

女川原子力発電所2号炉 液状化影響の検討方針について

平成30年1月30日
東北電力株式会社

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

目次

1. 液状化評価の基本方針 2

2. 液状化検討対象層の抽出 3

3. 液状化検討対象施設の抽出 8

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 13

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 41

6. 液状化影響の検討方針

7. 液状化検討対象施設の評価の見通し

追而

補足説明資料

1. 評価対象構造物の断面図 90

2. 液状化に関連する基本物性の補足 104

3. 液状化強度試験結果 【データ集1. に収録】

4. 構造物毎の地下水位について 110

5. 盛土のN値の取扱いについて 132

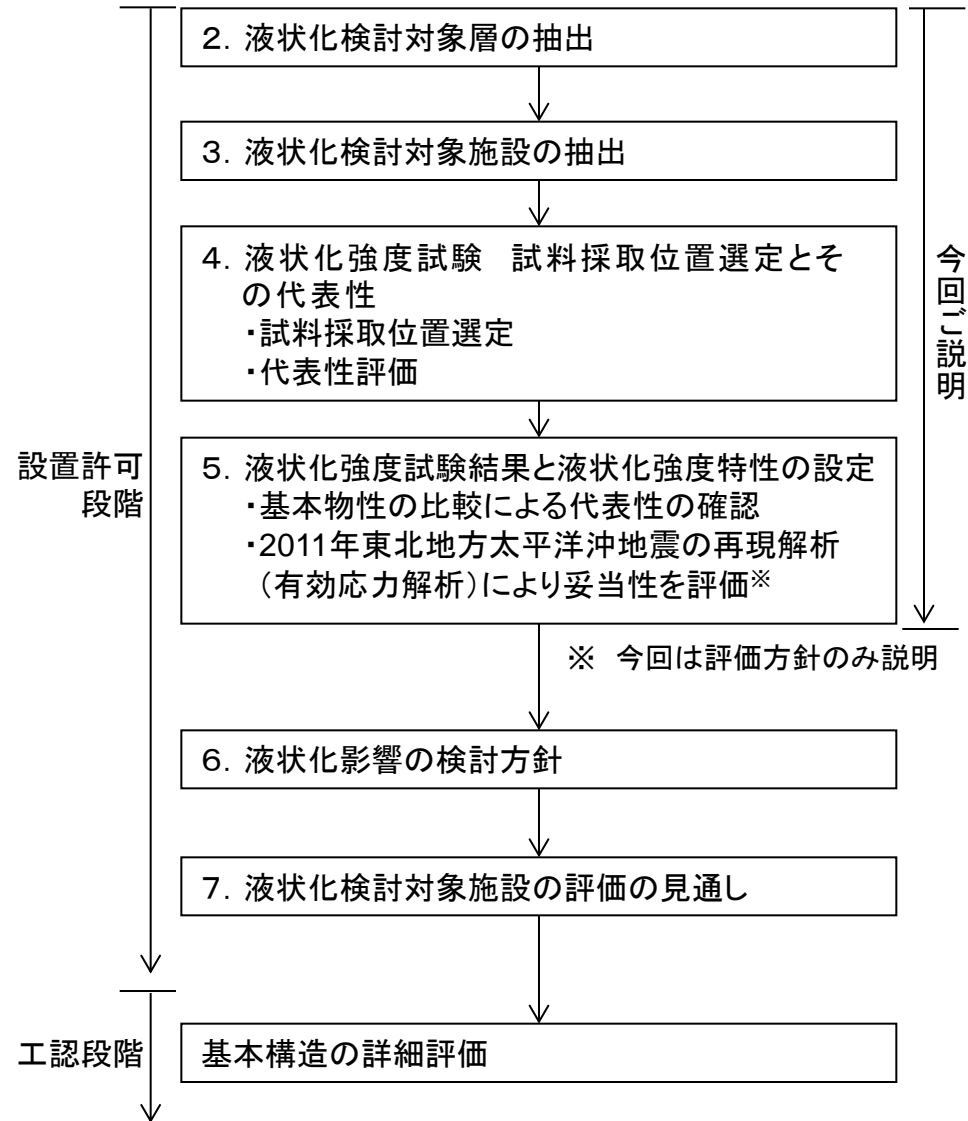
6. 盛土・旧表土のボーリング柱状図・コア写真 【データ集2. に収録】

7. N値とFcの関係の整理 138

8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について 140

1. 液状化評価の基本方針

- 道路橋示方書の液状化評価方法を基本とし、液状化評価の対象外とされるG.L.-20m以深の土層等についても液状化強度試験を実施する。保守的に、全ての土層(岩盤及び地盤改良部を除く)を液状化検討対象層とする。
- 液状化評価の対象施設を屋外の設計基準対象施設(建物・構築物、屋外重要土木構造物、津波防護施設)及び重大事故等対処施設を対象に施設の設置状況などから抽出する。
- 試験結果に基づいて、地震時の地盤の状態を「液状化」、「繰返し軟化」及び「非液状化」と分類し、液状化検討対象層が「液状化」とされる結果がないこと(支持力を喪失しない、あるいは急激な流動変位が発生しない地盤であることを)把握する。
- 液状化強度試験結果に基づいて設定した液状化強度特性により、2011年東北地方太平洋沖地震の観測波を用いた再現解析(有効応力解析)を実施し、設定した液状化強度特性の妥当性を確認する。
- 抽出された液状化検討対象施設に対し、妥当性を確認した液状化強度特性及び基準地震動 S_s を用いた有効応力解析を行い、施設に対する液状化の影響を確認する。
- なお、盛土・旧表土の取扱い(施設とするか地盤とするか)については検討中であり、今回の説明では周辺地盤と区別せずに取扱う。



液状化影響評価フロー

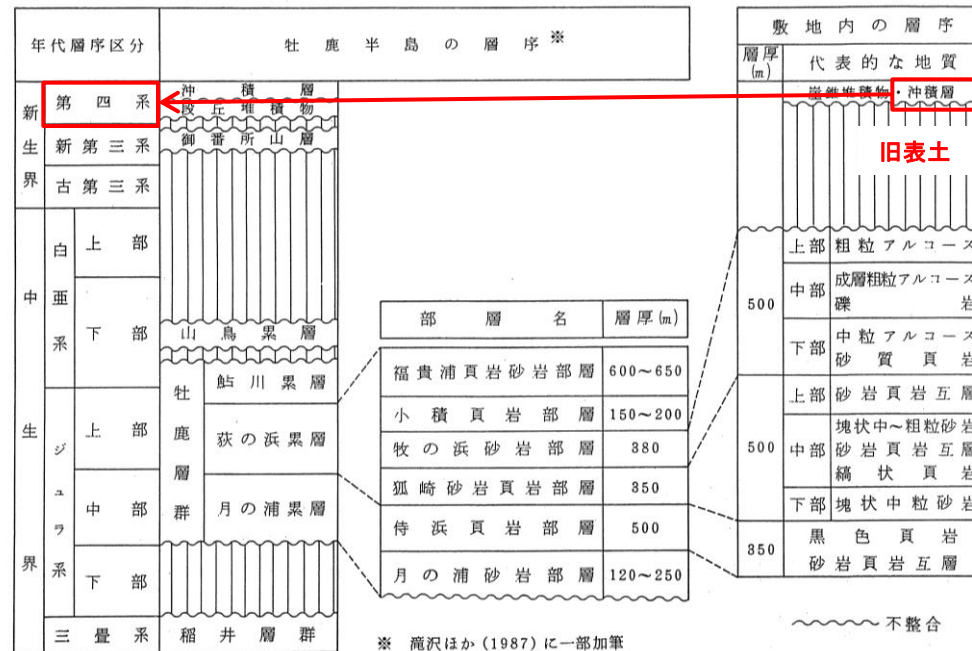
注) 2011年東北地方太平洋沖地震による地殻変動について、津波防護設計においては、潮位と構造物との関係が評価に影響することから、一様に約1mの沈降が発生したことを考慮した値を用いる。

本方針書においては、「5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定」及び「7. 液状化検討対象施設の評価の見通し」について、一様に約1mの沈降が発生したことを考慮した値を用いる。

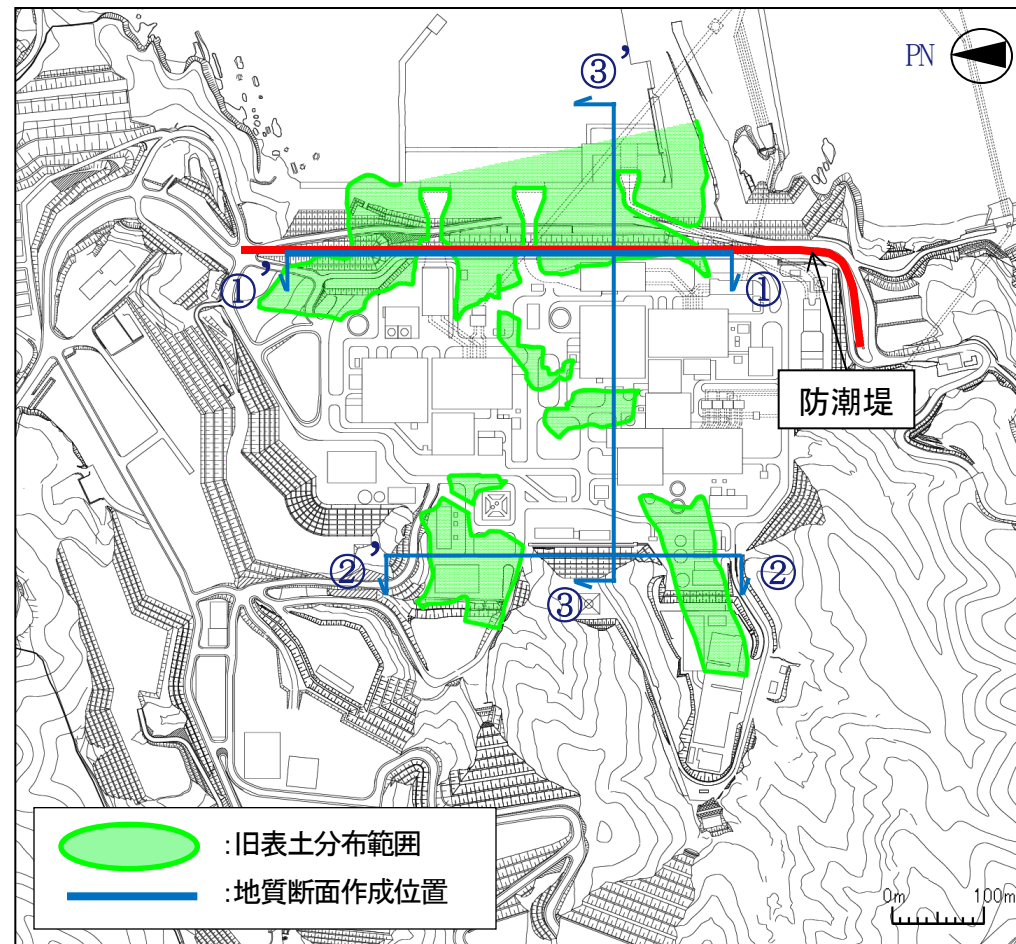
敷地の概況

- 敷地には、砂岩、頁岩及び砂岩頁岩互層の堆積岩類が広く分布し、部分的にこれら貫いてひん岩が分布する。また、一部海岸付近及び低地周辺には、未固結～半固結の堆積物が分布する。
- 敷地の地質は、中生界ジュラ系、これを覆う第四系等によって構成されている。敷地のジュラ系は、牡鹿層群月の浦累層及び荻の浜累層に区分される(敷地の地質平面図及び断面図はp.25に示す)。
- 屋外の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の設置位置に分布する第四系としては、沖積層(旧表土)がある。また、整地地盤まで盛土により埋戻されている。
- 敷地の地盤は上記のとおり岩盤、盛土、旧表土に分類され、液状化の可能性を考慮する必要がある地盤は、盛土及び旧表土である。

地質層序表



- 旧表土は、発電所建設時の掘削により、その多くが取り除かれており、現在では防潮堤海側周辺など、発電所建設時に改変がなかった一部の範囲に残るのみとなっている。
- 牡鹿層群の上位に分布する第四系の沖積層(旧表土)は、地層の連続性から同時代に堆積したものと考えられる。
- 土質は粘性土～粘土質砂質土～砂質土を主体としており、海浜砂に比べ粒径が比較的幅広く分布する特徴を有する。

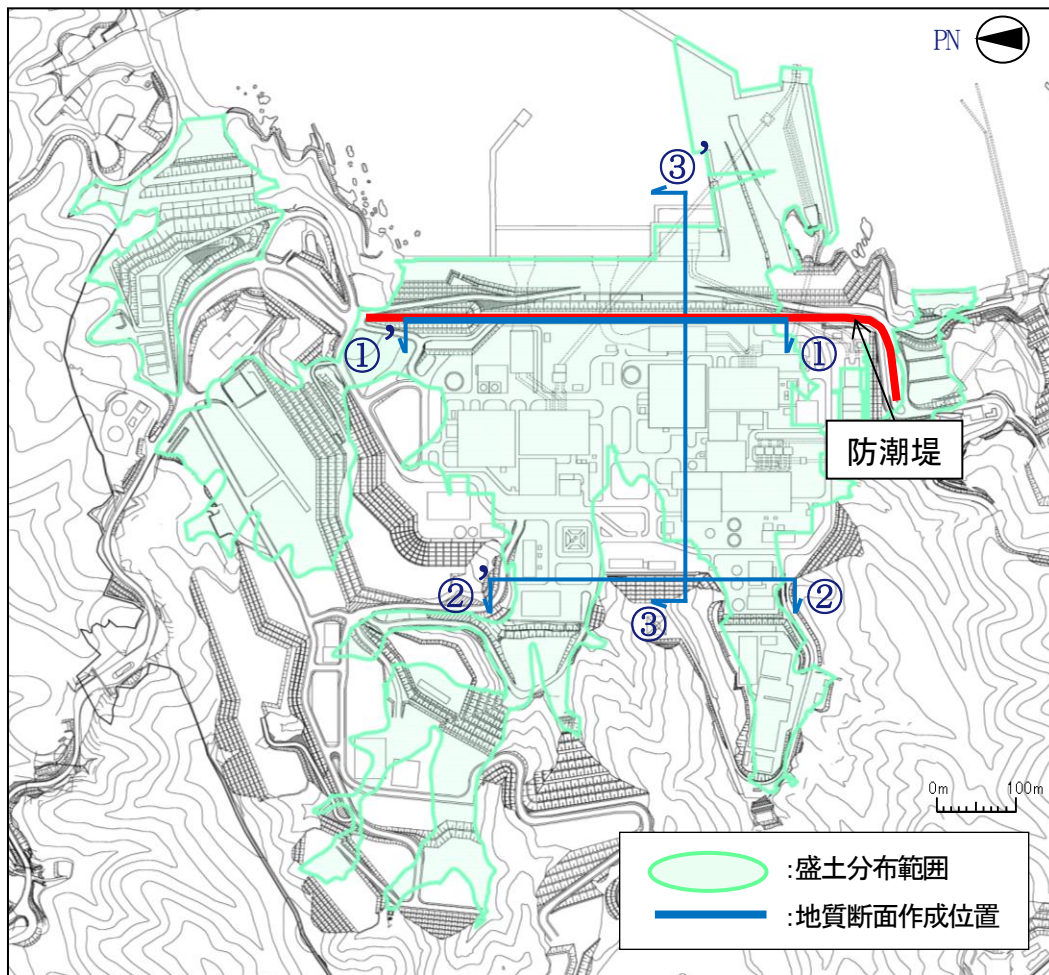


旧表土の分布範囲

盛土の分布

- 盛土は、発電所建設時の敷地造成及び構造物建設時の埋戻しにより、敷地のほぼ全域にわたって分布している。
- 盛土は人工地盤として締固め管理※して施工されており、盛土材料は建設時に発生した岩砕（最大粒径300mm）が主体となっている。

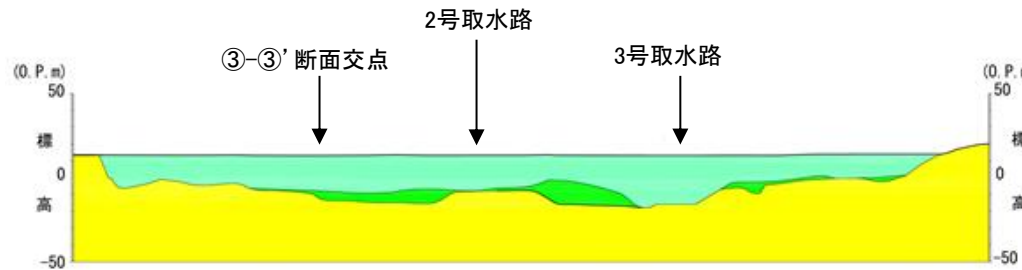
※撒き出し厚30cmとし、振動ローラー等で締固めを実施。施工後、現場密度試験を行い、室内試験（突固め試験）結果と比較し十分締固められていることを確認している。



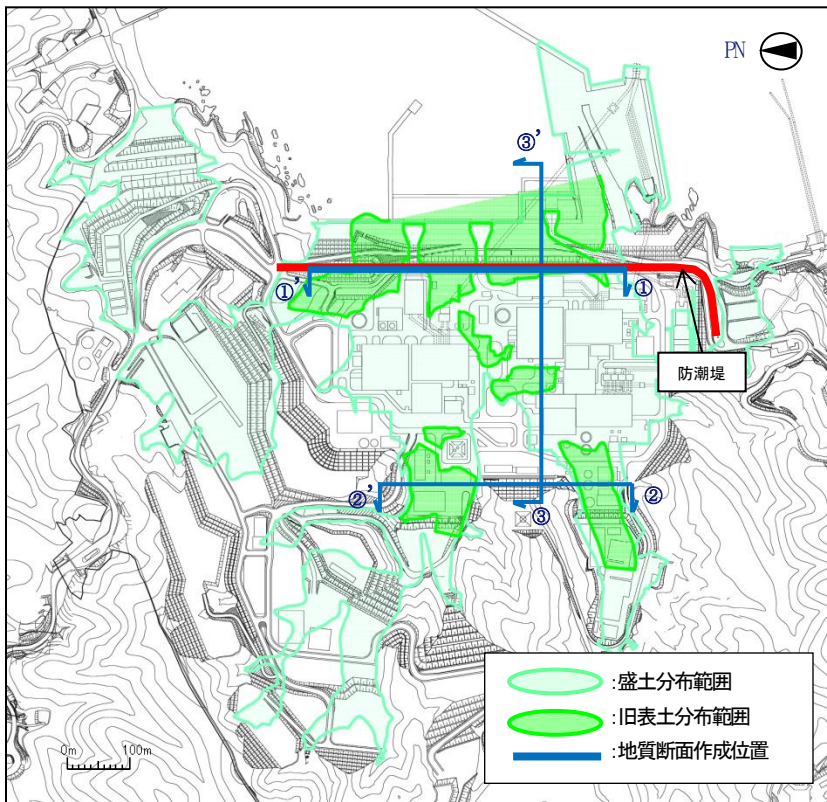
盛土の分布範囲

2. 液状化検討対象層の抽出 旧表土及び盛土の分布状況

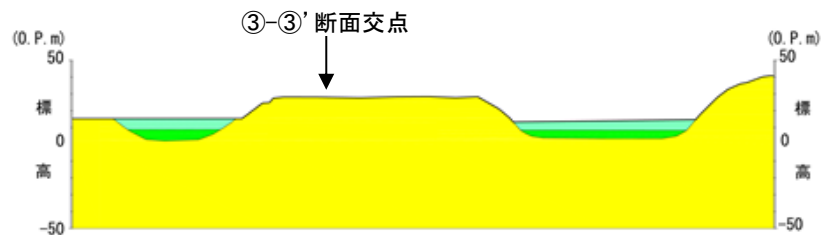
- 敷地における旧表土及び盛土の分布について、地質断面図により示す。
- ボーリング柱状図及びコア写真を補足説明資料6 (データ集2.)に示す。



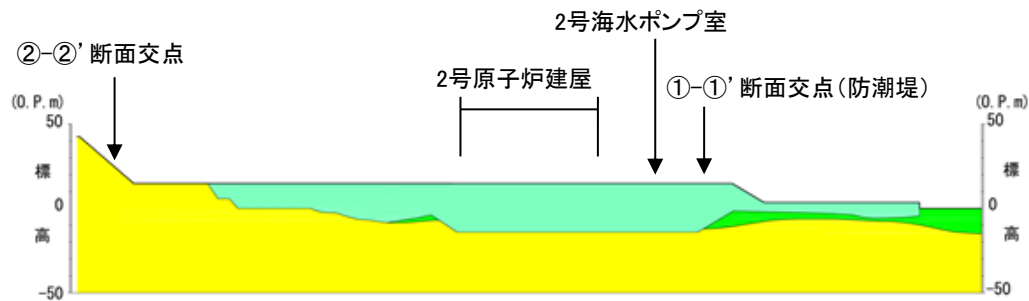
旧表土は、防潮堤付近に広く分布。2号取水路と3号取水路の中間付近で最も厚くなり、最大層厚は14m程度。
①-①' 断面図 (防潮堤)



地質断面位置図



旧表土は、山側の沢地形部に分布。最大層厚は7m程度。
②-②' 断面図



旧表土は、発電所建設時に掘削を行わなかった範囲に局所的に分布。層厚は最大3m程度。防潮堤海側の最大層厚は9m程度。
③-③' 断面図



地質断面図

液状化検討対象層の抽出

- 液状化検討対象層の抽出は、道路橋示方書で対象としている地層を基本とする。

道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（（社）日本道路協会，平成14年3月）

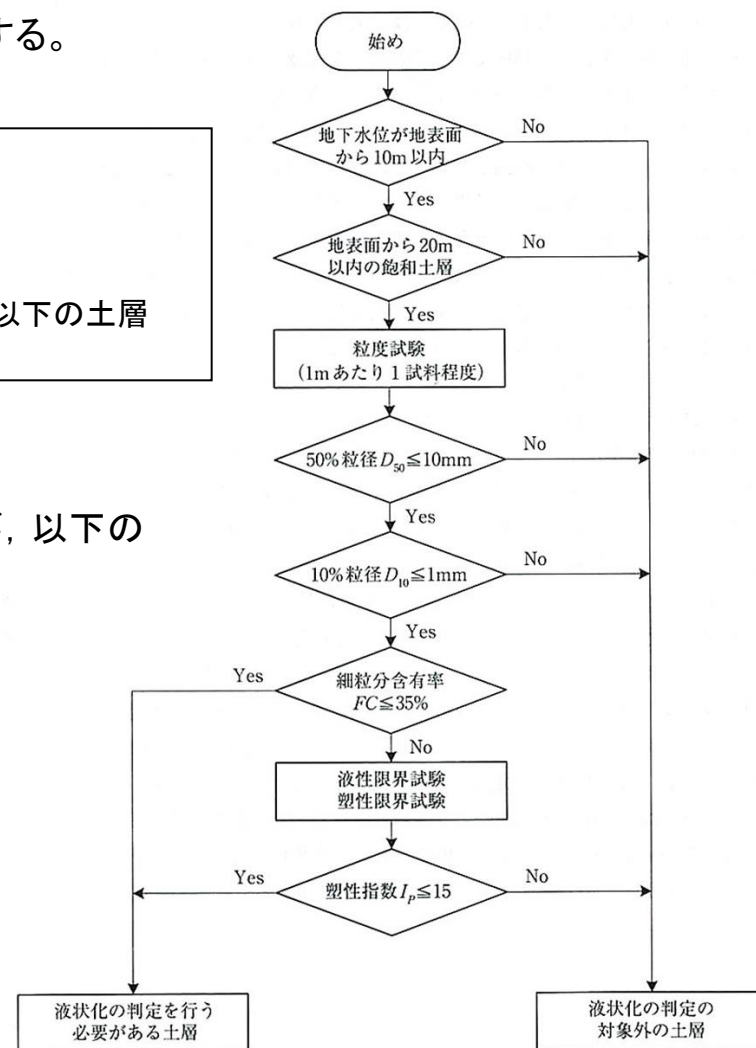
液状化検討対象層は、以下の条件全てに該当する土層と定めている。

- ① 地下水位がG.L.-10m以内であり、かつG.L.-20m以内の飽和土層
- ② 細粒分含有率が35%以下、または細粒分含有率が35%を超えても塑性指数が15以下の土層
- ③ 平均粒径が10mm以下で、かつ10%粒径が1mm以下である土層

- 道路橋示方書によれば比較的浅部の地盤等が液状化検討対象層となるが、以下の場合も含め液状化検討対象層として抽出する。

- ・G.L.-20m以深の飽和土層
- ・細粒分含有率が35%以上の飽和土層
- ・平均粒径が10mm以上の飽和土層

- 以上より、液状化検討対象層として旧表土及び盛土を抽出する。



液状化検討対象層の抽出フロー

道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（（社）日本道路協会（平成24年3月）p138より抜粋

3. 液状化検討対象施設の抽出 設計基準対象施設

- 屋外の設計基準対象施設※¹及び重大事故等対処施設※²を対象とし、液状化評価の対象施設を検討した。
 - 設備の設置状況などから、「設計基準対象施設」については、液状化評価の対象として防潮堤を抽出した。
- 液状化検討対象施設（設計基準対象施設：第4条関係）

施設名称	構造概要	支持層	設置状況など(補足説明資料4参照)			液状化評価の対象
			地下水位の状況	その他	断面図	
防潮堤	杭基礎構造, 盛土構造	岩盤	• 支持層より地下水位が高い。	• 地下水位以下に液状化検討対象層が分布。 • 側方流動や沈下の可能性がある。	p.113, 補足説明資料1	○
防潮壁	杭基礎構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.114	—
原子炉建屋※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.115	—
制御建屋※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.115	—
排気筒※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.116	—
排気筒連絡ダクト※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	[岩盤部] • 保守的にトンネル天端に地下水位を設定。 (地下水位低下設備による)	• 周囲に液状化検討対象層は分布しない。	p.116,p117	—
			[土砂部] • 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.116,p117	—
原子炉機器冷却海水配管ダクト※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.118	—
海水ポンプ室※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)	—	p.118	—
軽油タンク室※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤	• 地下水位低下設備等は設置されていない。	• 高さのあるMMR上に設置しており、液状化検討対象層は構造物より下方に分布。 • 構造物直下には液状化検討対象層が分布しない。	p.119	—
軽油タンク連絡ダクト※ ³	鉄筋コンクリート構造	岩盤			p.119	—

※¹ 耐震設計上の重要度分類Sクラスの機器・系統及びそれらを支持する建物・構築物。

※² 常設耐震重要重大事故防止設備または常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設(特定重大事故等対処施設を除く)及び可搬型重大事故等対処設備保管場所・アクセスルート。

※³ 重大事故等対処施設を兼ねる。

3. 液状化検討対象施設の抽出 重大事故等対処施設(1/2)

- 施設の設置状況などから、「重大事故等対処施設①」については、液状化評価の対象施設は抽出されなかった。

液状化検討対象施設（重大事故等対処施設①：第39条関係）

施設名称	構造概要	支持層	設置状況など(補足説明資料4参照)			液状化評価の対象
			地下水位の状況	その他	断面図	
緊急時対策建屋	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 支持層上面付近まで低下。(地下水位低下設備による) 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布しない。(セメント改良土による埋戻し) 	p.119	—
緊急用電気品建屋	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に局所的にしか液状化検討対象層が分布しない。 構造物直下には液状化検討対象層は分布しない。 	p.120	—
淡水貯水槽	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布しない。(セメント改良土による埋戻し) 	p.120	—
復水貯蔵タンク基礎	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 高さのあるMMR上に設置しており、液状化検討対象層は構造物より下方に分布。 構造物直下には液状化検討対象層が分布しない。 	p.119	—
地下軽油タンク室	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布しない。(セメント改良土による埋戻し) 	p.120	—
取水路	鉄筋コンクリート構造	岩盤	[標準部] <ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	[標準部] <ul style="list-style-type: none"> 構造物直下には液状化検討対象層は分布しない。 地形の傾斜がなく側方流動や偏土圧の影響は考えられない。 	p.121	—
			[漸拡部] <ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	[漸拡部] <ul style="list-style-type: none"> 周囲に局所的にしか液状化検討対象層が分布しない。 構造物直下には液状化検討対象層は分布しない。 	p.121	
取水口	鉄筋コンクリート構造	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備等は設置されていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲を地盤改良しており、液状化対象層は局所的にしか分布しない。 	p.122	—

3. 液状化検討対象施設の抽出 重大事故等対処施設(2/2)

- 「重大事故等対処施設②」のうち、保管場所(第3, 第5)及びアクセスルートが液状化評価の対象施設として抽出されるが、これらは、想定外の事象として保守的に液状化を前提として評価を行い必要な対策を検討していくことから、本検討における液状化評価の対象からは除外している。

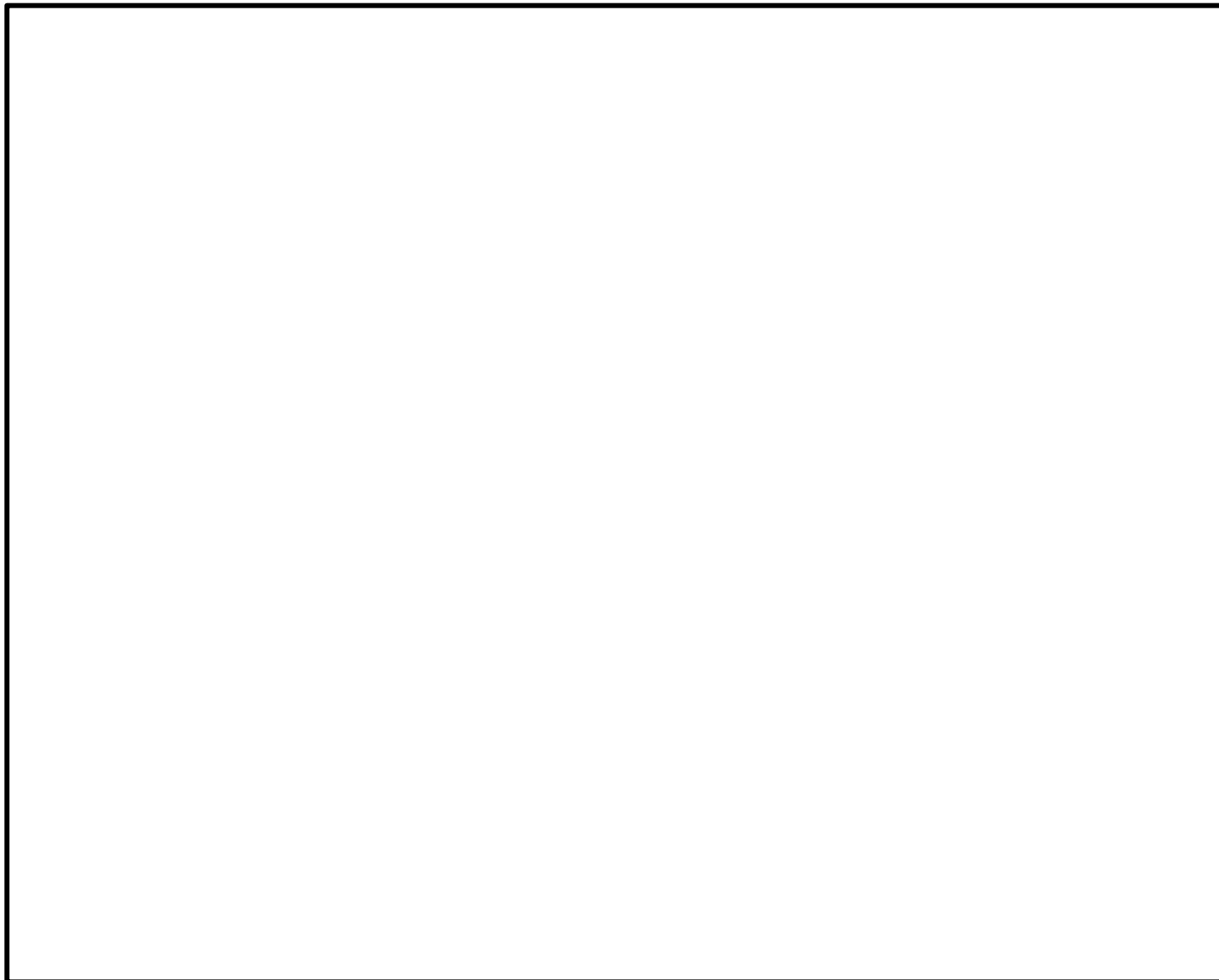
液状化検討対象施設(重大事故等対処施設②: 第43条関係)

施設名称	構造概要	支持層	設置状況など(補足説明資料4参照)	断面図	液状化 評価 の対象
保管場所 (第1, 第6)	コンクリート舗装	岩盤	・岩盤上に設置しており、液状化検討対象層は分布しない。	p.123	—
保管場所 (第2)	鉄筋コンクリート構造	岩盤, セメント改良土	・淡水貯水槽及び周囲のセメント改良土上に設置しており、液状化検討対象層は分布しない。	p.123	—
保管場所 (第3, 第5)	コンクリート舗装	セメント改良土, 盛土	・想定外の事象として保守的に地下水位以深の盛土・旧表土は液状化するものとして影響評価し、必要に応じて対策を実施。	—	○※1
アクセスルート	アスファルト舗装	岩盤, セメント改良土, 盛土	・想定外の事象として保守的に地下水位以深の盛土・旧表土は液状化するものとして影響評価し、必要に応じて対策を実施。	—	○※2





※1: 保管場所(第3, 第5)は防潮堤付近であることから、防潮堤の評価にて含まれるものとする。

※2: アクセスルートは仮復旧の評価も併せて行うことから、「女川原子力発電所2号炉可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルートについて」にて評価を行う。

耐震重要施設配置図(第4条)及び常設重大事故等対処施設配置図(第39条)



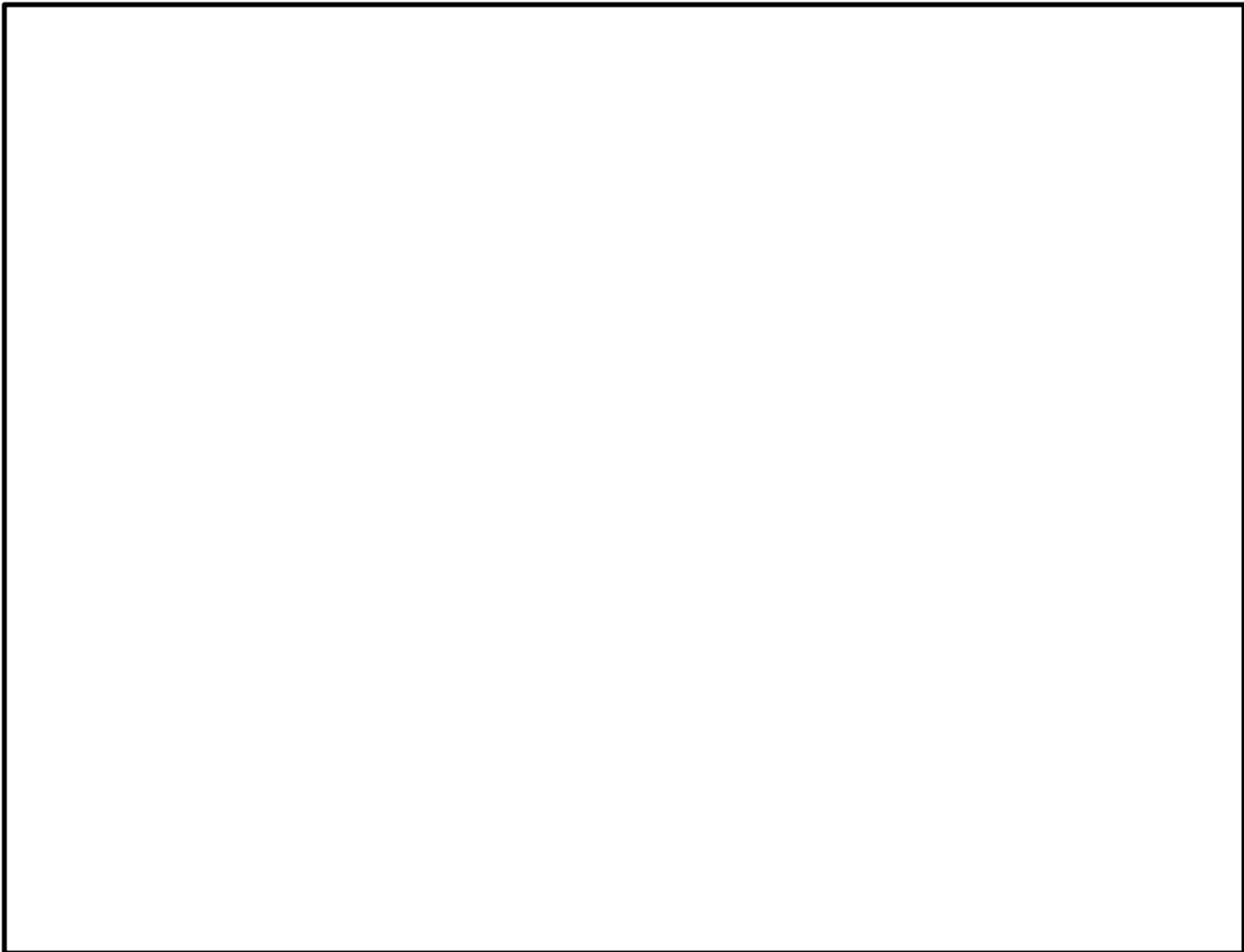
凡例

-  : 耐震重要施設
-  : 常設重大事故等対処施設
-  : 耐震重要施設及び
常設重大事故等対処施設
-  は地中構造物を示す

耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設配置図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

3. 液状化検討対象施設の抽出
保管場所・アクセスルート図(第43条)

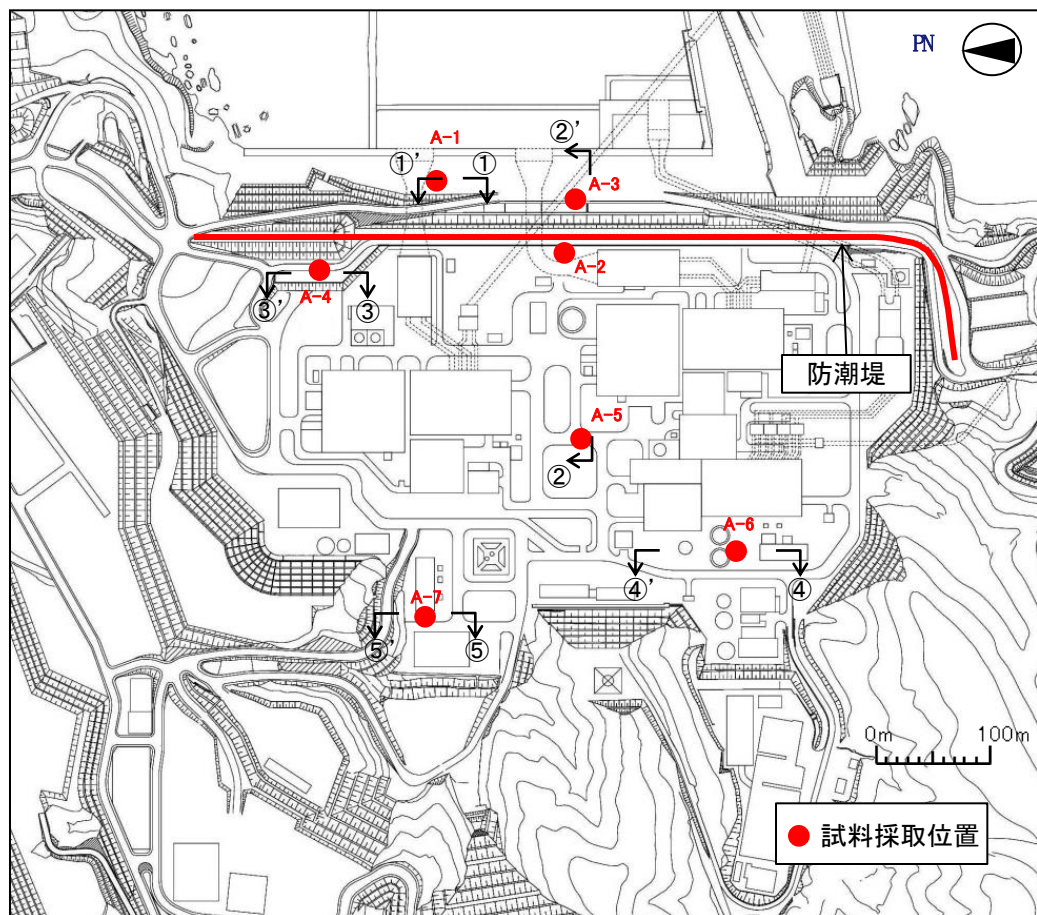


保管場所及びアクセスルート図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

試料採取位置の選定(旧表土)

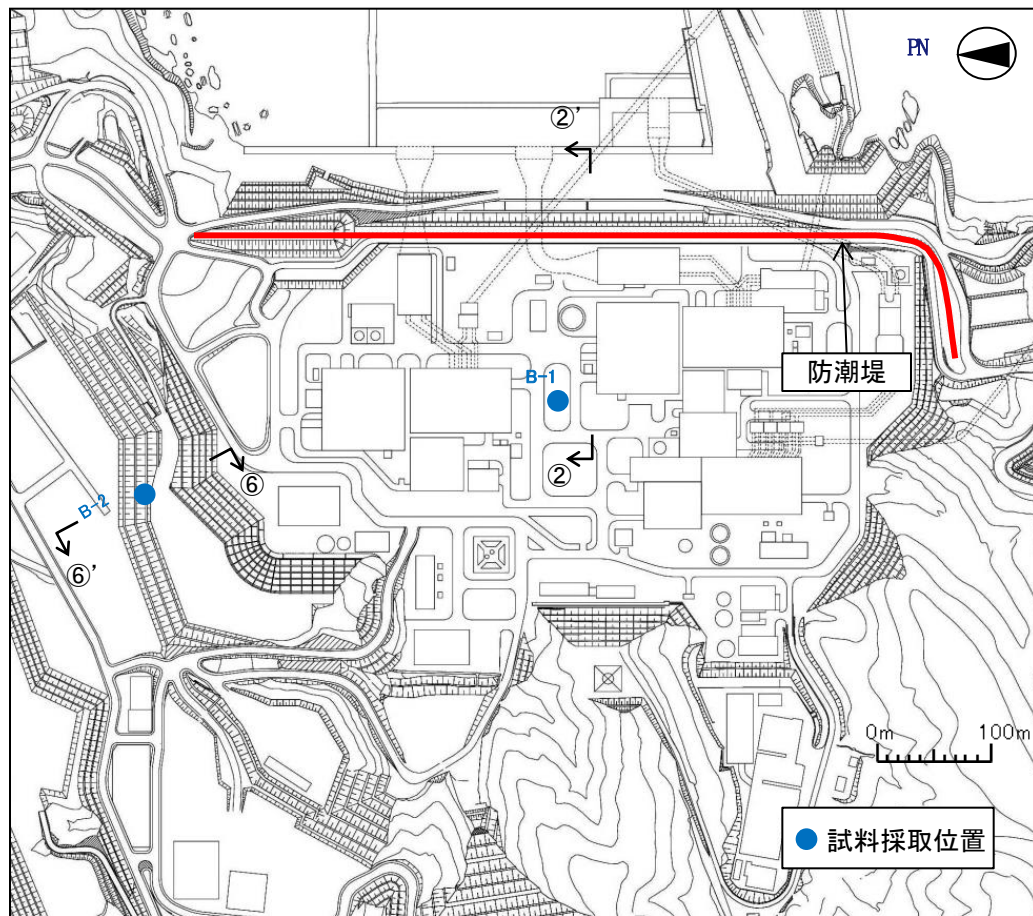
- 液状化評価の対象施設として防潮堤を抽出することも踏まえて、敷地内に残存する液状化検討対象層である旧表土から網羅的に試料採取が可能な位置を選定した。
- 旧表土の試料採取位置を示す。また、次々頁に試料採取位置における地質断面図を示す。



試料採取位置(旧表土)

試料採取位置の選定(盛土)

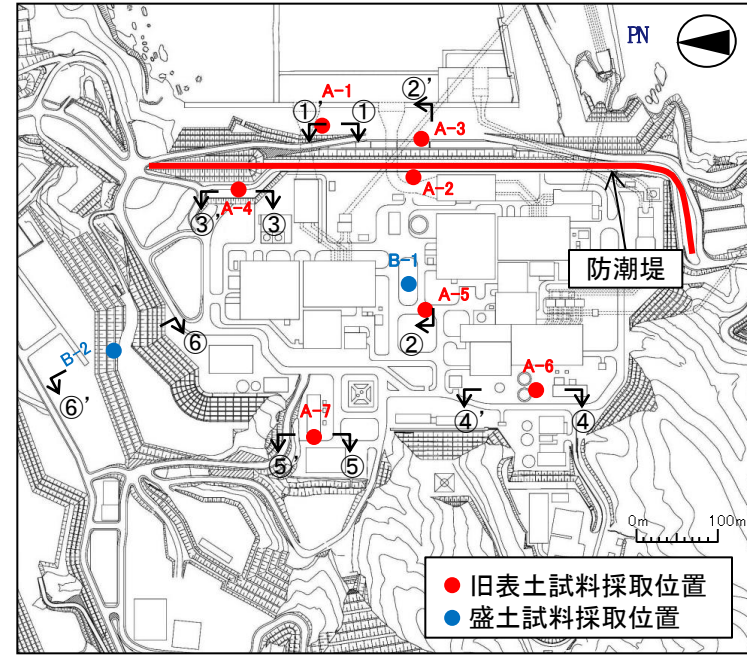
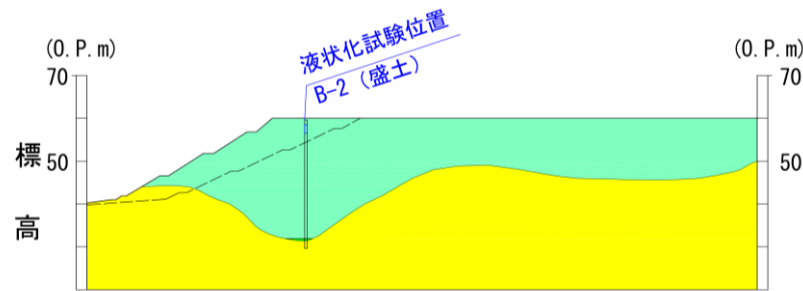
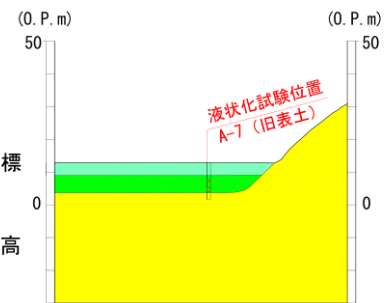
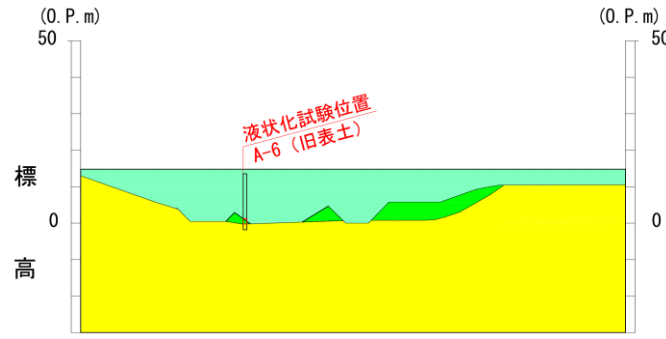
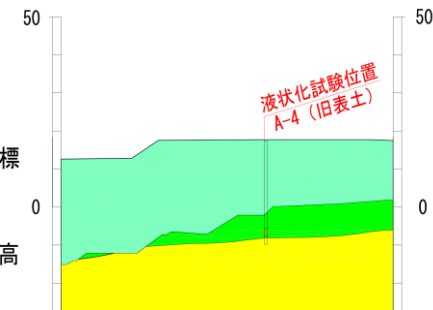
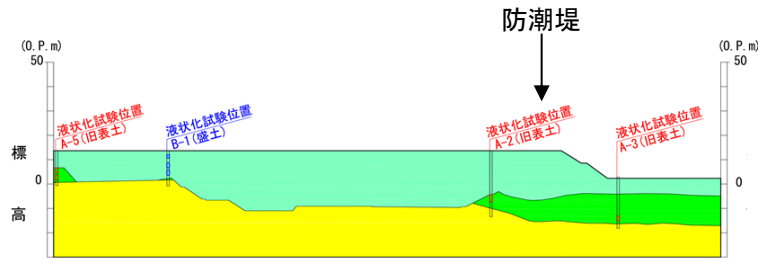
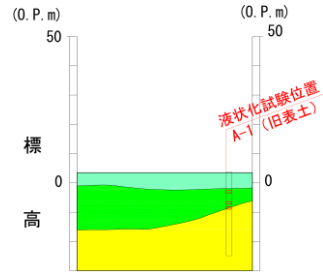
- 液状化検討対象層のうち盛土は、建設時に発生した岩砕(最大粒径300mm)主体であり、締固め管理して施工された人工地盤である。試料採取位置は、盛土の均一性を別途確認したうえで、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設がO.P.+14m盤, O.P.約+60m盤の2地点に設置されることを踏まえ、それぞれから1地点ずつ計2地点を代表地点として選定した。
- 液状化検討対象層(盛土)の試料採取位置を示す。また、次頁に試料採取位置における地質断面図を示す。



試料採取位置(盛土)

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 試料採取位置の地質断面(旧表土及び盛土)

- 液状化検討対象層(旧表土及び盛土)の試料採取位置における地質断面図を示す。



※ 断面図(⑥-⑥')は液状化強度試験当時のものであり、その後点線のとおり掘削・整地したことから、地質断面位置図の標高とは整合していない。(平面図は掘削・整地後の形状を示す)

地質断面図

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 代表性確認指標の選定(旧表土)(1/2)

- 選定した旧表土採取位置の代表性確認のため、液状化強度試験箇所と敷地全体における物性値の比較を行った。
- 選定した指標は液状化強度比 R_L との相関性の観点から以下のとおりとし、各種試験はJISに基づき実施した。
- 液状化に関連する基本物性について、補足説明資料2に示す。

旧表土の代表性確認にあたり選定した指標

[粒度分布]

基本的な土の物性値。

各基準類における液状化判定に平均粒径、10%粒径が用いられており、液状化強度比 R_L との相関が高い。

[細粒分含有率]

各基準類の液状化判定における液状化強度比 R_L の算定式において、液状化強度比 R_L を補正するパラメータとして用いられており、液状化強度比 R_L との相関が高い。

[N値]

各基準類の液状化判定における液状化強度比 R_L の算定式がいずれもN値をパラメータとした式である。

また、有効応力解析 (FLIP) の簡易パラメータ設定法にN値が用いられており、液状化強度比 R_L との相関が高い。

各基準類における液状化強度比 R_L と基本物性の相関性

基準類名	R_L 算定に用いる主物性	R_L 補正に用いる物性
道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, ((社)日本道路協会, 平成14年3月)	N値 (有効上載圧を考慮した補正を行う)	細粒分含有率 F_c
港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置(その2)(日本港湾協会, 2007年(部分改訂, 2012年))		細粒分含有率 F_c
建築基礎構造設計指針((社)日本建築学会, 2001年)		細粒分含有率 F_c
鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計((公財)鉄道総合技術研究所, 平成24年9月)		細粒分含有率 F_c

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 代表性確認指標の選定(旧表土)(2/2)

(補足資料)道路橋示方書における液状化強度比, N値及び細粒分含有率の関係

(3) 繰返し三軸強度比

繰返し三軸強度比 R_L は式 (8.2.9) により算出するものとする。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \dots\dots (8.2.9)$$

ここで,

<砂質土の場合>

$$N_a = c_1 N_1 - c_2 \dots\dots (8.2.10)$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_v + 70) \dots\dots (8.2.11)$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases} \dots\dots (8.2.12)$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases} \dots\dots (8.2.13)$$

<れき質土の場合>

$$N_a = \{1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)\} N_1 \dots\dots (8.2.14)$$

ここに,

R_L : 繰返し三軸強度比

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N_1 : 有効上載圧 100 kN/m² 相当に換算した N 値

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

c_1, c_2 : 細粒分含有率による N 値の補正係数

FC : 細粒分含有率 (%) (粒径 75 μ m 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 平均粒径 (mm)

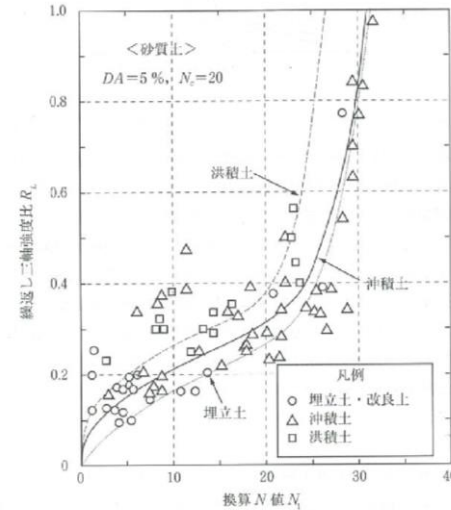


図-参6.4 砂質土の換算 N 値と繰返し三軸強度比 R_L の関係

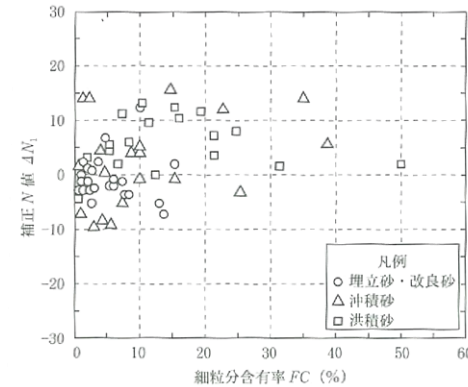
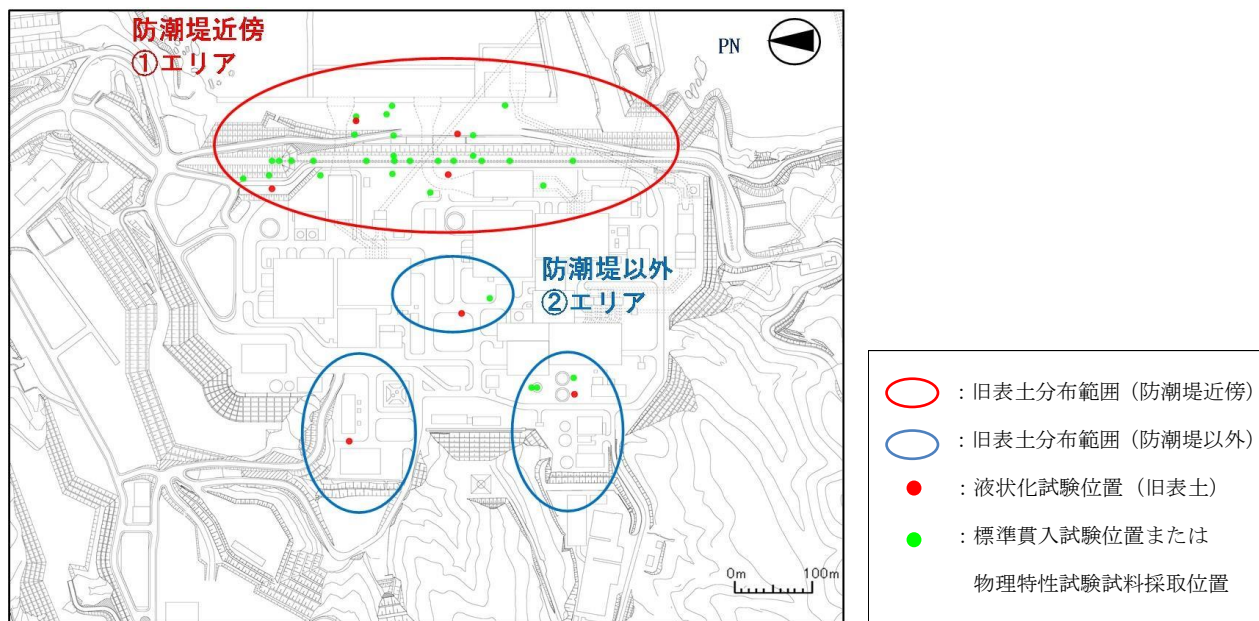


図-参6.5 砂質土の細粒分含有率と補正項 ΔN_1 の関係

- 旧表土を対象とした液状化強度試験箇所と周辺調査箇所の位置図を示す。
- 敷地全体の旧表土の情報は、防潮堤(液状化検討対象施設)付近における代表性を確認する観点から、防潮堤近傍(①エリア)と防潮堤以外(②エリア)に区分した場合についても検討した。
- 試験箇所と敷地全体の各指標による比較を行った他、敷地全体で防潮堤近傍(①エリア)とそれ以外(②エリア)に区分し、各々との比較を行った。

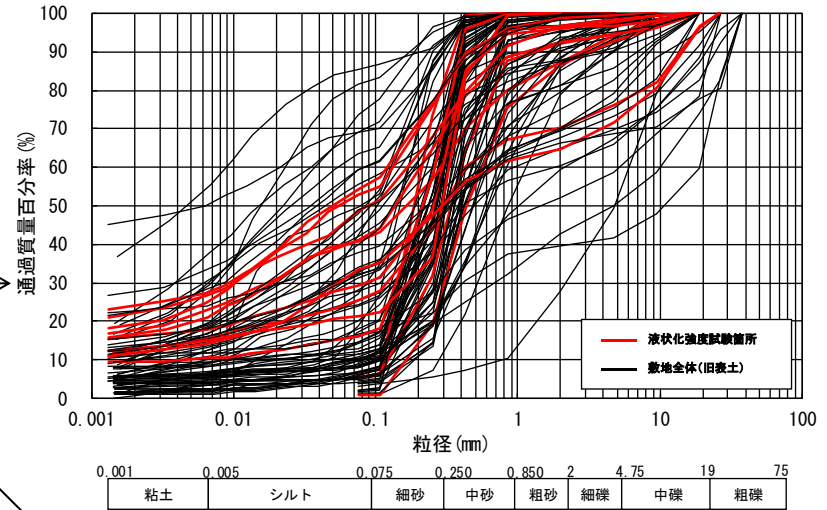


旧表土分布範囲のエリア分けと試験試料採取位置

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 旧表土の基本物性の比較(試験箇所全体)

