

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補足-024-1 改8
提出年月日	2020年4月16日

柏崎刈羽原子力発電所 7号機

地盤の支持性能について

2020年 4月

東京電力ホールディングス株式会社

目次

	頁
1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 対象施設周辺の地質等	2
3.1 対象施設周辺の地質	2
3.2 対象施設周辺の地質分布状況の整理結果	15
3.3 敷地の地下水位分布及び耐震評価における地下水位設定方針	17
3.3.1 対象施設周辺の地下水位分布	17
3.3.2 耐震評価における地下水位の設定方針	19
4. 地盤の解析用物性値	23
4.1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値	23
4.2 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値	28
4.2.1 全応力解析に用いる解析用物性値	36
4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値	42
4.2.3 その他の解析用物性値	88
4.2.4 地盤の物性のばらつきについて	89
5. 極限支持力	90
5.1 基礎地盤（西山層）の極限支持力度	90
5.2 直接基礎の支持力算定式	94
5.3 杭基礎の支持力算定式	97
6. 地盤の速度構造	101
6.1 入力地震動の設定に用いる地下深部モデル	101
6.2 地震応答解析に用いる浅部地盤の解析モデル	104
参考資料 1	(参考) 1-1
参考資料 2	(参考) 2-1
参考資料 3	(参考) 3-1
参考資料 4	(参考) 4-1
参考資料 5	(参考) 5-1
参考資料 6	(参考) 6-1
参考資料 7	(参考) 7-1
参考資料 8	(参考) 8-1
参考資料 9	(参考) 9-1
参考資料 10	(参考) 10-1
参考資料 11	(参考) 11-1
参考資料 12	(参考) 6-1

: 今回説明範囲

#### 4. 地盤の解析用物性値

##### 4.1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値

設置変更許可申請書に記載された解析用物性値を表 4-1, 図 4-1~図 4-6, 設定根拠を表 4-2 に示す。設置変更許可申請書に記載された解析用物性値については, 原位置試験及び室内試験から得られた各種物性値を基に設定した。また, 建物・構築物の地震応答解析に用いる地盤諸定数については (参考資料 12) に示す。

(a) 埋戻土

埋戻土は、敷地内全域に広く分布する。図4-20に、埋戻土の液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔の位置を示す。埋戻土は、敷地における掘削土を起源としており、掘削土は土捨て場まで運搬したのち、埋戻しの際に、再び土捨て場から搬出し、ブルドーザによる敷均し後に振動ローラーで転圧しており、施工後には締固め度の確認試験を行い、所定の締固め度を確保する品質管理を行っている。

図4-21に、液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔における埋戻土の粒径加積曲線を示す。敷地内の埋戻土は若干ばらつきがあるものの、砂が主体の粒度分布を示す。液状化強度試験箇所の粒度分布は、概ね敷地内調査孔の平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲内に入っている。

図4-22に、埋戻土の液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔のN値、細粒分含有率Fcの深度分布を示す。また、図中には、液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔の各々の値の平均、平均 $\pm 1\sigma$ の値を表記している。液状化強度試験箇所近傍の平均N値、平均細粒分含有率Fcは、敷地内調査孔の平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲内にある。

以上より、埋戻土の液状化強度試験箇所は、粒度分布、N値及び細粒分含有率Fcが敷地内調査孔の平均値 $\pm 1\sigma$ の範囲内であることから、敷地内の埋戻土に対して代表性及び網羅性を有していることを確認した。

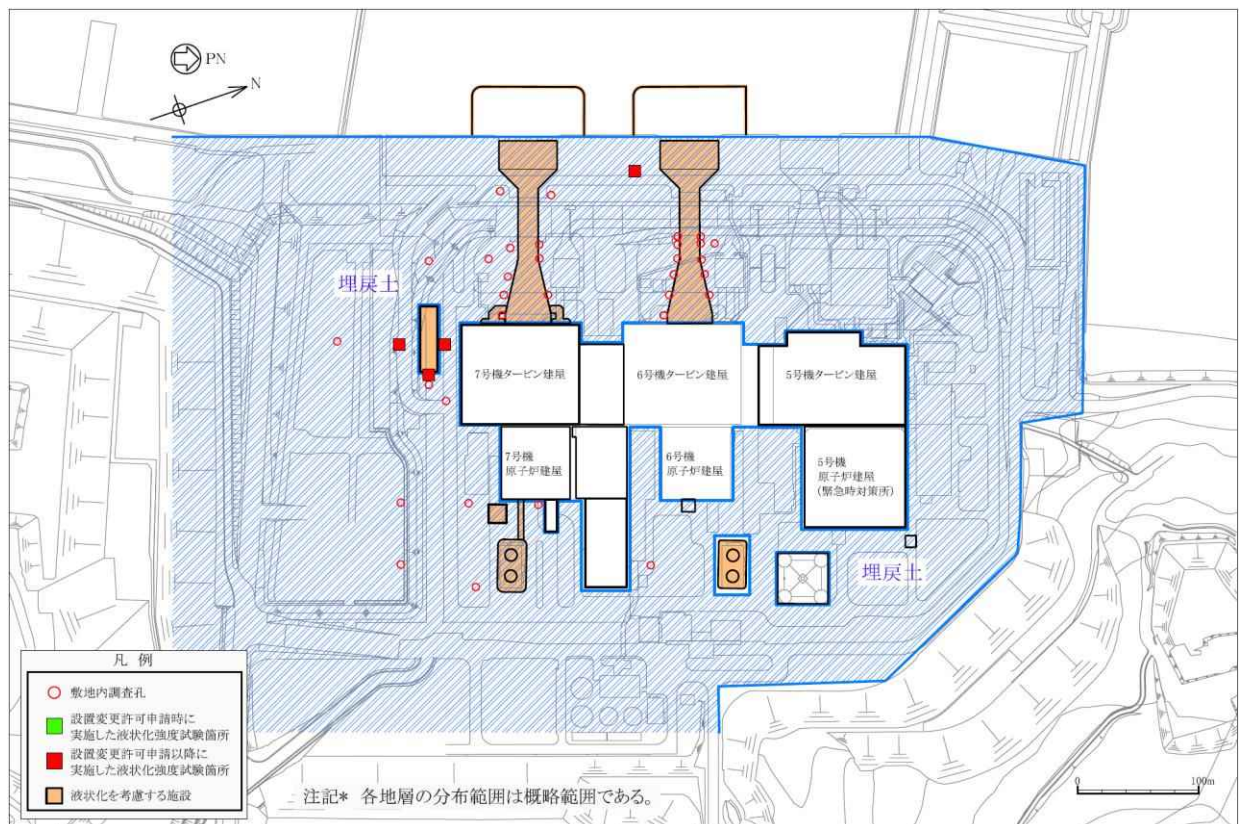


図4-20 埋戻土の液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔



地盤の支持性能についての参考資料

(参考資料1) 地下水位の詳細について

(参考資料2) 解析用物性値の代用の考え方

(参考資料3) 液状化強度試験の詳細について

(参考資料4) 地震応答解析にて考慮する地盤物性のばらつき

(参考資料5) 有効応力解析に用いる解析用物性値の適用性について

(参考資料6) 地盤改良体についての補足

(参考資料7) 杭基礎の支持力評価方法に関する補足

(参考資料8) 地質区分の詳細について

(参考資料9) マンメイドロックの設計について

(参考資料10) 液状化抵抗曲線の回帰曲線(平均-1 $\sigma$ 強度)を下回る試験データについて

(参考資料11) H-Dモデルと試験結果の動的変形特性の比較

(参考資料12) 建築・構築物の地震応答解析に用いる地盤諸定数について

: 今回説明範囲

(参考資料 2) 解析用物性値の代用の考え方

1. 有効応力解析における解析用物性値の代用の考え方

工事計画認可申請における細分化した地質区分において、「分布範囲が狭い地層」、または「層厚が薄い地層」については、「同時代に堆積し、施設直下及び直近に分布する代表的な地層」により解析用物性値を代用することとする。解析用物性値を代用する地層に対しては、物理特性、速度特性、強度特性、液状化強度特性を比較することにより代用の妥当性を確認する。

本項では、他の地質区分の試験結果で代用する地層について、有効応力解析における解析用物性値の設定における考え方を示す。

表 1-1 及び表 1-2 に設置変更許可書に記載されていない解析用物性値の設定根拠一覧を示す。

表 1-1 解析用物性値の設定根拠 (液状化検討対象層)

物性値	地質区分		新期砂層・沖積層			古安田層			
	埋戻土		新期砂層	沖積層上部 (砂質)	沖積層下部	A2s層	A3s層	A2g層 (砂質)	A1g層
物理特性	密度 $\rho$		物理試験			物理試験			
	間隙率 $n$		物理試験			物理試験			
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ms}$		PS検層によるS波速度, 密度に基づき設定			PS検層によるS波速度, 密度に基づき設定			
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ms}'$		慣用値	$G_{ms}$ に対応する値		$G_{ms}$ に対応する値			
	ポアソン比 $\nu$		慣用値 (PS検層)	慣用値		慣用値			
	減衰定数の上限値 $h_{max}$		動的変形特性に基づき設定			動的変形特性に基づき設定			
強度特性	粘着力 $c'$		三軸圧縮試験			三軸圧縮試験			
	内部摩擦角 $\phi'$								
液状化特性	変相角 $\phi_p$		液状化強度試験結果 に基づく要素シミュレーション			液状化強度試験結果 に基づく要素シミュレーション			
	液状化パラメータ	$S_1$							
		$w_1$							
		$p_1$							
		$p_2$							
	$c_1$								

注： 図中の赤枠は、他の地質区分の試験結果で代用している地層を示す。

表 1-2 解析用物性値の設定根拠（非液状化検討対象層）

物性値		地質区分	埋戻土Ⅱ	新期砂層・沖積層	古安田層				A2g層 (シルト質)	A1c層
				沖積層上部 (シルト質)	A3c層	A3a1層	A2c層	A2a1層		
物理特性	密度 $\rho$		物理試験	物理試験						A2c層で代用
	間隙率 $n$		物理試験	物理試験						
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ms}$		PS検層によるS波速度， 密度に基づき設定	PS検層によるS波速度，密度に基づき設定						
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ms}'$		$G_{ms}$ に対応する値	$G_{ms}$ に対応する値						
	ポアソン比 $\nu$		慣用値	慣用値						
	減衰定数の上限値 $h_{max}$		動的変形特性に基づき設定	動的変形特性に基づき設定						
強度特性	粘着力 $c'$		三軸圧縮試験	三軸圧縮試験						
	内部摩擦角 $\phi'$									

注： 図中の赤枠は、他の地質区分の試験結果で代用している地層を示す。

1.1 他の地質区分の解析用物性値で代用する地層の妥当性確認の方針

他の地質区分の解析用物性値で代用する場合は、同年代に堆積した地層の試験結果と比較し、物理特性、速度特性、強度特性、液状化強度特性を比較することにより、代用の妥当性を確認する。

ここで、液状化検討対象層においては、「物理特性」、「速度特性」、「強度特性」及び「液状化強度特性」を比較する。非液状化検討対象層においては、「物理特性」、「速度特性」、「強度特性」を比較する。各特性で着目する比較指標とその選定理由を表 1-3 に示す。

表 1-3 解析用物性値の代用における比較指標と選定理由

特性	比較指標	選定理由
物理特性	粒度分布, 湿潤密度 $\rho_t$ , 含水比 $w$ , 間隙比 $e$ , 塑性指数 $I_p$	地盤材料の基本的な特性値を示すパラメータであることから選定した。
速度特性	せん断波速度 $V_s$	初期せん断弾性係数を規定するパラメータであることから選定した。
強度特性	粘着力 $c'$ , 内部摩擦角 $\phi'$ or N値	せん断強度を規定するパラメータであることから選定した。力学試験の結果が得られない場合は、強度定数と相関性があるN値を比較する。
液状化強度特性	N値, 細粒分含有率 $F_c$ , 液状化強度比 $R_L$	道路橋示方書における液状化判定に用いられる指標であることから選定した。

1.2 他の地質区分の解析用物性値で代用する地層のばらつきについて

地盤剛性のばらつきは、参考資料 4「2.3 地盤剛性及び液状化強度特性のばらつきを考慮した解析ケース」に示すとおり、PS 検層の結果に基づいて、耐震評価において地盤物性のばらつき ( $\pm 1\sigma$ ) を考慮した解析ケースを実施する。

ここで、他の地質区分の解析用物性値で代用する地層については、「分布範囲が狭い地層」、または「層厚が薄い地層」であることから、同年代に堆積し、施設直下及び直近に分布する代表的な地層の解析用物性値で代用することが妥当であると判断した地質区分については、ばらつきの評価も含めて代用する。

## 2. 代用する地層（A2s 層）について

古安田層の A2s 層は、大湊側敷地に広く分布する地層である。A2s 層は古安田層（液状化検討対象層）の代表的な地層として、他の古安田層の液状化検討対象層（A3s 層、A2g 層（砂質）、A1g 層）に対して、解析用物性値を代用しており、耐震評価上重要な地層である。

本項では、代用する地層（A2s 層）について、その特徴（分布範囲・外観）、液状化を評価する観点から配慮した液状化強度試験の供試体選定箇所について示す。

### 2.1 A2s 層の特徴（分布範囲・外観）

古安田層（洪積層）の A2s 層は、原子炉建屋やタービン建屋周辺以外の敷地に広く分布する。図 2-1 に、A2s 層の分布範囲を示す。図 2-2 に、A2s 層のコア写真を示す。A2s 層は砂が主体的であるが、礫やシルトも認められる。

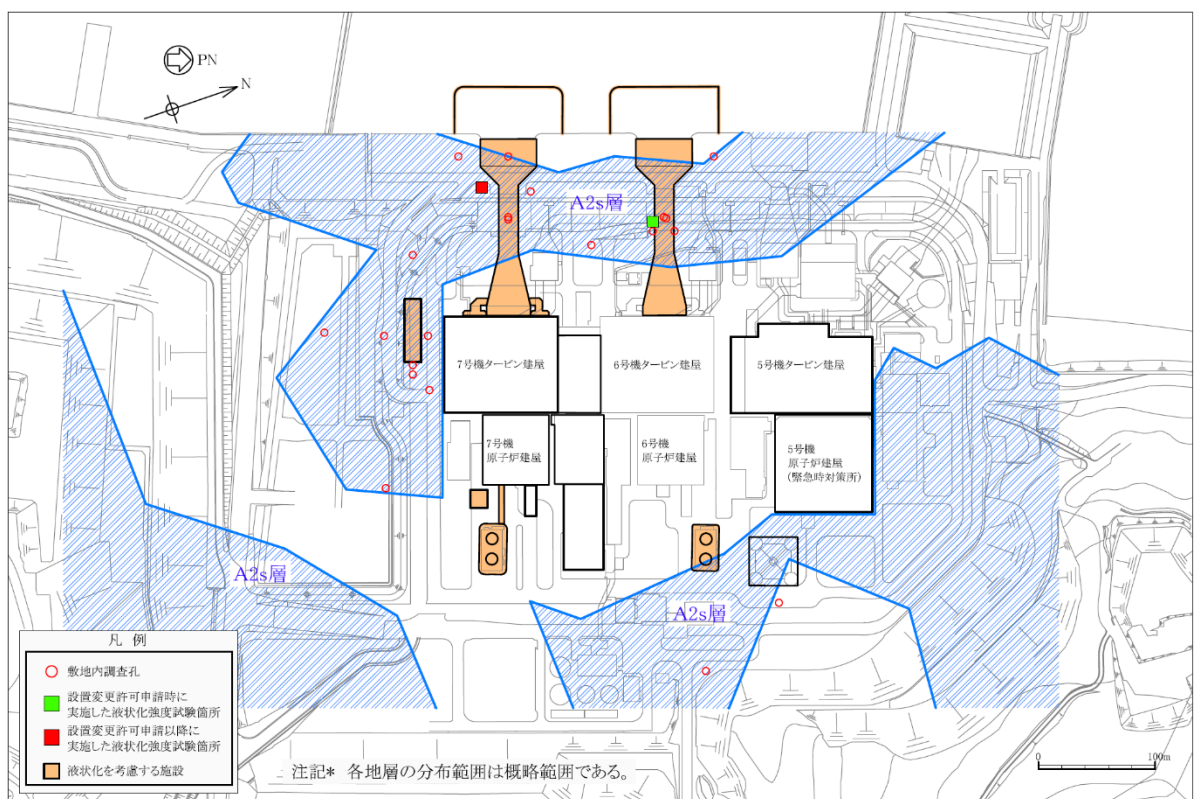


図 2-1 A2s 層の分布範囲（再掲）



図 2-2 古安田層 (A2s 層) の代表的なコア写真



## 2.2 液状化強度試験に用いる A2s 層の物理特性と供試体選定箇所について

表 2-1 に A2s 層の基礎物理特性を、図 2-3 に液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔における A2s 層の粒径加積曲線を示す。敷地内の A2s 層は、礫～シルトまでの広い粒度分布を示しており、細粒分含有率  $F_c$  の平均値は 37.7%となる。

A2s 層の液状化強度試験の供試体は、代表性の観点から、対象施設近傍から採取している。これに加えて、液状化を評価する観点から、礫～シルトまでの広い粒度分布を示す A2s 層の採取コアの中でも砂分を多く含む箇所を供試体として選定している。

図 2-4 に、液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔における粒度分布の平均値及び平均値  $\pm 1\sigma$  を示す。同図から、液状化強度試験箇所の細粒分含有率  $F_c$  平均値は 16.0%であり、敷地内調査孔の細粒分含有率  $F_c$  平均値の 37.7%と比較して細粒分が少ないことがわかる。

A2s 層の液状化強度試験の供試体について、採取深度の N 値と細粒分含有率  $F_c$  を用いて、道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説 ((社) 日本道路協会, H24.3) に基づき液状化強度比  $R_L$  を算出した。その結果を図 2-5 に示す。A2s 層の液状化強度試験の供試体の液状化強度比  $R_L$  の平均値は 3.9 となり、As2 層全体の液状化強度比  $R_L$  の平均値 7.6 に比して小さい。N 値については敷地全体よりも平均値は高いが、これは図 2-6 に示すとおり、供試体は採取コアの中でも細粒分含有率が小さい箇所を選定したため、N 値が大きくなる傾向があるためと考えられる。これより、液状化強度試験の供試体採取箇所は、A2s 層全体に対しても液状化しやすい箇所を選定していることがわかる。

なお、液状化強度試験の供試体は、代表性の観点から対象施設近傍から採取することを基本とし、採取コアの観察から砂分を多く含む箇所を選定している。図 2-7 に、敷地内の A2s 層の分布範囲と液状化強度試験供試体の採取箇所を示す。ここで、敷地内の A2s 層が分布するエリアを西側、南側及び東側の 3つのエリアに区分し、液状化強度試験供試体を採取した「西側エリア」と「南側及び東側エリア」との物理特性を比較した。粒度分布の比較を図 2-8 に、粒度組成の比較を表 2-2 に示す。

これより、液状化強度試験供試体を採取している西側エリアは、敷地内の A2s 層の中でも細粒分含有率が比較的低いエリアであることがわかる。一般的に細粒分含有率が低い地盤ほど液状化しやすい性状を示すことから、液状化強度試験の供試体選定位置は敷地内でも液状化しやすい箇所を選定していると判断できる。

表 2-1 A2s 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A2s 層	1.88	0.08	29.3	6.3	0.829	0.116	37.7	27.4	31.6	14.7
	(1.85)	(0.06)	(31.3)	(5.3)	(0.899)	(0.139)	(16.0)	(8.4)	(NP)	—

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

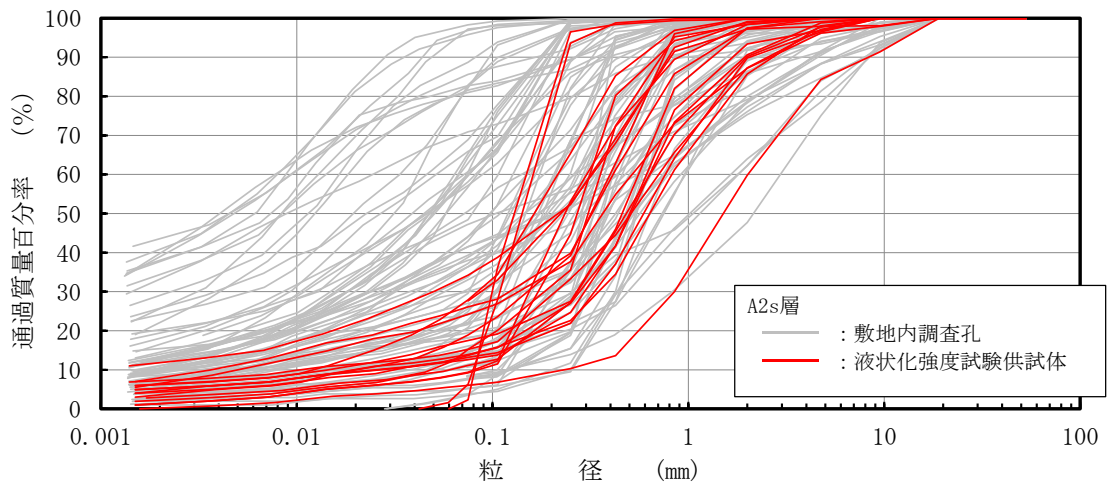


図 2-3 A2s 層の液状化強度試験供試体と敷地内調査孔の粒度試験結果

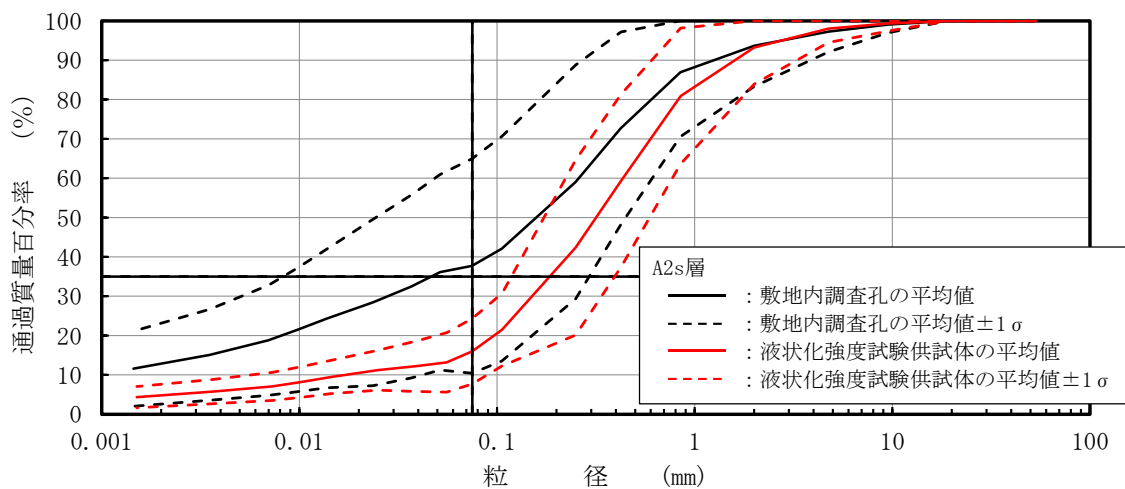


図 2-4 A2s 層の液状化強度試験供試体と敷地内調査孔の粒度分布比較 (平均及び平均 $\pm 1\sigma$ )

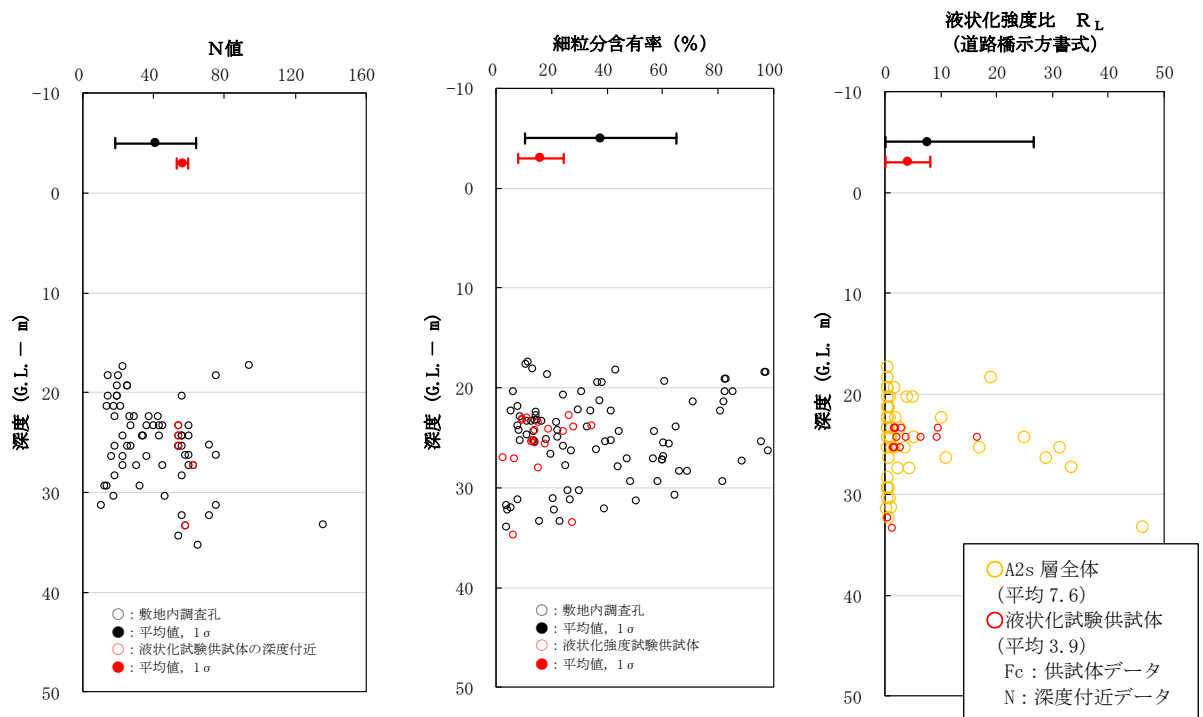


図 2-5 液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔のN値，細粒分含有率  $F_c$ ，液状化強度比  $R_L$  の比較  
(古安田層 (A2s 層))

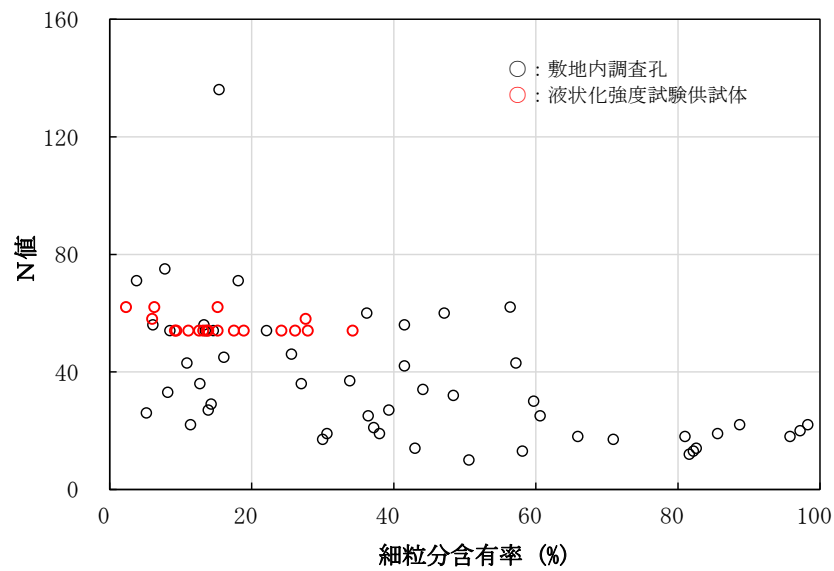


図 2-6 液状化強度試験箇所及び敷地内調査孔の細粒分含有率  $F_c$  とN値の関係  
(古安田層 (A2s 層)) (再掲)

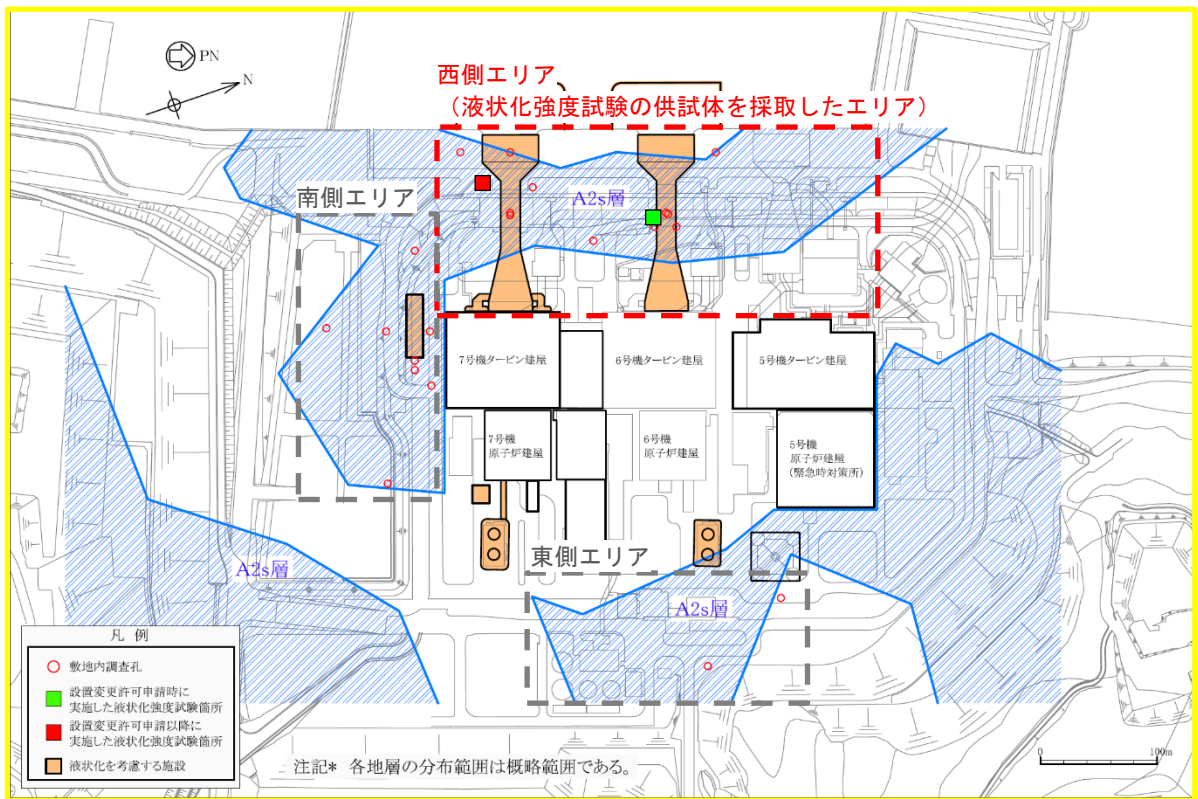


図 2-7 A2s 層の分布範囲とエリア区分

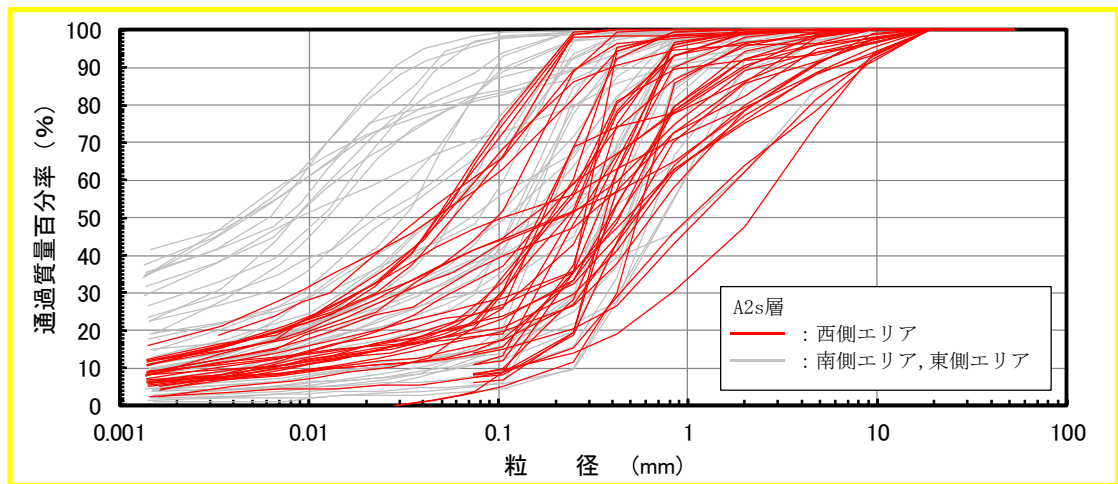


図 2-8 エリア別の A2s 層の粒度分布の比較

表 2-2 エリア別の A2s 層の粒度組成の比較

地層	エリア	礫分(2mm 以上)	砂分(2.0~0.075mm)	細粒分(0.0075mm 以下)	数量
		(%)	(%)	(%)	
A2s 層	西側*	10.1	62.5	27.4	42
	南側	1.8	49.3	48.9	39
	東側	9.9	53.2	36.9	6

注記\* : A2s 層の液状化強度試験の供試体採取エリア

3. 他の地層区分の試験結果で代用している地層の設定根拠

3.1 液状化検討対象層

3.1.1 A3s 層の解析用地盤物性値

(1) 解析用物性値の代用方針

液状化検討対象層の A3s 層は、泥岩礫やシルト層を含む更新世の砂質土層であり、層厚は薄く敷地内にまばらに分布する。A3s 層の分布範囲を図 3-1 に、A3s 層の分布範囲にて作成した地質断面図を図 3-2 示す。

