

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料	
資料番号	KK67-0106 改08
提出年月日	平成28年9月29日

## 柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

### 液状化影響の検討方針について

平成28年9月

東京電力ホールディングス株式会社

## これまでの経緯および本検討の位置づけ

第 336 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（平成 28 年 3 月 4 日）の原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性において、取水路などを支持する古安田層※に対する支持性能の補足として、以下のようにご説明をしている。

- 支持地盤（古安田層）は、シルト主体の地層であり、液状化が懸念される地盤ではないと判断できる。
- 道路橋示方書・同解説（H14）や建築基礎構造設計指針（2001）では、地表面から 20m 以浅の沖積層を液状化判定が必要な土層としており、古安田層の一部に分布する砂層は、中期更新世の地層かつ深度 20m 以深の非常に密な地盤であることから、その対象とはならない。
- ただし、この古安田層の砂層については、詳細設計段階において基準地震動  $S_s$  に対する液状化に関する詳細な検討を行う。

本検討は、耐震設計・耐津波設計基本方針における液状化の構造物への影響評価の考え方についてとりまとめたものである。また、構造物影響評価の考え方をご説明する上で、詳細設計段階における評価の前提となる液状化試験結果についてあわせてご説明する。なお、液状化に対する構造物への影響評価の見通しについてもご説明する。

※ 安田層下部層の MIS10～MIS7 と MIS6 の境界付近の堆積物については、本資料では『古安田層』と仮称する。

## 目次

1. 液状化評価の基本方針	・・・	3
2. 液状化評価対象層の抽出	・・・	7
3. 液状化試験位置とその代表性		
3. 1 液状化試験位置の選定	・・・	19
3. 2 液状化試験選定箇所の代表性確認	・・・	25
3. 3 追加調査	・・・	50
4. 液状化試験結果		
4. 1 液状化試験方法	・・・	54
4. 2 液状化試験結果の分類に対する基本的考え方	・・・	58
4. 3 試験結果の分類	・・・	63
5. 基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定 (FL 法)	・・・	81
6. 基準地震動 $S_s$ に対する液状化試験の妥当性確認	・・・	87
7. 液状化強度特性の設定	・・・	102
8. 液状化影響の検討方針	・・・	111
9. 設置許可段階における構造物評価の見通し		
9. 1 代表構造物の抽出	・・・	113
9. 2 取水路	・・・	115
9. 3 荒浜側防潮堤	・・・	118
10. 参考文献	・・・	123
11. 参考資料		
11. 1 評価対象構造物の断面図	・・・	124
11. 2 荒浜側の古安田層中の砂層に関する補足	・・・	134
11. 3 液状化に関連する基本物性に関する補足	・・・	139
11. 4 液状化関連の文献整理	・・・	145

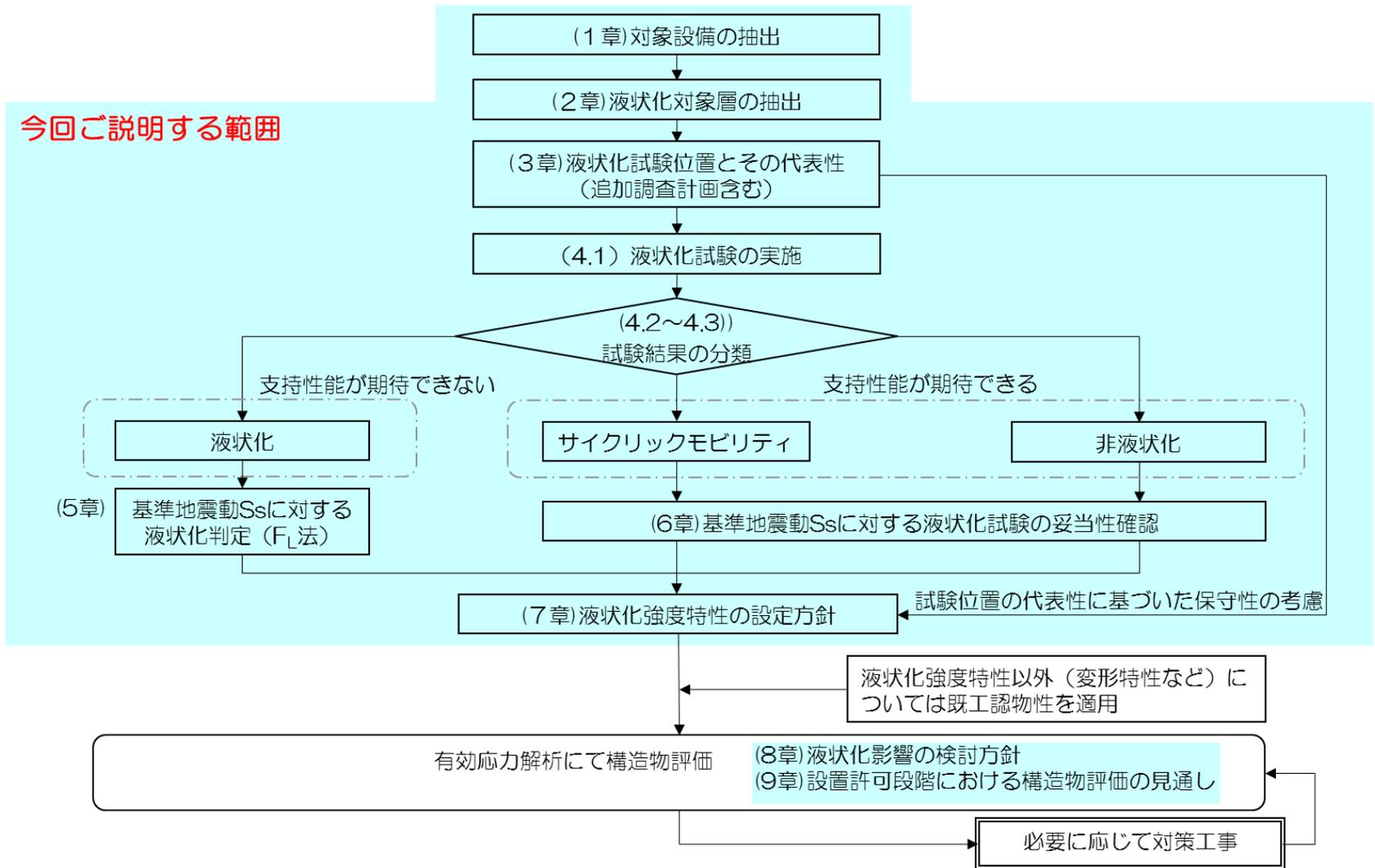
## 1. 液状化評価の基本方針

第 1.1 図に液状化評価の流れ，第 1.1 表に液状化評価の基本方針を示す。

液状化評価については道路橋示方書を基本として，道路橋示方書において液状化評価の対象外となっている洪積層についても液状化試験を実施し，液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施する。液状化試験に基づいて，地震時の地盤の状態を『液状化』、『サイクリックモビリティ』および『非液状化』と判定する。

それぞれの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し，構造物への影響評価を実施する。なお，試験結果が非液状化となる土層も，念のため液状化強度特性を設定して保守的な構造物評価を実施する。設定した液状化強度特性については，試験結果を基本に設定するが，基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。

液状化評価の対象となる施設は，屋外の設計基準対象施設（屋外重要土木構造物，津波防護施設，浸水防止設備）および重大事故等対処施設を対象に抽出した。第 1.2 表に液状化評価の対象設備を示す。なお，波及的影響評価において抽出される屋外下位クラス施設に対する基本方針は、波及的影響評価の中で整理を行う。



第 1.1 図 液状化評価の流れ

第 1.1 表 液状化評価の基本方針

本検討の対象砂層			道路橋示方書における液状化評価の対象	当社評価		
地層名	堆積年代	調査地点名 土層名		液状化試験による判定	液状化強度特性の設定の考え方	液状化強度特性の保守性
埋戻土層	—	A-1 埋戻土層	○ 対象	液状化	試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。	試験結果を基本として、基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。
新期砂層 ・沖積層	完新世 (沖積層)	A-3 新期砂層・沖積層		サイクリック モビリティ		
古安田層 (古安田層 中の砂層が 対象)	更新世 (洪積層)	新しい	× 対象外	非液状化	※	
					A-1 洪積砂層 I 洪積砂層 II	
		古い		A-2 洪積砂層 II	0-1 洪積砂質土層 I 洪積砂質土層 II	非液状化であると考えられるが、保守的な構造物評価を実施するため、液状化強度特性を設定する。

※ A-2 地点の洪積砂層 I については非液状化であると考えられるが、A-1 地点の洪積砂層 I・II と同時代に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

第 1.2 表 液状化評価の対象設備

設備分類		設備名称	構造概要	支持層
設計基準対象施設	屋外重要土木構造物	スクリーン室	鉄筋コンクリート構造	古安田層
		取水路	鉄筋コンクリート構造	古安田層
		補機冷却用海水取水路 <sup>※1</sup>	鉄筋コンクリート構造	西山層
		海水貯留堰 <sup>※2</sup>	鋼管矢板構造	古安田層, 西山層
		軽油タンク基礎	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
		燃料移送系配管ダクト	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
	津波防護施設	荒浜側防潮堤	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
		海水貯留堰 <sup>※2</sup>	鋼管矢板構造	古安田層, 西山層
	浸水防止設備	止水蓋, 止水壁等	鉄筋コンクリート構造, 鋼構造	古安田層・地盤改良土
	重大事故等対処施設	常設代替交流電源設備基礎	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
格納容器圧力逃がし装置基礎		鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層	

※1：マンメイドロックを介して西山層に直接支持，※2：海水貯留堰は屋外重要土木構造物と津波防護施設の兼用。海水貯留堰の周辺には液状化評価対象層は存在しないことから，液状化評価対象設備からは除外する。

## 2. 液状化評価対象層の抽出

第 2.1 表に敷地の地質層序表を示す。敷地の地質は、下位から新第三系の寺泊層及び椎谷層、新第三系鮮新統～第四系下部更新統の西山層、下部更新統の灰爪層、それらを不整合で覆う中部更新統の古安田層、上部更新統の大湊砂層及び番神砂層、完新統の新时期砂層・沖積層からなる。

土木構造物の設置地盤に分布する砂層としては、古安田層中の砂層、新时期砂層・沖積層、埋戻土層がある。

古安田層は、敷地のほぼ全域にわたって分布し、主に粘土～シルトからなり、砂、砂礫等を挟在する。また、本層は、MIS10～MIS 7 と MIS 6 との境界付近の海進、海退に伴う堆積物を含むものと推定され、中部更新統と判断される。

敷地の古安田層は全域に広く分布しており、古安田層中の砂層は、主に Ata-Th テフラを含むシルト主体の MIS7 の地層に挟在している。また、MIS7 の堆積物の基底には砂礫層が分布している。第 2.1 図に古安田層上限面図およびボーリング柱状図を示す。

新时期砂層・沖積層は、敷地のほぼ全域にわたって下位層を覆って分布している。下位層上限面に刻まれた谷を埋めるように堆積したため、場所により層厚が大きく変化している。本層は、主に未固結の淘汰の良い細粒～中粒砂からなる。現在の海浜、砂丘を形成しており、下位層を不整合に覆う。

液状化評価対象層については、道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（(社)日本道路協会、H24.3）（以下、「道路橋示方書」という）に基づいて対象層を抽出した。第 2.1 図に液状化評価対象層の抽出フローを示す。

道路橋示方書では、沖積層を液状化評価対象層としているが、本評価では洪積層（古安田層）についても、同様に抽出対象とした。また、地表面から 20m 以深は対象外となっているが、本評価では地表から 20m 以深の砂層も抽出対象とした。

大湊側の土木構造物のうち、スクリーン室、取水路、軽油タンク基礎、燃料移送系配管ダクト、常設代替交流電源設備基礎の地盤には砂層が分布している。これらの施設に着目して地質断面図を作成し、砂層の分布状況について第 2.3 図に整理した。

6 号炉および 7 号炉の取水路及び常設代替交流電源設備基礎の周辺地盤については、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが同程度の標高で広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、MIS7 の同時期に堆積した地層である。

常設代替交流電源設備及び 7 号炉軽油タンク基礎の周辺地盤には、細粒～中粒砂からなる新时期砂層・沖積層が分布している。

6 号炉軽油タンク基礎等の周辺地盤には、古安田層中の砂層が一部分布している。この

砂層は、取水路付近の砂層からは西山層の高まり等により連続していないものの、古安田層中に挟在する砂層が同様に分布していることから、取水路付近の砂層と同様に MIS7 の同時期に堆積した地層である。

6 号炉および 7 号炉の取水路の地盤については、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが同程度の標高で広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、MIS7 の同時期に堆積した地層である。

以上より、大湊側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

荒浜側の土木構造物のうち、荒浜側防潮堤、浸水防止設備（止水蓋、止水壁等）の設置地盤には砂層が分布している。いずれの施設もタービン建屋より海側に位置することから、荒浜側防潮堤の縦断方向の地質断面図を作成し、砂層の分布状況について第 2.4 図に整理した。

3 号炉および 4 号炉海側の地盤には、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、大湊側と同様に MIS7 の同時期に堆積した地層である。

4 号炉海側には、古安田層の上位に新期砂層・沖積層が連続して分布している。

1 号炉および 2 号炉海側の地盤には、3 号炉および 4 号炉海側から連続するシルト主体の地層の上位に位置する砂層が概ね 10m 以上の厚さで連続して分布していることから、この砂層は同時期に堆積した砂層である。なお、古安田層の基底に一部分布する砂層は、3 号炉および 4 号炉海側に分布する MIS7 の砂層と同じ地層と想定される。

1 号炉海側の防潮堤端部には、4 号炉海側と同様に新期砂層・沖積層が分布している。

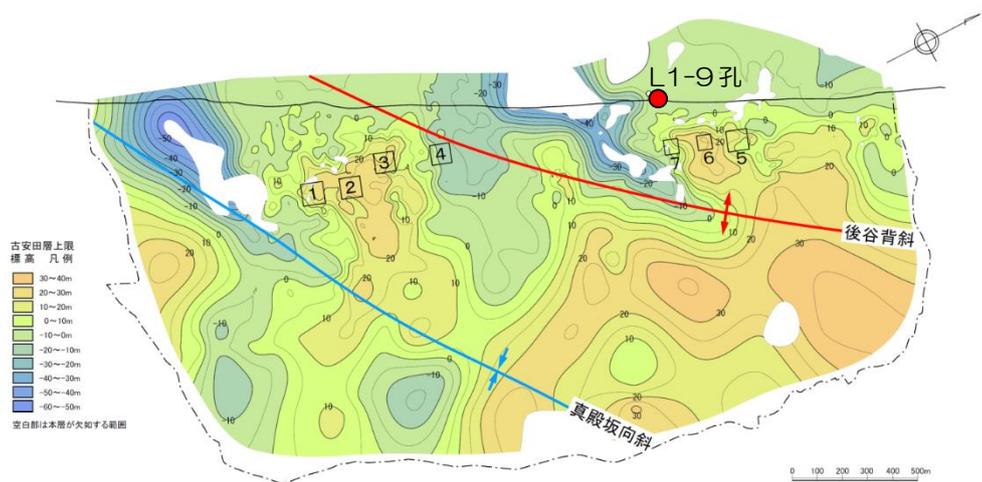
以上より、荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に 3 号炉および 4 号炉海側に分布する古安田層中の砂層、主に 1 号炉および 2 号炉海側に分布する古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