- 液状化強度試験試料採取位置の粒度分布は、概ね敷地全体の粒度分布の平均的な範囲にあり、細粒分含有率は敷地全体の $\pm 1\sigma$ の範囲で概ね敷地全体の平均的な範囲にある。
- N値については敷地全体よりも試料採取箇所がやや小さい値である。
- 以上から、敷地全体と比較し同等あるいはやや液状化しやすい箇所から採取された試料により液状化強度試験を実施しており、試験結果から得た旧表土の液状化強度特性には代表性があるといえる。
- なお、N値と細粒分含有率(F_c)の関係について整理したものを参考に補足説明資料7に示す。

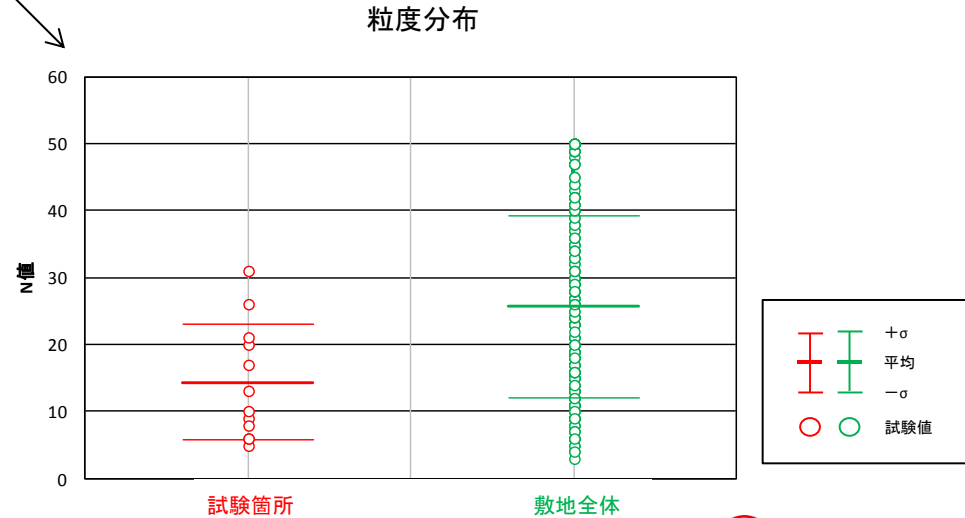
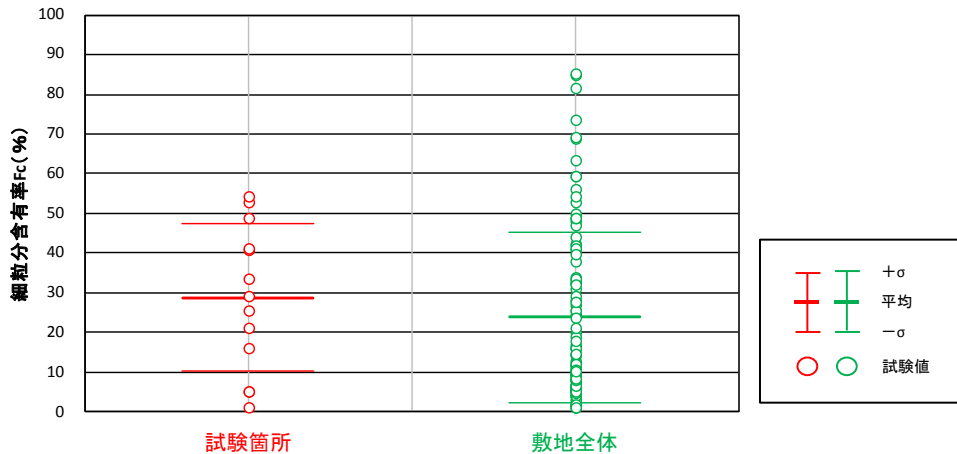
注) 沈降分析を実施していない試料に関しては、 $75\mu\text{m}$ 以上の粒度分布のみ表示。



粒度分布
・概ね敷地全体の平均的な粒度分布を持つ試料で試験を実施

細粒分含有率
・概ね敷地全体における $\pm 1\sigma$ の範囲内の試料で試験を実施

N値
・平均値、 -1σ 値共に敷地全体より小さい箇所での試験を実施



細粒分含有率

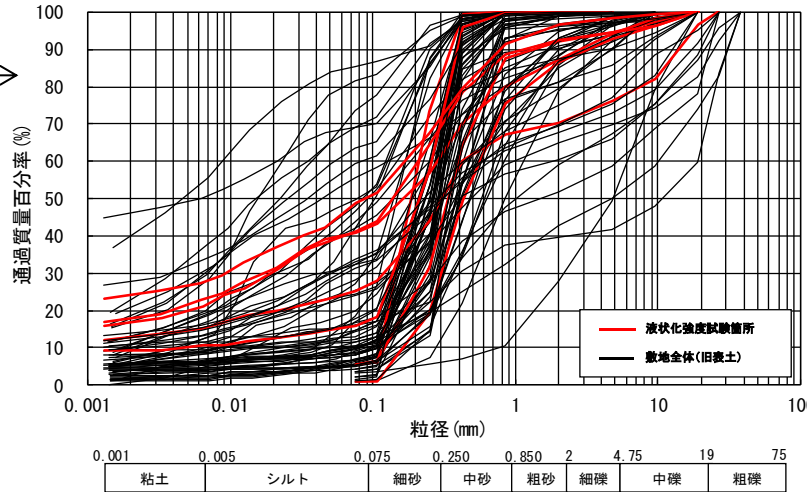
N値

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 旧表土の基本物性の比較(エリア区分毎)

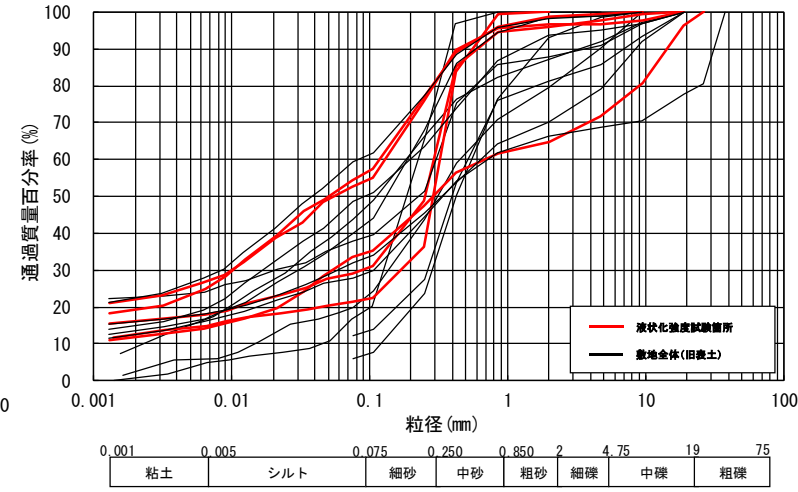
- 旧表土の基本物性について、防潮堤近傍(①エリア)と防潮堤以外(②エリア)に区分し、補足的な比較を行った。
- 各エリアにおいて、敷地全体と比較し同等あるいはやや液状化しやすい箇所から採取された試料により液状化強度試験を実施しており、試験結果から得た旧表土の液状化強度特性には代表性があるといえる。

注) 沈降分析を実施していない試料に関しては、75 μ m以上の粒度分布のみ表示。

粒度分布
・概ね各エリア全体の平均的な粒度分布を持つ試料で試験を実施

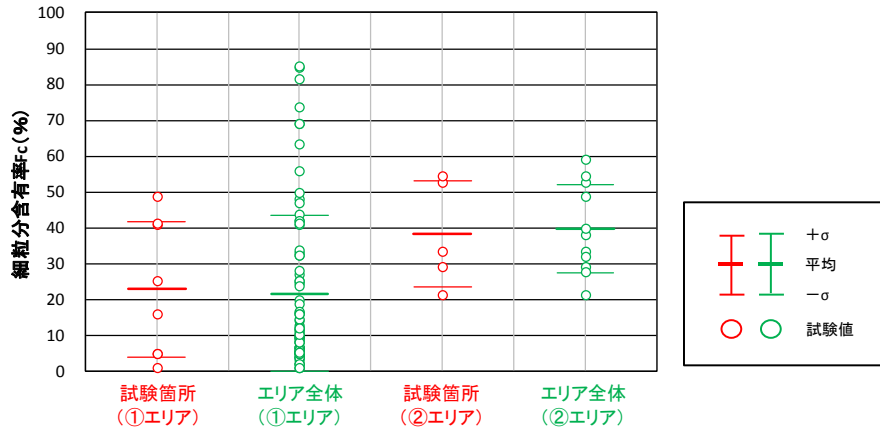


防潮堤近傍(①エリア)



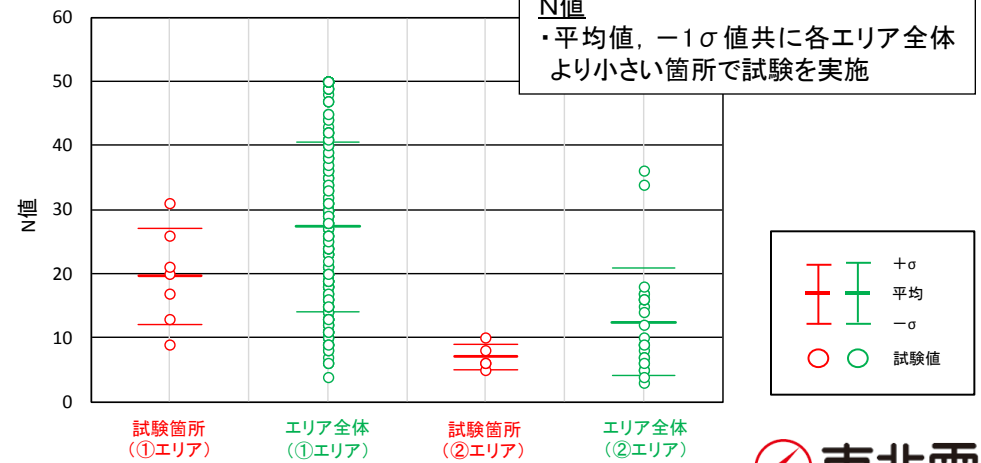
防潮堤以外(②エリア)

細粒分含有率
・概ね各エリア全体における $\pm 1\sigma$ の範囲内の試料で試験を実施



細粒分含有率

粒度分布



N値

N値
・平均値、 -1σ 値共に各エリア全体より小さい箇所での試験を実施

- 盛土の液状化強度試験を実施する試料採取位置の代表性を以下の方針で確認する。

【①盛土の均一性】

盛土は発電所建設時の基礎掘削の際に発生した岩砕を主体としており、盛土の施工時に締固め度を管理した均一な材料であることを確認する。



【②盛土の基本物性の比較】

液状化強度特性と関連すると考えられる基本物性として、粒度分布、細粒分含有率及び相対密度を選定し液状化強度試験箇所と敷地全体とで比較する。

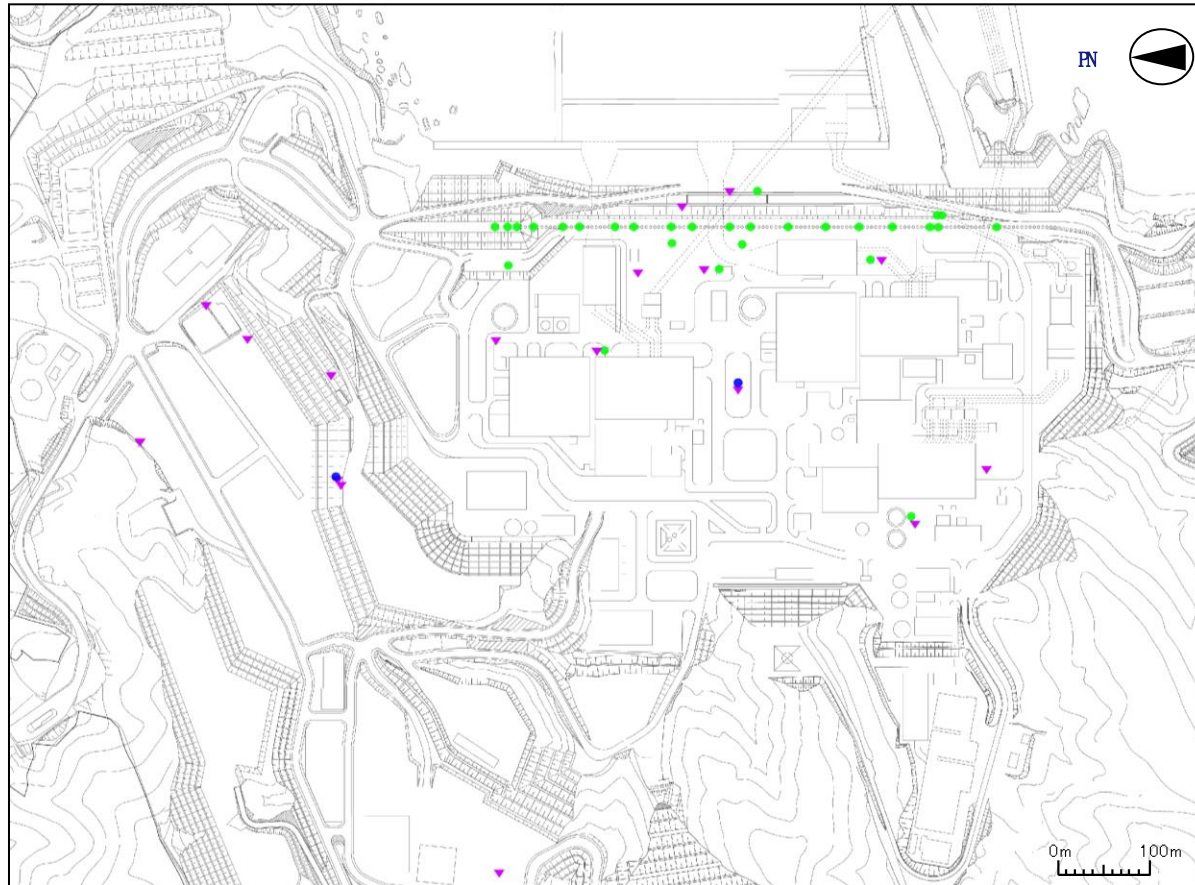


【③盛土の液状化強度試験位置の代表性】

防潮堤の設計に用いる液状化強度特性の妥当性を確認するため、防潮堤近傍と液状化強度試験箇所の粒度分布、相対密度及びS波速度を比較する。

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の試料採取位置

- 盛土を対象とした液状化強度試験箇所と周辺調査箇所の位置図を示す。

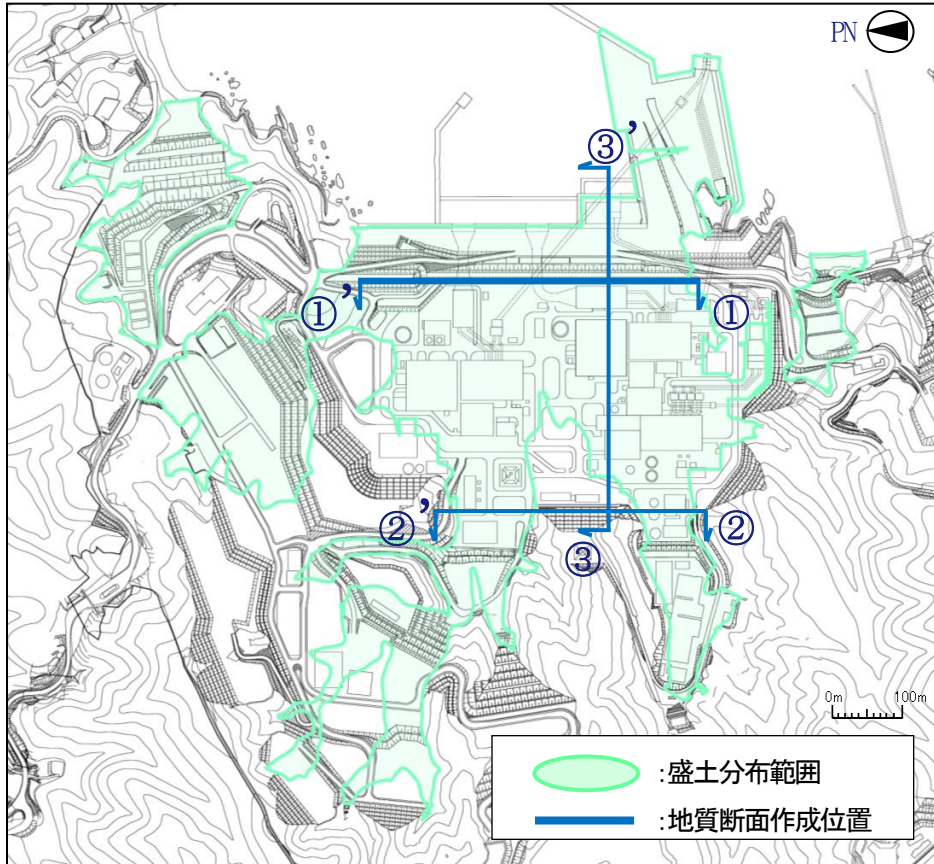


盛土の試験試料採取位置

- 盛土を対象とした液状化強度試験箇所を選定にあたり、盛土は堅固な岩盤を掘削した岩砕を用いて造成したものであり、施工管理基準により施工範囲全域にわたって同様に締固められていることから、均一性が確保されている。
- 盛土の液状化強度試験の試料採取位置の代表性について、盛土材料(岩砕)の母材の性状及び盛土施工の品質管理により示す。

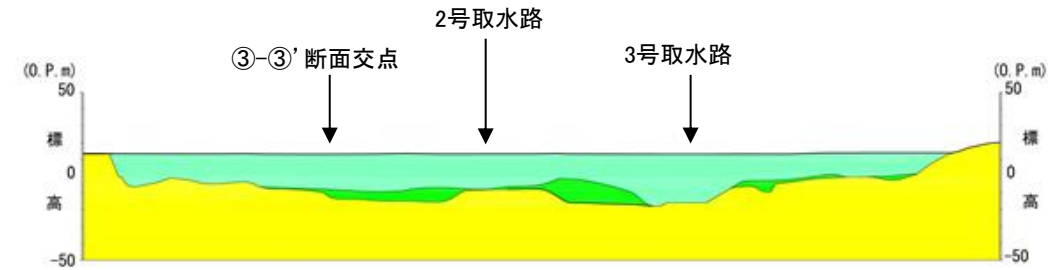
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性
盛土の均一性について:盛土の施工範囲

- 盛土の施工範囲を下図に示す。

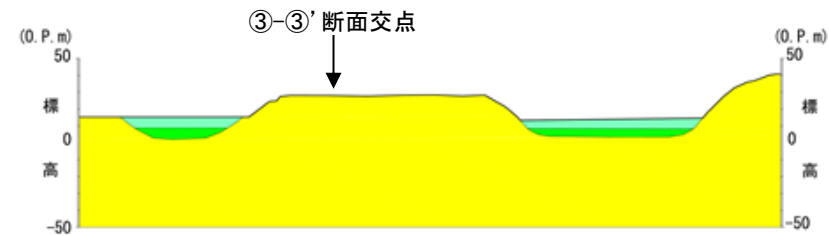


盛土の分布範囲

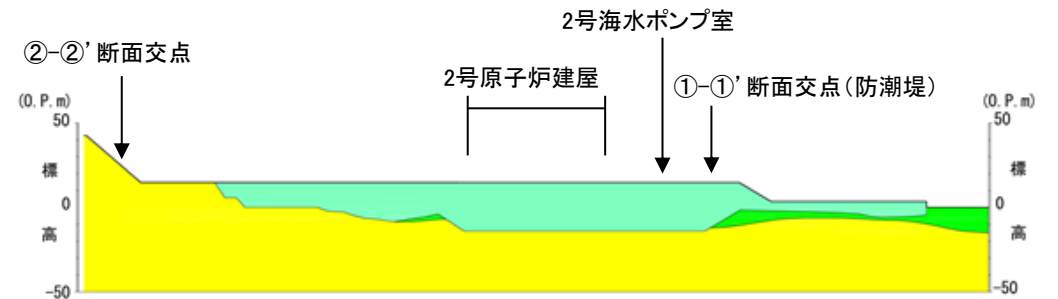
原子炉建屋, タービン建屋, 制御建屋, 取水口~海水ポンプ室などの岩盤に直接設置する施設においては, 沖積層(旧表土)を除去した上で盛土の施工を行っている。



①-①' 断面図(防潮堤)

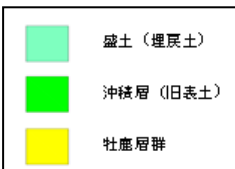


②-②' 断面図



③-③' 断面図

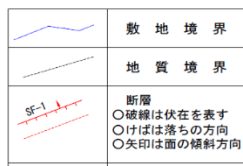
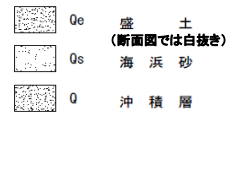
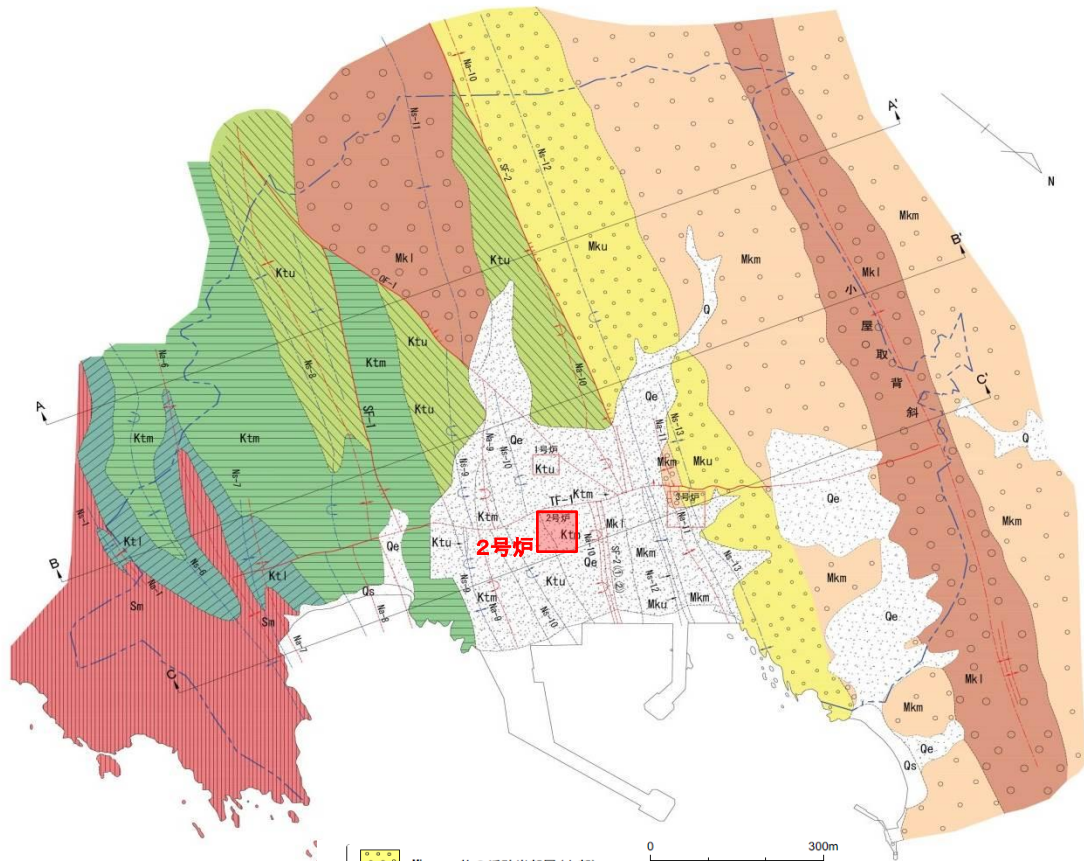
断面図



4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

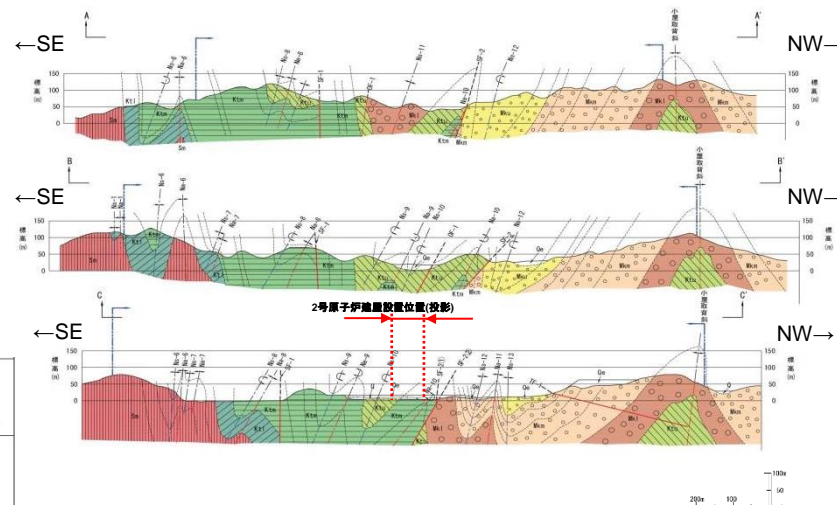
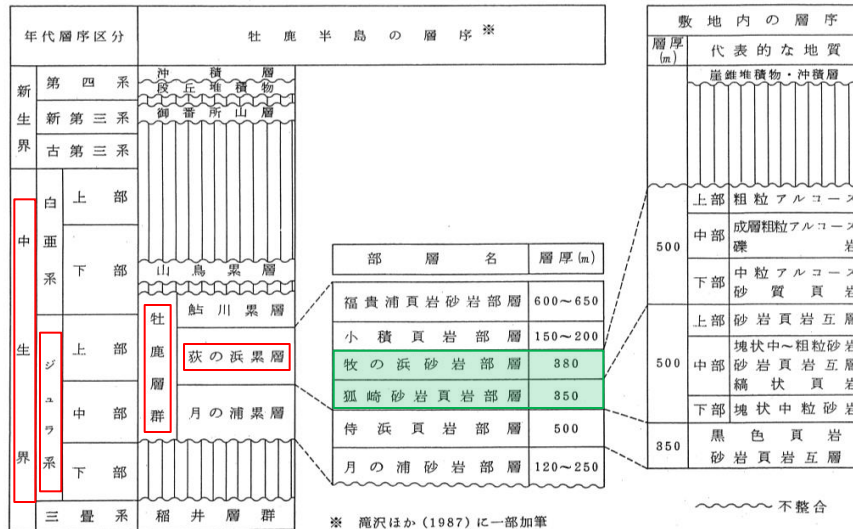
盛土の均一性について: 盛土材料(岩砕)の母材の性状(1/2)

- 盛土材料(岩砕)の母材は敷地に分布する硬岩(砂岩, 頁岩主体)であり, 発電所建設における基礎掘削において発生した岩砕である。



敷地の地質平面図

敷地の地質層序表



敷地の地質断面図

※地質境界, 断層線, 褶曲軸の位置は, 主にそれらと地表面との交わる線を示している。

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

盛土の均一性について:盛土材料(岩砕)の母材の性状(2/2)

- 盛土材料(岩砕)は, 発電所建設段階において, 岩盤に直接設置する施設(原子炉建屋, タービン建屋, 制御建屋, 取水口～海水ポンプ室等)の基礎掘削の際に発生した岩砕である。
- 発生した岩砕は最大粒径300mmで調整し, 埋戻し材料として施工した。

1号炉建設時の掘削状況

2号炉建設時の掘削状況

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

盛土の均一性について:盛土の施工・品質管理(1/3)

- 盛土の施工にあたっては、施工管理基準を定め、これに基づき実施することにより発電所敷地全域における盛土の品質を一定に保っている。

①盛土材料の選別

- 盛土材料は原子炉建屋周辺の掘削岩盤を材料としており、粒径300mm以上は品質確保のため除去

②施工方法

- 事前に試験施工を行い、十分な転圧・締固め※エネルギーを得られる重機を選定
(選定した重機 … 敷き均し:21tブルドーザ, 転圧:8t振動ローラー)
- 撒き出し厚30cmとし、盛土施工エリア全域に同様の施工管理基準を適用

※締固めの目的

- 密度を高め、水の浸入による軟化・膨張を防ぐ
- 盛土の安定・支持力の増大を図る
- 盛土完成後の圧縮沈下を小さくする

③品質管理(土質試験)

- 下表のとおり、一定数量毎に密度・含水比及び沈下量を管理

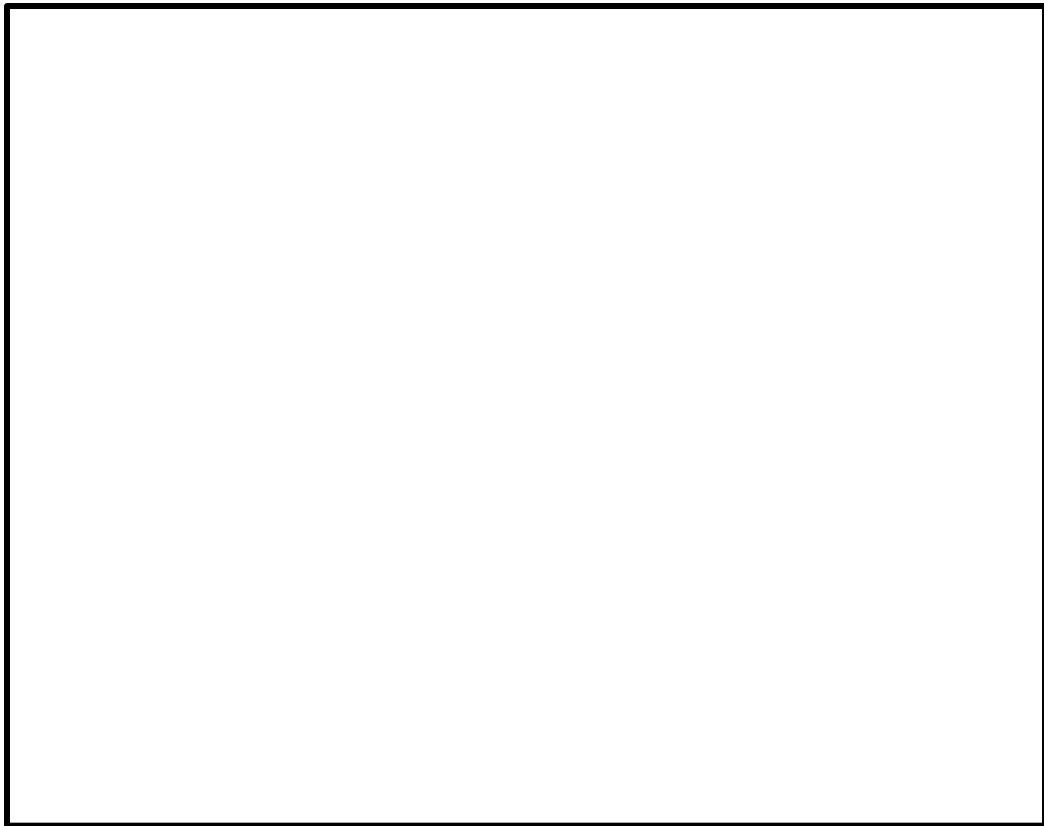
盛土品質管理 試験項目		試験頻度・管理基準値
密度試験	水置換法: JIS A 1214	・3箇所/5,000m ³ ・ γ_{dmax} ※1の90%以上(締固め度90%以上※2)
含水比	土の含水比試験方法: JIS A 1203	・1箇所/日 ・ γ_{dmax} 時の90%以上の密度となる含水比以内
沈下板	レベル測定	・10箇所/日 ・残留沈下50mm
突固め試験	JIS A 1210	・1回/5,000m ³
フルイ分試験	JIS A 1204	・1回/50,000m ³
比重試験	JIS A 1202	・1回/50,000m ³
三軸圧縮試験	—	・1回/250,000m ³

※1 γ_{dmax} :最大乾燥密度

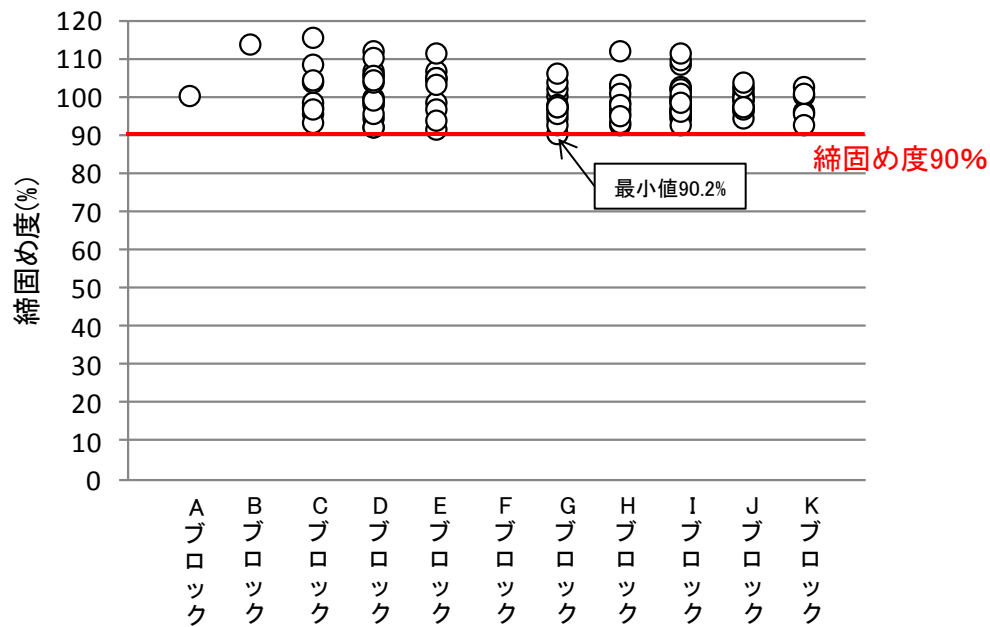
※2 社内基準による

盛土の均一性について: 盛土の施工・品質管理(2/3)

- 盛土の品質管理に用いた指標のうち、締固め度（=乾燥密度÷最大乾燥密度(γ_{dmax}))の実績を下図に示す。
- 2号炉建設においては、盛土を複数の施工ブロックに分けて施工しているが、いずれの施工ブロックにおいても検査結果は全て管理基準(90%以上)を満たしており、一定の品質を確保している。



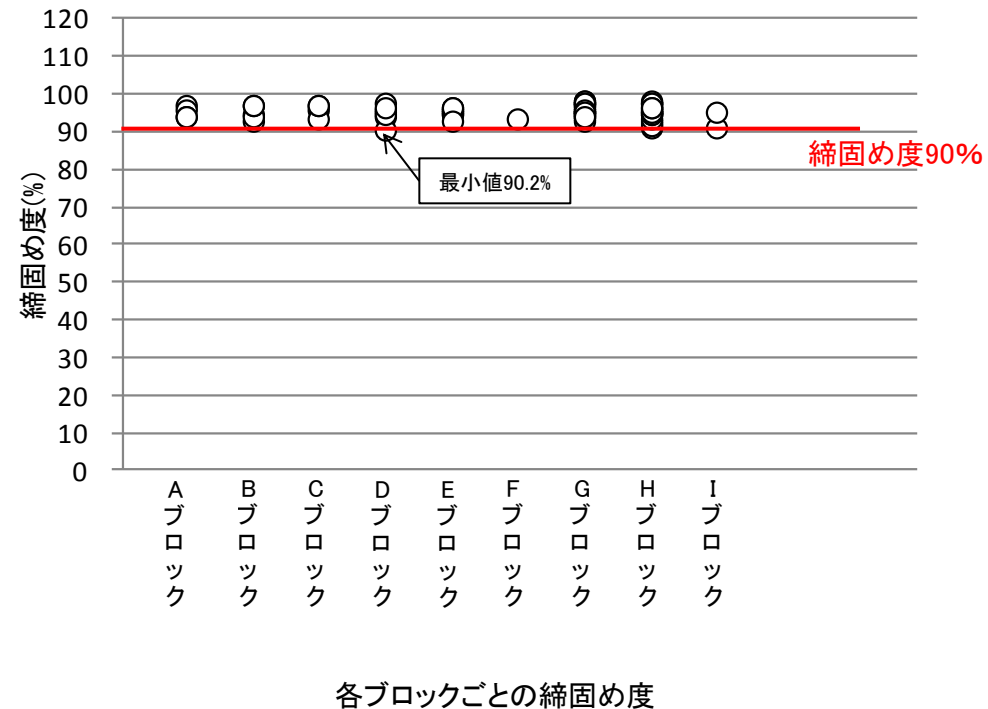
盛土の施工ブロック図



各ブロックごとの締固め度

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の均一性について:盛土の施工・品質管理(3/3)

- 3号炉建設段階における施工ブロック割と締固め度（＝乾燥密度÷最大乾燥密度(γ_{dmax})）の実績を示す。
- 3号炉建設においても、全てのブロックで検査結果は管理基準(90%以上)を満たしており、一定の品質を確保している。



盛土の施工ブロック図

代表性確認指標の選定(盛土)

- 盛土の液状化強度試験を実施した箇所が敷地全体の盛土を代表しているかを確認するため、液状化強度試験箇所と敷地内全体における粒度等の比較を行った。
- 盛土を構成する岩砕の最大粒径は300mmであり、岩砕が多く含まれることから標準貫入試験が適正に実施できないこと、通常の小口径ボーリングコア試料では物理特性を把握することができないことから、N値を使用せず粒度分布や現場密度試験に基づく相対密度により比較を行った。盛土のN値については、補足説明資料5に示す。
- 選定した指標は液状化強度比 R_L との相関性の観点から以下のとおりとし、各種試験はJIS及びJGSに基づき実施した。
- 液状化に関連する基本物性について、補足説明資料2に示す。

盛土の代表性確認にあたり選定した指標

[粒度分布]

基本的な土の物性値。

各基準類における液状化判定に平均粒径、10%粒径が用いられており、液状化強度比 R_L との相関が高い。

[細粒分含有率]

各基準類の液状化判定における液状化強度比 R_L の算定式において、液状化強度比 R_L を補正するパラメータとして用いられており、液状化強度比 R_L との相関が高い。

[相対密度]

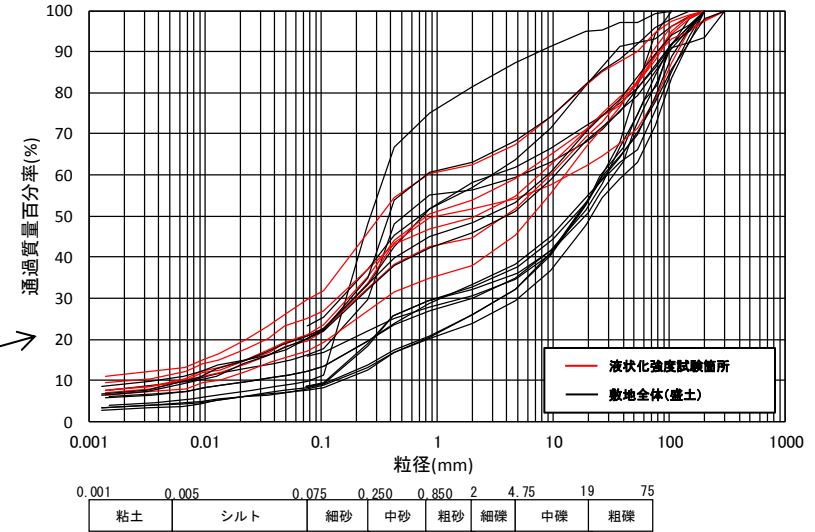
ダイレイタンシー特性(繰返しせん断に伴う体積変化)に直接関連する指標であり、液状化強度比 R_L との相関が高い。

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の基本物性の比較

【基本物性(試験箇所全体)】

- 液状化強度試験箇所の粒度分布は、敷地全体の粒度分布と同程度かやや細粒分に富んでいる。
- ボーリングコアから算定した細粒分含有率については、敷地全体との比較から概ね敷地全体の範囲と同程度の範囲である。
- 相対密度については、敷地全体との比較からやや小さい箇所である。
- 以上より、液状化強度が敷地全体の平均的あるいはやや液状化強度が小さいと推定される箇所より採取した試料により液状化強度試験を実施していることから、試験結果から得た盛土の液状化強度特性には代表性があるといえる。

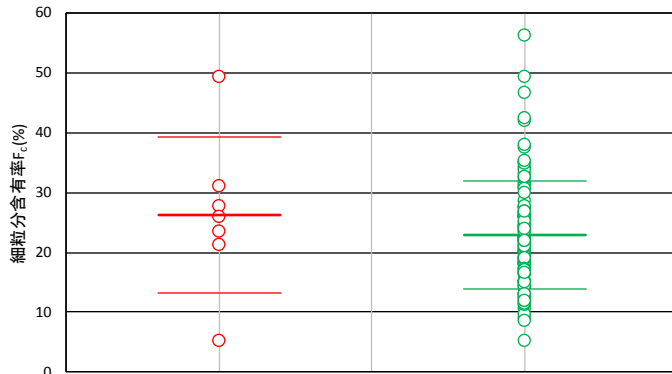
注) 沈降分析を実施していない試料に関しては、
75 μ m以上の粒度分布のみ表示。



粒度分布
 ・敷地内の盛土の粒度分布は類似しており、ばらつきの範囲内に分布

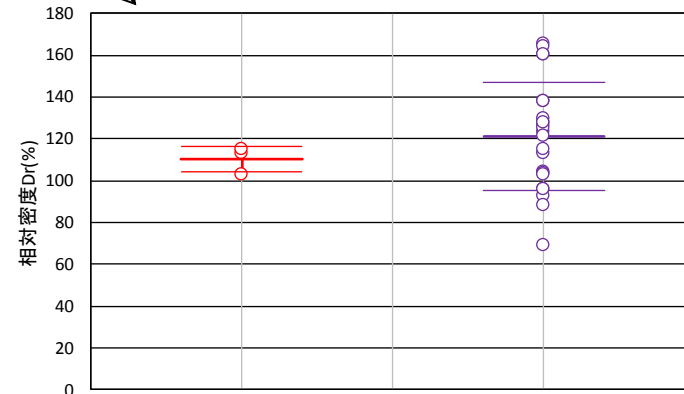
細粒分含有率
 ・概ね敷地全体の $\pm 1\sigma$ の範囲の試料で試験を実施

相対密度
 ・平均値において小さい箇所
 で試験を実施



試験箇所 敷地全体
 細粒分含有率(ボーリングコア)

+ σ
 平均
 - σ
 ○ ● 試験値

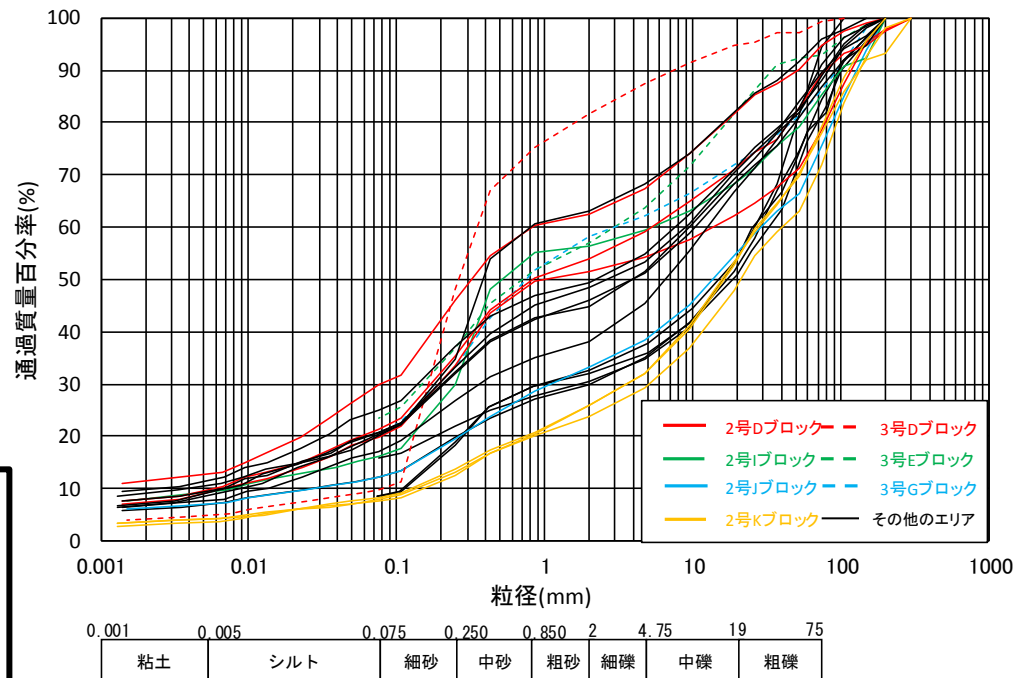


試験箇所 敷地全体
 相対密度

+ σ
 平均
 - σ
 ○ ● 試験値

盛土の基本物性の比較(施工ブロック毎における粒度の整理)

- 盛土の施工時期の違いが品質に影響がないことを確認するため、施工ブロック毎に粒度試験データを整理した。
- 2号炉及び3号炉建設段階の施工ブロック割における供試体レベルのJGS「石分を含む地盤材料の粒度試験方法」による粒度分布を示す。
- 号炉間や施工ブロック間の明瞭な傾向の違いはなく、施工時期や施工範囲によるばらつきは認められない。



粒度分布 注) 沈降分析を実施していない試料に関しては、75 μ m以上の粒度分布のみ表示。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

盛土の液状化強度試験位置の代表性について(1/7)

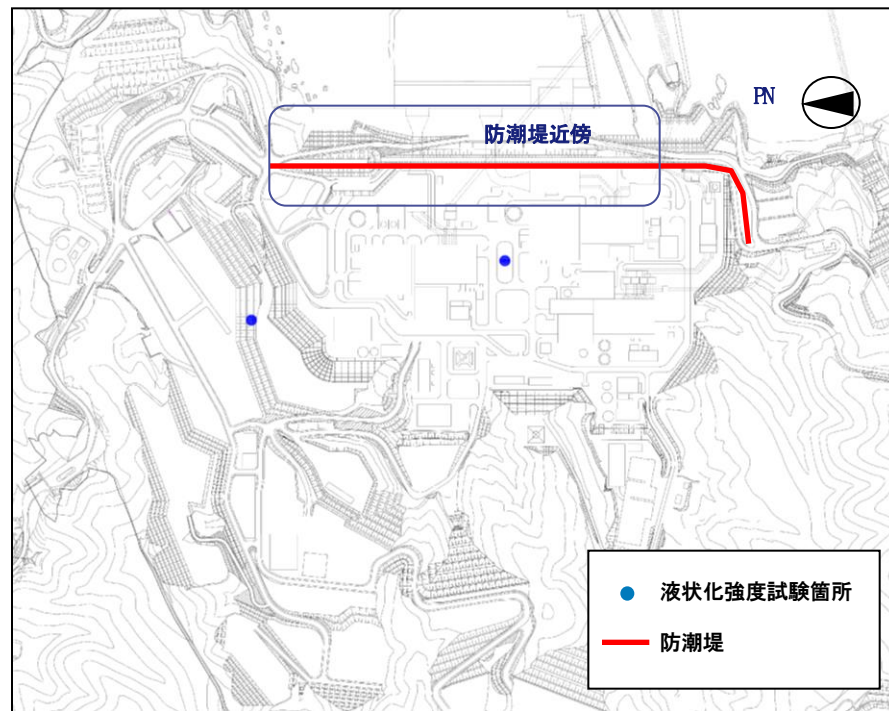
- 防潮堤近傍の物性値と液状化強度試験用の試料採取位置における物性値を比較することにより、防潮堤の設計における液状化強度特性として、液状化強度試験により設定した液状化強度特性を用いることの妥当性を確認する。
- 比較する物性値は、粒度分布、相対密度、S波速度及び盛土の施工における品質管理項目である締固め度とした。なお、比較する物性値は以下の理由により選定したものである。

- ・粒度分布は基本的な土の物性値であり液状化しやすさの判定指標とされ、道路橋示方書における液状化判定において平均粒径、10%粒径が用いられているなど、液状化強度との相関が高い。

- ・相対密度は、ダイレイタンシー特性と密接に関係するため、液状化強度との相関が高い。

- ・S波速度は、各基準類においてN値と関連付けられるなど、地盤の剛性や強度と相関する物性であり、局所的ではなく深さ方向に平均的な地盤の強度を確認できる指標である。

- ・盛土の施工管理項目である締固め度は、施工期間中に全域で確認し管理を実施していることから盛土範囲を網羅しており、締固め程度についてエリア毎の比較が可能である。



液状化強度試験用試料採取箇所

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

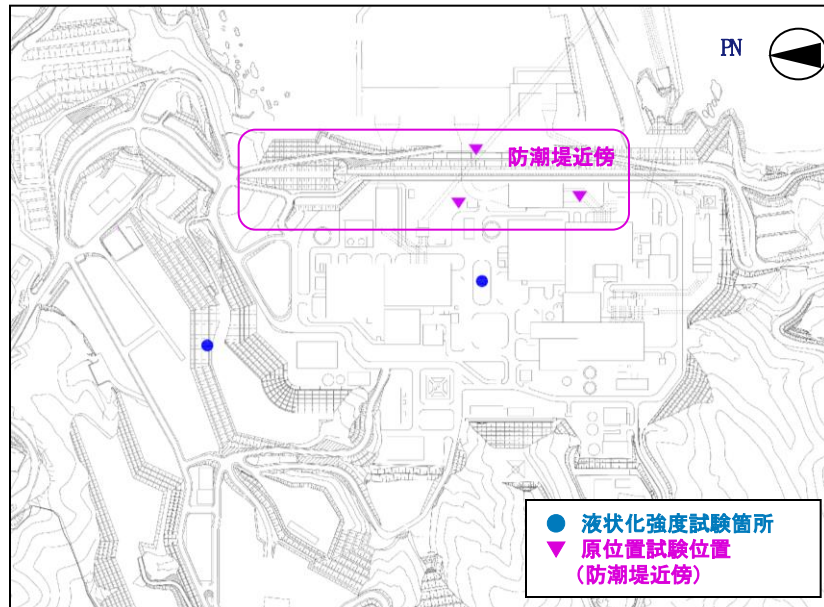
盛土の液状化強度試験位置の代表性について(2/7)

- 防潮堤近傍と液状化試験箇所における粒度分布について、道路橋示方書の判定基準である②及び③で比較する。

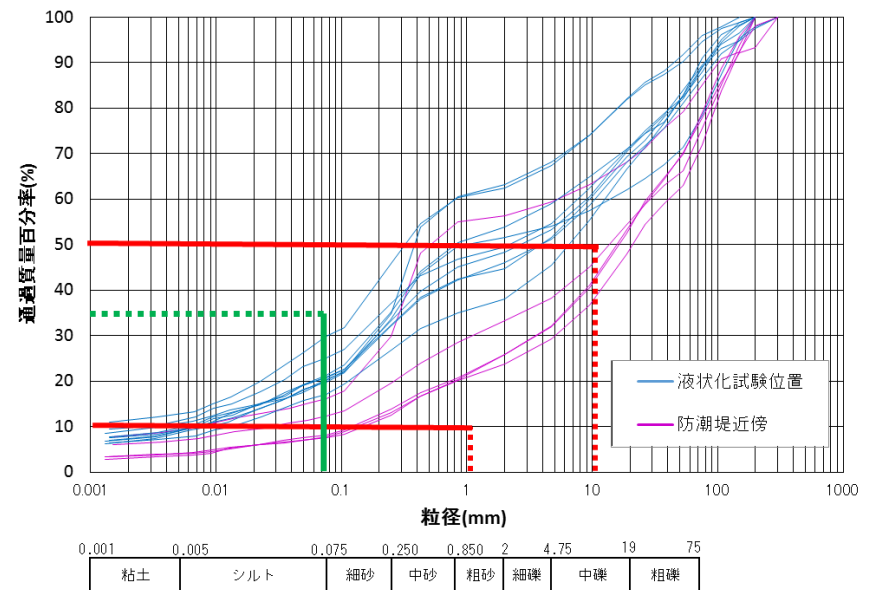
【道路橋示方書の判定基準】

- ①地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ地表面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- ②細粒分含有率 F_c が35%以下の土層または F_c が35%を超えても塑性指数 IP 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

- 判定基準②に関して、防潮堤近傍及び液状化強度試験箇所のいずれも $F_c < 35\%$ となっており、液状化の判定が必要な土質となる。防潮堤近傍は液状化強度試験箇所よりも細粒分含有率が少ないことから、防潮堤近傍の盛土は液状化強度試験箇所よりも液状化しやすい。
- 判定基準③に関して、
 - ・防潮堤近傍では、概ね $D_{50} > 10\text{mm}$
 - ・液状化強度試験箇所では $D_{50} \leq 10\text{mm}$ かつ $D_{10} \leq 1\text{mm}$
 となっており、防潮堤近傍は液状化の判定が不要な土質であり、逆に液状化強度試験箇所は液状化の判定が必要な土質であることから、防潮堤近傍の盛土は液状化強度試験箇所よりも液状化しにくい。



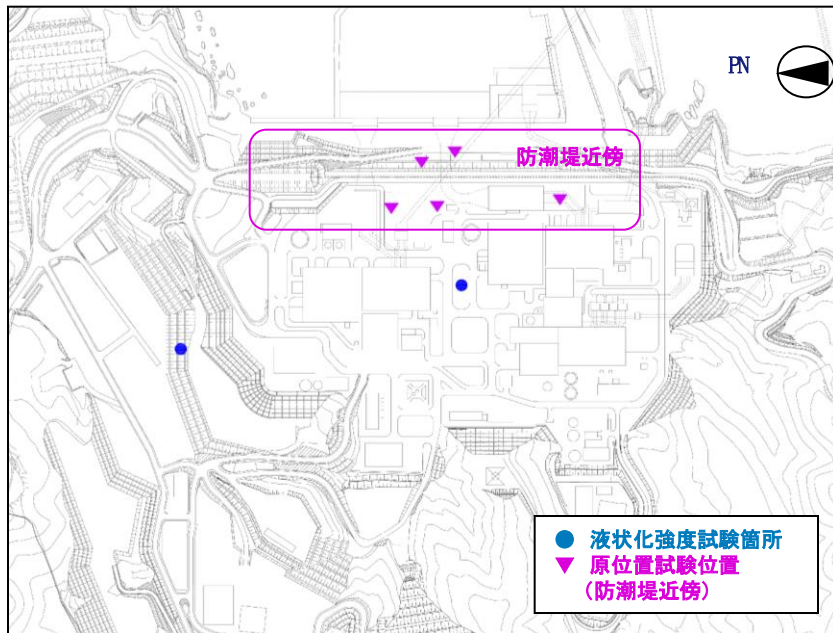
試験試料採取位置



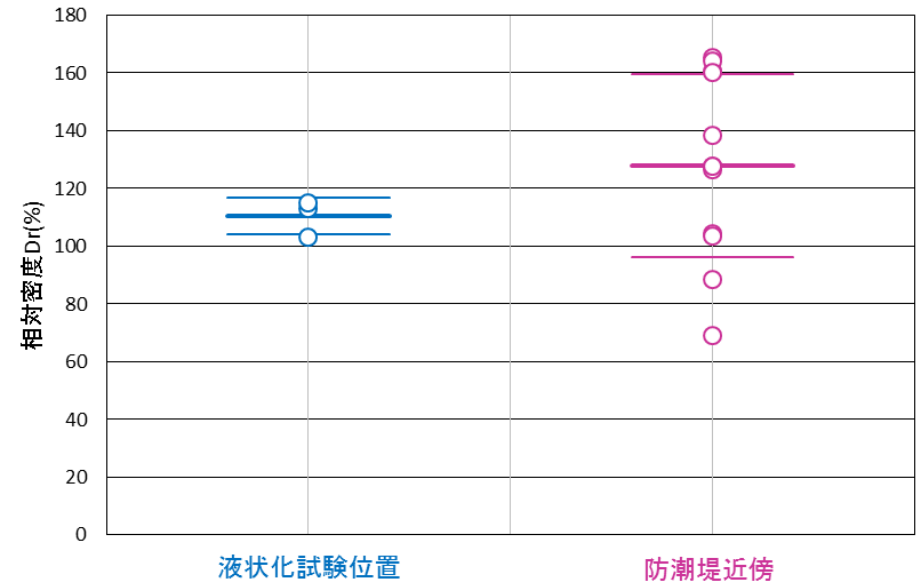
粒度分布

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の液状化強度試験箇所への代表性について(3/7)

- 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所における相対密度を比較する。
- 液状化強度試験箇所の相対密度の平均値から、防潮堤近傍と同程度かやや小さい箇所で試験を実施している。



