

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)
【補足説明資料】

2025年11月27日
日本原子力発電株式会社

本資料中の  は、商業秘密又は防護上の観点で公開できません。

目 次

1. 概要	3
2. 第1360回審査会合コメント⑬回答 （高強度鉄筋SD685の適用性について）	6
3. 第1360回審査会合コメント⑭回答 （防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）	30
4. 第1360回審査会合コメント⑮回答 （地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）	62
5. 第1360回審査会合コメント⑯回答 （防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）	117

1. 概要

1. 概要 (1 / 3)

審査会合コメント一覧を以下に示す。

審査会合コメント整理表

今回説明するものでも更なる追加説明が必要なものについては、STEP4で追加説明を実施する。

審査会合	コメント		回答
第1240回	①	- 基準適合性を判断するために必要な調査項目を網羅的に整理し不具合事象の全容を示すこと。 - 調査結果を踏まえた既工認との相違点を網羅的に整理して説明すること。	回答済 (第1259回)
	②	既工認に立ち返り、設計や工事等の各方面から課題を網羅的に整理した上で対応方法を示すこと。	STEP3で説明 ・基本方針は第1329回説明済
	③	不確かさを考慮して設計すること（局部的に応力集中が起こる可能性も否定できない）。	回答済 (第1360回)
	④	既工認と同様に、設計条件及び評価項目のすべてに対して説明する等検討すること。	STEP3で説明 ・基本方針は第1329回説明済 ・評価結果はSTEP4で説明
第1259回	⑤	現状の調査結果からは不具合の全容を確認したことにはならないため、作り直しも含めて対応方針を整理して示すこと。	回答済 (第1280回)
第1280回	⑥	鋼製防護壁全体としての構造と施工方法に成立性が見込まれる形で検討すること。	STEP3で説明 ・基本方針は第1329回説明済
	⑦	地中連続壁を残置する影響については、想定される様々な角度から十分に検討すること。	回答済 (第1360回)
	⑧	地盤改良、新規基礎追加等については、周辺施設に与える影響を網羅的に検討すること。また、実現性のある工事計画を綿密に立案すること。	STEP4で説明 ・基本方針は第1329回説明済 ・地盤改良等の周辺施設への影響結果はSTEP4で説明
	⑨	地盤改良を新たに実施する場合には改良土全体が所定の強度を有していることを確認するための品質管理方法について、設工認で示す内容、使用前事業者検査で示す内容を整理すること。	STEP4で説明 ・基本方針は第1329回説明済 ・地盤改良（薬液注入）試験施工の結果はSTEP4で説明
第1309回	⑩	構造変更案について具体的な評価の説明に当たっては、実現可能性・基準適合性を的確に審査できるレベルに達した資料を整えて説明すること。また、特徴や弱点を踏まえて課題を網羅的に抽出してロジックを含めて資料化すること。	STEP3で説明 ・基本方針は第1329回説明済
	⑪	説明スケジュールを明確にすること。	STEP3で説明
	⑫	施工性について、施工管理が可能である旨も含めて具体的に説明すること。	回答済 (第1329回)

1. 概要 (2 / 3)

審査会合	コメント	回答
第1360回	⑬ ● 高強度鉄筋SD685の適用性について、コンクリート標準示方書等に基づいて適用範囲であるとしているが、その根拠（実験論文等）や「実験等により検討することが望ましい。」との記載に対する対応要否について説明すること。また、高強度鉄筋はヤング係数が変わらずその強度が高くなることから降伏点の弾性ひずみが大きくなるため、その影響についても説明するとともに、これらの設計への影響について、網羅的に整理して説明すること。	STEP3で説明 (今回説明)
	⑭ ● 設計上のポイントとなる地盤バネについては、地盤バネの設定が適切であると判断するために必要なエビデンスを詳細に説明すること。	STEP3で説明 (今回説明)
	⑮ ● 地盤改良工事について、改良品質に対する不確かさが安全側に設計へ反映されていることがわかるように説明すること。 例1) 改良品質の不確かさが、安全側に設計へ反映されているか説明すること。 例2) 地盤改良（薬液注入）は構造物の直下や深い深度に施工するため、施工実績を示すとともに、その施工性が設計に影響を及ぼさないことを説明すること。 例3) 地盤改良（薬液注入）について、薬剤の種類、注入方法、改良対象の地質を示すとともに、その適用性を示して、設計上の想定に影響を及ぼさないことを説明すること。	STEP3で説明 (今回説明)
	⑯ ● 地盤改良以外の工事について、設計上の想定に影響を及ぼす可能性があるものを抽出し、安全側の設計となっていることを説明すること。 例1) 中実鉄筋コンクリートにおけるD51-17.5段の太径鉄筋による高密度の配筋については施工実績が少なく施工難易度が高いと考えられるので、工事計画を実現するための対策を示すとともに不具合を繰り返さない取り組みを説明し、設計への影響がないことを説明すること。 例2) 中実鉄筋コンクリートの機械式継ぎ手の範囲には水平鉄筋が配置されないため、配置しないことによる影響が安全側に設計へ反映されていることを説明すること。 例3) 鋼管杭の岩盤への根入れ箇所について、先行置換材であるセメントベントナイトの強度と岩盤強度の大小関係を比較し、鋼管杭の地盤バネが安全側に設定されていることを示すこと。また、セメントベントナイトの耐用年数等、設計の想定に影響を及ぼす可能性がある工事の計画を網羅的に抽出し、それが安全側に設計へ反映されていることを説明すること。	STEP3で説明 (今回説明)

2. 審査会合コメント⑬回答

2. 審査会合コメント⑬回答

コメント回答

【第1360回審査会合コメント⑬】

No	コメント
⑬	高強度鉄筋SD685の適用性について、コンクリート標準示方書等に基づいて適用範囲であるとしているが、その根拠（実験論文等）や「実験等により検討することが望ましい。」との記載に対する対応要否について説明すること。また、高強度鉄筋はヤング係数が変わらずその強度が高くなることから降伏点の弾性ひずみが大きくなるため、その影響についても説明するとともに、これらの設計への影響について、網羅的に整理して説明すること。

No	回答概要
⑬	- コンクリート標準示方書（2017）で高強度鉄筋SD685を利用可能と判断した根拠（網羅的に検討された項目：付着強度・応力ひずみ関係・各種耐力の算定・ひび割れ幅・最大鉄筋量・定着長等）について整理し、実験結果や既往の算定式の適用性について問題がないことを確認したことから、防潮堤（鋼製防護壁）で適用可能であることを確認した。 - 高強度鉄筋の定着長の評価については、コンクリート標準示方書（2017）や鉄道構造物等設計標準（R6）で「実験等により検討することが望ましい」とされているものの、鉄道構造物等設計標準（R6）では、実験を実施しない場合に適用できる算定式が示されており、本設計では算定式に基づく定着長に対して、更に保守的な長さを確保した定着長を設定した。なお念のため、今後実験（鉄筋の引き抜き試験）を行い設定した保守的な定着長で問題がないことを確認する。 - 耐津波設計では、部材の平面保持を仮定した評価である三次元静的フレーム解析により、頂版鉄筋コンクリートにSD685鉄筋が必要だと判断した。加えて、SD685鉄筋近傍の詳細な応力状況を確認するため、コンクリートのひび割れ等に伴う部材の局所的な剛性低下を考慮できる三次元材料非線形解析（COM3）による詳細評価により、頂版鉄筋コンクリートの曲げ引張が卓越する部材上面付近の最大ひずみは、SD685の許容ひずみ（3300μ）未満の2500μ程度であり、その発生範囲は局所的であることを確認した。また、部材の大部分がSD490鉄筋の降伏ひずみである2450μ未満となっており、頂版鉄筋コンクリートは、大局的には審査実績のあるSD490鉄筋による設計の範囲に収まっていることを確認した。したがって、防潮堤（鋼製防護壁）の頂版鉄筋コンクリートにおいては、SD685鉄筋の使用によっても顕著なひずみの増大は生じず、鉄筋周囲のコンクリートのひび割れや剛性低下が設計に及ぼす影響は無いと判断した。

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(1) コンクリート標準示方書における高強度鉄筋SD685の適用根拠（1/2）

鉄筋コンクリートで利用し得る高強度鉄筋については、構造物の大型化や耐震基準類の見直しにより構造物への要求性能が高まっていることや部材寸法の縮小や過密配筋の解消のためその必要性が増えていることから研究が進み、コンクリート標準示方書（2017）では高強度鉄筋の適用範囲の拡大に伴う改定がなされSD685鉄筋までが利用可能となった。そこで、コンクリート標準示方書の改訂にあたって網羅的に検討された内容（コンクリート標準示方書（2022）含む）について確認した。その具体的な記載内容については参考①～⑥に示す。

鉄筋強度に係わる項目 (参考①)	着目点	コンクリート標準示方書で利用可能とした根拠	備考	
本編5.3.1コンクリート強度の付着強度	コンクリート強度の付着強度	付着強度を求める実験が、SD685より高強度のPC鋼棒（節付き）などで実施されており、SD685まで付着強度算定式が適用できることを確認している。	左記の土木学会が示す利用可能とした根拠により、設計上の影響はないことを確認。	参考②
本編5.4.1鋼材の強度、 5.4.2鋼材の疲労強度、 5.4.3鋼材の応力ひずみ関係	鋼材の強度、 応力ひずみ関係	SD685の応力ひずみ関係で明確な降伏点が生じる製品が出されていることを確認。また、ひずみ硬化を考慮した引張応力下の式と実験結果とよく一致していることを確認している。	同上	
標準3編安全性に関する照査における2章の各種耐力の算定	部材の曲げ耐力	部材の軸方向圧縮耐力および曲げ耐力については、SD685より高強度のPC鋼棒ですでに適用されているため、既往の耐力評価手法を同様に用いて問題がないことを確認している。	同上	参考③
	部材のせん断耐力	せん断伝達耐力、ねじり耐力について、SD685鉄筋は検討を行っておらず、高強度の影響を考慮する場合は別途検討した場合に使用してよいとしている。	防潮堤（鋼製防護壁）はせん断補強筋としてSD685を用いないため対象外。	
標準3編安全性に関する照査における3章の疲労強度の算定	疲労強度の算定	疲労に対する断面破壊の限界状態の照査等に関する記載。	防潮堤（鋼製防護壁）は疲労破壊の検討対象外。	—
標準4編使用性に関する照査における2章のひび割れ幅や応力度の算定	部材のひび割れ幅や応力度の算定	SD685を用いた部材実験を参照し、SD685を用いた場合のひび割れ幅の算定に既往のひび割れ幅算定式を適用できることを確認している。	左記の土木学会が示す利用可能とした根拠により、設計上の影響はないことを確認。	参考④

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(1) コンクリート標準示方書における高強度鉄筋SD685の適用根拠（2/2）

鉄筋強度に係わる項目 (参考①)	着目点	コンクリート標準示方書で利用可能とした根拠	備考	
標準4編使用性に関する 照査における3章の変 位・変形の算定	変位変形の 算定	限界状態における照査に関する記載。	防潮堤（鋼製防護壁）は許容応 力度設計のため対象外。	—
標準5編耐震設計および 耐震性に関する照査にお ける5章の部材の力学モ デルのモデル化	部材の力学 モデルのモ デル化	棒部材の力学モデルの骨格曲線（トリリニア型モ デル）に関する記載。	防潮堤（鋼製防護壁）は許容応 力度設計のため対象外。	—
標準5編耐震設計および 耐震性に関する照査にお ける5章の鋼材のモデル 化	鋼材のモデ ル化	鋼材の応力-ひずみ関係をトリリニア型としてモ デル化に関する記載。	防潮堤（鋼製防護壁）は許容応 力度設計のため対象外。	—
標準7編鉄筋コンクリー トの前提および構造細目 における2章の鉄筋の曲 げ形状	最大鉄筋量	コンクリートの破壊が先行する脆性的な破壊を回 避する目的で、実験データから「軸方向鉄筋量は 釣合い鉄筋比の75%以下とすることを原則とす る」とし、従来の規定を踏襲できることを確認し ている。	左記の土木学会が示す利用可能 とした根拠により、設計上の影 響はないことを確認。	参考 ⑤
	定着長	SD490やSD685等の鉄筋の降伏強度の特性値が 380N/mm ² を超えるJIS規格による鉄筋の定着長は、 実験等により検討することが望ましいとしている。 （鉄道構造物等設計標準には、特別な実験を行わ ない場合には別途示された算定式を用いてよいと されている）	定着長は、各種基準類と比較し た上で保守的な定着長を設定し、 今後実物大の実験によっても念 のため確認することから設計へ の影響はない。	参考 ⑥



以上より、防潮堤（鋼製防護壁）での適用について問題ないと判断した。

(2) 定着特性の妥当性（SD685鉄筋の基本定着長の設定）

- ・ コンクリート標準示方書（2022年）や鉄道構造物等設計標準(R6)では「SD490やSD685等の鉄筋の降伏強度の特性値が380N/mm²を超えるJIS規格による鉄筋の定着長は、実験等により検討することが望ましい」とされているが、鉄道構造物等設計標準には、特別な実験を行わない場合には別途示された算定式を用いてよいとされている。
- ・ 鉄道構造物等設計標準(R6)の算定式を用いた鉄筋の定着長は、下表に示す通り他の規格基準類の算定式に比較して最も短くなるため、道路橋示方書による算定式を用いて保守的な定着長を設定することとした。

設計基準・指針類での定着長算定結果

設計基準・指針	コンクリート標準示方書 (2022年)	鉄道構造物等設計 標準・同解説 (R6)	道路橋示方書・同解説IV (平成24年)
鉄筋の基準値： f_{yd}	685N/mm ²	685N/mm ²	400N/mm ² ※1)
コンクリート設計基準強度： f_{ck}'	50N/mm ²	50N/mm ²	50N/mm ²
付着力補正係数： γ_c	1.3	—	—
コンクリートの付着強度： f_{bod}	3.19N/mm ²	3.80N/mm ²	2.00N/mm ² ※2)
係数 α_b 算定のためのパラメータ： K_c	1.62※4)	1.62 ※4)	—
鉄筋のかぶり・あき、横方向鉄筋量による補正係数： α_b	0.80	0.663	—
鉄筋種別による補正係数： α_t	—	1.257	—
定着長： $\alpha_b \cdot \alpha_t \cdot f_{yd} / (4 \cdot f_{bod}) \times \phi$	42.9 ϕ	37.6 ϕ	50 ϕ ※3)

注記) ※1) 鉄筋の基準値は鉄筋のSD685の許容応力度 (σ_{sa}) を使用。

※2) コンクリート付着強度はコンクリートの許容付着応力度 (τ_{sa}) を使用。

※3) 定着長の算定は $l_a = \sigma_{sa} \cdot \phi / 4\tau_{sa}$ で算定。

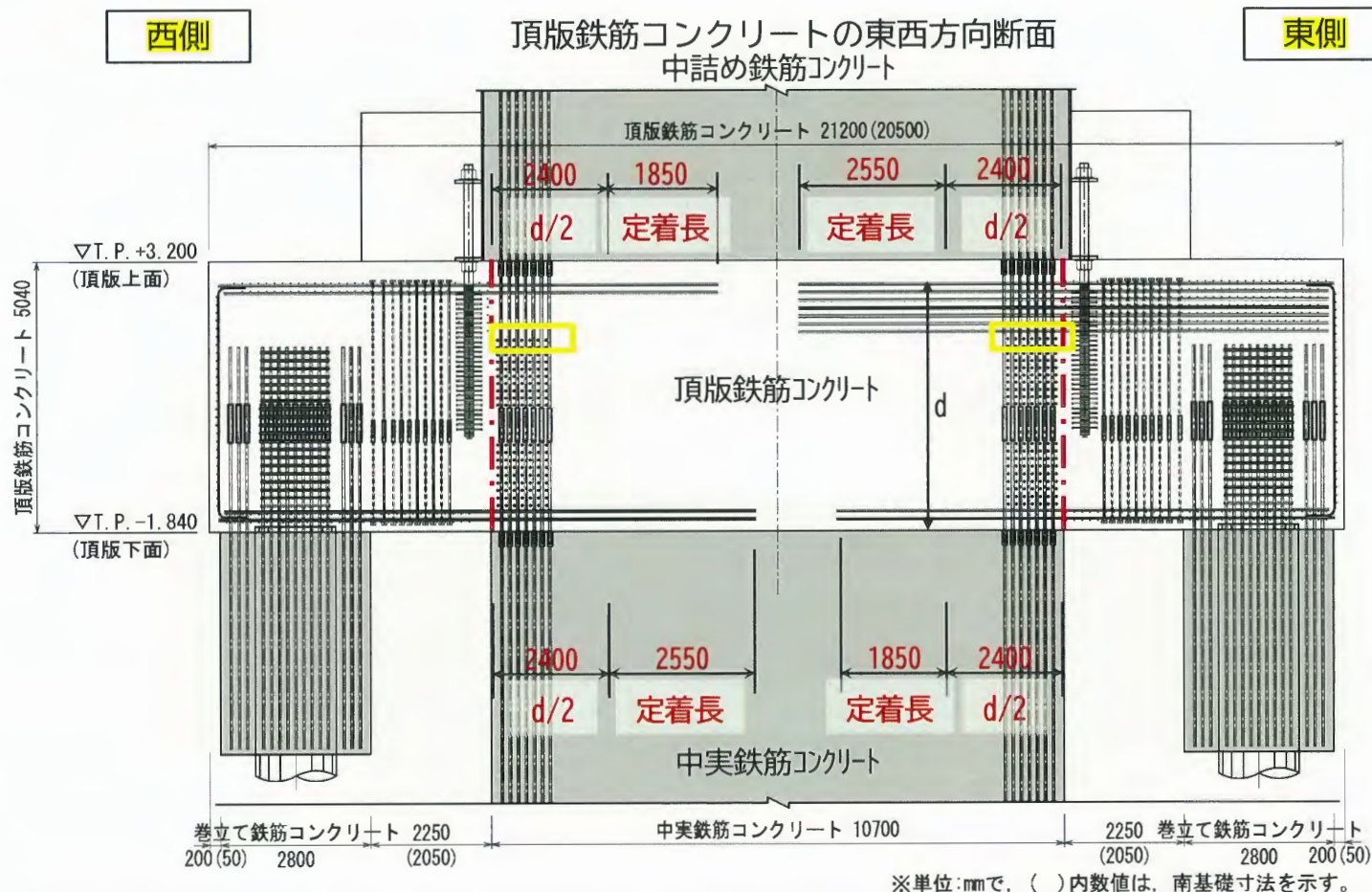
※4) 横方向等の実配筋量は、保守的な定着長になるよう必要最小鉄筋量で算定した結果である。

- ・ 実験を実施しない場合に適用される鉄道構造物等設計標準算定式を用いた定着長に対して、更に保守的な長さを確保した定着長とした。
- ・ なお念のため、今後、実験（鉄筋の引き抜き試験）を行い、当該定着長の設定に問題がないことを確認する。
(最上段の鉄筋に着目した鉄筋の引き抜き試験：SD685鉄筋と強度50N/mm²コンクリートの一体性の確認)

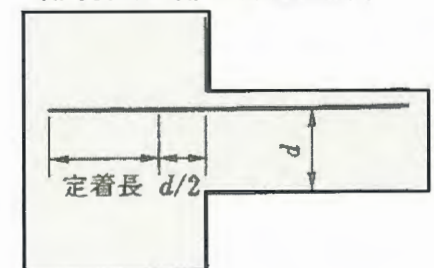
2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(2) 定着特性の妥当性（基本定着長の設定）

- 配筋の施工性を考慮するとともに東西で必要段数が異なることから、東西方向断面は部材交差部として軸方向鉄筋の定着を確保した上で、東西の軸方向鉄筋は連結しない。
- 片持はりの固定端では「引張鉄筋の端部が定着部において上下から拘束されている場合には、はり部材の接合部の断面の有効高さの1/2だけ定着部内に入った位置から所定の定着長を確保することが望ましい」とされていることから、これに基づき中実鉄筋コンクリート範囲内に確保する鉄筋の定着長を設定した（下図参照）。



部材交差部の鉄筋定着



定着長

SD685 : $50.00 \cdot \phi$

SD490 : $36.25 \cdot \phi$

引張鉄筋の端部が定着部において上下から拘束されている場合

- 中詰め鉄筋コンクリートからの水平回転モーメントが、頂版鉄筋コンクリートを介して中実鉄筋コンクリートに伝達するものとして、頂版鉄筋コンクリート内の軸方向鉄筋に沿うフープ鉄筋量を設定した。

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(2) 定着特性の妥当性（端支点を超え定着する場合の低減定着長の設定）

- 部材端部の定着長については、コンクリート標準示方書(2022)に示される「v)端支点を超えて定着する場合」に基づき定着長を設定した。

コンクリート標準示方書(2022)より抜粋

v) 端支点を超えて定着する場合、支承の中心から l_s だけ離れた断面位置の鉄筋応力に対する低減定着長 l_o 以上を支承の中心からとり、さらに部材端まで延ばさなければならない。

- ここで l_s は、モーメントシフト量であり、本構造では中実鉄筋コンクリートと巻立て鉄筋コンクリートの各部材端間のスパン長となる（ $l_s=2.050\text{m}$ (南基礎), 2.250m (北基礎)）。
- また、低減定着長 l_o はコンクリート標準示方書に示される式(2.5.2)に基づき設定される。
- 支承中心からの定着区間長 $=1.100\text{m}$ (南基礎), 1.250m (北基礎)が確保できるため、下表に示すとおり低減定着長を満足する。

津波重畳時 引張鉄筋D51(SD685)

照査位置	単位	南基礎		北基礎	
		西側下面	東側上面	西側下面	東側上面
Asc/As	—	0.30	0.30	0.35	0.39
50.0φ(D51)	mm	2550	2550	2550	2550
$l_o > l_d \cdot \text{Asc/As}$	mm	765	765	893	984
$l_o \geq l_d/3$	mm	850	850	850	850
低減定着長 l_o	mm	850	850	893	984
定着区間長	mm	1100	1100	1250	1250
照査値	—	0.78	0.78	0.72	0.79

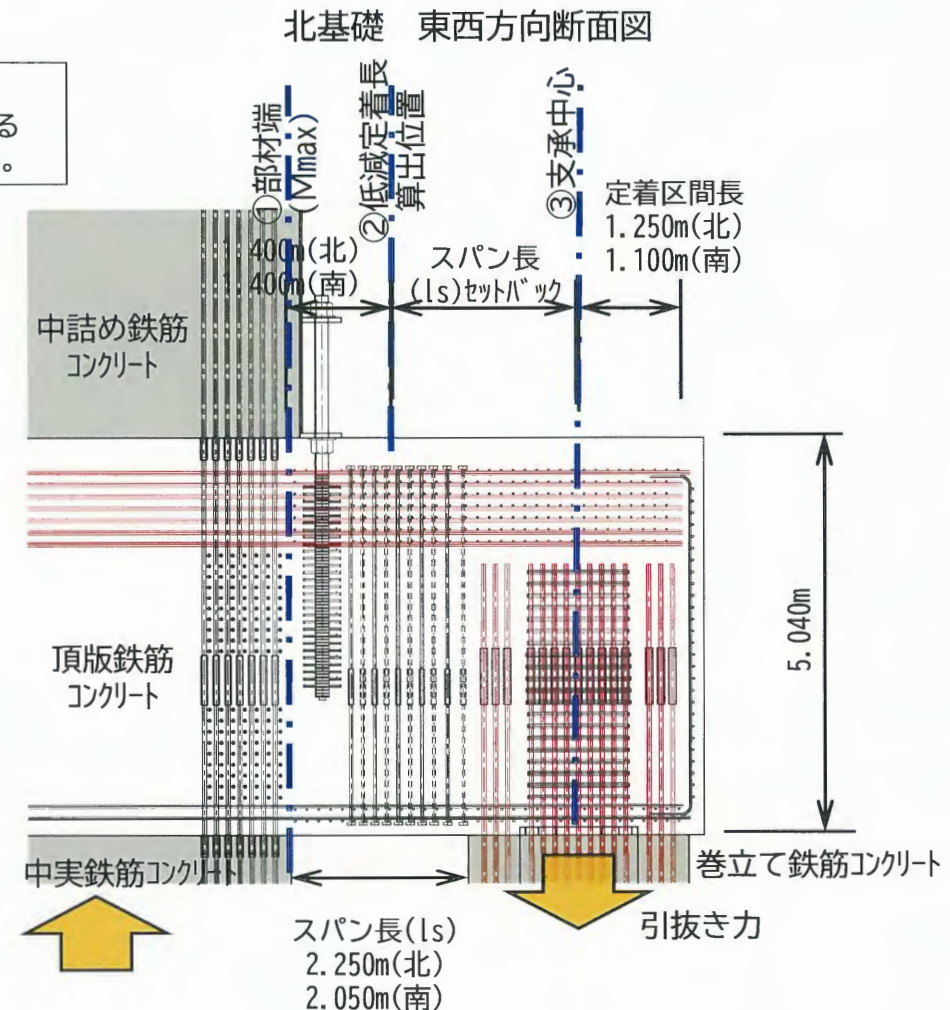
(2) 実際に配置される鉄筋量 A_s が計算上必要な鉄筋量 A_{sc} よりも大きい場合、低減定着長 l_o を式(2.5.2)により求めてよい。

$$l_o \geq l_d \cdot (A_{sc}/A_s) \quad (2.5.2)$$

ただし、 $l_o \geq l_d/3$, $l_o \geq 10\phi$

ここに、 ϕ : 鉄筋直径

コンクリート標準示方書に示される式(2.5.2)



2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(3) ひずみレベルの確認（目的と評価法）

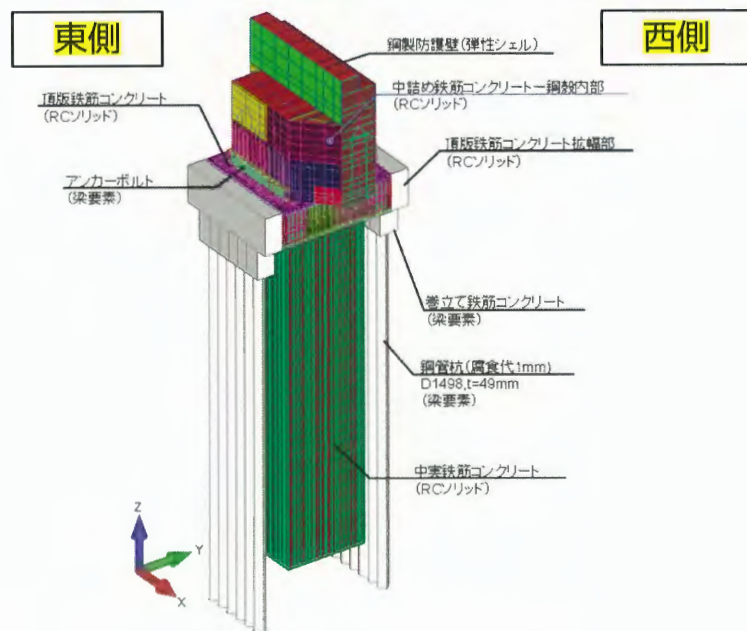
構造変更後の基礎構造に対して、各部材設計の妥当性を検証するため三次元材料非線形解析(COM3)を用いて以下の確認を行った。

1) 目的（高強度鉄筋SD685の使用に伴うコンクリートのひび割れと剛性低下の影響評価）

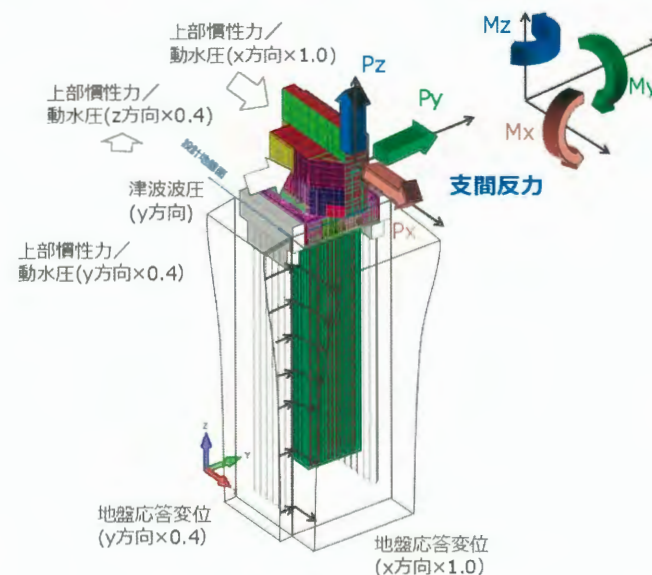
耐津波設計では、部材の平面保持を仮定した評価である三次元静的フレーム解析により、頂版鉄筋コンクリートにSD685鉄筋が必要だと判断した。SD685鉄筋近傍の詳細な応力状況を確認するため、コンクリートのひび割れに伴う部材の局所的な剛性低下を考慮できる三次元非線形解析(COM3)による詳細評価により、SD685鉄筋使用箇所におけるひずみ状況が許容応力度相当のひずみ未満であることを確認することで、SD685鉄筋の弾性ひずみの増大によるコンクリートのひび割れや剛性低下が、設計に及ぼす影響が無いことを確認する。

2) 三次元材料非線形解析(COM3)による評価法

- ・工認設計モデルで最大照査値が生じている津波+余震荷重に対する南基礎全体の挙動評価を対象とした。
- ・工認設計モデルの照査値最大ケースに対応して、地盤バネ条件は南基礎において頂版鉄筋コンクリートや中実鉄筋コンクリートの照査値が厳しくなる地盤バネ4とし、余震時荷重は堤軸(X)方向1.0倍、堤軸直交(Y)方向0.4倍、鉛直(Z)方向0.4倍とした。



解析モデル（南基礎）



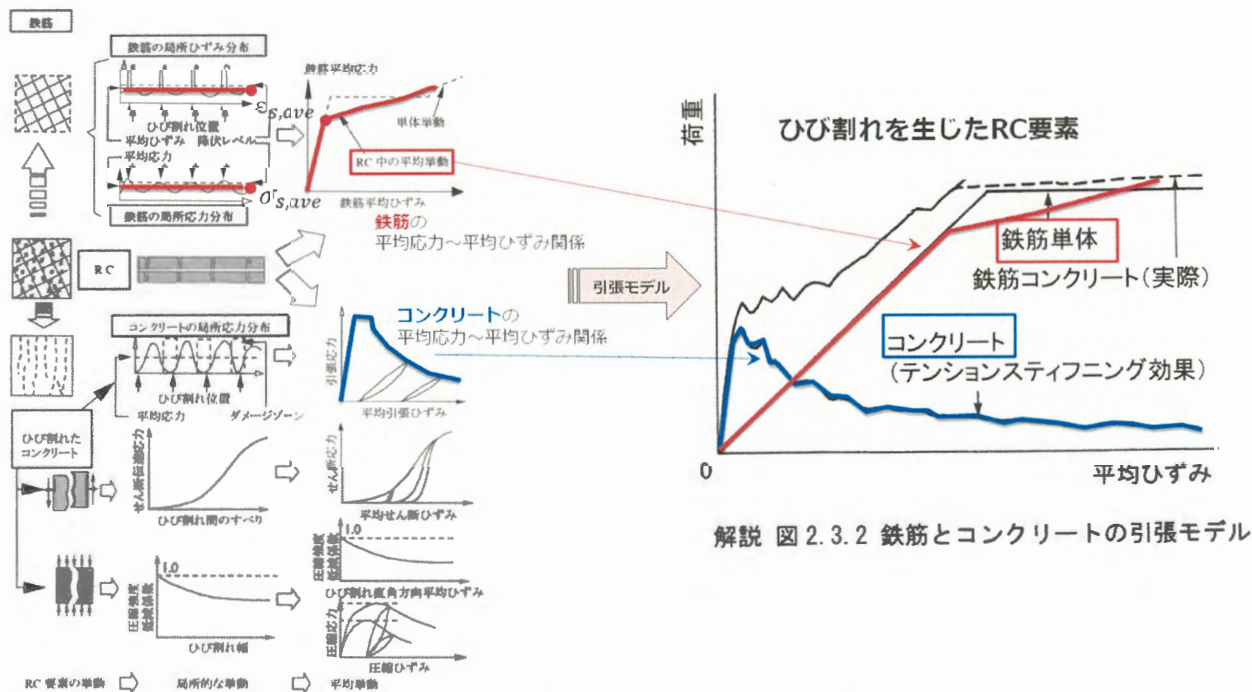
荷重モデル

地上に遡上する津波(Y方向1.0) + 余震重畳時(X方向: 1.0, Y方向: 0.4, Z方向: 0.4)

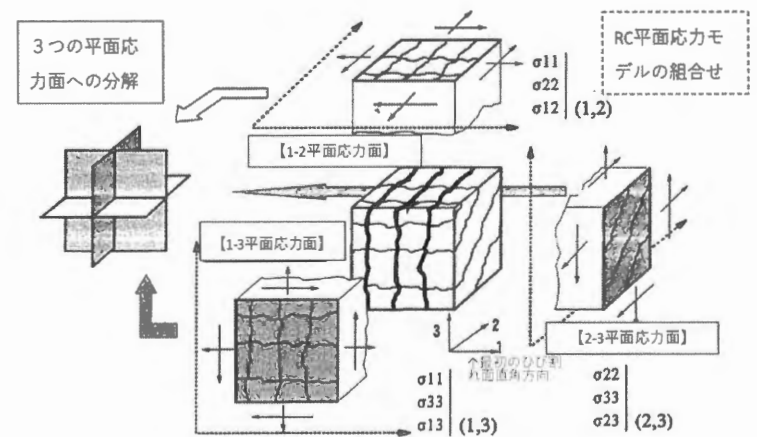
2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(3) ひずみレベルの確認（三次元材料非線形解析（COM3）によるひずみレベルの確認）

- COM3は、コンクリートに発生するひびわれによって鉄筋とコンクリートに生じる局所的な応力分布を“鉄筋コンクリート部材”としての平均的な応力と平均ひずみの関係として表現する構成則を用いてひびわれ発生に伴う非線形挙動を解析することが可能なコードである。
- コンクリートに関する数多くの実験と理論的検証結果に基づいた合理的な構成則を用いており、ひび割れを生じる様々な鉄筋コンクリート構造物の解析を行うことができる。
- COM3は、コンクリート標準示方書に準拠した構成則をモデル化していることから、その適用範囲もコンクリート標準示方書と同様である。



(要素の平均応力～平均ひずみの引張モデル（分散ひび割れモデル）)



$$RC \text{ 3次元応力} = \text{平面応力}(1,2) + \text{平面応力}(2,3) + \text{平面応力}(1,3)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.5\sigma_1 \\ 0.5\sigma_2 \\ 0 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0.5\sigma_2 \\ 0.5\sigma_3 \\ 0 \\ \sigma_{23} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0.5\sigma_1 \\ 0 \\ 0.5\sigma_3 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix}$$

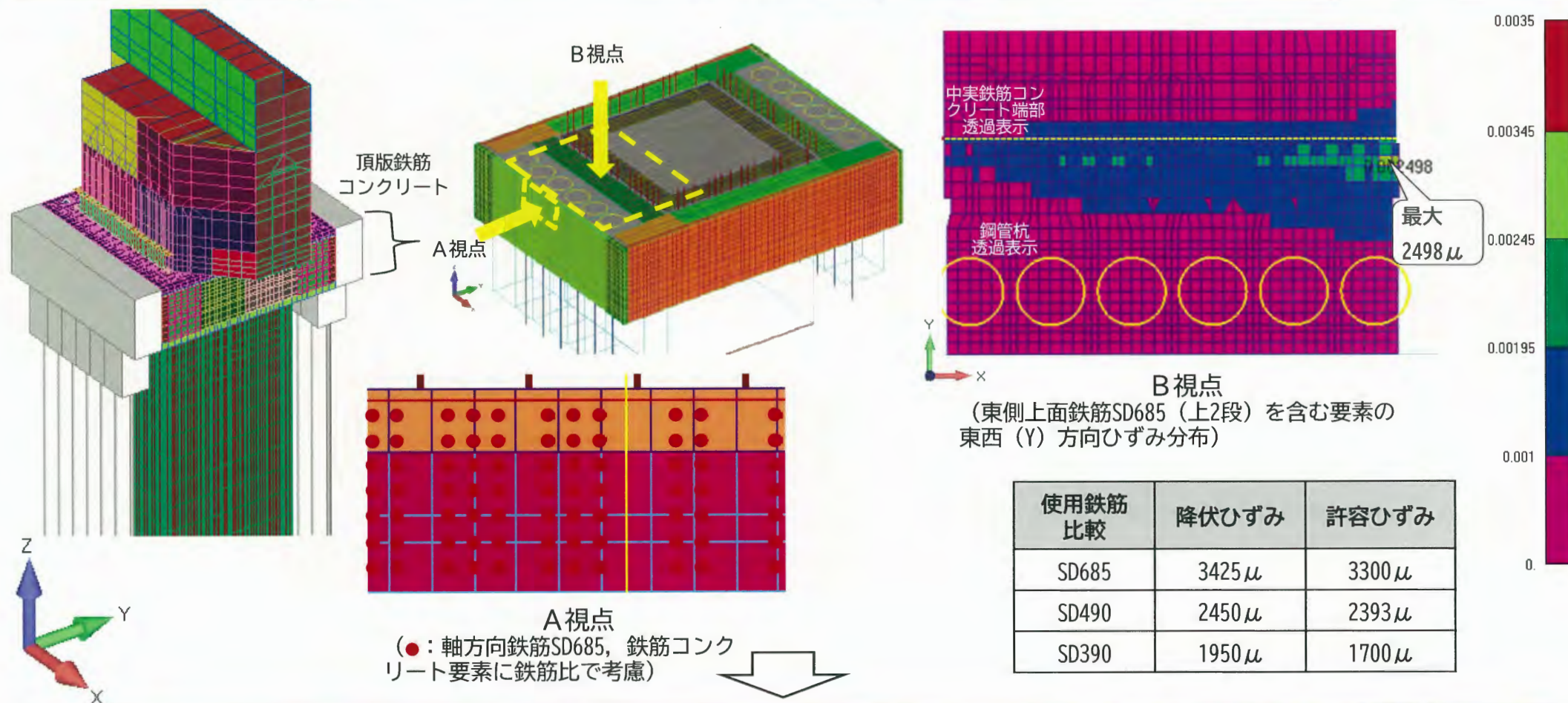
3次元 平面 (1-2) 平面 (2-3) 平面 (1-3)

(3次元での応力表現)

COM3における鉄筋コンクリートの非線形構成則

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

(3) ひずみレベルの確認（三次元材料非線形解析（COM3）によるひずみレベルの確認）



耐津波設計では、部材の平面保持を仮定した評価である三次元静的フレーム解析により、頂版鉄筋コンクリートにSD685鉄筋が必要だと判断した。加えて、SD685鉄筋近傍の詳細な応力状況を確認するため、コンクリートのひび割れ等に伴う部材の局所的な剛性低下を考慮できる三次元材料非線形解析（COM3）による詳細評価により、頂版鉄筋コンクリートの曲げ引張が卓越する部材上面付近の最大ひずみは、SD685の許容ひずみ（3300 μ ）未満の2500 μ 程度であり、その発生範囲は局所的であることを確認した。また、部材の大部分がSD490鉄筋の降伏ひずみである2450 μ 未満となっており、頂版鉄筋コンクリートは、大局的には審査実績のあるSD490鉄筋による設計の範囲に収まっていることを確認した。したがって、防潮堤（鋼製防護壁）の頂版鉄筋コンクリートにおいては、SD685鉄筋の使用によっても顕著なひずみの増大は生じず、鉄筋周囲のコンクリートのひび割れや剛性低下が設計に及ぼす影響は無いと判断した。

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考①】コンクリート標準示方書設計編（2017）高強度鉄筋の適用性に関わる検討項目について

コンクリート標準示方書設計編（2017）では、高強度鉄筋の適用性に伴う改定がなされ、SD685鉄筋までが利用可能となった。改定に関わる解説資料においては、適用に当たっての検討項目として以下を挙げている。

2.3 SD490 を超える強度の異形鉄筋の取り扱い

2.3.1 概要

異形鉄筋は、JIS では SD490 までは規格化されているが、高強度鉄筋を用いれば鉄筋量を減らすことができ過密鉄筋が回避できる、部材断面寸法を縮小できる、寸法縮小に伴い部材重量を減らすことができるなど、多くのメリットがある。そのため、SD490 を超える鉄筋を使用した場合の研究は数多く行われている。今回の改訂では、SD685 までの鉄筋単体および部材挙動の検討を行い、従来の評価式や新たな評価式の適用性が確認できた項目については、SD685 まで利用可能にした。なお、検討が不十分で適用性が確認できなかった項目については、別途検討すれば利用可能という形にした。

示方書の鉄筋強度に関わる項目としては、以下が挙げられる。

- ・ 本編 5.3.1 コンクリート強度の付着強度
- ・ 本編 5.4.1 鋼材の強度、5.4.2 鋼材の疲労強度、5.4.3 鋼材の応力ひずみ関係
- ・ 標準 3 編安全性に関する照査における 2 章の各種耐力の算定
- ・ 標準 3 編安全性に関する照査における 3 章の疲労強度の算定
- ・ 標準 4 編使用性に関する照査における 2 章のひび割れ幅や応力度の算定
- ・ 標準 4 編使用性に関する照査における 3 章の変位・変形の算定
- ・ 標準 5 編耐震設計および耐震性に関する照査における 5 章の部材の力学モデルのモデル化
- ・ 標準 5 編耐震設計および耐震性に関する照査における 5 章の鋼材のモデル化
- ・ 標準 7 編鉄筋コンクリートの前提および構造細目における 2 章の鉄筋の曲げ形状

出典：コンクリートライブラリー149 2017年制定コンクリート標準示方書 改定資料 設計編・施工編，土木学会

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考②】高強度鉄筋の適用性に関わる「付着強度」と「応力ひずみ関係」の取り扱い

コンクリート標準示方書設計編・施工編の改定資料（2017）において、SD685鉄筋までの高強度鉄筋の取り扱いに関して、「付着強度」と「応力ひずみ関係」について以下のように解説している。

2.3.2 付着強度

付着強度を求める実験が、PC 鋼棒など高強度鋼材を使って実施されており¹⁾、SD685 まで付着強度算定式が適用できることを確認した。また、2.3.6 節で示すが、SD685 を用いた RC 部材に対し、数値解析の適用性を検討したところ、従来の付着強度－すべり関係を用いてひび割れ間隔やひび割れ幅を妥当に評価できることを併せて確認した。

2.3.3 応力ひずみ関係

図-SD685 までは図 2.3.3.1 に示すように明確な降伏点が生じる製品が出されていることを確認した。また、鉄筋の引張強度に対する降伏点強度の比は、鉄筋強度が高くなるほど大きくなる。そのため、引張強度に対する降伏点強度の比を 65～80%と記述していたが、65～85%と修正した。

鉄筋の応力ひずみ関係については、標準 5 編耐震設計及び耐震性に関する照査や標準 10 編非線形有限要素解析による性能照査でひずみ硬化を考慮した引張応力下の式が示されているが、図 2.3.3.1 に実験結果と示方書で示されている式との比較を行ったが、両者はよく一致しており、SD685 までは従来通りの式が適用できることを確認した。ただし、繰返し応力下の適用性の確認は十分できなかったため、繰返し荷重下の問題に適用する場合は、履歴モデルについて適用範囲を判断する必要がある。

PC鋼棒など高強度鋼材を使った付着強度試験のPC鋼棒の形状は、一般的な鉄筋と同様、節付きのものを使用している。

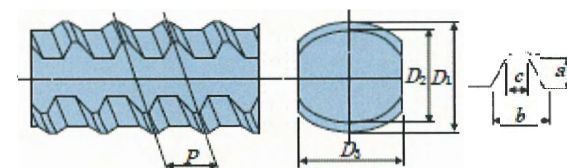


図-2 鉄筋の形状

1) かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力－すべり関係、土木学会論文集E2, Vol. 67, No. 2, 280-296, 2011

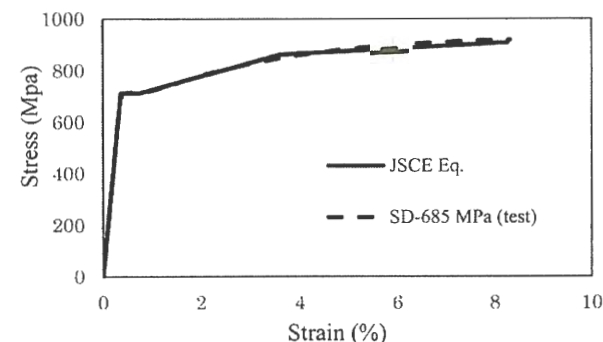


図 2.3.3.1 SD685 鉄筋の応力ひずみ関係

【参考③】高強度鉄筋の適用性に関わる「各種耐力」の取り扱い

断面耐力

コンクリート標準示方書設計編・施工編（2017）において、SD685鉄筋を用いた部材の軸方向圧縮耐力および曲げ耐力については、既往の耐力評価手法を同様に用いて問題がないことが示されている。なお、SD685鉄筋は本構造においてせん断補強筋として使用しない。

2.3.4 断面耐力

軸方向圧縮耐力および曲げ耐力については、SD685よりも強度の高いPC鋼棒で既に適用されているため、SD685も同様に用いれば問題がない。棒部材のせん断耐力については、2012年版からせん断補強鉄筋の設計降伏強度は 800N/mm^2 まで適用範囲となっている。せん断伝達耐力、ねじり耐力については十分な検討を行うことができなかったため、その算定の際にはSD490の強度を用いることとし、高強度の影響を考慮する場合は別途検討した場合に使用してよいとした。

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考④】高強度鉄筋の適用性に関わる「ひび割れ幅」の取り扱い（1/2）

コンクリート標準示方書設計編・施工編の改定資料（2017）の「2.3.6 ひび割れ幅および変位・変形（1）SD685を用いた部材実験による検討」において、既往のひび割れ幅算定式がSD685鉄筋を用いた場合にも使用できることを示している。

2.3.6 ひび割れ幅および変位・変形

(1) SD685を用いた部材実験による検討

図 2.3.6.1 に示す、引張鉄筋を一段配置しおよび二段配置した場合の部材実験を行い、SD685 を用いた場合のひび割れ幅と短期の変位・変形の算定式の適用性を確認した。また、高強度鉄筋を用いる場合は高強度コンクリートと組合わせて使用される場合が多いため、表 2.3.6.1 に示すようにコンクリート強度と鉄筋強度を組み合わせ 4 つの供試体を作成した。コンクリートについては、示方書の適用範囲の 80N/mm² に近い 70N/mm² 程度と普通強度の 30N/mm² 程度、鉄筋については SD345 と SD685 を用いた。実験では、曲げひび割れ幅は、新たなひび割れ発生が確認されたらその都度荷重を除荷し、断面下端部のひび割れ位置にハイゲージを設置して測定した。曲率は、等曲げ区間内で載荷点と部材中央の 3 点で鉛直変位を測定し、等曲げ区間の平均曲率を算定した。

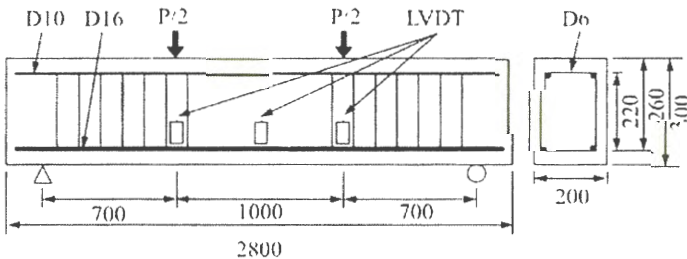


図 2.3.6.1 一段配置供試体概要

表 2.3.6.1 一段配置供試体の材料特性

Beam	Concrete		Rebar	
	f_c' (MPa)	E_c (GPa)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
C-N,S-N	33.7	26.1	SD-345	197.2
C-N,S-H	33.7	26.1	SD-685	193.2
C-H,S-N	70.0	34.1	SD-345	197.2
C-H,S-H	73.0	35.1	SD-685	193.2

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考④】高強度鉄筋の適用性に関わる「ひび割れ幅」の取り扱い（2/2）

- ・コンクリート標準示方書設計編・施工編の改定資料（2017）の「2.3.6 ひび割れ幅および変位・変形（1）SD685を用いた部材実験による検討」において、既往のひび割れ幅算定式がSD685鉄筋を用いた場合にも使用できることを示している。
- ・SD685を使用した梁のひび割れ幅の変化は、降伏点までほぼ直線的に増加しており、大きなひずみおよび応力が作用してもひび割れ幅に大きな影響を与えないことを確認している。

ひび割れ幅算定式

$$w = 1.1 k_1 k_2 k_3 (4c + 0.7(c_s - \Phi)) \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (2.3.6.1)$$

図 2.3.6.4 に実験値ならびに式 (2.3.6.1) で得られる最大ひび割れと荷重の関係を示す。なお、算定式において、載荷実験は養生後すぐに短時間の載荷で行ったので、コンクリートの収縮およびクリープ等の影響を考慮する ε'_{csd} は、0 とした。算定式は降伏時点で実験値と概ね一致し、降伏以前は実験値を安全側に評価していることからその適用が可能であることが確認された。

表 2.3.6.1 一段配置供試体の材料特性

Beam	Concrete		Rebar	
	f'_c (MPa)	E_c (GPa)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
C-N,S-N	33.7	26.1	SD-345	197.2
C-N,S-H	33.7	26.1	SD-685	193.2
C-H,S-N	70.0	34.1	SD-345	197.2
C-H,S-H	73.0	35.1	SD-685	193.2

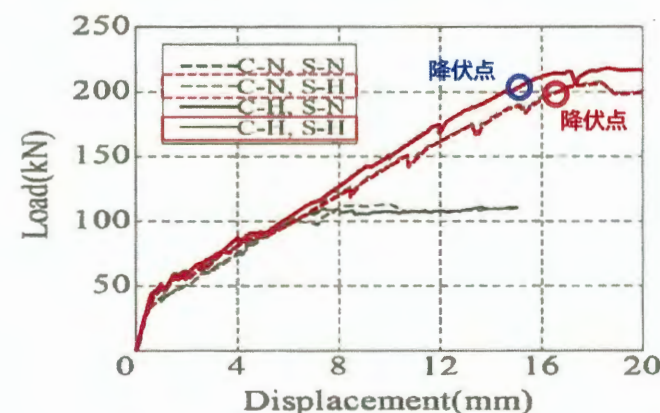


図 2.3.6.2 荷重変位関係

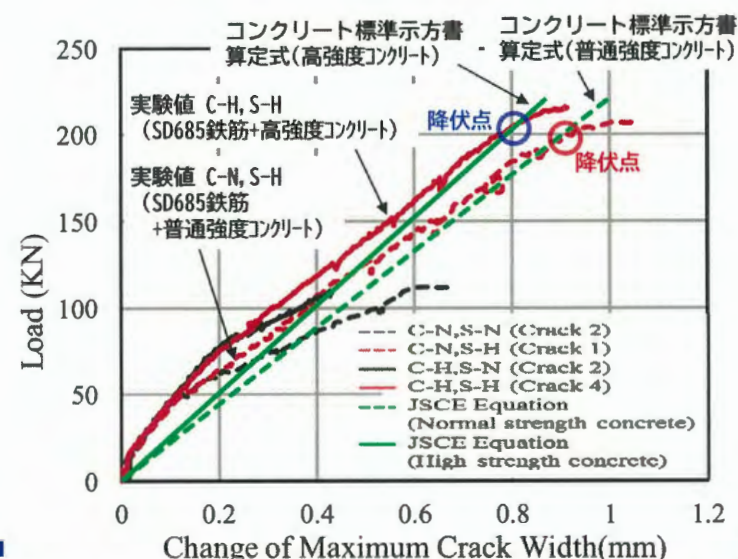


図 2.3.6.4 最大ひび割れ幅の実験値と示方書式の比較

【参考⑤】高強度鉄筋の適用性に関わる「各種耐力」の取り扱い（1/2）

最大鉄筋量（1/2）

コンクリート標準示方書設計編・施工編（2022）では、「2.4.3.2 最大鉄筋量」において、高強度鉄筋SD685まで適用範囲を拡大した根拠について以下のように解説している。

2.4.3.2 最大鉄筋量

最大鉄筋量に関しては、「曲げモーメントの影響が支配的な棒部材の軸方向鉄筋量は、釣合鉄筋比の75%以下とすることを原則とする.」と言う従来の規定を踏襲することとした.この規定は、主に断面破壊時にコンクリートの破壊が先行する脆性的な破壊を回避する目的で定められているが、これを釣合鉄筋比の75%以下としたことについては、材料強度のばらつきや鉄筋配置の施工誤差等を考慮して余裕を持たせたという定性的な考察²⁾や、過去の実験データ³⁾を基に釣合破壊に対して非超過確率30%程度の安全余裕を確保したとする準定量的な考察⁴⁾があるものの、明確な根拠は不明であった。また、高強度材料を用いた場合の適用性等について検証されているかも不明であった。そこで、高強度材料を用いた場合も含めた最大鉄筋量について、簡易な計算ではあるが定量的な検討も含めた考察を行った.

釣合鉄筋比は、設計編〔標準〕7編の式（解2.3.3）より次式により算定される。

$$\rho_b = \alpha \frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{cu} + f_{yd}/E_s} \cdot \frac{f'_{cd}}{f_{yd}} \quad (2.4.1)$$

ここに、 ρ_b : 釣合鉄筋比

$\alpha=0.88-0.004f_{ck}$ ただし、 $\alpha \leq 0.68$

ε'_{cu} : コンクリートの終局ひずみで〔設計編：標準〕3編の図2.4.1で示された値としてよい。

f_{yd} : 鉄筋の設計引張降伏強度（N/mm²）

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度（N/mm²）

E_s : 鉄筋のヤング係数（N/mm²）

【参考⑤】高強度鉄筋の適用性に関わる「各種耐力」の取り扱い（2/2）

最大鉄筋量（2/2）

コンクリート標準示方書設計編・施工編の改定資料（2022）では、「2.4.3.2 最大鉄筋量」において、高強度鉄筋SD685まで適用範囲を拡大した根拠について以下のように解説している。

図2.4.5より、 p_b （実強度相当）/ p_b （設計強度）は75%～79%程度となっている。これは、引張鉄筋量を設計強度により算定した釣合鉄筋比の75%以下とすれば、実構造物において引張鉄筋の降伏強度が設計強度の1.2倍であつても釣合破壊を概ね回避できることを示している。ただし、図2.4.5に示す p_b （実強度相当）/ p_b （設計強度）の数値は、コンクリート強度および鉄筋の引張降伏強度が大きいほど小さくなる傾向にあり、このことは、設計強度に対する釣合鉄筋比の75%とする最大鉄筋量は、材料強度が大きいほど釣合破壊に対する余裕が低下することを意味する。したがって、高強度材料の場合には、コンクリートの応力-ひずみ曲線や鉄筋の強度特性等を適切に評価した上で、部材の破壊性状を確認することが望ましい。

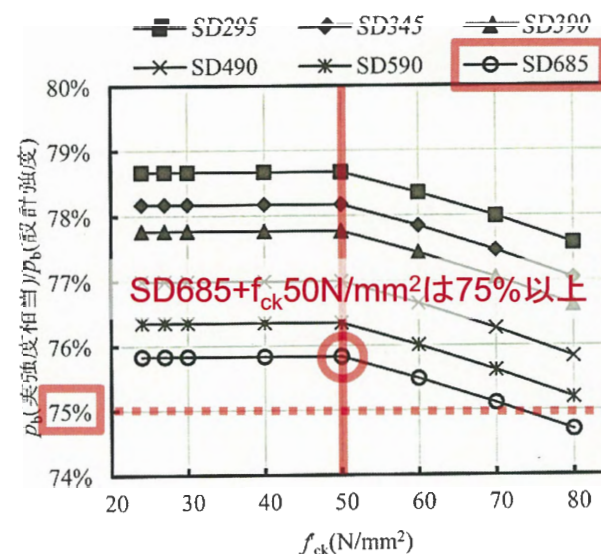


図 2.4.5 p_b （実強度）/ p_b （設計強度）

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考⑥】高強度鉄筋の適用性に関わる「定着長」の取り扱い（1/3）

➤ 設計基準・指針類の材料特性値範囲及び定着の設計法

①コンクリート標準示方書（社団法人 土木学会，2022年）

コンクリートの圧縮強度特性値が80（N/mm²）以下，鉄筋の引張強度の特性値が685（N/mm²）までを適用範囲としている。鉄筋の定着長は下記の式で算定される。

（1）鉄筋の基本定着長 l_d は，式（2.5.1）による算定値を，次の（i）～（iii）に従って補正した値とする。ただし，この補正した値 l_d は20φ以上とする。また，鉄筋の降伏強度の特性値が390N/mm²を超える場合は，降伏強度の影響を適切に考慮しなければならない。

$$l_d = \alpha \frac{f_{yd}}{4f_{bnd}} \phi \quad (2.5.1)$$

ここに， ϕ ：鉄筋の直径

f_{yd} ：鉄筋の設計引張降伏強度

f_{bnd} ：コンクリートの設計付着強度で， γ_c は1.3として，「設計編：本編」式（解 5.4.2）の f_{bnd} より求めてよい。ただし， $f_{bnd} \leq 3.2$ N/mm²

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.0 \quad (k_c \leq 1.0 \text{ の場合}) \\ &= 0.9 \quad (1.0 < k_c \leq 1.5 \text{ の場合}) \\ &= 0.8 \quad (1.5 < k_c \leq 2.0 \text{ の場合}) \\ &= 0.7 \quad (2.0 < k_c \leq 2.5 \text{ の場合}) \\ &= 0.6 \quad (2.5 < k_c \text{ の場合}) \end{aligned}$$

$$\text{ここに，} k_c = \frac{c}{\phi} + \frac{15 A_t}{s \phi}$$

c ：鉄筋の下側のかぶりの値と定着する鉄筋のあきの半分のうち小さい方

A_t ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積

s ：横方向鉄筋の中心間隔

（i）引張鉄筋の基本定着長 l_d は，式（2.5.1）による算定値とする。ただし，標準フックを設ける場合には，この算定値から10φだけ減じることができる。

（ii）圧縮鉄筋の基本定着長 l_d は，式（2.5.1）による算定値の0.8倍とする。ただし，標準フックを設ける場合でも，これ以上減じてはならない。

（iii）定着を行う鉄筋が，コンクリートの打込みの際に，打込み終了面から300mmの深さより上方の位置で，鉄筋の下側におけるコンクリートの打込み高さが300mm以上ある場合，かつ水平から45°以内の角度で配置されている場合は，引張鉄筋または圧縮鉄筋の基本定着長は，（i）または（ii）で算定される値の1.3倍とする。

- ・コンクリート標準示方書では，ブリージングによる付着強度の低下を考慮して定着長の割増し（1.3倍）を規定している。
- ・一方で，本構造物では充填性も考慮して高流動コンクリートを使用することとしており，普通コンクリートに比べてブリージングは小さいと考えられることから割増しは考慮していない（鉄道構造物等設計標準・同解説では，ブリージングを生じないコンクリートを用いる場合には，補正は不要と記載がある）。

【高流動コンクリートの配合設計・施工指針】（土木学会）

（2）について 高流動コンクリートは，通常のコンクリートに比べて以下の特徴がある。

- ① 単位粗骨材量が少なく，高性能A型減水剤の使用量が多い。
- ② ブリーディングおよびレイタンスの発生が少ない。
- ③ 凝結硬化が遅延する傾向にある。
- ④ 使用材料の品質変動や計量誤差による影響を受けやすいため，厳しい品質管理，製造管理ならびに施工管理が要求される。

【鉄道構造物等設計標準・同解説】（国土交通省鉄道局）

定着を行う鉄筋の配筋角度や下側のコンクリートの打込み高さに関して，鉄筋の付着強度がブリーディング等の影響により低下することを考慮して，定着長の延伸を定めた。解説図 2.3.18 に示したような位置にあり，水平から45°以内の角度に配置する鉄筋が該当する。ただし，ブリーディングを生じないコンクリートを用いる場合は，コンクリートの打込み高さに関する基本定着長の補正は行わなくよい。

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【参考⑥】高強度鉄筋の適用性に関わる「定着長」の取り扱い（2/3）

鉄道構造物設計標準・同解説（コンクリート構造物）（平成16年）では高強度鉄筋の適用性に伴う改定がなされているが、「付属資料16 高強度鉄筋を使用する場合の留意点」において、高強度鉄筋SD685まで適用範囲を拡大した根拠について示している。

5. 鉄筋の基本定着長

SD 490 および SD 685 相当の鉄筋を用いる場合の基本定着長 l_d は、「11.9.3 鉄筋の基本定着長」に示される式（11.9.1）に対して、鉄筋強度に対する補正係数 α_t を考慮した式（1）を用いて算定してよい。

$$l_d = \alpha_b \cdot \alpha_t \cdot \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \geq 20\phi \quad (1)$$

ここに、 l_d ：基本定着長

f_{syd} ：鉄筋の設計引張降伏強度

f_{bod} ：コンクリートの設計付着強度

ϕ ：鉄筋の直径

$$\alpha_b = (0.75/K_c) + 0.2 \quad \text{ここで、} 0.5 \leq \alpha_b \leq 1.0$$

$$\alpha_t = (f_{syd}/345)^{1/3}$$

$$K_c = (c_b/\phi) + \{15A_t/(s \cdot \phi)\}$$

c_b ：鉄筋かぶり、鉄筋のあきの1/2の小さい方の値

A_t ：割裂破壊面に垂直な横方向鉄筋の断面積

s ：横方向鉄筋の中心間隔

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

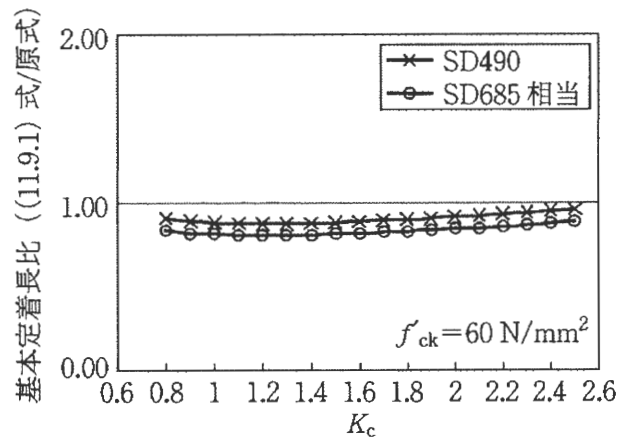
【参考⑥】高強度鉄筋の適用性に関わる「定着長」の取り扱い（3/3）

鉄道構造物設計標準・同解説（コンクリート構造物）（平成16年）では高強度鉄筋の適用性に伴う改定がなされているが、「付属資料16 高強度鉄筋を使用する場合の留意点」において、高強度鉄筋SD685まで適用範囲を拡大した根拠について示している。

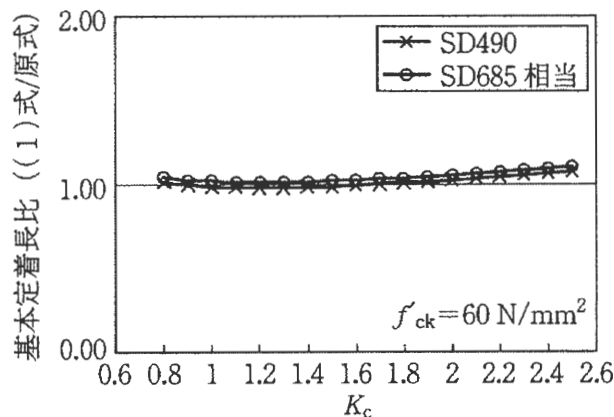
付属図 16.4 には、一例として、コンクリート圧縮強度が 60 N/mm^2 の場合について、従来の設計式（11.9.1）を SD 490 および SD 685 相当鉄筋に適用した場合の算定値に対する付属資料 15「鉄筋の基本定着長」に示される原式（1）による比を示す。これによると式（11.9.1）をこれらの鉄筋に適用した場合には、基本定着長を短く算定する結果となることがわかる。

これに対して、付属図 16.5 には、式（1）による算定値に対する原式の比を示す。図より、鉄筋強度に対する補正係数 α_t を考慮することにより、基本定着長は妥当に評価されていることがわかる。

