

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)

2025年10月29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. 1360回審査会合のコメント⑯	3
--------------------	---

1. 審査会合コメント⑯回答

1. 審査会合コメント回答⑯

【1360回審査会合コメント⑯】

No	コメント
⑯	<ul style="list-style-type: none">● 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。

No	回答概要
⑯	<p>地盤改良（薬液注入）において、品質の不確かさの要因を抽出し、各要因に対する工事計画における対応を示すとともに、設計の要求品質を確保する施工（地盤改良体）の実現性について説明する。なお、概要は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none">・地盤改良（薬液注入）の改良品質に対する不確かさの要因を整理した。・地盤改良（薬液注入）の計画（配合設計及び施工計画（試験施工含む））から施工・品質管理について、整理した不確かさの要因の影響に対する対応方策を確認した。・地盤改良（薬液注入）の試験施工等の施工実績から、今回の計画が施工可能であることを確認した。 <p>以上のことから、地盤改良（薬液注入）の改良品質に対する不確かさの影響が設計の想定に影響を及ぼさないことを確認した。</p>

1. 審査会合コメント⑯回答

(地盤改良 (薬液注入, セメント系) の施工性・検査性に係る方針)

➤ 地盤改良の品質の不確かさの要因

防潮堤（鋼製防護壁）では地盤改良（薬液注入）と地盤改良（セメント系）を計画しており、改良品質の不確かさが懸念される。このため、地盤改良の改良品質の不確かさの要因について整理する。

区分	地盤改良（薬液注入）	記載頁	地盤改良（セメント系）	記載頁
工法	浸透固化処理工法	p. 6～ p. 7	掘削・置換工法	p. 44
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。	p. 6～ p. 7	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。	p. 44
要求品質	設計の条件となる液状化強度比以上	p. 22	設計の一軸圧縮強度以上	p. 44
改良品質の不確かさの要因	改良材	なし（工場生産された薬液であり、品質は安定）	p. 7	なし（工場生産されたセメントであり品質は安定）
	改良材の耐久性	なし（耐久性のある特殊シリカ系薬液を使用）	p. 7	なし（セメントによる固化であり安定的）
	地盤、施工条件	地盤の不均一性（粒度分布、透水性等のばらつき） 施工条件（注入圧力、注入速度の妥当性）	p. 13～ p. 16	なし（地盤の掘削、置換工法である）
	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	p. 17	なし（掘削により改良範囲を直接確認可能）
	改良範囲	大深度改良範囲の改良精度 (改良範囲確保、施工性)	p. 18～ p. 19	なし（掘削により改良範囲を直接確認可能）
	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 シリカ含有量増分値と液状化強度比の関係	p. 21～ p. 32	セメントの配合量と一軸圧縮強度の関係

上記の改良品質の不確かさの要因に対し、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安全側に設計へ反映されていることを確認する。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

1. 地盤改良 (薬液注入)

通常の地盤改良 (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	本設工事, 仮設工事
溶液型	水ガラス系	仮設工事
	アルカリ系	
	シリカゾル系	本設工事
	非アルカリ シリカゾル 活性シリカ	
	特殊シリカ系	
	超微粒子シリカ	

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固化処理工法があり、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、浸透固化処理工法を適用する。当工法は、敷地内の取水構造物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⁾	<ul style="list-style-type: none">・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。	<ul style="list-style-type: none">・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。
浸透固化処理工法 ³⁾	<ul style="list-style-type: none">・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。	<ul style="list-style-type: none">・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。

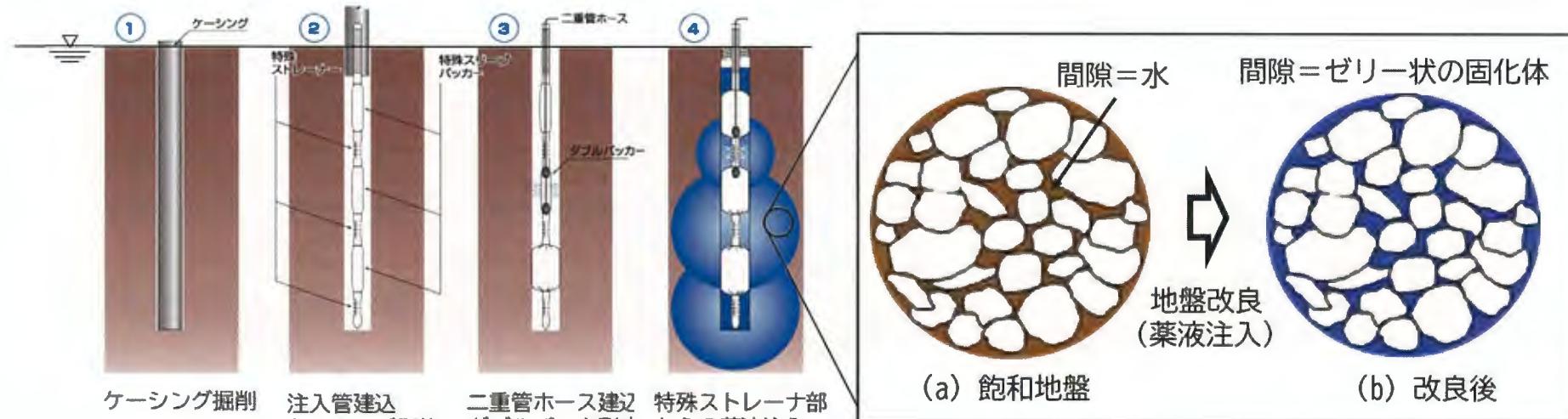
注記：1)浸透固化処理工法技術マニュアル, (財)沿岸開発技術研究センター, p. 3, 平成15年3月

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

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良(薬液注入)の施工性・検査性に係る方針)

1. 地盤改良(薬液注入)



地盤改良(薬液注入)施工概念図(浸透固化処理工法)

▶ 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、本薬液は取水構造物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。

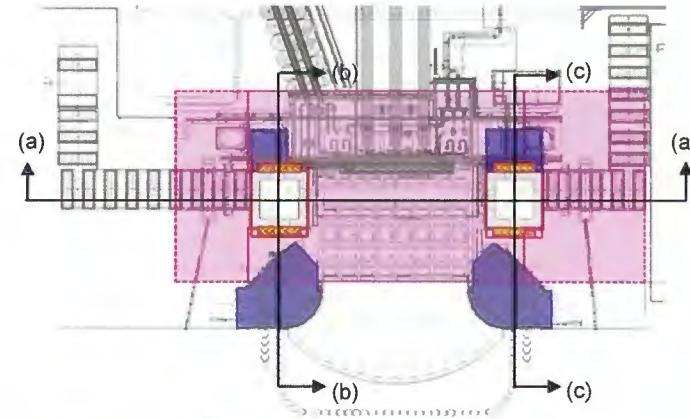
2)岡田和成、木下圭介、藤井雄一：超多点注入工法(結束細管多点注入工法)=構造物近傍・直下の浸透注入工法による地盤改良=、基礎工、地盤注入開発機構、Vol43、No.10、pp.22-24、2015.10

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

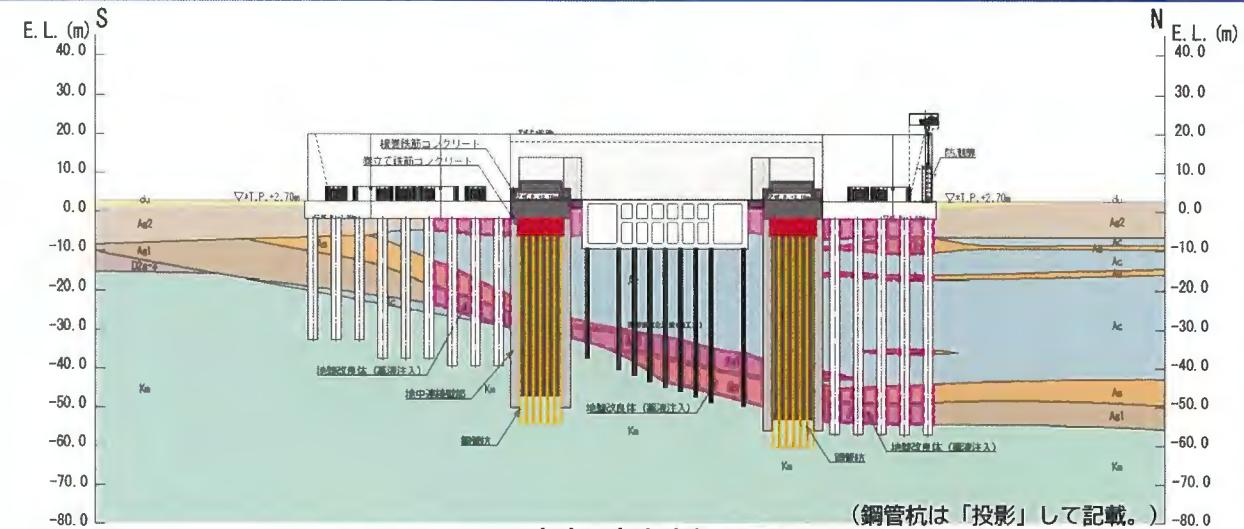
1. 審査会合コメント⑯回答

(地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

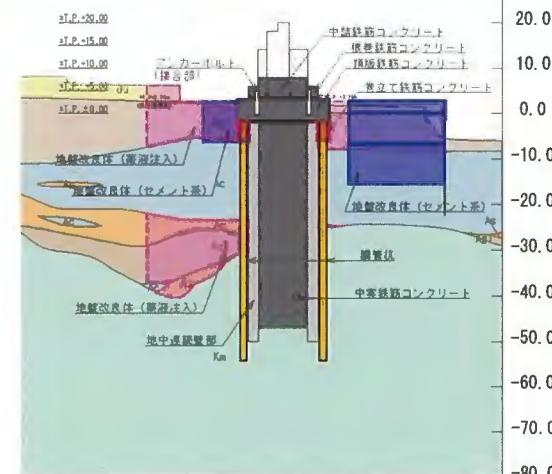
2. 地盤改良 (薬液注入, セメント系) 範囲



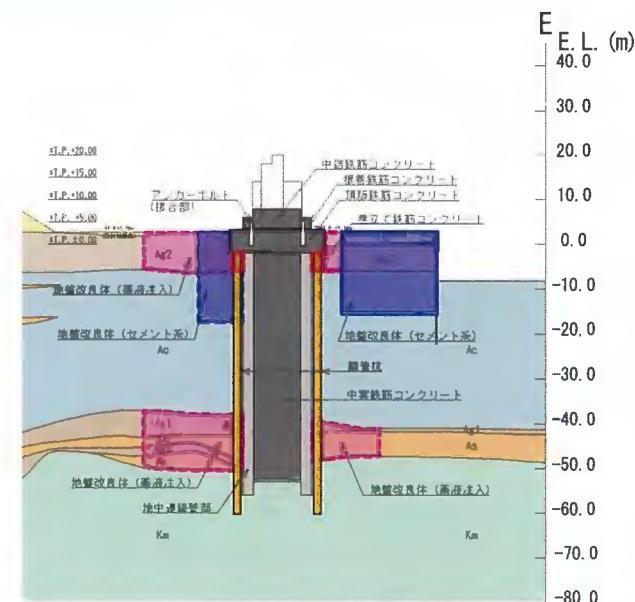
凡 例
既実施地盤改良体 (セメント系)
地盤改良体 (セメント系)
既実施地盤改良体 (薬液注入)
地盤改良体 (薬液注入)
鋼管杭
巻立て鉄筋コンクリート



(a)-(a)断面図



(b)-(b)断面図



(c)-(c)断面図

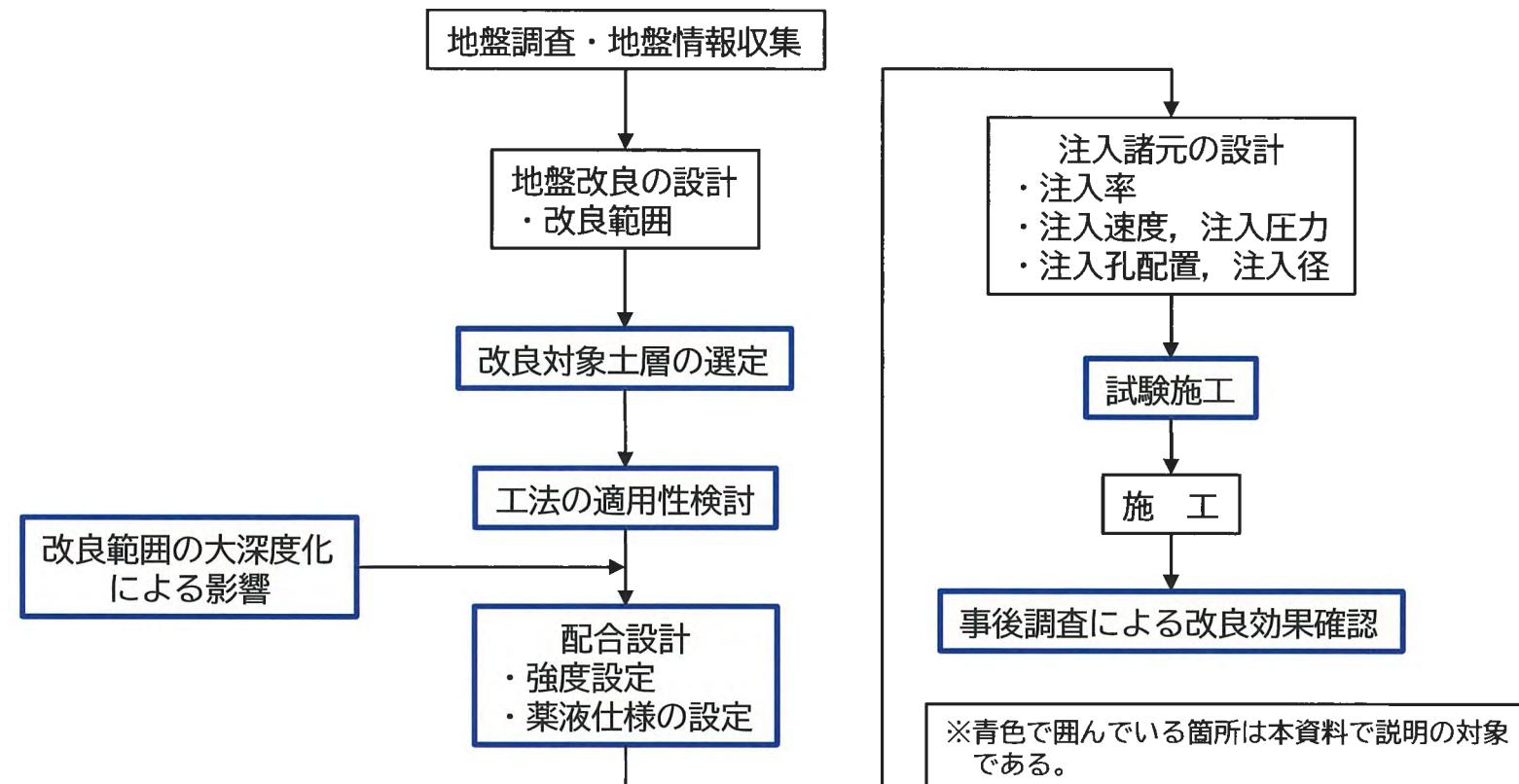
地盤改良 (セメント系, 薬液注入) 範囲

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

液状化対策の浸透固化処理工法の設計は、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（取水構造物）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

