

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-023-01
提出年月日	2021年10月22日

地盤の支持性能について

2021年10月

中国電力株式会社

## 目次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
3. 対象施設周辺の地質等	3
3.1 対象施設周辺の地質	3
3.2 対象施設周辺の地質状況整理結果	16
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	18
3.3.1 敷地の地下水位分布	18
3.3.2 耐震評価における設計地下水位設定方針	23
4. 地盤の解析用物性値	58
4.1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値	58
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	66
4.2.1 有効応力解析に用いる解析用物性値	72
4.2.2 改良地盤に用いる解析用物性値	124
4.2.3 その他の解析用物性値	124
4.2.4 地盤の物性のばらつきについて	124
5. 極限支持力	125
5.1 基礎地盤（岩盤）の極限支持力度	125
5.2 直接基礎の支持力算定式	130
5.3 杭基礎の支持力算定式	131
6. 地盤の速度構造	132
6.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル	132
6.2 地震応答解析に用いる解析モデル	135
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

## 1. 概要

本資料は、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」に基づき、設計基準対象施設並びに常設耐震重要重大事故防止設備以外の常設重大事故防止設備、常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。）、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く。）（以下「常設重大事故等対処施設」という。）及び波及的影響の設計対象とする下位クラス施設の耐震安全性評価を実施するにあたり、対象施設を設置する地盤の物理特性、強度特性、変形特性等の地盤物性値の設定及び支持性能評価で用いる地盤諸元の基本的な考え方を示したものである。

## 2. 基本方針

設計基準対象施設，常設重大事故等対処施設及び波及的影響の設計対象とする下位クラス施設において，これらの対象施設を設置する地盤の物理特性，強度特性，変形特性等の解析用物性値については，各種試験に基づき設定する。また，全応力解析及び有効応力解析等に用いる解析用物性値をそれぞれ設定する。全応力解析に用いる解析用物性値は，設置変更許可申請書（添付書類六）に記載した調査・試験結果に基づき設定することを基本とする。有効応力解析に用いる解析用物性値は，設計及び工事の計画の認可申請において設定する。

対象施設を設置する地盤の地震時における支持性能評価については，設計基準対象施設及び常設重大事故等対処施設の耐震重要度分類又は施設区分に応じた地震力により地盤に作用する接地圧が，地盤の極限支持力度に対して妥当な安全余裕を有することを確認することによって行う。

極限支持力度は，道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会，平成 14 年 3 月）（以下「道路橋示方書」という。）の支持力度算定式に基づき，対象施設の支持地盤の平板載荷試験又は室内試験の結果により設定する。

杭基礎の押込み力及び引抜き力に対する支持力度評価において，液状化検討対象層である地下水位以深の埋戻土及び砂礫層の杭周面摩擦力を支持力度として考慮せず，支持力度評価を行うことを基本とする。ただし，杭周面地盤に地下水位以浅の埋戻土及び砂礫層，改良地盤，非液状化層及び岩盤がある場合は，その杭周面摩擦力を支持力度として考慮する。

耐震評価における地下水位は，地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲においては，その機能を考慮した設計地下水位を設定し，地下水位低下設備の効果が及ばない範囲においては，自然水位より保守的に高く設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定する。



### 3. 対象施設周辺の地質等

#### 3.1 対象施設周辺の地質

敷地の地質層序を表 3.1-1 に、地質調査位置図を図 3.1-1 に、敷地の地質平面図を図 3.1-2 に、敷地の地質断面位置を図 3.1-3 に、地質断面図を図 3.1-4～図 3.1-14 に示す。

敷地の地質は、新第三紀中新世の堆積岩類から成る成相寺層及び貫入岩類、並びにそれらを覆う被覆層から構成される。成相寺層は海成層で、下位より下部頁岩部層、火砕岩部層及び上部頁岩部層に区分される。

なお、原子炉建物基礎地盤及び周辺斜面には、成相寺層のうち下部頁岩部層、貫入岩類が分布する。

敷地に分布する成相寺層の構造は、露頭状況の良好な北部の海岸付近では、概ね走向  $N60^{\circ}\sim 80^{\circ}W$ 、傾斜  $12^{\circ}\sim 20^{\circ}N$  の同斜構造を示す。

原子炉建物設置位置の約 200m 南方には  $N85^{\circ}E\sim E-W$  の軸をもつ背斜構造が存在し、背斜軸より南では緩い傾斜を示す。

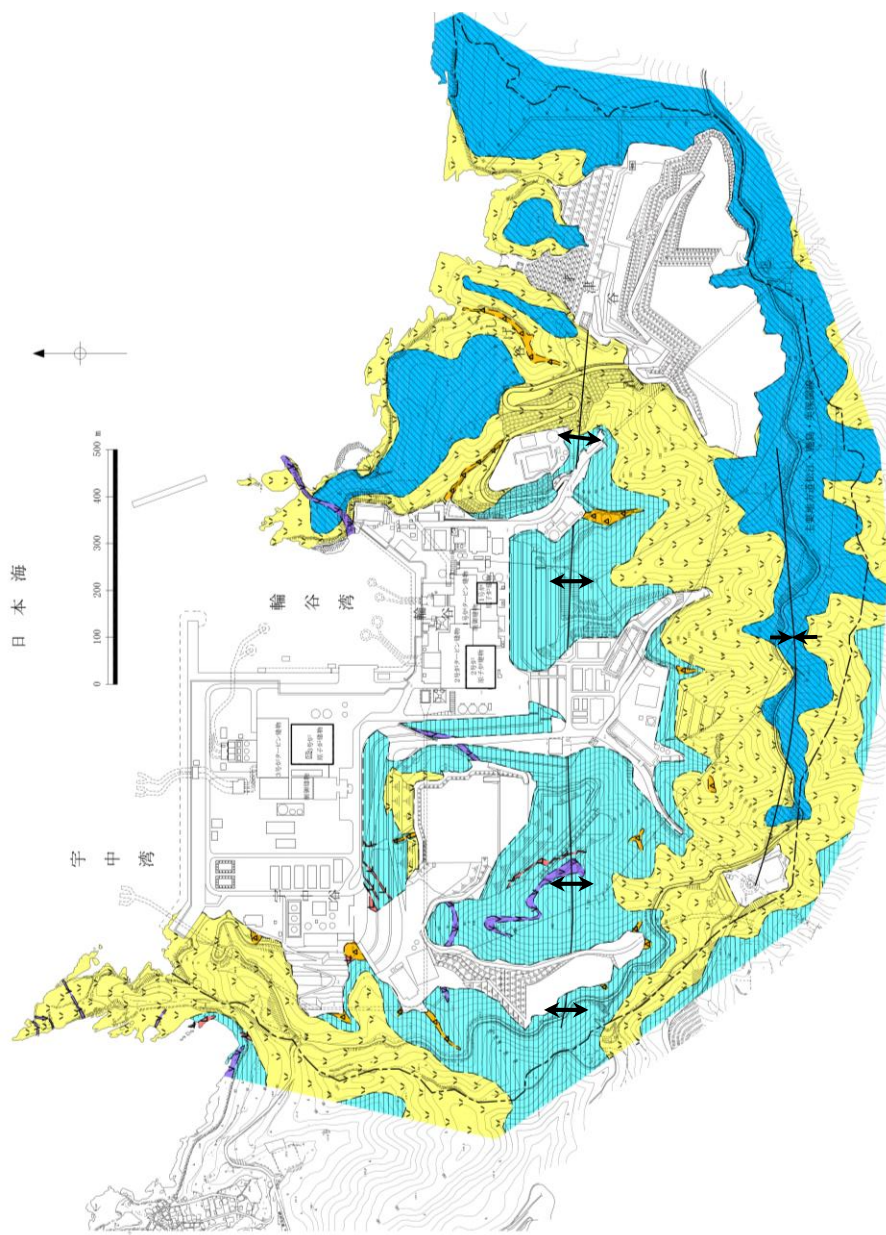
また、平面図及び断面図では、地層の食違いがなく、連続して分布することから、敷地において、地層と斜交し破砕を伴う断層は認められないが、粘土分を含み、平板状あるいは平面状の形態を持ち、この面に沿って変位している可能性があり、地層と平行な断層であるシームが認められる。

表 3.1-1 敷地の地質層序

地質時代		地層名		主要構成地質	
新生代	第四紀	完新世	被覆層	盛土	礫混じり砂質土・礫混じり粘性土
				崖錐堆積物	礫混じり砂質土・礫混じり粘性土
	新第三紀	中新世	貫入岩類		ドレライト・安山岩
			成相寺層	上部頁岩部層	黒色頁岩
				火砕岩部層	凝灰岩・凝灰角礫岩
				下部頁岩部層	黒色頁岩・凝灰質頁岩



図 3.1-1 地質調査位置図



凡例

地質時代	地層名	主要構成地質
第四紀	完新世	礫混り砂質土・礫混り粘性土
	新世	礫混り砂質土・礫混り粘性土
第三紀	貫入岩類	安山岩
	成層	トレライト
	相寺層	黒色頁岩
新第三紀	上部頁岩部層	凝灰岩・凝灰角礫岩
	下部頁岩部層	黒色頁岩・凝灰質頁岩

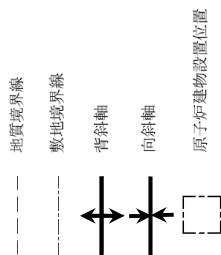


図 3.1-2 敷地の地質平面図

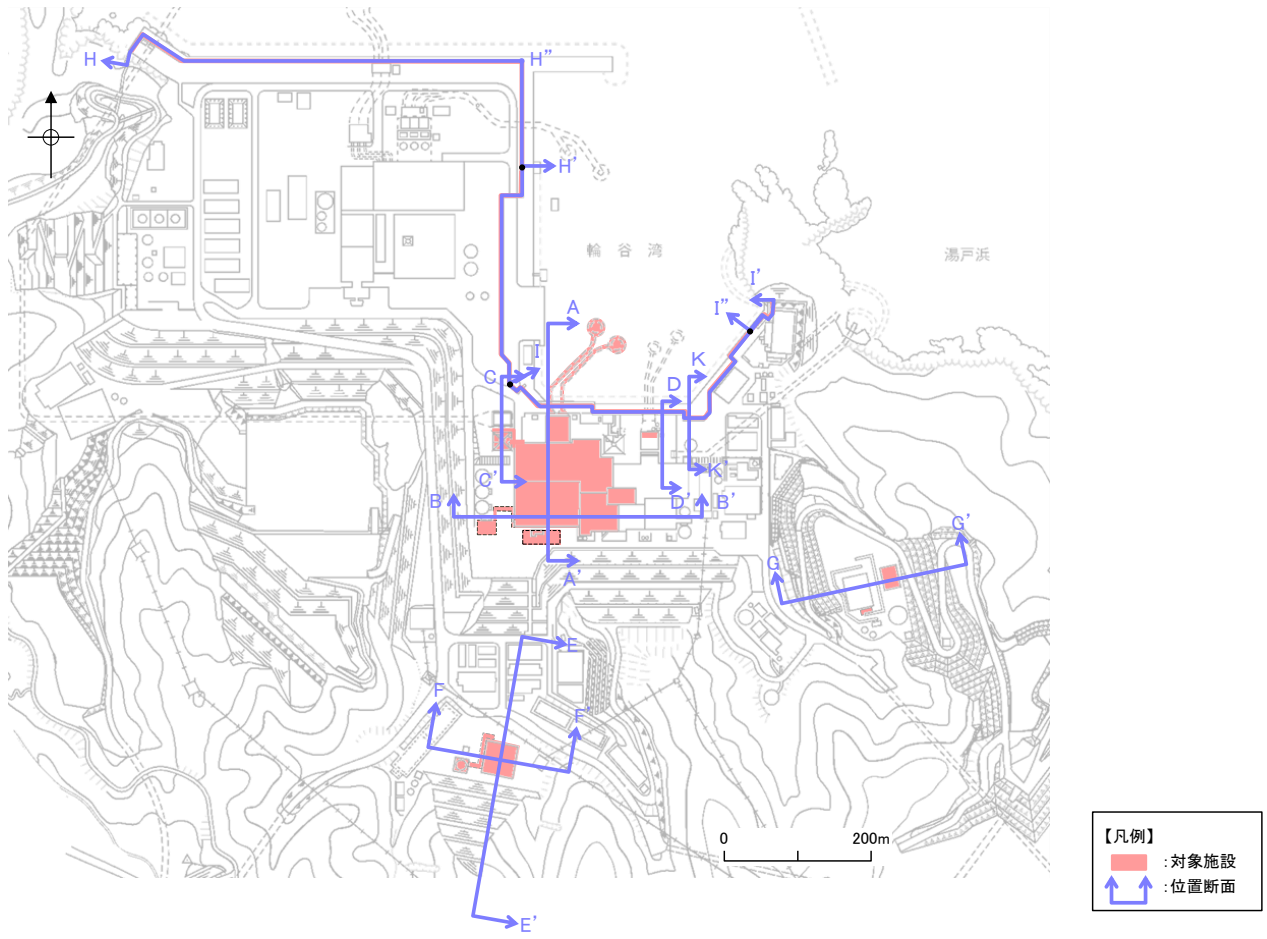


图 3.1-3 地質断面図位置

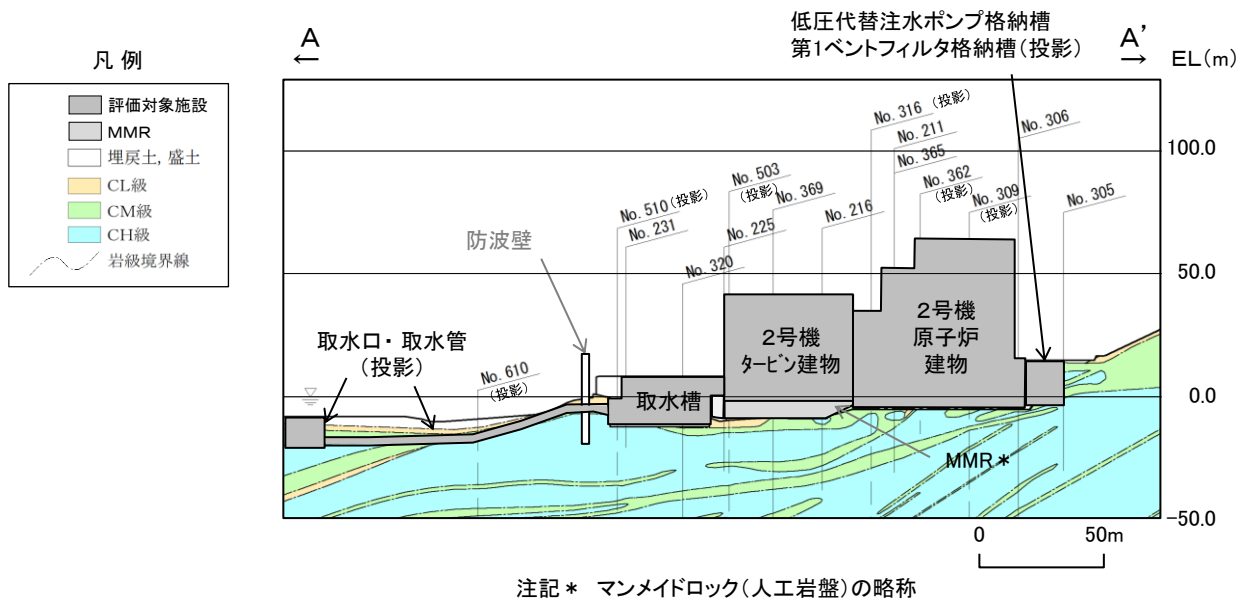


図 3.1-4 原子炉建物等の地質断面図 (A-A' 断面)

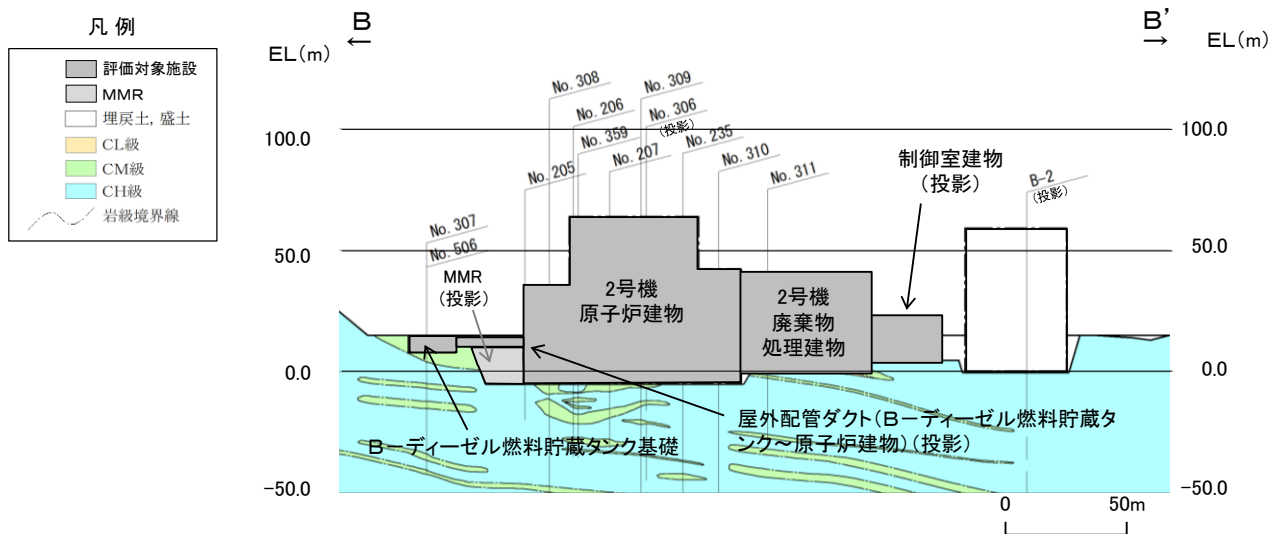


図 3.1-5 原子炉建物等の地質断面図 (B-B' 断面)

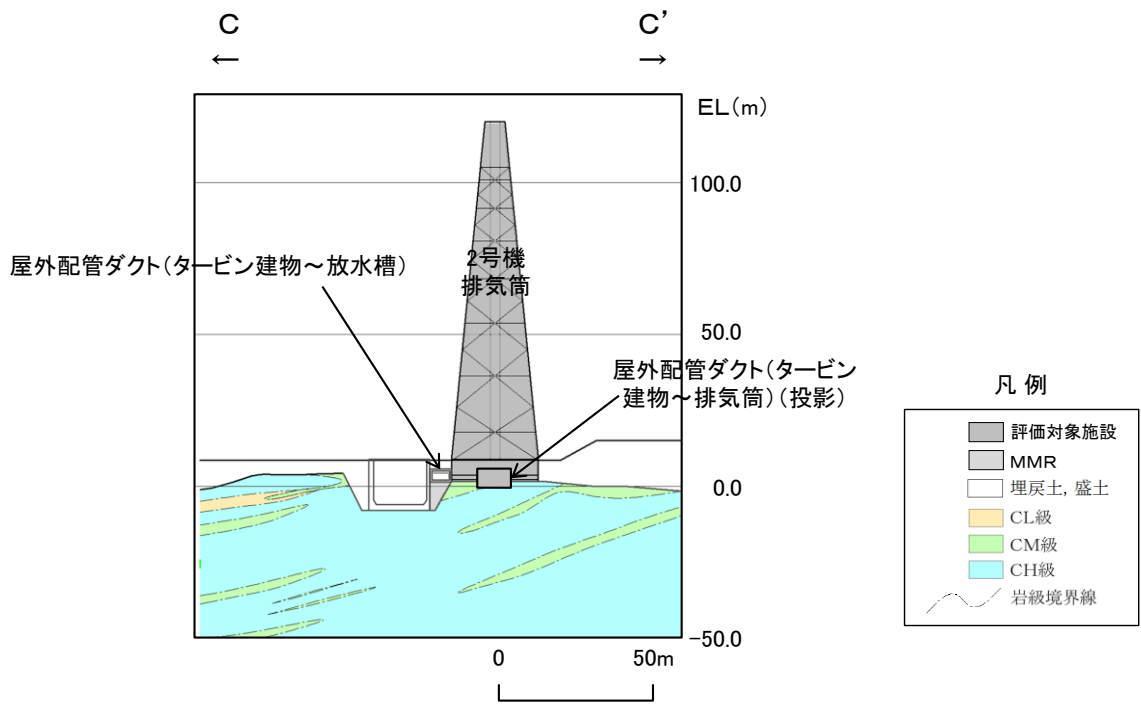


図 3.1-6 排気筒等の地質断面図 (C-C' 断面)

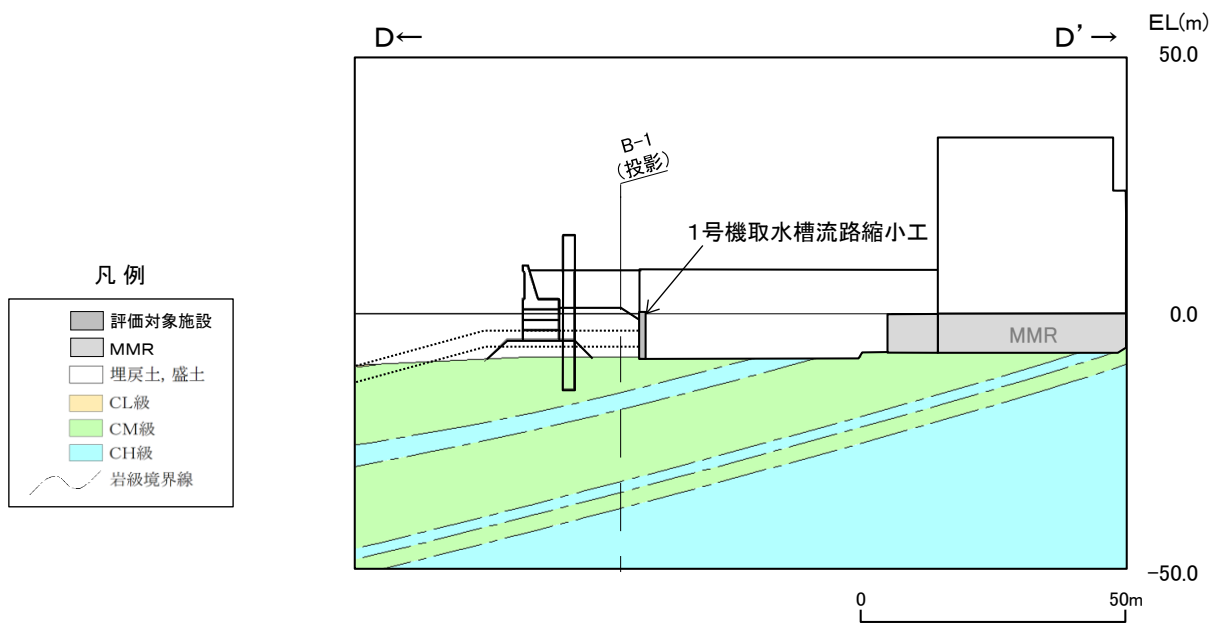


図 3.1-7 1号機取水槽流路縮小工の地質断面図 (D-D' 断面)

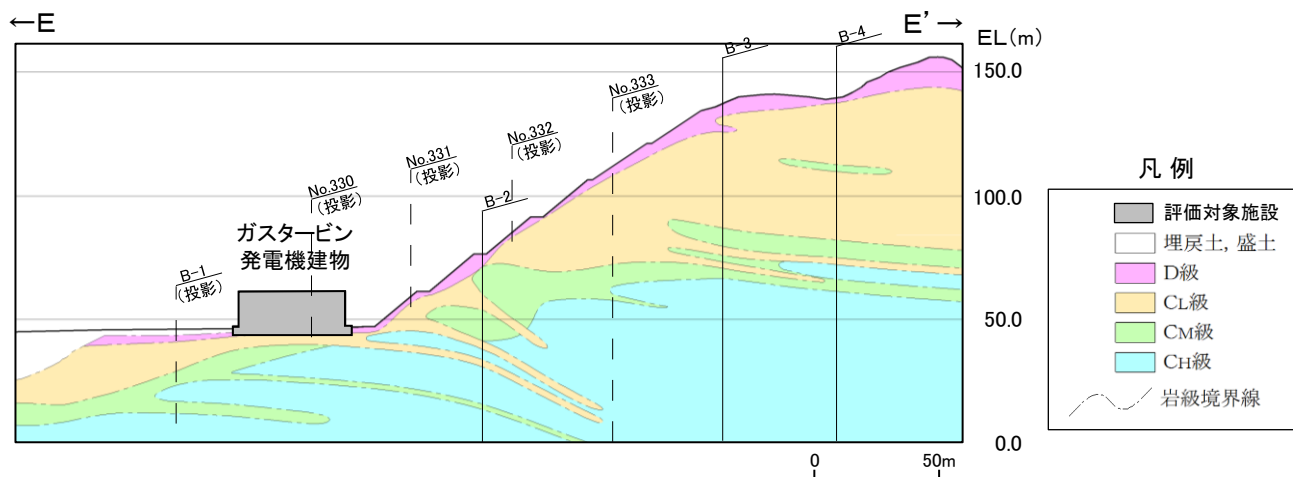


図 3.1-8 ガスタービン発電機建物の地質断面図 (E-E' 断面)

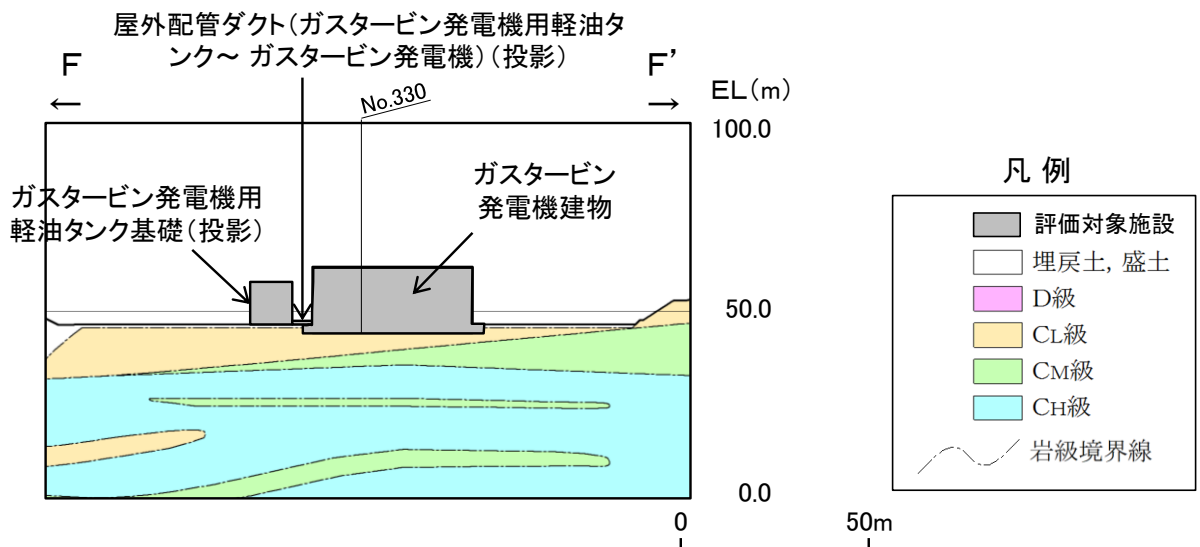


図 3.1-9 ガスタービン発電機建物等の地質断面図 (F-F' 断面)





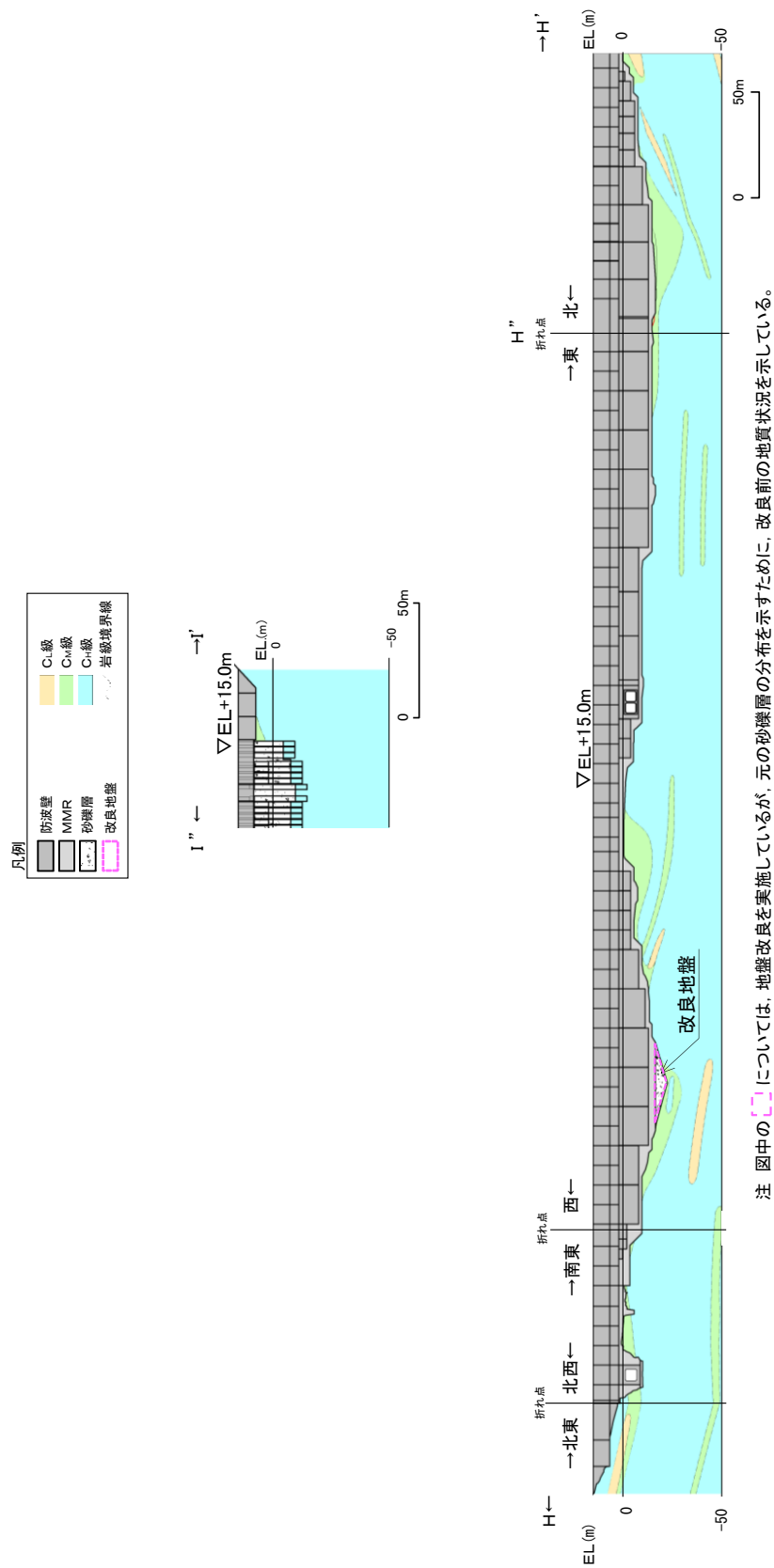


図 3.1-11 防波壁（波返重力擁壁）の地質断面図（H-H'， I'' - I' 断面）

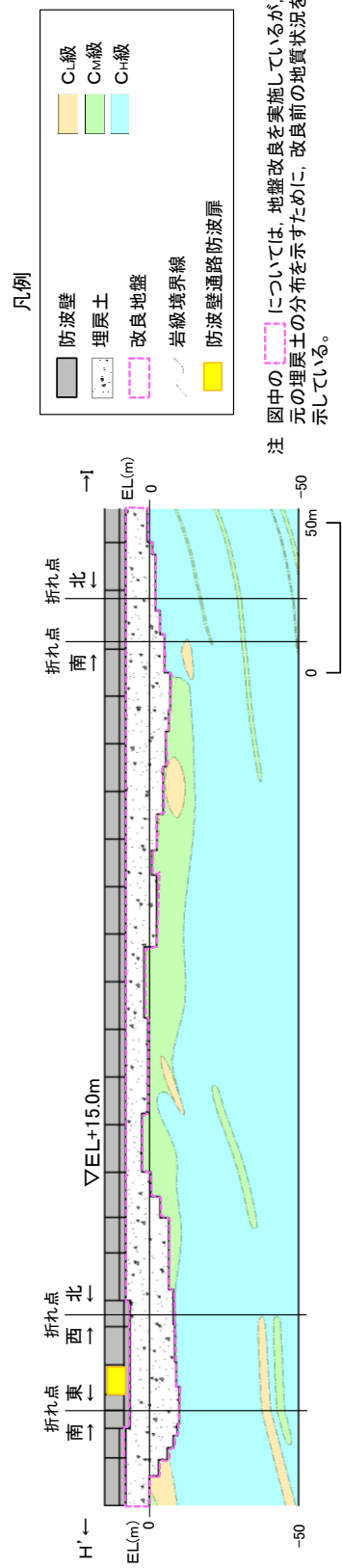
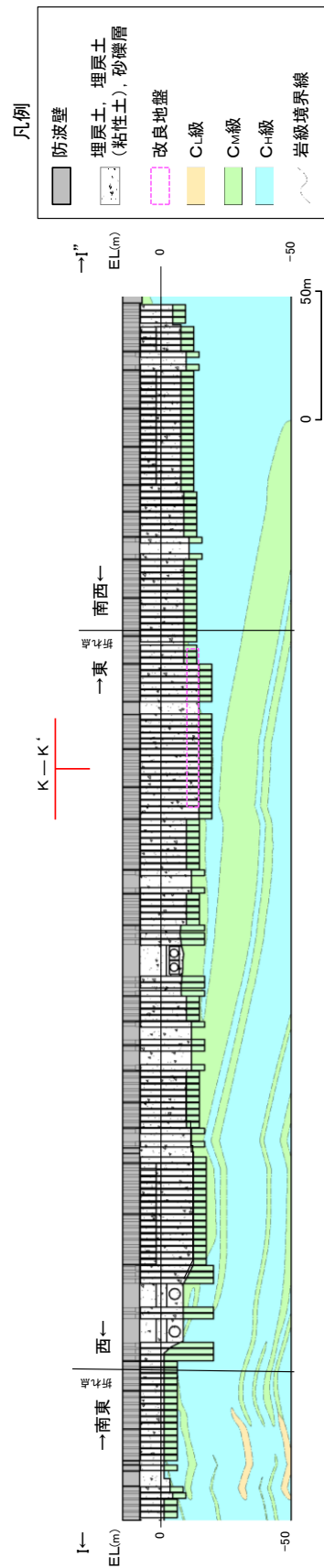


図 3.1-12 防波壁（逆T擁壁）の地質断面図（H' - I 断面）



注1 図中の杭筋については、杭が位置しているが、埋戻土の形状を示すために、周辺地盤の地質状況を示している。  
 注2 図中の [ ] については、地盤改良を実施しているが、元の砂礫層の分布を示すために、改良前の地質状況を示している。

図 3.1-13 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地質断面図（I-I''断面）

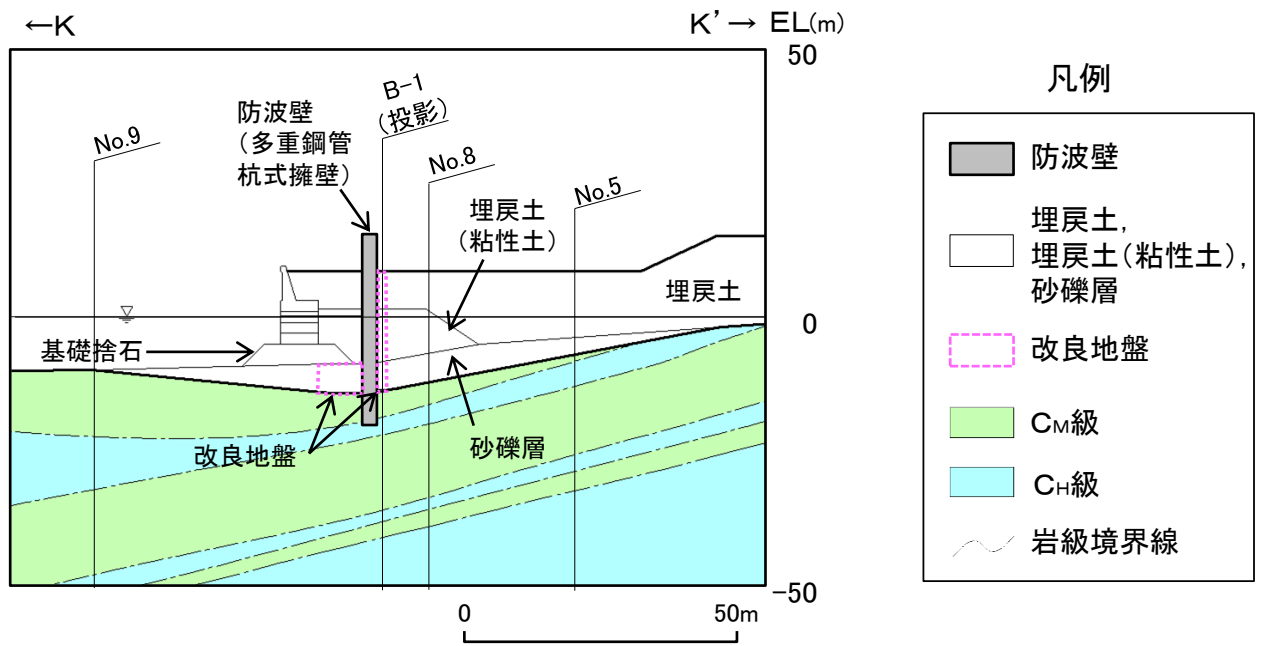


図 3.1-14 防波壁 (多重鋼管杭式擁壁) の地質断面図 (K-K'断面)

### 3.2 対象施設周辺の地質状況整理結果

対象施設の配置図を図 3.2-1 に示す。「3.1 対象施設周辺の地質」において作成した地質断面図等より、対象施設周辺の地質分布状況を整理した結果を表 3.2-1 に示す。これらの地質に対し、図 3.1-1 に示すような広範囲における調査結果等に基づき解析用物性値を設定した。

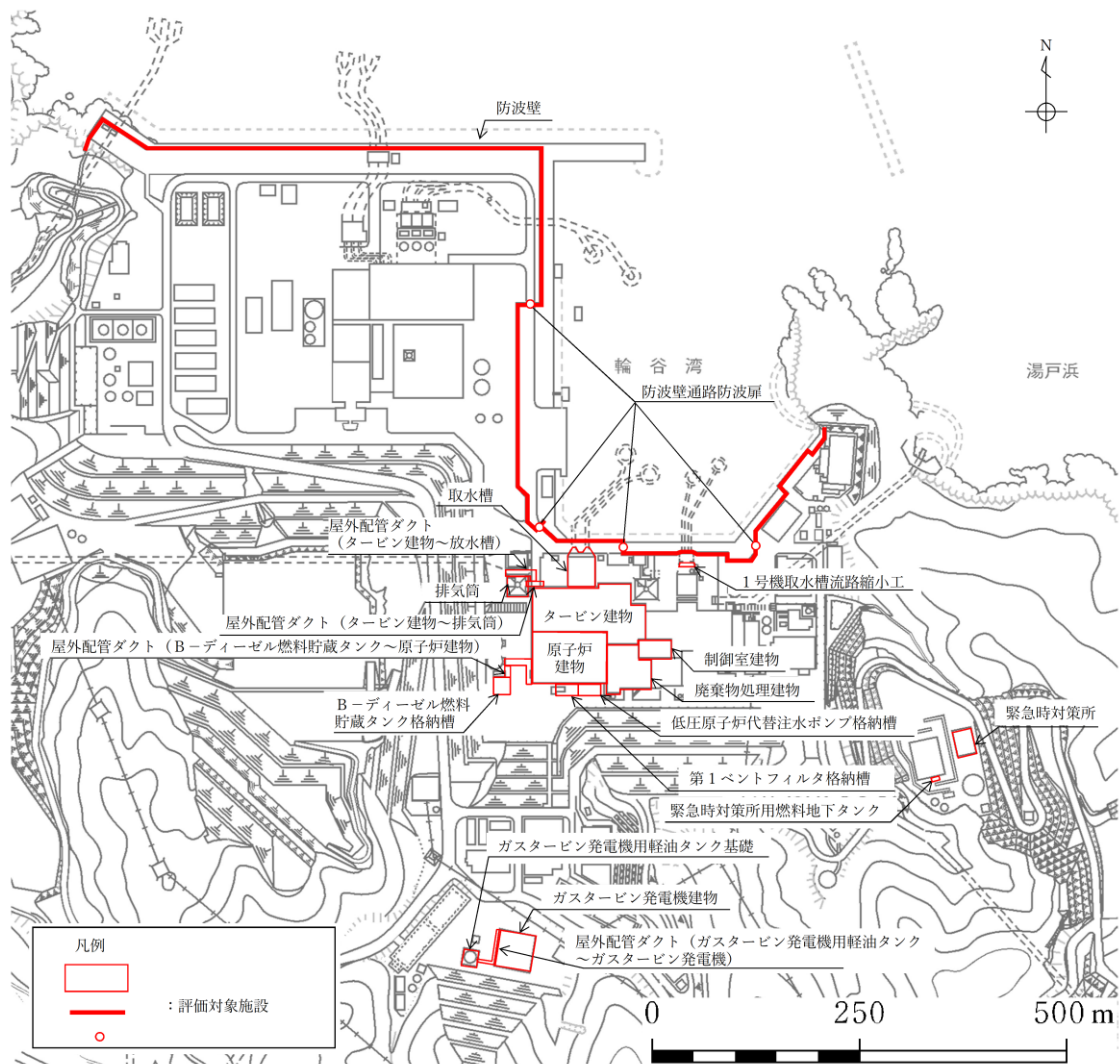


図 3.2-1 対象施設の配置図

表 3.2-1 対象施設周辺の地質分布一覧

施設名		埋戻土	砂礫層	埋戻土 (粘性土)	改良 地盤	岩盤	MMR	碎石
建物・ 構築物	原子炉建物	●	—	—	—	●	●	—
	タービン建物	●	—	—	—	●	●	—
	廃棄物処理建物	●	—	—	—	●	○	—
	制御室建物	●	—	—	—	●	○	—
	排気筒	●	—	—	—	●	●	—
	緊急時対策所	—	—	—	—	●	—	—
	ガスタービン発電機建物	●	—	—	—	●	—	—
土木 構造物	取水槽	●	—	—	—	●	●	—
	取水管	—	—	—	—	○	—	●
	取水口	—	—	—	—	●	—	—
	屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	●	—	—	—	○	●	—
	屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	●	—	—	—	○	●	—
	B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	●	—	—	—	●	●	—
	屋外配管ダクト（B-ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	●	—	—	—	●	●	—
	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	●	○	●	●	●	—	—
	防波壁（逆T擁壁）	●	—	—	●	○	—	—
	防波壁（波返重力擁壁）	●	○	—	○	●	●	—
	1号機取水槽流路縮小工	●	—	—	—	●	—	—
	防波壁通路防波扉	●	○	●	●	●	—	—
	第1ベントフィルタ格納槽	●	—	—	—	○	●	—
	低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	●	—	—	—	●	●	—
	緊急時対策所用燃料地下タンク	—	—	—	—	●	●	—
	ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	●	—	—	—	○	●	—
	屋外配管ダクト（ガスタービン発電機用軽油タンク～ガスタービン発電機）	●	—	—	—	○	●	—

凡例 ●：施設直下あるいは直近に分類している地質

○：施設直下及び直近には分布していないが、地質断面図内に現れる地質

—：施設直下及び直近には分布しておらず、地質断面図内にも現れない地質

### 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

#### 3.3.1 敷地の地下水位分布

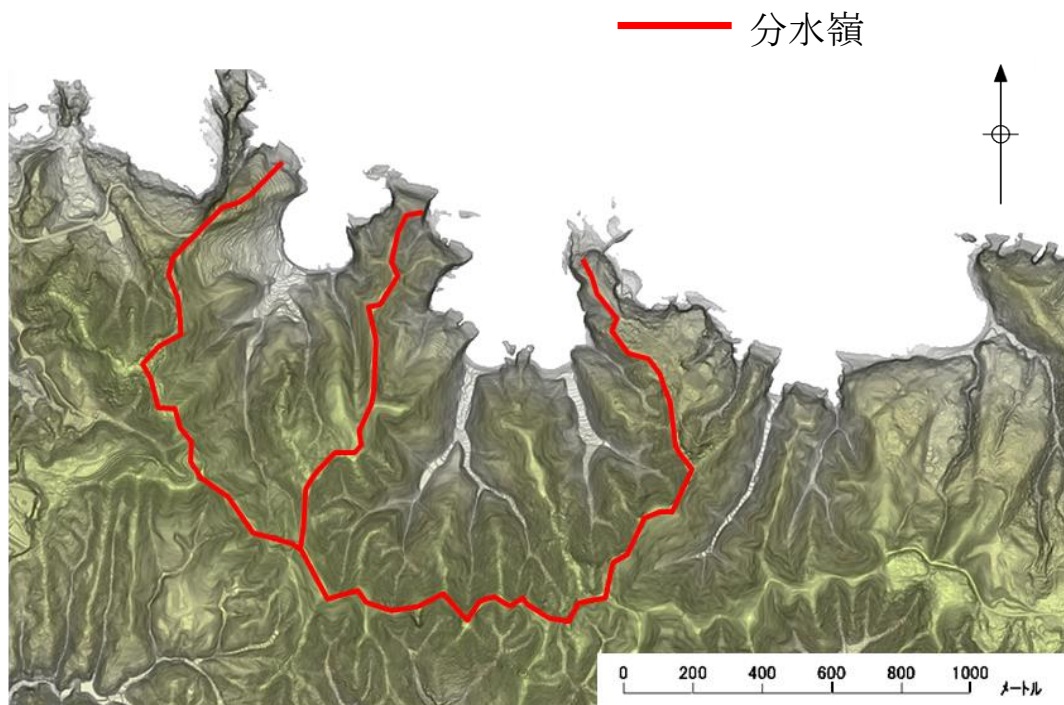
##### (1) 敷地の水文環境

敷地は、北側が海に面し、その他は山地に囲まれている。敷地の地形は、沿岸低山地と後背山地に大別され、沿岸低山地は標高約 80m 以下の山地で、緩慢な山頂面から海に急傾斜している。また、後背山地は標高約 80～160m の山地で、開折谷が発達しており、中央が扇状に大きく広がっている。

山側に降った雨は、蒸発散分を除き、表面水として敷地へ流入するものと盛土や岩盤内に浸透し地下水として敷地に流入するものに分かれる。表面水は排水路を通じて海へ排水される、また、地下水は主要建物周辺に設置した地下水位低下設備（既設）により集水後、排水路へ排水される。