なお、以上のことに関しては、異なるコンクリート強度についても同様な傾向を示すことが確認されている。



付属図 16.4 基本定着長の比較
（11.9.1 式と原式の比較）



付属図 16.5 基本定着長の比較
（鉄筋強度に対する補正係数 α_t 考慮）

原式（1）

$$\lambda_{dl} = \frac{\frac{f_{syd}}{1.25/f'_{cd}} - 13.3}{0.318 + 0.795K_c} \cdot \phi \quad (1)$$

f_{syd} ：鉄筋の設計引張降伏強度 (N/mm^2)

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm^2)

ϕ ：定着する鉄筋の直径 (mm)

$K_c = (c_b/\phi) + \{15 A_t / (s \cdot \phi)\}$

ただし、 $c_b/\phi \leq 2.5$

c_b ：定着する鉄筋のかぶりと定着する鉄筋のあきの 1/2 のうち、小さい方値 (mm)

A_t ：仮定される割裂破壊断面に垂直な横方向鉄筋の断面積 (mm^2)

s ：横方向鉄筋の中心間隔 (mm)

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【その他】頂版鉄筋コンクリートのモデル化の方針

構造変更により鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリートが追加されたことに伴い、三次元フレームモデルにて頂版鉄筋コンクリートを平板要素としてモデル化する方針とした。中実鉄筋コンクリート範囲内には、頂版鉄筋コンクリートの張出し部の鉄筋の定着長を必要長さ分確保し剛域として設定することから、頂版鉄筋コンクリート全体を平板要素としてモデル化しても力学特性を適切に評価できると判断される。

【三次元フレームモデルにおける頂版鉄筋コンクリートのモデル化方針】

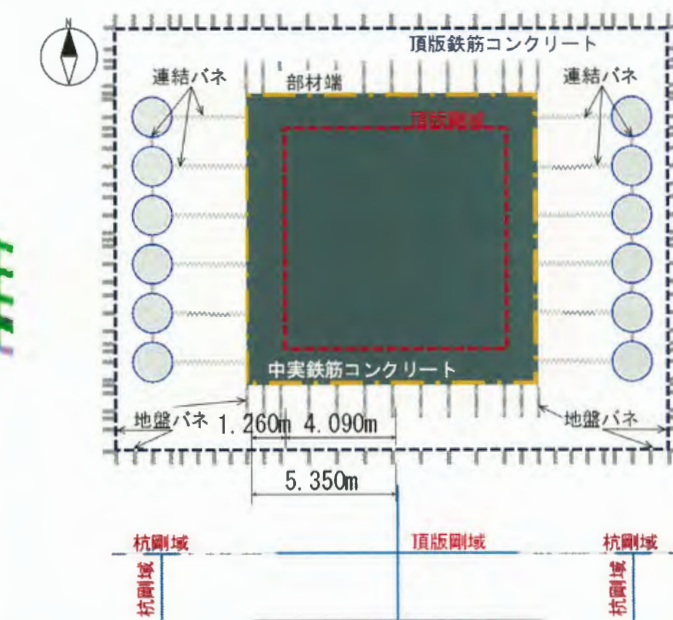
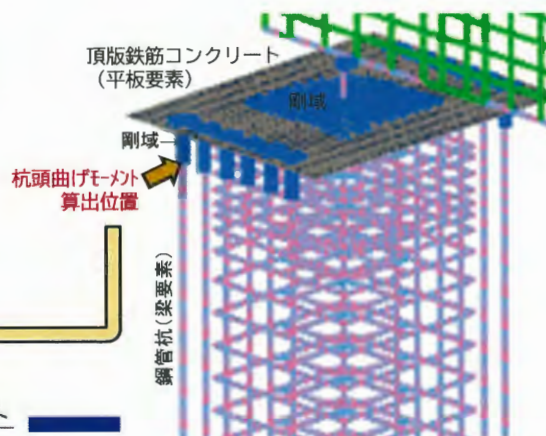
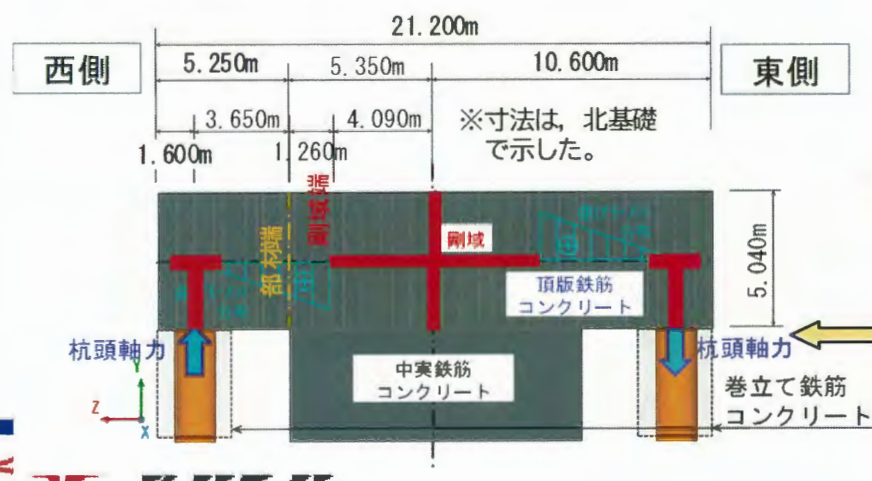
- 頂版鉄筋コンクリート(部材厚5.040m)は、中実鉄筋コンクリートの構造梁と鋼管杭をモデル化するために、鋼管杭が南北方向に複数配置されることや中実鉄筋コンクリートからの張出しの影響を評価できる平板要素とした。
- 平板要素のメッシュサイズは板厚(5.040m)の1/2以下とし、鋼管杭の配置や剛域、曲げ軸力およびせん断照査位置を考慮して分割を決定した。
- 剛域の設定は、道路橋示方書Ⅳ(H24)に準拠し、以下のとおり設定した。
 - > 平板要素でモデル化した頂版鉄筋コンクリートの剛域は、中実鉄筋コンクリートの外周面を部材端として、部材端から内側に頂版厚 $\times 0.25$ ($5.040 \times 0.25 = 1.260\text{m}$)を設定した。したがって、下図に示す剛域内の平板要素には、曲げモーメントもせん断力も発生しない解析条件とした。
 - > 鋼管杭の杭頭から平板要素軸線まで剛域を延ばし、鋼管杭と頂版の剛体接続を考慮した。
- 平板要素として得られた断面力に対して東西・南北方向それぞれの梁として曲げ・せん断照査を実施している。

【頂版鉄筋コンクリートの照査位置】

- 曲げ軸力照査位置は、中実部の外周面位置(=部材端)とした。
- せん断照査位置は、部材端から外側に頂版厚 $\times 1/2$ ($5.040 \times 1/2 = 2.520\text{m}$)の位置とした。

【杭頭結合部の照査位置】

- 曲げ軸力照査位置は、鋼管杭の剛域端とした。
- 杭頭結合部の曲げモーメントの算出位置は、鋼管杭の杭頭の節点とした。



2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【その他】釣合い鉄筋比（中実鉄筋コンクリート）

防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波・耐震設計においては、道路橋示方書・同解説Ⅲ（平成24年）に準拠し、軸方向鉄筋が釣合い鉄筋比以下であることを確認した。

以下、軸方向鉄筋が最大となる中実鉄筋コンクリート（南基礎）の計算事例を示す。

中実鉄筋コンクリート（南基礎）の釣合い鉄筋比に係る確認結果

	照査の種類	終局釣合い鉄筋比 (%)	引張鉄筋比 (%)	結果	備考
南基礎	釣合い鉄筋比	3.71	3.69	OK	詳細を右表に示す。

中実鉄筋コンクリート（南基礎）の計算シート

鉄筋降伏ひずみ	ϵ_{sy}	0.00245
鉄筋の降伏点	σ_{sy}	490 N/mm ²
鉄筋の弾性係数	E_s	200000 N/mm ²
圧縮鉄筋総断面積	$A_{s'}$	3652654 mm ²
鉄筋総本数	n	3604 本
D51断面積	$A_{s'} \text{ D51}$	2027 mm ² /1本
コンクリート設計基準強度	σ'_{ck}	50 N/mm ²
コンクリートの終局ひずみ	ϵ_{cu}	0.0035
圧縮鋼材の応力度	σ'_s	197.4 N/mm ²
終局荷重作用時の軸方向力	N_d	303327357 N
終局釣合い鋼材比	ρ_b	0.0494
終局釣合い鋼材比に乗じる係数75%		0.75
終局釣合い鋼材比×0.75	$0.75\rho_b$	0.037
終局釣合い鋼材比×0.75の百分率表示		3.71 %
有効断面積	$A=Bd$	99099833 mm ²
引張鉄筋本数	n_s	1802
引張鉄筋の総断面積	A_s	3652654 mm ²
引張鉄筋比	ρ_t	0.037
引張鉄筋比の百分率表示		3.69 %

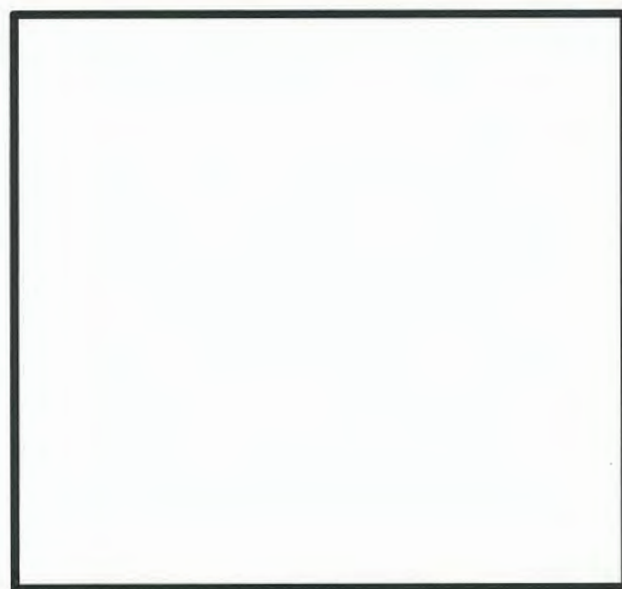
引張鉄筋量は、道路橋示方書Ⅳ（平成24年）に基づき算出した。
中実鉄筋コンクリートは、正方形断面であり、軸方向鉄筋の配置も対称であるため、軸方向鉄筋量の1/2が引張鉄筋量になる。

（道路橋示方書の記載：軸方向引張鉄筋比は、断面の中立軸よりも引張側にある鉄筋断面積の総和から求めることを規定しているが、計算の簡略化のため断面の図心位置から引張側にある軸方向鉄筋の断面積の総和から求めてもよい）

堤軸直交方向



堤軸方向



中実鉄筋コンクリート（南基礎）の配筋図

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【その他】軸方向鉄筋量の比率（中実鉄筋コンクリート）

- 最大鉄筋量については、道路橋示方書・同解説において、コンクリートの破壊が鉄筋の降伏に先行せず、かつ施工時の充填性に問題がないように設定する必要があるとされている。
- コンクリートの破壊が鉄筋の降伏に先行しないことに対しては、軸方向鉄筋が釣合鉄筋比以下であることを確認した（三次元材料非線形解析（COM3）を用いた評価でも、鉄筋やコンクリートが降伏に至らないことを確認）。
- 施工時の充填性について問題がないことについては、この基準（解説）で記載されている“軸方向鉄筋量は、部材の全断面積の6%程度以下とするのがよい”に対し軸方向鉄筋量の比率は6.38%であるが、高流動コンクリートや機械式継手・機械式定着を採用し、実物大のモックアップ試験により問題がないことを確認した。

道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成29年）

(2) 最大鉄筋量

1) 曲げを受ける部材の軸方向鉄筋量は、コンクリートの破壊が鉄筋の降伏に先行せず、かつ、コンクリートの施工時に充てん不足が生じない範囲に抑えなければならない。

2) i) 及び ii) による場合には、1) を満足するとみなしてよい。

i) 軸方向引張鉄筋を釣合い鉄筋量以下となるように配置する。

ii) 軸方向鉄筋量を部材の全断面積の6%以下とする。

1) 必要条件
満足する必要がある。

2) 十分条件
これらを満足すれば1)を満足する。
(みなし規定)

(2)(2)i) 軸方向引張鉄筋量が多くなると鉄筋の降伏よりもコンクリートの破壊が先行し、脆性的な破壊が生じるおそれがある。下部構造の抵抗特性としてこのような破壊形態は避けるべきであることから、軸方向引張鉄筋は、その鉄筋量が釣合い鉄筋量以下となるように配置する。ここで、釣合い鉄筋量とは、軸方向引張鉄筋が降伏点に達すると同時にコンクリートの線圧縮ひずみとその終局圧縮ひずみに達するような引張鉄筋量である。一般には部材の軸方向引張鉄筋量を部材の有効断面積の2%以下とすればよいが、軸方向引張鉄筋量が有効断面積の2%を超える場合には、脆性的な破壊の影響を考慮して個別に検討を行う。ここで、部材の有効断面積は、部材断面幅に部材断面の有効高を乗じたものである。

ii) 鉄筋が過密に配置される場合には、コンクリート打設等の施工性が低下する。したがって、軸方向力を受ける部材の軸方向鉄筋量は、部材の全断面積の6%程度以下とするのがよい。

下部構造の部材は断面積に対して鉄筋量が過大になることは少ないと考えられるが、太径の鉄筋を使う場合やラーメン構造などで断面が小さくなる場合には、鉄筋量が部材断面に対して大きくなる場合があるので注意が必要である。

① ⇒ 軸方向鉄筋が釣合鉄筋比以下であることを確認。

② ⇒ コンクリート打設等の施工性・品質を確保するための方策を講じた。

> コンクリートの充填性向上のための対策

- ・高流動コンクリートの採用：ランク1 50-70-20N
- ・機械式定着方式の採用：フックを排除
- ・機械式継手の採用：重ね継手を排除

> モックアップ試験での確認

- ・コンクリート充填性（打設後切断確認）
- ・コンクリートの水平方向の流動距離、筒先位置間隔
- ・コンクリートの自由落下高さ
- ・鉄筋組立の施工性確認
（段取り筋位置、固定方法、間隔精度）
- ・鉄筋最小あき寸法（3DCADで事前に確認）

2. 審査会合コメント⑬回答（高強度鉄筋SD685の適用性について）

【その他】引張鉄筋比及び部材全断面積に対する軸方向鉄筋量の比率（中実鉄筋コンクリート）

引張鉄筋比



引張鉄筋比（道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成24年））

表-4.2.3 に示す軸方向引張鉄筋比 p_t に関する補正係数 c_{pt} を τ_{a1} に乗じる。
この場合において、 p_t は中立軸よりも引張側にある軸方向鉄筋の断面積の
総和を、部材断面幅 b に部材断面の有効高 d を乗じた bd で除して求める。

$$\text{引張鉄筋比} = \frac{\text{引張鉄筋量}}{\text{幅}b \times \text{有効高}d} = \frac{3,652,654\text{mm}^2}{10.7\text{m} \times 9.262\text{m}} = 3.69\%$$

軸方向鉄筋量の比率



軸方向鉄筋量の比率（道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成24年））

また、鉄筋が過密に配置される場合には、コンクリート打設等の施工性が低下する。
したがって、軸方向力を受ける部材の軸方向鉄筋量は、部材の全断面積の 6%程度以下
とするのがよい。

$$\text{軸方向鉄筋量の比率} = \frac{\text{軸方向鉄筋量}}{\text{全断面積 (幅}b \times \text{高さ}h)} = \frac{7,305,308\text{mm}^2}{10.7\text{m} \times 10.7\text{m}} = 6.38\%$$

※ 軸方向鉄筋量は、全ての軸方向鉄筋の断面積であり、7,305,308mm²（引張鉄筋量の2倍）である。

3. 審査会合コメント⑭回答

3. 審査会合コメント⑭回答

コメント回答

【第1360回審査会合コメント⑭】

No	コメント
⑭	設計上のポイントとなる地盤バネについては、地盤バネの設定が適切であると判断するために必要なエビデンスを詳細に説明すること。

No	回答概要
⑭	防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計においては、津波荷重による上部工から下部工への荷重伝達及び南北基礎間の相互作用を適切に評価するため、上下一体の三次元静的フレーム解析を採用し、周辺地盤を地盤バネとしてモデル化している。当該地盤バネの適切性については、以下のとおり「配置」と「変形特性」の観点より詳細に説明する。 ①地盤バネの「配置」について - 防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計モデルにおいて採用している地盤バネ（部材間を接続する連結バネを含む。）について、周辺地盤との位置関係を考慮し、その配置や地盤反力係数等の各設定が妥当であることを確認した。 - 地盤バネの配置について、新設の構造部位（鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリート）に計画されている目地材や均質置換土の材料特性を踏まえても、各バネの設定が妥当（目地材や均質置換土による影響が無い。）であることを確認した。 ②地盤バネの「変形特性」について - 地盤バネの変形特性（バネ剛性及び反力上限値の設定方法）は、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠した考え方として既工認を踏襲しており、妥当であることを確認した。 - 防潮堤（鋼製防護壁）の周辺地盤に計画する地盤改良体（セメント系）について、地盤バネのバネ剛性には加算せず、反力上限値の増分として考慮しており、さらにバネの分担面積を減ずることで保守的な設定となっていることを確認した。加えて、三次元FEMによる傍証解析を実施した上で、現状のバネ設定が基礎の変形量の観点で十分に保守的であることをもって、その妥当性を確認した。 - 津波時において地盤抵抗が小さいと仮定したケース（本震影響を考慮して設定）である地盤バネ2のバネ剛性については、S_sによる一次元地盤応答解析との剛性比較により、その妥当性を確認した。 - 反力上限値を設定した地盤バネによる応答変位法について、一次元地盤応答解析における地盤構成則（H-Dモデル）との理論的な比較や、文献情報を参照することで、その妥当性を確認した。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（1）耐津波設計における地盤バネの設定と説明のポイント（1/2）

防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計においては、津波荷重による上部工から下部工への荷重伝達及び南北基礎間の相互作用を適切に評価するため、上下一体の三次元静的フレーム解析を採用し、周辺地盤を地盤バネとしてモデル化している。本項では、当該地盤バネについて「配置」と「変形特性」の観点より詳細に説明する。

地盤バネの配置

- 防潮堤（鋼製防護壁）の地盤バネは、下部工の側方及び底面と周辺地盤の接続を模擬して設定される地盤バネと、鋼管杭同士または鋼管杭と中実鉄筋コンクリートの間における応力伝達を模擬して設定される連結バネに大別できる。→各バネの設定方法を「(2) 地盤バネの配置と設定の考え方」に示す。
- 各バネは下部工周辺の地盤材料等に応じてその物性値を設定するが、新設の構造部位（鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリート）については、施工計画等も考慮した上で設定の妥当性を確認する。→確認内容の詳細を「(3) 鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリート周囲のバネ設定について」に示す。

地盤バネの変形特性

- 地盤バネの変形特性は、既工認と同様「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、反力上限値を考慮して設定したバイリニア型として設定する。バネ剛性及び反力上限値について、具体的には「津波時：2ケース」及び「重畳時：3ケース」を採用する。→変形特性の考え方を「(4) 地盤バネの変形特性」に示す。
- また、南北基礎の西側浅部には地盤改良体（セメント系）を計画しているが、地盤改良体（セメント系）については反力上限値の増分として変形特性に反映する。→詳細を「(5) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法」に示す。
- 地盤バネの変形特性について、耐津波設計における各地盤バネの役割※（受働側・主働側）を考慮した上で、その考え方が妥当であることを確認する。確認項目については以下のとおり。
 - 【受働側】・地盤改良体（セメント系）の考慮方法の妥当性について
→確認内容の詳細を「(6) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法の妥当性」に示す。
 - ・津波時における設計方針（本震影響の考慮）の妥当性について
→確認内容の詳細を「(7) 津波時における地盤バネ2の妥当性」に示す。
 - 【主働側】・応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性について
→確認内容の詳細を「(8) 応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性」に示す。

※構造物の受働側及び主働側における地盤バネの役割について次頁にて補足する。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（1）耐津波設計における地盤バネの設定と説明のポイント（2/2）

防潮堤（鋼製防護壁）の受働側及び主働側における地盤バネの役割は以下のとおりである。

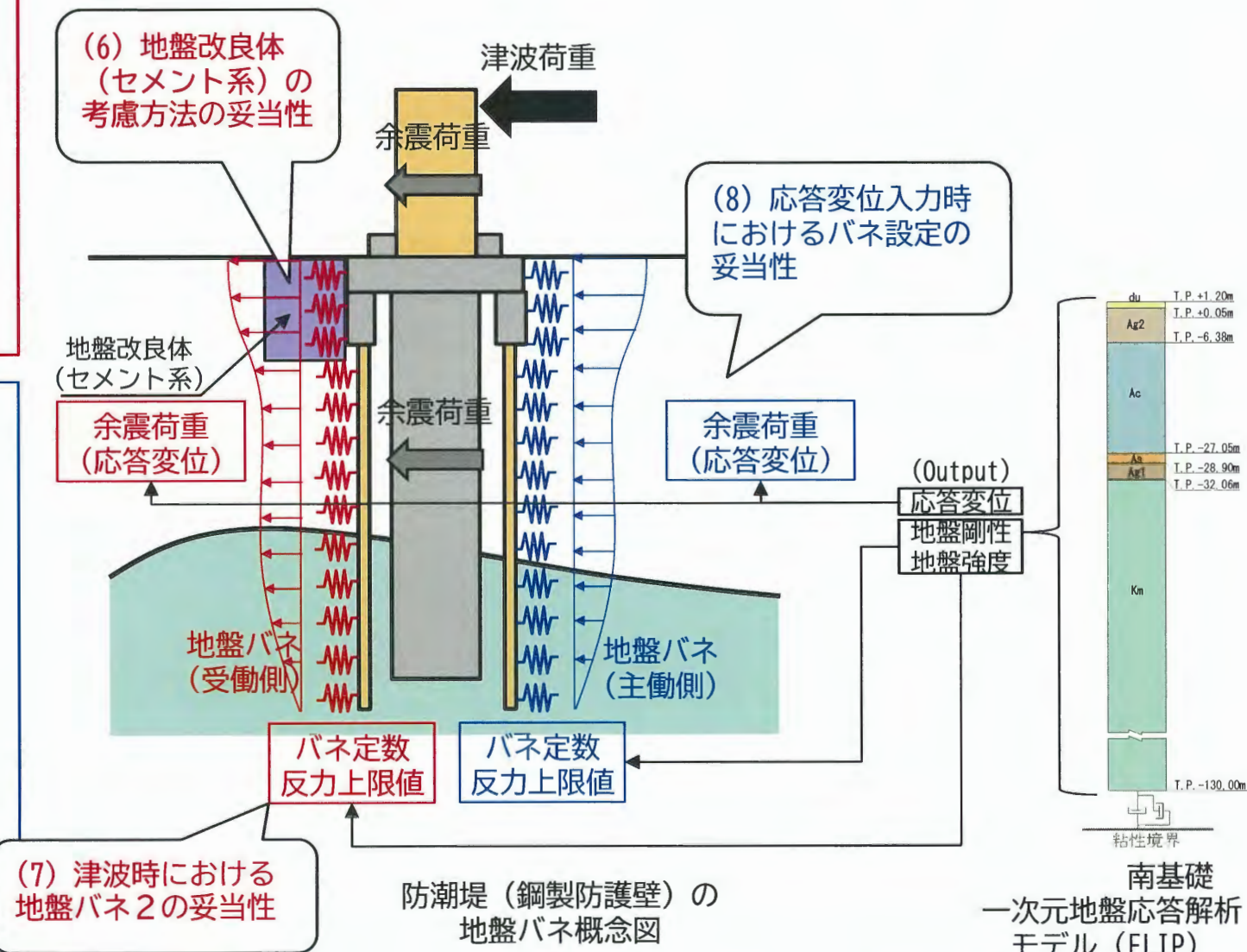
・地盤バネ（受働側）

津波荷重及び余震荷重に対する受働抵抗としての地盤反力を模擬するバネである。



・地盤バネ（主働側）

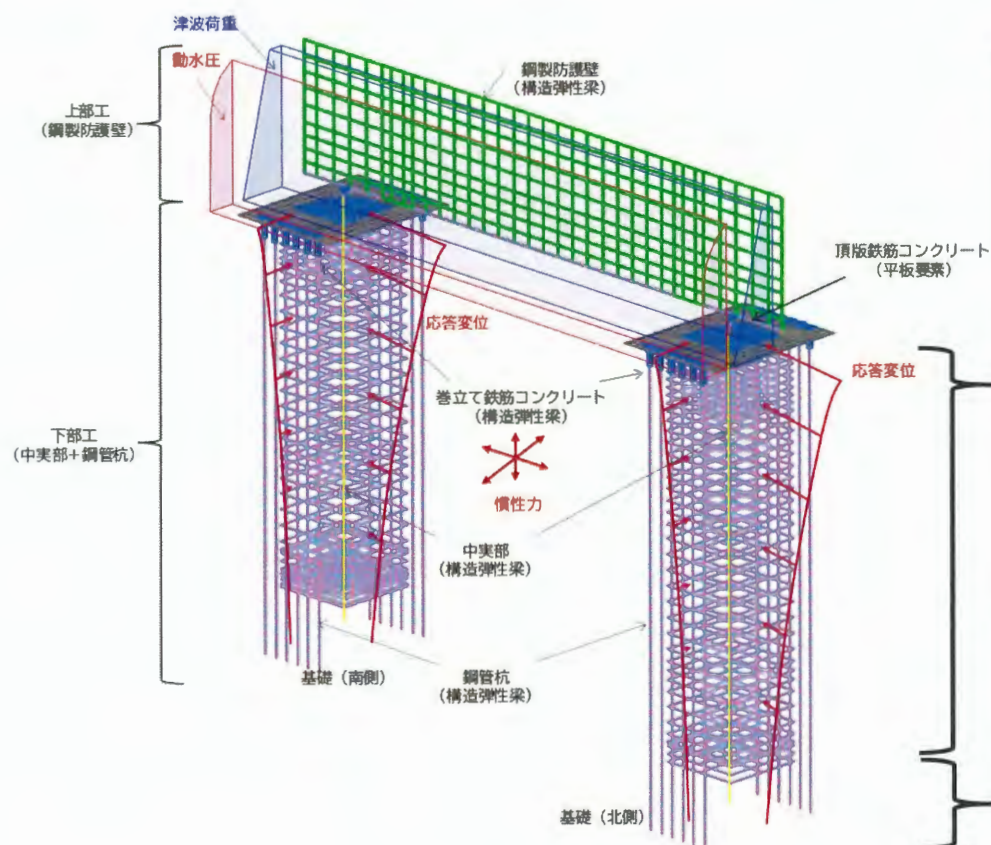
一次元地盤応答解析による応答変位を入力することで、下部工に余震荷重を作用させる。応答変位の入力イメージは以下のとおり。



(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (1/6)

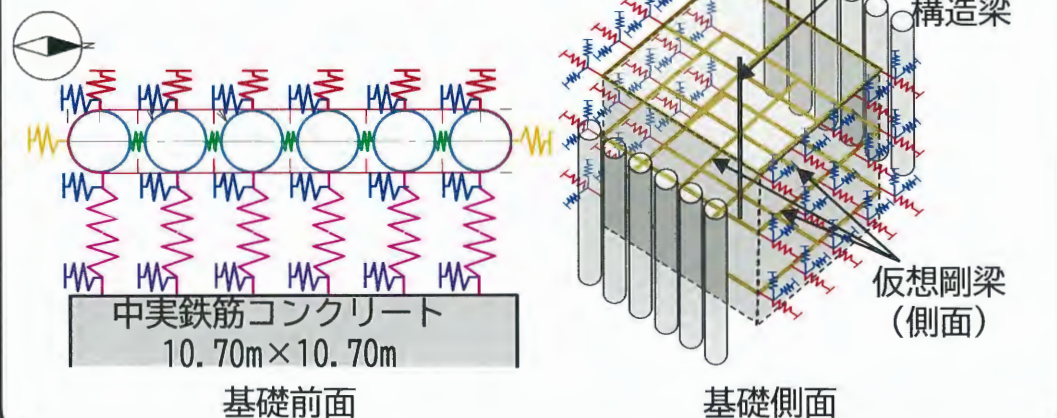
(1) 地盤バネの配置概要

耐津波設計の三次元フレームモデルに用いる地盤バネは、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、地盤反力上限値を考慮したバイリニア型として設定することを基本とする。

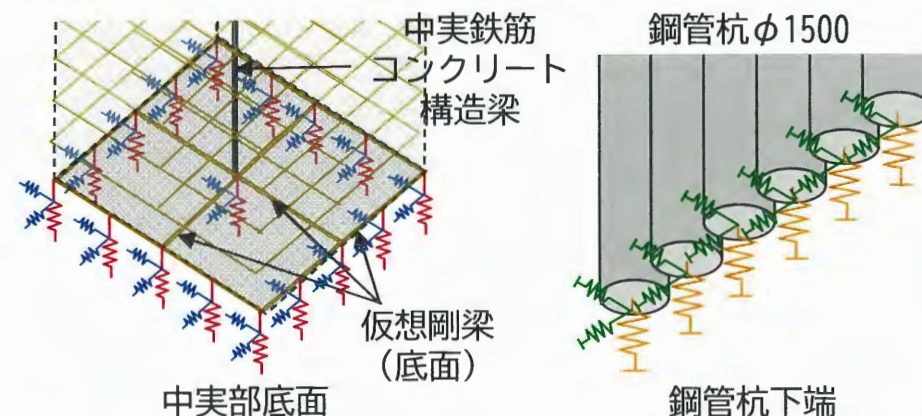


三次元フレームモデル

①基礎一般部の地盤バネ配置



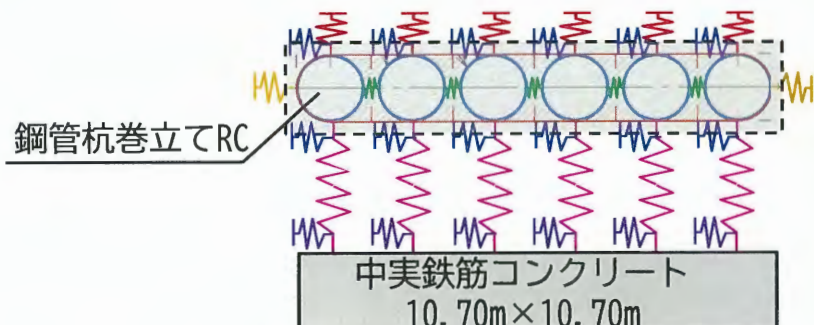
②中実部底面及び鋼管杭下端の地盤バネ配置



(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (2/6)

(2) 地盤バネの配置と設定 1/5

①基礎一般部の地盤バネ（基礎前面）
巻立て鉄筋コンクリート（T.P. -6.0m以浅）



地盤バネ一覧表（受働側及び主働側共通の設定）

記号 (ばね色)	設定面	区分	換算載荷幅 (m)	地盤反力係数等	地盤反力上限値 の有無
■P-1	東西	面直(外向き)	中間部1.800 端部2.250	道示 K_H (下式参照)	有
■K-1		面直(内向き)	中間部1.800 端部2.250	連結バネとして設定 (下式参照)	無
■P-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH} , K_{SV} (下式参照)	有
■RC-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH} , K_{SV} (下式参照)	無
■P-3	南北 端部のみ	面直	2.500 (巻立て厚)	道示 K_H (下式参照)	有
■K-2	南北	面直	2.500 (巻立て厚)	連結バネとして設定 (下式参照)	無

道示 K_H の算定式（■P-1, ■P-3）

$$K_H = \alpha_k K_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

K_H ：部材面法線方向地盤反力係数（ kN/m^3 ）

α_k ： K_H の推定に用いる補正係数（=1.5）

K_{H0} ：直径0.3 m剛体円板の平板載荷試験の値
に相当する水平方向地盤反力係数（ kN/m^3 ）

$$K_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

α ：地盤反力係数の換算係数（ $\alpha=1.0$ ）

E_0 ：地盤の変形係数（ kN/m^2 ）

$$E_0 = 2(1 + \nu_d)G$$

ν_d ：動ポアソン比

G ：地盤のせん断弾性係数（ kN/m^2 ）

B_H ：換算載荷幅

（上記“地盤バネ一覧表のとおり。”）

道示 K_{SH} , K_{SV} の算定式（■P-2, ■RC-2）

$$K_{SH} = K_{SV} = 0.3K_H$$

K_{SH} ：部材面接線（水平せん断）方向地盤反力係数
（ kN/m^2 ）

K_{SV} ：部材面接線（鉛直せん断）方向地盤反力係数
（ kN/m^2 ）

連結バネの算定式（■K-1, ■K-2）

$$K_{RCR} = E_0 / l_{RC} \quad K_{PR} = E_c / l_{PR}$$

K_{RCR} ：鉄筋コンクリート基礎と鋼管杭の連結バネ
（K-1）の反力係数（ kN/m^2 ）

K_{PR} ：巻立てRC間の連結バネ（K-2）の反力係数
（ kN/m^2 ）

E_0 ：地盤の変形係数（ kN/m^2 ）

E_c ：コンクリートの変形係数（ kN/m^2 ）

l_{RC} , l_{PR} ：連結バネの長さ（m）

地盤の変形係数 E_0 、地盤のせん断弾性係数 G

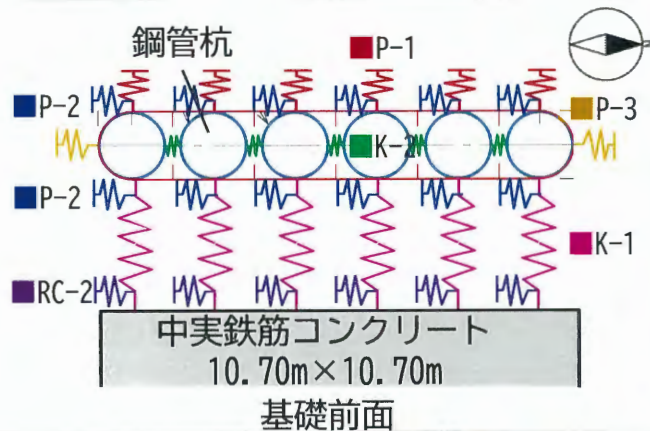
地盤の変形係数 E_0 （地盤のせん断弾性係数 G ）は、地盤バネの種類に応じて下記のとおり設定する。

津波時：地盤バネ1は初期せん断弾性係数 G_m に基づき設定、地盤バネ2は静弾性係数 E に基づき設定
（上限値は、地盤バネ1がピーク強度（平均）、地盤バネ2が残留強度（ -1σ ）から設定）

重畳時：地盤バネ3～5は、余震時の一次元地盤応答解析により算出した収束剛性 G に基づき設定
（上限値は、ピーク強度（平均）の余震時の収束強度（面直 σ_f 、せん断 τ_f ）から設定）

(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (3/6)

(2) 地盤バネの配置と設定 2/5

①基礎一般部の地盤バネ（基礎前面）
鋼管杭(T.P. -6.0m以深)

地盤バネ一覧表（受働側及び主働側共通の設定）

記号 (ばね色)	設定面	区分	換算載荷幅 (m)	地盤反力係数等	地盤反力上限値 の有無	その他
■P-1	東西	面直(外向き)	1.498 (鋼管杭外径)	道示 K_H (下式参照)	有	群杭の低減考慮
■K-1		面直(内向き)	中間部1.800 端部1.649	連結バネとして設定 (下式参照)	無	仮想ケーソン断面 考慮
■P-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH} , K_{SV} (下式参照)	有	同上
■RC-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH} , K_{SV} (下式参照)	無	
■P-3	南北 端部のみ	面直	1.198 (鋼管杭外径 $\times 0.8$)	道示 K_H (下式参照)	有	仮想ケーソン断面 考慮
■K-2	南北	面直	1.320 (鋼管杭間)	連結バネとして設定 (下式参照)	無	

道示 K_H の算定式 (■P-1, ■P-3)

$$K_H = \alpha_k K_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

 K_H : 部材面法線方向地盤反力係数 (kN/m³) α_k : K_H の推定に用いる補正係数 (=1.5) K_{H0} : 直径0.3 m剛体円板の平板載荷試験の値
に相当する水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

$$K_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

 α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha=1.0$) E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

$$E_0 = 2(1 + \nu_d)G$$

 ν_d : 動ポアソン比 G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m²) B_H : 換算載荷幅

(上記“地盤バネ一覧表のとおり。)

道示 K_{SH} , K_{SV} の算定式 (■P-2, ■RC-2)

$$K_{SH} = K_{SV} = 0.3K_H$$

 K_{SH} : 部材面接線(水平せん断)方向地盤反力係数
(kN/m²) K_{SV} : 部材面接線(鉛直せん断)方向地盤反力係数
(kN/m²)

連結バネの算定式 (■K-1, ■K-2)

$$K_{RCR} = E_0/l_{RC} \quad K_{PR} = E_0/l_{PR}$$

 K_{RCR} : 鉄筋コンクリート基礎と鋼管杭の連結バネ
(K-1)の反力係数 (kN/m²) K_{PR} : 鋼管杭間の連結バネ (K-2)の反力係数
(kN/m²) E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²) l_{RC} , l_{PR} : 連結バネの長さ (m)地盤の変形係数 E_0 , 地盤のせん断弾性係数 G 地盤の変形係数 E_0 (地盤のせん断弾性係数 G)は、地盤バネの種類に応じて下記のとおり設定する。津波時: 地盤バネ1は初期せん断弾性係数 G_m に基づき設定, 地盤バネ2は静弾性係数 E に基づき設定
(上限値は、地盤バネ1がピーク強度(平均), 地盤バネ2が残留強度(-1σ)から設定)重畳時: 地盤バネ3~5は、余震時の一次元地盤応答解析により算出した収束剛性 G に基づき設定
(上限値は、ピーク強度(平均)の余震時の収束強度 (面直 σ_f , せん断 τ_f)から設定)

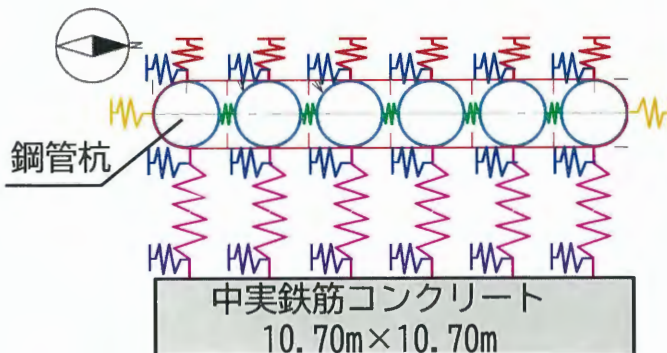
(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (4/6)

(2) 地盤バネの配置と設定 3/5

地盤バネ一覧表（受働側及び主働側共通の設定）

記号 (ばね色)	設定面	区分	換算載荷幅 (m)	地盤反力係数等	地盤反力上限値 の有無	その他
■ P-1	東西	面直(外向き)	1.498 (鋼管杭外径)	道示 K_H	有	群杭の低減考慮
■ K-1		面直(内向き)	中間部1.800 端部1.649	連結バネとして 設定	無	仮想ケーソン断面 考慮
■ P-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH} , K_{SV}	有	同上
■ P-3	南北 端部のみ	面直	1.198 (鋼管杭外径 $\times 0.8$)	道示 K_H	有	同上

①基礎一般部の地盤バネ（基礎前面）
群杭効果及び仮想ケーソン断面による
評価に係る補足

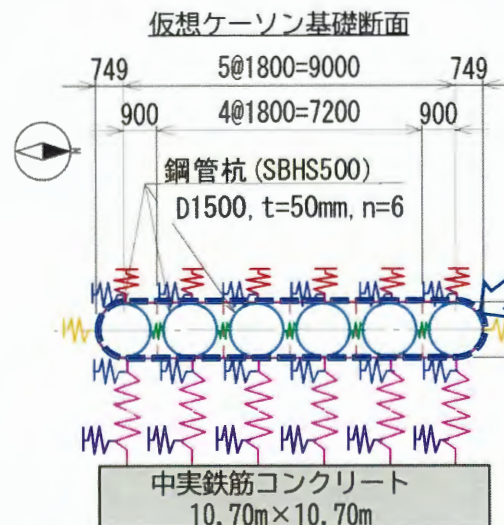


■ 群杭効果を考慮した地盤バネの低減

- 道路橋示方書IV(H24)において、鋼管杭の中心間隔が杭径Dの2.5倍以上であると群杭の影響は比較的小さい。
- 中心間隔は、 $1.8/1.5=1.2D < 2.5D$ であり、鋼管杭の群杭の影響を考慮する必要がある。
- 群杭の影響は、水平方向地盤反力係数の低減により考慮
- 低減の方法は、水平方向地盤反力係数に下式の補正係数 $\mu=0.74$ を乗じる。

$$\begin{aligned}\mu &= 1 - 0.2 \left(2.5 - \frac{L}{D} \right) \\ &= 1 - 0.2(2.5 - 1.2) \\ &= 1 - 0.26 = 0.74 \quad [L < 2.5D]\end{aligned}$$

■ 仮想ケーソン断面の考え方を考慮して有効載荷幅を設定



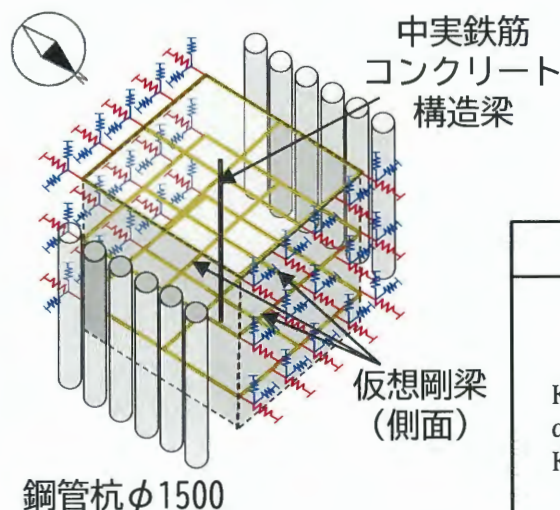
- 地盤バネK-1及びP-2は、左図の小判型の仮想ケーソン基礎断面を考慮して、換算載荷幅（中間杭：1.800m，端部杭：1.649m）を設定した。
- 地盤バネP-3は、有効幅 B_e を考慮して換算載荷幅1.198m（鋼管杭外径 $\times 0.8$ ）とした。

6本の鋼管杭を小判型の仮想ケーソン基礎断面として考える。

(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (5/6)

(2) 地盤バネの配置と設定 4/5

①基礎一般部の地盤バネ（基礎側面）



地盤バネ一覧表（受働側及び主働側共通の設定）

記号 (ばね色)	設定面	区分	換算載荷幅 (m)	地盤反力係数等	地盤反力上限値 の有無
■RC-1	南北	面直	10.7m	道示 K_H (下式参照)	有
■RC-2		水平・鉛直 せん断	同上	道示 K_{SH}, K_{SV} (下式参照)	有

道示 K_H の算定式（■RC-1）

$$K_H = \alpha_k K_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

K_H : 部材面法線方向地盤反力係数 (kN/m³)
 α_k : K_H の推定に用いる補正係数 (=1.5)
 K_{H0} : 直径0.3 m剛体円板の平板載荷試験の値
 に相当する水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

$$K_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha=1.0$)
 E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

$$E_0 = 2(1 + \nu_d)G$$

ν_d : 動ポアソン比
 G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m²)
 B_H : 換算載荷幅
 (上記“地盤バネ一覧表のとおり。)

道示 K_{SH}, K_{SV} の算定式（■RC-2）

$$K_{SH} = K_{SV} = 0.3K_H$$

K_{SH} : 部材面接線(水平せん断)方向地盤反力係数 (kN/m²)
 K_{SV} : 部材面接線(鉛直せん断)方向地盤反力係数 (kN/m²)

地盤の変形係数 E_0 、地盤のせん断弾性係数 G

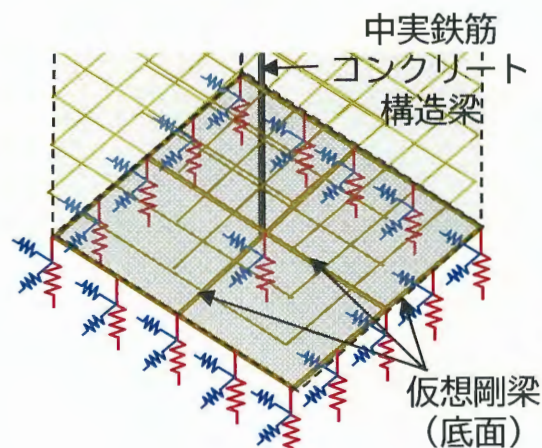
地盤の変形係数 E_0 （地盤のせん断弾性係数 G ）は、地盤バネの種類に応じて下記のとおり設定する。

津波時：地盤バネ1は初期せん断弾性係数 G_m に基づき設定、地盤バネ2は静弾性係数 E に基づき設定
 （上限値は、地盤バネ1がピーク強度（平均）、地盤バネ2が残留強度（ -1σ ）から設定）

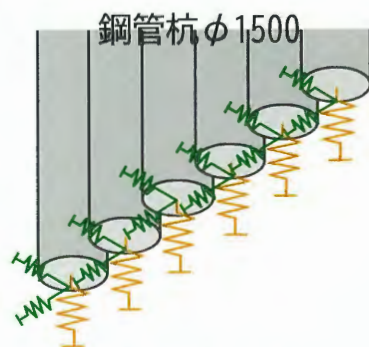
重畳時：地盤バネ3～5は、余震時の一次元地盤応答解析により算出した収束剛性 G に基づき設定
 （上限値は、ピーク強度（平均）の余震時の収束強度（面直 σ_f 、せん断 τ_f ）から設定）

(2) 地盤バネの配置と設定の考え方 (6/6)

(2) 地盤バネの配置と設定 5/5

②中実部底面及び鋼管杭下端の
地盤バネ

中実部底面



鋼管杭下端

地盤バネ一覧表

記号 (ばね色)	設定面	区分	換算載荷幅 (m)	地盤反力係数等	地盤反力上限値 の有無
■RCb-1	中実部 底面	面直	10.7	道示 K_V (下式参照)	有
■RCb-2		水平2方向 せん断	同上	道示 K_{SL} , K_{ST} (下式参照)	有
■Pb-1	鋼管杭 下端	面直	1.328 (等価矩形断面幅)	道示 K_V (下式参照)	有
■Pb-2		水平2方向 せん断	同上	道示 K_{SL} , K_{ST} (下式参照)	有

道示 K_V の算定式 (■RCb-1, ■Pb-1)

$$K_V = K_{V0} \left(\frac{B_V}{0.3} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

K_V : 部材底面法線方向地盤反力係数 (kN/m³)
 K_{V0} : 直径0.3 m剛体円板の平板載荷試験の値
 に相当する鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

$$K_{V0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

α : 地盤反力係数の換算係数 ($\alpha = 1.0$)
 E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²)

$$E_0 = 2(1 + \nu_d)G$$

ν_d : 動ポアソン比
 G : 地盤のせん断弾性係数 (kN/m²)
 B_V : 換算載荷幅
 (上記“地盤バネ一覧表のとおり。)

道示 K_{SL} , K_{ST} の算定式 (■RCb-2, ■Pb-2)

$$K_{SL} = K_{ST} = 0.3K_H$$

K_{SL} : 部材底面接線(堤軸せん断)方向地盤反力係数 (kN/m²)
 K_{ST} : 部材面接線(堤軸直交せん断)方向地盤反力係数
 (kN/m²)

地盤の変形係数 E_0 , 地盤のせん断弾性係数 G

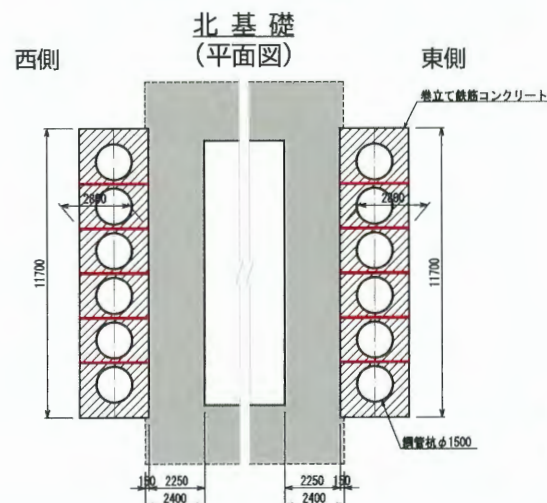
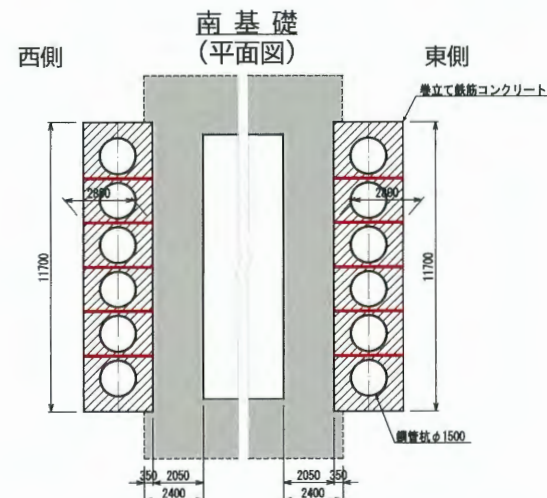
地盤の変形係数 E_0 (地盤のせん断弾性係数 G)は、地盤バネの種類に応じて下記のとおり設定する。

津波時：地盤バネ1は初期せん断弾性係数 G_m に基づき設定、地盤バネ2は静弾性係数 E に基づき設定
 (上限値は、地盤バネ1がピーク強度(平均)、地盤バネ2が残留強度($-\sigma$)から設定)

重畳時：地盤バネ3～5は、余震時の一次元地盤応答解析により算出した収束剛性 G に基づき設定
 (上限値は、ピーク強度(平均)の余震時の収束強度(面直 σ_f , せん断 τ_f)から設定)

(1) 巻立て鉄筋コンクリート間の目地材に係る考察

- ・巻立て鉄筋コンクリートは各杭ごとに施工し、杭間（コンクリート間）には目地材（縁切り材）を配置する計画である。
- ・目地材（縁切り材）は、以下のとおり、弾性プラスチック加圧発砲目地（オレフィン系樹脂）を使用する。



製品名：ウルトラ目地タイト

カタログより抜粋

ウルトラ目地タイトの特徴

1 弾性に富む

ゴムに似た弾性に富み、コンクリート・防音壁等の膨張・収縮に耐しなみに良く、すき間のあき心配がありません。

2 耐久性に優れている

耐熱性、耐オゾン性は、ゴム・ポリエチレン等の発泡体と比較して数段優れています。

3 透水性・透湿性に優れている

ウルトラ目地タイトは独立気泡でセルが非常に小さいために、ゴム・ポリエチレン等の発泡体と比較して透水量、透湿量が少なくなっています。

4 軽くて、しかも作業性が良い

ゴムより軽く、ポリエチレンとほぼ同程度のため、作業時の取扱い・運搬時あるいは切断等の加工も容易で作業性が向上します。

5 復元力に優れている

ゴムや他のプラスチック製の発泡体と比較して復元力が優れています。

6 へたりやばみだしが少ない

独立気泡体で独立気泡のため圧縮に対するはみだしやへたりが少なく、水密性に富み、事故防止につながります。

7 耐寒性に優れている

冬期間でも夏期間でもほとんど同じやわらかさを保っています。

8 難燃性に優れている

特殊難燃剤を配合しているウルトラ目地タイトは融点・着火点が高く難燃性にすぐれています。特に溶接の火花が散る作業現場および難燃性を必要とする構造物の目地材として使用されます。

試験項目	単位	数 値
圧縮強さ	N/mm ²	0.1
復元率	%	95
硬 度	—	20
密 度	g/cm ³	0.03

— 目地材（10mm）

■ 地中連続壁

【解析モデル上の取り扱いについて】

- ・当該目地部は、耐津波評価においては“連結バネ”，耐震評価においては“ジョイント要素”にてモデル化されており、いずれのモデルにおいてもコンクリート相当の剛性を有する設定としている。
- ・目地材の幅が10mmと極めて小さいこと、巻立て鉄筋コンクリートは直上の頂版鉄筋コンクリートにより拘束されており、杭間の変形は極めて小さいと考えられることから、杭間要素の影響は顕著でなく、現状のモデル化は妥当であると判断される。

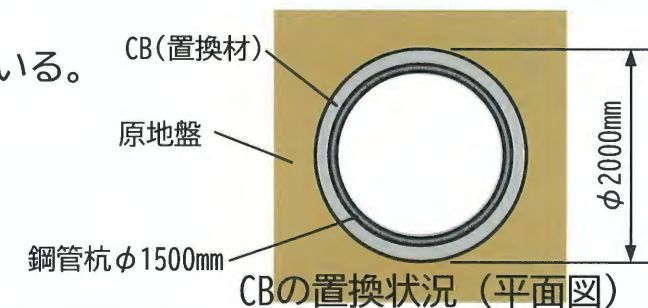
(3) 鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリート周囲のバネ設定について (2/3)

(2) 鋼管杭の均質置換土に係る考察 1/2

◆均質置換土の材料仕様について

均質置換土は、セメントベントナイト（CB）とし、以下の材料仕様を計画している。

- ・一軸圧縮強さ q_u ：500 kN/m²
- ・せん断強度 τ_f ：250 kN/m²（ $\tau_f = q_u/2$ として算定）
- ・初期せん断弾性係数：339,000 kN/m²（配合試験による試験値）



【耐津波設計におけるモデル化の妥当性について】

- ・耐津波設計モデルでは置換材を原地盤（地盤バネ）としてモデル化している。
- ・耐津波設計モデルにおける原地盤とCBの物性値を以下のとおり比較する。

初期せん断弾性係数およびせん断強度の比較
（各地層で最大となる最深部の値）

北基礎	標高 (T. P.)	層厚 (m)	σ'_m (kN/m ²)	平均有効 拘束圧 σ'_{ma}	基準せん断 弾性係数 (kN/m ²)	C_{CD} (kN/m ²)	ϕ_{CD}	初期せん断 弾性係数 (kN/m ²)	せん断強度 τ_f (kN/m ²)
Ag2	-7.00	3.00	57.1	497.0	278087.0	0.0	37.4	94289	34.7
Ac	-39.55	4.05	164.1	480.0	121829.0	25.0	29.1	63766	101.7
As	-44.70	1.70	229.1	378.0	143284.0	12.0	41.0	110176	159.4
Ag1	-52.85	2.15	253.5	814.0	392073.0	0.0	37.4	218792	154.0

CBの初期せん断弾性係数及びせん断強度は、原地盤よりも大きく、CBの残置が鋼管杭と原地盤の応力伝達に影響を与えるものではないことを確認した。

※各物性値が相対的に大きい北基礎の算定結果を掲載する。

※耐震設計においては置換材を原地盤（マルチスプリング要素）としてモデル化しているが、耐津波設計と同様、CBの各物性値は原地盤よりも大きいことを確認している。

※Km層は均質な岩盤であることから、均質置換土による先行置換は実施しない計画である。

(3) 鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリート周囲のバネ設定について (3/3)

(2) 鋼管杭の均質置換土に係る考察 2/2

前述した材料仕様を満足するためのCBの品質管理方針を以下に示す。

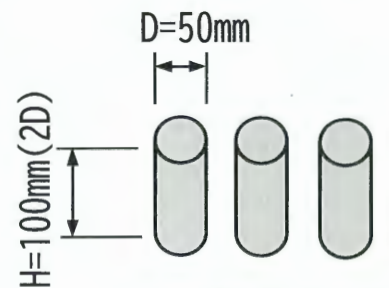
◆均質置換土（CB）の品質管理について

CBの一軸圧縮強さ（現場必要強度）は、 $q_u=500 \text{ kN/m}^2$ であり、本強度を確保するため、施工計画上の室内目標強度は現場必要強度に対して安全率 $\alpha=2.0$ を考慮した値として $500 \times \alpha=1,000 \text{ kN/m}^2$ とする。

CBは「JIS A 1216」に定める土の一軸圧縮試験方法に基づき、3本の供試体により一軸圧縮強さを確認する。

一軸圧縮強さの評価方法については「JIS A 1216」に定めされていないことから、国土交通省の品質管理基準で定めているコンクリートの圧縮強度の評価と同様とし、各供試体で室内目標強度の85%以上かつ3本の供試体の平均が室内目標強度以上であることを確認する。

「JIS A 1216」土の一軸圧縮試験方法による圧縮強度の確認



CB供試体作成(3本)
 $H=1.8D \sim 2.5D$ の
範囲とする



一軸圧縮強度試験

国土交通省の品質管理基準による
圧縮強度の評価

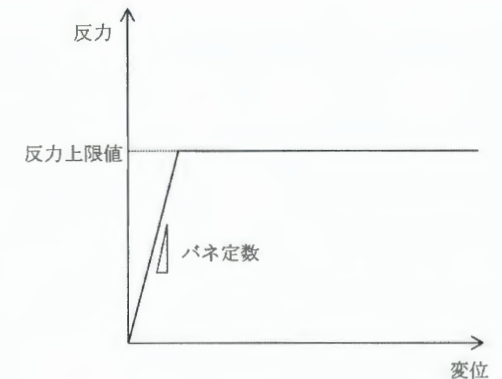
各供試体で室内目標強度の85%以上
かつ3本の供試体の平均が室内目標強
度以上であることを確認する。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（4）地盤バネの変形特性（1/8）

（1）地盤バネの変形特性の設定（津波時）1/3

- 津波時の地盤バネは、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、反力上限値を考慮したバイリニア型として設定する。
- 津波時のバネ定数及び反力上限値の設定は、下表に示す地盤剛性4種類と反力上限値4種類を用いて、地盤の最も高い剛性（初期剛性）と最も大きい強度（ピーク強度（平均））の組合せ、地盤の最も低い剛性（静弾性係数）と最も小さい強度（残留強度（ -1σ ））の組合せを採用し、各構造部位において安全側となる設計を実施する。
- 結果として、津波時には下記に示す2ケースの地盤バネにて、バネ定数及び反力上限値を増減させた検討を実施することで、津波来襲前に発生する地震動に起因した地盤の軟化を考慮する方針である。
- 以上については、既工認と同様の設計方針である。



地盤バネのバイリニアモデル

荷重条件	地盤剛性	反力上限値
津波時	初期剛性 余震時の収束剛性 地震時の収束剛性 静弾性係数	ピーク強度(平均) ピーク強度(-1σ) 残留強度(平均) 残留強度(-1σ)



○津波時の地盤バネケース：2 ケース

ケース名	地盤バネの バネ定数	地盤バネの 反力上限値	備考
地盤バネ1 (津波時)	初期せん断剛性 から設定	ピーク強度(平均)から設定	地盤抵抗が大きいと仮定したケース
地盤バネ2 (津波時)	静弾性係数 から設定	残留強度(-1σ)から設定	地盤抵抗が小さいと仮定したケース

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（4）地盤バネの変形特性（2/8）

（1）地盤バネの変形特性の設定（津波時）2/3

津波時における地盤バネの反力上限値は、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、以下の式より設定する。

① 鋼管杭の地盤バネの反力上限値

面直方向の地盤バネの反力上限値	せん断方向の地盤バネの反力上限値																												
水平（面直）方向地盤反力度の上限値 P_{HU}の算定方法を以下に示す。 $P_{HU} = \eta_P \alpha_P P_U$ ここで、 P_{HU}：水平（面直）方向地盤反力度の上限値（kN/m^2） P_U：地震時の地盤の受働土圧強度（kN/m^2） $P_U = K_{EP} \gamma h + 2c \sqrt{K_{EP}}$ α_P：単杭における水平（面直）方向地盤反力度の上限値の補正係数 砂質土地盤：$\alpha_P = 3.0$ 粘性土地盤：$\alpha_P = 1.5$ η_P：群杭効果を考慮した水平（面直）方向地盤反力度の上限値の補正係数 粘性土地盤：$\eta_P = 1.0$ 砂質土地盤：$\alpha_P \eta_P = \text{荷重載荷直角方向の杭の中心間隔} / \text{杭径} (\leq \alpha_P)$ K_{EP}：地震時の受働土圧係数 $K_{EP} = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta_E \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta_E) \sin(\phi + \alpha)}{\cos \delta_E \cos \alpha}} \right)^2}$ c：土の粘着力（kN/m^2） ϕ：土のせん断抵抗角（$^\circ$） δ_E：地震時の基礎平面と土の摩擦角（$^\circ$）で、$-\phi/6$ とする。 α：地表面と水平面のなす角度（$^\circ$）	せん断方向地盤反力度の上限値は、下表に示す最大周面摩擦力度（中掘り杭工法）に基づき設定する。 表-解 12.4.6 最大周面摩擦力度（kN/m^2） <table><tr><th>施工方法</th><th>地盤の種類</th><th>砂 質 土</th><th>粘 性 土</th></tr><tr><td>打 込 み 杭 工 法 (打撃工法, バイプロハンマ工法)</td><td></td><td>$2N (\leq 100)$</td><td>c 又は $10N (\leq 150)$</td></tr><tr><td>場 所 打 ち 杭 工 法</td><td></td><td>$5N (\leq 200)$</td><td>c 又は $10N (\leq 150)$</td></tr><tr><td>中 掘 り 杭 工 法</td><td></td><td>$2N (\leq 100)$</td><td>$0.8c$ 又は $8N (\leq 100)$</td></tr><tr><td>プレバールング杭工法</td><td></td><td>$5N (\leq 150)$</td><td>c 又は $10N (\leq 100)$</td></tr><tr><td>鋼管ソイルセメント杭工法</td><td></td><td>$10N (\leq 200)$</td><td>c 又は $10N (\leq 200)$</td></tr><tr><td>回 転 杭 工 法</td><td></td><td>$3N (\leq 150)$</td><td>c 又は $10N (\leq 100)$</td></tr></table> ただし、c は地盤の粘着力（kN/m^2）, N は標準貫入試験の N 値	施工方法	地盤の種類	砂 質 土	粘 性 土	打 込 み 杭 工 法 (打撃工法, バイプロハンマ工法)		$2N (\leq 100)$	c 又は $10N (\leq 150)$	場 所 打 ち 杭 工 法		$5N (\leq 200)$	c 又は $10N (\leq 150)$	中 掘 り 杭 工 法		$2N (\leq 100)$	$0.8c$ 又は $8N (\leq 100)$	プレバールング杭工法		$5N (\leq 150)$	c 又は $10N (\leq 100)$	鋼管ソイルセメント杭工法		$10N (\leq 200)$	c 又は $10N (\leq 200)$	回 転 杭 工 法		$3N (\leq 150)$	c 又は $10N (\leq 100)$
施工方法	地盤の種類	砂 質 土	粘 性 土																										
打 込 み 杭 工 法 (打撃工法, バイプロハンマ工法)		$2N (\leq 100)$	c 又は $10N (\leq 150)$																										
場 所 打 ち 杭 工 法		$5N (\leq 200)$	c 又は $10N (\leq 150)$																										
中 掘 り 杭 工 法		$2N (\leq 100)$	$0.8c$ 又は $8N (\leq 100)$																										
プレバールング杭工法		$5N (\leq 150)$	c 又は $10N (\leq 100)$																										
鋼管ソイルセメント杭工法		$10N (\leq 200)$	c 又は $10N (\leq 200)$																										
回 転 杭 工 法		$3N (\leq 150)$	c 又は $10N (\leq 100)$																										

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（4）地盤バネの変形特性（3/8）

（1）地盤バネの変形特性の設定（津波時）3/3

津波時における地盤バネの反力上限値は、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、以下の式より設定する。

