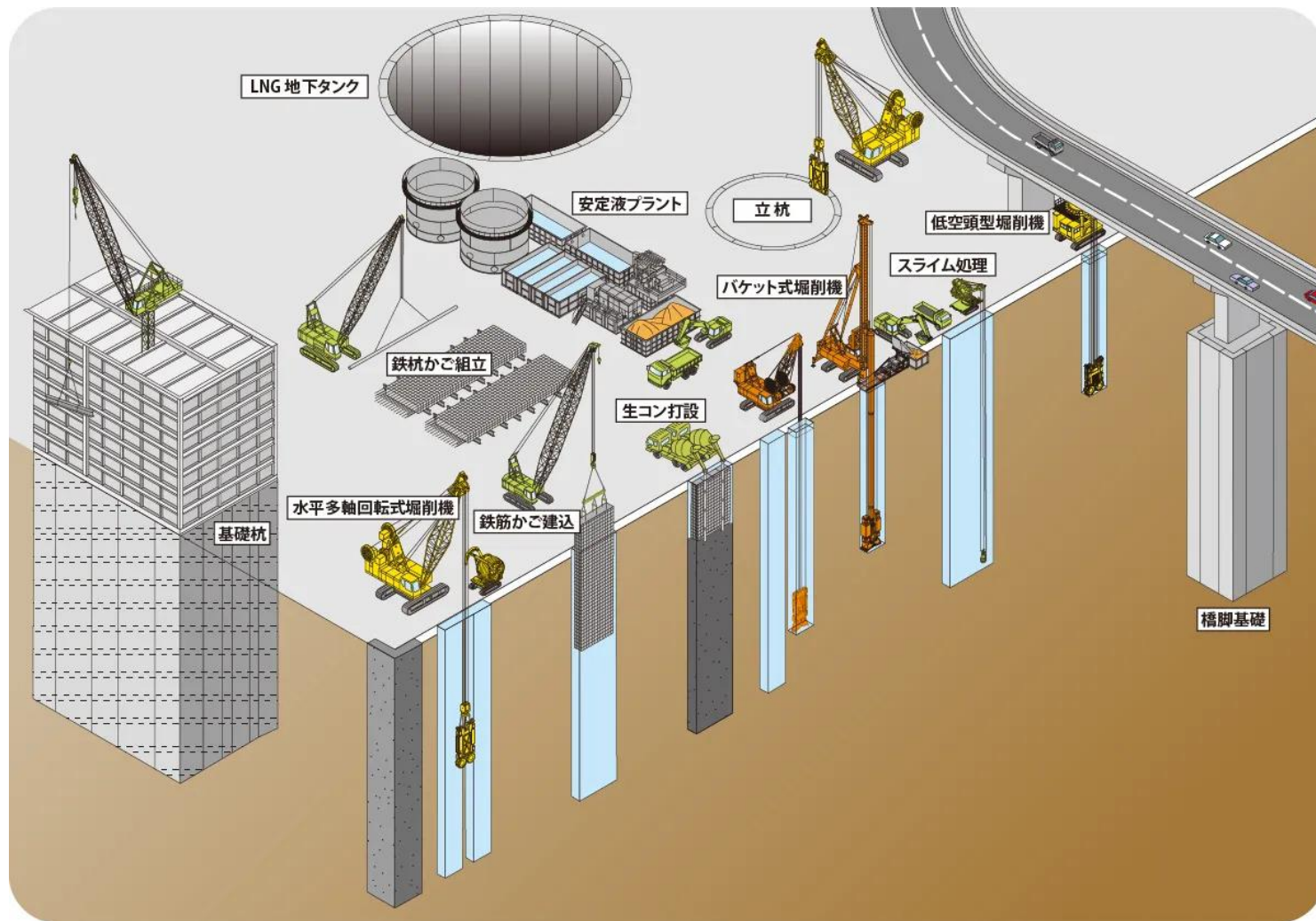
4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（２）不具合事象の概要（地中連続壁工法）

- 地中連続壁工法は地中に鉄筋コンクリート製の連続した壁体を構築する工法であり、本工事では、当初、防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構築工法として採用した。
- 地中連続壁工法は建築物や土木構造物の基礎、止水壁及び土留め壁を構築するために広く用いられている。施工は安定液（泥水）で掘削溝壁の崩壊を防止しながら地盤を掘削して掘削溝を形成し、鉄筋かごを建て込んだ後にコンクリートを打設して壁体を構築する。