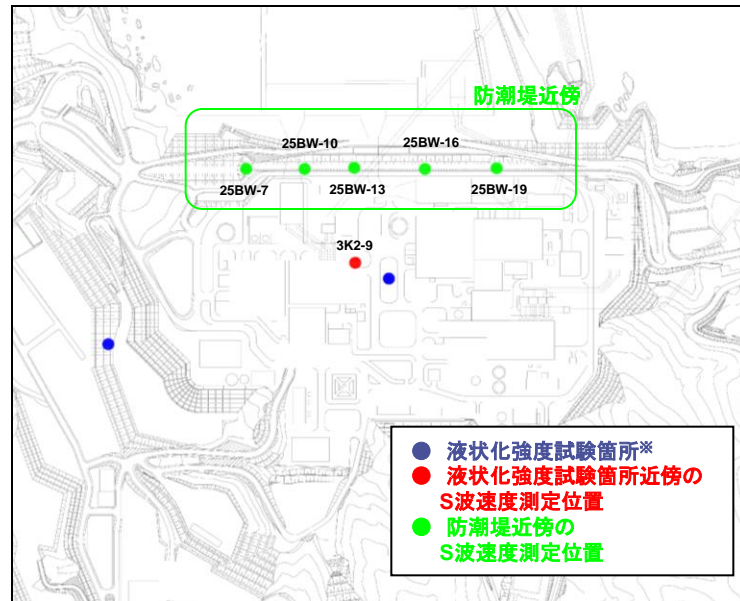
試験試料採取位置



相対密度

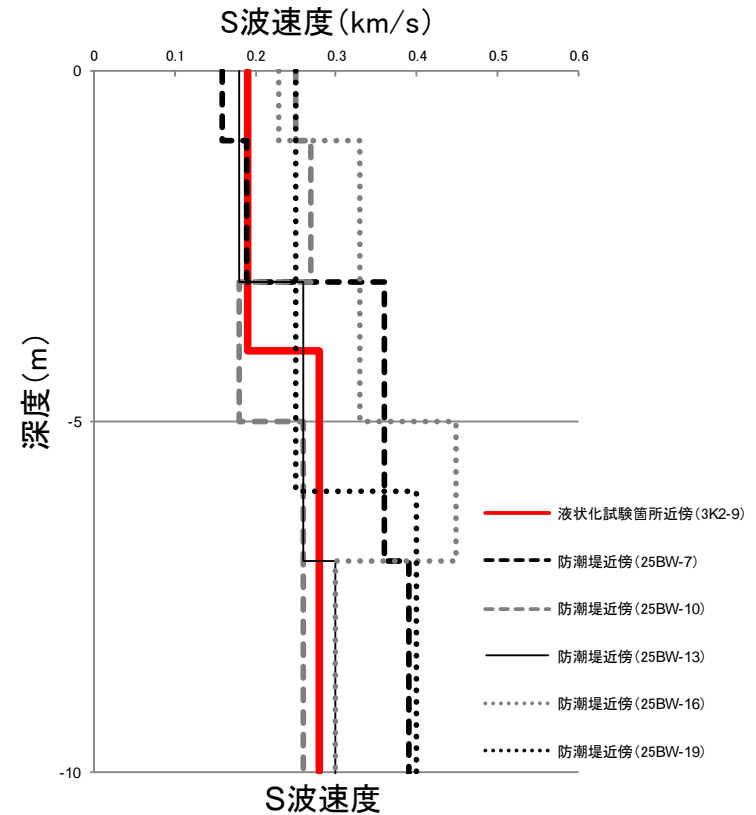
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の液状化強度試験箇所代表性について(4/7)

- 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所の近傍におけるS波速度を比較する。
- 防潮堤近傍の5箇所におけるS波速度と液状化強度試験箇所近傍におけるS波速度とを比較すると、ほぼ同程度となっている。



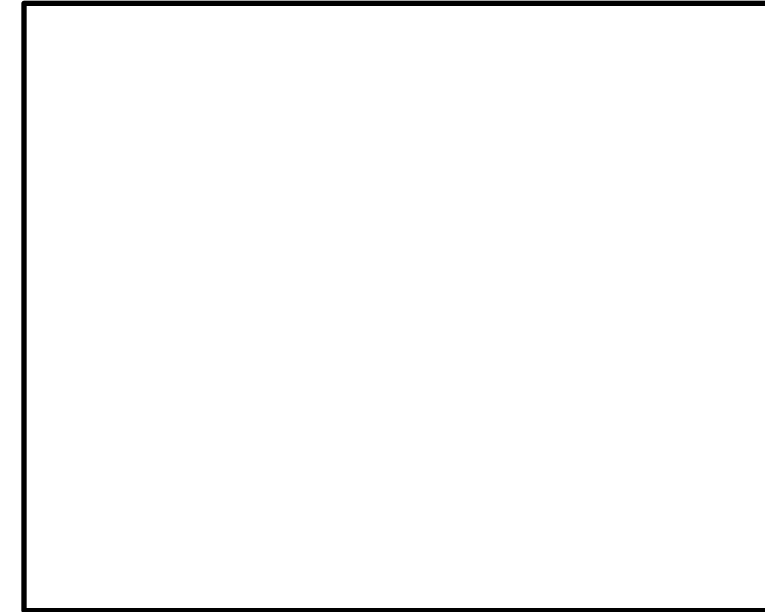
S波速度測定位置

※液状化強度試験箇所ではS波速度を測定していない。

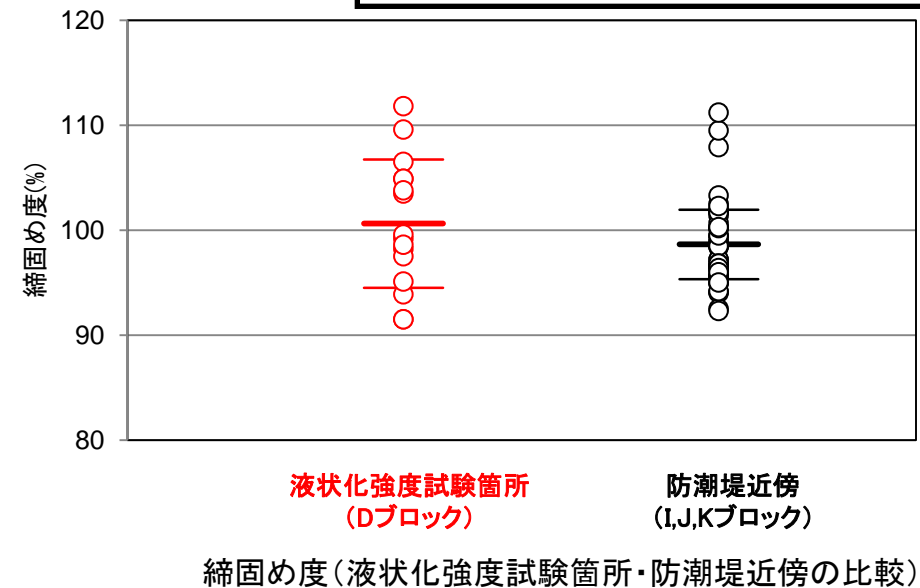
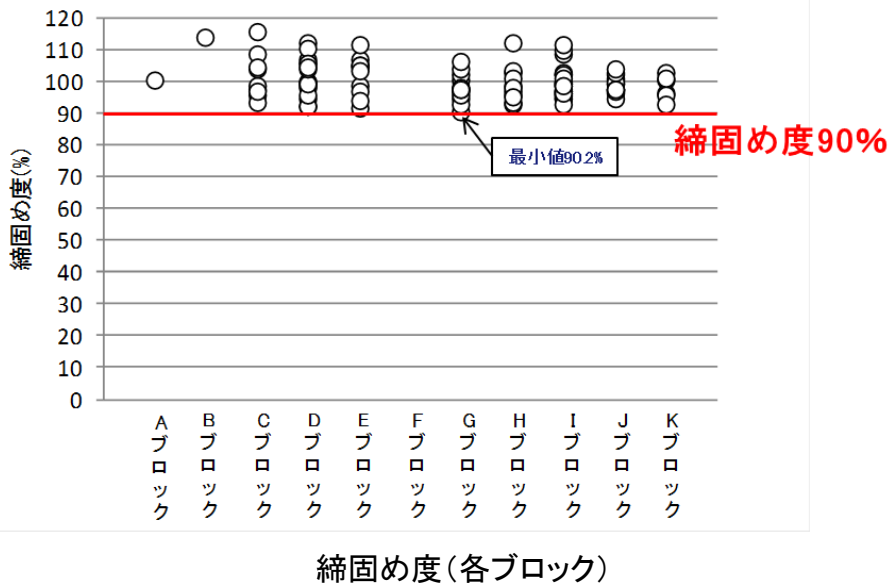


4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の液状化強度試験箇所代表性について(5/7)

- 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所における締固め度を比較する。
- 盛土施工の品質管理に用いた指標のうち、締固め度（＝乾燥密度÷最大乾燥密度（ γ_{dmax} ））の実績を各ブロック及び防潮堤近傍ブロックと液状化強度試験箇所付近のブロックを抜き出して下図に示す。
- 2号炉建設においては、盛土を複数の施工ブロックに分けて施工しているが、いずれの施工ブロックにおいても試験結果は全て管理基準（90%以上）を満たしており、十分締固められている。
- 液状化強度試験箇所と防潮堤近傍を比較すると、ほぼ同程度の締固め度である。



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



盛土の液状化強度試験位置の代表性について(6/7)

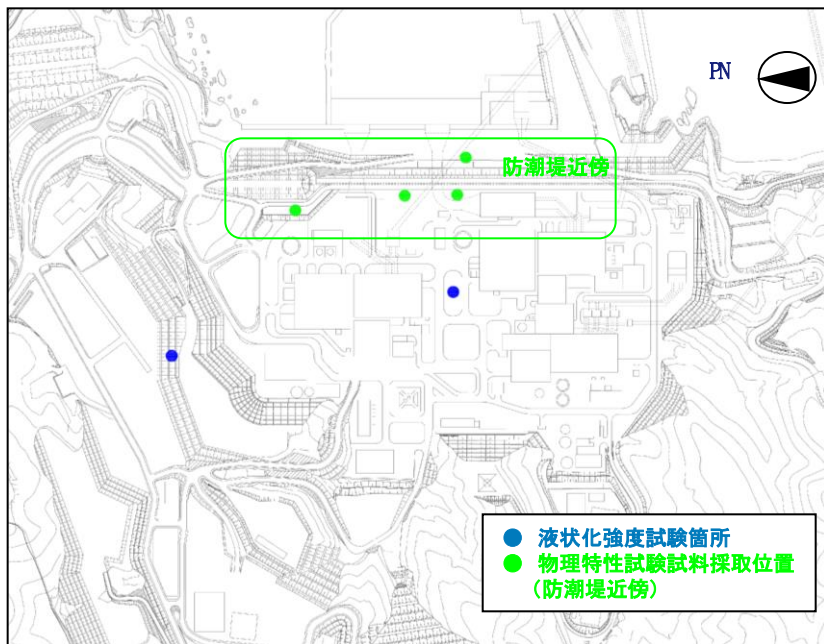
- 粒度分布, 相対密度, S波速度及び盛土施工の品質管理項目である締固め度について, 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所における比較により, 以下を確認した。
 - ・粒度分布の比較では, 道路橋示方書の判定基準(細粒分含有率, 平均粒径・10%粒径)によると, 細粒分含有率について防潮堤近傍の方が液状化しやすい結果となり, 平均粒径・10%粒径について液状化試験箇所の方が液状化しやすい結果となった。防潮堤近傍と液状化強度試験箇所の液状化しやすいの大小が異なるが, 細粒分含有率を液状化強度試験に用いる供試体レベルで比較した場合, 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
 - ・相対密度の比較では, 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
 - ・S波速度の比較では, 防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
 - ・締固め度の比較では, 防潮堤近傍と試験箇所どちらも管理基準以上の締固め度であり, かつ, 防潮堤近傍の締固め度は, 液状化強度試験箇所とほぼ同程度である。

以上より, 防潮堤近傍の盛土は, 液状化強度試験箇所の盛土と比べ, 液状化に対する抵抗性がほぼ同程度であり, 液状化強度試験箇所において採取した試料から得られた液状化強度特性を防潮堤において適用することは妥当である。

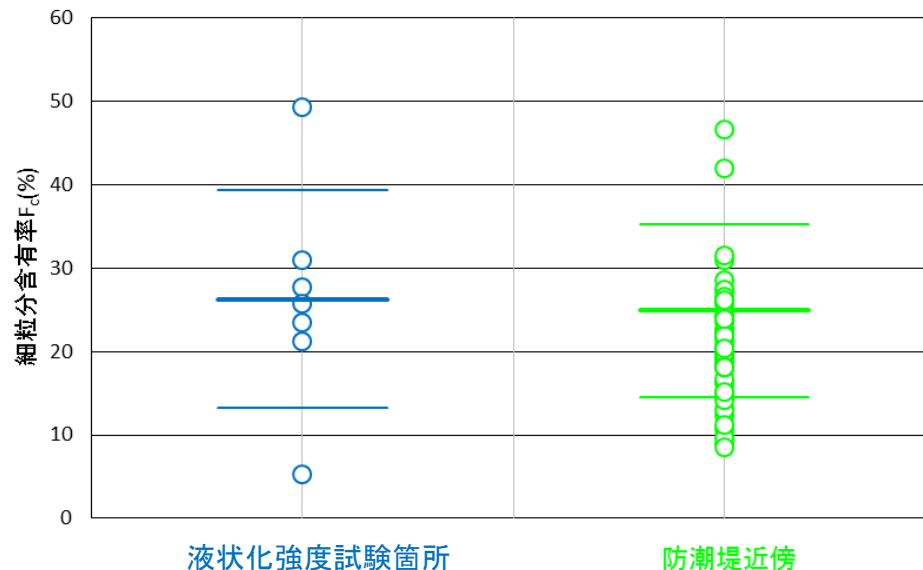
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性 盛土の液状化強度試験箇所の代表性について(7/7)

【盛土の粒度分布の比較に関する補足】

- 現場粒度試験による比較では、液状化試験箇所の細粒分含有率は防潮堤近傍より大きく、液状化しにくい結果となったが、実際の試験に用いる供試体レベルで細粒分含有率の比較を行った。
- 敷地の盛土は最大粒径300mmの岩砕を含むことを踏まえると、平均粒径や10%粒径の比較には75mm以上の土粒子も対象とすることが有効であるものの、岩砕を含む程度により細粒分含有率は大きく変化することから、細粒分含有率の比較には、液状化強度試験に用いる供試体レベルでの比較を目的として、JIS「土の粒度試験方法」に準拠した75mm以下の土粒子を対象とする。
- 液状化強度試験に用いた試料のごく近傍で同じ深度における細粒分含有率と、防潮堤近傍の細粒分含有率を比較すると、ほぼ同程度である。



試験試料採取位置



細粒分含有率(ボーリングコア)

代表性確認まとめ（旧表土・盛土）

【旧表土】

- 試料採取位置は、敷地全体と比べて以下の特徴を有していることから、敷地全体の中で液状化しやすい位置となっている。

【粒度分布】	概ね敷地全体の平均的な粒度分布を持つ試料で試験を実施
【細粒分含有率】	概ね敷地全体における $\pm 1\sigma$ の範囲内の試料で試験を実施
【N値】	平均値、 -1σ 値共に敷地全体より小さい箇所での試験を実施

- よって、試験は保守的な位置で実施しており、代表性を有していると評価した。

【盛土】

- 試料採取位置は、敷地全体と比べて以下の特徴を有していることから、敷地全体の中で液状化しやすい位置となっている。

【粒度分布】	敷地内の盛土の粒度分布は類似しており、ばらつきの範囲内に分布
【相対密度】	平均値において小さい箇所での試験を実施
【細粒分含有率】	概ね敷地全体の $\pm 1\sigma$ の範囲の試料で試験を実施

- よって、試験は保守的な位置で実施しており、代表性を有していると評価した。
- また、防潮堤近傍は、試料採取位置と比べて以下の特徴を有していることから、液状化強度試験箇所において採取した試料から得られた液状化強度特性を防潮堤の設計に適用することは妥当である。

【粒度分布】	防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
【相対密度】	防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
【S波速度】	防潮堤近傍と液状化強度試験箇所はほぼ同程度である。
【締固め度】	防潮堤近傍と試験箇所どちらも管理基準以上の締固め度であり、かつ、防潮堤近傍の締固め度は、液状化強度試験箇所とほぼ同程度である。

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

- 本章では液状化強度試験結果の整理を行い、試験結果に基づき液状化強度特性を設定し、その妥当性を確認する。

■液状化強度試験結果

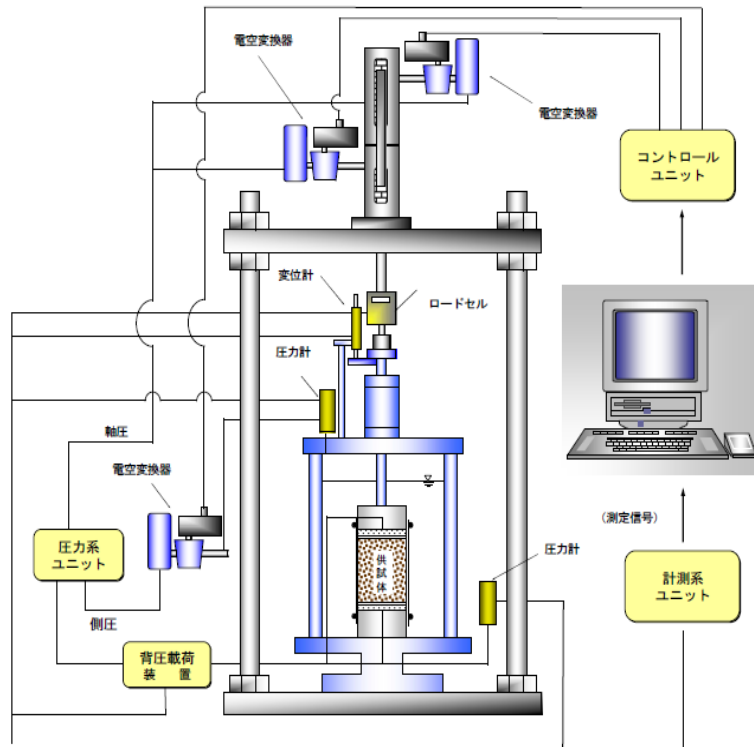
- 試験結果に基づいて、地震時の地盤の状態を「液状化」、「繰返し軟化」及び「非液状化」と分類する。
- 女川の防潮堤については、一部の区間で盛土・旧表土を介して岩盤に支持されており、盛土・旧表土が液状化して支持力を失うような状態になる場合には防潮堤の安定性を確保できない。そのため、液状化検討対象層である盛土・旧表土について、「液状化」と分類される結果がないこと(支持力を失うような状態にはならないこと)を把握する。なお、「繰返し軟化」または「非液状化」と分類される場合でも、間隙水圧の上昇による剛性の低下が生じる可能性があることから、液状化強度特性を設定して有効応力解析による防潮堤の評価を行う。
- 液状化強度試験が基準地震動 S_s 相当の地盤の状態(繰返し応力及び繰返し回数)を模擬していることを確認するため、累積損傷度理論(吉見(1991))を適用し、評価・検討を行う。

■液状化強度特性の設定

- 液状化強度試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し、2011年東北地方太平洋沖地震の観測波を用いた有効応力解析により、設定した液状化強度特性の妥当性の確認を行う。

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 試験方法

- 旧表土及び盛土の液状化強度特性を求めるため、地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」(JGS 0541)に基づき液状化強度試験を実施する。
- 試料採取は、原位置の地盤を乱さないよう、凍結サンプリングやゲルプッシュサンプリングにより実施した。



【試験条件】

- 供試体寸法(旧表土): 外径50mm・高さ100mm, 外径70mm・高さ140mm
- 供試体寸法(旧表土・盛土): 外径100mm・高さ200mm
- 供試体寸法(盛土): 外径300mm・高さ600mm
- 载荷波形: 正弦波(0.1~0.2Hz)
- 拘束圧: 供試体平均深度の有効土被り圧を考慮して設定
- 軸ひずみ10%に達するまで試験を実施
- 所定の軸ひずみ(1%, 2%, 5%, 10%)及び過剰間隙水圧比0.95の繰返し回数を評価

繰返し非排水三軸試験の概要

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(1/6)

- 液状化強度試験の結果は、有効応力が低下する影響を広義に分類・定義している土木学会地震工学委員会の報告書に基づき分類する。
- 防潮堤直下には支持力を期待する盛土・旧表土が分布することから、液体状となり支持力を失う「液状化」が生じない地盤であることを確認する。
- 液状化しなくとも、間隙水圧の上昇による剛性の低下が生じる場合、構造物の設計で考慮する必要があると考えることから、「繰返し軟化」についても分類する。ただし、「サイクリック・モビリティ」は「繰返し軟化」のうち、有効応力がゼロ(せん断抵抗が小さくなる)まで低下するケースと考えられることから「繰返し軟化」に含める。

土木学会地震工学委員会「レベル2地震動による液状化研究小委員会」活動成果報告書

女川の液状化強度試験結果の分類

液状化：

地震の繰返しせん断力などによって、飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内で間隙水圧が上昇・蓄積し、有効応力がゼロまで低下し液体状となり、その後地盤の「流動」ともなう現象。



液状化

広義の液状化：

緩い砂地盤や砂礫地盤に限定せず、密な砂地盤や密な砂礫地盤さらに粘性土地盤でも地震などを含む種々の外力によって有効応力が低下し、地盤の強度または剛性の低下により有害な沈下や変形などが起こる現象。

繰返し軟化、サイクリック・ソフトニング：

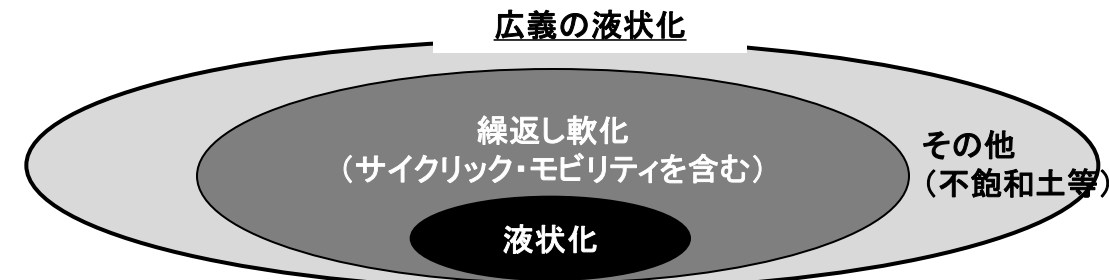
繰返し载荷による間隙水圧上昇と剛性低下によりせん断ひずみが発生し、それが繰返し回数とともに除々に増大するが、土のもつダイレイタンスー特性や粘性のためにひずみは有限の大きさにとどまり、大きなひずみ範囲にいたるまでの流動は起きない。



繰返し軟化

サイクリック・モビリティ：

繰返し载荷において土が「繰返し軟化」する過程で、限られたひずみ範囲ではせん断抵抗が小さくなくても、ひずみが大きく成長しようとする、正のダイレイタンスー特性のためにせん断抵抗が急激に作用し、せん断ひずみの成長に歯止めがかかる現象。



非液状化

液状化、繰返し軟化以外を非液状化に分類する。

液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(2/6)

- 土木学会地震工学委員会の定義に基づき、液状化強度試験結果の分類を行うにあたり、以下の項目により、「液状化」、「繰返し軟化」、「非液状化」に分類する。
- 「繰返し軟化」と「サイクリック・モビリティ」は、合わせて「繰返し軟化」に分類する。

液状化強度試験結果の判定項目と分類

○:該当する, ×:該当しない

判定項目※1	液状化	繰返し軟化		非液状化
			サイクリック モビリティ	
<ul style="list-style-type: none"> 間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。) 	○	○	○	×
<ul style="list-style-type: none"> 有効応力がゼロまで低下する。 	○	×※2	○	×
<ul style="list-style-type: none"> 液体状となり流動する。 (ひずみが急増する。) 	○	×	×	×
<ul style="list-style-type: none"> 正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。) 	×	○	○	○ or ×※3

※1 土木学会地震工学委員会の定義に基づき判定項目を策定したが、液状化強度試験の結果に対して判定できるよう、括弧内の判断項目を補足した。

※2 旧表土の試験のうちA-1シリーズは有効応力経路のデータを取得しておらず、「繰返し軟化」と「サイクリックモビリティ」の判定ができないため、「-」で表示し、「繰返し軟化」に整理する。

※3 項目の判定はするものの、「非液状化」の分類に影響は及ぼさない。

液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(3/6)

- 参考文献に記載の液状化に関する内容を以下に示す。

【土質工学用語辞典(1985)】

間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果、飽和砂質土がせん断強さを失うことを液状化という。

【社団法人地盤工学会(2006)】

砂などの繰返し載荷において、有効拘束圧がゼロに近づいてから、載荷時にせん断剛性の回復、除荷時に有効応力の減少を繰返していくが、ひずみは有限の大きさにとどまる現象をサイクリックモビリティといい、液状化とは区別して用いられることがある。

【安田(1991)】

密詰めの場合には大ひずみは生じない。一時的に有効拘束圧がゼロになっても、その後にせん断力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効拘束圧が増加(回復)し、有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。この現象を“サイクリックモビリティ”と呼んで液状化と区別することもある。

【石原(2017)】

間隙水圧は徐々に上昇しているが、最終的にこれが初期の拘束圧力 σ'_0 に等しくなっている時点が厳密な意味で液状化の発生ということになる。

砂質土は、その密度や細粒分の含有率によって同じ振幅の繰返し軸荷重を加えても、間隙水圧の上昇そして軸ひずみ発生の模様が多少変わってくる。細粒分が多い場合、軸ひずみは増大しても間隙水圧は100%上昇しないことが多い。しかし、土は著しく軟化し、繰返し強度が低下しているので、実用上この場合も液状化とみなすことが多い。本来は“繰返し軟化”というべき。

液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(4/6)

【井合(2008)】

サイクリックモビリティとは、「密な砂地盤が繰返しせん断を受け、過剰間隙水圧の増加に伴って、せん断ひずみ振幅が徐々に増大する現象である。」

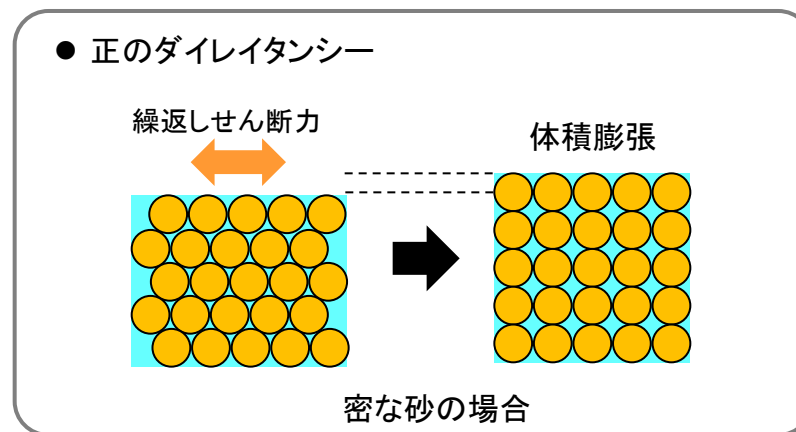
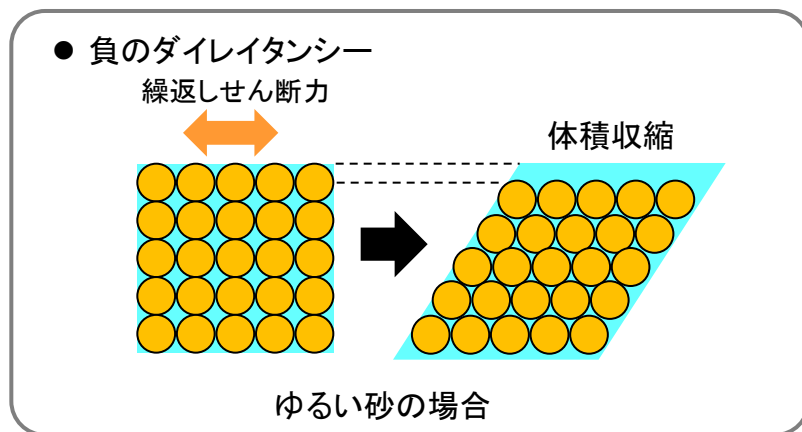
地盤の液状化は、ゆるい砂地盤が繰返しせん断を受け、せん断振幅が急増し、地盤全体が泥水状態となり、噴砂や噴水を伴うことが多いので、現象的にサイクリックモビリティとは異なる。

【吉見(1991)】

ゆるい砂の液状化と異なる点は、密な砂では、せん断ひずみがある限度を超えると、せん断によって体積が膨張しようとする傾向(正のダイレイタンス)が現れるので、非排水条件のもとでは、せん断ひずみが大きくなると間隙水圧が減少し、したがって有効応力が回復することである。

有効応力がゼロになるのは、せん断応力がゼロになる瞬間だけであり、せん断応力が作用している間は有効応力が存在するので、間隙水圧比が100%に達した後でも、繰返しせん断に対して相当な剛性を保持する。

密な砂では、ゆるい砂でみられるような破局的なクイックサンドは起こらず、有限なひずみ振幅を持つせん断変形が繰り返されるにすぎない。



液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(5/6)

液状化強度試験の例(液状化の場合)

試験条件		
供試体	他事例	
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)	160	
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$	0.229	
試験結果		液状化の判断
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○	液状化
有効応力がゼロまで低下する	○	
液体状となり流動する(ひずみ急増)	○	
ダイレイタンスー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	×	

液状化後、排水、再堆積させた試料



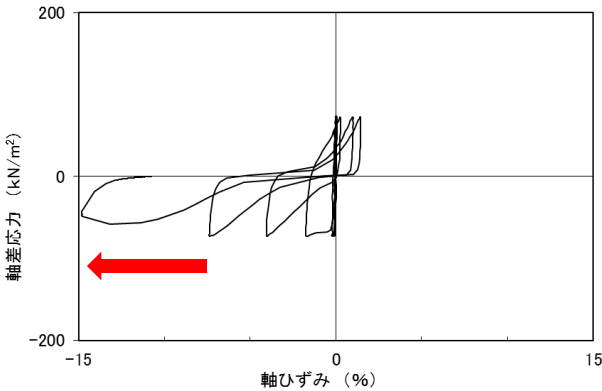
試験後の供試体

【液状化による被害例】

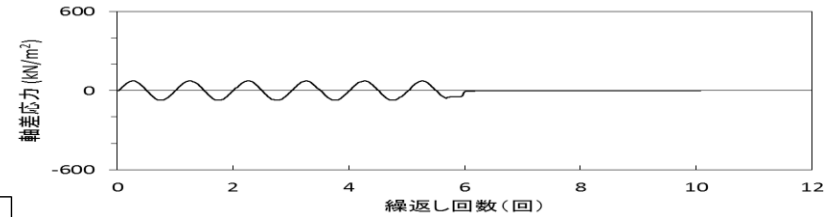
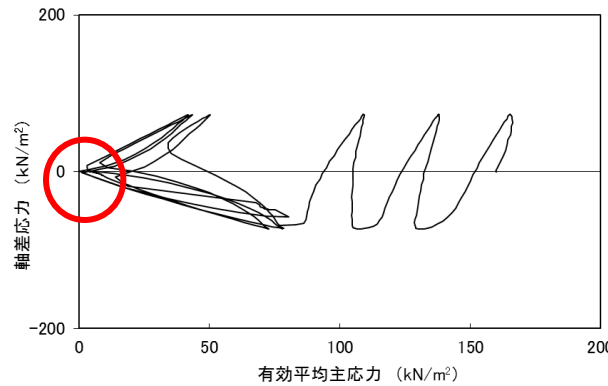


新潟地震で地盤の液状化現象により支持力を失って傾いた県営アパート※

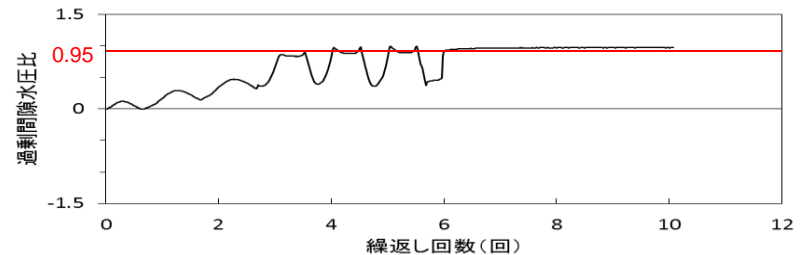
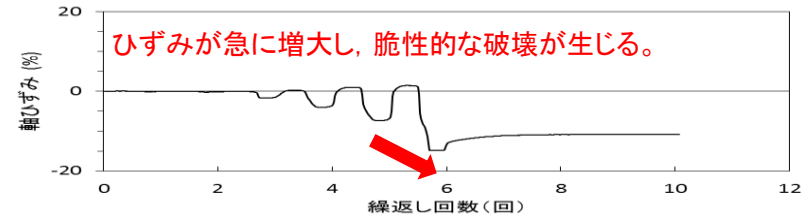
ひずみが急に増大し、脆性的な破壊が生じる。



有効応力がゼロになり、液体状になる。



ひずみが急に増大し、脆性的な破壊が生じる。



過剰間隙水圧比は95%を超過し、100%になる。

※新潟日報社:新潟地震の記録, p27, 1964.

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定
 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(6/6)

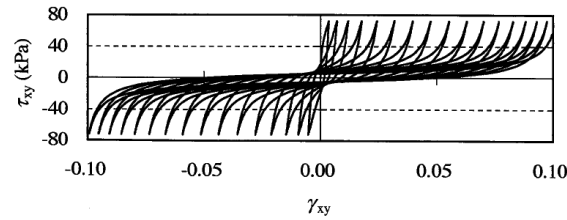
液状化強度試験の例(繰返し軟化の場合)

試験条件		
供試体		他事例※1
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		
試験結果		液状化の判断
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○	繰返し軟化
有効応力がゼロまで低下する	○	
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×	
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○	

※1 井合ほか(2008): 砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係, 京都大学防災研究所年報第51号

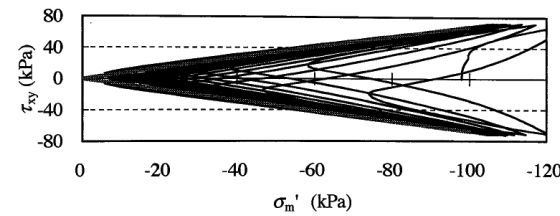
ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じない。

せん断応力 τ_{xy} ～せん断ひずみ γ_{xy} 関係



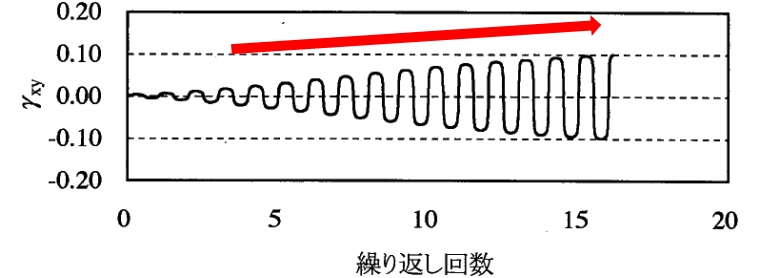
有効応力がゼロまで低下するものの、ダイレイタンシー特性により有効応力が回復する。

有効応力経路図

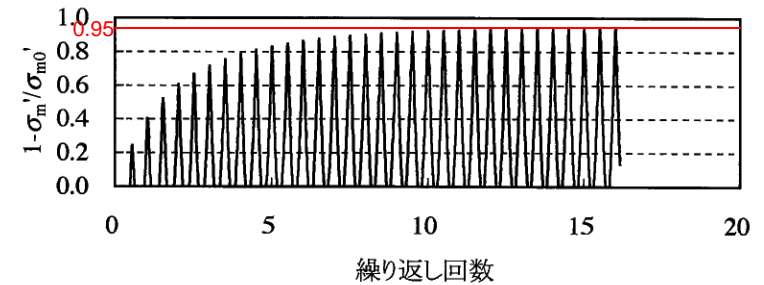


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じない。

せん断ひずみ γ_{xy} 時刻歴図



過剰間隙水圧比(=1- σ'_m/σ'_{m0})時刻歴



5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定
 旧表土の液状化強度試験結果(1/7)

- 旧表土に対して実施した50ケースの液状化強度試験結果の一覧を以下に示す。

試料番号		A-1-1(φ50)				A-1-2(φ50)				A-1-3(φ50)				
深度 GL-(m)		6.00~6.90				9.00~9.85				11.65~12.45				
供試体No.		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.693				2.695				2.688				
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		78.5				98.1				127.5				
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.347	0.391	0.491	0.641	0.333	0.363	0.425	0.313	0.304	0.342	0.423	0.485	
繰返し 載荷 回数	両軸 振り 幅 ず みの	DA=1%	18.2	14.1	3.5	0.9	13.1	4.0	1.0	38.7	46.0	28.0	3.0	0.8
		DA=2%	30.0	24.2	12.2	4.7	24.1	10.0	4.8	70.1	60.4	43.9	8.0	3.3
		DA=5%	53.6	43.0	29.5	20.1	36.1	18.0	11.7	95.7	81.0	64.0	19.1	12.0
		DA=10%	—	—	—	—	45.9	25.5	18.9	116.3	104.2	85.3	34.2	25.0
	過剰間隙水圧比95%		41	32	24	17	34	18	13	84	75	59	19	13

試料番号		A-2(φ100)					A-3(φ100)					
深度 GL-(m)		18.00~20.95					16.00~17.95					
供試体No.		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.696					2.685					
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		400					320					
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.599	0.403	0.302	0.329	0.282	0.301	0.400	0.500	0.279	0.247	
繰返し 載荷 回数	両軸 振り 幅 ず みの	DA=1%	0.2	0.7	12.0	5.5	10.6	3.0	0.2	0.1	4.5	16.7
		DA=2%	0.4	2.0	19.7	9.5	15.6	7.5	0.4	0.3	9.5	—
		DA=5%	1.0	4.0	38.2	18.8	21.7	20.8	0.9	0.7	16.9	—
		DA=10%	2.0	7.0	89.0	35.0	28.9	40.9	2.5	1.5	23.3	—
	過剰間隙水圧比95%		—	—	49	14	18	9	—	1	12	—

注) 赤枠は試験結果を例示したケース

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 旧表土の液状化強度試験結果(2/7)

- 旧表土に対して実施した50ケースの液状化強度試験結果の一覧を以下に示す。

試料番号		A-4(φ100)				A-6(φ100)				
深度 GL-(m)		23.55~24.95				12.30~13.80				
供試体No.		1	2	3	4	1	2	3	4	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.701				2.698				
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		450				270				
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.290	0.509	0.420	0.355	0.386	0.304	0.350	0.334	
繰返し 載荷 回数	両軸 振ひ 幅 ず み の	DA=1%	8.5	0.6	2.0	3.5	0.6	—	10.7	8.0
		DA=2%	16.4	1.5	6.0	9.0	1.5	—	17.8	13.9
		DA=5%	32.6	4.0	17.2	21.0	5.5	—	26.9	21.8
		DA=10%	59.0	8.0	42.6	44.8	9.0	—	—	—
	過剰間隙水圧比95%	22	6	11	23	8	—	19	—	

試料番号		A-5-1(φ100)					A-5-2(φ70)					
深度 GL-(m)		7.00~9.00					10.00~12.00					
供試体No.		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.681					2.681					
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		160					210					
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.377	0.332	0.289	0.269	0.265	0.350	0.254	0.293	0.237	0.204	
繰返し 載荷 回数	両軸 振ひ 幅 ず み の	DA=1%	1.5	7.0	10.6	222.4	9.0	0.1	8.5	4.5	71.1	126.8
		DA=2%	4.0	12.7	17.1	—	18.9	0.3	14.7	9.0	108.5	162.9
		DA=5%	8.0	21.4	26.4	—	37.2	0.6	27.5	16.3	140.0	190.5
		DA=10%	12.7	29.7	—	—	—	1.5	42.4	22.7	157.0	202.3
	過剰間隙水圧比95%	6	11	14	—	16	1	24	18	124	177	

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 旧表土の液状化強度試験結果(3/7)

- 旧表土に対して実施した50ケースの液状化強度試験結果の一覧を以下に示す。

試料番号		A-7-1(φ70)					A-7-2(φ100)					
深度 GL-(m)		5.20~5.80					7.55~8.85					
供試体No.		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.697					2.716					
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		110					150					
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.402	0.454	0.555	0.505	0.322	0.489	0.697	0.601	0.654	0.266	
繰返し 載荷回数	両軸 振ひ 幅ず みの	DA=1%	2.0	2.0	0.6	0.6	1.0	5.0	0.3	16.1	0.8	147.1
		DA=2%	9.5	12.1	2.0	2.5	8.5	11.0	0.7	28.9	2.5	169.8
		DA=5%	31.7	50.9	12.5	11.8	71.8	23.8	2.0	34.7	5.5	194.6
		DA=10%	73.8	147.2	34.8	23.8	219.9	28.9	3.0	—	8.5	—
	過剰間隙水圧比95%	19	12	6	8	38	5	3	4	4	153	

旧表土の液状化強度試験結果(4/7)

- 旧表土の液状化強度試験で得られた結果と解釈は以下の通りである。
- 防潮堤近傍で採取したA-2試料の供試体No.2(非液状化の例)及びNo.4(繰返し軟化の例)の試験結果を代表として、次頁以降に示す。
- 全ての液状化強度試験の結果については、補足説明資料3(データ集1.)に示す。

■試験結果

- 有効応力がゼロとなり液体状になることはなかった。(全50ケース)
- 過剰間隙水圧は上昇・蓄積するものの、せん断応力の作用によって有効応力は回復した。(全50ケース)
- 過剰間隙水圧比は、95%を超過しないケースと超過するケースが見られた。
- ひずみは徐々に大きくなるが、急には増大しないため、脆性的な破壊は生じなかった。(全50ケース)

■試験結果の解釈

- 旧表土に対する液状化強度試験の結果は、「非液状化」または「繰返し軟化」と分類される。
- 地震時の旧表土の挙動は、液状化被害例(p.47)のように支持力を失う事象は発生せず、ひずみが漸増するねばり強い挙動を示す。
- 上記を踏まえ、施設の耐震性評価にあたっては、有効応力解析により過剰間隙水圧の上昇に伴う旧表土の剛性低下を考慮した変形量の評価を行う方針とする。

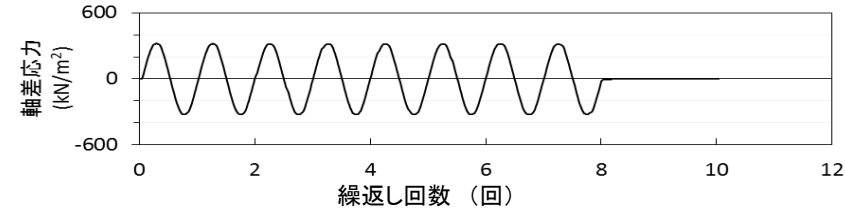
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 旧表土の液状化強度試験結果(5/7)

試験条件	
供試体	A-2試料(No.2)
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)	400
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$	0.403
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	×
有効応力がゼロまで低下する	×
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○
液状化の判断	
非液状化	

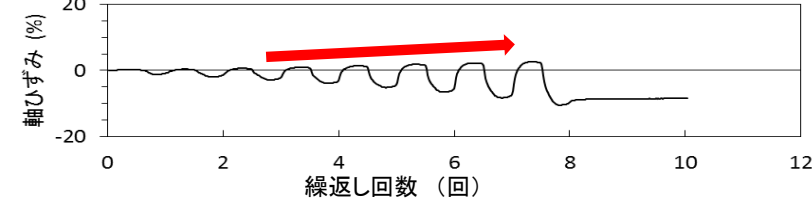
供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。



試験後の供試体

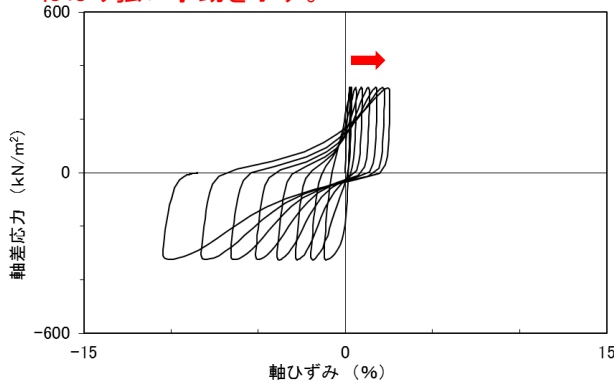


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じない。

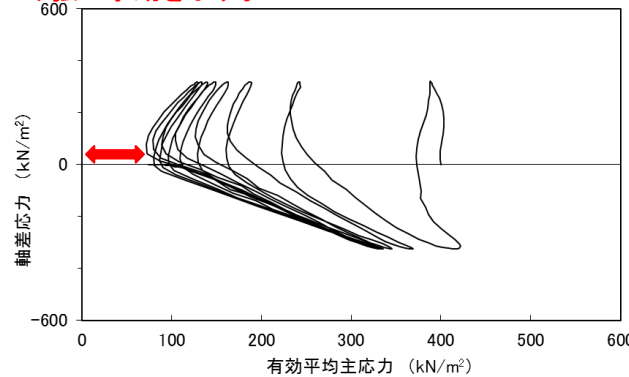


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

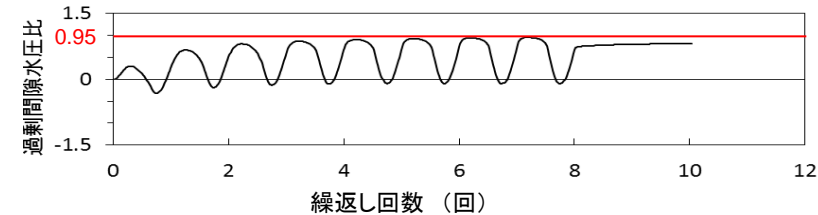
繰返し荷重を載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。また、せん断応力(軸差応力)作用時に、有効応力は回復し、ねばり強い挙動を示す。



液状化強度試験結果(軸ひずみ)



液状化強度試験結果(有効平均主応力)



過剰間隙水圧比は95%を超過しない。せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し(さらに負になる。), 有効応力が回復する。

液状化強度試験結果(繰返し回数)

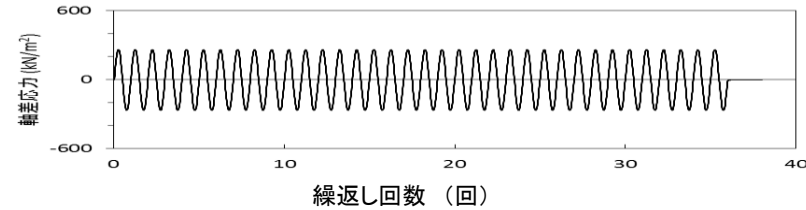
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 旧表土の液状化強度試験結果(6/7)

試験条件	
供試体	A-2試料(No.4)
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)	400
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$	0.329
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○
有効応力がゼロまで低下する	×
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○
液状化の判断	
繰返し軟化	

供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。



試験後の供試体

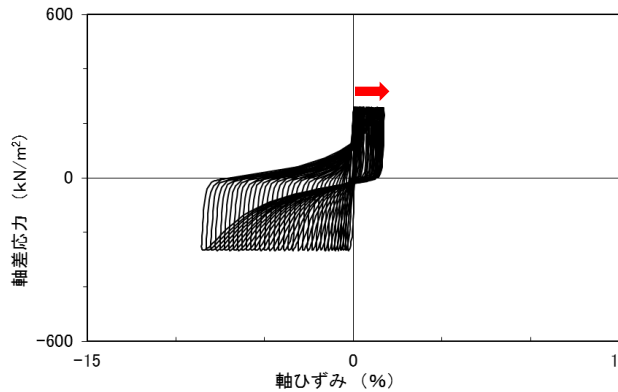


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

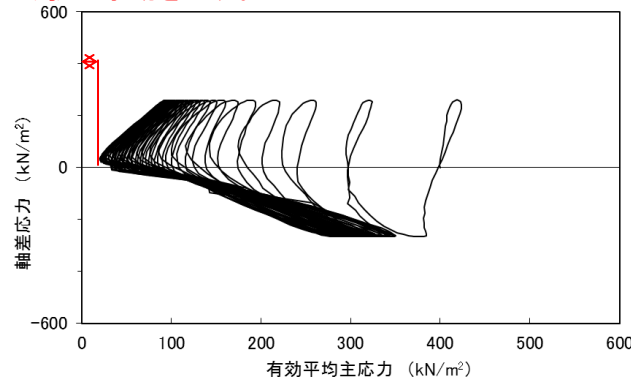


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

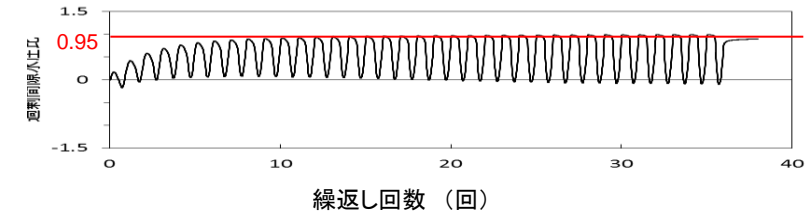
繰返し荷重を載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。また、せん断応力(軸差応力)作用時に、有効応力は回復し、ねばり強い挙動を示す。



液状化強度試験結果(軸ひずみ)



液状化強度試験結果(有効平均主応力)



過剰間隙水圧比は95%を超過するものの、頭打ちとなり、100%にはならない。せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し(さらに負になる。), 有効応力が回復する。

液状化強度試験結果(繰返し回数)

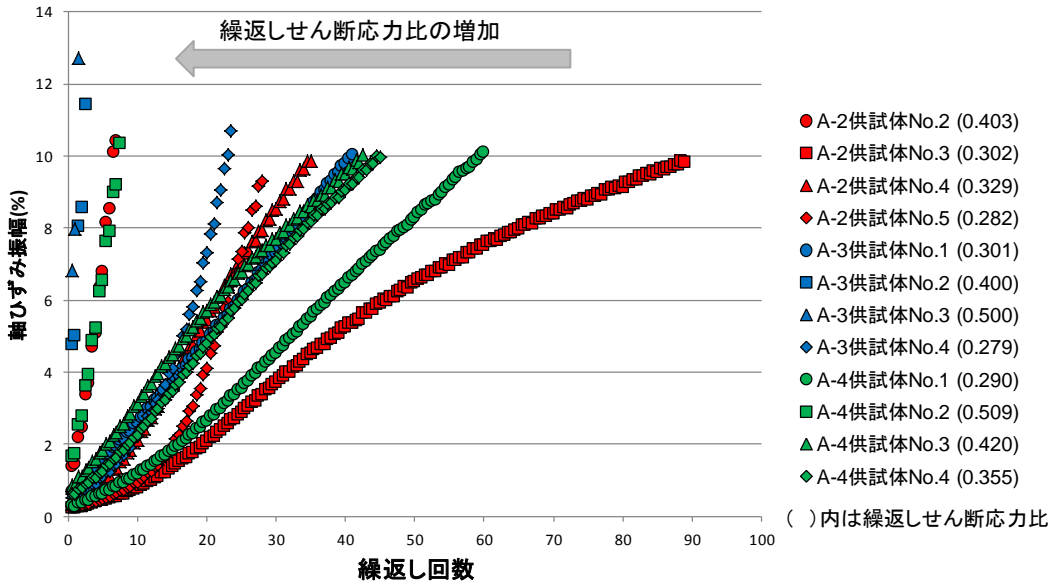
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 旧表土の液状化強度試験結果(7/7)

- 旧表土に対する液状化強度試験で見られた、ねばり強い挙動に対する定量評価を行った。
- 繰返しせん断応力比が概ね0.4以下では、過剰間隙水圧が蓄積した状態における1回当たりの軸ひずみ振幅の平均増分はわずかに約0.3%であり、ねばり強い挙動を示す。

【旧表土の変形特性の整理】

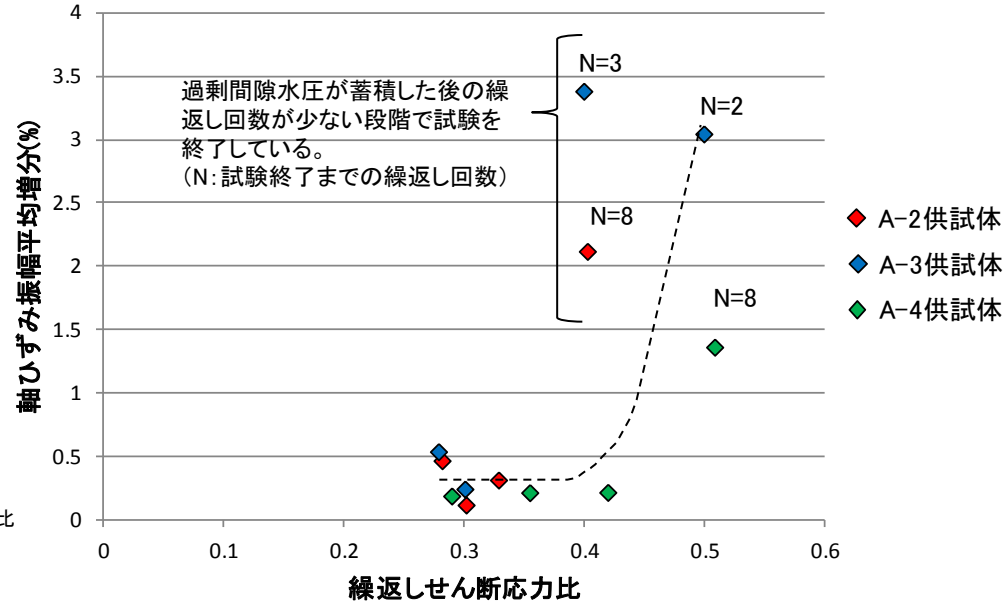
繰返し载荷に対し、繰返しせん断応力比が大きいほど軸ひずみ振幅の傾きが大きく、プロット間隔が大きい傾向を示す。

繰返し载荷に対し過剰間隙水圧が蓄積した状態におけるひずみ増分の平均値は、概ね同様の傾向を示す。



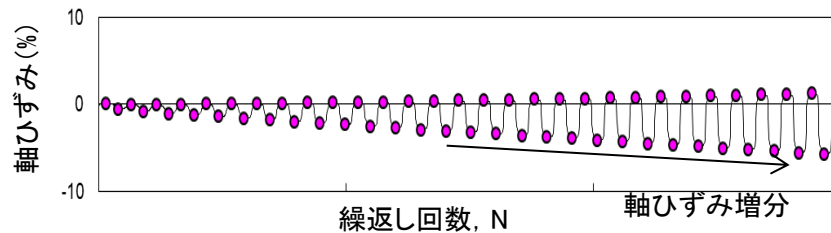
軸ひずみ振幅—繰返し回数関係※1

※1: 液状化強度試験において、繰返し载荷に対する軸ひずみ振幅をプロットした図であり、軸ひずみの発生度合いを示す。



軸ひずみ増分—繰返しせん断応力比※2

※2: 液状化強度試験において、繰返しせん断応力比に対し、軸ひずみの平均増分(左のグラフの傾き)をプロットし、1波あたりのひずみ増分を示す。



軸ひずみ—繰返し回数関係

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定
盛土の液状化強度試験結果(1/5)

- 盛土に対して実施した24ケースの液状化強度試験結果の一覧を以下に示す。

試料番号		B-1-1 (φ 100)				B-1-2 (φ 100)				B-1-3 (φ 100)				
深度 GL-(m)		1.70~2.95				5.00~6.95				8.00~9.95				
供試体No.		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.693				2.693				2.712				
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		50				120				180				
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.591	0.706	0.926	1.239	0.309	0.501	0.603	0.424	1.160	1.402	1.257	1.489	
繰返し 載荷回数	両軸 振ひ ず み の	DA=1%	31.5	14.7	3.0	0.7	33.8	4.0	0.7	16.7	3.0	1.0	0.7	0.3
		DA=2%	46.5	47.6	17.7	2.5	49.3	11.8	2.5	41.6	22.7	14.8	11.7	0.6
		DA=5%	69.4	—	51.0	7.0	75.7	25.8	12.6	405.9	191.9	26.8	113.6	3.0
		DA=10%	133.4	—	105.7	11.9	148.5	49.8	69.0	—	—	—	148.1	4.0
	過剰間隙水圧比95%		55	77	25	4	44	13	14	58	—	—	147	4

試料番号		B-1-4 (φ 300)				B-2-1 (φ 100)				B-2-2 (φ 300)				
深度 GL-(m)		1.50~2.50				1.50~3.45				1.50~2.50				
供試体No.		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.705				2.710				2.699				
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)		50				50				50				
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$		0.483	0.397	0.437	0.528	1.199	0.406	0.608	0.897	0.407	0.390	0.367	0.485	
繰返し 載荷回数	両軸 振ひ ず み の	DA=1%	2.0	18.7	8.5	2.5	0.2	97.6	25.3	2.0	0.8	5.0	11.6	23.2
		DA=2%	5.0	32.1	16.0	7.5	0.5	138.4	47.6	8.5	2.0	11.7	18.2	43.4
		DA=5%	10.9	71.7	34.4	18.3	1.5	221.0	149.1	28.8	5.0	25.3	30.6	85.2
		DA=10%	22.0	—	86.4	42.9	3.0	—	—	50.9	11.8	63.3	—	—
	過剰間隙水圧比95%		—	53	—	28	—	167	26	14	5	22	40	90

注) 赤枠は試験結果を例示したケース

礫質土に対する液状化強度試験の適用性

- 島田ほか(2016), 松尾(2004), 岡市ほか(2009)等では, 礫質土に対する液状化強度試験が実施されており, 多くの実験事例があることから, 女川原子力発電所の盛土(岩砕を含む)に対しても液状化強度試験により液状化強度特性を定めることは可能である。

礫質土に対する液状化強度試験に用いる供試体径

- 女川原子力発電所の盛土の液状化強度試験は, 供試体径300mmと100mmで実施しているが, 鴨居ほか(2002), 島田ほか(2016)等によれば, 供試体径の違いは液状化強度試験の結果に影響しないとのことが示されており, いずれの試験結果も採用する。

- 盛土の液状化強度試験で得られた結果と解釈は以下の通りである。
- O.P.+14.8m盤で採取したB-1試料の供試体No.1の試験結果を代表として、次頁に示す。
- 全ての液状化強度試験の結果については、補足説明資料3(データ集1.)に示す。

■試験結果

- 有効応力がゼロとなり液体状になることはなかった。(全24ケース)
- 過剰間隙水圧は上昇・蓄積するものの、せん断応力の作用によって有効応力は回復した。(全24ケース)
- 過剰間隙水圧比は、95%を超過しないケースと超過するケースが見られた。
- ひずみは徐々に大きくなるが、急には増大しないため、脆性的な破壊は生じなかった。(全24ケース)

