

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3月20日
東北電力株式会社

目次

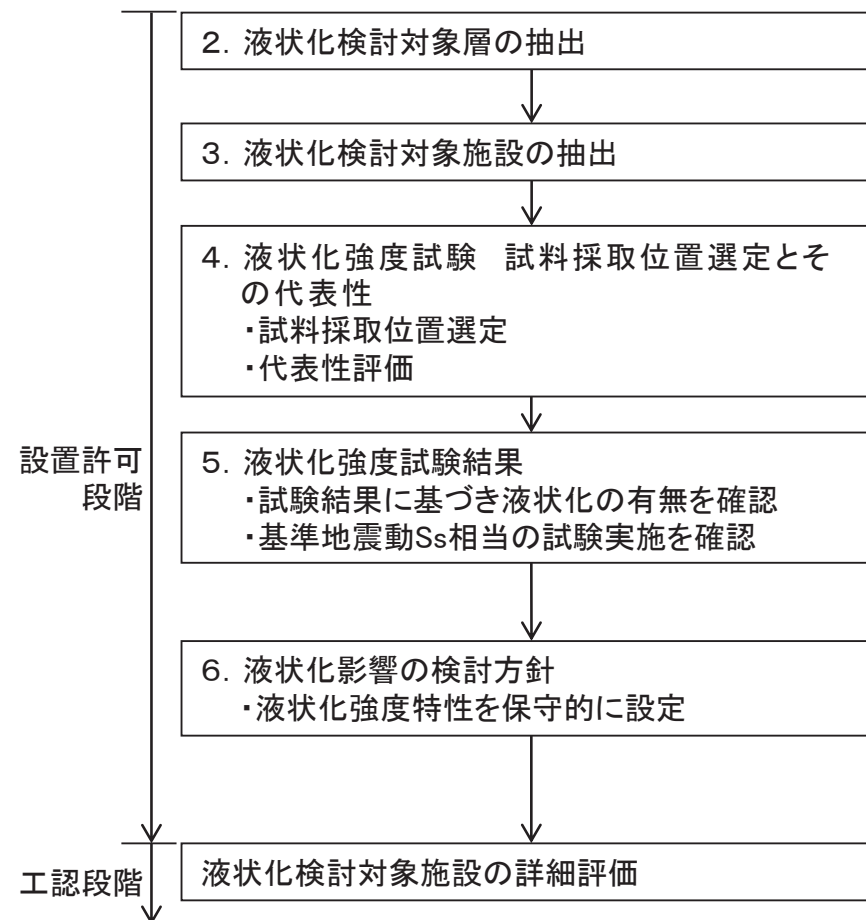
1. 液状化評価の基本方針	2
2. 液状化検討対象層の抽出	4
3. 液状化検討対象施設の抽出	10
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性	32
5. 液状化強度試験結果	44
6. 液状化影響の検討方針	80
補足説明資料	
1. 防潮堤の設計方針等の変更について (平成30年2月13日第548回審査会合資料再掲)	84
2. 盛土・旧表土のボーリング柱状図・コア写真【データ集1.に収録】	
3. 液状化に関連する基本物性の補足	99
4. N値とFcの関係の整理	105
5. 盛土の均一性	107
6. 盛土のN値の取扱いについて	116
7. 液状化強度試験結果【データ集2.に収録】	
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	122

参考文献

1. 液状化評価の基本方針

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するが、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し、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。
- 液状化強度試験の試料採取位置について、敷地全体の基本物性値と比較し、その代表性を確認する。
- 液状化強度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」とならないこと（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。また、累積損傷度理論を適用し、基準地震動 S_s 相当の地盤の状態を模擬して液状化強度試験が実施できていることを確認する。
- 抽出された液状化検討対象施設のうち、過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の剛性低下を考慮した変形量等の評価を行う必要のある施設については、保守的に設定した液状化強度特性を用いて有効応力解析を行い、基準地震動 S_s に対する影響を確認する。



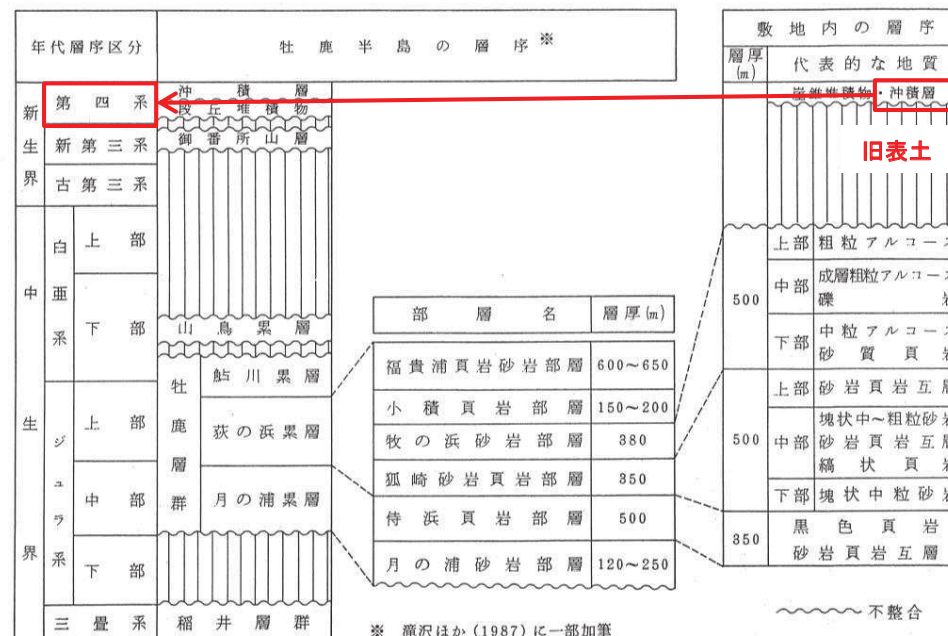
液状化影響評価フロー

2. 液状化検討対象層の抽出

2. 液状化検討対象層の抽出 敷地の概況

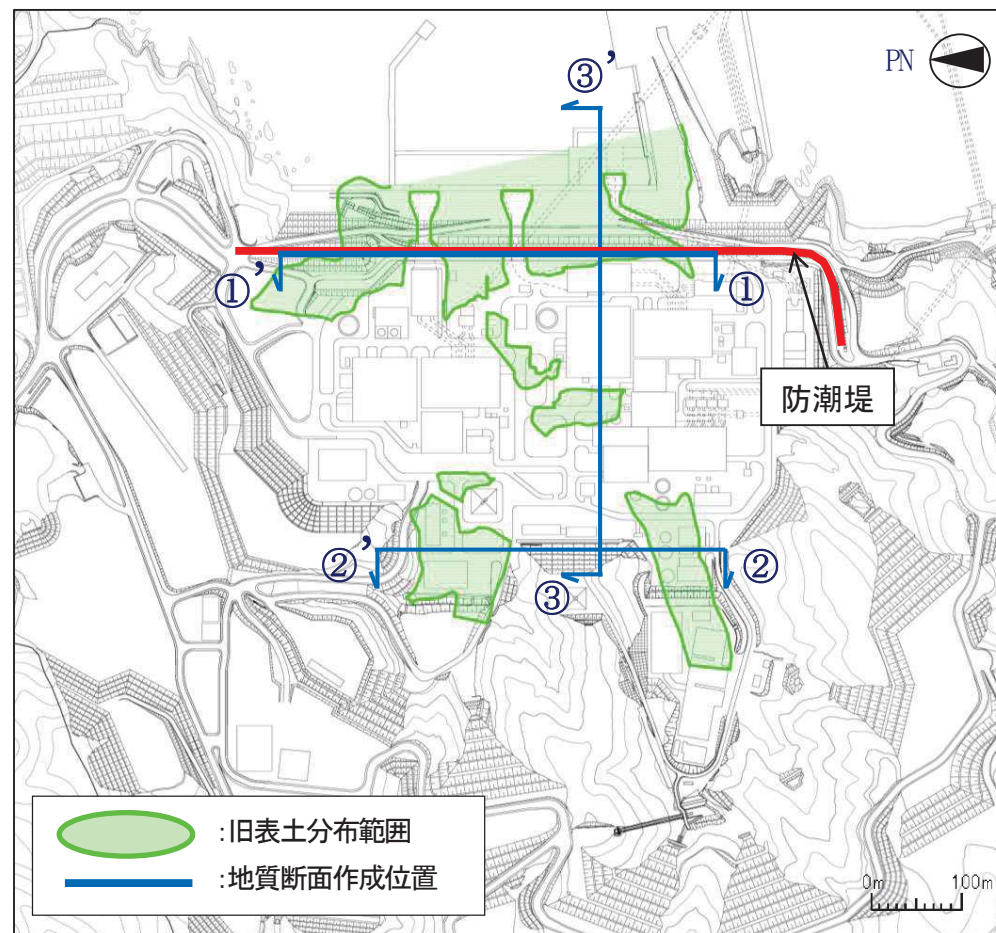
- 敷地には、砂岩、頁岩及び砂岩頁岩互層の堆積岩類が広く分布し、部分的にこれら貫いてひん岩が分布する。また、一部海岸付近及び低地周辺には、未固結～半固結の堆積物が分布する。
- 敷地の地質は、中生界ジュラ系、これを覆う第四系等によって構成されている。敷地のジュラ系は、牡鹿層群月の浦累層及び荻の浜累層に区分される(敷地の地質平面図及び断面図はp.110に示す)。
- 屋外の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の設置位置に分布する第四系としては、沖積層(旧表土)がある。また、整地地盤まで盛土により埋戻されている。
- 敷地の地盤は上記のとおり岩盤、盛土、旧表土に分類され、液状化の可能性を考慮する必要がある地盤は、盛土及び旧表土である。

地質層序表



2. 液状化検討対象層の抽出 旧表土の分布

- 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。

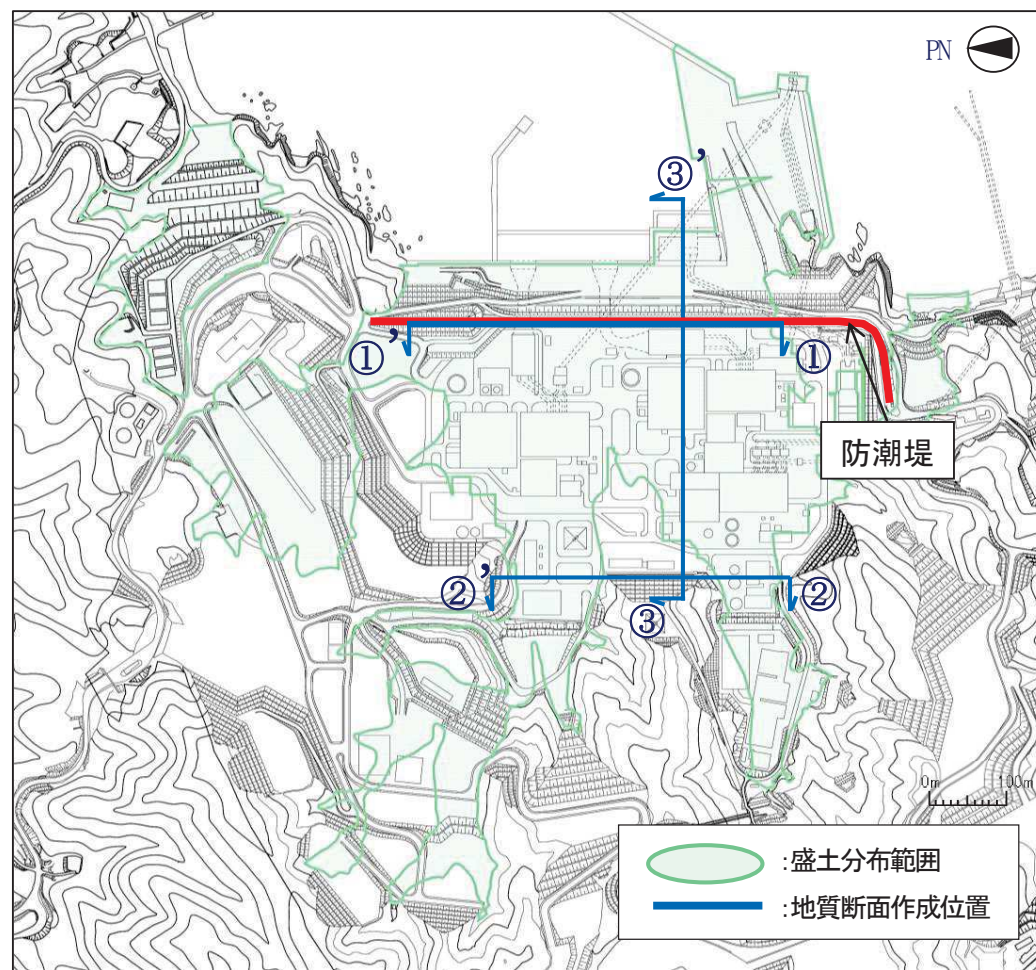


旧表土の分布範囲

2. 液状化検討対象層の抽出 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。

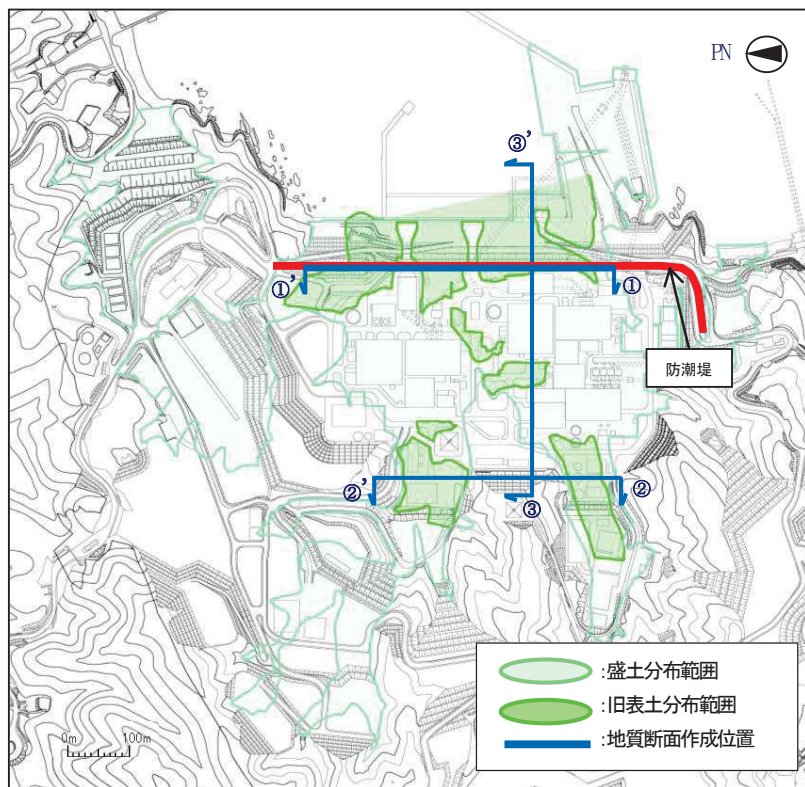


盛土の分布範囲

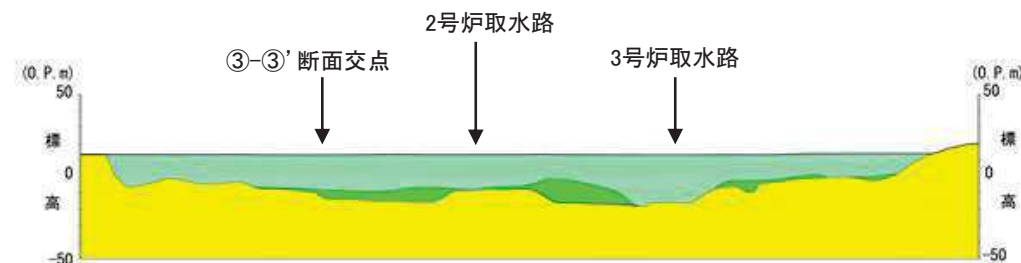
2. 液状化検討対象層の抽出

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2（データ集1.）に示す。

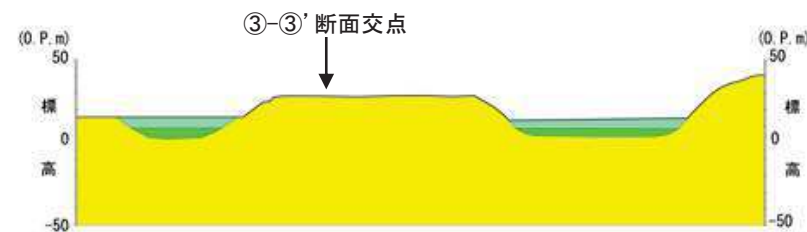


地質断面位置図



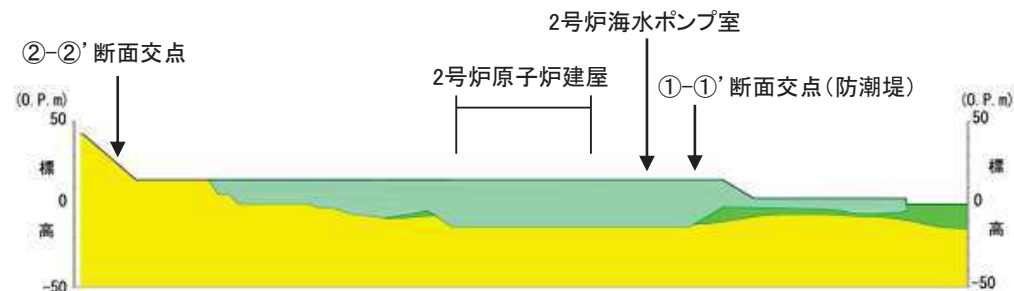
旧表土は、防潮堤付近に広く分布。2号炉取水路と3号炉取水路の中間付近で最も厚くなり、最大層厚は14m程度。

①-①' 断面図 (防潮堤)



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部的に分布。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土層を基本とする。

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)

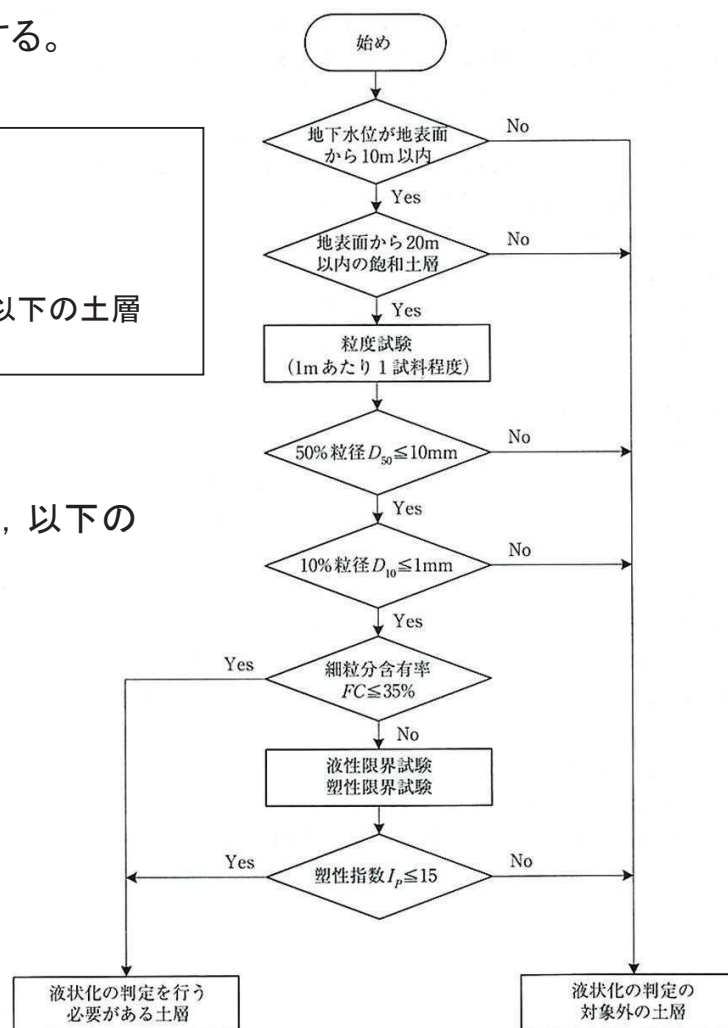
液状化検討対象層は、以下の条件全てに該当する土層と定めている。

- 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

3. 液状化検討対象施設の抽出 対象施設抽出の方針

- 屋外の設計基準対象施設※¹及び重大事故等対処施設※²について、以下の観点で抽出フローを整理していく。

※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。

1) 規則条文の要求事項

(設計基準対象施設の地盤)

第三条 設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力(…中略…)が作用した場合においても当該設計基準対象施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。

2 耐震重要施設は、変形した場合においても安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。

〔変形とは、地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓み並びに地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状をいう。(別記1)〕

・1項について

設計基準対象施設及び重大事故等対処施設は、全て岩盤又は改良地盤に支持されているため、液状化による影響はない。

・2項について

圧密、揺すり込み沈下及び液状化によって隣接する建物・構築物間で生じる不等沈下等の変状が生じるおそれがある場合、これらの現象が生じたとしても、施設の安全機能が重大な影響を受けないよう、所要の対策を講じる方針とする。

⇒液状化検討対象施設の抽出及び影響評価の方針について整理する。

2) 女川原子力発電所の土質の特徴

「5. 液状化強度試験結果」に示すとおり、敷地の盛土・旧表土は、液状化せず、繰返し軟化する。

⇒繰返し軟化による影響を考慮して影響評価方法を整理する。

3) 地盤の繰返し軟化による構造物への影響

a) 構造物近傍の繰返し軟化地盤から構造物が受ける影響

・地盤の軟化が、構造物の動的応答に影響を与え、設計用荷重等(土圧、変位等)が大きくなる可能性がある。

・構造物に接する地盤が液状化検討対象層の場合に影響を受ける可能性がある。

⇒構造物近傍での影響評価を実施する。

b) 構造物から離れた繰返し軟化地盤から構造物が間接的に受ける影響

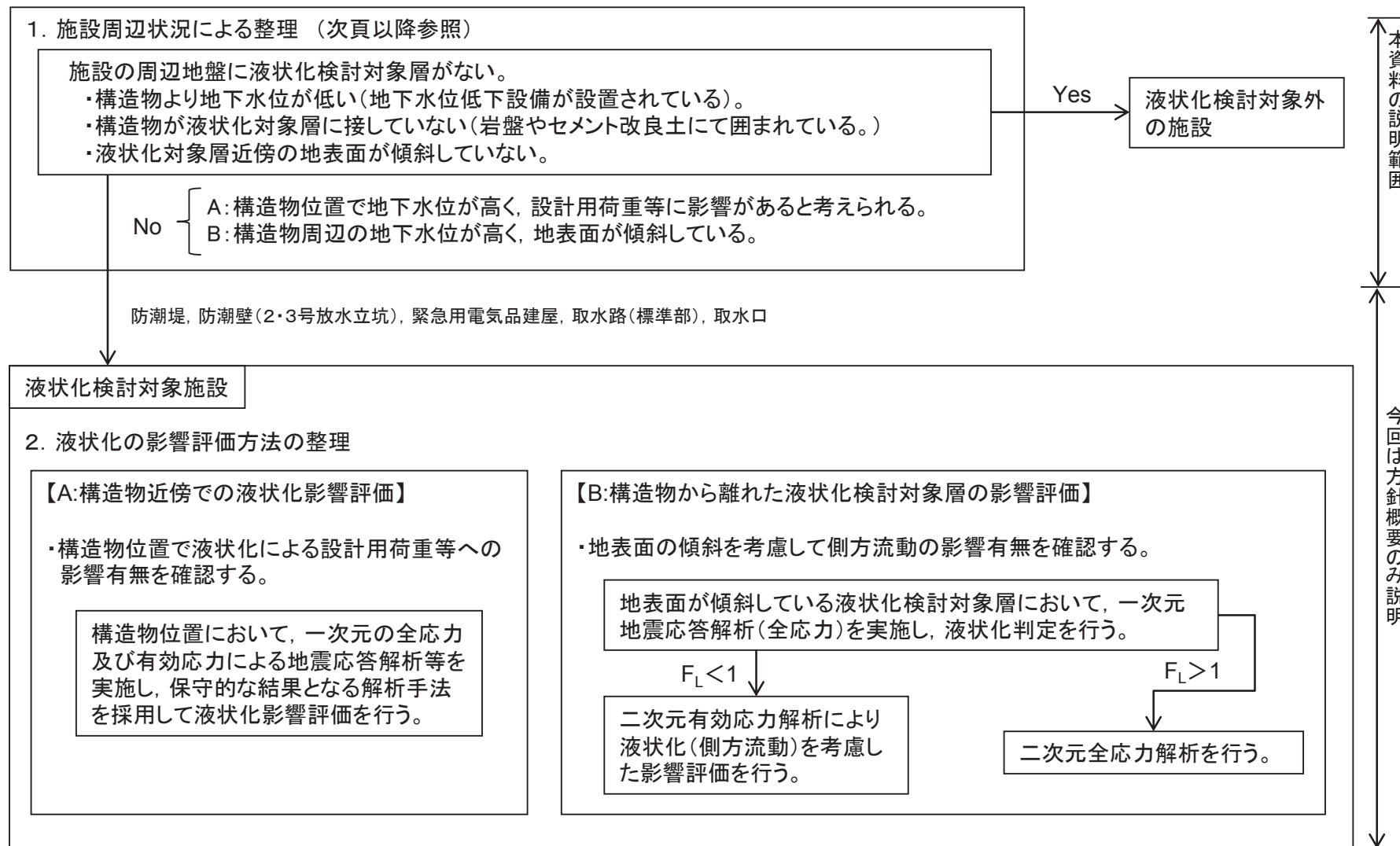
・斜面等の影響により偏土圧が作用する施設では、地盤の繰返し軟化により偏土圧の影響が大きくなる可能性がある。

・構造物周辺の地表面が傾斜している場合に影響を受ける可能性がある。

⇒構造物から離れた液状化検討対象層での影響評価を実施する。

3. 液状化検討対象施設の抽出 抽出フロー

- 屋外の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設について、以下のフローにて液状化検討対象施設及び影響評価方法を整理する。



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及び重大事故等対処施設を対象に、液状化評価の対象施設を検討した。
- 「設計基準対象施設」については、地下水位の状況や液状化対象層の分布状況などを踏まえて、以下のとおり抽出した。

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	施設周辺状況など			液状化 検討対象施設
			地下水位の状況	液状化対象層の分布状況等	断面図	
原子炉建屋※	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.19	—
制御建屋※	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.19	—
排気筒※	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.20	—
排気筒連絡ダクト※	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)	• 岩盤中に設置されており、周囲に液状化検討対象層は分布しない。	p.20,p21	—
			[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.20,p21	—
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.22	—
海水ポンプ室※	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)	周囲に液状化検討対象層が分布し地表面の傾斜があるものの、防潮堤の直下を地盤改良(追加)することから、側方流動の影響を受けない。	p.22	—
軽油タンク室※	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。 • 構造物側面には地下水はない。	• 周囲に液状化検討対象層が分布するが、地表面の傾斜はない。	p.23	—
軽油タンク連絡ダクト※	鉄筋コンクリート構造	岩盤			p.23	—
防潮堤	杭基礎構造, 盛土構造	岩盤, 改良地盤	• 鋼管式鉛直壁(一般部)では支持層より地下水位が高い。 • 盛土堤防では施設(セメント改良土)底面に地下水位がある。	• 周囲に液状化検討対象層が分布し地表面が傾斜している。 (防潮堤の沈下対策として構造物直下を含めた追加の地盤改良を計画, 改良範囲等を検討中) (補足説明資料1参照)	p.24	A, B
防潮壁(2・3号炉海水ポンプ室)	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.25	—
防潮壁(2・3号炉放水立坑)	杭基礎構造	岩盤	• 地下水位低下設備等は設置されていない。 • 支持層より地下水位が高い。	• 周囲に液状化検討対象層が分布する。	p.26	A

※: 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)

- 「重大事故等対処施設①」については、地下水位の状況や液状化対象層の分布状況などを踏まえて、以下のとおり抽出した。

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	施設周辺状況など			液状化 検討対象施設
			地下水位の状況	液状化対象層の分布状況等	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。 (地下水位低下設備を設置予定) 	<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.27	—
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。 建屋側面に地下水位がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布するが、 地表面の傾斜はない。 	p.28	A
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。 構造物側面に地下水位がある。 	<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.28	—
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。 構造物側面に地下水位がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲は建屋又はセメント改良土であり、液状 化検討対象層が分布しない。 地表面の傾斜はない。 	p.28	—
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。 構造物側面に地下水位がない。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布するが、 地表面の傾斜はない。 	p.23	—
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。 構造物側面に地下水位がある。 	[標準部] <ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布するが、 地表面の傾斜はない。 	p.29	A
			[漸拡部] <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) 	[漸拡部] <ul style="list-style-type: none"> 周囲に液状化検討対象層が分布するが、 地表面の傾斜はない。 	p.29	—
			[防潮堤横断部] <ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備は設置されていない。 	[防潮堤横断部] <ul style="list-style-type: none"> 周囲を地盤改良しており、液状化検討対象 層は分布しない。 	p.30	—
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。 構造物側面に地下水位がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 周囲を地盤改良しているが、その外側に液 状化検討対象層が分布する。 	p.30	A

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」については、地下水位の状況や液状化対象層の分布状況などを踏まえて、以下のとおり抽出した。
- 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、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）

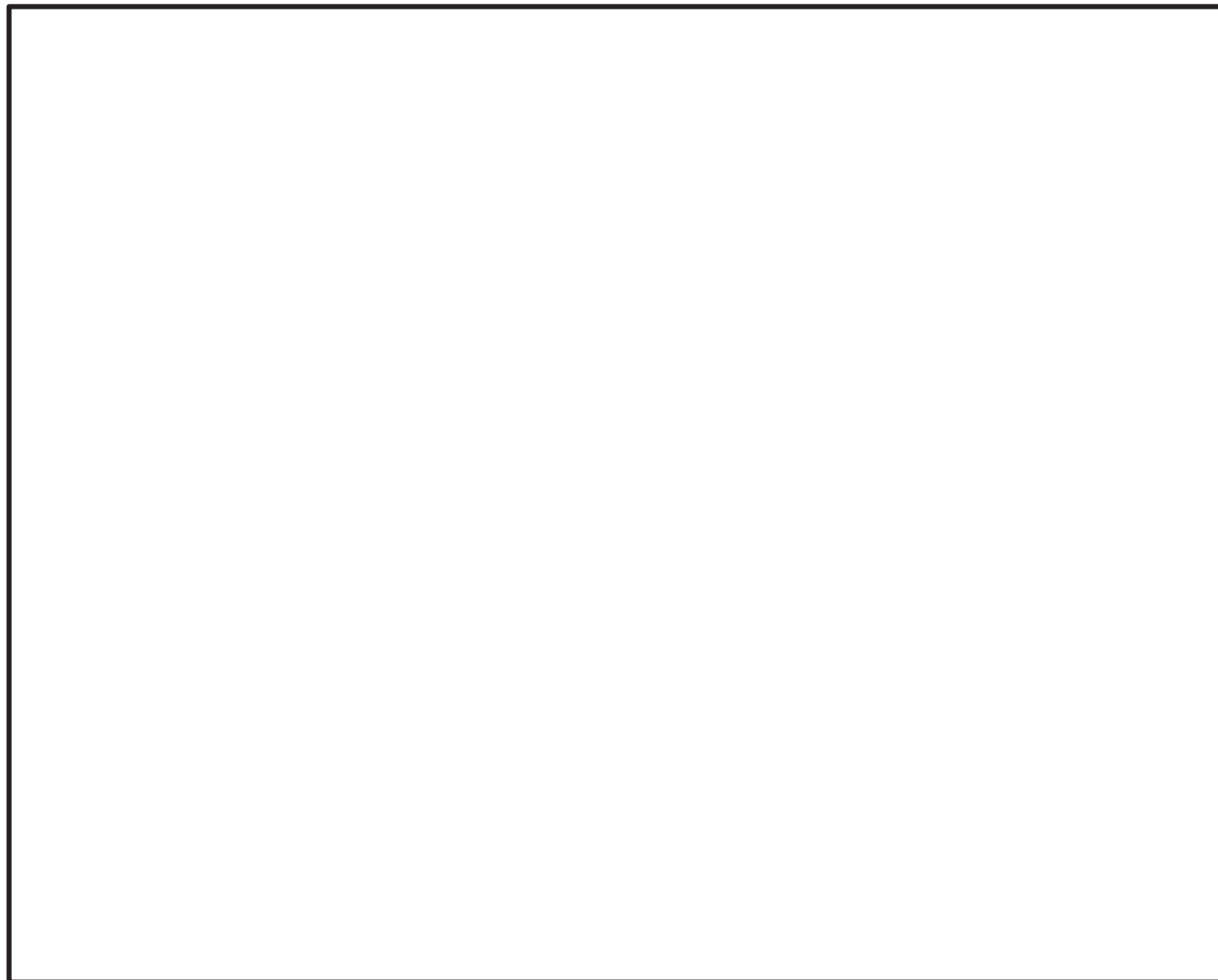
施設名称	構造概要	支持層	施設周辺状況など	断面図	液状化評価の対象
保管場所 ※1 (第1, 第3, 第4)	コンクリート舗装	岩盤, MMR	• 岩盤及びMMR上に設置しており、液状化検討対象層は分布しない。	p.31	—
保管場所 (第2)	鉄筋コンクリート構造	岩盤, セメント改良土	• 淡水貯水槽及び周囲のセメント改良土上に設置しており、液状化検討対象層は分布しない。	p.31	—
アクセスルート	アスファルト舗装	岩盤, セメント改良土, 盛土	• 想定外の事象として保守的に地下水位以深の盛土・旧表土は液状化するものとして影響評価し、必要に応じて対策を実施。	—	A※2

※1: 保管場所は検討中のため変更の可能性がある。





※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。

3. 液状化検討対象施設の抽出

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)



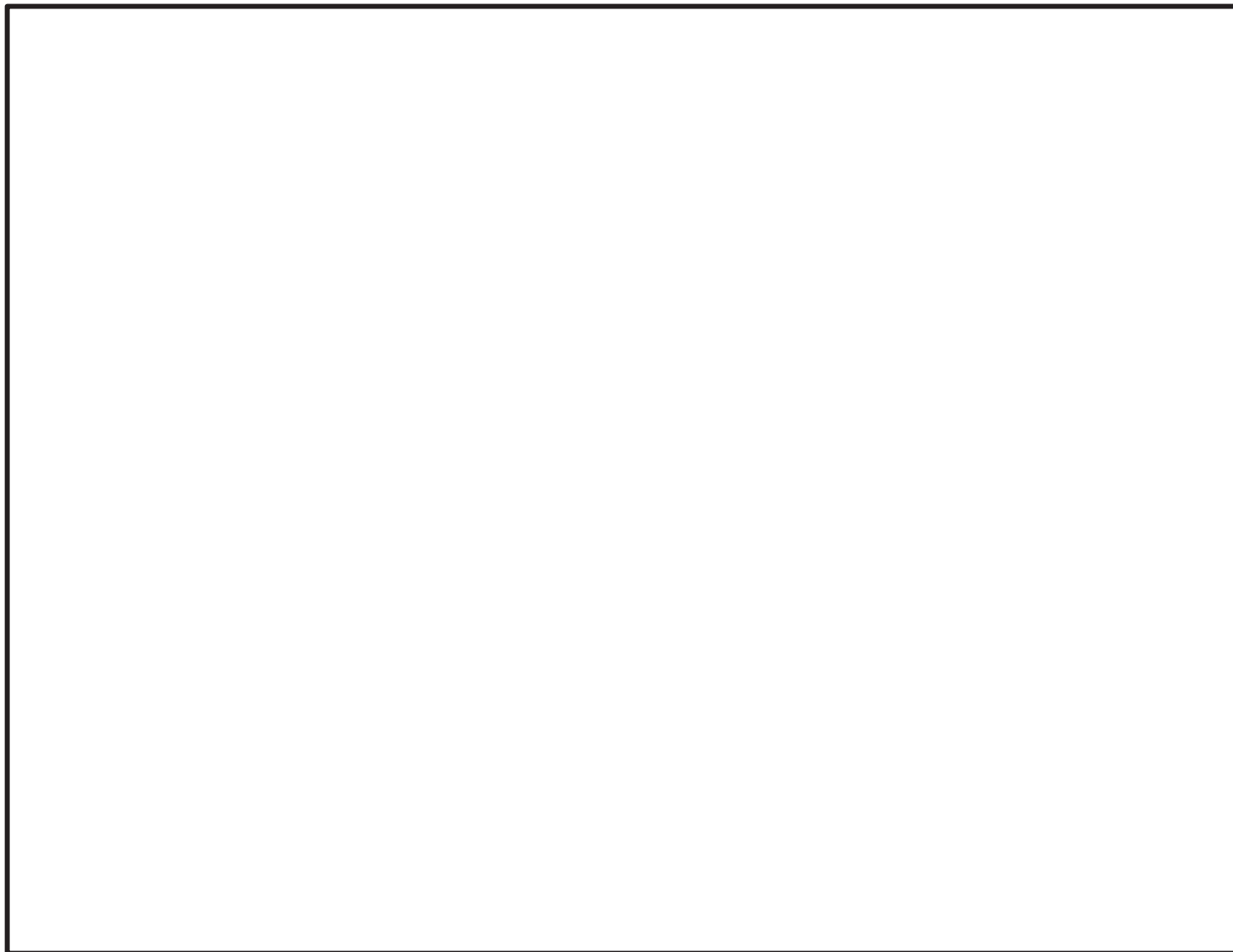
凡例

-  : 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)



※ 保管場所は検討中のため
変更の可能性がある。

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。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(1/14)

- 各施設の地下水位・施設設置状況を次頁以降に示す。
- なお、防潮堤直下を地盤改良することとしており、敷地内の地下水位が変化する可能性がある。そのため、設置許可段階においては浸透流解析を実施し、工事計画認可段階においては必要に応じて地下水位を再設定して評価する。

	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2, 第3, 第4)※2, アクセスルート※3

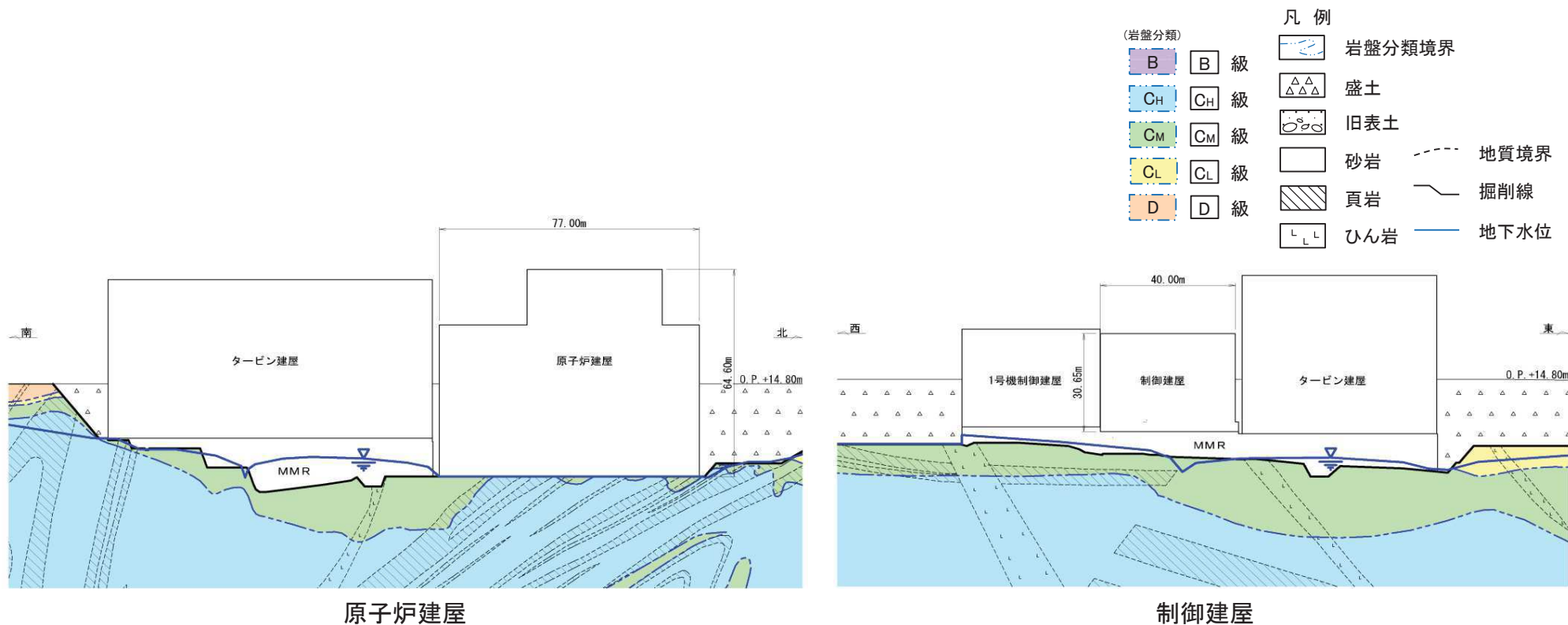
※1 重大事故等対処施設を兼ねる。

※2 管場所は検討中のため変更の可能性がある。

※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(現在, 審査中)。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(2/14)

- 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。

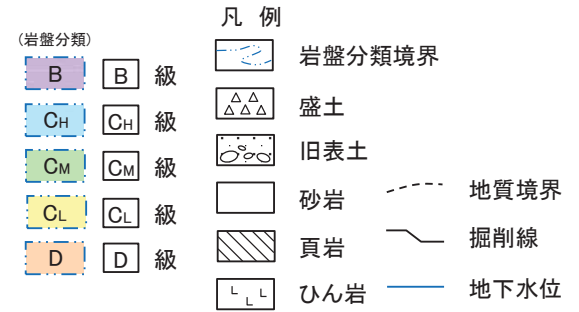
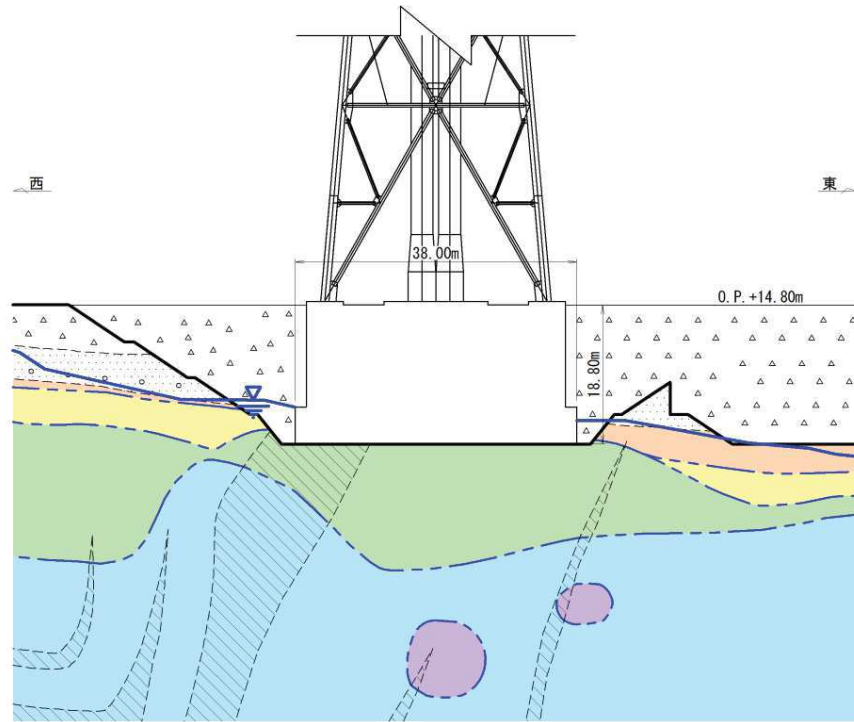


液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

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)

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(3/14)

