

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

TEPCO

2020年7月9日
東京電力ホールディングス株式会社

工事計画認可申請に係る論点整理について

【説明内容】

- 下記の工事計画認可申請に係る論点及び第863回審査会合における指摘事項に対する回答について説明する。

■ 耐震評価に関する論点整理・指摘事項への回答

分類	No.	説明項目（論点/指摘事項への回答）	関連する 主な説明事項
耐震	1	地盤の支持性能について 【指摘事項に対する回答】	[3]－2
耐津波	2	耐津波設計における浸水防護重点化範囲等の設計について	－

論点1

地盤の支持性能について【指摘事項に対する回答】

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。

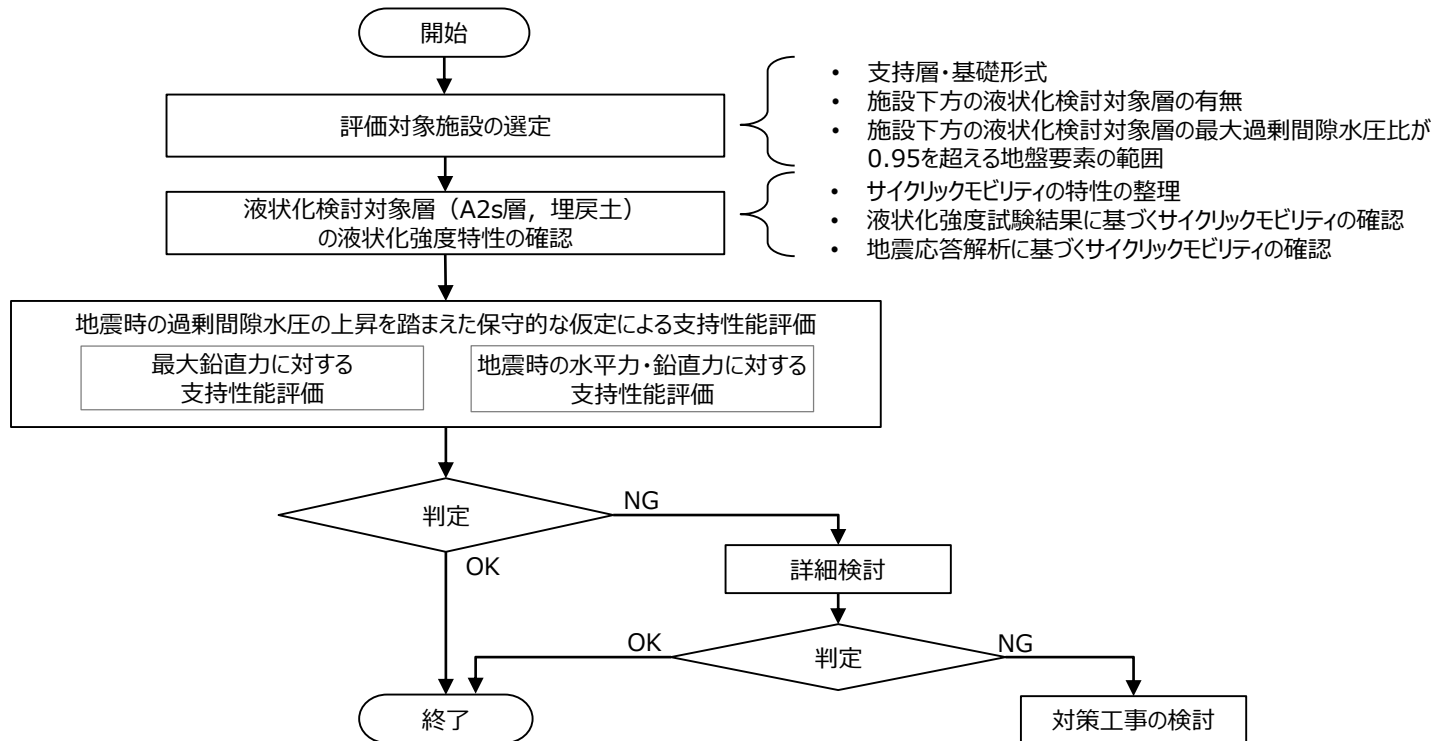
目次

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（A2s層）が分布する施設について、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（A2s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

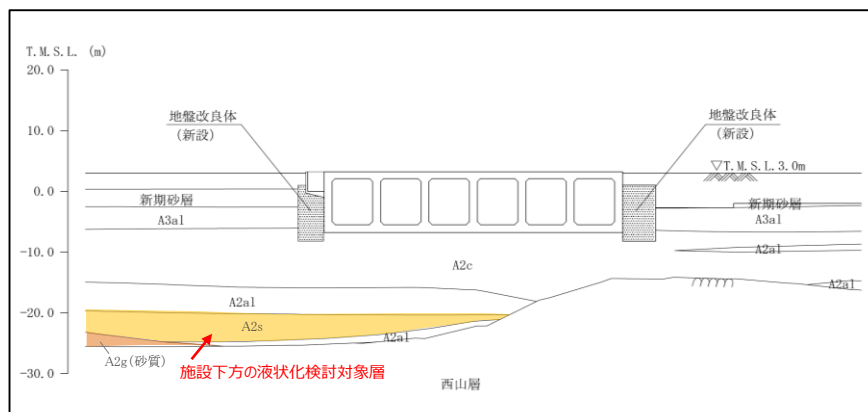
- 建物・構築物及び屋外重要土木構造物のうち、杭や鋼管矢板を介して岩盤に支持する施設を除いた、古安田層に直接支持される施設で、施設下方に液状化検討対象層が分布する施設を整理した。
- その結果、該当する施設として7号機スクリーン室、取水路（漸縮部、一般部）、6号機取水路（漸縮部、一般部）が抽出された。

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

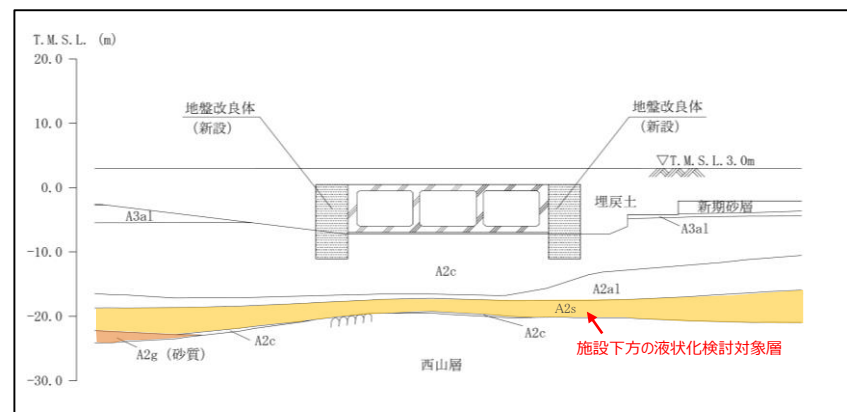
号機	施設		支持層	基礎形式	施設下方における液状化検討対象層の有無	確認要否
7号機	格納容器圧力逃がし装置基礎		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
	大物搬入建屋		西山層	杭基礎 (杭を介して岩着)	—	—
	海水貯留堰		古安田層, 西山層	鋼管矢板基礎	無し	—
	スクリーン室		古安田層	直接基礎	有り	○
	取水路	漸縮部	古安田層	直接基礎	有り	○
		一般部	古安田層	直接基礎	有り	○
		漸拡部	古安田層, 西山層, マンメイドロック	直接基礎	無し	—
	補機冷却用海水取水路		マンメイドロック	直接基礎	無し	—
	軽油タンク基礎		西山層	杭基礎 (杭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

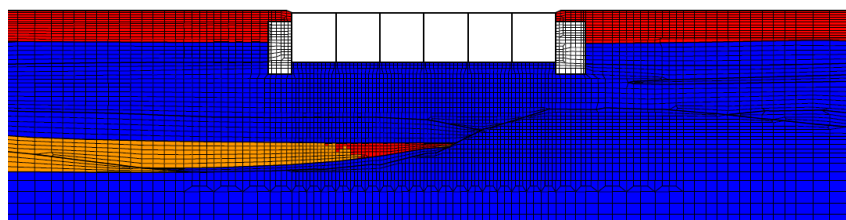
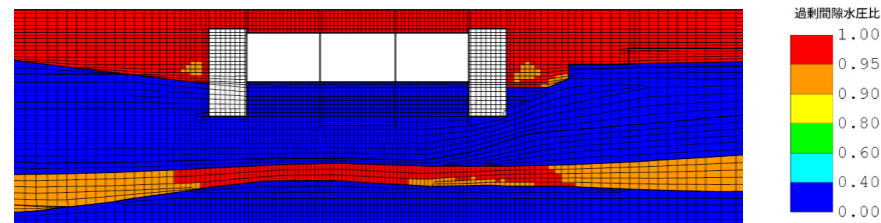
- 抽出された施設（7号機スクリーン室，取水路（漸縮部，一般部），6号機取水路（漸縮部，一般部））について，地震時の全時刻歴を通した各地盤要素の最大過剰間隙水圧比分布を確認した。
- その結果，7号機スクリーン室及び6号機取水路（漸縮部）について，施設下方の液状化検討対象層（A2s層）の比較的広い範囲に最大過剰間隙水圧比が0.95を超える地盤要素が認められたことから，本検討の評価対象施設として選定した。



7号機スクリーン室の断面図



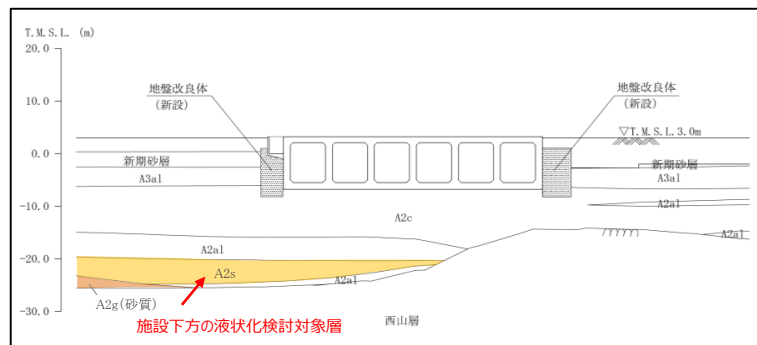
6号機取水路（漸縮部）の断面図

7号機スクリーン室の最大過剰間隙水圧比分布図
(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図
(解析ケース③, Ss-3--)

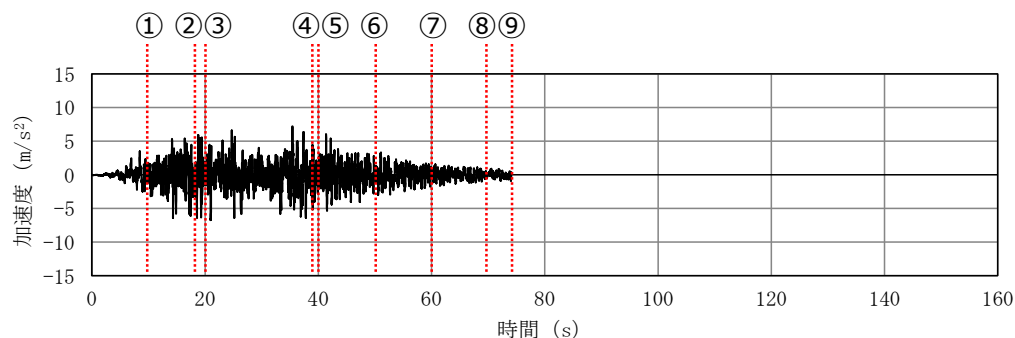
注：最大過剰間隙水圧比分布図は，地震時の全時刻を通した各地盤要素の過剰間隙水圧比の最大値を示している。

過剰間隙水圧比の発生状況（7号機スクリーン室）

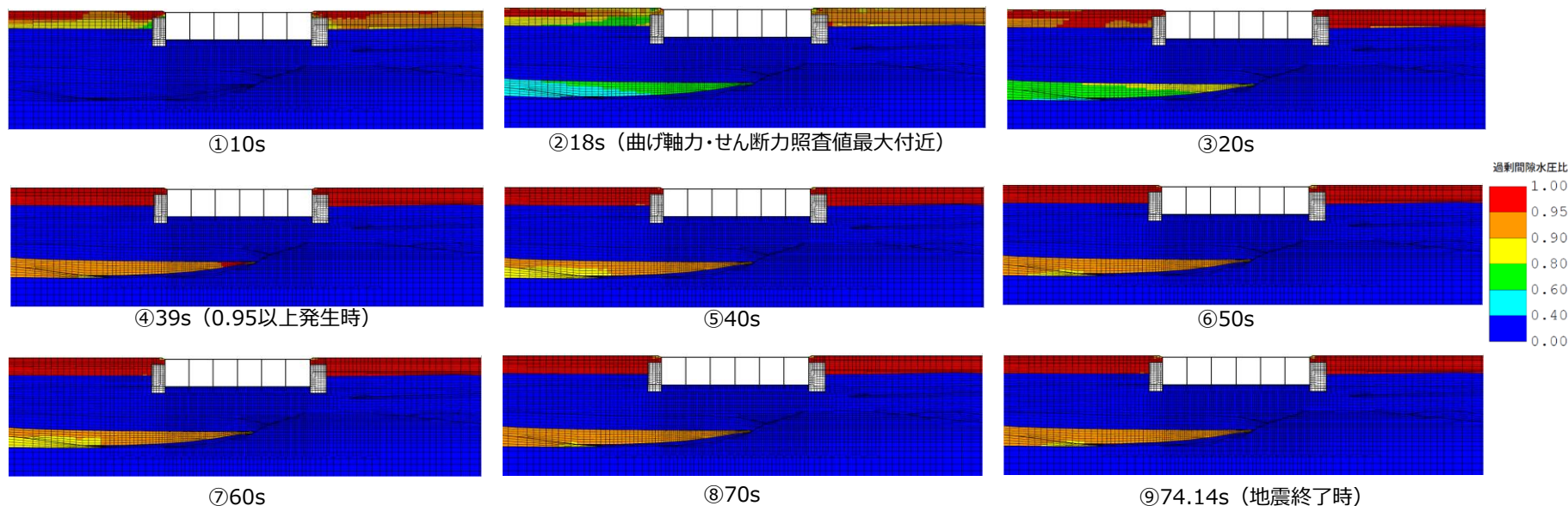
- 施設下方の液状化検討対象層（A2s層）は、過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えるものの、地震終了時には0.95以下となる。



7号機スクリーン室の断面図



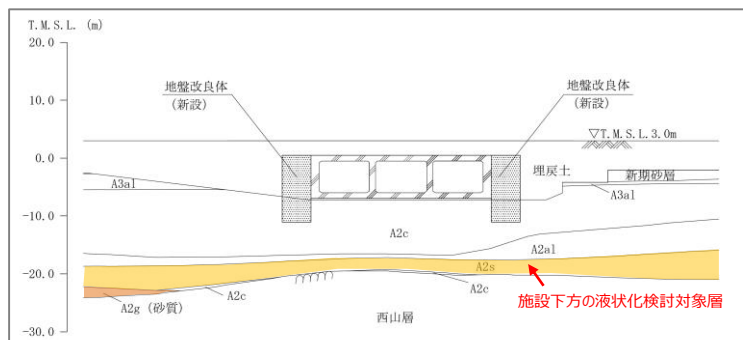
基準地震動の時刻歴波形（水平方向：Ss-3）



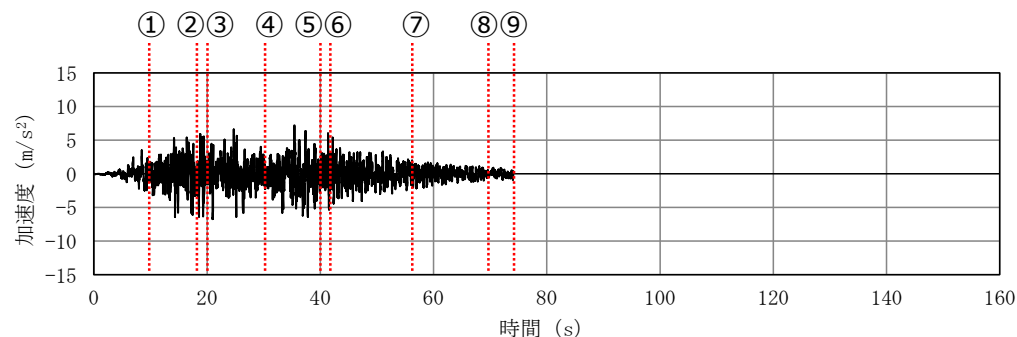
7号機スクリーン室の過剰間隙水圧の発生状況

過剰間隙水圧比の発生状況（6号機取水路（漸縮部））

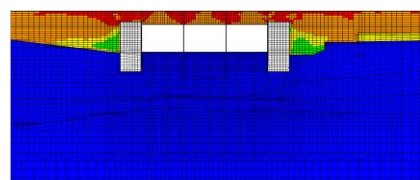
- 施設下方の液状化検討対象層（A2s層）は、過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えるものの、地震終了時には0.95以下となる。



