

資料 1 - 2

泊発電所 3 号炉審査資料	
資料番号	DB04 r. 3. 33
提出年月日	令和5年11月20日

泊発電所 3 号炉

設置許可基準規則等への適合状況について
(設計基準対象施設等)

第4条 地震による損傷の防止

令和 5 年 1 1 月
北海道電力株式会社

枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

泊発電所3号炉

施設の耐震評価に用いる地盤の液状化の評価方針

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化検討対象層の抽出
 - 2.1 敷地の地質概況
 - 2.2 埋戻土の分布
 - 2.3 砂層の分布
 - 2.4 液状化検討対象層の選定方針
 - 2.5 液状化検討対象層の選定結果
3. 液状化検討対象施設の抽出
 - 3.1 液状化検討対象施設の抽出方針
 - 3.2 液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定の観点
4. 液状化強度試験の試料採取位置選定とその代表性
 - 4.1 試料採取位置の選定及び代表性確認の方針
 - 4.2 試料採取位置の選定
 - 4.3 試料採取位置の代表性確認
 - 4.3.1 埋戻土の代表性確認
 - 4.3.2 砂層の代表性確認
 - 4.3.3 液状化強度試験 試料採取位置の代表性のまとめ
 - 4.4 追加調査位置
 - 4.4.1 追加調査の必要性検討
5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定
 - 5.1 液状化強度試験方法
 - 5.2 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方
 - 5.3 液状化強度試験結果
 - 5.3.1 埋戻土の液状化強度試験結果
 - 5.3.2 砂層の液状化強度試験結果
 - 5.4 基準地震動に対する液状化強度試験の妥当性確認
 - 5.5 液状化強度特性の設定
6. 液状化影響の検討方針

- 添付資料 1 埋戻土・砂層のボーリング柱状図・コア写真及び液状化強度試験結果データ集
- 添付資料 2 液状化検討対象層の選定について(Ac 層)
- 添付資料 3 埋戻土・砂層の基本物性
- 添付資料 4 埋戻土の N 値について
- 添付資料 5 建設時における埋戻土の施工及び品質管理について
- 添付資料 6 液状化に関連する基本物性の補足
- 添付資料 7 1, 2 号埋戻土及び 3 号埋戻土の区分けについて
- 添付資料 8 粒度分布の代表性確認指標としての妥当性確認
- 添付資料 9 設工認段階におけるエリア分けの検討方針(案)

1. 液状化評価の基本方針

本資料では、施設の耐震評価に用いる地盤の液状化影響の検討方針を示す。

耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設においては、液状化、揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮した場合においても、当該施設の安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

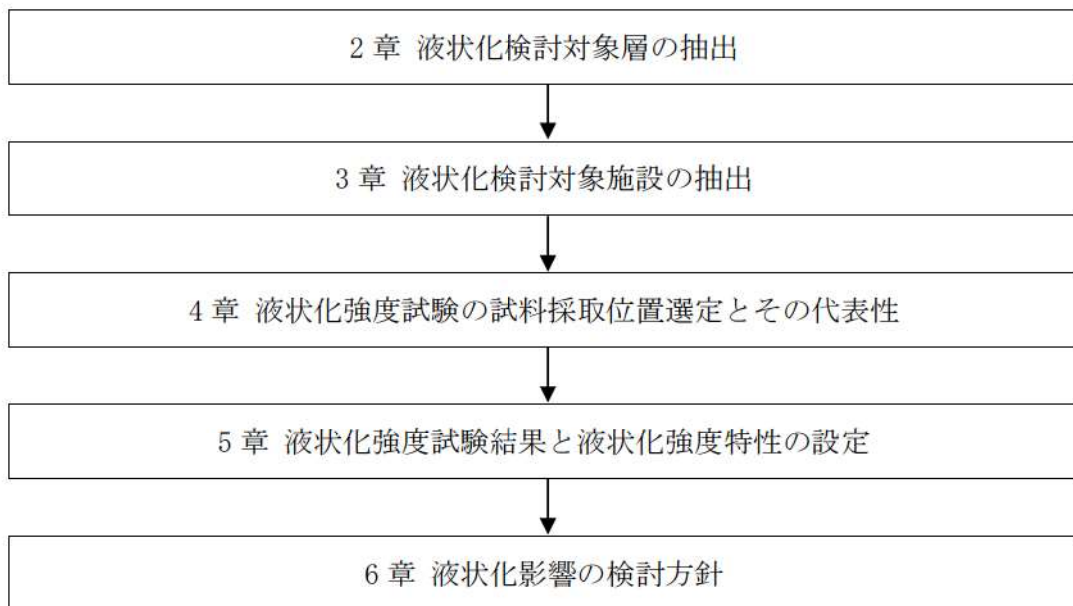
耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の設計に**当たり**、地下水排水設備の機能に期待する施設においては、その機能を考慮した設計地下水位を設定する。地下水排水設備の機能に期待しない施設においては、自然水位に基づき設定した水位又は地表面にて設計地下水位の影響を考慮する。

なお、各施設の設計地下水位は設計及び工事計画認可段階(以下、「設工認段階」という)において設定するものとする。

泊発電所における液状化影響評価のフローを第1.1-1図に示す。

- ・液状化影響評価については、道路橋示方書・同解説V 耐震設計編(2002)(以下、「日本道路協会(2002, V耐震設計編)」という)の評価方法を基本とするが、日本道路協会(2002, V耐震設計編)においては対象外とされているG.L. -20m 以深の土層等についても液状化強度試験を実施し、すべての埋戻土及び砂層を液状化検討対象層とすることで保守的な評価とする(2. 液状化検討対象層の抽出)。
- ・屋外の耐震重要施設(建物・構築物, 屋外重要土木構造物, 津波防護施設等)を対象に、液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定の方針を示す(3. 液状化検討対象施設の抽出)。
- ・液状化検討対象層として抽出した埋戻土及び砂層の液状化強度試験の試料採取位置について、その周辺で実施したボーリング調査位置の物理特性と比較し、その代表性を確認する(4. 液状化強度試験の試料採取位置選定とその代表性)。
- ・現状の液状化強度試験位置では、液状化検討対象施設近傍が網羅できていないと判断される場合は、追加調査を実施する(4. 液状化強度試験の試料採取位置選定とその代表性)。
- ・液状化強度試験結果に基づいて、地震時の地盤の状態を「液状化」、「繰返し軟化」及び「非液状化」と分類し、液状化検討対象層が「液状化」とならないこと(支持力を喪失しない、又は急激な流動変位が発生しない地盤であること)を把握する。また、累積損傷度理論を適用し、基準地震動相当の地盤の状態を模擬して液状化強度試験が実施できていることを確認する(5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定)。
- ・設置許可段階における施設の有効応力解析に用いる液状化強度特性は、現時点の液状化強度試験結果を用いて、液状化強度特性を保守的(下限値)に設定する(5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定)。

- ・設工認段階においては、追加の液状化強度試験結果を含めて、液状化強度特性を液状化検討対象層の各層の下限値に設定する。ただし、取放水設備工事によって埋戻仕様が規定されたエリアとそれ以外のエリアに細分化することが可能である場合は、そのエリアごとの液状化強度試験結果の下限値に設定することを検討する(6. 液状化影響の検討方針)。
- ・液状化検討対象施設の解析手法は、施設の周辺状況に応じた液状化の影響を踏まえて選定し、有効応力解析を選定する場合は有効応力解析に加え、液状化が発生しない場合の影響を確認するために全応力解析での耐震評価も実施する(6. 液状化影響の検討方針)。



第 1.1-1 図 液状化影響評価フロー

2. 液状化検討対象層の抽出

2.1 敷地の地質概況

敷地の地質平面図を第 2.1-1 図に示す。敷地の基盤をなす地層は、新第三系上部中新統神恵内層であり、神恵内層を覆って第四紀中期更新世以前の海成堆積物、後期更新世の段丘堆積物及び崖錐Ⅰ堆積物、完新世の崖錐Ⅱ堆積物及び沖積層が分布する。敷地の基盤をなす地層である神恵内層は、岩相の特徴から凝灰質泥岩と火砕岩層に大別される。神恵内層の凝灰質泥岩層は、敷地北部の茶津川付近に分布し、火砕岩層は敷地全域に広く分布しており、3号原子炉建屋設置位置付近には安山岩が認められる。

発電所の埋立地盤については、敷地造成時に発生した掘削岩砕からなる埋立地盤が主体であり、施工時期、材料により 1,2号埋戻土、3号埋戻土に区分される。1,2号埋戻土は、1,2号建設時の埋戻土で火砕岩主体の岩砕地盤であり、3号埋戻土は、3号建設時の埋戻土で安山岩主体の岩砕地盤である。

岸壁及び津波防護施設前面には、沖積層に相当する砂層(As1層及びAs2層)、砂礫層(Ag層)及び粘土・シルト層(Ac層)が分布している。

道路橋示方書・同解説 IV下部構造編(2012) (以下、「日本道路協会(2012, IV下部構造偏)」)というでは、「砂層、砂礫層はN値が30程度以上あれば良質な支持層と考えるとよい。」とされている(下記参照)。

また、地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例では、N値と相対密度の関係が示されており、30未満は「中位の～非常に緩い」、30以上は「密な～非常に密な」ものとされている(下記参照)。

以上に基づき、砂層については、N値<30をAs1層、N値≥30をAs2層と分類し、それぞれの解析用物性値を設定する。

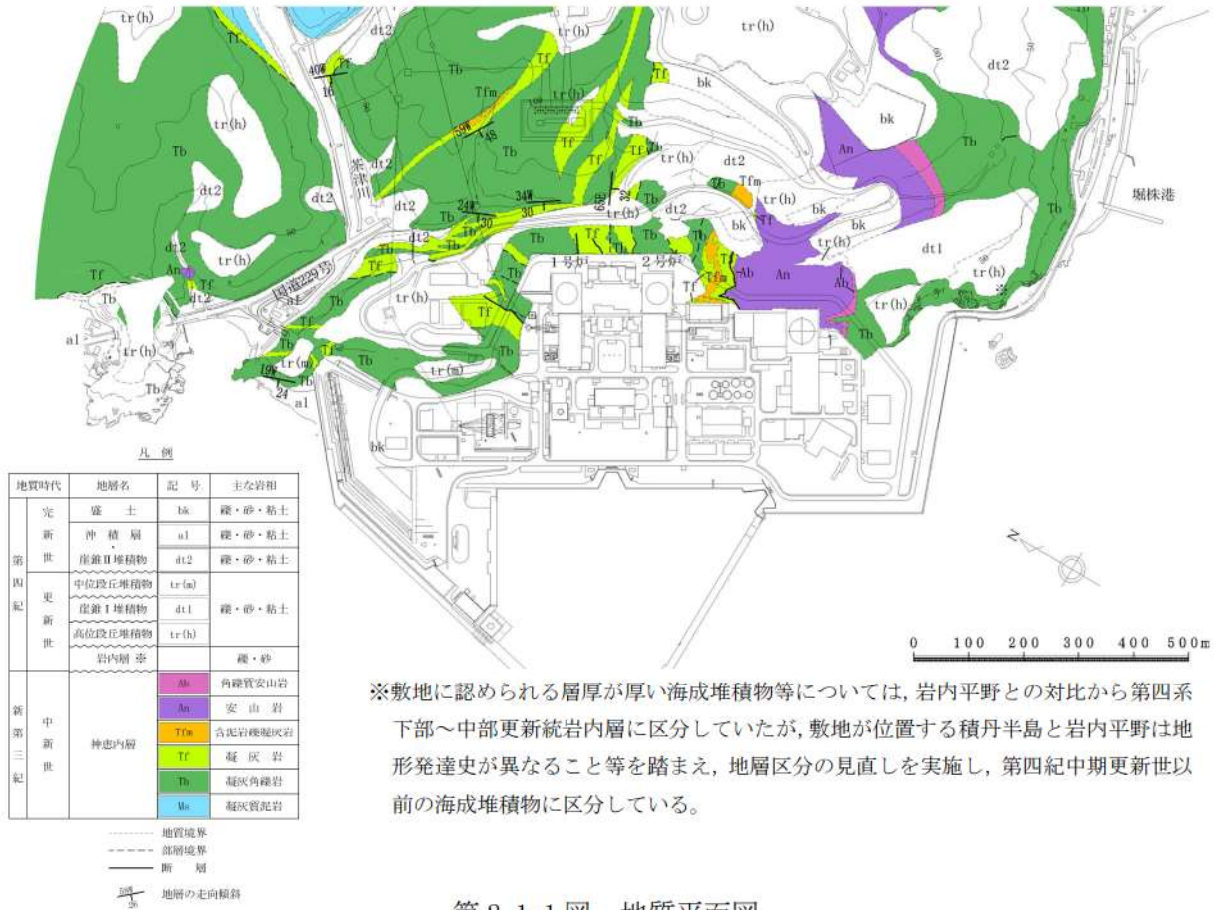
【地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例】

N値	相 対 密 度
0～4	非常に緩い (very loose)
4～10	緩い (loose)
10～30	中位の (medium)
30～50	密な (dense)
50以上	非常に密な (very dense)

【日本道路協会(2012, IV下部構造偏)に一部加筆】

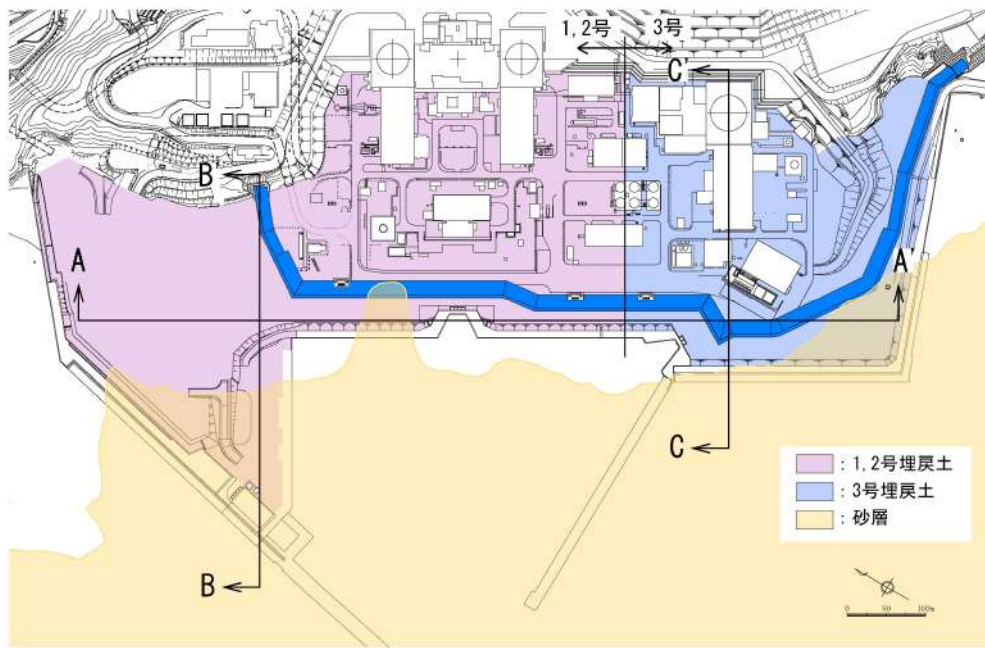
ii) 砂層、砂れき層はN値が30程度以上あれば良質な支持層と考えるとよい。ただし、砂れき層ではれきをたたいてN値が過大に出る傾向があるので、支持層の決定には十分な注意が必要である。

埋戻土の分布状況について平面図を第 2.1-2 図に、地質断面位置図を第 2.1-3 図に、埋戻土及び砂層のボーリング柱状図及びコア写真を添付資料 1 に示す。

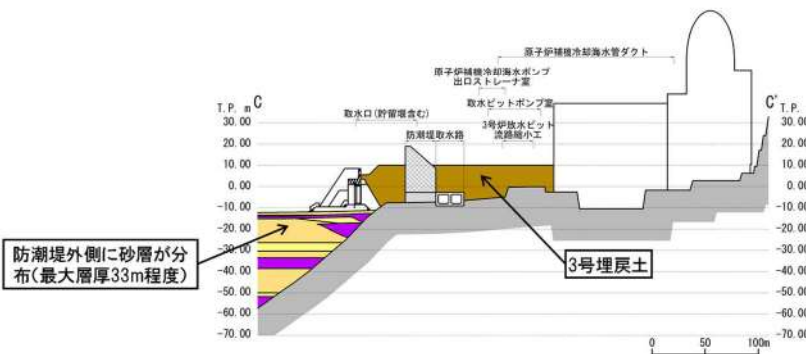
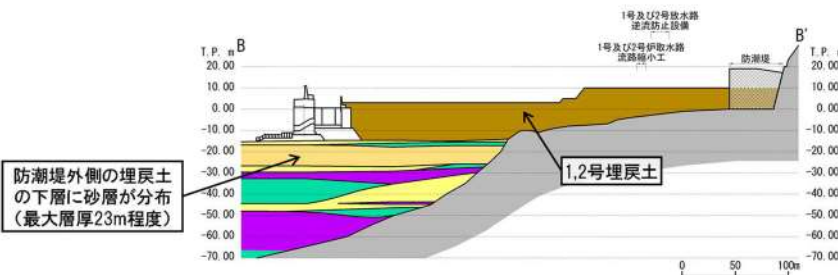
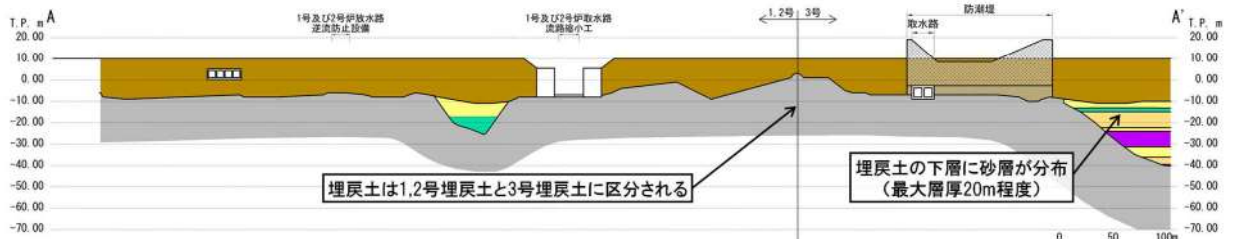


