

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7-046 改0
提出年月日	2020年 6月 4日

工事計画に係る説明資料

(液状化検討対象層を踏まえた支持性能評価)

2020年6月

東京電力ホールディングス株式会社

柏崎刈羽原子力発電所 第7号機  
工事計画認可申請に係る論点整理について  
(指摘事項に対する回答)

**TEPCO**

---

2020年6月5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

### ▶ 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の指摘事項に対する回答

No.	実施日	指摘事項
1	令和2年5月26日 第863回 審査会合	岩盤に支持されていない取水路及びスクリーン室の支持地盤について、A2s層の有効応力解析の結果を踏まえ、サイクリックモビリティと判定した根拠及び妥当性を示した上で、支持地盤が支持力を有している根拠及び妥当性を説明すること。

# 目次

---

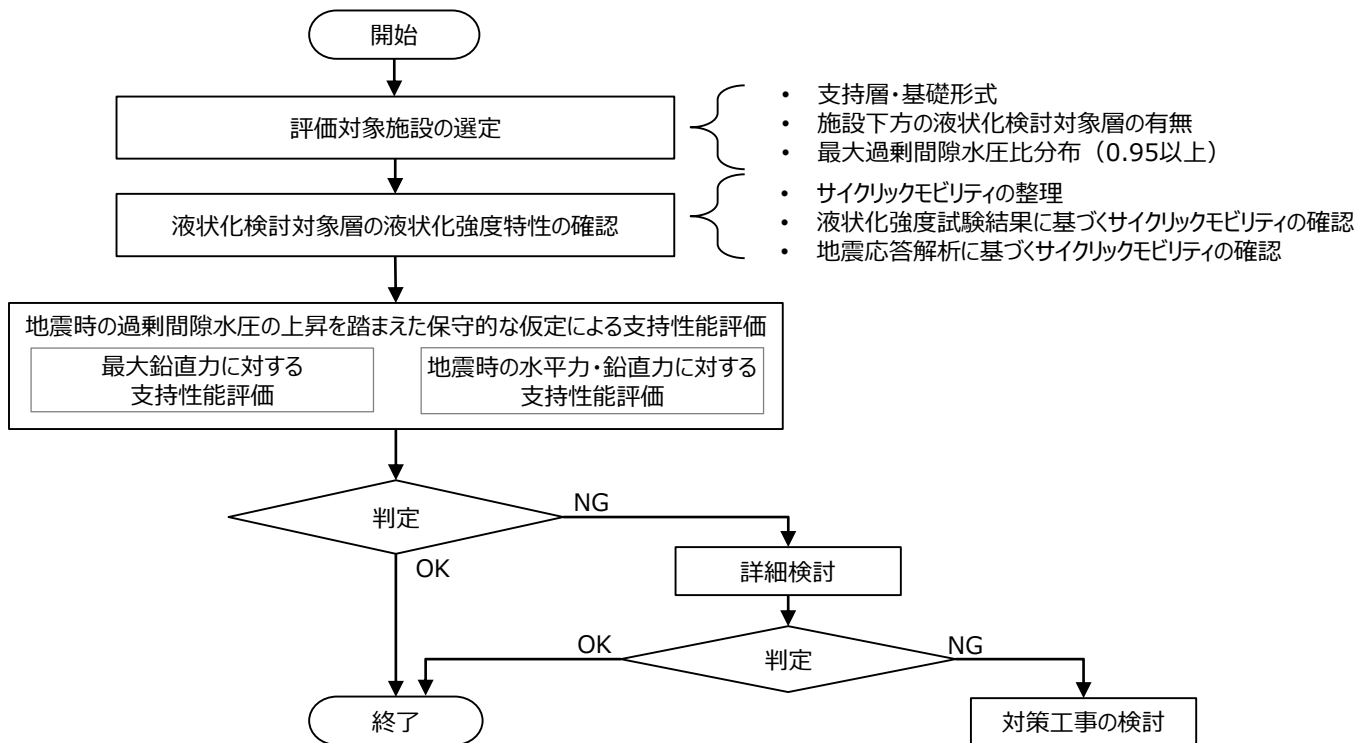
1. はじめに
2. 評価対象施設の選定
3. 液状化検討対象層の液状化強度特性の確認
4. 地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた保守的な仮定による  
支持性能の影響評価
5. まとめ

---

# 1. はじめに

## 液状化検討対象層を踏まえた支持性能の影響評価

- 建物・構築物及び屋外重要土木構造物のうち、杭や鋼管矢板を介して岩盤に支持する施設を除いた、古安田層に直接支持される施設で、施設下方に液状化検討対象層が分布している施設について、地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた支持性能の影響評価を実施する。
- 本検討では、評価対象施設を選定し、液状化検討対象層の液状化強度特性（サイクリックモビリティ）を確認し、地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた保守的な仮定による支持性能評価を行う。
- 検討の結果、支持性能を満足しないと判断される場合は、より詳細な検討を行い、必要に応じて対策工事の検討を行う。



液状化検討対象層を踏まえた支持性能の検討フロー

---

## 2. 評価対象施設の選定

## 評価対象施設の選定

- 建物・構築物及び屋外重要土木構造物のうち、杭や鋼管矢板を介して岩盤に支持する施設を除いた、古安田層に直接支持される施設で、施設下方に液状化検討対象層が分布している施設を整理した。
- その結果、該当する施設として7号機スクリーン室、取水路（漸縮部、一般部）、6号機取水路（漸縮部、一般部）が抽出された。

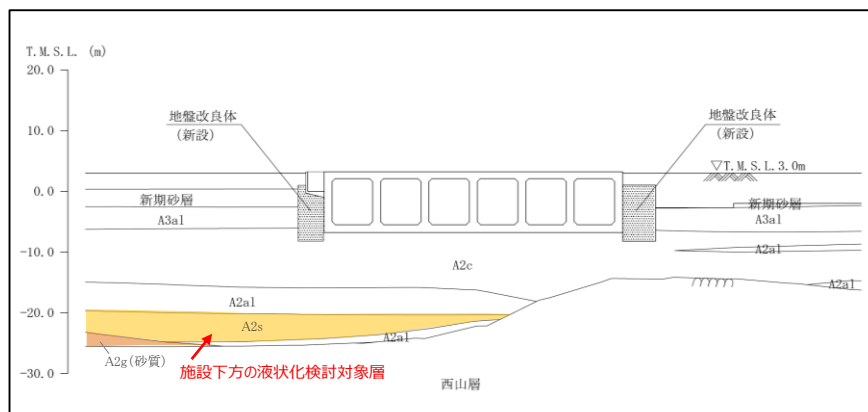
建物・構築物及び屋外重要土木構造物の支持層、基礎形式及び施設下方における液状化検討対象層の有無 整理表

号機	施設		支持層	基礎形式	施設下方における液状化検討対象層の有無	確認要否
7号機	格納容器圧力逃がし装置基礎		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
	大物搬入建屋		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
	海水貯留堰		古安田層, 西山層	鋼管矢板基礎	無し	—
	スクリーン室		古安田層	直接基礎	有り	○
	取水路	漸縮部	古安田層	直接基礎	有り	○
		一般部	古安田層	直接基礎	有り	○
		漸拡部	古安田層, 西山層, マンメイドロック	直接基礎	無し	—
	補機冷却用海水取水路		マンメイドロック	直接基礎	無し	—
	軽油タンク基礎		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
	燃料移送系配管ダクト		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
第一ガスタービン発電機基礎 第一ガスタービン発電機用燃料タンク基礎		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—	
6号機	海水貯留堰		古安田層, 西山層	鋼管矢板基礎	無し	—
	スクリーン室		古安田層	直接基礎	無し	—
	取水路	漸縮部	古安田層	直接基礎	有り	○
		一般部	古安田層	直接基礎	有り	○
		漸拡部	古安田層 マンメイドロック	直接基礎	無し	—

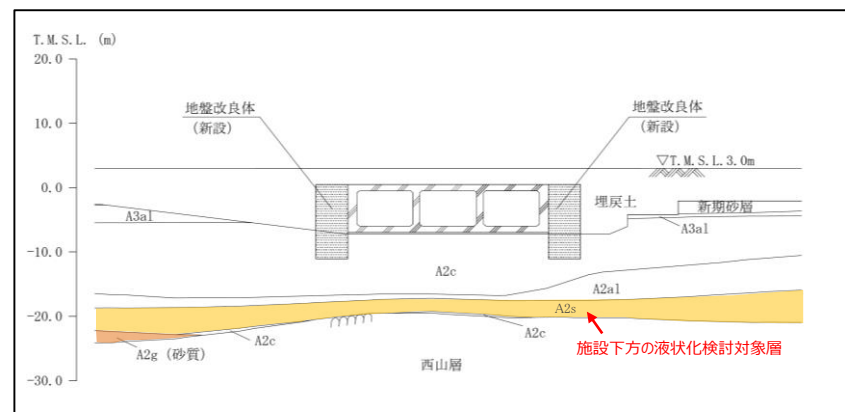


## 評価対象施設の選定

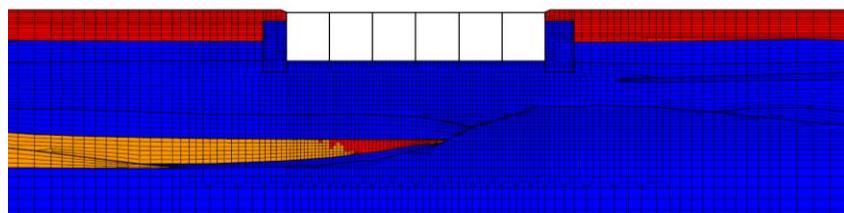
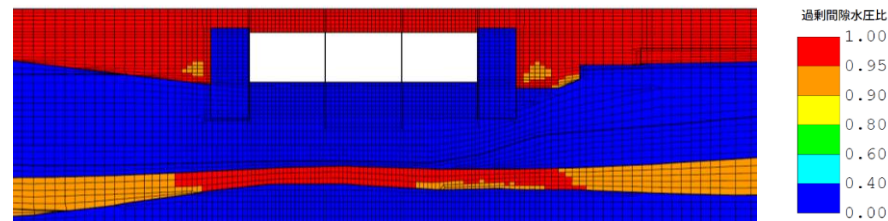
- 抽出された施設（7号機スクリーン室，取水路（漸縮部，一般部），6号機取水路（漸縮部，一般部））について，地震時の全時刻歴における最大過剰間隙水圧比分布を確認した。
- その結果，7号機スクリーン室及び6号機取水路（漸縮部）について，施設下方の液状化検討対象層の比較的広い範囲に最大過剰間隙水圧比が0.95を超える地盤要素が認められたことから，本検討の評価対象施設として選定した。