② 中実鉄筋コンクリート側面，巻立て鉄筋コンクリート及び頂版鉄筋コンクリートの地盤バネの反力上限値

面直方向の地盤バネの反力上限値	せん断方向の地盤バネの反力上限値
水平（面直）方向地盤反力度の上限値 P_{HU} の算定方法を以下に示す。 $P_{HU} = \alpha_p P_{EU}$ ここで、 P_{HU}：水平（面直）方向地盤反力度の上限値（kN/m^2） P_{EP}：地震時の地盤の受働土圧強度（kN/m^2） $P_{EP} = K_{EP} \gamma h + 2c\sqrt{K_{EP}}$ α_p：水平（面直）方向の地盤反力度の上限値の割増し係数 α_p は以下の式により算定する。ただし、N 値2 以下の軟弱な粘性土の場合は、$\alpha_p = 1.0$ とする。 $\alpha_p = 1.0 + 0.5(z/B_e) \leq 3.0$ z：設計上の地盤面からの深さ（m） B_e：基礎の有効前面幅（$=15.5\text{m}$） K_{EP}：地震時の受働土圧係数 $K_{EP} = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta_E \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta_E) \sin(\phi + \alpha)}{\cos \delta_E \cos \alpha}} \right)^2}$ c：土の粘着力（kN/m^2） ϕ：土のせん断抵抗角（$^\circ$） δ_E：地震時の基礎平面と土の摩擦角（$^\circ$）で、$-\phi/6$ とする。 α：地表面と水平面のなす角度（$^\circ$）	せん断方向の地盤バネの上限値 τ_f の算出方法を以下に示す。 （砂質土） $\tau_f = \min[5N, (c + p_0 \tan \phi)] \leq 200$ （粘性土・地盤改良体） $\tau_f = c + p_0 \tan \phi \leq 150$ ここで、 τ_f：地盤反力度の上限値（kN/m^2） N：標準貫入試験より得られた N 値（平均値） c：粘着力（kN/m^2） p_0：基礎壁面に作用する静止土圧強度（kN/m^2） ϕ：せん断抵抗角（$^\circ$）

※以上については、既工認と同様の設計方針である。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（4）地盤バネの変形特性（4/8）

（2）地盤バネの変形特性の設定（重畳時） 1/3

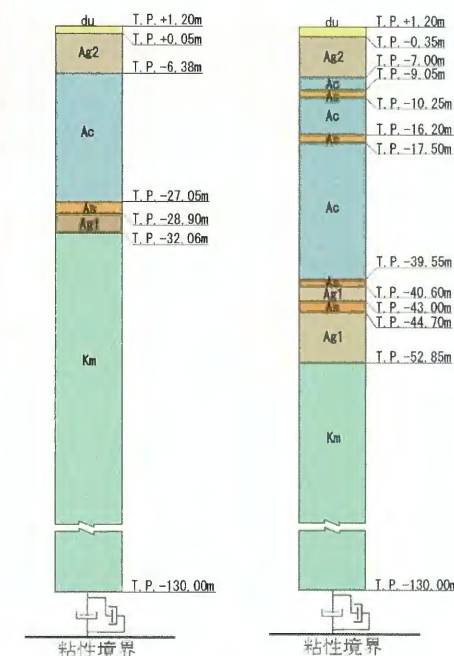
- 重畳時の地盤バネは、津波時と同様に「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」に準拠し、反力上限値を考慮したバイリニア型として設定する。
- 重畳時の検討では、一次元地盤応答解析結果を用いてバネ定数及び反力上限値を設定し、各構造部位の設計を実施する。
- なお、既工認では、一次元地盤応答解析において下表に示す地盤のばらつき①～⑥を考慮していたが、周辺地盤に地盤改良体（薬液注入）を敷設することを踏まえ、“液状化パラメータ非適用”のケースを採用する。
- さらに、ケース③'として、既工認では考慮していなかった平均 -1σ の非液状化ケースを設定する。

地盤ケース	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）	② 地盤物性のばらつきを考慮（ $+1\sigma$ ）した解析ケース	③ 地盤物性のばらつきを考慮（ -1σ ）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（ $+1\sigma$ ）して非液状化の条件を仮定した解析ケース	③' 地盤物性のばらつきを考慮（ -1σ ）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	液状化パラメータを非適用

○重畳時の地盤ケース：3ケース

ケース名 （決定ケース）	地盤バネのバネ定数及び 反力上限値	備考
地盤バネ3 （地盤ケース⑥）	S_0 波による1次元有効応力解析から 地表面応答加速度が最大となるケース・時刻の地盤物性により設定	地盤抵抗が 大きいケース
地盤バネ4 （地盤ケース③'）	S_0 波による1次元有効応力解析から 地表面応答変位が最大となるケース・時刻の地盤物性により設定	地盤抵抗が 小さいケース
地盤バネ5 （地盤ケース③'）	S_0 波による1次元有効応力解析から せん断ひずみが最大値を示すケース・時刻の地盤物性により設定	

※防潮堤（鋼製防護壁）にて考慮する
地盤物性のばらつきケース



南基礎 北基礎
一次元地盤応答解析モデル（FLIP）

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

(4) 地盤バネの変形特性 (5/8)

(2) 地盤バネの変形特性の設定（重畳時）2/3

- 一次元地盤応答解析による重畳時の地盤バネの設定方法について、以下にとりまとめる。

一次元地盤応答解析 (入力地震動 S_d 波)	地盤ケース		
	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	③' 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

上記3ケースの一次元地盤応答解析結果より、
各着目指標に応じたケース・時刻を設定し、
地盤バネの構成要素となる各パラメータを抽出する。



項目	重畳時の地盤ケース		
	地盤バネ3	地盤バネ4	地盤バネ5
着目指標	地表面応答加速度	地表面応答変位	地盤のせん断ひずみ
地盤ケース の選定結果	地表面応答加速度が最大になる地 盤ケース【地盤ケース⑥】	地表面応答変位（基礎下端に対す る地表面の相対変位）が最大にな る地盤ケース【地盤ケース③'】	地盤のせん断ひずみが最大になる 地盤ケース【地盤ケース③'】
地盤バネの構成要素 a. 地盤バネ定数 b. 反力上限値 c. 応答変位	選定された各地盤ケースにて、上述した“着目指標”が最大となる時刻の以下パラメータを抽出する。 A. 地盤剛性 B. 地盤強度 C. 基礎下端に対する地盤の相対変位分布		
設計震度	選定された各地盤ケースにおける“地表面最大加速度”より上部工及び下部工の設計震度を設定する。 (設計震度は時刻によらず最大値を抽出する。)		

※地盤ケース及び各パラメータの選定方法は、既工認と同様である。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（4）地盤バネの変形特性（6/8）

（2）地盤バネの変形特性の設定（重畳時） 3/3

重畳時における地盤バネの反力上限値は、一次元地盤応答解析(FLIP)の結果より、以下の式にて設定する。下式はFLIPの内部計算に適用されている理論式であり、下式によりFLIPの地盤の骨格曲線と地盤バネが整合する。

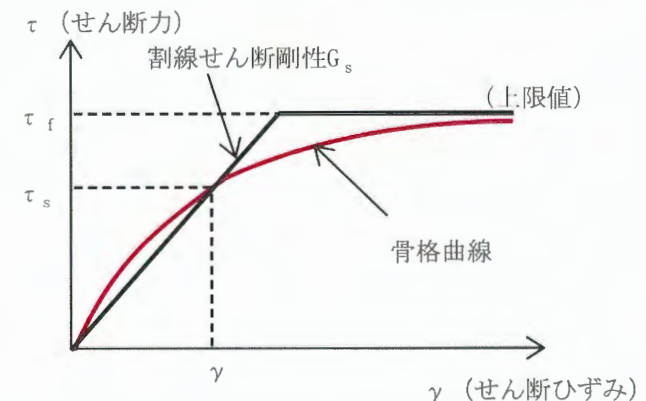
面直方向の地盤バネの反力上限値	せん断方向の地盤バネの反力上限値
水平方向地盤反力度の上限値 P_{HU} の算定方法を以下に示す。 $P_{HU} = c_{CD} \times \cos \phi_{CD} + \sigma'_m \times (1 + \sin \phi_{CD})$ ここで、 P_{HU} : 基礎前面の水平地盤反力度の上限値 (kN/m²) c_{CD} : 粘着力 (kN/m²) ϕ_{CD} : せん断抵抗角 (°) σ'_m : 時刻 t_{max} における地盤の平均有効主応力 (kN/m²)	地盤反力度の上限値 τ_f の算定方法を以下に示す。 $\tau_f = c_{CD} \times \cos \phi_{CD} + \sigma'_m \times \sin \phi_{CD}$ ここで、 τ_f : 地盤反力度の上限値 (kN/m²) c_{CD} : 粘着力 (kN/m²) ϕ_{CD} : せん断抵抗角 (°) σ'_m : 時刻 t_{max} における地盤の平均有効主応力 (kN/m²)

【参考】

重畳時における地盤バネ定数の算定根拠となる E_s は下式により、一次元地盤応答解析における各地盤要素の骨格曲線（右図の赤線）における割線せん断剛性 G_s より算定される。

$$G_s(\sigma'_m, \gamma) = \frac{\tau_s(\sigma'_m, \gamma)}{\gamma}$$

$$E_s(\sigma'_m, \gamma) = 2 \times (1 + \nu_d) \times G_s(\sigma'_m, \gamma)$$



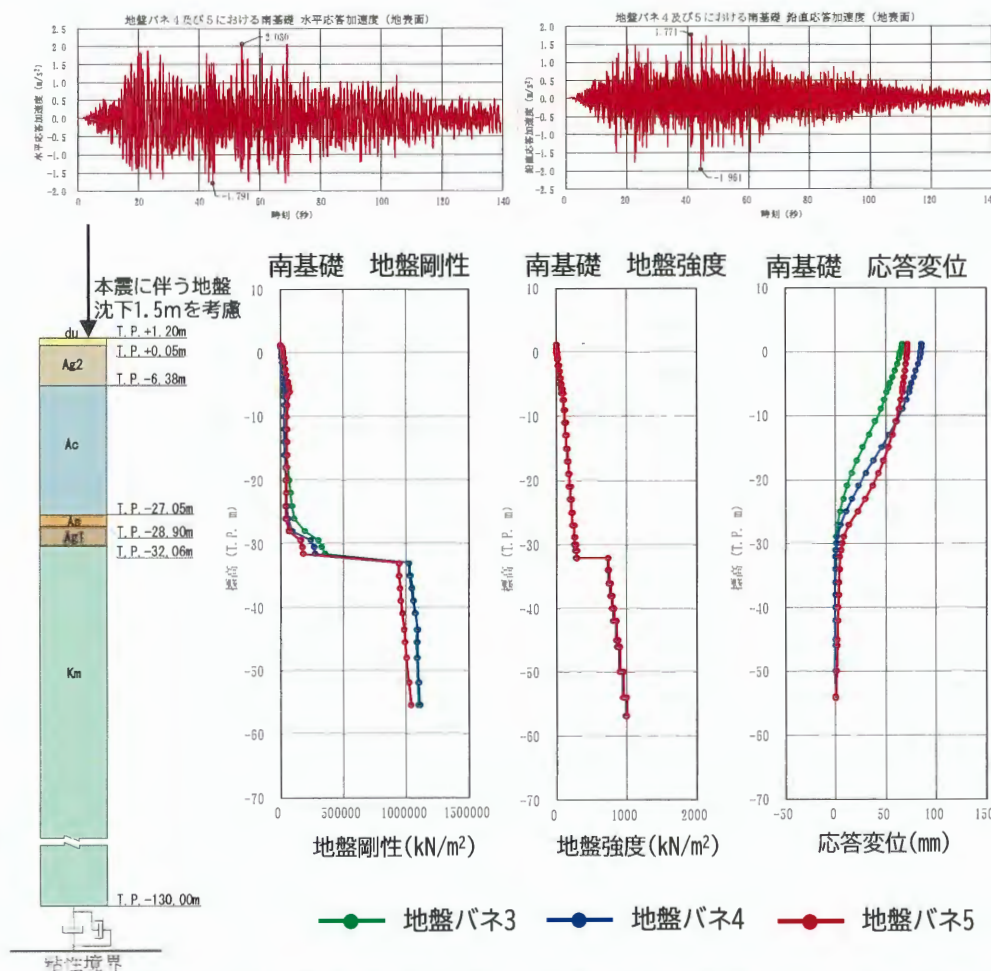
※以上については、既工認と同様の設計方針である。

(4) 地盤バネの変形特性 (7/8)

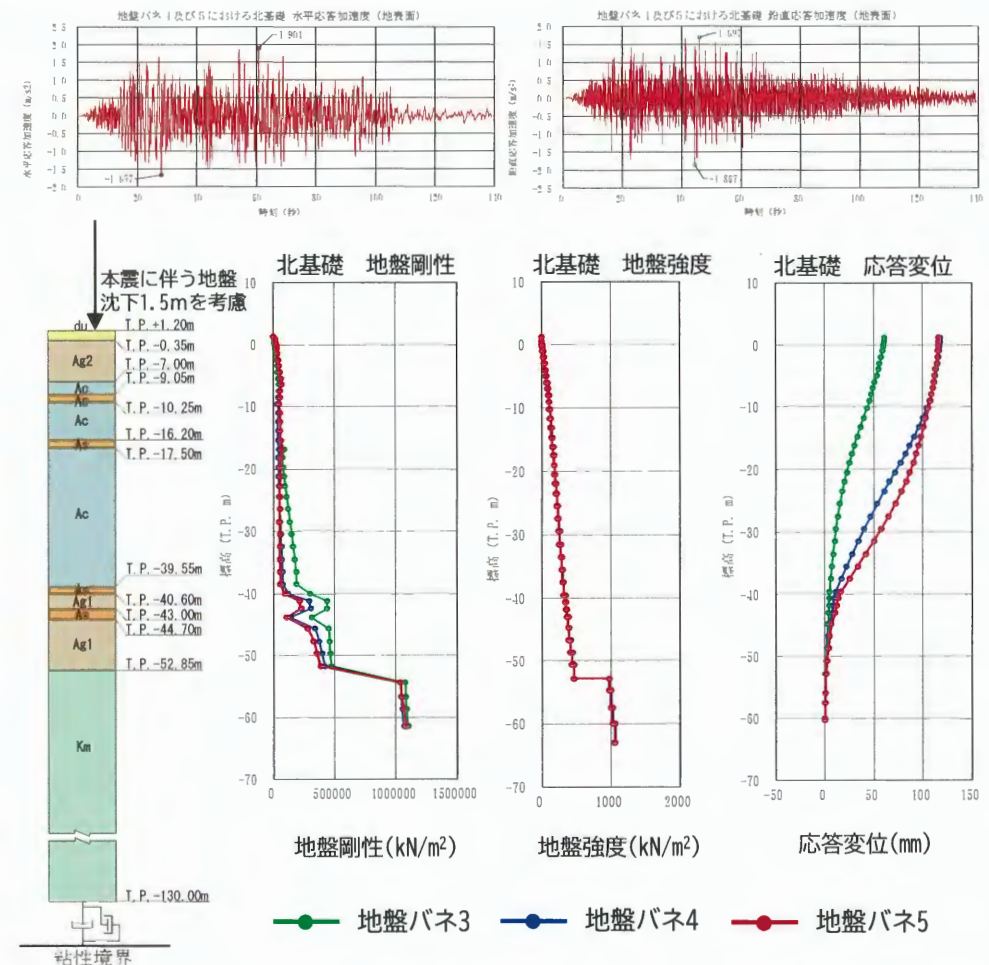
(3) 地盤バネ（重畳時）設定のための一次元地盤応答解析結果

一次元地盤応答解析モデル及び一次元地盤応答解析の結果を以下に示す。

一次元地盤応答解析により得られた地表面応答加速度、地盤剛性及び強度、地盤変位に基づき、三次元フレーム解析における設計震度、地盤バネ係数及び上限値、応答変位を設定する。



南基礎の一次元地盤応答解析モデルと解析結果



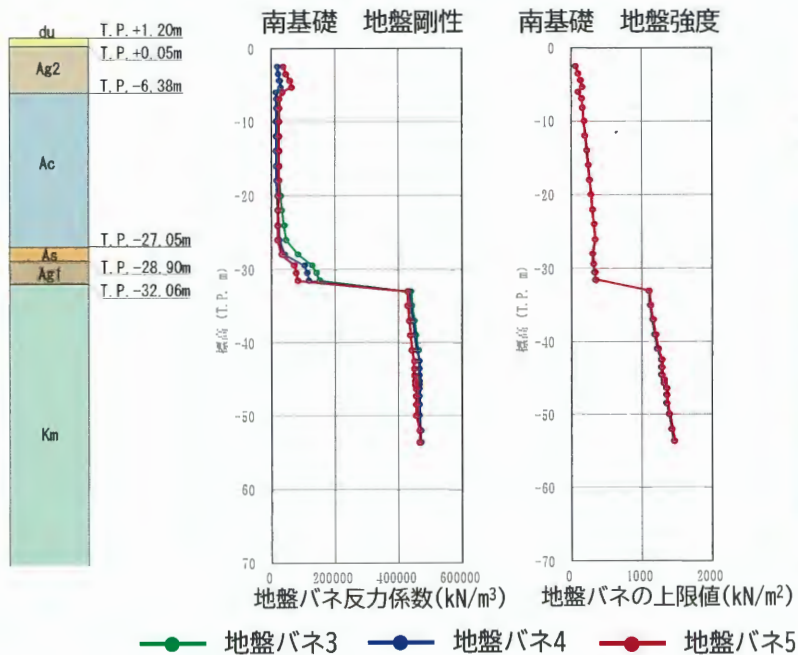
北基礎の一次元地盤応答解析モデルと解析結果

(4) 地盤バネの変形特性 (8/8)

審査会合（第1360回）
資料1-2を一部変更

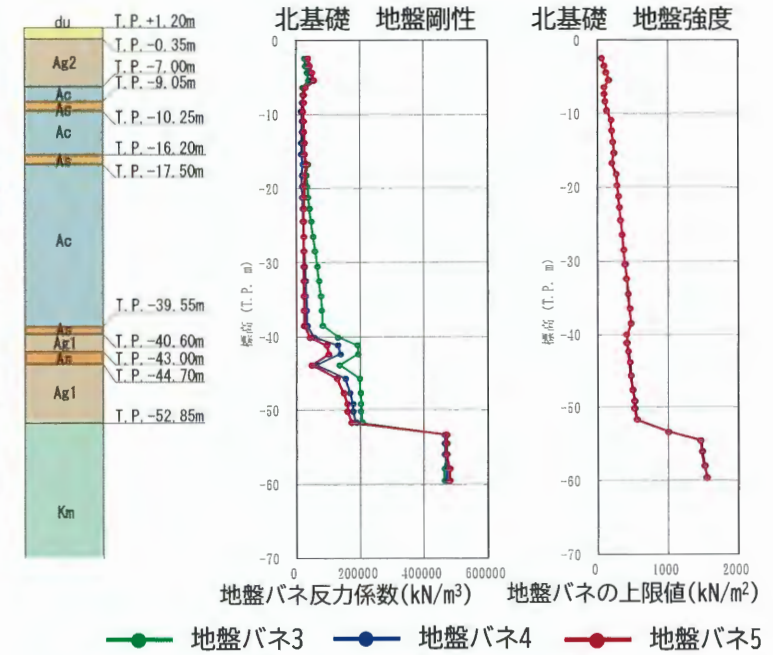
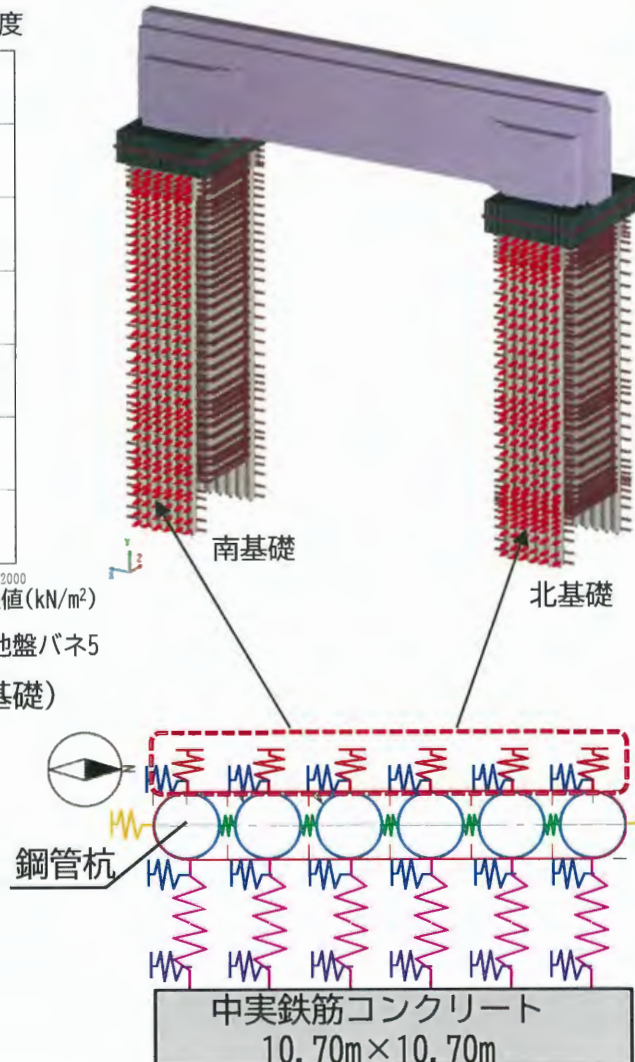
(4) 地盤バネ（重畳時）の設定結果の一例

地盤バネの設定事例（基礎前面 地盤バネP-1の場合）



巻立てRC及び鋼管杭前面の地盤バネP-1（南基礎）

重畳時においては、一次元地盤応答解析により得られた地盤剛性及び地盤強度に基づき、三次元静的フレーム解析における地盤バネの変形特性（バネ定数及び反力上限値）を設定する。



巻立てRC及び鋼管杭前面の地盤バネP-1（北基礎）

基礎前面の地盤バネ一覧表

記号 (ばね色)	設定面	区分
■ P-1	東西	面直(外向き)
■ K-1		面直(内向き)
■ P-2		水平・鉛直せん断
■ RC-1		水平・鉛直せん断
■ P-3	南北 端部のみ	面直
■ K-2	南北	面直

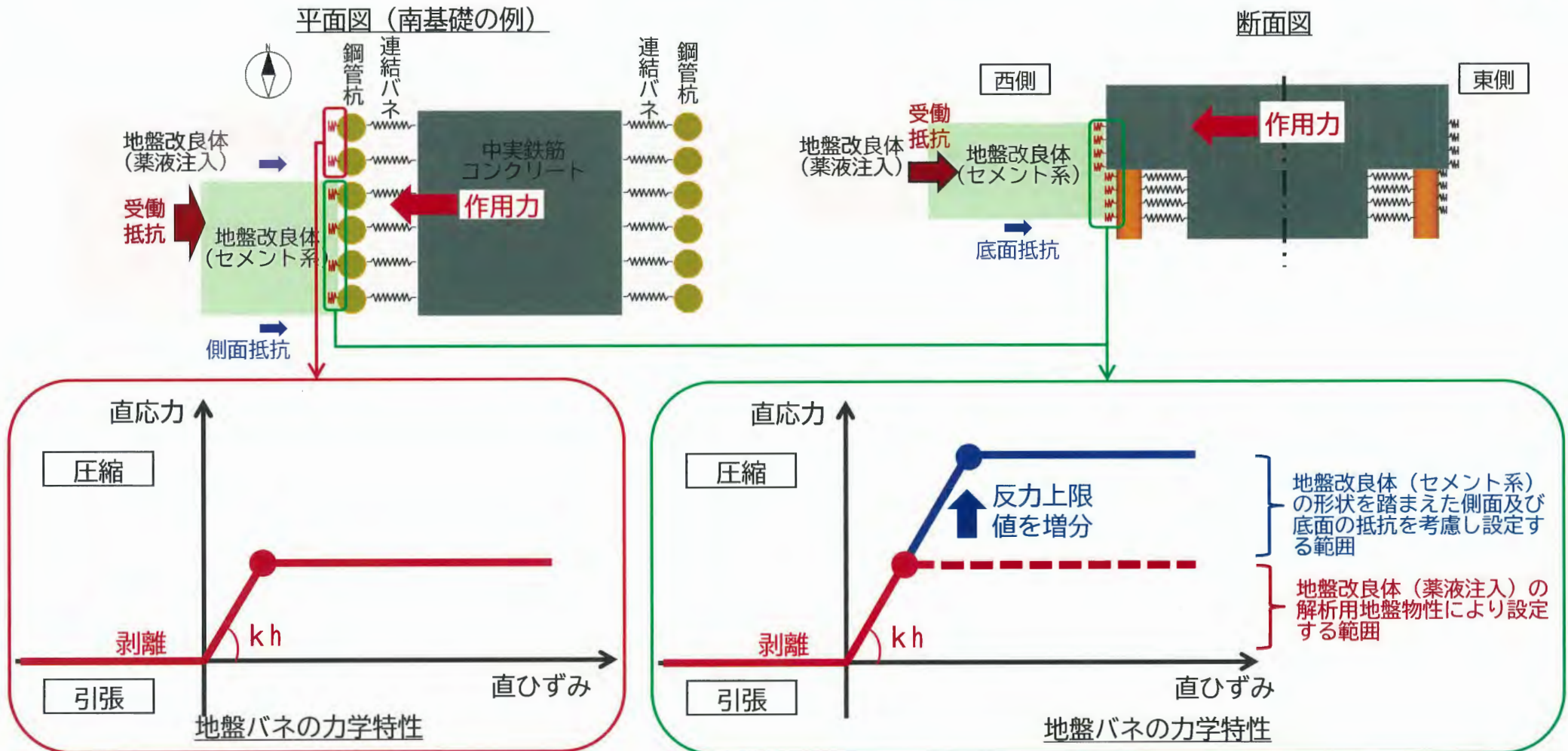
(5) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法（1/3）

(1) 地盤改良体（セメント系）を考慮した地盤バネ設定の考え方

地盤改良体（セメント系）の考慮

- ・ 南・北基礎の西側の浅部に地盤改良体（セメント系）を設置する。
- ・ 地盤改良体（セメント系）と鋼管杭間のバネの設定において、地盤改良体（セメント系）の剛性による地盤反力係数 kh の増大は見込まずに、地盤バネの地盤反力度の上限値の増分として加算する※。

※地盤改良体（セメント系）の側面と底面に作用する水平方向せん断抵抗力を3次元FEM解析により別途確認



3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

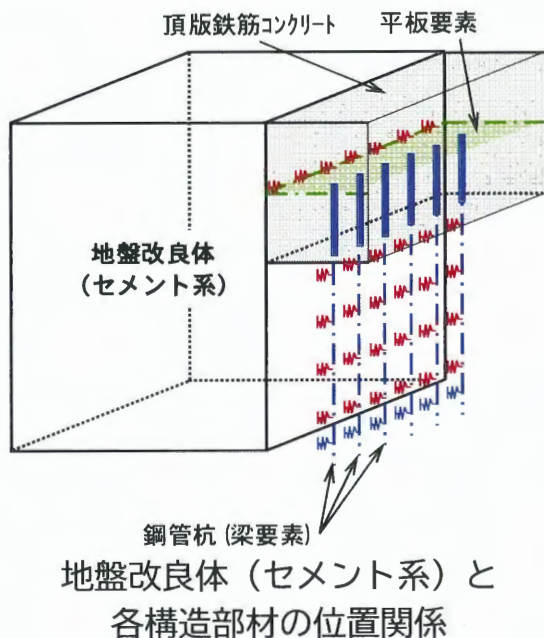
(5) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法（2/3）

(2) 地盤バネへの地盤改良体（セメント系）の反映方法について 1/2

前頁のとおり、地盤改良体（セメント系）は地盤バネにおける反力上限値の増分として反映する。反映方法の詳細については以下のとおり。

- 地盤改良体（セメント系）は直方体であり、津波荷重に対し、背面、側面（2面）及び底面には、周辺地盤から面直及びせん断の2方向の抵抗力が発生する。頂版鉄筋コンクリート、鋼管杭及び巻立て鉄筋コンクリートの地盤バネ（受働側）においては、地盤改良体（セメント系）による抵抗力を考慮した上で反力上限値を設定する。
- 地盤バネ（受働側）の反力上限値の増分として考慮する抵抗力は、保守側の配慮として、上述した4面のうち側面（片面）と底面の2面に発生する作用力方向の水平せん断抵抗力である。
- せん断抵抗力は、一次元地盤応答解析（FLIP）により算出される周辺地盤の τ_f (kN/m²) × 分担面積 (A_f) として算定する。各周辺地盤の τ_f (kN/m²) の算定の考え方を以下に示す。また、分担面積 (A_f) の算定の考え方と反力上限値増分の算定方法を次頁に示す。

一次元地盤応答解析（FLIP）による τ_f 算定の考え方



対象構造	標高	改良体の周辺地盤 (一次元地盤モデルに対応)	各土質の強度特性																	
頂版鉄筋コンクリート	-0.32	du~Ag2	τ_fの算定に用いる強度特性 <table><tr><th colspan="2">周辺地盤</th><th>粘着力 c (N/mm²)</th><th>内部摩擦角 ϕ (°)</th></tr><tr><td rowspan="4">第四紀層</td><td>du 層</td><td>0</td><td>37.3</td></tr><tr><td>Ag2 層</td><td>0</td><td>37.4</td></tr><tr><td>As 層</td><td>0</td><td>41.0</td></tr><tr><td>Ac 層</td><td>0.025</td><td>29.1</td></tr></table> $\tau_f = c_{CD} \times \cos \phi_{CD} + \sigma'_m \times \sin \phi_{CD}$ c_{CD} : 粘着力 (kN/m²) ϕ_{CD} : せん断抵抗角 (°) σ'_m : 時刻 t_{max} における地盤の平均有効主応力 (kN/m²) ※一次元地盤応答解析による、各地盤バネ 設定時刻での各土層の平均有効主応力	周辺地盤		粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	第四紀層	du 層	0	37.3	Ag2 層	0	37.4	As 層	0	41.0	Ac 層	0.025	29.1
周辺地盤		粘着力 c (N/mm ²)		内部摩擦角 ϕ (°)																
第四紀層	du 層	0		37.3																
	Ag2 層	0		37.4																
	As 層	0		41.0																
	Ac 層	0.025		29.1																
巻立て鉄筋コンクリート	-1.84	Ag2																		
	-6.00	Ag2																		
鋼管杭	-6.00	Ag2																		
	-7.00	Ag2																		
	-7.00	Ac																		
	-9.05	Ac																		
	-9.05	As																		
	-10.25	As																		
	-10.25	Ac																		
	-16.20	Ac																		
	-16.20	As																		
	-17.50	As																		
	改良体底面	-17.50	Ac																	

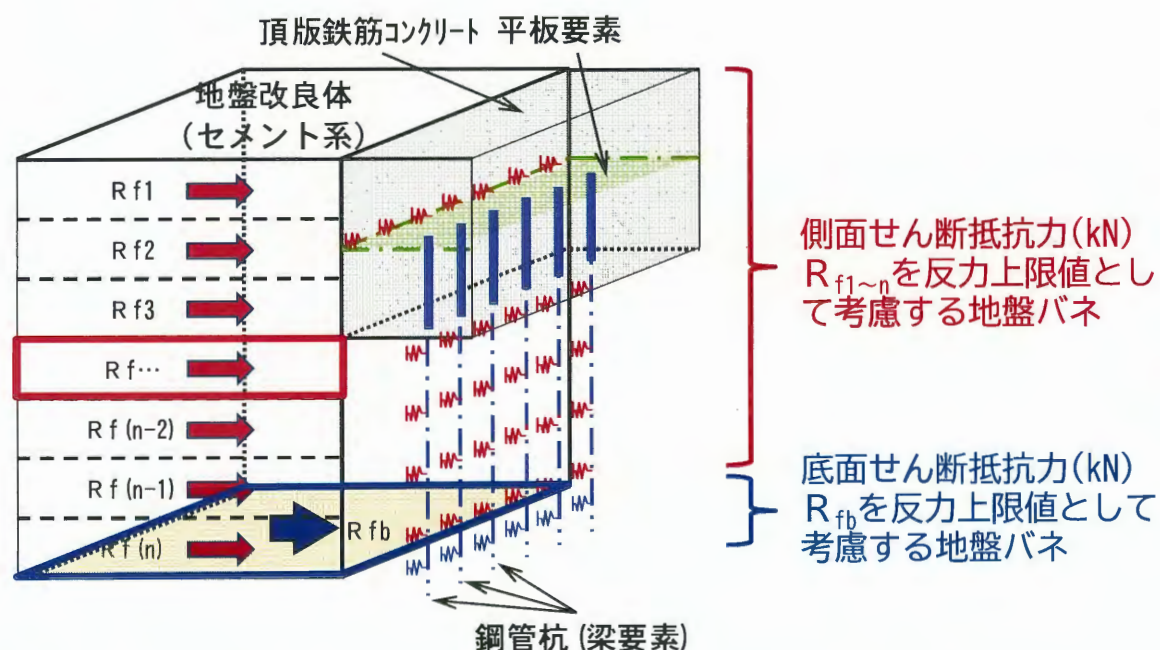
※上述の τ_f 算定式は重畳時において適用される。津波時においては、本資料の44p及び45pに記載の反力上限値（せん断方向）が適用される。

(5) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法（3/3）

(2) 地盤バネへの地盤改良体（セメント系）の反映方法について 2/2

前頁に続き、地盤改良体（セメント系）の反映方法の詳細を以下に示す。

- 前頁に算出方法を示した各周辺地盤の τ_f (kN/m²)に対し、以下のとおり地盤バネ毎にその分担面積(A_f)を設定し、頂版鉄筋コンクリート(平板要素)、巻立て鉄筋コンクリート(梁要素)及び鋼管杭(梁要素)の各地盤バネに増分として付加する。
- 地盤バネ4（北基礎）における反力上限値と地盤改良体（セメント系）による増分を下表に例示する。



→ 側面せん断抵抗力(kN) $R_f = \tau_f \times A_f$ (A_f は上図□で算出)

→ 底面せん断抵抗力(kN) $R_{fb} = \tau_{fb} \times A_{fb}$ (A_{fb} は上図□で算出)

地盤改良体（セメント系）の反映方法に係る概念図

反力上限値増分算出の考え方（鋼管杭のバネを例示）

$$\text{反力上限値増分 (kN/m}^2\text{)} = \text{せん断抵抗力 (kN)} / \text{杭本数} / \text{バネの支配面積}^*$$

※支配面積 = バネの分担幅 × 換算載荷幅

反力上限値と地盤改良体（セメント系）による増分（地盤バネ4（北基礎））

対象構造	土質	標高	上限値 (kN/m ²)	増分 (kN/m ²)	増分/上限値
頂版鉄筋コンクリート Be=15.500m	du~ Ag2	-0.32	16.1	3.3	21%
巻立て鉄筋コンクリート Be=1.800m	Ag2	-1.84	47.3	9.6	20%
	Ag2	-6.00	99.8	24.2	24%
鋼管杭 Be=1.498m	Ag2	-6.00	105.5	33.4	32%
	Ag2	-7.00	105.5	35.8	34%
	Ac	-7.00	104.4	52.7	51%
	Ac	-9.05	111.4	55.2	50%
	As	-9.05	139.4	49.6	36%
	As	-10.25	139.4	49.6	36%
	Ac	-10.25	193.9	61.5	32%
	Ac	-16.20	239.8	72.3	30%
	As	-16.20	206.2	73.4	36%
	As	-17.50	206.2	73.4	36%
鋼管杭 Be=1.498m (改良体底面)	Ac	-17.50	270.6	1320.9	488%

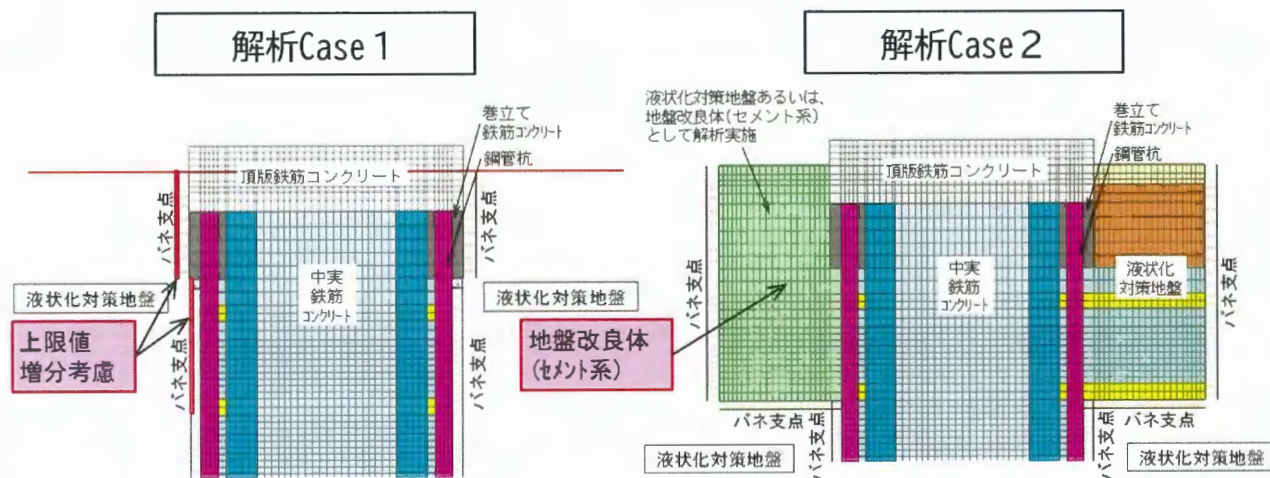
3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（6）地盤改良体（セメント系）の考慮方法の妥当性（1/2）

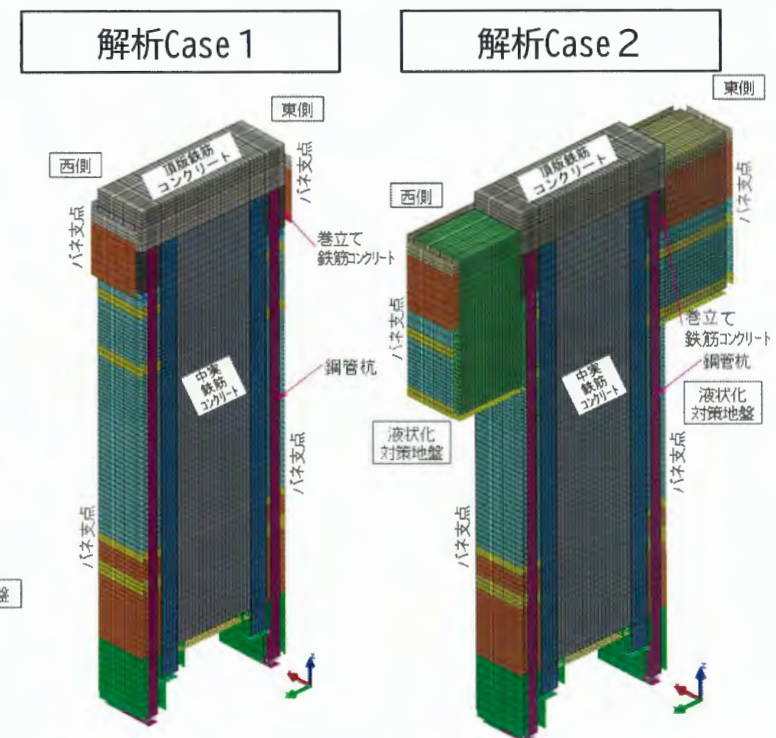
（1）三次元FEM解析による妥当性の確認方針

地盤改良体（セメント系）を地盤バネの反力上限値の増分として考慮する考え方について、傍証のための三次元FEM解析を実施する。

- ・ 三次元FEM解析については、地盤改良体（セメント系）のモデル化に着目した2つの解析モデルを作成し、同一の荷重条件に対し下部工の水平変位量を比較する。
- ・ 解析Case 1は、地盤改良体（セメント系）を地盤バネの反力上限値として考慮した解析モデルであり、工認設計モデルと同様の地盤バネ条件にて側方抵抗を模擬している。
- ・ 一方、解析Case 2は、地盤改良体（セメント系）をソリッド要素でモデル化し、その外側に地盤バネを設けることで、地盤改良体（セメント系）が下部工の側方抵抗として寄与する効果を精緻に表現している。
- ・ これら2つの解析モデルによる下部工の水平変位量の大小関係を比較することで、地盤改良体（セメント系）を地盤バネの反力上限値の増分として考慮することの妥当性を確認する。



三次元FEMの解析モデル（鉛直断面）



三次元FEMの解析モデル
（実モデルを半分に切断した鳥瞰図）

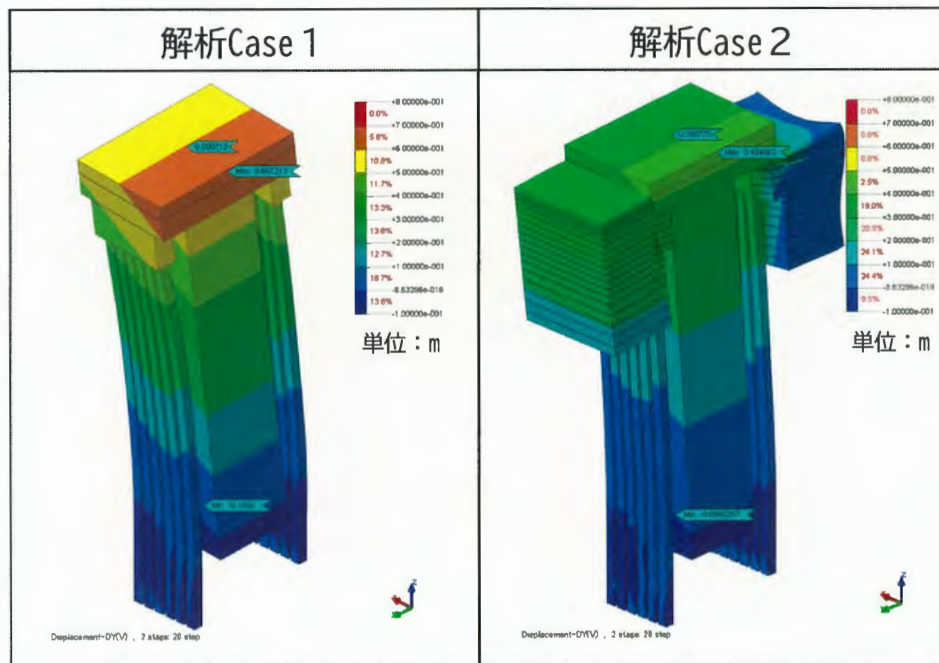
3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

(6) 地盤改良体（セメント系）の考慮方法の妥当性（2/2）

(2) 三次元FEM解析による妥当性の確認結果

解析Case1及び解析Case2における水平変位及び変位コンターを以下に示す。

水平変位は解析Case1（地盤改良体（セメント系）を地盤バネの反力上限値として考慮した解析モデル）が大きくなる結果であり、地盤改良体（セメント系）の取扱いとしては十分に保守的であることを確認した。



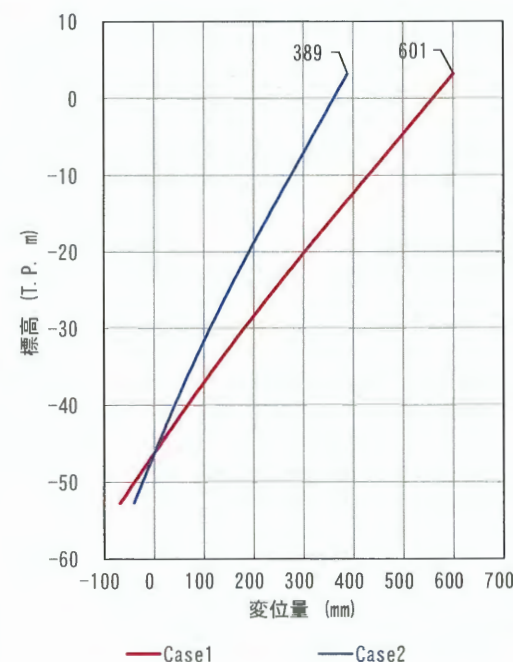
水平変位コンター図（北基礎）

- 2つの解析モデルにおける水平変位量の相違は、本資料の52p（下線部）に記載する反力上限値の保守性によるものと推察する。解析Case2では、**全面**の全方位の抵抗力が発揮されることから、変位量が小さくなる。

以上より、現状の地盤バネは十分に保守的な設定となっており、設計条件として、妥当であることを確認した。

水平変位の算定結果（北基礎）

解析Case	改良体のモデル化	地盤改良体（セメント系）の反映方法	水平変位 (mm)
1	地盤バネ	地盤バネの反力上限値の増分	601
2	ソリッド要素	ソリッド要素にて実形状を考慮	389



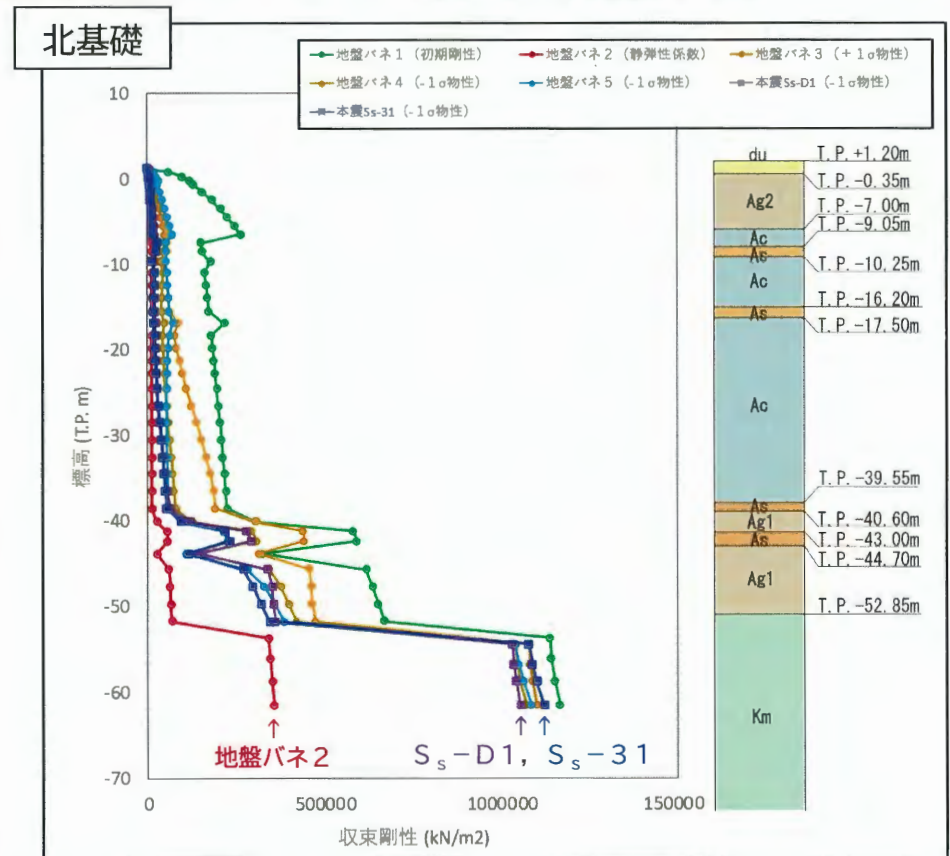
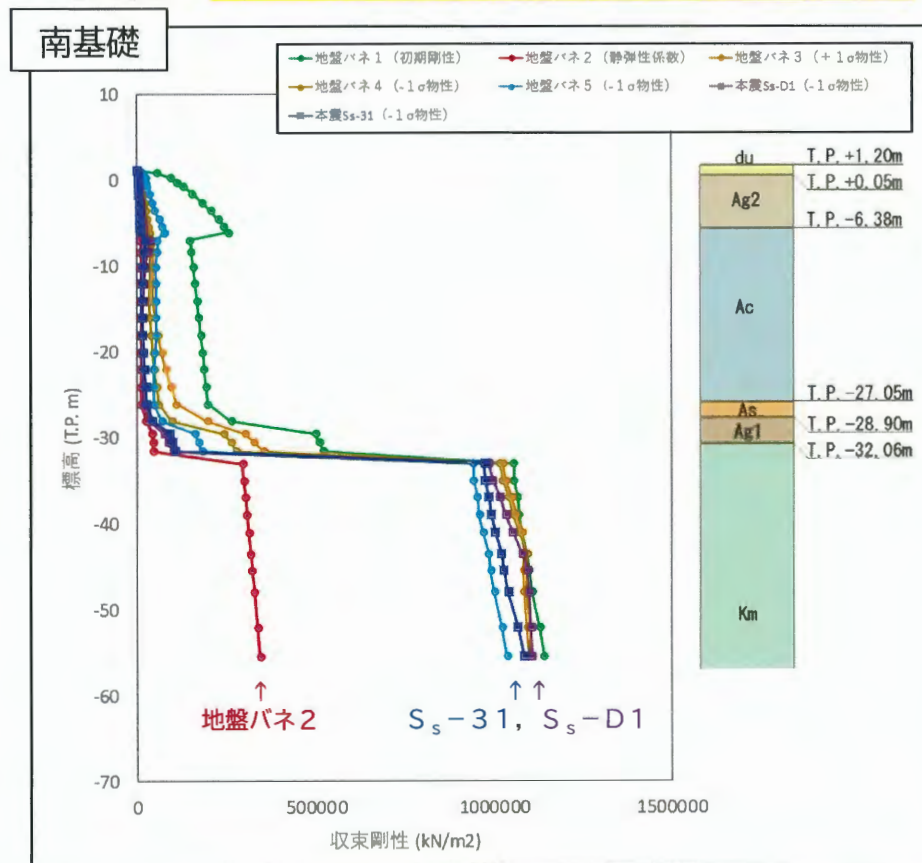
水平変位の深度分布図（北基礎）

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

(7) 津波時における地盤バネ2の妥当性

(1) 津波時における地盤バネ2（静弾性係数による）の妥当性

- 津波時においては前述した2ケースの地盤バネにて、バネ定数及び反力上限値を増減させた検討を実施することで、津波襲来前に発生する地震動に起因した地盤の軟化を考慮する方針である。
- 本項では、上記地盤バネのうち“最も地盤抵抗が小さいと仮定した”地盤バネ2について、基準地震動 S_s 地震時の地盤剛性（一次元地盤応答解析による収束剛性）との比較を行うことで、その妥当性を確認する。



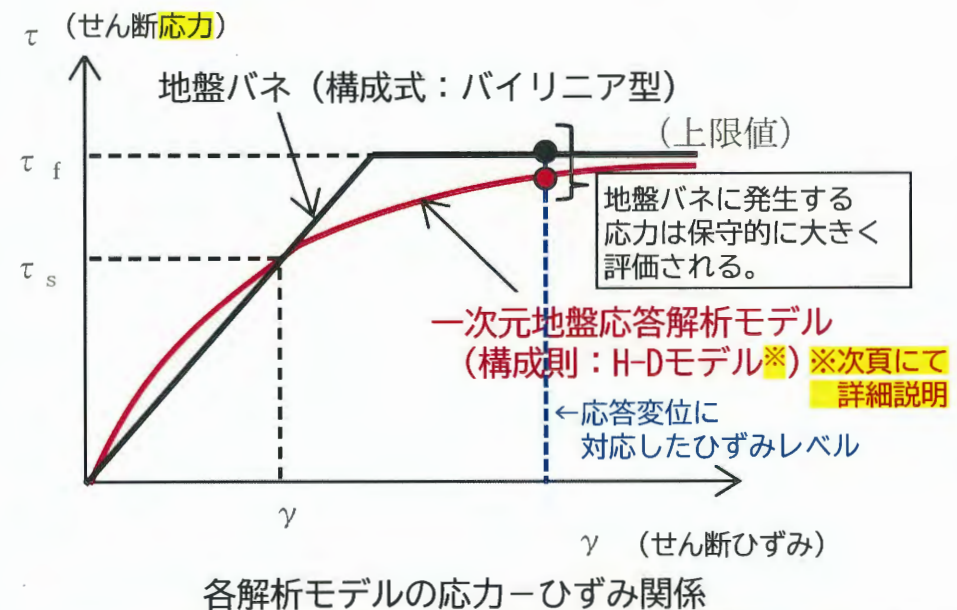
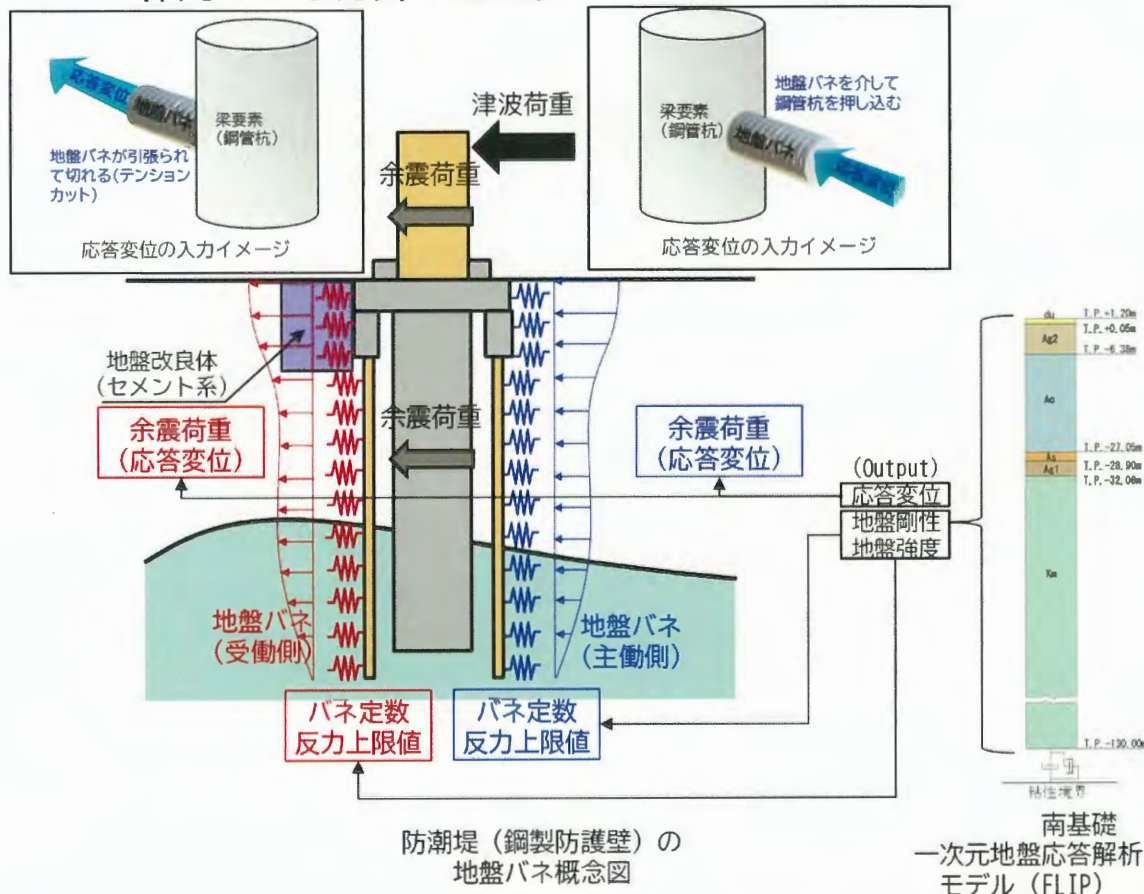
地盤バネ2の地盤剛性（静弾性係数による）は、基準地震動 S_s により軟化した地盤剛性よりも小さく、耐津波設計における地盤バネ（受働側）の設計条件として妥当であることを確認した。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

（8）応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性（1/5）

（1）応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性 1/2

- 防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計においては、余震荷重を応答変位法により考慮する方針である。応答変位法については下図に示すとおり、一次元地盤応答解析により算定した各地盤要素の応答変位を地盤バネを介して構造物に入力する。
- 応答変位法では、一次元地盤応答解析にて発生する地盤応力を変位を介して構造物に作用させるが、一次元地盤応答解析の応力－ひずみ関係と、地盤バネ（構造物側）の応力－ひずみ関係を整合させることで、等価な地盤応力を作用させる方針である。



上述した一次元地盤応答解析及び地盤バネの応力－ひずみ関係により、応答変位により設定した地盤応力（主働土圧）は、一次元地盤応答解析による地盤応力と等価（かつ保守的）であり、設計手法として問題のないことを確認した。

3. 審査会合コメント⑭回答（防潮堤（鋼製防護壁）の耐津波設計における地盤バネについて）

(8) 応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性 (2/5)

(1) 応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性 2/2

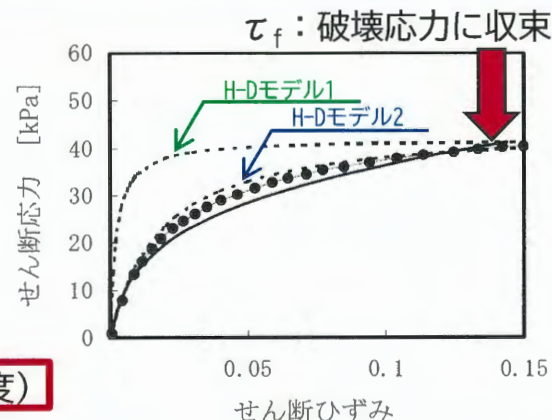
- 前頁に示す地盤の構成則であるH-Dモデル（一次元地盤応答解析モデル）の概要を以下に示す。

H-D モデルの骨格曲線：

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \quad \text{または} \quad \tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \left| \frac{G_0 \gamma}{\tau_f} \right|}$$

τ ：せん断応力
 γ ：せん断ひずみ
 G_0 ：初期せん断剛性
 なお、 $\tau_f = G_0 \gamma_r$

τ_f ：破壊応力（せん断強度）
 γ_r ：基準せん断ひずみ



- せん断試験結果の例
- R-Oモデル
- H-Dモデル1： τ_f を実験結果と一致させる
- H-Dモデル2： G_0 を実験結果と一致させる

	G_0 [kPa]	τ_f [kPa]
実験結果	2500	42
R-Oモデル	2500	42
	$\alpha=7.9$	
	$\beta=2.2$	
H-Dモデル1	20000	42
H-Dモデル2	2500	45

図 1.3-5 R-O モデル, H-D モデルの例

H-D モデルでは、せん断ひずみ(γ)を無限大にした場合のせん断応力(τ)が、 $G_0 \cdot \gamma_r$ または破壊応力(τ_f)に収束するため、 $G_0 \cdot \gamma_r$ または τ_f によってせん断応力の上限を定義することが可能となる。

参考文献：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 2018
 （土木学会原子力土木委員会 地中構造物の耐震性能照査高度化小委員会），p. 53～55

以上より、一次元地盤応答解析における地盤の構成則であるH-Dモデルにおいては、与条件の一つである破壊応力（せん断強度）をせん断応力が超えないことを確認した。よって、前頁に示すバイリニア型の地盤バネの構成式との大小関係が成立するものと判断する。

（8）応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性（3/5）

（2）バイリニア型地盤バネによる応答変位法に係る文献情報 1/2

- ① “液状化に起因した地盤の側方流動に対する杭基礎設計法の提案”：須田嘉彦・佐藤正行・溜幸生・國生剛治，土木学会論文集C Vol.63 No.2, pp.487－501, 2007年5月.