※敷地に認められる層厚が厚い海成堆積物等については、岩内平野との対比から第四系下部～中部更新統岩内層に区分していたが、敷地が位置する積丹半島と岩内平野は地形発達史が異なること等を踏まえ、地層区分の見直しを実施し、第四紀中期更新世以前の海成堆積物に区分している。

第 2.1-1 図 地質平面図



第 2.1-2 図 埋戻土の分布範囲並びに地質断面位置図



- 凡例
- セメント改良土
 - 下部コンクリート
 - 埋戻土
 - 砂 (As1)
 - 砂 (As2)
 - 砂礫
 - 粘土・シルト
 - 岩盤

第 2.1-3 図 地質断面図

2.2 埋戻土の分布

発電所の埋戻地盤については、敷地造成時に発生した掘削岩砕からなる埋戻地盤が主体である。

泊発電所の埋戻地盤は、施工時期、材料により、1,2号埋戻土、3号埋戻土に区分される。

1,2号埋戻土は、1,2号建設時の埋戻土で火砕岩主体の岩砕地盤であり、3号埋戻土は、3号建設時の埋戻土で安山岩主体の岩砕地盤である。

2.3 砂層の分布

各断面位置における砂層の分布の特徴は以下のとおりである。

・A-A' 断面

防潮堤付近にわずかに砂層が分布している。埋戻土の下層に砂層が分布しており、その層厚は最大20m程度である。

・B-B' 断面

1,2号側の防潮堤外側に一部砂層が分布している。埋戻土の下層に砂層が分布しており、その層厚は最大23m程度である。

・C-C' 断面

3号側の防潮堤外側に砂層が分布しており、その層厚は最大33m程度である。

2.4 液状化検討対象層の選定方針

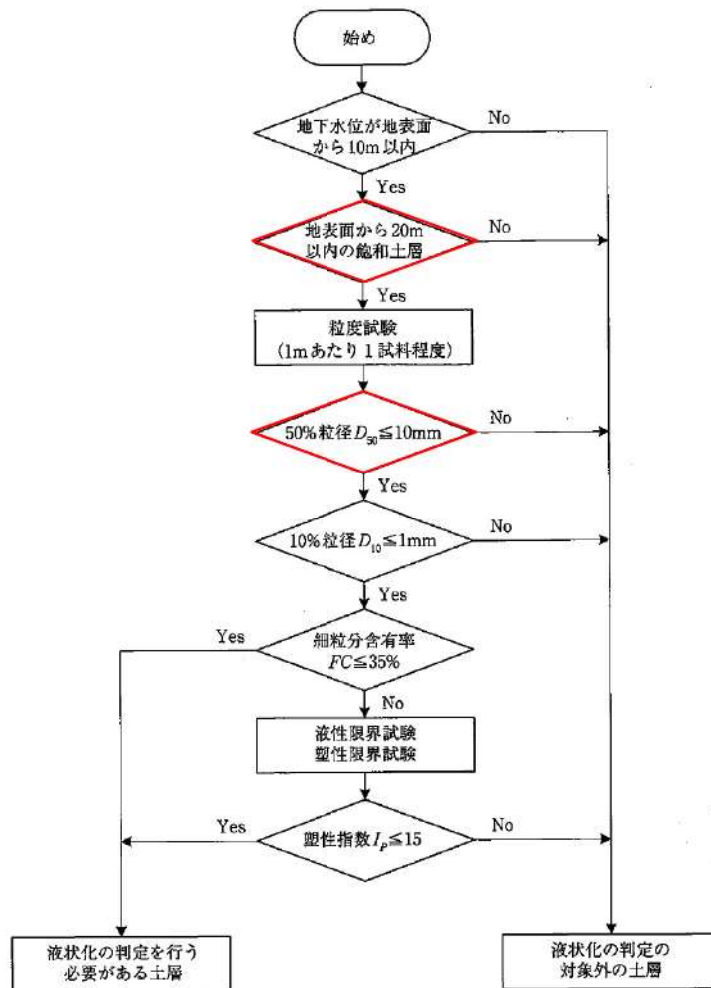
敷地の埋戻地盤である埋戻土と砂層(As1層及びAs2層)、砂礫層(Ag層)、粘土・シルト層(Ac層)について、日本道路協会(2002, V耐震設計偏)に基づき、第2.4-1図に示す手順で液状化検討対象層を抽出する。

日本道路協会(2002, V耐震設計偏)では、地震時に影響を与える液状化が生じる可能性がある液状化検討対象層として、次の3つの条件すべてに該当する土層と定めている。

- ① 地下水位がG.L. -10m以内であり、かつG.L. -20m以内の飽和土層
- ② 細粒分含有率が35%以下、又は細粒分含有率が35%を超えても塑性指数が15以下の土層
- ③ 平均粒径が10mm以下で、かつ10%粒径が1mm以下である土層

液状化検討対象層の抽出は、日本道路協会(2002, V耐震設計編)で対象としている地層を基本とし、比較的浅部の地盤等が液状化検討対象層となるが、以下の場合も含め液状化検討対象層として抽出する。

- ・ G. L. -20m 以深の飽和土層
- ・ 平均粒径が 10 mm以上の飽和土層



※本評価では、日本道路協会(2002, V耐震設計編)において対象外となる以下の土層も評価対象とする

- ・ G. L. -20m 以深の飽和土層
- ・ 平均粒径が 10mm 以上の飽和土層

第 2.4-1 図 液状化検討対象層の抽出フロー

(道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(2012)に一部加筆)

2.5 液状化検討対象層の選定結果

液状化検討対象層の選定結果を第 2.5-1 表に示す。日本道路協会(2002, V耐震設計編)に基づき、液状化検討対象層として地下水位以深の 1,2 号埋戻土, 3 号埋戻土, 砂層(As1 層及び As2 層)及び砂礫層(Ag 層)を選定した。粘土・シルト層(Ac 層)については、「細粒分含有率 $F_c > 35\%$, かつ塑性指数 $I_p > 15$ 」を満足しているため液状化検討の対象外とした。

また、粘土・シルト層(Ac 層)については、建築基礎構造設計指針及び鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(平成 24 年 9 月)に基づき、「粘土分含有率 $P_c > 10\%$ 」及び「粘土分含有率 $P_c > 15\%$ 」を満足し、液状化検討の対象外とした。

なお、液状化検討対象層の選定について(Ac 層)を添付資料 2 に示す。

第 2.5-1 表 液状化検討対象層の選定結果

地質名	層相	道路橋示方書(2002) における 液状化検討対象層		泊サイトの 液状化検討 対象層	備考
		深 度	粒度分布		
1,2 号埋戻土	岩碎 (火砕岩類系)	○	○ (一部×)	○	・粒度分布により非液状化層と判定されるものもあるが、保守的に評価対象とする。
3 号埋戻土	岩碎 (安山岩系)	○	○ (一部×)	○	・粒度分布により非液状化層と判定されるものもあるが、保守的に評価対象とする。
As1	砂 (N 値 < 30)	×	○	○	・20m 以深に分布する範囲についても保守的に評価対象とする。
As2	砂 (30 ≤ N 値)	×	○	○	・20m 以深に分布する範囲についても保守的に評価対象とする。
Ag	砂礫	×	○ (一部×)	○	・20m 以深に分布する範囲についても保守的に評価対象とする。 ・粒度分布により非液状化層と判定されるものもあるが、保守的に評価対象とする。 ・解析用物性値は As2 層に準拠する。
Ac	粘土・シルト	×	×	×	・細粒分含有率 $F_c > 35\%$ かつ塑性指数 $I_p > 15$ より、評価対象外とする。 ・粘土分含有率 $P_c > 10\%$ 以下及び粘土分含有率 $P_c > 15\%$ 以下を満足することも確認し、評価対象外とする。

※○：液状化検討対象 ×：液状化検討対象外

3. 液状化検討対象施設の抽出

3.1 液状化検討対象施設の抽出方針

屋外の耐震重要施設、常設重大事故等対処施設等の設置状況及び地下水位を考慮し、液状化の影響を検討する必要がある液状化検討対象候補施設を抽出する。液状化検討対象候補施設の抽出対象としては、すべての屋外の耐震重要施設(建物・構築物、屋外重要土木構造物、津波防護施設・浸水防止設備)、常設重大事故等対処施設を対象候補として検討する。ただし、代替非常用発電機については、周囲に液状化検討対象層が分布しないこと及び岩盤上に直接設置されることから、液状化検討対象候補施設の抽出対象外とする。

液状化検討対象候補施設の一覧を第 3.1-1 表に、液状化検討対象候補施設、可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルートの配置図を第 3.1-1 図に示す。また、建物・構築物と屋外重要土木構造物、津波防護施設・浸水防止設備(以下、「屋外重要土木構造物及び津波防護施設等」という)について、液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定フローを第 3.1-2 図に示す。

緊急時対策所、空調上屋及び燃料タンク(SA)室の設計地下水位について、設工認段階の液状化検討対象施設の選定においては、第 3.1-3 図に示す例のような、防潮堤設置後における地下水排水設備が機能しない状態が継続した場合の定常的な地下水位分布を予測した三次元浸透流解析の結果を使用する。

なお、可搬型重大事故等対処設備による重大事故等への対応に必要なアクセスルートは、地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりの影響を受けることなく通行性を確保する設計とする。

ここでは、液状化検討対象施設の抽出の考え方を示し、設工認段階において、改めて設定した設計地下水位に基づき液状化検討対象施設の抽出を行う。

第 3.1-1 表 液状化検討対象候補施設 一覧

施設分類	施設名称	基礎形式	支持層 ^{※2}	基礎下端高さ ^{※3} (T.P. m)	地下水位の設定方針		
設計基準対象施設	建物・構築物	原子炉建屋	直接基礎	岩盤	2.8	地下水排水設備の機能に期待して、設計地下水位を設定 (建屋基礎下面下に設計地下水位を設定)	
		原子炉補助建屋	直接基礎	岩盤	0.3		
		ディーゼル発電機建屋	直接基礎	岩盤	4.2		
		A1, A2-燃料油貯油槽タンク室	直接基礎	岩盤	2.1		
		B1, B2-燃料油貯油槽タンク室	直接基礎	岩盤	2.0	地表面に設定	
	屋外重要土木構造物	取水口	直接基礎	岩盤	-11.5	T.P. 0.55m に設定 ^{※4}	
		取水路	直接基礎	岩盤	-9.0	地表面に設定 ^{※5}	
		取水ピットスクリーン室	直接基礎	岩盤	-10.0	地表面に設定	
		取水ピットポンプ室	直接基礎	岩盤	-12.6	地表面に設定	
		原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室	直接基礎	岩盤	-6.0	地表面に設定	
		原子炉補機冷却海水管ダクト	直接基礎	岩盤	-5.0	地表面に設定	
		B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ	直接基礎	岩盤	8.3	地表面に設定	
	津波防護施設・浸水防止設備 ^{※1}	防潮堤	直接基礎	岩盤	迫而	地表面に設定 ^{※5}	
		3号炉取水ピットスクリーン室防水壁	直接基礎	岩盤	0.5	地表面に設定	
		3号炉放水ピット流路縮小工	直接基礎	岩盤	-3.0	地表面に設定	
		3号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備	直接基礎	岩盤	迫而	地表面に設定	
		屋外排水路逆流防止設備	直接基礎	岩盤	3.1	地表面に設定 ^{※5}	
		1号及び2号炉取水路流路縮小工	直接基礎	岩盤	迫而	地表面に設定 ^{※5}	
		1号及び2号炉放水路逆流防止設備	直接基礎	岩盤	迫而	地表面に設定 ^{※5}	
		貯留堰	直接基礎	岩盤	-12.0	地表面に設定 ^{※5}	
	重大事故等対処施設	建物・構築物	緊急時対策所	直接基礎	岩盤	37.7	自然水位 ^{※6} に基づき設定
			空調上屋	直接基礎	岩盤	37.7	自然水位 ^{※6} に基づき設定
			燃料タンク(SA)室	直接基礎	岩盤	37.7	自然水位 ^{※6} に基づき設定