- 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。



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。

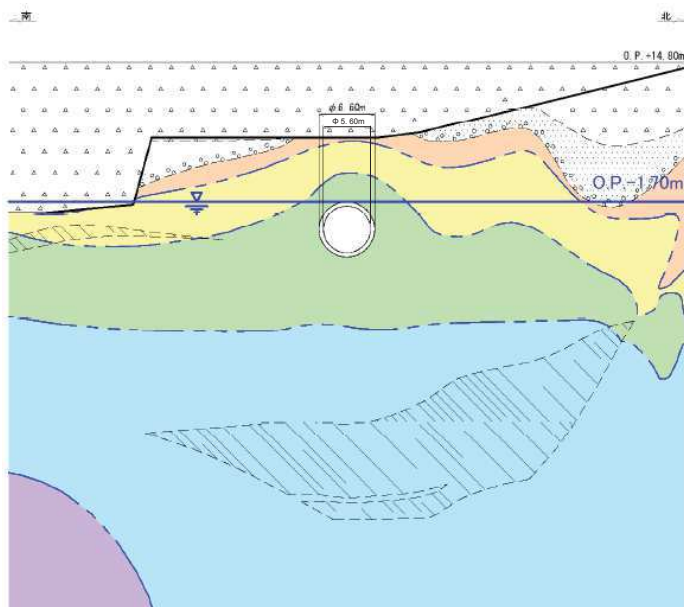
排気筒

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)

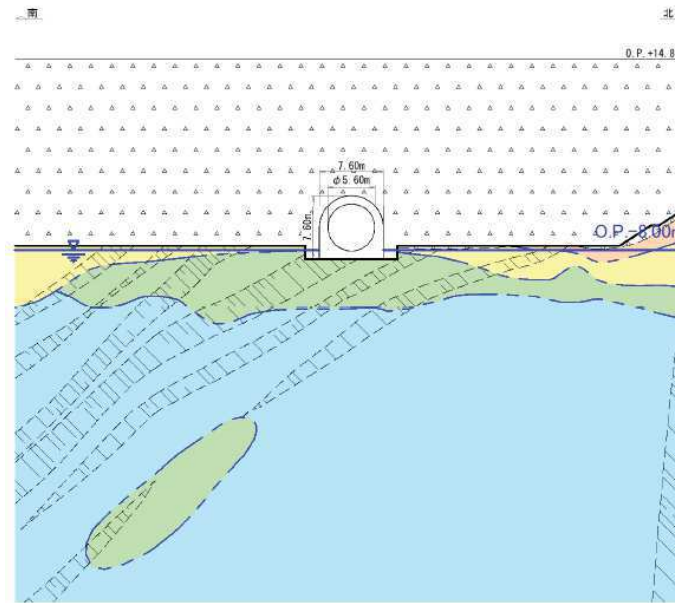
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<p>[岩盤部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・保守的にトンネル天端に地下水位を設定。(地下水位低下設備による) ・岩盤中に設置されており、周囲に液状化検討対象層が分布しない。 <p>[土砂部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・支持層上面付近まで低下。(地下水位低下設備による)

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(4/14)

- 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)



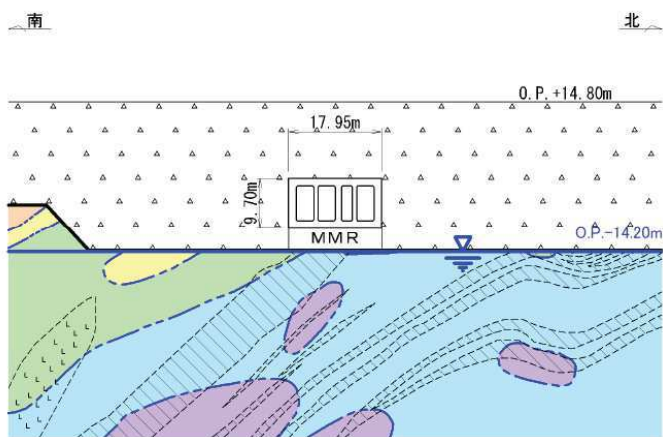
排気筒連絡ダクト(土砂部)

- 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
 - LLL ひん岩
 - 地質境界
 - 掘削線
 - 地下水位

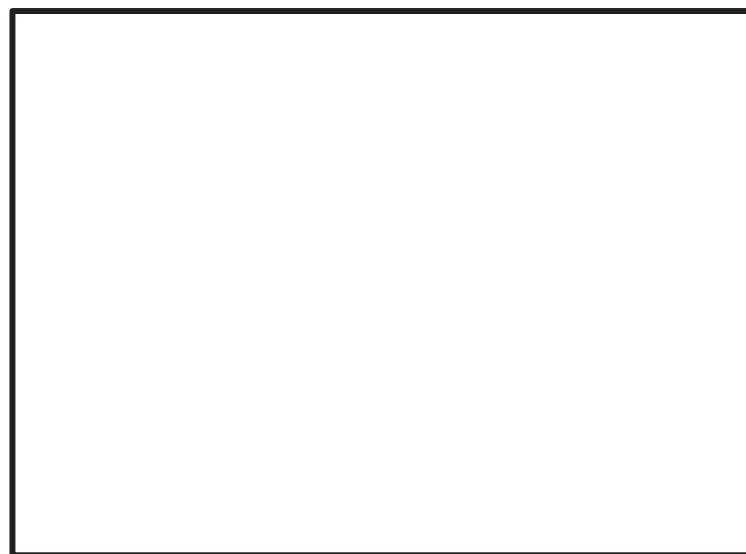
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<p>[岩盤部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・保守的にトンネル天端に地下水位を設定。 ・岩盤中に設置されており、周囲に液状化検討対象層が分布しない。 <p>[土砂部]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(5/14)

- 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。

- 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

- ※1 改良範囲は今後の安定性評価等により決定。
- ※2 今後の評価により必要な場合。
- ※3 海水ポンプ室の東側の地下水位は、防潮堤直下を追加地盤改良することで、低下すると考えられるが、設置許可段階においては保守的に既往の浸透流解析結果から設定。

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※3。 (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地表面が傾斜しているが、防潮堤の直下を追加地盤改良する計画であることから、防潮堤東側斜面による側方流動の影響を受けない。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(6/14)

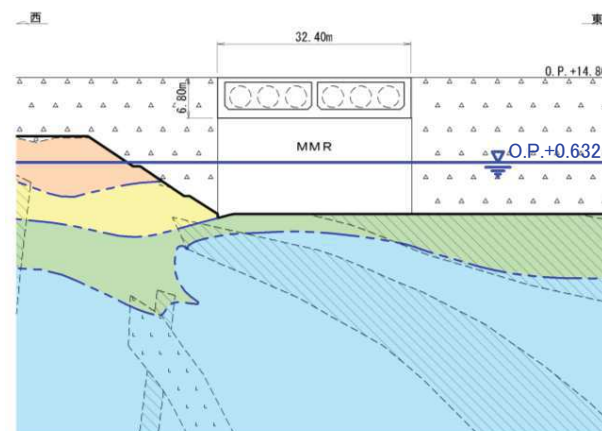
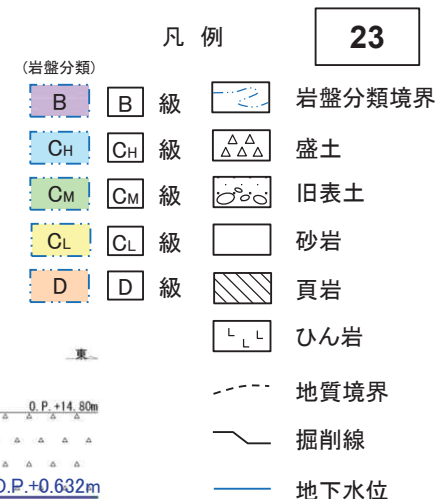
- 軽油タンク室, 軽油タンク連絡ダクト, 復水貯蔵タンク基礎における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



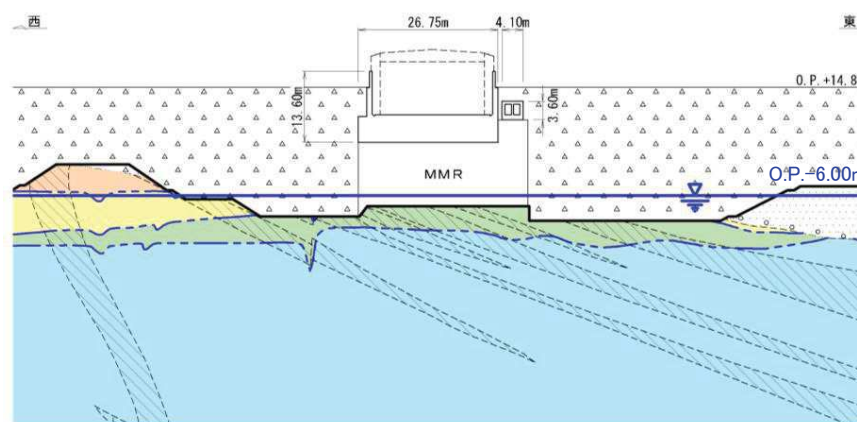
軽油タンク室, 軽油タンク連絡ダクト, 復水貯蔵タンク基礎

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	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下設備は設置されていない。 周囲に液状化検討対象層が分布する。 周囲に液状化検討対象層が分布するが、地表面の傾斜はない。



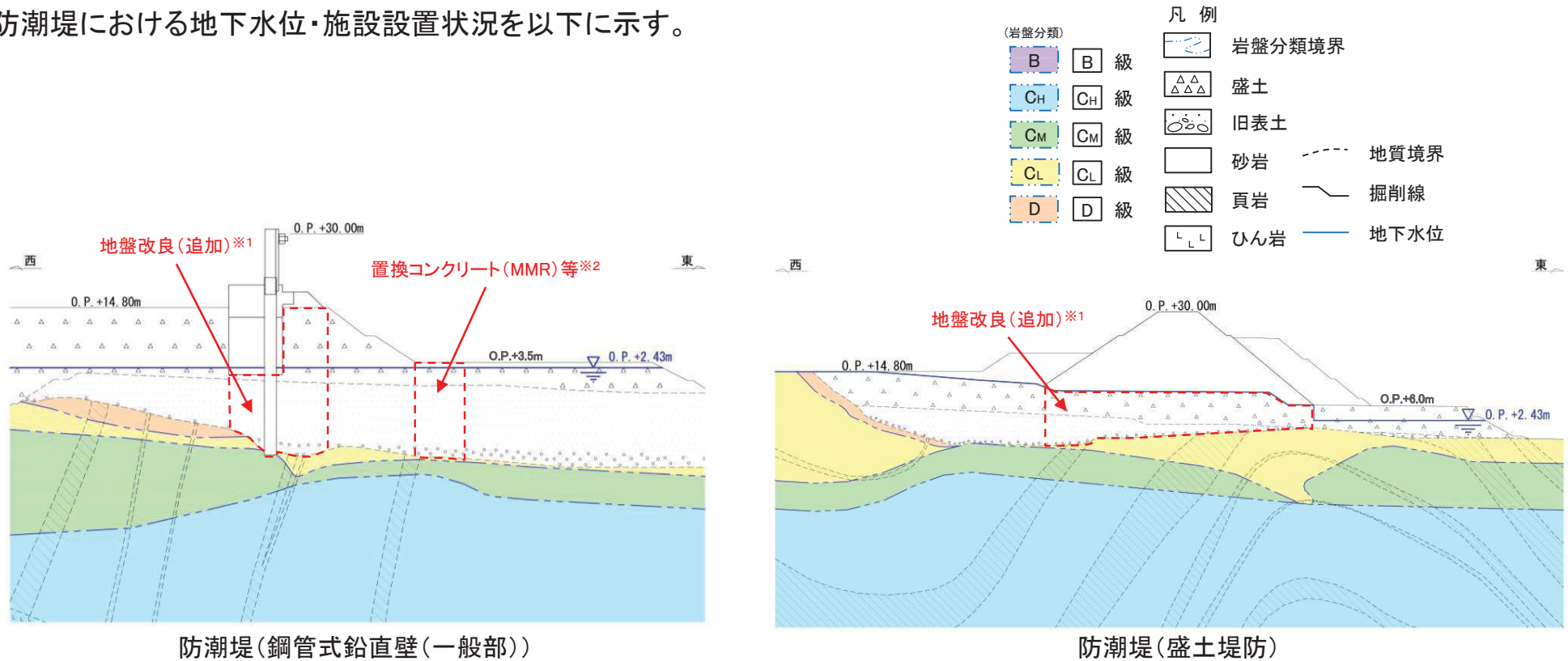
軽油タンク室



軽油タンク連絡ダクト, 復水貯蔵タンク基礎

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(7/14)

- 防潮堤における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



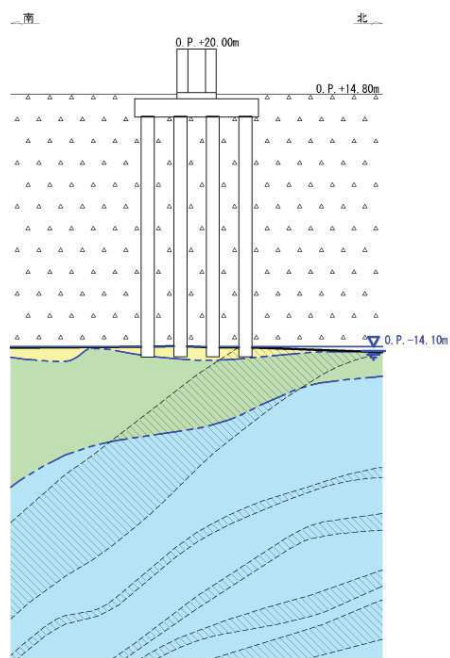
※1 改良範囲は今後の安定性評価等により決定。
 ※2 今後の評価により必要な場合。

液状化評価の対象※3	A, B
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。 ・周囲に液状化検討対象層が分布し地表面が傾斜している。 (防潮堤の沈下対策として構造物直下を含めた追加の地盤改良を計画, 改良範囲等を検討中)

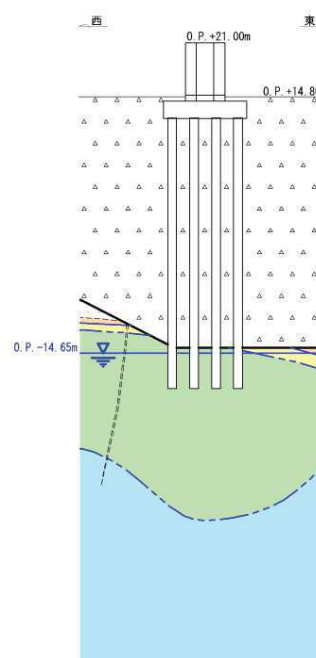
※3 A: 構造物位置で地下水位が高く, 設計用荷重等に影響があると考えられる。
 B: 構造物周辺の地下水位が高く, 地表面が傾斜している。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(8/14)

- 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)



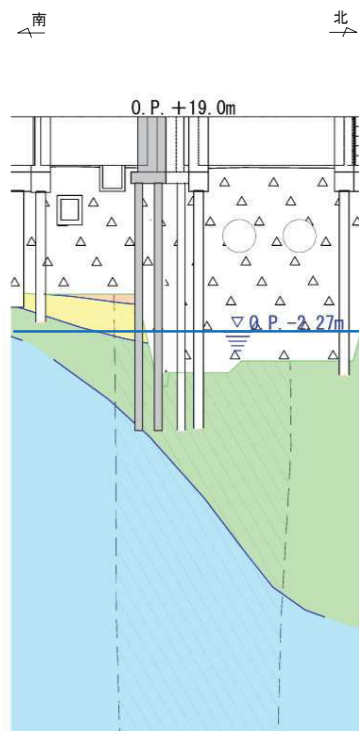
防潮壁(3号炉海水ポンプ室)

- 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

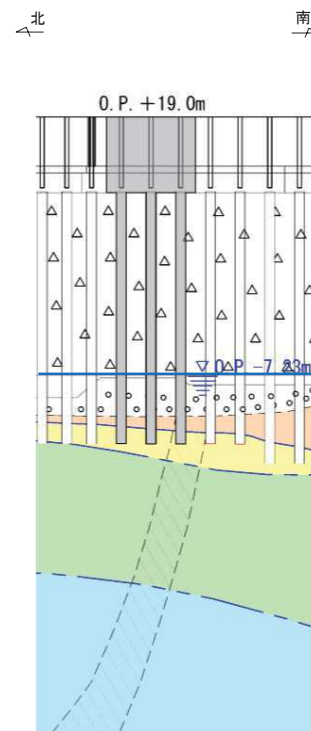
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備による)

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(9/14)

- 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号炉放水立坑)



防潮壁(3号炉放水立坑)

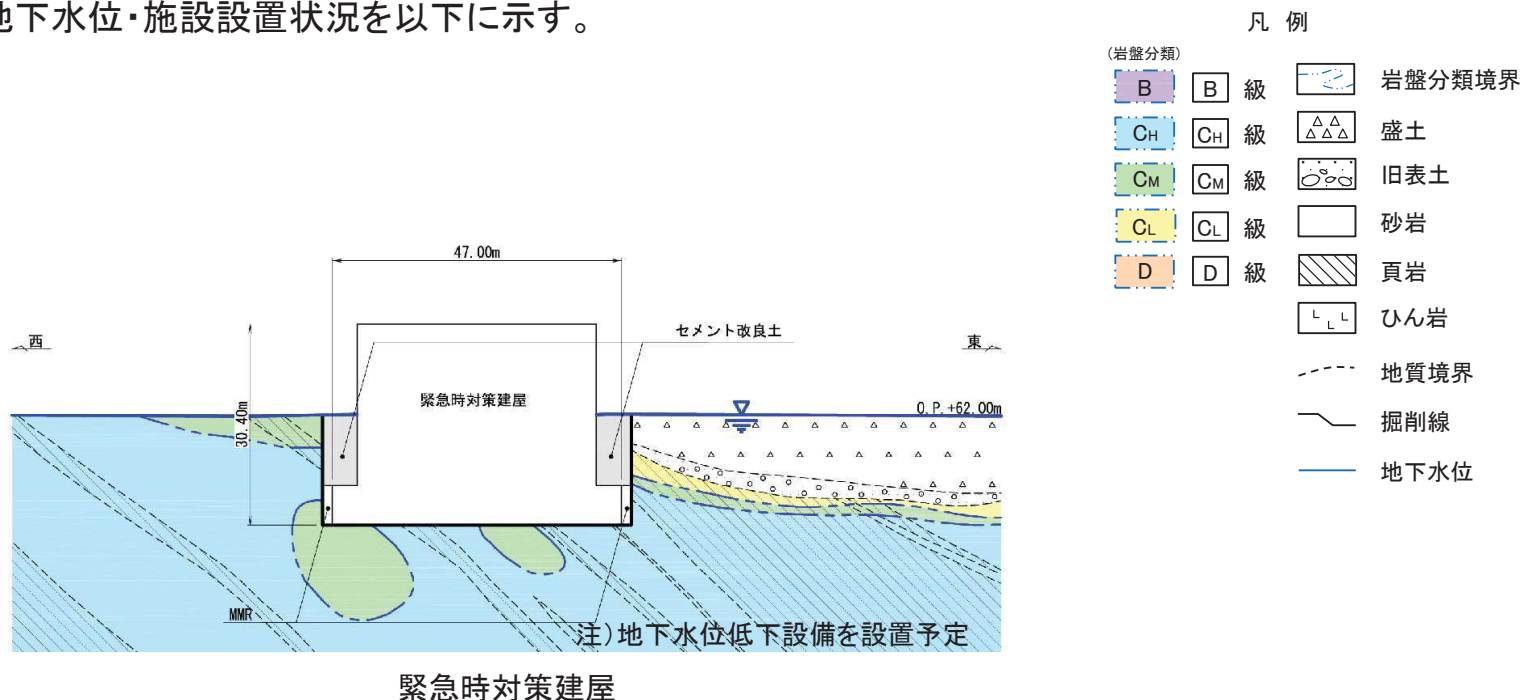
- 凡例
- (岩盤分類)
- B 級
 - CH 級
 - CM 級
 - CL 級
 - D 級
- 岩盤分類境界
 - 盛土
 - 旧表土
 - 砂岩
 - 頁岩
 - ひん岩
 - 地質境界
 - 掘削線
 - 地下水位

液状化評価の対象※	A
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位低下設備等は設置されていない。 ・周囲に液状化検討対象層が分布する。

※A: 構造物位置で地下水位が高く、設計用荷重等に影響があると考えられる。
B: 構造物周辺の地下水位が高く、地表面が傾斜している。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(10/14)

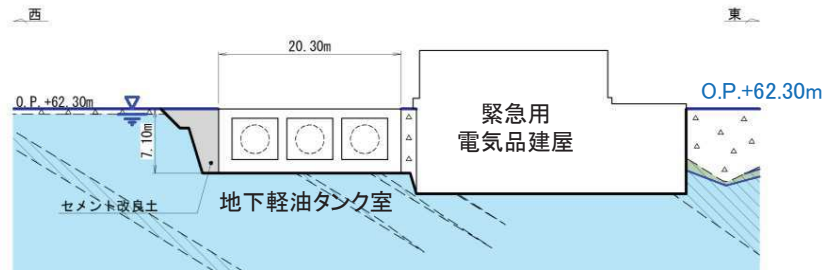
- 緊急時対策建屋における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



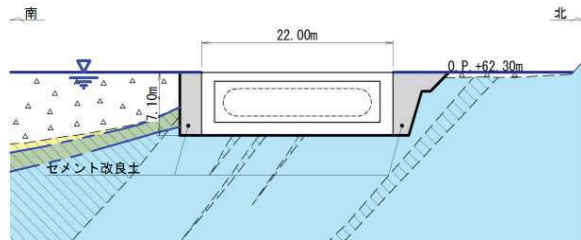
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	<ul style="list-style-type: none"> ・支持層上面付近まで低下。 (地下水位低下設備を設置予定) ・周囲に液状化検討対象層が分布しない。 (セメント改良土による埋戻し)

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(11/14)

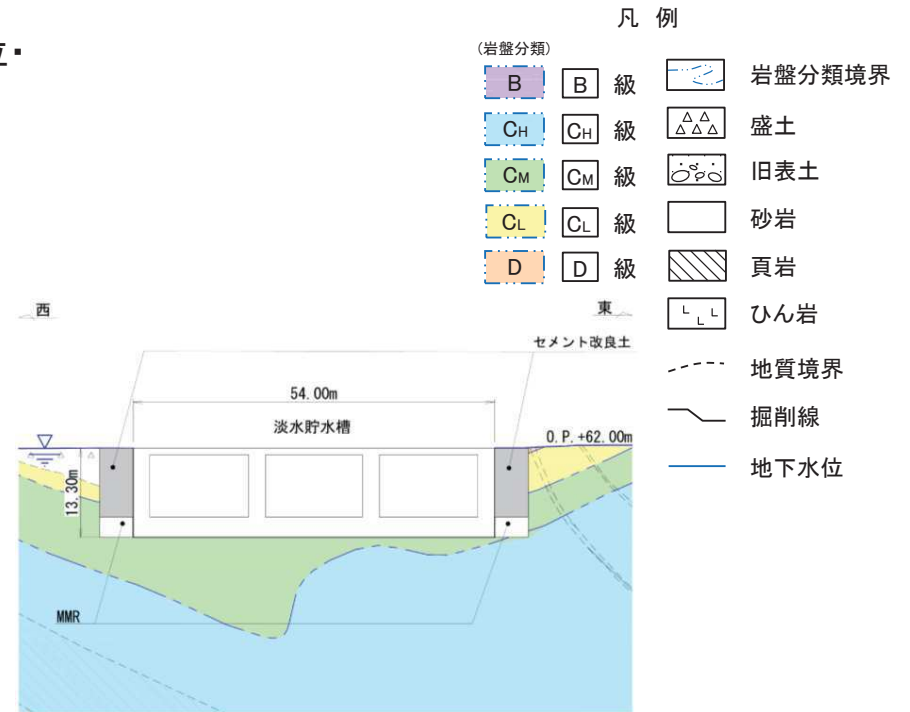
- 緊急用電気品建屋, 地下軽油タンク室, 淡水貯水槽における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



緊急用電気品建屋



地下軽油タンク室



淡水貯水槽



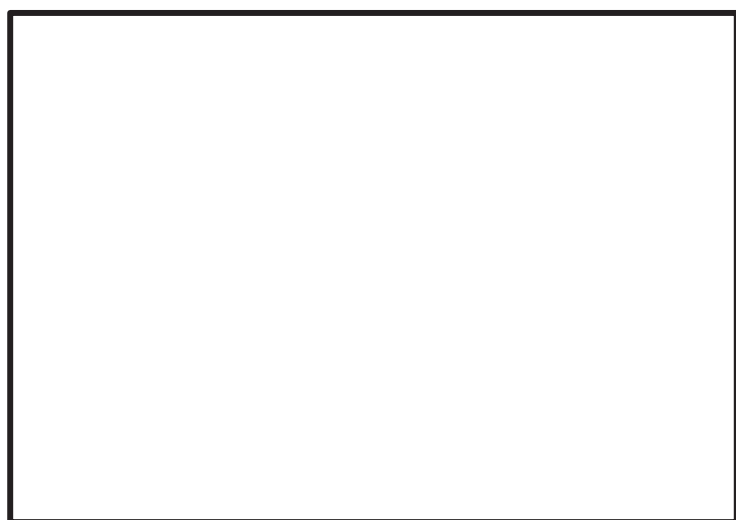
液状化評価の対象※	[緊急用電気品建屋] A [地下軽油タンク室] -
地下水位・施設設置状況	[緊急用電気品建屋] ・地下水位低下設備は設置されていない。 ・周囲に液状化対象層が分布するが, 地表面の傾斜はない。 [地下軽油タンク室] ・周囲は建屋又はセメント改良土であり, 液状化検討対象層が分布しない。 ・岩盤の傾斜は構造物から下がり勾配であり, 側方流動は構造物から離れる方向に発生する。

液状化評価の対象	-
地下水位・施設設置状況	・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)

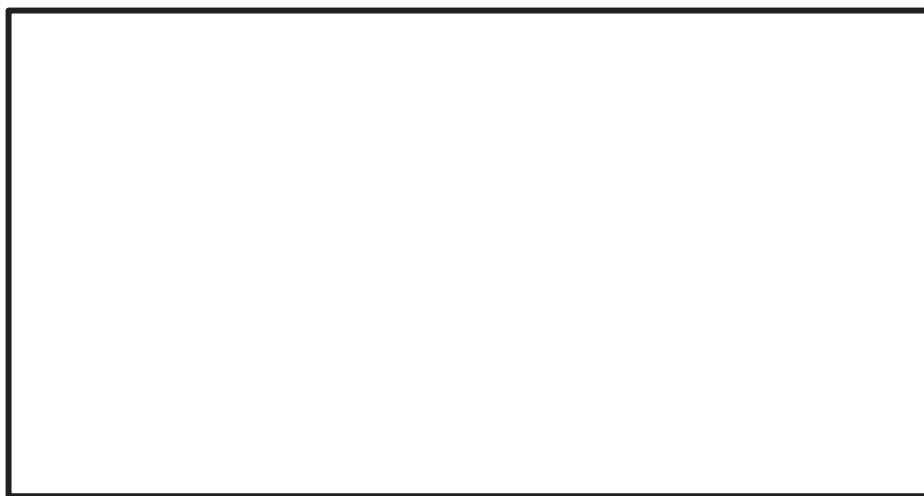
※A: 構造物位置で地下水位が高く, 設計用荷重等に影響があると考えられる。
B: 構造物周辺の地下水位が高く, 地表面が傾斜している。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(12/14)

- 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。



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。

- 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※1	A
地下水位・施設設置状況	[標準部] ・地下水位低下設備は設置されていない。 ・構造物側面に地下水位がある。 ・周囲に液状化検討対象層が分布するが、地表面の傾斜はない。

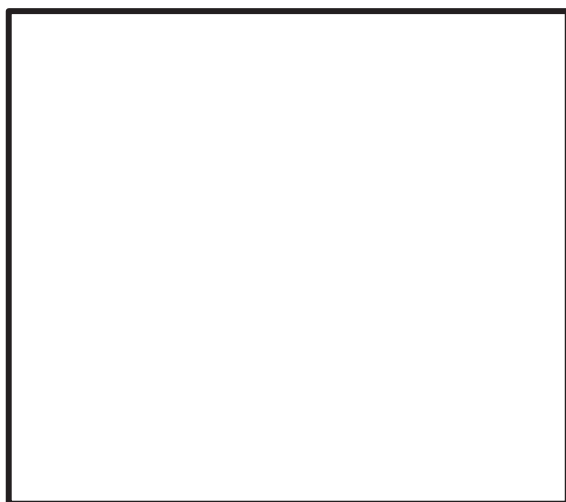
液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	[漸拡部] ・支持層上面付近まで低下※4。(地下水位低下設備による) ・周囲に液状化検討対象層が分布し地表面の傾斜があるものの、取水路(漸拡部)との間には防潮堤があり、その直下を地盤改良(追加)することから、側方流動の影響はない。

- ※2 改良範囲は今後の安定性評価等により決定。
- ※3 今後の評価により必要な場合。
- ※4 取水路(漸拡部)の地下水位は、防潮堤直下の地盤改良の追加により低下する見込み。

※1 A: 構造物位置で地下水位が高く、設計用荷重等に影響があると考えられる。
B: 構造物周辺の地下水位が高く、地表面が傾斜している。

3. 液状化検討対象施設の抽出 各施設の地下水位(13/14)

- 取水路(防潮堤横断部)及び取水口における地下水位・施設設置状況を以下に示す。



取水路(防潮堤横断部)



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	[防潮堤横断部] ・地下水位低下設備は設置されていない。※2 ・周囲を地盤改良しており、液状化検討対象層は分布しない。

液状化評価の対象※3	A
地下水位・施設設置状況	・地下水位低下設備は設置されていない。 ・構造物側面に地下水位がある。 ・周囲を地盤改良しているが、その外側に液状化検討対象層が分布する。

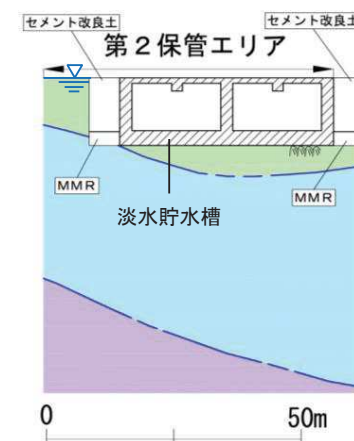
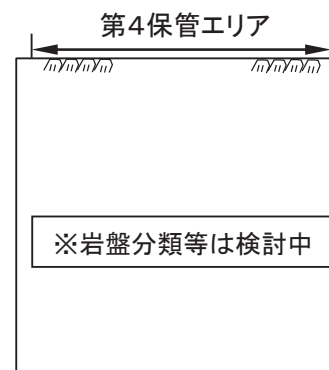
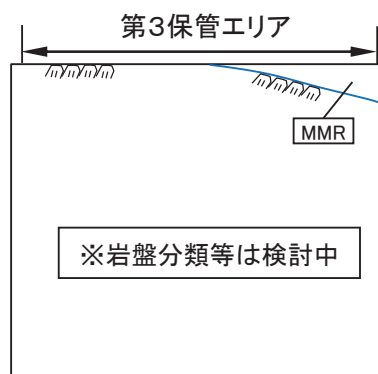
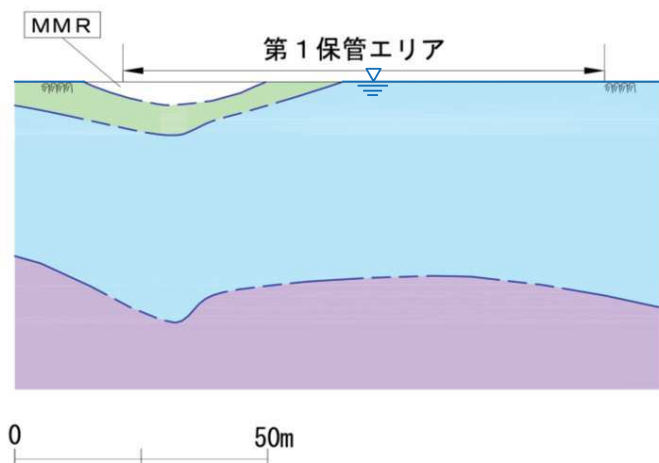
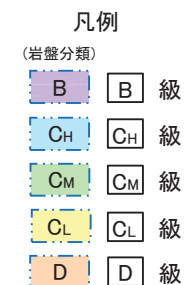
※3 A: 構造物位置で地下水位が高く、設計用荷重等に影響があると考えられる。
B: 構造物周辺の地下水位が高く、地表面が傾斜している。

※1 改良範囲は今後の安定性評価等により決定。
※2 取水路(防潮堤横断部)の地下水位は、防潮堤直下の地盤改良の追加により低下する見込み。

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 各施設の地下水位(14/14)

- ・ 保管場所(第1, 第2, 第3, 第4)における地下水位・施設設置状況を以下に示す。
- ・ なお, 保管場所は検討中のため変更の可能性がある。



保管場所(第1, 第3, 第4)

保管場所(第2)

液状化評価の対象	—
地下水位・施設設置状況	・ 岩盤及びMMR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。

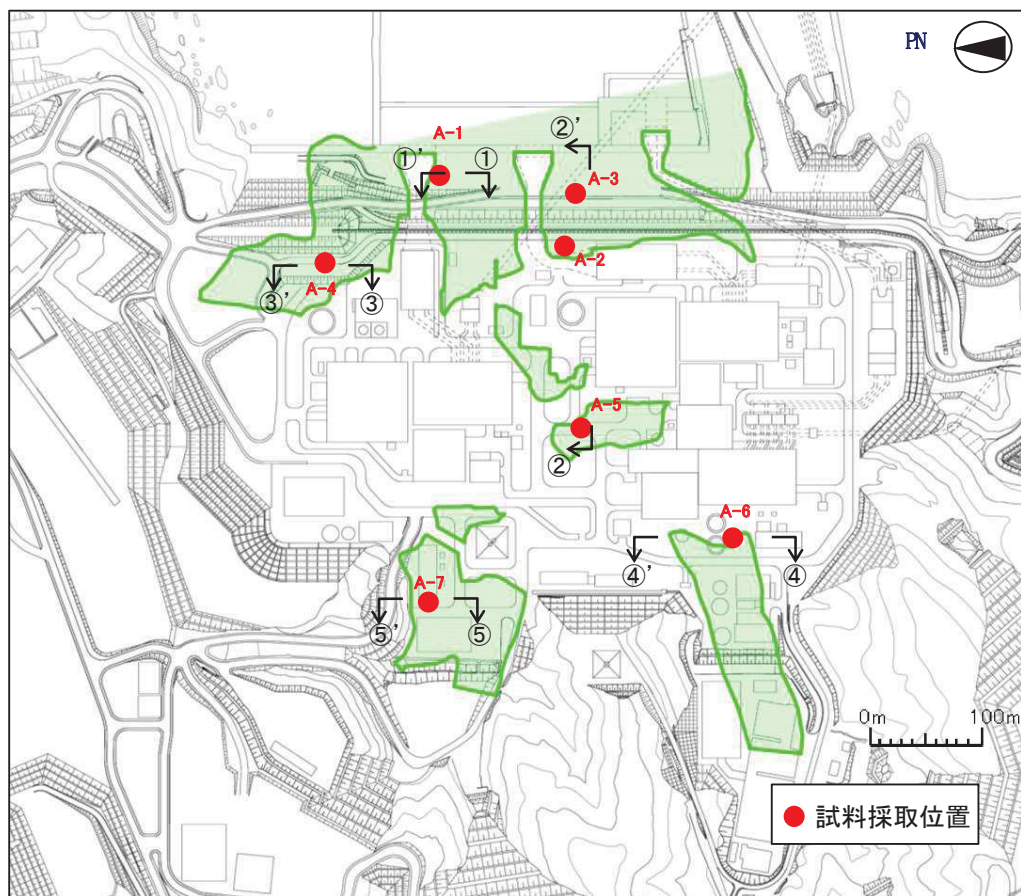
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

- 4. 1 旧表土
- 4. 2 盛土
- 4. 3 まとめ

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

4.1 旧表土【液状化強度試験の試料採取位置】

- 旧表土(液状化検討対象層)については、敷地内に残存する範囲から可能な限り敷地全体を網羅するように下図に示す位置で液状化強度試験の試料を採取した。

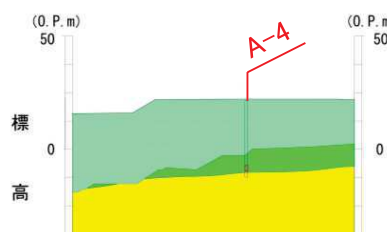


試料採取位置(旧表土)

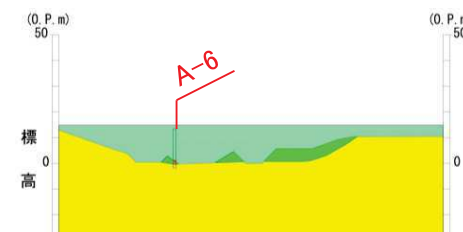


断面図(①-①')

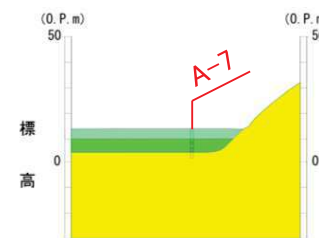
断面図(②-②')



断面図(③-③')



断面図(④-④')



断面図(⑤-⑤')



4.1 旧表土【代表性確認指標の選定(1/2)】

- 選定した旧表土の試料採取位置の代表性を確認するため、以下に示す3項目の指標(粒度分布, 細粒分含有率及びN値)について液状化強度試験箇所と敷地全体の比較を行った。
- 3つの指標は液状化強度比 R_L との相関性の観点から選定しており, JISに基づき試験を実施した。
- 液状化に関連する基本物性について, 補足説明資料3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

4.1 旧表土【代表性確認指標の選定(2/2)】

【補足】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。

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

ここで,

<砂質土の場合>

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

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

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

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

<れき質土の場合>

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

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/m^2 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 $75 \mu\text{m}$ 以下の土粒子の通過質量百分率)

D_{50} : 平均粒径 (mm)

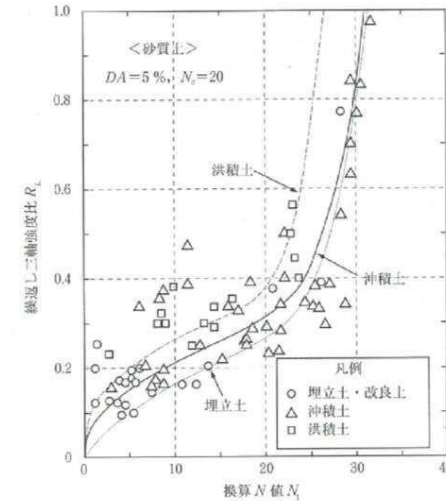


図-参6.4 砂質土の換算 N 値と繰返し三軸強度比 R_L の関係

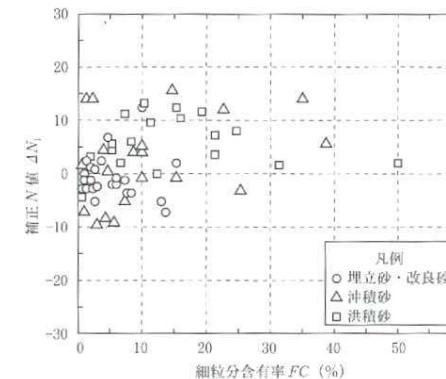
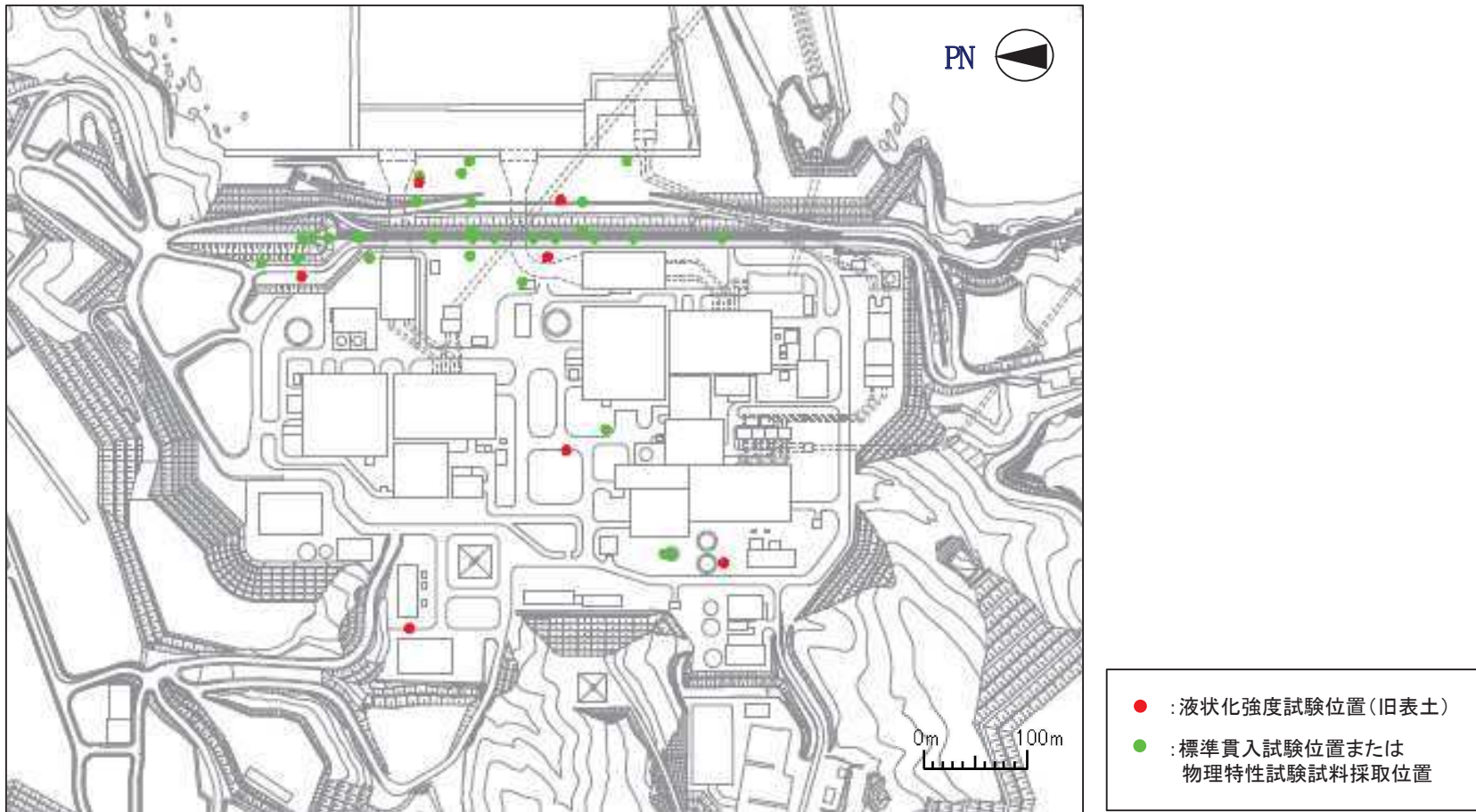


図-参6.5 砂質土の細粒分含有率と補正項 ΔN_1 の関係

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

4.1 旧表土【基本物性試験の試料採取位置】

- 旧表土を対象とした粒度分布、細粒分含有率及びN値の試験箇所を下図に示す。また、これらの試験箇所のうち、液状化強度試験を実施した箇所については色分けして表示した。



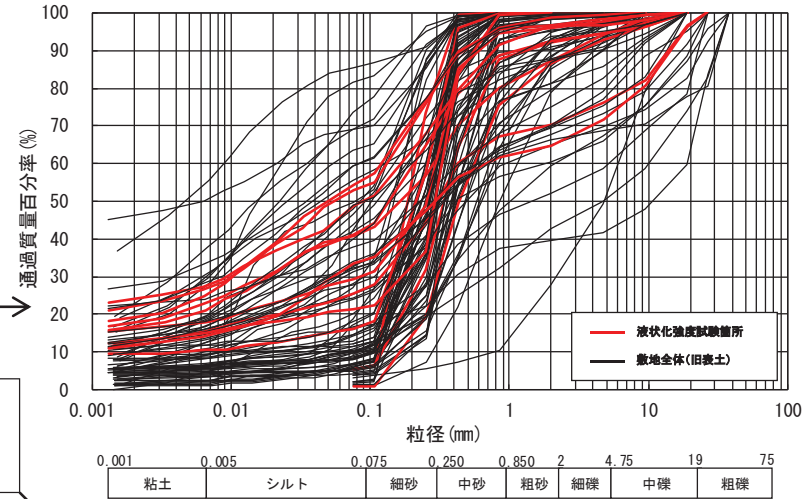
旧表土と試験試料採取位置

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

4.1 旧表土【敷地全体との基本物性の比較】

- 粒度分布について、液状化強度試験箇所は概ね敷地全体の粒度分布の平均的な範囲にある。
- 細粒分含有率について、液状化強度試験箇所は敷地全体の $\pm 1\sigma$ 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、液状化強度試験箇所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、液状化強度試験箇所は敷地全体と比較し、同程度あるいはやや液状化しやすい箇所から採取されており、液状化強度試験箇所は敷地全体に対して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4に示す。