地盤の側方流動現象を模擬した小型及び大型振動台実験による杭への作用力評価法に基づき，非液状化層に対して応答変位法を適用した杭基礎設計法を提案した論文である。同論文では，上限値を考慮したバイリニア型地盤バネ（弾塑性型モデル）を用いた応答変位解析により，杭の挙動を精度よく再現できることが示されている。また，側方流動により地盤が杭を押す際の土圧の発生メカニズムについても言及している。

（8）応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性（4/5）

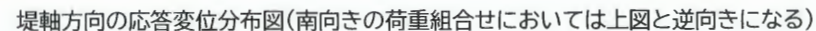
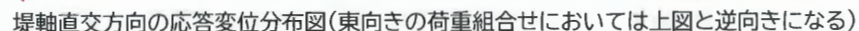
（2）バイリニア型地盤バネによる応答変位法に係る文献情報 2/2

- ② “液状化地盤中の杭基礎地中構造物における応答変位法の適用性検討”：溜幸生・野本高憲・赤石沢総光，土木学会第53回年次学術講演会 I-B387，pp. 774－775，平成10年10月．

液状化地盤中の杭基礎地中構造物に対する耐震検討を実施した論文である。動的有効応力解析コードFLIPによる解析と上限値を考慮した非線形地盤バネを用いた応答変位解析を実施し，応答変位解析の適用可能性について示されている。地盤反力係数は，本設計と同様に，最大相対変位発生時刻に着目し，同時刻の地盤の履歴曲線の割線剛性に基づき設定している。

(8) 応答変位入力時におけるバネ設定の妥当性 (5/5)

下図は、解析モデルにおける実際の応答変位入力状況の一例である。



4. 審査会合コメント⑮回答

4. 審査会合コメント⑮回答 コメント回答

【1360回審査会合コメント⑮】

No	コメント
⑮	● 地盤改良工事について、改良品質に対する不確かさが安全側に設計へ反映されていることがわかるように説明すること。 - 例1) 改良品質の不確かさが、安全側に設計へ反映されているか説明すること。 - 例2) 地盤改良（薬液注入）は構造物の直下や深い深度に施工するため、施工実績を示すとともに、その施工性が設計に影響を及ぼさないことを説明すること。 - 例3) 地盤改良（薬液注入）について、薬剤の種類、注入方法、改良対象の地質を示すとともに、その適用性を示して、設計上の想定に影響を及ぼさないことを説明すること。

回答概要

No	回答概要
⑮	【地盤改良（薬液注入）】 地盤改良の改良品質に対する不確かさの要因として抽出した地盤条件、施工条件、改良範囲、配合設計等について地盤改良における適用性を確認するとともに、要求品質を確保するための対策方針を整理した。また、施工の実現性について確認した。 【地盤改良の適用性】 ・ 地盤改良（薬液注入）の対象は礫・砂層とし、特殊シリカ系薬液を用いる浸透注入工法とした。 ・ 土質性状の調査により細粒分含有量は概ね浸透注入工法の適用限界となる40%以下であること、計画最大深度の地盤における限界注入速度試験により均一な改良体を形成する浸透注入が可能であることを確認した。 ・ 構造物の直下への施工法（注入孔配置）を図化し、計画範囲の改良が可能であることを確認した。 【要求品質を確保するための対策方針】 ・ 配合試験に用いる試料は保守的に液状化しやすい粒度調整試料を採用し、試験結果のばらつきを考慮して液状化強度比は平均-1σを用いて薬液濃度や施工後の改良品質の管理値を設定した。 ・ 薬液注入速度は限界注入速度試験結果の最小値である3.0ℓ/minとする。 ・ 薬液注入管の設置精度（ボーリングの削孔精度）を考慮し、地盤改良端に追加の地盤改良を行う。 【施工の実現性】 ・ 地盤改良（薬液注入）の既施工箇所の施工実績・試験施工結果から、本計画が実現可能であることを確認した。 【地盤改良（セメント系）】 掘削・置換工法においては、流動化処理土の強度のばらつきについて配合試験の結果を確認し、要求品質の確保が可能であることを確認した。 なお、既工認（貯留席の取付け護岸）で実施した高圧噴射攪拌工法においては、改良孔をラップ配置とすることや、改良材と土質で決定される強度を設計に反映することにより、改良径や一軸圧縮強度の要求品質を確保していることを確認した。 以上から、地盤改良（薬液注入、セメント系）の改良品質に対する不確かさに対し、設計条件が安全側となるような施工計画であることを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(1) 地盤改良の改良品質の不確かさの要因

防潮堤（鋼製防護壁）で計画している地盤改良（薬液注入，セメント系）について，改良品質の不確かさの要因を整理する。

地盤改良の適用性及び改良品質の不確かさの要因の確認事項

区分		地盤改良（薬液注入）	地盤改良（セメント系）	
工 法		浸透注入工法	掘削・置換工法	（既施工）高圧噴射攪拌工法
工法概要		対象地盤（砂・砂礫地盤）に薬液を浸透注入し，地盤を改質する。	改良範囲を掘削し，流動化処理土（セメント系地盤改良体）にて置き換える。	ボーリング孔より高圧で地盤改良材を噴射し，地盤を切削・攪拌し地盤を改良する。
要求品質		設計から得られた地震時の最大せん断応力比に対し，改良地盤の液状化強度比が上回る事	設計で用いた強度及び剛性以上	設計で用いた強度及び剛性以上
改良品質の不確かさの要因	改良材	非該当（工場生産された薬液であり，品質は安定）	非該当（工場生産されたセメントであり品質は安定）	非該当（工場生産されたセメント系改良材であり品質は安定）
	地盤改良体の耐久性	非該当（耐久性のある特殊シリカ系薬液を使用）	非該当（セメントによる固化であり安定的）	非該当（セメントによる固化であり安定的）
	地盤条件	地盤の不均一性（粒度分布，透水性等のばらつき）	非該当（掘削により計画範囲の地盤は撤去されるため地盤の不均一性の影響を受けない）	地盤の不均一性（土質，締り度）
	施工条件	施工条件（注入圧力，注入速度の妥当性）	非該当（掘削・置換工法であり特筆する制約はない）	非該当（護岸部の改良であり海側への逸走が想定されるが，海側は改良深度以深まで鋼矢板で囲われており，改良材の海側への逸走は防がれている）
	地下水による施工環境への影響	被圧水位および急な地下水位の勾配	非該当（掘削により計画範囲の地下水はなくなるため地下水の影響を受けない）	非該当（改良材を高圧で噴射する工法であり地下水の影響を受けない）
	改良範囲	大深度改良範囲の施工性，改良精度（改良範囲確保） 構造物の直下に対する施工性	非該当（掘削により改良範囲を直接確認可能）	非該当（改良深度は工法の適用範囲内であり深度による影響を受けない。改良径の不確かさは地盤条件にて確認）
	配合設計	液状化強度比と一軸圧縮強度の関係 一軸圧縮強度と薬液濃度の関係 シリカ含有量増分量と液状化強度比の関係	セメントの配合量と一軸圧縮強度の関係	非該当（土質に応じた改良材を選定し，その改良材により決定される強度を設計に採用している）

これらの地盤改良の適用性及び改良品質の不確かさの要因に対し，地盤改良の改良品質を確保するための工事計画（工法の適用性，配合設計・施工設計（試験施工含む））～品質管理（事後調査による改良効果の確認）について整理し，改良品質に対する不確かさが設計上の想定に影響を及ぼさないことを確認する。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

1. 地盤改良（薬液注入）

通常的地盤改良（薬液注入）で使用される薬液分類を下表に示す。

薬液の分類¹⁾

懸濁型 —— セメント系等 溶液型 水ガラス系 アルカリ系 シリカゾル系 特殊シリカ系 非アルカリシリカゾル 活性シリカ 超微粒子シリカ	本設工事，仮設工事
	仮設工事
	本設工事

①仮設工事：掘削等の施工時の補助工法とし，湧水や地盤の崩壊等のトラブル防止のための地盤改良

②本設工事：耐久性薬液を使用し，所定の品質を満たす永続性のある土構造物を構築する地盤改良

液状化対策の地盤改良（薬液注入）は，事前混合処理工法と浸透注入工法があり，主な特徴を下表に示す。防潮堤（鋼製防護壁）の地盤改良（薬液注入）は，浸透注入工法を適用する。当工法は，敷地内の施設において周辺地盤の液状化対策として採用され，施工実績がある。

液状化対策原理による地盤改良（薬液注入）工法の分類

工法名	概 要	備 考
事前混合処理工法 ²⁾	・懸濁型のセメント系薬液を使用。 ・土粒子間の接触点をセメント等の固化材により固結する。 ・土粒子間の間隙水は残留する。	・地盤の過剰間隙水圧の発生や伝播が起こる。 ・想定以上の地震時には，未改良土より脆性が高く，液状化が発生する。
浸透注入工法 ³⁾	・溶液型（シリカゾル系，特殊シリカ系）薬液を使用。 ・土粒子間の間隙の水を薬液に置換え。 ・薬液のゲル状の固化に伴う付着により土粒子を固結する。	・改良地盤では過剰間隙水圧が発生し難く，改良範囲外地盤からの過剰間隙水圧の伝播がない。 ・想定以上の地震時でも，液状化は発生しない。

注記：1)浸透固化処理工法技術マニュアル，（財）沿岸開発技術研究センター，p.3，平成15年3月

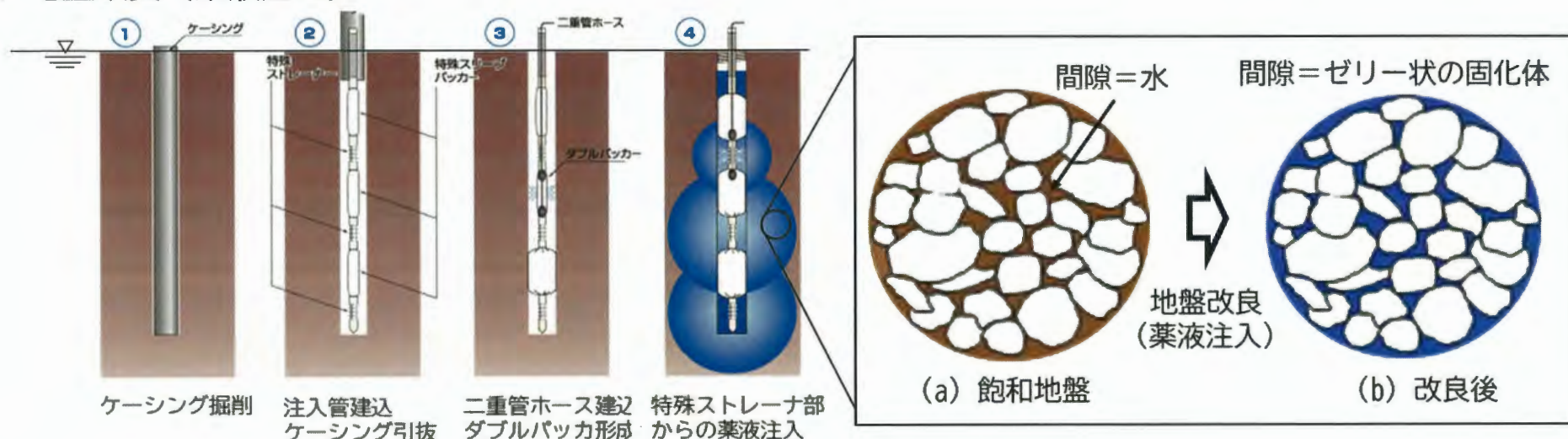
2)善功企，山崎浩之，佐藤泰：事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性，港湾技術研究所報告，Vol.29，No.2，pp.85-117，6.1990

3)山崎浩之，前田健一，高橋邦夫，善功企，林健太郎：溶液注入固化材による液状化対策工法の開発，港湾技研資料，No.005，pp.3-29，6.1998

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

1. 地盤改良（薬液注入）



地盤改良（薬液注入）施工概念図（浸透注入工法）

➤ 注入薬液

薬液は、工場生産され品質が安定しており、本設工事に適用され、長期耐久性¹⁾および液状化対策²⁾として実績が確認されている特殊シリカ系薬液を使用する。また、当薬液は敷地内施設において周辺地盤の液状化対策として使用した実績がある。

溶液型シリカ系グラウトの耐久性の総合評価³⁾

注入材	ゲル化原理	シリカの溶脱	体積変化	強度	止水性	環境性	耐久性	総合
アルカリ系	部分中和	大	大	低下あり	低下あり	△	×	×
シリカゾル系	中和・ゾル化	ほとんどない	大	低下あり	低下あり	△	△	○
活性シリカコロイド系・ 活性複合シリカ系	脱アルカリ・ コロイド化	ほとんどない	小	低下なし	低下なし	◎	◎	◎

注記：1)米倉亮三，島田俊介：長期耐久性地盤注入工法の最近の動向，基礎工，地盤注入開発機構，Vol43，No.10，pp.1-9，2015.10.

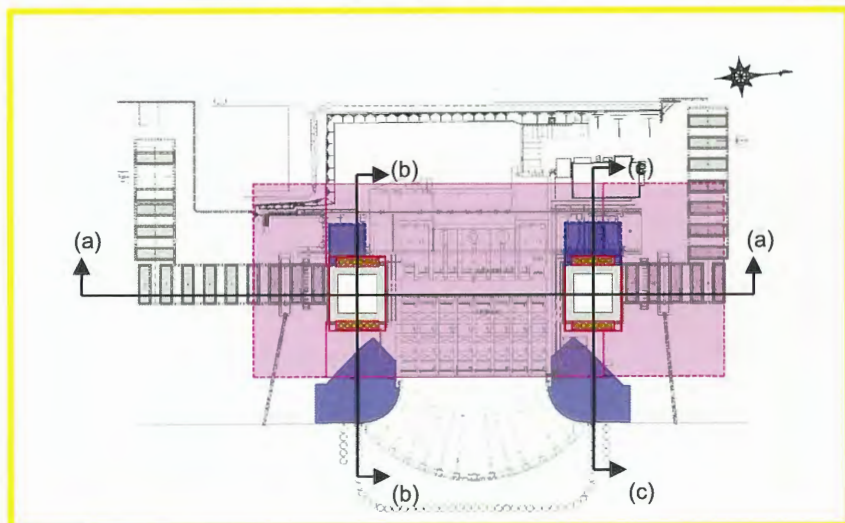
2)岡田和成，木下圭介，藤井雄一：超多点注入工法（結束細管多点注入工法）=構造物近傍・直下の浸透注入工法による地盤改良=，基礎工，地盤注入開発機構，Vol43，No.10，pp.22-24，2015.10

3)恒久グラウト注入工法技術マニュアル，地盤注入開発機構，2019年9月

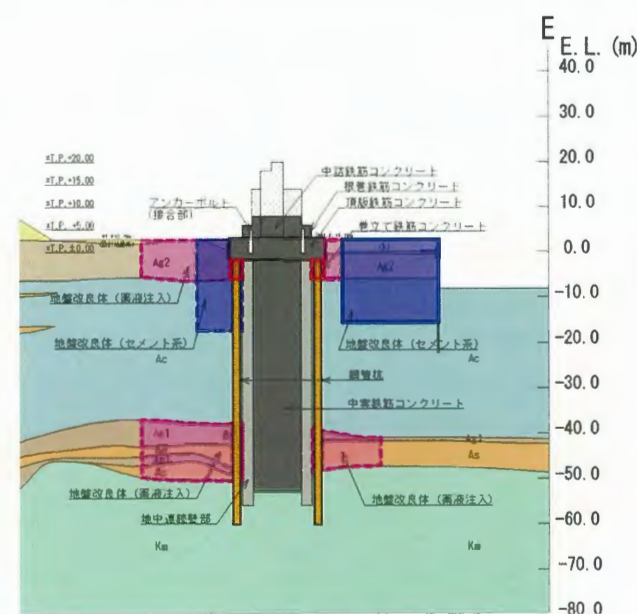
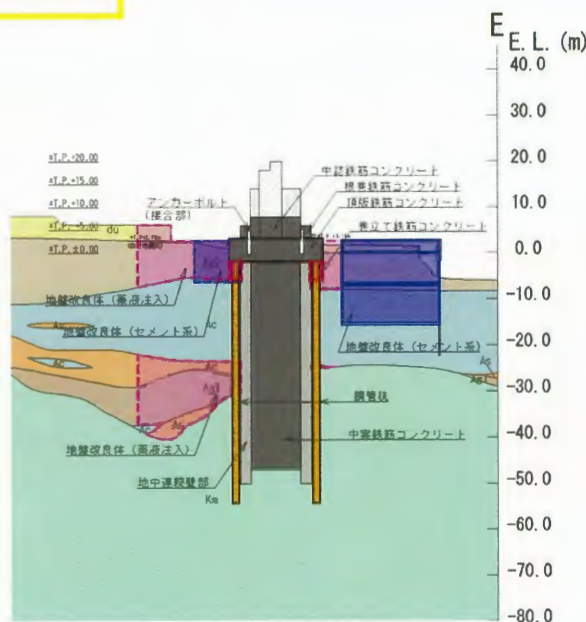
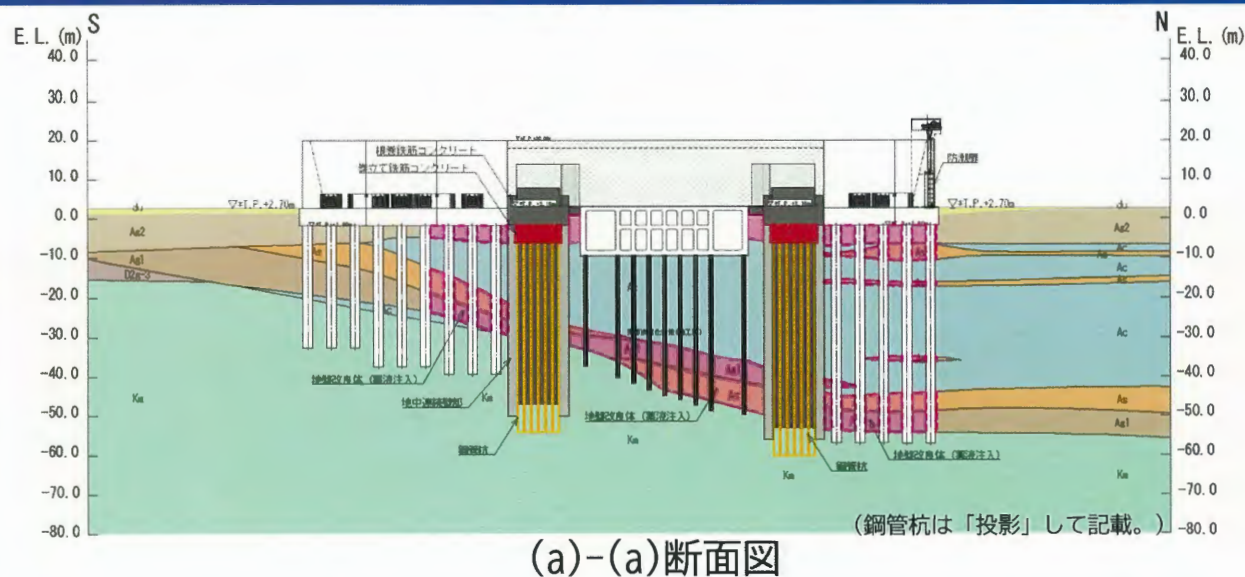
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

2. 地盤改良（薬液注入，セメント系）範囲



- 凡 例
- 既実施地盤改良体（セメント系）
 - 地盤改良体（セメント系）
 - 既実施地盤改良体（薬液注入）
 - 地盤改良体（薬液注入）
 - 鋼管杭
 - 巻立て鉄筋コンクリート



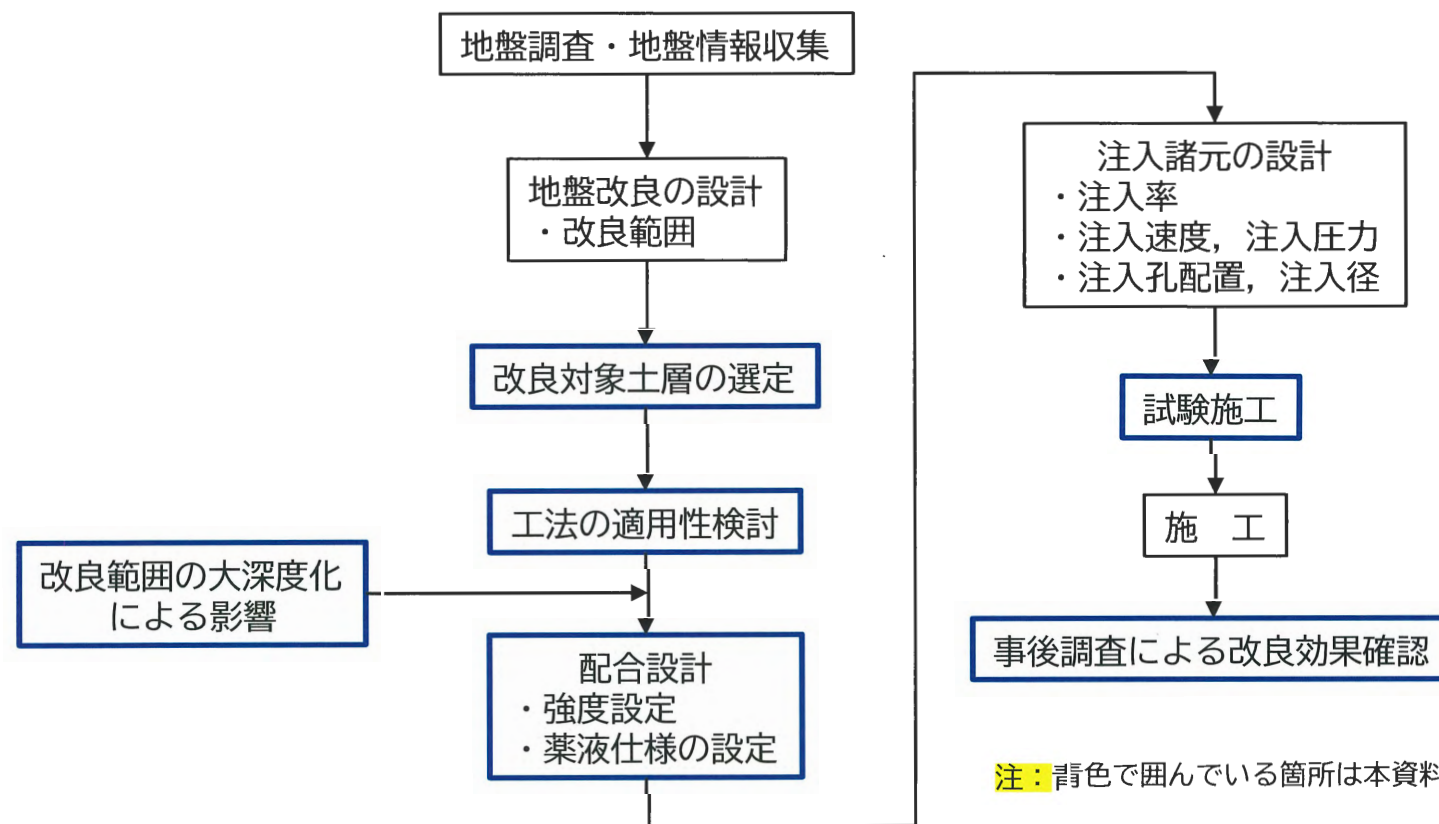
地盤改良（セメント系，薬液注入）範囲

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

液状化対策の浸透注入工法の設計は、下図の設計フローに従い行う。

次頁以降に、設計フローの各項目のうち、改良対象土層の選定、工法の適用性、配合設計、試験施工の検討結果について示す。また、同一工法で地盤改良（薬液注入）を実施した既施工箇所および試験施工での事後調査による改良効果確認について示す。



地盤改良（薬液注入）設計フロー

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(1) 地盤改良（薬液注入）対象土層の抽出

地盤改良（薬液注入）は、液状化対策として地下水以深の飽和している砂・礫質土を対象とする。

既工認（補足－340－1【地盤の支持性能について】）では、道路橋示方書（道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成24年3月）で対象としている土層を基本とし，さらに，道路橋示方書では検討対象外としている更新世および現地盤面から－20m以深の土層も抽出対象としている。

【道路橋示方書の液状化検討対象土層】

- ①地下水位が現地盤面から－10m以内であり，かつ現地盤面から－20m以内の飽和土層
- ②細粒分含有率FCが35%以下，またはFCが35%超えても塑性指数 I_p が15以下の土層
- ③平均粒径 D_{50} が10mm以下で，かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下である土層

上記の既工認での液状化検討対象層抽出方針に基づき，液状化対策の地盤改良（薬液注入）は，Ag2層，As層，Ag1層を対象とする。

防潮堤（鋼製防護壁）周辺地盤の地盤改良（薬液注入）対象土層抽出結果

地質記号	層相	液状化検討対象土層	地盤改良（薬液注入）対象土層	備考
Ag2	礫	○	○	G. L. -20m以浅に分布
Ac	粘土	対象外	対象外	対象外
As	砂	○	○	G. L. -20m以深に分布する範囲についても検討対象とする
Ag1	礫	○	○	G. L. -20m以深に分布する範囲についても検討対象とする

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(2) 工法の適用条件

浸透注入工法の適用性は、均質な改良体が形成できる薬液の浸透注入について地盤条件（細粒分含有率，透水性），施工条件（注入圧力，注入速度）から施工性検討を実施するものである。

浸透注入工法において留意すべき条件を以下に示す。

【地盤条件】

①細粒分含有率FC

- ・適用限界は $FC \leq 40\%$ の地盤を対象とする。

（ただし、 $FC > 25\%$ の土層においては、試験施工を実施して注入径，注入速度を設定する）

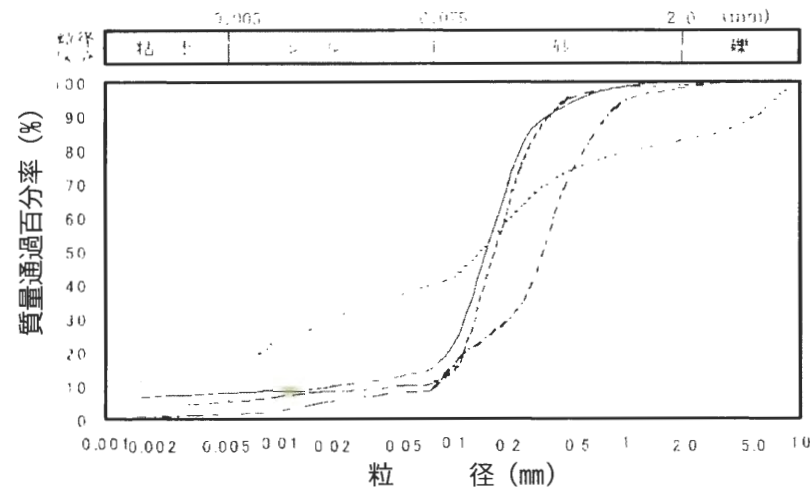
②粘性土が互層状に分布する地盤

③貝殻混じり地盤

- ・貝殻に含まれているカルシウム成分によりゲルタイムに影響を与える。

④薬液の逸走が懸念される礫混じり，または礫地盤

⑤薬液の逸走や拡散が懸念される地下水の流れが速い地盤



浸透注入工法施工実績における代表的な粒度分布例

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

（2）工法の適用条件

地盤条件については、下図に示す改良範囲周辺においての調査孔のデータを整理するとともに、粒度試験の結果より下記の森田¹⁾提案式を適用した地盤の透水係数より検討を実施する。

$$\kappa = 0.014 \times D_{30}^{1.2} \times U_c^{-1} \times A^{-2}$$

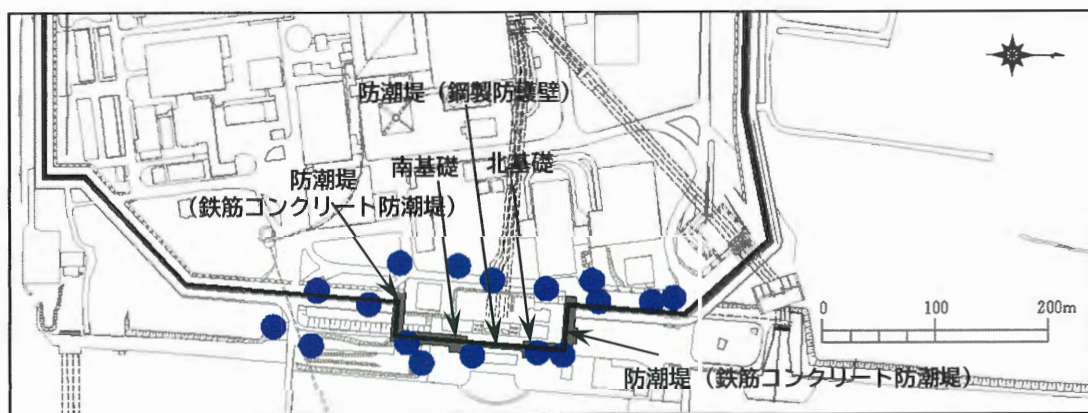
ここで、 κ は透水係数（m/sec）、 D_{30} は試料30%通過粒径（mm）、 U_c は均等係数、 A はN値から下表により設定した締まり度ランク（テルツァッギーとパックの区分を適用）である。

【施工条件】

注入圧力、注入速度は、地盤の限界注入速度試験、または施工実績（細粒分含有率と注入速度の関係）より求めても良いとしている²⁾。

防潮堤（鋼製防護壁）の地盤改良（薬液注入）においては、既施工箇所より深い土層も対象としているために、限界注入速度試験を実施し、注入圧力および注入速度を設定することとする。

次頁以降に、前述した地盤条件および施工条件の留意点を踏まえた浸透注入工法の適用性について示す。



● 防潮堤（鋼製防護壁）周辺地盤調査孔

防潮堤（鋼製防護壁）周辺地盤調査孔

締まり度ランク³⁾

N値	締まり度	ランク値
0～4	非常に緩い	1
4～10	緩い	2
10～30	中位	3
30～50	密	4
50以上	非常に密	5

注記：1) 森田悠紀雄，坪田邦治，西垣誠，小松満：粒度分布と間隙率を考慮した土の透水係数の推定方法，土と基礎，地盤工学会，53-7，pp. 5～7，2005

2) 浸透固化処理工法技術マニュアル，財沿岸開発技術研究センター，p. 41，平成15年3月

3) 地盤調査法，社団法人地盤工学会，p. 201

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

（2）工法の適用条件

➤ 地盤改良（薬液注入）の概要及び改良対象土層に対する適用性

地盤改良の改良品質に対する不確かさの要因のうち、地盤改良（薬液注入：浸透注入工法）の適用性に係る項目について、地盤改良（薬液注入：浸透注入工法）が適用可能であることを確認する。

地盤改良（薬液注入：浸透注入工法）の適用性に関する確認結果

不確かさの要因	詳細	地盤改良（薬液注入：浸透注入工法）の適用性確認結果
地盤，施工条件	地盤の不均一性（粒度分布）	4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針にて整理・検討
	地盤の不均一性（細粒分含有率）	【適用可能】…P73～P75（3）工法の適用性検討結果（地盤調査）参照 各土層の粒度分布を確認した結果，改良対象土層は，概ね浸透注入工法の適用範囲である細粒分含有率であることを確認
	地盤の不均一性（透水性のばらつき）	4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針にて整理・検討
	施工条件（注入圧力，注入速度の妥当性）	【適用可能】…P76（4）高静水圧・高拘束圧下での施工（限界注入速度試験）参照 計画最大深度の地盤にて限界注入速度試験を実施し，均一な改良体が形成できる浸透注入が可能であることを確認
地下水による施工環境への影響	被圧水位および急な地下水位の勾配	【適用可能】…P77（5）工法の適用性検討結果（地下水）参照 サイト内の地下水位分布を確認し，被圧水位および急な地下水位の勾配がないことを確認
改良範囲	構造物の直下に対する施工性	【適用可能】…P78，P79（6）構造物直下に対する施工性 参照 構造物の直下への施工法（注入孔配置）を図化し，計画範囲の改良が可能であることを確認
	大深度改良範囲の改良（施工性）	【適用可能】…P103 5. 事後調査（5）試験施工での事後調査結果 参照 計画と同じ大深度の地盤に対し試験施工を実施し，計画どおり施工可能であることを確認
	大深度改良範囲の改良精度（改良範囲確保）	4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針にて整理・検討
配合設計	液状化強度比と一軸圧縮強度の関係他	4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針にて整理・検討

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

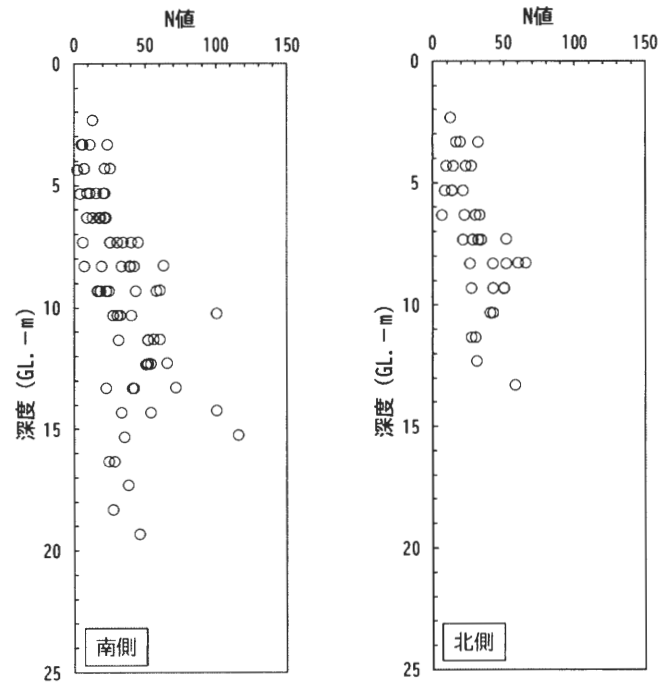
（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

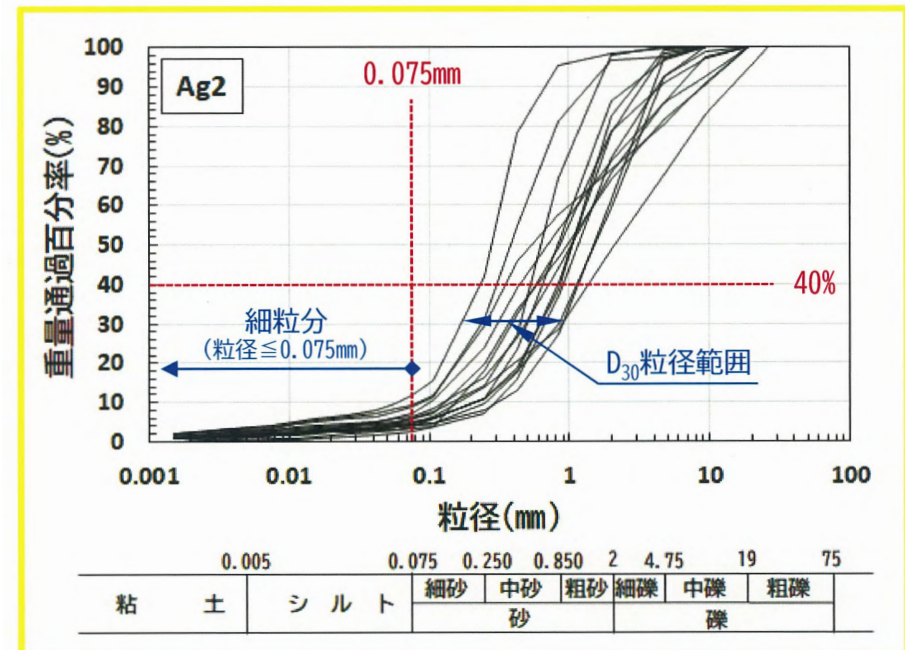
（3）工法の適用性検討結果（地盤調査）

防潮堤（鋼製防護壁）周辺地盤の調査孔のデータを整理した。各土層の結果を以下に示す。

【Ag2層】



防潮堤（鋼製防護壁）近傍調査孔のN値（Ag2層）



粒度試験結果（Ag2層）

- ・ Ag2層は、南側において分布深度が深くなるものの、同じ深度でのN値は概ね同等と評価できる。
- ・ 粒度試験の結果、細粒分（粒径 $\leq 0.075\text{mm}$ ）含有率FCは、全調査孔で10%程度以下である。
- ・ 均等係数（ $U_c = D_{60}/D_{10}$ 、 D_{60} は試料の60%通過粒径、 D_{10} は試料の10%通過粒径）は2.3～21.1（粒度の配合は均一～比較的良好）である。
- ・ 均等係数 U_c が小さい範囲では砂分（粒径 $\leq 2\text{mm}$ ）が卓越となっている。
- ・ 地盤の透水性に影響する D_{30} 粒径は、 $0.2\text{mm} \sim 1\text{mm}$ であり、推定透水係数は $2.4 \times 10^{-3} \sim 5.9 \times 10^{-2} \text{ (cm/sec)}$ が得られた。

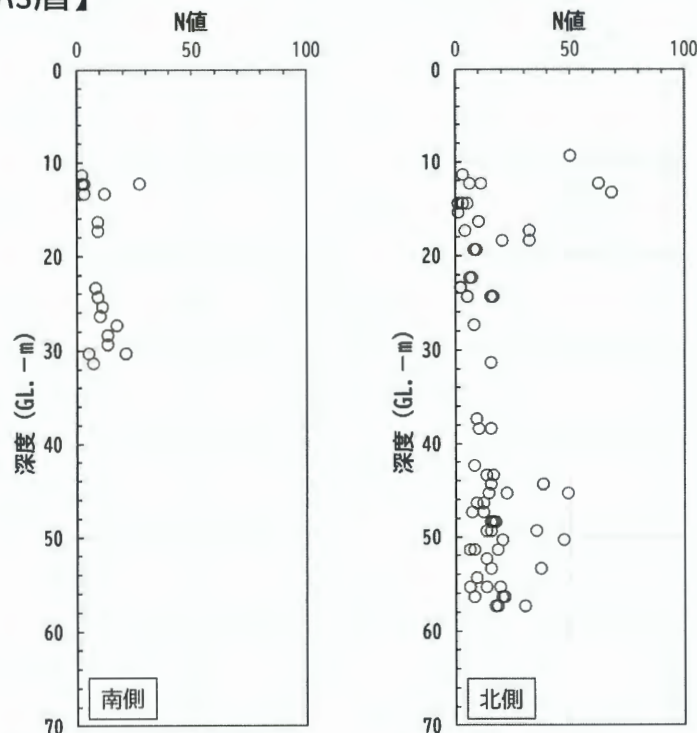
・ N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により分布範囲による土性の変化は小さく、均一な土層と判断した。
・ 改良範囲及びその周辺の調査孔の細粒分含有率FCは40%以下であり、浸透注入工法が適用可能と判断した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

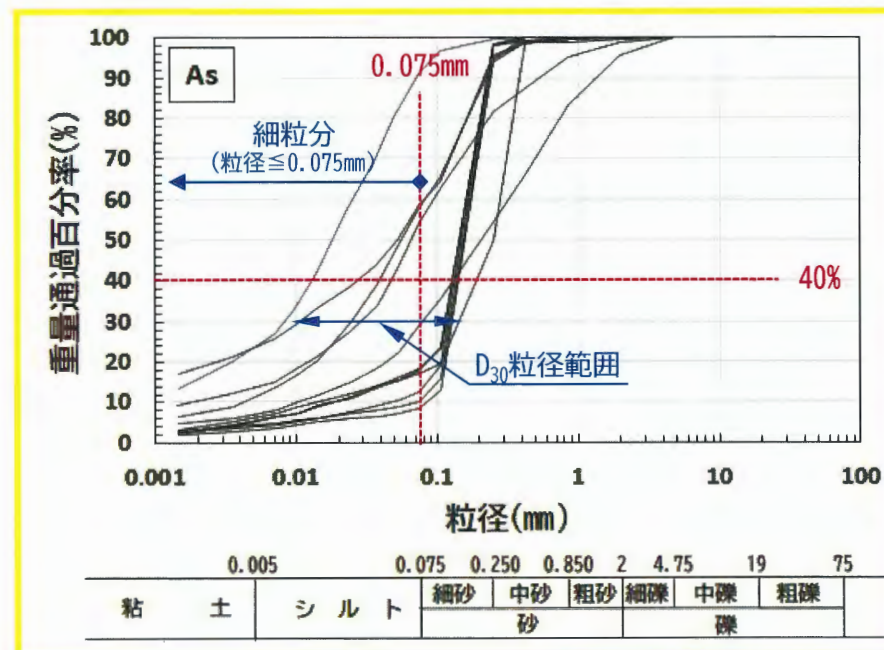
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計 （3）工法の適用性検討結果（地盤調査）

【As層】



防潮堤（鋼製防護壁）近傍調査孔のN値（As層）



粒度試験結果（As層）

- ・北側のAs層の分布深度が深くなるものの、同じ深度でのN値は概ね同等と評価できる。
- ・粒度試験の結果、細粒分（粒径 $\leq 0.075\text{mm}$ ）含有率FCは調査孔により40%以上の箇所があり、ばらつきが大きい。
- ・均等係数（ $U_c = D_{60}/D_{10}$ 、 D_{60} は試料の60%通過粒径、 D_{10} は試料の10%通過粒径）は、2～40（粒度の配合は、均一～比較的良好）である。
- ・地盤の透水性に影響する D_{30} 粒径は $0.0082 \sim 0.18\text{mm}$ であり、推定透水係数は $9 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-2} \text{ (cm/sec)}$ のばらつきが大きい値が得られた。

・N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により、粒度分布、細粒分含有率は分布範囲により変化する不均一な土層と判断した。

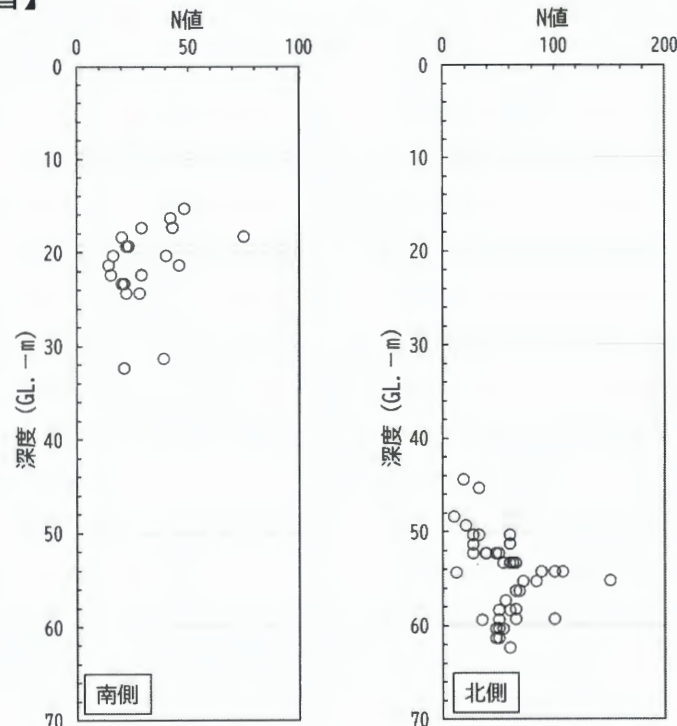
・改良範囲及びその周辺の調査孔の細粒分含有率FCは粒度分布のばらつきが大きく、一部に40%以上の箇所があるものの、これらに対しても注入仕様の適切な設定により適用可能※とされており、浸透注入工法の中でも注入間隔が小さく・低注入速度で着実に浸透注入を行う工法を採用することで適用可能と判断した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

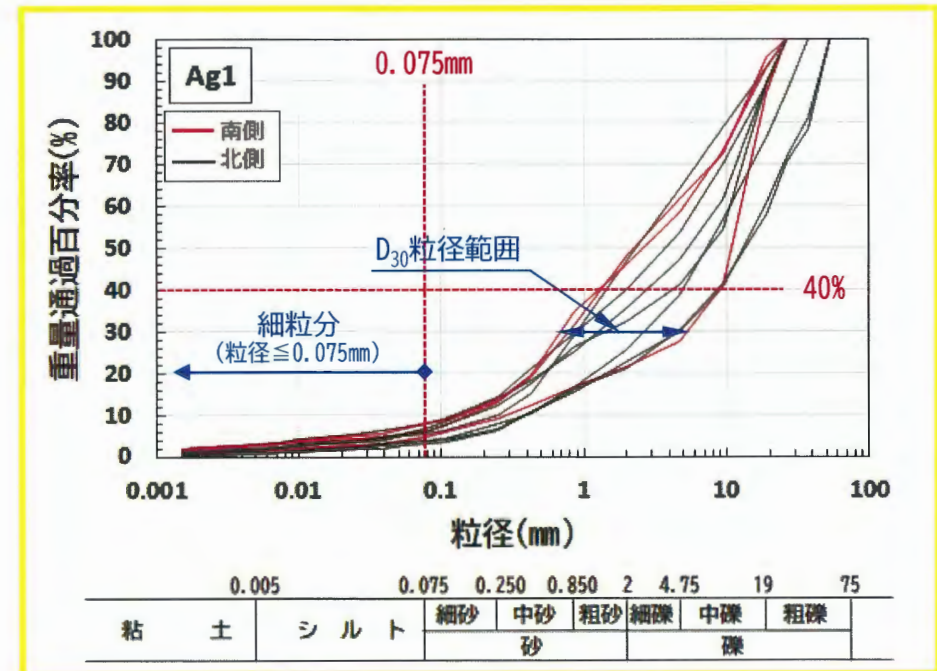
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計 （3）工法の適用性検討結果（地盤調査）

【Ag1層】



防潮堤（鋼製防護壁）近傍調査孔のN値（Ag1層）



粒度試験結果（Ag1層）

- ・ Ag1層の分布深度は南側と北側で異なり、N値は土被り圧が大きくなる北側が大きくなっている。
- ・ 粒度試験の結果、北側と南側の粒度分布の差はなく、細粒分（粒径 $\leq 0.075\text{mm}$ ）含有率FCは10%以下である。
- ・ 均等係数（ $U_c = D_{60}/D_{10}$ ）は、おおむね15～65であり、幅広い粒径を有する土質である。
- ・ 地盤の透水性に影響する粒径 D_{30} は $0.7\text{mm} \sim 5.4\text{mm}$ の範囲であり、推定透水係数は南側で $1.5 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ ，北側で $7.6 \times 10^{-3} \sim 8.9 \times 10^{-4} \text{ (cm/sec)}$ であり、同じ施工範囲での透水性の変化は小さい。

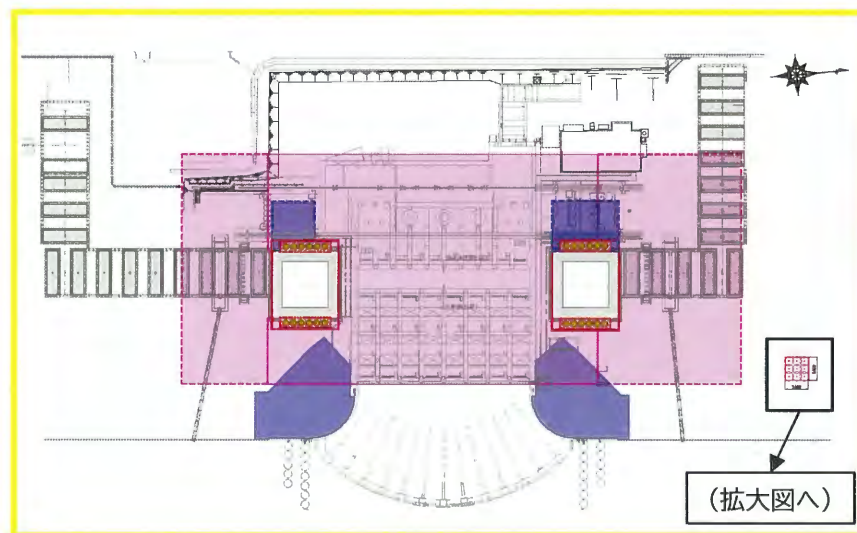
- ・ N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により、南側と北側の分布深度は異なるものの、均一な土層と判断した。
- ・ 改良範囲及びその周辺の調査孔の調査結果は幅広い粒径を有する土質と示されたが細粒分含有率FCは40%以下であり、浸透注入工法が適用可能と判断した。また、北側のN値が比較して大きくなっているものの、同範囲の透水性の変化は小さく浸透注入の施工に支障はない。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

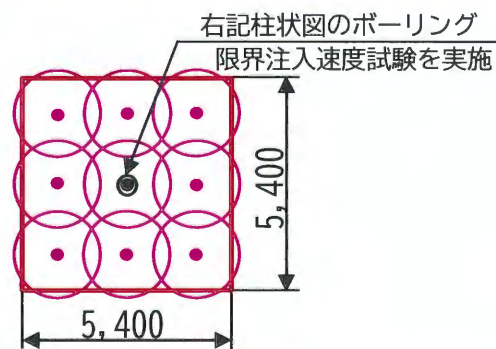
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(4) 高静水圧・高拘束圧下での施工（限界注入速度試験）

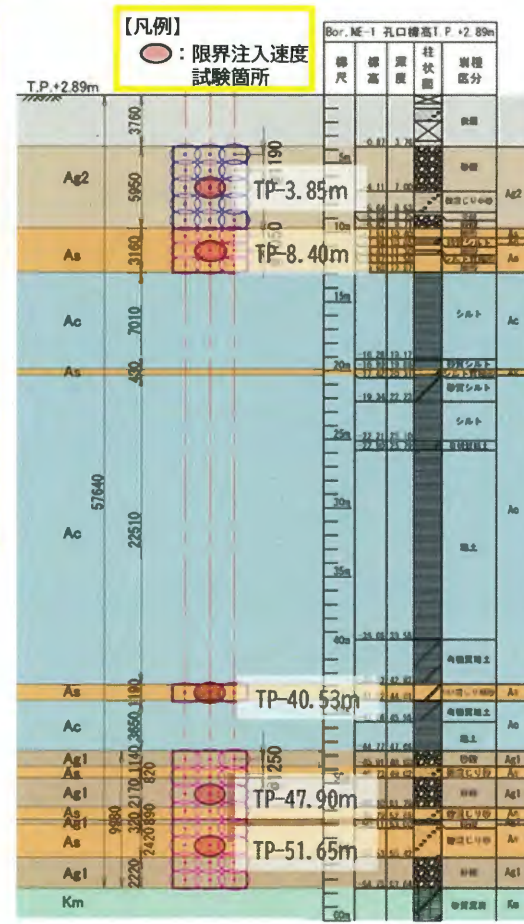


(拡大図へ)

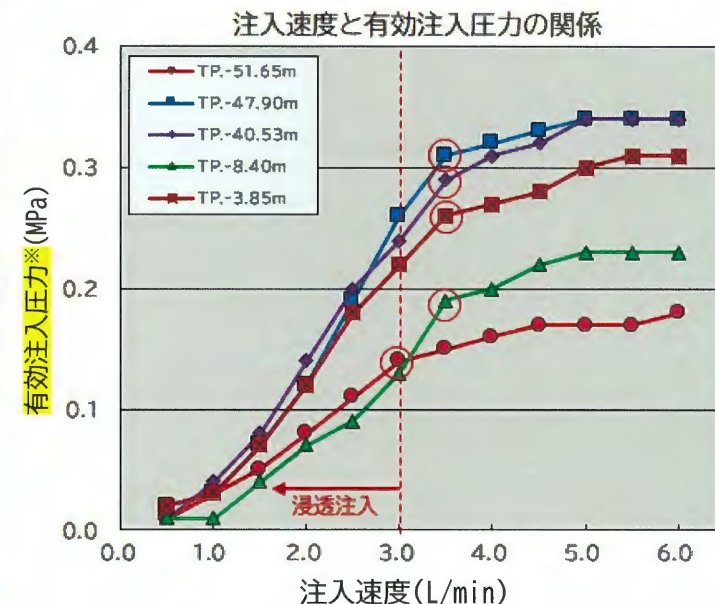


(拡大図)

試験施工実施箇所位置



限界注入速度試験箇所の地盤状況



原地盤での限界注入速度試験結果

※有効注入圧力：注入圧力から当該箇所の静水圧を差し引いた値

- 計画最大深度の地盤にて限界注入速度試験を実施し、均一な改良体が形成できる浸透注入が可能であることを確認した。既施工箇所より深い改良対象土層の限界注入速度試験で得られた、均一な改良体が形成できる浸透注入の注入圧力、注入速度の施工条件を施工に反映し、改良品質の不確かさの要因に対する対応方策とした。

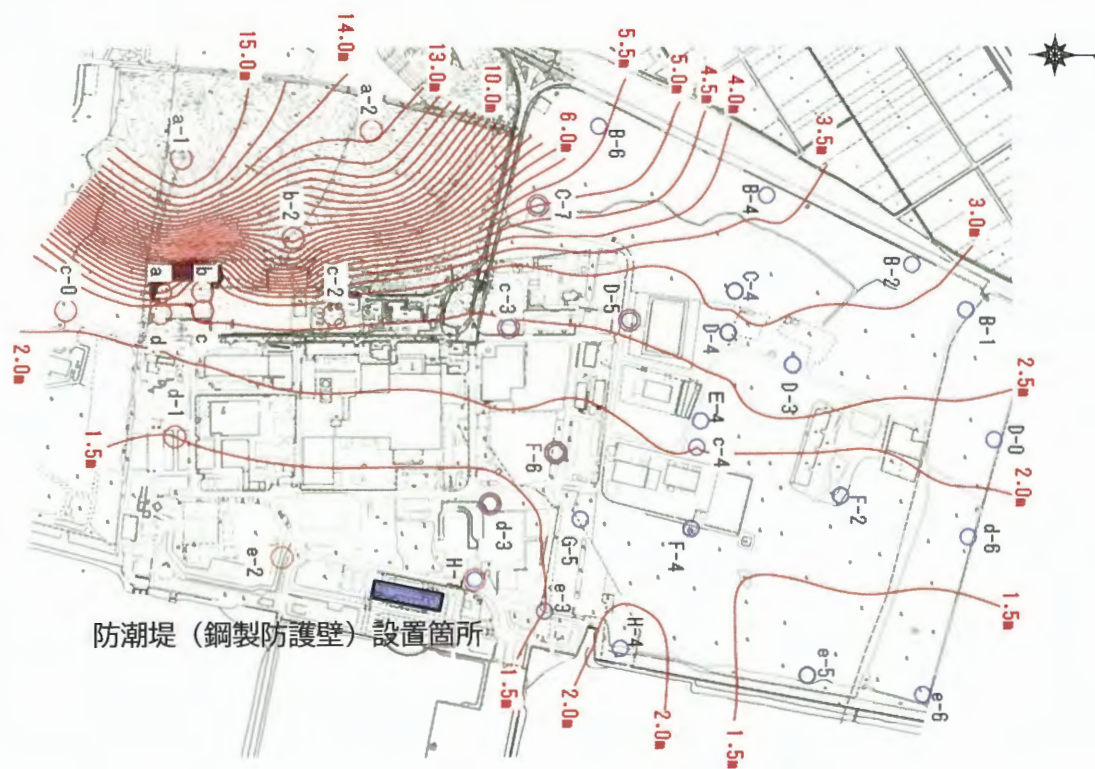
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(5) 工法の適用性検討結果（地下水）

敷地の地下水位観測に基づき、観測最高水位（平成29年6月）コンター図を以下に示す。防潮堤（鋼製防護壁）設置箇所の範囲での地下水は、海水面と周辺地下水位T.P. +1.5mの等高線との間の流れであり、陸部から海への緩やかな流れになっている。また、Ac層（粘性土）下部に分布するAg1層、As層においては、地下水位の計測データから被圧水位は確認されていない。



観測最高地下水位コンター図

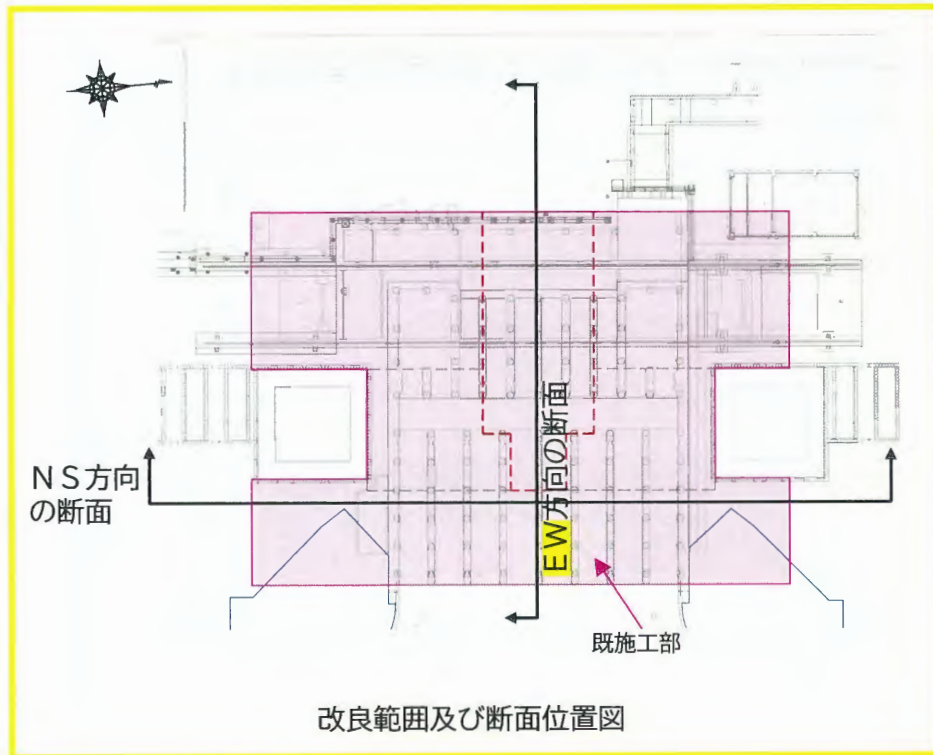
- ・ 以上から、薬液注入を阻害、または薬液が逸走するような急な水位勾配および被圧水位はないことから地盤改良の品質に影響を与えることはなく、浸透注入工法が適用できると判断した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

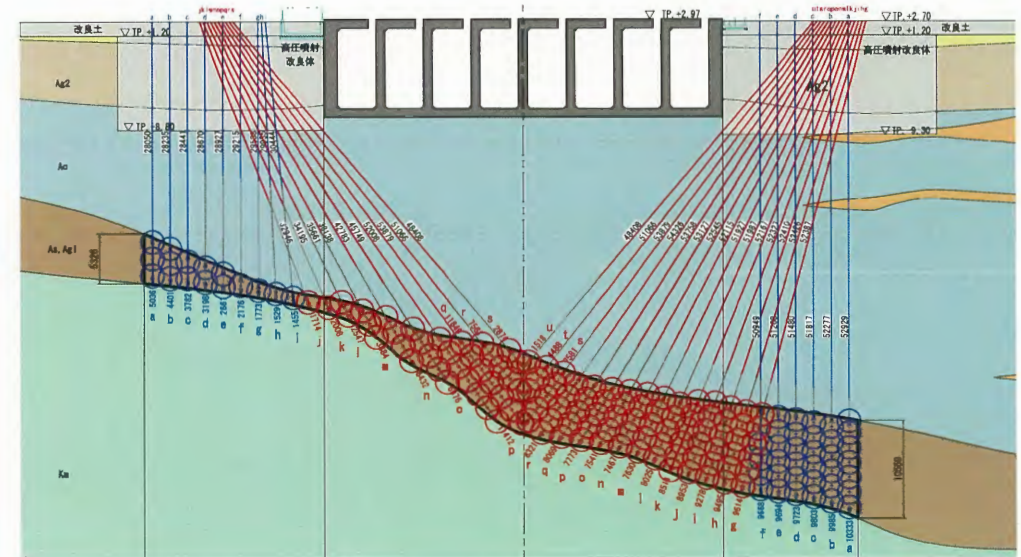
（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

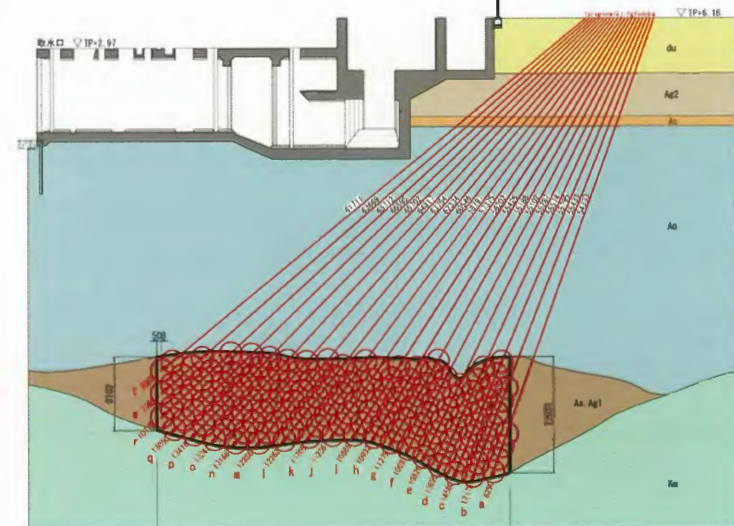
（6）構造物直下に対する施工性
既施工部の施工実績を以下に示す。



青線：鉛直ボーリング
赤線：斜めボーリング



NS方向の断面



EW方向の断面

地盤改良（薬液注入）の配置

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

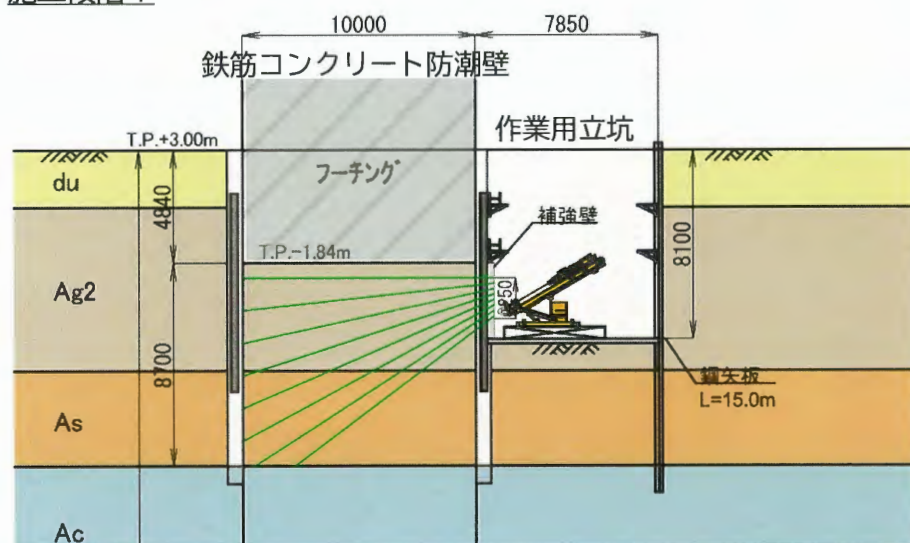
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(6) 構造物直下に対する施工性

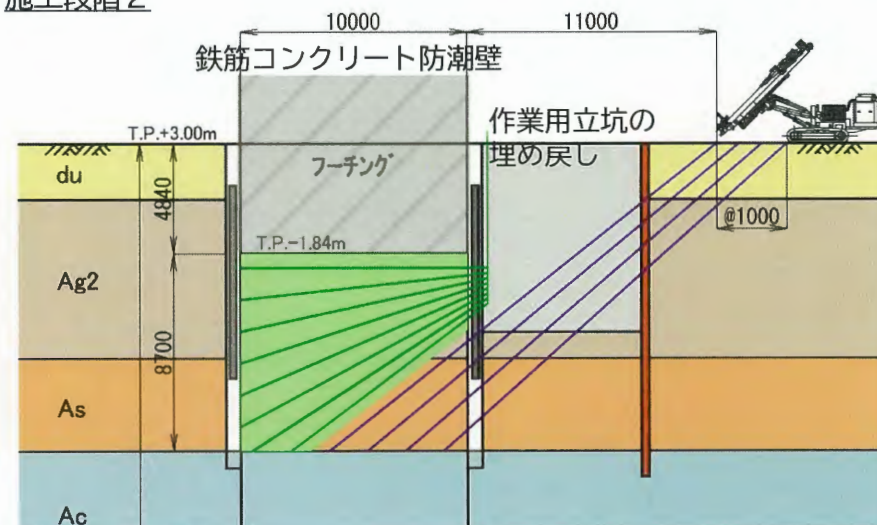
追加範囲の構造物の直下への施工法（注入孔配置）を図化し、計画範囲の改良が可能であることを確認した。

施工段階1



改良範囲の側方に作業用立坑を設置し、立坑内より水平・斜め方向に地盤改良を実施

施工段階2



施工段階1完了後、作業用立坑を埋戻し当該箇所を通過するように斜め方向に地盤改良を実施

構造物直下の地盤改良の施工方法の例

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

➤ まとめ

1) 改良対象土層

礫質土Ag2層，Ag1層，砂質土As層であり，（道路橋示方書では検討対象外としている）G. L. -20m以深に分布する各土層も改良対象とした。

2) 地盤の不均一性（細粒分含有量FC）による施工性

改良範囲及び周辺の調査孔のAg2層，As層，Ag1層の細粒分含有量FCは，概ね浸透注入工法の適用限界となる40%以下である。なお，As層は粒度分布のばらつきが大きく，一部にFCが40%以上の箇所があるものの注入仕様の適切な設定（注入間隔が小さく，低注入速度）で着実に浸透注入を行う工法を採用することから浸透注入は適用可能と判断した。

3) 高静水圧・高拘束圧下での施工性

計画最大深度の地盤にて限界注入速度試験を実施し，均一な改良体が形成できる浸透注入が可能であることを確認した。

4) 地下水（水位勾配と被圧水位）による施工性

薬液注入を阻害，または薬液が逸走するような急な水位勾配および被圧水位はない。

5) 構造物の直下に対する施工性

構造物の直下への施工法（注入孔配置）を図化し，計画範囲の改良が可能であることを確認した。

以上より，防潮堤（鋼製防護壁）の改良範囲での浸透注入工法は適用可能であることを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

地盤改良の改良品質に対する不確かさの要因に対し、施工計画段階（配合試験・施工設計）及び施工段階で改良地盤における要求品質を確保するための対策・方策を実施することで、改良品質に対する不確かさが設計の想定に影響を及ぼさないことを確認する。

改良品質に対する不確かさの要因及び要求品質を確保するための対策方針

不確かさの要因	詳細	要求品質を確保するための対策方針
地盤, 施工条件	地盤の不均一性（粒度分布）	（配合設計）…P85, P86（1.3）配合試験用の試料採取 参照 配合試験に用いる試料は、設置変更許可及び既工認時の各土層の液状化強度試験実施箇所の粒度分布（液状化しやすい粒度分布）に合わせた粒度調整試料を採用
	地盤の不均一性（細粒分含有率）	適用性にて確認済
	地盤の不均一性（透水性のばらつき）	（施工設計）…P97（2.2）地盤の透水性の不均一性（限界注入速度試験）参照 薬液注入速度は限界注入速度試験結果の最小値である3.0ℓ/minを採用
	施工条件（注入圧力, 注入速度の妥当性）	適用性にて確認済
地下水による施工環境への影響	被圧水位および急な地下水位の勾配	適用性にて確認済
改良範囲	構造物の直下に対する施工性	適用性にて確認済
	大深度改良範囲の改良（施工性）	適用性にて確認済
	大深度改良範囲の改良精度（改良範囲確保）	（施工設計）…P96（2.1）大深度改良範囲の改良精度（改良範囲の確保）参照 注入管の設置精度（ボーリングの削孔精度）の実績に基づき、地盤改良の配孔は改良範囲外縁部に施工誤差を考慮した配置を採用
配合設計	液状化強度比と一軸圧縮強度の関係 一軸圧縮強度と薬液の濃度の関係 シリカ含有量増分量と液状化強度比の関係	（配合設計）…P82～P95（1）配合設計 参照 薬液の濃度を変えた供試体による一軸圧縮試験、液状化試験、シリカ含有量増分量の相関においては、品質目標である液状化強度比は試験結果のばらつきを考慮した平均-1σの液状化強度比との関係を採用

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

（1）配合設計

配合設計フローおよび改良地盤に必要とする強度および薬液配合設定について示す。

①液状化検討対象地盤を非液状化地盤とした2次元有効応力解析（解析コードF L I P）を実施し，各層の最大せん断応力比 $L_{max}(=\tau/\sigma'_{m0})$ を求める。