A3s 層の有効応力解析に用いる解析用物性値は、同じ古安田層で敷地に広く、また厚く分布し、施設直下及び直近に認められる A2s 層にて代用する方針とする。

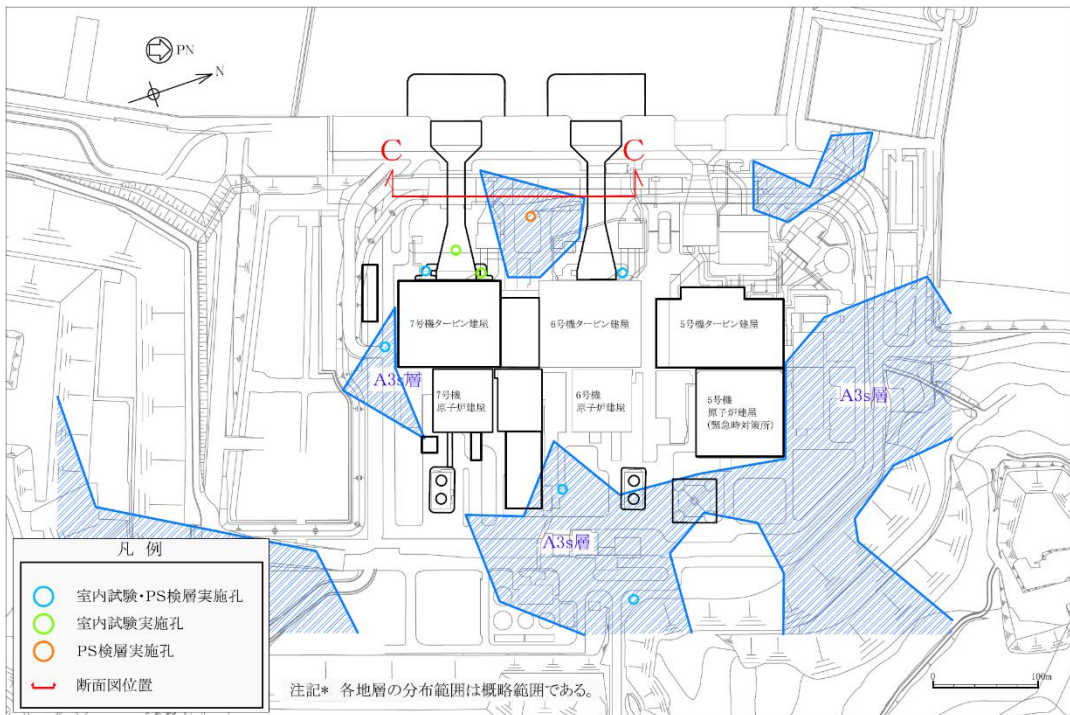


図 3-1 A3s 層の分布範囲（試料採取位置及び PS 検層位置）

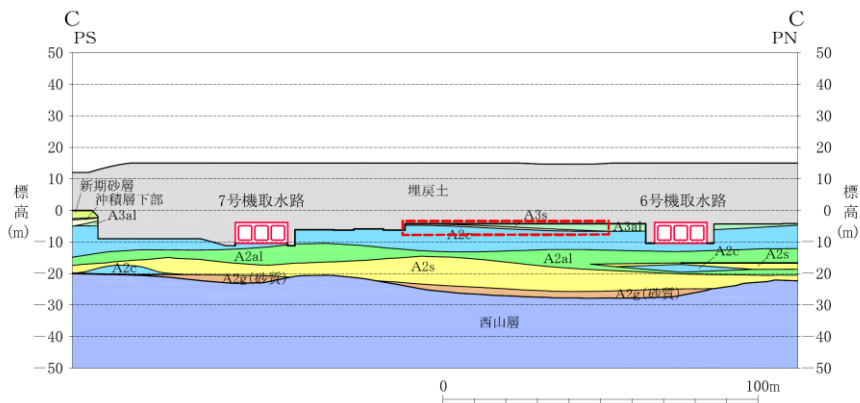


図 3-2 A3s 層の分布範囲にて作成した地質断面図



(2) 解析用物性値の代用の妥当性

A3s 層の解析用物性値を A2s 層で代用する妥当性を確認するため、両層の「物理特性」、「速度特性」、「強度特性」及び「液状化強度特性」について比較する。

「物理特性」については、粒度分布、湿潤密度、含水比、間隙比及び塑性指数について比較した。図 3-3 に両層の粒度加積曲線を、表 3-1 に両層の物理特性を示す。これより、A3s 層は A2s 層と比較して、湿潤密度は A3s 層の方が軽く、含水比及び間隙比は A2s 層より大きい結果となった。これは、A3s 層の細粒分含有率の平均値が 52.2%であるのに対し、A2s 層の細粒分含有率の平均値は 37.7%（液状化試験供試体：16.0%）と、同時代の砂質土層でも A3s 層の方が細粒分を多く含むためだと考えられる。A3s 層の塑性指数は 29.9 であり、A2s 層の 31.6（液状化試験供試体：NP）に対し、ほぼ同等の値である。

「速度特性」について、両層の PS 検層により得られるせん断波速度を比較した。PS 検層の位置図を図 3-1 に示す。両層のせん断波速度の比較結果を図 3-4 に示す。

「強度特性」について、原地盤から採取した試料に対して実施した三軸圧縮試験により比較を行った。三軸圧縮試験結果の比較結果を図 3-5 に示す。A3s 層と A2s 層の強度定数（ $c'$ 、 $\phi'$ ）を比較した結果、有意な差が無いことを確認した。

「液状化強度特性」について、両層の N 値、細粒分含有率及び道路橋示方書 V（耐震設計編）に基づき算定した液状化強度比  $R_L$  を比較した。これらの比較結果を図 3-6 に示す。A3s 層の方が代用する A2s 層よりも液状化強度比  $R_L$  が若干大きい結果となった。

これらの結果より、A3s 層は代用する A2s 層と比べて、細粒分含有率が多いものの、速度特性及び強度特性に有意な差が無いことを確認した。また、液状化強度特性については、代用する A2s 層よりも道路橋示方書 V により算定される液状化強度  $R_L$  が若干高い値を示している。よって、代用する A2s 層は、A3s 層よりも道路橋示方書 V により算定される液状化強度  $R_L$  を小さく評価している。したがって、A3s 層を A2s 層の解析用物性値で代用することは、地中構造物の耐震評価に影響の大きい液状化強度特性の観点において保守的な評価につながるものと考えられる。

以上より、A3s 層の解析用地盤物性値を A2s 層で代用することは妥当である。



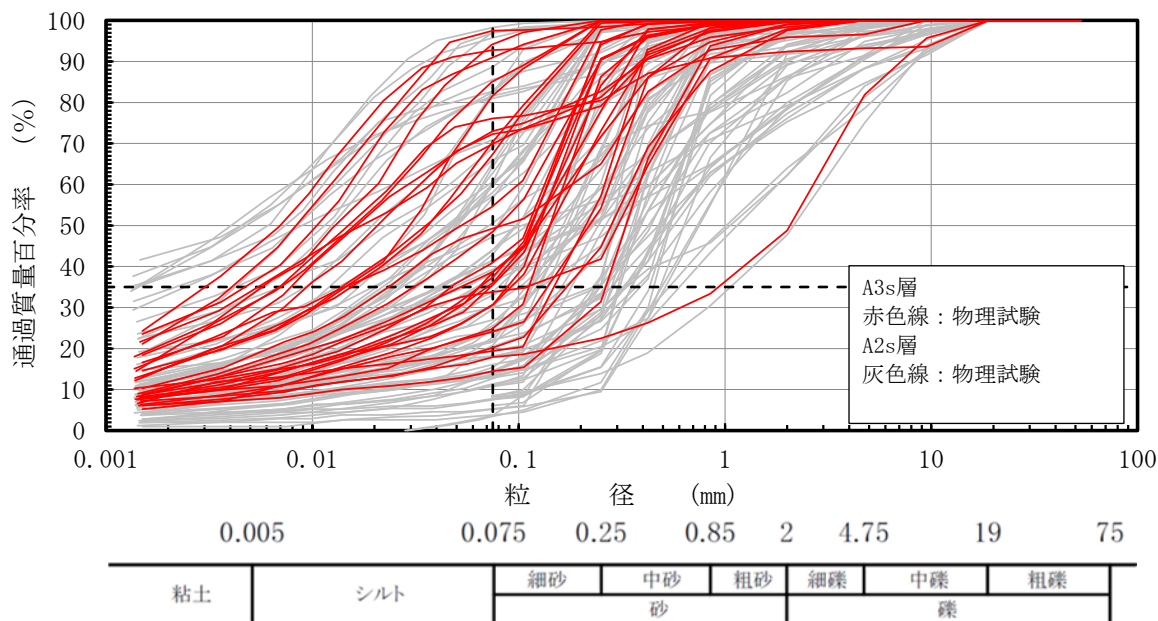


図 3-3 A3s 層と A2s 層の粒径加積曲線

表 3-1 A3s 層と A2s 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A3s 層	1.77	0.06	35.2	8.2	1.049	0.169	52.2	26.2	29.9	15.4
A2s 層	1.88 (1.85)	0.08 (0.06)	29.3 (31.3)	6.3 (5.3)	0.829 (0.899)	0.116 (0.139)	37.7 (16.0)	27.4 (8.4)	31.6 (NP)	14.7 —

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

(参考) 粒度組成

地層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒分 (%)	数量
	平均値	平均値	平均値	平均値	平均値	
A3s 層	2.4	45.4	32.3	19.9	52.2	30
A2s 層	6.4 (6.8)	55.9 (77.2)	22.7 (16.0)	16.9 (6.3)	37.7 (16.0)	87 (19)

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

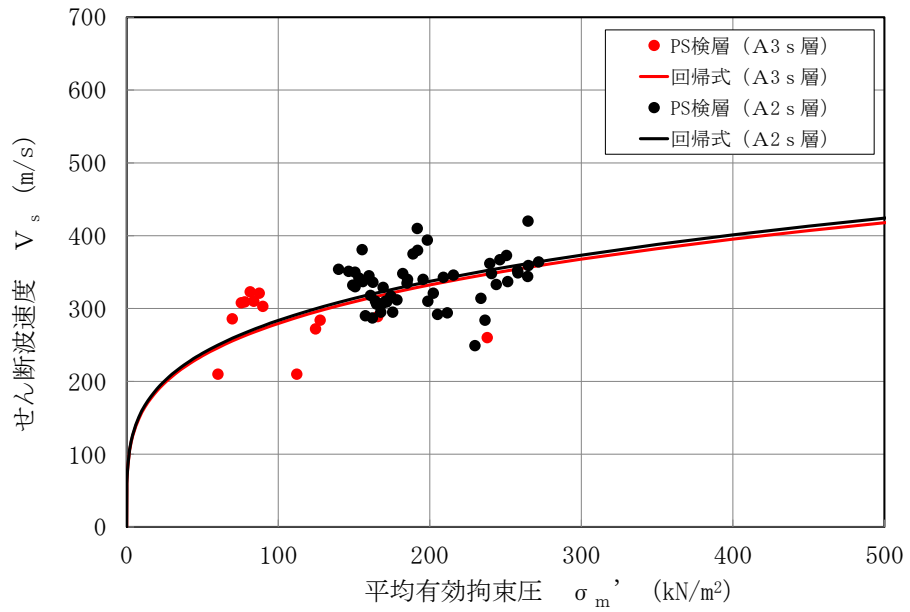


図 3-4 A3s 層と A2s 層の PS 検層結果の比較

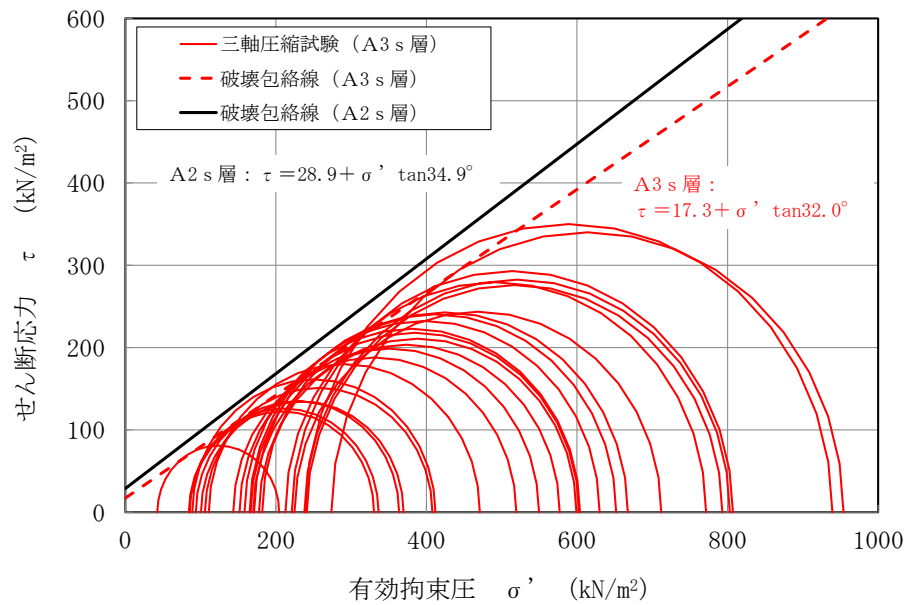


図 3-5 A3s 層と A2s 層の三軸圧縮試験結果 [圧密非排水条件] の比較

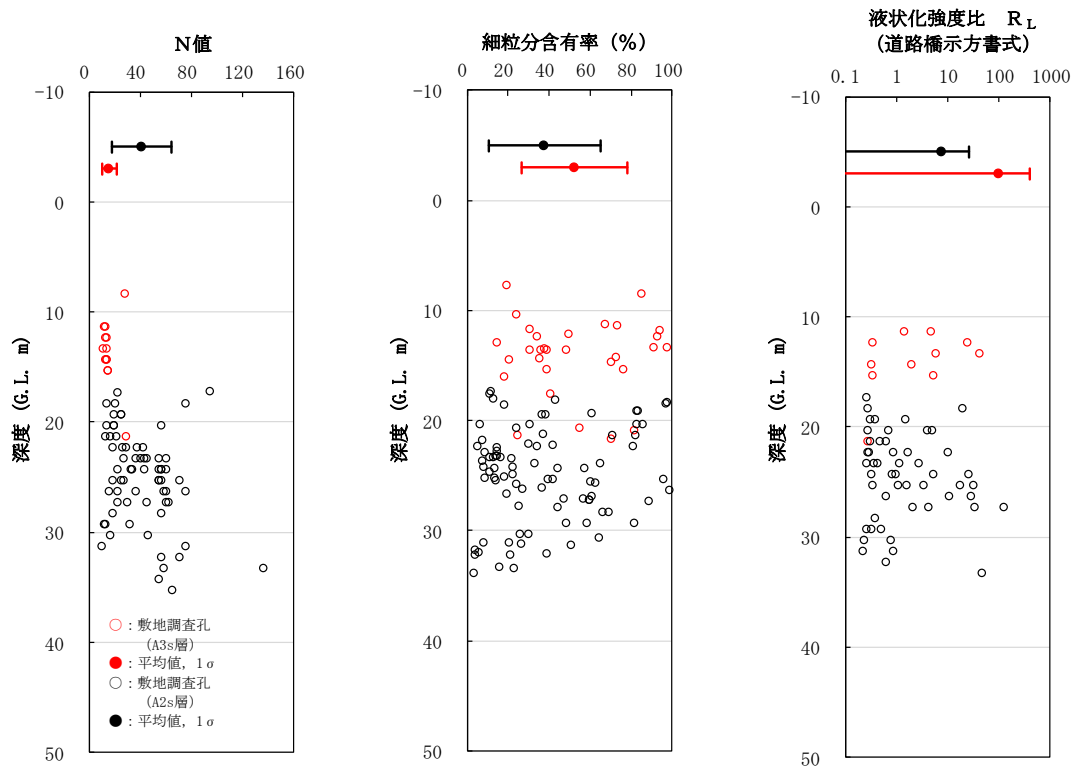


図 3-6 A3s 層と A2s 層の N 値，細粒分含有率  
 及び道路橋示方書 V に基づく液状化強度比  $R_L$  の比較

### 3.1.2 A2g 層（砂質）の解析用地盤物性値

#### (1) 解析用物性値の代用方針

液状化検討対象層の A2g 層（砂質）は、硬質な細礫及び泥岩礫を含む更新世の砂礫層であり、敷地の西側及び南端部に分布する。A2g 層（砂質）の分布範囲を図 3-7 に、A2g 層（砂質）の分布範囲にて作成した地質断面図を図 3-8 に示す。

A2g 層（砂質）の有効応力解析に用いる解析用地盤物性値は、同じ古安田層で敷地に広く、また厚く分布し、施設直下及び直近に認められる A2s 層にて代用する方針とする。

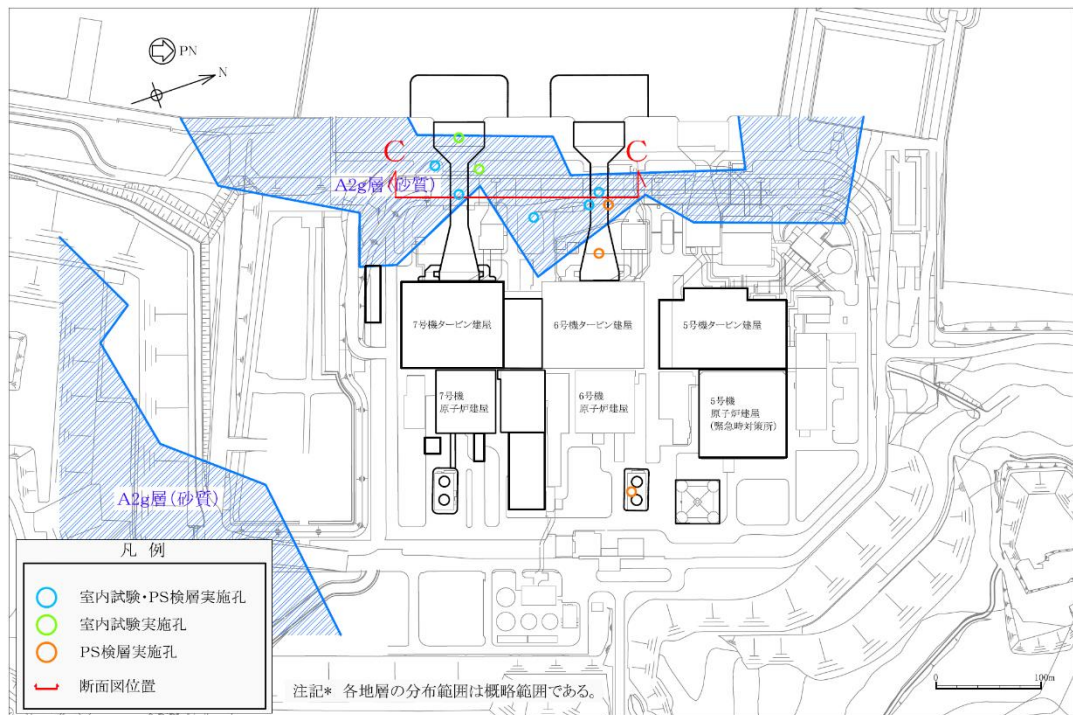


図 3-7 A2g 層（砂質）の分布範囲（試料採取位置及び PS 検層位置）

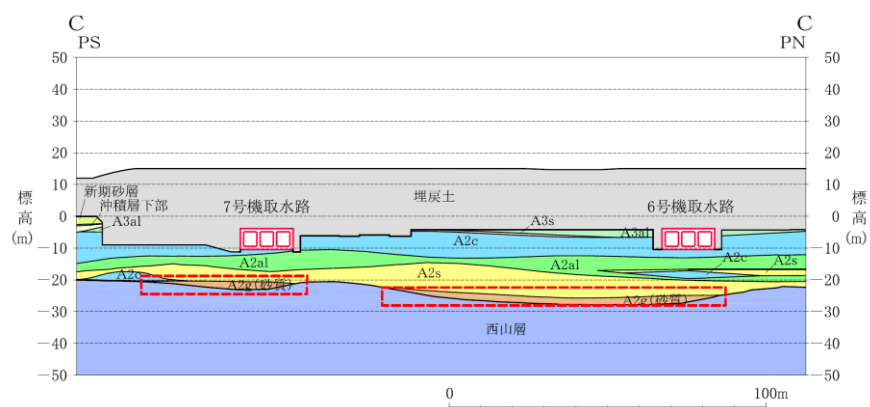


図 3-8 A2g 層（砂質）の分布範囲にて作成した地質断面図

(2) 解析用物性値の代用の妥当性の検討

A2g 層（砂質）の解析用物性値を A2s 層で代用する妥当性を確認するため、両層の「物理特性」、「速度特性」、「強度特性」及び「液状化特性」について比較する。

「物理特性」については、粒度分布、湿潤密度、含水比、間隙比及び塑性指数について比較した。両層の粒度加積曲線を図 3-9 に、物理特性を表 3-2 に示す。これらより、A2g 層（砂質）は A2s 層と比較して、湿潤密度はより軽く、含水比はより小さく、間隙比はより大きい結果となっている。これは、A2g 層（砂質）が A2s 層と比較して泥岩礫を多く含むためだと考えられる。細粒分含有率に着目すると、A2g 層（砂質）26.5%で、A2s 層の 37.7%（液状化強度試験の供試体：16.0%）であり、液状化強度試験に用いた A2s 層の方が細粒分含有率は低い。砂分（粒径：0.075～2.0mm）に着目すると、A2g 層（砂質）は 37.3%であるのに対し、A2s 層は 55.9%（液状化試験供試体：77.2%）であり、代用する A2s 層の方がより液状化しやすい性状の地層であることがわかる。

「速度特性」については、両層の PS 検層により得られるせん断波速度を比較した。PS 検層の位置図を図 3-7 に示す。両層のせん断波速度の比較結果を図 3-10 に示す。

「強度特性」については、礫分が主体的であるため力学試験の実施が困難であることから、内部摩擦角と相関性のある N 値を比較した。両層の N 値の比較結果を図 3-11 に示す。A2g 層（砂質）の方が代用する A2s 層よりも N 値が大きいことを確認した。

「液状化特性」については、N 値、細粒分含有率及び道路橋示方書 V（耐震設計編）に基づき算定した液状化強度比  $R_L$  を比較した。これらの比較結果を図 3-11 に示す。A2g 層（砂質）の方が代用する A2s 層よりも N 値が大きく、液状化強度比  $R_L$  の平均値は小さいもののばらつきの範囲内であることを確認した。

これらの比較結果より、A2g 層（砂質）は、代用する A2s 層と比べて、泥岩礫を多く含むものの、速度特性は A2s 層と概ね同じであり、N 値は A2s 層よりも大きいことを確認した。また、道路橋示方書 V により算定される液状化強度  $R_L$  の平均値は A2s 層よりも小さく、ばらつきの範囲内であることを確認した。

A2g 層（砂質）は礫分が主体的であるため、力学試験及び液状化強度試験の適用が困難な側面があるが、A2g 層（砂質）の基質は砂分であるため、砂分を主体とする A2s 層を代用することにより、同等の評価が期待できる。また、代用する A2s 層は、A2g 層（砂質）よりも速度特性を小さく評価している。

以上より、A2g 層（砂質）の解析用地盤物性値を A2s 層で代用することは妥当である。

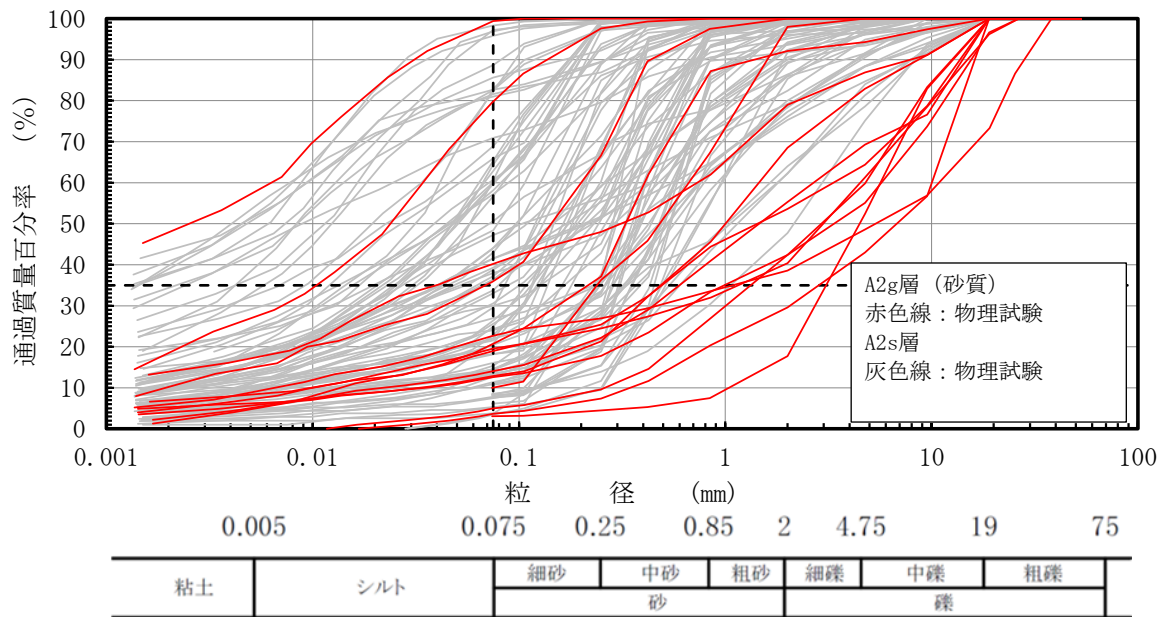


図 3-9 A2g 層 (砂質) と A2s 層の粒径加積曲線

表 3-2 A2g 層 (砂質) と A2s 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A2g 層 (砂質)	1.75	0.13	25.8	11.8	0.998	0.141	26.5	27.8	結果なし	—
A2s 層	1.88	0.08	29.3	6.3	0.829	0.116	37.7	27.4	31.6	14.7
	(1.85)	(0.06)	(31.3)	(5.3)	(0.899)	(0.139)	(16.0)	(8.4)	(NP)	—

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

(参考) 粒度組成

地層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒分 (%)	数量
	平均値	平均値	平均値	平均値	平均値	
A2g 層 (砂質)	36.1	37.3	15.8	14.7	26.5	15
A2s 層	6.4	55.9	22.7	16.9	37.7	87
	(6.8)	(77.2)	(16.0)	(6.3)	(16.0)	(19)

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。



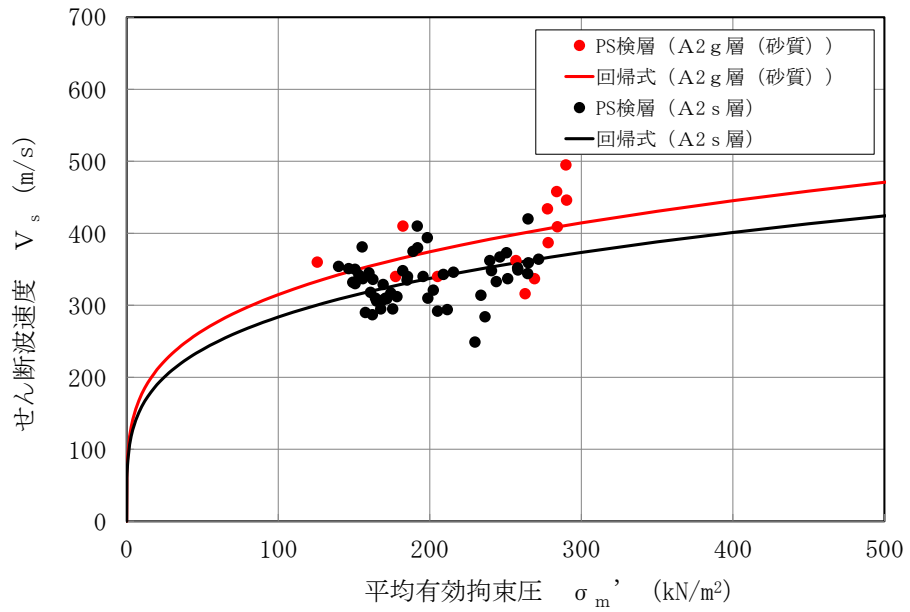


図 3-10 A2g 層 (砂質) と A2s 層の PS 検層結果の比較

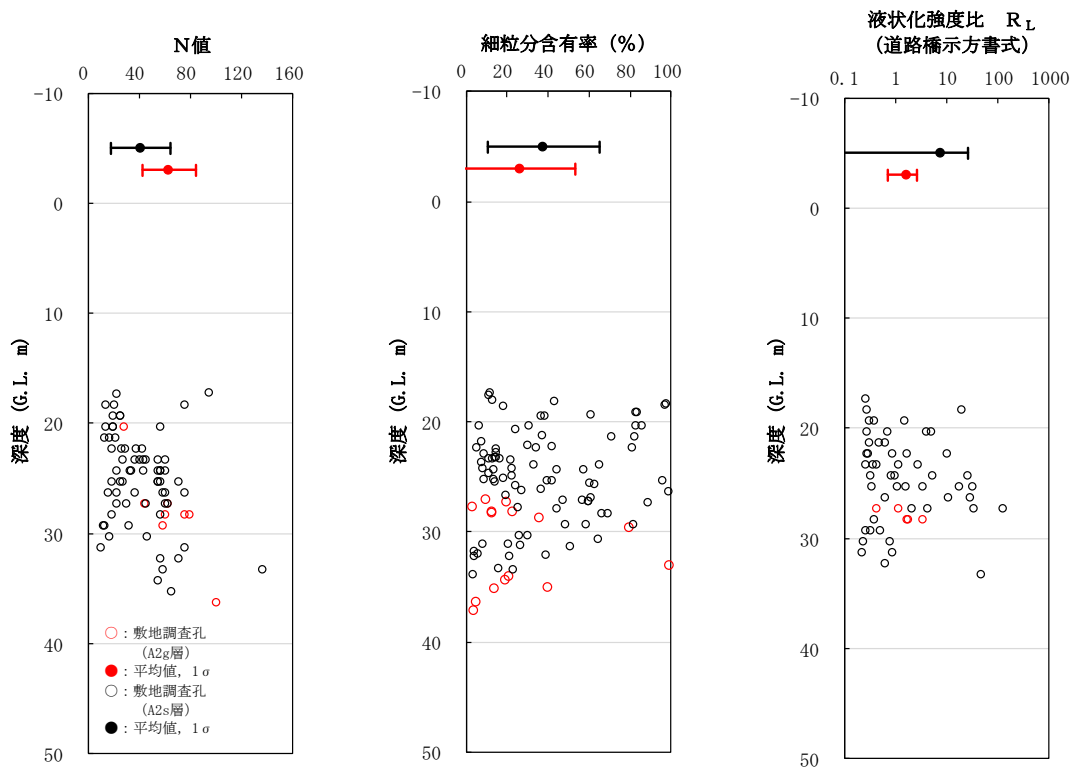


図 3-11 A2g 層 (砂質) と A2s 層の N 値, 細粒含有率  
及び道路橋示方書 V に基づく液状化強度比  $R_L$  の比較

### 3.1.3 A1g 層の解析用地盤物性値

#### (1) 解析用物性値の代用方針

液状化検討対象層の A1g 層は、泥岩礫を含む砂礫及び泥岩礫を含む砂質シルトを主体とする更新世の堆積物であり、敷地の南部に分布する。また、A1g 層の分布範囲は、耐震評価における対象施設から十分離れている。A1g 層の分布範囲を図 3-12 に、A1g 層の分布範囲にて作成した地質断面図を図 3-13 に示す。

A1g 層の有効応力解析に用いる解析用地盤物性値は、同じ古安田層で敷地に広く、また厚く分布し、施設直下及び直近に認められる A2s 層にて代用する方針とする。

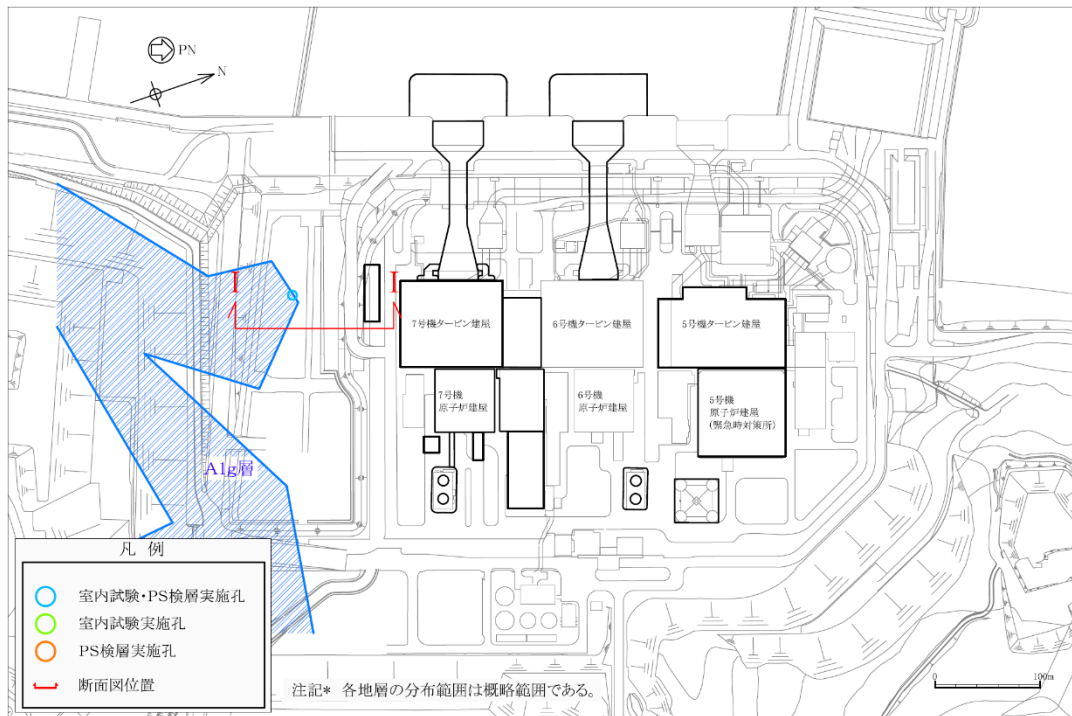


図 3-12 A1g 層の分布範囲（試料採取位置及び PS 検層位置）

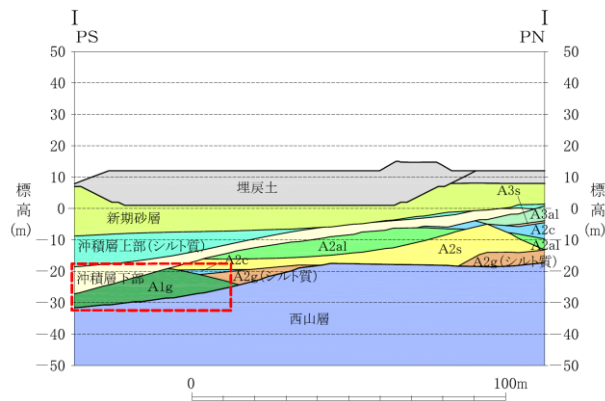


図 3-13 A1g 層の分布範囲にて作成した地質断面図

(2) 解析用物性値の代用の妥当性

A1g 層の解析用物性値を A2s 層で代用する妥当性を確認するため、両層の「物理特性」、  
「速度特性」、  
「強度特性」及び「液状化特性」について比較する。

「物理特性」については、粒度分布、湿潤密度、含水比、間隙比及び塑性指数について比較した。両層の粒度加積曲線を図 3-14 に、物理特性を表 3-3 に示す。A1g 層は A2s 層と比較して、湿潤密度はより軽く、含水比及び間隙比はより大きい結果となっている。これは、A1g 層の細粒分含有率が 53.6%であるのに対し、A2s 層の細粒分含有率が 37.7%と、同時代に堆積した砂質土層でも A1g 層の方が細粒分を多く含むためだと考えられる。砂分（粒径：0.075~2.0mm）に着目すると、A2g 層（砂質）は 37.8%であるのに対し、A2s 層は 55.9%（液状化試験供試体：77.2%）であり、代用する A2s 層の方がより液状化しやすい性状の地層であることがわかる。また、A1g 層の塑性指数は 27.6 を示す。

「速度特性」については、両層の PS 検層により得られるせん断波速度を比較した。両層のせん断波速度の比較結果を図 3-15 に示す。

「強度特性」については、礫分が主体的であるため力学試験の実施が困難であることから、強度定数（ $c'$ 、 $\phi'$ ）と相関性の高い N 値による比較を行った。両層の N 値の比較結果を図 3-16 に示す。A1g 層の方が代用する A2s 層よりも N 値が大きいことを確認した。

「液状化特性」については、N 値、細粒分含有率及び道路橋示方書 V に基づき算定した液状化強度比を比較した。これらの比較結果を図 3-16 に示す。A1g 層の方が代用する A2s 層より液状化強度比  $R_L$  が若干大きい結果となった。これは、A1g 層の方が細粒分を多く含むことが要因と考えられる。

これらの比較結果より、A1g 層は、代用する A2s 層と比べて、細粒分含有率が多いものの、速度特性及び強度特性は A2s 層と概ね同じであり、道路橋示方書 V により算定される液状化強度  $R_L$  は A2s 層よりも若干高い値を示す。したがって、A1g 層を A2s 層の解析用物性値で代用することは、地中構造物の耐震評価に影響の大きい液状化強度特性の観点において保守的な評価につながるものと考えられる。