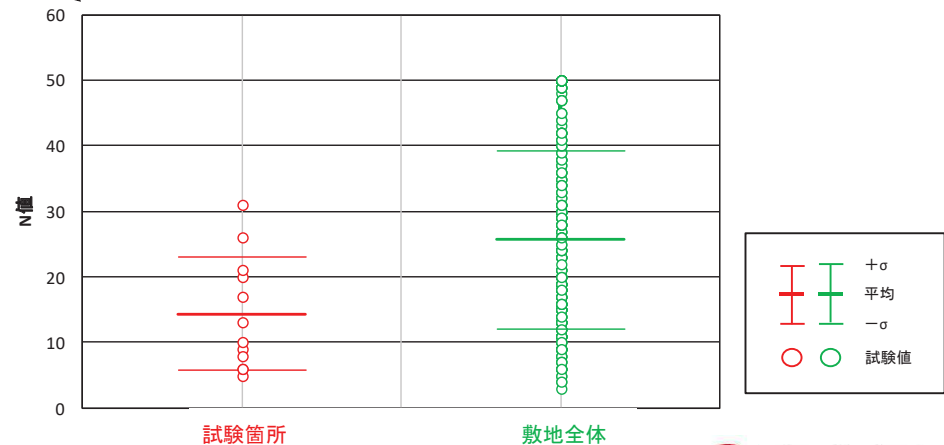
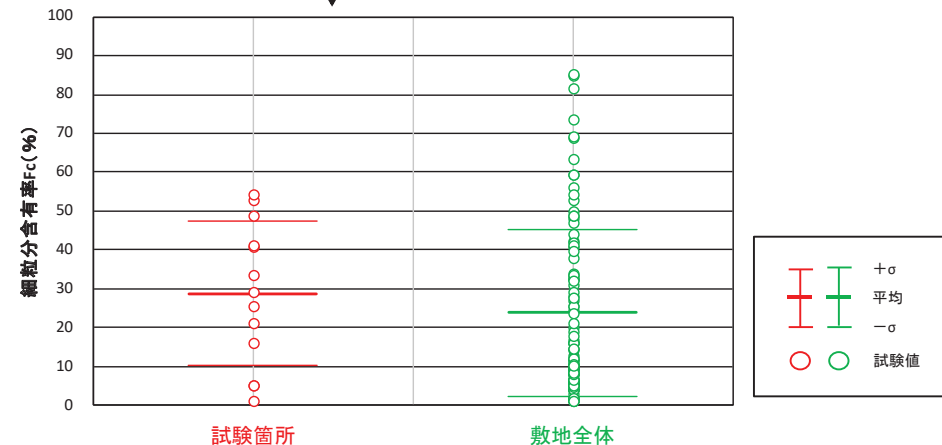
注) 沈降分析を実施していない試料に関しては、
75 μ m以上の粒度分布のみ表示。



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



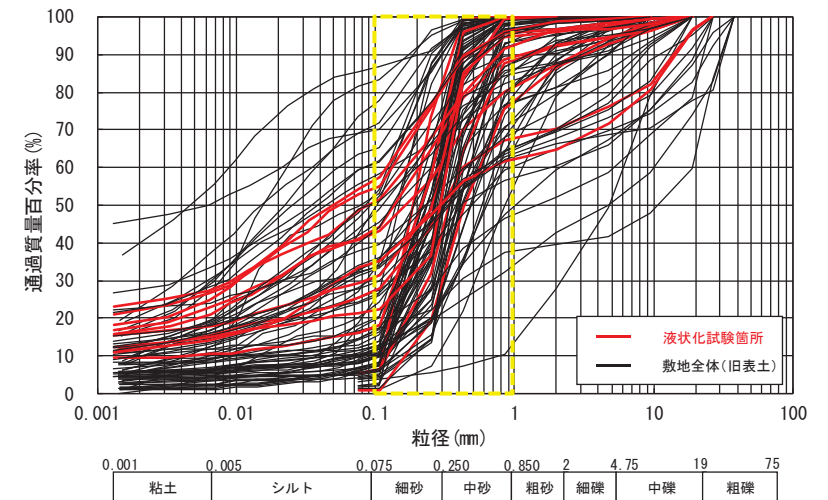
細粒分含有率

N値

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

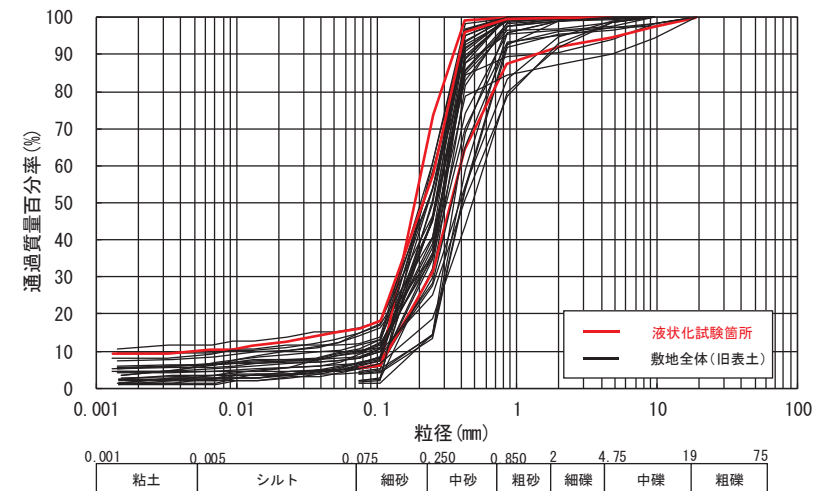
4.1 旧表土【液状化のしやすさに関する検討】

- 液状化強度試験箇所を含めた敷地全体の粒度分布から液状化しやすい傾向にある試料(細粒分含有率が小さく、0.1~1mmの範囲で急激な立ち上がりとなっている試料)を抽出し、その平面的な分布について確認した。
- その結果、海側(図面上部の防潮堤近傍)から採取した旧表土が液状化しやすい傾向となっていることを確認した。
- なお、旧表土の液状化強度試験は、上記の海側からも試料を採取していることから、敷地に対して代表性があるといえる。

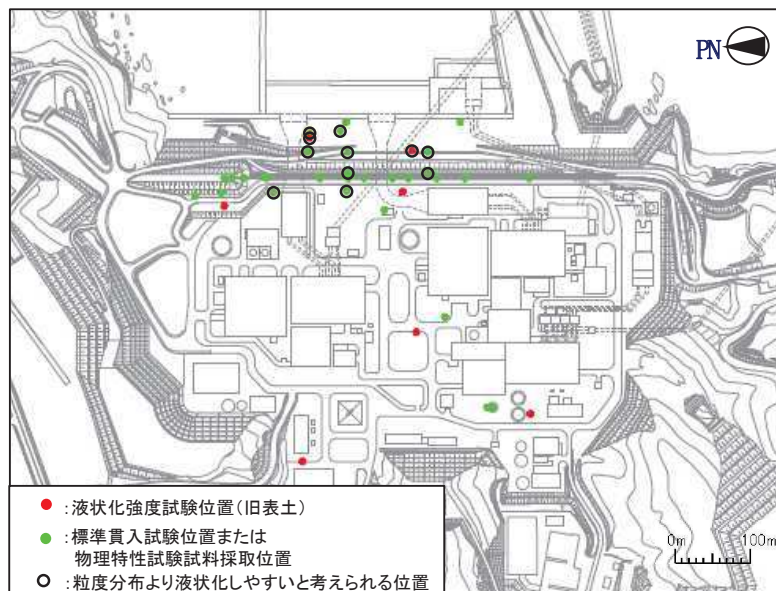


粒度分布

液状化しやすい傾向にあるデータを抽出



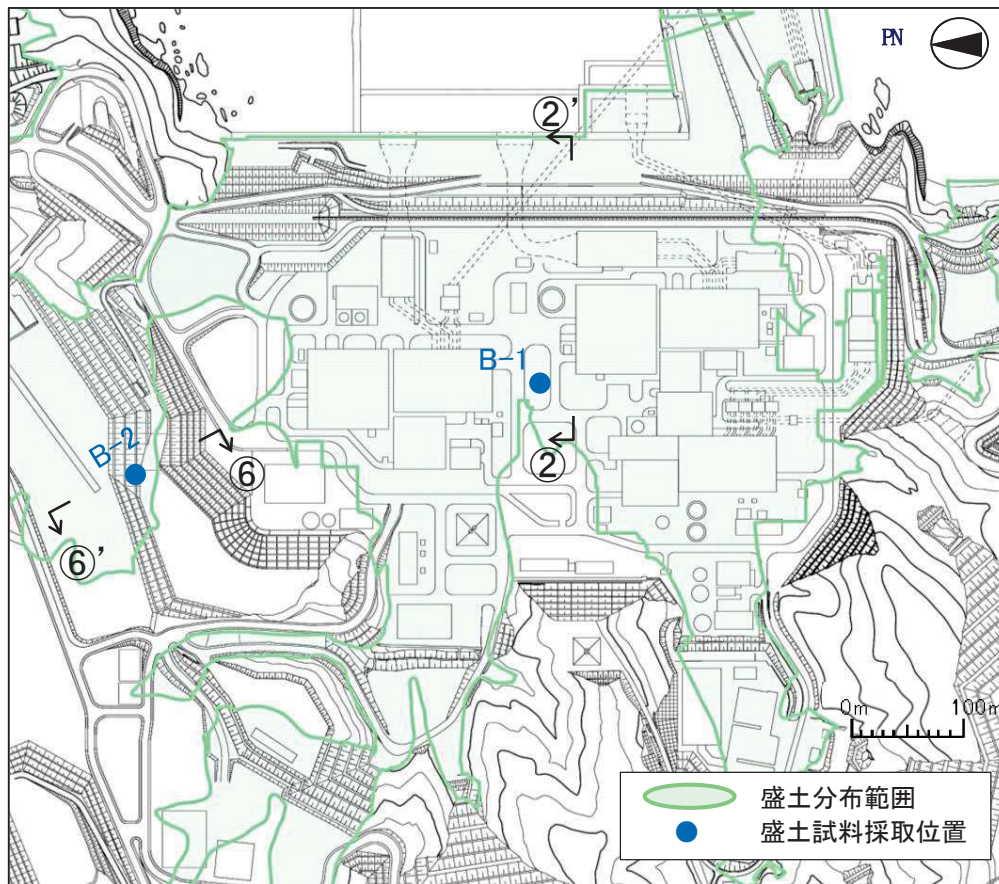
粒度分布



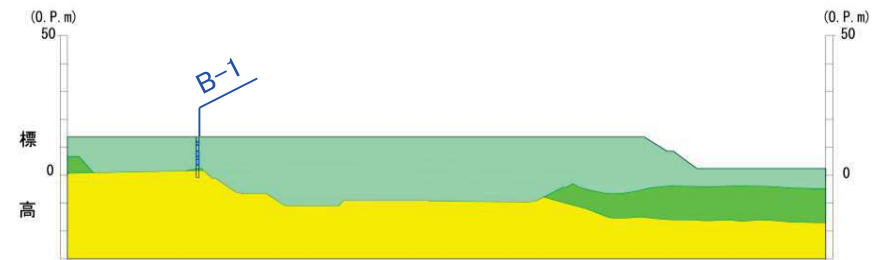
4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

4.2 盛土【液状化強度試験の試料採取位置】

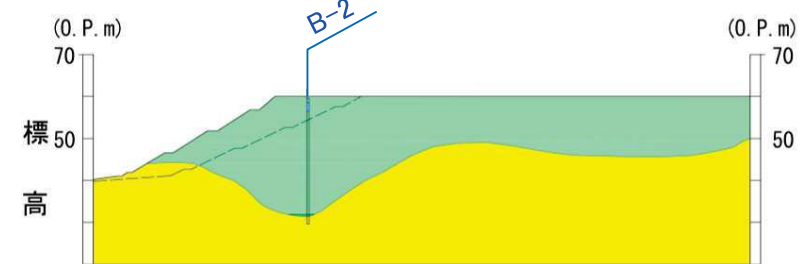
- 盛土(液状化検討対象層)については、建設時に発生した岩砕(最大粒径300mm)が主体であり、締固め管理して施工された人工地盤である(盛土の均一性については、補足説明資料5に示す。)
- 液状化強度試験の試料採取位置は、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設がO.P.+14.8m盤及びO.P.+62m盤に設置されることを踏まえ、それぞれから1地点ずつ計2地点を選定した。
- なお、今後必要に応じて盛土を対象とした液状化強度試験を追加することも検討する。



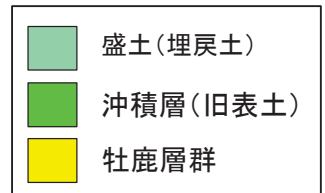
試料採取位置(盛土)



断面図(②-②')



断面図(⑥-⑥')※



※ 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)

4.2 盛土【代表性確認指標の選定】

- 選定した盛土の試料採取位置の代表性を確認するため、以下に示す3項目の指標(粒度分布, 細粒分含有率及び相対密度)について液状化強度試験箇所と敷地全体の比較を行った。
- 3つの指標は液状化強度比 R_L との相関性の観点から選定しており, JISに基づき試験を実施した。
- 液状化に関連する基本物性について, 補足説明資料3に示す。

- なお, 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6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。

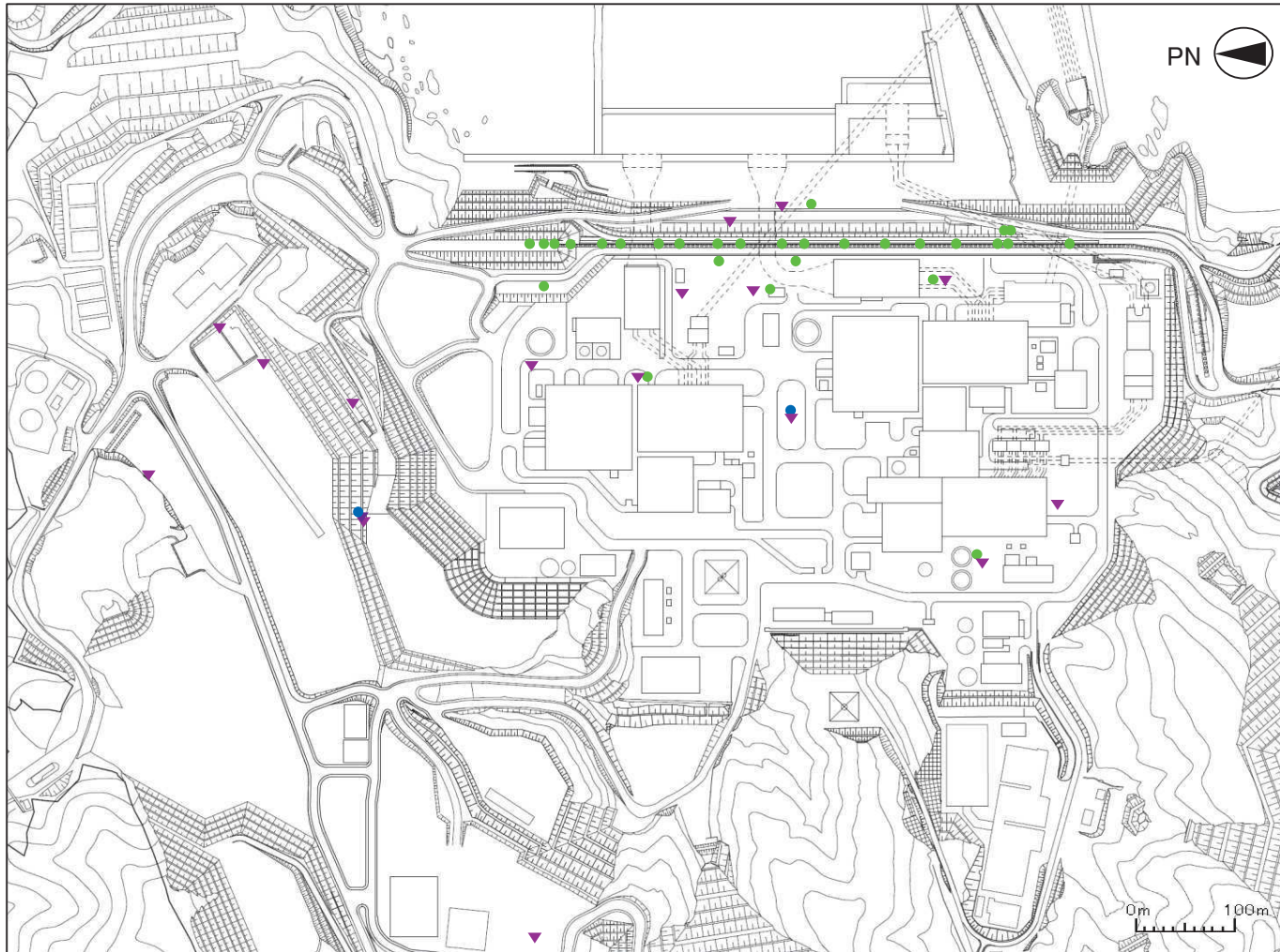
[相対密度]

ダイレイタンスー特性(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

4.2 盛土【基本物性試験の試料採取位置】

- 盛土を対象とした粒度分布、細粒分含有率及び相対密度の試験箇所を下図に示す。また、これらの試験箇所のうち、液状化強度試験を実施した箇所については色分けして表示した。



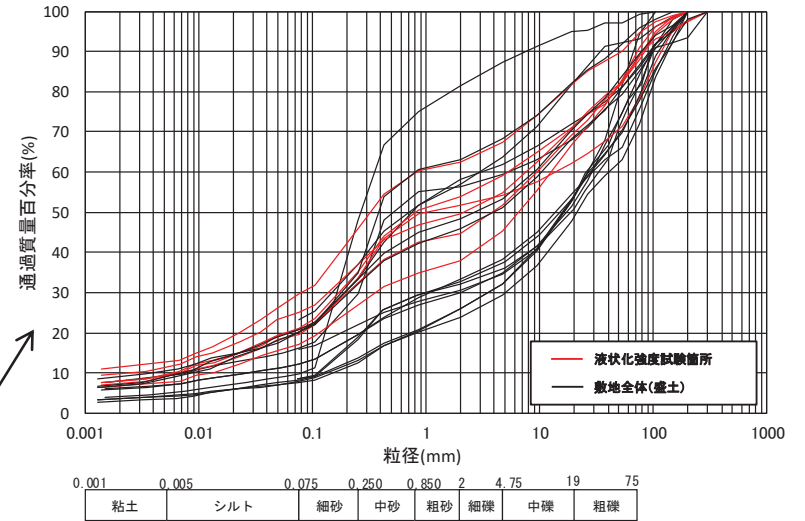
盛土の試験試料採取位置

4. 液状化強度試験 試料採取位置選定とその代表性

4.2 盛土【敷地全体との基本物性の比較】

- 粒度分布について、液状化強度試験箇所は敷地全体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、液状化強度試験箇所は敷地全体と同程度の範囲である。
- 相対密度について、液状化強度試験箇所は敷地全体よりもやや小さい箇所である。
- 以上から、液状化強度試験箇所は敷地全体と比較し、同程度あるいはやや液状化しやすい箇所から採取されており、液状化強度試験箇所は敷地全体に対して代表性があるといえる。

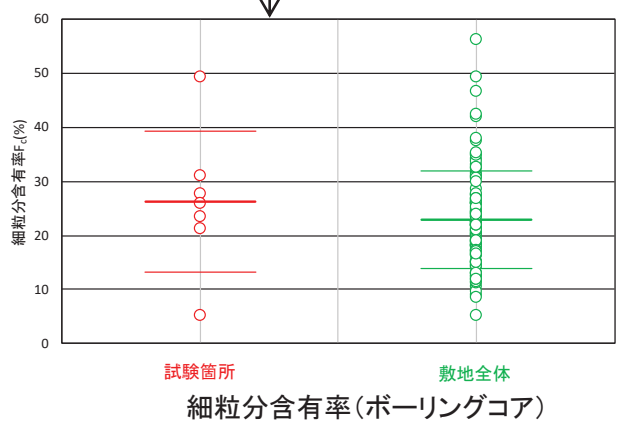
注) 沉降分析を実施していない試料に関しては、75 μm以上の粒度分布のみ表示。



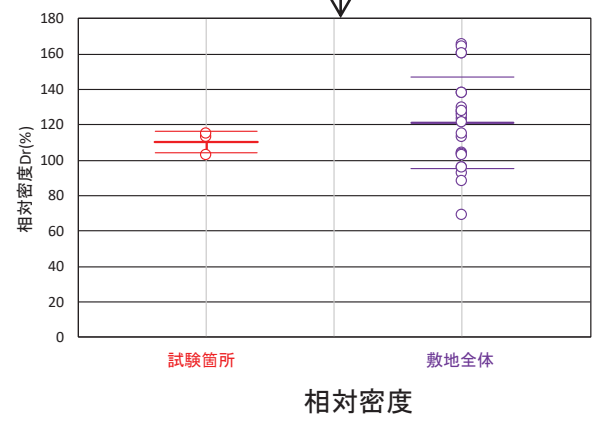
粒度分布
 ・敷地内の盛土の粒度分布は類似しており、ばらつき範囲内に分布

粒度分布

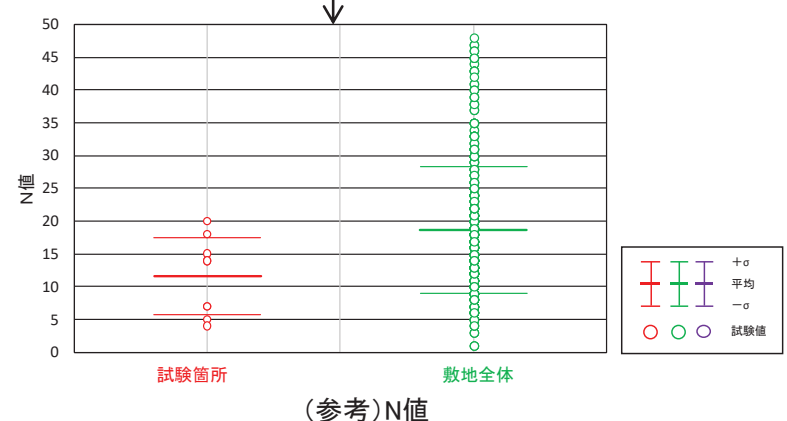
細粒分含有率
 ・概ね敷地全体の $\pm 1\sigma$ の範囲の試料で試験を実施



相対密度
 ・平均値において小さい箇所
 で試験を実施



N値※
 ・平均値において小さい箇所
 で試験を実施
 ※礫あたりは除外



(参考)N値

4.3 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、敷地全体の中で同程度あるいはやや液状化しやすい位置となっている。
- このことから、旧表土を対象にした液状化強度試験は敷地に対して、代表性を有していると評価した。

【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試験を実施

【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、敷地全体の中で同程度あるいはやや液状化しやすい位置となっている。
- このことから、盛土を対象にした液状化強度試験は敷地に対して、代表性を有していると評価した。

【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 $\pm 1\sigma$ の範囲内の試料で試験を実施
【相対密度】	平均値において敷地全体より小さい箇所試験を実施

5. 液状化強度試験結果

- 5. 1 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方
- 5. 2 液状化強度試験の試料採取位置
- 5. 3 液状化強度の試験方法
- 5. 4 旧表土の液状化強度試験結果
- 5. 5 盛土の液状化強度試験結果
- 5. 6 液状化強度試験結果のまとめ
- 5. 7 基準地震動 S_s に対する液状化強度試験の妥当性確認

5.1 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。
- 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

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」をともなう現象。

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。

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。

女川の液状化強度試験結果の分類



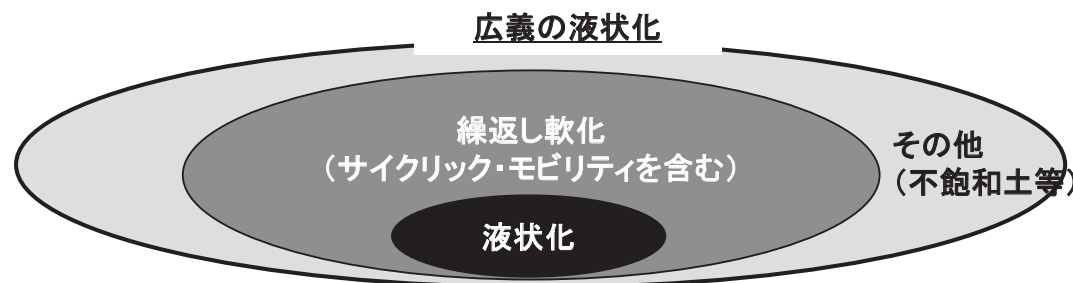
液状化



繰返し軟化

非液状化

液状化、繰返し軟化以外を非液状化に分類する。



5.1 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、以下の判定項目から、「液状化」、「繰返し軟化」及び「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。

5. 液状化強度試験結果

5.1 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(3/6)

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'_v (kN/m ²)	160	
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_v$	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



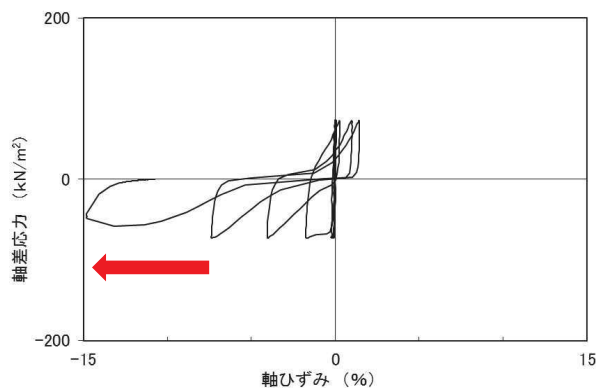
試験後の供試体

【液状化による被害例】

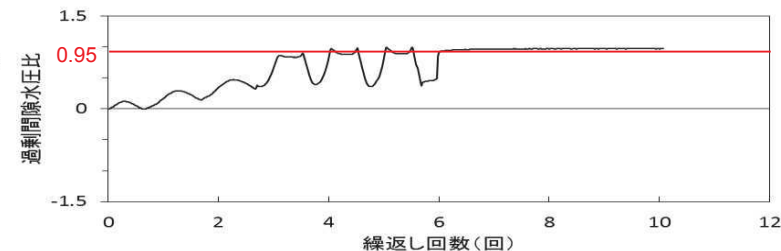
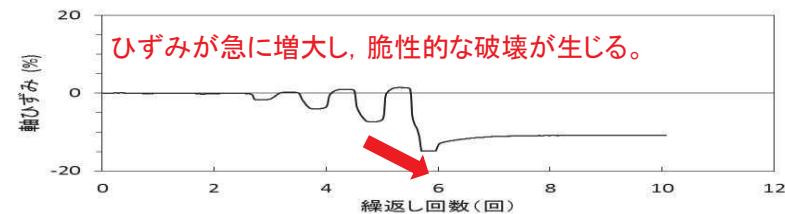
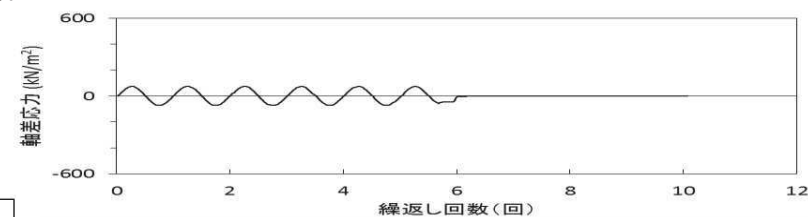
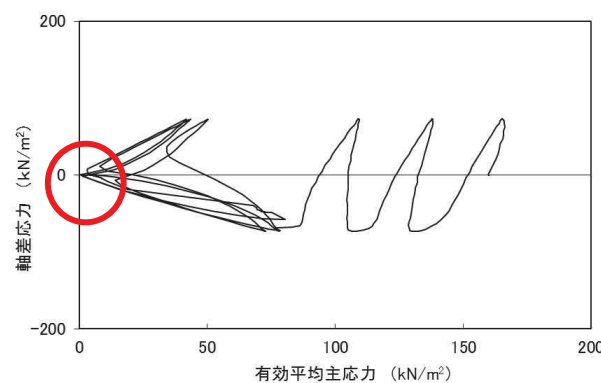


新潟地震で地盤の液状化現象により支持力を失って傾いた県営アパート※

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。



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

5.1 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(4/6)

液状化強度試験の例(繰返し軟化の場合)

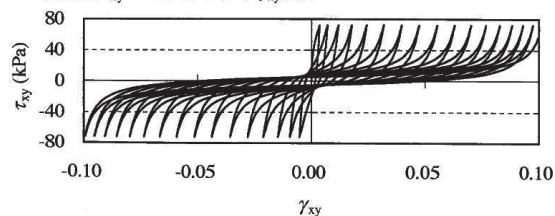
試験条件		
供試体		他事例※1
圧密圧力 σ'_0 (kN/m ²)		
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$		
試験結果		液状化の判断
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○	繰返し軟化
有効応力がゼロまで低下する	○	
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×	
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○	

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。

※1 井合ほか(2008): 砂の繰返し载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

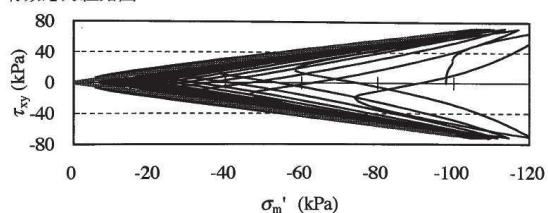
ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じない。

せん断応力 τ_{xy} ~ せん断ひずみ γ_{xy} 関係

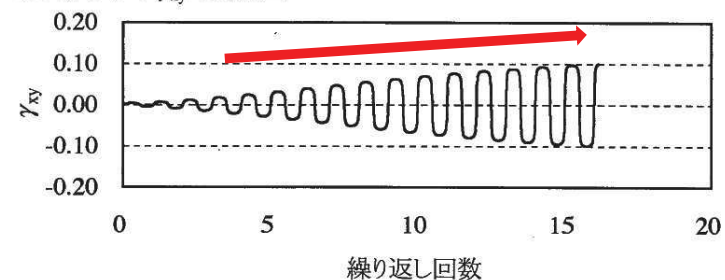


有効応力がゼロまで低下するものの、ダイレイタンシー特性により有効応力が回復する。

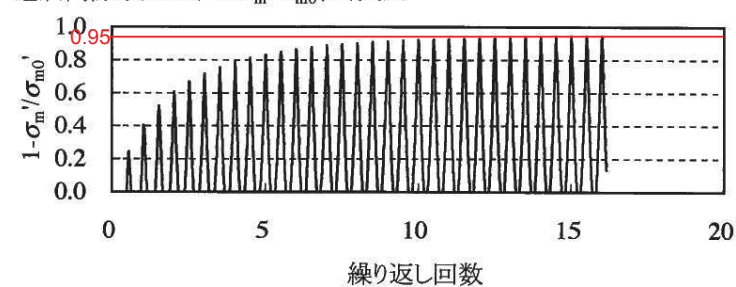
有効応力経路図



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



5.1 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(5/6)

- 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様相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ため、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。

5.1 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方(6/6)

【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。」

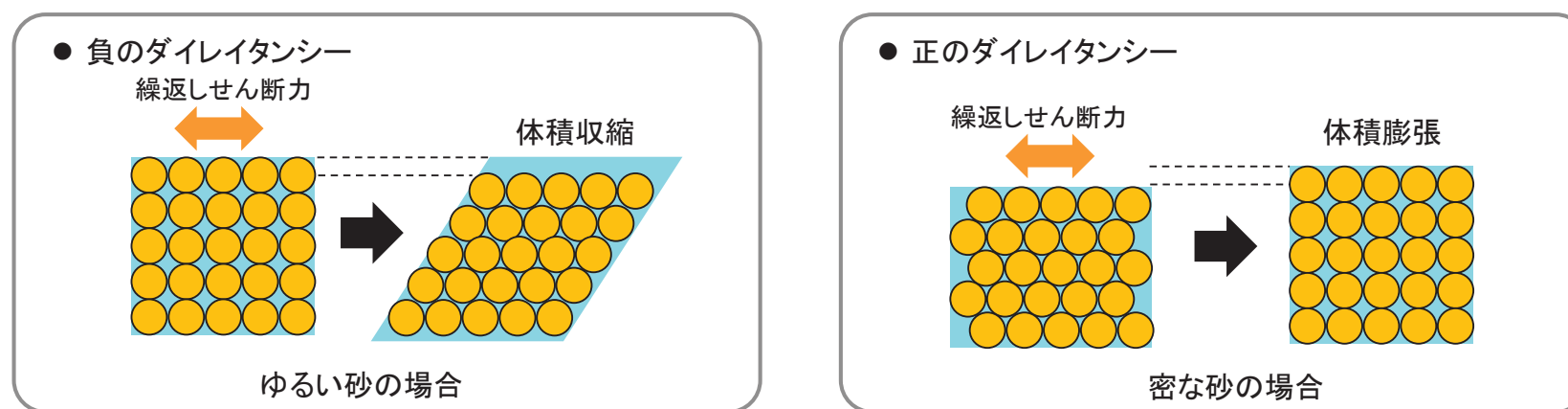
地盤の液状化は、ゆるい砂地盤が繰返しせん断を受け、せん断振幅が急増し、地盤全体が泥水状態となり、噴砂や噴水を伴うことが多いので、現象的にサイクリックモビリティとは異なる。

【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増加し、したがって有効応力が回復することである。

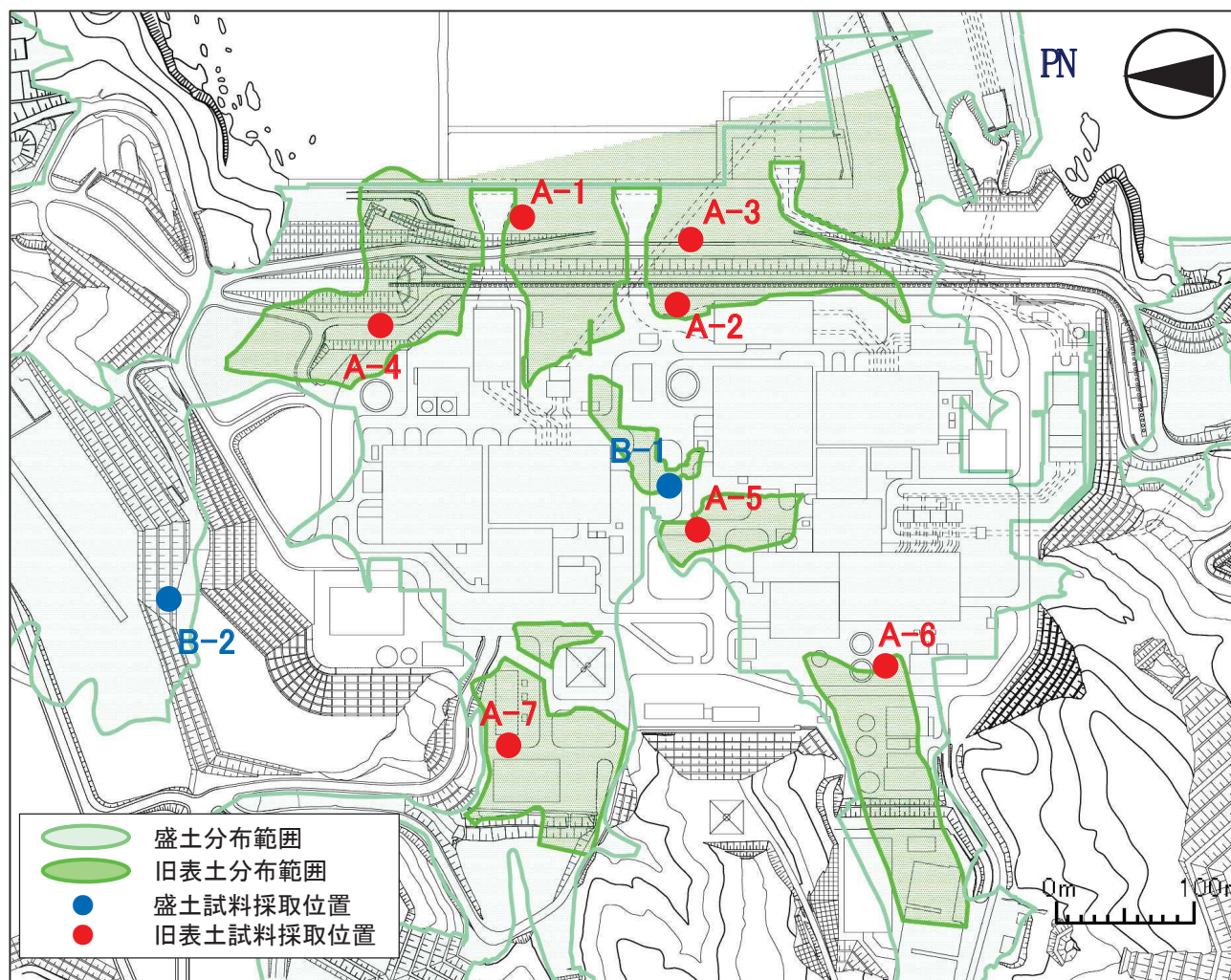
有効応力がゼロになるのは、せん断応力がゼロになる瞬間だけであり、せん断応力が作用している間は有効応力が存在するので、間隙水圧比が100%に達した後でも、繰返しせん断に対して相当な剛性を保持する。

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。



5.2 液状化強度試験の試料採取位置

- 旧表土及び盛土の液状化強度試験について、下図の位置で実施した。
- なお、今後必要に応じて液状化強度試験を追加することも検討する。



液状化強度試験の試料採取位置図

5. 液状化強度試験結果

5.3 液状化強度の試験方法

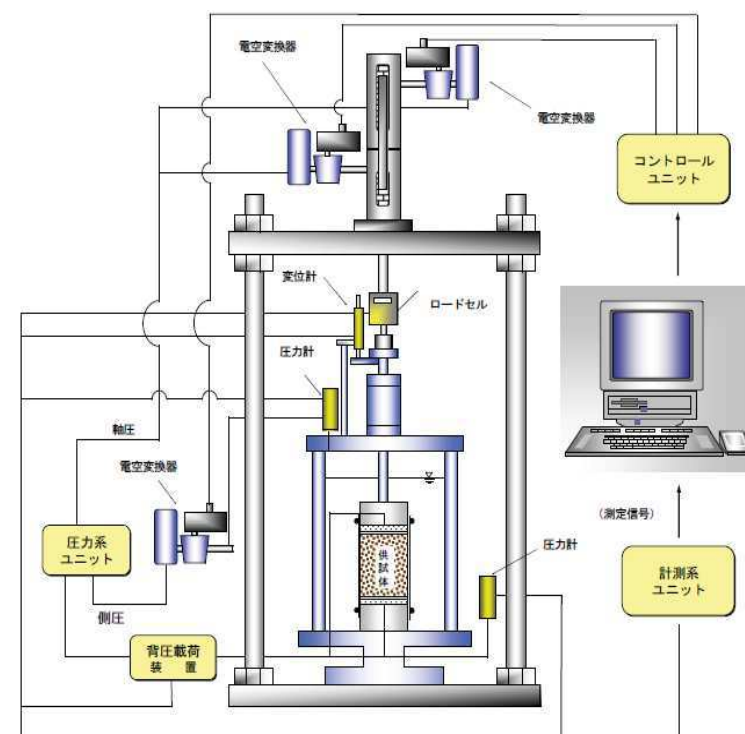
- 旧表土及び盛土の液状化強度特性を求めるため、地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」(JGS 0541)に基づき液状化強度試験を実施する。
- 試料採取は、原位置の地盤を乱さないよう、凍結サンプリングやゲルプッシュサンプリングにより実施した。

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。



繰返し非排水三軸試験の概要

【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

5. 液状化強度試験結果

5.4 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 振ひ 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 振ひ 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

5.4 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

5.4 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	

5. 液状化強度試験結果

5.4 旧表土の液状化強度試験結果(4/7)

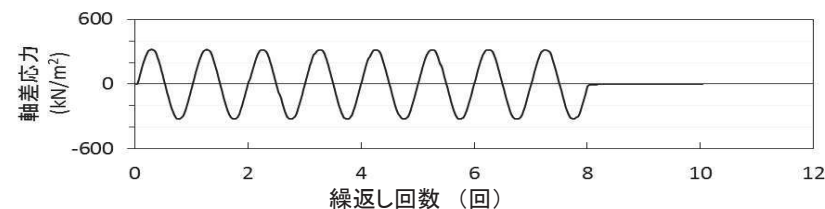
液状化強度試験結果(旧表土の非液状化の例)

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		液状化の判断
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	×	非液状化
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)	×	
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○	

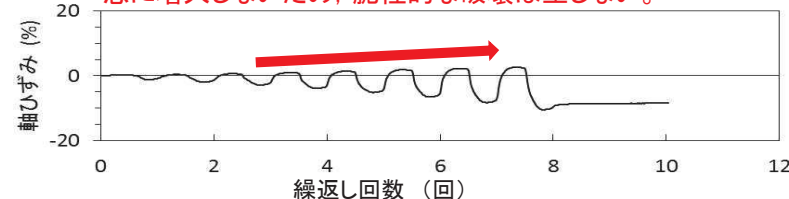
供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。



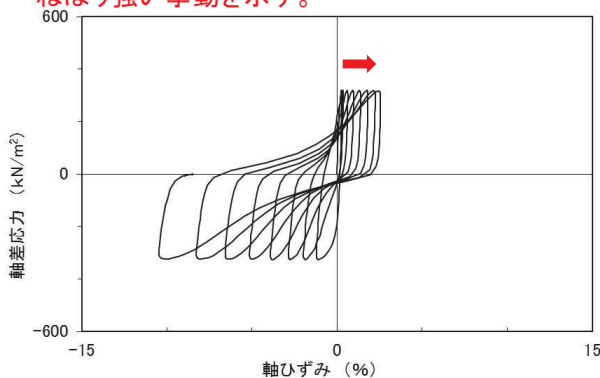
試験後の供試体



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。

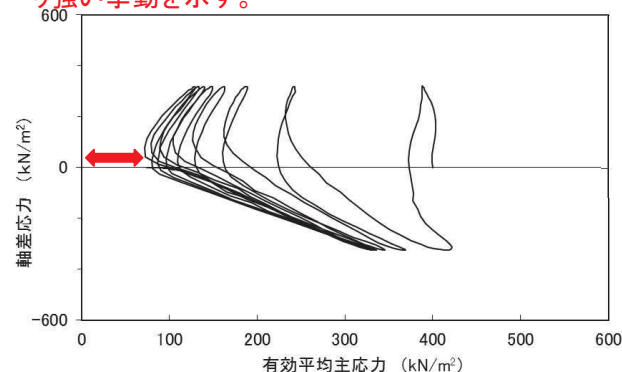


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

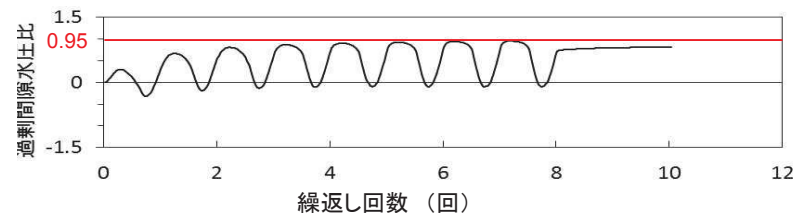


液状化強度試験結果(軸ひずみ)

繰返し荷重を载荷しても、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)



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

5.4 旧表土の液状化強度試験結果(5/7)