地中連続壁工法の概要 （イメージ）

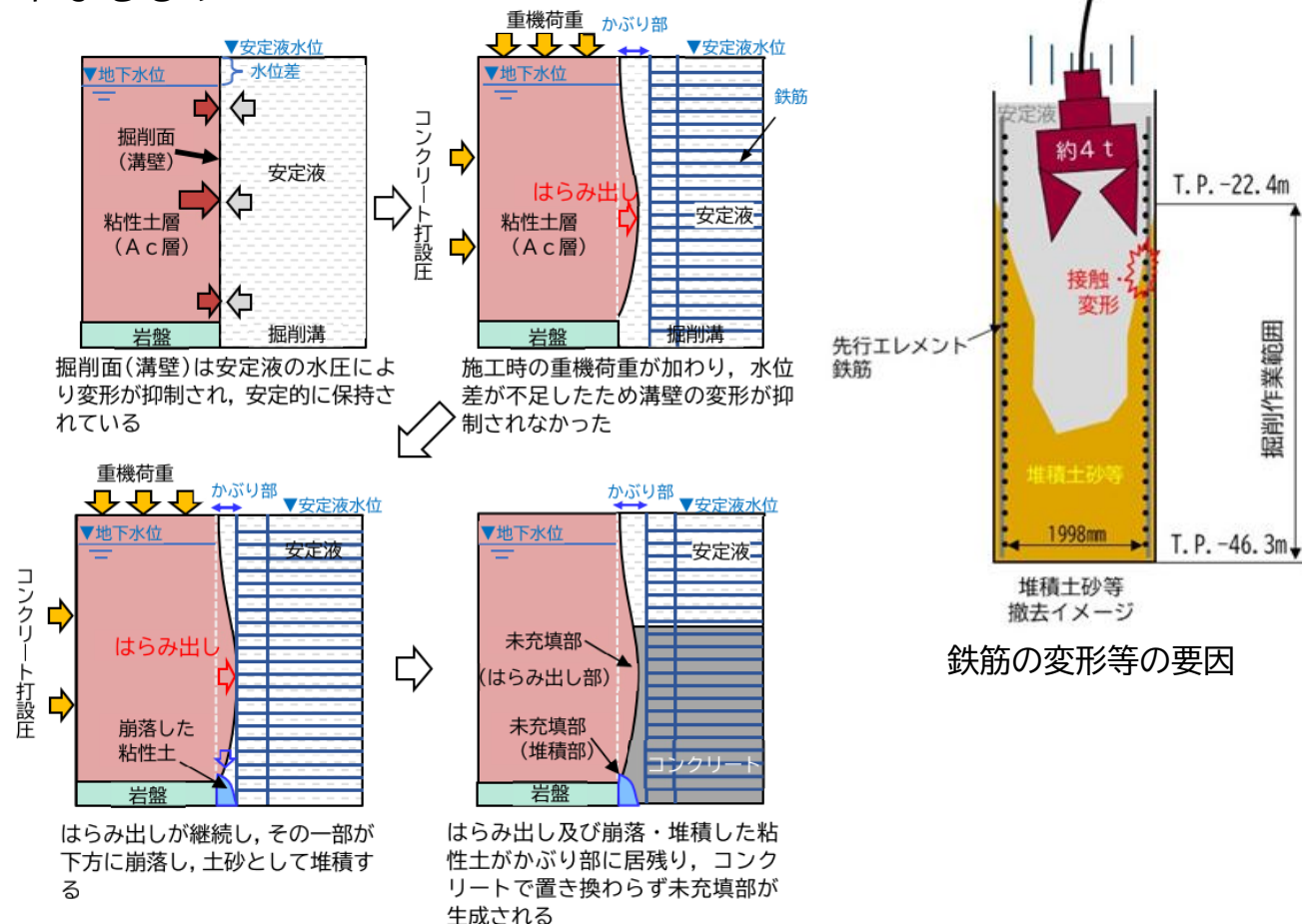
出典：「地中連続壁工法とは」（地中壁施工協会）
(<https://www.renpeki.jp/underground-wall/>)



4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（3）不具合事象発生の要因（コンクリートの未充填及び鉄筋の変形等）

- コンクリート未充填部が発生した原因は、「コンクリートの流路阻害」であり、特に粘性土層（A c 層）のはらみ出し及び崩落によるもの
- 鉄筋の変形等は、溝壁内に堆積した崩壊土砂等の撤去作業に使用していたハンマークラブが、先行して設置した鉄筋かごに接触して当該鉄筋かごを変形させるとともに、その後に設置した鉄筋かごが変形した鉄筋かごと干渉したことによるもの



コンクリートの未充填（粘性土のはらみ出し）の発生過程

事象を引き起こした根本原因

- 各施工ステップにおいてリスク想定が不十分であり、不具合の発生を予期できなかった
- 工事が計画通り行われていることを直接確認せず、代替措置を講じなかった（施工中に溝壁の状態を直接確認する方法がない中、確認するための代替措置を講じなかったこと及び鉄筋かごの状態を直接確認せず、代替措置を講じなかったこと）

4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（４）鋼製防護壁基礎の構造変更

- 地中連続壁部の不具合の状況を調査したが、その全容を把握できなかったため、不具合が生じた地中連続壁部は残置するが、基礎として使用しない設計に変更することとした（審査会合（第1280回）で説明）
- 地中連続壁部を基礎として使用しない設計とすることにより、防潮堤基礎の剛性・耐力が確保できないため、その対策として「追加基礎（鋼管杭）」及び「周辺地盤の地盤改良」を取り入れた構造に変更し、支配的な津波荷重に対して抵抗を期待する構造に変更した（審査会合（第1309回）で説明）

青字は、既工認から変更した箇所

	既工認※	構造変更
概略図		
上部工	鋼製防護壁，中詰RC，根巻RC，止水ジョイント部	同左
接合部	アンカーボルト	同左
下部工	・頂版RC ・地中連続壁基礎（A. 中実RCとC. 地中連続壁をジバル鉄筋により一体化した構造）	・頂版RC ・複合基礎（A. 中実RC，B. 鋼管杭，D. 巻立てRC） ・C. 地中連続壁部は構造部材として考慮しない
周辺地盤	第四系（地盤改良なし）	第四系（地盤改良あり）
基礎地盤	久米層（岩盤）	同左

（５）構造変更後の構造成立性評価に係る検討

構造変更後の耐震・耐津波に係る構造成立性評価及び施工性・検査に係る検討を下記の手順で確実に進め、構造成立性及び施工の実現性を確認した

STEP 1

●構造変更案の概要

- 構造変更案の概要（追加基礎・地盤改良の追加）
- 今後の説明の流れ

STEP 2

●基本方針の設定※1

【耐震・耐津波評価】の基本方針

- 要求性能と設計評価方針
- 検討モデル（鋼管杭、地盤改良、頂版鉄筋コンクリート、地盤バネ、群杭の扱い等）
- 評価フロー、評価項目
- STEP3で示す耐震評価に係る構造成立性の評価方法

【影響評価】の基本方針

- 地中連続壁の残置影響に係る評価ロジック、評価条件、評価方針及び保守性の整理
- 追加基礎・地盤改良による周辺施設への影響に係る評価項目、評価方法、周辺施設の詳細情報