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

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%超えて塑性指数 I_p が15以下の土層
- ③平均粒径D50が10mm以下で、かつ10%粒径D10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。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

(2) 工法の適用条件

浸透固化処理工法の適用性は、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。

浸透固化処理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）

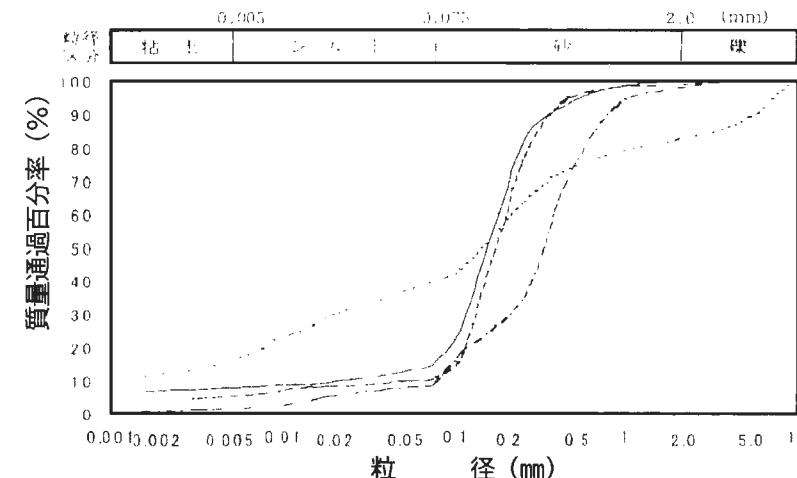
②粘性土が互層状に分布する地盤

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



浸透固化処理工法施工実績における代表的な粒度分布例

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

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。

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

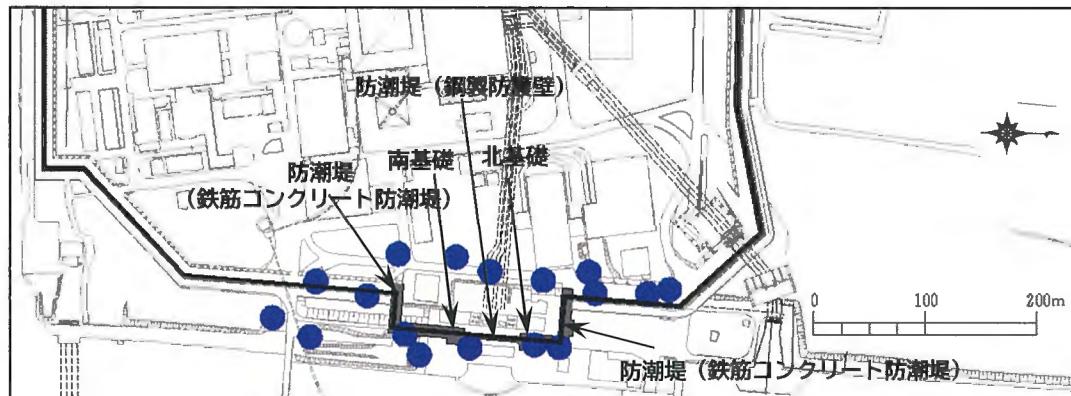
ここで、 κ は透水係数 (m/sec)、 D_{30} は試料30%通過粒径 (mm)、 U_c は均等係数、 A はN値から下表により設定した締まり度ランク (テルツアッギーとペックの区分を適用) である。

【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固化処理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

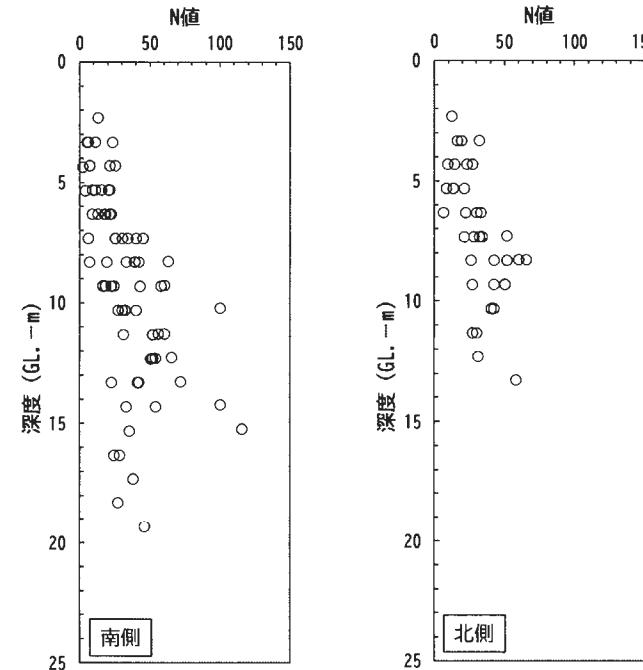
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良 (薬液注入) の設計

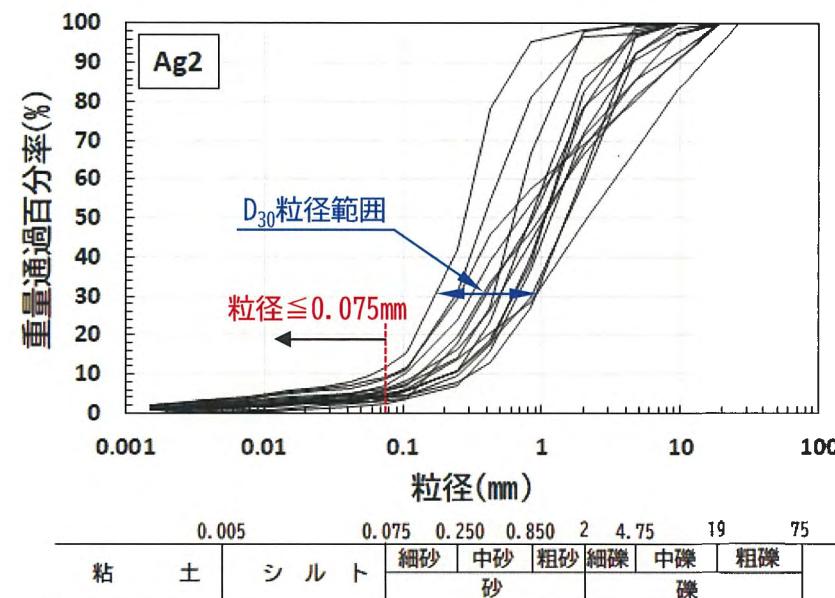
(3) 工法の適用性検討結果 (地盤調査)

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~比較的良い) 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、0.2mm~1mm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。

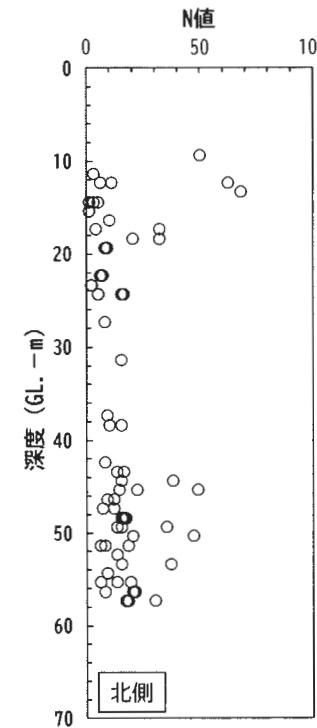
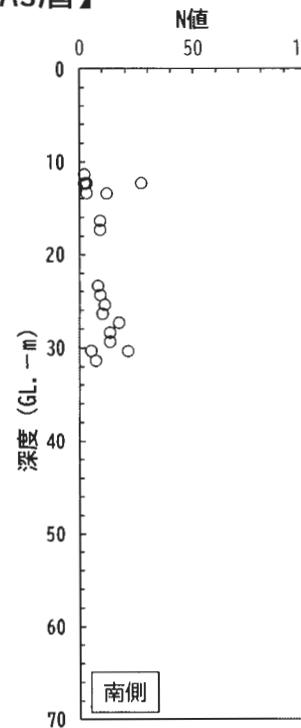
- ・N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により分布範囲による土性の変化は小さく、均一な土層と判断した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

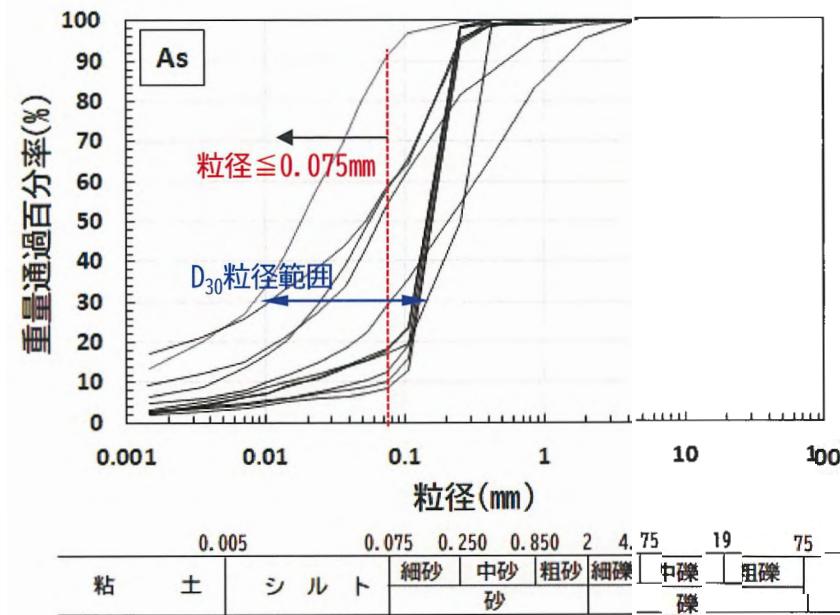
3. 地盤改良 (薬液注入) の設計

(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~比較的良い) である。
- 地盤の透水性に影響するD₃₀粒径は0.0082~0.18mmであり、推定透水係数は $9 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-2}$ (cm/sec) のばらつきが大きい値が得られた。

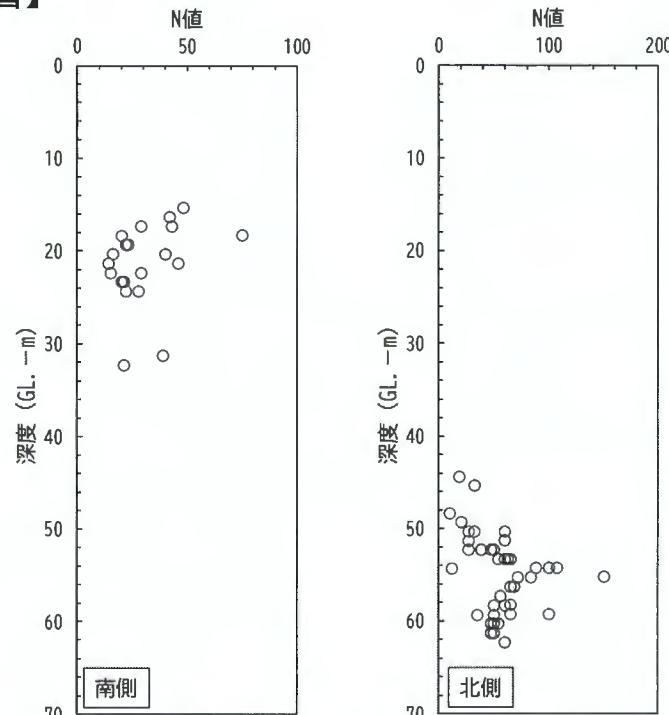
・N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により、粒度分布、細粒分含有率は分布範囲により変化する不均一な土層と判断した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