■試験結果の解釈

- 盛土に対する液状化強度試験の結果は、「非液状化」または「繰返し軟化」と分類される。
- 地震時の盛土の挙動は、液状化被害例(p.47)のように支持力を失う事象は発生せず、ひずみが漸増するねばり強い挙動を示す。
- 上記を踏まえ、施設の耐震性評価にあたっては、有効応力解析により過剰間隙水圧の上昇に伴う盛土の剛性低下を考慮した変形量の評価を行う方針とする。

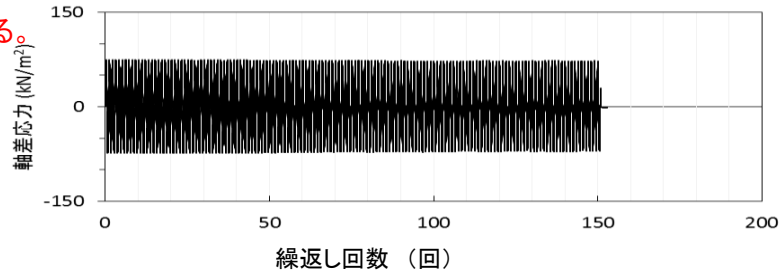
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 盛土の液状化強度試験結果(4/5)

試験条件	
供試体	B-1-2試料(No.1)
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)	120
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$	0.309
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○
有効応力がゼロまで低下する	×
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○
液状化の判断	
繰返し軟化	

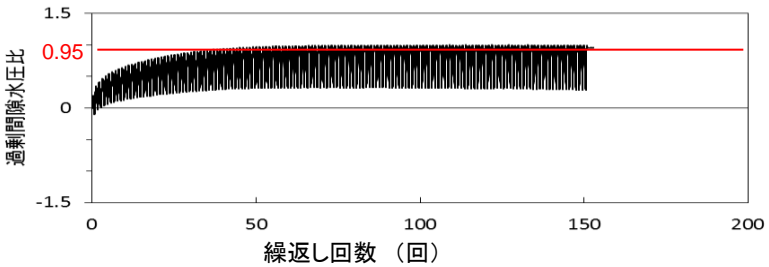
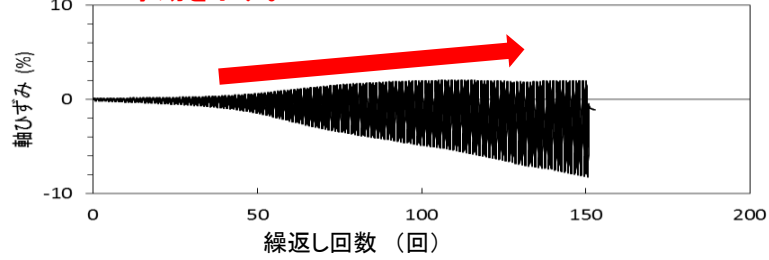
供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。



試験後の供試体



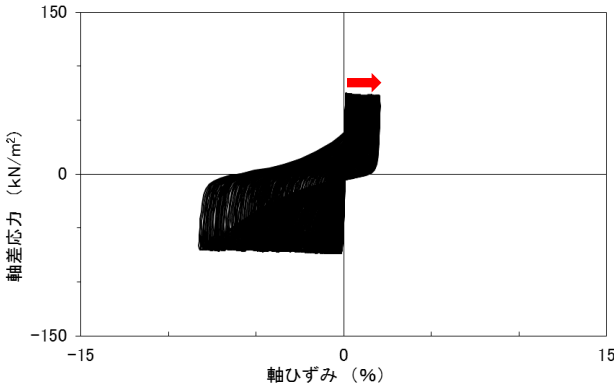
ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。



過剰間隙水圧比は95%を超過するものの、頭打ちとなり、100%にはならない。せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し(さらに負になる。), 有効応力が回復する。

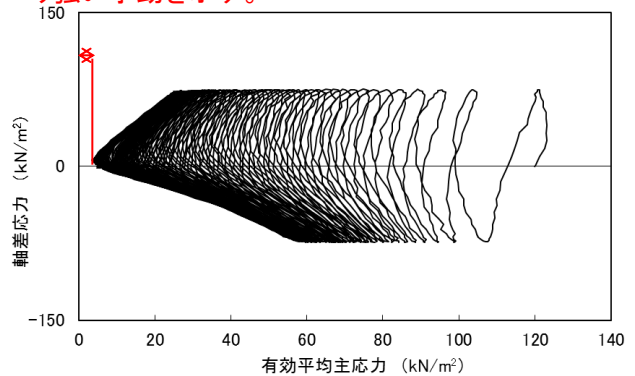
液状化強度試験結果(繰返し回数)

ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。



液状化強度試験結果(軸ひずみ)

繰返し荷重を載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。また、せん断応力(軸差応力)作用時に、有効応力は回復し、ねばり強い挙動を示す。



液状化強度試験結果(有効平均主応力)

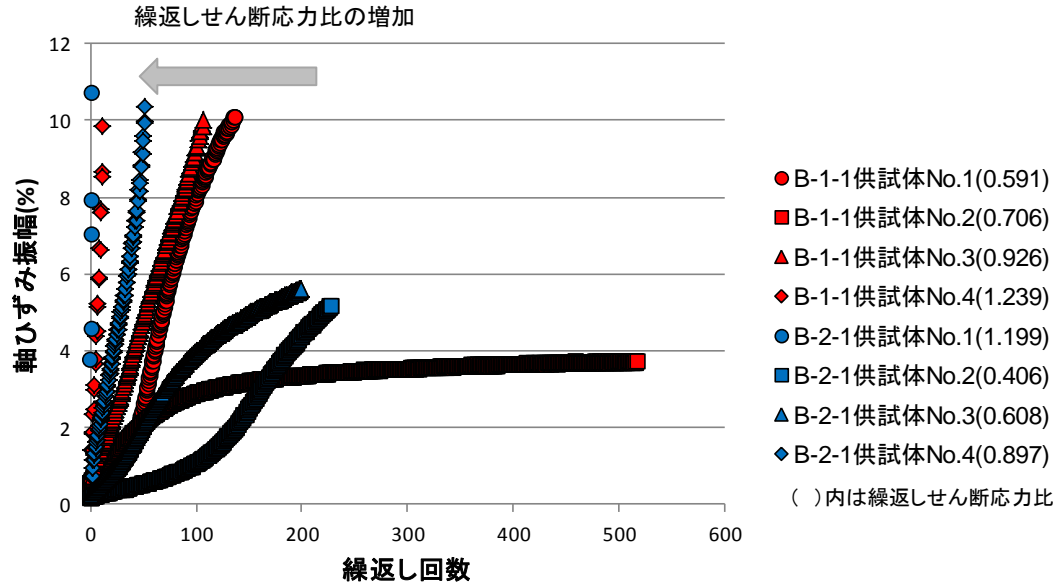
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

盛土の液状化強度試験結果 (5/5)

- 盛土に対する液状化強度試験で見られた、ねばり強い挙動に対する定量評価を行った。
- 繰返しせん断応力比が概ね1.0以下では、過剰間隙水圧が蓄積した状態における1回当たりの軸ひずみ振幅の平均増分はわずかに約0.2%以下であり、ねばり強い挙動を示す。

【盛土の変形特性の整理】

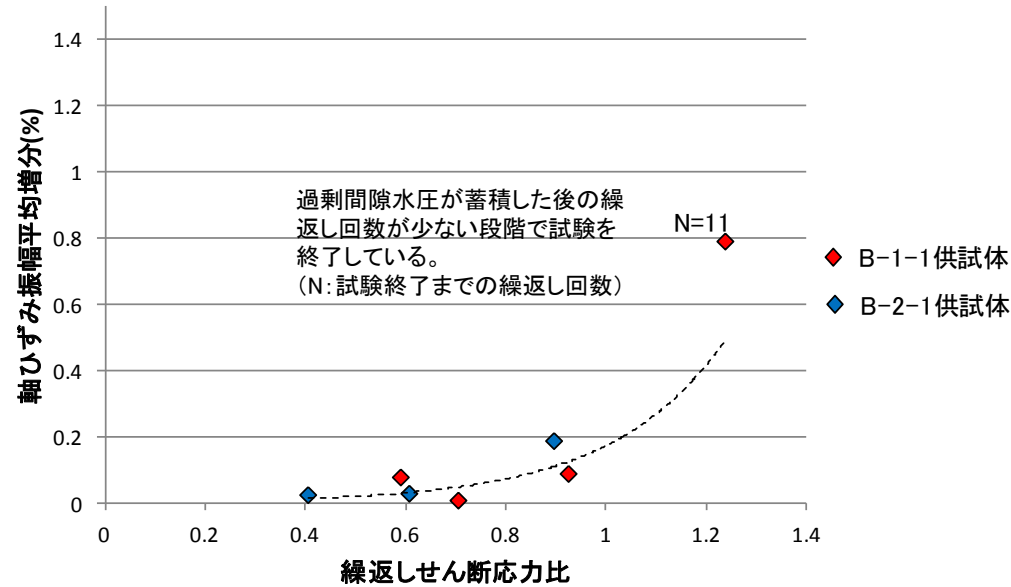
繰返し载荷に対し、繰返しせん断応力比が大きいほど軸ひずみ振幅の傾きが大きく、プロット間隔が大きい傾向を示す。



軸ひずみ—繰返し回数関係※1

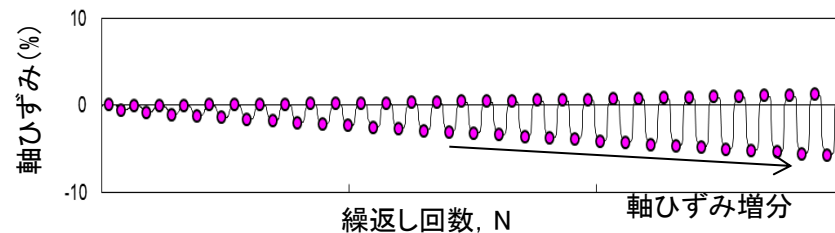
※1: 液状化強度試験において、繰返し载荷に対する軸ひずみ振幅をプロットした図であり、軸ひずみの発生度合いを示す。

繰返し载荷に対し過剰間隙水圧が蓄積した状態におけるひずみ増分の平均値は、概ね同様の傾向を示す。



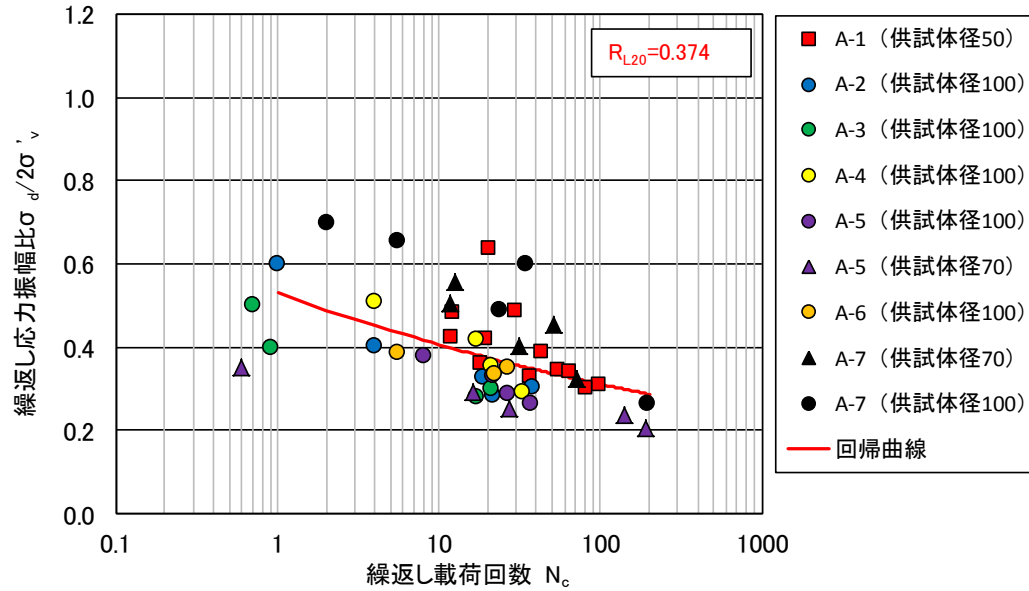
軸ひずみ増分—繰返しせん断応力比※2

※2: 液状化強度試験において、繰返しせん断応力比に対し、軸ひずみの平均増分(左のグラフの傾き)をプロットし、1波あたりのひずみ増分を示す。

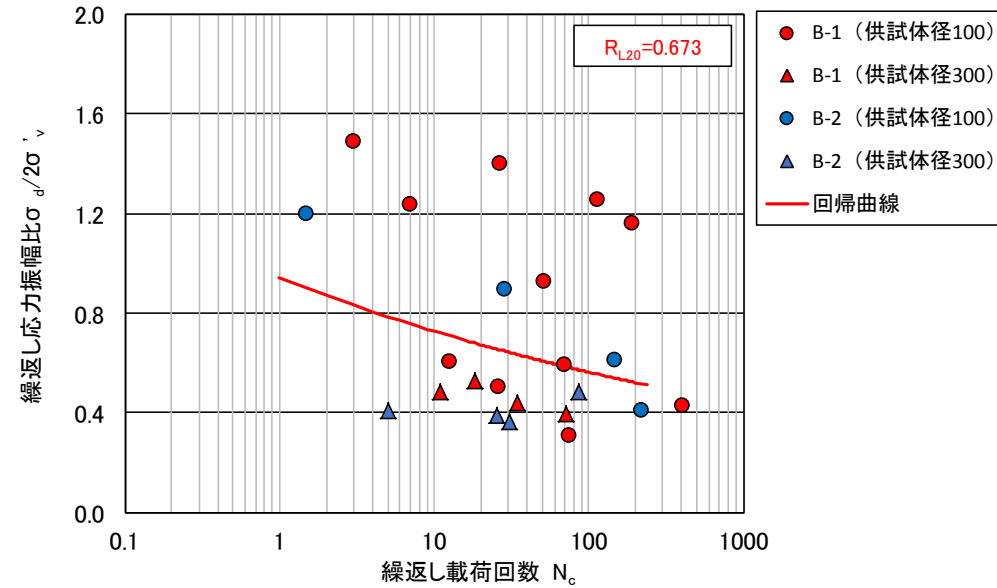


5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定 液状化強度曲線（旧表土・盛土）

- 試験結果(平均値)による液状化強度比 R_{L20} は 旧表土: $R_{L20}=0.374$, 盛土: $R_{L20}=0.673$ である。



(旧表土)



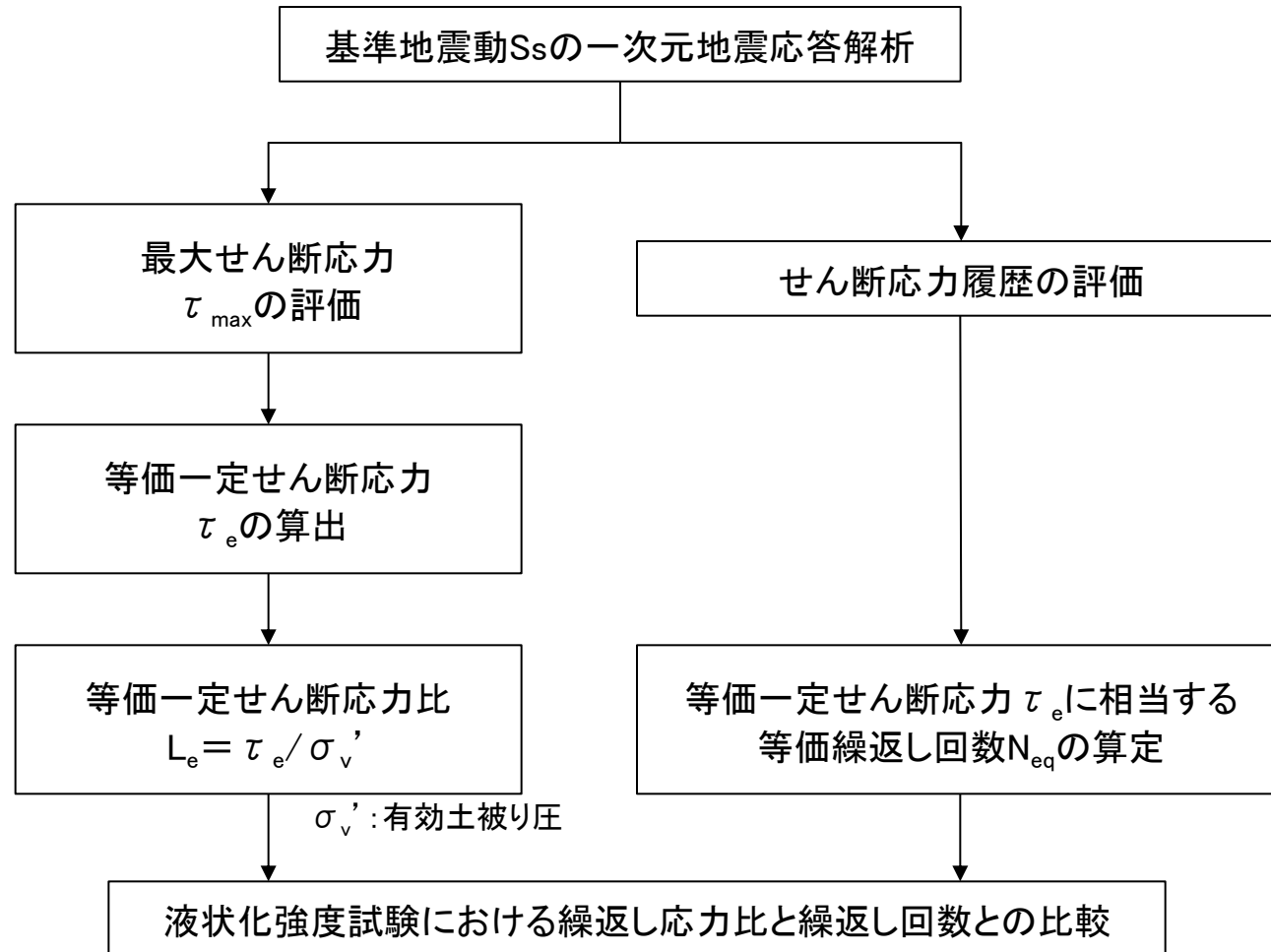
(盛土)

液状化強度試験結果に基づく液状化強度曲線

※ 供試体径300mmの試験結果が小さめなのは、供試体を地盤浅部より採取しているためと考えられる。

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(1/15)

- 液状化強度試験が基準地震動Ss相当の地盤の状態(繰返し応力及び繰返し回数)を模擬していることを確認する。
- 累積損傷度理論(吉見(1991))を適用し、以下のフローに基づいて評価検討を行った。



基準地震動Ssにおける等価一定せん断応力比と等価繰返し回数の評価フロー

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(2/15)

- 金属材料の疲労破壊の分野で提案された累積損傷度理論を応用して、不規則波である基準地震動Ssによって発生する地盤のせん断応力と等価な一定せん断応力及びその繰返し回数を求め、試験結果との比較を実施する。

累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法(吉見(1991) 参考)

- 累積損傷度理論は、金属の疲労破壊の分野で提案されたものである。
- 繰返し荷重 τ_i が N_i 回作用したことによるのと同等の効果を、別の応力レベル τ_e によって得るために必要な繰返し回数(等価繰返し回数) N_e は以下のように定義される。

$$N_e = \frac{N_i}{N_{if}} N_{ef}$$

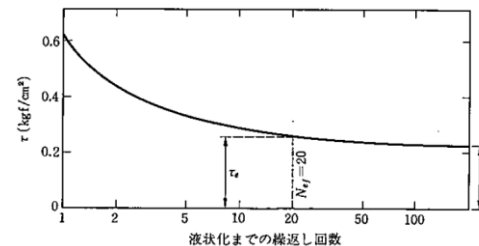
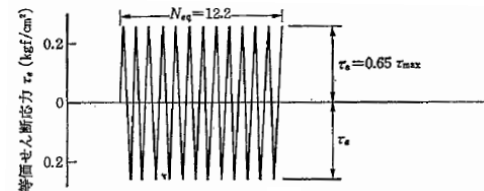
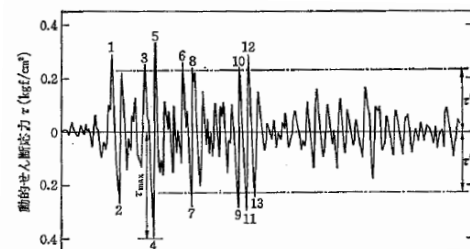
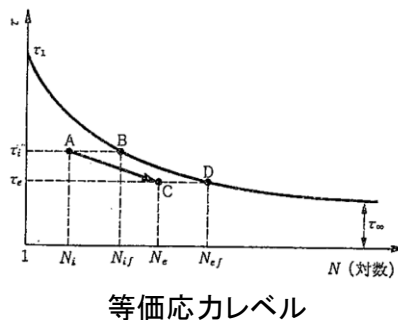
ここに、

N_i : せん断応力 τ_i の繰返し回数

N_{if} : せん断強度 τ_i での繰返し回数

N_e : せん断応力 τ_e の繰返し回数

N_{ef} : τ_e なる等価振幅応力を加えた場合の破壊までの繰返し回数



不規則波から等価規則波形を求める方法

- τ_e は、不規則波中の最大振幅の65%の値とする。

$$\tau_e = 0.65 \times \tau_{max}$$

- 複数の τ_i を有する不規則波全体を τ_e なる単一応力レベルでの等振幅繰返しせん断波で置き換えるための等価繰返し回数 N_{eq} は、次式で求められる。

$$N_{eq} = \sum N_e = N_{ef} \sum \frac{N_i}{N_{if}}$$

- あるレベル未満のせん断応力は、ほとんど破壊に寄与しない。今回の検討では、液状化強度の最大繰返し回数200回に相当するせん断応力を閾値として設定し、そのせん断応力以下は対象外とした。

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(3/15)

【比較位置】

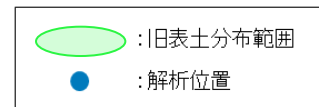
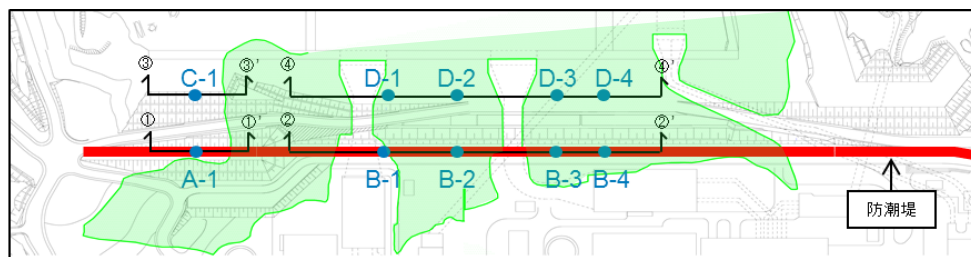
- 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認として一次元地震応答解析を実施する箇所は、地下水位が比較的高く液状化検討対象層が分布する敷地海側の防潮堤近傍から選定する。選定に当っては、拘束圧が小さいO.P.+2.5m盤と拘束圧が大きいO.P.+14m盤から盛土厚、旧表土厚の大小を考慮して以下の10点を選定した。

【A-1, B-1~B-4について】

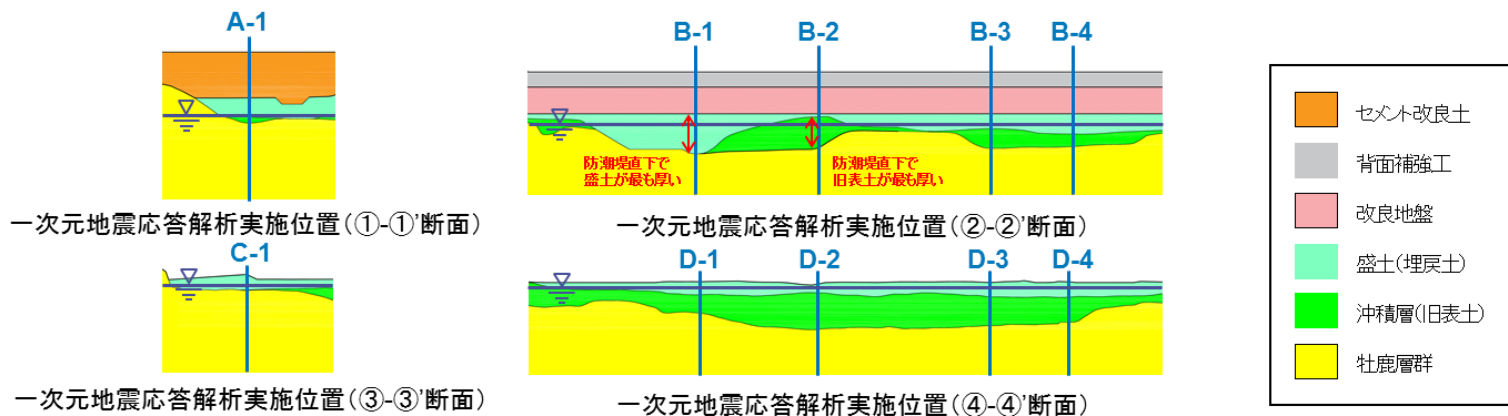
- 拘束圧が大きいO.P.+14m盤で地下水位が高く液状化検討対象施設である防潮堤直下。
- A-1は盛土堤防直下で最も拘束圧が大きく盛土・旧表土が分布。
- B-2は最も旧表土が厚く分布。B-3, 4は平均的な盛土・旧表土の厚さ。B-1は盛土のみ分布。

【C-1, D-1~D-4について】

- 地下水位が高く拘束圧が小さいO.P.+2.5m盤。
- C-1は盛土堤防近傍で盛土のみ分布。
- D-2は旧表土が厚く分布。D-1, 3, 4は平均的な盛土・旧表土の厚さ。



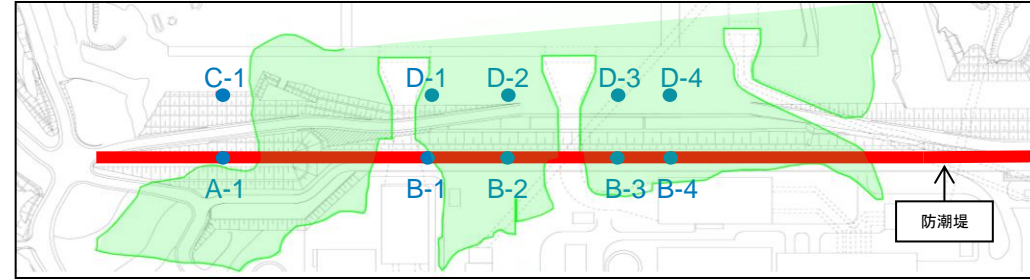
一次元地震応答解析実施平面位置



基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(4/15)

【解析結果:旧表土】

- 液状化検討対象施設である防潮堤直下及び地下水位が高く液状化対象層が厚く分布するO.P.+2.5m盤で一次元地震応答解析を実施し、各位置における等価一定せん断応力比と等価繰返し回数を算出した。
- 旧表土における算出結果を以下の表に示す。



一次元地震応答解析実施位置

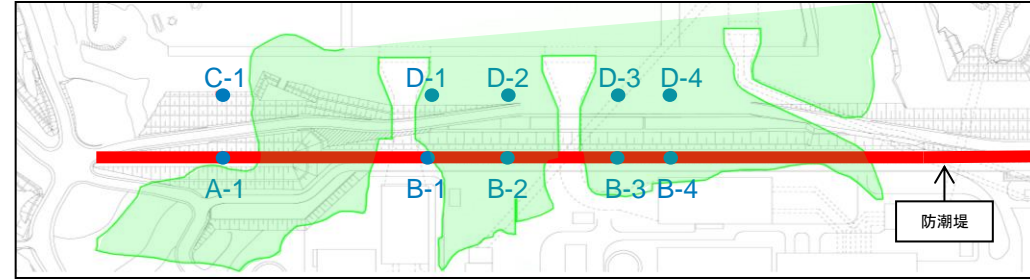
位置	防潮堤直下										O.P. +2.5m盤									
	A-1		B-1		B-2		B-3		B-4		C-1		D-1		D-2		D-3		D-4	
有効土被り圧 (kN/m ²)	579.7		—		531.8		540.2		555.3		—		107.1		134.9		132.4		128.1	
基準地震動S _s	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}
S _s -D1	0.17	39.17	対象層なし		0.18	58.78	0.18	49.27	0.18	42.98	対象層なし		0.49	76.32	0.42	44.56	0.42	49.50	0.43	63.32
S _s -D2	0.16	48.42			0.17	53.85	0.17	45.35	0.17	37.66			0.48	49.94	0.38	68.82	0.40	43.78	0.42	41.29
S _s -D3	0.15	43.98			0.17	56.01	0.16	43.42	0.16	40.66			0.46	51.81	0.36	107.11	0.36	93.21	0.37	72.98
S _s -F1	0.16	99.43			0.17	73.51	0.17	72.57	0.17	64.20			0.48	75.00	0.39	80.74	0.40	92.34	0.42	77.11
S _s -F2	0.14	67.73			0.18	30.82	0.17	33.30	0.17	37.71			0.48	25.22	0.40	29.05	0.41	28.24	0.43	26.19
S _s -F3	0.12	0.10			0.14	20.50	0.12	200 ^{*1}	0.11	200 ^{*1}			0.40	50.08	0.30	46.62	0.30	44.78	0.31	46.20
S _s -N1	0.20	24.53			0.20	29.99	0.20	28.51	0.20	28.61			0.52	20.95	0.45	22.11	0.46	21.40	0.46	20.99

※1 試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数200回のせん断応力比(R₂₀₀)に対して、解析から得られる等価一定せん断応力比(L_e)が小さい場合は、その等価一定せん断応力比に相当する等価繰返し回数(N_{eq})を200回とした。

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(5/15)

【解析結果:盛土】

- 液状化検討対象施設である防潮堤直下及び地下水位が高く液状化対象層が厚く分布するO.P.+2.5m盤で一次元地震応答解析を実施し、各位置における等価一定せん断応力比と等価繰返し回数を算出した。
- 盛土における算出結果を以下の表に示す。



一次元地震応答解析実施位置

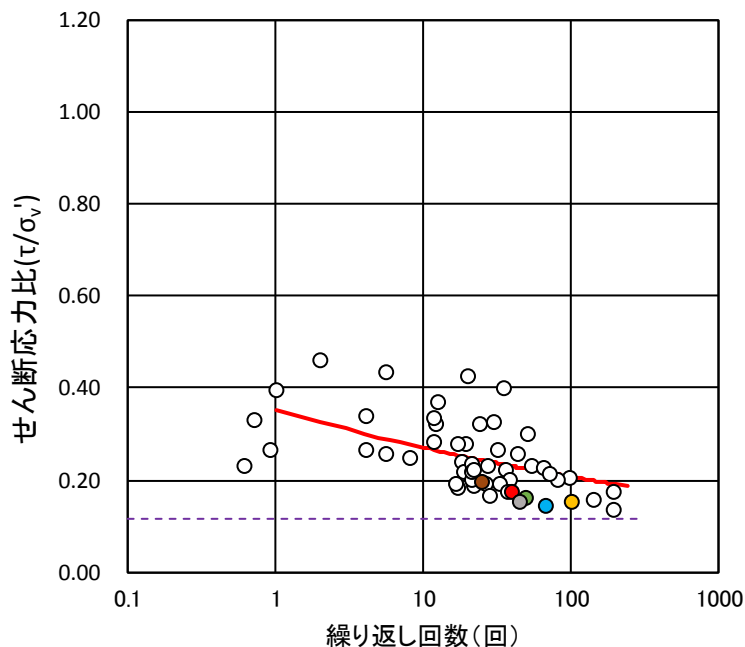
位置	防潮堤直下										O.P. +2.5m盤									
	A-1		B-1		B-2		B-3		B-4		C-1		D-1		D-2		D-3		D-4	
有効土被り圧 (kN/m ²)	564.6		551.8		—		496.7		511.3		36.1		39.8		40.7		50.3		50.6	
基準地震動Ss	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}	τ_e/σ_v	N _{eq}
Ss-D1	0.18	200 ^{*1}	0.17	200 ^{*1}	対象層なし	0.17	200 ^{*1}	0.18	200 ^{*1}	0.86	50.33	0.56	94.30	0.46	72.83	0.50	67.62	0.53	64.27	
Ss-D2	0.16	200 ^{*1}	0.16	200 ^{*1}		0.17	200 ^{*1}	0.17	200 ^{*1}	0.88	55.10	0.64	59.68	0.47	61.09	0.47	67.68	0.54	42.34	
Ss-D3	0.16	200 ^{*1}	0.17	200 ^{*1}		0.16	200 ^{*1}	0.15	200 ^{*1}	0.64	105.36	0.48	120.87	0.45	71.79	0.45	83.29	0.46	86.31	
Ss-F1	0.15	200 ^{*1}	0.16	200 ^{*1}		0.17	200 ^{*1}	0.17	200 ^{*1}	0.61	87.30	0.49	100.58	0.45	59.08	0.45	84.31	0.45	94.97	
Ss-F2	0.14	200 ^{*1}	0.14	200 ^{*1}		0.18	200 ^{*1}	0.18	200 ^{*1}	0.70	74.97	0.59	39.65	0.64	22.42	0.67	22.22	0.66	22.41	
Ss-F3	0.11	200 ^{*1}	0.09	200 ^{*1}		0.12	200 ^{*1}	0.11	200 ^{*1}	0.81	37.15	0.57	38.18	0.58	23.00	0.53	21.96	0.54	22.07	
Ss-N1	0.21	200 ^{*1}	0.23	20.50		0.21	200 ^{*1}	0.22	200 ^{*1}	0.92	22.43	0.56	21.42	0.63	20.73	0.62	20.80	0.60	20.96	

※1 試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数200回のせん断応力比(R₂₀₀)に対して、解析から得られる等価一定せん断応力比(L_e)が小さい場合は、その等価一定せん断応力比に相当する等価繰返し回数(N_{eq})を200回とした。

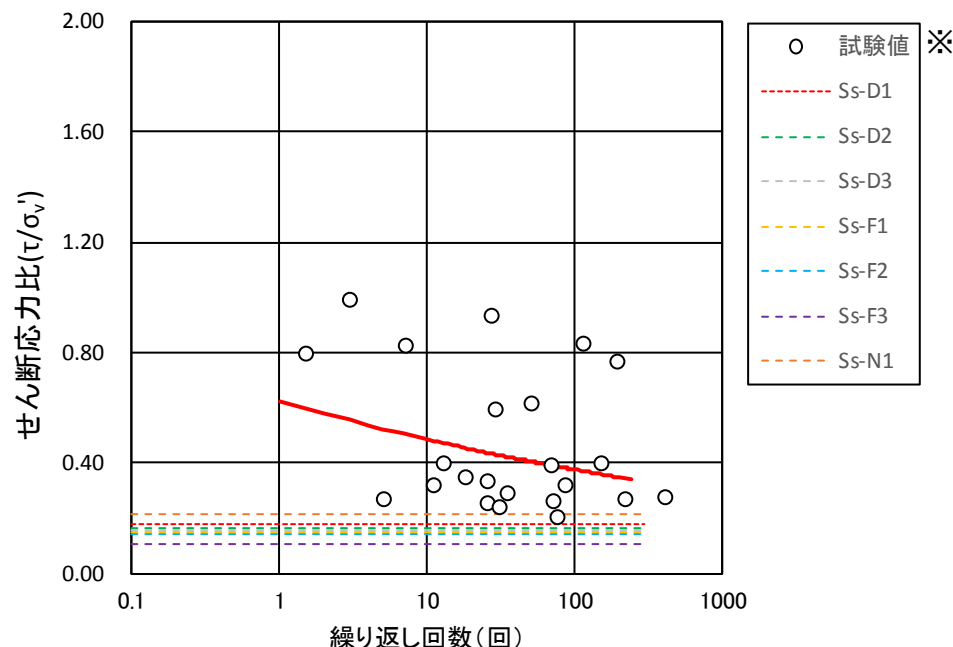
基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(6/15)

【解析実施位置:A-1】

- 旧表土・盛土における防潮堤直下(A-1)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動S_s相当の試験が実施できていることを確認した。
- 旧表土での基準地震動S_s-F3及び盛土での全基準地震動S_sで地盤に発生するせん断応力比は、液状化強度試験の繰返し回数の上限値である200回のせん断応力比以下となっており、非液状化と判断され、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化強度試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施できている。



(旧表土)



(盛土)

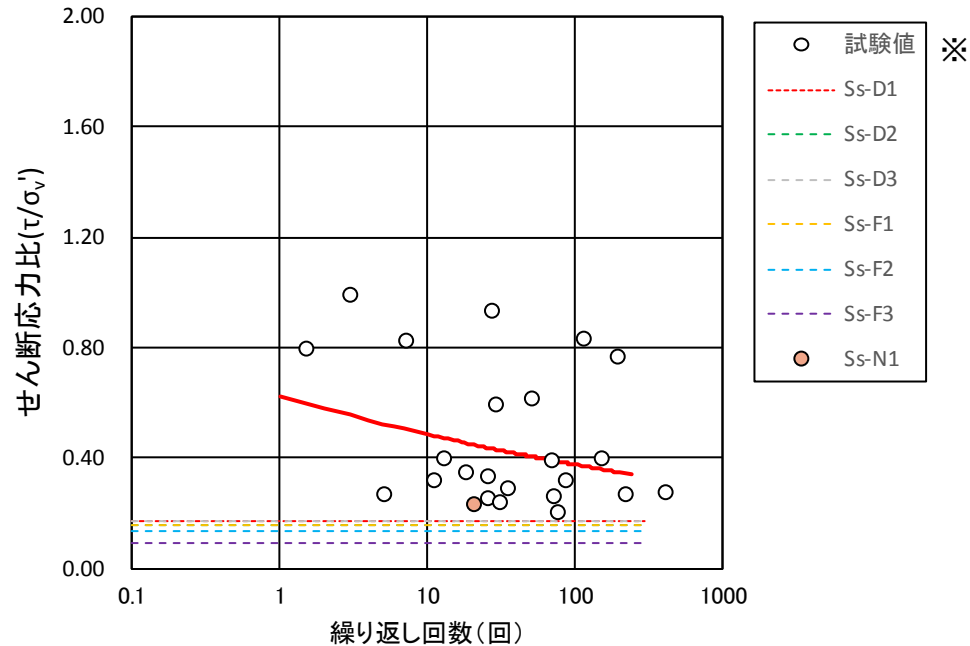
累積損傷度理論に基づく評価結果(A-1)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma'_v = R \times 2/3 \times \sigma'_v$, R:液状化強度比, σ'_v :有効土被り圧

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(7/15)

【解析実施位置:B-1】

- 盛土における防潮堤直下(B-1)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 盛土での全基準地震動Ssで地盤に発生するせん断応力比は、液状化強度試験の繰返し回数の上限值である200回のせん断応力比以下となっており、非液状化と判断され、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化強度試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施できている。



(盛土)

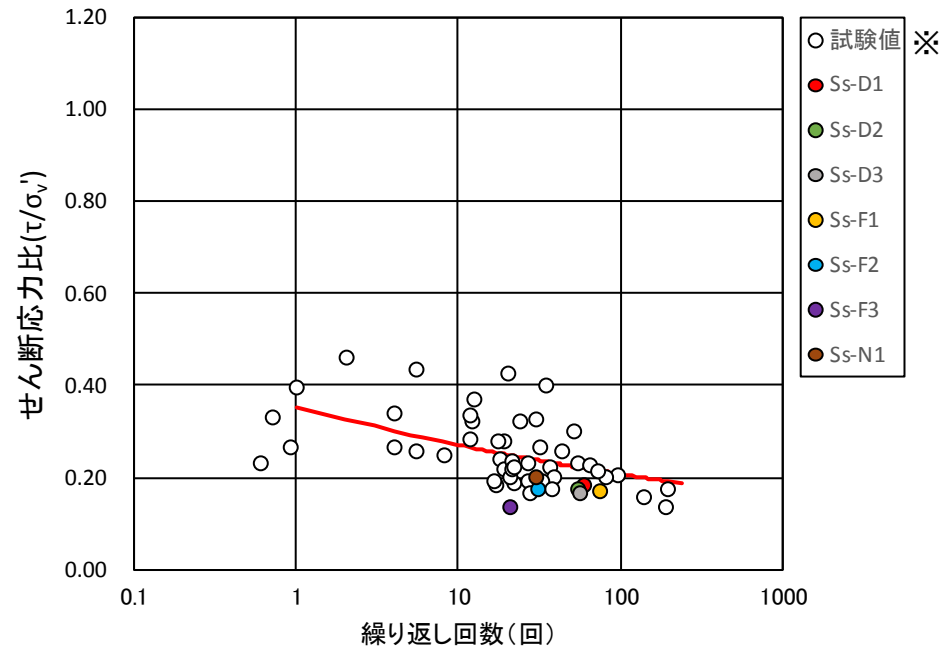
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-1)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(8/15)

【解析実施位置:B-2】

- 旧表土における防潮堤直下(B-2)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動S_s相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)

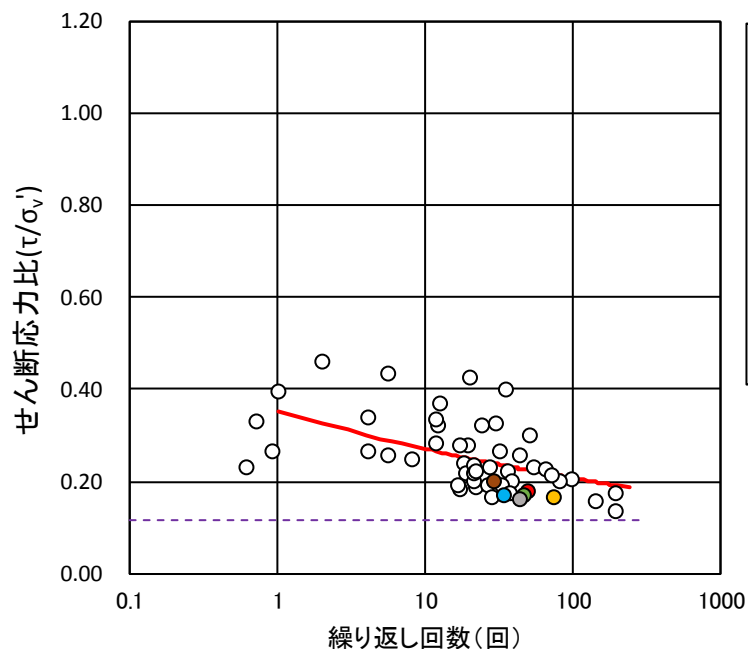
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-2)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R :液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

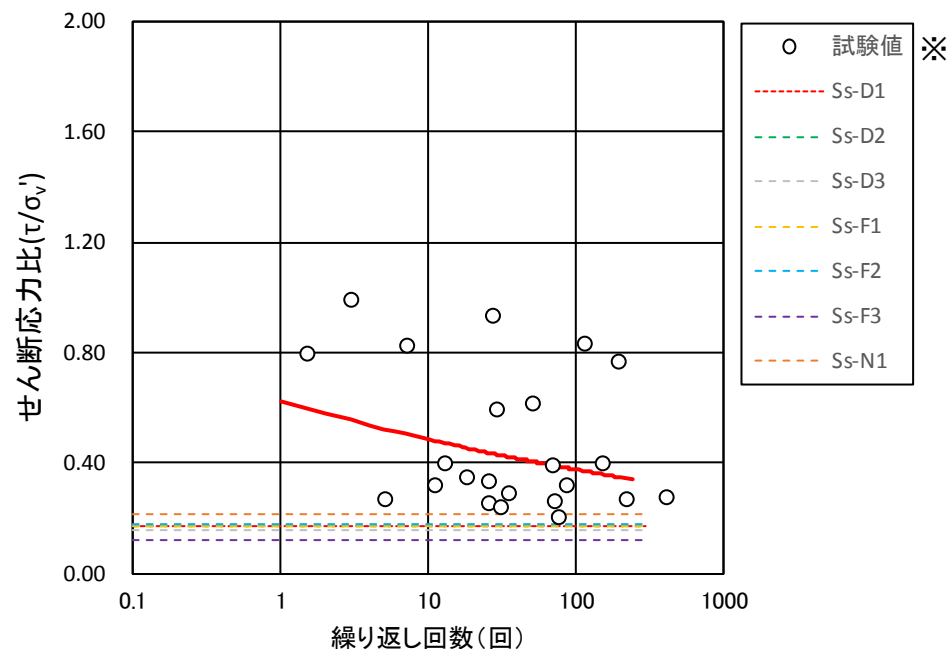
基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(9/15)

【解析実施位置:B-3】

- 旧表土・盛土における防潮堤直下(B-3)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動S_s相当の試験が実施できていることを確認した。
- 旧表土での基準地震動S_s-F3及び盛土での全基準地震動S_sで地盤に発生するせん断応力比は、液状化強度試験の繰返し回数の上限值である200回のせん断応力比以下となっており、非液状化と判断され、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化強度試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施できている。



(旧表土)



(盛土)

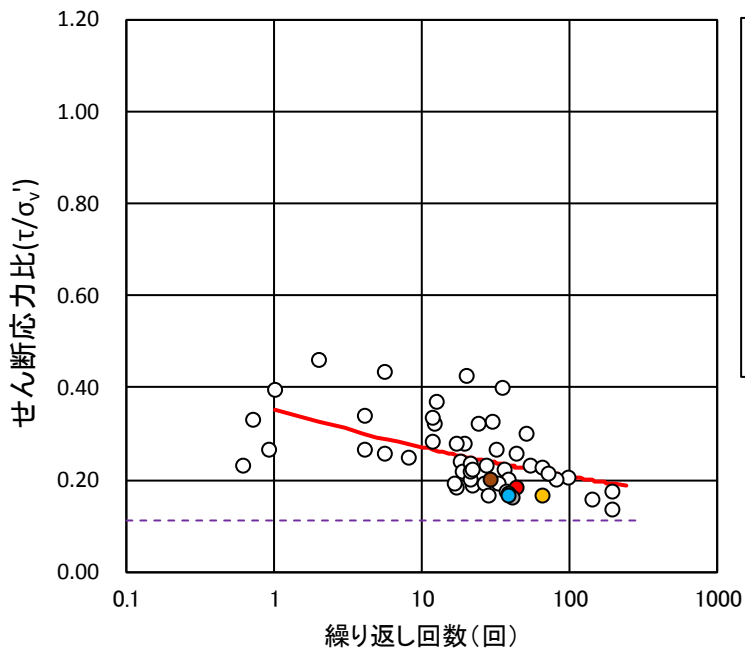
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-3)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

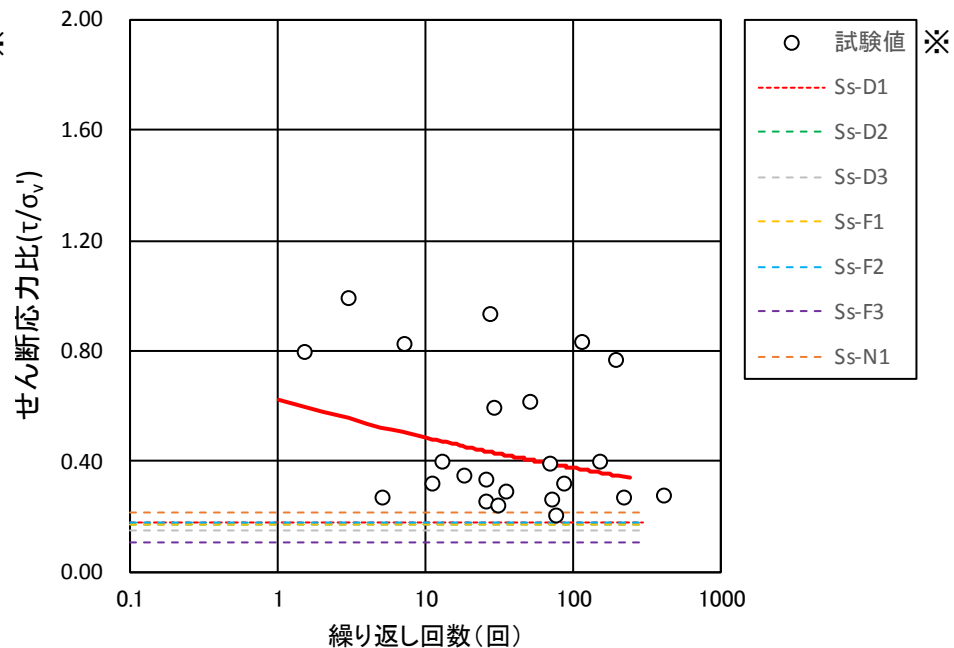
基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(10/15)

【解析実施位置:B-4】

- 旧表土・盛土における防潮堤直下(B-4)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動S_s相当の試験が実施できていることを確認した。
- 旧表土での基準地震動S_s-F3及び盛土での全基準地震動S_sで地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線の繰返し回数200回のせん断応力比以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化強度試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施できている。



(旧表土)



(盛土)

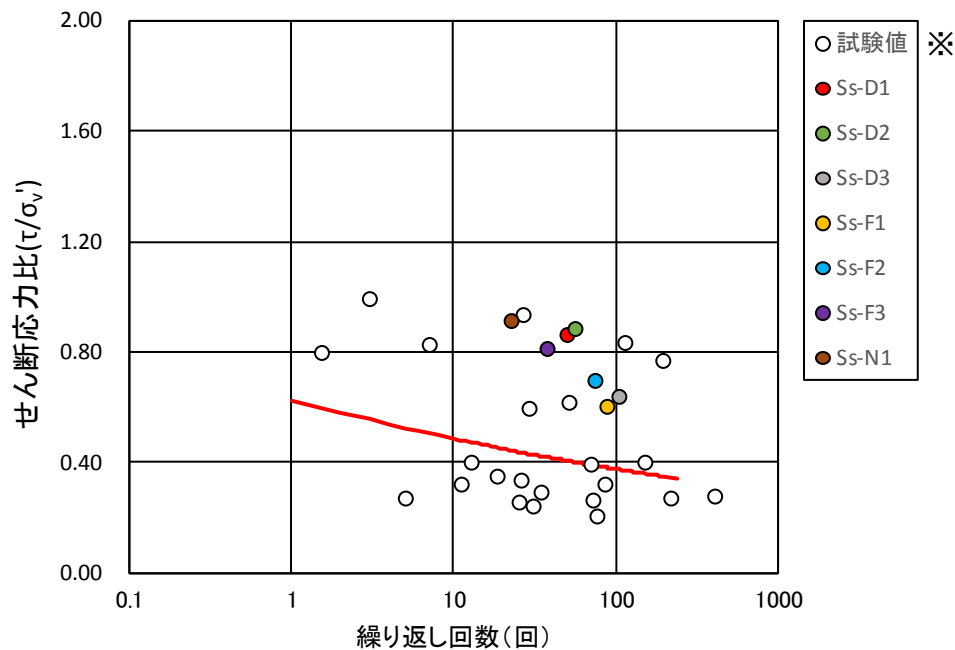
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-4)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(11/15)

【解析実施位置:C-1】

- 盛土におけるO.P.+2.5m盤(C-1)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(盛土)

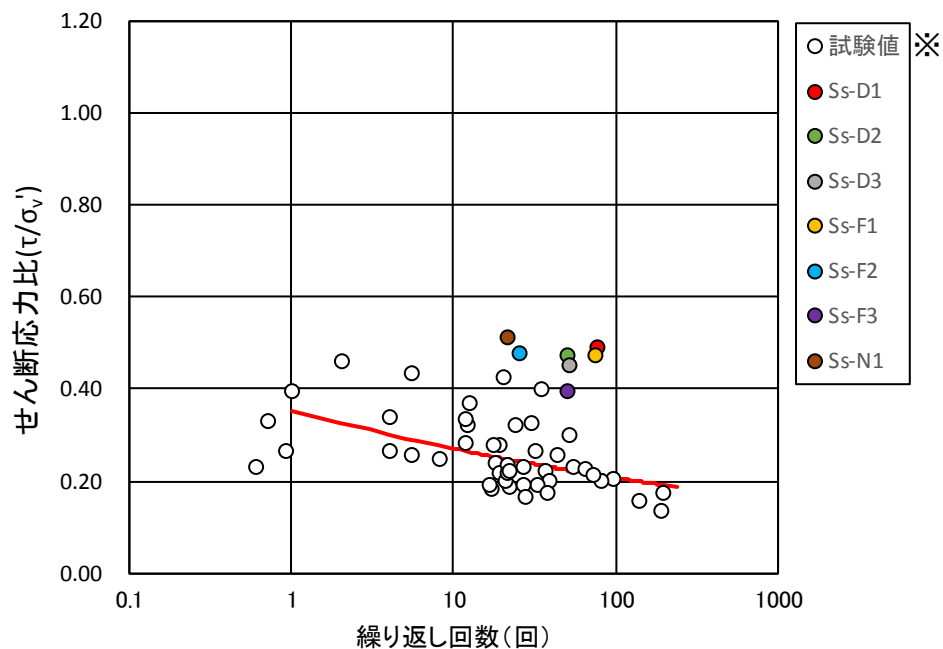
累積損傷度理論に基づく評価結果(C-1)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

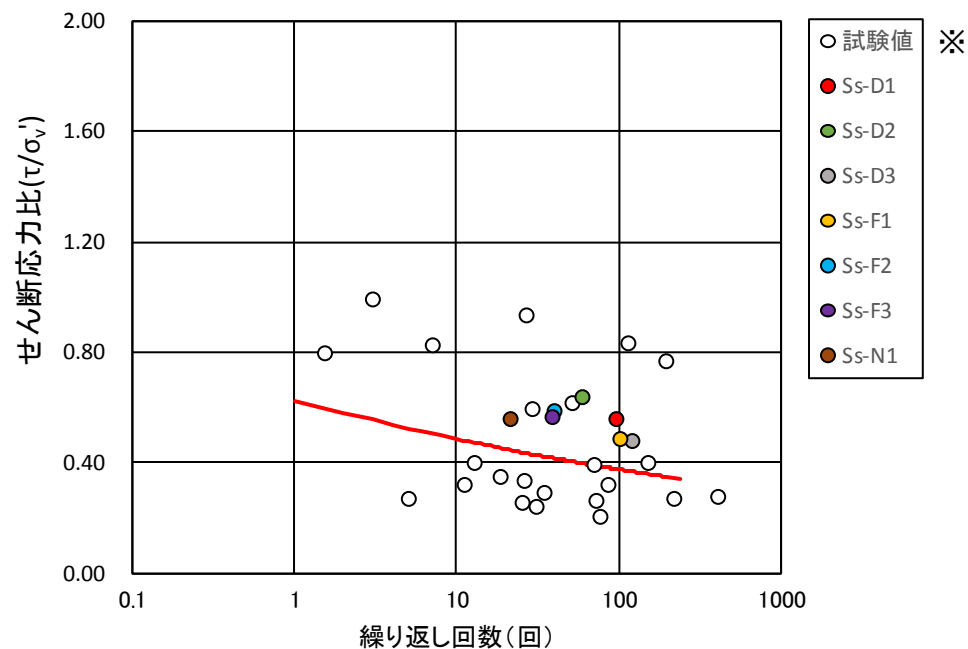
基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(12/15)

【解析実施位置:D-1】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+2.5m盤(D-1)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)



(盛土)

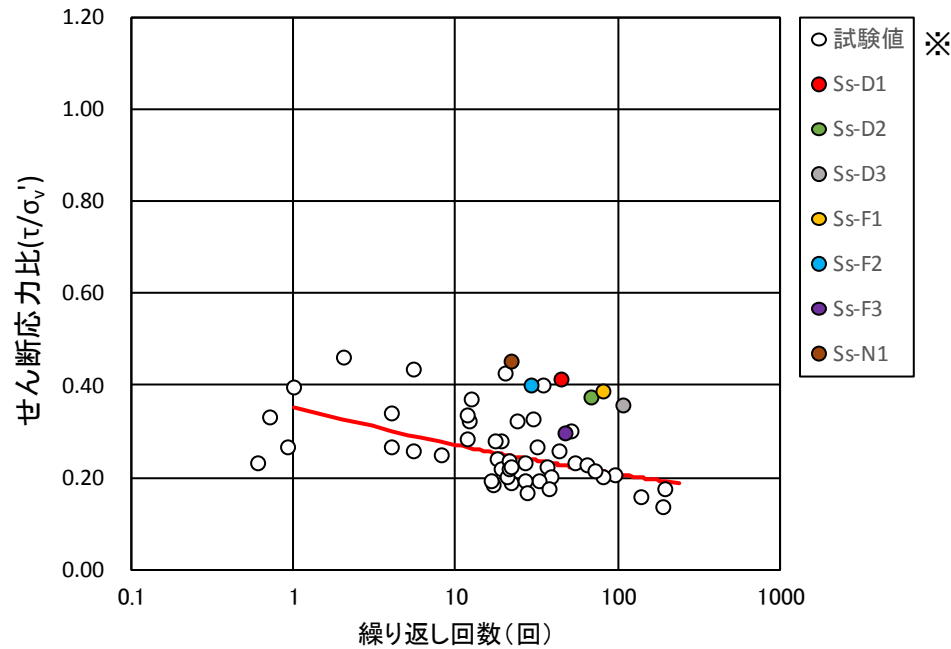
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-1)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0)/3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