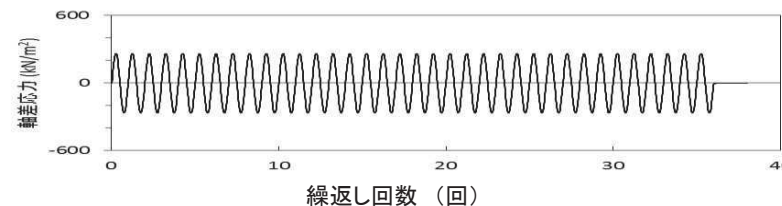
液状化強度試験結果(旧表土の繰返し軟化の例)

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		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)	○	

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

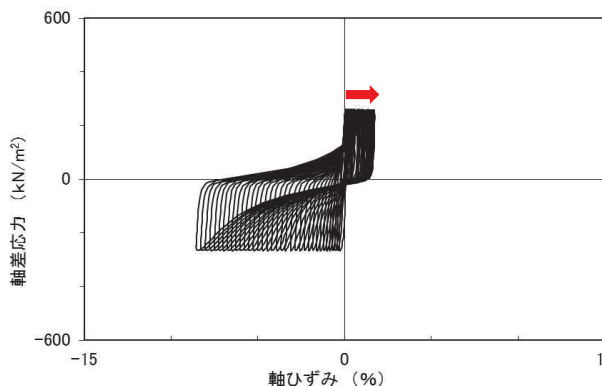


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

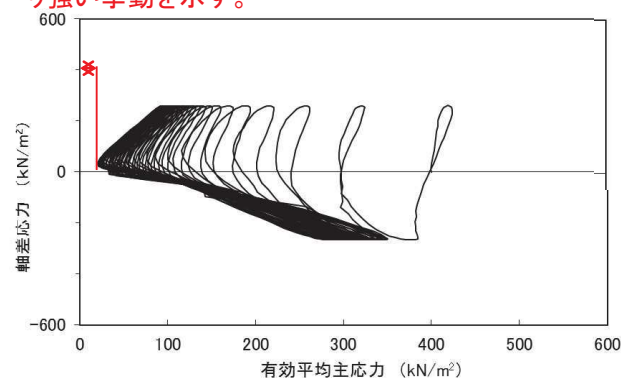


ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

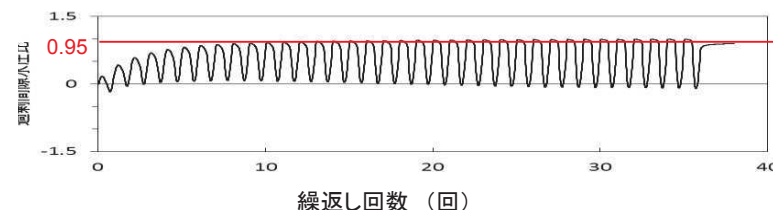
繰返し荷重を載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。また、せん断応力(軸差応力)作用時に、有効応力は回復し、ねばり強い挙動を示す。



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)

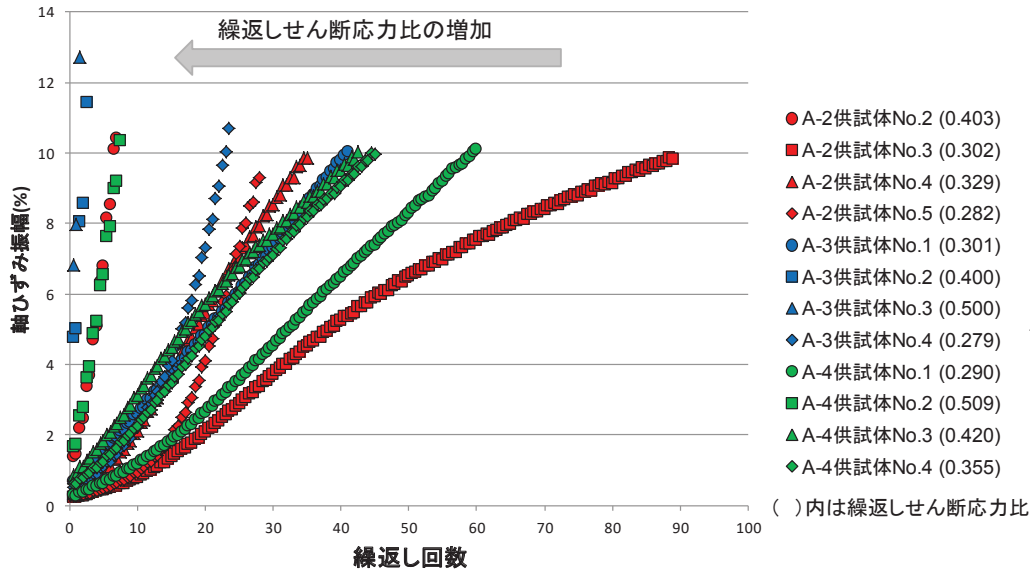
5. 液状化強度試験結果

5.4 旧表土の液状化強度試験結果(6/7)

- 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】

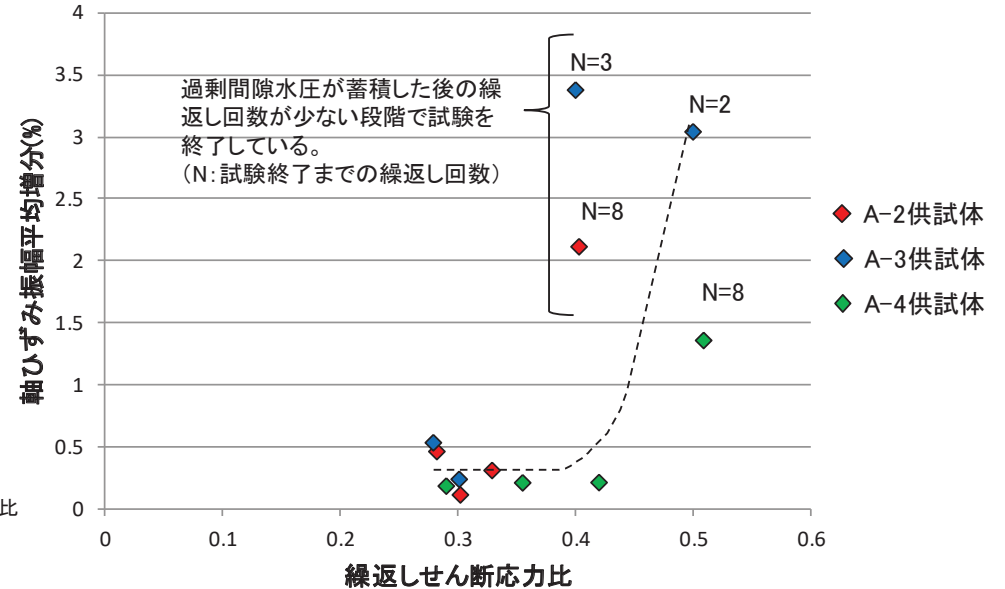
繰返し载荷に対し、繰返しせん断応力比が大きいほど軸ひずみ振幅の傾きが大きく、プロット間隔が大きい傾向を示す。



軸ひずみ振幅—繰返し回数関係※1

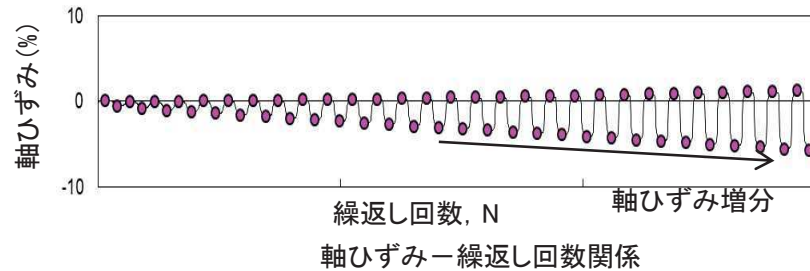
※1: 液状化強度試験において、繰返し载荷に対する軸ひずみ振幅をプロットした図であり、軸ひずみの発生割合を示す。

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。



5.4 旧表土の液状化強度試験結果(7/7)

- 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とおりである。
- 液状化強度試験の結果の詳細については、補足説明資料7(データ集2.)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。
- 3. で抽出された液状化検討対象施設の耐震性評価にあたっては、「非液状化」または「繰返し軟化」と分類される場合でも、過剰間隙水圧の上昇に伴う旧表土の剛性の低下が生じる可能性があると考え、有効応力解析により変形量等の評価を行う方針とする。

5. 液状化強度試験結果

5.5 盛土の液状化強度試験結果(1/4)

- 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(φ100)				B-1-2(φ100)				B-1-3(φ100)				
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 幅 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(φ300)				B-2-1(φ100)				B-2-2(φ300)				
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 幅 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

5. 液状化強度試験結果

5.5 盛土の液状化強度試験結果(2/4)

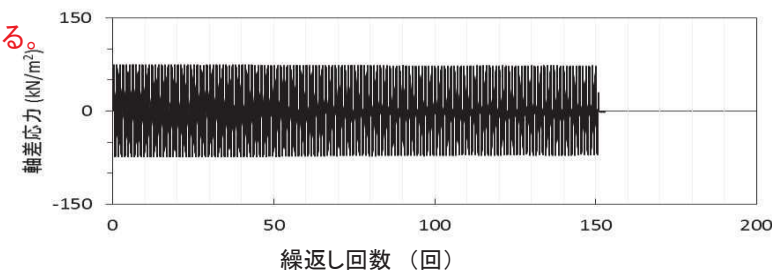
液状化強度試験結果(盛土の繰返し軟化の例)

供試体が試験前後とも自立するほどの強度がある。

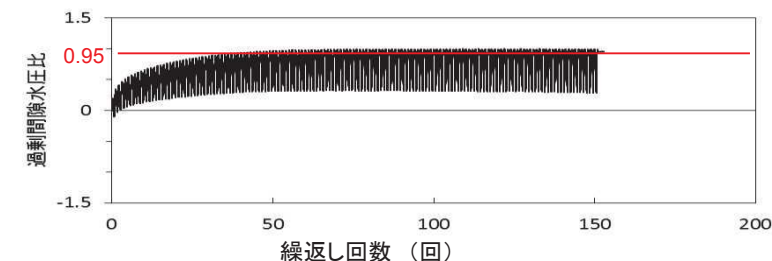
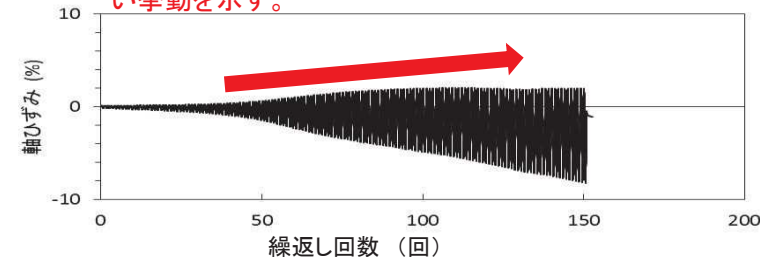
試験条件		液状化の判断
供試体	B-1-2試料(No.1)	
圧密圧力 σ'_c (kN/m ²)	120	
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_c$	0.309	
試験結果		繰返し軟化
間隙水圧が上昇・蓄積する(95%)	○	
有効応力がゼロまで低下する	×	
液体状となり流動する(ひずみ急増)	×	
ダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する(有効応力回復)	○	



試験後の供試体



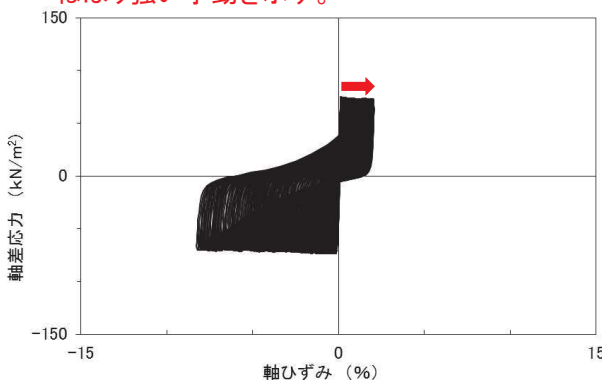
ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。



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。

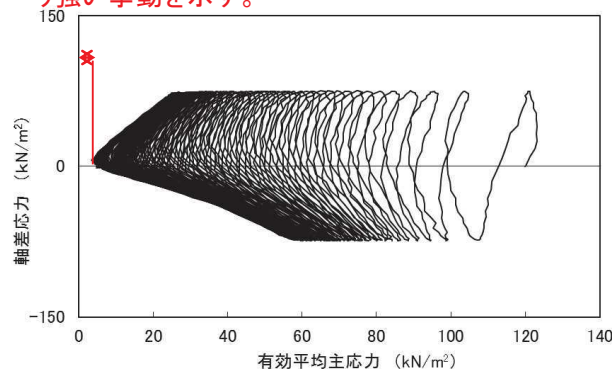
液状化強度試験結果(繰返し回数)

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)

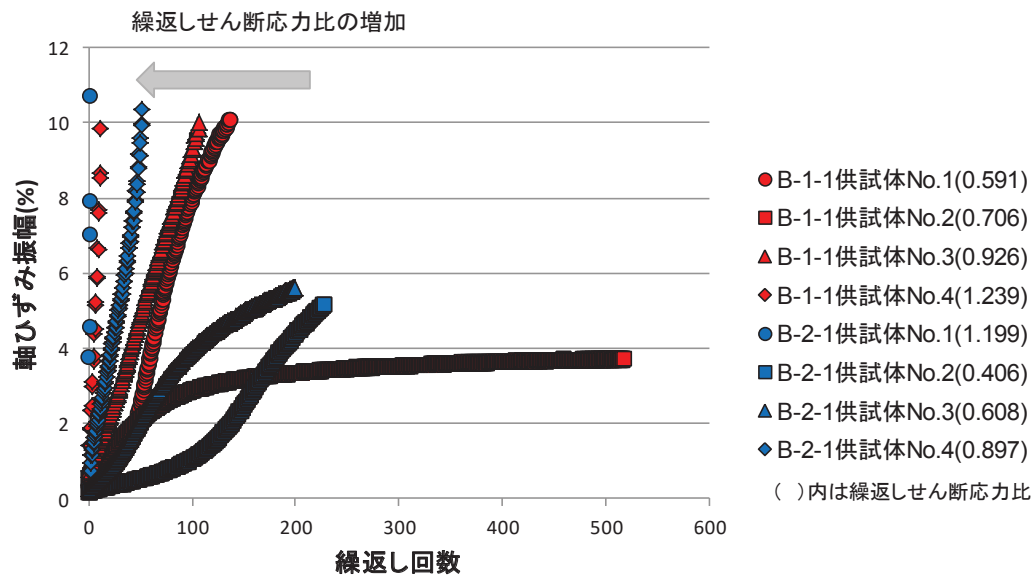
5. 液状化強度試験結果

5.5 盛土の液状化強度試験結果(3/4)

- 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】

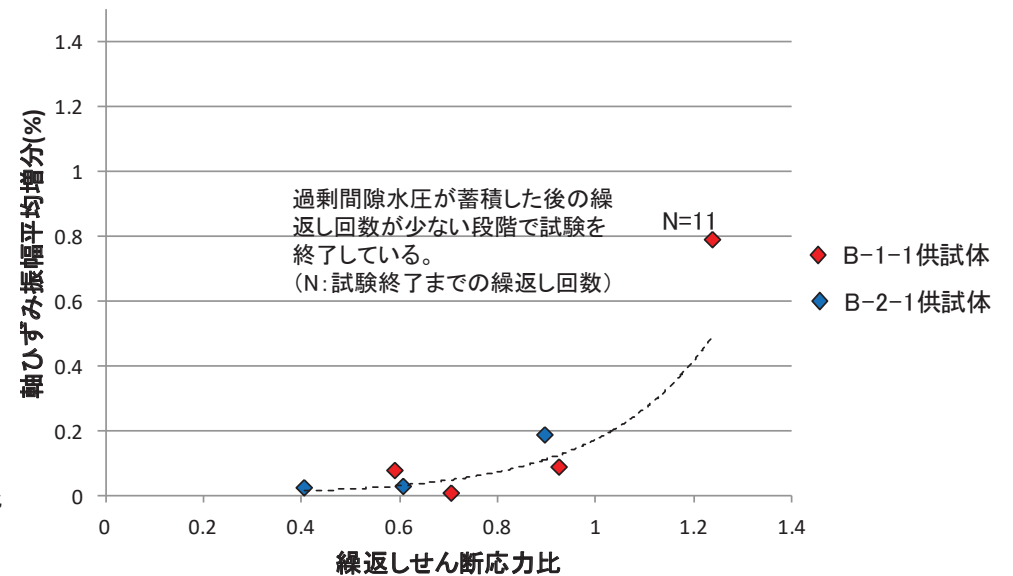
繰返し载荷に対し、繰返しせん断応力比が大きいほど軸ひずみ振幅の傾きが大きく、プロット間隔が大きい傾向を示す。



軸ひずみ—繰返し回数関係※1

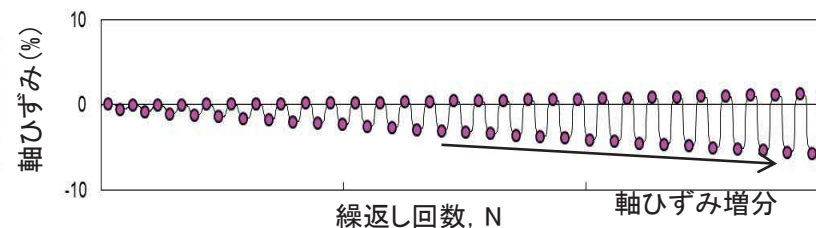
※1: 液状化強度試験において、繰返し载荷に対する軸ひずみ振幅をプロットした図であり、軸ひずみの発生度合いを示す。

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。



5.5 盛土の液状化強度試験結果(4/4)

- 盛土の液状化強度試験で得られた結果と解釈は以下のとおりである。
- 液状化強度試験の結果の詳細については、補足説明資料7(データ集2.)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)

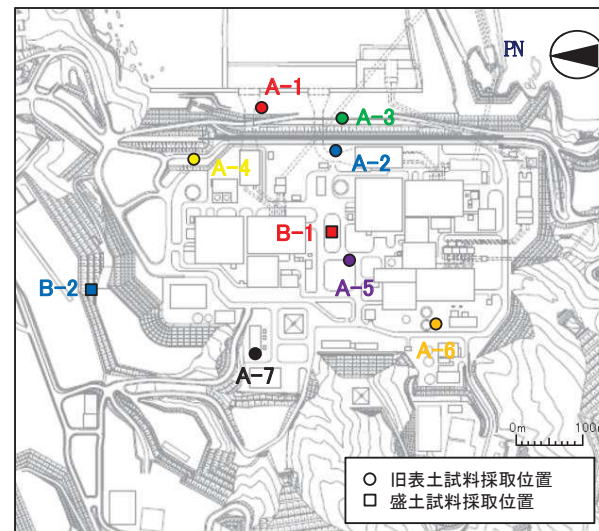
■試験結果の解釈

- 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。
 - 3. で抽出された液状化検討対象施設の耐震性評価にあたっては、「非液状化」または「繰返し軟化」と分類される場合でも、過剰間隙水圧の上昇に伴う盛土の剛性の低下が生じる可能性があると考え、有効応力解析により変形量等の評価を行う方針とする。
- なお、2011年東北地方太平洋沖地震において、構内の盛土に沈下が生じており、その実績を整理した結果及び液状化の可能性も含めた要因について考察した結果を補足説明資料8に示す。

5. 液状化強度試験結果

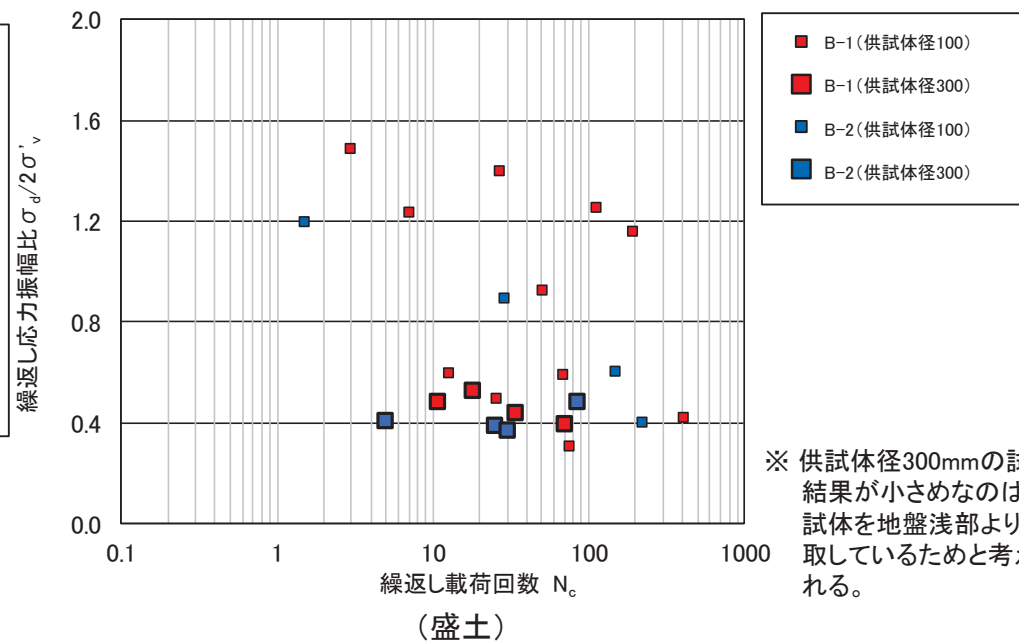
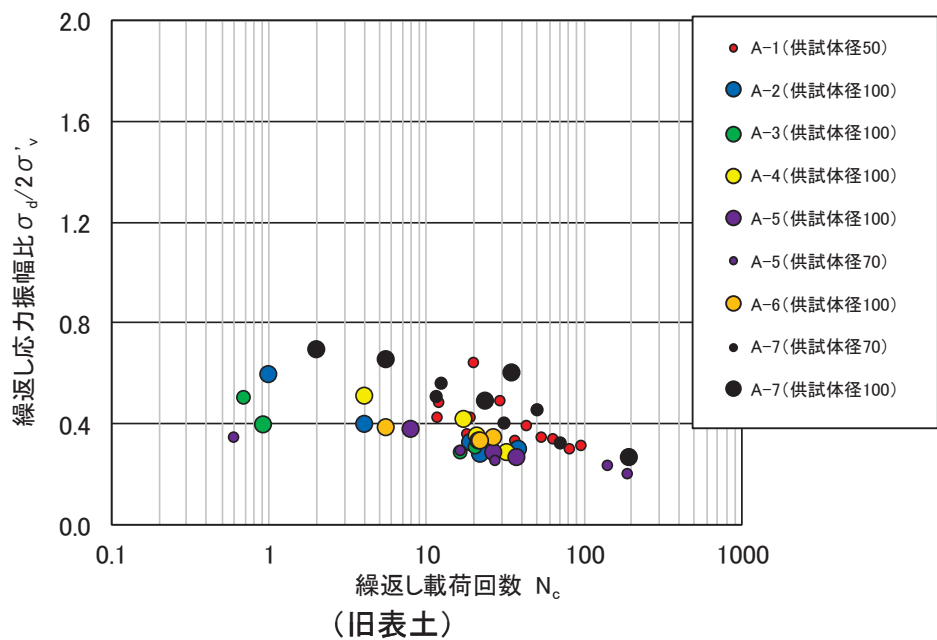
5.6 液状化強度試験結果のまとめ

- 旧表土及び盛土の液状化強度試験結果に基づく繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比の関係を下図に示す。



64

試料採取位置

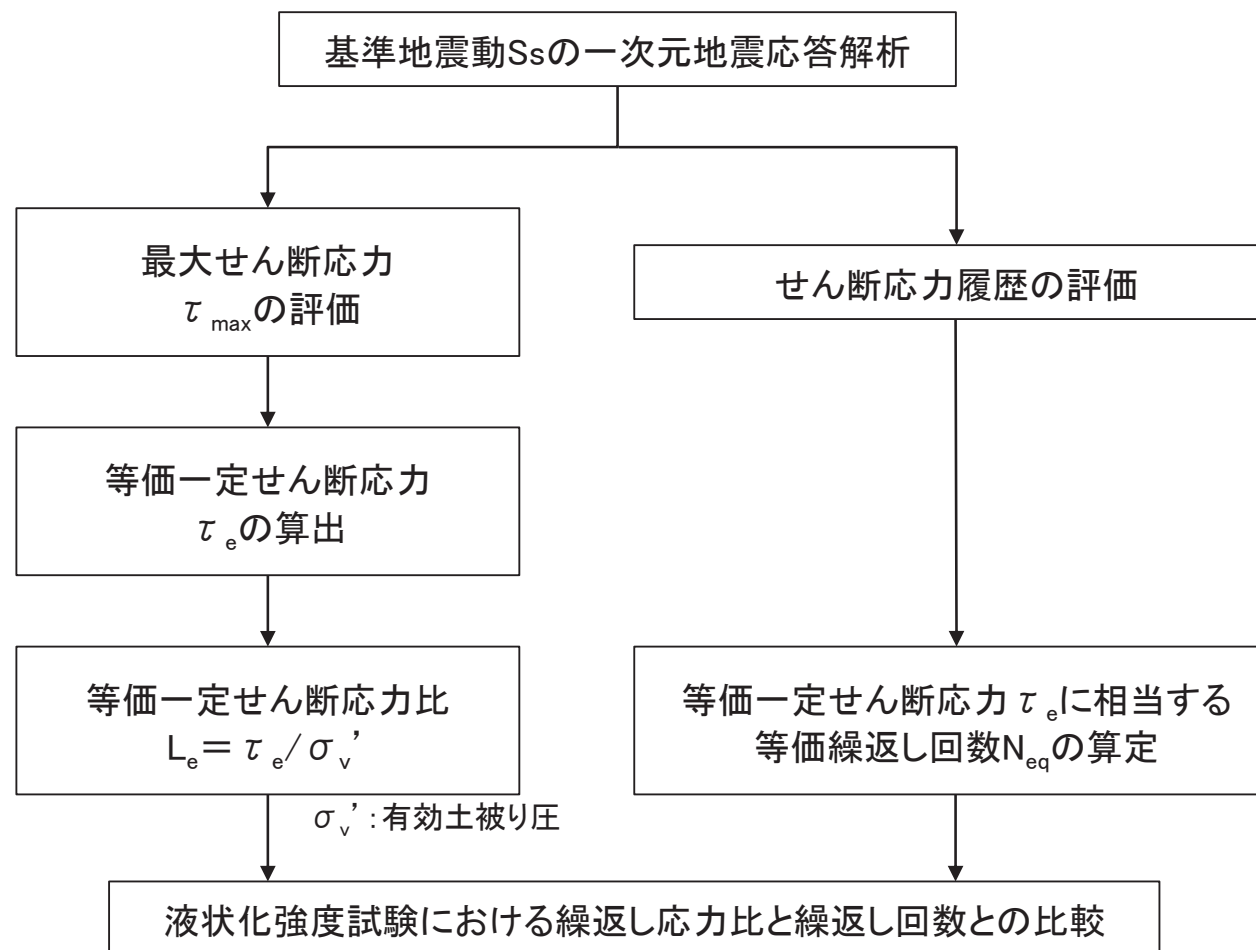


※ 供試体径300mmの試験結果が小さめなのは、供試体を地盤浅部より採取しているためと考えられる。

液状化強度試験結果に基づく繰返し載荷回数と繰返し応力振幅比の関係

5.7 基準地震動S_s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。
- 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。
- せん断応力比と繰返し回数の比較の結果、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。



基準地震動S_s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

5.7 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。

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

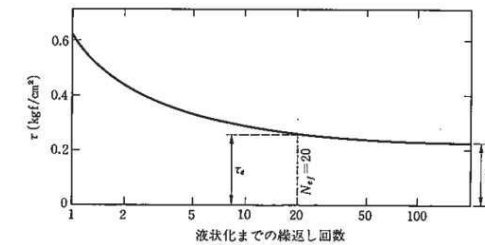
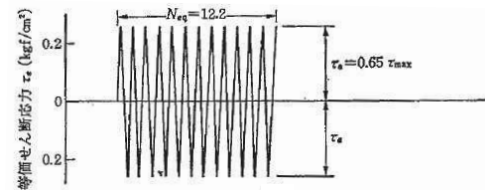
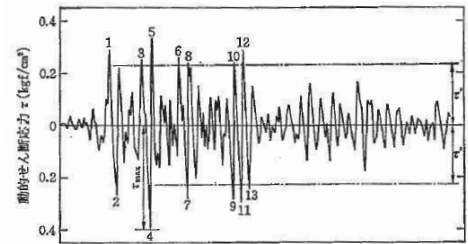
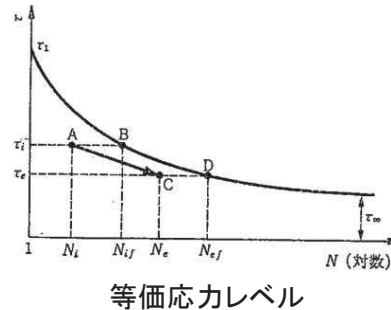
ここに、

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。

5.7 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】

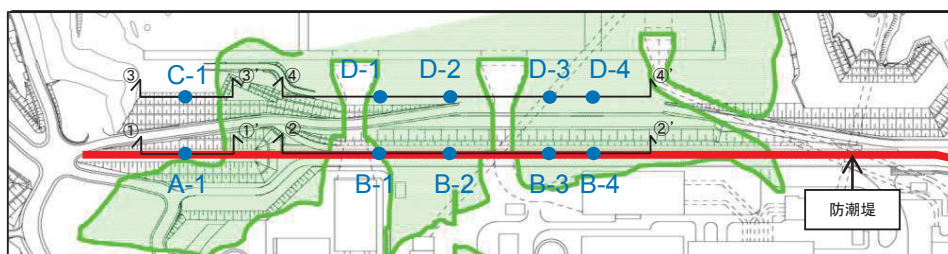
- 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認として、防潮堤を代表施設に一次元地震応答解析を実施した。
- 一次元地震応答解析を実施する箇所は、防潮堤近傍で拘束圧が小さいO.P.+3.5m盤と拘束圧が大きいO.P.+14.8m盤から盛土厚、旧表土厚の大きさを考慮して以下の10点を選定した。
- なお、比較位置周辺の地盤について、防潮堤の沈下対策として追加の地盤改良を計画(改良範囲等を検討中)しているが、基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認にあたっては、追加の地盤改良を考慮しない(盛土及び旧表土として評価する)こととする。

【A-1, B-1~B-4について】

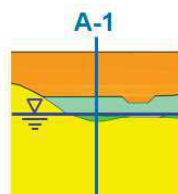
- ①拘束圧が大きいO.P.+14.8m盤で地下水位が高く液状化検討対象施設である防潮堤直下。
- ②A-1は盛土堤防直下で最も拘束圧が大きく盛土・旧表土が分布。
- ③B-2は最も旧表土が厚く分布。B-3, 4は平均的な盛土・旧表土の厚さ。B-1は盛土のみ分布。

【C-1, D-1~D-4について】

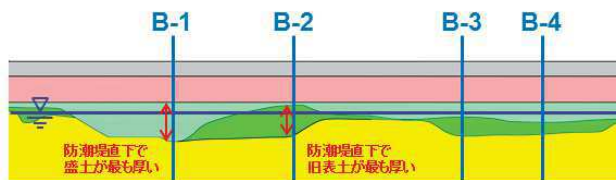
- ①地下水位が高く拘束圧が小さいO.P.+3.5m盤。
- ②C-1は盛土堤防近傍で盛土のみ分布。
- ③D-2は旧表土が厚く分布。D-1, 3, 4は平均的な盛土・旧表土の厚さ。



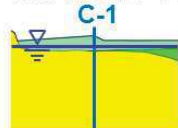
一次元地震応答解析実施平面位置



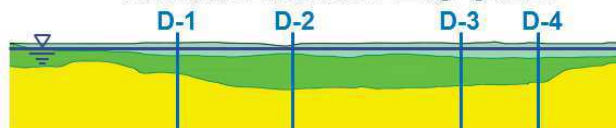
一次元地震応答解析実施位置(①-①'断面)



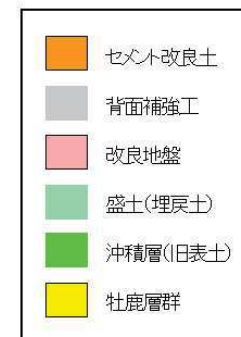
一次元地震応答解析実施位置(②-②'断面)



一次元地震応答解析実施位置(③-③'断面)



一次元地震応答解析実施位置(④-④'断面)

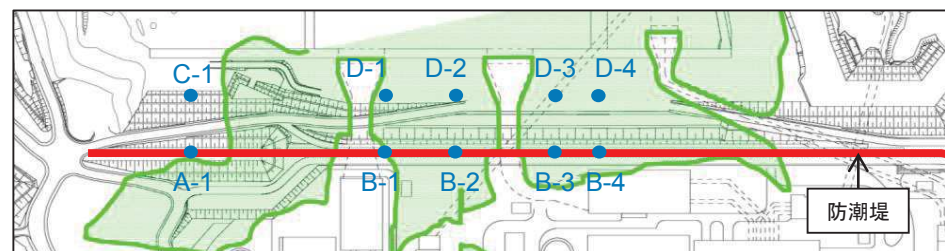


5. 液状化強度試験結果

5.7 基準地震動Ss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.+3.5m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. +3.5m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	0.17	39.17	対象層なし				0.18	58.78	0.18	49.27	0.18	42.98	対象層なし															
Ss-D2	0.16	48.42					0.17	53.85	0.17	45.35	0.17	37.66									0.49	76.32	0.42	44.56	0.42	49.50	0.43	63.32
Ss-D3	0.15	43.98					0.17	56.01	0.16	43.42	0.16	40.66									0.48	49.94	0.38	68.82	0.40	43.78	0.42	41.29
Ss-F1	0.16	99.43					0.17	73.51	0.17	72.57	0.17	64.20									0.46	51.81	0.36	107.11	0.36	93.21	0.37	72.98
Ss-F2	0.14	67.73					0.18	30.82	0.17	33.30	0.17	37.71									0.48	75.00	0.39	80.74	0.40	92.34	0.42	77.11
Ss-F3	0.12	0.10					0.14	20.50	0.12	200 ^{※1}	0.11	200 ^{※1}									0.48	25.22	0.40	29.05	0.41	28.24	0.43	26.19
Ss-N1	0.20	24.53					0.20	29.99	0.20	28.51	0.20	28.61									0.40	50.08	0.30	46.62	0.30	44.78	0.31	46.20
																	0.52	20.95	0.45	22.11	0.46	21.40	0.46	20.99				

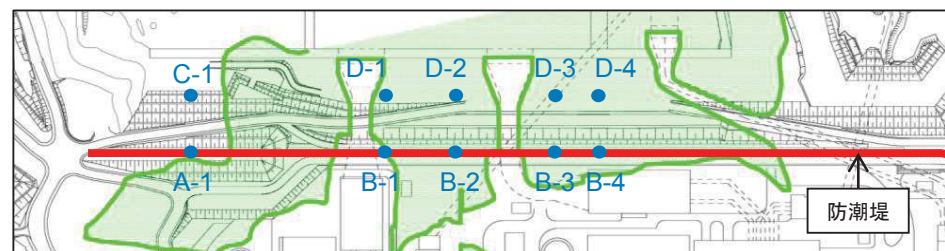
※1 試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数200回のせん断応力比(R₂₀₀)に対して、解析から得られる等価一定せん断応力比(L_e)が小さい場合は、その等価一定せん断応力比に相当する等価繰返し回数(N_{eq})を200回とした。

5. 液状化強度試験結果

5.7 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.+3.5m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. +3.5m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	

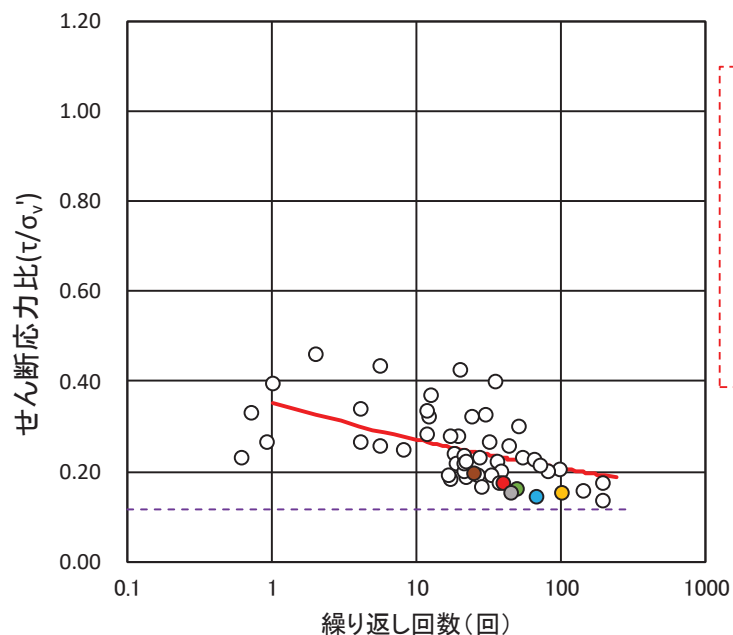
※1 試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数200回のせん断応力比(R₂₀₀)に対して、解析から得られる等価一定せん断応力比(L_e)が小さい場合は、その等価一定せん断応力比に相当する等価繰返し回数(N_{eq})を200回とした。

5. 液状化強度試験結果

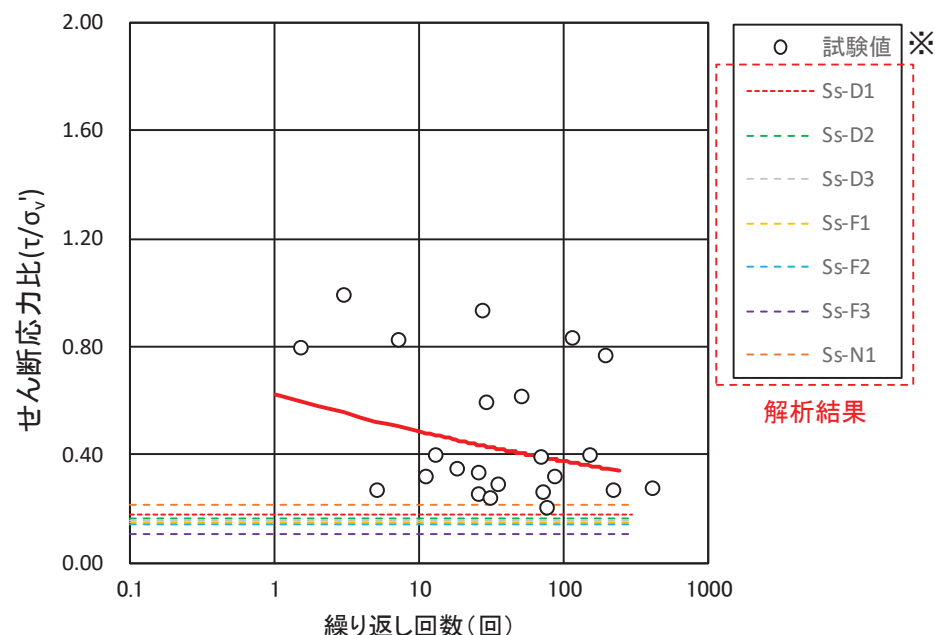
5.7 基準地震動S_sに対する液状化強度試験の妥当性確認(6/15)

【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)

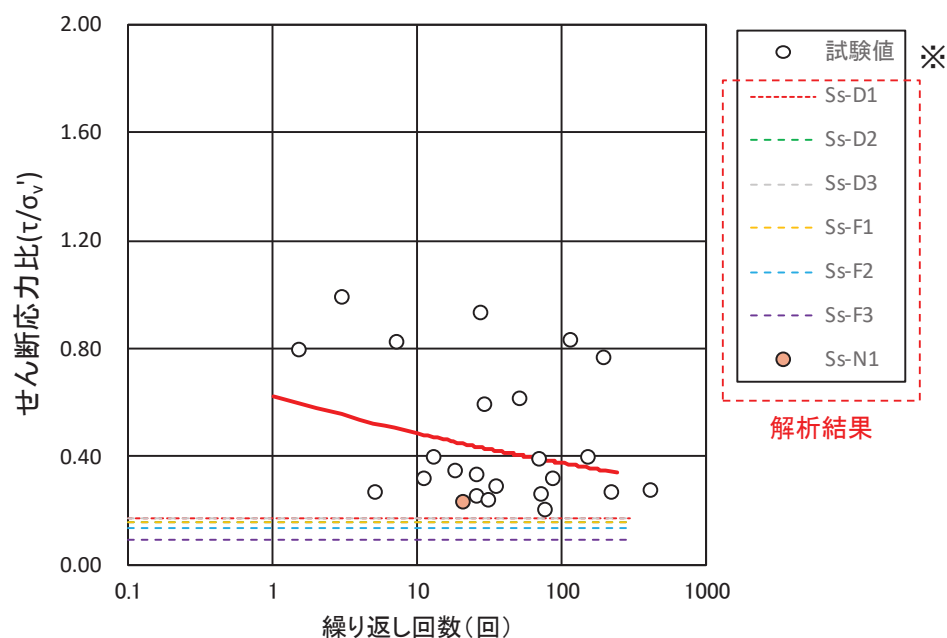
累積損傷度理論に基づく評価結果(A-1)

※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

5.7 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)

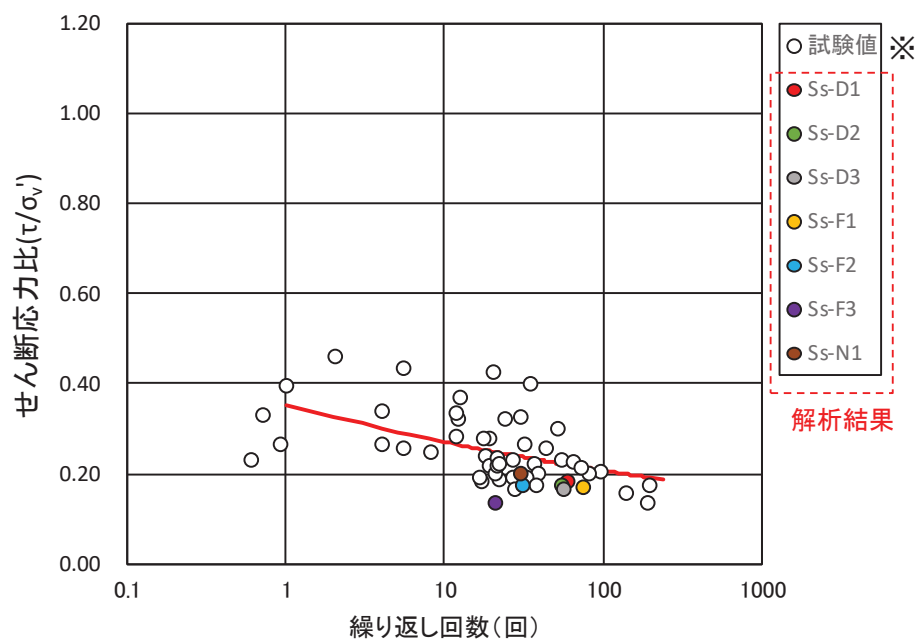
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-1)

※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

5.7 基準地震動Ss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Ss相当の試験が実施できていることを確認した。



(旧表土)