7号機スクリーン室の断面図

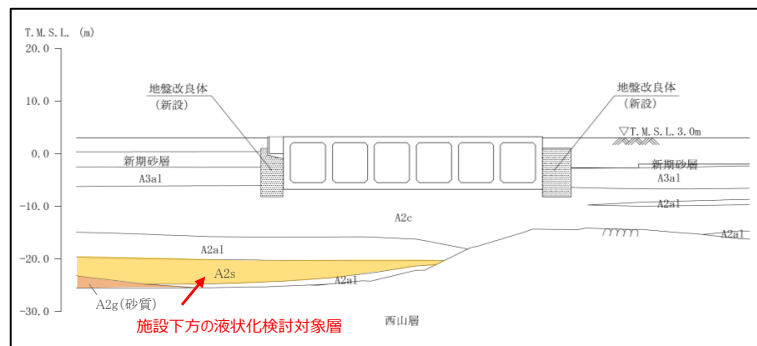


6号機取水路（漸縮部）の断面図

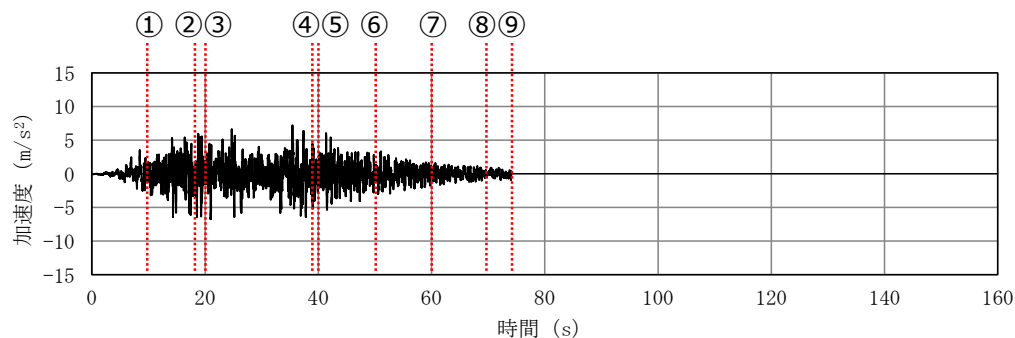
7号機スクリーン室の最大過剰間隙水圧比分布  
(解析ケース①, Ss-3--)6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布  
(解析ケース③, Ss-3--)

## 過剰間隙水圧比の発生状況（7号機スクリーン室）

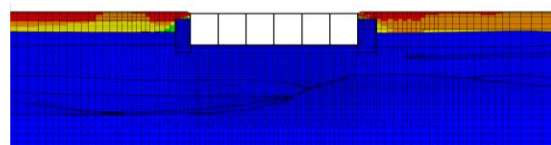
- 施設下方の液状化検討対象層（A2s層）は、過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えるものの、地震終了時には0.95以下となる。



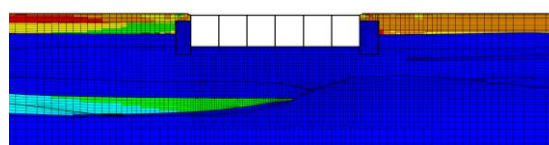
7号機スクリーン室の断面図



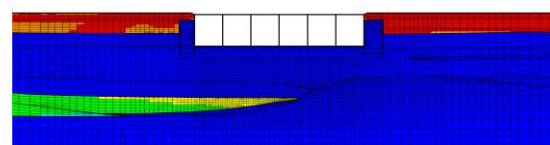
基準地震動の時刻歴波形（水平方向：Ss-3）



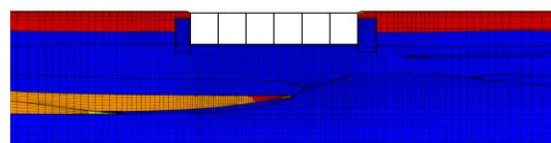
①10s



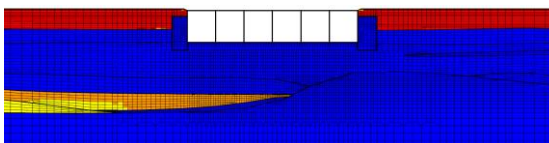
②18s（曲げ軸力・せん断力照査値最大付近）



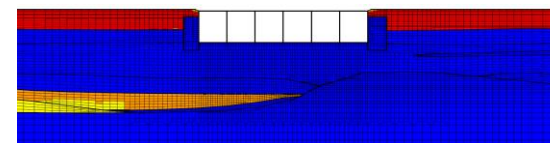
③20s



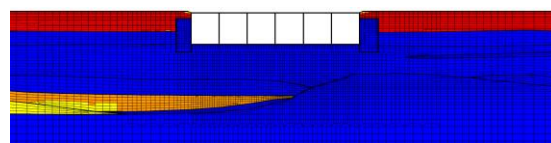
④39s（0.95以上発生時）



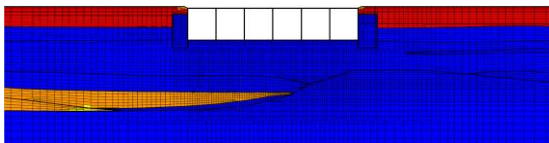
⑤40s



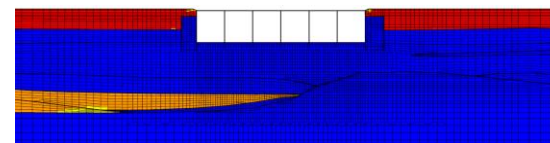
⑥50s



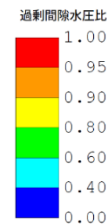
⑦60s



⑧70s



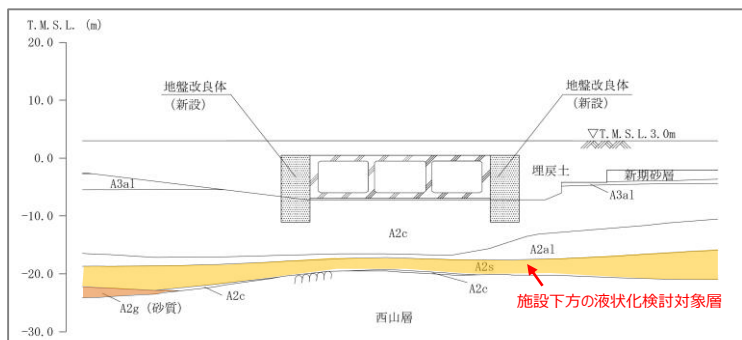
⑨74.14s（地震終了時）



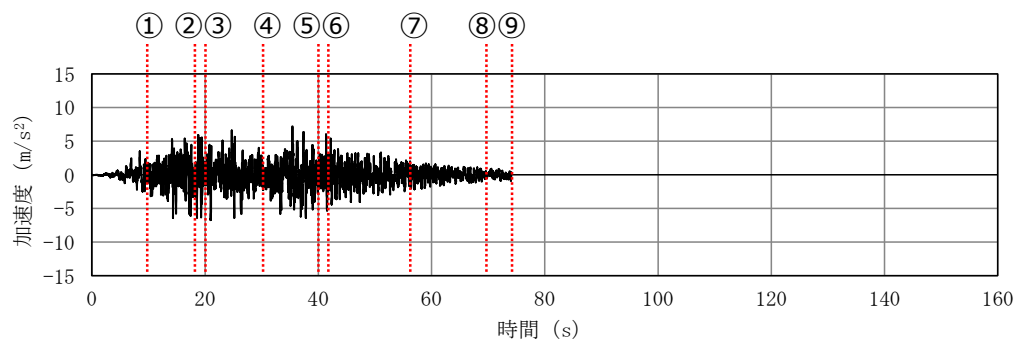
7号機スクリーン室の過剰間隙水圧の発生状況

## 過剰間隙水圧比の発生状況（6号機取水路（漸縮部））

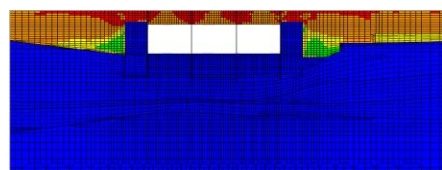
- 施設下方の液状化検討対象層（A2s層）は、過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えるものの、地震終了時には0.95以下となる。