なお、今後、地下水位低下設備の新設に伴う集水範囲の変更や、防波壁周辺の地盤改良等により、敷地内の地下水の流動場は従前の山から海に向かう 1 方向流れから将来的に変化すると考えられる。発電所周辺の分水嶺の分布状況を図 3.3-1 に、主な地表水の流れを図 3.3-2 に示す。





※航空レーザー測量で取得した2mメッシュのDEMデータに、空中写真により取得した旧地形のDEMデータを合成して作成したもの

図 3.3-1 発電所周辺の分水嶺の分布状況



-----> 主な地表水の流れ
 島根原子力発電所周辺の空中写真  
出典：国土地理院（2009年撮影）

図 3.3-2 発電所周辺の主な地表水の流れ

## (2) 観測記録

敷地の地下水位分布を把握するため、施設近傍に地下水位観測孔を設置し、地下水位の連続観測を実施した。

地下水位の観測記録\*は、降雨記録と併せて、3.3.2にて詳述する設計地下水位の設定において参照する浸透流解析モデルの検証に活用する。

観測孔は、EL 8.5m 盤、EL 15.0m 盤及び EL 44.0m 盤に設置している。

図 3.3-3 に地下水位観測孔位置図、表 3.3-1 に観測水位一覧表を示す。

観測水位の最高水位と平均水位の差分は、地下水位低下設備（既設）周辺の観測孔や山側の観測孔で相対的に大きく、海に近接する観測孔において相対的に小さくなっている。この要因として、敷地内より水位の低い海水面との釣り合いにより、海に近接する観測孔では地下水位が相対的に小さくなっていることが考えられる。

注記\*：一定期間の連続観測データを対象としており、観測期間中に工事や地形改変等の影響を受ける可能性があるデータは除外する。例えば、ボーリング調査実施時などに確認された孔内水位は、施工時の注水影響等を含む可能性があるため検証データには含めていない。

なお、観測水位には地下水位低下設備（既設）の効果が含まれているが、今後実施する地下水位低下設備（新設）等の効果は含まれていない。

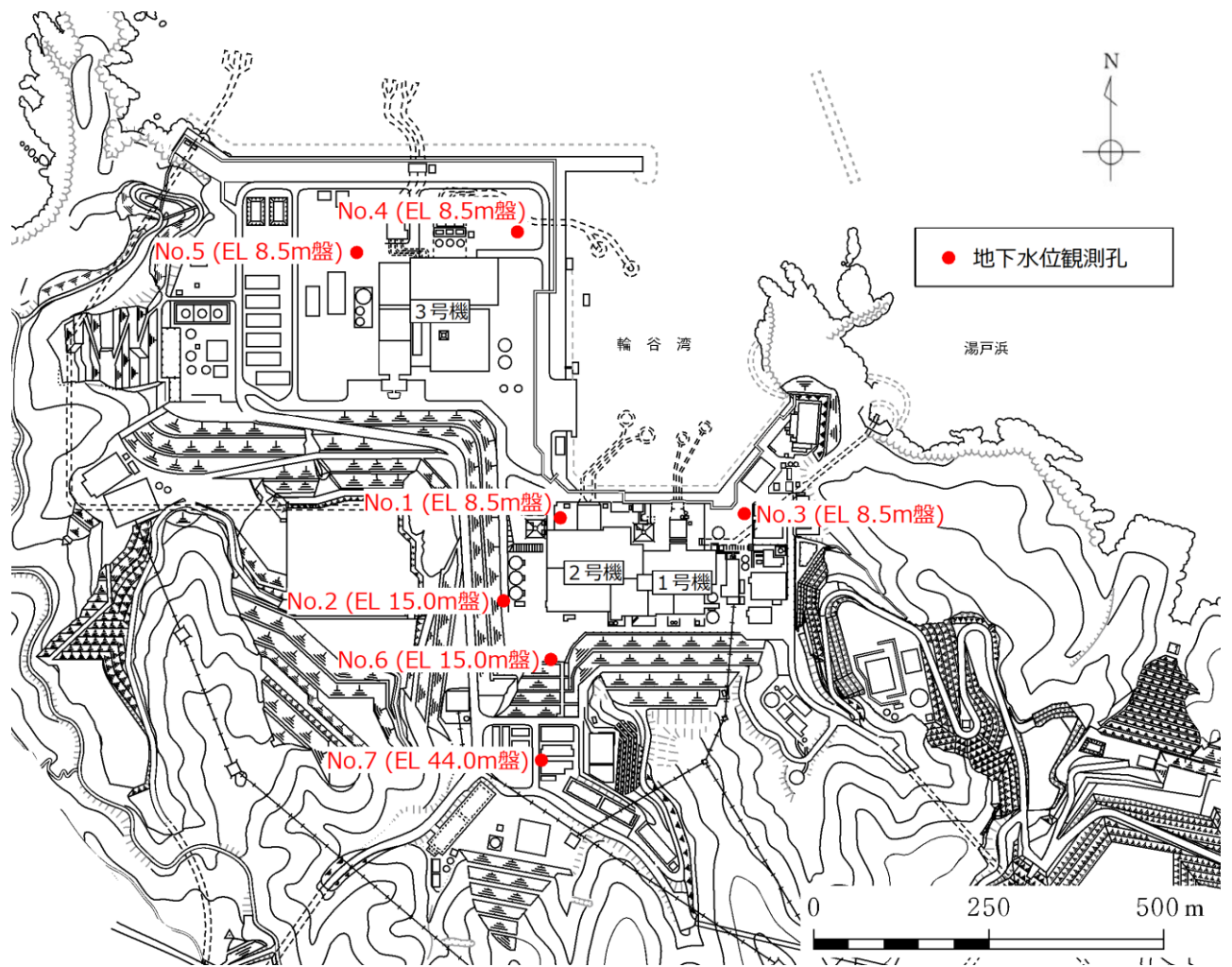


图 3.3-3 地下水位観測孔位置图

表 3.3-1 觀測水位一覽表

觀測孔	觀測期間	觀測水位 (EL m)		觀測最高 地下水位 計測時期	備考
		最高	平均		
No. 1	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	1.79	2018. 6. 29	EL 8.5m 盤
		平均	0.58		
No. 2	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	3.59	2018. 10. 1	EL 15.0m 盤
		平均	-2.26		
No. 3	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	1.43	2020. 7. 14	EL 8.5m 盤
		平均	0.82		
No. 4	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	4.03	2020. 7. 14	EL 8.5m 盤
		平均	2.27		
No. 5	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	4.12	2020. 7. 14	EL 8.5m 盤
		平均	1.85		
No. 6	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	6.74	2020. 7. 14	EL 15.0m 盤
		平均	-0.69		
No. 7	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	7.97	2018. 7. 7	EL 44.0m 盤
		平均	4.96		

### 3.3.2 耐震評価における設計地下水位設定方針

#### (1) 設計揚圧力及び設計地下水位の設定方針

防波壁の設置及び地盤改良により山から海に向かう地下水の流れが遮断され敷地内の地下水位が上昇するおそれがあることを踏まえ、原子炉建物等の建物・構築物に作用する揚圧力及び液状化影響の低減を目的とし、地下水位を一定の範囲に保持するための地下水位低下設備を設置する。

耐震評価において、地下水位の影響を受ける施設（以下「評価対象施設\*<sup>1</sup>」という。）について、この地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲（EL 8.5m 盤及び EL 15.0m 盤）においては、その機能を考慮した設計揚圧力及び設計地下水位を設定し水圧の影響を考慮する。また、地下水位低下設備の効果が及ばない範囲においては、自然水位\*<sup>2</sup>より保守的に高く設定した水位又は地表面にて設計地下水位を設定し水圧の影響を考慮する。

注記\*1：評価対象施設は、EL 8.5m 盤、EL 15.0m 盤、EL 44.0m 盤及び EL 50.0m 盤エリアに設置される設計基準対象施設及び常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備又は常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類がSクラスのもの）が設置される重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を除く）。

\*2：自然水位とは、地下水位低下設備等の人為的な措置の影響が含まれない地下水位を指す。浸透流解析結果により地下水位を設定する際には、地下水位低下設備の機能を考慮しない。

#### (2) 浸透流解析を用いた設計揚圧力及び設計地下水位の設定方法

上記(1)に示す設計揚圧力及び設計地下水位の設定方針を踏まえ、本章では地下水位低下設備の機能を考慮し浸透流解析により設計揚圧力及び設計地下水位を設定する手順について説明する。

##### a. 浸透流解析の目的

設置変更許可時の方針を踏まえ、妥当な解析モデルを用いて、将来的な施設配置を考慮した設計揚圧力及び設計地下水位を保守的に高く設定することを目的とする。

##### b. 解析手順の設定における考慮事項

地下水位低下設備の機能を考慮した設計揚圧力及び設計地下水位の設定において参照する浸透流解析については、以下の事項に考慮し解析フローを定めた。

- ・地下水流動場を表現するための情報が入手できることを確認する。
- ・地下水流動の特徴を表現できる解析コードを選択する。
- ・地下水流動場を表現できる解析領域を設定する。
- ・地下水流動に影響を与える要素（地形・地質構造，造成形状，水理特性，ドレーン及び地中構造物等）を適切にモデルに反映する。
- ・水理的挙動に影響を与えるパラメータを適切に設定する。
- ・地下水位の観測値と解析値の比較等によりモデルの妥当性を確認する。

c. 解析手順の設定

a. に示した解析の目的及び b. に示した考慮事項を踏まえ，水収支が閉じる領域として，敷地周辺の分水嶺までの範囲を対象とした再現解析モデル（1，2号機エリア及び3号機エリア）を作成し，観測降雨を付与した再現解析（定常解析）を行い，地下水位の観測値と解析値の比較を行うことでモデルの妥当性を確認する。

この上で，解析目的を達成するため，以下を考慮した予測解析（定常解析）を行い，評価対象施設の耐震設計において参照する解析水位を算定する。

- ・将来的な造成形状，ドレーン及び地中構造物等を反映する。
- ・保守的に地下水位の高い解析結果を得られるよう，ドレーンは信頼性の確保状況に応じて有効範囲を設定し，水理的挙動に影響を与えるパラメータを保守的に設定する。

上記により得られた解析水位を保守的に高く包絡するように，設計揚圧力及び設計地下水位を設定する。

設定した設計揚圧力及び設計地下水位が有する保守性について，観測水位との比較を行い，検証する。

また，設計地下水位より十分に低い地下水位を設定し，耐震性への影響検討を実施する。

d. 設計揚圧力及び設計地下水位の設定フロー

前項の整理を踏まえ，設計揚圧力及び設計地下水位の設定フローを図 3.3-4 に示す。

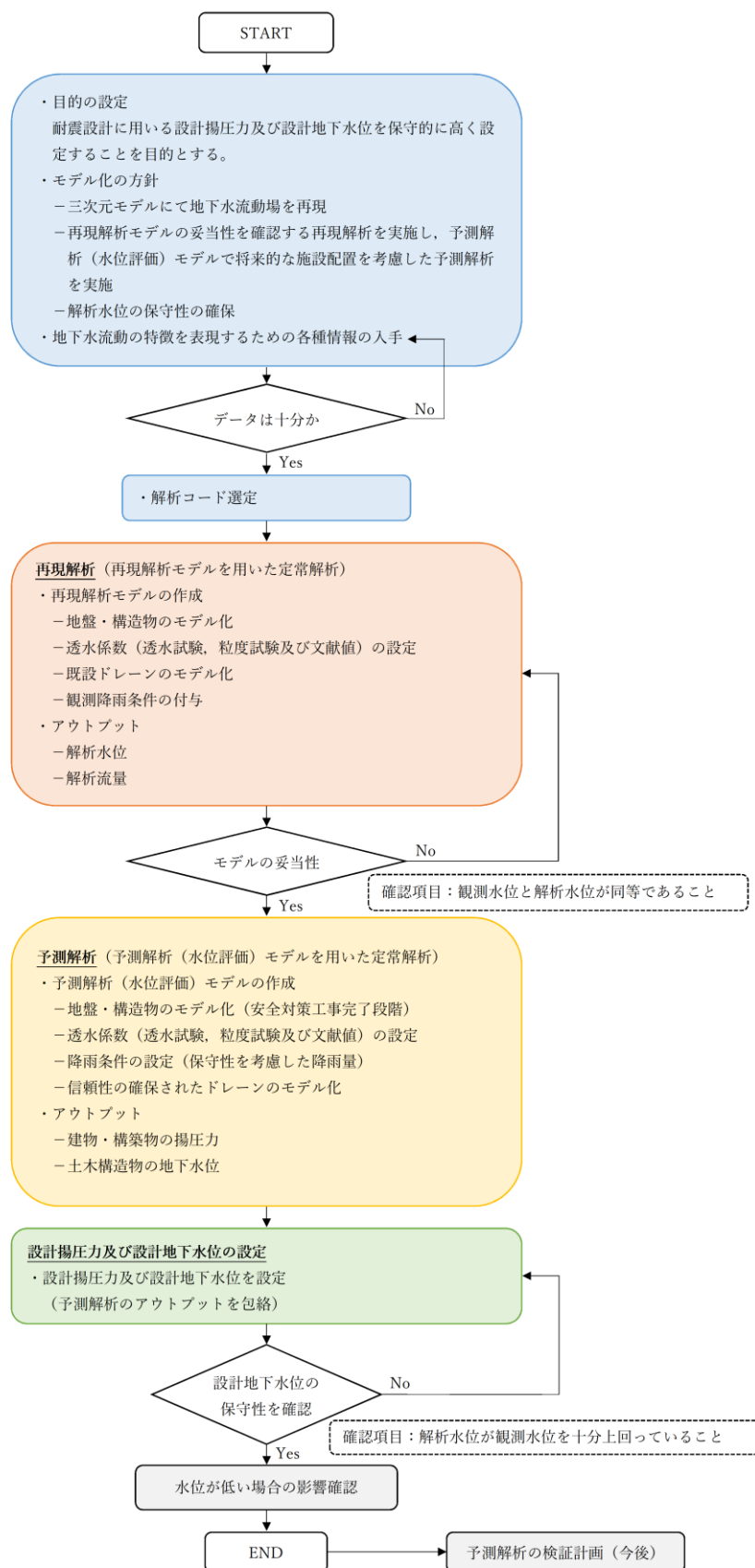


図 3.3-4 設計揚圧力及び設計地下水位の設定フロー



(3) モデル化方針の設定

a. モデル化の方針

島根原子力発電所においては、建設時の工事計画認可時に実施した浸透流解析（2次元浸透流解析）により原子炉建物等の設計揚圧力及び設計地下水位を設定している。

防波壁の設置及び地盤改良並びに地下水位低下設備の新設により、敷地内の地下水の流動場は従前の山から海に向かう1方向の流れから将来的に変化すると考えられることを踏まえ、3次元に拡張した浸透流解析により、定常的な地下水位分布を算定する。

モデルの妥当性は、分水嶺までの範囲を模擬した再現解析モデル（1，2号機エリア及び3号機エリア）を用いて地下水位観測孔（図3.3-5）における観測水位（表3.3-2）の再現性を確認することにより行うが、敷地の改変（安全対策工事に伴う造成等）時期を考慮し、再現性の確認を行う時期に対応したモデル化を行う。この際に用いる透水係数は、透水試験，粒度試験及び文献値に基づき設定する。

この上で、予測解析においては揚圧力及び地下水位が保守的に高く算出されるよう、降雨条件を保守的に設定した定常解析を行う。造成形状や構造物は安全対策工事完了段階に対応したモデル化を行い、地下水位低下設備は信頼性が確保された範囲に限定する。



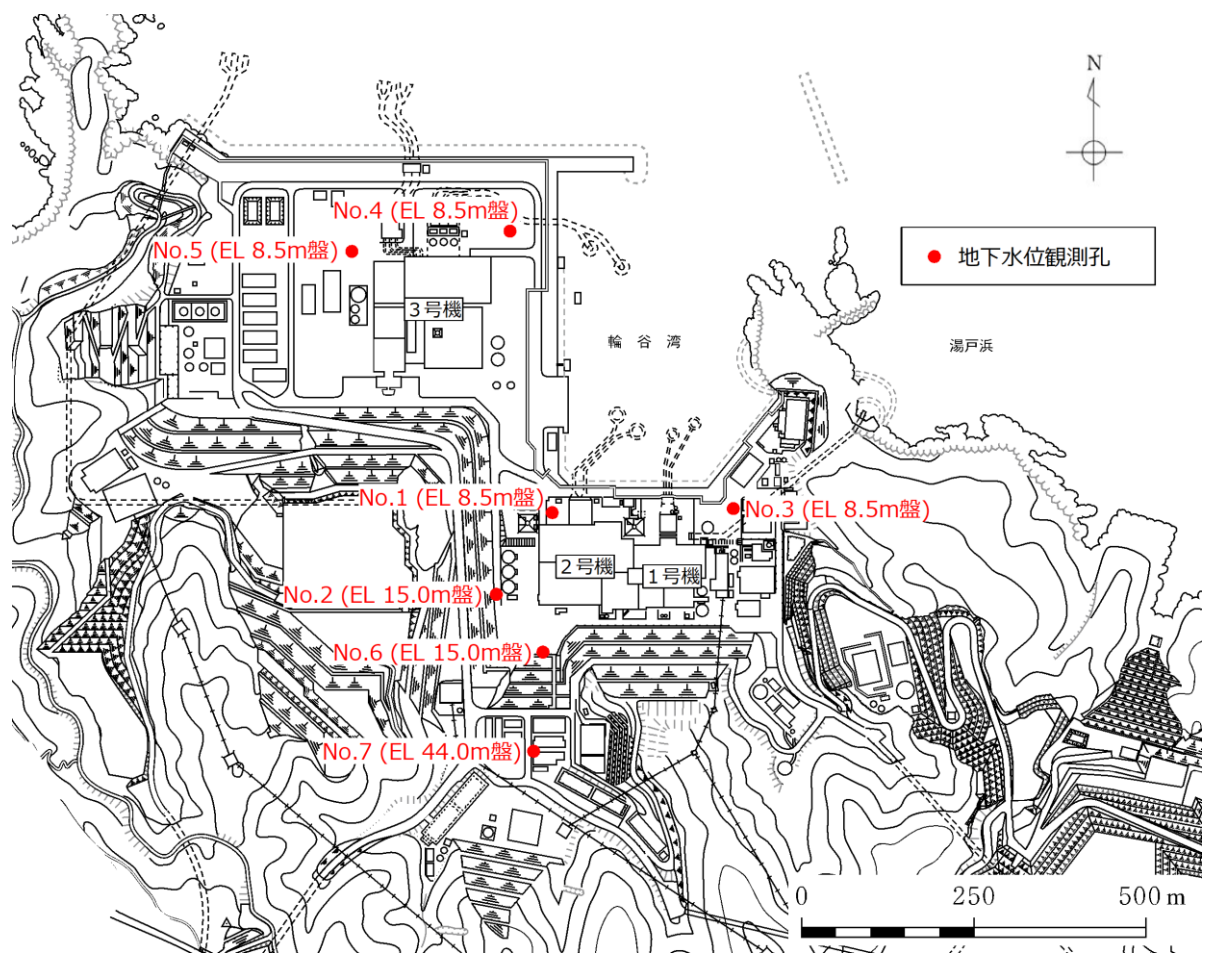


图 3.3-5 地下水位観測孔位置图

表 3.3-2 觀測水位一覽表

觀測孔	觀測期間	觀測水位 (EL m)		觀測最高 地下水位 計測時期	備考
		最高	平均		
No. 1	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	1. 79	2018. 6. 29	EL 8. 5m 盤
		平均	0. 58		
No. 2	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	3. 59	2018. 10. 1	EL 15. 0m 盤
		平均	-2. 26		
No. 3	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	1. 43	2020. 7. 14	EL 8. 5m 盤
		平均	0. 82		
No. 4	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	4. 03	2020. 7. 14	EL 8. 5m 盤
		平均	2. 27		
No. 5	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	4. 12	2020. 7. 14	EL 8. 5m 盤
		平均	1. 85		
No. 6	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	6. 74	2020. 7. 14	EL 15. 0m 盤
		平均	-0. 69		
No. 7	2014. 11. 1~ 2020. 9. 30	最高	7. 97	2018. 7. 7	EL 44. 0m 盤
		平均	4. 96		

b. モデル化に用いるデータの収集

a. に示すモデル化の方針を具体化するにあたり，地下水流動場を表現するために参照するデータを表 3.3-3 に示す。

表 3.3-3 解析において参照するデータ

種類	内容	参照するデータ
地盤	・地形の情報（図面，数値標高モデル（DEM）等）	・DEM（数値標高モデル，国土地理院） ・工事記録による造成履歴 ・安全対策工事計画（工事完了時の状態）
	・敷地の地質・地質構造の情報（敷地造成を含む）	・地質調査に基づく敷地の地質・地質構造 ・敷地造成に係る図面等
気象	・降水量	・構内観測所データ ・気象庁データ
水理	・水理特性 ・検証において参照する地下水位観測記録	・原位置透水試験結果等 ・地下水位観測記録
構造物	・地中構造物	・工事記録 ・設計計算書等
排水設備等	・地下水位低下設備，構内排水	・工事記録 ・設計計算書等
その他	・既往の地下水位設定方法	・建設時の工事計画認可時において実施した2次元浸透流解析

c. データの十分性

b. の整理から，浸透流解析モデルの構築にあたり必要なデータが収集されていることを確認した。

また，モデルの妥当性の確認に用いる観測記録については，主要な評価対象施設が配置される EL 8.5m 盤及び EL 15.0m 盤並びに施設や敷地造成が地下水位に与える影響が相対的に小さいと考えられる EL 44.0m 盤の高台を含めて偏りなく複数設定しており，これらのデータを活用し地下水流動場の検証を行うことが可能であることを確認した。

d. 解析コードの選定

地下水の挙動を取扱うことができる Dtransu-3D・EL，バージョン：ver.2af90MP を使用する。また，解析コードの適用性について参考資料 1 に示す。

e. 対象施設の抽出

評価対象施設の配置を図 3.3-6 に示す。

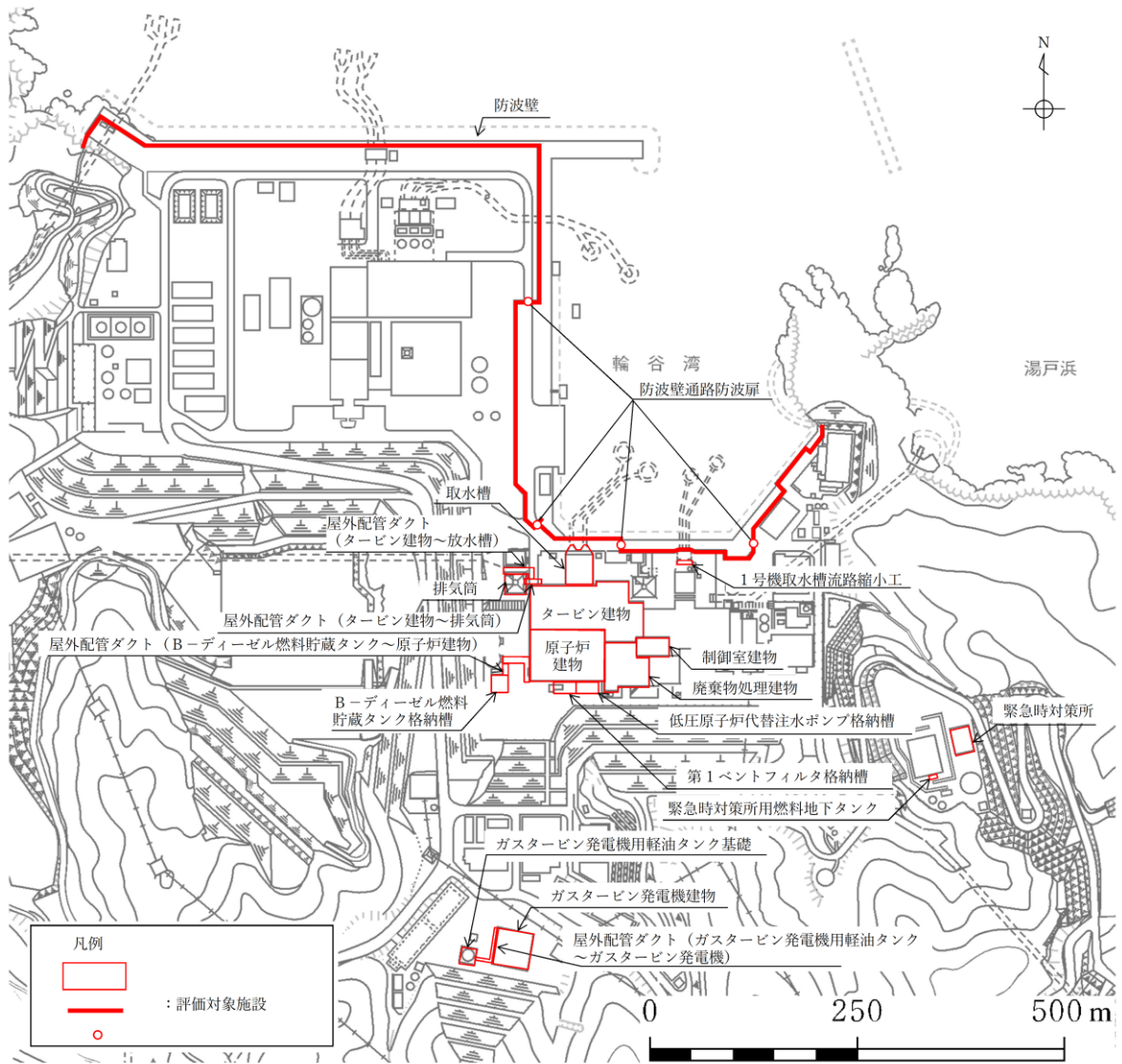


図 3.3-6 屋外の評価対象施設の配置図

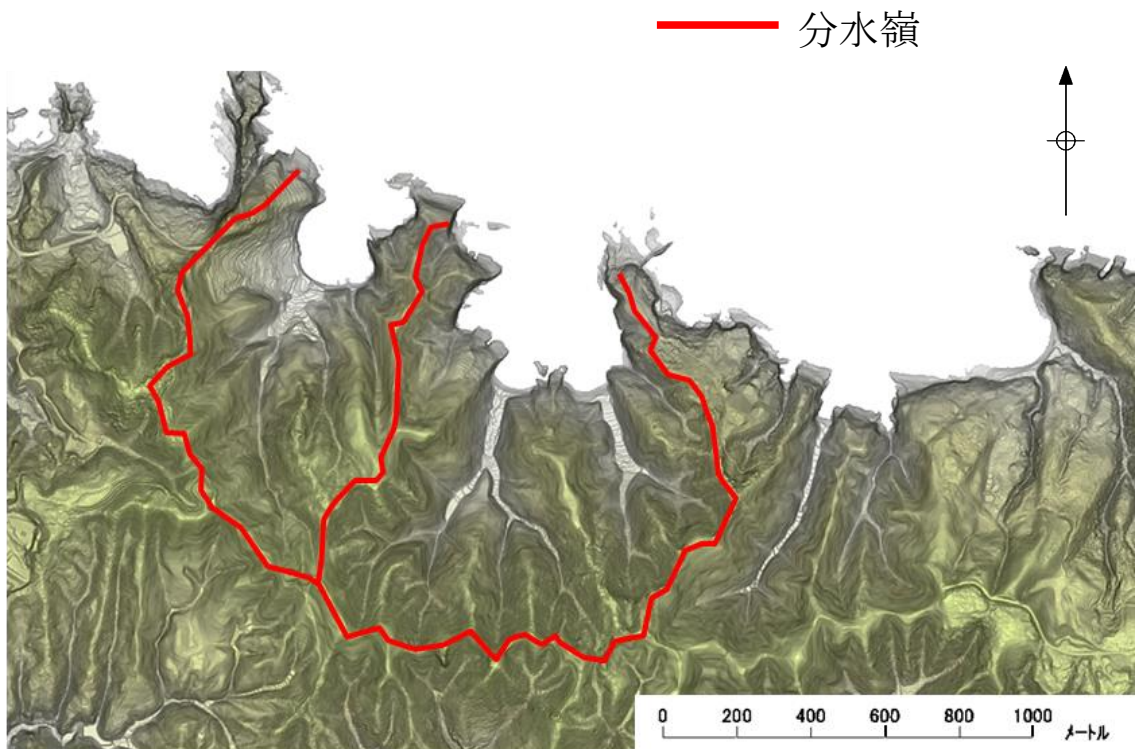
(4) 再現解析

a. 再現解析モデルの作成

(a) モデル化範囲の設定

再現解析モデルは，評価対象施設を含む分水嶺までの範囲をモデル化する。

モデル作成の際に参照した敷地内の分水嶺を図 3.3-7 に，再現解析モデルの鳥瞰図を図 3.3-8 及び図 3.3-9 に示す。



※航空レーザー測量で取得した2mメッシュのDEMデータに，空中写真により取得した旧地形のDEMデータを合成して作成したもの

図 3.3-7 敷地内の分水嶺

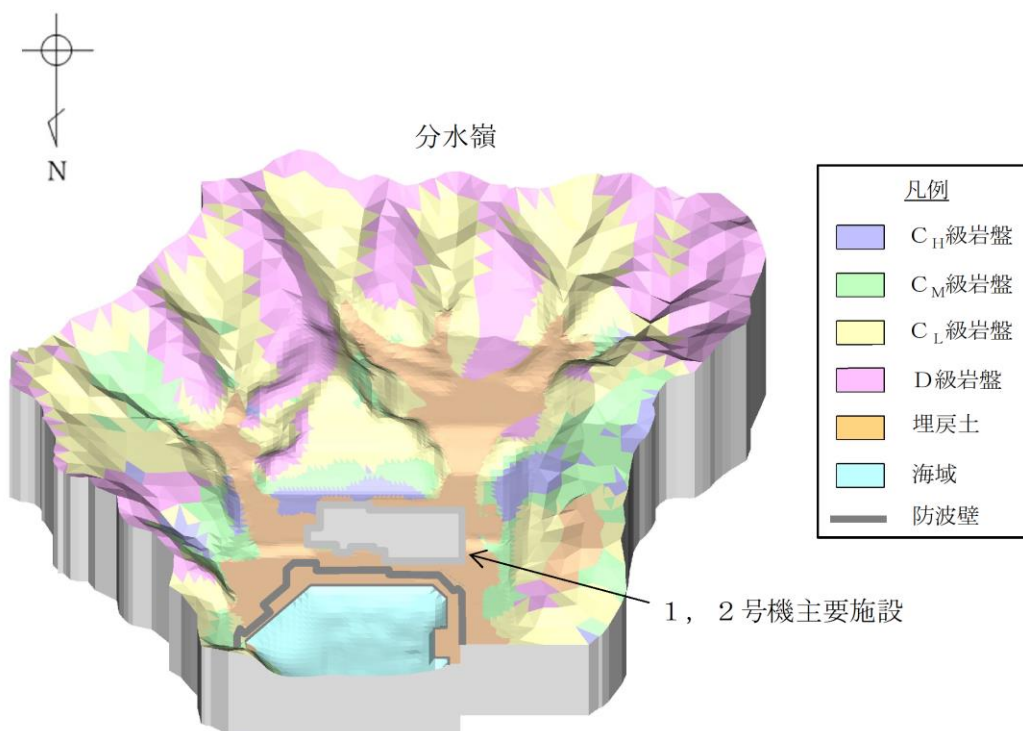


図 3.3-8 再現解析モデル鳥瞰図（1，2号機エリア）

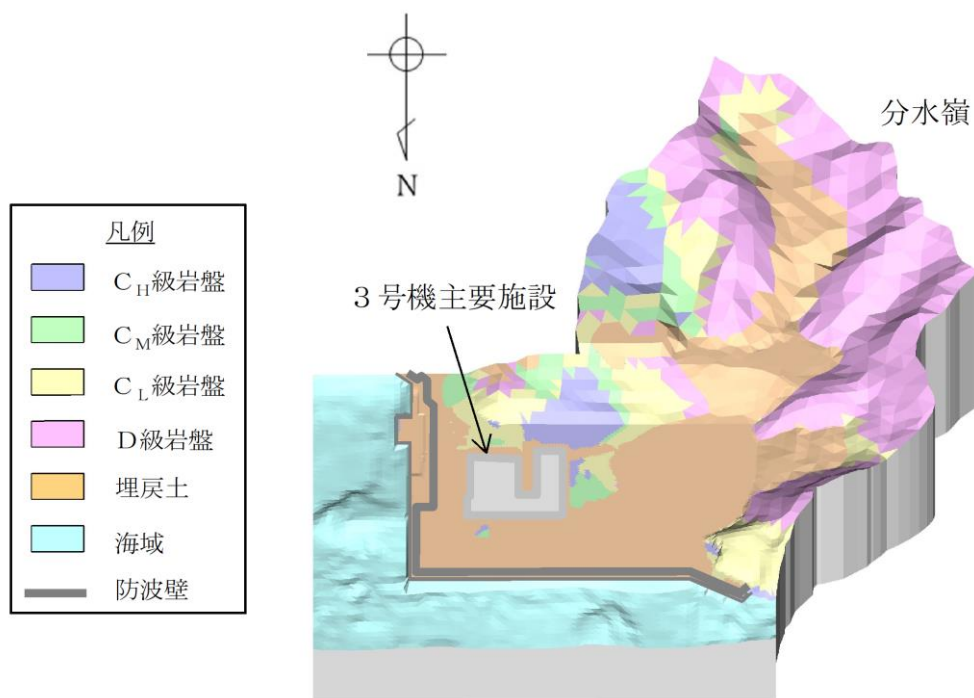


図 3.3-9 再現解析モデル鳥瞰図（3号機エリア）

(b) 格子サイズ

モデルの格子サイズについて、3次元浸透流解析により得られた解析水位に基づき設定される設計地下水位が評価対象施設の耐震設計における解析断面上に反映される（2次元動的有限要素法を用いる場合など）ことを考慮し、格子寸法を1～40m程度に設定した（構造物近傍は最小1m程度、山側領域は40m程度）。

(c) 検証期間の設定

検証対象とする観測水位は、地下水位観測開始以降で、一定期間の連続観測水位データが取得されている2016年4月～2018年8月とする。

(d) 地盤・構造物のモデル化

イ. 地形

地形（造成形状）は、検証期間における状態を考慮し設定した。

ロ. 地盤

敷地の地質構造や発電所建設時の敷地造成形状を考慮し設定した。シームについてはモデル化していない。

ハ. 構造物

- ・検証期間における設置状況を踏まえてモデル化した（検証期間において完成していない構造物等は考慮しない）。
- ・非岩着で基礎の浅い構造物等は、地下水流動への影響が軽微でありモデル化しない。
- ・舗装部への降雨は、構内排水路を介して海へと排水されることから考慮しない。
- ・建物の屋根排水は構内排水路に集水されるため考慮しない。

(e) 透水係数の設定

地盤及び施設の透水係数は、透水試験、粒度試験及び文献値に基づき設定する。

透水係数の設定値と設定根拠を表3.3-4に示す。



表 3.3-4 透水係数の設定値と設定根拠（再現解析モデルによる定常解析）

区分		設定値 (cm/s)	設定根拠
構造物, 改良地盤		$1 \times 10^{-5}$	管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・ 管理マニュアル(改訂版)* <sup>1</sup> に基づき設 定
岩盤	C <sub>H</sub> 級	$5 \times 10^{-5}$	試験結果の平均値に基づき設定
	C <sub>M</sub> 級	$6 \times 10^{-4}$	
	C <sub>L</sub> 級	$1 \times 10^{-3}$	
	D級	$2 \times 10^{-3}$	粒度試験結果を踏まえ, 土質試験の方 法と解説* <sup>2</sup> に基づきクレーガーの方法 * <sup>3</sup> により設定
砂礫層		$4 \times 10^{-3}$	試験結果の平均値に基づき設定
埋戻土		$2 \times 10^{-1}$	

注記\*1: H20.8 (財) 港湾空間高度化環境研究センター

\*2: H12.3 (社) 地盤工学会

\*3: 粒径加積曲線から求まる 20%粒径D<sub>20</sub> を用いて透水係数の概略値を推定する  
方法

(f) ドレーンのモデル化

ドレーンは、検証期間における供用状態に対応し、1～3号機のドレーン（既設）を考慮する（ドレーン（新設）は考慮しない）。ドレーン（既設）の配置図を図 3.3-10 に示す。

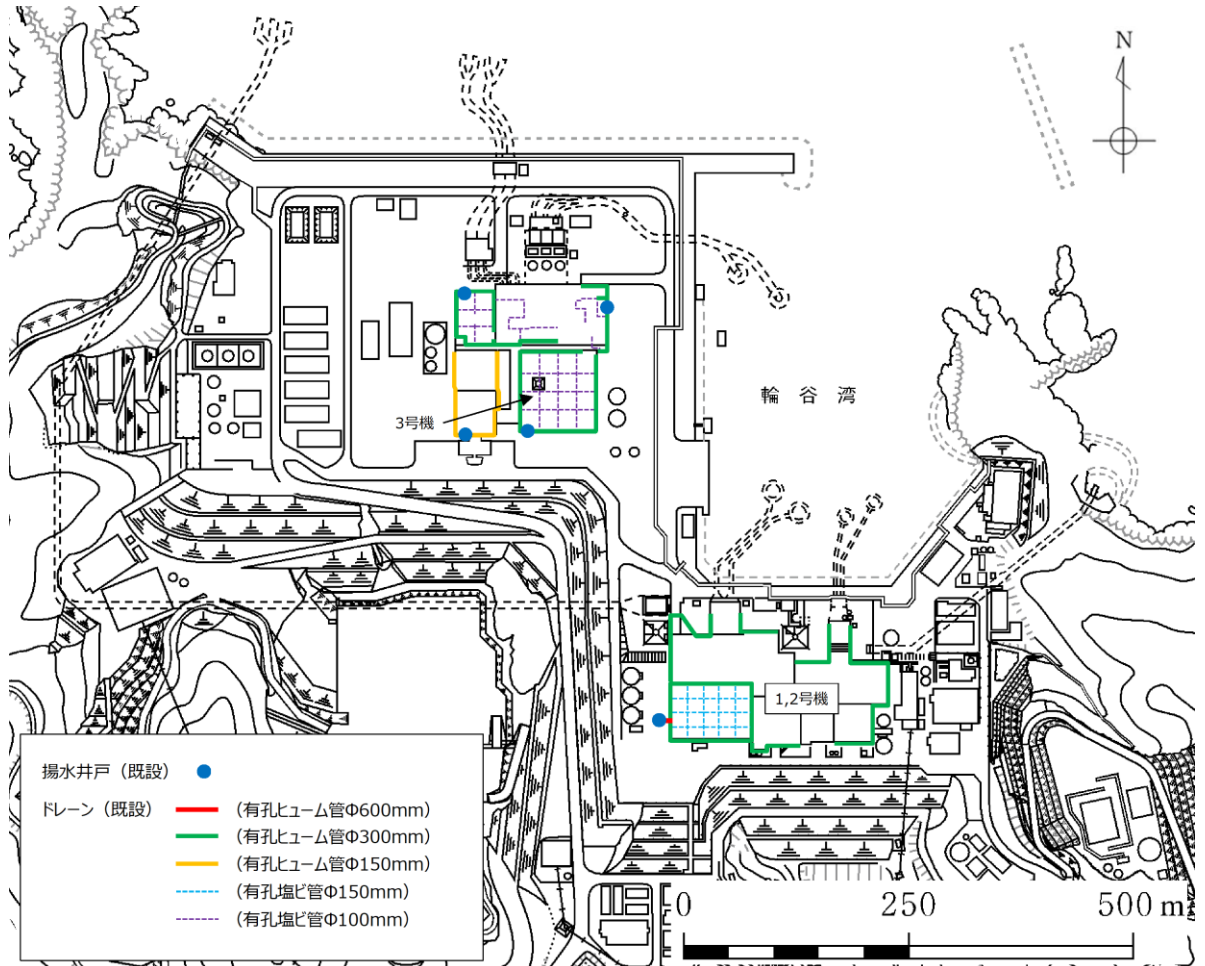


図 3.3-10 ドレーン（既設）配置図

(g) 浸透流解析条件まとめ（再現解析モデル）

表 3.3-5 に、再現解析モデルの解析条件一覧を示す。

表 3.3-5 再現解析モデルの概要

項目	再現解析モデル
目的	モデル化の妥当性を確認（観測記録の再現性を確保）
解析コード	Dtransu-3D・EL, バージョン：ver.2af90MP
解析領域	敷地を取り囲む分水嶺までを解析範囲とする  <p style="text-align: center;">1, 2号機エリア                      3号機エリア</p>
格子数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・平面格子数：1, 2号機エリア：約 2.1 万 3号機エリア：約 2.4 万</li> <li>・総格子数：1, 2号機エリア：約 121 万 3号機エリア：約 138 万</li> <li>・格子寸法：1~40m 程度（構造物近傍は最小 1m 程度, 山側領域は 40m 程度）</li> </ul>
解析種別	定常解析
検証期間	2016 年 4 月～2018 年 8 月
気象条件	降水量：構内観測所データ
モデル（地形）	検証期間に対応した状態
モデル（地盤）	検証期間に対応した状態
モデル（構造物）	検証期間に対応した状態
モデル（ドレーン）	ドレーン（既設）を管路として考慮
境界条件	実態に則した設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>・山側：閉境界</li> <li>・海側：H.W.L.に水位固定</li> <li>・ドレーン：管路としてモデル化</li> </ul>
透水係数	透水試験, 粒度試験*1 及び文献値*2
有効間隙率	物理試験及び文献値*3

注記\*1：土質試験の方法と解説に基づき設定

\*2：管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル（改訂版）に基づき設定

\*3：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）に基づき設定

b. モデルの妥当性に係る検証

再現解析モデルとして、検証期間に対応した地盤・構造物の配置をモデル化に反映し、透水試験、粒度試験及び文献値に基づき水理特性を設定した。この再現解析モデルに観測降雨を付与した定常解析結果から、検証期間中の各観測孔における平均水位と解析水位の比較を行った（図 3.3-11）。この結果、検証を行った期間において、解析水位は観測水位と整合的であることを確認した。

なお、設置許可時と同様に、観測降雨を与える再現解析（非定常解析）については参考として実施する。再現解析（非定常解析）の降雨に対する感度向上に関する取り組みについて参考資料 2 に示す。

以上から、設定した再現解析モデルの妥当性を確認した。

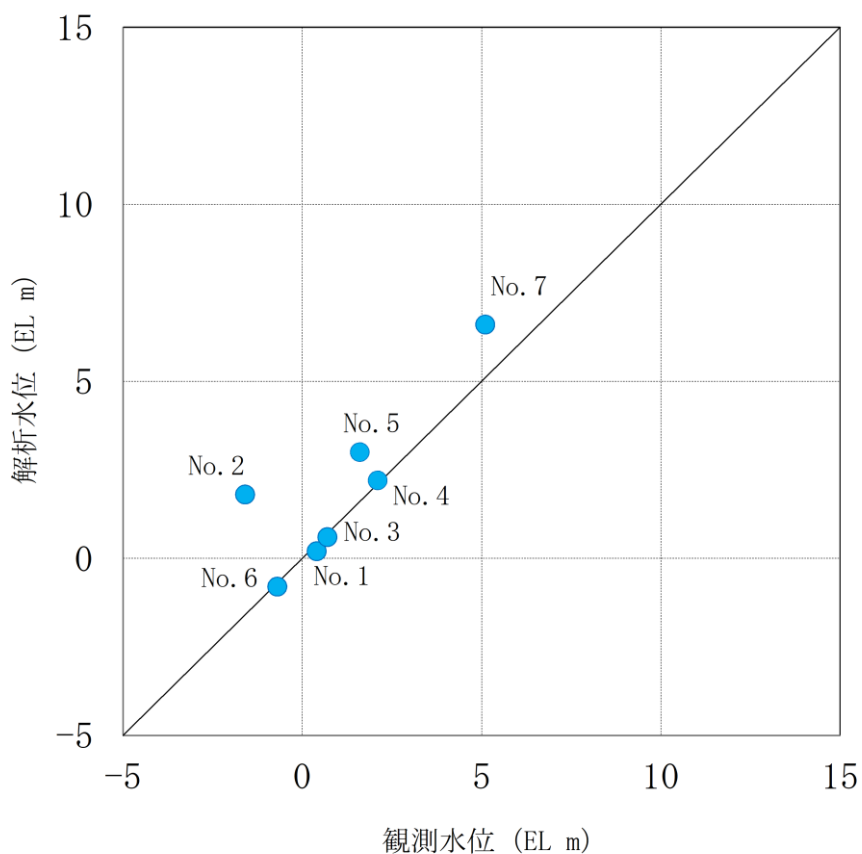


図 3.3-11 観測水位と解析水位の比較

(5) 予測解析

a. 予測解析（水位評価）モデルの概要

(a) モデル化範囲の設定

再現解析で妥当性を確認したモデルと同様の範囲をモデル化する。

(b) 格子サイズ

再現解析で妥当性を確認したモデルと同様の考え方で設定する。

(c) 地盤・構造物のモデル化

イ. 地形

地形（造成形状）については，安全対策工事完了段階における状態を考慮し設定した。

ロ. 地盤

再現解析で妥当性を確認したモデルをベースに，安全対策工事完了段階における防波壁周辺の改良地盤等を図 3.3-12 のとおり考慮した。

なお，シームについてはモデル化していない。

ハ. 構造物

再現解析で妥当性を確認したモデルをベースに，安全対策工事完了段階における構造物等の配置を表現するため，図 3.3-12 に示す構造物等についてモデル化を行った。

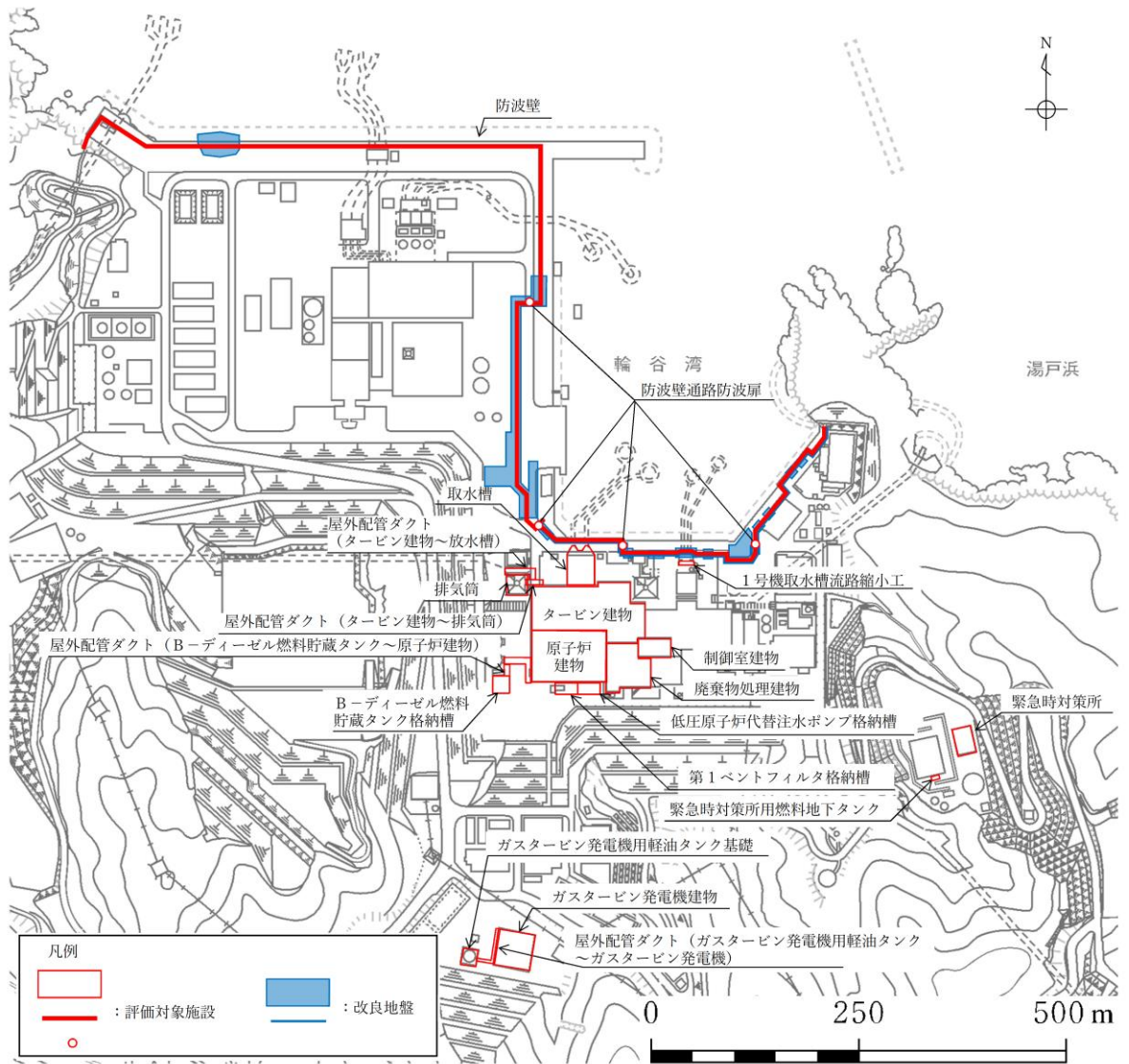


図 3.3-12 評価対象施設及び改良地盤の位置図

(d) 透水係数及び境界条件の設定

イ. 透水係数

再現解析で妥当性を確認したモデルと同様の考え方で設定する。

ロ. 降雨条件

降雨条件の設定は揚圧力、地下水位いずれも保守的に高く算出されるよう、松江地方気象台における年間降水量にばらつきを考慮した値（平均値+1 $\sigma$ ）に、今後の気候変動予測による降水量の変化\*を加味し、2,400mm/年を設定する。