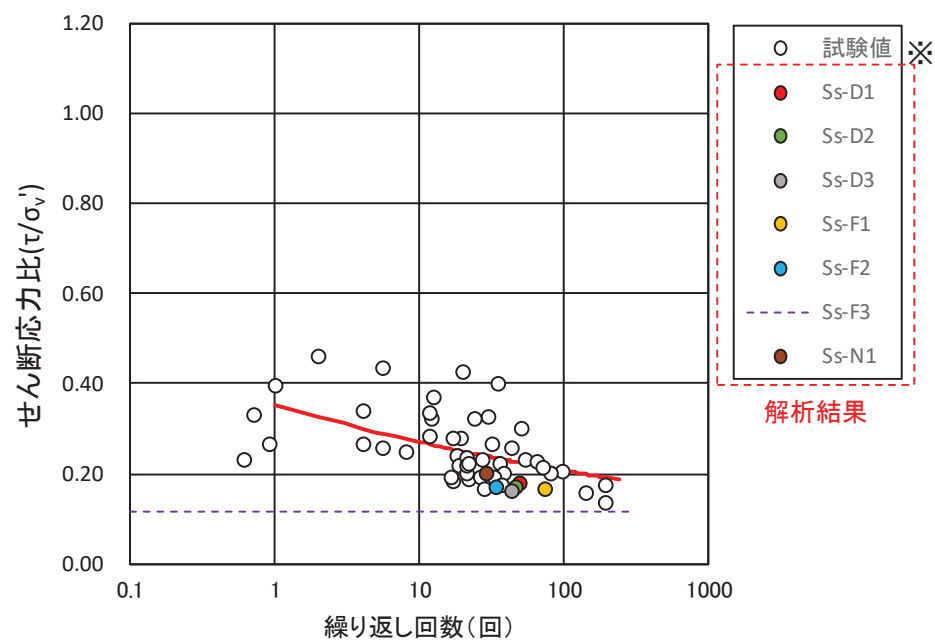
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-2)

※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

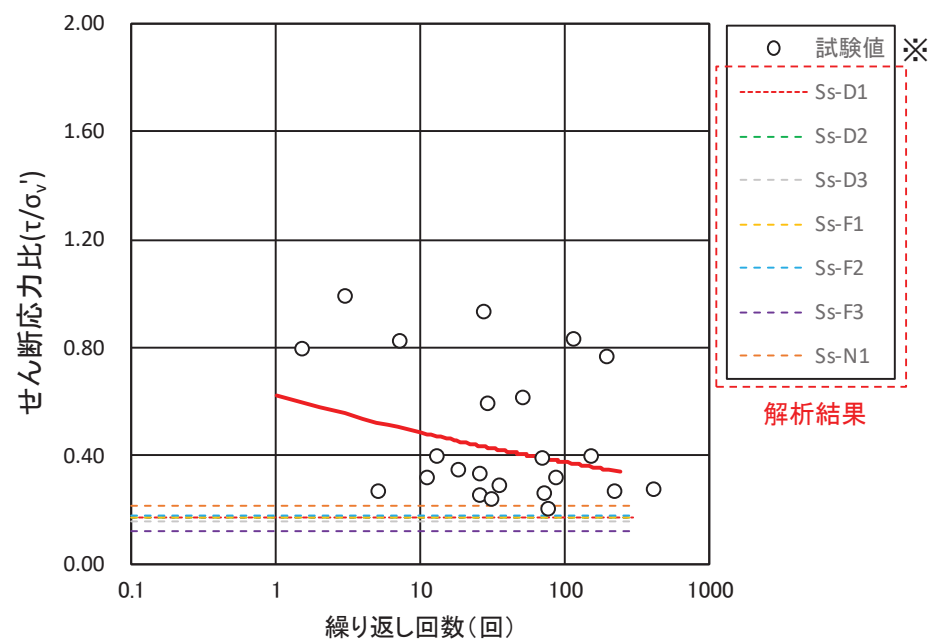
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(9/15)

【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Ss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Ss-F3及び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。



(旧表土)



(盛土)

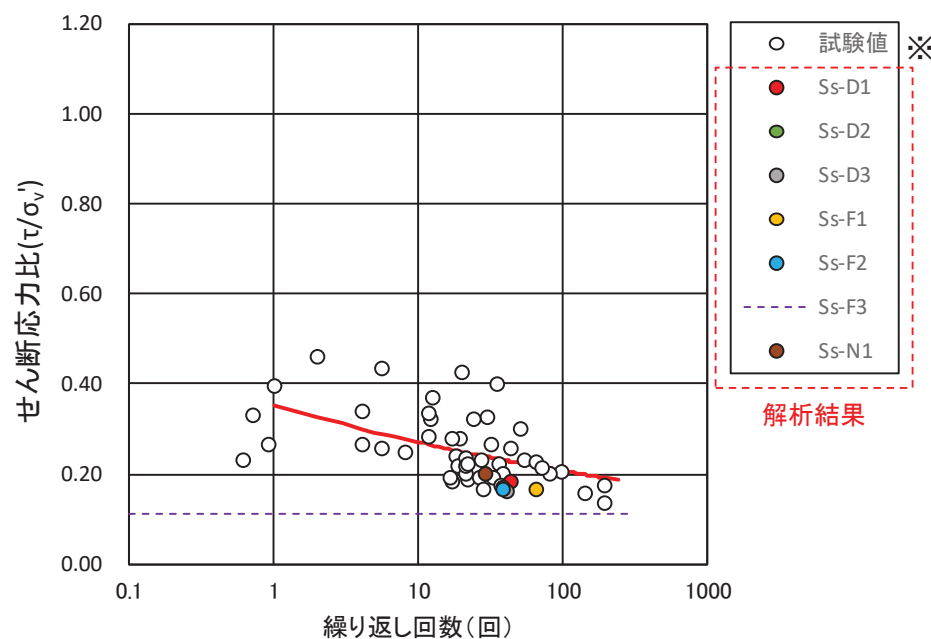
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-3)

※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

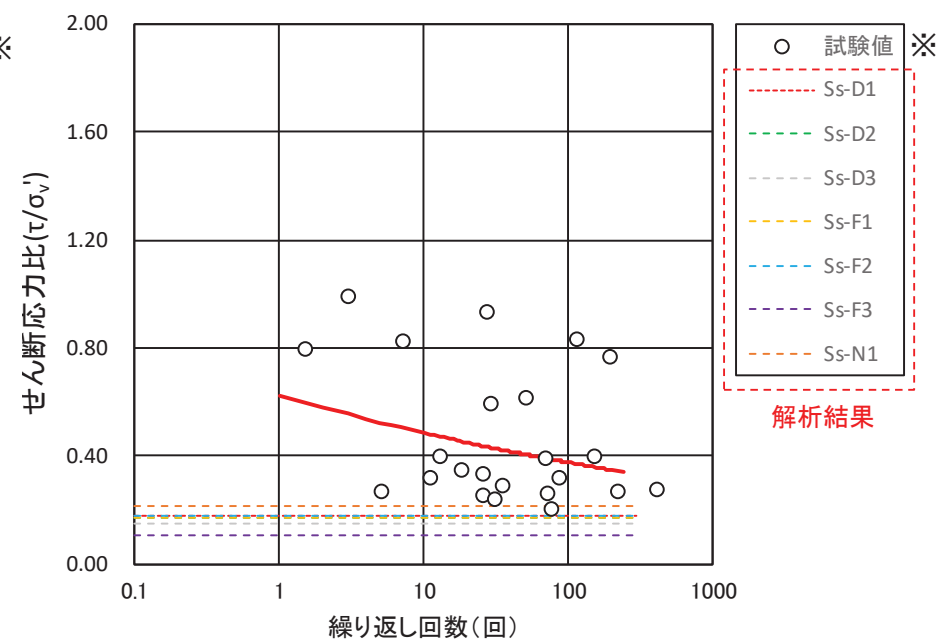
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(10/15)

【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Ss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Ss-F3及び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、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)

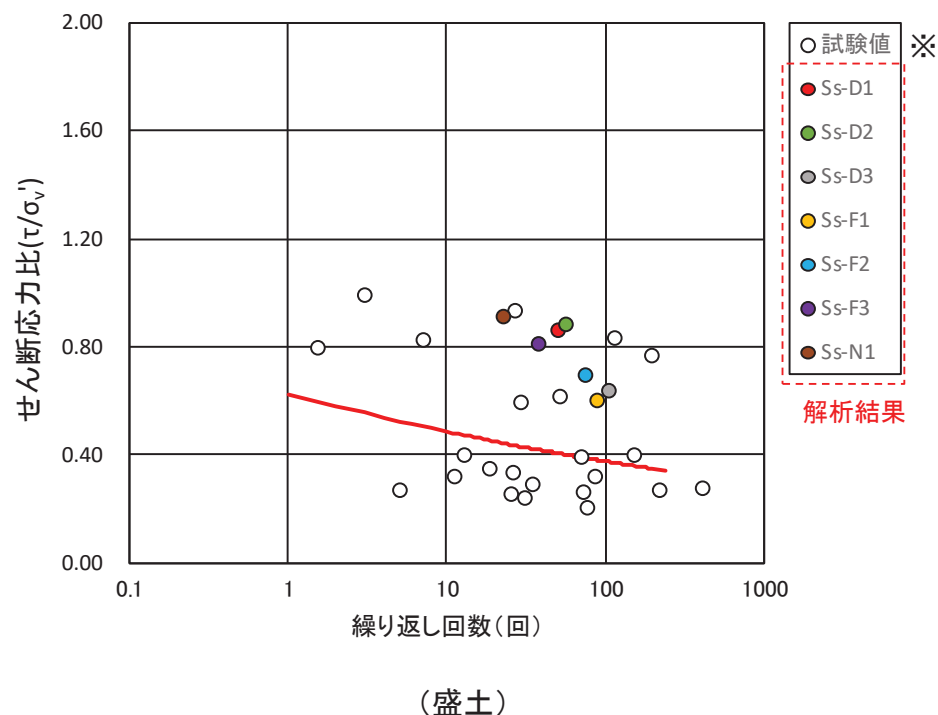
累積損傷度理論に基づく評価結果(B-4)

※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

5.7 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.+3.5m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。



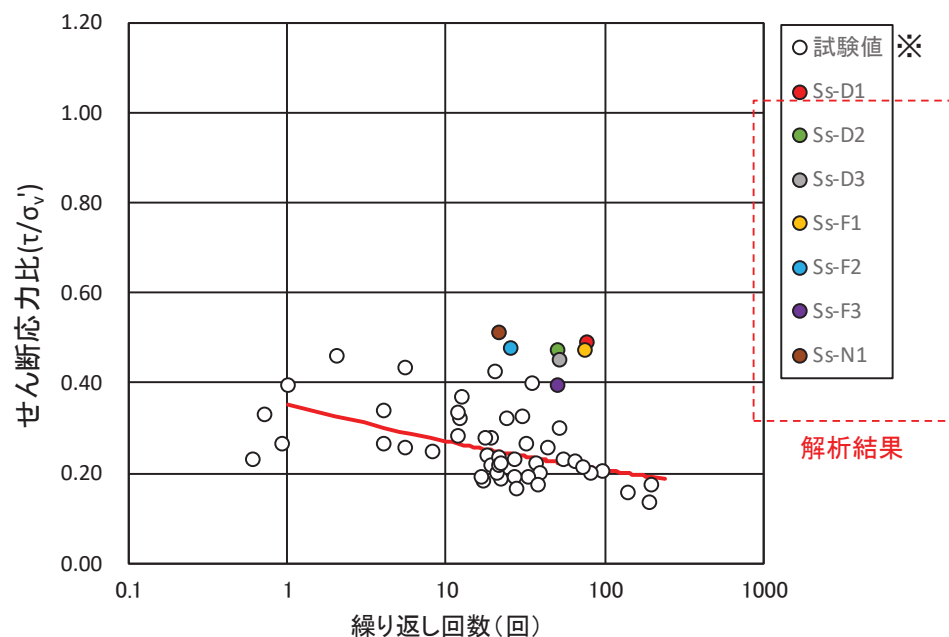
累積損傷度理論に基づく評価結果(C-1)

※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

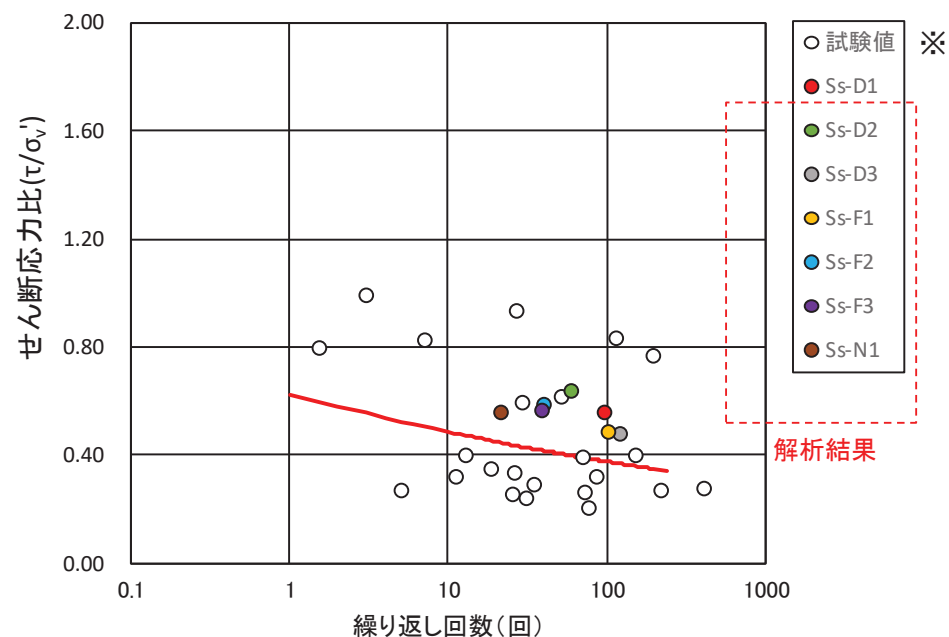
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(12/15)

【解析実施位置:D-1】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+3.5m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)

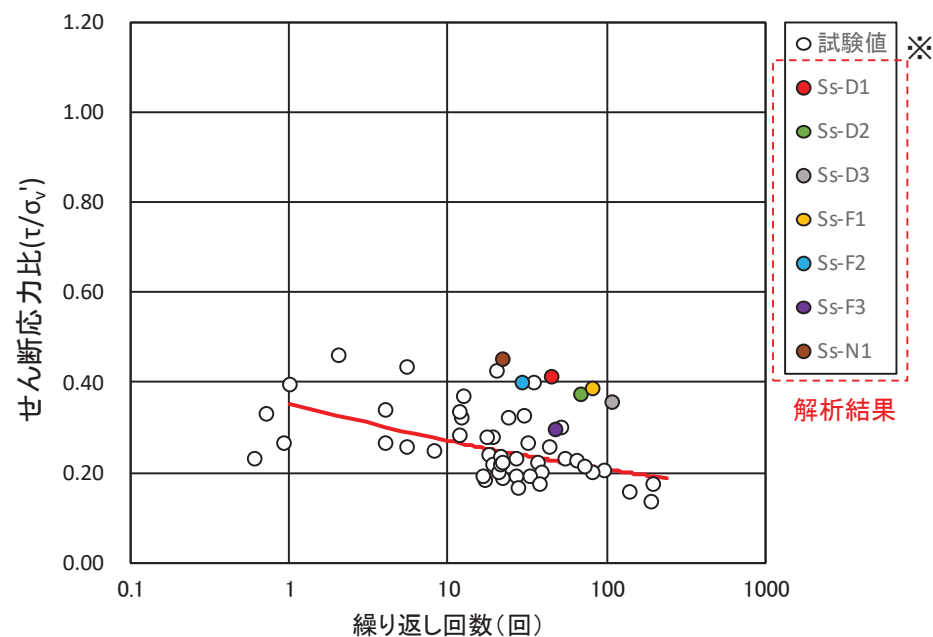
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-1)

※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

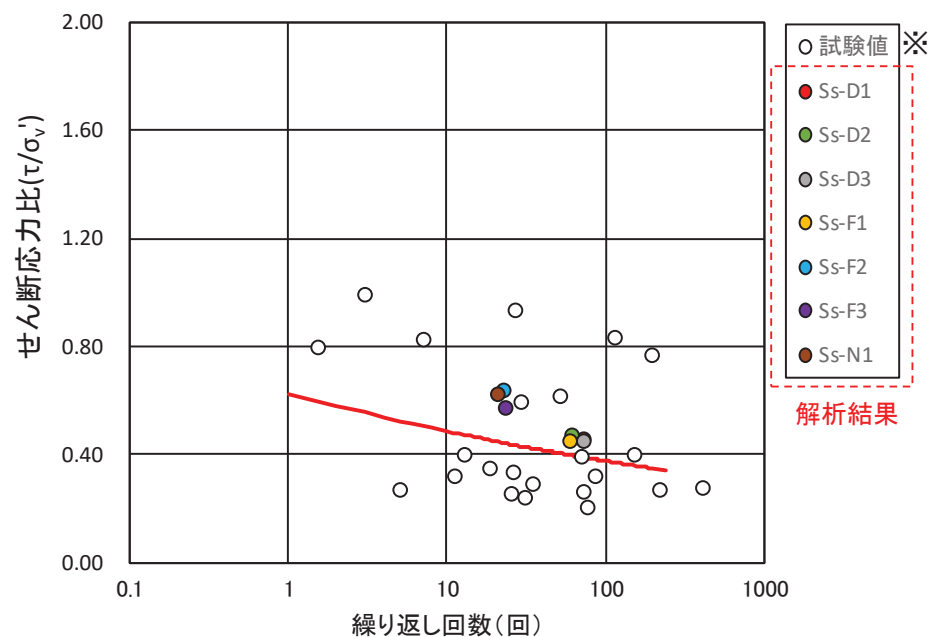
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(13/15)

【解析実施位置:D-2】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+3.5m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)

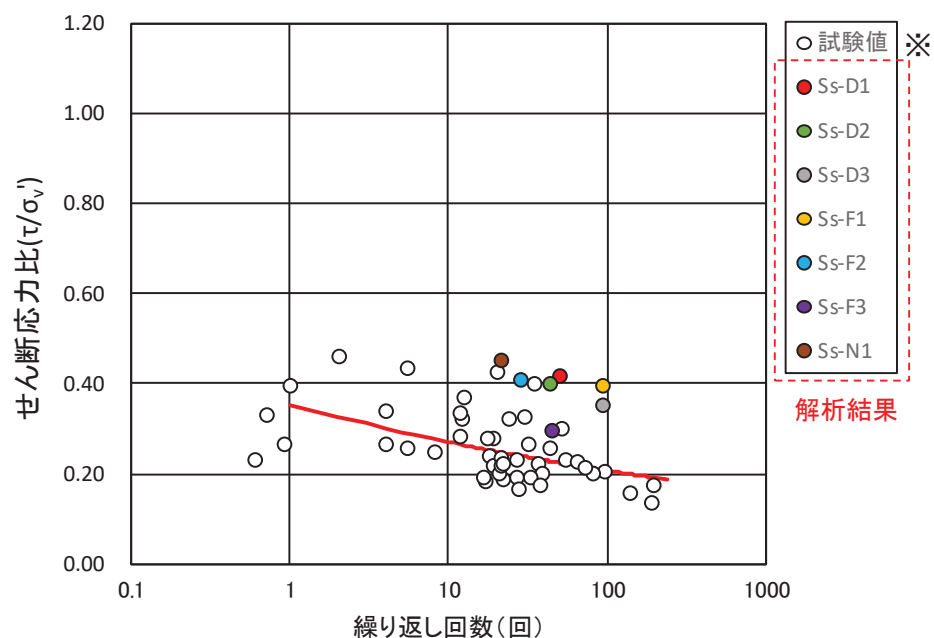
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-2)

※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

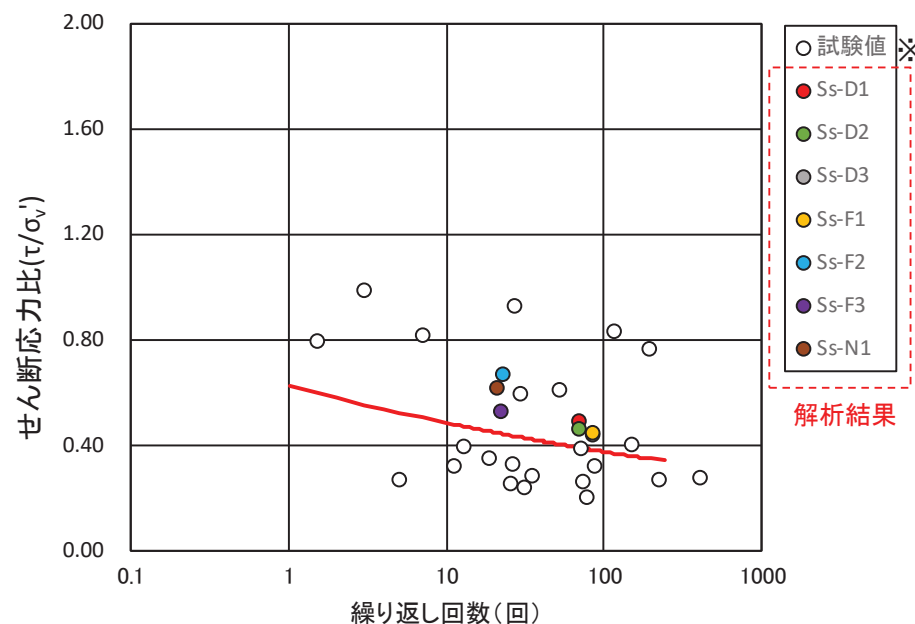
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(14/15)

【解析実施位置:D-3】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+3.5m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)

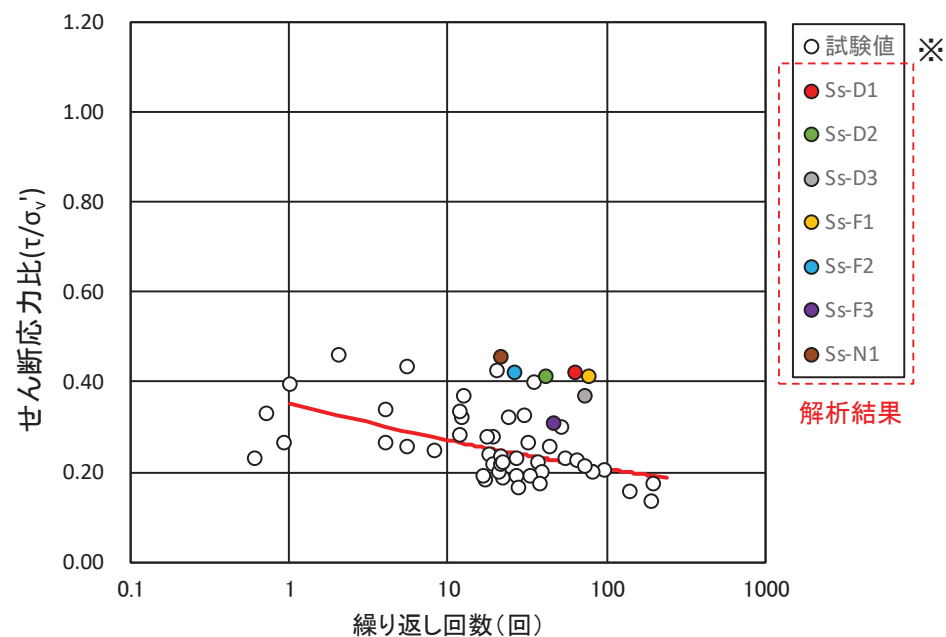
累積損傷度理論に基づく評価結果(D-3)

※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

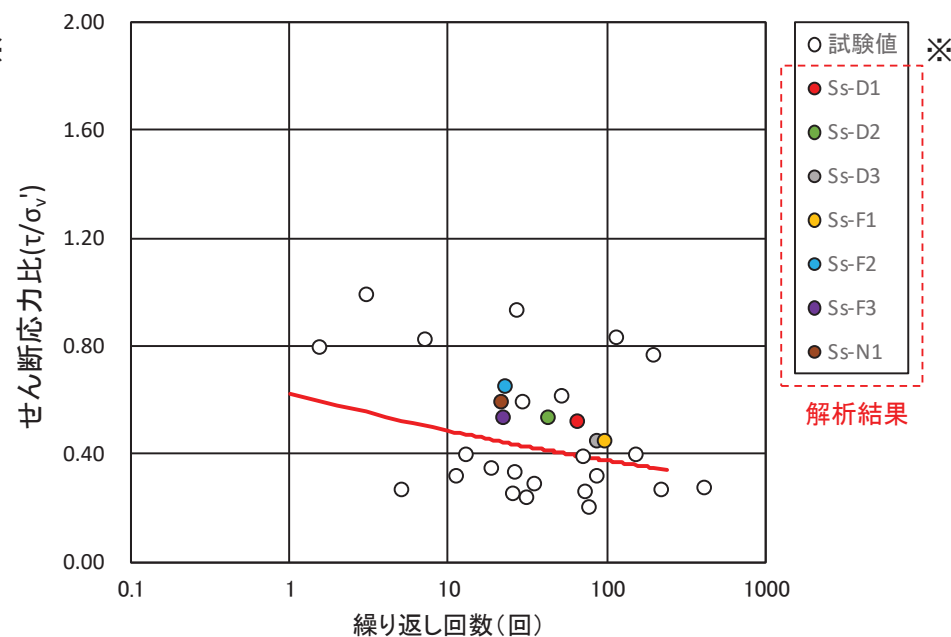
5.7 基準地震動Ssに対する液状化強度試験の妥当性確認(15/15)

【解析実施位置:D-4】

- 旧表土・盛土におけるO.P.+3.5m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

6. 液状化影響の検討方針

液状化強度特性の設定方針

【液状化に対する基本設計方針】

圧密、揺すり込み沈下及び液状化によって隣接する建物・構築物の間で生じる不等沈下等の変状が生じるおそれがある場合、これらの現象が生じたとしても、施設の安全機能が重大な影響を受けないよう、所要の対策を講じる。

- 工事計画認可段階において、有効応力解析が必要と判断された施設については保守的に設定した液状化強度特性を用いて有効応力解析を実施し、各施設の液状化影響について確認する。
- 液状化強度特性の設定にあたっては、敷地全体の液状化強度試験から得られる液状化強度特性を保守的に設定（下限値）することを基本とし、各施設近傍に試験結果がある場合には、その試験結果から液状化強度特性を保守的に設定（下限値）する。
- なお、防潮堤については、設置許可段階で構造成立性と評価の見通しを示すこととしていることから、設置許可と工事計画認可段階を以下のとおり整理した。

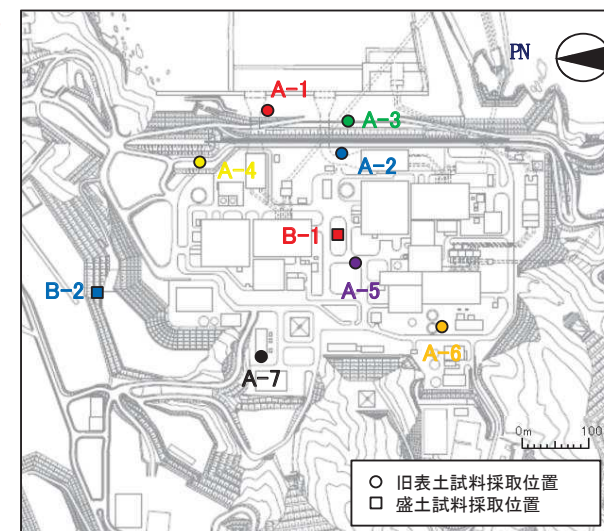
	設置許可段階（設計方針と見通し）	工事計画認可段階
防潮堤	[盛土] • 敷地内の全試験結果の下限値を採用し、液状化影響について確認する。	<ul style="list-style-type: none"> • 盛土及び旧表土ともに、設置許可段階の設計方針に従い、液状化影響を確認する。 • なお、盛土については、防潮堤近傍において液状化強度試験の追加実施を検討し、信頼性のある試験結果が得られた場合において液状化強度特性を見直すこととする。
	[旧表土] • 防潮堤近傍の試験結果の下限値を採用し、液状化影響について確認する。	

6. 液状化影響の検討方針

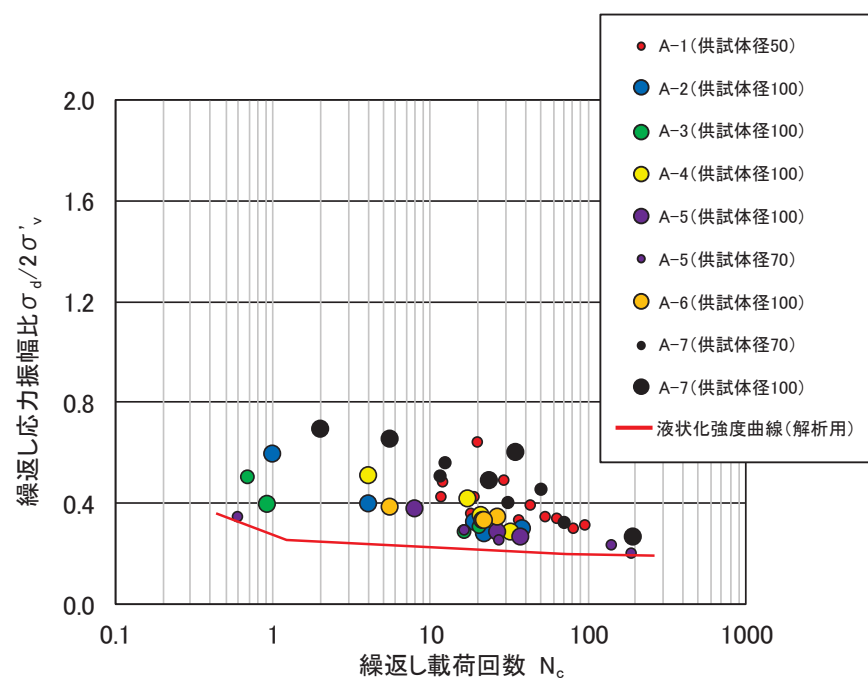
液状化強度特性の設定【敷地全体:旧表土・盛土】

82

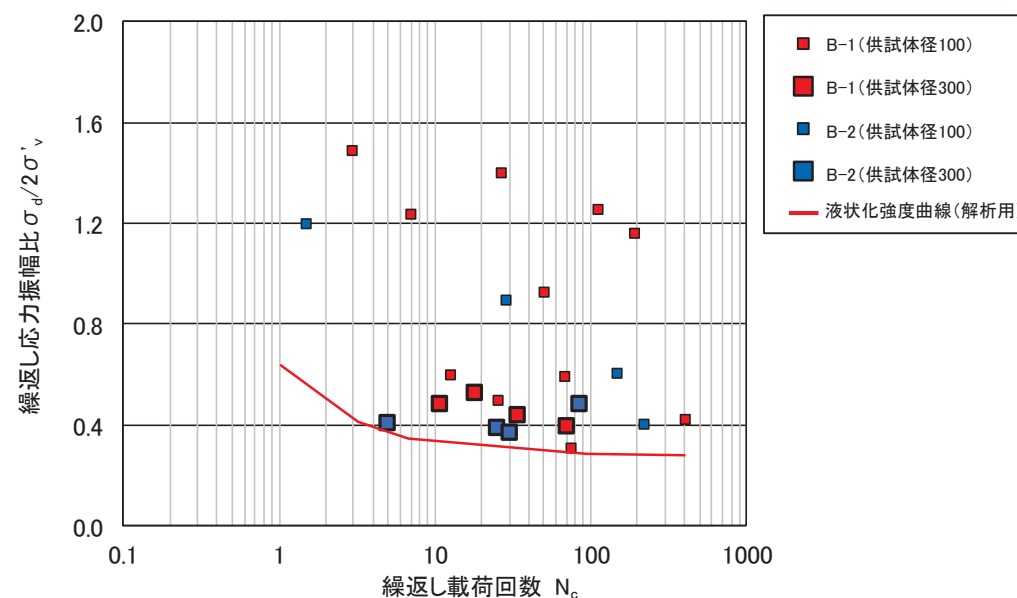
- 有効応力解析が必要と判断された施設については、工認段階において、敷地全体の液状化強度試験から得られる液状化強度特性を保守的に設定(下限値)することを基本とし、各施設近傍に試験結果がある場合には、その試験結果から液状化強度特性を保守的に設定(下限値)することとする。
- なお、今後必要に応じて液状化強度試験を追加することも検討する。



試料採取位置



(旧表土)

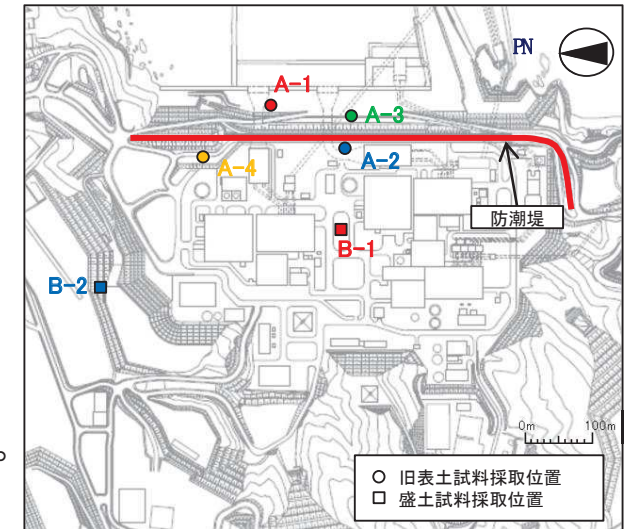


(盛土)

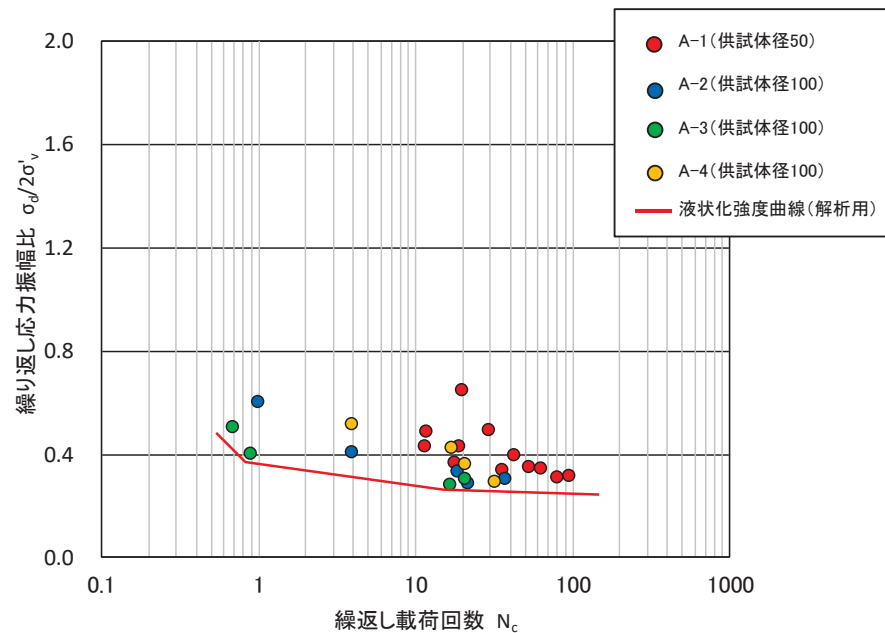
液状化強度試験結果に基づく液状化強度曲線(イメージ)

6. 液状化影響の検討方針 (参考資料)液状化強度特性の設定 【防潮堤:旧表土・盛土】

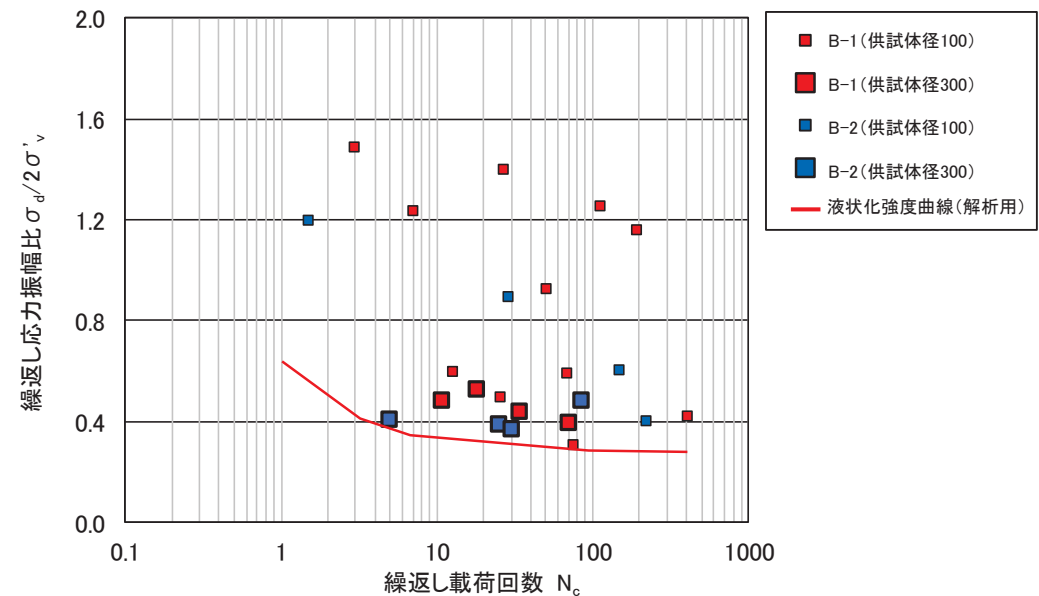
- 設置許可段階での防潮堤の耐震性評価においては、有効応力解析により液状化の影響を確認することとし、有効応力解析に用いる旧表土の液状化強度特性は、防潮堤近傍の液状化強度試験結果に基づき、盛土の液状化強度特性は、敷地全体の液状化強度試験結果に基づき、下図のとおり下限値を基本に保守的に設定する。
- 工認段階における防潮堤の耐震性評価に用いる液状化強度特性は、設置許可段階の設定を基本とする。
- なお、盛土については、防潮堤近傍において液状化強度試験の追加実施を検討し、信頼性のある試験結果が得られた場合において液状化強度特性を見直すこととする。



試料採取位置



(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(イメージ)

補足説明資料

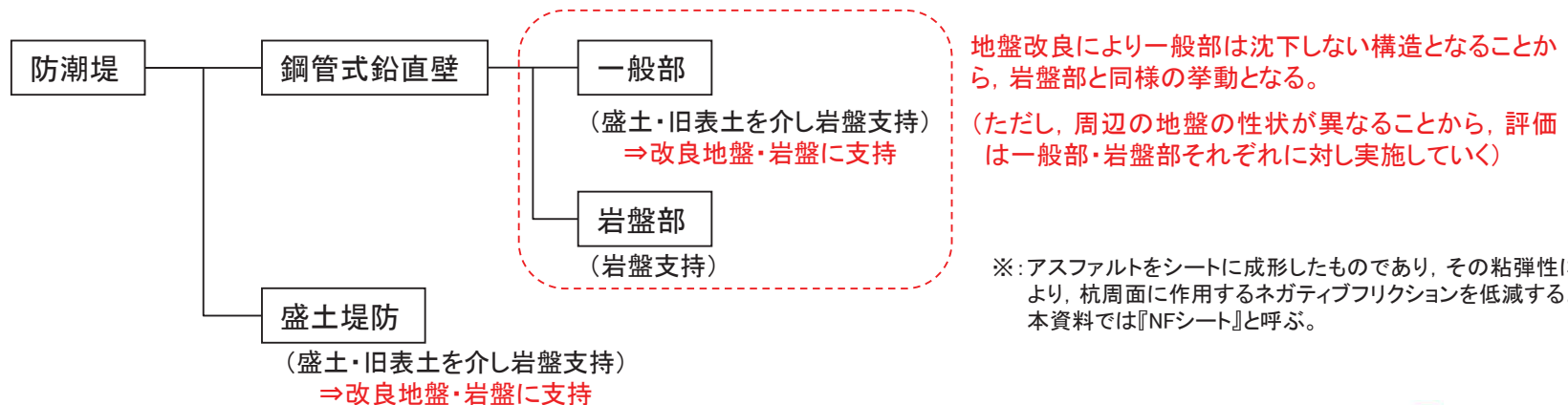
1. 防潮堤の設計方針等の変更について
(平成30年2月13日第548回審査会合資料)(再掲)

1.1 防潮堤の構造変更について

- 本資料では、防潮堤の設計方針について、**沈下対策を実施**することに変更するとともに、**液状化評価の方針の一部を変更**することを説明する。合わせて、設置許可基準規則第3条に定める地盤の支持性能への適合性について、考え方を整理した。
- 沈下対策の検討においては、盛土・旧表土の沈下に各部材が追従するこれまでの設計を変更し、地盤改良による沈下防止を基本とする。この改良地盤と岩盤を合わせて「地盤」と定義する。
- これにより、改良地盤・岩盤が一体となって施設を支持する構造となる。また、沈下に伴い考慮すべき損傷モードが減ることにより、安全性の向上が期待できる。

追加対策と設置許可基準規則への対応性

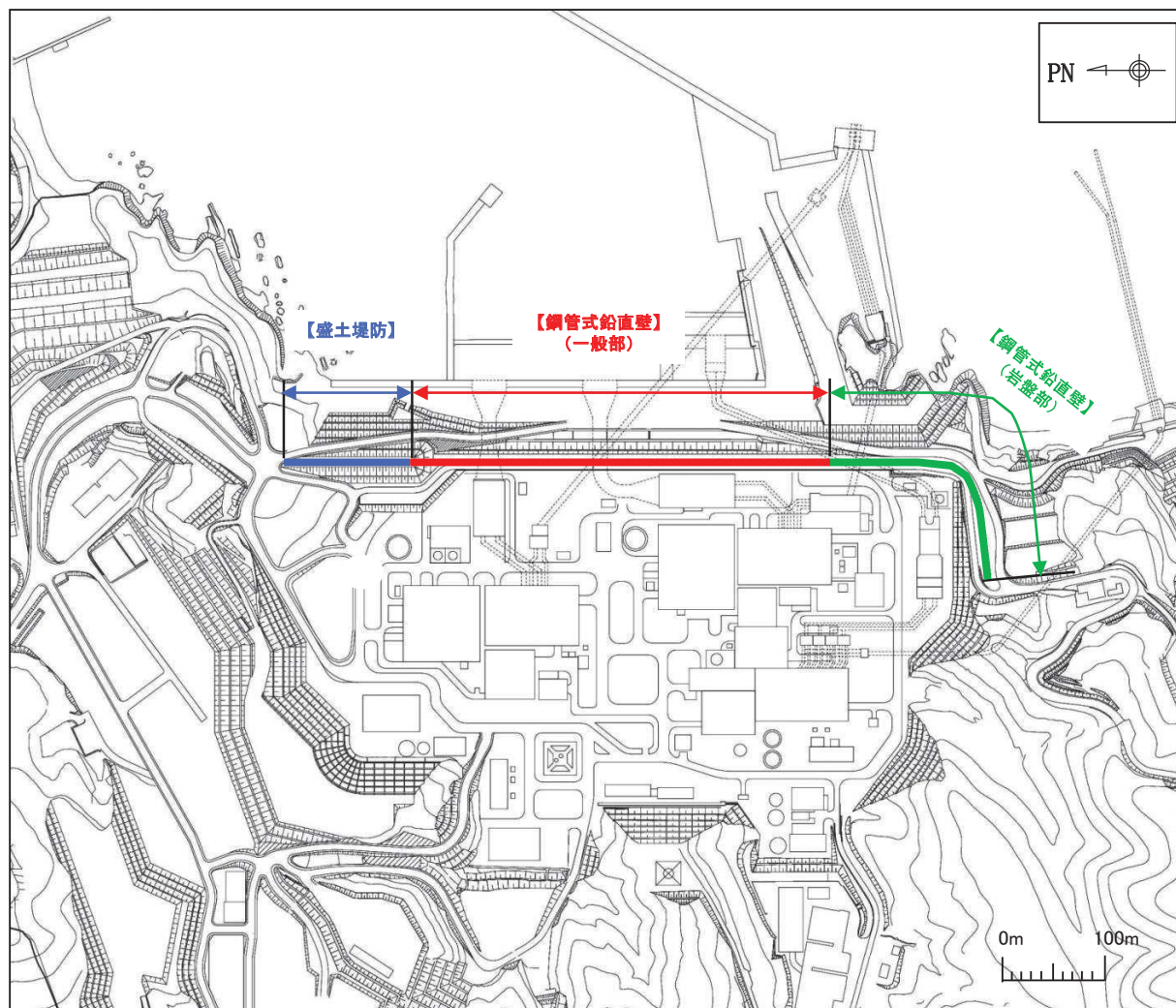
設置許可基準規則	追加対策(地盤改良)に伴う条文への適合方針	備考
第3条 (地盤の支持性能, 変形(液状化等)の考慮)	<ul style="list-style-type: none"> 施設直下の地盤が支持性能を有すること及び所要のすべり安全率を有することを確認する。(1項) 盛土・旧表土の地盤改良により、地震発生に伴う沈下・変形を防止する。(2項) 	改良範囲は条文に適合する範囲を解析的に決定する。
第4条 (地震による損傷の防止)	<ul style="list-style-type: none"> 沈下対策を踏まえ、想定される損傷モードに対して施設の安全性が確保されることを確認する。 また、「再使用性」を重視して杭の応答を概ね弾性範囲に留める。 	NFシート※の追従性等、沈下に伴い検討が必要となっていた損傷モードが簡略化あるいは省略される。また、長杭の応答が軽減され、概ね弾性範囲となる見通し。
第5条 (津波による損傷の防止)	<ul style="list-style-type: none"> 沈下対策を踏まえ、想定される損傷モードに対して施設の止水性が確保されることを確認する。 	沈下に伴い発生するおそれのあった改良地盤上下の隙間等がなくなり、浸水経路の形成可能性のある部位が減少あるいは考慮不要となる。