第 2.1 表 敷地の地質層序表

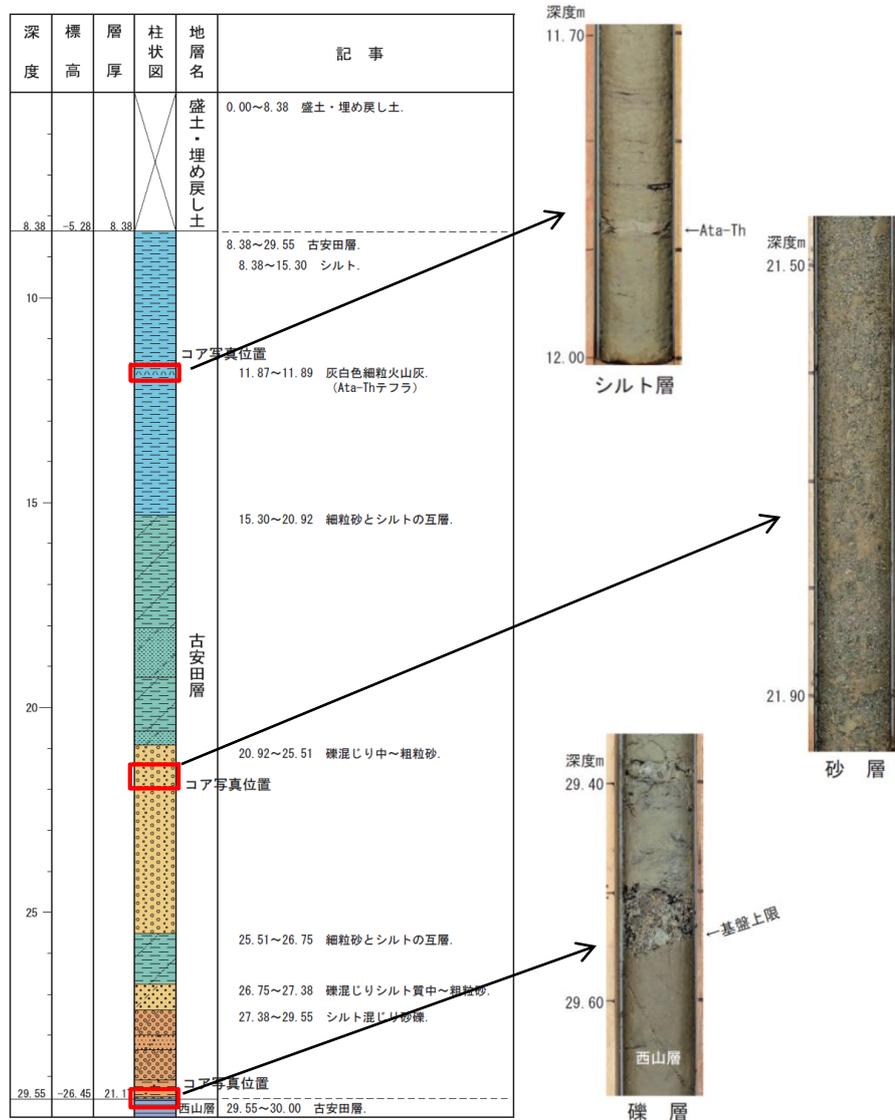
時代	地層名	主な層相・岩質	テフラ・放射年代	
第四紀	完新世	新期砂層・沖積層	上部は灰白色の細～中粒砂 下部は茶褐色の細～中粒砂，腐植物を含む ← 腐植 (6, 150±170年)	
	後期	番神砂層	灰白色～赤褐色の中～粗粒砂	
		大湊砂層	褐色～黄褐色の中～粗粒砂， シルトの薄層を含む ← NG(約13万年前)	
	中期	古安田層	A <sub>4</sub> 部層	最上部は砂 粘土～シルト，砂を多く挟む ← γ-1(約20万年前)
			A <sub>3</sub> 部層	粘土～シルト 縞状粘土，有機物，砂を伴う，貝化石を含む
			A <sub>2</sub> 部層	粘土～シルト 砂，厚い砂礫，有機物を挟む ← Ata-Th(約24万年前)
			A <sub>1</sub> 部層	粘土～シルト 砂，砂礫を挟む ← Kkt(約33-34万年前)
	前期	西山層	灰爪層	凝灰質泥岩，凝灰質砂岩，凝灰岩 ← Iz (約1.5Ma)
			N <sub>3</sub> 部層	砂質泥岩 砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む 貝化石を含む
			N <sub>2</sub> 部層	シルト質泥岩 縞状泥岩，凝灰岩，ノジュールを多く挟む ← Fup (約2.2Ma) ← Tsp (約2.3Ma) ← Az (約2.4Ma)
	鮮新世	後期	N <sub>1</sub> 部層	シルト質～粘土質泥岩 砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む 珪質海綿化石を含む ← Nt-17 (340±20万年) ← Nt-7 (350±20万年)
			椎谷層	砂岩，砂岩・泥岩互層，細礫岩等を挟む
		中新世	中期	寺泊層

~~~~ 不整合

※ MIS : 海洋酸素同位体ステージ (Marine oxygen Isotope Stage)



(a)古安田層上限面図



(b)古安田層ボーリング柱状図 (L1-9 孔)

第 2.1 図 古安田層中の砂層について

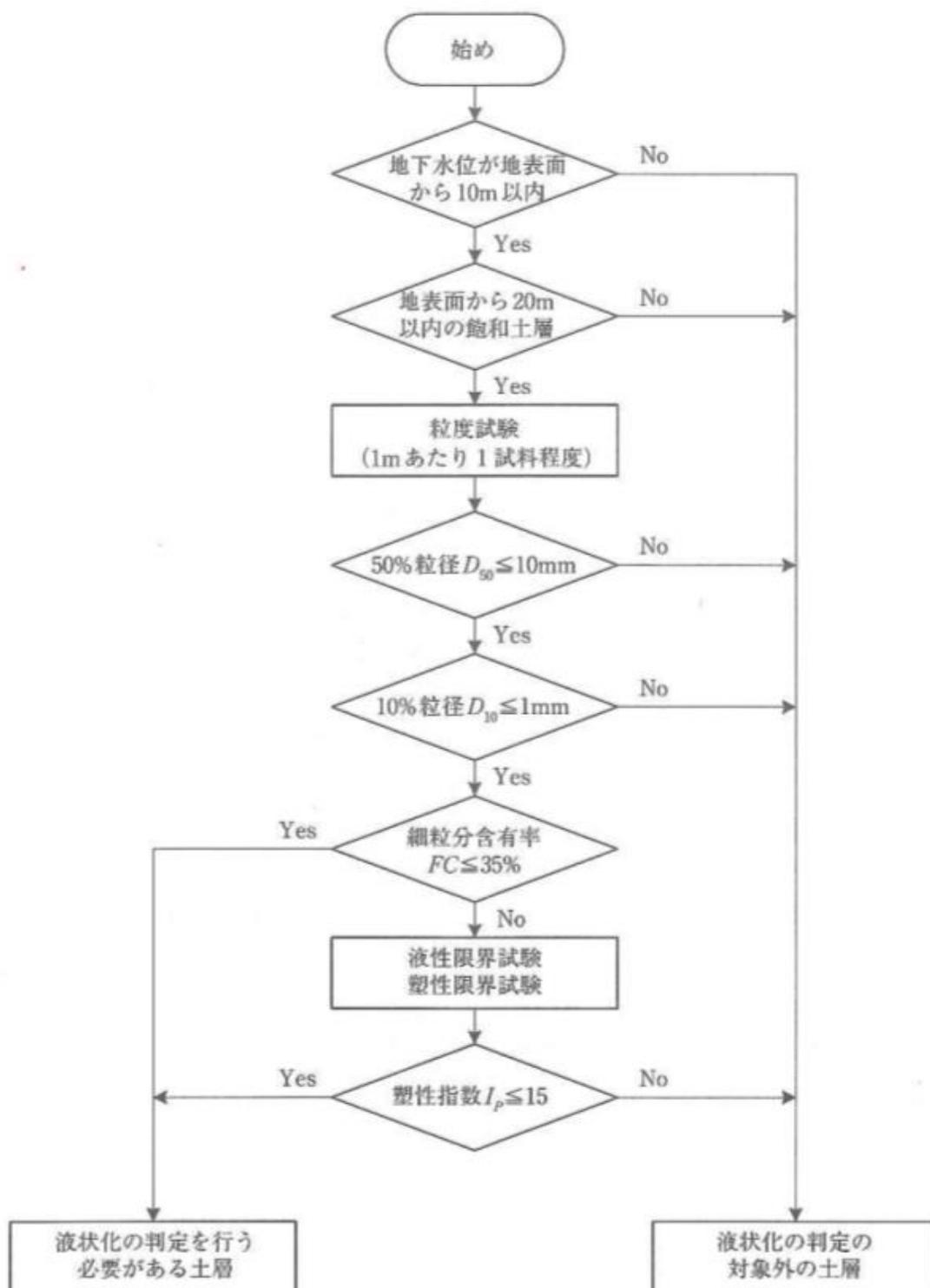
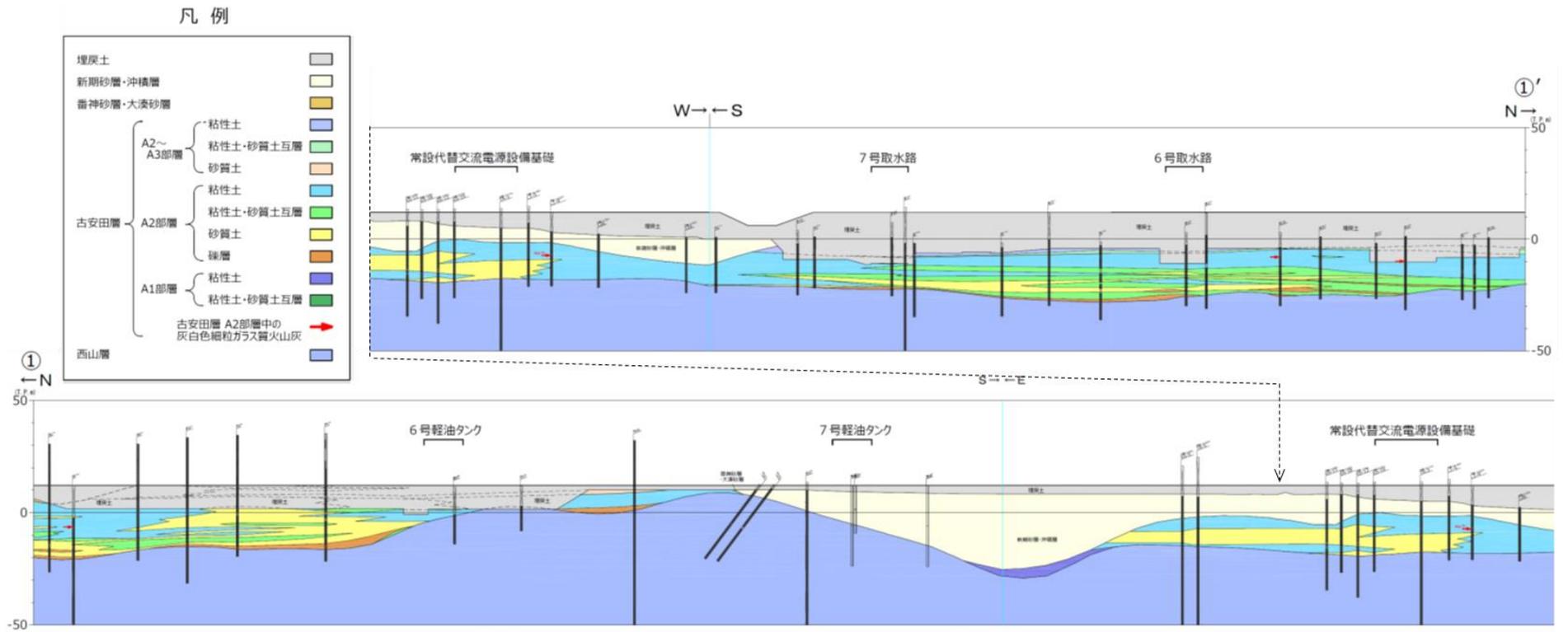


図-解8.2.1 液状化の判定を行う必要がある土層の評価の手順

第 2.2 図 液状化評価の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， H24.3 ）



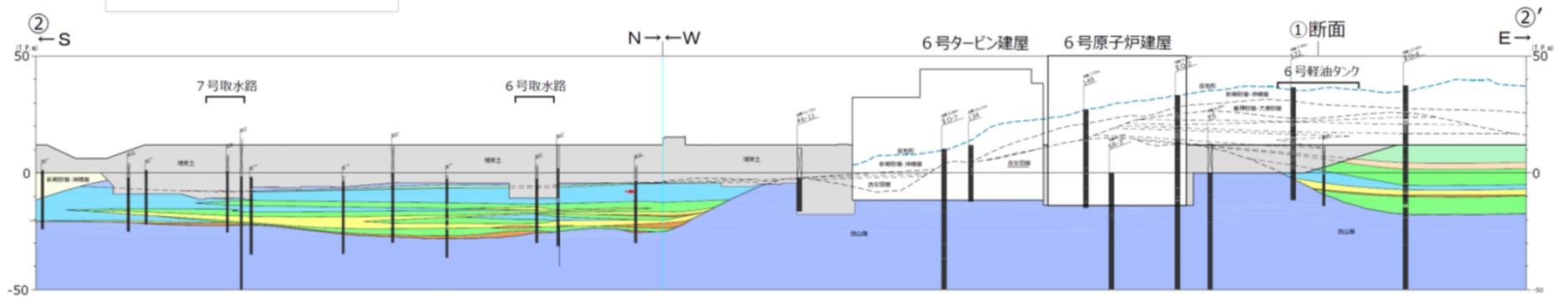
第 2.3 図 大湊側の砂層分布  
(a) 大湊側 全体平面図



第 2.3 図 大湊側の砂層分布  
(b) 地質断面図 ① - ①' 断面

凡例

|                             |           |   |
|-----------------------------|-----------|---|
| 埋炭土                         | ■         |   |
| 新期砂層・沖積層                    | ■         |   |
| 番神砂層・大湊砂層                   | ■         |   |
| A2～<br>A3部層                 | 粘性土       | ■ |
|                             | 粘性土・砂質土互層 | ■ |
|                             | 砂質土       | ■ |
| 古安田層                        | 粘性土       | ■ |
|                             | 粘性土・砂質土互層 | ■ |
|                             | 砂質土       | ■ |
|                             | 礫層        | ■ |
| A1部層                        | 粘性土       | ■ |
|                             | 粘性土・砂質土互層 | ■ |
| 古安田層 A2部層中の<br>灰白色細粒ガラス質火山灰 |           | → |
| 西山層                         | ■         |   |



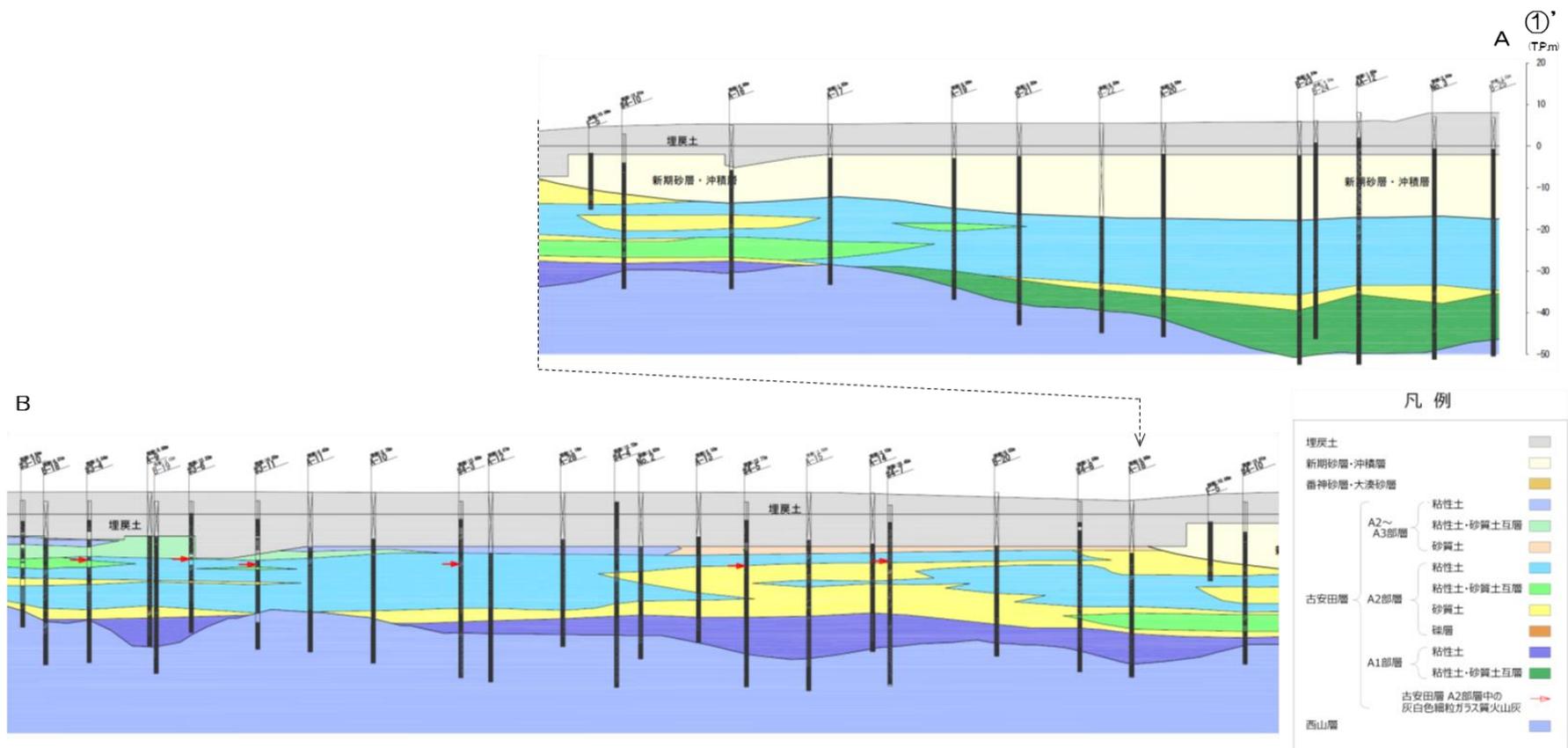
第 2.3 図 大湊側の砂層分布  
(c) 地質断面図 ② - ②' 断面



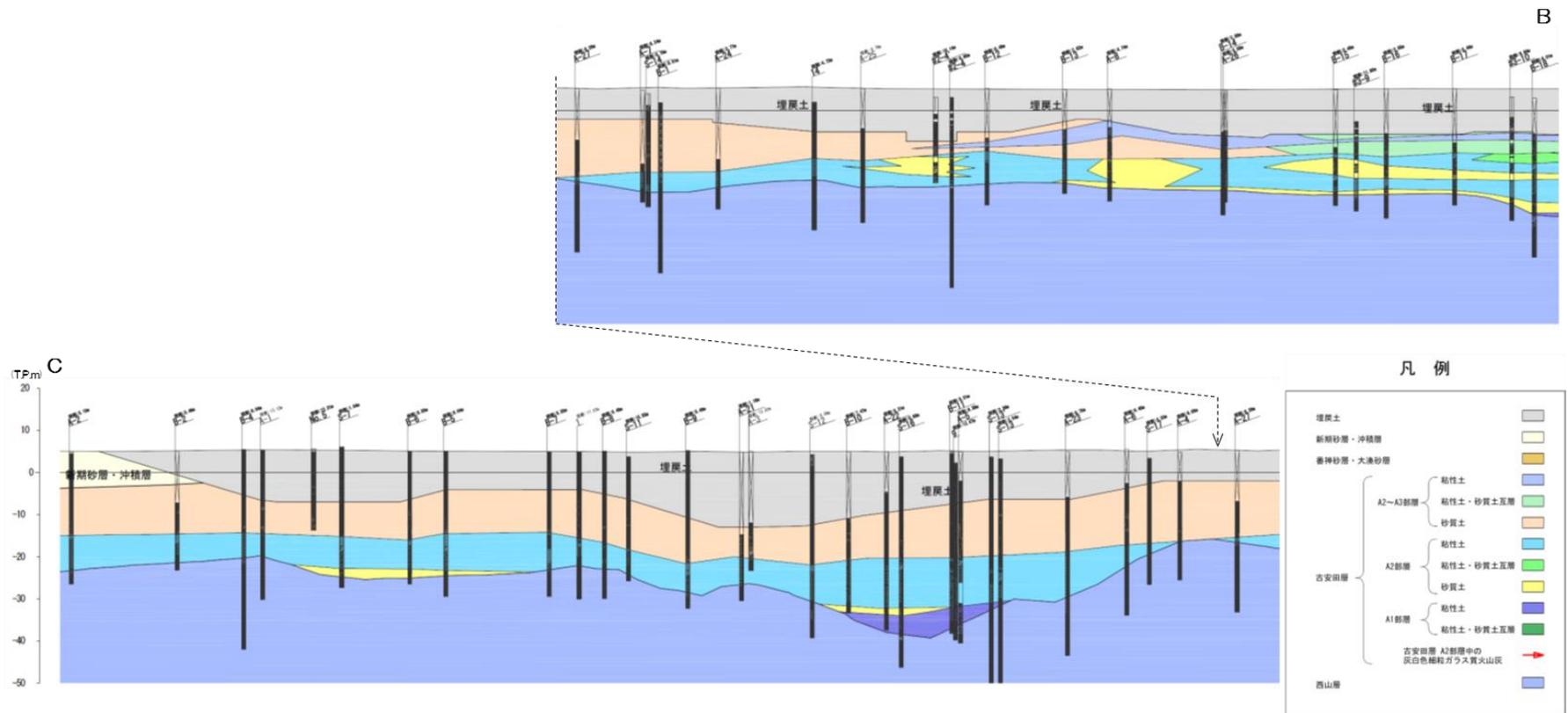


第 2.4 図 荒浜側の砂層分布

(a) 荒浜側 全体平面図



第 2.4 図 荒浜側の砂層分布  
(b) ① - ①' (A~B) 断面



第 2.4 図 荒浜側の砂層分布  
(c) ① - ①' (B~C) 断面

### 3. 液状化試験位置とその代表性

#### 3.1 液状化試験位置の選定

大湊側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

液状化試験については、砂層の分布状況から比較的砂層が厚く堆積している6号炉取水路付近の地点を選定し（O-1）、試料を採取して液状化試験を実施した。

常設代替交流電源設備基礎や7号炉軽油タンク基礎等の周辺地盤に分布している新期砂層・沖積層については、敷地の全域に分布していることから4号炉で確認している新期砂層・沖積層と連続する地層であると想定される。

第3.1.1図に大湊側の試料採取地点位置図（O-1）を示す。

荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に3～4号炉海側に分布する古安田層中の砂層、主に1～2号炉海側に分布する古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

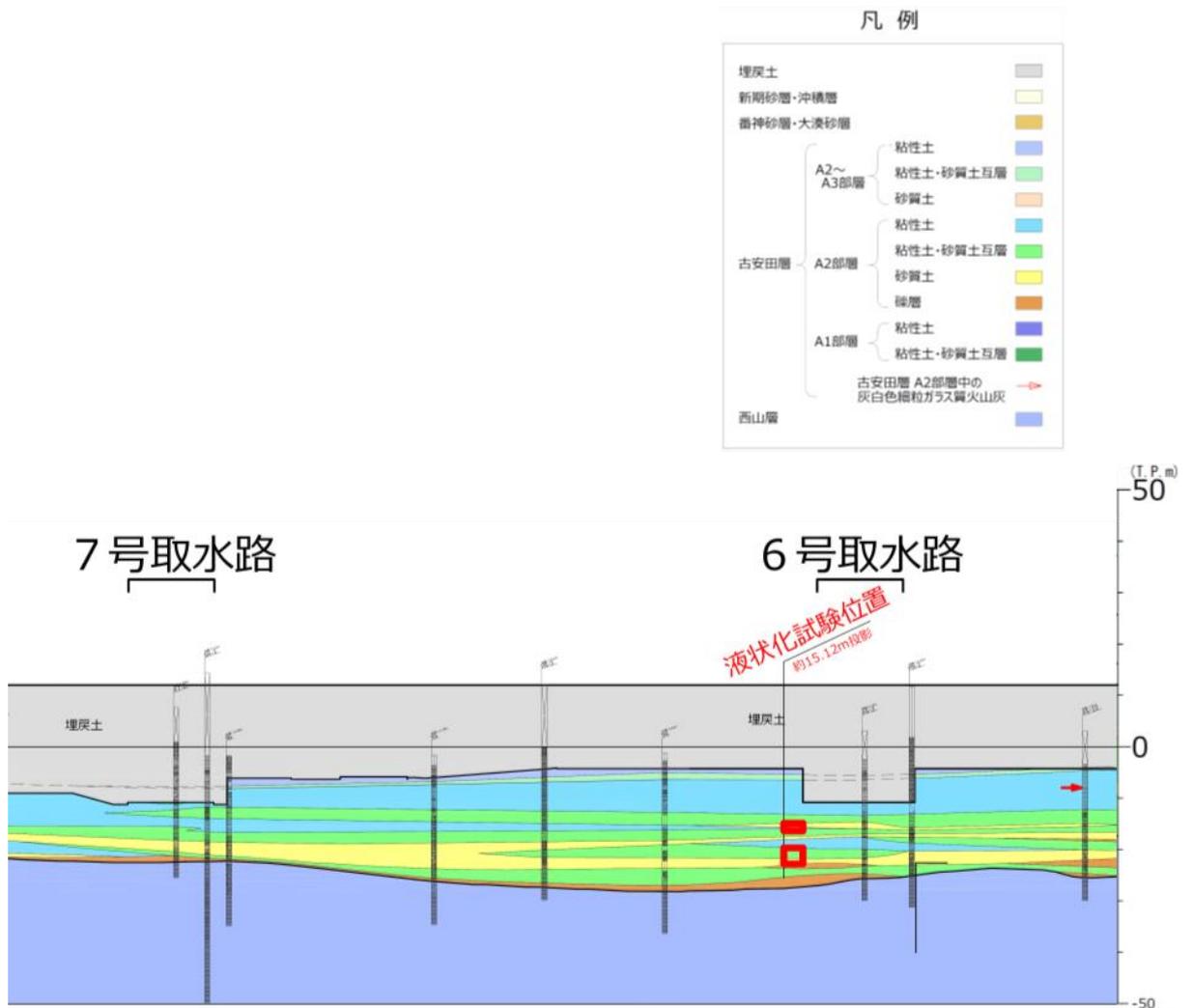
荒浜側については、砂層の分布状況から以下のとおり地点を選定し、試料を採取して液状化試験を実施した。

- 1～2号炉海側の古安田層中の砂層は、3～4号炉海側から連続するシルト主体の地層の上位に位置する砂層が連続して分布していることから、1号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-1）。
- 3～4号炉海側の古安田層中の砂層は、その分布状況から4号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-2）。
- 新期砂層・沖積層は、10m以上の層厚で連続して分布していることから、比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-3）。



(a) 平面図

第 3.1.1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)



(b) 断面図

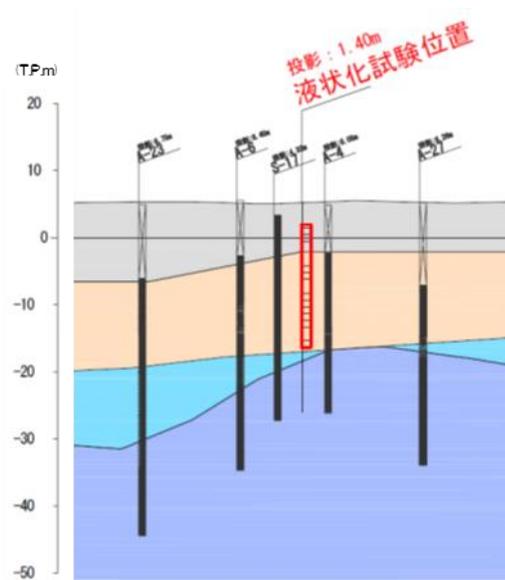
第 3.1.1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)



(a) 平面図

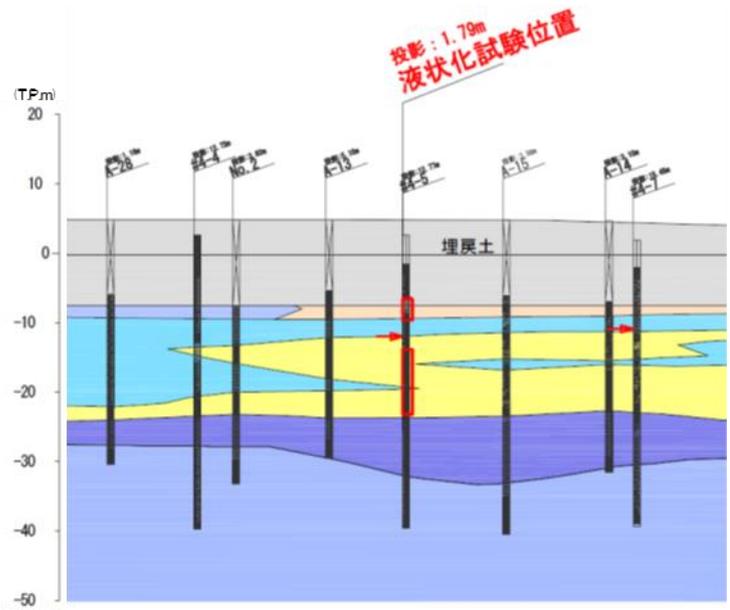
第 3.1.2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)

凡例



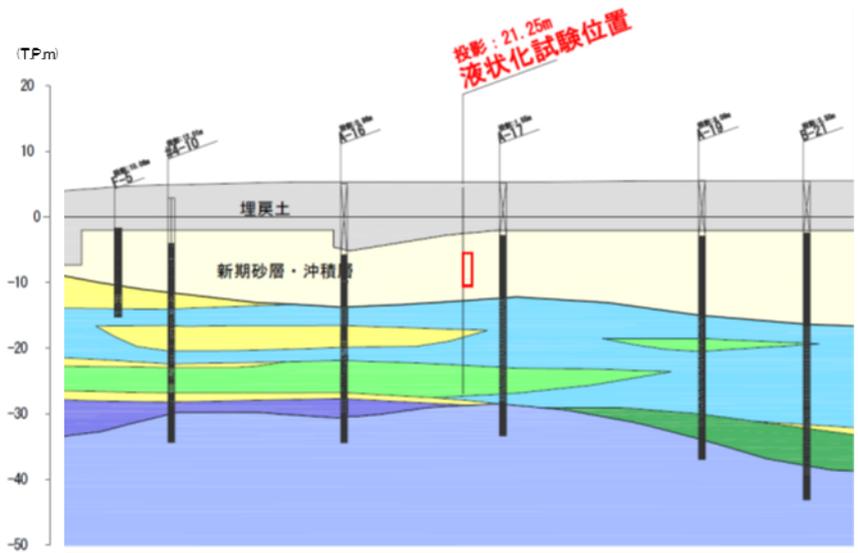
(b) 断面図 (A-1)

第 3.1.2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)



(c) 断面図 (A-2)

第 3.1.2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)



(d) 断面図 (A-3)

第 3.1.2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)

### 3.2 液状化試験選定箇所の代表性確認

液状化試験箇所における基本物性（粒径加積曲線，N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度）について，第3.2.1～4図に示す。

これらの基本物性について，液状化試験選定箇所の代表性確認を目的に，液状化試験箇所と周辺調査箇所の比較，検討を行った。比較する指標としては，N値，細粒分含有率を選定し，参考指標として粒径加積曲線及び密度（相対密度，乾燥密度）を選定した。第3.2.1表に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を示す。

N値は，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り，また，有効応力解析（FLIP）の簡易パラメータ設定法にN値がパラメータとして用いられており，液状化強度比との相関が最も高いと考えられることから，指標として選定した。

細粒分含有率は，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，液状化強度比との相関が高いと考えられることから，指標として選定した。

粒径加積曲線や密度（相対密度，乾燥密度）は，基本的な土の物性値であることから，参考指標として選定した。

各基準における設計で設定する地盤物性値のばらつきに対する考え方は，「地盤工学会基準 JGS4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（2006）」や「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）」，「道路橋示方書・同解説（2012）」によると，平均値を原則とし，ばらつきを考慮する場合は変動係数などに応じて設定するという考え方が示されている。

液状化試験箇所と周辺調査箇所のN値等の比較に際しては，各基準における地盤物性値のばらつきに対する考え方を参考に，「平均値」及び平均値から標準偏差 $\sigma$ を減じた「平均値- $1\sigma$ （以下，「 $-1\sigma$ 値」と称す）」について整理した。

#### 【地盤工学会基準 JGS4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（2006）】

- 設計に用いる「特性値」の決定にあたっては，過去の経験にもとづき，地盤パラメータのばらつきや単純化したモデルの適用性に十分留意しなければならない。
- この特性値は，原則として導出値の平均値（期待値）である。この平均値は単なる機械的な平均値ではなく，統計的な平均値の推定誤差を勘案したものでなければならない。
- 特性値を示すにあたっては，地盤の特性を記述するために，特性値に加えて，導出値のばらつきの指標（たとえば標準誤差や変動係数）を含めることが望ましい。

#### 【港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）】

- 性能照査に用いる地盤定数の設計用値は、原則として地盤工学会基準 JGS4001に基づき、推定する。
- 地盤定数の代表値である特性値は、データ数が十分かつ導出値のばらつきが小さい場合には、原則として導出値の平均値をもって算定することができる。ただし、データ数が不足している場合（10個未満）及び導出値のばらつきが大きい場合には、導出値の平均値を補正した上で、特性値を設定する必要がある。
- 特性値は、導出値のばらつきに関する補正係数  $b_1$  を標準偏差として定義される変動係数に応じて設定することにする。

#### 【道路橋示方書・同解説（2012）】

- 地盤は複雑でばらつきの大きい材料であるが、設計に用いる地盤定数は、基礎に作用する荷重に対して、その条件下で最も高い確率で起こり得る基礎の挙動を推定するものである。したがって、地盤定数は、計算式の精度や特性を顧慮したうえで、当該地盤の平均的な値と考えられるものを求めることが原則である。
- 自然地盤から得られる計測データは多様で、しかもばらつきの大きいものである。データのばらつきだけでなく、データ数を合理的に評価して設計に用いる地盤定数を定める必要がある。

各液状化試験箇所とその対象地層の周辺調査箇所における基本物性を整理した。第3.2.5図に液状化試験箇所と周辺調査箇所の位置図、第3.2.6～12図に各土層の基本物性の比較結果を示す。なお、各種試験は、JISに基づき実施した。

A-1地点の洪積砂層Ⅰは、周辺調査箇所と比べて、N値が同程度であり細粒分含有率が小さいこと、A-1の洪積砂層Ⅱは、細粒分含有率が若干大きいもののN値が小さいことから、代表性を有していると評価した。ただし、当該地層は層厚が厚く分布範囲が広いことを踏まえ、データ拡充を目的とした追加調査を実施する。

A-2地点の洪積砂層Ⅰは、周辺調査箇所と比べて、N値及び細粒分含有率の $-1\sigma$ 値が大きいものの、液状化強度との相関が最も高いN値の平均値は小さいことから、代表性を有していると評価した。ただし、A-2地点の洪積砂層Ⅰは、A-1地点の洪積砂層Ⅰ、Ⅱと同時代に堆積した地層であること、N値がA-1地点の洪積砂層Ⅱと同程度であることを踏まえ、後述する液状化試験結果から非液状化層と評価しているものの、物性設定においては保守的にサイクリックモビリティを示すA-1地点の洪積砂層Ⅱの試験結果を用いる方針とする。

A-2地点の洪積砂層Ⅱは、周辺調査箇所と比べて、N値及び細粒分含有率が同程度もしくは小さいことから、代表性を有していると評価した。なお、後述する液状化試験結果から非液状化層と評価しているA-2地点の洪積砂層Ⅱは、主にサイクリックモビ

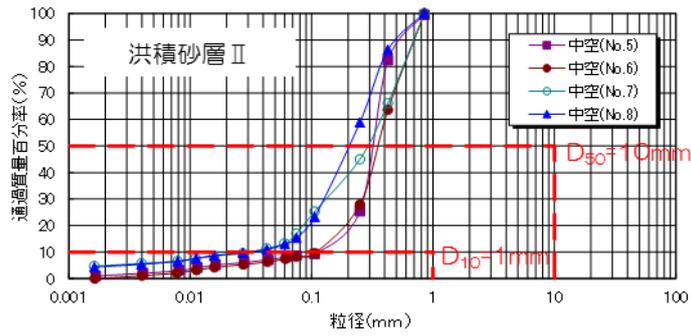
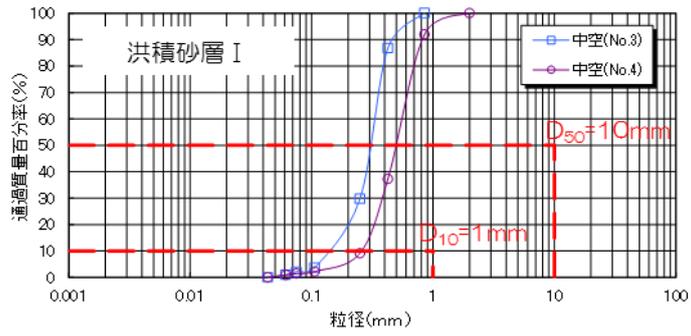
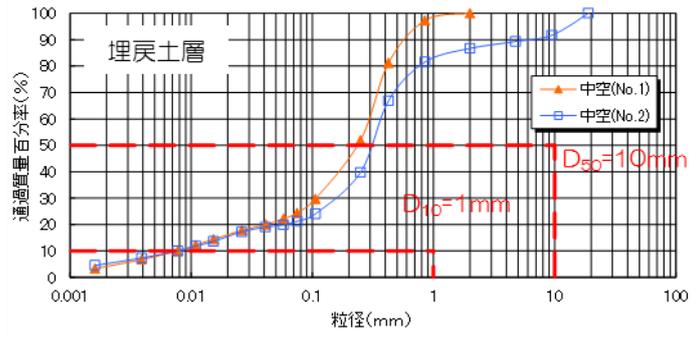
リティを示すA-1地点の洪積砂層Ⅰ、Ⅱ及びA-2地点の洪積砂層Ⅰの下位に分布する砂層であり、より古い時代に堆積した砂層である。

O-1地点の洪積砂質土層Ⅰ、Ⅱは、周辺調査箇所と比べて、細粒分含有率の大きい試料が1試料あることで平均値が若干大きいもののN値が同程度であることから、代表性を有していると評価した。ただし、液状化試験箇所の粒径加積曲線が周辺調査箇所よりばらつきが大きいこと、6、7号炉の申請であることも踏まえ、N値のデータが少ない7号取水路周辺でデータ拡充を目的とした追加調査を実施する。

A-3地点の新期砂層・沖積層は、荒浜側の周辺調査箇所と比べて、N値及び細粒分含有率がいずれも小さく下限付近であることから、試験は保守的な箇所で実施していると評価した。

A-3地点の新期砂層・沖積層は、大湊側の周辺調査箇所と比べて、細粒分含有率が小さいものの、N値が大きいことから、大湊側の新期砂層・沖積層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。

A-1地点の埋戻土層は、N値のみの比較ではあるものの、液状化強度との相関が最も高いN値が周辺調査箇所と比べて小さく下限付近であることから、試験は保守的な箇所で実施していると評価した。

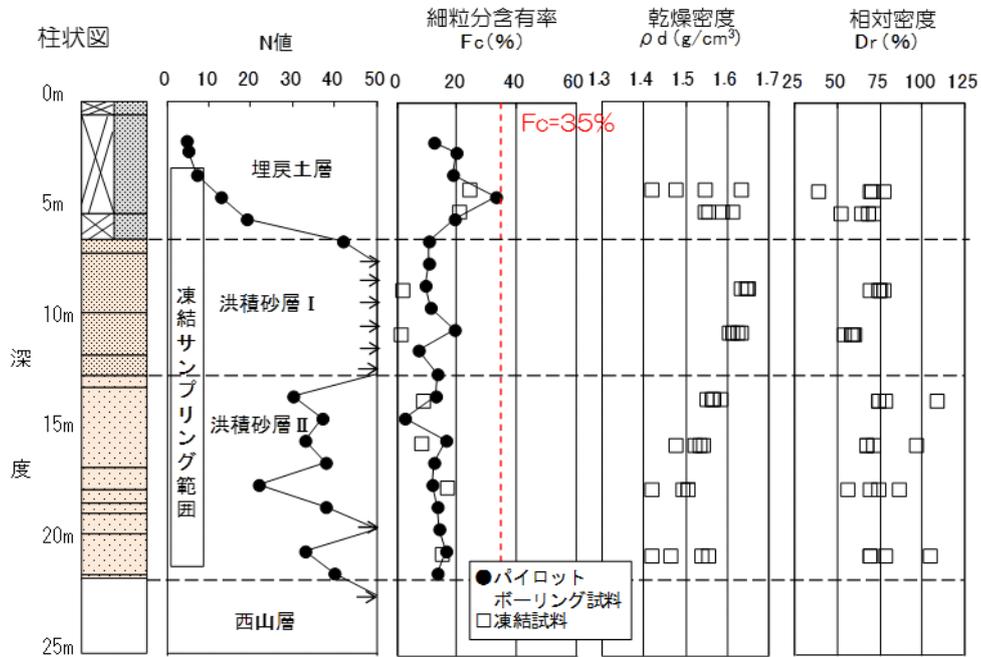


(a) 粒径加積曲線

第 3.2.1 図 液状化試験箇所の基本物性 (A-1)

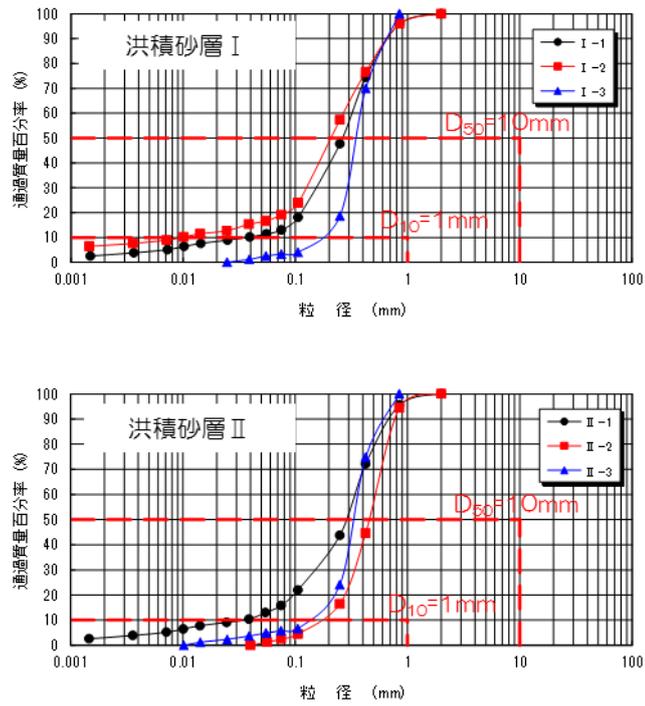
細粒分含有率：粒度0.075mm未満の土粒子の質量百分率

相対密度： $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$ ， $e_{\max}$ ：最大間隙比， $e_{\min}$ ：最小間隙比，  
 $e$ ：間隙比（間隙の体積÷土粒子の体積）

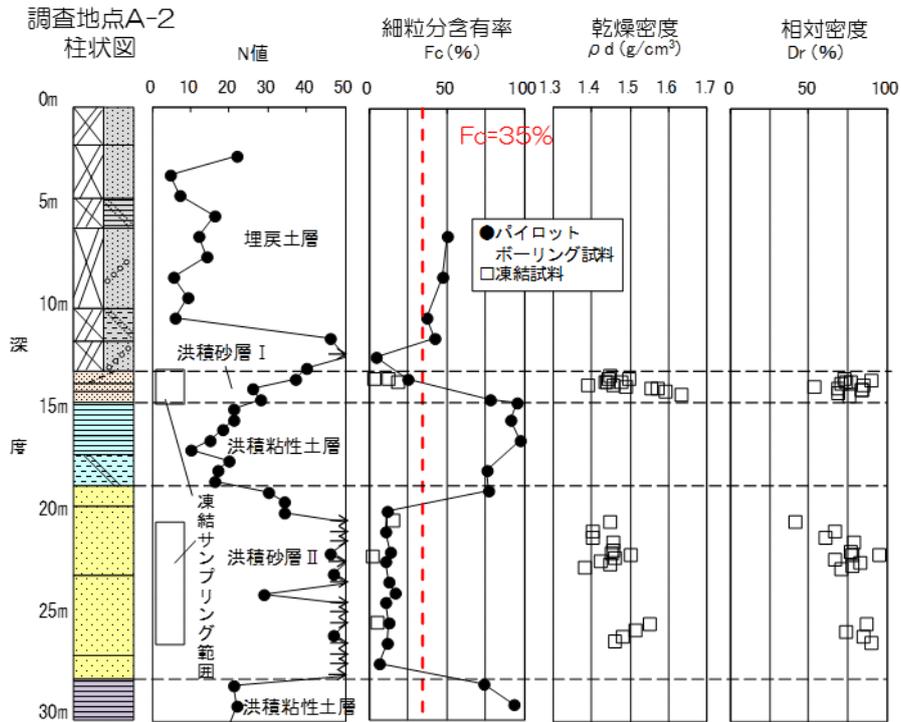


※古安田層中の砂層は、N値50以上の砂層（洪積砂層 I）とN値50以下の地層（洪積砂層 II）に区分して試験を実施した。

(b) 基本物性（N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度）の深度分布  
 第 3.2.1 図 液状化試験箇所の基本物性（A-1）

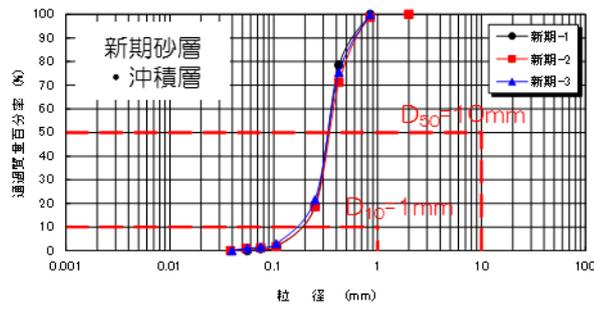


(a) 粒径加積曲線

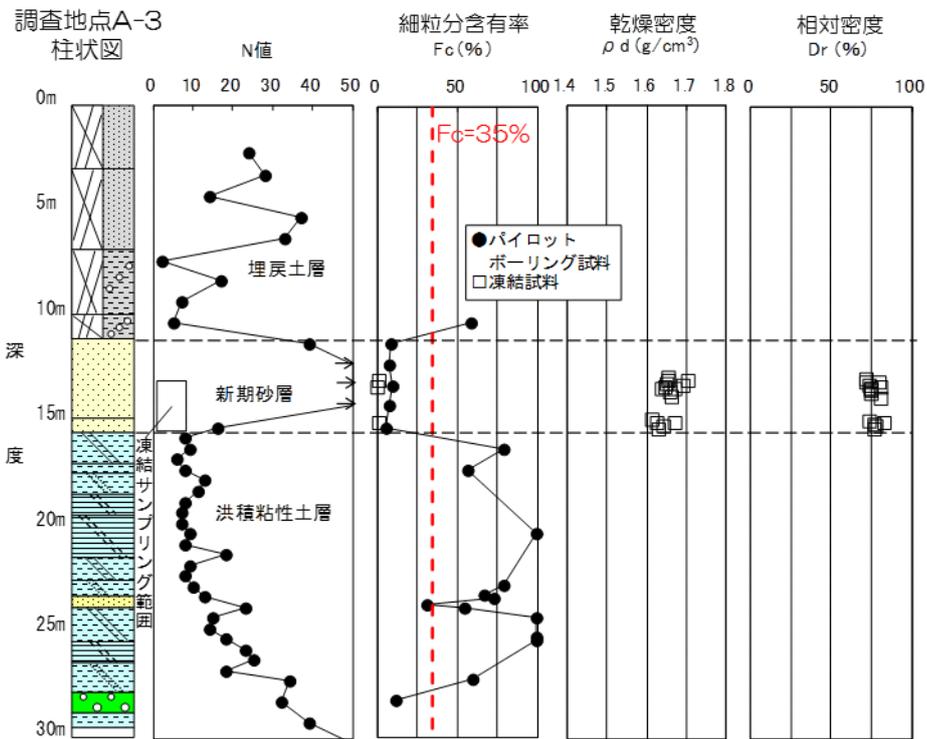


※古安田層中の砂層は、上から洪積砂層 I と洪積砂層 II に区分して試験を実施した。

(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布  
第 3.2.2 図 液状化試験箇所の基本物性 (A-2)

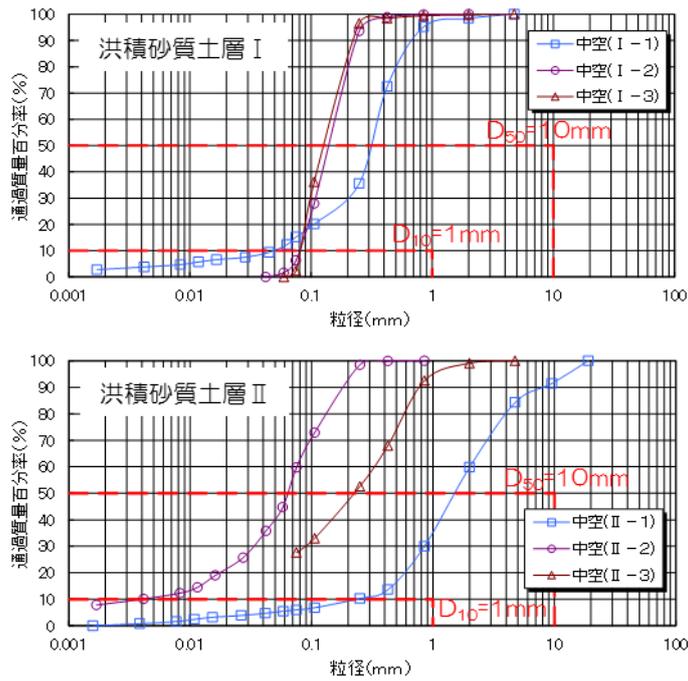


(a) 粒径加積曲線

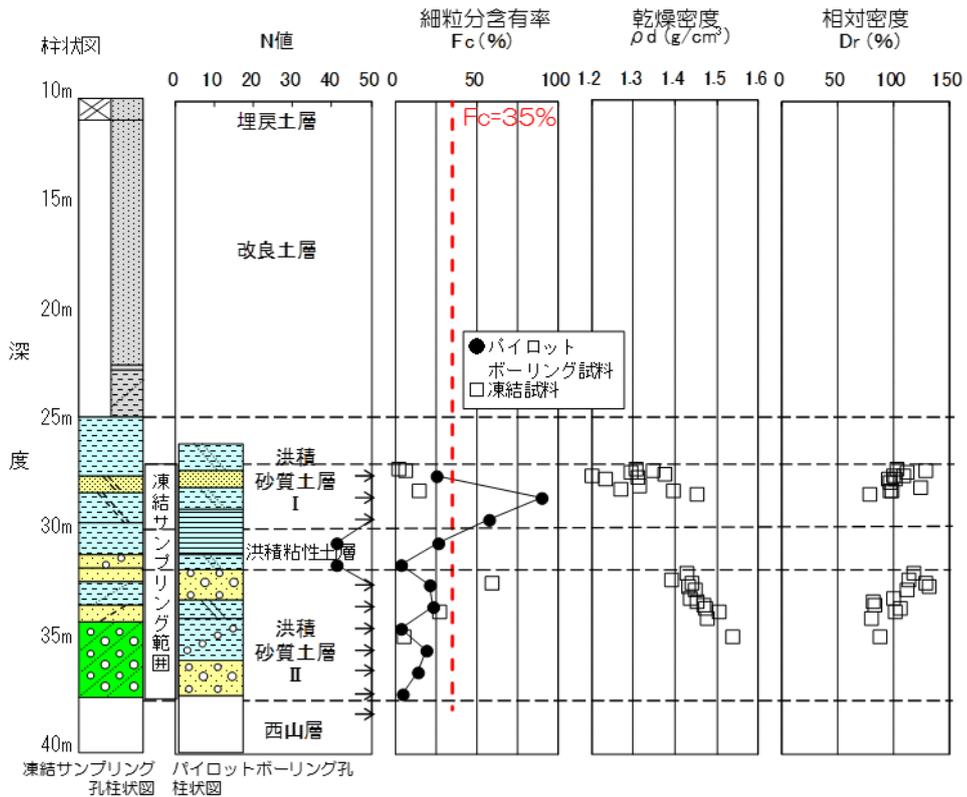


(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布

第 3.2.3 図 液状化試験箇所の基本物性 (A-3)



(a) 粒径加積曲線



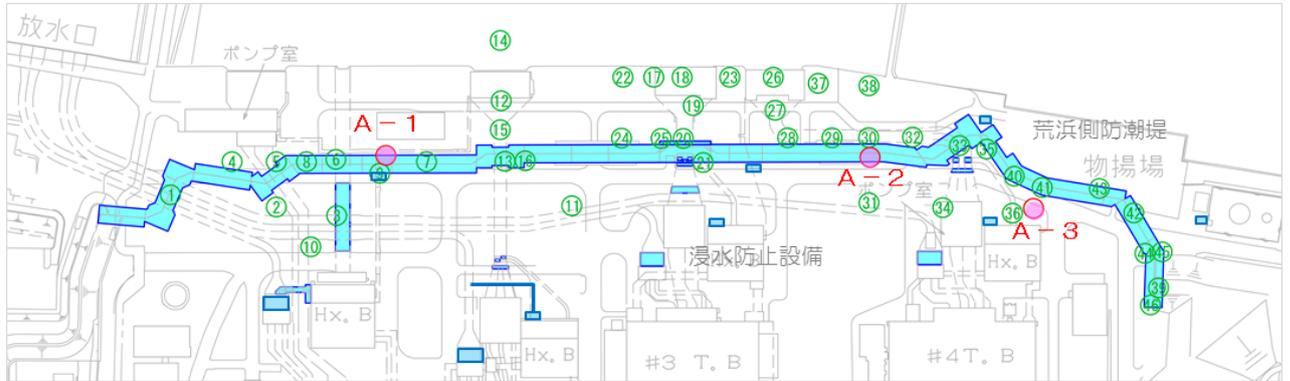
※古安田層中の砂層は同時代の地層であるが、上位を洪積砂質土層 I、下位を洪積砂質土層 II と区分し、それぞれの拘束圧に応じて液状化試験を実施した。

(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布  
第 3.2.4 図 液状化試験箇所の基本物性 (O-1)

第 3.2.1 表 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                                                                                                                                                             | 液状化強度比 $R_L$ の算定に用いる主物性                | 液状化強度比の補正に用いる物性                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <p>道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, 2012</p> <p>(下水道施設の耐震対策指針と解説, 日本下水道協会, 2006)</p> <p>(河川砂防技術基準(案)同解説設計編, 日本河川協会編, 1997)</p> <p>(高圧ガス設備等耐震設計指針, 高圧ガス保安協会, 2000)</p> | <p><b>N値</b><br/>(有効上載圧を考慮した補正を行う)</p> | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                              |
| <p>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</p> <p>(部分改訂, 2012)</p>                                                                                                 |                                        | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                              |
| <p>建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, 2001</p> <p>(水道施設耐震工法指針・同解説, 日本水道協会, 1997)</p>                                                                                            |                                        | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                              |
| <p>鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, (財)鉄道総合技術研究所, 2012</p>                                                                                                                    |                                        | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math><br/>平均粒径 <math>D_{50}</math></p> |

- : 液状化試験 試料採取位置
- : 標準貫入試験位置または物理特性試料採取位置  
(○内数値は位置番号, 荒浜側①~④⑥, 大湊側④⑨~⑥②)



(a) 荒浜側



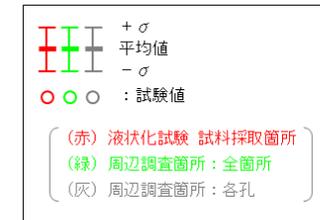
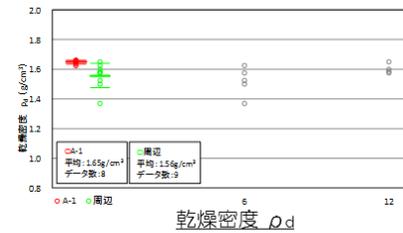
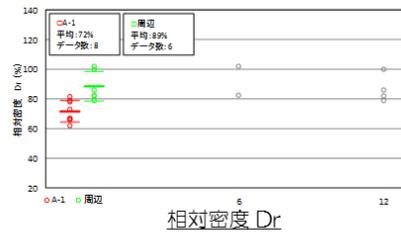
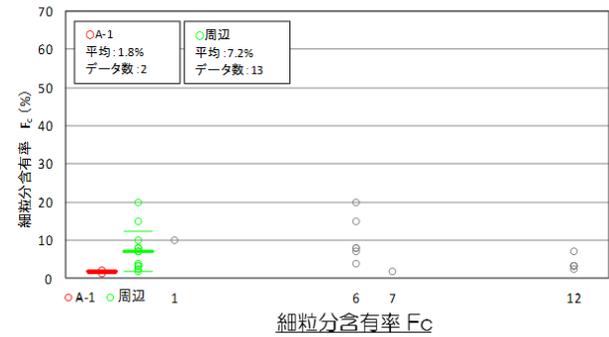
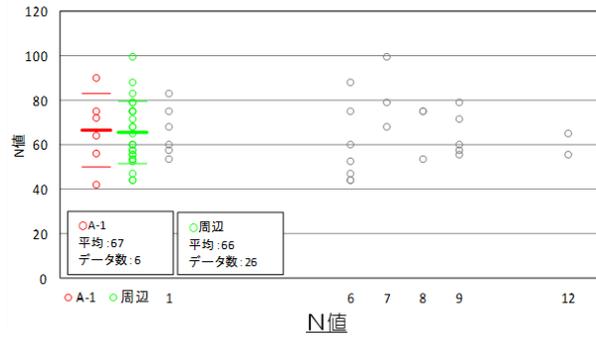
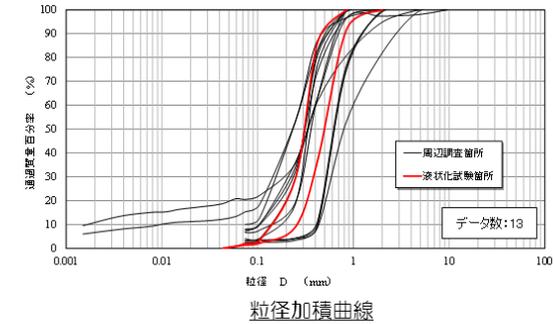
(b) 大湊側

第 3.2.5 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の位置図



- **N値**：液状化試験箇所と周辺調査箇所の平均値及び-1σ値は同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。

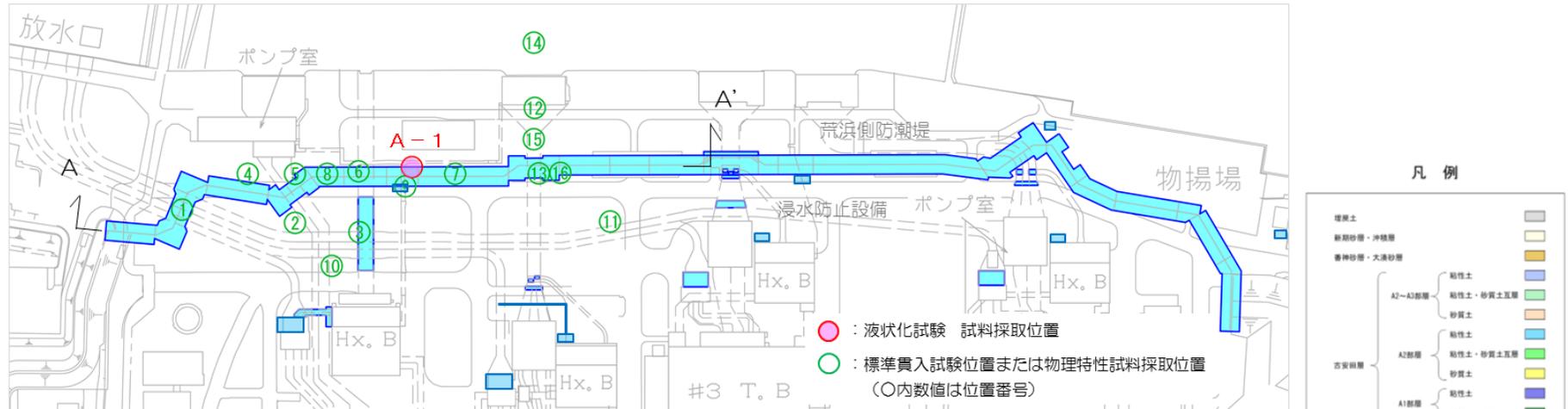
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より大きい。



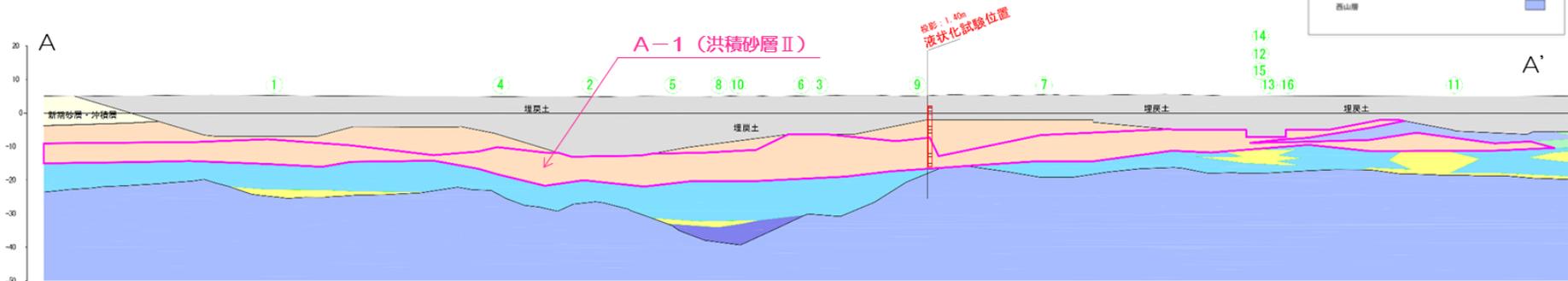
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1 (洪積砂層 I)

(b) 基本物性比較

第 3.2.6 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-1 地点の洪積砂層 I)



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-1（洪積砂層Ⅱ）



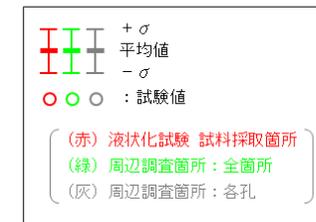
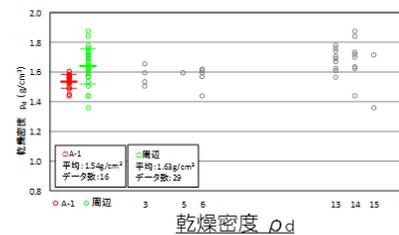
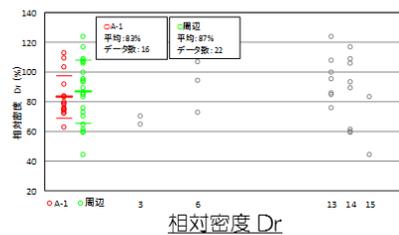
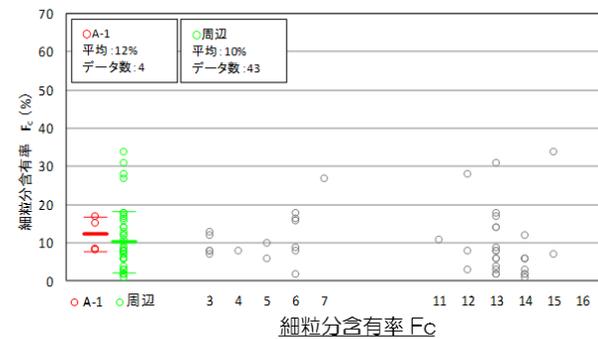
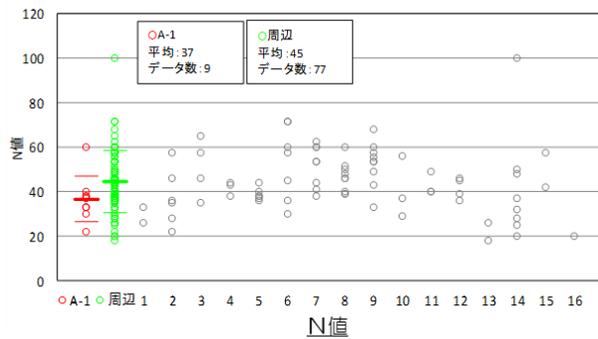
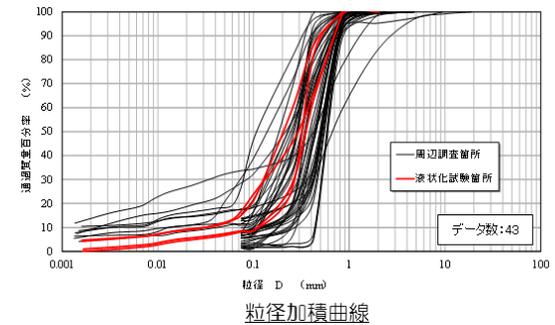
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-1（洪積砂層Ⅱ）

(a) 比較対象位置図

第 3.2.7 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-1 地点の洪積砂層Ⅱ）

- **N値**：液状化試験箇所（赤）の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所（緑）より小さい。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所（赤）の平均値及び-1σ値は周辺調査箇所（緑）より若干大きい（ばらつきが小さい）。

（参考）**粒径加積曲線**：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
**相対密度**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所と同程度である。  
**乾燥密度**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。



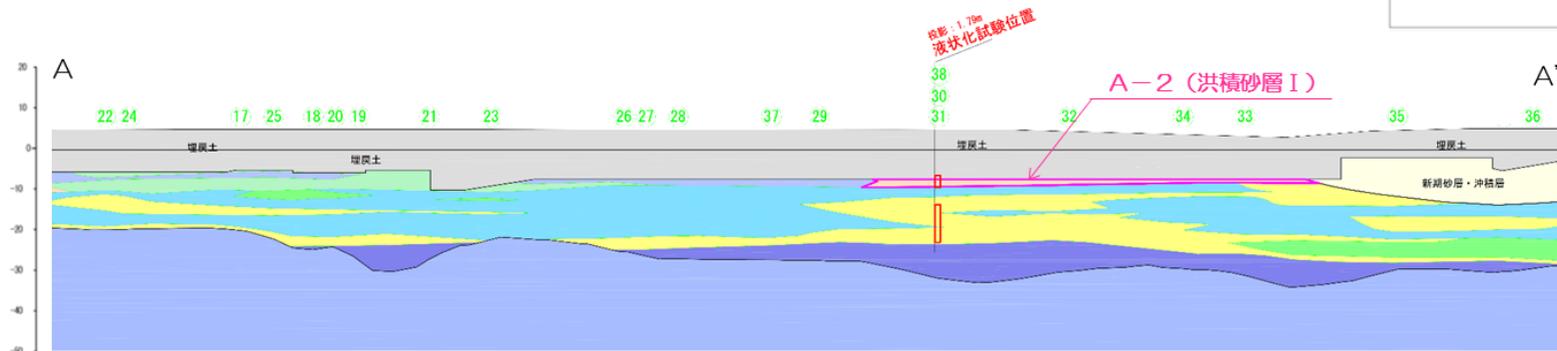
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1（洪積砂層Ⅱ）

(b) 基本物性比較

第 3.2.7 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-1 地点の洪積砂層Ⅱ）



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-2（洪積砂層 I）



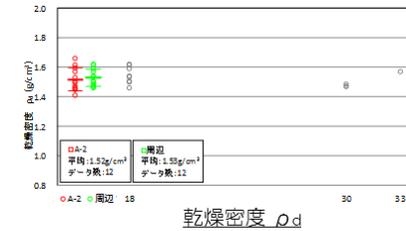
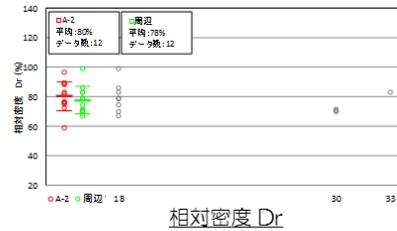
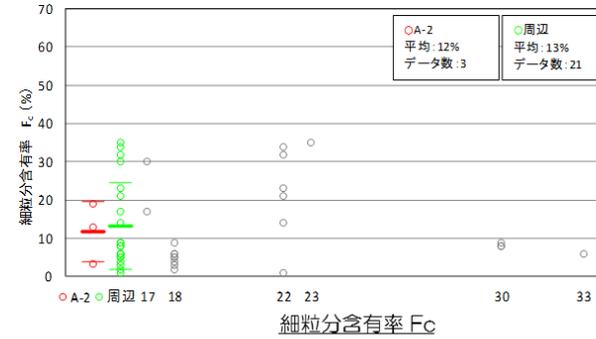
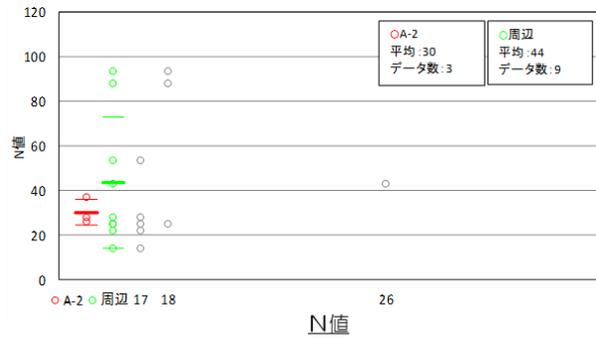
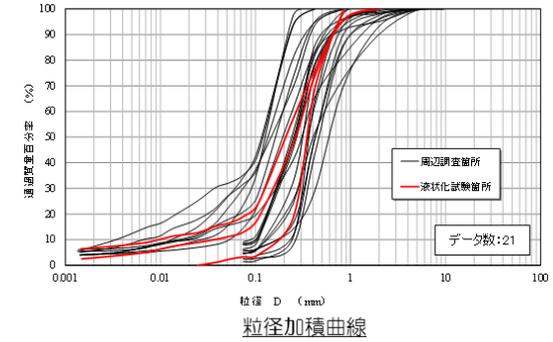
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-2（洪積砂層 I）

(a) 比較対象位置図

第 3.2.8 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層 I）

- **N値**：液状化試験箇所（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）より小さく、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より大きい（ばらつきが小さい）。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所（赤）の平均値は、周辺調査箇所（緑）と同程度であり、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より若干大きい。

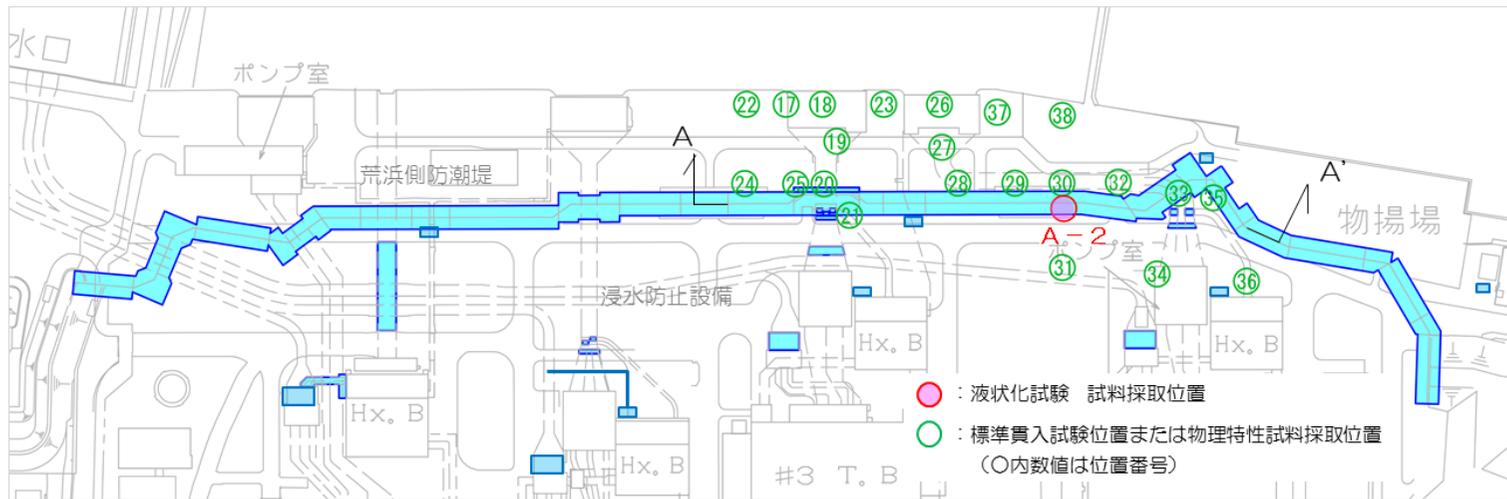
（参考）**粒径加積曲線**：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
**相対密度**：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所と同程度である。  
**乾燥密度**：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より若干小さい。



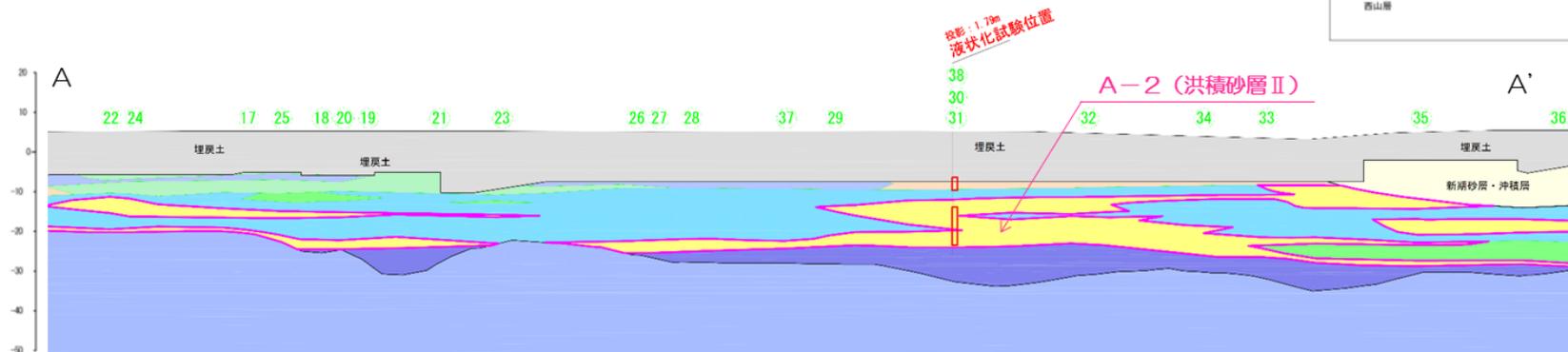
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2 (洪積砂層 I)

(b) 基本物性比較

第 3.2.8 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-2 地点の洪積砂層 I)



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-2（洪積砂層Ⅱ）



N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-2（洪積砂層Ⅱ）

(a) 比較対象位置図

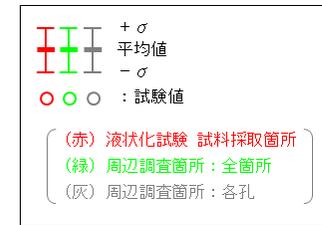
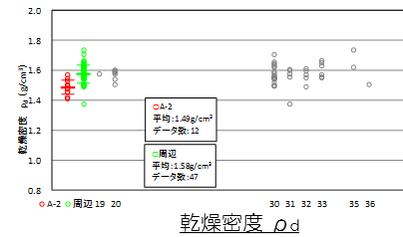
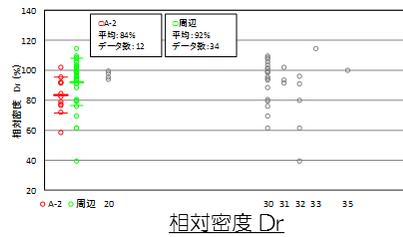
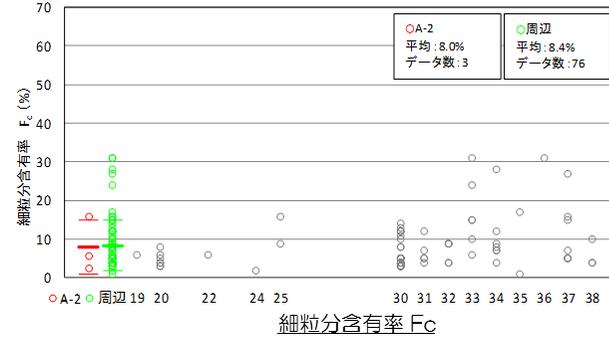
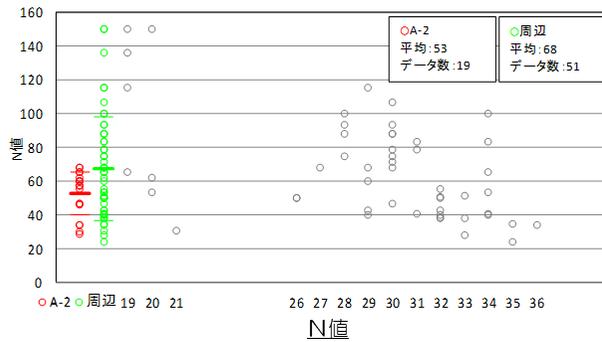
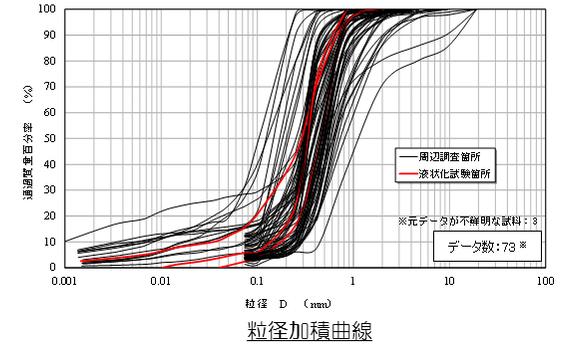
第 3.2.9 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層Ⅱ）

- **N値**：液状化試験箇所（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）より小さく、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所と同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）と同程度であり、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より小さい。

（参考）粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつき範囲内に入っている。

相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。

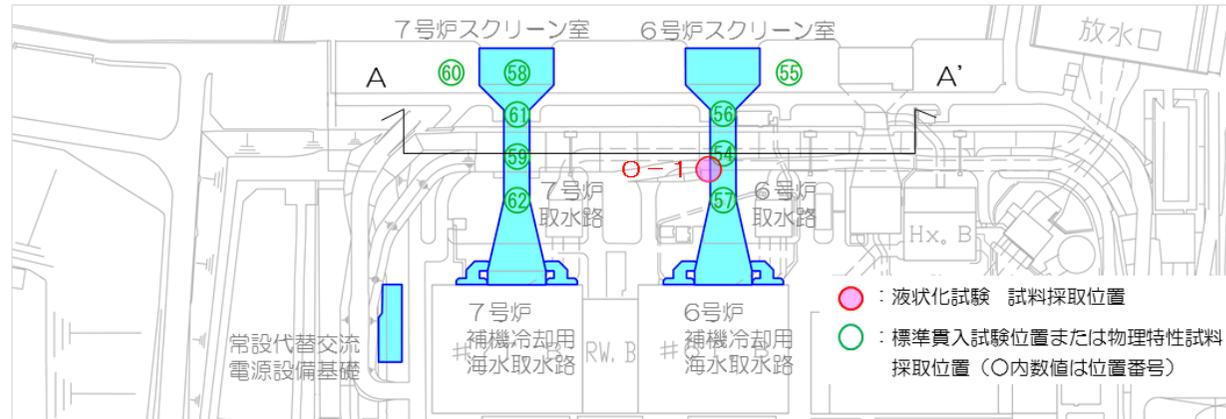
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。



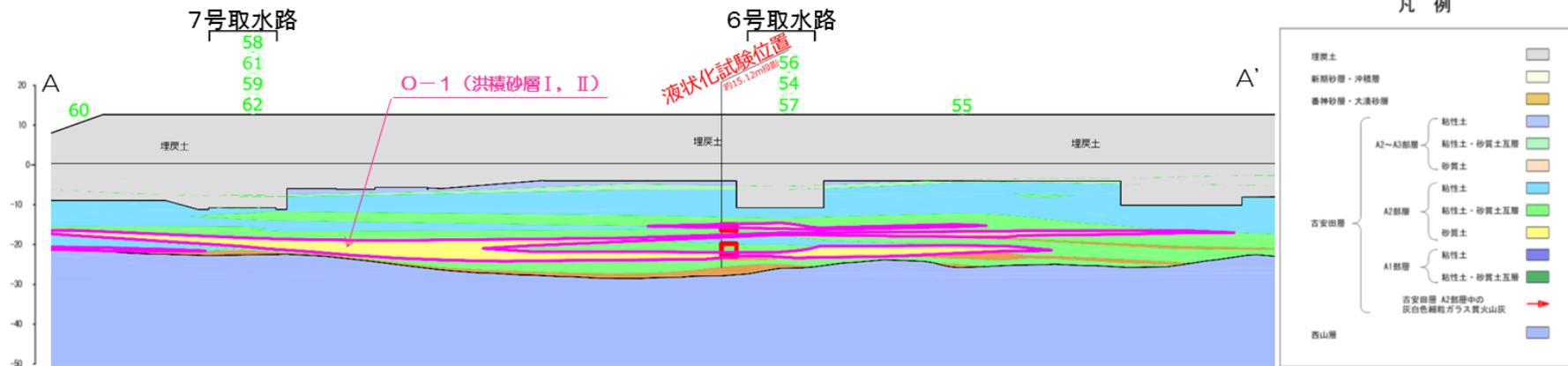
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2 (洪積砂層Ⅱ)

(b) 基本物性比較

第 3.2.9 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層 II）



N値及び物理特性の調査位置図：大湊側 O-1（洪積砂質土層 I，II）



N値及び物理特性の整理対象層：大湊側 O-1（洪積砂質土層 I，II）

(a) 比較対象位置図

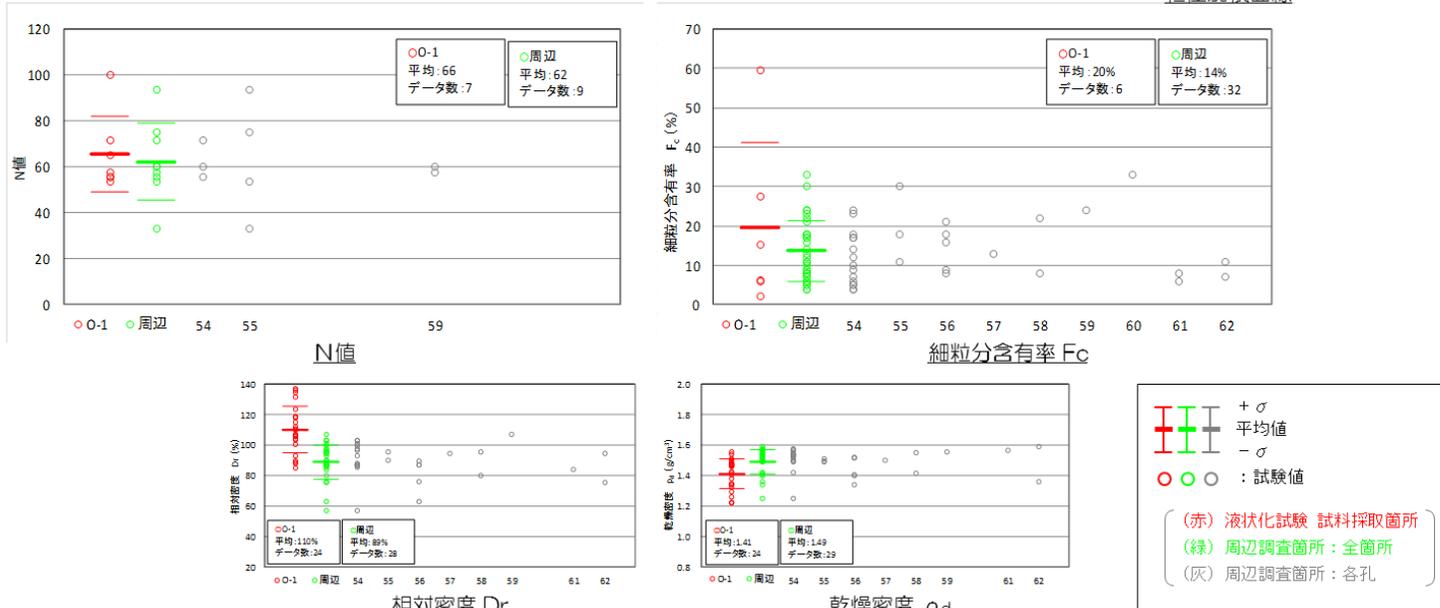
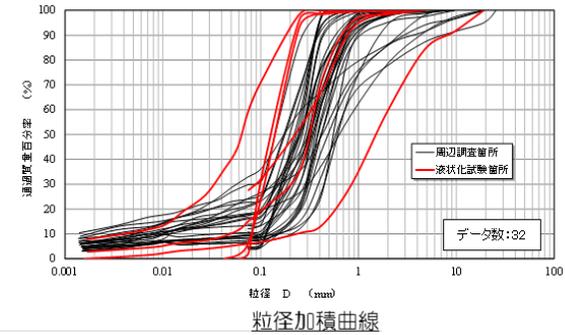
第 3.2.10 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（O-1 地点の洪積砂質土層 I，II）

- **N値**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所と同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より大きく、-1σ値は周辺調査箇所より小さい（ばらつきが大きい）。

(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所はばらつきが大きく、周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っていないデータがある。

相対密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より大きい。

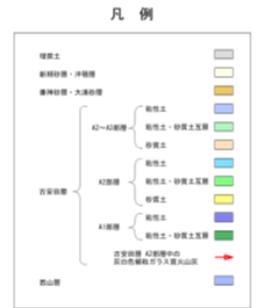
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。



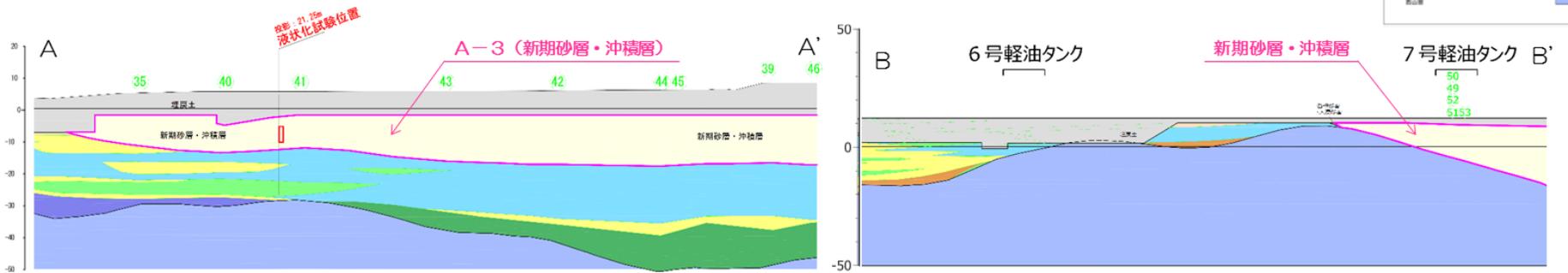
N値及び物理特性の比較 大湊側 O-1 (洪積砂質土層 I, II)

(b) 基本物性比較

第 3.2.10 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (O-1 地点の洪積砂質土層 I, II)



N値及び物理特性の調査位置図：A-3（新期砂層・沖積層）



N値及び物理特性の整理対象層：A-3（新期砂層・沖積層）

(a) 比較対象位置図

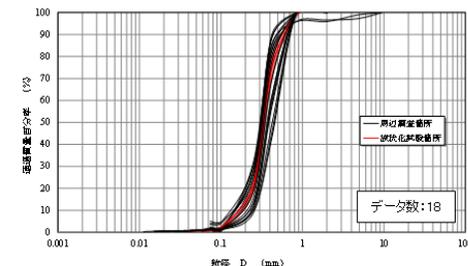
第 3.2.11 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-3 地点の新期砂層・沖積層）

- **N値**：液状化試験箇所のN値は、荒浜側周辺調査箇所より小さく下限付近であり、大湊側の周辺調査箇所より大きい。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より小さく、 $-1\sigma$ 値は荒浜側の周辺調査箇所と同程度であり、大湊側の周辺調査箇所より小さい。

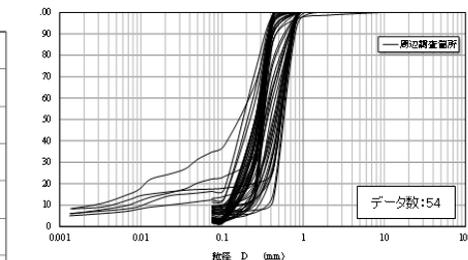
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っており、荒浜側はばらつきが小さく、よく一致している。

相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。

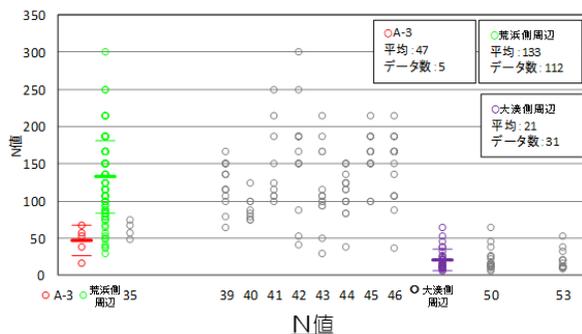
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、荒浜側の周辺調査箇所より小さく、大湊側の周辺調査箇所より大きい。



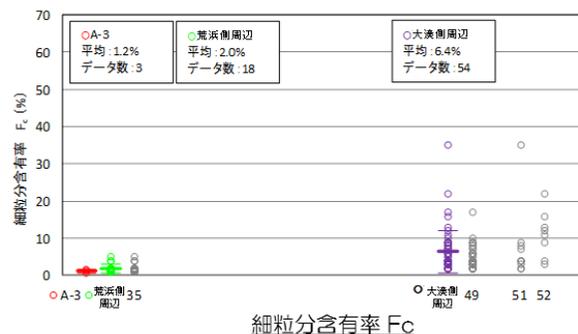
粒径加積曲線（荒浜側）



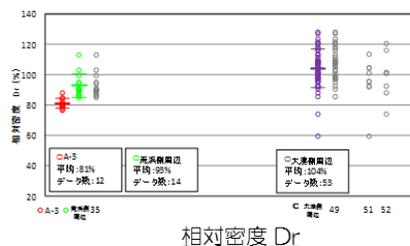
粒径加積曲線（大湊側）



N値