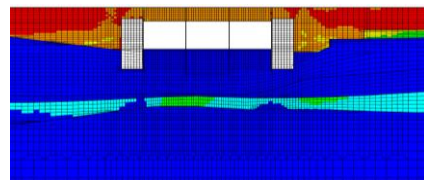
6号機取水路（漸縮部）の断面図



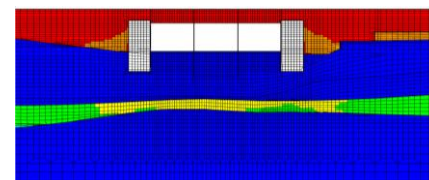
基準地震動の時刻歴波形（水平方向：Ss-3）



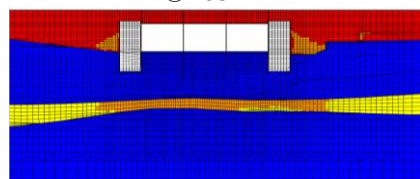
①10s



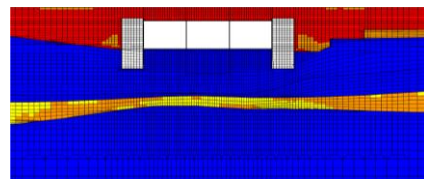
②18s（曲げ軸力・せん断力照査値最大付近）



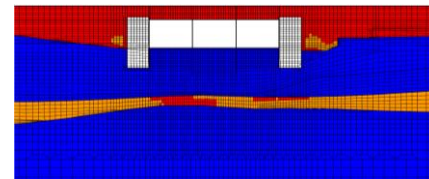
③20s



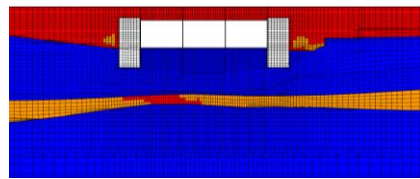
④30s



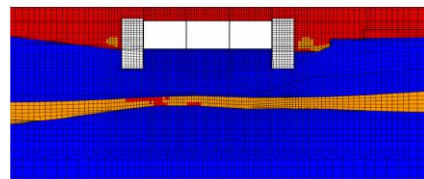
⑤40s



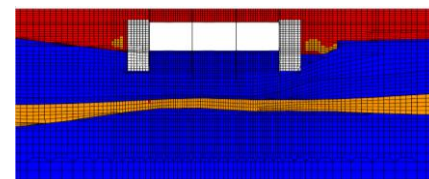
⑥42s（0.95以上発生時）



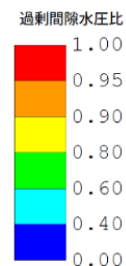
⑦57s（0.95以上発生時）



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。

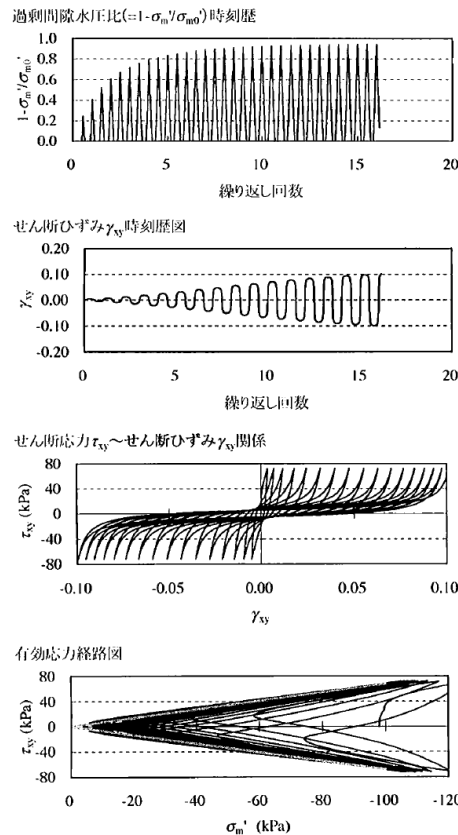


図-1 密な砂の非排水繰返しせん断挙動の例¹⁾

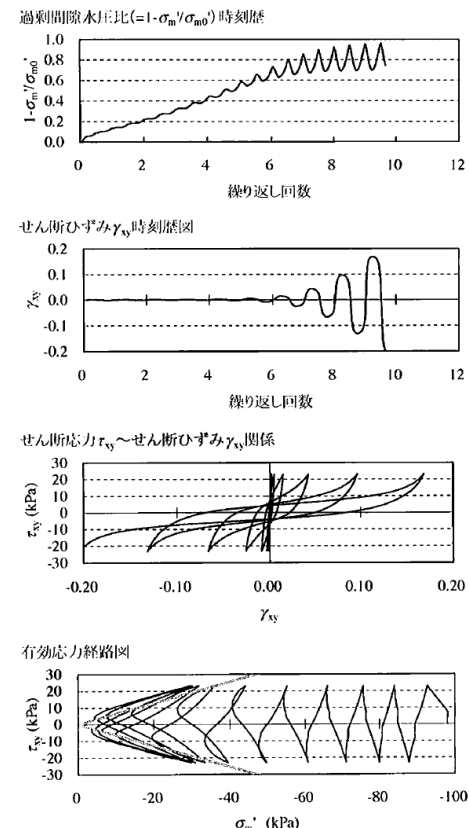


図-2 ゆるい砂の非排水繰返しせん断挙動の例¹⁾

（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。

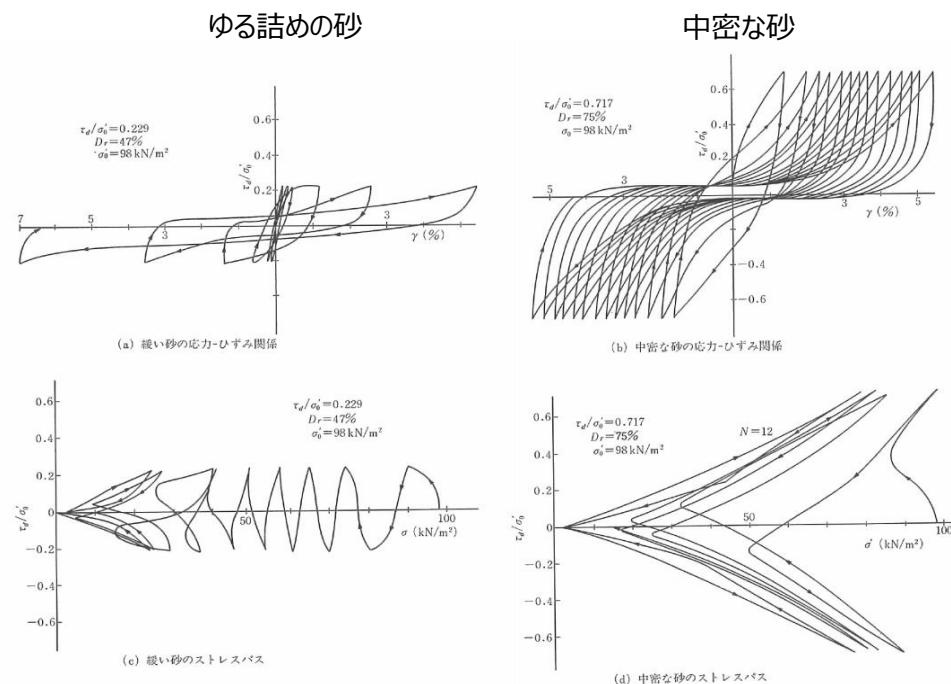
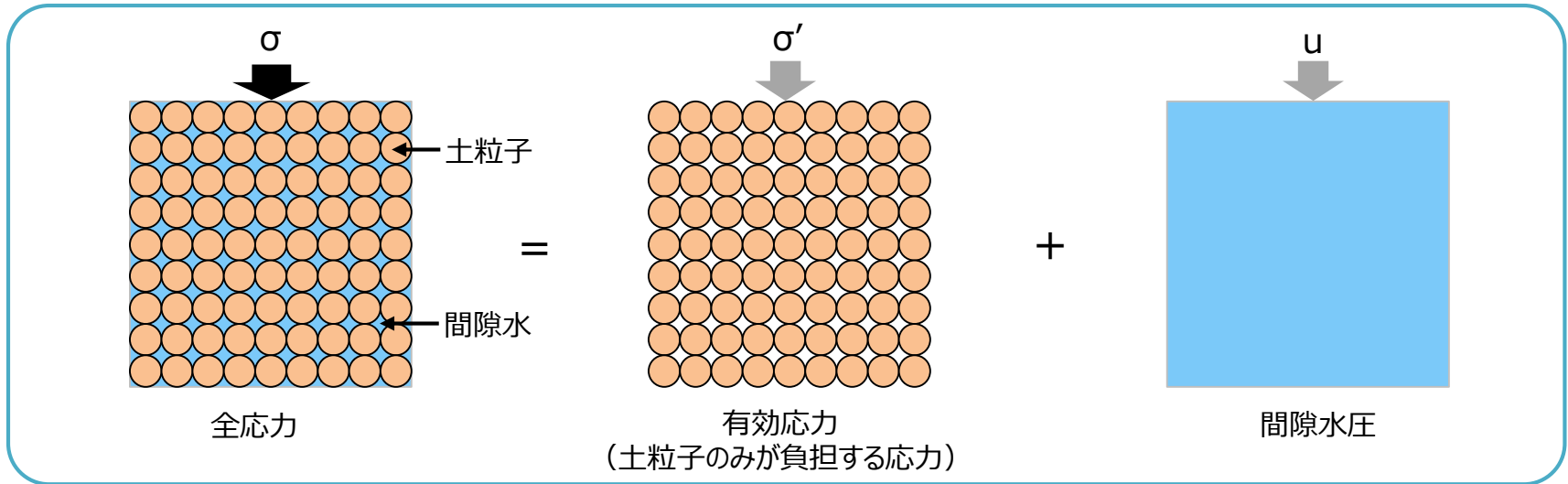


図 4-5 ゆる詰めと密な試料の応力経路および応力～ひずみ関係の比較（繰返しねじりせん断試験，富士川砂）³⁾

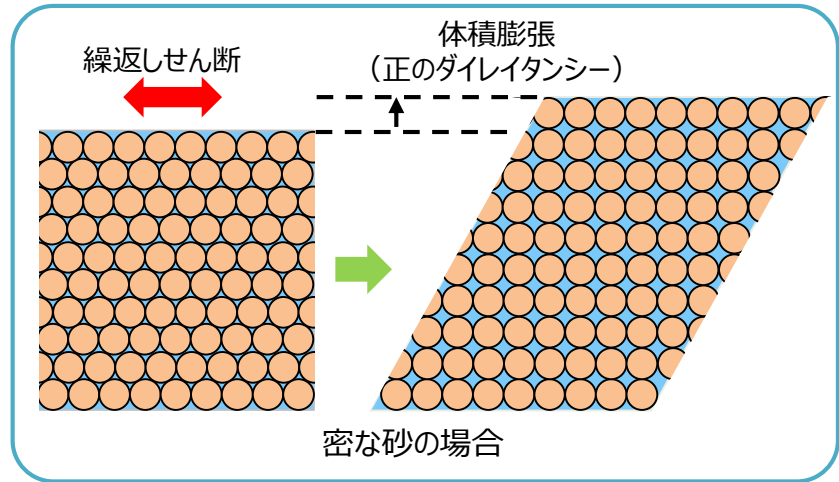
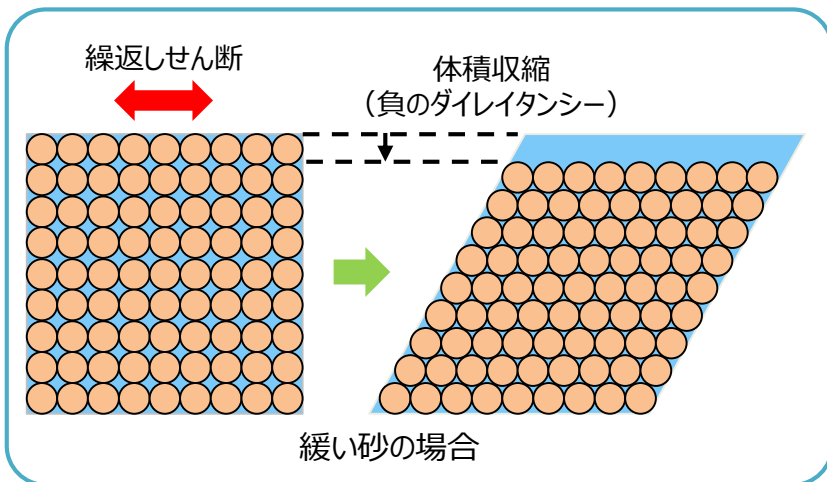
ゆる詰めと密な試料の応力経路及び応力～ひずみ関係の比較

（出典）液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，1991年5月

サイクリックモビリティの概念図

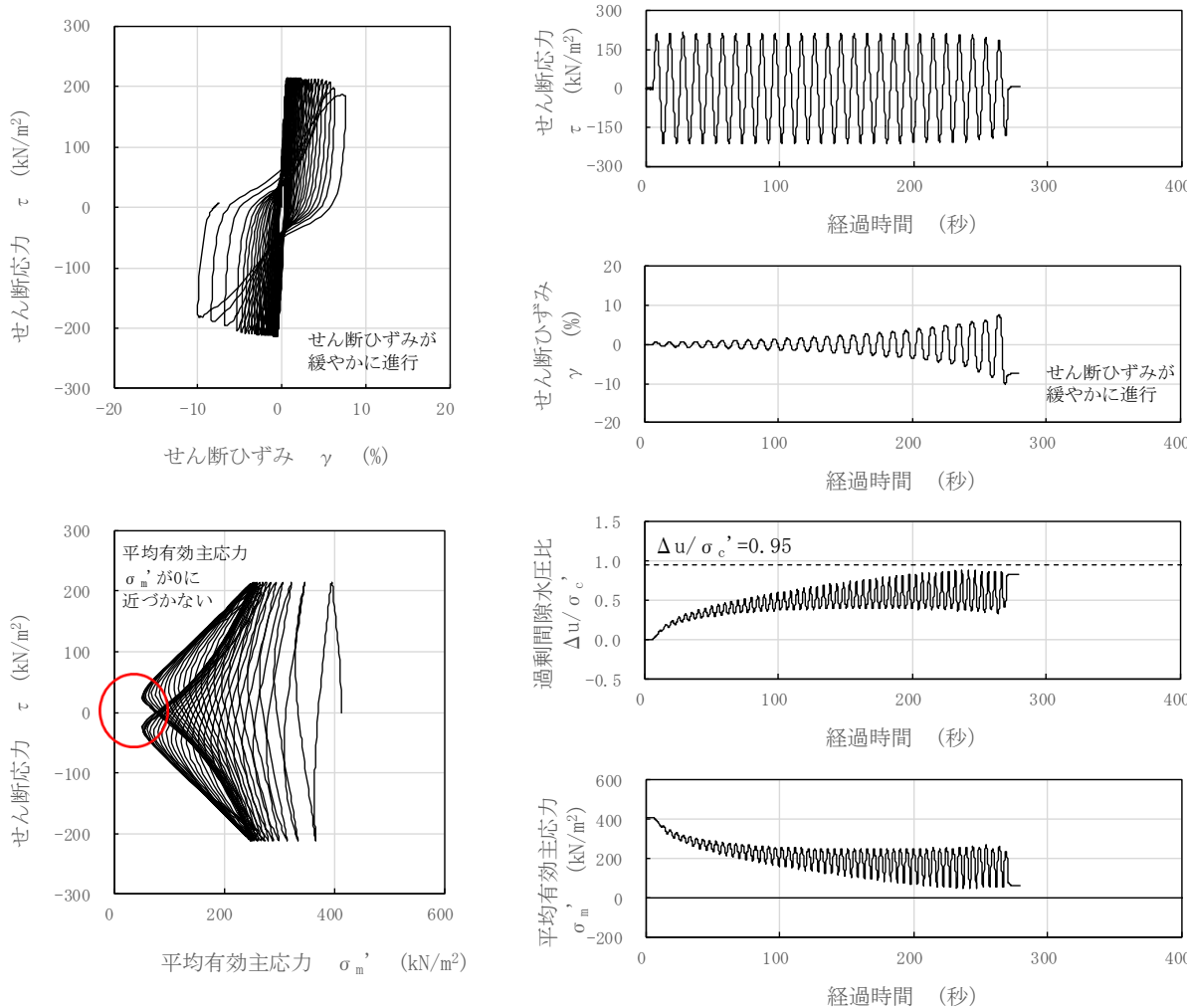


地盤の強度の概要



地盤のダイレイタンス特性の概要

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進行
- 平均有効主応力 σ'_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

↓

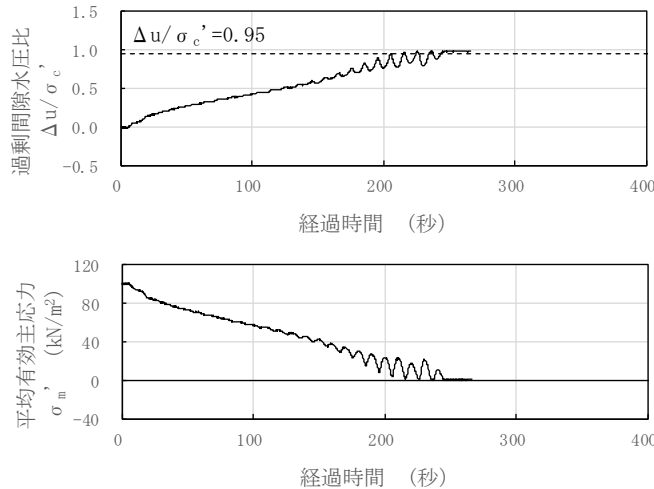
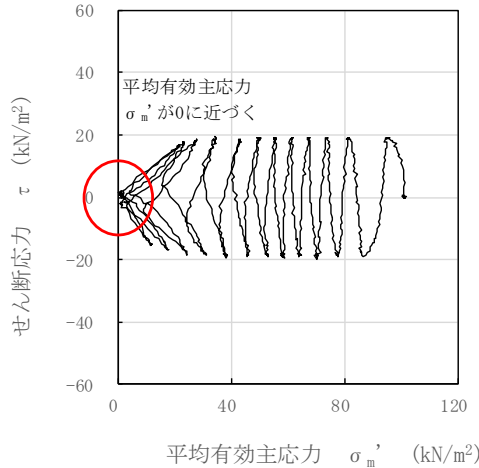
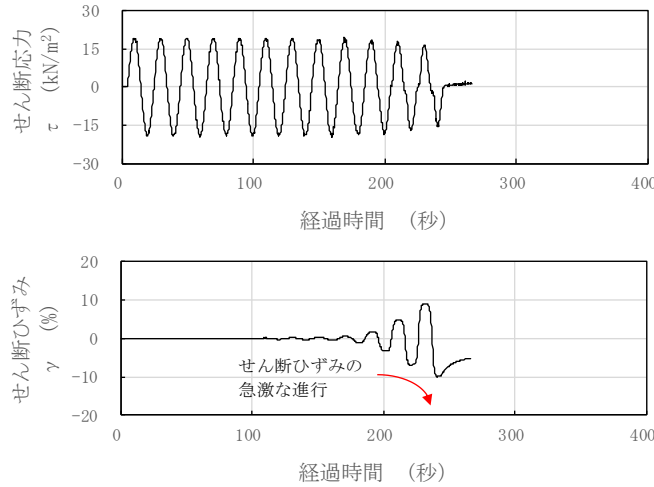
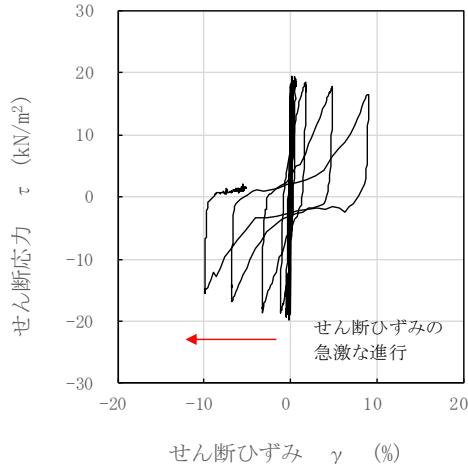
液状化強度試験の結果から、サイクリックモビリティの特徴を示すことを確認。

