

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
提出年月日	平成28年6月27日

柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉における 液状化影響の検討方針について

平成28年 6月28日

東京電力ホールディングス株式会社

本日のご説明内容

指摘区分	指摘日	コメント	回答方針
ヒアリング (耐津波)	H28.5.13	ボーリング地点及びサンプリング箇所的位置選定が、代表性・網羅性の観点で適切である事を説明すること。	既往試験の代表性・網羅性についてご説明 (P.8-20)
ヒアリング (耐震)	H28.6.9	液状化試験の結果に基づき事業者が非液状化層と見なしている層についても、ボーリング調査及びサンプリングの位置の代表性及び網羅性、試験方法の適切性の観点から追加調査の実施を検討し説明すること。	
ヒアリング (耐津波)	H28.5.13	今回用いた液状化試験の方法（中空ねじりせん断試験）や、液状化しないことの判定の目安について、根拠（出典）を説明すること。	液状化試験の方法についてご説明 (P.26-27)
ヒアリング (耐津波)	H28.5.13	サイクリックモビリティを評価する試験として適切な方法を整理すること。	サイクリックモビリティについてご説明 (P.28-33)
ヒアリング (耐津波)	H28.5.13	サイクリックモビリティによる影響評価（沈下、ひずみ、流動化等）、工認実績、民間規格での取扱い等を踏まえた上で説明すること。	液状化・サイクリックモビリティに関する影響の検討方針についてご説明 (P.50-54, 79-82)
ヒアリング (耐震)	H28.6.9	液状化層及び非液状化層による施設への影響を、より詳細な方法（FLIP等）により照査すると共に、地盤改良等の対策工も視野に入れた設計方針を策定し説明すること。	

1. 液状化評価の基本方針	4
2. 液状化評価対象層の抽出	8
3. 液状化試験結果	21
4. 液状化判定	55
5. 試験結果の妥当性に関する考察	60
6. 液状化影響の検討方針	79

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図
②液状化関連の文献整理

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図
②液状化関連の文献整理

【新規制基準における液状化について】

■ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (設計基準対象施設の地盤)

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

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

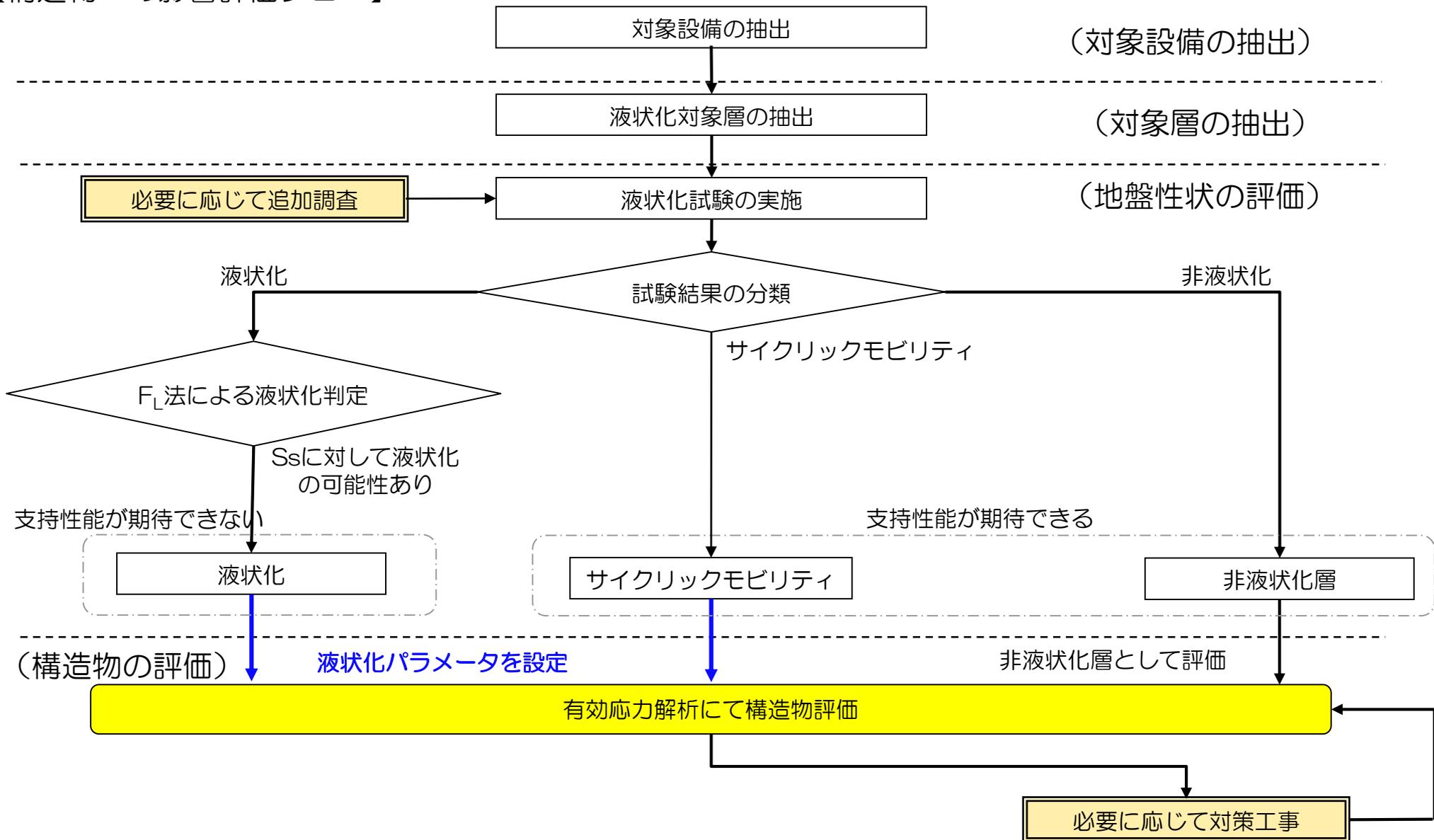
■ 実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(別記1) 第3条(設計基準対象施設の地盤)

1 第3条第1項に規定する「設計基準対象施設を十分に支持することができる」とは、設計基準対象施設について、自重及び運転時の荷重等に加え、耐震重要度分類の各クラスに応じて算定する地震力が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有する設計であることをいう。

2 第3条第2項に規定する「変形」とは、地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓み並びに地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状をいう。

1. 液状化評価の基本方針

【構造物への影響評価フロー】



1. 液状化評価の基本方針

【評価対象設備の抽出】

- 土木構造物（屋外重要土木構造物、津波防護施設、浸水防止設備、常設代替交流電源設備基礎）を対象とする。

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※1	鉄筋コンクリート構造	西山層
		海水貯留堰※2	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※2	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
	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

※1：マンメイドロックを介して西山層に支持

※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

- 評価対象設備のうち、補機冷却用海水取水路はマンメイドロックを介して西山層に直接支持されること、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。

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図
②液状化関連の文献整理

2. 液状化評価対象層の抽出

【敷地の地質について】

- 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からMIS7とMIS6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。
- 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。