※1 浸水防止設備については、屋外に設置される施設を対象に検討する。

※2 MMR^{※7}等を介して岩盤に支持される施設についても、岩盤に支持されているとする。

※3 各施設の代表的な基礎下端高さを示す。

※4 取水口の設計地下水位は、日本港湾協会(2007)の残留水位の設定方法に基づき T.P. 0.55m に設定する。

※5 防潮堤よりも海側の設計地下水位は、朔望平均満潮位 T.P. 0.26m に設定し、防潮堤よりも山側の設計地下水位は、地表面に設定する。

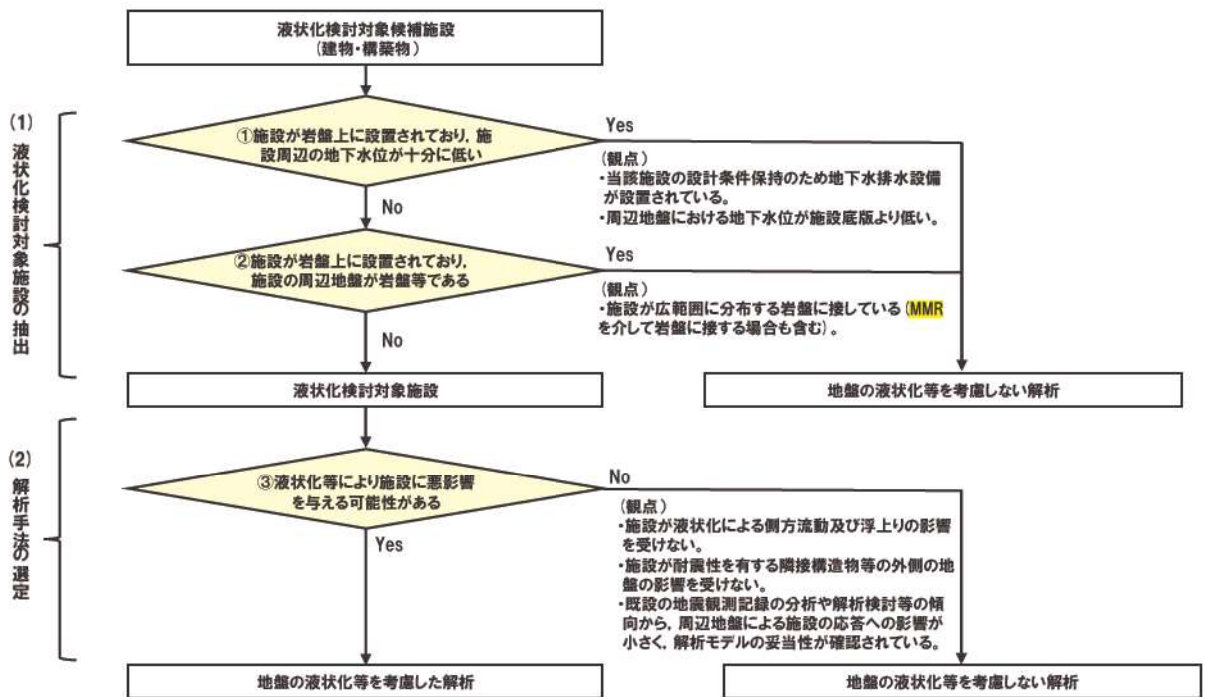
※6 解析条件を保守的に設定した三次元浸透流解析の予測解析水位。

※7 MMR(マンメイドロック)は、構造物を支持する又は構造物の周囲を埋め戻す無筋コンクリートであり、地盤として扱う。

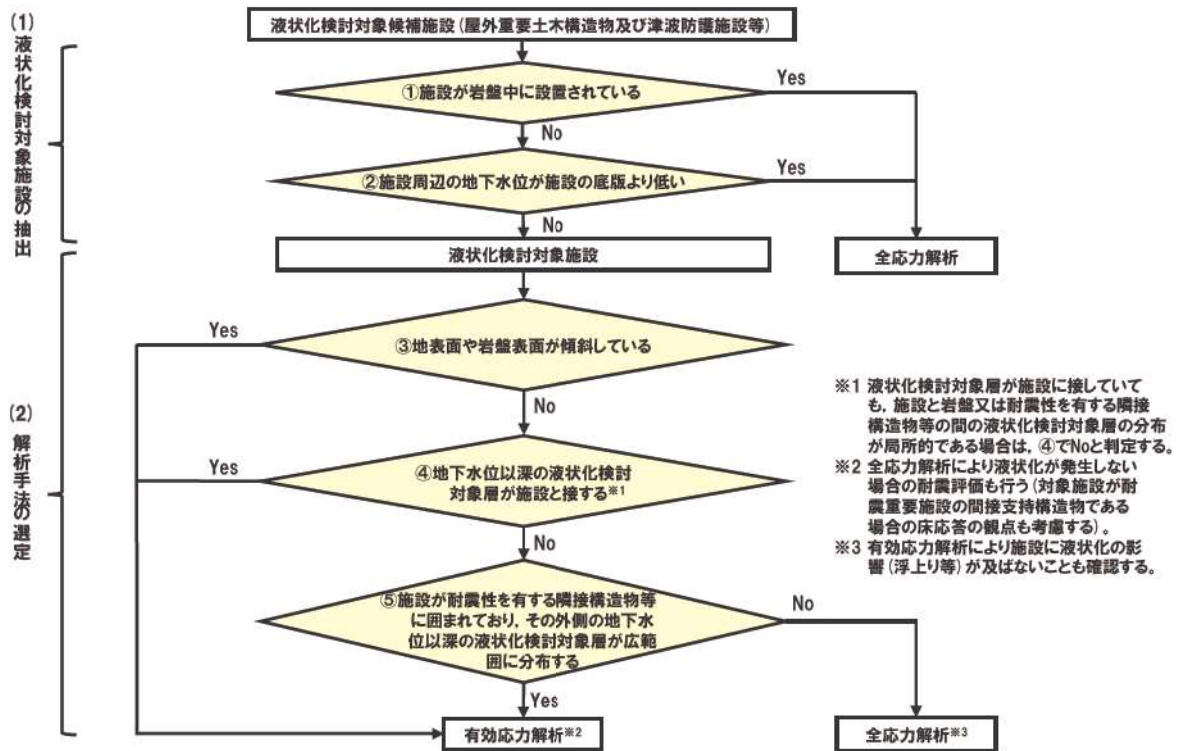


:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

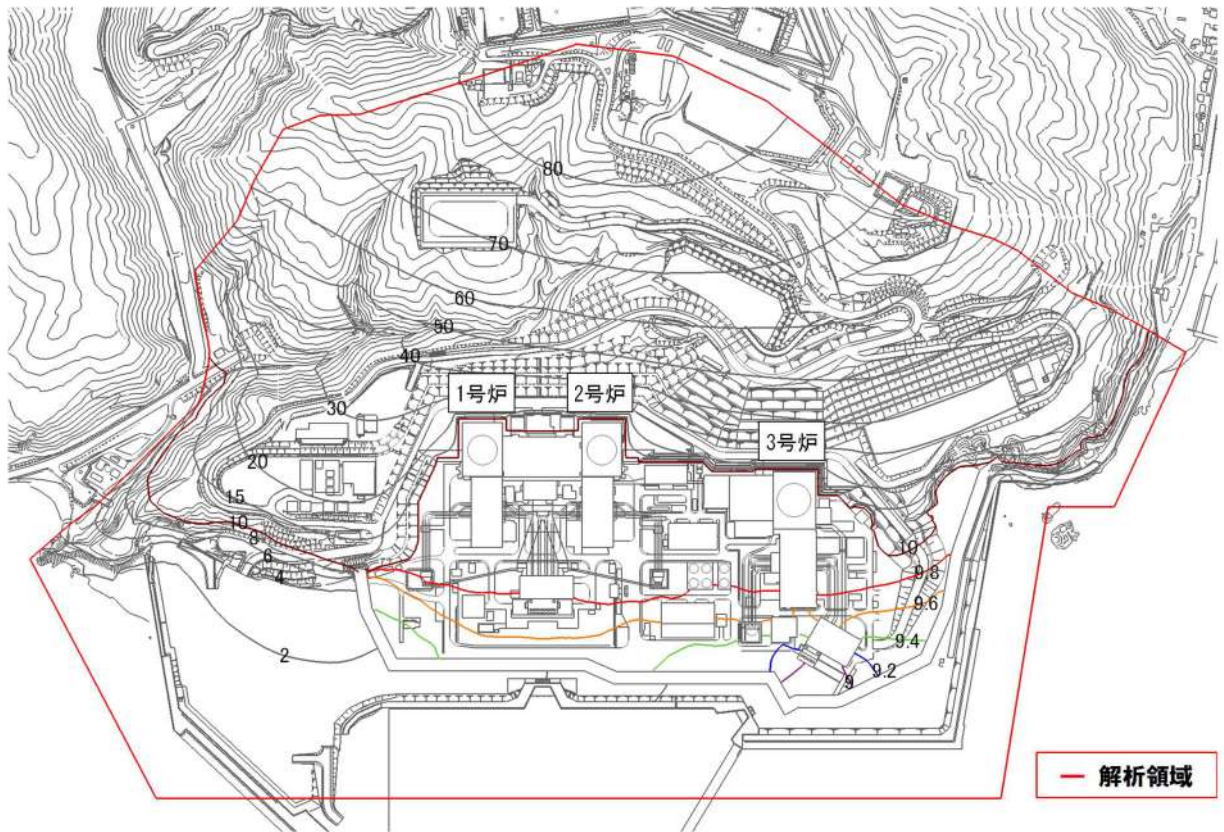
第 3.1-1 図 液状化検討対象候補施設，可搬型重大事故等対処設備
保管場所及びアクセスルート 配置図



第 3.1-2 図(1) 液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定フロー(建物・構築物)



第 3.1-2 図(2) 液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定フロー(屋外重要土木構造物及び津波防護施設等)



※図中の数値が記載されたコンターは地下水位を示す。

第 3.1-3 図 地下水排水設備の機能に期待せずに設定した定常的な地下水位分布算定結果(例)

3.2 液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定の観点

液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定における観点を以下に示す。

(1) 液状化検討対象施設の抽出

a. 屋外の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設(建物・構築物)

液状化検討対象施設は以下の項目で抽出する(第3.1-2 図(1)の判定①, ②)。

- ・施設が岩盤上に設置されており, かつ, 施設周辺の地下水位が十分に低いか
- ・施設が岩盤上に設置されており, 施設の周辺地盤が岩盤等であるか

(観点): 当該施設的设计条件保持のため地下水排水設備が設置されている。

周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。

施設が広範囲に分布する岩盤に接している(MMRを介して岩盤に接している場合も含む)。

b. 屋外の耐震重要施設(屋外重要土木構造物及び津波防護施設等)

液状化検討対象施設は以下の項目で抽出する(第3.1-2 図(2)の判定①, ②)。

- ・施設が岩盤中に設置されているか
- ・施設周辺の地下水位が施設の底版より低いか

(観点): 施設の上方, 下方及び側方が岩盤に囲まれている。

周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。

(2) 液状化検討対象施設の解析手法の選定

a. 屋外の耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設(建物・構築物)

上記(1)a.にて液状化検討対象施設として抽出された施設について, 以下に示す観点より液状化等により施設に悪影響を与えるおそれがあるか判断する(第3.1-2 図(1)の判定③)。

(観点): 施設が液状化による側方流動及び浮上りの影響を受けない。

施設が耐震性を有する隣接構造物等の外側の地盤の影響を受けない。

既設の地震観測記録の分析や解析検討等の傾向から, 解析モデルの妥当性が確認されているか。

液状化等により施設に影響を与える可能性がある場合は, 地盤の液状化等の影響を考慮した解析を行う。

また, 対象施設が耐震重要施設の間接支持構造物である場合は, 床応答の観点も考慮して解析手法を選定するものとする。

b. 屋外の耐震重要施設(屋外重要土木構造物及び津波防護施設等)

上記(1)b.にて液状化検討対象施設として抽出された施設について、以下の1)～3)に示す観点により、解析手法を選定する。

1) 地表面や岩盤表面が傾斜している(第3.1-2図(2)の判定③)。

施設周辺で液状化が発生した場合、地表面や岩盤表面の傾斜により側方流動が発生し、一方向に変位・荷重が作用することから、有効応力解析を選定する。

2) 地下水位以深の液状化検討対象層が施設と接する(第3.1-2図(2)の判定④)。

施設に接する地盤で液状化が発生すること、及び液状化により浮上りの影響を受け可能性があることから、有効応力解析を選定する。

3) 施設が耐震性を有する隣接構造物等に囲まれており、その外側の地下水位以深の液状化検討対象層が広範囲に分布する(第3.1-2図(2)の判定⑤)。

施設に接する液状化検討対象層はないが、施設側方の耐震性を有する隣接構造物等の外側の地盤の液状化による影響を判断できないことから、有効応力解析を選定する。

上記の1)～3)においては、有効応力解析に加え、液状化が発生しない場合の影響を確認するために全応力解析での耐震評価も実施するものとする。

上記の1)～3)のいずれにも該当しない場合は、施設周辺の液状化検討対象層が局所的に分布する状況であり、施設に液状化の影響が及ばないことから全応力解析を選定するが、全応力解析に加え、有効応力解析により施設に液状化の影響(浮上り等)が及ばないことも確認する。

また、対象施設が耐震重要施設の間接支持構造物である場合は、床応答の観点も考慮して解析手法を選定するものとする。

以上を踏まえ、設工認段階で設定する設計地下水位に対する液状化検討対象施設の抽出及び解析手法選定の考え方を確認する目的で、液状化検討対象施設を抽出した結果(例)を第3.2-1表に、抽出した液状化検討対象施設(例)の解析手法について検討した結果(例)を第3.2-2表に、各施設の設置状況を第3.2-1図～第3.2-20図に示す。

建物・構築物では、原子炉建屋、原子炉補助建屋、ディーゼル発電機建屋、A1、A2-燃料油貯油槽タンク室、緊急時対策所、空調上屋及び燃料タンク(SA)室では、施設が岩盤上に設置され、地下水排水設備又は自然水位により施設周辺の地下水位が施設底版より低くなることから、液状化検討対象外の施設として、地盤の液状化を考慮しない解析を選定する。B1、B2-燃料油貯油槽タンク室は、地下水位が施設底版より高いものの、岩盤上に設置され、かつ、施設側方はMMRに接しその外側には岩盤が広く分布することから、

液状化検討対象外の施設として、地盤の液状化を考慮しない解析を選定する。

屋外重要土木構造物及び津波防護施設等では、すべての施設が岩盤中に設置される施設ではなく、地下水位が施設底版より高いことから、液状化検討対象施設とし、解析手法は、防潮堤及び屋外排水路逆流防止設備では岩盤表面が傾斜していることから有効応力解析を選定し、取水ピットスクリーン室及び貯留堰では施設が液状化検討対象層に接していないものの、MMR や取水口の外側の液状化検討対象層が広範囲に分布することから有効応力解析を選定する。防潮堤、取水ピットスクリーン室及び貯留堰以外の施設については、施設に液状化検討対象層が接することから有効応力解析を選定する。

設工認段階においては、すべての屋外の耐震重要施設(建物・構築物、屋外重要土木構造物及び津波防護施設等)を対象に、確定した設計地下水位を踏まえ、改めて網羅的に液状化検討対象施設を抽出し、その上で解析手法を選定する。

なお、第 3.1-2 図のフローにより抽出した液状化検討対象施設のうち、地下水位が施設底版より高く、施設と地下水が接する場合は、間隙水圧の上昇により浮き上がりのおそれが有ることから、浮き上がりに対する安全性を確認する。

また、波及的影響評価において抽出される屋外下位クラス施設に対する検討方針は本資料に基づき整理を行う。

※液状化と繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む)の区分については「5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定」にて後述する。

第 3.2-1 表(1) 液状化検討対象施設の選定結果の例

(第 3.1-2 図(1)の①, ②)

施設分類	施設名称	項目			液状化検討 対象施設 ○：対象 ×：対象外	
		①施設が岩盤上に設置されており、施設周辺の地下水位が十分に低い	②施設が岩盤上に設置されており、施設の周辺地盤が岩盤等である			
設計基準 対象施設	建物・ 構築物	原子炉建屋	Yes	—	—	×
		原子炉補助建屋	Yes	—	—	×
		ディーゼル発電機建屋	Yes	—	—	×
		A1, A2-燃料油貯油槽タンク室	Yes	—	—	×
		B1, B2-燃料油貯油槽タンク室	No	Yes	施設が MMR を介して、広範囲に分布する岩盤に接している	×
重大事 故等対 処施設		緊急時対策所	Yes	—	—	×
		空調上屋	Yes	—	—	×
		燃料タンク(SA)室	Yes	—	—	×

第 3.2-1 表(2) 液状化検討対象施設の選定結果の例
(第 3.1-2 図(2)の①, ②)

施設分類	施設名称	項目			液状化検討 対象施設 ○：対象 ×：対象外	
		①施設が岩 盤中に設置 されている	②施設周辺の地下水位が施設の底版より低い			
設計基準 対象施設	屋外 重要 土木 構造物	取水口	No	No	T.P. 0.55m に設計地下水位を設定する。 ^{※2}	○
		取水路	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○
		取水ピットスクリーン室	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		取水ピットポンプ室	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		原子炉補機冷却海水ポンプ出口 ストレーナ室	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		原子炉補機冷却海水管ダクト	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		B1, B2-ディーゼル発電機燃料油 貯油槽トレンチ	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
	津波 防護 施設 ・ 浸水 防止 設備 ^{※1}	防潮堤	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○
		3号炉取水ピットスクリーン室 防水壁	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		3号炉放水ピット流路縮小工	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		3号炉原子炉補機冷却海水放水 路逆流防止設備	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。	○
		屋外排水路逆流防止設備	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○
		1号及び2号炉取水路流路縮小 工	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○
		1号及び2号炉放水路逆流防止 設備	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○
		貯留堰	No	No	地表面に設計地下水位を設定する。 ^{※3}	○

※1 浸水防止設備については、屋外に設置される施設を対象に検討する。

※2 取水口の設計地下水位は、日本港湾協会(2007)の残留水位の設定方法に基づき T.P. 0.55m に設定する。

※3 防潮堤よりも海側の設計地下水位は、朔望平均満潮位 T.P. 0.26m に設定し、防潮堤よりも山側の設計地下水位は、地表面に設定する。

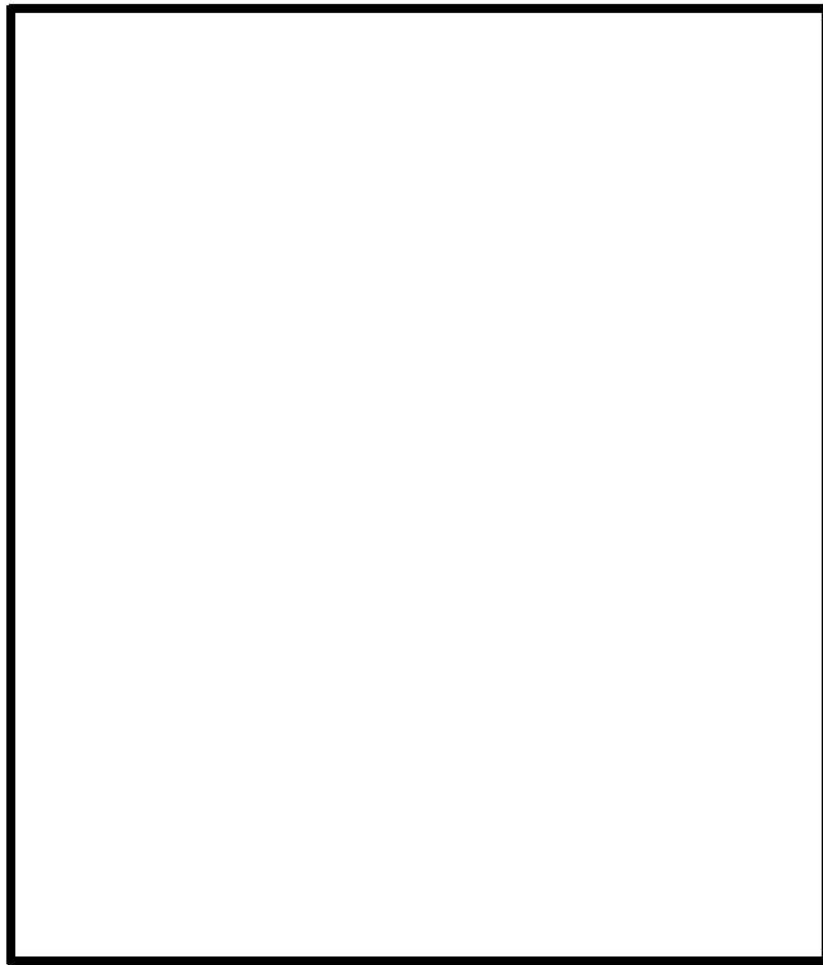
第 3. 2-2 表 液状化検討対象施設の解析手法選定結果の例

(屋外重要土木構造物及び津波防護施設等)

(第 3. 1-2 図(2)の③, ④, ⑤)