↓

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/m², せん断応力比=0.519)

液状化強度試験の結果（埋戻土）



【埋戻土の試験結果】

- せん断ひずみの急激な進行
- 平均有効主応力 σ'_m が0に近づく
- 過剰間隙水圧比が上昇と下降を繰り返し0.95を超える



液状化強度試験の結果から、液状化の特徴を示すことを確認。

液状化強度試験結果の一例（埋戻土）
 (GL.-5.27~5.39m, 有効拘束圧100kN/m², せん断応力比=0.190)

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。

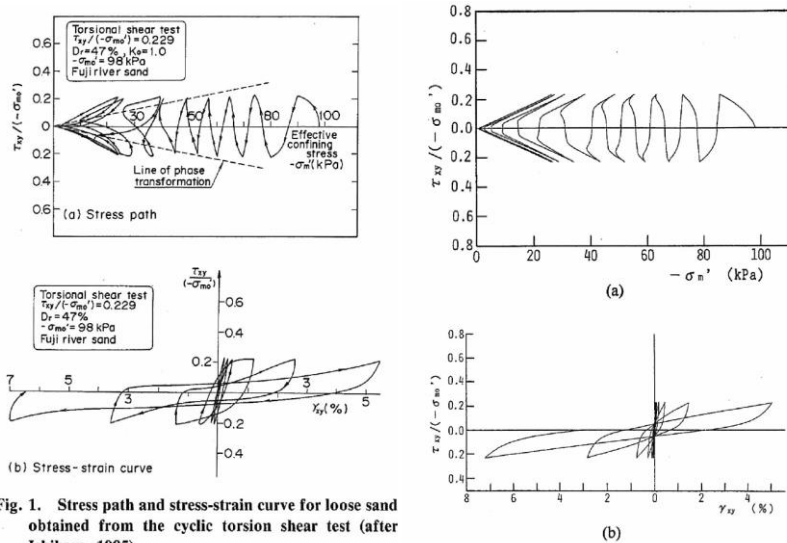


Fig. 1. Stress path and stress-strain curve for loose sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

実験結果

ゆるい砂 (相対密度 $D_r=47\%$)

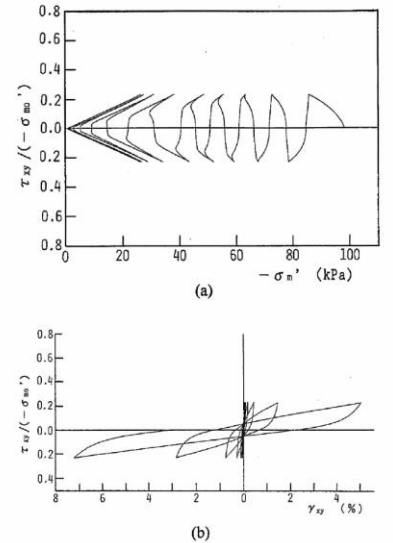


Fig. 9. Computed results of loose sand to be compared with the laboratory results in Fig. 1. (a) Stress path, (b) Stress strain curve

解析結果

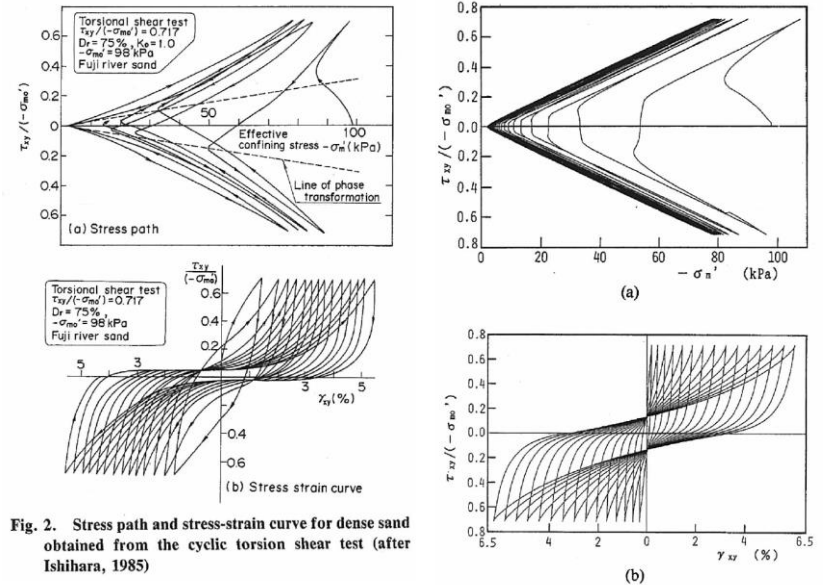


Fig. 2. Stress path and stress-strain curve for dense sand obtained from the cyclic torsion shear test (after Ishihara, 1985)

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.

(参考) 相対密度: A2s層 (平均値96%), 埋戻土 (平均値75%)

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。なお、当サイクリックモビリティの実測例では、観測地点周辺において、地割れや噴水、噴砂などの地盤変状は発生していないことが報告されている。

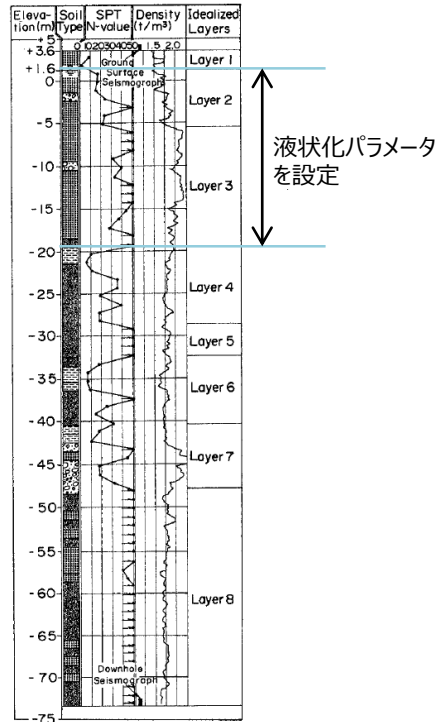


Fig. 21. Idealized soil layers for response analysis

解析モデル

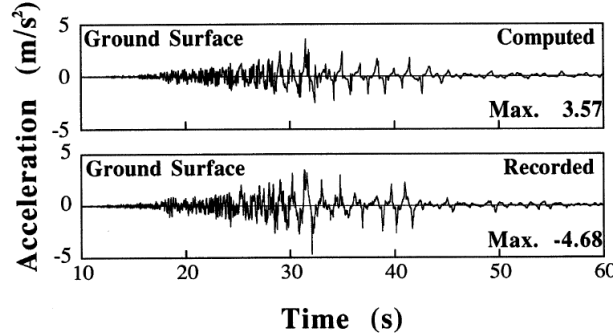


Fig. 24. Recorded and computed accelerations at the ground surface

地表面加速度の比較（上段：解析値，下段：観測値）

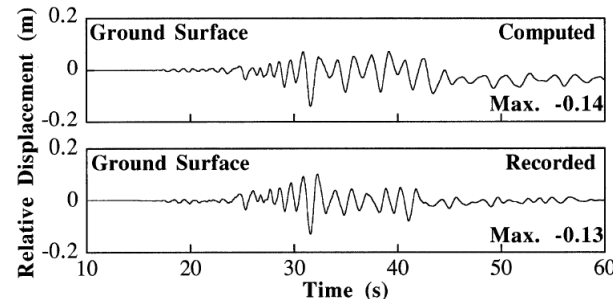
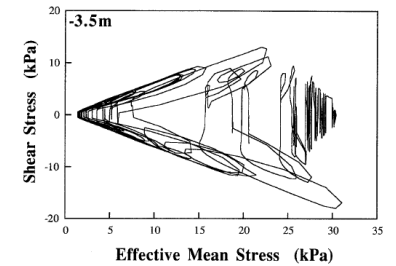
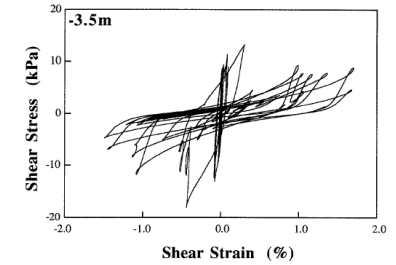


Fig. 25. Recorded and computed displacements at the ground surface relative to the base at a depth of 77 meters

地表面変位の比較（上段：解析値，下段：観測値）



(a)



(b)

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

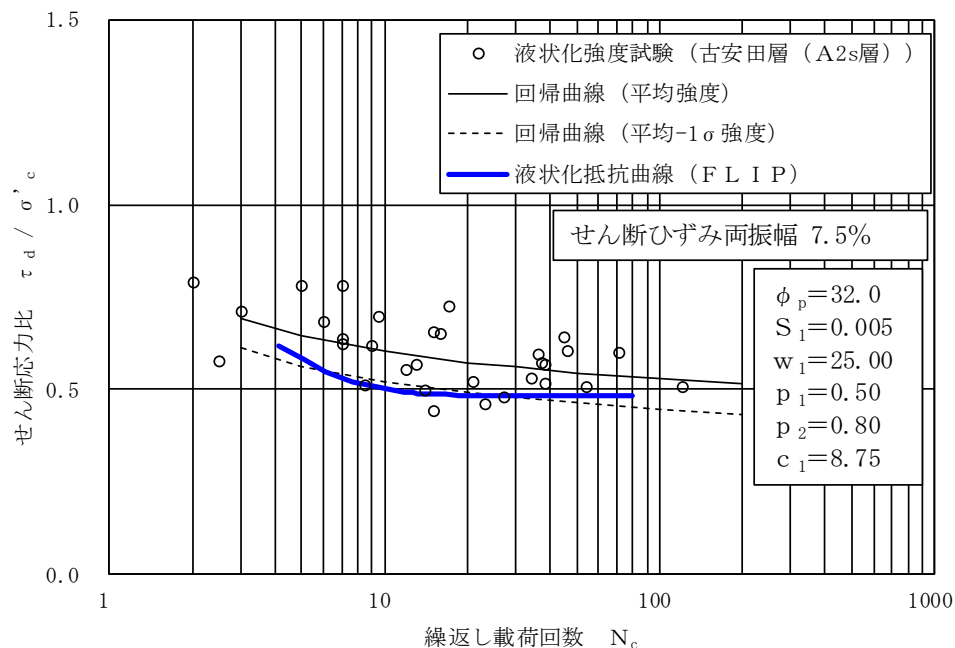
解析値の一例

（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、A2s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 σ に設定している。

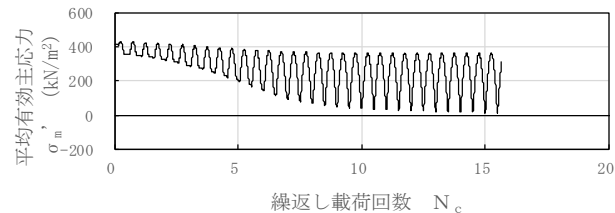
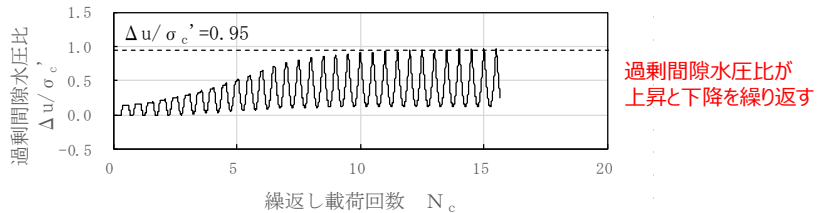
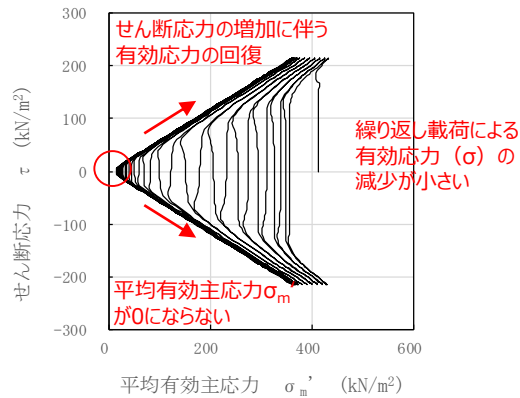
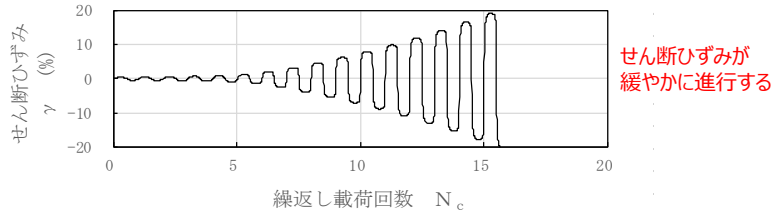
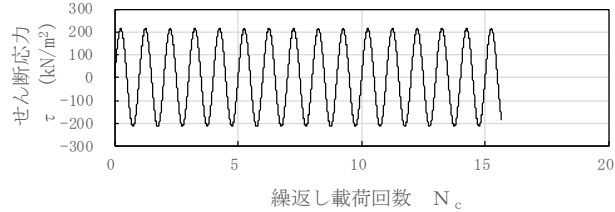
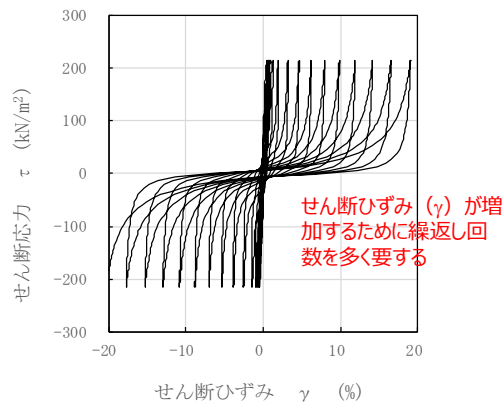


有効応力解析における液状化強度特性の設定 (A2s層)

- 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 σ に設定している。

解析コードFLIPによる要素シミュレーションの結果 (A2s層)

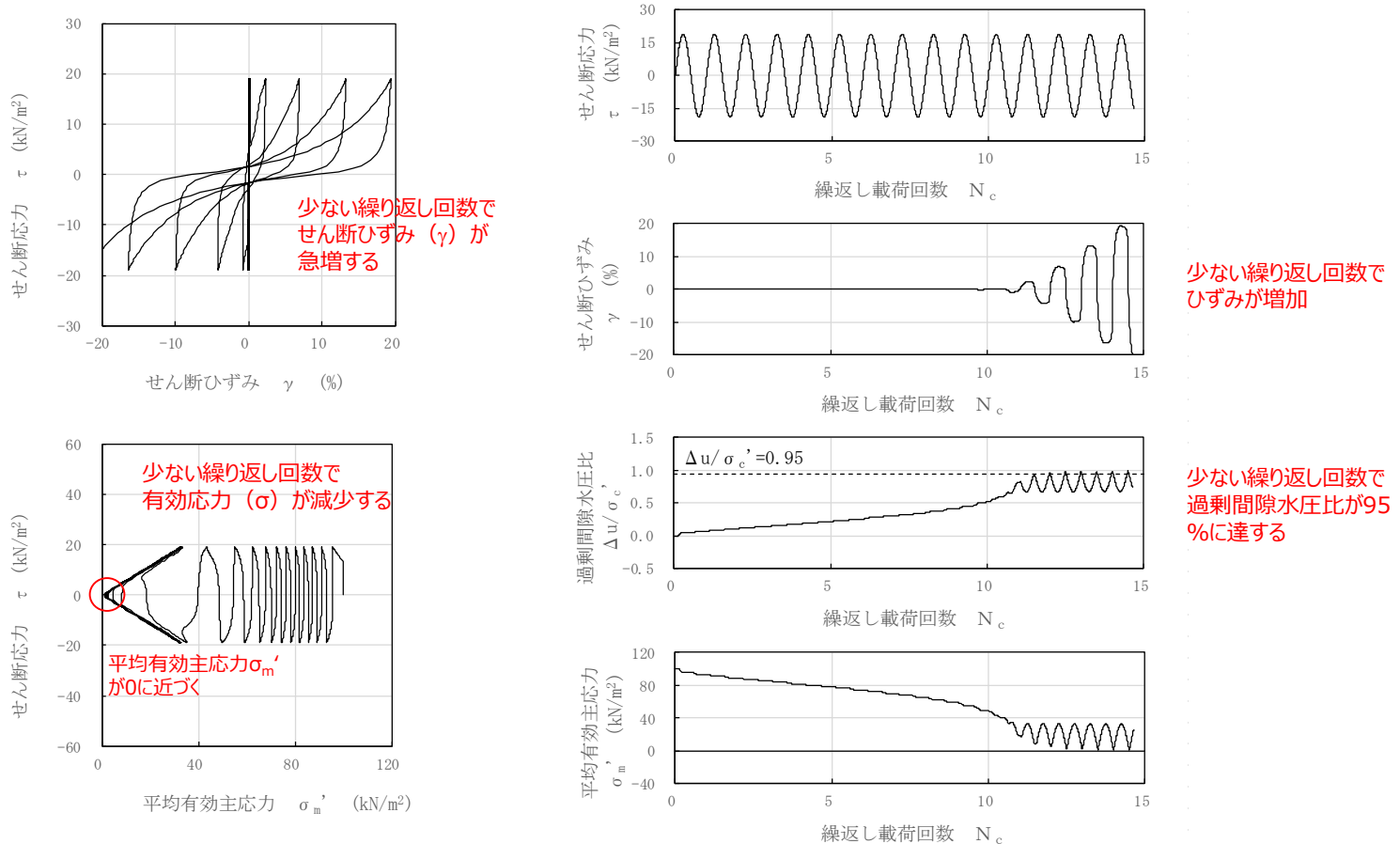
- 解析コードFLIPによるA2s層の要素シミュレーション（液状化強度試験の再現解析）の結果を下図に示す（液状化強度特性は液状化抵抗曲線の平均値-1 σ に設定）。
- A2s層は、せん断応力の増加に伴い有効応力が回復しており、また、過剰間隙水圧比が上昇と下降を繰り返す等の様相が認められることから、解析コードFLIPにより、A2s層のサイクリックモビリティを再現できることを確認した。