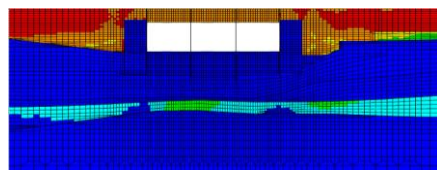
6号機取水路（漸縮部）の断面図



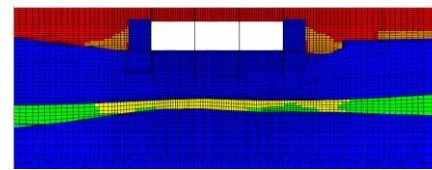
基準地震動の時刻歴波形（水平方向：Ss-3）



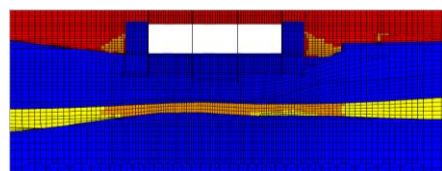
①10s



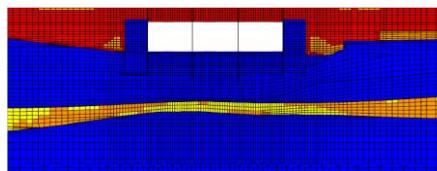
②18s（曲げ軸力・せん断力照査値最大付近）



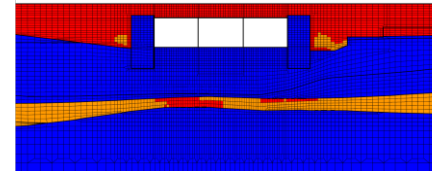
③20s



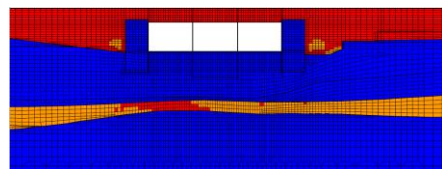
④30s



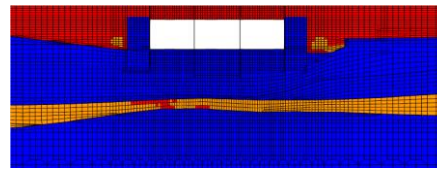
⑤40s



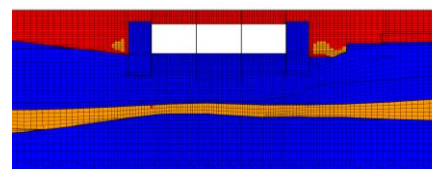
⑥42s（0.95以上発生時）



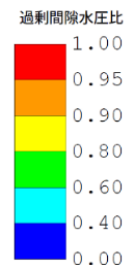
⑦57s（0.95以上発生時）



⑧70s（0.95以上発生時）



⑨74.14s（地震終了時）



6号機取水路（漸縮部）の過剰間隙水圧の発生状況

---

### 3. 液状化検討対象層の液状化強度特性の確認

## サイクリックモビリティとは

### 液状化（密な砂の場合）

- ▶ サイクリックモビリティとは、「密な砂地盤が繰り返しせん断を受け、過剰間隙水圧の増加に伴って、せん断ひずみ振幅が徐々に増大する現象である。」としている（図-1）。
- ▶ 地盤の液状化は、ゆるい砂地盤が繰り返しせん断を受け、せん断振幅が急増し、地盤全体が泥水状態となり、噴砂や噴水を伴うことが多いので、現象的にサイクリックモビリティとは異なる。
- ▶ 密な砂では、ゆるい砂で見られるようなひずみの急増は見られず、変形が限定される傾向が著しい。この点で、サイクリックモビリティ現象を示す密な砂地盤は、構造設計におけるductility（ねばり）の効果と同等の工学的特性を有するものと評価される。

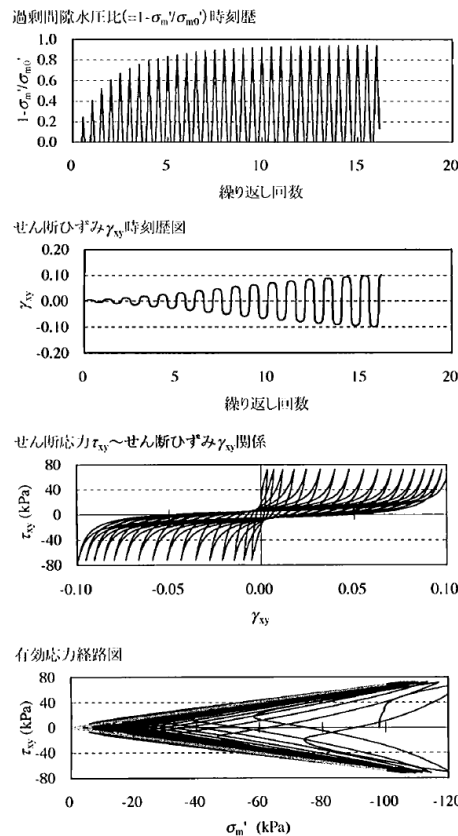


図-1 密な砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

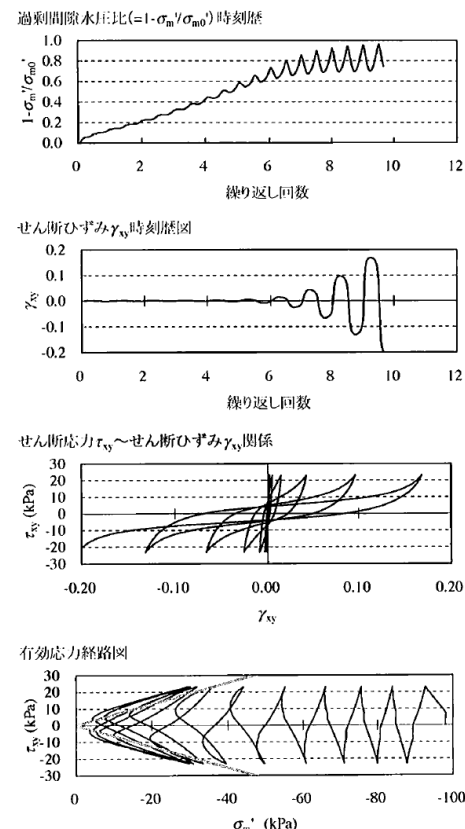


図-2 ゆるい砂の非排水繰返しせん断挙動の例<sup>1)</sup>

（出典）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

## サイクリックモビリティとは

### サイクリックモビリティ

- ▶ ゆる詰めと密詰めでの応力経路と応力～ひずみ関係を示すと図4-5となる。ゆる詰めの場合は応力経路が原点に近づいてゆき有効拘束圧が0になった後、せん断力が加わると、大きなひずみが発生する。
- ▶ 密詰めの場合には大ひずみは生じない。  
一時的に有効拘束圧が0になっても、その後  
にせん断力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効拘束圧が増加（回復）し、有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。  
この現象を“サイクリックモビリティ”と呼んで液状化と区別することもある。