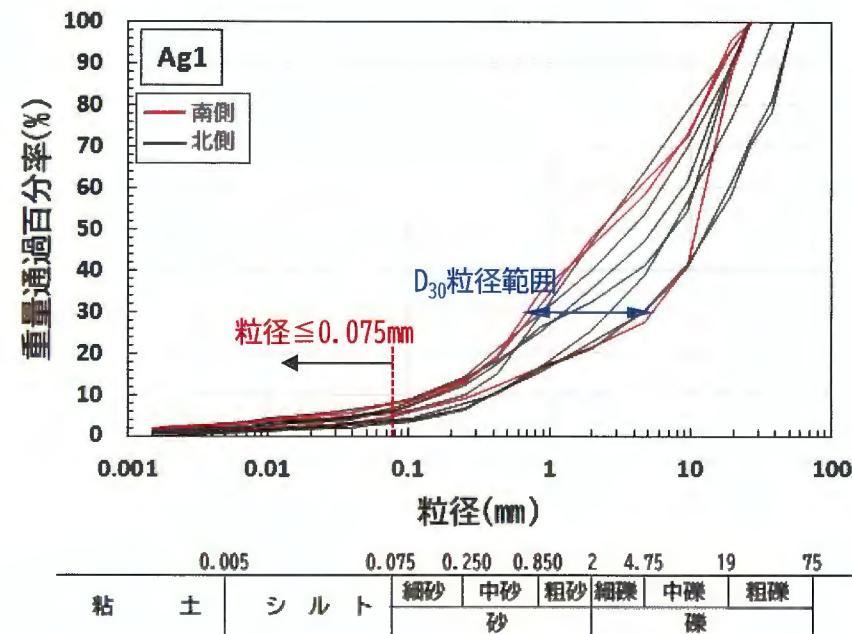
3. 地盤改良 (薬液注入) の設計

(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 ≤ 0.075mm) 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D₃₀は0.7mm~5.4mmの範囲であり、推定透水係数は南側で $1.5 \times 10^{-2} \sim 2.3 \times 10^{-3}$ (cm/sec)、北側で $7.6 \times 10^{-3} \sim 8.9 \times 10^{-4}$ (cm/sec) であり、同じ施工範囲での透水性の変化は小さい。

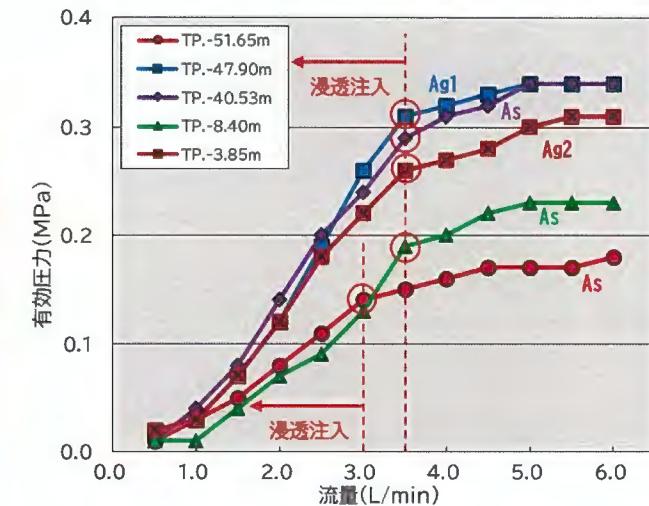
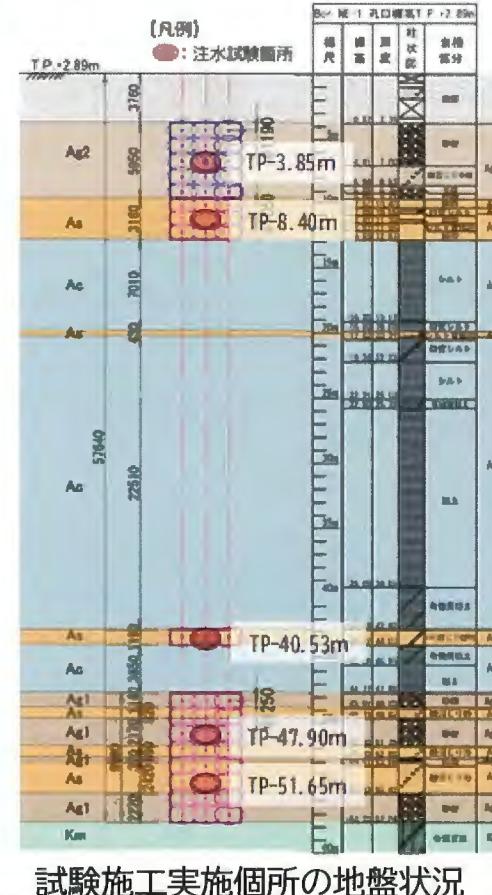
・N値、粒度分布、細粒分含有率FC等により、南側と北側の分布深度は異なるものの、均一な土層と判断した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良 (薬液注入) の設計

(4) 工法の適用性検討結果 (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。



- 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。

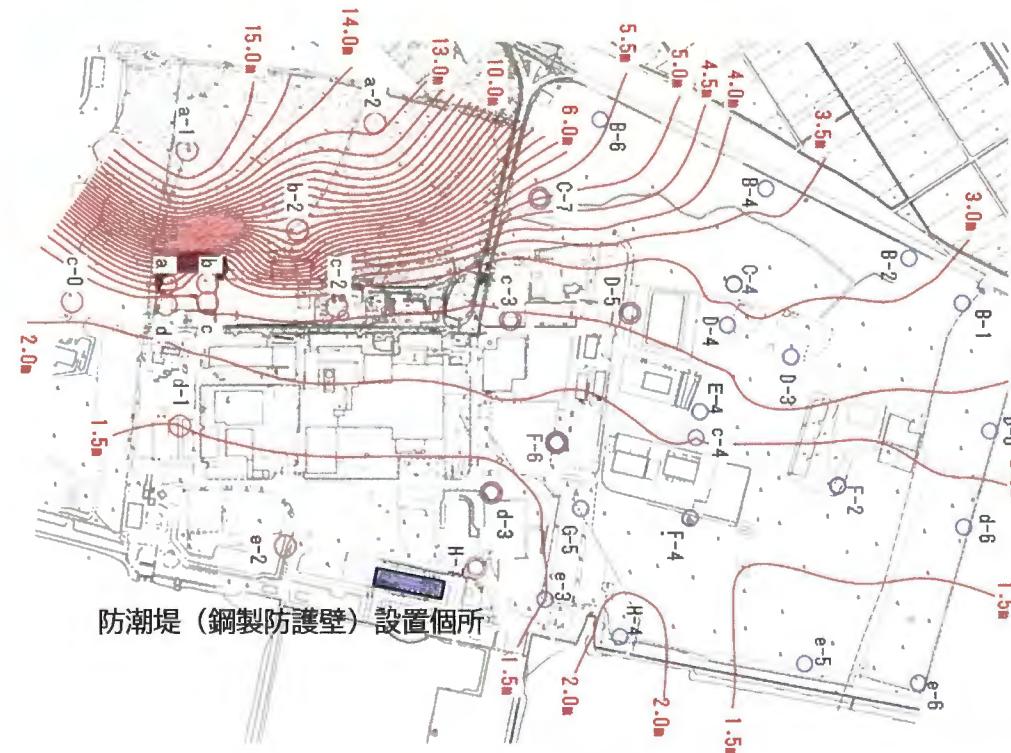
- Ag2層、Ag1層は、均一な地盤と評価され、代表的な土質の砂礫で試験を実施した。
 - As層は、調査位置により土性が変化する不均一な土層であり、シルト質砂～礫混じり砂まで広い土質を対象にして試験を実施した。
 - 施工においては、限界注入速度試験結果の最小速度である3.0(L/min)を注入速度とする。
- 以上の結果を施工に反映し、地盤の不均一性、施工条件による改良品質の不確かさの要因に対する対応方策とする。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

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）設置個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, 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い。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良(薬液注入)の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良(薬液注入)の設計

(6) 工法の適用性検討結果(大深度施工への対応)

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。

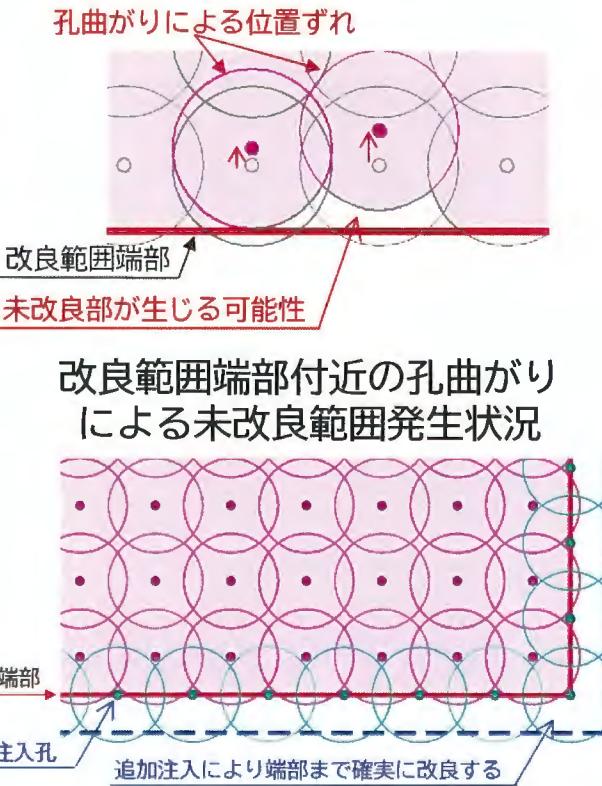
1) 注入孔曲がり

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。

② 改良範囲端部の対応策

既施工の実績から孔曲がりは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。

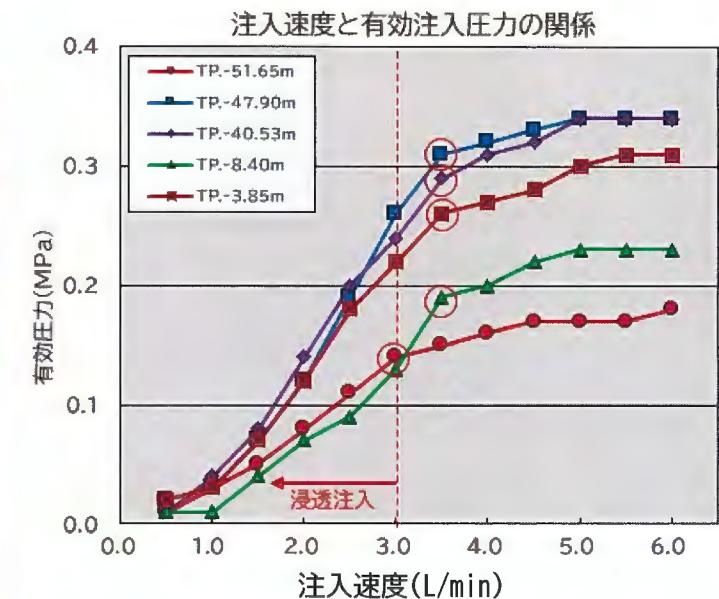
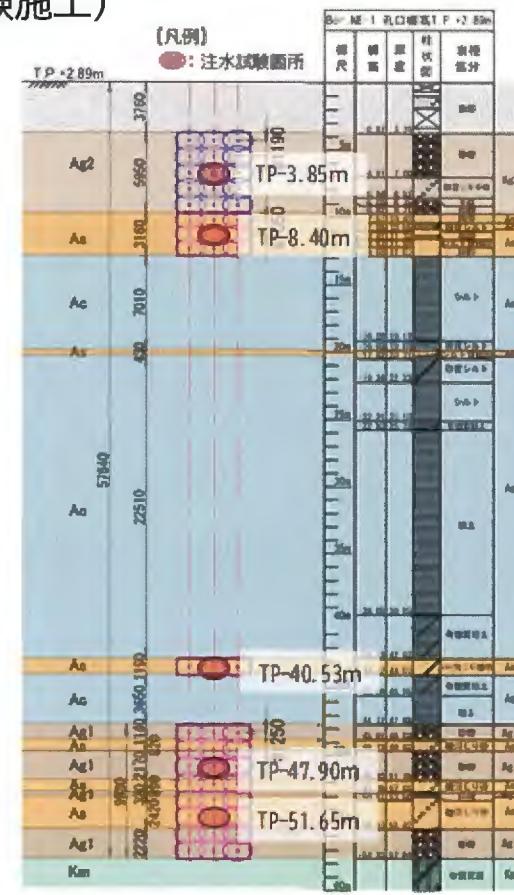
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

3. 地盤改良（薬液注入）の設計

（6）工法の適用性検討結果（大深度施工への対応）

2) 高静水圧・高拘束圧下での施工（試験施工）

試験施工実施箇所位置



- 既施工箇所より深い改良対象土層の試験施工で得られた、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。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

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, 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, 施工条件

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により設定した適切な施工条件を施工に反映し, 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。

3) 地下水（被圧水位と水位勾配）による施工環境への影響

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い。

4) 改良範囲（改良範囲の確保と施工性）

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する。

また, 既施工箇所より深い改良対象土層における試験施工で得られた施工条件（均質な改良体が形成できる浸透注入の注入圧力, 注入速度）での施工を行うこととする。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良(薬液注入)の施工性・検査性に係る方針)

4. 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FLIP)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。