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

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	新时期砂層・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) Y-1 (約20万年前)	
	更新世	古安田層	Δ ₄ 部層	最上部は砂 粘土～シルト、砂を多く挟む	
			Δ ₃ 部層	粘土～シルト 繊維状粘土、有機物、砂を伴う、貝化石を含む	
			Δ ₂ 部層	粘土～シルト 砂、厚い砂礫、有機物を挟む	Afa-Th (約24万年前)
			Δ ₁ 部層	粘土～シルト 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)
			N ₃ 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	
		西山層	N ₂ 部層	シルト質泥岩 繊維状泥岩、凝灰岩、ノジュールを多く挟む	Fup (約2.2Ma) Tsd (約2.3Ma) Az (約2.4Ma)
N ₁ 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)	
鮮新世	後期	椎谷層	砂岩、砂岩・泥岩互層、細礫岩等を挟む		
	前期	寺泊層	黒色泥岩、砂岩・泥岩互層		
新第三紀	中新世	後期			
	中期				

~~~~~ 不整合

### 【液状化評価対象層の抽出フロー】

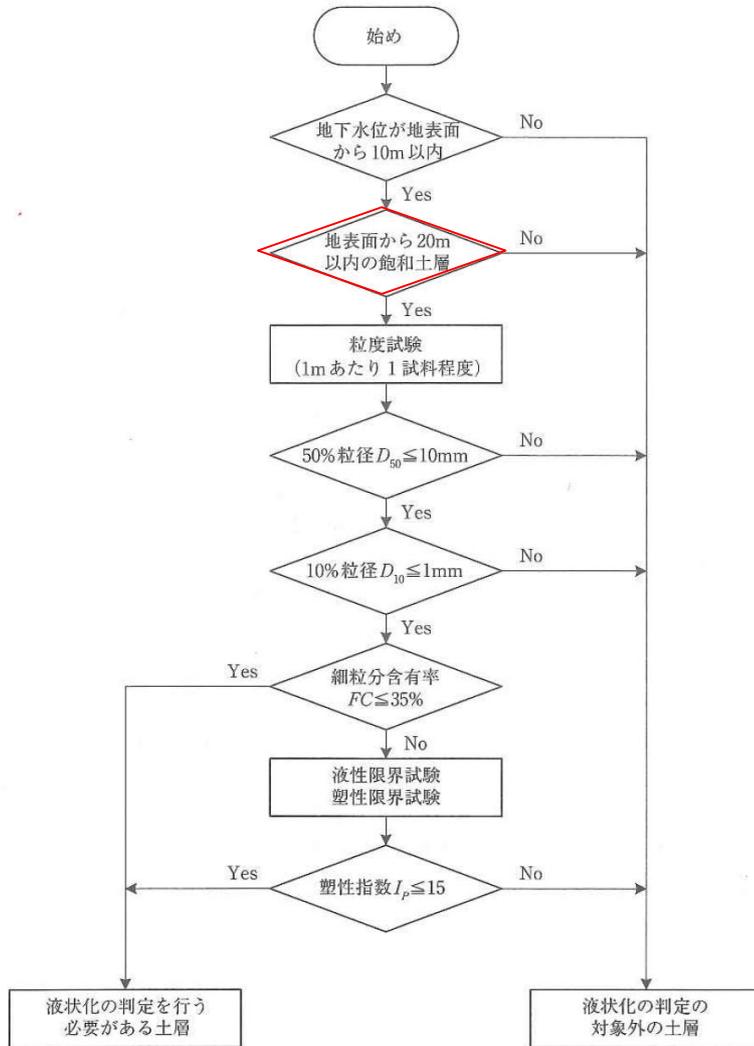


図-解8.2.1 液状化の判定を行う必要がある土層の評価の手順

### 液状化評価の対象層の抽出フロー

道路橋示方書 ( V 耐震設計編) ・同解説  
(社)日本道路協会, H24.3) 一部加筆

- 道路橋示方書 ( V 耐震設計編) ・同解説 ( (社)日本道路協会, H24.3 ) に基づいて対象層を抽出する。(左図)
- 道路橋示方書 ( V 耐震設計編) ・同解説では、沖積層を対象としているが、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以深も抽出対象とした。

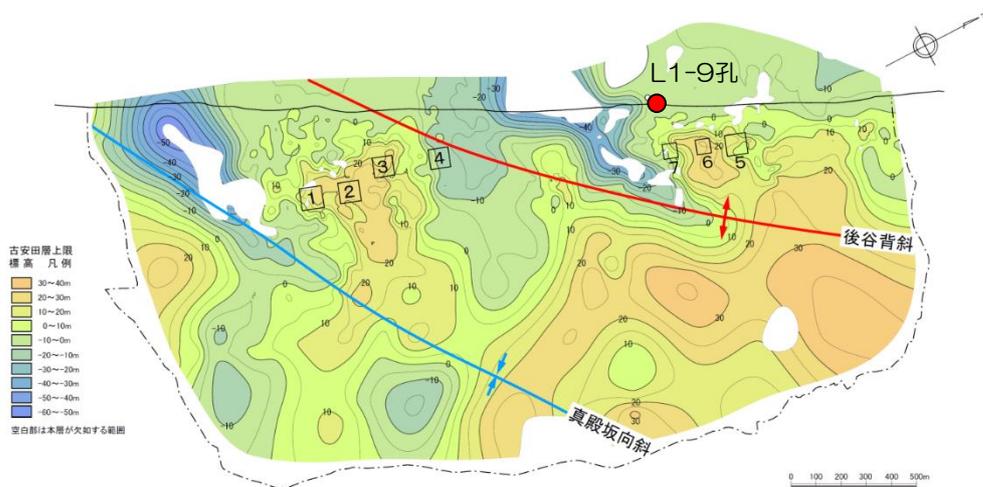
洪積層は、東北地方太平洋沖地震や兵庫県南部地震を含む既往の地震において液状化したという事例は確認されていない。洪積層は一般に  $N$  値が高く、また、続成作用により液状化に対する抵抗が高いため、一般には液状化の可能性は低い。このため、原則として洪積層は液状化の判定の対象とする必要はない。なお、ここでいう洪積層とは、第四紀のうち古い地質時代 (更新世) における堆積物による土層に概ね対応すると考えてよい。

(参考：道路橋示方書 ( V 耐震設計編) ・同解説 ( (社)日本道路協会, H24.3 ) 抜粋)

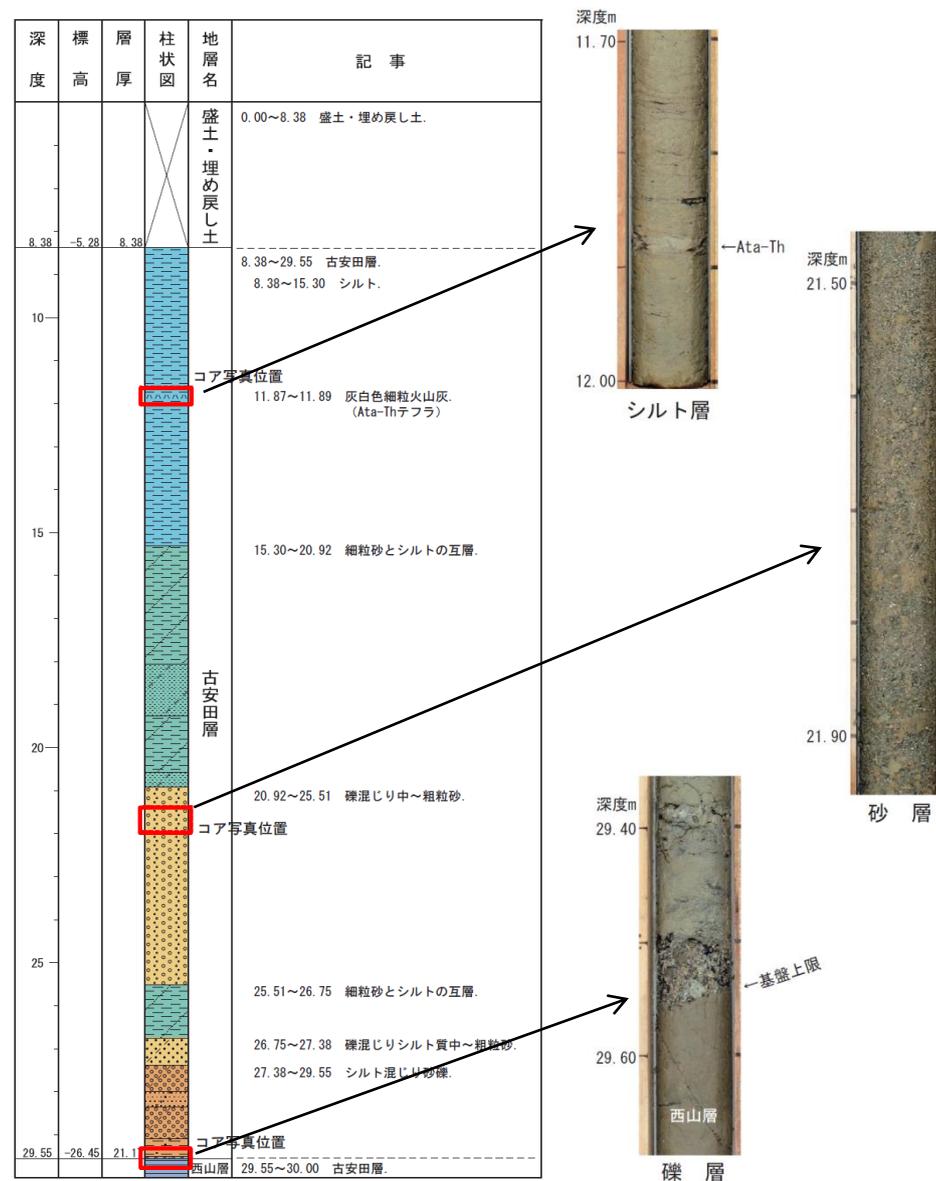
## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【敷地の古安田層中の砂層について】

- 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の基底には砂礫層が分布している。



古安田層上限面図

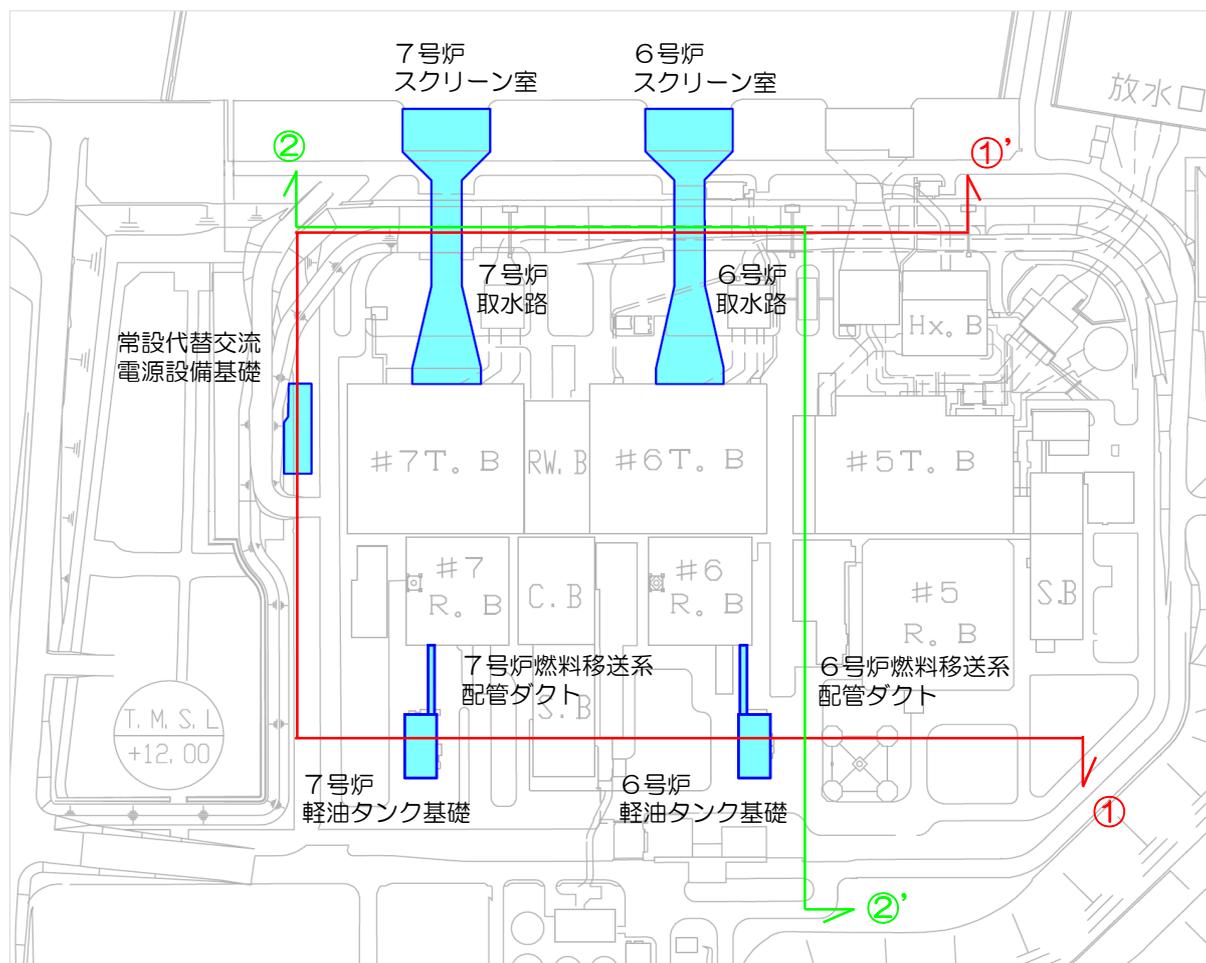


古安田層ボーリング柱状図 (L1-9孔)

## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【大湊側の砂層分布状況について】

- 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整理した。

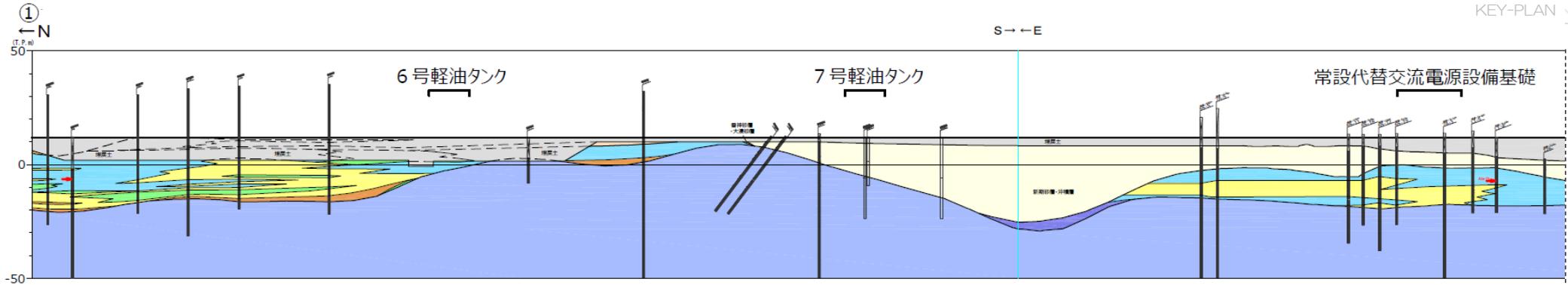
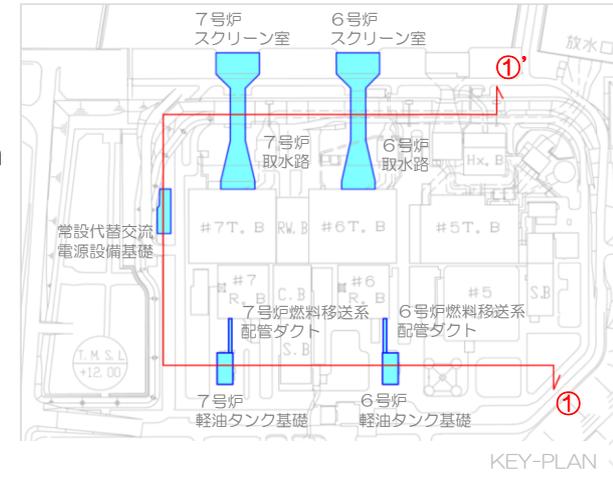


大湊側 全体平面図

## 2. 液状化評価対象層の抽出

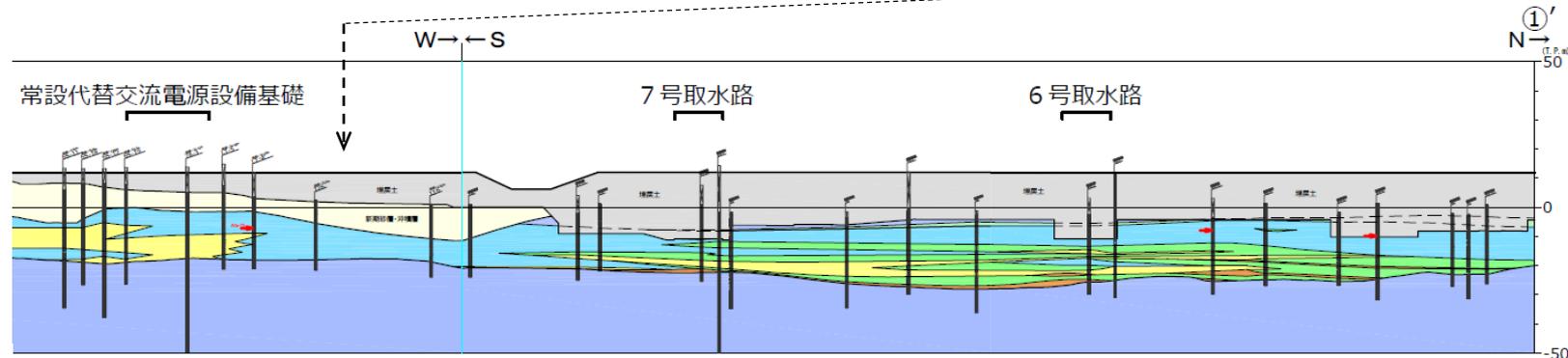
### 【大湊側の砂層分布状況について】

- 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～中粒砂からなる新期砂層・沖積層（）が分布している。



凡例

|                         |                                                                                                                                          |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 埋戻土                     | <span style="background-color: lightgrey; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>            |
| 新期砂層・沖積層                | <span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>               |
| 番神砂層・大湊砂層               | <span style="background-color: orange; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>               |
| A2～A3部層                 | 粘性土 <span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>        |
|                         | 粘性土・砂質土互層 <span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> |
|                         | 砂質土 <span style="background-color: lightyellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>      |
| 古安田層                    | 粘性土 <span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>        |
|                         | 粘性土・砂質土互層 <span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> |
|                         | 砂質土 <span style="background-color: lightyellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>      |
|                         | 礫層 <span style="background-color: brown; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>             |
| A1部層                    | 粘性土 <span style="background-color: lightblue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>        |
|                         | 粘性土・砂質土互層 <span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> |
| 古安田層 A2部層中の灰白色細粒ガラス質火山灰 | <span style="color: red;">→</span>                                                                                                       |
| 西山層                     | <span style="background-color: blue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span>                 |

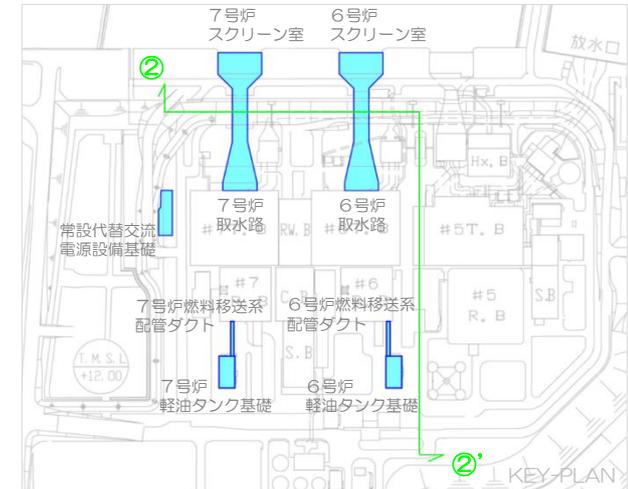


地質断面図 ① - ①' 断面

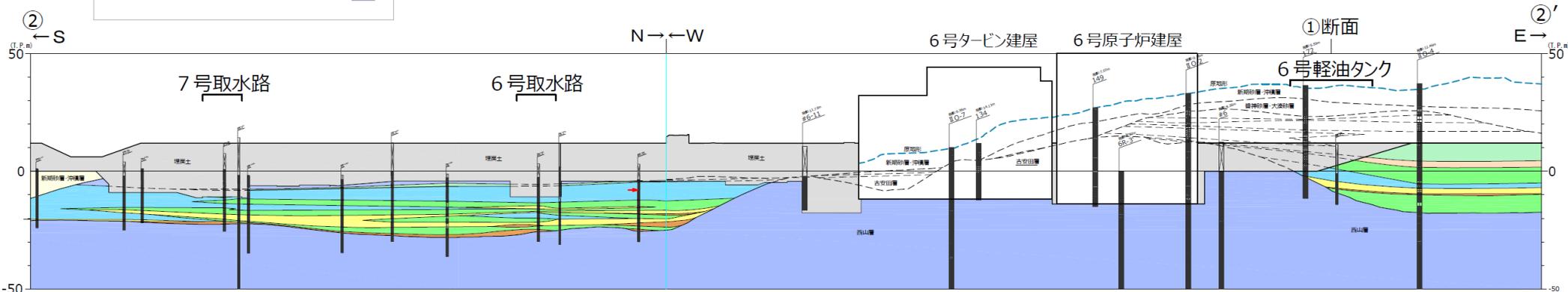
## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【大湊側の砂層分布状況について】

- 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。



#### 凡例

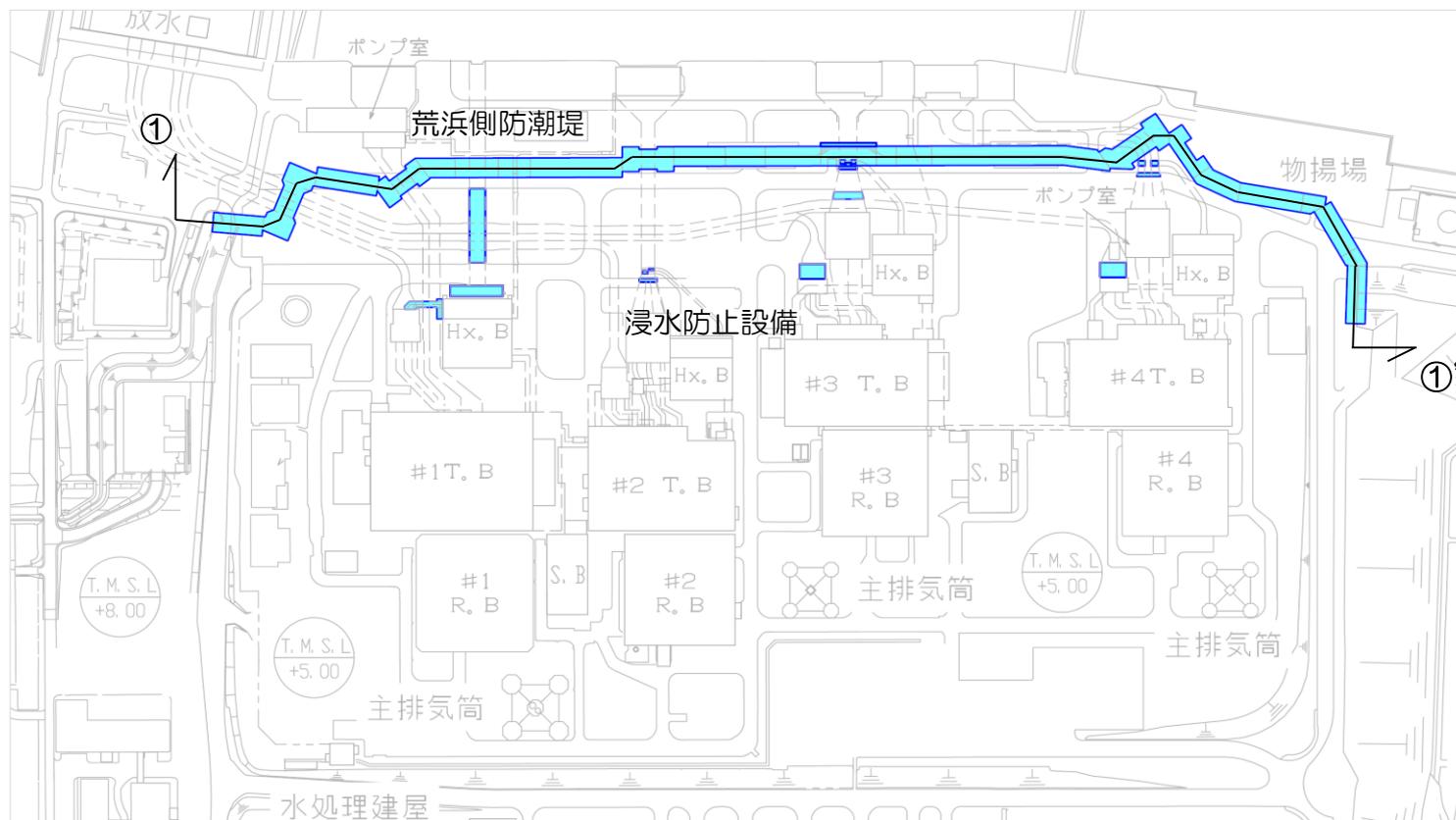


地質断面図 ② - ②' 断面

## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【荒浜側の砂層分布状況について】

- 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整理した。

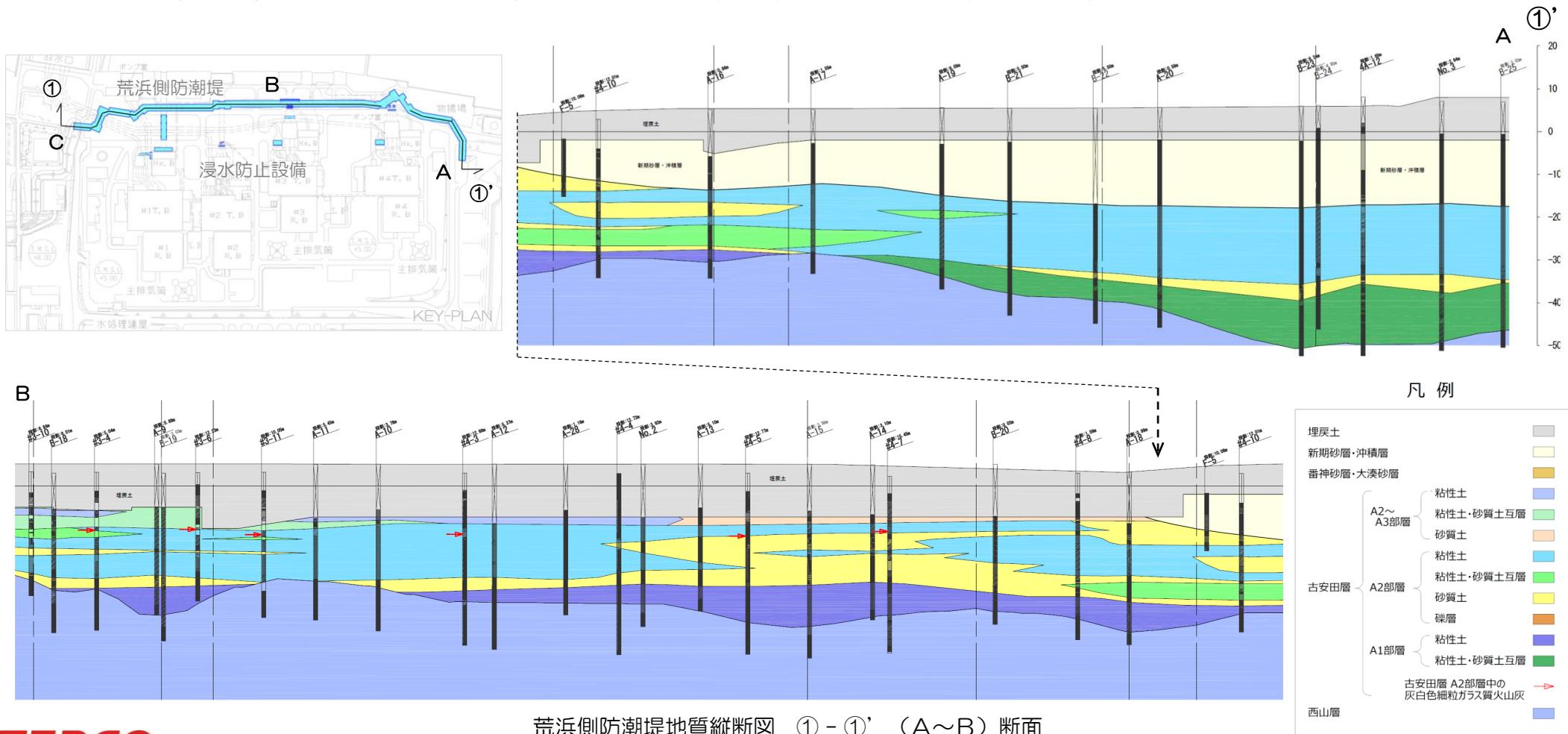


荒浜側 全体平面図

## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【荒浜側の砂層分布状況について】

- 3～4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、その基底には広く砂層が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。

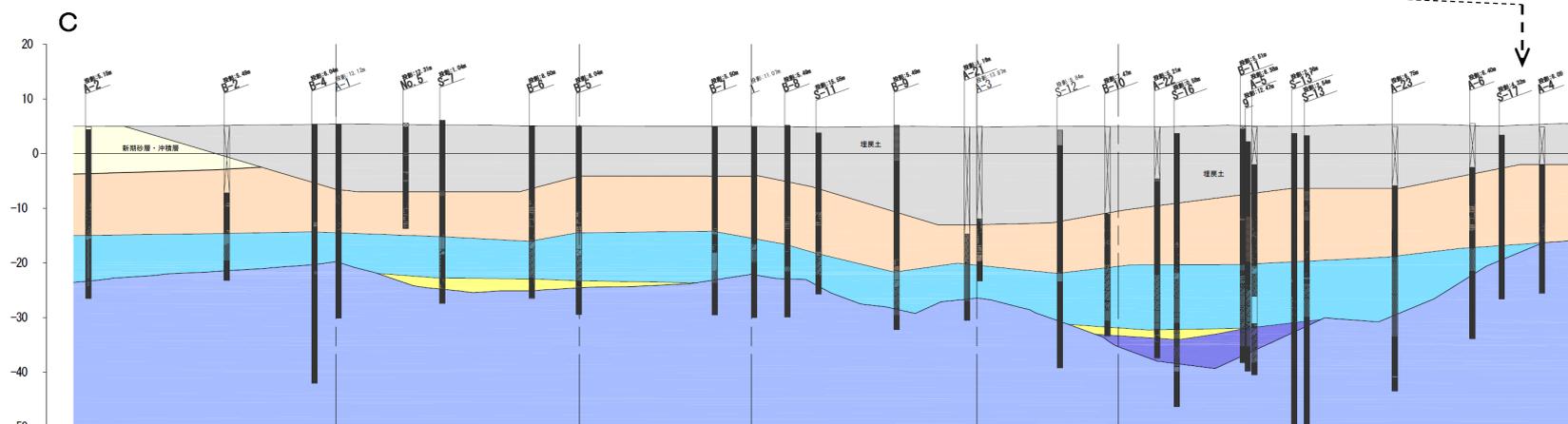
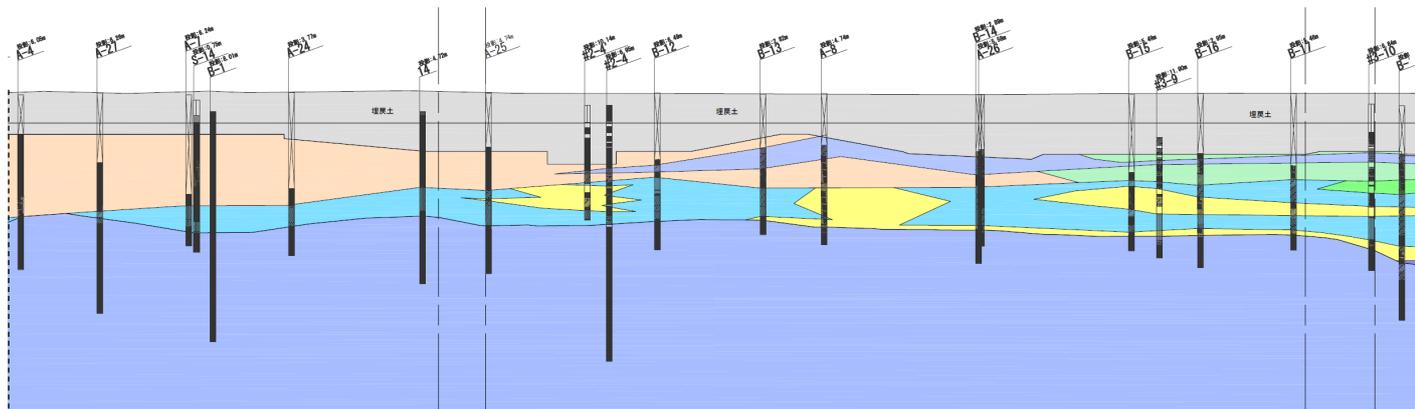


荒浜側防潮堤地質縦断図 ① - ①' (A~B) 断面

## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【荒浜側の砂層分布状況について】

- 1～2号炉海側の地盤には、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、3～4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。



凡例

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

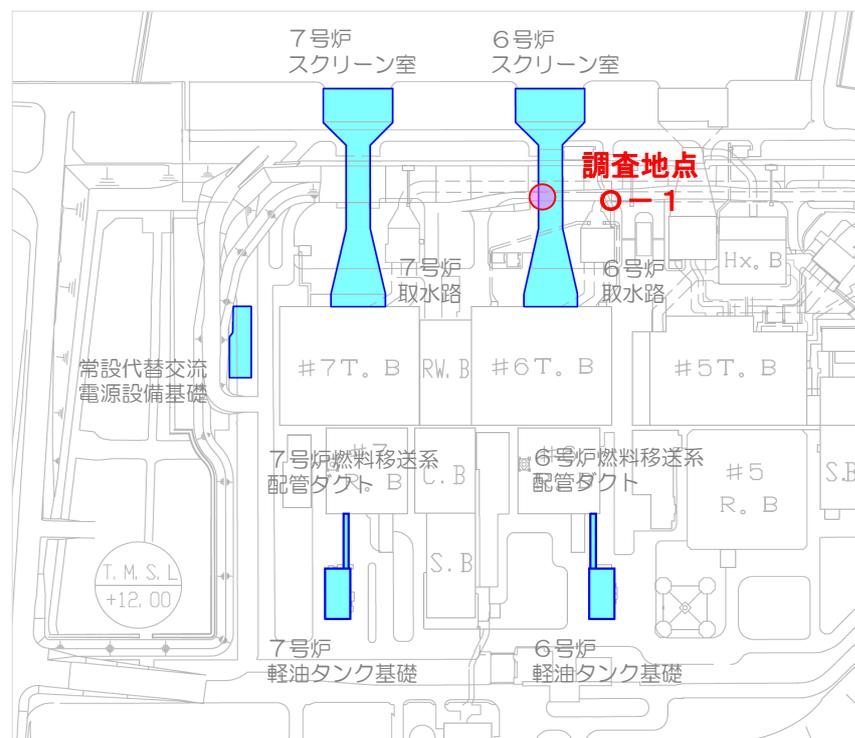
荒浜側防潮堤地質縦断面図 ① - ①' (B～C) 断面

## 2. 液状化評価対象層の抽出

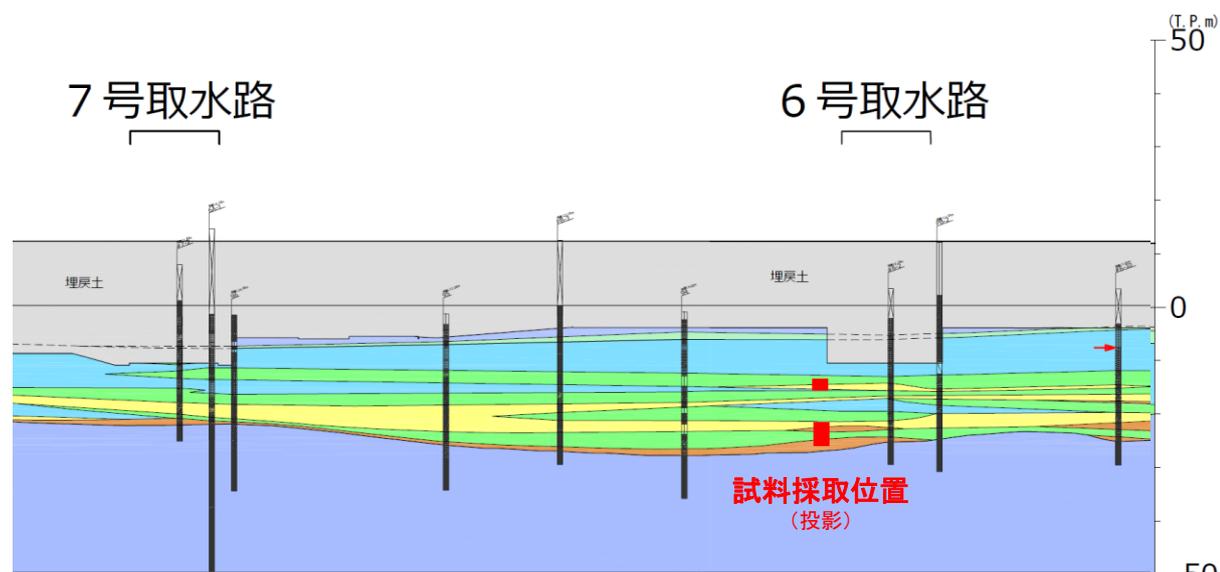
### 【大湊側の液状評価対象層の抽出及び調査地点の選定について】

- 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。
- 液状化特性の調査については、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），調査を実施した。
- 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。

凡例



大湊側 調査位置図（調査地点O-1）



大湊側 試料採取位置図（調査地点O-1）

## 2. 液状化評価対象層の抽出

### 【荒浜側の調査地点及び代表性について】

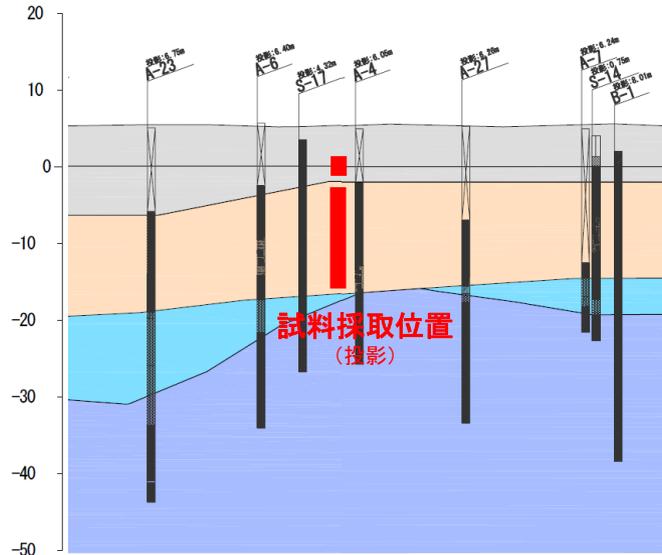
- 荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に3～4号炉海側に分布する古安田層中の砂層（）、主に1～2号炉海側に分布する古安田層中の砂層（）、新期砂層・沖積層（）及び埋戻土層（）を抽出した。
- 荒浜側については、砂層の分布状況から以下のとおり調査地点を選定し、調査を実施した。
  - 1～2号炉海側の古安田層中の砂層は、3～4号炉海側から連続するシルト主体の地層の上位に位置する砂層が連続して分布していることから、1号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定し（地点A-1）、調査を実施した。
  - 3～4号炉海側の古安田層中の砂層は、その分布状況から4号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定し（地点A-2）、調査を実施した。
  - 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（地点A-3）、調査を実施した。



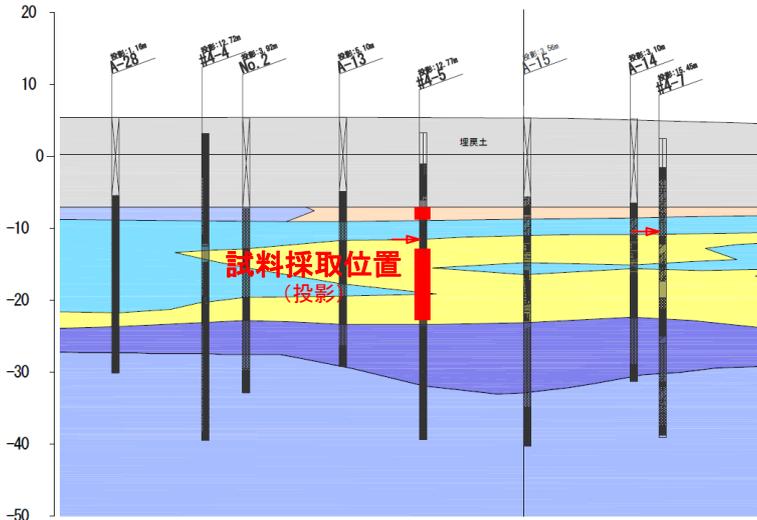
大湊側 調査位置図（調査地点O-1）

## 2. 液状化評価対象層の抽出

【荒浜側の調査地点及び代表性について】

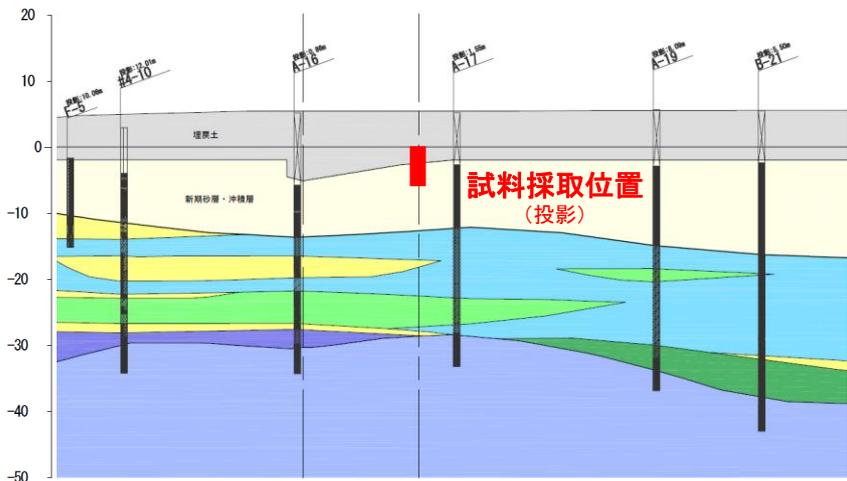
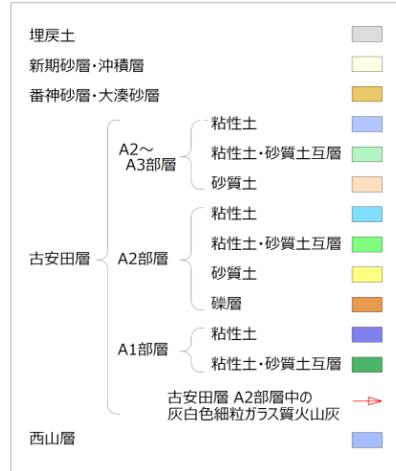


調査地点A-1



調査地点A-2

凡例



調査地点A-3

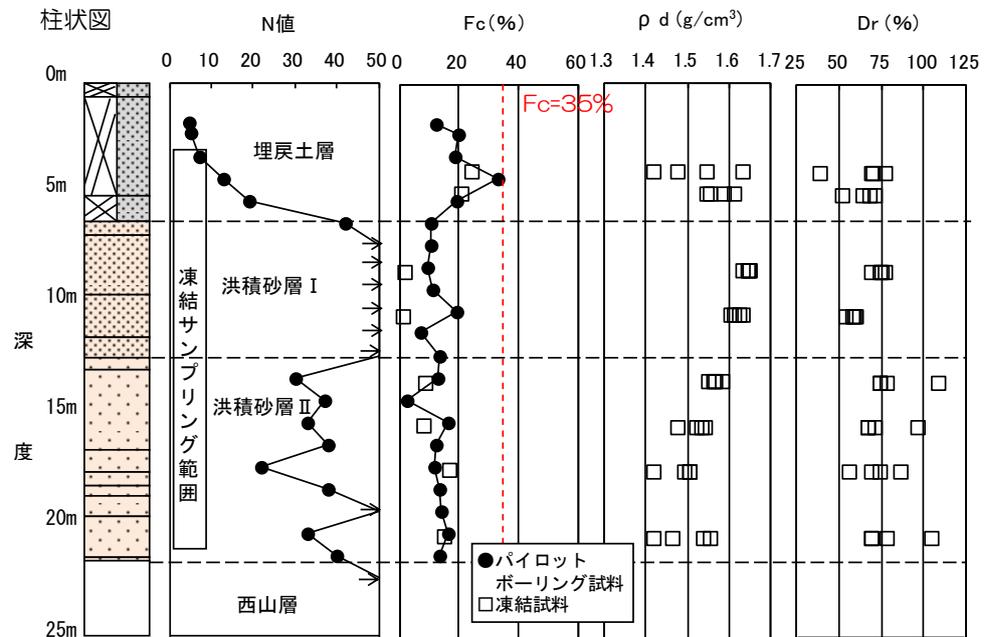
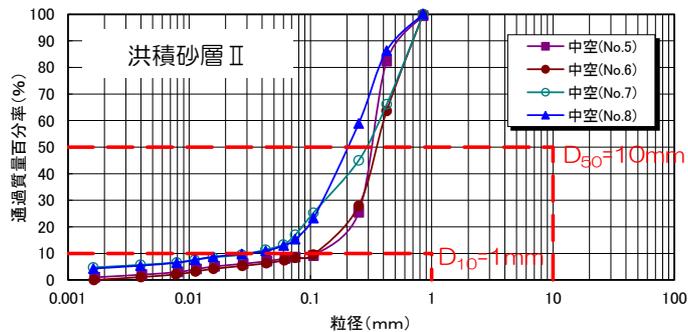
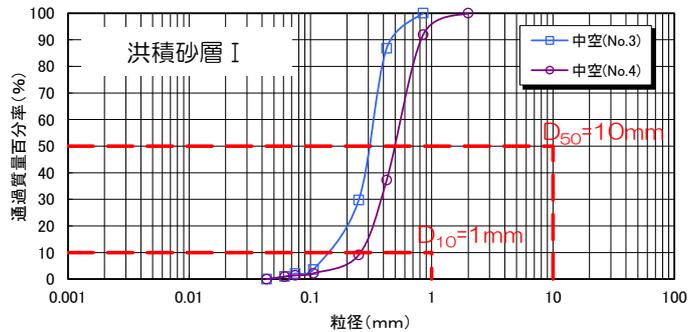
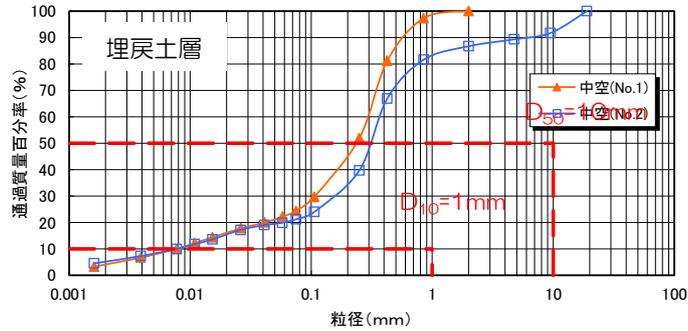
荒浜側 試料採取位置図

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図  
②液状化関連の文献整理

### 3. 液状化試験結果

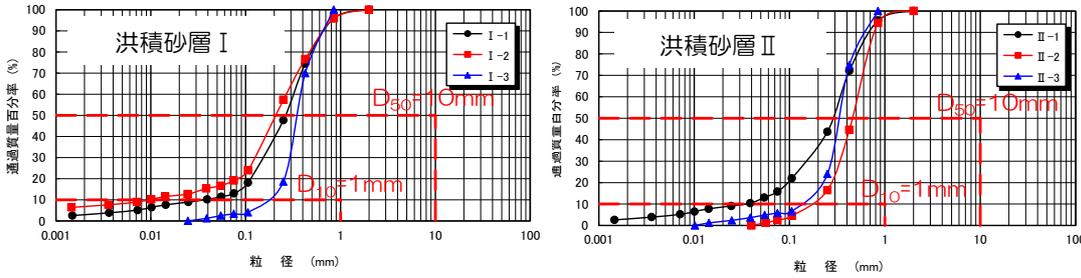
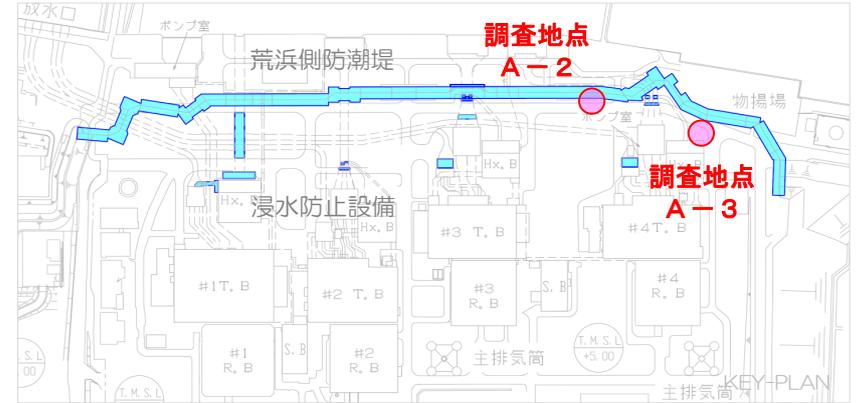
#### 【調査地点 A-1 : 基本物性】



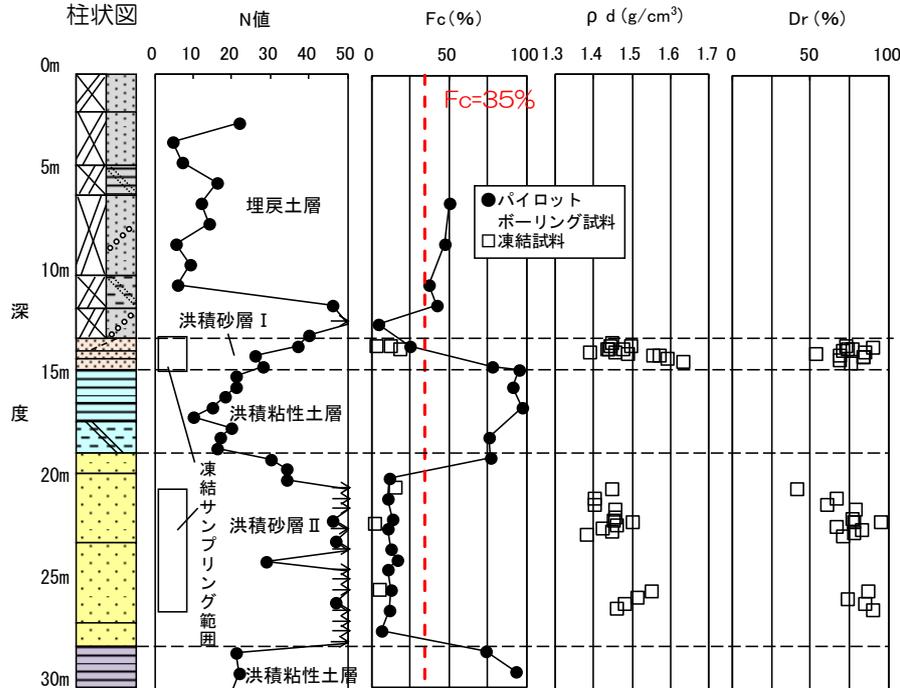
※古安田層中の砂層は、N値50以上の砂層（洪積砂層 I）とN値50以下の地層（洪積砂層 II）に区分して試験を実施した。

# 3. 液状化試験結果

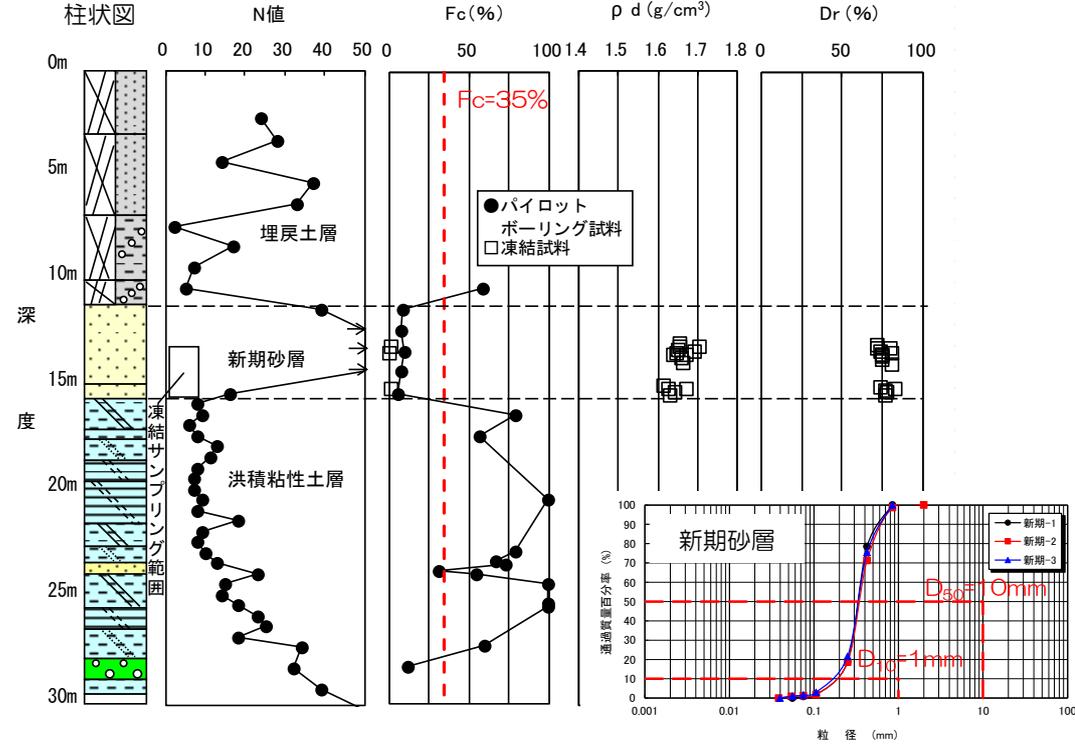
【調査地点 A-2, A-3 : 基本物性】



調査地点A-2

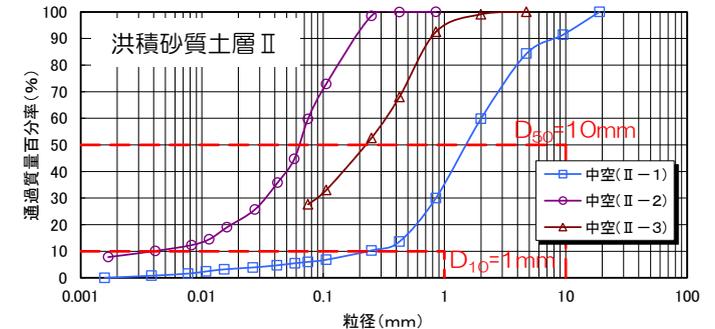
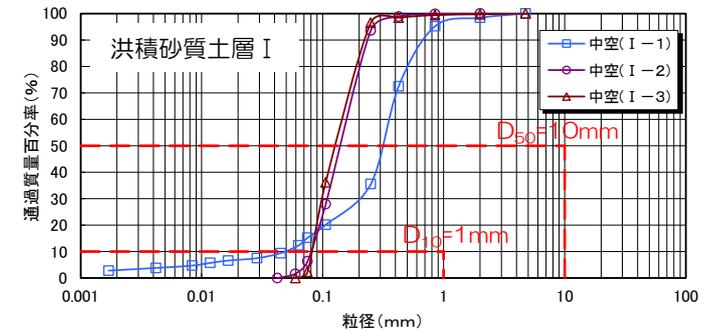
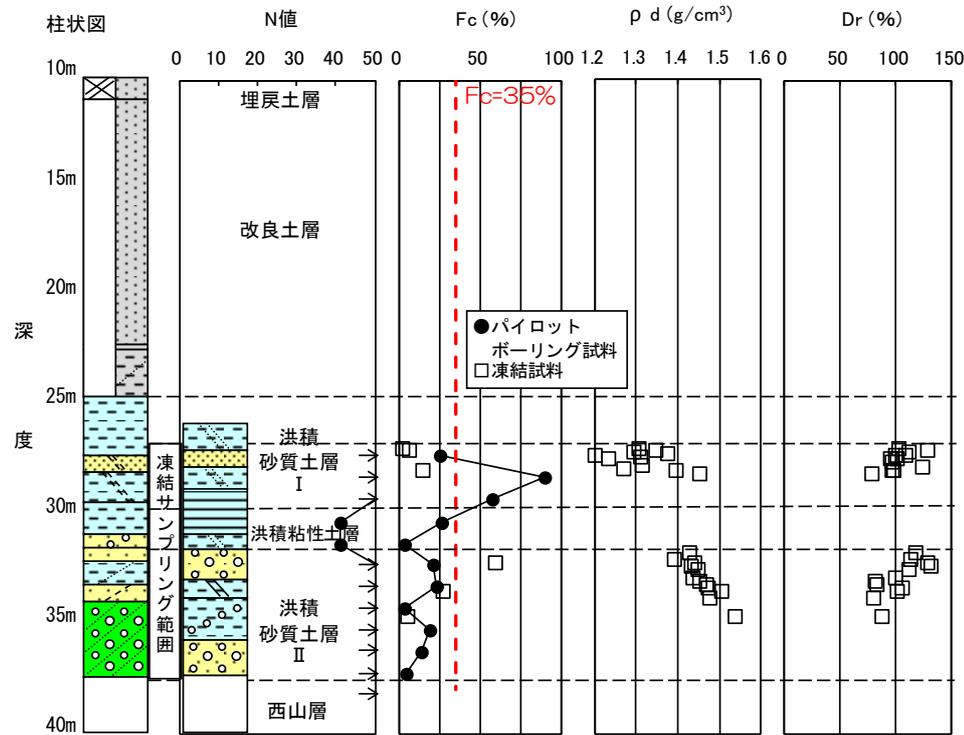
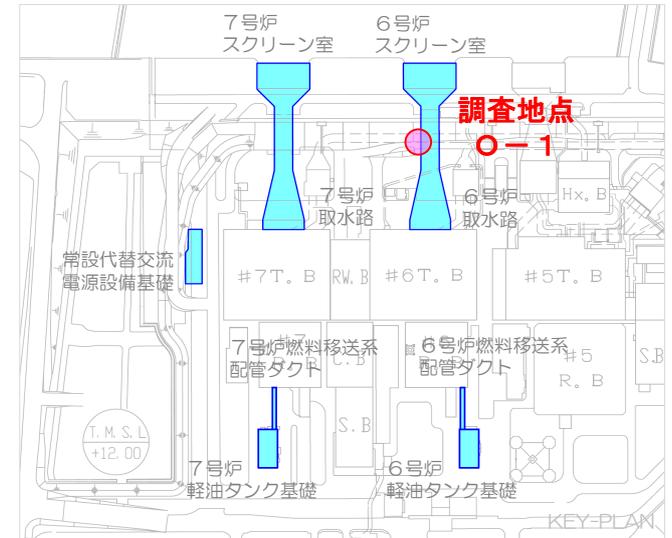


調査地点A-3



# 3. 液状化試験結果

【調査地点 ○ー1 : 基本物性】



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

### 3. 液状化試験結果

(平成28年5月13日) 第365回ヒアリング(耐津波設計) 資料再掲

#### (参考) 凍結サンプリングの概要

- ・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 $\phi 86\text{mm}$ )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。

(1) 作業ステージ・機械設置

(2) 凍結管・ガイド管・温度計設置

(3) 地盤凍結

(4) 凍結土のサンプリング

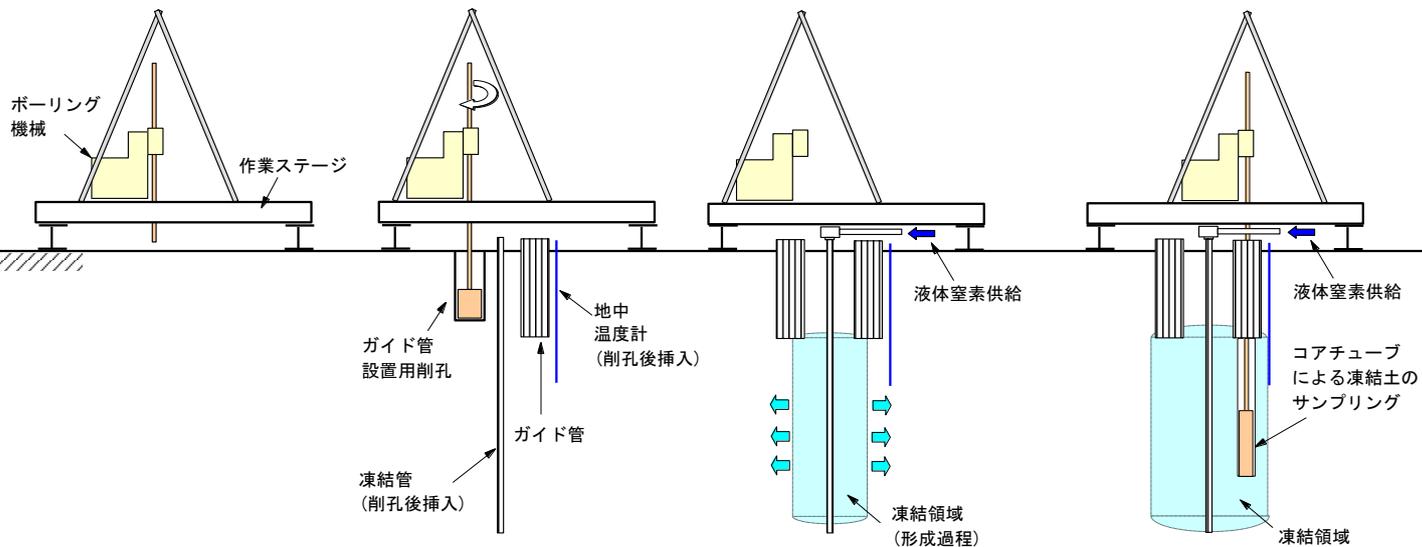


図 凍結サンプリングの概要



図 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)

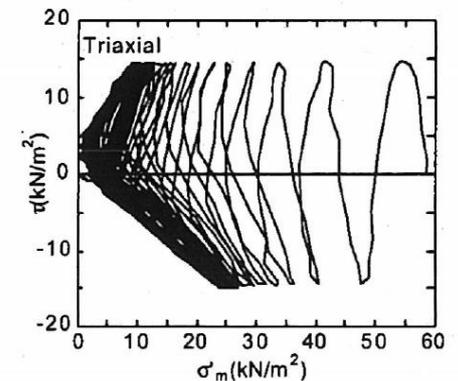
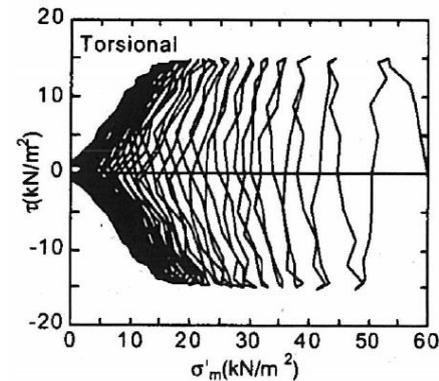
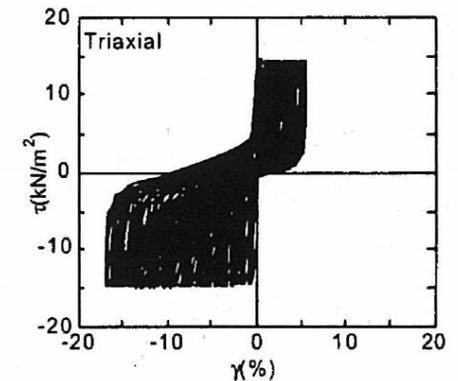
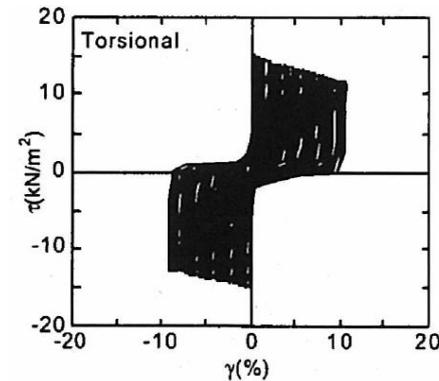