以上より、A1g 層の解析用地盤物性値を A2s 層で代用することは妥当である。

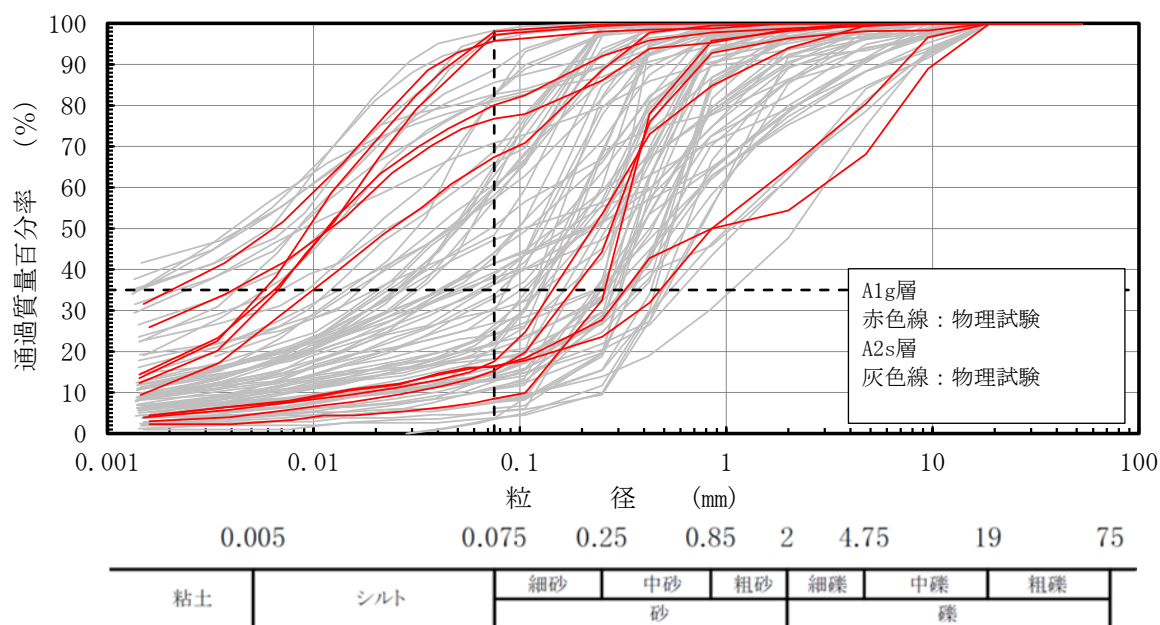


図 3-14 A1g 層と A2s 層の粒径加積曲線

表 3-3 A1g 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A1g 層	1.78	0.05	34.3	14.3	1.141	0.100	53.6	38.3	27.6	9.1
A2s 層	1.88	0.08	29.3	6.3	0.829	0.116	37.7	27.4	31.6	14.7
	(1.85)	(0.06)	(31.3)	(5.3)	(0.899)	(0.139)	(16.0)	(8.4)	(NP)	—

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

(参考) 粒度組成

地層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒分 (%)	数量
	平均値	平均値	平均値	平均値	平均値	
A1g 層	8.6	37.8	33.5	20.1	53.6	11
A2s 層	6.4	55.9	22.7	16.9	37.7	87
	(6.8)	(77.2)	(16.0)	(6.3)	(16.0)	(19)

注：()内の数値は、液状化強度試験供試体の値を示す。

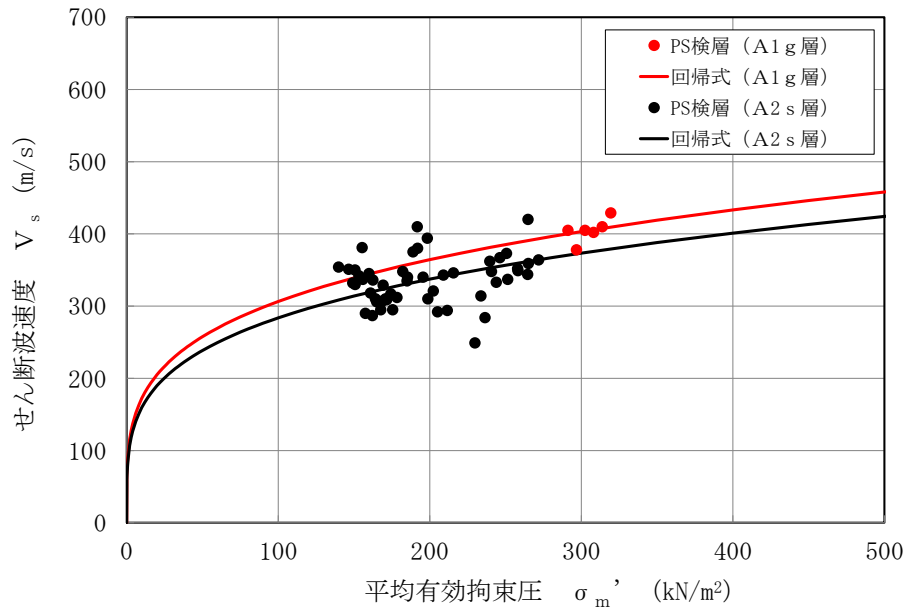


図 3-15 A1g 層と A2s 層の PS 検層結果の比較

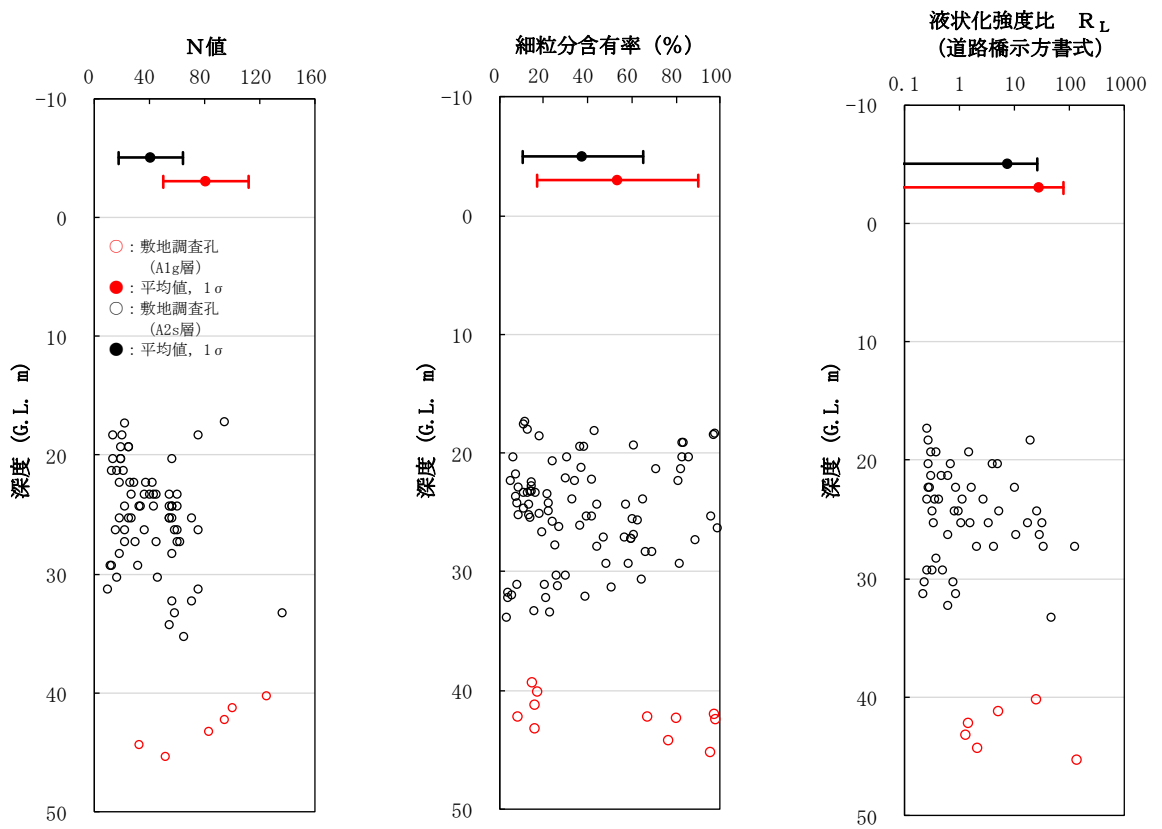


図 3-16 A1g 層と A2s 層の N 値，細粒分含有率  
及び道路橋示方書 V に基づく液状化強度比  $R_L$  の比較

### 3.2 非液状化検討対象層

#### 3.2.1 A2g層（シルト質）の解析用地盤物性値

##### (1) 解析用物性値の代用方針

非液状化検討対象層のA2g層（シルト質）は、砂礫を含む砂質シルトを主体とする更新世の堆積物であり、敷地の東側に分布する。A2g層（シルト質）の分布範囲を図3-17に、A2g層（シルト質）の分布範囲にて作成した地質断面図を図3-18に示す。

A2g層（シルト質）の有効応力解析に用いる解析用地盤物性値は、同じ古安田層で敷地に広く、また厚く分布し、施設直下及び直近に認められるA2c層にて代用する方針とする。

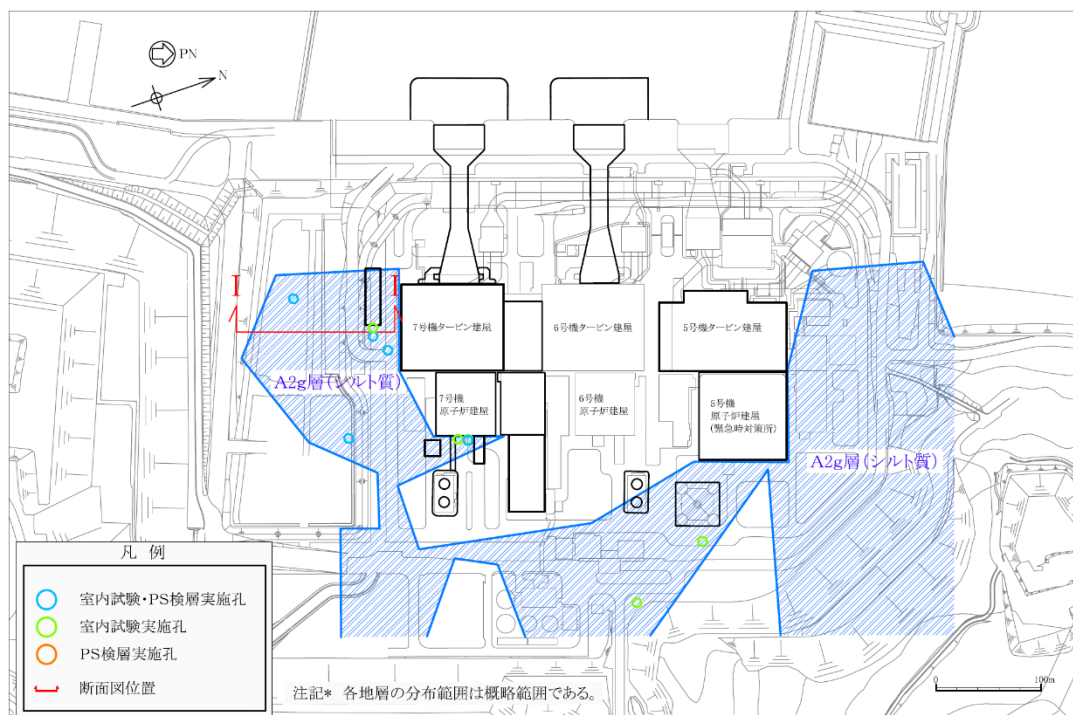


図3-17 A2g層（シルト質）の分布範囲（試料採取位置及びPS検層位置）

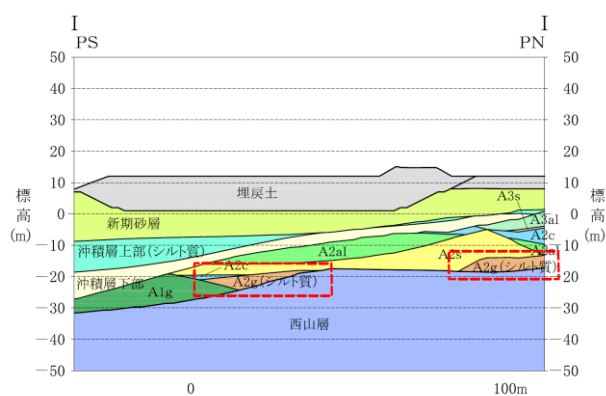


図3-18 A2g層（シルト質）の分布範囲にて作成した地質断面図



(2) 解析用物性値の代用の妥当性

A2g 層（シルト質）の解析用物性値を A2c 層で代用する妥当性を確認するため、両層の「物理特性」、「速度特性」及び「強度特性」について比較する。

「物理特性」については、湿潤密度、含水比、間隙比及び塑性指数について比較した。図 3-19 に両層の粒径加積曲線を、表 3-4 に両層の湿潤密度、含水比及び間隙率を示す。これより、A2g 層（シルト質）は A2c 層と比較して、湿潤密度はより重く、含水比は同等、間隙比はより小さい結果となっている。これは、A2g 層（シルト質）の礫分が 4.3% であるのに対し、A2c 層の礫分は 0.2% と同時代の粘性土層でも A2g 層（シルト質）の方が礫分を多く含むためだと考えられる。A2g 層（シルト質）は西山層の泥岩礫が細粒化したものであるため、一部に礫が現れる場合があるが、細粒分含有率は 77.6% を示しており、シルトを主体とする地層であることから、A2c 層と同等の性状を有する地層であると判断できる。

「速度特性」については、PS 検層により得られるせん断波速度を比較した。PS 検層の位置図を図 3-17 に示す。両層のせん断波速度の比較結果を図 3-20 に示す。

「強度特性」については、シルトを主体とした西山層の泥岩礫を含むため力学試験の実施が困難であることから、強度定数（ $c'$ 、 $\phi'$ ）と相関性の高い N 値による比較を行った。両層の N 値及び細粒分含有率の比較結果を図 3-21 に示す。A2g 層（シルト質）と A2c 層の N 値を比較した結果、有意な差が無いことを確認した。

これらの比較結果より、A2g 層（シルト質）は、代用する A2c 層と比べて、礫分が多いものの、速度特性及び強度特性に関しては A2c 層と概ね同じである。A2g 層（シルト質）の基質はシルトであるため、シルト分を主体とする A2c 層で代用することにより、同等の評価が期待できる。

以上より、A2g 層（シルト質）の解析用地盤物性値を A2c 層で代用することは妥当である。

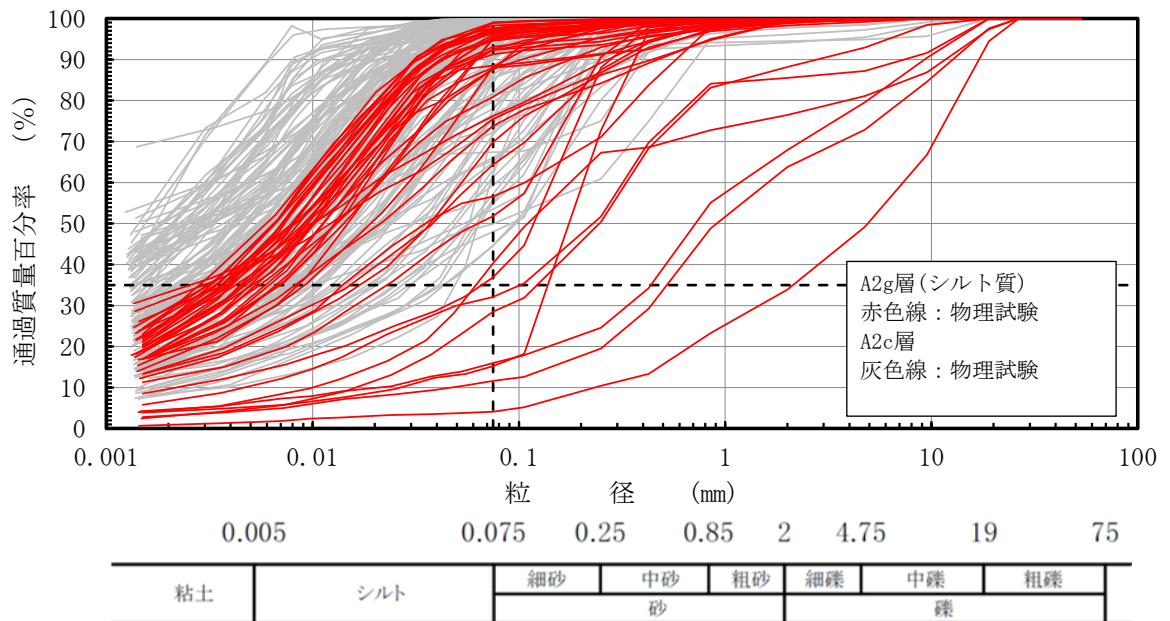


図 3-19 A2g 層（シルト質）と A2c 層の粒径加積曲線

表 3-4 A2g 層（シルト質）と A2c 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A2g 層 (シルト質)	1.92	0.26	40.9	13.6	0.849	0.550	77.6	28.0	45.1	11.7
A2c 層	1.80	0.06	41.0	5.9	1.081	0.139	90.6	13.6	39.9	14.7

(参考) 粒度組成

地層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒分 (%)	数量
	平均値	平均値	平均値	平均値	平均値	
A2g 層 (シルト質)	4.3	18.1	47.6	30.0	77.6	46
A2c 層	0.2	9.2	47.5	43.1	90.6	161

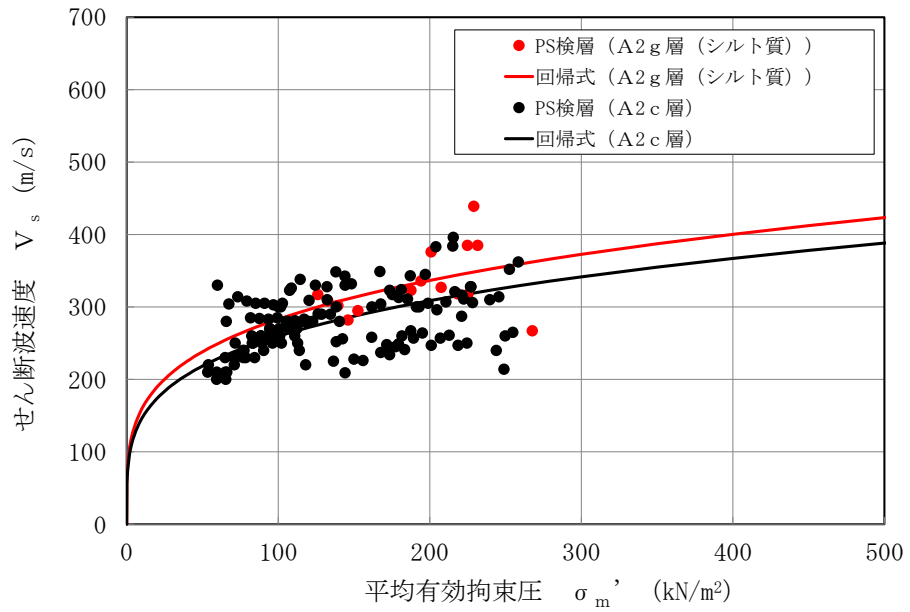


図 3-20 A2g 層（シルト質）と A2c 層の PS 検層結果の比較

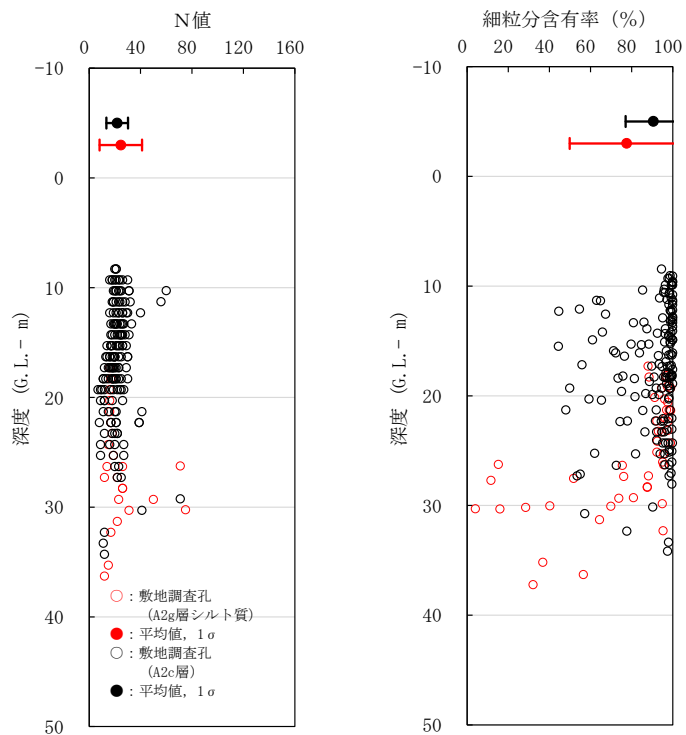


図 3-21 A2g 層（シルト質）と A2c 層の N 値及び細粒分含有率の比較

### 3.2.2 A1c 層の解析用地盤物性値

#### (1) 解析用物性値の代用方針

非液状化検討対象層の A1c 層は、シルト及び砂混じりシルトを主体とする更新世の粘性土層であり、敷地の南部に分布している。また、A1c 層の分布範囲は、耐震評価における対象施設から十分離れている。A1c 層の分布範囲を図 3-22 に、A1c 層の分布範囲にて作成した地質断面図を図 3-23 示す。

有効応力解析に用いる A1c 層の解析用地盤物性値は、同じ古安田層で敷地に広く、また厚く分布し、施設直下及び直近に認められる A2c 層にて代用する方針とする。

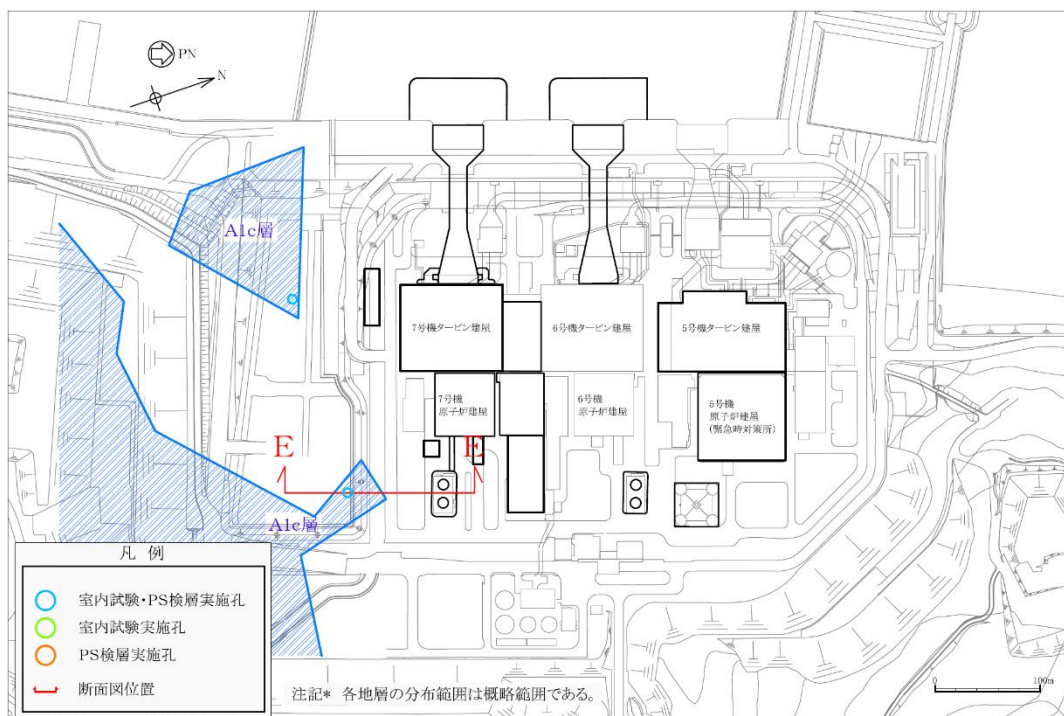


図 3-22 A1c 層の分布範囲（試料採取位置及び PS 検層位置）

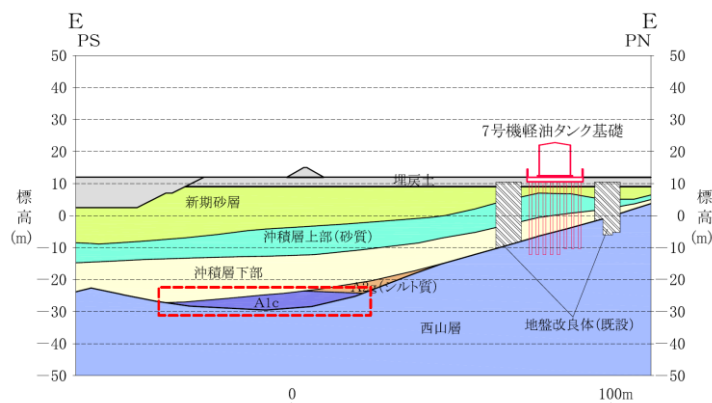


図 3-23 A1c 層の分布範囲にて作成した地質断面図

(2) 解析用物性値の代用の妥当性

A1c 層の解析用物性値を A2c 層で代用する妥当性を確認するため、両層の「物理特性」、  
「速度特性」及び「強度特性」について比較する。

「物理特性」については、湿潤密度、含水比、間隙比及び塑性指数について比較した。  
両層の粒径加積曲線を図 3-24 に、物理特性を表 3-5 に示す。これらより、A1c 層は A2c  
層と比較して、湿潤密度はより軽く、含水比及び間隙比はより大きい結果となっている。  
これは、A1c 層がシルトを主体とし、A2c 層と比較すると淘汰がよく粒度が揃っているため  
と考えられる。

「速度特性」については、両層の PS 検層により得られるせん断波速度を比較した。両層  
のせん断波速度の比較結果を図 3-25 に示す。

「強度特性」については、原地盤から採取した試料を用いた三軸圧縮試験に基づき比較  
した。A1c 層と A2c 層の強度定数 ( $c'$ ,  $\phi'$ ) を比較した結果、有意な差が無いことを確  
認した。

これらの比較結果より、A1c 層は、代用する A2c 層と比べて、分級された土質であるも  
の、速度特性及び強度特性に関しては A2c 層と概ね同じである。

以上より、A1c 層の解析用地盤物性値を A2c 層で代用することは妥当である。

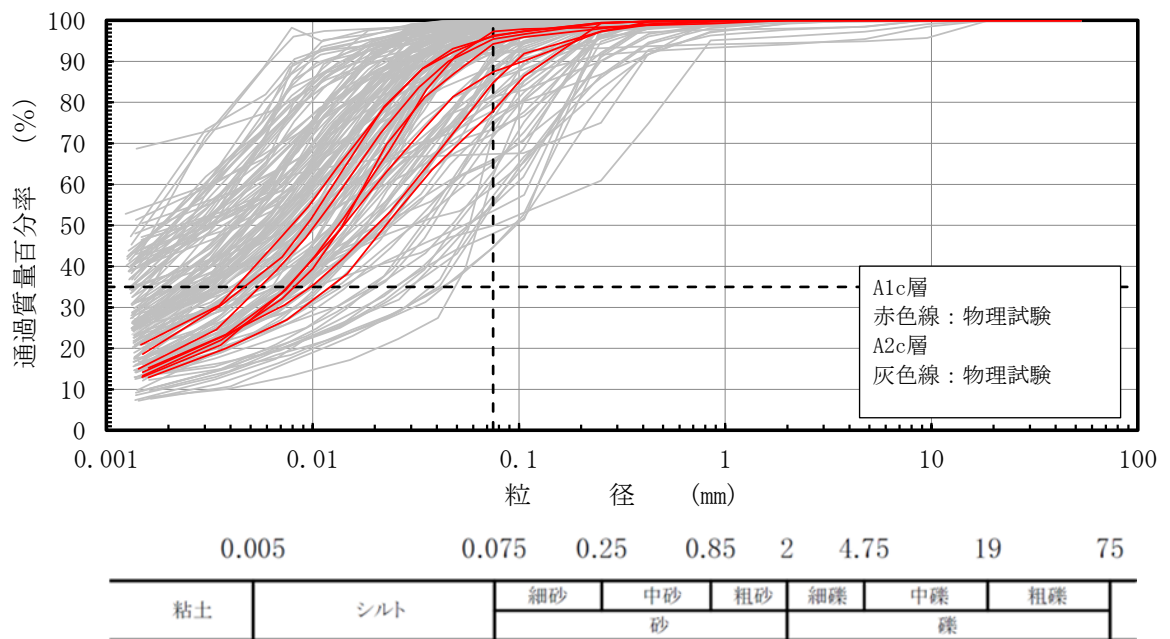


図 3-24 A1c 層と A2c 層の粒径加積曲線

表 3-5 A1c 層の基礎物理特性

地層	湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )		含水比 $w$ (%)		間隙比 $e$		細粒分含有率 (%)		塑性指数 $I_p$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A1c 層	1.73	0.02	46.6	2.9	1.255	0.041	91.2	7.0	36.1	9.4
A2c 層	1.80	0.06	41.0	5.9	1.081	0.139	90.6	13.6	39.9	14.7

(参考) 粒度組成

地層	礫分 (%)	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	細粒分 (%)	数量
	平均値	平均値	平均値	平均値	平均値	
A1c 層	0.0	8.8	61.9	29.3	91.2	8
A2c 層	0.2	9.2	47.5	43.1	90.6	161

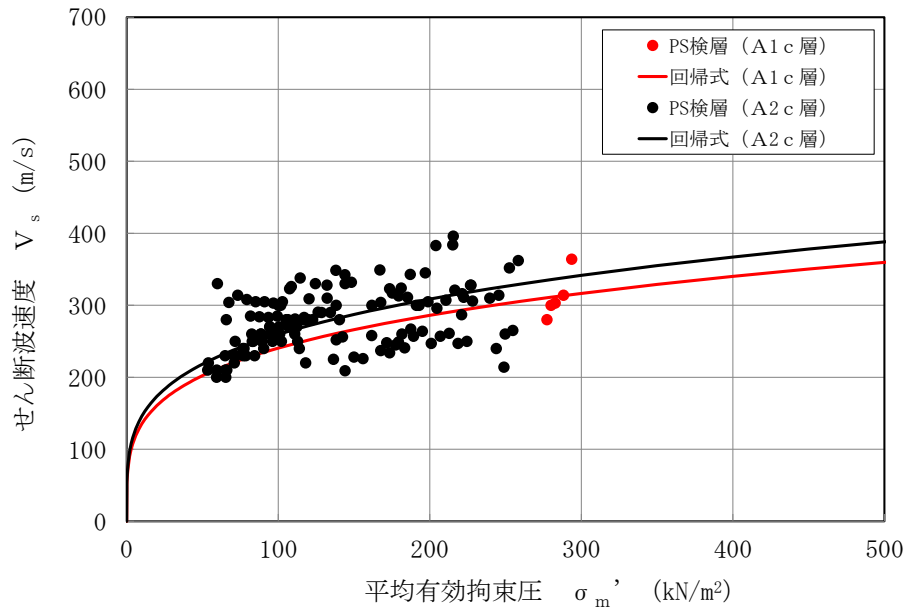


図 3-25 A1c 層と A2c 層の PS 検層結果の比較

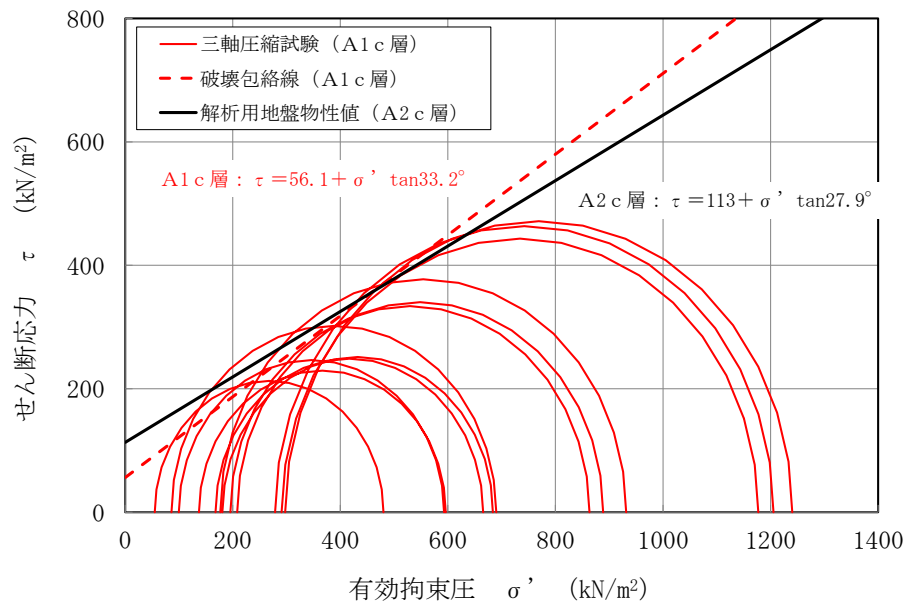


図 3-26 A1c 層と A2c 層の三軸圧縮試験結果 [圧密非排水条件] の比較



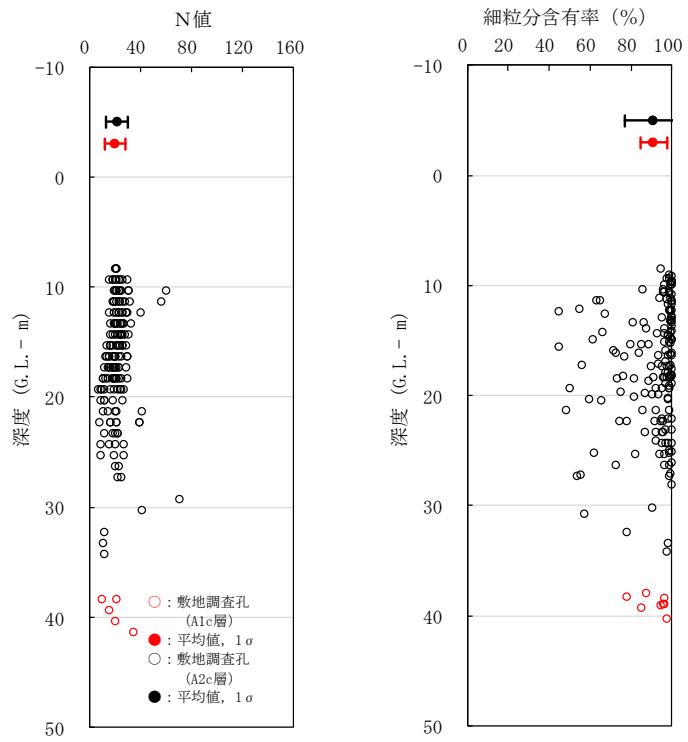


図 3-27 A1c 層と A2c 層の N 値及び細粒分含有率の比較

(参考資料 5) 有効応力解析に用いる解析用物性値の適用性について

1. 概要

「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値」で設定した地盤の液状化強度特性に対して、耐震評価への適用性を確認するため、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震の地震記録を入力波とした解析コードFLIPによる有効応力解析を行い、当該地震時に敷地内で観察された地盤変状と比較する。検討フローを図1-1に示す。