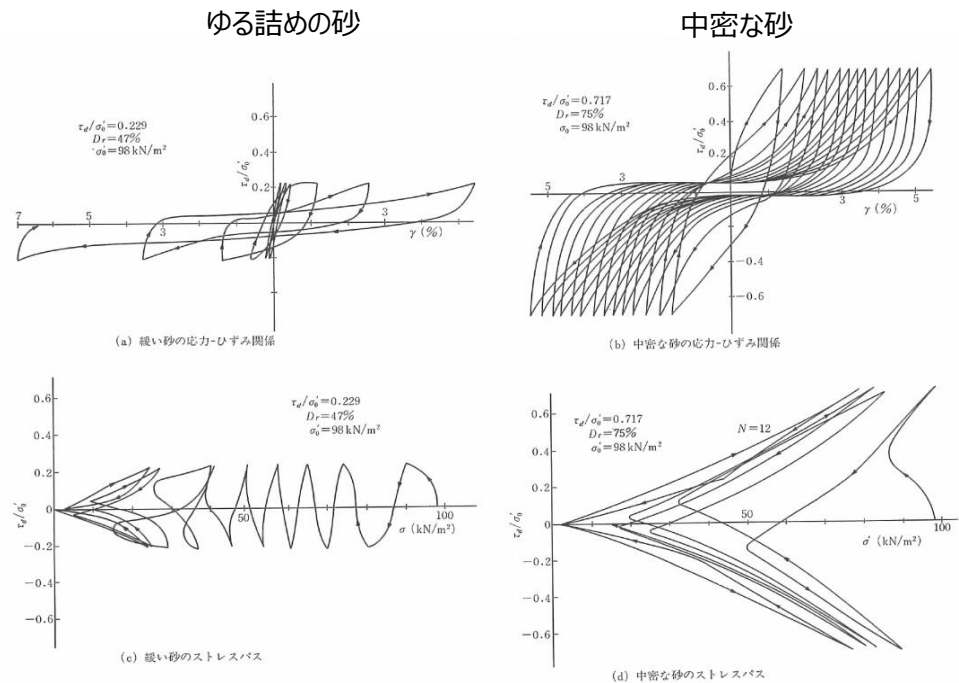
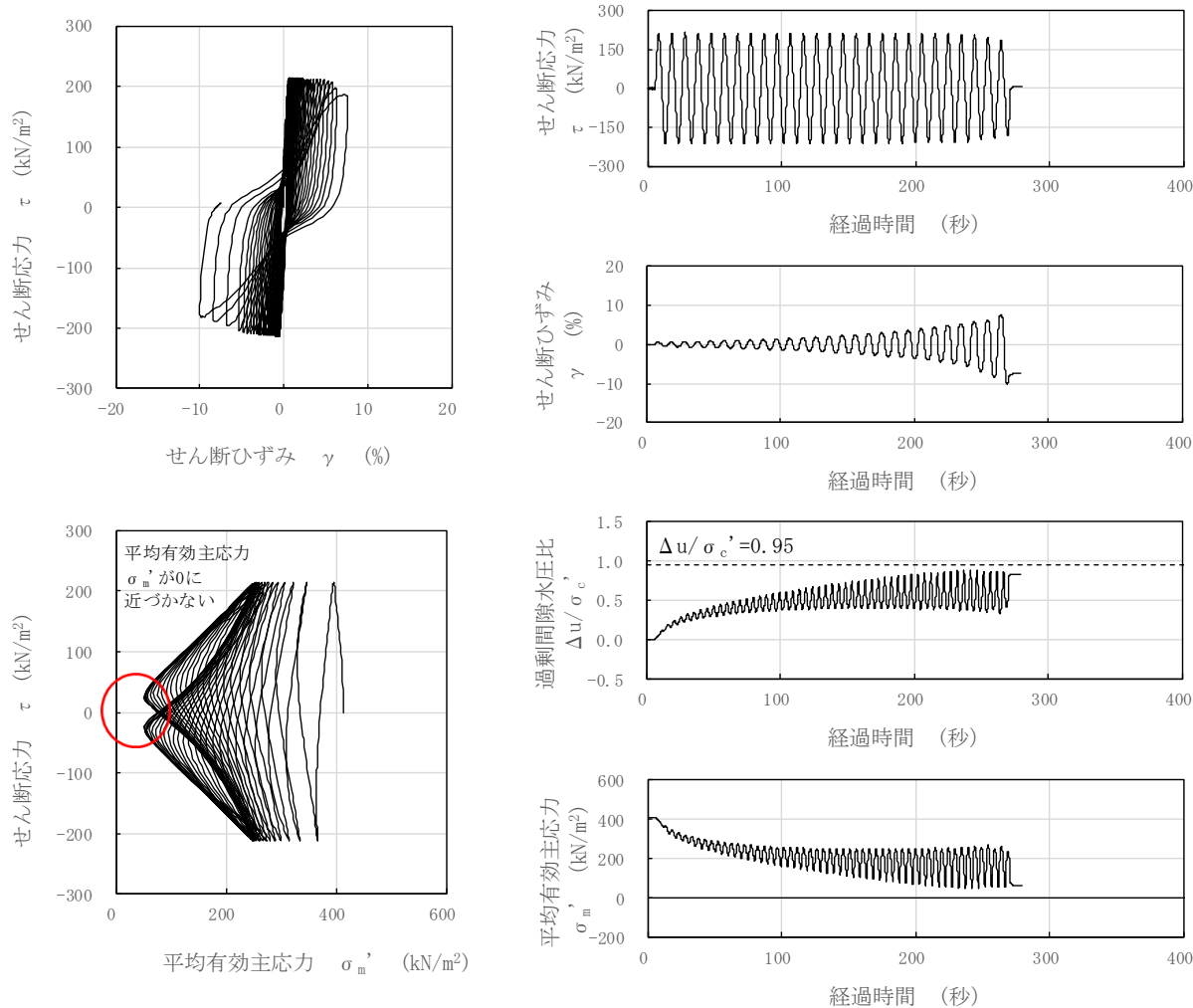


図 4-5 ゆる詰めと密な試料の応力経路および応力～ひずみ関係の比較（繰返しねじりせん断試験，富士川砂）<sup>3)</sup>

ゆる詰めと密な試料の応力経路及び応力～ひずみ関係の比較

（出典）液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，1991年5月

# 液状化強度試験の結果 (A2s層)



**【A2s層の試験結果】**

- せん断ひずみが緩やかに上昇
- 平均有効主応力 $\sigma'_m$ が0に近づかない（有効応力を保持している）
- 過剰間隙水圧比が上昇と下降を繰り返し0.95を超えない



液状化強度試験の結果から、サイクリックモビリティの特徴を示すことを確認。



解析コードはサイクリックモビリティを適切に考慮できるFLIPを適用。

## 液状化強度試験結果の一例 (A2s層)

(GL.-25.10~25.25m, 有効拘束圧412kN/m<sup>2</sup>, せん断応力比=0.519)



# サイクリックモビリティに対する解析コードFLIPの適用性

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

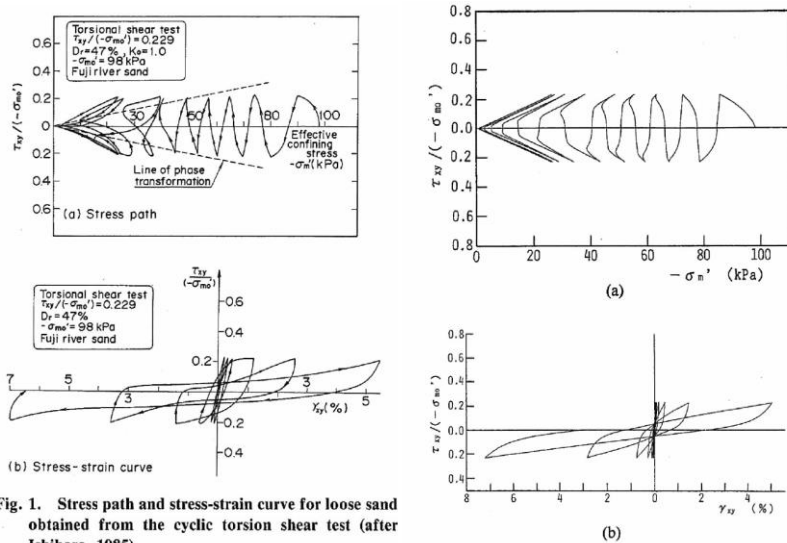


Fig. 1. Stress path and stress-strain curve for loose sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

実験結果

ゆるい砂 (相対密度 $D_r=47\%$ )

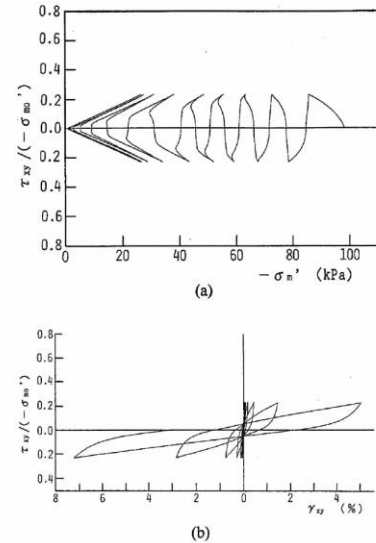


Fig. 9. Computed results of loose sand to be compared with the laboratory results in Fig. 1. (a) Stress path, (b) Stress strain curve

解析結果

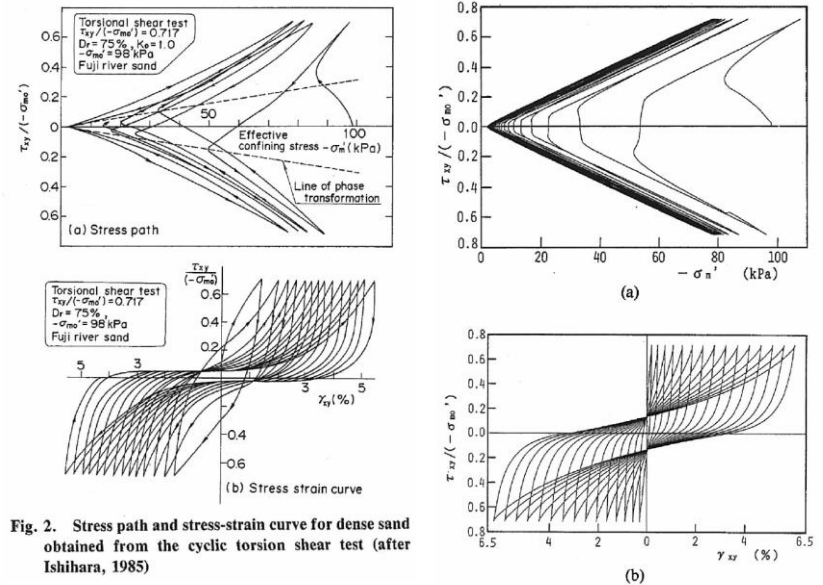


Fig. 2. Stress path and stress-strain curve for dense sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

実験結果

密な砂 (相対密度 $D_r=75\%$ )

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

解析結果

(出典) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1992): STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.32, No. 2, pp.1-15.