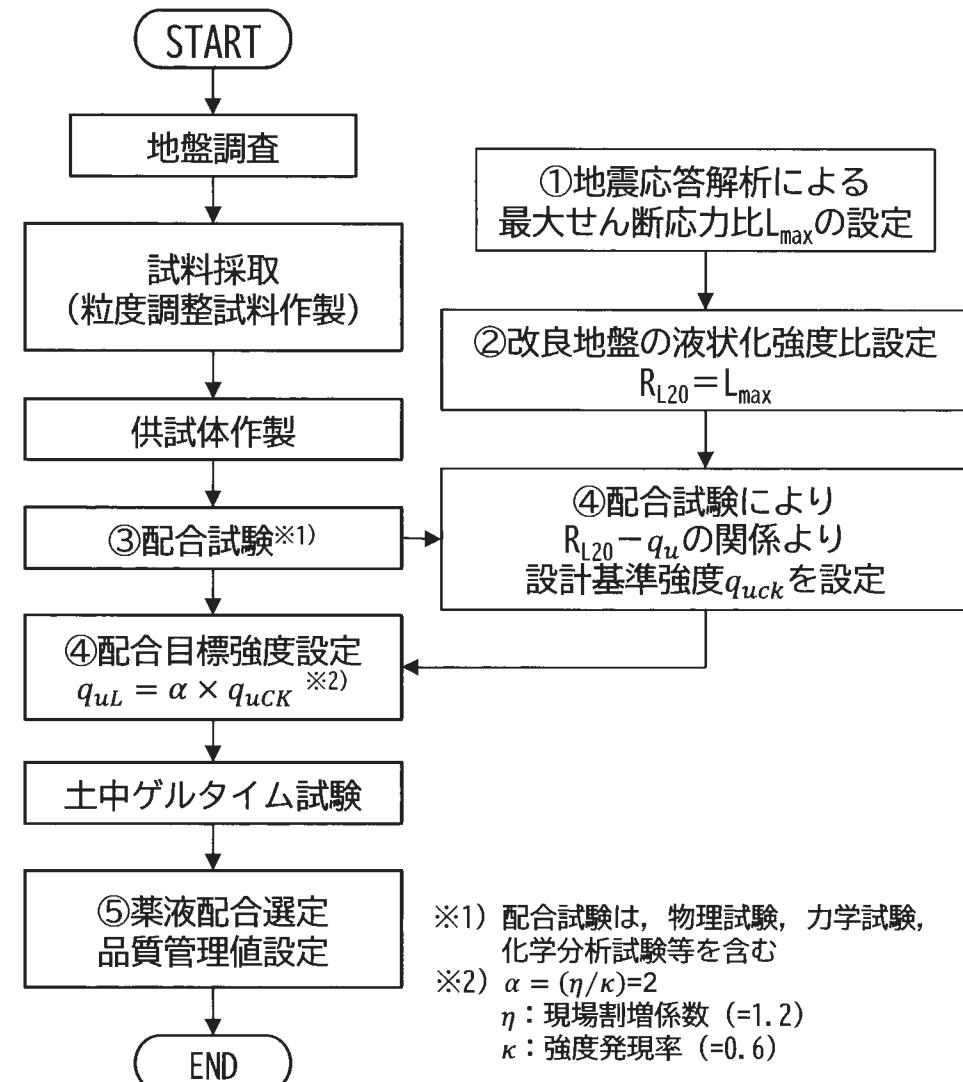
③配合試験による液状化強度比と一軸圧縮強度、薬液濃度と一軸圧縮強度との関係をまとめること。

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¹⁾

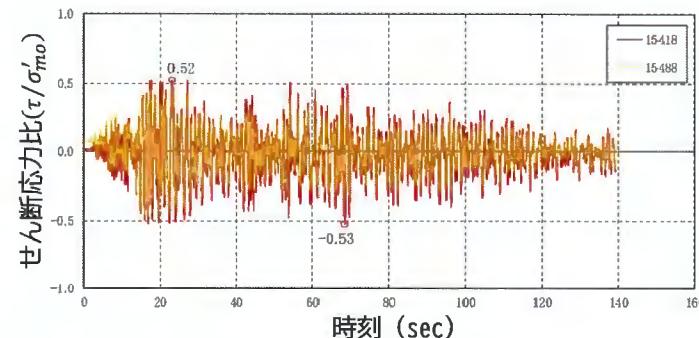
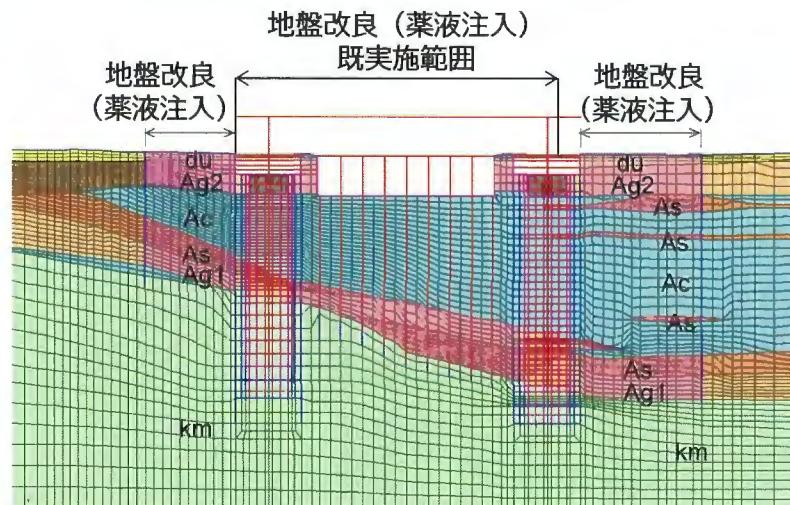
注記: 1) 浸透固化処理工法技術マニュアル、財沿岸開発技術研究センター、p. 45、平成15年3月 より引用・加筆

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(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。



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

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

σ'_{mo} : $t=0$ において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

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良(薬液注入)の施工性・検査性に係る方針)

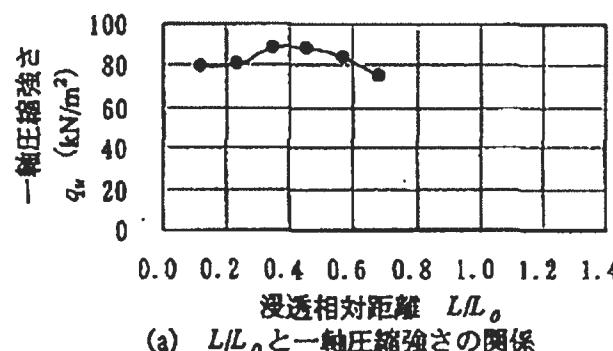
4. 配合設計

(2) 設計基準強度および配合目標強度

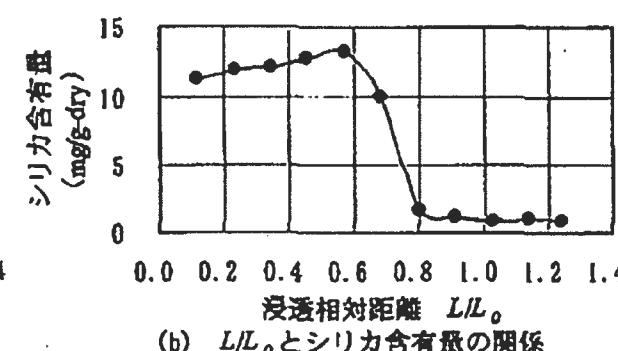
浸透固化処理工法では、一軸圧縮強度 q_u と液状化強度比 R_{L20} は薬液濃度とともに増加し、一軸圧縮強度 q_u と液状化強度比 R_{L20} の間にも有為な関係があることから、配合試験結果から液状化強度比(最大せん断応力比)に相当する一軸圧縮強度を改良後の地盤に必要とする強度として設計基準強度としている。

原地盤での地盤改良(薬液注入)においては、山崎ら¹⁾は一次元注入試験装置を用いて浸透距離と一軸圧縮強度 q_u 、シリカ含有量、強度発現率について検討を行い、地下水による希釀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。

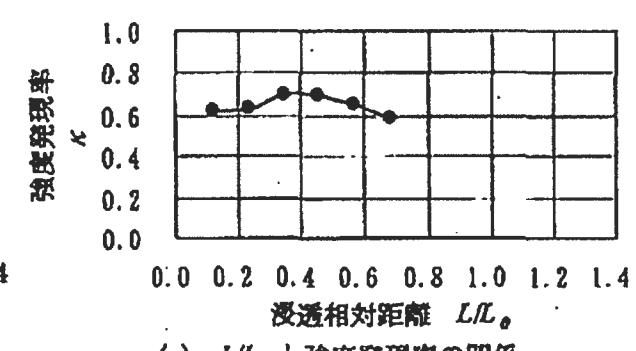
$$q_{uL} = (q_{uck}/\kappa) \times \eta = 2 \times q_{uck}$$



(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¹⁾

注記：1)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.

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(3) 配合試験用の試料採取

既施工配合試験（2018年度, [REDACTED]周辺地盤液状化対策）及び今回の配合試験（2025年度）において試料採取した位置を以下に示す。



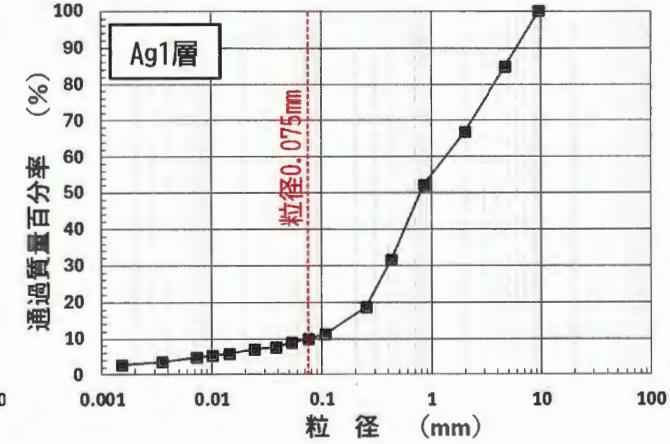
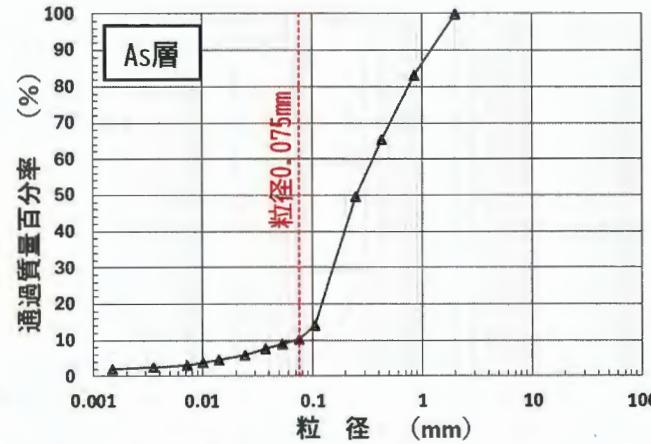
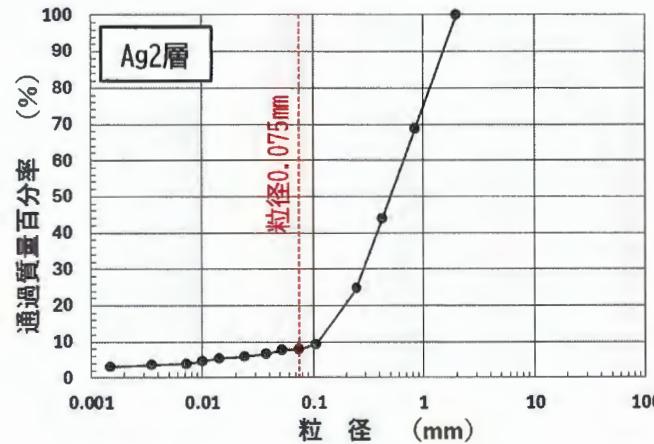
配合試験用の試料採取箇所

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

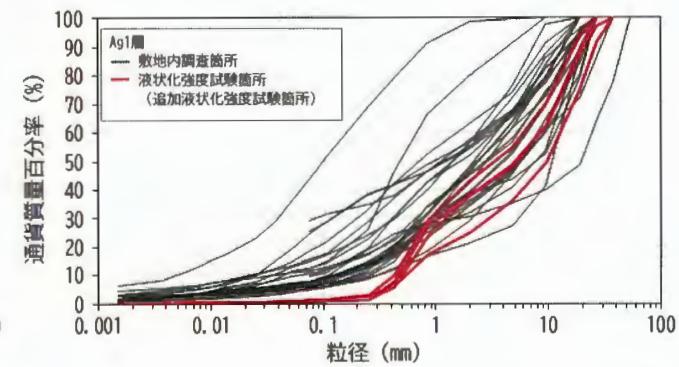
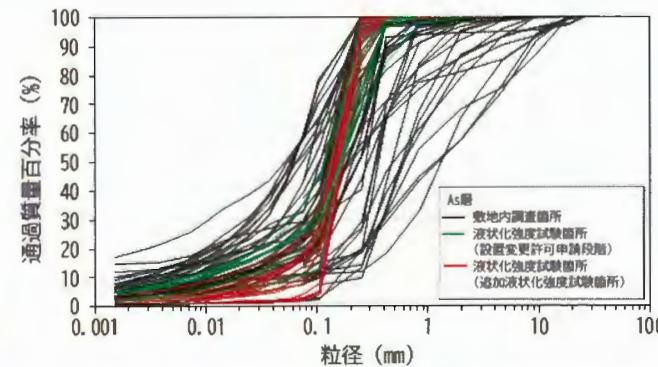
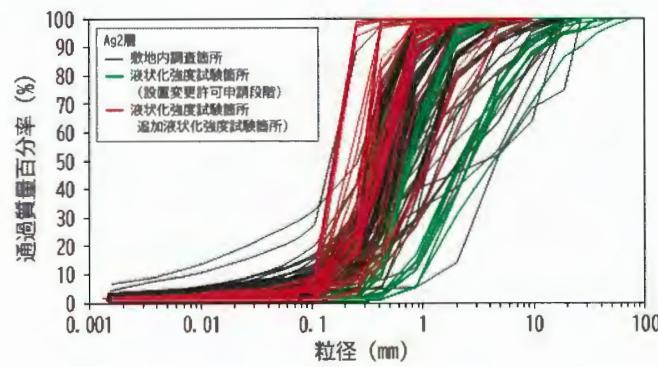
4. 配合設計