### 3. 液状化試験結果

#### 【液状化試験について】

- 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がJGS 0541として規程されている。
- 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)
- 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。(土木学会, 2003)
- 以上を踏まえ、洪積層である安田層中の砂層やN値の比較的大きい新期砂層を対象とした試験を実施するにあたり、高せん断力比の液状化試験を実施する必要があることから、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。

液状化試験方法 (安田, 1991)

|                                               | 载荷状況 | 応力状態 |
|-----------------------------------------------|------|------|
| 繰返し三軸<br>(別名 振動三軸<br>動的三軸)                    |      |      |
| 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同種類) |      |      |



繰返しねじりせん断試験

繰返し三軸試験

繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験の  
応力-ひずみ関係 (上図) と応力経路 (下図)  
(土木学会, 2003)

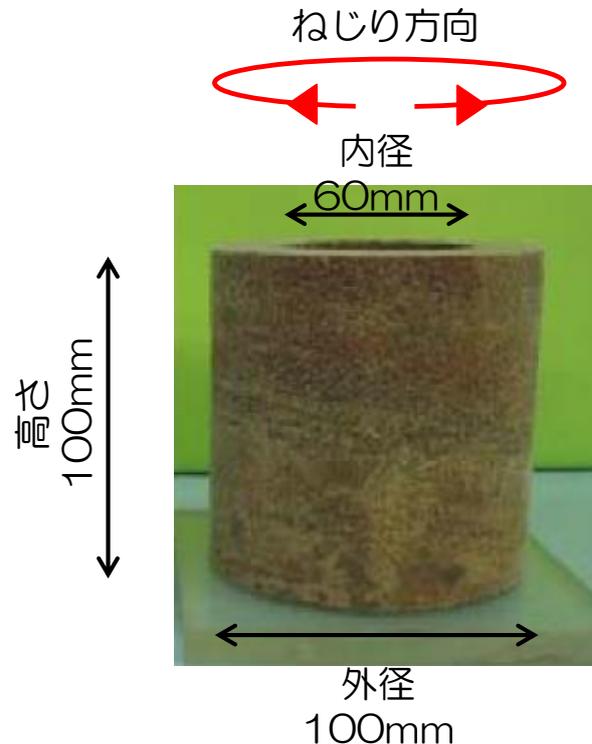
#### 【試験の概要】

- 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。

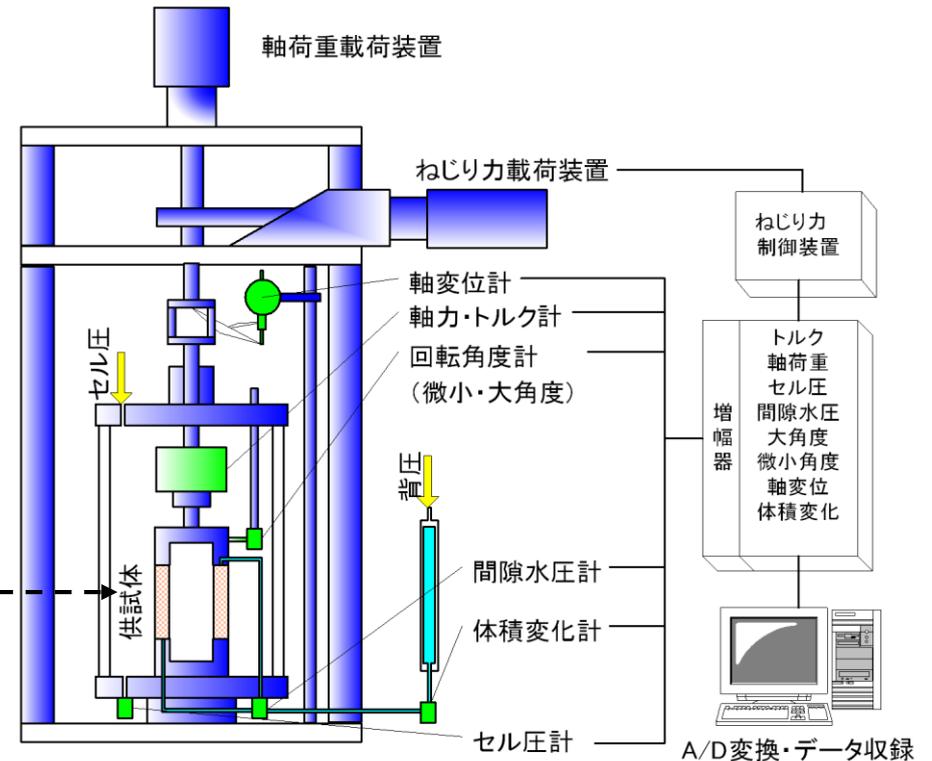
#### 【試験条件】

- 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）



中空ねじり試験供試体写真



中空ねじり試験機の概要

【本資料上の用語の定義】 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)を参考

#### ■ 繰返し軟化

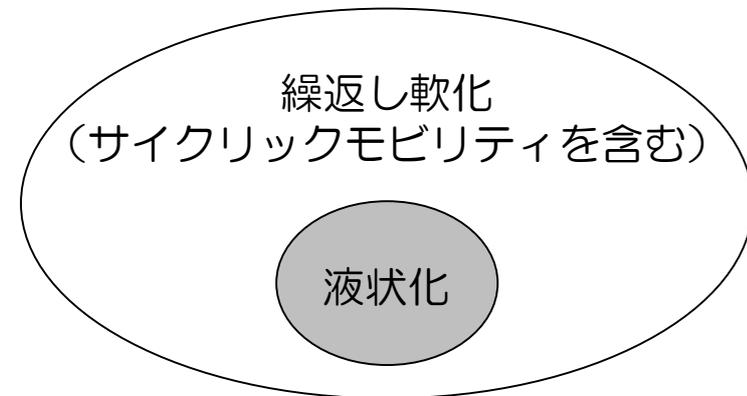
繰返し载荷による間隙水圧上昇と剛性低下によりせん断ひずみが発生し, それが増え回数とともに徐々に増大するが, 土のもつダイレイタンスー特性や粘性のためにひずみは有限の大きさにとどまり, 大きなひずみ範囲にいたるまでの流動は起きない。

#### ■ サイクリックモビリティ

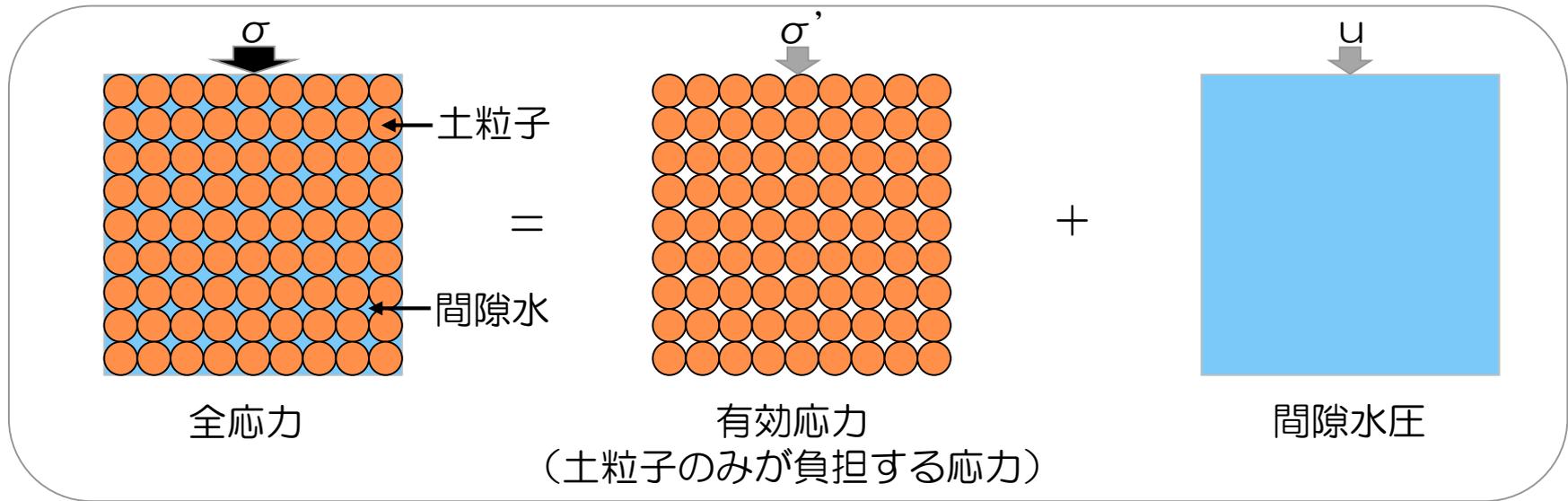
繰返し载荷において土が「繰返し軟化」する過程で, 限られたひずみ範囲ではせん断抵抗が小さくなって, ひずみが大きく成長しようとする時, 正のダイレイタンスー特性のためにせん断抵抗が急激に作用し, せん断ひずみの成長に歯止めがかかる現象。主に, 密な砂や礫質土, 過圧密粘土のように正のダイレイタンスー特性が著しい土において顕著に現れる。

#### ■ 液状化

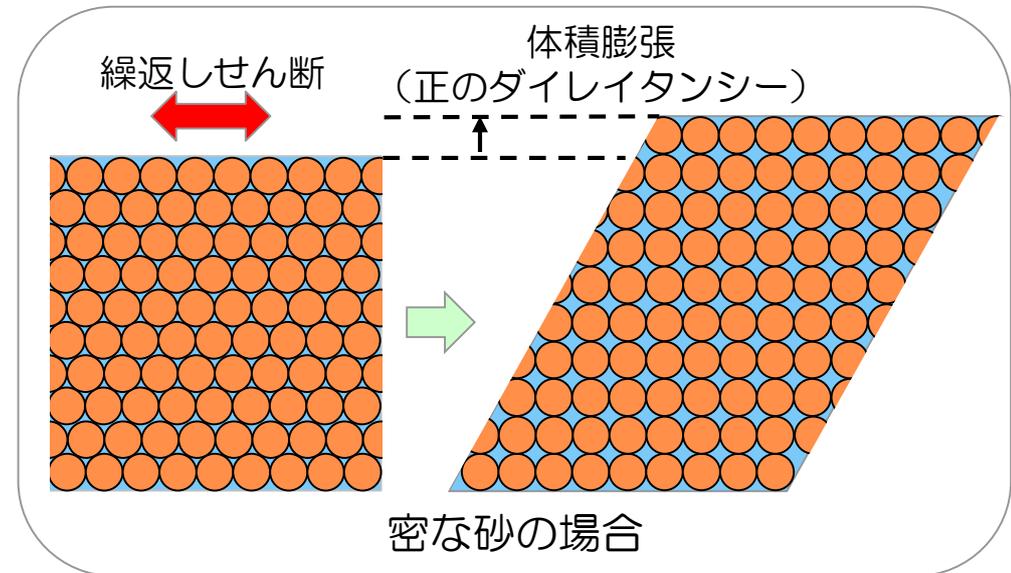
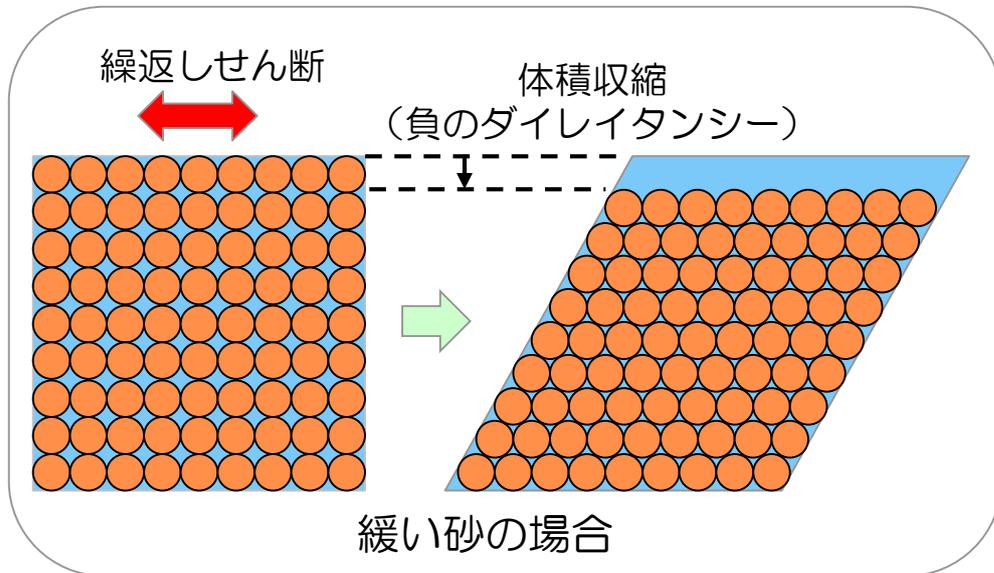
地震の繰返しせん断力などによって, 飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内での間隙水圧が上昇・蓄積し, 有効応力がゼロまで低下し液体状となり, その後地盤の流動を伴う現象, または流動ポテンシャルをもった地盤となる現象。



繰返し载荷による地盤の状態



地盤の強度の概要



地盤のダイレイタンス特性の概要

### 3. 液状化試験結果

#### 【サイクリックモビリティについて】

一般的にサイクリックモビリティは、その現象の違いから液状化とは区別されている。

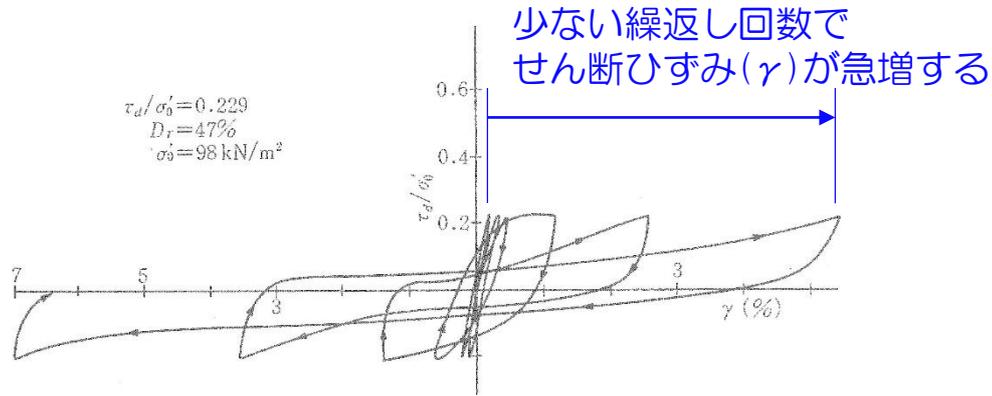
- サイクリックモビリティとは、砂などの繰返し载荷において、有効拘束圧がゼロに近づいてから、载荷時にせん断剛性の回復、除荷時に有効応力の減少を繰り返していくが、ひずみは有限の大きさとどまる現象であり、液状化とは区別して用いられることがある。（地盤工学会，2006）
- 地盤の液状化は、ゆるい砂地盤が繰返しせん断を受け、せん断振幅が急増し、地盤全体が泥水状態となり、噴砂や噴水を伴うことが多いので、現象的にサイクリックモビリティとは異なる。（井合，2008）
- サイクリックモビリティにおいて、有効応力がゼロになるのは、せん断応力がゼロになる瞬間だけであり、せん断応力が作用している間は有効応力が存在するので、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。（安田，1991）

余白

### 3. 液状化試験結果

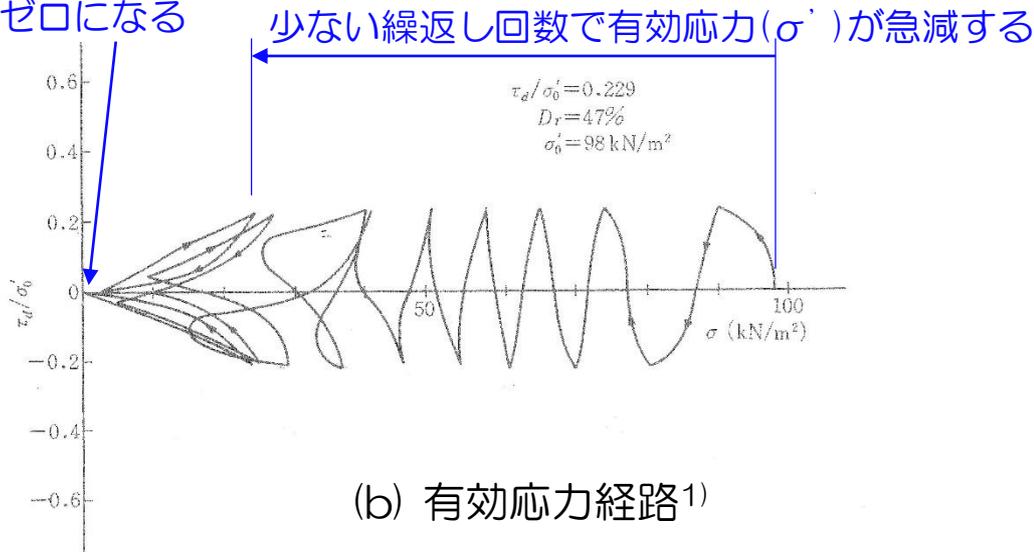
(平成28年5月13日) 第365回ヒアリング(耐津波設計) 資料再掲

#### 【液状化試験のイメージ(1)】

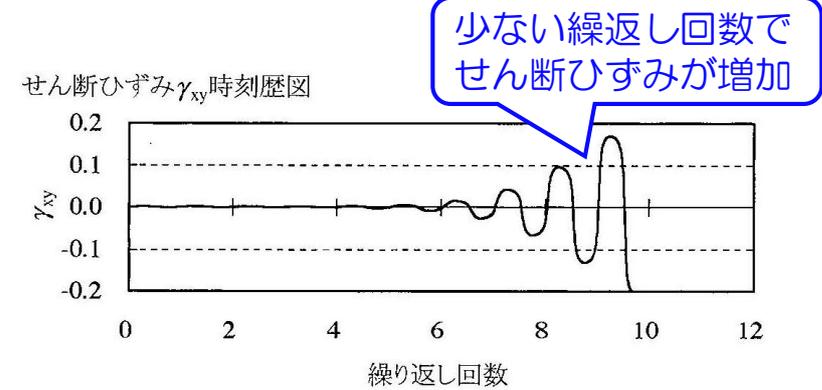


(a) せん断応力—せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>

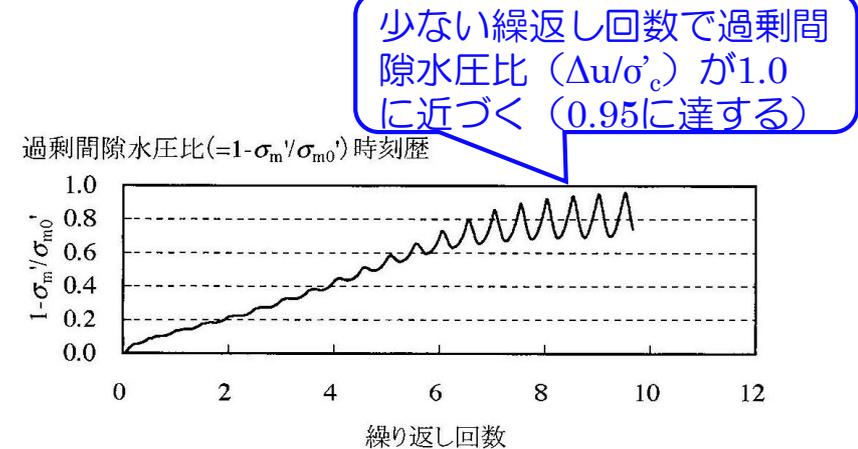
有効応力(\$\sigma'\$)  
がゼロになる



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>



(c) せん断ひずみ<sup>2)</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)

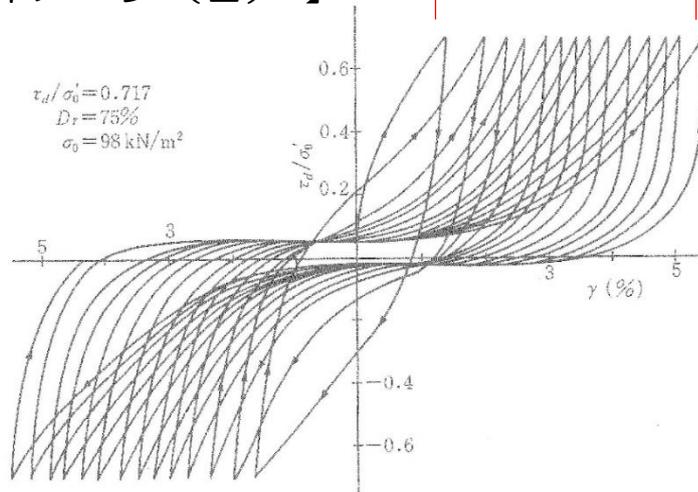
1) 永瀬英生：多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性，東京大学博士論文，1984

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.

### 3. 液状化試験結果

(平成28年5月13日) 第365回ヒアリング (耐津波設計) 資料再掲

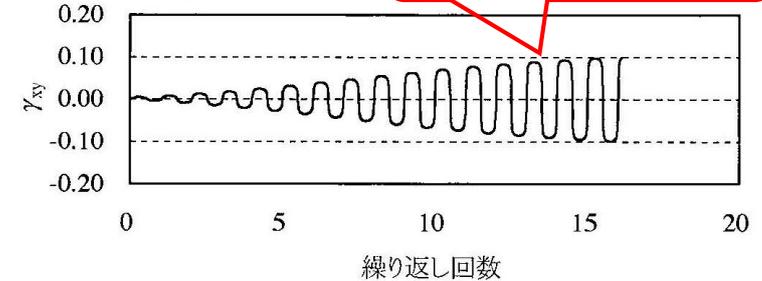
#### 【液状化試験のイメージ (2)】



(a) せん断応力-せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>

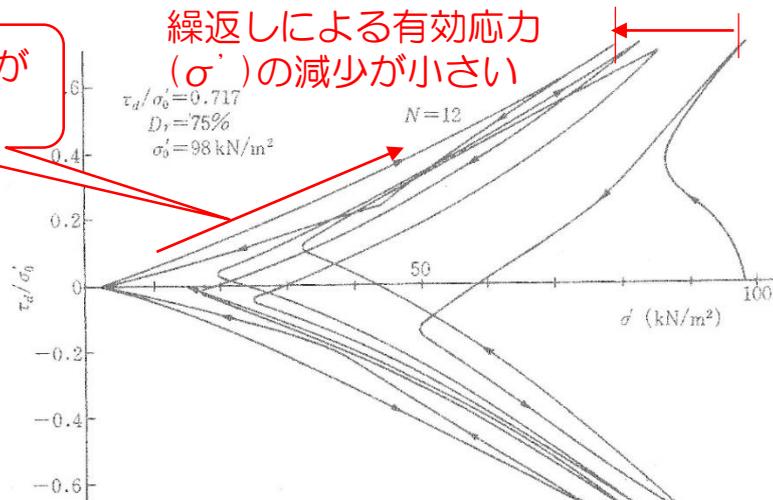
せん断ひずみ( $\gamma$ )が増加する  
のに繰返し回数を多く要する

せん断ひずみ $\gamma_{xy}$ 時刻歴図



(c) せん断ひずみ<sup>2)</sup>

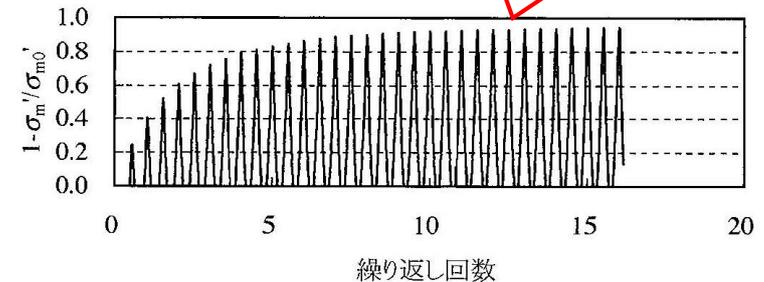
有効応力( $\sigma'$ )が  
回復する



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>

過剰間隙水圧比が  
上昇と下降を繰り返す。

過剰間隙水圧比(=1-\sigma'\_m/\sigma'\_{m0})時刻歴



(d) 過剰間隙水圧比<sup>2)</sup>

#### 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.

### 3. 液状化試験結果

#### 【埋戻土層 (A-1)】

| 試料番号                                  |                        | #1-O-1              |      |      |      | #1-O-2    |      |      |      |     |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|------|------|------|-----------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                        | 3.50~4.50           |      |      |      | 4.50~5.50 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                        | 埋戻土層                |      |      |      | 埋戻土層      |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                        | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1         | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                        | 2.710               |      |      |      | 2.720     |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                        | 50                  |      |      |      | 100       |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                        | 0.25                | 0.30 | 0.20 | 0.35 | 0.26      | 0.21 | 0.24 | 0.29 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅          | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 7.5  | 5.5  | 103  | 3.5       | 4.5  | 54   | 29   | 5.5 |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 8.5  | 7    | 106  | 5         | 5    | 56   | 32   | 6.5 |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 10   | 9    | 111  | 7.5       | 6    | 59   | 36   | 8   |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 16   | 15   | 119  | 27        | 8    | 64   | 46   | 12  |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=15\%$  | 21   | 23   | 127  | 109       | 10   | 68   | 54   | 15  |
|                                       | 間隙水圧比 95%<br>$N_{u95}$ | 15                  | 16   | 116  | 35   | 9         | 64   | 45   | 14   |     |

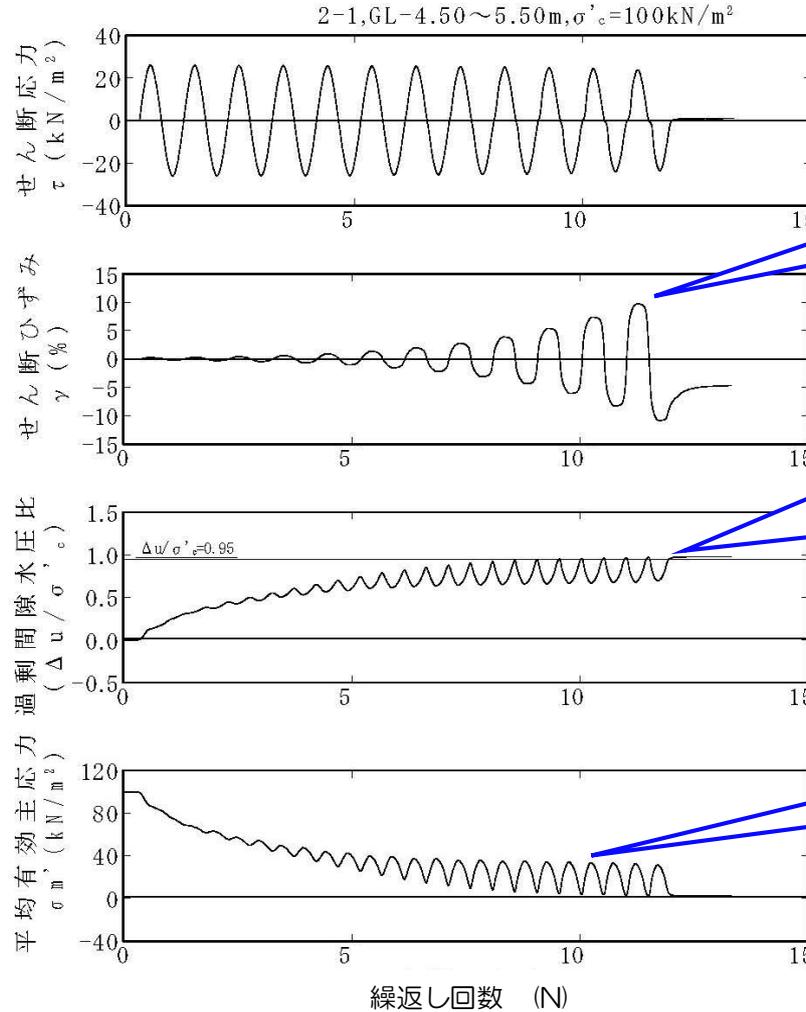
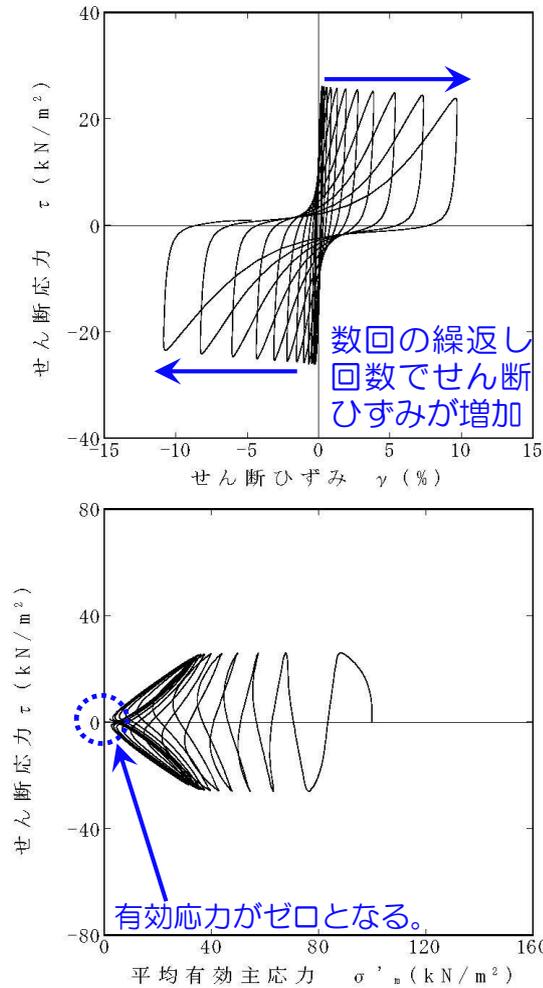
■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)

太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

【埋戻土層 (A-1)】

$\sigma'_c = 100 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.26$



数回の繰返し回数でせん断ひずみが増加

数回の繰返し回数で過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) が1に近づく (0.95に達する)

有効応力が徐々に減少する

中空ねじり試験結果 (埋戻土層 (A-1) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層 I (A-1)】

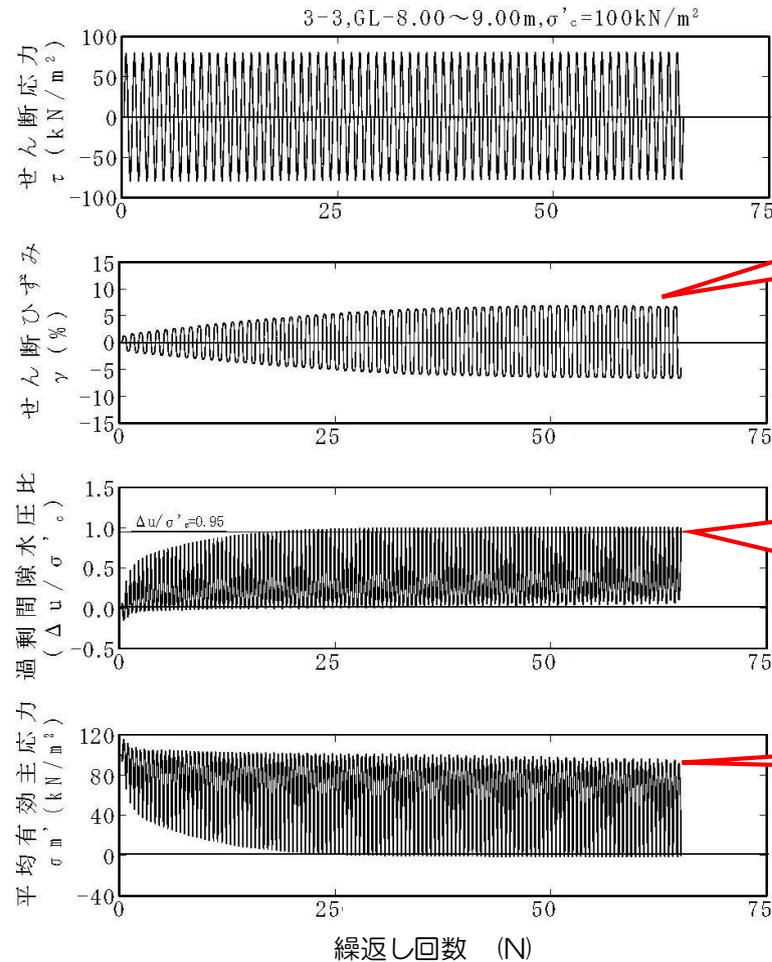
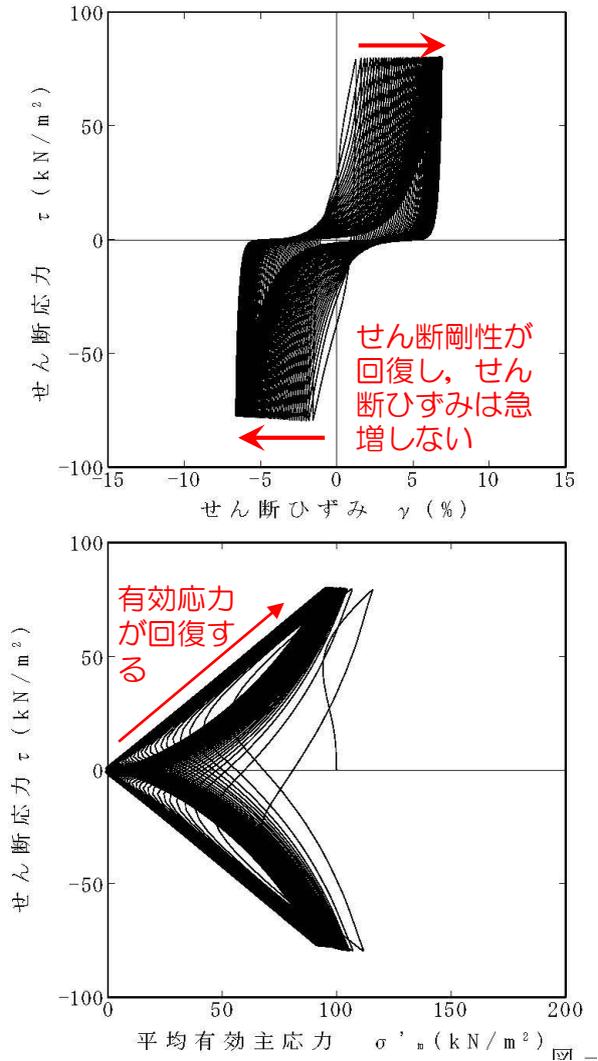
| 試料番号                                  |                        | #1-1-1              |      |      |      | #1-1-2      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 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    | 3    | 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 | 0.79 | 0.97 | 0.48        | 0.61 | 0.44 | 0.39 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅          | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 4    | 0.9  | 0.5  | 0.3         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 3   |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 6.5  | 2    | 0.7  | 0.5         | 2.5  | 0.6  | 1.5  | 5   |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 14   | 6.5  | 1    | 0.7         | 5    | 0.9  | 4    | 8.5 |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 48   | 32   | 14   | 9           | 18   | 7.5  | 17   | 25  |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=15\%$  | 102  | 96   | —    | 41          | 53   | 23   | 41   | 48  |
|                                       | 間隙水圧比 95%<br>$N_{u95}$ | 40                  | 31   | 18   | 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)  
 太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層 I (A-1)】

$$\sigma'_c = 100 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.79$$



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。

中空ねじり試験結果 (洪積砂層 I (A-1) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層Ⅱ (A-1)】

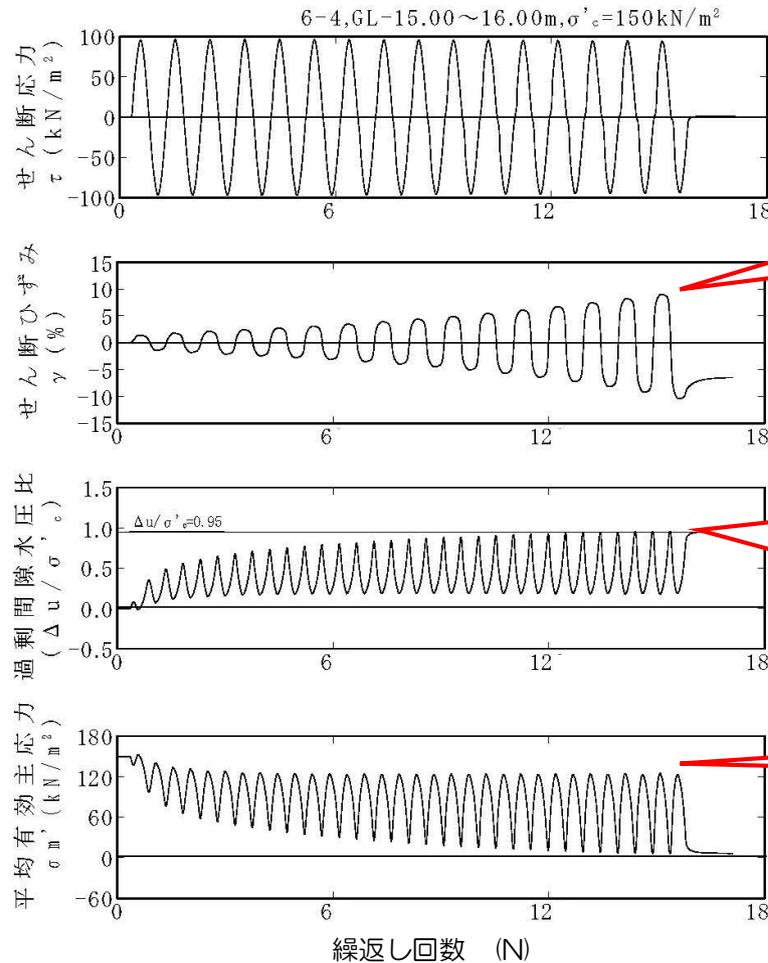
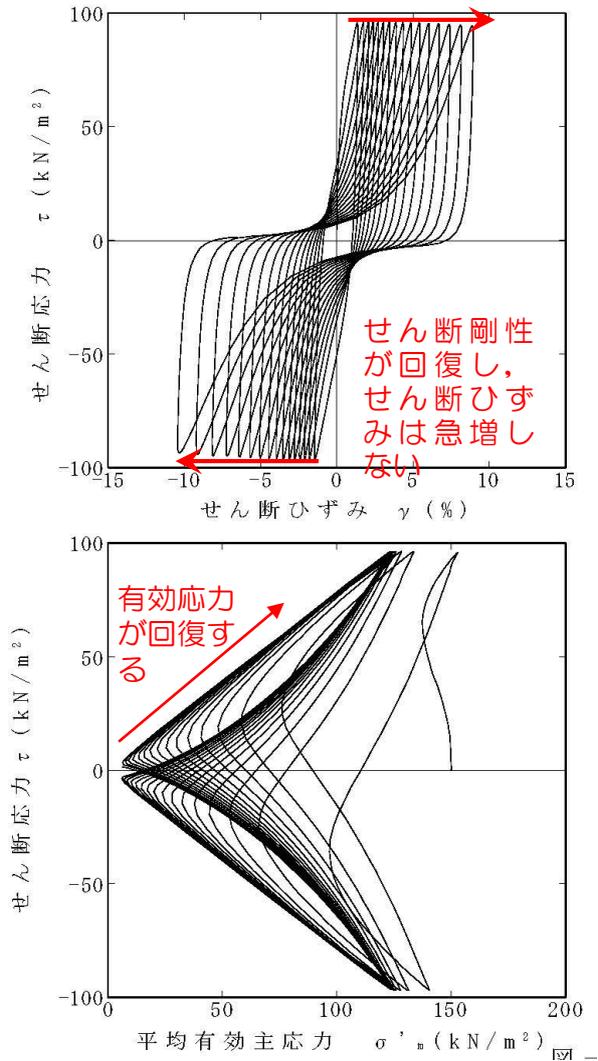