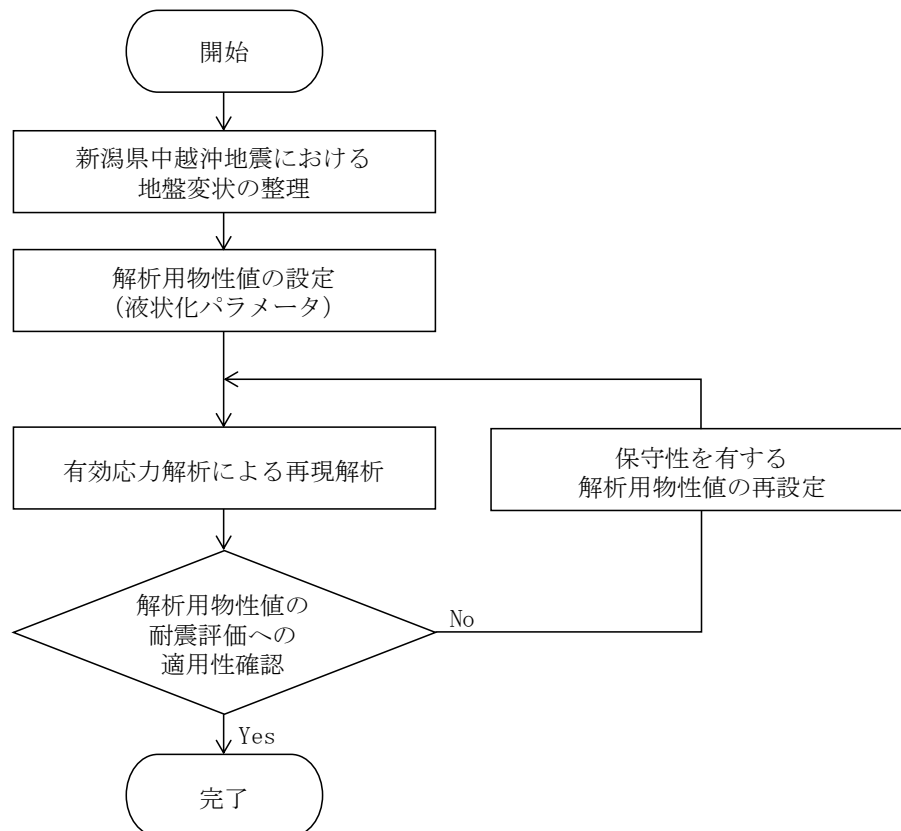


図 1-1 解析用物性値の適用性検討のフロー

## 2. 新潟県中越沖地震と敷地内地盤変状

### 2.1 新潟県中越沖地震の概要

2007年7月16日午前10時13分頃、新潟県中越沖において、大きな地震が発生し、新潟県と長野県で最大震度6強を観測した他、北陸地方を中心に東北地方から近畿・中国地方にかけて広い範囲で地震動が観測された。気象庁発表（平成19年7月 地震・火山月報（防災編））によれば、マグニチュードは6.8、震源の深さは17kmであり、震央距離16km、震源距離約23kmに位置していた柏崎刈羽原子力発電所は地震発生により大きな地震動を受けた。新潟県中越沖地震の震央と柏崎刈羽原子力発電所の位置を図2-1に示す。

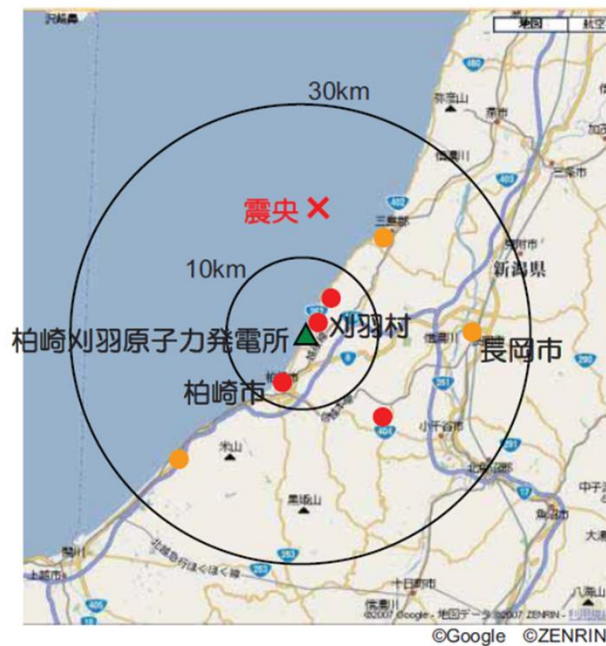


図2-1 新潟県中越沖地震の震央と柏崎刈羽原子力発電所の位置

（出典：柏崎刈羽原子力発電所5号機 新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る点検・評価報告書（建物・構築物編））

### 2.2 新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所（大湊側）の敷地内地盤変状について

新潟県中越沖地震における敷地内の地盤変状について、地震前後（2006年4月、2007年10月）に撮影された航空写真測量データに基づき作成した図のうち、図2-2に亀裂・噴砂位置、図2-3に地盤水平変動、図2-4に地盤鉛直変動を示す。なお、本項では柏崎刈羽原子力発電所の大湊側の敷地において観察された地盤変状について示す。

#### 2.2.1 亀裂・噴砂

敷地山側の駐車場付近に噴砂が確認されている。敷地の海側エリアでは護岸のはらみ出しが確認されており、地下水位以深の埋戻土の液状化に起因するものと考えられる。地表面に発生した亀裂の多くは直線状に発生しており、地中埋設物の存在による埋戻土の相対沈下や法面の変状の影響であると考えられる。

### 2.2.2 地盤水平変動

地盤水平変動については、6号機及び7号機の原子炉建屋及びタービン建屋周辺の水平変位量は比較的小さい。一方、護岸近傍の海側エリアでは、その形状と埋戻土の影響から、0.5mを超える海側への水平変位が確認されている箇所もある。また、法面近傍では亀裂が生じている箇所も多く、比較的大きな水平変位が認められている。

### 2.2.3 地盤鉛直変動

敷地における特徴的な地盤鉛直変動としては、5号機海水熱交換機器建屋近傍で最大約1.0mの沈下が確認されている。6号機及び7号機の原子炉建屋及びタービン建屋周囲では顕著な沈下はなかった。建屋近傍や段差箇所等の局所的な沈下を除けば、沈下量は最大で0.3～0.5m程度であった。

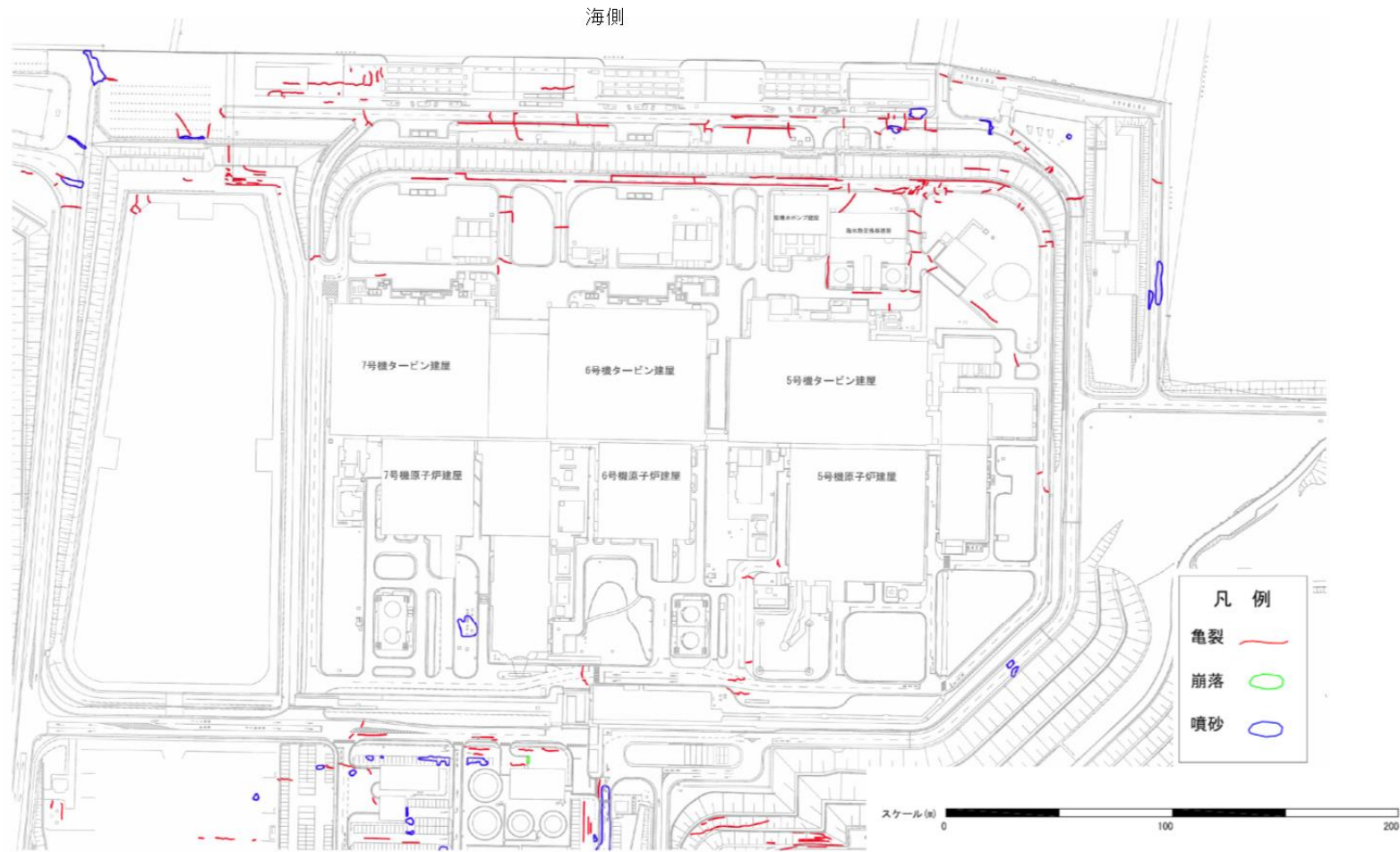
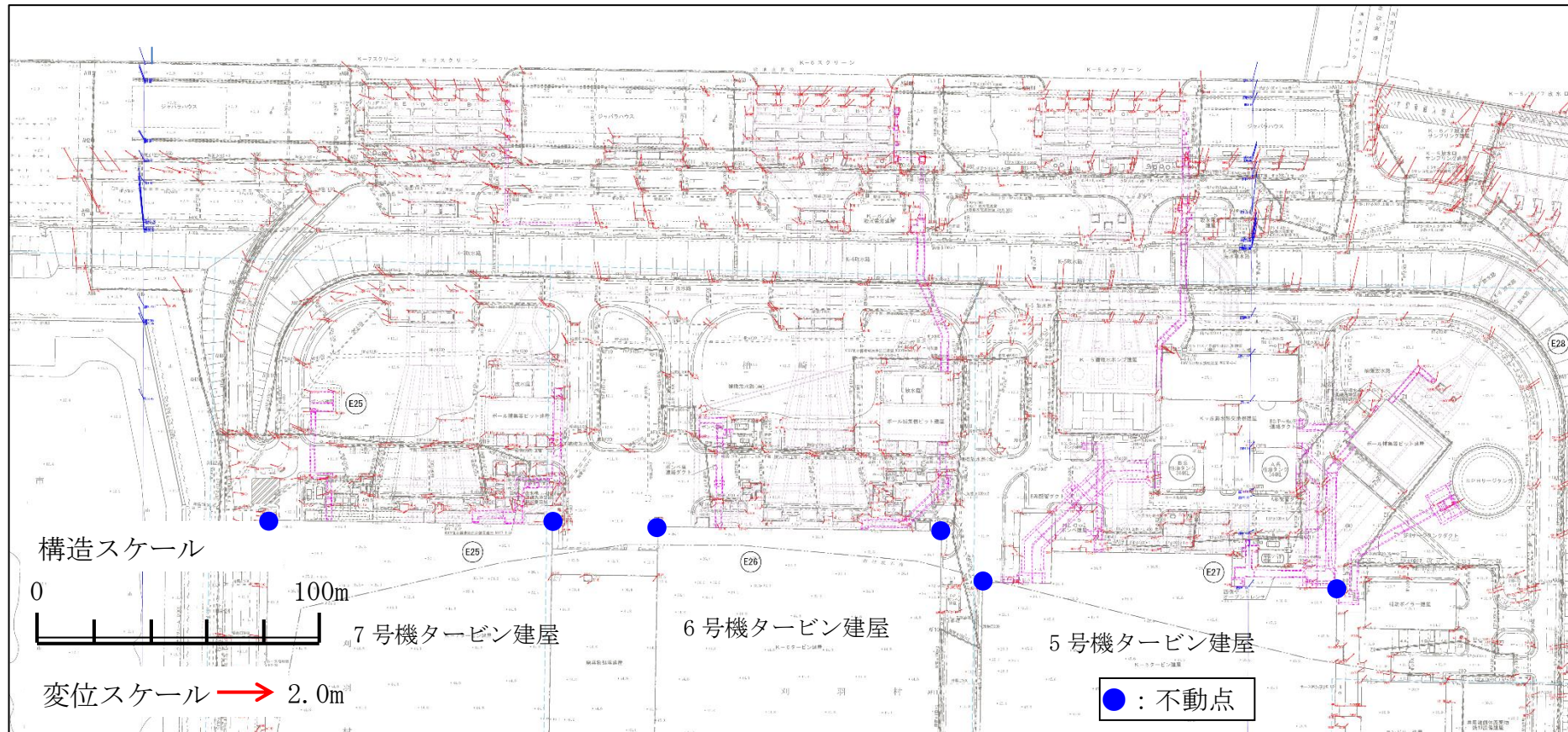


図2-2 新潟県中越沖地震における敷地内の亀裂・噴砂位置  
(出典：耐震・構造設計小委員会 地震・津波，地質・地盤合同WG（第3回）（2007））

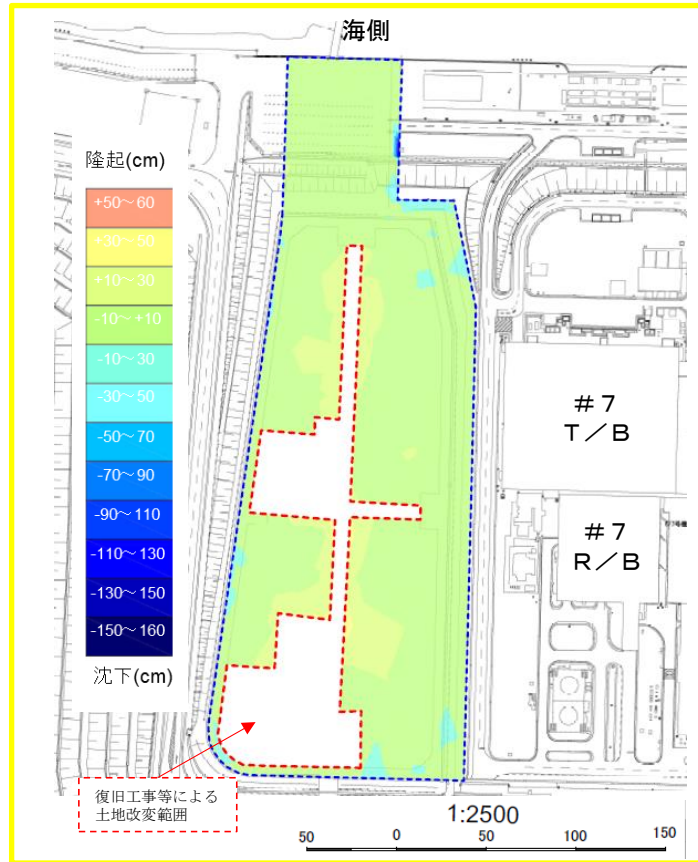




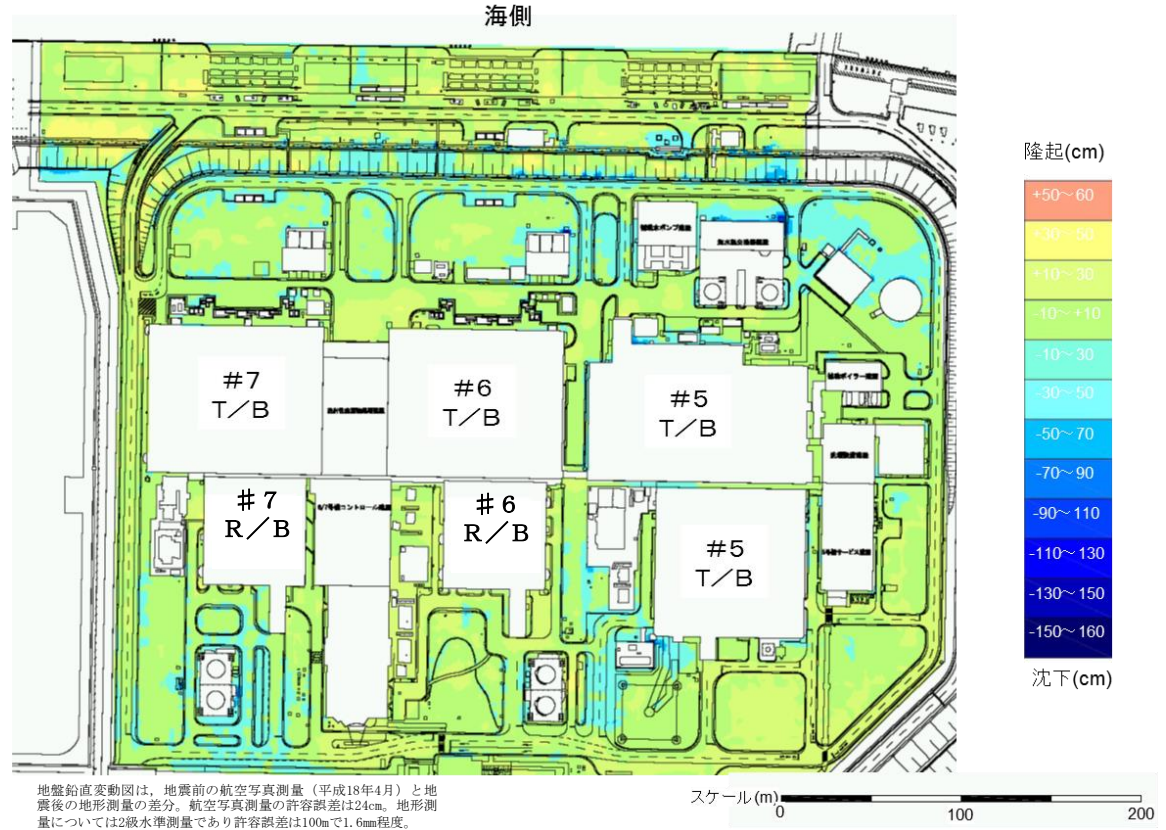
注1\* : 変位量は、「2006年4月撮影」と「2007年10月撮影」の航空写真測量結果の差分から算定している。

注2\* : 測量における不動点は、原子炉建屋・タービン建屋の隅角部としている。(大湊側は10点)

図2-3 新潟県中越沖地震における敷地内の地盤水平変動図



(a) 敷地南側



(b) 5~7号機周辺\*

図 2-4 新潟県中越沖地震における敷地内の地盤鉛直変動図 大湊側

注記\* : 耐震・構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同WG（第4回）（2008）に一部加筆



### 3. 有効応力解析による再現解析

#### 3.1 有効応力解析による地盤変位の再現解析

新潟県中越沖地震の地震記録を入力波とした有効応力解析を行い、当該地震時に敷地内で観察された地盤変状と比較することで、解析用物性値の適用性について確認する。

有効応力解析の解析コードは、解析コード F L I P (ver. 7.4.1) を用いる。

##### 3.1.1 解析条件

###### (1) 解析断面

解析断面は、大湊側の海側エリアの中で、西山層上限面が深く、比較的大きな地盤変状が認められた断面を選定した。解析断面位置を示した平面図を図 3-1 に、地質断面図を基に作成した解析モデルを図 3-2、図 3-3 に示す。

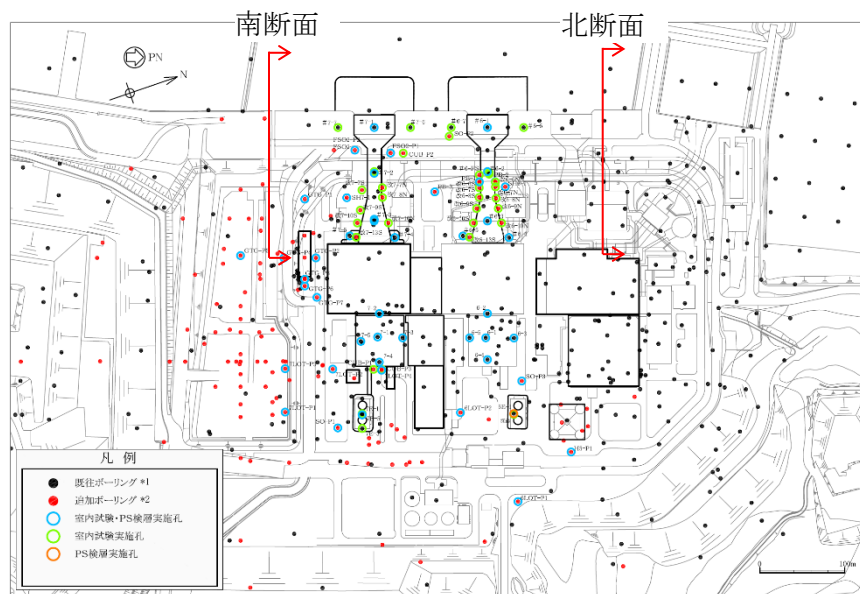


図 3-1 再現解析における解析断面位置

###### (2) 地下水位設定

耐震評価に用いる地下水位設定は、観測記録に基づき保守性を考慮して観測記録の最高水位よりもさらに高く、例えば護岸部で T. M. S. L. 3.0m (地表面) に設定している。しかし、この設定では液状化範囲が広がることにより地盤変位が大きくなるため、再現解析の評価として適さないものと考えられる。したがって、再現解析においては、海側の地下水観測孔 (MW-1 孔, 7GW-5 孔, 7GW-6 孔, 6GW-3 孔) の年間平均地下水位 (2018 年) T. M. S. L. 0.42 ~ 1.24m と、既工認における地下水位 T. M. S. L. 1.0m を参考にして、護岸より陸側を一律 T. M. S. L. 1.0m と設定する。また、海水位は T. M. S. L. 0.0m とする。

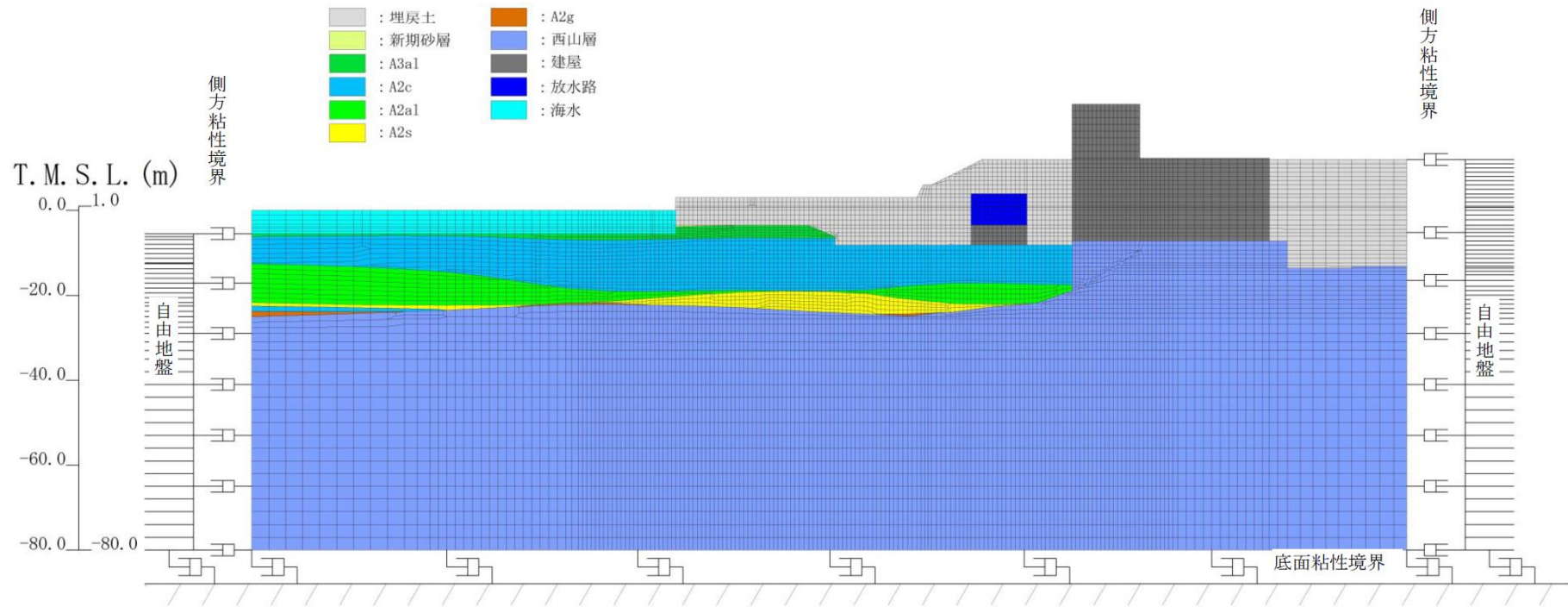


図 3-2 再現解析の解析モデル (北断面)

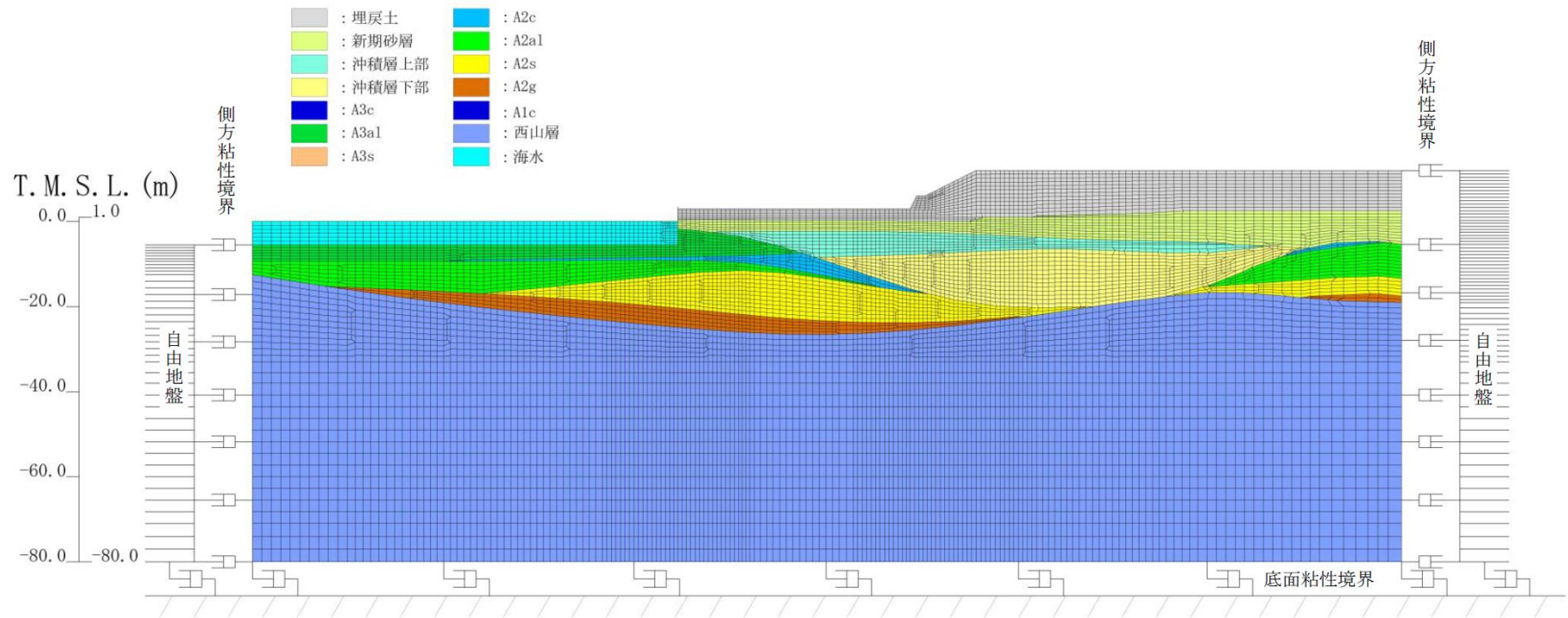
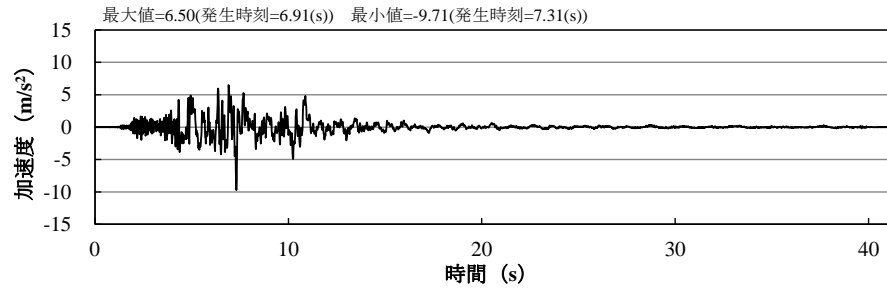


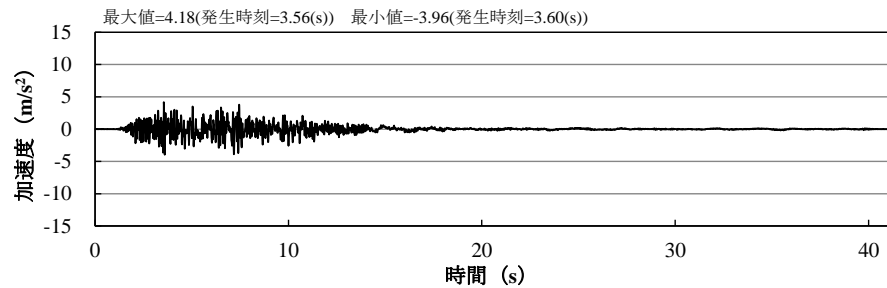
図 3-3 再現解析の解析モデル (南断面)

(3) 入力地震動

入力地震動は、新潟県中越沖地震において原子炉建屋で観測された地震記録を解析モデル下端（T. M. S. L. -80m）に引き戻した地震動を用いる。（北断面）は5号機原子炉建屋，（南断面）は7号機原子炉建屋で観測された地震記録を用いた。図3-4、図3-5に入力地震動の水平・鉛直の時刻歴を示す。

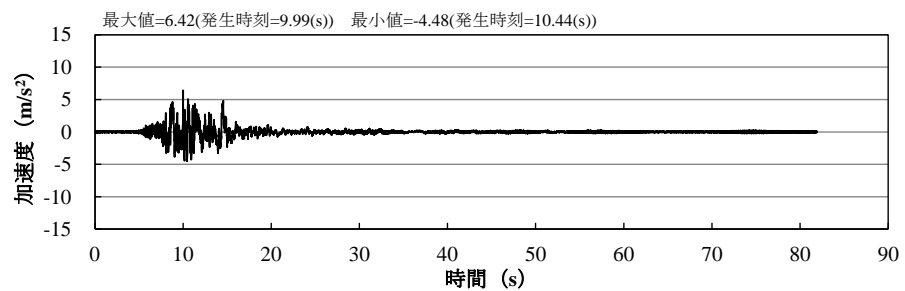


(a) 水平動

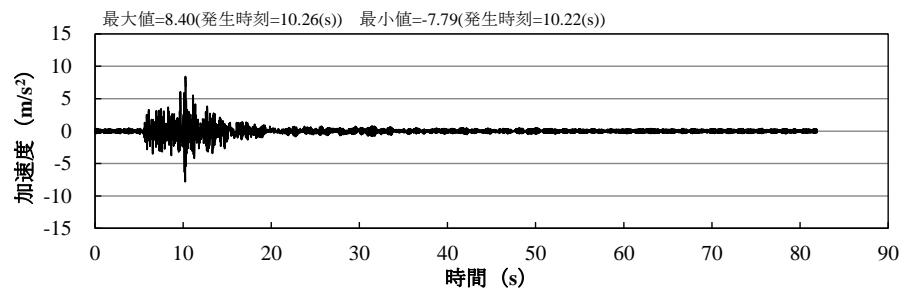


(b) 上下動

図3-4 入力地震動（北断面）



(a) 水平動



(b) 上下動

図3-5 入力地震動（南断面）

(4) 解析用物性値（液状化パラメータ）の設定

耐震評価に用いる解析用物性値は、保守性を考慮するため、地盤の液状化強度特性のばらつきを踏まえ、液状化強度試験の「回帰曲線-1σ」に基づいて液状化パラメータを設定している。再現解析においては、解析コードの再現性と適用性に注目することから、「回帰曲線（平均値）」に基づいて液状化パラメータを設定する。

本検討では、「4.2.2 有効応力解析に用いる解析用物性値」に示した解析用物性値を『基本ケース』とし、液状化強度試験の平均値に基づき設定した解析用物性値を『平均値ケース』とする。表3-1に再現解析における「平均値ケース」の解析用物性値を、図3-6～図3-10に液状化強度特性をまとめる。なお、比較のため、「基本ケース」の結果も併記する。

表3-1 再現解析に用いる解析用物性値（液状化検討対象層：平均値ケース）

物性値		地層区分	埋戻土	新期砂層・沖積層			古安田層			
				新期砂層	沖積層上部 (砂質)	沖積層下部	A2s層	A3s層	A2g層 (砂質)	A1g層
物理特性	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		1.94 (1.79)	2.05 (2.00)	1.90	2.02	1.91	1.91	1.91	1.91
	間隙率 $n$		0.45	0.44	0.48	0.42	0.45	0.45	0.45	0.45
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{mn}$ (kN/m <sup>2</sup> )		$1.04 \times 10^5$	$1.26 \times 10^5$	$1.25 \times 10^5$	$1.92 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )		98.0	98.0	110.0	150.0	200.0	200.0	200.0	200.0
	ポアソン比 $\nu$		0.33 (0.42)	0.33 (0.44)	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 $h_{max}$		0.225	0.234	0.247	0.211	0.157	0.157	0.157	0.157
強度特性	粘着力 $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )		0.0 (9.6)	0.0 (94.4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	内部摩擦角 $\phi'$ (°)		35.9 (34.8)	34.6 (27.6)	36.7	35.6	36.6	36.6	36.6	36.6
液状化特性	変相角 $\phi_p$ (°)		32.0	31.0	33.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
	液状化パラメータ	$S_1$	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
		$w_1$	16.00	13.80	27.00	17.30	40.00	40.00	40.00	40.00
		$p_1$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		$p_2$	1.00	0.70	0.70	0.65	0.80	0.80	0.80	0.80
		$c_1$	2.40	2.78	3.60	2.65	9.95	9.95	9.95	9.95