この境界条件の設定における保守性について図 3.3-13 に示す。

図 3.3-13 は、観測降雨（1,540mm/年）及び予測解析で用いる降雨条件（2,400mm/年）を与えた際の解析モデル境界部における解析水位を示したものであり、予測解析で用いる降雨条件による解析水位が観測降雨による地下水位を大きく包絡していることから、設計揚圧力及び設計地下水位を保守的に高く評価できる。

注記\*：気象庁・環境省 「日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について」



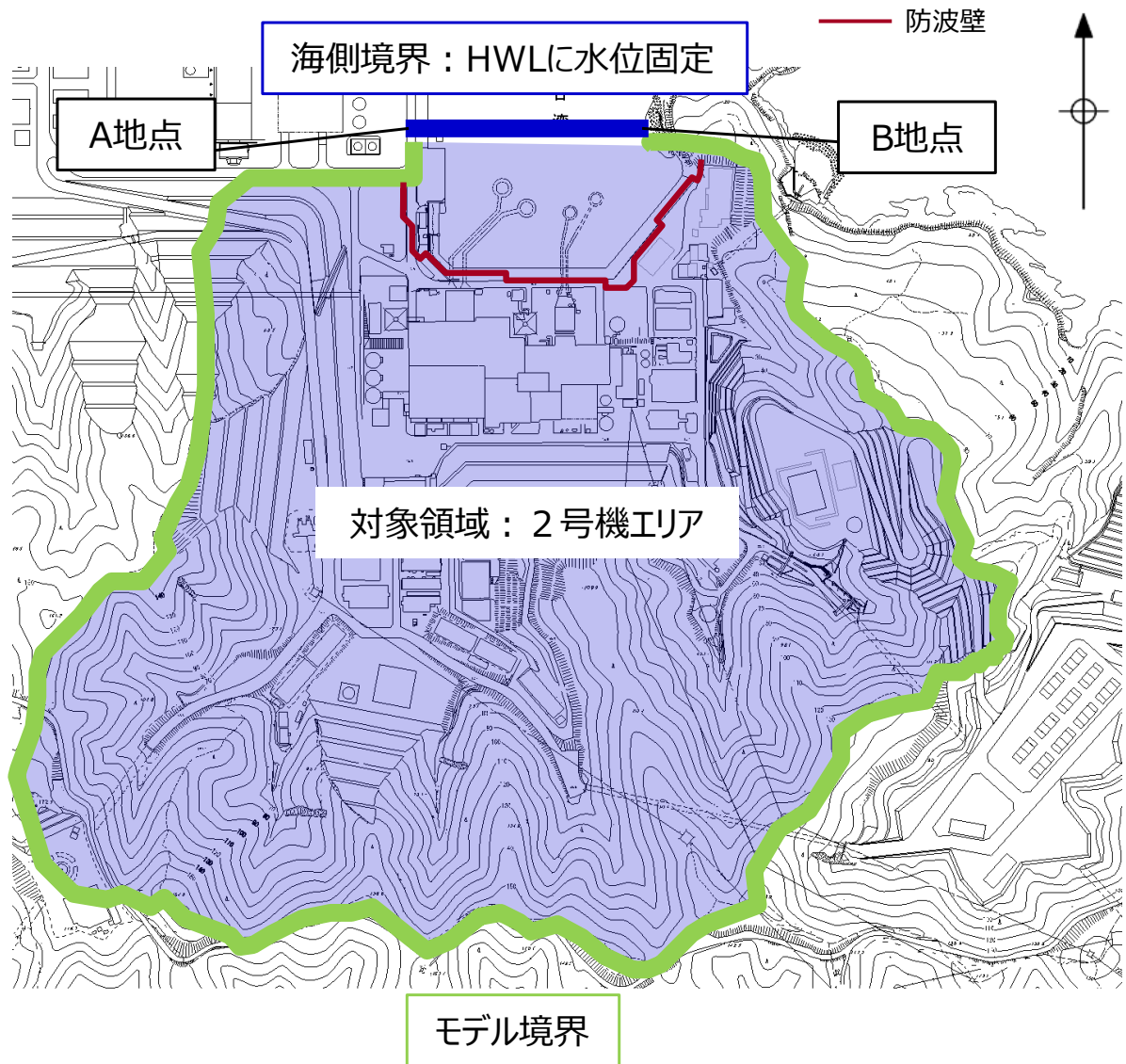
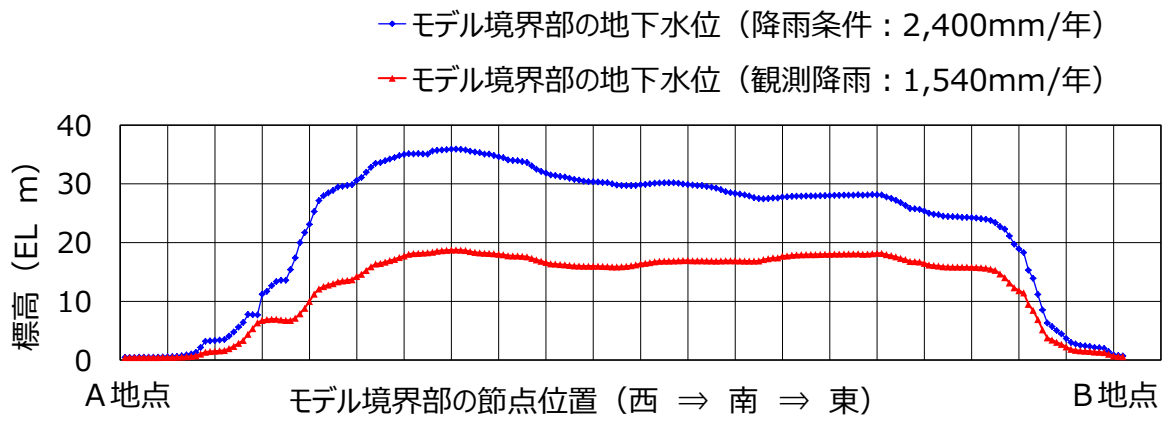


図 3.3-13 保守的な降雨条件の設定例



(e) ドレーンのモデル化

イ. 有効範囲の設定

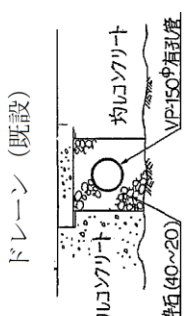
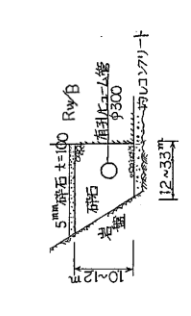

集水機能に寄与するドレーンの有効範囲について、ドレーン（新設）に限定することで保守性を確保する。

なお、評価対象施設のうち、原子炉建物、タービン建物、廃棄物処理建物、制御室建物及び排気筒を除く屋外重要土木構造物等の設計地下水位を設定する際には、地下水位が保守的に高く算定されるよう、ドレーン（新設）についても考慮しない。

ドレーンの種類と各観点に対する評価、並びに浸透流解析上の取扱いについて表 3.3-6 に示す。

また、予測解析において参照する地下水位低下設備の配置を図 3.3-14 に示す。

表 3.3-6 ドレーンの状態に対応した分類と浸透流解析上の取扱い

ドレーンの種類	各観点に対する評価			浸透流解析上の取扱い
	耐久性	耐震性	保守管理性	
<p>ドレーン (既設)</p>  	○	△	×	<p>岩盤や構造物に囲まれており、周囲を砕石で埋め戻しているため、機能に期待しない場合においても、砕石相当の透水性を有するが、方が一、経年的に周囲の埋戻土からの土砂流入により通水面積の減少が発生した場合、確実に土砂を除去できないため、砕石の間に土砂が流入した状態を仮定した透水係数 (<math>2 \times 10^{-1} \text{cm/s}</math>) を設定した。</p>
<p>ドレーン (新設)</p> 	○	○	○	<p>管の耐久性・耐震性が確保され、構造を確認できるところから、大気圧解放状態とする。</p>

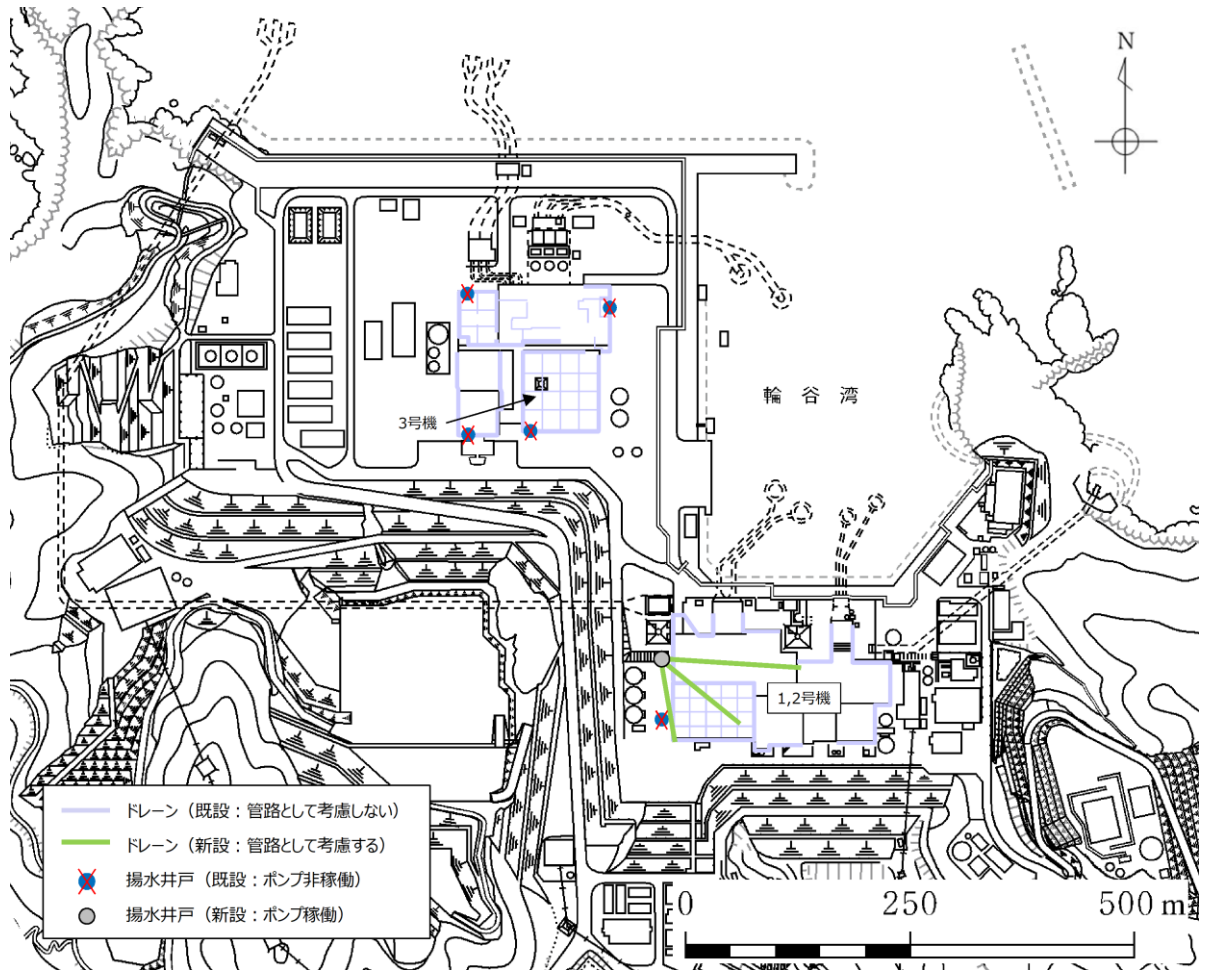


図 3.3-14 予測解析において参照する地下水位低下設備の配置

(f) 浸透流解析条件まとめ（予測解析（水位評価）モデル）

表 3.3-7 に、再現解析モデルと予測解析（水位評価）モデルの解析条件一覧を示す。

表 3.3-7 予測解析（水位評価）モデルの概要

項目	【参考】再現解析モデル	予測解析（水位評価）モデル	
目的	モデル化の妥当性を確認 （観測記録の再現性を確保）	建物・構築物における保守的な設計揚圧力を設定	屋外重要土木構築物等における保守的な設計地下水位を設定
解析コード	Dtransu-3D・EL, バージョン：ver.2af90MP		
解析領域	敷地を取り囲む分水嶺までを解析範囲とする 		
格子数	<ul style="list-style-type: none"> <li>平面格子数：1, 2号機エリア：約 2.1 万 3号機エリア：約 2.4 万</li> <li>総格子数：1, 2号機エリア：約 121 万 3号機エリア：約 138 万</li> <li>格子寸法：1～40m 程度（構築物近傍は最小 1m 程度、山側領域は 40m 程度）</li> </ul>		
解析種別	定常解析		
検証期間	2016 年 4 月～2018 年 8 月	—	
気象条件	降水量：構内観測所データ	保守的な降水量として、2,400mm/年を考慮	
モデル（地形）	検証期間に対応した状態	安全対策工事完了段階に対応した状態	
モデル（地盤）	検証期間に対応した状態	安全対策工事完了段階に対応した状態（防波壁周辺の改良地盤等を考慮）	
モデル（構築物）	検証期間に対応した状態	安全対策工事完了段階に対応した状態	
モデル（ドレーン）	ドレーン（既設）を管路として考慮	既設：管路として考慮しない 新設：管路として考慮	既設：管路として考慮しない 新設：管路として考慮しない
境界条件	実態に則した設定 ・山側：閉境界 ・海側：H.W.L.に水位固定 ・ドレーン：管路としてモデル化	保守的な設定 ・山側：閉境界 ・海側：H.W.L.に水位固定 ・ドレーン：新設のみ計画高に水位固定	更なる保守的な設定 ・山側：閉境界 ・海側：H.W.L.に水位固定
透水係数	透水試験，粒度試験*1及び文献値*2		
有効間隙率	物理試験及び文献値*3		

注記\*1：土質試験の方法と解説に基づき設定

\*2：管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル（改訂版）に基づき設定

\*3：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）に基づき設定

b. 解析結果

(a) 建物・構築物の設計揚圧力の設定に参照する地下水位分布

地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲（EL 8.5m 盤及び EL 15.0m 盤）に位置する建物・構築物の設計揚圧力の設定において参照する地下水位分布を図 3.3-15 に示す。

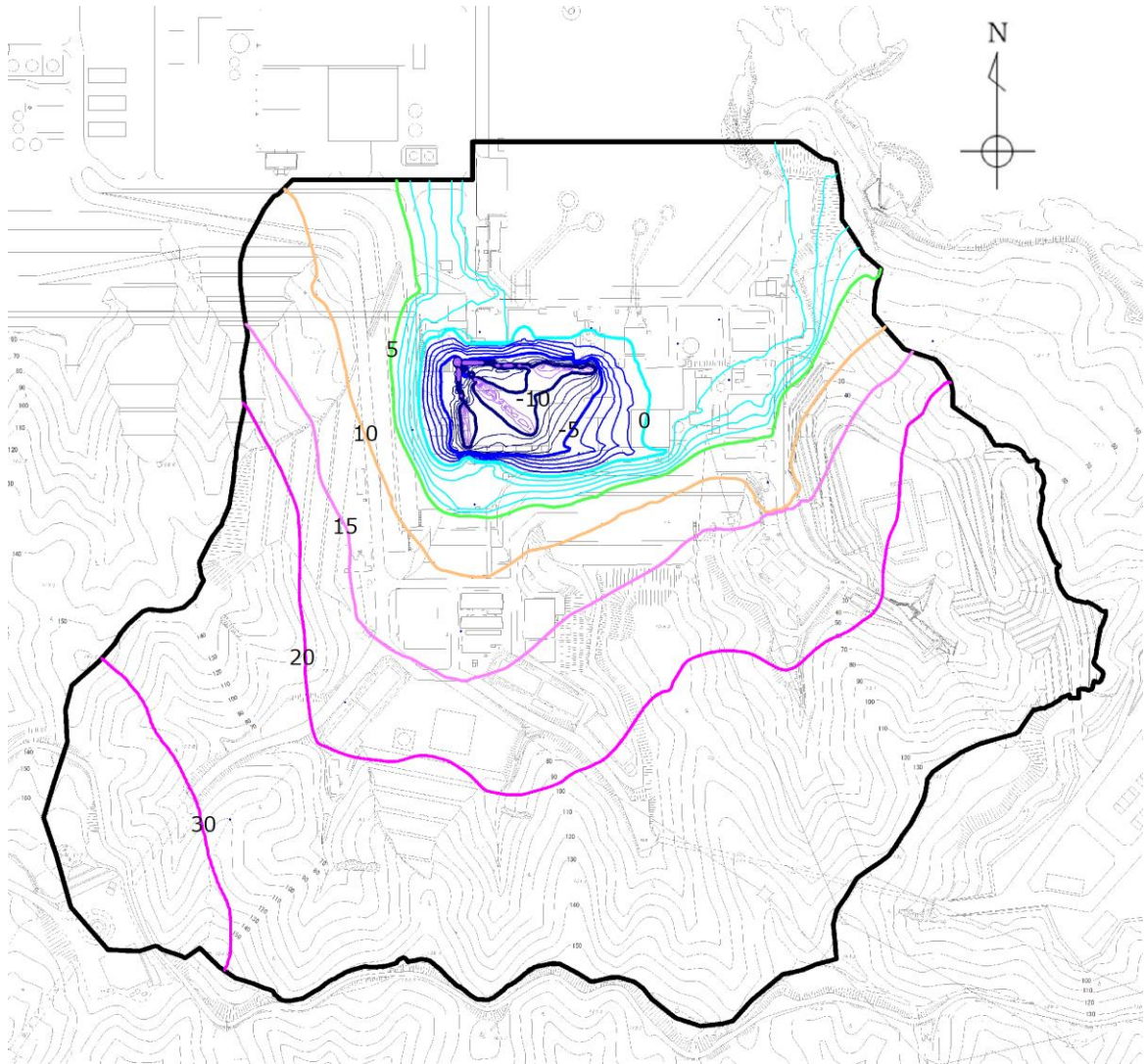
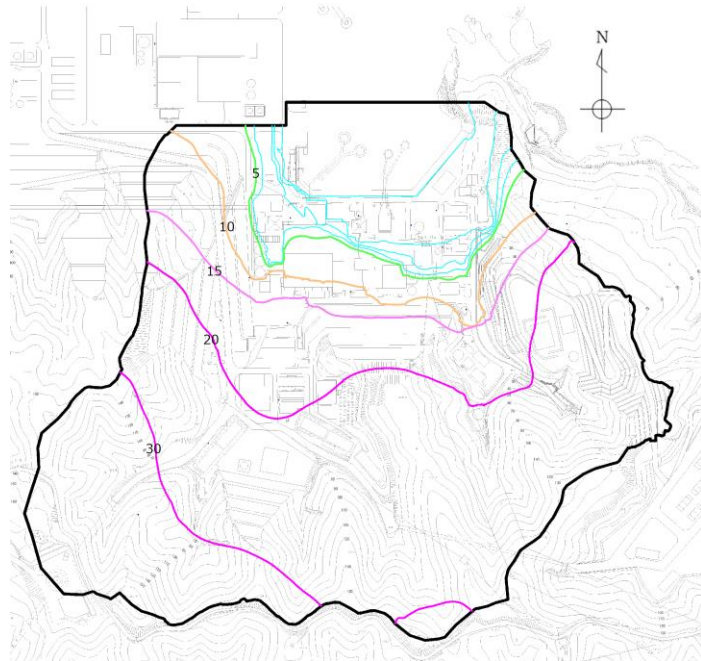


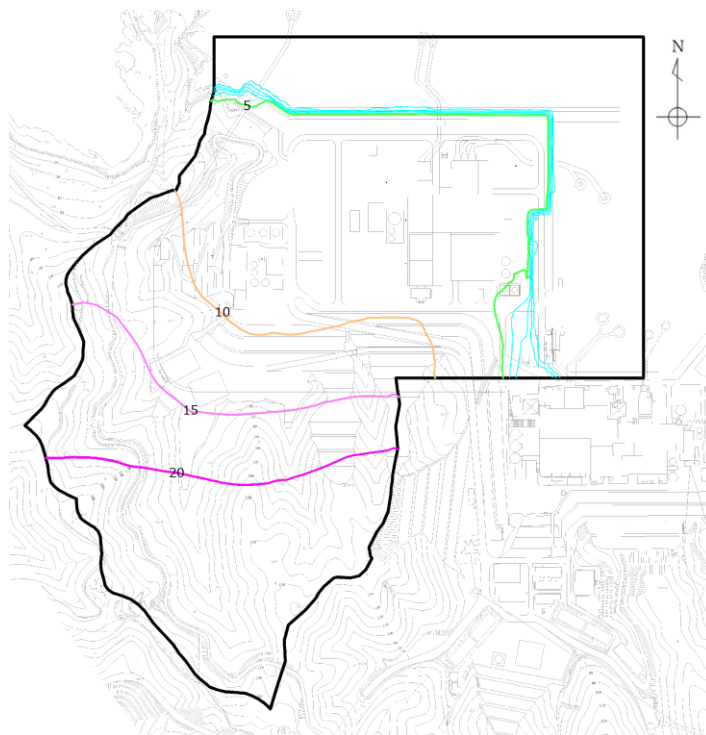
図 3.3-15 建物・構築物の設計揚圧力の設定において参照する敷地の地下水位分布 (EL m)



- (b) 屋外重要土木構造物等の設計地下水位の設定に参照する地下水位分布  
 屋外重要土木構造物等の設計地下水位の設定において参照する地下水位（自然水位）分布を図 3.3-16 に示す。



1, 2号機エリア



3号機エリア

図 3.3-16 屋外重要土木構造物等の設計地下水位の設定に参照する  
 地下水位（自然水位）分布（EL m）

c. 設計揚圧力及び設計地下水位の設定

予測解析に基づく設計揚圧力及び設計地下水位の設定結果を以下に示す。

(a) 建物・構築物の耐震評価における地下水位設定

地下水位低下設備の効果が及ぶ範囲（EL 8.5m 盤及び EL 15.0m 盤）に位置する建物・構築物について、予測解析により得られた地下水位・揚圧力並びにこれを参照した設計揚圧力を表 3.3-8 に示す。また、周辺の地下水位分布を図 3.3-17～図 3.3-19 に示す。

表 3.3-8 建物・構築物における設計揚圧力の設定一覧

施設名称 (基礎底面高さ)	建設時工事 計画認可時の 設計揚圧力	予測解析結果* ( 上段：揚圧力 ) ( 下段：地下水位 )	設計揚圧力	備考
原子炉建物 (EL-4.7m)	0.8t/m <sup>2</sup>	0.0t/m <sup>2</sup> ----- EL-9.9m	0.8t/m <sup>2</sup> (7.8kN/m <sup>2</sup> )	建設時の工 事計画認可 時からの変 更なし
タービン建物 (EL 0.0m)	2.0t/m <sup>2</sup>	0.0t/m <sup>2</sup> ----- EL-7.0m	2.0t/m <sup>2</sup> (19.6kN/m <sup>2</sup> )	
廃棄物処理建物 (EL 0.0m)	2.0t/m <sup>2</sup>	0.0t/m <sup>2</sup> ----- EL-5.5m	2.0t/m <sup>2</sup> (19.6kN/m <sup>2</sup> )	
制御室建物 (EL 0.1m)	0.0t/m <sup>2</sup>	0.0t/m <sup>2</sup> ----- EL-3.9m	0.0t/m <sup>2</sup> (0.0kN/m <sup>2</sup> )	
排気筒 (EL 2.0m)	0.0t/m <sup>2</sup>	0.0t/m <sup>2</sup> ----- EL-1.0m	0.0t/m <sup>2</sup> (0.0kN/m <sup>2</sup> )	

注記\*：建物底面に作用する平均揚圧力又は平均地下水位

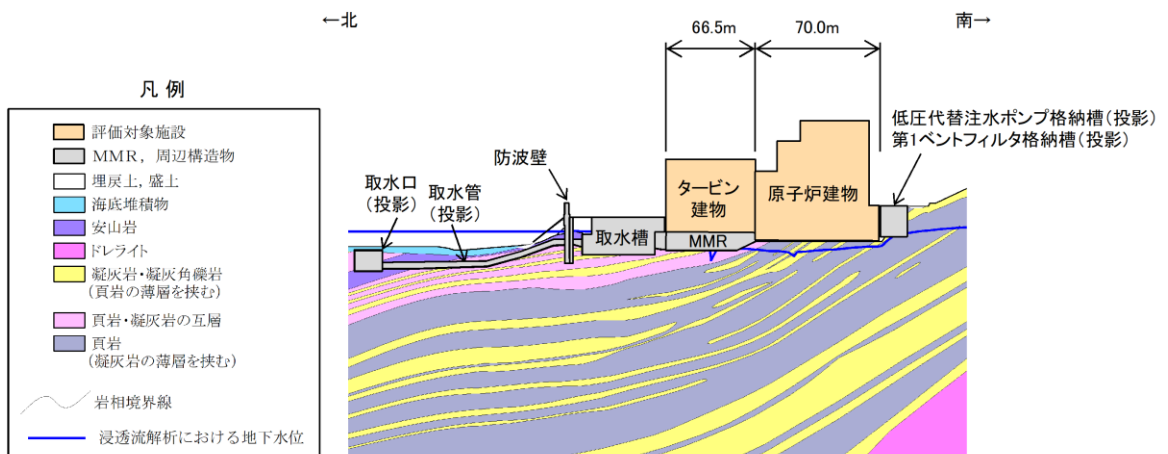


図 3.3-17 原子炉建物及びタービン建物の地下水位分布 (南北)

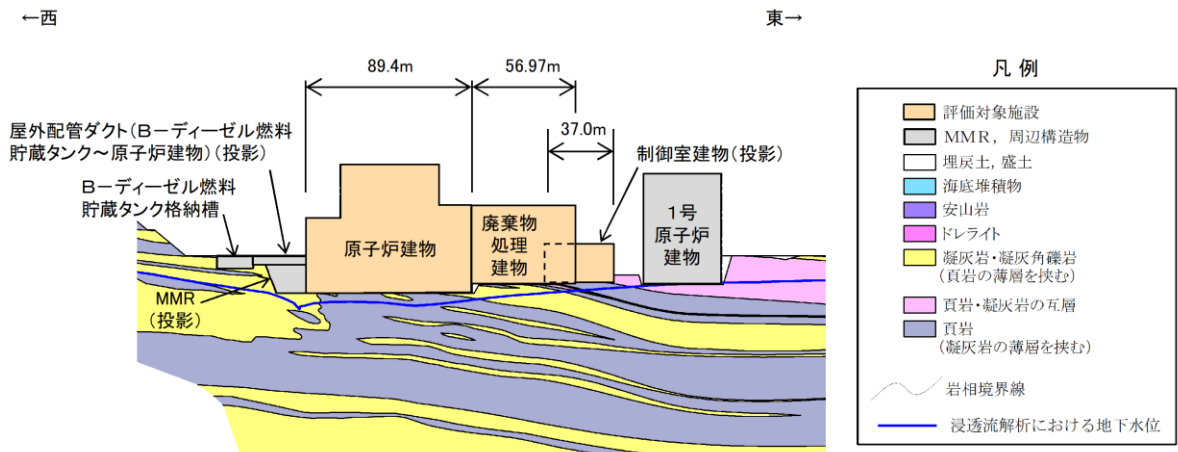


図 3.3-18 原子炉建物，廃棄物処理建物及び制御室建物の地下水位分布 (東西)



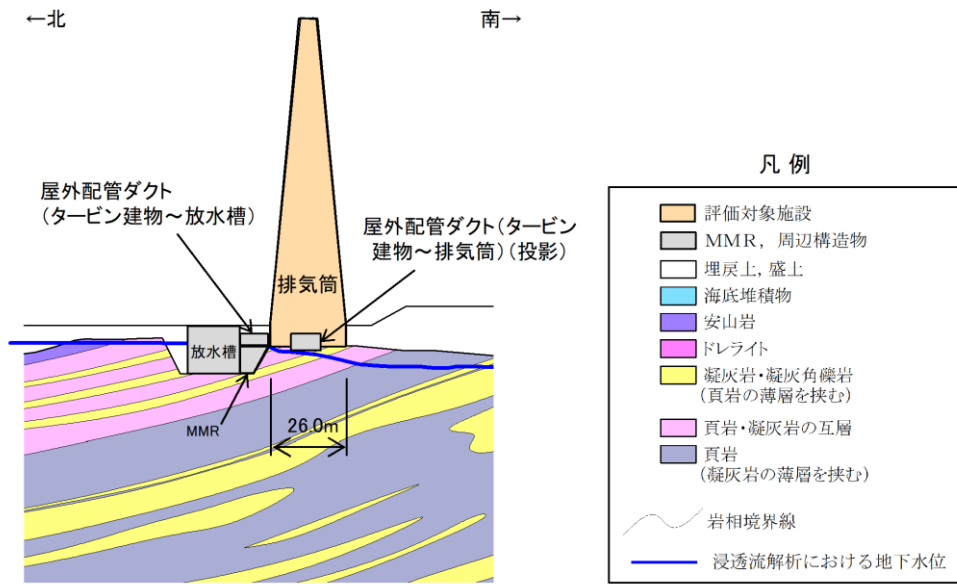


図 3.3-19 排気筒の地下水位分布 (南北)

(b) 屋外重要土木構造物等の耐震評価における地下水位設定

屋外重要土木構造物等について、予測解析により得られた解析水位（自然水位）並びにこれを参照した設計地下水位及び建設時の工事計画認可時の設計地下水位（建設時の工事計画認可申請対象外の施設を除く）を表 3.3-9 に示す。

設計地下水位の設定にあたっては、耐震評価における設計地下水位の設定方針に基づき、観測水位の不確かさ等を考慮して、解析水位（自然水位）に対して余裕を考慮し設定している。設計地下水位の設定方針について参考資料 3 に示す。

表 3.3-9 屋外重要土木構造物等における設計地下水位の設定一覧

施設名称	建設時の工事 計画認可時の 設計地下水位 (EL m)	予測解析による 地下水位 (自然水位) (EL m)	設計 地下水位 (EL m)	備考
取水槽	0.3	0.58~3.8	4.5	
屋外配管ダクト(タービン建物~排気筒)	0.3	2.7~3.6	4.9	
屋外配管ダクト(タービン建物~放水槽)	—*1	2.9~3.8	5.2	
B-ディーゼル燃料貯蔵タンク格納槽	—*1	3.9~15.0	15.0	地表面
屋外配管ダクト(B-ディーゼル燃料貯蔵タンク~原子炉建物)	—*1	5.8~14.9	15.0	地表面
防波壁(多重鋼管杭式擁壁)*2	—*1	0.58~4.5	5.5	
防波壁(逆T擁壁)*2	—*1	0.58~6.3	8.5	地表面
防波壁(波返重力擁壁)*2	—*1	0.58~7.2	8.5	地表面
1号機取水槽流路縮小工	—*1	0.58~1.6	3.0	
防波壁通路防波扉*3	—*1	0.7~6.0	8.5	地表面
第1ベントフィルタ格納槽	—*1	9.4~15.0	15.0	地表面
低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	—*1	9.4~15.0	15.0	地表面
緊急時対策所	—*1	22.4~23.8	—*4	
緊急時対策所用燃料地下タンク	—*1	22.1~22.6	—*4	
ガスタービン発電機建物	—*1	22.0~24.9	—*5	
ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	—*1	23.6~24.7	—*5	
屋外配管ダクト(ガスタービン発電機用軽油タンク~ガスタービン発電機)	—*1	22.1~24.2	—*5	

注記\*1: 建設時の工事計画認可申請対象外

\*2: 代表断面の設計地下水位を掲載

\*3: 代表として防波壁通路防波扉(3号機東側)の設計地下水位を掲載

\*4: 地下水位が施設設置地盤(EL 50.0m 盤)より十分低い

\*5: 地下水位が施設設置地盤(EL 44.0m 盤)より十分低い

(6) 設計揚圧力及び設計地下水位の保守性・妥当性の検証

a. 検討の目的

屋外重要土木構造物等に適用する設計地下水位は、安全対策工事を考慮した予測解析結果を参照し設定することから、工事完了前の段階で観測水位を用いた直接的な検証を行うことができない。

設計地下水位は保守性を確保する方針としているが、仮に敷地の地下水位が施設の設計地下水位を超過する場合は、耐震安全性へ影響が生じる可能性があることを踏まえ、観測水位と解析水位（自然水位）の比較から、設計地下水位の保守性を検証する。

解析水位（自然水位）は、解析条件設定において保守性を持たせた解析結果であり、設計地下水位はその解析水位（自然水位）を更に上側に包絡するよう設定している。

このため、観測水位に対して解析水位（自然水位）の余裕が確認された場合、設計地下水位は保守性を有していると判断する。

b. 観測水位と解析水位（自然水位）の比較結果

解析水位（自然水位）について、地下水位観測記録との比較による検証結果を示す。

検証に用いた観測孔位置の平面図を図 3.3-20 に、観測水位と解析水位（自然水位）の関係を表 3.3-10 に示す。

この結果、解析水位（自然水位）は観測最高地下水位を上回っており、設計地下水位は十分な保守性を有していると判断した。

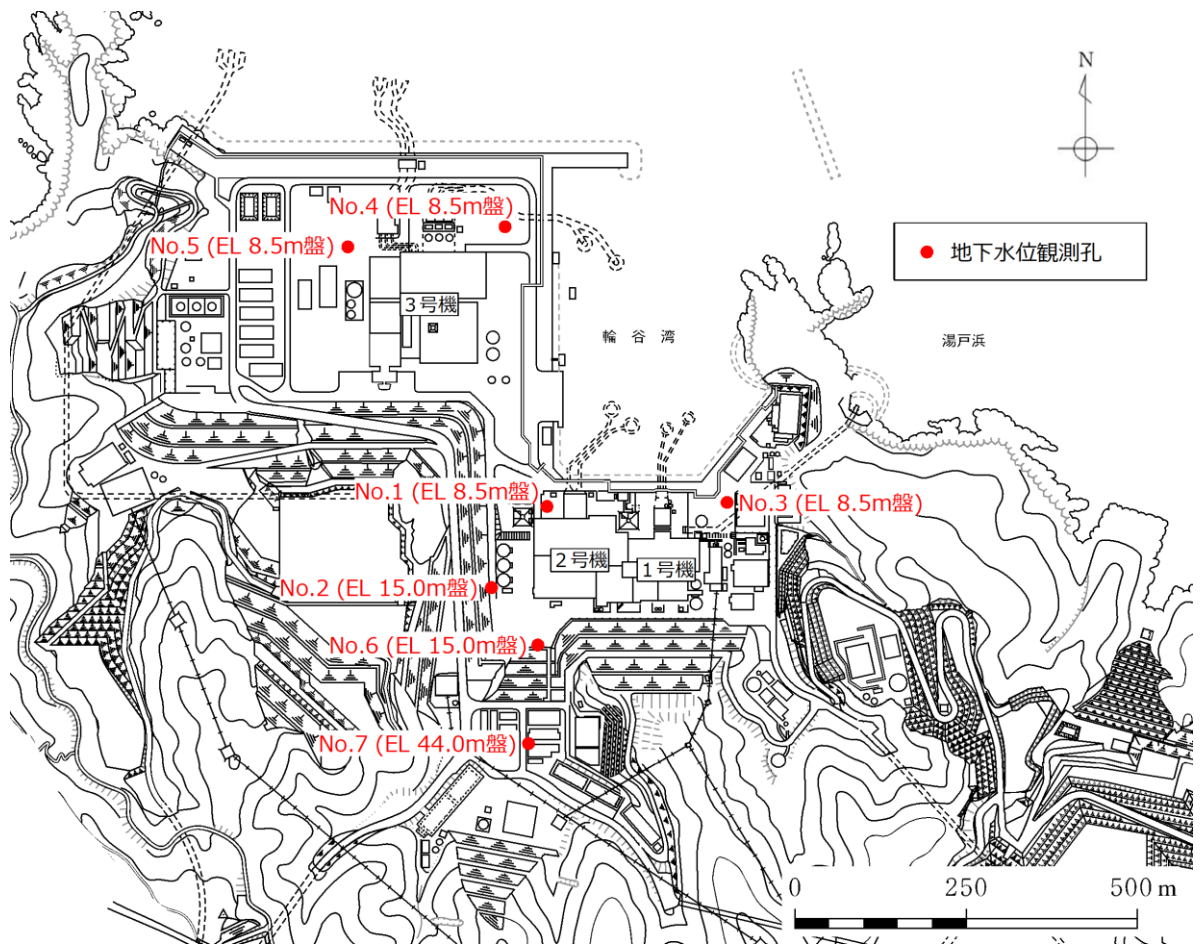


図 3.3-20 観測水位と解析水位（自然水位）の比較において参照する観測孔位置図

表 3.3-10 観測水位と解析水位（自然水位）関係

観測孔	(A) 観測水位 (EL m)		(B) 解析水位 (自然水位) (EL m)	差分* (m) (B) - (A)
	最高	平均		
No. 1	最高	1.79	3.41	1.62 (2.83)
	平均	0.58		
No. 2	最高	3.59	10.65	7.06 (12.91)
	平均	-2.26		
No. 3	最高	1.43	1.51	0.08 (0.69)
	平均	0.82		
No. 4	最高	4.03	5.97	1.94 (3.70)
	平均	2.27		
No. 5	最高	4.12	6.75	2.63 (4.90)
	平均	1.85		
No. 6	最高	6.74	15.00	8.26 (15.69)
	平均	-0.69		
No. 7	最高	7.97	19.00	11.03 (14.04)
	平均	4.96		

注記\*：上段は最高水位との差分を，下段の（ ）内は平均水位との差分を示す

(7) 水位が低い場合の影響確認

設計地下水位は、保守的な条件のもと実施する予測解析を参照して設定することから、新設する地下水位低下設備が稼働した場合の平常時の地下水位は、設計地下水位よりも更に低くなると想定される。

平常時の地下水位における耐震安全性への影響を確認するため、その影響の有無や程度に応じて、設計地下水位より十分に低い地下水位を設定した耐震安全性評価に影響検討として実施する。

(8) 建物・構築物における設計揚圧力の妥当性の検証

予測解析結果のうち、地下水位低下設備を考慮した解析結果は、将来的な地下水位低下設備稼働時の状況等を考慮したものであることから、今後、運転段階において地下水位の観測記録を取得し、設計揚圧力と比較することにより、予測解析の妥当性を確認する方針とする。

(9) 参考文献

- ・地下水流動解析のガイドラインに関する調査（長谷川琢磨，地下水学会誌第 48 巻第 2 号 75～86（2006））
- ・余裕深度処分安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方（社団法人土木学会（2008））
- ・流域スケールにおける反応性窒素移動過程のモデル化と実流域への適用性検討（森康二ほか，地下水学会誌第 58 巻第 1 号 63～86（2016））
- ・水循環解析におけるモデルの設定および再現性の検証事例の報告-福井県大野盆地における事例-（西村宗倫ほか，地下水学会誌第 59 巻第 2 号 125～158（2017））
- ・流域モデリングの水循環解析への適用と実際（田原ほか，日本地下水学会 2014 年度秋季講演会講演予稿，158-163（2014））
- ・Integrated watershed modeling for simulation of spatiotemporal redistribution of post-fallout radionuclides: Application in radiocesium fate and transport processes derived from the Fukushima accidents（Mori Koji et al, Environmental Modelling & Software, 72, 126-146（2015））

#### 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

全応力解析に用いる解析用物性値として、設置変更許可申請書に記載された解析用物性値を表 4.1-1～表 4.1-3 に、設定根拠を表 4.1-4 及び表 4.1-5 に示す。動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性を図 4.1-1～図 4.1-7 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。



表 4.1-1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値  
(岩盤)

	物理特性		強度特性		静的変形特性		動の変形特性		減衰特性
	密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	せん断強度 $\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (°)	残留強度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 E (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	静ポアソン比 $\nu_s$	動せん断弾性係数 G <sub>d</sub> (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	動ポアソン比 $\nu_d$	減衰定数 h
岩盤 (成相寺層)	頁岩	C <sub>H</sub> 級	1.14	54	1.48 $\sigma^{0.72}$	3.74	0.19	表4.1-2参照	0.03
		C <sub>M</sub> 級	0.92	54	0.34 $\sigma^{0.54}$	1.95	0.20		
		C <sub>L</sub> 級	0.28	45	0.34 $\sigma^{0.54}$	0.54	0.20		
	頁岩と凝灰岩 の互層	C <sub>H</sub> 級	1.14	54	1.28 $\sigma^{0.72}$	3.74	0.19		
		C <sub>M</sub> 級	0.92	54	0.34 $\sigma^{0.54}$	1.95	0.20		
		C <sub>L</sub> 級	0.28	28	0.34 $\sigma^{0.54}$	0.43	0.20		
	凝灰岩・ 凝灰角礫岩	C <sub>H</sub> 級	1.54	55	1.28 $\sigma^{0.72}$	7.78	0.19		
		C <sub>M</sub> 級	1.14	47	0.34 $\sigma^{0.54}$	1.47	0.20		
		C <sub>L</sub> 級	0.60	28	0.34 $\sigma^{0.54}$	0.43	0.25		
岩盤 (貫入岩)	ドレライト	C <sub>H</sub> 級	2.14	52	1.56 $\sigma^{0.72}$	7.78	0.22		
		C <sub>M</sub> 級	1.58	52	0.36 $\sigma^{0.54}$	1.47	0.25		
		C <sub>L</sub> 級	0.83	43	0.36 $\sigma^{0.54}$	0.43	0.25		
	安山岩	C <sub>H</sub> 級	2.14	52	1.56 $\sigma^{0.72}$	7.78	0.25		
		C <sub>M</sub> 級	1.58	52	0.36 $\sigma^{0.54}$	1.47	0.25		
		C <sub>L</sub> 級	0.83	43	0.36 $\sigma^{0.54}$	0.43	0.25		

表 4.1-2 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値  
(岩盤)

	動せん断弾性係数 $G_d$ ( $\times 10^8$ N/mm <sup>2</sup> )						動ポアソン比 $\nu_d$						
	第1層 速度層	第2層 速度層	第3層 速度層	第4層 速度層	第5層 速度層	第6層 速度層	第1層 速度層	第2層 速度層	第3層 速度層	第4層 速度層	第5層 速度層	第6層 速度層	
頁岩	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.08	6.58	9.77	10.28	14.19						
	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.04	6.45	9.58	10.08	13.92						
	C <sub>I</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47						
	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.07	6.55	9.73	10.24	14.14						
	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.02	6.37	9.47	9.96	13.75						
	C <sub>I</sub> 級	0.15	1.89	5.96	8.86	9.32	12.87						
	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.03	6.43	9.54	10.04	13.86						
	C <sub>H</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47	0.45	0.39	0.38	0.34	0.34	0.35
	C <sub>I</sub> 級	0.14	1.86	5.89	8.75	9.20	12.70						
	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.25	7.12	10.57	11.12	15.35						
	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.11	6.66	9.89	10.40	14.36						
	C <sub>I</sub> 級	0.16	2.05	6.48	9.62	10.12	13.97						
安山岩	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>I</sub> 級	0.16	2.10	6.63	9.85	10.36	14.30						
岩盤 (成相寺層)	頁岩と凝灰岩 の互層	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.08	6.58	9.77	10.28	14.19					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.04	6.45	9.58	10.08	13.92					
		C <sub>I</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.07	6.55	9.73	10.24	14.14					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.02	6.37	9.47	9.96	13.75					
		C <sub>I</sub> 級	0.15	1.89	5.96	8.86	9.32	12.87					
	凝灰岩・ 凝灰角礫岩	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.03	6.43	9.54	10.04	13.86					
		C <sub>H</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47	0.45	0.39	0.38	0.34	0.35
		C <sub>I</sub> 級	0.14	1.86	5.89	8.75	9.20	12.70					
		C <sub>H</sub> 級	0.17	2.25	7.12	10.57	11.12	15.35					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.11	6.66	9.89	10.40	14.36					
		C <sub>I</sub> 級	0.16	2.05	6.48	9.62	10.12	13.97					
ドレライト	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>I</sub> 級	0.16	2.10	6.63	9.85	10.36	14.30						
岩盤 (貫入岩)	頁岩と凝灰岩 の互層	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.08	6.58	9.77	10.28	14.19					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.04	6.45	9.58	10.08	13.92					
		C <sub>I</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.07	6.55	9.73	10.24	14.14					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.02	6.37	9.47	9.96	13.75					
		C <sub>I</sub> 級	0.15	1.89	5.96	8.86	9.32	12.87					
	凝灰岩・ 凝灰角礫岩	C <sub>H</sub> 級	0.16	2.03	6.43	9.54	10.04	13.86					
		C <sub>H</sub> 級	0.15	1.98	6.25	9.28	9.76	13.47	0.45	0.39	0.38	0.34	0.35
		C <sub>I</sub> 級	0.14	1.86	5.89	8.75	9.20	12.70					
		C <sub>H</sub> 級	0.17	2.25	7.12	10.57	11.12	15.35					
		C <sub>H</sub> 級	0.16	2.11	6.66	9.89	10.40	14.36					
		C <sub>I</sub> 級	0.16	2.05	6.48	9.62	10.12	13.97					
ドレライト	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>H</sub> 級	0.17	2.17	6.86	10.19	10.72	14.80						
	C <sub>I</sub> 級	0.16	2.10	6.63	9.85	10.36	14.30						