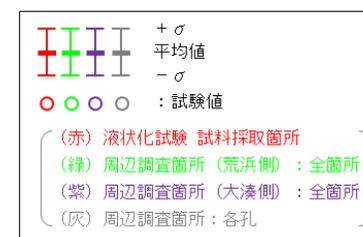
細粒分含有率  $F_c$



相対密度  $D_r$



乾燥密度  $\rho_d$

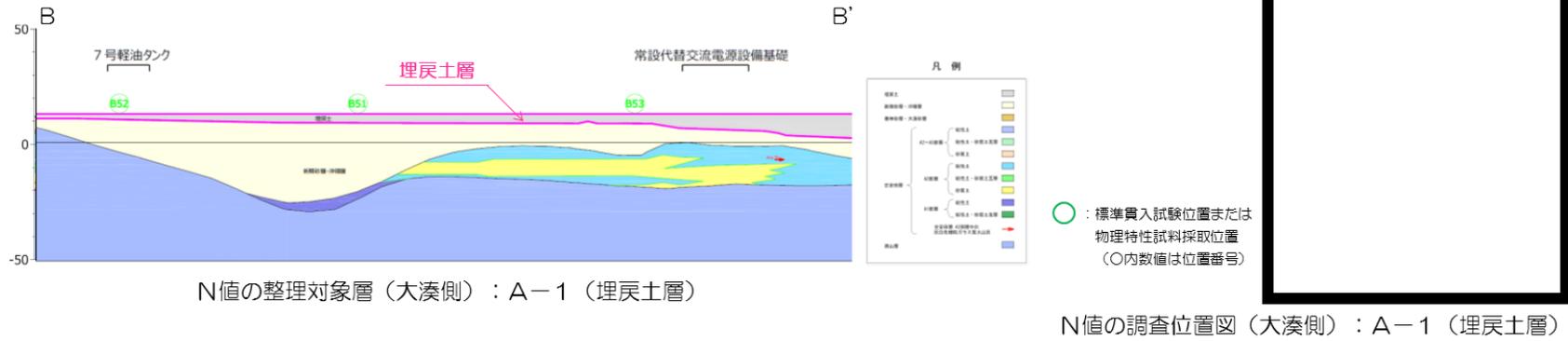


N値及び物理特性の比較 A-3（新期砂層・沖積層）

(b) 基本物性比較

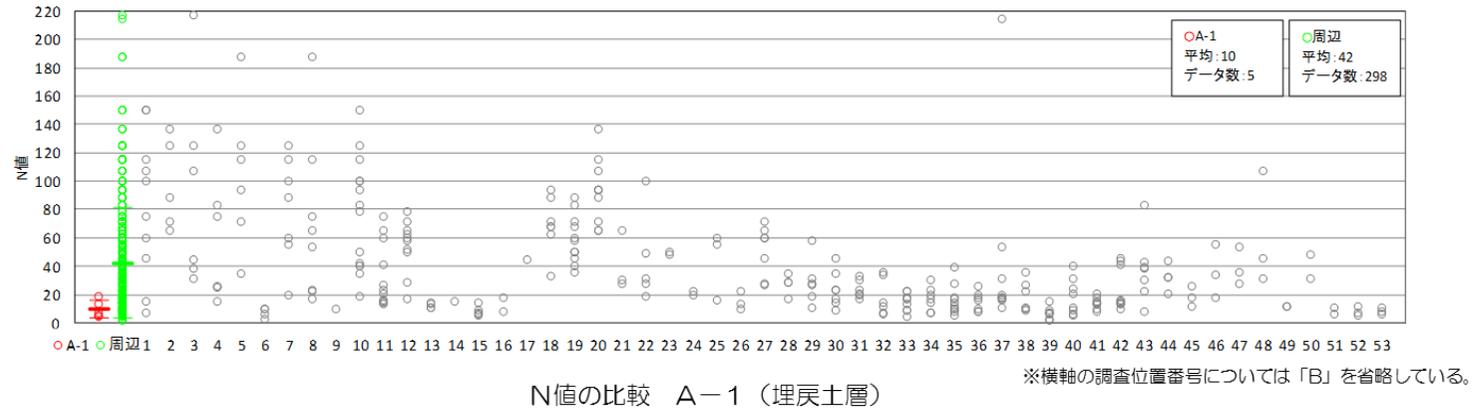
第 3.2.11 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-3 地点の新期砂層・沖積層）





(b) 比較対象位置図（大湊側）

■ **N値**：液状化試験箇所とのN値は、周辺調査箇所より小さく、下限付近である。



(b) 基本物性比較

第 3.2.12 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-1 の埋戻土層）

第 3.2.2 表 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較のまとめ

| 地層区分                     |       | N 値 | 細粒分<br>含有率 | 追加<br>調査<br>実施 |
|--------------------------|-------|-----|------------|----------------|
| A-1<br>洪積砂層 I            | 平均値   |     |            | ○              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-1<br>洪積砂層 II           | 平均値   |     |            | ○              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-2<br>洪積砂層 I            | 平均値   |     |            | ※              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-2<br>洪積砂層 II           | 平均値   |     |            | -              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| O-1<br>洪積砂質土層 I,<br>II   | 平均値   |     |            | ○              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-3<br>新期砂層・沖積層<br>(荒浜側) | 平均値   |     |            | -              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-3<br>新期砂層・沖積層<br>(大湊側) | 平均値   |     |            | ○              |
|                          | -1σ 値 |     |            |                |
| A-1<br>埋戻土層              | 平均値   |     | -          | -              |
|                          | -1σ 値 |     | -          |                |

：周辺調査箇所に対して液状化試験箇所が小さい  
(変動率 < -10%)

：周辺調査箇所と液状化試験箇所が同程度  
(-10% ≤ 変動率 ≤ 10%)

：周辺調査箇所に対して液状化試験箇所が大きい  
(変動率 > 10%)

※ 液状化強度特性の設定は、保守的に A-1 (洪積砂層 II) の液状化試験結果を用いる。

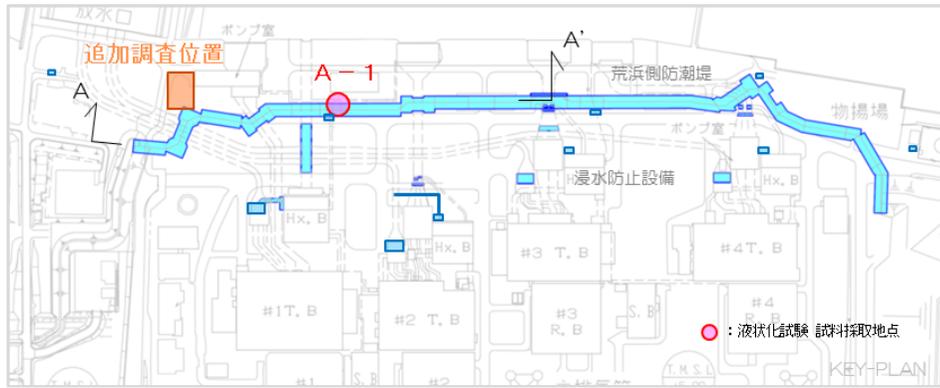
### 3.3 追加調査

3.1 および 3.2 の検討結果を踏まえて、第 3.3.1 図に追加調査実施予定地を示す。

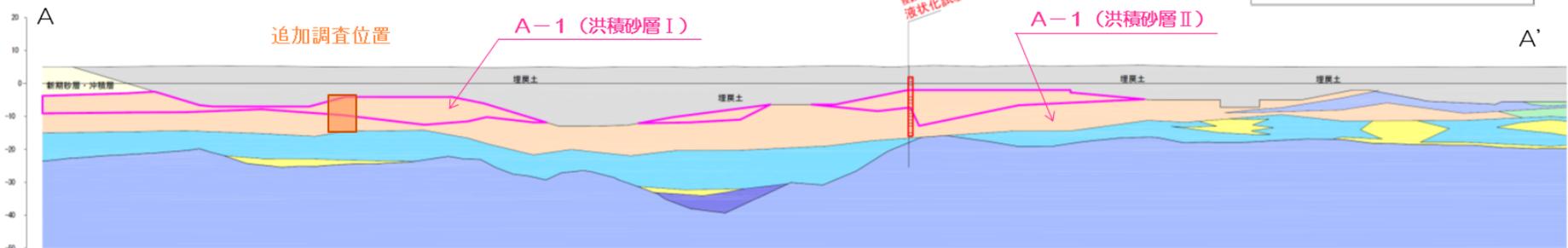
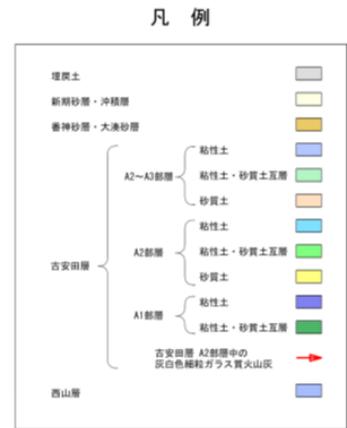
荒浜側における A-1 地点の洪積砂層 I, II 及び A-2 地点の洪積砂層 I は、地質の連続性等の評価や周辺調査箇所 N 値や細粒分含有率の比較から代表性を有していると評価した。ただし、層厚が厚く分布範囲が広いことを踏まえ、データ拡充を目的とした追加調査を実施する。なお、A-2 地点の洪積砂層 I は、A-1 地点の洪積砂層 I, II と同時代に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、物性設定においては保守的に A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果を用いる方針とする。追加調査位置は、事前調査を実施し、A-1 地点の洪積砂層 I, II の両層を採取できる場所を選定する。

O-1 地点の洪積砂質土層 I, II は、地質の連続性等の評価や周辺調査箇所 N 値や細粒分含有率の比較から代表性を有していると評価した。ただし、6, 7 号炉の申請であることを踏まえ、7 号取水路周辺でデータ拡充を目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、古安田層中に挟在する砂層から試料が確実に採取できる場所を選定する。

A-3 地点の新期砂層・沖積層は、大湊側の周辺調査箇所と比べて、細粒分含有率が小さいものの、N 値が大きいことから、大湊側の新期砂層・沖積層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、新期砂層・沖積層から試料が確実に採取できる場所を選定する。



荒浜側 調査位置図

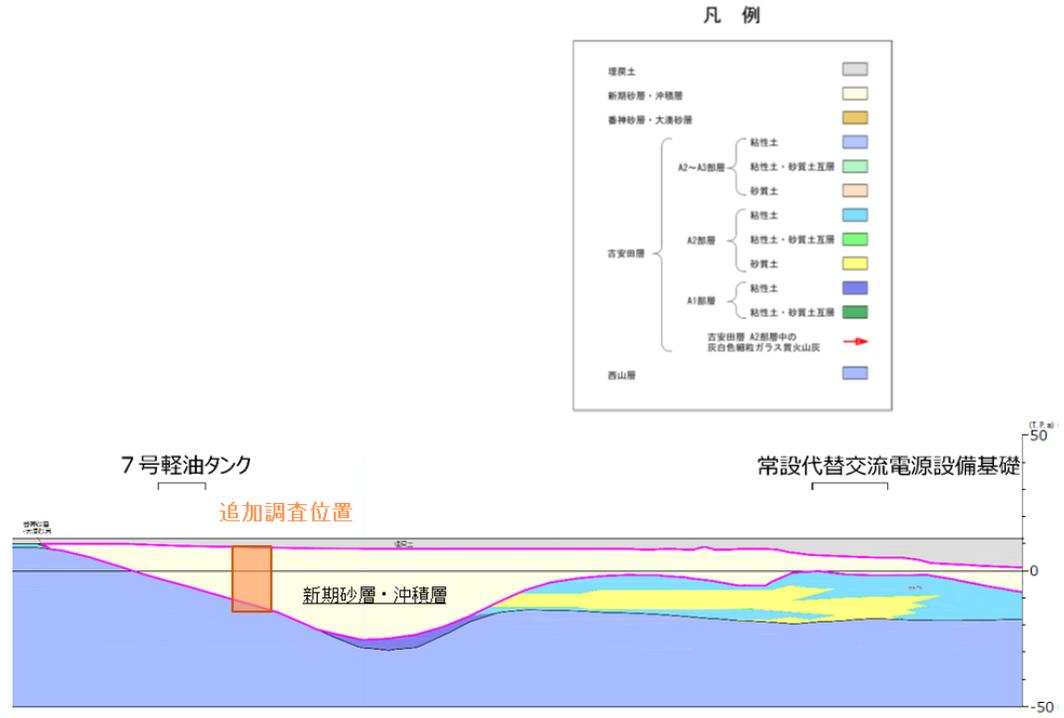


荒浜側 地質断面図

(a) 荒浜側：A-1 地点の洪積砂層 I, II および A-2 地点の洪積砂層 I

第 3.3.1 図 追加調査実施予定地





大湊側 地質断面図 (常設代替交流電源設備基礎～7号炉軽油タンク基礎)

(c) 大湊側：新期砂層・沖積層  
 第 3.3.1 図 追加調査実施予定地

## 4. 液状化試験結果

### 4.1 液状化試験方法

地盤工学会では、地盤の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）が規程されている。実務的には、地盤の液状化強度特性を求める試験方法として、繰返し非排水三軸試験のほかに、中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験などが用いられる。（安田, 1991） 第 4.1.1 図に一般的な液状化試験方法の例を示す。

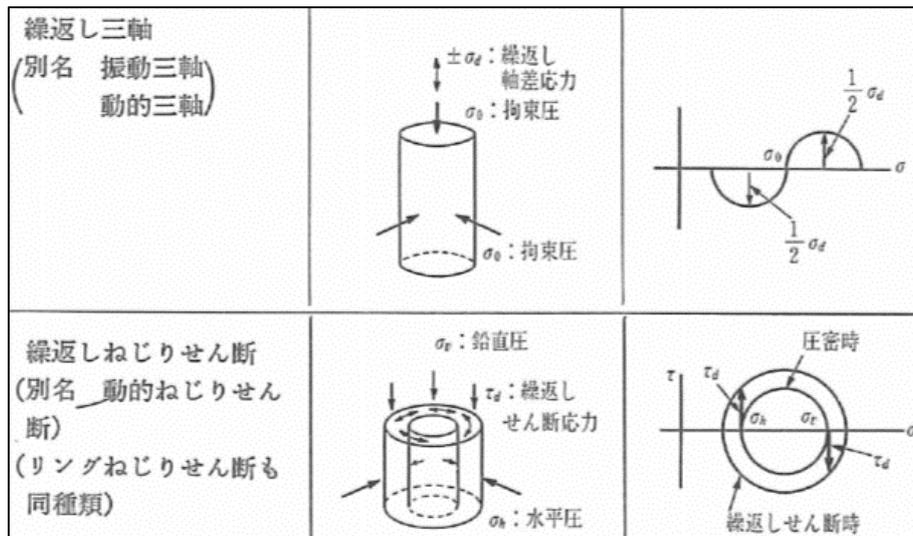
三軸試験に代表される間接型せん断試験と比較して、ねじりせん断試験は比較的広範囲な応力経路またはひずみ経路を供試体に与えられる。（地盤工学会, 2009） 三軸試験では圧縮側と引張側で挙動が異なり、応力経路は上下では対称ではないし、ひずみの発生量も異なる。これに対してねじり試験では応力-ひずみ関係、応力経路ともほぼ対称な形をしている。（土木学会, 2003：第 4.1.2 図）

以上を踏まえ、洪積層である古安田層中の砂層や N 値の比較的大きい新期砂層・沖積層を対象とした試験を実施するにあたり、高せん断応力比の液状化試験を実施することから、中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験を採用した。

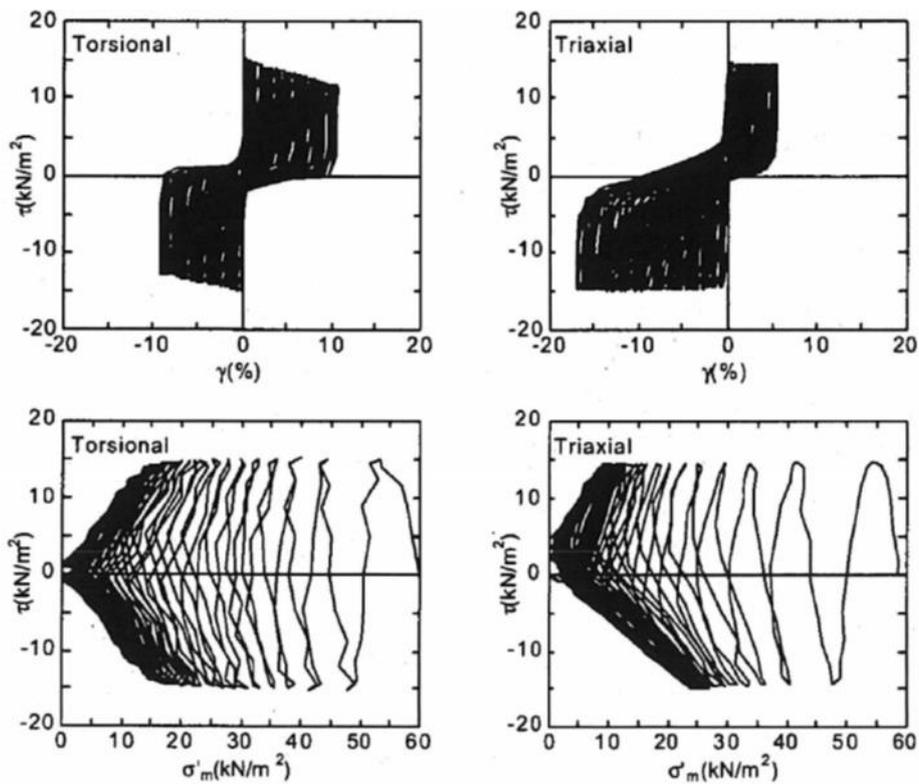
実施した中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要を第 4.1.3 図に、試料採取に用いた凍結サンプリングの概要を第 4.1.4 図に示す。

載荷状況

応力状態



第 4.1.1 図 一般的な液状化試験方法の例  
(安田, 1991 抜粋)



(a)繰返しねじりせん断試験

(b)繰返し三軸試験

第 4.1.2 図 液状化試験結果の例

[上図：応力-ひずみ関係，下図：応力経路]

(土木学会, 2003)

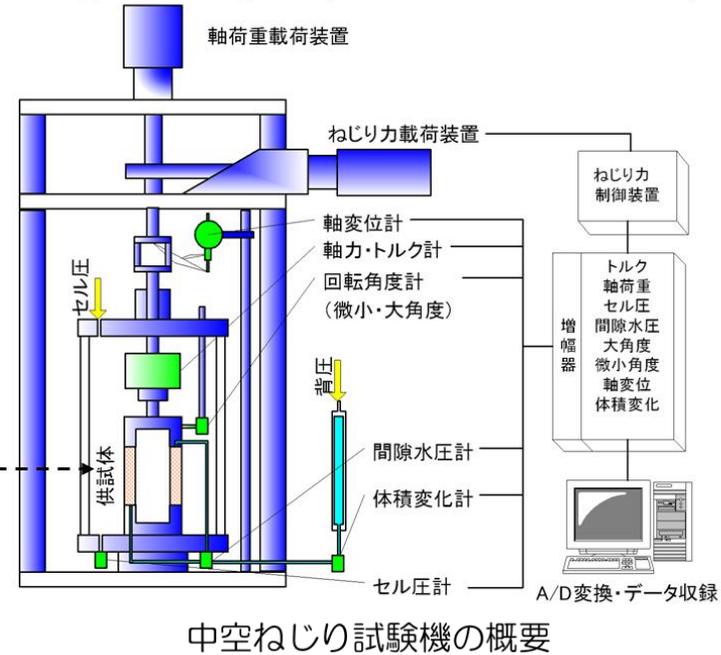
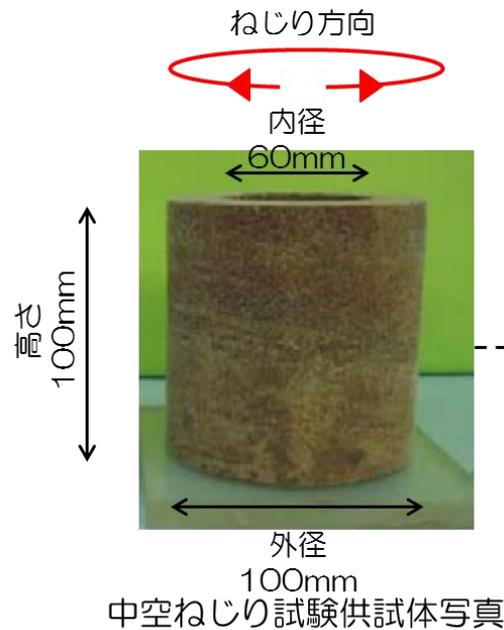
【試験の概要】

- 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法（地盤工学会：JGS 0543-2000）（以下、中空ねじり試験という。）を参考に実施。

【試験条件】

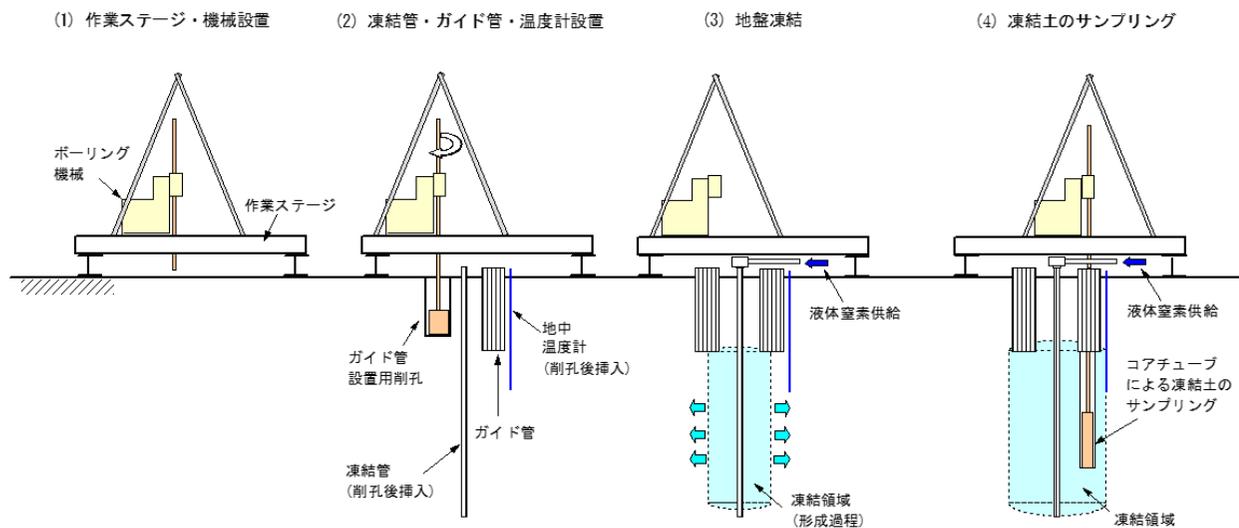
- 供試体寸法：外径100mm（内径60mm），高さ100mm（一部供試体は，外径70mm（内径30mm），高さ100mm）
- 载荷波形：正弦波（0.1Hz）
- 拘束圧：供試体平均深度の有効土被り圧を考慮して設定

- 繰返し回数200回を上限として，過剰間隙水圧比0.95および両振幅せん断ひずみ15%に達するまで試験を実施。（JGS 0541-2000を参考）
- 所定の両振幅せん断ひずみ（1.5%，2%，3%，7.5%，15%）および過剰間隙水圧比0.95の繰返し回数を評価。（JGS 0541-2000を参考）

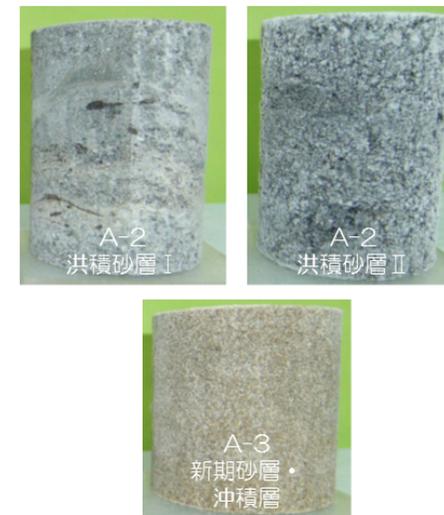


第 4.1.3 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要

- 凍結サンプリングは、砂・砂質土地盤や砂礫地盤を対象に高品質な不攪乱試料を採取する手法。
- 凍結管に液体窒素を流し込み、ゆっくりと地盤を凍結させた後に、コアサンプリングを行う。
- サンプリング手順は以下の通り
  - ① 既往調査より対象土層の厚い箇所を確認し、凍結サンプリング計画地点を決定。
  - ② 凍結サンプリング計画地点近傍にてパイロットボーリング（孔径φ86mm）を行い、サンプリング対象層の深度を確認。
  - ③ 液体窒素を流し込み、地中温度計が0度付近になるまで地盤の凍結を行う。
  - ④ 凍結が確認された後、コアチューブによる試料のサンプリングを行う。



凍結サンプリングの概要



試験供試体例  
 (左上：洪積砂層 I 右上：洪積砂層 II  
 下：新期砂層・沖積層 )

第 4.1.4 図 凍結サンプリングの概要

## 4.2 液状化試験結果の分類に対する基本的考え方

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（土木学会，2003）では，地盤の液状化およびそれに関連する事象の定義として，以下のように記載されている。第4.2.1図に地盤の液状化およびそれに関連する事象の概念図，第4.2.2図に地盤の強度とダイレイタンス特性の概要を示す。

### 【液状化】

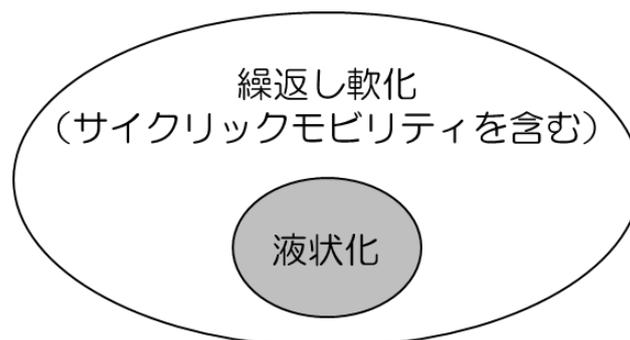
地震の繰返しせん断力などによって，飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内での間隙水圧が上昇・蓄積し，有効応力がゼロまで低下し液体状となり，その後地盤の流動を伴う現象。

### 【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っても，ひずみが大きく成長しようとする時，正のダイレイタンス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。主に，密な砂や礫質土，過圧密粘土のように正のダイレイタンス特性が著しい土において顕著に現れる。

### 【繰返し軟化】

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徐々に増大するが，土のもつダイレイタンス特性や粘性のためにひずみは有限の大きさとどまり，大きなひずみ範囲にいたるまでの流動は起きない。

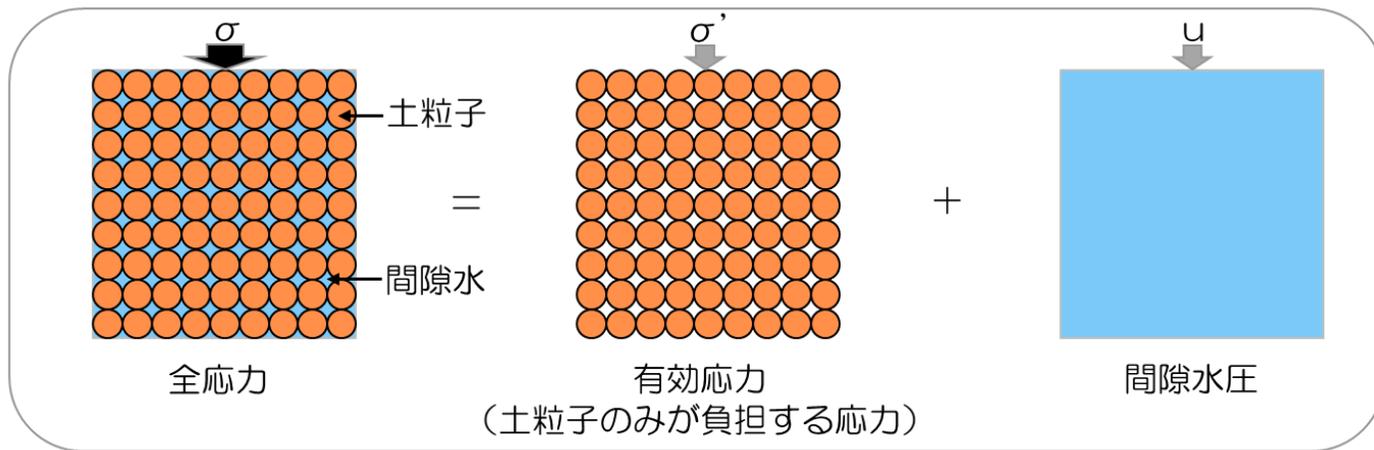


第4.2.1図 地盤の液状化およびそれに関連する事象の概念図

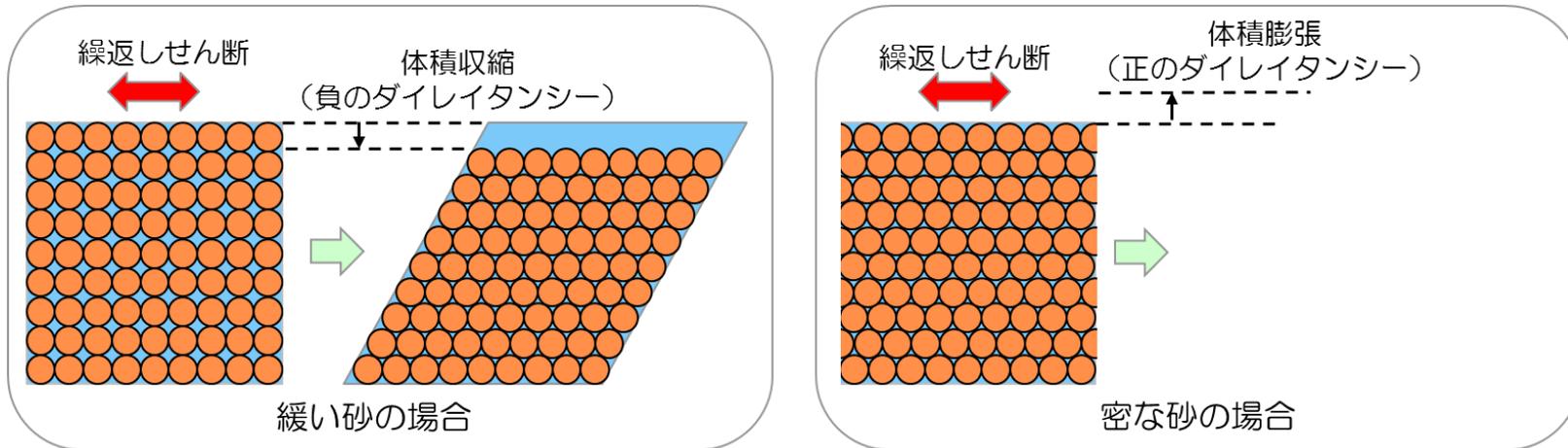
これらの事象のうちサイクリックモビリティは、その現象の違いから一般的に液状化とは区別されている。以下に既往文献におけるサイクリックモビリティの記述を示す。また、第 4.2.3 図および第 4.2.4 図に緩い砂と密な砂の液状化試験結果の比較を示し、液状化とサイクリックモビリティの違いを整理した。

- サイクリックモビリティとは、砂などの繰返し载荷において、有効拘束圧がゼロに近づいてから、载荷時にせん断剛性の回復、除荷時に有効応力の減少を繰り返していくが、ひずみは有限の大きさとどまる現象であり、液状化とは区別して用いられることがある。(地盤工学会, 2006)
- 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。(井合, 2008)
- サイクリックモビリティにおいて、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。(吉見, 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 0 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。(安田, 1991)

これらの知見を踏まえて、液状化試験結果を、「液状化」、「サイクリックモビリティ」および「非液状化」の 3 つに大別することとした。



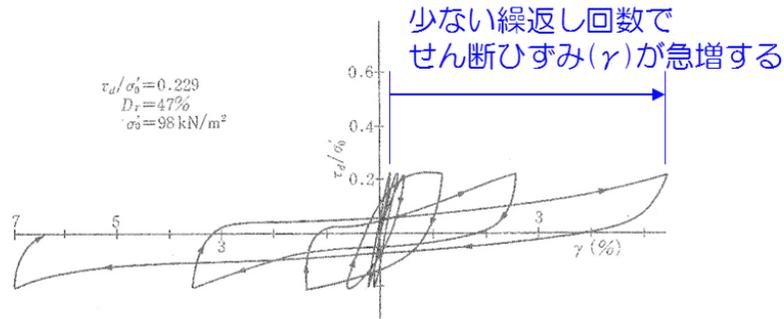
地盤の強度の概要



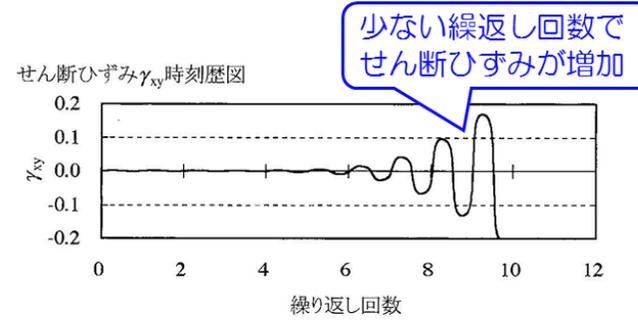
地盤のダイレイタンス特性の概要

第 4.2.2 図 地盤の強度とダイレイタンス特性の概要

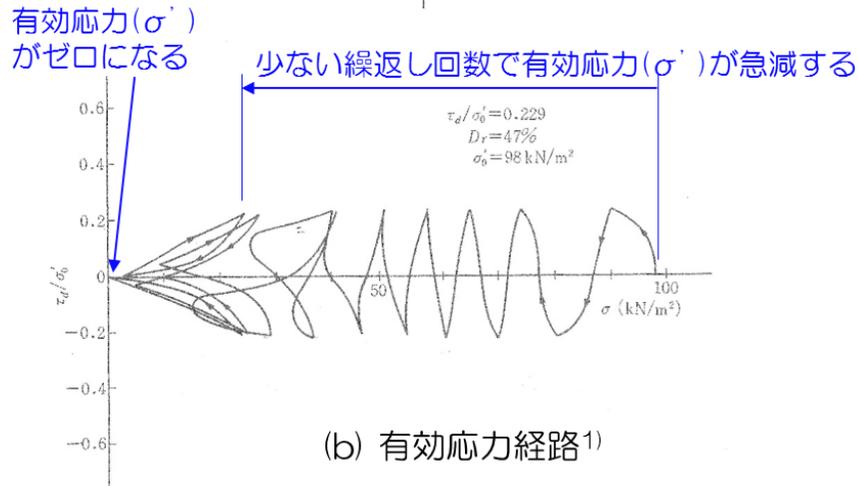
【液状化試験のイメージ (1)】



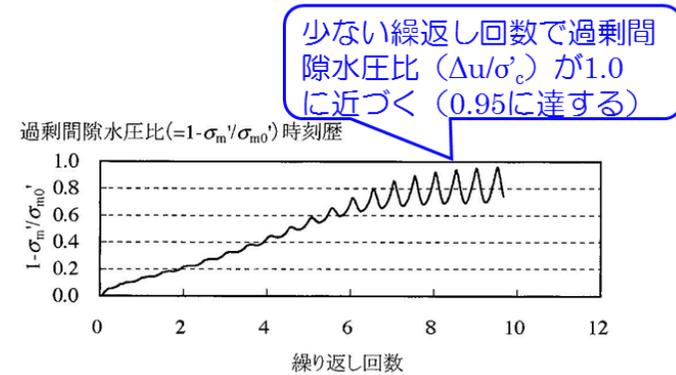
(a) せん断応力-せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>



(c) せん断ひずみ<sup>2)</sup>



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>



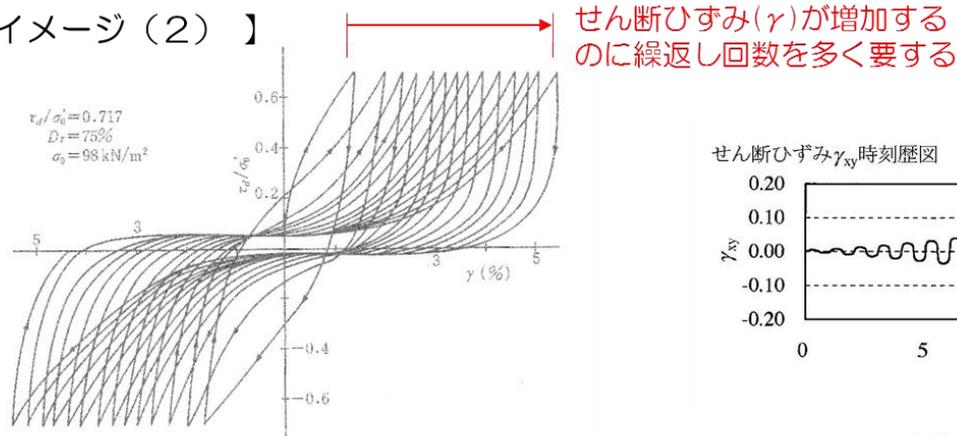
(d) 過剰間隙水圧比<sup>2)</sup>

液状化試験の例 (液状化する場合)

1) 永瀬英生：多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性，東京大学博士論文，1984  
 2) 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，pp.291-304，2008.

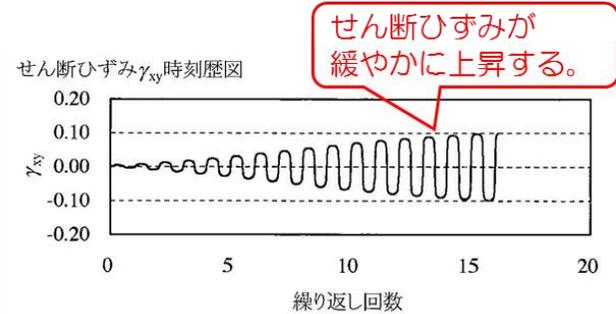
第 4.2.3 図 緩い砂の液状化試験結果

【液状化試験のイメージ (2)】

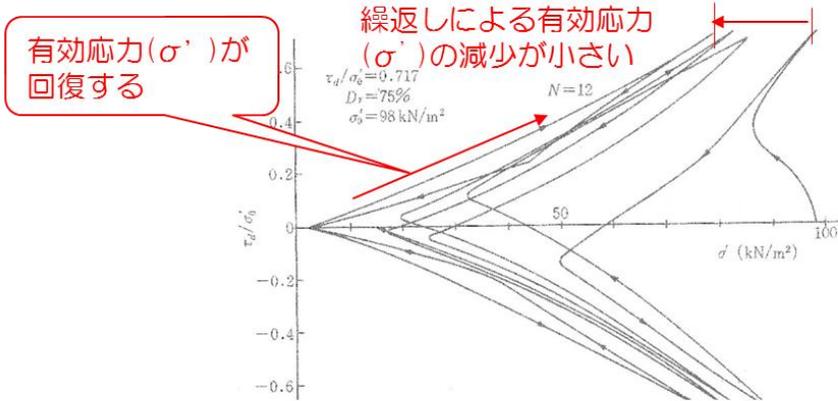


(a) せん断応力-せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>

せん断ひずみ( $\gamma$ )が増加する  
のに繰返し回数を多く要する



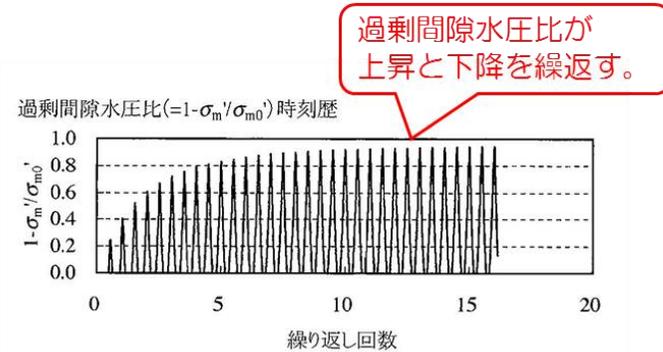
(c) せん断ひずみ<sup>2)</sup>



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>

有効応力( $\sigma'$ )が  
回復する

繰返しによる有効応力  
( $\sigma'$ )の減少が小さい



(d) 過剰間隙水圧比<sup>2)</sup>

過剰間隙水圧比が  
上昇と下降を繰り返す。

液状化試験の例 (サイクリックモビリティの場合)

1) 永瀬英生: 多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性, 東京大学博士論文, 1984.  
2) 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, pp.291-304, 2008.

第 4.2.3 図 密な砂の液状化試験結果

### 4.3 試験結果の分類

第 4.3.1～7 表に各土層の液状化試験結果を、第 4.3.1～7 図に各土層の液状化試験結果の例を、第 4.3.8 表に液状化試験結果のまとめを、第 4.3.8 図に液状化試験後の供試体状況を示す。

A-1 地点の埋戻土層の液状化試験結果は、過剰間隙水圧比が 1.0 に近づき (0.95 を上回り)、有効応力がゼロとなる。また、その繰り返しせん断を受けても、有効応力の回復はみられず、せん断ひずみが急激に上昇する。これらの状況から、この試験結果は液状化していると判断した。

A-3 地点の新期砂層・沖積層および A-1 地点の洪積砂層 I・II の液状化試験結果は、過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰り返す、上昇時に 1.0 に近づく (0.95 を上回る)。これに伴って、有効応力は減少するが、繰り返しせん断を受けることで回復する。また、せん断ひずみは緩やかに上昇する。これらの状況から、この試験結果はサイクリックモビリティであると判断した。

A-2 地点の洪積砂層 I・II および 0-1 地点の洪積砂質土層 I・II の液状化試験結果は、過剰間隙水圧比が 0.95 を上回ることがなく、試験実施の間、有効応力を保持している。また、せん断ひずみが緩やかに上昇し、試験終了直前で急激にせん断ひずみが増大する傾向である。A-2 地点の洪積砂層 I・II の液状化試験後の供試体状況をみると、明確なせん断破壊が確認され、このせん断ひずみの増大はせん断破壊によって発生したものと考えられる。これらの状況から、この試験結果は非液状化であると判断した。

これらの区分を整理して、第 4.3.9 表に示す。

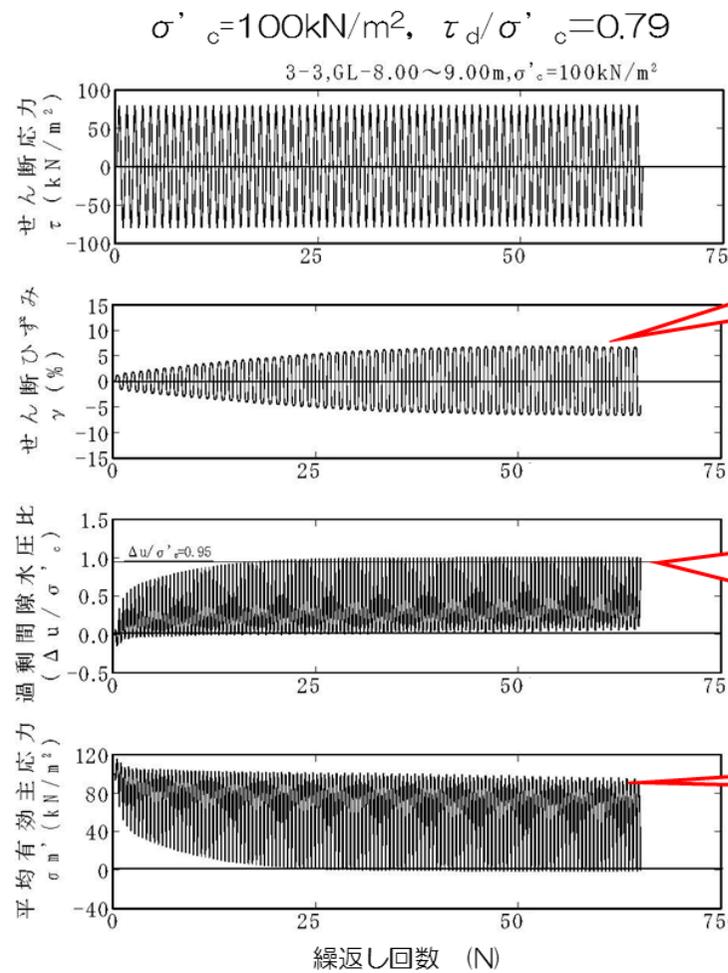
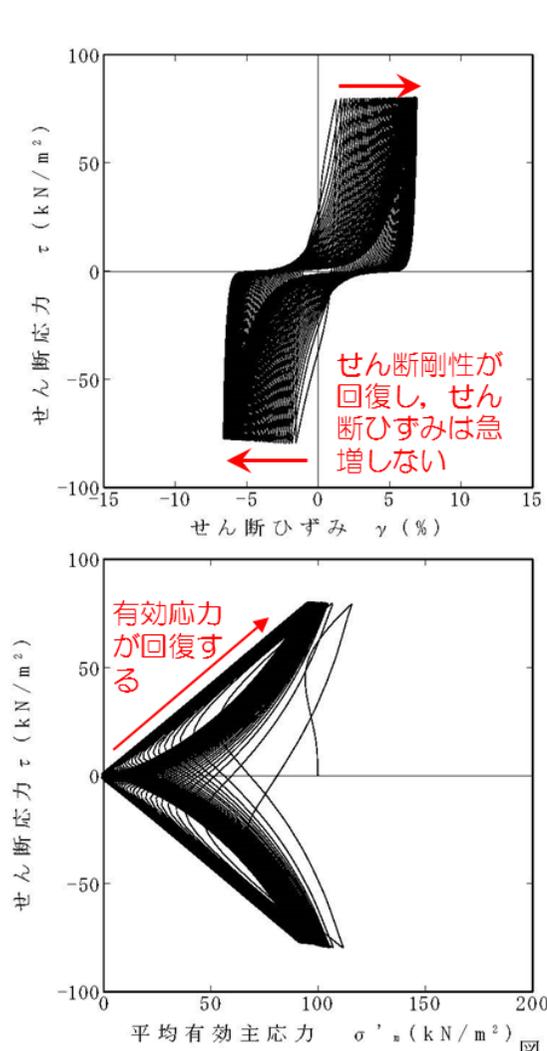
埋戻土層以外の土層は、比較的 N 値が高く、液状化試験結果はサイクリックモビリティあるいは非液状化を示している。このことは、道路橋示方書において、一般に N 値が高く、続成作用を受けている洪積層などは、液状化に対する抵抗が高いため、一般には液状化の可能性は低いという記載に整合する。

埋戻土層については試験結果が液状化を示していることから道路橋示方書の液状化判定法 (FL 法) を実施し、基準地震動  $S_s$  作用時の液状化の有無を判定する。埋戻土層以外の土層については液状化を示さず、道路橋示方書の液状化判定方法が適用出来ないと考えられることから、液状化試験が基準地震動  $S_s$  相当の地盤の状態を模擬していることを確認する。

第 4.3.1 表 液状化試験結果 (A-1 地点の洪積砂層 I)

| 試料番号                                  |                   | #1-1-1              |      |             |            | #1-1-2      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------|------|-------------|------------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                   | 8.00~9.00           |      |             |            | 10.00~11.00 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                   | 洪積砂層 I              |      |             |            | 洪積砂層 I      |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                   | 1                   | 2    | <u>3</u>    | 4          | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                   | 2.739               |      |             |            | 2.732       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                   | 100                 |      |             |            | 150         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                   | 0.47                | 0.59 | <u>0.79</u> | 0.97       | 0.48        | 0.61 | 0.44 | 0.39 |     |
| 繰返回数                                  | せん断<br>両振幅<br>ひずみ | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 4    | 0.9         | <u>0.5</u> | 0.3         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 3   |
|                                       |                   | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 6.5  | 2           | <u>0.7</u> | 0.5         | 2.5  | 0.6  | 1.5  | 5   |
|                                       |                   | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 14   | 6.5         | <u>1</u>   | 0.7         | 5    | 0.9  | 4    | 8.5 |
|                                       |                   | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 48   | 32          | <u>14</u>  | 9           | 18   | 7.5  | 17   | 25  |
|                                       |                   | $\gamma_{DA}=15\%$  | 102  | 96          | —          | 41          | 53   | 23   | 41   | 48  |
| 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{U95}$              |                   | 40                  | 31   | <u>18</u>   | 19         | 21          | 15   | 22   | 25   |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) が、上昇と下降を繰返し、上昇時に1に近づく (0.95に達する)。

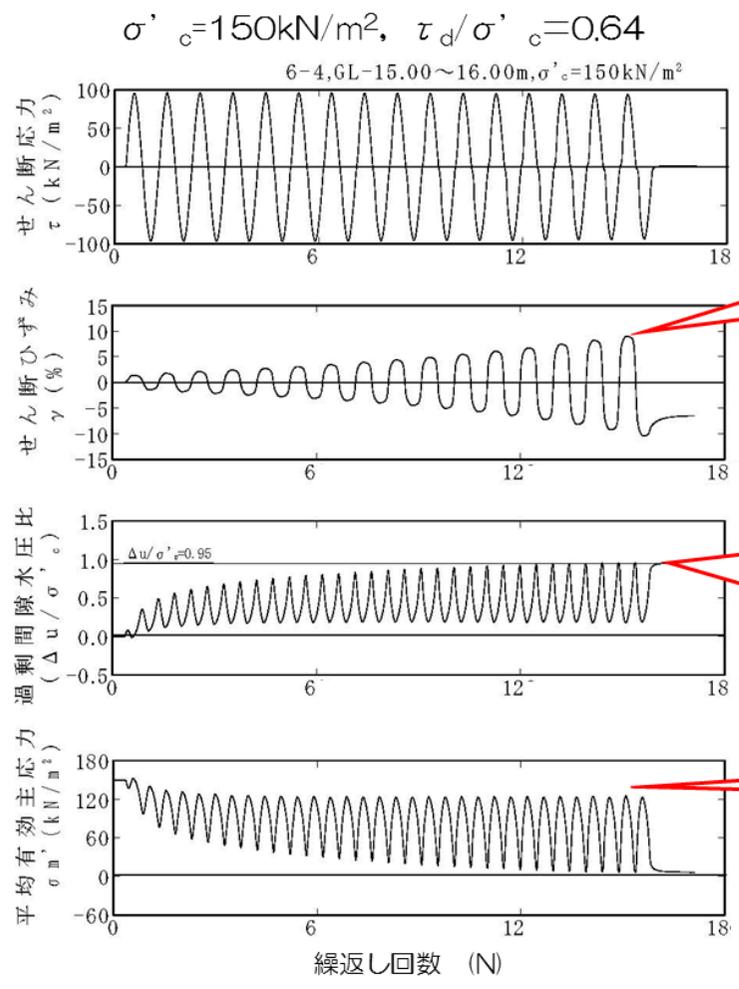
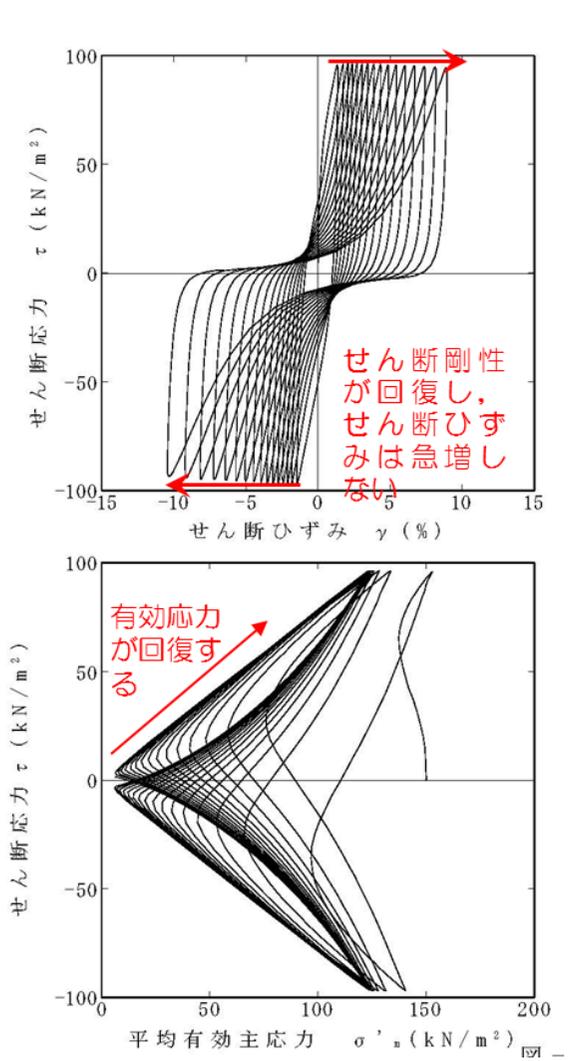
有効応力が回復する。

第 4.3.1 図 液状化試験結果の例 (A-1 地点の洪積砂層 I)

第 4.3.2 表 液状化試験結果 (A-1 地点の洪積砂層Ⅱ)

| 試料番号                                  |                          | #1-2-1              |      |      |      | #1-2-2             |      |      |             | #1-2-3      |      |      |      | #1-2-4      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|------|------|------|--------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                          | 13.00~14.00         |      |      |      | <u>15.00~16.00</u> |      |      |             | 17.00~18.00 |      |      |      | 20.00~21.00 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                          | 洪積砂層Ⅱ               |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ              |      |      |             | 洪積砂層Ⅱ       |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ       |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                          | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | 3    | <u>4</u>    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                          | 2.714               |      |      |      | <u>2.688</u>       |      |      |             | 2.684       |      |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                          | 150                 |      |      |      | <u>150</u>         |      |      |             | 200         |      |      |      | 200         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                          | 0.51                | 0.41 | 0.46 | 0.36 | 0.39               | 0.45 | 0.50 | <u>0.64</u> | 0.40        | 0.35 | 0.48 | 0.38 | 0.40        | 0.46 | 0.50 | 0.62 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>面振幅            | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 0.4  | 0.8  | 1    | 10                 | 2    | 1.5  | 0.8         | <u>0.5</u>  | 2    | 4.5  | 0.6  | 7           | 2    | 0.9  | 0.8  | 0.6 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 0.6  | 1    | 2    | 11                 | 2.5  | 3.5  | 1           | <u>0.7</u>  | 3.5  | 7.5  | 0.8  | 12          | 3.5  | 1.5  | 1.5  | 0.7 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 0.9  | 4    | 2.5  | 20                 | 6    | 7    | 4           | <u>1</u>    | 6.5  | 14   | 2    | 20          | 7    | 4.5  | 5    | 1.5 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 7    | 30   | 17   | 65                 | 26   | 20   | 18          | <u>7</u>    | 15   | 30   | 7    | 39          | 27   | 16   | 19   | 9   |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=15\%$  | 16   | 56   | 32   | 102                | 48   | 37   | 33          | <u>13</u>   | 22   | 43   | 13   | 56          | 52   | 25   | 31   | 18  |
|                                       | 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{U95}$ |                     | 16   | 40   | 22   | 61                 | 31   | 27   | 24          | <u>14</u>   | 19   | 33   | 13   | 42          | 31   | 22   | 30   | -   |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) が、上昇と下降を繰返し、上昇時に1に近づく (0.95に達する)。

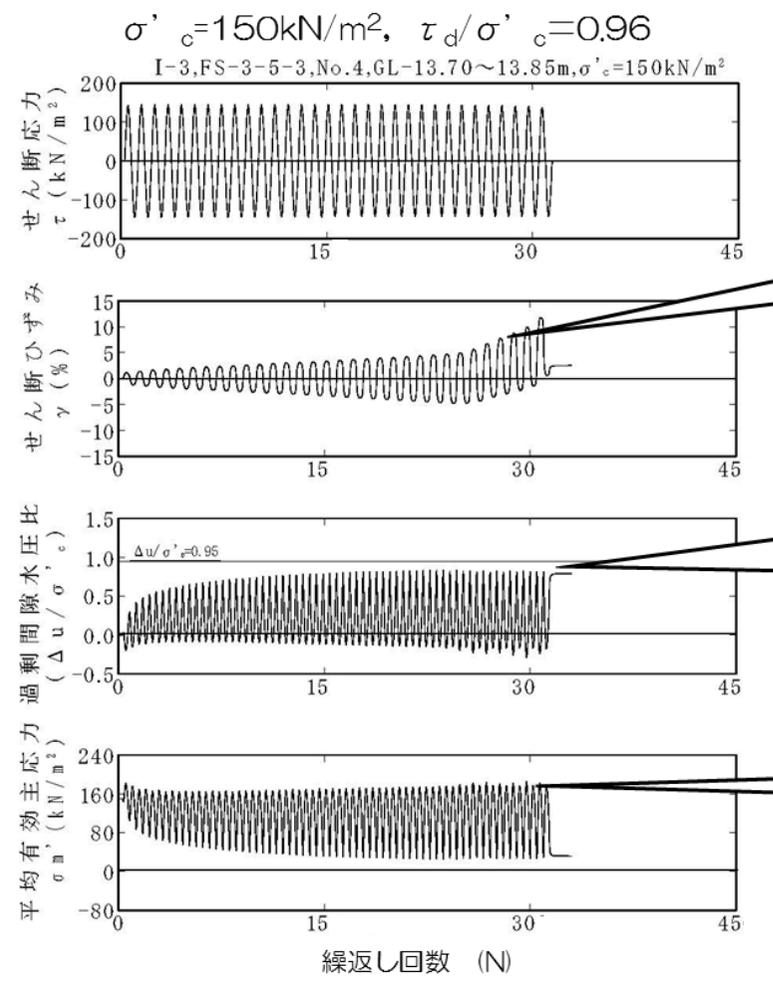
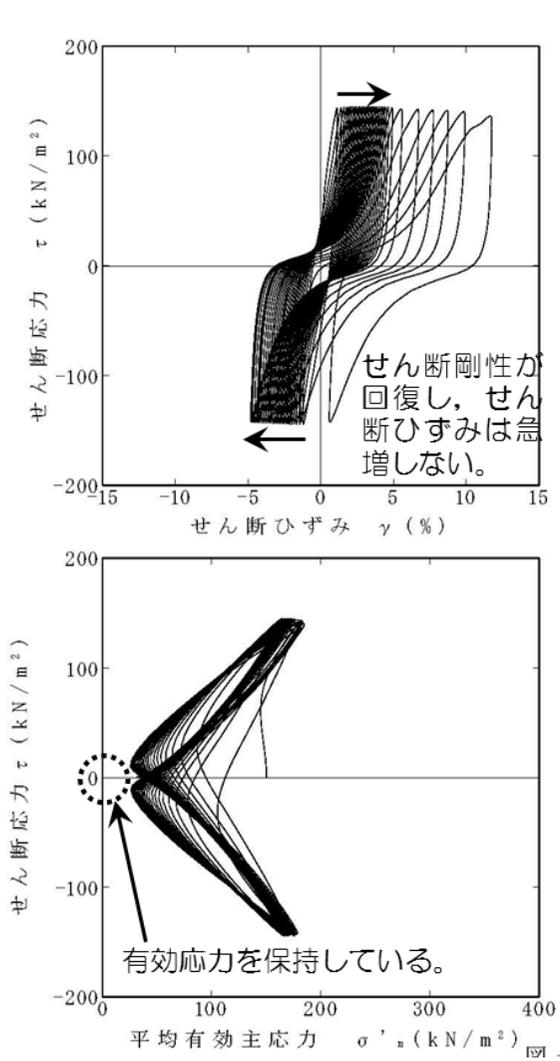
有効応力が回復する。

第 4.3.2 図 液状化試験結果の例 (A-1 地点の洪積砂層 II)

第 4.3.3 表 液状化試験結果 (A-2 地点の洪積砂層 I)

| 試料番号                                  |              | #4-1-1         |      |      |      | #4-1-2      |      |      |      | #4-1-3             |      |      |             |            |
|---------------------------------------|--------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|--------------------|------|------|-------------|------------|
| 深度 G.L.- (m)                          |              | 13.20~14.14    |      |      |      | 13.36~13.99 |      |      |      | <u>13.21~13.85</u> |      |      |             |            |
| 土質材料                                  |              | 洪積砂層 I         |      |      |      | 洪積砂層 I      |      |      |      | 洪積砂層 I             |      |      |             |            |
| 供試体 No.                               |              | 1              | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | 3    | 4           |            |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |              | 2.665          |      |      |      | 2.656       |      |      |      | <u>2.754</u>       |      |      |             |            |