【施工性・検査】の基本方針

- 追加基礎・地盤改良の施工方法と設計への反映事項の整理
- 品質確保のための検査項目（品質管理目標）
- 地盤改良（薬液注入）の性能目標、物性値

●構造成立性の見通し

【耐津波評価】の結果※2

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による各部の照査

STEP 3

●構造成立性

【耐震・耐津波評価】の結果

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による各部の照査

【影響評価】の結果

- 代表的な応力（断面力最大ケース）による地中連続壁の残置影響評価

STEP 4

●詳細検討結果

【耐震・耐津波評価】の結果

- 全解析ケースによる各部の照査

【影響評価】の結果

- 地中連続壁部の残置影響評価
- 追加基礎・地盤改良による周辺施設への影響評価

【施工性・検査】の確認結果

- 地盤改良物性値（ばらつき、液状化強度）に係る試験確認

※1 STEP2で設定した基本方針に基づき構造成立性の見通しの確認（STEP2,3）、詳細検討（STEP4）を実施する

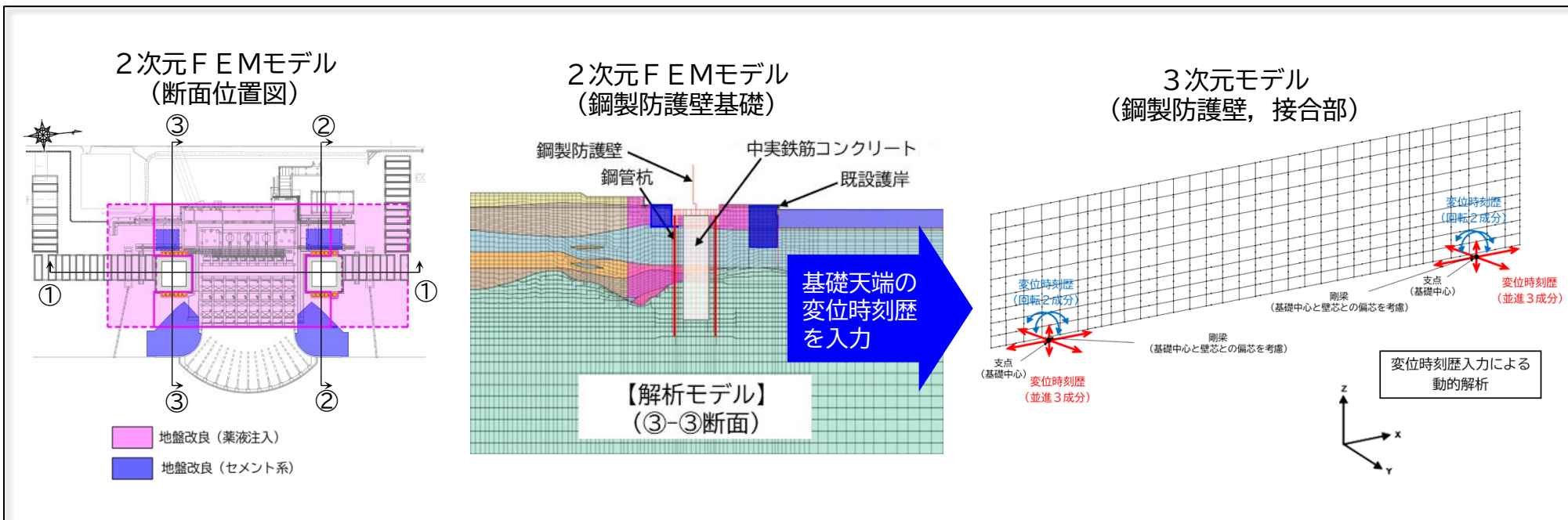
※2 構造変更する基礎に対して、最も厳しい荷重条件である耐津波時（重畳時）を代表ケースとして見通しを確認する

(6) 耐震評価結果 (1/2)

評価内容（耐震）

- ・ 構造変更を含む防潮堤全体の基準適合性を確認するため、既工認と同じ方針に基づき、全検討ケースによる全ての部位の照査を実施した
- ・ 鋼製防護壁基礎を2次元FEMモデルで、鋼製防護壁を3次元モデルで評価し、各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界以下であることを確認する
- ・ 構造変更として追加する鋼管杭（巻立て鉄筋コンクリート含む）、地盤改良体（既実施分を含むセメント系及び薬液注入）について、2次元FEMモデルに反映した

評価モデル

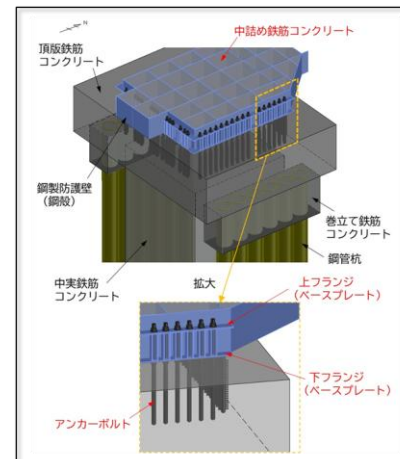
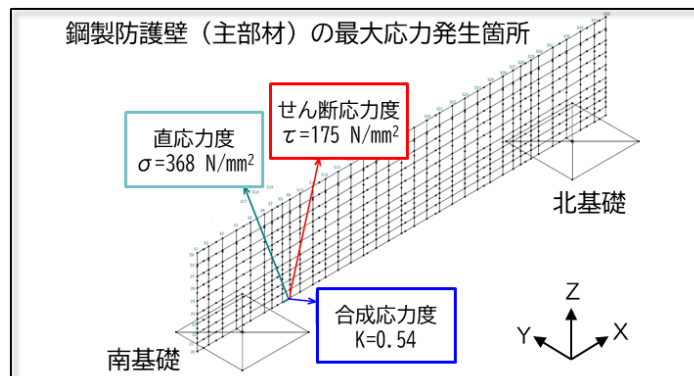
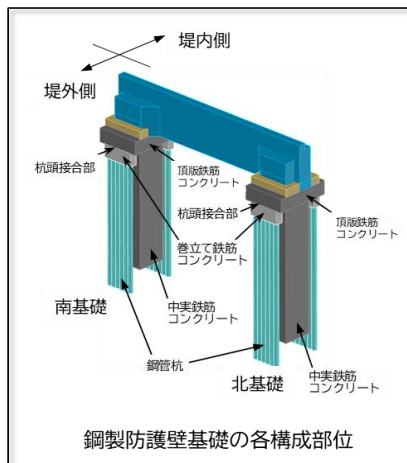