表 4.1-3 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値  
(D級岩盤・シーム・埋戻土・旧表土・MMR・改良地盤)

	物理特性		強度特性		静的変形特性		動的変形特性		減衰特性
	密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	せん断 強度 $\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	内部 摩擦角 $\phi$ (°)	残留強度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	静ポアソン 比 $\nu_s$	動せん断 弾性係数 $G_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	動ポアソン 比 $\nu_d$	減衰定数 h
D級岩盤	2.28	0.11	6	$0.11 + \sigma \tan 6^\circ$	$141 \sigma^{0.39}$	0.30	$G_0 = 148 \sigma^{0.49}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00062)$	0.45	$\gamma \leq 1 \times 10^{-4}$ : $h = 0.023$ $\gamma > 1 \times 10^{-4}$ : $h = 0.023 + 0.071 \cdot \log(\gamma / 0.0001)$
シーム	2.23	0.19	18	$0.19 + \sigma \tan 18^\circ$	$G_{0.5} = 44 \sigma^{0.34}$	0.40	$G_0 = 225 \sigma^{0.31}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / [1 + (\gamma / 0.00149)^{0.849}]$	0.45	$h = \gamma / (2.14 \gamma + 0.017) + 0.031$
埋戻土, 盛土	2.11	0.22	22	$0.22 + \sigma \tan 22^\circ$	$E_{0.5} = 115 \sigma^{0.61}$	0.40	$G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00027)$	0.45	$h = 0.0958 \gamma / (\gamma + 0.00020)$
埋戻土 (購入土)	2.01	0.04	21	$0.04 + \sigma \tan 21^\circ$	$E_{0.5} = 227 \sigma^{0.75}$	0.40	$G_0 = 275 \sigma^{0.61}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00048)$	0.45	$h = 0.2179 \gamma / (\gamma + 0.00085)$
旧表土	2.00	0.03	21	$0.03 + \sigma \tan 21^\circ$	$E_{0.5} = 37 \sigma^{0.79}$	0.40	$G_0 = 240 \sigma^{0.61}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.0011)$	0.45	$h = 0.20 \gamma / (\gamma + 0.000413)$
MMR	2.35	—	—	—	23,500	0.20	9,792	0.20	0.05
改良地盤 (高圧噴射攪拌工法)	2.44	1.14	47	$0.34 \sigma^{0.54}$	1,470	0.20	6,250	0.38	0.03
改良地盤 I (薬液注入工法)	2.11	0.22	22	$0.22 + \sigma \tan 22^\circ$	$E_{0.5} = 115 \sigma^{0.61}$	0.40	$G_0 = 749 \sigma^{0.66}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00027)$	0.45	$h = 0.0958 \gamma / (\gamma + 0.00020)$
改良地盤 II (薬液注入工法)	改良地盤①	2.11	0.63	$0.63 + \sigma \tan 38^\circ$	1,087	0.33	$G_0 = 409$ $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00027)$	0.33	
	改良地盤②	2.11	0.49	$0.49 + \sigma \tan 41^\circ$	898	0.33	$G_0 = 338$ $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00027)$	0.33	$h = 0.0958 \gamma / (\gamma + 0.00020)$
	改良地盤③	2.11	1.14	$1.14 + \sigma \tan 41^\circ$	2,088	0.33	$G_0 = 785$ $G/G_0 = 1 / (1 + \gamma / 0.00027)$	0.33	

表 4.1-4 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値の設定根拠（岩盤）

岩種	岩級	物理特性	強度特性		変形特性			減衰特性	
			ピーク強度	残留強度	静的特性	動的特性	減衰定数		
					静弾性係数	静ポアソン比	動せん断弾性係数	動ポアソン比	
岩盤 (成相寺層)	頁岩	密度試験 (飽和)	ブロック せん断試験	摩擦抵抗 試験	平板載荷試験	—軸圧縮試験	PS 検層	慣用値 <sup>*1</sup>	
									Ch級
									C <sub>M</sub> 級
	頁岩と凝灰 岩の互層		Cl級						
			Ch級						
			C <sub>M</sub> 級						
	凝灰岩・ 凝灰角礫岩		Cl級						
			Ch級						
			C <sub>M</sub> 級						
	ドレライト		Cl級						
			Ch級						
			C <sub>M</sub> 級						
	安山岩		Cl級						
			Ch級						
			C <sub>M</sub> 級						
岩盤 (貫入岩)	Cl級								
	Ch級								
	C <sub>M</sub> 級								

注記 \*1 社団法人日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEAG4601-2015)を参考に設定。

表 4.1-5 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値の設定根拠  
(D級岩盤・シーム・埋戻土・旧表土・MMR・改良地盤)

	強度特性		変形特性				減衰特性
	ピーク強度	残留強度	静的特性		動的特性		
			静弾性係数	静ポアソン比	動せん断弾性係数	動ポアソン比	
D級岩盤	中型三軸圧縮試験		中型三軸圧縮試験		動的中型三軸圧縮試験	慣用値 <sup>**2</sup>	動的中型三軸圧縮試験
シーム	単純せん断試験		単純せん断試験		動的単純せん断試験		動的単純せん断試験
埋戻土, 盛土	大型三軸圧縮試験	ピーク強度と同じ値	大型三軸圧縮試験	慣用値 <sup>**2</sup>	動的大型三軸圧縮試験	慣用値 <sup>**3</sup>	動的大型三軸圧縮試験
埋戻土 (購入土)	三軸圧縮試験		三軸圧縮試験		繰返し中空ねじりせん断試験		繰返し中空ねじりせん断試験
旧表土					動的三軸圧縮試験		動的三軸圧縮試験
MMR	—	—	慣用値 <sup>**1</sup>	慣用値 <sup>**1</sup>	慣用値 <sup>**1</sup>	慣用値 <sup>**1</sup>	慣用値 <sup>**1</sup>
改良地盤 (高圧噴射攪拌工法)			凝灰岩・凝灰角礫岩 (C <sub>w</sub> 級) を流用				
改良地盤 I (薬液注入工法)			埋戻土, 盛土を流用				
改良地盤 II (薬液注入工法)	密度試験 (飽和) (埋戻土, 盛土を流用)	せん断強度は PS 検層に基づく換算値 内部摩擦角は簡易設定法に用いた N 値に基づく換算値	ピーク強度と同じ値	慣用値 <sup>**4</sup>	G <sub>0</sub> は PS 検層ひずみ依存特性は動的大型三軸圧縮試験 (埋戻土, 盛土を流用)	慣用値 <sup>**4</sup>	動的大型三軸圧縮試験 (埋戻土, 盛土を流用)

注記 \*1 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能調査指針・マニュアル (社団法人土木学会, 1992年・2005年) を参考に設定。  
 \*2 設計用地盤定数の決め方-岩盤編- (社団法人地盤工学会, 2007年) を参考に設定。  
 \*3 原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術 (技術資料) (社団法人土木学会, 2009年) を参考に設定。  
 \*4 港湾の施設の技術上の基準・解説 (公益社団法人日本港湾協会, 2018年) を参考に設定。

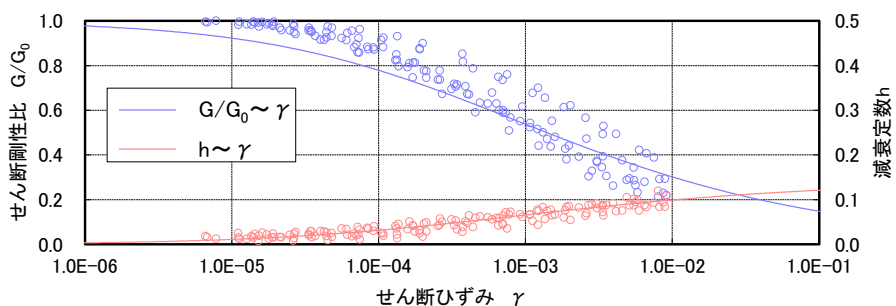


図 4.1-1 D級岩盤（頁岩，頁岩・凝灰岩の互層）の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

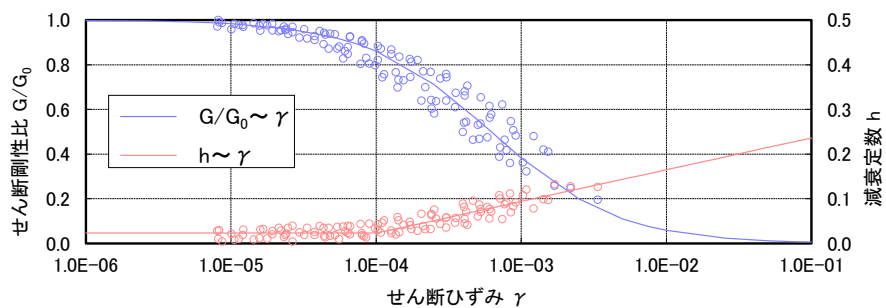


図 4.1-2 D級岩盤（凝灰岩・凝灰角礫岩）の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

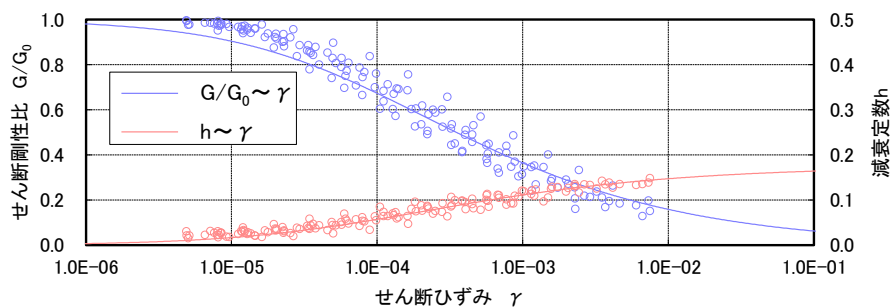


図 4.1-3 D級岩盤（ドレライト・安山岩）の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

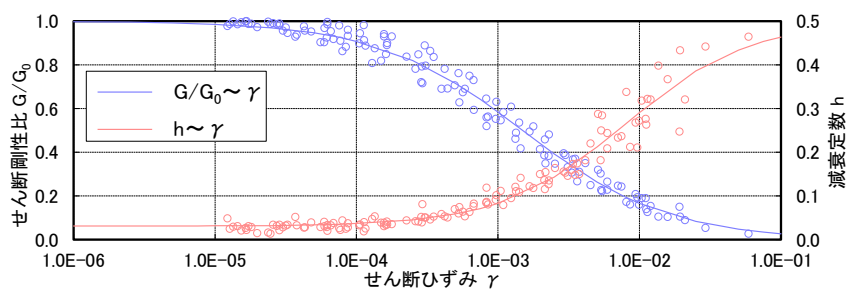


図 4.1-4 シームの動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

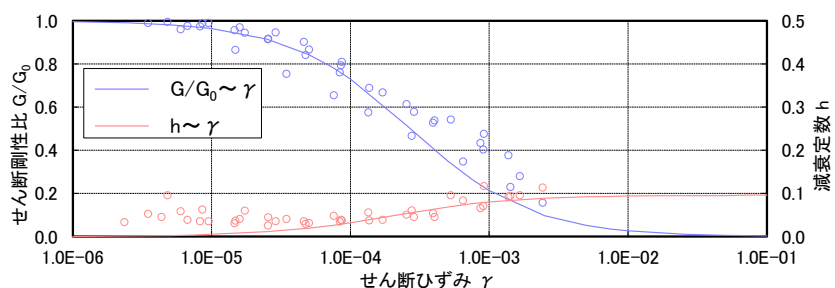


図 4.1-5 埋戻土・盛土の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

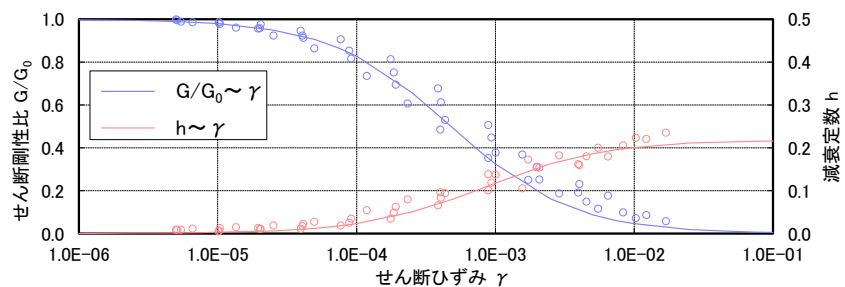


図 4.1-6 埋戻土（購入土）の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

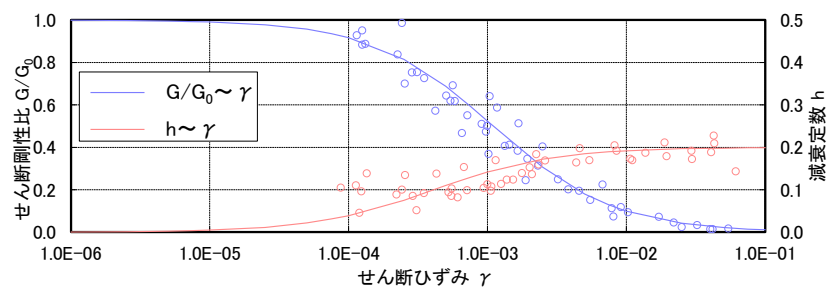


図 4.1-7 旧表土の動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存特性

#### 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

設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値のうち、有効応力解析に用いる解析用物性値を表 4.2-1～表 4.2-2 に、設定根拠を表 4.2-6～表 4.2-7 に示す。改良地盤に用いる解析用物性値を表 4.2-3 に、設定根拠を表 4.2-8 に示す。その他の解析用物性値を表 4.2-4～表 4.2-5 に、設定根拠を表 4.2-9～表 4.2-10 に示す。以下の章に、各物性値の設定根拠を示す。

表 4.2-1 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値  
(有効応力解析)  
(液状化検討対象層)

		埋戻土	砂礫層	
物理特性	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.11 【2.00】	2.05	
	間隙率 $n$	0.45	0.45	
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ma}$ (kN/m <sup>2</sup> )	154,600	225,400	
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$ (kN/m <sup>2</sup> )	98	98	
	ポアソン比 $\nu$	0.33	0.33	
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	0.095	0.095	
強度特性	粘着力 $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	0	0	
	内部摩擦角 $\phi'$ (°)	40.17	38.74	
液状化特性	変相角 $\phi_p$ (°)	28	28	
	液状化パラメータ	S1	0.005	0.005
		w1	4.080	4.020
		P1	0.5	0.5
		P2	0.990	1.100
C1		2.006	1.916	

注：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を示す。

動せん断弾性係数、内部摩擦角及び液状化パラメータは代表的な数値を示す。



表 4.2-2 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値  
(有効応力解析)  
(非液状化層)

		埋戻土 (粘性土)	基礎捨石及び被覆石
物理特性	密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.07 【2.03】	2.04 【1.84】
	間隙率 $n$	0.55	0.45
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ma}$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	186,300	180,000
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	151.7	98
	ポアソン比 $\nu$	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	0.095	0.24
強度特性	粘着力 $c'$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	0	20
	内部摩擦角 $\phi'$ ( $^\circ$ )	30	35

注：括弧内【】の数字は地下水位以浅の数値を示す。  
動せん断弾性係数及び基準平均有効拘束圧は代表的な数値を示す。

表 4.2-3 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値  
(有効応力解析)  
(改良地盤)

対象施設		防波壁				
		多重鋼管杭式擁壁		逆T擁壁		波返重力擁壁
種別 (工法, 地盤種別)		改良地盤① (薬液注入)	改良地盤② (高圧噴射)	改良地盤① (薬液注入, 浅層)	改良地盤② (薬液注入, 深層)	改良地盤 (高圧噴射)
物理特性	密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.05	2.11	2.11	2.11	2.05
	間隙率 $n$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ma}$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	886,300	368,100	357,400	799,800	360,500
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ma}'$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	98	98	98	98	98
	ポアソン比 $\nu$	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	0.095	0.095	0.095	0.095	0.095
強度特性	粘着力 $c$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	230	1,250	490	570	1,250
	内部摩擦角 $\phi'$	38.74	—	40.57	40.57	—

注：動せん断弾性係数, 粘着力及び内部摩擦角は代表的な数値を示す。

表 4.2-4 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値  
(有効応力解析)

(防波壁 (逆 T 擁壁) 及び防波壁 (波返重力擁壁) における岩盤)

		岩盤②速度層	岩盤④速度層	岩盤⑤速度層	岩盤⑥速度層	岩盤⑦速度層
P波速度	$V_p$ (m/s)	1710	3240	3860	4150	3800
S波速度	$V_s$ (m/s)	620	1520	1900	2100	1770
単位体積重量	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23.3	24.5	25.2	24.4	25.1
動ポアソン比	$\nu_d$	0.42	0.36	0.34	0.33	0.36
減衰定数	$h$	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

表 4.2-5 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値  
(全応力解析)

(砕石)

対象施設		取水管
種別 (地盤種別)		砕石
物理特性	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.57
変形特性	動せん断弾性係数 $G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	19,000
	ポアソン比 $\nu$	0.45
	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	$6.511 \times 10^{-3}$
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	0.1938

注： $\gamma$  はせん断ひずみ (%) を示す。

表 4.2-6 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値の設定根拠  
(有効応力解析)  
(液状化検討対象層)

		埋戻土	砂礫層	
物理特性	密度 $\rho$	物理試験		
	間隙率 $n$	慣用値 <sup>*1</sup>		
変形特性	動せん断弾性係数 $G_{ms}$	動的変形特性に基づき設定	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 <sup>*1</sup>		
	ポアソン比 $\nu$	慣用値 <sup>*1</sup>		
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	動的変形特性に基づき設定		
強度特性	粘着力 $c'$	慣用値 <sup>*1</sup>		
	内部摩擦角 $\phi'$	文献 <sup>*1</sup> からN値(原位置試験)と有効上載圧により設定		
液状化特性	変相角 $\phi_p$	文献 <sup>*1,*2</sup> からN値(原位置試験), 有効上載圧及び細粒分含有率(物理試験)により設定		
	液状化パラメータ			S1
				w1
				P1
				P2 C1

注記\*1: 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易設定法  
(港湾技研資料No. 869, 平成9年6月)

\*2: FLIPの解析における解析精度向上に関する諸検討成果報告書(付録)  
(第2期FLIP研究会解析精度向上作業部会, 2004.6)

表 4.2-7 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値の設定根拠  
(有効応力解析)  
(非液状化層)

		埋戻土(粘性土)	基礎捨石及び被覆石
物理特性	密度 $\rho$	物理試験	慣用値 <sup>*1</sup>
	間隙率 $n$	慣用値 <sup>*1</sup>	
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	
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ms}'$	$G_{ms}$ に対応する値	
	ポアソン比 $\nu$	慣用値 <sup>*1</sup>	
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	動的変形特性に基づき設定	
強度特性	粘着力 $c'$	慣用値 <sup>*1</sup>	
	内部摩擦角 $\phi'$	慣用値 <sup>*1</sup>	

注記\*1: 港湾構造物設計事例集(沿岸技術研究センター, 平成19年3月)

表 4.2-8 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値の設定根拠  
(有効応力解析)  
(改良地盤)

対象施設		防波壁			
		多重鋼管杭式擁壁		逆T擁壁	波返重力擁壁
種別(地盤種別)		改良地盤① (薬液注入)	改良地盤② (高压喷射)	改良地盤①, ② (薬液注入)	改良地盤 (高压喷射)
物理特性	密度 $\rho$	原地盤の物性値を設定			
	間隙率 $n$	原地盤の物性値を設定			
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	設計S波速度, 密度に基づき設定	設計S波速度, 密度に基づき設定	設計S波速度, 密度に基づき設定
	基準平均有効拘束圧 $\sigma_{ms}'$	原地盤の物性値を設定			
	ポアソン比 $\nu$	原地盤の物性値を設定			
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	原地盤の物性値を設定			
強度特性	粘着力 $c$	強度試験結果, 文献 <sup>*1</sup> に基づき設定	設計強度, 文献 <sup>*2</sup> に基づき設定	設計強度, 文献 <sup>*1</sup> に基づき設定	設計強度, 文献 <sup>*2</sup> に基づき設定
	内部摩擦角 $\phi$	原地盤の物性値を設定	—	原地盤の物性値を設定	—

注記\*1: 浸透固化処理工法技術マニュアル2010年版, 沿岸開発技術研究センター

\*2: 地盤工学会用語辞典(地盤工学会, 2006.3)

表 4.2-9 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値の設定根拠  
(有効応力解析)  
(防波壁(逆T擁壁)及び防波壁(波返重力擁壁)における岩盤)

	岩盤②速度層	岩盤④速度層	岩盤⑤速度層	岩盤⑥速度層	岩盤⑦速度層
P波速度 $V_p$ (m/s)	PS検層				
S波速度 $V_s$ (m/s)	PS検層				
単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	密度試験				
動ポアソン比 $\nu_d$	PS検層				
減衰定数 $h$	慣用値				

表 4.2-10 設置変更許可申請書に記載されていない解析用物性値の設定根拠  
 (全応力解析)  
 (碎石)

対象施設		取水管
種別 (地盤種別)		碎石
物理特性	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	文献*1
変形特性	動せん断弾性係数 $G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	文献*1
	ポアソン比 $\nu$	慣用値*2
	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	文献*1の動的変形特性に基づき設定
	減衰定数の上限値 $h_{max}$	文献*1の動的変形特性に基づき設定

注記\*1：大型せん断リング土槽振動実験によるレキ材の動的変形特性 (港湾技研資料No. 663, 1990年3月)  
 \*2：埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版) (財団法人沿岸開発技術研究センター, 平成9年)

#### 4.2.1 有効応力解析に用いる解析用物性値

建物・構築物及び土木構造物の動的解析において、地震時における地盤の有効応力の変化に応じた影響を考慮する必要がある場合は、有効応力解析を実施する。

地盤の液状化強度特性は、敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえたうえで実施した液状化強度試験結果よりも保守的な簡易設定法により決定される液状化強度を用いて設定する。

設置変更許可申請書における解析用物性値は全応力解析用に設定しているため、液状化検討対象層の物理的及び力学的特性から、各層の有効応力解析に必要な物性値を設定する。

また、有効応力解析に用いる岩盤の解析用物性値は、設置変更許可申請書（添付書類六）に記載した値に基づき設定する。岩盤の速度構造については、後述の（6.地盤の速度構造）に示す。

なお、地盤の物理的及び力学的特性は、日本産業規格（JIS）又は地盤工学会（JGS）等の基準に基づいた試験の結果及び文献等を踏まえ設定することとした。

(1) 液状化評価方針の概要

液状化評価のフローを図 4.2-1 に示す。

液状化評価については道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（（社）日本道路協会，H24.3）（以下，「道路橋示方書V」という）及び港湾の施設の技術上の基準・同解説（（社）日本港湾協会，H19年版）（以下，「港湾基準」という）を基本とするが，液状化評価の対象外となっている土層についても，液状化の有無を確認して保守的な評価を実施する。

液状化強度試験に基づいて，地震時の地盤の状態を『液状化』又は『繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）』，若しくは『非液状化』と判定する。

液状化強度特性は，港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた港湾構造物設計事例集（沿岸技術研究センター，H19年版）（以下，「設計事例集」という）に準拠し，有効応力解析（FLIP）の簡易パラメータ設定法（以下，「簡易設定法」という）により設定する。なお，液状化強度試験結果が繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む），若しくは非液状化となる土層も，念のため液状化強度特性を設定して保守的な構造物評価を実施する。また，地盤の液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえたうえで実施した液状化強度試験結果よりも保守的な簡易設定法により決定される液状化強度を用いて設定する。

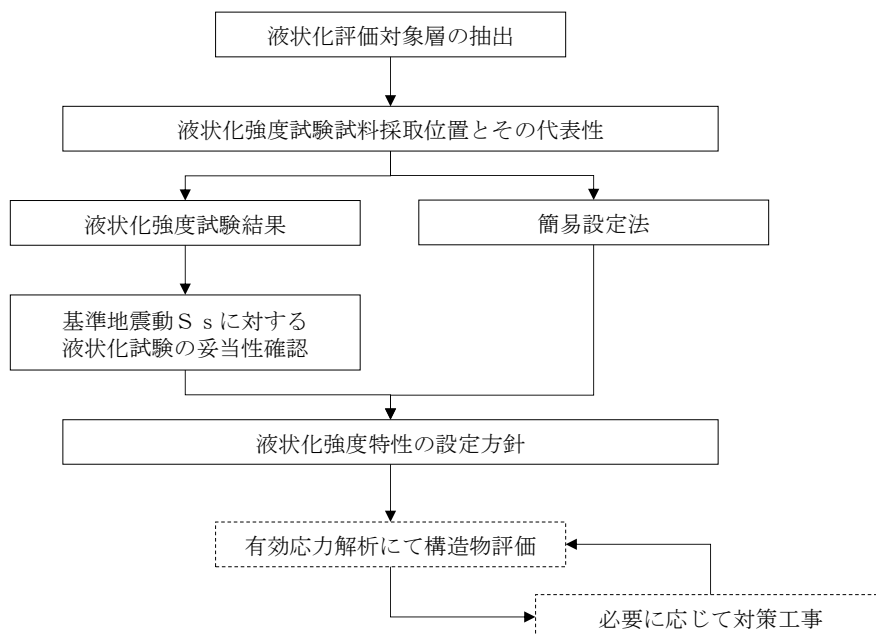


図 4.2-1 液状化評価のフロー

## (2) 液状化評価対象層の抽出

表 3.1-1 に敷地の地質層序を示す。敷地の地質は、新第三紀中新世の堆積岩類からなる成相寺層及び貫入岩類、並びにそれらを覆う被覆層から構成される。成相寺層は海成層で、下位より下部頁岩部層、火砕岩部層及び上部頁岩部層に区分される。

被覆層は、崖錐・海底堆積物及び盛土からなる。崖錐・海底堆積物は主に礫混じり砂質土及び礫混じり粘性土からなり、約 2m～5m の厚さで、斜面中腹や裾部、あるいは谷部等の傾斜面に分布する。また、盛土は 1 号機、2 号機及び 3 号機建設時の埋立地等に分布する。

敷地の被覆層である盛土は、埋戻土と埋戻土（粘性土）に分類している。

埋戻土は、発電所建設時の敷地造成において発生した新第三紀中新世の成相寺層の岩砕が主体となっており、広く分布する。

埋戻土（粘性土）は、護岸建設時に、背面の止水性を担保するために幅 20m 程度にわたり裏込めしたものである。図 4.2-2 に被覆層のボーリング柱状図を示す。

敷地の被覆層である崖錐・海底堆積物は、砂礫層として分類している。

液状化評価対象層については、道路橋示方書 V 及び港湾基準に基づいて対象層を抽出した。図 4.2-3 に道路橋示方書 V の液状化評価対象層の抽出フローを示す。

また、図 4.2-4 に港湾基準の液状化判定に用いる粒度分布図を示す。

図 4.2-5 に発電所建設前の地形立体図を示す。1 号機、2 号機及び 3 号機の建設に当たり、周辺の山を掘削して敷地を造成し、原子炉建物、取水槽等の施設を岩盤上に設置した。敷地の前面（北側）に護岸を設置し、敷地造成において発生した岩砕を主体とする埋戻土により埋戻した。なお、護岸背面の止水性を担保するための埋戻土（粘性土）が 1、2 号機北側に分布し、砂礫層として分類した崖錐・海底堆積物が 1 号機東側、3 号機北側及び輪谷湾周辺において局所的に分布する。

対象設備周辺の地層の分布状況について図 4.2-6、図 4.2-7 及び図 4.2-8 に整理した。

埋戻土は、敷地全体において概ね全域にわたって広範囲に分布する。

埋戻土（粘性土）は、1、2 号機北側護岸背面にのみ分布する。

砂礫層は、1 号機東側の EL 15m 以下の敷地、3 号機北側の EL 8.5m 以下の敷地及び輪谷湾周辺において局所的に分布する。

敷地内における購入地盤材料の使用箇所を図 4.2-9 に示す。取水管、3 号機東側護岸・岸壁、1、2 号機北側護岸、防波堤等において、砕石、基礎捨石、被覆石を使用している。

購入地盤材料は天然石材であり、粒度調整されたものである。

敷地内で EL 15m 以下に分布する地盤材料の抽出結果を表 4.2-11 に示す。



埋戻土（粘性土）は、護岸建設時に、背面の止水性を担保するために施工している。埋戻土（粘性土）の分布状況、試験に用いた試料の採取位置を図 4.2-10 に、採取した埋戻土（粘性土）の写真を図 4.2-11 に示す。また、塑性図による粘性土の分類を図 4.2-12 に示す。

図 4.2-12 より、埋戻土（粘性土）は、土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205）より、低液性限界の粘土（CL）に分類される。A線より下側の場合はシルトに分類されるが、埋戻土（粘性土）は塑性指数  $I_p$  が大きいため粘土に分類される。

基礎捨石は、1，2号機北側護岸、防波堤等に使用している。寸法 200mm から 250mm 程度の材料を使用しているため間隙が大きく、十分な透水性を有する。基礎捨石の設置状況の写真を図 4.2-13 に示す。

被覆石は、1，2号機北側護岸等に使用している。寸法 700mm から 800mm 程度の材料を使用しているため間隙が大きく、十分な透水性を有する。被覆石の寸法及び設置状況の写真を図 4.2-14 に示す。

道路橋示方書 V に基づき液状化評価対象層を抽出した結果を図 4.2-15 に示す。液状化の判定を行う必要がある土層は砂礫層のみである。

港湾基準に基づき液状化評価対象層を抽出した結果を図 4.2-16 に示す。粒径加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲内に含まれないため、液状化の判定を行う必要がある土層はない。

道路橋示方書 V では、50%粒径が 10mm 以下で、かつ、10%粒径が 1 mm 以下である土層について液状化評価対象層としているが、本評価では 50%粒径が 10mm を超過する、又は、50%粒径が 10mm 以下であっても 10%粒径が 1 mm を超過する土層についても、同様に抽出対象とする。

港湾基準では、粒度による土の分類を行い、粒径加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲内に含まれる土を液状化評価対象層としているが、範囲以外に含まれる土についても同様に抽出対象とする。

以上より、敷地内の液状化評価対象層として、被覆層の分布状況、道路橋示方書 V 及び港湾基準に基づく液状化評価対象層の抽出結果を踏まえ、保守的に埋戻土及び砂礫層を抽出した。

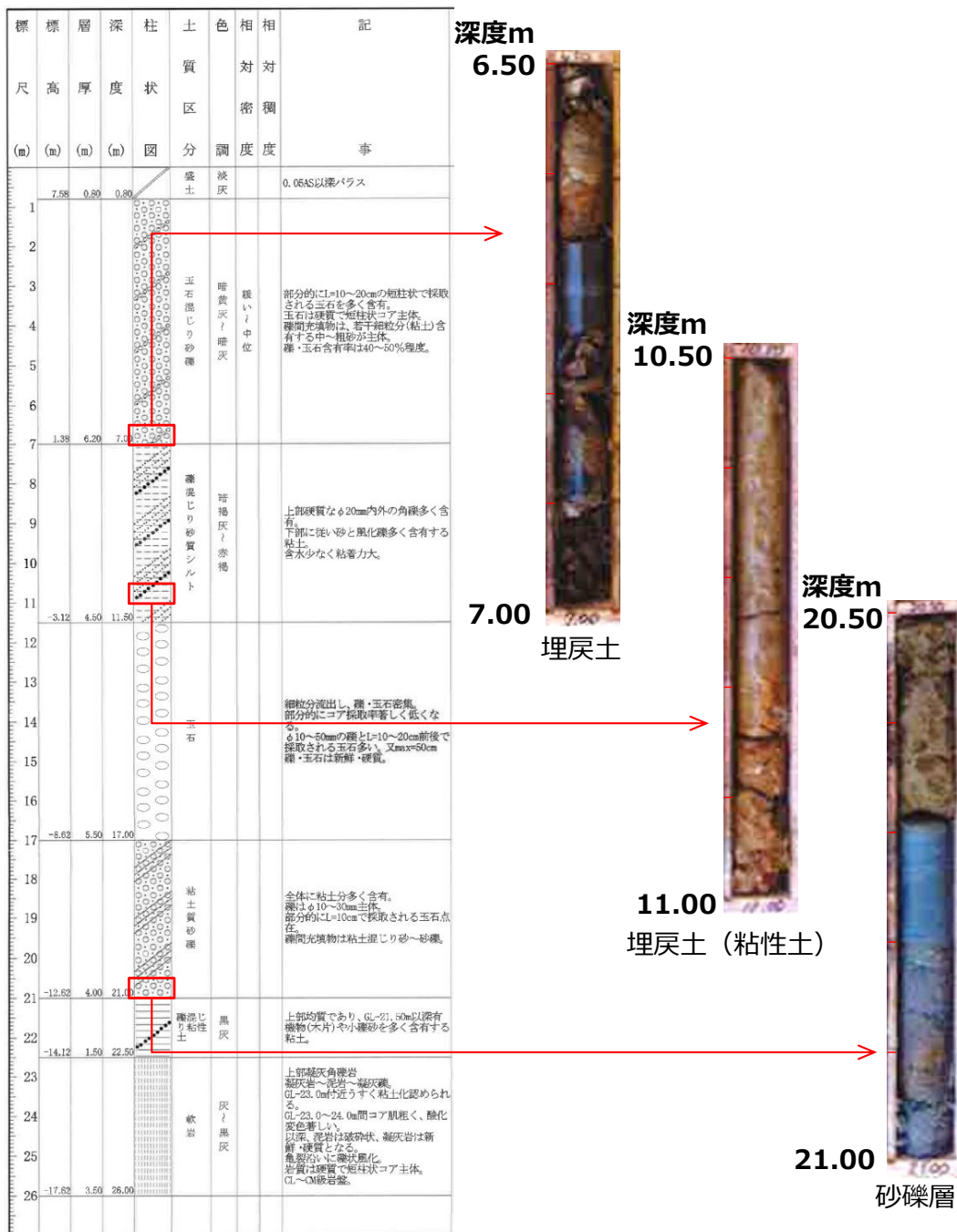


図 4.2-2 被覆層のボーリング柱状図

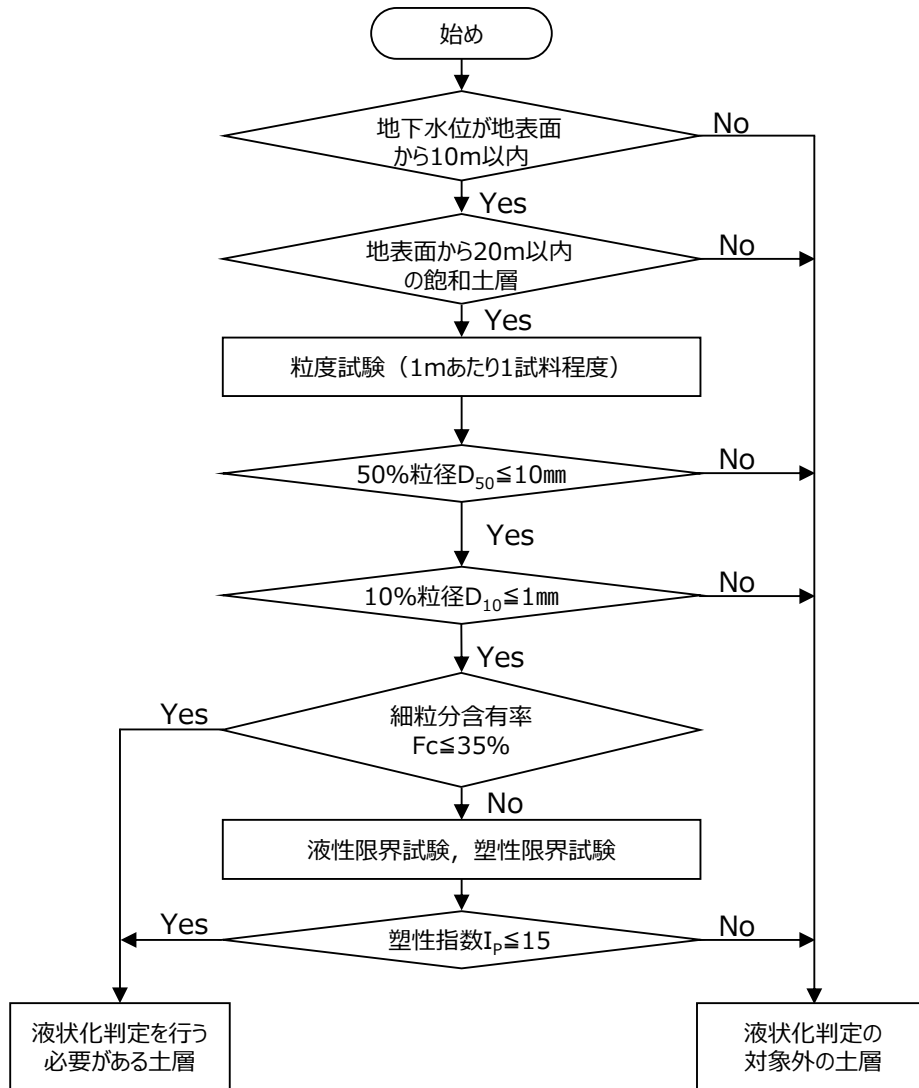


図 4.2-3 液化化評価の対象層の抽出フロー  
(道路橋示方書 V)

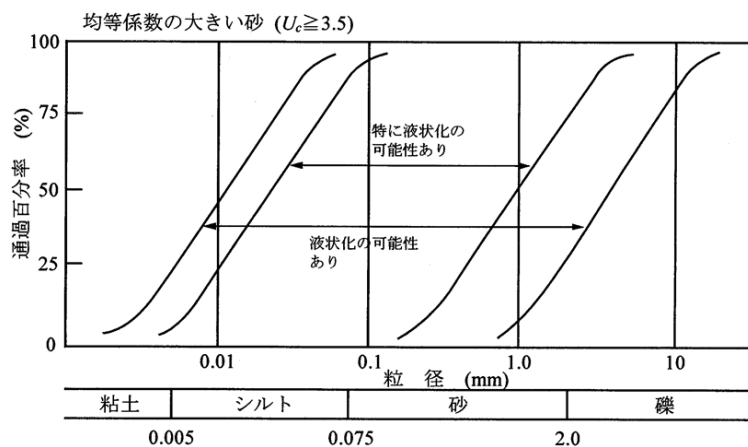


図 4.2-4 粒度による液化化判定 (港湾基準)

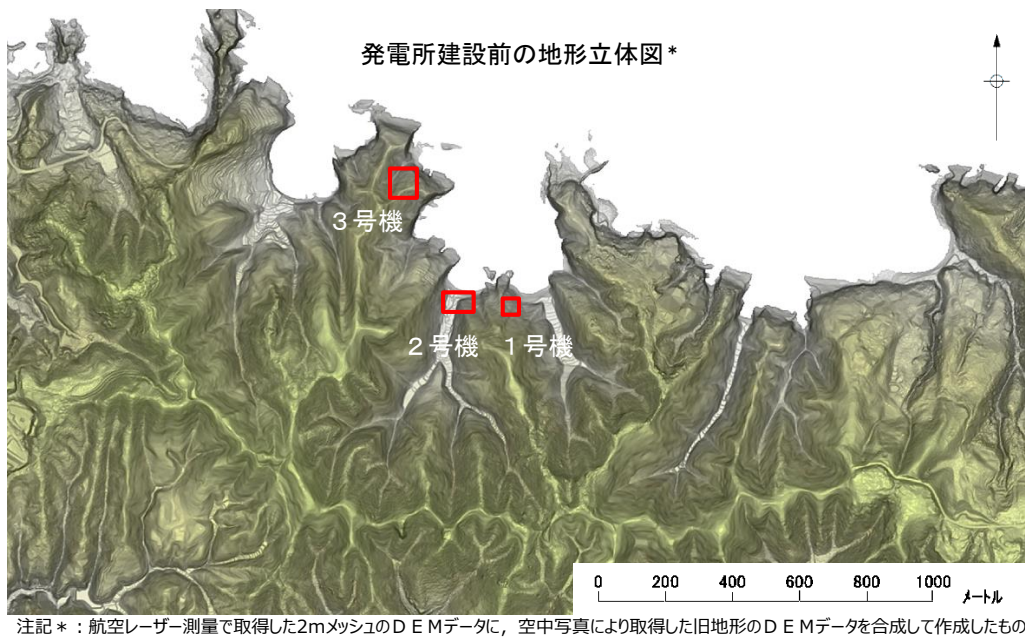


図 4.2-5 発電所建設前の地形立体図

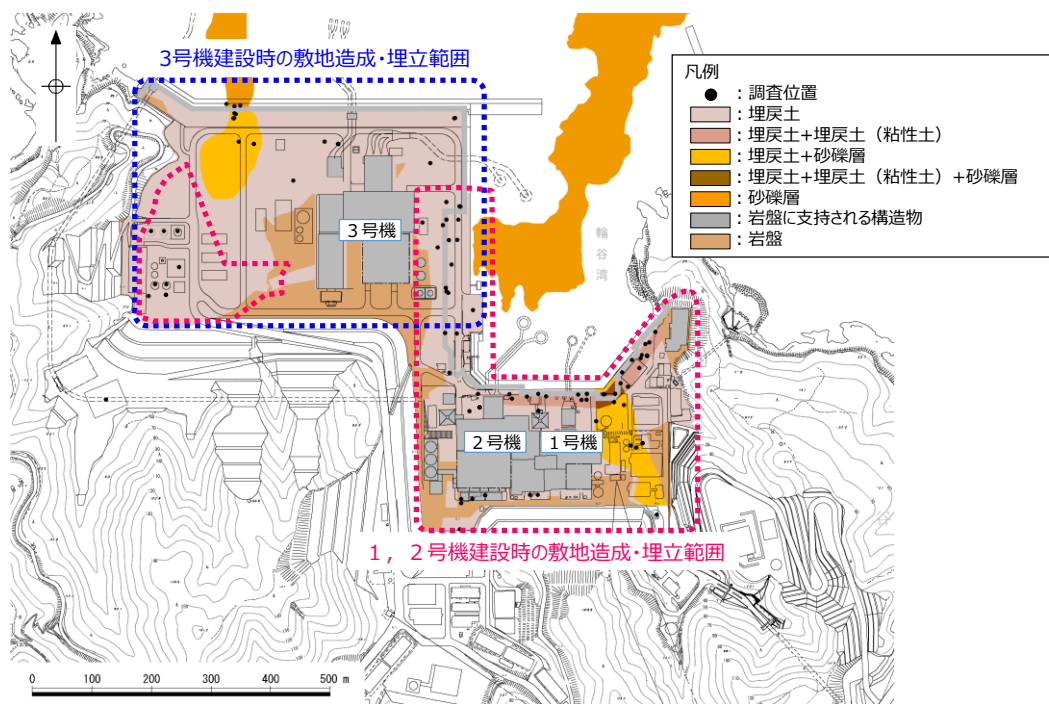
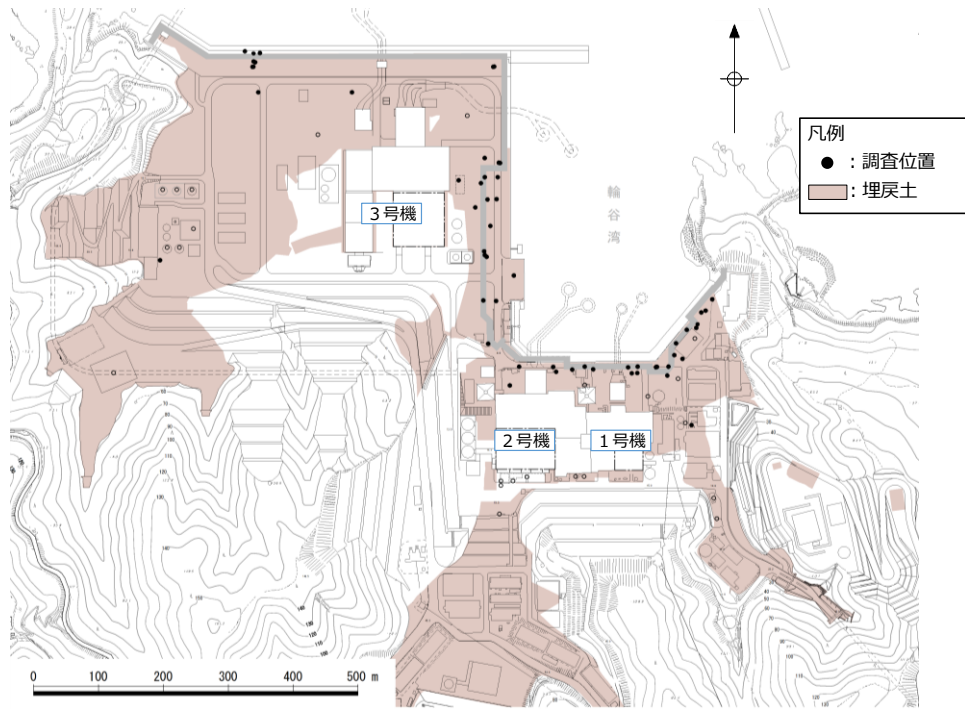
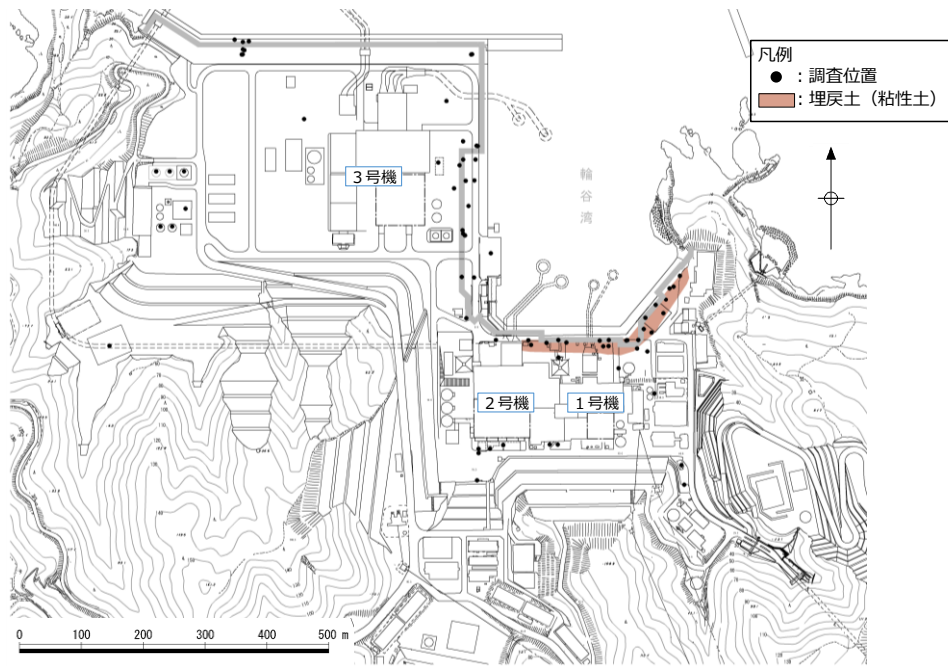