# サイクリックモビリティに対する解析コードFLIPの適用性

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

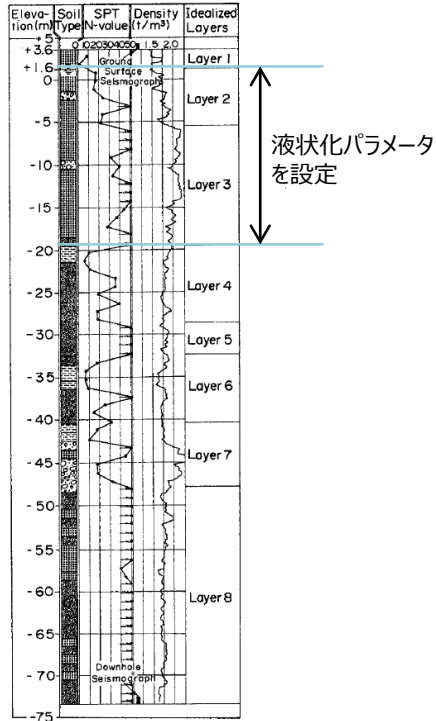


Fig. 21. Idealized soil layers for response analysis

解析モデル

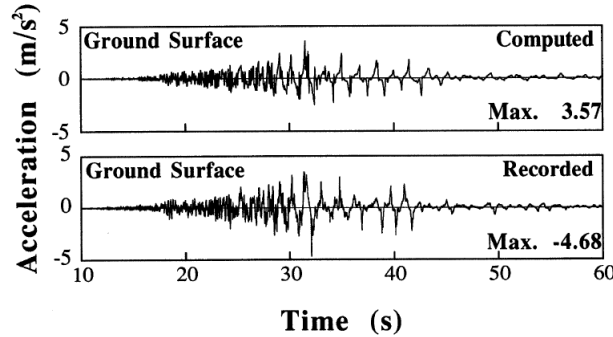


Fig. 24. Recorded and computed accelerations at the ground surface

地表面加速度の比較 (上段：解析値, 下段：観測値)

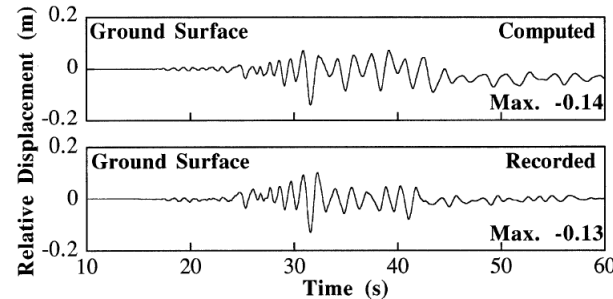


Fig. 25. Recorded and computed displacements at the ground surface relative to the base at a depth of 77 meters

地表面変位の比較 (上段：解析値, 下段：観測値)

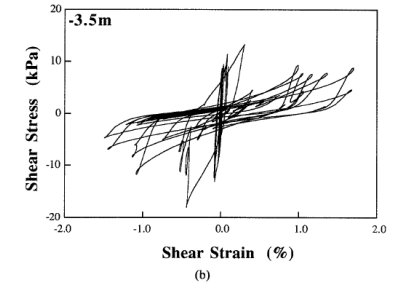
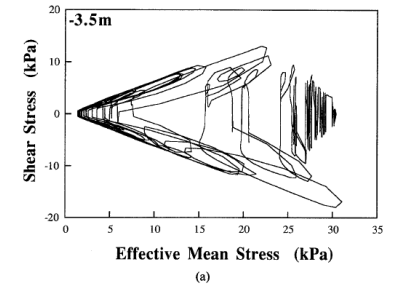


Fig. 26. Computed stress path and stress-strain relation at a depth of 3.5 meters in Layer 2; (a) stress paths and (b) stress strain relation

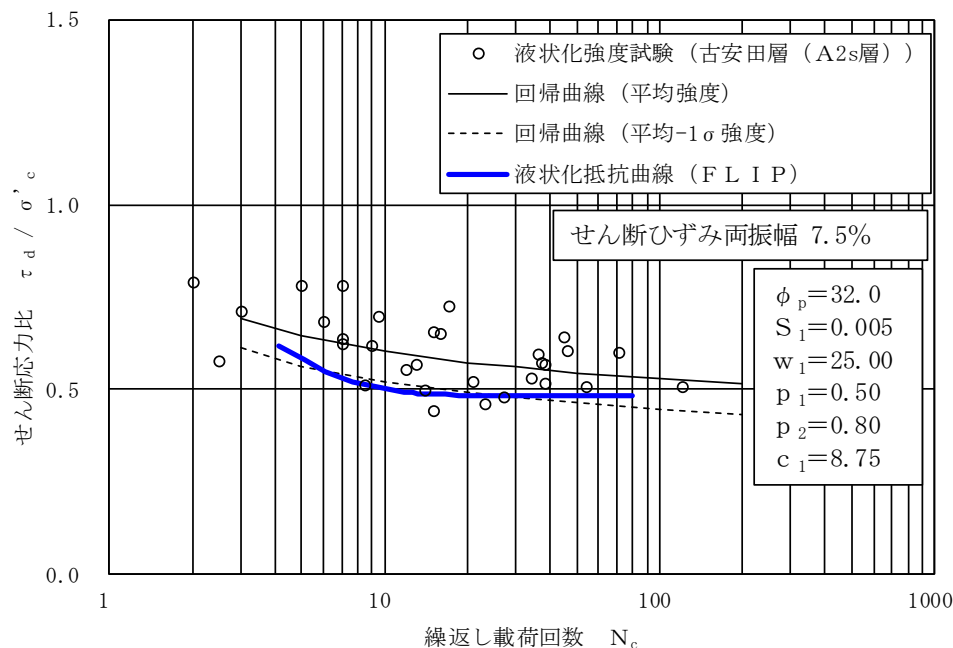
解析値の一例

(上段：有効応力経路, 下段：せん断応力-せん断ひずみ関係)

(出典) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K. (1995): RESPONSE OF A DENSE SAND DEPOSIT DURING 1993 KUSHIRO-OKI EARTHQUAKE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol.35, No. 1, pp.115-131.

## 有効応力解析におけるA2s層の液状化強度特性

- 有効応力解析FLIPにおけるA2s層の液状化強度特性は、液状化強度試験の代表性・網羅性を確認した上で、各地層で得られた液状化強度特性のばらつきを踏まえて、液状化抵抗曲線の平均値-1 $\sigma$ に設定している。

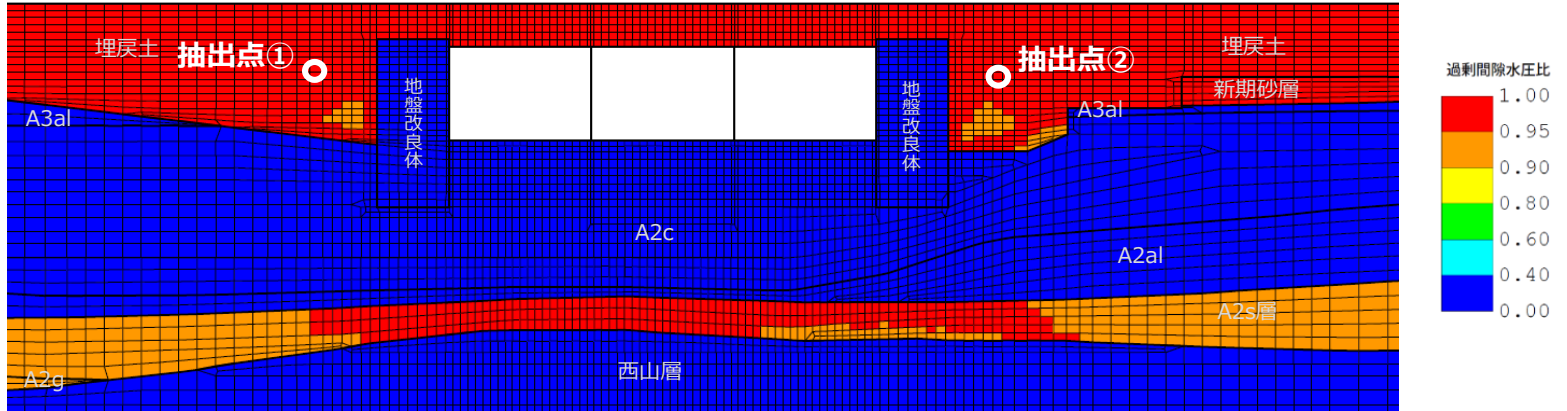


有効応力解析における液状化強度特性の設定  
(A2s層)

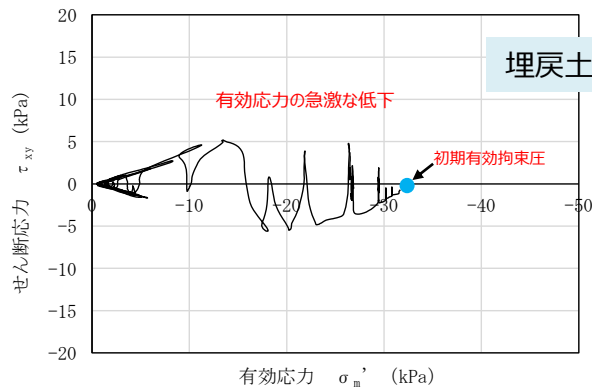
- 液状化強度試験に用いた供試体は、対象施設近傍で採取するとともに、地層の中でも砂分が多い箇所のものを選定した。
  - 設置変更許可以降、追加調査を実施してデータを拡充させることにより、データの信頼度を向上した。
- ↓
- 液状化強度特性のばらつきを踏まえて、液状化抵抗曲線の平均値-1 $\sigma$ に設定している。