| 試料番号                                  |               | #1-2-1         |      |      |      | #1-2-2      |      |      |             | #1-2-3      |      |      |      | #1-2-4      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 13.00~14.00    |      |      |      | 15.00~16.00 |      |      |             | 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    | 4           | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | 2.714          |      |      |      | 2.688       |      |      |             | 2.684       |      |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 150            |      |      |      | 150         |      |      |             | 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 | <b>0.64</b> | 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>両振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 0.4  | 0.8  | 1    | 10          | 2    | 1.5  | 0.8         | <b>0.5</b>  | 2    | 4.5  | 0.6  | 7           | 2    | 0.9  | 0.8  | 0.6 |
|                                       |               | $r_{DA}=2.0\%$ | 0.6  | 1    | 2    | 11          | 2.5  | 3.5  | 1           | <b>0.7</b>  | 3.5  | 7.5  | 0.8  | 12          | 3.5  | 1.5  | 1.5  | 0.7 |
|                                       |               | $r_{DA}=3.0\%$ | 0.9  | 4    | 2.5  | 20          | 6    | 7    | 4           | <b>1</b>    | 6.5  | 14   | 2    | 20          | 7    | 4.5  | 5    | 1.5 |
|                                       |               | $r_{DA}=7.5\%$ | 7    | 30   | 17   | 65          | 26   | 20   | 18          | <b>7</b>    | 15   | 30   | 7    | 39          | 27   | 16   | 19   | 9   |
|                                       |               | $r_{DA}=15\%$  | 16   | 56   | 32   | 102         | 48   | 37   | 33          | <b>13</b>   | 22   | 43   | 13   | 56          | 52   | 25   | 31   | 18  |
| 間隙水圧比 95%<br>$N_{95}$                 |               | 16             | 40   | 22   | 61   | 31          | 27   | 24   | <b>14</b>   | 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)  
太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

【洪積砂層Ⅱ (A-1)】

$$\sigma'_c = 150 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.64$$



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。

中空ねじり試験結果 (洪積砂層Ⅱ (A-1) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層 I (A-2)】

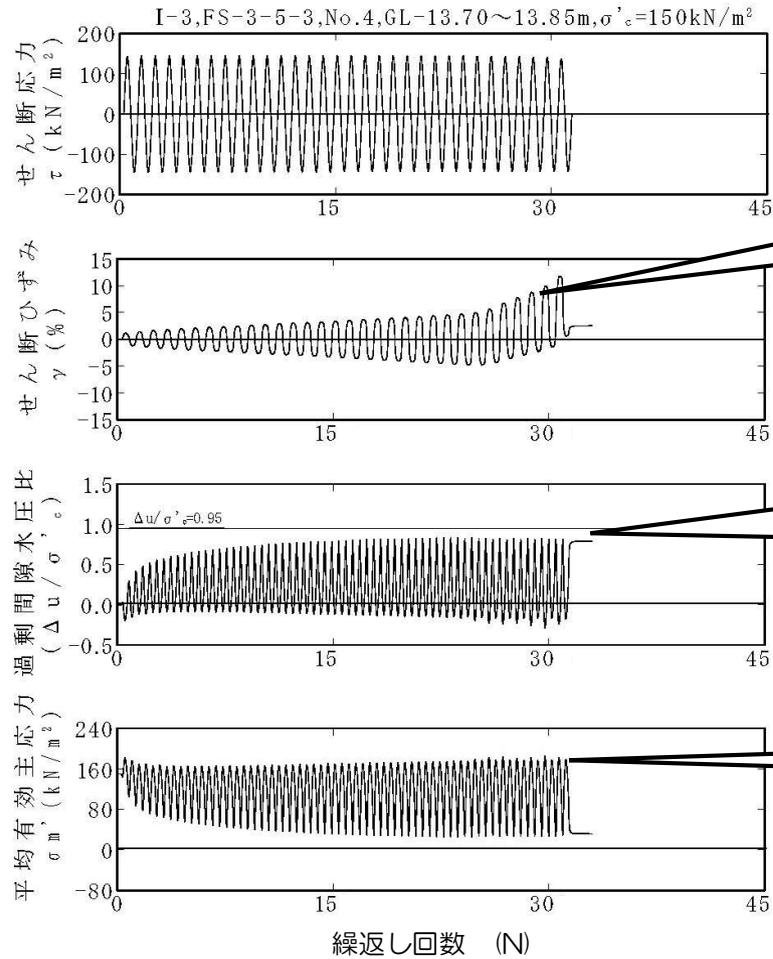
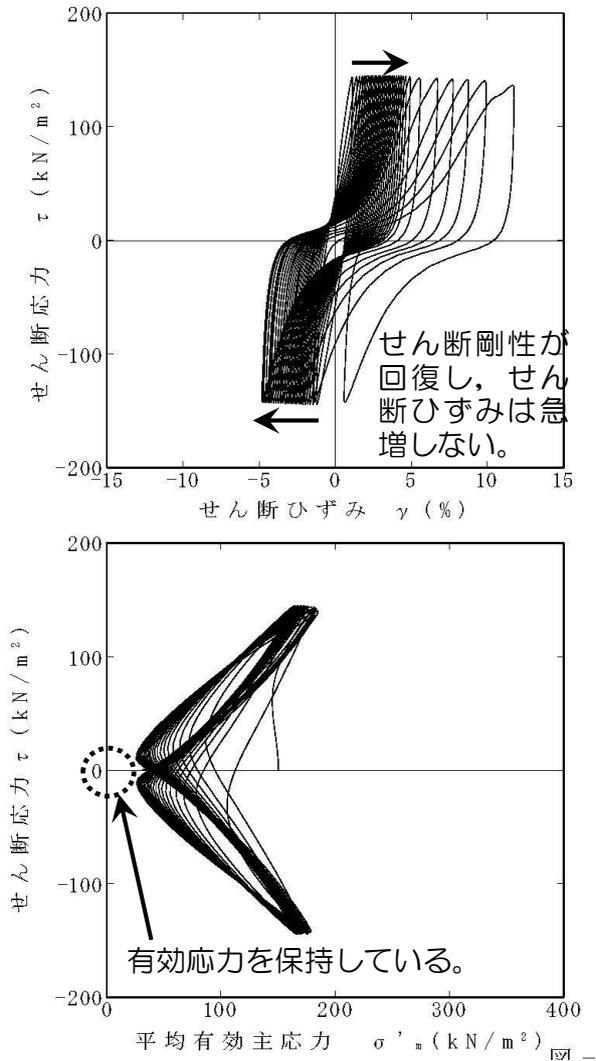
| 試料番号                                  |               | #4-1-1         |      |      |      | #4-1-2      |      |      |      | #4-1-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 13.20~14.14    |      |      |      | 13.36~13.99 |      |      |      | 13.21~13.85 |      |      |      |     |
| 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       |      |      |      | 2.754       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 150            |      |      |      | 150         |      |      |      | 150         |      |      |      |     |
| 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 | 0.96 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 10   | 5    | 0.7  | 0.4         | 0.9  | 0.5  | 0.4  | 9           | 0.5  | 0.9  | 0.6  | 0.6 |
|                                       |               | $r_{DA}=2.0\%$ | 23   | 9    | 1    | 0.5         | 3    | 0.6  | 0.6  | 18          | 0.7  | 2    | 0.8  | 0.9 |
|                                       |               | $r_{DA}=3.0\%$ | 44   | 21   | 4    | 0.7         | 13   | 0.9  | 0.9  | 37          | 1    | 8    | 2    | 2.5 |
|                                       |               | $r_{DA}=7.5\%$ | 60   | 56   | 23   | 5           | 51   | 4.5  | 6.5  | 91          | 5    | 43   | 17   | 18  |
|                                       |               | $r_{DA}=15\%$  | 71   | 62   | 35   | -           | 63   | 7    | 9    | -           | 7    | -    | 29   | -   |
| 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)  
太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層 I (A-2)】

$$\sigma'_{c0} = 150 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_{c0} = 0.96$$



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_{c0}$ ) 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。

中空ねじり試験結果 (洪積砂層 I (A-2) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層Ⅱ (A-2)】

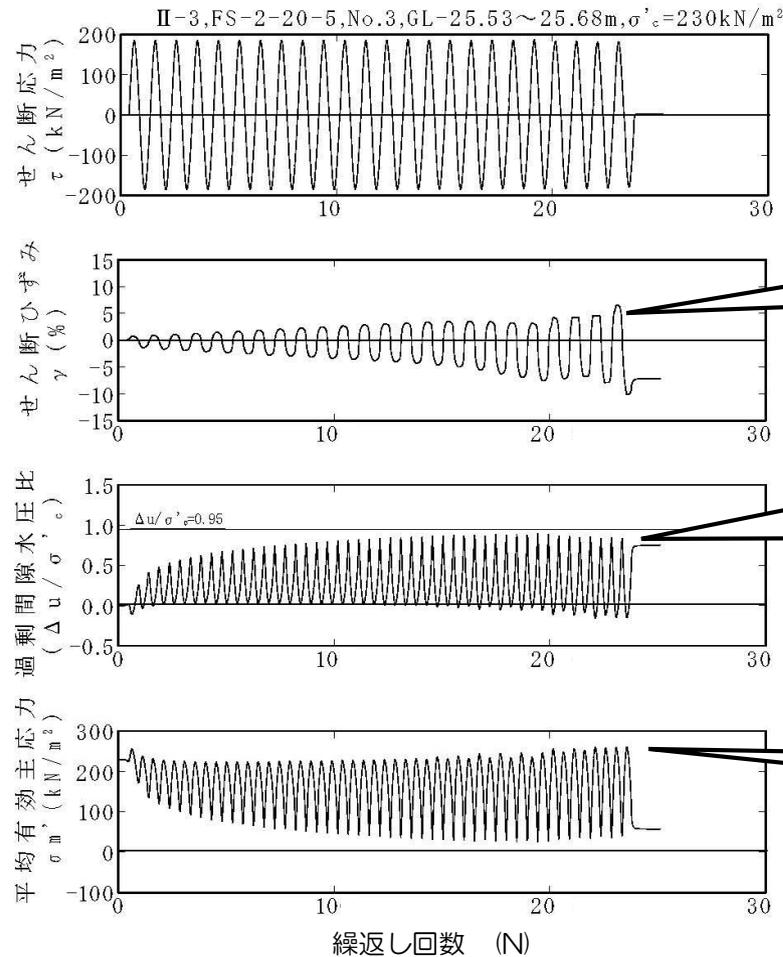
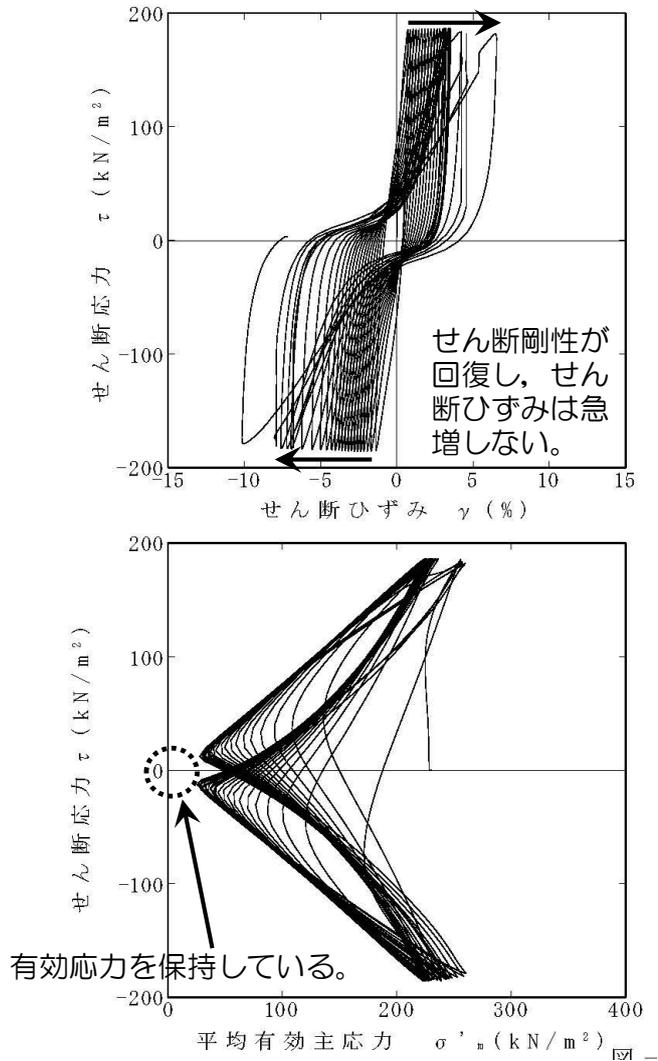
| 試料番号                                  |                     | #4-2-1         |      |      |      | #4-2-2      |      |      |      | #4-2-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                     | 20.20~21.96    |      |      |      | 21.96~22.62 |      |      |      | 25.15~26.23 |      |      |      |     |
| 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    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                     | 2.680          |      |      |      | 2.679       |      |      |      | 2.721       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                     | 230            |      |      |      | 230         |      |      |      | 230         |      |      |      |     |
| 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 | 0.81 | 0.76 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅       | $r_{DA}=1.5\%$ | 1.5  | 0.3  | 0.8  | 200         | 2.5  | 0.9  | 0.3  | 0.3         | 2    | 0.8  | 0.7  | 0.9 |
|                                       |                     | $r_{DA}=2.0\%$ | 3.5  | 0.4  | 1.5  | —           | 6    | 2    | 0.5  | 0.4         | 5.5  | 1.5  | 1    | 2.5 |
|                                       |                     | $r_{DA}=3.0\%$ | 7    | 0.7  | 3.5  | —           | 14   | 5.5  | 0.7  | 0.6         | 17   | 4.5  | 3    | 6   |
|                                       |                     | $r_{DA}=7.5\%$ | 20   | 3    | 15   | —           | 46   | 22   | 3.5  | 2           | 74   | 17   | 14   | 22  |
|                                       |                     | $r_{DA}=15\%$  | —    | 7.5  | —    | —           | 78   | —    | 6.5  | 4.5         | 110  | —    | 24   | 36  |
|                                       | 間隙水圧比 95% $N_{u95}$ | —              | —    | —    | —    | 61          | —    | —    | —    | 87          | —    | —    | —    |     |

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

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂層Ⅱ (A-2)】

$$\sigma'_c = 230 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.81$$



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。

有効応力が回復する。

中空ねじり試験結果 (洪積砂層Ⅱ (A-2) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【新期砂層 (A-3)】

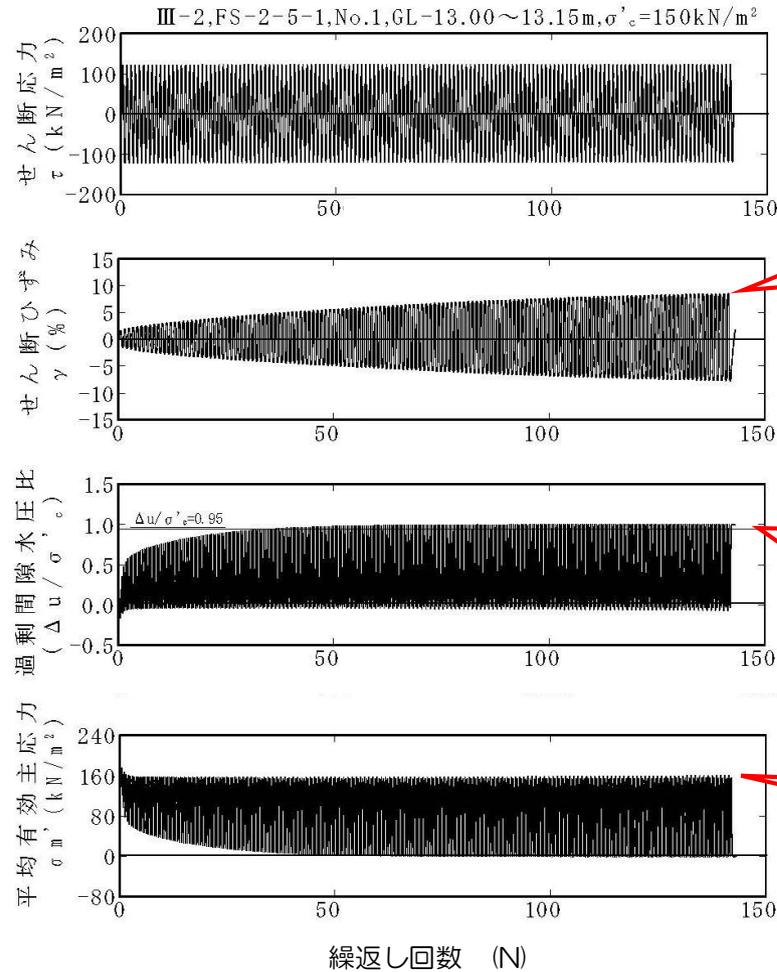
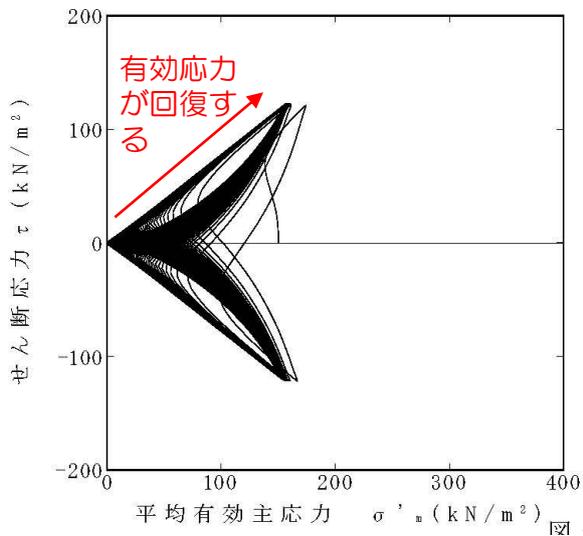
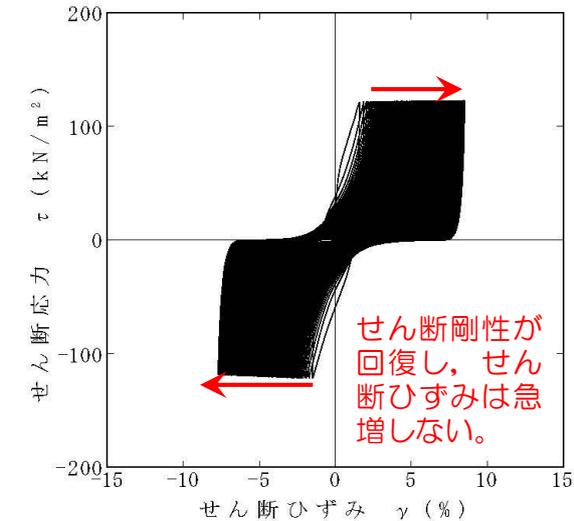
| 試料番号                                  |               | #4-3-1              |      |      |      | #4-3-2      |      |      |      | #4-3-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 13.04~13.51         |      |      |      | 13.00~13.68 |      |      |      | 14.96~15.43 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |               | 新期砂層                |      |      |      | 新期砂層        |      |      |      | 新期砂層        |      |      |      |     |