②液状化安全率（ R_{L20}/L_{max} ）を1とし改良後の地盤の液状化強度比を設定する。

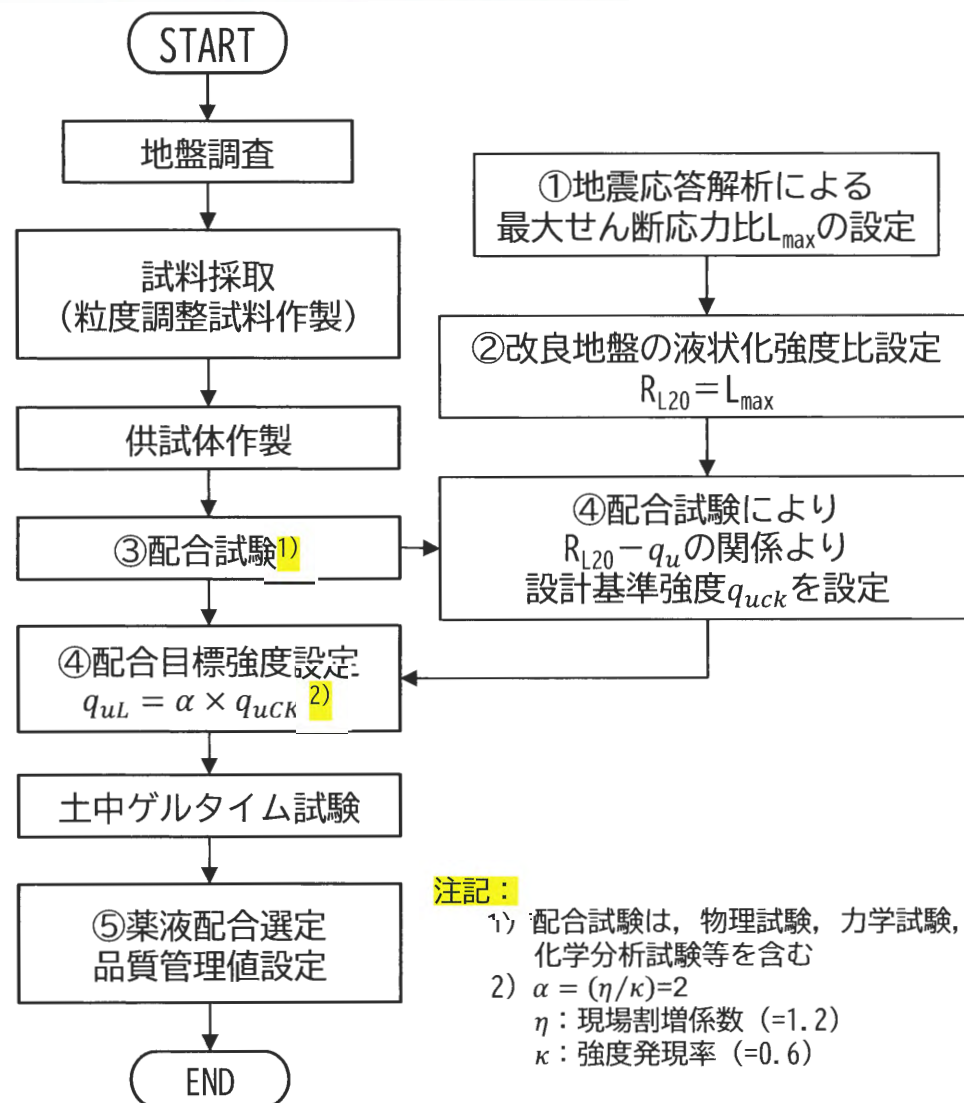
③配合試験による液状化強度比と一軸圧縮強度，薬液濃度と一軸圧縮強度との関係をまとめる。

④最大せん断応力比 L_{max} に相当する一軸圧縮強度（設計基準強度 q_{uck} ）及び配合目標強度(q_{uL})を設定する。

$$q_{uL} = \eta \cdot q_{uck} / \kappa = 2 \cdot q_{uck}$$

η ：現場割増係数（=1.2）， κ ：強度発現率（=0.6）

⑤配合試験結果から配合目標強度を包含する試験の最小薬液濃度ケースを注入薬液濃度とする。



配合設計フロー※

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

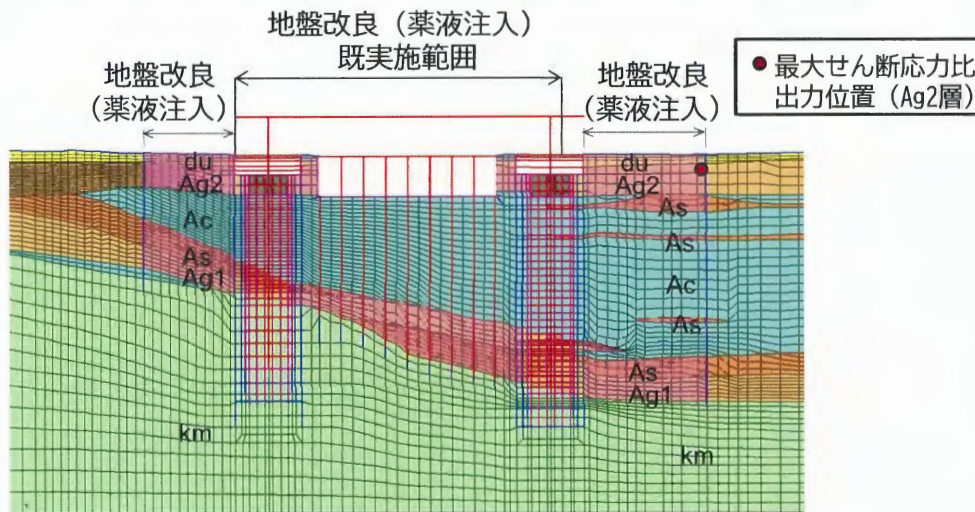
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

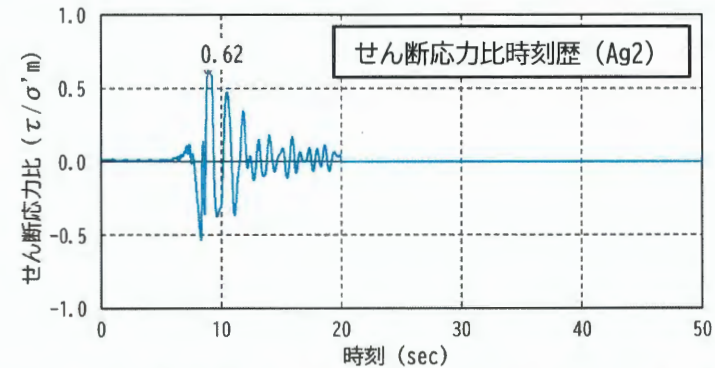
(1) 配合設計

(1.1) 最大せん断応力比 (L_{max})の算定

①改良後の地盤においての地震応答解析を実施し、各土層内に発生するせん断応力比の時刻歴波形から最大せん断応力比を抽出する。



2次元FLIP解析モデル



地盤のせん断応力時刻歴データから発生する最大せん断応力比 L_{max} 算出。

$$L_{max} = \tau / \sigma'_{m0} \quad , \quad \sigma'_{m0} = (\sigma'_v + 2\sigma'_h) / 3$$

σ'_{m0} : $t=0$ における初期平均有効主応力

σ'_v, σ'_h : 各時刻歴での鉛直, 水平成分の有効主応力

②液状化安全率 F_L を1とし、改良後の地盤の液状化強度比 R_{L20} を設定する。

$$F_L = (C_w \times R_{L20}) / L_{max} = 1 \quad (C_w \div 1)$$

$$R_{L20} = L_{max}$$

2次元FLIP解析による地盤内の最大せん断応力比

層区分	最大せん断応力比 L_{max}
Ag2	0.62
As	0.65
Ag1	0.58

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.2) 設計基準強度および配合目標強度

浸透注入工法では、一軸圧縮強度 q_u と液状化強度比 R_{L20} は薬液濃度とともに増加し、一軸圧縮強度 q_u と液状化強度比 R_{L20} の間にも有為な関係があることから、配合試験結果から液状化強度比（最大せん断応力比）に相当する一軸圧縮強度を改良後の地盤に必要とする強度として設計基準強度としている。

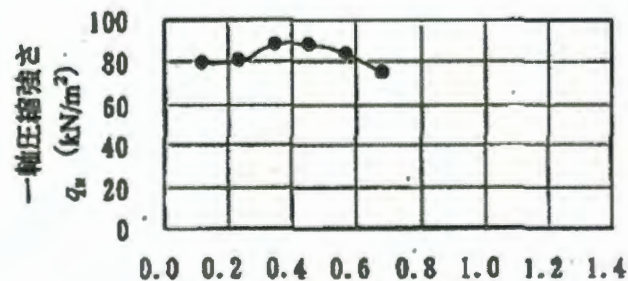
原地盤での地盤改良（薬液注入）においては、山崎ら※は一次元注入試験装置を用いて浸透距離 (L) を浸透到達距離 (L_0) で無次元化した (L/L_0) と一軸圧縮強度 q_u 、シリカ含有量、強度発現率について検討を行い、地下水による希釈の影響を考慮しての強度（配合目標強度）を定める必要があるとしている。また、配合目標強度は、設計基準強度に対して浸透注入時の強度発現率を0.6とし、安全率を考慮した改良強度としている（下記の算定式のとおり）。ここで、 q_{uL} は配合目標強度、 q_{uck} は設計基準強度、 κ は強度発現率（0.6）、 η は現場割増係数（1.2）である。

$$q_{uL} = (q_{uck} / \kappa) \times \eta = 2 \times q_{uck}$$

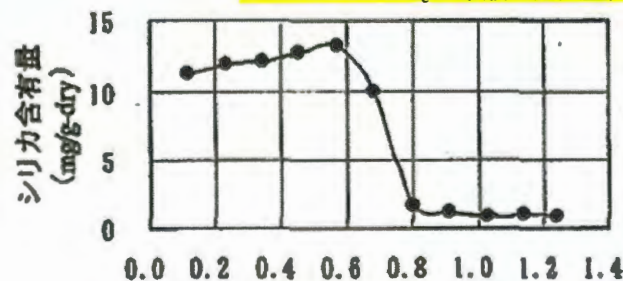
注：浸透到達距離 L_0 は間隙を100%改良と仮定してある注入量 Q の薬液を浸透注入させたときの理論的な到達距離であり、下図は同条件で実験により実際の浸透距離 L の位置での一軸圧縮強度等を測定した結果を示している。なお、浸透到達距離 L_0 は次式にて求められる。

$$L_0 = (Q \cdot n) / (100 / A) \quad \text{：一次元の場合}$$

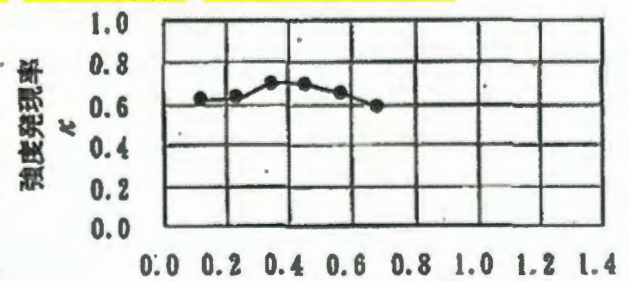
Q ：薬液の注入量、 n ：間隙率(%), A ：試験注入管の断面積



(a) L/L_0 と一軸圧縮強さの関係



(b) L/L_0 とシリカ含有量の関係



(c) L/L_0 と強度発現率の関係

一次元浸透注入試験結果※

※山崎浩之，善功企，河村健輔：溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用，港湾空港技術研究所報告，第41巻，第2号，pp.119～151，2002.6.

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

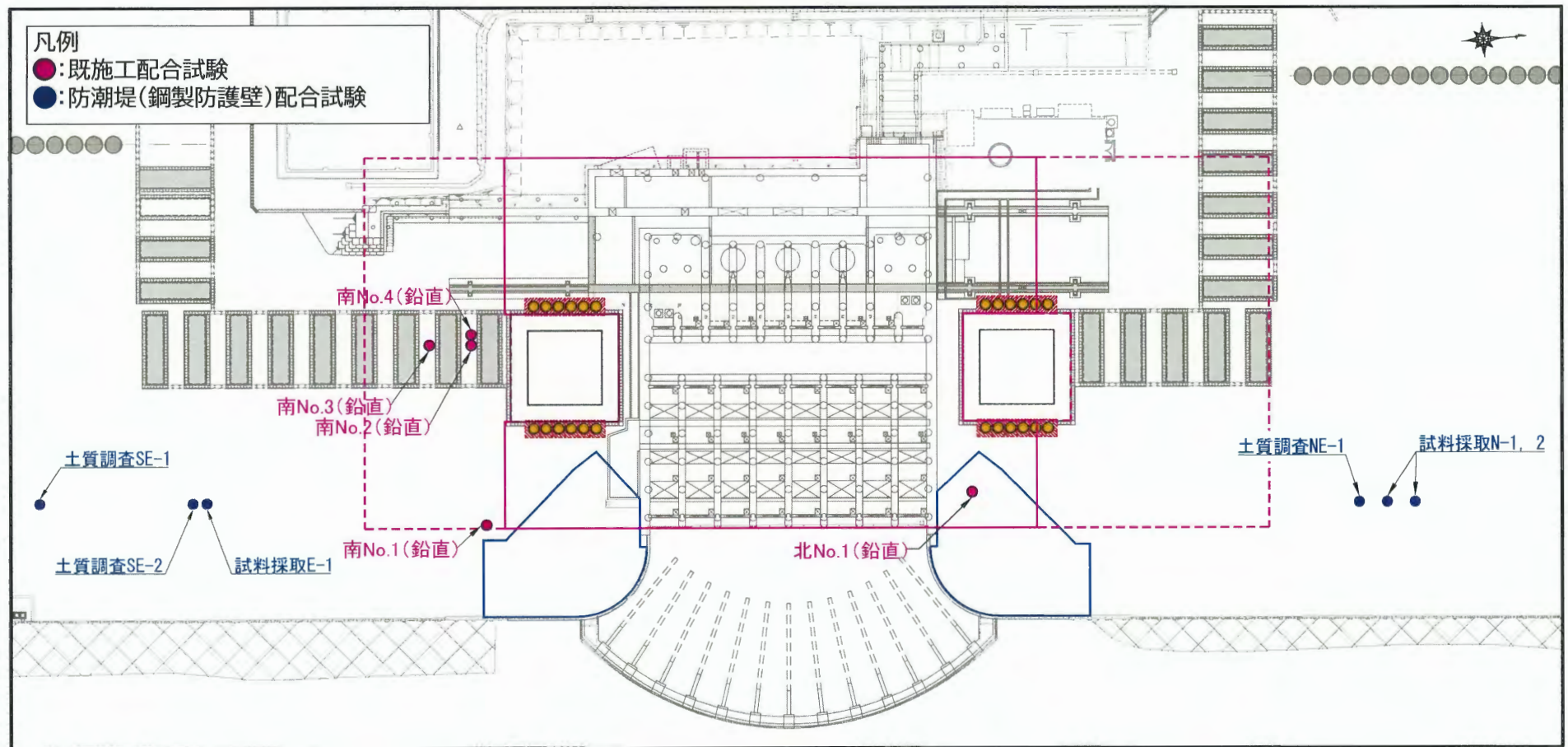
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.3) 配合試験用の試料採取

既施工配合試験及び防潮堤（鋼製防護壁）の配合試験において試料採取した位置を以下に示す。



配合試験用の試料採取箇所

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

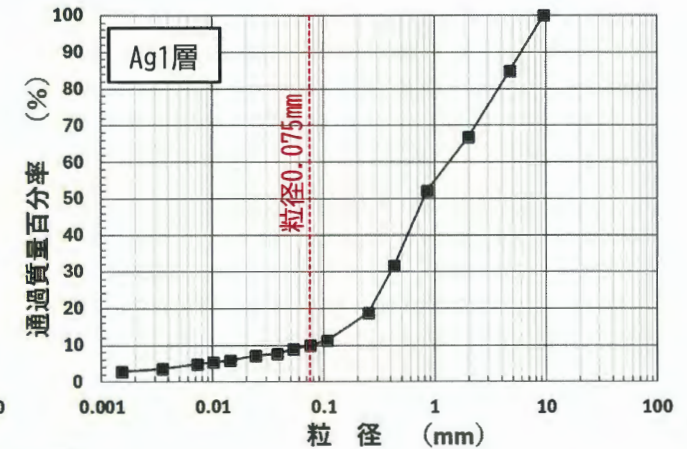
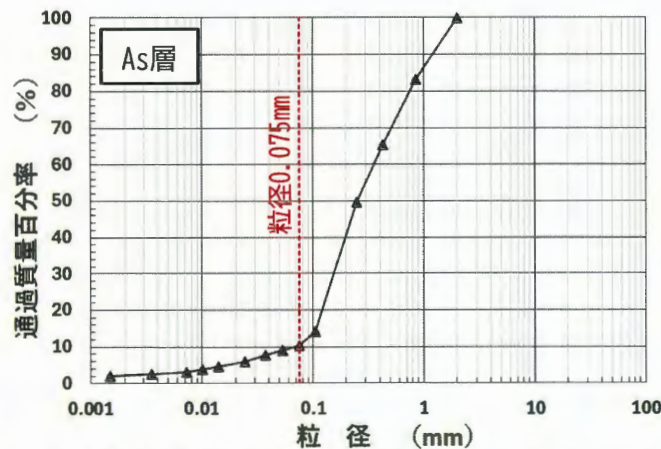
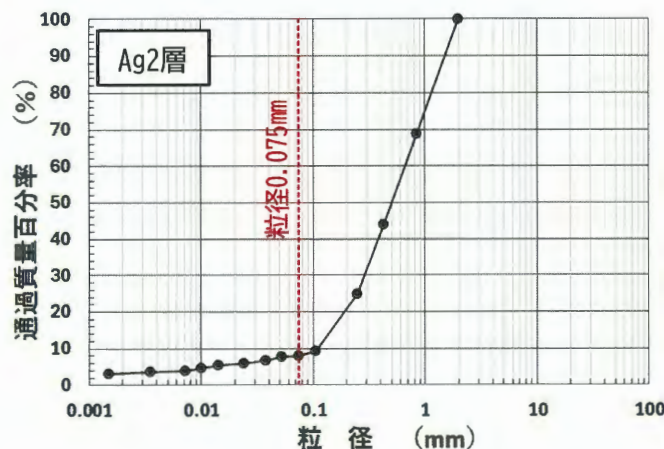
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

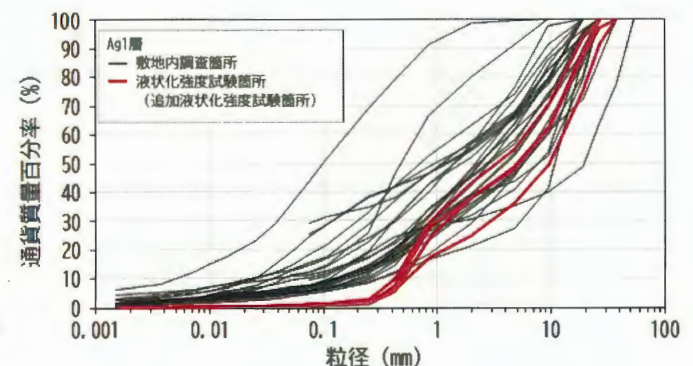
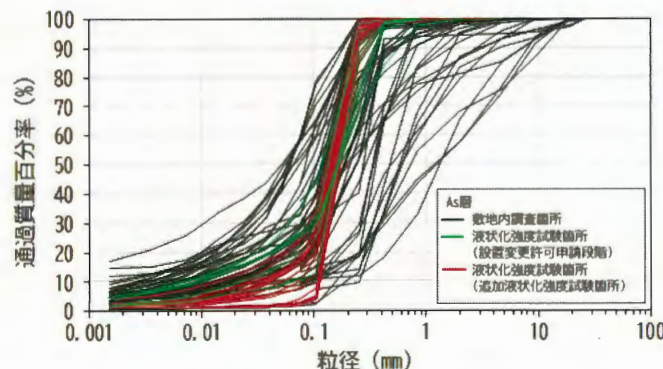
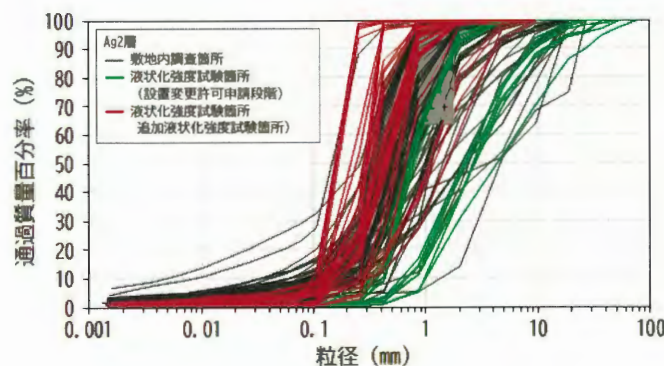
(1) 配合設計

(1.3) 配合試験用の試料採取

配合試験は、設置変更許可及び既工認時の各土層の液状化強度試験実施箇所の粒度分布（追加液状化強度試験箇所と同様に均等係数を小さく液状化しやすい粒度分布（下の図の赤線の粒度分布））に合わせた粒度調整試料を用いている。



配合試験試料の粒度調整後の粒度試験結果



敷地内Ag2層, As層, Ag1層の粒度試験結果

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

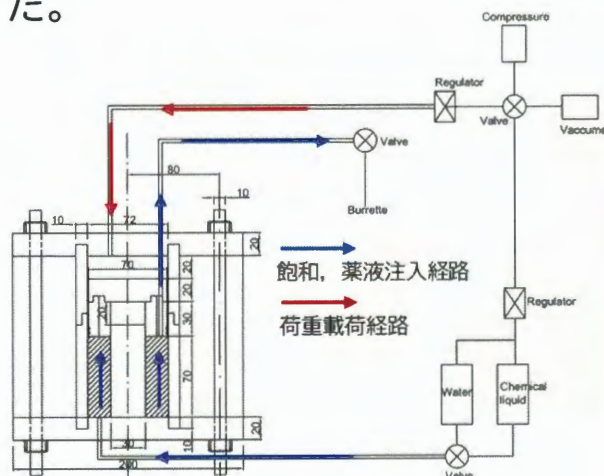
4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.4) 室内物理・力学試験

地盤改良（薬液注入）の配合設計において改良地盤の地震時のせん断特性を把握するために、液状化対策対象とする各土層（Ag2層，As層，Ag1層）に対して中空繰返しねじりせん断試験及び繰返し三軸試験を実施した。供試体の作成は、炉乾燥した試料を空气中落下法で目標相対密度になるようにモールド内に締固めた後、脱気した水を供試体下部から上部方向に通水させる飽和過程，原地盤の土被り圧の载荷の順に行った。その後，飽和過程と同様，薬液を供試体下部から上部の方に浸透させ，薬液注入を実施した。作成した供試体のモールドは28日間一定の水温で水中養生した後，脱型して試験を実施した。

配合設計においては，土の物理試験（土粒子の密度，粒度，含水比等），一軸圧縮強度試験，中空繰返しねじりせん断試験（Ag2層，As層），繰返し三軸試験（Ag1層）を実施した。また，力学試験後は供試体から採取した試料を用いてシリカ含有量試験を実施した。各試験は，地盤工学会の基準¹⁾および浸透固化処理工法技術マニュアル²⁾を適用した。



中空繰返しねじりせん断試験用供試体
作成装置及び供試体成型状況



中空繰返しねじりせん断試験状況



繰返し非排水三軸試験状況

注記：1)地盤材料試験の方法と解説，公益社団法人地盤工学会

2)浸透固化処理工法技術マニュアル，財沿岸開発技術研究センター，平成15年3月

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

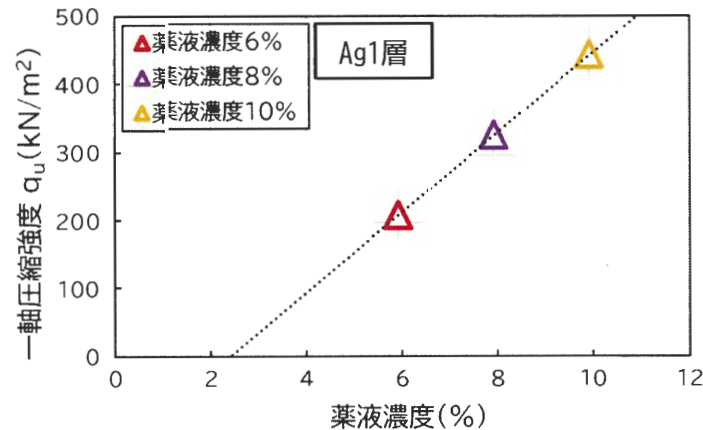
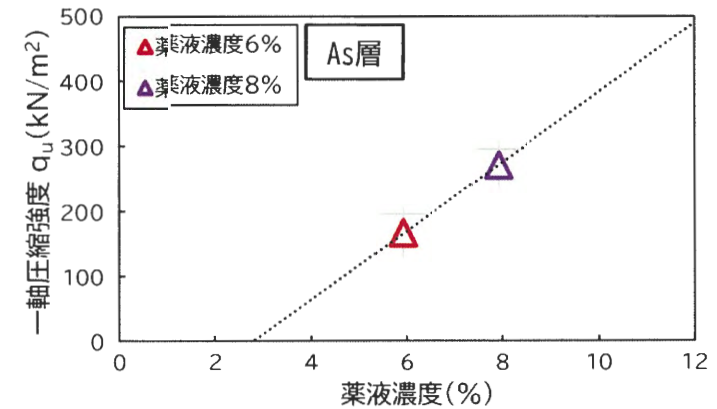
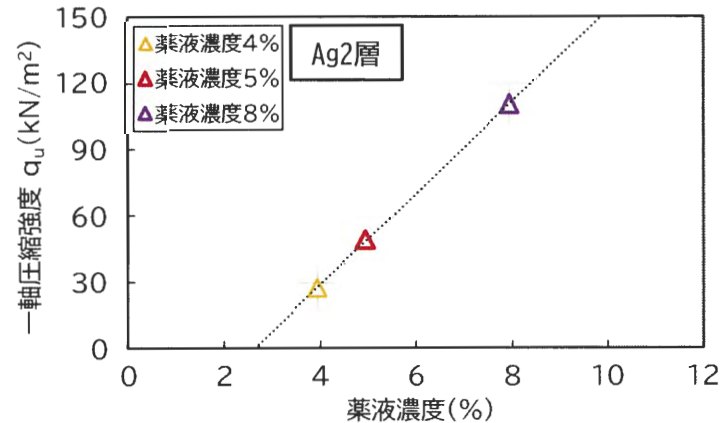
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.5) 一軸圧縮強度試験結果

各土層で実施した一軸圧縮試験結果を示す。



薬液濃度と一軸圧縮強度関係

各土層は、薬液の濃度の増加とともに一軸圧縮強度が増加し、両者の間には良い線形比例関係が認められる。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

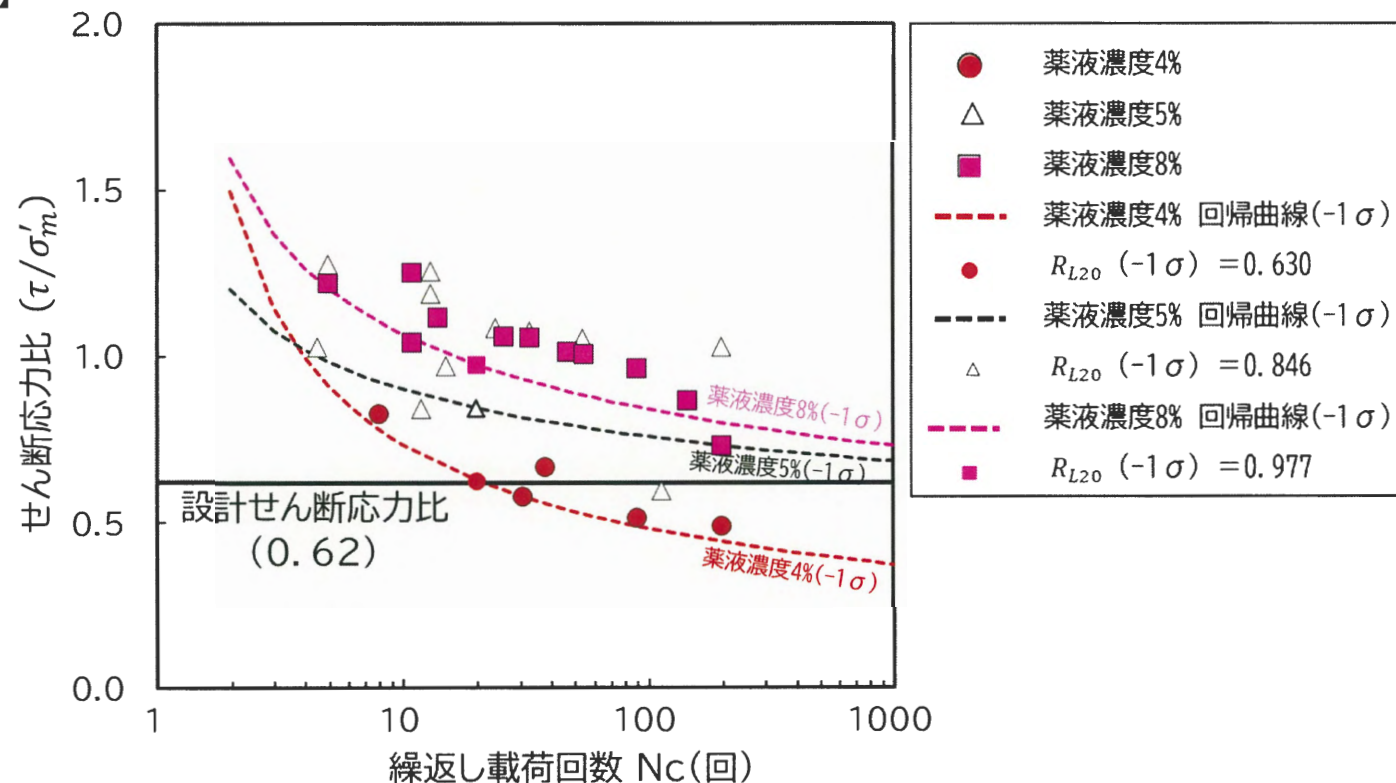
4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

（1）配合設計

（1.6）液状化強度試験結果

各土層で実施した液状化強度試験結果を示す。

【Ag2層】



Ag2層の液状化強度試験（中空繰返しねじりせん断試験）結果

- ・ 薬液を注入した供試体の液状化強度試験結果は、概ね薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ ばらつきを考慮（平均-1 σ ）した液状化強度比 R_{L20} (-1 σ) は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

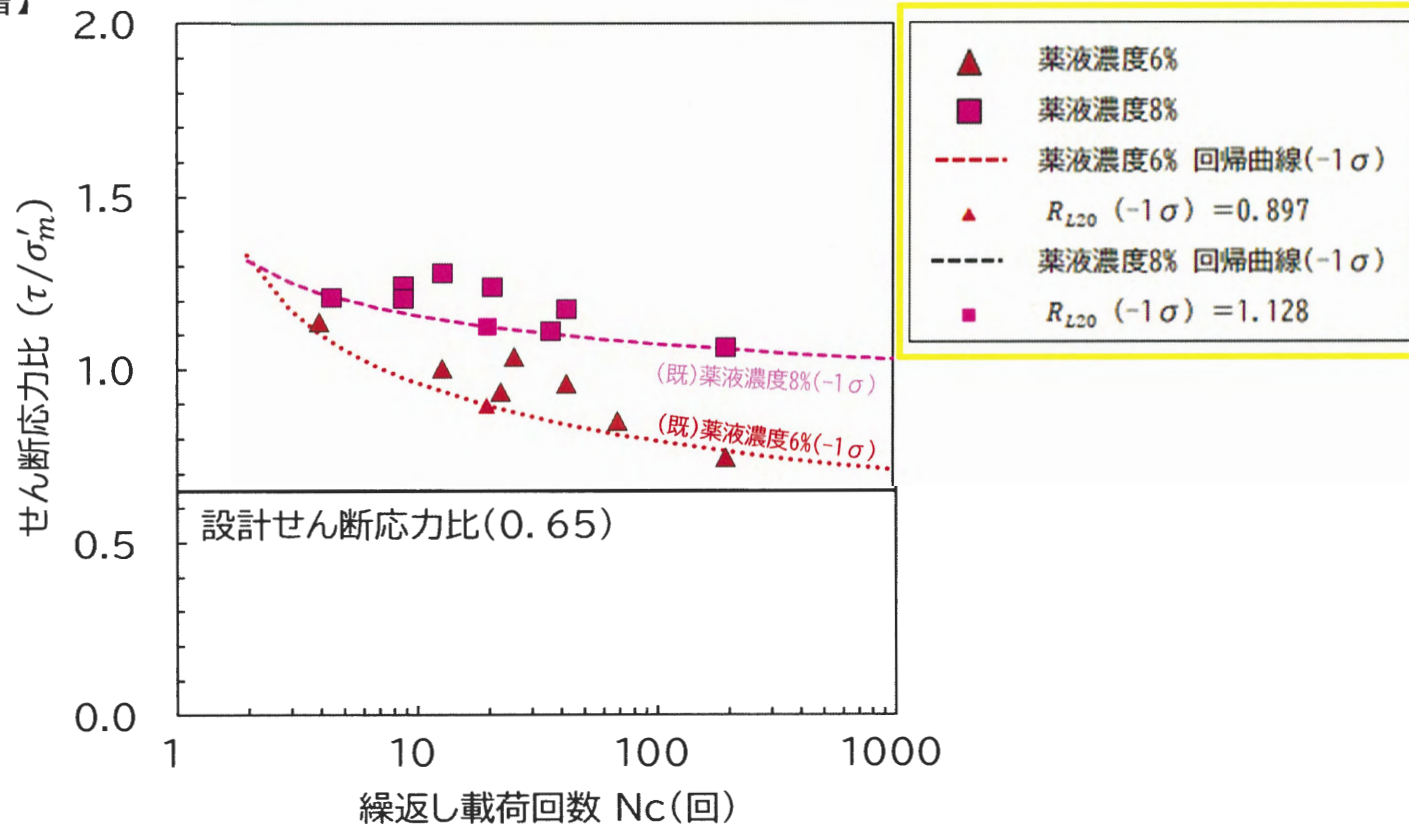
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.6) 液状化強度試験結果

【As層】



As層の液状化強度試験（中空繰返しねじりせん断試験）結果

- ・ 薬液を注入した供試体の液状化強度試験結果は、概ね薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ ばらつきを考慮（平均 -1σ ）した液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$ は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

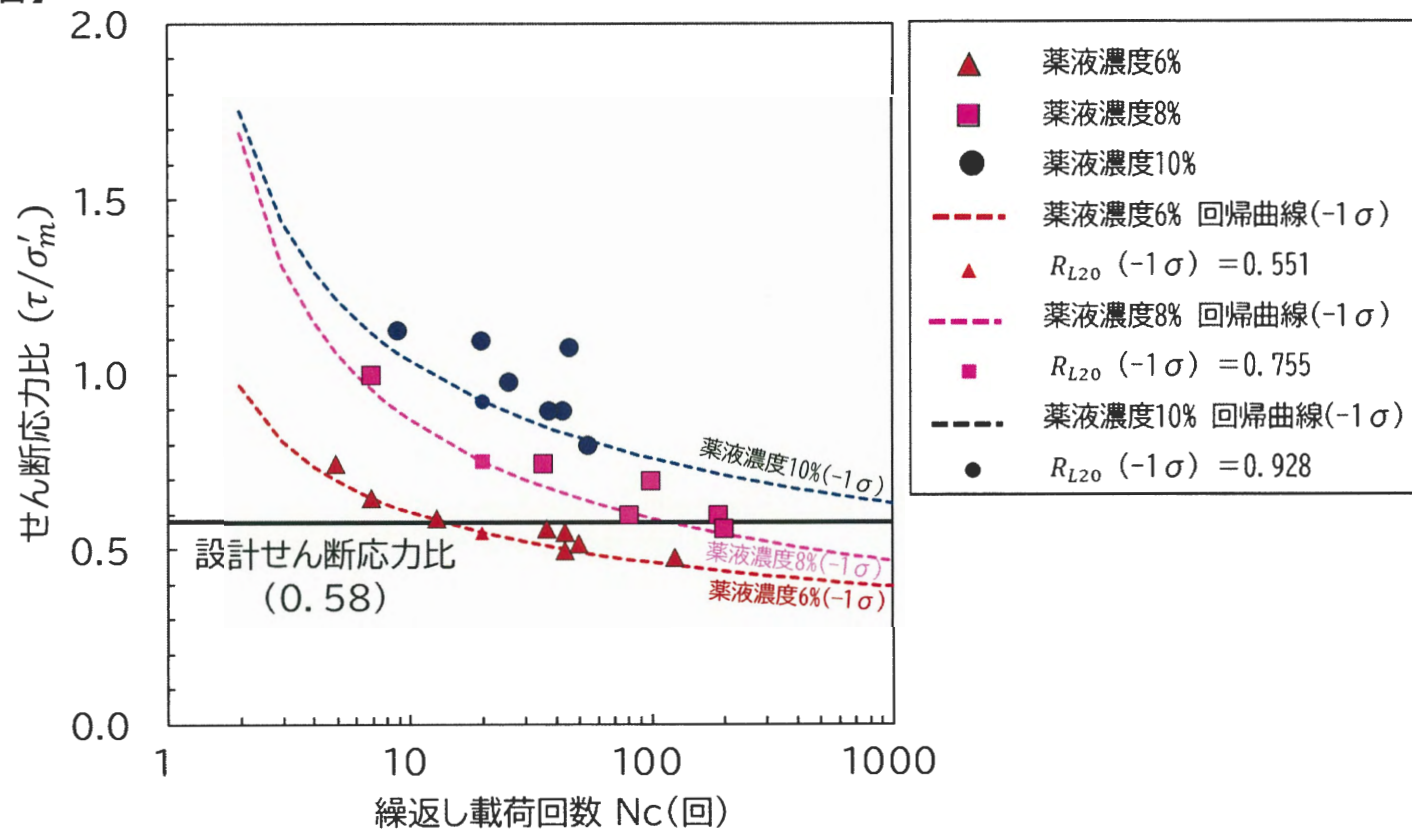
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.6) 液状化強度試験結果

【Ag1層】



Ag1層の液状化強度試験（繰返し非排水三軸試験）結果

- ・ 薬液を注入した供試体液状化強度試験結果は、薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ ばらつきを考慮（平均-1 σ ）した液状化強度比 R_{L20} (-1 σ) は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

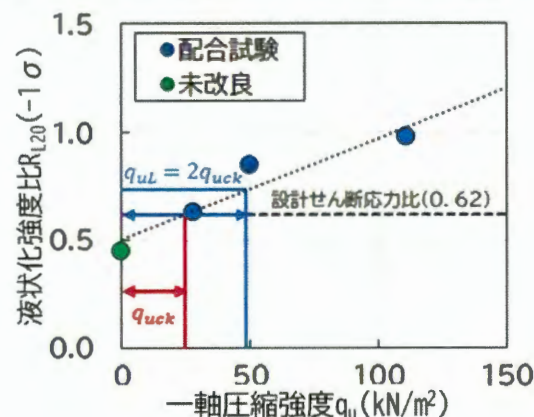
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

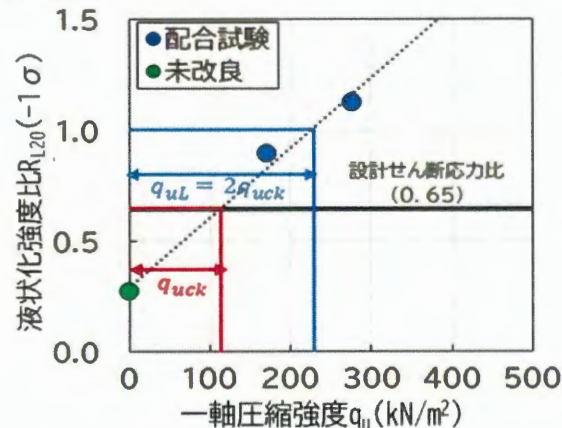
(1) 配合設計

(1.7) 薬液濃度の選定

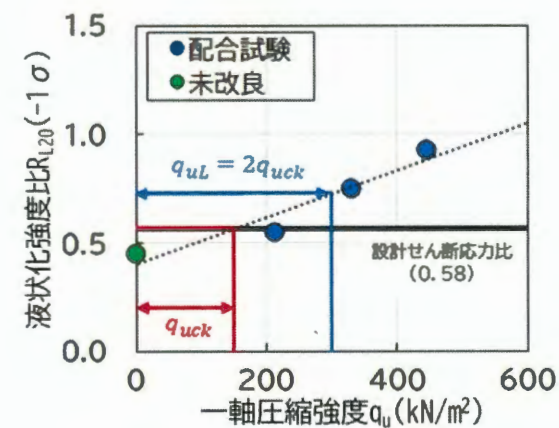
①設計基準強度 (q_{uck})，配合目標強度 (q_{uL}) の設定



(a) Ag2層



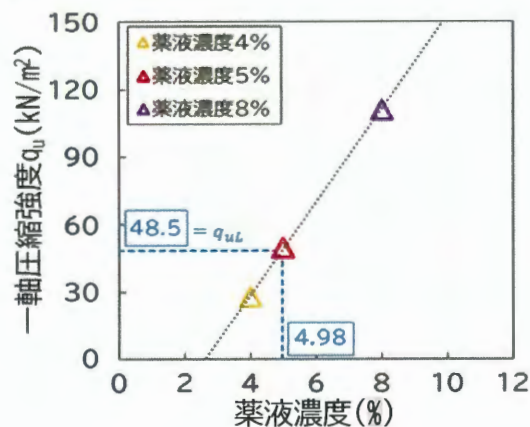
(b) As層



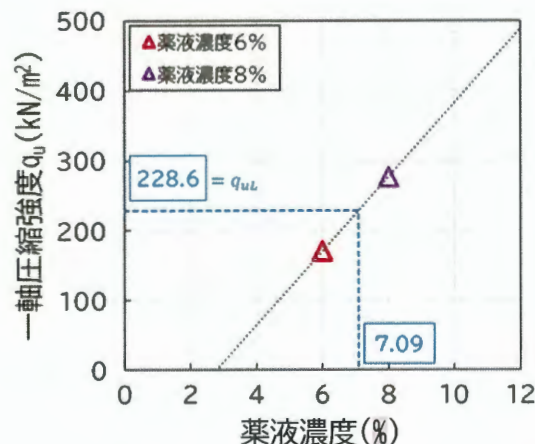
(c) Ag1層

各土層の設計基準強度と配合目標強度

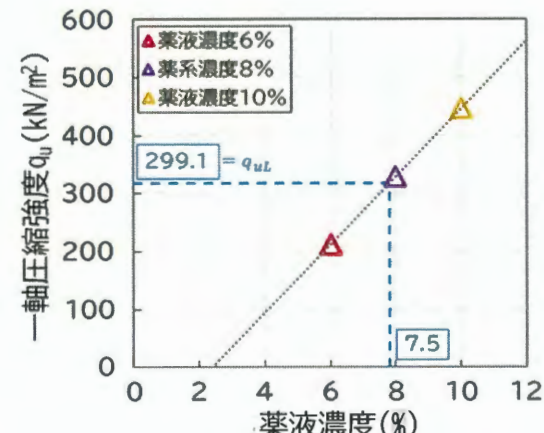
②薬液濃度の設定



(a) Ag2層



(b) As層



(c) Ag1層

薬液濃度の設定

各土層の最大せん断応力比より必要な配合目標強度に対応する注入薬液仕様は、Ag2層で5%、As層およびAg1層で8%となった。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.8) シリカ含有量による評価

地盤改良（薬液注入）の改良品質を確認する指標としては一軸圧縮強度が標準とされているが、施工後の地盤からの試料採取時に試料の乱れが予想されることから、試料採取時の試料の乱れの影響を受けないシリカ含有量（シリカ含有量増分量）を改良品質を確認するための指標とし、その管理値を以下のとおり設定する。なお、地盤改良体（薬液注入）のシリカ含有量増分量は以下の式で算定する。

$$\text{シリカ含有量増分量} (\Delta W_{SiO_2}) = \text{改良後の地盤のシリカ含有量} (W_{impSiO_2}) - \text{原地盤のシリカ含有量} (W_{0SiO_2})$$

注：原地盤のシリカ含有量 (W_{0SiO_2}) は以下の調査結果の平均値を採用する。

各層の未改良及び配合試験試料の液状化強度比及びシリカ含有量

	項 目	Ag2層			As層		Ag1層		
未改良	原地盤の液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$	0.450			0.271		0.450		
	原地盤のシリカ含有量 (mg/g)	0.765			1.988		2.033		
	原地盤のシリカ含有量の試料数	6個			17個		15個		
配合試験	薬液濃度	4%	5%	8%	6%	8%	6%	8%	10%
	改良体の液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$	0.630	0.846	0.977	0.897	1.128	0.551	0.755	0.928
	改良体のシリカ含有量 (mg/g)	8.027	10.000	17.000	15.000	20.000	11.579	19.750	22.667
	改良体のシリカ含有量の試料数	5個	1個	1個	1個	1個	5個	5個	7個
	改良体のシリカ含有量増分量 (mg/g)	7.262	9.235	16.235	13.012	18.012	9.546	17.717	20.634

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

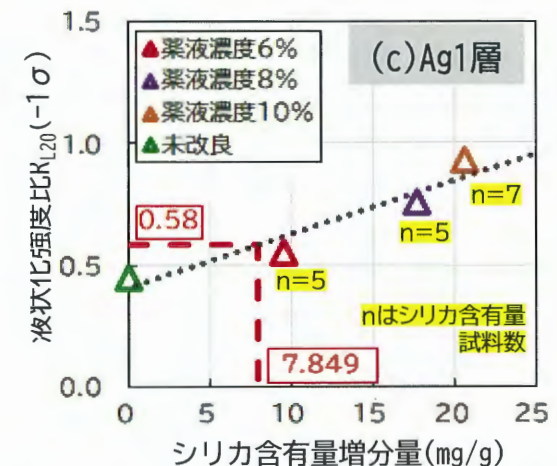
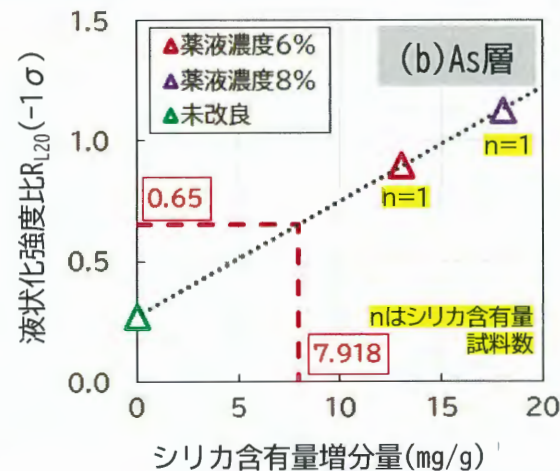
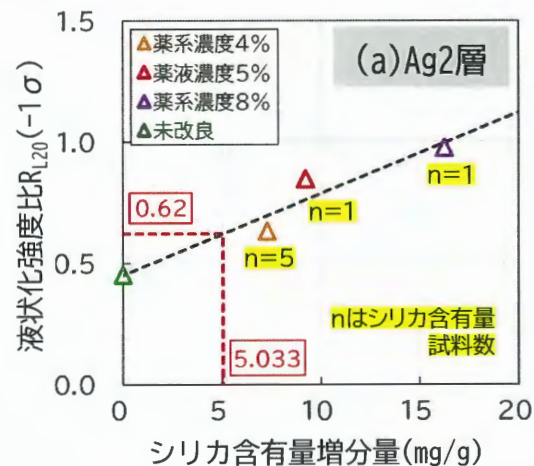
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.8) シリカ含有量による評価

前頁の各層の未改良及び配合試験試料の液状化強度比及びシリカ含有量より、薬液濃度を基準としてシリカ含有量増分量と液状化強度比の関係を整理し、各地層の最大せん断応力比 L_{max} 以上となる液状化強度比に相当するシリカ含有量増分量を算定し、管理値として設定する。



各層のシリカ含有量増分量と液状化強度比の関係

各層のシリカ含有量増分量の管理値

地層	Ag2層	As層	Ag1層
最大せん断応力比 L_{max}	0.62	0.65	0.58
要求される液状化強度比 $R_{L20}(-1σ)$	0.62以上	0.65以上	0.58以上
管理値：シリカ含有量増分量 (mg/g)	5.033以上	7.918以上	7.849以上

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

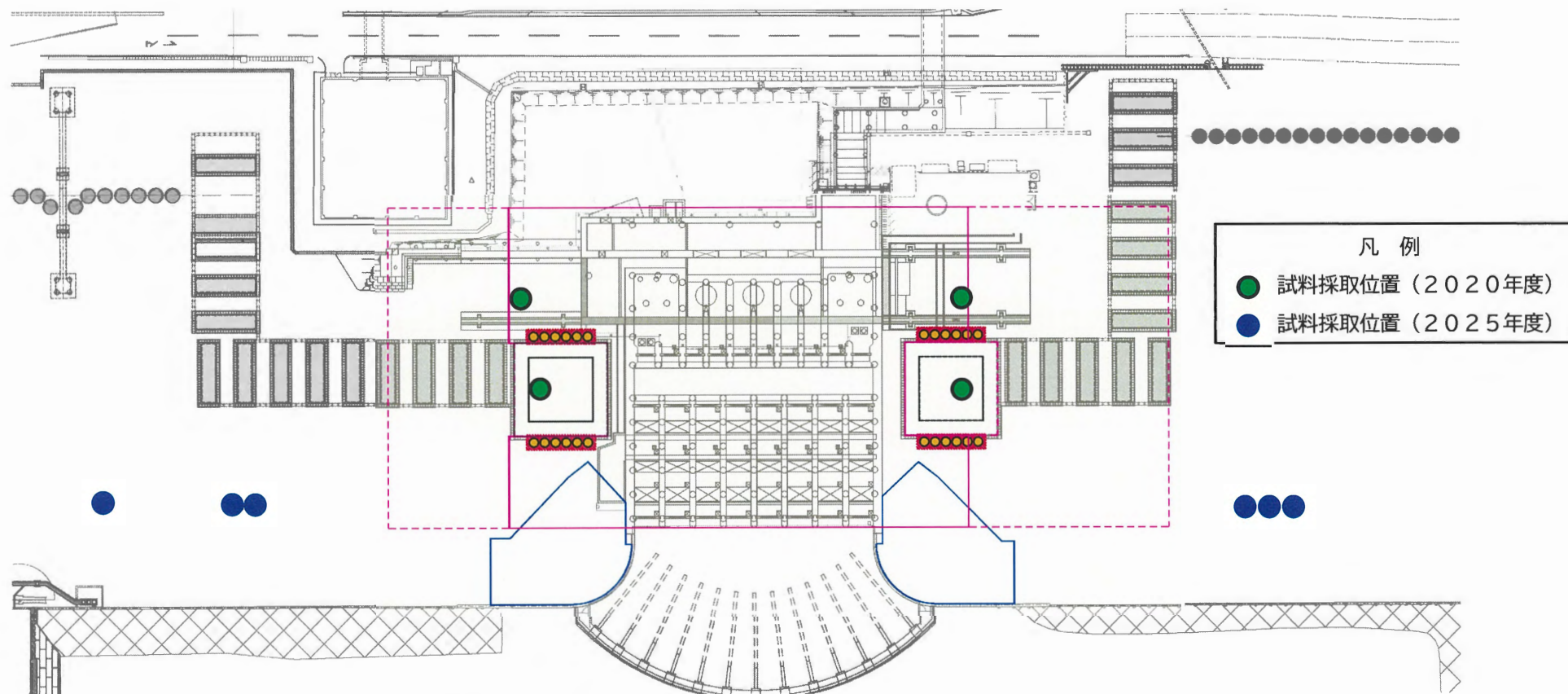
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

(1) 配合設計

(1.8) シリカ含有量による評価

原地盤（未改良）のシリカ含有量の試料採取箇所位置を下図に示す。



原地盤（未改良）のシリカ含有量の試料採取箇所位置図

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

（2）施工設計

（2.1）大深度改良範囲の改良精度（改良範囲の確保）

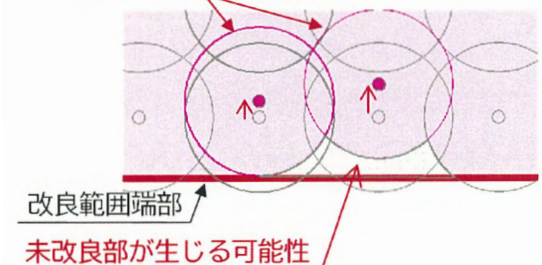
防潮堤（鋼製防護壁）における液状化対策の地盤改良（薬液注入）は、従来の適用深度G. L. -20m以浅より深く、最大でG. L. -60mに達しているため、注入孔曲がりによる改良出来形の確保、高水圧、高拘束圧下での施工性について検討を行った。

1）注入孔曲がり

①改良範囲端部にて未改良部が生じる可能性

注入孔削孔における孔曲がりの影響として改良範囲端部に未改良部が発生する可能性がある。

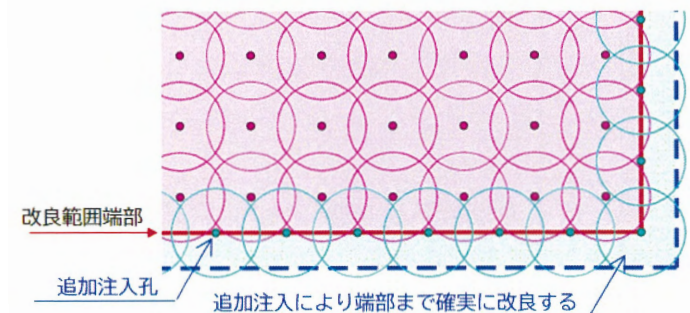
孔曲がりによる位置ずれ



改良範囲端部付近の孔曲がりによる未改良範囲発生状況

②改良範囲端部の対応策

既施工の実績から孔曲がり率は1/100以下となっており、改良範囲端部の未改良事象の対策として、計画段階で改良範囲端部に孔曲がりの影響を考慮した改良範囲（孔曲がり1/100）を設定し、設計改良範囲を確実に確保することとする。



改良端部の追加注入孔配置の考え方

- ・ 改良範囲端部において、注入孔削孔時の孔曲がりの影響を考慮して設定した改良範囲を施工に反映し、改良範囲の不確かさの要因に対する対応方策とした。
- ・ また、薬液注入の位置・角度および削孔長などについては施工時に確認する。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

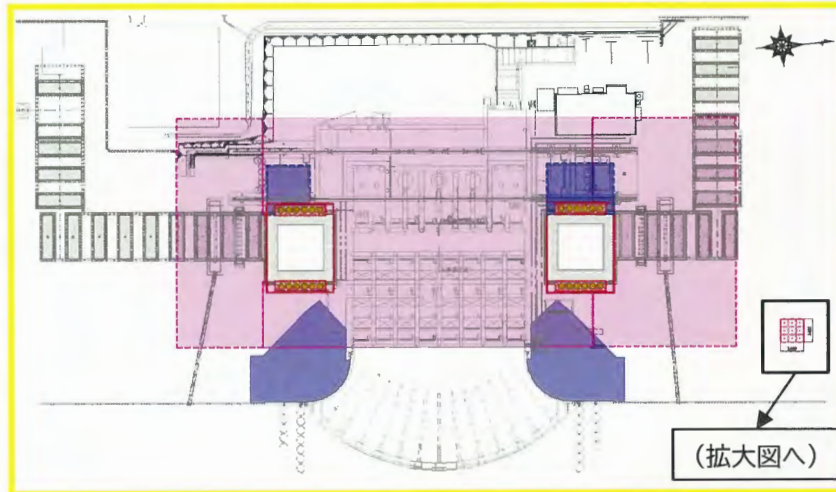
（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

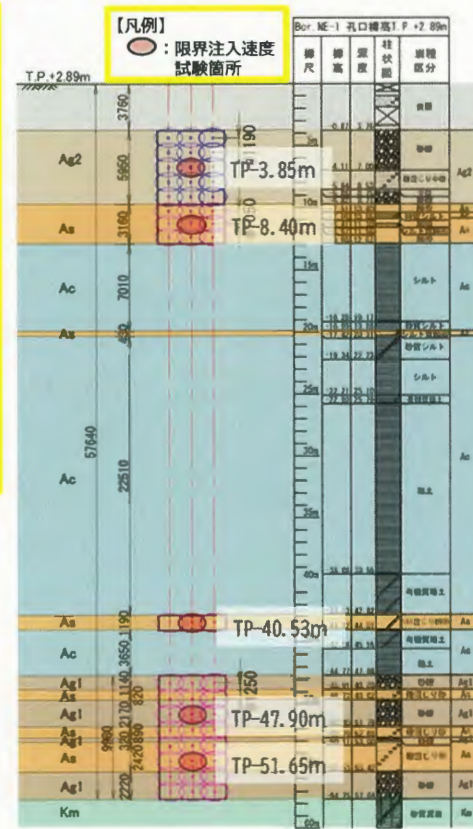
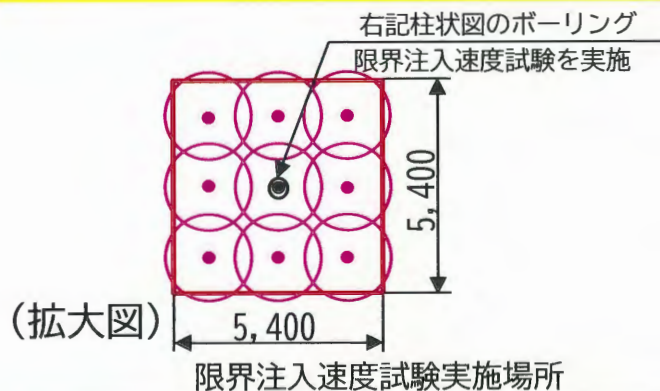
（2）施工設計

（2.2）地盤の透水性の不均一性（限界注入速度試験）

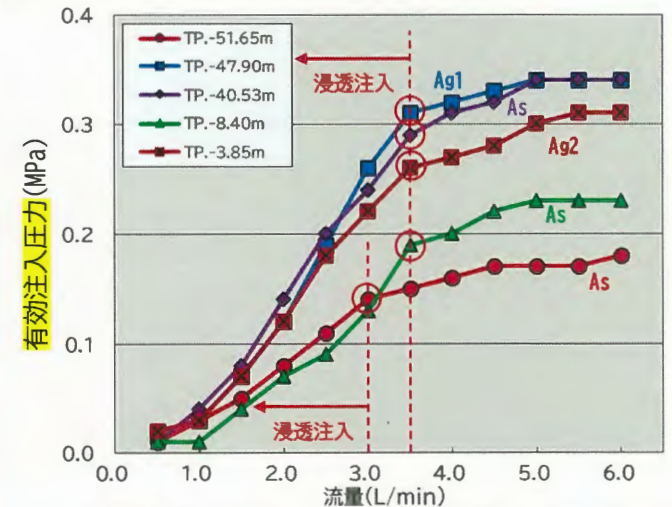
地盤調査結果を踏まえ、Ag2層、As層、Ag1層の限界注入速度試験を実施した。その結果を以下に示す。



（拡大図へ）



限界注入速度試験実施箇所の地盤状況



原地盤限界注入速度試験結果（試験施工）

- ・ As層は、細粒分含有量FC等により土性が変動するため、限界注入速度試験はシルト質砂～礫混じり砂までの広い土質において限界注入速度試験を実施した。
- ・ 限界注入速度試験の結果、3.0～3.5(L/min)の注入速度で浸透注入が可能であることを確認した。

- ・ Ag2層、Ag1層は、均一な地盤と評価され、代表的な土質の砂礫で試験を実施した。
 - ・ As層は、調査位置により土性が変化する不均一な土層であり、シルト質砂～礫混じり砂まで広い土質を対象にして試験を実施した。
 - ・ 施工においては、限界注入速度試験結果の最小速度である3.0(L/min)を注入速度とする。
- 以上の結果を施工に反映し、地盤の不均一性、施工条件による改良品質の不確かさの要因に対する対応方策とする。

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

4. 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

➤ まとめ

1) 地盤の不均一性（粒度分布）

配合試験に用いる試料は、粒度分布の不均一性に対し保守的な配合試験となるよう設置変更許可及び既工認時の液状化強度試験実施箇所の粒度分布（追加液状化強度試験箇所と同様に均等係数が小さく液状化しやすい粒度分布）に調整したものを採用した。

2) 地盤の不均一性（透水性のばらつき）

透水係数の不均一性に対し、注入速度は各土層（Ag2層，As層，Ag1層）で実施した限界注入速度試験の結果のうち最小値の限界注入速度（3.0ℓ/min）を採用することで浸透注入の品質を確保する。

3) 配合試験における液状化強度比の設定（薬液の濃度の設定，管理値の設定）

改良後の地盤での動的解析から各土層に作用する最大せん断応力比を抽出し，改良後の地盤に必要な液状化強度比として設定した。

保守的な薬液濃度の設定になるように，1) のとおり液状化しやすい粒度分布に調整したものをを用いた配合試験を行うとともに配合試験の液状化強度比は，試験結果のばらつきを考慮し（平均-1σ）に低減した液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$ とした。この液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$ と一軸圧縮強度及び一軸圧縮強度と薬液の濃度の関係に現場施工の割増を行い，必要な液状化強度比を実現するための薬液の濃度を設定した。

また，施工後の品質管理については，シリカ含有量増分量と液状化強度比の関係から，必要な液状化強度比に相当するシリカ含有量増分量を管理値として設定した。

4) 注入孔削孔時の孔曲がりに対しては，改良範囲端部において孔曲がり（1/100）の影響を考慮した改良範囲を追加して設定し，設計改良範囲を確保する。

以上より，地盤改良の改良品質の不確かさが設計の想定に影響を及ぼさないことを確認した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

5. 事後調査

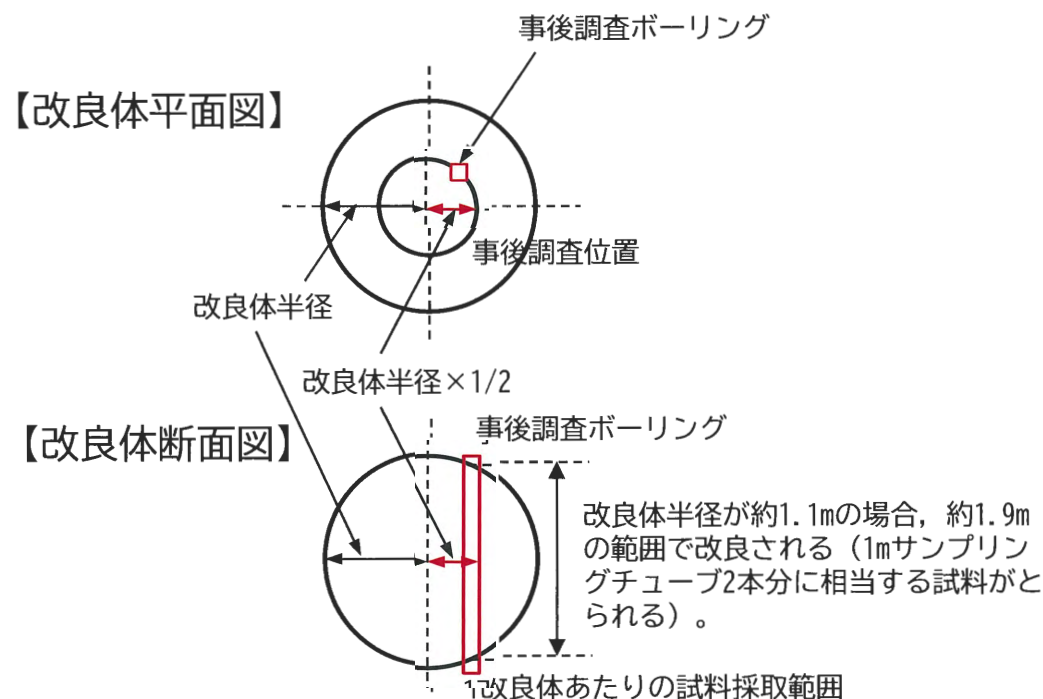
（1）品質管理

浸透注入工法における品質管理は、改良体が所定の品質を満足していることを確認することである。

改良体の品質は、改良施工後の地盤において調査ボーリングにより乱れが少ない試料を採取し、一軸圧縮強度で評価することを標準としている。しかし、防潮堤（鋼製防護壁）周辺地盤の改良範囲においては、G.L.-60mの大深度地盤を対象としており、試料採取時の土被り圧の解放、サンプラーとの摩擦による乱れの影響は大きく、また礫を多く含有するAg2層、Ag1層や細粒分を多く含有するAs層の土質特性を考慮すると一軸圧縮強度では正確な評価が困難となることが予想される。