注記：括弧内の数字は、地下水位以浅の数値を表す。

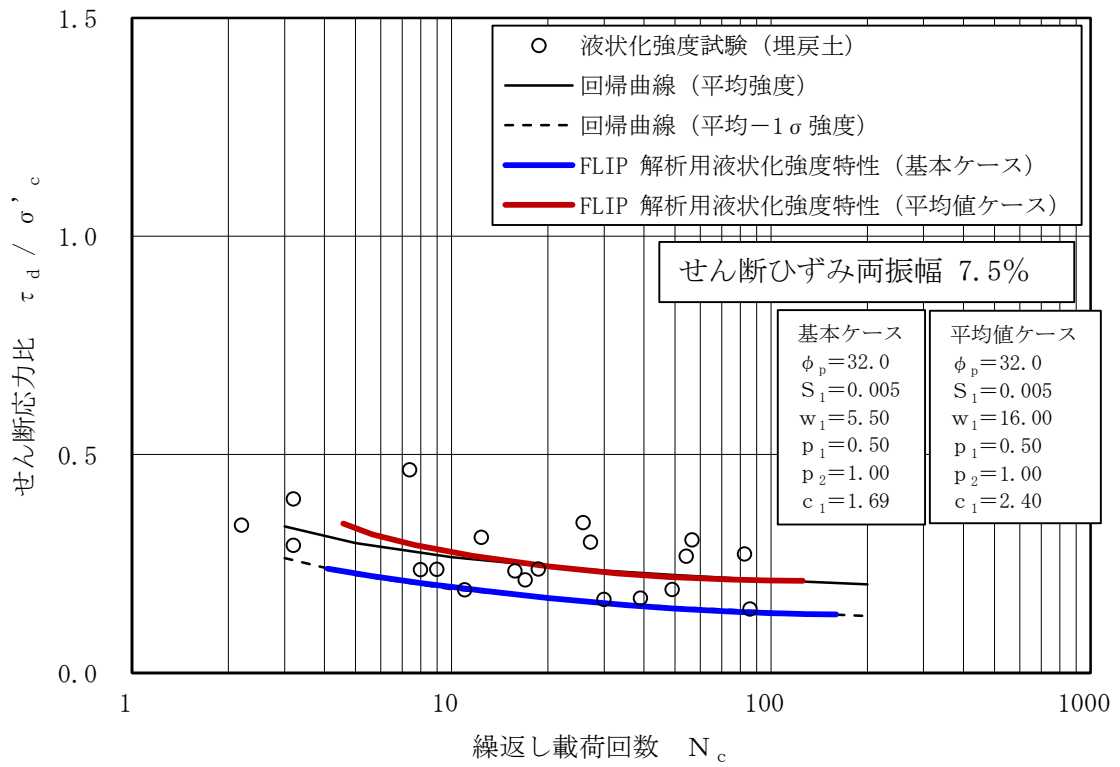


図 3-6 液状化抵抗曲線 (埋戻土)

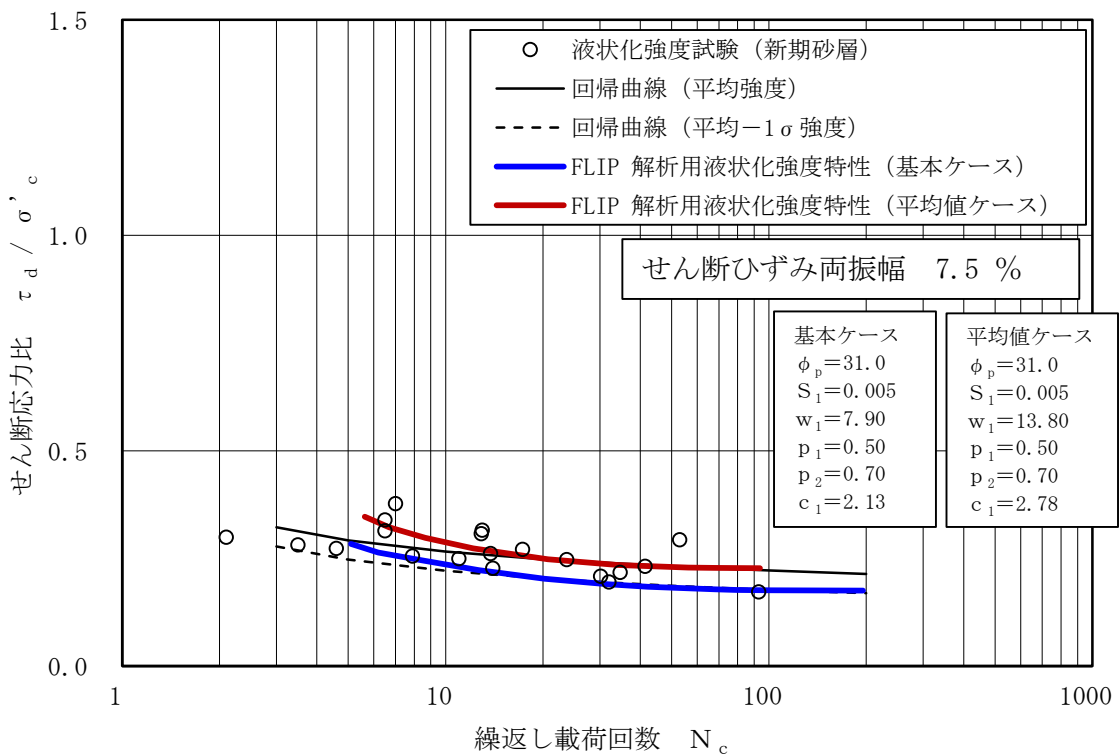


図 3-7 液状化抵抗曲線 (新期砂層)

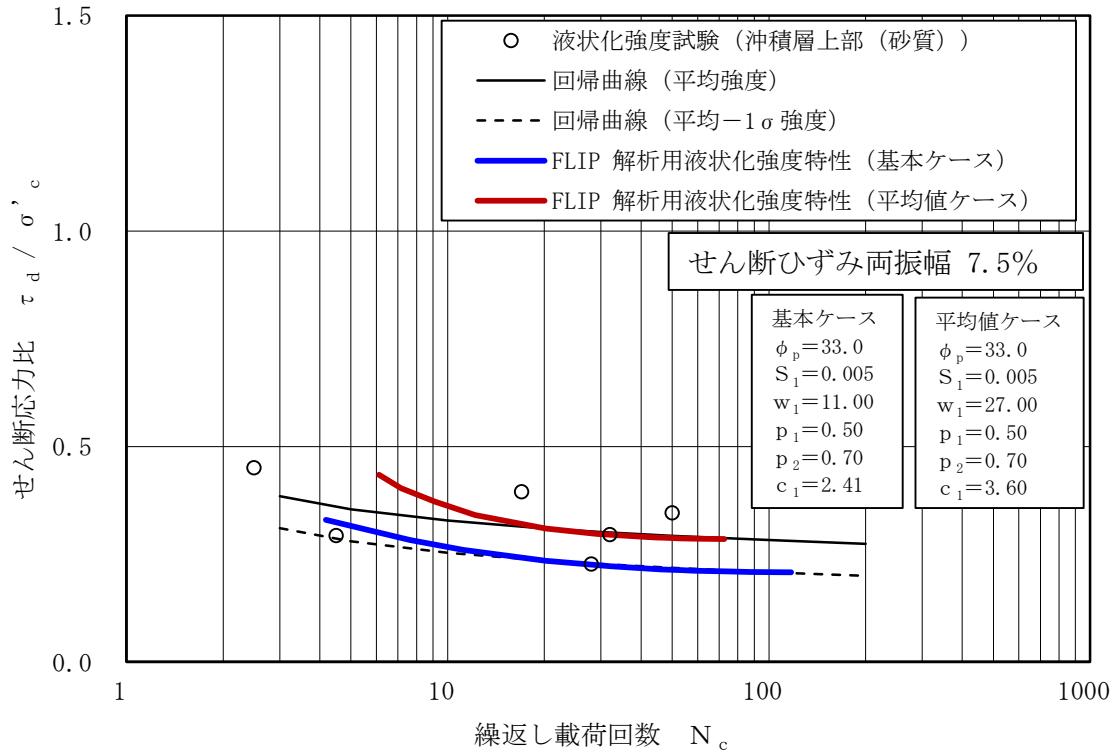


図 3-8 液状化抵抗曲線（沖積層上部（砂質））

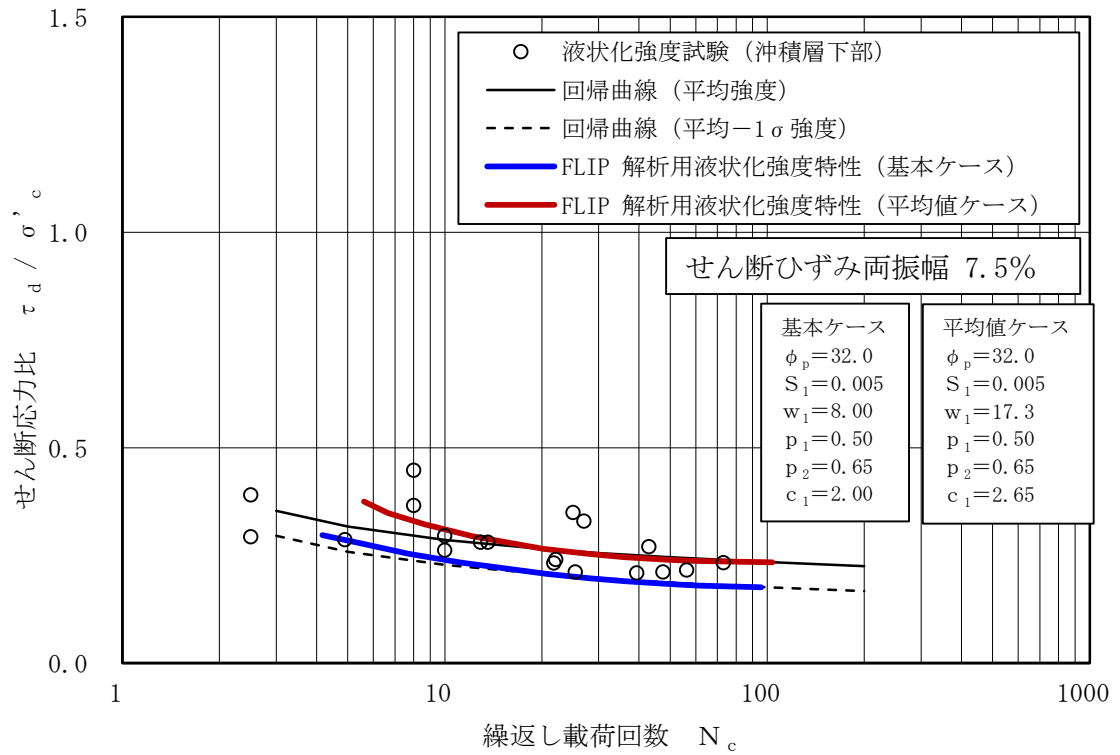


図 3-9 液状化抵抗曲線（沖積層下部）



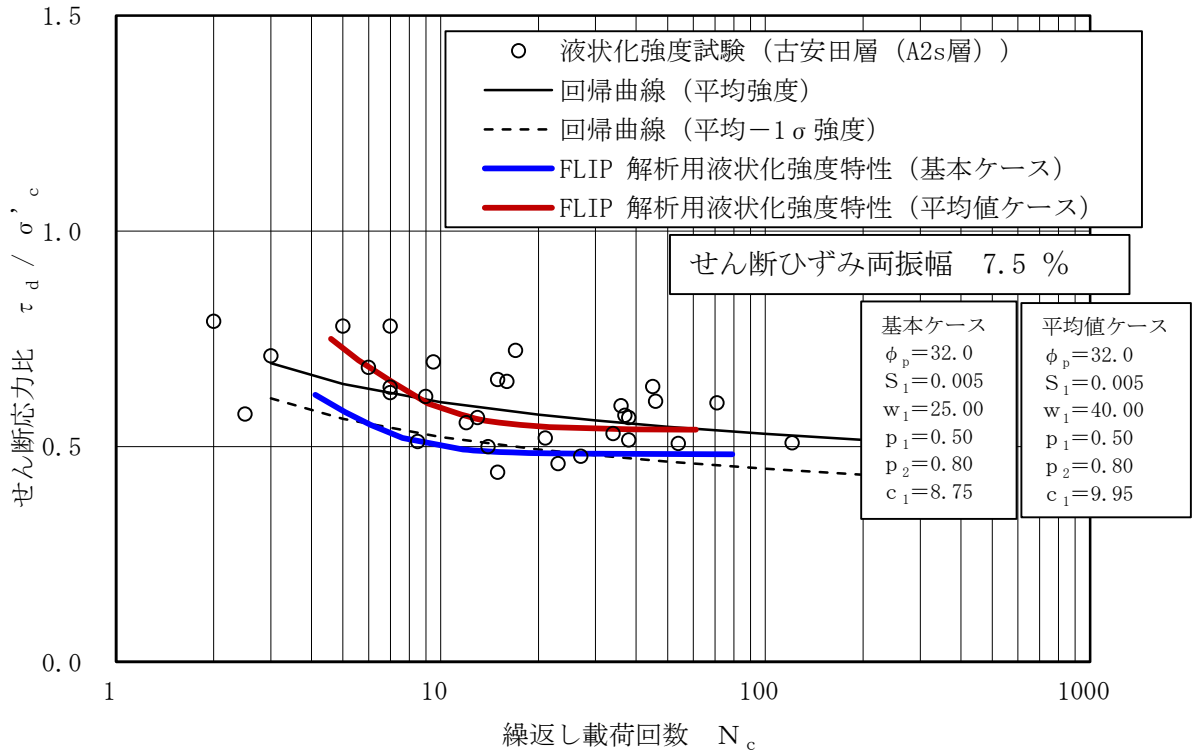


図 3-10 液状化抵抗曲線 (古安田層 (A2s 層))

(5) 減衰定数

耐震評価に適用する有効応力解析では、履歴減衰と粘性減衰を考慮している。履歴減衰による減衰は、地盤及び構造物の非線形性の程度に応じた値とする。粘性減衰による減衰は、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される Rayleigh 減衰にて与える。Rayleigh 減衰の減衰マトリックス  $[C]$  は、質量マトリックス  $[M]$  及び剛性マトリックス  $[K]$  の線形結合で表される。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

ここで、 $[C]$ ：減衰マトリックス、  
 $[M]$ ：質量マトリックス、  
 $[K]$ ：剛性マトリックス、  
 $\alpha, \beta$ ：係数

有効応力解析では、時系列で地盤の1次固有振動数が低振動数側へシフトして行くことから、Rayleigh 減衰の係数  $\alpha, \beta$  の両方を用いると、質量比例項の減衰  $\alpha [M]$  の影響により、有効応力解析における減衰定数が低振動数帯で過減衰となる場合がある。

一方、有効応力解析における低振動数帯で減衰  $\alpha [M]$  の影響がない剛性比例型減衰では、地盤の1次固有振動数が時系列で低振動数側へシフトしていくのに伴い、1次固有振動モードに対する減衰定数が初期減衰定数より保守的に小さい側へ変化していくことを考慮できる。

ゆえに、有効応力解析では、地震力による時系列での地盤剛性の軟化に伴う1次固有振動数の低振動数側へのシフトに応じて、1次固有振動モードに対する減衰定数として、初期減衰定数よりも保守的に小さい側のモード減衰定数を適用し、地盤応答の適切な評価が行えるように係数  $\alpha$  を0として設定し、低振動数帯で減衰  $\alpha [M]$  の影響がない剛性比例型減衰を採用した。

係数  $\beta$  については、北断面及び南断面の解析モデルの共通条件として下端 (T.M.S.L. - 80m) から地表面までの範囲をモデル化している点を踏まえ、いずれの断面についても係数  $\beta$  を0.005と設定する。FLIP 研究会によると、標準的な係数  $\beta$  の設定方法は、解析対象とする地盤・構造系と類似する既往の地震被害事例に基づいて算定する方法であり、これが最も信頼性の高い係数  $\beta$  の値を与えるとされる\*。また、FLIPによる岸壁等の既往解析事例に対して Rayleigh 減衰の係数  $\beta$  を調査した結果、係数  $\beta$  の範囲は0.0005~0.01と報告されている\*。

再現解析結果と観察された地盤変状と比較することで、減衰定数を含む解析用物性値の設定が適切な保守性を有することを確認する。

注記\*：FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ「理論編」

### 3.1.2 解析結果

再現解析により得られた「水平変位量」「鉛直変位量」を観測記録と比較し、解析用物性値の再現性と適用性を確認する。

#### (1) 再現解析結果（水平変位量）と考察

有効応力解析による地表面水平変位量の結果を図 3-11, 図 3-12 に示す。図の水平座標は護岸からの距離で示している。

##### a. 基本ケース

北断面の基本ケースについて、護岸天端における地表面水平変位は「1.63m」となり、地震後に観察された変位である「0.59m」と比較して 2.7 倍も大きな変位量となった。護岸から離れた位置においても、実績に比して大きな水平変位量が得られている。

南断面の基本ケースについて、護岸における地表面水平変位は「1.14m」となり、地震後に観察された変位である「0.53m」と比較して 2.1 倍も大きな変位量となった。護岸から離れた位置においても、実績に比して大きな水平変位量が得られている。

したがって、基本ケースで設定している解析用物性値は、変形量の観点から十分な保守性を有していると判断できる。

##### b. 平均値ケース

北断面の平均値ケースについて、護岸天端の地表面水平変位「1.34m」は、地震後に観察された変位である「0.59m」と比較して 2.2 倍以上の変位量となった。平均的な液状化強度特性を設定した場合でも実測値よりも大きな変位となった。

南断面の平均値ケースについて、護岸の地表面水平変位「0.90m」は、地震後に観察された変位である「0.53m」と比較して 1.6 倍以上の変位量となった。平均的な液状化強度特性を設定した場合でも実測値よりも大きな変位となった。

##### c. 考察

基本ケース及び平均値ケースともに、再現解析は実測値を上回る結果となっているが、地表面が海側へ水平変位を生じる実測値の傾向を再現できている。

##### (a) 北断面

北断面の基本ケースにおける過剰間隙水圧比と最大せん断ひずみ残留値を、図 3-13 及び図 3-14 に示す。比較的浅い深度にある飽和した液状化検討対象層（埋戻土）では、過剰間隙水圧比が 95%を超過する範囲が広がっており、小段擁壁が存在する地表面形状の影響もあり、大きな水平変位が発生したものと考えられる。

北断面の平均値ケースにおける過剰間隙水圧比（図 3-15）と最大せん断ひずみ残留値（図 3-16）においても同様の傾向が認められるが、基本ケースと比較して過剰間隙水圧比が上昇する範囲は狭く、水平変位の大小関係と整合的である。

##### (b) 南断面

南断面の基本ケースにおける過剰間隙水圧比と最大せん断ひずみ残留値を、図 3-17 及び図 3-18 に示す。比較的浅い深度にある飽和した液状化検討対象層（埋戻土、新期砂層）では、過剰間隙水圧比が 95%を超過する範囲が広がっているが、その層厚は北断

面と比較して薄い。そのため、南断面では北断面と比較して小さな地表面水平変位が得られたものと考えられる。また、小段擁壁の下方に位置する液状化検討対象層（沖積層下部）では、間隙水圧比が80～95%程度まで上昇していることと、直上小段の荷重が沖積層下部に影響を与えやすい形状となっていることから、比較的大きな残留ひずみを得られたものと考えている。

南断面の平均値ケースにおける過剰間隙水圧比（図 3-19）と最大せん断ひずみ残留値（図 3-20）においても同様の傾向が認められるが、基本ケースと比較して過剰間隙水圧比が上昇する範囲は狭く、水平変位の大小関係と整合的である。

今回用いている有効応力解析の解析コード（FLIP）は、実測値の傾向を再現できていることから適用性があるものと判断できる。また、変形量の観点からは、ここで設定した減衰定数と液状化試験結果の平均値から設定した解析用物性値を採用した場合にも保守性を有すると判断できる。

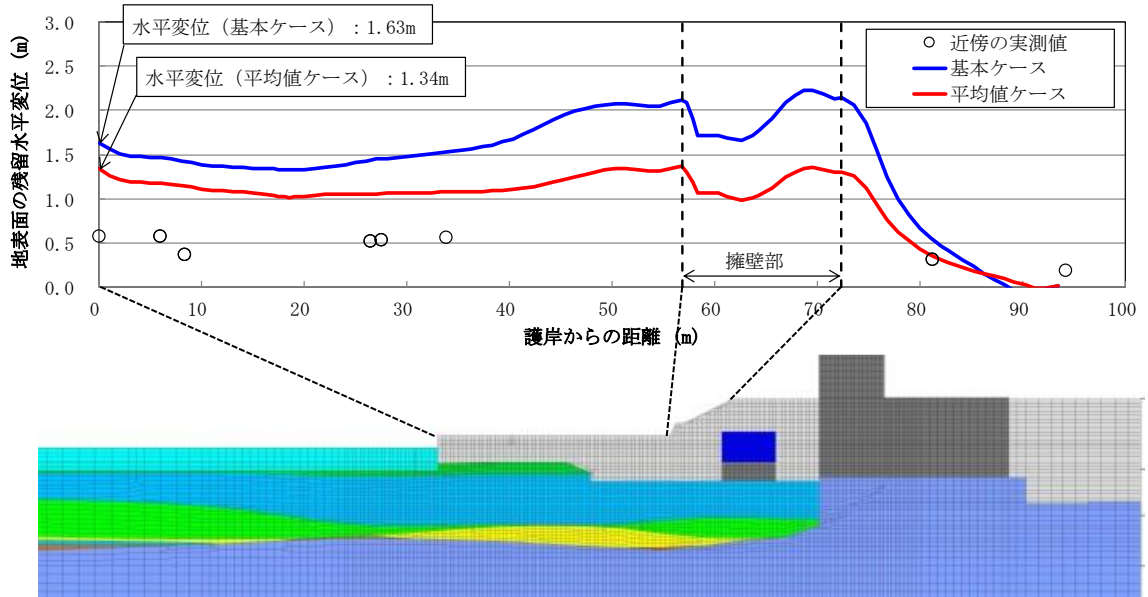


図 3-11 護岸からの距離と地表面水平変位の関係（北断面）

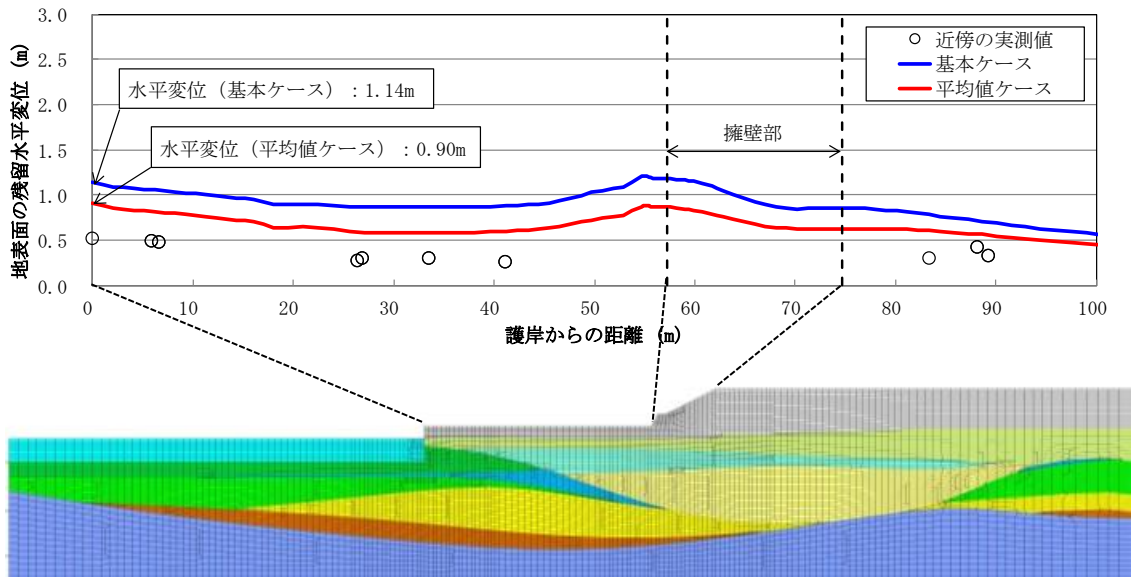


図 3-12 護岸からの距離と地表面水平変位の関係（南断面）

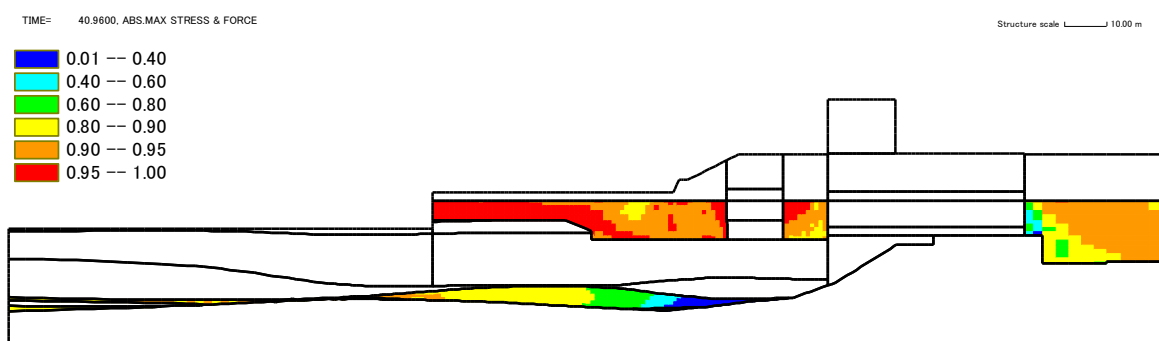


図 3-13 最大過剰間隙水圧（基本ケース）（北断面）

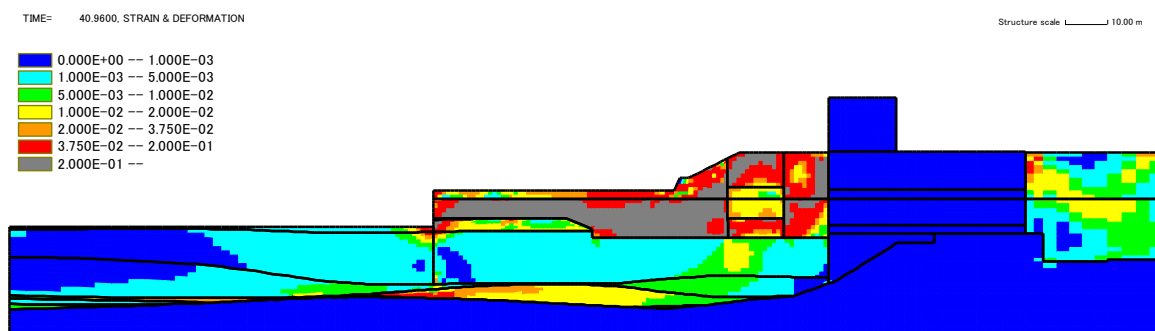


図 3-14 最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$ （残留値：基本ケース）（北断面）

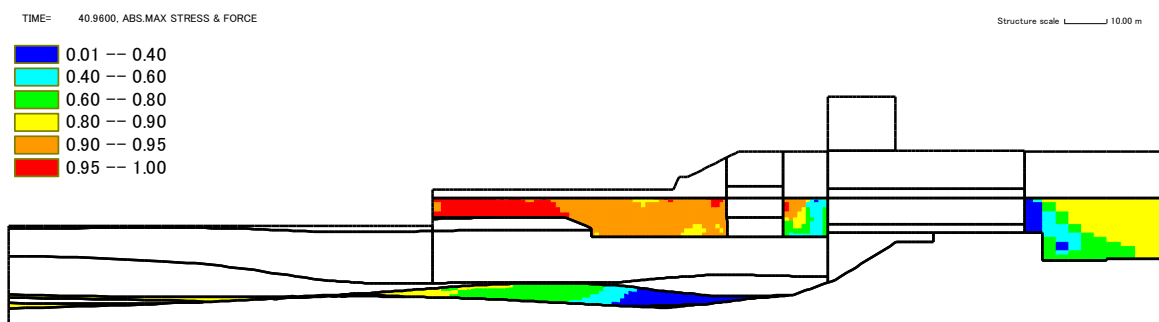


図 3-15 最大過剰間隙水圧（平均値ケース）（北断面）

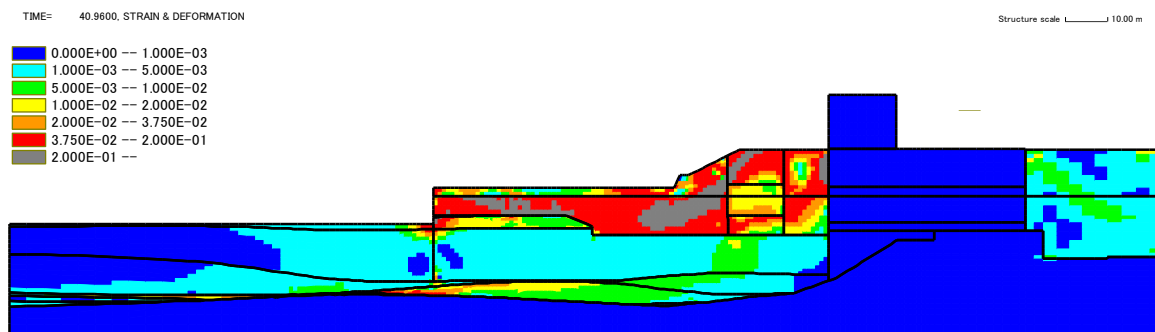


図 3-16 最大せん断ひずみ（残留値：平均値ケース）（北断面）

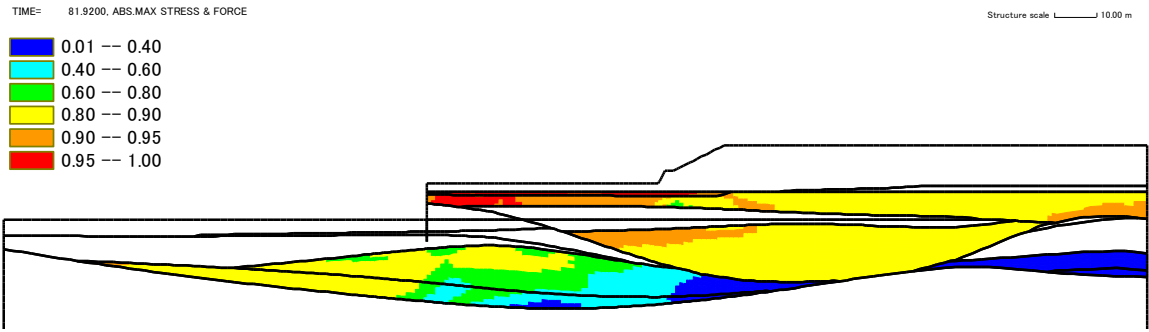


図 3-17 最大過剰間隙水圧（基本ケース）（南断面）

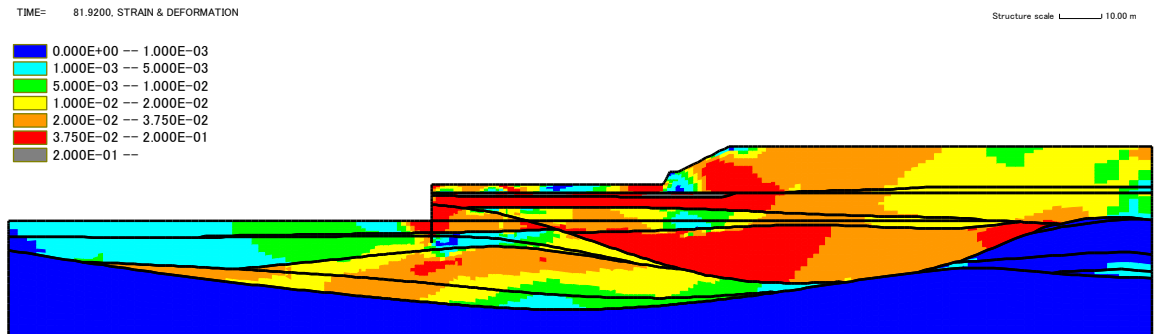


図 3-18 最大せん断ひずみ  $\gamma_{max}$ （残留値：基本ケース）（南断面）

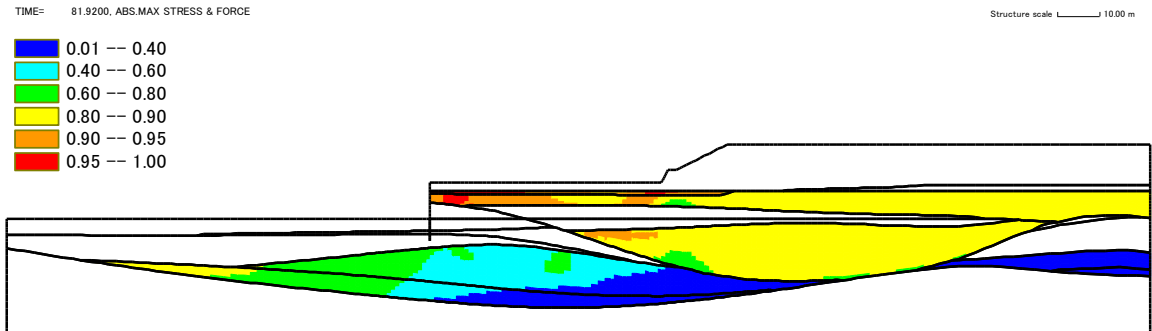


図 3-19 最大過剰間隙水圧（平均値ケース）（南断面）

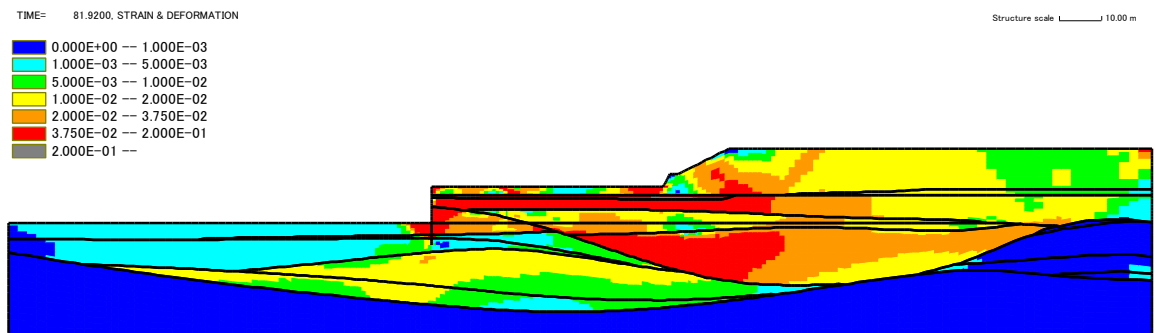


図 3-20 最大せん断ひずみ（残留値：平均値ケース）（南断面）



(2) 再現解析結果（鉛直変位量）と考察

有効応力解析による地表面鉛直変位量の結果を、図 3-21、図 3-22 に示す。図の水平座標は護岸からの距離で示している。

a. 基本ケース

基本ケースについては、有効応力解析の鉛直変位量は、地表面形状に応じて側方流動の影響を受けた沈下と隆起を生じており、新潟県中越沖地震時に観察された実績の沈下量とは異なる傾向を示す。

有効応力解析による護岸付近の鉛直変位量は、北断面で「0.73m」、南断面で「0.49m」であり、側方流動による変形の影響で生じているが、これは実績の沈下量の「0.00m」と比較して大きい。小段擁壁付近の有効応力解析結果についても、側方流動の影響により法尻で隆起、法肩で沈下しているが、実績沈下量は小さく明瞭な傾向は認められていない。いずれも、有効応力解析では側方流動の影響に伴う鉛直変位量を保守的に算定している。

b. 平均値ケース

平均値ケースについては、有効応力解析の鉛直変位量は、基本ケースと比較して沈下と隆起の傾向が抑制されるものの、新潟県中越沖地震時に観察された実績の沈下・隆起量に対して有効応力解析の地表面変位量が大きいことから、側方流動の影響に伴う鉛直変位量を保守的に算定している。

c. 考察

再現解析による鉛直変位量は、護岸付近で沈下、小段擁壁付近の法尻で隆起、法肩で沈下する傾向にある。

有効応力解析の解析コード F L I P (ver. 7.4.1) は、非排水条件に基づく解析コードであることから、再現解析による鉛直変位は、大きな水平変位（図 3-11、図 3-12）が生じた箇所での側方流動の影響により発生するものと考えられる。図 3-21 の北断面の小段擁壁部の鉛直変形量が、基本ケースと平均値ケースで大きく異なることは、図 3-11 の当該箇所の水平変位量が基本ケースと平均値ケースで大きく異なっている点と整合的である。