| 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> )  |               | 2.719               |      |      |      | 2.780       |      |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 150                 |      |      |      | 150         |      |      |      | 150         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |               | 0.81                | 0.70 | 0.62 | 0.49 | 0.81        | 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>両振幅 | $r_{DA}=1.5\%$      | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 2           | 0.5  | 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         | 0.7  | 0.4  | 0.8  | 1.5         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 0.4 |
|                                       |               | $r_{DA}=3.0\%$      | 0.9  | 2    | 2    | 8.5         | 1    | 0.6  | 2    | 4           | 5    | 0.7  | 3    | 0.5 |
|                                       |               | $r_{DA}=7.5\%$      | 15   | 19   | 18   | 50          | 24   | 9    | 24   | 21          | 32   | 9    | 22   | 8   |
|                                       |               | $r_{DA}=15\%$       | 76   | 96   | 53   | 146         | 112  | 91   | 77   | 65          | 94   | 43   | 60   | 77  |
|                                       |               | 間隙水圧比 95% $N_{u95}$ | 28   | 28   | 30   | 40          | 38   | 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)  
太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

【新期砂層 (A-3)】

$\sigma'_c = 150 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.81$



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。

中空ねじり試験結果 (新期砂層 (A-3) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂質土層 I (O-1)】

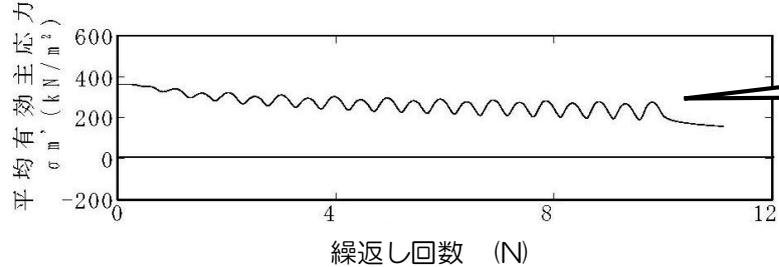
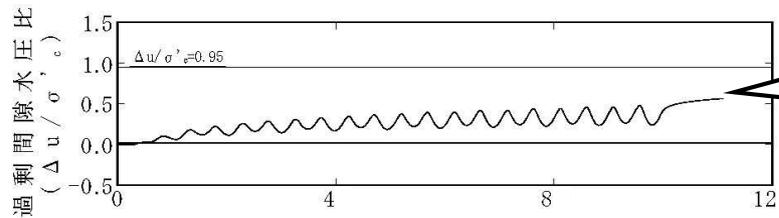
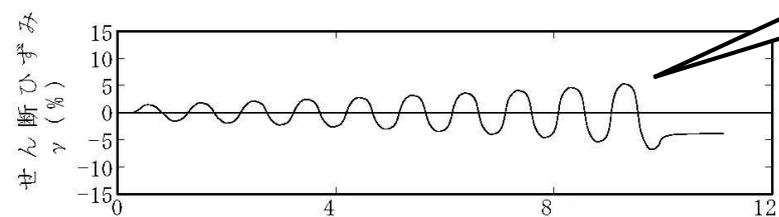
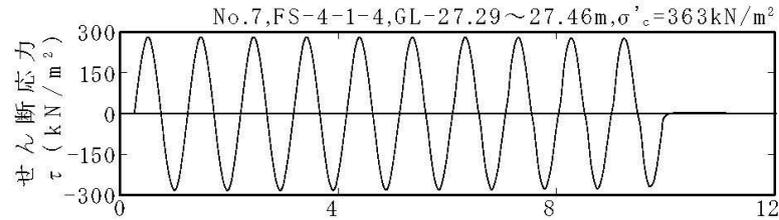
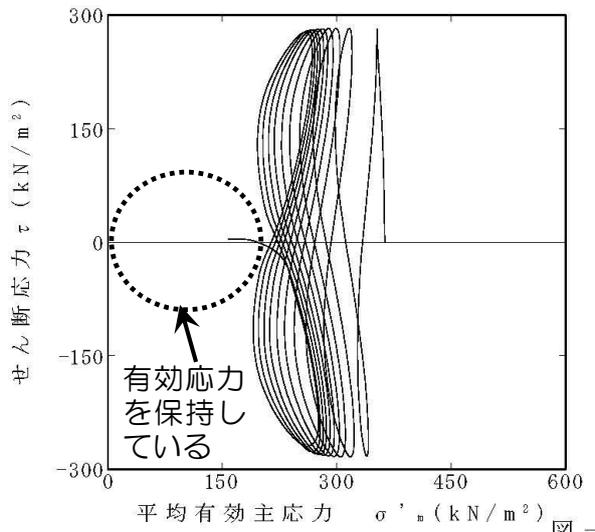
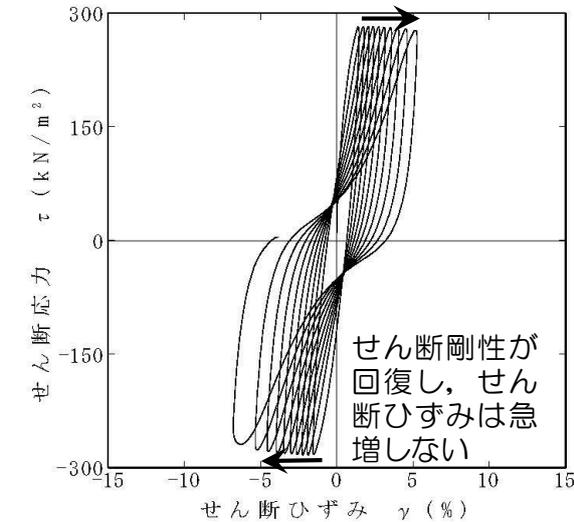
| 試料番号                                  |                     | #6-1-1         |      |      |      | #6-1-2      |      |      |      | #6-1-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|---------------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                     | 27.68~28.16    |      |      |      | 26.95~27.63 |      |      |      | 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    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                     | 2.649          |      |      |      | 2.677       |      |      |      | 2.669       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                     | 363            |      |      |      | 363         |      |      |      | 363         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                     | 0.51           | 0.60 | 0.78 | 0.64 | 0.51        | 0.61 | 0.78 | 0.68 | 0.51        | 0.46 | 0.35 | 0.64 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅       | $r_{DA}=1.5\%$ | 8.5  | 0.9  | 0.5  | 0.7         | 0.9  | 0.7  | 0.5  | 0.5         | 0.5  | 42   | 200> | 0.9 |
|                                       |                     | $r_{DA}=2.0\%$ | 18   | 5.5  | 0.7  | 0.9         | 6    | 1    | 0.7  | 0.7         | 0.7  | 200> | -    | 3.5 |
|                                       |                     | $r_{DA}=3.0\%$ | 30   | 26   | 1.5  | 2           | 35   | 12   | 1    | 1           | 1    | -    | -    | 15  |
|                                       |                     | $r_{DA}=7.5\%$ | 54   | 71   | 5    | 7           | 121  | 46   | 7    | 6           | 8.5  | -    | -    | 45  |
|                                       |                     | $r_{DA}=15\%$  | -    | -    | -    | -           | 127  | 53   | -    | -           | 12   | -    | -    | -   |
|                                       | 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)  
太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

【洪積砂質土層 I (O-1)】

$\sigma'_c = 363 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.78$



中空ねじり試験結果 (洪積砂質土層 I (O-1) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【洪積砂質土層Ⅱ (O-1)】

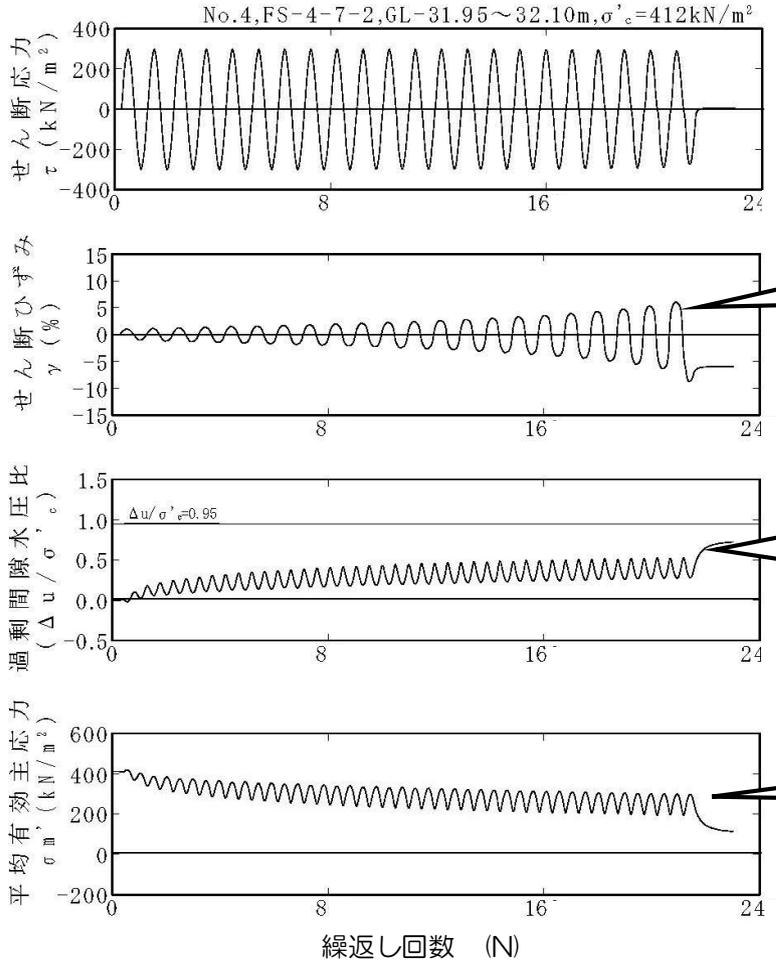
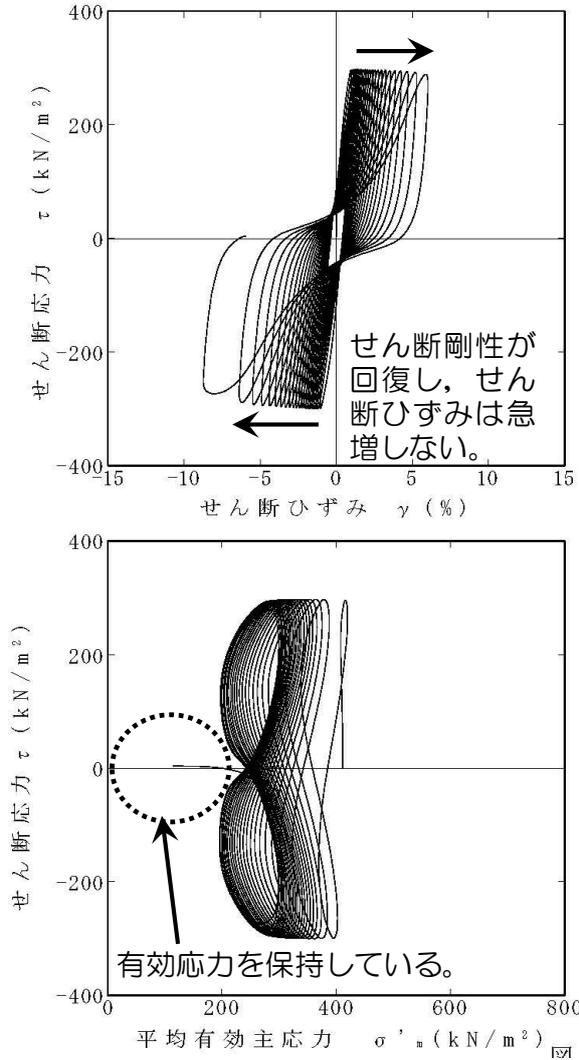
| 試料番号                                  |                        | #6-2-1              |      |      |             | #6-2-2      |      |      |      | #6-2-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                        | 31.65~34.75         |      |      |             | 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    | 4           | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                        | 2.664               |      |      |             | 2.646       |      |      |      | 2.672       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                        | 412                 |      |      |             | 412         |      |      |      | 412         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                        | 0.59                | 0.52 | 0.79 | <b>0.72</b> | 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         | <b>0.7</b>  | 5.5  | 0.8  | 0.6  | 1           | 1    | 2    | 0.7  | 0.9 |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 5    | 11   | 0.5         | <b>1</b>    | 24   | 1.5  | 0.9  | 5.5         | 4    | 6    | 1    | 2   |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 13   | 19   | 1           | <b>5</b>    | 61   | 7    | 2.5  | 17          | 14   | 15   | 3.5  | 5   |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 36   | 38   | 2           | <b>17</b>   | 111  | 25   | 8.5  | 38          | 37   | 34   | 9.5  | 16  |
|                                       |                        | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | -    | -           | -           | 116  | 30   | -    | -           | 43   | 43   | 11   | -   |
|                                       | 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)  
太字 : 次ページに例示する試験結果

### 3. 液状化試験結果

【洪積砂質土層Ⅱ (O-1)】

$$\sigma'_c = 412 \text{ kN/m}^2, \tau_d / \sigma'_c = 0.72$$



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。

中空ねじり試験結果 (洪積砂質土層Ⅱ (O-1) の例)

### 3. 液状化試験結果

#### 【まとめ】

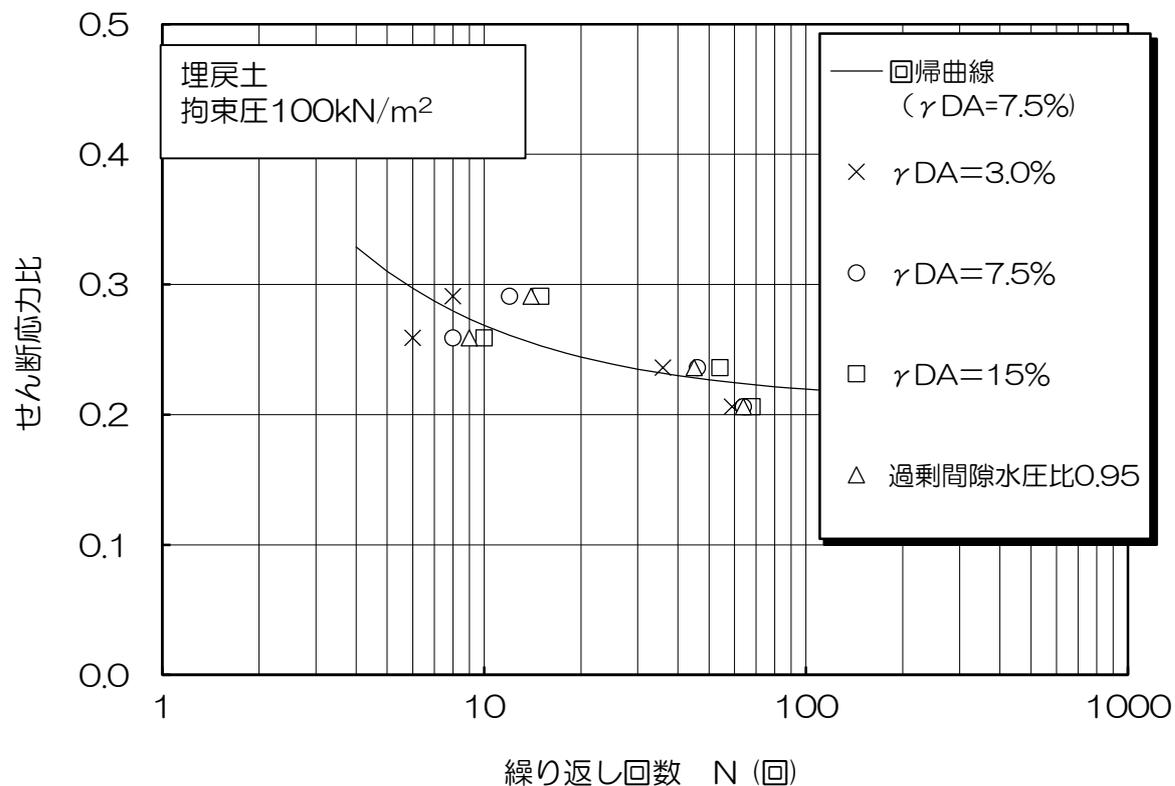
- 液状化試験の結果は、下表の3つに分類される。
- 洪積砂層Ⅰ(A-1)・洪積砂層Ⅱ(A-1)および新期砂層(A-3)は、比較的N値が高く、液状化試験結果はサイクリックモビリティを示している。このことは、道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説((社)日本道路協会、H24.3)において、一般にN値が高く、続成作用を受けている洪積層などは、液状化に対する抵抗が高いため、一般には液状化の可能性は低いという記載に整合する。しかしながら、瞬間的に過剰間隙水圧比が1.0となることを踏まえ、液状化パラメータを設定しその影響を評価することとする。
- 液状化層である埋戻土について、基準地震動 $S_s$ に対する液状化の可能性を評価する。

| 対象層      | 埋戻土層                                                                                                                    | 洪積砂層Ⅰ(A-1)<br>洪積砂層Ⅱ(A-1)<br>新期砂層(A-3)                                                                                                       | 洪積砂層Ⅰ(A-2)<br>洪積砂層Ⅱ(A-2)<br>洪積砂質土層Ⅰ(O-1)<br>洪積砂質土層Ⅱ(O-1)                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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> |
| 現象の整理    | 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、有効応力を保持している。                                                                                                 |
| 液状化評価    | $S_s$ による液状化判定の対象層                                                                                                      | 影響評価対象層<br>(液状化パラメータを設定)                                                                                                                    | 非液状化                                                                                                               |

### 3. 液状化試験結果

#### 【液状化パラメータの設定方針（埋戻土層）】

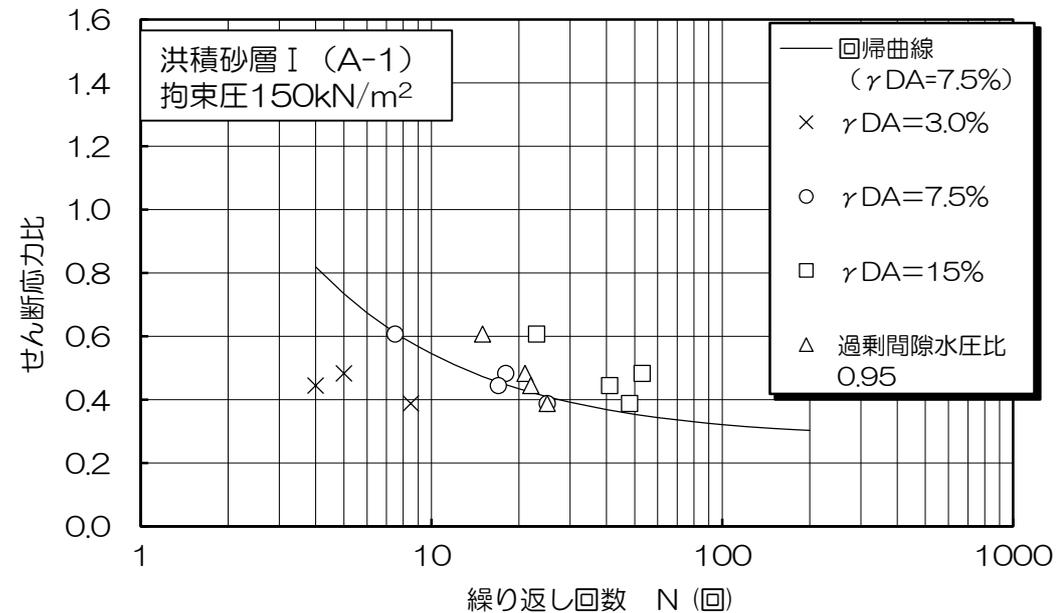
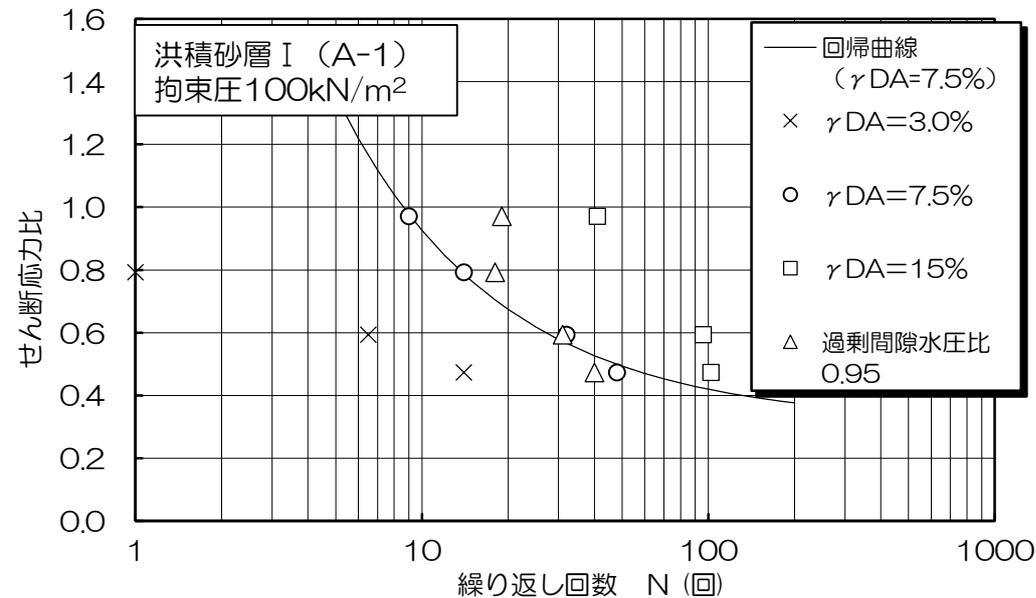
- 埋戻土層の液状化試験からせん断応力比と一定のせん断ひずみが発生する繰返し回数の関係を整理して液状化パラメータを設定し、基準地震動 $S_s$ に対する液状化の判定を実施する。



### 3. 液状化試験結果

#### 【液状化パラメータの設定方針（洪積砂層 I（A-1））】

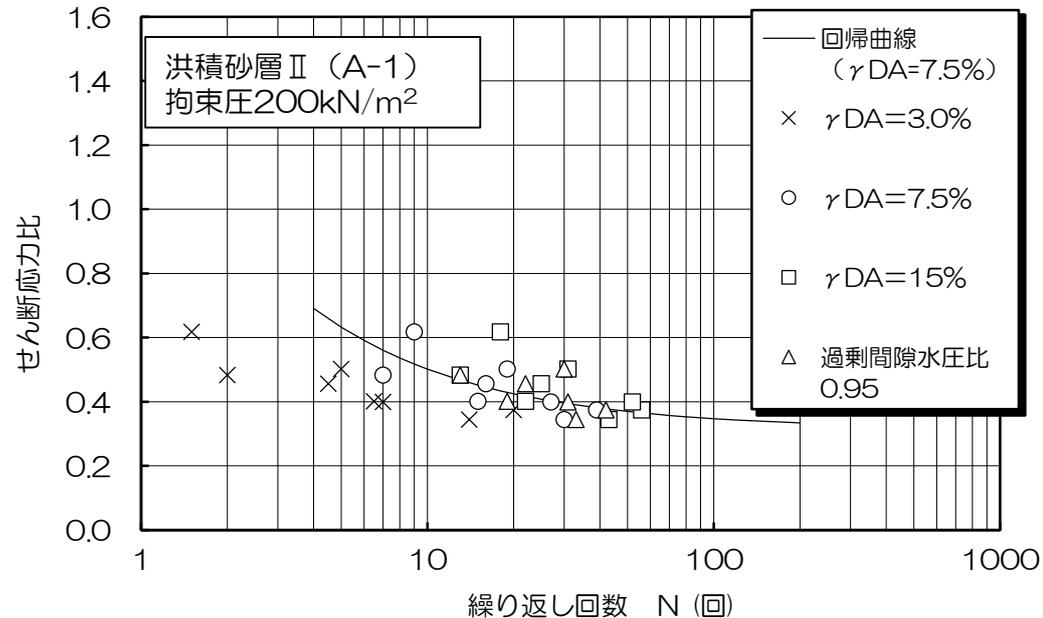