(3) 配合試験用の試料採取

配合試験は、設置変更許可およ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）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

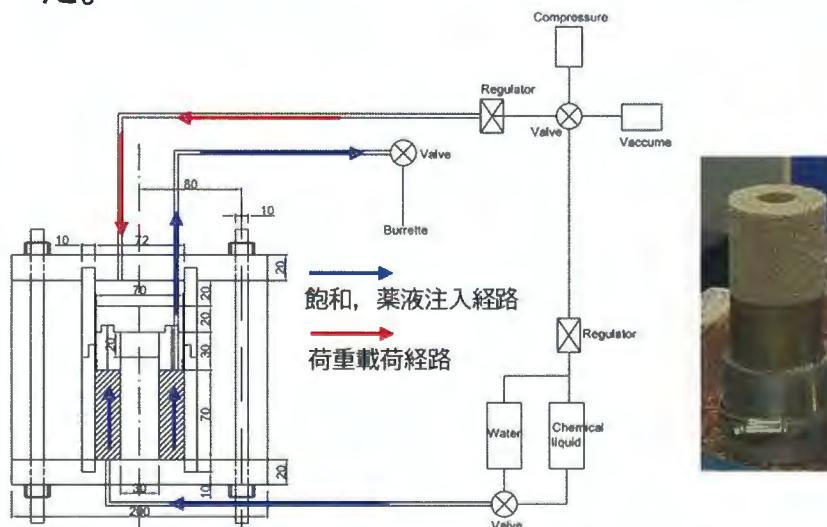
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(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気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載荷の順に行った。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。

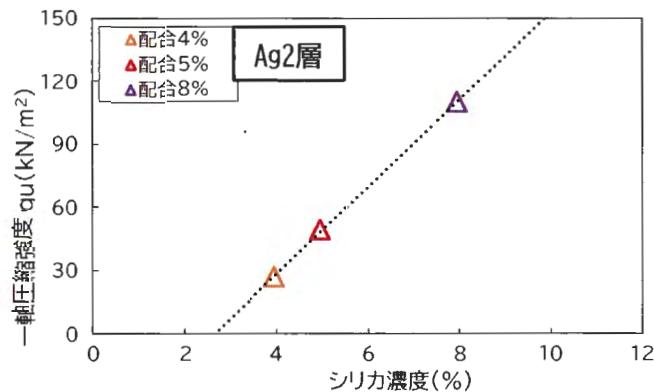


1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

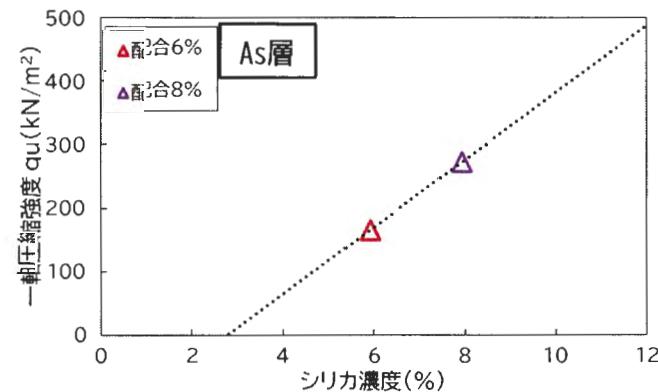
4. 配合設計

(5) 一軸圧縮強度試験

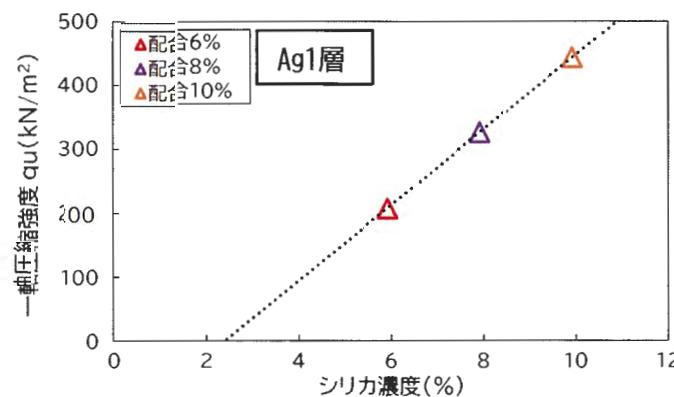
各土層で実施した一軸圧縮試験結果を示す。



(a) Ag2層



(b) As層



(c) Ag1層

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。

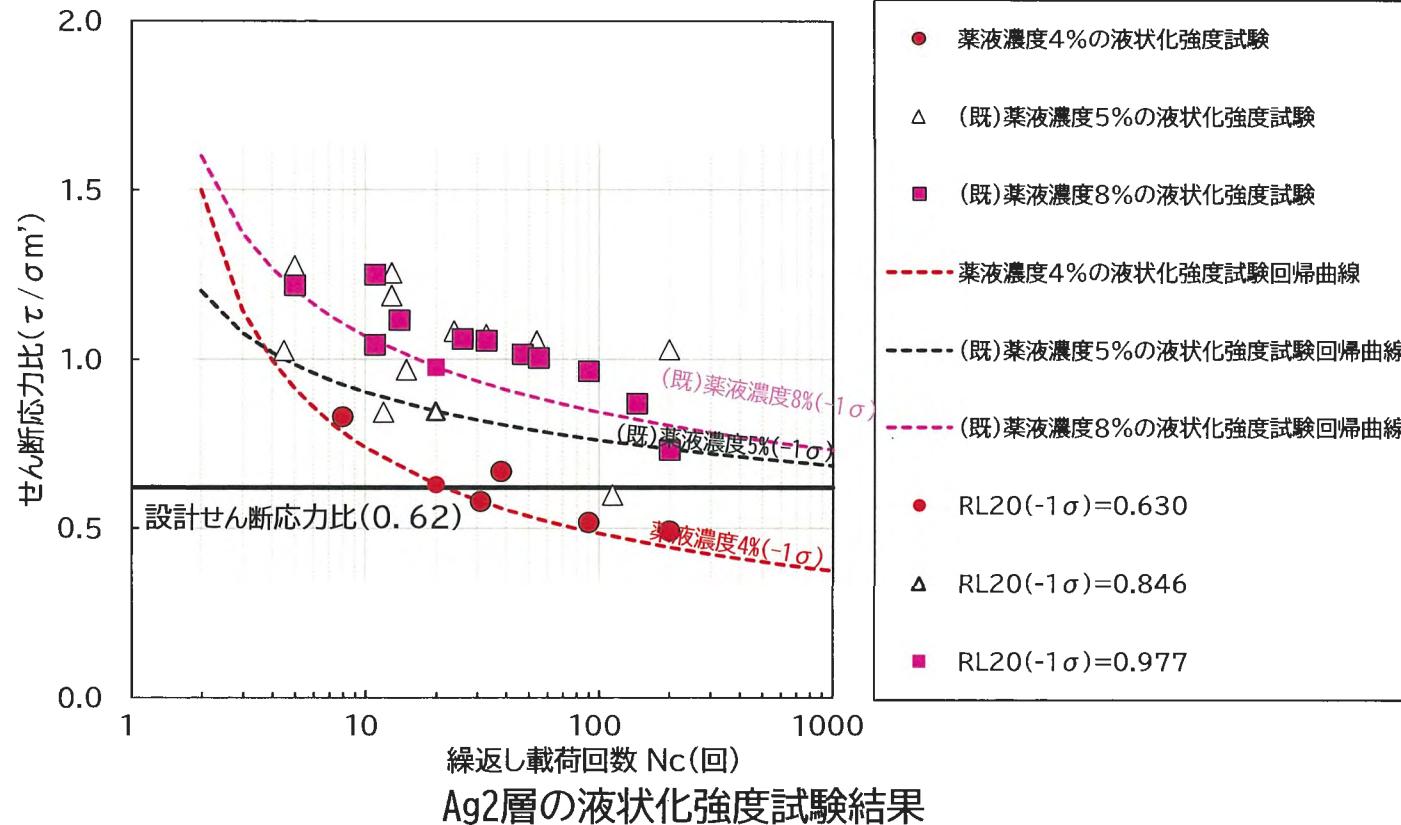
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(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】



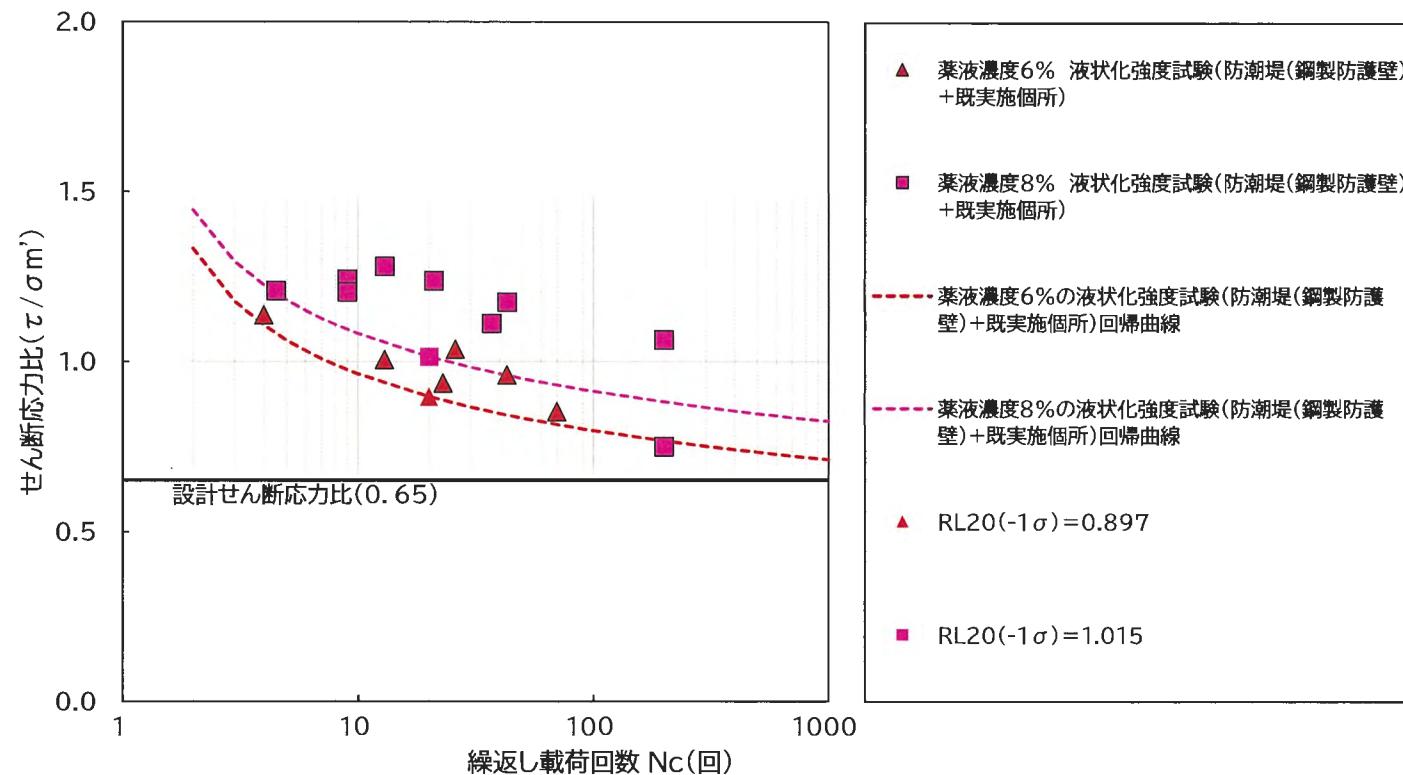
- ・薬液を注入した供試体の液状化強度試験結果は、概ね薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ばらつきを考慮（平均-1σ）した液状化強度比 $R_{L20(-1\sigma)}$ は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(6) 液状化強度試験結果