## 有効応力解析による地震応答解析結果

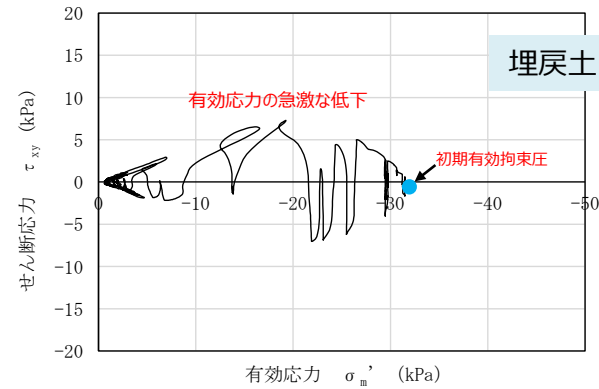
- 埋戻土の基準地震動 $S_s$ に対する有効応力経路を確認した結果、せん断応力の発生に伴い有効応力が急激に低下していることから、液状化の様相を呈していることを確認した。



6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布  
(解析ケース③,  $S_s-3--$ )



(a) 抽出点①

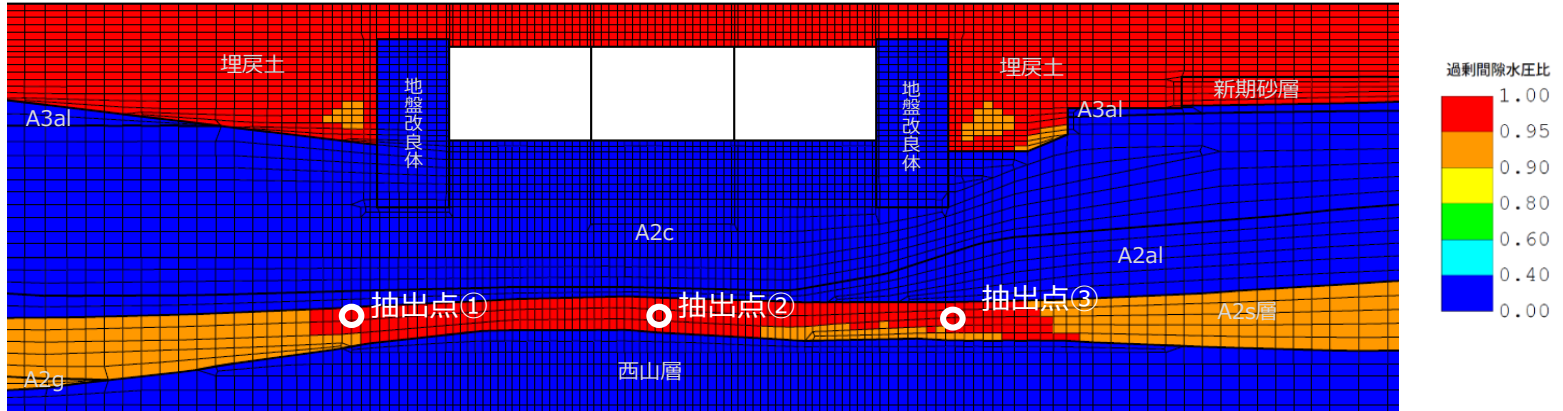


(b) 抽出点②

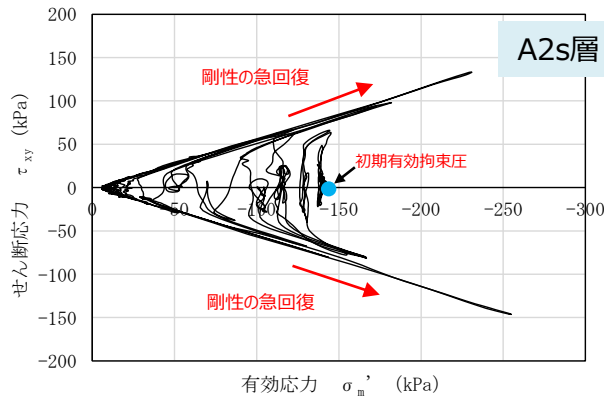
埋戻土の有効応力経路（解析ケース③,  $S_s-3--$ ）

## 有効応力解析による地震応答解析結果

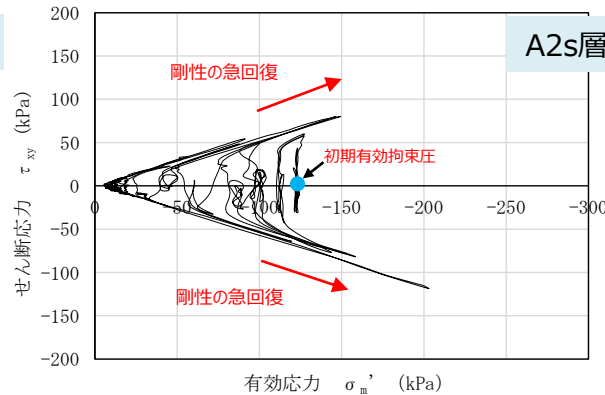
- A2s層の基準地震動Ssに対する有効応力経路を確認した結果、せん断応力の発生に伴い初期の有効拘束圧（有効応力経路の始点）より大きくなるような剛性の急回復があることから、サイクリックモビリティの様相を呈していることを確認した。



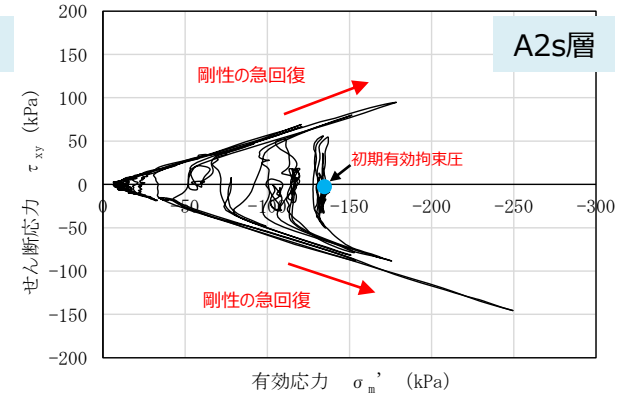
6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布  
（解析ケース③, Ss-3--）



(a) 抽出点①



(b) 抽出点②



(c) 抽出点③

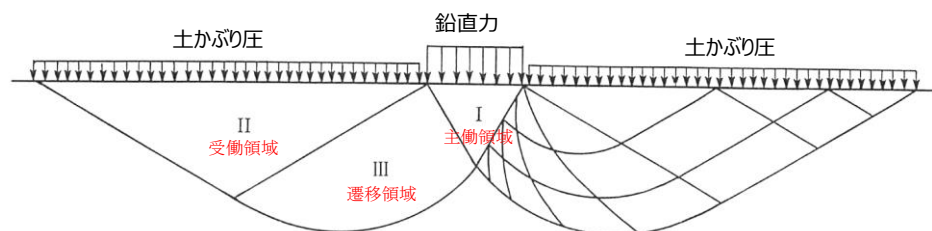
A2s層の有効応力経路（解析ケース③, Ss-3--）

---

## 4. 地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた 保守的な仮定による支持性能評価

## 最大鉛直力に対する支持性能評価

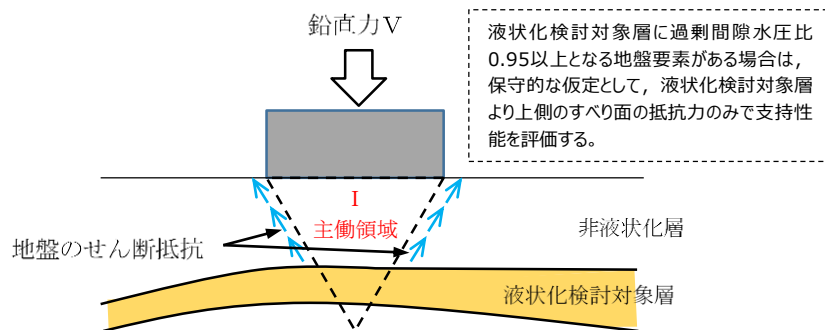
- 道路橋示方書の極限支持力の算定式はTerzaghiの支持力理論に基づいている。
- 本検討では、地震時の過剰間隙水圧比の上昇を踏まえ、保守的な仮定として、Terzaghiの支持力理論のうち、受働領域Ⅱ及び遷移領域Ⅲのすべり面の抵抗力は考慮せず、主働領域Ⅰの過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超える地盤要素がある液状化検討対象層よりも上側の地層におけるすべり面の抵抗力のみによる支持性能評価を実施した。



Terzaghiの支持力理論 概念図  
(引用：土質力学，石原研而，丸善に一部加筆)

### ● Terzaghiの支持力理論

基礎に鉛直方向の押し込み力を作用させると、基礎下の土はくさび形の剛体（主動領域Ⅰ）として働き、この三角形くさびに対して遷移領域Ⅱと受働領域Ⅲの受働土圧で抵抗する。Terzaghiの支持力理論は、これらについての力の釣合いから求められた式である。