本改良設計においては、試料採取時の乱れの要因に影響されない改良体のシリカ含有量増量を管理値として設定する。

調査数量は、実績のある基準※に基づき、改良対象土層5,000m³未満は調査ボーリング3本、5,000m³以上は2,500m³増えることに1本追加することとする。



事後ボーリング調査実施例¹⁾

※浸透固化処理工法技術マニュアル，（財）沿岸開発技術研究センター，p.47，平成15年3月

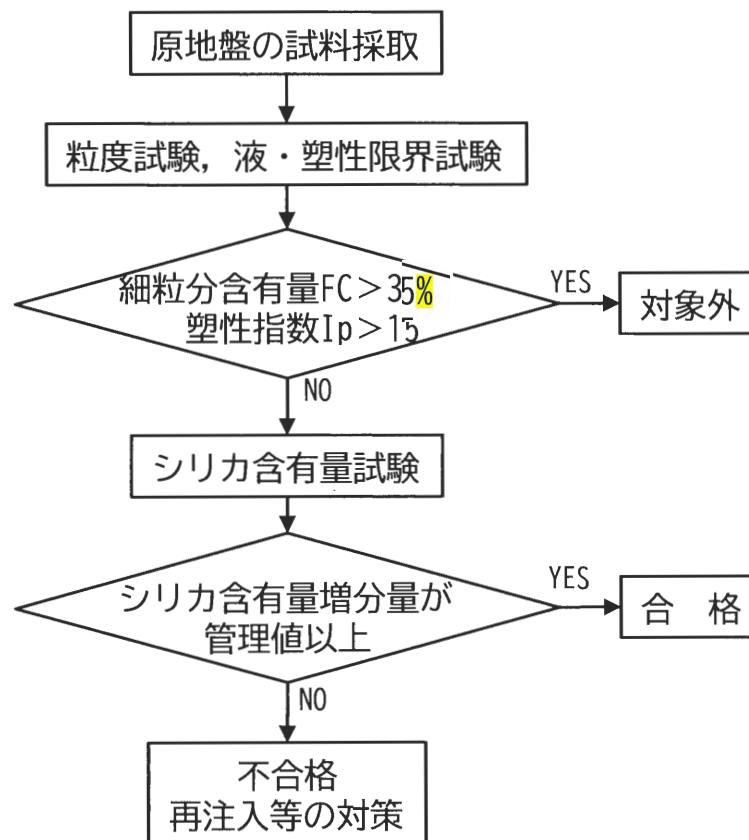
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

5. 事後調査

（2）評価フロー

防潮堤（鋼製防護壁）の地盤改良（薬液注入）の品質確認フローを以下に示す。地盤改良（薬液注入）の既施工箇所では、当品質確認フローを適用している。



品質確認（事後調査）フロー

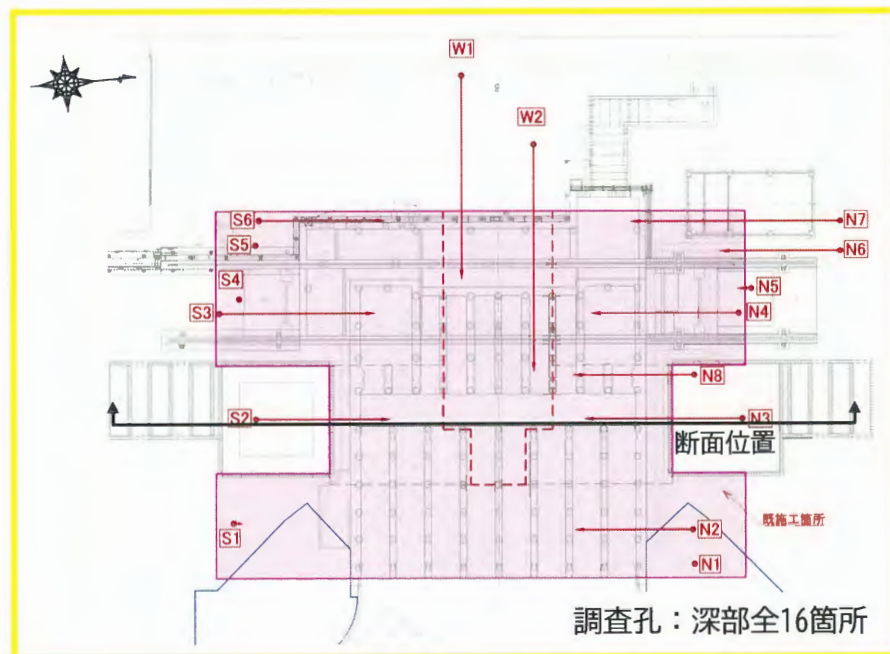
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

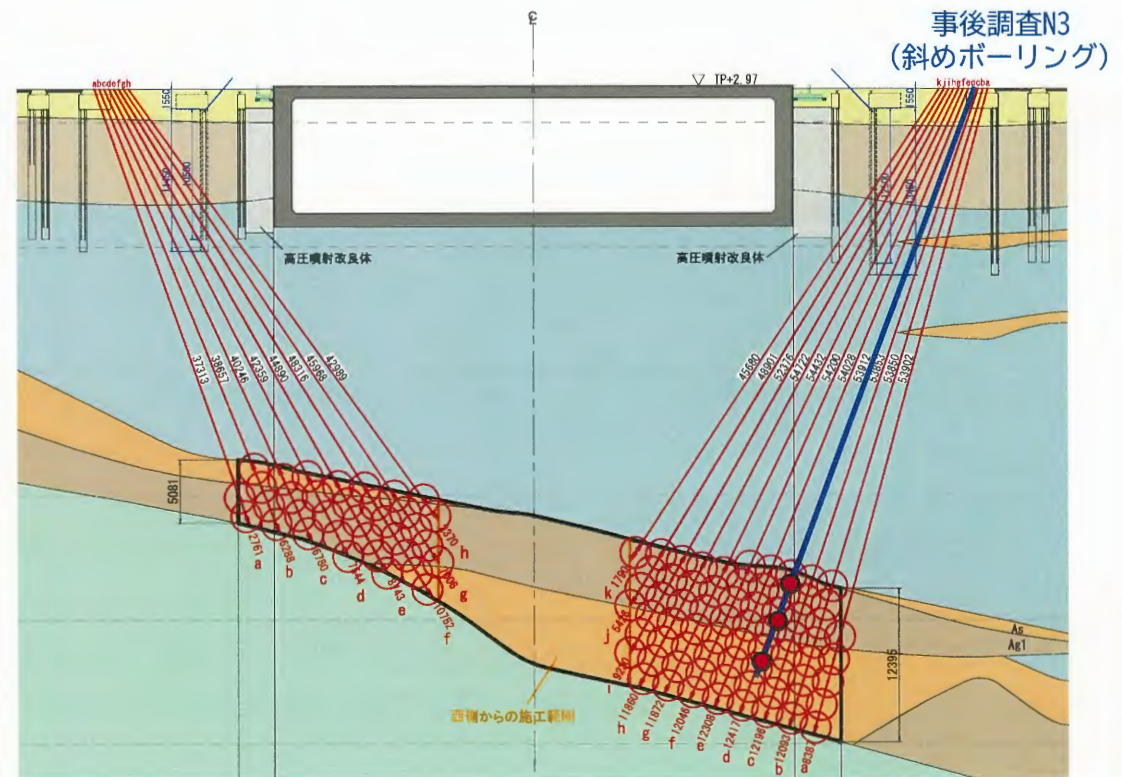
5. 事後調査

(3) 既施工箇所における事後調査実施箇所

地盤改良（薬液注入）の既施工箇所において、浸透注入工法で定められた調査数量の事後調査の調査ボーリングを実施した。事後調査ボーリング実施箇所を以下に示す。



改良範囲及び断面位置図



● …シリカ含有量試験箇所（採取例）

事後調査の試料採取位置（既施工箇所）

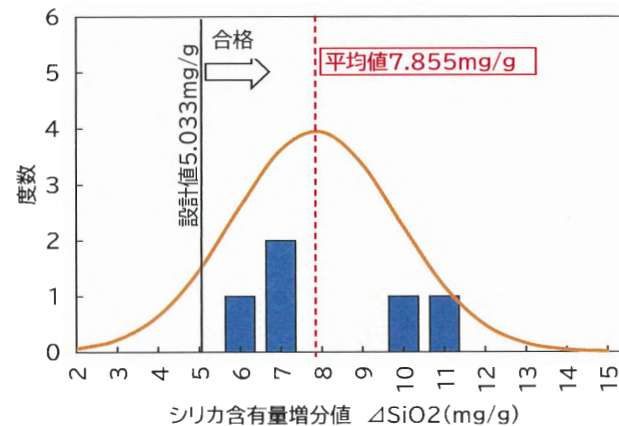
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

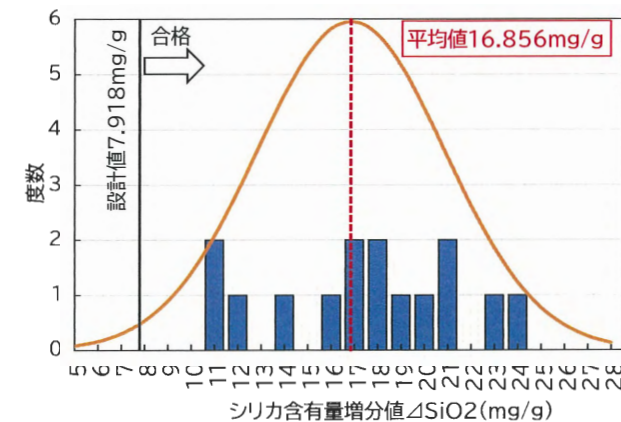
5. 事後調査

(4) 既施工箇所における事後調査結果

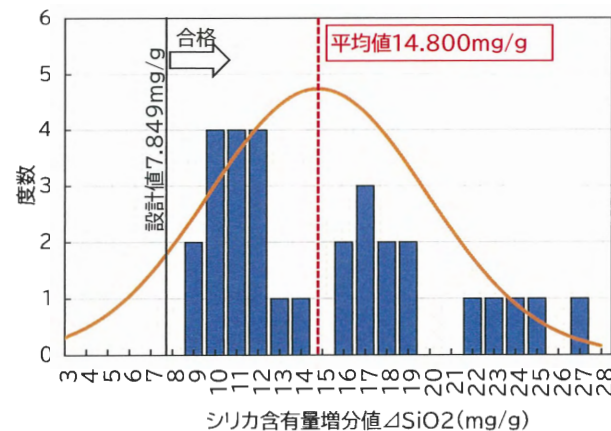
既施工箇所のシリカ含有量増分量は、防潮堤（鋼製防護壁）で設定する設計管理値を満足する結果が得られた。これにより、大深度での高水圧・高拘束圧下においても、要求品質は満足できることを確認した。



a) Ag2層



b) As層



c) Ag1層

既施工箇所のシリカ含有量増分値測定結果

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

5. 事後調査

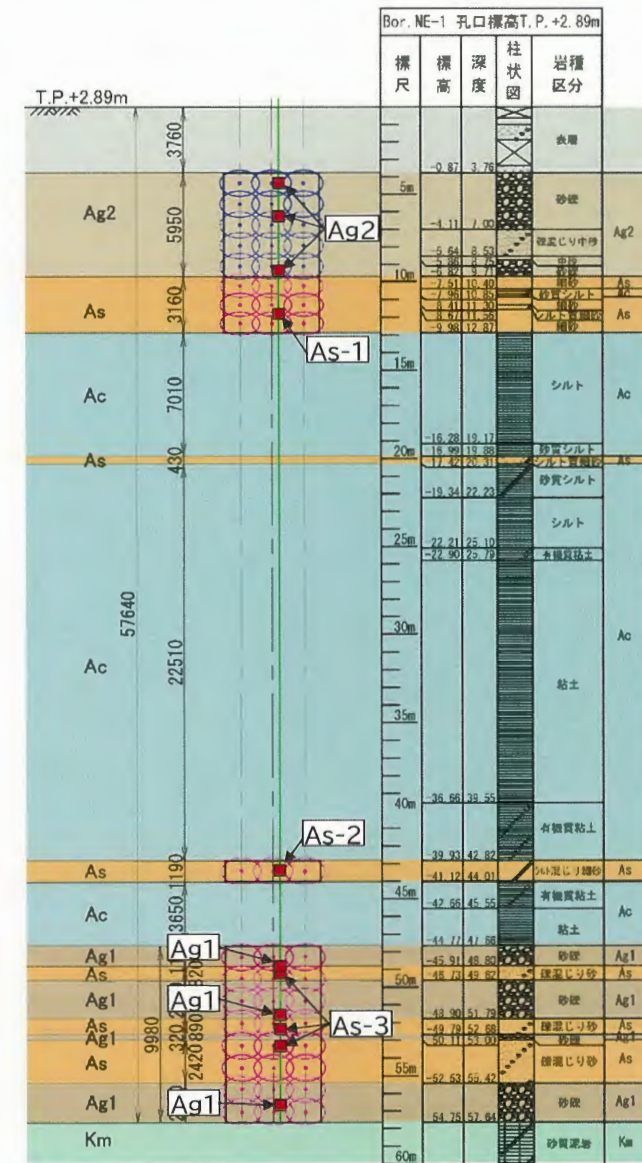
（5）試験施工での事後調査結果

既施工箇所より深い地盤の試験施工にて、事後の品質確認として地盤改良（薬液注入）後のAg2層、As層、Ag1層をサンプリングし、シリカ含有量試験を実施した。

試験結果より、シリカ含有量増分量は全層の試料で設計値を上回ることを確認した。また、Ac層内に介在する薄いAs層への限定的な改良や、深度G.L.-20m以深の高水圧・高拘束圧下に分布するAs層、Ag1層でも適切な改良効果が得られた。

シリカ含有量増分量評価結果

施工位置	確認場所	試料名	シリカ(SiO ₂)含有量 (mg/g)			合否	
			平均値	改良前	増加分	管理値	判定
試験施工	Ag2	Ag2層 TP.-1.41m~-1.51m	22.000	0.765	21.235	≧ 5.033	合格
試験施工	Ag2	Ag2層 TP.-3.31m~-3.41m	11.667	0.765	10.902	≧ 5.033	合格
試験施工	Ag2	Ag2層 TP.-6.41m~-6.51m	13.000	0.765	12.235	≧ 5.033	合格
試験施工	As-1	As層-1 TP.-8.86m~-8.96m	26.667	1.988	24.679	≧ 7.918	合格
試験施工	As-2	As層-2 TP.-40.41m~-40.51m	13.667	1.988	11.679	≧ 7.918	合格
試験施工	As-3	As層-3 TP.-46.26m~-46.36m	29.667	1.988	27.679	≧ 7.918	合格
試験施工	As-3	As層-3 TP.-49.41m~-49.51m	14.000	1.988	12.012	≧ 7.918	合格
試験施工	As-3	As層-3 TP.-50.36m~-50.46m	33.333	1.988	31.345	≧ 7.918	合格
試験施工	Ag1	Ag1層 TP.-45.86m~-45.96m	39.333	2.033	37.300	≧ 7.849	合格
試験施工	Ag1	Ag1層 TP.-48.61m~-48.71m	12.667	2.033	10.634	≧ 7.849	合格
試験施工	Ag1	Ag1層 TP.-53.71m~-53.81m	42.667	2.033	40.634	≧ 7.849	合格



■・・・シリカ含有量試験試料採取深度

事後調査の試料採取位置（試験施工）

既施工箇所の施工実績及び試験施工結果から、前述の工事計画が実現可能であることを確認した。

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針

5. 事後調査

➤ まとめ

- 1）施工後の品質確認は、試料採取における土被り圧の解放やサンプラーとの摩擦などによる試料の乱れの影響を受けない、シリカ含有量増分量とする。
- 2）既施工箇所の事後調査では、シリカ含有量増分量は防潮堤（鋼製防護壁）の設計値を満足することを確認した。
- 3）既施工箇所より深い地盤に対して実施した試験施工での事後調査においても、シリカ含有量増分量は防潮堤（鋼製防護壁）の管理値を満足しており、高水圧、高拘束圧下でも適切な改良効果が得られていることを確認した。

以上より、既施工箇所の施工実績及び試験施工結果から、前述の工事計画が実現可能であることを確認した。

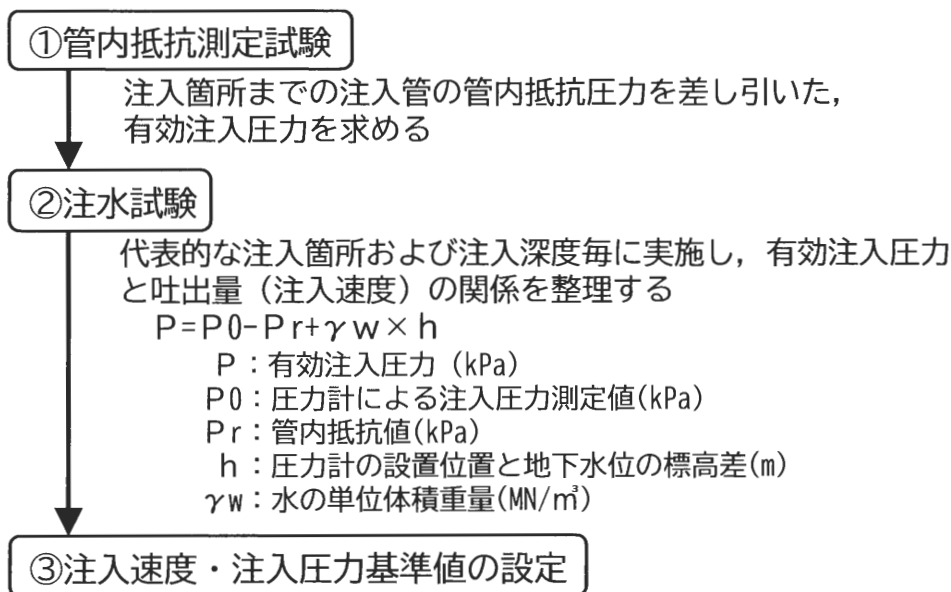
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料①：限界注入速度試験】

➤ 限界注入速度試験

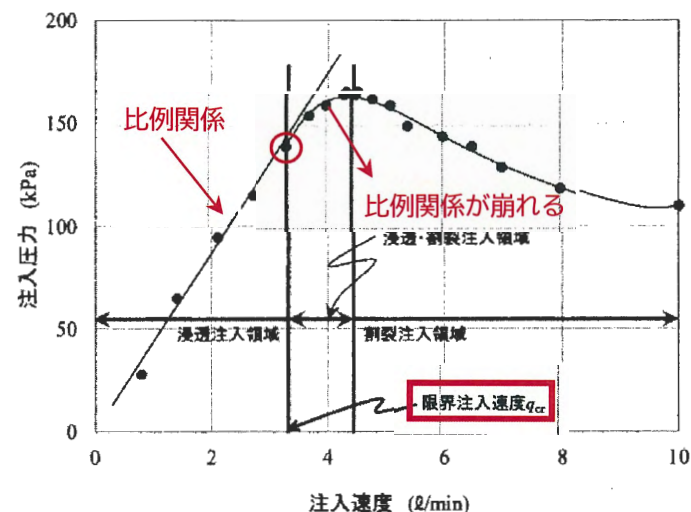
注入速度と注入圧力の関係を下図に示す。注入速度が遅い状態では、注入速度と注入圧力は比例関係であり、この際の注入形態は浸透注入となり、均質な改良体が形成される。注入速度がある速度より大きくなると、注入速度と注入圧力の比例関係は保てず、割裂浸透の注入形態となり、均質な改良体は形成されにくい。この注入速度と注入圧力の関係に影響を及ぼす要因としては、細粒分含有率、密度、土被り圧、地盤の透水性などがある。

このため、注入対象地盤の細粒分含有率、密度、土被り圧、地盤の透水性などについて評価を実施し、限界注入速度試験より注入速度と注入圧力の関係を把握した上で、適切な注入速度、注入圧力を設定する。



浸透領域における最大吐出量を注入限界速度とし、この時の吐出量と注入圧力を、注入速度および注入圧力基準値とする

限界注入速度試験フロー①



現場注水試験例（注入速度と注入圧力の関係）²⁾

注記：1) 超多点注入工法技術マニュアル，地盤注入開発機構，平成24年2月
2) 恒久グラウト注入工法技術マニュアル，地盤注入開発機構，2019年9月

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料①：限界注入速度試験】

➤ 限界注入速度試験

◆ 限界注入速度試験箇所の設定

試験施工箇所のコアボーリングより採取したコアを観察し、簡易的な土質特性（以下、「土性」という。）の評価を実施した。その結果を以下に示す。

【確認結果】

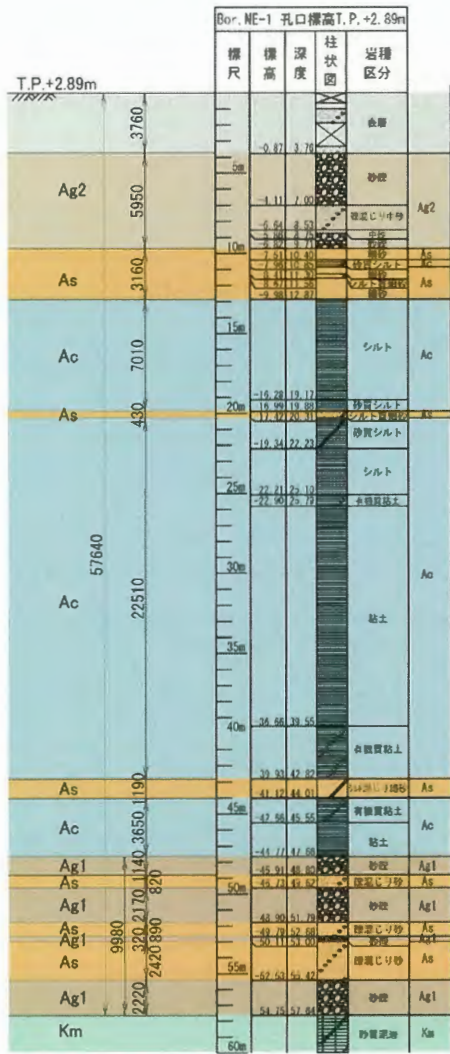
- ・ Ag2層, As層, Ag1層とも土性の評価結果は近傍の既施工箇所とほぼ同等である。
- ・ Ag2層, Ag1層は土性, 締まり度などにばらつきが少ない。一方, As層は下表のとおり土質「礫混じり砂～シルト混じり砂」, 締まり度「緩い～中位」などばらつきを有している。

項目		層区分	Ag2層	As層			Ag1層
				①(浅部)	②(深部)	③(深部)	
分布深度 (T.P.m)	上端		-0.87	-6.82	-39.93	-48.90	-46.73
	下端		-6.82	-9.98	-41.12	-52.53	-48.90
土質			砂礫 礫混じり砂	砂	シルト混じり砂	礫混じり砂	砂礫
細粒分観察結果			細粒分少ない	細粒分少ない	細粒分多い	細粒分少ない	細粒分少ない
N値 ¹⁾			33	7	16	21	50回 以上
締まり度			密	緩い	中位	中位	非常に密
透水性 ²⁾			中位	中位	低い	中位	中位
評価結果			・ 既施工箇所と土性が同等であることを確認した。 ・ 既施工箇所より改良深度が深くなるため, 限界注入速度試験を実施し, 注入速度と注入圧力を確認する。				

土性の評価結果は既施工箇所とほぼ同等であるが, 改良深度が既施工箇所より深くなることから限界注入速度試験を実施し, 注入速度と注入圧を確認することとした。また, 土性のばらつきが確認されたAs層については上表のとおり複数箇所にて同試験を実施した。

注記：1) 試験箇所近傍調査孔を適用

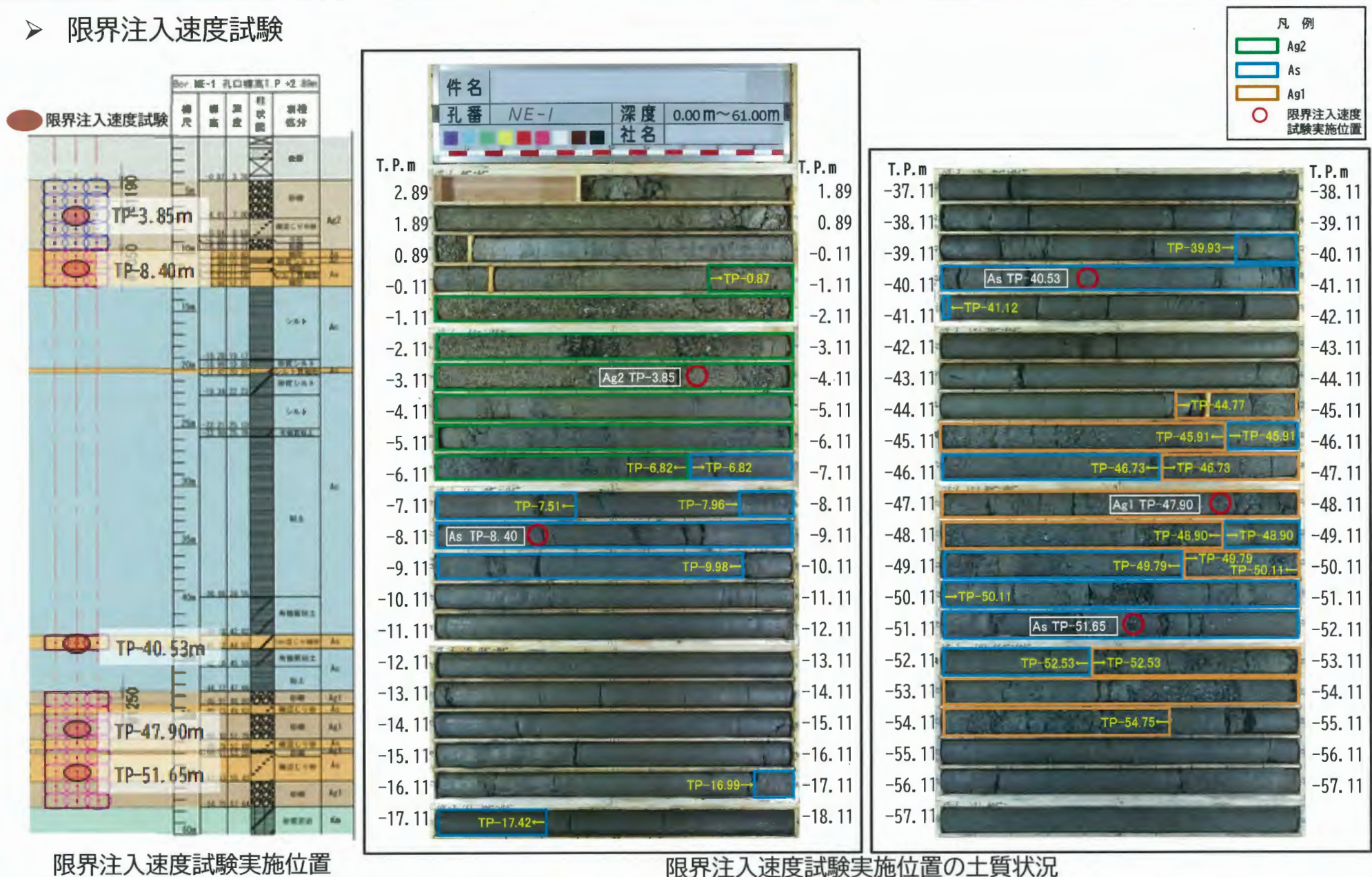
2) 地盤材料試験の方法と解説（二分冊の1），地盤工学会



4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料①：限界注入速度試験】

➤ 限界注入速度試験



4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料②：注入孔曲がり計測結果】

➤ 注入孔曲がり計測結果

既施工箇所での注入孔の削孔は、構造物下部の注入範囲においては斜め削孔を、その他施工範囲では鉛直削孔を実施している。以下に注入孔の孔曲がり計測結果を示す。

孔曲がり計測結果（施工済み 斜め削孔）

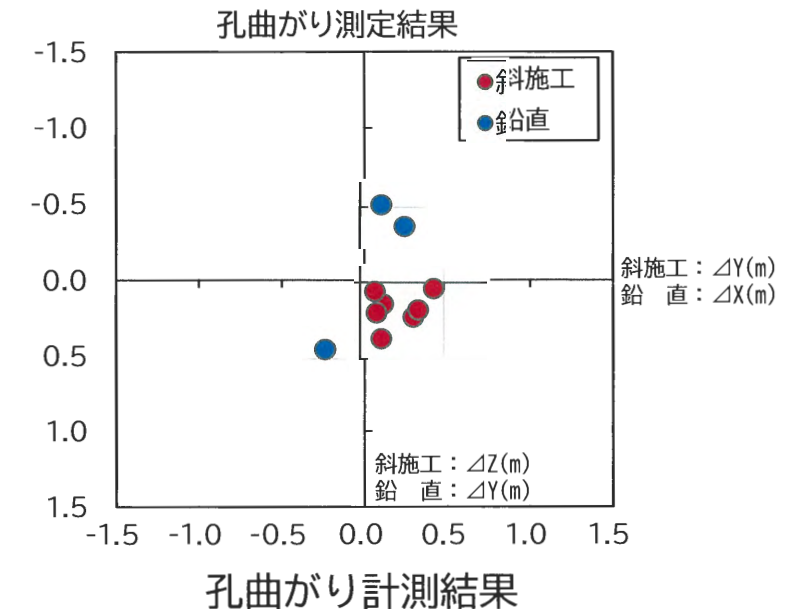
孔番号	削孔角度 [°]	削孔長 [m]	偏心量[m]				削孔精度
			ΔX	ΔY	ΔZ	偏心量	
A-1 m	57.1	64.90	0.316	0.130	0.371	0.501	1/103
A-1 p	41.1	53.58	0.288	0.320	0.228	0.487	1/111
C-1 q	36.4	53.88	0.193	0.140	0.144	0.278	1/195
C-1 s	40.1	48.41	0.280	0.350	0.183	0.482	1/102
F-1 g	33.4	49.95	0.101	0.090	0.063	0.149	1/338
B-2 j	30.6	55.31	0.230	0.100	0.201	0.317	1/150
WN-3-j	30.5	58.18	0.060	0.442	0.043	0.448	1/131

・偏心量は計画削孔ラインと実削孔到達点との直線距離で算出

孔曲がり計測結果（試験施工 鉛直削孔）

孔番号	削孔角度 [°]	削孔長 [m]	偏心量[m]				削孔精度
			ΔX	ΔY	ΔZ	偏心量	
No. 4	鉛直	57.64	0.127	-0.513	-	0.528	1/108
No. 6	鉛直	57.64	0.265	-0.370	-	0.455	1/125
No. 9	鉛直	57.64	-0.213	0.440	-	0.489	1/115

・偏心量は計画削孔ラインと実削孔到達点との直線距離で算出



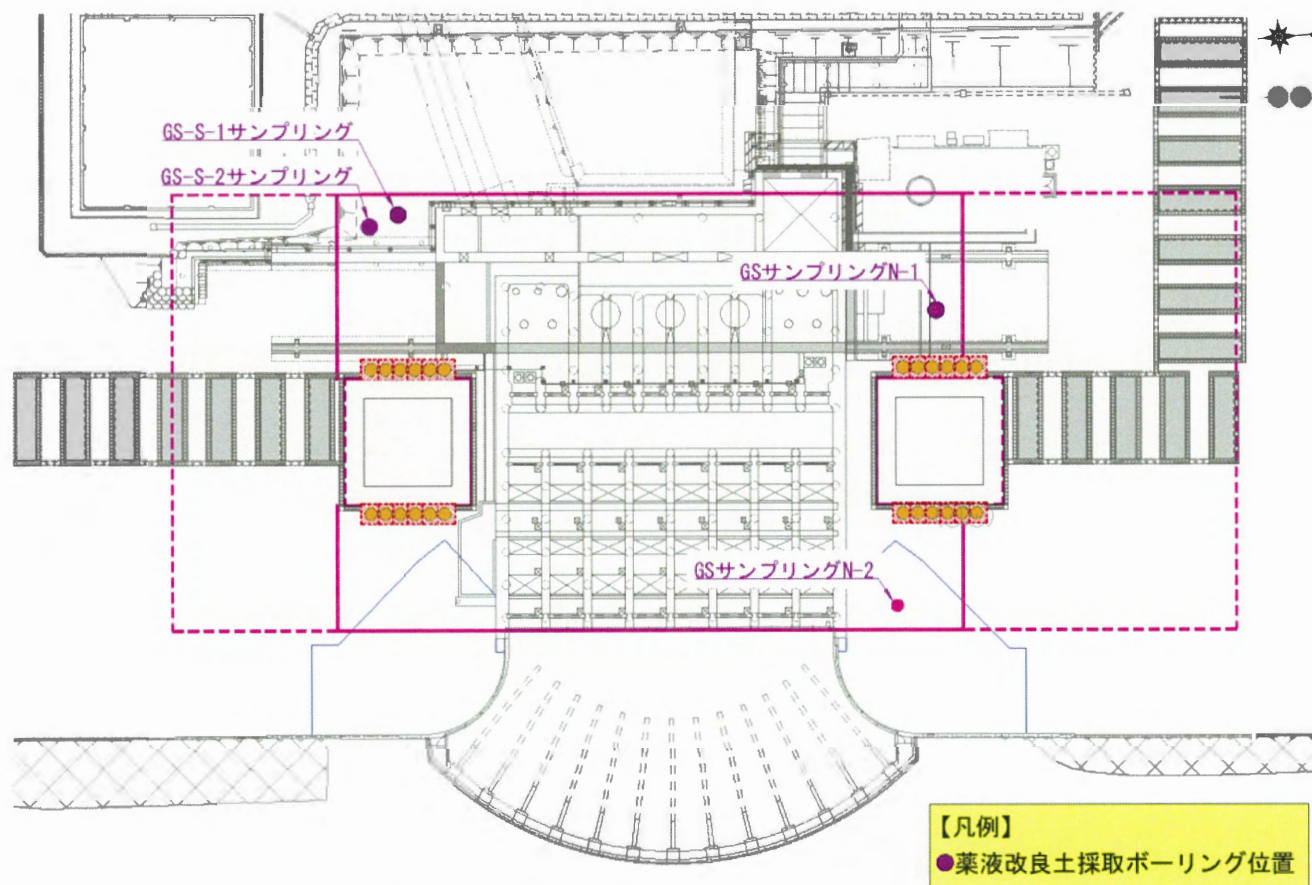
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料③：改良後の液状化強度試験】

➤ 改良後の液状化強度試験

（1）既施工箇所での液状化強度試験用の試料採取箇所

既施工箇所において、改良地盤の液状化強度比の評価も実施した。試料の採取は、砂・礫質土の乱れの影響が小さいとされるGSサンプリングで実施した。



現地改良土不攪乱試料採取位置

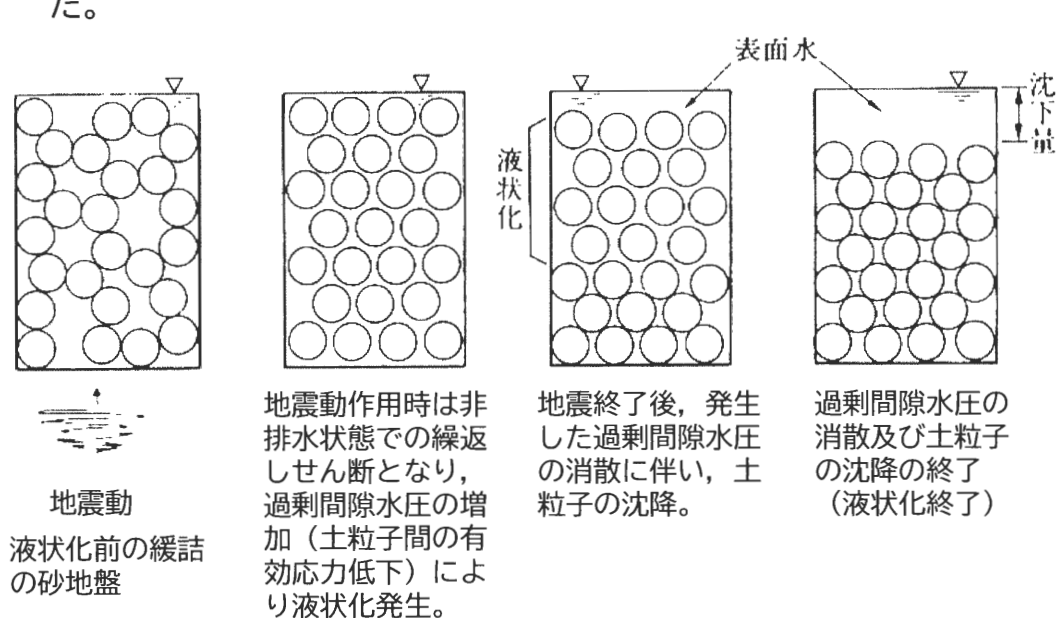
(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料③：改良土の液状化強度試験】

◆土の液状化と液状化強度試験

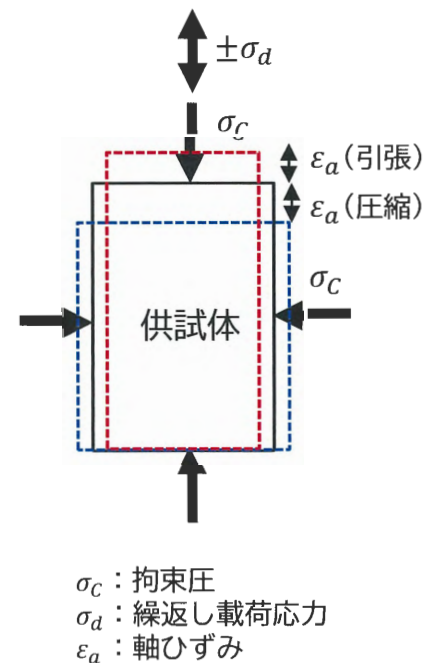
地下水以深の飽和した砂・礫質土地盤は、地震動のような繰返し荷重が作用すると非排水状態での繰返しせん断となり、緩詰の砂・礫質土地盤ではせん断変形に伴う土粒子の移動により間隙の水圧が上昇し、土粒子は水中に浮いた状態となりせん断強度が失われ、液体と似た挙動を示すこととなり、この現象を液状化という。

地盤の液状化強度の試験法は、供試体に一定の拘束圧を加えた状態で軸差応力 σ_d を圧縮・引張方向に載荷を行う繰返し非排水三軸試験、拘束圧の制御が可能で供試体上部に一定のトルク T （せん断力）を回転方向を正負で載荷を行う中空繰返しねじりせん断試験が代表的なものである。繰返し非排水三軸試験は軸ひずみ ε_a が5%、中空繰返しねじりせん断試験はせん断ひずみ ε_s が7.5%に達した際の過剰間隙水圧比が0.95以上に達することを液状化²⁾としており、 $\varepsilon_s = (1 + \nu)\varepsilon_a$ の関係から非排水条件でのポアソン比 $\nu = 0.5$ として ε_a が5%と ε_s が7.5%は同一状態を示す。

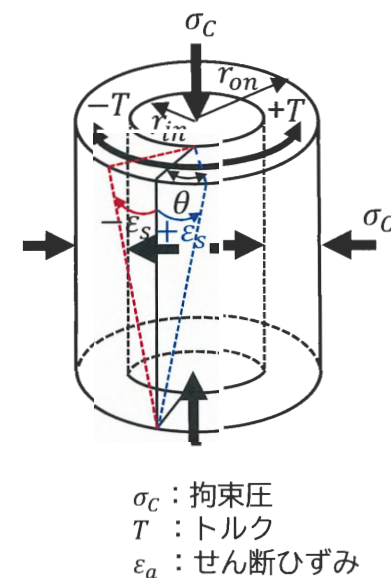
中空繰返しねじりせん断試験の標準供試体の厚さ(20mm)は最大粒径の5～10倍以上が望ましいこと²⁾からこれに合致する土粒子の粒径が比較的小さいAg2層、As層は中空繰返しねじりせん断試験、合致しない土粒子の粒径が大きいAg1層は繰返し非排水三軸試験を適用した。



地盤の液状化の概念¹⁾



繰返し非排水三軸試験



中空繰返しねじりせん断試験

注記：1)吉見吉昭：砂地盤の液状化，技報堂出版株式会社，1991年，5月

2)地盤材料試験の方法と解説（一二分冊の2一），公益社団法人地盤工学会

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

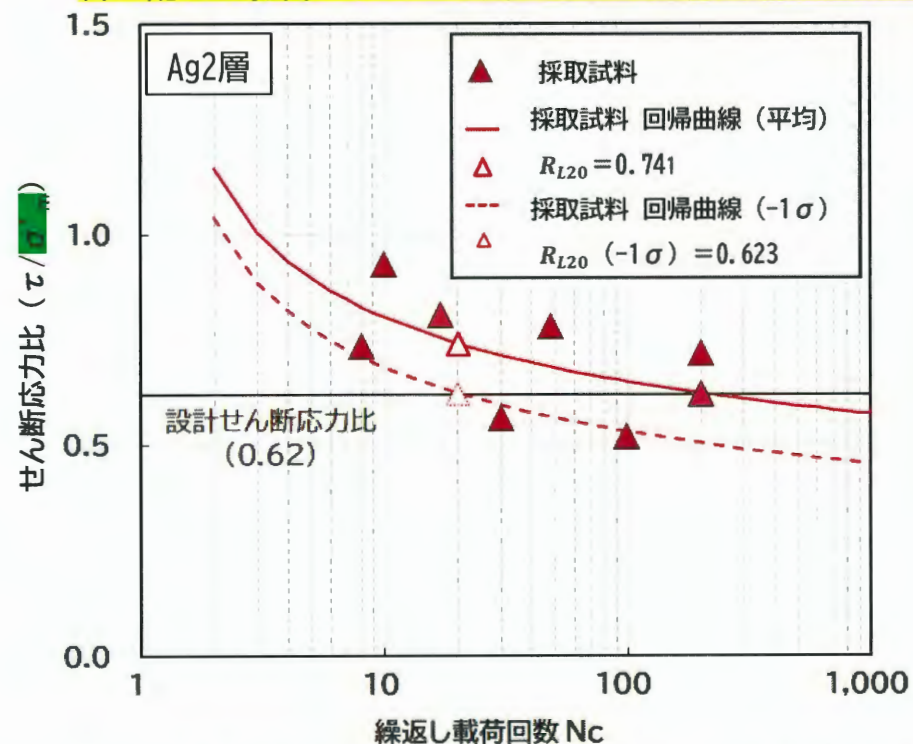
（2）地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料③：改良土の液状化強度試験】

◆地盤改良（薬液注入）の地盤から採取した試料の液状化強度試験結果に対する考察

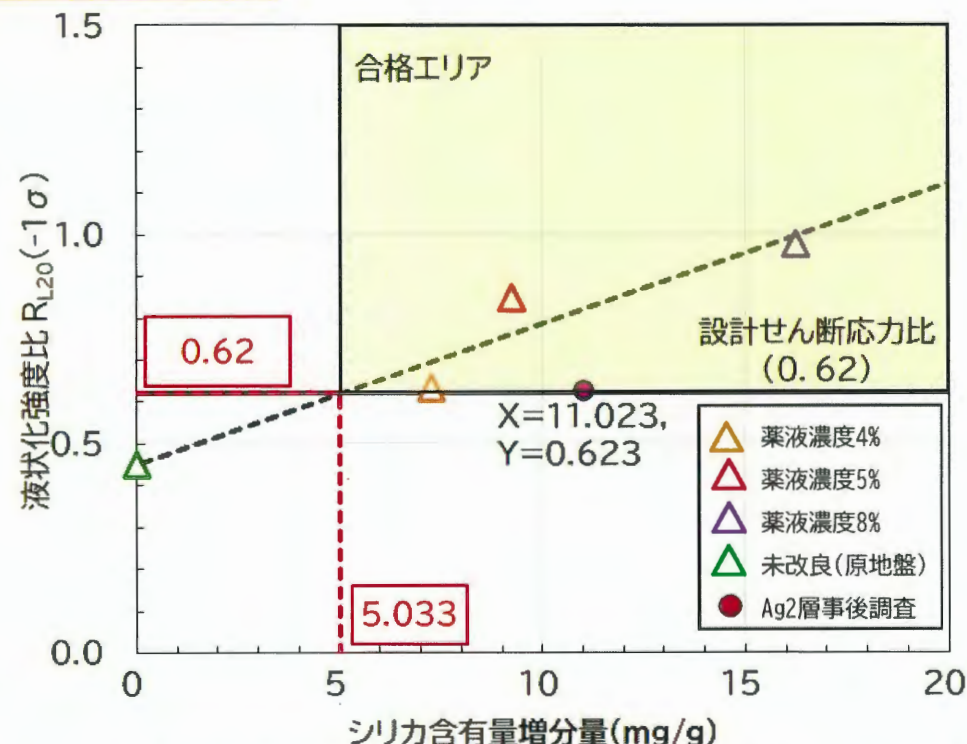
施工後の品質管理は採取した試料のシリカ含有量増分量を確認する計画であるが、地盤改良の改良品質について既施工箇所にてGSサンプリングにより採取した試料を用いた液状化強度試験により直接確認した結果及びその考察を以下に示す。

【試験結果及び考察】（以下は代表してAg2層の結果等を示す。）

- ・液状化強度試験試料の平均シリカ含有量増分量は11.023mg/gであり、シリカ含有量増分量の管理値5.033mg/gを上回った。
- ・液状化強度試験による $R_{L20}(-1\sigma)=0.623$ は設計せん断応力比0.62とほぼ同様な値であった。試験の結果から「せん断ひずみ7.5%においても過剰間隙水圧比は95%に未達」であり、液状化の定義から「液状化していない」と評価した。なお、液状化強度曲線を求めるデータは過剰間隙水圧比の値に拘らず試験の停止条件である「せん断ひずみ7.5%」に達した際の繰り返し載荷回数を採用している（次頁参照）。
- ・シリカ含有量増分量と液状化強度比の相関より液状化強度試験による $R_{L20}(-1\sigma)$ は小さかった理由としては、試料採取時の試料の乱れの影響によるせん断ひずみの進行の増大によるものと考えられる。



液状化強度試験（中空繰返しねじりせん断試験）結果

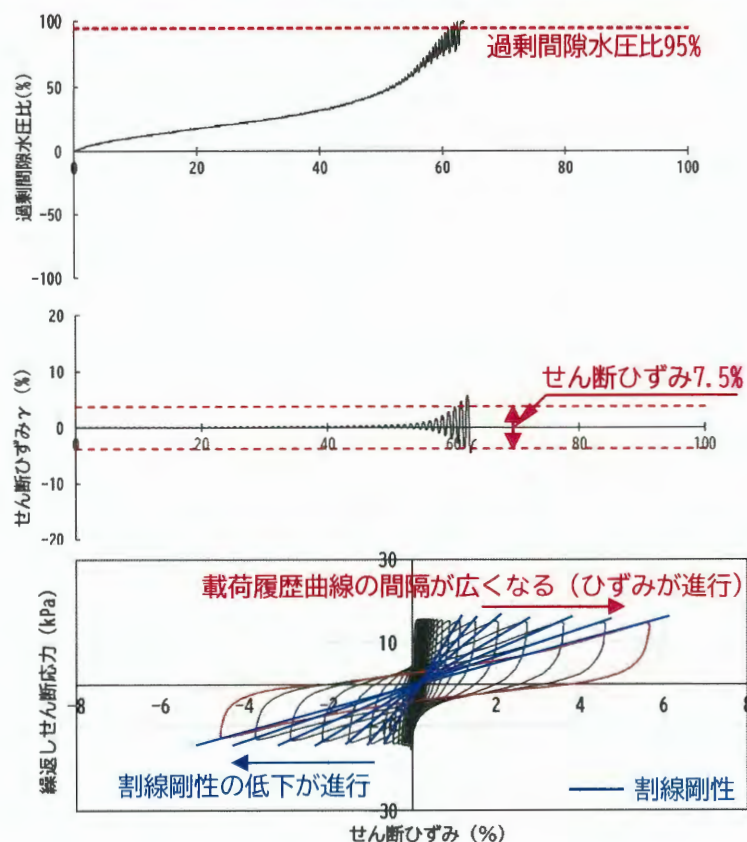


シリカ含有量増分量と液状化強度比 $R_{L20}(-1\sigma)$ 判定結果

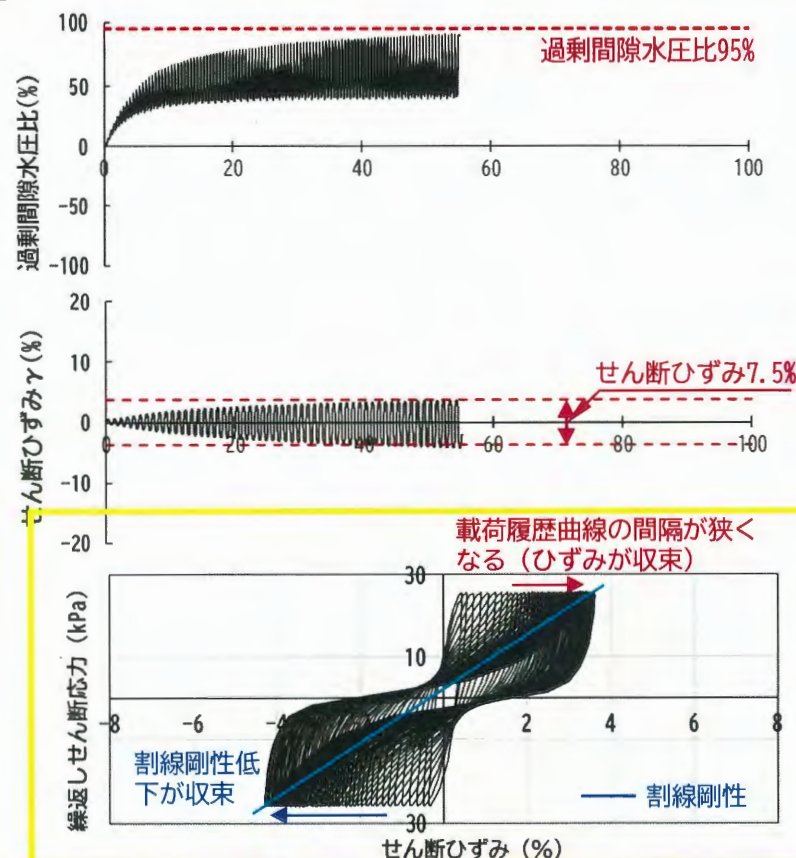
4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(2) 地盤改良（薬液注入）の改良品質の不確かさへの対策方針【参考資料③：改良土の液状化強度試験】

◆ 未改良土と改良土の液状化強度試験による繰返しせん断特性



(a)未改良土 (Ag2層, $(\tau/\sigma'_m)=0.472$)



(b)改良土 (Ag2層, $(\tau/\sigma'_m)=0.782$, 薬液濃度5%)

項目	未改良土	改良土
過剰間隙水圧比	繰返し载荷とともに徐々に蓄積され漸増するが、ある繰返し回数（本試験では50回）付近で急激に増加し、その後過剰間隙水圧比95%に達しており、液状化していると評価した。	繰返し载荷初期は過剰間隙水圧の増加量が大きい、その増加量は徐々に減じており、せん断ひずみ7.5%でも過剰間隙水圧比は95%に達せず、液状化していないと評価した。
せん断ひずみ	ある繰返し回数（本試験では50回）以上で急増し、過剰間隙水圧比95%に達したほぼ同じ時点でせん断ひずみ7.5%に達しており、液状化していると評価した。	繰返し载荷初期はせん断ひずみの増加量は大きい、その増加量は徐々に減じながらせん断ひずみ7.5%に達する（過剰間隙水圧の増加に伴うせん断ひずみの急増は見られないことから液状化していないと評価した）。
せん断応力とひずみ関係	ある繰返し回数（本試験では50回）以上でせん断ひずみの振幅が大きくなり、最終的には過剰間隙水圧の増加により割線剛性の低下が進行し、剛性を失った扁平な形状の载荷履歴曲線を示しており液状化していると評価した。	繰返し载荷初期のせん断ひずみの振幅は未改良土より大きい、载荷履歴曲線のせん断ひずみの振幅は徐々に収束し、試験後半ではほぼ同じ形状で割線剛性の低下が収束しており、剛性を維持していることから液状化していないと評価した。

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

（3）地盤改良（セメント系：掘削・置換工法）の改良品質の不確かさへの対策方針

1. 概要

防潮堤（鋼製防護壁）基礎の西側を掘削・置換工法により地盤改良（セメント系）する計画である。先に整理した本地盤改良の改良品質の不確かさの要因である「配合設計（セメントの配合量と一軸圧縮強度の関係）」について、設計への影響の有無を確認する。

2. 工事概要

改良計画範囲を掘削し、当該箇所をプラントにて製造した流動化処理土により埋め戻す（置き換える）。

3. 流動化処理土の要求性能

現地打設した流動化処理土が設計の一軸圧縮強度を満足すること
設計の一軸圧縮強度 $q_{ud} = 1.5 \text{ N/mm}^2$

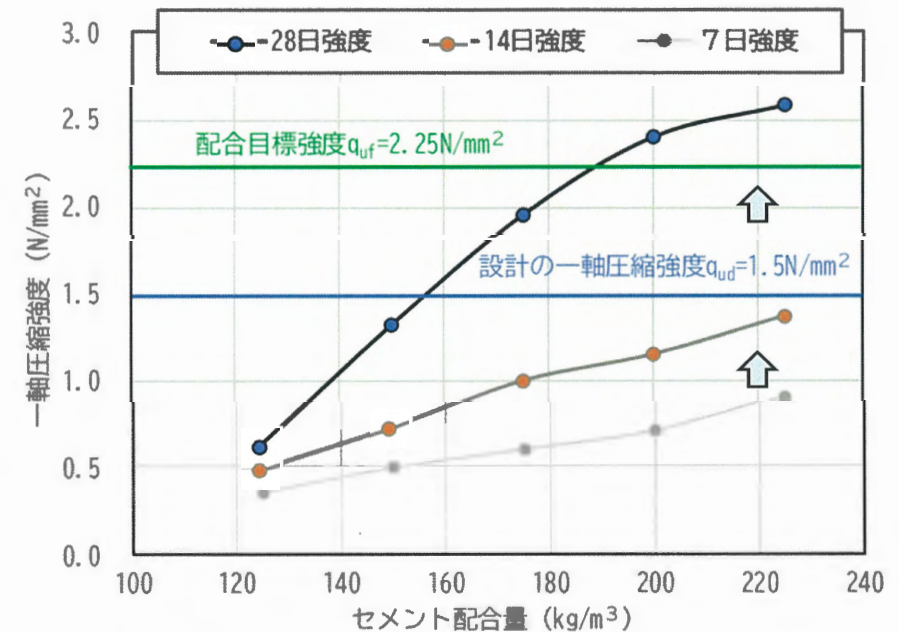
4. 配合設計（セメントの配合量と一軸圧縮強度の関係）

セメントの配合量を変化させた試験練りを実施し、設計の一軸圧縮強度に対する配合目標強度を設定した。本工事で使用する流動化処理土は購入砂を材料として製造する方針としており、母材のばらつきは小さいと判断し、 $q_{uf} = 1.5q_{ud} = 2.25 \text{ N/mm}^2$ とした。

配合試験結果（セメント配合量と一軸圧縮強度の関係）

セメント配合量	購入砂	ベントナイト	水	一軸圧縮強度
125	1142.7	10.0	523.8	0.627 N/mm ²
150	1119.2	10.0	524.5	1.327 N/mm ²
175	1095.7	10.0	525.1	1.959 N/mm ²
200	1072.3	10.0	525.7	2.407 N/mm ²
225	1048.8	10.0	526.4	2.589 N/mm ²

注：単位記載のない数値の単位はkg/m³



配合試験結果（セメント配合量と一軸圧縮強度の関係）
（養生期間による強度増加）

4. 審査会合コメント⑮回答（地盤改良の改良品質の不確かさへの対策方針）

(3) 地盤改良（セメント系：掘削・置換工法）の改良品質の不確かさへの対策方針

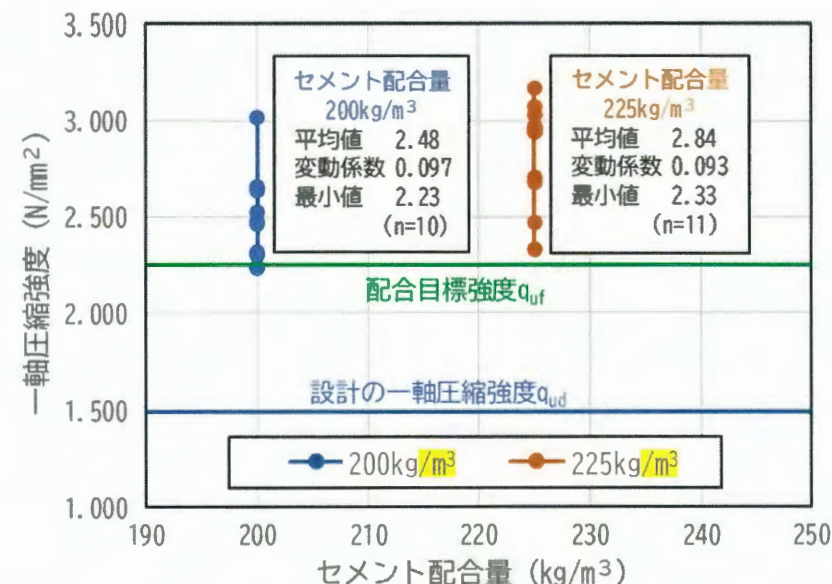
5. 強度のばらつきを考慮した配合の決定

前頁の配合試験結果より、配合目標強度を満足する配合は、セメントの配合量 200kg/m^3 及び 225kg/m^3 であった。この配合2ケースについて、追加の一軸圧縮強度試験を実施し、強度のばらつきを確認した。

この確認の結果、最小値及び平均 -1σ が配合目標強度を満足する「セメント配合量 225kg/m^3 」を採用することで、改良地盤の品質を十分確保することが可能である。

一軸圧縮試験結果（ばらつき評価）

セメント配合量	200kg/m^3	225kg/m^3
平均値 (N/mm ²)	2.48	2.84
最小値 (N/mm ²)	2.23	2.33
変動係数	0.097	0.093
平均 -1σ (N/mm ²)	2.16	2.32
(参考)試験数	10	11



6. 地盤改良（セメント系）の品質管理

プラントによる流動化処理土の製造は上記5.の配合によるものとし、流動化処理土の品質管理は、他工事において適用実績のある「流動化処理土利用技術マニュアル《平成19年/第2版》（独立行政法人土木研究所/流動化処理工法総合監理 編）」に従い以下の項目を実施する。

なお、改良範囲については、掘削完了時（置換開始前）及び置換完了時に測量にて確認する。

流動化処理土の品質管理基準

項目	確認項目	頻度	確認方法
材料	一軸圧縮強度	製造日ごとに1回	一軸圧縮強度 q_u を求め、 q_u の平均値 $\geq$ 設計の一軸圧縮強度以上であることを確認する。

(4) 地盤改良（セメント系：高圧噴射攪拌工法）の改良品質の不確かさへの対策方針

1. 概要

防潮堤（鋼製防護壁）の東側において高圧噴射攪拌工法により地盤改良（セメント系）を実施している。先に整理した本地盤改良の改良品質の不確かさの要因である「地盤の不均一性（土質，締り度）」について，設計への影響の有無を確認する。

2. 工事概要

ボーリング孔より高圧で地盤改良材を噴射し，地盤を切削・攪拌し地盤を改良する。

3. 地盤改良体の要求性能

地盤改良体が設計の一軸圧縮強度※を満足すること

設計の一軸圧縮強度 砂・礫質土層 $q_{ud}=3.0\text{N/mm}^2$
粘性土層 $q_{ud}=1.0\text{N/mm}^2$

※土質に応じた改良材を選定し，その改良材により決定される強度を設計に採用

4. 改良品質の不確かさへの対策方針

改良品質の不確かさの要因及び要求品質を確保するための対策方針を下表に示す。

不確かさの要因	詳細	要求品質を確保するための対策方針
地盤の不均一性	地盤の不均一性（土質，締り度）の影響による改良径のばらつき	改良配置についてはラップ配置を採用する。また，事後調査ボーリングを行い，計画範囲が改良できていることを確認した。
	地盤の不均一性（土質，締り度）の影響による一軸圧縮強度のばらつき	各土層に応じた改良材を選定し，その改良材と土質より決定される地盤改良体の一軸圧縮強度を設計に採用していることを確認した。

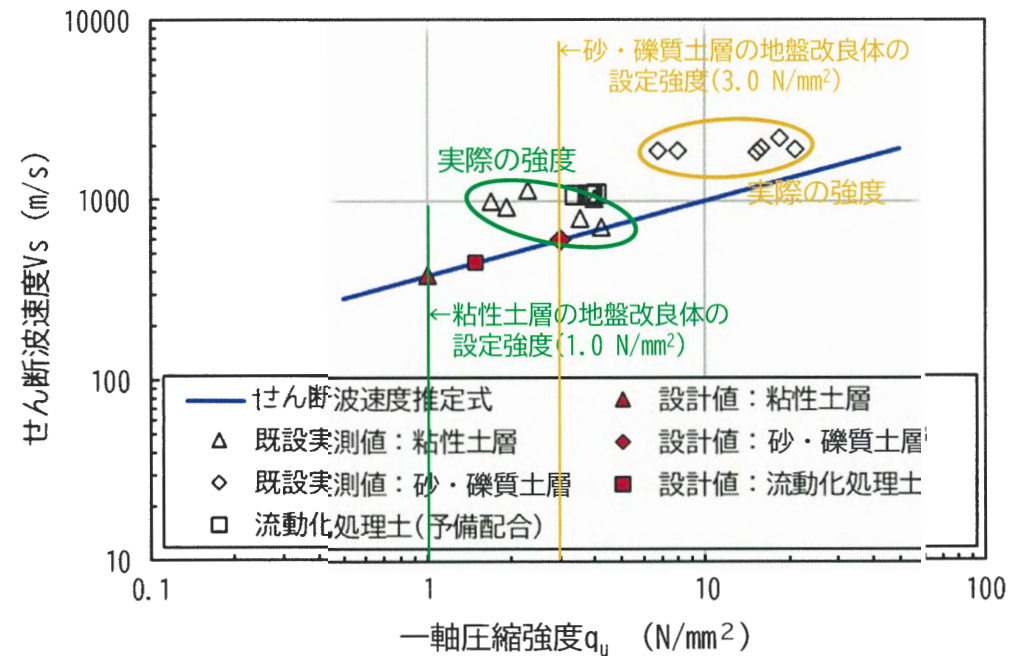
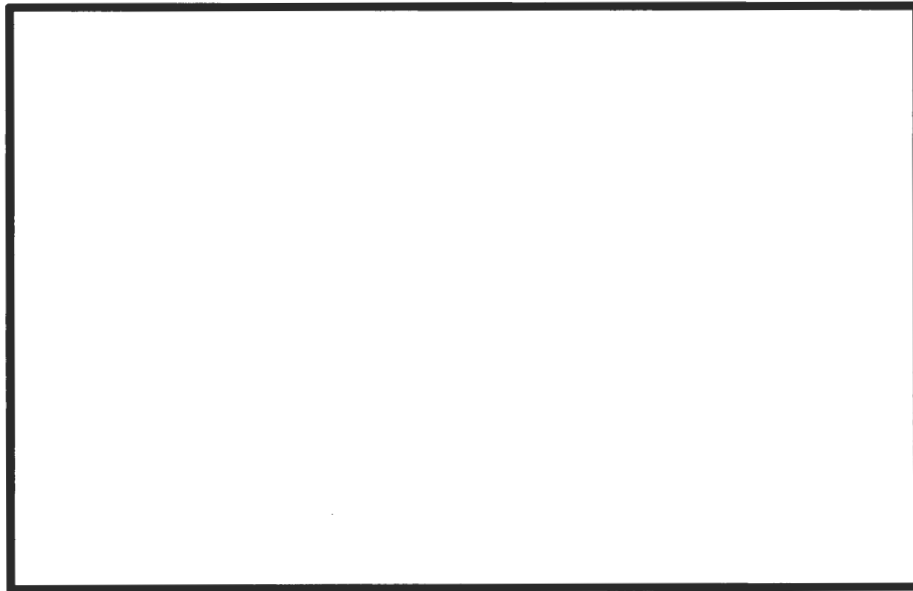
改良品質の不確かさへの対策方針及び施工箇所の調査結果を次頁に示す。

（4）地盤改良（セメント系：高圧噴射攪拌工法）の改良品質の不確かさへの対策方針

【要求品質を確保するための対策方針及び施工結果】

地盤改良のボーリング孔の配置として地盤改良円を重ねるように配置（ラップ配置）することで、改良径のばらつきの対策とする。

なお、施工箇所にて改良品質等の確認のために実施した一軸圧縮強度試験及び弾性波速度を確認した結果、地盤改良体の一軸圧縮強度 q_u 及びせん断波速度 V_s の試験結果が、改良品質を満足していることを確認している。