(6) 耐震評価結果 (2/2)

評価結果（耐震）

- 耐震評価の結果、各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 下記の評価結果表は、鋼製防護壁基礎・鋼製防護壁・接合部の主要な評価対象部位における最大照査値を示したものである

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		発生値	許容限界	最大照査値	地震動	地盤ケース（地盤剛性）
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸方向 鉄筋引張応力度(N/mm ²)	176	435.0	0.41	Ss-31	ケース①
		南基礎	せん断	堤軸方向 せん断力(kN)	209596	262058	0.80	Ss-31	ケース④
	鋼管杭	北基礎	曲げ	堤軸直交方向 圧縮応力度(N/mm ²)	226	442.5	0.52	Ss-31	ケース④
		北基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断応力度(N/mm ²)	13.5	255.0	0.06	Ss-D1	ケース①
鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材の最大応力発生箇所	主部材	直応力度(N/mm ²)	368	615	0.60	Ss-D1	ケース④
				せん断応力度(N/mm ²)	175	352.5	0.50	Ss-D1	ケース④
				合成応力度(-)	0.54	1.2	0.45	Ss-D1	ケース④
接合部	アンカーボルト	北基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	232	315.0	0.74	Ss-D1	ケース④
		北基礎	コーンせん断	コーンせん断応力度(N/mm ²)	1.145	1.558	0.74	Ss-D1	ケース④



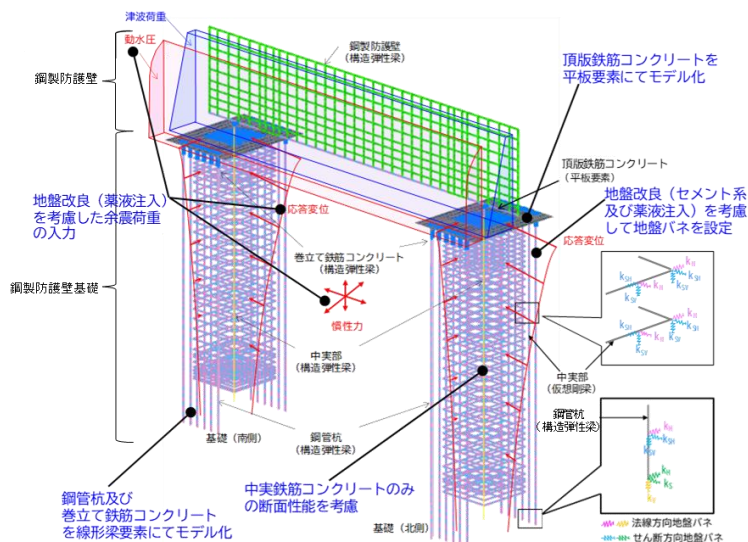
4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容 （7）耐津波評価結果（1/2）

評価内容（耐津波）

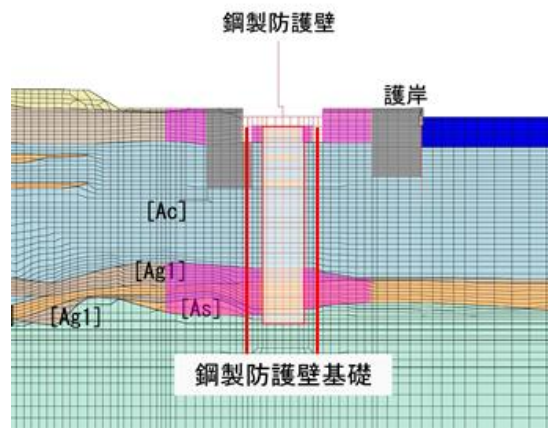
- ・ 構造変更を含む防潮堤全体の基準適合性を確認するため「敷地に遡上する津波」及び「基準津波」について全ての部位の照査を実施した。
- ・ 鋼製防護壁・鋼製防護壁基礎・接合部は3次元フレームで評価し、各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界以下であることを確認する。また、基礎地盤の支持性能については2次元FEMモデルで評価した。
- ・ なお、接合部の評価の妥当性については3次元材料非線形解析モデルを用いて確認した。