図 4.2-6 敷地の被覆層 (平面図)

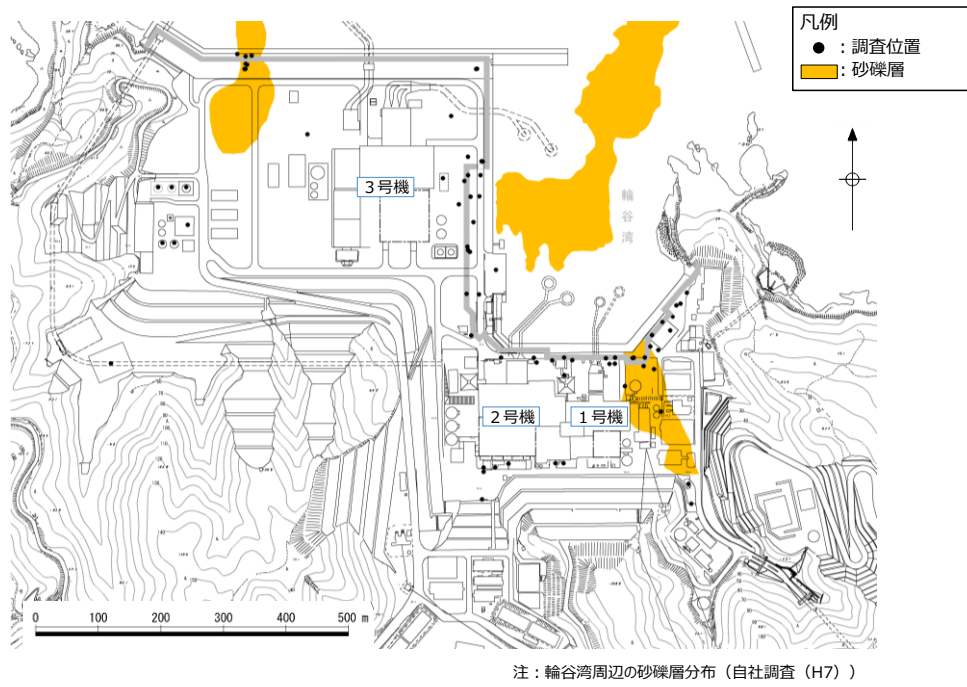


(a) 埋戻土



(b) 埋戻土 (粘性土)

図 4.2-7 敷地の地層分布状況 (平面図)

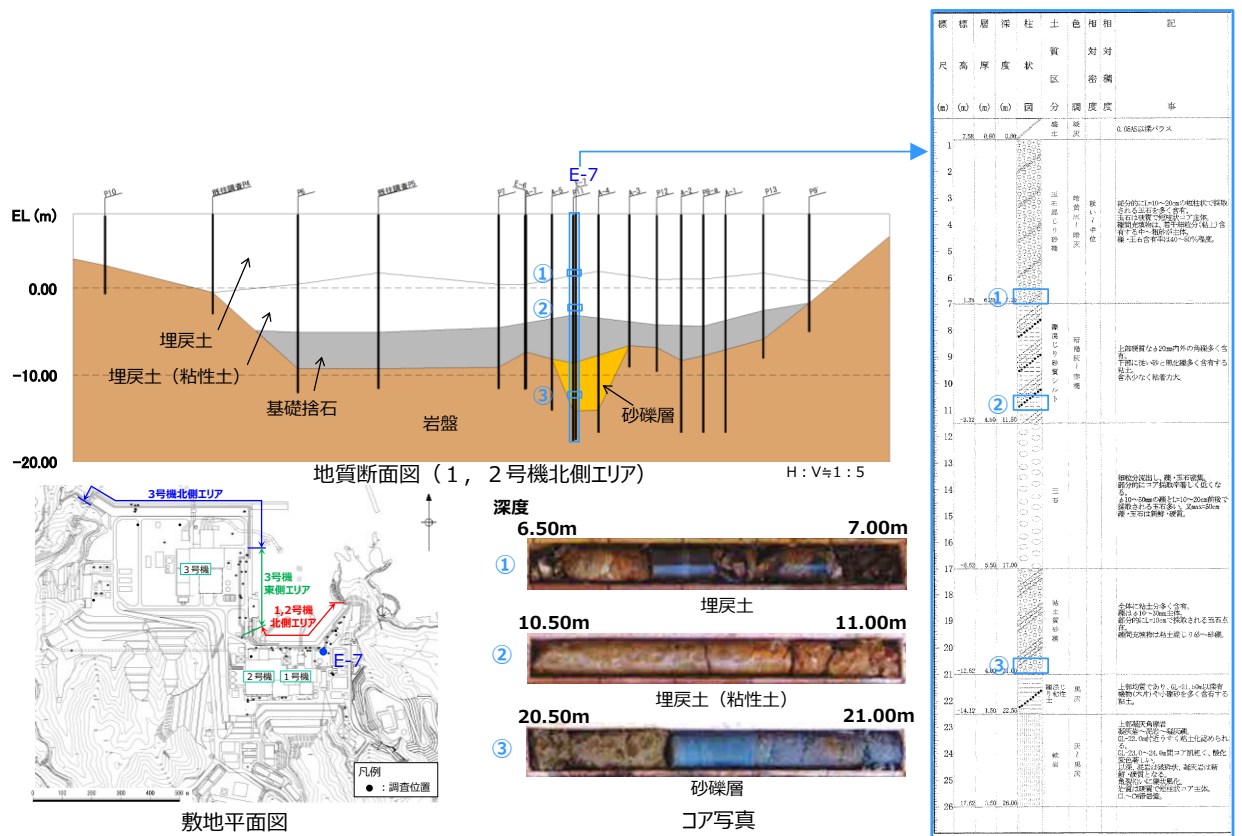


(c) 砂礫層分布図

図 4.2-7 敷地の地層分布状況（平面図）

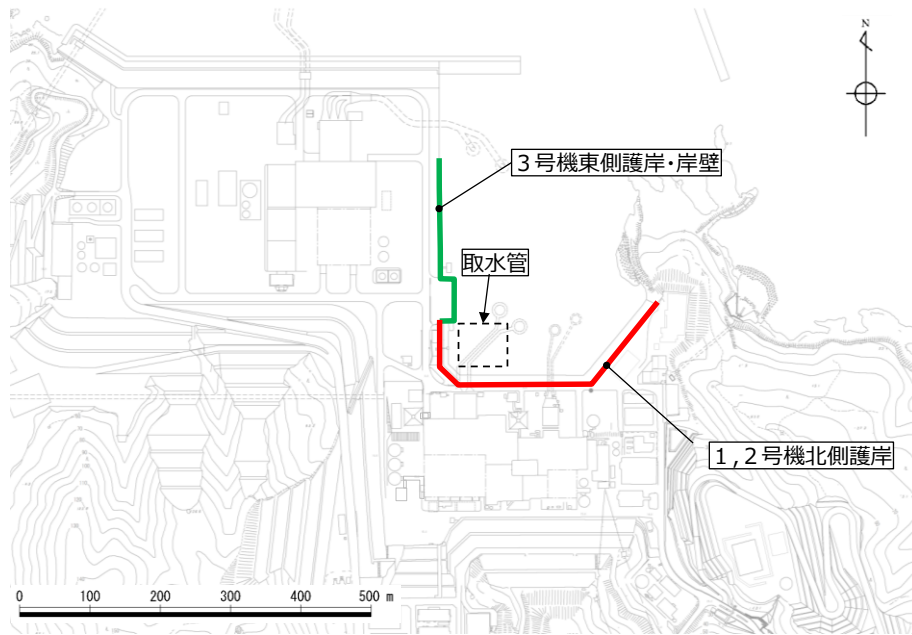




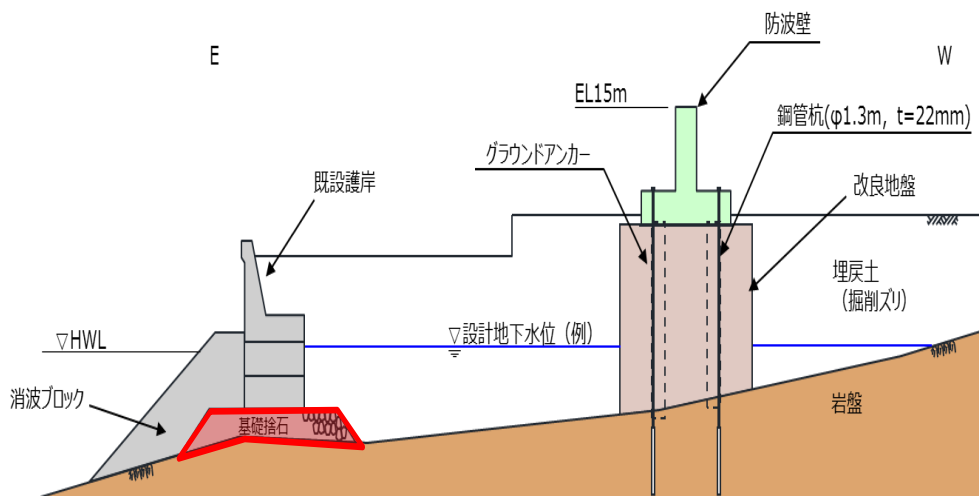


(c) 1, 2号機北側エリア分布図  
 図 4.2-8 敷地の地層分布状況 (断面図)



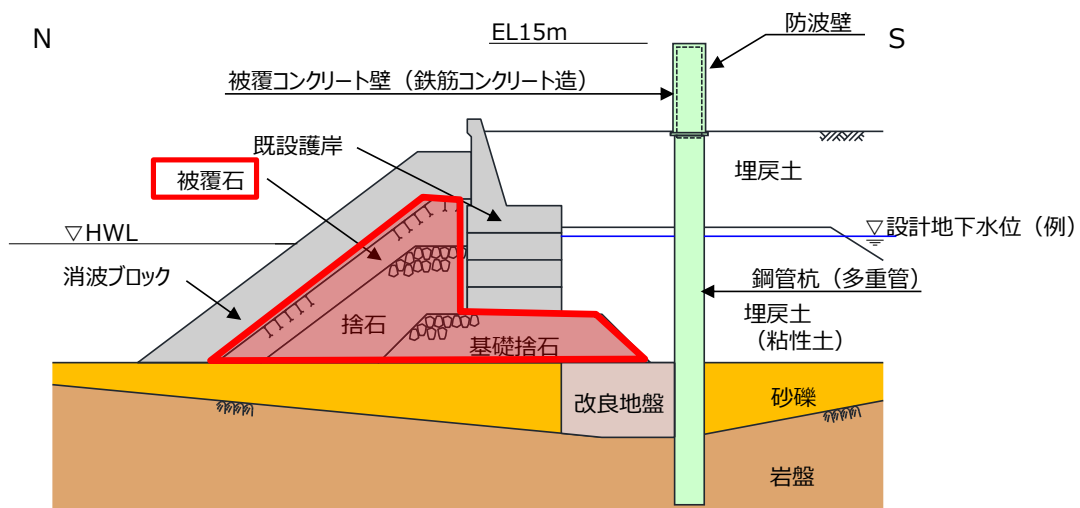


敷地平面図

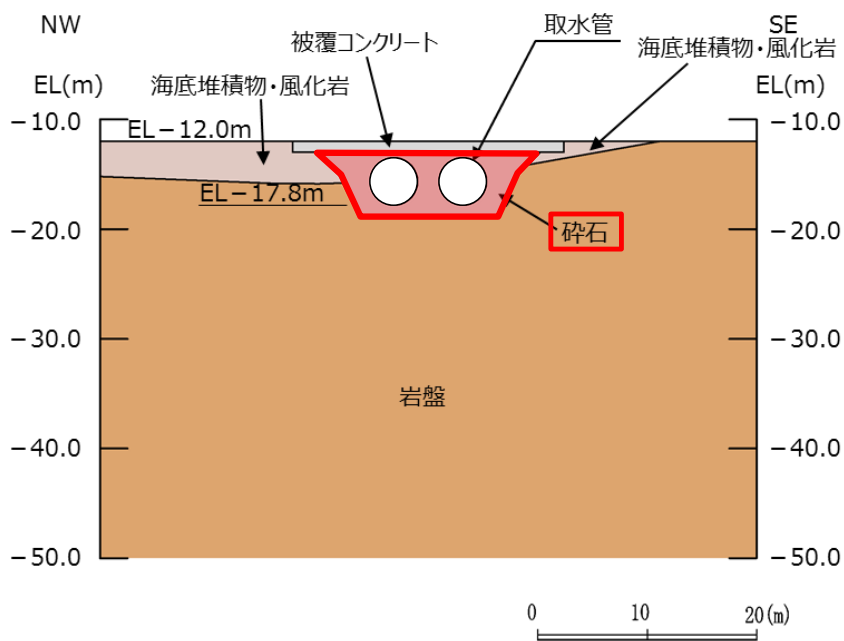


(a) 3号機東側護岸

図 4.2-9 購入地盤材料の使用箇所



(b) 1, 2号機北側護岸



(c) 取水管

図 4.2-9 購入地盤材料の使用箇所

表 4.2-11 地盤材料の液状化判定の要否 (EL 15m 以下)

地盤材料	規格	分布場所・使用場所	液状化判定の要否
埋戻土	—	・ 概ね全域に分布	粒径2mm未満の砂を含むため、道路橋示方書Vに基づき液状化判定を実施する。
埋戻土 (粘性土)	—	・ 1, 2号機北側護岸背面に分布	粘土質であるため対象外とする (土の液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205) 結果: $I_p=27.3$ )。
砂礫層 (崖錐・海底堆積物)	—	・ 1号機東側に局所的に分布 ・ 3号機北側に局所的に分布 ・ 輪谷湾内に分布	粒径2mm未満の砂を含むため、道路橋示方書Vに基づき液状化判定を実施する。
碎石	20~80mm (底部のみ5~20mm)	・ 取水管	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること、十分な透水性を有することから、対象外とする。
基礎捨石	200~250mm程度 (30kg/個以上)	・ 1, 2号機北側護岸 ・ 3号機東側護岸・岸壁	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること、十分な透水性を有することから、対象外とする。
被覆石	700~800mm程度 (1.5t/個)	・ 1, 2号機北側護岸	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること、十分な透水性を有することから、対象外とする。

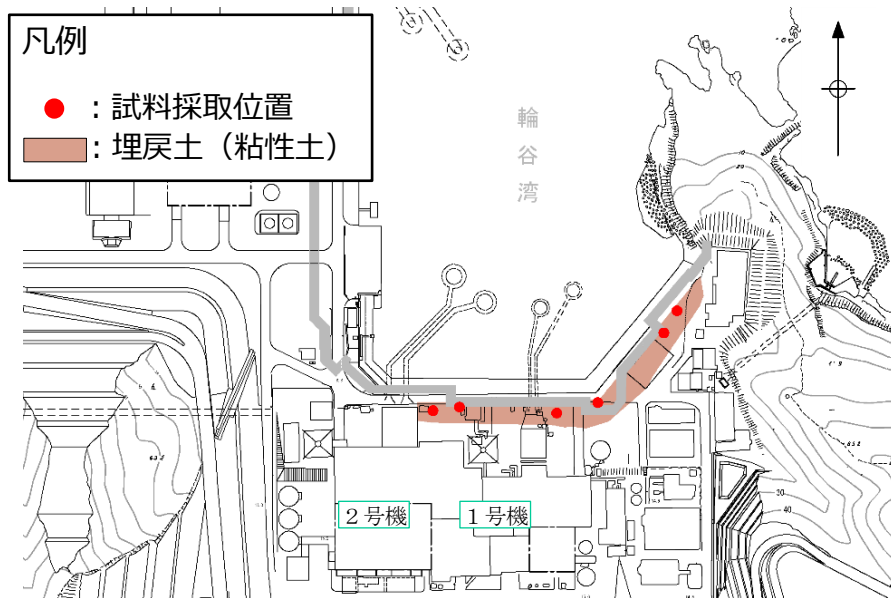
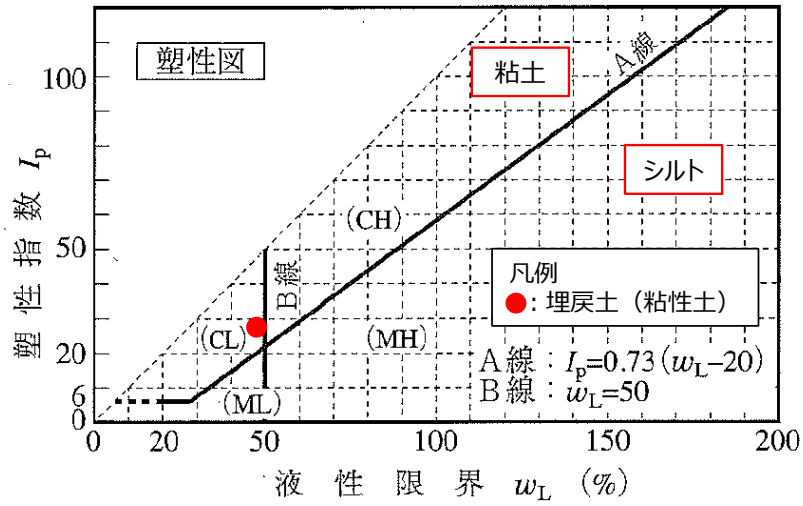


図 4.2-10 埋戻土 (粘性土) の分布状況及び試料採取位置



図 4.2-11 採取した埋戻土 (粘性土)

	液性限界 $w_L$ (%)	塑性限界 $w_p$ (%)	塑性指数 $I_p$
埋戻土 (粘性土) (平均値, 試験数: 22)	48.5	21.2	27.3



※ 地盤工学会, H22: 土質試験 基本と手引きに加筆

図 4.2-12 塑性図による粘性土の分類

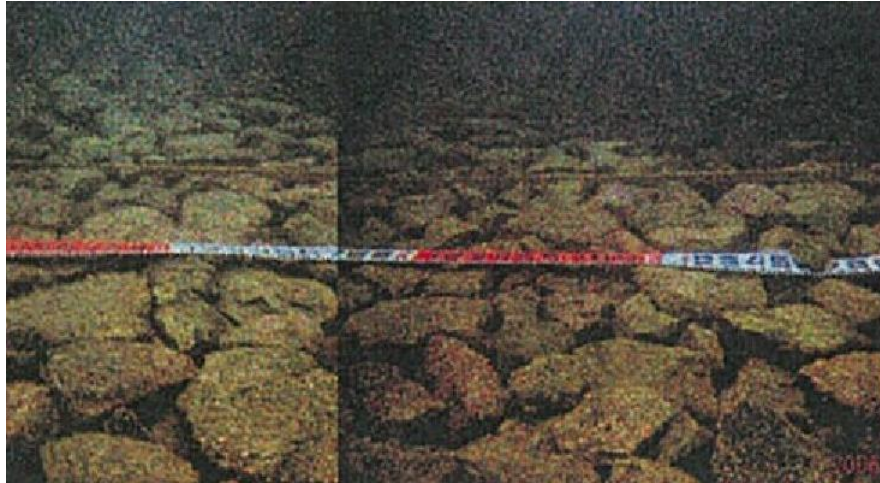
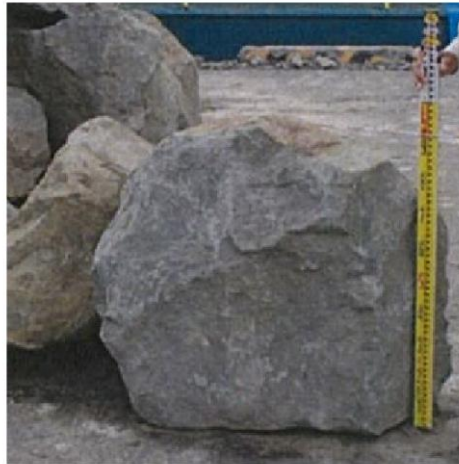


図 4.2-13 基礎捨石の設置状況 (防波堤)



被覆石の寸法（1，2号機北側護岸）



被覆石の設置状況（1，2号機北側護岸）

図 4.2-14 被覆石の寸法及び設置状況の写真

地層名	50%粒径 (平均) (mm)	10%粒径 (平均) (mm)	細粒分含有率 (平均) (%)
埋戻土	16.5	-	-
砂礫層	9.1	0.0651	15.6

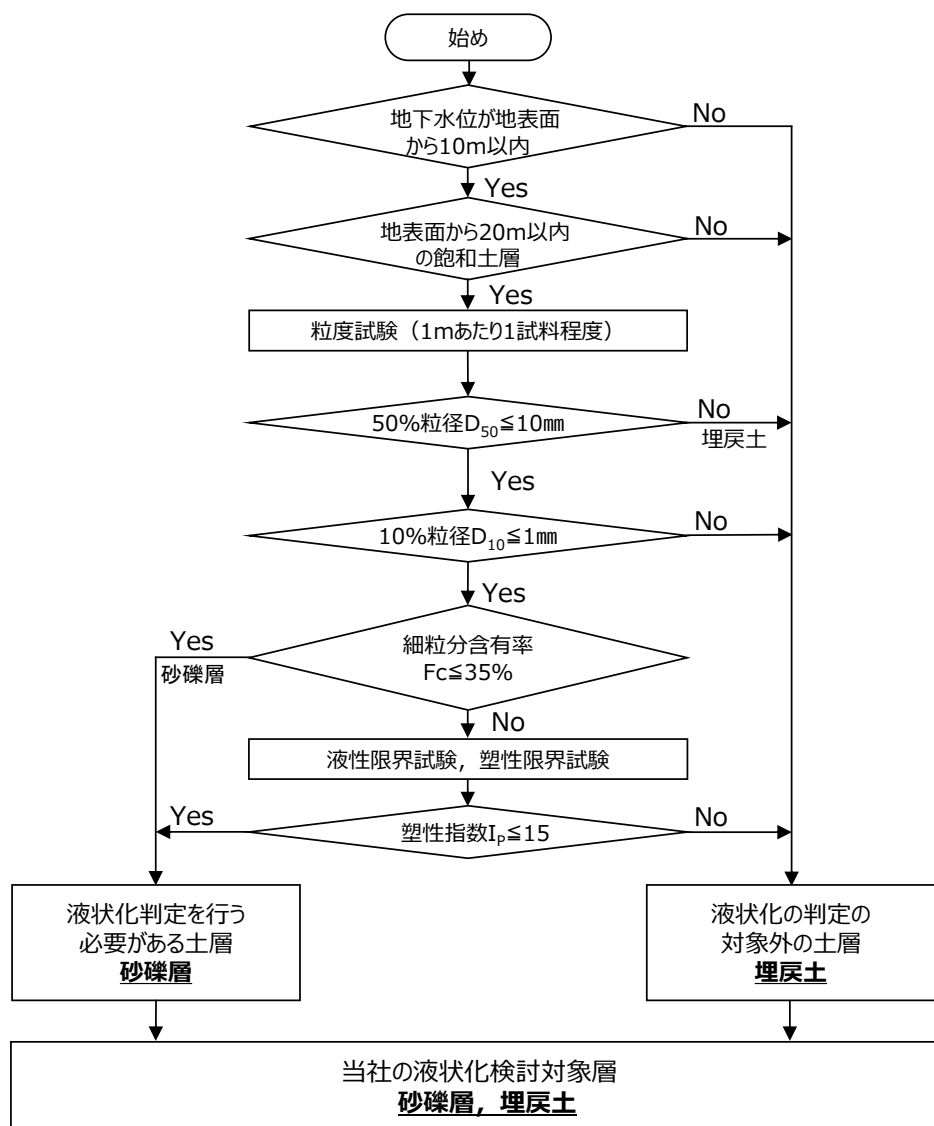
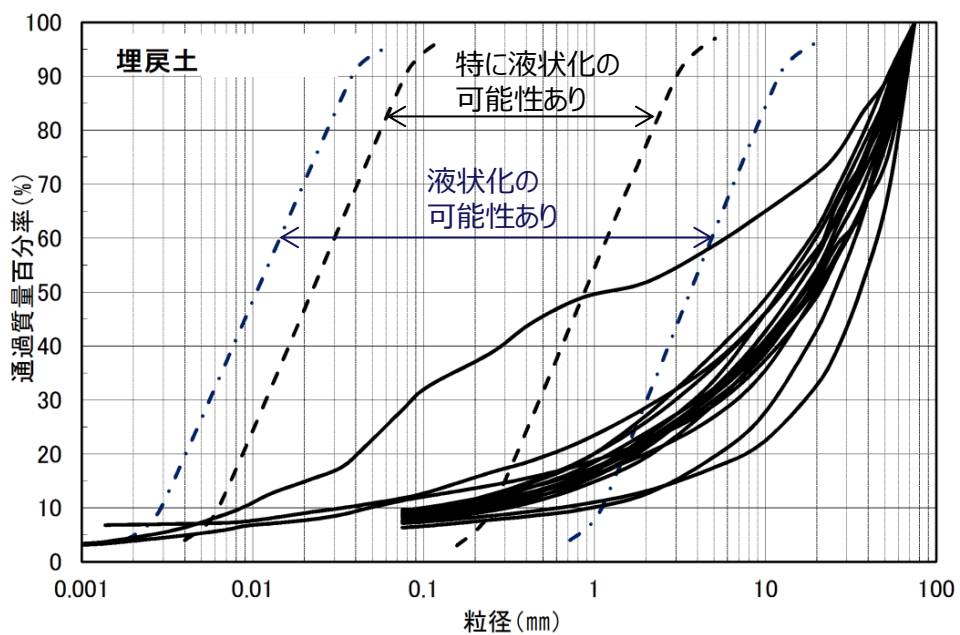
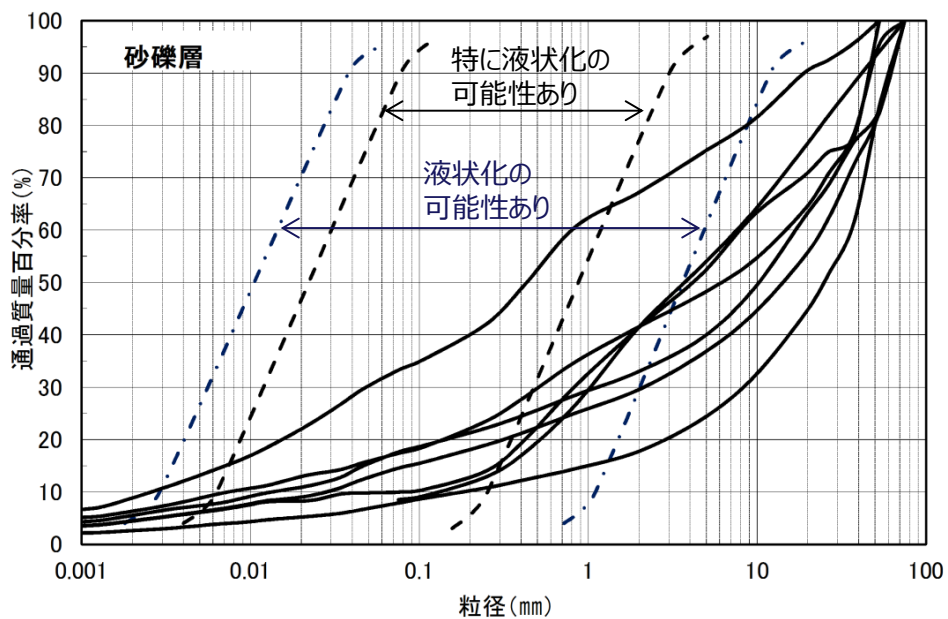


図 4.2-15 道路橋示方書 V に基づく抽出結果





埋戻土の粒度による液状化判定



砂礫層の粒度による液状化判定

図 4.2-16 港湾基準に基づく抽出結果

(3) 液状化強度試験試料採取位置とその代表性

a. 液状化強度試験試料の採取方法

ロータリー式三重管サンプラーに加えて，液状化強度試験データ数を確実に増やす観点から，表層試料採取により液状化強度試験試料を採取した。

b. 液状化強度試験試料採取位置とその代表性

図 4.2-17 に敷地内の試料採取地点位置図を示す。

敷地内の液状化評価対象層として，埋戻土及び砂礫層の分布状況から以下のとおり地点を選定し，試料を採取して液状化強度試験を実施する。

埋戻土は3号機西側から1，2号機東側に広く分布している。このうち，地下水水位以下で埋戻土が厚く分布している護岸法線に沿った地点を広範囲に選定し，ロータリー式三重管サンプラーにより試料採取した（E-2～E-8）。なお，埋戻土に対する液状化強度試験の位置及びデータ数について，代表性・網羅性の確保及び保守的な液状化強度の設定の観点から，ロータリー式三重管サンプラーにより液状化強度試験データが得られていない位置を選定し，表層試料採取を追加実施した（A～E）。

砂礫層は局所的に分布していることから，分布箇所である3号機北側西端及び1，2号機北側東端の地点を選定し，ロータリー式三重管サンプラーにより試料採取した（E-1，E-7，E-8）。

ロータリー式三重管サンプラーにより，地表から岩盤まで不攪乱試料の採取を実施した。供試体作製が可能な試料（巨礫の有無，必要高さ，自立性等）を確認し，液状化強度試験を実施した。

併せて，近傍においてボーリング調査を実施し，標準貫入試験及び粒度試験用の試料採取を実施した。ロータリー式三重管サンプラーによる液状化強度試験実施箇所を図 4.2-18 に示す。

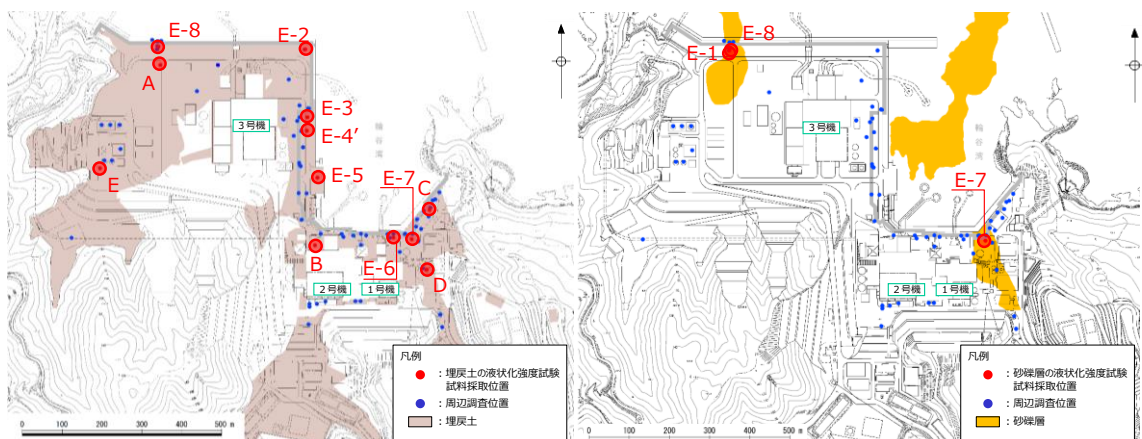
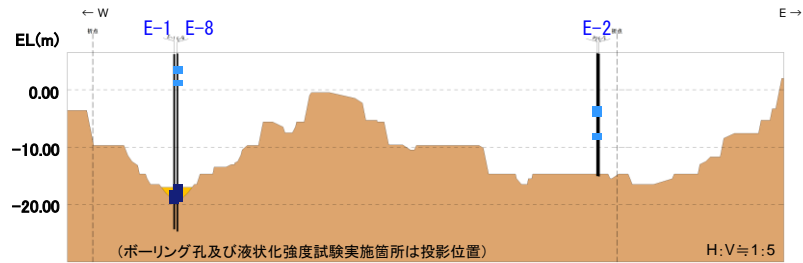
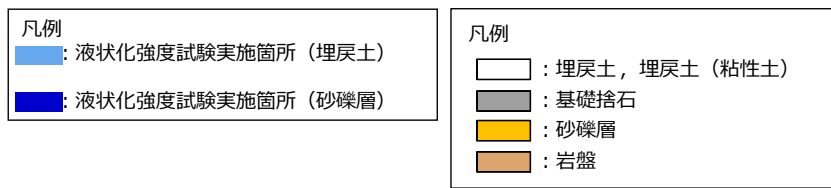
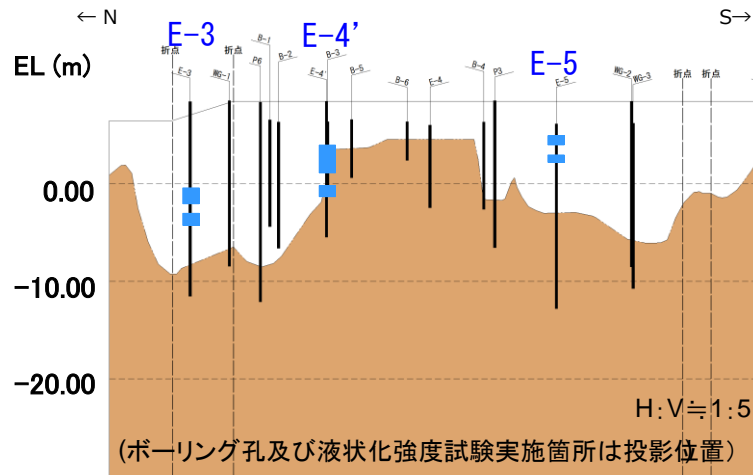


図 4.2-17 液状化強度試験試料採取地点位置図

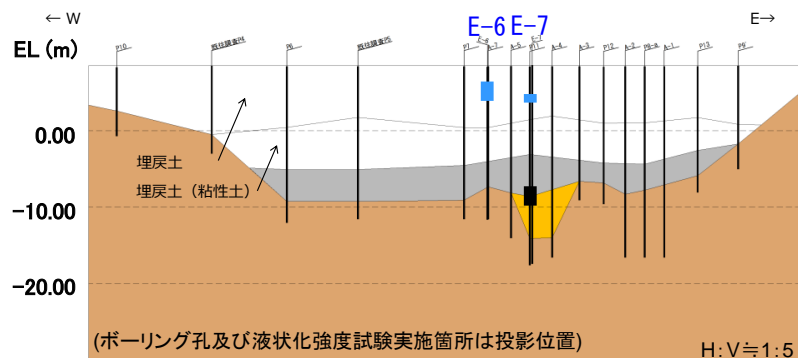




(a) 3号機北側エリア



(b) 3号機東側エリア



(c) 1, 2号機北側エリア

図 4.2-18 ロータリー式三重管サンプラーによる液状化強度試験実施箇所

敷地の被覆層（埋戻土）は敷地造成において発生した岩砕を主体とする材料により埋戻した人工地盤であることから、埋戻土の粒径加積曲線となるように粒度調整を行い、敷地の埋立工事における施工管理基準値となるよう密度調整を行うことにより、人工地盤である敷地の被覆層（埋戻土）を再現した供試体を作製する。図 4.2-19 に表層採取試料による供試体作成方法を示す。

路盤材以深の埋戻土を対象として表層試料採取を実施した（A～E地点）。表層試料採取による液状化強度試験実施箇所を図 4.2-20 に示す。また、表層試料採取にあたり、巨礫を除いて採取した。図 4.2-21 に表層試料採取状況及び巨礫の例を示す。

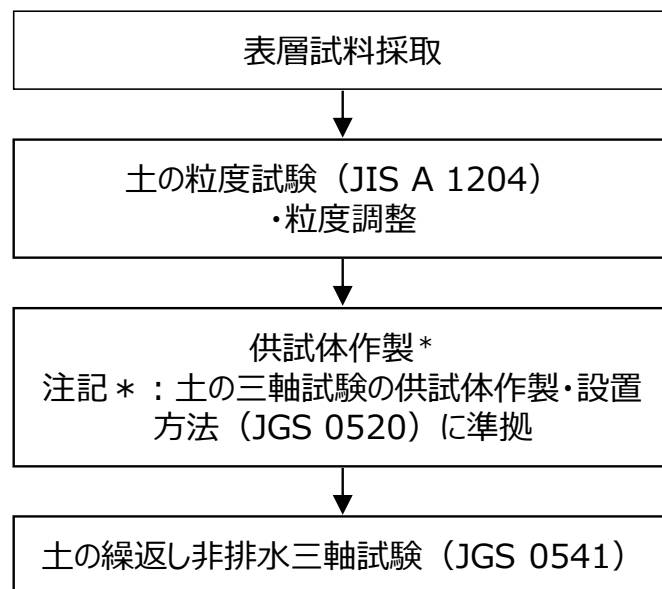


図 4.2-19 表層採取試料による供試体作成方法

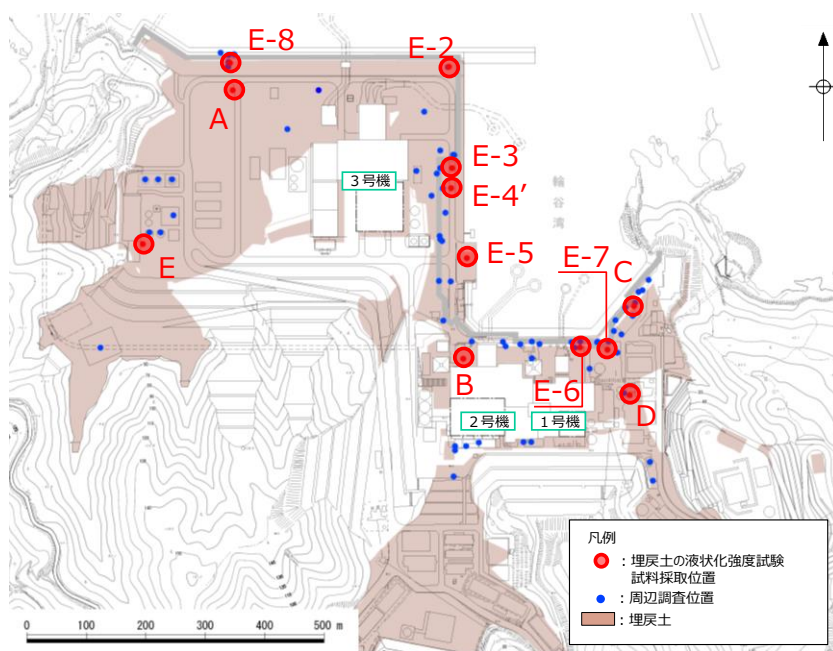


図 4.2-20 表層採取試料による液状化強度試験実施箇所



表層採取試料状況 (A地点)

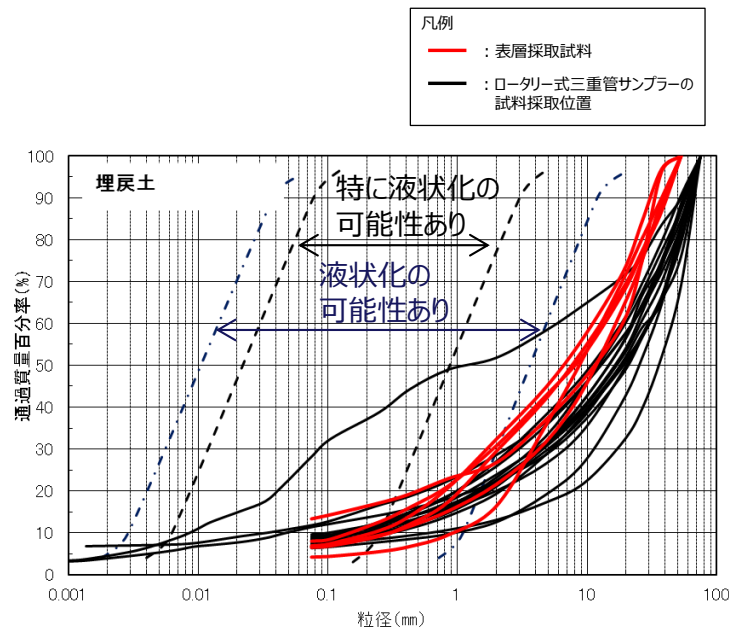


巨礫の例

図 4.2-21 表層試料採取状況及び巨礫の例

ロータリー式三重管サンプラーの試料採取位置の粒径加積曲線と同等になるよう、最大粒径 53mm として表層採取試料の粒度調整を実施した。粒度調整後の表層採取試料の粒径加積曲線及び細粒分含有率を図 4.2-22 に示す。

表層採取試料の細粒分含有率の平均値は、ロータリー式三重管サンプラーの試料採取位置の細粒分含有率の平均値及び平均値-1 $\sigma$  値の範囲内である。土の三軸試験の供試体作製・設置方法 (JGS 0520) に基づき、表層採取試料による供試体を作製した。



表層採取試料の細粒分含有率

	細粒分含有率 (%)
A	6.6/6.5
B	13.3
C	4.2
D	8.0
E	6.9
平均値	7.6

ロータリー式三重管サンプラーの試料採取位置の細粒分含有率

	細粒分含有率 (%)
平均値	9.8
平均値- $\sigma$	4.7

図 4.2-22 表層採取試料とロータリー式三重管サンプラーの試料採取位置の粒径加積曲線及び細粒分含有率

3号機建設時の敷地の埋戻しに当たり、大型締固め試験により乾燥密度  $\rho_d$  を算出した（締固めエネルギー  $1.0E_c$ 、乾燥密度  $\rho_d = 1.874\text{g/cm}^3$ ）。乾燥密度  $\rho_d = 1.874\text{g/cm}^3$  を踏まえ、礫補正後乾燥密度  $\rho_d' = 1.95\text{g/cm}^3$  を算出し、施工管理基準値とした。図 4.2-23 に締固めエネルギーと乾燥密度の関係図を示す。

礫補正後乾燥密度とは、粒径 53mm 以下の材料を対象に実施した大型締固め試験結果に対し、53mm 以上の礫を含む実際の埋戻土の乾燥密度を算出するための補正である。したがって、表層採取試料の最大粒径は 53mm であることから、表層採取試料による供試体作製に当たっては、乾燥密度  $\rho_d = 1.874\text{g/cm}^3$  を目標値とした。

供試体作製は、土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）に準拠して実施した。試料を 5 層に分けてモールド（直径 100mm）に入れ、静的締固め法により作製した。

以上の方法により表層採取試料による供試体を作製し、土の繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）を実施した。

表 4.2-12 に表層採取試料による供試体の乾燥密度を示す。

締固めエネルギー ( $E_c$ )	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
乾燥密度 $\rho_d$ ( $\text{g/cm}^3$ )	1.801	1.874	1.933	1.974	2.013

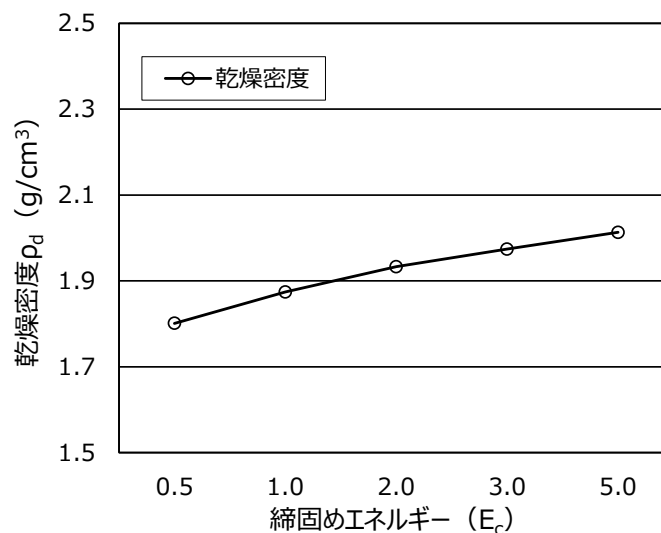


図 4.2-23 締固めエネルギーと乾燥密度の関係図

表 4.2-12 表層採取試料による供試体の乾燥密度

	乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )		乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )
A①	1.866	C②	1.873
A②	1.877	C③	1.873
B①	1.868	C④	1.877
B②	1.871	D①	1.872
C①	1.875	E①	1.875

c. 液状化強度試験試料採取位置の代表性確認

液状化強度試験試料採取位置の代表性確認を目的に、液状化強度試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体との比較、検討を行った。比較する指標としては、N値、細粒分含有率を選定する。表 4.2-13 に各基準類における液状化強度比  $R_L$  と基本物性の相関性を示す。

N値は、各基準類の液状化判定における液状化強度比  $R_L$  の算定式がいずれもN値をパラメータとした式であり、また、有効応力解析 (FLIP) の簡易設定法にN値がパラメータとして用いられており、液状化強度比  $R_L$  との相関が最も高いと考えられることから、指標として選定する。

細粒分含有率は、各基準類の液状化判定における液状化強度比  $R_L$  の算定式において、液状化強度比  $R_L$  を補正するパラメータとして用いられており、液状化強度比  $R_L$  との相関が高いと考えられることから、指標として選定する。

各基準における設計で設定する地盤物性値のばらつきに対する考え方は、「地盤工学会基準 JGS 4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則 (2006)」や「港湾基準」, 「道路橋示方書V」によると、平均値を原則とし、ばらつきを考慮する場合は変動係数等などに応じて設定するという考え方が示されている。

液状化強度試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体とのN値等の比較に際しては、各基準における地盤物性値のばらつきに対する考え方を参考に、「平均値」及び平均値から標準偏差  $\sigma$  を減じた「平均値- $1\sigma$  (以下「 $-1\sigma$  値」という)」について整理した。表 4.2-14 に各基準類における地盤物性値のばらつきに対する考え方を示す。