一軸圧縮強度及びせん断波速度の調査結果

5. 審査会合コメント⑯回答

5. 審査会合コメント⑩回答

コメント回答

【第1360回審査会合コメント⑩】

No	コメント
⑩	● 地盤改良以外の工事について、設計上の想定に影響を及ぼす可能性があるものを抽出し、安全側の設計となっていることを説明すること。 - 例1) 中実鉄筋コンクリートにおけるD51-17.5段の太径鉄筋による高密度の配筋については施工実績が少なく施工難易度が高いと考えられるので、工事計画を実現するための対策を示すとともに不具合を繰り返さない取り組みを説明し、設計への影響がないことを説明すること。 - 例2) 中実鉄筋コンクリートの機械式継手の範囲には水平鉄筋が配置されないため、配置しないことによる影響が安全側に設計へ反映されていることを説明すること。 - 例3) 鋼管杭の岩盤への根入れ箇所について、先行置換材であるセメントベントナイトの強度と岩盤強度の大小関係を比較し、鋼管杭の地盤バネが安全側に設定されていることを示すこと。また、セメントベントナイトの耐用年数等、設計の想定に影響を及ぼす可能性がある工事の計画を網羅的に抽出し、それが安全側に設計へ反映されていることを説明すること。

回答概要

No	回答概要
⑩	防潮堤（鋼製防護壁）の工事の施工ステップ毎に、設計上の想定に影響を及ぼす可能性があるものとして太径鉄筋の高密度配筋の鉄筋組立（精度確保・鉄筋間の干渉）・コンクリートの充填の実現性、鋼管杭打設における打設精度確保・施工荷重の影響、高強度鋼材の溶接等、注視すべきプロセスを抽出し、モックアップ試験、3次元CADによる鉄筋間の干渉の可視化、施工機械の配置図及び施工状態の確認等により施工性や品質管理の観点から、これらが実現性のある工事計画、安全側の設計となっていることを確認した。 なお、例示のあった項目等についての検討・確認結果の概要は以下のとおり。 ・ 中実鉄筋コンクリートの構築について、鉄筋組立・コンクリート充填のモックアップ試験を実施し、中実鉄筋コンクリートの確実な構築のため方策が有効であることを確認した。 ・ 中実鉄筋コンクリートの機械式継手の範囲の帯鉄筋については構造評価の鉄筋の配置が困難なため近傍に移動し、当該位置には設置可能な最大径の鉄筋を構造細目に従い帯鉄筋として配置する計画（構造設計の鉄筋として加算しない）であり、安全側の設計となっていることを確認した。 ・ 支障物は岩盤中にないため、セメントベントナイトへの置換は堆積層のみとした。セメントベントナイトは文献調査の結果から長期安定性を有していることを確認し、設計に影響ないことを確認した。 ・ 鋼管杭打設について、施工時の重機配置から重機荷重が鋼管杭の打設精度に影響を及ぼすことはないこと及び発電所内の施工実績から鉛直精度管理システムによる精度確保により十分な精度で打設できることを確認した。

（1）防潮堤（鋼製防護壁）工事の施工性等に係る基本方針

防潮堤（鋼製防護壁）の地中連続壁を構築する際、掘削した溝壁の安定性が確保できず、はらみ出し・崩落等の発生により、コンクリートの未充填や鉄筋の高止まりが発生した。また、コンクリートの未充填や鉄筋の変形等の状態についての把握が地中連続壁の構築後となっており、不具合を施工中に検知・是正することができなかった。

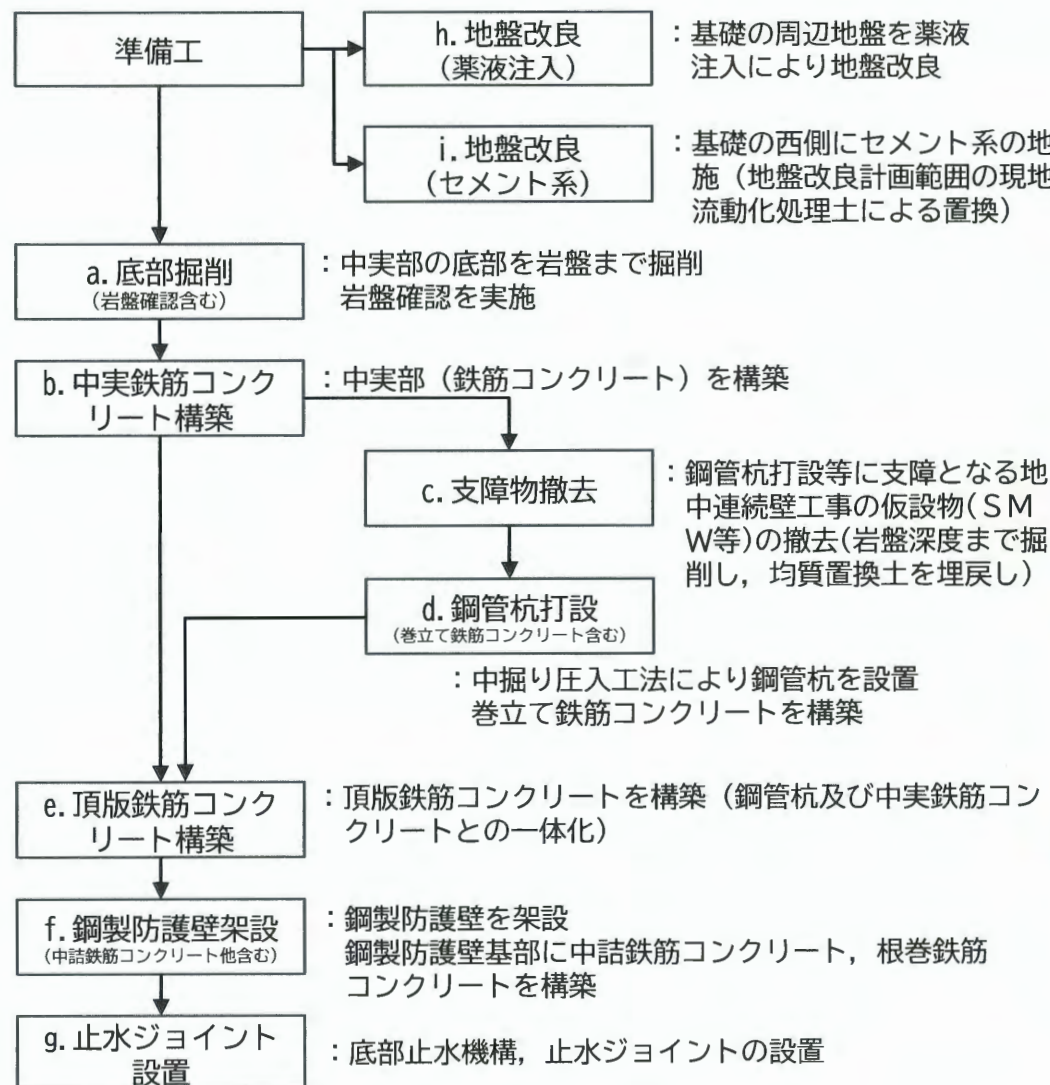
これらを鑑み、防潮堤（鋼製防護壁）の工事に係る施工性等の確保として、各施工ステップの施工性等について以下の基本方針に基づき検討・確認を行った。また、不具合を繰り返さない取り組みとして、各施工ステップの施工内容から、設計上の想定に影響を及ぼす可能性があるもの（施工難易度が高いプロセス等）の注視すべきプロセス等を網羅的に抽出し、これらのプロセス等が設計に影響を及ぼさないための方策等を検討・確認した。

【施工性等に係る基本方針】

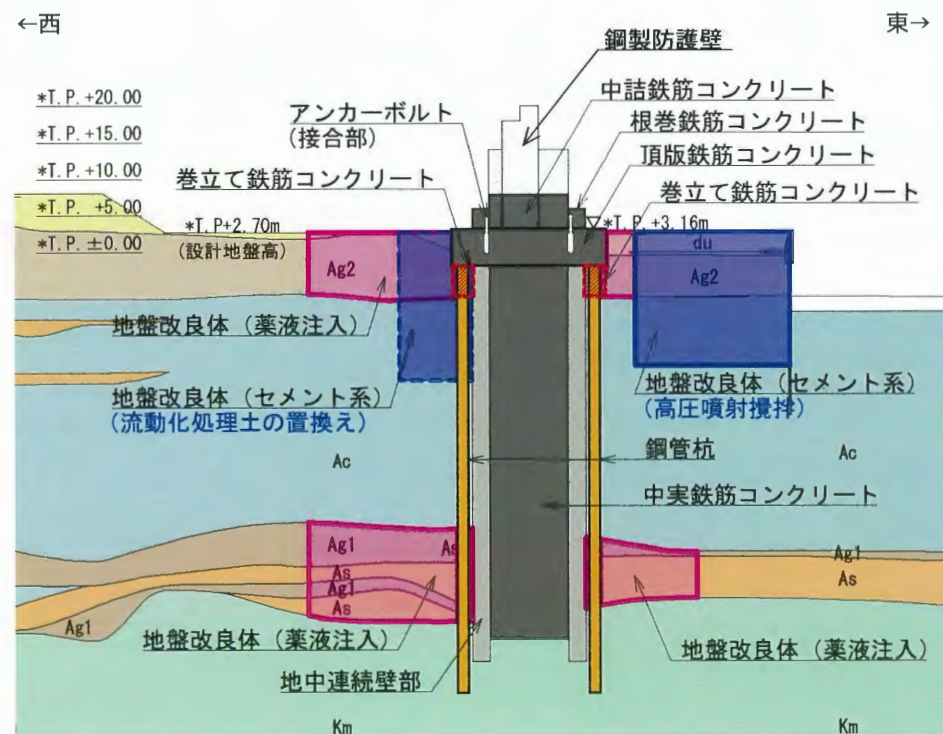
- ・ 防潮堤（鋼製防護壁）の施工方法について、適用性、施工実績を踏まえ、地盤のはらみ出し・崩落等を回避できる施工方法を選定する。
- ・ 施工エリアについて現場調査や各施工ステップの施工図を作成し、特定した支障物や重機配置場所等への対策を検討の上、施工性を確認する。
- ・ 各施工ステップにおけるリスクを想定し、その対策を施すことで施工の実現性を確保する。
- ・ 施工ステップ毎に工事が計画どおり行われていることの確認が可能か、品質を確認（検査）する項目・時期・方法を整理し、確認する。
- ・ 不具合を施工中及び施工後に検知・是正できるよう目視等で実態を確認できる検査を選定する。

(2) 防潮堤（鋼製防護壁）工事の施工ステップ

防潮堤（鋼製防護壁）工事の施工ステップを以下に示す。



施工ステップ図※



北基礎断面図（例）

※ 工事の流れの基本を示した図であり、工事の細部で施工ステップ図と異なる順序で施工を実施する可能性がある。

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(3) 施工ステップの施工性等の検討・確認結果（概要）

(2)の施工ステップ毎に、施工の難易度が高い等の注視すべきプロセス等を網羅的に整理し、設計への影響を確認する。

施工ステップ	施工ステップの概要	注視すべきプロセス等 (一般工事との相違点等)	設計影響の確認方法	備考
a. 底部掘削	中実鉄筋コンクリート設置位置の地盤の掘削、岩盤確認	なし	—	
b. 中実鉄筋コンクリート構築	中実鉄筋コンクリートの構築	①太径鉄筋の高密度な配筋を多重に構築する実績の少ない作業であり、鉄筋組立の精度確保、コンクリートの充填の施工難易度が高い ②機械式継手の範囲の帯鉄筋の配置の確認	①実規模のモックアップ試験により施工性・品質を確認 ②機械式継手(周辺含む)の配置を確認	
c. 支障物撤去	鋼管杭打設の準備として打設位置の支障物を撤去。均質置換土による埋戻し	・鋼管杭打設時に撤去されない均質置換土の設計への影響	・施工内容の確認及び均質置換土の地盤物性値（経年変化含む）を整理	
d. 鋼管杭打設	中掘り圧入工法による鋼管杭の打設。巻立て鉄筋コンクリートの構築	①約50mの鋼管杭を水平に30cm間隔で打設するため高い打設精度が求められ施工難易度が高い ②鋼管杭打設における施工荷重（重機荷重）の影響 ③狭隘な区画での太径鉄筋の組立であり、施工難易度が高い	①鋼管杭の施工方法・実績の整理 ②鋼管杭打設時の重機配置及び工事仮設・杭打設への影響の確認 ③3次元CADによる配筋干渉及び施工図による施工性の確認	
e. 頂版鉄筋コンクリート構築	頂版鉄筋コンクリートの構築	・中実鉄筋コンクリート、鋼管杭との接続箇所であり、構造鉄筋と定着鉄筋などが複雑に交錯するため、鉄筋組立の施工の難易度が高い	・3次元CADによる配筋の干渉確認	
f. 鋼製防護壁架設	鋼製防護壁の組立・架設 中詰め鉄筋コンクリートの構築の構築	①鋼製防護壁の一部に高強度鋼材を採用しており、部材溶接の施工難易度が高い ②鋼製防護壁の基部内での太径の鉄筋の組立であり、施工難易度が高い	①高強度鋼材に対する溶接施工試験結果に基づく施工仕様の決定 ②3次元CADによる配筋干渉及び施工図による施工性の確認	
g. 止水ジョイント設置	鋼製防護壁の境界部に止水ジョイントの取付・設置	なし	—	
h. 地盤改良 (薬液注入)	薬液注入による地盤の改良 (非液化化地盤に改質)	・地盤を改良する行為であり、施工性、地盤改良体の品質の不確かさが設計に及ぼす影響	・配合試験、試験施工、現場状況に基づく施工仕様の決定。施工実績と設計の関係の整理	前章参照
i. 地盤改良 (セメント系)	掘削・置換工法			

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ①鉄筋組立，コンクリートの充填

注視プロセス等①：太径鉄筋の高密度な配筋を多重に構築する実績の少ない作業であり，鉄筋組立の精度確保，コンクリートの充填の施工難易度が高い

上記の注視プロセス等に対し，中実鉄筋コンクリートの構築を確実に実施するための方策等の確認として，以下のモックアップ試験・確認を実施する。

【モックアップ試験で確認する事項】

- ・太径鉄筋の高密度な配筋を精度よく組立てられること…A
- ・上記の配筋にてコンクリートが確実に充填されること…B，C

A. 鉄筋組立試験

主鉄筋が18段の多段配筋（鉛直鉄筋，水平鉄筋）及び複数段のせん断補強筋（水平格子鉄筋）を計画のとおり精度よく組立可能であることを確認するため，実配筋による鉄筋組立を実施する。

また，鉄筋組立に用いる段取り鉄筋等の適用性を確認する。

B. コンクリート充填確認試験

高密度配筋において，高流動コンクリート（自己充填性コンクリート）によるコンクリートの打設が可能（確実に充填されること）であることを確認するため，高密度配筋を組み立てた場所に使用予定のコンクリートを打設し，流動状況などを確認する。硬化後，試験体を切断し，充填を確認する。

なお，流動状況，流動距離をもとに施工計画を策定する。

C. 打設時のコンクリート性状変化防止の確認

大深度（約50m直下）におけるコンクリート打設によるコンクリートの性状変化（スランプフローの低下等）を防止する方策を確認する。

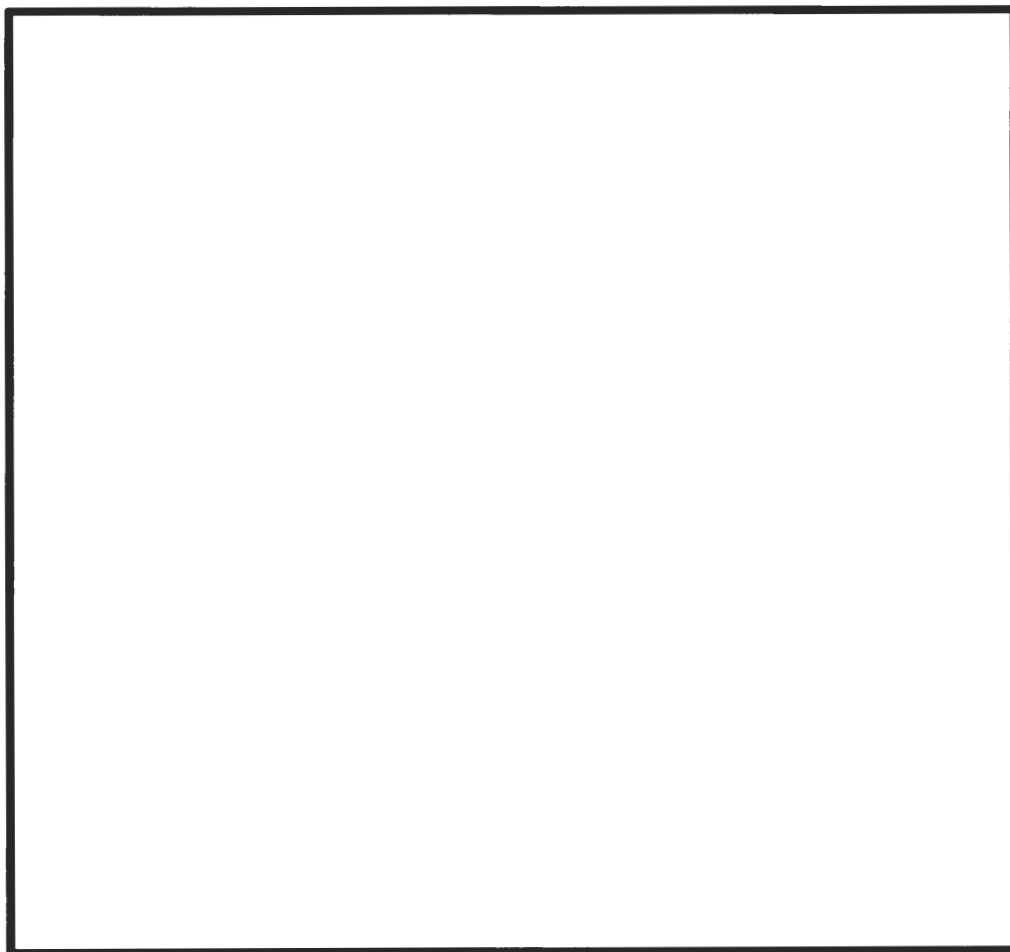
中実鉄筋コンクリート 構造図（南基礎）

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

A. 鉄筋組立試験

設計の構造図（前頁のC-C断面）を参考に、施工性確認として右図の配筋の組立試験を行う。組立は実際の組立と同じ、1施工分の高さ3.3mを施工する。

組立は現地の環境と同様とするため、地中連続壁内空（10.7m×10.7m）を板で模擬し、内空のみで作業する。



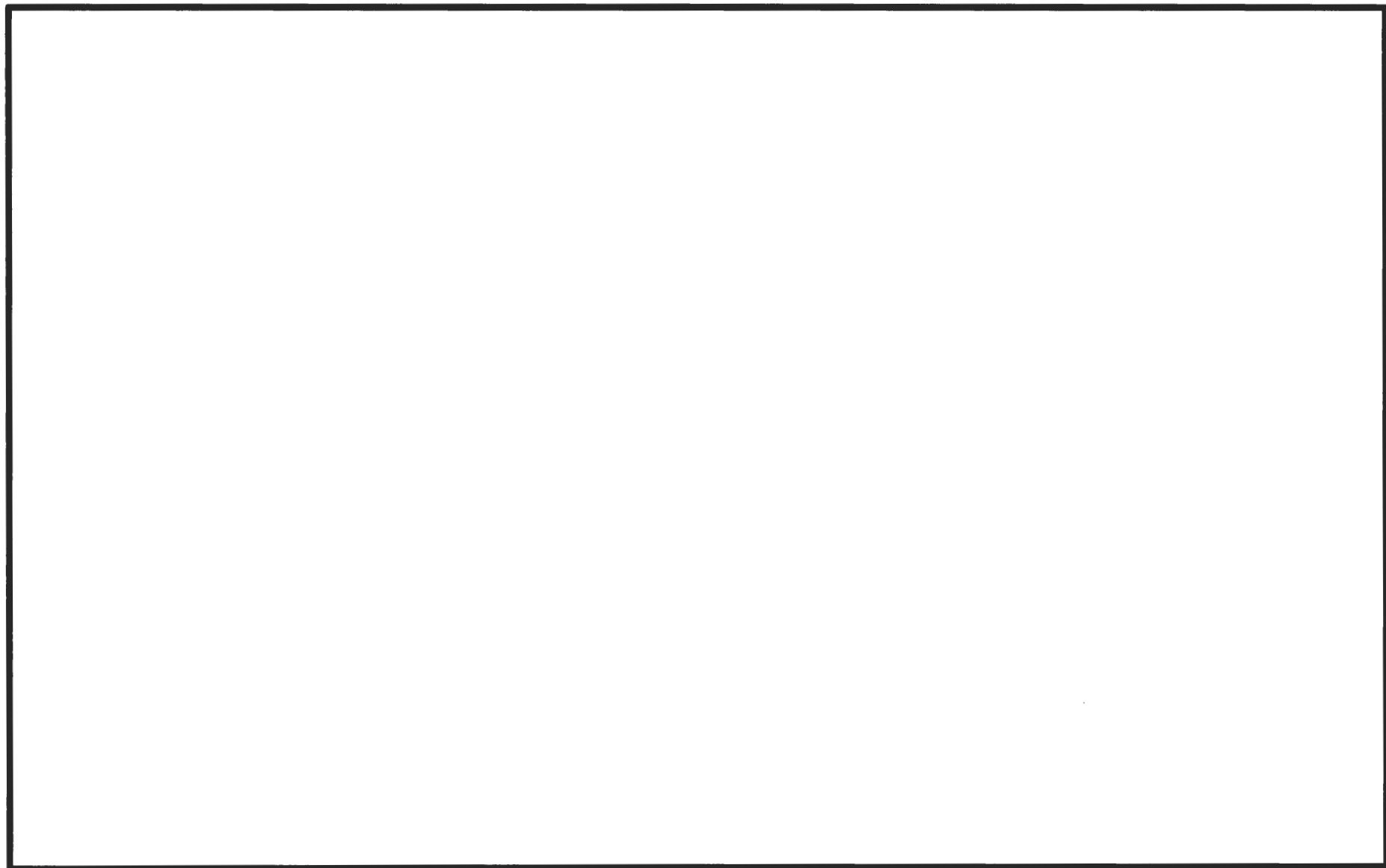
モックアップ試験体（組立完了状態）



モックアップ試験配筋図（南基礎）

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

A. 鉄筋組立試験



試験状況（鉛直鉄筋・フープ筋組立）

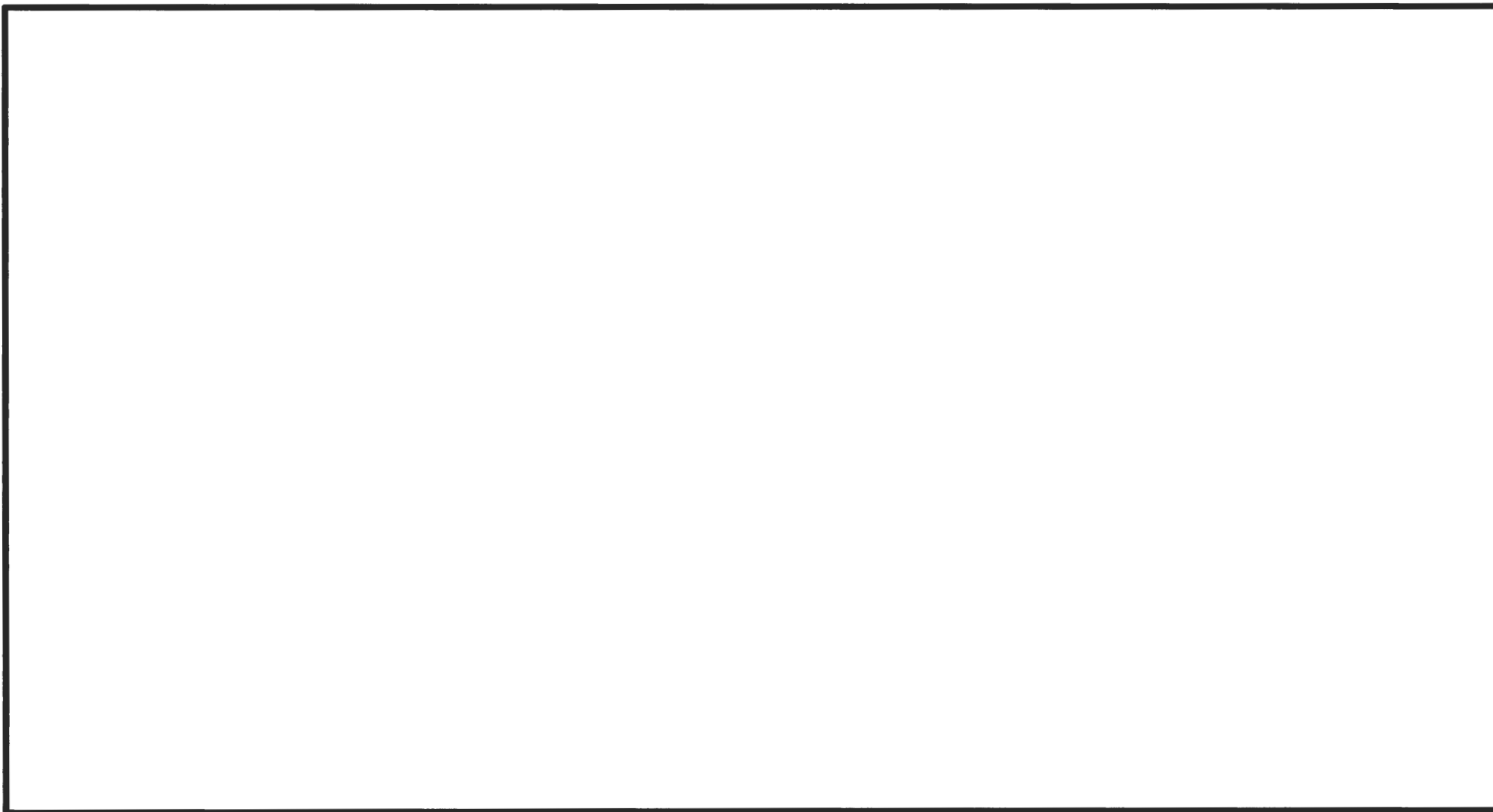
試験状況（せん断補強筋（水平鉄筋））

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

A. 鉄筋組立試験

【多段配筋の組立に係わる精度確保の方策（その1）】

次の方策を施すことで多段配筋の組立精度を確保し、設計・計画どおりの組立が実現可能である。



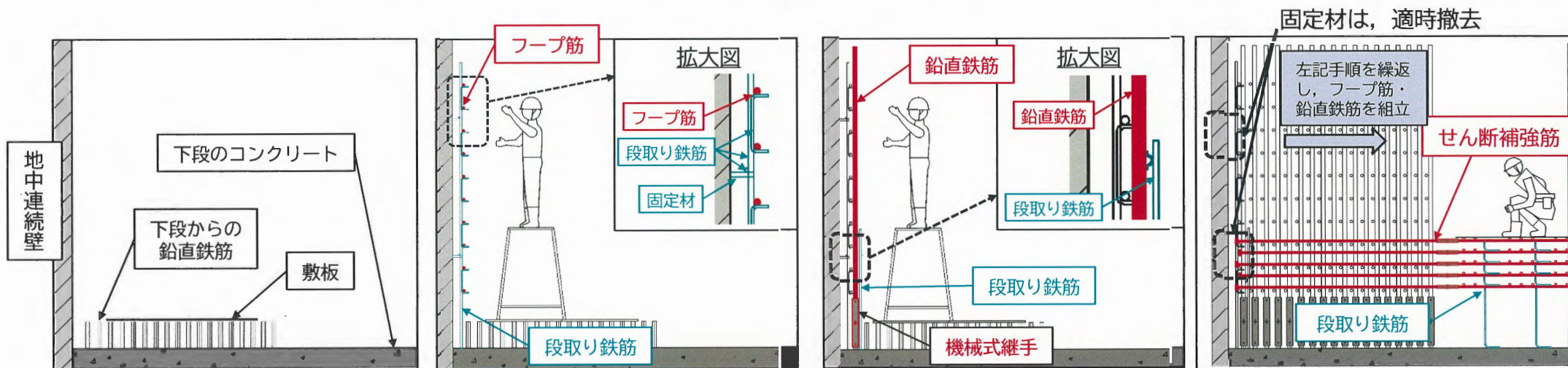
(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

A. 鉄筋組立試験

【多段配筋の組立に係わる精度確保の方策（その2）】

2段目以降の施工方法を下図に示す。

- ①作業床を整備として、先行して構築した下段の鉛直鉄筋の上に敷板を設置する。
- ②地中連続壁に固定した段取り鉄筋によりフープ筋の鉄筋間隔を定幅に調整・組立精度を確保する。フープ筋及び下段の鉛直鉄筋に設置した機械式継手に当該鉛直鉄筋を設置する（機械式継手には遊びがあり、鉛直鉄筋の位置調整は可能）。
- ③鉛直鉄筋・フープ筋を②の手順で組み立てたのち、せん断補強筋を設置する（せん断補強筋の位置、間隔は段取り鉄筋にて確保）。



下段からの鉛直鉄筋の上に作業床を整備するため、敷板を設置する。

地中連続壁に固定した段取り鉄筋にフープ筋を設置することで、鉄筋間隔を定幅に調整し、組立精度を確保する。

フープ筋及び下段の鉛直鉄筋に設置した機械式継手に当該段の鉛直鉄筋を設置する。機械式継手には遊びがあり、鉛直鉄筋の位置調整は可能。

左記手順を繰り返し鉛直鉄筋・フープ筋を組み立てる。その後、せん断補強筋を設置する（せん断補強筋の位置、間隔は段取り筋にて確保）。

①作業床の整備（敷板の設置）

②鉛直鉄筋・フープ筋の組立
（その1：フープ筋仮置き）

②鉛直鉄筋・フープ筋の組立
（その2：組立）

③せん断補強筋
（格子鉄筋）の組立

2段目以降の鉄筋組立

以上のことから、設計・計画どおりの組立を実現可能であり、設計上影響を及ぼさないことを確認した。

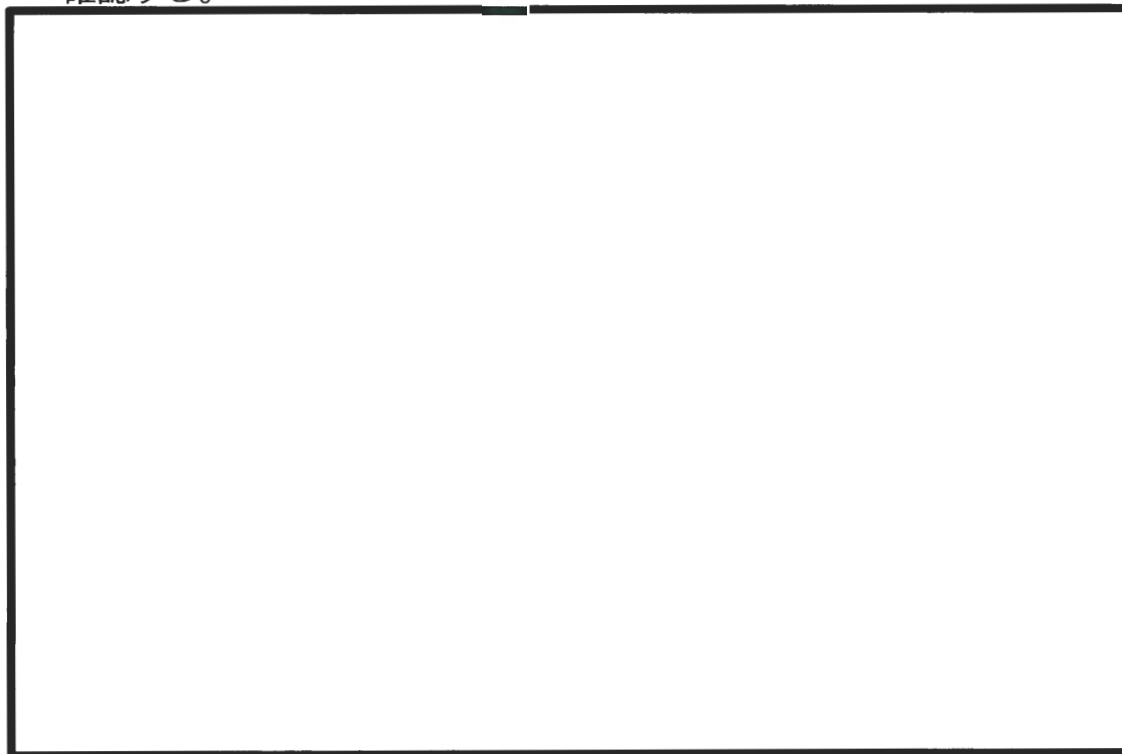
(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

B. コンクリート充填確認試験

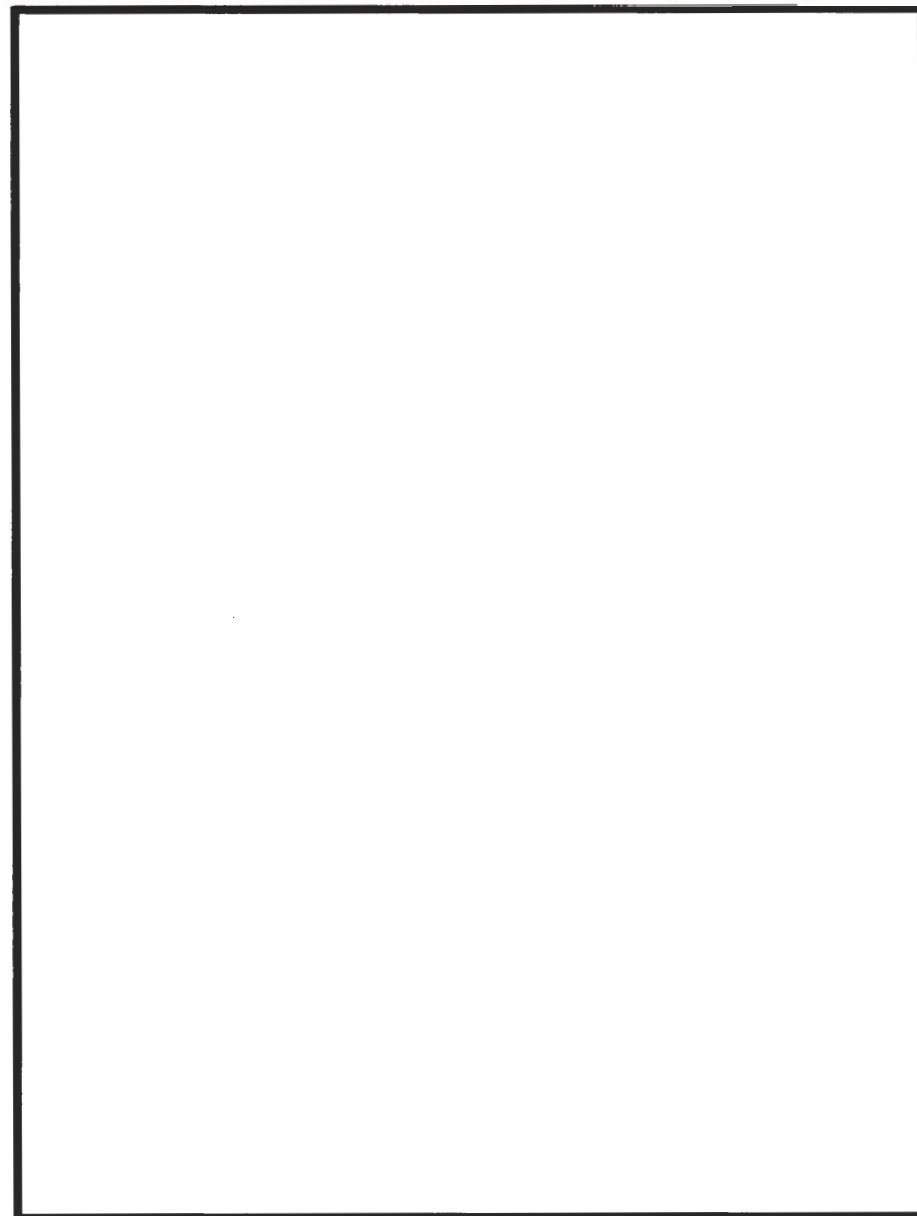
試験体の配筋図は右図のとおり。

平面で計画の1/4、高さ約1m分の実配筋を組み立て、そこに実際に使用予定の高流動コンクリート（自己充填性：ランク1：スランプフロー700mm）を高さ約1m打設し、コンクリートの流動状況、流動距離を確認する。

実施工を想定し、コンクリートの打設は1層高さ30cmとして3層約1m分行い、流動状況を確認する。また、施工計画の向上を図るため、打込み場所の高さが30cmとなる時点での水平方向の流動範囲（流動距離）を確認する。試験体硬化後、切断してコンクリートの充填を確認する。



モックアップ試験体 観察箇所

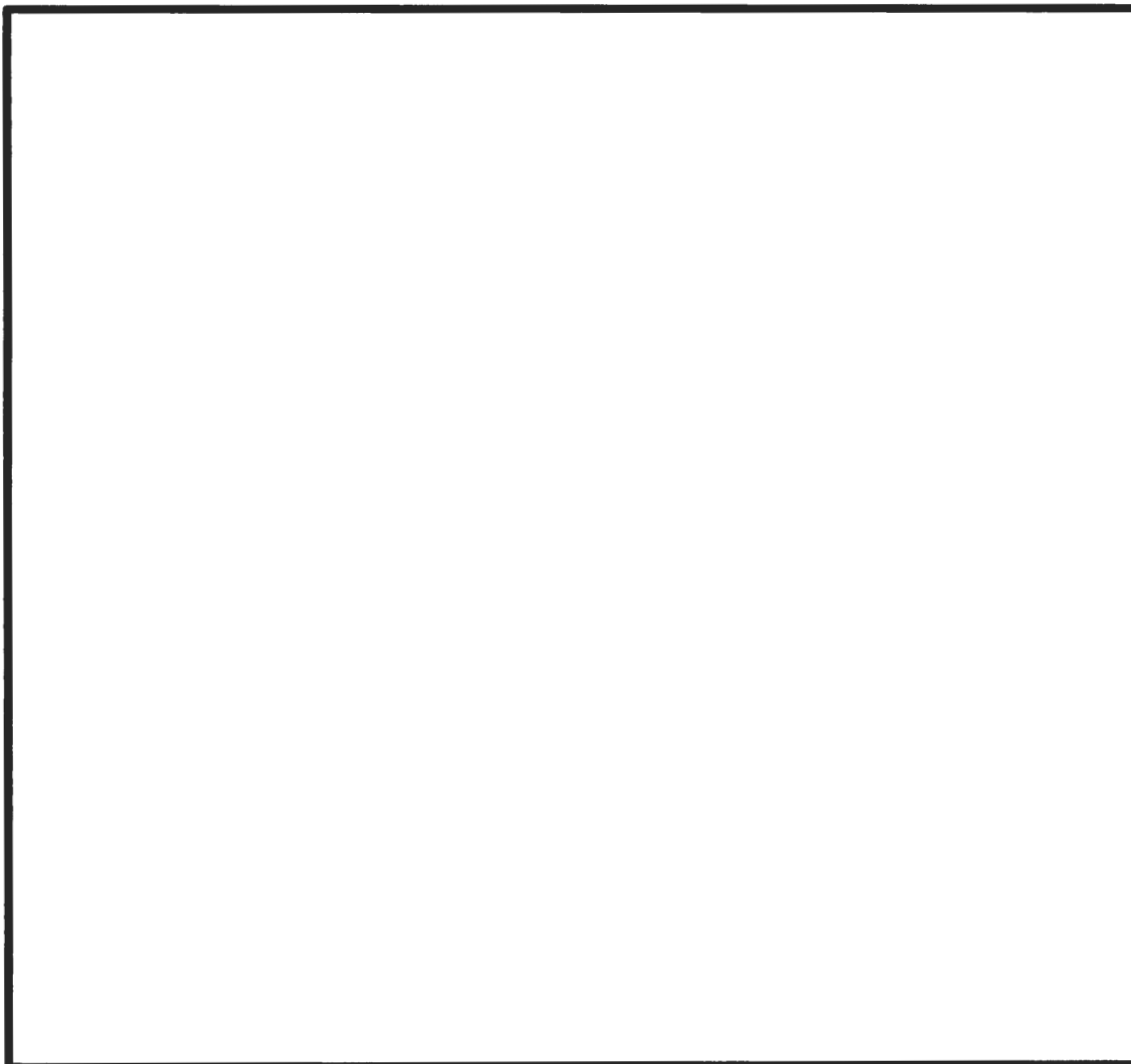


モックアップ試験体 配筋図

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

B. コンクリート充填確認試験

実施結果（流動状況の写真，試験体の切断結果の写真）



コンクリート打設時の状況
（コンクリートの流動状況）



試験体の切断観察結果

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

C. 打設時のコンクリート性状変化防止の確認

大深度（約50m直下）におけるコンクリート打設によるコンクリートの性状変化（スランプフロー等）を防止する方策を確認することで、施工上影響を及ぼさないことを確認する。

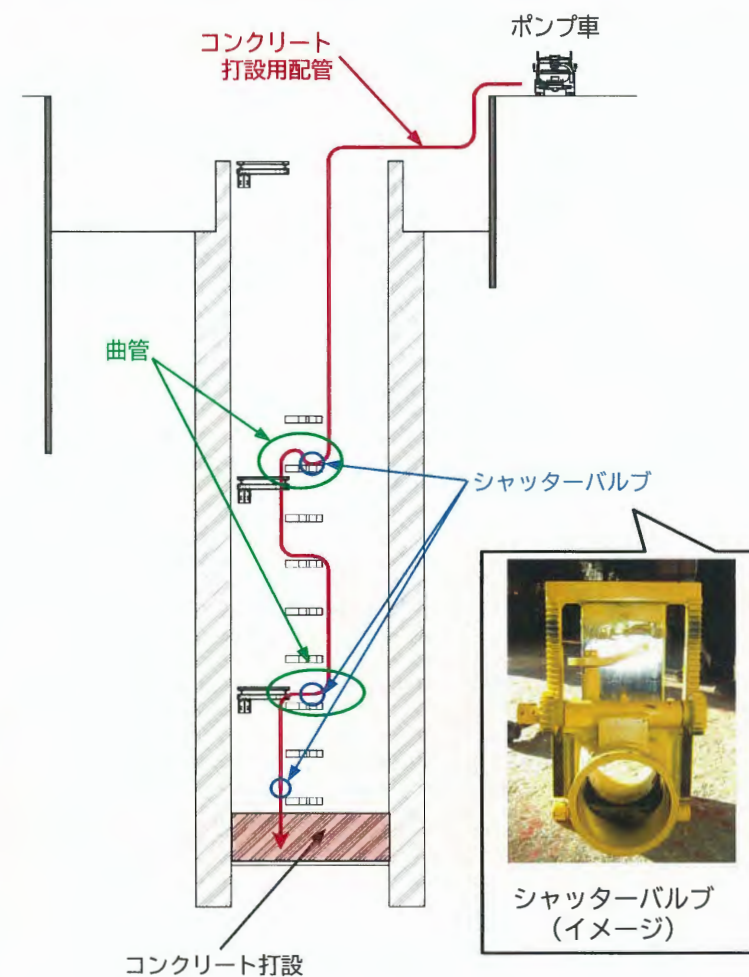
【性状変化（スランプフローの変化）防止のための方策】

- ・コンクリート打設前に配管内にモルタルを充填させ、コンクリートの骨材分離の原因となる自由落下を防止する。
- ・配管の適当な箇所に曲管およびシャッターバルブを設けることで、コンクリートの落下速度を調整する。

（施工に先んじて上記の有効性を確認する。）

確認結果：

- ・太径鉄筋の高密度な配筋について、実規模のモックアップ試験体を組み立て、組立精度が確保できることを確認した。
- ・太径鉄筋の高密度な配筋への高流動コンクリートによる打設を行い、充填に問題がないことを確認した。



コンクリート打設用配管イメージ

以上の確認結果から、中実鉄筋コンクリートの構築が、施工性や品質管理の観点から実現性のある工事計画であり、設計への影響はないことを確認した。

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ①鉄筋組立，コンクリートの充填

中実鉄筋コンクリートの高密度配筋部を鉄筋組立及びコンクリート充填確認としてモックアップ試験を実施しているが，中実鉄筋コンクリート以外にも防潮堤（鋼製防護壁）の構築には鉄筋コンクリート（本頁では「RC」と記載する。）工事があることから，本成果のこれらへの適用性を確認した。

施工ステップ	RC工事	太径配筋(D51等) 高密度な配筋	配筋設置誤差の累積	コンクリート打設 における悪条件	確認結果
b. 中実鉄筋コンクリート構築	中実RCの構築	太径鉄筋の使用：該当 高密度な配筋：該当 ⇒鉄筋組立試験を実施(①)	該当（打継ぎ回数） ・北14回（影響大） ・南12回（影響大） ⇒鉄筋組立試験を実施(①)	・高密度配筋（D51@140） ・多段配筋（18段） ・精度確保の為の段取り材 ・高流動コンクリート(ランク1) ⇒コンクリート充填試験(②)	—
d. 鋼管杭打設	巻立てRCの構築	太径鉄筋の使用：該当 高密度な配筋：該当 ⇒配筋の干渉確認が必要	非該当	・高密度配筋（D51@150） ・多段配筋（杭外3段） 〃（杭内2段） ・高流動コンクリート(ランク1) ⇒充填に係る確認要	【鉄筋組立】 ・3次元CADによる配筋の干渉確認 【コンクリートの充填】 ・条件はb. より軽微であり，②の試験結果を適用可能
e. 頂版鉄筋コンクリート構築	頂版RCの構築	太径鉄筋の使用：該当 高密度な配筋：該当 ⇒配筋の干渉確認が必要	該当 ・1回（影響小） ⇒一般工事と同程度	・高密度配筋（D51@150） ・多段配筋（7段：上部） ・高流動コンクリート(ランク1) ⇒充填に係る確認要	【鉄筋組立】 ・3次元CADによる配筋の干渉確認 【コンクリートの充填】 ・条件はb. より軽微であり，②の試験結果を適用可能
f. 鋼製防護壁架設	中詰めRCの構築	太径鉄筋の使用：該当 高密度な配筋：該当 ⇒配筋の干渉確認が必要	該当 ・1回（影響小） ⇒一般工事と同程度	・高密度配筋（D51@140） ・多段配筋（7段） ・高流動コンクリート(ランク1) ⇒充填に係る確認要	【鉄筋組立】 ・3次元CADによる配筋の干渉確認 【コンクリートの充填】 ・条件はb. より軽微であり，②の試験結果を適用可能
	（参考）根巻きコンクリートの構築	太径鉄筋の使用：非該当 高密度な配筋：非該当 ⇒一般工事と同じ	該当 ・1回（微） ⇒一般工事と同じ	・配筋（D29@150） ・普通コンクリート ⇒一般工事と同じ	不要（一般工事と同じ）

各RC工事の条件を確認し，本モックアップ試験の結果は他RC工事の施工性の確認にも適用可能であることを確認した。

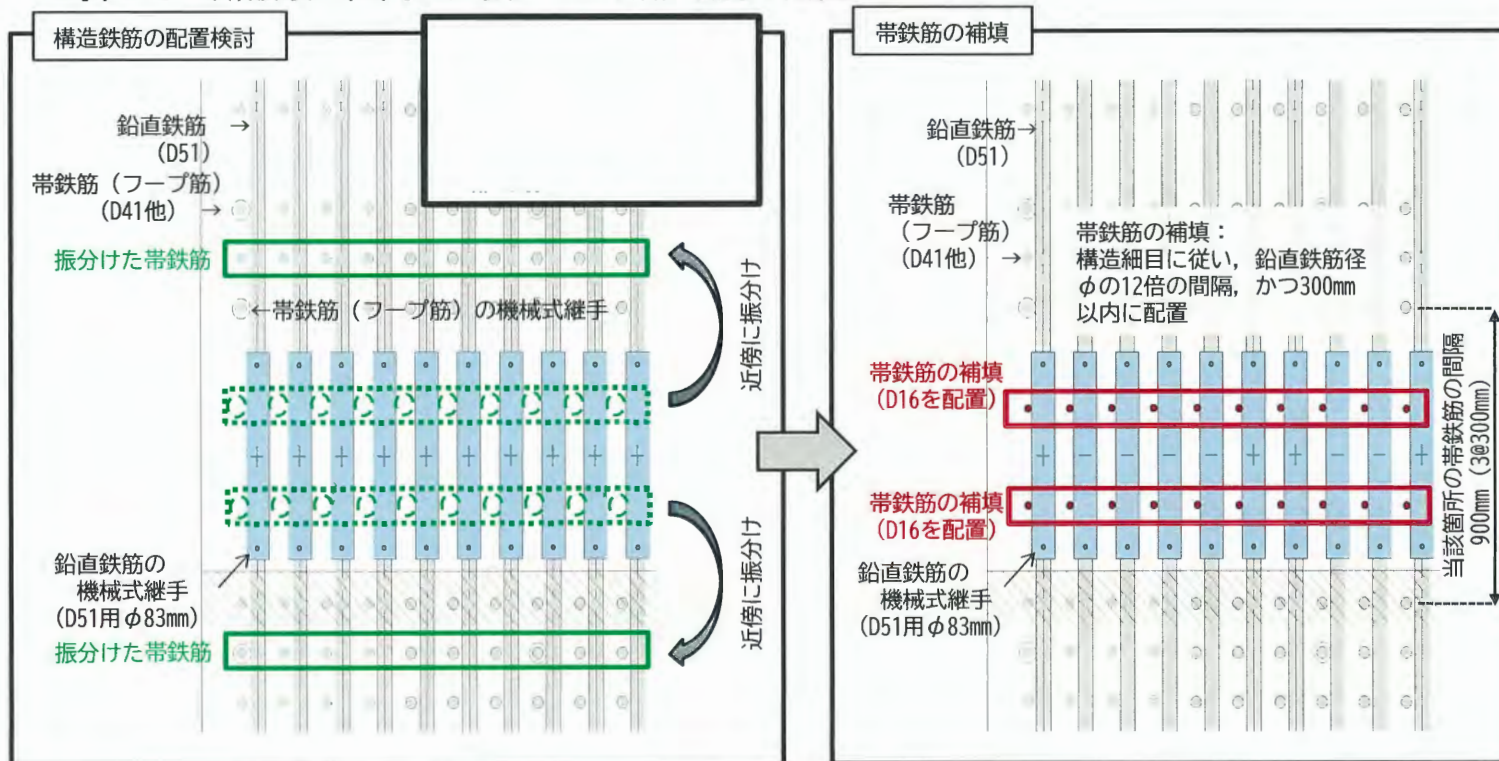
なお，他のRC工事の高密度な配筋干渉は個別の部位ごとに3次元CADにより確認することで，中実鉄筋コンクリートを模擬したモックアップ試験の結果は他のRC工事の実現性の確認にも適用可能である。

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ②機械式継手の範囲の帯鉄筋の配置

注視プロセス等②：機械式継手の範囲の帯鉄筋の配置を確認する。

- ・ 構造設計の帯鉄筋は太径（D41～D35）の鉄筋のため、鉛直鉄筋の配筋間隔により機械式継手の範囲には配置せず、必要鉄筋量を確保するよう機械式継手の上下に振り分けて配置する。
- ・ 本構造物は許容応力度法による弾性設計であり、軸方向鉄筋の座屈が懸念される応力状態ではないものの、移動された元の箇所については、せん断力による斜めひび割れの進展防止・軸方向鉄筋のはらみ出し抑制の観点から配置可能な最大のD16を構造細目に従い配置する（構造設計の鉄筋として加算しない）。なお、基礎幅は10.7mあり機械式継手の範囲を考慮してもせん断力による斜めせん断破壊の区間に必要なせん断補強筋は配置される。



機械式継手の範囲の配筋詳細

構造設計で必要な配筋を満足させるとともに、機械式継手の範囲には追加で構造細目を満足するように帯鉄筋を配置することから、安全側の設計となっていることを確認した。

中実鉄筋コンクリート 構造図（南基礎）

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ②機械式継手の範囲の帯鉄筋の配置

【参考】帯鉄筋に関する解説

道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成24年）

（1）曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚において塑性化を考慮する領域では、かぶりコンクリートが剥落して軸方向鉄筋や帯鉄筋が露出し、これが塑性変形能に影響を及ぼすことを念頭に置く必要があることから、このような損傷が生じて、軸方向鉄筋や横拘束鉄筋が十分に機能するように、これらの配筋に関する構造細目を定めている。本構造細目は、橋脚の柱部だけでなく、ラーメン橋脚の横ばり部のように、塑性化する可能性がある領域に適用する。ここで、横拘束鉄筋とは軸方向鉄筋のはらみ出しを抑制する効果とコンクリートを拘束する効果を期待するために、部材軸に対して直角方向に配置される鉄筋であり、軸方向鉄筋を取り囲む帯鉄筋と部材断面を貫通するように配筋される中間帯鉄筋から構成される。なお、本規定は鉄筋コンクリート橋脚において地震時に塑性化を考慮する領域を対象としているが、塑性化を考慮しない場合には、下部構造編7章に規定する構造細目の規定に従う必要がある。

（3）横拘束鉄筋の配置は、次の事項による場合においては、（1）（2）を満たすものとみなす

1）横拘束鉄筋のうちの帯鉄筋には異形棒鋼を用い、その直径は13mm以上、かつ、軸方向鉄筋の直径よりも小さくする。塑性化を考慮する領域における帯鉄筋間隔は、帯鉄筋の直径に応じて表-10.8.1に示す値以下、かつ、断面高さの0.2倍以下とする。この場合、断面高さは、矩形断面の場合においては短辺の長さ、また、円形断面の場合においては直径とする。

なお、弾性域に留まることが確実な領域では、帯鉄筋間隔の上限値は300mmとしてもよい。ただし、高さ方向に対して途中で帯鉄筋の間隔を変化させる場合においては、その間隔を徐々に変化させなければならない。

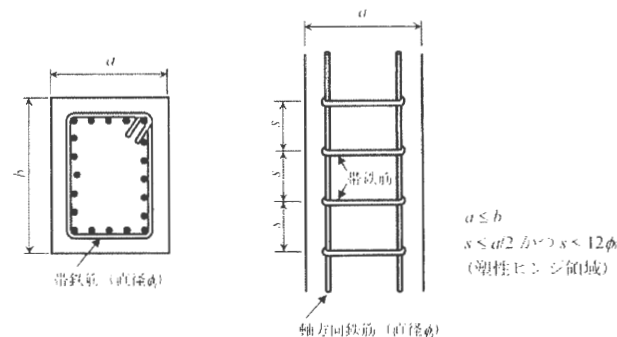
コンクリート標準示方書（2022）

8.4.3 帯鉄筋の配置

（1）帯鉄筋の部材軸方向の間隔は、一般に、軸方向鉄筋の直径の12倍以下で、かつ部材断面の最小寸法以下とする。ヒンジとなる領域は、軸方向鉄筋の直径の12倍以下で、かつ部材断面の最小寸法の1/2以下とする。なお、帯鉄筋は、原則として、軸方向鉄筋を取り囲むように配置するものとする。

（2）矩形断面で帯鉄筋を用いる場合には、帯鉄筋の一边の長さは、帯鉄筋直径の48倍以下かつ1m以下とする。帯鉄筋の一边の長さがそれを超えないように、帯鉄筋を配置しなければならない。

【解説】（1）について 帯鉄筋やせん断鉄筋等の横方向鉄筋は、斜めひび割れの進展を抑制してせん断耐力を向上させるとともに、軸方向鉄筋の座屈を防止し、かつ、コアコンクリートを拘束する役割も果たすものである。したがって、せん断補強あるいは所要のじん性の確保という観点からは、7章における照査を満足する鉄筋量が配置されるとともに、この節で示すように、部材軸方向の間隔も所定の値以下とする必要がある（解説図8.4.1）。



解説図 8.4.1 軸方向鉄筋全てを取り囲んで配置する帯鉄筋の間隔

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

中実鉄筋コンクリートにおける機械式継手の配置等を整理する。併せて防潮堤（鋼製防護壁）の中実鉄筋コンクリート以外の各部位の機械式継手の配置等も整理する。

1) 使用する機械式継手の種類

鉄筋継手箇所に使用する機械式継手は、施工性に応じて選定する。使用する機械式継手を以下に整理する。なお、機械式継手の名称は、コンクリートライブラリー-156 鉄筋定着・継手指針[2020年版](土木学会)（以下「継手指針」という。）に記載される名称とする。

タイプ	機械式継手の名称	継手の構成	鉄筋の節への対応	施工の特徴	施工イメージ	選定理由 (配置箇所の特徴)	
1	モルタル充填継手		異形鉄筋同士、ねじ節鉄筋同士のほか、異形鉄筋とねじ節鉄筋との接続も可能	- 鉄筋及び機械式継手を回すことなく、互いの鉄筋間をスライドさせて所定の位置にセットする。 - スリーブ内に余裕があり、誤差を吸収できるため組立精度の確保が容易		鉄筋組立の誤差を吸収する箇所（多段接続箇所他）	I
						SD685鉄筋を接続する箇所（SD685の鉄筋・継手の供給性を考慮）	II
2	ねじ節鉄筋継手（グラウト固定方式）		ねじ節鉄筋同士のみ	予め先行側の鉄筋にカプラーと固定用ナットを装着しておき、カプラー内にグラウトを注入後、打継側の鉄筋を回してカプラー内に挿入する		機械式継手を設置する鉄筋が組立順の関係で突出できない箇所	III
						接続時に機械式継手がスライドできない箇所	IV
3	ねじ節鉄筋継手（グラウト固定方式）		ねじ節鉄筋同士のみ	互いの鉄筋を所定の位置に配置した後、機械式継手を回してスライドさせ所定の位置にセットし、グラウトする		上記以外 (制約のない箇所)	V

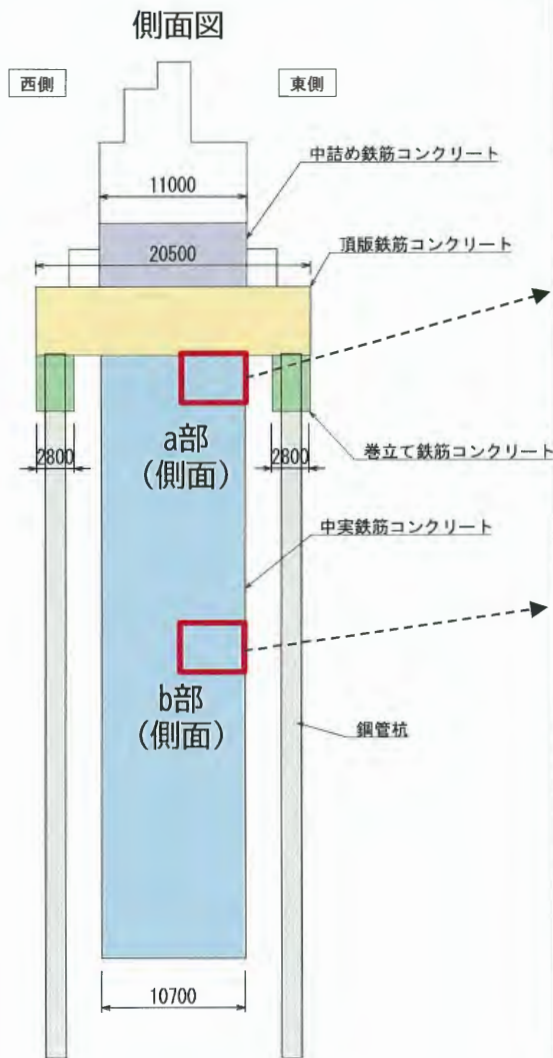
注：次頁以降の機械式継手の使用箇所においては、「上記タイプ1～3」及び「選定理由I～V」で記載する

5. 審査会合コメント⑩回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

2)各部位における機械式継手の配置等 ①中実鉄筋コンクリート

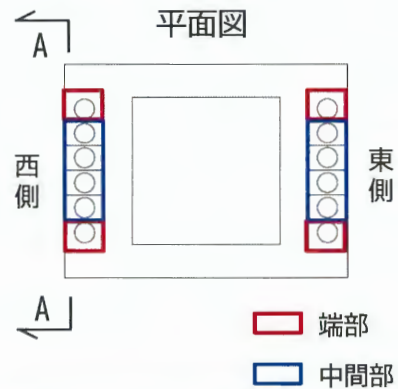
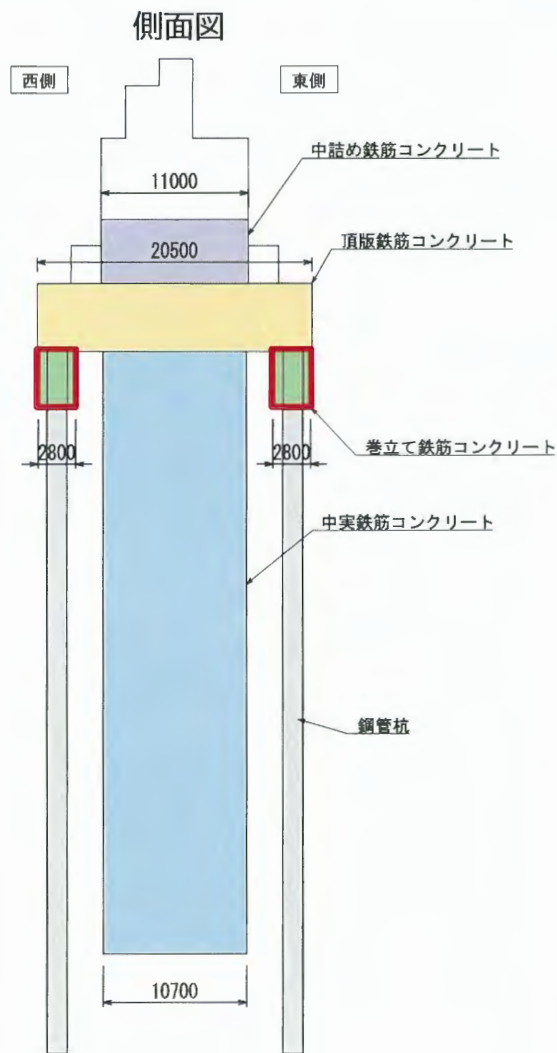