防潮堤の構造形式

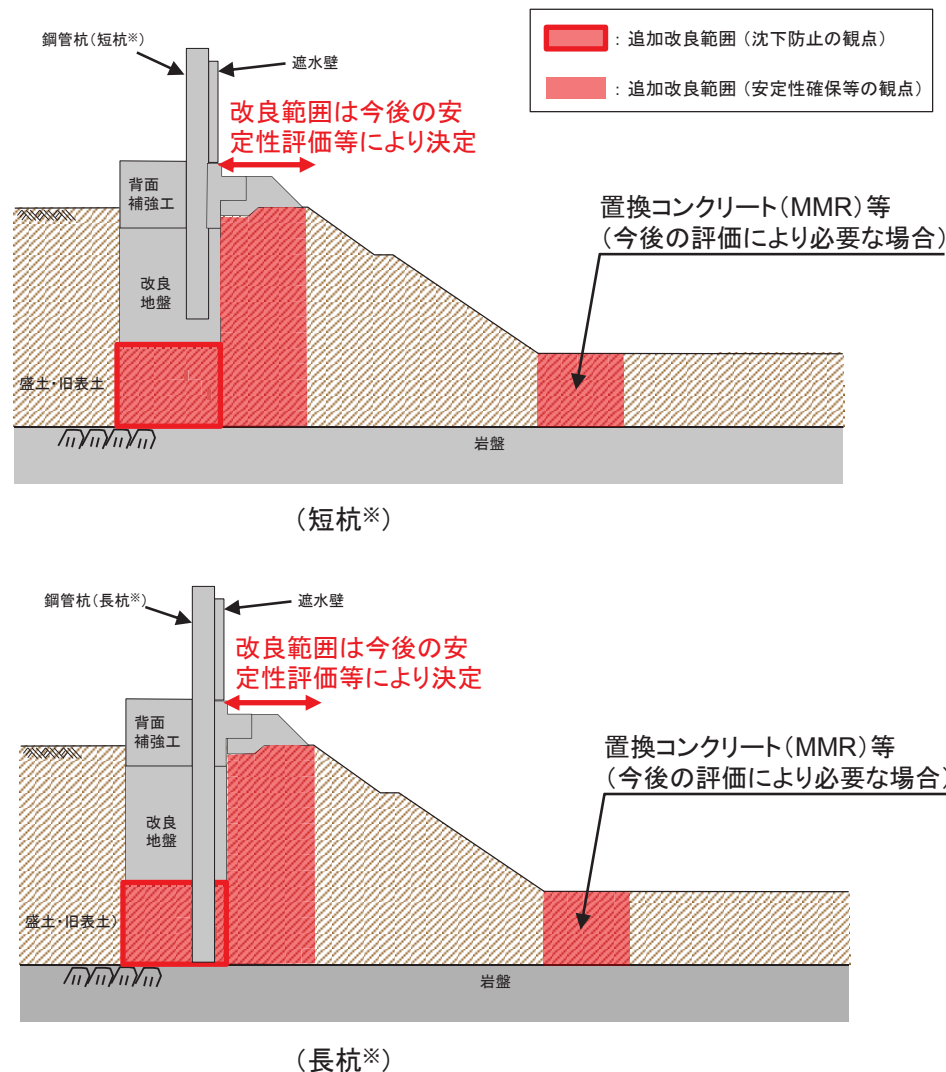
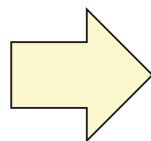
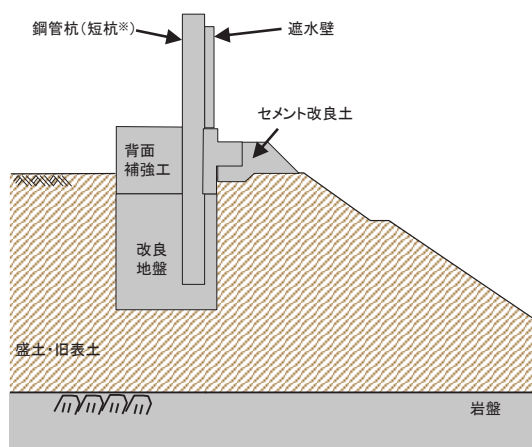
1.2 防潮堤の構造形式

- 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。



1.3 各構造における構造変更の概要[鋼管式鉛直壁(一般部)]

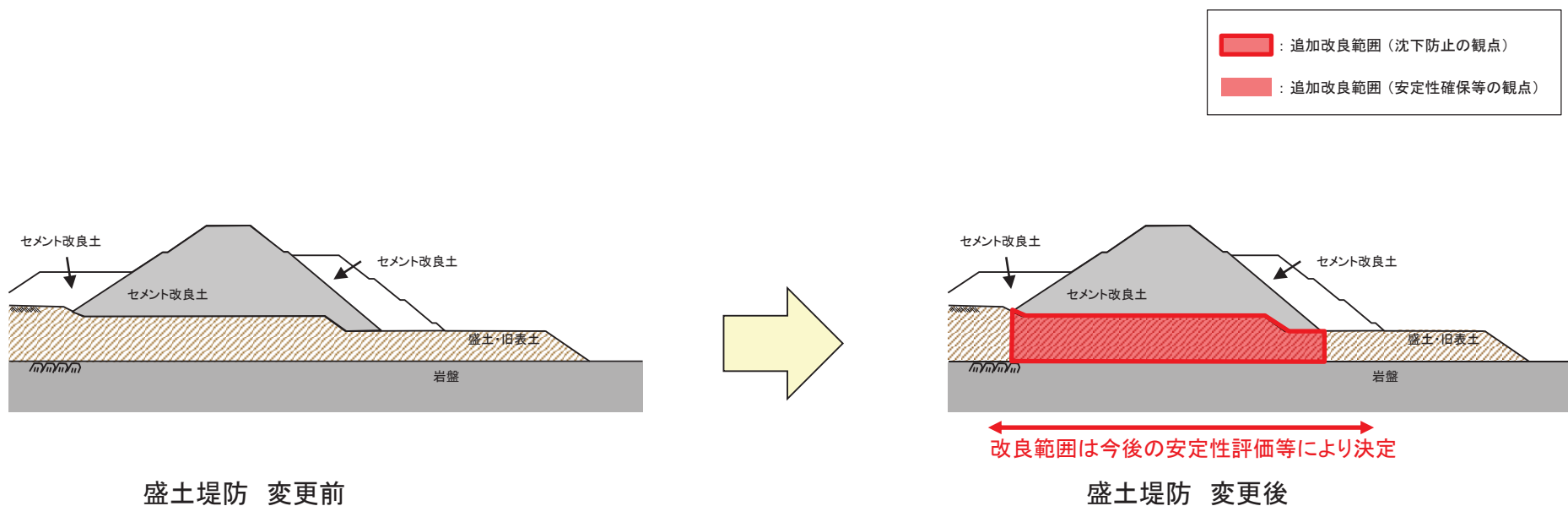
- ・ 沈下対策として、既設の改良地盤直下を改良する。
- ・ 対策範囲等については、各条文に適合できるよう、今後の設計において決定していく。



※:「長杭」、「短杭」は、鋼管式鉛直壁(一般部)を構成する2種類の長さの鋼管杭に対して設計図書の中で付けた名称

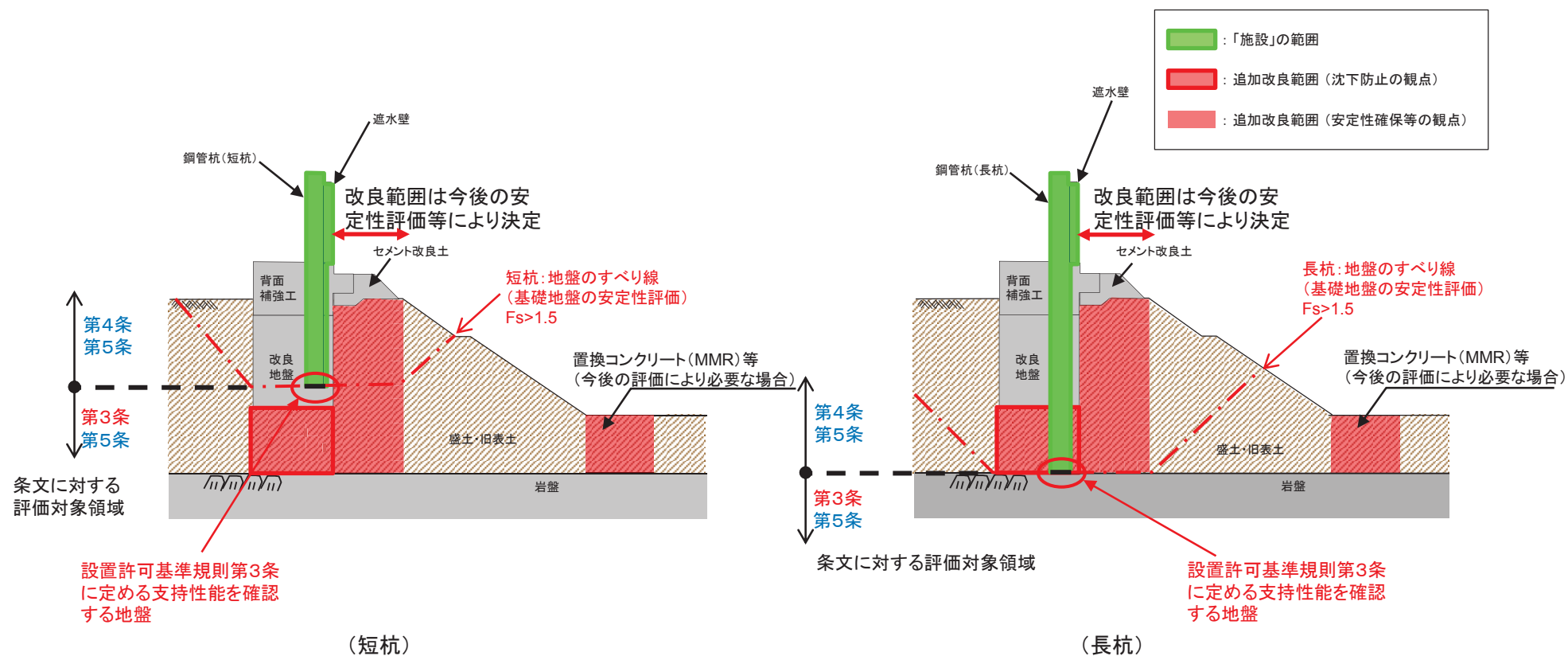
1.3 各構造における構造変更の概要[盛土堤防]

- ・ 沈下対策として、既設のセメント改良土直下を改良する。
- ・ 対策範囲等については、各条文に適合できるよう、今後の設計において決定していく。



1.4 設置許可基準規則への適合性について[鋼管式鉛直壁(一般部)]

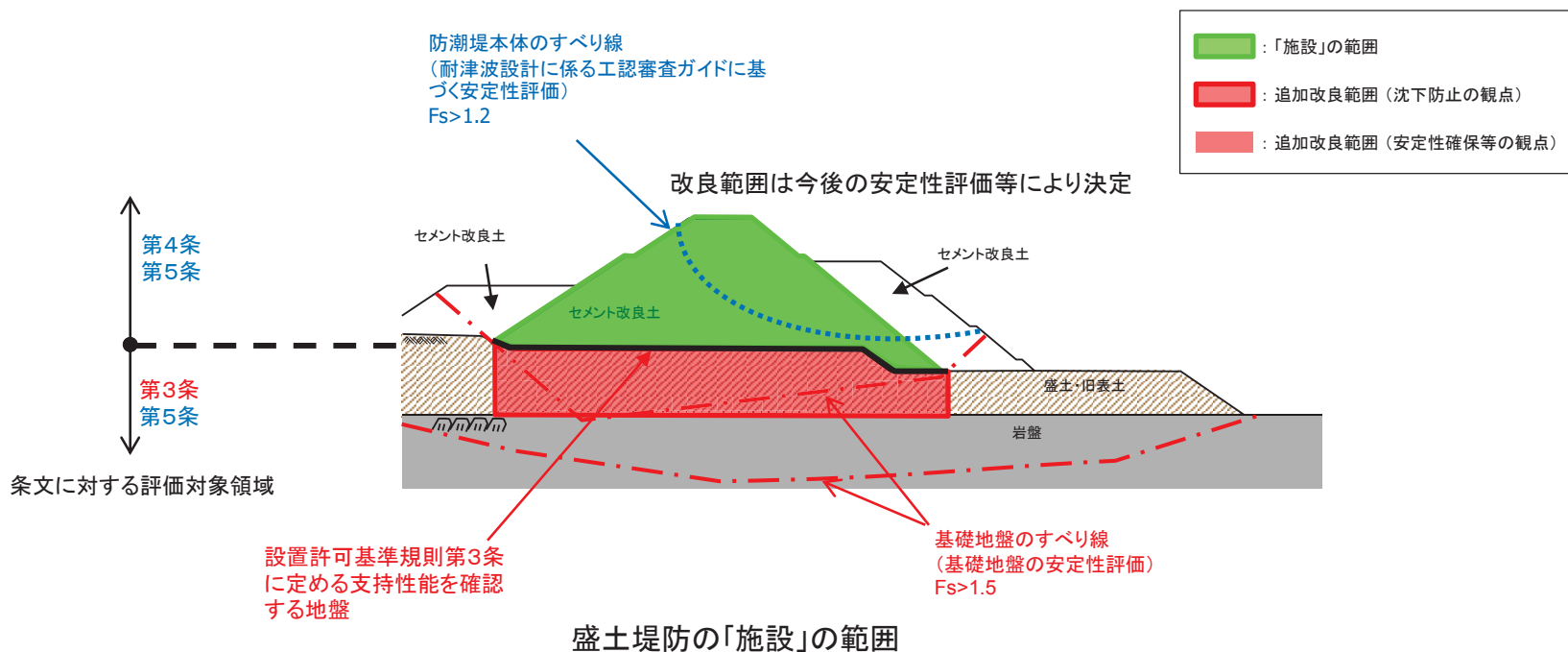
- 鋼管杭, 遮水壁及び止水目地を「施設」, 背面補強工, 改良地盤, セメント改良土, 盛土・旧表土及び岩盤等を「地盤」と定義し, 杭下を通るすべり線はすべり安全率 $F_s > 1.5$ を確保することで設置許可基準規則第3条に適合できるように, 改良範囲を決定する。
- 杭を概ね弾性範囲とすること等により, 設置許可基準規則第4条に適合する構造であることを確認する。
- 施設の止水性に加え, 改良地盤も含めた周辺地盤の止水性(ボイリング等)から, 設置許可基準規則5条に適合する構造であることを確認する。



鋼管式鉛直壁(一般部)の「施設」の範囲

1.4 設置許可基準規則への適合性について[盛土堤防]

- セメント改良土(防潮堤本体)を「施設」、改良地盤、盛土・旧表土、セメント改良土(防潮堤本体以外)及び岩盤を「地盤」と定義し、施設下を通るすべり線はすべり安全率 $F_s > 1.5$ を確保することで設置許可基準規則第3条に適合できるよう、改良範囲を決定する。
- 施設を通るすべり線は $F_s > 1.2$ を確保することで、設置許可基準規則第4条に適合する構造であることを確認する。
- 施設の止水性に加え、改良地盤も含めた地盤の止水性(ボーリング等)から、設置許可基準規則第5条に適合する構造であることを確認する。



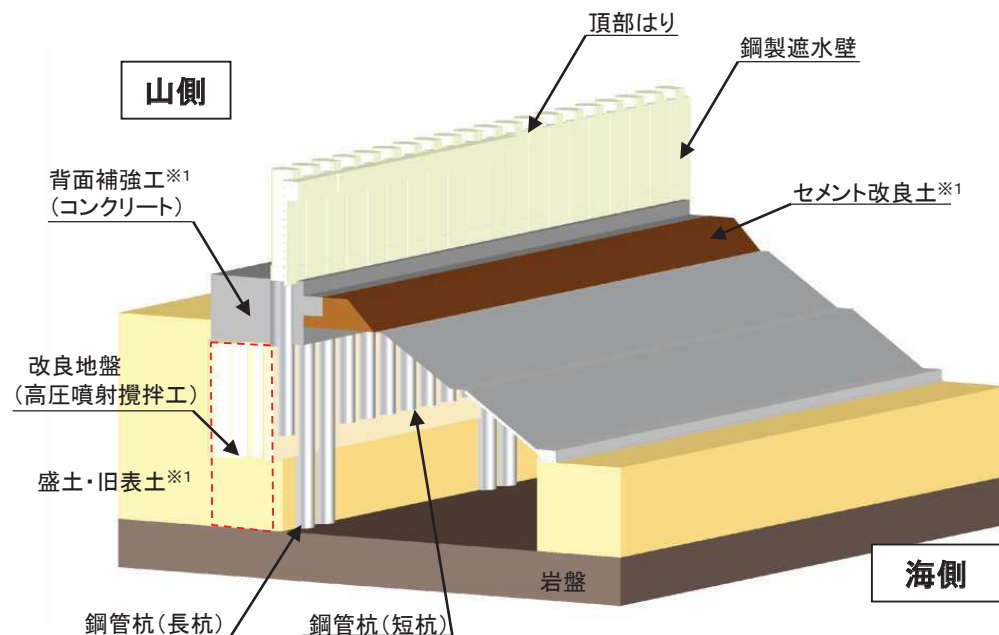
[参考] 耐津波設計に係る工認審査ガイドの記載

(盛土構造の防潮堤等の設計審査における留意事項)

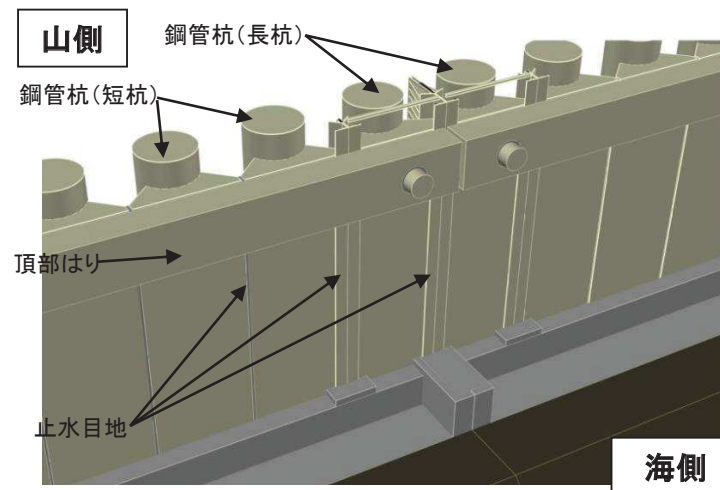
- 盛土構造の防潮堤や河川堤防等の盛土・地山斜面に関する安定性の評価については、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に準ずるものとする。

1.5 評価対象部位の役割と主な変更点[鋼管式鉛直壁(一般部)]

- 評価対象部位と役割及び施設の範囲は右下表のとおりとする。



※1: 周辺地盤として考慮



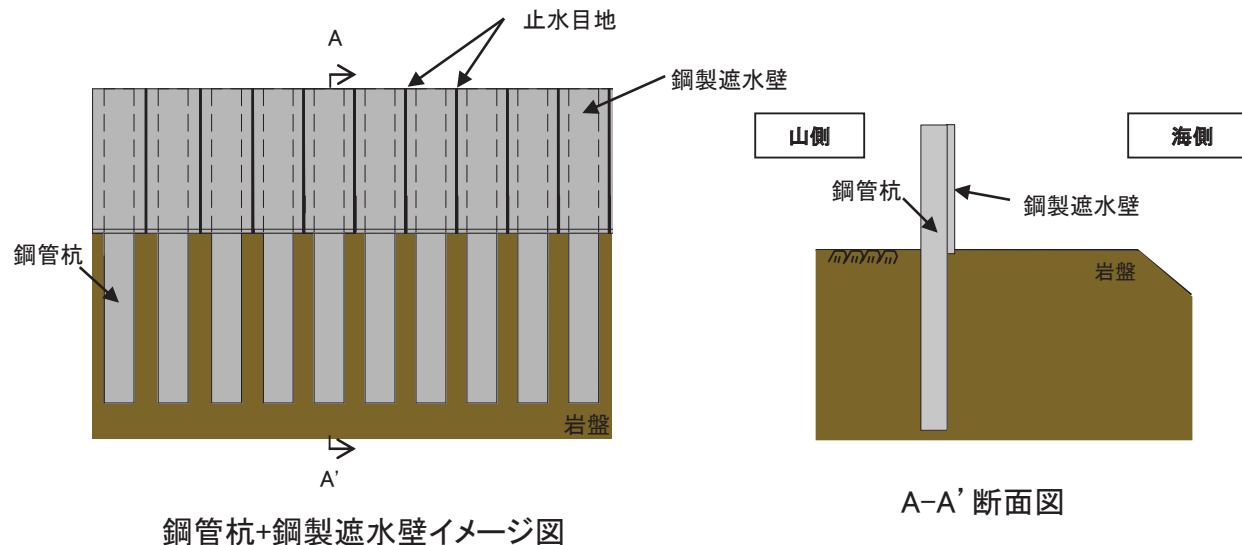
施設の範囲

評価対象部位		役割	備考
鋼管杭	長杭	鋼製遮水壁及び頂部はりを支持	
	短杭	鋼製遮水壁を支持	
鋼製遮水壁		止水機能の保持	
止水目地		鋼製遮水壁間の止水機能の保持	
頂部はり		—※2	
背面補強工		鋼管杭の変位を抑制	周辺地盤
改良地盤		鋼管杭を支持	基礎地盤(短杭)
セメント改良土		鋼管杭の変位を抑制	周辺地盤
盛土・旧表土			
岩盤		鋼管杭を支持	基礎地盤(長杭)

※2: 沈下時に機能を期待していたが、沈下しない設計に変更したため、設計基準対象施設に該当しない部位

1.5 評価対象部位の役割と主な変更点[鋼管式鉛直壁(岩盤部)]

- 評価対象部位と役割及び施設の範囲は下表のとおりとする(変更なし)。

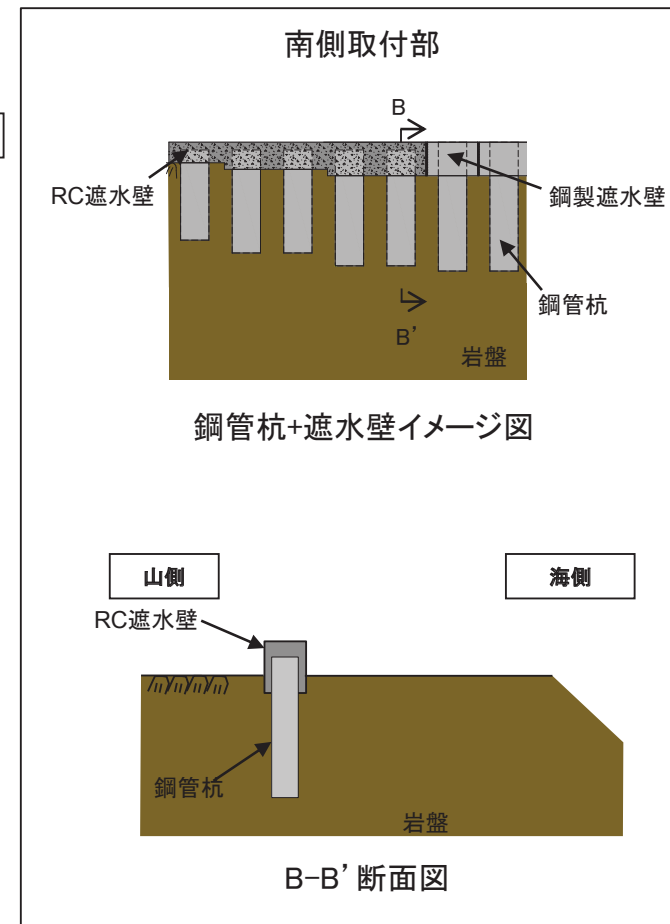


鋼管杭+鋼製遮水壁イメージ図

A-A' 断面図

■ 施設の範囲

評価対象部位	役割
鋼管杭	鋼製遮水壁を支持
鋼製遮水壁 (RC遮水壁)	止水機能の保持
止水目地	鋼製遮水壁間の止水機能の保持
岩盤	鋼管杭を支持

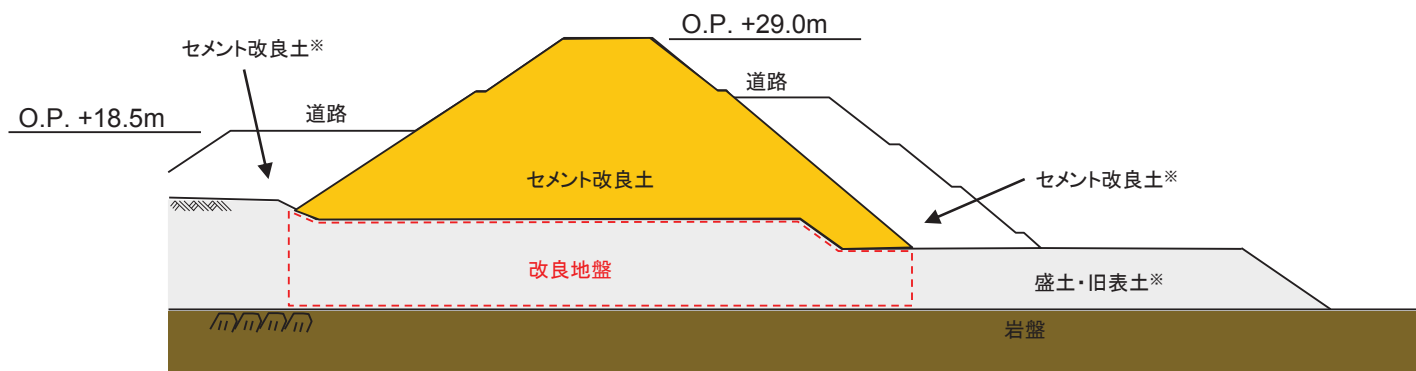


鋼管杭+遮水壁イメージ図

B-B' 断面図

1.5 評価対象部位の役割と主な変更点[盛土堤防]

- 評価対象部位と役割及び施設の範囲は下表のとおりとする。



※: 周辺地盤として考慮

盛土堤防断面図

■ 施設の範囲

評価対象部位	役割	備考
盛土堤防(セメント改良土)	止水機能の保持 基礎地盤に津波時等の荷重を伝達	
岩盤, 改良地盤	盛土堤防を支持	基礎地盤
セメント改良土, 盛土, 旧表土	盛土堤防の変位を抑制	周辺地盤

1.6 損傷モードの主な変更点[鋼管式鉛直壁(一般部)]

- 鋼管式鉛直壁(一般部)の損傷モードは以下のとおり簡略化される。

	変更前	変更後
防潮堤下の地盤(盛土・旧表土)の沈下	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土の沈下を許容する。 長杭へのネガティブフリクションへの配慮としてNFシートを施工する。 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土を地盤改良することにより、沈下しない設計とする。 沈下しないことでネガティブフリクションが発生しないことから、NFシートの機能は期待しない設計とする。
地震・津波荷重への抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> 短杭は許容応力度以下を確認する。 長杭は短杭と同じ深さまでは許容応力度以下を確認し、それより深い位置では杭の塑性率が許容塑性率以下であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 短杭・長杭ともに概ね弾性範囲であることを確認する。 (盛土・旧表土を地盤改良することにより、長杭の下部も概ね弾性範囲となる。)
長杭と短杭の挙動の違い	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土の不等沈下や汀線方向(防潮堤縦断方向)の地震荷重等の影響により、鋼管の損傷や通水経路の形成が懸念される。 実現象を詳細に考慮した3次元解析により安全性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土を地盤改良することにより、不等沈下等は発生しない設計とし、通水経路の形成を防止する。
鋼製遮水壁の止水性	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土の沈下量や、周辺地盤の側方流動の影響等を考慮して杭間に発生する相対変位を評価し、止水目地を設定する。 止水目地の性能試験により、許容変形量及び許容水圧以下であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺地盤の側方流動の影響等を考慮して杭間に発生する相対変位を評価し、止水目地を設定する。 (盛土・旧表土を地盤改良することにより、隣り合う長杭と短杭の間及び長杭と長杭の間の水平及び鉛直方向の相対変位は小さくなる。) 止水目地の性能試験により、許容変形量及び許容水圧以下であることを確認する。

補足説明資料1. 防潮堤の設計方針等の変更について
 1.6 損傷モードの主な変更点[盛土堤防]

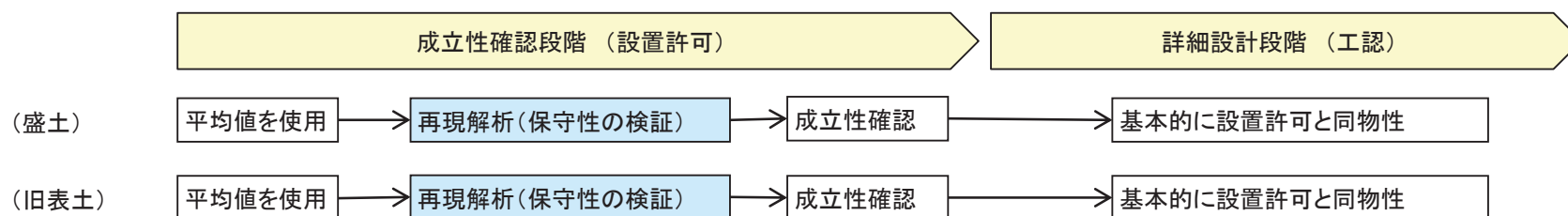
- 盛土堤防の損傷モードは以下のとおり簡略化される。

	変更前	変更後
防潮堤下の地盤 (盛土・旧表土)の 沈下	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土の沈下を許容する。 想定される津波高さに余裕を考慮した防潮堤高さを維持する。 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土を地盤改良することにより、沈下しない設計とする。 想定される津波高さに余裕を考慮した防潮堤高さを維持する。
地震・津波荷重への 抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> 堤体内部に想定したすべり線に対して、すべり安全率が許容値以上であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎地盤及び堤体内部に想定したすべり線に対して、すべり安全率が許容値以上であることを確認する。
津波時の止水性・ 耐洗掘性	<ul style="list-style-type: none"> セメント改良土は、津波時の洗掘・侵食に対して十分な耐性をもつことを確認する。 盛土・旧表土が津波時の通水経路とならないことを浸透流解析により確認する。 盛土・旧表土の洗掘対策として、法尻補強(セメント改良土で置換)を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> セメント改良土及び改良地盤は、津波時の洗掘・侵食に対して十分な耐性をもつことを確認する。 不等沈下に伴うセメント改良土のひび割れなどの通水経路の形成を防止する。
鋼管式鉛直壁との 境界部の安定性	<ul style="list-style-type: none"> 防潮堤の下部及び端部の岩盤形状の傾斜、盛土・旧表土の層厚の不均一性等により盛土・旧表土の沈下を含めた3次元的な損傷が懸念される。 境界部において鋼管式鉛直壁(一般部)に盛土堤防からの荷重が伝達し、鋼管杭の損傷が懸念される。 実現現象を詳細に考慮した3次元解析により安全性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 盛土・旧表土を地盤改良することにより、沈下に伴う複雑な挙動は解消され、3次元的な損傷の影響は小さくなる。 境界部において鋼管式鉛直壁(一般部)に盛土堤防からの荷重が伝達するが、盛土堤防及び鋼管式鉛直壁(一般部)の下部の盛土・旧表土をいずれも地盤改良することで、境界部における荷重伝達の影響は小さくなる。 境界部の安定性が損なわれる可能性は小さいが、念のため実現現象を詳細に考慮した3次元解析により安全性を確認する。

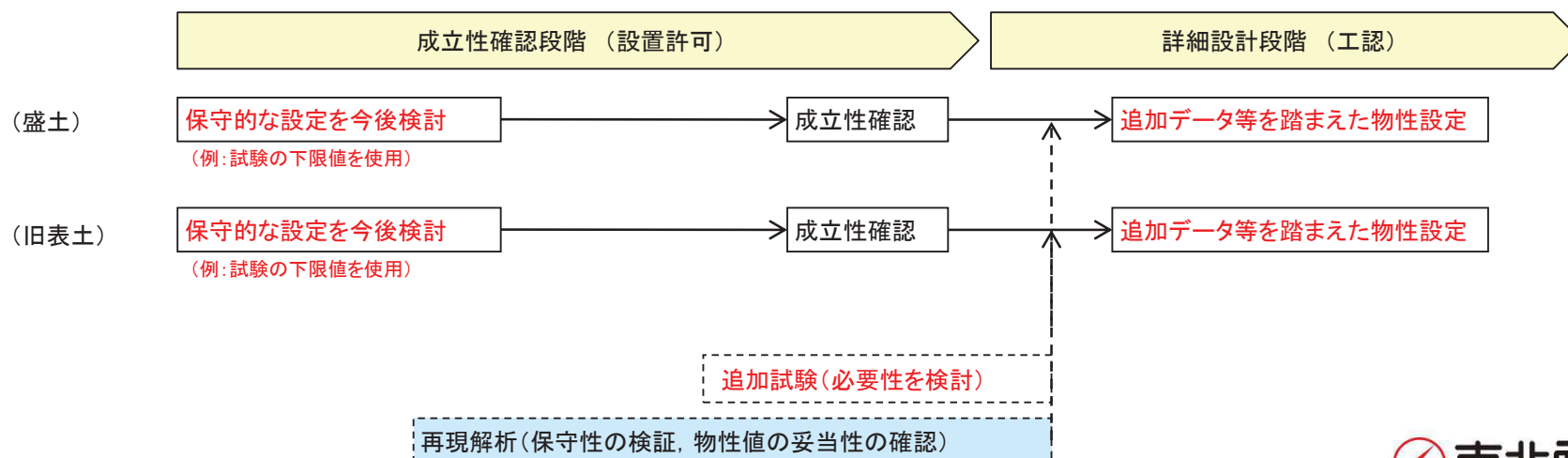
補足説明資料1. 防潮堤の設計方針等の変更について
 1.7 液状化パラメータ設定の変更について

- 物性値のばらつきを考慮し、液状化パラメータの設定方法を変更する。
- 成立性確認段階(設置許可)では、盛土・旧表土の液状化強度特性について、保守的な設定(例:試験の下限値)により成立性を示す。
- 詳細設計段階(工認)においては、液状化試験の追加実施の必要性を含め、液状化強度特性の再設定について検討していく。

液状化パラメータの設定方法(変更前)



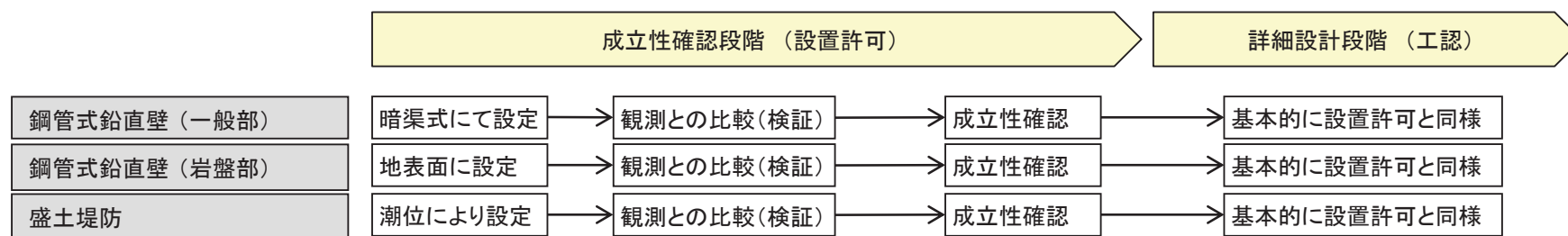
液状化パラメータの設定方法(変更後)



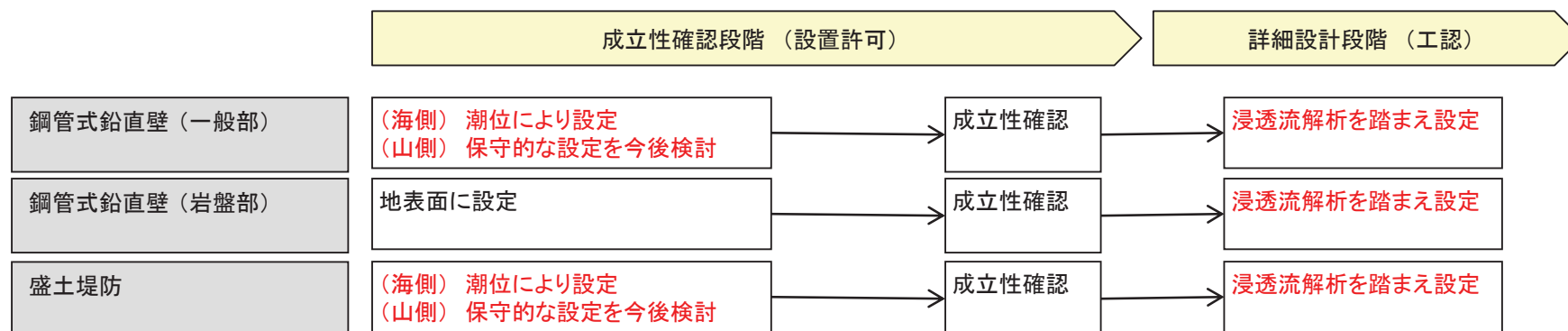
補足説明資料1. 防潮堤の設計方針等の変更について
1.8 地下水位の設定の変更について

- 地盤改良を実施することにより、地下水位が変動する可能性があることから、設定方法を変更する。
- 地下水位の設定について、成立性確認段階では改良後構造を踏まえた保守的な設定を行う。詳細設計段階では浸透流解析を踏まえ設定する。

地下水位の設定方法(変更前)

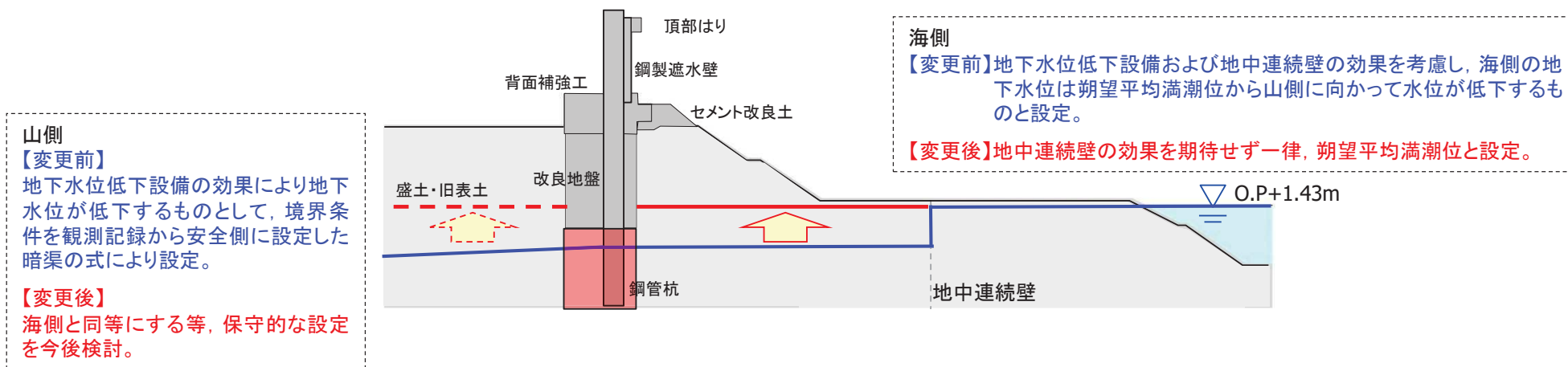


地下水位の設定方法(変更後)

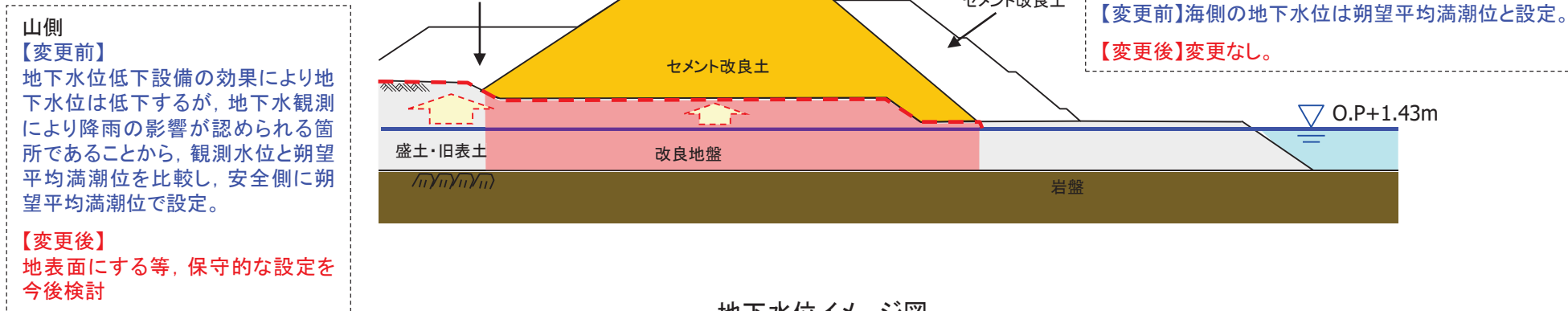


- 鋼管式鉛直壁(一般部)および盛土堤防における地下水位設定の変更イメージを示す。

【鋼管式鉛直壁(一般部)の例】



【盛土堤防の例】



地下水位イメージ図

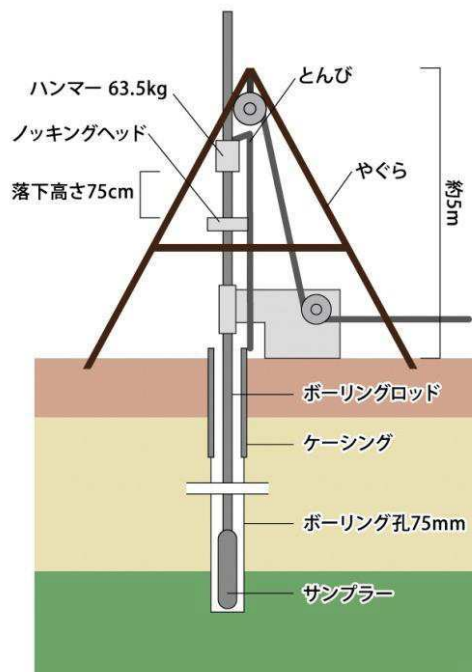
補足説明資料

3. 液状化に関連する基本物性の補足

- 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(Fc)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(Fc)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(Fc)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

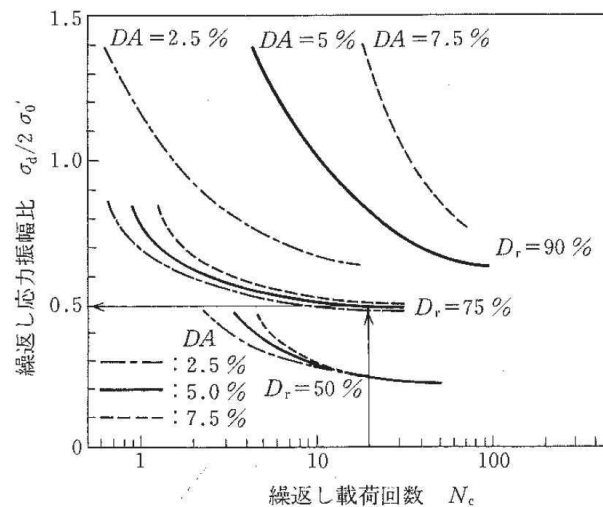
- 相対密度は、下式で定義される地盤の締まりを表す指標である。相対的に、相対密度が大きい方が地盤は密で、小さい方が疎である。
- 相対密度は、力学特性を表すパラメータとして利用されている。なお、相対密度はそれぞれの密度の誤差が相対密度に大きな誤差となって反映されるという特徴を持っており、特に細粒分を多く含む場合には誤差が大きくなる特性がある。