| 圧密圧力 $\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> ) |              | 150            |      |      |      | 150         |      |      |      | <u>150</u>         |      |      |             |            |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_c$             |              | 0.60           | 0.43 | 0.92 | 1.18 | 0.79        | 1.03 | 1.20 | 0.61 | 1.01               | 0.71 | 0.81 | <u>0.96</u> |            |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 10   | 5    | 0.7  | 0.4         | 0.9  | 0.5  | 0.4  | 9                  | 0.5  | 0.9  | 0.6         | <u>0.6</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=2.0\%$ | 23   | 9    | 1    | 0.5         | 3    | 0.6  | 0.6  | 18                 | 0.7  | 2    | 0.8         | <u>0.9</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=3.0\%$ | 44   | 21   | 4    | 0.7         | 13   | 0.9  | 0.9  | 37                 | 1    | 8    | 2           | <u>2.5</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=7.5\%$ | 60   | 56   | 23   | 5           | 51   | 4.5  | 6.5  | 91                 | 5    | 43   | 17          | <u>18</u>  |
|                                       |              | $r_{DA}=15\%$  | 71   | 62   | 35   | -           | 63   | 7    | 9    | -                  | 7    | -    | 29          | -          |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |              | -              | -    | -    | -    | -           | -    | -    | -    | -                  | -    | -    | -           |            |

下線：次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_e$ ) が上昇と下降の繰返し、0.95に達しない。

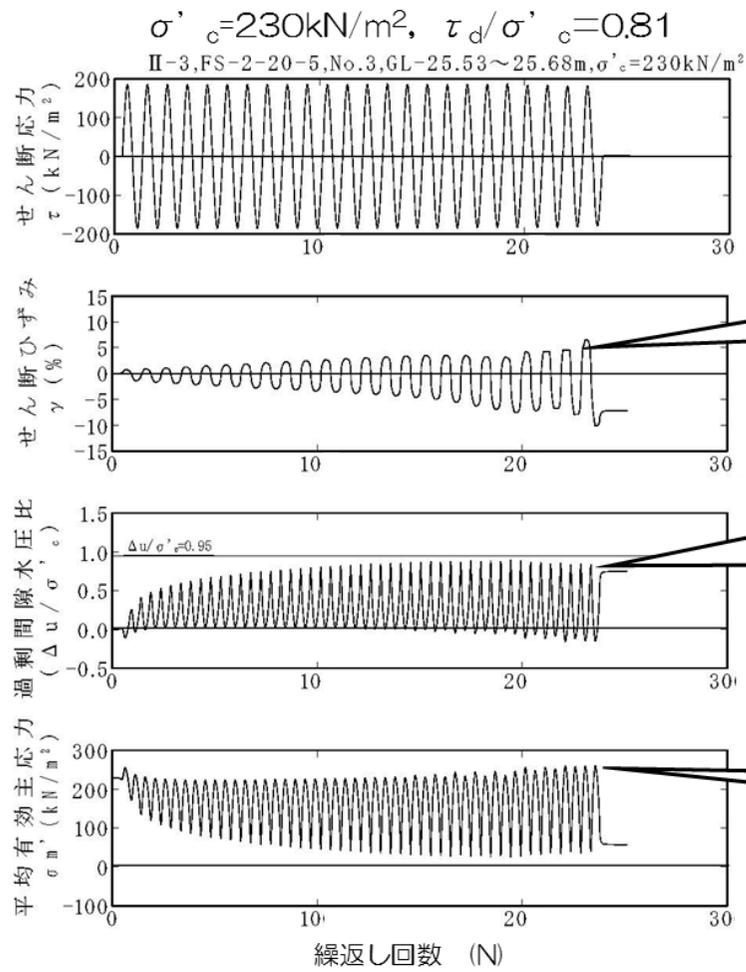
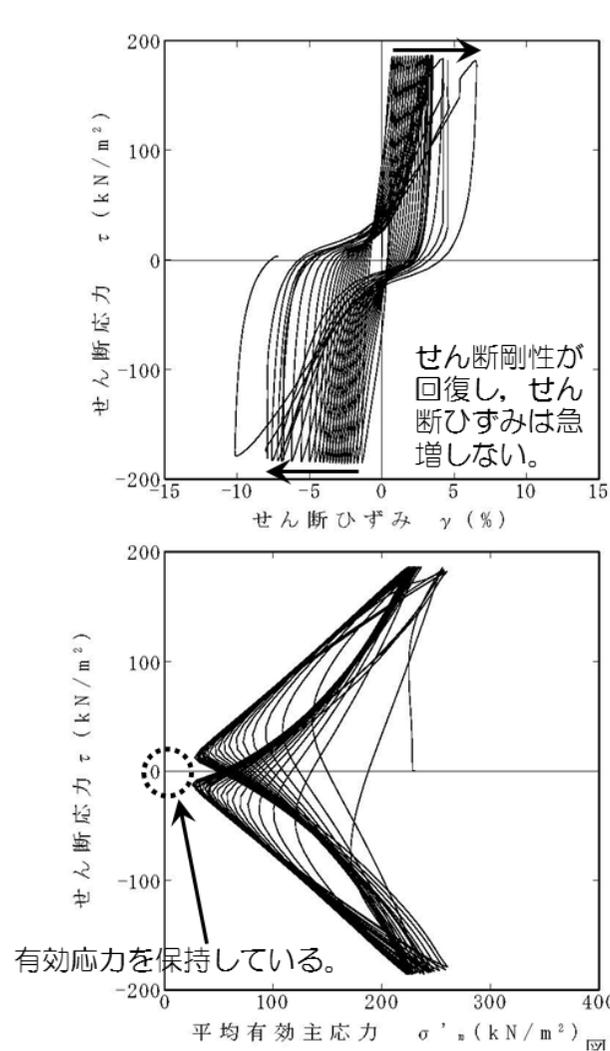
有効応力が回復する。

第 4.3.3 図 液状化試験結果の例 (A-2 地点の洪積砂層 I)

第 4.3.4 表 液状化試験結果 (A-2 地点の洪積砂層Ⅱ)

| 試料番号                                  |               | #4-2-1              |      |      |      | #4-2-2      |      |      |      | #4-2-3             |      |             |            |     |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|------|------|------|-------------|------|------|------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 20.20~21.96         |      |      |      | 21.96~22.62 |      |      |      | <u>25.15~26.23</u> |      |             |            |     |
| 土質材料                                  |               | 洪積砂層Ⅱ               |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ       |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ              |      |             |            |     |
| 供試体 No.                               |               | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | <u>3</u>    | 4          |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | 2.680               |      |      |      | 2.679       |      |      |      | <u>2.721</u>       |      |             |            |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 230                 |      |      |      | 230         |      |      |      | <u>230</u>         |      |             |            |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |               | 0.42                | 0.80 | 0.63 | 0.36 | 0.57        | 0.66 | 0.80 | 0.70 | 0.71               | 0.86 | <u>0.81</u> | 0.76       |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅 | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 1.5  | 0.3  | 0.8  | 200         | 2.5  | 0.9  | 0.3  | 0.3                | 2    | 0.8         | <u>0.7</u> | 0.9 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 3.5  | 0.4  | 1.5  | -           | 6    | 2    | 0.5  | 0.4                | 5.5  | 1.5         | <u>1</u>   | 2.5 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 7    | 0.7  | 3.5  | -           | 14   | 5.5  | 0.7  | 0.6                | 17   | 4.5         | <u>3</u>   | 6   |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 20   | 3    | 15   | -           | 46   | 22   | 3.5  | 2                  | 74   | 17          | <u>14</u>  | 22  |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | 7.5  | -    | -           | 78   | -    | 6.5  | 4.5                | 110  | -           | <u>24</u>  | 36  |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |               | -                   | -    | -    | -    | <b>61</b>   | -    | -    | -    | <b>87</b>          | -    | -           | -          |     |

**■** : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_e$ ) が上昇と下降の繰返し、0.95に達しない。

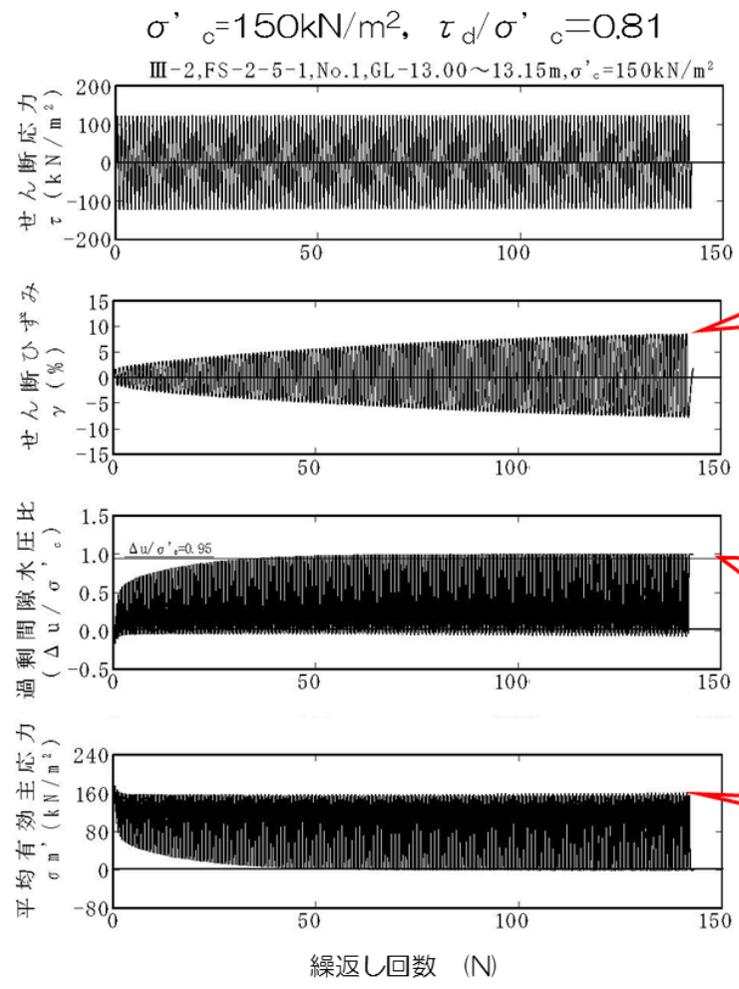
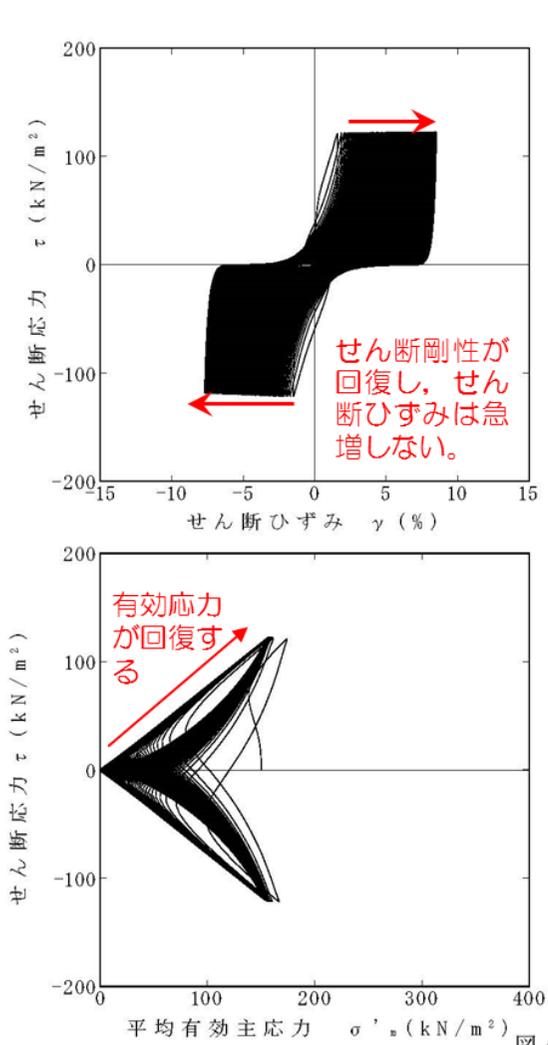
有効応力が回復する。

第 4.3.4 図 液状化試験結果の例 (A-2 地点の洪積砂層 II)

第 4.3.5 表 液状化試験結果 (A-3 地点の新时期砂層・沖積層)

| 試料番号                                  |               | #4-3-1         |      |      |      | <u>#4-3-2</u>      |            |      |      | #4-3-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|----------------|------|------|------|--------------------|------------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 13.04~13.51    |      |      |      | <u>13.00~13.68</u> |            |      |      | 14.96~15.43 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |               | 新时期砂層・沖積層      |      |      |      | 新时期砂層・沖積層          |            |      |      | 新时期砂層・沖積層   |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |               | 1              | 2    | 3    | 4    | <u>1</u>           | 2          | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | 2.719          |      |      |      | <u>2.780</u>       |            |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 150            |      |      |      | <u>150</u>         |            |      |      | 150         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_c$             |               | 0.81           | 0.70 | 0.62 | 0.49 | <u>0.81</u>        | 0.91       | 0.72 | 0.54 | 0.60        | 0.81 | 0.70 | 1.02 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>面振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 2                  | <u>0.5</u> | 0.3  | 0.6  | 0.9         | 0.8  | 0.3  | 0.7  | 0.3 |
|                                       |               | $r_{DA}=2.0\%$ | 0.6  | 0.8  | 0.9  | 3.5                | <u>0.7</u> | 0.4  | 0.8  | 1.5         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 0.4 |
|                                       |               | $r_{DA}=3.0\%$ | 0.9  | 2    | 2    | 8.5                | <u>1</u>   | 0.6  | 2    | 4           | 5    | 0.7  | 3    | 0.5 |
|                                       |               | $r_{DA}=7.5\%$ | 15   | 19   | 18   | 50                 | <u>24</u>  | 9    | 24   | 21          | 32   | 9    | 22   | 8   |
|                                       |               | $r_{DA}=15\%$  | 76   | 96   | 53   | 146                | <u>112</u> | 91   | 77   | 65          | 94   | 43   | 60   | 77  |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |               | 28             | 28   | 30   | 40   | <u>38</u>          | 44         | 34   | 24   | 38          | 25   | 28   | 39   |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) が、上昇と下降を繰り返し、上昇時に1に近づく (0.95に達する)。

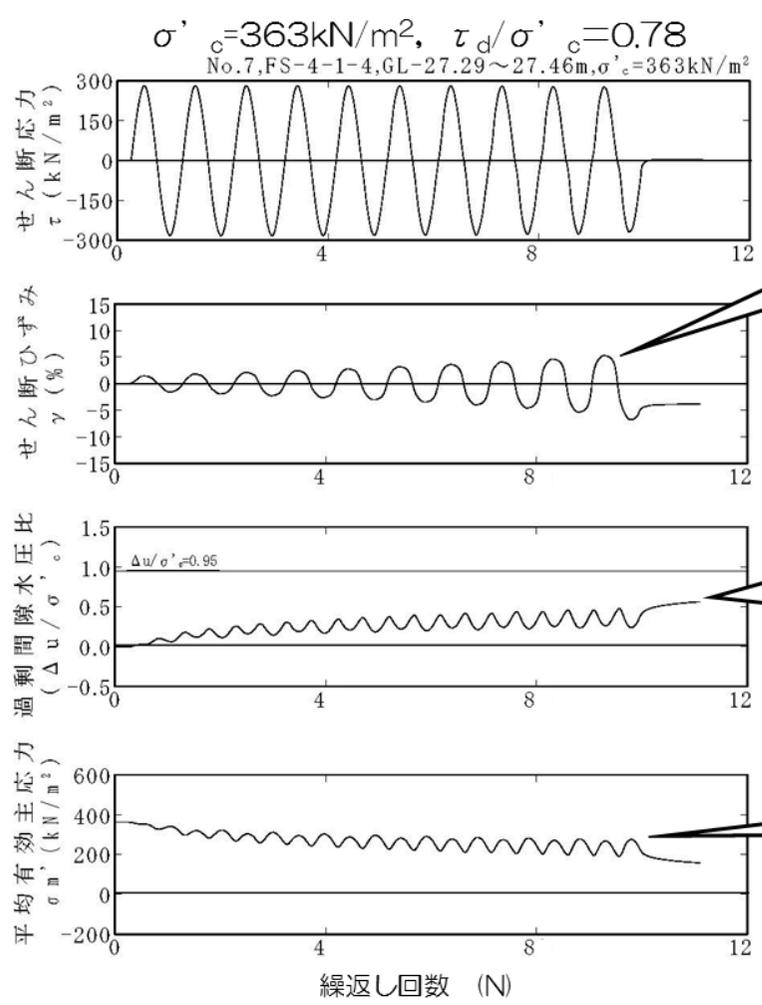
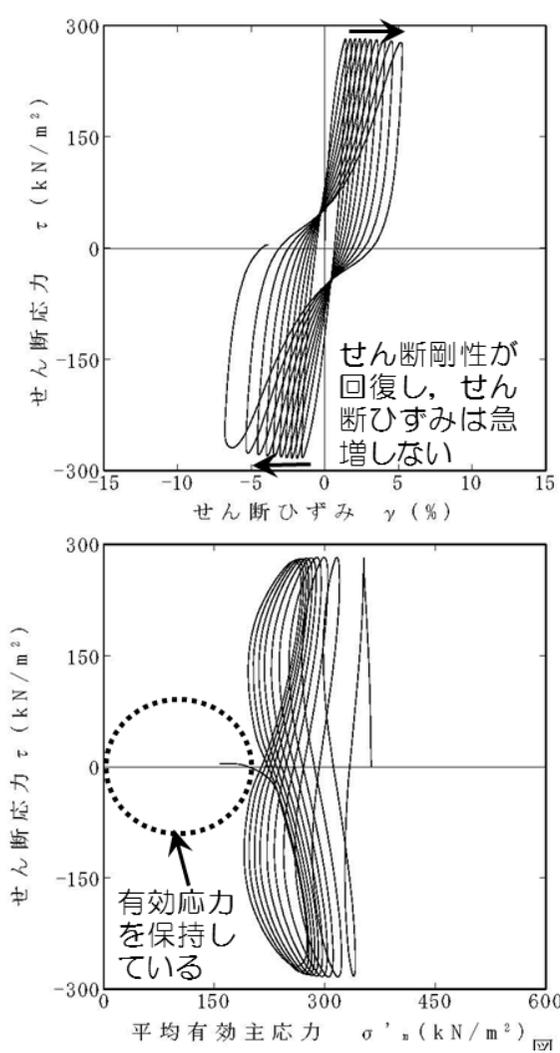
有効応力が回復する。

第 4.3.5 図 液状化試験結果の例 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)

第 4.3.6 表 液状化試験結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)

| 試料番号                                  |               | #6-1-1              |      |      |      | #6-1-2             |      |             |            | #6-1-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|------|------|------|--------------------|------|-------------|------------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 27.68~28.16         |      |      |      | <u>26.95~27.63</u> |      |             |            | 26.88~27.48 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |               | 洪積砂質土層 I            |      |      |      | 洪積砂質土層 I           |      |             |            | 洪積砂質土層 I    |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |               | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | <u>3</u>    | 4          | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | 2.649               |      |      |      | <u>2.677</u>       |      |             |            | 2.669       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 363                 |      |      |      | <u>363</u>         |      |             |            | 363         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |               | 0.51                | 0.60 | 0.78 | 0.64 | 0.51               | 0.61 | <u>0.78</u> | 0.68       | 0.51        | 0.46 | 0.35 | 0.64 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅 | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 8.5  | 0.9  | 0.5  | 0.7                | 0.9  | 0.7         | <u>0.5</u> | 0.5         | 0.5  | 42   | 200> | 0.9 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 18   | 5.5  | 0.7  | 0.9                | 6    | 1           | <u>0.7</u> | 0.7         | 0.7  | 200> | -    | 3.5 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 30   | 26   | 1.5  | 2                  | 35   | 12          | <u>1</u>   | 1           | 1    | -    | -    | 15  |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 54   | 71   | 5    | 7                  | 121  | 46          | <u>7</u>   | 6           | 8.5  | -    | -    | 45  |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | -    | -    | -                  | 127  | 53          | -          | -           | 12   | -    | -    | -   |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |               | -                   | -    | -    | -    | -                  | -    | -           | -          | -           | -    | -    | -    |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比( $\Delta u / \sigma'_c$ )が上昇と下降の繰返し、0.95に達しない。

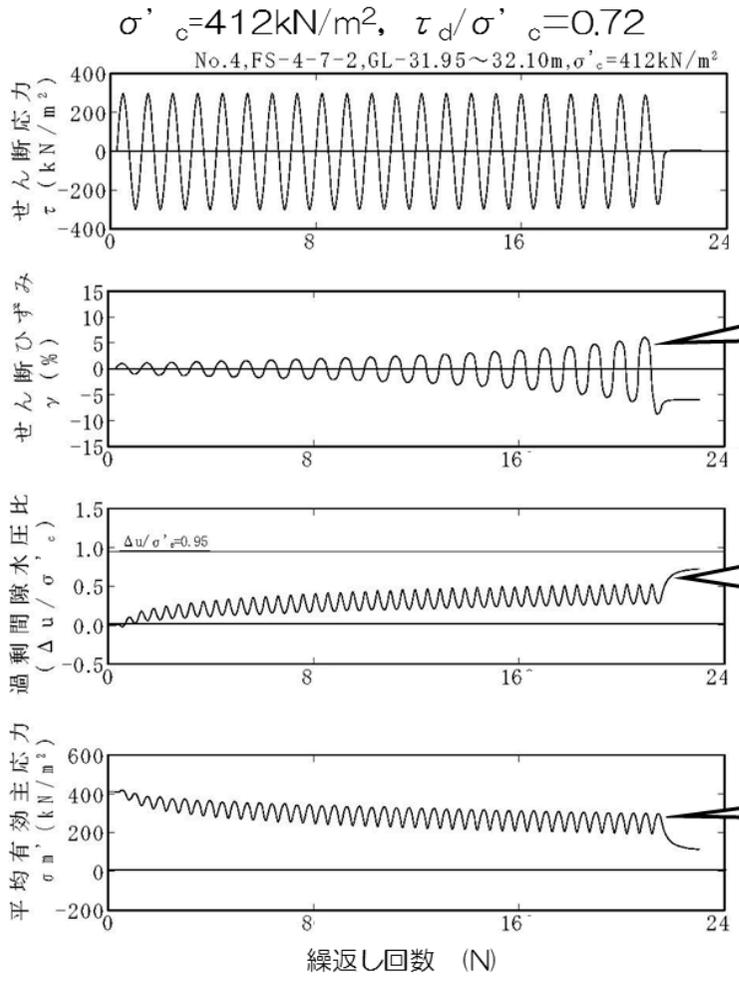
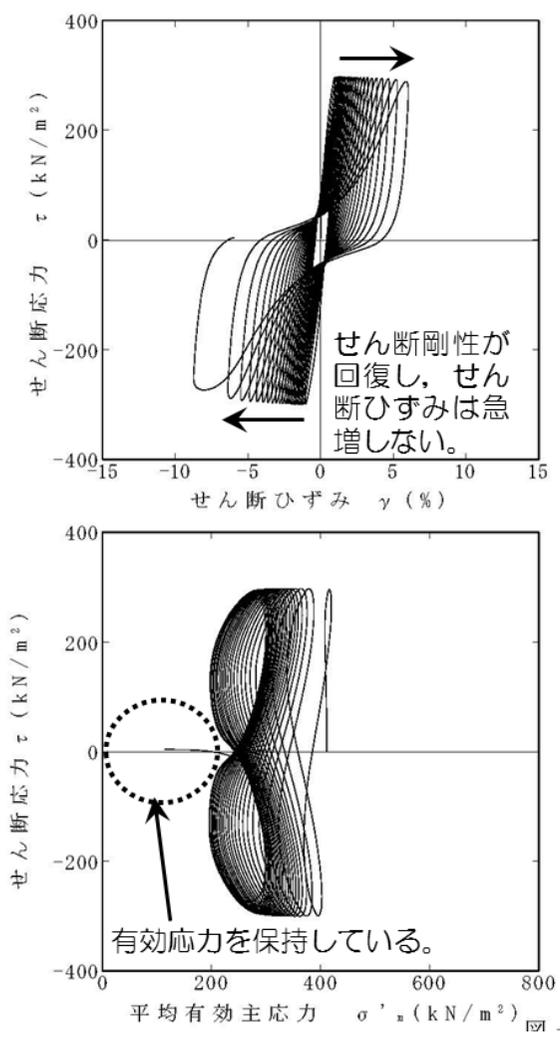
有効応力を保持している。

第 4.3.6 図 液状化試験結果の例 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)

第 4.3.7 表 液状化試験結果 (O-1 地点の洪積砂質土層Ⅱ)

| 試料番号                                  |               | #6-2-1              |      |      |             | #6-2-2      |      |      |      | #6-2-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | <u>31.65~34.75</u>  |      |      |             | 32.10~32.95 |      |      |      | 32.95~33.55 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |               | 洪積砂質土層Ⅱ             |      |      |             | 洪積砂質土層Ⅱ     |      |      |      | 洪積砂質土層Ⅱ     |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |               | 1                   | 2    | 3    | <u>4</u>    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | <u>2.664</u>        |      |      |             | 2.646       |      |      |      | 2.672       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | <u>412</u>          |      |      |             | 412         |      |      |      | 412         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |               | 0.59                | 0.52 | 0.79 | <u>0.72</u> | 0.51        | 0.58 | 0.69 | 0.64 | 0.57        | 0.53 | 0.70 | 0.65 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>面振幅 | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 1.5  | 6.5  | 0.3         | <u>0.7</u>  | 5.5  | 0.8  | 0.6  | 1           | 1    | 2    | 0.7  | 0.9 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 5    | 11   | 0.5         | <u>1</u>    | 24   | 1.5  | 0.9  | 5.5         | 4    | 6    | 1    | 2   |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 13   | 19   | 1           | <u>5</u>    | 61   | 7    | 2.5  | 17          | 14   | 15   | 3.5  | 5   |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 36   | 38   | 2           | <u>17</u>   | 111  | 25   | 8.5  | 38          | 37   | 34   | 9.5  | 16  |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | -    | -           | -           | 116  | 30   | -    | -           | 43   | 43   | 11   | -   |
| 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{u95}$              |               | -                   | -    | -    | -           | -           | -    | -    | -    | -           | -    | -    | -    |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_e$ ) が上昇と下降を繰返し、0.95に達しない。

有効応力を保持している。

第 4.3.7 図 液状化試験結果の例 (O-1 地点の洪積砂質土層 II)

|                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| A-1 (埋戻土層)                                                                         | A-3 (新期砂層・沖積層)                                                                      | A-1 (洪積砂層 I)                                                                         | A-1 (洪積砂層 II)                                                                        |
|   |   |   |   |
| <p>供試体側面にしわが確認される。</p>                                                             | <p>供試体側面にしわが確認される。</p>                                                              | <p>供試体側面にしわが確認される。</p>                                                               | <p>供試体側面に大きな変状は認められない。</p>                                                           |
| A-2 (洪積砂層 I)                                                                       | A-2 (洪積砂層 II)                                                                       | O-1 (洪積砂質土層 I)                                                                       | O-1 (洪積砂質土層 II)                                                                      |
|  |  |  |  |
| <p>供試体側面にせん断破壊による変状が認められる。</p>                                                     | <p>供試体側面にせん断破壊による変状が認められる。</p>                                                      | <p>供試体側面に大きな変状は認められない。</p>                                                           | <p>供試体側面に大きな変状は認められない。</p>                                                           |

第 4.3.8 図 液状化試験後の供試体状況

第 4.3.8 表 液状化試験結果のまとめ

|                          | A-1<br>埋戻<br>土層 | A-3<br>新期砂層<br>・沖積層 | A-1<br>洪積砂層Ⅰ    | A-1<br>洪積砂層Ⅱ    | A-2<br>洪積砂層Ⅰ    | A-2<br>洪積砂層Ⅱ    | O-1<br>洪積砂質土<br>層Ⅰ | O-2<br>洪積砂質土<br>層Ⅱ |
|--------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 形成時期                     | -               |                     |                 |                 |                 |                 |                    |                    |
|                          |                 | 沖積層                 | 洪積層             |                 |                 |                 |                    |                    |
| N値おおむね50以上               | ×               | ○                   | ○               | ×               | ×               | ○               | ○                  | ○                  |
| 平均相対密度80%以上              | ×               | ○                   | ○               | ○               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 液状化試験試料<br>採取深度(GL m)    | -3.5~<br>-5.5   | -13.0~<br>-15.4     | -8.0~<br>-11.0  | -13.0~<br>-21.0 | -13.2~<br>-14.1 | -20.2~<br>-26.2 | -26.9~<br>-28.2    | -31.7~<br>-34.8    |
| 過剰間隙水圧比が<br>0.95※を上回らない。 | ×               | ×                   | ×               | ×               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 過剰間隙水圧比が回復<br>する。        | ×               | ○                   | ○               | ○               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| せん断破壊発生の有無               | ×               | ×                   | ×               | ×               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 現象の整理                    | 液状化             | サイクリック<br>モビリティ     | サイクリックモ<br>ビリティ | サイクリックモ<br>ビリティ | 非液状化            | 非液状化            | 非液状化               | 非液状化               |