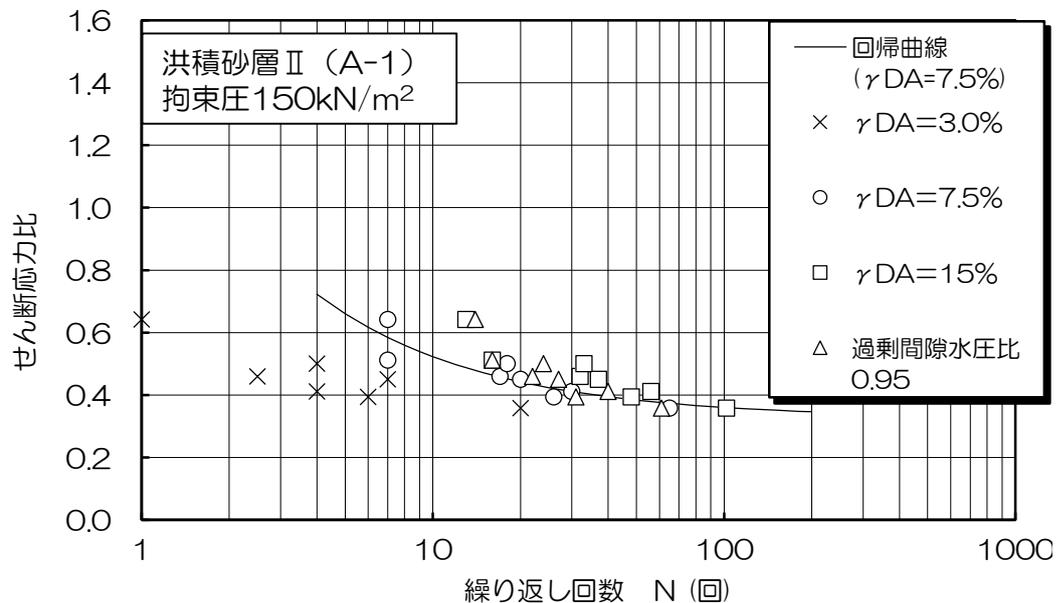
- 洪積砂層 I（A-1）については、サイクリックモビリティを示すが、埋戻土層同様に液状化試験からせん断応力比と一定のせん断ひずみが発生する繰り返し回数（回）の関係を整理して液状化パラメータを設定し、構造物への影響を評価する。



### 3. 液状化試験結果

#### 【液状化パラメータの設定方針（洪積砂層Ⅱ（A-1））】

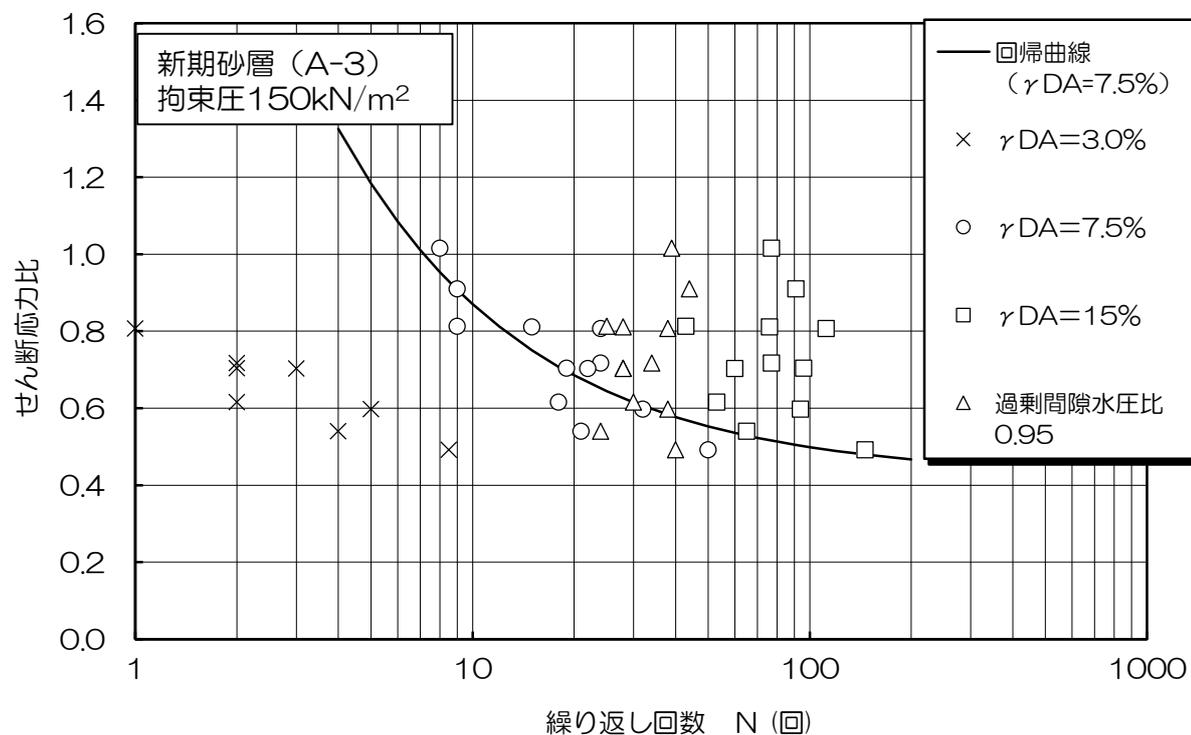
- 洪積砂層Ⅱ（A-1）については、サイクリックモビリティを示すが、埋戻土層同様に液状化試験からせん断応力比と一定のせん断ひずみが発生する繰返し回数（ $N$ ）の関係を整理して液状化パラメータを設定し、構造物への影響を評価する。



### 3. 液状化試験結果

#### 【液状化パラメータの設定方針（新期砂層（A-3））】

- 新期砂層（A-3）については，サイクリックモビリティを示すが，埋戻土層同様に液状化試験からせん断応力比と一定のせん断ひずみが発生する繰返し回数（ $N$ ）の関係を整理して液状化パラメータを設定し，構造物への影響を評価する。



1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図  
②液状化関連の文献整理

# 4. 液状化判定

## 【 $F_L$ 法による液状化判定】

- 埋戻土層を対象として、 $F_L$ 法による液状化判定を実施する。

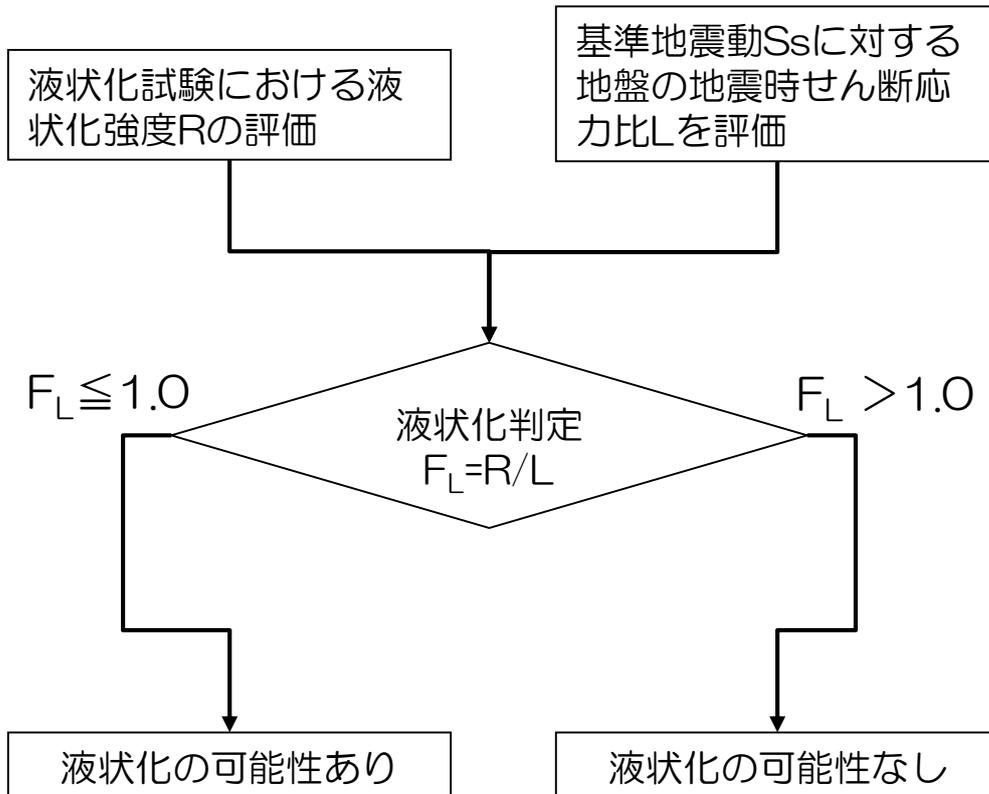
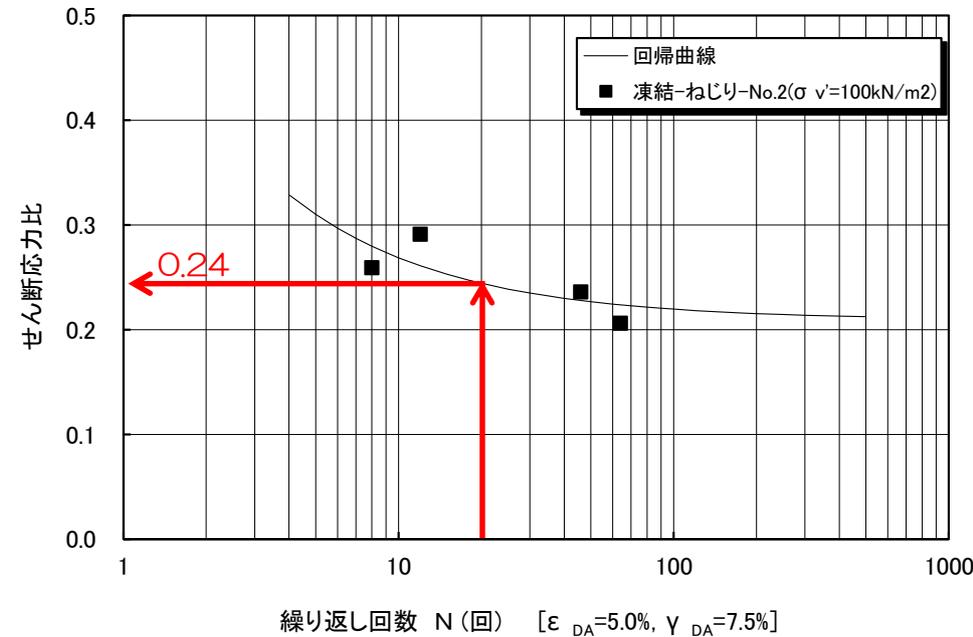


図  $F_L$ 法による液状化判定のフロー



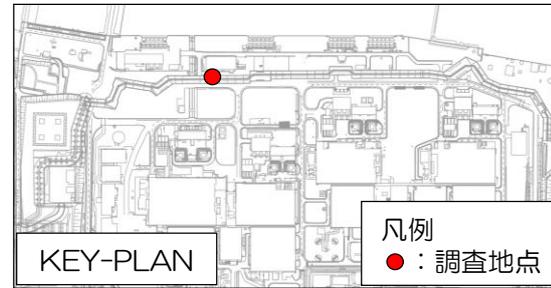
※Rは、せん断ひずみ両振幅7.5%の液状化曲線の繰返し回数20回に相当するせん断応力比とする。

図 液状化試験における液状化強度Rの評価

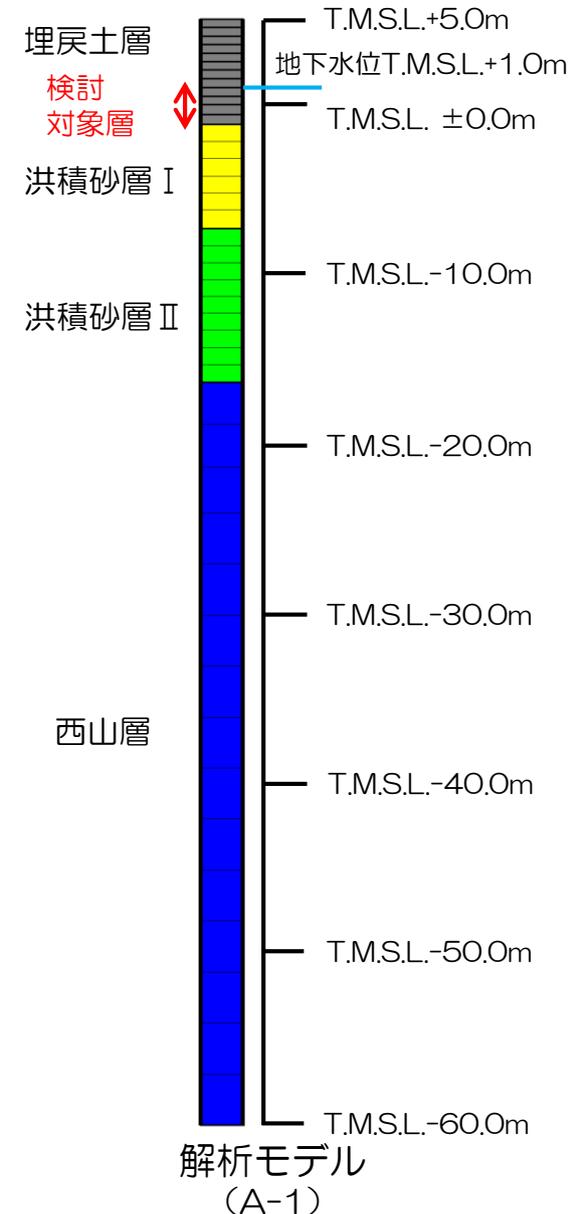
## 4. 液状化判定

### 【解析条件】

- 下記の地盤モデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。



地盤物性値



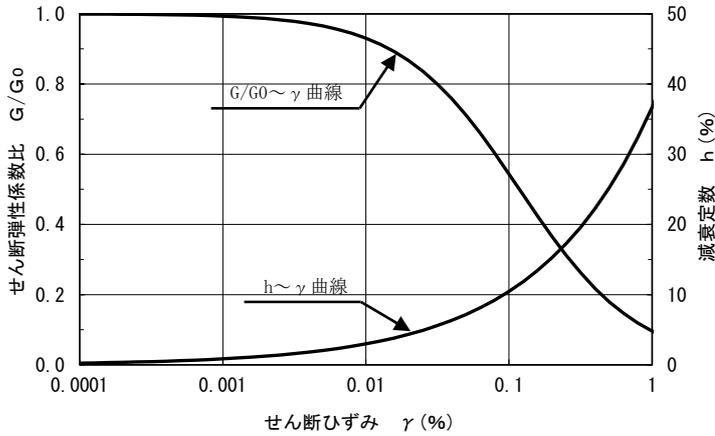
| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 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

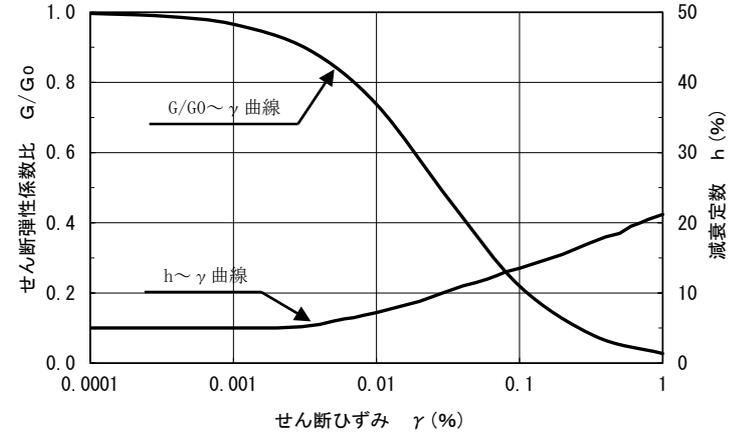
(既工認物性)

# 4. 液状化判定

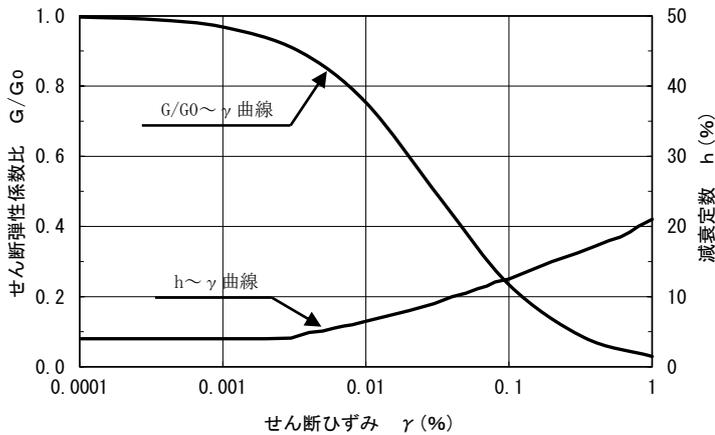
## 【解析条件】



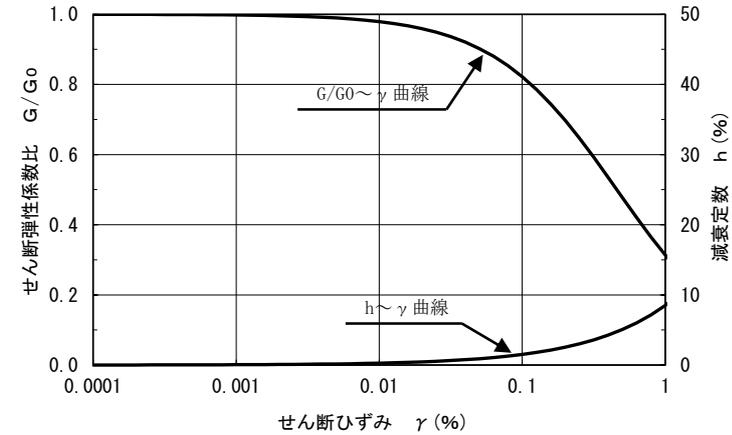
埋戻土層



洪積砂層 I



洪積砂層 II



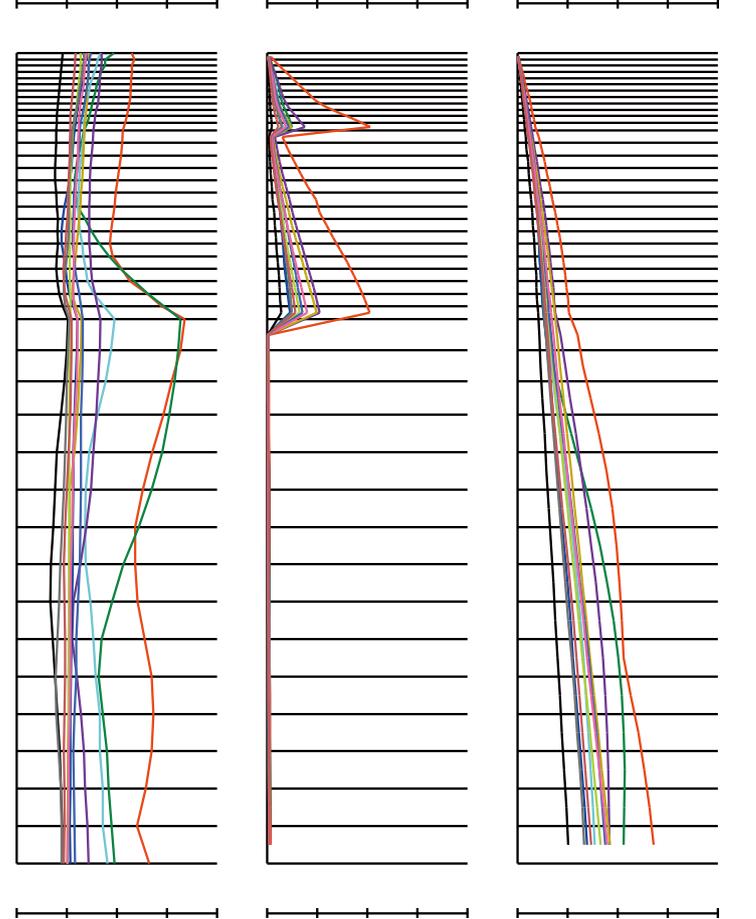
西山層

せん断剛性および減衰のひずみ依存性

## 【液状化判定結果】



最大加速度分布 [g a l]      最大せん断ひずみ分布 [%]      最大せん断応力分布 [N/mm<sup>2</sup>]



最大応答値分布

## 液状化判定結果

| 基準地震動Ss | 最大せん断応力比 L | 液状化強度 R | F <sub>L</sub> 値 =R/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 |

### 【まとめ】

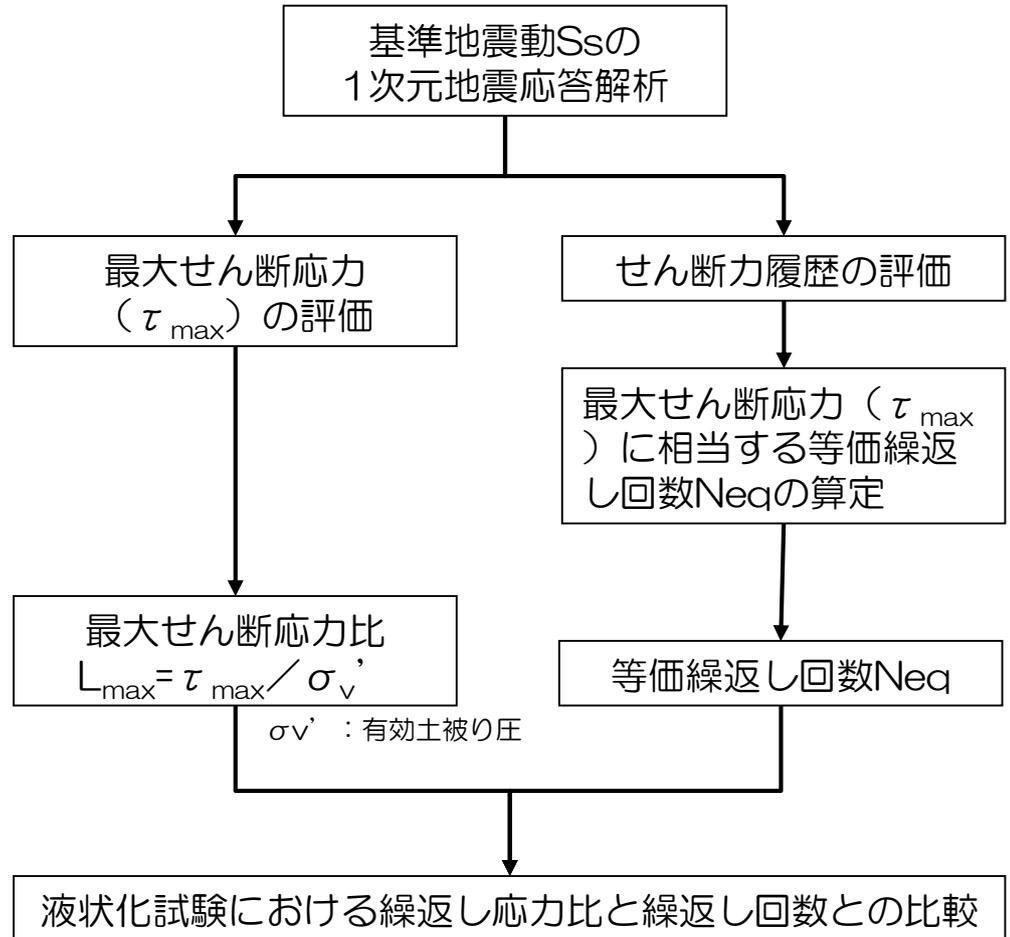
- F<sub>L</sub>法による液状化判定の結果、埋戻土層は基準地震動Ssに対して液状化する可能性がある。

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図  
②液状化関連の文献整理

## 【検討フロー】

- 新期砂層および古安田層中の砂層の中空ねじり試験の状態（繰返し応力および繰返し回数）と、基準地震動Ssが地盤に作用した際の地盤状態を比較し、試験条件が基準地震動Ss相当となっていることを目的として、右記のフローに基づいた評価を実施した。



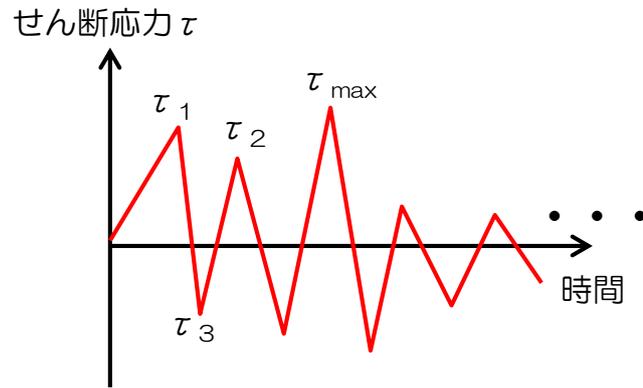
基準地震動Ssにおける最大せん断応力比と等価繰返し回数の評価フロー

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

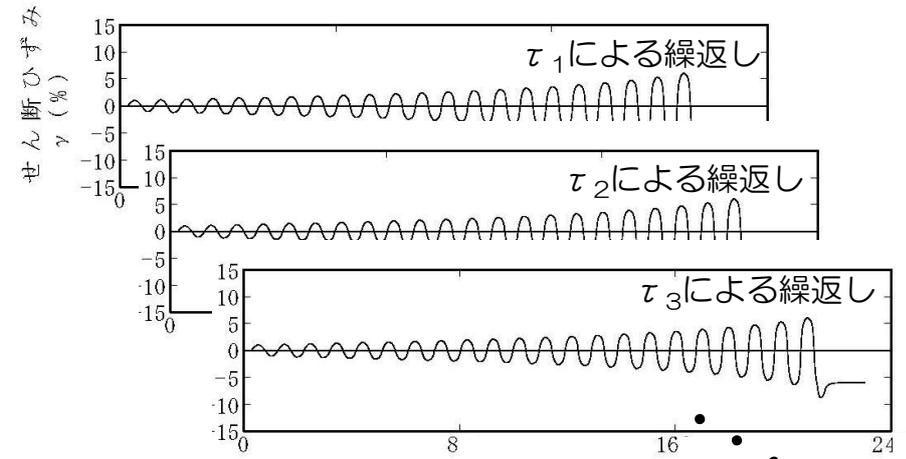
【等価繰返し回数の評価方法：吉見(1991)を参考】

吉見吉昭：砂地盤の液状化（第二版），技報堂出版，1991

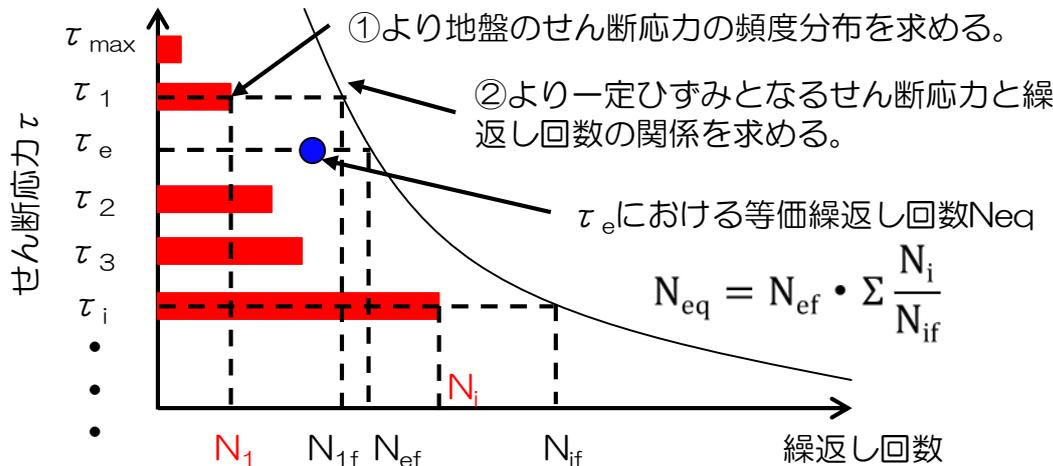
- 金属材料の疲労破壊の分野で提案された累積損傷度理論を応用して，不規則波である基準地震動 $S_s$ によって発生する地盤のせん断応力と，等価な一定せん断応力の繰返し回数を求め，試験結果との比較を実施する。



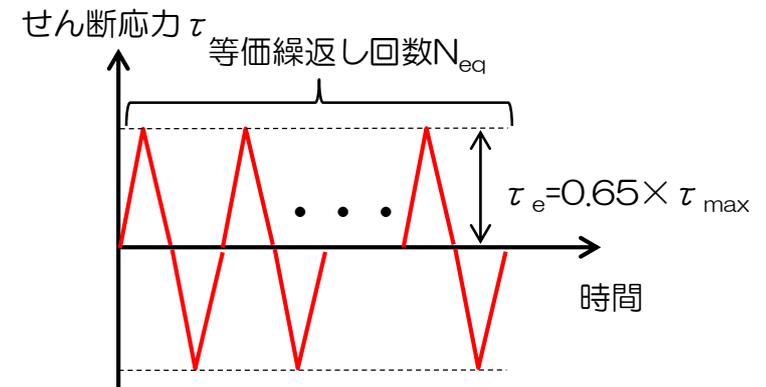
①対象地盤の地震応答解析におけるせん断応力履歴



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

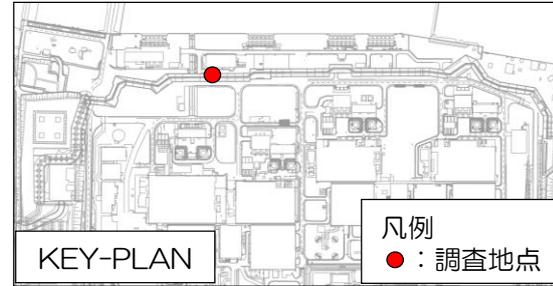


④対象地盤の地震応答解析と等価な一定せん断応力比と等価繰返し回数

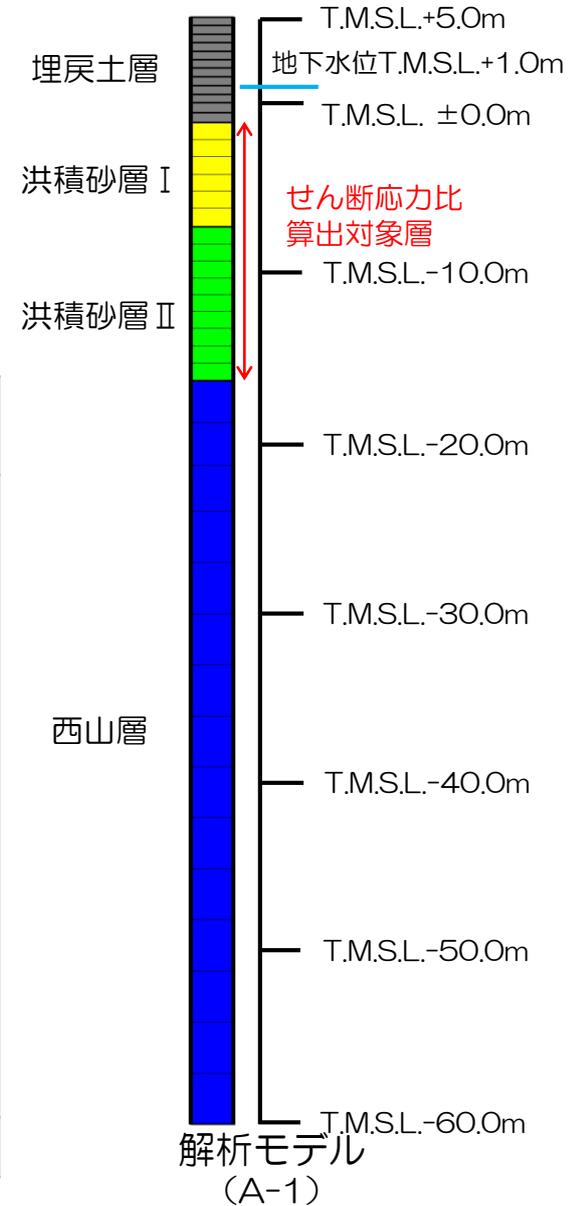
# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【解析条件：A-1】

- 下記の地盤モデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。



地盤物性値



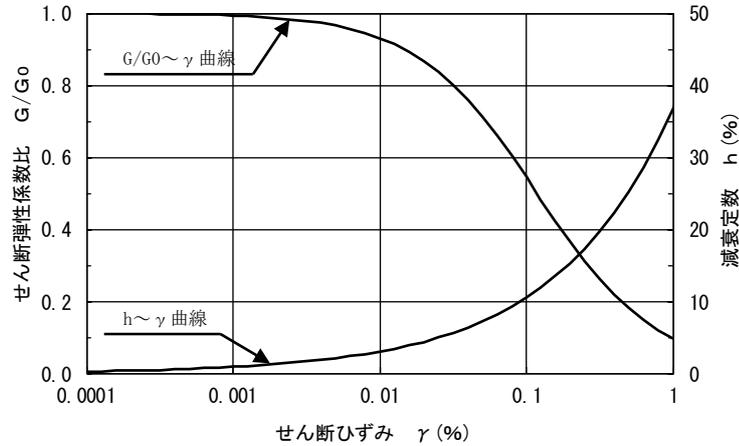
| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋炭土層             |                            | 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             | $7.73 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 16.9                                      | 0.43             | $9.17 \times 10^5$                      | —                 |

\* 1 : 地下水水位以深の物性値

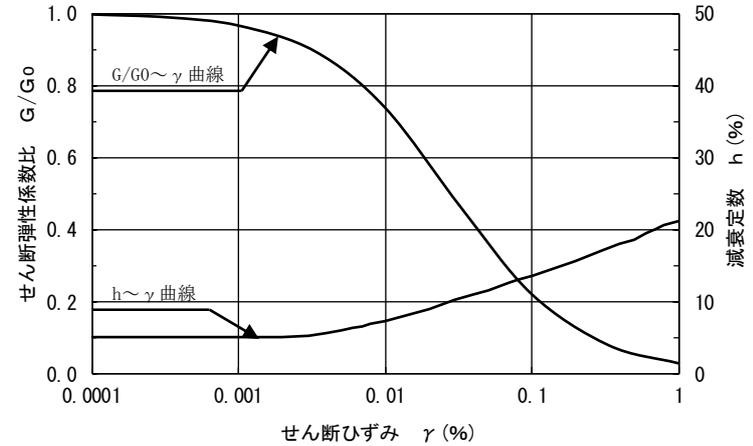
(既工認物性)

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

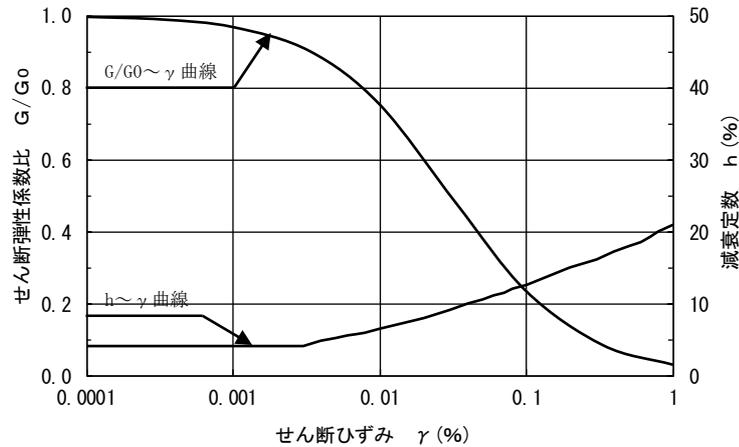
【解析条件：A-1】



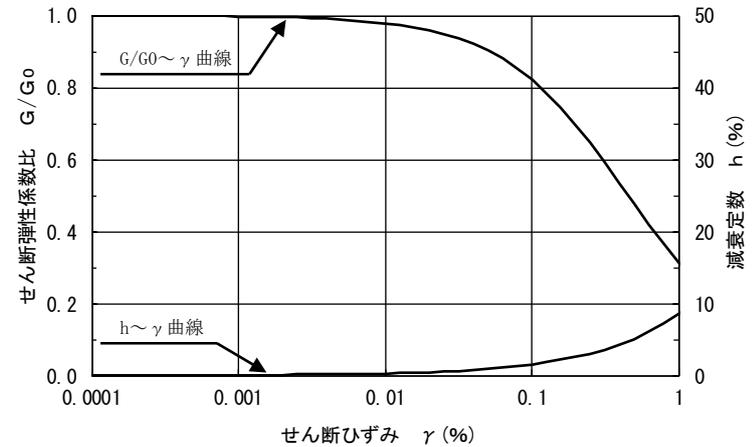
埋戻土層



洪積砂層 I



洪積砂層 II



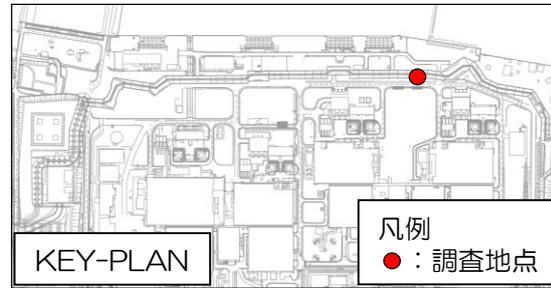
西山層

せん断剛性および減衰のひずみ依存性

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【解析条件：A-2】

- 下記の地盤モデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。

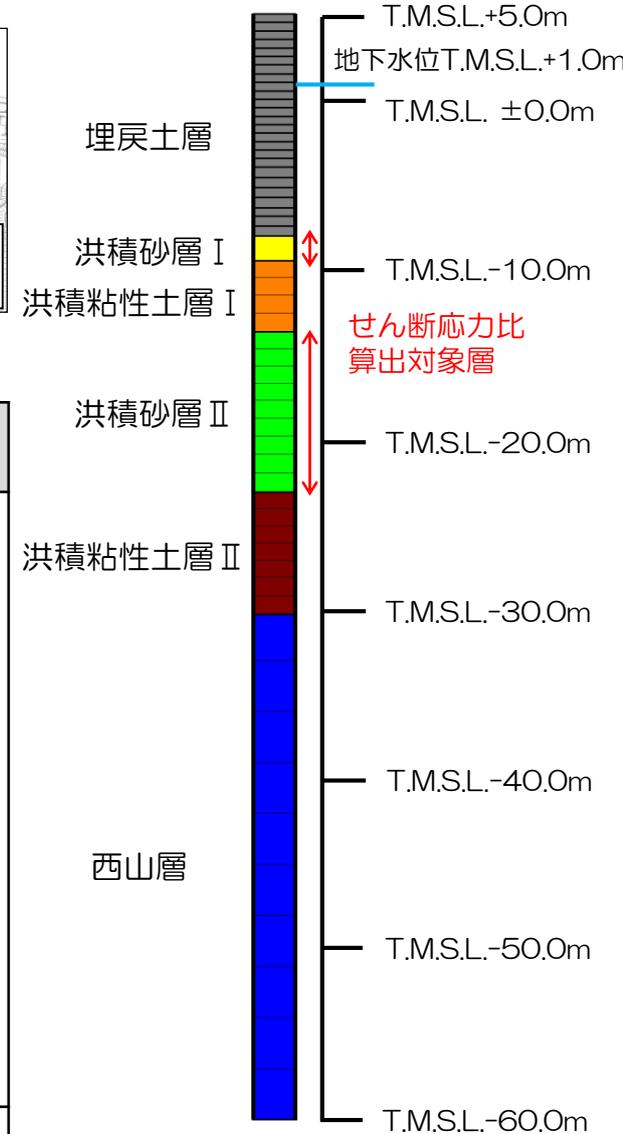


地盤物性値

| 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             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-285.0m           | 17.3                                      | 0.42             | $7.90 \times 10^5$                      |                   |
| 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)

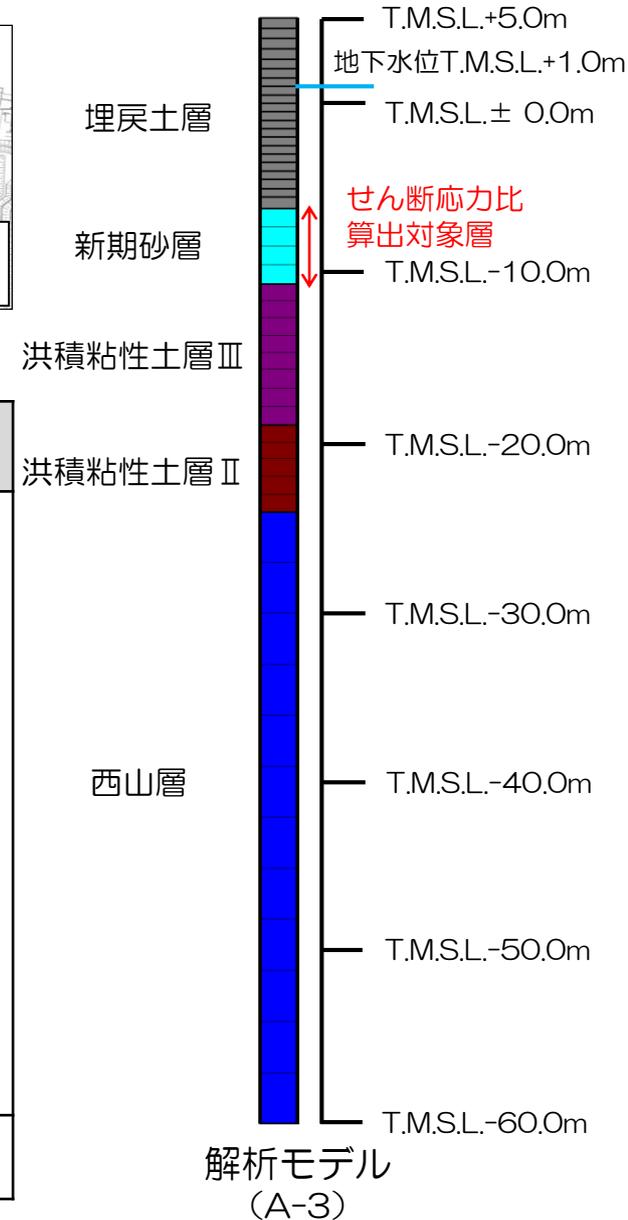
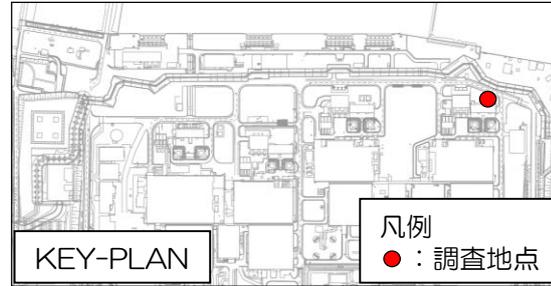


解析モデル (A-2)

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【解析条件：A-3】

- 下記の地盤モデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。



地盤物性値

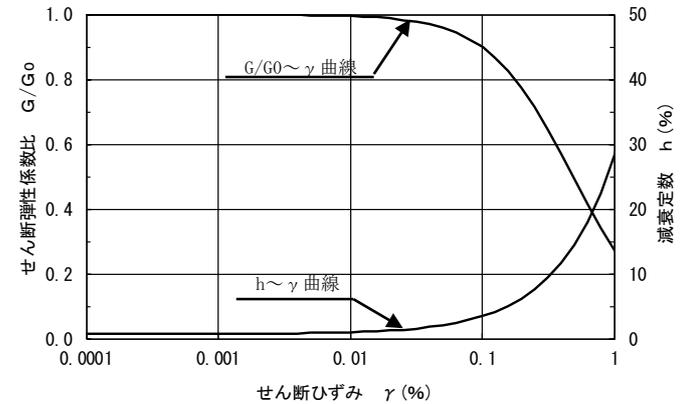
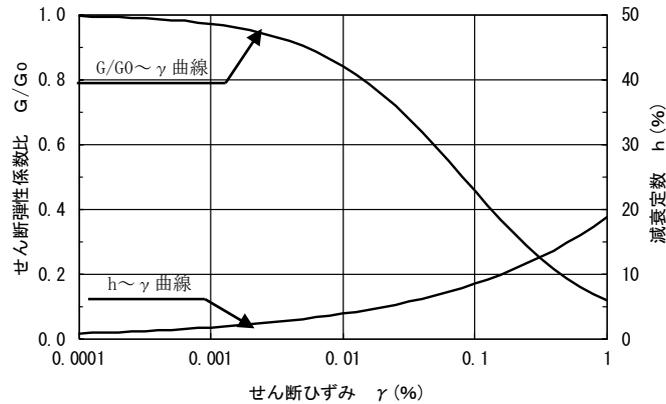
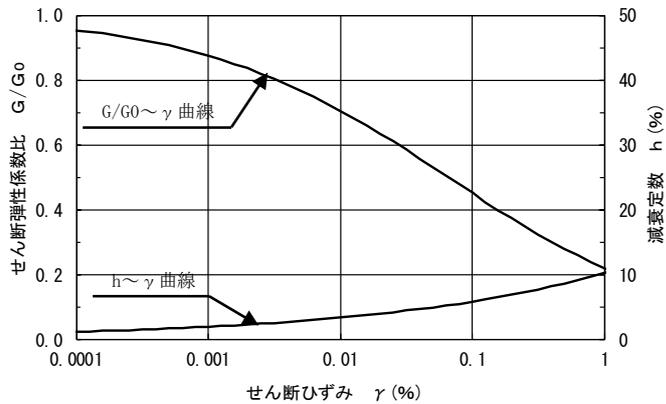
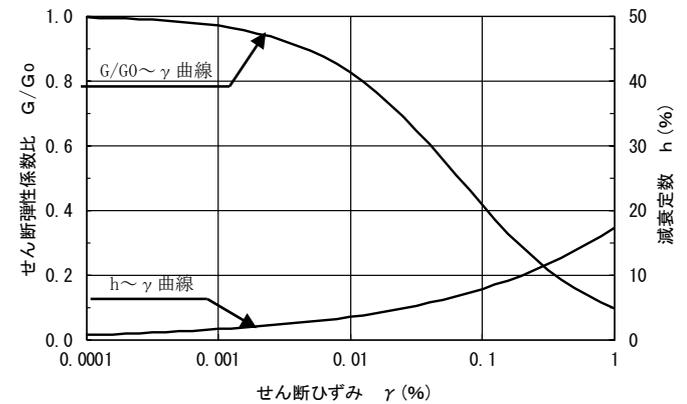
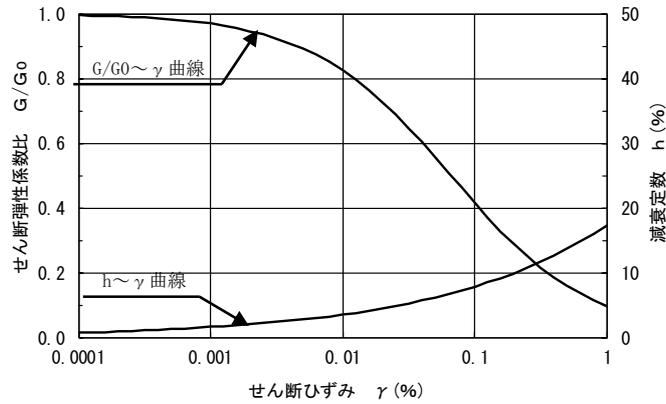
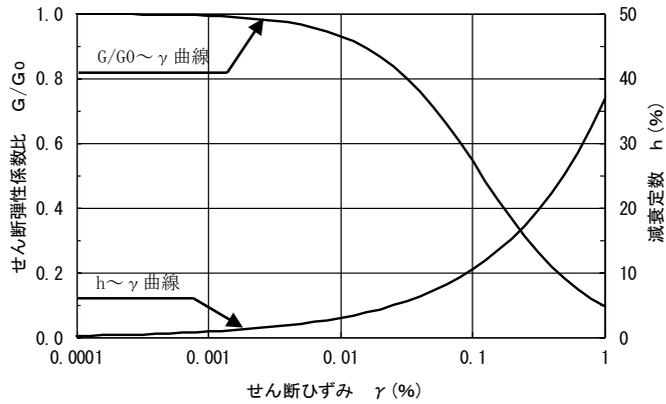
| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 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             |                            | 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             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-285.0m           | 17.3                                      | 0.42             | $7.90 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 17.8                                      | 0.41             | $9.18 \times 10^5$                      | —                 |

\* 1 : 地下水水位以深の物性値

(既工認物性)

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【解析条件：A-2,3】

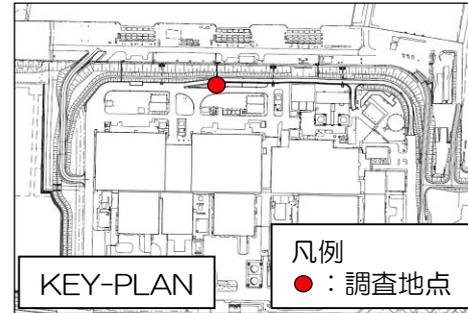


せん断剛性および減衰のひずみ依存性

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

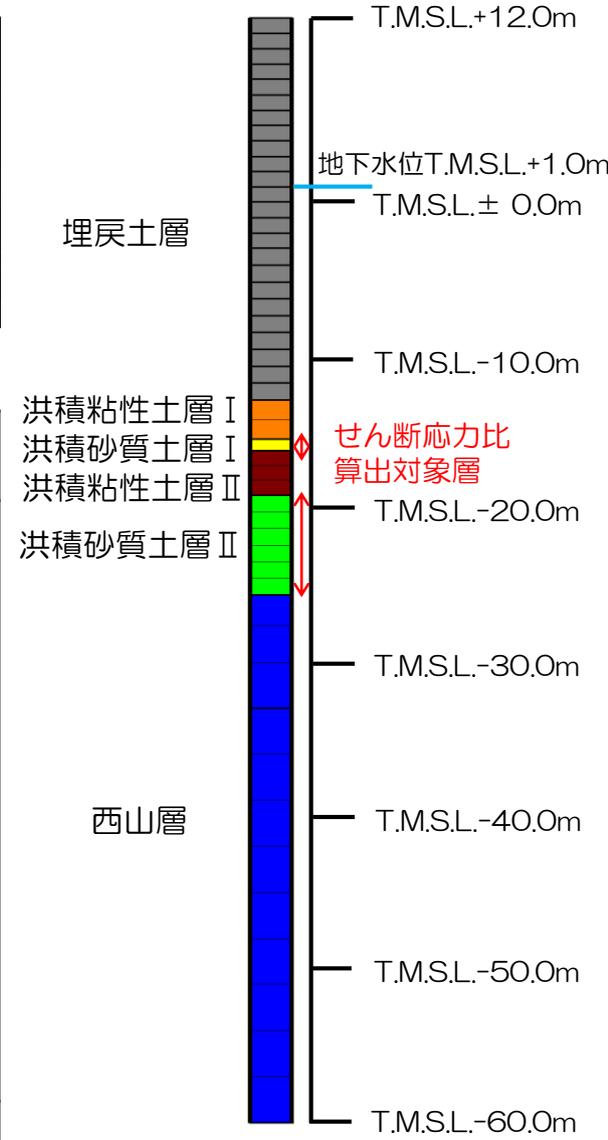
【解析条件：O-1】

- 下記の地盤モデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。



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 | $1980 \times \sigma_v'{}^{0.667}$ *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             | $1.05 \times 10^6$                      |                   |



解析モデル (O-1)

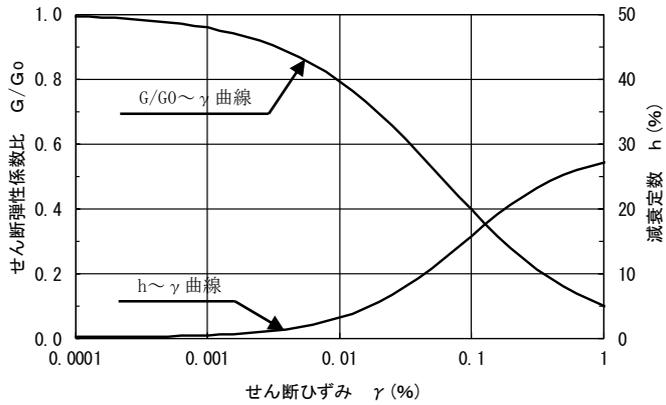
\* 1 : 地下水位以深の物性値

\* 2 : 下限値  $2.75 \times 10^4$  kN/m<sup>2</sup>

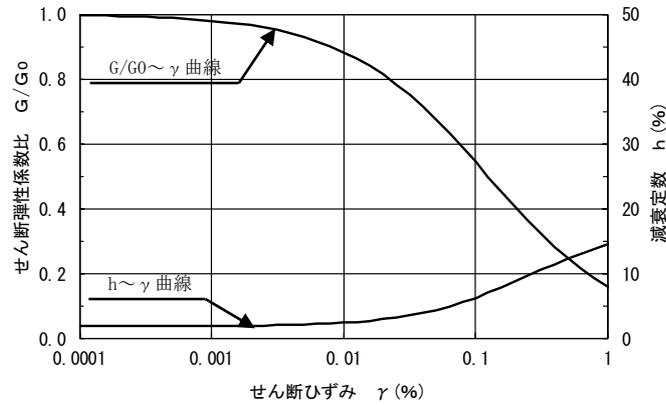
(既工認物性)

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

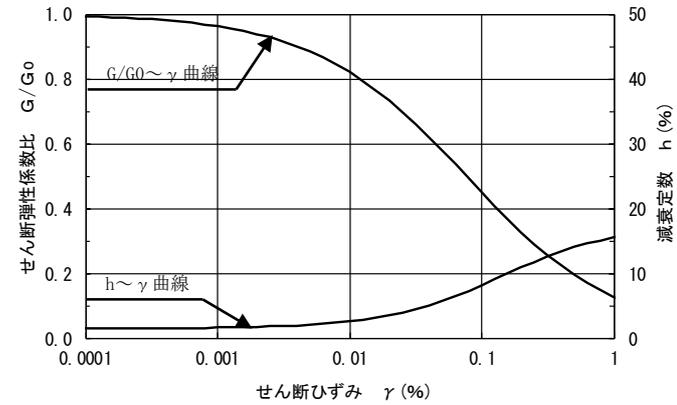
【解析条件：O-1】



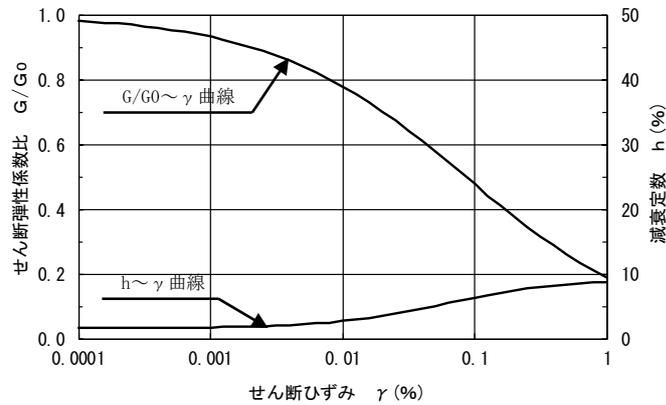
埋戻土層



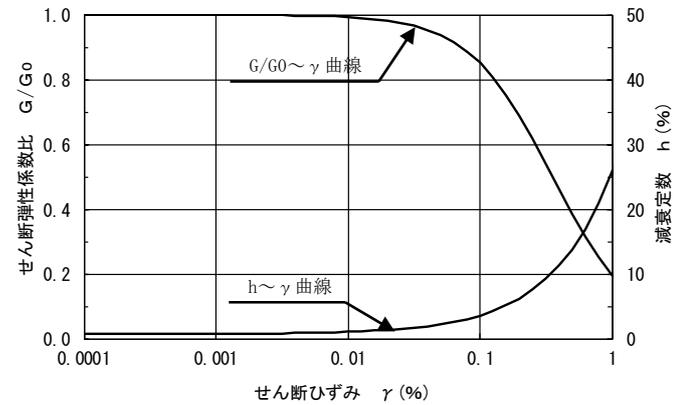
洪積粘性土層 I



洪積砂質土層 I, II



洪積粘性土層 II



西山層

せん断剛性および減衰のひずみ依存性

## 5. 試験結果の妥当性に関する考察

### 【解析結果】

### 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             |                   | 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>   | 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             | 200 <sup>*1</sup> | 0.46             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss2EW   | 0.55                                       | 15.0              | 0.55                                       | 17.6            | 0.52                                       | 19.1            | 0.47                                       | 24.2            | 0.53             | 200 <sup>*1</sup> | 0.64             | 126.8             | 0.55             | 20.4              | 0.32             | 200 <sup>*1</sup> | 0.34             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss2NS   | 0.52                                       | 17.8              | 0.53                                       | 17.9            | 0.53                                       | 19.1            | 0.51                                       | 20.3            | 0.53             | 200 <sup>*1</sup> | 0.60             | 200 <sup>*1</sup> | 0.56             | 20.9              | 0.25             | 200 <sup>*1</sup> | 0.25             | 200 <sup>*1</sup> |
| 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             | 200 <sup>*1</sup> | 0.44             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss4EW   | 0.49                                       | 20.9              | 0.50                                       | 20.7            | 0.50                                       | 22.1            | 0.47                                       | 25.1            | 0.48             | 200 <sup>*1</sup> | 0.53             | 200 <sup>*1</sup> | 0.48             | 60.9              | 0.34             | 200 <sup>*1</sup> | 0.37             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss4NS   | 0.34                                       | 200 <sup>*1</sup> | 0.36                                       | 23.9            | 0.37                                       | 40.9            | 0.37                                       | 31.3            | 0.39             | 200 <sup>*1</sup> | 0.42             | 200 <sup>*1</sup> | 0.40             | 200 <sup>*1</sup> | 0.22             | 200 <sup>*1</sup> | 0.23             | 200 <sup>*1</sup> |