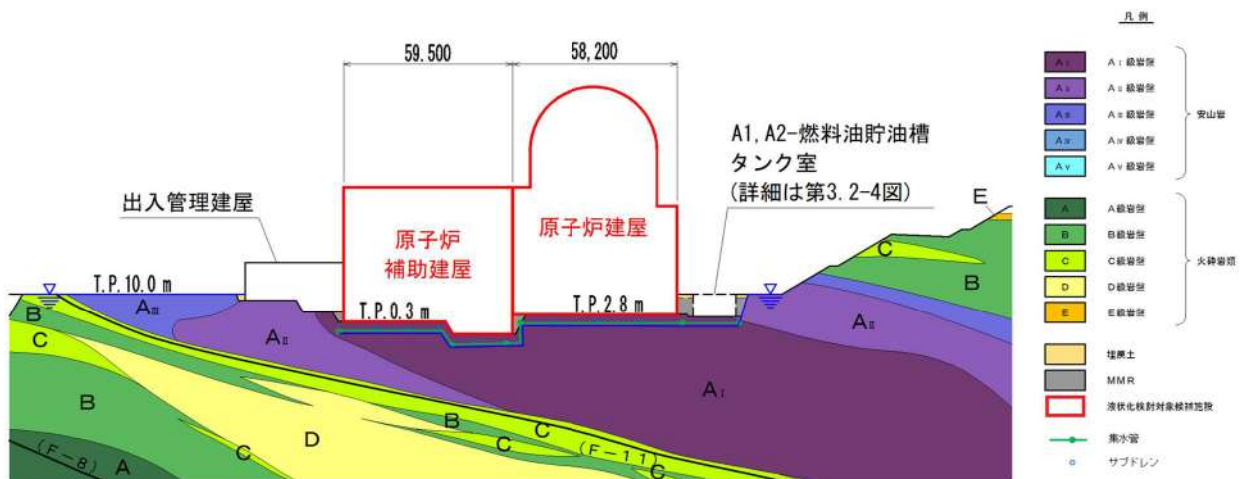
施設分類	施設名称	項目			解析手法の選定結果	
		③地表面や岩盤表面が傾斜している	④地下水位以深の液状化検討対象層が施設と接する※1	⑤施設が耐震性を有する隣接構造物等に囲まれており、その外側の地下水位以深の液状化検討対象層が広範囲に分布する		
設計基準対象施設	屋外重要土木構造物	取水口	No	Yes	—	有効応力解析
		取水路	No	Yes	—	有効応力解析
		取水ピットスクリーン室	No	No	Yes	有効応力解析
		取水ピットポンプ室	No	No	Yes	有効応力解析
		原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレーナ室	No	No	Yes	有効応力解析
		原子炉補機冷却海水管ダクト	No	Yes	—	有効応力解析
		B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ	No	Yes	—	有効応力解析
	津波防護施設・浸水防止設備	防潮堤	Yes	—	—	有効応力解析
		3号炉取水ピットスクリーン室防水壁	No	Yes	—	有効応力解析
		3号炉放水ピット流路縮小工	No	Yes	—	有効応力解析
		3号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備	No	Yes	—	有効応力解析
		屋外排水路逆流防止設備	Yes	—	—	有効応力解析
		1号及び2号炉取水路流路縮小工	No	Yes	—	有効応力解析
		1号及び2号炉放水路逆流防止設備	No	Yes	—	有効応力解析
	貯留堰	No	No	Yes	有効応力解析	

※1 液状化検討対象層が施設に接していても、施設と岩盤又は耐震性を有する隣接構造物等との間の液状化検討対象層の分布が局所的である場合は、④でNoと判定する。

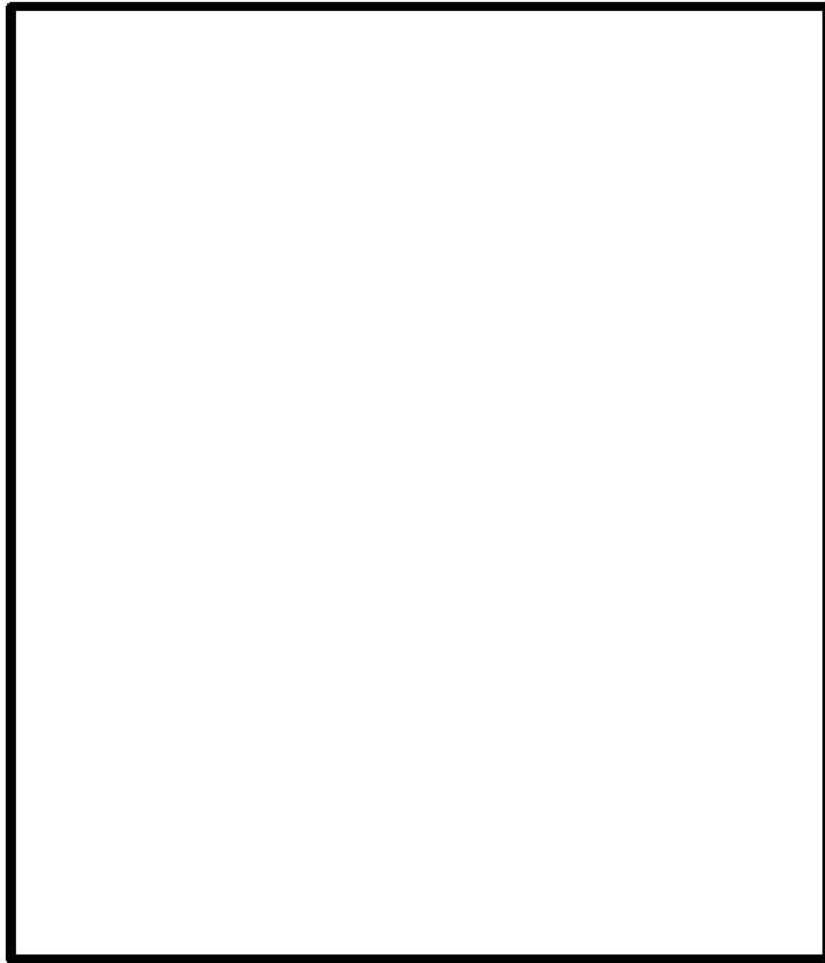


□:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

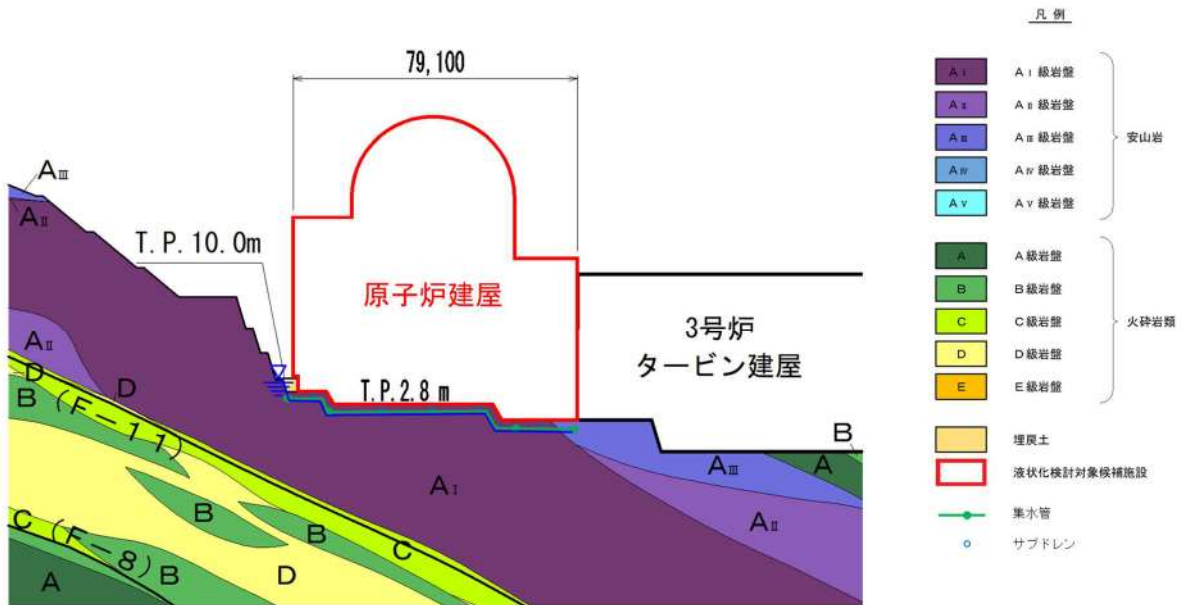


第 3.2-1 図 原子炉建屋，原子炉補助建屋，A1, A2-燃料油貯油槽タンク室断面図(①-①')

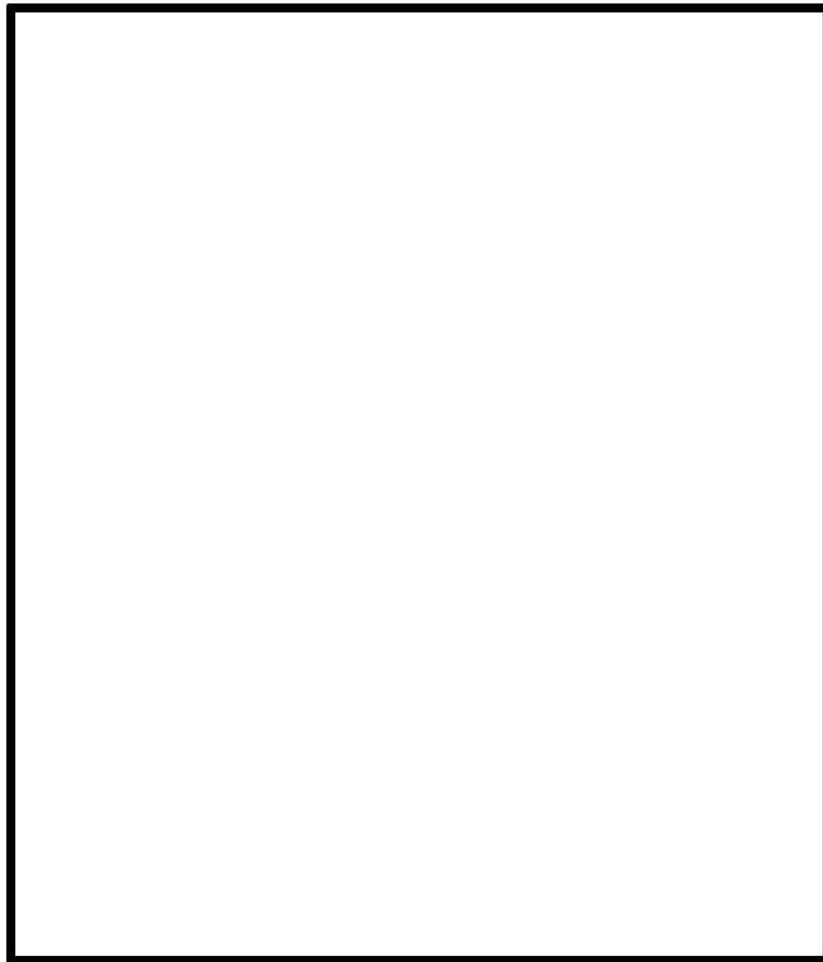


□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

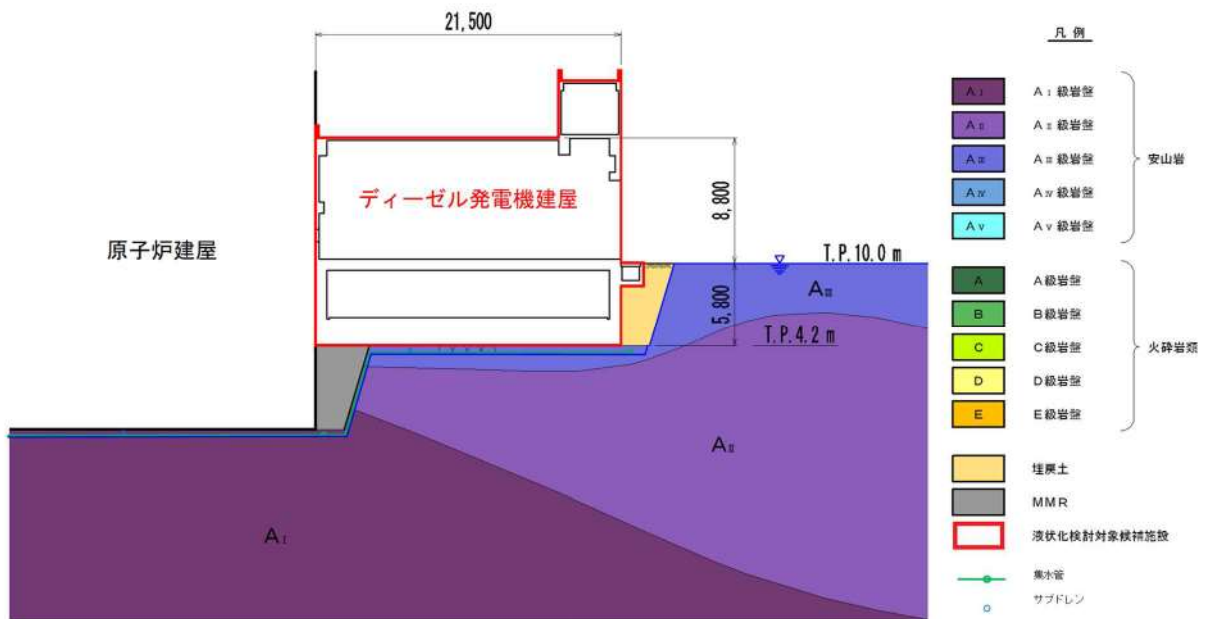


第 3.2-2 図 原子炉建屋断面図(②-②')