※JGS 0541-2000において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としていることによる。

第 4.3.9 表 液状化試験結果の分類

| 対象層                           | A-1 (埋戻土層)                                                                                                                     | A-1 (洪積砂層Ⅰ)<br>A-1 (洪積砂層Ⅱ)<br>A-3 (新期砂層・沖積層)                                                                                                       | A-2 (洪積砂層Ⅰ)<br>A-2 (洪積砂層Ⅱ)<br>O-1 (洪積砂質土層Ⅰ)<br>O-1 (洪積砂質土層Ⅱ)                                                             |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 液状化試験の状況                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を上回る)。</li> <li>• 有効応力がゼロになる。</li> <li>• ひずみが急激に上昇する。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し、上昇時に1.0に近づく (0.95を上回る)。</li> <li>• 有効応力が減少するが、回復する。</li> <li>• ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が0.95を上回らない。</li> <li>• 有効応力を保持している。</li> <li>• ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul> |
| 試験結果の分類                       | 試験結果は、液状化である。                                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 試験結果は、サイクリックモビリティである。</li> <li>• 有効応力が回復するため支持力が期待できる。</li> </ul>                                         | 試験結果は、非液状化である。                                                                                                           |
| 基準地震動S <sub>s</sub> に対する液状化判定 | 基準地震動S <sub>s</sub> に対する液状化判定 (F <sub>L</sub> 法) を実施                                                                           | 基準地震動S <sub>s</sub> に対する液状化試験の妥当性確認                                                                                                                |                                                                                                                          |

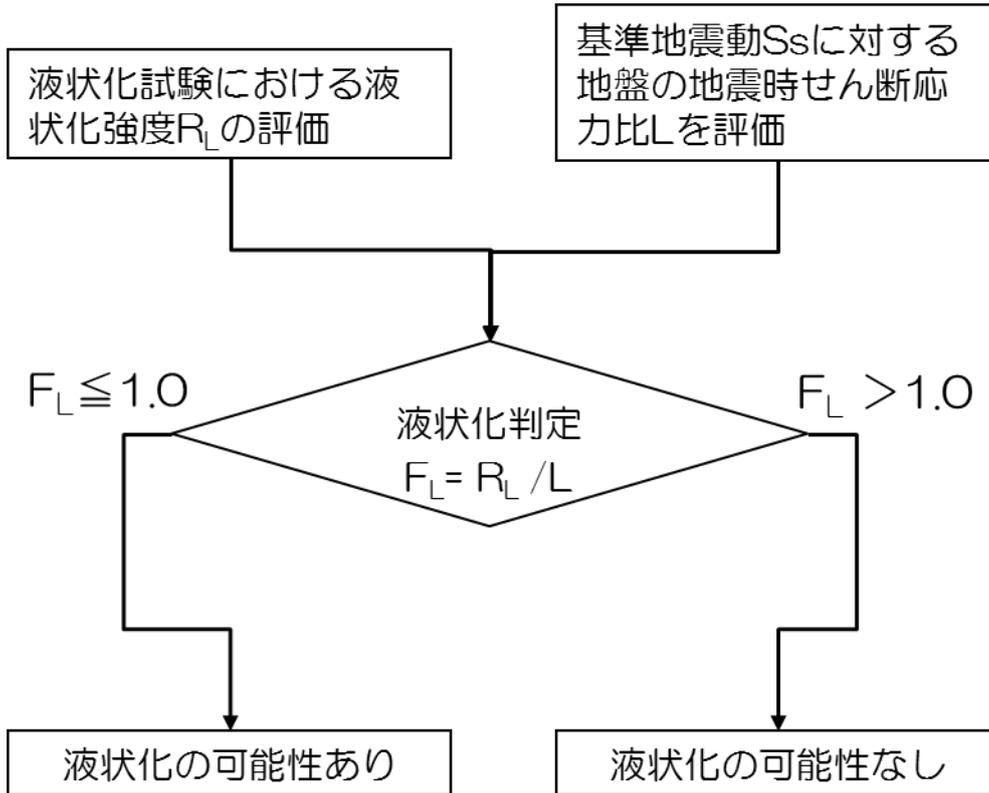
## 5. 基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定 (FL 法)

A-1 地点の埋戻土層については液状化試験結果が液状化を示していることから道路橋示方書の液状化判定 (FL 法) を実施し、基準地震動  $S_s$  作用時の液状化の有無を判定する。第 5.1 図に FL 法による液状化判定のフローを示す。

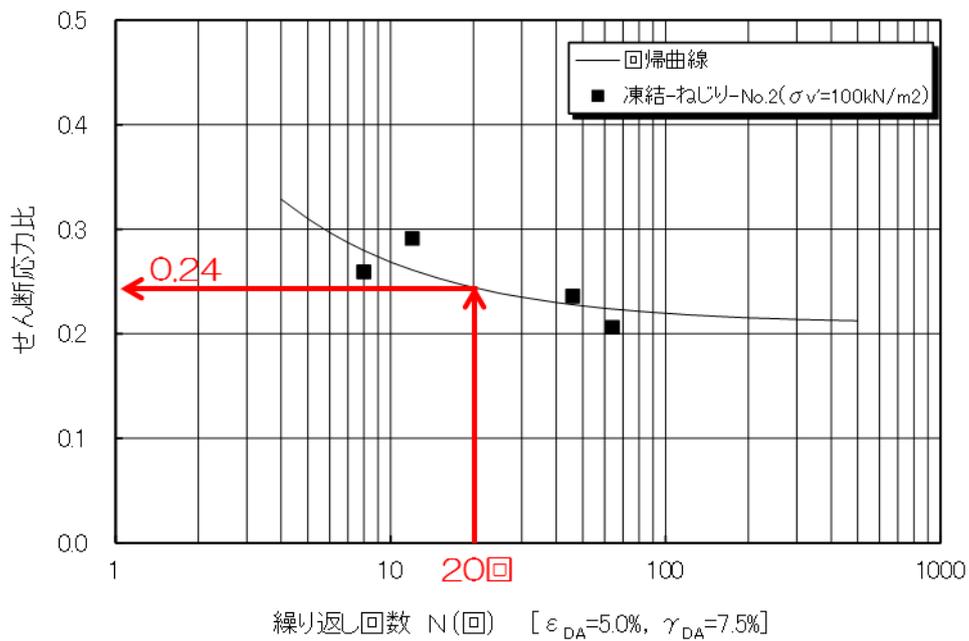
液状化判定 (FL 法) に用いる A-1 地点の埋戻土層の液状化強度  $R_L$  は、先述の液状化試験結果に基づいて設定する。第 5.2 図に液状化試験結果に基づく液状化強度  $R_L$  を示す。

基準地震動  $S_s$  が作用した際の A-1 地点の埋戻土層に発生するせん断応力比を一次元逐次非線形解析より求める。第 5.3 図に解析用物性値および解析モデルを、第 5.4 図に地震応答解析結果を示す。

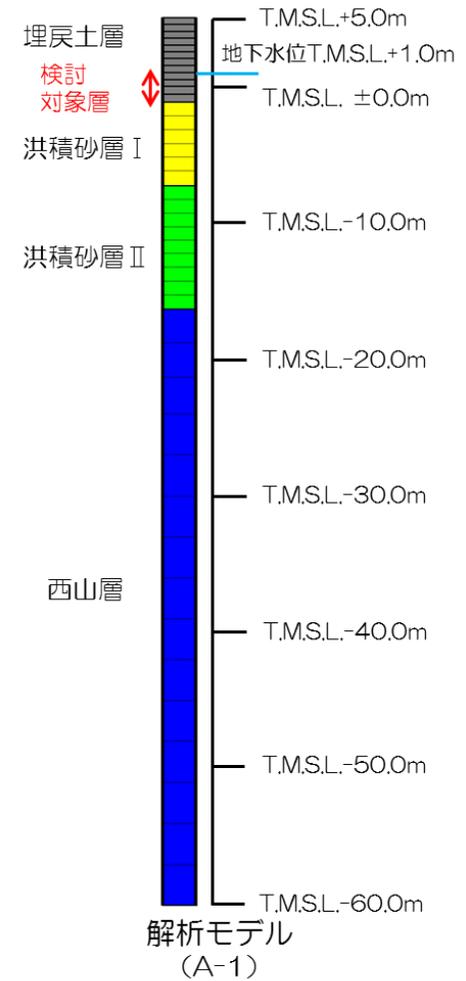
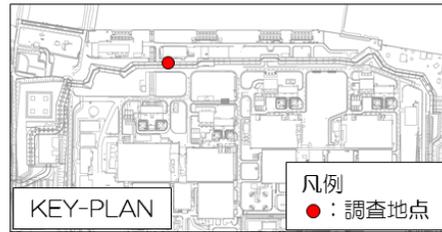
地震応答解析結果における最大せん断応力と液状化試験から求まる液状化強度  $R_L$  を比較し、第 5.1 表に示す。液状化判定 (FL 法) の結果、A-1 地点の埋戻土層は、全ての基準地震動  $S_s$  に対して液状化する可能性があるとは判断される。



第 5.1 図 FL法による液状化判定のフロー



第 5.2 図 液状化試験結果に基づく液状化強度  $R_L$  (埋戻土層)



地盤物性値

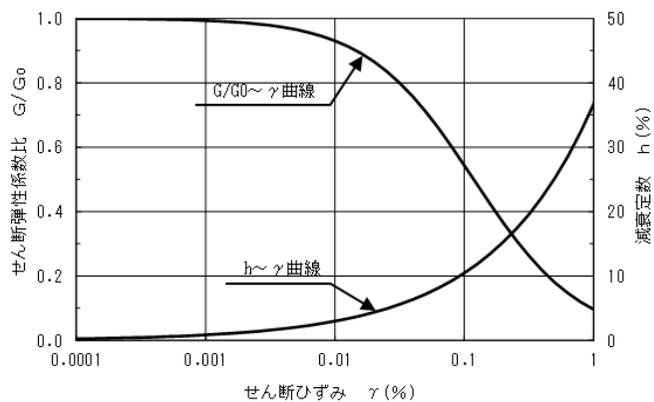
| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$     | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1   | $1980 \times \sigma_v'{}^{0.667}$       | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積砂層 I                     | 19.1                                      | 0.47               | $1.53 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積砂層 II                    | 18.6                                      | 0.48               | $1.49 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-62.0m | 16.9                                      | 0.43               | $5.02 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-77.0m            | 16.9                                      | 0.43               | $5.99 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $6.62 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-128.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $7.28 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-192.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $7.73 \times 10^5$                      |                   |
| ~T.M.S.L.-284.0m | 16.9                       | 0.43                                      | $8.20 \times 10^5$ |                                         |                   |
| 解放基盤             |                            | 16.9                                      | 0.43               | $9.17 \times 10^5$                      |                   |

\* 1 : 地下水位以深の物性値

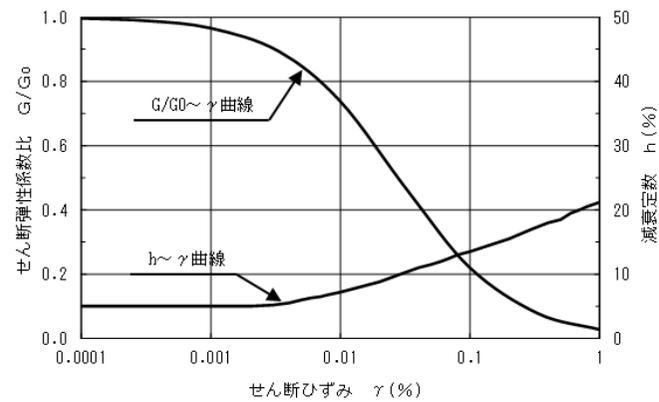
(既工認物性)

(a) 基本物性

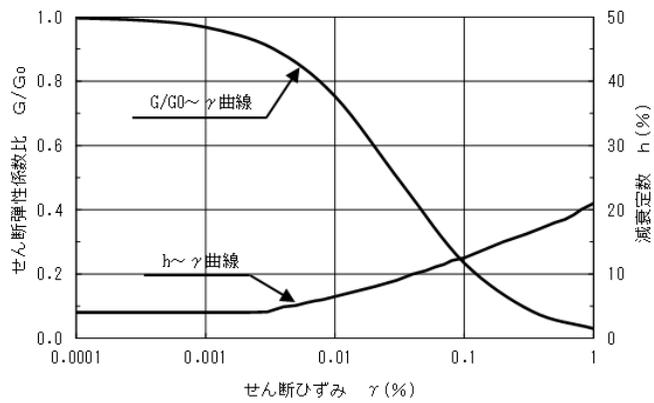
第 5.3 図 解析用物性値および解析モデル (A-1 地点)



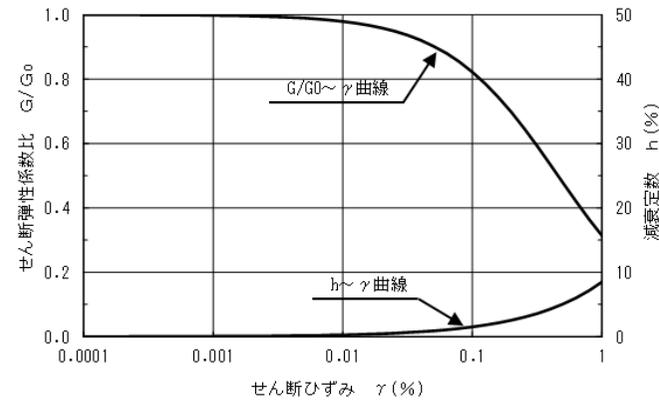
埋戻土層



洪積砂層 I



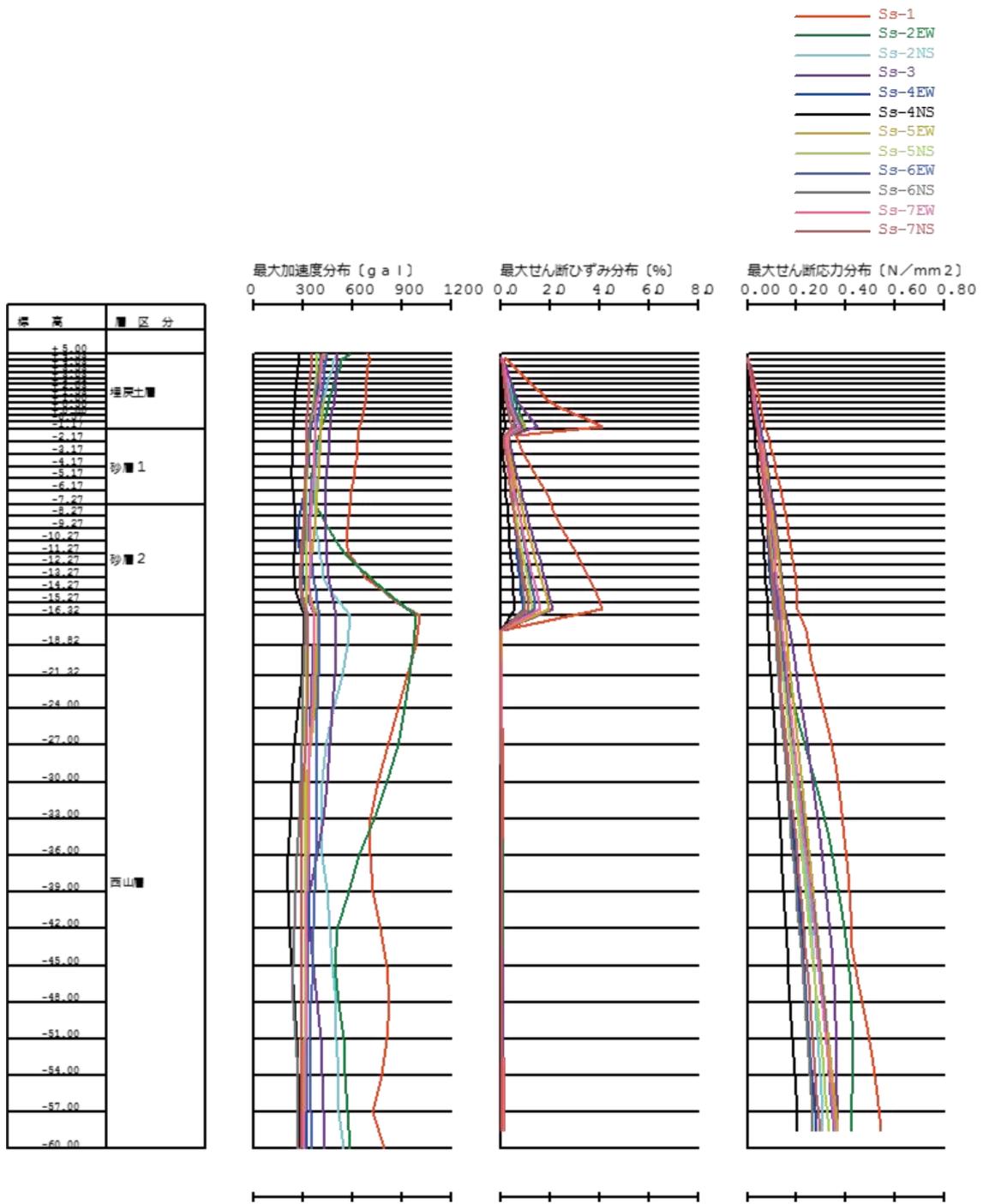
洪積砂層 II



西山層

(b) せん断剛性および減衰のひずみ依存性

第 5.3 図 解析用物性値および解析モデル (A-1 地点)



第 5.4 図 地震応答解析結果 (A-1 地点)

第 5.1 表 埋戻土層の液状化判定 (F<sub>L</sub>法) 結果

| 基準<br>地震動 S <sub>s</sub> | 最大せん断応力比<br>L | 液状化強度<br>R <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> 値<br>=R <sub>L</sub> /L | 評価  |
|--------------------------|---------------|-------------------------|----------------------------------------|-----|
| Ss1                      | 0.76          | 0.24                    | 0.32                                   | 液状化 |
| Ss2EW                    | 0.51          |                         | 0.47                                   | 液状化 |
| Ss2NS                    | 0.47          |                         | 0.51                                   | 液状化 |
| Ss3                      | 0.57          |                         | 0.42                                   | 液状化 |
| Ss4EW                    | 0.44          |                         | 0.55                                   | 液状化 |
| Ss4NS                    | 0.30          |                         | 0.80                                   | 液状化 |
| Ss5EW                    | 0.51          |                         | 0.47                                   | 液状化 |
| Ss5NS                    | 0.44          |                         | 0.55                                   | 液状化 |
| Ss6EW                    | 0.49          |                         | 0.49                                   | 液状化 |
| Ss6NS                    | 0.43          |                         | 0.56                                   | 液状化 |
| Ss7EW                    | 0.47          |                         | 0.51                                   | 液状化 |
| Ss7NS                    | 0.40          |                         | 0.60                                   | 液状化 |

## 6. 基準地震動 Ss に対する液状化試験の妥当性確認

新期砂層・沖積層および古安田層中の砂層については、試験結果が液状化を示さず、道路橋示方書の液状化判定方法が適用出来ないと考えられる。このため、液状化試験が基準地震動 Ss 相当の地盤の状態（繰返し応力および繰返し回数）を模擬していることを確認する。第 6.1 図に累積損傷度理論に基づく評価のフローを、第 6.2 図に累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法を示す。

なお、埋戻土層においては、5 章に示した FL 法の判定結果から、基準地震動 Ss において地盤に発生するせん断応力比よりも小さいせん断応力比で液状化する結果となっている。

評価にあつて、液状化試験箇所である A-1 地点、A-2 地点、A-3 地点および O-1 地点の地盤モデルを用いて、一次元逐次非線形解析を実施した。第 5.3 図、第 6.3 図および第 6.4 図に各地点の解析用物性値および解析モデルを示す。また、評価結果を第 6.1 表および第 6.5～11 図に示す。

A-1 地点の洪積砂層 I について、解析結果による最大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および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。低拘束圧部の基準地震動 Ss-4NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（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、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。（第 6.5 図参照）

A-1 地点の洪積砂層 II について、解析結果による最大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および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。（第 6.6 図参照）

A-2 地点の洪積砂層 I について、解析結果による最大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および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。Ss-1, Ss-3 および Ss-5EW 以外の基準地震動 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で設定した下限値（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、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。（第 6.7 図参照）

A-2 地点の洪積砂層 II について、解析結果による最大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および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。Ss-2NS, Ss-4EW, Ss-4NS, Ss-5NS, Ss-6EW, Ss-6NS および Ss-7NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（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

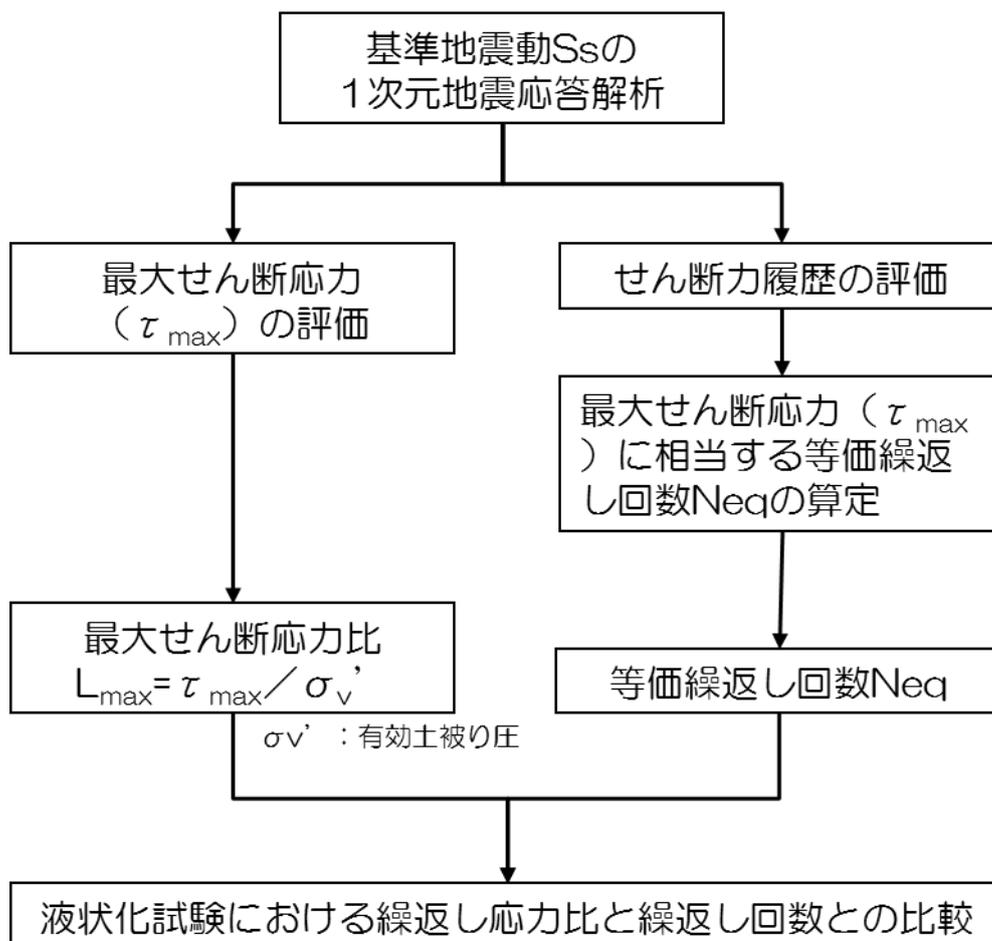
あるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 6.8 図参照)

A-3 地点の新期砂層・沖積層について、解析結果による最大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および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。Ss-4NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値(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、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 6.9 図参照)

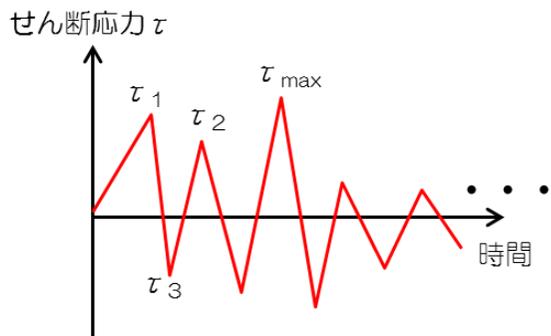
O-1 地点の洪積砂質土層 I について、全ての基準地震動 Ss で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値(繰返し回数 200 回のせん断応力比)以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 6.10 図参照)

O-1 地点の洪積砂質土層 II について、全ての基準地震動 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で設定した下限値(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、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 6.11 図参照)

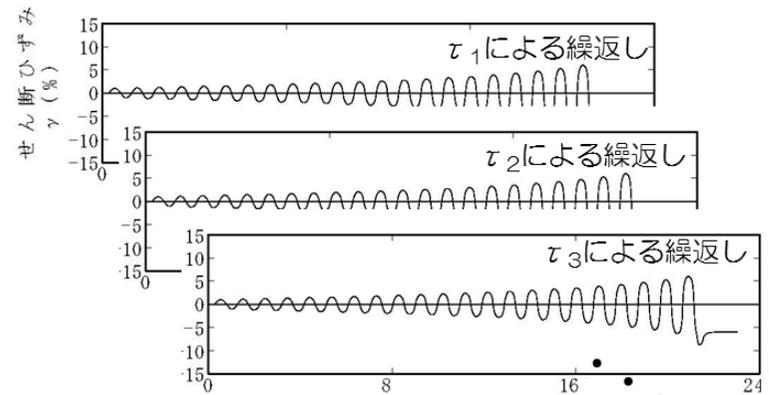
新期砂層・沖積層および古安田層中の砂層における液状化試験の結果は、基準地震動 Ss 時の最大せん断応力比および等価繰返し回数と同程度である。よって、今回実施した試験は、当該地盤に基準地震動 Ss 相当が作用した状態を概ね再現できている判断される。



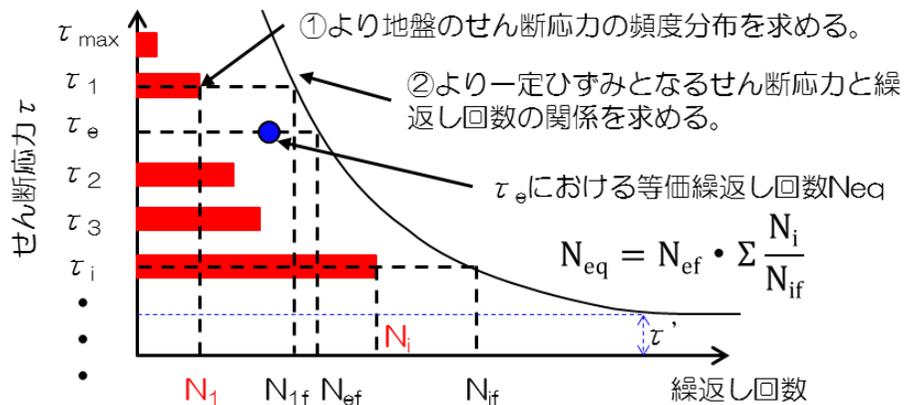
第 6.1 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価のフロー



①対象地盤の地震応答解析におけるせん断応力履歴

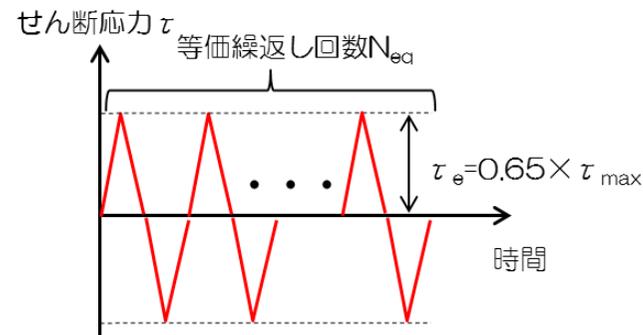


②試験による一定せん断応力振幅時の繰返し回数とせん断ひずみ



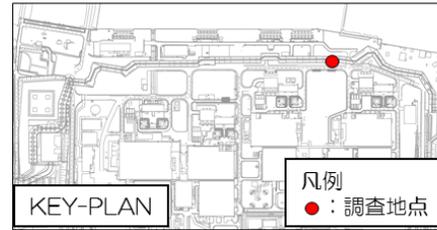
③累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

$\tau'$  : あるレベル以下のせん断応力については、累積損傷度に寄与しないため、評価対象外とする。本検討では、液状化試験の最大繰返し回数 200 回に相当するせん断応力を設定した。



④対象地盤の地震応答解析と等価な一定せん断応力比と等価繰返し回数

第 6.2 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

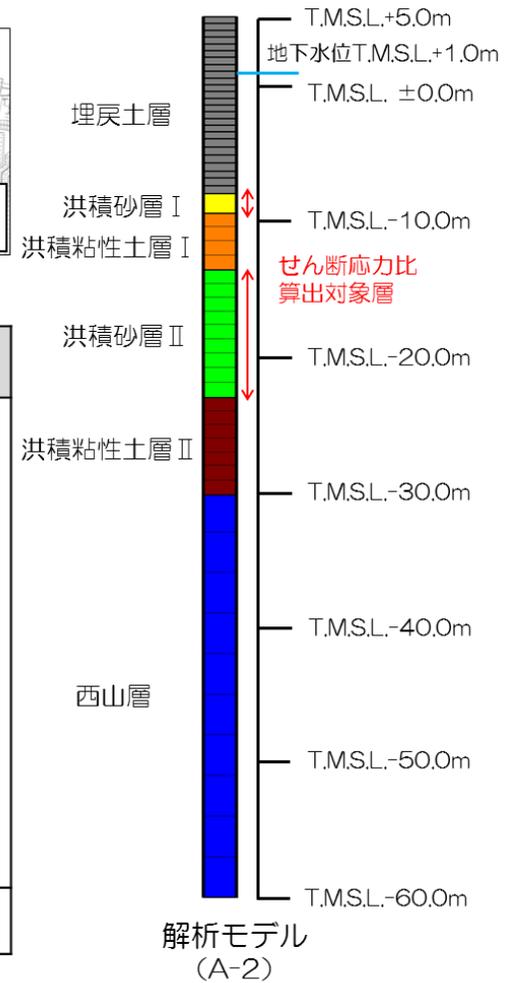


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v'^{0.667}$         | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積砂層Ⅰ                      | 18.3                                      | 0.47             | $2.29 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅰ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.24 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積砂層Ⅱ                      | 18.5                                      | 0.48             | $2.06 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.74 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-66.0m | 15.6                                      | 0.46             | $3.23 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 15.8                                      | 0.45             | $3.86 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-150.0m           | 16.9                                      | 0.44             | $5.39 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-248.0m           | 17.4                                      | 0.43             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 17.8                                      | 0.41             | $9.18 \times 10^5$                      | —                 |

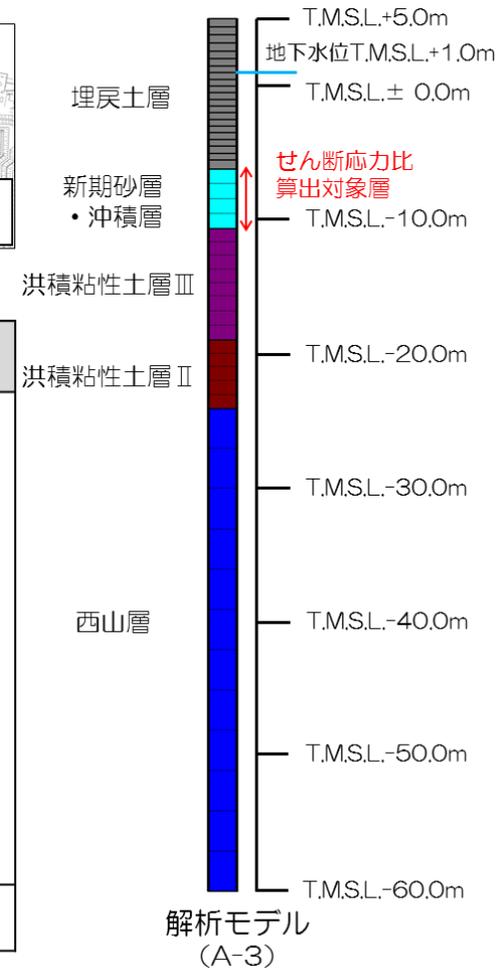
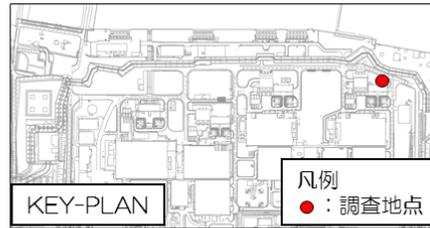
\* 1 : 地下水位以深の物性値

(既工認物性)



(a) 基本物性 (A-2 地点)

第 6.3 図 解析用物性値および解析モデル



地盤物性値

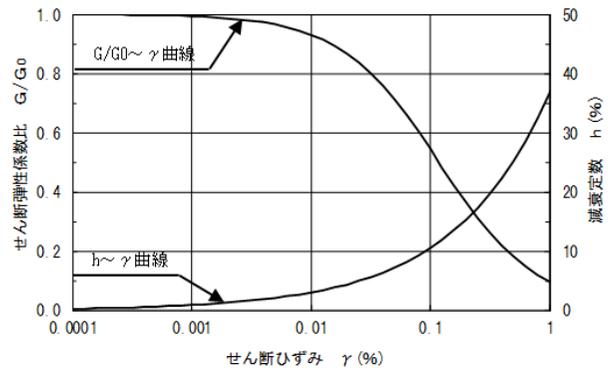
| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |   |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|---|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v'{}^{0.667}$       | ひずみ依存性を<br>考慮     |   |
| 新期砂層・沖積層         |                            | 19.9                                      | 0.48             | $1.82 \times 10^5$                      |                   |   |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積粘性土層Ⅲ                    | 17.8                                      | 0.49             | $8.82 \times 10^4$                      |                   |   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.74 \times 10^5$                      |                   |   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-66.0m | 15.6                                      | 0.46             | $3.23 \times 10^5$                      |                   |   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 15.8                                      | 0.45             | $3.86 \times 10^5$                      |                   |   |
|                  | ~T.M.S.L.-150.0m           | 16.9                                      | 0.44             | $5.39 \times 10^5$                      |                   |   |
|                  | ~T.M.S.L.-248.0m           | 17.4                                      | 0.43             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |   |
| 解放基盤             |                            | 17.8                                      | 0.41             | $9.18 \times 10^5$                      |                   | — |

\* 1 : 地下水位以深の物性値

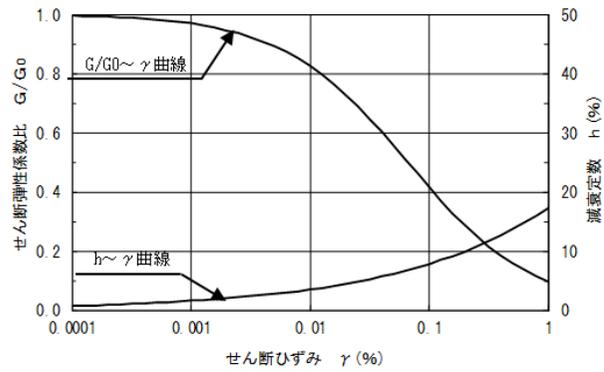
(既工認物性)

(b) 基本物性 (A-3 地点)

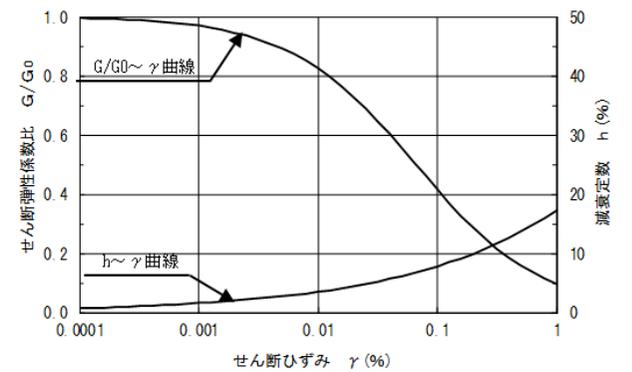
第 6.3 図 解析用物性値および解析モデル



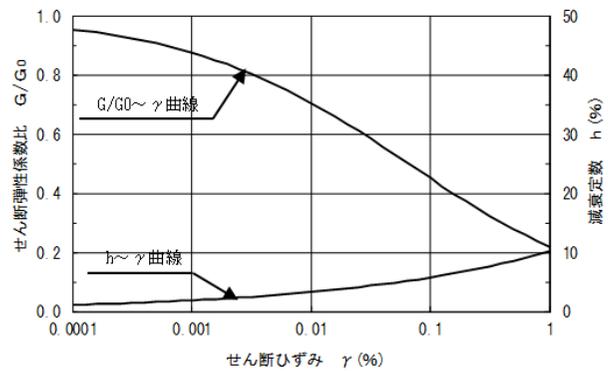
埋戻土層



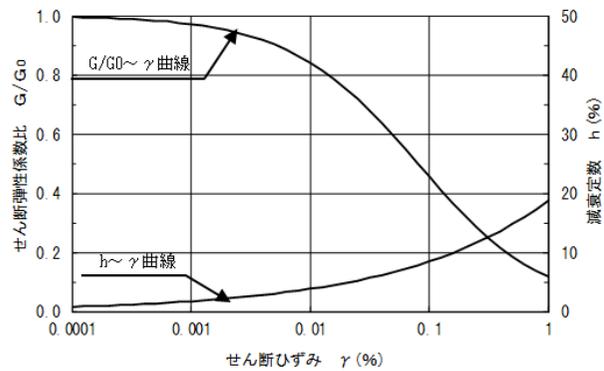
洪積砂層 I, II



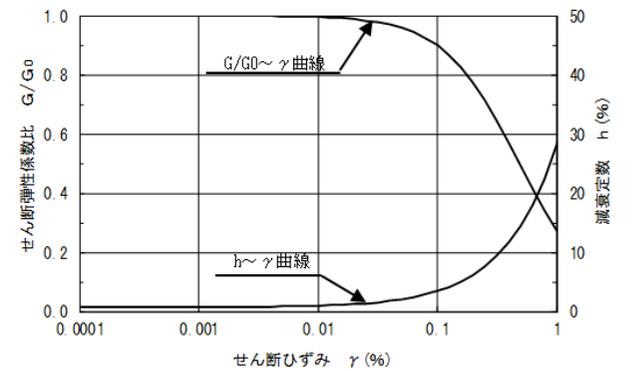
新期砂層・沖積層



洪積粘性土層 I, II



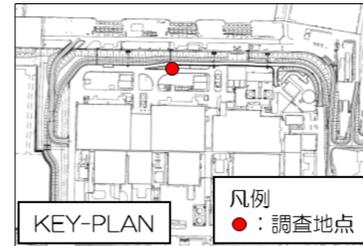
洪積粘性土層 III



西山層

(c) せん断剛性および減衰のひずみ依存性 (A-2 および A-3 地点)

第 6.3 図 解析用物性値および解析モデル

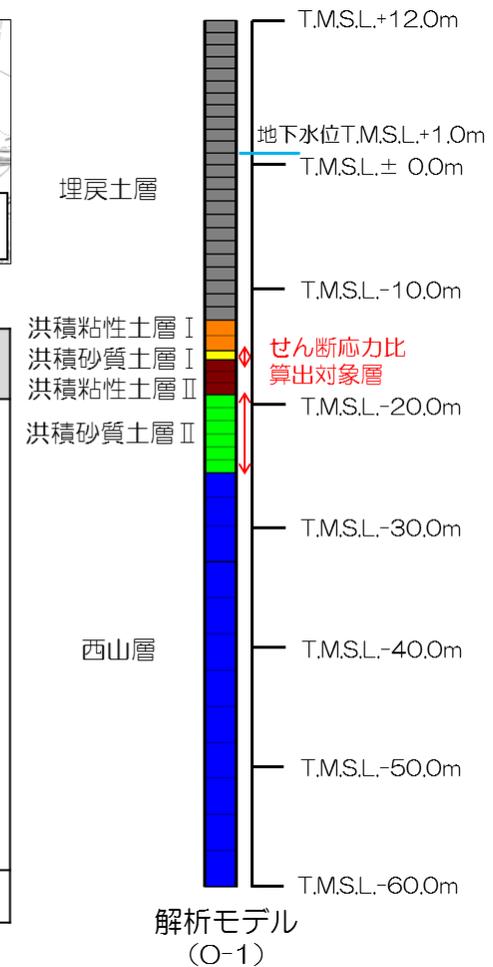


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.41<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v' \cdot 0.667$ *2  | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積粘性土層Ⅰ                    | 17.8                                      | 0.49             | $9.63 \times 10^4$                      |                   |
|                  | 洪積砂質土層Ⅰ                    | 18.6                                      | 0.48             | $1.82 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.7                                      | 0.49             | $1.13 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積砂質土層Ⅱ                    | 18.6                                      | 0.48             | $2.07 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-33.0m | 17.0                                      | 0.45             | $4.16 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-90.0m            | 16.6                                      | 0.45             | $4.75 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-136.0m           | 17.3                                      | 0.43             | $6.13 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-155.0m           | 19.3                                      | 0.42             | $8.33 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 19.9                                      | 0.42             | $1.05 \times 10^6$                      | -                 |

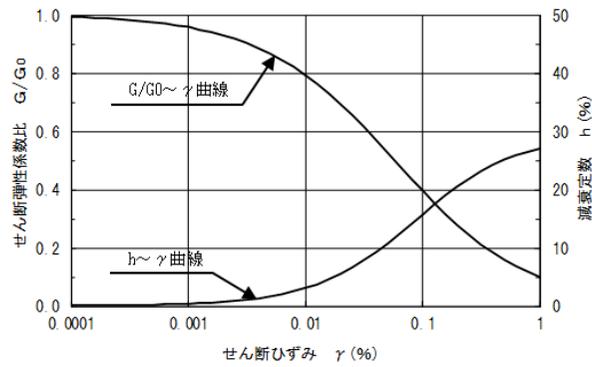
\* 1 : 地下水位以深の物性値  
\* 2 : 下限値  $2.75 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup>

(既工認物性)

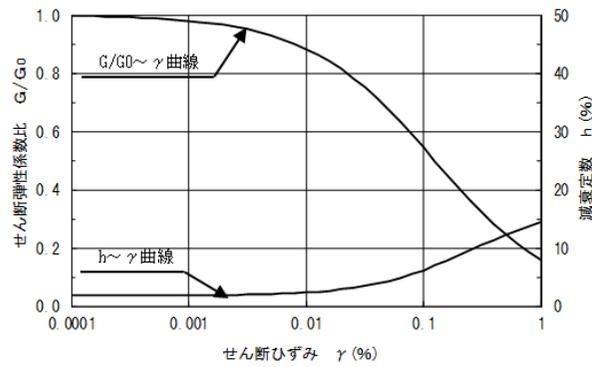


(a) 基本物性 (O-1 地点)

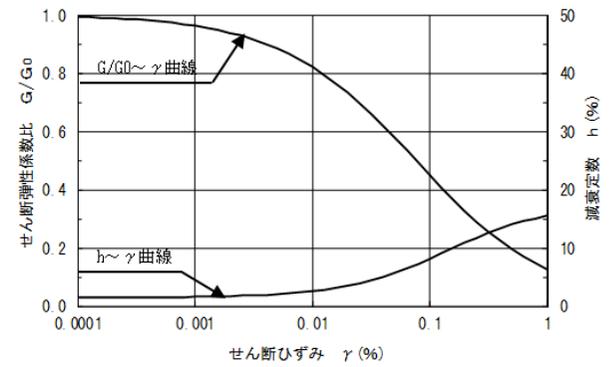
第 6.4 図 解析用物性値および解析モデル



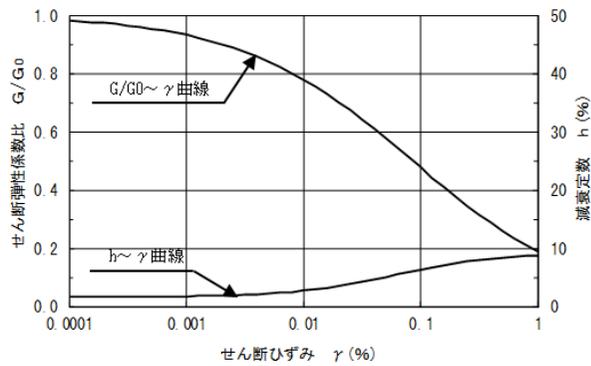
埋戻土層



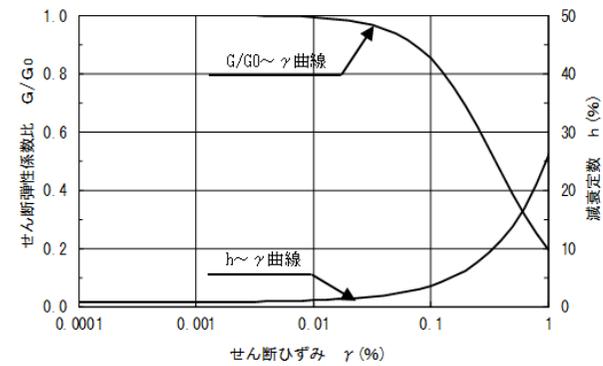
洪積粘性土層 I



洪積砂質土層 I, II



洪積粘性土層 II



西山層

(b) せん断剛性および減衰のひずみ依存性 (O-1 地点)

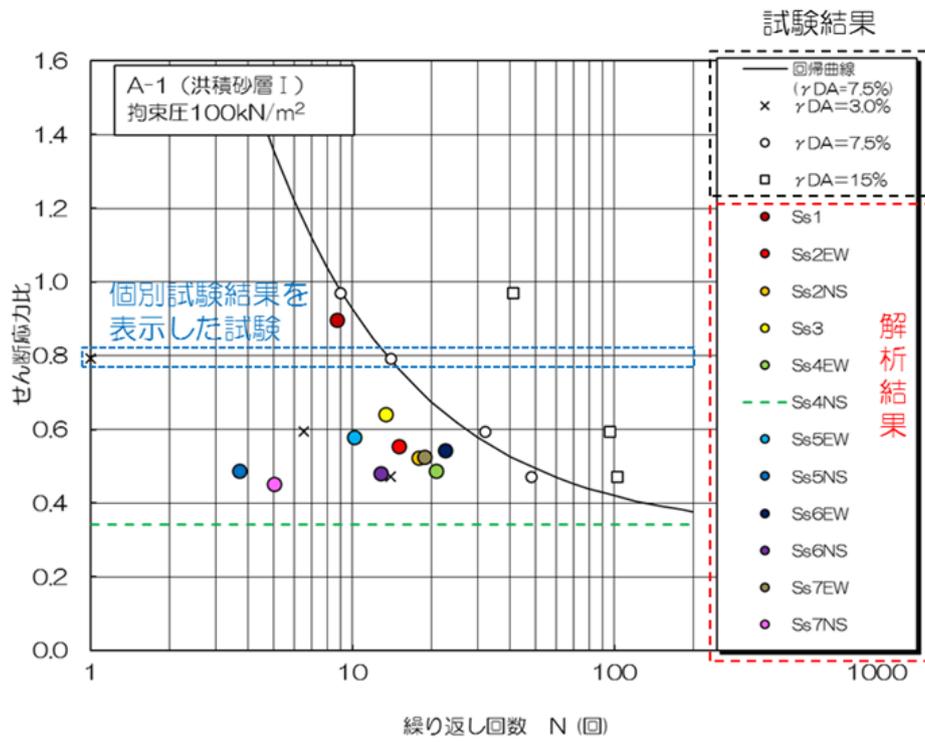
第 6.4 図 解析用物性値および解析モデル

第 6.1 表 地震応答解析における最大せん断応力と等価繰返し回数

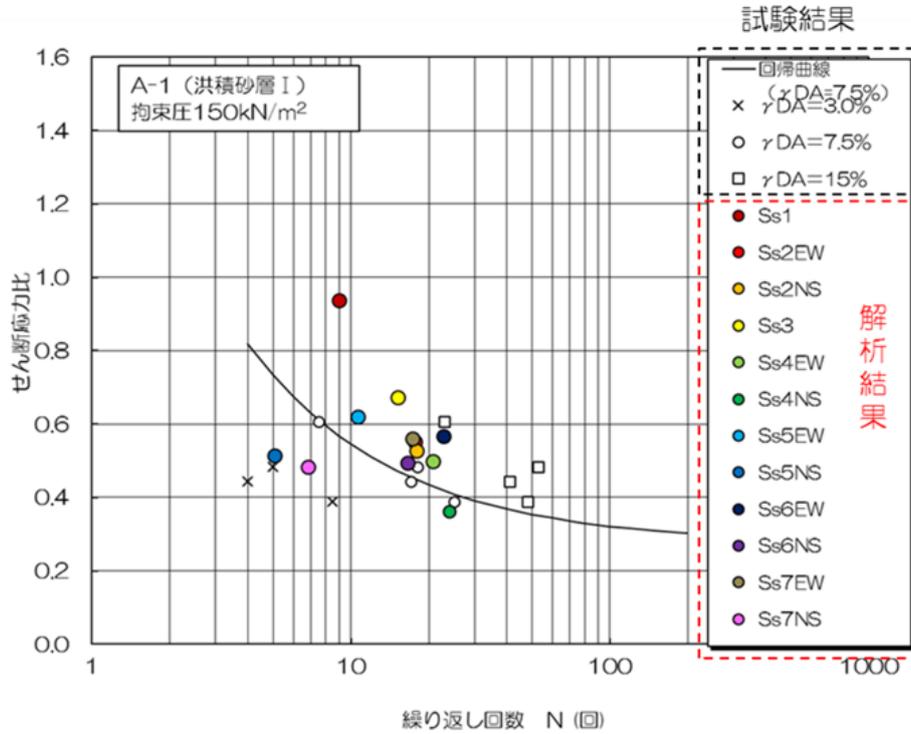
| 基準地震動Ss | A-1                                        |                 |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 | A-2              |                 |                  |                 | A-3              |                 | O-1              |                 |                  |                 |