| 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             | 200 <sup>*1</sup> | 0.48             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss5NS   | 0.49                                       | 3.7               | 0.51                                       | 5.1             | 0.53                                       | 4.7             | 0.53                                       | 4.9             | 0.52             | 200 <sup>*1</sup> | 0.61             | 200 <sup>*1</sup> | 0.54             | 4.4               | 0.24             | 200 <sup>*1</sup> | 0.25             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss6EW   | 0.54                                       | 22.5              | 0.57                                       | 22.7            | 0.57                                       | 20.4            | 0.57                                       | 20.3            | 0.57             | 200 <sup>*1</sup> | 0.62             | 200 <sup>*1</sup> | 0.59             | 22.6              | 0.40             | 200 <sup>*1</sup> | 0.44             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss6NS   | 0.48                                       | 12.8              | 0.50                                       | 16.5            | 0.50                                       | 14.8            | 0.49                                       | 14.7            | 0.52             | 200 <sup>*1</sup> | 0.57             | 200 <sup>*1</sup> | 0.53             | 10.8              | 0.27             | 200 <sup>*1</sup> | 0.27             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss7EW   | 0.53                                       | 18.8              | 0.56                                       | 17.3            | 0.58                                       | 15.3            | 0.59                                       | 14.2            | 0.58             | 200 <sup>*1</sup> | 0.67             | 38.7              | 0.62             | 15.1              | 0.48             | 200 <sup>*1</sup> | 0.51             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss7NS   | 0.45                                       | 5.0               | 0.48                                       | 6.8             | 0.50                                       | 5.3             | 0.50                                       | 5.5             | 0.51             | 200 <sup>*1</sup> | 0.56             | 200 <sup>*1</sup> | 0.52             | 7.1               | 0.29             | 200 <sup>*1</sup> | 0.31             | 200 <sup>*1</sup> |
| Ss8     | —                                          | —                 | —                                          | —               | —                                          | —               | —                                          | —               | —                | —                 | —                | —                 | —                | —                 | 0.33             | 200 <sup>*1</sup> | 0.35             | 200 <sup>*1</sup> |

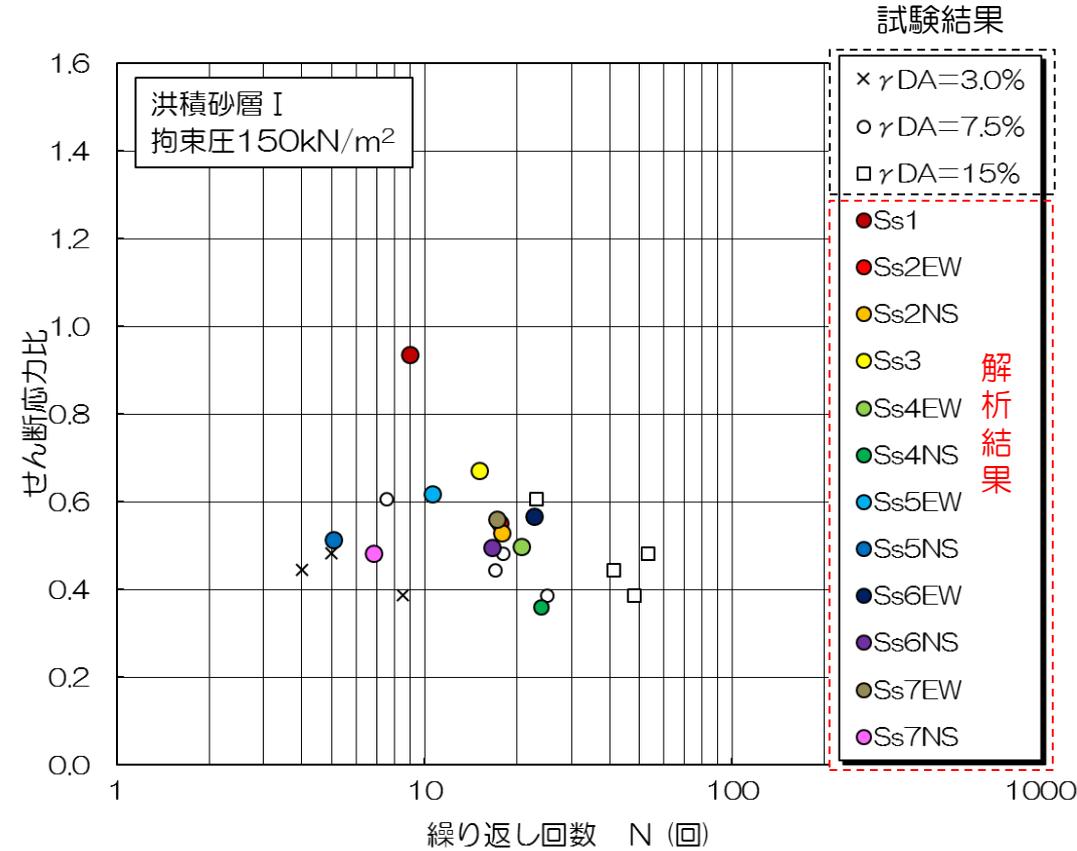
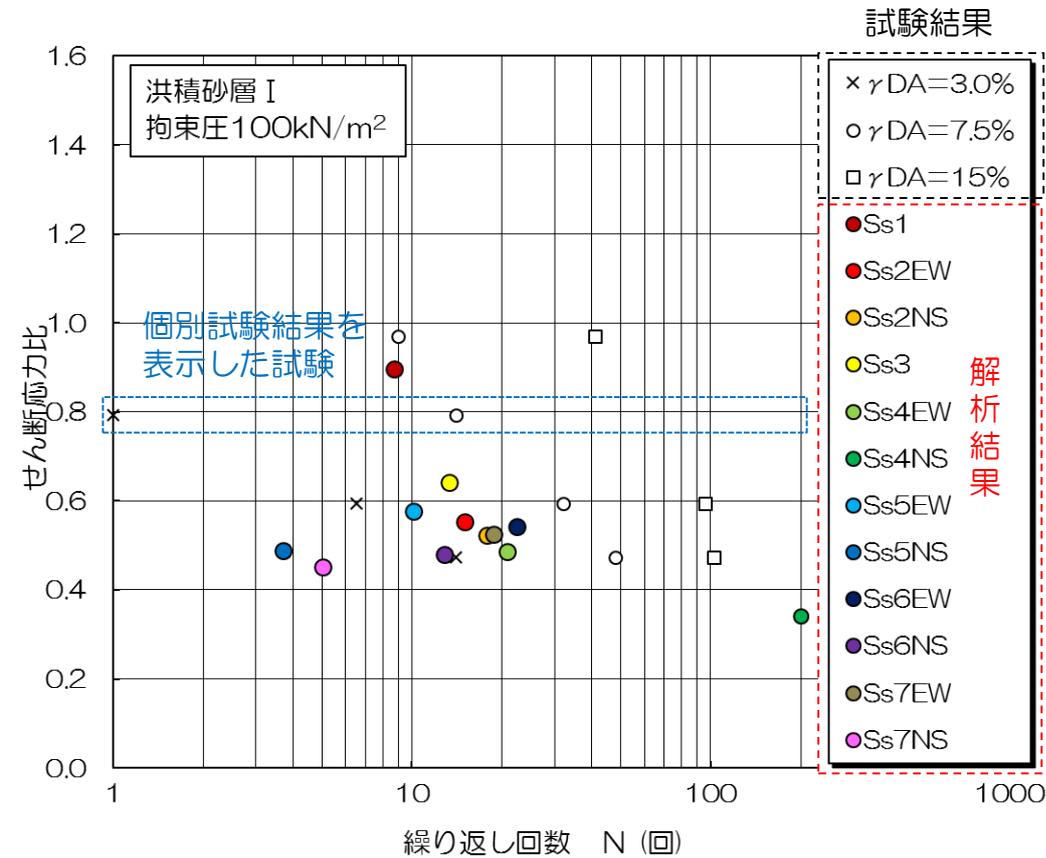
最大せん断応力比： $L_{max} = \tau_{max} / \sigma_v'$ ， $\tau_{max}$ ：最大せん断応力， $\sigma_v'$ ：有効土被り圧， $N_{eq}$ ：等価繰返し回数

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

# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂層 I (A-1)】

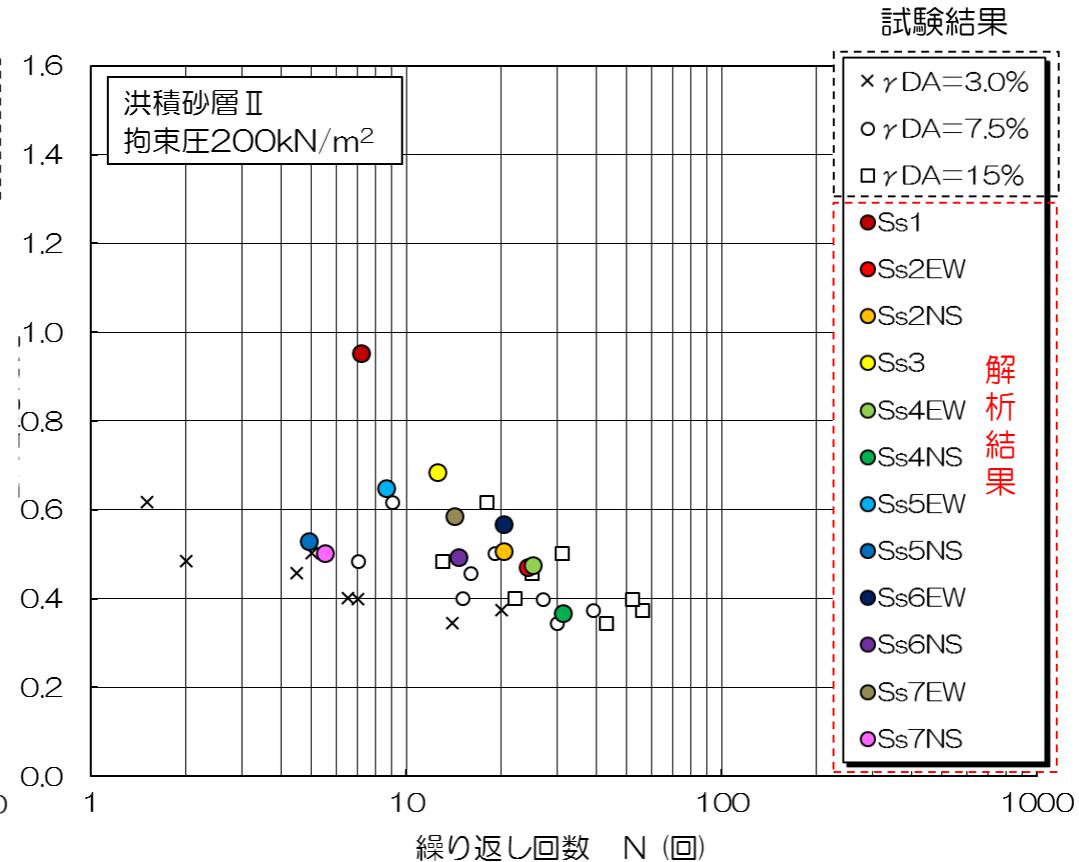
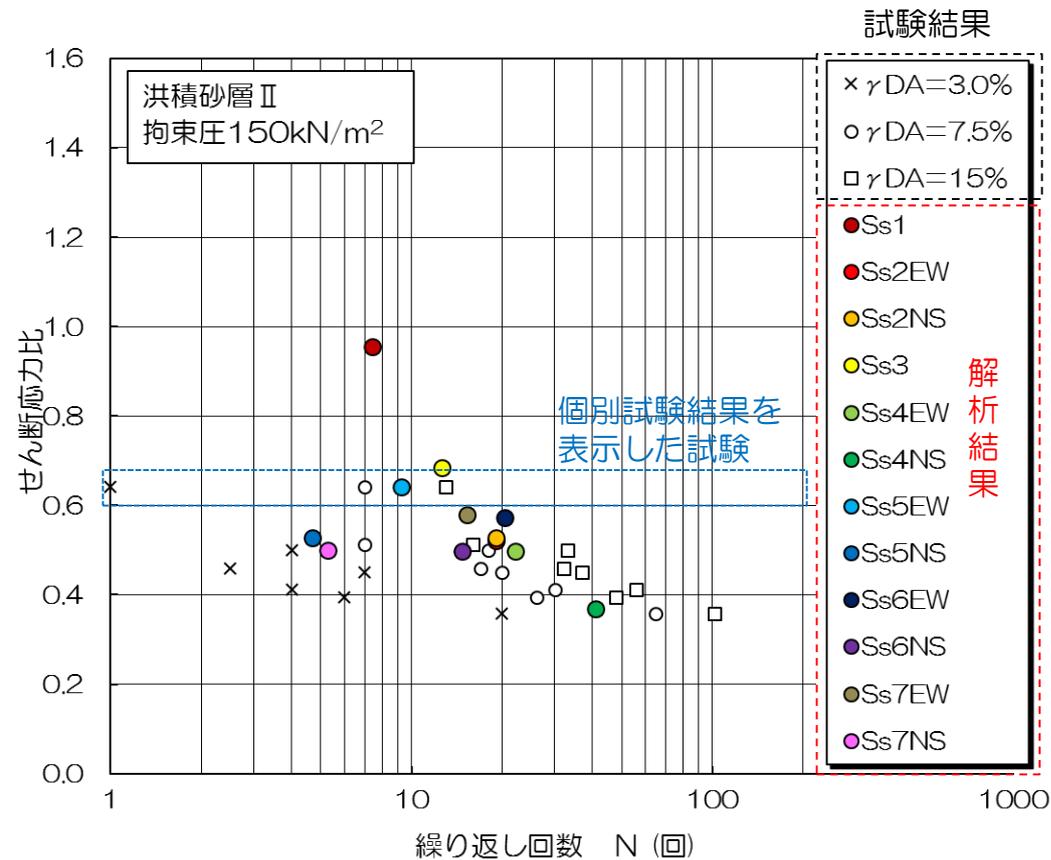
- 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。



# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂層Ⅱ (A-1)】

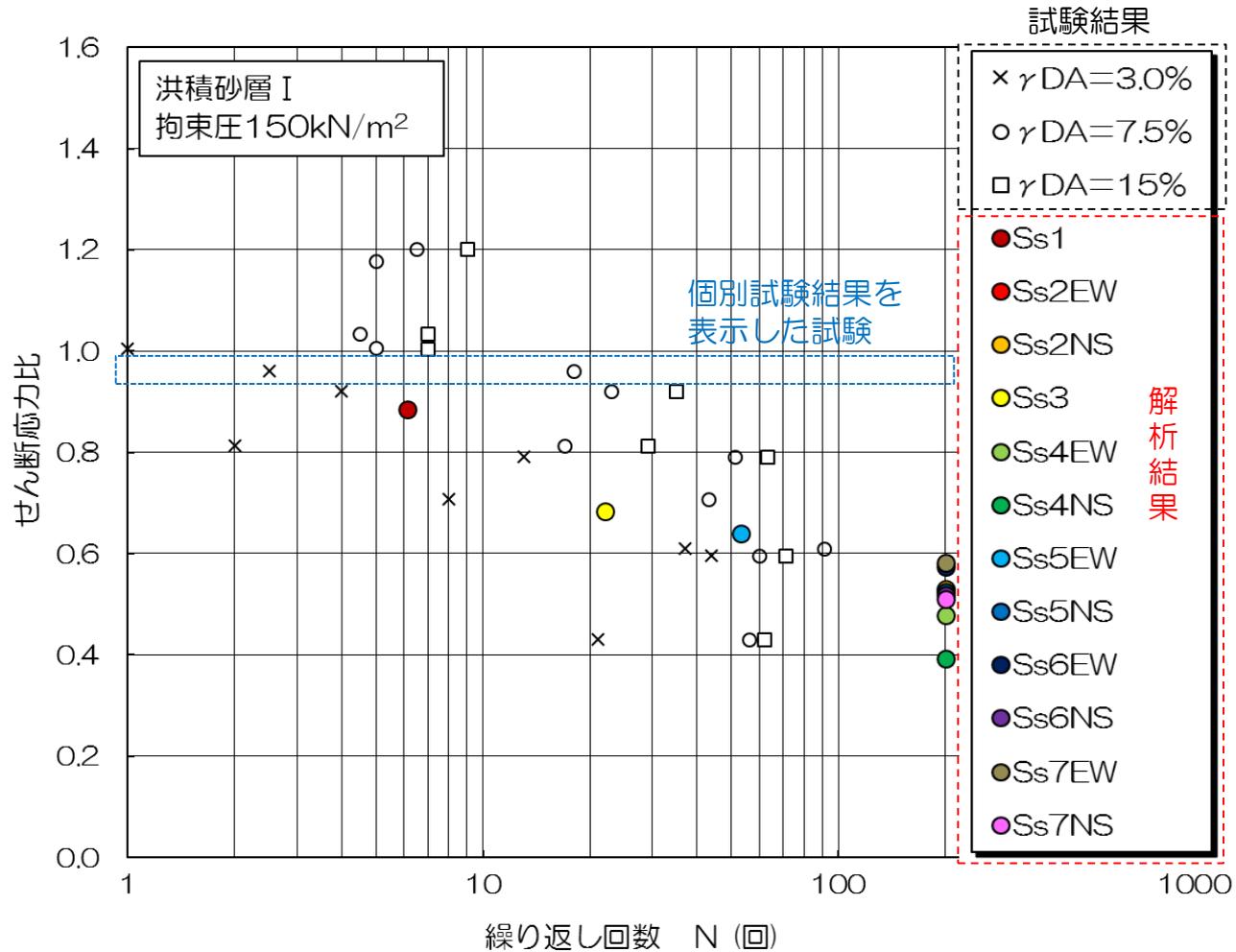
■ 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。



## 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂層 I (A-2)】

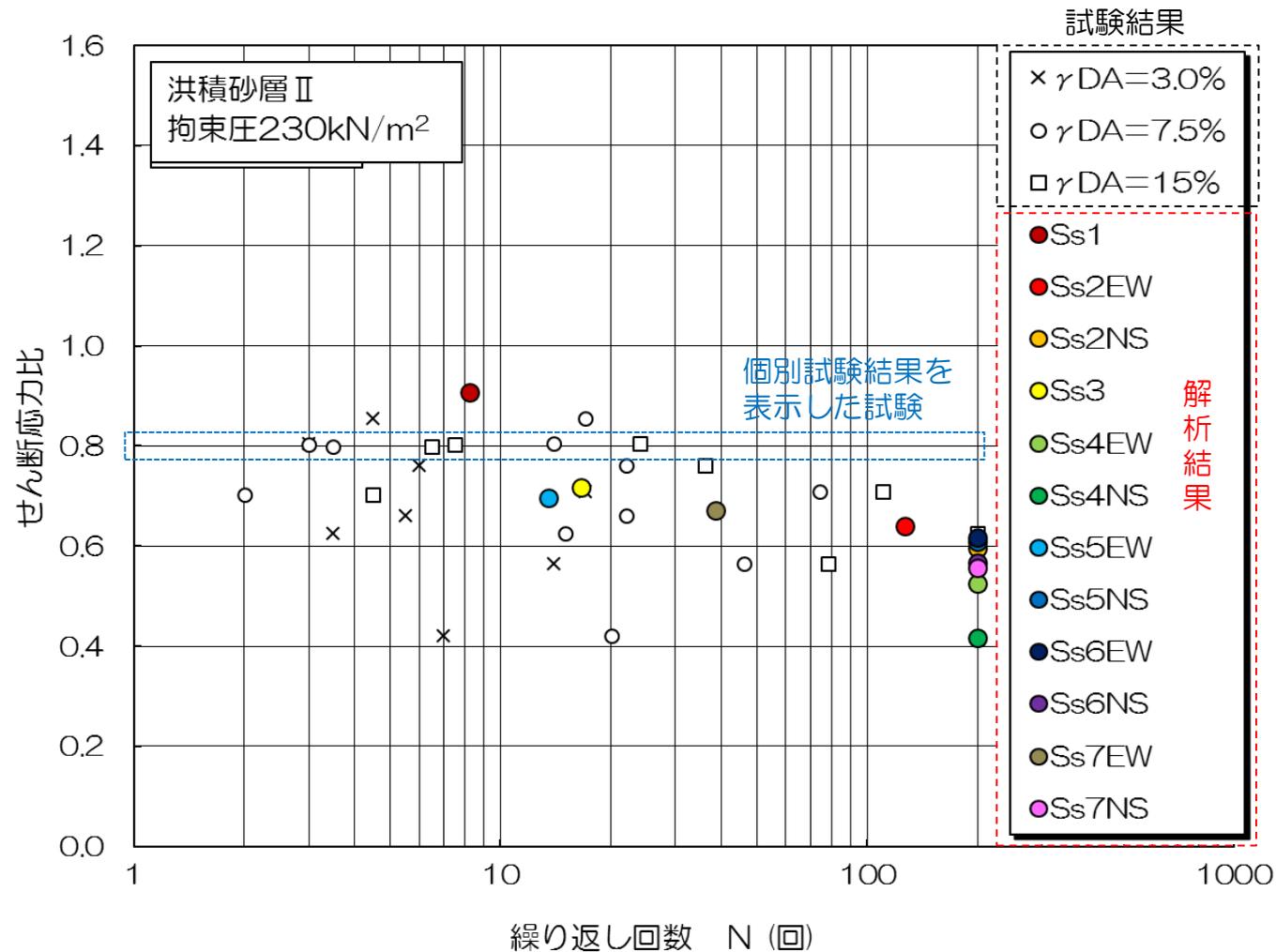
- 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。



## 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂層Ⅱ（A-2）】

- 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。

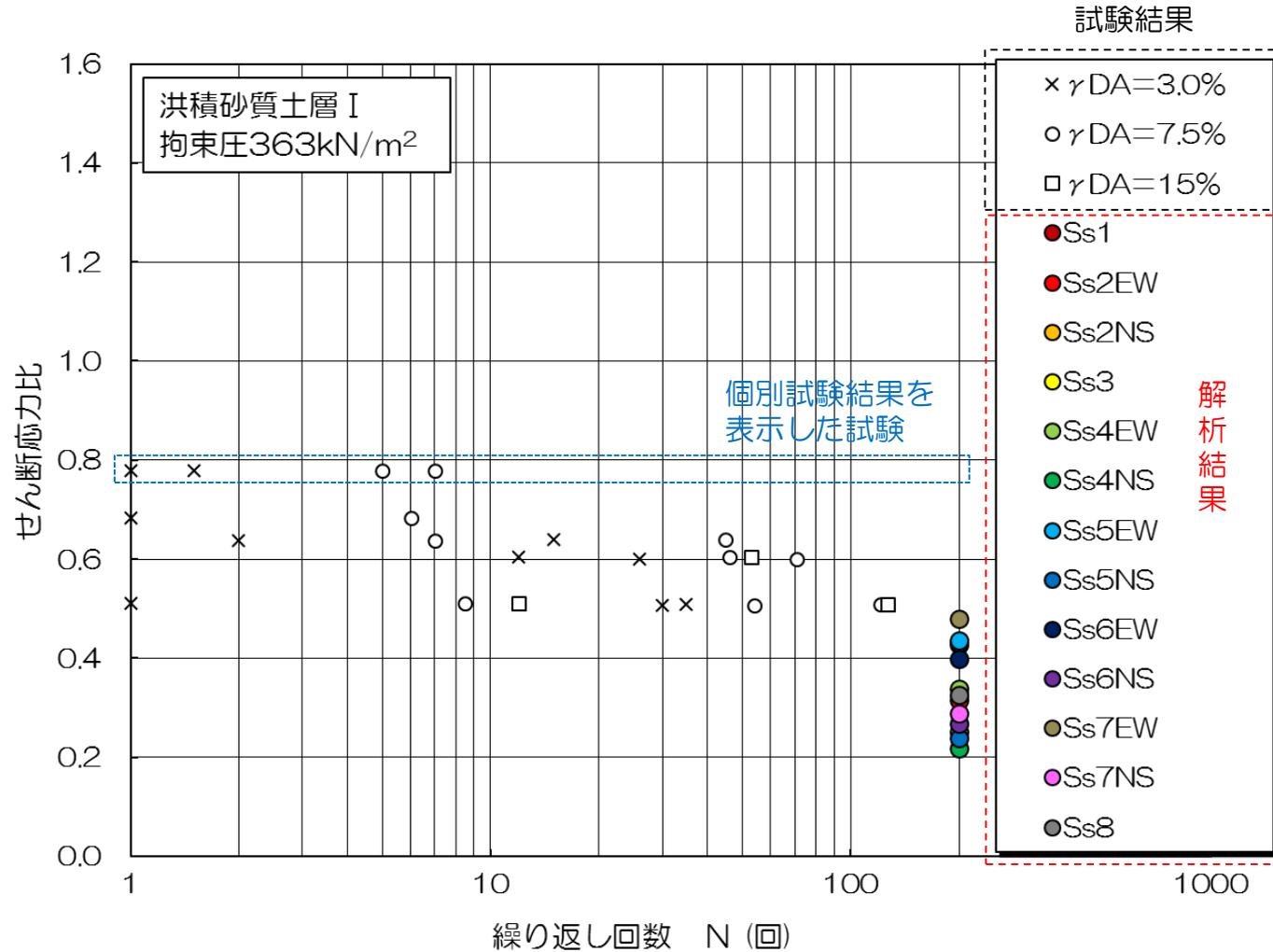




# 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂質土層 I (O-1)】

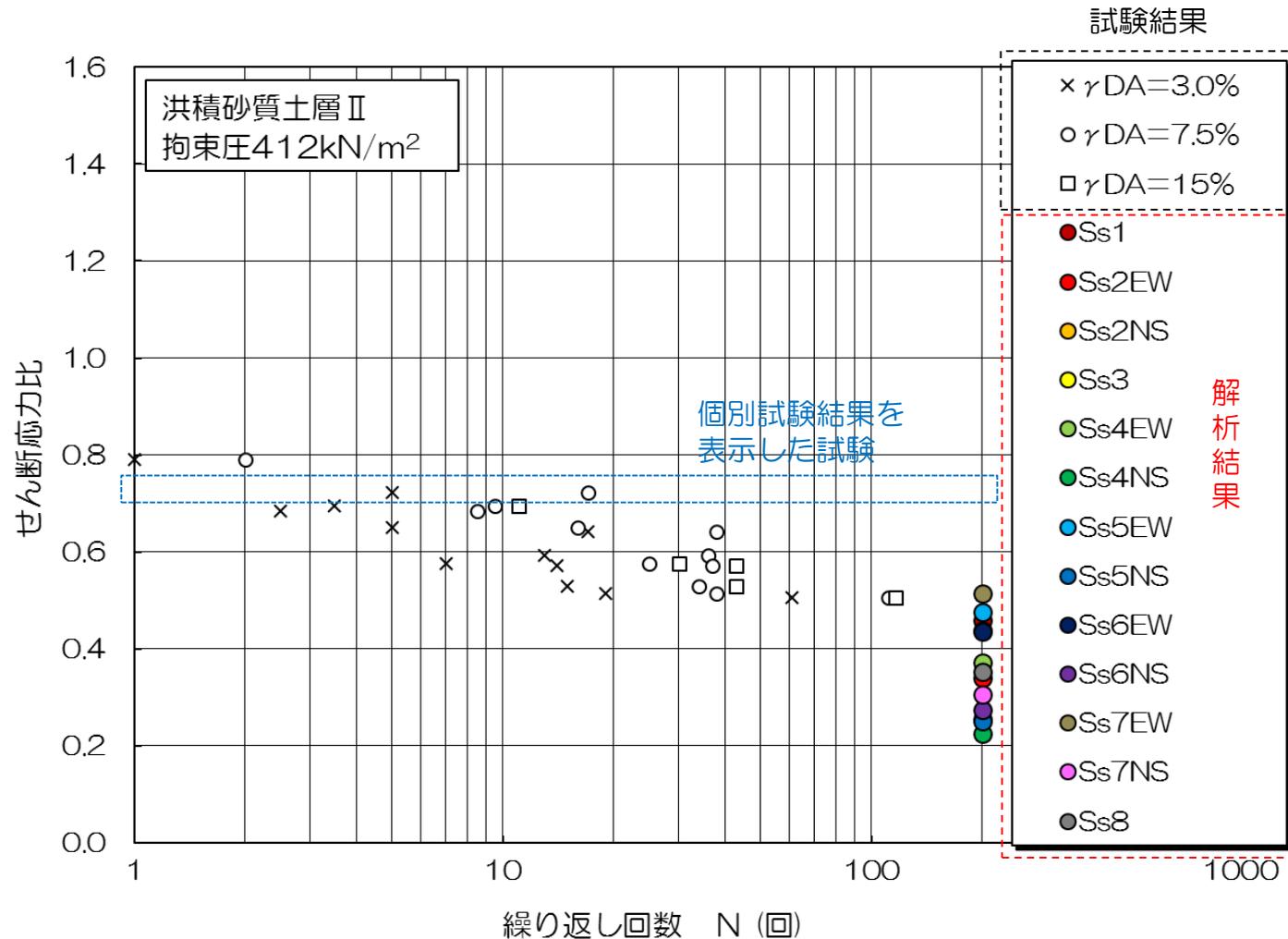
- 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。



## 5. 試験結果の妥当性に関する考察

【比較評価：洪積砂質土層Ⅱ (O-1)】

- 試験条件は、基準地震動Ss相当のせん断応力比および繰返し回数となっている。



## 5. 試験結果の妥当性に関する考察

### 【まとめ】

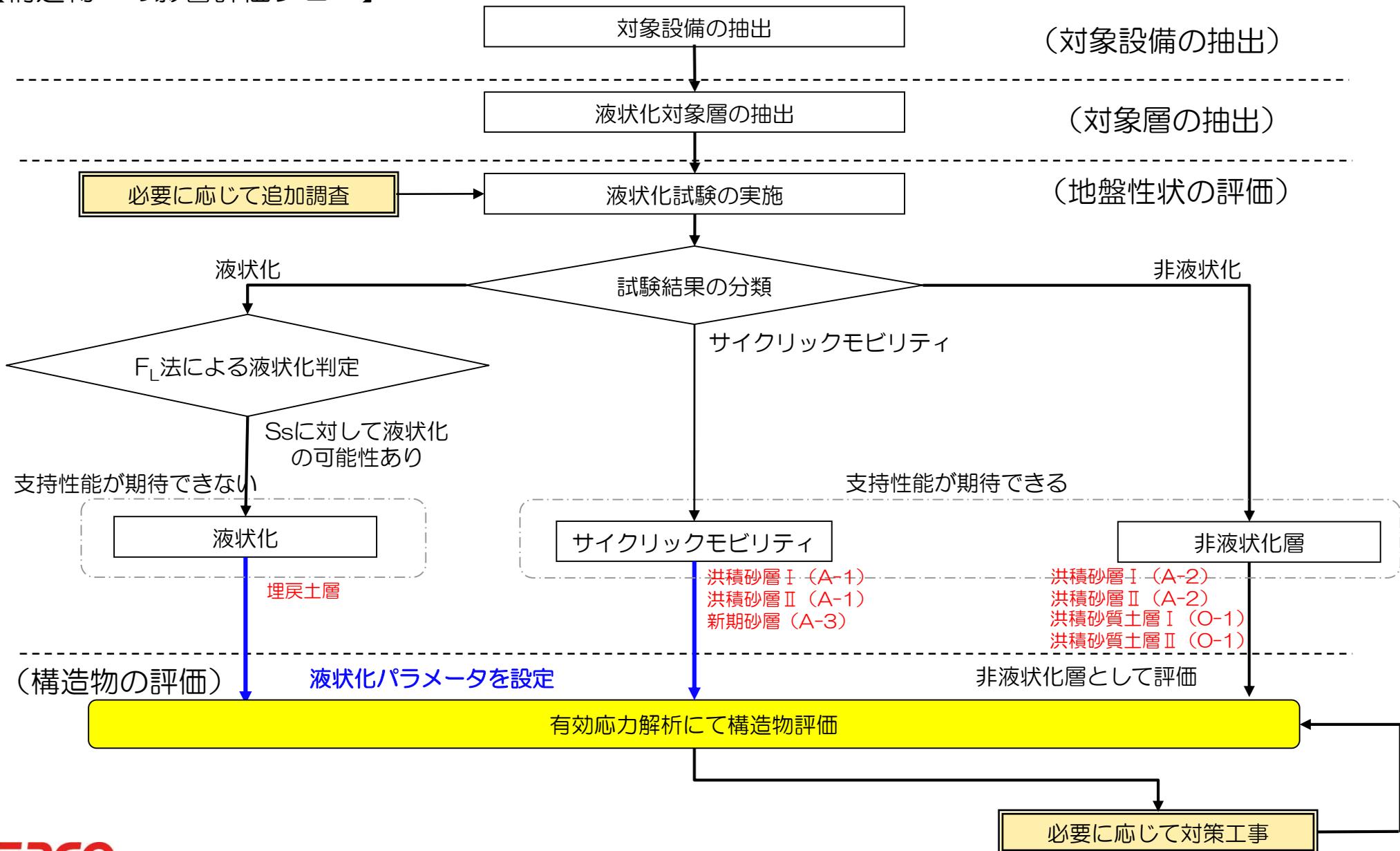
- 新期砂層および古安田層中の砂層における中空ねじり試験の結果は、基準地震動 $S_s$ 時のせん断応力比と等価繰返し回数と同等レベルである。
- よって、基準地震動 $S_s$ が当該地盤に作用した場合、試験と同様の状態となり、液状化する可能性はない。

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図  
②液状化関連の文献整理

## 6. 液状化影響の検討方針

【構造物への影響評価フロー】



## 6. 液状化影響の検討方針

- 液状化の構造物への影響評価については、有効応力解析を前提とした評価を実施する。また、試験の結果、サイクリックモビリティを示す地層についても、液状化パラメータを設定し、有効応力解析を実施する。なお、二次元有効応力解析には解析コード「FLIP」を用いることを基本とする。

|                |             |                                          |                                                              |
|----------------|-------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 対象層            | 埋戻土層        | 洪積砂層Ⅰ (A-1)<br>洪積砂層Ⅱ (A-1)<br>新期砂層 (A-3) | 洪積砂層Ⅰ (A-2)<br>洪積砂層Ⅱ (A-2)<br>洪積砂質土層Ⅰ (O-1)<br>洪積砂質土層Ⅱ (O-1) |
| 液状化判定          | 液状化         | サイクリックモビリティ                              | 非液状化                                                         |
| 有効応力解析における状態設定 | 液状化パラメータを設定 |                                          | 非液状化層として設定                                                   |

## 6. 液状化影響の検討方針

- 設置許可段階における有効応力解析の見通しについては、各構造物の基礎形式および地層構成に着目し、代表構造物について解析結果を示す。
- 杭基礎構造の代表としては、大湊側より基準地震動が大きな荒浜側に設置されている「荒浜側防潮堤」を抽出し、杭周辺地盤の液状化およびサイクリックモビリティの構造物影響を評価する。
- 直接基礎構造物の代表としては、「取水路」を抽出し、構造物周辺地盤の液状化の構造物影響を評価する。

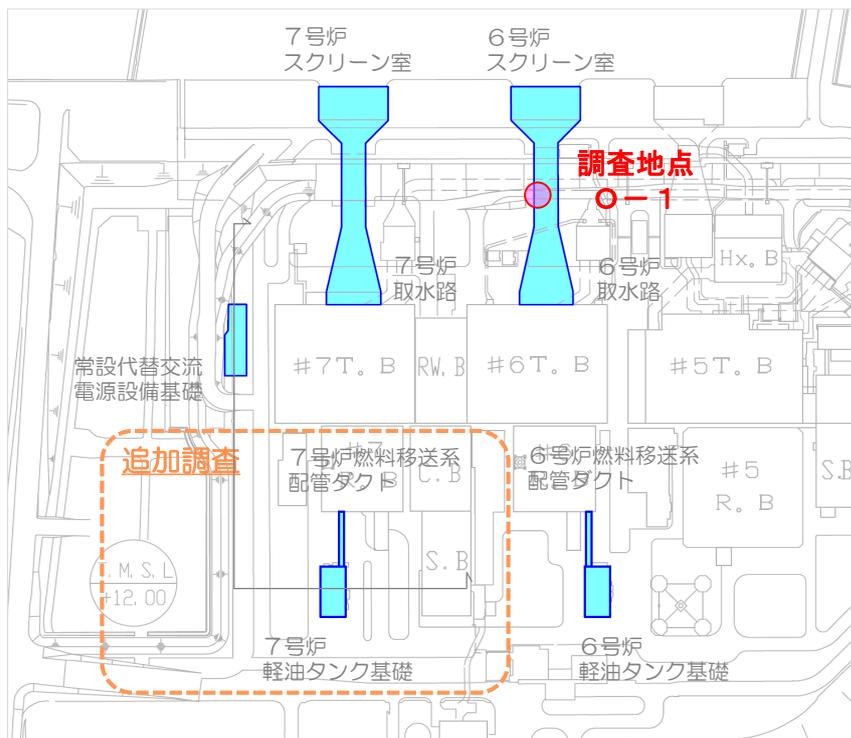
| 設備分類      |              | 設備名称             | 構造概要             | 支持層  | 設置場所 |
|-----------|--------------|------------------|------------------|------|------|
| 設計基準対象施設  | 屋外重要土木構造物    | スクリーン室           | 鉄筋コンクリート構造       | 古安田層 | 大湊   |
|           |              | 取水路              | 鉄筋コンクリート構造       | 古安田層 | 大湊   |
|           |              | 軽油タンク基礎          | 鉄筋コンクリート + 杭基礎構造 | 西山層  | 大湊   |
|           |              | 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  | 大湊   |
|           | 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  | 荒浜   |
|           | 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 | 荒浜   |
| 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              | 大湊   |      |

- 影響評価の結果によっては、必要に応じて追加対策を実施する。

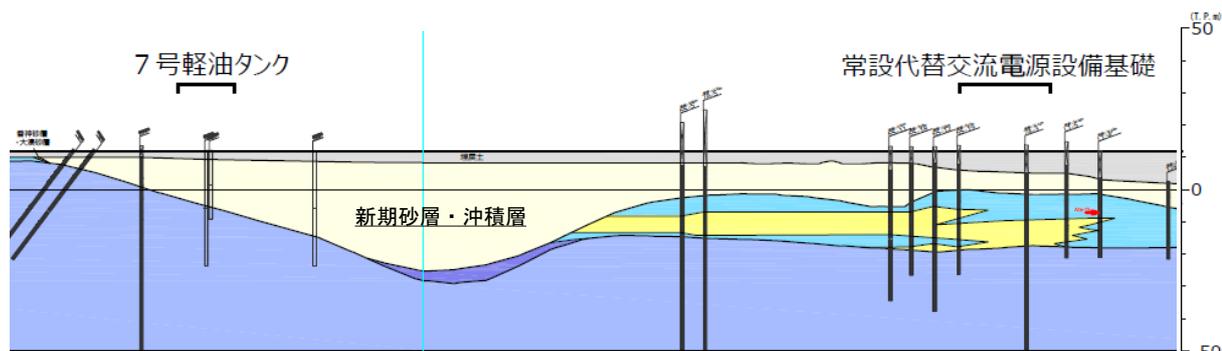
## 6. 液状化影響の検討方針

### 【大湊側の追加調査について】

- 代替交流電源設備や7号炉軽油タンク等の杭基礎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が、データ拡充の観点から大湊側の新期砂層・沖積層に対する調査を実施する。調査結果は、工認時にお示しする。



大湊側 調査位置図



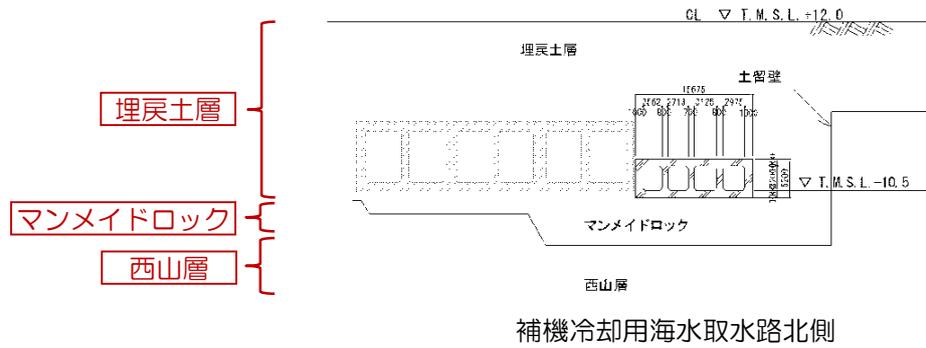
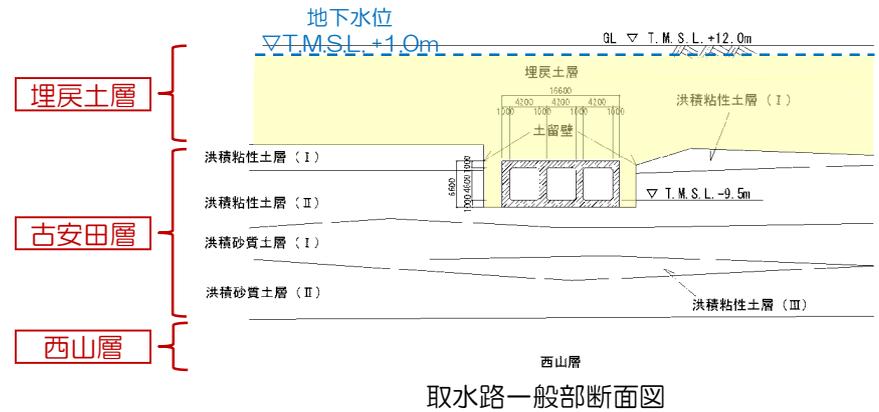
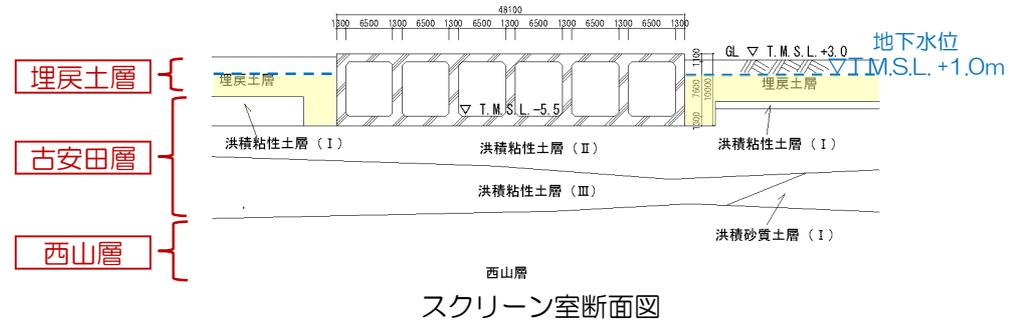