A2s層の要素シミュレーションの結果 (有効拘束圧412kN/m², せん断応力比 $R_{L20}=0.519$)

解析コードFLIPによる要素シミュレーションの結果（埋戻土）

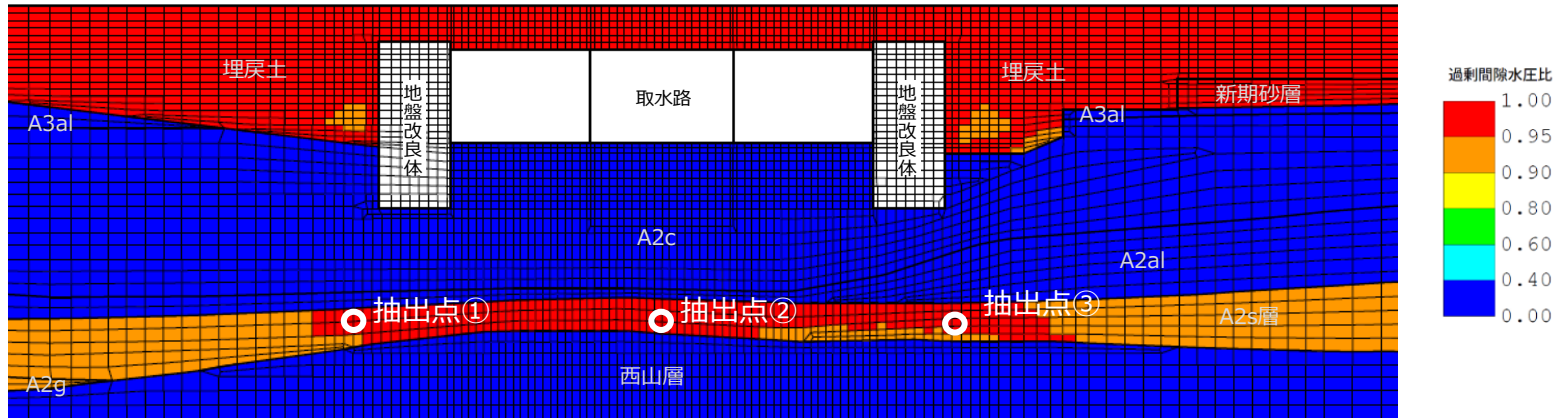
- 参考として、解析コードFLIPによる埋戻土の要素シミュレーションの結果を下図に示す（液状化強度特性は液状化抵抗曲線の平均値-1 σ に設定）。
- 埋戻土は、A2s層と比べて、少ない繰返し回数でせん断ひずみが急増し、また、少ない繰返し回数で過剰間隙水圧比が95%に達しており、液状化の様相を示している。



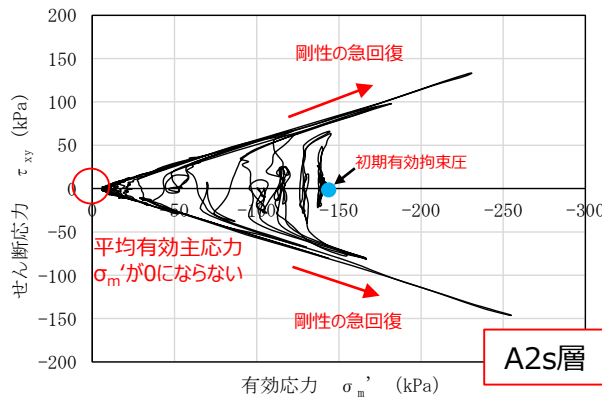
埋戻土の要素シミュレーションの結果（有効拘束圧100kN/m²，せん断応力比 $R_{L20}=0.190$ ）

有効応力解析による地震応答解析結果（有効応力経路：A2s層）

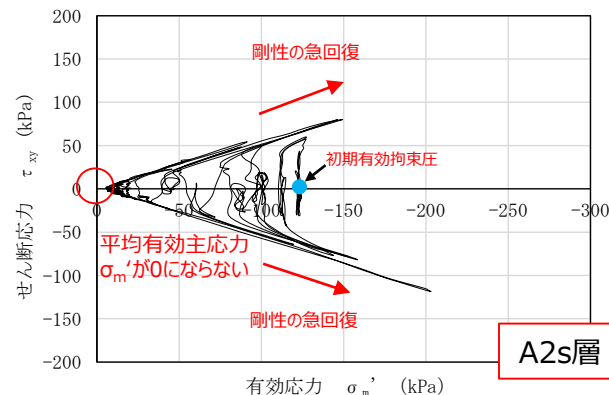
- A2s層の基準地震動Ssに対する有効応力経路を確認した結果、せん断応力の発生に伴い初期の有効拘束圧（有効応力経路の始点）より大きくなるような剛性の急回復があることから、サイクリックモビリティの様相を呈していることを確認した。



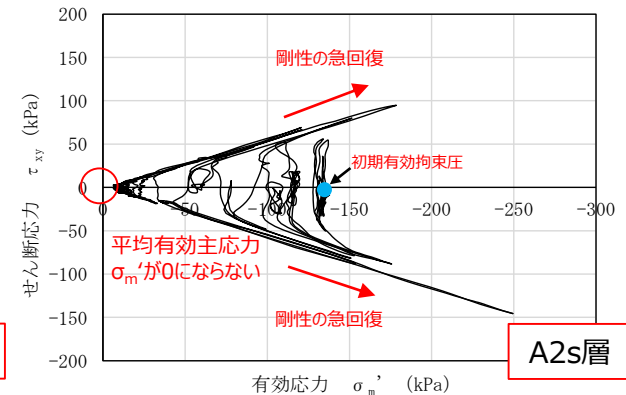
6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布
（解析ケース③，Ss-3--）



(a) 抽出点①



(b) 抽出点②

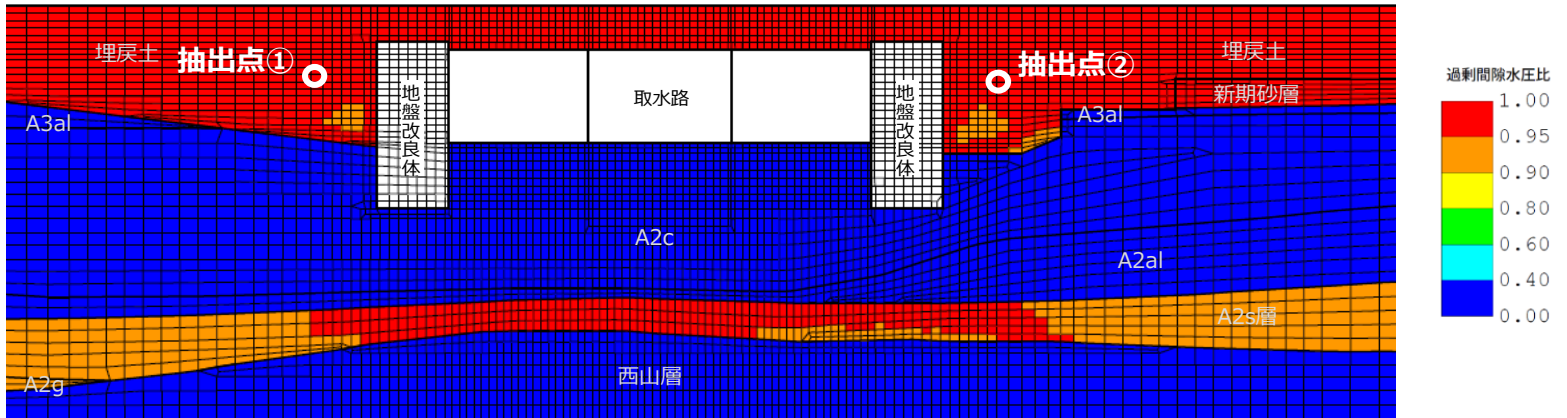


(c) 抽出点③

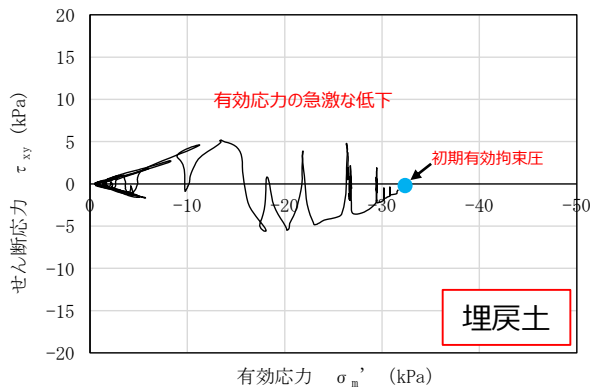
A2s層の有効応力経路（解析ケース③，Ss-3--）

有効応力解析による地震応答解析結果（有効応力経路：埋戻土）

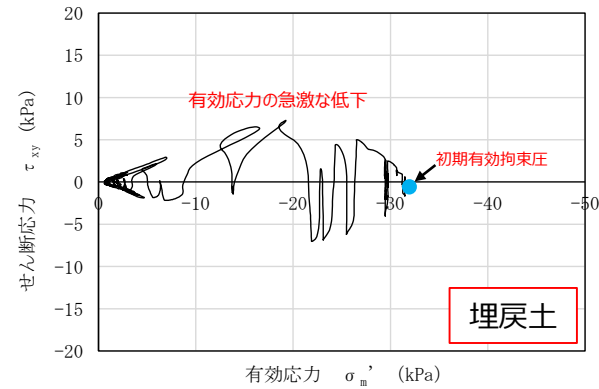
- 埋戻土の基準地震動 S_s に対する有効応力経路を確認した結果、せん断応力の発生に伴い有効応力が急激に低下することから、液状化の様相を呈していることを確認した。



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

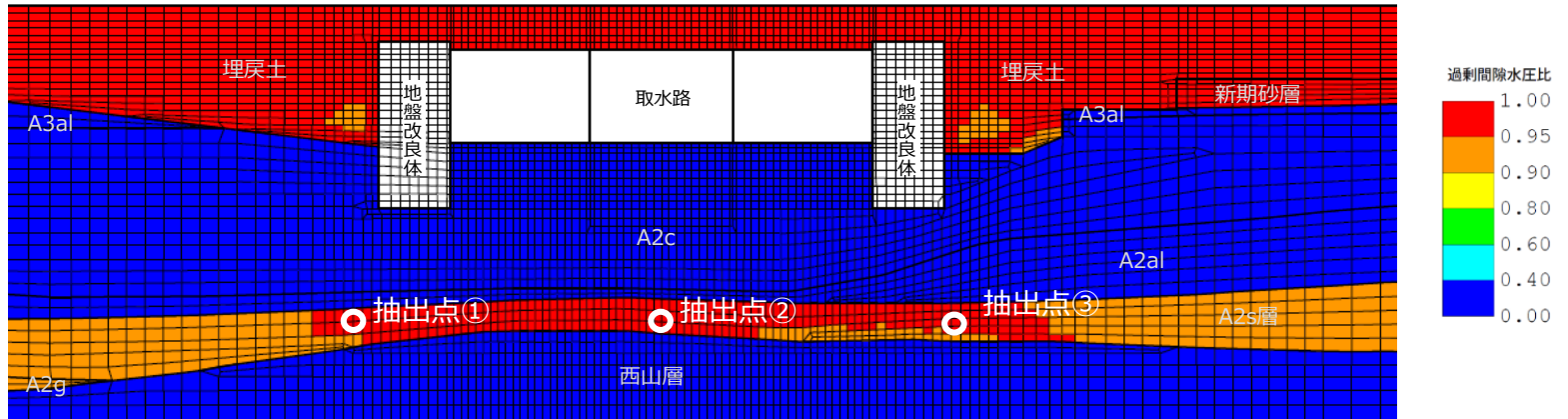


(b) 抽出点②

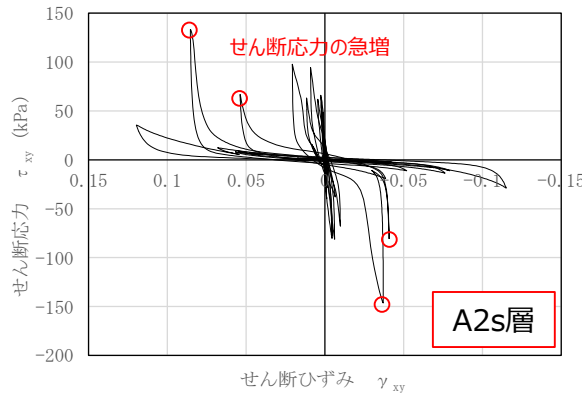
埋戻土の有効応力経路（解析ケース③, S_s-3-- ）

有効応力解析による地震応答解析結果（せん断応力～せん断ひずみ関係：A2s層）

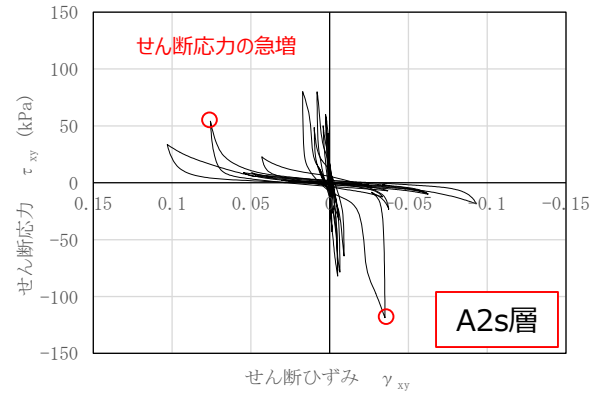
- A2s層の基準地震動Ssに対するせん断応力～せん断ひずみ関係を確認した結果、せん断ひずみが大きくなるとせん断応力の急増が認められることから、サイクリックモビリティの様相を呈していることを確認した。



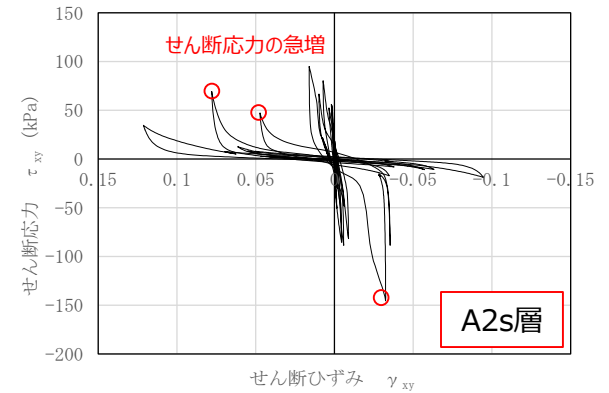
6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布
（解析ケース③，Ss-3--）



(a) 抽出点①



(b) 抽出点②

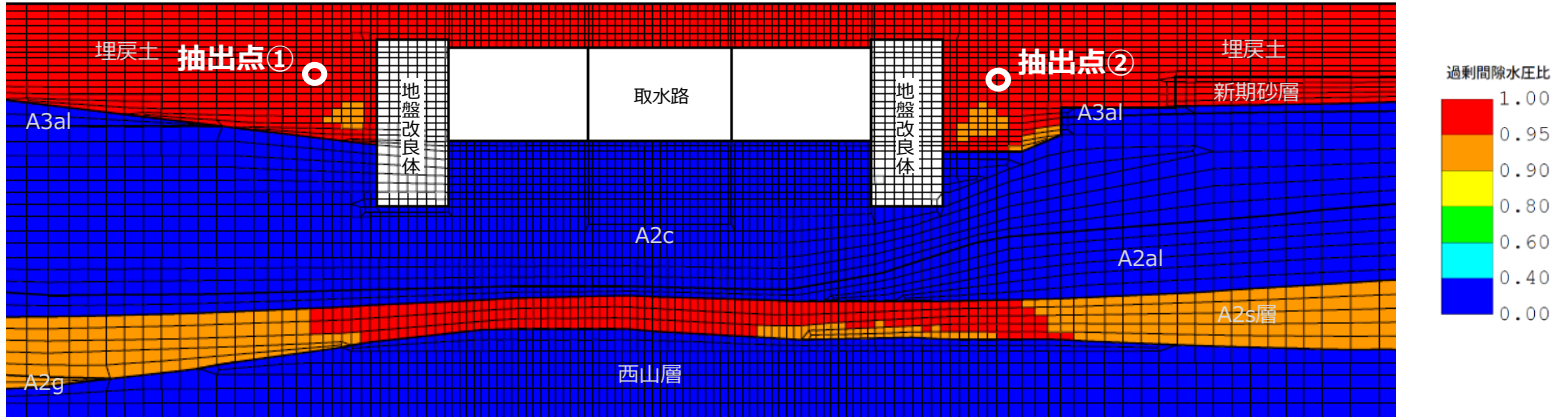


(c) 抽出点③

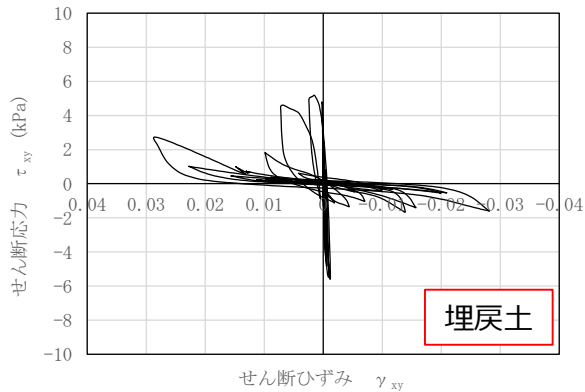
A2s層のせん断応力～せん断ひずみ関係（解析ケース③，Ss-3--）

有効応力解析による地震応答解析結果（せん断応力～せん断ひずみ関係：埋戻土）

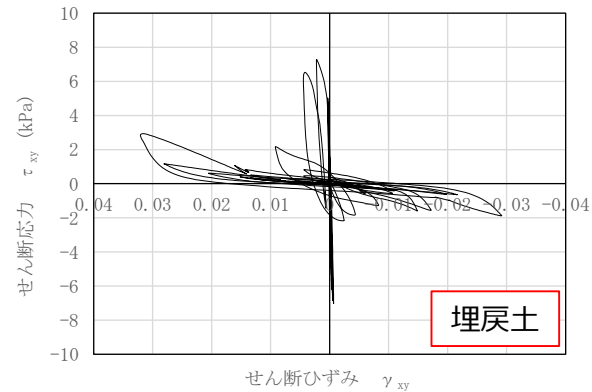
- 埋戻土の基準地震動 S_s に対するせん断応力～せん断ひずみ関係を確認した結果、A2s層で見られたひずみの増加に伴うせん断応力の急増が認められないことから、液状化の様相を呈していることを確認した。