5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

2)各部位における機械式継手の配置等 ②巻立て鉄筋コンクリート

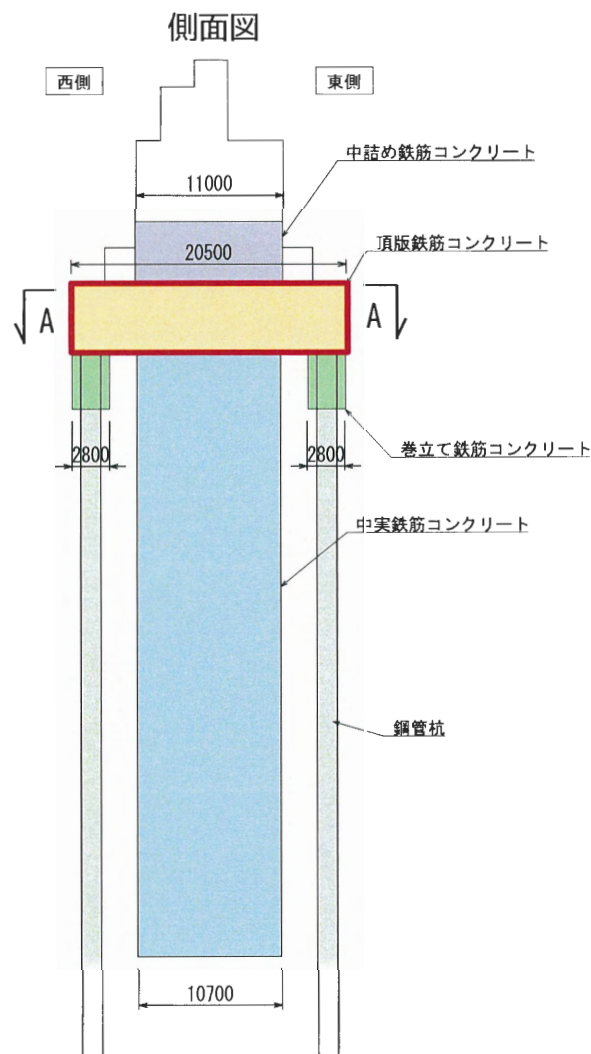


5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

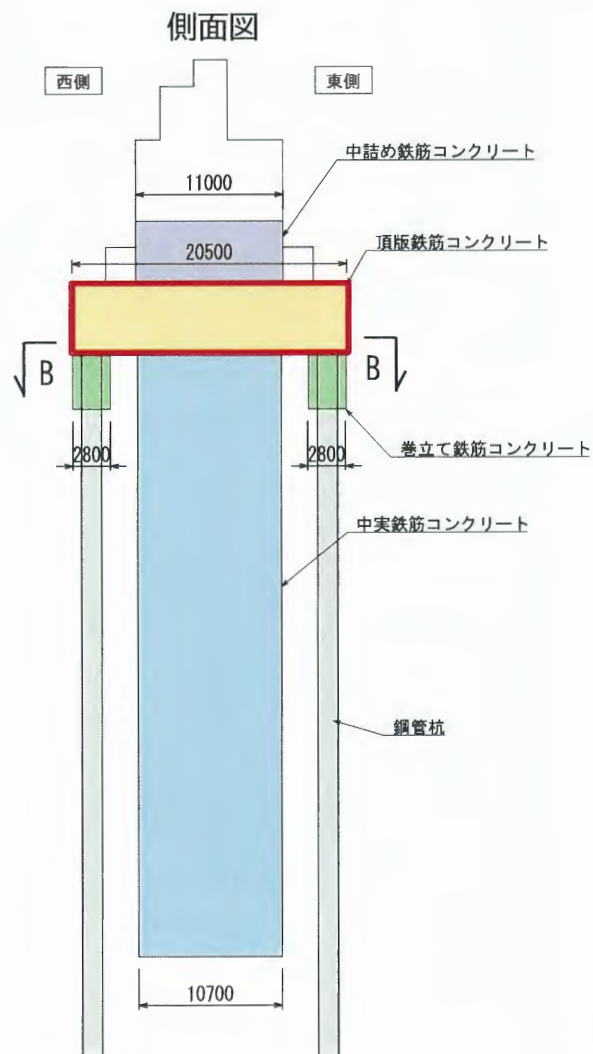
2)各部位における機械式継手の配置等 ③頂版鉄筋コンクリート（1/3）



(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

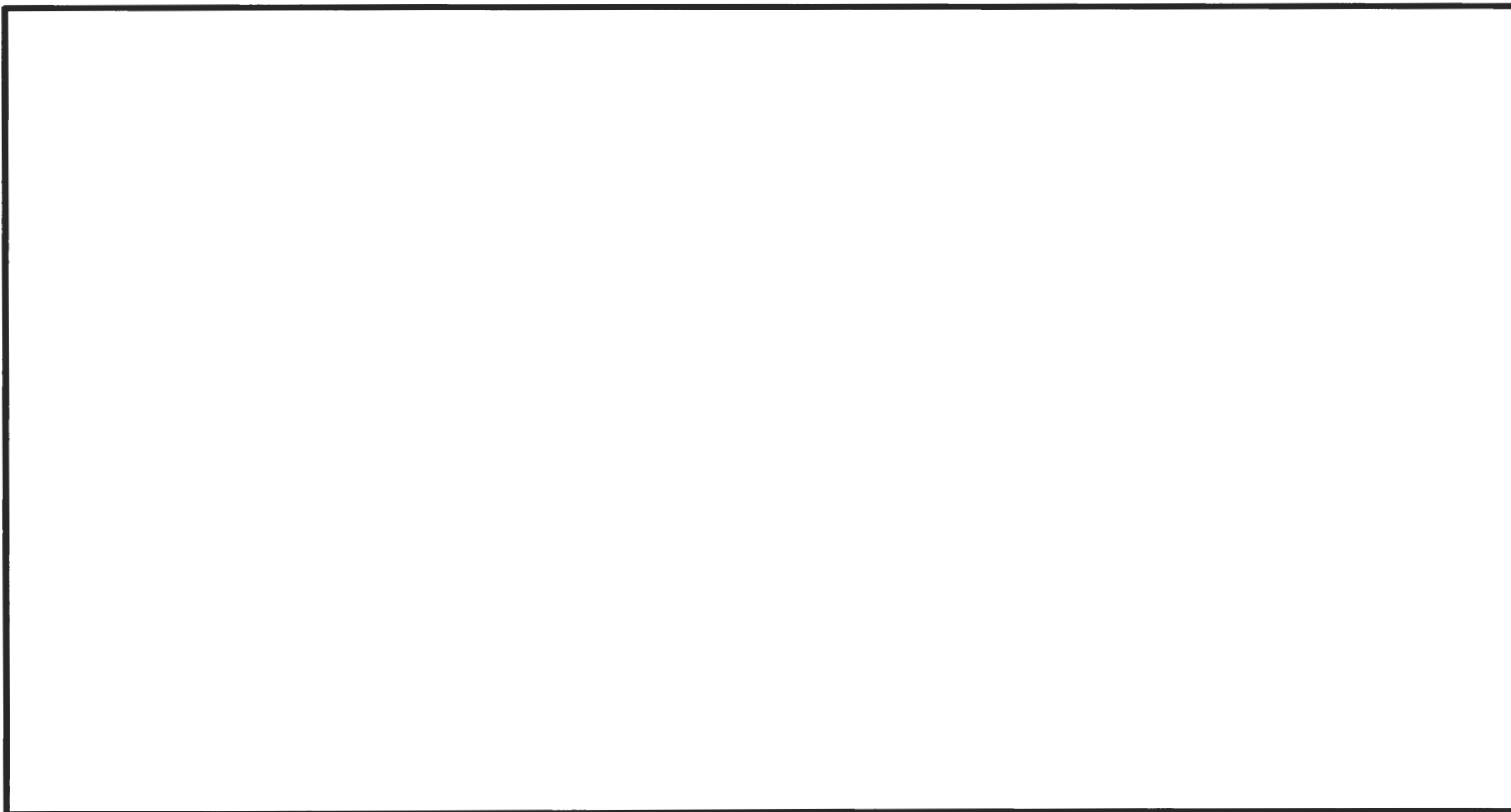
2)各部位における機械式継手の配置等 ③頂版鉄筋コンクリート（2/3）



（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 （参考）機械式継手の配置

2)各部位における機械式継手の配置等 ③頂版鉄筋コンクリート（3/3）

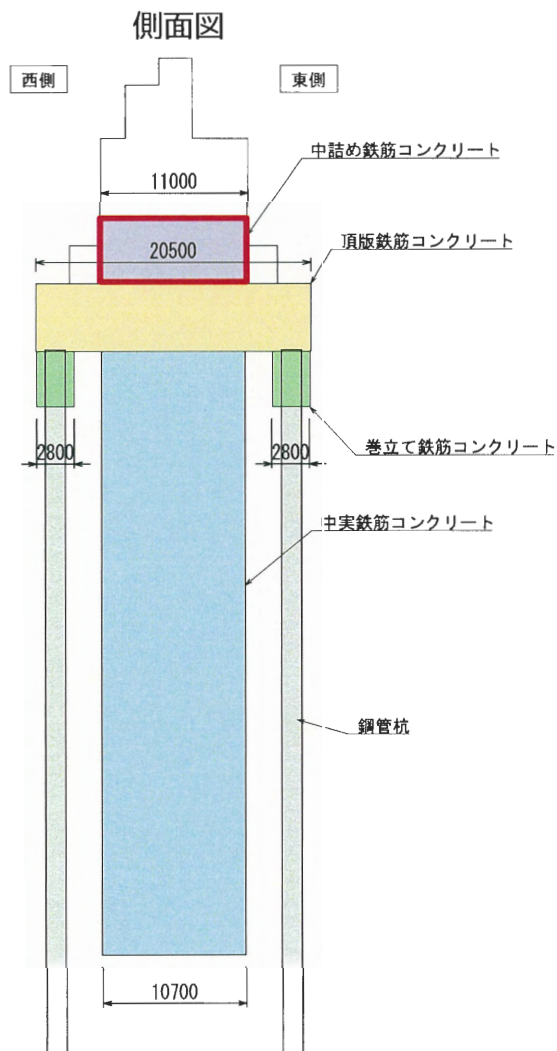


5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

2)各部位における機械式継手の配置等 ④中詰め鉄筋コンクリート



(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築（参考）機械式継手の配置

【機械式継手の配置に対する設計上の扱い】

各部位の鉄筋においては、施工性や鉄筋形状により継手相互の離隔を確保（千鳥配置）できない箇所があるため、継手の集中度が「1/2より大」（イモ継ぎ）となる箇所が生じる。その場合の規準適合性を継手指針に準拠して確認した。

機械式継手の配置に対し、継手指針に基づき各部位の設計を以下のように整理する。

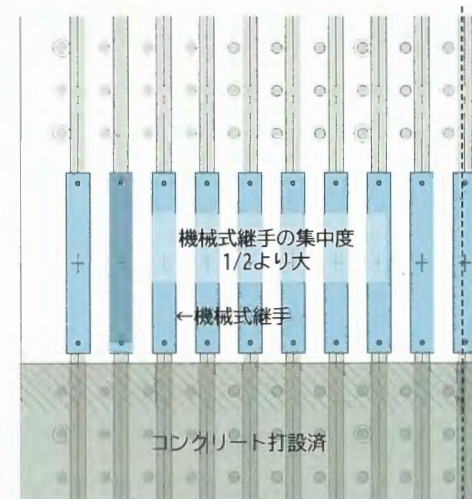
- ・機械式継手部は引張降伏強度の低減係数 α （表3.5.2）、継手単体の材料修正係数 p_{mj} （表3.6.2）を用いて照査を行う。
- ・鉛直鉄筋は、多段配筋となり、継手相互の軸方向距離を確保した施工が困難なことから、機械式継手の集中度は「1/2より大（通称「イモ継ぎ」）」となる。
- ・機械式継手の施工レベルは2（解説表3.1）、検査レベルは1（解説表3.2）として計画するため、機械式継手の信頼度はⅠ種（解説表3.5.2）に該当する。
- ・機械式継手の種類はSA級またはA級を採用する計画である。

以上の結果、

機械式継手の引張降伏強度の低減係数 α は1.0（表3.5.2）

機械式継手単体の材料修正係数 p_{mj} は1.0（表3.6.2）

として、照査（設計）する。



鉄筋の配置
(例：中実鉄筋コンクリート)

$$f_{jd} = \alpha f_{jk} / \gamma_s$$

f_{jd} ：継手の引張降伏強度の設計値 (N/mm²)

f_{jk} ：継手単体の引張降伏強度の特性値 (N/mm²)

α ：引張降伏強度の低減係数（表3.5.2参照）

γ_s ：母材鋼材の材料係数

表3.5.2 引張降伏強度の低減係数 α (P28※)

継手の信頼度	継手の集中度	
	1/2以下	1/2より大
Ⅰ種	1.0	1.0
Ⅱ種	0.9	0.8
Ⅲ種	0.8	—

解説 表3.5.2 施工および検査のレベルから定まる継手の信頼度 (P27※)

施工のレベル	検査のレベル		
	1	2	3
1	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅱ種
2	Ⅰ種	Ⅱ種	Ⅲ種
3	Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅲ種

解説 表3.1 機械式継手の施工のレベル (P157※)

施工のレベル	1
	公的認定機関の認定書類に示される施工手順に従って、継手製造元技術者またはそれに準ずる技術者から教育を受けた作業者が、公的認定機関から認定された品質管理体制の下で、施工仕様書に従って施工を行う場合。
2	公的認定機関の認定書類に示される施工手順に従って、継手製造元技術者またはそれに準ずる技術者から教育を受けた作業者が、施工仕様書に従って施工を行う場合。

解説 表3.2 機械式継手の検査のレベル (P157※)

検査のレベル	1
	公的認定機関から認定を受けた検査員が、全数検査を行う場合。
2	公的認定機関の認定を受けた機械式継手のメーカーの技術講習会を受講し資格を取得した検査者が、全数検査を行う場合。

$$f_{jk} = p_{mj} f_{yk}$$

f_{jk} ：継手単体の引張降伏強度の設計値 (N/mm²)

f_{yk} ：母材鉄筋の規格降伏強度の特性値 (N/mm²)

p_{mj} ：継手単体の材料修正係数（表3.6.2参照）

表3.6.2 継手単体の材料修正係数 p_{mj} (P33※)

継手種類	継手単体の材料修正係数
SA級	1.0
A級	1.0
B級	0.8
C級	0.6

5. 審査会合コメント⑩回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ③高強度鉄筋SD685の機械式継手の適用性

高強度鉄筋SD685については一部で機械式継手による鉄筋継ぎを予定しており、設計に影響を及ぼす可能性の確認として、SD685の機械式継手の適用性を確認する。

継手指針では公的機関による評価を受けた機械式継手が複数掲載されている。この中で継手性能や施工条件などを確認し、SD685のD51の鉄筋に適合する適切な機械式継手を選定する。また、前述の整理のとおりSD685の機械式継手は「モルタル充填継手」（前述のタイプ1）から右表のとおり選定した。

右表に同製品の継手指針の掲載内容の抜粋を示す。右表のとおり「SD685-D51」の鉄筋に対応している。同継手の施工要領書に定められた方法で設置し施工の品質を確保することで、高強度鉄筋SD685を機械式継手を用いて継ぐことが、設計に影響を及ぼすことはない。

防潮堤（鋼製防護壁）で使用する機械式継手一覧
（SD685用機械式継手）

鉄筋種類	SD685		
タイプ	1	2	3
鉄筋名D51	○	—	—
鉄筋名D41	—	—	—
鉄筋名D38	—	—	—

○：使用する機械式継手

継手方式分類		モルタル充填継手	
工法名称		スリムスリーブ	
協会／企業		日本スプライススリーブ株式会社	
工法説明のURL		http://www.splice.co.jp	
継手性能	強度、剛性、じん性、すべり量	A級	SA級
	疲労性能	有り	有り
	その他	—	SA級は仕様別に別途条件有
公的機関による評定番号あるいは証明番号		BCJ評定 RC-393-03 BCJ評定-RC0460-01	土研セ企性 第1403号 土研セ企性 第1710号 土研セ構継 第1807号 ((一財)土木研究センター)
鉄筋材料指定の有無		無し	有り
鉄筋種類		SD295A・B→SD685	SD345～SD490
鉄筋呼び名		D10～D51	D16～D51

継手指針に掲載された機械式継手（抜粋）

注：BCJ評定
機械式継手の等級に必要な性能（強度、剛性、じん性、滑り量）を有することを、(財)日本建築センター（BCJ、国土交通大臣指定の公的機関）にて評定

5. 審査会合コメント⑩回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

b. 中実鉄筋コンクリート構築 ③高強度鉄筋SD685の機械式継手の適用性

【参考】SD685以外の鉄筋に対する機械式継手

SD685以外の鉄筋に用いる機械式継手について整理する。
前項の「（参考）機械式継手の配置」にて示した各部位の
機械式継手の詳細については、公的機関による評価を受けた
機械式継手を選定した。

各々の機械式継手について継手指針での掲載内容を前頁
及び右表に示す。なお、「（参考）機械式継手の配置」で
示した機械式継手の種類を下表のとおり整理する。

防潮堤（鋼製防護壁）で使用する機械式継手一覧
（SD685用機械式継手除く）

鉄筋種類	SD490			SD390		
タイプ	1	2	3	1	2	3
鉄筋名D51	○	○	—	—	—	—
鉄筋名D41	○	—	—	○	—	—
鉄筋名D38	○	○	○	○	—	—
鉄筋名D35	○	—	—	○	○	○
鉄筋名D32	○	—	—	○	—	—
鉄筋名D29	○	—	—	—	—	○

○：使用する機械式継手

継手方式分類		ねじふし鉄筋グラウト固定式	
工法名称		リレージョイント	エポックジョイントEP
協会／企業		東京鉄鋼株式会社	
工法説明のURL		http://www.tokyotekko.co.jp	
継手性能	強度、剛性、じん性、すべり量	A級	SA級
	疲労性能	有り	有り
	その他	—	SA級は仕様別途条件有
公的機関による評価番号あるいは証明番号	BCJ評価-RC0282-06	土研ゼン性 第1607号 土研ゼン性 第1903号 試験成績書第18-0230号 （一財）土木研究センター	評価 CBL RC007-14号
鉄筋材料指定の有無		ネジテツコン	
鉄筋種類	SD295A・B～SD490	SD345～SD490	SD295A・B～SD390
鉄筋呼び名	D13～D51	D13～D51	D19～D51

継手方式分類		ねじふし鉄筋グラウト固定式	
工法名称		フリージョイント Fタイプ	フリージョイント FSタイプ
協会／企業		東京鉄鋼株式会社	
工法説明のURL		http://www.tokyotekko.co.jp	
継手性能	強度、剛性、じん性、すべり量	A級	SA級
	疲労性能	有り	有り
	その他	—	SA級は仕様別途条件有
公的機関による評価番号あるいは証明番号	BCJ評価-RC0112-06、 BCJ評価-RC0209-03(590)	土研ゼン性 第1604号 （一財）土木研究センター	BCJ評価-RC0112-06
鉄筋材料指定の有無		ネジテツコン	
鉄筋種類	SD295A・B～USD680A・B	SD345～SD390	SD295A・B～SD490
鉄筋呼び名		D19～D51	

継手指針に掲載された機械式継手（抜粋）

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

c. 支障物撤去 均質置換土（セメントベントナイト）の設計への影響

注視プロセス等：鋼管杭打設時に撤去されない均質置換土の設計への影響

- ・均質置換土（セメントベントナイト）と周辺地盤の強度の関係による地盤バネへの影響
- ・セメントベントナイトの劣化による設計への影響

上記の注視プロセス等について、①施工計画の確認、②均質置換土と周辺地盤の強度との関係の確認、③均質置換土（「セメントベントナイト」、以下「CB」という。）の長期安定性に関する文献調査を実施する。

① 施工計画

鋼管杭打設場所の支障物は岩盤内にはないこと、本地点の岩盤（Km層）は均質な砂質泥岩であることから、支障物撤去及び地盤の均質化のための掘削は、**堆積層のみを対象に実施する。**

（岩盤深度まで掘削しない。）

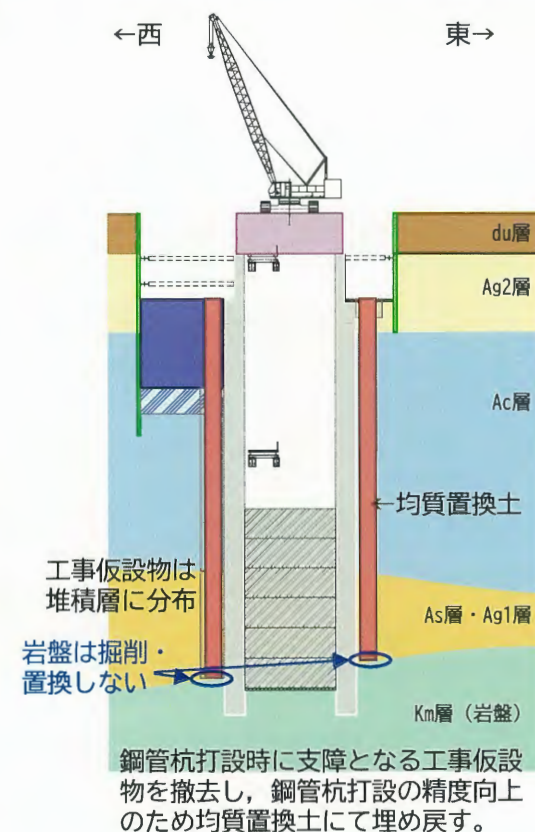
② 均質置換土と周辺地盤の強度との関係（詳細はコメント⑭回答（P41）参照）

支障物撤去後の埋め戻しとして用いる均質置換土の配合試験結果と周辺地盤（掘削・置換を実施する堆積層）の物性値を比較する。

この結果、均質置換土の強度・剛性は全ての堆積層の強度・剛性よりも大きく、**設計に用いる地盤バネへの影響はないことを確認している。**

③ CBの長期安定性に関する文献調査

CBの強度発現の原理、ベントナイトの特徴を確認する。また、CBの経時変化・劣化に関する文献を確認し、長期安定性を確認する。



支障物撤去
（均質置換土置換）

5. 審査会合コメント⑩回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

c. 支障物撤去 均質置換土（セメントベントナイト）の設計への影響

③ CBの長期安定性に関する文献調査

CBの長期安定性の観点から、構造物へのCBの使用事例を調査した。

杭基礎施工便覧によれば、ケーシングの外周部を掘削する場合は、先端地盤を乱して支持力に影響を及ぼすおそれがあるため、埋戻しに流動化処理土やセメントベントナイト等周辺地盤と同等以上の強度を有するものを用いるとされている。また、道路橋示方書・同解説（平成24年）他によれば、ケーソン基礎において、地盤とケーソン壁面間の空隙に地盤と同等以上の強度を有するセメントペーストやセメントベントナイト等の充てん材を注入するコンタクトグラウトを行う必要があるとされている。

上記のとおり、基礎と周辺地盤の接触部に周辺地盤より強度を有するCBを用いることは、各種基準にて推奨された工法である。

また、右表は可塑性グラウト注入工法※に示された各種裏込め注入グラウトの性能比較表であり、CBは長期強度を有するものと評価されている。

（なお、本表はグラウト注入への適用性の観点で物性（硬化時間等）・施工性が評価されており、本施工への適用性とは一致しない。また、表中の「固結の均一性」については、本工事のCBは施工時に均一に練り混ぜる計画であり該当しない。）

各種裏込め注入グラウトの性能比較表※

特長	種別	エアモルタル	CB	砂モルタル	LW	アルミニウム塩系	粘土鉱物系	高分子剤系
グラウトの性状		流動状グラウト				可塑性グラウト		
注入方式		一液性		二液性		二液性		一液性
物性	硬化時間	長い ×	長い ×	長い ×	1～3分 ○	ほぼ瞬時 ◎	同左 ◎	同左 ◎
	可塑性保持時間	なし ×	なし ×	なし ×	なし ×	長い ◎	〃 ◎	〃 ◎
	水による希釈	あり ×	あり ×	あり ×	あり ×	なし ◎	〃 ◎	〃 ◎
	材料分離	なし ○	少しあり △	少しあり △	少しあり △	なし ◎	〃 ◎	〃 ◎
	長期強度	あり ○	あり ○	あり ○	なし ×	あり ○	〃 ○	〃 ○
	固結後の容積変化	なし ○	なし ○	なし ○	あり ×	なし ◎	〃 ◎	〃 ◎
	固結の均一性	良い ○	劣る ×	やや低い △	良い ○	非常に良い ◎	〃 ◎	〃 ◎
施工性	圧送性	良い ○	良い ○	やや低い △	良い ○	良い ○	同左 ○	低い △
	限定注入	困難 ×	困難 ×	困難 ×	条件次第 △	可能 ◎	〃 ◎	同左 ◎
	隙間からの漏出	非常に多い ×	非常に多い ×	多い △	止まる ○	直ちに止まる ◎	〃 ◎	〃 ◎
	注入範囲	広い ○	広い ○	狭い ×	条件次第 △	広い ○	〃 ○	〃 ○
	充填性	良い ○	良い ○	劣る ×	劣る ×	良い ◎	〃 ◎	〃 ◎
総合評価	歩留まり	低い △	劣る ×	低い △	良い ○	良い ◎	〃 ◎	〃 ◎
	総合評価	隙間の多い所・水がある所には不向き △	物性的に難点が多い ×	物性的に難点が多い ×	可塑性領域がないので施工困難 ×	高価であるが歩留まりが良いので総合的には安価になる ◎	同左 ◎	同左 ◎

※可塑性グラウト注入工法 新設と補強・補修 三木他 日刊建設工業新聞社

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

c. 支障物撤去 均質置換土（セメントベントナイト）の設計への影響

③ CBの長期安定性に関する文献調査

CBの強度発現の原理は、セメント系地盤改良・ソイルセメントと同様、セメントの水和反応による硬化である。CBはセメントと水とベントナイトで構成され、セメント系地盤改良・ソイルセメントに比べCBは組成の不確かさは少なく均質な材料である。また、ベントナイトの特徴として以下の点が挙げられる。

- ・経年劣化しにくい。
- ・セメントの劣化成分を有しない。
- ・湿潤と乾燥・凍結と融解を繰り返す環境下でも品質が変化しない。

以上により、CBはソイルセメントと同様に安定的と評価できることから、原理や使用環境が類似するソイルセメントの長期安定性について文献を調査した（右表）。調査の結果、ソイルセメントは一軸圧縮強度や静弾性係数など施工直後に比べ増加しており、長期安定性を有すると評価できる。これらを考慮するとCBも同様に長期安定性を有する材料と評価できる。

一方、セメント系材料の長期安定性・耐久性については周辺環境に影響を受け、その劣化要因として「凍害の影響」や「海水の影響」が挙げられる。

CBの使用箇所は土中であり、また発電所は「凍害を受ける地域」には該当しないが、海の近傍に位置することから、海水中の硫酸イオンによる劣化（強度低下）を防ぐため、高炉セメント（耐硫酸塩セメント）を使用し、劣化を防止する。

以上より、CBは長期安定性を有する材料と評価した。

文献調査結果

文献名	ソイルセメント柱列壁の耐久性に関する研究	施工後35年経過した鋼管ソイルセメント柱列壁の長期耐久性の調査
出典・執筆者	日本建築学会学術講演会1999 阪井ほか	日本建築学会学術講演会2009 吉田ほか
概要	施工後13年経ったソイルセメント柱列壁より鉛直方向にコアサンプリングを実施し、一軸圧縮強度試験を実施し、一軸圧縮強度、静弾性係数とも施工直後に比べて増加しており、強度面における劣化は13年経過時点では認められなかった。	35年前に施工された鋼管ソイルセメント柱列壁のソイルセメントおよび鋼管を採取し、 長期的な耐久性 を評価した。 劣化深さは約5mm/35年であった。
図表		

以上の確認結果から、鋼管杭打設時に残置される均質置換材（CB）は、周辺地盤との強度の関係、長期安定性を確認し、残置することにおいても設計への影響がないことを確認した。

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

d. 鋼管杭打設 ①鋼管杭の打設精度

注視プロセス等①：約50mの鋼管杭を水平に30cm間隔で打設するため高い打設精度が求められ施工難易度が高い

上記の注視プロセス等について、鋼管杭の施工方法及びその実績を整理する。

【鋼管杭打設における鉛直精度の確保のための施工方法及びその実績】

①均質置換土（CB）による置換

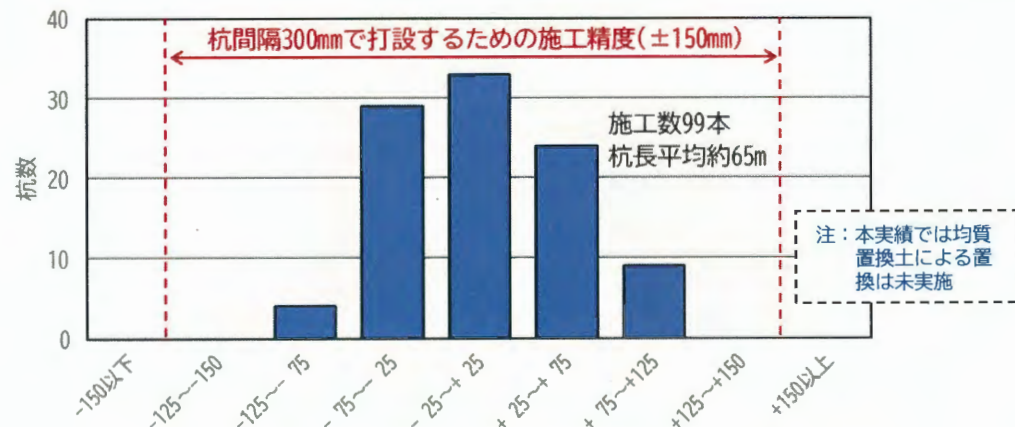
地盤の固さの不均質さの影響による鋼管杭打設時の鉛直精度低下を防ぐため、事前に岩盤標高付近までの堆積層を均質置換土に置き換える。

（地盤改良体（セメント系）の範囲は流動化処理土を代用する。）

②鋼管杭の鉛直精度管理システム※による施工管理

中掘り圧入工法による鋼管杭打設時に、鋼管杭の鉛直精度を常時監視するシステムを使用し、打設精度を向上させる。なお、本工法の組合せは発電所内の鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の基礎工事（基礎杭長、約65m）で使用し、十分な精度で施工できることを確認している。

※ 測量機器（トータルステーション）を用いて杭を計測し、杭の位置及び傾きを計測・管理し、杭打設の施工精度を向上させるツール

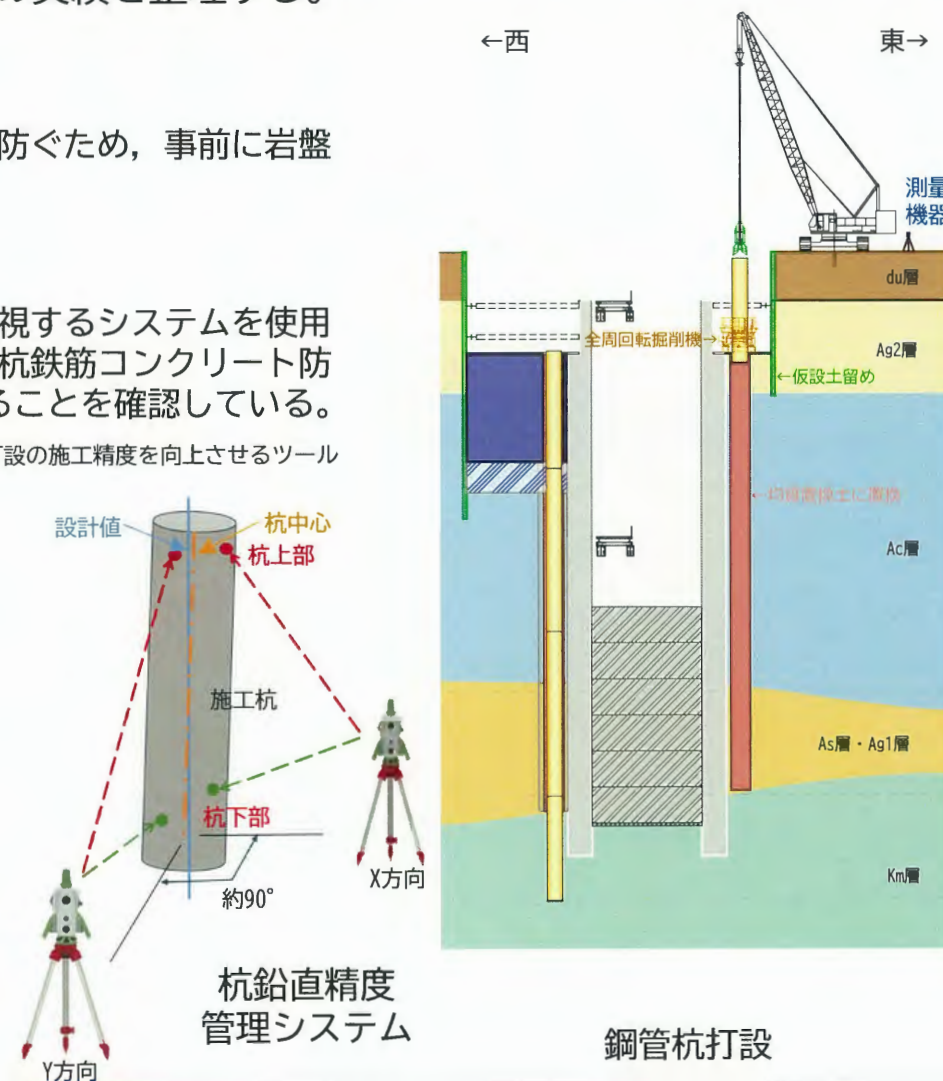


鋼管杭下端における鋼管杭列方向の計画位置からの離れ（mm）

鉛直精度管理システムを用いた鋼管杭打設の施工精度

（当社、鋼管杭鉄筋コンクリート壁の施工実績）

■ 以上の確認結果から、鋼管杭の高精度の打設が施工性や品質管理の観点から実現性のある工事計画であり、設計への影響はないことを確認した。



5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

d. 鋼管杭打設 ②鋼管杭打設時の施工荷重（重機荷重）の影響

注視プロセス等②：鋼管杭打設等における打設場所近傍への重機配置による工事の品質への影響を確認する。

上記の注視プロセス等について、鋼管杭施工時等の重機配置等を確認する。

鋼管杭打設等の施工では200tクローラークレーン及び全周回転掘削機を使用する。これらの重機配置による工事の品質への影響としては重機の接地荷重増大による地盤への影響（に伴う工事の品質への影響）が想定される。

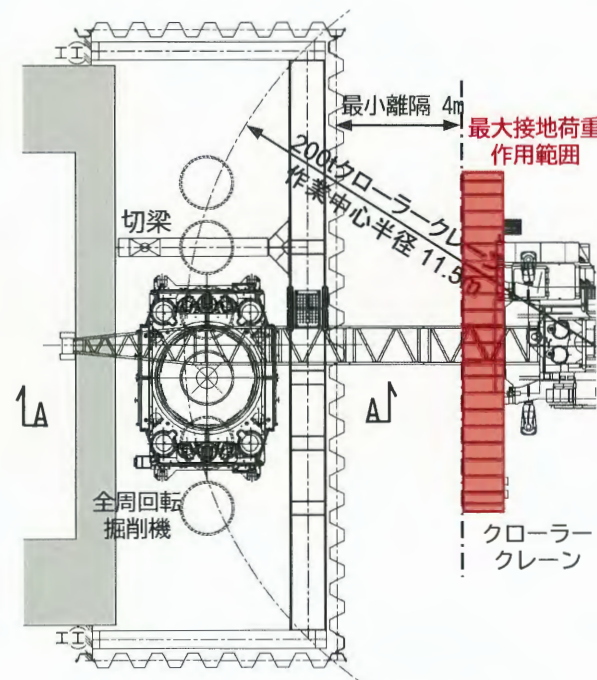
この影響の確認として、堆積層が厚く重機荷重の影響を受けやすい北基礎のうち、重機が直接地盤に設置される東側の鋼管杭打設等の施工における重機配置等を確認した。この確認により、重機の接地荷重が最大となる重機及び状況は、全周回転掘削機を施工場所に設置・撤去する際のクローラークレーンであった。

この接地荷重最大の状況においては、鋼管杭等の打設は行われておらず、接地荷重が鋼管杭等の打設精度に影響を及ぼすことはない。なお、鋼管杭の建て込み時もクローラークレーンの接地荷重が大きくなるが、同時に鋼管杭の打設は行われていないため鋼管杭の打設精度に影響を及ぼすことはない。また、打設中は鋼管杭等により掘削部周囲の土砂は保持されることから、地盤のはらみ出しや崩壊等は発生しない。

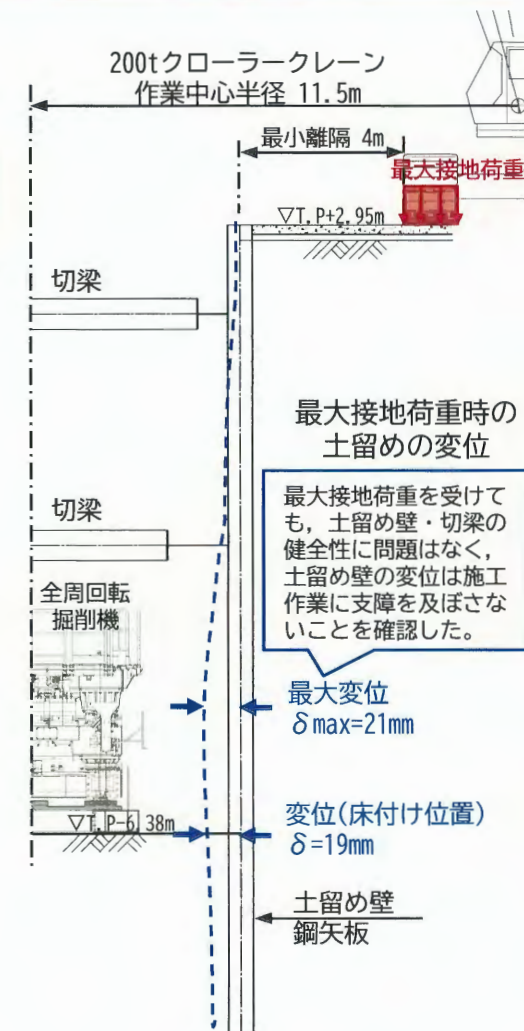
なお、この重機荷重（接地荷重が最大になるケース）を考慮して、鋼管杭打設盤を確保するための土留めを設置しており、施工エリアの確保も問題ない。

以上より、鋼管杭打設等で使用する重機荷重が工事の品質へ影響を及ぼすことはないことを確認した。

最大接地荷重				
ブーム方向	吊り荷重 (t)	最小離隔 (m)	キャビラ幅 (m)	最大接地荷重 (t)
側方	65	4.0	1.1	220



クレーン配置平面図
（最大接地荷重の状況）



A-A断面（断面図）
（北基礎（東側））

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

d. 鋼管杭打設 ③狭隘な区画での太径鉄筋の組立

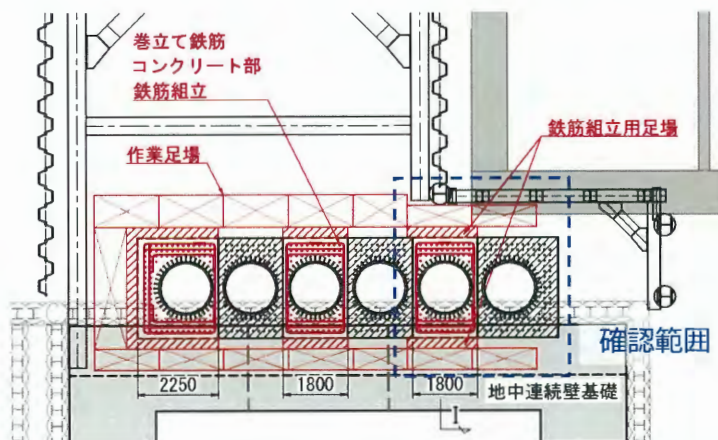
注視プロセス等③：巻立て鉄筋コンクリートは狭隘な区画で太径鉄筋を組み立てるため施工難易度が高い

上記の注視プロセス等について、3次元CADにより配筋干渉及び施工図により施工性を確認する。

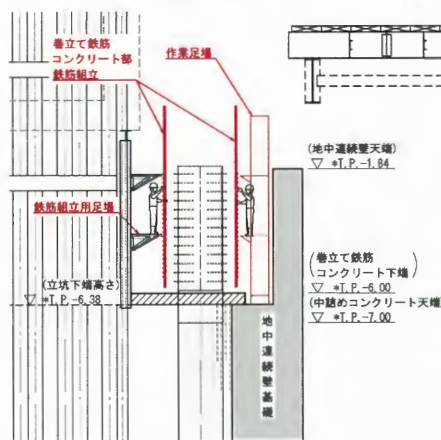
巻立て鉄筋コンクリートは、鉛直鉄筋(D51)、フープ筋(D38)、せん断補強筋(D41)、配力筋(D22)がスタッド付鋼管杭の周囲に密に配置される。これらを3次元CADにより図化し干渉を確認する（右図）。

また、巻立て鉄筋コンクリートの施工エリアは、地中連続壁や既設施設に挟まれ狭隘な場所での鉄筋組立となることから、施工エリアを図化し、組立作業の施工性を確認する。

鉄筋組立用足場の設置、鉄筋の配置場所への搬入、作業方法を確認し、施工可能であることを確認。



平面図

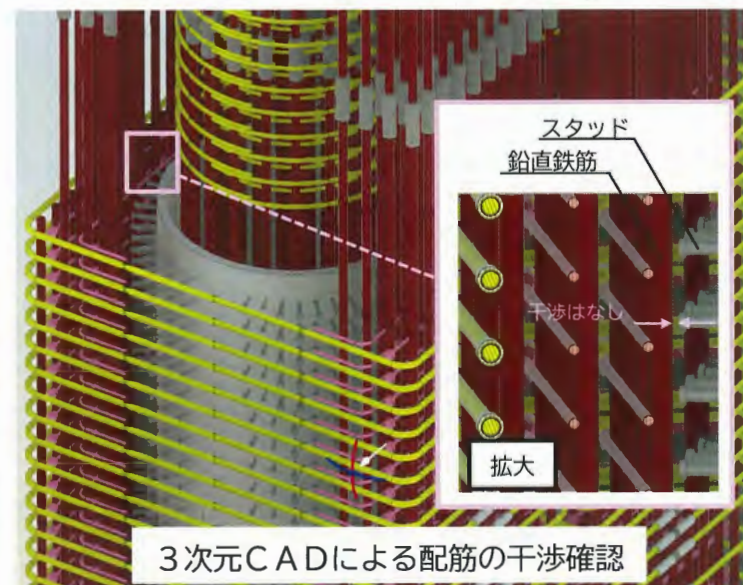


鉛直断面図

施工エリア図（例：鉄筋組立の施工性確認）

以上の確認結果から、巻立て鉄筋コンクリートの施工が施工性・品質の観点から実現性のある工事計画であり、設計への影響はないことを確認した。

巻立て鉄筋コンクリートの配筋



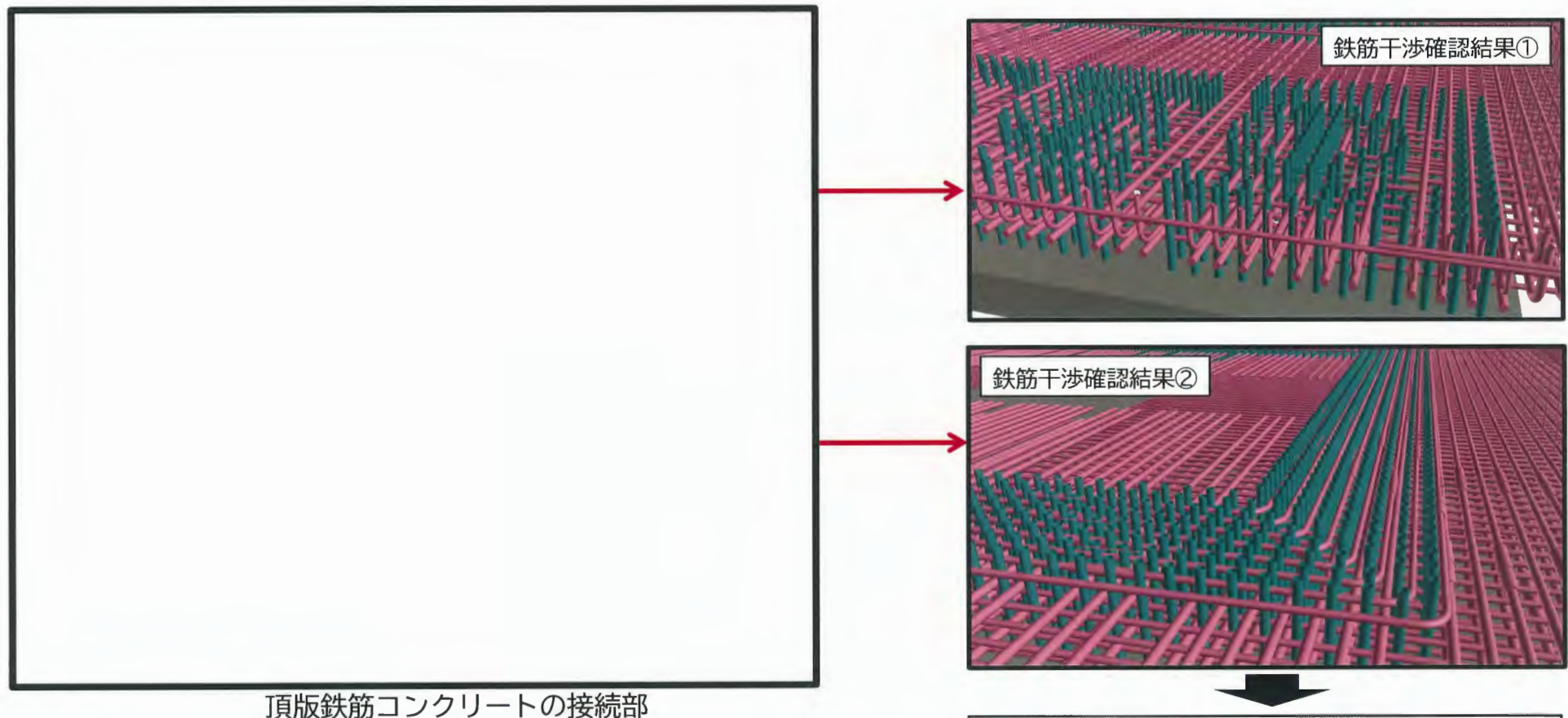
3次元CADにより、鉄筋等の配置干渉はなく鉄筋組立が可能であることを確認した。

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

e. 頂版鉄筋コンクリート構築 接続部の複雑な鉄筋の組立

注視プロセス等：中実鉄筋コンクリート，鋼管杭との接続箇所であり，構造鉄筋と定着鉄筋などが複雑に交錯するため，鉄筋組立の難易度が高い。

上記の注視プロセス等について，頂版鉄筋コンクリートは当該部の構造鉄筋に加え，中実鉄筋コンクリート等からの定着鉄筋などが複雑に交錯する配筋となる。このため，3次元C A Dによりこれらの鉄筋の配置干渉を確認する。



頂版鉄筋コンクリートの接続部

以上の確認結果から，頂版鉄筋コンクリートの施工が施工性・品質の観点から実現性のある工事計画であり，設計への影響はないことを確認した。

3次元C A Dにより，各鉄筋は干渉せず，設計へ影響を及ぼすことはないことを確認した。

（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

f. 鋼製防護壁架設 ①高強度鋼材（SBHS700）の溶接

注視プロセス等①：鋼製防護壁の一部に高強度鋼材を採用しており，部材溶接の施工難易度が高い

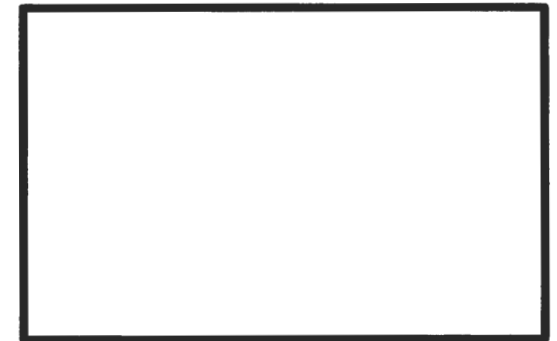
上記の注視プロセス等について，高強度鋼材（SBHS700）の現場溶接の品質を確保するため，試験施工により溶接に関わる各種条件を設定する。

【溶接に関わる各種条件の設定】

①熱管理条件

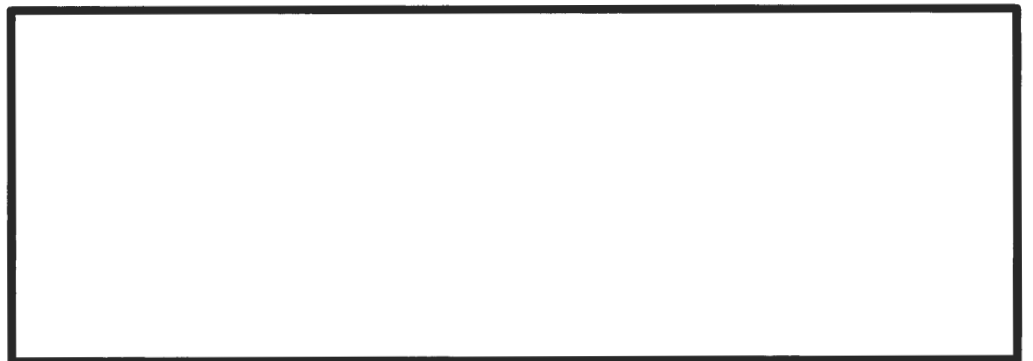
適切な熱管理条件（入熱量とパス間温度など）を求めるため，同条件下（開先形状，溶接姿勢，使用溶接材料）での試験施工を実施し，要求品質を満足できる条件を確認した（右表はSBHS700同士の条件）。

また，その他の組合せ（SBHS700×SBHS500）についても，同様にそれぞれ適切な熱管理条件を求め，要求品質を満足できる条件を確認した。



②開先条件

各溶接姿勢（下向き，上向き，横向き，立向き）における開先形状および開先精度の管理値について設定した。



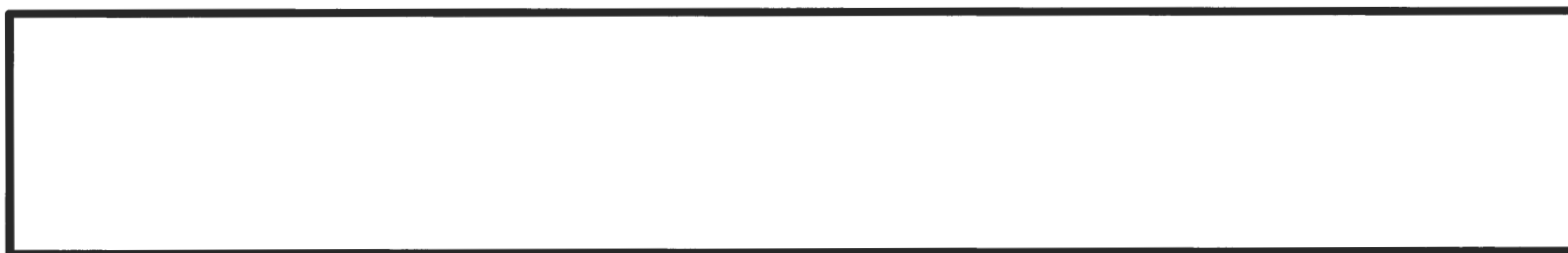
（4）各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

f. 鋼製防護壁架設 ①高強度鋼材（SBHS700）の溶接

③溶接条件

適切な溶接条件を求めるため、同条件下（開先形状、溶接姿勢、使用溶接材料）での試験施工を実施し、要求品質を満足できる条件を確認した（下表はSBHS700同士の設定）。

また、SBHS700×SBHS500についてもそれぞれ適切な入熱量条件を設定し、品質を確認した。



【確認結果】

- ・試験施工により適切な溶接条件（熱管理条件ほか）を確認し、所定の品質を確保する条件を設定できた。
- ・設定した溶接に関わる各種条件を施工時に着実に実施すること及び非破壊検査の全箇所実施により、品質を確保する。

以上により、施工時にこれらを着実に実施することで、不具合のない構造物の構築は可能である。

以上の確認結果から、鋼製防護壁の高強度鋼材の溶接が、施工性・品質の観点から実現性のある工事計画であり、設計への影響はないことを確認した。

(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

f. 鋼製防護壁架設 ①高強度鋼材（SBHS700）の溶接

防潮堤（鋼製防護壁）では、鋼製防護壁以外に鋼管杭にも高強度鋼材（SBHS500）を用いている。SBHS500については道路橋示方書・同解説（平成29年）他¹⁾に溶接に関わる各種条件が明示されており、溶接条件・熱管理条件は一般化されている。以下に、道路橋示方書・同解説（平成29年）他¹⁾に基づく溶接に関わる各種条件を示す。

【溶接に関わる各種条件の設定】

①溶接条件・熱管理条件

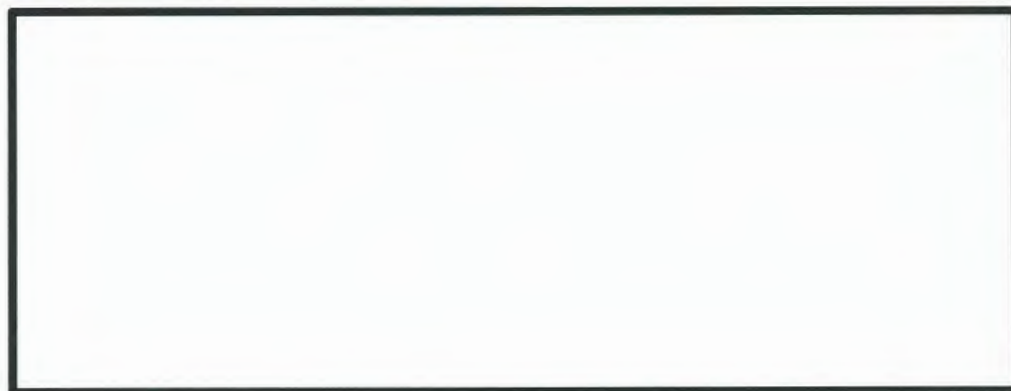
溶接条件及び熱管理条件（入熱量とパス間温度）を道路橋示方書・同解説（平成29年）他¹⁾に基づき以下のとおりとする。

溶接条件・熱管理条件

項目	施工仕様・管理値
溶接方法	ガスシールド メタルアーク溶接
溶接姿勢	横向き
開先形状	レ型
パス間温度（℃）	300以下
溶接入熱（J/mm）	7000以下

②開先条件

溶接姿勢（横向き）における開先形状及び開先精度の管理値について設定した。また、参考として次頁に鋼管杭の継手形状を示す。



鋼管杭の溶接は、道路橋示方書・同解説（平成29年）他¹⁾に溶接に関わる条件などが示されており、一般化された作業である。以上より、本作業は施工性・品質の観点から実現性のある工事計画であり、設計への影響はないことを確認した。

注記：1) 橋梁用高性能鋼材（社）日本鉄鋼連盟 橋梁用鋼材研究会

5. 審査会合コメント⑯回答（防潮堤（鋼製防護壁）の工事計画の実現性等について）

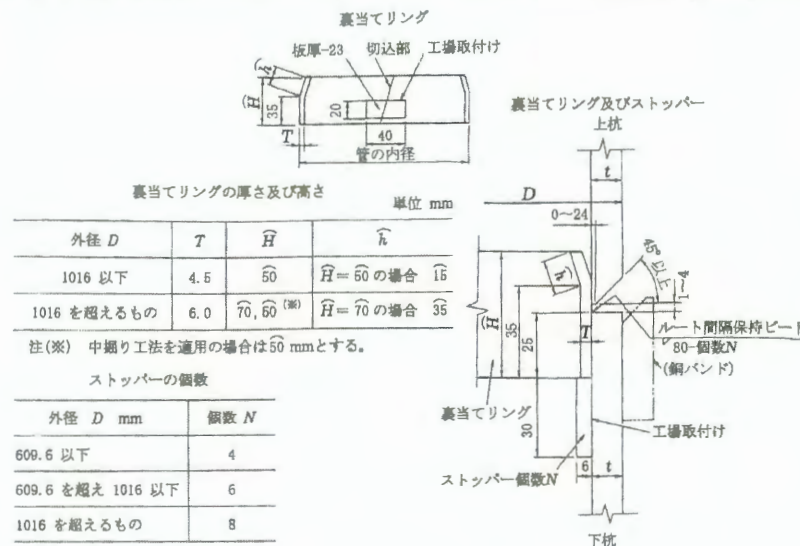
(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

f. 鋼製防護壁架設 ①高強度鋼材（SBHS700）の溶接

【参考：鋼管杭の継手形状】

継手形状は、道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成29年）を参考に以下の施工条件を勘案して決定した。

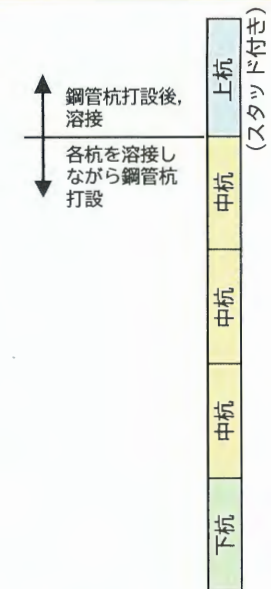
- ・溶接姿勢は横向きとする。
- ・下杭～中杭は各杭を溶接しながら鋼管杭を打設することから、鋼管の外側から外面溶接する。
- ・中杭と上杭の溶接は、上杭の鋼管外面にスタッドが設置されており、杭間隔も30cmと狭隘であることから鋼管の内側から内面溶接する。
- ・溶接の際は裏当てリング等の補助部材を用いて溶接不具合の防止を図る。
- ・開先形状は、鋼管の板厚が50mmと厚いため溶接パス数を極力少なくさせるため、道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成29年）に記載の標準形状寸法（左下図）より狭くしているが、溶接試験により融合不良、スラグ巻き込みなどの不具合が生じないことを確認している。



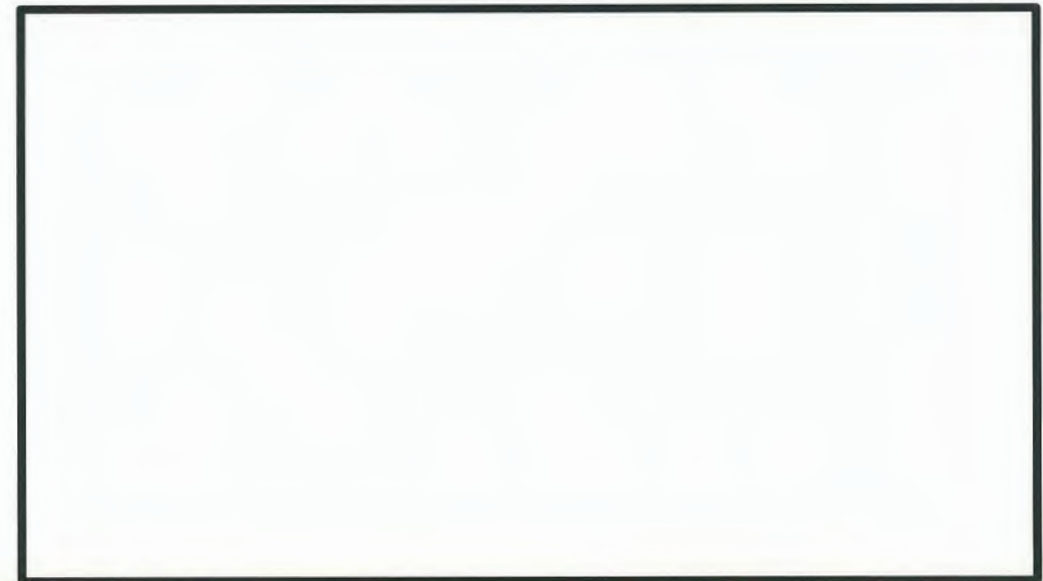
(注1) ルート間隔保持ビードに替えてスペーサーを用いてもよい
(注2) 上括弧 () は曲線部も含んだ長さを意味する

鋼管杭の半自動溶接現場継手標準形状寸法¹⁾

注記：1)道路橋示方書・同解説Ⅳ（平成29年）



鋼管杭分割イメージ図
(製作時)



(4) 各施工ステップの施工性等の検討・確認結果

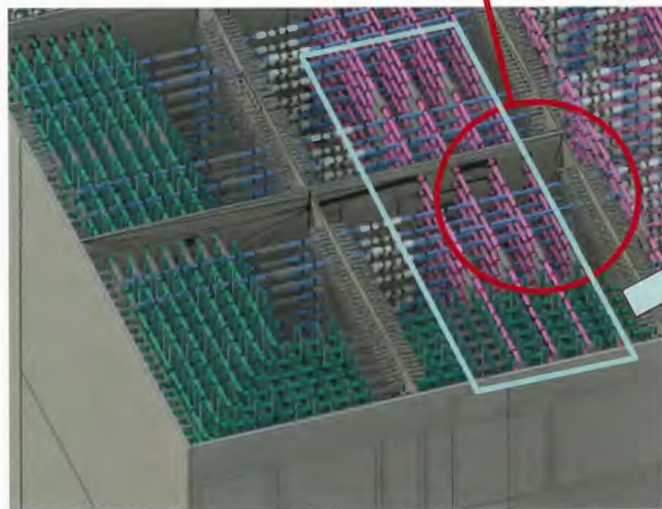
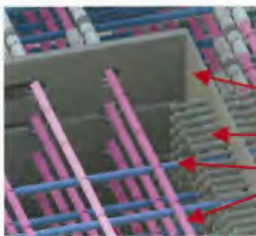
f. 鋼製防護壁架設 ②狭隘な鋼製防護壁基部内での太径鉄筋の組立

注視プロセス等②：鋼製防護壁の基部内での太径の鉄筋の組立であり，施工難易度が高い

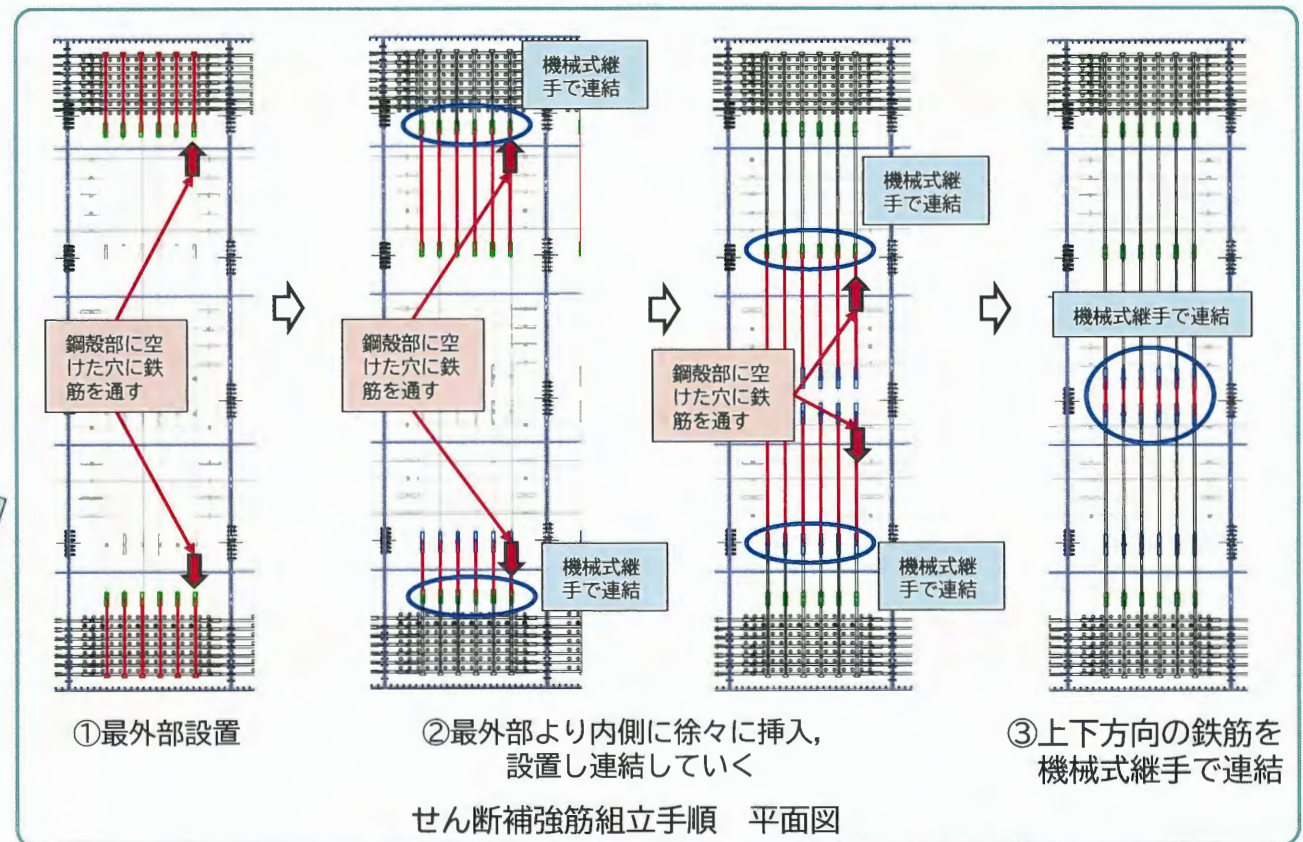
上記の注視プロセス等について，鋼製防護壁の基部内の中詰鉄筋コンクリートは，当該部の構造鉄筋，鋼殻部（鋼製防護壁を構成する壁体）とコンクリートの一体化のためのスタッドと頂版鉄筋コンクリートから定着鉄筋が複雑に交錯する配筋となる。このため，3次元CADによりこれらの鉄筋の配置干渉を確認する。また，鋼殻部が狭隘なことから鉄筋の組立手順を図化し施工性を確認する。

【拡大図】

鋼殻部，鉄筋，
スタッドの配置
干渉確認



3次元CADによる鉄筋配置干渉確認



以上の確認結果から，鋼製防護壁の基部内での太径の鉄筋の組立は，施工性・品質の観点から実現性のある工事計画であり，設計への影響はないことを確認した。