液状化強度試験を実施した箇所のうち、埋戻土及び砂礫層の液状化強度試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体や防波壁近傍におけるN値や物理特性 (細粒分含有率) の比較を行い、代表性を確認した。図 4.2-24 に各土層の基本物性の比較結果を示す。なお、各種試験は、JIS に基づき実施した。

E-2～E-8地点の埋戻土は、敷地全体と比べて、N値及び細粒分含有率ともに、液状化強度試験試料採取位置の平均値及び $-1\sigma$ 値が、敷地全体のばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）の範囲内であることから、液状化強度試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。また、埋戻土は敷地全体に分布するため、場所によって埋戻土の性状が異なる懸念があることから、敷地の広範囲にわたって設置された防波壁に着目して、液状化強度試験試料採取位置と3つの構造形式の防波壁近傍の基本物性を比較したところ、N値及び細粒分含有率ともに、液状化強度試験試料採取位置の平均値が、防波壁近傍のばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）の範囲内であることから、液状化強度試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。

E-1，E-7，E-8地点の砂礫層の細粒分含有率は、液状化強度試験試料採取位置の平均値及び $-1\sigma$ 値が、敷地全体のばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）の範囲内であった。また、N値は、液状化強度試験試料採取位置の平均値は敷地全体のばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）の範囲内であり、液状化強度試験試料採取位置の $-1\sigma$ 値は敷地全体のばらつき（ $\pm 1\sigma$ ）の範囲から僅かに外れているものの概ね一致していることから、液状化強度試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。なお、砂礫層は敷地の局所的な範囲で確認されており、液状化強度試験試料採取位置と敷地全体の調査位置とは近接している。



表 4.2-13 各基準類における液状化強度比  $R_L$  と  
基本物性の相関性

基準類名	液状化強度比 $R_L$ の算定 に用いる主物性	液状化強度比 $R_L$ の補正 に用いる物性
道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, H24 (下水道施設の耐震対策指針と解説, 日本下水道協会, H18) (河川砂防技術基準(案)同解説 設計編, 日本河川協会編, H9) (高圧ガス設備等耐震設計指針, 高圧ガス保安協会, H12)	N値 (有効上載圧を考慮した 補正を行う)	細粒分含有率 $F_c$
港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置(その2), 日本港湾協会, H19 (部分改訂, H24)		細粒分含有率 $F_c$
建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, H13 (水道施設耐震工法指針・同解説, 日本水道協会, H9)		細粒分含有率 $F_c$
鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, (財)鉄道総合技術研究所, H24		細粒分含有率 $F_c$ 平均粒径 $D_{50}$
港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, H19 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), 運輸省港湾局監修, H9		細粒分含有率 $F_c$

表 4.2-14 各基準類における地盤物性値のばらつきに対する考え方

基準類名	地盤物性値のばらつきに対する考え方
地盤工学会基準 JGS4001	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計に用いる「特性値」の決定にあたっては、過去の経験にもとづき、地盤パラメータのばらつきや単純化したモデルの適用性に十分留意しなければならない。</li> <li>この特性値は、原則として導出値の平均値(期待値)である。この平均値は単なる機械的な平均値ではなく、統計的な平均値の推定誤差を勘案したものでなければならない。</li> <li>特性値を示すにあたっては、地盤の特性を記述するために、特性値に加えて、導出値のばらつきの指標(たとえば標準誤差や変動係数)を含めることが望ましい。</li> </ul>
港湾基準	<ul style="list-style-type: none"> <li>性能照査に用いる地盤定数の設計用値は、原則として地盤工学会基準JGS4001に基づき、推定する。</li> <li>地盤定数の代表値である特性値は、データ数が十分かつ導出値のばらつきが小さい場合には、原則として導出値の平均値をもって算定することができる。ただし、データ数が不足している場合(10個未満)及び導出値のばらつきが大きい場合には、導出値の平均値を補正した上で、特性値を設定する必要がある。</li> <li>特性値は、導出値のばらつきに関する補正係数<math>b_1</math>を標準偏差として定義される変動係数に応じて設定することとする。</li> </ul>
道路橋示方書	<ul style="list-style-type: none"> <li>地盤は複雑でばらつきの大きい材料であるが、設計に用いる地盤定数は、基礎に作用する荷重に対して、その条件下で最も高い確率で起こり得る基礎の挙動を推定するものである。したがって、地盤定数は、計算式の精度や特性を考慮したうえで、当該地盤の平均的な値と考えられるものを求めることが原則である。</li> <li>自然地盤から得られる計測データは多様で、しかもばらつくのがふつうである。データのばらつきだけでなく、データ数を合理的に評価して設計に用いる地盤定数を定める必要がある。</li> </ul>



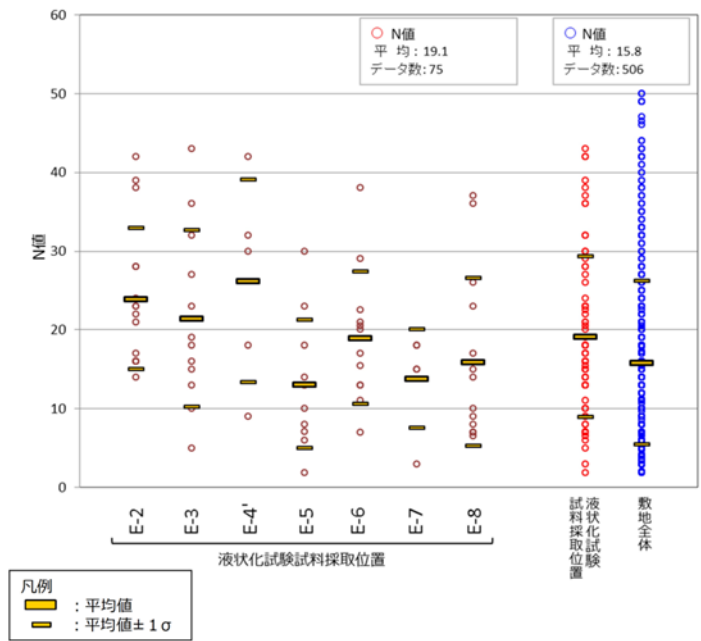


図 4.2-24(1) 埋戻土の液状化強度試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較 (N値)

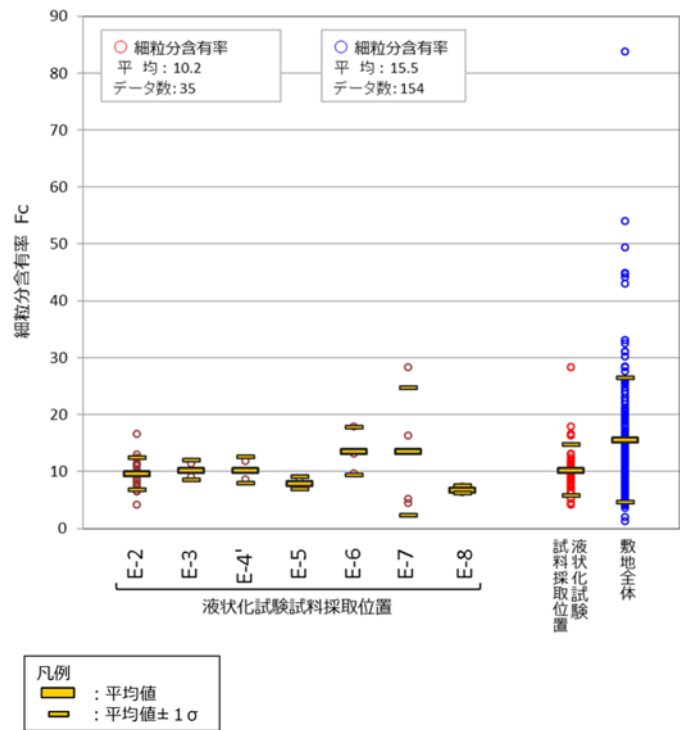


図 4.2-24(2) 埋戻土の液状化強度試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較 (細粒分含有率)

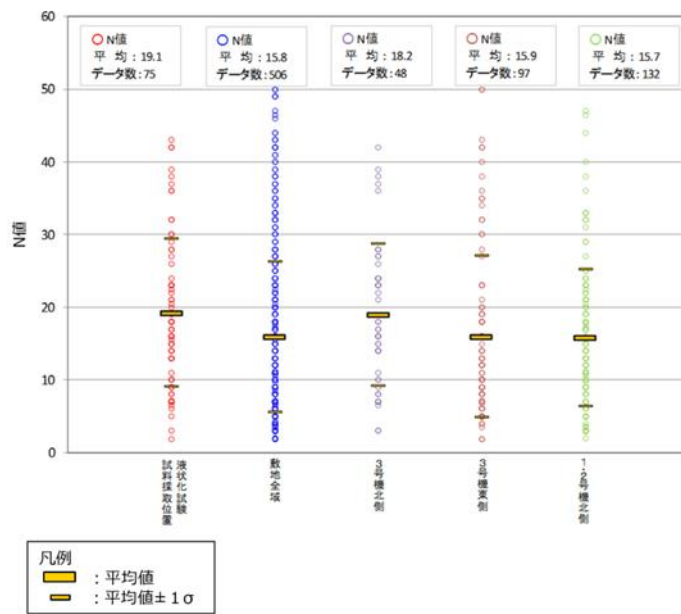


図 4.2-24(3) 埋戻土の液状化強度試験試料採取位置と防波壁近傍の基本物性比較 (N値)

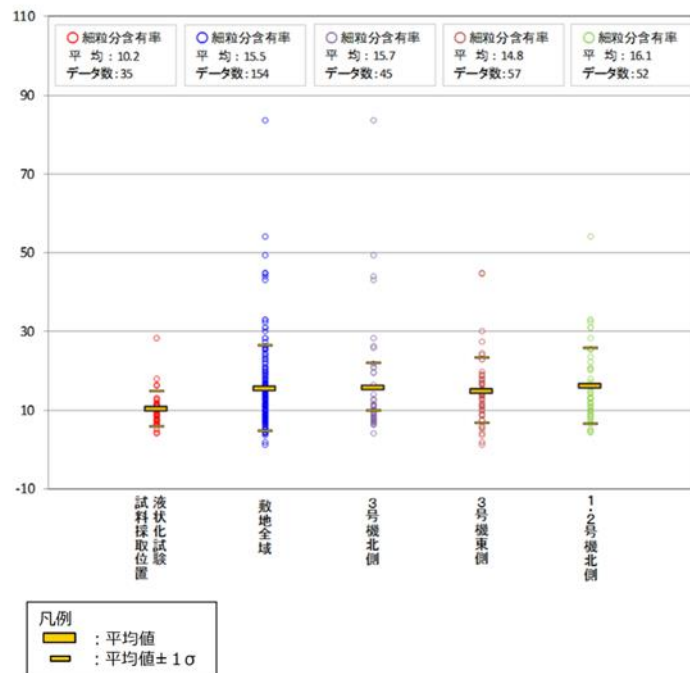


図 4.2-24(4) 埋戻土の液状化強度試験試料採取位置と防波壁近傍の基本物性比較 (細粒分含有率)

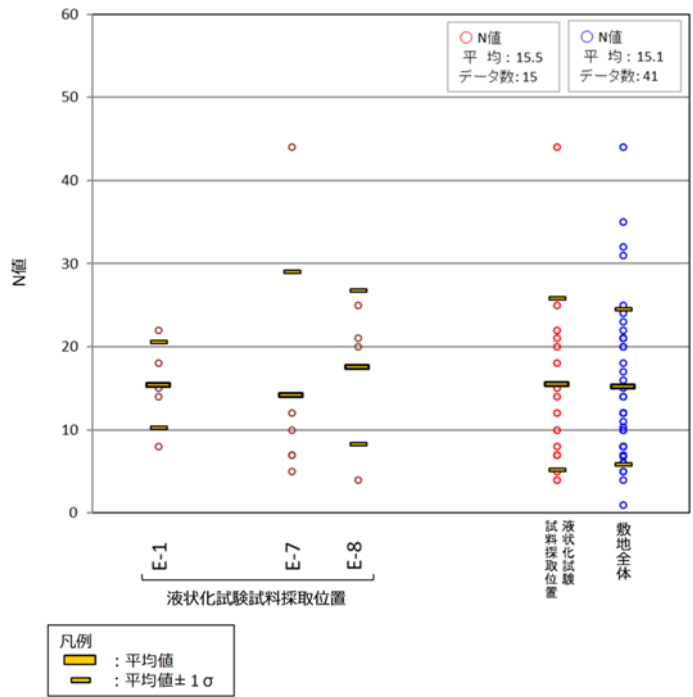


図 4.2-24(5) 砂礫層の液化化強度試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較 (N値)

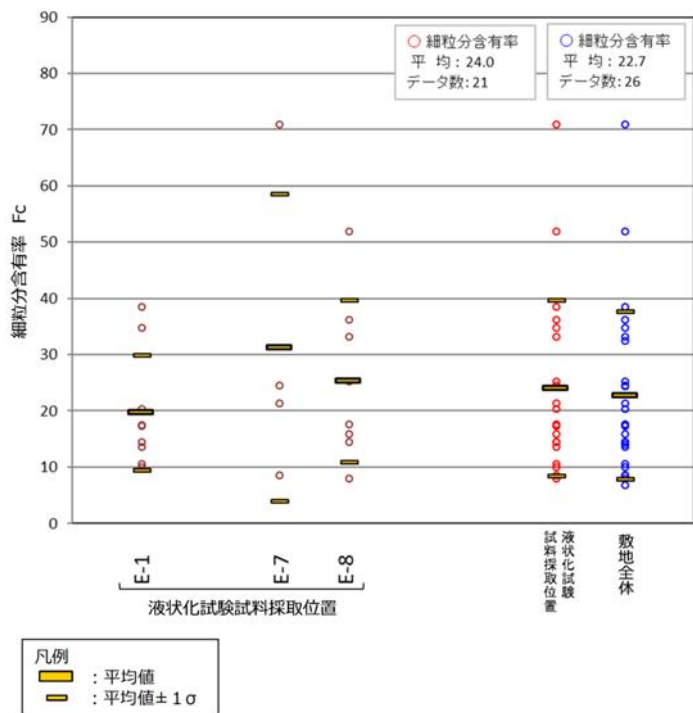


図 4.2-24(6) 砂礫層の液化化強度試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較 (細粒分含有率)

(4) 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

a. 液状化強度試験方法

地盤工学会では、地盤の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）（地盤工学会，H21）が規定されている。実務的には、地盤の液状化強度特性を求める試験方法として、繰返し非排水三軸試験のほかに、中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験等が用いられる。（安田，H3）

図 4.2-25 に一般的な液状化強度試験方法の例を，図 4.2-26 に液状化強度試験結果の例を示す。

繰返し非排水三軸試験では、等方に拘束圧をかけた状態で軸方向に外力を繰返し与えて液状化させるので、圧縮側と引張側で応力経路やひずみの生じ方が異なる。一方、繰返しねじりせん断試験では、円周方向に回転させるように外力を加える。原地盤の拘束圧に近い異方応力状態での試験も可能である。また、応力経路も原地盤に近い挙動となる。

ただし、実務では装置や操作が比較的容易であり、実績の多い繰返し非排水三軸試験が用いられることが多い。また、繰返しねじりせん断試験では中空の円筒状の供試体を用いるので、粒径が大きい試料には適用が困難である。

以上を踏まえ、埋戻土及び砂礫層を対象とした液状化強度試験を実施するに当たり、繰返し非排水三軸試験を採用した。

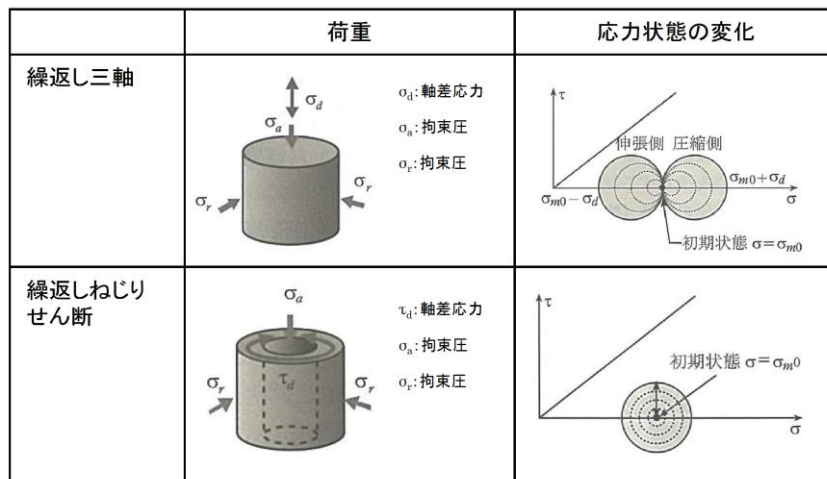


図 4.2-25 一般的な液状化強度試験方法の例（吉田，H22）

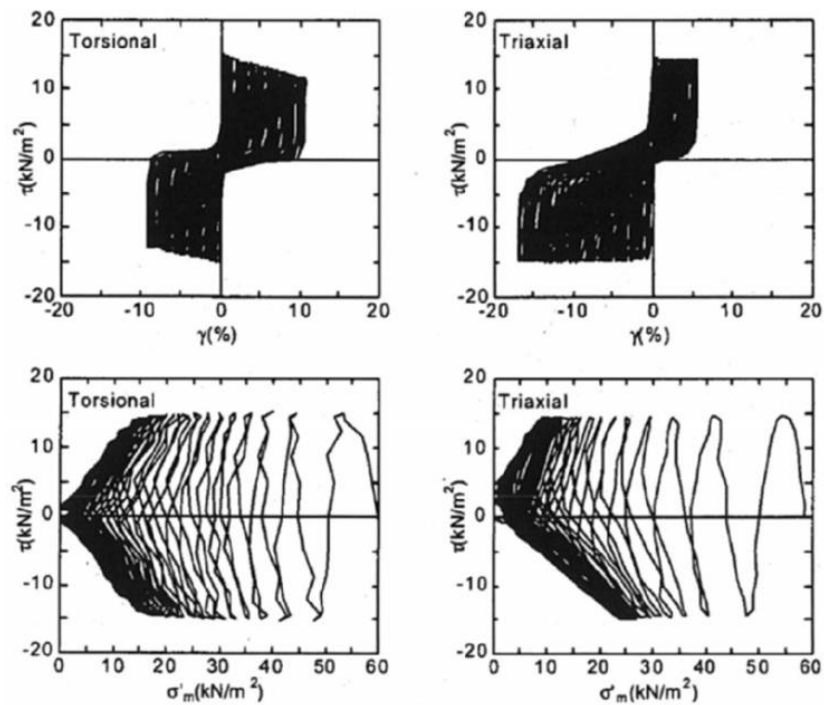


図 4.2-26 液状化強度試験結果の例  
 [上図：応力-ひずみ関係，下図：応力経路]  
 (土木学会，H15)

実施した繰返し非排水三軸試験の概要を図 4.2-27 に示す。

土の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541-2009) を参考に実施した。なお，供試体はロータリー式三重管サンプラー及び表層試料採取により採取した試料とした。

**【試験概要】**

- 供試体寸法 : 外径 88mm, 高さ 176mm
- 載荷波形 : 正弦波 (0.1Hz)
- 拘束圧 : 供試体平均深度の有効土被り圧を考慮して設定
- 両振幅軸ひずみ 10% に達するまで試験を実施する。
- 所定の両振幅軸ひずみ (1, 2, 5, 10%) 及び過剰間隙水圧比 0.95 の繰返し回数 を評価。

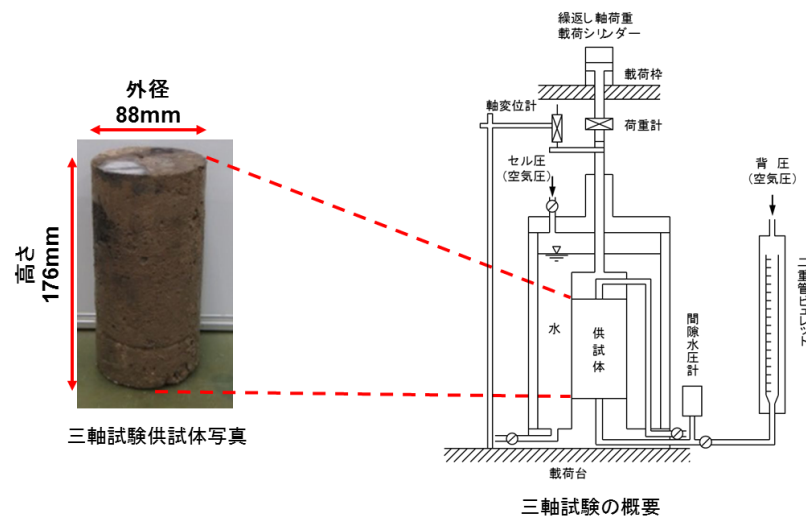


図 4.2-27 繰返し非排水三軸試験の概要

b. 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方

レベル2地震動による液状化研究小委員会活動成果報告書（土木学会，H15）では，地盤の液状化及びそれに関連する事象の定義として，以下のように記載されている。図 4.2-28 に地盤の強度とダイレイタンスー特性の概要を示す。

【液状化】

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

【サイクリックモビリティ】

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

【繰返し軟化】

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

これらの事象のうちサイクリックモビリティは，その現象の違いから一般的に液状化とは区別されている（表 4.2-15 参照）。以下に既往文献におけるサイクリックモビリティの記述を示す。また，図 4.2-29 及び図 4.2-30 に緩い砂と密な

砂の液状化強度試験結果の比較を示し、液状化とサイクリックモビリティの違いを整理した。

- ・サイクリックモビリティとは、砂などの繰返し载荷において、有効拘束圧がゼロに近づいてから、载荷時にせん断剛性の回復、除荷時に有効応力の減少を繰り返していくが、ひずみは有限の大きさにとどまる現象であり、液状化とは区別して用いられることがある。（地盤工学会，H18）
- ・地盤の液状化は、緩い砂地盤が繰返しせん断を受け、せん断振幅が急増し、地盤全体が泥水状態となり、噴砂や噴水を伴うことが多いので、現象的にサイクリックモビリティとは異なる。（井合，H20）
- ・サイクリックモビリティにおいて、有効応力がゼロになるのは、せん断応力がゼロになる瞬間だけであり、せん断応力が作用している間は有効応力が存在するので、間隙水圧比が100%に達した後でも、繰返しせん断に対して相当な剛性を保持する。（吉見，H3）
- ・密詰めの場合には大ひずみは生じない。一時的に有効拘束圧が0になっても、その後せん断力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効拘束圧が増加（回復）し、有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。この現象を“サイクリックモビリティ”と呼んで液状化と区別することもある。（安田，H3）

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

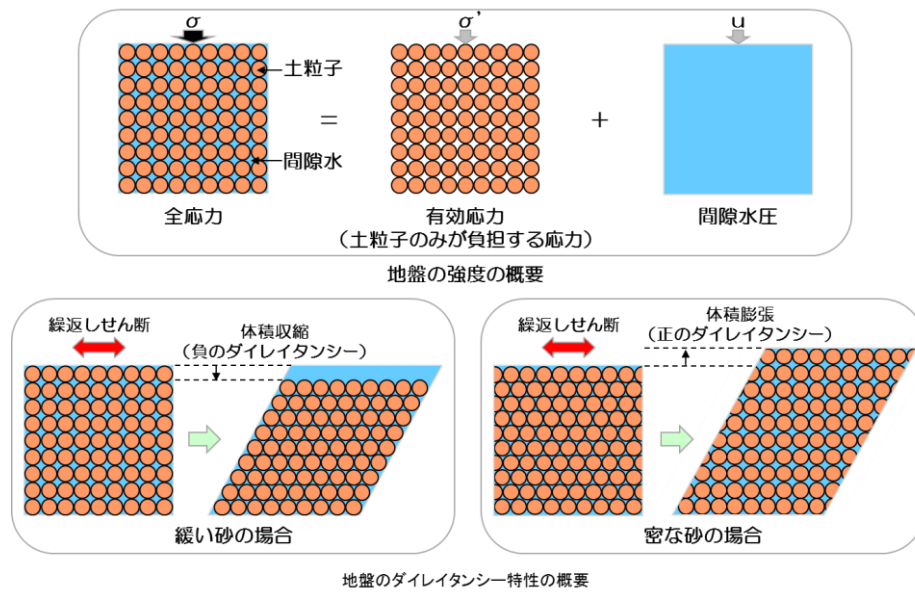


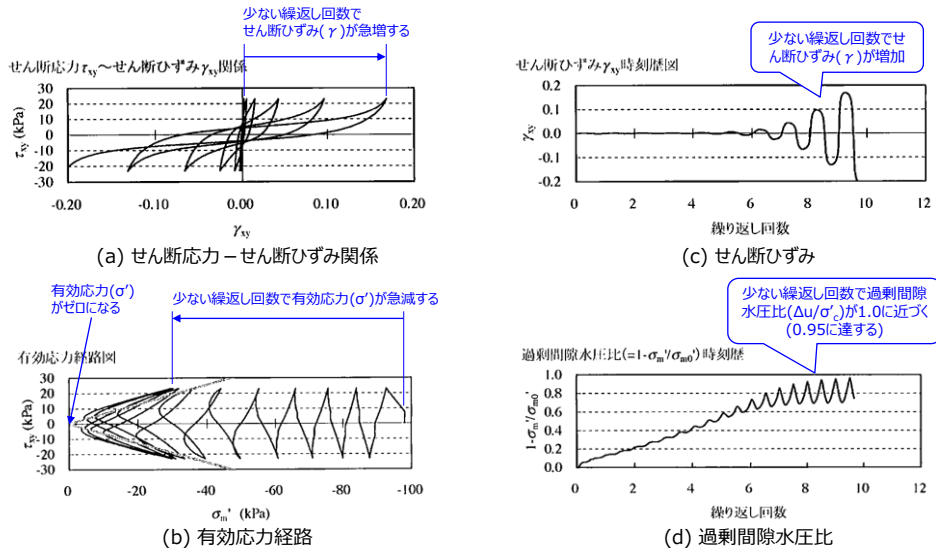
図 4.2-28 地盤の強度とダイレイタンス特性の概要

表 4.2-15 液状化強度試験結果の分類

○：該当する ×：該当しない

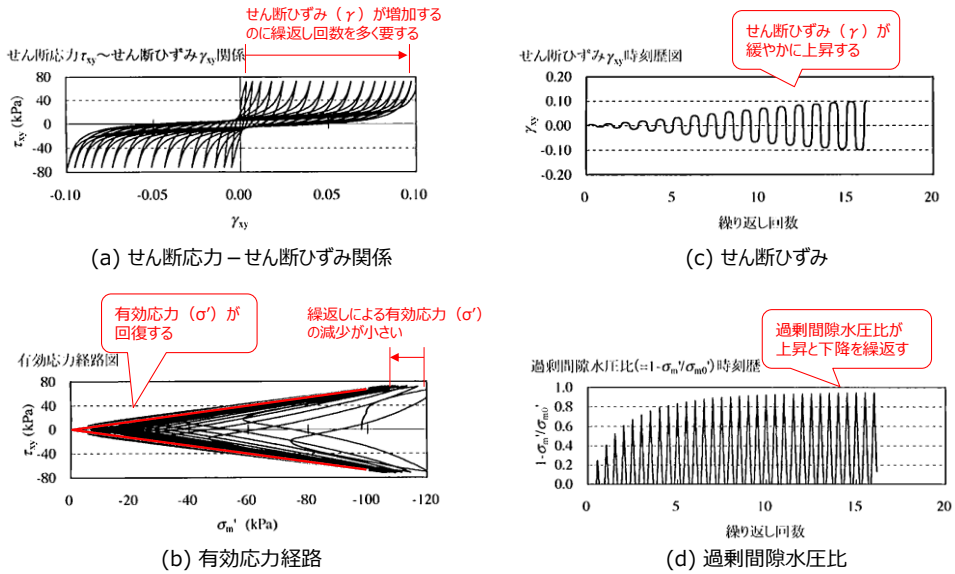
判定項目	液状化	繰返し軟化		非液状化
			サイクリック モビリティ	
・ 間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○	○	○	×
・ 有効応力がゼロまで低下する。	○	×	○	×
・ 液体状となり流動する。 (ひずみが急増する。)	○	×	×	×
・ 正のダイレイタンス特性により せん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	×	○	○	○





液状化試験の例（液状化する場合）（井合進，H20）

図 4.2-29 緩い砂の液状化強度試験結果



液状化試験の例

（繰返し軟化（サイクリックモビリティを含む）の場合）（井合進，飛田哲男，小堤治（H20））

図 4.2-30 密な砂の液状化強度試験結果

c. 液状化強度試験結果の分類

埋戻土及び砂礫層の液状化強度試験結果のまとめを表 4.2-16 及び表 4.2-17 に示す。

埋戻土の試験結果は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し、上昇時に 1.0 に近づき (0.95 を上回り)、せん断ひずみは緩やかに上昇する。また、有効応力は保持している、若しくは減少するがせん断変形時の正のダイレイタンス特性により回復した。一方、E-4' 地点及びD地点では過剰間隙水圧比が 0.95 を上回らなかった。これらの状況から、埋戻土(掘削ズリ)は非液状化、若しくは繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む)であると判断した。

供試体直径の 1/5 を超える礫を含む供試体については、土の三軸試験の供試体作製・設置方法 (JGS 0520) を満足しないため、試験結果を参考値とし、以降の評価には採用しない。埋戻土の液状化強度試験結果のうち、供試体直径の 1/5 を超える礫を含む供試体について、液状化試験後の写真を表 4.2-18 に示す。

砂礫層の試験結果は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し、上昇時に 1.0 に近づき (0.95 を上回り)、せん断ひずみは緩やかに上昇する。また、有効応力は保持している、若しくは減少するがせん断変形時の正のダイレイタンス特性により回復した。これらの状況から、砂礫層は繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む)であると判断した。

これらの区分を整理して、表 4.2-19 に示す。

すべての土層で、液状化強度試験結果は繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む)あるいは非液状化を示している。このことは、50%粒径が 10 mm 超過、又は、10%粒径が 1 mm 超過である、粗粒で均等係数が低い礫質土では透水係数が高く液状化しにくいという道路橋示方書 V の記載に整合する。

埋戻土及び砂礫層は液状化を示さず、道路橋示方書 V の液状化判定法 (FL 法) が適用できないと考えられることから、埋戻土について、液状化強度試験が基準地震動  $S_s$  相当の地盤の状態を模擬していることを確認することとする。

表 4.2-16 液状化強度試験結果のまとめ  
(埋戻土, ロータリー式三重管サンプラー)

	E-2			E-3		
	埋戻土					
試料番号	S2-9*2	S2-10	S2-14-1*2	S3-9-1*2	S3-9-2*2	S3-11*2
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	×	○	○	○
液体状となり流動しない。(ひずみが急増しない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	サイクルモビリティ	サイクルモビリティ	サイクルモビリティ	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化

	E-4'			E-5		
	埋戻土					
試料番号	S4-5①*2	S4-5②*2	S4-6	S4-8-2*2	S5-1	S5-3*2
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	○	○	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○	○	○	○
液体状となり流動しない。(ひずみが急増しない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	繰返し軟化	繰返し軟化	非液状化	非液状化	繰返し軟化	繰返し軟化

	E-6			E-7		
	埋戻土					
試料番号	S6-1-1*2	S6-1-2*2	S6-3①*2	S7-3①	S7-3③*2	S7-3④*2
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×	○	○	○
液体状となり流動しない。(ひずみが急増しない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	サイクルモビリティ	繰返し軟化	サイクルモビリティ	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化

	E-8		
	埋戻土		
試料番号	S8-2*2	S8-4③*2	S8-4④*2
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×
液体状となり流動しない。(ひずみが急増しない。)	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○
現象の整理	サイクルモビリティ	繰返し軟化	サイクルモビリティ

注記\*1: JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。  
\*2: 供試体直径の1/5を超える礫を含む一部の供試体も試験を実施し、液状化判定の参考とするが、評価には採用しない。

表 4.2-16 液状化強度試験結果のまとめ  
(埋戻土, 表層試料採取)

	A		B		C	
	埋戻土					
試料番号	A①	A②	B①	B②	C①	C②
過剰間隙水圧比95%を超えない。*	×	○	×	○	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×	○	×	×
液体状となり流動しない。(ひずみが増えない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	サイクリック モビリティ	非液状化	サイクリック モビリティ	非液状化	サイクリック モビリティ	サイクリック モビリティ

	C		D	E
	埋戻土			
試料番号	C③	C④	D①	E①
過剰間隙水圧比95%を超えない。*	×	×	○	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	○	×
液体状となり流動しない。(ひずみが増えない。)	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○
現象の整理	サイクリック モビリティ	サイクリック モビリティ	非液状化	サイクリック モビリティ

注記\*: JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。

表 4.2-17 液状化強度試験結果のまとめ  
(砂礫層)

	E-1					E-7
	砂礫層					
試料番号	S1-23-3①*2	S1-23-3②	S1-24	S1-25*2	S1-26*2	S7-15
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○	○	×	○
液体状となり流動しない。(ひずみが増えない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化	サイクルモビリティ	繰返し軟化

	E-7			E-8		
	砂礫層					
試料番号	S7-16①*2	S7-16②	S7-17	S8-23-1	S8-24①	S8-24②
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	○	○	×	×
液体状となり流動しない。(ひずみが増えない。)	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○	○	○	○
現象の整理	サイクルモビリティ	サイクルモビリティ	繰返し軟化	繰返し軟化	サイクルモビリティ	サイクルモビリティ

	E-8		
	砂礫層		
試料番号	S8-25①*2	S8-25②	S8-25③
過剰間隙水圧比95%を超えない。*1	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○
液体状となり流動しない。(ひずみが増えない。)	○	○	○
正のダイレイタンス特性によりせん断抵抗が作用する。(有効応力が回復する。)	○	○	○
現象の整理	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化

注記\*1: JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。  
\*2: 供試体直径の1/5を超える礫を含む一部の供試体も試験を実施し、液状化判定の参考とするが、評価には採用しない。

表 4.2-18 埋戻土の液状化強度試験結果  
(供試体直径の 1 / 5 を超える礫を含む供試体)


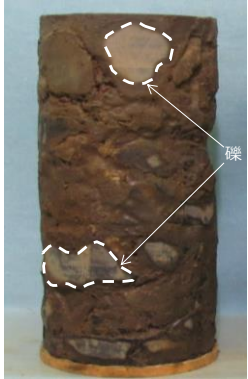

	E-3	E-6	E-8
試料番号	S3-9-2	S6-3	S8-2
写真			

表 4.2-19 液状化強度試験結果の分類

対象層	埋戻土	砂礫層
液状化試験の状況	<ul style="list-style-type: none"> <li>過剰間隙水圧比が0.95を上回るが、有効応力は0にならない。なお、一部の供試体では、過剰間隙水圧比が0.95を下回る。</li> <li>有効応力は減少するが、回復する。</li> <li>ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過剰間隙水圧比が0.95を上回るが、有効応力は0にならない。</li> <li>有効応力は減少するが、回復する。</li> <li>ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul>
試験結果の分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験結果は、非液状化又は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であり、液状化ではない。</li> <li>有効応力は維持又は回復するため、支持力が期待できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験結果は、繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であり、液状化ではない。</li> <li>有効応力は維持又は回復するため、支持力が期待できる。</li> </ul>
基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定	基準地震動 $S_s$ に対する液状化試験の妥当性確認	

液状化強度試験結果（埋戻土）による液状化強度曲線を図 4.2-31 に示す。液状化強度曲線は，試験結果から得られる近似曲線が試験結果の下限値を通るように保守的に設定する。

表層採取試料による供試体は，人工地盤である敷地の被覆層（埋戻土）を再現するため粒度調整及び密度調整を行い作製した。一方，敷地の埋立工事から 1，2号機エリアで 30 年以上，3号機エリアで 10 年以上経過しており，被覆層（埋戻土）は経年的な圧密を受けていることから，液状化強度試験結果①（ロータリ一式三重管サンプラー）は液状化強度試験結果②（表層試料採取）の上側に位置する。

上記と同様に，液状化強度試験結果（砂礫層）による液状化強度曲線を図 4.2-32 に示す。

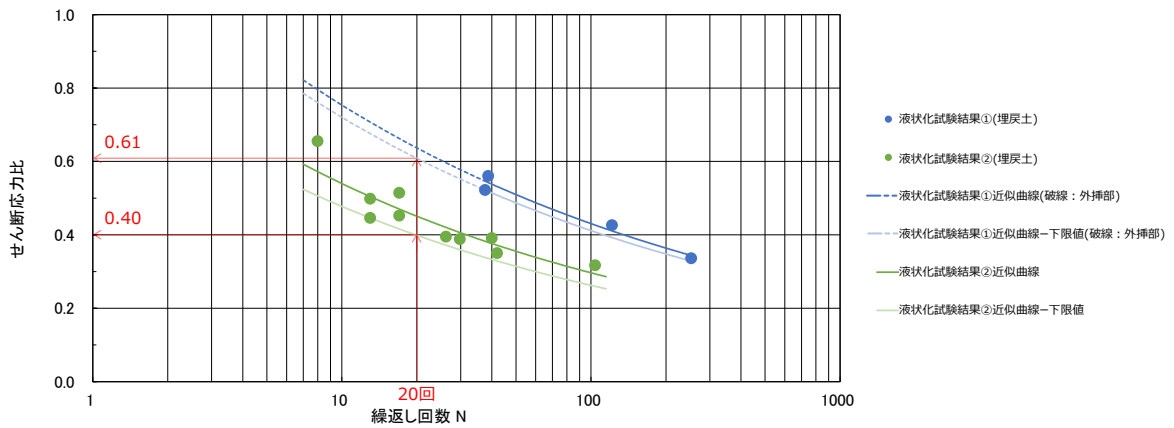


図 4.2-31 埋戻土の液状化強度曲線

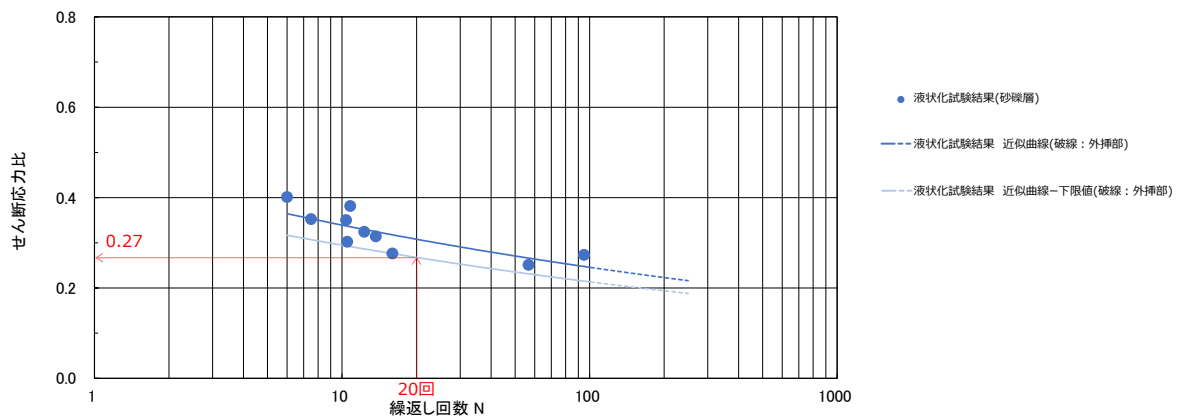


図 4.2-32 砂礫層の液状化強度曲線

d. 有効応力解析の液状化強度特性の設定方針

港湾基準では、有効応力解析（FLIP）に使用する地盤の物性に関するパラメータの設定方法について、原位置で行われた詳細な土質データを用いて検討することを基本としているが、簡易設定法による方法も明記されている。

簡易設定法は、港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた設計事例集に準拠し、液状化強度比  $R_L$  と相関が高い  $N$  値、有効上載圧及び細粒分含有率を用いて、有効応力解析（FLIP）の解析理論に則った液状化強度特性を設定することができる。

有効応力解析（FLIP）は、解析において土粒子と間隙水の両方を取り扱うことによって、過剰間隙水圧の上昇を模擬できるとともに、過剰間隙水圧の上昇に伴う土要素の剛性及び強度の低下、すなわち液状化現象を模擬することができる解析コードである。更に、地盤の液状化に伴う構造物の変形等、地盤と構造物の相互作用を模擬することができる。

有効応力解析（FLIP）で用いる有効応力モデルのパラメータのうち、液状化強度特性（過剰間隙水圧の発生）を設定するパラメータを表 4.2-20 に示す。

表 4.2-20 有効応力解析（FLIP）で用いる有効応力モデルの主なパラメータ

分類	モデルパラメータ	
液状化特性	$\phi_p$	変相角
	$w_1$	過剰間隙水圧上昇の全体を規定するパラメータ
	$p_1$	過剰間隙水圧上昇の前半を規定するパラメータ
	$p_2$	過剰間隙水圧上昇の後半を規定するパラメータ
	$c_1$	液状化強度の下限値を規定するパラメータ
	$S_1$	液状化の終局状態を規定するパラメータ

液状化強度特性を設定するパラメータは、繰返し非排水三軸試験結果を踏まえ、FLIPで試行的な繰返し計算を行い、全てのせん断応力比における整合性を確認して設定する方法が標準的とされている。

一方、簡易設定法は標準的な液状化パラメータ設定法を基に、これらのパラメータを、通常的地盤調査で比較的入手しやすい標準貫入試験の  $N$  値等と関連付けて設定する方法である。

簡易設定法では、原位置の  $N$  値及び有効上載圧より求まる等価  $N$  値をもとに簡易的に求めた液状化強度曲線が、FLIPを用いた繰返し三軸試験のシミュレーション結果に合うように求める。その液状化パラメータのうち  $p_2$  については、以下の式で算出する。



$$(N)_{0.66} = (N - 1.828(\sigma_v' - 0.66)) / (0.399(\sigma_v' - 0.66) + 1)$$

$$N_a = (1 / 0.66) 0.5 \times (N)_{0.66} + dNt$$

$$p_2 = -0.0166N_a + 1.215$$

ここに、 $(N)_{0.66}$ ：等価N値

$\sigma_v'$ ：有効上載圧

注記：dNt は森田ら（1997）の図 4.2-33 から求める

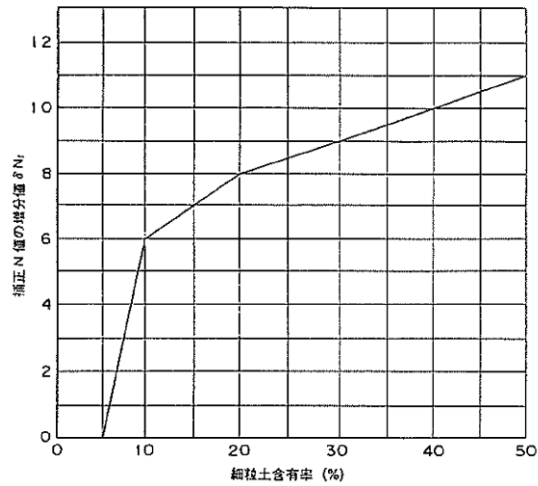


図 4.2-33 細粒分含有率に応じた補正N値の増分値

$w_1$ ,  $c_1$  については、最新の研究成果に基づき図 4.2-34 から算出する。なお、変相角  $\phi_p=28$  度、 $p_1=0.5$ ,  $s_1=0.005$  については、「液状化による構造物被害予測プログラム F L I P において必要な各種パラメタの簡易設定法（森田ら）」に基づき固定値とする。

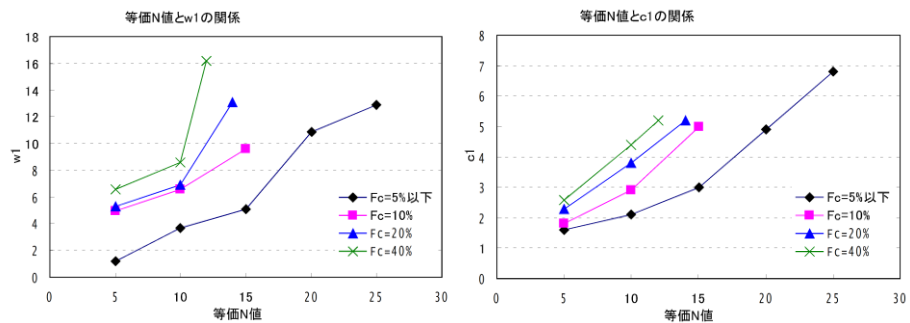


図 4.2-34 等価N値と液状化パラメータ  $w_1$  及び  $c_1$  の関係

標準貫入試験（JIS A 1219）\*で求めたN値については、以下のとおり扱うことにより、保守的に液状化強度特性を設定する。

- ① N値=50 以上：非常に密な地盤であるため、液状化強度特性の設定に使用しない。
- ② N値=30 以上：密な地盤であるため、保守的に補正し、以下のとおり扱う。
  - ・ 10cm 毎の打撃回数の最小値を 3 倍した値とし、その値が 30 以上の場合、結果を液状化強度特性の設定に使用しない。
  - ・ 10cm 毎の打撃回数の最小値を 3 倍した値とし、その値が 30 未満の場合、結果を液状化強度特性の設定に使用する。
- ③ N値=30 未満：液状化強度特性の設定にそのまま使用する。

注記\*：標準貫入試験（JIS A 1219）は、標準貫入試験用サンプラーを動的貫入することによって原位置における地盤の硬軟、締まり具合又は土層の構成を判定するためのN値を得るために行う。試験は、質量 63.5kg のハンマーを 76cm の高さから自由落下させ、標準貫入試験用サンプラーを打ち込む。N値は、標準貫入試験用サンプラーを 30cm 打ち込むために必要な打撃回数である。

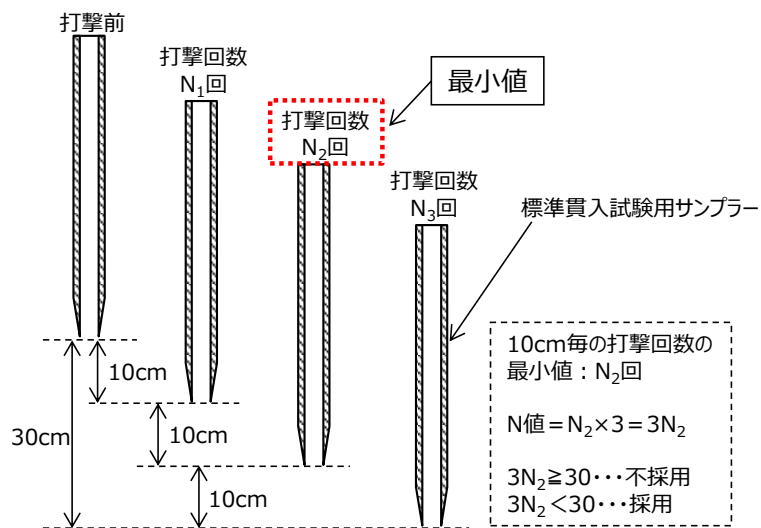


図 4.2-35 N 値の評価概要図 (② N 値=30 以上)