|---------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|         | 洪積砂層Ⅰ<br>(土被り圧<br>100kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅰ<br>(土被り圧<br>150kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅱ<br>(土被り圧<br>150kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅱ<br>(土被り圧<br>200kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅰ            |                 | 洪積砂層Ⅱ            |                 | 新期砂層・沖積層         |                 | 洪積砂質土層Ⅰ          |                 | 洪積砂質土層Ⅱ          |                 |
|         | L <sub>max</sub>                           | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> |
| Ss1     | 0.90                                       | 8.7             | 0.94                                       | 9.0             | 0.96                                       | 7.4             | 0.95                                       | 7.2             | 0.88             | 6.1             | 0.91             | 8.2             | 0.98             | 6.0             | 0.43             | -※1             | 0.46             | -※1             |
| Ss2EW   | 0.55                                       | 15.0            | 0.55                                       | 17.6            | 0.52                                       | 19.1            | 0.47                                       | 24.2            | 0.53             | -※1             | 0.64             | 126.8           | 0.55             | 20.4            | 0.32             | -※1             | 0.34             | -※1             |
| Ss2NS   | 0.52                                       | 17.8            | 0.53                                       | 17.9            | 0.53                                       | 19.1            | 0.51                                       | 20.3            | 0.53             | -※1             | 0.60             | -※1             | 0.56             | 20.9            | 0.25             | -※1             | 0.25             | -※1             |
| Ss3     | 0.64                                       | 13.3            | 0.67                                       | 15.1            | 0.68                                       | 12.6            | 0.69                                       | 12.5            | 0.68             | 22.1            | 0.72             | 16.6            | 0.73             | 11.2            | 0.43             | -※1             | 0.44             | -※1             |
| Ss4EW   | 0.49                                       | 20.9            | 0.50                                       | 20.7            | 0.50                                       | 22.1            | 0.47                                       | 25.1            | 0.48             | -※1             | 0.53             | -※1             | 0.48             | 60.9            | 0.34             | -※1             | 0.37             | -※1             |
| Ss4NS   | 0.34                                       | -※1             | 0.36                                       | 23.9            | 0.37                                       | 40.9            | 0.37                                       | 31.3            | 0.39             | -※1             | 0.42             | -※1             | 0.40             | -※1             | 0.22             | -※1             | 0.23             | -※1             |
| Ss5EW   | 0.58                                       | 10.1            | 0.62                                       | 10.6            | 0.64                                       | 9.2             | 0.65                                       | 8.6             | 0.64             | 53.1            | 0.70             | 13.5            | 0.68             | 8.2             | 0.44             | -※1             | 0.48             | -※1             |
| Ss5NS   | 0.49                                       | 3.7             | 0.51                                       | 5.1             | 0.53                                       | 4.7             | 0.53                                       | 4.9             | 0.52             | -※1             | 0.61             | -※1             | 0.54             | 4.4             | 0.24             | -※1             | 0.25             | -※1             |
| Ss6EW   | 0.54                                       | 22.5            | 0.57                                       | 22.7            | 0.57                                       | 20.4            | 0.57                                       | 20.3            | 0.57             | -※1             | 0.62             | -※1             | 0.59             | 22.6            | 0.40             | -※1             | 0.44             | -※1             |
| Ss6NS   | 0.48                                       | 12.8            | 0.50                                       | 16.5            | 0.50                                       | 14.8            | 0.49                                       | 14.7            | 0.52             | -※1             | 0.57             | -※1             | 0.53             | 10.8            | 0.27             | -※1             | 0.27             | -※1             |
| Ss7EW   | 0.53                                       | 18.8            | 0.56                                       | 17.3            | 0.58                                       | 15.3            | 0.59                                       | 14.2            | 0.58             | -※1             | 0.67             | 38.7            | 0.62             | 15.1            | 0.48             | -※1             | 0.51             | -※1             |
| Ss7NS   | 0.45                                       | 5.0             | 0.48                                       | 6.8             | 0.50                                       | 5.3             | 0.50                                       | 5.5             | 0.51             | -※1             | 0.56             | -※1             | 0.52             | 7.1             | 0.29             | -※1             | 0.31             | -※1             |
| Ss8     |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 |                  |                 |                  |                 |                  |                 | 0.33             | -※1             | 0.35             | -※1             |

最大せん断応力比： $L_{max} = \tau_{max} / \sigma_v'$ ， $\tau_{max}$ ：最大せん断応力， $\sigma_v'$ ：有効土被り圧， $N_{eq}$ ：等価繰返し回数

- ※1 解析から得られる最大せん断応力比 ( $L_{max}$ ) が、試験結果から設定した回帰曲線の繰返し回数200回の値よりも小さいものについては、累積損傷度理論にも基づく等価繰返し回数の評価対象外であるため「-」と表記
- ※2 試験は等方等圧試験であり、実地盤と応答解析を比較するため、静止土圧係数 ( $K_0$ ：一般値0.5) により、等価せん断応力を補正して最大せん断応力を等価繰返し回数と対比する。 $\tau_e \times 3 / (1 + 2K_0) = 0.65 \times 3 / 2 \times \tau_{max} \doteq \tau_{max}$ ， $\tau_e$ ：等価せん断応力

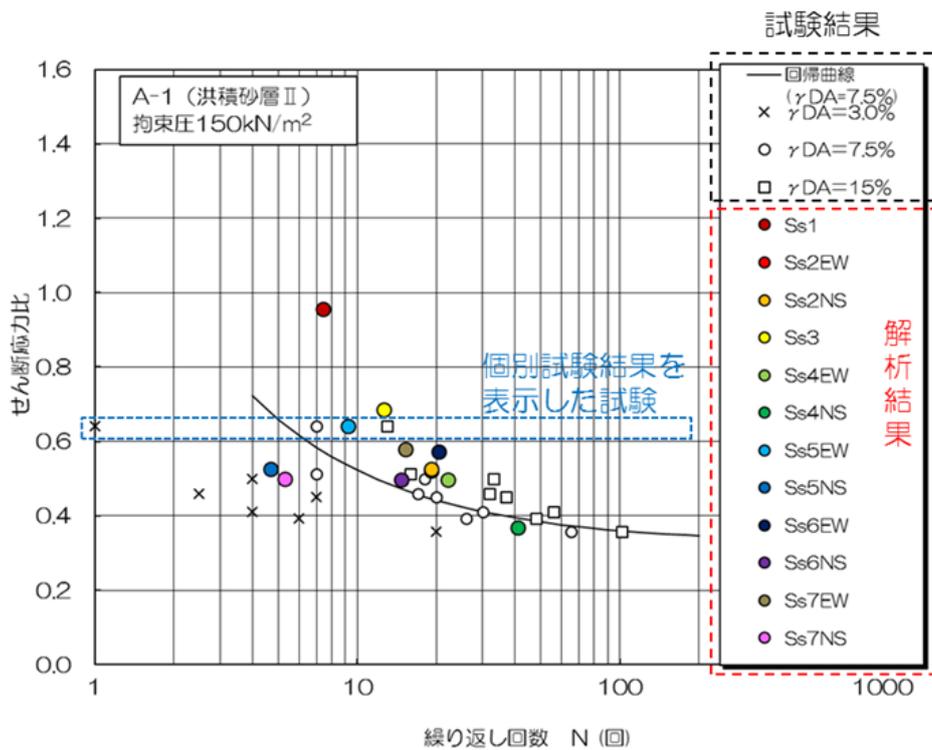


(a) 拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>

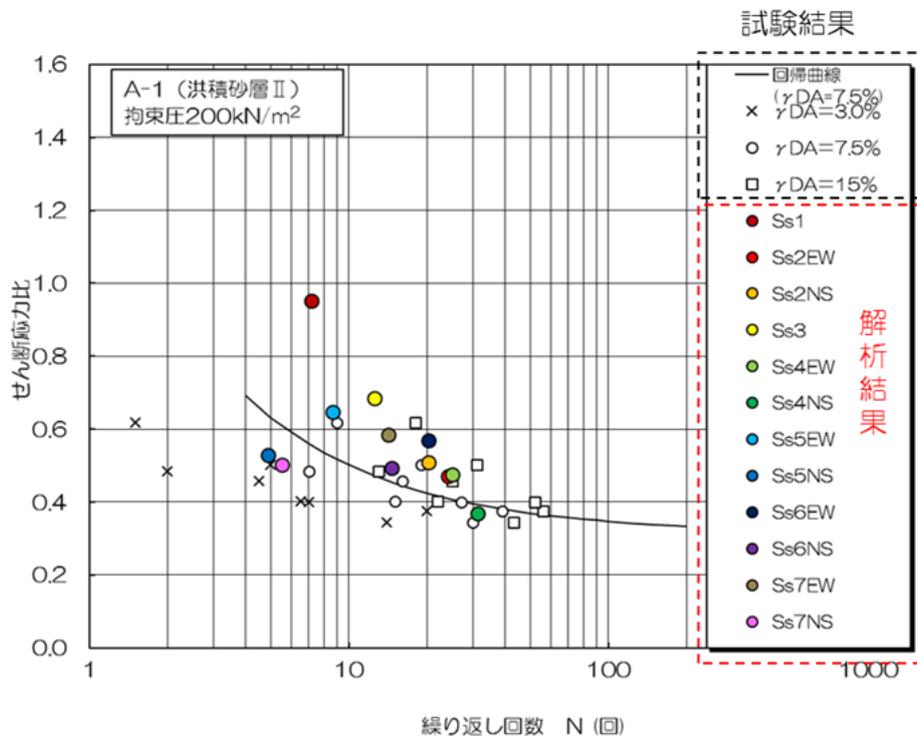


(b) 拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>

第 6.5 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-1 地点の洪積砂層 I)

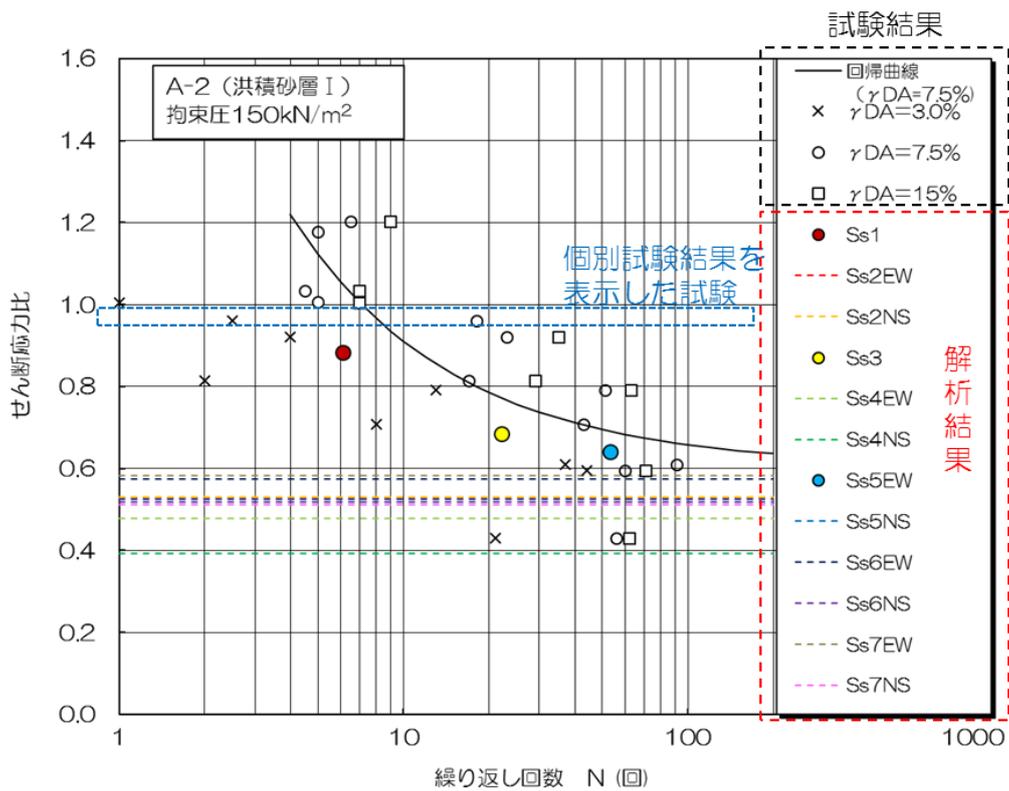


(a) 拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>

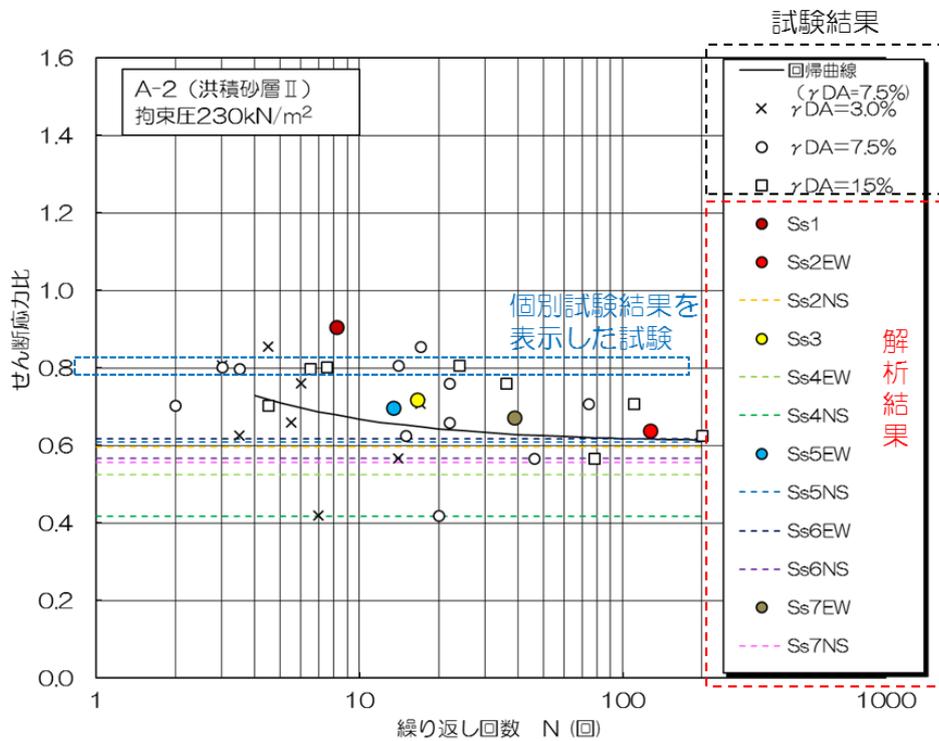


(b) 拘束圧 200kN/m<sup>2</sup>

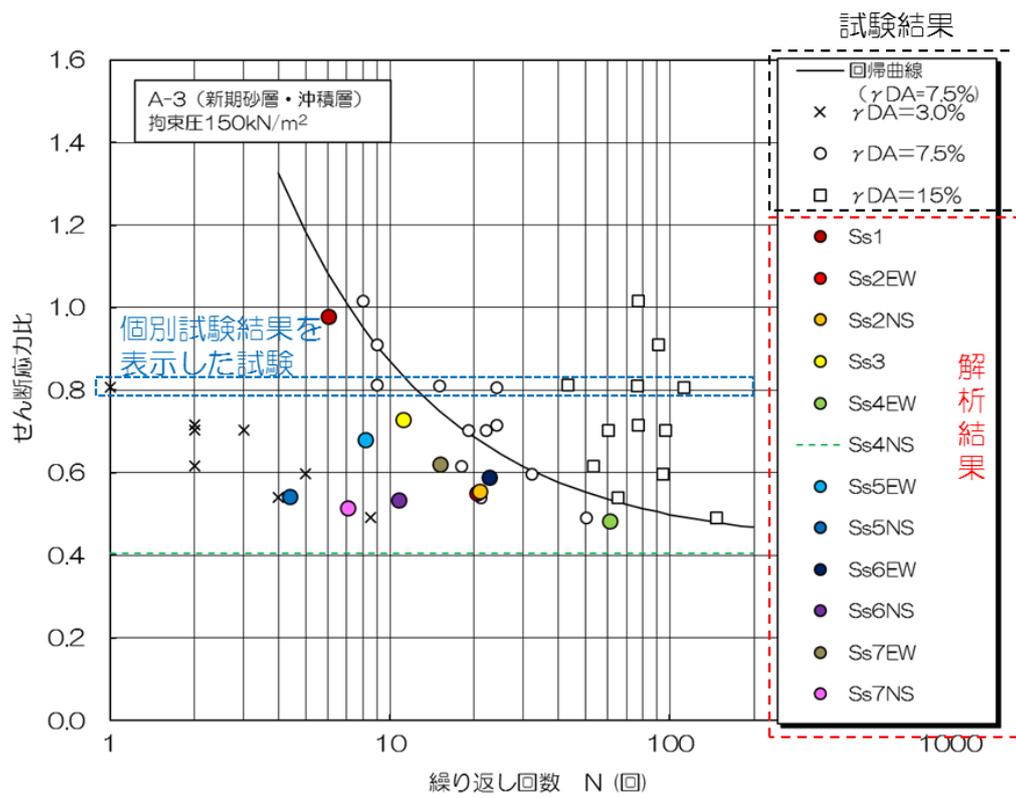
第 6.6 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-1 地点の洪積砂層 II)



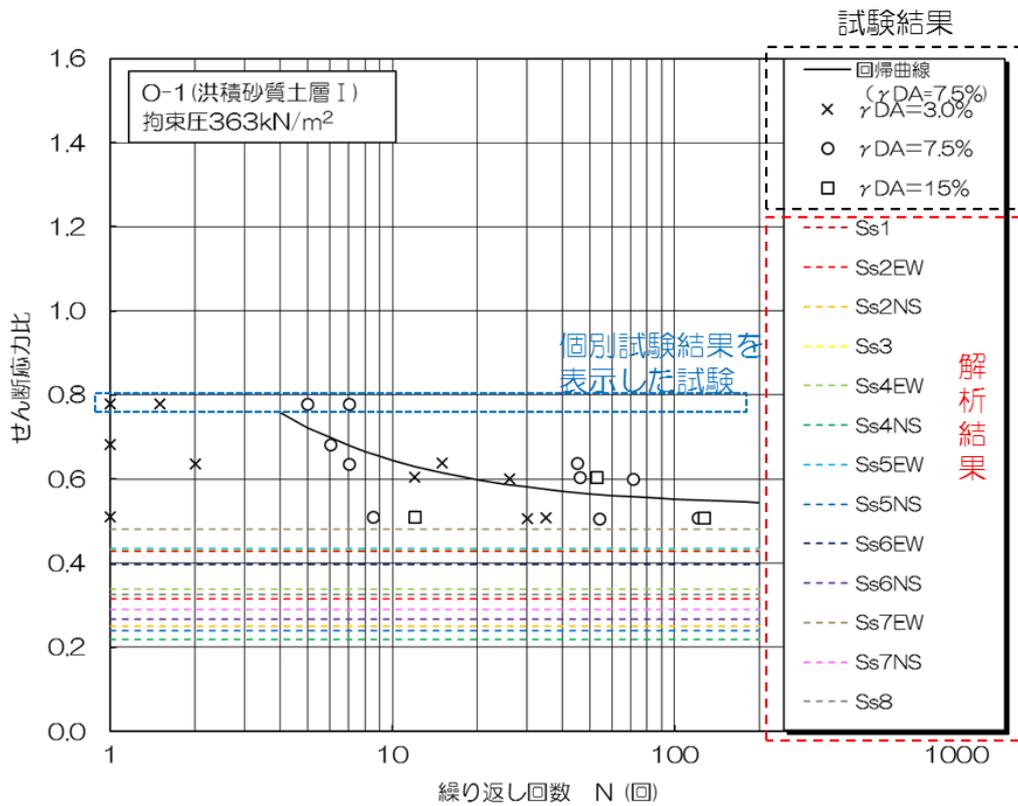
第 6.7 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-2 地点の洪積砂層 I)



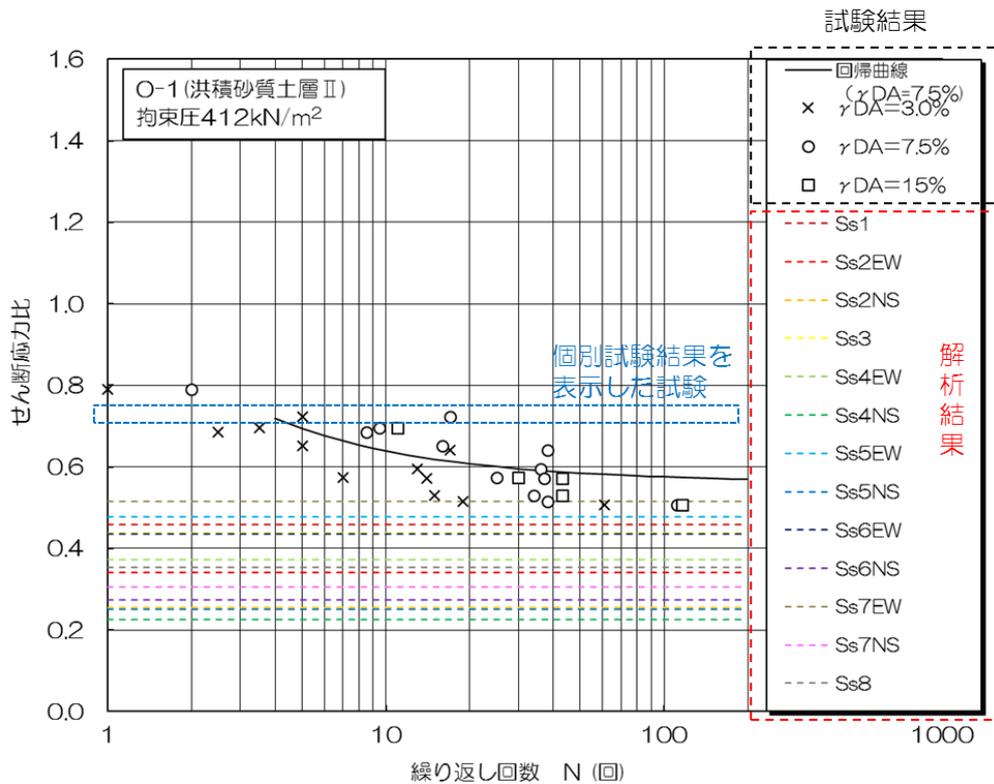
第 6.8 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-2 地点の洪積砂層 II)



第 6.9 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)



第 6.10 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)



第 6.11 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 II)

## 7. 液状化強度特性の設定

第2章で示した地層の同一性および第3章で示した液状化試験箇所の保守性・代表性の結果に基づいて、各土層で実施した液状化試験結果をそれぞれに適用し、各土層の液状化強度特性を設定して、構造物の影響評価を実施する。第7.1図に液状化強度特性の設定のフローを、第7.2図に地質断面の概要と調査位置の概要を、第7.1表に液状化強度特性を設定する土層と設定の基となる液状化試験箇所の関係を示す。

なお、試験結果が非液状化となる土層についても、念のため試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し、保守的な構造物影響評価を実施する。3/4号炉側の古安田層中の砂層のうち比較的新しい砂層（A-2地点の洪積砂層Ⅰ）については、試験結果が非液状化であるが、地層の同一性を考慮して、A-1地点の洪積砂層Ⅱの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。古安田層中の砂層のうち比較的古い砂層（A-2地点の洪積砂層ⅡおよびO-1地点の洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱ）については、試験結果が非液状化であるが、それぞれの試験で得られたせん断ひずみと繰返し回数に基づいて、液状化強度特性を設定する。

各土層での液状化強度特性は、液状化試験を基本として、各土層で得られた基本物性のバラツキも考慮することで、保守的な設定とする。設定の方法について、第3章の液状化試験箇所の代表性の結果に基づいて、液状化試験箇所が周辺調査箇所に対して保守的な箇所で実施していると考えられる土層（埋戻土層、新期砂層・沖積層（荒浜側））と、液状化試験箇所が周辺調査箇所に対する代表性を有していると考えられる土層（古安田層中の砂層）に大別して設定する。

液状化試験箇所が周辺調査箇所に対して保守的な箇所で実施していると考えられる土層（埋戻土層、新期砂層・沖積層（荒浜側））については、液状化試験箇所の基本物性が、周辺調査箇所の下限相当となっていることから、試験結果を各土層の代表値とすることが保守的と考えられる。ただし、試験結果の下限に相当する液状化強度  $R_L$  を評価して、これを満足する液状化強度特性を設定することで、さらに保守的な設定とする。具体的には、試験結果においてせん断ひずみ両振幅が7.5%となる点に対して回帰曲線の評価し、この回帰曲線を下方に移動し、試験値の下限を通る曲線と、繰返し回数20回との交点を求め、液状化試験の下限値に相当する液状化強度  $R_L$  として評価する。なお、道路橋示方書では、繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅が5%（せん断ひずみ両振幅7.5%）に達するのに要するせん断応力振幅を初期有効拘束圧で除した値を液状化強度  $R_L$  として定義している。第7.3図に液状化試験結果の下限に相当する液状化強度  $R_L$  の評価結果を示す。

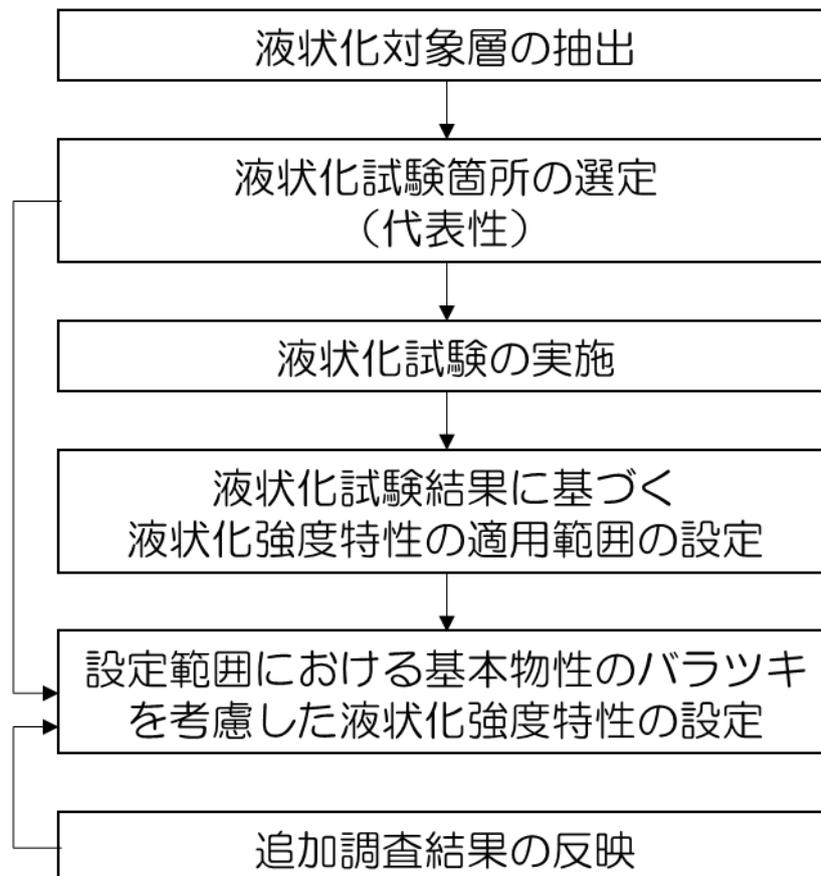
液状化試験の下限値に相当する液状化強度  $R_L$  は、A-1地点の埋戻土層で0.19、A-3地点の新期砂層・沖積層で0.55となり、構造物影響評価の解析においては、これを満足するように液状化強度特性を設定する。

液状化試験箇所が周辺調査箇所に対する代表性を有していると考えられる土層（古安田

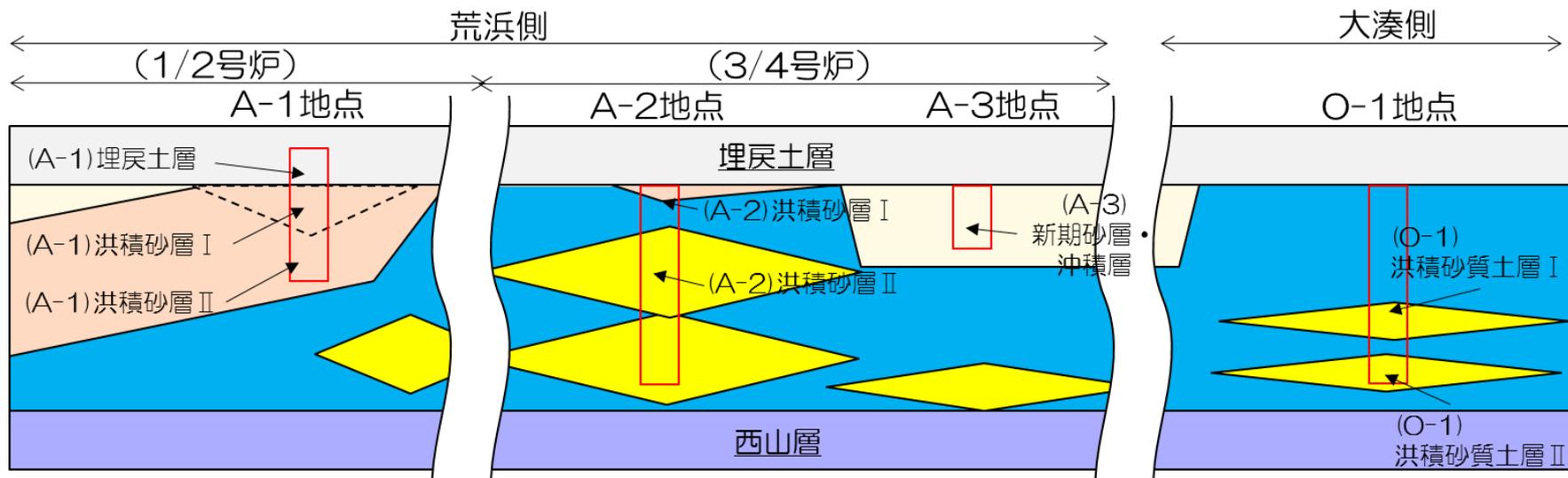
層中の砂層)については、液状化試験箇所の基本物性が、周辺調査箇所と同程度になっているところから、試験結果を各土層の代表値とすることは妥当であると考えられる。ただし、N 値のバラツキを液状化試験のバラツキと仮定して液状化強度  $R_L$  を保守的に低減させ、これを満足する液状化強度特性を設定する。具体的には、試験結果においてせん断ひずみ両振幅が 7.5%となる点に対して回帰曲線を求め、繰返し回数 20 回とせん断応力比を評価し、当該地層の N 値の平均値に対する平均値 $\cdot 1\sigma$ の値の比を乗して、N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  として評価する。第 7.4 図に N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  の評価結果を示す。

N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  は、A-1 地点の洪積砂層 I で 0.53 (拘束圧  $100\text{kN/m}^2$ ) および 0.34 (拘束圧  $150\text{kN/m}^2$ )、A-1 地点の洪積砂層 II で 0.30 (拘束圧  $150\text{kN/m}^2$ ) および 0.29 (拘束圧  $200\text{kN/m}^2$ )、A-2 地点の洪積砂層 II で 0.36、O-1 地点の洪積砂質土層 I で 0.45、O-1 地点の洪積砂質土層 II で 0.45 となり、構造物影響評価の解析においては、これを満足するように液状化強度特性を設定する。

なお、第 3 章および第 9 章で述べるように追加試験を計画しており、追加調査の結果を適切に反映し、設定した液状化強度特性の保守性を確認する。また、必要に応じて液状化強度特性の見直しを実施する。



第 7.1 図 液状化強度特性の設定のフロー



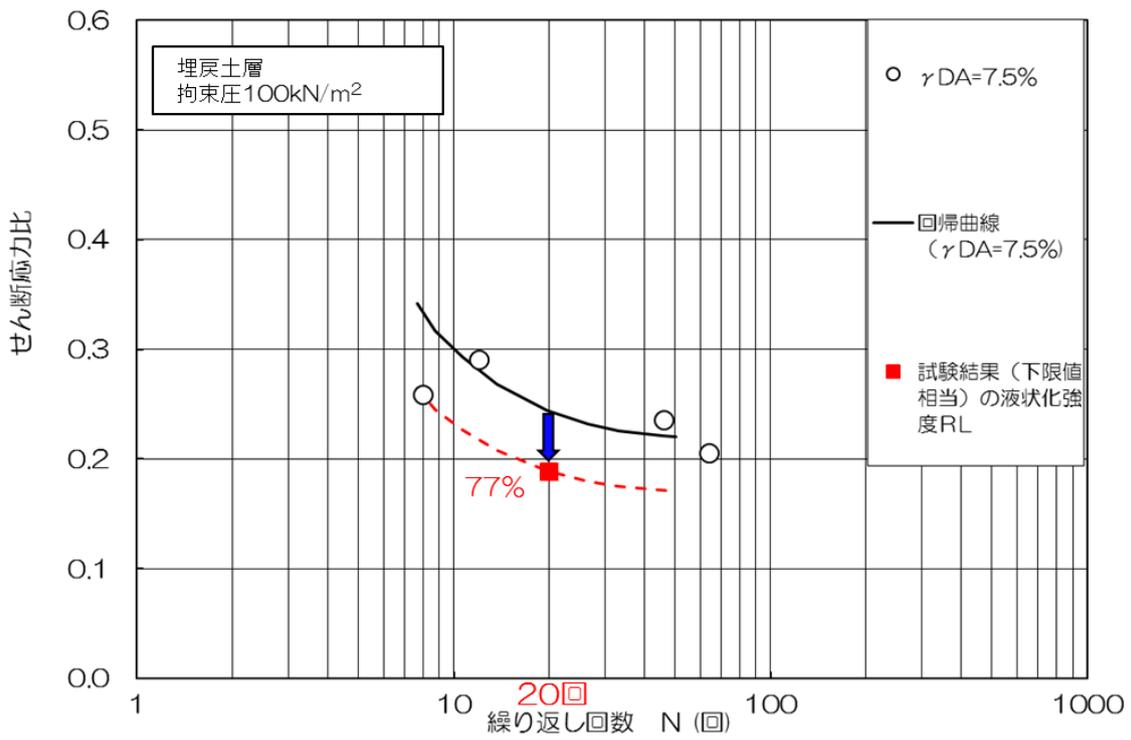
第 7.2 図 地質断面の概要と調査位置の概要

第 7.1 表 液状化強度特性を設定する土層と設定の基となる液状化試験箇所の関係

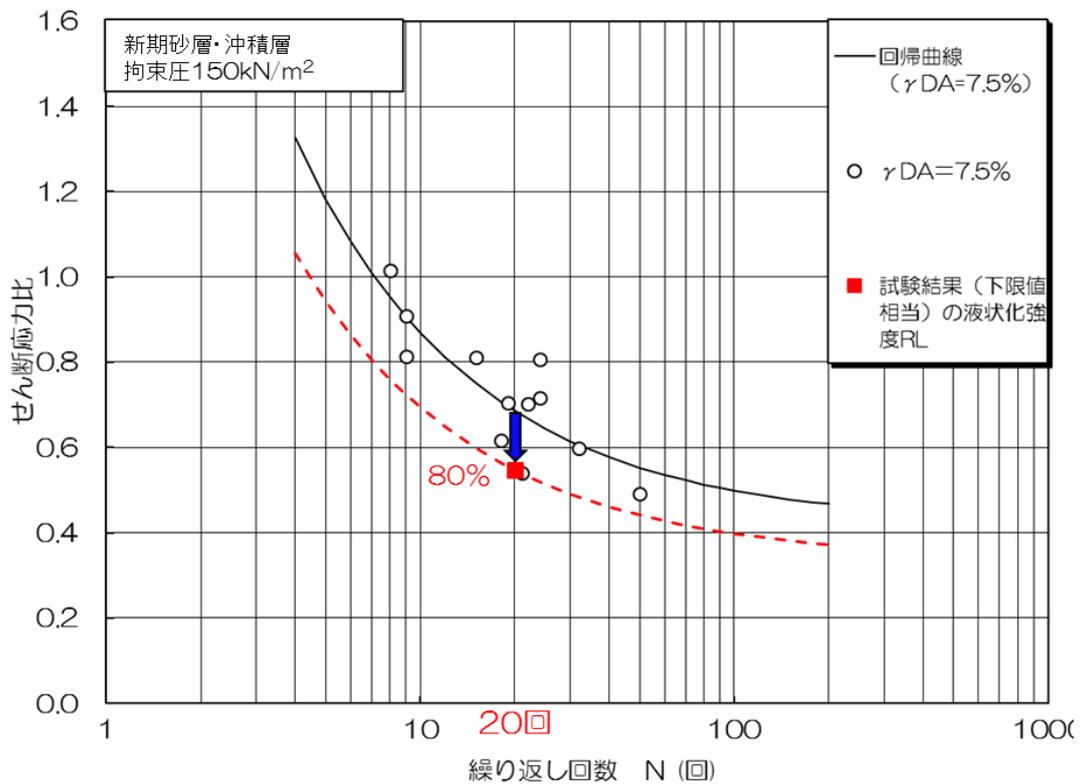
| 今回対象構造物 |          | 1号炉側<br>防潮堤など    | 2号炉側<br>防潮堤など     | 3/4号炉側<br>防潮堤など | 6/7号炉<br>取水路・軽油タンク基礎・GTG基礎など |  |
|---------|----------|------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|--|
| 対象土層    | 埋戻土層     |                  | A-1<br>埋戻土層       |                 |                              |  |
|         | 新期砂層・沖積層 |                  | A-3<br>新期砂層・沖積層   |                 | [追加調査]<br>新期砂層・沖積層           |  |
|         | 古安田層     | 比較的<br>新しい<br>砂層 | N値<br>平均50以上      | A-1<br>洪積砂層Ⅰ    | (出現しない)                      |  |
|         |          |                  | N値<br>平均50以下      | A-1<br>洪積砂層Ⅱ    |                              |  |
|         | 比較的古い砂層  |                  | A-2<br>洪積砂層Ⅱ (※2) |                 | 0-1<br>洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱ (※2)        |  |
|         | 洪積粘性土層   |                  | (非液状化層)           |                 |                              |  |
|         | 西山層      |                  | (非液状化層)           |                 |                              |  |

※1：3/4号炉側の古安田層中の砂層のうち比較的新しい砂層については、試験結果が非液状化であるが、地層の同一性を考慮して、A-1地点の洪積砂層Ⅱの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

※2：古安田層中の砂層のうち比較的古い砂層については、試験結果が非液状化であるが、念のため液状化強度特性を設定した構造物影響評価を実施する。液状化強度特性は、荒浜側についてはA-2地点の洪積砂層Ⅱ、大湊側については0-1地点の洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

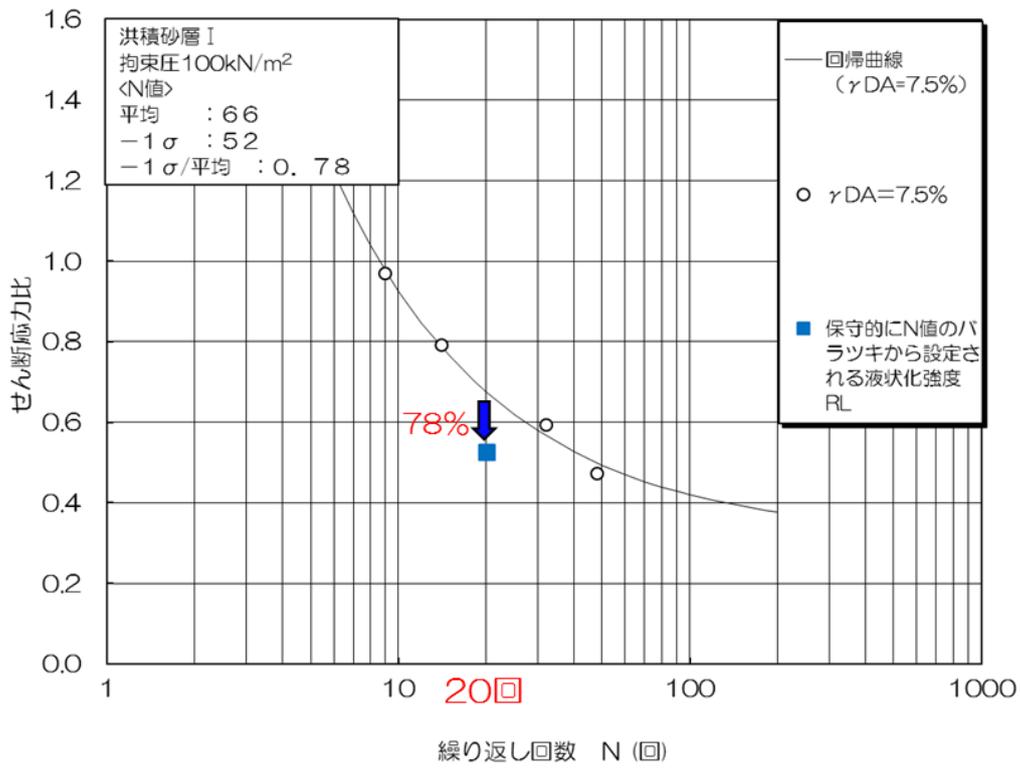


(a) 埋戻土層

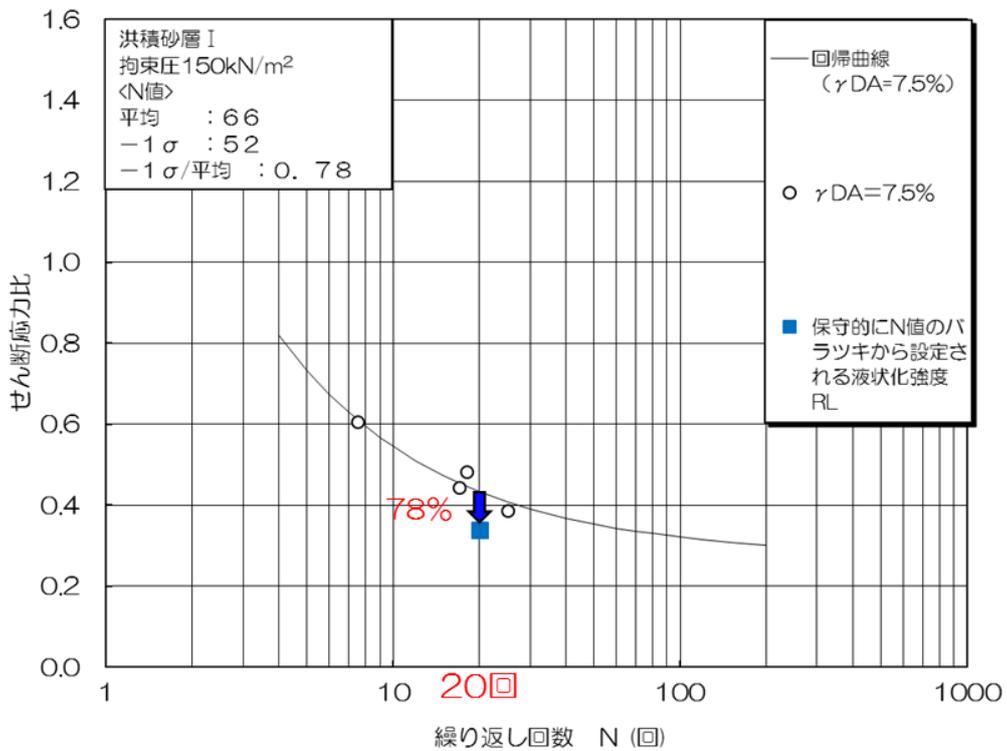


(b) 新規砂層・沖積層

第 7.3 図 液状化強度特性の設定  
(液状化試験結果の下限に相当する液状化強度  $R_L$ )



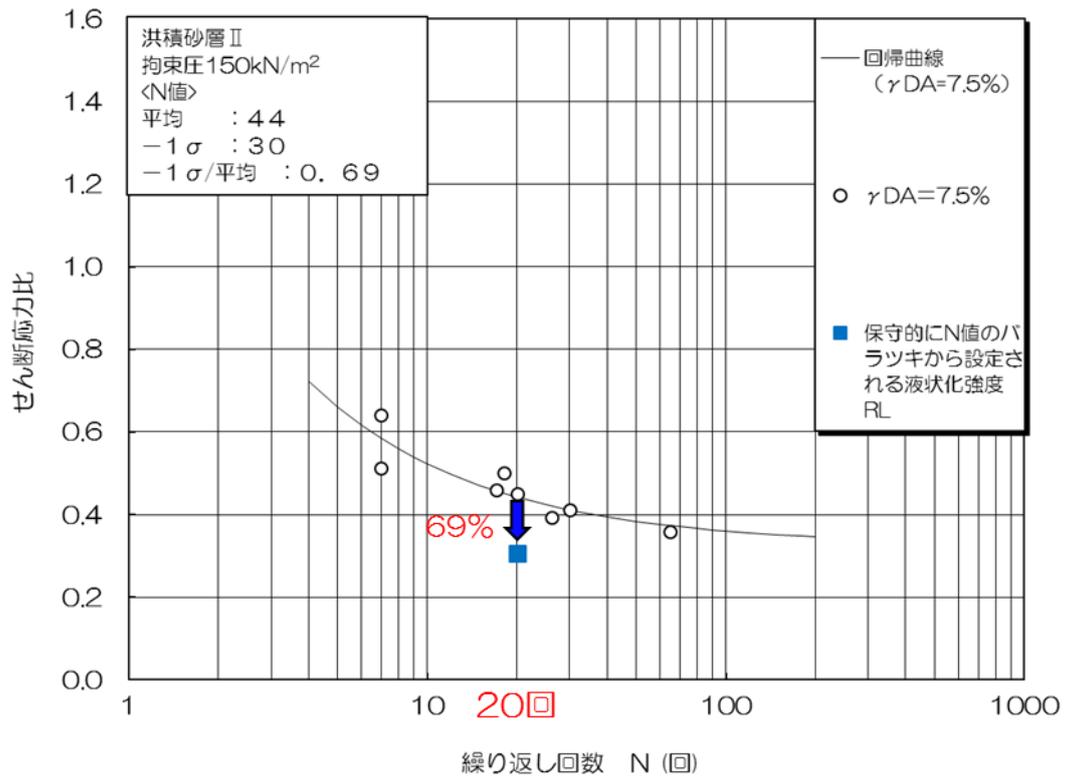
(a) A-1 地点の洪積砂層 I (拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>)



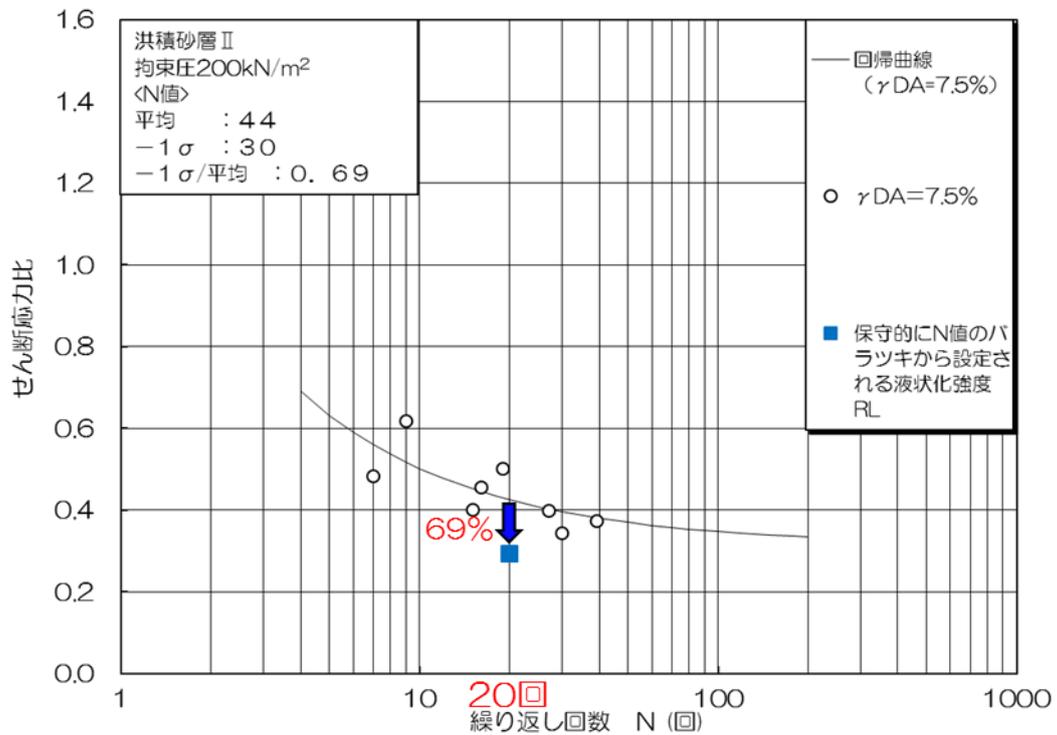
(b) A-1 地点の洪積砂層 I (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)

第 7.4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度 R<sub>L</sub>)



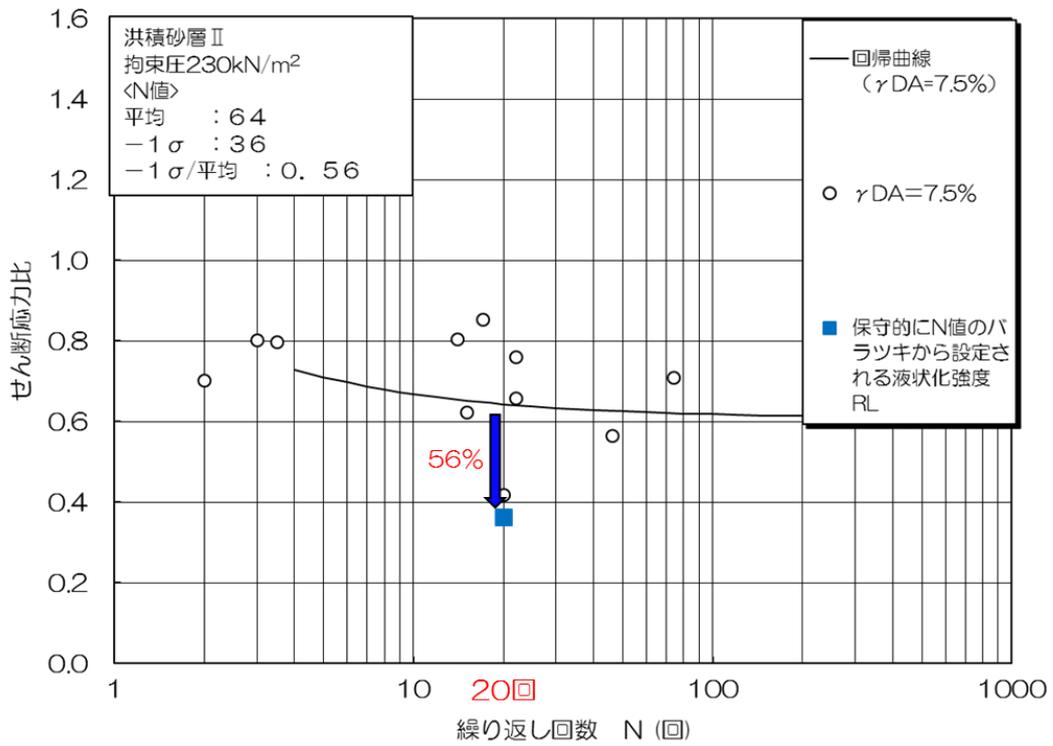
(c) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)



(d) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧 200kN/m<sup>2</sup>)

第 7.4 図 液状化強度特性の設定

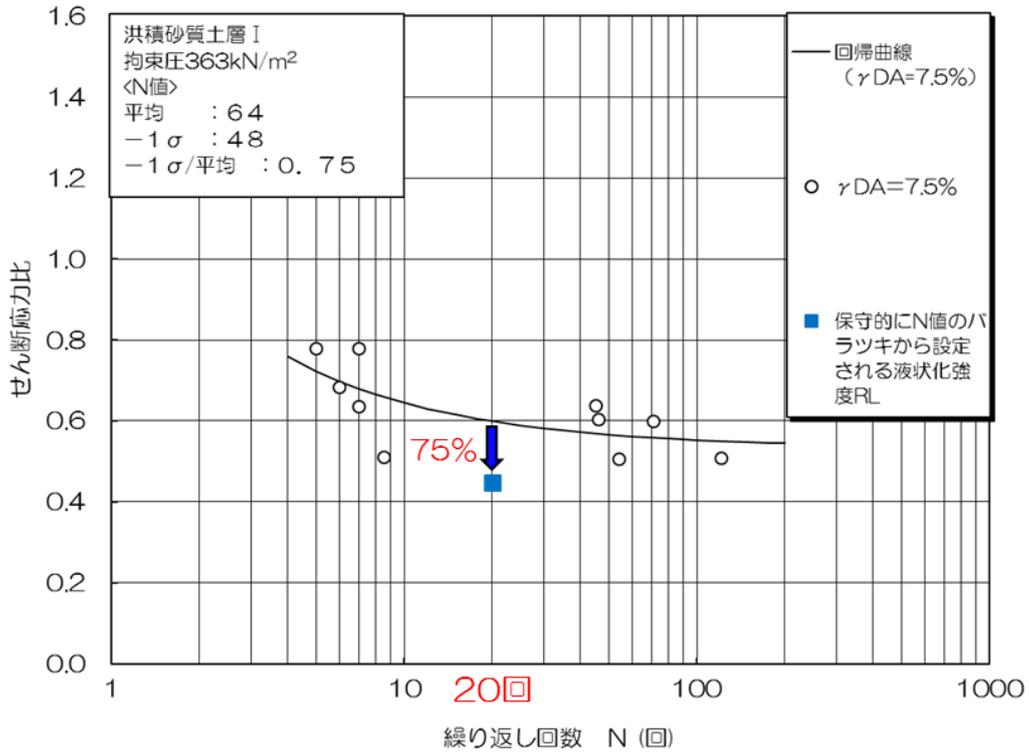
(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度 R<sub>L</sub>)



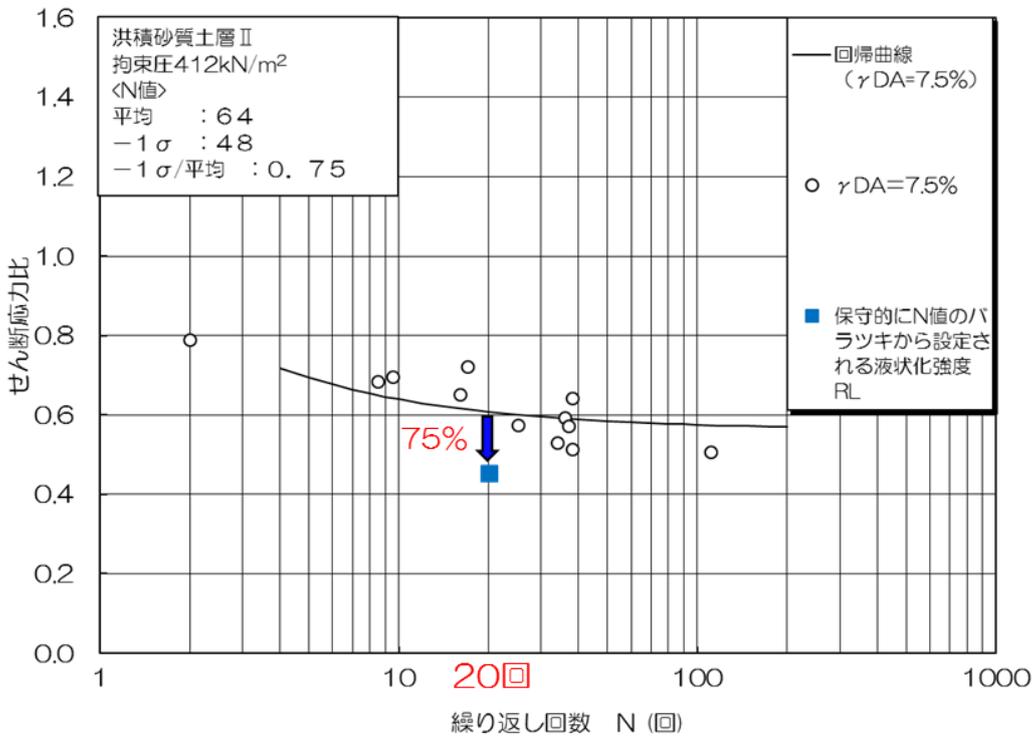
(e) A-2 地点の洪積砂層Ⅱ

第 7.4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度 R<sub>L</sub>)



(f) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧  $200\text{kN/m}^2$ )



(g) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧  $200\text{kN/m}^2$ )

第 7.4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$ )

## 8. 液状化影響の検討方針

液状化評価については道路橋示方書を基本として、道路橋示方書において液状化評価の対象外となっている洪積層についても液状化試験を実施し、液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施した。液状化試験に基づいて、地震時の地盤の状態を『液状化』、『サイクリックモビリティ』および『非液状化』と判定した。それぞれの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し、構造物への影響評価を実施する。なお、試験結果が非液状化となる土層も、念のため液状化強度特性を設定して保守的な構造物評価を実施する。設定した液状化強度特性については、試験結果を基本に設定するが、基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。

構造物の影響評価については、液状化に伴う影響を考慮するため、有効応力解析を実施する。有効応力解析においては、解析コード「FLIP」などを用いる。液状化試験結果に基づいて保守的に設定した液状化強度  $R_L$  を満足するように、有効応力解析の液状化パラメータを設定し、構造物の影響評価を実施する。解析コード「FLIP」については、Iai et.al(1992) および Iai et.al(1995)において、液状化およびサイクリックモビリティを示す地層についての適用性が検証されている。Iai et.al(1992)においては、サイクリックモビリティが観察された砂の繰返しねじり試験結果に対して、解析コード「FLIP」を用いた解析を実施し、解析結果が室内試験結果と良い対応を示したと報告している。Iai et.al(1995)においては、解析コード「FLIP」を用いて、1993年釧路沖地震の再現解析を実施している。1993年釧路沖地震の観測波はサイクリックモビリティの影響を示すスパイク状の地震波となっており、解析コード「FLIP」において地震観測値の密な地盤の液状化パラメータを設定することで、サイクリックモビリティの影響を示す観測値を再現することができたと報告している。よって、設置許可段階における構造物評価の見通しについては、解析コード「FLIP」を用いることとした。

なお、工事認可段階における構造物評価に用いる解析コードの選定にあたっては、2007年新潟県中越沖地震における取水路の鉛直変位など構造物の被害状況の再現性を検証し、採用した解析コードの柏崎刈羽原子力発電所への適用性を確認する。また、構造物評価よっては、必要に応じて追加対策を実施する。

第 8.1 表 液状化評価の基本方針

| 本検討の対象砂層                      |              |                              | 道路橋示方書における液状化評価の対象       | 当社評価                                          |                        |                                     |
|-------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 地層名                           | 堆積年代         | 調査地点名<br>土層名                 |                          | 液状化試験による判定                                    | 液状化強度特性の設定の考え方         | 液状化強度特性の保守性                         |
| 埋戻土層                          | —            | A-1<br>埋戻土層                  | ○<br>対象                  | 液状化                                           | 試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。 | 試験結果を基本として、基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。 |
| 新期砂層<br>・沖積層                  | 完新世<br>(沖積層) | A-3<br>新期砂層・沖積層              |                          | サイクリック<br>モビリティ                               |                        |                                     |
| 古安田層<br>(古安田層<br>中の砂層が<br>対象) | 更新世<br>(洪積層) | 新しい                          | A-1<br>洪積砂層 I<br>洪積砂層 II | ×<br>対象外                                      | ※                      |                                     |
|                               |              | 古い                           | A-2<br>洪積砂層 I            |                                               |                        |                                     |
|                               |              |                              | A-2<br>洪積砂層 II           |                                               |                        |                                     |