最大鉛直力に対する支持性能評価の概念図

### ● 抵抗力Rの算定方法

主動領域Ⅰによって形成されるすべり線が通る地層の抵抗力Rを下式で算定する。

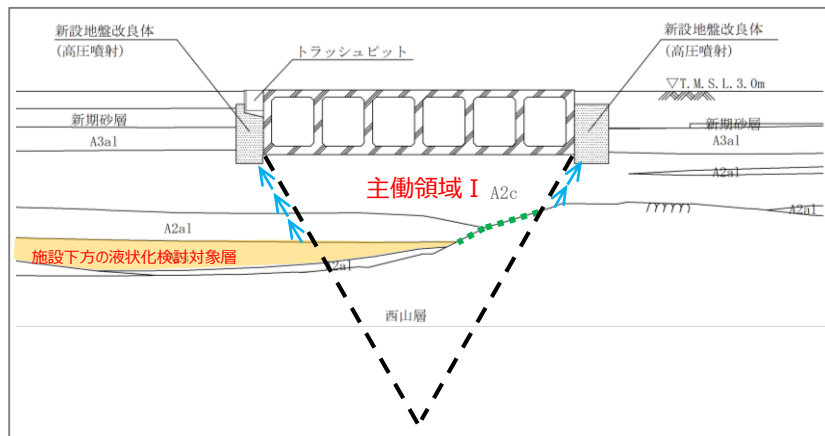
$$R = \Sigma(c' + \sigma'_n \cdot \tan\phi')l$$

ここで

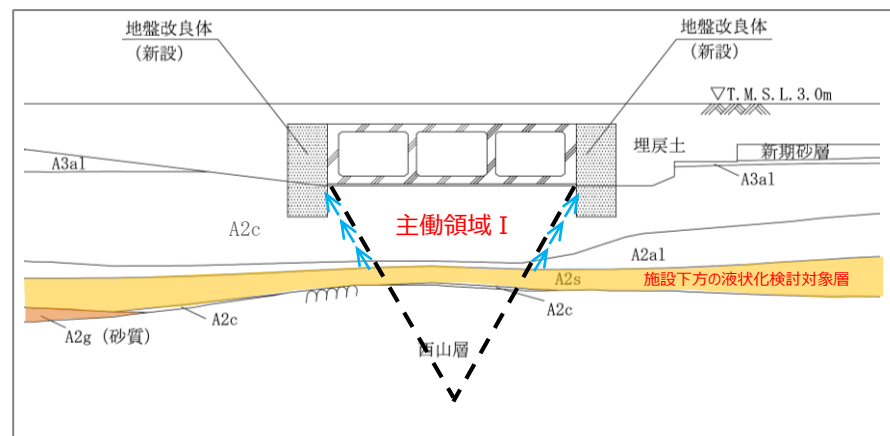
- $c'$  : 各地層の粘着力
- $l$  : 各地層のすべり線長さ
- $\sigma'_n$  : すべり線法線方向応力
- $\phi'$  : 各地層の内部摩擦角

## 評価結果

- 評価の結果、保守的な仮定による支持性能評価でも、地震時の支持性能が確保されることを確認した。



7号機 スクリーン室



6号機 取水路 (漸縮部)

### 保守的な仮定による最大鉛直力に対する支持性能評価結果

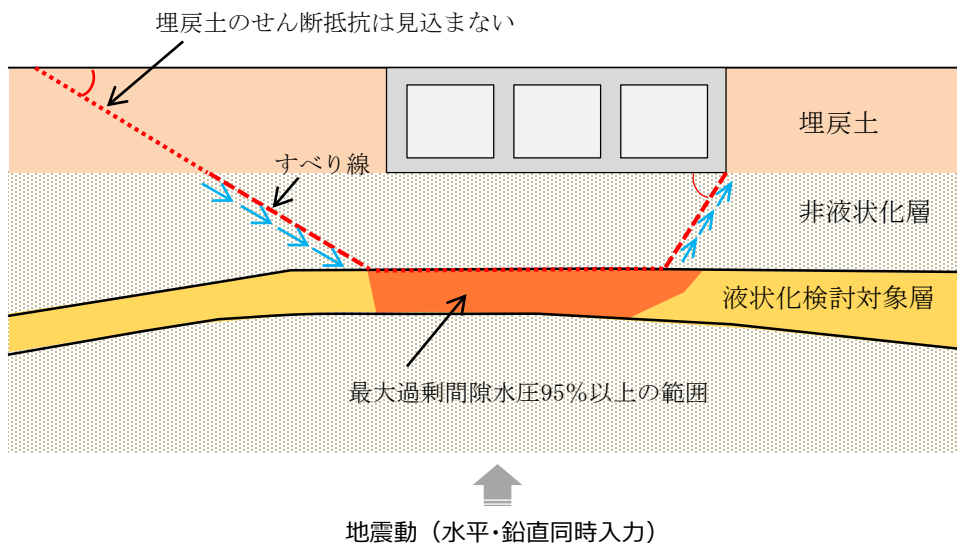
評価断面	最大鉛直力*1 $R_a$ (kN)	支持力 $R_u$ (kN)	照査値 $R_a/R_u$	判定
7号機 スクリーン室	2530	2990	0.85*2	OK
6号機 取水路(漸縮部)	2200	2960	0.75	OK

注記\*1：鉛直力は、各構造物において地震応答解析を実施した全ての解析ケース及び地震動のうち、最大となる値。

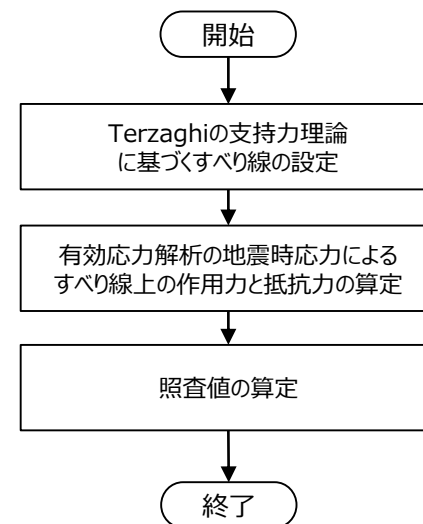
\*2：A2c層と西山層及びA2a1層と西山層との境界（図中の緑破線箇所）におけるせん断抵抗を考慮しない照査値。

## 地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価

- 有効応力解析FLIPによる地震応答解析では、水平地震動と鉛直地震動を同時に入力し、耐震安全性評価を実施していることから、この解析結果を用いて、地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価を行う。
- 本検討では、施設下方の液状化検討対象層の過剰間隙水圧が上昇する範囲を踏まえ、Terzaghiの支持力理論に基づくすべり線を仮定して、すべり線上の作用力と抵抗力を比較することにより支持性能評価を行う。



地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価の概念図

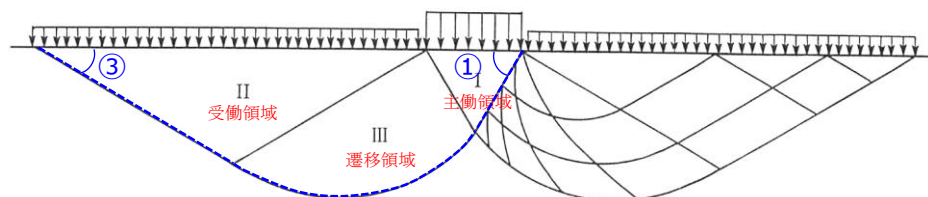


地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価のフロー図

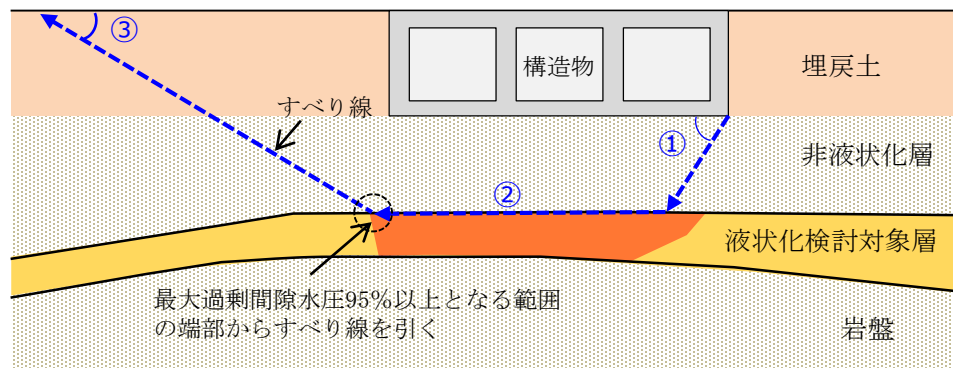


## すべり線の設定

- すべり線は下記に示す方法により設定する。
  - Terzaghiの支持力理論に基づき、地盤の内部摩擦角に応じ、主働領域 I における構造物端部からの角度①及び受働領域 II における角度③を設定。
  - 最大過剰間隙水圧比が95%以上となる範囲に基づき、②の領域を設定。



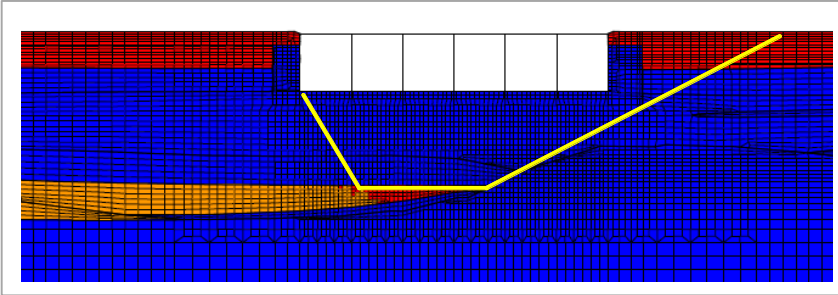
Terzaghiの支持力理論 概念図  
(引用：土質力学，石原研而，丸善に一部加筆)