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

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75μm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。

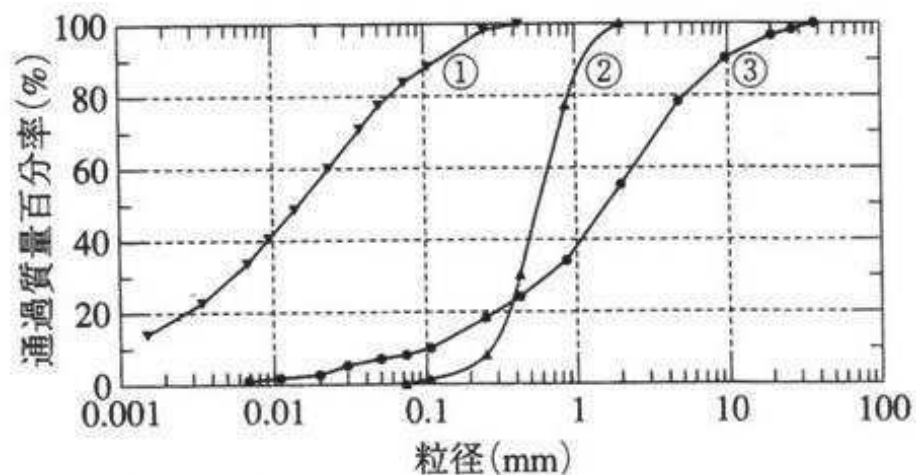


液状化強度曲線の形状と土の特性の関係
 (地盤材料試験の方法と解説, (社)地盤工学会, 2009)

- 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

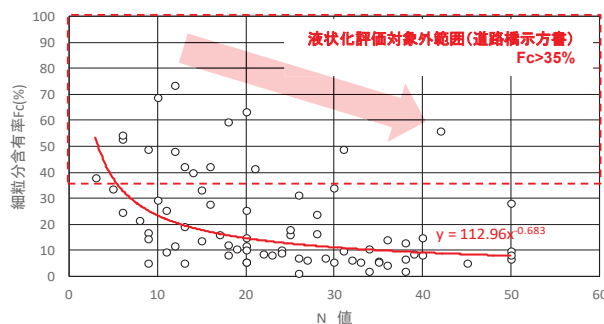
4. N値とFcの関係の整理

【N値とFcの関係の整理】

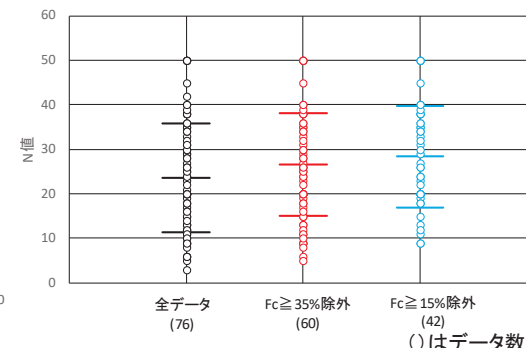
- 粘性土やシルトは液状化しにくい土質とされ、これらが地盤にどれだけ含まれるかを示す値として細粒分含有率（以下Fc）がある。道路橋示方書（V耐震設計編）では、液状化の判定を行う必要がある土層としてFcが35%以下と規定している。一方、液状化強度比の算定式のパラメータであり、液状化強度比と相関が高いとされるN値は、Fcとも相関関係にあるとされる。
- 以上より、各土層（旧表土、盛土）のN値とFcの相関を確認した。また、 $F_c \geq 35\%$ の試料及び参考として港湾の施設の技術上の基準でN値の補正が必要とされている $F_c \geq 15\%$ の試料を除外した場合のN値の整理を行っ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

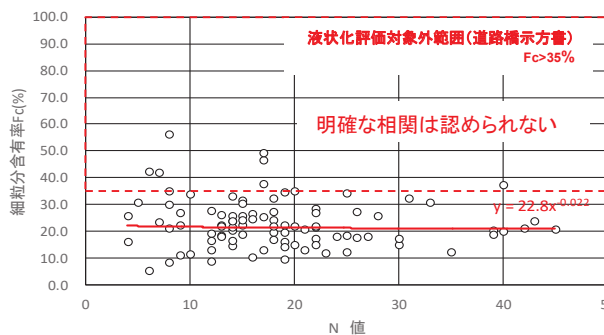
- 旧表土はFcが大きくなるにしたがいN値は小さくなる傾向が認められる。
- 一方、Fcが大きくてもN値が大きい試料があり、Fcが大きいかからといって必ずしもN値が小さくなるわけではない。
- 盛土はN値とFcの明確な相関は認められない。



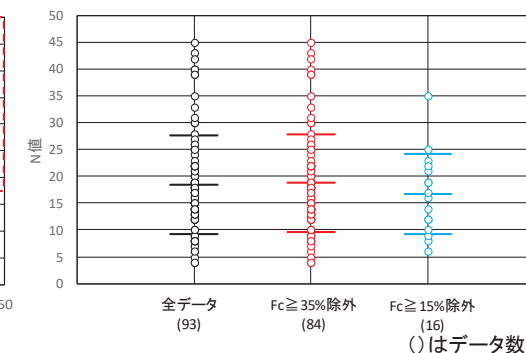
(旧表土)N値とFcの関係



(旧表土)全体FcとN値の整理



(盛土)N値とFcの関係



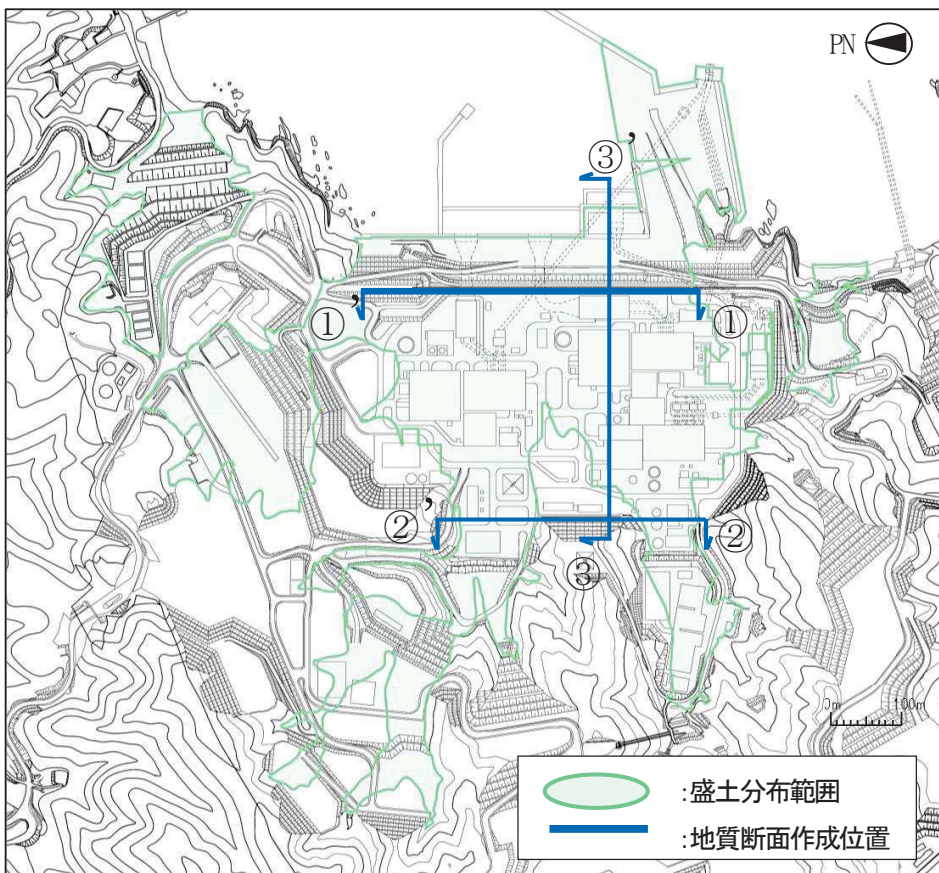
(盛土)全体FcとN値の整理

補足説明資料

5. 盛土の均一性

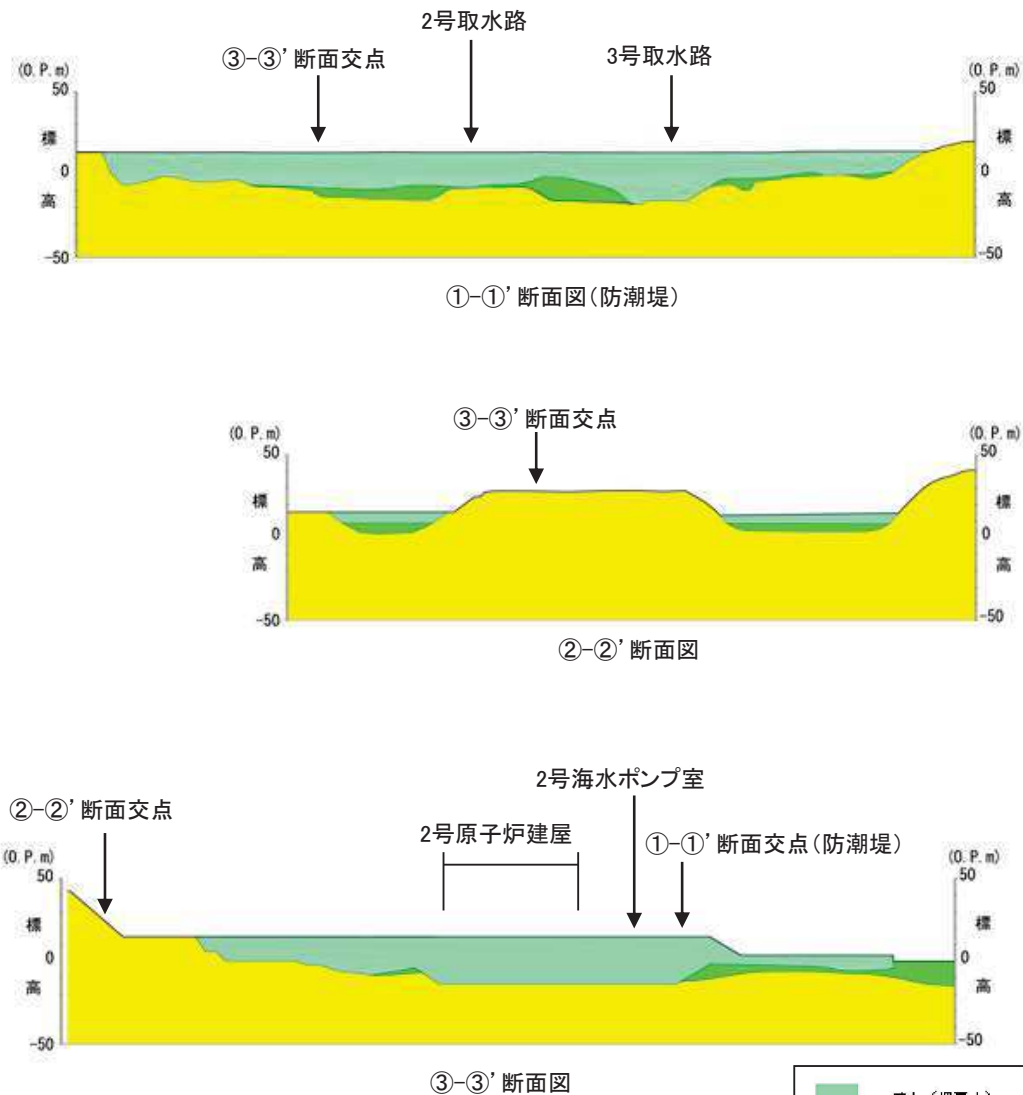
- 盛土を対象とした液状化強度試験箇所を選定にあたり、盛土は堅固な岩盤を掘削した岩砕を用いて造成したものであり、施工管理基準により施工範囲全域にわたって同様に締固められていることから、均一性が確保されている。
- 盛土の液状化強度試験の試料採取位置の代表性について、盛土材料(岩砕)の母材の性状及び盛土施工の品質管理により示す。

- 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。



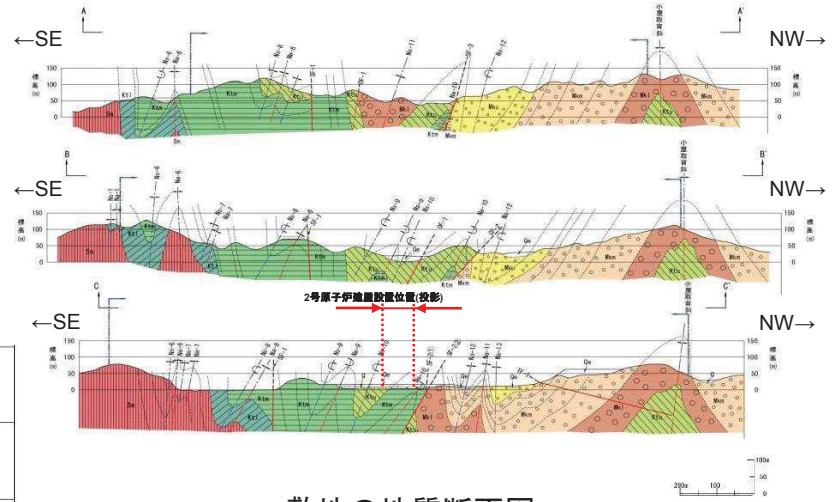
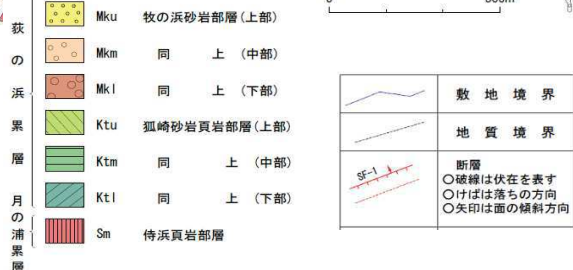
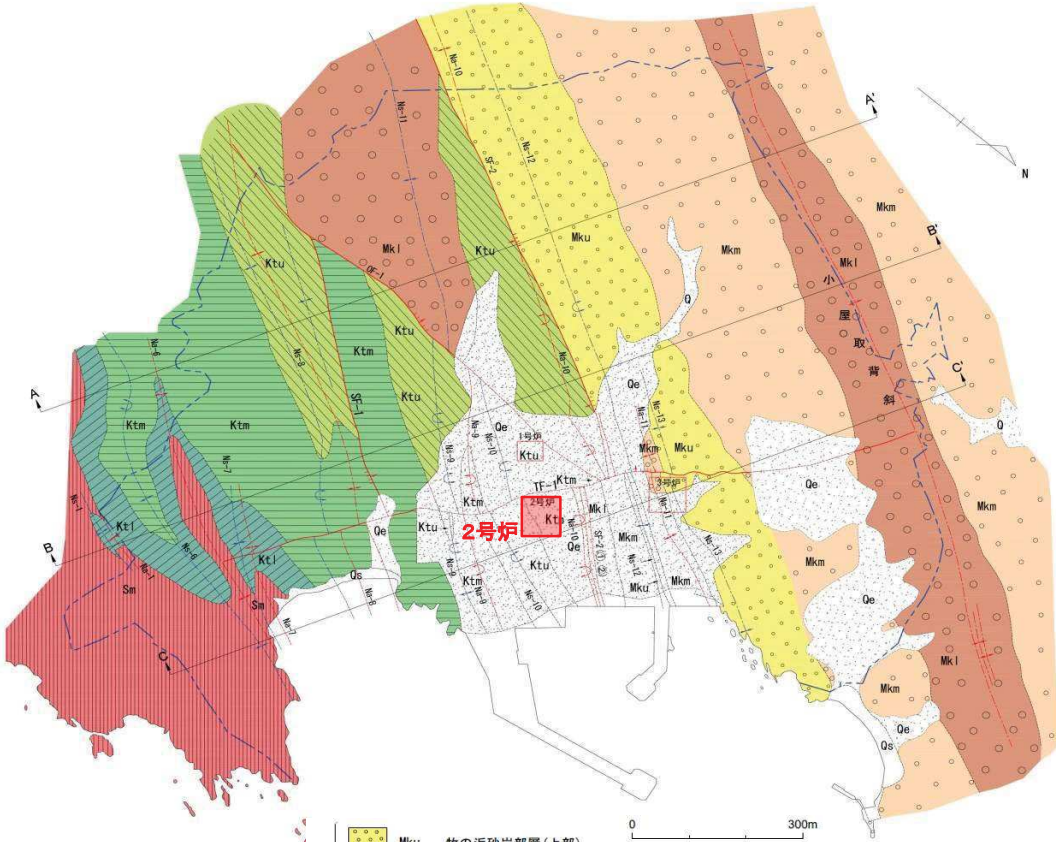
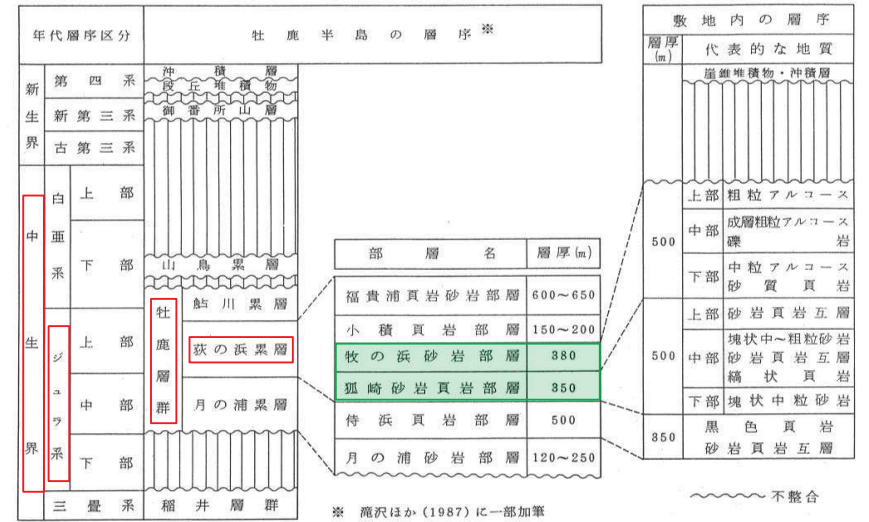
断面図



補足説明資料5. 盛土の均一性
 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



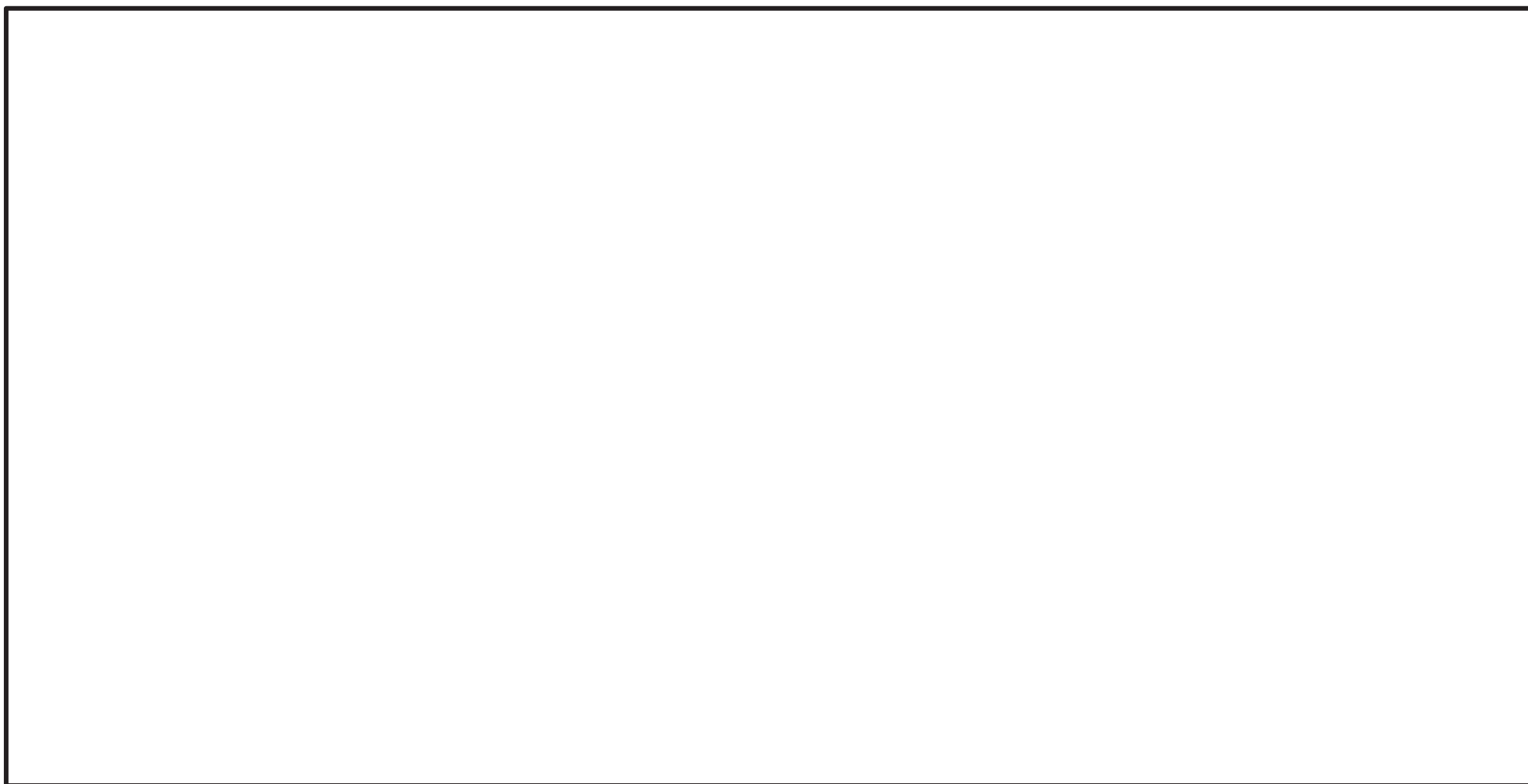
敷地の地質断面図

※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。

敷地の地質平面図

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。

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
- 掘削岩盤は、土砂仮置場に運搬し、腐葉土、粘土塊、泥等を除去し、粒径300mm以下の岩砕として仮置きし、造成時に使用。

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

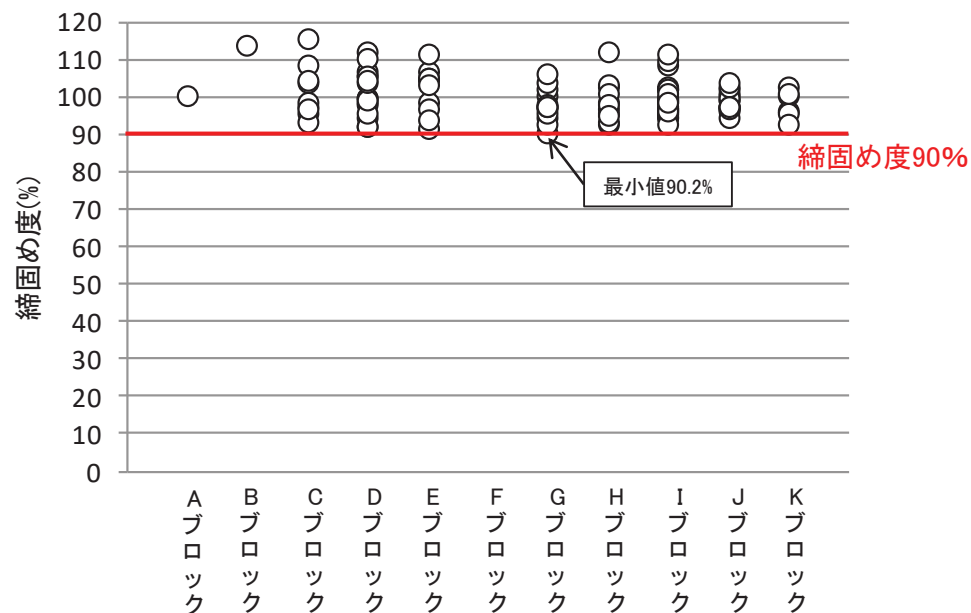
盛土品質管理 試験項目		試験頻度・管理基準値
密度試験	水置換法: JIS A 1214	・3箇所/5,000m ³ ・ γ_{dmax} ^{※1} の90%以上(締固め度90%以上※2)
含水比	土の含水比試験方法: JIS A 1203	・1箇所/日 ・ γ_{dmax} 時の90%以上の密度となる含水比以内
沈下板	レベル測定	・10箇所/日 ・残留沈下50mm
突固め試験	JIS A 1210	・1回/5,000m ³
フルイ分試験	JIS A 1204	・1回/50,000m ³
比重試験	JIS A 1202	・1回/50,000m ³
三軸圧縮試験	—	・1回/250,000m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



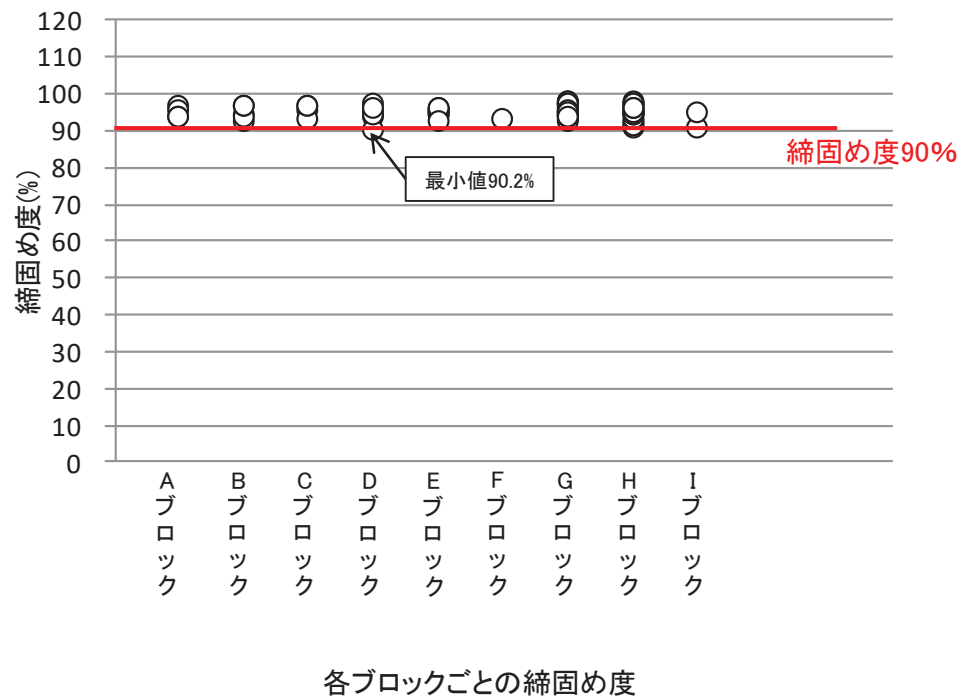
各ブロックごとの締固め度

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

- 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。



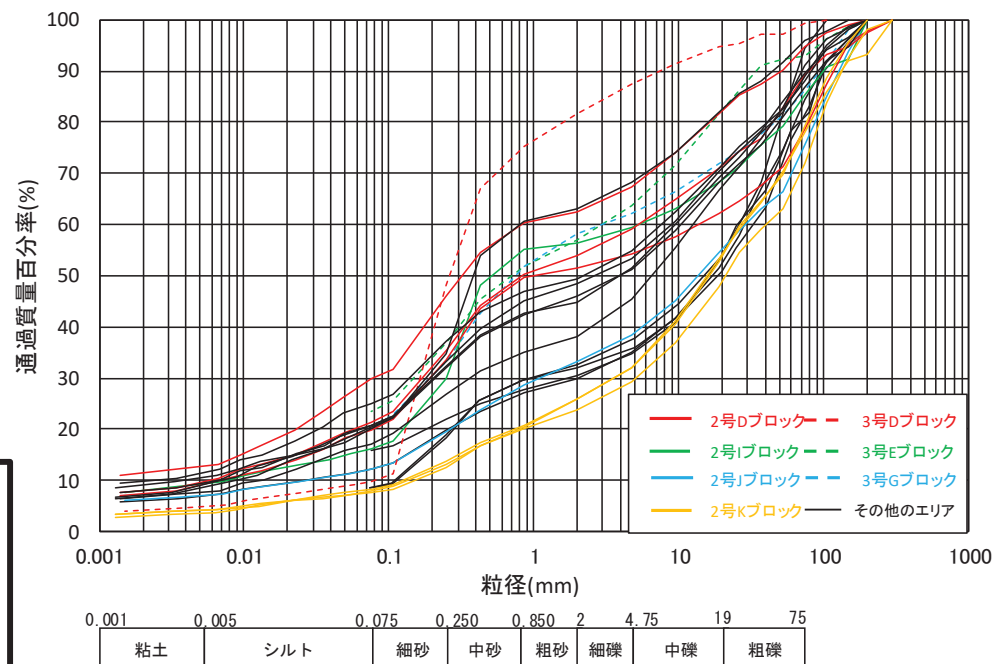
盛土の施工ブロック図



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。

補足説明資料

6. 盛土のN値の取扱いについて

■ 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。

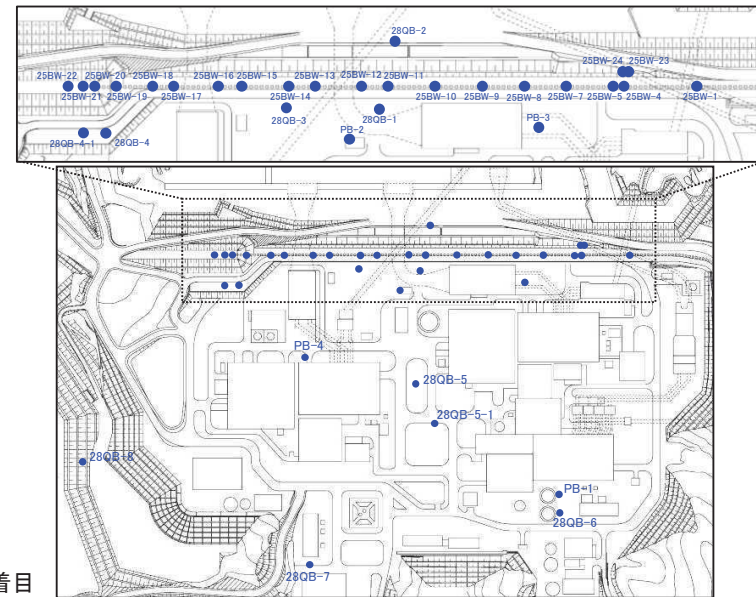
■ 岩砕のN値採用が難しい理由

- 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。

補足説明資料6. 盛土のN値の取扱いについて
盛土のN値について(2)

■ 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、概ね観測地下水水位で浅である。
- 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。

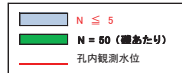


※1液状化強度試験試料採取位置の-1σ以下として、N値5以下に着目

盛土における深度方向のN値の分布

Q.P(m)	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4※2	25BW-1	25BW-2	25BW-3	25BW-4	25BW-5	25BW-6	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	Q.P(m)	28QB-8		
15~14																																							58~58	5	
14~13																																								58~57	4
13~12		9	60	6	9	29	15	13		7	3	1	24	5	13	10	6	6	6	6	6	6	50	50	50	9	5	15	22	10	19	15	6	20	20			57~56	7		
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					56~55	9		
11~10	9	60	60	4	12	50	21	60	17	60	1	13	14	17	24	21	13	12	17	14	7	50	50	50	10	17	25	22	18	9	6	10	25	23					55~54	17	
10~9	41	16	17	10		30	27	14	22	7	60	12	13	14	18	10	19	33	16	12	20	60	60	60	19	40	28	21	60	6	16	26	30					54~53	22		
9~8	60	6	23	9		20	22	13	36	10	17	24	16	45	9	9	60	20	35	23	12	9	10	9	21	12	13	18	14	7	17	45					53~52	13			
8~7	50	10	17	14		22	50	28	26	50	11	10	10	21	24	12	50	50	9	24	24	7	11	14	28	15	18	21	18	14	12	42					52~51	18			
7~6	23	46	16	7		24	16	10	46	14	11	15	13	22	30	35	60	8	15	12	50	19	7	5	19	13	14	7	13	25	4	40					51~50	22			
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							50~49	22			
5~4	20	15	14	13		19	16	27	17	41	60	13	13	27	16	13	60	60	23	14	50	13	20	13	24	17	33	30	19	18								49~48	31		
4~3	14	34	15	18		19	23	11	11	13	21	12	29	60	9	60	15	14	24	10	22	9	22	18	20	7	22	18	20	7								48~47	14		
3~2	25	13	9	18		60	45	21	60	35	14	60	16	24	27	33	11	33	60	32	14	15	9	26	38	25	14	60	60	30								47~46	13		
2~1	31	19	19	34		11	11	27	50	44	13	50	9	14	12	50	11	28	50	16	50	19	43	29	25	9	15	16	17	39								46~45	10		
1~0	22	44	12	26		8	19	31	50	24	60	43	22	18	20	24	20	26	37	19	15		14	13	31	19	16	19	50									45~44	16		
0~-1	15	38	18	15		8	35	47	21	13	15	50	21	11	10	32	11	29	20																				44~43	15	
-1~-2	25	47	14	24		16	20		14	14	32	32	25	60				48	15	29	50				8		30	19										43~42	19		
-2~-3	30	60	22	20		9	25	20	33	11	23		16	17				60	45	60	18				4		20	8	13									42~41	15		
-3~-4	10	60	43	21		7	16	8	60	11	18		17					13	9	31					11		18	19										41~40	18		
-4~-5		21	17	12		16			60	17	15							60	46	22					6														40~39	8	
-5~-6		31		10		13			10	16	22							16	20	35					19														39~38	17	
-6~-7		40		18					19	60								24	60	15																			38~37	14	
-7~-8				12							22							14	15	13																			37~36	22	
-8~-9				12														15	15	14																			36~35	8	
-9~-10				15														20	22	33																			35~34	14	
-10~-11				47														28	16	31																			34~33	6	
-11~-12				30															38	28																			33~32	8	
-12~-13				14															30	11																					
-13~-14				39															30	22																					
-14~-15				10															30	22																					
-15~-16				12															30	19																					

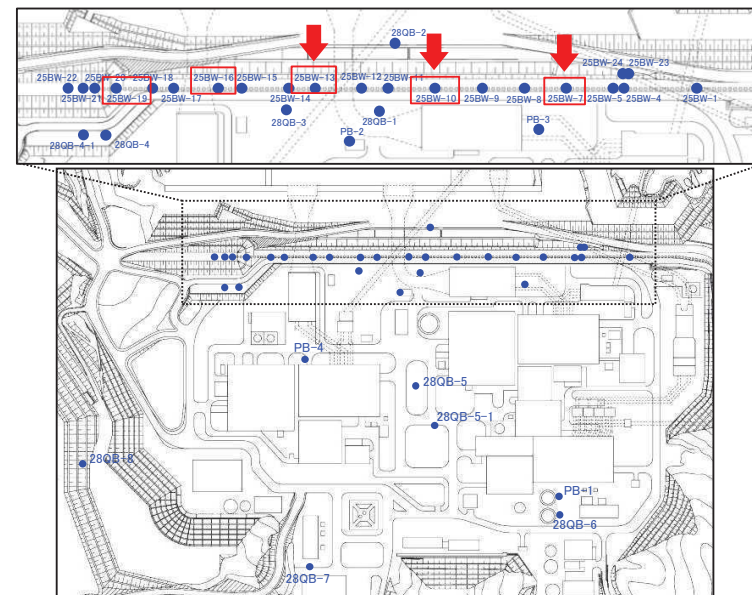
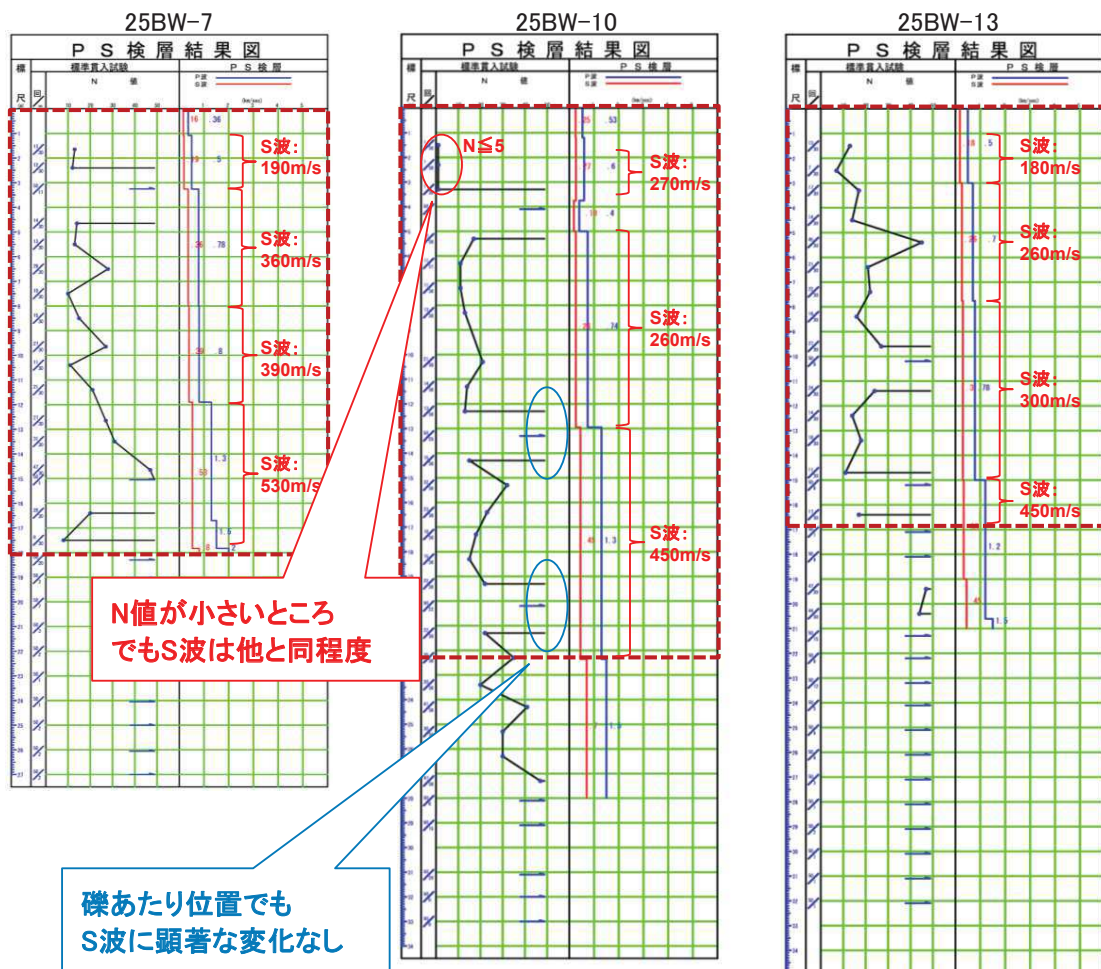
※2孔内観測水位なし



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。



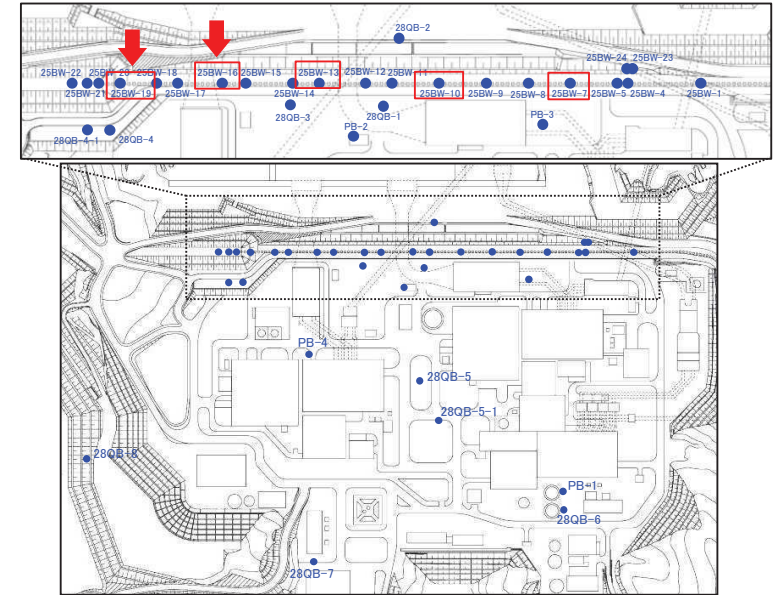
PS検層実施位置
PS検層実施位置図

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

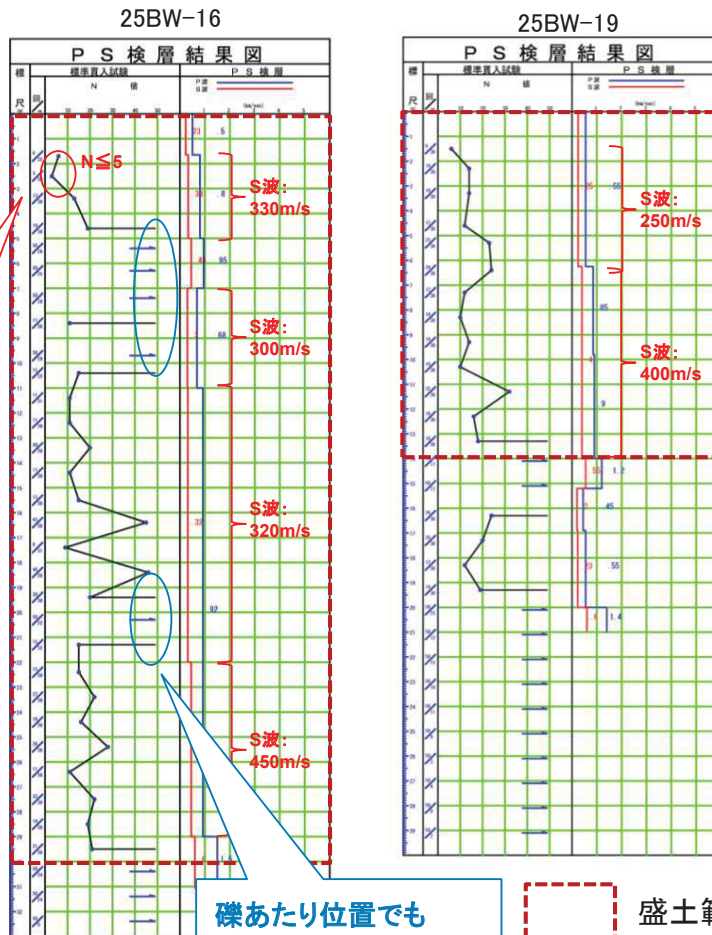
■ PS検層結果

- 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。



PS検層実施位置

PS検層実施位置図



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

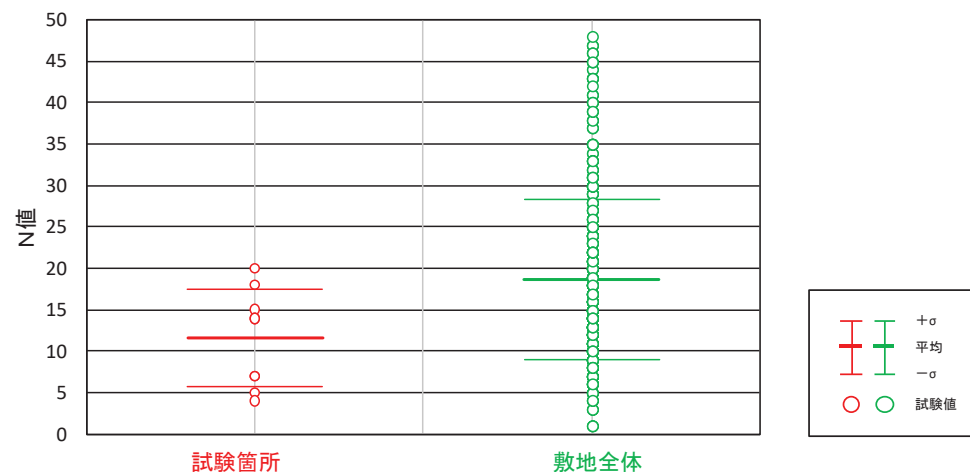
盛土範囲

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4に示す。



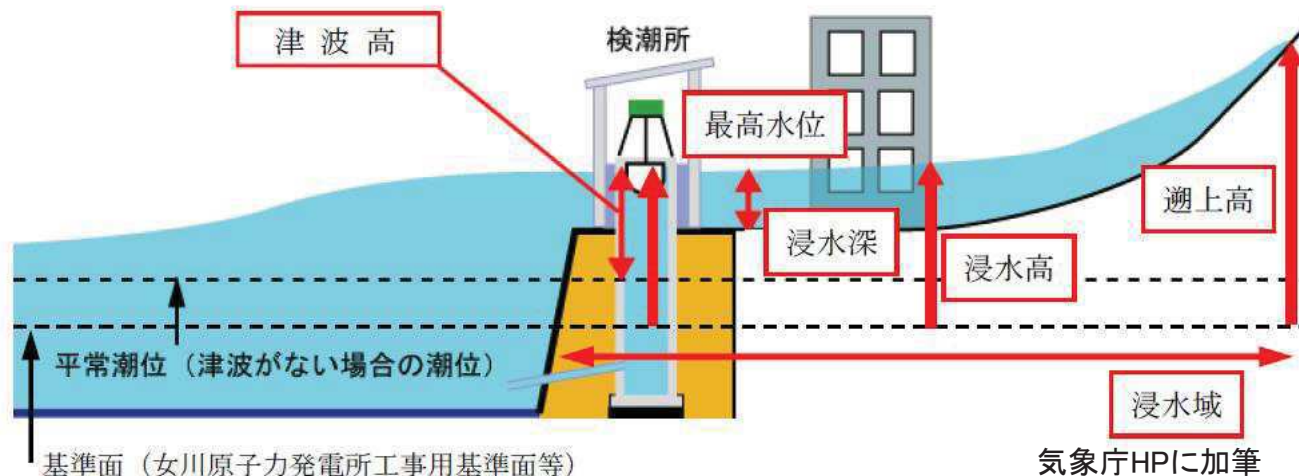
盛土におけるN値の比較

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

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伴う津波の調査概要について

- 痕跡調査を実施(平成23年3月17日～18日, 3月26日)し, 発電所敷地における浸水高, 遡上高を調査した。また, 海水により運搬されたと考えられる痕跡物の到達点の追跡により津波に伴う海水の浸入の痕跡を調査した。用語の定義を以下に示す(参考図参照)。
 - ・ 最高水位: 潮位計で観測された津波の高さの最高値
 - ・ 津波高: 津波によって海面が上昇した高さ
 - ・ 浸水高: 建屋や設備に残された津波の痕跡の高さ
 - ・ 遡上高: 海岸から内陸に津波が及んだ高さ
 - ・ 浸水域: 津波によって浸水した範囲
- ※ 痕跡高: 浸水高、遡上高を総称