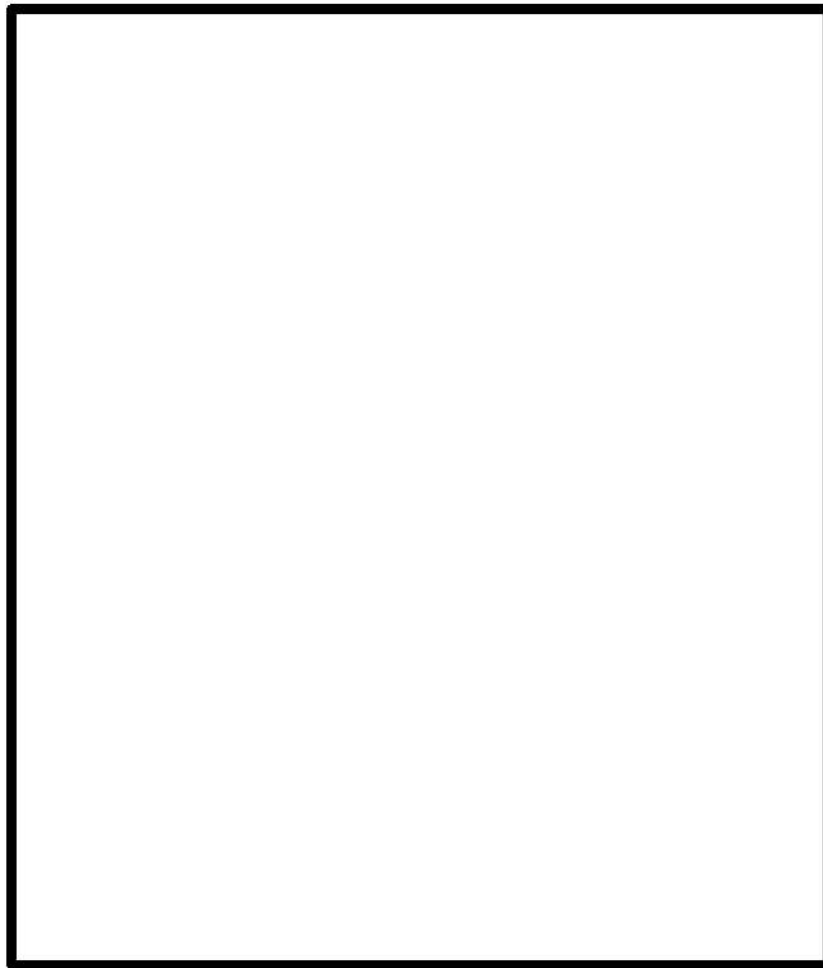


□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

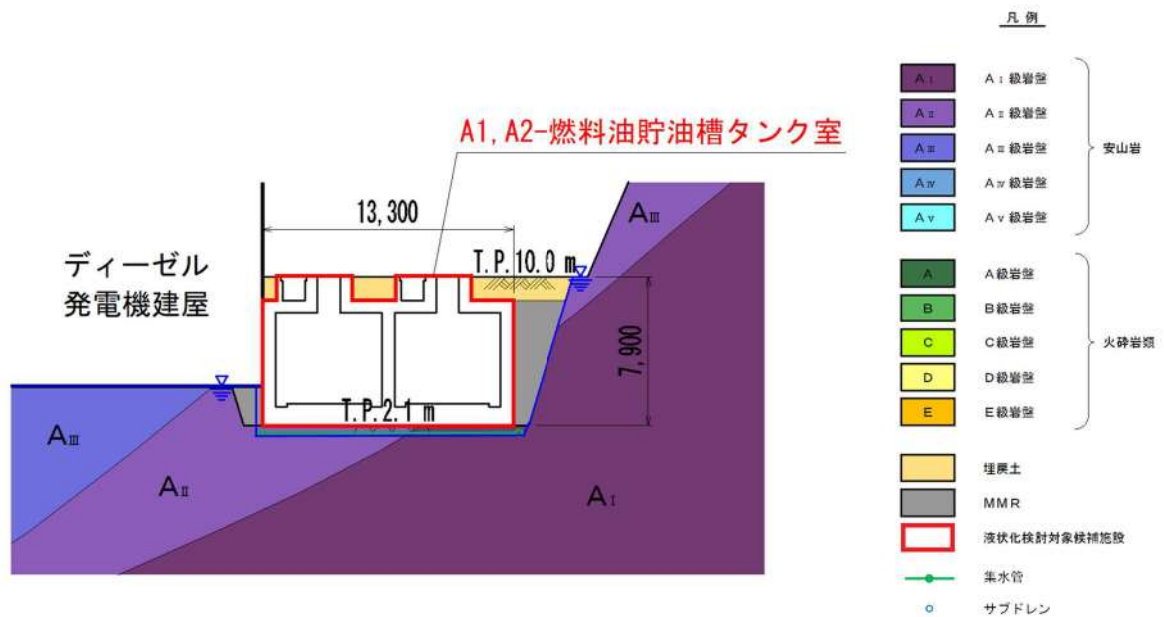


第 3.2-3 図 ディーゼル発電機建屋断面図

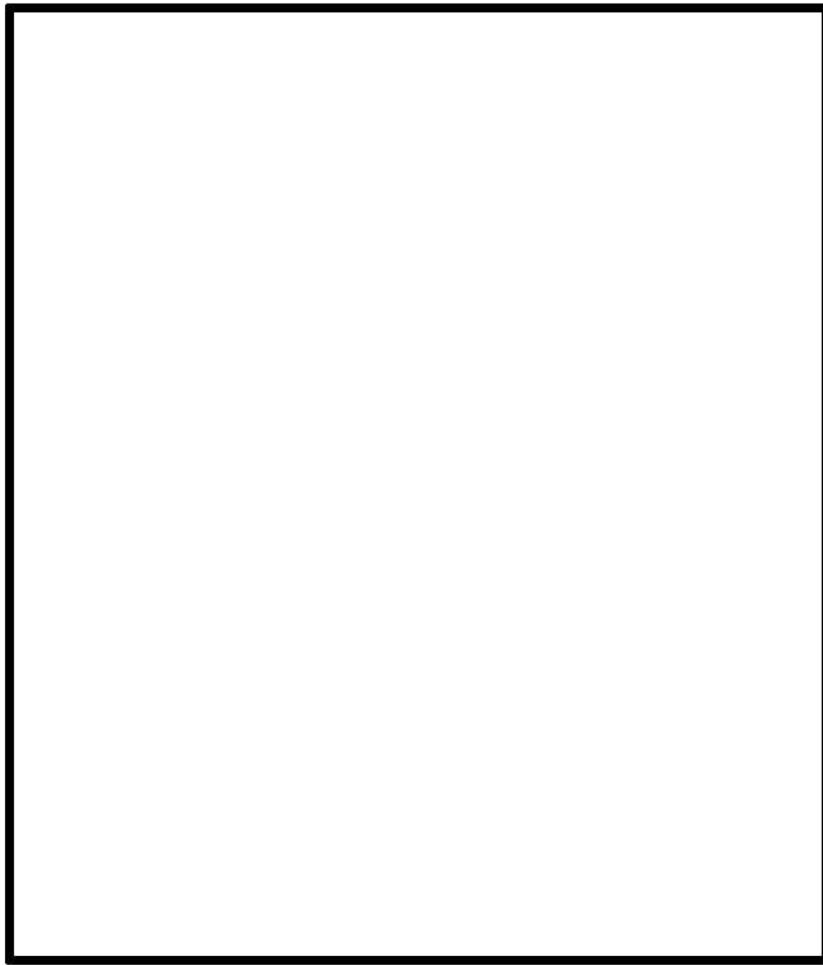


□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

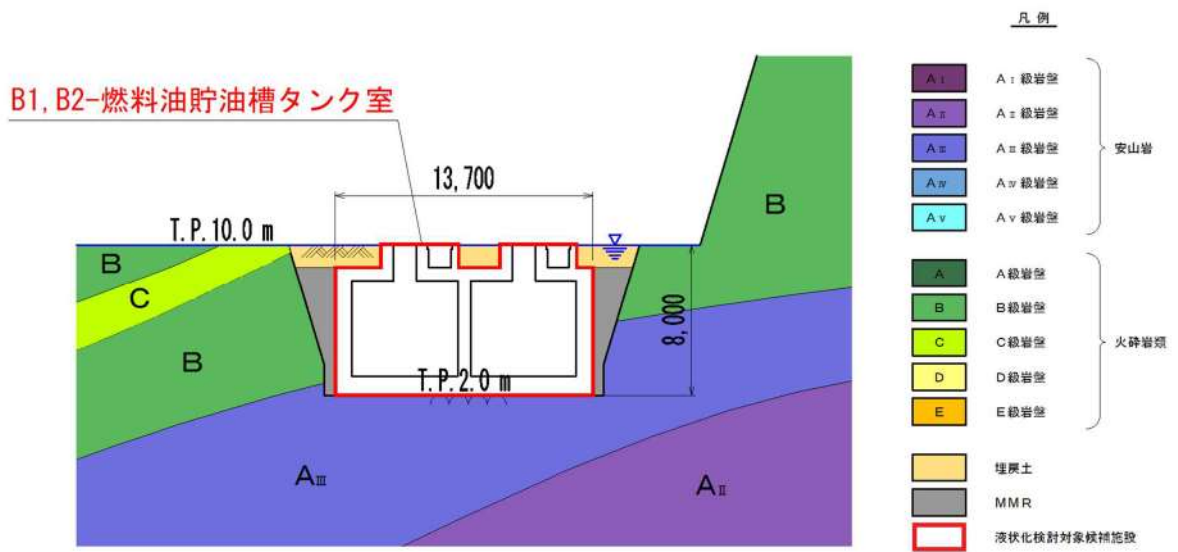


第 3.2-4 図 A1, A2-燃料油貯油槽タンク室断面図

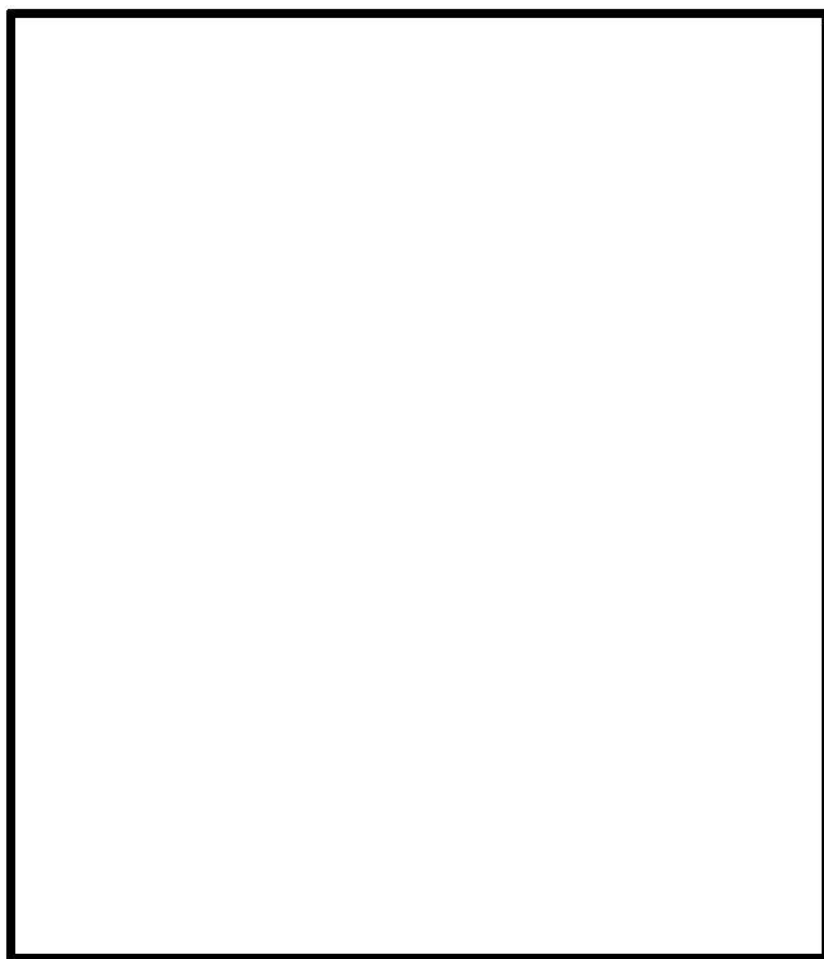


□: 枠図みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

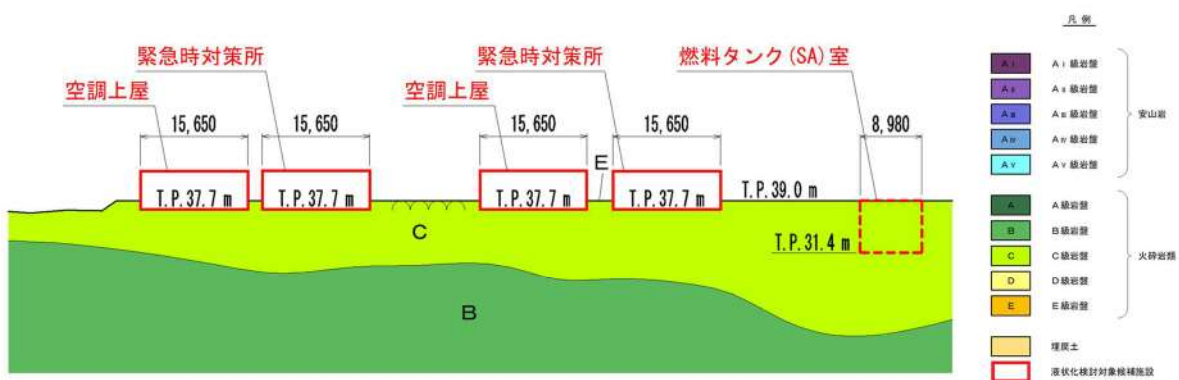


第 3.2-5 図 B1, B2-燃料油貯油槽タンク室断面図



□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

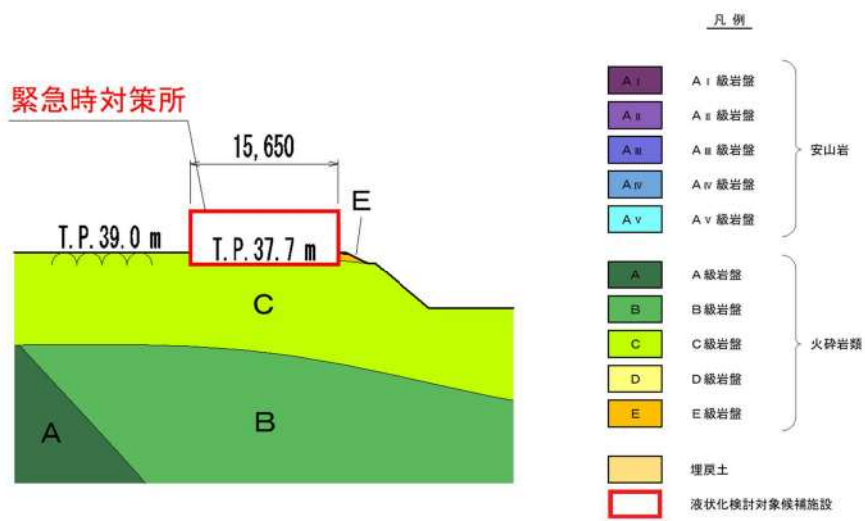


第 3.2-6 図 (1/2) 緊急時対策所, 空調上屋断面図 (③-③')

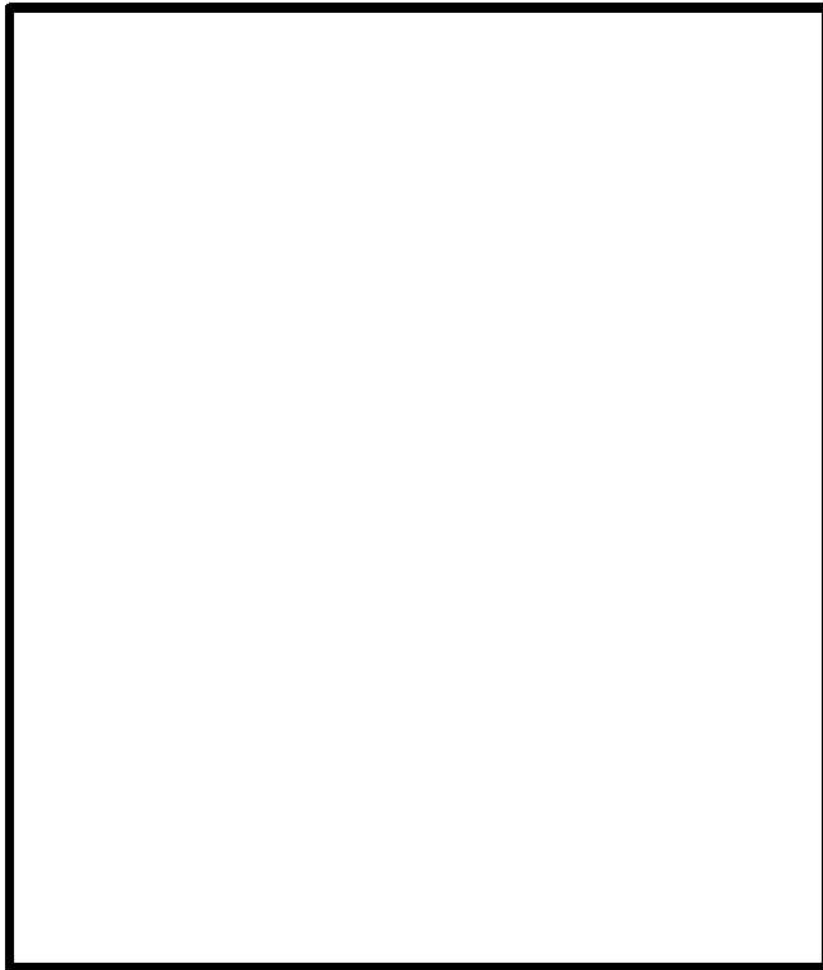


□:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

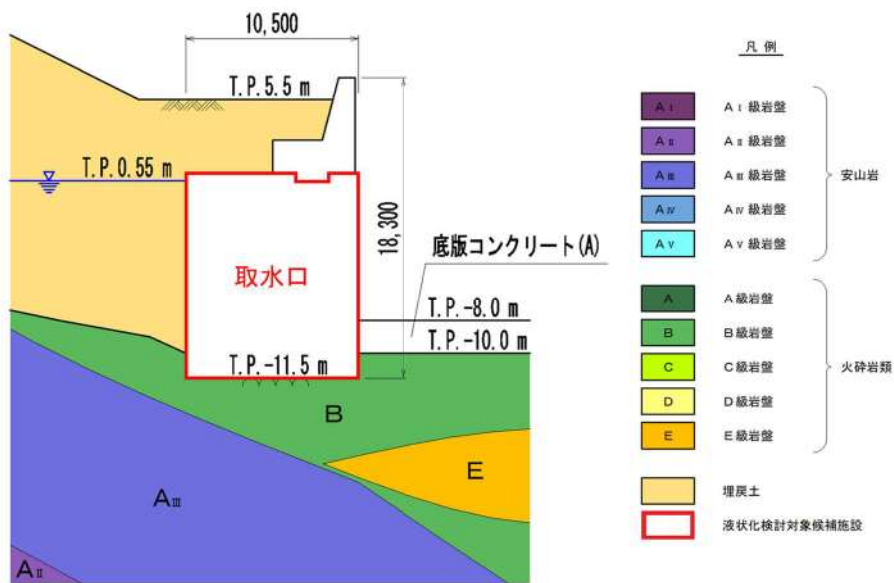


第 3.2-6 図 (2/2) 緊急時対策所断面図 (④-④')