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

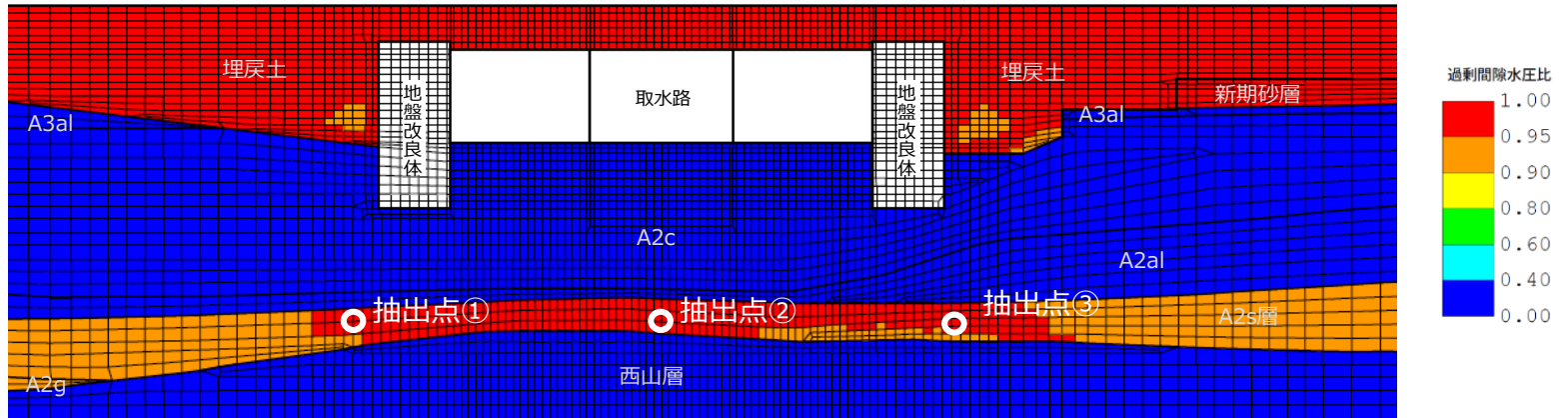


(b) 抽出点②

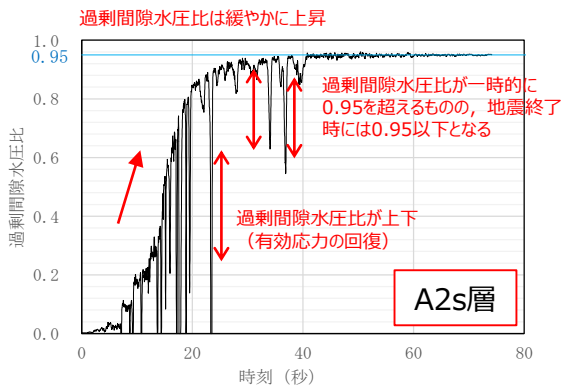
埋戻土のせん断応力～せん断ひずみ関係（解析ケース③， S_s-3-- ）

有効応力解析による地震応答解析結果（過剰間隙水圧比：A2s層）

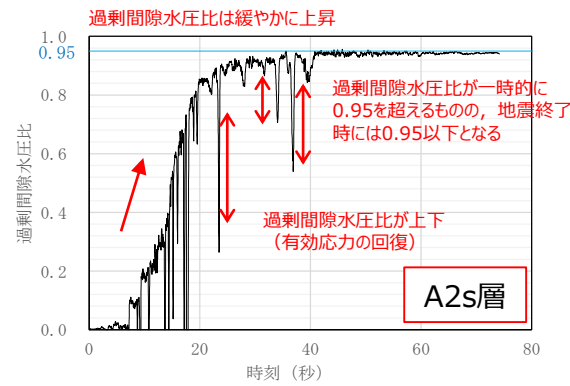
- A2s層の基準地震動Ssに対する過剰間隙水圧比の時刻歴推移を確認した結果、過剰間隙水圧比の上昇は比較的緩やかであり、過剰間隙水圧比が上下する現象（せん断ひずみの発生に伴う有効応力の回復）が確認されることから、サイクリックモビリティの様相を呈していることを確認した。



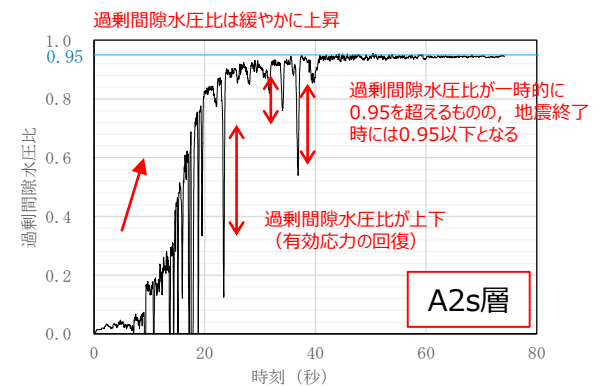
6号機取水路（漸縮部）の最大過剰間隙水圧比分布
（解析ケース③，Ss-3--）



(a) 抽出点①



(b) 抽出点②

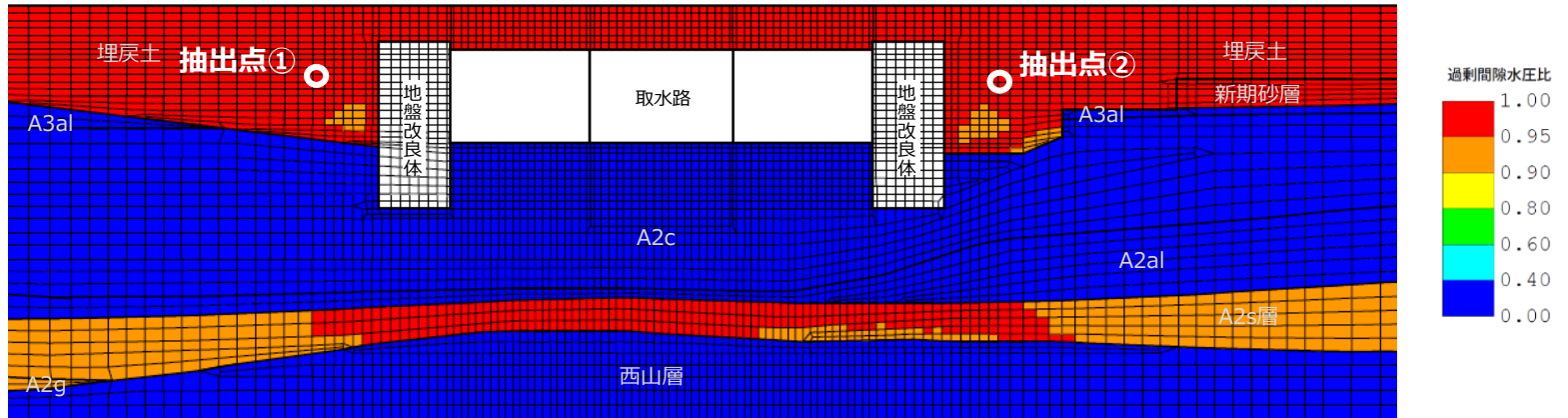


(c) 抽出点③

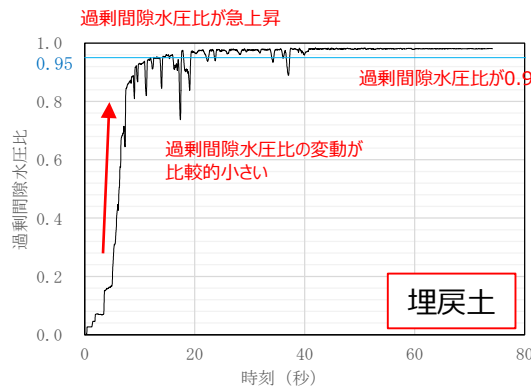
A2s層の過剰間隙水圧比の時刻歴推移（解析ケース③，Ss-3--）

有効応力解析による地震応答解析結果（過剰間隙水圧比：埋戻土）

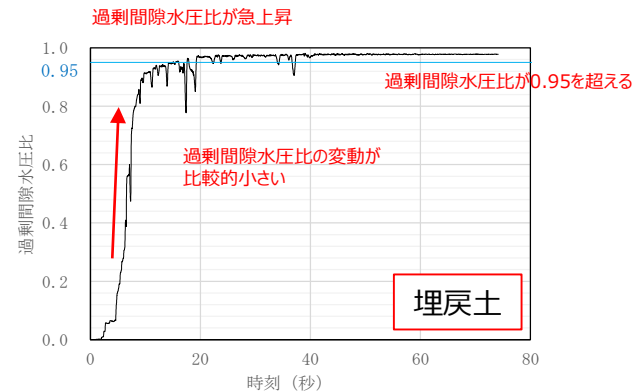
- 埋戻土の基準地震動Ssに対する過剰間隙水圧比の時刻歴推移を確認した結果、地震直後に過剰間隙水圧比が急上昇しており、A2s層で見られた過剰間隙水圧比の変動（有効応力の回復）が少ないことから、液状化の様相を呈していることを確認した。



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，Ss-3--）



(a) 抽出点①

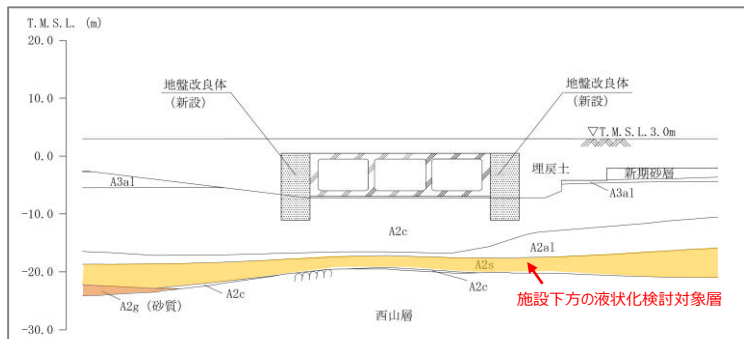


(b) 抽出点②

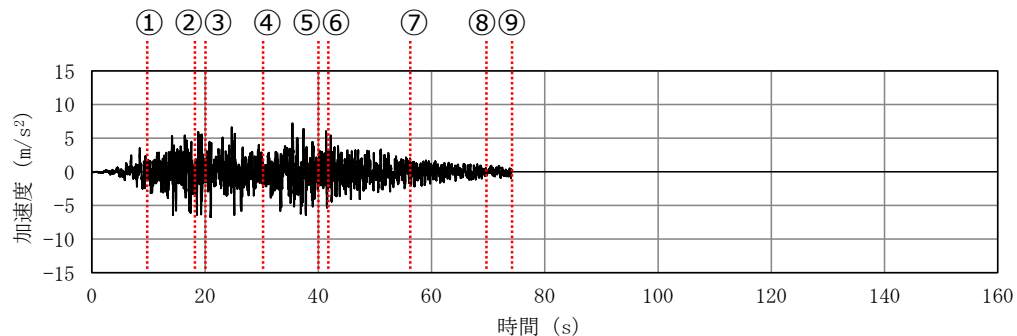
埋戻土の過剰間隙水圧比の時刻歴推移（解析ケース③，Ss-3--）

地盤の有効応力の時刻歴推移

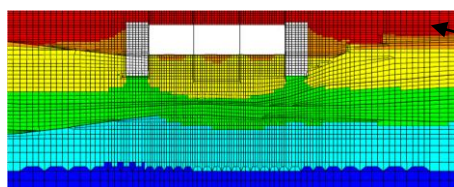
- A2s層の基準地震動Ssに対する有効応力の時刻歴推移を確認した結果、全時刻において有効応力が保持されていることから、サイクリックモビリティの様相を呈しており、西山層まで鉛直力を伝達することを確認した。



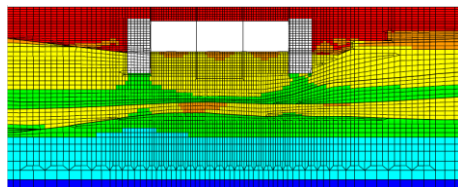
6号機取水路（漸縮部）の断面図



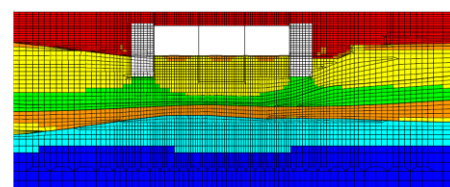
基準地震動の時刻歴波形（水平方向：Ss-3）



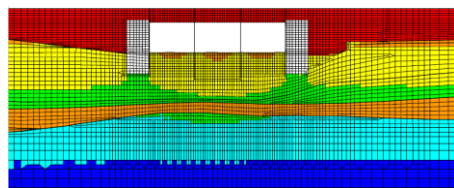
① 10s



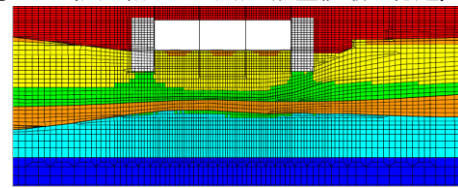
② 18s（曲げ軸力・せん断力照査値最大付近）



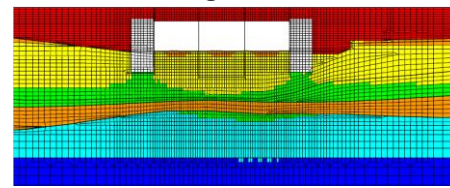
③ 20s



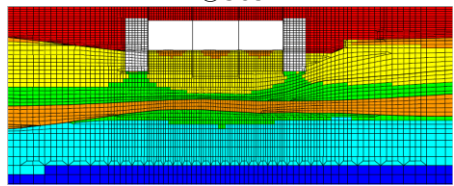
④ 30s



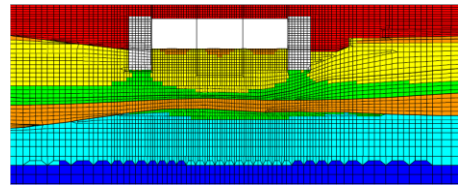
⑤ 40s



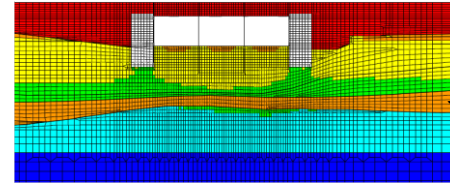
⑥ 42s（0.95以上発生時）



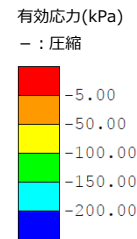
⑦ 57s（0.95以上発生時）



⑧ 70s（0.95以上発生時）



⑨ 74.14s（地震終了時）

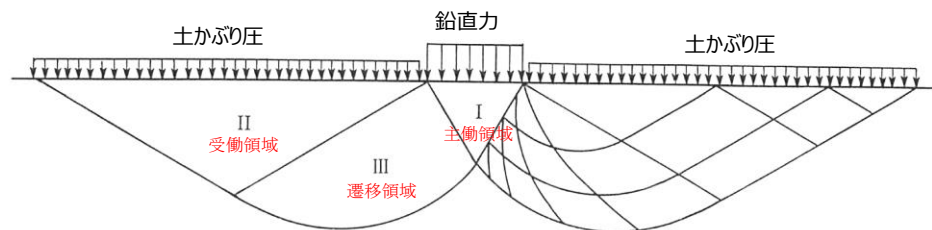


6号機取水路（漸縮部）の有効応力の発生状況

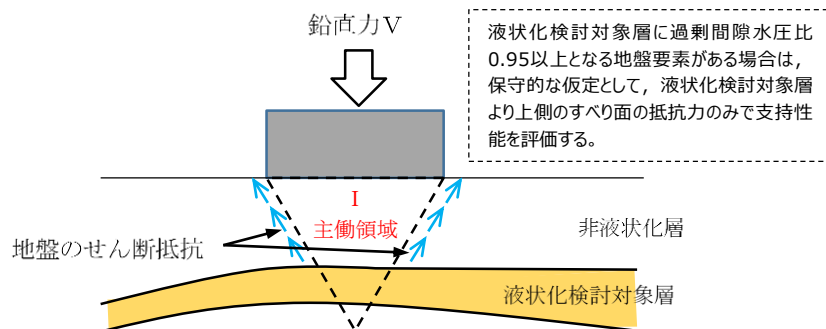
4. 地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた 保守的な仮定による支持性能評価

最大鉛直力に対する支持性能評価

- 前述のとおり、A2s層は地震時においても有効応力を保持し、西山層まで鉛直力が伝達することを確認した。
- 一方で、一部の施設において、A2s層の過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えることを踏まえ、地震時の過剰間隙水圧の上昇を踏まえた保守的な仮定による支持性能評価を実施した。
- 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)



最大鉛直力に対する支持性能評価の概念図

● 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（主働領域Ⅰ）として働き、この三角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。

● 抵抗力Rの算定方法

主働領域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。

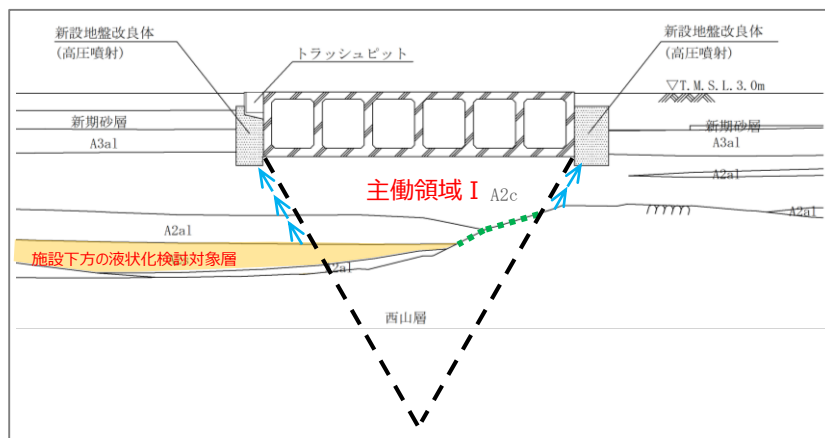
$$R = \Sigma(c' + \sigma'_n \cdot \tan\phi')l$$