表 4.2-21 簡易設定法における N 値の考え方

	打撃回数			N 値 (JIS A 1219) ( $N_1 + N_2 + N_3$ )	N 値 (補正) (最小値の3倍)	評価結果 (今回)
	$N_1$	$N_2$	$N_3$			
①	50	-	-	50	-	使用しない
	17	33	-	50	-	使用しない
	17	11	22	50	-	使用しない
②	15	12	18	45	36	使用しない
	15	9	18	42	27	27
③	8	10	5	23	-	23

上述の方法等で求まる液状化パラメータに基づき，FLIPにおいて各せん断応力比に対する繰返し回数を計算すると，図4.2-36及び図4.2-37に示す簡易設定法に基づく液状化強度曲線が設定される。なお，敷地全体としての評価を行うことにより代表性・網羅性を確保する観点から，埋戻土及び砂礫層のN値及び細粒分含有率については，敷地全体の平均値を用いる。

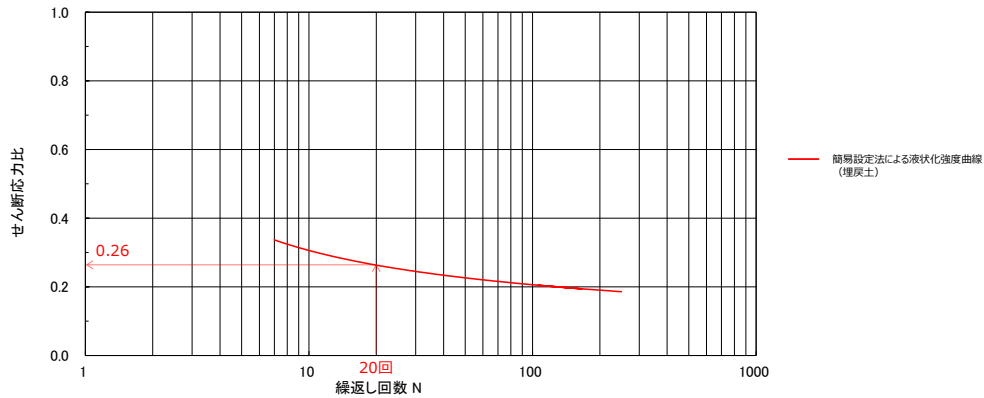


図 4.2-36 埋戻土の液状化強度曲線

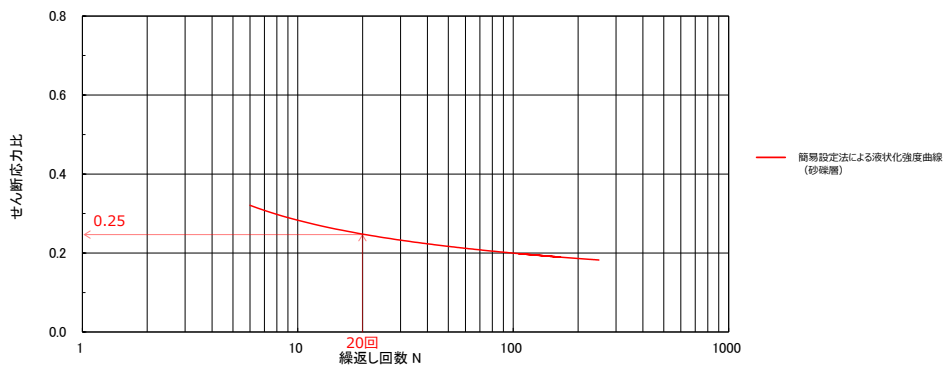


図 4.2-37 砂礫層の液状化強度曲線

簡易設定法により設定された液状化強度特性は、液状化強度試験結果下限値の液状化強度特性よりも保守的であることを確認する。

図 4.2-38 及び図 4.2-39 に簡易設定法による液状化強度曲線と液状化強度試験結果による液状化強度曲線を示す。

簡易設定法により設定した液状化強度曲線（埋戻土）は、液状化強度試験結果①（ロータリー式三重管サンプラー）及び液状化強度試験結果②（表層試料採取）による液状化強度曲線の下側に位置する。そのため、簡易設定法による液状化強度比  $R_L$  (0.26) は、液状化強度試験①（ロータリー式三重管サンプラー）による液状化強度比  $R_L$  (0.61) 及び液状化強度試験結果②（表層試料採取）による液状化強度比  $R_L$  (0.40) を下回り、保守的であることを確認した。また、簡易設定法により設定した液状化強度曲線（砂礫層）は液状化強度試験結果による液状化強度曲線の下側に位置し、簡易設定法による液状化強度比  $R_L$  (0.25) は液状化強度試験による液状化強度比  $R_L$  (0.27) を下回り、保守的であることを確認した。

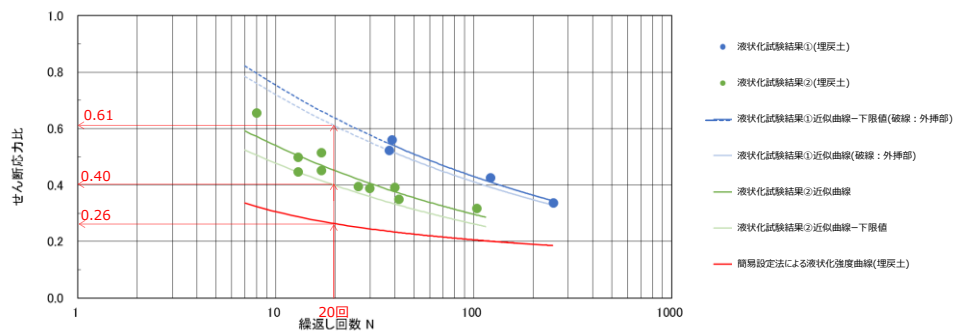


図 4.2-38 簡易設定法及び液状化強度試験結果による液状化強度曲線の比較（埋戻土）

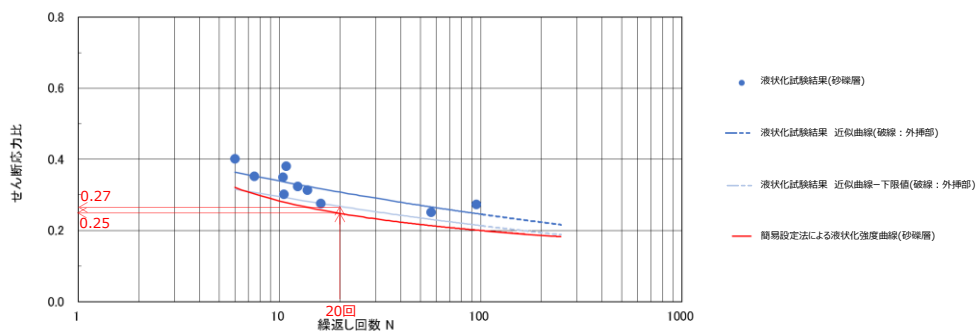


図 4.2-39 簡易設定法及び液状化強度試験結果による液状化強度曲線の比較（砂礫層）

e. 簡易設定法の適用範囲

「液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易設定法（森田ら）」では、FLIPを用いて解析を行う場合の種々のパラメータの設定方法として標準貫入試験のN値から簡易的に設定する方法が示されており、この検討で用いられているせん断応力比は、0.2~0.9程度（ $F_c=10\sim 20\%$ ）と幅の広い値としている。

島根2号機における埋戻土の累積損傷度理論に基づく評価において、基準地震動 $S_s$ での最大せん断応力比は0.4~0.7程度である。

島根2号機における埋戻土の最大せん断応力比は、森田らの検討で使用されているせん断応力比に包含されていることから、簡易設定法が適用できると考えられる。

表-6 等価N値( $N_{0.66}$ )に対するせん断応力比 $\tau_1/\sigma_m'$ （細粒分含有率 $F_c \geq 10\%$ の場合）

(a)  $F_c = 10\%$ の場合

(N) <sub>0.66</sub>	$N_a$	10回	15回	26回
5	12	0.24	0.22	0.21 <sup>最小</sup>
10	18	0.35	0.31	0.28
15	24	0.69	0.54	0.43

(b)  $F_c = 20\%$ の場合

(N) <sub>0.66</sub>	$N_a$	10回	15回	26回
5	14	0.26	0.24	0.22
10	20	0.41	0.36	0.32
14	25	0.85 <sup>最大</sup>	0.66	0.51

図 4.2-40 簡易設定法の根拠資料

「液状化解析プログラムFLIPによる動的解析の実務（財団法人沿岸技術研究センター）」では、兵庫県南部地震における神戸 RF3岸壁及び神戸港T栈橋の被災状況に対して、簡易設定法により液状化パラメータを設定した再現解析にて検証を行った実績が示されている。

「神戸 RF3岸壁」は重力式構造物を、「神戸港T栈橋」は杭式構造物を対象としており、「神戸 RF3岸壁」においては、埋立土及び置換砂の液状化パラメータを簡易設定法で設定し、概ね被災状況を再現できている。

以上の実績を踏まえ、島根2号機における防波壁等に対する液状化影響評価において簡易設定法が適用できると判断した。

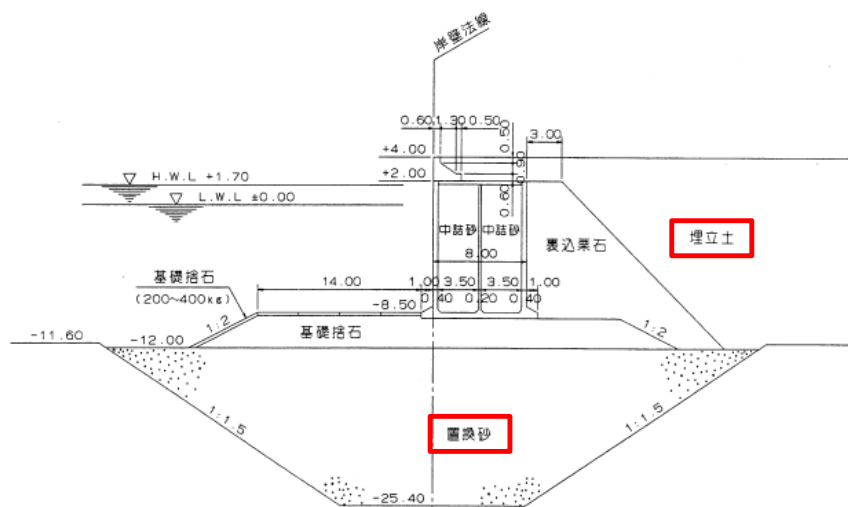


図 4.2-41 神戸 RF3岸壁 標準断面図

表 4.2-22 簡易設定法におけるN値の考え方

地震名	対象施設	被災状況	再現解析
平成7年 兵庫県南部 地震	神戸 RF3岸壁	水平変位 3.7m	水平変位 3.09m
	神戸港 T栈橋	水平変位 1.4~1.5m	水平変位 2.01m

液状化解析プログラムFLIPによる動的解析の実務（財団法人沿岸技術研究センター）より引用

N値及び粒径加積曲線について、島根2号機の埋戻土及び砂礫層と、神戸港の埋立土との比較を図4.2-42に示す。

神戸港の埋立土のN値は、いずれも5～10前後、最大20程度を示しており、島根2号機と同程度である。神戸港の埋立土の粒径は、島根2号機の埋戻土（掘削ズリ）より小さく、砂礫層と同程度であるが、両者とも粒径が広い範囲にわたって分布し、礫を含む土層である。

以上より、簡易設定法により液状化パラメータを設定した再現解析にて検証を行った実績のある神戸港の埋立土に対し、島根2号機の埋戻土及び砂礫層の土質性状は類似していることから、簡易設定法の適用は妥当であると判断した。

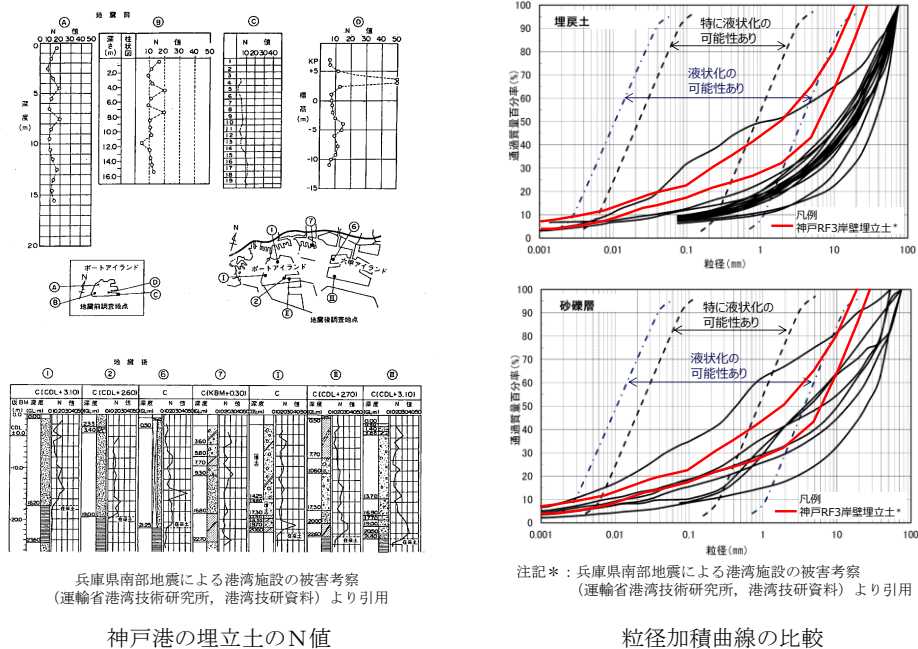


図4.2-42 島根2号機の埋戻土及び砂礫層と神戸港埋立土の比較



f. 参考文献

- ・道路橋示方書：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），（社）日本道路協会，H24.3
- ・港湾基準：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，H19年版
- ・港湾構造物設計事例集，沿岸技術研究センター，H19年版
- ・地盤工学会基準 JGS4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（H18）
- ・地盤工学会，H21：地盤材料試験の方法と解説，平成21年11月
- ・安田，H3：液状化の調査から対策工まで，安田進，鹿島出版会，H3.5
- ・吉田，H22：地盤の地震応答解析，吉田望，鹿島出版会，H22.10
- ・土木学会，H15：過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響，土木学会地震工学委員会レベル2地震動による液状化研究小委員会 レベル2地震動による液状化に関するシンポジウム論文集，pp397-400，H15.6
- ・地盤工学会，H18：地盤工学用語辞典，pp219-220，H18.3
- ・井合進，H20：サイクリックモビリティ Cyclic Mobility，地盤工学会誌，56-8，H20.3
- ・吉見，H3：砂地盤の液状化（第二版），技報堂出版，H3.5
- ・井合進，飛田哲男，小堤治（H20）：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係，京都大学防災研究所年報，第51号，pp.291-304，H20
- ・鉄道総合技術研究所（H24）：鉄道構造物等設計標準・同解説，H24.9
- ・Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T (1992): STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol, 32, No. 2, pp. 1-15.
- ・Iai. S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K. (1995): RESPONSE OF A DENSE SAND DEPOSIT DURING 1993 KUSHIRO-OKI EARTHQUAKE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol, 35, No. 1, pp. 115-131.
- ・コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，（社）土木学会，H14年制定
- ・建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，H16年版
- ・建築物の構造関係技術基準解説書，国土交通省住宅局建築指導課，国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，日本建築行政会議 監修，H19.8
- ・森田ら，H9：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法，運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料，No. 869，H9.6
- ・第四期 FLIP 研究会 14年間のまとめ WG，H23：液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務，財団法人沿岸技術研究センター，H23.8
- ・地盤工学会，H22：土質試験 基本と手引き
- ・兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察：運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料，No. 813，H7

#### 4.2.2 改良地盤に用いる解析用物性値

改良地盤については、対象設備別、工法別に、原位置試験、室内試験及び文献等を踏まえ設定することとし、表 4.2-3 及び表 4.2-8 のとおり、解析用物性値を設定する。

#### 4.2.3 その他の解析用物性値

##### (1) 防波壁（逆 T 擁壁）及び防波壁（波返重力擁壁）における岩盤

防波壁（逆 T 擁壁）及び防波壁（波返重力擁壁）における岩盤については、表 4.2-4 及び表 4.2-9 のとおり、解析用物性値を設定する。

##### (2) 砕石

取水管における砕石については、文献に基づき、表 4.2-5 及び表 4.2-10 のとおり解析用物性値を設定する。

#### 4.2.4 地盤の物性のばらつきについて

建物・構築物及び土木構造物の地震応答解析においては地盤の物性のばらつきを考慮している。

## 5. 極限支持力

極限支持力度は、平板載荷試験結果又は道路橋示方書の支持力算定式に基づき設定することを基本とする。

### 5.1 基礎地盤（岩盤）の極限支持力度

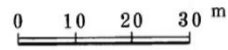
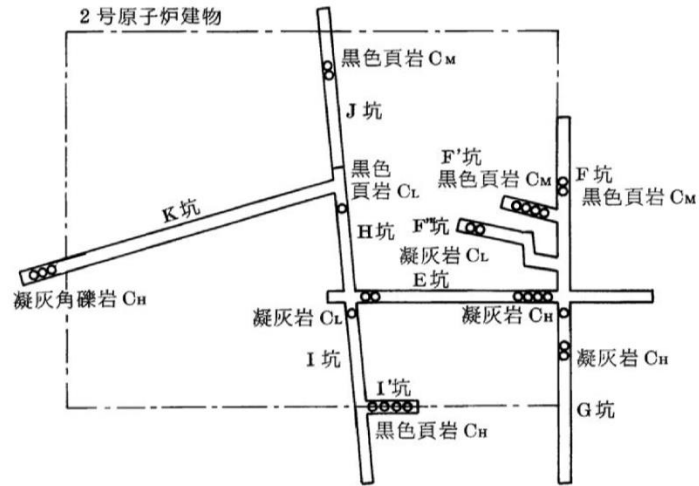
基礎地盤（岩盤）の極限支持力度を表 5.1-1 に示す。

基礎地盤（岩盤）の極限支持力度は、設置変更許可申請書（添付資料六）に示した平板載荷試験結果を基に設定する。設置変更許可申請書（添付資料六）に示した平板載荷試験実施位置を図 5.1-1，平板載荷試験結果を図 5.1-2～図 5.1-4 に示す。なお、基礎地盤の短期許容支持力度は、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987（（社）日本電気協会）に基づき、極限支持力度の 2/3 として設定する。

表 5.1-1 基礎地盤（岩盤）の極限支持力度

岩級	極限支持力度* (N/mm <sup>2</sup> )
C <sub>H</sub> 級	11.7
C <sub>M</sub> 級	
C <sub>L</sub> 級	3.9

注記\*: C<sub>H</sub>級及びC<sub>M</sub>級の岩盤は 120kg/cm<sup>2</sup> (11.7N/mm<sup>2</sup>) を載荷しても破壊しないことから、極限支持力度を 11.7N/mm<sup>2</sup> とした。なお、設置変更許可申請書（添付資料六）では、評価基準値として 100 kg/cm<sup>2</sup> (9.8N/mm<sup>2</sup>) 以上としている。C<sub>L</sub>級の岩盤は 40kg/cm<sup>2</sup> (3.9N/mm<sup>2</sup>) を載荷しても破壊しないことから、極限支持力度を 3.9N/mm<sup>2</sup> とした。なお、設置変更許可申請書（添付資料六）では、評価基準値として 40 kg/cm<sup>2</sup> (3.9N/mm<sup>2</sup>) 以上としている。



凡 例

— 試掘坑

○ 平板載荷試驗位置

图 5.1-1 平板載荷試驗實施位置

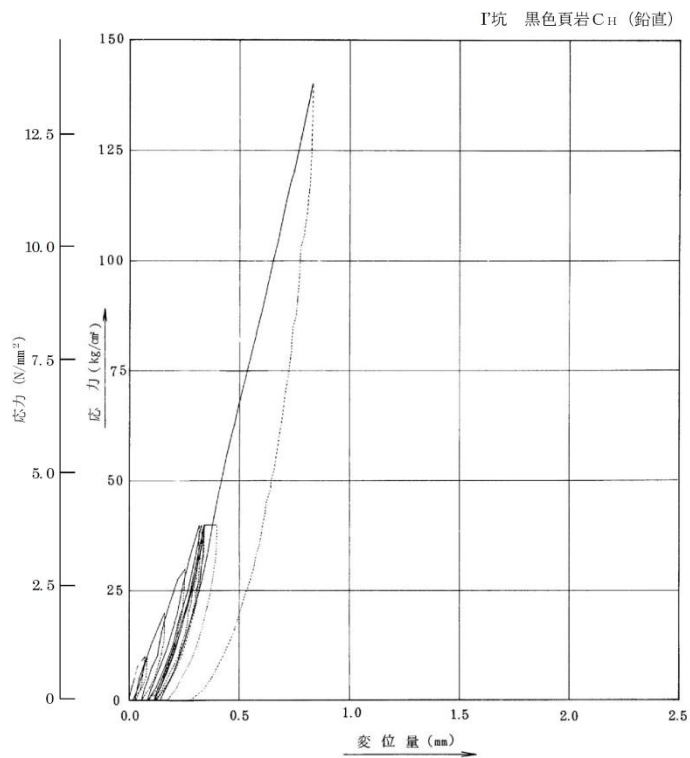
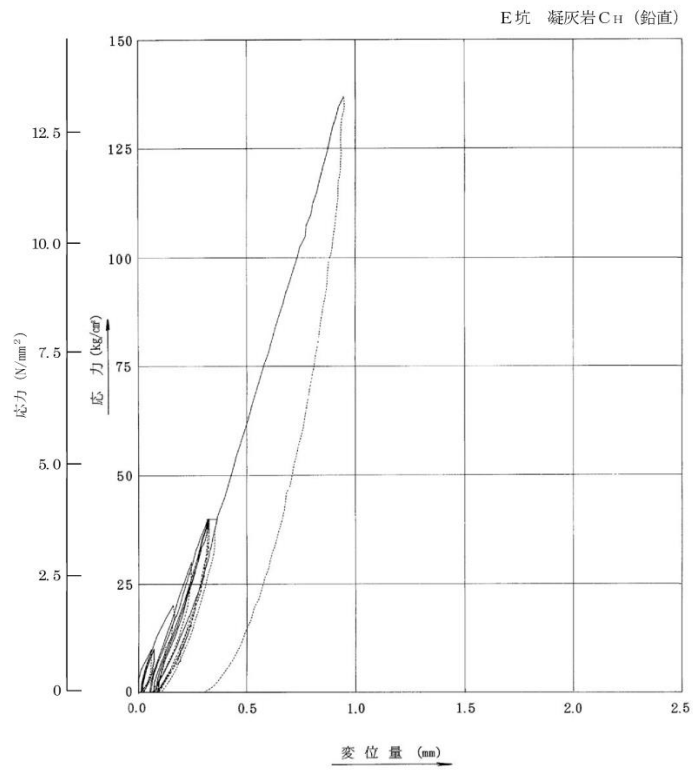


図 5.1-2 平板載荷試験結果 (C<sub>H</sub>級)

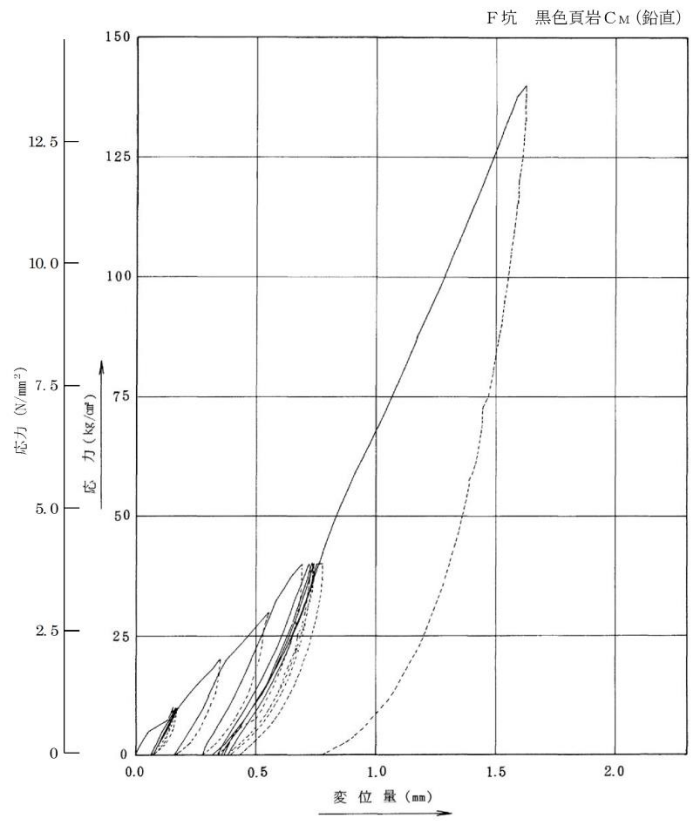


図 5.1-3 平板載荷試験結果 (C<sub>M</sub>級)

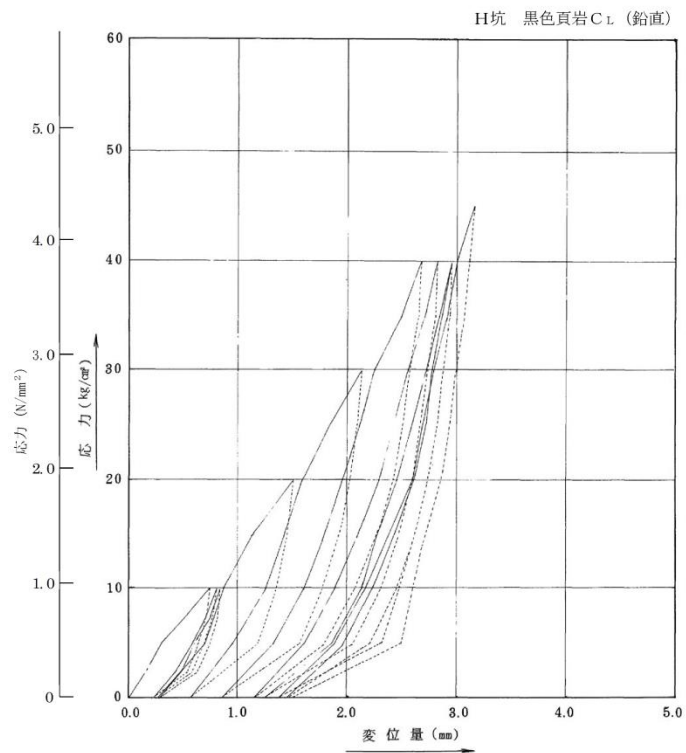
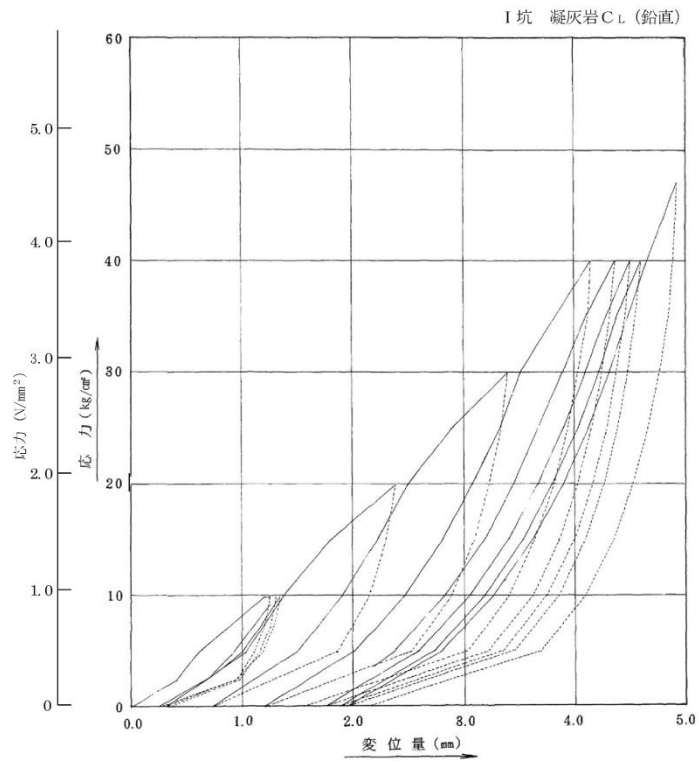


図 5.1-4 平板載荷試験結果 (C<sub>L</sub>級)

## 5.2 直接基礎の支持力算定式

道路橋示方書による直接基礎の支持力算定式を以下に示す。

### ・道路橋示方書による極限支持力算定式（直接基礎）

$$Q_u = A_e \cdot \{ \alpha \cdot \kappa \cdot c \cdot N_c \cdot S_c + \kappa \cdot q \cdot N_q \cdot S_q + 1/2 \gamma_1 \cdot \beta \cdot B_e \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \}$$

ここで、

$Q_u$  : 荷重の偏心傾斜，支持力係数の寸法効果を考慮した地盤の極限支持力 (kN)

$c$  : 地盤の粘着力 (kN/m<sup>2</sup>)

$q$  : 上載荷重 (kN/m<sup>2</sup>) で，  $q = \gamma_2 \cdot D_f$

$A_e$  : 有効載荷面積 (m<sup>2</sup>)

$\gamma_1, \gamma_2$  : 支持地盤及び根入れ地盤の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

ただし，地下水位以下では水中単位体積重量とする。

$B_e$  : 荷重の偏心を考慮した基礎の有効載荷幅 (m)

$$B_e = B - 2 \cdot e_B$$

$B$  : 基礎幅 (m)

$e_B$  : 荷重の偏心量 (m)

$D_f$  : 基礎の有効根入れ深さ (m)

$\alpha, \beta$  : 基礎の形状係数

$\kappa$  : 根入れ効果に対する割増し係数

$N_c, N_q, N_\gamma$  : 荷重の傾斜を考慮した支持力係数

$S_c, S_q, S_\gamma$  : 支持力係数の寸法効果に関する補正係数



### 5.3 杭基礎の支持力算定式

杭基礎の押し込み力及び引抜き力に対する支持力評価において、液状化検討対象層である地下水位以深の埋戻土及び砂礫層の杭周面摩擦力を支持力として考慮せず、支持力評価を行うことを基本とする。ただし、杭周面地盤に地下水位以浅の埋戻土及び砂礫層、改良地盤、非液状化層及び岩盤がある場合は、その杭周面摩擦力を支持力として考慮する。

#### ・道路橋示方書による極限支持力算定式

(杭基礎 [中掘り工法] )

$$R_u = q_d \cdot A + U \cdot \sum L_i \cdot f_i$$

ここで、

$R_u$  : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)

$q_d$  : 杭先端における単位面積当たりの極限支持力度 (kN/m<sup>2</sup>)

$$q_d = 3 \cdot q_u$$

$q_u$  : 支持岩盤の一軸圧縮強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$A$  : 杭先端面積 (m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周長 (m)

$L_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

$f_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m<sup>2</sup>)

## 6. 地盤の速度構造

### 6.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル

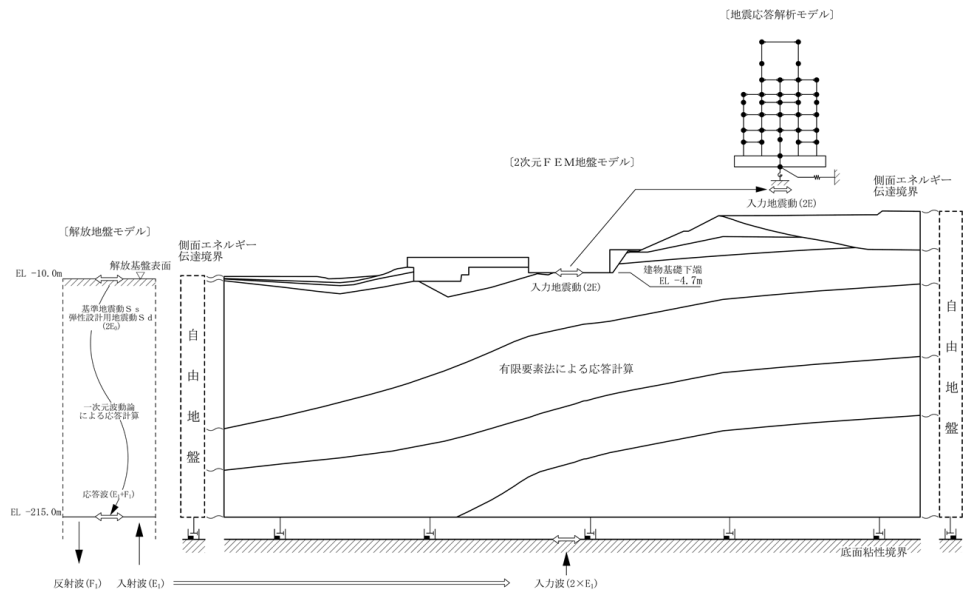
入力地震動の設定に用いる地下構造モデルについては、解放基盤表面（EL-10m）から EL-215m までの地盤をモデル化する。地下構造モデルの概要を表 6.1-1 及び表 6.1-2 に示す。入力地震動算定の概念図を図 6.1-1 及び図 6.1-2 に示す。

表 6.1-1 入力地震動の策定に用いる地下構造モデル

速度層	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
①層	0.80	0.25	20.6	0.446
②層	2.10	0.90	23.0	0.388
③層	3.60	1.60	24.5	0.377
④層	4.00	1.95	24.5	0.344
⑤層	4.05	2.00	26.0	0.339
⑥層	4.95	2.35	27.9	0.355

表 6.1-2 入力地震動の策定に用いる地下構造モデル  
(防波壁(逆T擁壁)及び防波壁(波返重力擁壁))

速度層	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
①層	0.52	0.27	22.4	0.45
②層	1.71	0.62	23.3	0.42
③層	2.27	0.96	23.4	0.39
④層	3.24	1.52	24.5	0.36
⑤層	3.86	1.90	25.2	0.34
⑥層	4.15	2.10	24.4	0.33
⑦層	3.80	1.77	25.1	0.36



(原子炉建物)

図 6.1-1 入力地震動算定の概念図 (建物・構築物)

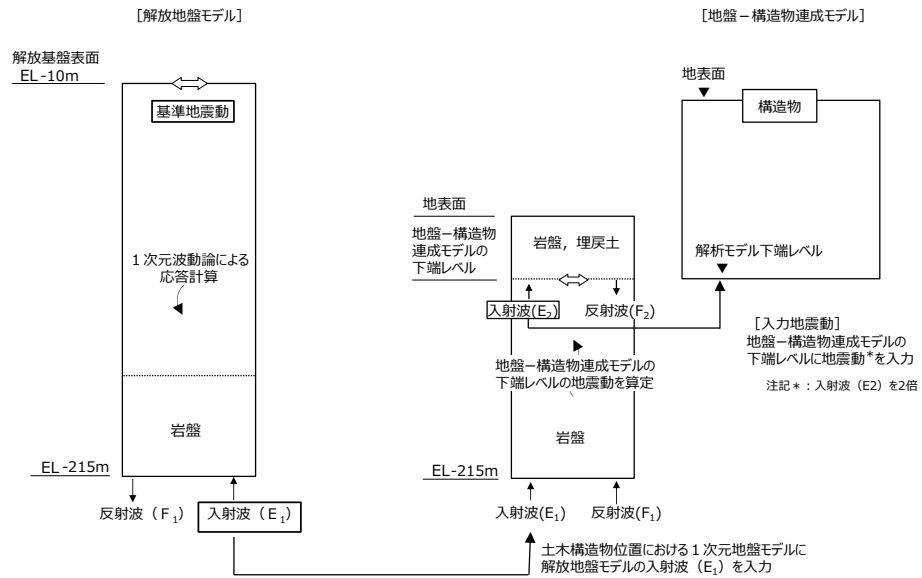


図 6.1-2 入力地震動算定の概念図 (土木構築物)

## 6.2 地震応答解析に用いる解析モデル

建物・構築物の地震応答解析に用いる地盤モデルは、地盤調査結果に基づいて設定する。建物・構築物の地震応答解析に用いる地盤モデルの地盤物性値は「4.1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値」を基本として設定する。

また、土木構造物の地震応答解析に用いる地盤モデルは、構造物周辺の地盤調査結果に基づいて設定する。土木構造物の地震応答解析に用いる地盤モデルの地盤物性値は、「4.1 設置変更許可申請書に記載された解析用物性値」及び「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」を基本として設定する。

(参考資料 1) 浸透解析に用いた解析コード「Dtransu-3D・EL」の適用性について

## 1. 解析コードの概要

項目	コード名 Dtransu-3D・EL
使用目的	浸透流解析
開発機関	岡山大学名誉教授 西垣誠 三菱マテリアル株式会社 株式会社ダイヤコンサルタント
開発時期	2017年（初版開発時期2001年）
使用したバージョン	Ver. 2. 0af90
コードの概要	<p>Dtransu-3D・ELは、オイラリアン・ラグランジアン法による飽和・不飽和浸透流-移流・分散解析プログラムであり、3次元モデルにおける密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流及び移流・分散問題を対象とした解析コードである。特に、移流・分散解析においてオイラリアン・ラグランジアン手法を用い、高ペクレ数から低ペクレ数の問題に対して安定した解析が可能である。</p> <p>適用事例は、一般的な地下水解析、汚染物質を含む移流・分散解析等多岐にわたる。</p>
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、有限要素法を用いた3次元飽和・不飽和浸透流-移流・分散解析プログラムであり、西垣らにより一般公開され地下水及び移流・分散解析に広く利用されていることを確認している。</li> <li>・浸透並びに移流・分散解析の標準的問題を例に、理論解と解析解を比較し、よく一致していることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。</li> </ul>

## 2. 解析手法について

### 2.1 一般事項

Dtransu-3D・EL は、様々な地下水および汚染物質を含む移流・分散現象を評価するために、非常に大規模な3次元非定常問題を高速で解析することを目的として開発されたものである。

### 2.2 解析コードの特徴

本シミュレーションシステムは、地下水流動および汚染物質を含む移流・分散について、統一的な数学モデルのもとで同時に扱うことを可能にし、対象とする地下水問題をオイリアン・ラグランジアン手法により、高ペクレ数から低ペクレ数の問題に対して安定した解析を可能にした解析コードである。

主な適用分野は、トンネル建設や地下構造物による地下水保全問題等の「水資源問題」、農薬や廃棄物による土壌・地下水汚染や放射性廃棄物の地層処分などに代表される「水環境問題」、豪雨時における斜面崩壊などの「水災害問題」である。

### 2.3 数値解析

空間離散化は、複雑な地形起伏や地盤物性分布、地下構造物形状を3次元の有限要素を用いてモデル化し、それぞれの有限要素内でダルシー則に従った質量保存則を考慮することで浸透現象を正確に評価する。

また、地下水流動については既に広く使われている飽和・不飽和浸透流解析の手法を用いて計算を行っている。

汚染物質を含む移流・分散解析では、連成問題として浸透（圧力水頭（ $\phi$ ））を解いて、次に移流分散（濃度（ $c$ ））を解く2段階に分けて各未知量を解き、反復収束解析を行うことで（ $\phi$ ）と（ $c$ ）の連成を行う一般的に使われている実用的な手法を用いている。さらに高ペクレ数から低ペクレ数の問題に対して安定した解析を行うためにオイリアン・ラグランジアン手法を用いている。

### 3. 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

#### 3.1 検証 (Verification)

本コードの検証として、多層地盤における浸透問題の検討を行った。地層が直列に複数存在している場合（直列モデル）及び地層が層になっている場合（並列モデル）での流量の比較を行った。次に、Thiem の井戸理論との比較を行い水面形状や流量の比較を行った。

また、非定常の水面変化について均質非定常問題を解くことで検証した。

#### 3.2 直列モデル

##### (1) テストケース

モデルの概念図を図 3-1 に示す。

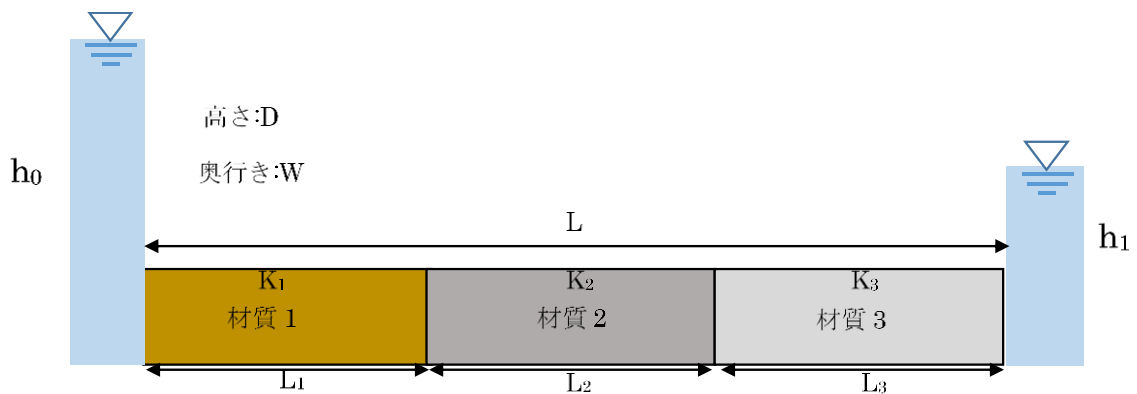


図 3-1 モデル概念図

ある境界水位を与えた際の右端部境界面における流量 ( $Q$  [ $\text{m}^3/\text{sec}$ ]) を求め、理論解と比較する。

また、 $L_1$  と  $L_2$  の境界における水頭 ( $h_a$  [ $\text{m}$ ]) を求め、理論解と比較する。

理論解は次式によって与えられる。

$$Q = KIDW$$

$$K = \frac{L}{\left(\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3}\right)}$$

$$I = \frac{h_0 - h_1}{L} = \frac{\Delta H}{L}$$

$$h_a = h_0 - \frac{L_1}{K_1} K \frac{(h_0 - h_1)}{L} DW$$



ここで、 $K$  は等価透水係数[m/s]、 $I$  は動水勾配、 $L$  は長さ[m]、 $D$  は高さ[m]、 $W$  は奥行き[m]、 $h_0$ 、 $h_1$  は境界の既知全水頭[m]である。

(2)解析モデル

解析に用いる FEM モデルを図 3-2 に、FEM モデルの諸元を表 3-1 に示す。

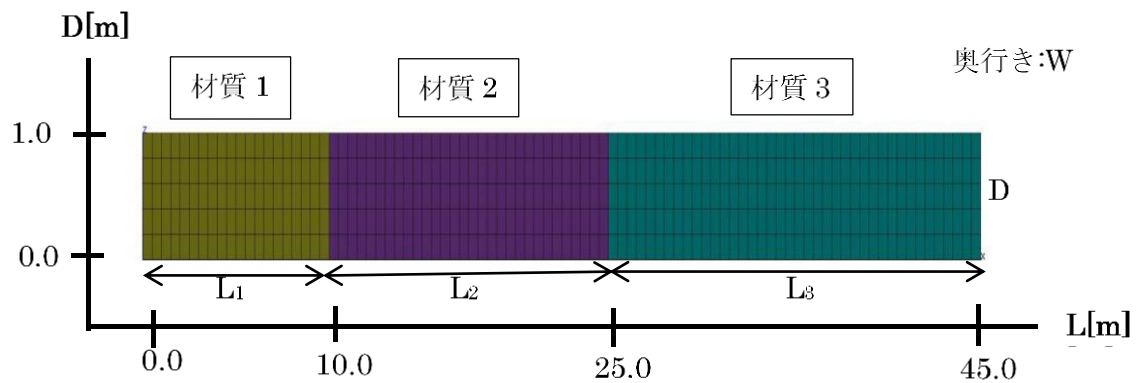


図 3-2 FEM モデル

表 3-1 FEM モデルの諸元

	設定値
節点数	1092
要素数	450
X 方向分割数	90
Y 方向分割数	1
Z 方向分割数	5
$L_1$ [m]	10.0
$L_2$ [m]	15.0
$L_3$ [m]	20.0
$D$ [m]	1.0
$W$ [m]	1.0

(3)解析条件

解析に用いる条件について表 3-2, 表 3-3 に示す。

表 3-2 解析条件

	記号	単位	材質 1	材質 2	材質 3
透水係数	K	m/sec	1.00E-05	1.00E-07	1.00E-04
間隙率	n	-	0.2	0.2	0.2

表 3-3 境界条件

	記号	単位	設定値
既知全水頭	$h_0$	m	5.0
既知全水頭	$h_1$	m	3.0

(4) 結果

右端部境界面における流量と  $L_1L_2$  境界における水頭値を比較した。  
理論解と Dtransu-3D で計算解の結果を表 3-4, 表 3-5 に示す。

表 3-4 理論解

$K_1$ [m/s]	$K_2$ [m/s]	$K_3$ [m/s]	等価透水係数 [m/sec]
1.00E-05	1.00E-07	1.00E-04	2.98E-07

$K$ [m/s]	I	D [m]	W [m]	$K_1$ [m/s]	$L_1$ [m]	理論解 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	理論解 $h_a$ [m]
2.98E-07	0.044	1.0	1.0	1.00E-05	10.0	1.32E-08	4.987

表 3-5 計算解

境界面流量
6.61E-10
-6.61E-10
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
1.32E-09
6.61E-10
6.61E-10
合計 (計算解) $Q$ [m <sup>3</sup> /s]
1.32E-08