評価モデル

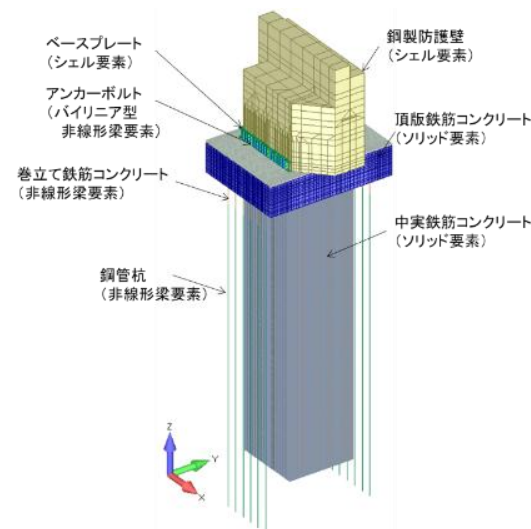
3次元フレームモデル
（鋼製防護壁基礎、鋼製防護壁、接合部）



2次元FEMモデル
（基礎地盤）



3次元材料非線形解析モデル
（接合部評価の妥当性確認）

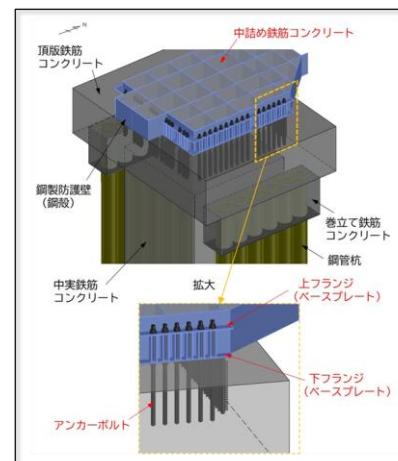
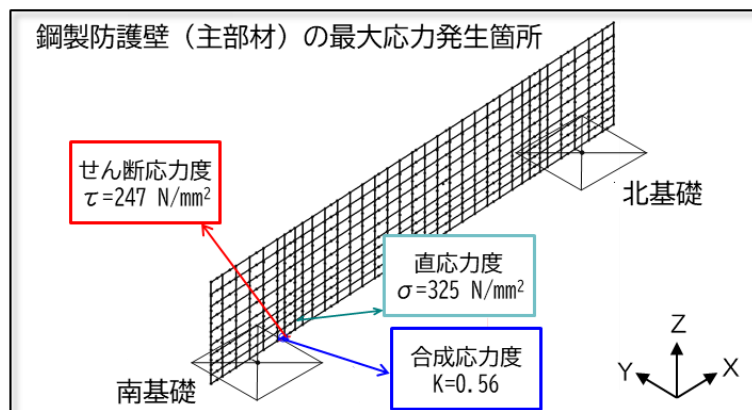
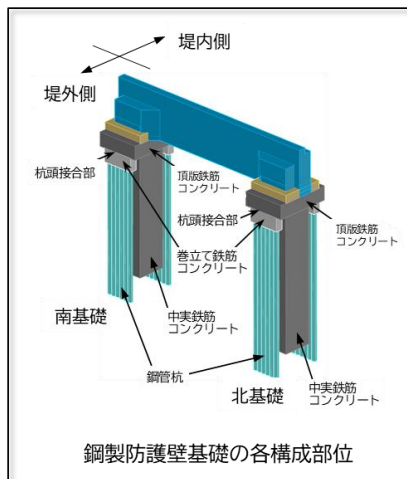


(7) 耐津波評価結果 (2/2)

評価結果（耐津波）

- 耐津波評価の結果，各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 下記の評価結果表は，鋼製防護壁基礎・鋼製防護壁・接合部の主要な評価対象部位における最大照査値を示したものである

区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		発生値	許容限界	最大照査値	津波種別	地盤ケース（地盤バネ）
鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	南基礎	曲げ	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	265.8	478.5	0.56	遡上津波	地盤バネ4
		南基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断力(kN)	214108	247591	0.87	遡上津波	地盤バネ4
	鋼管杭	北基礎	曲げ	曲げ応力度(N/mm ²)	452.4	500.0	0.91	遡上津波	地盤バネ4
		南基礎	せん断	せん断応力度(N/mm ²)	45.3	285.0	0.16	遡上津波	地盤バネ4
鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材の最大応力発生箇所	主部材	直応力度(N/mm ²)	324.6	697	0.47	遡上津波	地盤バネ5
				せん断応力度(N/mm ²)	246.6	399.5	0.62	遡上津波	地盤バネ5
				合成応力度(－)	0.56	1.2	0.47	遡上津波	地盤バネ5
接合部	アンカーボルト	南基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	216.2	355.0	0.61	遡上津波	地盤バネ5
		南基礎	コーンせん断	コーンせん断応力度(N/mm ²)	1.142	1.554	0.74	遡上津波	地盤バネ5



4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

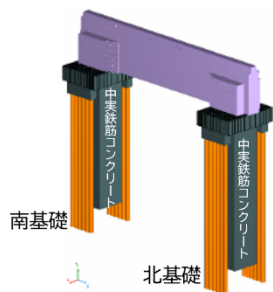
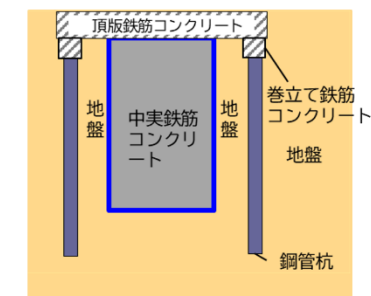
（８）構造変更による影響評価： 地中連続壁部の残置影響評価結果（1/2）

評価の目的（耐震・耐津波）

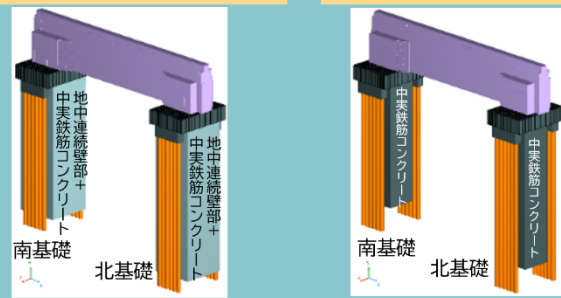
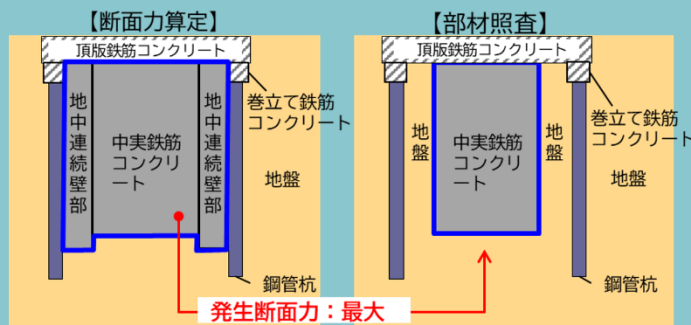
- 地中連続壁部は不具合の全容が把握できておらず、地震・津波荷重に対する耐力が期待できない。
このため、工認設計の解析評価では**地中連続壁部を構造部材として考慮せず**，中実鉄筋コンクリートと鋼管杭の変形が生じやすい「**地盤**」としてモデル化した。【工認設計モデル】
- ただし、**実際には地中連続壁部には強度・剛性があるため**，接触する中実鉄筋コンクリートへの影響を評価，確認する必要がある。このため，**地中連続壁部を健全と仮定して最大限の発生断面力を算定し**，中実鉄筋コンクリートのみで構造を成立させる**保守的なモデル**で影響を評価した。【残置影響評価モデル】
さらに，地中連続壁部の強度・剛性の不均一性を網羅的に評価するため，地中連続壁部の一部区間の強度と剛性を低下させたモデルでも評価した。【部分欠損モデル】