また、南断面の鉛直変形量（図 3-22）については、水平変位量（図 3-12）が北断面と比較して小さく、基本ケースと平均値ケースの差分も小さいことから、側方流動に伴う鉛直変形も抑えられた結果となったと考えられる。

新潟県中越沖地震時に観察された実績の沈下量は再現解析から得られる鉛直変形量の絶対値に対して小さく、耐震評価を行う上では保守的な評価が可能であると判断した。

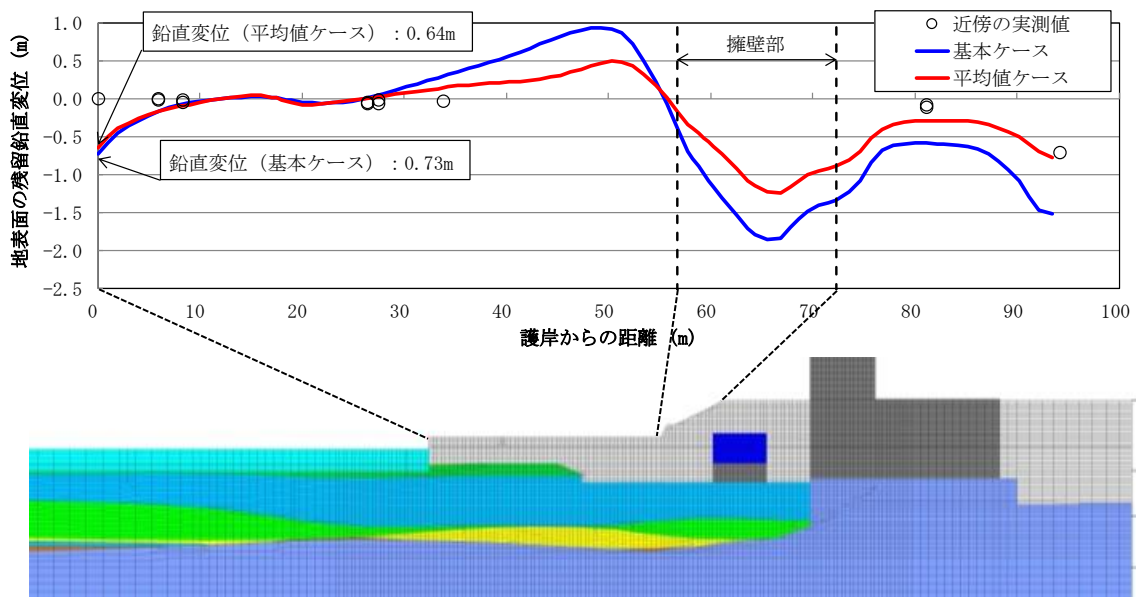


図 3-21 護岸からの距離と地表面鉛直変位の関係 (北断面)

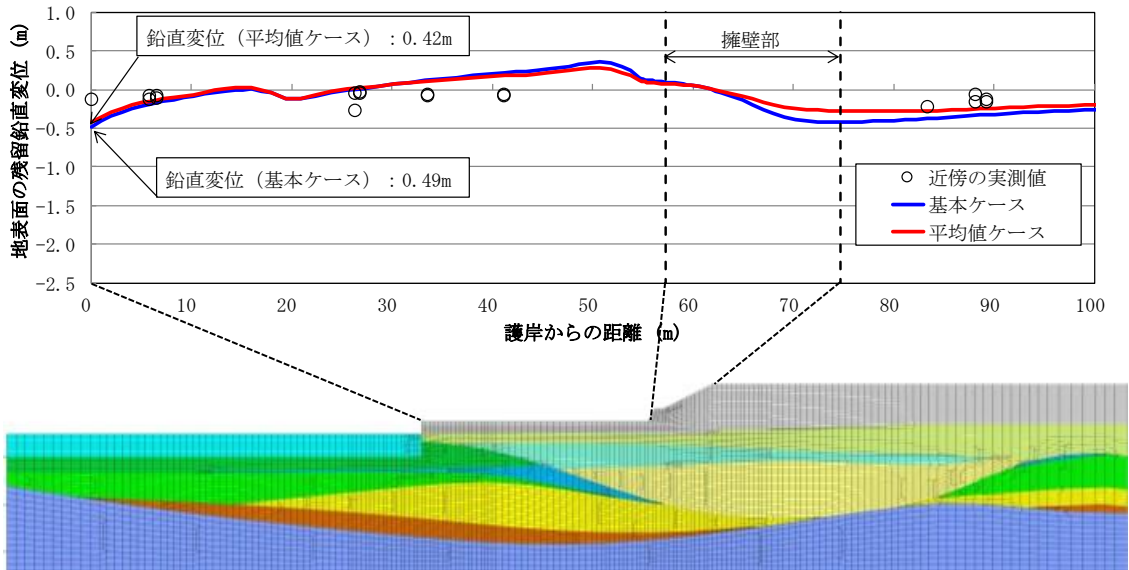


図 3-22 護岸からの距離と地表面鉛直変位の関係 (南断面)

### 3.2 まとめ

新潟県中越沖地震の地震記録を入力波として、大湊側敷地の南北2断面を対象とした再現解析を行い、当該地震時に敷地内で観察された地盤変状と比較することで解析コードの適用性、減衰定数を含む解析用物性値の保守性について確認した。

再現解析にあたっては、液状化強度特性については試験結果のばらつきを踏まえ基本ケース（平均値 $-1\sigma$ ）と平均値ケースの2ケースを適用し、減衰定数については対象の南北2断面が同規模の領域をモデル化している点を踏まえ共通の係数（Rayleigh減衰  $\alpha=0$ ,  $\beta=0.005$ ）を適用した。

再現解析の結果、有効応力解析コード（FLIP）は、地表面が海側へ変形した実測値の傾向を再現できており、耐震評価への適用性を有していると判断した。また、いずれのケースについても再現解析の変形量が実測値を概ね上回る評価ができていることから、ここで設定している減衰定数と解析用物性値は、耐震評価を実施する上での保守性を有しており、適用性があると判断した。

## 4. 参考文献

- 1) 小長井ほか：2007年新潟県中越沖地震の被害とその特徴，2010 土木学会地震被害調査小委員会，2006年～2010年に発生した国内外の地震被害報告書，2010.
- 2) 東京電力（株）：新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について，経済産業省総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会 地震・津波，地質・地盤合同WG，第3回会合配布資料（合同W3-1），pp7-9，2007.12.25.
- 3) 東京電力（株）：新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について，経済産業省総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会 地震・津波，地質・地盤合同WG，第4回会合配布資料（合同W4-1-1），pp10-11，2008.2.15.

(参考資料 9) マンメイドロックの設計について

## 1. 概要

原子炉建屋等の基礎岩盤の一部は、マンメイドロックで置き換えることにより、基礎岩盤の安定性の向上を図っている。このマンメイドロックについては、「西山層と同等以上の力学的特性と有する」材料として設計し、室内試験により物性値を設定している。

本項では、西山層と同等以上の力学的特性と有する置き換え材料として設計されたマンメイドロックの設計の考え方について記す。

## 2. マンメイドロックの設計について

置き換え材料としては、コンクリートが一般的であるが、柏崎刈羽原子力発電所の基礎岩盤は、新第三紀の泥岩である西山層であり、工学的な分類では軟岩である。このため、柏崎刈羽地点でコンクリートを置き換え材料として使用した場合、強度は泥岩に比べて十分に大きいため問題とならないが、

- ① 剛性については、コンクリートでは泥岩の数十倍も堅いため、周辺の岩盤よりも大きな力を負担（場合によっては、破壊）する一方、応力がスムーズに伝達されずに局所的に集中する。
- ② 単位体積重量については、コンクリートの方が 1.5 倍程度大きいため、地震時の慣性力は周辺の岩盤よりも大きく、また、偏心している場合には振動性状が複雑となる。といった問題が生じることが予想される。

このため、置き換え材料として次のような材料を使用することとした。

- ① 西山層泥岩と同等以上の強度特性があること
- ② 長期的な安定性が保証されたセメントコンクリート系の材料であること
- ③ 単位体積重量、変形特性については、西山層泥岩と同程度であること。

このような置き換え材料を使用する時、地震時の応答特性は周辺の岩盤と同等となり、原子炉建屋に及ぼす影響も同等となる。また、原子炉建屋に働く力は、マンメイドロックを介して西山層に確実に伝達され、マンメイドロック周辺の西山層との間での変形や力の伝達はスムーズとなる。

上記より、マンメイドロックは、西山層と同等以上の力学的特性と有する置き換え材料として設計されたものである。

3. マンメイドロックの物性値及びその根拠

マンメイドロックの配合を表 3-1 に、解析用物性値を表 3-2 に示す。

マンメイドロックの解析用物性値の設定根拠を、表 3-3 に示す。

表 3-1 マンメイドロックの配合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位体積重量
西山泥岩	新期砂	固化材	水	(g/cm <sup>3</sup> )
230	700	180	597	1.71

注： 固化材の構成割合は、クリンカー62%，スラグ20%，石膏18%である（重量比）。

表 3-2 マンメイドロックの解析用物性値

物性値		マンメイドロック		
		原子炉建屋	コントロール建屋下	
物理特性	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.75	1.75	
変形特性	静的 変形特性	変形係数 $E_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	1160	1020
		静ポアソン比 $\nu$	0.44	0.45
	動的 変形特性	初期動せん断弾性係数 $G_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	2110	1990
		動ポアソン比 $\nu_d$	0.36	0.36
		動せん断弾性係数の ひずみ依存性 $G/G_0 \sim \gamma$	$1/(1+4.30\gamma^{1.00})$	$1/(1+4.30\gamma^{1.00})$
		減衰定数のひずみ依存特 性 $h \sim \gamma$	$19.0\gamma^{0.60}$	$19.0\gamma^{0.60}$
強度特性	ピーク強度	$C_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.84	1.84
		$\phi_u$ (°)	0	0
		$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.666	0.666
	残留強度	$C_{ur}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.38	1.38

注1： P は、平均有効拘束圧 (N/mm<sup>2</sup>) を示す。

注2：  $\gamma$  は、せん断ひずみ (%) を示す。

表 3-3 マンメイドロックの解析用物性値の設定根拠

物性値		マンメイドロック	
		原子炉建屋	コントロール建屋下
物理特性		密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	・密度試験結果 (土質工学会編「土質試験法」に準拠)
変形特性	静的 変形特性	変形係数 $E_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	・三軸圧縮試験結果 (土質工学会編「土質試験法」に準拠)
		静ポアソン比 $\nu$	・三軸圧縮試験結果
	動的 変形特性	初期動せん断弾性係数 $G_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	・弾性波速度測定試験 (物理探鉱技術協会編「岩石試料の速度測定要綱」に準拠)
		動ポアソン比 $\nu_d$	・弾性波速度測定試験 (物理探鉱技術協会編「岩石試料の速度測定要綱」に準拠)
		動せん断弾性係数の ひずみ依存性 $G/G_0 \sim \gamma$	・動的単純せん断試験 (変形試験)
		減衰定数のひずみ依存特 性 $h \sim \gamma$	・動的単純せん断試験 (変形試験)
強度特性	ピーク強度	$C_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	・三軸圧縮試験結果 (土質工学会編「土質試験法」に準拠)
		$\phi_u$ (°)	
		$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	・圧裂引張強度試験 (J I S M 0303に準拠)
	残留強度	$C_{ur}$ (N/mm <sup>2</sup> )	・三軸圧縮試験結果 (土質工学会編「土質試験法」に準拠)

4. マンメイドロックのばらつきについて

屋外重要土木構造物は地中埋設構造物であり、耐震評価においては側方地盤のせん断変形による損傷モードが支配的であるため、側方地盤の初期せん断弾性係数 $G_0$ のばらつきを考慮する。一方、支持地盤となるマンメイドロックについては、側方地盤と比較して構造物の耐震評価に与える影響は軽微と考えられることから、初期せん断弾性係数 $G_0$ のばらつきは考慮しない。

(参考資料 10) 液状化抵抗曲線の回帰曲線 (平均-1 $\sigma$ 強度) を下回る試験データについて

### 1. はじめに

有効応力解析に用いる液状化強度特性は、地盤のばらつきを踏まえ、保守的に液状化抵抗曲線の回帰曲線 (平均-1 $\sigma$ 強度) と同等となるように設定する。

図 1-1 に、古安田層 (A2s 層) の液状化強度試験結果及び有効応力解析 (FLIP) における液状化強度特性を示す。同図に示すとおり、A2s 層の液状化強度試験結果の中には、液状化抵抗曲線の回帰曲線 (平均-1 $\sigma$ 強度) を下回る結果を示す供試体が少数存在する。

本項では、これら A2s 層の液状化抵抗曲線の回帰曲線 (平均-1 $\sigma$ 強度) を下回る供試体について、供試体の採取位置と評価対象施設との位置関係を整理した上で、供試体の土質性状及び採取箇所の地層の連続性等を検討する。

なお、その他の液状化検討対象層 (埋戻土、新期砂層、沖積層上部 (砂質)、沖積層下部) については、液状化抵抗曲線の回帰曲線 (平均-1 $\sigma$ 強度) を下回る供試体はない。

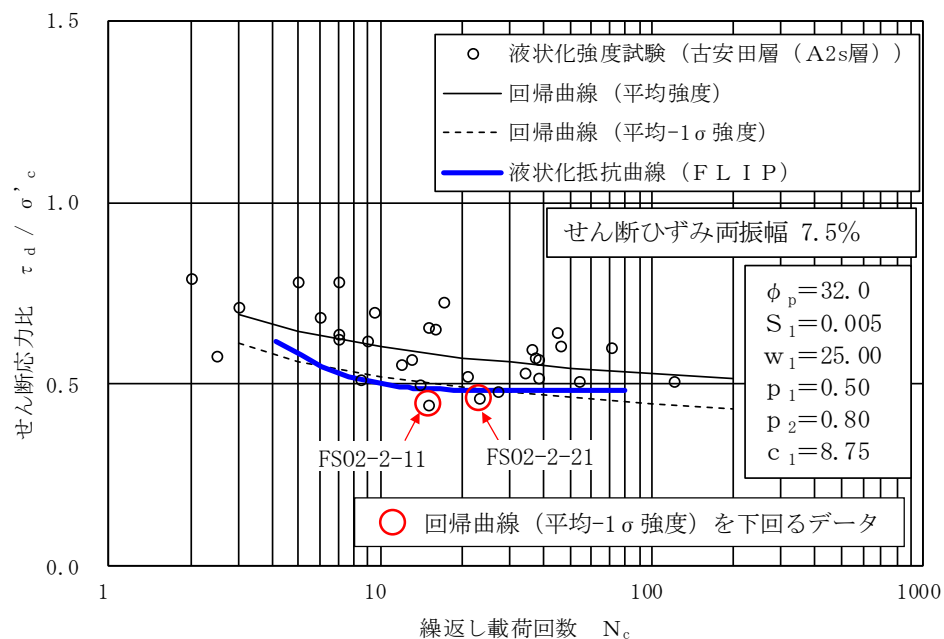


図 1-1 液状化強度試験結果及び有効応力解析における液状化強度特性 (A2s 層)



## 2. 液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均-1σ強度）を下回る供試体について

### 2.1 検討方針

A2s層に対する液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均-1σ強度）を下回る供試体の「土質性状の特異性」及び「地層の連続性」について検討する。

供試体の検討項目を表 2-1 に示す。

表 2-1 液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均-1σ強度）を下回る供試体の検討項目

項目	検討事項	比較指標
土質性状の特異性	A2s層において、当該供試体がその他の液状化強度試験供試体と比べて、土質性状として特異性の有しているか	物理特性（粒度分布、粒度組成）及び力学特性（N値）
地層の連続性	A2s層において、当該供試体の特徴を示す地層が広範囲に分布しているか	ボーリング柱状図

### 2.2 検討対象とする供試体の選定

図 2-1 に示すとおり、有効応力解析（FLIP）における液状化強度特性（平均-1σ強度）を下回る供試体として、「FS02-2-11」及び「FS02-2-21」に着目し、「土質性状の特異性」及び「地層の連続性」を検討する。

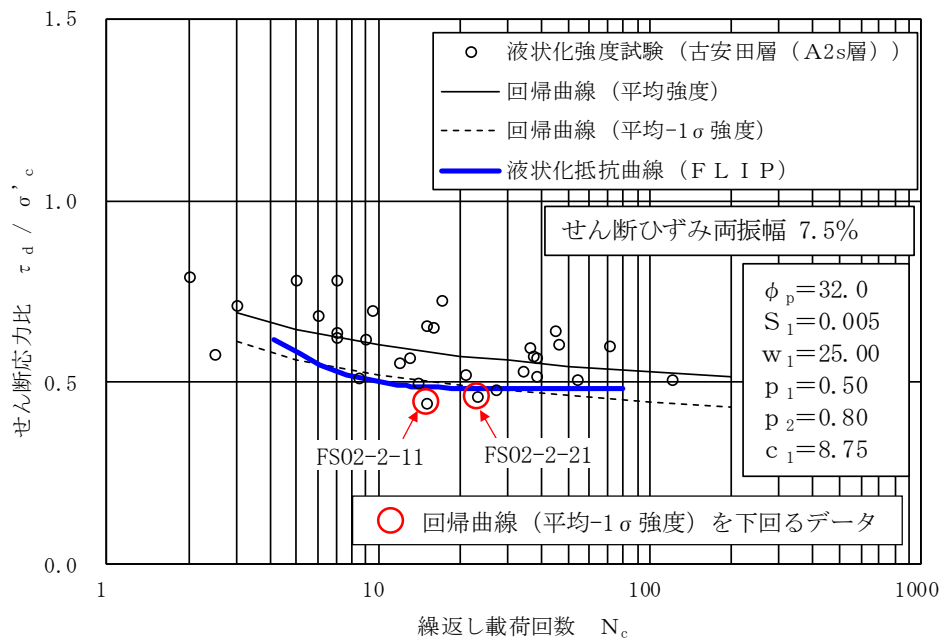


図 2-1 A2s層の液状化強度試験結果

### 2.3 供試体の採取位置

液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る供試体の採取位置を図 2-2 に示す。当該供試体（FS02-2-11 及び FS02-2-21）は、スクリーン室や取水路の近傍に位置する「FS02-2 孔」において凍結サンプリングにより採取した。

パイロットボーリング（FS02-P2 孔）の柱状図を図 2-3 に、凍結サンプリング採取コアの写真及び観察スケッチを図 2-4～図 2-5 に示す。

A2s 層は、砂を主体とし、一部に礫やシルト層を含む地層である。液状化強度試験に用いる供試体は、A2s 層の中でも砂分が多い箇所から採取しており、当該供試体（FS02-2-11 及び FS02-2-21）は、「礫混じり粗砂」と観察される箇所から採取し、外観からは巨礫やシルト層を介在するなどの特異性は認められない。

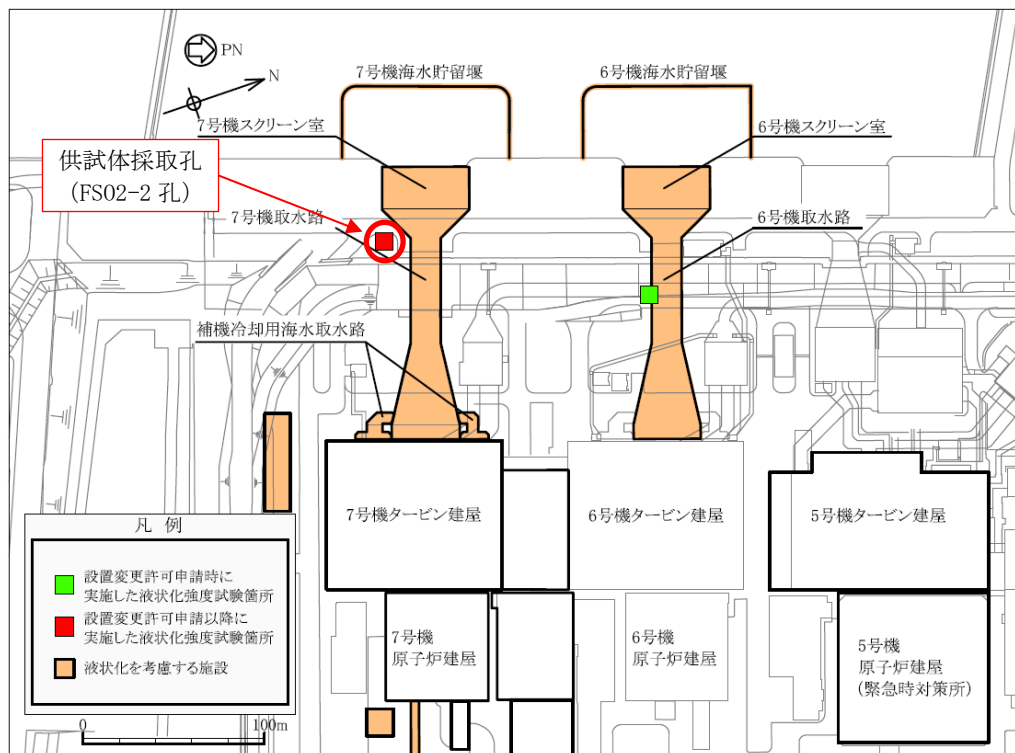


図 2-2 A2s 層の供試体の採取位置

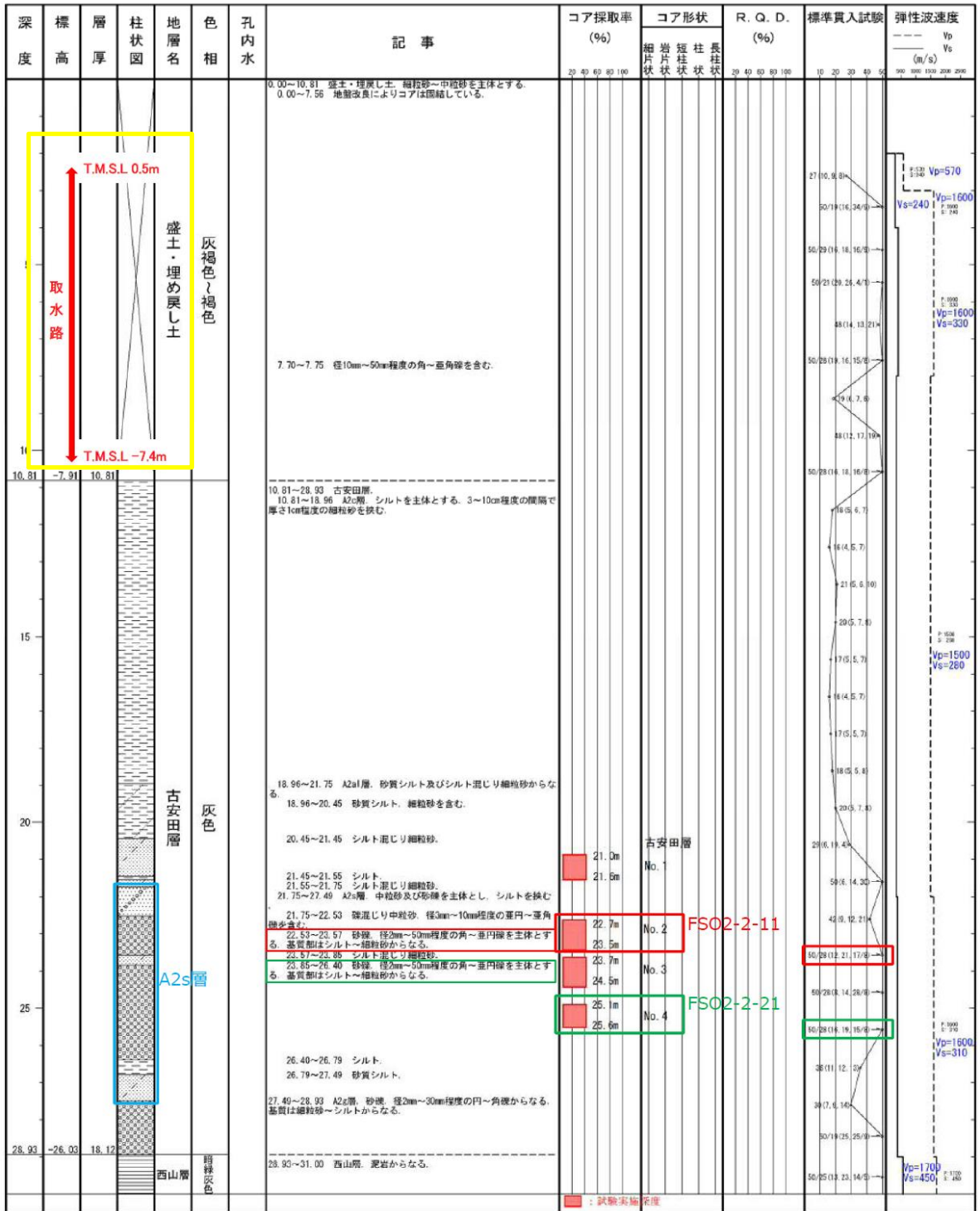


図 2-3 パイロット孔 (FSO2-P2 孔) のボーリング柱状図

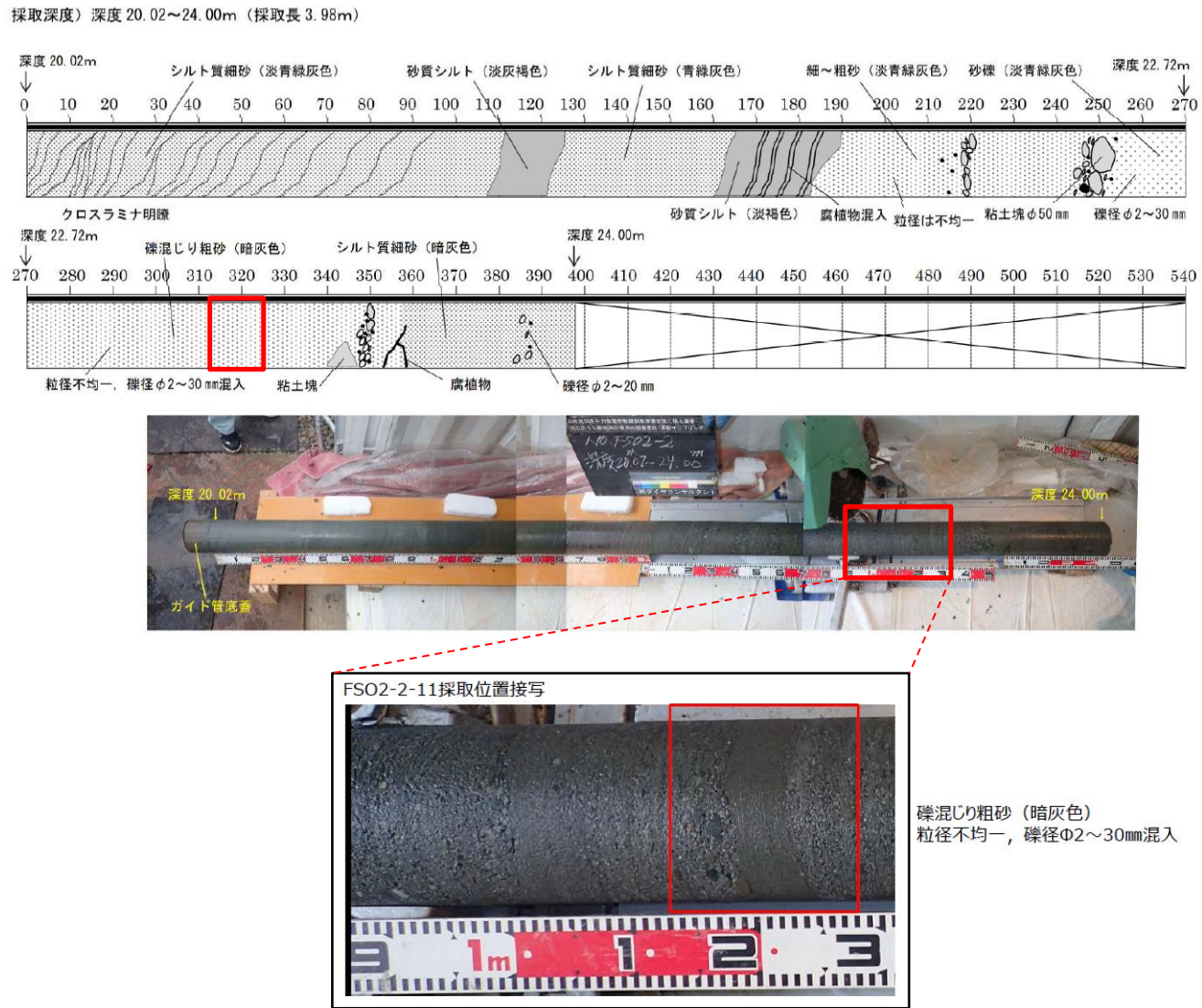


図 2-4 凍結サンプリング写真及び観察スケッチ (供試体番号 : FSO2-2-11)



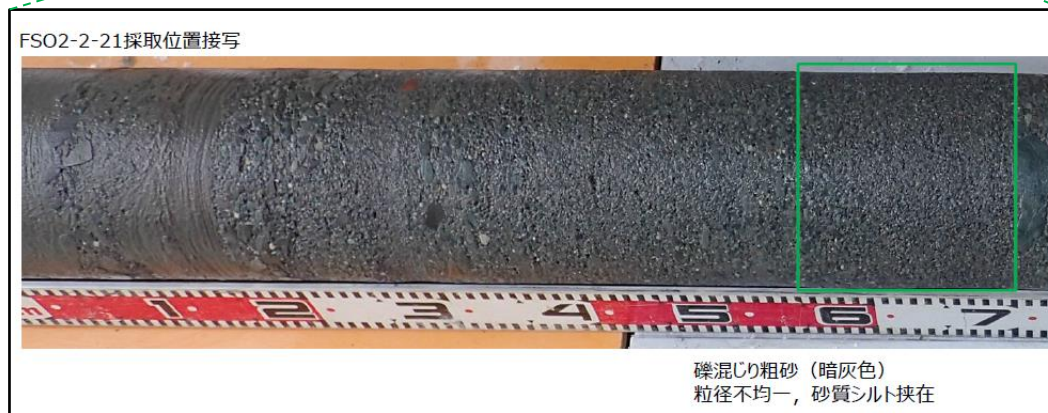
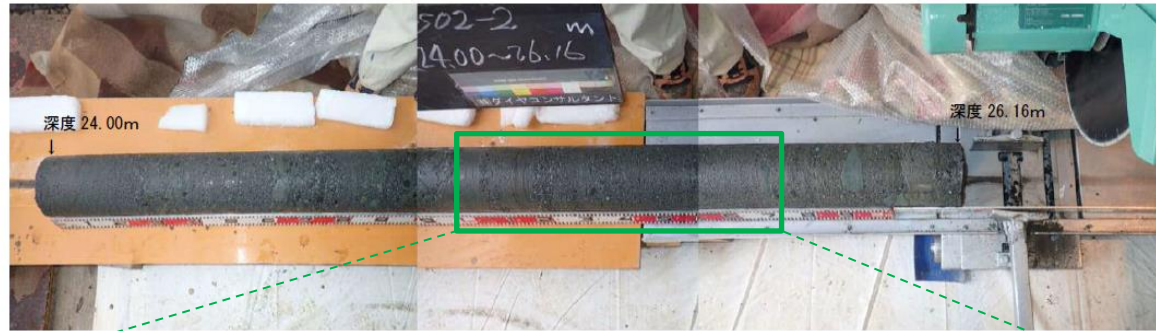
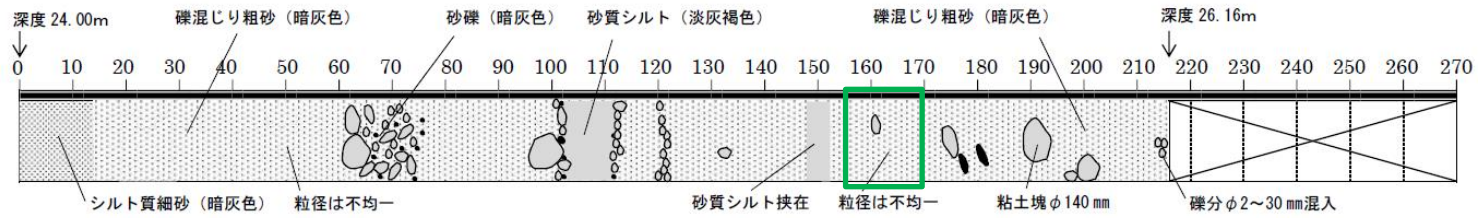


図 2-5 凍結サンプリング写真及び観察スケッチ (供試体番号: FS02-2-21)

#### 2.4 液状化強度試験結果

液状化抵抗曲線の回帰曲線 $-1\sigma$ を下回る供試体「FS02-2-11」及び「FS02-2-21」の液状化強度試験結果を図 2-6 及び図 2-7 に示す。

「FS02-2-11」及び「FS02-2-21」ともに、せん断ひずみは緩やかに上昇しており、平均有効取応力 $\sigma'_m$ が 0 に近づかず、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、現象としては液状化に至っていないものと考えられる。

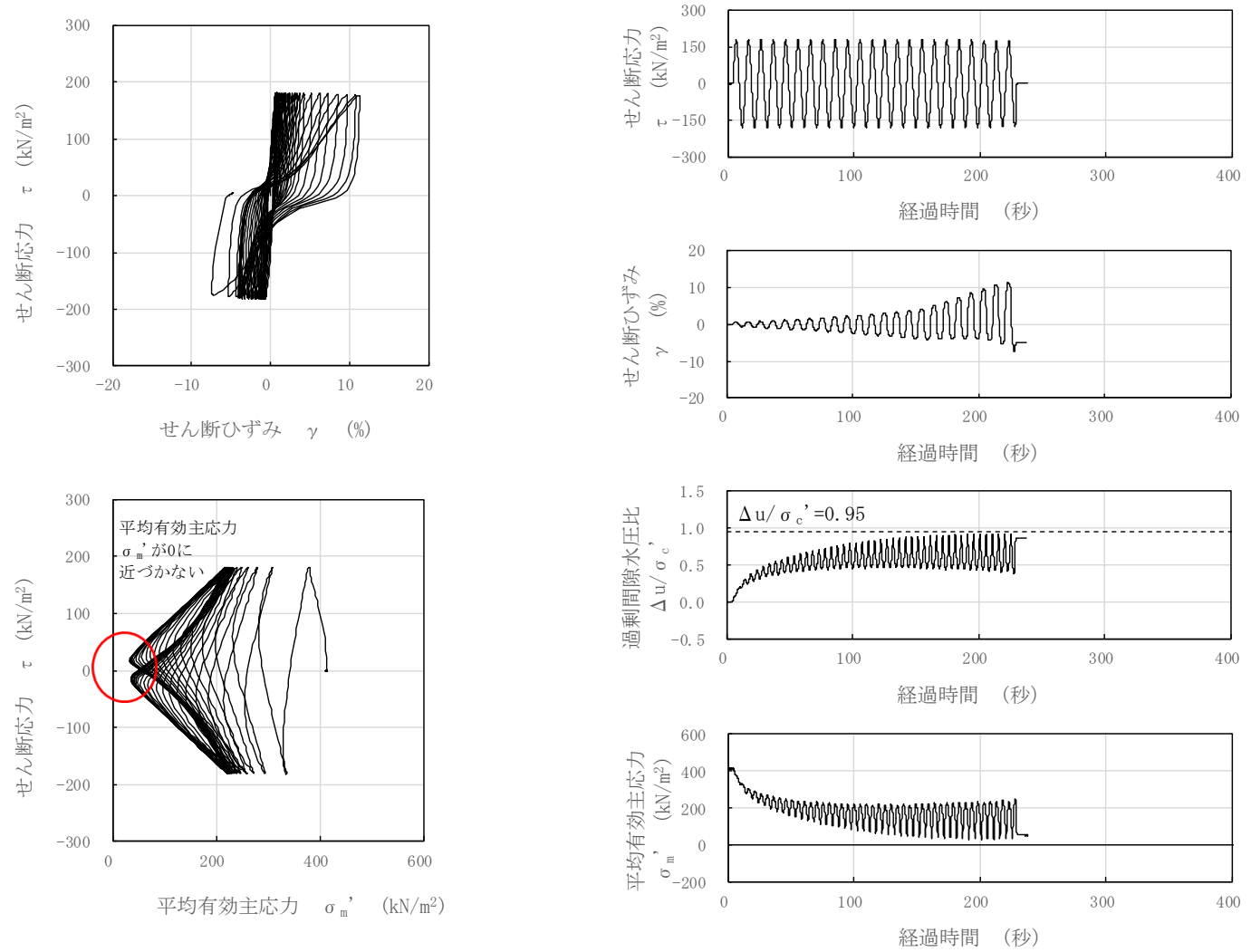


図 2-6 液状化試験結果 (A2s 層, FS02-2-11, GL. -23.15~23.30m, 有効拘束圧 412kN/m<sup>2</sup>, せん断応力比=0.440)