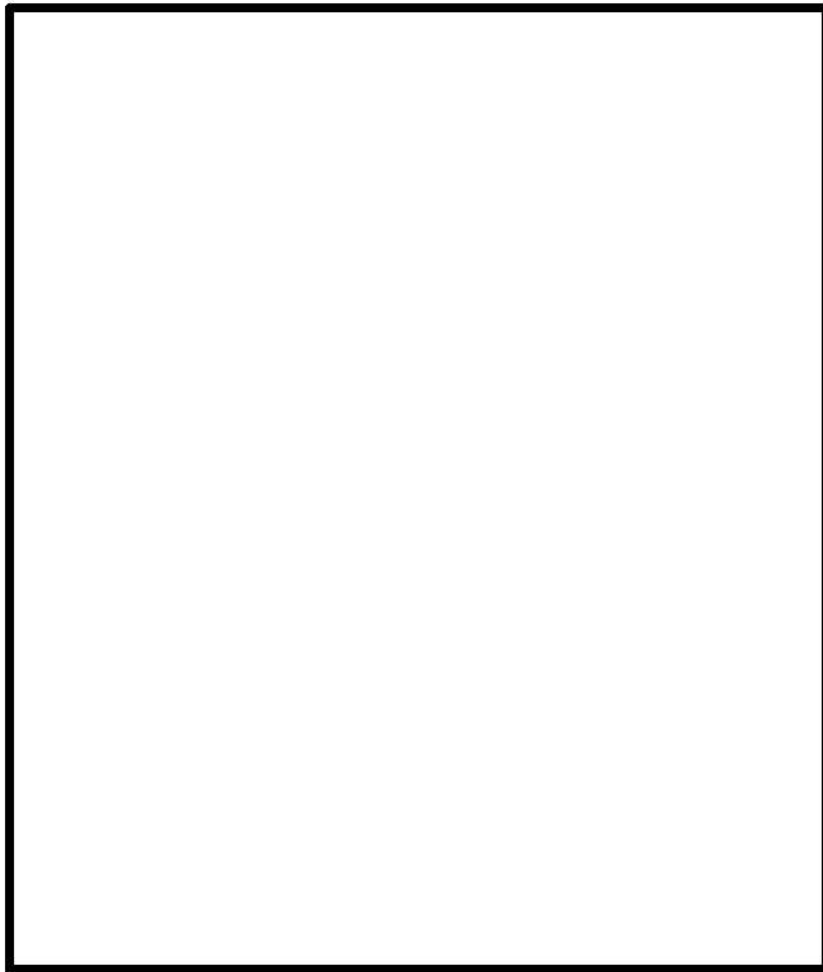


□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

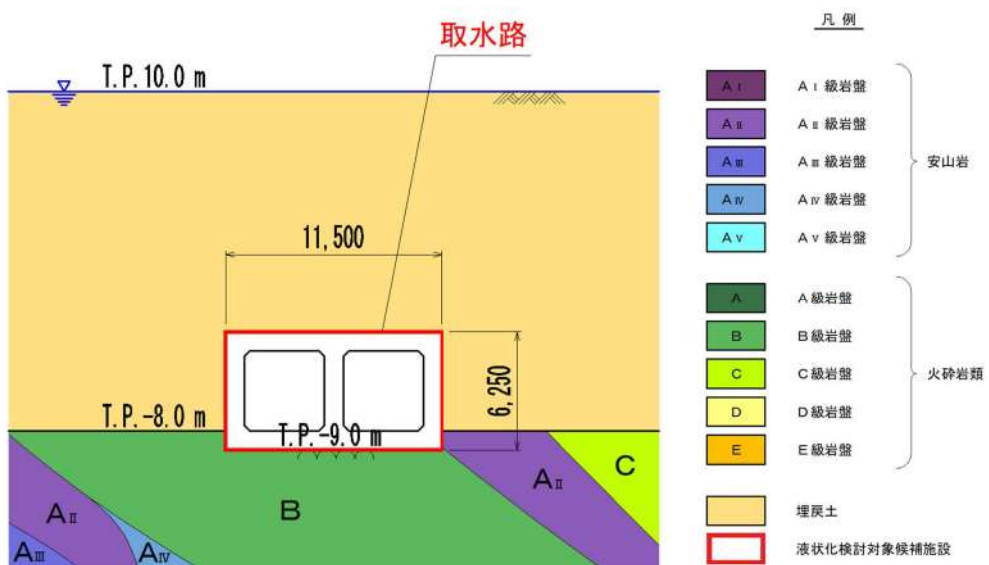


第 3.2-7 図 取水口断面図

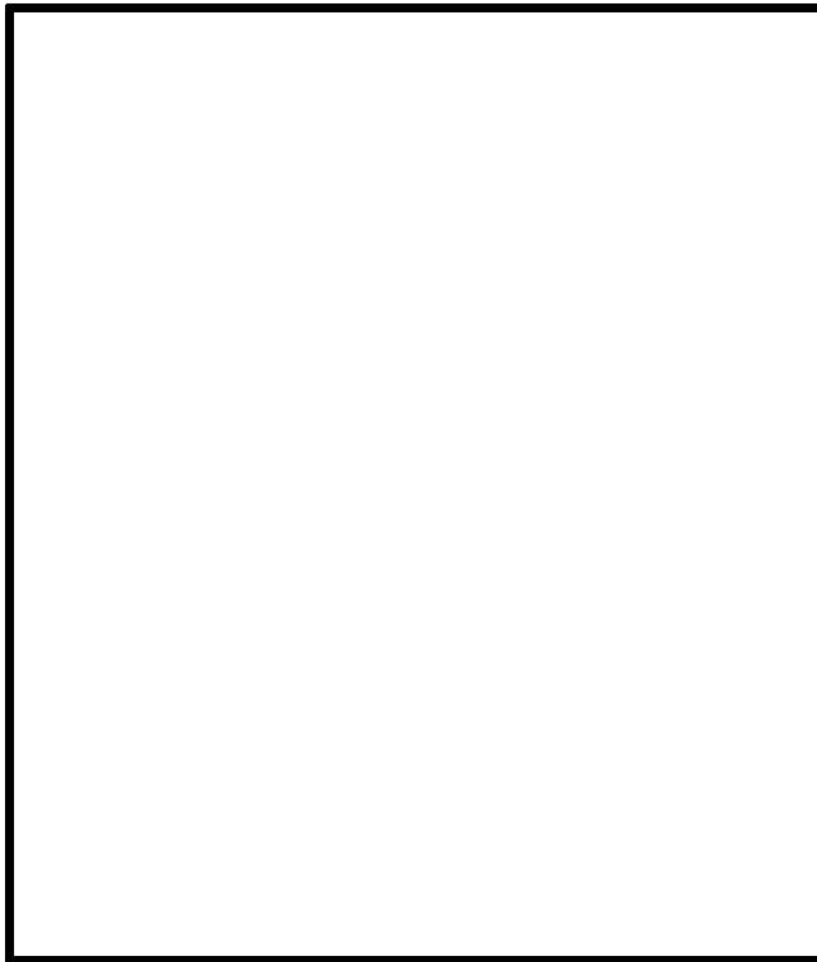


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

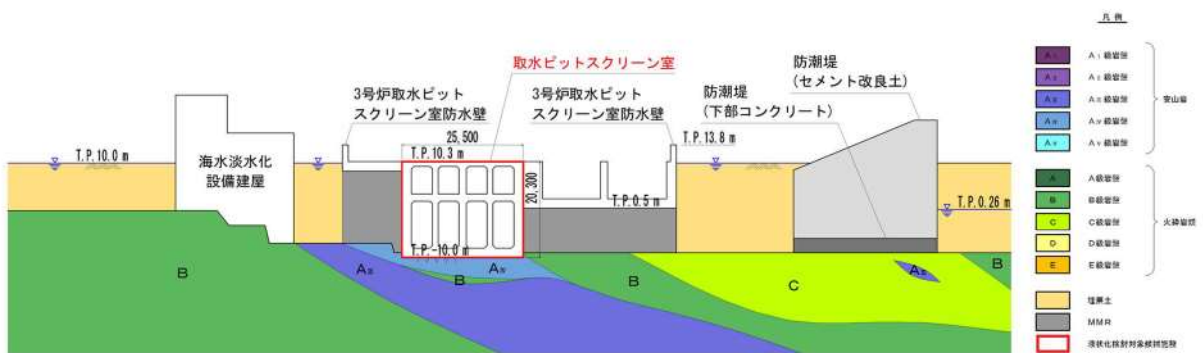


第 3.2-8 図 取水路断面図

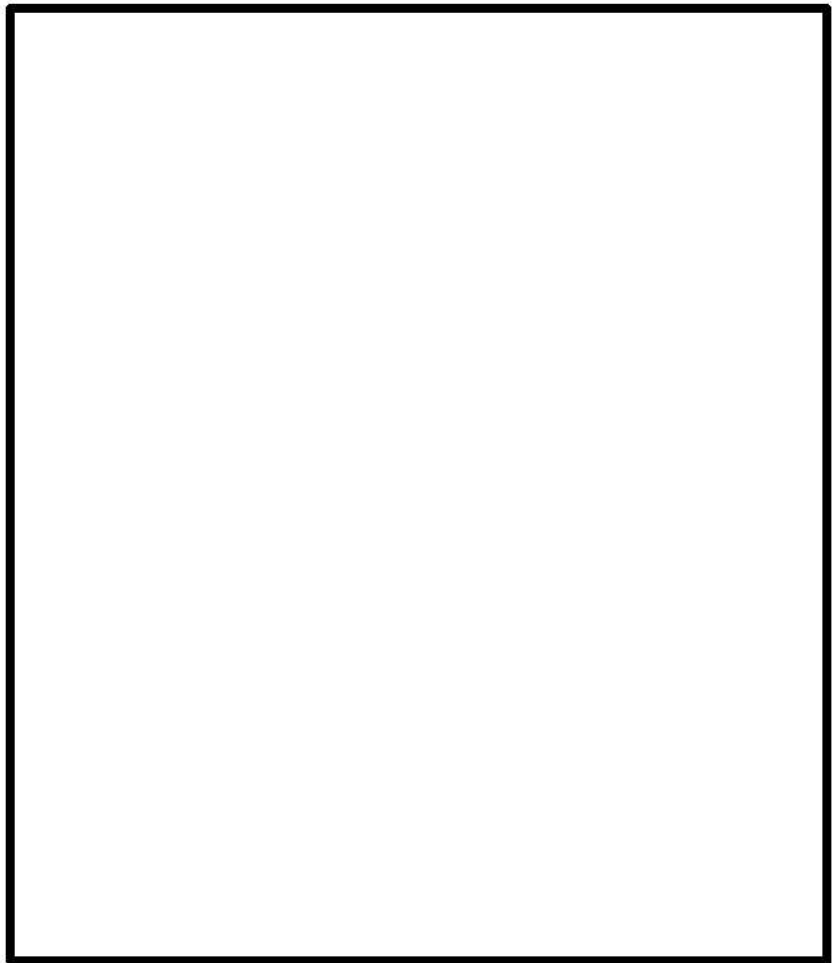


□:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

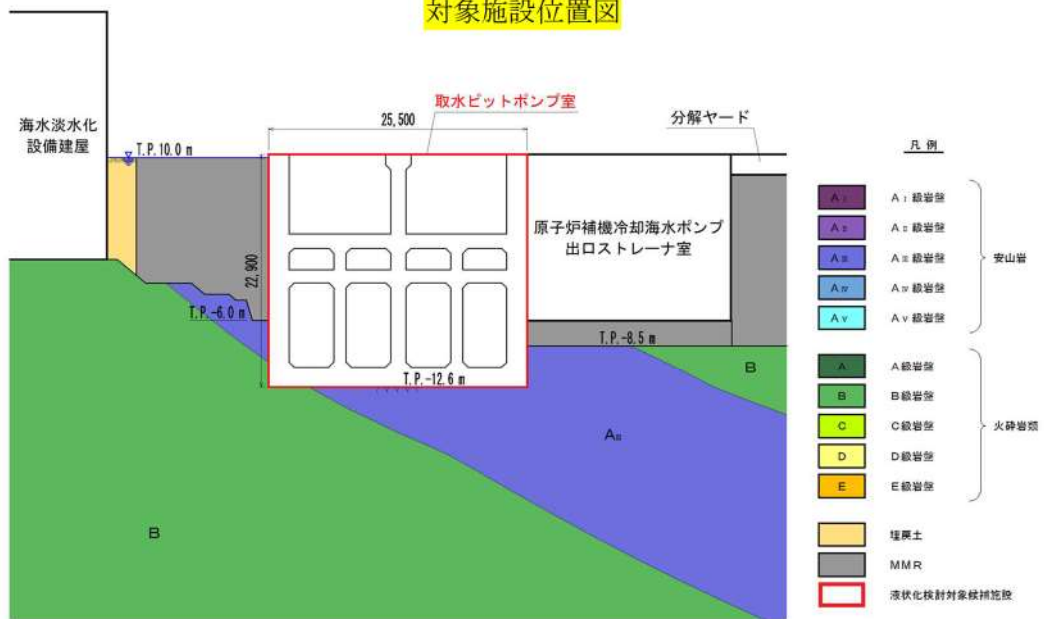


第 3.2-9 図 取水ピットスクリーン室断面図



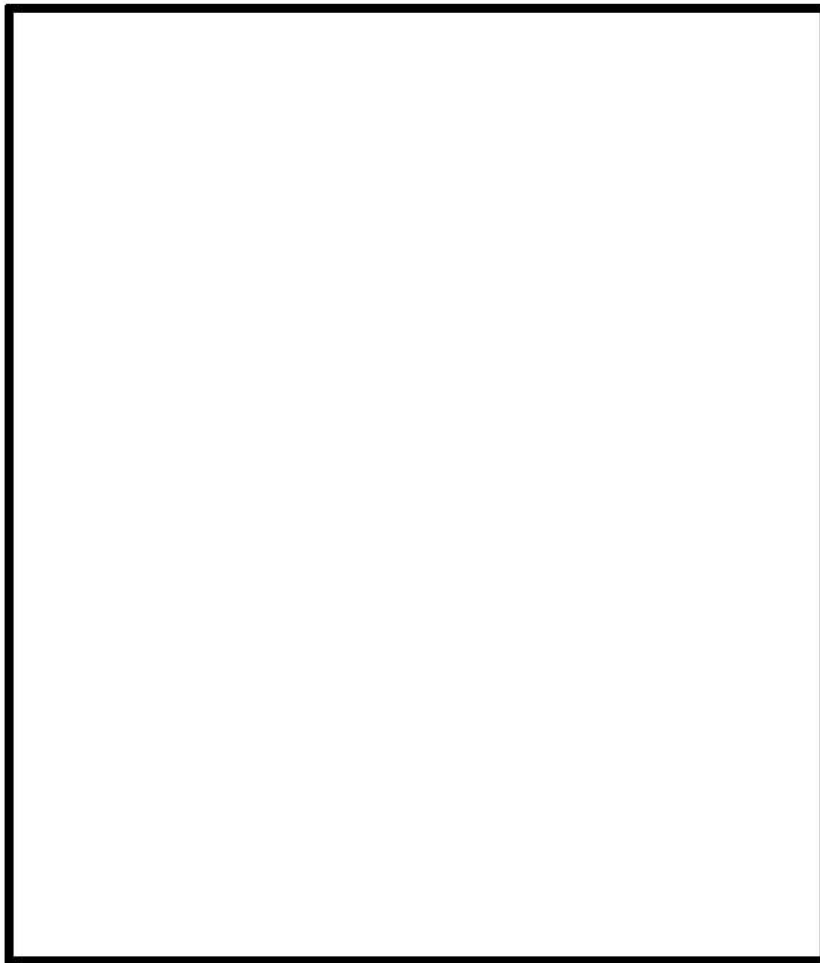
□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



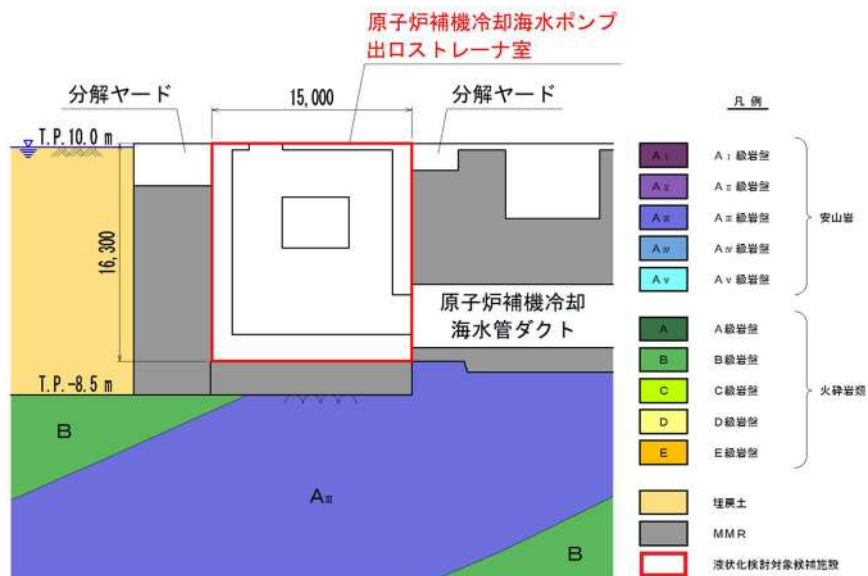
※分解ヤード下を含む取水ピットポンプ室周辺の地盤については、MMR 置換による耐震補強を検討中。