評価モデル

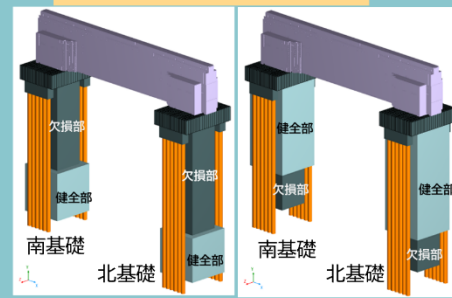
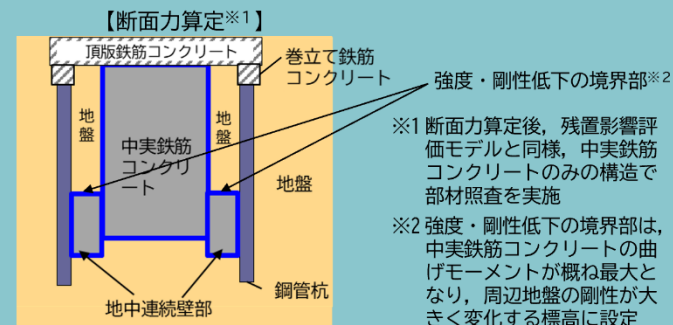
【工認設計モデル】



【残置影響評価モデル】



【部分欠損モデル】



- ※1 断面力算定後，残置影響評価モデルと同様，中実鉄筋コンクリートのみで構造で部材照査を実施
- ※2 強度・剛性低下の境界部は，中実鉄筋コンクリートの曲げモーメントが概ね最大となり，周辺地盤の剛性が大きく変化する標高に設定

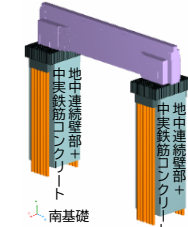
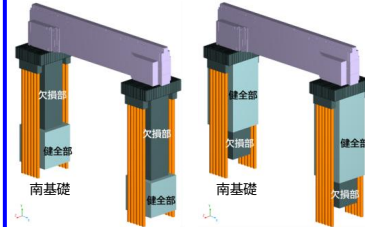
左：上部欠損モデル
右：下部欠損モデル

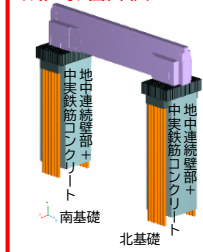
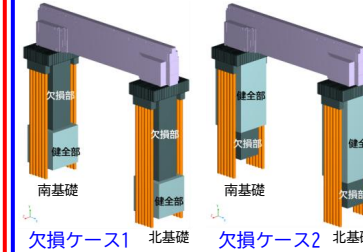
4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（8）構造変更による影響評価： 地中連続壁部の残置影響評価結果（2/2）

評価結果（耐震・耐津波）

- 耐震・耐津波評価の結果，各評価対象部位に発生する応力度及び断面力が許容限界を下回ることを確認した
- 下記に鋼製防護壁基礎・鋼製防護壁・接合部の主要な評価対象部位における最大照査値を示す

耐震評価結果	残置影響評価モデル						部分欠損モデル※			
	区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		最大照査値	検討ケース	最大照査値	検討ケース	欠損ケース
	鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	北基礎	曲げ	堤軸方向 鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.40	Ss-31, ケース③	(南基礎) 0.35	Ss-31, ケース④	欠損ケース1
			南基礎	せん断	堤軸方向 せん断力(kN)	0.99	Ss-31, ケース④	(南基礎) 0.82	Ss-31, ケース④	欠損ケース2
		鋼管杭	北基礎	曲げ	堤軸直交方向 圧縮応力度(N/mm ²)	0.45	Ss-31, ケース④	残置影響評価モデル 		
			北基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断応力度(N/mm ²)	0.06	Ss-31, ケース④			
	鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材の最大応力発生箇所	主部材	直応力度(N/mm ²)	0.62	Ss-D1, ケース④	部分欠損モデル 		
					せん断応力度(N/mm ²)	0.52	Ss-D1, ケース④			
					合成応力度(-)	0.48	Ss-D1, ケース④			
	接合部	アンカーボルト	北基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	0.75	Ss-D1, ケース④	欠損ケース1 		
北基礎			コーンせん断	コーンせん断応力度(N/mm ²)	0.74	Ss-D1, ケース④	欠損ケース2 			