ここで

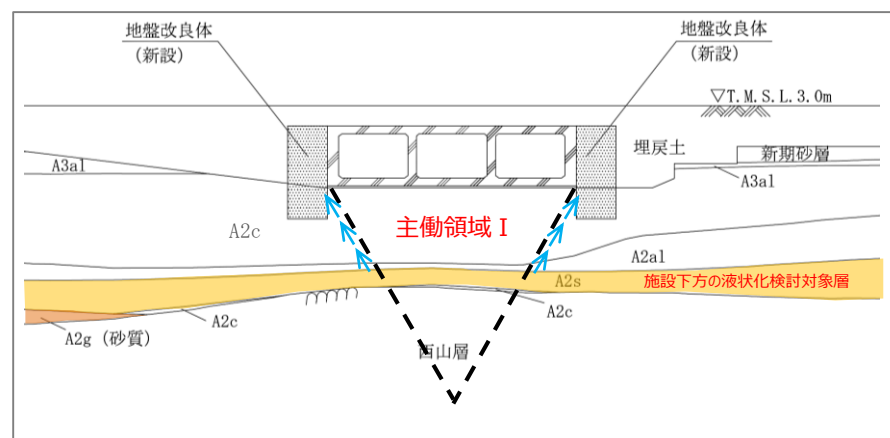
- c' : 各地層の粘着力
- l : 各地層のすべり線長さ
- σ'_n : すべり線法線方向応力
- ϕ' : 各地層の内部摩擦角

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

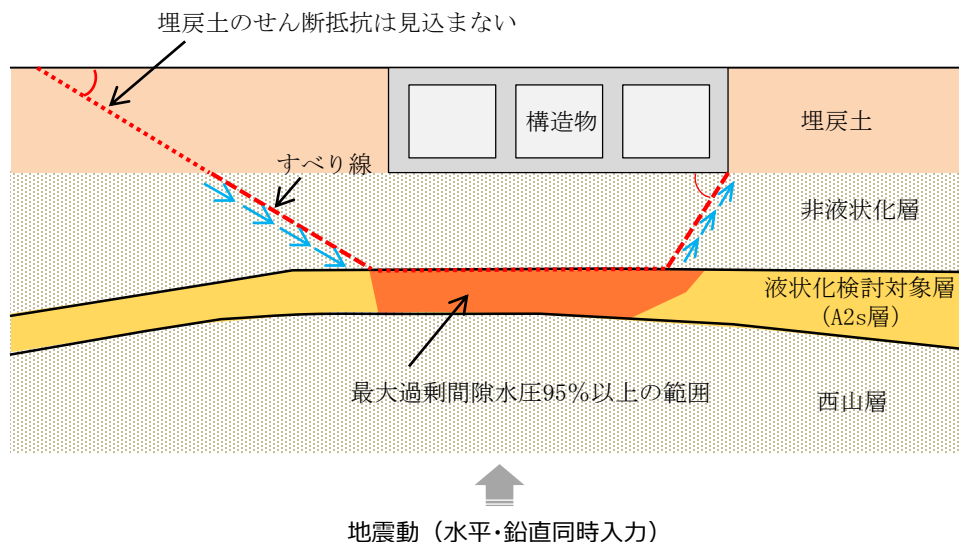
評価断面	最大鉛直力*1 R_a (kN)	支持力 R_u (kN)	照査値 R_a/R_u	判定
7号機 スクリーン室	2530	2990	0.85*2	OK
6号機 取水路(漸縮部)	2200	2960	0.75	OK

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。

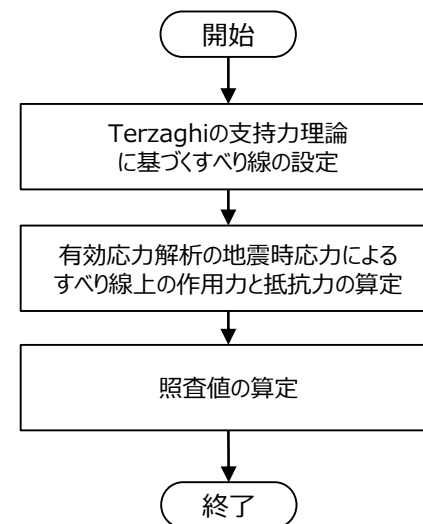
*2：液状化検討対象層より上側のA2c層と西山層及びA2a1層と西山層との境界（図中の緑破線箇所）におけるせん断抵抗を考慮しない照査値。

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することから、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（A2s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設定して、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。



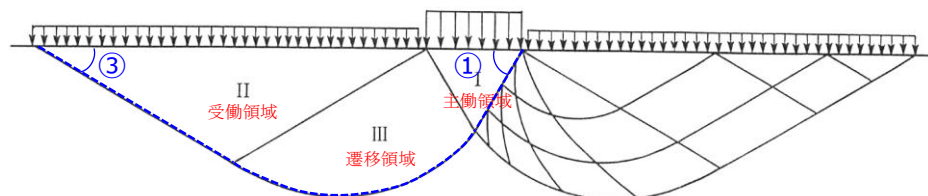
地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価の概念図



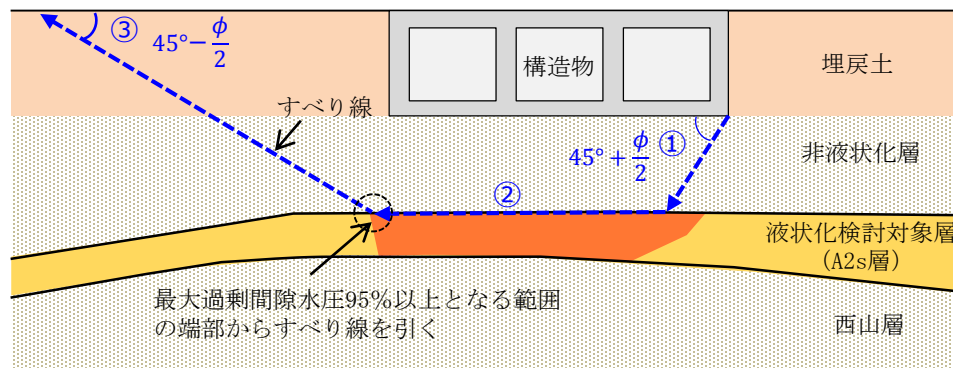
地震時の水平力・鉛直力に対する支持性能評価のフロー図

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 ($45^\circ + \phi/2$) 及び受働領域 II における角度③ ($45^\circ - \phi/2$) 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。



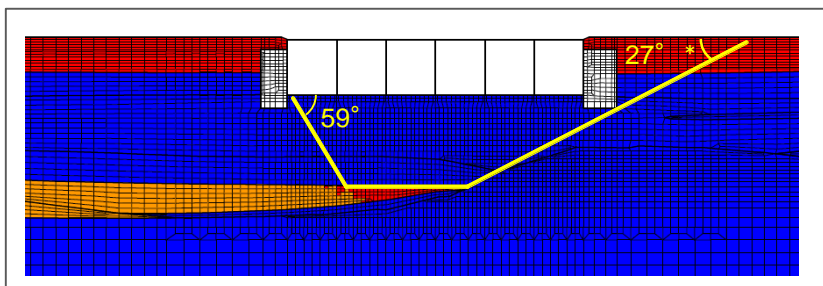
Terzaghiの支持力理論 概念図
(引用：土質力学，石原研而，丸善に一部加筆)



すべり線の設定方法の概念図

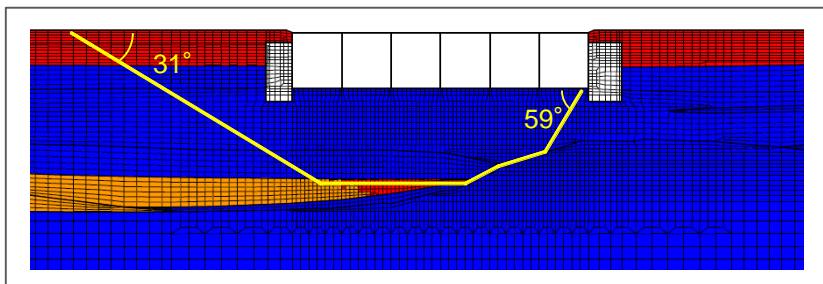
すべり線の設定

- 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。



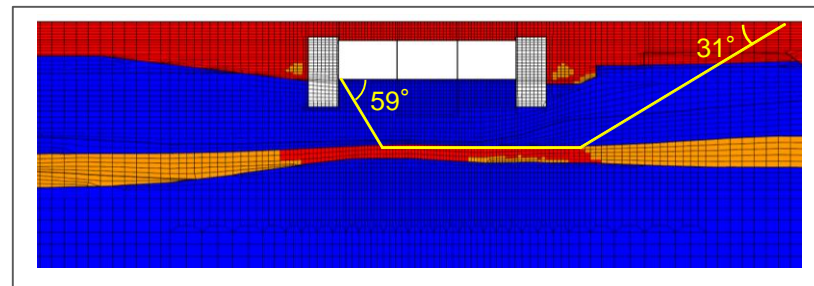
注記* : Terzaghiの支持力理論に基づき、角度③を設定した場合、すべり線上に地盤改良体が位置するため、地盤改良体を通らない位置にすべり線を設定し、角度を補正 (31°→27°)

(a) 右すべり線

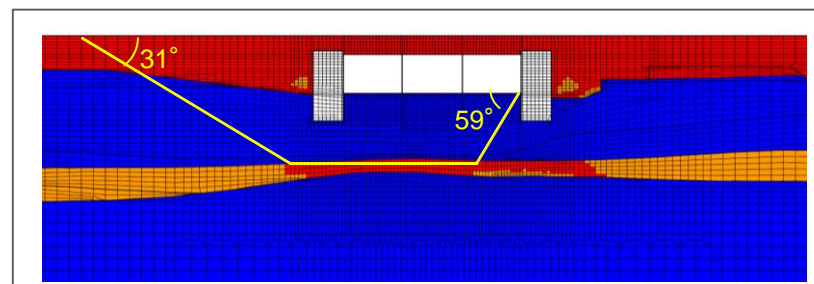


(b) 左すべり線

7号機 スクリーン室



(a) 右すべり線

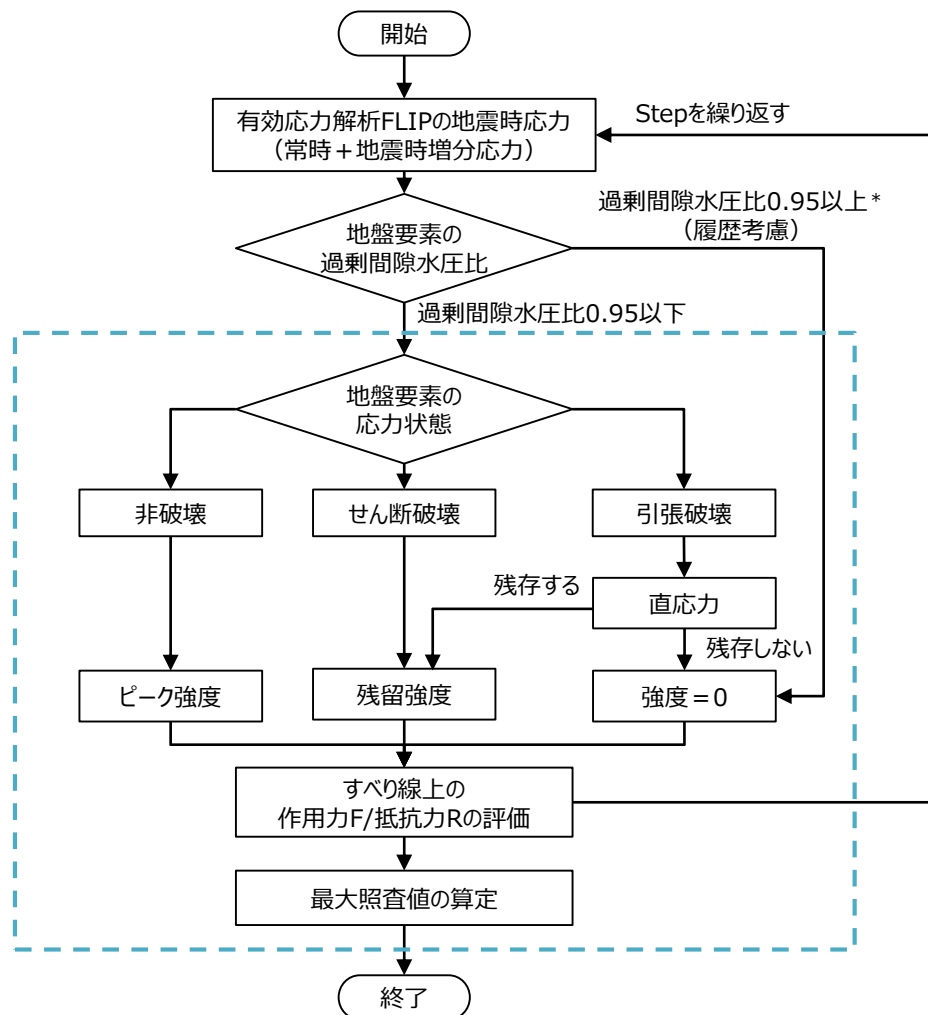


(b) 左すべり線

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。



注記*：有効応力解析で過剰間隙水圧比が0.95以上となった地盤要素は、過剰間隙水圧比が0.95以上となった時刻以降の強度を0とする。

地盤の強度定数

	ピーク強度		残留強度	
	粘着力 c' (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$)	粘着力 c' (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ' ($^\circ$)
A3al層	29.2	34.2	14.7	28.1
A2c層	113	27.9	73.9	18.8
A2al層	82.8	28.7	62.8	22.9
A2s層*	0	36.6	0	35.0

注：埋戻土及び新期砂層については、強度を0として扱う。

注記*：A2s層の粘着力 c は0として扱う。

設置変更許可申請書の基礎地盤安定性評価と同様の手法

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

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 σ)	地盤剛性 (-1 σ)	地盤剛性 (平均値)	地盤剛性 (+1 σ)
液状化強度特性の設定	液状化強度特性 (-1 σ)	液状化強度特性 (-1 σ)	液状化強度特性 (-1 σ)	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（A2s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（A2s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、液状化検討対象層（A2s層）は、せん断ひずみが緩やかに進行し、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。
- 有効応力解析FLIPの結果から、液状化検討対象層（A2s層）は、せん断ひずみが緩やかに進行し、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し、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。
- 液状化検討対象層（A2s層）の基準地震動Ssに対する有効応力の時刻歴推移を確認した結果、全時刻において有効応力が保持されていることから、サイクリックモビリティの様相を呈しており、西山層まで鉛直力を伝達することを確認した。
- 一部の施設において、液状化検討対象層（A2s層）の過剰間隙水圧比が一時的に0.95を超えることを踏まえ、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、施設下方に分布する液状化検討対象層（A2s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。

論点2

耐津波設計における浸水防護重点化範囲等の設計について

目次

1. はじめに
2. 浸水防護重点化範囲の設定
3. 浸水防護重点化範囲等の設計

1. はじめに

本日の説明内容

- 2019年6月19日に設置変更許可を受けた申請における耐津波設計において、重要な安全機能を有する施設の隔離（内郭防護）として、溢水事象を安全側に想定した場合でも、重要な安全機能を有する施設が浸水により機能喪失することがない設計とすることとしている。
- 詳細設計の進捗に伴い、上記設計方針に変更はないものの、重要な安全機能を有する施設等を内包する浸水防護重点化範囲について、再整理する必要が生じたため、経緯及び整理結果を説明する。
- 加えて、復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁の耐津波設計における位置づけの整理を説明する。

2. 浸水防護重点化範囲の設定

2.1 浸水防護重点化範囲の追加（その1）

- 設置許可における検討内容と、工認において詳細設計の進捗に伴い追加した内容、及び関連する内郭防護の溢水事象（図1）との関連を表1に示す。
- 設置許可時では、静的な耐震Sクラス機器（配管、電路等）のみを設置する区画については、浸水防護重点化範囲として設定していなかったが、耐津波設計に係る工認審査ガイド*に基づき、改めて浸水防護重点化範囲として設定する。

表1：設置許可及び工認における検討内容

	設置許可の検討内容	工認での検討内容	溢水事象
浸水防護重点化範囲の設定	重要な安全機能を有する設備等が設置されている区画を浸水防護重点化範囲と設定	設置許可のエリアに加え、静的な耐震Sクラス機器（配管、電路等）のみを設置する区画も浸水防護重点化範囲と設定	① ③
浸水防護重点化範囲への浸水対策	浸水防護重点化範囲の境界での浸水対策を実施	設置許可の境界における浸水対策に加え、浸水が想定される区画に設置されている静的な耐震Sクラス機器が浸水により機能喪失しないことを確認	① ② ③

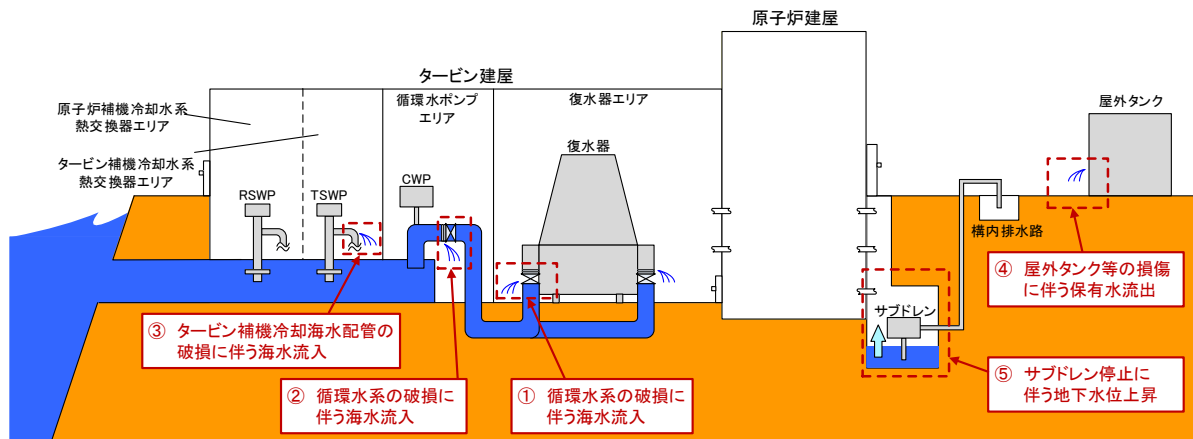


図1：内郭防護の設計において安全側に想定する溢水事象

注記*：工認審査ガイドでの規定：重要な安全機能を有する設備等を内包する建屋及び区画については、浸水防護重点化範囲として明確化すること。

2.1 浸水防護重点化範囲の追加（その2）

- タービン建屋地下2階，地下中2階のタービン補機冷却水系熱交換器を設置するエリア（Hx/A）及び復水器を設置するエリア（C/A）の一部には，静的なスクラス機器（配管，電路等）が存在するため，浸水防護重点化範囲と設定する。
- タービン建屋地下1階，1階にも静的なスクラス機器（配管，電路等）が存在するため浸水防護重点化範囲と設定する。