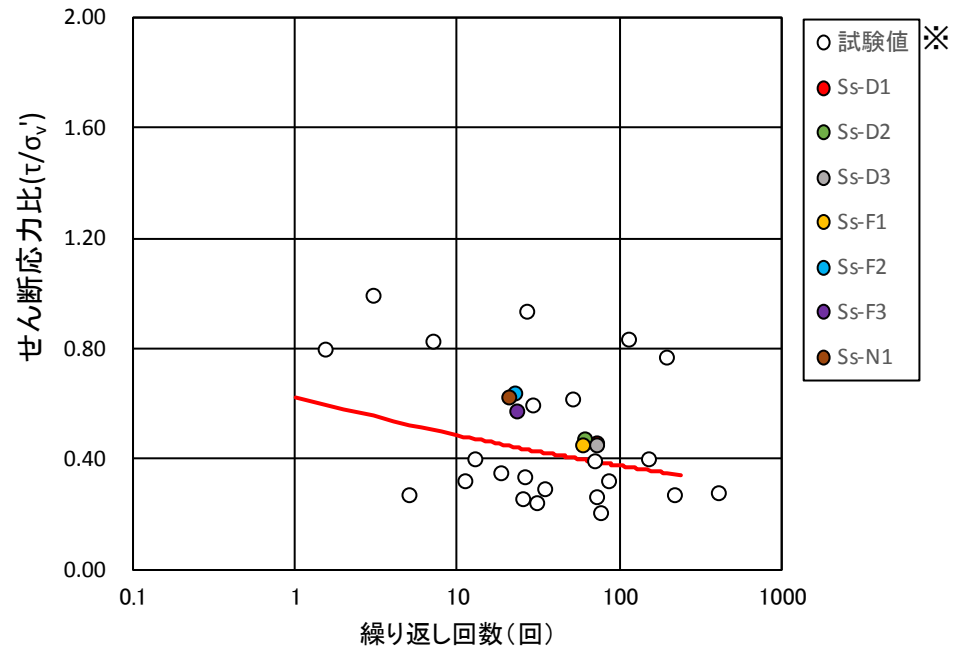
基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(13/15)

【解析実施位置:D-2】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+2.5m盤(D-2)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)



(盛土)

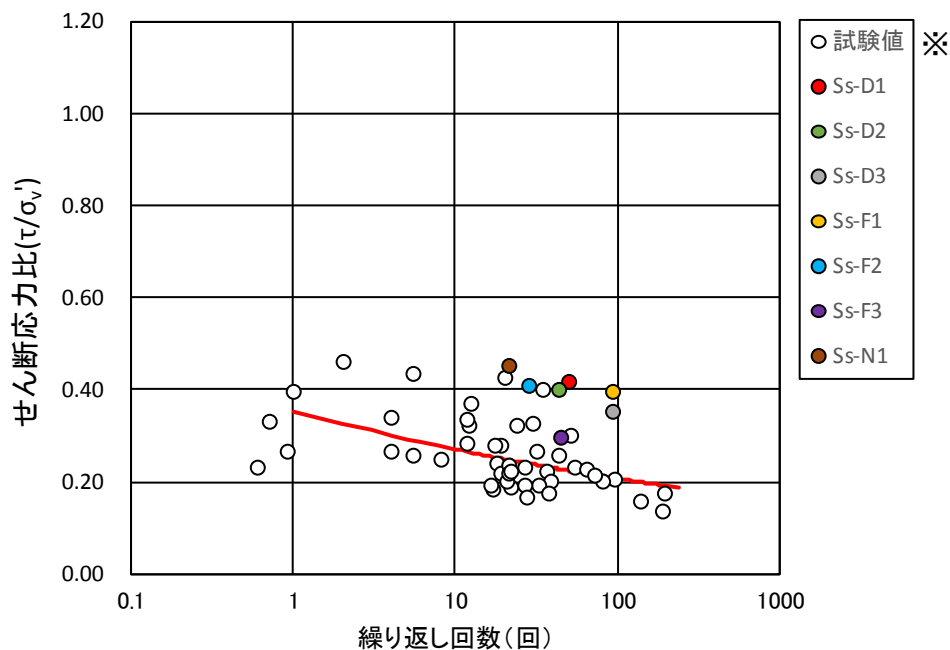
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-2)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0) / 3 \times \sigma_v' = R \times 2 / 3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

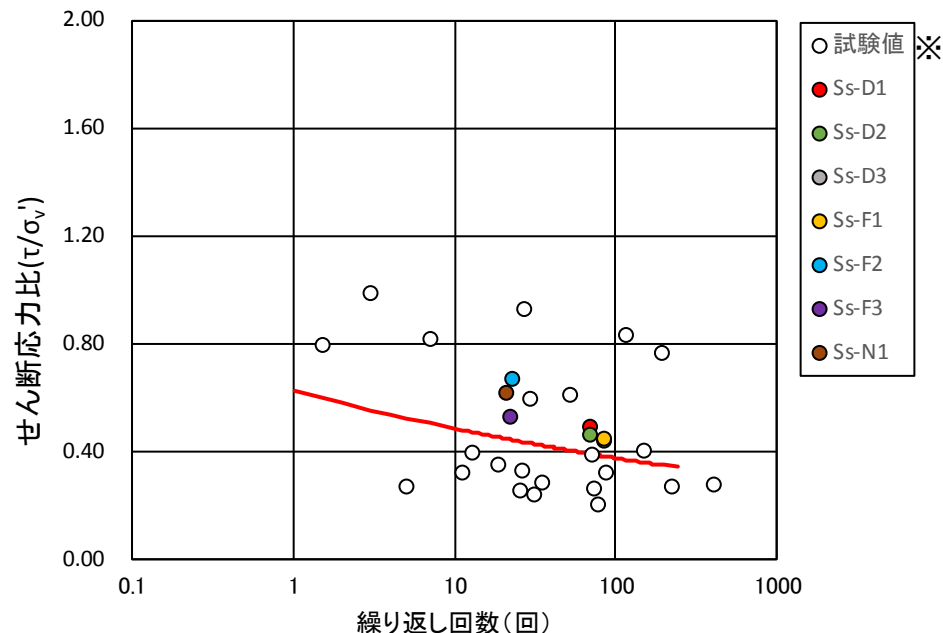
基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(14/15)

【解析実施位置:D-3】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+2.5m盤(D-3)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)



(盛土)

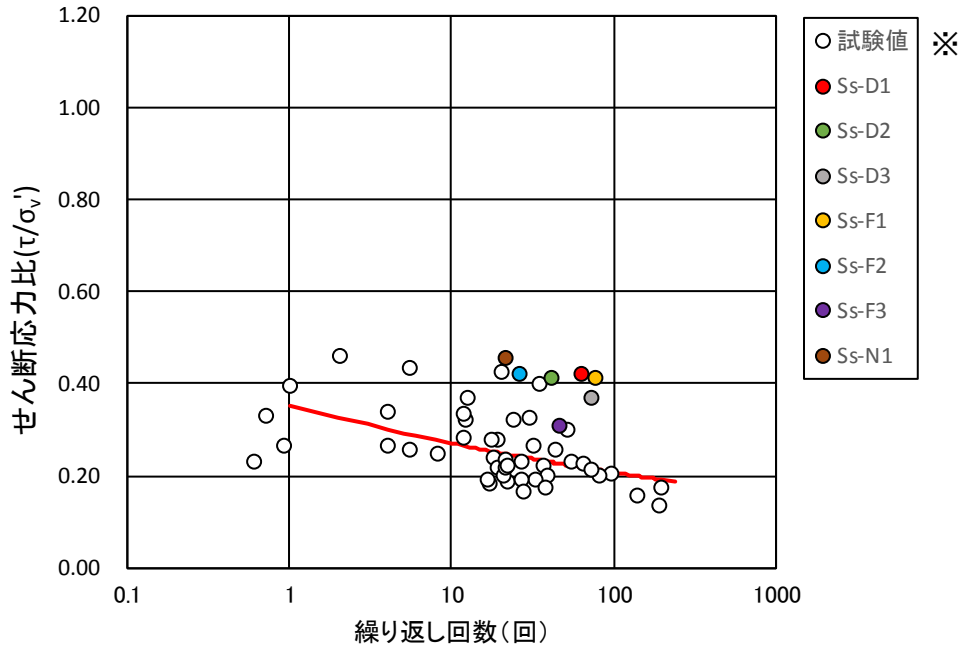
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-3)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0) / 3 \times \sigma_v' = R \times 2/3 \times \sigma_v'$, R:液状化強度比, σ_v' :有効土被り圧

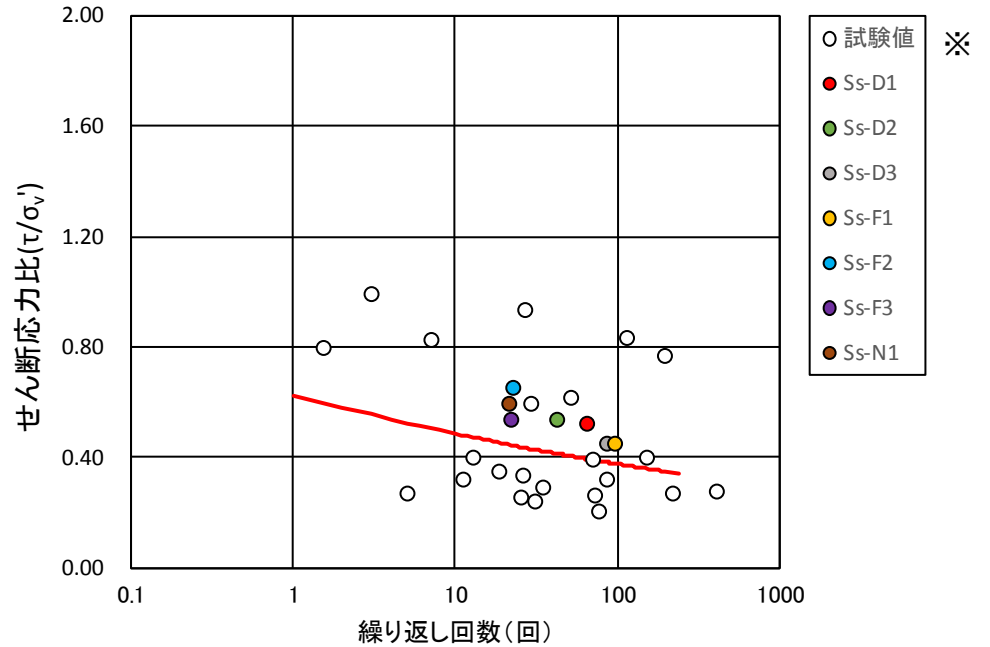
基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(15/15)

【解析実施位置:D-4】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+2.5m盤(D-4)の累積損傷度理論に基づく評価結果を示す。
- 解析結果によるせん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)



(盛土)

累積損傷度理論に基づく評価結果(D-4)

※試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 :一般値0.5)により、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正する。 $\tau = R \times (1+2K_0) / 3 \times \sigma'_v = R \times 2/3 \times \sigma'_v$, R:液状化強度比, σ'_v :有効土被り圧

液状化強度特性の設定(1/11)

液状化強度特性の妥当性確認の考え方

- 液状化強度特性の妥当性を確認するため、2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地盤の変位(実測値)と、2011年東北地方太平洋沖地震で観測された地震動を入力した再現解析結果を比較する。
- 再現解析は2011年東北地方太平洋沖地震による残留変位が確認できる箇所を対象に、試験結果をもとに設定した液状化強度特性を用いた有効応力解析(FLIP : ver7.3.0_2 以下FLIPという)により実施する。
- 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地盤の変位(実測値)を再現解析の値が上回る場合、設定した液状化強度特性が保守的であると評価できる。

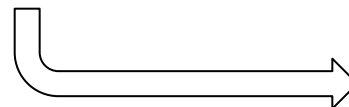
比較対象とする2011年東北地方太平洋沖地震の地盤の変位

【前提条件】

有効応力の減少に伴う剛性低下が生じていた地盤を対象とする。



試験結果をもとに設定した液状化強度特性を用いた有効応力解析による再現解析の変位



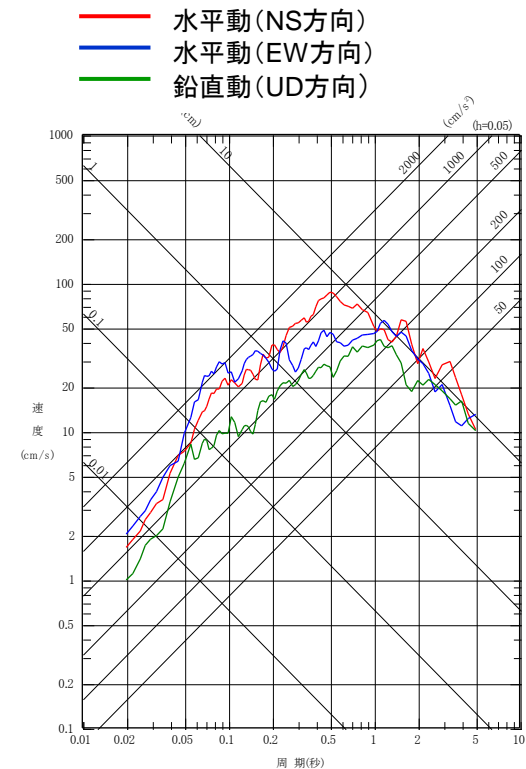
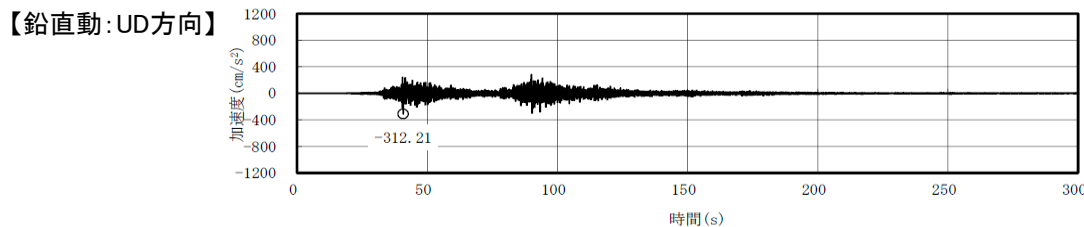
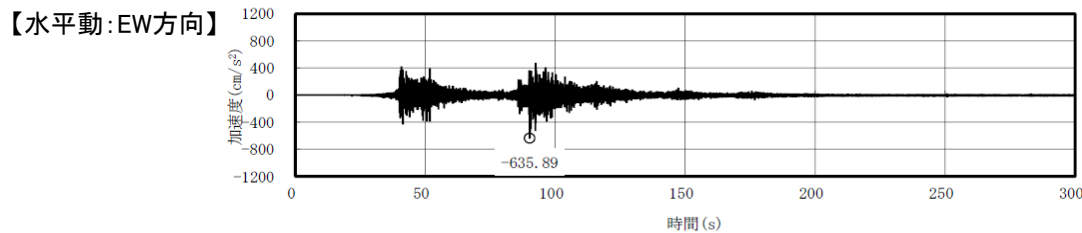
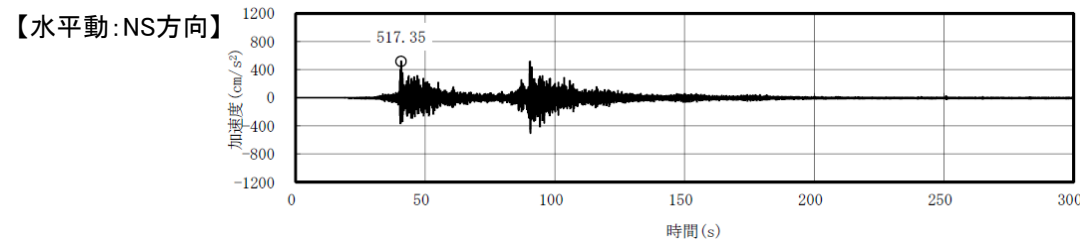
液状化強度特性が妥当

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

液状化強度特性の設定(2/11)

解析に用いる地震動(2011年東北地方太平洋沖地震)

- 2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析に用いる地震動は、女川原子力発電所で観測された敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の地震波から表層の影響を除去したはざとり波を用いることとする。地震動の時刻歴波形及び応答スペクトルを以下に示す。
- 再現解析に用いる地震動の最大加速度は水平動(NS方向)，水平動(EW方向)，鉛直動(UD方向)それぞれ517.35gal, 635.89gal, 312.21galである。
- なお、再現解析を行う解析断面はEW断面であることから、EW方向の水平動を用いる。



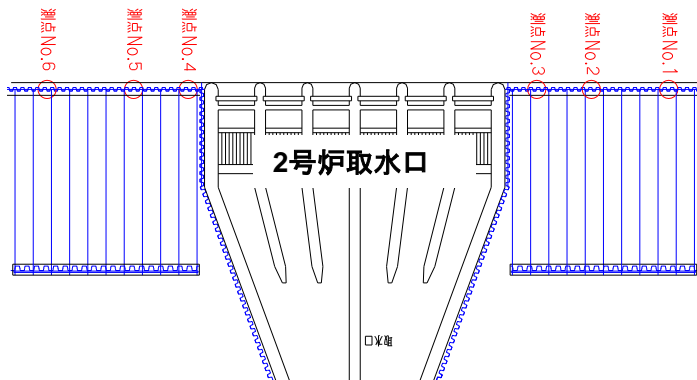
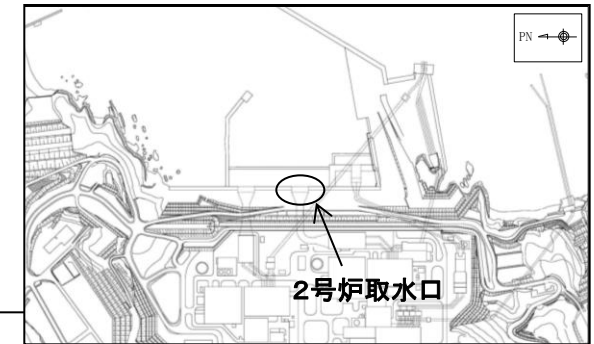
2011年東北地方太平洋沖地震において女川原子力発電所で観測された地震動の時刻歴波形

応答スペクトル図

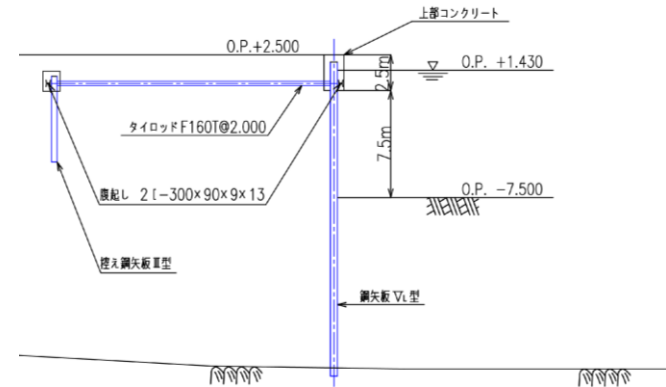
液状化強度特性の設定(3/11)

2011年東北地方太平洋沖地震による地盤変位の再現対象

- 2011年東北地方太平洋沖地震後の施設の点検(変位量測定を実施)により、2号炉取水口と隣接する敷地護岸(矢板式護岸)において水平方向(東側・海側へ)の残留変位が確認されたことから、この敷地護岸(矢板式護岸)の変位を対象とする。
- 再現対象とする敷地護岸(矢板式護岸)の位置及び構造の概要を以下に示す。



敷地護岸(矢板式護岸)変位量測定箇所位置図(平面図)



※2011年東北地方太平洋沖地震による1mの沈降を考慮している。

敷地護岸変位量測定箇所位置図(断面図)

液状化強度特性の設定(4/11)

2011年東北地方太平洋沖地震による地盤変位の再現対象における液状化発生有無の確認

- 再現対象である2号炉取水口と隣接する敷地護岸(矢板式護岸)は、O.P.+2.5m盤に位置し、2011年東北地方太平洋沖地震の後に発生した津波により浸水を受けた場所(女川原子力発電所で観測された津波高さはO.P.約+13m)であることから、代表的な液状化の痕跡である噴砂や地中構造物の浮き上がりは確認されていない。
- このため、敷地護岸(矢板式護岸)付近における2011年東北地方太平洋沖地震による液状化の有無については、一次元全応力解析により、液状化に対する抵抗率(F_L)及び土質定数の低減係数(D_E)を確認することにより判断する。
- なお、液状化に対する抵抗率(F_L)の判定は、動的せん断強度比(R)と一次元全応力解析から得られる地震時せん断応力(L)の比により算出する。
- 一次元全応力解析の実施及び液状化に対する抵抗率(F_L)と土質定数の低減係数(D_E)の関係(道路橋示方書より抜粋)を以下に示す。

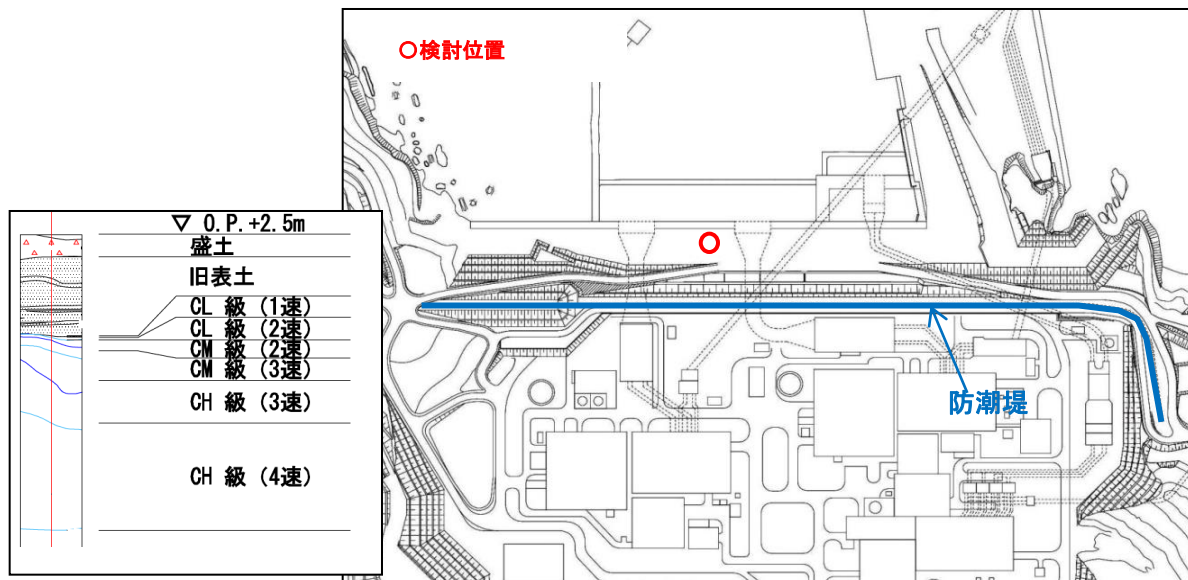


表-8.2.1 土質定数の低減係数 D_E

F_L の範囲	現地盤面からの深度 x (m)	動的せん断強度比 R			
		$R \leq 0.3$		$0.3 < R$	
		レベル1地震動に対する照査	レベル2地震動に対する照査	レベル1地震動に対する照査	レベル2地震動に対する照査
$F_L \leq 1/3$	$0 \leq x \leq 10$	1/6	0	1/3	1/6
	$10 < x \leq 20$	2/3	1/3	2/3	1/3
$1/3 < F_L \leq 2/3$	$0 \leq x \leq 10$	2/3	1/3	1	2/3
	$10 < x \leq 20$	1	2/3	1	2/3
$2/3 < F_L \leq 1$	$0 \leq x \leq 10$	1	2/3	1	1
	$10 < x \leq 20$	1	1	1	1

道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編) ((社)日本道路協会, 平成14年3月 p125より抜粋)

液状化強度特性の設定(5/11)

液状化に対する抵抗率(F_L)の判定結果及び土質定数の低減係数(D_E)の関係

- 敷地護岸(矢板式護岸)付近での液状化に対する抵抗率(F_L)の確認を行った結果及び土質定数の低減係数(D_E)の判定結果のイメージを以下に示す。
- 液状化に対する抵抗率(F_L)が1.0を下回ったとしても直ちに土質定数(強度や剛性)が下がるものではないことから、道路橋示方書では地表面からの深度、動的せん断強度比R及び F_L の関係で土質定数の低減係数(D_E)を定めている。
- 仮に液状化に対する抵抗率(F_L)が1.0を下回ったとしても直ちに敷地護岸(矢板式護岸)の周辺地盤の強度が低下し、それに伴う残留水平変位が生じるものではないことから、確実に有効応力の減少に伴う地盤の剛性低下が生じていたことを確認するため、土質定数の低減係数(D_E)も1.0を下回る範囲が多いことを確認する。
- 以下に液状化に対する抵抗率(F_L)及び土質定数の低減係数(D_E)のイメージを示す。この結果から、土質定数の低減係数(D_E)が1.0を下回る範囲が多く、当該地点は有効応力の減少により地盤の剛性低下が生じていたことを確認する。

高さ O.P.(m)	層名称	地下水位	F_L (=R/L)	D_E
2.500	盛土		—	
1.500			—	
0.500		▽	—	
-0.600		—	1.31	
-1.320			1.28	
-2.040	旧表土		0.67	1
-3.040			0.65	2/3
-4.040			0.65	2/3
-4.978			0.65	2/3
-5.978			0.64	2/3
-6.978			0.66	2/3
-7.978			0.68	1
-8.978			0.70	1
-9.978			0.72	1
-10.978			0.74	1
-11.978			0.76	1
-12.978			0.78	1
-13.978			0.79	1
-14.978			0.81	1
-15.978			0.84	1
-16.978		0.86	1	

※ 液状化強度比 R_L 20は以下の通りである。
 盛土:0.673 旧表土:0.374

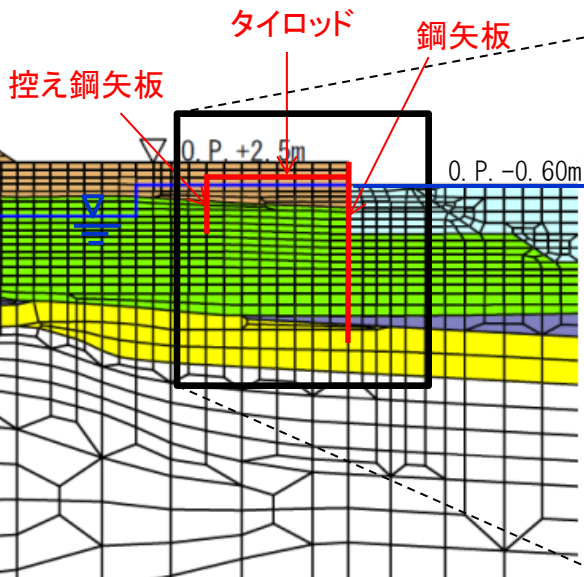
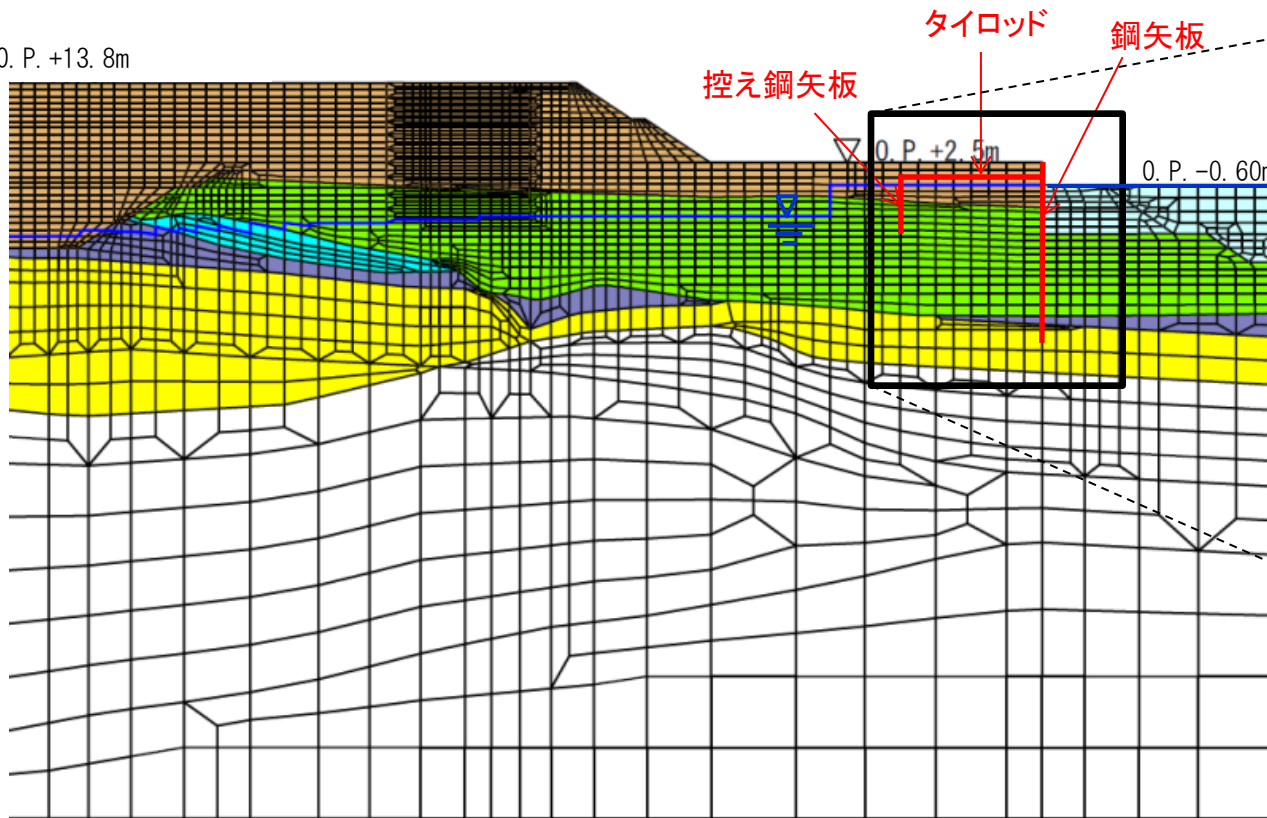
F_L 判定結果及び D_E の関係(イメージ)

液状化強度特性の設定(6/11)

有効応力解析による2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析

- 地震後に水平変位が発生していた敷地護岸(矢板式護岸)周辺の地盤は、有効応力の減少に伴い剛性低下していたと判断されることから、2次元有効応力解析を実施し、実測の変位との比較を行うことにより、液状化強度特性の妥当性を確認する。
- 有効応力解析の実施に当っては、敷地護岸(矢板式護岸)を形成する部材として鋼矢板、タイロッド及び控え鋼矢板をモデル化すると共に、地下水位は2011年東北地方太平洋沖地震の発生時刻における潮位より水位(O.P.-0.60m)を設定する等、忠実に地震時の状況を再現する。
- 解析モデル図を以下に示す。

O. P. +13.8m



敷地護岸(矢板式護岸)周辺拡大図

※2011年東北地方太平洋沖地震による1mの沈降を考慮している。

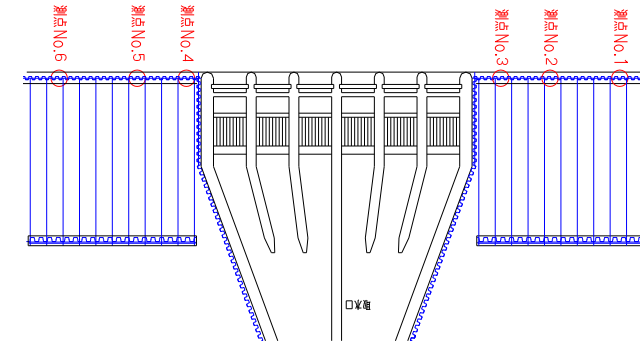
2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析モデル図(一部拡大)

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

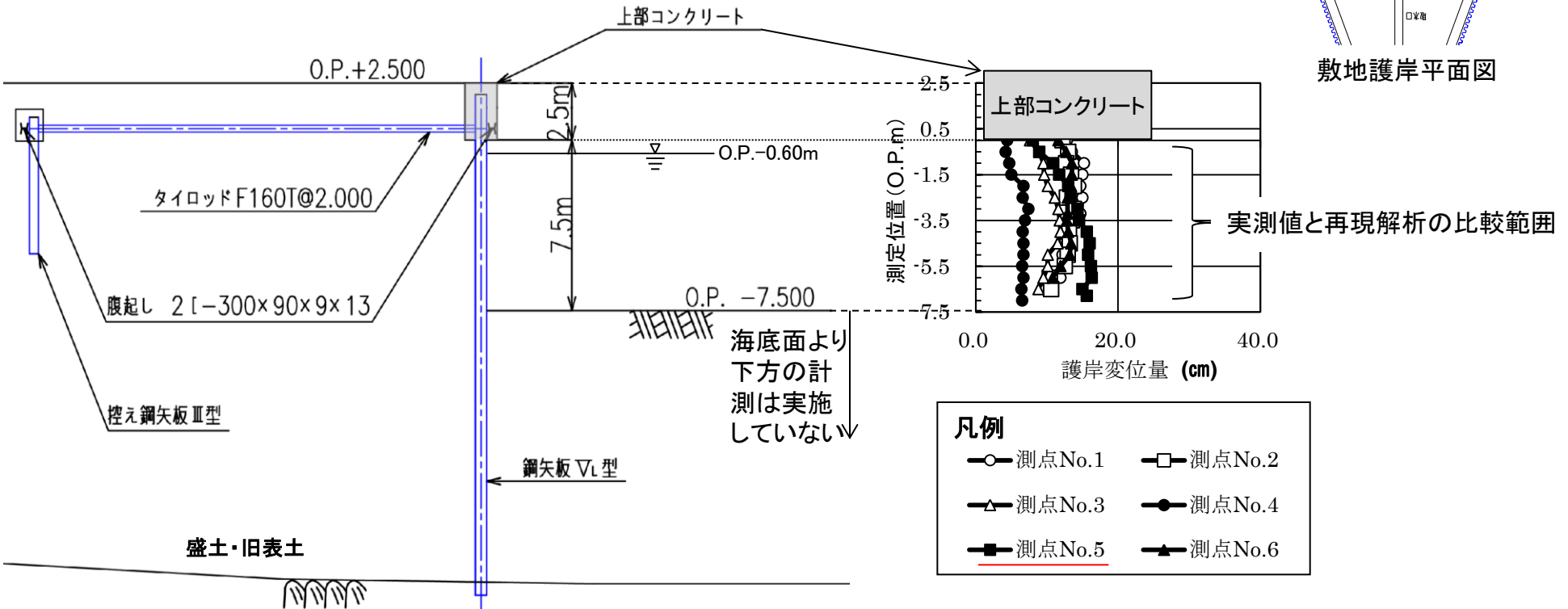
液状化強度特性の設定(7/11)

敷地護岸(矢板式護岸)の変位実測値

- 敷地護岸(矢板式護岸)の水平変位の状況を以下に示す。
- 敷地護岸(矢板式護岸)の上部は上部コンクリートにより覆われており、この上部コンクリート及び海底面より下部の変位は計測していないことから、中間の鋼矢板部分の変位に着目する。
- 水平変位は概ね10cm~16cm(測点No.5 最大16.3cm)となっており、有意な水平変位が確認できることから検討対象として適している。



敷地護岸平面図



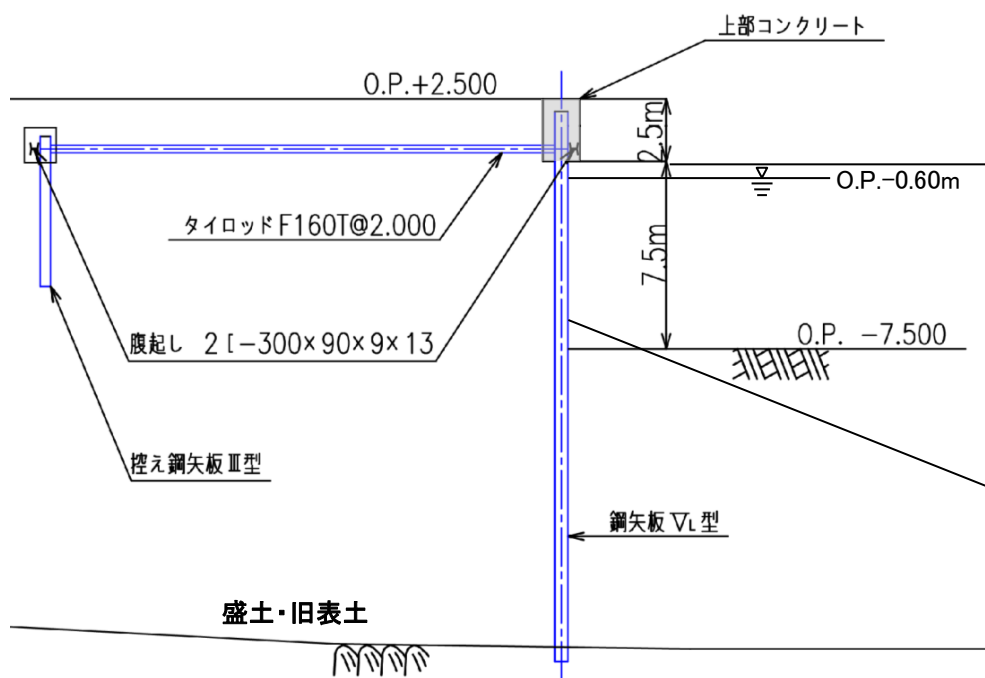
※2011年東北地方太平洋沖地震による約1mの沈降を考慮している。

敷地護岸(矢板式護岸)断面図

液状化強度特性の設定(8/11)

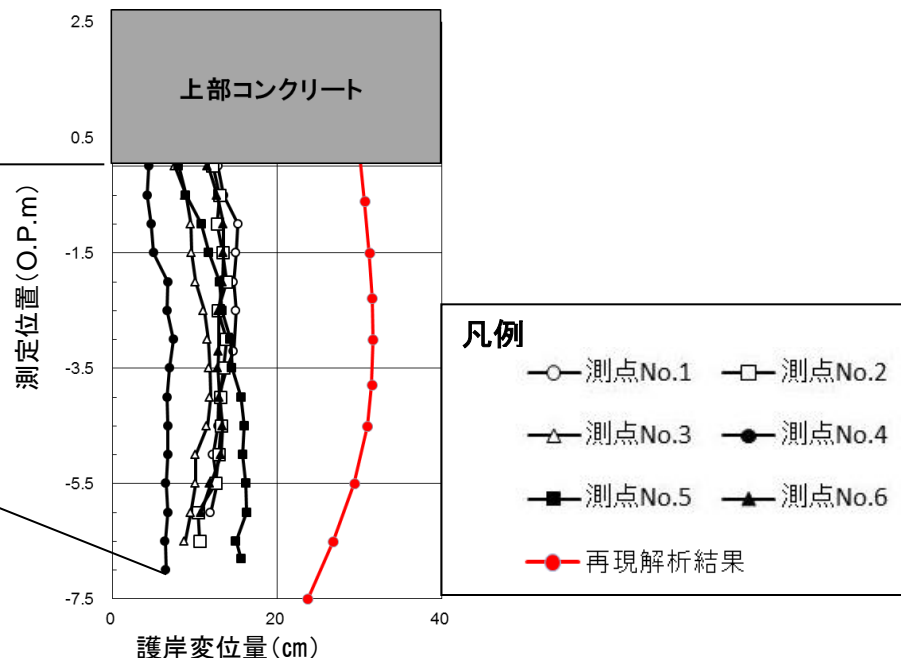
2011年東北地方太平洋沖地震における敷地護岸の変位と有効応力解析による再現解析結果の比較

- 2011年東北地方太平洋沖地震における敷地護岸(矢板式護岸)の水平変位と、敷地全体から採取した試料の試験結果の平均値をもとに設定した液状化強度特性による有効応力解析での再現解析結果の比較を行う。
- 鉛直変位(沈下)については、施設評価において有効応力解析結果による変形に加え、揺すり込み沈下及び過剰間隙水圧の消散による沈下を考慮し、また、地盤のばらつきを考慮して上部の構造に対して保守的な評価となるような鉛直変位を設定することとし、今回の再現解析による比較の対象外とする。なお、2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について、補足説明資料8に示す。
- 【比較結果のイメージ】有効応力解析による再現解析の水平変位(最大31.6cm)が敷地護岸(矢板式護岸)の実測変位(最大16.3cm)を上回っており、今後実施する基準地震動 S_s に対する有効応力解析では、敷地全体から採取した試料の試験結果の平均値をもとに設定した液状化強度特性を用いることが妥当であることを確認した。



※2011年東北地方太平洋沖地震による1mの沈降を考慮している。

敷地護岸(矢板式護岸)断面図



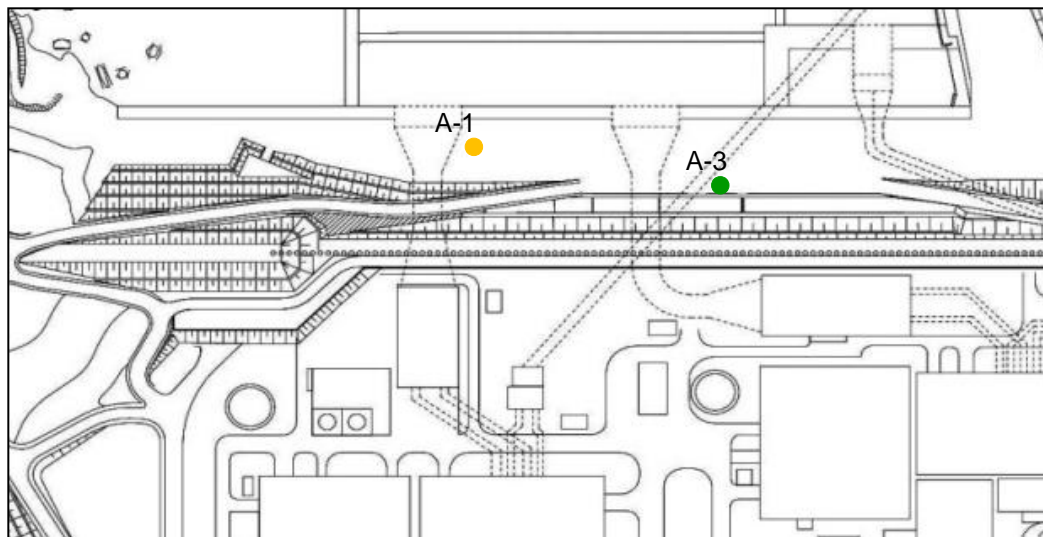
敷地護岸(矢板式護岸)の実測変位と再現解析結果の比較(イメージ)

液状化強度特性の設定(9/11)

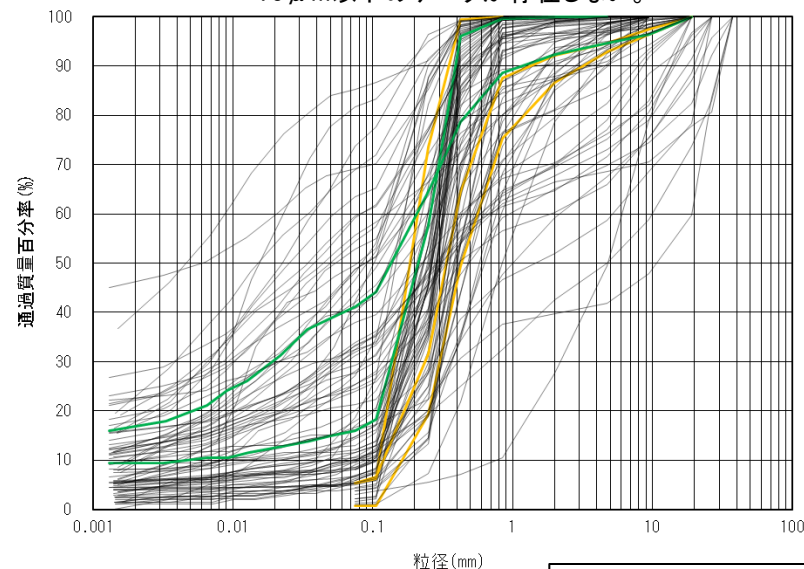
汀線近傍の試料に基づく液状化強度特性を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析

- 2011年東北地方太平洋沖地震における敷地護岸(矢板式護岸)の変位を再現した結果から、試験結果をもとに設定した液状化強度特性を用いた有効応力解析(FLIP)では水平変位を保守的に算定できることをもって、その妥当性を示す。
- 参考に、再現解析を液状化検討対象施設である防潮堤近傍で採取された試料による液状化強度特性を用いて2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析を実施する。試料はA-1, A-3地点より採取されたものを用いる。
- A-1, A-3地点より採取された試料の粒度分布を以下に示す。両者の粒度分布は敷地全体と比べ、粒径が比較的均等で海浜砂としての特徴を有し汀線からの距離も同等であることから、概ね同一の土質であると判断される。

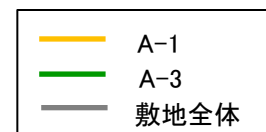
注) 一部沈降分析を実施していない試料に関しては、 $75\mu\text{m}$ 以下のデータが存在しない。



汀線近傍の試料採取位置



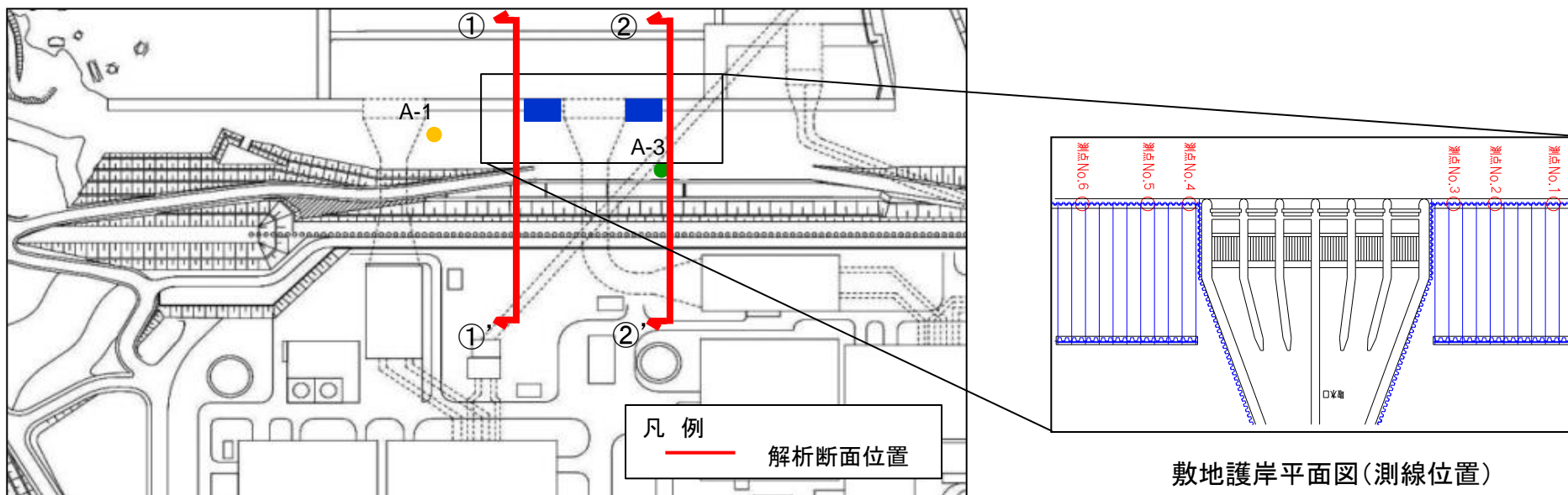
A-1, A-3の粒度分布



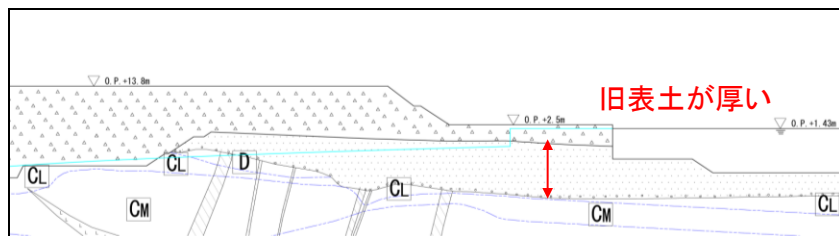
液状化強度特性の設定(10/11)

2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析断面について

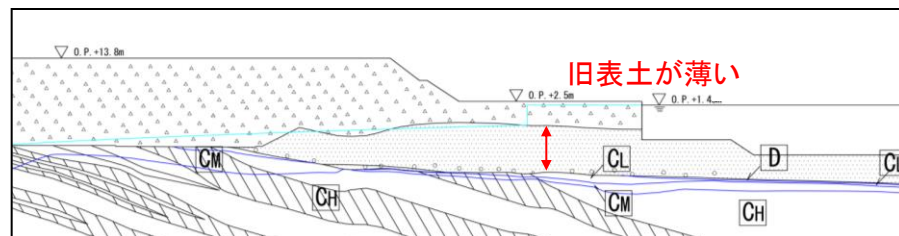
- ・ 汀線近傍の試料による液状化強度特性を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析に当っては、精度を上げる観点から複数の断面にて再現解析を実施する。
- ・ 解析断面の選定は、2011年東北地方太平洋沖地震の変位が確認できている敷地護岸(矢板式護岸)を含む範囲から、盛土・旧表土の層厚が異なる2断面とし、各断面に近い測点(①-①'断面:No.6, ②-②'断面:No.1)の実測値と再現解析による水平変位を比較する。



再現解析断面位置図



①-①' 断面図

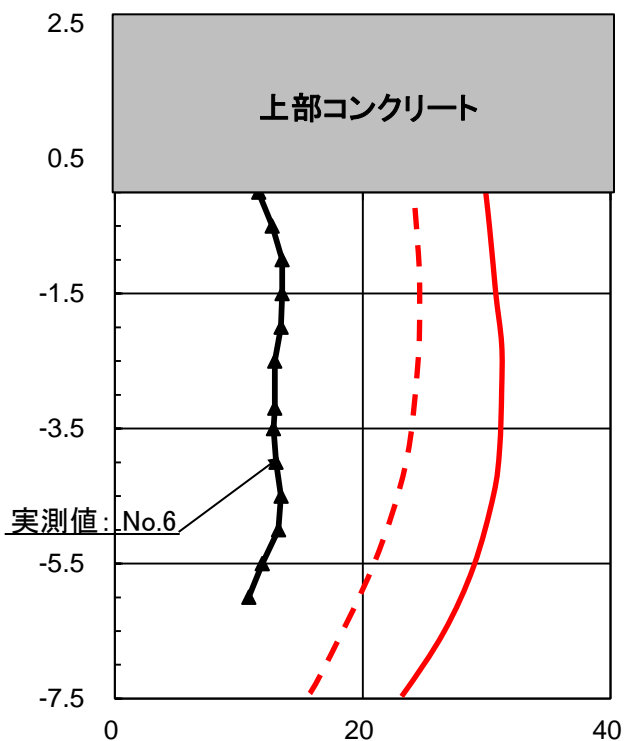


②-②' 断面図

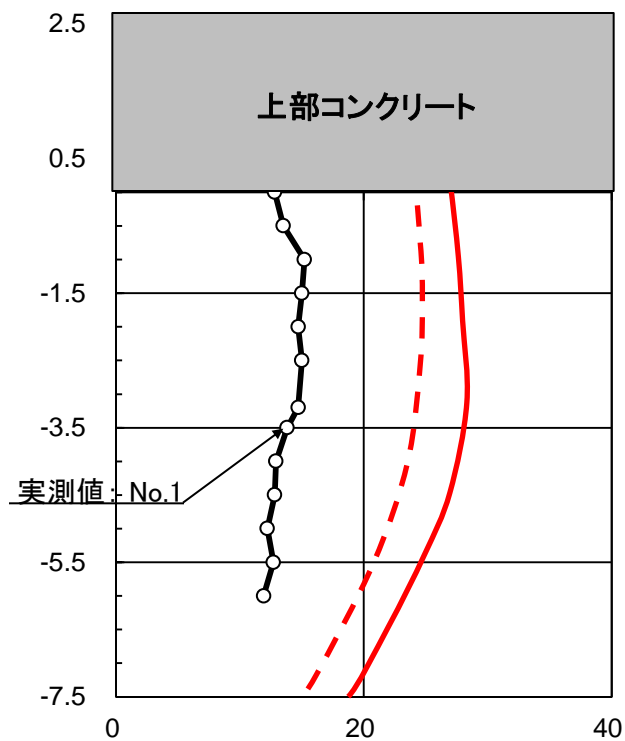
液状化強度特性の設定(11/11)

液状化強度特性の妥当性確認の方法

- 汀線近傍の試料による液状化強度特性を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の再現解析結果(- - -)が実測値(———)を上回ることを確認するとともに、敷地全体の試験結果をもとに設定した旧表土の液状化強度特性を用いた再現解析の結果(———)が(- - -)を上回ることを確認する。
- 以上の結果が得られた場合、敷地全体の試験結果をもとに設定した旧表土の液状化強度特性は保守的な設定となっており、基準地震動 S_s に対する有効応力解析に用いる液状化強度特性として妥当であることが確認できる。



①-①'断面図の解析結果(イメージ)



②-②'断面図の解析結果(イメージ)

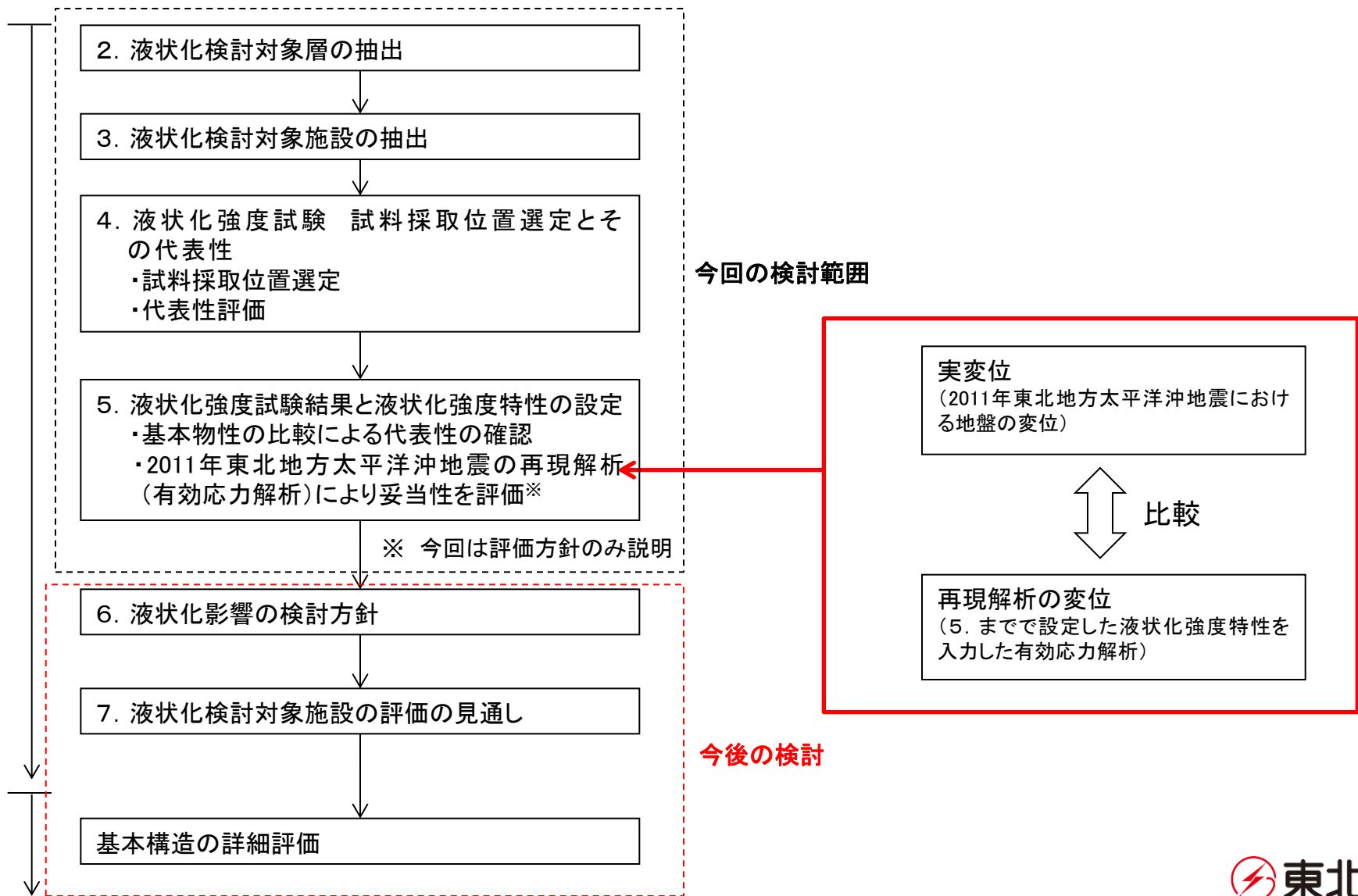
- 敷地全体の試験結果をもとに設定した液状化強度特性を用いた再現解析結果
- - - 汀線近傍の試験結果をもとに設定した液状化強度特性を用いた再現解析結果

まとめ

- 本検討では、道路橋示方書では検討対象外としているものも含め、岩盤及び地盤改良部を除く全ての土層として旧表土及び盛土を液状化検討対象層とした。
- 液状化検討対象施設としては、屋外の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設のうち、直下及び周囲の地下水水位以下に液状化検討対象層が分布することから液状化に伴う沈下や側方流動の可能性のある防潮堤を抽出した。
- 液状化検討対象層とした旧表土及び盛土について試料を採取し、液状化強度試験を実施した。
- 試料採取位置の発電所敷地内における代表性について、旧表土は粒度分布、細粒分含有率及びN値により確認し、盛土は粒度分布、相対密度、S波速度及び盛土の施工における品質管理項目である締固め度により確認した。旧表土及び盛土については、試料採取箇所は敷地全体と比べて液状化しやすい位置であり、試験は保守的な位置で実施していることから代表性を有していると評価した。さらに、防潮堤近傍の盛土は、液状化強度試験箇所の盛土と比べほぼ同程度であり、液状化強度試験箇所において採取した試料から得られた液状化強度特性を防潮堤に適用することは妥当であると評価した。
- 旧表土及び盛土から採取した試料について液状化強度試験を実施した結果、全ての試料について非液状化または繰返し軟化と判断されたことから、地震時の旧表土及び盛土は支持力を失うような事象は発生せず、ひずみが漸増するねばり強い挙動を示す。よって、施設の耐震性評価にあたっては、有効応力解析により過剰間隙水圧の上昇に伴う旧表土及び盛土の剛性低下を考慮した変形量の評価を行う方針とする。なお、液状化強度試験は基準地震動 S_s 相当の地盤の状態を模擬していることを累積損傷度理論を適用して確認した。
- 今後、設定した液状化強度特性を用いて、女川原子力発電所敷地護岸(2011年東北地方太平洋沖地震において残留変位が発生)の再現解析を行い、その妥当性を確認していく。