耐津波評価結果	残置影響評価モデル							部分欠損モデル※				
	区分	評価対象部位	照査位置	照査項目；応力度及び断面力の種類		最大照査値	津波種別	地盤バネ	最大照査値	地盤バネ	欠損ケース	
	鋼製防護壁基礎	中実鉄筋コンクリート	南基礎	曲げ	鉄筋引張応力度(N/mm ²)	0.90	遡上津波	地盤バネ4	(南基礎) 0.35	地盤バネ4	欠損ケース2	
			南基礎	せん断	堤軸直交方向 せん断力(kN)	0.97	遡上津波	地盤バネ4	(南基礎) 0.88	地盤バネ4	欠損ケース1	
		鋼管杭	北基礎	曲げ	曲げ応力度(N/mm ²)	0.66	遡上津波	地盤バネ5	残置影響評価モデル 	遡上津波	地盤バネ4	部分欠損モデル 
			南基礎	せん断	せん断応力度(N/mm ²)	0.15	遡上津波	地盤バネ4				
	鋼製防護壁	鋼製防護壁	主部材の最大応力発生箇所	主部材	直応力度(N/mm ²)	0.46	遡上津波	地盤バネ5	欠損ケース1 			
					せん断応力度(N/mm ²)	0.57	遡上津波	地盤バネ5		欠損ケース2 		
					合成応力度(-)	0.40	遡上津波	地盤バネ5				
	接合部	アンカーボルト	南基礎	引張	引張応力度(N/mm ²)	0.59	遡上津波	地盤バネ5				
南基礎			コーンせん断	コーンせん断応力度(N/mm ²)	0.73	遡上津波	地盤バネ5					

（９）確実な工事完遂のための施工方法と品質管理（検査）（１／２）

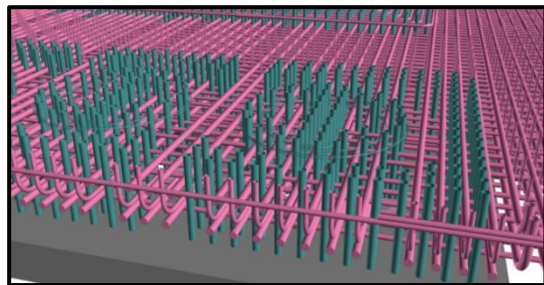
防潮堤（鋼製防護壁）の工事を確実に完遂するため、不具合事象の原因を踏まえ、施工方法と品質管理について、以下の対策を実施する

不具合事象	根本原因	対策
コンクリートの未充填 （粘土層のはらみ出しによる）	リスク想定が不十分であり、 不具合の発生を予期できなかった	全施工ステップについて、不具合事象再発も含めて、あらゆるリスクを網羅的に洗い出し、全てのリスクについて対策を実施する （今回は地中連続壁工法を採用しないため、粘土層のはらみ出しは生じないことを確認済）

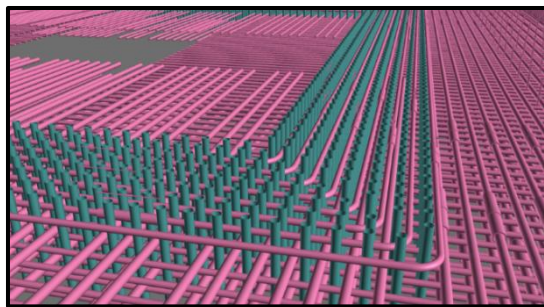
洗い出したリスクと対策の例

（例１）事前の配筋施工確認（ＣＡＤでの確認）

リスク	太径鉄筋を高密度に配筋するため、鉄筋が相互に干渉して計画通りに組み立てられない
対策	３次元ＣＡＤにより鉄筋同士が干渉しないことを確認するとともに、計画した組立工程で計画精度内に配筋できることを確認した



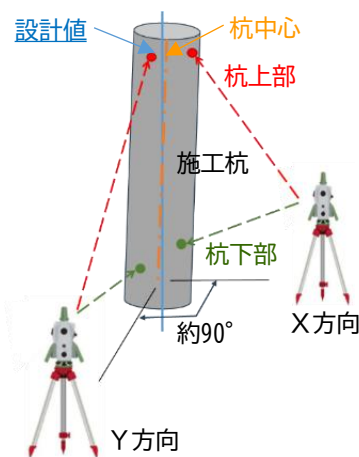
図では水平鉄筋と鉛直鉄筋の干渉を確認するため、鉛直鉄筋を見やすい高さで切断した状態を表示



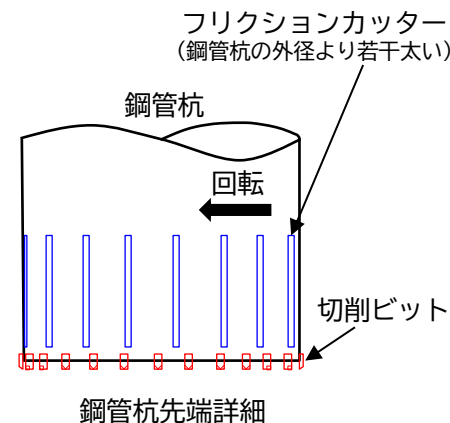
（例２）確実な鋼管杭打設（杭鉛直精度の確保、地盤との摩擦低減）

リスク	a. 地盤の不均一性の影響で鋼管杭を鉛直に打設できず、隣接する鋼管杭と接触する b. 鋼管杭が摩擦により周辺地盤と固着する
対策	a. 杭鉛直精度管理システムで打設中の鋼管杭を計測し、杭の鉛直精度を確保する b. 鋼管杭の先端にフリクションカッターを取付け、鋼管杭と地盤の摩擦を低減する