【As層】



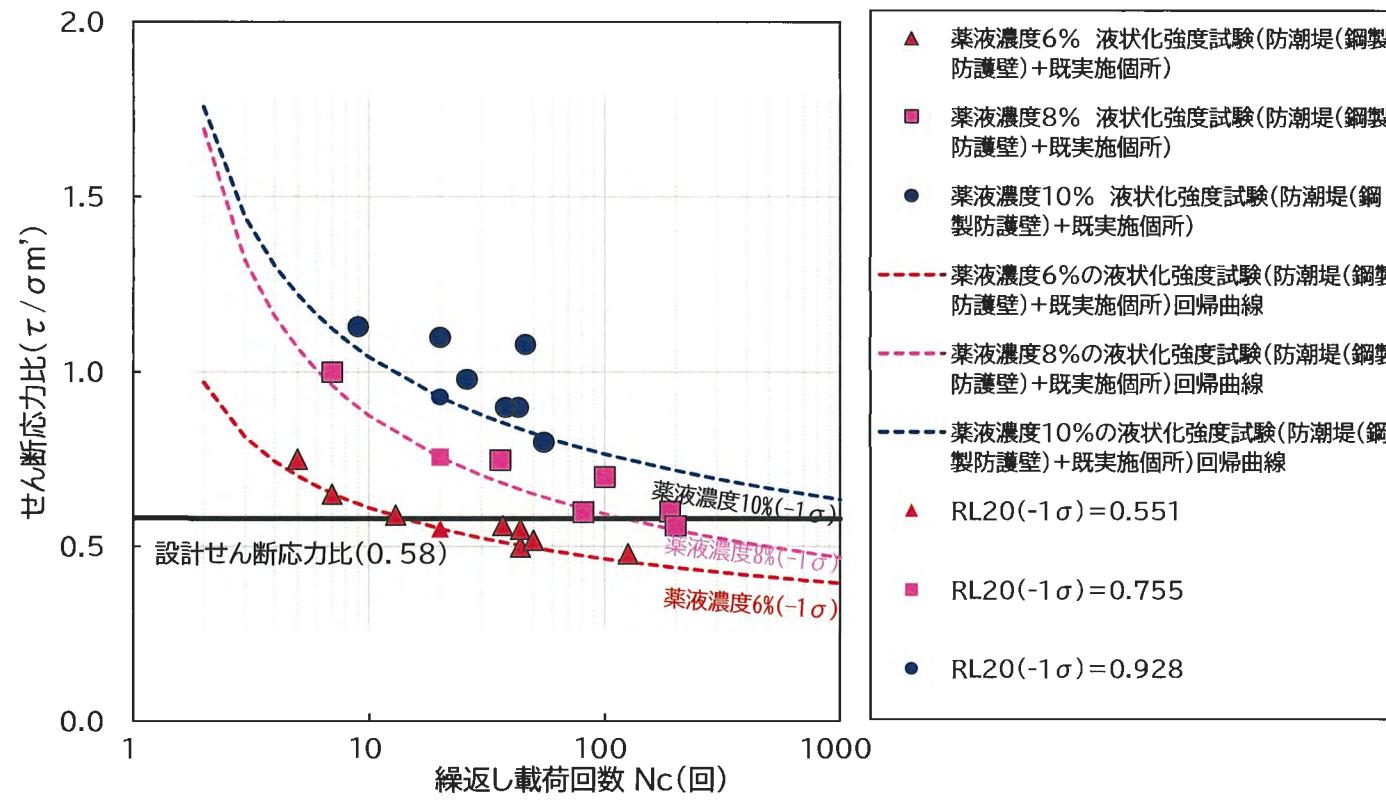
- ・薬液を注入した供試体の液状化強度試験結果は、概ね薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ばらつきを考慮(平均-1σ)した液状化強度比 $R_{L20(-1\sigma)}$ は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

(6) 液状化強度試験結果

【Ag1層】



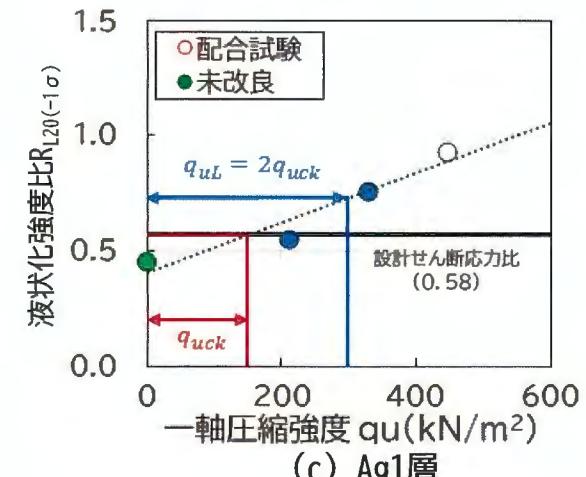
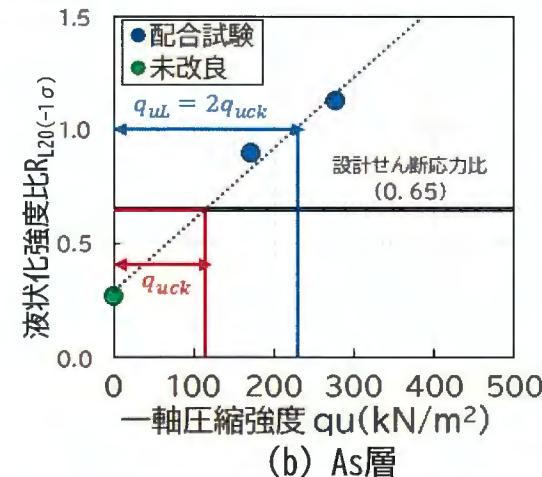
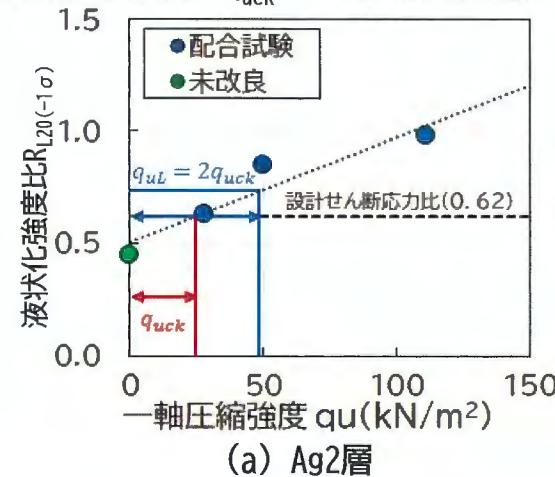
- ・薬液を注入した供試体液状化強度試験結果は、薬液濃度の順に大きくなっている。
- ・ばらつきを考慮（平均 -1σ ）した液状化強度比 $RL20(-1\sigma)$ は、薬液濃度の増加とともに大きくなることを確認した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

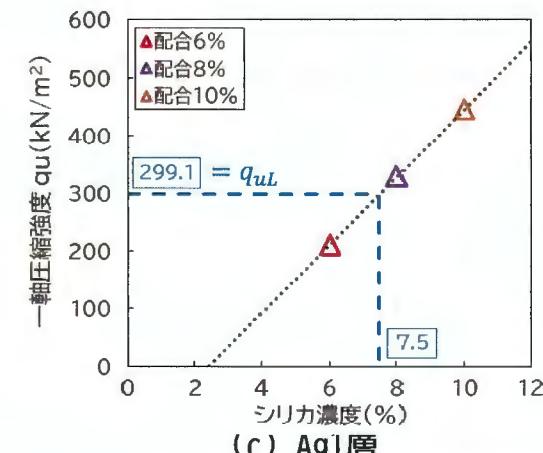
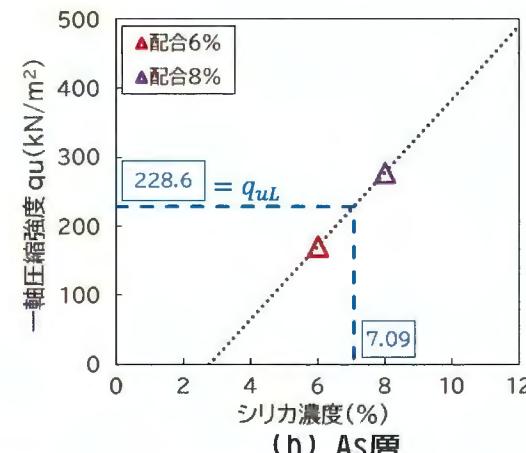
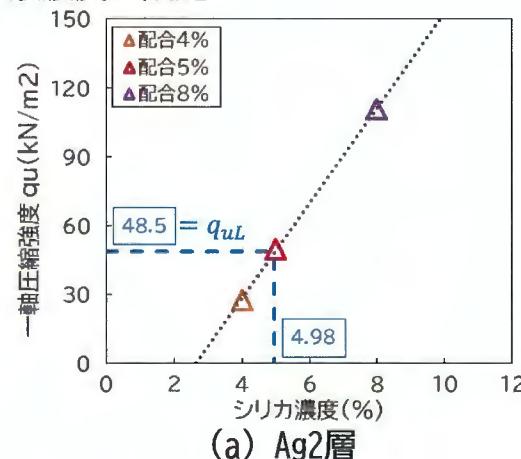
(7) 薬液濃度の選定

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



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



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。

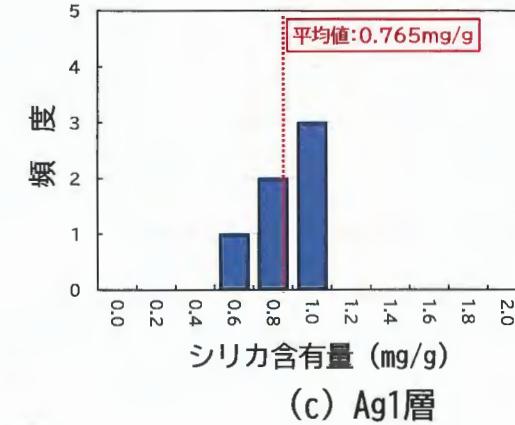
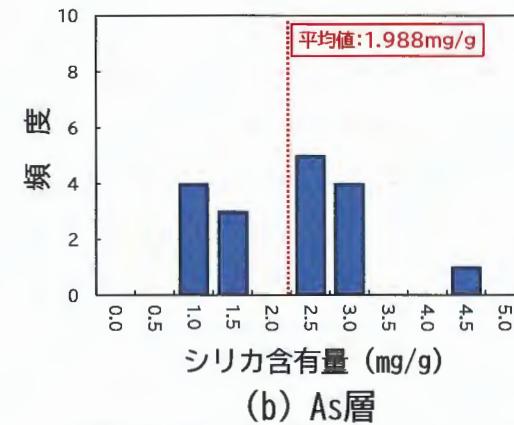
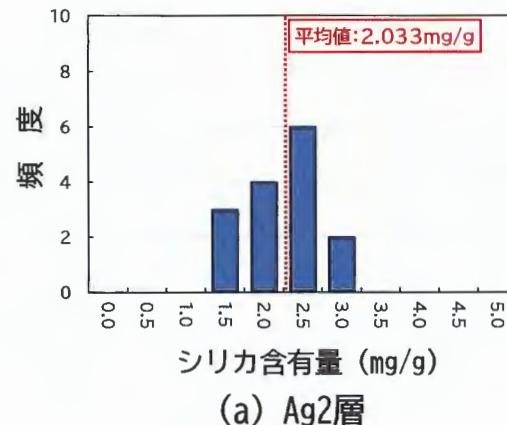
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

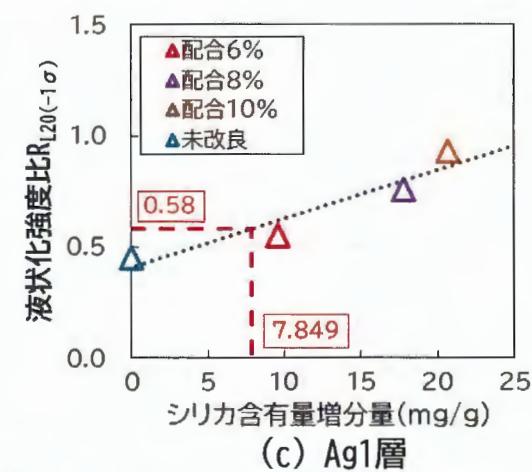
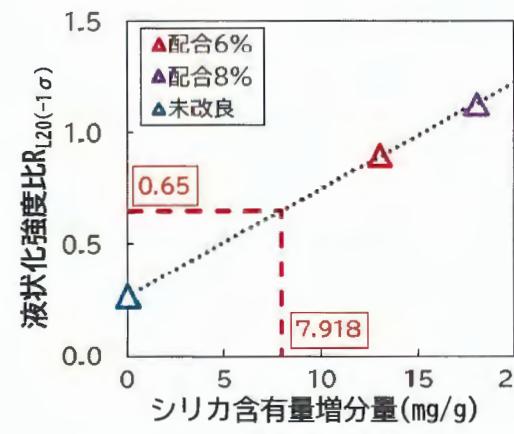
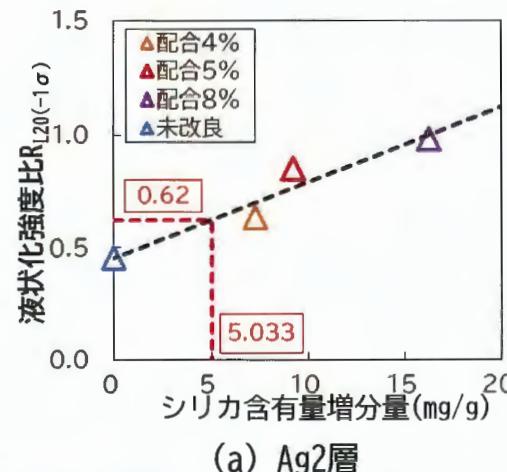
(8) シリカ含有量による評価

改良後の改良体が所定の品質を確保していることを確認するために、液状化強度比とシリカ含有量増分量の関係からシリカ含有量増分量を管理値設定する。改良体のシリカ含有量増分量は、以下のように算定する。