第 3.2-10 図 取水ピットポンプ室断面図



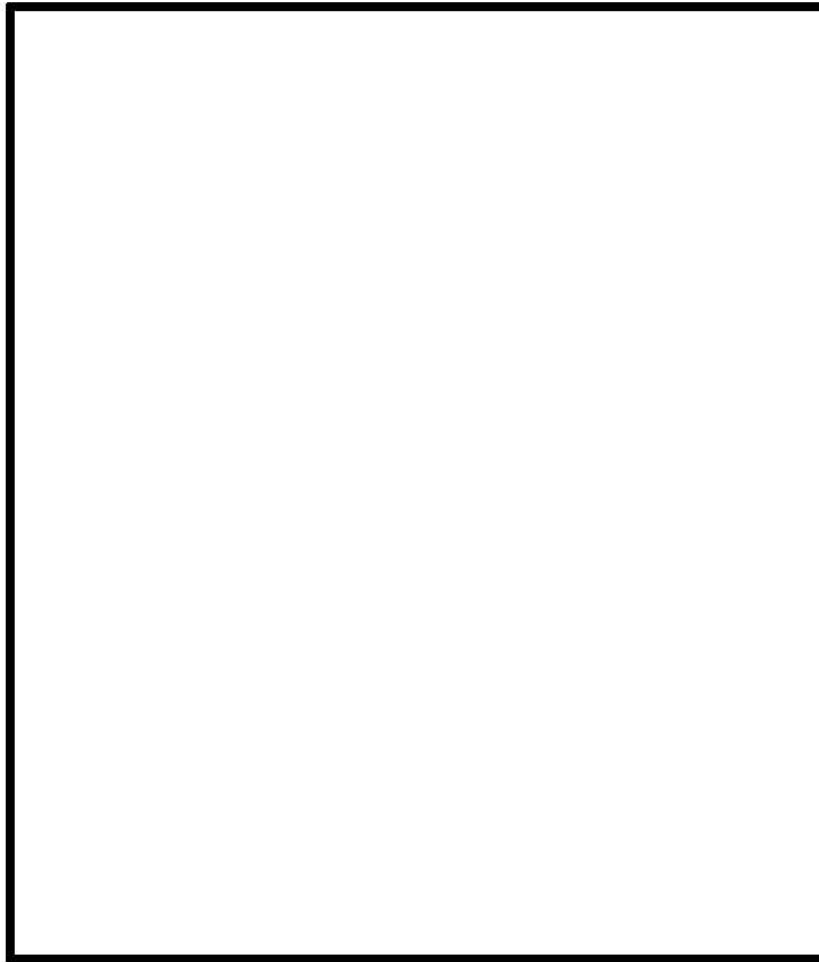
□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



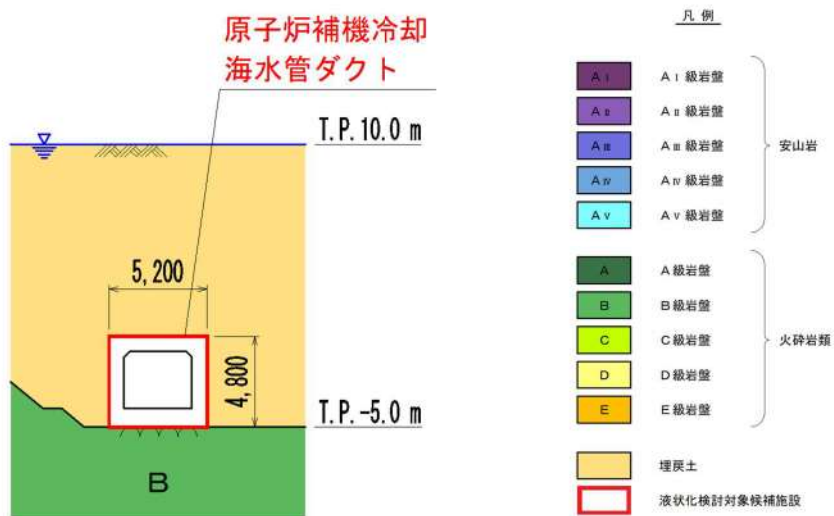
※分解ヤード下を含む取水ピットポンプ室周辺の地盤については、MMR 置換による耐震補強を検討中。

第 3.2-11 図 原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレナ室断面図

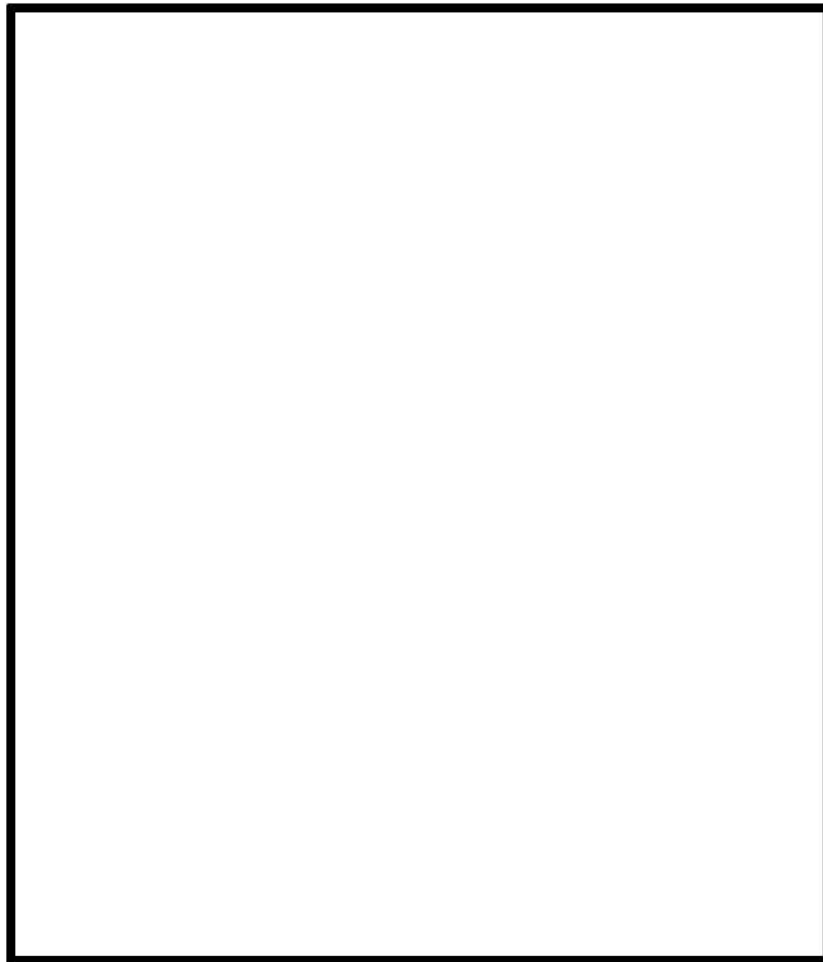


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

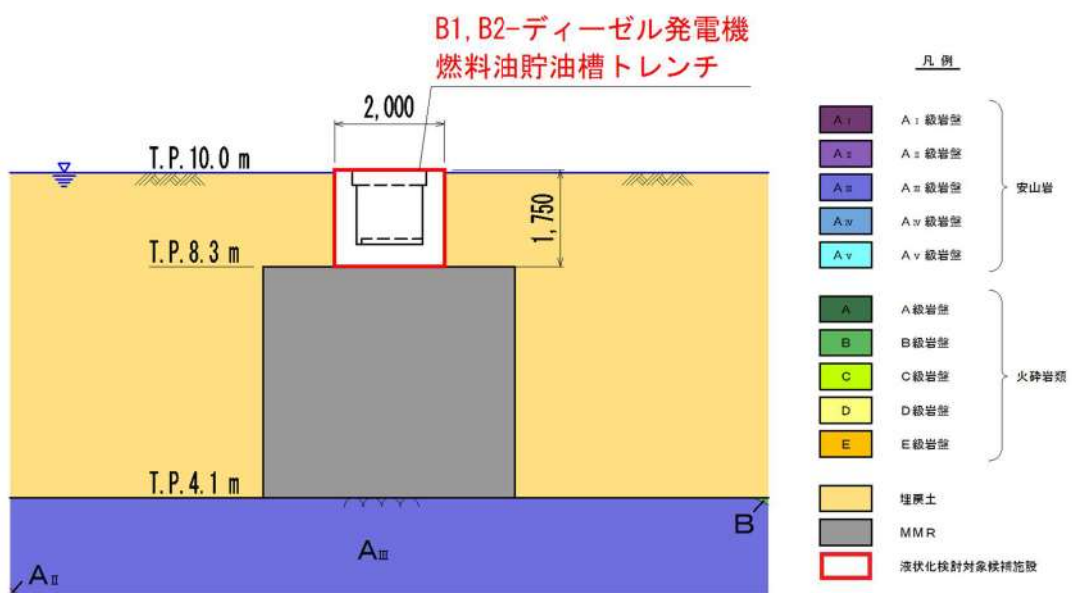


第 3.2-12 図 原子炉補機冷却海水管ダクト断面図

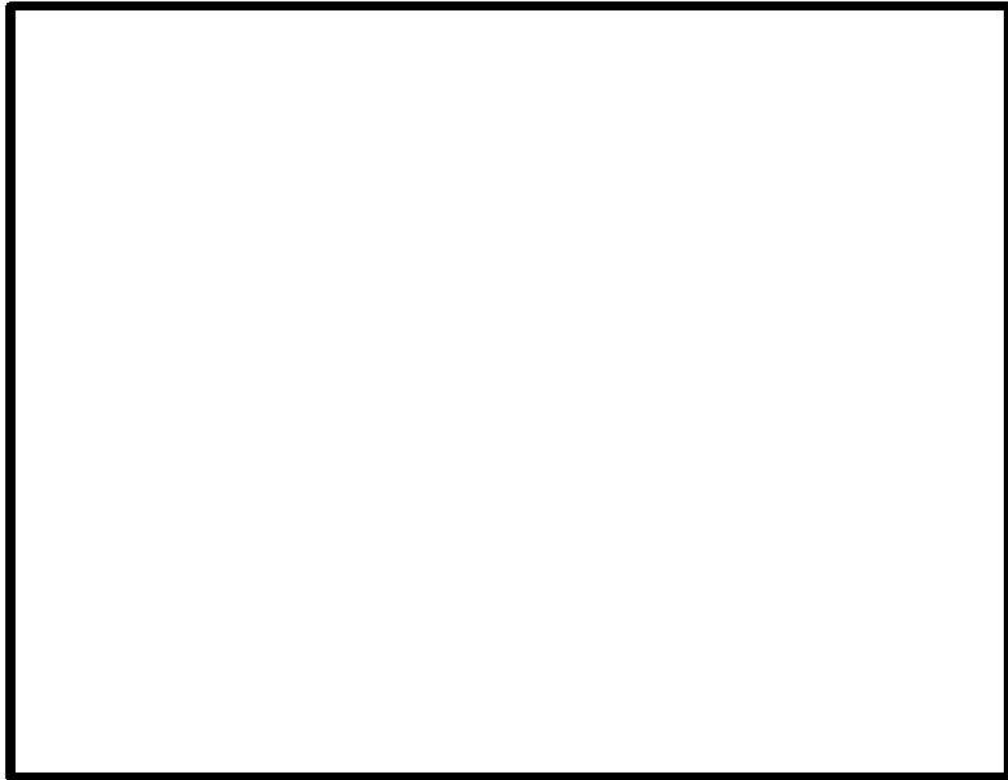


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

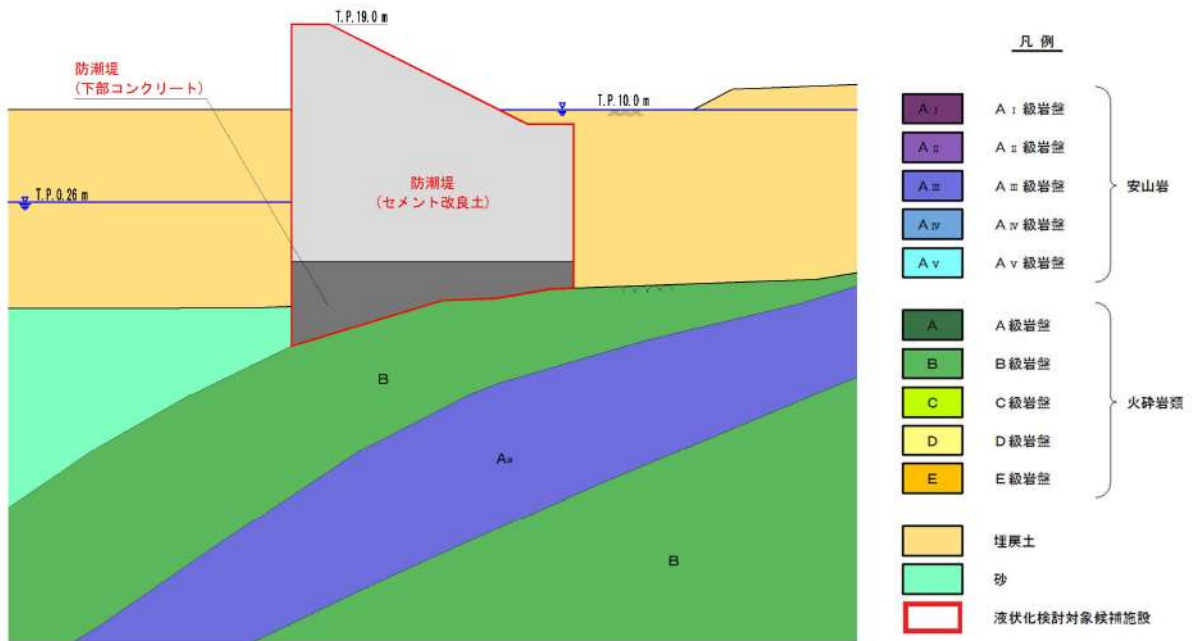


第 3.2-13 図 B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽トレンチ断面図



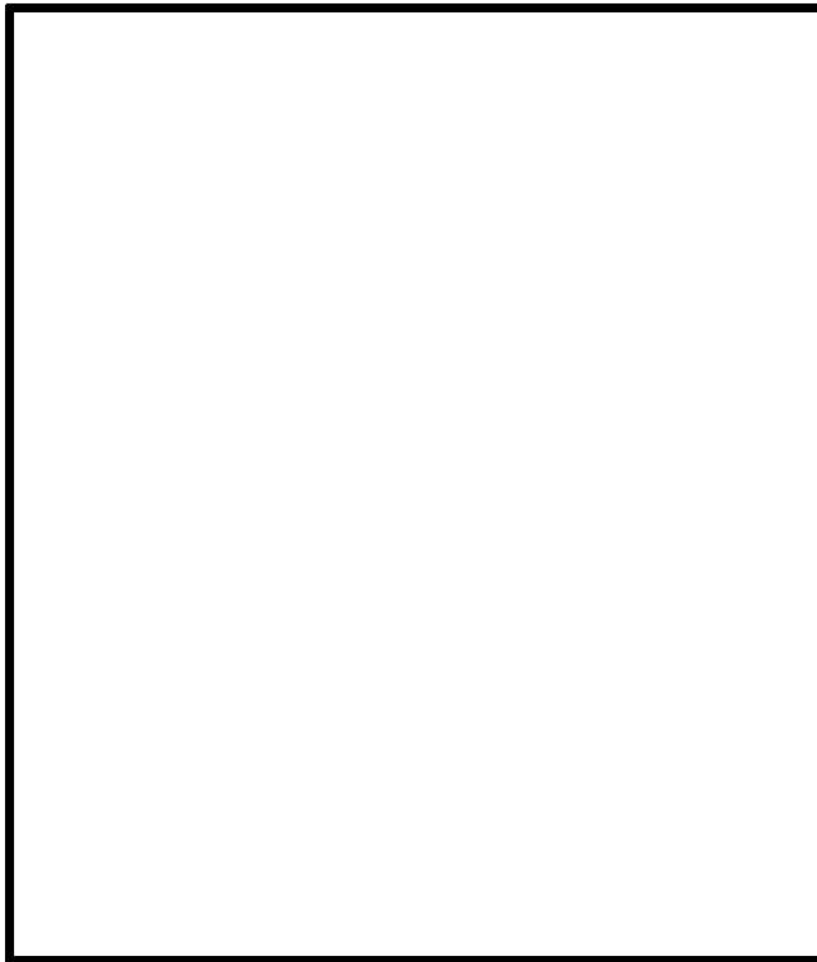
□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



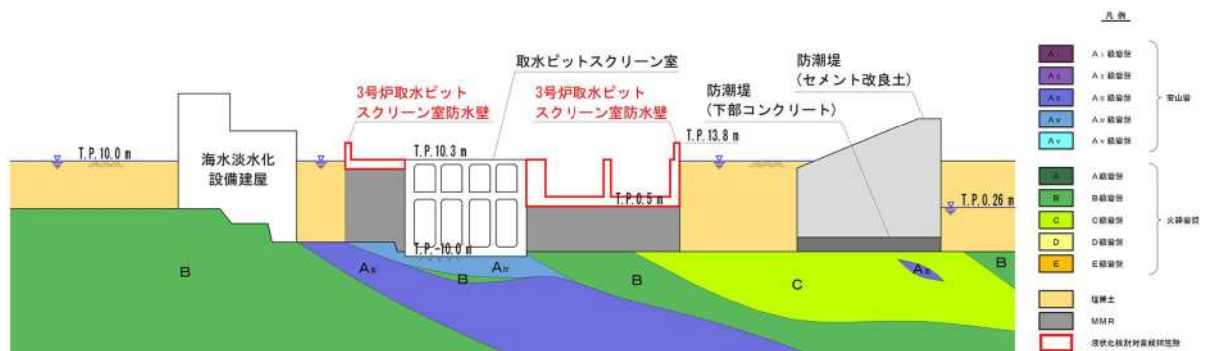
※下部コンクリートは、防潮堤の高さ・止水性維持を目的として設置する無筋コンクリートであり、施設として扱う。