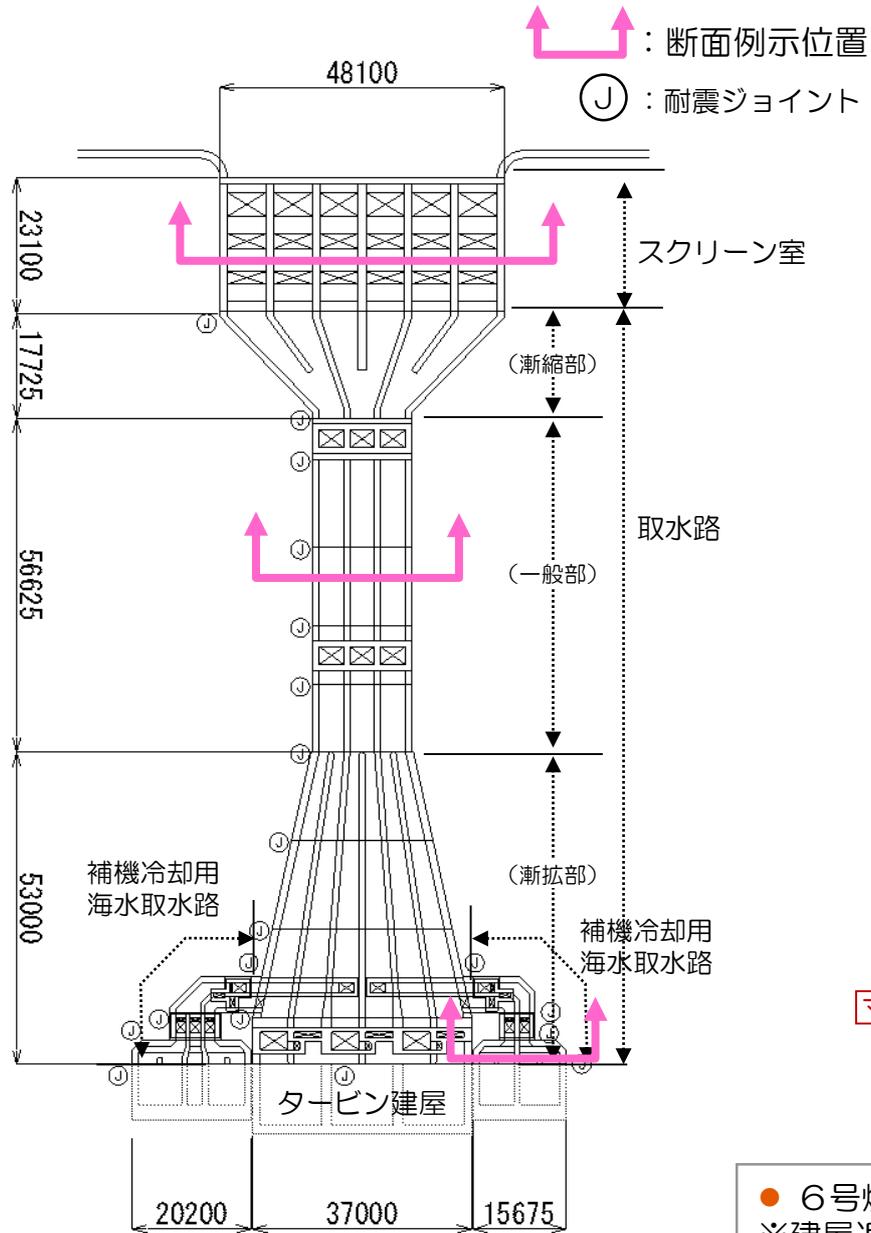
大湊側 地質断面図 (常設代替交流電源設備基礎～7号炉軽油タンク基礎)

以上

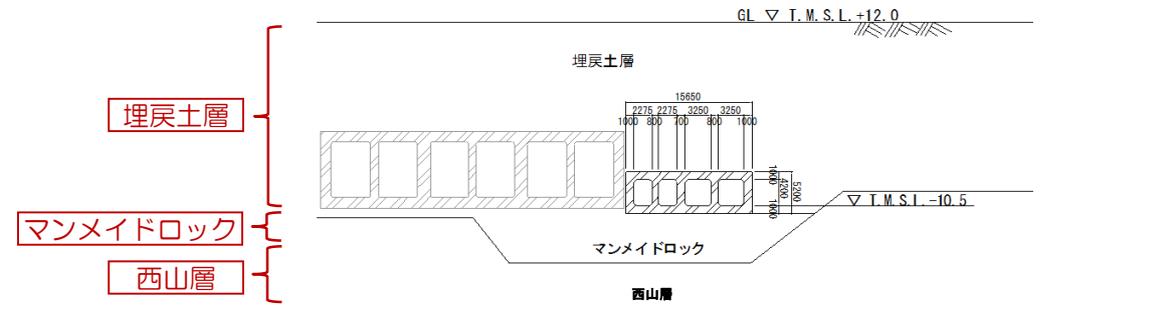
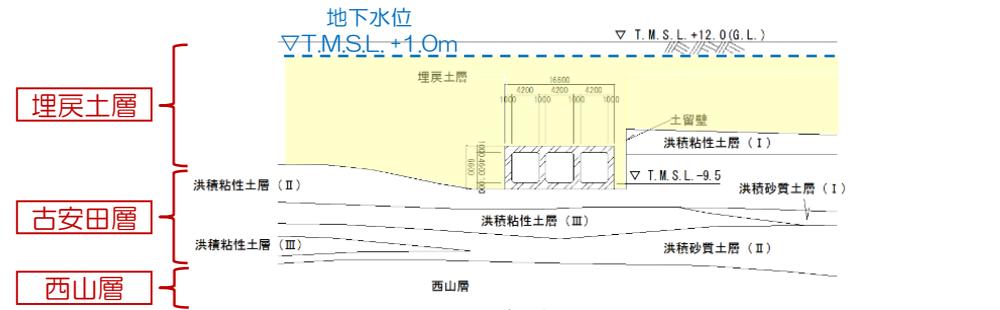
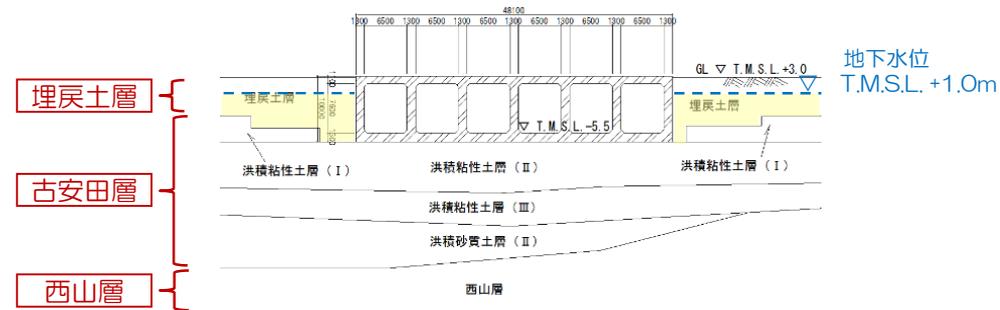
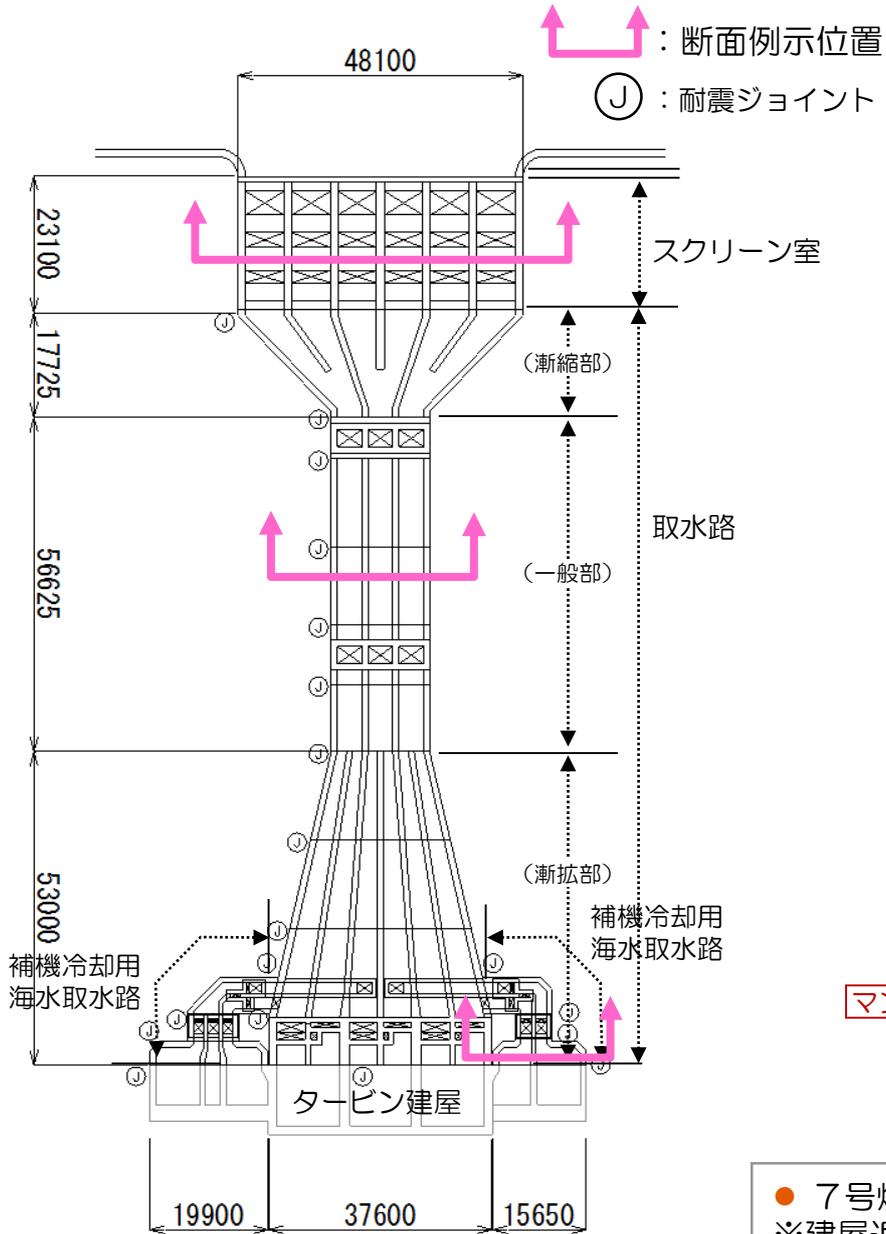
1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化試験結果
4. 液状化判定
5. 試験結果の妥当性に関する考察
6. 液状化影響の検討方針

(参考資料) ①評価対象構造物の断面図  
②液状化関連の文献整理

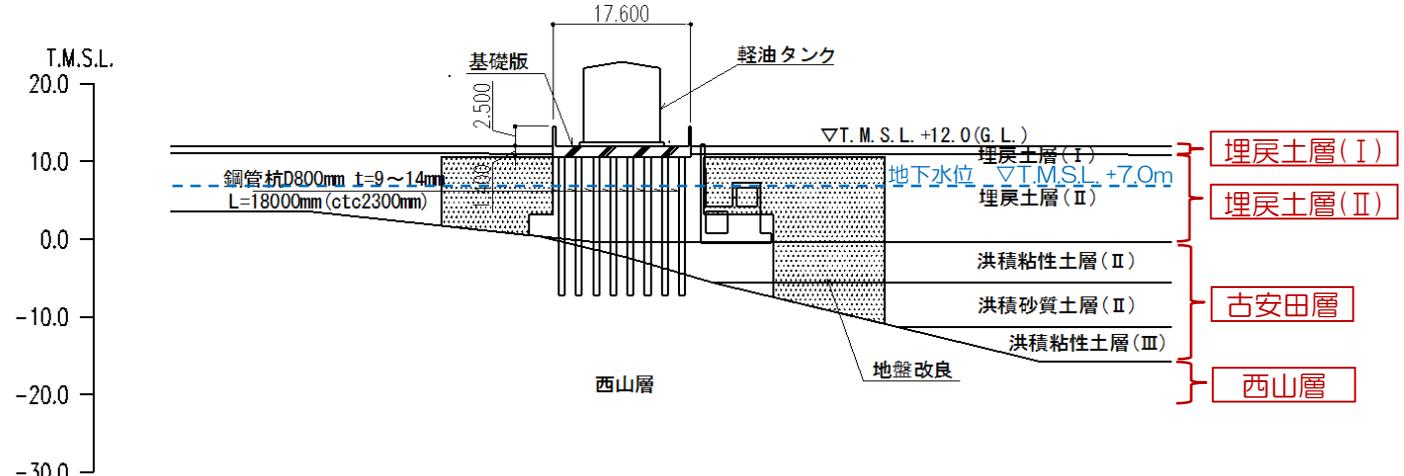
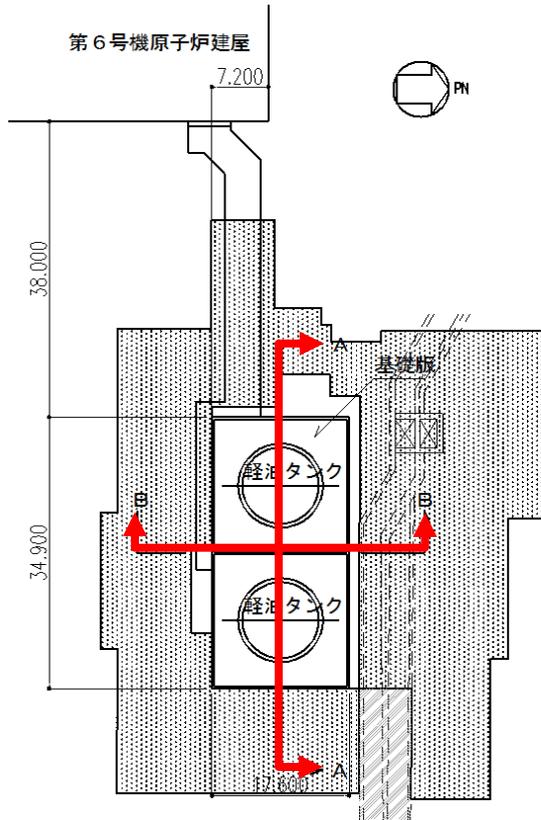
# ① 評価対象構造物の断面図



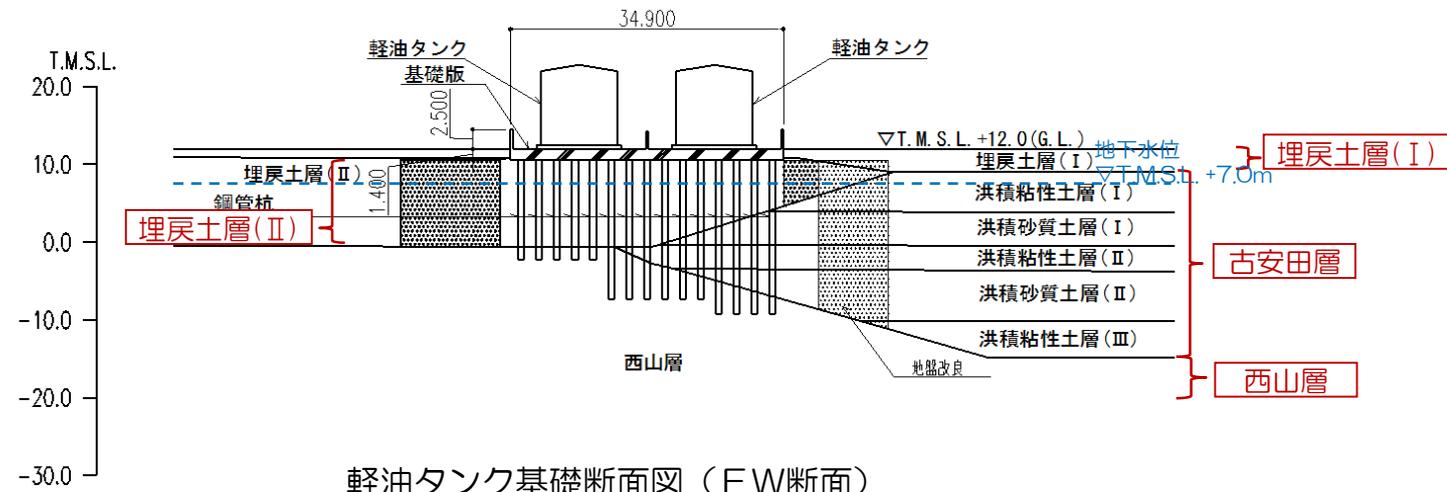
● 6号炉取水路の周辺には、地下水位以下に液状化層（埋戻土層）が存在する。  
 ※建屋近傍については、サブドレンにより地下水位は十分に低下している。



● 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）が存在する。  
 ※建屋近傍については、サブドレンにより地下水位は十分に低下している。



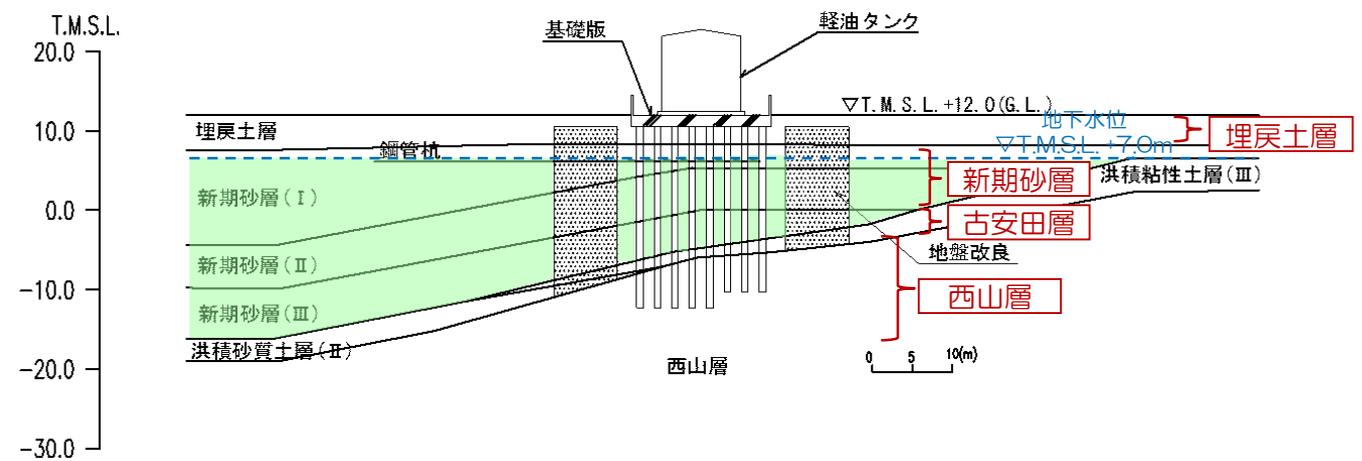
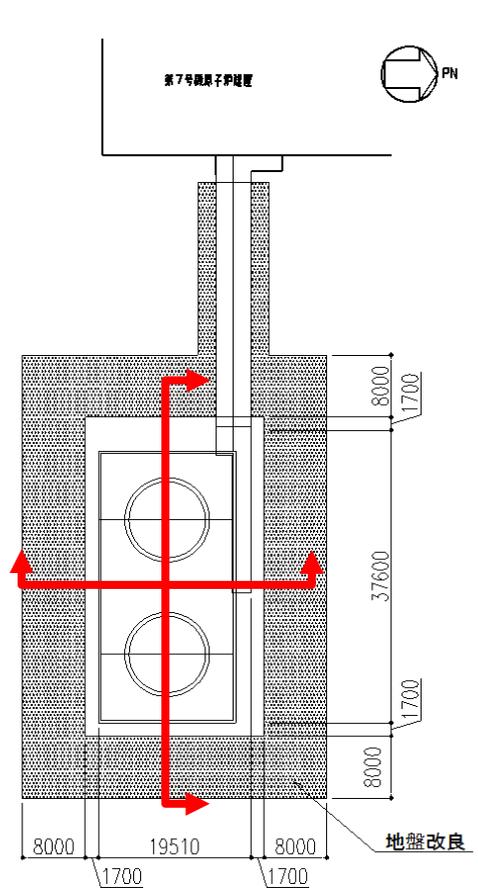
軽油タンク基礎断面図 (NS断面)



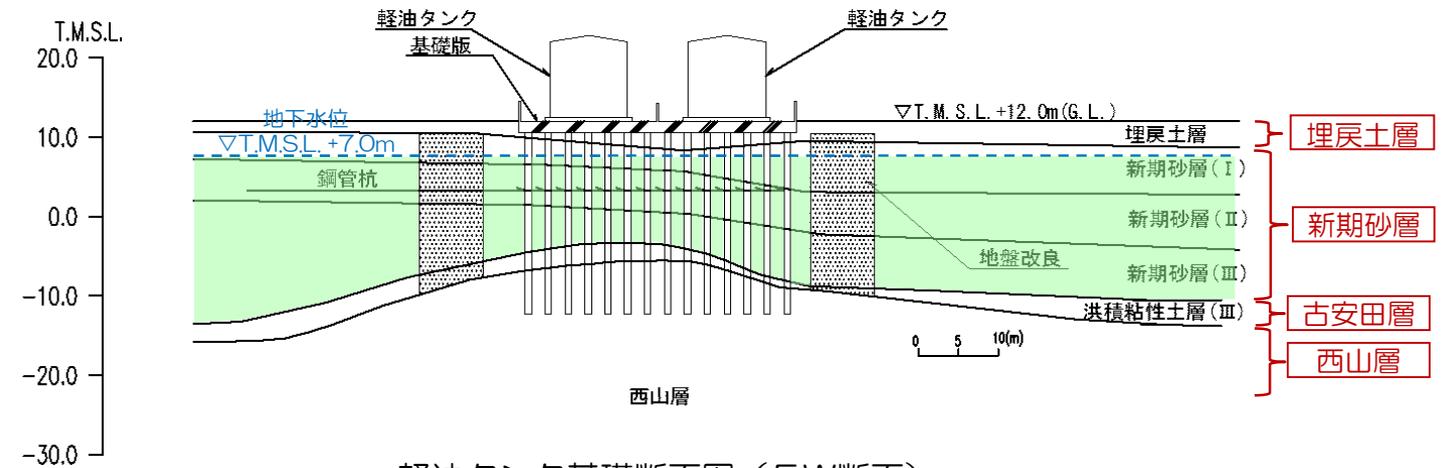
軽油タンク基礎断面図 (EW断面)

● 6号炉軽油タンク基礎の周辺には、地下水位以下に液状化層および影響評価対象層は存在しない。  
 ※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) 7号炉軽油タンク基礎

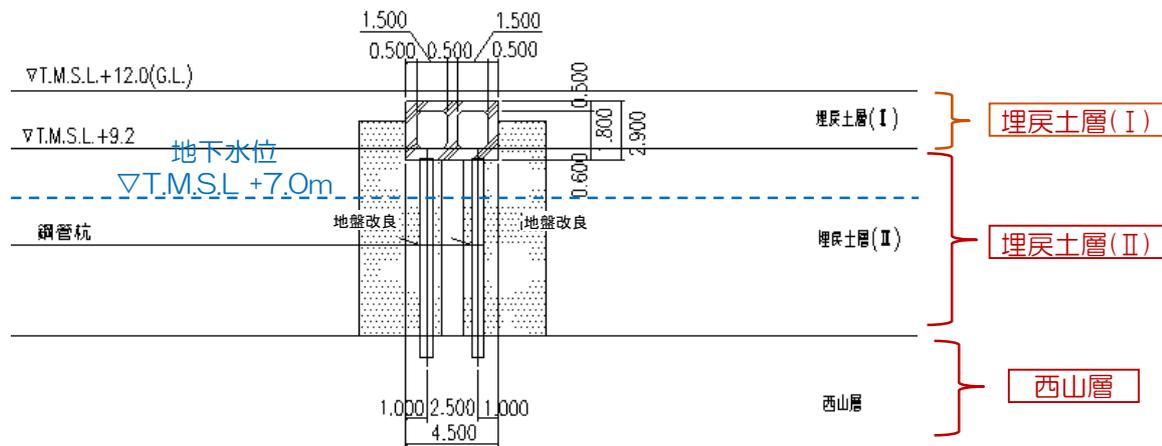
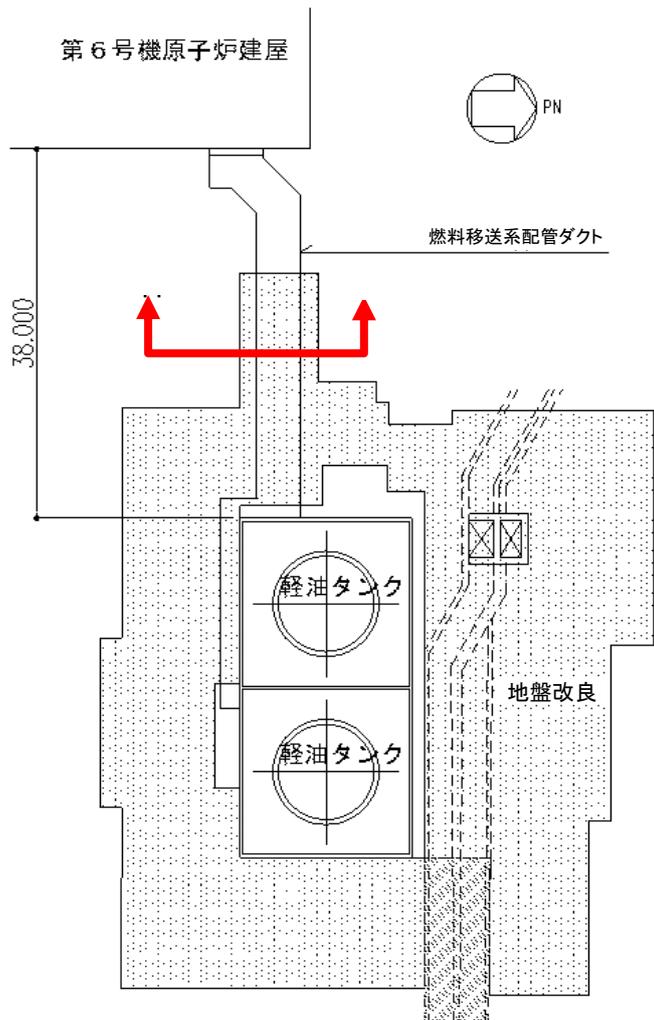


軽油タンク基礎断面図 (NS断面)



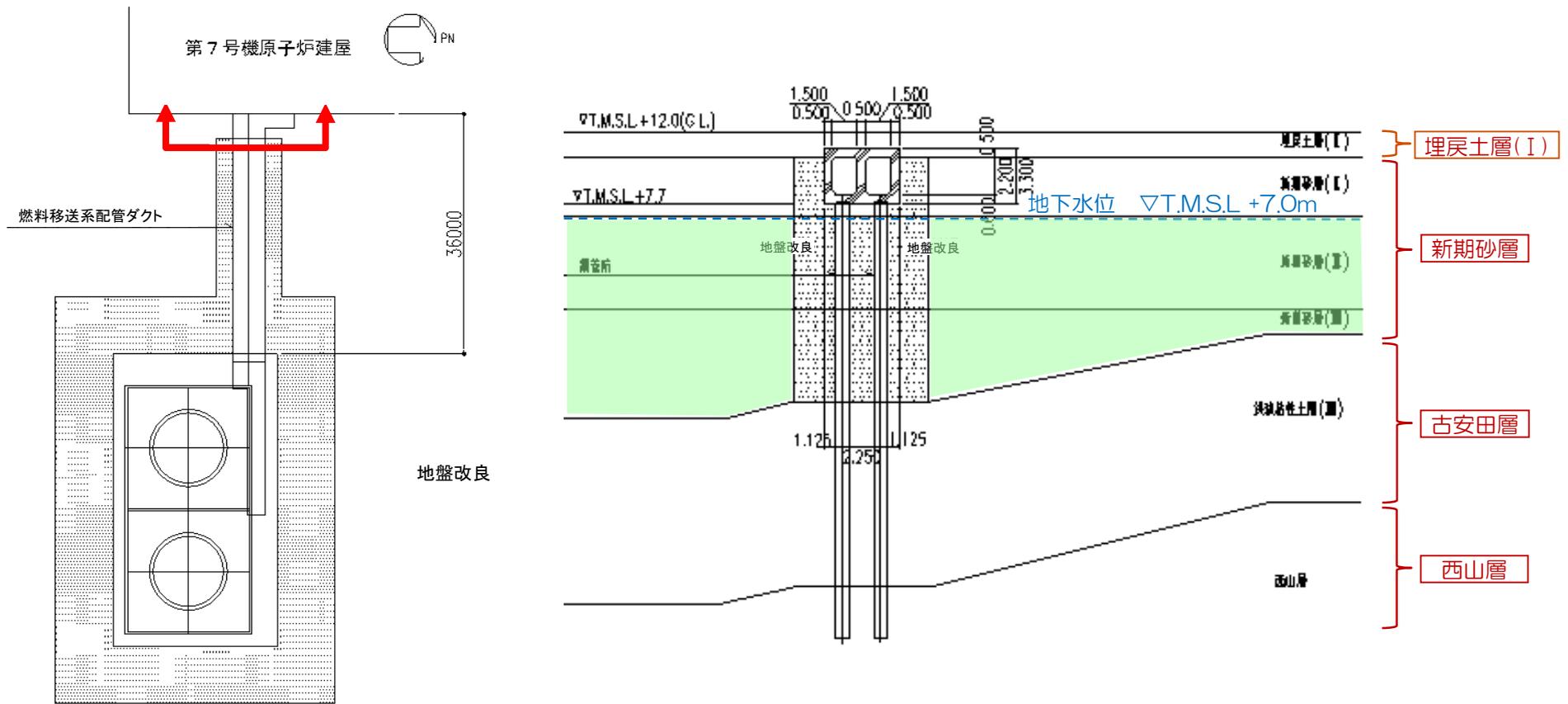
軽油タンク基礎断面図 (EW断面)

● 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）が存在する。



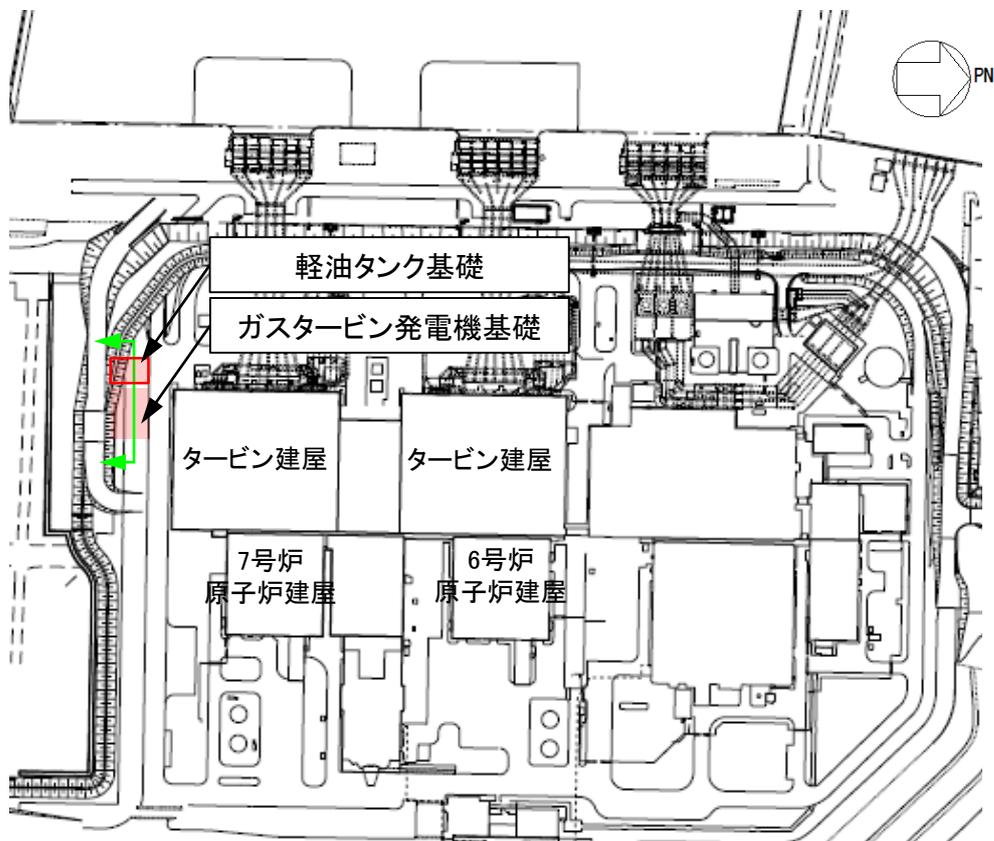
6号機燃料移送系配管ダクト断面図

- 6号炉燃料移送系配管ダクトの周辺には、地下水位以下に液状化層および影響評価対象層は存在しない。  
 ※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。

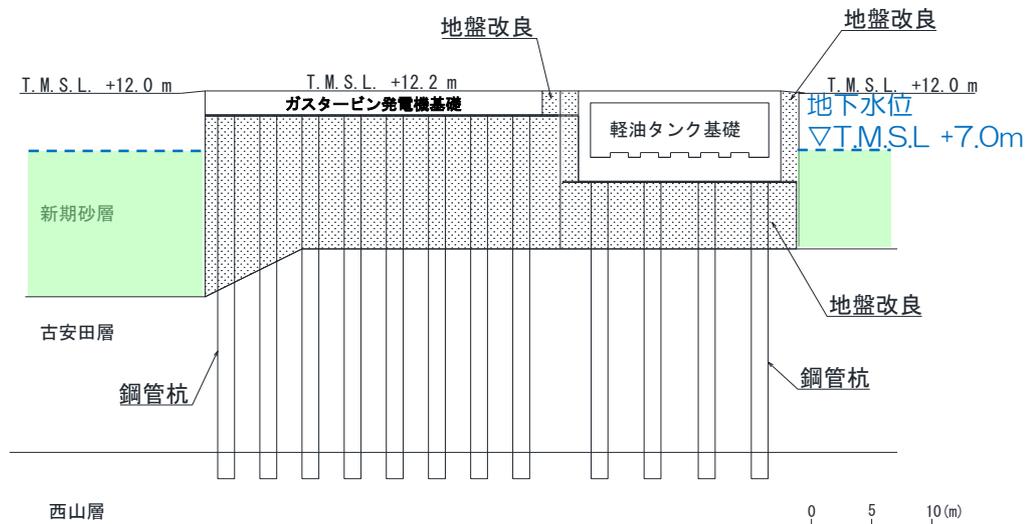


7号機燃料移送系配管ダクト断面図

● 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）が存在する。

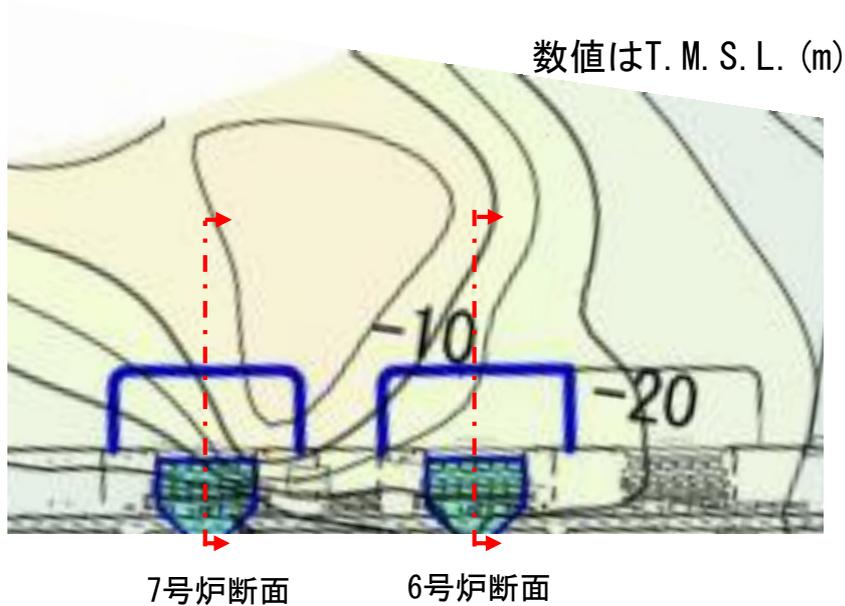


大湊側配置図

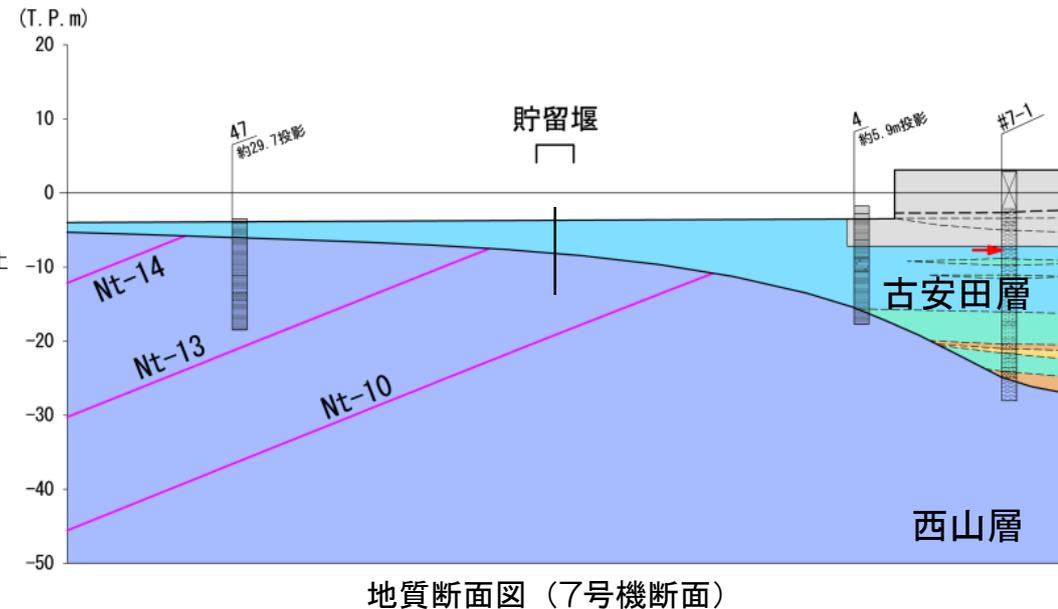
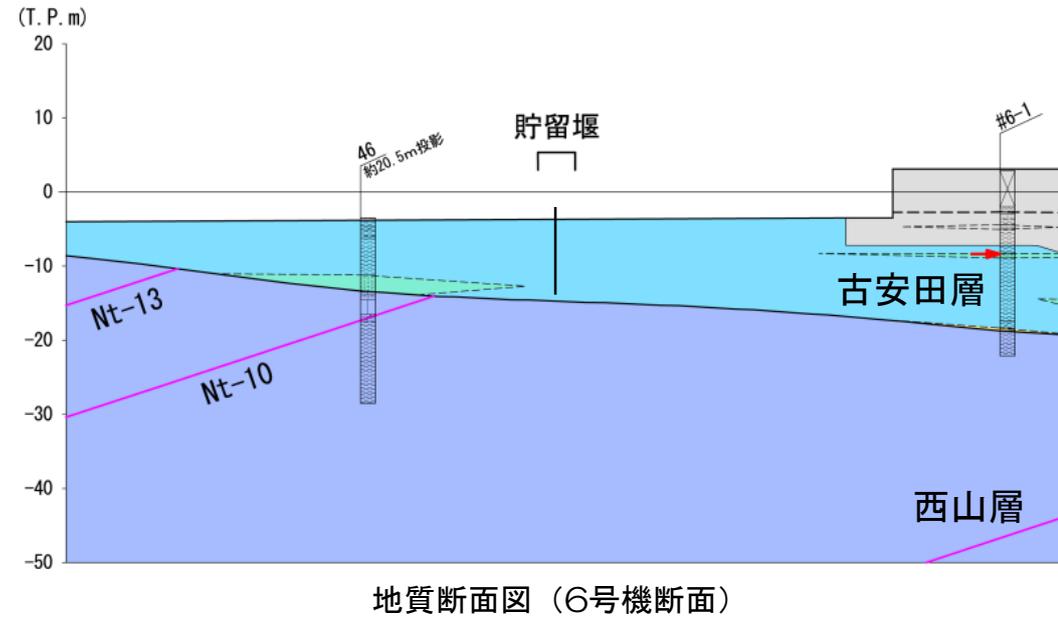


常設代替交流電源設備基礎断面図 (EW断面)

- 常設代替交流電源設備基礎の周辺には、地下水位以下に影響評価対象層（新期砂層）が存在する。



西山層上限面図と貯留堰との位置関係



地質凡例

|      |          |
|------|----------|
|      | 盛土・埋め戻し土 |
| 古安田層 |          |
|      | 火山灰      |
|      | シルト層     |
|      | 砂・シルト互層  |
|      | 砂層       |
|      | 礫層       |
| 西山層  |          |
|      | 泥岩       |
|      | 鍵層       |

● 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。

## ②液状化関連の文献整理

# 試験方法

安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，1991年5月

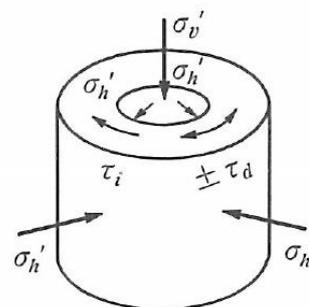
表 3-3 室内液状化試験装置の種類と特徴

| 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>(初期せん断応力が加わることもある)        | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 多方向ランダム波           |
| 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>正弦波またはランダム波 |
| 繰返し単純せん断                                      | NGI 型<br>       |         |                          | 異方応力状態<br>(準 $K_0$ 圧密;<br>$K_0$ 未知)<br>(初期せん断応力も可) | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 多方向<br>正弦波またはランダム波 |
|                                               | Cambridge 型<br> |         |                          | 異方応力状態<br>( $K_0$ 圧密)<br>(初期せん断応力も可)               | 平面ひずみ<br>単純せん断変形 | 一方向<br>正弦波またはランダム波 |

安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，1991年5月

### 繰返しねじりせん断装置（動的ねじりせん断装置）

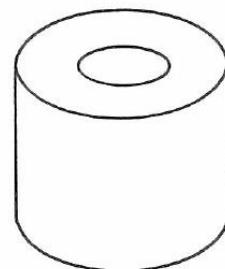
- 繰返しねじりせん断試験では中空円筒や中実円柱の供試体を用い，これにねじりせん断力を加える。
- 円筒や円柱では半径方向にせん断ひずみの値が異なってくるため，その影響をなるべく少なくするため，中空円筒の供試体の方がよく用いられる。
- 供試体には図3-8 (a) に示したように初期の拘束圧や初期せん断力を加えておいた後，繰返しせん断力を加える。
- 地盤内での応力状態に合わせて異方応力（軸圧と側圧が異なる）にしたり，斜面内や構造物下の地盤の状態を再現するために初期せん断力を加えたり，さらに，側圧でも外圧と内圧とを違って三主応力が異なるようにすることができる。



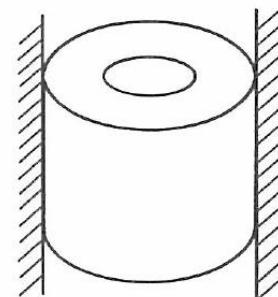
$\sigma_v'$ ：有効鉛直圧  
 $\sigma_h'$ ：有効水平圧  
 $\tau_i$ ：初期せん断力  
 $\tau_d$ ：繰返しせん断力

通常の液状化試験では  
 $\sigma_v' = \sigma_h' = \sigma_0'$  と等方に  
 することが多い

(a) 応力状態



自由 (平面応力)



拘束 (平面ひずみ)

(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

社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，平成21年11月

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 | 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)               |
|          | 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>室内ベーンせん断試験 (第8章)                                                                                  |       |                                                        |
| 主応力載荷型   | 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) |
|          | 平面ひずみ試験 (第8章)<br>三主応力制御試験 (第8章)                                                                                                          |       |                                                        |

社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，平成21年11月

### 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。

澤田俊一，三上武子，吉田望，竹島康人，藤井紀之：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

- ▶ 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。

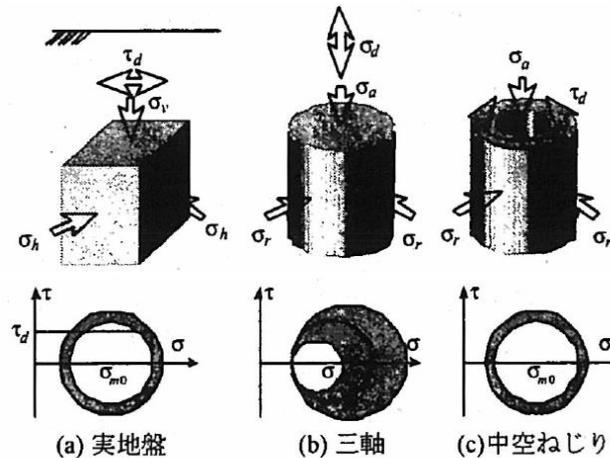


図2.1 室内試験における応力状態

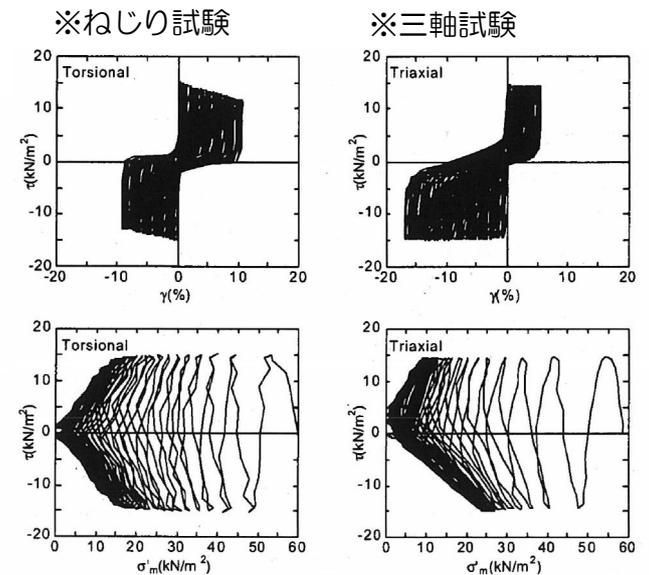


図3.3 三軸試験と中空ねじり試験の代表的な応力-ひずみ関係と応力経路

# サイクリックモビリティ (密な砂地盤における挙動)

社団法人地盤工学会：地盤工学用語辞典，pp219-220，平成18年3月

### サイクリックモビリティー

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ーといい、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、引き続く载荷に対して大きいひずみが発生しない。

龍岡文夫：サイクリック・モビリティ (Cyclic Mobility) ， 土と基礎， 28-6，  
1980年6月

### 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。

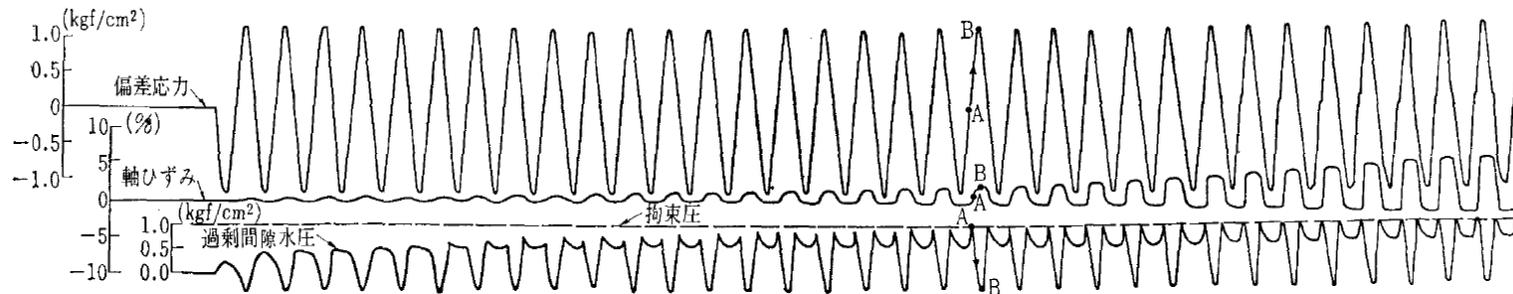


図-1 不飽和状態 ( $w=8\%$ ) でタンピングして作製した Monterey No. 0 砂の振動三軸試験結果 ( $D_r=79\%$ ，背圧  $1 \text{ kgf/cm}^2$ ，初期圧密応力  $\sigma_c'=1 \text{ kgf/cm}^2$ ，偏差応力比  $\sigma_{dp}/2\sigma_c'=0.55$ ，供試体寸法：高さ  $153 \text{ mm}$ ，直径  $61 \text{ mm}$ ，空圧式繰返し荷重 ( $1 \text{ Hz}$ ))。

井合進：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

### 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、ゆるい砂でみ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。

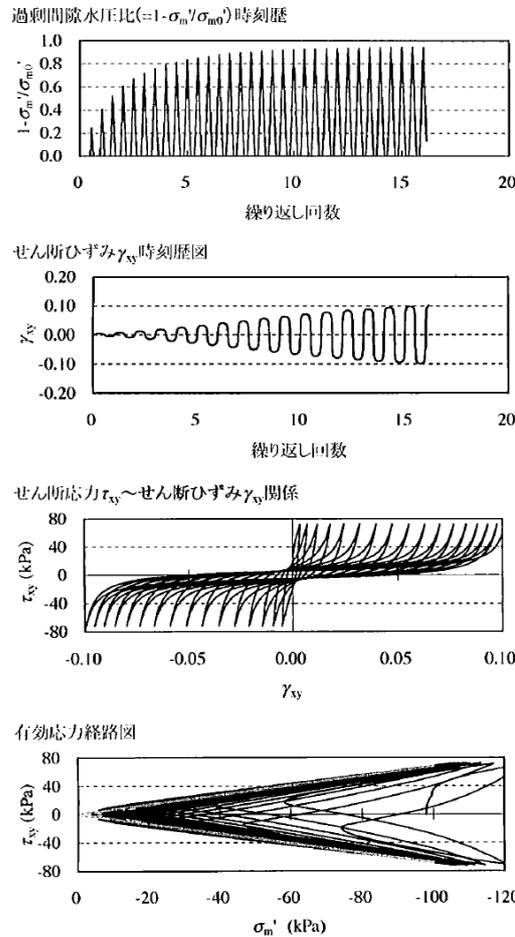


図-1 密な砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

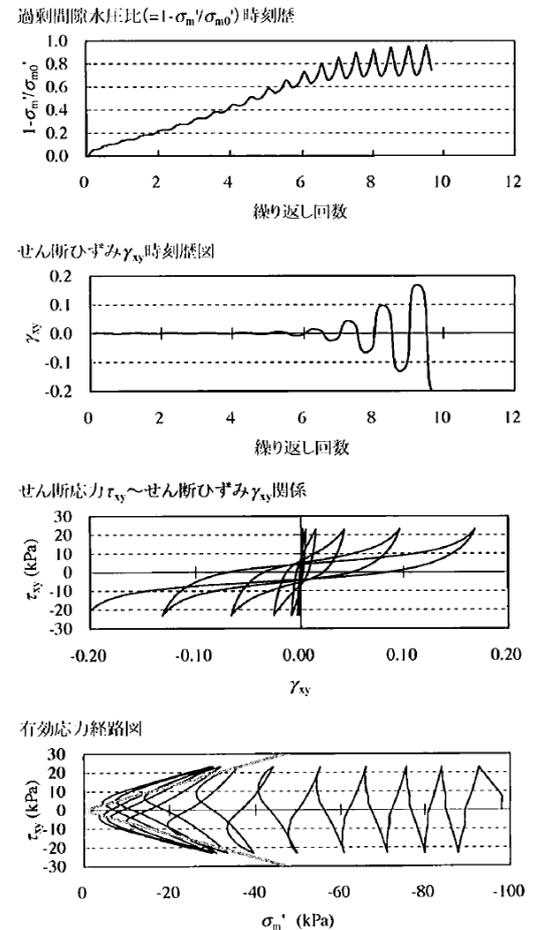


図-2 ゆるい砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

吉見吉昭：砂地盤の液状化（第二版），技報堂出版，1991年5月

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，緩い砂で見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。

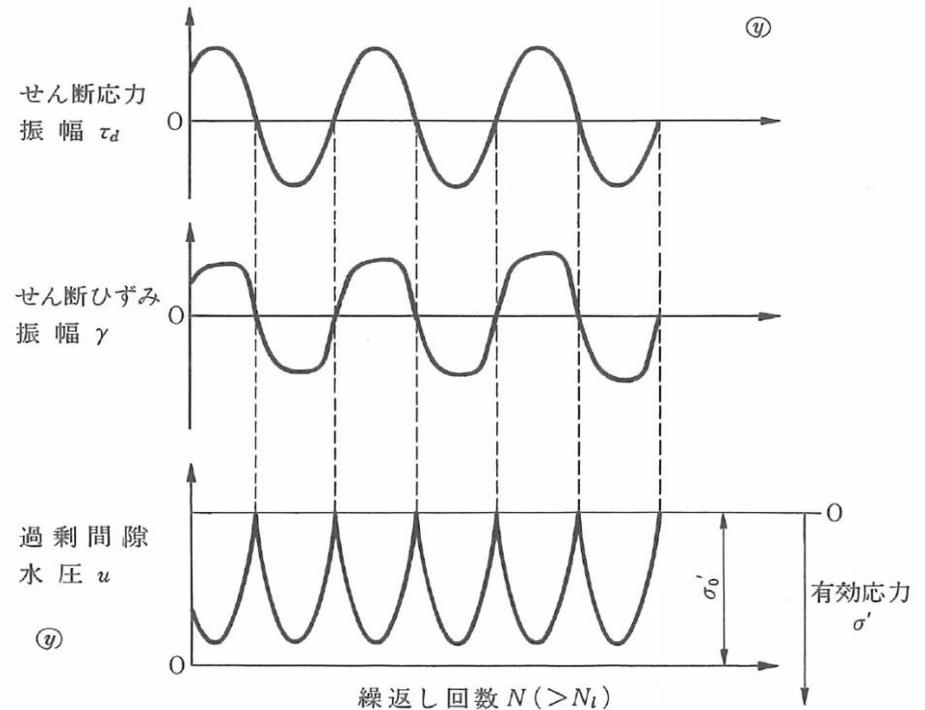


図-2.11 密な飽和砂の繰返し単純せん断試験において，間隙水圧比が100%に達した後のせん断ひずみと過剰間隙水圧の変化（模式図）

安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，1991年5月

### サイクリックモビリティー

- 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ー”と呼んで液状化と区別することもある。

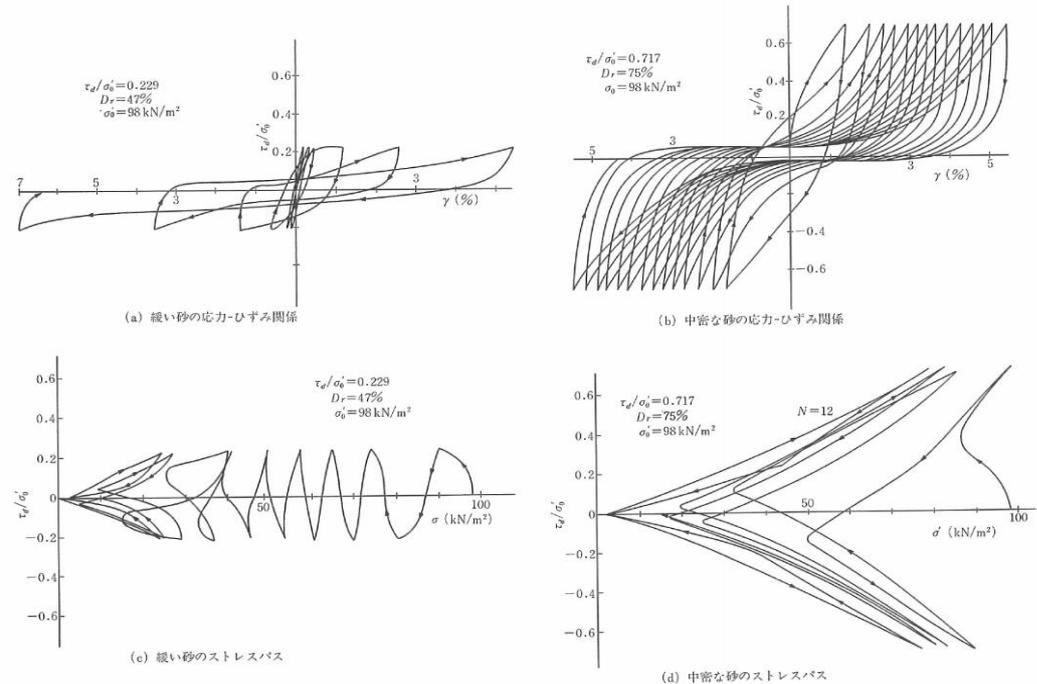


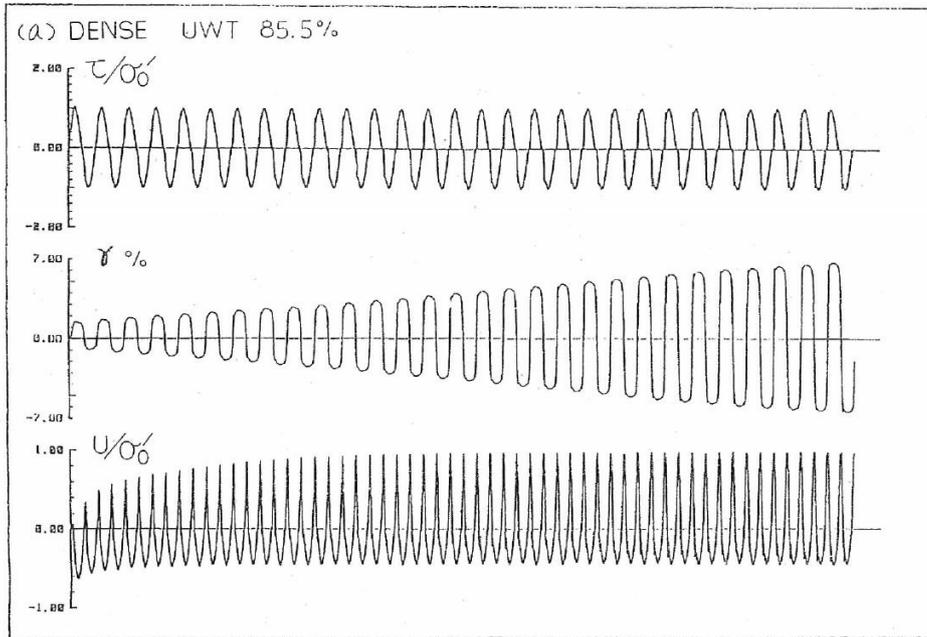
図 4-5 ゆる詰めと密な試料の応力経路および応力～ひずみ関係の比較（繰返しねじりせん断試験，富士川砂）<sup>3)</sup>

国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江刺靖行: 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

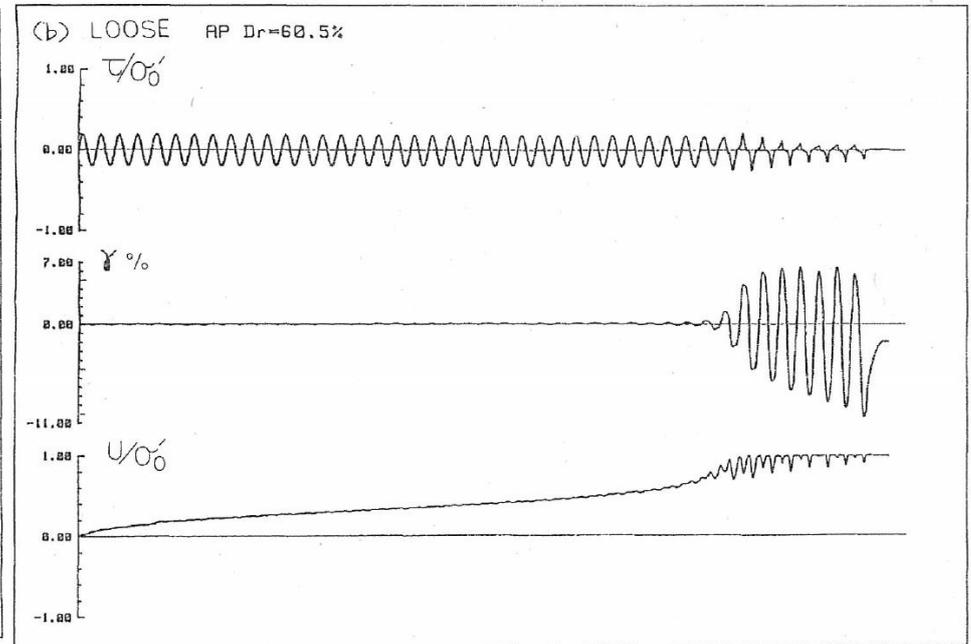
## 液状化 (密な砂の特徴)

- 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



国生剛治, 吉田保夫, 西好一, 江刺靖行: 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

### 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いない。

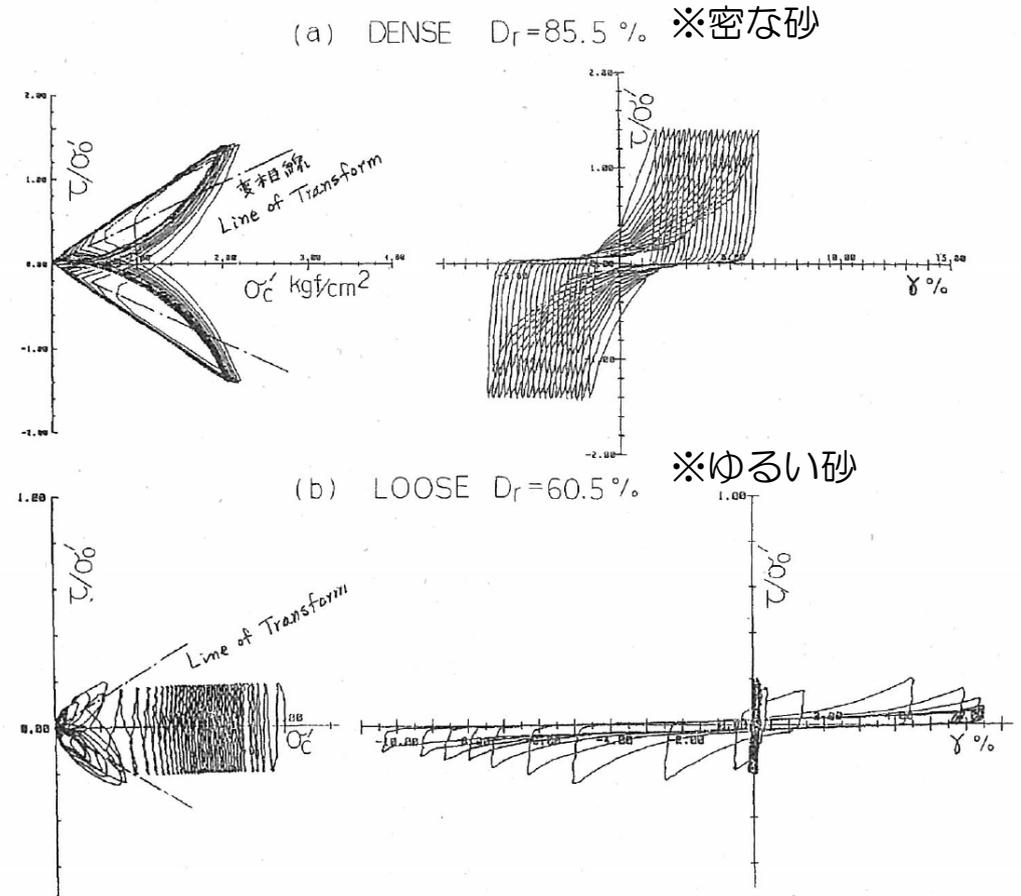


図3-2 密な砂(a)とゆるい砂(b)の中空ねじりせん断試験による有効応力径路(左側)と応力・ひずみ関係  
Effective Stress Path and Stress - Strain Curve for Dense Sand (a) and Loose Sand (b)

# 有効応力解析に関する記載

社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成19年7月

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、栈橋、物揚場、浮栈橋、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、栈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、直杭式横栈橋、斜め組杭式横栈橋、ジャケット式栈橋等に分類される。
- (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。

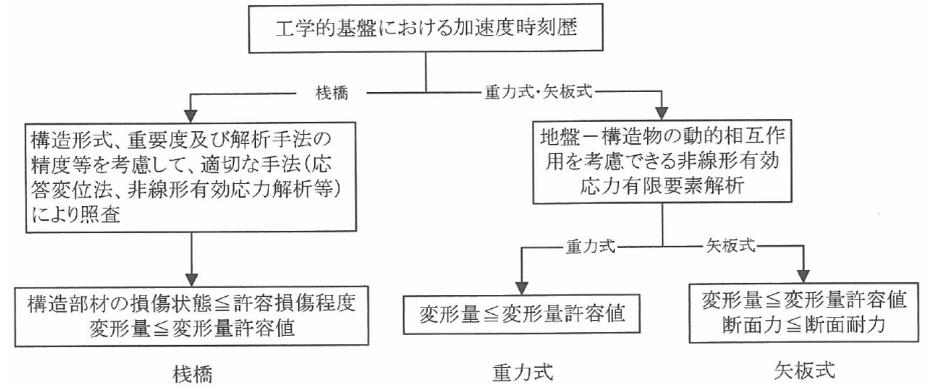


図-1.1.2 レベル2地震動に対する性能照査順序の例

## 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成19年7月

### (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。

## 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説，平成24年9月

### 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>例として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.