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



未改良の原地盤のシリカ含有量



各層のシリカ含有量増分値の管理値

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

4. 配合設計

➤ まとめ

1) 改良地盤の液状化強度比の設定

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。

2) 配合試験における液状化強度比の設定

原地盤の液状化強度試験箇所（液状化しやすい）の粒度分布に調整した試料を用いるとともに、配合試験の液状化強度比は、試験のばらつきを考慮し（平均-1 σ ）に低減した液状化強度比 $R_{L20(-1\sigma)}$ とした。

3) 薬液の濃度の設定

配合試験により、液状化強度比と一軸圧縮強度、一軸圧縮強度と薬液の濃度、シリカ含有量と薬液の濃度の関係が有為であることを確認した上で、保守的な薬液の濃度を設定した。

以上より、配合試験から保守的に設定した薬液の仕様及び液状化強度比などの評価により改良品質の不確かさを考慮した施工計画になっていることを確認した。

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

5. 事後調査

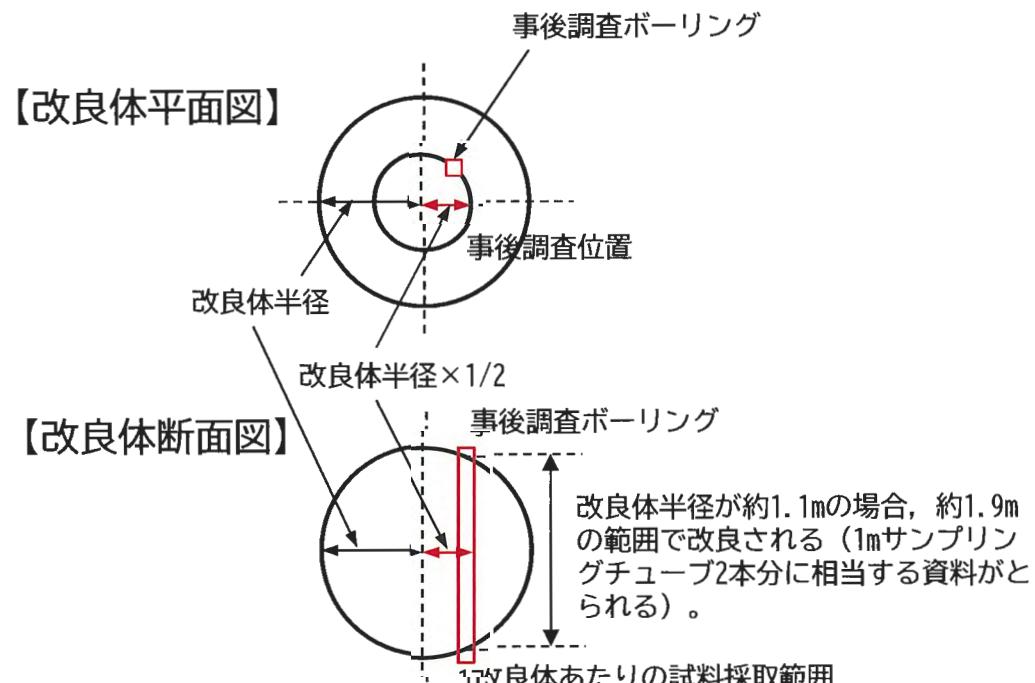
(1) 品質管理

浸透固化処理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增量を管理値として設定する。

調査数量は、実績のある基準¹⁾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⁾

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. 45、平成15年3月

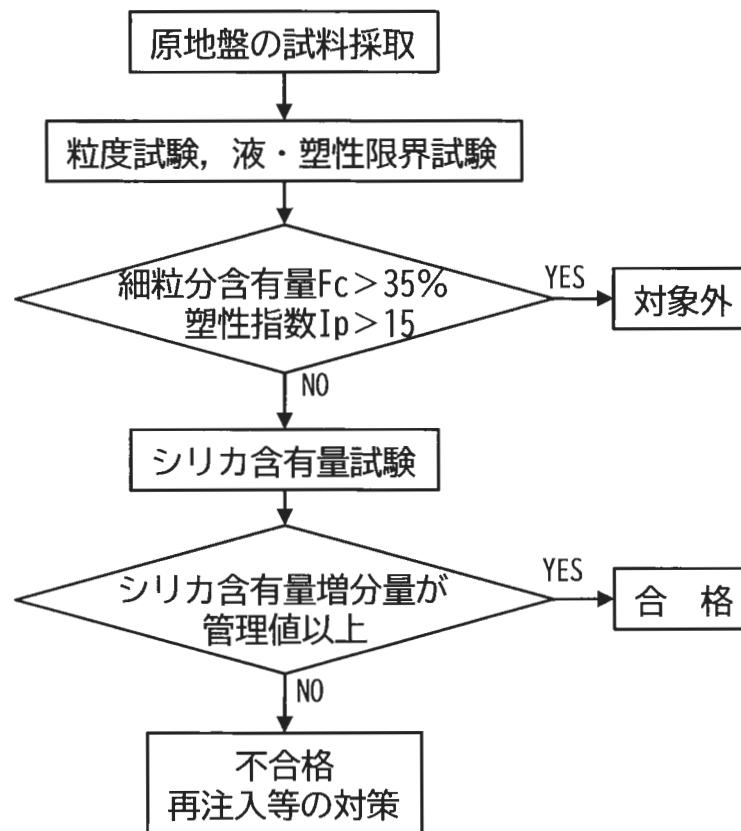
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

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（取水構造物）では、下記の品質確認フローを適用するとともに、液状化強度試験用のサンプリングを行い、中空繰返しねじりせん断試験、繰返し三軸試験を実施した。

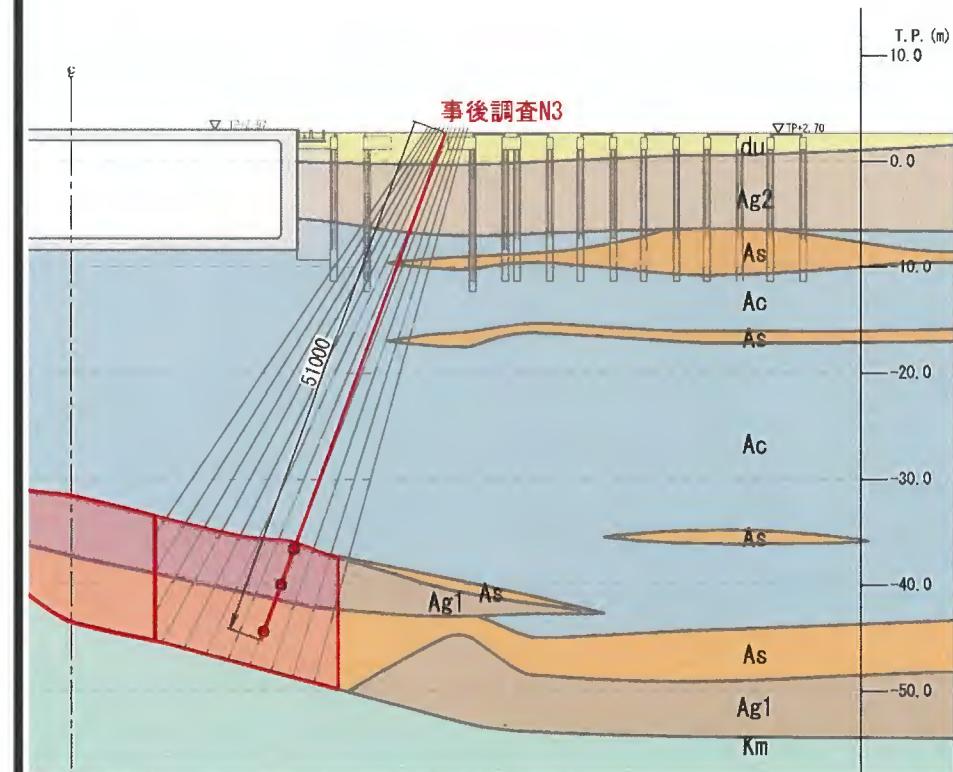


1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

5. 事後調査

(3) 既施工箇所においての事後調査実施箇所

地盤改良 (薬液注入) の既施工箇所 [] において、浸透固化処理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。



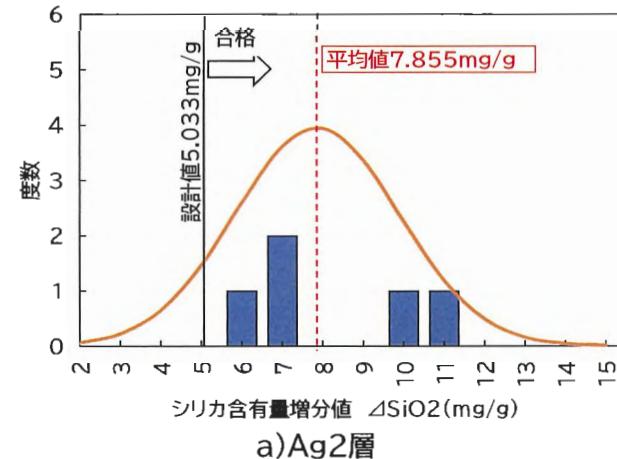
事後のサンプリング位置（既施工箇所 深部全16箇所）

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

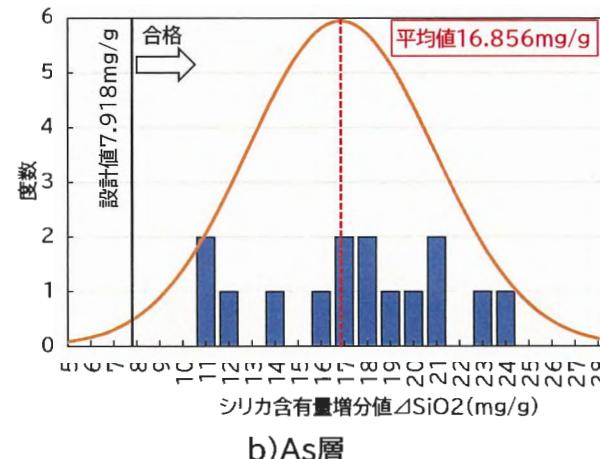
5. 事後調査

(4) 既施工箇所において事後調査結果

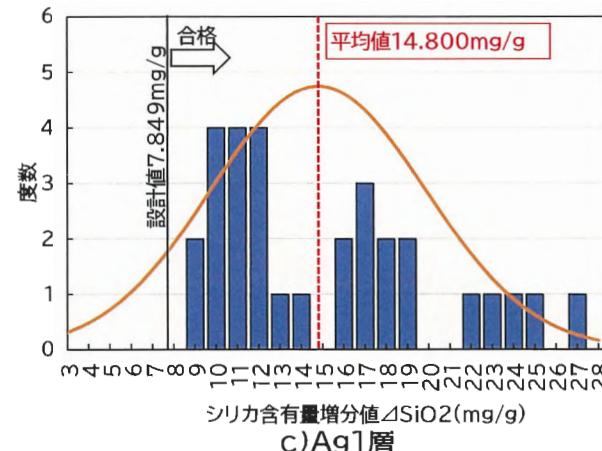
既施工箇所のシリカ含有量増分量は、防潮堤（鋼製防護壁）で設定する設計管理値を満足する結果が得られた。これにより、大深度での高水圧・高拘束圧下においても、要求品質は満足できることを確認した。



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

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針)

5. 事後調査

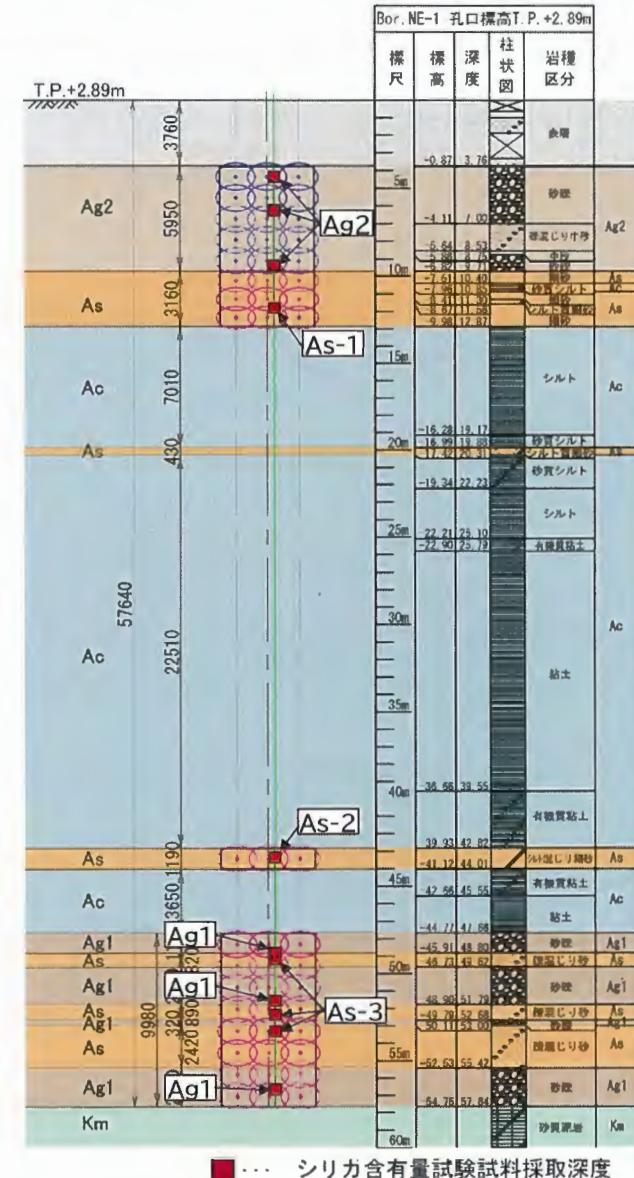
(5) 試験施工での事後調査結果

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, As, 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、シリカ含有量増加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, 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