|                               |              | 0-1<br>洪積砂質土層 I<br>洪積砂質土層 II | 非液状化                     | 非液状化であると考えられるが、保守的な構造物評価を実施するため、液状化強度特性を設定する。 |                        |                                     |

※ A-2 地点の洪積砂層 I については非液状化であると考えられるが、A-1 地点の洪積砂層 I・II と同時代に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

## 9. 設置許可段階における構造物評価の見通し

### 9.1 代表構造物の抽出

設置許可段階における構造物評価の見通しについて、各構造物の基礎形式および地層構成に着目し、代表構造物を選定した。第 9.1.1 表に設置許可段階における構造物評価の見通しを検討する代表構造物の選定を示す。

直接基礎構造物の代表としては、①地中埋設構造物は液状化に伴う土圧変動の影響が大きいこと、②支持地盤が古安田層であることから、「取水路・スクリーン室」を抽出する。

杭基礎構造の代表としては、①杭長が長いこと、②大湊側よりも荒浜側の方が基準地震動が大きいことから、「荒浜側防潮堤」を抽出する。

選定した代表構造物について代表断面を選定し、代表断面について構造物影響評価を実施する。構造物評価の成立性および必要に応じた追加対策は、代表断面における構造物評価の結果をそれ以外の位置・構造物の見通しに展開する。

第 9.1.1 表 設置許可段階における構造物評価の見通しを検討する代表構造物の選定

| 設備分類      |           | 設備名称                     | 基礎形式（杭長）   | 構造概要           | 支持地盤       | 設置場所 |
|-----------|-----------|--------------------------|------------|----------------|------------|------|
| 設計基準対象施設  | 屋外重要土木構造物 | 取水路・スクリーン室               | 直接基礎       | 鉄筋コンクリート構造     | 古安田層       | 大湊   |
|           |           | 補機冷却用海水取水路 <sup>※1</sup> | 直接基礎       | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 大湊   |
|           |           | 軽油タンク基礎                  | 杭基礎（約 20m） | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 大湊   |
|           |           | 燃料移送系配管ダクト               | 杭基礎（約 25m） | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 大湊   |
|           | 津波防護施設    | 荒浜側防潮堤                   | 杭基礎（約 60m） | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 荒浜   |
|           | 浸水防止設備    | 止水蓋，止水壁等                 | 直接基礎       | 鉄筋コンクリート構造，鋼構造 | 古安田層・地盤改良土 | 荒浜   |
| 重大事故等対処施設 |           | 常設代替交流電源設備基礎             | 杭基礎（約 30m） | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 大湊   |
|           |           | 格納容器圧力逃がし装置基礎            | 杭基礎（約 30m） | 鉄筋コンクリート構造     | 西山層        | 大湊   |

※1：マンメイドロックを介して西山層に支持

## 9.2 取水路

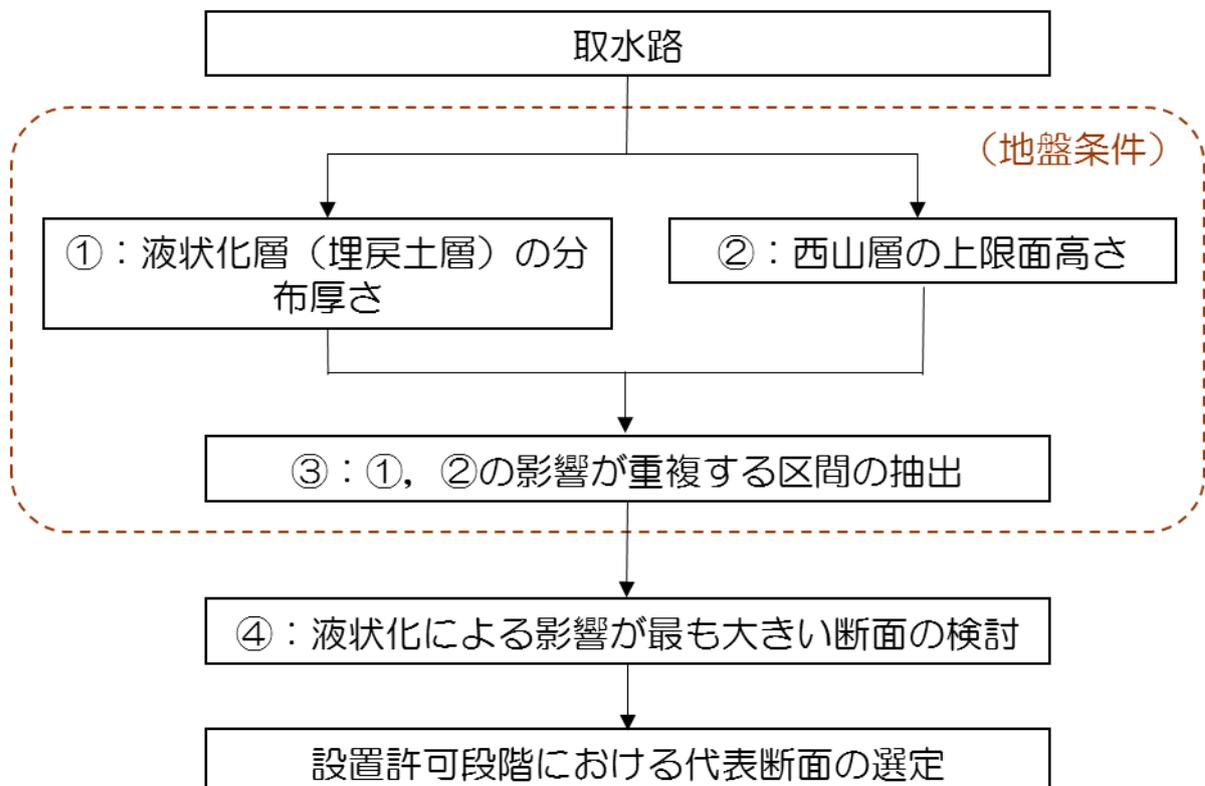
「取水路・スクリーン室」について液状化による設備への影響の見通しとして、液状化現象の影響が最も大きいと考えられる断面を選定し、構造物の評価を実施する。第9.2.1図に取水路における代表断面の選定フローを示す。

構造物評価への液状化の影響として、地盤条件の観点から①液状化層（埋戻土層）の分布厚さ、西山層より浅部の地盤での地震動増幅特性の観点から②西山層の上限面の高さに着目し、代表断面を選定する。

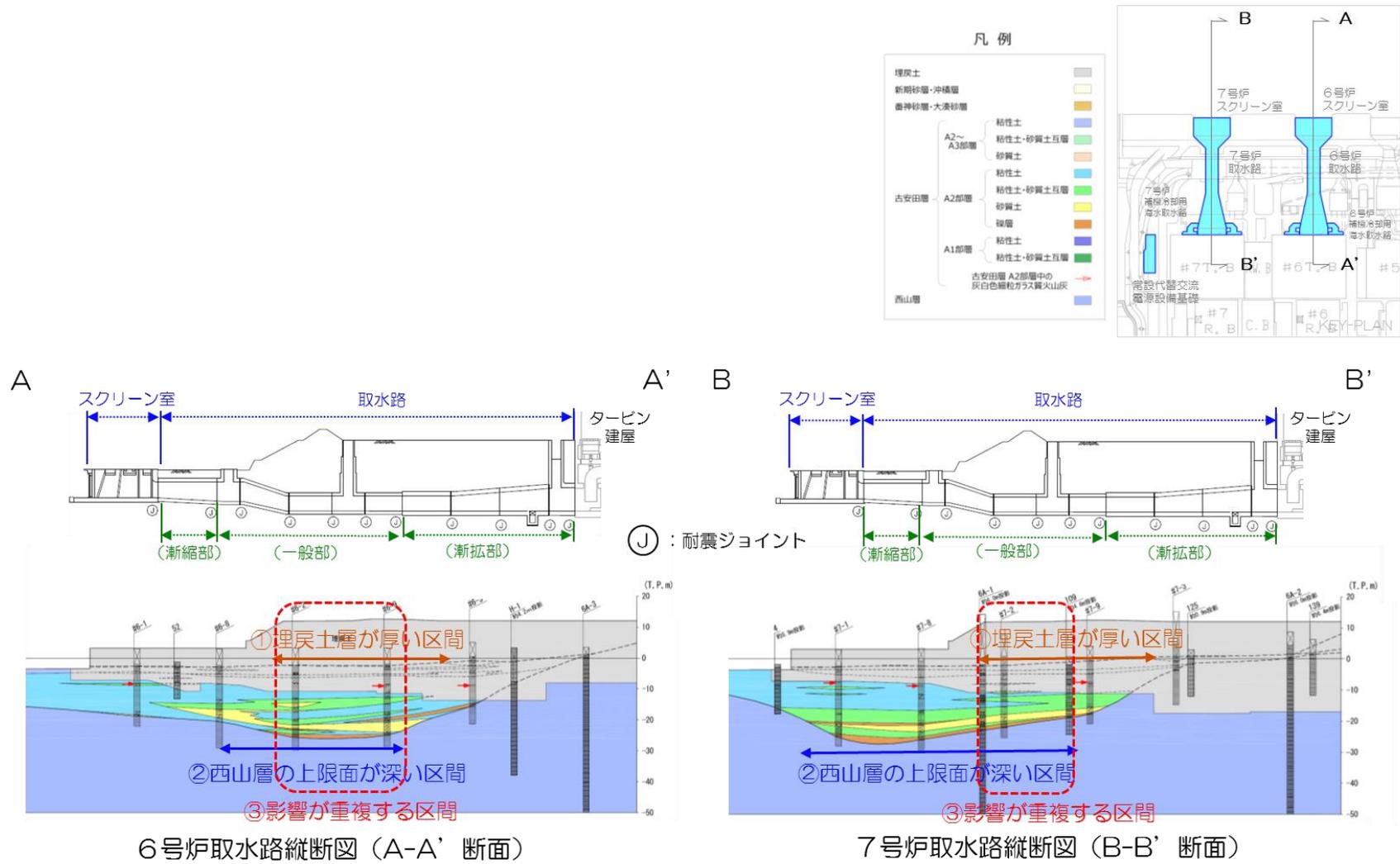
液状化層（埋戻土層）の分布厚さは、6/7号炉ともに取水路（一般部）から取水路（漸拡部）にかけて厚くなっている。西山層の上限面高さは、6号炉では取水路（一般部）において、7号炉ではスクリーン室から取水路（一般部）にかけて、深くなっている。両者の影響が重複する区間として、6/7号炉ともに取水路のうち一般部の区間が抽出される。詳細を第9.2.2図に示す。

6/7号炉の取水路（一般部）を比較すると、双方ともに取水路（一般部）の断面は古安田層を掘り込んでいるものの、7号炉の南側の側方は埋戻土層となっている。構造物側方に分布する古安田層の変形抑制効果を考慮すると、取水路（一般部）は、6号炉よりも7号炉の方が、液状化現象が構造物の耐震性に与える影響が大きいと考えられる。詳細を第9.2.3図に示す。

以上のことから、代表断面として、7号炉取水路（一般部）を選定し、2次元有効応力解析（FLIP）による評価を実施する。



第9.2.1図 取水路における代表断面の選定フロー



第 9.2.2 図 取水路における代表断面 (その 1)



### 9.3 荒浜側防潮堤

「荒浜側防潮堤」について液状化による設備への影響の見通しとして、液状化現象の影響が最も大きいと考えられる断面を選定し、構造物の評価を実施する。第 9.3.1 図に荒浜側防潮堤における代表断面の選定フローを示す。

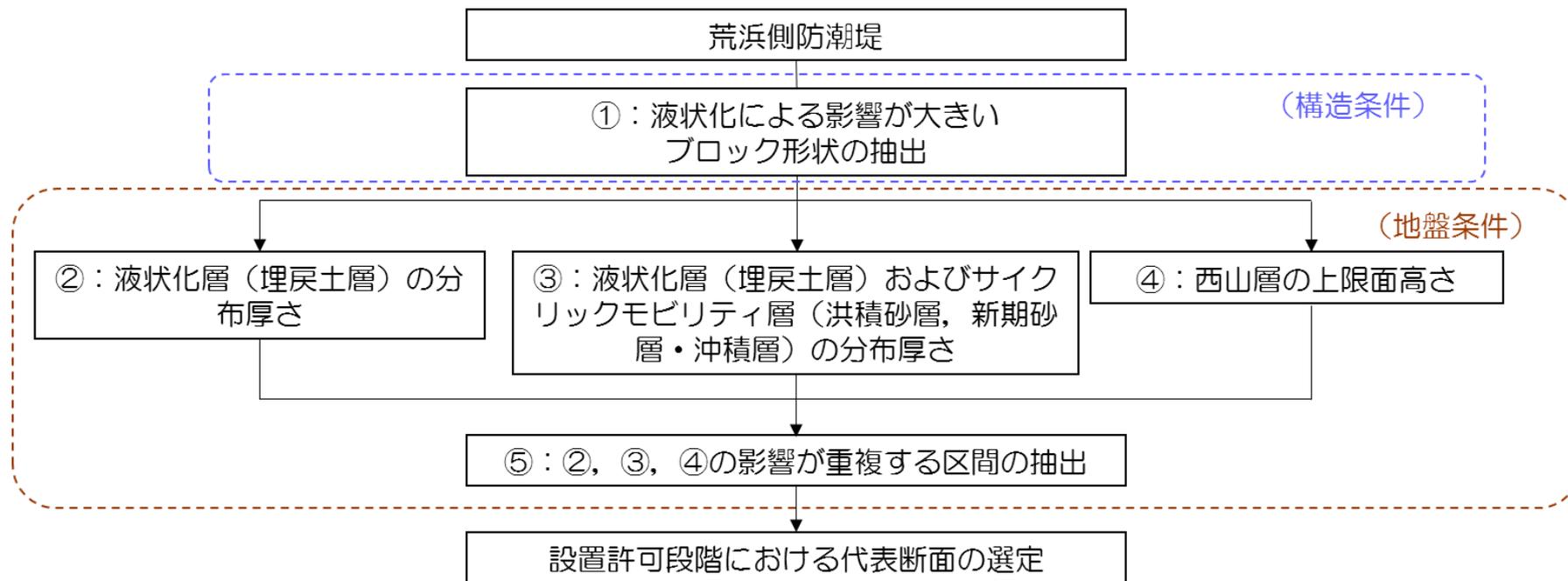
構造物評価への影響として、構造条件の観点から、荒浜側防潮堤の鉄筋コンクリート擁壁部が長手方向にブロック分割されていることを踏まえ、①液状化による影響が大きいブロック形状を抽出する。また、構造物評価への液状化の影響として、地盤条件の観点から、②液状化層（埋戻土層）の分布厚さ並びに③液状化層（埋戻土層）およびサイクリックモビリティを示す層（新期砂層・沖積層および A-1 地点の洪積砂層 I・II）の分布厚さ、西山層より浅部の地盤での地震動増幅特性の観点から④西山層の上限面の高さに着目し、代表断面を選定する。

防潮堤の短軸方向の杭の配列に着目すると、ブロック毎に差異があり、杭が 3～6 列の配置となっている。なお、杭の仕様は同一であり（材質 SKK490、杭径 1,200mm、厚さ 25mm）ブロック毎に差異はない。短軸方向断面における杭に対する液状化による土圧の影響を考慮すると、杭の配列が 3 列と最も少ないブロックが、構造物の耐震性に与える影響が大きいと考えられる。以上のことから、短軸方向断面における杭の配列が 3 列と最も少ないブロックから代表断面を選定する。第 9.3.2 図に検討対象として選定するブロックを示す (①)。

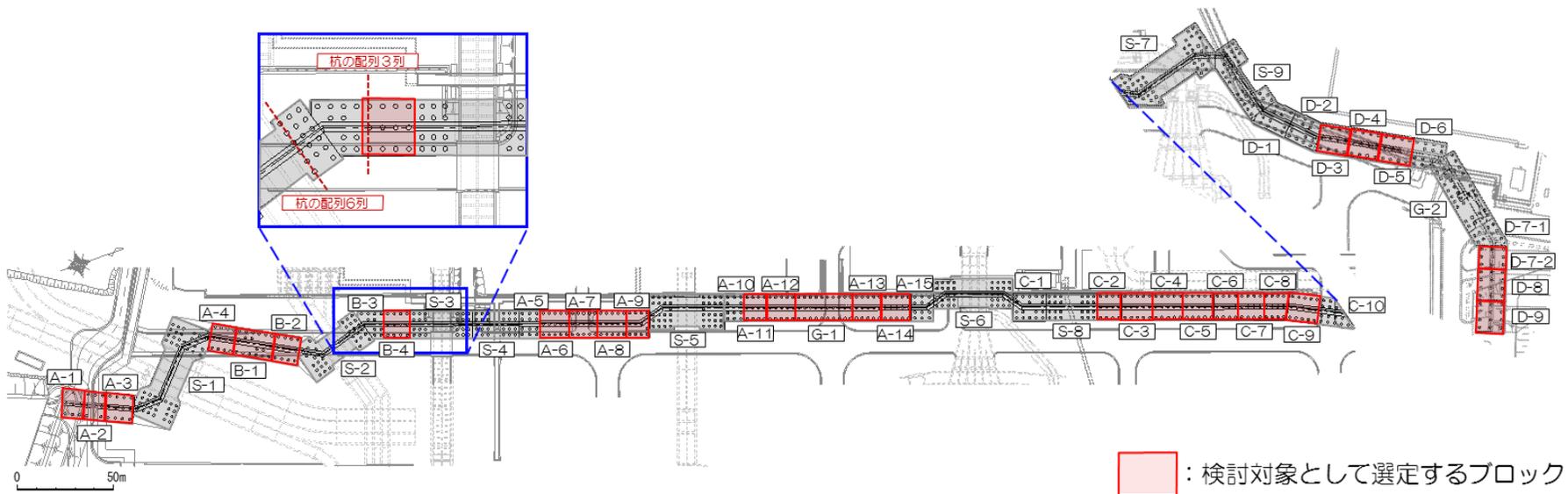
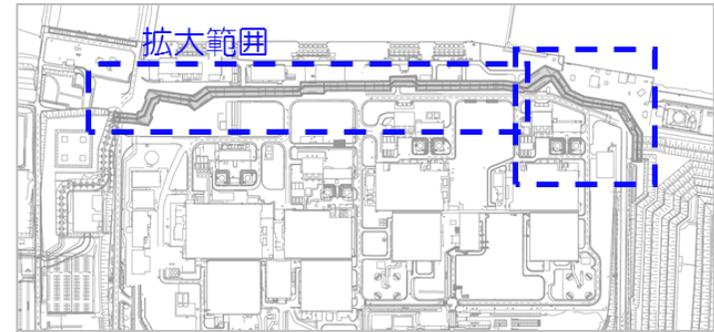
選定したブロックに対して、液状化層である埋戻土層の層厚を整理し、第 9.3.3 図に示す。埋戻土層は、1 号炉海側および 3、4 号炉海側において、その分布が厚くなっている (②)。

さらに、液状化層（埋戻土層）に加えて、サイクリックモビリティを示す層（新期砂層・沖積層および A-1 地点の洪積砂層 I・II）の層厚および西山層の上限高さを整理し、第 9.3.4 図に示す。これらの土層を合わせた層厚ならびに西山層の上限面高さは、1 号炉海側および 4 号炉北側において、深くなっている (③・④)。

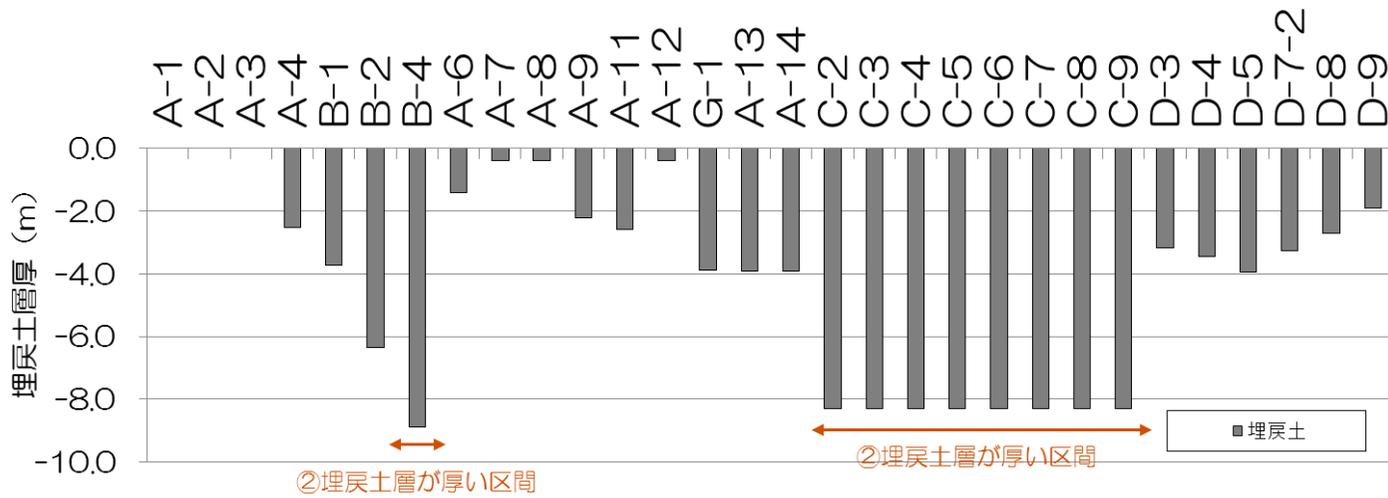
上記の影響が重複する区間として、1 号炉海側の B-4 ブロックが抽出される。第 9.3.5 図に荒浜側防潮堤における代表断面の選定を示す。なお、D-7-2 ブロックは、③・④の影響が重複するものの、②液状化層である埋戻土層の厚さが約 2 m と、B-4 ブロックでの厚さ約 9 m との差があることから、B-4 ブロックを代表とする。抽出された 1 号炉海側の B-4 ブロックを代表断面として選定し、2 次元有効応力解析 (FLIP) による評価を実施する。



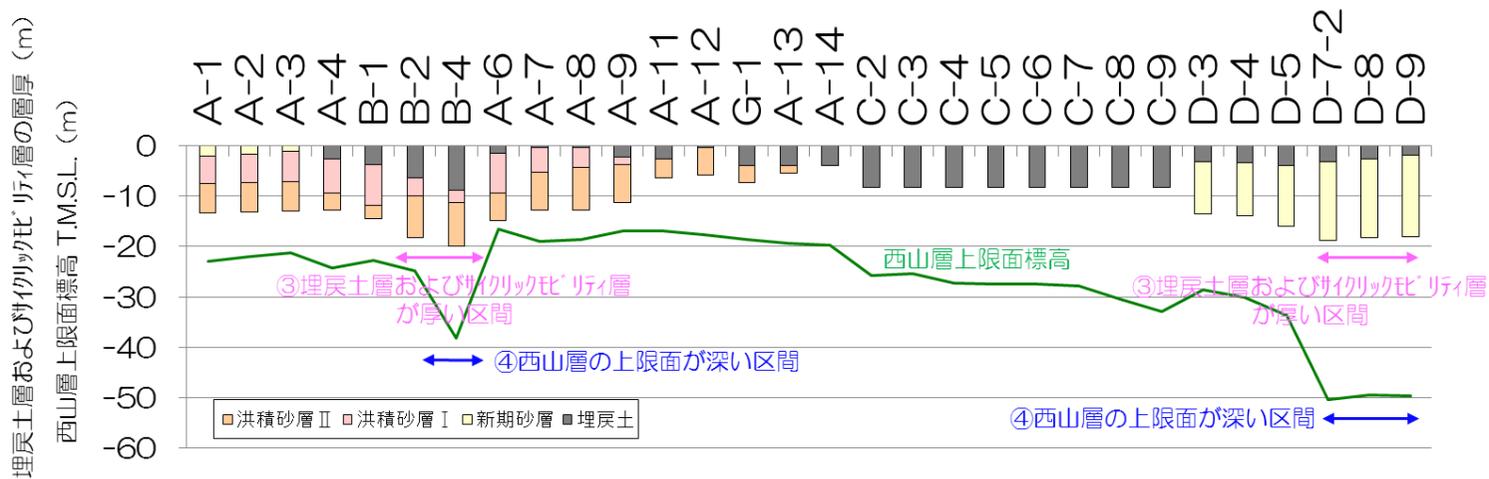
第 9.3.1 図 荒浜側防潮堤における代表断面の選定フロー



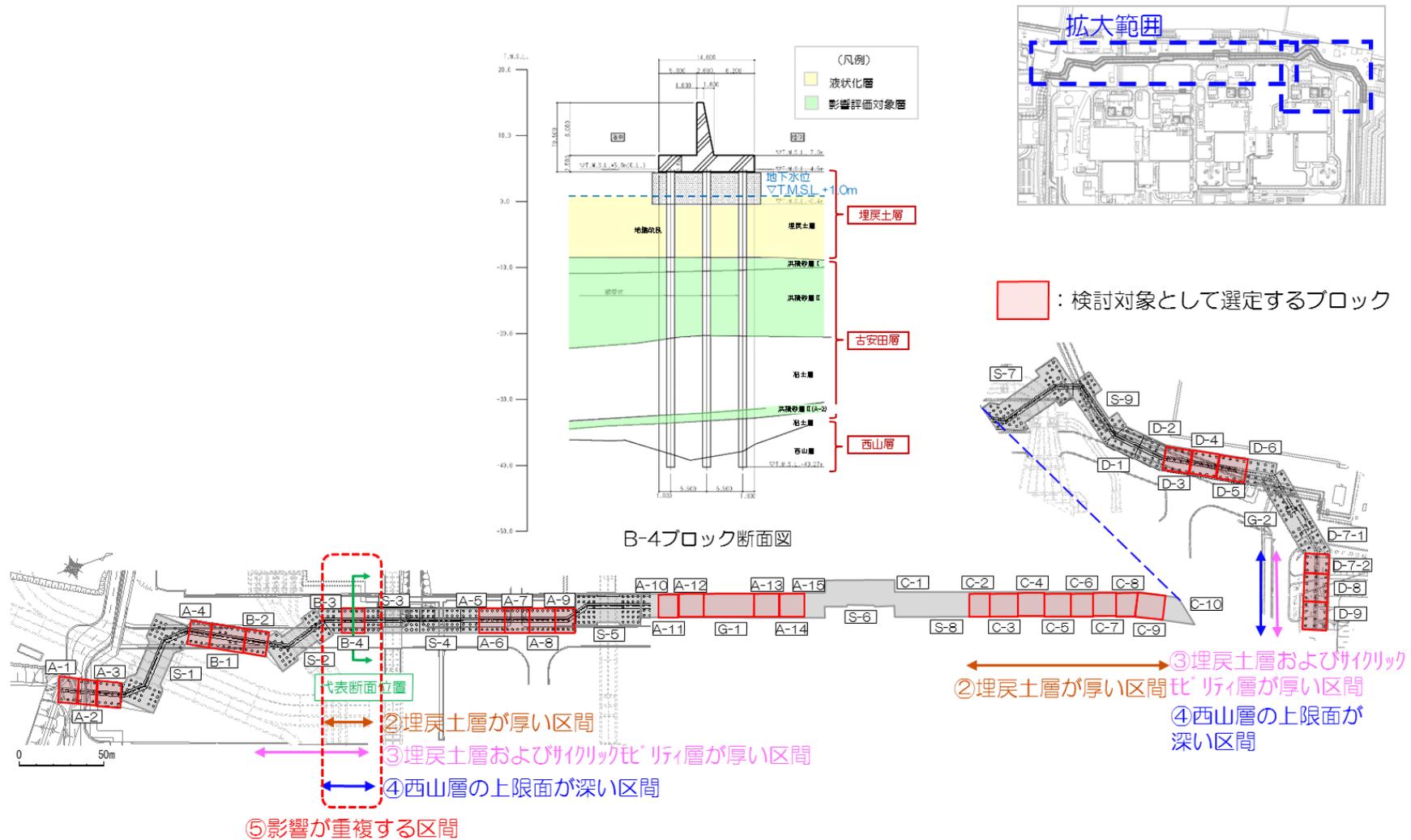
第 9.3.2 図 検討対象として選定するブロック



第 9.3.3 図 選定したブロックにおける埋戻土層厚



第 9.3.4 図 選定したブロックにおける埋戻土層およびサイクリックモビリティを示す層の層厚



第 9.3.5 図 荒浜側防潮堤における代表断面の選定

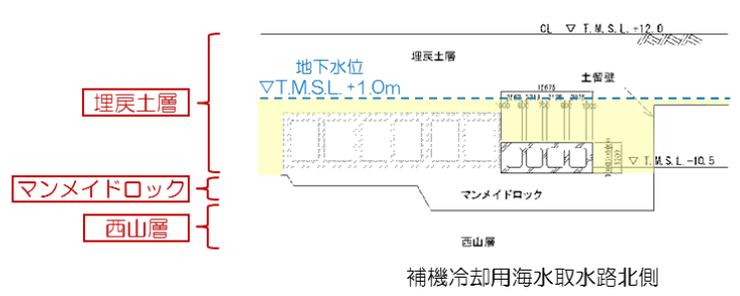
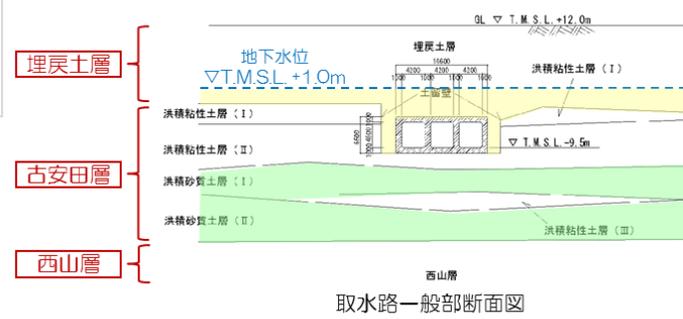
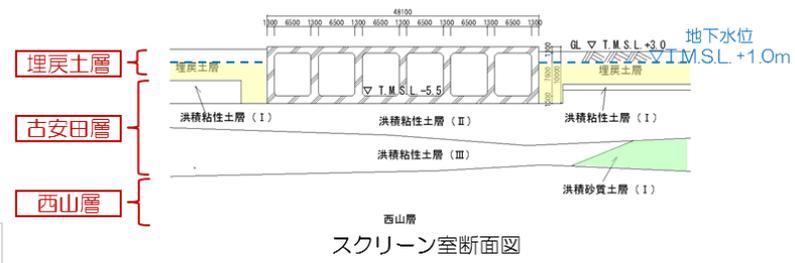
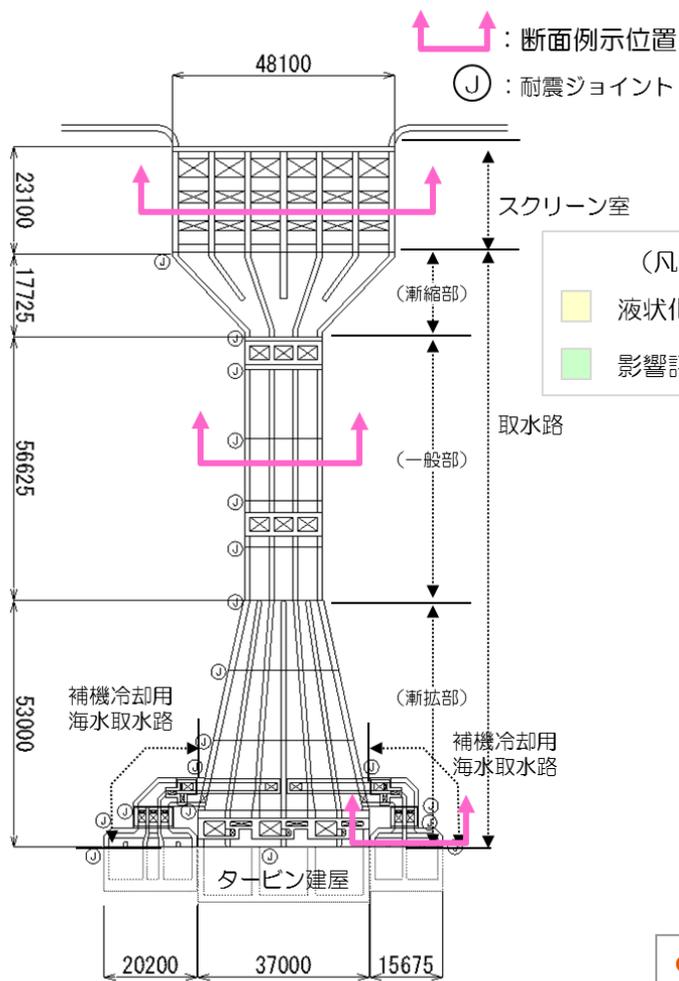
## 10. 参考文献

- (社)日本道路協会(2012) : 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 平成24年3月
- 安田進(1991) : 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1991年5月
- 地盤工学会(2009) : 地盤材料試験の方法と解説, 平成21年11月
- 土木学会(2003) : 過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響, 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 レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集, pp397-400, 2003年6月
- 地盤工学会(2000) : 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 平成12年3月
- 地盤工学会(2006) : 地盤工学用語辞典, pp219-220, 平成18年3月
- 井合進(2008) : サイクリックモビリティ Cyclic Mobility, 地盤工学会誌, 56-8, 2008年8月
- 吉見吉昭(1991) : 砂地盤の液状化(第二版), 技報堂出版, 1991年, 5月
- 永瀬英生(1984) : 多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性, 東京大学博士論文, 1984
- 井合進, 飛田哲男, 小堤治(2008) : 砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係, 京都大学防災研究所年報, 第51号, pp.291-304, 2008.
- 日本港湾協会(2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成19年7月
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992) : STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No. 2, pp.1-15.
- Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K. (1995) : RESPONSE OF A DENSE SAND DEPOSIT DURING 1993 KUSHIRO-OKI EARTHQUAKE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.35, No. 1, pp.115-131.
- 龍岡文夫(1980) : サイクリック・モビリティ (Cyclic Mobility), 土と基礎, 28-6, 1980年6月
- 国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江刺靖行(1983) : 密な砂地盤の地震時安定性評価法の検討(その1) 密な砂の動的強度特性, 電力中央研究所報告 研究報告: 383025, 昭和58年10月
- 鉄道総合技術研究所(2012) : 鉄道構造物等設計標準・同解説, 平成24年9月

## 11. 参考資料

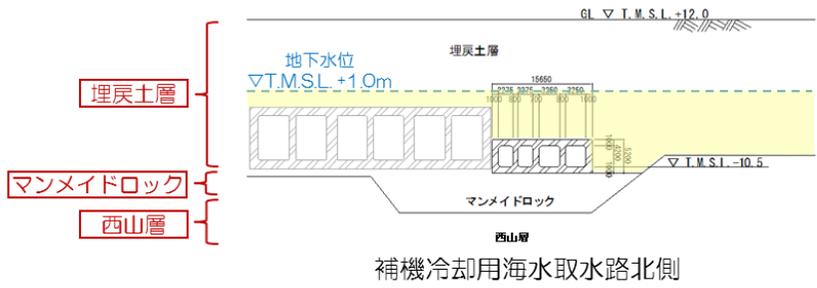
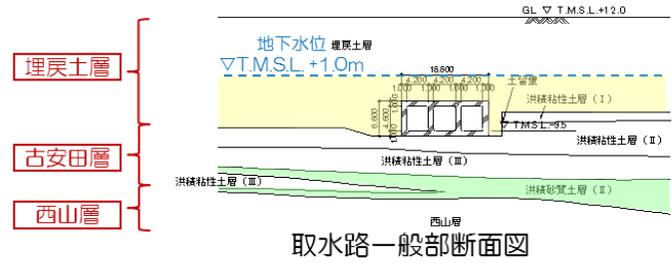
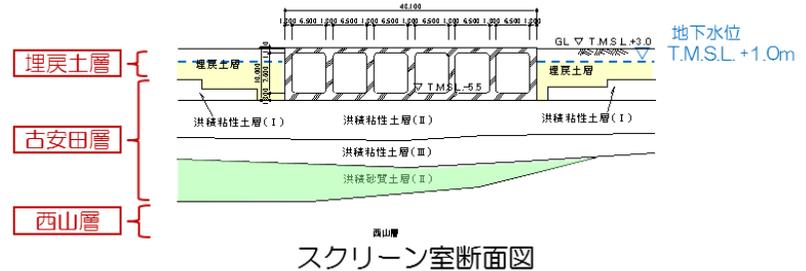
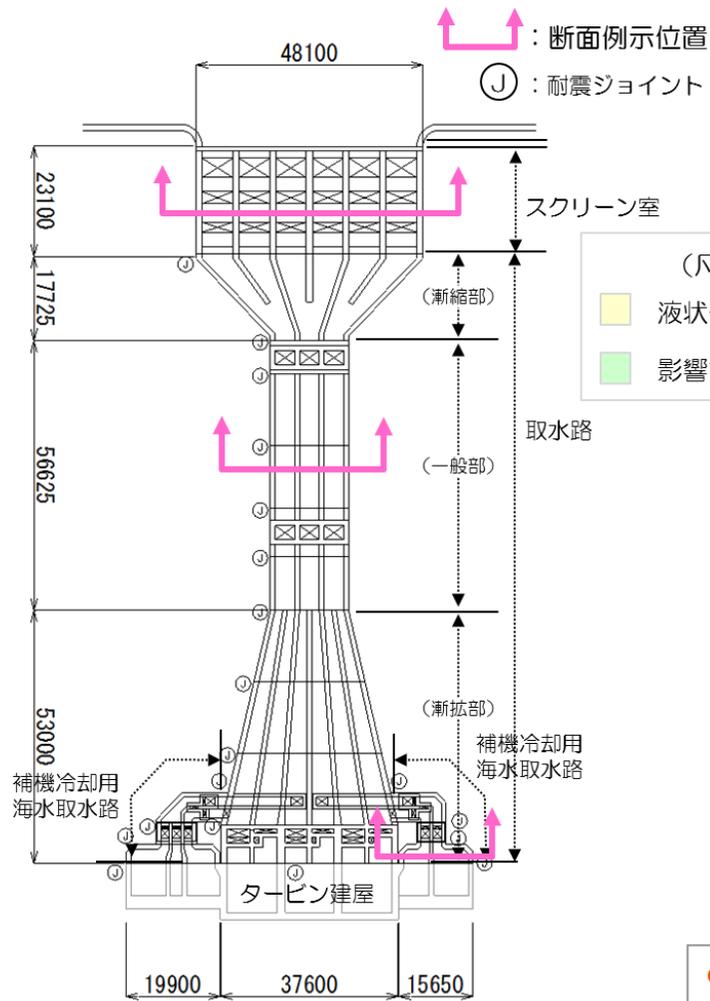
### 11.1 評価対象構造物の断面図

液状化評価の対象となる構造物の断面図を参考第 11.1.1～9 図に示す。



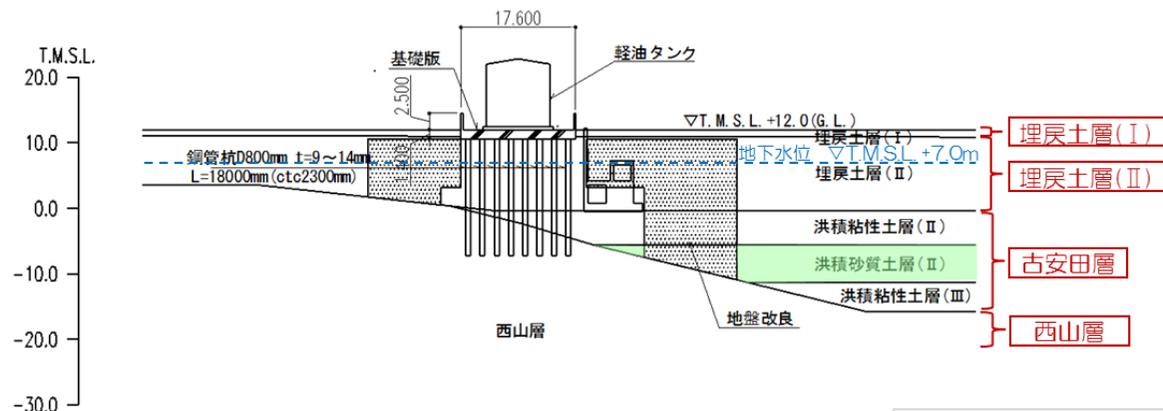
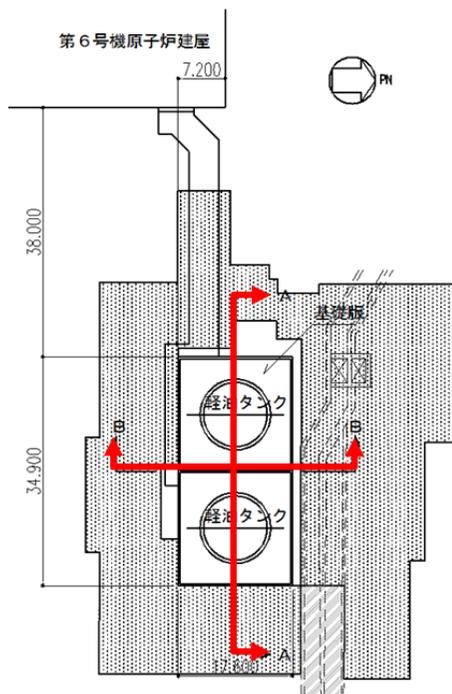
● 6号炉取水路の周辺には、地下水位以下に液状化層（埋戻土層）および影響評価対象層（洪積砂質土層）が存在する。

参考第 11.1.1 図 6号炉取水路断面図



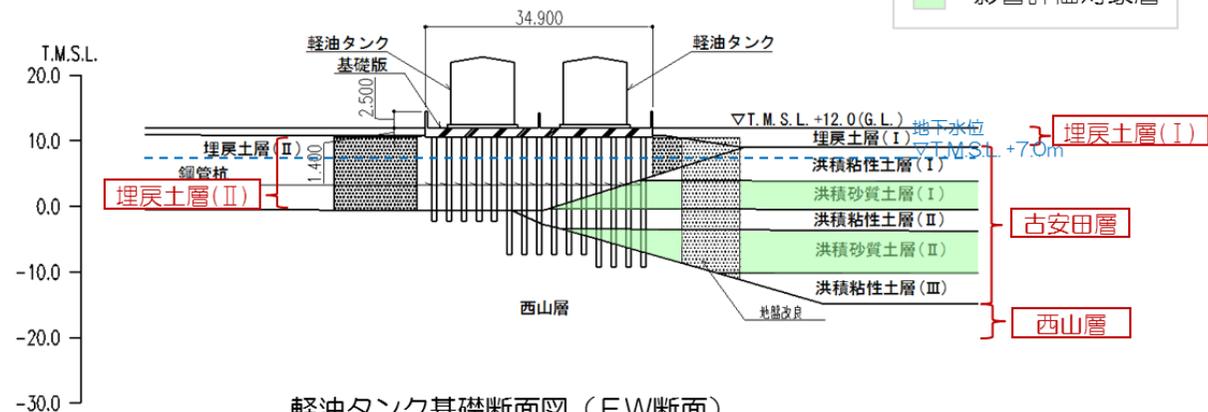
● 7号炉取水路の周辺には、地下水位以下に液状化層（埋戻土層）および影響評価対象層（洪積砂質土層）が存在する。

参考第 11.1.2 図 7号炉取水路断面図



軽油タンク基礎断面図 (NS断面)

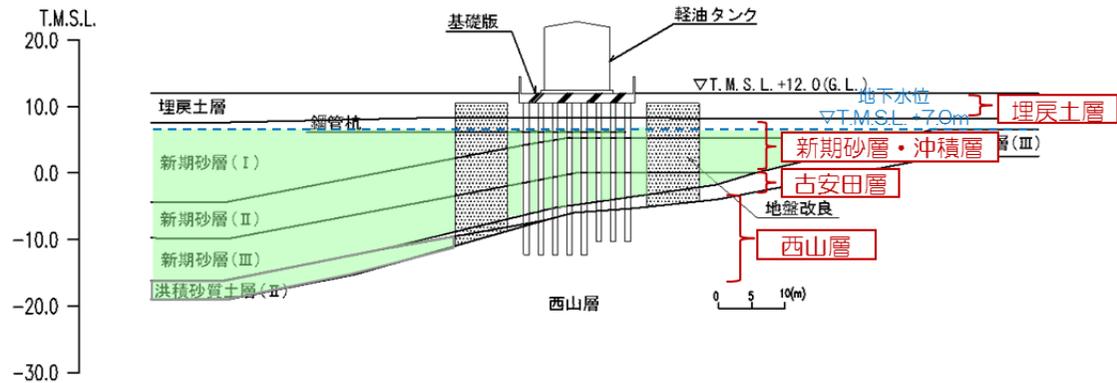
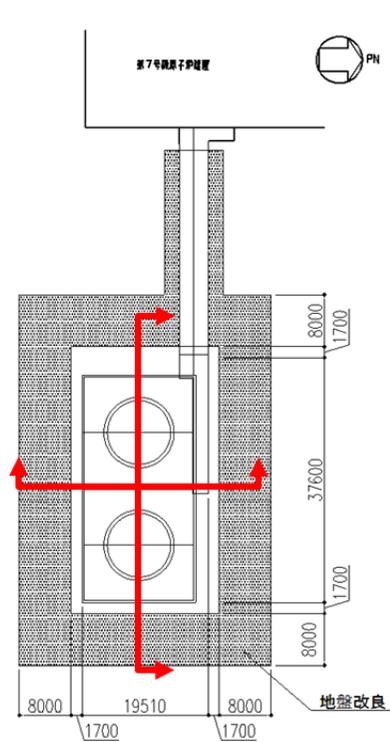
(凡例)  
 影響評価対象層



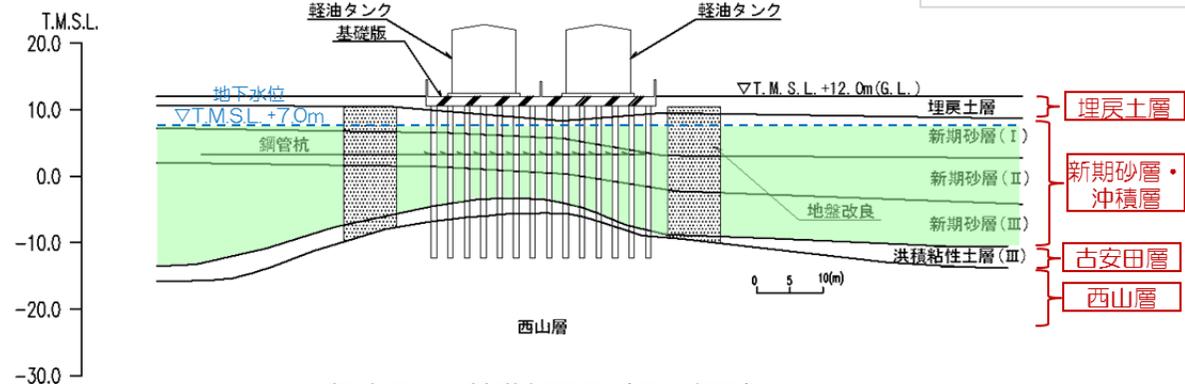
軽油タンク基礎断面図 (EW断面)

- 6号炉軽油タンク基礎の周辺には、地下水位以下に影響評価対象層（洪積砂質土層）が存在する。  
 ※埋戻土層(Ⅱ)は、建設時に掘削した西山層（泥岩）を埋め戻したものである。

参考第 11.1.3 図 6号炉軽油タンク基礎



軽油タンク基礎断面図 (NS断面)

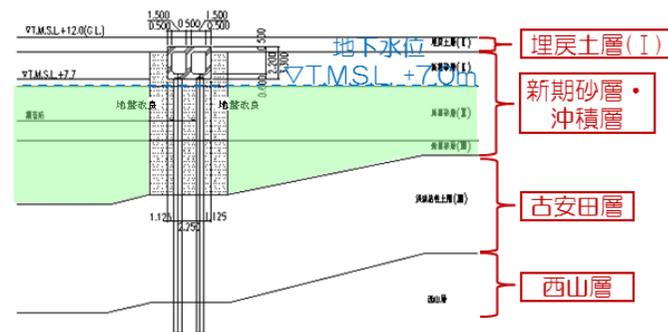
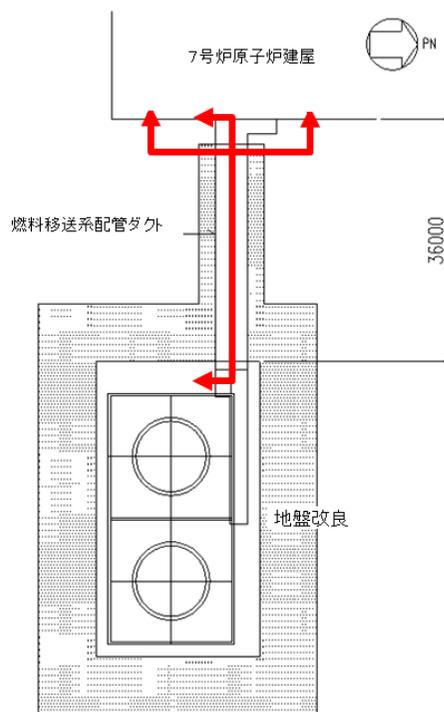


軽油タンク基礎断面図 (EW断面)

- 7号炉軽油タンク基礎の周辺には、地下水位以下に影響評価対象層（新期砂層・沖積層，洪積砂質土層）が存在する。

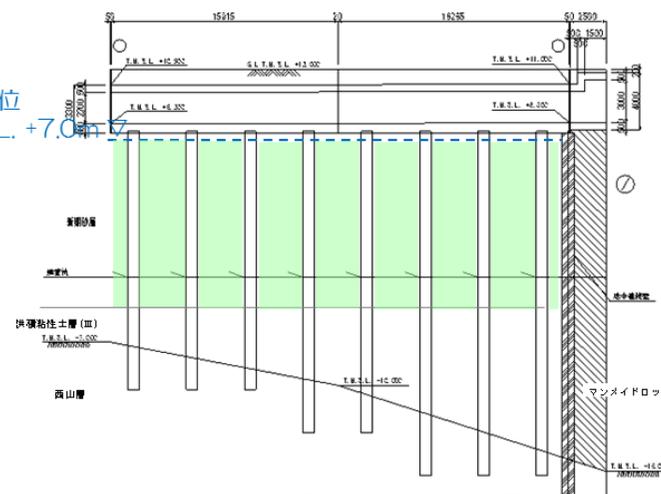
参考第 11.1.4 図 7号炉軽油タンク基礎





燃料移送系配管ダクト断面図

地下水位  
T.M.S.L. +7.0m

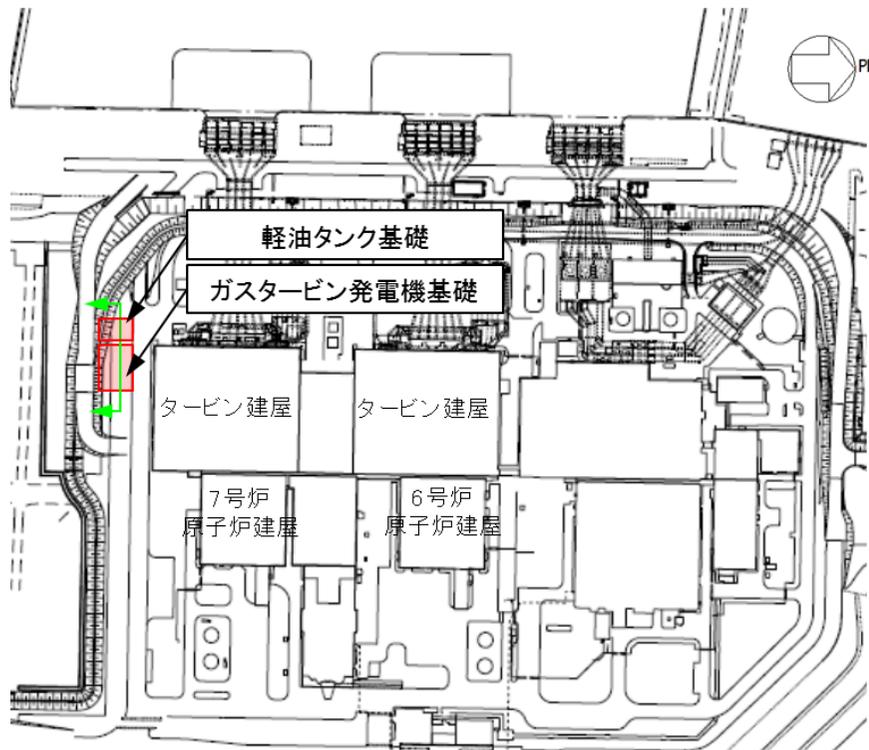


燃料移送系配管ダクト縦断面図

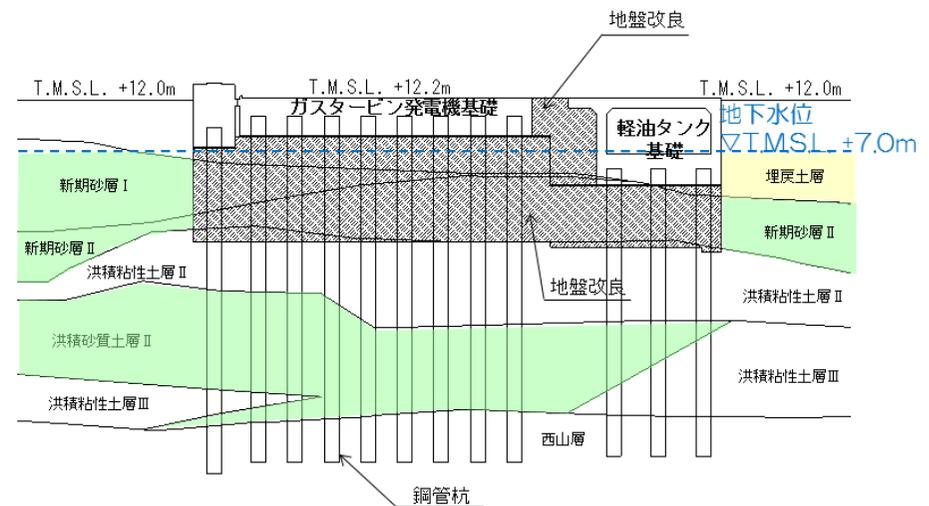
(凡例)  
■ 影響評価対象層

- 7号炉燃料移送系配管ダクトの周辺には、地下水位以下に影響評価対象層（新期砂層・沖積層）が存在する。

参考第 11.1.6 図 7号炉燃料移送系配管ダクト断面図



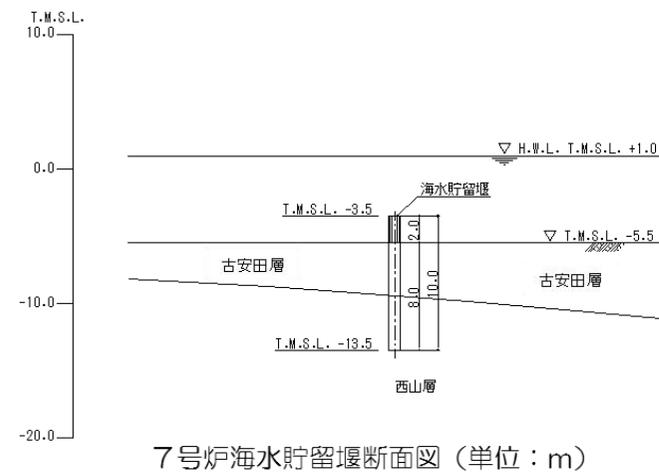
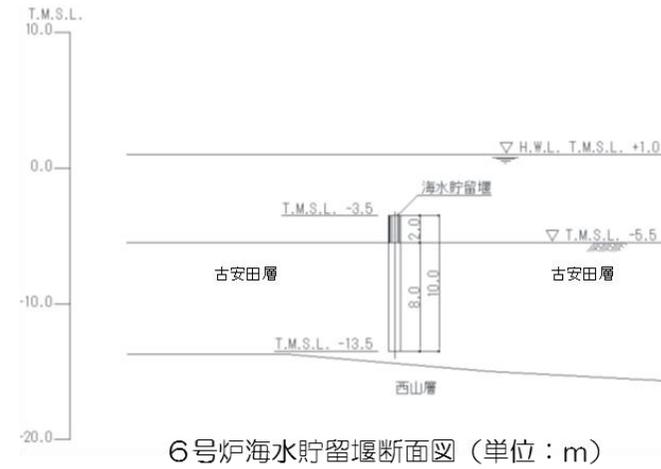
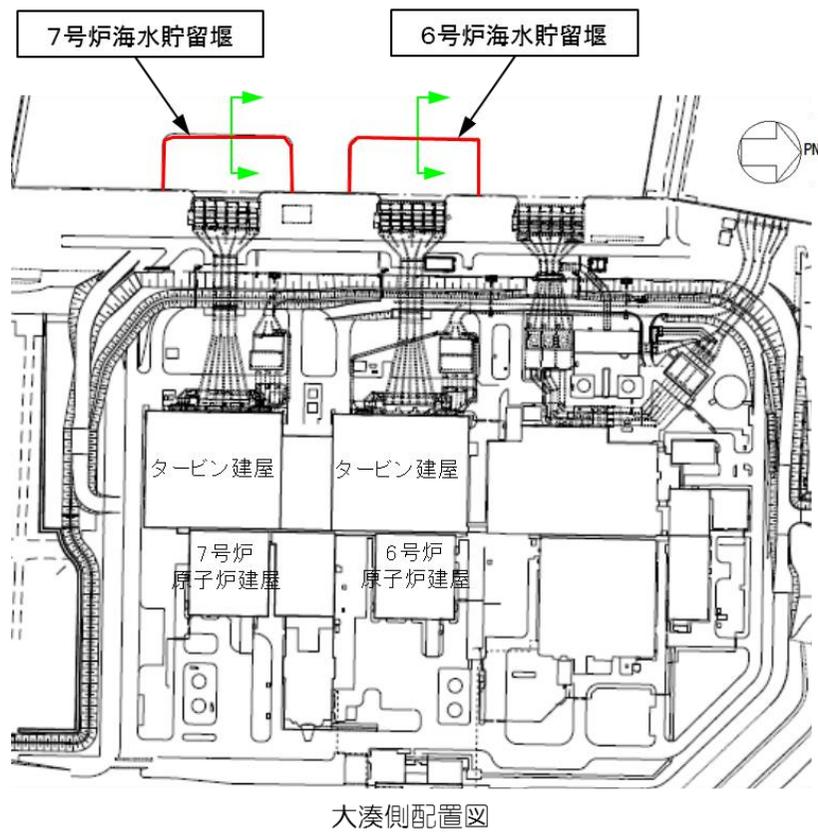
大湊側配置図



常設代替交流電源設備基礎断面図 (EW断面)

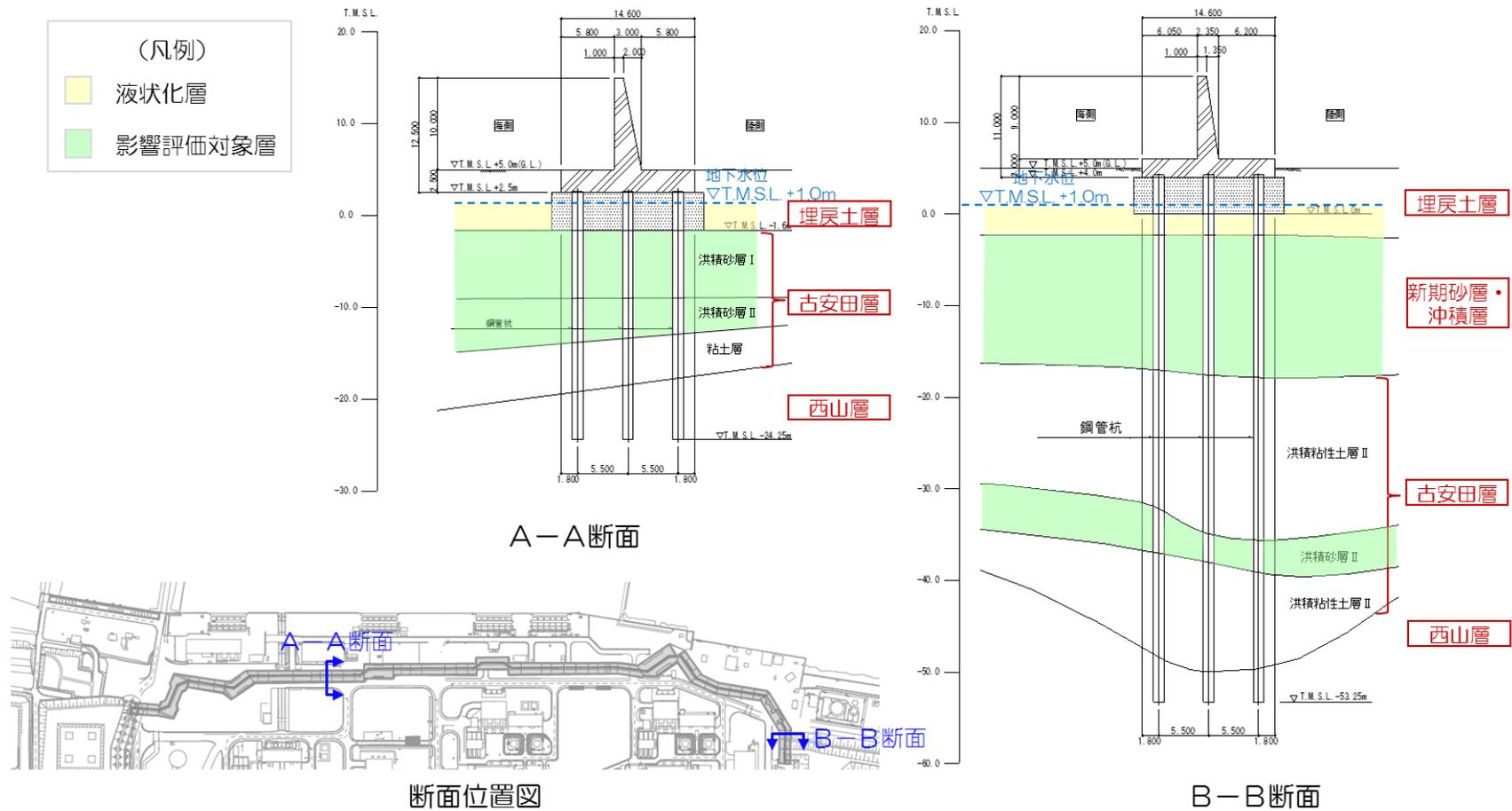
- 常設代替交流電源設備基礎の周辺には、地下水位以下に液状化層（埋戻土層）および影響評価対象層（新期砂層・沖積層，洪積砂質土層）が存在する。

参考第 11.1.7 図 常設代替交流電源設備基礎断面図



- 海水貯留堰の周辺には、液状化層および影響評価対象層は存在しない。

参考第 11.1.8 図 海水貯留堰



- 荒浜側防潮堤の周辺には、地下水位以下に液状化層（埋戻土層）および影響評価対象層（新期砂層・沖積層，洪積砂層）が存在する。

参考第 11.1.9 図 荒浜側防潮堤

## 11.2 荒浜側の古安田層中の砂層に関する補足

新期砂層・沖積層は、敷地のほぼ全域にわたって下位層を覆って分布している。下位層上限面に刻まれた谷を埋めるように堆積したため、場所により層厚が大きく変化している。本層は、主に未固結の淘汰の良い細粒～中粒砂からなる。現在の海浜、砂丘を形成しており、下位層を不整合に覆う。新期砂層・沖積層は、荒浜側防潮堤付近で確認されており、比較的淘汰が良く、固結の程度が低い。第 11.2.1 表に敷地の地質層序表を、第 11.2.1 図に敷地の地質図を、第 11.2.2 図に新期砂層・沖積層の露頭状況を示す。

1 号海水機器建屋南側法面では、古安田層中に砂質土が確認されている。この砂質土には最上部に腐植質シルトを狭在する箇所があり、上位の新期砂層・沖積層と不整合で境している。ここでは新期砂層・沖積層と古安田層の不整合が、T.M.S.L.-2m付近に確認されている。古安田層中の砂層には、葉理が認められ、新期砂層・沖積層に比べシルト質で固結の程度が高い。第 11.2.3 図に古安田層中の砂層の露頭状況を示す。

以上より、荒浜側にみられる新期砂層・沖積層を古安田層中の砂層の層位関係を直接確認しており、これらの対比は可能である。

第 11.2.1 表 敷地の地質層序表

| 時代  | 地層名               | 主な層相・岩質           | テフラ・放射年代                            |                                            |                                   |                                          |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| 第四紀 | 完新世               | 新期砂層・沖積層          | 上部は灰白色の細～中粒砂<br>下部は茶褐色の細～中粒砂，腐植物を含む | 腐植 (6, 150±170年)                           |                                   |                                          |
|     |                   | 後期                | 番神砂層                                |                                            | 灰白色～赤褐色の中～粗粒砂                     |                                          |
|     | 更新世               | 後期                | 大湊砂層                                | 褐色～黄褐色の中～粗粒砂，<br>シルトの薄層を含む                 | NG(約13万年前)                        |                                          |
|     |                   |                   | 中期                                  | A <sub>1</sub> 部層                          | 最上部は砂<br>粘土～シルト，砂を多く挟む            | y-l(約20万年前)                              |
|     |                   | A <sub>2</sub> 部層 |                                     | 粘土～シルト<br>織状粘土，有機物，砂を伴う，貝化石を含む             | Ata-Th(約24万年前)                    |                                          |
|     |                   | A <sub>3</sub> 部層 |                                     | 粘土～シルト<br>砂，厚い砂礫，有機物を挟む                    |                                   |                                          |
|     |                   | A <sub>4</sub> 部層 |                                     | 粘土～シルト<br>砂，砂礫を挟む                          | Kkt(約33-34万年前)                    |                                          |
|     |                   | 前期                | 灰爪層                                 | 凝灰質泥岩，凝灰質砂岩，凝灰岩                            | Iz(約1.5Ma)                        |                                          |
|     |                   |                   | 西山層                                 | N <sub>3</sub> 部層                          | 砂質泥岩<br>砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む<br>貝化石を含む | Fup(約2.2Ma)<br>Tsp(約2.3Ma)<br>Az(約2.4Ma) |
|     |                   |                   |                                     | N <sub>2</sub> 部層                          | シルト質泥岩<br>織状泥岩，凝灰岩，ノジュールを多く挟む     |                                          |
|     | N <sub>1</sub> 部層 |                   |                                     | シルト質～粘土質泥岩<br>砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む<br>珪質海綿化石を含む |                                   |                                          |
|     | 新第三紀              | 鮮新世               | 後期                                  |                                            | Nt-17(340±20万年)                   |                                          |
|     |                   |                   | 前期                                  |                                            | Nt-7(350±20万年)                    |                                          |
|     |                   | 中新世               | 後期                                  | 椎谷層                                        | 砂岩，砂岩・泥岩互層，細礫岩等を挟む                |                                          |
| 中期  |                   |                   | 寺泊層                                 | 黒色泥岩，砂岩・泥岩互層                               |                                   |                                          |

----- 不整合



2号造成北側法面

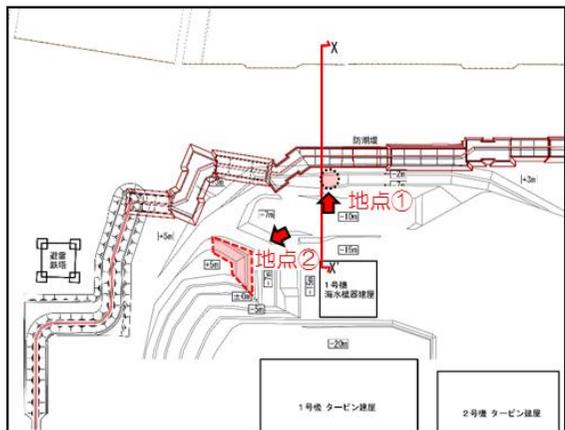


2号造成北側法面  
(新期砂層・沖積層拡大)

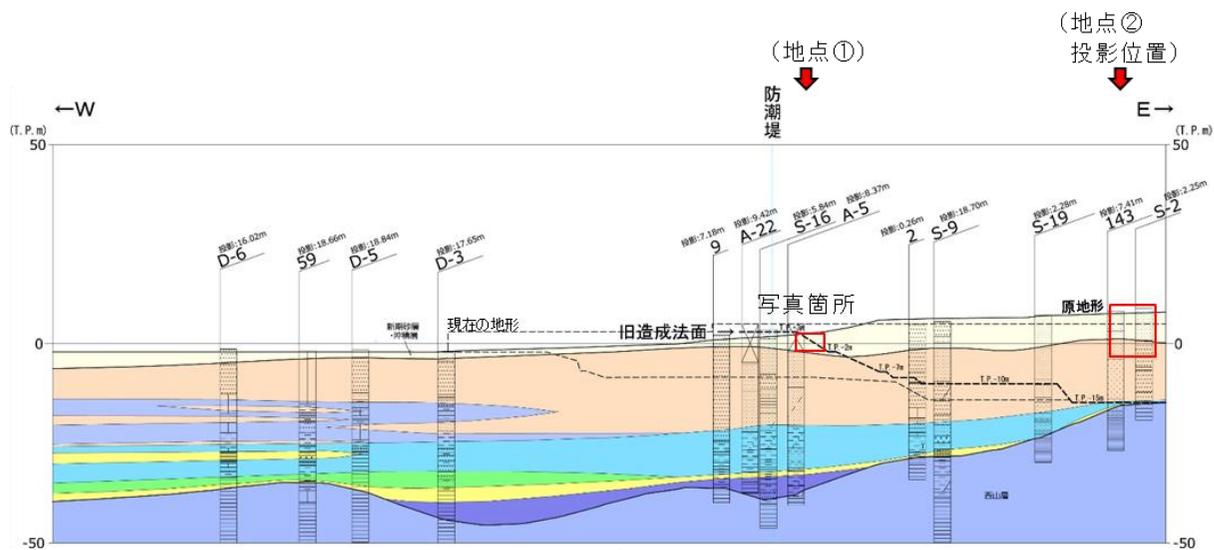


敷地の地質図

第 11.2.1 図 敷地の地質図



位置図



X-X' 断面

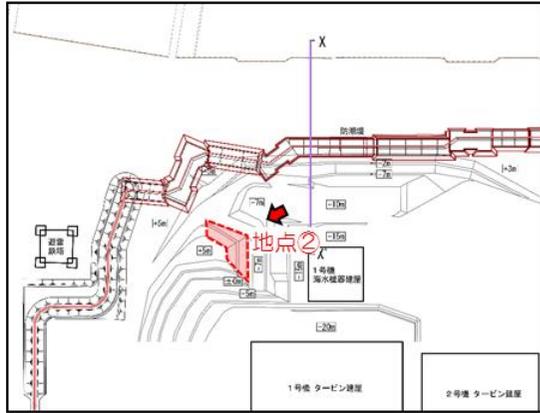


1号海水機器建屋西側法面 T.M.S.L.+3m~-2m  
**新期砂層・沖積層 (地点①)**

地質凡例

|                                   |                |                |
|-----------------------------------|----------------|----------------|
| 埋戻土                               | [Grey]         |                |
| 新期砂層・沖積層                          | [Light Yellow] |                |
| 舊神砂層・大湊砂層                         | [Orange]       |                |
| A <sub>2</sub> ~A <sub>3</sub> 部層 | 粘性土            | [Blue]         |
|                                   | 粘性土・砂質土互層      | [Green]        |
|                                   | 砂質土            | [Light Orange] |
| 古安田層                              | 粘性土            | [Light Blue]   |
|                                   | 粘性土・砂質土互層      | [Light Green]  |
|                                   | 砂質土            | [Yellow]       |
| A <sub>1</sub> 部層                 | 粘性土            | [Dark Blue]    |
|                                   | 粘性土・砂質土互層      | [Dark Green]   |
| 砂質土                               | [Light Yellow] |                |
| 西山層                               | [Dark Blue]    |                |

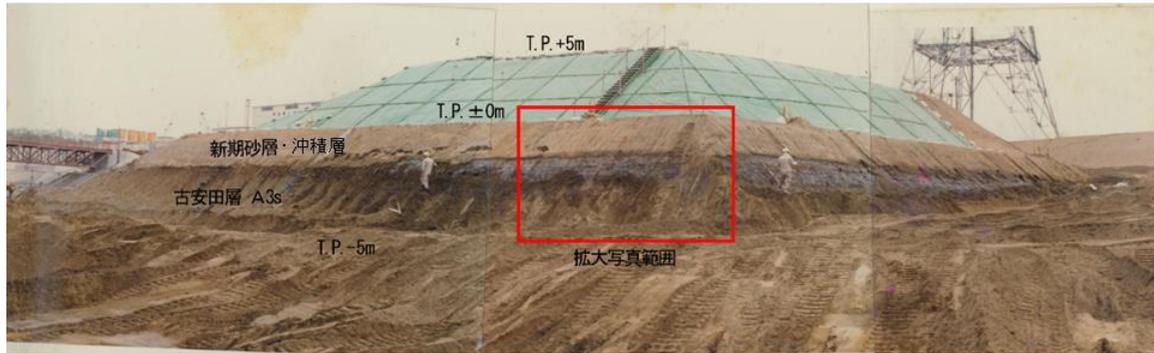
第 11.2.2 図 新期砂層・沖積層の露頭状況



位置図



新期砂層・沖積層と古安田層 (砂層) 地層境界



1号海水機器建屋南側法面 T.M.S.L. ±0~-5m全景 (地点②)



1号海水機器建屋南側法面 T.M.S.L. -5m~-7m  
古安田層中の砂層 (地点②)

第 11.2.3 図 古安田層中の砂層の露頭状況

### 11.3 液状化に関連する基本物性に関する補足

液状化に関連する基本物性に関して，第 11.3.1 図にN値（標準貫入試験）について，第 11.3.2 図に細粒分含有率（Fc）について，第 11.3.3 図に乾燥密度及び間隙比について，第 11.3.4 図に相対密度（Dr）について，第 11.3.5 図に粒径加積曲線について示す。

## N値とは

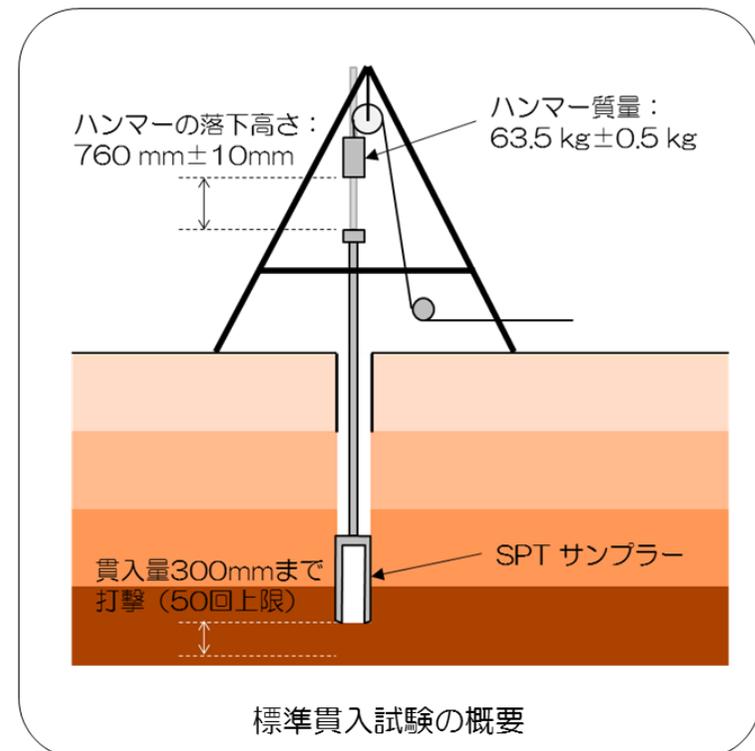
- N値は、原位置で行う標準貫入試験により求まる値であり、地盤の硬さ・強度や締まりの程度の評価に用いられる。N値が高い方が地盤が硬く・密であり、小さい方が地盤が軟らかく・疎である。
- N値は、地盤上または地盤中に構築する構造物の設計等において、地盤の強度（内部摩擦角 $\phi$ 、粘着力 $c$ 、支持力度、液状化強度など）や地盤の剛性（S波速度、弾性係数など）を推定するために一般的に用いられている。

## 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。
- また、打撃回数50回において、貫入量が300mm未満のものについては、以下の換算によりN値を評価した。

$$N\text{値} = \frac{300\text{mm}}{\text{打撃回数50回における打ち込み深度(mm)}} \times 50$$

（例）打撃回数50回において打ち込み深度が200mmの場合のN値は75となる。



第 11.3.1 図 N値（標準貫入試験）について

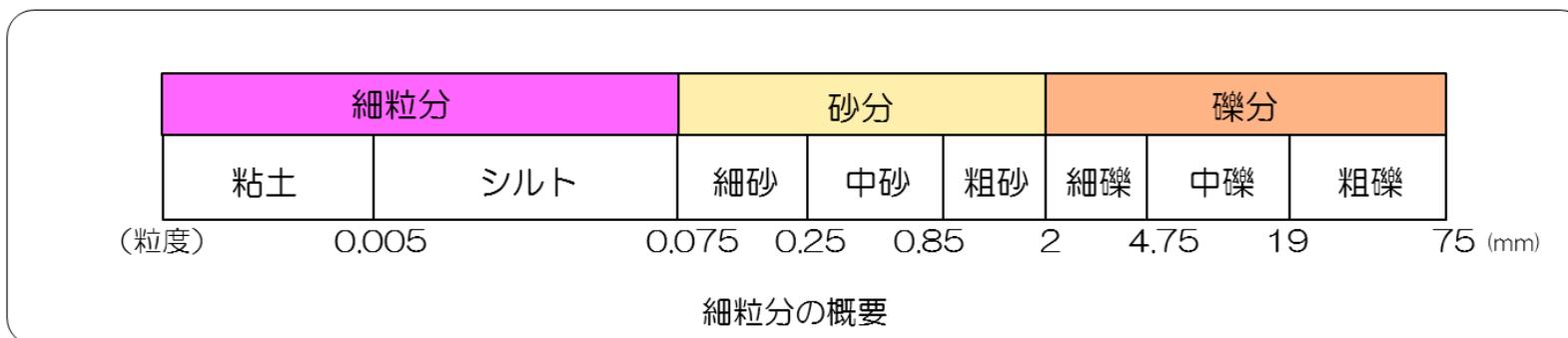
### 細粒分含有率 (Fc) とは

- 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

- 細粒分含有率試験は、「土の細粒分含有率試験方法」(JIS A 1223:2000)に基づいて実施する。
- 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。

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



第 11.3.2 図 細粒分含有率 (Fc) について

### 乾燥密度、間隙比とは

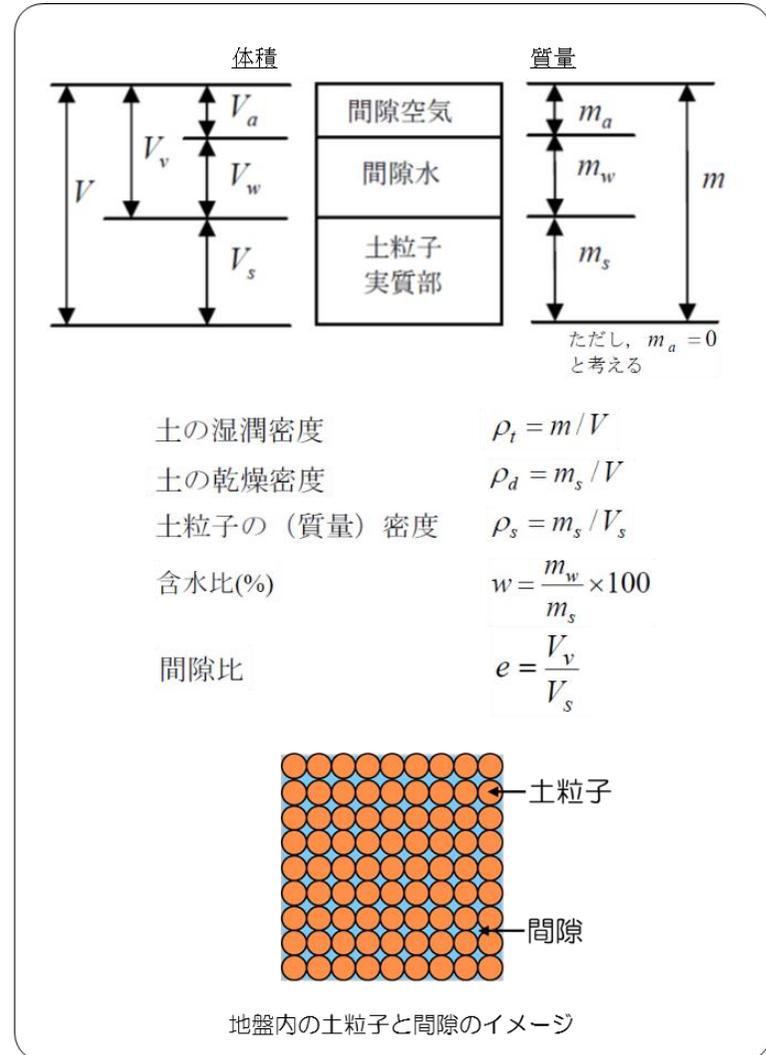
- 乾燥密度、間隙比は、土の湿潤密度、含水比試験及び土粒子の密度試験から求まる湿潤密度、含水比及び土粒子の密度から算出され、土の締め具合を表す基本的な土の物性値である。なお、間隙比は相対密度の算出にも用いられる。

### 試験方法

- 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。
- 「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。
- 乾燥密度( $\rho_d$ )及び間隙比( $e$ )は、下式により算出する。

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

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



第 11.3.3 図 乾燥密度及び間隙比について

### 相対密度とは

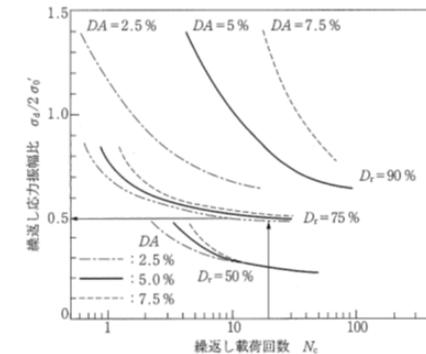
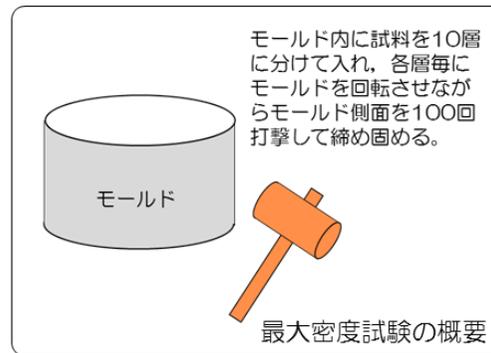
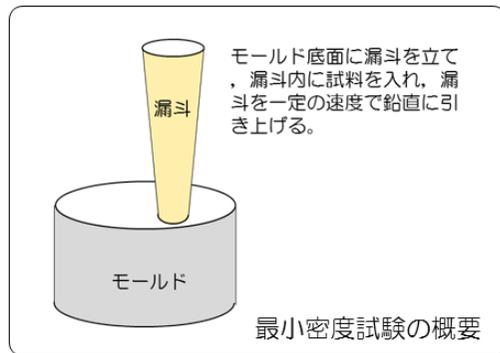
- 相対密度は、下式で定義される地盤の締まりを表す指標である。相対的に、相対密度が大きい方が地盤は密で、小さい方が疎である。
- 砂の相対密度は、力学特性を表すパラメータとして利用されている。なお、相対密度はそれぞれの密度の誤差が相対密度に大きな誤差となって反映されるという特徴を持っており、特に細粒分を多く含む場合には誤差が大きくなる特性がある。

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

$e$  : 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

- 最大、最小密度の試験は、「砂の最小密度・最大密度試験方法」(JIS A 1224:2000)に基づいて実施する。
- 「砂の最小密度・最大密度試験方法」においては、「2mmふるいを通し、75 $\mu$ mふるいに95%以上残留する砂」を基本としており、採取した試料のうち粒径2mm以上の礫を除去して試験を実施した。
- 地盤工学会(2000)によれば、「更新世中期や前期に堆積した砂のように極めて密な砂の場合、相対密度は100%を越えることが普通である。」とされている。