$L_1L_2$ 境界における水頭値 (計算解) $h_a$ [m]
4.987

### 3.3 並列モデル

#### (1) テストケース

モデルの概念図を図 3-3 に示す。

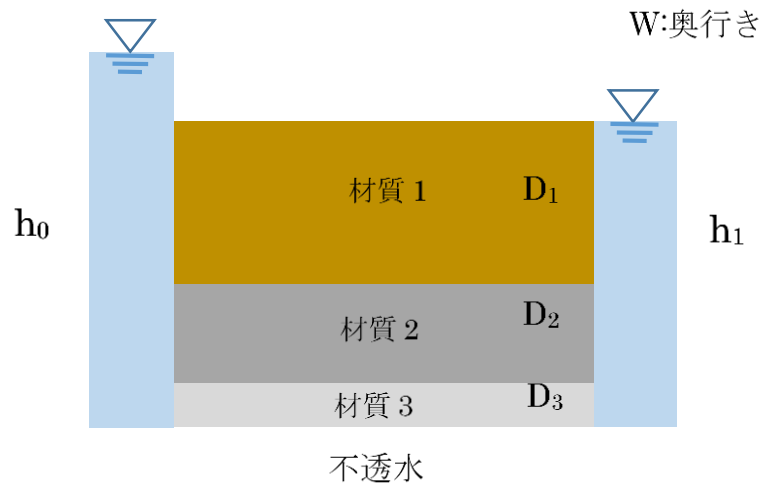


図 3-3 モデル概念図

ある境界水位をあたえた際の境界面における流量(Q)を求め、理論解と比較する。  
理論解は次式によって与えられる。

$$Q = (K_1 D_1 + K_2 D_2 + K_3 D_3) I W$$

ここで、各 K は透水係数[m/s]、I は動水勾配、各 D は層厚[m]、W は奥行き[m]である。

(2)解析モデル

解析に用いる FEM モデルを図 3-4 に、FEM モデルの諸元を表 3-6 に示す。

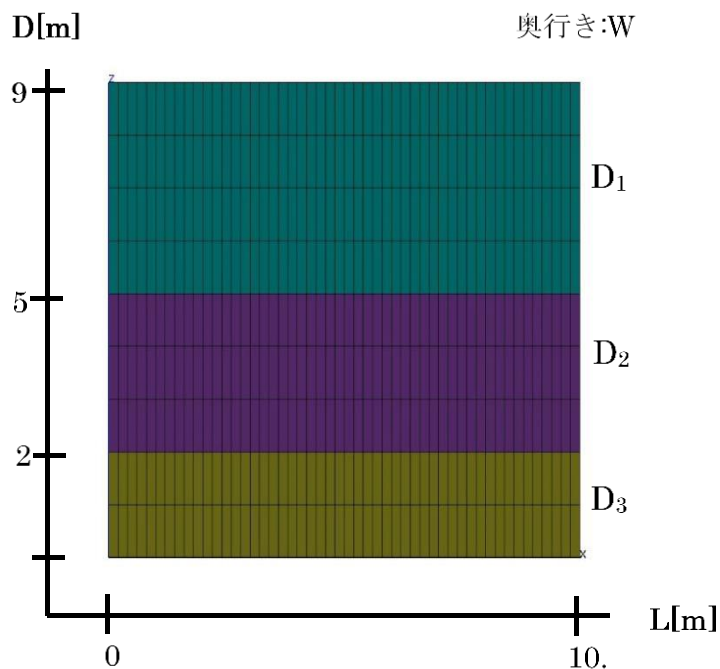


図 3-4 FEM モデル

表 3-6 FEM モデルの諸元

	設定値
節点数	1020
要素数	450
X 方向分割数	50
Y 方向分割数	1
Z 方向分割数	9
D <sub>1</sub> [m]	4.0
D <sub>2</sub> [m]	3.0
D <sub>3</sub> [m]	2.0
L [m]	10.0
W [m]	1.0

(3)解析条件

解析に用いる条件について表 3-7, 表 3-8 に示す。

表 3-7 解析条件

	記号	単位	材質 1	材質 2	材質 3
透水係数	K	m/sec	1.00E-07	1.00E-05	1.00E-06
間隙率	n	-	0.2	0.2	0.2

表 3-8 境界条件

	記号	単位	設定値
既知全水頭	$h_0$	m	11.0
既知全水頭	$h_1$	m	9.0

(4)結果

境界面における流量を比較した。

理論解と Dtransu-3D で計算解の結果を表 3-9, 表 3-10 に示す。

表 3-9 理論解

$K_1$ [m/s]	$K_2$ [m/s]	$K_3$ [m/s]	$D_1$ [m]	$D_2$ [m]	$D_3$ [m]	$W$ [m]	$I$	理論解 $Q$ [m <sup>3</sup> /s]
1.00E-07	1.00E-05	1.00E-06	4.0	3.0	2.0	1.0	2.00E-01	6.48E-06



表 3-10 計算解

境界流量 $Q[m^3/s]$
5.00E-09
5.00E-09
1.00E-08
1.00E-08
1.00E-08
1.00E-08
1.00E-08
1.00E-08
5.05E-07
5.05E-07
1.00E-06
1.00E-06
1.00E-06
1.00E-06
5.50E-07
5.50E-07
1.00E-07
1.00E-07
5.00E-08
5.00E-08
合計(計算解) $Q[m^3/s]$
6.48E-06

### 3.4 Thiem の井戸理論 (定常)

#### (1) テストケース

モデルの概念図を図 3-5 に示す。

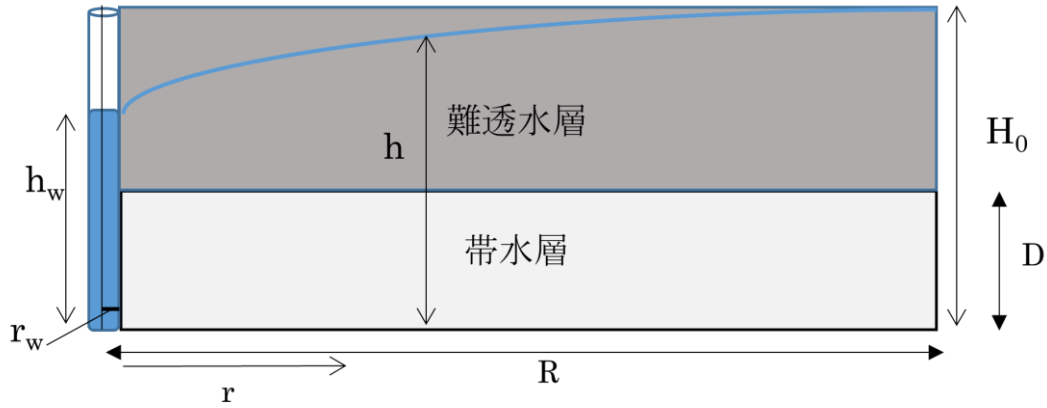


図 3-5 モデル概念図

ある境界水位と井戸内水位をあたえた際の境界面における流量(Q)を求め、理論解と比較する。

また、影響圏における水位(h)を求め、理論解と比較する。

理論解は次式によって与えられる。

$$Q = 2\pi KD \frac{H_0 - h}{\ln(R/r)}$$

$$Q = 2\pi KD \frac{H_0 - h}{\ln(R/r)} H_0 - h = \frac{H_0 - h}{\ln(R/r_w)} \ln(R/r)$$

$$H_0 - h = \frac{H_0 - h_w}{\ln(R/r_w)} \ln(R/r)$$

ここで、 $r_w$  は井戸半径[m]、 $R$  は影響圏半径[m]、 $D$  は層厚[m]、 $h_w$  は井戸内水位[m]、 $H_0$  は境界水位[m]である。

(2)解析モデル

解析に用いるモデルは帯水層のみを FEM モデル化した。また，理論解におけるモデルは，井戸周囲 360° あるうちの一部（軸対称モデル）となっているため，FEM モデル化にあたり 1° 分切り出したモデルとした。FEM モデルを図 3-6 に，FEM モデルの諸元を表 3-11 に示す。

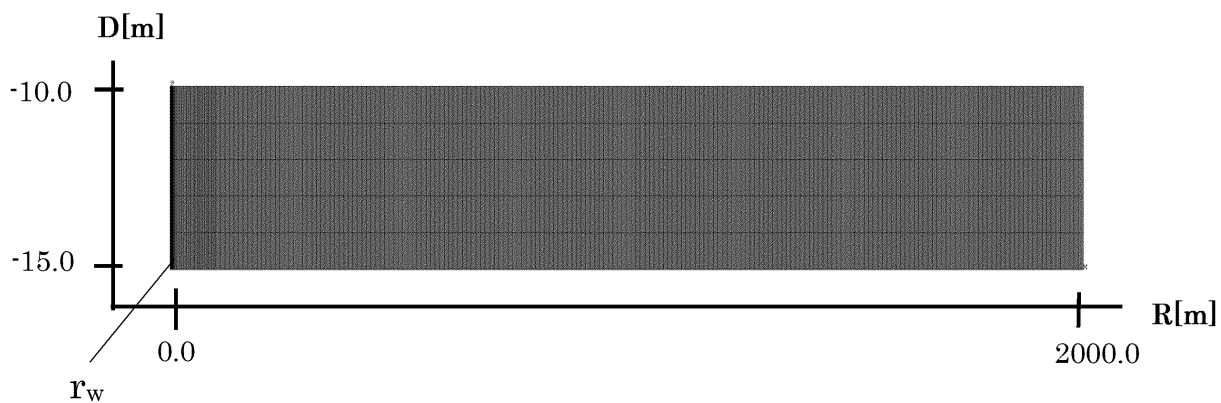


図 3-6 FEM モデル

表 3-11 FEM モデルの諸元

	設定値
節点数	3396
要素数	1410
X 方向分割数	282
Y 方向分割数	1
Z 方向分割数	5
D[m]	5.0
R[m]	2000.0
$r_w$ [m]	0.02

(3)解析条件

解析に用いる条件について表 3-12, 表 3-13 に示す。

表 3-12 解析条件

	記号	単位	帯水層
透水係数	K	m/sec	1.00E-06
間隙率	n	-	0.2

表 3-13 境界条件

	記号	単位	設定値
井戸内水位	$h_w$	m	-3.0
既知全水頭	$H_0$	m	0.0

(4) 結果

R 方向各地点での全水頭値を比較した。

理論解と Dtransu-3D 計算解の比較結果を図 3-7 に示す。

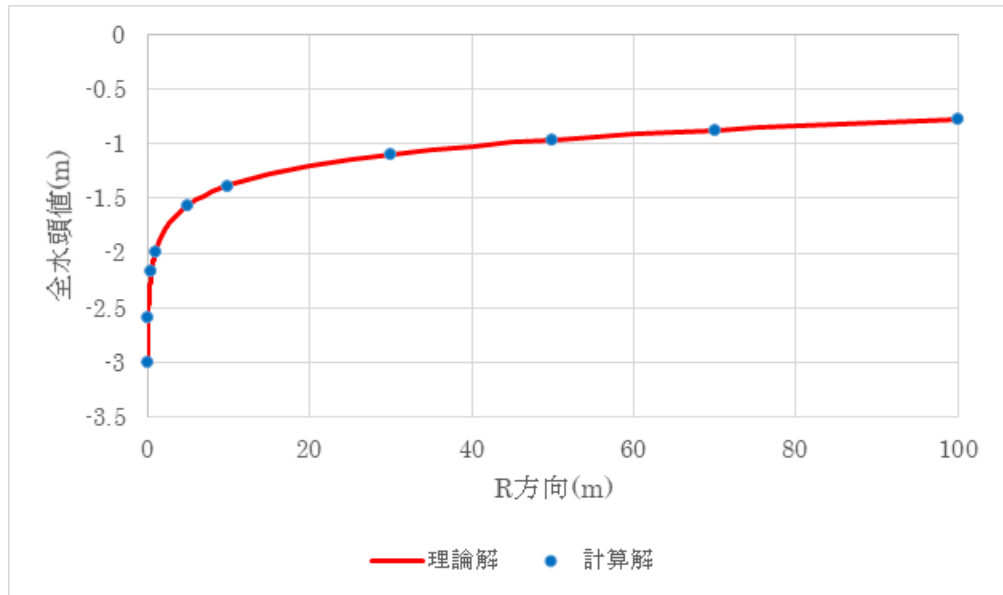


図 3-7 計算解と理論解の比較

また、井戸との境界における流量を比較した。

理論解と Dtransu-3D で計算解の結果を表 3-14, 表 3-15 に示す。

表 3-14 理論解

r[m]	K[m/s]	D[m]	Ho[m]	h <sub>w</sub> [m]	理論解 Q
0.02	1.00E-06	5.0	0.0	-3.0	8.19E-06

表 3-15 計算解

境界流量 Q[m <sup>3</sup> /s]
9.44E-10
1.34E-09
1.89E-09
2.68E-09
1.89E-09
2.68E-09
1.89E-09
2.68E-09
1.89E-09
2.68E-09
9.44E-10
1.34E-09
合計*360 (計算解) Q[m <sup>3</sup> /s]
8.22E-06

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE (平均二乗平方根誤差) で行った。データ数を  $N$ ，理論解を  $T_i$  ( $i = 1, \dots, N$ )，Dtransu-3D 計算解を  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) とすると，RMSE は次式で表される。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2}$$

表 3-16 誤差評価

比較点数	全水頭の RMSE [m]
93	0.0543

### 3.5 均質非定常問題

#### (1) テストケース

モデルの概念図を図 3-8 に示す。

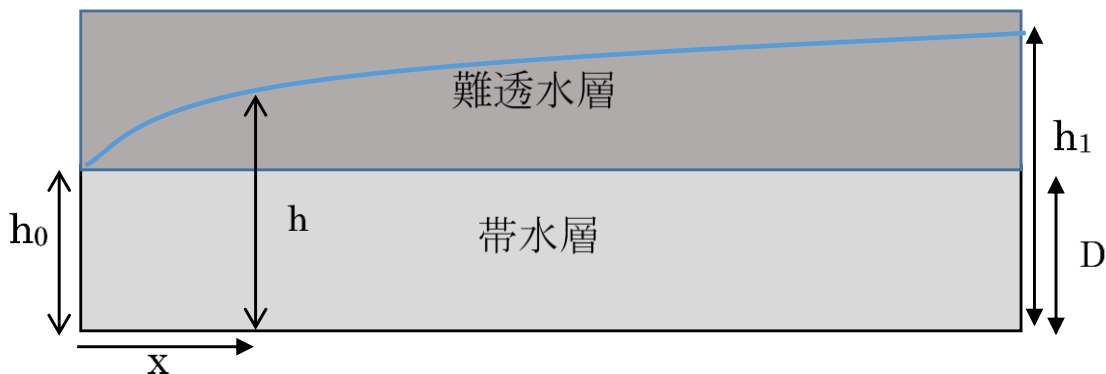


図 3-8 モデル概念図

非定常における理論解は次式によって与えられる。

$$h_1 - h = (h_1 - h_0) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{t(k/S_s)}} \right)$$

余誤差関数

$$\operatorname{erfx}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

ここで、 $x$  は長さ [m]、 $k$  は透水係数 [m/s]、 $S_s$  は比貯留係数 [1/m]、 $t$  は時間 [s]、 $h_0$ 、 $h_1$  は境界の既知全水頭 [m] である。

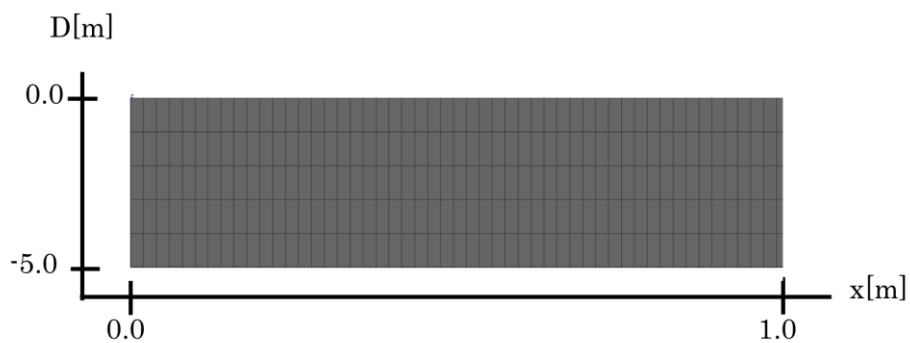


(2) 解析モデル

解析に用いるモデルは帯水層のみを FEM モデル化した。FEM モデルを図 3-9 に、FEM モデルの諸元を表 3-17 に示す。



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 3-9 FEM モデル

表 3-17 モデルの諸元

	設定値
節点数	57612
要素数	24000
X 方向分割数	4800
Y 方向分割数	1
Z 方向分割数	5
x [m]	1000.0

(3)解析条件

解析に用いる条件について表 3-18, 表 3-19 に示す。

表 3-18 解析条件

	記号	単位	帯水層
透水係数	K	m/sec	1.00E-09
間隙率	n	-	0.2
比貯留係数	$S_s$	1/m	1.00E-04

表 3-19 境界条件

	記号	単位	設定値
既知全水頭	$h_1$	m	5.0
既知全水頭	$h_0$	m	0.5

(4) 結果

x 方向における全水頭値を比較した。

Dtransu-3D 計算解と理論解との比較結果を図 3-10 に示す。

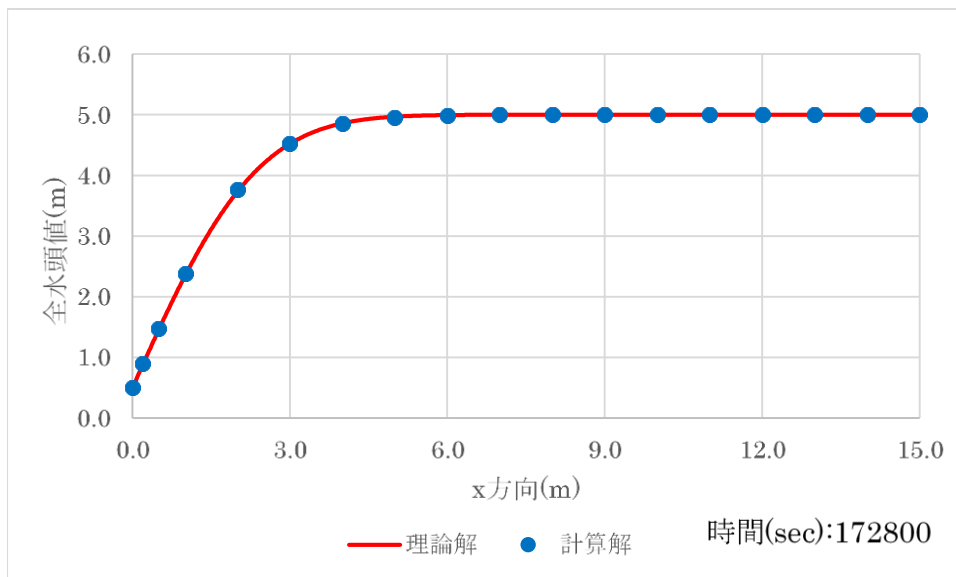
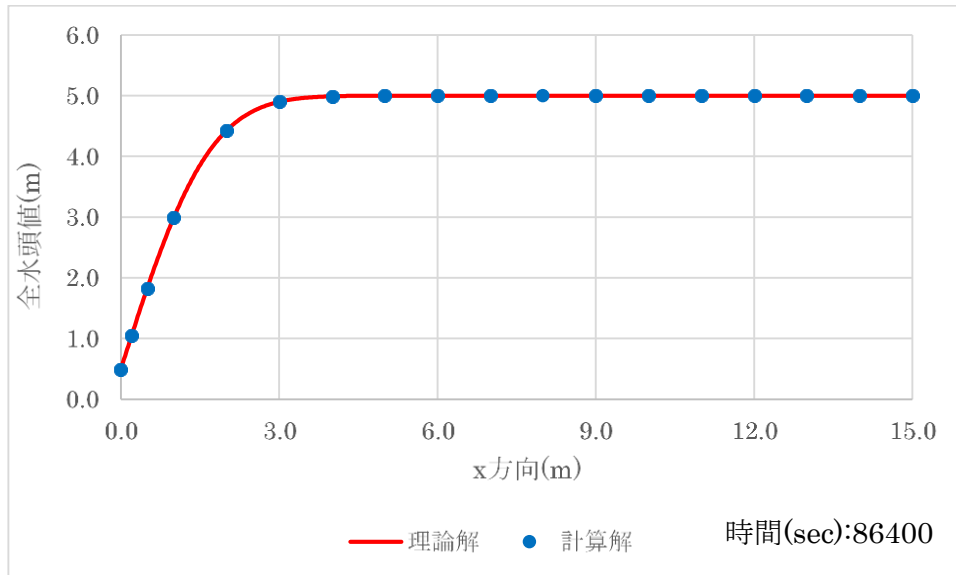


図 3-10 計算解と理論解の比較

(5) 誤差評価

誤差評価は RMSE (平均二乗平方根誤差) で行った。データ数を  $N$ 、理論解を  $T_i$  ( $i = 1, \dots, N$ )、Dtransu-3D 計算解を  $A_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) とすると、RMSE は次式で表される。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (T_i - A_i)^2}$$

表 3-20 誤差評価

比較時間 (sec)	比較点数	全水頭の RMSE [m]
86400	751	1.68E-02
172800	751	6.11E-03

### 3.6 妥当性確認 (Validation)

解析コードは、土木、環境、資源、エネルギー、農林水産、災害・防災などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

### 3.7 評価結果

3.1 から 3.6 より、本解析コードを用いることは妥当である。

## 4. 参考文献

- ・ Dtransu-3D・EL 理論マニュアル (2011 年版)

(参考資料 2) 非定常解析の降雨に対する感度向上についての取り組み

## 1. 概要

設置許可時に、再現解析（定常解析）に加え、観測降雨を与える再現解析（非定常解析）を参考として実施した。その結果、降雨時の解析水位の感度が観測水位と比較して小さい傾向が確認された。

上記を踏まえ、本資料では、再現解析（非定常解析）における降雨時の解析水位の感度が小さい要因を分析し、感度向上を目的とした検討内容及び結果について説明する。

ここで、本資料に記載する浸透流解析の一覧を表 1-1 に示す。

表 1-1 浸透流解析一覧

解析種別		実施時期	内容	以降の記載方法
再現解析	定常解析	設置許可時	モデルの妥当性確認のため実施	再現解析①
	非定常解析	設置許可時	再現解析①の参考として実施	再現解析②
		詳細設計時	再現解析②を踏まえ、降雨時の解析水位の感度向上を目的として実施（今回実施）	再現解析③

## 2. 再現解析（非定常解析）の感度向上のための検討

### 2.1 降雨に対する感度向上に寄与する要因の分析

再現解析②の解析モデルでは、地表面への降雨は構内排水路を介して海へ排水されることから、舗装範囲については降雨の地下への浸透を考慮していない。実際には、工事中の掘削等の影響により、地表面から降雨が浸透することも想定されることから、地表面からの降雨の浸透が再現解析（非定常解析）の感度向上に寄与する一因として推察される。

### 2.2 感度向上のための検討内容

#### (1) 境界条件

再現解析③では、検証期間中に施工中であった安全対策工事に伴う舗装の撤去・掘削等による地表面の状況を踏まえ、降雨の地下への浸透について考慮する。

#### (2) 検証期間

解析水位と観測水位を比較するための検証期間は、地下水位観測開始以降で、一定期間の観測水位データが概ね連続的に取得されている2016年4月～2016年11月とする。

表2-1に、今回実施する再現解析③のモデル概要を示す。

表 2-1 再現解析③のモデル概要

項目	【参考】再現解析① モデル	再現解析③ モデル
目的	モデル化の妥当性を確認 (観測記録の再現性を確保)	モデル化の妥当性を確認 (降雨による解析地下水位の感度向上)
解析コード	Dtransu-3D・EL, バージョン: ver.2af90MP	
解析領域	敷地を取り囲む分水嶺までを解析範囲とする 	
格子数	<ul style="list-style-type: none"> <li>平面格子数: 1, 2号機エリア: 約 2.1 万 3号機エリア: 約 2.4 万</li> <li>総格子数: 1, 2号機エリア: 約 121 万 3号機エリア: 約 138 万</li> <li>格子寸法: 1~40m 程度 (構造物近傍は最小 1m 程度, 山側領域は 40m 程度)</li> </ul>	
解析種別	定常解析	非定常解析
検証期間	2016 年 4 月~2018 年 8 月	2016 年 4 月~2016 年 11 月
降雨条件	構内観測所における年平均降水量 1,540mm/年を定常的に与える	構内観測所における検証期間中の降水量を 経時的に与える
モデル (地形)	検証期間に対応した状態	
モデル (地盤)	検証期間に対応した状態	検証期間に対応した状態
モデル (構造物)	検証期間に対応した状態	
モデル (ドレーン)	ドレーン (既設) を管路として考慮	
境界条件	実態に則した設定 ・山側: 閉境界 ・海側: H.W.L.に水位固定 ・ドレーン: 管路としてモデル化	感度向上を目的とした設定 ・山側: 閉境界 ・海側: H.W.L.に水位固定 ・ドレーン: 管路としてモデル化 ・安全対策工事の実施状況を踏まえて舗装 範囲の見直し
透水係数	透水試験, 粒度試験*1及び文献値*2	
有効間隙率	物理試験及び文献値*3	

注記\*1: 土質試験の方法と解説に基づき設定

\*2: 管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル (改訂版) に基づき設定

\*3: 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版) に基づき設定



### 3. 解析結果

再現解析③について、図3-1に示す地下水位観測孔における解析水位を観測値と比較することにより、解析水位の降雨への感度を図3-2のとおり確認した。また、再現解析②の結果についても併記した。

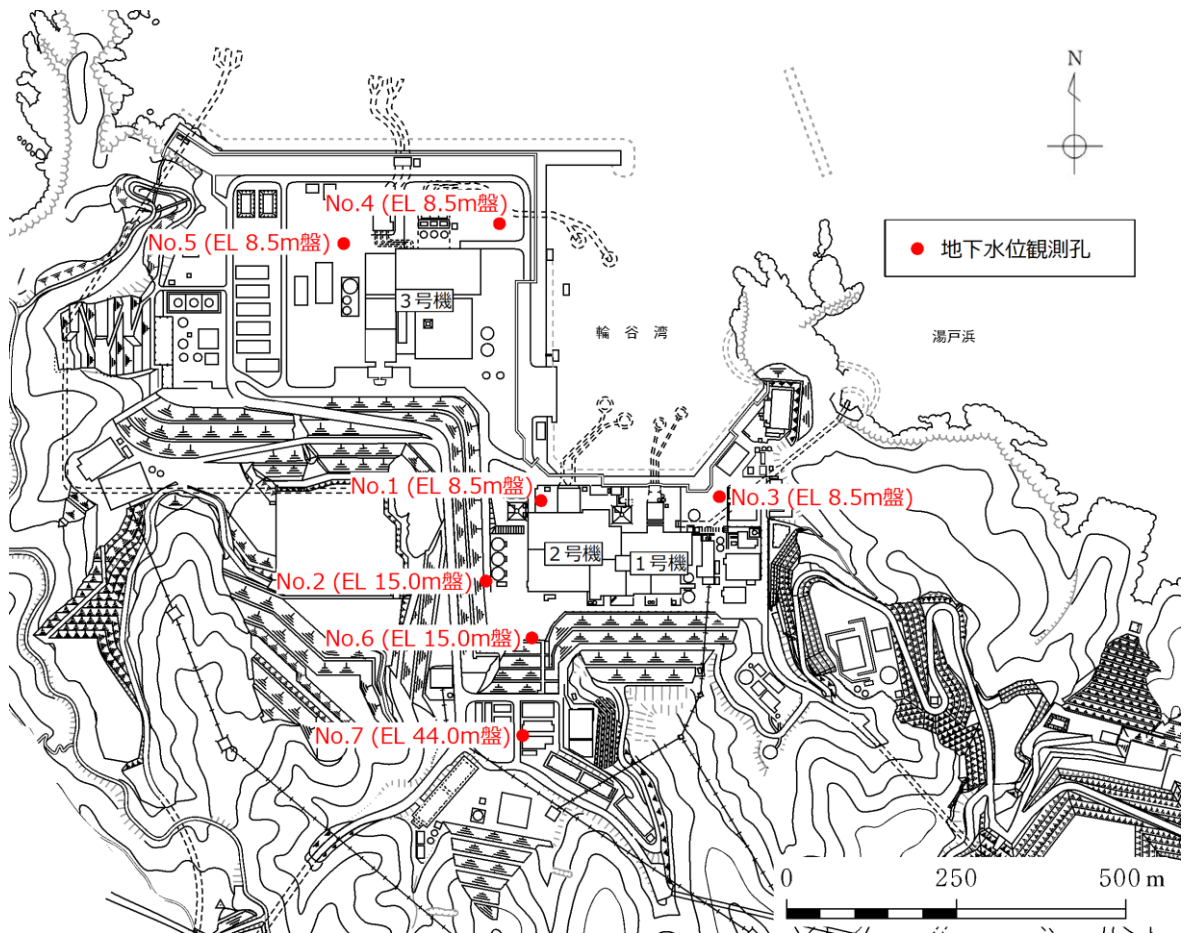


図3-1 地下水位観測孔位置図

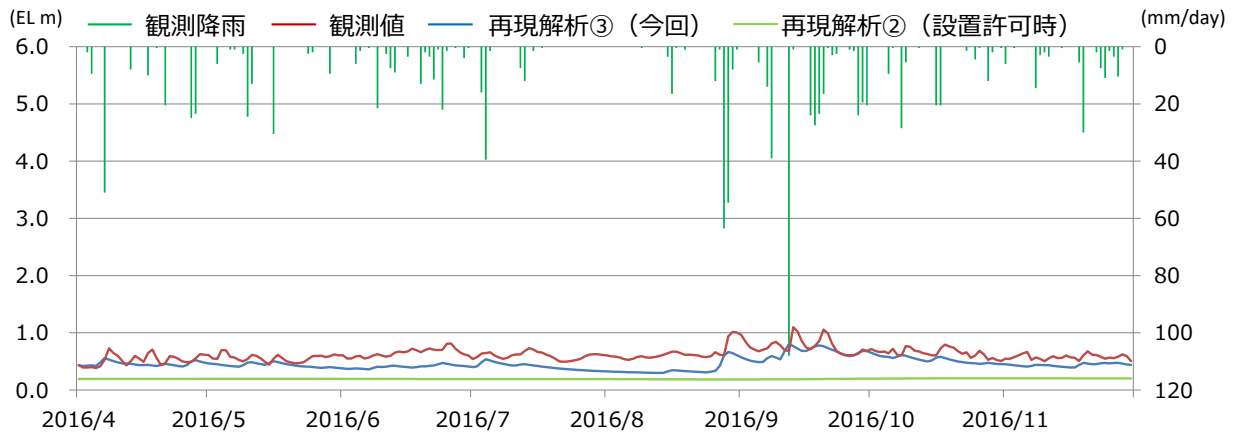


図 3-2(1) 地下水位の経時変化 (No. 1 孔)

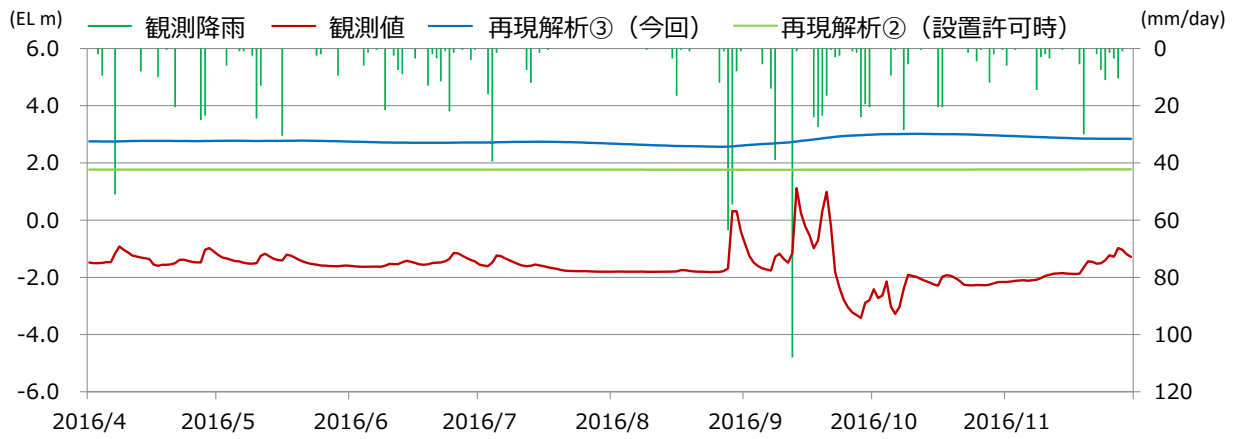


図 3-2(2) 地下水位の経時変化 (No. 2 孔)

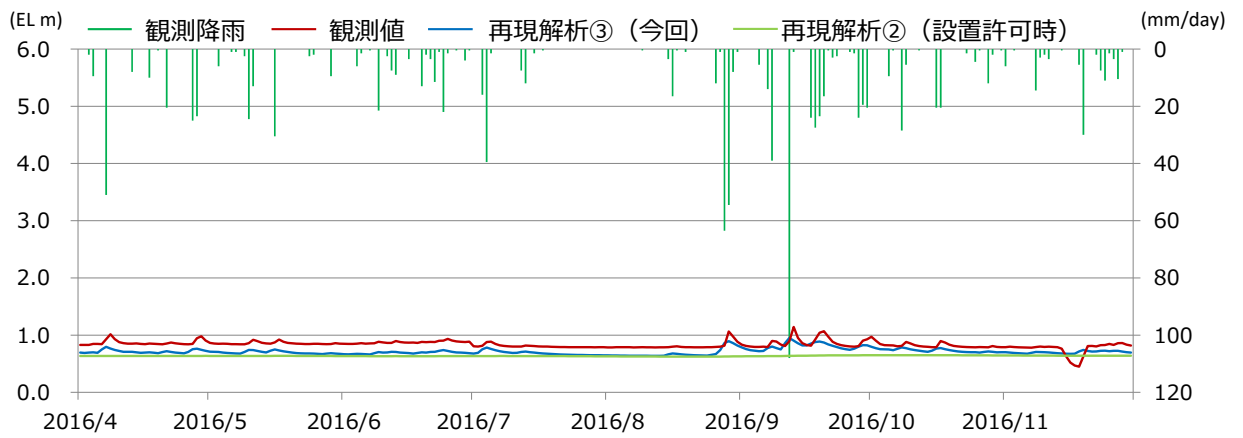


図 3-2(3) 地下水位の経時変化 (No. 3 孔)

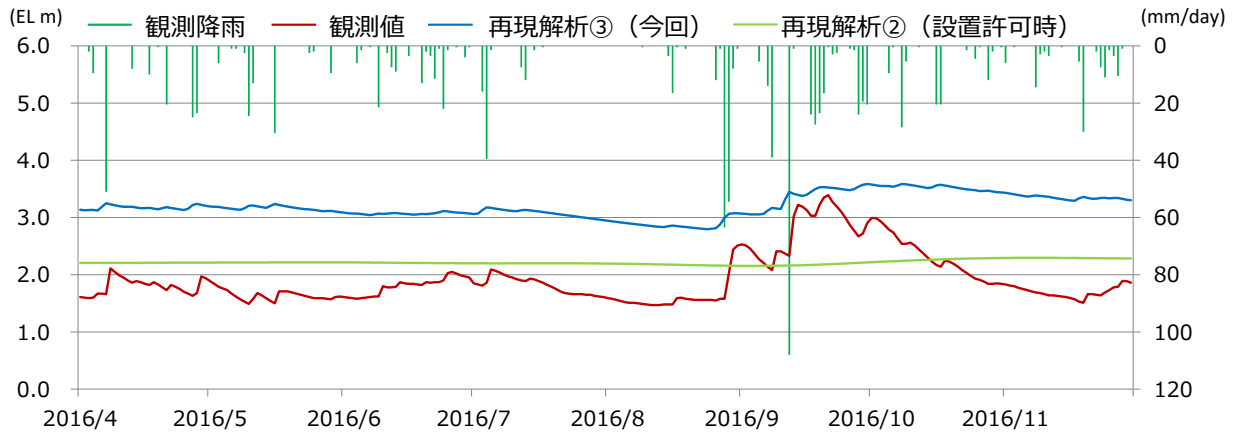


図 3-2(4) 地下水位の経時変化 (No. 4 孔)

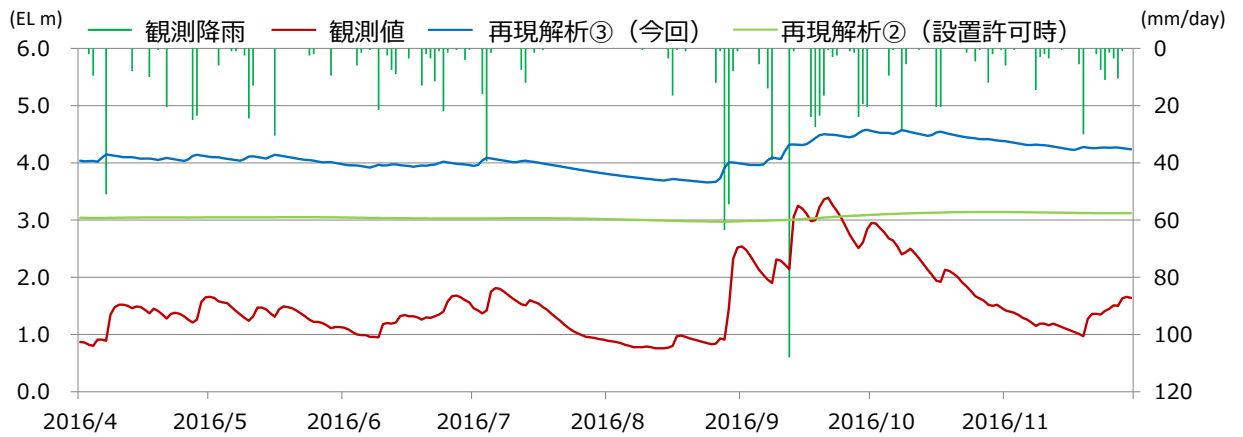


図 3-2(5) 地下水位の経時変化 (No. 5 孔)

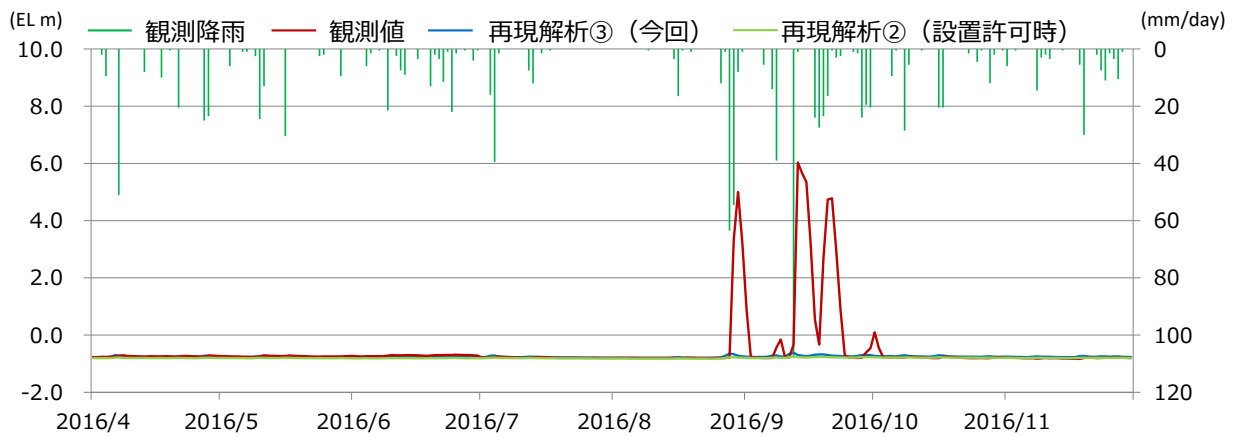


図 3-2(6) 地下水位の経時変化 (No. 6 孔)

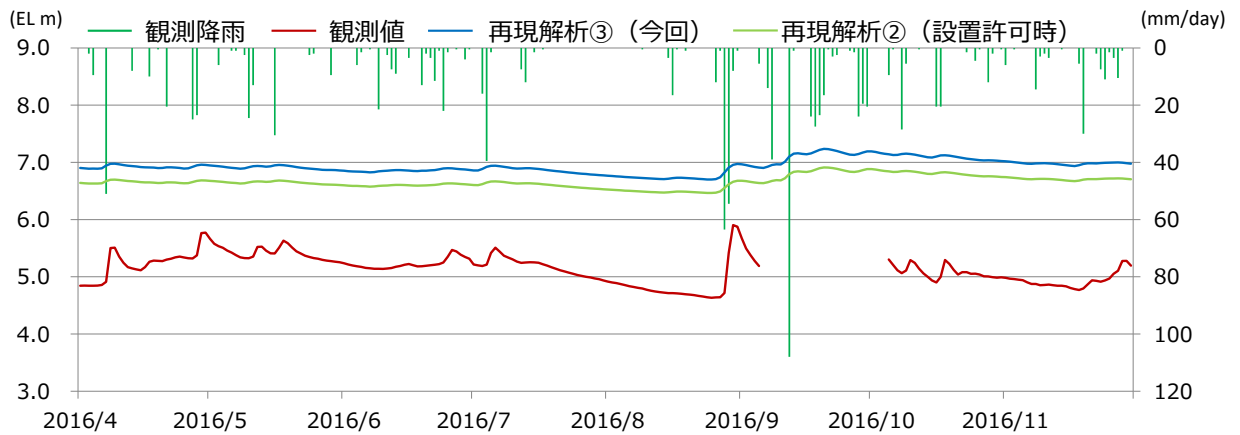


図 3-2(7) 地下水位の経時変化 (No. 7 孔)

再現解析③では、再現解析②と比較して、降雨に対する解析水位の感度が向上していることが確認された。No. 6 孔については、一部の期間において観測水位が降雨に伴い大きく変動しているものの、地下水位低下設備（既設）に近接する観測孔であるため、検証期間を通して解析水位と観測水位の変動がいずれも小さい傾向にある。一部の期間において観測水位が降雨に伴い大きく変動している要因としては、観測孔周辺での工事状況等の影響により、一時的に雨水が観測孔に流入し易い状況であったことが推察される。

#### 4. 非定常解析の感度向上に関する取り組み結果

再現解析③では、再現解析②から一部境界条件を変更し、降雨への感度分析を行った。その結果、観測孔によってばらつきは見られるものの、大局的には地下水位の時系列的な変動を再現できており、再現解析②に比べて降雨に対する感度が向上していることを確認した。

#### 5. 非定常解析の位置付けについて

再現解析③では、降雨に対する一定の感度向上が確認された一方で、一時的な地下水位変動への追従性については課題も確認された。

以上を踏まえ、非定常解析については、解析モデルの妥当性検証の取り組みとして補足的に実施する位置付けとし、設計地下水位の設定においては、降雨条件に保守性を持たせた定常解析による予測解析に基づき設定する方針とする。

なお、表 5-1 のとおり、検証期間全体を通して定常解析による予測解析の水位は再現解析③による解析水位及び観測水位を常に上回っていることから、設計地下水位は十分な保守性を有していることを確認している。

表 5-1 地下水位の比較

観測孔 No.	最高水位		
	再現解析③* (今回)	観測水位*	予測解析
1	EL 0.81m	EL 1.10m	EL 3.41m
2	EL 3.02m	EL 1.11m	EL 10.65m
3	EL 0.95m	EL 1.14m	EL 1.51m
4	EL 3.58m	EL 3.39m	EL 5.97m
5	EL 4.58m	EL 3.39m	EL 6.75m
6	EL-0.62m	EL 6.03m	EL 15.00m
7	EL 7.24m	EL 5.90m	EL 19.00m

\* : 検証期間中の最高値

(参考資料 3) 屋外重要土木構造物等の設計地下水位の設定方法

1. 概要

屋外重要土木構造物等の設計地下水位は、予測解析（水位評価）モデルを用いた3次元浸透流解析（定常解析）より得られた解析水位を参照し、これを上側に包絡するように設定する方針としている。

本資料は、土木構造物の設計地下水位の設定方法について整理したものである。

2. 設計地下水位の設定方法

設計地下水位は、構造物の耐震安全性評価で対象とする解析モデル範囲内で、浸透流解析の結果から最大地下水位を抽出し、それを上回る地下水位として全断面に対して一律に設定する。

設計地下水位の設定方法のイメージを図 2-1 に示す。

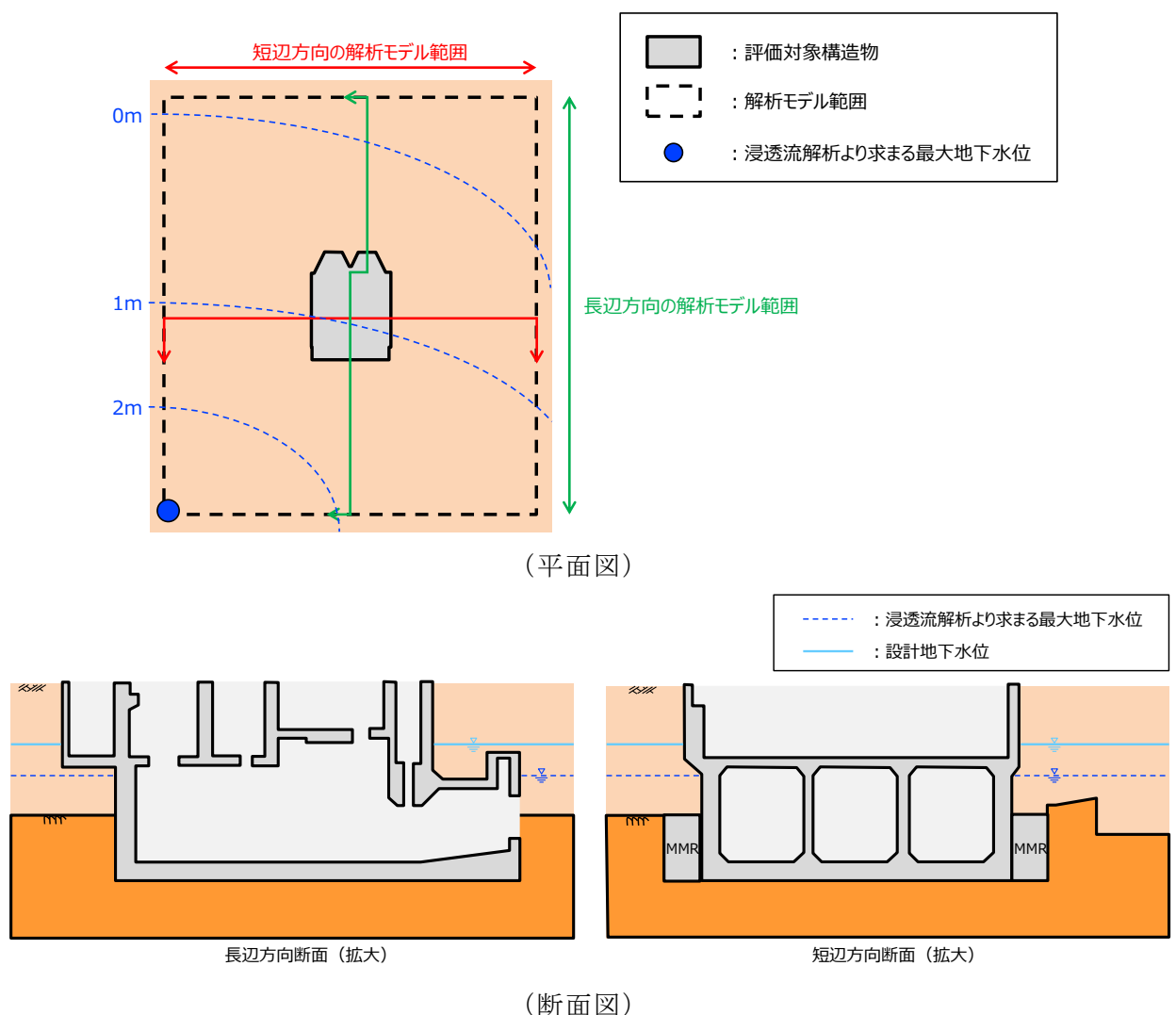


図 2-1 設計地下水位の設定方法のイメージ図