今後の検討

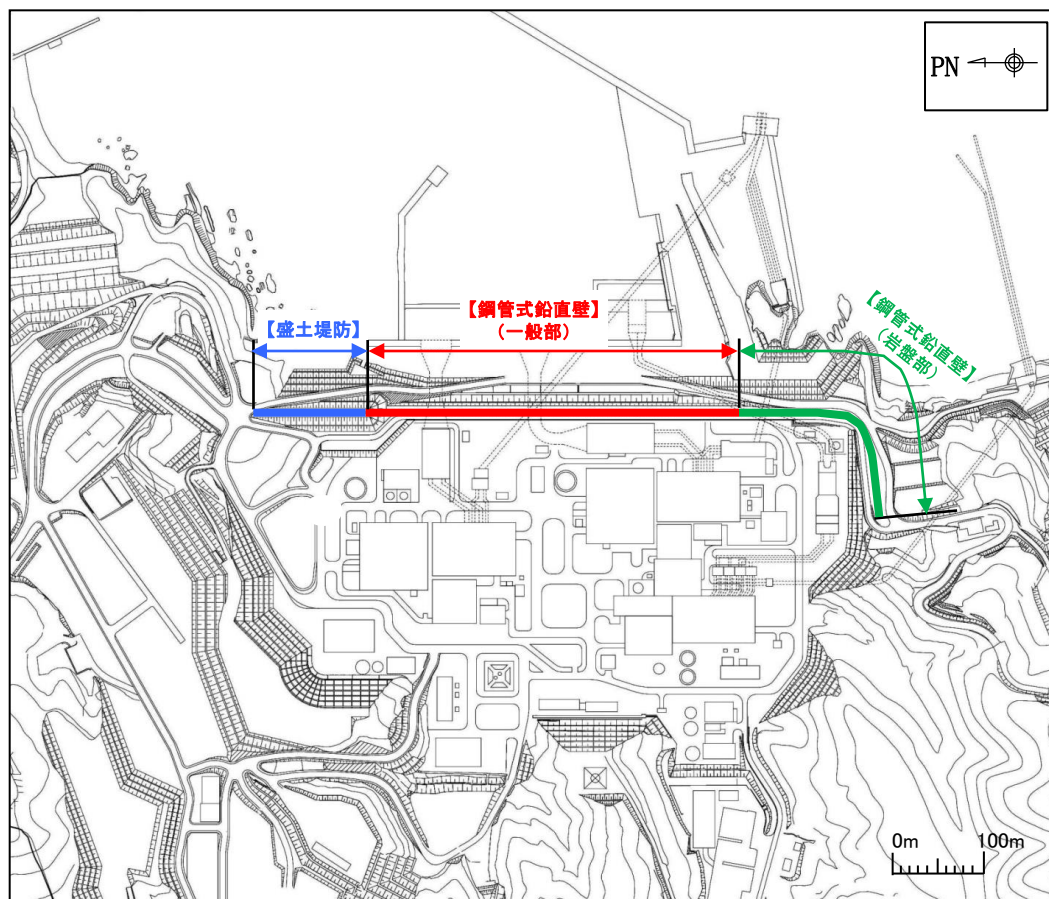
- 今後、設定した液状化強度特性を用いて、女川原子力発電所敷地護岸(2011年東北地方太平洋沖地震において残留変位が発生)の再現解析を行い、その妥当性を確認していく。



補足説明資料

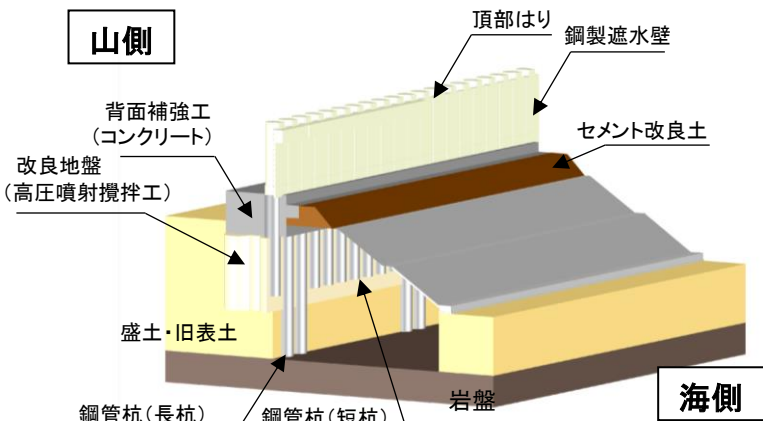
1. 評価対象構造物の断面図

- 「3. 液状化検討対象施設の抽出」において、液状化検討対象構造物として防潮堤を抽出した。
- 防潮堤の構造形式は、鋼管式鉛直壁と盛土堤防の2つに分類され、鋼管式鉛直壁はさらに一般部と岩盤部に分類される。
- 次頁以降に、断面図及び地質断面図を示す。

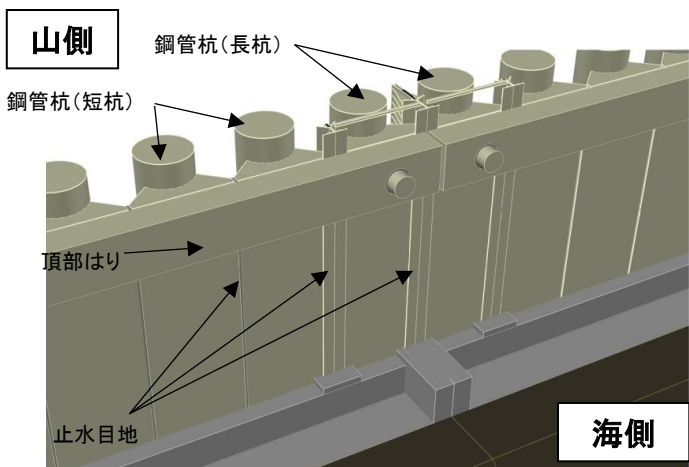


防潮堤位置図

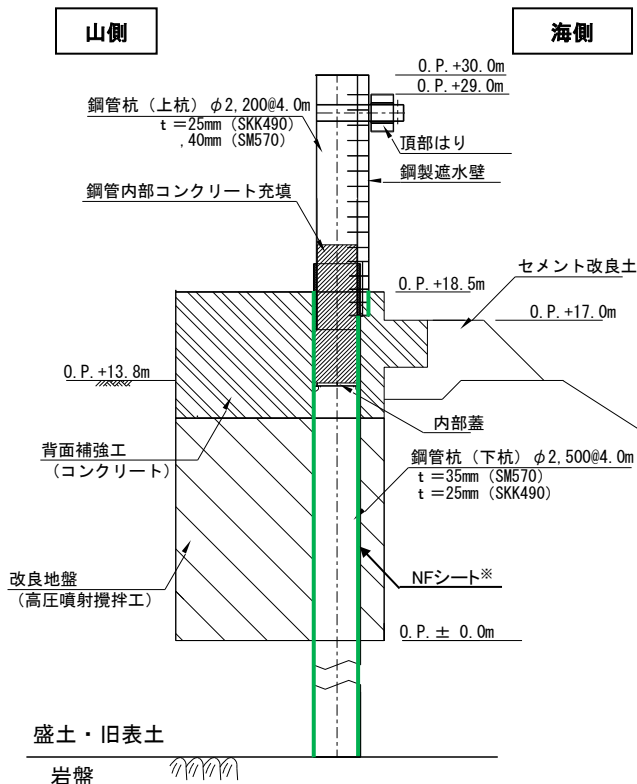
・ 鋼管式鉛直壁(一般部)の断面図を以下に示す。



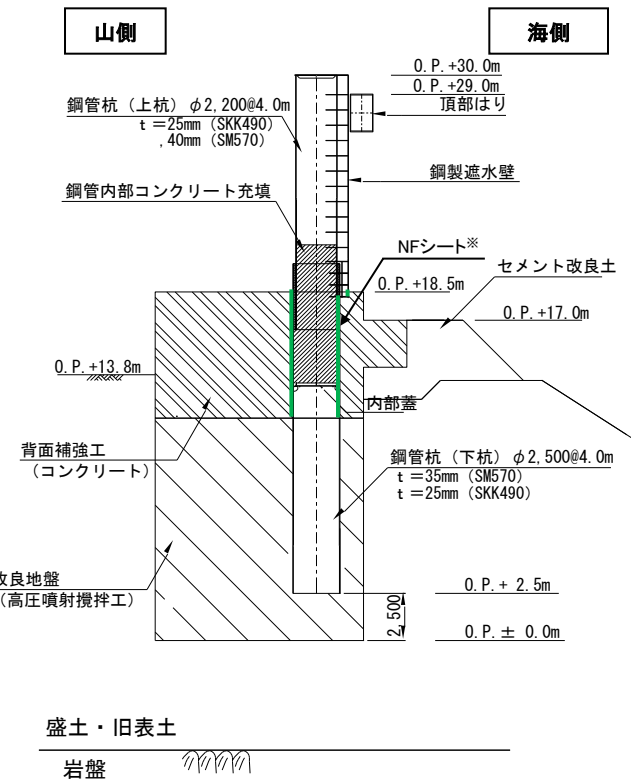
防潮堤概観図



鋼製遮水壁拡大図



一般部(長杭)



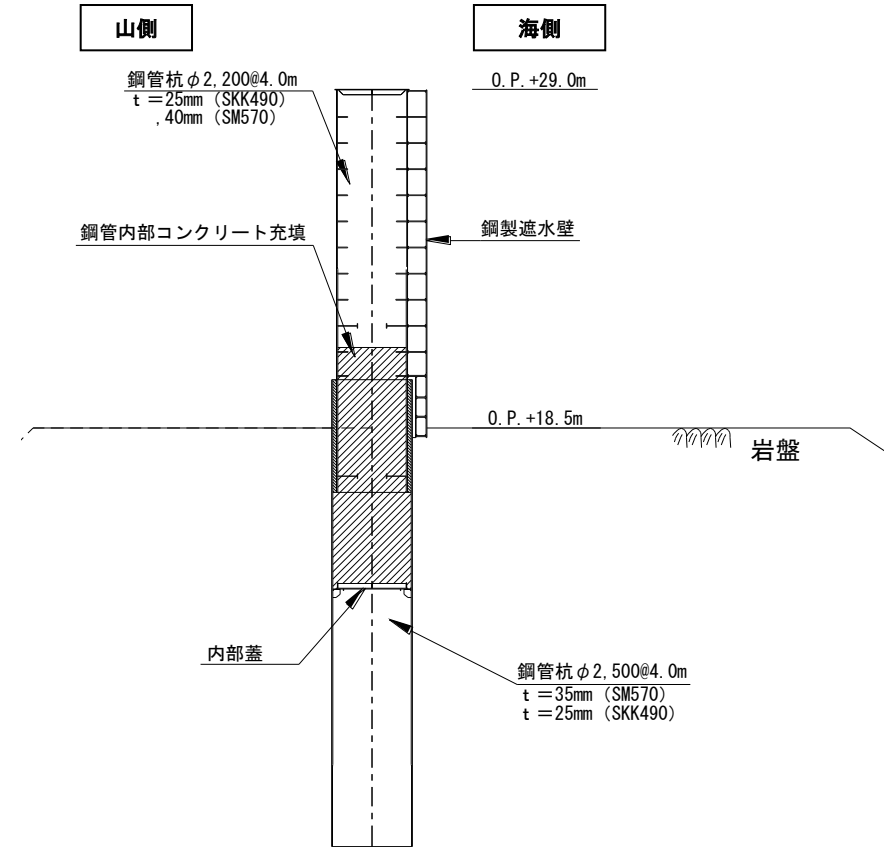
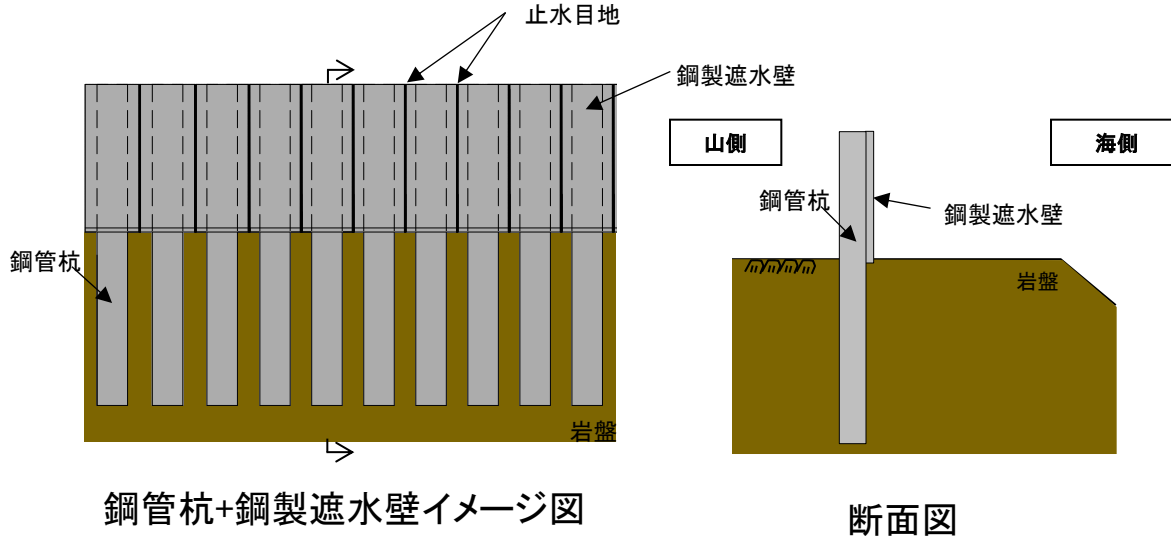
一般部(短杭)

鋼管式鉛直壁(一般部)断面図

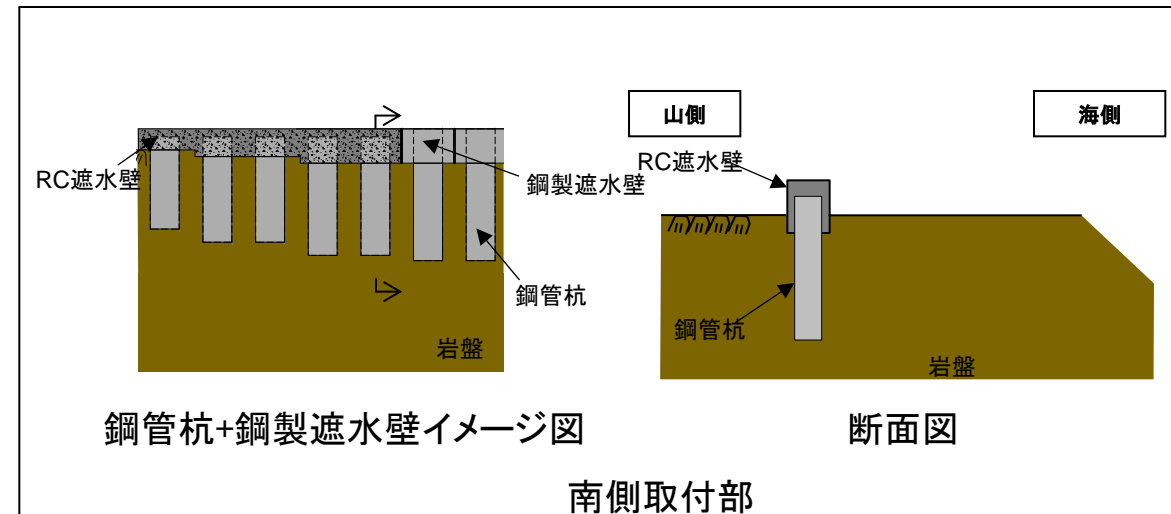
※NFシート：アスファルトをシートに成形したものであり、その粘弾性により、杭周面に作用するネガティブフリクションを低減する。本資料では『NFシート』と呼ぶ。

評価対象構造物の概要(2/3)

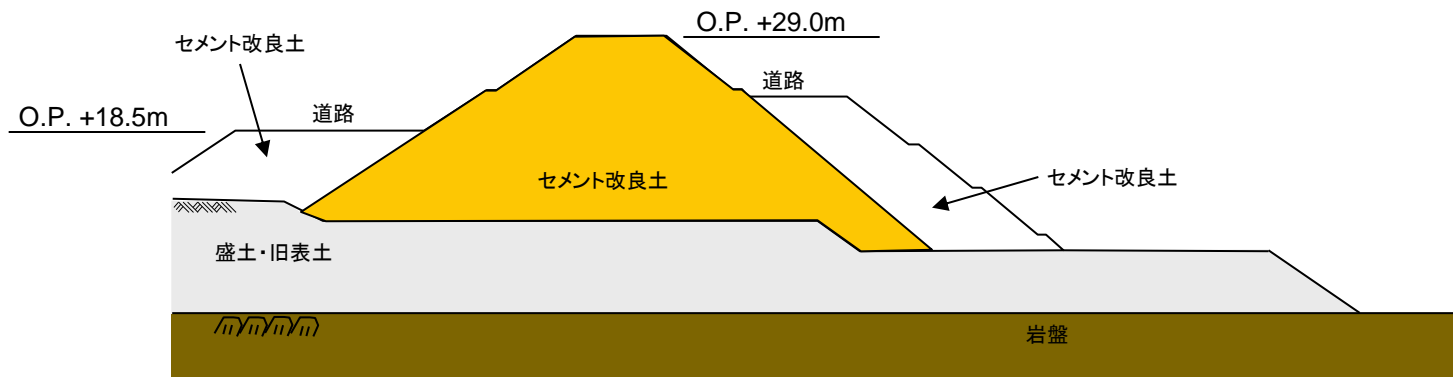
- 鋼管式鉛直壁(岩盤部)の断面図を以下に示す。



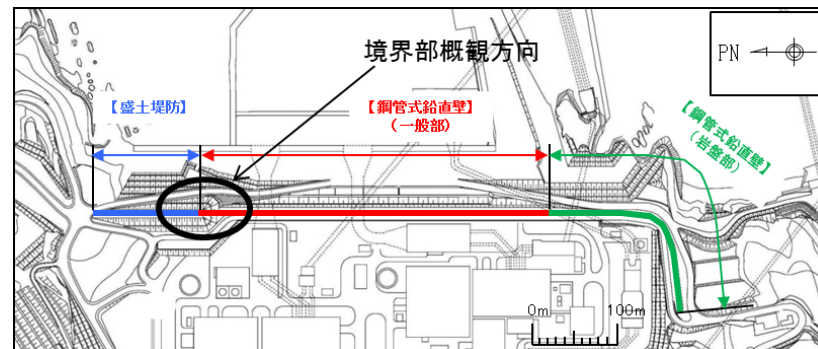
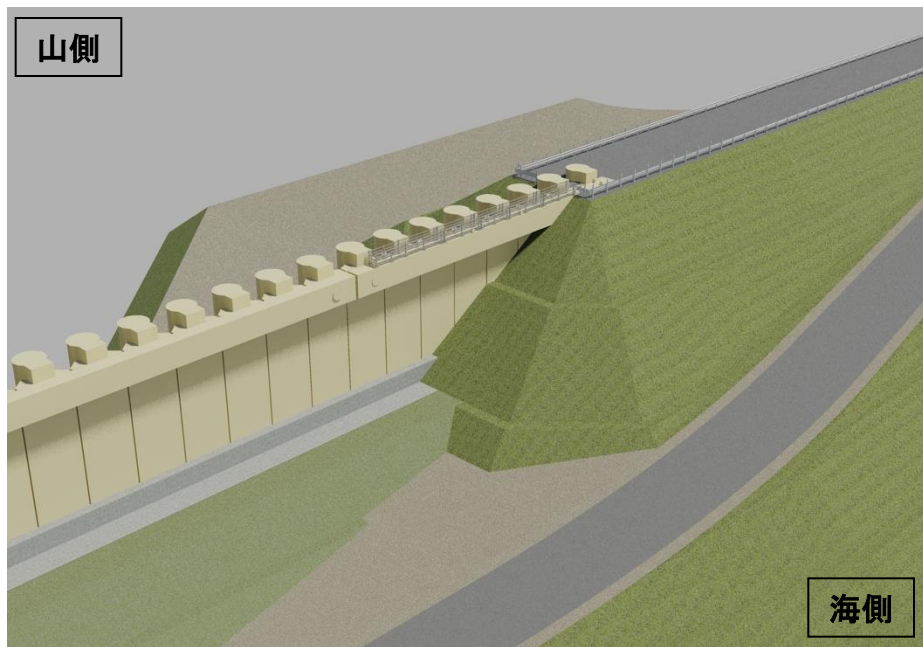
鋼管式鉛直壁(岩盤部)断面図



- 盛土堤防の断面図及び盛土堤防と鋼管式鉛直壁(一般部)の境界部の状況について以下に示す。

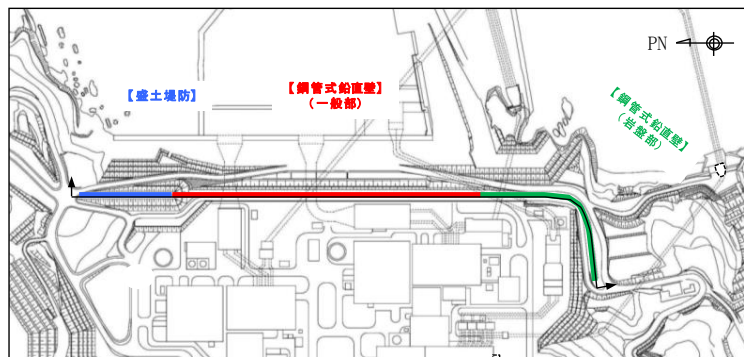


盛土堤防断面図

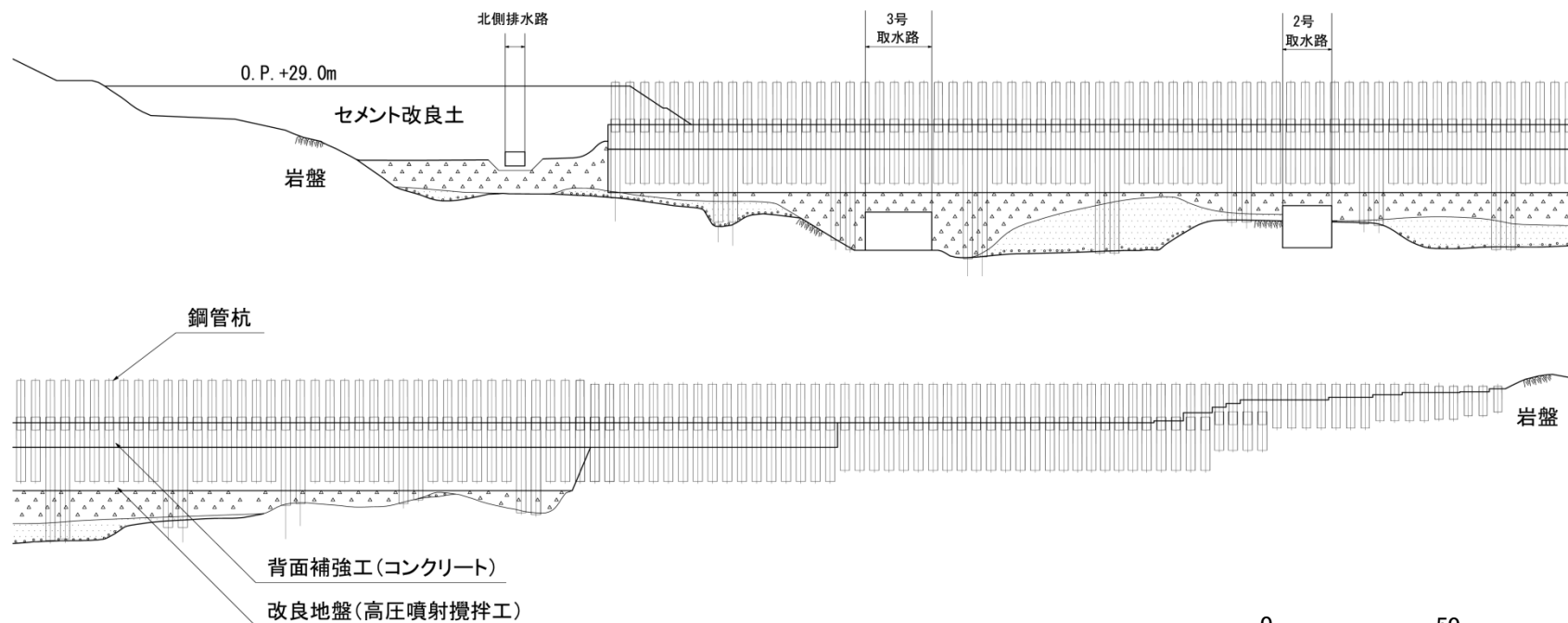


盛土堤防と鋼管式鉛直壁(一般部)の境界部の状況

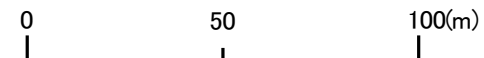
・防潮堤縦断方向の盛土・旧表土の分布を以下に示す。



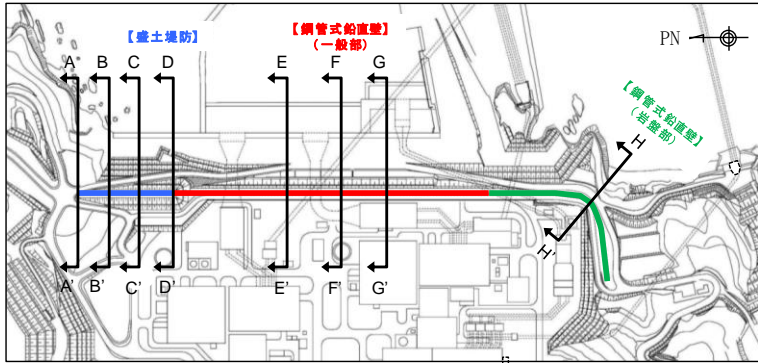
凡 例	
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土



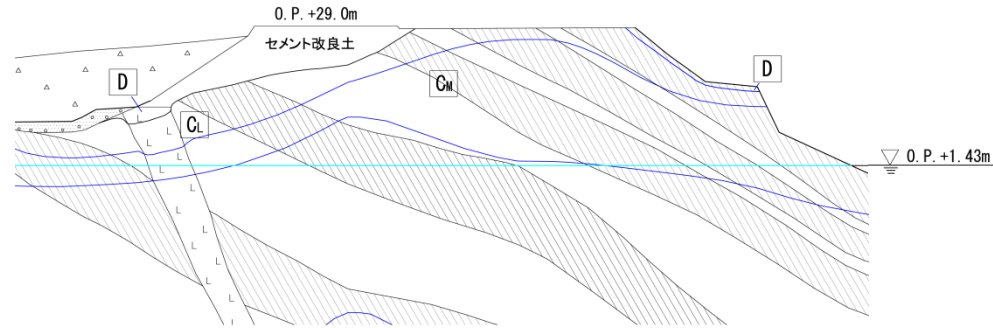
防潮堤 縦断図



・盛土堤防A-A' 断面の地質断面図を以下に示す。

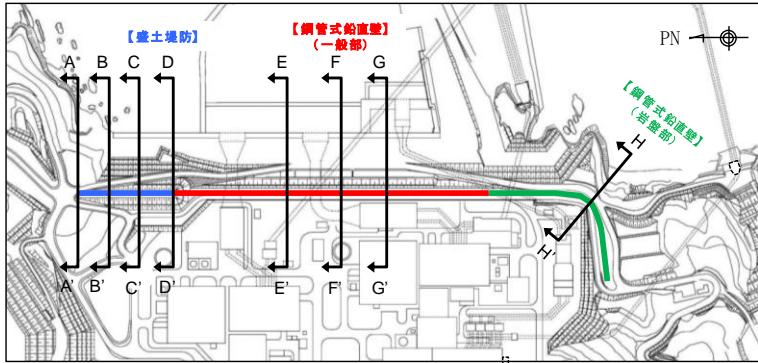


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	
	地 下 水 位

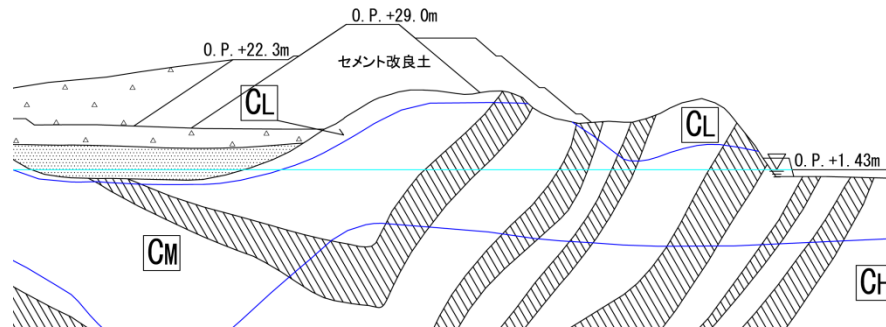


防潮堤 盛土堤防 横断面図(A-A')

・盛土堤防B-B'断面の地質断面図を以下に示す。



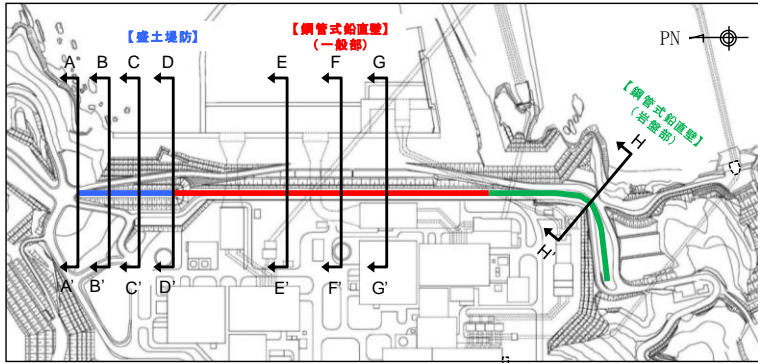
凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	地 下 水 位



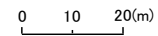
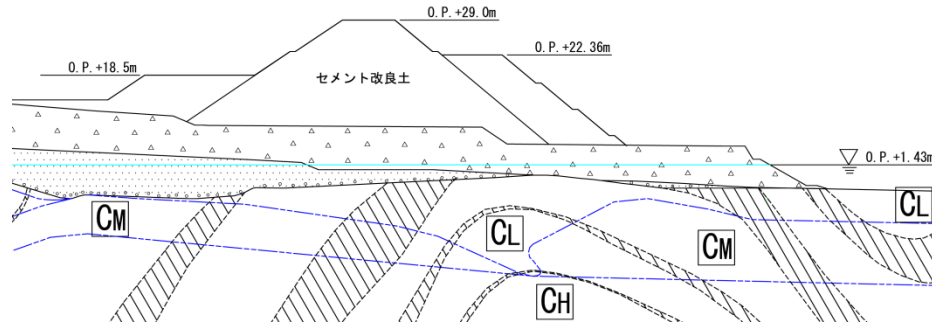
0 10 20(m)

防潮堤 盛土堤防 横断面図(B-B')

・盛土堤防C-C' 断面の地質断面図を以下に示す。

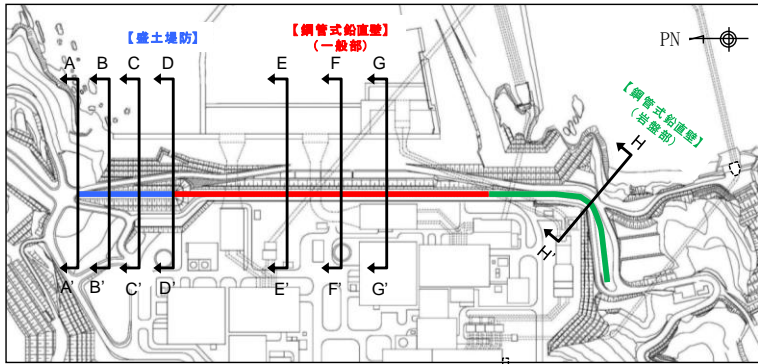


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	地 下 水 位

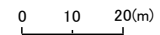
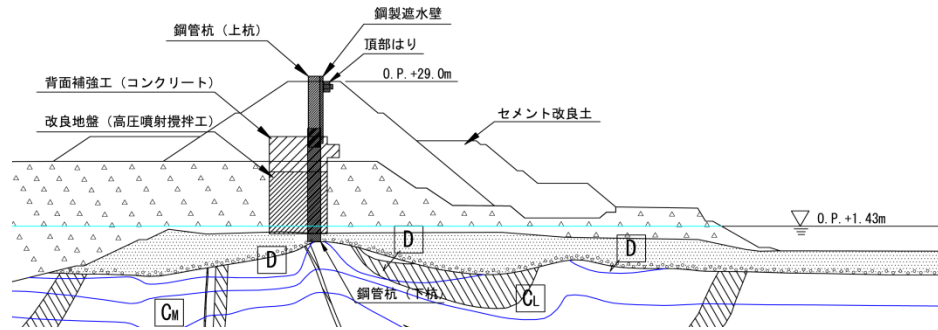


防潮堤 盛土堤防 横断面図(C-C')

・盛土堤防と鋼管式鉛直壁(一般部)の境界部D-D'断面の地質断面図を以下に示す。

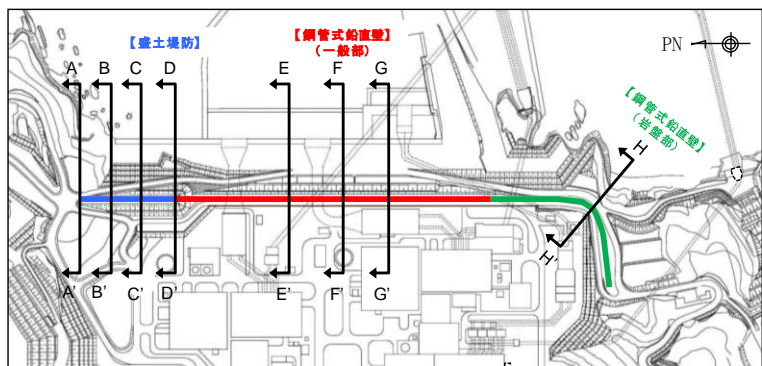


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	地 下 水 位

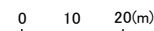
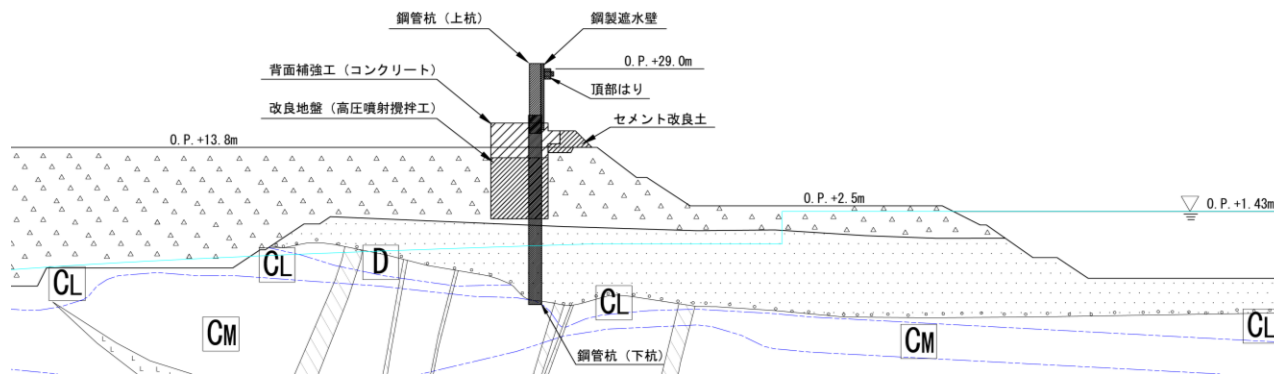


防潮堤 盛土堤防と鋼管式鉛直壁(一般部)の境界部 横断面図(D-D')

・鋼管式鉛直壁(一般部)E-E' 断面の地質断面図を以下に示す。

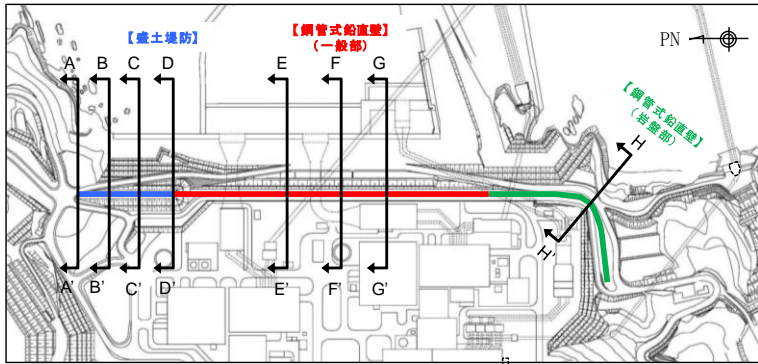


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂
	真 岩
	ひ ん 岩
	[記号] 地 下 水 位

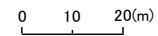
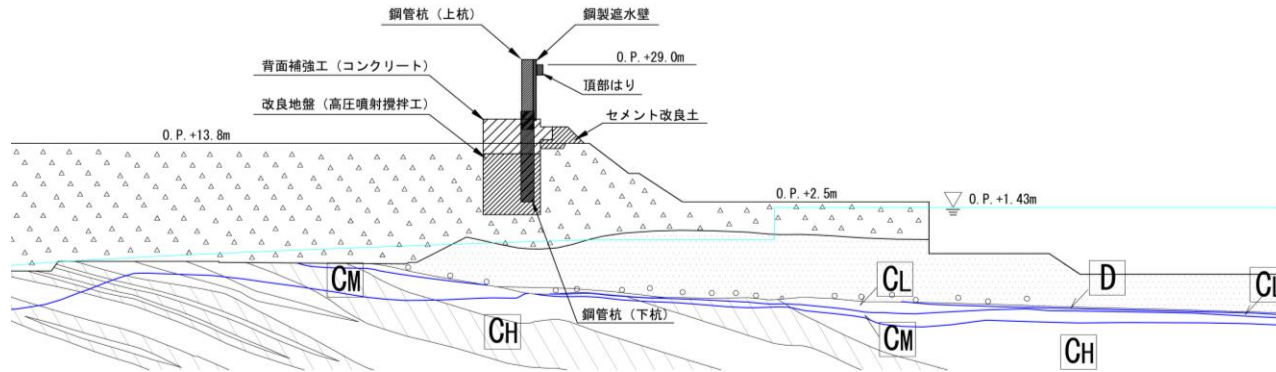


防潮堤 鋼管式鉛直壁(一般部) 横断面図(E-E')

・鋼管式鉛直壁(一般部)F-F' 断面の地質断面図を以下に示す。

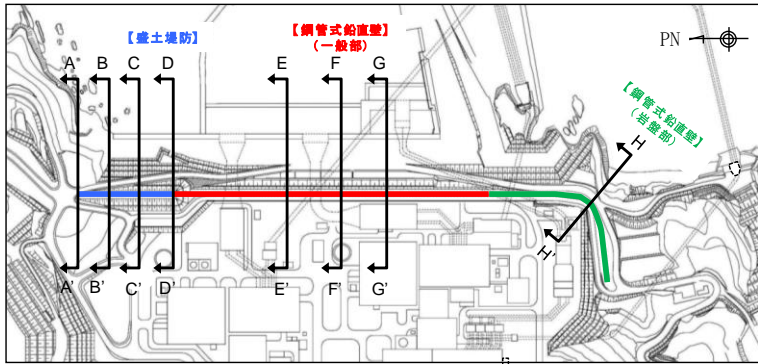


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	地下水位

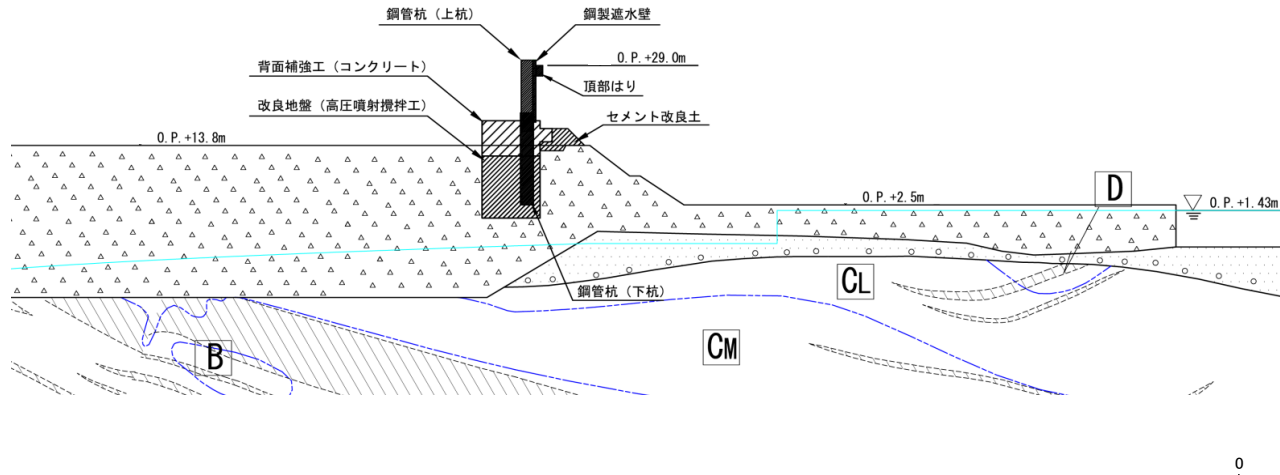


防潮堤 鋼管式鉛直壁(一般部) 横断面図(F-F')

・鋼管式鉛直壁(一般部)G-G' 断面の地質断面図を以下に示す。

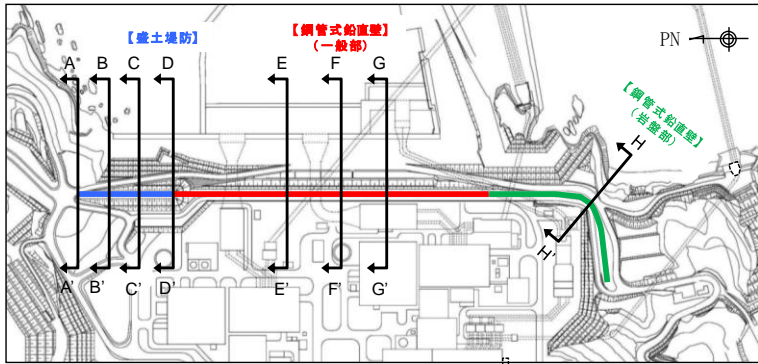


凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂
	真 岩
	ひ ん 岩
	[記号] 地 下 水 位

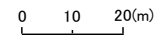
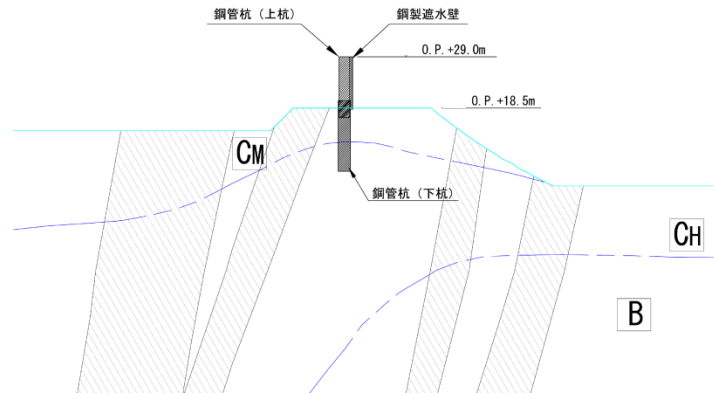


防潮堤 鋼管式鉛直壁(一般部) 横断面図(G-G')

・鋼管式鉛直壁(岩盤部)H-H' 断面の地質断面図を以下に示す。



凡 例	
[岩盤分類]	
	岩盤分類境界
	B 級
	CH 級
	CM 級
	CL 級
	D 級
[地質区分]	
	盛 土
	旧 表 土
	砂 岩
	頁 岩
	ひ ん 岩
[記号]	地下水位



防潮堤 鋼管式鉛直壁(岩盤部) 横断面図(H-H')

補足説明資料

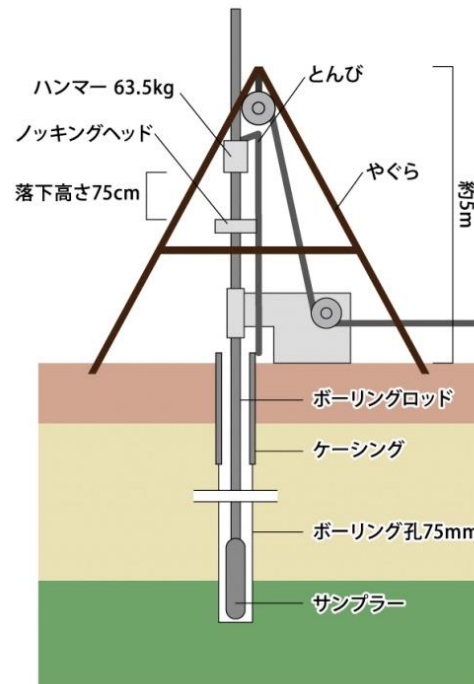
2. 液状化に関連する基本物性の補足

N値(標準貫入試験)

- N値は、原位置で行う標準貫入試験により求まる値であり、地盤の硬さ・強度や締まりの程度の評価に用いられる。N値が高い方が地盤が硬く密であり、小さい方が地盤が軟らかく疎である。
- N値は、地盤上または地盤中に構築する構造物の設計等において、地盤の強度(内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c 、支持力度、液状化強度など)や地盤の剛性(S波速度、弾性係数など)を推定するために一般的に用いられている。

【試験方法】

- 標準貫入試験は、「標準貫入試験方法」(JIS A 1219:2001)に基づいて実施する。
- 試験は、質量 $63.5\text{kg}\pm 0.5\text{kg}$ のハンマーを $760\text{mm}\pm 10\text{mm}$ の高さから落下させて、SPTサンプラーを打ち込む。50回を打撃回数の限度として、300mm貫入するに必要な打撃回数(N値)を求める。
- 標準貫入試験の概要を下図に示す。



標準貫入試験の概要

細粒分含有率(F_c)

- 細粒分含有率(F_c)は、地盤を構成する土粒子の全質量に対する細粒分(粒径0.075mm未満)の質量割合であり、土質材料を分類する際の指標として用いられ、液状化判定の対象層選定の指標としても用いられる。
- 細粒分含有率(F_c)は、土質材料の分類以外にも、液状化強度の推定など地盤の工学的性質に及ぼす細粒分の影響を検討する際のパラメータとしてよく用いられている。また、盛土材の適否を検討する際にも細粒分含有率が用いられる。

【試験方法】

- 細粒分含有率は、「土の粒度試験方法」(JIS A 1204:2000)により算出する。
- 2mmふるいによるふるい分けを実施し、2mmふるい残留分に対するふるい分けを行う。
- その後、2mmふるい通過分に対する沈降分析を行い、2mmふるい通過、0.075mm残留分に対するふるい分析を行う。
- ここで、0.075mm通過分の試料の割合を細粒分含有率とし、算出方法は以下のとおりとする。
- 試料の乾燥質量(m_s)を測定する。次に、ふるい目開き0.075mmに残った試料の乾燥質量(m_{0s})を測定し、細粒分含有率(F_c)を評価する。

$$F_c = \frac{m_s - m_{0s}}{m_s} \times 100$$

m_s : 試料の乾燥質量

m_{0s} : 0.075mmに残った試料の乾燥質量

		粒 径 (mm)								
		0.075			2			75		
		0.005	0.25	0.85	4.25	19	300			
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨礫	
		砂			礫			石		
細粒分		粗粒分					石分			

細粒分の概要

乾燥密度, 間隙比

- 乾燥密度, 間隙比は, 含水比試験及び土粒子の密度試験から求まる湿潤密度, 含水比及び土粒子の密度から算出され, 土の締まり具合を表す基本的な土の物性値である。なお, 乾燥密度及び間隙比は相対密度の算出に用いられる。

【試験方法】

- 旧表土の湿潤密度は「土の湿潤密度試験方法」(JIS A 1225:2009)に, 含水比は「土の含水比試験方法」(JIS A 1203:2009)に, 土粒子の密度は「土粒子の密度試験方法」(JIS A 1202:2009)に基づいて実施する。盛土の湿潤密度は「水置換による土の密度試験方法」(JGS 1612:2003)に基づいて実施する。
- 「土の湿潤密度試験方法」においては, 乱さない供試体の質量と体積を室内で直接測定して求める。「土の含水比試験方法」においては, 試料の乾燥前後の質量を測定して求める。「土粒子の密度試験方法」においては, 土粒子の質量と体積を測定して求める。「水置換による土の密度試験方法」においては, 原地盤を直接掘削し, 掘削後の穴に水を入れて体積を求め, 掘削土の質量と体積から湿潤密度を算出する。その他については, 「土の湿潤密度試験方法」と同様である。
- 乾燥密度(ρ_d)及び間隙比(e)は, 下式により算出する。

$$\rho_d = (\rho_t / (1 + w / 100))$$

$$e = (\rho_s / \rho_d) - 1$$

w : 含水比

ρ_t : 湿潤密度

ρ_s : 土粒子密度

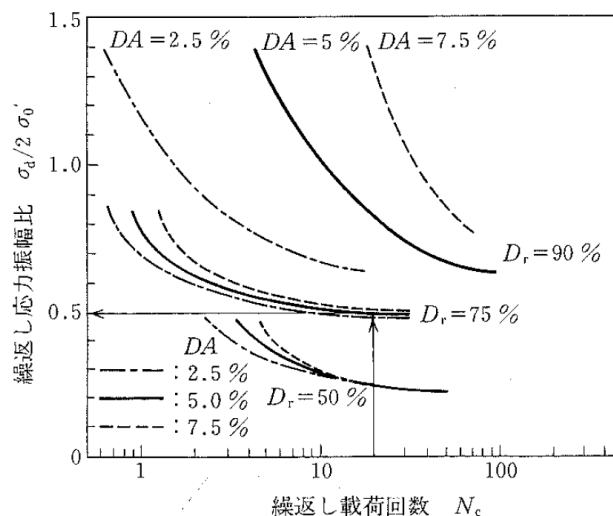
- 相対密度は、下式で定義される地盤の締まりを表す指標である。相対的に、相対密度が大きい方が地盤は密で、小さい方が疎である。
- 相対密度は、力学特性を表すパラメータとして利用されている。なお、相対密度はそれぞれの密度の誤差が相対密度に大きな誤差となって反映されるという特徴を持っており、特に細粒分を多く含む場合には誤差が大きくなる特性がある。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

e : 試料の間隙比(間隙の体積÷土粒子の体積)
 e_{max} : 最小密度試験による試料の間隙比
 e_{min} : 最大密度試験による試料の間隙比

【試験方法】

- 最小、最大密度の試験は、「礫の最小密度・最大密度試験方法」(JGS 0612:2009)に基づいて実施する。
- 「礫の最小密度・最大密度試験方法」においては、「2mm以上の礫を含み、目開き75 μ mふるいに90%以上残留する粗粒土」を基本としており、採取した試料のうち粒径53mmあるいは37.5mm以上の礫を除去して試験を実施した。
- 「地盤材料試験の方法と解説」(2009)によれば、礫を含む粗粒土では、最大の粒径が53mm以上の礫が含まれている場合には、その部分を取り除いて試験を行うことから、最小密度、最大密度は小さくなり、実地盤の相対密度が100%を超えることがあると示されている。



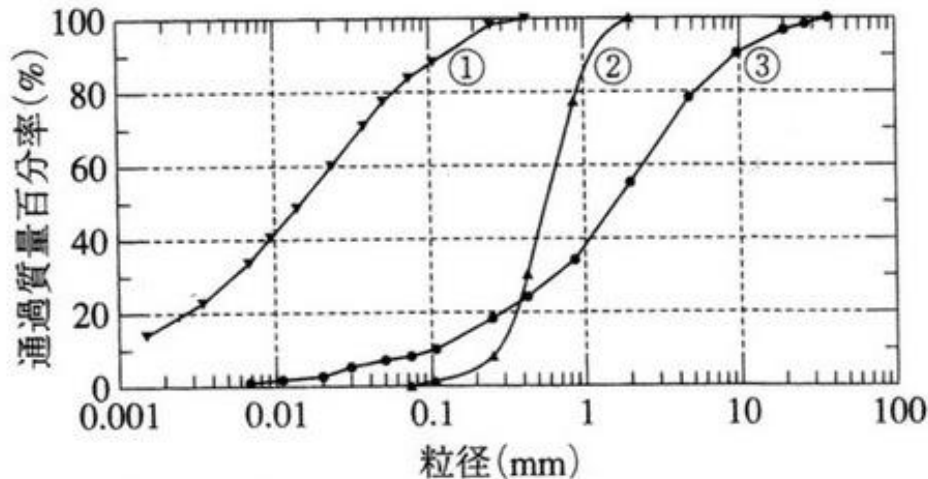
液状化強度曲線の形状と土の特性の関係
 (地盤材料試験の方法と解説, (社)地盤工学会, 2009)

粒径加積曲線

- 土を構成する土粒子の粒度の分布状態を粒度といい、土粒子の分布状態を粒径とその粒径より小さい粒子の質量百分率の関係を示した曲線を粒径加積曲線という。
- 粒径加積曲線は、土の締固め特性や透水性及び液状化強度などの力学的性質の推定、建設材料としての適性の判定や掘削工・基礎工等の施工性の決定などに利用されている。

【試験方法】

- 土の粒度試験は、「土の粒度試験方法」(JIS A 1204:2009)及び「石分を含む地盤材料の粒度試験方法」(JGS 0132:2009)に準拠して実施する。なお、石分とは、地盤材料のうち粒径75mm以上の粒子をいう。
- 「土の粒度試験方法」においては、粒径2mm以上の土粒子はふるい分析を、2mm未満の土粒子は沈降分析を行った後にふるい分析を行う。
- 「石分を含む地盤材料の粒度試験方法」においては、石分の詳細な粒度分布を把握するために、目開き300,200,150,106,75mmのふるいを用いて原位置にて試験を実施する。75mmふるい通過分については、室内で「土の粒度試験方法」を実施する。
- 粒径加積曲線の例を下図に示す。①は細粒土、②は分級された砂、③は粒径幅の広い砂礫の礫である。



粒径加積曲線の例

補足説明資料

4. 構造物毎の地下水位について

液状化検討対象施設

- 「3. 液状化検討対象施設の抽出」で抽出した液状化検討対象施設について、次頁以降に各施設における地下水位・施設設置状況を示す。

液状化検討対象施設

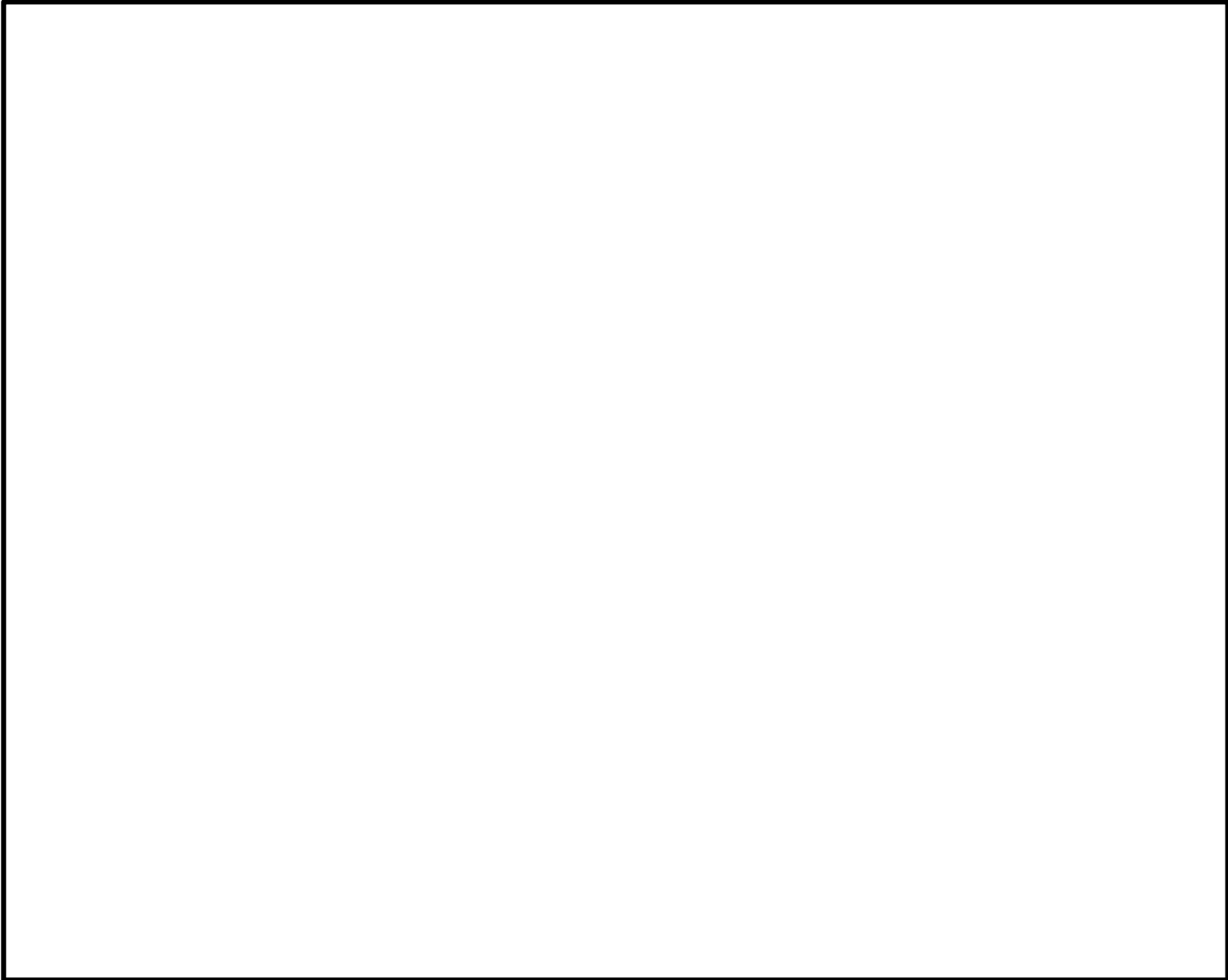
	対象施設名称
設計基準対象施設(第4条関係)	防潮堤, 防潮壁, 原子炉建屋※1, 制御建屋※1, 排気筒※1, 排気筒連絡ダクト※1, 原子炉機器冷却海水配管ダクト※1, 海水ポンプ室※1, 軽油タンク室※1, 軽油タンク連絡ダクト※1
重大事故等対処施設①(第39条関係)	緊急時対策建屋, 緊急用電気品建屋, 淡水貯水槽, 復水貯蔵タンク基礎, 地下軽油タンク室, 取水路, 取水口
重大事故等対処施設②(第43条関係)	保管場所(第1, 第6), 保管場所(第2), 保管場所(第3, 第5)※2, アクセスルート※3