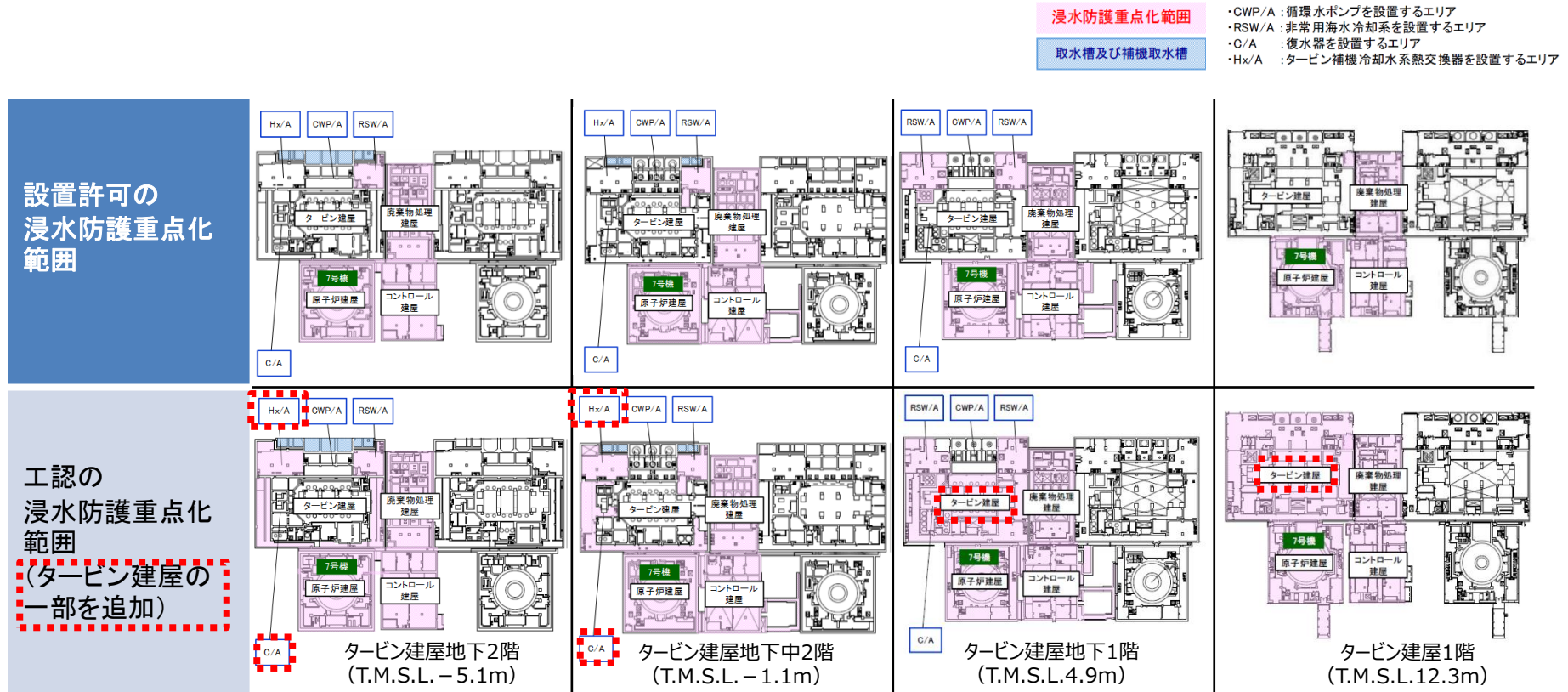


図2：浸水防護重点化範囲

2.2 浸水防護重点化範囲内の設備特性に基づく整理

- 浸水防護重点化範囲内に設置する設備の特性（浸水による機能喪失有無）を考慮し、浸水防護重点化範囲を、『浸水防護重点化範囲』と『浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）』に分類する。
- 設備の特性を踏まえ、安全機能喪失防止に関する設計方針を表2のとおり整理する。

表2：浸水防護重点化範囲における安全機能喪失防止に関する設計方針

	浸水防護重点化範囲	浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）
範囲内に設置する設備	耐震Sクラス動的機器（ポンプ，電源盤等）， 耐震Sクラス静的機器（配管，電路等）	浸水により機能喪失しないことを確認した，耐震Sクラス静的機器（配管，電路等）
浸水による機能喪失防止に関する設計方針	浸水経路に対して浸水対策を実施し，当該範囲の浸水を防止することで，安全上重要な機器の機能喪失を防止	浸水を前提とし，安全性評価を実施し，安全上重要な機器が機能喪失しないことを確認
上記設計方針とする理由	動的機器については，浸水により機能喪失するため，区画内が浸水することが無い設計とする必要がある。	静的機器については，動的機器と異なり浸水した場合でも機能喪失するとは限らないため，浸水時にも機能喪失しないことを確認できれば，区画内への浸水も許容する。

2.3 設備特性に基づく浸水防護重点化範囲の分類

- 工認で設定した浸水防護重点化範囲について，設備の特性を基に，「浸水防護重点化範囲」と「浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）」に分類する（図3参照）。

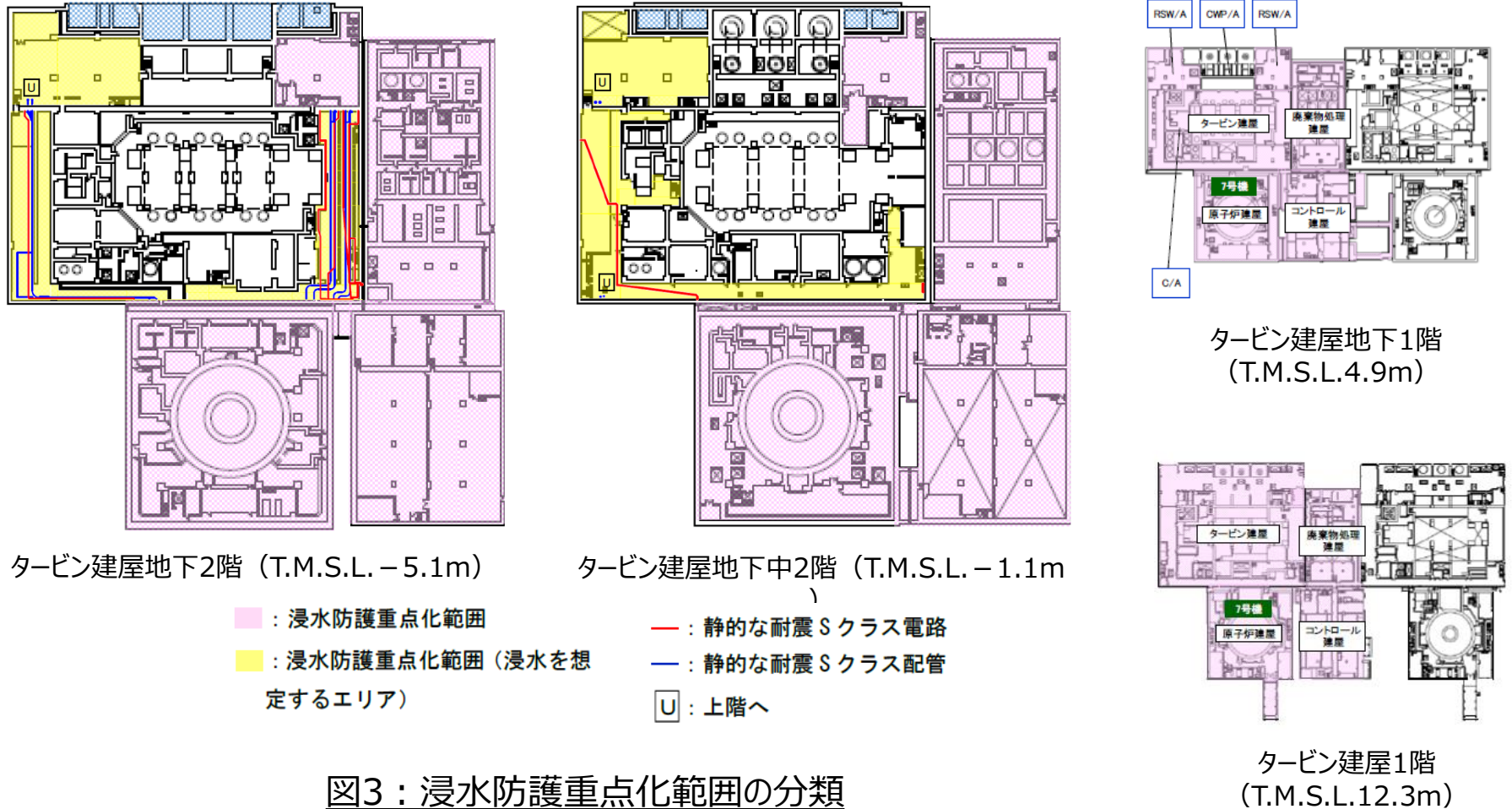
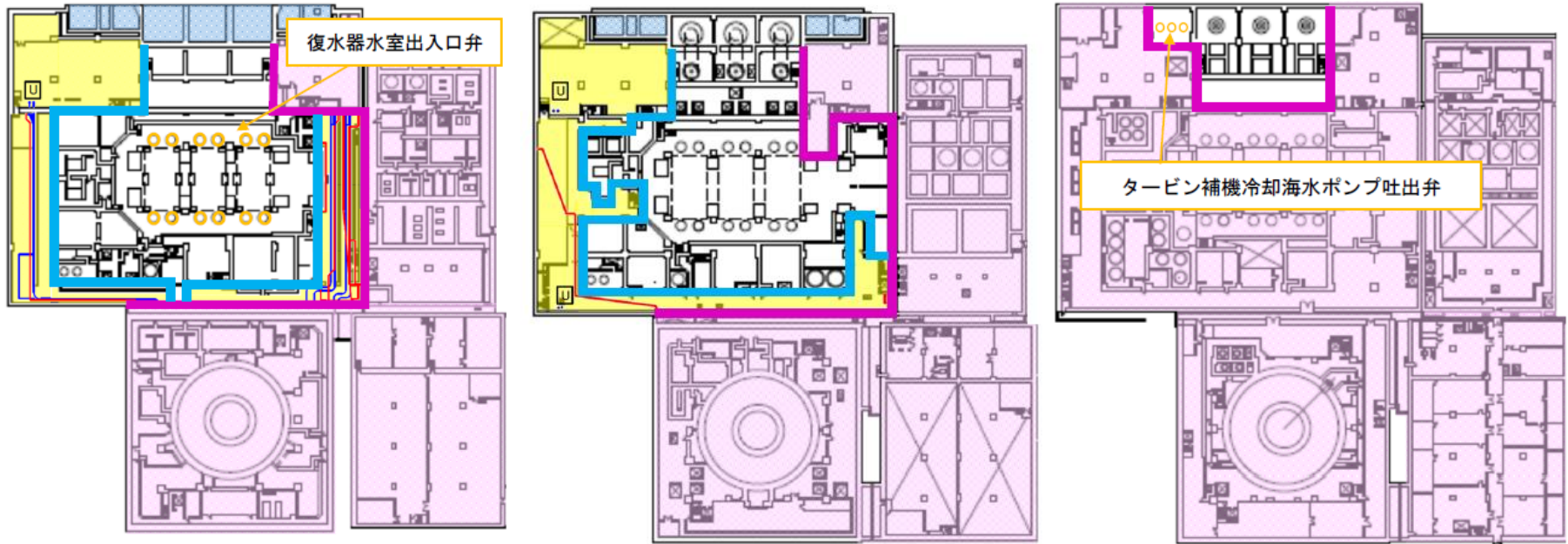


図3：浸水防護重点化範囲の分類

3. 浸水防護重点化範囲等の設計

3.1 浸水防護重点化範囲の境界について

- 浸水防護重点化範囲との境界（②）と浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）との境界（①）を図4に示す。（地上1階については，境界が存在しないため，記載を割愛）



(1) タービン建屋地下2階 (T.M.S.L. -5.1m)

(2) タービン建屋地下中2階 (T.M.S.L. -1.1m)

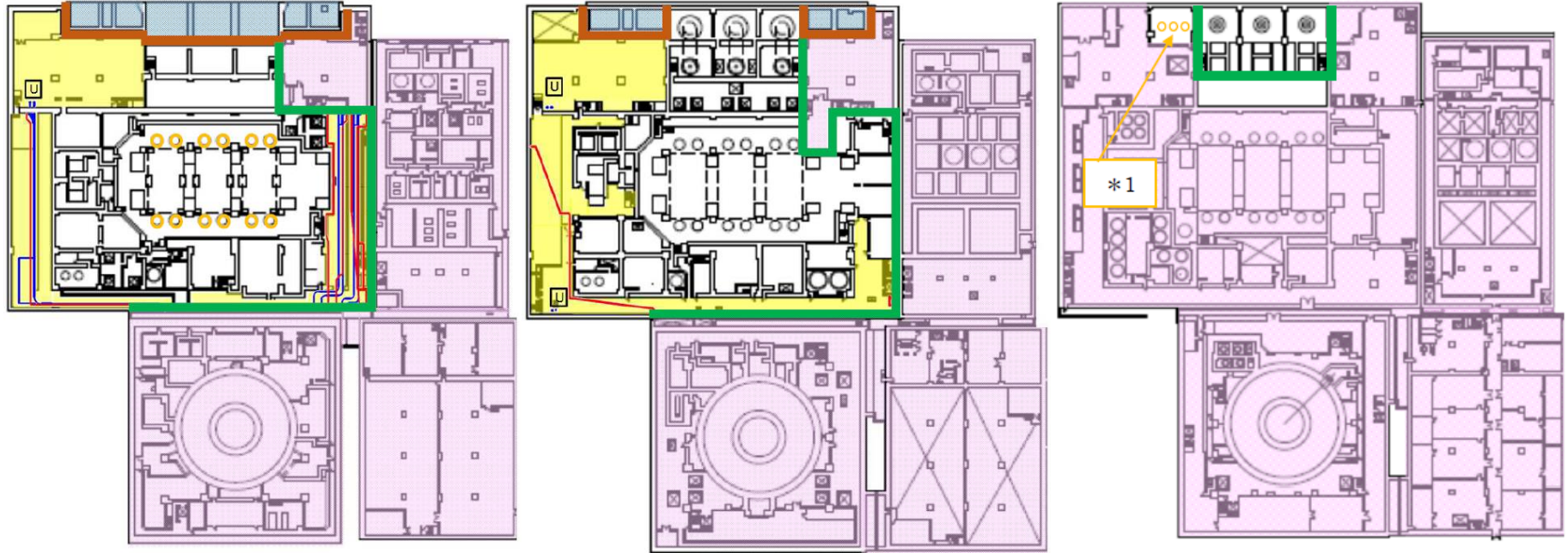
(3) タービン建屋地下1階 (T.M.S.L. 4.9m)

- : 浸水防護重点化範囲
- : 浸水防護重点化範囲との境界②
- : 浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）
- : 浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）との境界①
- : 静的な耐震Sクラス電路
- : 静的な耐震Sクラス配管
- U : 上階へ

図4：タービン建屋の浸水防護重点化範囲境界の整理

3.2 浸水防護重点化範囲の境界の浸水対策

- 浸水防護重点化範囲との境界 (②) は、設計方針に基づき浸水を防止する必要があるため、内郭防護の浸水対策を実施する。なお、タービン建屋地下1階については、耐震強化等を踏まえ境界を変更する。



(1) タービン建屋地下2階 (T.M.S.L. -5.1m) (2) タービン建屋地下中2階 (T.M.S.L. -1.1m) (3) タービン建屋地下1階 (T.M.S.L. 4.9m)

■ : 浸水防護重点化範囲

■ : 浸水防護重点化範囲 (浸水を想定するエリア)

■ : 耐津波設計において内郭防護の浸水対策を実施する境界

■ : 外郭防護 (参考)

— : 静的な耐震Sクラス電路

— : 静的な耐震Sクラス配管

注記 *1 : 溢水の発生防止のためタービン補機冷却海水系を耐震強化し、溢水が発生しないエリア

図5 : 内郭防護の浸水対策を実施する範囲の境界の整理

3.3 工認ガイドの要求事項への適合について（その1）

- 耐津波設計に係る工認審査ガイドにおける要求事項に対して、『浸水防護重点化範囲』と『浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）』それぞれの境界の適合状況を表3に整理する。

表3：工認審査ガイドの適合状況

ガイドに記載されている「規制基準における要求事項等」, 「確認内容」		浸水防護重点化範囲とその境界 ②	浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）とその境界 ①
3.5.2 浸水防護重点化範囲の境界における浸水対策	津波による溢水を考慮した浸水範囲, 浸水量を安全側に想定すること。	復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁が閉止するまでにポンプが起動し続け配管破損箇所からの溢水が流入すると想定	同左
	浸水範囲, 浸水量の安全側の想定に基づき, 浸水防護重点化範囲への浸水の可能性のある経路, 浸水口（扉, 開口部, 貫通口等）を特定し, それらに対して浸水対策を施すこと。	境界の壁・床の貫通口等に浸水対策を実施	境界の壁には貫通口等があるため浸水を想定するが, 溢水量の低減及び境界②への浸水による水圧及び水位の影響を低減するために復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁を自動閉止するインターロックを設置
	【確認内容】(3) 浸水防護重点化範囲の境界において特定した経路, 浸水口における浸水防止設備の位置・仕様・強度を確認する。(中略) 確認の詳細を「5. 浸水防止設備に関する事項」に示す。	浸水対策として設置した水密扉・床ドレンライン浸水防止治具・貫通部止水処置・取水槽閉止板を浸水防止設備として位置づけ耐震・強度計算を実施 (浸水防護重点化範囲である原子炉建屋等への浸水を防止)	— (浸水防止設備ではないが, 地震後の溢水量を低減させるため, 復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁のSs機能維持を確認)
	【確認内容】(4) 浸水範囲への浸水が安全機能への影響がないことを確認するため, 浸水防護重点化範囲への浸水量（漏水量）を確認するとともに, 範囲内への浸水が重要な安全機能を有する設備等の機能に影響を及ぼさないことを確認する。 浸水量評価及び安全評価の確認の詳細を「7. 浸水量評価に基づく安全性評価」に示す。	—	復水器エリアはT.M.S.L.約+2.4mまで浸水すると想定。 重要な安全機能を有する設備等として静的機器（耐震Sクラス配管・電路）がある。 「7. 浸水量評価に基づく安全性評価」に沿った評価を実施（次頁参照）