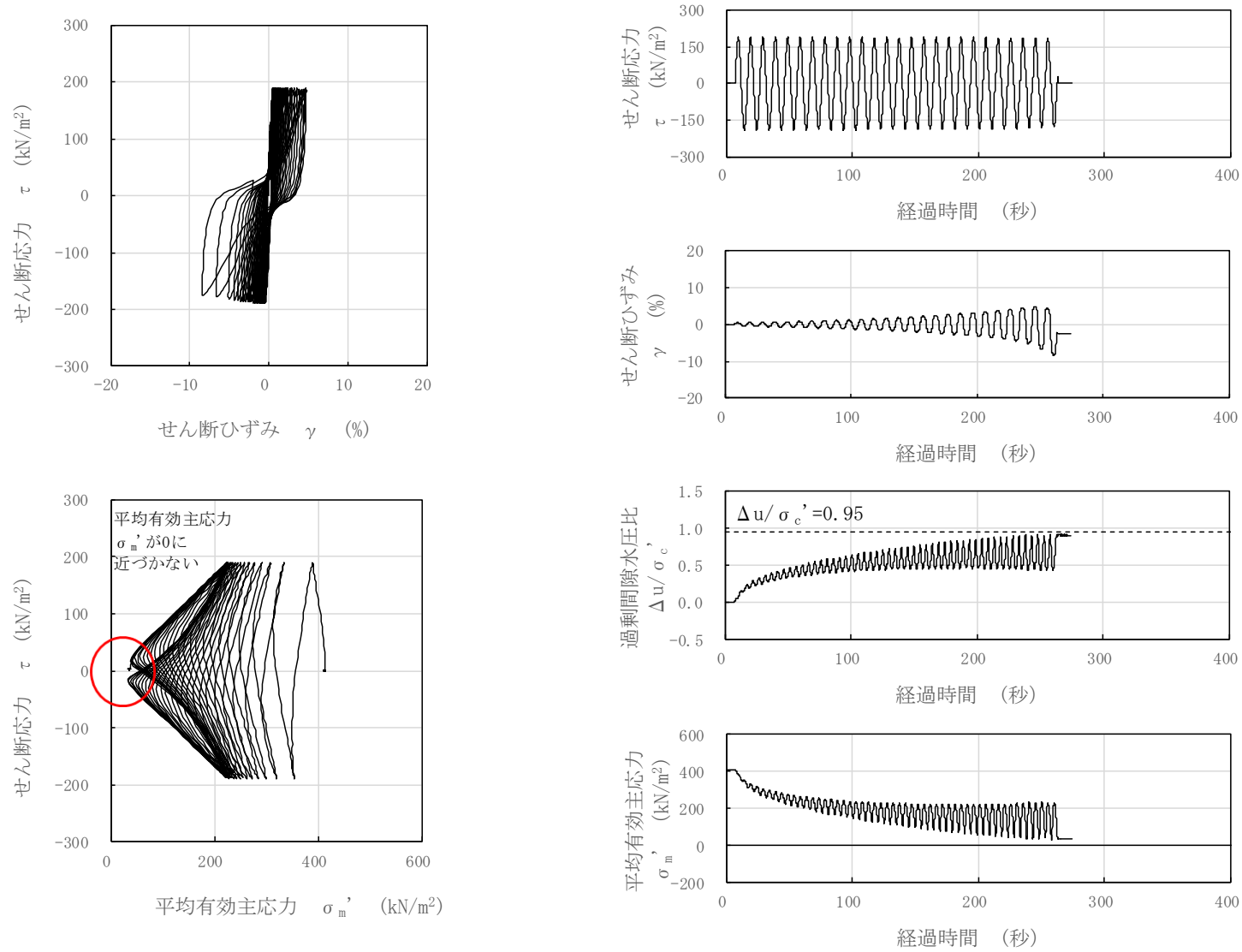


図 2-7 液状化試験結果 (A2s 層, FS02-2-21, GL. -25.55~25.70m, 有効拘束圧 412kN/m<sup>2</sup>, せん断応力比=0.460)

## 2.5 液状化抵抗曲線の回帰曲線 $-1\sigma$ を下回る供試体の土質性状

### 2.5.1 土質性状の特異性

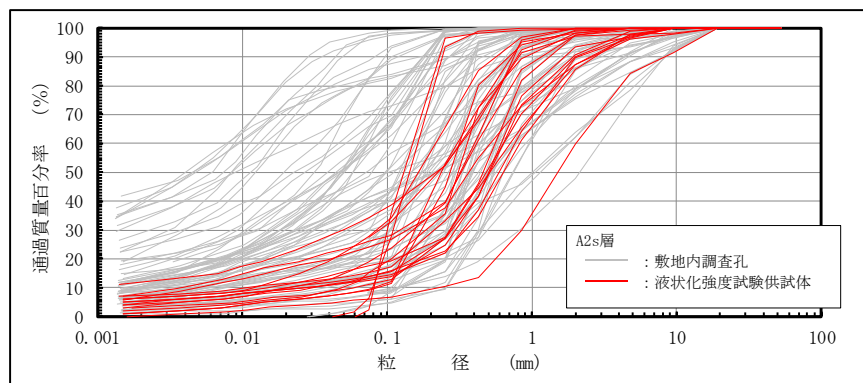
#### (1) 物理特性の比較

FS02-2-11 及び FS02-2-21 の粒度分布を図 2-8 に、粒度組成を表 2-2 に示す。

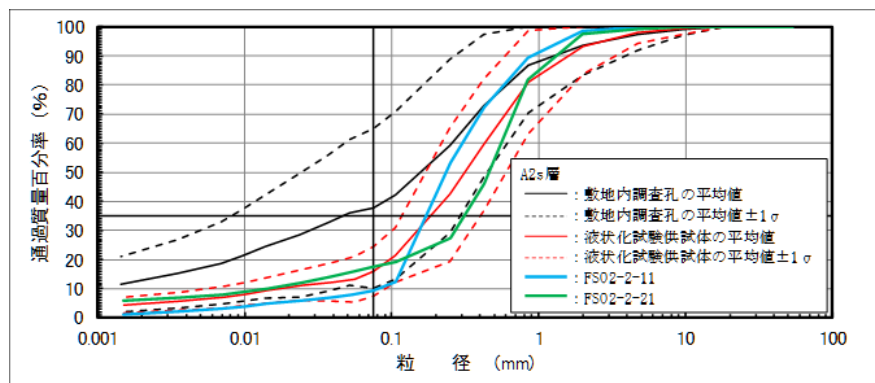
粒度分布については、図 2-8(b) に示すように、FS02-2-11 及び FS02-2-21 の粒度分布は、液状化強度試験供試体の平均値 $\pm 1\sigma$ 以内に概ね収まっている。

細粒分含有率については、FS02-2-11 は 9.4% と供試体全体の平均値 16.0% と比較してやや低いものの、ばらつき ( $-1\sigma$ ) の範囲内にあり、FS02-2-21 は 17.5% と供試体全体の平均値 16.0% に近い値である。

上記より、供試体 FS02-2-11 及び FS02-2-21 について、他の液状化強度試験供試体と比べて、物理特性の観点からは特異性はないと評価できる。



(a) A2s 層 (敷地全体)



(b) A2s 層 (液状化強度試験供試体)

図 2-8 粒度分布の比較

表 2-2 粒度組成

対象		礫分 (2mm 以上) (%)		砂分 (2.0~0.075mm) (%)		細粒分含有率 (0.075mm 以下) (%)	
		平均値	標準偏差 $\sigma$	平均値	標準偏差 $\sigma$	平均値	標準偏差 $\sigma$
A2s 層	敷地全体	6.4	10.4	55.9	25.2	37.7	27.4
	供試体全体	6.8	9.5	77.2	10.9	16.0	8.5
	FS02-2-11	1.6	—	89.0	—	9.4	—
	FS02-2-21	2.5	—	80.0	—	17.5	—

(2) 力学特性（N値）の比較

図 2-9 に、A2s 層の N 値の深度分布図を示す。図中には、液状化抵抗曲線の回帰曲線  $1\sigma$  を下回る供試体を採取した FS02-2 孔 (FS02-2 孔) の近傍で実施したパイロット孔 (FS02-P2 孔) における N 値を示す。

上記より、供試体 FS02-2-11 及び FS02-2-21 の採取深度における N 値は、液状化強度試験供試体の N 値のばらつきの範囲内にあると判断できることから、力学特性の観点から特異性はないと評価できる。

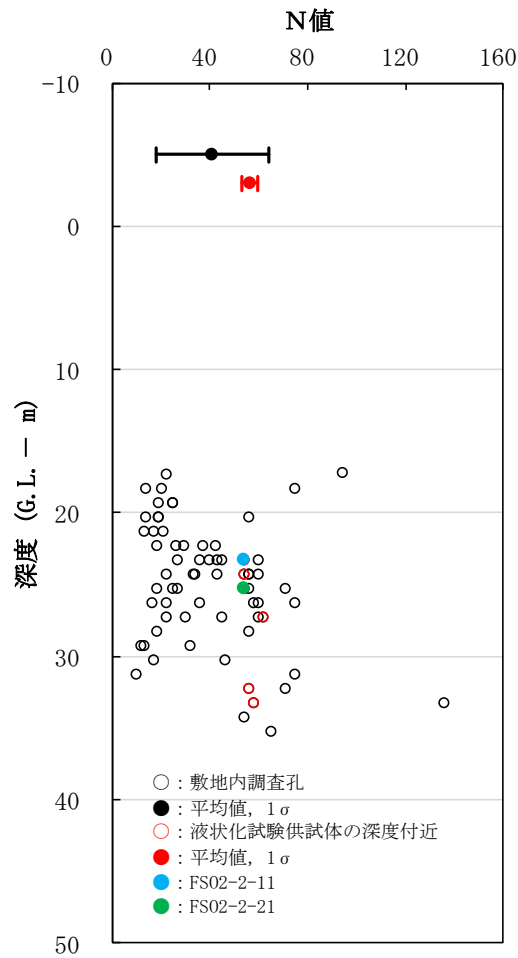


図 2-9 N 値の深度分布図 (A2s 層)

## 2.5.2 地層の連続性

液状化抵抗曲線の回帰曲線 $-1\sigma$ を下回る供試体について、供試体採取孔（FSO2-P2）近傍のボーリング孔に着目し、地層の連続性を検討する。

図 2-10 にボーリング孔の採取位置を、図 2-11～図 2-13 に各孔のボーリング柱状図を示す。

ボーリング柱状図では、液状化抵抗曲線の回帰曲線 $-1\sigma$ を下回る供試体の層相は「礫主体の砂礫」と判別している。供試体採取孔の近傍孔に着目した場合、礫主体の層相は一部確認されるものの、砂礫は広範囲に連続して分布していないことがわかる。

上記より、液状化抵抗曲線の回帰曲線 $-1\sigma$ を下回る供試体が採取された土層は、近傍孔のボーリング柱状図の層相から判断すると、広範囲に連続して分布している可能性は低いものと判断できる。

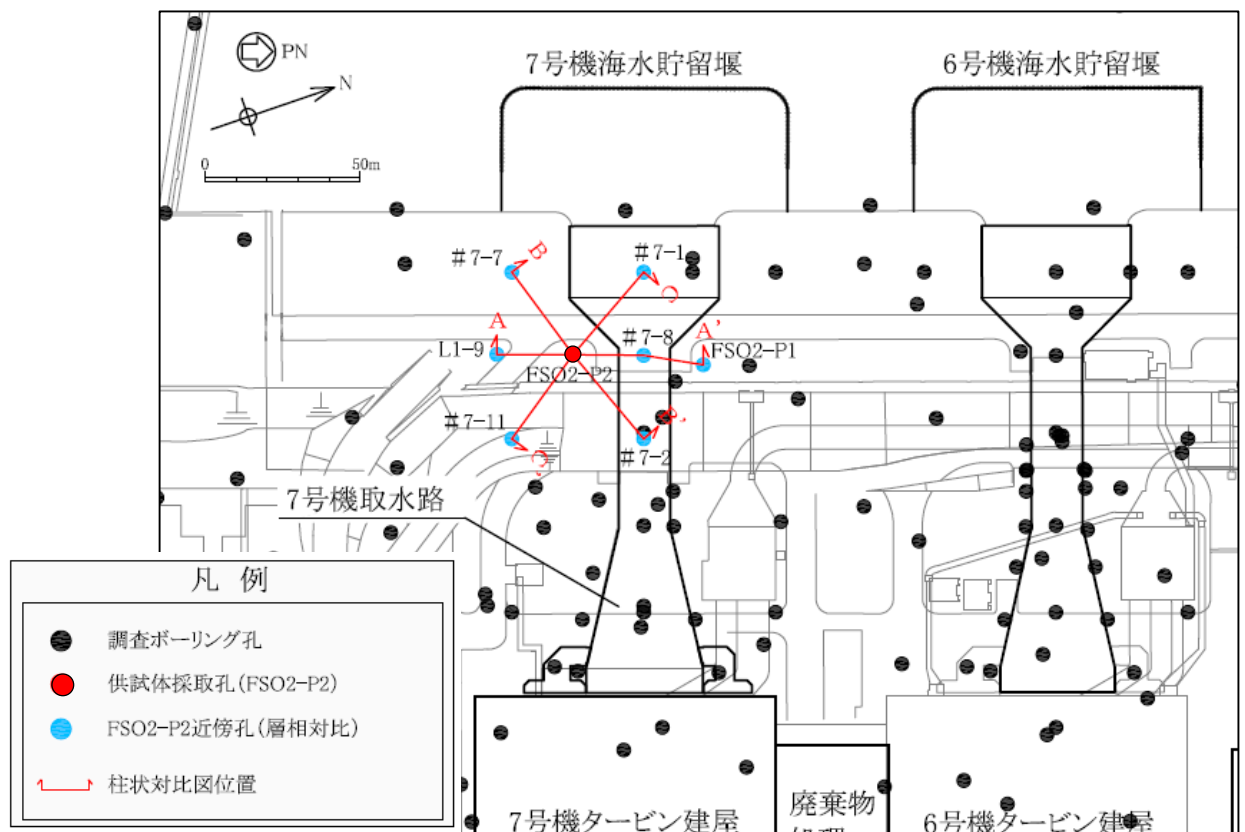


図 2-10 ボーリング孔の位置図（拡大）

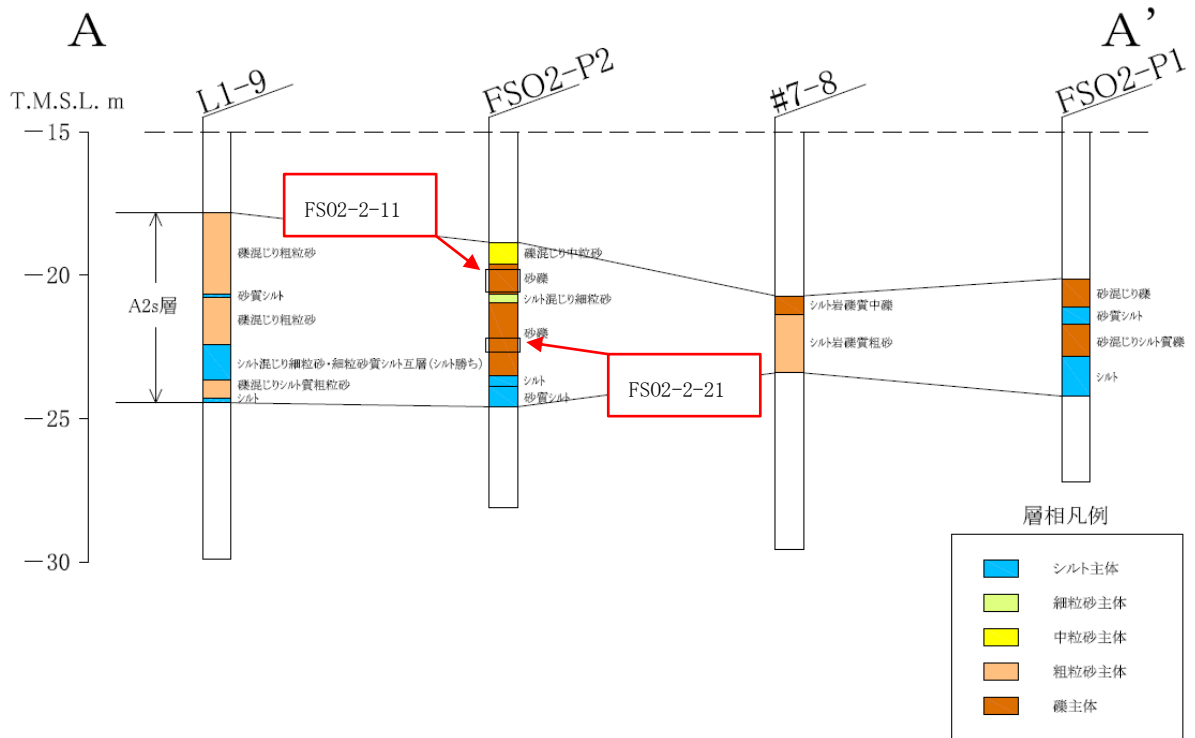


図 2-11 ボーリング柱状図 (A-A' 断面)

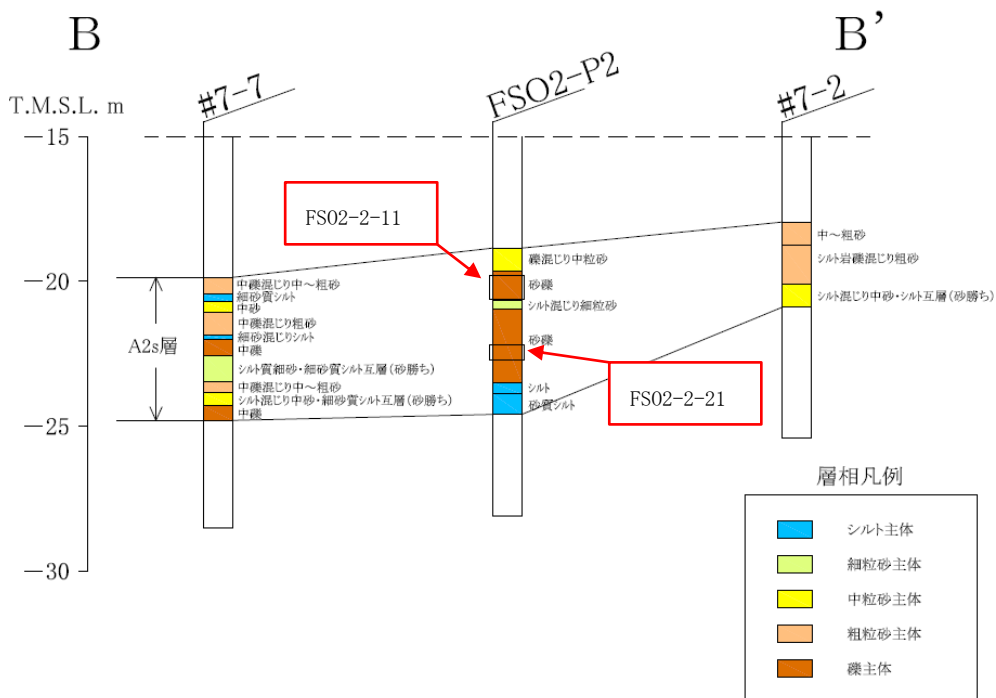


図 2-12 ボーリング柱状図 (B-B' 断面)

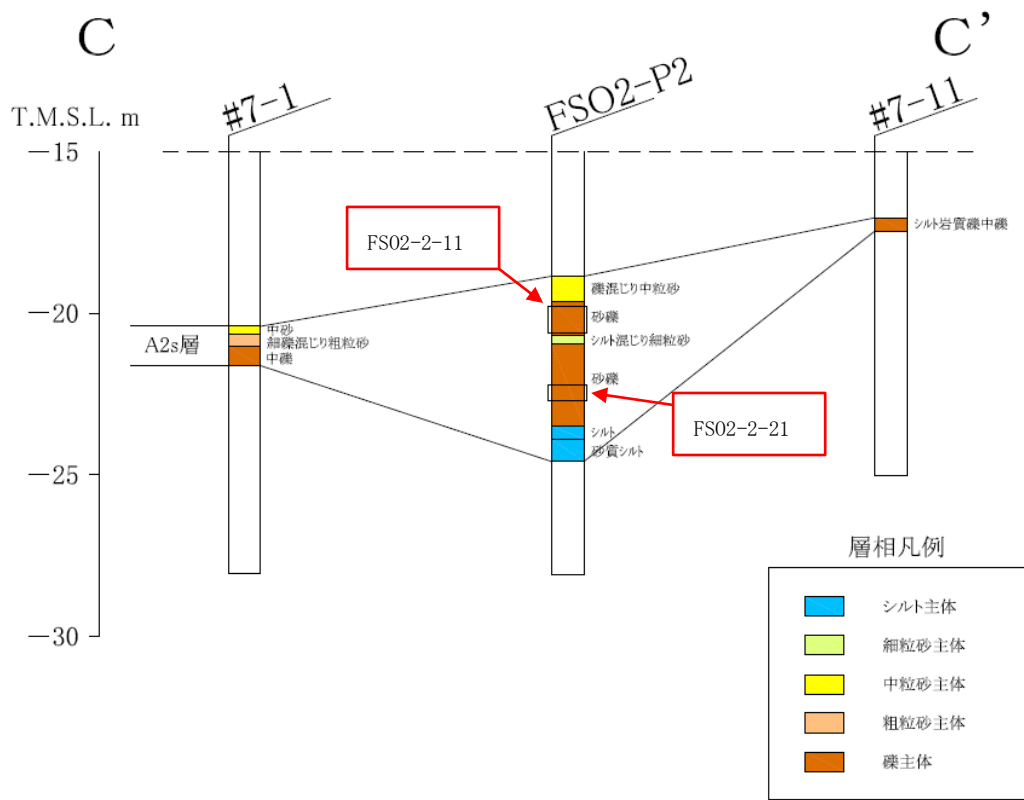


図 2-13 ボーリング柱状図 (C-C' 断面)

### 3. 液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る試験データの感度分析

前述 2. に示したとおり，液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る試験データは，土質性状としては A2s 層のばらつきの範囲内であり，広範囲に連続して分布していないと判断でき，当該データについては設計上考慮する必要性は低いと考えられる。

仮に，平均 $-1\sigma$ 強度を下回る試験データ（下限値相当）を設計上考慮した場合においても，液状化強度特性の差異は僅かであることから，耐震評価への影響は限定的であると考えられる。

本節では，平均 $-1\sigma$ 強度を下回る試験データ（下限値相当）を用いた地震応答解析を実施し，その感度を確認することにより，構造物の耐震評価に及ぼす影響の要否を定量的に評価する。

#### 3.1 感度分析の解析条件

解析断面は，供試体の採取孔（FS02-2 孔）の近傍にある対象施設のうち，構造物直下の A2s 層が最も厚い「7 号機 取水路（一般部）」（B-B 断面）を代表として選定した。解析断面を図 3-1 に示す。

感度分析では，同図に分布する A2s 層を下限値相当の液状化強度特性を設定する。感度分析に用いる下限値相当の液状化強度特性を図 3-2 に示す。

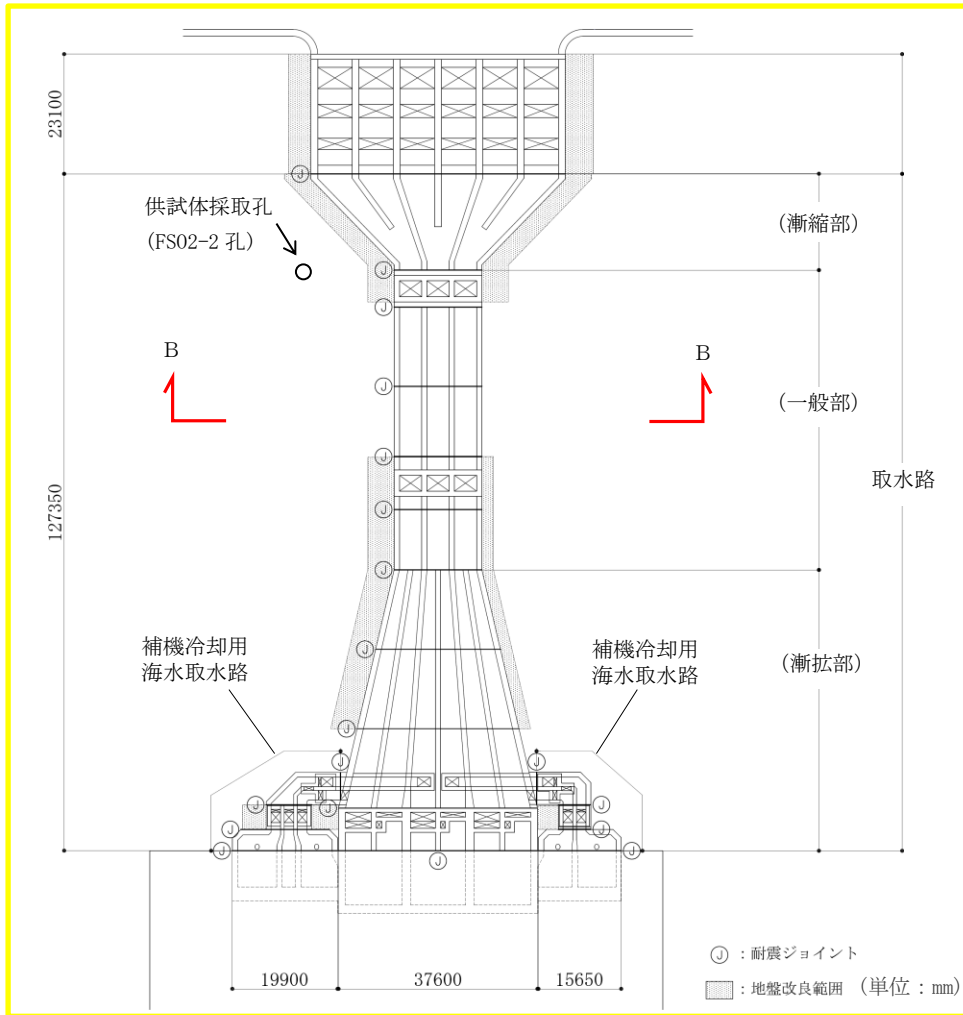
平均 $-1\sigma$ 強度を用いた耐震評価の詳細については，KK7 補足-027 資料 5「スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価」に示す。

入力地震動には，7 号機 取水路（一般部）における平均 $-1\sigma$ 強度を用いた耐震評価において，加速度が比較的大きな「S<sub>s</sub>-1（++）」を感度解析の代表波として選定する。

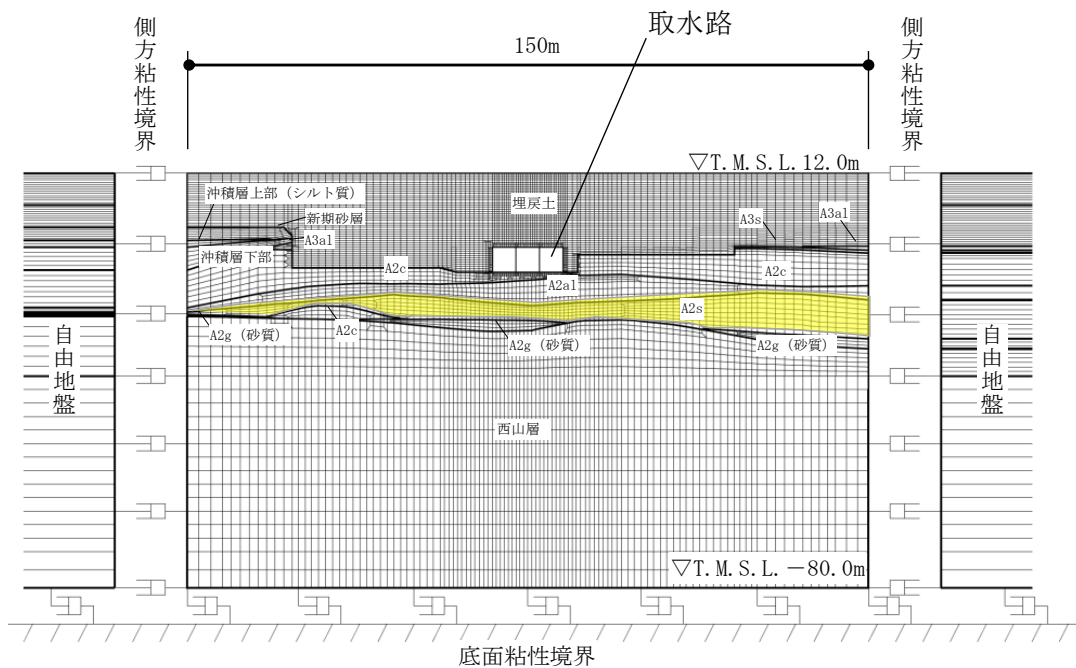
感度分析の解析条件を表 3-1 に示す。

感度分析では，A2s 層の液状化強度特性を平均（ $-1\sigma$ ）強度とした「基本ケース」と，液状化強度特性を下限値相当とした「下限値ケース」を比較する。感度分析の比較ケースの条件を表 3-2 に示す。





(a) 解析断面位置図



(b) 解析モデル図 (B-B断面)

図 3-1 解析断面 (取水路 (一般部))

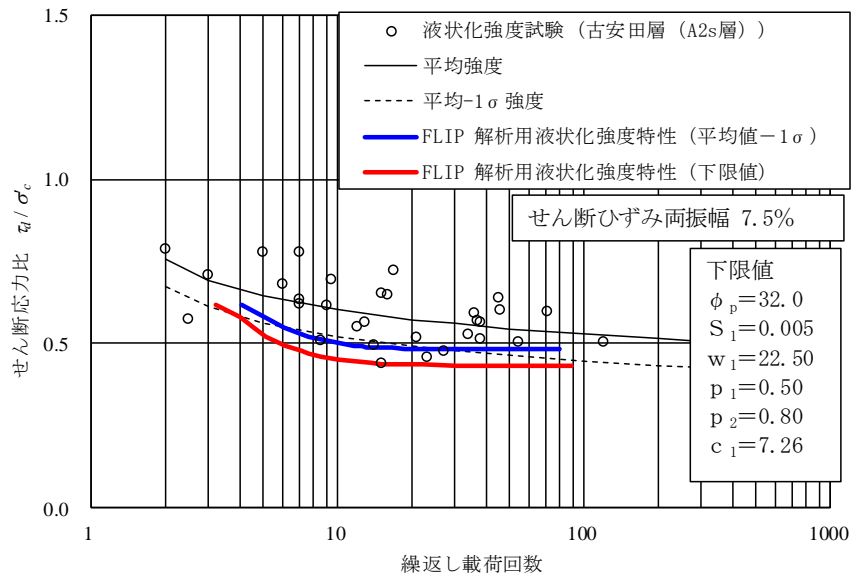


図 3-2 影響検討における液状化強度特性（下限値）の設定

表 3-1 感度分析の解析条件

項目	条件
解析断面	7号機 取水路（一般部）
入力地震動	S s -1 (++)
地盤剛性	平均値

表 3-2 感度分析の比較ケースの条件

解析ケース	液状化強度特性の設定
基本ケース	平均 (-1σ) 強度
下限値ケース	下限値相当

### 3.2 感度分析の結果

取水路（一般部）の構造と評価部位を図 3-3 に示す。照査結果を表 3-3 に、最大せん断ひずみ分布図の比較を図 3-4 に、過剰間隙水圧比分布図の比較を図 3-5 に示す。

照査結果から、曲げ照査及びせん断力照査ともに、基本ケースと下限値ケースとの間に差異がないことを確認した。A2s 層は構造物の下方に分布し、離れた位置にあることから、構造物の応力状態に影響を与えなかったものと考えられる。

最大せん断ひずみは、基本ケースと下限値ケースで優位な差は生じておらず、また、過剰間隙水圧比も基本ケースと下限値ケースで概ね同等の応答となっている。なお、最大せん断ひずみについては、基本ケースの方が下限値ケースよりも大きい範囲もあるが、これは、液状化しやすい下限値ケースでは、西山層と A2s 層との剛性比が大きくなった結果、層全体のせん断ひずみの発生が基本ケースと比べて抑えられた可能性が考えられる。

これより、A2s 層の液状化強度特性の差異（平均 $-1\sigma$ 強度と下限値相当）が耐震評価に与える影響は僅かであり、対象施設の耐震評価において、下限値相当の液状化強度特性を考慮する必要はないと判断できる。

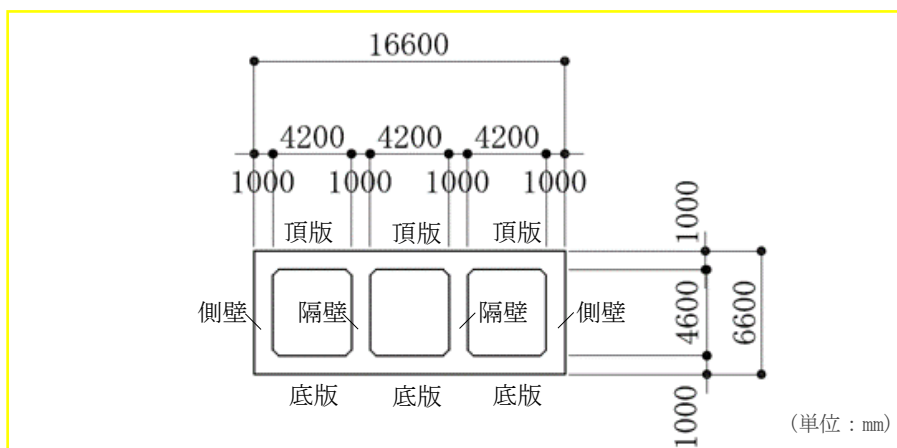
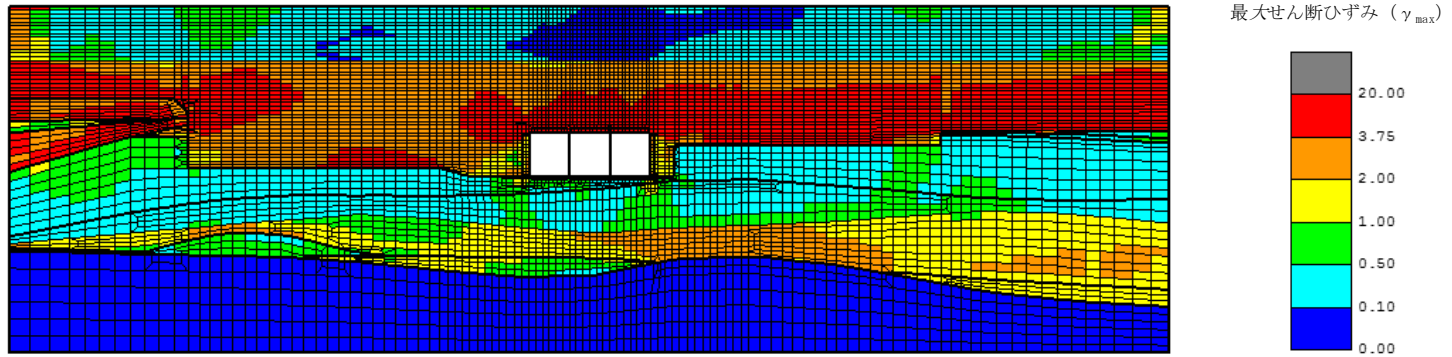