※1 重大事故等対処施設を兼ねる





※2 保管場所(第3, 第5)は防潮堤付近であることから, 防潮堤の評価にて包含されるものとする

※3 アクセスルートは仮復旧の評価も併せて行うことから, 「女川原子力発電所2号炉可搬型重大事故等対処対象施設保管場所及びアクセスルートについて」にて評価を行う

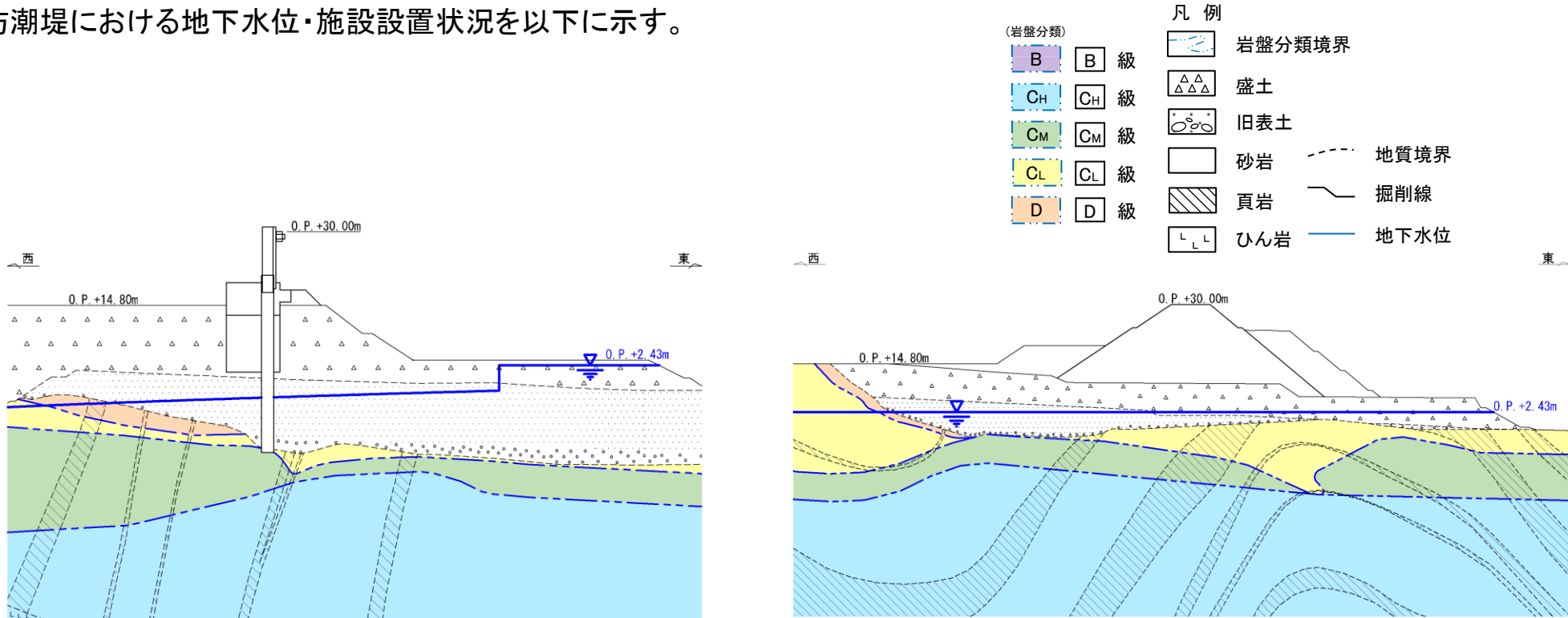
- 液状化検討の対象施設の配置図及び断面図の位置を示す。



凡例

-  : 耐震重要施設
-  : 常設重大事故等対処施設
-  : 耐震重要施設及び
常設重大事故等対処施設
-  は地中構造物を示す

- 防潮堤における地下水位・施設設置状況を以下に示す。

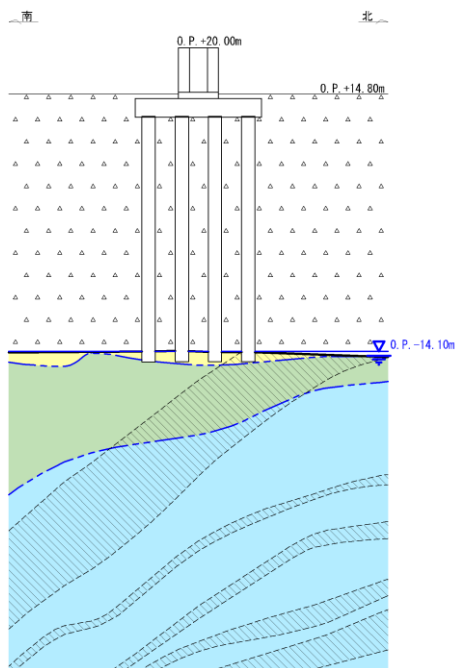


防潮堤(鋼管式鉛直壁(一般部))

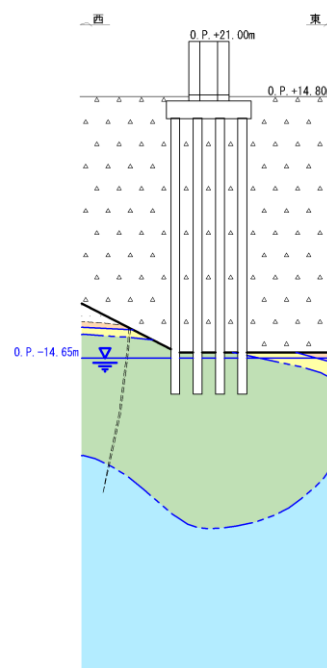
防潮堤(盛土堤防)

液状化評価の対象	○
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層より地下水位が高い。 ・地下水位以下に液状化検討対象層が分布。 ・側方流動や沈下の可能性がある。

- 防潮壁における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



防潮壁(2号炉海水ポンプ室)

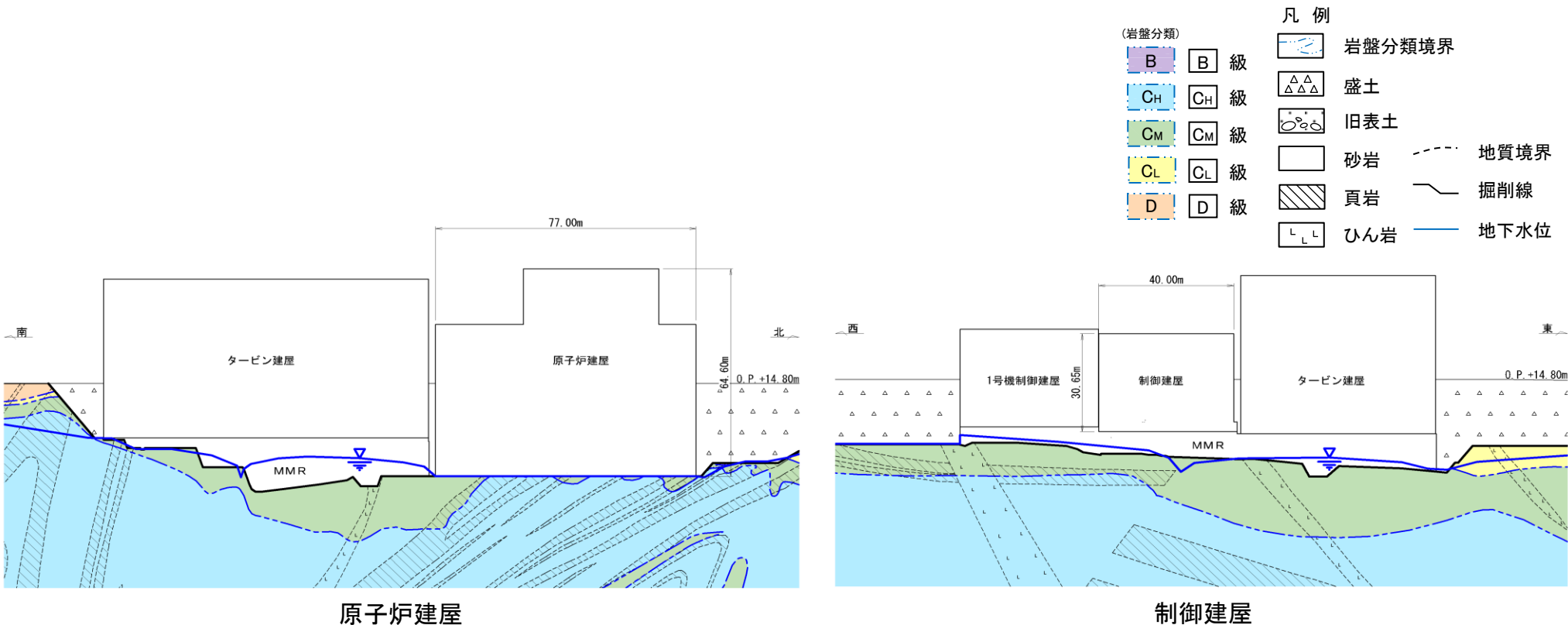


防潮壁(3号炉海水ポンプ室)

- 凡例
- (岩盤分類)
- B B 級
 - CH CH 級
 - CM CM 級
 - CL CL 級
 - D D 級
 - 岩盤分類境界
 - 盛土
 - 旧表土
 - 砂岩
 - 頁岩
 - ひん岩
 - 地質境界
 - 掘削線
 - 地下水位

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

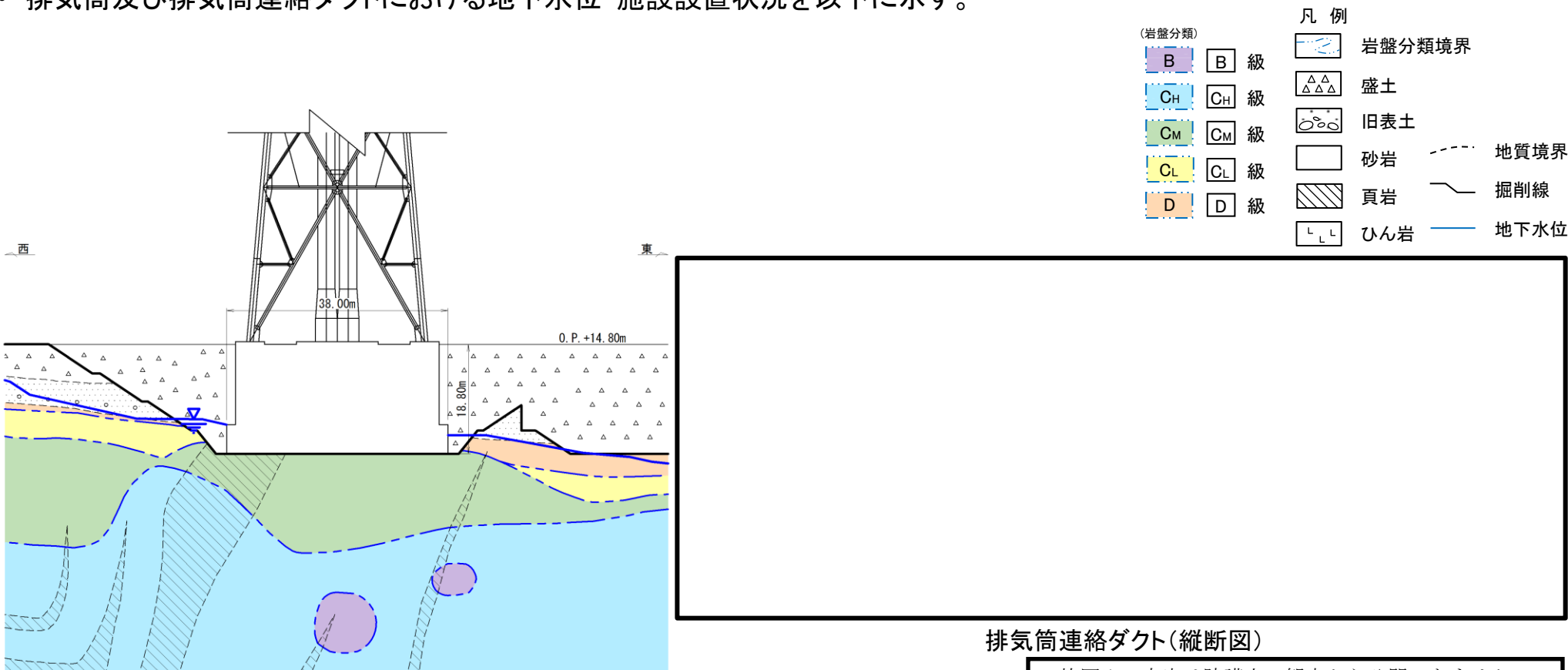
- 原子炉建屋及び制御建屋における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

- ・ 排気筒及び排気筒連絡ダクトにおける地下水位・施設設置状況を以下に示す。



凡例

(岩盤分類)

- B 級
- CH 級
- CM 級
- CL 級
- D 級

岩盤分類境界

盛土

旧表土

砂岩

頁岩

ひん岩

地質境界

掘削線

地下水位

排気筒連絡ダクト(縦断図)

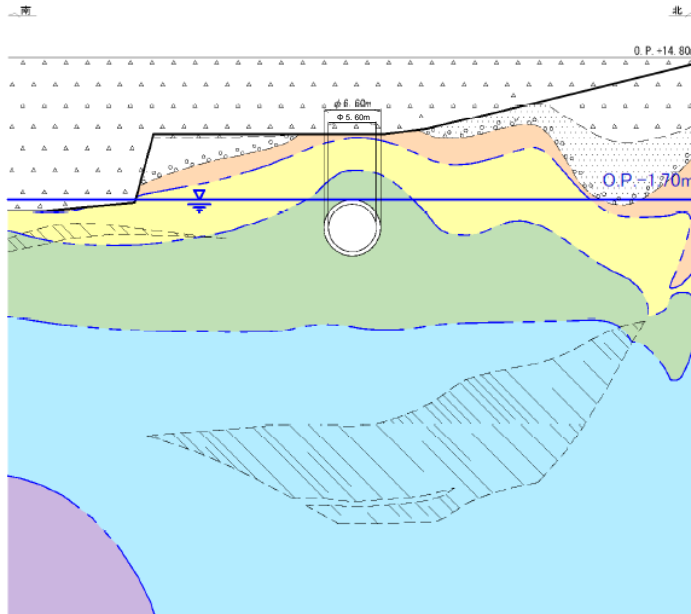
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

排気筒

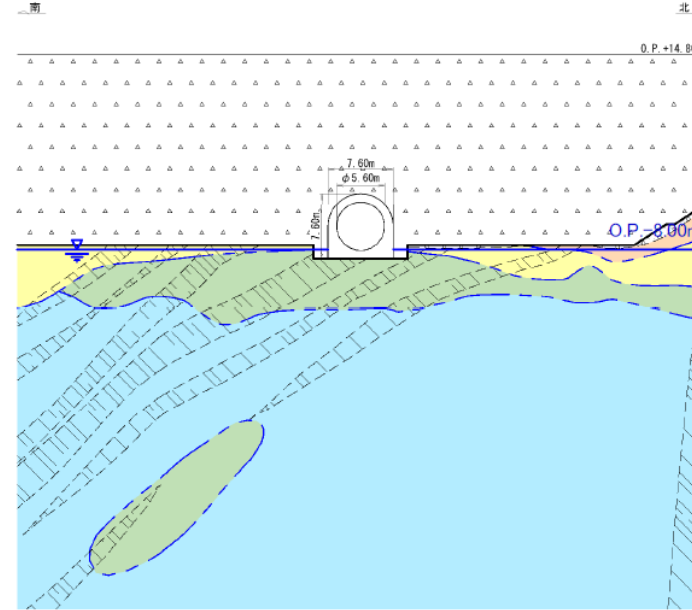
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	[岩盤部] ・保守的にトンネル天端に地下水位を設定。 ・周囲に液状化検討対象層が分布しない。 [土砂部] ・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

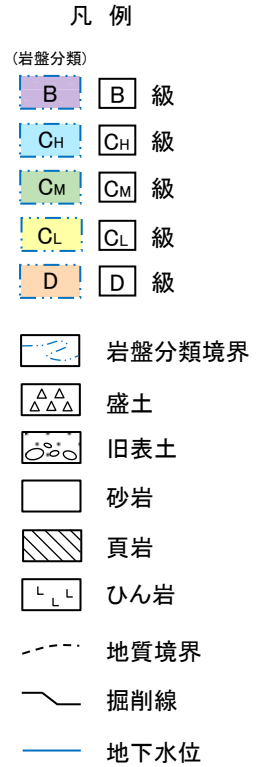
- 排気筒連絡ダクトにおける地下水位・施設設置状況を以下に示す。



排気筒連絡ダクト(岩盤部)

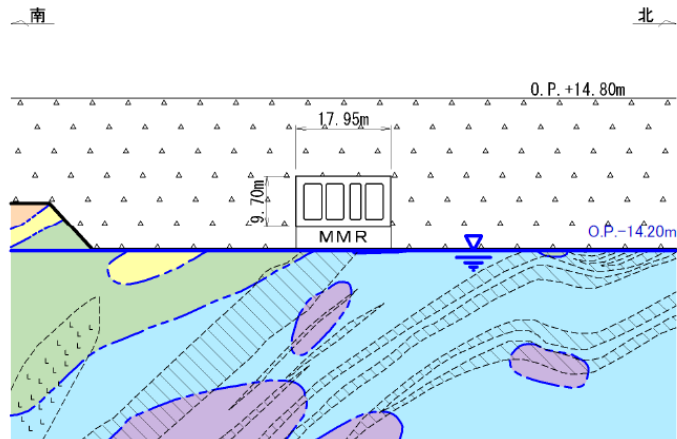
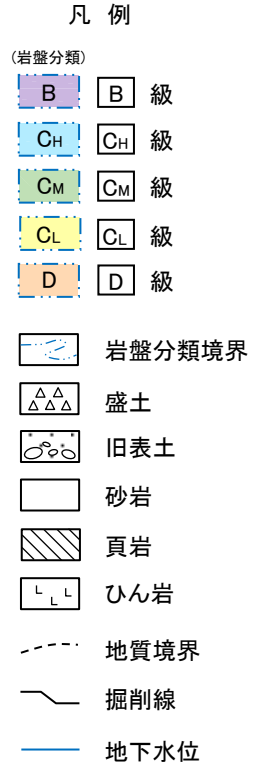


排気筒連絡ダクト(土砂部)

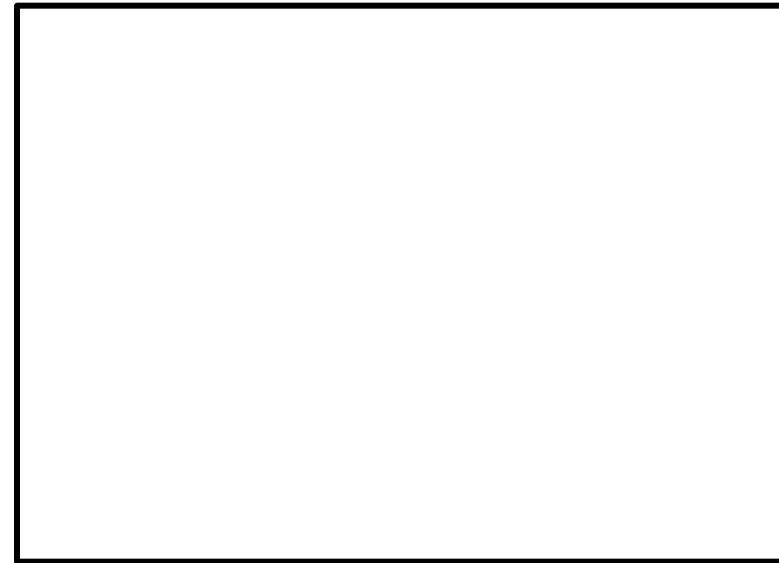


液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<p>[岩盤部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・保守的にトンネル天端に地下水位を設定。 ・周囲に液状化検討対象層が分布しない。 <p>[土砂部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・支持層上面付近まで低下。 <p>(地下水位低下設備による)</p>

- 原子炉機器冷却海水配管ダクト及び海水ポンプ室における地下水位及び施設設置状況を以下に示す。



原子炉機器冷却海水配管ダクト



海水ポンプ室

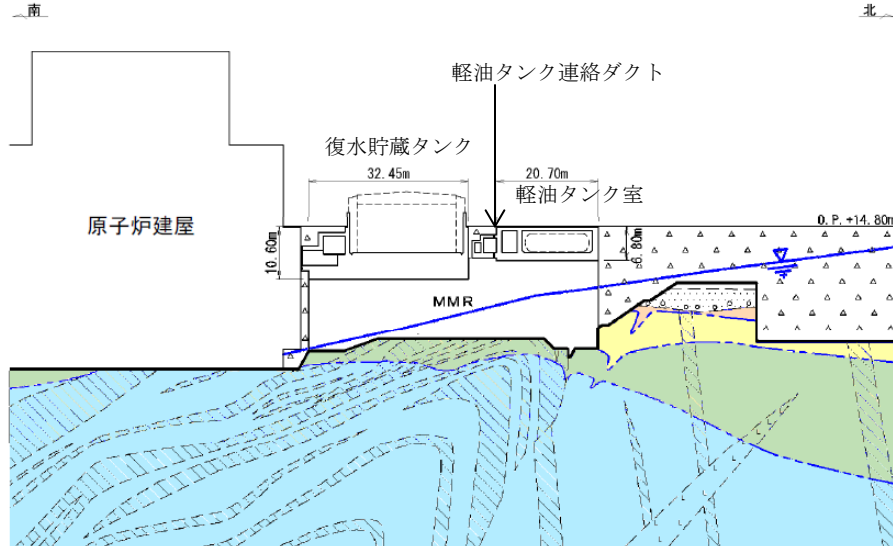
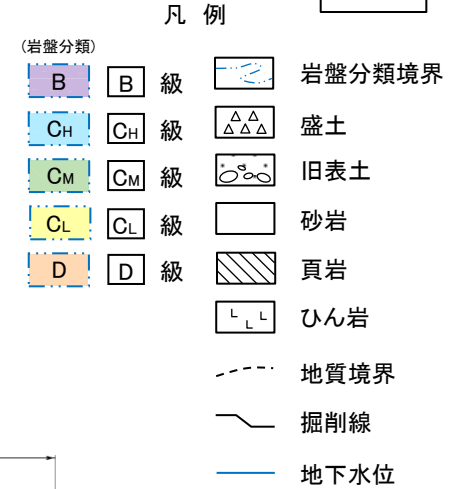
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

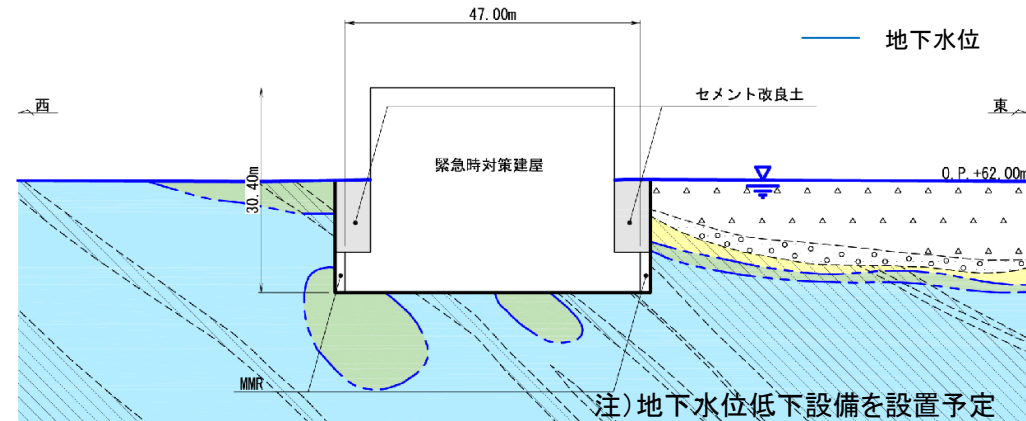
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

補足説明資料 4. 構造物毎の地下水位について
各対象施設の地下水位設定(8/12)

- 軽油タンク室, 軽油タンク連絡ダクト, 復水貯蔵タンク基礎及び緊急時対策建屋における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



軽油タンク室, 軽油タンク連絡ダクト, 復水貯蔵タンク基礎

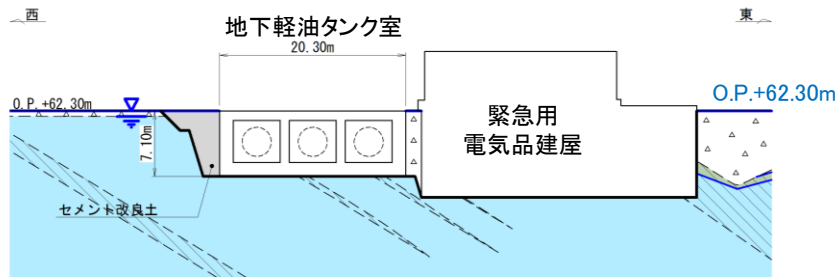


緊急時対策建屋

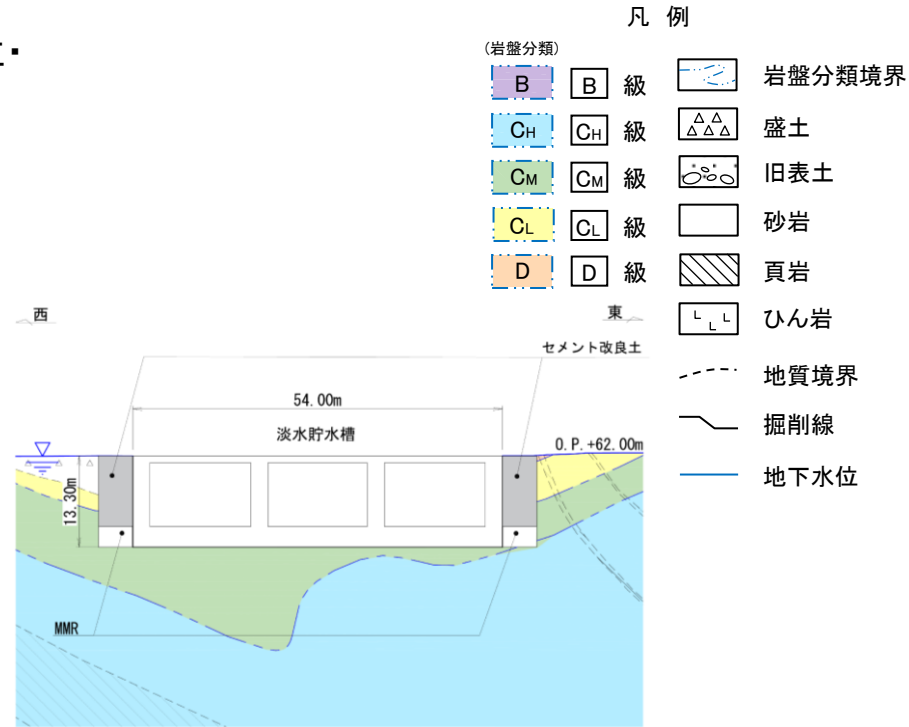
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備は設置されていない 高さのあるMMR上に設置しており、液状化検討対象層は構造物より下方に分布 構造物直下には液状化検討対象層が分布しない。

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> 支持層上面付近まで低下 (地下水位低下設備による) 周囲に液状化検討対象層が分布しない (セメント改良土による埋戻し)

- 緊急用電気品建屋, 地下軽油タンク室, 淡水貯水槽における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



緊急用電気品建屋, 地下軽油タンク室



淡水貯水槽






液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備は設置されていない。 [緊急用電気品建屋] 液状化検討対象層は建屋周辺に局所的にしか分布しない。 構造物直下には液状化検討対象層は分布しない。 [地下軽油タンク室] 周囲に液状化検討対象層が分布しない。 (セメント改良土による埋戻し)

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備は設置されていない。 周囲には液状化検討対象層が分布しない。 (セメント改良土による埋戻し)

- 取水路(標準部及び漸拡部)における地下水位・施設設置状況を以下に示す。

凡例

(岩盤分類)

-  B 級
-  CH 級
-  CM 級
-  CL 級
-  D 級

 岩盤分類境界


 盛土


 旧表土


 砂岩

 頁岩

 ひん岩

 地質境界

 掘削線

 地下水位

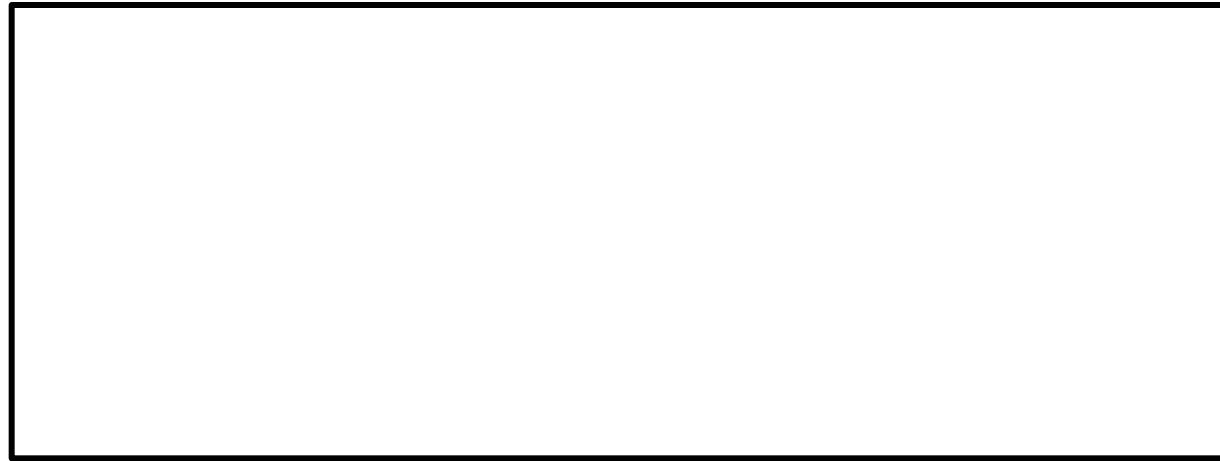
取水路(標準部)

取水路(漸拡部)















枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<p>[標準部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下水位低下設備は設置されていない。 ・構造物直下に液状化検討対象層が分布しない。 ・周囲に液状化検討対象層が分布するが、地形の傾斜がなく側方流動や偏土圧の影響は考えられない。 <p>[漸拡部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下水位低下設備は設置されていない。 ・液状化検討対象層の分布は局所的。 ・構造物直下に液状化検討対象層が分布しない。

- 取水口における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



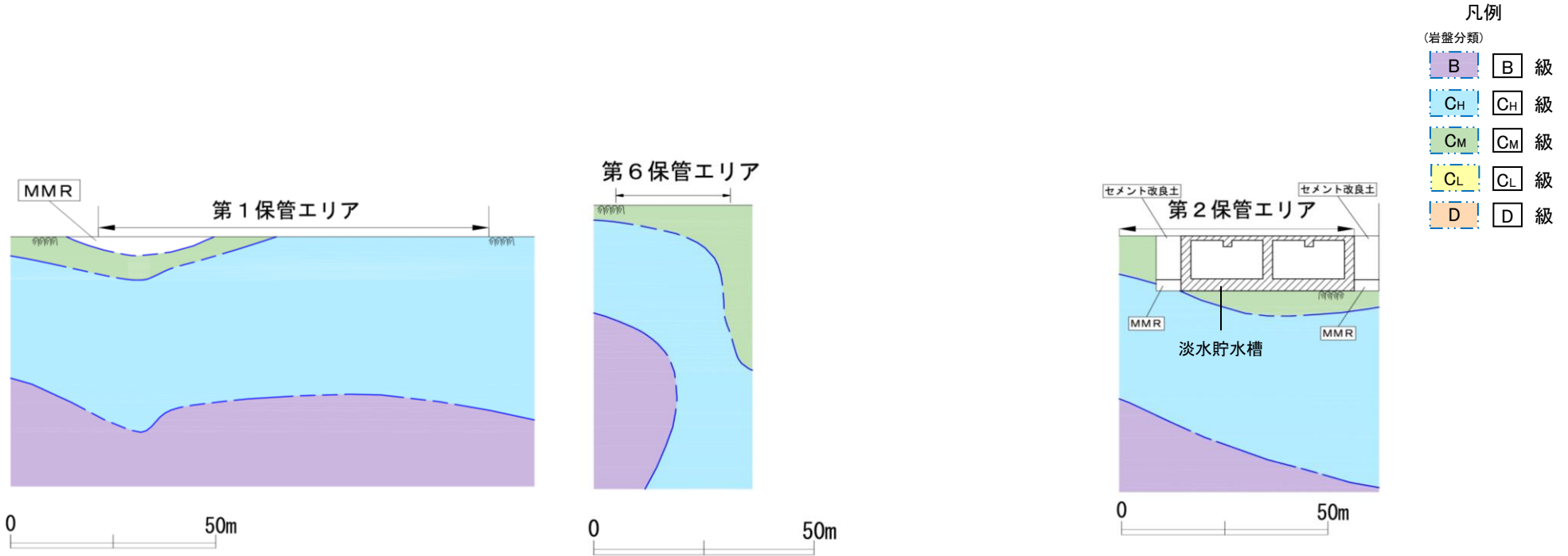
取水口

- 凡例
- (岩盤分類)
-  B 級
 -  CH 級
 -  CM 級
 -  CL 級
 -  D 級
 -  岩盤分類境界
 -  盛土
 -  旧表土
 -  砂岩
 -  頁岩
 -  ひん岩
 -  地質境界
 -  掘削線
 -  地下水位

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位低下設備は設置されていない。 ・周囲を地盤改良しており、液状化検討対象層の分布は局所的。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

- 保管場所(第1, 第6), 保管場所(第2)における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



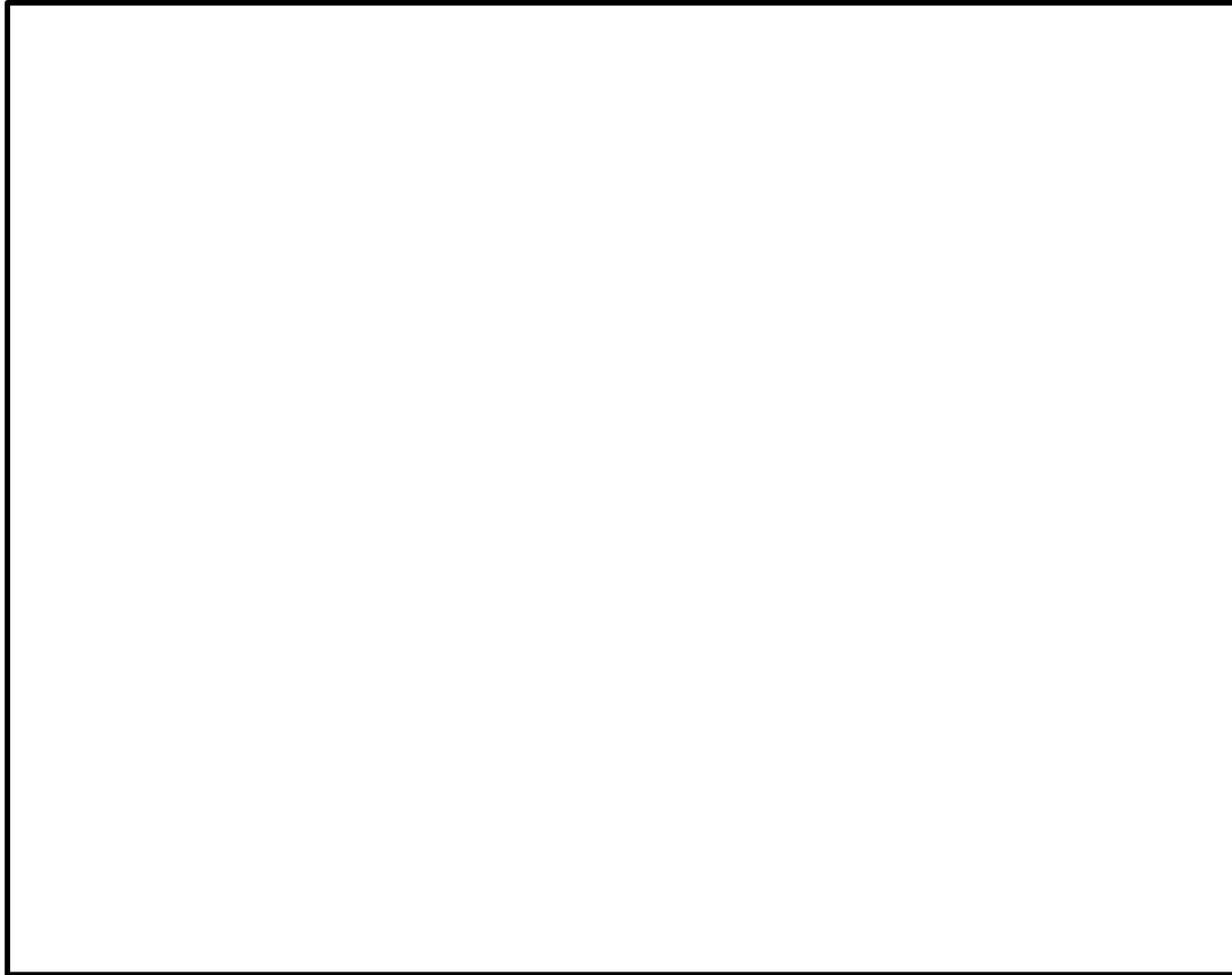
保管場所(第1, 第6)

保管場所(第2)

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・岩盤上に設置しており, 液状化検討対象層は分布しない。

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・淡水貯水槽及び周囲のセメント改良土上に設置しており, 液状化検討対象層は分布しない。

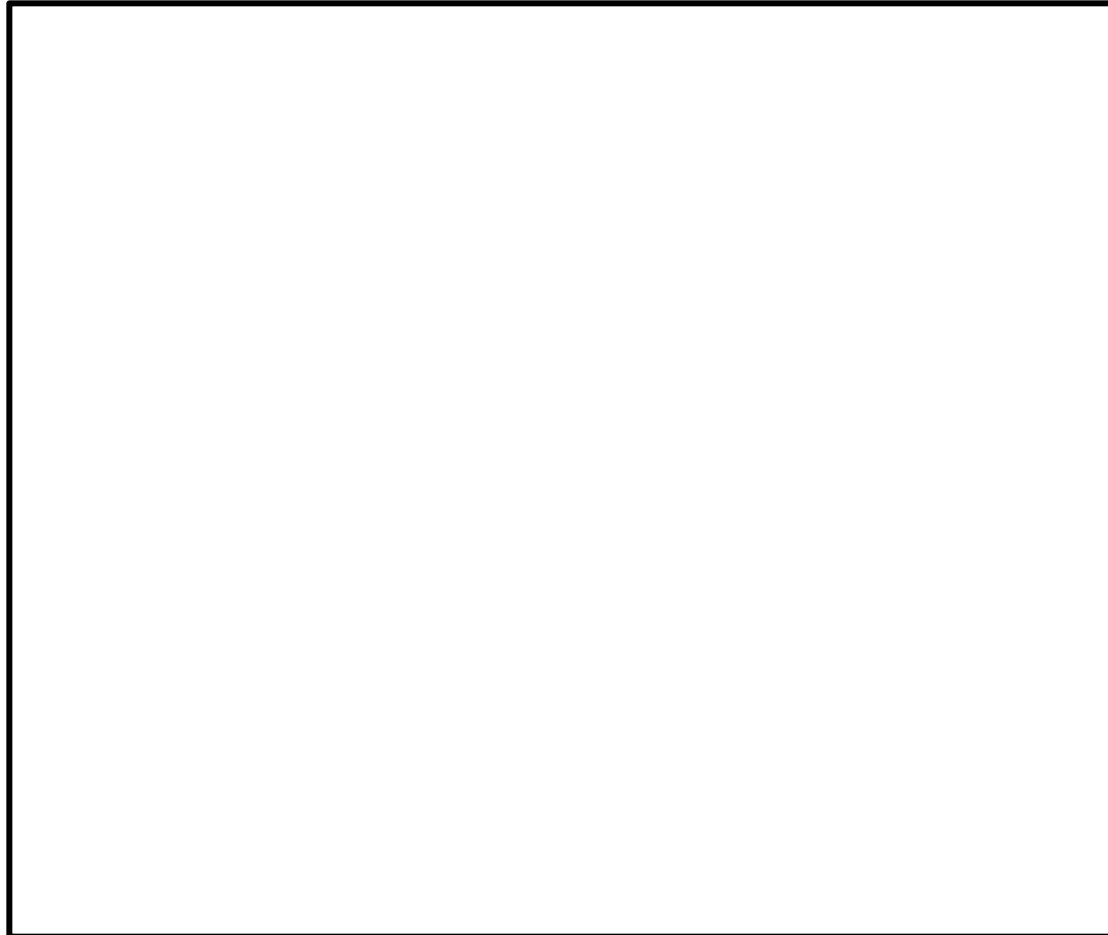
- 原子炉建屋, 制御建屋, タービン建屋, 排気筒, 海水ポンプ室等の施設周辺には, 施設に作用する揚圧力を低減するため, 地下水位低下設備を設置し地下水位を低下させている。



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

(参考)浸透流解析の概要(1/6) 断面位置

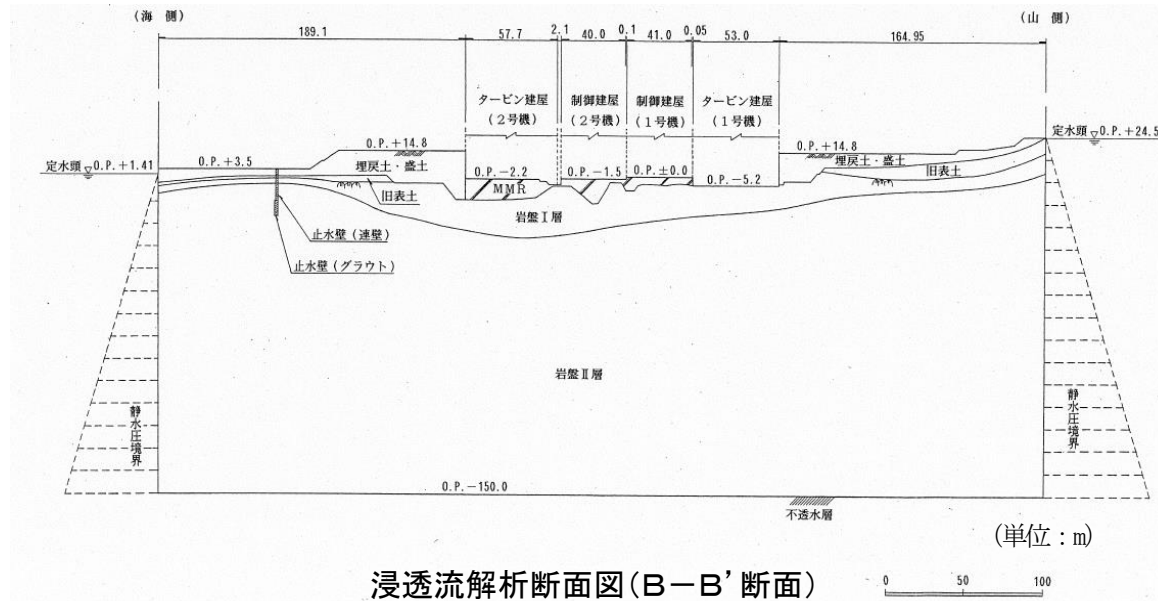
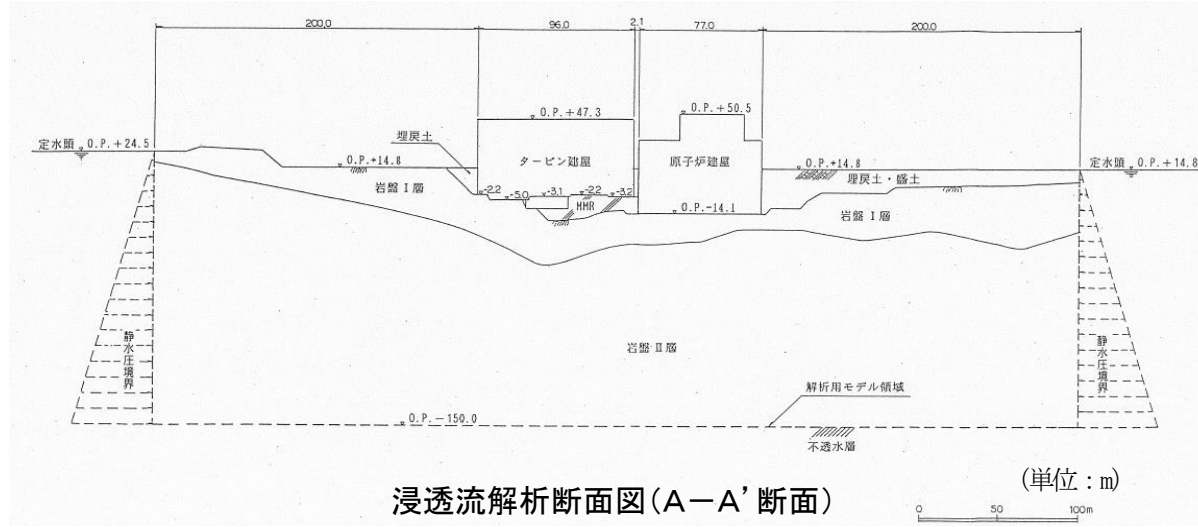
- 施設の耐震設計に用いる地下水位は、地下水位低下設備を考慮した浸透流解析を参考に設定している。
- 以下に解析断面位置(4断面)を示す。



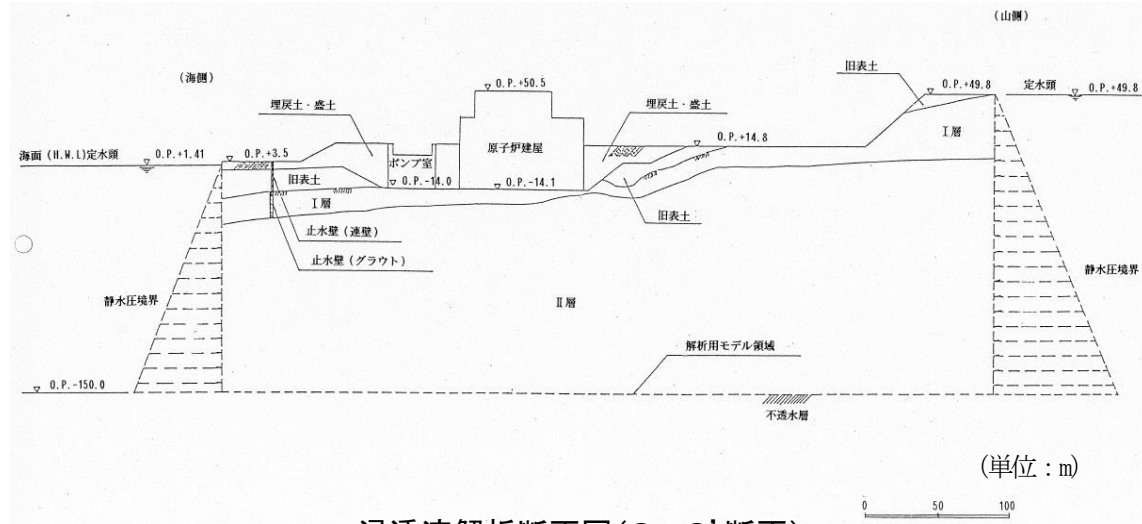
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

(参考)浸透流解析の概要(2/6) 解析断面①

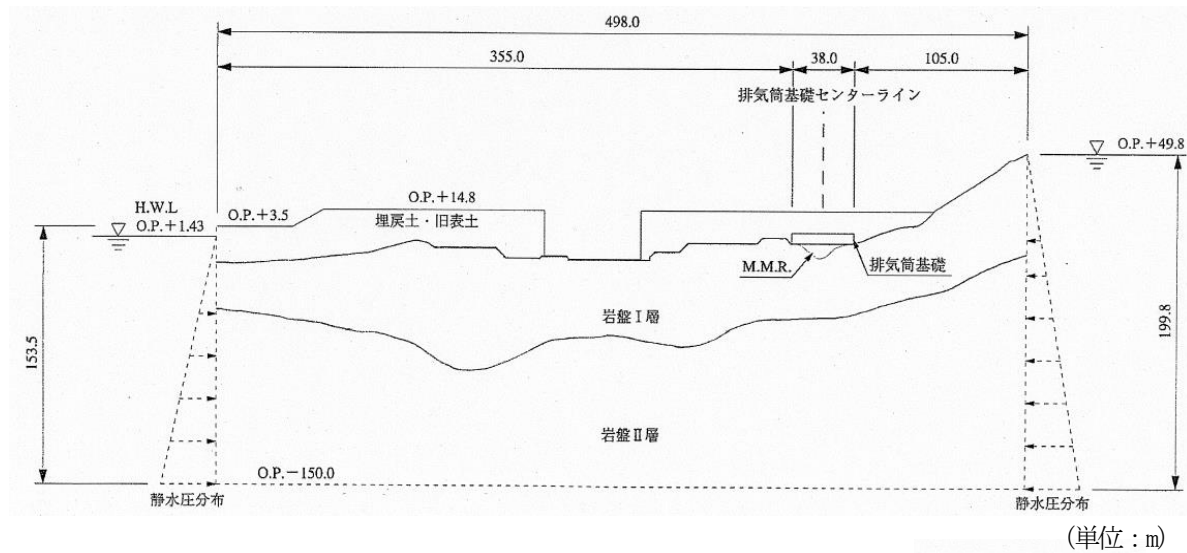
- 解析断面位置(A-A', B-B'断面)を以下に示す。



- 解析断面位置(C-C', D-D'断面)を以下に示す。



浸透流解析断面図(C-C'断面)



浸透流解析断面図(D-D'断面)

(参考)浸透流解析の概要(4/6) 透水係数

- 浸透流解析に用いた透水係数を以下に示す。
- 岩盤の透水係数は、2号炉及び3号炉のそれぞれの基礎地盤・周辺斜面の安定性評価のために実施した透水試験により設定している。

解析用物性値(2号炉周辺)

(単位:cm/s)

地層	盛土 ・旧表土	岩盤		MMR
		I層	II層	
透水係数	3.0×10^{-3}	7.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}

注)A-A'断面, B-B'断面, C-C'断面に使用

解析用物性値(3号炉周辺)

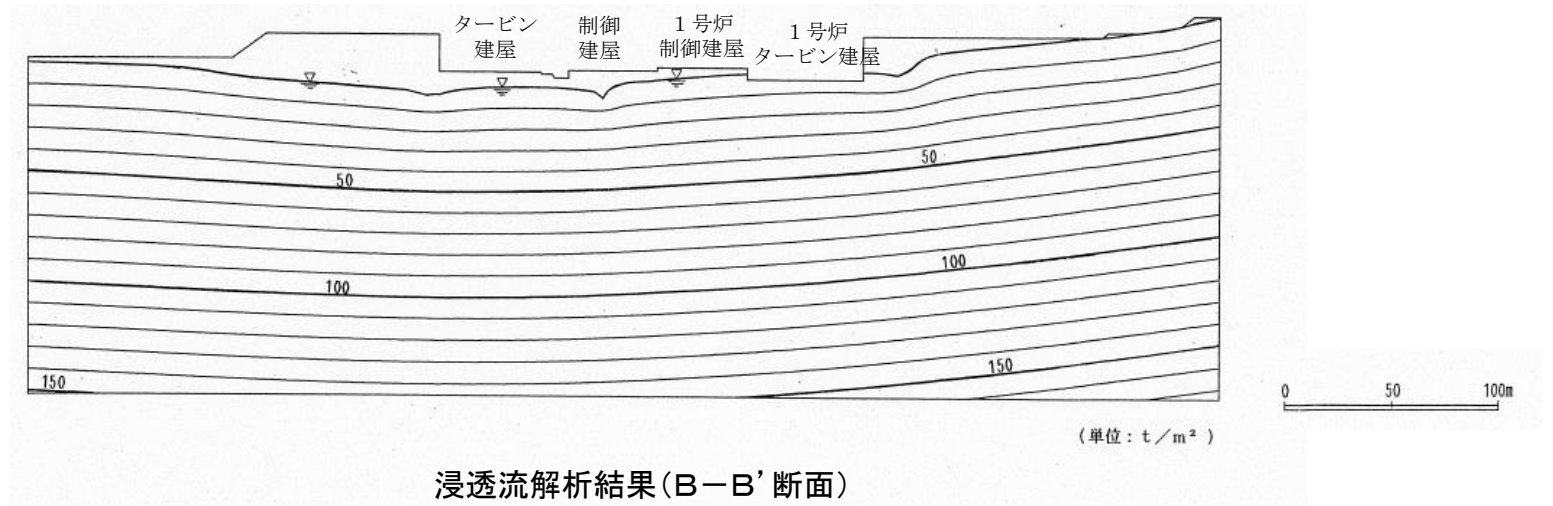
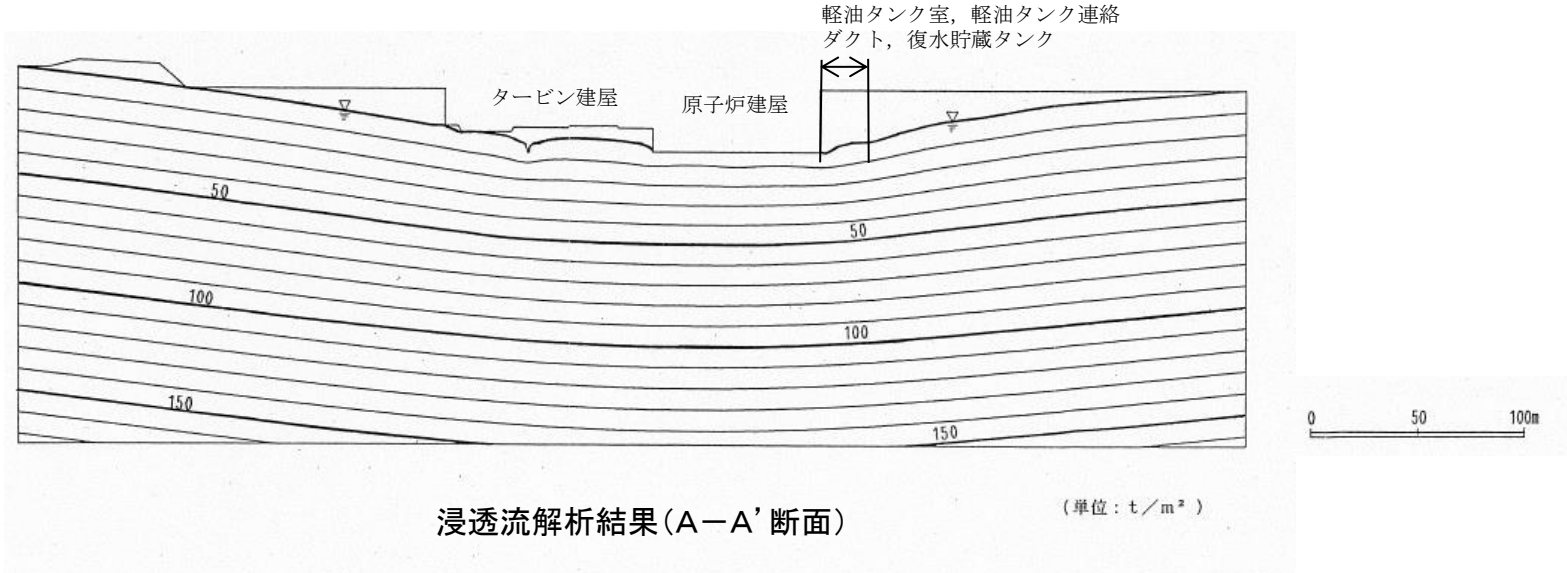
(単位:cm/s)

地層	盛土 ・旧表土	岩盤		MMR
		I層	II層	
透水係数	3.0×10^{-3}	2.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-9}