a. 杭鉛直精度の確保



b. 地盤との摩擦低減



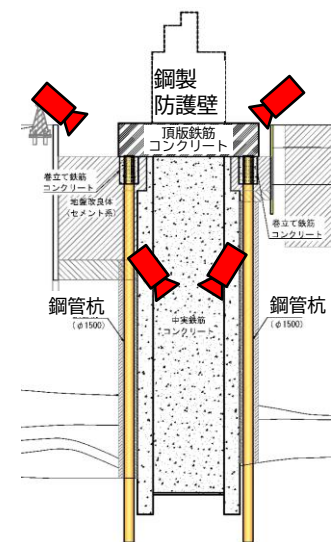
4. 参考 防潮堤（鋼製防護壁）基礎の構造変更に係る検討内容

（９）確実な工事完遂のための施工方法と品質管理（検査）（２／２）

防潮堤（鋼製防護壁）の工事を確実に完遂するため、不具合事象の原因を踏まえ、施工方法と施工品質管理について、以下の対策を実施する

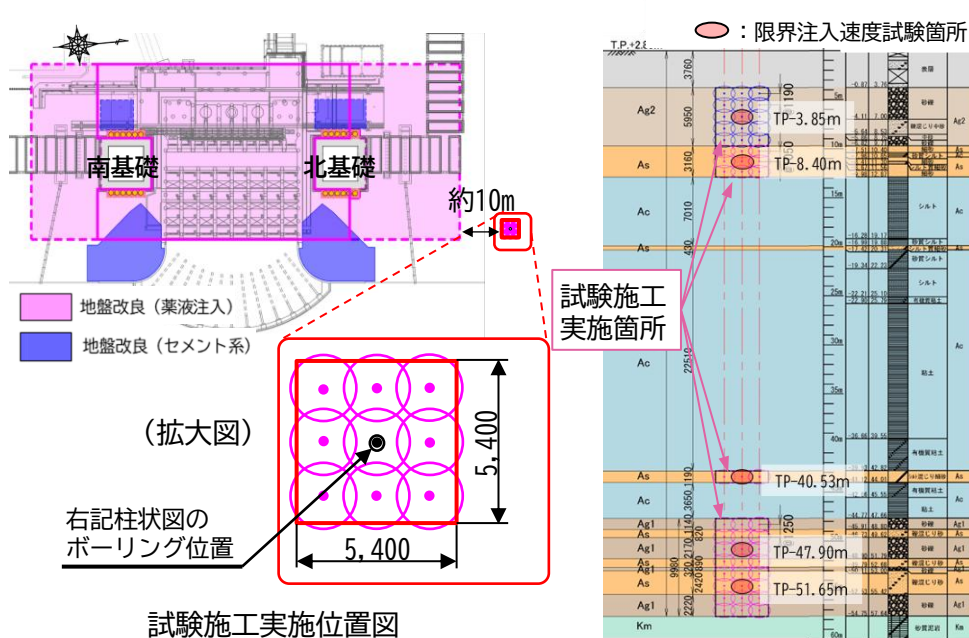
不具合事象	根本原因	対策
・コンクリートの未充填 ・鉄筋等の変形	工事が計画通り行われていることを直接確認せず、代替措置を講じなかった	・施工結果は原則、直接確認（目視、計測）する（カメラによる工事管理も導入：下図参照） ・直接確認できない施工は定量的方法で品質を確認（非破壊検査等）する ⇒ さらに薬液注入による地盤改良では、施工時の改良品質の不確かさを考慮し、以下を実施する ✓ 事前に試験施工を実施（下図参照） ✓ 品質を担保する管理基準値を保守的に設定（下図参照） ・各施工ステップにおいて、工事が計画通りに実施されていることを都度確認しながら施工を進めることで、各工程で求められる品質を一つ一つ確実に積み上げる

中実鉄筋コンクリート施工でのカメラ設置イメージ



現場作業責任者の作業管理手段を増やし管理の効率化と作業品質向上を図る

既施工実績より深い位置に薬液を注入するため、試験施工を実施し、管理基準を満足する施工ができることを確認した



地盤改良（薬液注入）の管理基準値の設定

- ・管理基準値設定に用いる試験データは、一般的に平均値を用いるところ、ばらつきを考慮して**1σ低減した値**を用いる
- ・検査で用いる管理基準値の設定に必要な標本数は、**規格基準で定める本数以上**を採取する
- ・保守的に設定した上記の管理基準値により使用前事業者検査を実施する

対象土層	管理基準値 (シリカ含有量増分量)
Ag 2層	5.1 mg/g以上
As 層	8.0 mg/g以上
Ag 1層	7.3 mg/g以上

（10）工事管理の改善と再発防止に向けた取組み

- ◆ 当社は、本不具合事象を当社の工事管理に起因する問題として重く受け止めている
- ◆ 本不具合に端を発し、設工認の変更に至ったことの重大性を踏まえ、異常兆候の発見及び情報共有が不十分だったと認識し、現場実態をより正確に把握する観点から、従来の工事管理・品質管理※1に加え、経営として責任あるリーダーシップの下、以下の改善を徹底する

発電所全体での取組み

異常兆候の早期発見に向けた改善

- ・ 協力会社を含めたCondition Report（C R）活動を一層活性化する
 - 全ての現場作業員へC R活動の目的・方法を定期的に周知する
 - 当社監理員が今以上に現場に関与し、現場作業員から直接、気付きや懸念を聞き取る

発電所において管理実績の少ない工事への新たな取組み

作業報告の場への参加による情報収集の強化

- ・ 施工会社の作業報告の場に当社監理員が参加し、工事の実施状況を確認するとともに、計画との差異や懸念事項を把握し、改善の要否を判断する
- ・ 収集した情報をC R活動に確実につなぎ、是正対応へ反映する

現場観察・作業観察※2による現場の改善

- ・ 当社監理員等による工事現場の観察（現場作業員の振舞いや現場状態の観察）を強化し、現場の弱点や課題を早期に発見することにより現場の改善につなげる

※1 協力会社からの作業進捗等の聞取り、書類確認・現場立会による工事品質の確認

※2 発電所では、上位職者が現場での行動観察を通じてパフォーマンスの課題を抽出し、改善につなげる活動を従来から実施している

発電所において、発電所長のリーダーシップの下、同様の不具合を二度と生じさせないという決意で、これらの取組みを強力に推進する