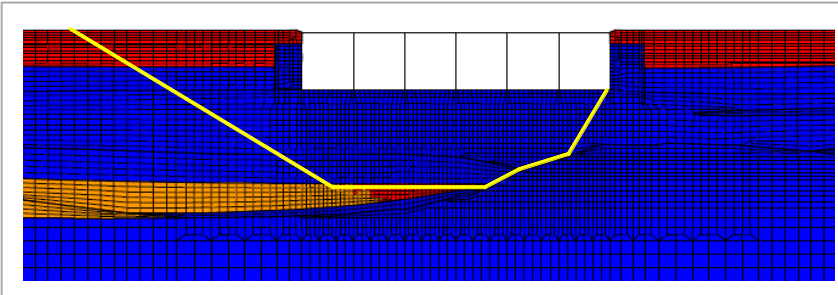
すべり線の設定方法の概念図

## すべり線の設定

- 地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価に用いたすべり線を下図に示す。

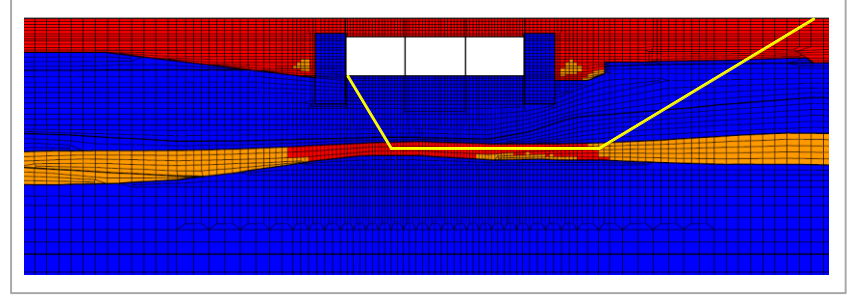


(a)右すべり線

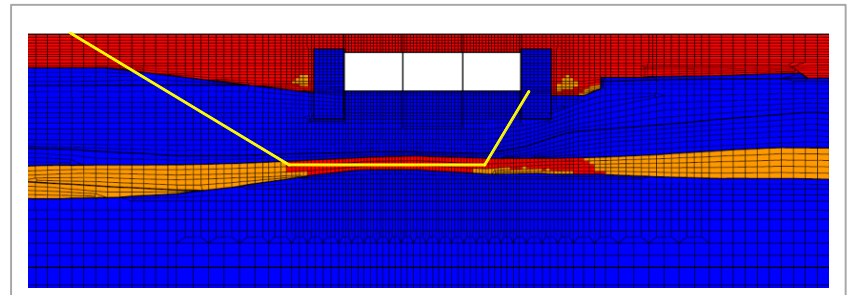


(b)左すべり線

7号機 スクリーン室



(a)右すべり線

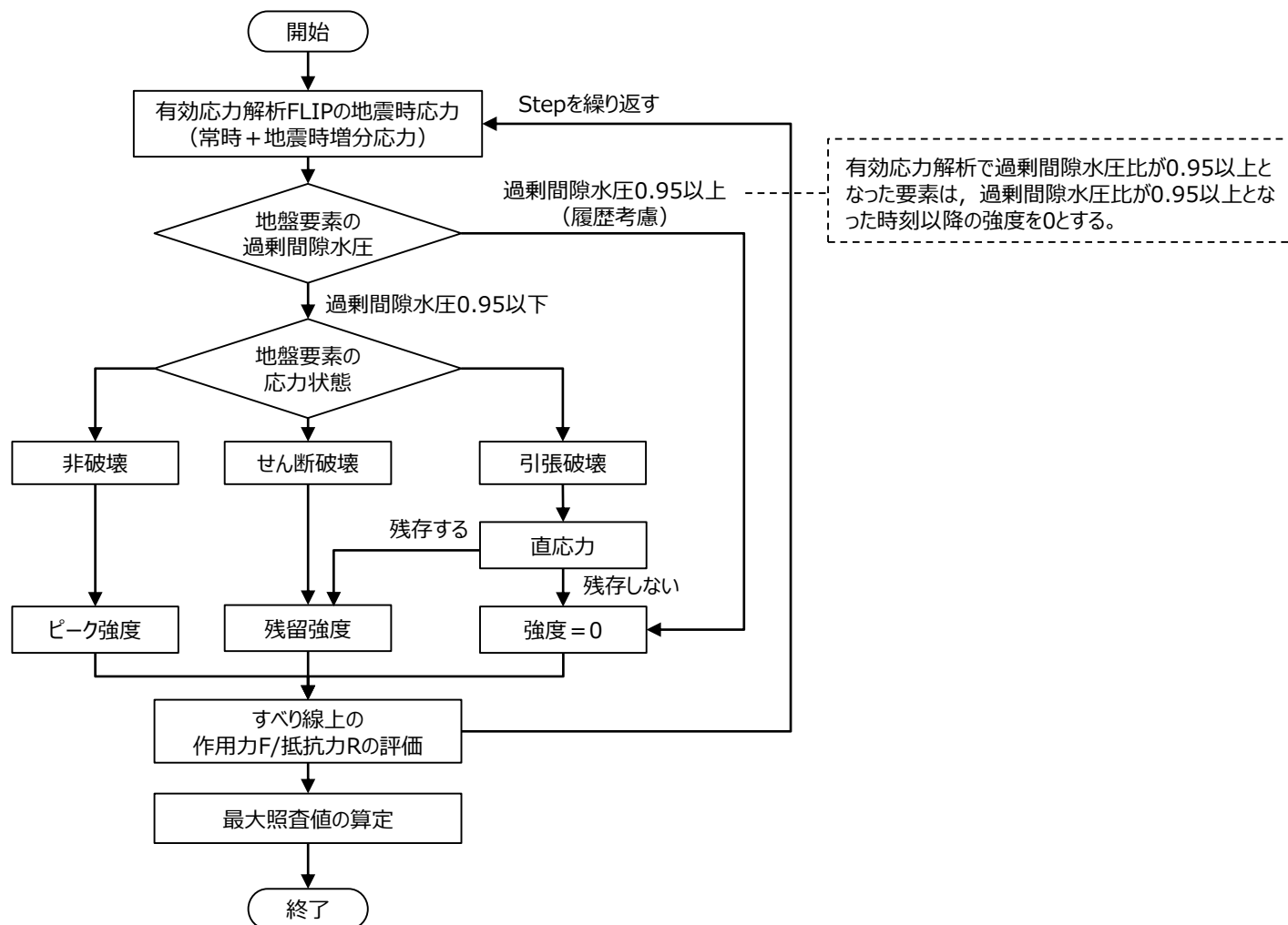


(b)左すべり線

6号機 取水路 (漸縮部)

## 評価方法

- 地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価における照査値の算定フローを以下に示す。



地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価における照査値の算定フロー

## 評価結果

- 液状化を考慮した解析ケース①～③のうち、地震応答解析を実施している全ての解析ケース・地震動について、地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価を実施した。
- 評価の結果、すべり線上の抵抗力Rは作用力Fを上回っており、地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能が確保されることを確認した。

解析ケースの一覧

解析ケース	①	②	③	④	⑤
地盤剛性の設定	地盤剛性 (平均値)	地盤剛性 (+1 $\sigma$ )	地盤剛性 (-1 $\sigma$ )	地盤剛性 (-1 $\sigma$ )	地盤剛性 (+1 $\sigma$ )
液状化強度特性の設定	液状化強度特性 (-1 $\sigma$ )	液状化強度特性 (-1 $\sigma$ )	液状化強度特性 (-1 $\sigma$ )	液状化パラメータ を非適用	液状化パラメータ を非適用

地震応答解析を実施している全ての解析ケース・地震動について評価



水平力・鉛直力同時作用に対する支持性能評価結果

評価断面	方向	解析ケース	基準地震動	すべり線上の 作用力F (kN)	すべり線上の 抵抗力R (kN)	最大照査値 F/R	判定
7号機 スクリーン室	右すべり	①	Ss-1 --	4885	6184	0.79	OK
	左すべり	①	Ss-3 --	4362	5547	0.79	OK
6号機 取水路(漸縮部)	右すべり	③	Ss-3 --	5431	9326	0.59	OK
	左すべり	①	Ss-3 - +	4417	7156	0.62	OK

## まとめ

- 本検討では、評価対象施設を選定し、液状化検討対象層の液状化強度特性（サイクリックモビリティ）を確認し、地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた保守的な仮定による支持性能評価を行った。
- 地震時における施設下方の液状化検討対象層の過剰間隙水圧比は、一時的に0.95を超える地盤要素が認められるものの、地震終了時には、過剰間隙水圧比が0.95を超える地盤要素は認められない。
- 液状化強度試験の結果から、A2s層は、せん断ひずみが緩やかに上昇し、過剰間隙水圧比が上昇と下降を繰り返し0.95を超えない等、サイクリックモビリティの様相を示すことを確認した。
- また、有効応力解析FLIPの結果から、A2s層は、せん断応力の増加に伴って剛性が回復する有効応力経路を示すことから、サイクリックモビリティの様相を示すことを確認した、
- 一部の施設において、液状化検討対象層の過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えていたことを踏まえ、地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた保守的な支持性能評価として、最大鉛直力に対する支持性能評価及び地震時の水平力・鉛直力に対する支持力評価を行った場合でも、十分な支持性能が確保されることを確認した。
- 以上のことから、建物・構築物及び屋外重要土木構造物の耐震評価において、施設下方に分布している液状化検討対象層は地盤の支持性能に与える影響がないことを確認した。