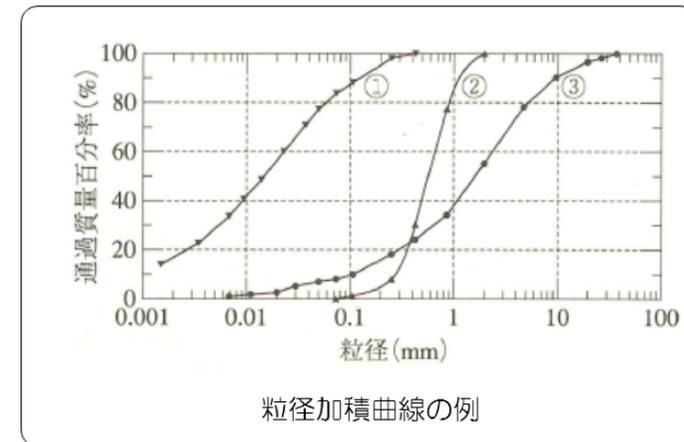
第 11.3.4 図 相対密度 ( $D_r$ ) について

### 粒径加積曲線とは

- 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・基礎工などの施工法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)に基づいて実施する。
- 「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古い分析を行う。



第 11.3.5 図 粒径加積曲線について

#### 11.4 液状化関連の文献整理

液状化に関連した文献を整理して，第 11.4.1 図に中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について，第 11.4.2 図にサイクリックモビリティについて，第 11.4.3 図に有効応力解析について示す。

表 3-3 室内液状化試験装置の種類と特徴

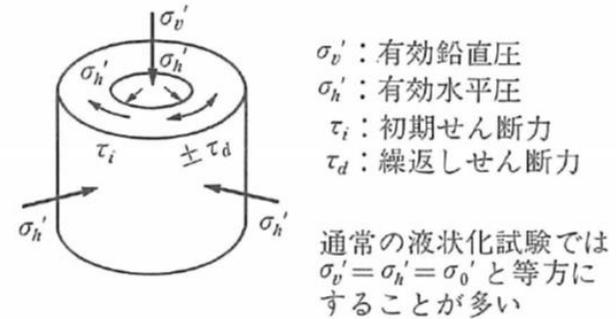
| 項目<br>種類                                          | 応力状態        | モ ー ル 円 | 応力経路<br>(全応力)<br>1→2→3→4 | 拘束状態                                                   | ひずみ状態            | 繰返し荷重                  |
|---------------------------------------------------|-------------|---------|--------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| 原地盤                                               |             |         |                          | 異方応力状態<br>( $K_0$ 圧密)<br>(初期せん断応力<br>が加わることも<br>ある)    | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 多方向ランダム<br>波           |
| 繰返し三軸<br>(別名 振動三軸)<br>動的三軸)                       |             |         |                          | 等方応力状態                                                 | 軸対称変形            | 一方向正弦波                 |
| 繰返しねじりせん断<br>(別名 動的ねじりせん断)<br>(リングねじりせん断も<br>同種類) |             |         |                          | 等方または異方<br>応力状態<br>( $K_0$ 圧密可)<br>(初期せん断応<br>力も加えられる) | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 一方向<br>正弦波またはラ<br>ンダム波 |
| 繰<br>返<br>し<br>単<br>純<br>せん<br>断                  | NGI 型       |         |                          | 異方応力状態<br>(準 $K_0$ 圧密;<br>$K_0$ 未知)<br>(初期せん断応<br>力も可) | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 多方向<br>正弦波またはラ<br>ンダム波 |
|                                                   | Cambridge 型 |         |                          | 異方応力状態<br>( $K_0$ 圧密)<br>(初期せん断応<br>力も可)               | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 一方向<br>正弦波またはラ<br>ンダム波 |

(a) 安田 (1991)

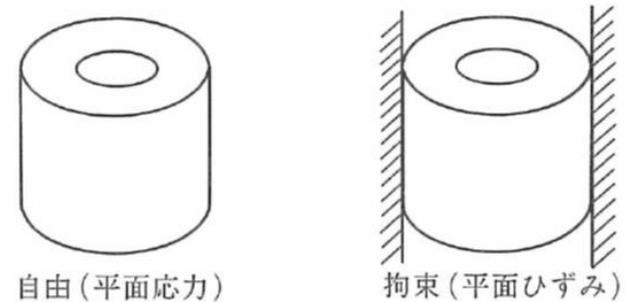
第 11.4.1 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について

繰返しねじりせん断装置（動的ねじりせん断装置）

- 繰返しねじりせん断試験では中空円筒や中実円柱の供試体を用い、これにねじりせん断力を加える。
- 円筒や円柱では半径方向にせん断ひずみの値が異なってくるため、その影響をなるべく少なくするため、中空円筒の供試体の方がよく用いられる。
- 供試体には図3-8 (a) に示したように初期の拘束圧や初期せん断力を加えておいた後、繰返しせん断力を加える。
- 地盤内での応力状態に合わせて異方応力（軸圧と側圧が異なる）にしたり、斜面内や構造物下の地盤の状態を再現するために初期せん断力を加えたり、さらに、側圧でも外圧と内圧とを違って三主応力が異なるようにすることができる。



(a) 応力状態



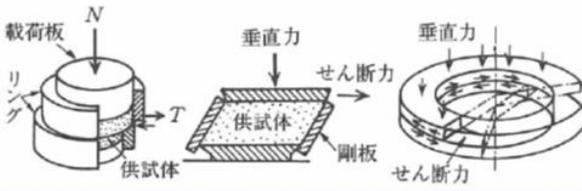
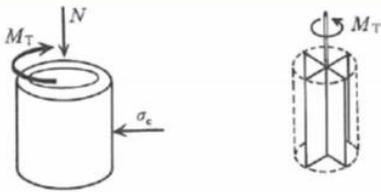
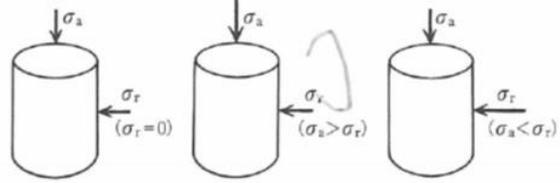
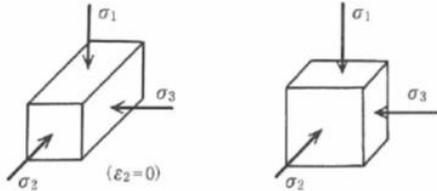
(b) 側方変位拘束条件

図 3-8 繰返しねじりせん断試験における応力，側方変位拘束条件

(b) 安田 (1991)

第 11.4.1 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について

表-7.1.1 せん断試験の種類

|          | 種類                                                                                                                                               | 試験の原理                                                                                 | 応力の載荷方法                                                |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| せん断応力載荷型 | 側方変位拘束型<br>土の一面せん断試験 (第4章)<br>単純せん断試験 (第8章)<br>リングせん断試験 (第8章)<br>岩盤不連続面の一面せん断試験 (第12章)                                                           |     | 特定のせん断または供試体の境界面に垂直力とせん断力を直接載荷 (主応力方向変化)               |
|          | 側方変位非拘束型<br>ねじりせん断試験 (第5章)<br>繰返しねじりせん断試験 (第7章)<br>室内ペーンせん断試験 (第8章)                                                                              |    |                                                        |
| 主応力載荷型   | 軸対称型<br>土の一軸圧縮試験 (第2章)<br>三軸圧縮試験 (第3章)<br>三軸伸張試験 (第3章)<br>繰返し三軸試験 (第6, 7章)<br>岩石の一軸圧縮試験 (第9章)<br>岩 (岩石) の三軸圧縮試験 (第10章)<br>圧裂による岩石の引張り強さ試験 (第11章) |     | 供試体の境界面に主応力を載荷し、結果として生じるせん断断面上の垂直応力・せん断応力を算定 (主応力方向固定) |
|          | 三主応力型<br>平面ひずみ試験 (第8章)<br>三主応力制御試験 (第8章)                                                                                                         |  |                                                        |

(b) 地盤工学会 (2009)

第 11.4.1 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について

## 第5章 ねじりせん断試験

- ▶ねじりせん断試験は，中空円筒供試体の上または下端にトルクを加えて円周方向にねじることによって供試体全体にせん断変形を与える試験であり，直接型せん断試験の一種である。
- ▶他の直接型せん断試験と比較すると，供試体の側方応力条件が明確であることと供試体の水平・鉛直面に共役なせん断応力を確実に作用させることができるという利点を有する。したがって，供試体に作用する主応力の大きさと方向が容易に求められる。
- ▶三軸試験に代表される間接型せん断試験と比較して以下のような利点を有する。
  - ①主応力方向が連続的に回転するような応力状態も再現することができる。
  - ②軸方向に対して直角方向にせん断できる。
  - ③比較的広範囲な応力経路またはひずみ経路を供試体に与えられる。
- ▶ねじりせん断試験では，制御できる応力の自由度が大きいことから，さまざまな応力状態のもとでの土の基本的な挙動を明らかにすることができる。

(d) 地盤工学会 (2009)

第 11.4.1 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について

- ▶ 現在液状化強度を求めるために最も普通に行われている振動三軸試験では、図2.1 (b)に示すように側圧を一定に保ったまま軸力を変動させせん断応力を変動させるものであり、せん断応力の変動とともに有効拘束圧も変化する。
- ▶ より原位置に近い応力状態を再現できる試験機に中空ねじり試験機がある。この試験では図2.1 (c)に示すように軸力、側圧を一定に保ったまません断応力を加えるので、試料の半径方向の応力変動が無視できるとすればほぼ実地盤に対応している。
- ▶ 三軸試験では圧縮側と引っ張り側で挙動が異なり、応力経路は上下では対象ではないし、ひずみの発生量も異なる。これに対してねじり試験では応力-ひずみ関係、応力経路ともほぼ対称な形をしている。

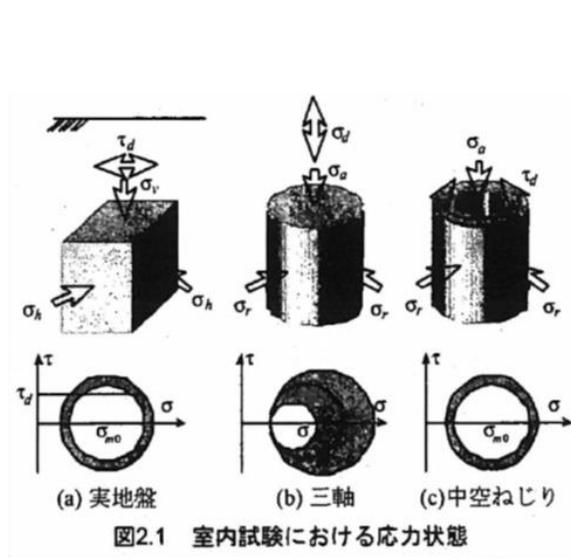


図2.1 室内試験における応力状態

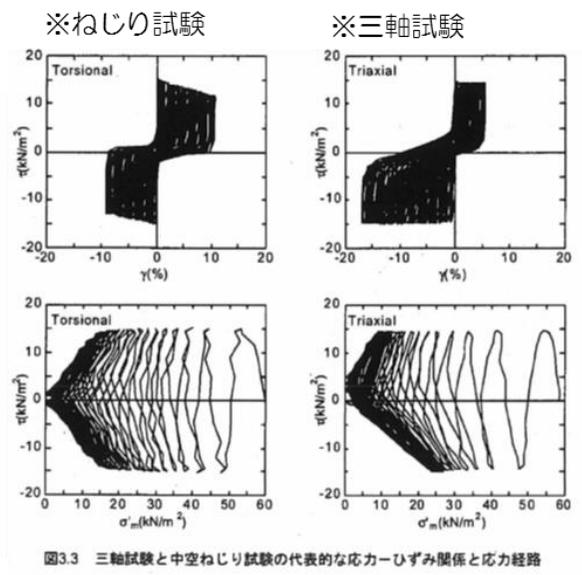


図3.3 三軸試験と中空ねじり試験の代表的な応力-ひずみ関係と応力経路

(e) 澤田ほか (2003)

第 11.4.1 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法について

## サイクリックモビリティ

cyclic mobility

砂などの繰返し载荷において、有効拘束圧 (effective confining pressure) がゼロに近づいてから、载荷時にせん断剛性 (shear modulus) の回復、除荷時に有効応力\*の減少を繰り返していくが、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。地震のような繰返しせん断応力を受ける場合には、有効拘束圧がゼロかそれに近いところで大きなひずみが生じる。一方ではひずみが大きくなると、再び剛性が回復してくるので、いわゆる液状化状態ではなくなる。有効拘束圧がゼロの付近でどの程度大きなひずみが発生するかは、主に砂の密度と繰返し载荷でのせん断応力の大きさや繰返し回数 (number of cycles) に依存しており、密度が小さいほど、また、液状化以後に繰返しせん断応力が大きく、繰返し回数が多いほど大きなひずみが発生する。逆に、密度の大きい砂では、一時的に有効拘束圧がゼロまたはその近くになっても、引き続き载荷に対して大きなひずみが発生しない。

(a) 地盤工学会 (2006)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

## 液状化（密な砂の場合）

- ▶ やや密な砂では、図-1に示すように一時的に $\sigma'$ がゼロになっても、図-1中のA→Bのように引き続きせん断応力を供試体に加えても、供試体のひずみが無限に大きくなるわけではない。
- ▶ 密な砂では、せん断応力が働いていない時に、一時的に有効拘束圧がゼロになってもせん断応力が加わり、せん断ひずみが生ずると体積が膨張しようとするダイレイタンスーの現象が生じる。
- ▶ 非排水状態にある飽和砂のように等体積状態であれば、体積膨張しようとするれば、負の過剰間隙水圧が発生することになり、有効拘束圧が増加することになる。図-1の場合でもA→Bのプロセスで過剰間隙水圧が大幅に減少している。したがって、有効拘束圧の増加に伴うせん断抵抗力の増加が生ずることになる。この傾向は密な砂ほど大きくなる。
- ▶ 非排水状態での繰返し荷重に対する飽和砂の強度は密になるほど、特に間隙水圧の上昇そのもので定義するのは適切ではなく、発生したひずみの大きさで、定義する方がよりよいということになる。

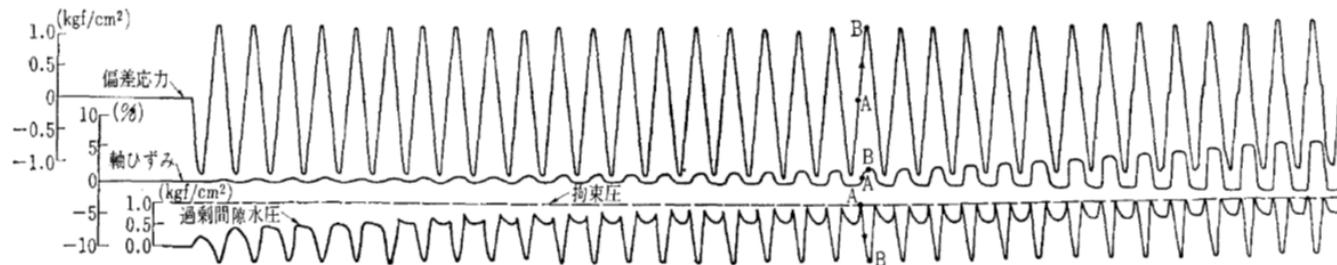


図-1 不飽和状態 ( $w=8\%$ ) でタンピングして作製した Monterey No. 0 砂の振動三軸試験結果 ( $D_r=79\%$ , 背圧  $1 \text{ kgf/cm}^2$ , 初期圧密応力  $\sigma_c'=1 \text{ kgf/cm}^2$ , 偏差応力比  $\sigma_{dp}/2\sigma_c'=0.55$ , 供試体寸法: 高さ  $153 \text{ mm}$ , 直径  $61 \text{ mm}$ , 空圧式繰返し荷重 ( $1 \text{ Hz}$ ))。

(b) 龍岡 (1980)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

## 液状化（密な砂の場合）

- ▶ サイクリックモビリティとは、「密な砂地盤が繰り返しせん断を受け、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。」としている（図-1）。
- ▶ 地盤の液状化は、ゆるい砂地盤が繰り返しせん断を受け、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。
- ▶ 密な砂では、ゆるい砂で見られるようなひずみの急増は見られず、変形が限定される傾向が著しい。この点で、サイクリックモビリティ現象を示す密な砂地盤は、構造設計における ductility（ねばり）の効果と同等の工学的特性を有するものと評価される。

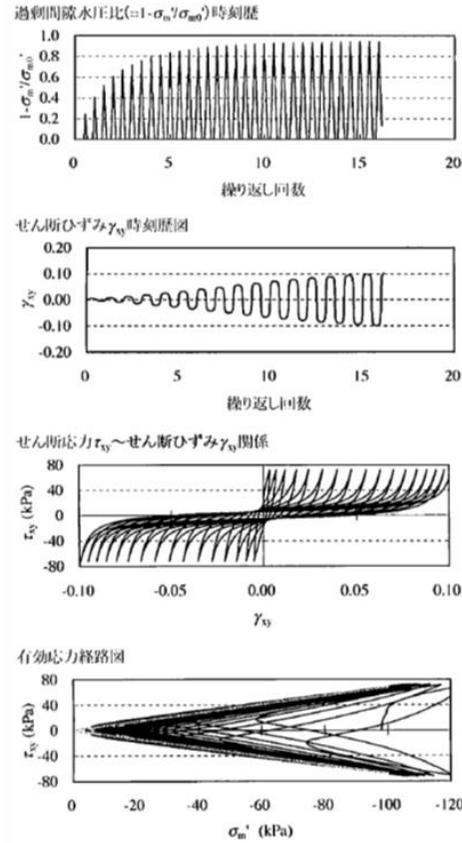


図-1 密な砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

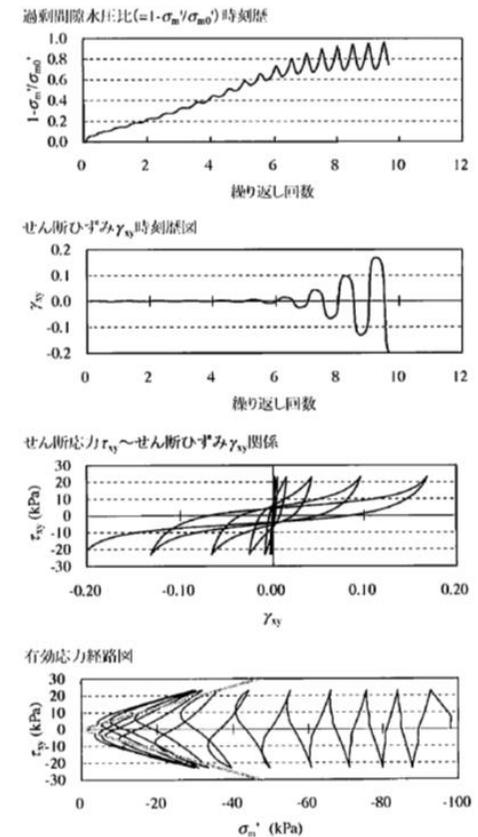


図-2 ゆるい砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

(c) 井合 (2008)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

## 間隙水圧上昇を伴う繰返しせん断変形（サイクリックモビリティー）

- 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、せん断によって堆積が膨張しようとする傾向（正のダイラタンシー）が現れるので、非排水条件のもとでは、せん断ひずみが大きくなると間隙水圧が減少し、したがって有効応力が回復することである。
- その結果、間隙水圧比が100%に達した後の過剰間隙水圧は、図-2.11に示すような変動を示す。
- すなわち、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、緩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もつせん断変形が繰り返されるにすぎない。

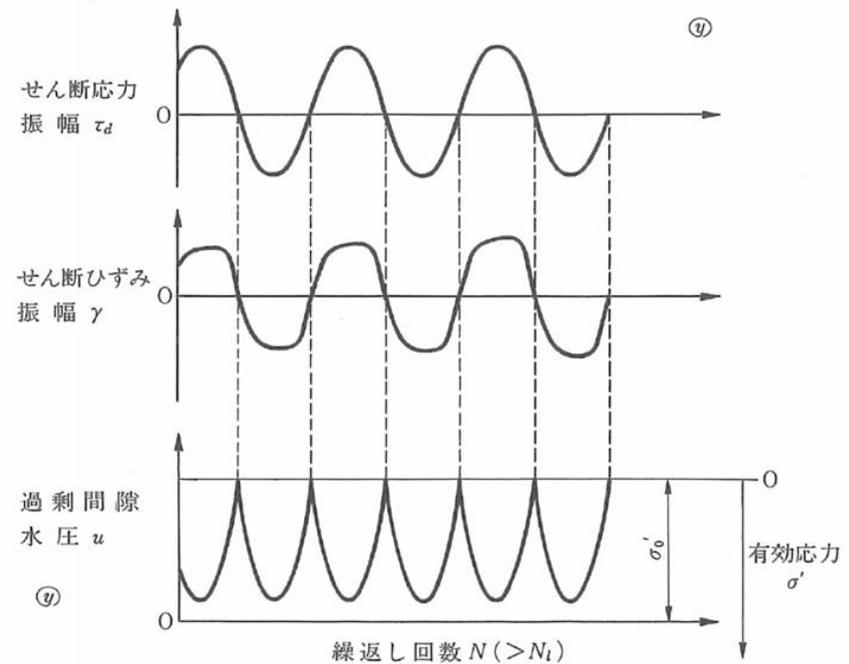


図-2.11 密な飽和砂の繰返し単純せん断試験において、間隙水圧比が100%に達した後のせん断ひずみと過剰間隙水圧の変化(模式図)

(d) 吉見 (1991)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティーについて

## サイクリックモビリティ

- ▶ ゆる詰めと密詰めでの応力経路と応力～ひずみ関係を示すと図4-5となる。ゆる詰めの場合は応力経路が原点に近づいてゆき有効拘束圧が0になった後、せん断力が加わると、大きなひずみが発生する。
- ▶ 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0になっても、その後  
にせん断力を加えると負の過剰間隙水  
圧が発生して有効拘束圧が増加（回復）  
し、有限の小さなひずみ振幅しか発生し  
ない。この現象を“サイクリックモビ  
リティ”と呼んで液状化と区別するこ  
ともある。

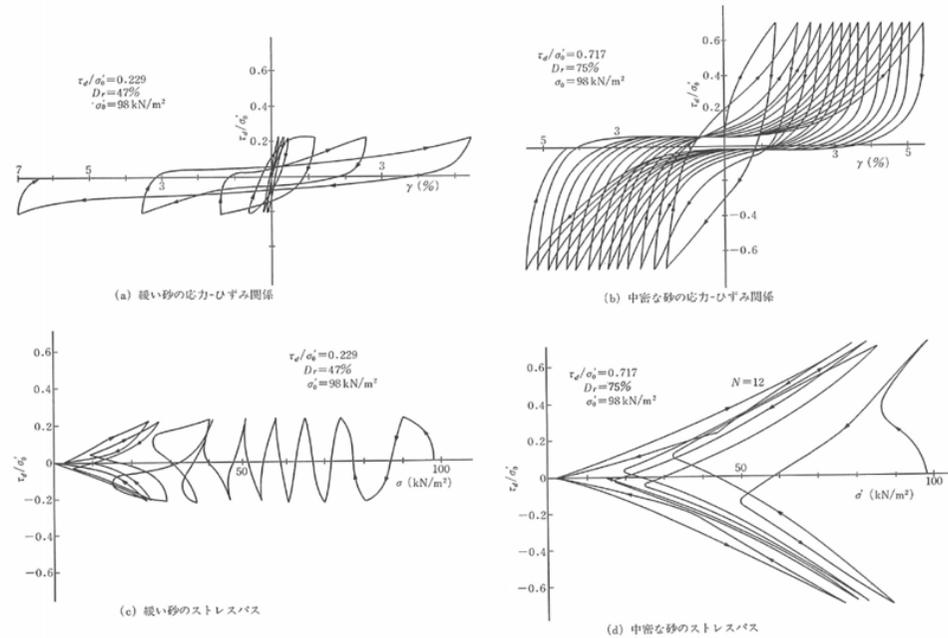


図 4-5 ゆる詰めと密な試料の応力経路および応力～ひずみ関係の比較（繰返しねじりせん断試験、富士川砂)<sup>2)</sup>

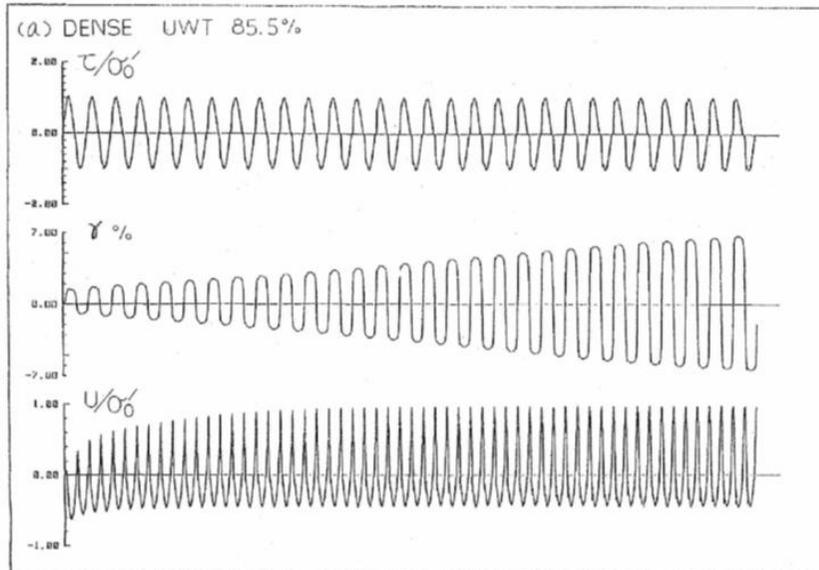
(e) 安田 (1991)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

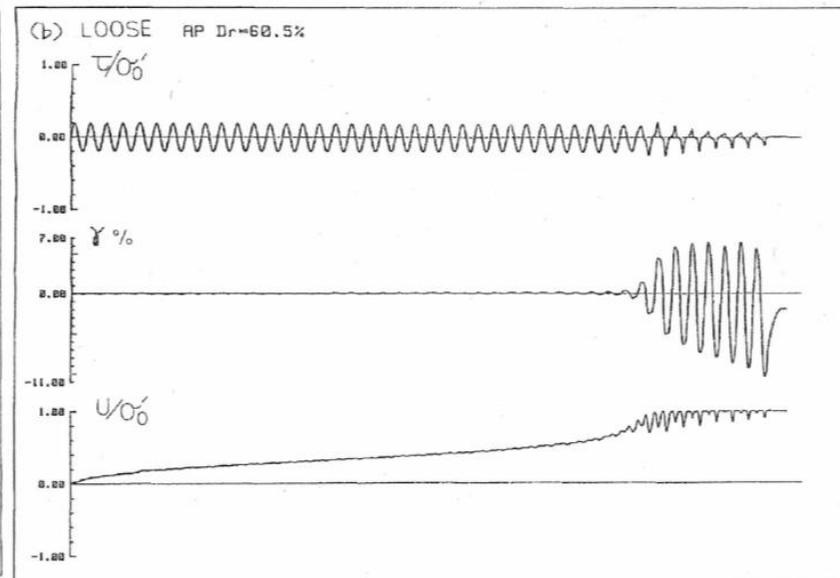
### 液状化（密な砂の特徴）

- ▶ ゆるい砂では応力径路がいわゆる「変相線」を越えた時点から除荷される時に砂が言わば泥水液体状となり、流動性を帯びてひずみが無限に生じる。
- ▶ 密な砂では応力径路が「変相角」を越えてからも液体状にならずせん断応力の除荷載荷に応じて破壊線に平行に応力径路が移動し有効応力がくり返し回復するようないわゆる“Cyclic Mobility”現象を示す。

※密な砂



※ゆるい砂



(f) 国生ほか (1983)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

### 液状化（密な砂の特徴）

- あるひずみ振幅の範囲内ではせん断抵抗が非常に低下し、一見、ゆるい砂と同様な挙動を示すが、その範囲を越えると有効応力が回復してくるために急激にせん断抵抗が増すことになる。载荷のくり返し数が増すに従って、このひずみ範囲は徐々に増大するが、ゆるい砂のようにひずみが急激にのびることは決してない。

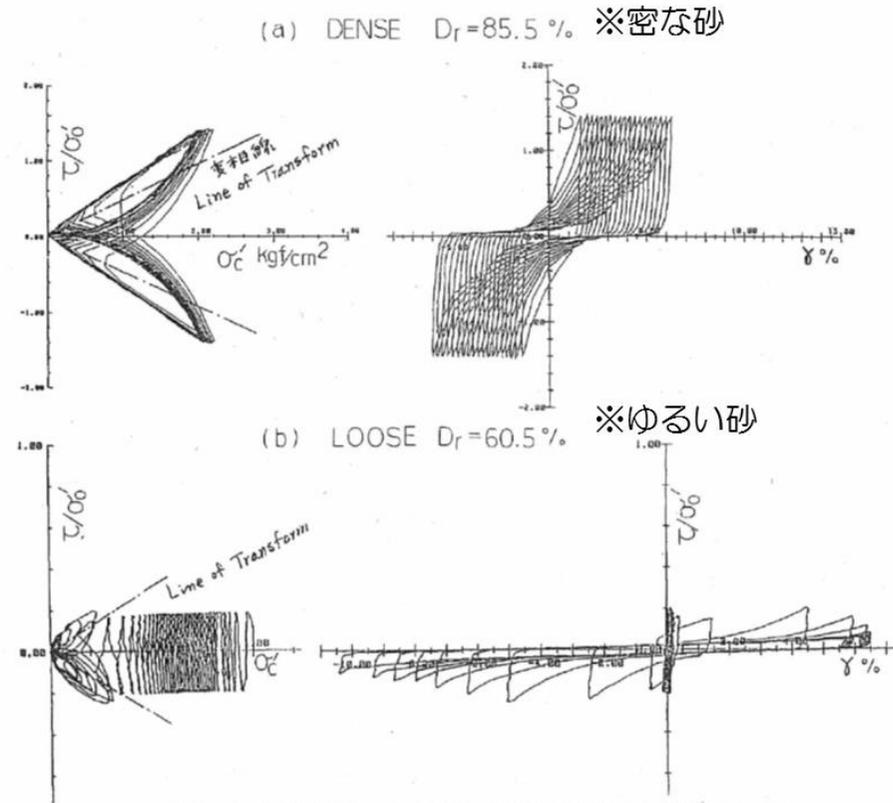


図3-2 密な砂(a)とゆるい砂(b)の中空ねじりせん断試験による有効応力経路（左側）と応力・ひずみ関係  
Effective Stress Path and Stress - Strain Curve for Dense Sand (a) and Loose Sand (b)

(g) 国生ほか (1983)

第 11.4.2 図 サイクリックモビリティについて

## 第5章 係留施設

### 1 総説

#### 【省令】(通則)

第二十五条 係留施設は、船舶の安全かつ円滑な利用を図るものとして、地象、気象、海象その他の自然状況及び船舶の航行その他の当該施設周辺の水域の利用状況に照らし、適切な場所に設置するものとする。

#### 【省令】(係留施設に関し必要な事項)

第三十四条 この章に規定する国土交通大臣が定める要件その他の係留施設の要求性能に関し必要な事項は、告示で定める。

#### 【告示】(係留施設)

第四十七条 係留施設の要求性能に関し省令第三十四条の告示で定める事項は、次条から第七十三条までに定めるとおりとする。

### 1.1 総論

- (1) 係留施設には、岸壁、棧橋、物揚場、浮桟橋、船揚場、係船浮標、係船杭、ドルフィン、デタッチドピア及びエアークッション艇発着施設等がある。岸壁、棧橋及び物揚場のうち、地震対策の観点から特に重要な施設でその耐震性能を強化する必要がある施設を耐震強化施設といい、地震動の作用後に当該施設に求められる機能に応じて、耐震強化施設(特定(緊急物資輸送対応))、耐震強化施設(特定(幹線貨物輸送対応))、耐震強化施設(標準(緊急物資輸送対応))に分類される。
- (2) 係留施設の構造形式は、自然条件、利用条件、施工条件及び経済性等を考慮して決定する。係留施設の構造形式は、重力式係船岸、矢板式係船岸、自立矢板式係船岸、二重矢板式係船岸、棚式係船岸、根入れを有するセル式係船岸、置きセル式係船岸、直杭式横桟橋、斜め組杭式横桟橋、ジャケット式桟橋等に分類される。
- (3) 係留施設のレベル1地震動及びレベル2地震動に対する標準的な性能照査順序の例を図-1.1.1及び図-1.1.2に示す。なお、詳細については、構造形式ごとの記述を参照することができる。

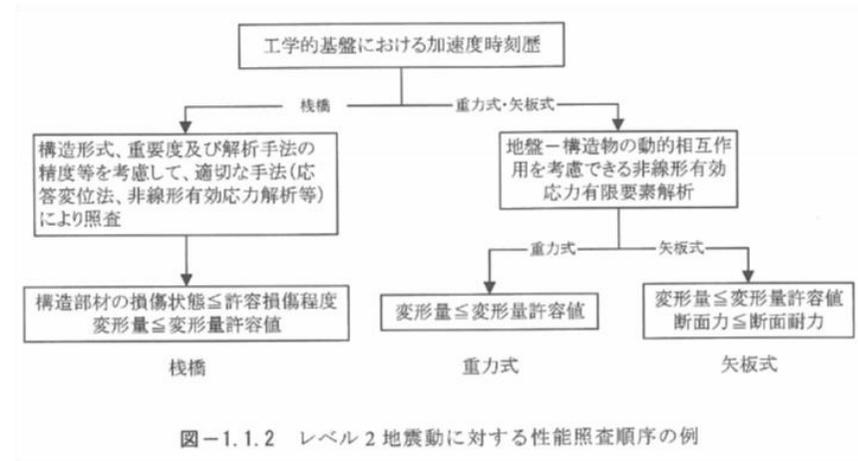


図-1.1.2 レベル2地震動に対する性能照査順序の例

(a) 日本港湾協会 (2007)

第 11.4.3 図 有効応力解析について

## 第5章 係留施設

### 1 総説

#### 【省令】(通則)

第二十五条 係留施設は、船舶の安全かつ円滑な利用を図るものとして、地象、気象、海象その他の自然状況及び船舶の航行その他の当該施設周辺の水域の利用状況に照らし、適切な場所に設置するものとする。

#### 【省令】(係留施設に関し必要な事項)

第三十四条 この章に規定する国土交通大臣が定める要件その他の係留施設の要求性能に関し必要な事項は、告示で定める。

#### 【告示】(係留施設)

第四十七条 係留施設の要求性能に関し省令第三十四条の告示で定める事項は、次条から第七十三条までに定めるとおりとする。

### 1.1 総論

- (1) 係留施設には、岸壁、棧橋、物揚場、浮棧橋、船揚場、係船浮標、係船杭、ドルフィン、デタッチドピア及びエアークッション艇発着施設等がある。岸壁、棧橋及び物揚場のうち、地震対策の観点から特に重要な施設でその耐震性能を強化する必要がある施設を耐震強化施設といい、地震動の作用後に当該施設に求められる機能に応じて、耐震強化施設(特定(緊急物資輸送対応))、耐震強化施設(特定(幹線貨物輸送対応))、耐震強化施設(標準(緊急物資輸送対応))に分類される。
- (2) 係留施設の構造形式は、自然条件、利用条件、施工条件及び経済性等を考慮して決定する。係留施設の構造形式は、重力式係船岸、矢板式係船岸、自立矢板式係船岸、二重矢板式係船岸、柵式係船岸、根入れを有するセル式係船岸、置きセル式係船岸、直杭式横棧橋、斜め組杭式横棧橋、ジャケット式棧橋等に分類される。
- (3) 係留施設のレベル1地震動及びレベル2地震動に対する標準的な性能照査順序の例を図-1.1.1及び図-1.1.2に示す。なお、詳細については、構造形式ごとの記述を参照することができる。

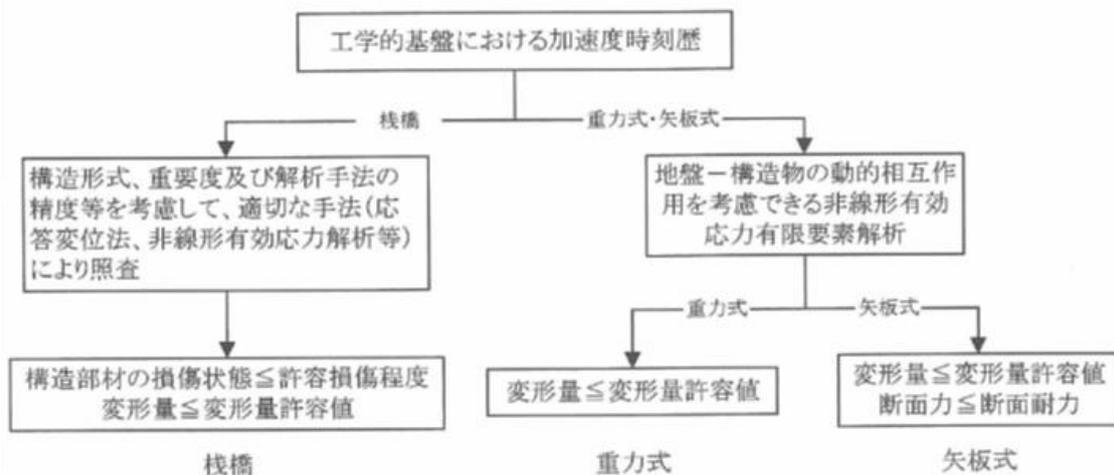


図-1.1.2 レベル2地震動に対する性能照査順序の例

(a) 日本港湾協会 (2007)

第11.4.3図 有効応力解析について

(9) 地震動に対する性能照査（詳細法）

- ① 重力式岸壁のレベル2地震動に対する耐震性能照査は、適切な地震応答解析あるいは実験により具体的に施設の変形量等を算定して行う。なお、レベル2地震動に関する偶発状態における変形量の標準的な限界値については、本編第5章1.4耐震強化施設のレベル2地震動に対する変形量の限界値の標準的な考え方を参照して、適切に設定することができる。

施設の変形等に対する性能照査手法は、大別すると、地震応答解析による方法と、振動台等による振動実験による方法の二種類がある。

(a) 地震応答解析による方法

地震応答解析は表-2.2.3のように分類できる。以下に、この分類にしたがって、各種の地震応答解析法を説明する。地震応答解析手法によっては、変形等の照査を行う目的には適さないものもあるため、下記の説明を踏まえて、目的に応じた解析手法を選択する必要がある。

表-2.2.3 地震応答解析の分類

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| 解析法<br>(飽和地盤の取り扱い) | 有効応力解析法、全応力解析法<br>(固層及び液層、固層) |
| 計算対象領域(次元)         | 一次元、二次元、三次元                   |
| 一般的な計算モデル          | 重複反射モデル、質点モデル、有限要素モデル         |
| 材料特性               | 線形、等価線形、非線型                   |
| 計算領域               | 時間領域解析法、周波数領域解析法              |

1) 有効応力解析法と全応力解析法

液状化の予測・判定という観点や、土の変形挙動の予測という観点から見ると、地震応答解析は有効応力解析法に基づくものと全応力解析法に基づくものに分けることができる。特に、地震動作用時の港湾の施設の変形予測に際しては、地盤内の過剰間隙水圧の発生に伴う有効応

力の減少（その極端な状態が液状化である）を考慮する必要がある場合が多い。これは、有効応力の減少など土の応力状態の変化に伴い、土の応力-ひずみ関係や減衰特性などが変化し、地盤の変形特性や応答特性が変化するためである。有効応力解析法は地盤に発生する過剰間隙水圧を計算により直接求めることができる方法であるが、全応力解析法では過剰間隙水圧の変化が計算されない。このため、例えば地盤の地震応答の計算において、ある程度以上の過剰間隙水圧（条件にもよるが、過剰間隙水圧比で概ね0.5以上）が発生する場合には、全応力解析法による計算結果は実際の地震応答とかなり異なる可能性が大きい。

単なる地震応答計算であれば、簡便な全応力解析法を実務で用いることも多いが、液状化の発生が懸念されるような港湾の施設の変形照査においては、有効応力解析法を用いることが基本である。

(b) 日本港湾協会（2007）

第11.4.3図 有効応力解析について

### 7.3 地盤応答解析

#### 7.3.1 一般

地点依存の動的解析により、表層地盤の挙動を算定する際は、建設地点の土の動力学特性や地層構成などに基づき、動的解析により求めるものとする。ただし、詳細な検討を必要としない場合等は、簡易解析法により算定してもよい。

#### 7.3.3 動的解析による方法

##### 7.3.3.1 一般

動的解析による方法により表層地盤の挙動を算定する場合は、土の動力学特性および地盤を適切にモデル化した時刻歴非線形動的解析法によるのがよい。

##### 7.3.3.4 地盤の液状化の可能性のある場合

液状化の可能性のある地盤では、過剰間隙水圧の上昇に伴う有効応力の低下を考慮した有効応力解析による動的解析法を用いて表層地盤の挙動を評価するのがよい。

#### 【解説】

液状化の可能性のある地盤における地盤の動的解析手法は、基本的には有効応力法による時刻歴動的解析法を用いるのがよい。有効応力法では、地盤を土と水とに分けて考える。有効応力法に用いられる基礎

方程式は、土に関する釣合式、水に関する釣合式、および水の流入・流出と土骨格の体積変化の関係などを考慮している。

液状化は、過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤の有効応力が減少し、地盤の剛性や強度が極端に低下する現象である。しかし、密度の大きい地盤では過剰間隙水圧が上昇して一時的に有効応力が減少してもサイクリックモビリティにより、地盤の剛性や強度が回復する。このように液状化は複雑な現象であり、これを表現するため、様々な地盤構成則が提案されている。それらには大きく分けて以下のタイプがある。

- 1) ひずみを弾性成分と塑性成分に分け、降伏、塑性化および硬化に関する三つの関数により、応力-ひずみ関係とダイレイタンス-関係を一体化して考慮する。
- 2) ひずみを弾性・塑性成分に分けず、せん断応力とせん断ひずみの関係を一つの数式で表現し、ダイレイタンス-特性は別途モデル化する<sup>1),2)</sup>。そのため、2)の方法は1)の方法に比べて理論的な厳密さに欠ける点があるが、必要なパラメータの設定方法が比較的容易であるなどの利点があり、適切に用いれば実務上十分な精度を有している。

上述したように、有効応力解析は地盤を土と水とに分けて考えるので、原理的には最も精度が高い解析法であるが、解析に用いられるパラメータの数が多く、その設定には精緻な地盤諸数値を必要とする。そのため、原位置でサンプリングした乱れの少ない試料を用いた詳細な室内土質試験を実施してパラメータを設定しなければ、解析手法と解析条件の精度のバランスに差が生じることもある。したがって、有効応力解析を実施して地盤の挙動を評価する際には、各パラメータが解析結果に与える感度を十分に勘案する必要がある。

#### 参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 2) 福武毅芳・松岡元：任意方向繰返し単純せん断における応力・ひずみ関係，土木学会論文集，No. 463/III-22号，pp. 75-84, 1993.

(c) 鉄道総合技術研究所 (2012)  
第 11.4.3 図 有効応力解析について

Iai et.al(1992)は、サイクリックモビリティが観察された砂の繰返しねじり試験結果に対して、有効応力解析プログラムFLIPを用いた解析を実施した。その結果、FLIPによる解析結果は、室内試験結果と良い対応を示したと報告している。

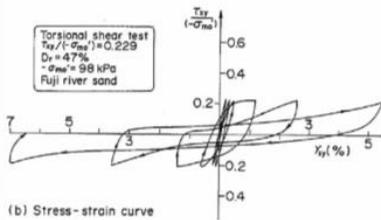
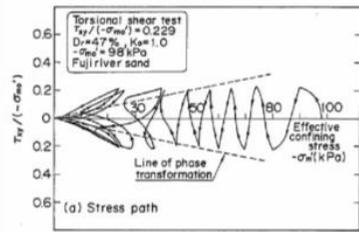


Fig. 1. Stress path and stress-strain curve for loose sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

実験結果

ゆるい砂 (相対密度 $D_r=47\%$ )

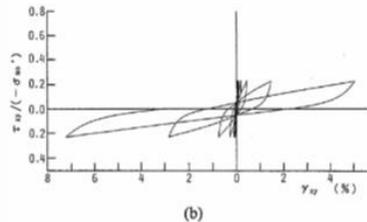
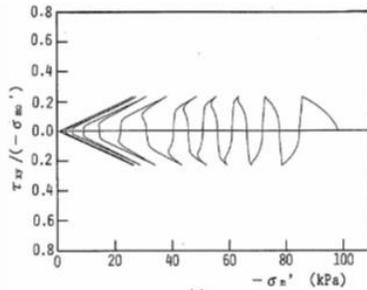


Fig. 9. Computed results of loose sand to be compared with the laboratory results in Fig. 1. (a) Stress path, (b) Stress strain curve

解析結果

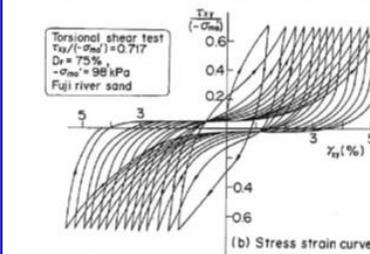
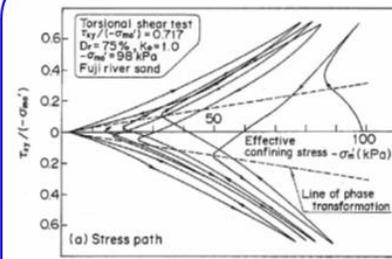


Fig. 2. Stress path and stress-strain curve for dense sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

実験結果

密な砂 (相対密度 $D_r=75\%$ )

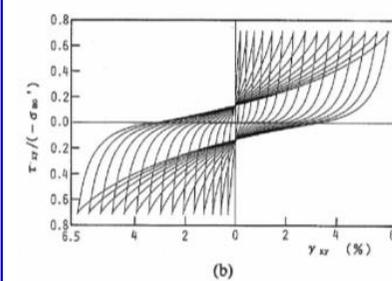
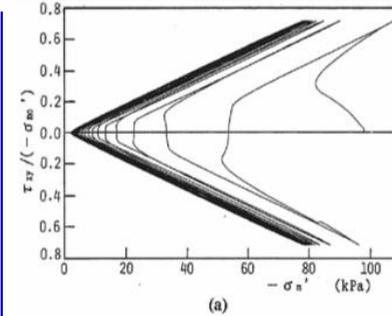


Fig. 10. Computed results of dense sand to be compared with the laboratory results in Fig. 2. (a) Stress path, (b) Stress strain curve

解析結果

(d)Iai et.al(1992)

第 11.4.3 図 有効応力解析について

Iai et.al(1995)は、有効応力解析プログラムFLIPを用いて、1993年釧路沖地震のシミュレーション解析を実施した。本検討では、密な地盤に対して液状化パラメータを設定している。FLIPによる地表面加速度は、サイクリックモビリティの影響を示す観測値を再現することができたと報告している。

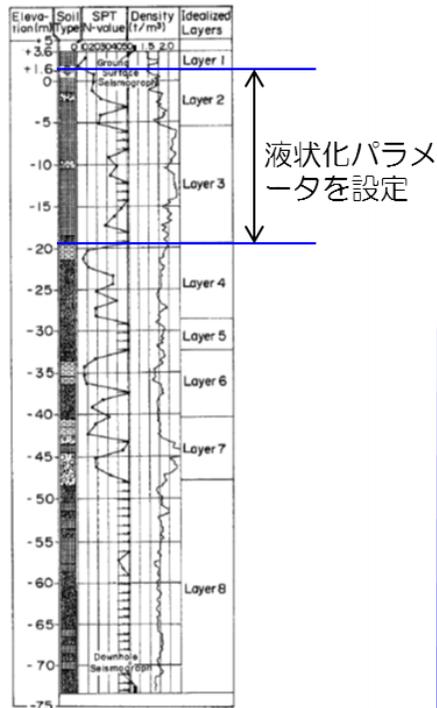


Fig. 21. Idealized soil layers for response analysis  
解析モデル

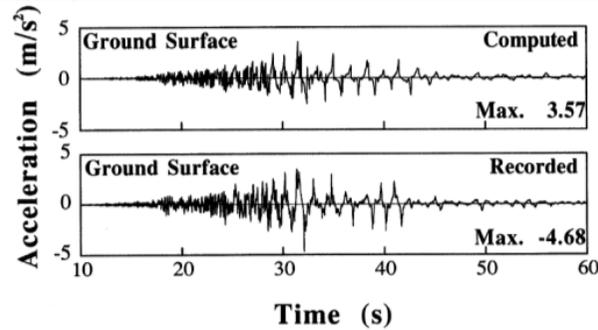


Fig. 24. Recorded and computed accelerations at the ground surface

地表面加速度の比較（上段：解析値，下段：観測値）

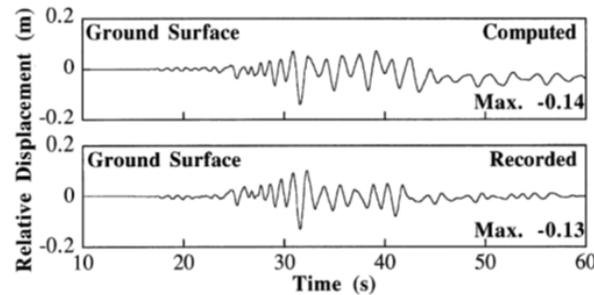


Fig. 25. Recorded and computed displacements at the ground surface relative to the base at a depth of 77 meters

地表面変位の比較（上段：解析値，下段：観測値）

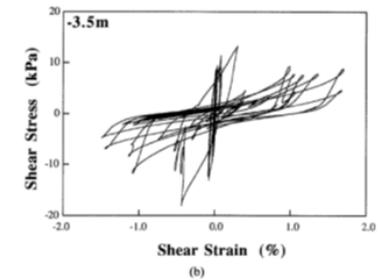
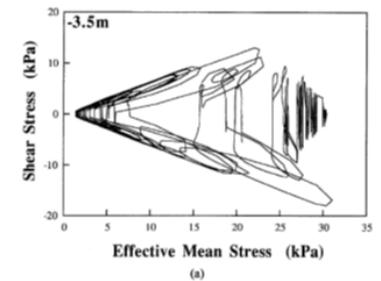


Fig. 26. Computed stress path and stress-strain relation at a depth of 3.5 meters in Layer 2; (a) stress paths and (b) stress strain relation

解析値の一例

（上段：有効応力経路，下段：せん断応力-せん断ひずみ関係）

(e)Iai et.al(1992)

第 11.4.3 図 有効応力解析について