注)D-D'断面に使用

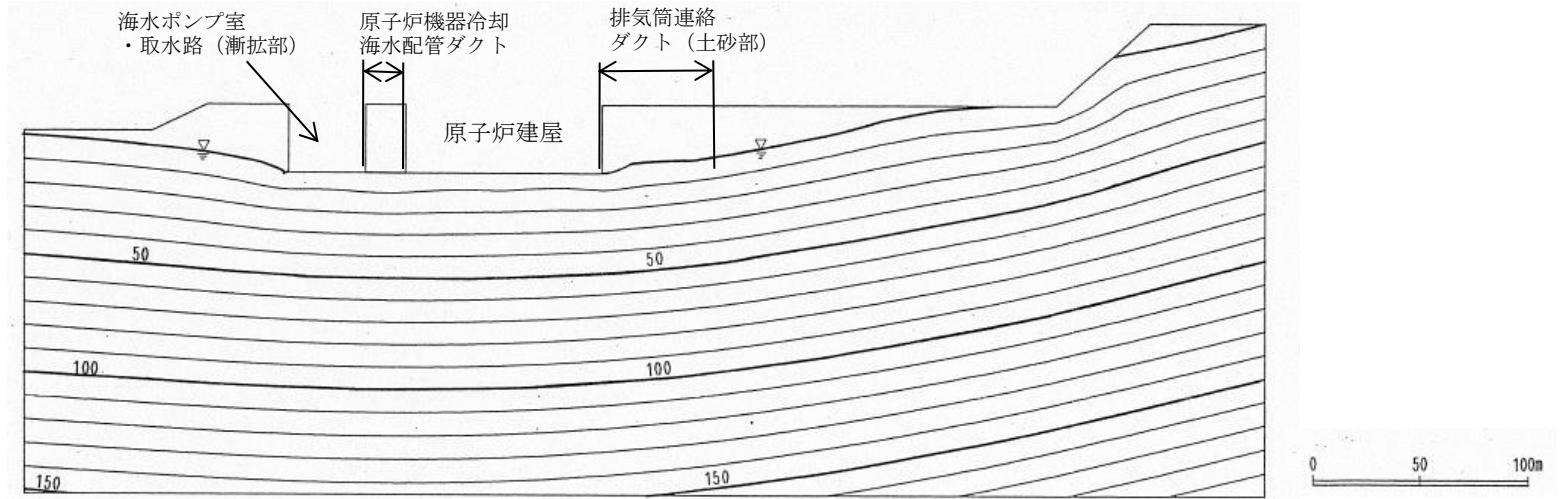
(参考)浸透流解析の概要(5/6) 浸透流解析結果①

- 浸透流解析の結果(A-A', B-B' 断面)を以下に示す。



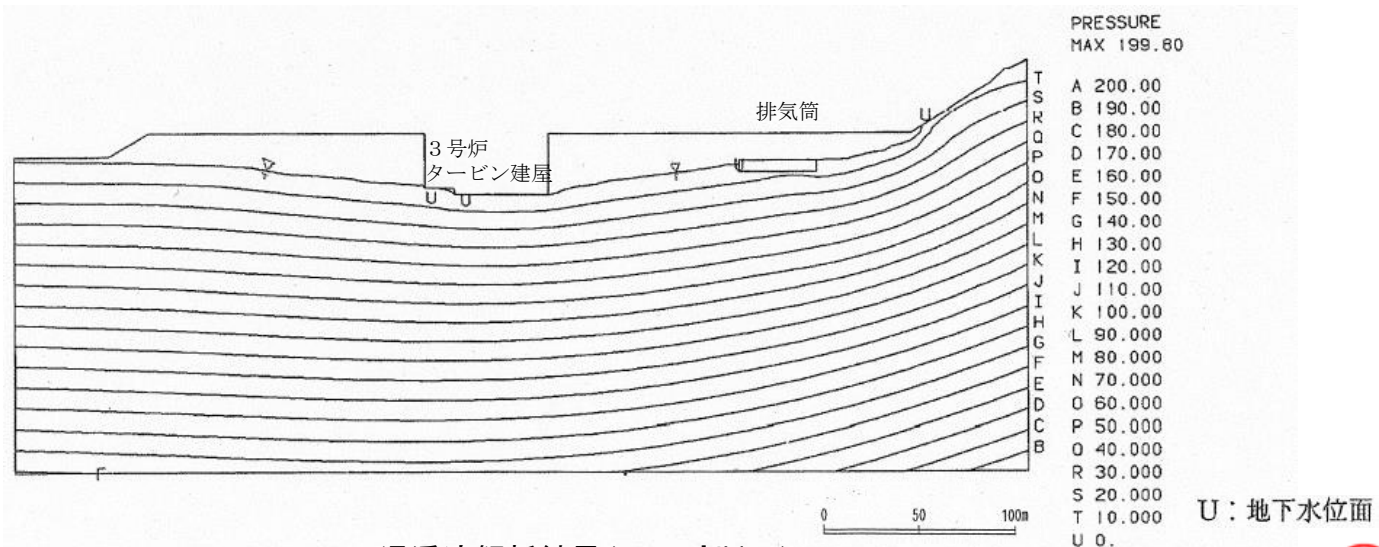
(参考)浸透流解析の概要(6/6) 浸透流解析結果②

- 浸透流解析の結果(C-C', D-D' 断面)を以下に示す。



浸透流解析結果(C-C' 断面)

(単位: t/m²)



浸透流解析結果(D-D' 断面)

(参考)セメント改良土による埋戻しについて

- 施設周辺の埋戻し材料は、基本的に盛土を用いているが、一部の施設周辺においては、セメント改良土により埋戻す計画としている。
- 緊急時対策建屋，地下軽油タンク及び淡水貯水槽の埋戻し材料の一部については、セメント改良土を用いる計画としているが、セメント改良土は、セメント混合処理土として固結した地盤であることから液状化する可能性はない。
- 以下にセメント改良土のコア写真を示す。



セメント改良土コア写真(28QB-4-1)

補足説明資料

5. 盛土のN値の取扱いについて

盛土のN値について(1)

■ 盛土の液状化強度試験試料採取位置の代表性確認のうちN値について

- 液状化強度試験試料採取位置の代表性確認指標としては、粒度分布のほか、液状化判定において参照するパラメータ(細粒分含有率、N値)を用いるのが一般的と考えられるが、盛土材料は建設時に発生した岩砕(最大粒径300mm)であり、適正なN値の測定が難しいことから、指標として採用せず、代替指標として礫よりも大きな体積を評価することができ、礫の影響を受けにくい水置換法に基づく相対密度を選定した。(旧表土は砂質土主体であり、標準貫入試験の適用地盤としてN値を採用)

指標	液状化強度比と相関が高いと考えられる理由	適用
粒度分布	各基準類における液状化判定で平均粒径、10%粒径を使用している	旧表土、盛土
細粒分含有率	各基準類の液状化判定における液状化強度比の算定式において、液状化強度比を補正するパラメータとして用いられている	旧表土、盛土
N値	各基準類の液状化判定式の液状化強度比の算定式のパラメータとして使用している	旧表土
相対密度	粗粒の粘着性のない土の締固め程度を表している	盛土

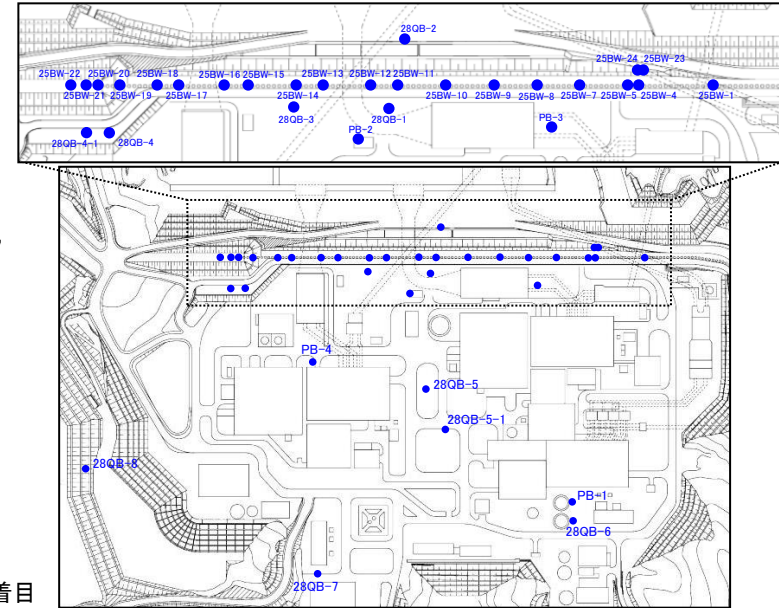
- 盛土のN値は液状化評価の対象施設である防潮堤付近での試料数も多いことから、参考として液状化強度試験試料採取位置との比較を行った。

■ 岩砕のN値採用が難しい理由

- 盛土として使用した岩砕は、礫(最大粒径300mm)を多く含む箇所があり、標準貫入試験を行った箇所に礫が存在した場合は、礫自体を打撃することによりN値が著しく大きくなる場合(以下、礫あたり)が考えられる。
(盛土の標準貫入試験については、50回で礫あたりと判断し試験を終了している。)
- また、岩砕を主体として盛土した場合、施工時に礫のかみ合わせにより、空隙も生じていると考えられる。これらの空隙箇所も含めて試験を行った際には、空打ち状態となりN値を過小評価してしまうことが考えられる。
- このことから、N値の分布が深度方向に不連続かつ過大／過小となる範囲が出現するため、実際の地盤の性状をN値で代表できない可能性がある。

■ N値のばらつきについて

- 本検討に用いたデータ(35点)は、2011年東北地方太平洋沖地震後に取得したものであり、このうち25点は防潮堤構築前に得たものである。
- N値の小さい箇所※1は離散的に出現する傾向があり、深さ方向に不連続となっている。なお、N値の小さい箇所は、概ね観測地下水位以浅である。
- N値の深度方向のばらつきの程度は盛土のマトリクス(礫の混入程度)により異なり、局所的に小さいN値も存在する。N値50以上は礫あたりと考えられる。
- また、地盤性状(応力状態や変形)を評価するのに必要な初期せん断弾性剛性 G_0 は、弾性論に基づきS波速度から求めることができる。防潮堤近傍で得たS波(5点)とN値を比較すると、S波は、締固め管理し造成された地盤として深度方向も大きくなる分布を示すが、N値は礫の存在により深度方向にばらついており、両者の対応はない。したがって、実際の地盤の性状をN値で代表できないと考えられる。



※1液状化強度試験試料採取位置の -1σ 以下として、N値5以下に着目

標準貫入試験位置図(盛土)

盛土における深度方向のN値の分布

O.P.(m)	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4※2	25BW-1	25BW-4	25BW-5	25BW-7	25BW-8	25BW-9	25BW-10	25BW-11	25BW-12	25BW-13	25BW-14	25BW-15	25BW-16	25BW-17	25BW-18	25BW-19	25BW-20	25BW-21	25BW-22	25BW-23	25BW-24	28QB-1	28QB-2	28QB-3	28QB-4	28QB-4-1	28QB-5	28QB-5-1	28QB-6	28QB-7	O.P.(m)	28QB-8						
15~14																																										
14~13																																										
13~12			9	50	6	9	29	15	13	7	3	1	24	5	13	10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6					
12~11			18	12	37	9	40	26	37	12	13	5	1	25	14	7	9	7	3	15	10	14	50	50	50	12	13	14	21	16	18	20	8	17	21							
11~10	9	50	50	50	4	12	50	21	50	17	50	1	13	14	17	24	21	13	12	17	14	7	50	50	10	17	25	22	18	9	6	10	25	23								
10~9	41	16	17	10		30	27	14	22	7	50		12	13	14	18	10	19	33	16	12	20	50	50	50	19	40	28	21	50	16	26	30									
9~8	50	6	23	9		20	22	13	38	10	17	24	16	45	9	9	50	20	35	23	12	6	10	3	21	12	3	13	18	14	7	17	45									
8~7	50	10	17	14		22	50	28	50	11	10	10	21	24	12	50	50	9	24	24	7	11	14	28	15	18	21	18	14	12	42											
7~6	23	46	16			24	16	10	46	14	11	15	13	22	30	35	50	8	15	12	50	19	7	5	19	13	14	7	13	25	40											
6~5	14	24	10	8		50	25	15	23	13	13	33	43	16	50	30	11	10	41	10	11	10	11	21	29	12	12	39	24	14	39											
5~4	20	15	14	13		19	16	27	17	41	50	13	13	27	18	13	50	50	23	14	50	13	20	13	24	17	33	30	19	18												
4~3	14	34	15	18		19	23	11	11	13	21	12	29	50	9	50	15	14	24	10	22	9	22	18	20	7	14	50	50	30												
3~2	25	13	9	18		50	45	21	50	35	14	50	16	24	27	33	11	33	50	32	14	15	9	26	38	25	15	8	43	8												
2~1	31	19	19	34		11	11	27	50	44	13	50	9	14	12	50	11	23	50	16	50	19	43	29	25	9	15	16	17	39												
1~0	22	44	12	29		8	19	31	50	24	50	42	26	18	20	34	20	26	47	19	15		14	13	31	19	16	19	19	50												
0~-1	15	38	18	15		16	20	47	21	14	13	15	50	21	11	10	32	11	29	20																						
-1~-2	25	47	14	24		16	20	25	14	14	32	32	25	50	10	48	15	29	50																							
-2~-3	30	50	22	20		9	25	20	33	11	23		16	17		50	45	50	18																							
-3~-4	10	50	43	21		7	16	8	50	11	18		17	9	13	9	31																									
-4~-5		21	17	12		16			50	17	15		14			50	46	22																								
-5~-6		31		10		10		16	22		10		16	21		20	35																									
-6~-7		40																																								
-7~-8																																										
-8~-9																																										
-9~-10																																										
-10~-11																																										
-11~-12																																										
-12~-13																																										
-13~-14																																										
-14~-15																																										
-15~-16																																										

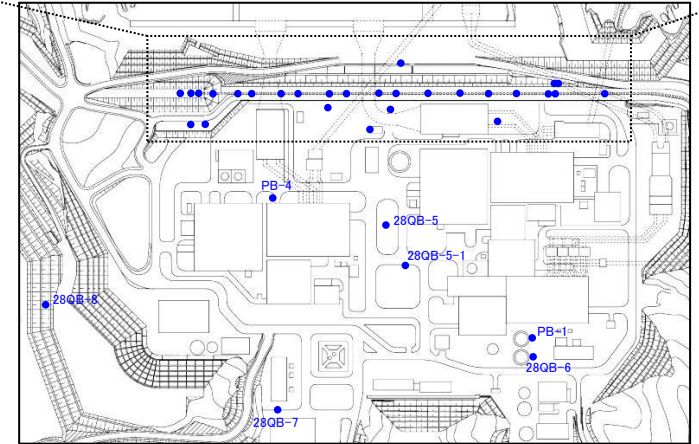
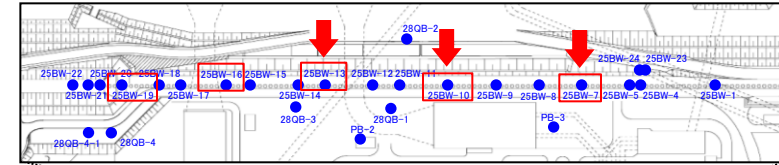
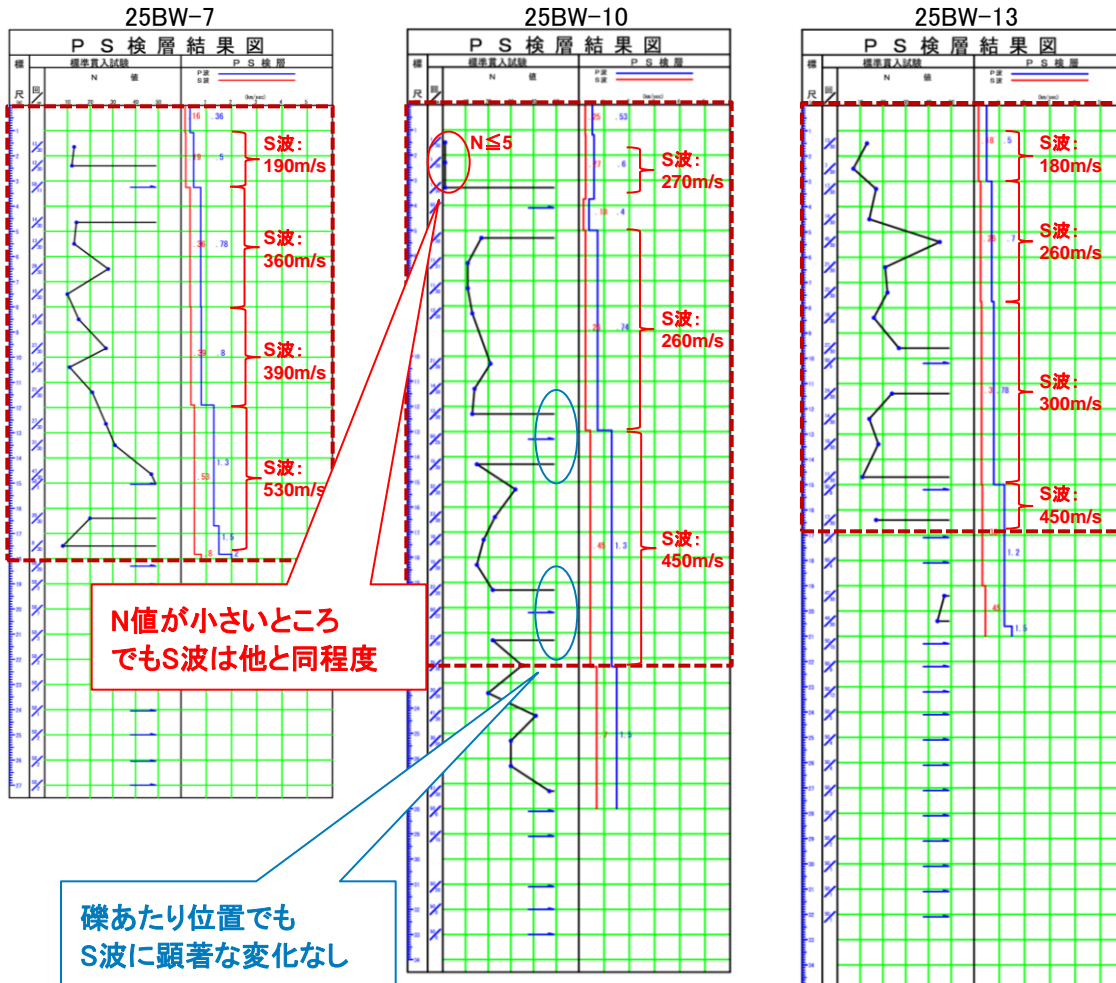
※2孔内観測水位なし

N ≤ 5
N = 50 (礫あたり)
 孔内観測水位

標準貫入試験後、防潮堤(鋼管式鉛直壁)の施工に伴い、現在は背面補強工及び改良地盤に置き換えられている範囲

■ PS検層結果

- N値とS波速度を比較すると、N値は礫の存在により深度方向にばらついているのに対し、S波はN値の大小に係わらず深度方向に増加していく傾向に顕著な変化は見られない。S波は初期せん断剛性 G_0 と関係が深いことから、盛土のN値は地盤性状を代表できないと考えられる。



PS検層実施位置

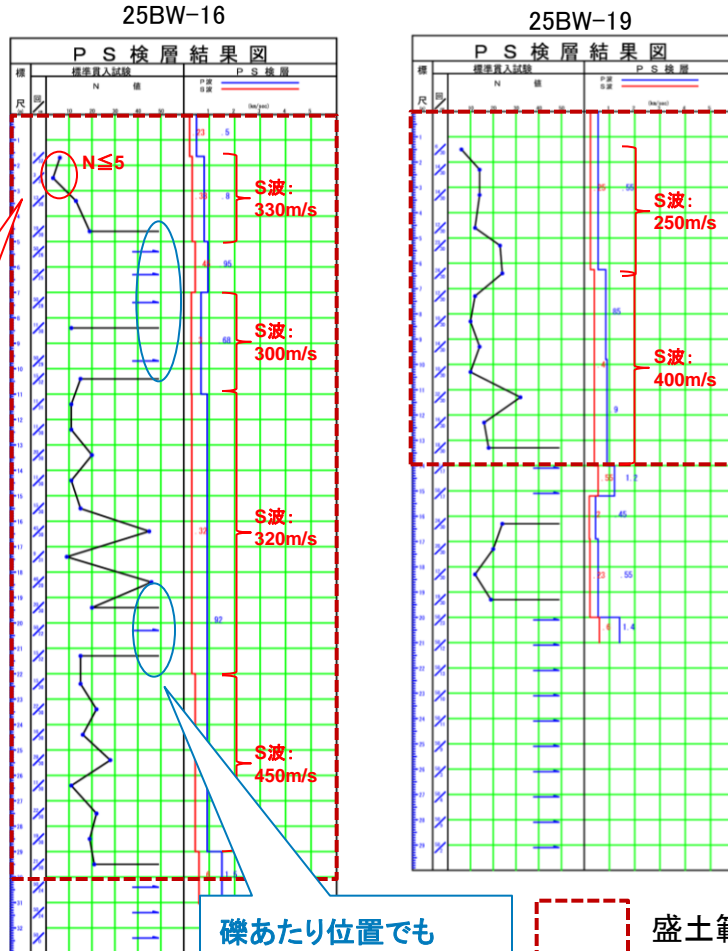
PS検層実施位置図

N値のばらつきに関係なく
速度は深度方向に増加傾向
にある

盛土範囲

■ PS検層結果

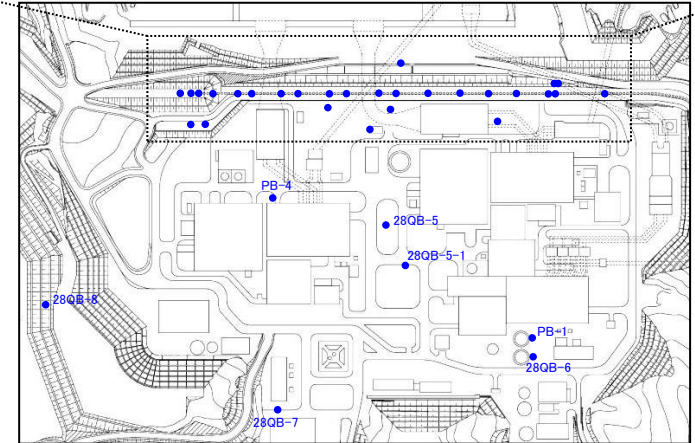
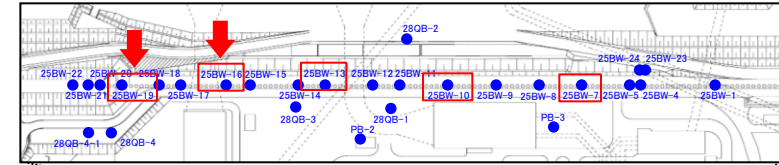
- N値とS波速度を比較すると、N値は礫の存在により深度方向にばらついているのに対し、S波はN値の大小に係わらず深度方向に増加していく傾向に顕著な変化は見られない。S波は初期せん断剛性 G_0 と関係が深いことから、盛土のN値は地盤性状を代表できないと考えられる。



N値が小さいところでもS波は他と同程度

礫あたり位置でもS波に顕著な変化なし

盛土範囲



PS検層実施位置

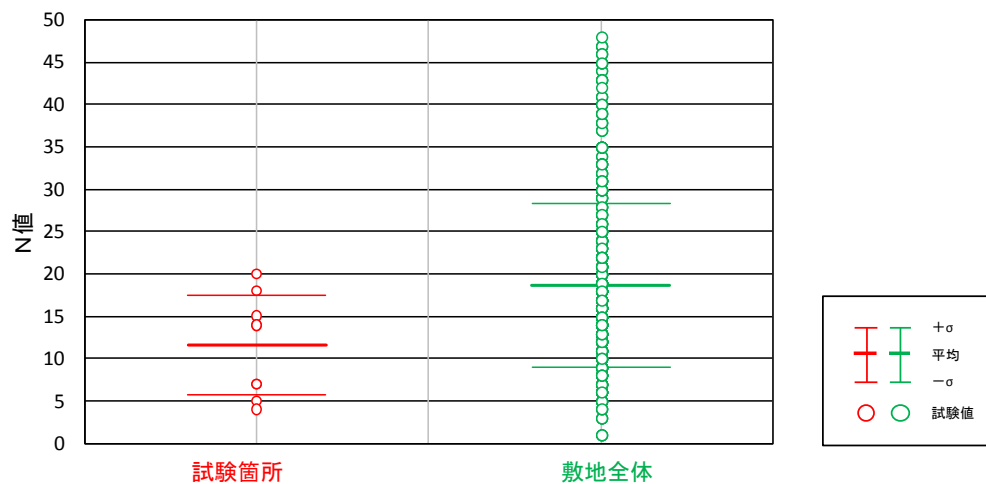
PS検層実施位置図

N値のばらつきに関わらず速度は深度方向に増加傾向にある

盛土の液状化強度試験試料採取位置のN値の比較

■ 液状化強度試験試料採取位置と敷地全体におけるN値の比較

- 礫あたりによりN値が過大となり、適正でないと判断されることから、 $N > 50$ のデータを除外した場合の整理を行った。
- N値については、敷地全体と液状化強度試験試料採取位置を比較して平均値、 -1σ とともに液状化強度試験箇所の方が小さい位置で試験を実施している。よって、N値による比較を行うと液状化強度試験は保守的な位置で実施していると考えられる。
- なお、盛土の標準貫入試験については、50回で礫あたりと判断し試験を終了している。
- なお、N値と細粒分含有率(F_c)の関係について整理したものを参考に補足説明資料7に示す。



盛土におけるN値の比較

補足説明資料

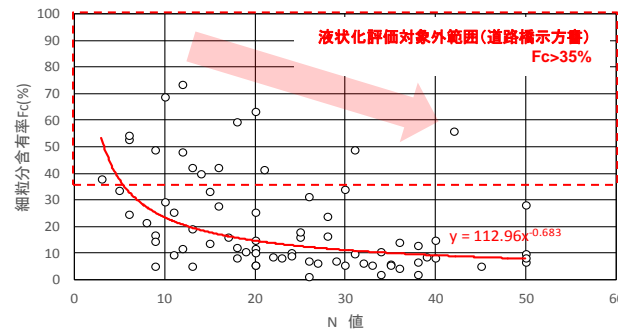
7. N値とFcの関係の整理

【N値とFcの関係の整理】

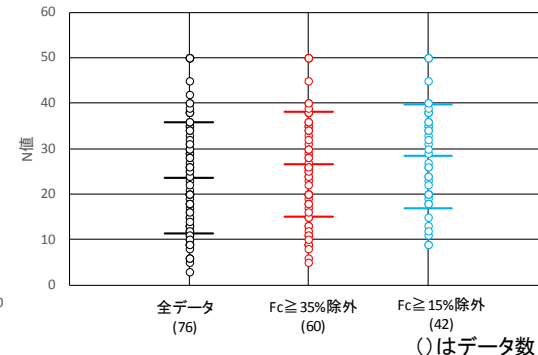
- 粘性土やシルトは液状化しにくい土質とされ、これらが地盤にどれだけ含まれるかを示す値として細粒分含有率（以下Fc）がある。道路橋示方書（V耐震設計編）では、液状化の判定を行う必要がある土層としてFcが35%以下と規定している。一方、液状化強度比の算定式のパラメータであり、液状化強度比と相関が高いとされるN値は、Fcとも相関関係にあるとされる。
- 以上より、各土層（旧表土、盛土）のN値とFcの相関を確認した。また、 $F_c \geq 35\%$ の試料及び参考として港湾の施設の技術上の基準でN値の補正が必要とされている $F_c \geq 15\%$ の試料を除外した場合のN値の整理を行った。
- なお、N値とFcの試料箇所は完全には一致しないため、N値のデータのうちFcのデータもある試料のみを用いることとする。

【旧表土・盛土のN値とFcの関係の整理結果】

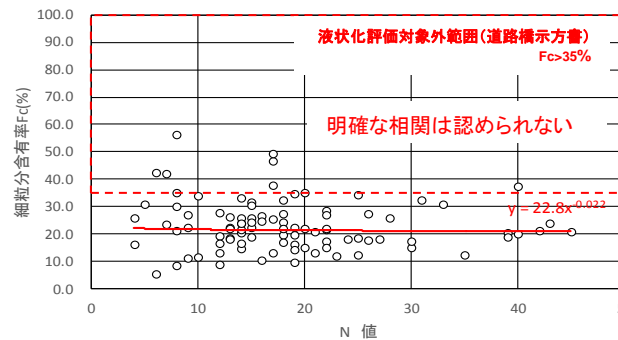
- 旧表土はFcが大きくなるにしたがいN値は小さくなる傾向が認められる。
- 一方、Fcが大きくてもN値が大きい試料があり、Fcが大きいかからといって必ずしもN値が小さくなるわけではない。
- 盛土はN値とFcの明確な相関は認められない。



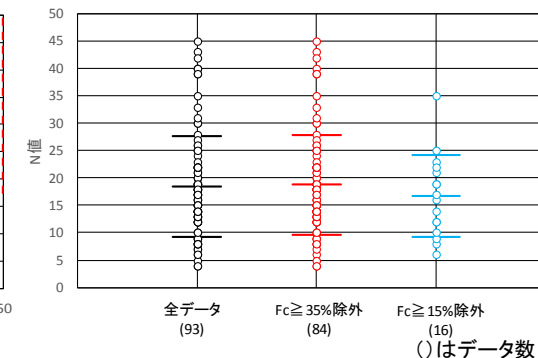
(旧表土)N値とFcの関係



(旧表土)全体FcとN値の整理
()はデータ数



(盛土)N値とFcの関係



(盛土)全体FcとN値の整理
()はデータ数

補足説明資料

8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。

構内道路【H23.3.12撮影】(3号炉海水ポンプ室脇から海側を撮影)

- 構内道路を横断して杭基礎構造の3号炉復水器連続洗浄装置連絡配管トレンチが埋設されているため、周辺の埋戻し部との境界で段差が生じたと考えられる。

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。

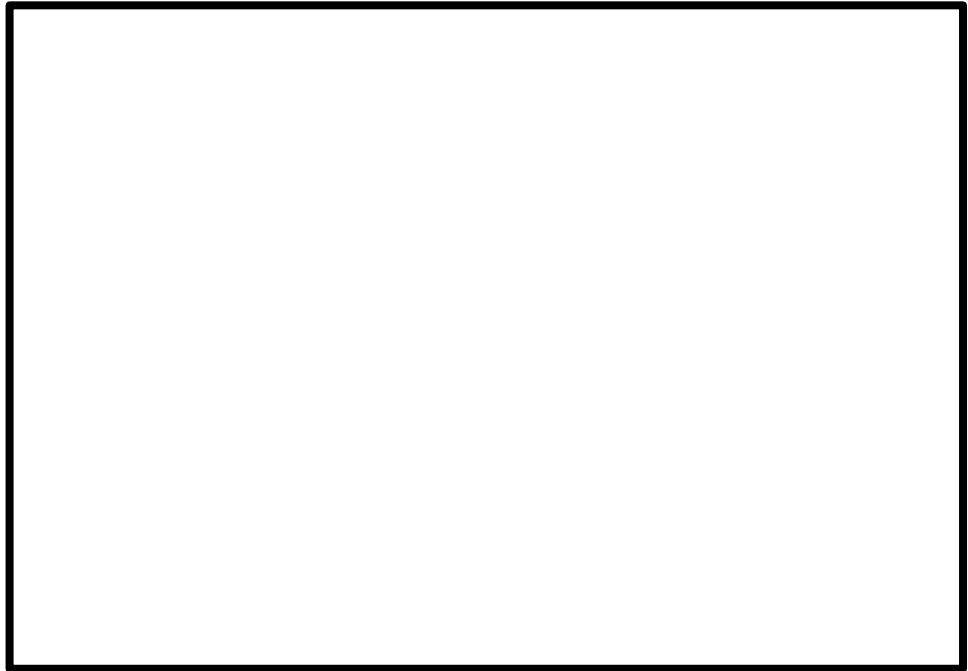
構内道路【H23.3.12撮影】（2号原子炉建屋脇から山側を撮影）

- 敷地の盛土の分布範囲から、写真手前側は埋戻し部（盛土）が分布している範囲であり、写真奥側は切土の範囲であることから、盛土層厚の違いによって段差が生じたものと考えられる。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

補足説明資料 8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について
地震後の沈下の状況(3/7)

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。



1号炉SPT・T-11トレンチ【H23.3.12撮影】

➤ 1号炉SPTは杭基礎、T-2-1トレンチはMMRを介して岩着しているが、写真中央のT-11トレンチは岩着していない構造であるため、T-11トレンチのみ沈下し、1号炉SPT及びT-2-1トレンチとの接続部において段差が生じたと考えられる。



←1号炉SPTとT-11トレンチの接続部

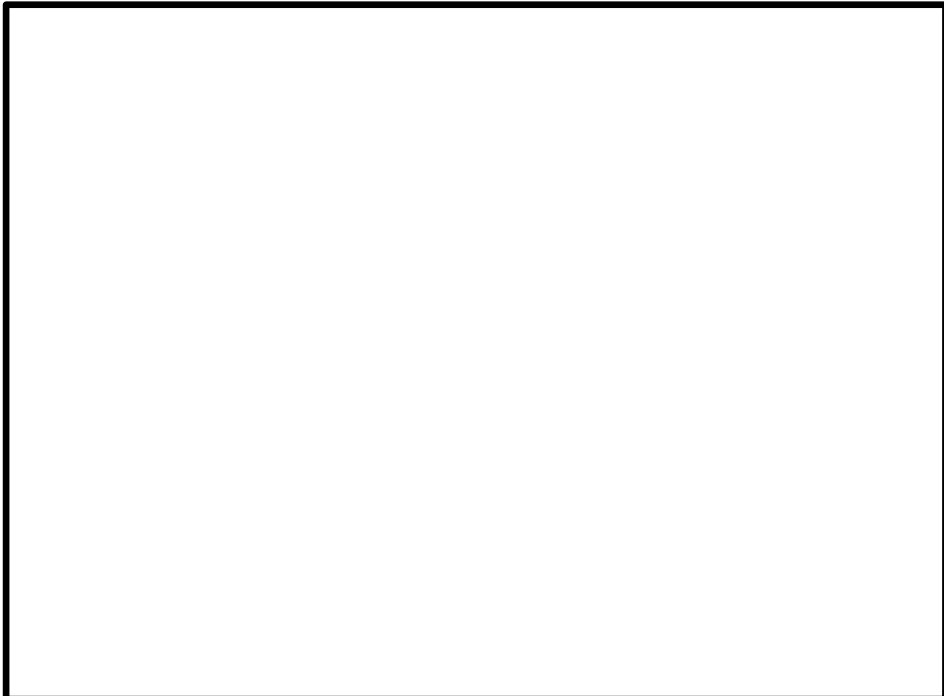
地震後の状況【H29.5.24撮影】



地震後の状況【H29.5.24撮影】

補足説明資料 8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について
地震後の沈下の状況(4/7)

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。

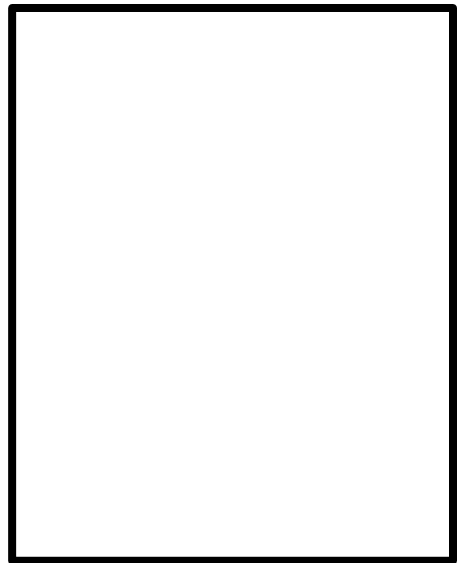


構内道路及び3号炉油水分離槽【H23.3.12撮影】

- 3号炉油水分離槽は、3T-9トレンチ(MMRを介して岩着)の近傍に位置している。そのため、3T-9トレンチに近い側と遠い側で沈下量が異なり、3号炉油水分離槽は写真のように傾いたと考えられる。



平面図



A-A断面図

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

補足説明資料 8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について
地震後の沈下の状況(5/7)

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。

構内道路【H23.3.12撮影】(2号炉海水ポンプ室付近から1号炉海水ポンプ室方向を撮影)
➤ 構内道路に段差や亀裂は確認されないが、海水ポンプ室門型クレーンのレール基礎との摩擦によりL型側溝に不陸が生じている。

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績を示す。

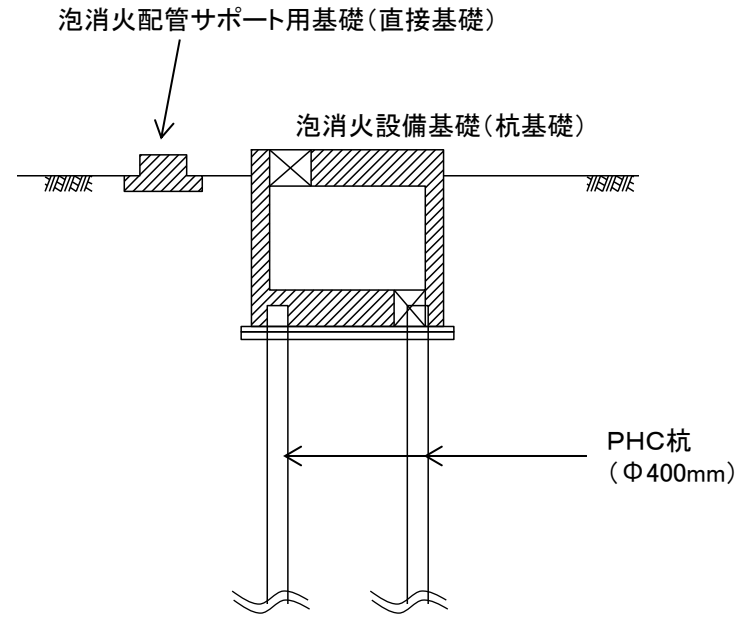


3号炉泡消火設備基礎【H23.3.20撮影】

- 写真㊦: 3号炉泡消火設備基礎は杭基礎構造(MMRを介して岩着)であるため、周辺の埋戻し部のみが沈下している。
- 写真㊦では基礎に敷設されている配管が3号原子炉建屋側に向かって下がっている状況が確認される。これは、写真㊦'から、3号炉泡消火設備基礎から3号原子炉建屋に中間にサポート部材があり、その基礎(直接基礎: 非岩着)が沈下したことにより生じたものであり、3号炉泡消火設備基礎が浮き上がったものではない(断面図は次頁に示す)。



- 泡消火設備基礎(杭基礎)に敷設されている配管は、泡消火配管サポート用基礎(直接基礎)を介して3号原子炉建屋の外側に敷設されている。
- 泡消火設備基礎(杭基礎)と泡消火配管サポート用基礎(直接基礎)の断面図を下に示す。



A-A' 断面図

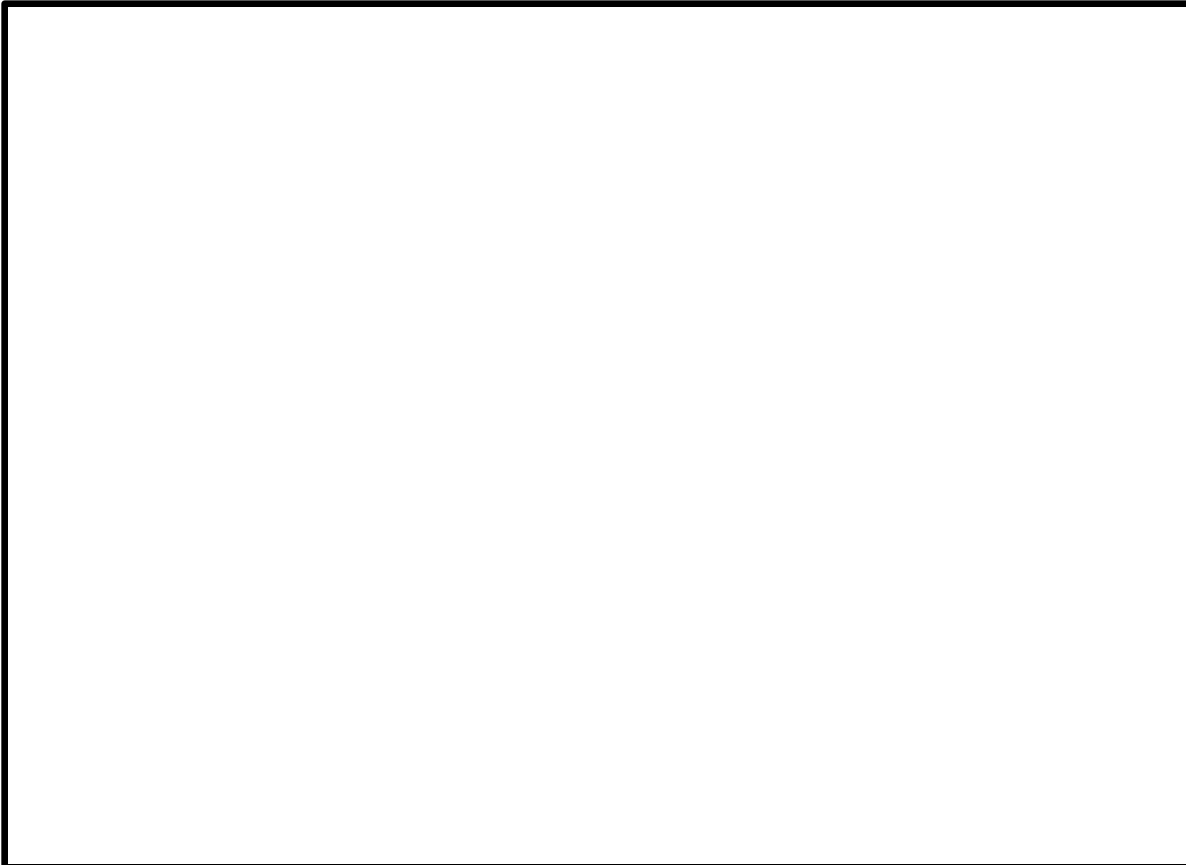
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

地震後の沈下実績(1/2)

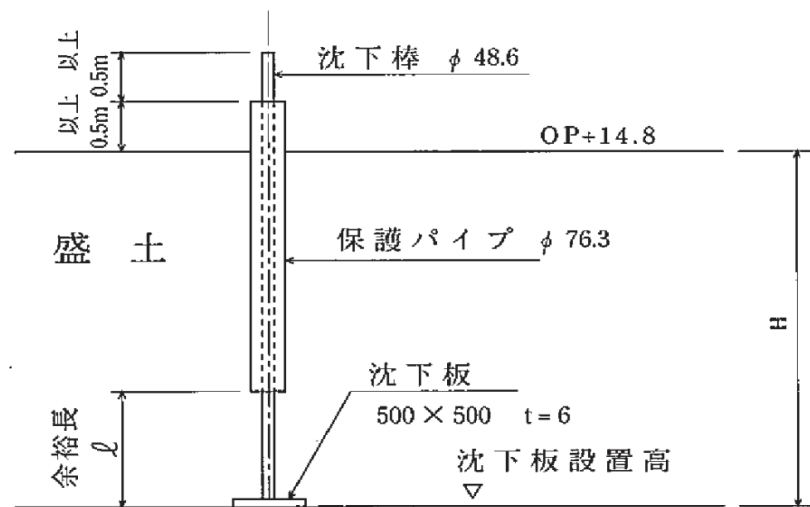
沈下の測定位置および測定方法

- 埋戻し土(盛土)の圧密沈下量や地震時の沈下量の把握のために沈下棒を設置しており、左下図に示す位置で沈下測定を実施している。
- 沈下棒の構造は右下図のとおりであり、沈下棒の天端部の標高を測定することにより、沈下板の下に存在する盛土や旧表土の沈下量を把握できる。沈下率は測定した沈下量を沈下板の下に存在する盛土および旧表土の層厚で除すことにより算出する。

- なお、沈下量の測定は2011年東北地方太平洋沖地震の前後の2月8日と3月27, 28日に実施しており、当該地震の影響による沈下量を把握できている。



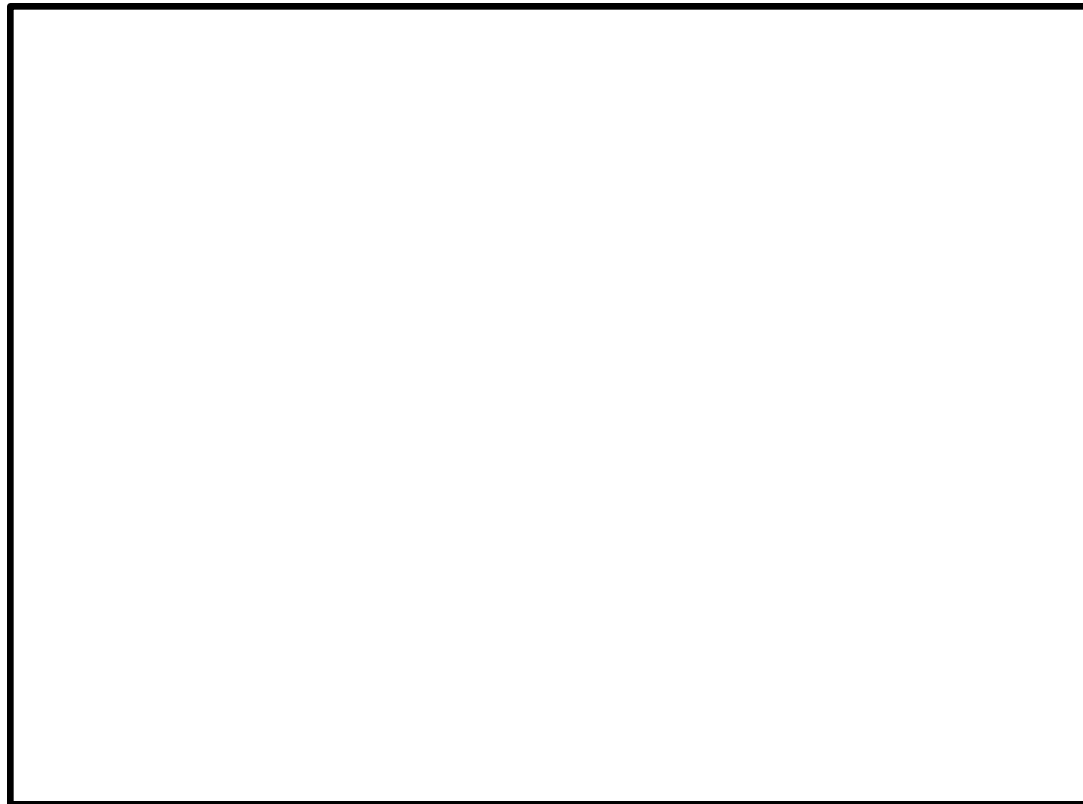
沈下測定箇所



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

地震後の沈下実績(2/2)

- 2011年東北地方太平洋沖地震における女川原子力発電所の沈下実績値を示す。
- 測定箇所13地点の平均沈下率は0.87%であり、概ね1.0%前後の沈下率であった。



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

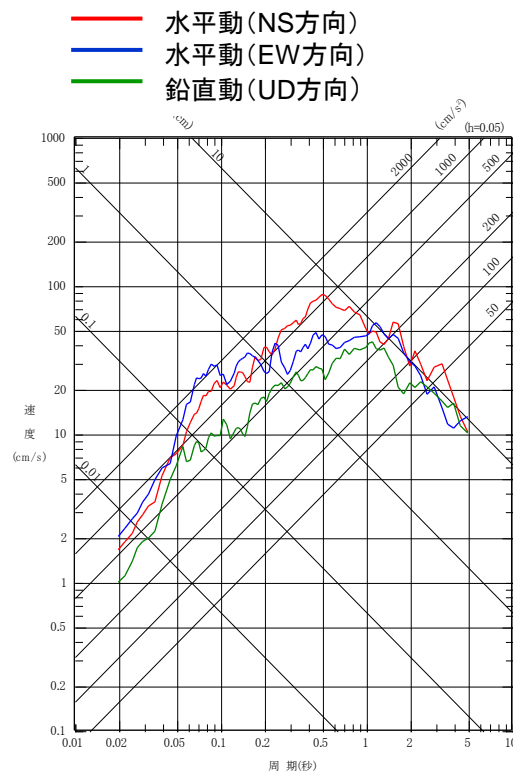
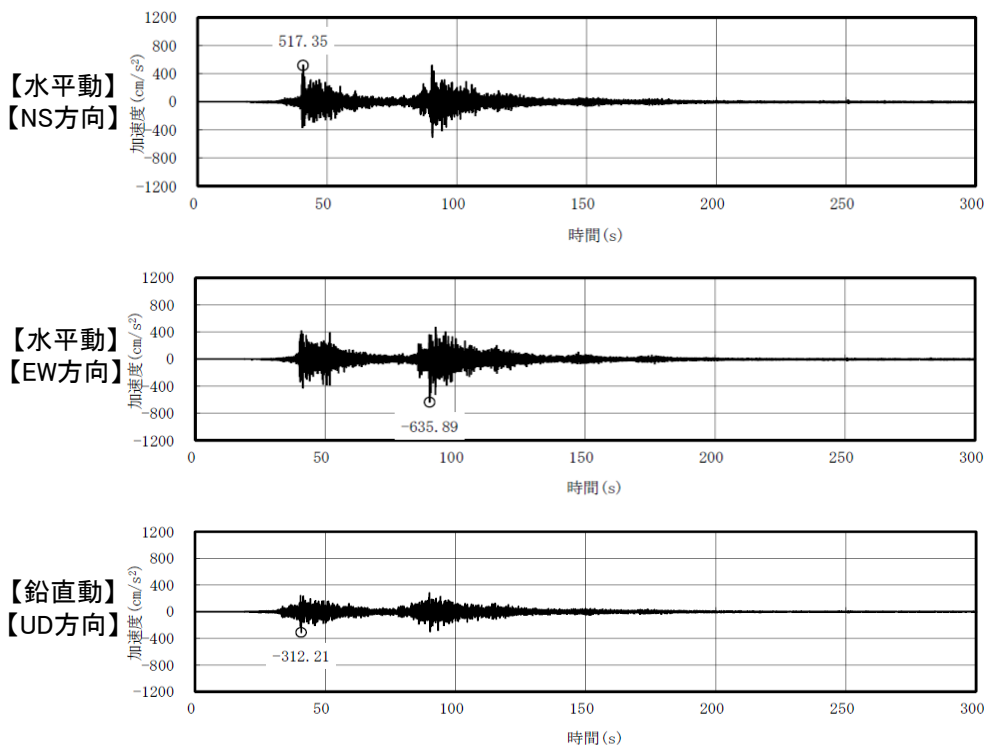
2011年東北地方太平洋沖地震（平成23年3月11日）
における沈下実績値

No.	沈下量	沈下率
1	15.0cm	0.93%
2	18.0cm	0.93%
3	4.3cm	0.18%
4	9.3cm	0.79%
5	11.5cm	1.00%
6	8.8cm	0.50%
7	30.1cm	1.18%
8	20.9cm	1.21%
9	15.7cm	0.76%
10	14.9cm	1.02%
11	10.8cm	0.84%
12	7.1cm	1.15%
13	19.8cm	0.82%

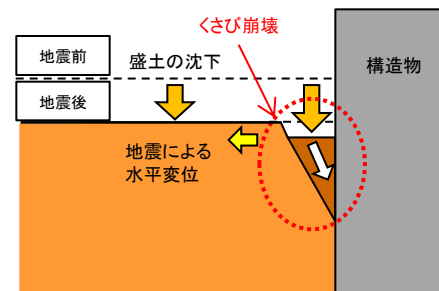
平均沈下率	0.87%
-------	-------

沈下の要因について

- 前頁までに示した沈下の要因としては、建屋近傍での状況及び計測であることから、建屋近傍のくさび崩壊※1に伴う沈下の成分を含む可能性があり、その他の要因として、不飽和地盤の繰返しせん断に伴う沈下及び飽和地盤の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下が考えられる。
- 今後、沈下量測定箇所における2011年東北地方太平洋沖地震による液状化の有無について、一次元地震応答解析により、液状化に対する抵抗率(F_L)を確認することで判断し、過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化(再圧密)の影響の有無を確認する等、沈下の要因について考察することとする。
- 沈下測定箇所の液状化判定の対象とする地震動は、女川原子力発電所で観測された敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の地震波から表層の影響を除去したはざとり波とする。地震動の時刻歴波形及び応答スペクトルを以下に示す。
- 2011年東北地方太平洋沖地震において女川原子力発電所で観測された地震動は、水平動(NS方向), 水平動(EW方向), 鉛直動(UD方向)それぞれ517.35gal, 635.89gal, 312.21galである。



※1 くさび崩壊とは
構造物と周囲地盤の相対変位に起因する主動状態で生じるすべり破壊。



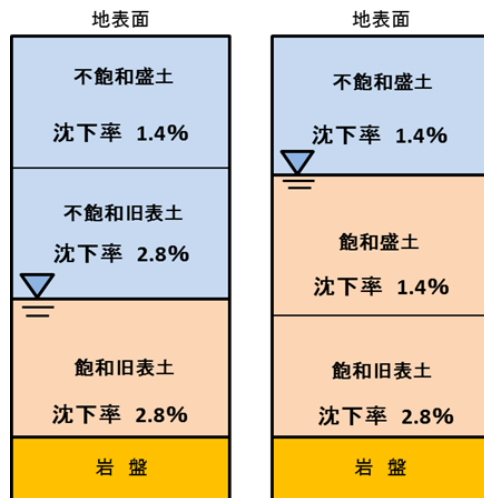
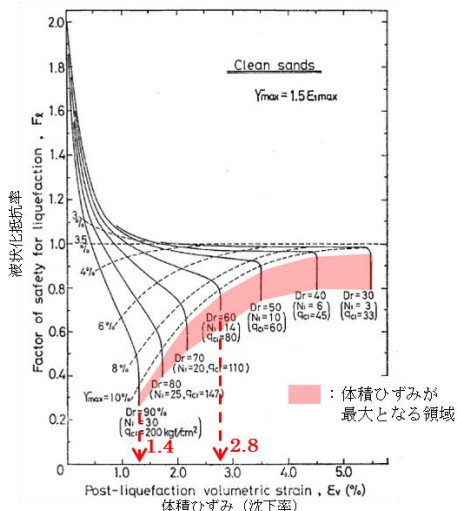
沈下量の算定方針について

【飽和地盤の液状化による沈下量】

- 地下水位以深の飽和盛土及び旧表土における過剰間隙水の消散に伴う沈下率を体積ひずみと液状化抵抗率の関係から算出する。
- 相対密度は調査結果から盛土は90%，旧表土は60%とする。
- 体積ひずみと液状化抵抗率の関係において、体積ひずみが最大となっている領域の飽和土は、完全に液状化した後の再圧密によって粒子が再配列され間隙が最も小さくなった状態を示しており、地震時のせん断ひずみ履歴による体積収縮の最大値を示していると考えられる。飽和地盤の沈下率は液状化判定によらずこの完全に液状化した状態を想定し、盛土は1.4%，旧表土は2.8%とする。沈下量は設定した沈下率に飽和地盤の厚さを乗じて算出する。

【不飽和地盤の揺すり込み沈下量】

- 海野ほか(2006)によると繰返しせん断による体積収縮量は応力履歴に依存せず、せん断ひずみ履歴により決定され、同一のせん断ひずみ履歴を与えると不飽和土と飽和土の体積収縮量は等しくなることが示されている。
- この知見を援用し、不飽和土の沈下率の算定に当たっては、安全側に飽和土が完全に液状化した飽和土の再圧密による体積収縮量と等しいと仮定して盛土は1.4%，旧表土は2.8%とする。沈下量は設定した沈下率に不飽和地盤の厚さを乗じて算出する。



盛土および旧表土の調査結果

地層	相対密度 (%)	
	平均値	平均値-1σ
盛土	121.2	95.5
旧表土	92.6	69.1

体積ひずみと液状化抵抗率の関係および沈下率設定図

1. 滝沢文教・久保和也・猪木幸男:寄磯地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 1987
2. (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 平成14年3月
3. (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 平成24年3月
4. (公社)日本港湾協会:港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置(その2), 2007年(部分改定2012年)
5. (社)日本建築学会:建築基礎構造物設計指針, 2001, p.327-348
6. (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 平成24年9月, p.165-170
7. 吉見吉昭:砂地盤の液状化(第2版), 技報堂出版, 1991年5月
8. 土木学会地震工学委員会:「レベル2地震動による液状化研究小委員会」活動成果報告書, 2003年6月
9. 土質工学用語辞典編集委員会(編集):土質工学用語辞典, 1985
10. (社)地盤工学会:地盤工学用語辞典, 2006
11. 安田進:液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1991年5月
12. 石原研而(2017):地盤の液状化 発生原理と予測・影響・対策, 朝倉書店, 2017年4月
13. 井合進:サイクリックモビリティ Cyclic Mobility, 地盤工学会誌, p.56-58, 2008年8月
14. 井合進, 飛田哲男, 小堤治:砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, 平成20年6月, p.291-303
15. 原忠, 國生剛治:砂礫の液状化強度および液状化後の非排水せん断強度に及ぼす粒度分布の影響, 土木学会論文集No.645/Ⅲ-50, p.245-253, 2000.3
16. 島田茂, 福井英人, 前田賢, 建山和由:礫質土の耐液状化性能に関する実験的研究—繰返し三軸強度比 R_L と締固め度 D_c の相関性について—, 地盤工学会誌, 2016年8月, p.22-25
17. 松尾修:道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, 土木学会論文集No.757/Ⅲ-66, p.1-20, 2004.3
18. 岡市明大, 大江一也, 井合進, 原忠:礫質土地盤の液状化特性に及ぼす非塑性細粒分・相対密度の影響, 土木学会第64回年次学術講演会, p.303-304, 平成21年9月
19. 鴨居正雄・内田明彦・乾一幸・安浩輝:試料採取径の違いが砂質土の液状化強度に及ぼす影響, 第37回地盤工学研究発表会, p.517-518, 2002年7月
20. (社)地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説, 2009年11月
21. 海野寿康, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明:同一繰返しせん断履歴における乾燥砂と飽和砂の体積収縮量の関係, 土木学会論文集C Vol.62 No.4, p.757-766, 2006.11