参考図:用語の定義

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の調査結果について(1/2)

- 発電所敷地における浸水高、遡上高及び浸水域の調査結果を下図に示す。なお、ここでは地震による地盤沈下量の約1mを考慮している。調査結果は以下のとおりである。

【浸水高, 浸水深】

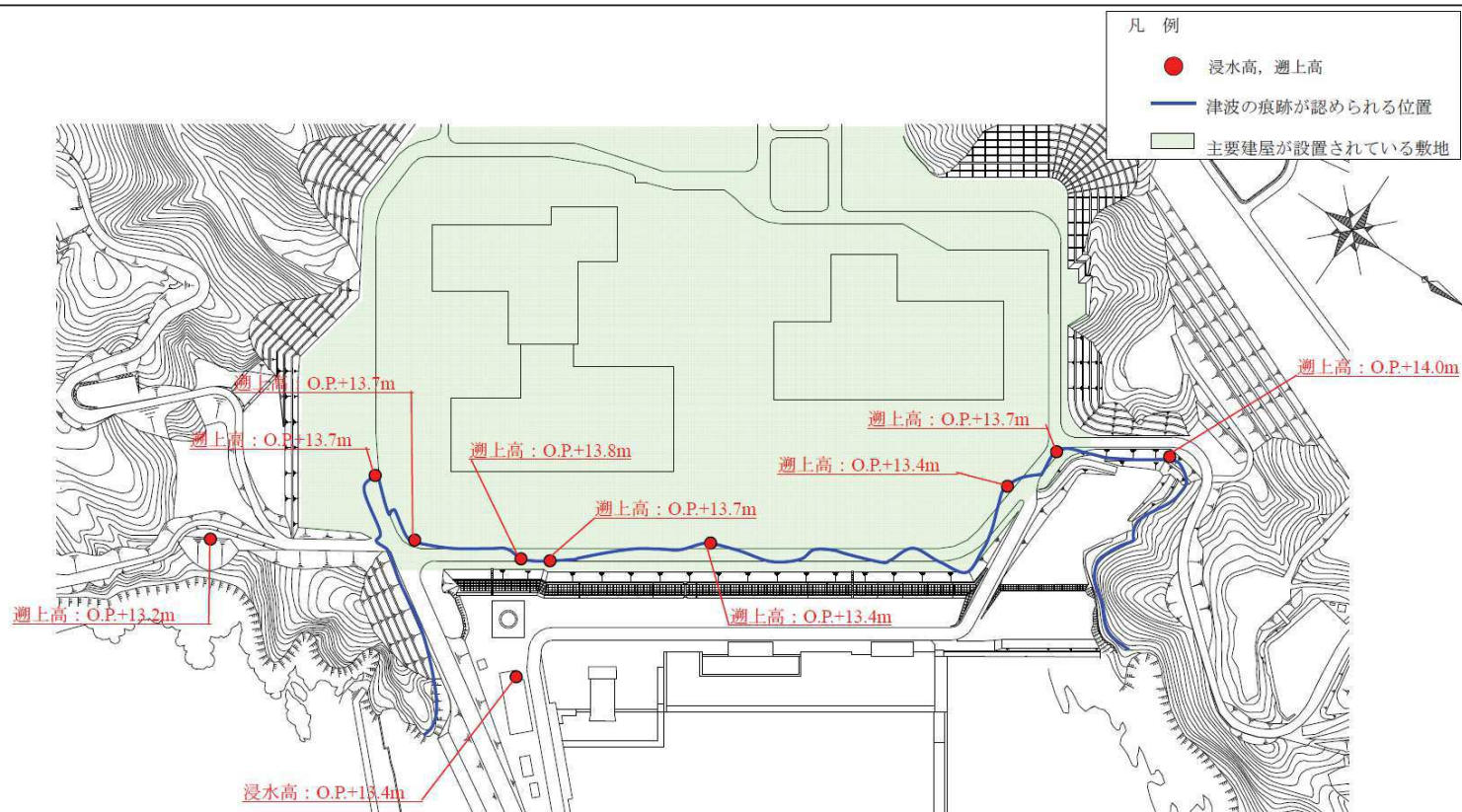
最大浸水高は、主要な建屋が設置されている敷地前面において、屋外電動機等点検建屋に残された痕跡痕からO.P.約+13.4m(浸水深約10.9m)である。

【遡上高】

最大遡上高は、主要な建屋が設置されている敷地北側の法面においてO.P.約+14.0mである。また、主要な建屋が設置されている敷地前面における最大遡上高は、O.P.約+13.8mである。

【浸水域】

海水により運搬されたと考えられる痕跡物の到達点の追跡調査により、津波に伴い海水が主要な建屋が設置されている敷地に侵入した範囲は、敷地(O.P.+13.8m)の法肩から平均約20mであり、主要な建屋には及んでいないことを確認した。

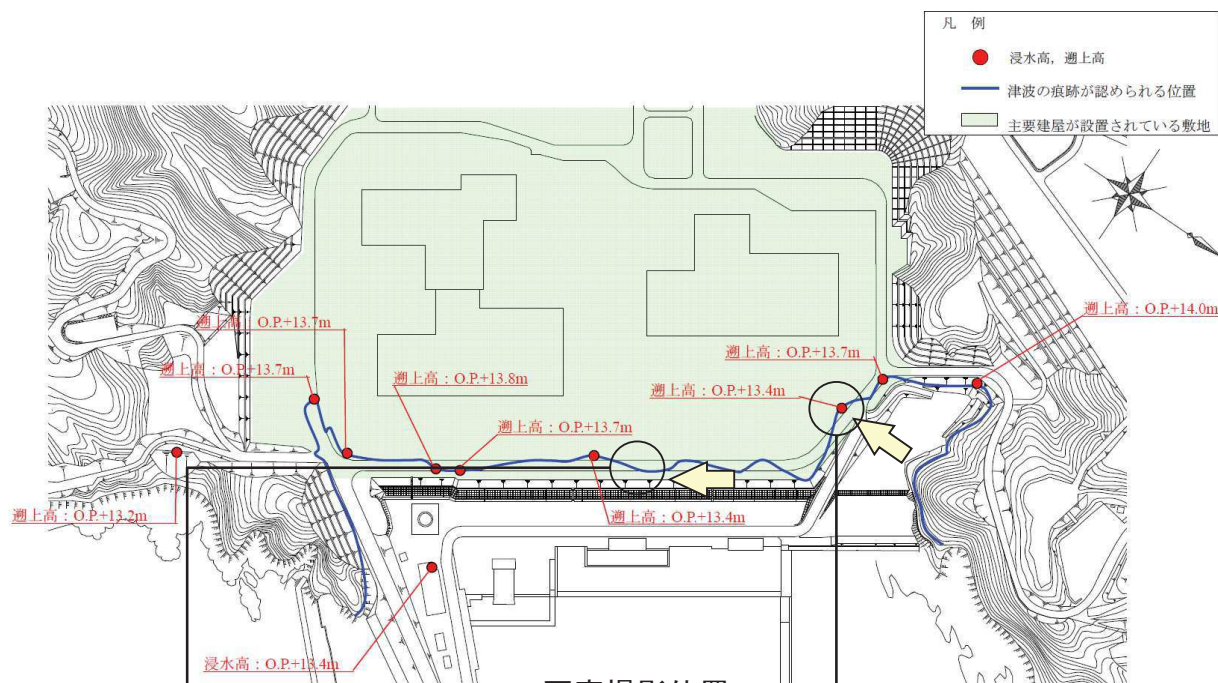


補足説明資料8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について
 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う津波の調査結果について(2/2)

- 発電所敷地の海側(法肩付近)において、津波による塵芥が残留した状況を確認している。



写真2 構内道路上に残留した塵芥



写真撮影位置



写真1 敷砂利上に残留した塵芥

3.11地震による地盤変位について

【東北地方太平洋沖地震前後の地盤変位量】

- 平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震前後における地盤変動を把握するため、構内の水準点(3点)を対象に水準測量を実施した。測量を実施した基準点の位置を右図に、測量結果による構内水準点標高の経年変化を下表に示す。
- 敷地内の地盤変位量は、3水準点においてほぼ同値であり、不等沈下の影響はなく、一様に変位していることを確認した。
- 地震後の測量では約1m沈降していたが、至近の測量(平成29年4月)では、前回(平成23年11月)に比べ約30cm隆起していることを確認した。なお、同年4月7日に東北地方太平洋沖地震の余震と考えられる地震(M7.4)が宮城県沖で発生しているため、前回(平成23年11月)の測量結果はこの余震の影響も含まれていると考えられる。

【津波防護設計における地殻変動量の考慮】

- 津波防護設計においては、約1mの沈降が発生していることを考慮した設計とし、敷地高さや施設高さ等に沈降量を考慮することとする。



水準測量実施位置図

表 構内水準点標高の経年変化

測点	地震前(A) 平成23年2月	地震後(B) 平成23年11月	地震後(C) 平成29年4月	地盤変位量 (B-A)	地盤変位量 (C-B)
水準点 基点	O.P.58.226m (T.P.57.486m)	O.P.57.264m (T.P.56.524m)	O.P.57.572m (T.P.56.832m)	-0.962m	0.308m
水準点 No.1	O.P.27.223m (T.P.26.483m)	O.P.26.252m (T.P.25.512m)	O.P.26.559m (T.P.25.819m)	-0.971m	0.307m
水準点 No.3	O.P.16.088m (T.P.15.348m)	O.P.15.114m (T.P.14.374m)	O.P.15.424m (T.P.14.684m)	-0.974m	0.310m

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(1/9)

127

- 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。
- 沈下量は写真右側の側溝から約15cmと推定される。

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(2/9)

- 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。
- 沈下量は写真のアスファルト舗装の段差から約10cmと推定される。

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(3/9)

129

- 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】

- 沈下量は右側の写真のタンク基礎が露出した部分から約15cmと推定される。



地震後の状況【H29.5.24撮影】

←巡視用ステップ

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(4/9)

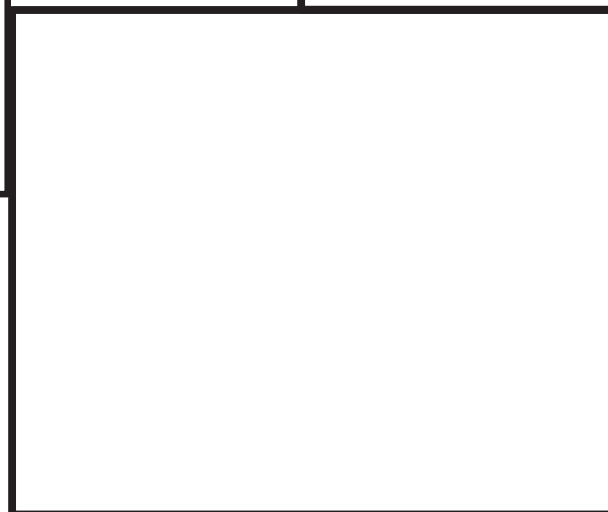
130

- 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。

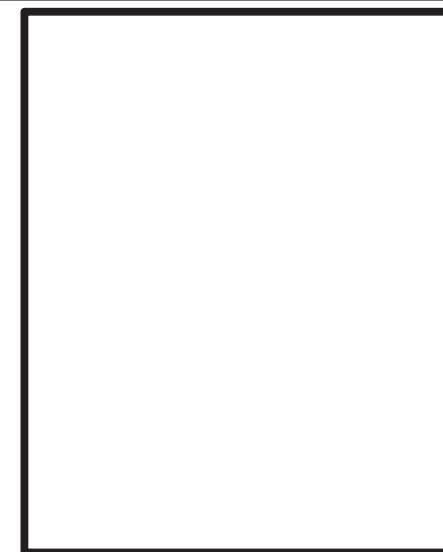


構内道路及び3号炉油水分離槽【H23.3.12撮影】

- 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。
- 沈下量は写真の油水分離層の奥の基礎から約35cmと推定される。



平面図



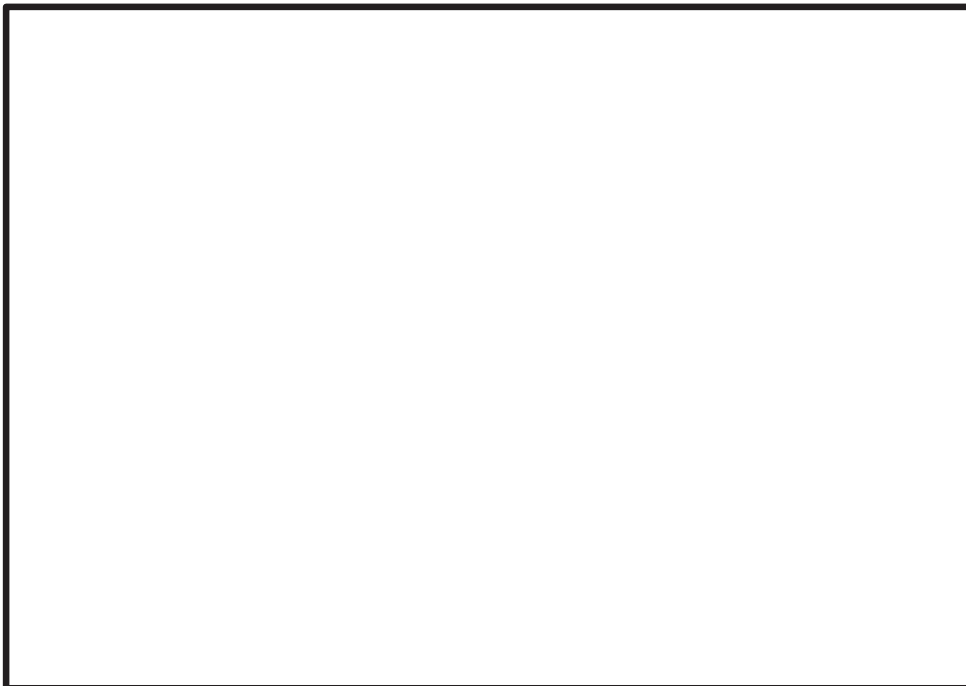
A-A断面図

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(5/9)

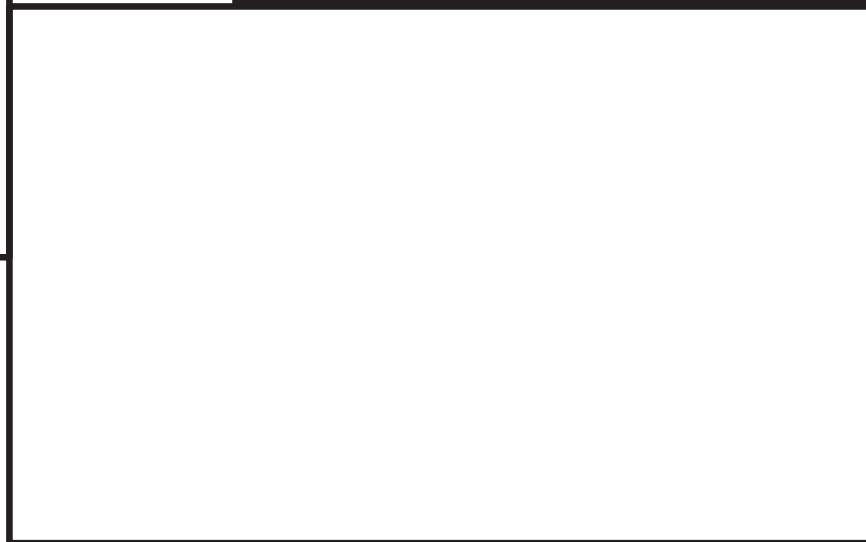
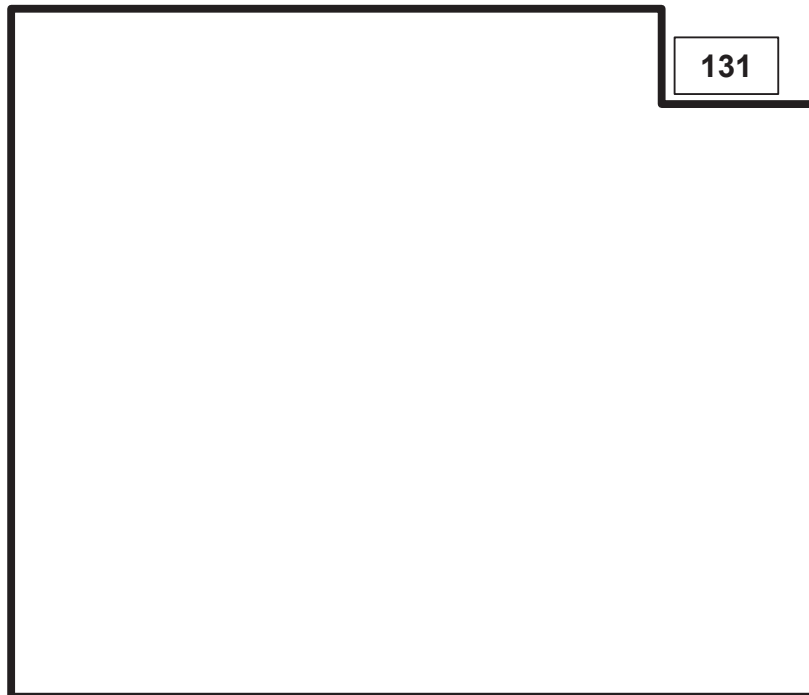
131

- 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)

- 門型クレーン基礎の一部に杭フーチングが張り出している箇所があり、L型側溝に不陸が生じている。
- フーチングの張出し部の上部にある側溝は道路側に傾いていること、道路の白線にはほとんど不陸が生じていないことから、沈下量は約15cmと推定される。



地震前の状況【H21.2.3撮影】
(写真㊸と逆方向から撮影)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

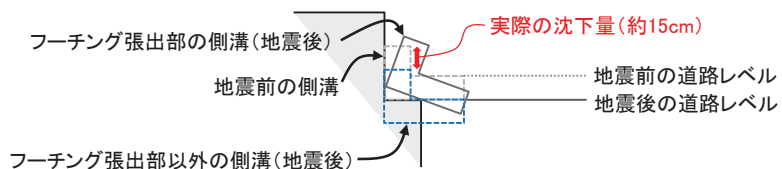
補足説明資料8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について 地震後の沈下の状況(6/9)

132

- 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)

- 門型クレーン基礎の一部に杭フーチングが張り出している箇所があり、L型側溝に不陸が生じている。
- フーチングの張出し部の上にある側溝は道路側に傾いていること、道路の白線にはほとんど不陸が生じていないことから、沈下量は約15cmと推定される。



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(7/9)

133

- 写真㊸は、3月12日のAM7:19に撮影したもので、写真左側が東、写真右が西である。レール基礎の右側(西側)に影が出来ていることが確認できる。
- また、3月11日から12日にかけて、降雪があった。
- このことから、レール基礎の右側(道路脇)に白っぽく見えるものは、3月11日からの降雪がレール基礎の陰になって残ったものであり、噴砂ではない。

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) ※3月12日のAM7:19に撮影

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) ※3月12日のAM7:06に撮影

レール基礎の陰に雪が残っている状況が確認される。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

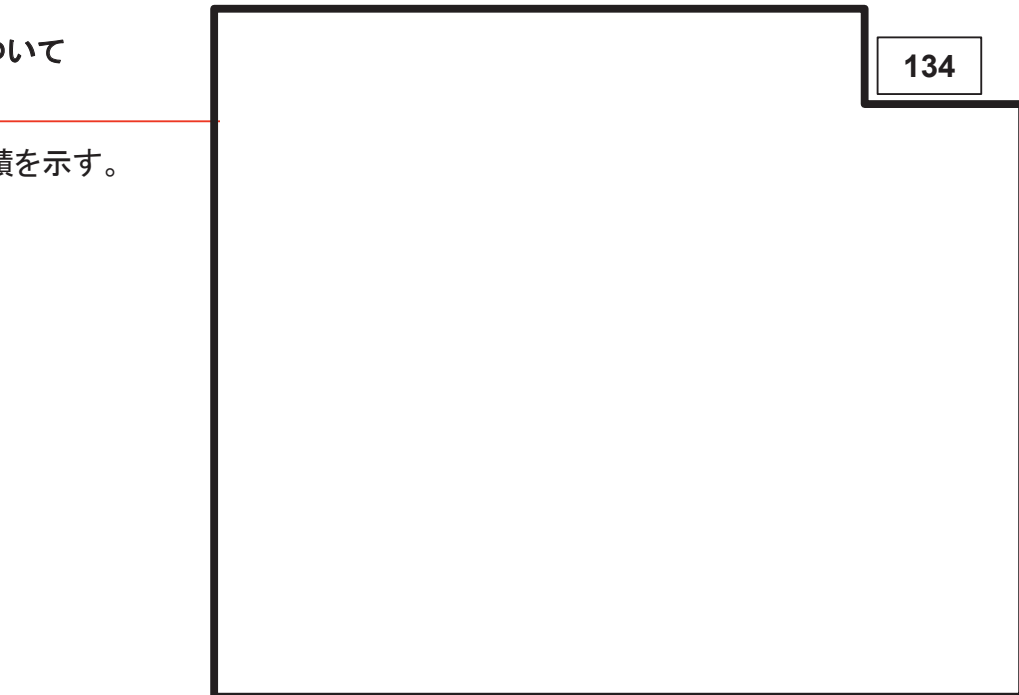
補足説明資料8. 2011年東北地方太平洋沖地震における沈下実績について
地震後の沈下の状況(8/9)

- 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。



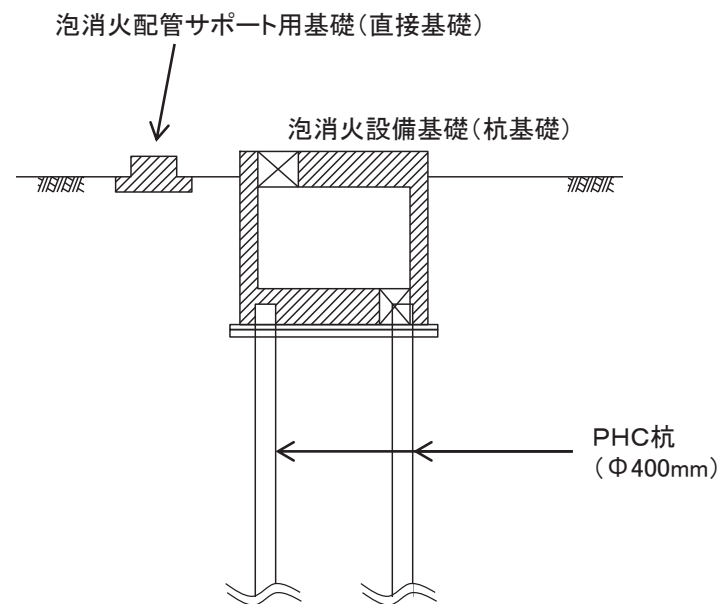
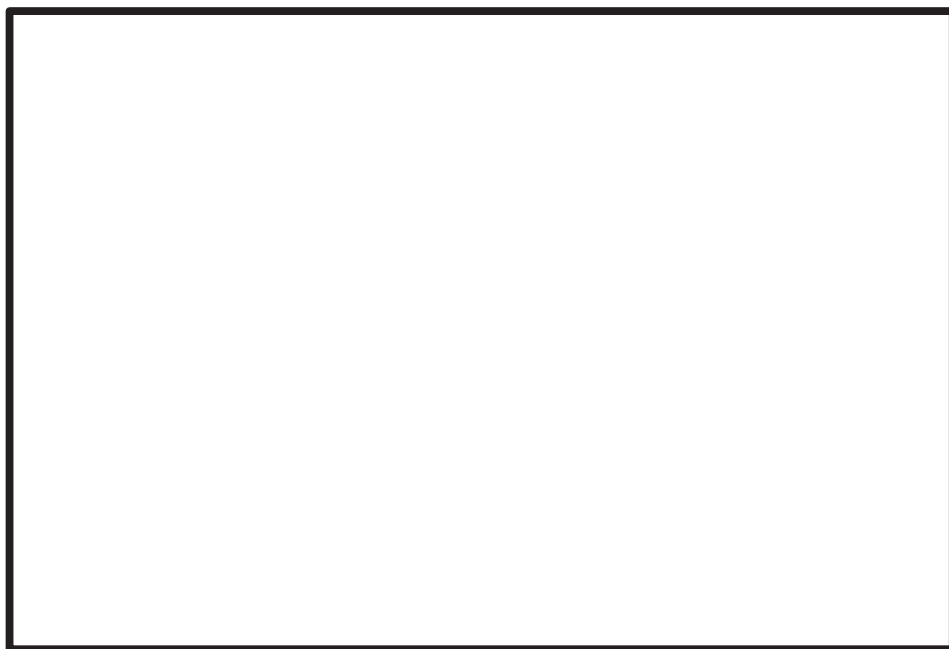
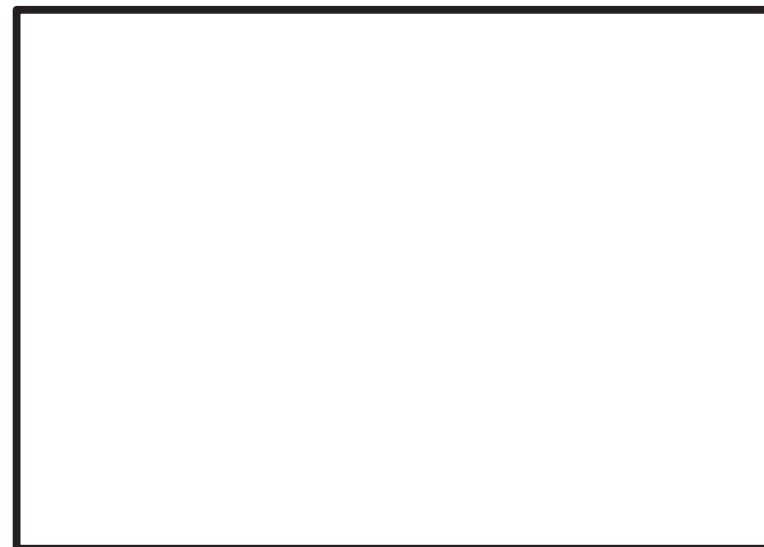
3号炉泡消火設備基礎【H23.3.20撮影】

- 写真⑤: 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⑥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⑥'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)。



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

- 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。
- 3号炉泡消火設備周辺の沈下量は下の写真から約40cmと推定される。



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 沈下量測定位置及び測定方法

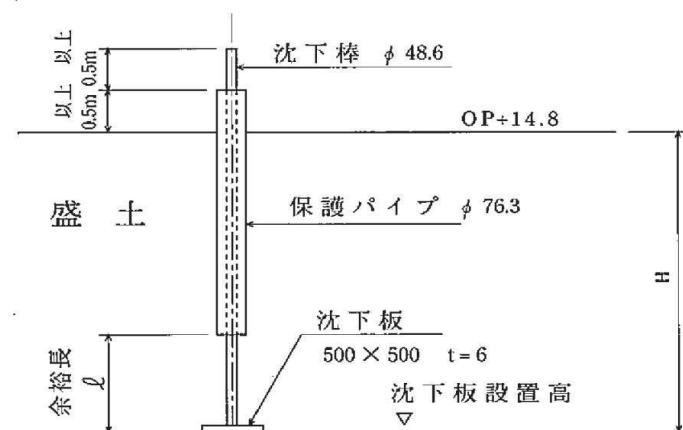
- 埋戻し土(盛土)の圧密沈下量や地震時の沈下量の把握のために沈下棒を設置しており、左下図に示す位置で沈下測定を実施した。
- 沈下棒の構造は右下図のとおりであり、水準点No.1から3号炉放水立坑の測定点を測定し、その測定点を基準に各沈下棒の天端部の標高を測定(2級レベル)することにより、沈下板の下に存在する盛土や旧表土の沈下量を求めた。
- 沈下率は測定した沈下量を沈下板の下に存在する盛土及び旧表土の層厚で除すことにより算出した。



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。

- 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。
- なお、同年4月7日に東北地方太平洋沖地震の余震と考えられる地震が宮城県沖で発生した(M7.4)が、この地震直後に行った設備点検で大きな変状は確認されなかったため、この余震による沈下量の測定は行っていない。



- 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。



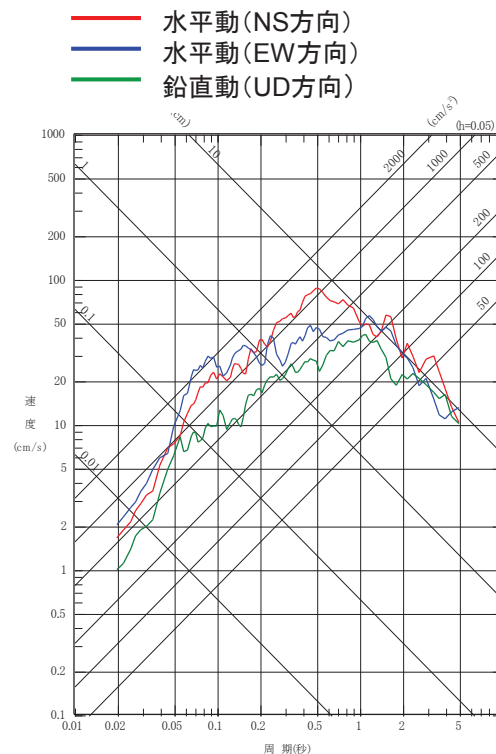
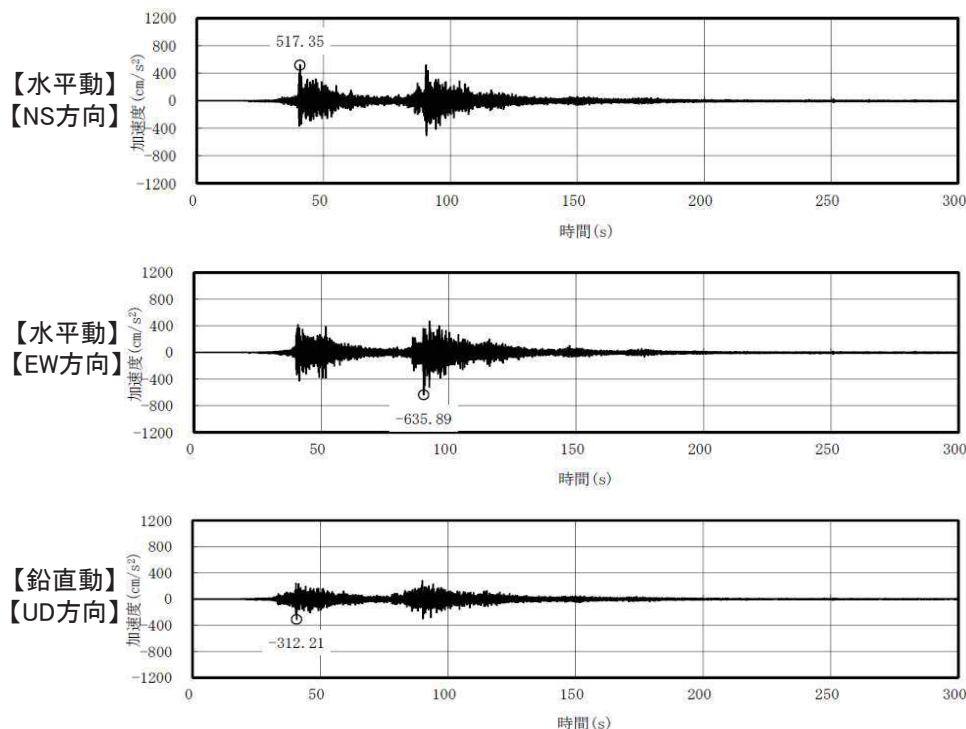
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

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

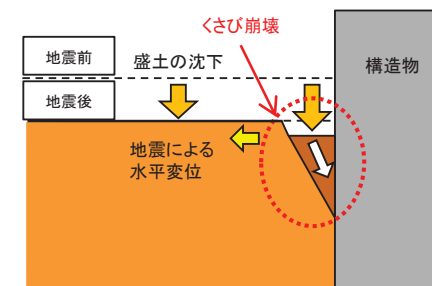
No.	沈下量	沈下率
1	15.0cm	0.93%
2	18.0cm	0.93%
3	4.3cm	0.18%
4	9.3cm	0.79%
5	11.5cm	1.00%
6	8.8cm	0.50%
7	30.1cm	1.18%
8	20.9cm	1.21%
9	15.7cm	0.76%
10	14.9cm	1.02%
11	10.8cm	0.84%
12	7.1cm	1.15%
13	19.8cm	0.82%
平均沈下率		0.87%

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、不飽和地盤の繰り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。
- 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ことにより、沈下の要因について考察する。
- 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ぎとり波とする。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。

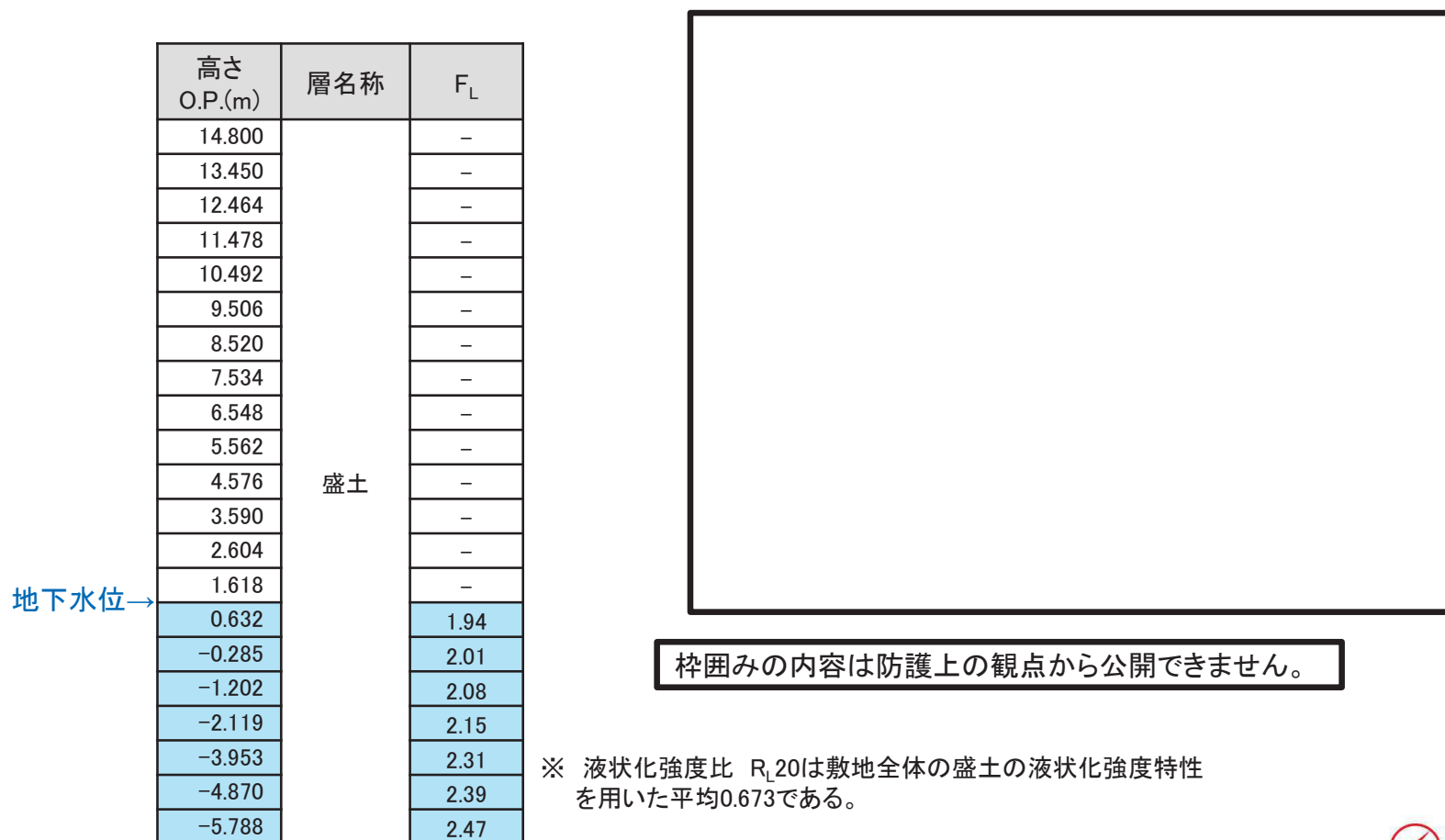


※1 くさび崩壊とは
構造物と周囲地盤の相対変位
に起因する主働状態で生じるす
べり破壊。



沈下測定箇所の液状化発生有無の確認

- 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は、沈下量測定箇所のうち比較的地下水位の高い地点(No. 10)を選定し、次元地震応答解析により、液状化に対する抵抗率(F_L)を確認することで液状化判定を行った。
- その結果、地下水位以深の飽和地盤の液状化に対する抵抗率(F_L)は1.0を上回っており、液状化はしていなかったと考えられる。
- このことから、今回測定した箇所での沈下については不飽和地盤の揺すり込み沈下であると判断される。



2011年東北地方太平洋沖地震によるO.P.+3.5m盤の液状化発生有無の確認(1/2)

- 2号炉取水口と隣接する敷地護岸(矢板式護岸)は、O.P.+3.5m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、液状化の痕跡である噴砂等は確認できない。
- 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、一次元地震応力解析により、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した。
- 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)の比により算出し、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)を右下に示す。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

2号炉取水口付近【H23.3.15撮影】

➤ 写真㊸: 2号炉取水口付近は、津波により浸水したため、地震による影響(液状化、噴砂等)の有無を確認することはできない。なお、道路に生じている段差は岩着している取水口と埋戻し土の境界であり、道路上に確認される砂については、津波によって巻き上げられた海砂が堆積したものと考えられる。

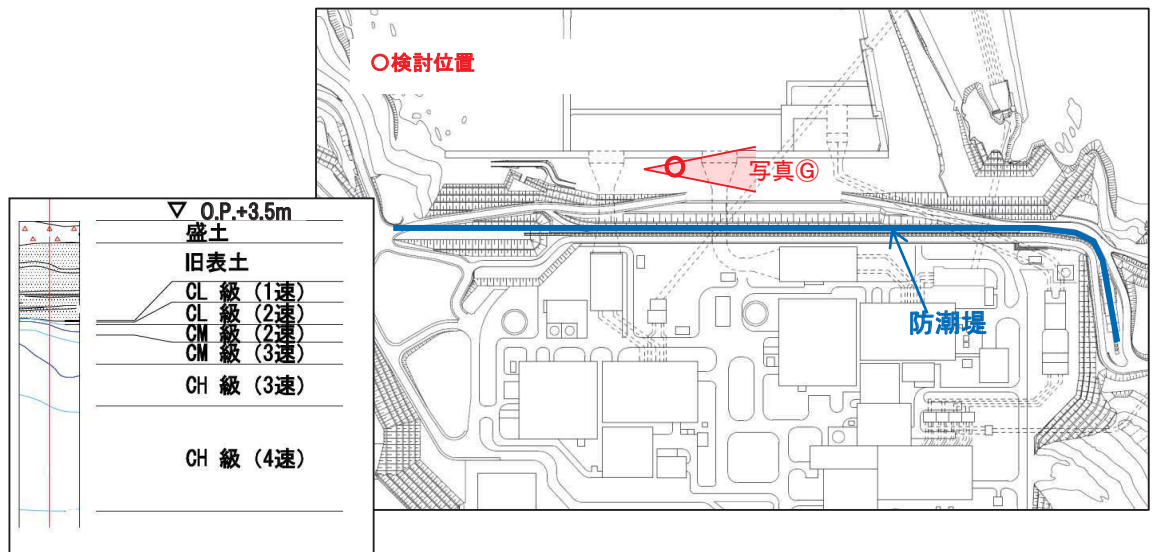


表-8.2.1 土質定数の低減係数 D_E

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)

2011年東北地方太平洋沖地震によるO.P.+3.5m盤の液状化発生有無の確認(2/2)

- 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)を確認することで液状化判定を行った。
- その結果, 地下水位以深の飽和地盤の液状化に対する抵抗率(F_L)は1.0を下回っており, 土質定数の低減係数(D_E)も1を下回る範囲が多いことから, O.P.+3.5m盤は有効応力の減少により地盤の剛性低下が生じていた可能性が高いと考えられる。

高さ O.P.(m)	層名称	F_L	D_E
3.500	盛土	-	-
2.500		-	-
1.500		-	-
0.400		1.01	-
-0.320		0.94	1
-1.040	旧表土	0.50	2/3
-2.040		0.49	2/3
-3.040		0.49	2/3
-3.978		0.50	2/3
-4.978		0.52	2/3
-5.978		0.54	2/3
-6.978		0.56	2/3
-7.978		0.59	2/3
-8.978		0.62	2/3
-9.978		0.66	2/3
-10.978		0.69	1
-11.978		0.73	1
-12.978		0.77	1
-13.978		0.82	1
-14.978		0.86	1
-15.978	0.90	1	

地下水位→

※ 液状化強度比 R_L 20は敷地全体の液状化強度特性を用いた平均であり, 以下のとおりである。
盛土:0.673 旧表土:0.374

F_L 判定結果及び D_E の関係

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: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. 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
16. 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
17. 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
18. 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
19. (社)地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説, 2009年11月