3.3 工認ガイドの要求事項への適合について（その2）

- 浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）については，安全性評価を実施し，安全機能に影響がないことを確認する（表4参照）。

表4：配管，電路等の浸水影響評価結果

設備	系統	影響評価内容		検討結果	
		① 水圧による損傷	② 電気接続部の没水	① 水圧による損傷	② 電気接続部の没水
配管	原子炉補機冷却水系	浸水による水頭圧（外圧）による配管の構造的損傷の可能性	—	配管設置箇所で想定される最大の水頭圧0.08MPa*1に対し許容圧力（0.40MPa）が上回ることを確認	—
電路（ケーブル）等	原子炉補機冷却水系	浸水による水頭圧（外圧）による電路（ケーブル）の構造的損傷の可能性	浸水する電路（ケーブル）の電気接続部の有無確認，電気接続部があれば，その没水による影響評価	電路設置箇所で想定される最大の水圧条件（静水圧換算：7.5m以上）を考慮した設計であることを確認	電気接続部がないことを確認

注記*1：タービン建屋内最地下階の水位7.5mからの換算値

3.4 溢水要求のための止水対策（その1）

- 浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）との境界（①）は、設計方針に基づき浸水を想定する。この境界を内包する(a)(b)(c)の各エリアでは、地震後低耐震の配管等の破損による溢水の発生が想定されるため（図6及び図7参照）、溢水量低減を目的として以下設計を実施。
- ✓ (a)(c)のエリアについては、基準津波到達前に漏えいを検知し、復水器水室出入口弁が自動閉止、循環水ポンプが自動停止することにより、溢水が停止する設計。
- ✓ (a)(c)のエリアの境界は耐震壁であると共に、両エリアを接続する床ドレンラインには、床ドレンライン浸水防止治具を設置し、(c)から(a)のエリアに溢水が流れない設計。

循環水配管伸縮継手の破損により溢水の発生が想定されるが、漏えいを検出し、復水器水室出入口弁の閉止により溢水が停止
(T.M.S.L.約+2.4mまで浸水)

循環水配管伸縮継手の破損により溢水の発生が想定されるが、漏えいを検出し、循環水ポンプ停止により溢水が停止
(T.M.S.L.約+11.85mまで浸水)

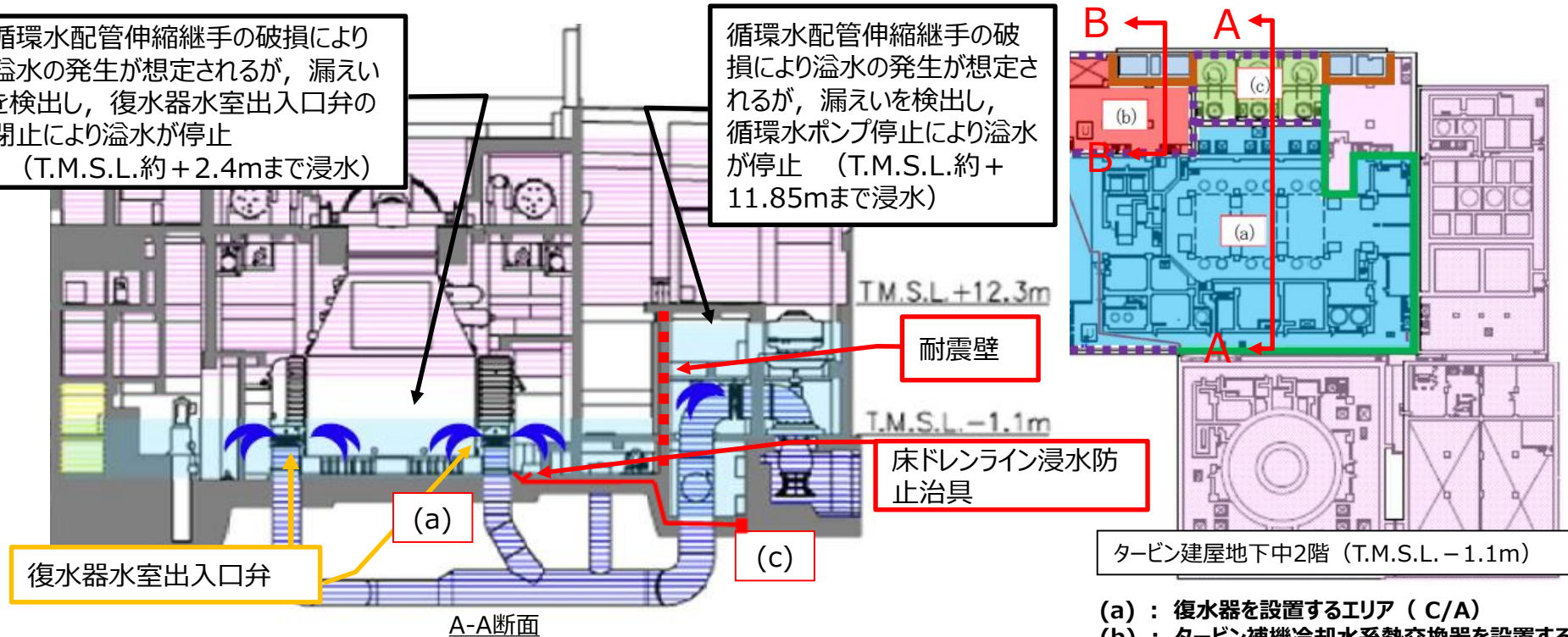


図6：タービン建屋内の浸水エリア図①（断面図）

- タービン建屋地下中2階 (T.M.S.L. - 1.1m)
- (a) : 復水器を設置するエリア (C/A)
 - (b) : タービン補機冷却水系熱交換器を設置するエリア (Hx/A)
 - (c) : 循環水ポンプを設置するエリア (CWP/A)

3.4 溢水要求のための止水対策（その2）

- ✓ (b)のエリアについては、基準津波到達前に漏えいを検知し、タービン補機冷却海水ポンプ吐出弁が自動閉止することにより、溢水が停止する設計。

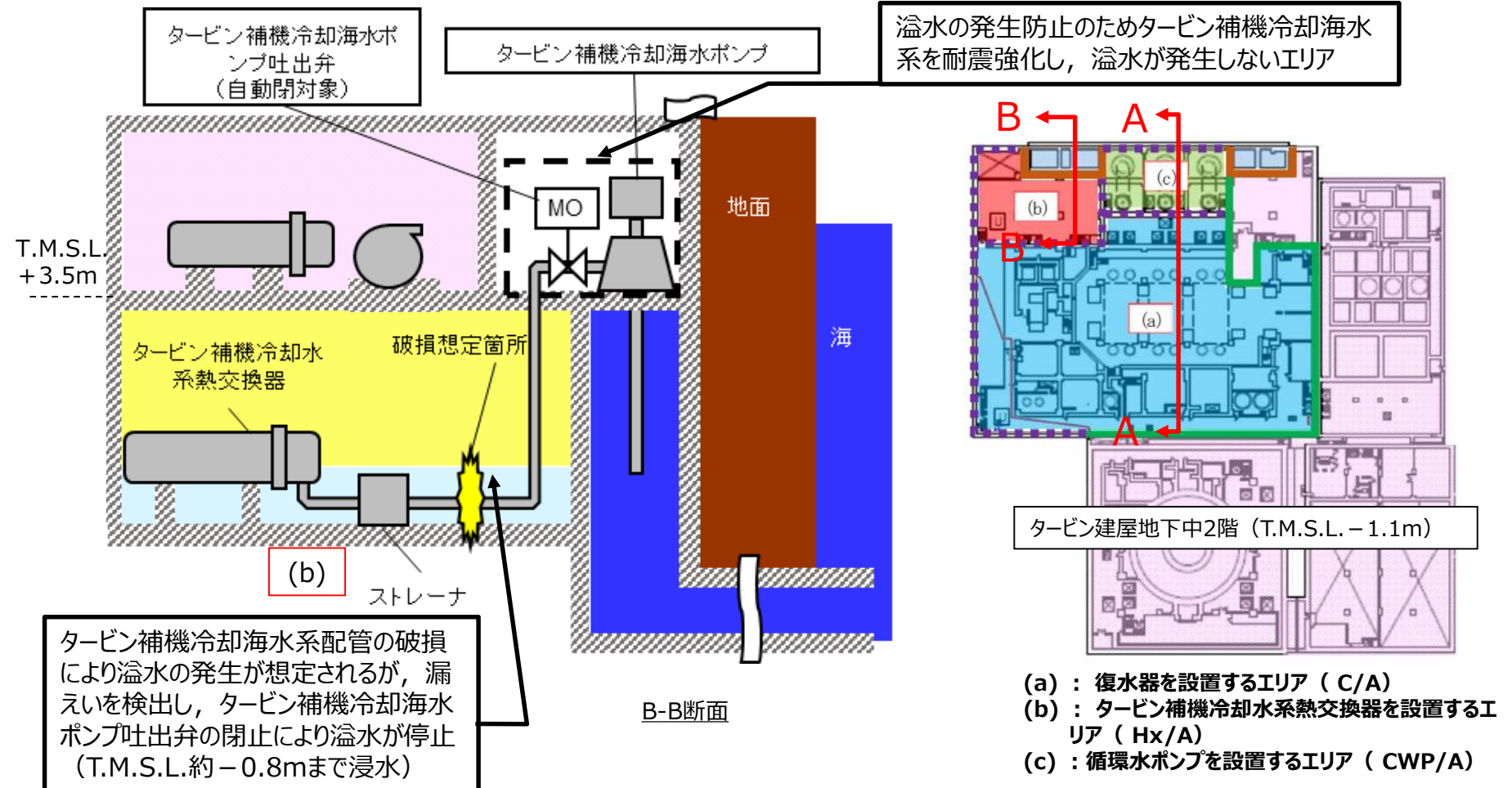


図7：タービン建屋内の浸水エリア図②（断面図）

3.4 溢水要求のための止水対策（その3）

- 浸水防護重点化範囲との境界（②）は内郭防護の止水対策を実施するが、これ以外の境界（紫点線）は、内部溢水（技術基準規則12条）の要求事項を満たすよう止水対策を実施する。
- ✓ (a)(b)(c)の各エリアにおいては、それぞれ異なる溢水源からの溢水を想定（図6及び図7参照）。水位が高いエリアから低いエリアに溢水が伝播すると、低いエリアの水位が上昇し止水対策範囲が増加するため、各エリアの境界においては、溢水伝播防止のために止水対策を実施
- ✓ 外部に溢水が漏えいしないように、タービン建屋外壁部の止水対策を実施
- タービン建屋内における内部溢水対応としての境界（紫点線）の止水対策箇所（水密扉、床ドレナイン浸水防止治具等）については、自主的に耐津波設計と同等の耐震設計を行う。

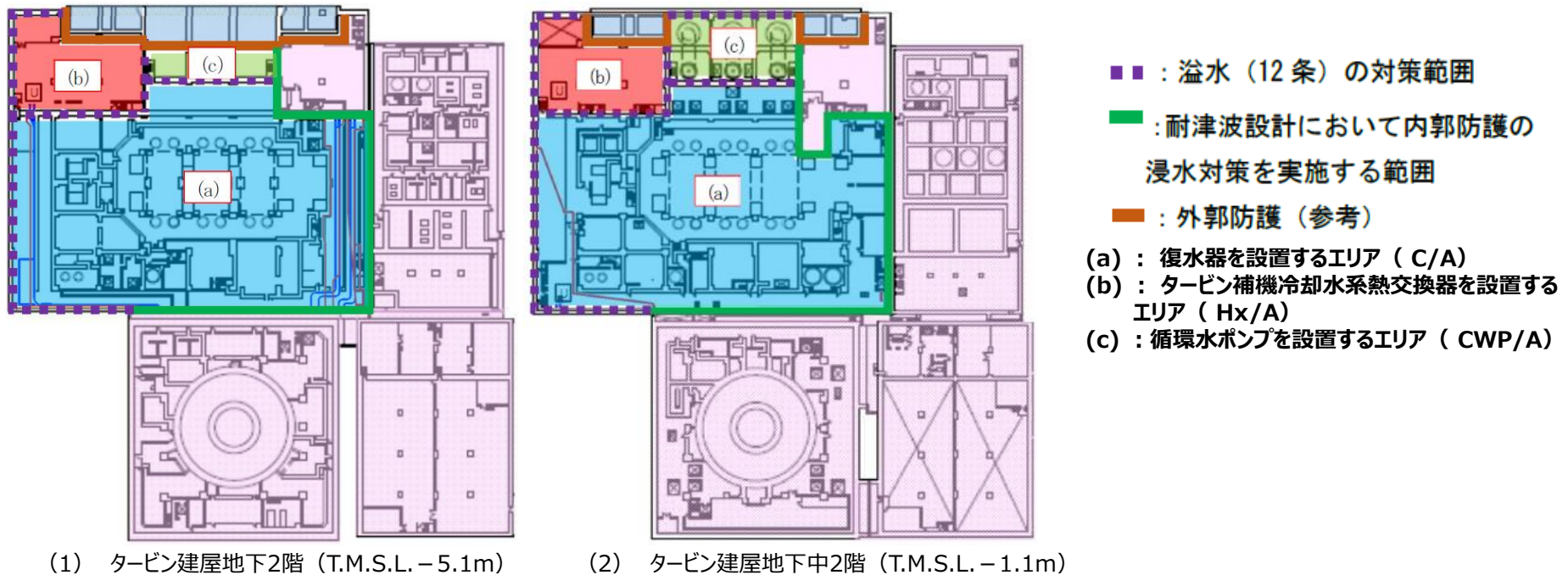
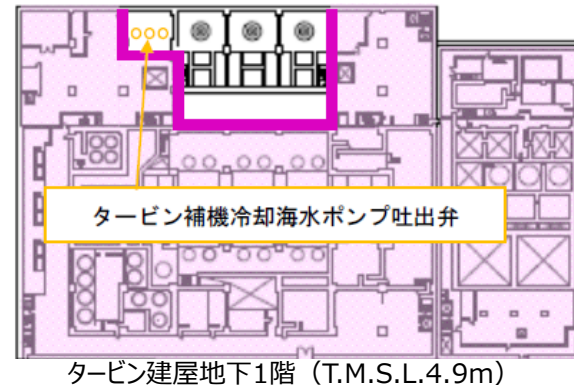
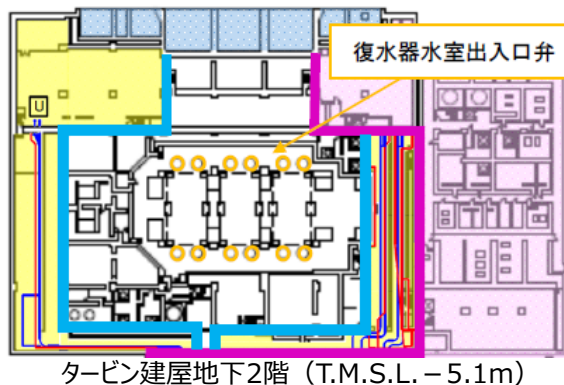


図8：タービン建屋内の浸水エリア図

3.5 復水器水室出入口弁等の位置付け

- 復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁は、地震後低耐震の配管等の破損により溢水が発生した場合に、基準津波到達前に漏えいを検知し、自動閉止する。
- 弁自動閉止は、内部溢水の評価の前提となる津波到達前の溢水量を低減させる目的であり、以下を期待する。
 - ✓ 浸水防護重点化範囲（浸水を想定するエリア）への溢水量を低減させる
 - ✓ 浸水防護重点化範囲の境界②に浸水防止設備として設置した水密扉や貫通部止水処置等への浸水による水圧及び水位の影響を低減する
- 一方、上記弁は浸水防護重点化範囲やその境界には設置されていない。

- 復水器水室出入口弁及びタービン補機冷却海水ポンプ吐出弁は、「津波による影響が発生することを防止する」設備として期待されないため、耐津波設計に係る工認審査ガイドの審査対象となる設備には該当しないと整理。
- ただし、溢水量低減が主目的であるものの、地震後の津波の到達前に閉止している弁であるため、内部溢水の対策設備と整理したうえで、津波時でも弁の閉止状態が保たれていることを確認。



【参考1】復水器水室出入口弁等を反映させる工認図書

- 「復水器水室出入口弁」及び「タービン補機冷却海水ポンプ吐出弁」は、内部溢水の評価の前提となる溢水量を低減させる主目的である。
- 一方、耐津波設計においても弁の閉止状態が保たれていることが期待されるため、以下の工認図書を提出することを検討中。

- ✓ 弁の耐津波設計における設計方針
⇒「V-1-1-3-2 津波への配慮に関する説明書」に追記
- ✓ Ss地震後も弁が動作可能なこと
⇒「V-2-別添2 溢水防護に係る施設の耐震性に関する説明書」に新規追加
- ✓ 余震（Sd地震）及び津波の波力を受けた場合でも弁の閉止状態が維持されること
⇒「V-3-別添3-1 津波への配慮が必要な施設の強度に関する説明書」に新規追加

第769回審査会合にて説明した主な説明事項

主な説明事項		
[1] 詳細設計段階における設置変更 許可審査時からの設計変更	1	中央制御室待避室の遮蔽設計の見直し
	2	5号機原子炉建屋内緊急時対策所の遮蔽設計の見直し
	3	5号機原子炉建屋内緊急時対策所可搬型電源設備の保管方法の変更
	4	復水移送ポンプ周りの手動弁の電動弁化及び屋内アクセスルートの見直し
[2] 設計方針に関する説明事項	1	使用済燃料貯蔵プール水位の監視
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件
	3	火災感知器の配置
	4	地下水に対する浸水防護対策
	5	竜巻設計飛来物の感度解析
	6	ブローアウトパネル及びブローアウトパネル閉止装置
[3] 耐震・強度評価に関する説明事項	1	津波漂流物の衝撃荷重（海水貯留堰）
	2	地盤物性の設定
	3	基礎地盤傾斜による建物・構築物及び機器の耐震性への影響
	4	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
	5	原子炉本体基礎の復元力特性
	6	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用
	7	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析モデルのモデル化方針
	8	屋外重要土木建造物のモデル化方針
	9	耐震評価における等価繰返し回数
	10	加振試験に基づく使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の設定
	11	弁の動的機能維持評価（一定の余裕の確保）
	12	燃料集合体の耐震性
	13	制御棒・破損燃料貯蔵ラックにおける排除水体積質量減算の適用
	14	ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用