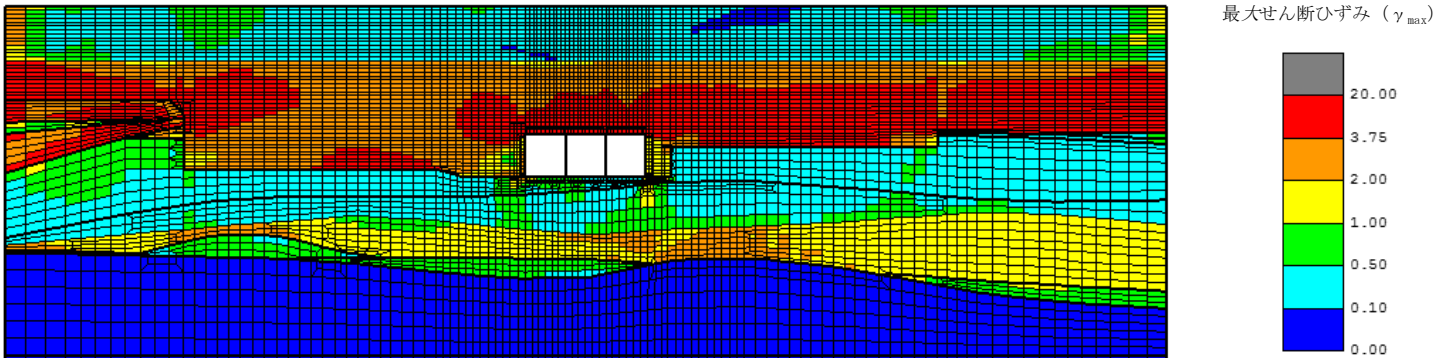
図 3-3 取水路（一般部）の構造と評価部位

表 3-3 照査結果の比較一覧（取水路（一般部）B-B断面，S<sub>s</sub>-1（++））

	部位	基本ケース			下限値ケース		
		R <sub>d</sub>	R <sub>L</sub>	照査値	R <sub>d</sub>	R <sub>L</sub>	照査値
曲げ照査	—	$2.34 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-2}$	0.24	$2.32 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-2}$	0.24
	部位	基本ケース			下限値ケース		
		V <sub>d</sub>	V <sub>yd</sub>	照査値	V <sub>d</sub>	V <sub>yd</sub>	照査値
せん断力照査	頂版	1153	2693	0.43	1153	2695	0.43
	底版	1264	2901	0.44	1262	2903	0.44
	側壁	1096	1554	0.71	1102	1560	0.71
	隔壁	841	926	0.91	837	926	0.91

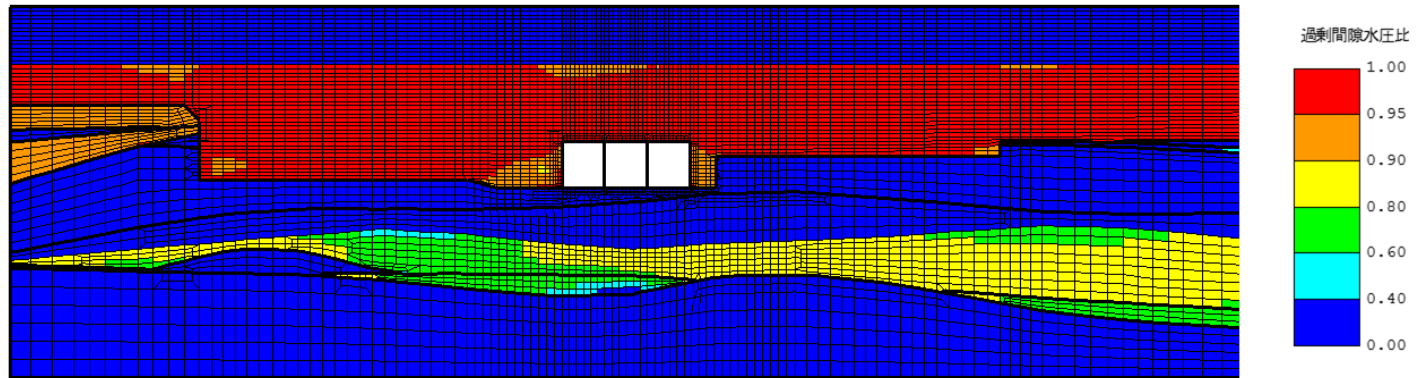


(a) 基本ケース

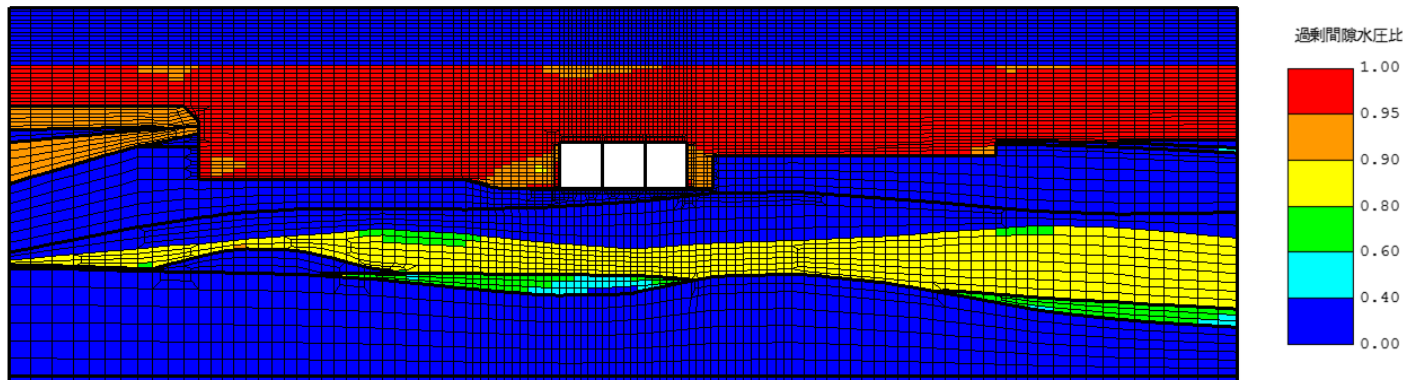


(b) 下限値ケース

図 3-4 最大せん断ひずみ分布図



(a) 基本ケース



(b) 下限値ケース

図 3-5 過剰間隙水圧比分布図

#### 4. まとめ

本検討では、A2s 層の液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る供試体について、供試体の採取位置と評価対象施設との位置関係を整理した上で、供試体の土質性状及び採取箇所  
の地層の連続性等を検討した。

検討では、液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る供試体について、土質性状の特異性を検討するため、粒度分布や粒度組成、N値等を比較した。その結果、当該供試体は、A2s 層の液状化強度試験の供試体のばらつきの範囲であり、特異性は認められないと判断できる。

また、当該供試体について、隣接ボーリング孔の観察記録から地層の連続性を確認した。その結果、当該供試体を採取した土層（礫主体の砂礫）は、広範囲に連続して分布していないと判断できる。

以上のことから、液状化抵抗曲線の回帰曲線（平均 $-1\sigma$ 強度）を下回る供試体は、土質性状としてはA2s 層のばらつきの範囲内にあり、広範囲に連続して分布していないことを確認した。

さらに、定量的な評価として、A2s 層の平均 $-1\sigma$ 強度を下回る試験データ（下限値相当）を考慮した感度分析を実施した。その結果、液状化強度特性の差異が耐震評価に影響を与えないことを確認したことから、現在の設定は妥当であると評価できる。

(参考) 供試体「FS02-2-9」について

図 4-1 に示すように、有効応力解析 (FLIP) における液状化強度特性 (平均値 (-1 $\sigma$ ) 強度) を下回る供試体は、「FS02-2-11」と「FS02-2-21」の他に、「FS02-2-9」が存在する。

ただし、「FS02-2-9」については、図 4-2 に示すように、液状化強度試験の初期段階で急激なひずみの局所化が発生しており、液状化に至る前にせん断破壊が発生したものと考えられることから、検討対象からは除外した。

なお、当該データのように、液状化に至る前にせん断破壊の発生した試験については、液状化と異なる現象でひずみが増大したものであるが、設計上の配慮として、液状化強度特性の設定においては、液状化に先行して発生したせん断破壊時の繰り返し回数をを用いて回帰曲線を作成している。

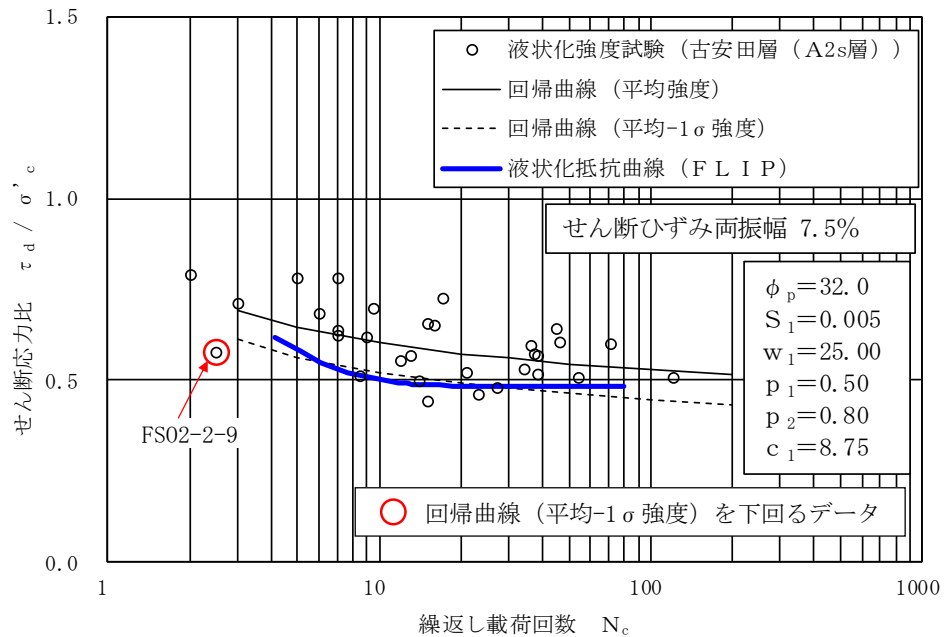


図 4-1 A2s 層の液状化強度試験結果



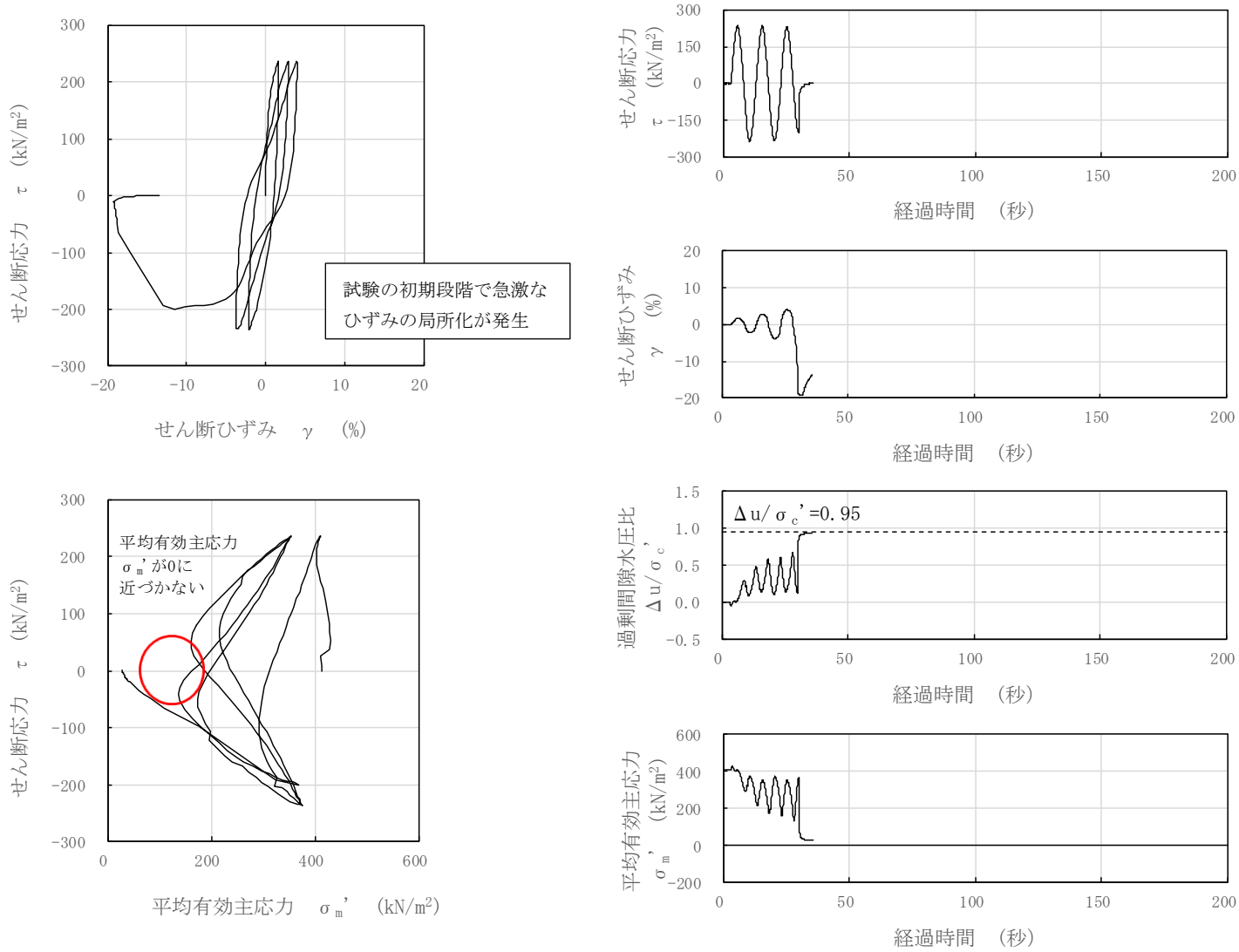


図 4-2 (参考) 液状化試験結果 (A2s 層, FS02-2-9, GL. -22.85~23.00m, 有効拘束圧 412kN/m<sup>2</sup>, せん断応力比=0.575)

(参考資料12) 建物・構築物の地震応答解析に用いる地盤諸定数について

### 1. 概要

本資料は、原子炉建屋，タービン建屋，コントロール建屋及び廃棄物処理建屋（以下、「原子炉建屋等」という。）の地震応答解析に用いる水平成層地盤モデル及び物性値の諸定数の設定について説明するものである。

原子炉建屋等の地震応答解析に用いる初期地盤定数を表1-1に示す。水平成層地盤モデルにおける地層の構成は、深部より西山層，古安田層及び新期砂層であり，建設工認時の6,7号機原子炉建屋の直下におけるボーリング（以下、「炉心ボーリング」という。）の結果に基づき設定している。表1-1に示す各地層の地盤物性値は，前述のとおり，炉心ボーリングの結果に基づき設定しているものであり，建設工認時より変更はない。また，各地層のせん断剛性のひずみ依存特性  $G/G_0 \sim \gamma$  曲線及び減衰定数のひずみ依存特性  $h \sim \gamma$  曲線は，設置変更許可申請書にも記載されている。これらの地盤物性値の設定根拠を以降の「2. 地盤調査結果及び試験結果」及び「3. 解析に用いる地盤の物性値」に示す。

表 1-1 初期地盤定数

標高 T. M. S. L. (m)	地層	せん断波 速度 $V_s$ (m/s)	単位体積 重量 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比 $\nu$	せん断剛性の ひずみ依存性 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線	減衰定数の ひずみ依存性 $h \sim \gamma$ 曲線 (%)
+12.0	新期砂層	150	16.1	0.347	$1/(1+10.95\gamma^{0.81})$	$\gamma/(0.031\gamma+0.002)$
+8.0		200	16.1	0.308		
+4.0	古安田層	<u>330</u>	17.3	<u>0.462</u>	$1/(1+5.39\gamma^{0.77})$	$24.8\gamma^{0.56}$
-6.0	西山層	<u>490</u>	<u>17.0</u>	<u>0.451</u>	$1/(1+4.10\gamma^{1.37})$	$25.0\gamma^{0.94}+0.7$
-33.0		<u>530</u>	<u>16.6</u>	<u>0.446</u>		
-90.0		<u>590</u>	<u>17.3</u>	<u>0.432</u>		
-136.0		<u>650</u>	<u>19.3</u>	<u>0.424</u>		
-155.0	椎谷層	<u>720</u>	<u>19.9</u>	<u>0.416</u>	$1/(1+5.76\gamma^{0.69})$	$\gamma/(0.065\gamma+0.004)+0.7$
$\infty$						

注記\*1：引用元にてSI単位となっていない数値はSI単位化している。

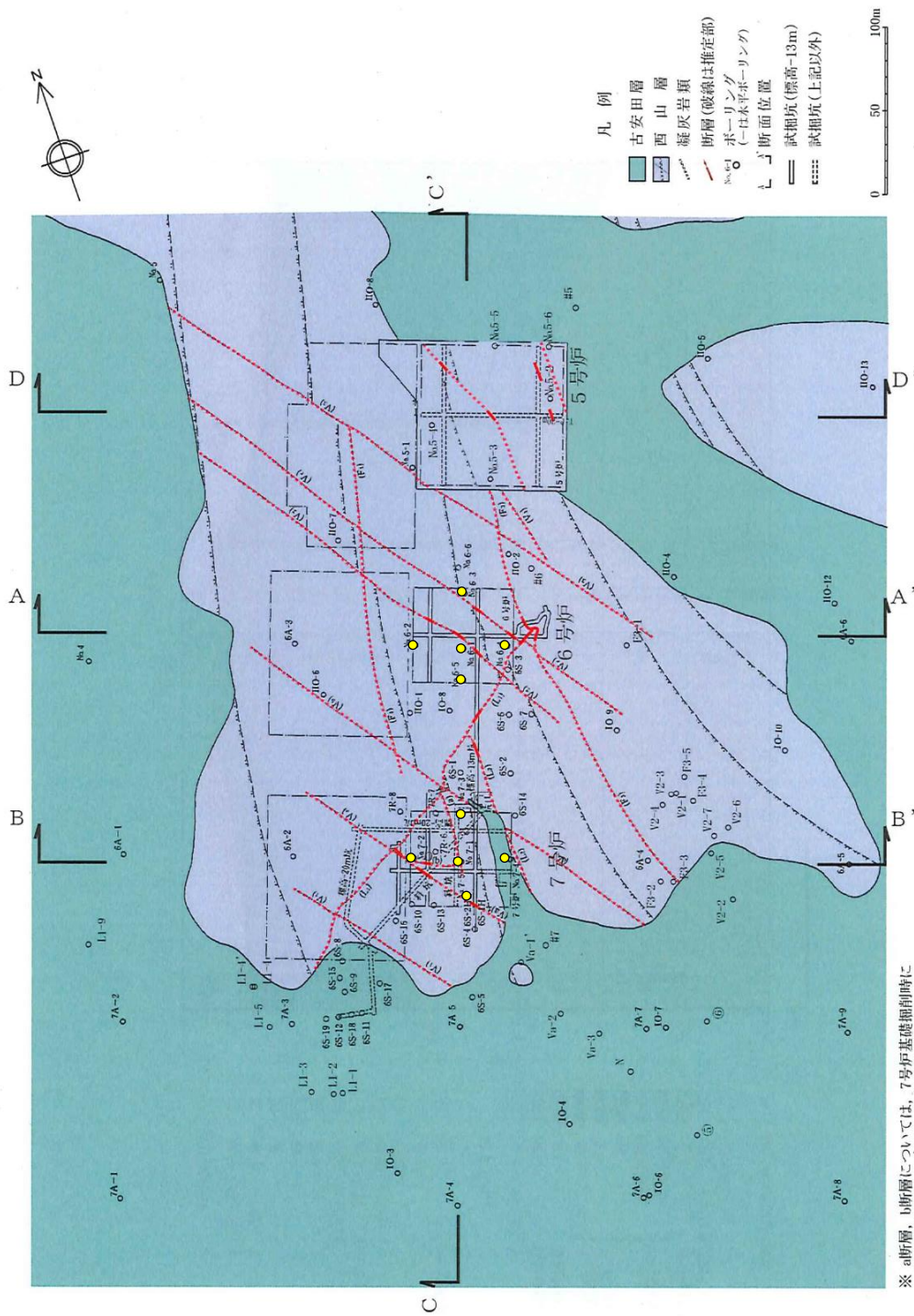
\*2：ハッチング箇所は，設置変更許可申請書に記載されている。

\*3：下線箇所は，炉心ボーリングに基づき設定している。

## 2. 地盤調査結果及び試験結果

### 2.1 地盤調査結果

原子炉建屋等の地震応答解析に用いる水平成層地盤モデルの設定根拠である炉心ボーリングの位置を図2-1に示す。



※ a断層, b断層については, 7号炉基礎掘削時にすべて取り除いており, 現在は存在しない。  
 ※ 5号炉の地質水平断面については, 5号炉試掘坑 (標高-25m~-30m) の水平断面を記載。

第3.4.2-8図 大湊側地質水平断面図 (標高-13m)

● : 炉心ボーリングの位置を示す。

図2-1 地質断面及び炉心ボーリングの位置

## 2.2 試験結果

解析に用いる地盤物性値は、せん断波速度（以下、「S波速度」という。） $V_s$ 、粗密波速度（以下、「P波速度」という。） $V_p$ 、単位体積重量 $\gamma_t$ 、ポアソン比 $\nu$ であり、その物性値は炉心ボーリングから採取した試料による試験結果と炉心ボーリングを用いて実施したP S 検層結果を基に設定しており、試験結果は建設工認時と同一である。表2-1に地盤物性値の設定根拠を示す。

S波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ はP S 検層結果または超音波速度試験結果から、単位体積重量 $\gamma_t$ は炉心ボーリングから採取した試料による物理試験結果から設定し、ポアソン比 $\nu$ はS波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ を用いた評価式により設定している。以降に各地層の物性値の設定根拠を示す。

表2-1 地盤物性値の設定根拠

地層	地盤物性値	試験名	備考
西山層	単位体積重量 $\gamma_t$	物理試験	「3.1 西山層の物性値」に設定根拠を示す
	S波速度 $V_s$ P波速度 $V_p$ ポアソン比 $\nu$	P S 検層結果	「3.1 西山層の物性値」に設定根拠を示す
古安田層	単位体積重量 $\gamma_t$	物理試験	設置変更許可申請書に記載がある
	S波速度 $V_s$ P波速度 $V_p$ ポアソン比 $\nu$	P S 検層結果	「3.2 古安田層の物性値」に設定根拠を示す
新期砂層	単位体積重量 $\gamma_t$	物理試験	設置変更許可申請書に記載がある
	S波速度 $V_s$ P波速度 $V_p$ ポアソン比 $\nu$	超音波速度試験	「3.3 新期砂層の物性値」に設定根拠を示す

### 3. 解析に用いる地盤の物性値

#### 3.1 西山層の物性値

西山層の物性値のうち、せん断剛性のひずみ依存特性  $G/G_0 \sim \gamma$  曲線及び減衰定数のひずみ依存特性  $h \sim \gamma$  曲線は設置変更許可申請書に記載されたものと同一であり、建設工認時より変更はない。

一方で、その他の物性値は、建設工認時より変更はないが、設置変更許可申請書には記載がないため、主にこれらの設定根拠を以降に示す。

西山層の解析に用いる地盤の物性値の設定にあたっては、地盤の深度方向に物性の変化が認められることから、S波速度に着目して解放基盤表面までの間を4層に分割している。

##### (1) S波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ の設定

図3-1に西山層のS波速度  $V_s$  及びP波速度  $V_p$  の深度方向分布を示し、これに基づきS波速度  $V_s$  及びP波速度  $V_p$  は、炉心ボーリングを用いて実施したP-S検層の結果を層区分毎に平均することにより設定している。

##### (2) 単位体積重量 $\gamma_t$ の設定

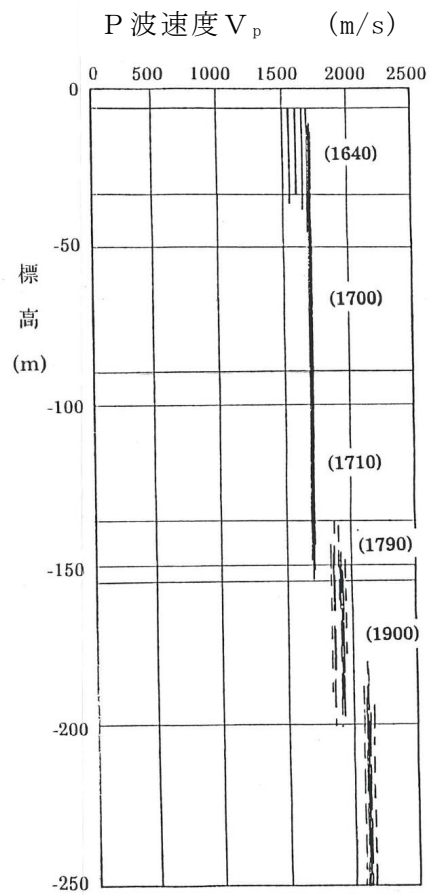
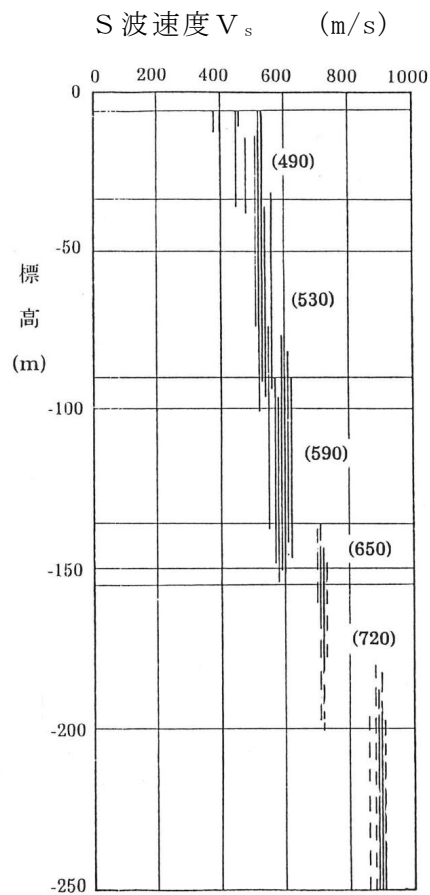
図3-2に西山層における単位体積重量の深度方向分布を示し、これに基づき単位体積重量  $\gamma_t$  は、採取した試料による物理試験の結果を層区分毎に平均することにより設定している。

##### (3) ポアソン比 $\nu$ の設定

S波速度  $V_s$  及びP波速度  $V_p$  を用いて次式により設定している。

$$\nu = \frac{0.5 \cdot \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

標高 T. M. S. L. (m)	地層
+12.0	新期砂層
+8.0	
+4.0	古安田層
-6.0	西山層
-33.0	
-90.0	
-136.0	
-155.0	
-155.0	椎谷層



( ) 内の数値は設定値を示す。

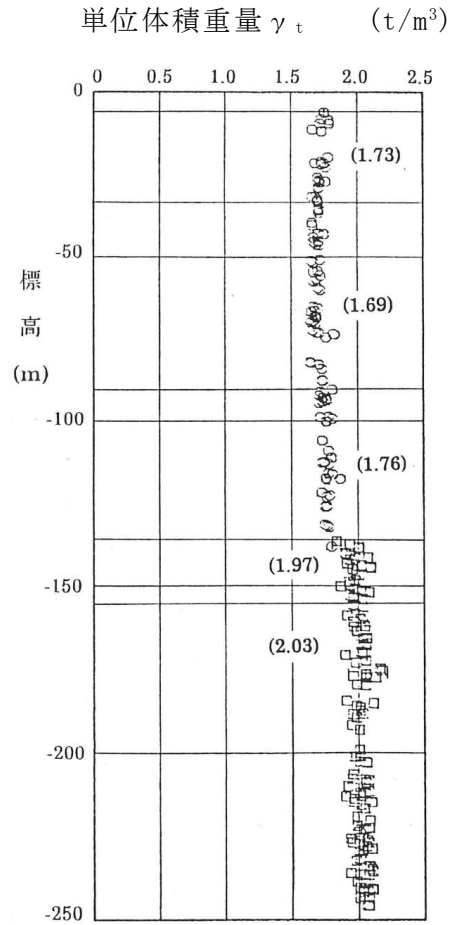
(a) S波速度  $V_s$  の分布

(b) P波速度  $V_p$  の分布

図 3-1 西山層の S 波速度  $V_s$  及び P 波速度  $V_p$  の設定値



標高 T. M. S. L. (m)	地層
+12.0	新期砂層
+8.0	
+4.0	古安田層
-6.0	西山層
-33.0	
-90.0	
-136.0	
-155.0	椎谷層



( ) 内の数値は設定値を示す。

単位体積重量  $\gamma_t$  の分布

図 3-2 西山層の単位体積重量  $\gamma_t$  の設定値

### 3.2 古安田層の物性値

古安田層の物性値のうち，単位体積重量 $\gamma_t$ ，せん断剛性のひずみ依存特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線及び減衰定数のひずみ依存特性 $h \sim \gamma$ 曲線は設置変更許可申請書に記載されたものと同じであり，建設工認時より変更はない。

一方で，その他の物性値は，建設工認時より変更はないが，設置変更許可申請書には記載がないため，主にこれらの設定根拠を以降に示す。

#### (1) S波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ の設定

図3-3に古安田層の弾性波速度の深度方向分布を示し，これに基づきS波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ は，炉心ボーリングを用いて実施したPS検層の結果を平均することにより設定している。

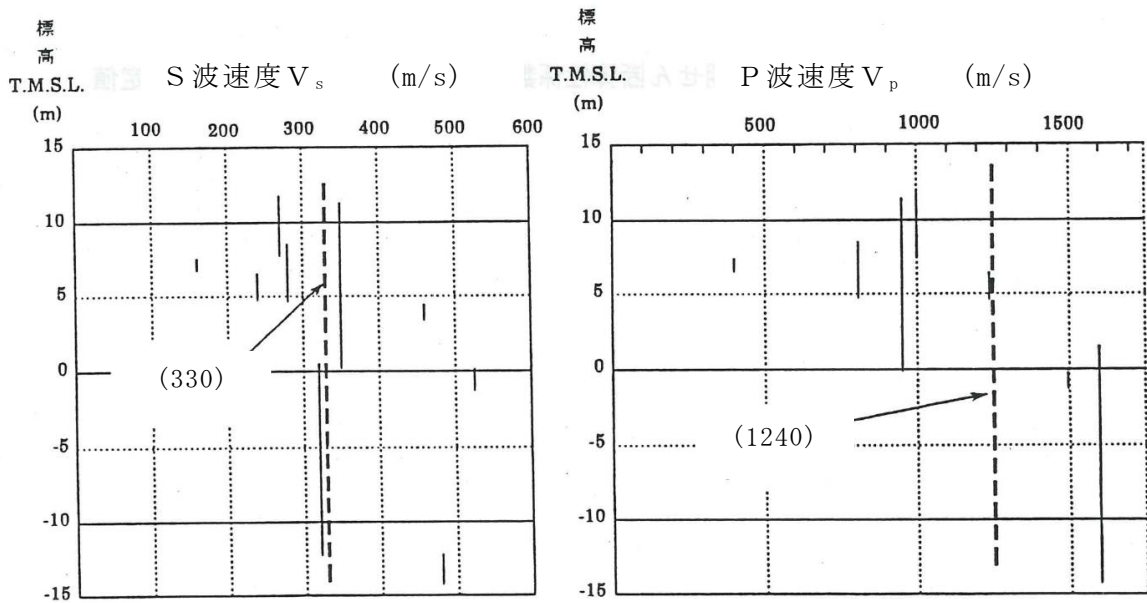
#### (2) 単位体積重量 $\gamma_t$ の設定

採取した試料による物理試験の結果を平均することにより設定しており，三軸圧縮試験の供試体の単位体積重量の平均値を用いた。

#### (3) ポアソン比 $\nu$ の設定

せん断波速度 $V_s$ ，P波速度 $V_p$ を用いて次式により設定している。

$$\nu = \frac{0.5 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$$



( ) 内の数値は設定値を示す。

(a) S波速度  $V_s$  の分布

(b) P波速度  $V_p$  の分布

図3-3 古安田層のS波速度  $V_s$  及びP波速度  $V_p$  の設定値

### 3.3 新期砂層の物性値

新期砂層の物性値のうち，単位体積重量 $\gamma_t$ ，せん断剛性のひずみ依存特性 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線及び減衰定数のひずみ依存特性 $h \sim \gamma$ 曲線は設置変更許可申請書に記載されたものと同じであり，建設工認時より変更はない。

一方で，S波速度 $V_s$ ，P波速度 $V_p$ 及びポアソン比 $\nu$ は，建設工認時より変更はないが，設置変更許可申請書には記載がないため，主にこれらの設定根拠を以降に示す。

#### (1) ポアソン比 $\nu$ の設定

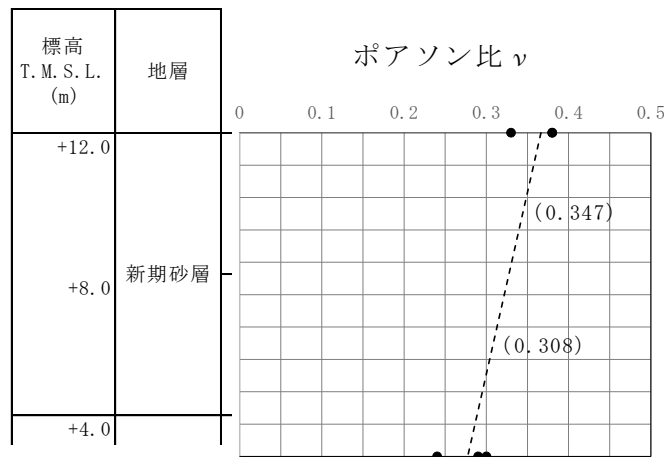
採取した試料による超音波速度試験の結果を基に設定しており，図3-4に示すように，ポアソン比 $\nu$ は拘束圧によって増加または減少する傾向が認められたことから，新期砂層を上下二層に分け，各層の層厚の中心における拘束圧に対応したポアソン比 $\nu$ を設定している。

#### (2) S波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ の設定

前述のポアソン比 $\nu$ 及び超音波速度試験により設定した初期せん断弾性係数 $G_0$ と等価なS波速度 $V_s$ 及びP波速度 $V_p$ を求め設計値として設定している。

#### (3) 単位体積重量 $\gamma_t$ の設定

採取した試料による物理試験の結果を層区分毎に平均することにより設定しており，三軸圧縮試験の供試体の単位体積重量の平均値を用いた。



●は超音波速度試験結果を示す。  
 ( ) 内の数値は設定値を示す。

図3-4 新期砂層のポアソン比  $\nu$  の設定値