事後のサンプリング位置 (試験施工)

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良（薬液注入）の施工性・検査性に係る方針)

5. 事後調査

➤ まとめ

- 1) 施工後の品質確認は、試料採取時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いる。なお、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。

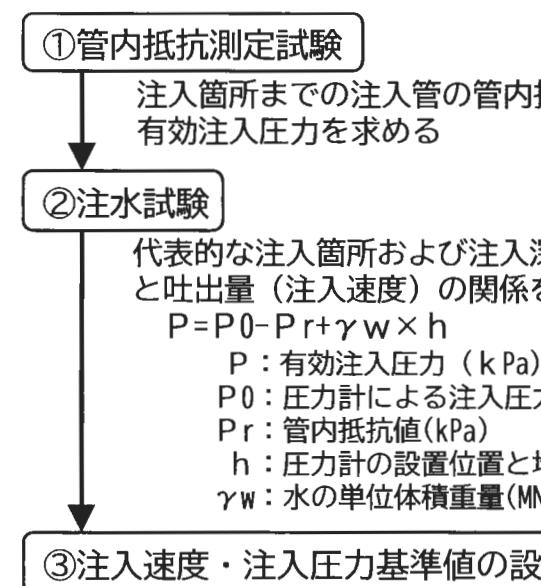
1. 審査会合コメント⑯回答

(地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針【参考資料①】)

➤ 限界注入速度試験

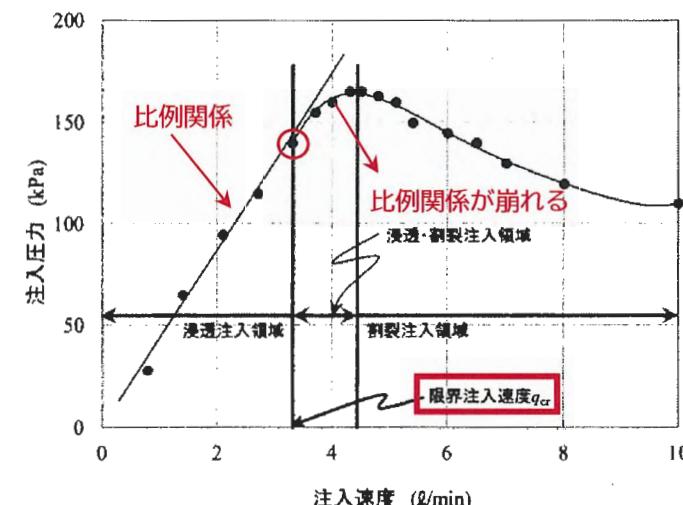
注入速度と注入圧力の関係を下図に示す。注入速度が遅い状態では、注入速度と注入圧力は比例関係であり、この際の注入形態は浸透注入となり、均質な改良体が形成される。注入速度がある速度より大きくなると、注入速度と注入圧力の比例関係は保てず、割裂浸透の注入形態となり、均質な改良体は形成されにくく。この注入速度と注入圧力の関係に影響を及ぼす要因としては、細粒分含有率、密度、土被り圧、地盤の透水性などがある。

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

※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

1. 審査会合コメント⑮回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針【参考資料②】)

➤ 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)

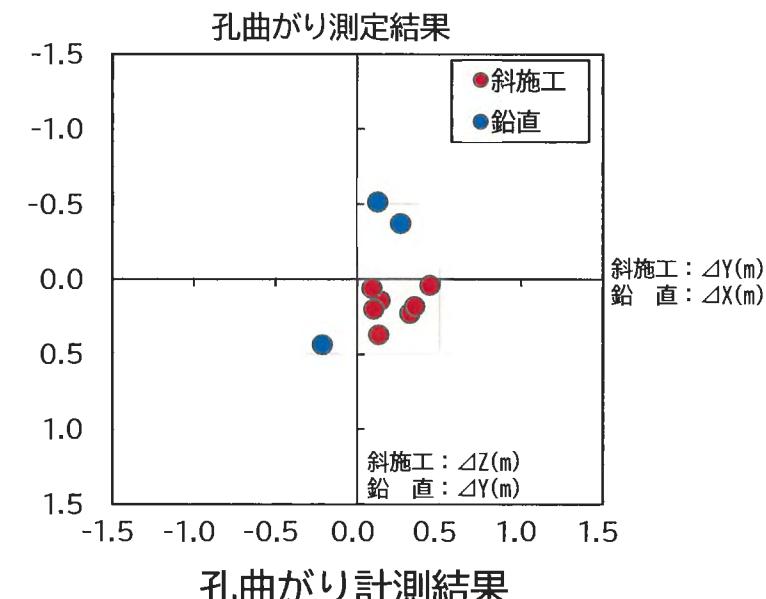
孔番号	削孔角度 [°]	削孔長 [m]	偏心量[m]				削孔精度
			ΔX	ΔY	ΔZ	偏心量	
A-1 m	57.1	64.90	0.316	0.130	0.371	0.501	1/103
A-1 p	41.1	53.58	0.288	0.320	0.228	0.487	1/111
C-1 q	36.4	53.88	0.193	0.140	0.144	0.278	1/195
C-1 s	40.1	48.41	0.280	0.350	0.183	0.482	1/102
F-1 g	33.4	49.95	0.101	0.090	0.063	0.149	1/338
B-2j	30.6	55.31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



1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針【参考資料③】)

➤ 改良後の液状化強度試験結果

(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G Sサンプリングで実施した。

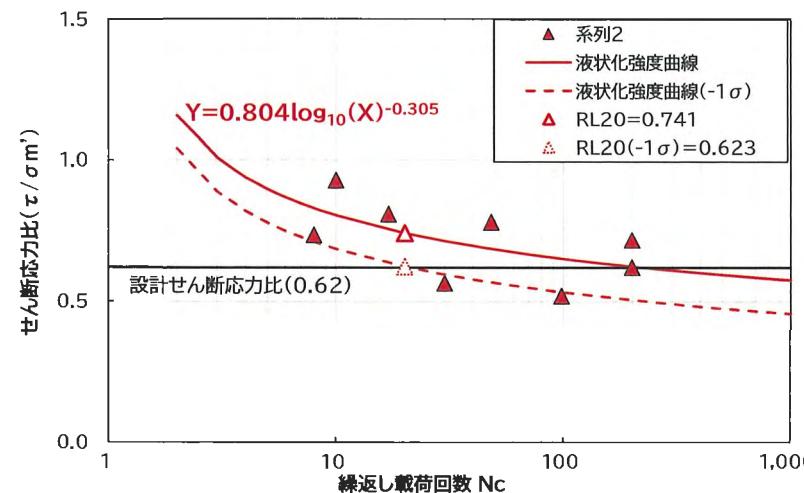


現地改良土不攪乱試料採取位置

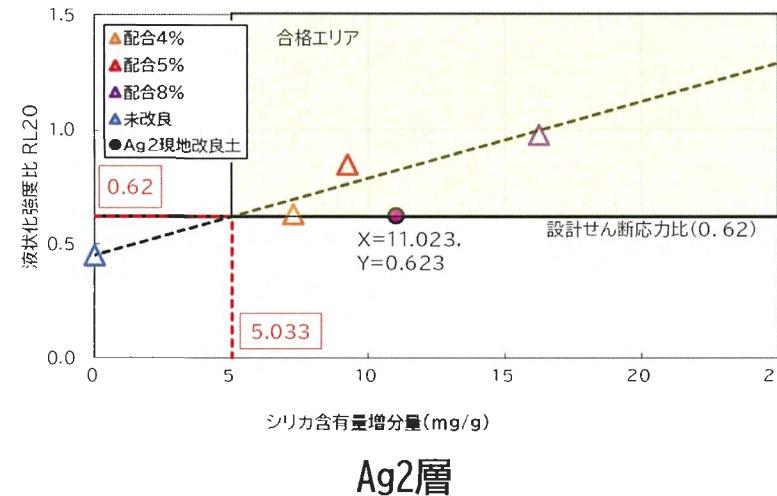
1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (薬液注入) の施工性・検査性に係る方針【参考資料③】)

▷ 改良後の液状化強度試験結果

①液状化強度比 (-1σ) と設計せん断応力比の比較

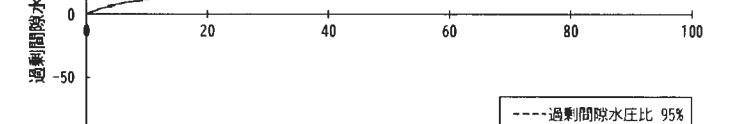


②配合試験と事後調査結果の比較



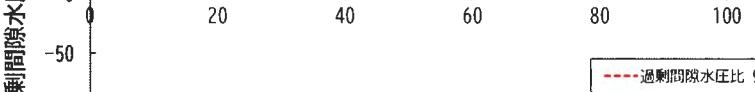
③液状化強度試験での過剰間隙水圧とせん断ひずみの発生状況

未改良土は一定の繰り返し回数を超えるとせん断ひずみとともに過剰間隙水圧比も急激に増加し、液状化状態に至る



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

改良土はせん断ひずみが7.5%に達しても過剰間隙水圧比は95%に達しない
載荷初期から過剰間隙水圧比は立ち上がり、その後は漸増する挙動を示す



改良土は、載荷初期からせん断ひずみは発生し、繰り返し回数の増加とともにせん断ひずみは漸増する



(b) 改良土 (Ag2層, $(\tau / \sigma'_m) = 0.782$)

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (セメント系) の施工性・検査性に係る方針)

1. 概要

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 $q_{ud} = 1.5 \text{ N/mm}^2$

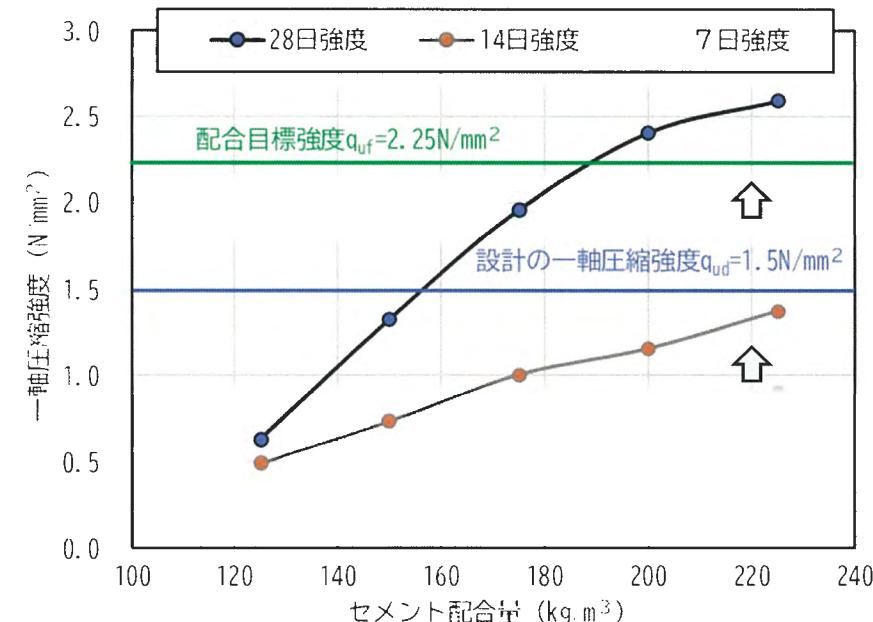
4. 配合設計 (セメントの配合量と一軸圧縮強度の関係)

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、 $q_{uf} = 1.5 q_{ud} = 2.25 \text{ N/mm}^2$ 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)

1. 審査会合コメント⑯回答 (地盤改良 (セメント系) の施工性・検査性に係る方針)

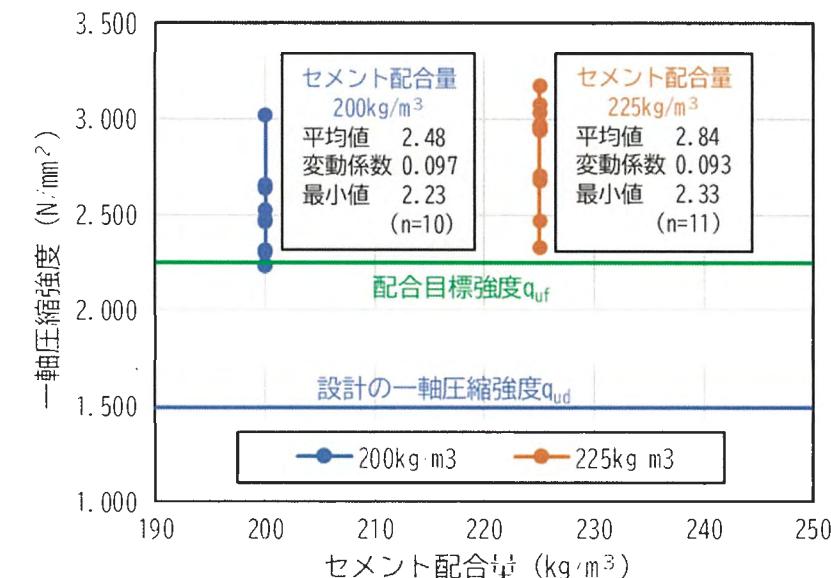
5. 強度のばらつきを考慮した配合の決定

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 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 及び $225\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $225\text{kg}/\text{m}^3$ 」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	$200\text{kg}/\text{m}^3$	$225\text{kg}/\text{m}^3$
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(3)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。