第 3. 2-14 図 防潮堤断面図

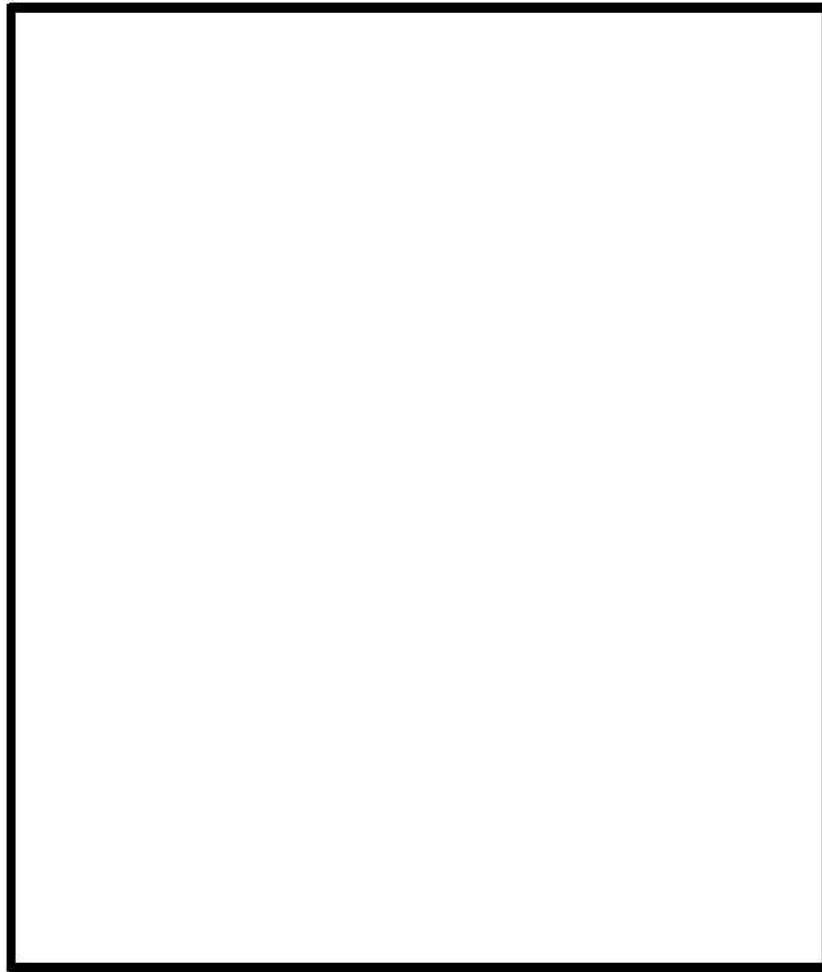


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

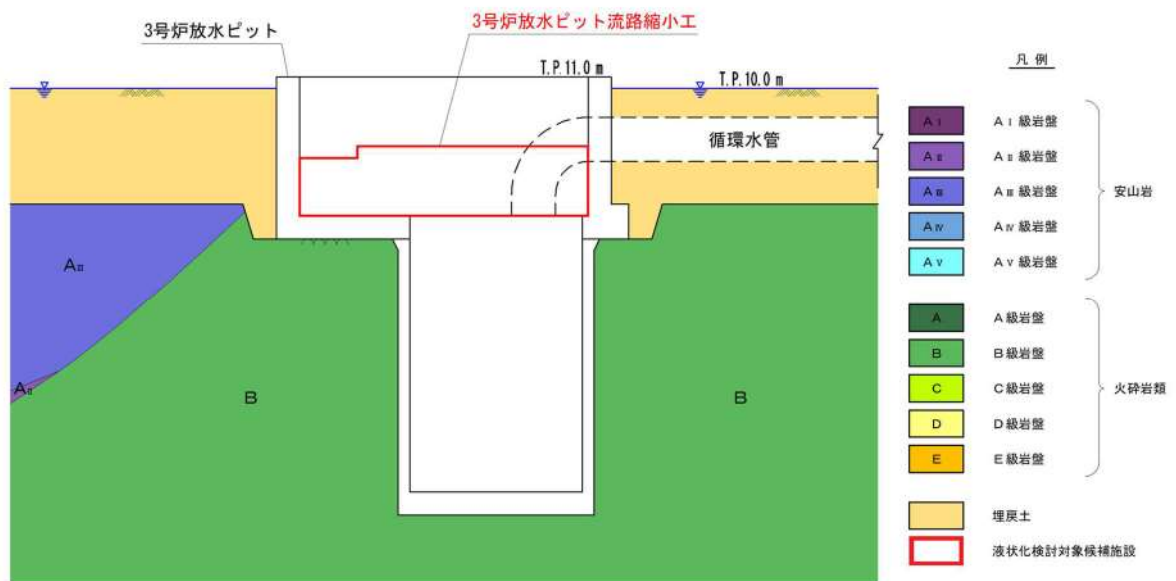


第 3.2-15 図 3 号炉取水ピットスクリーン室防水壁断面図

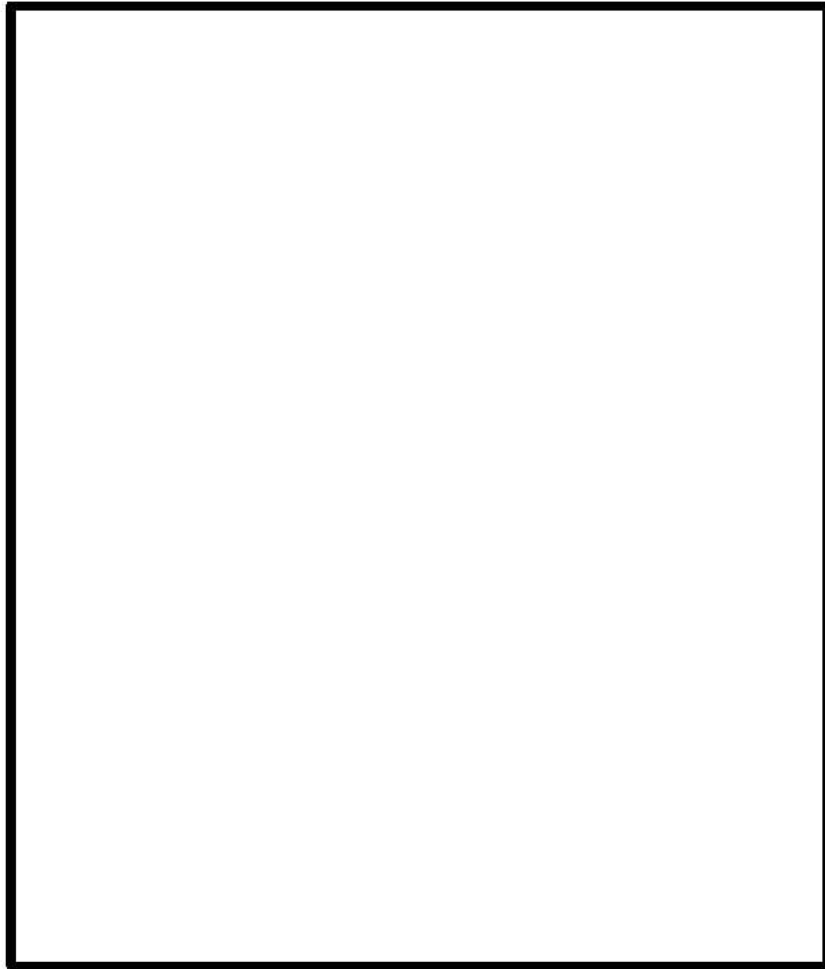


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

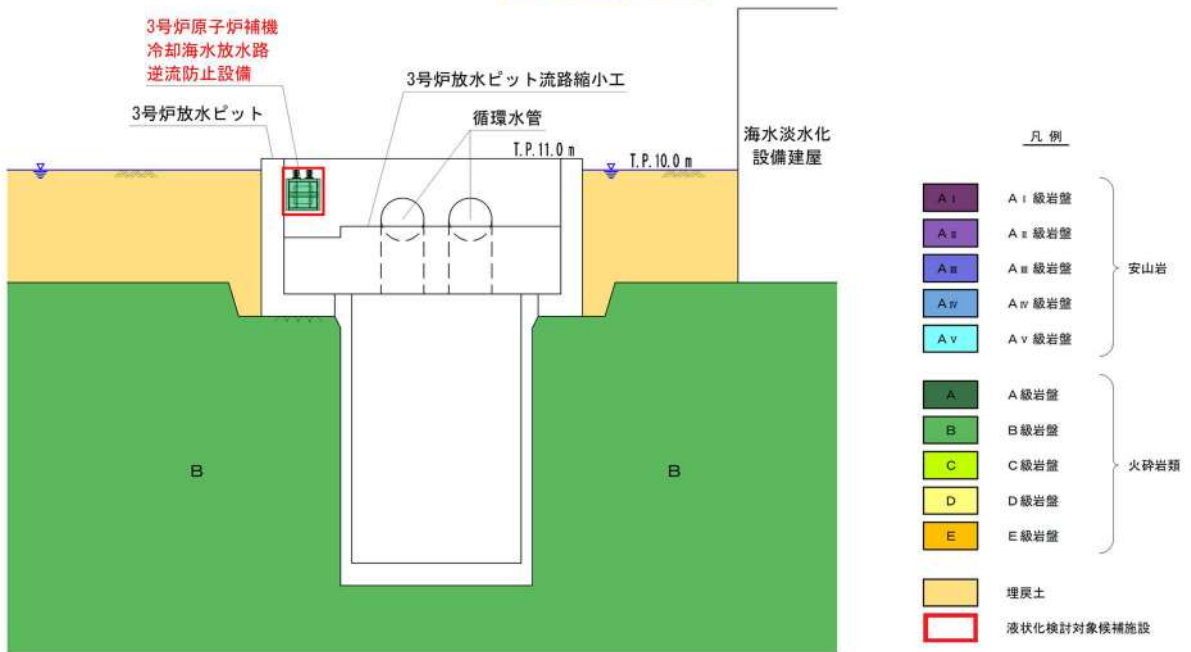


第 3.2-16 図 3 号炉放水ピット流路縮小工断面図

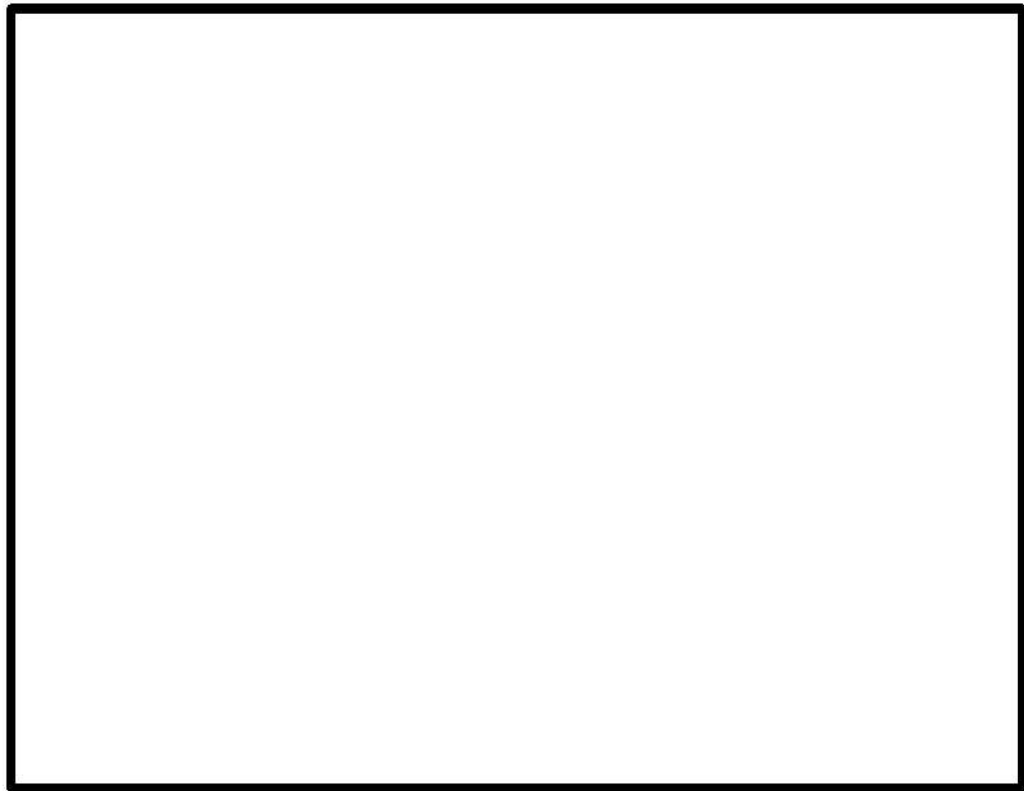


□:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

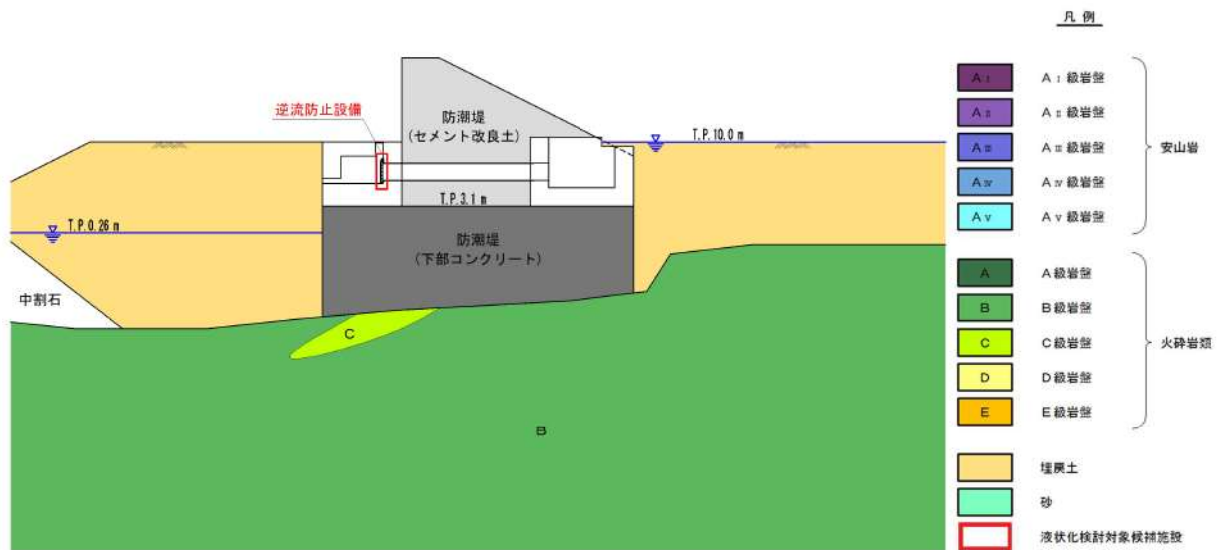


第 3.2-17 図 3 号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備断面図



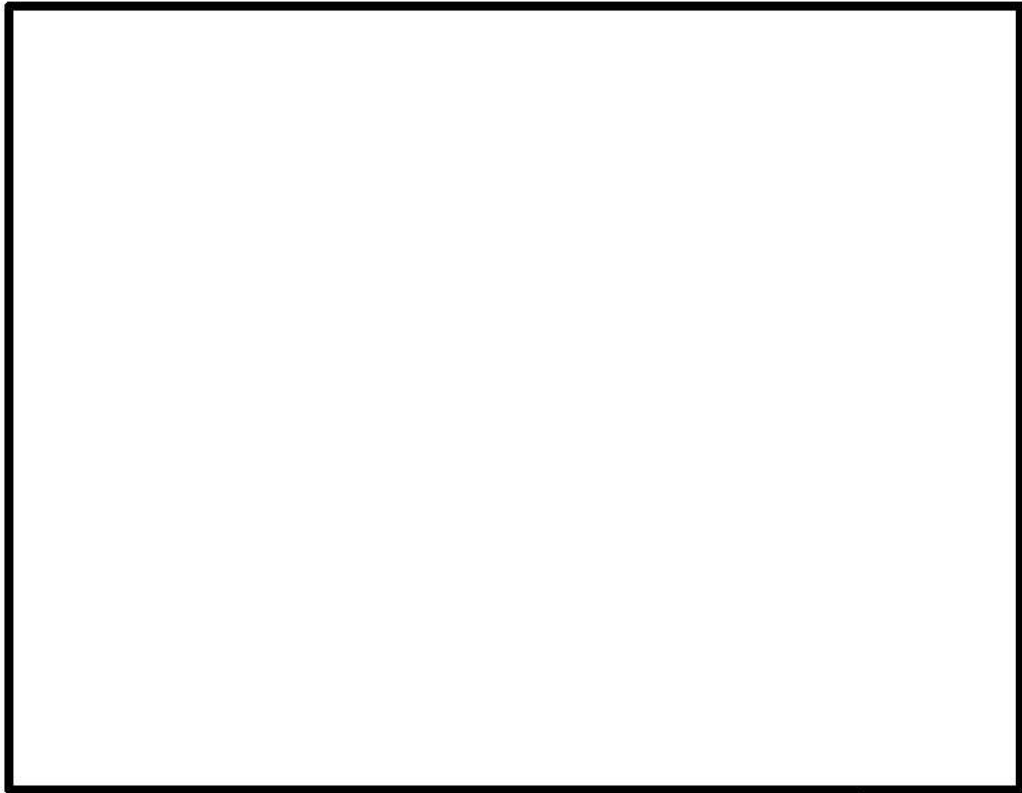
□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



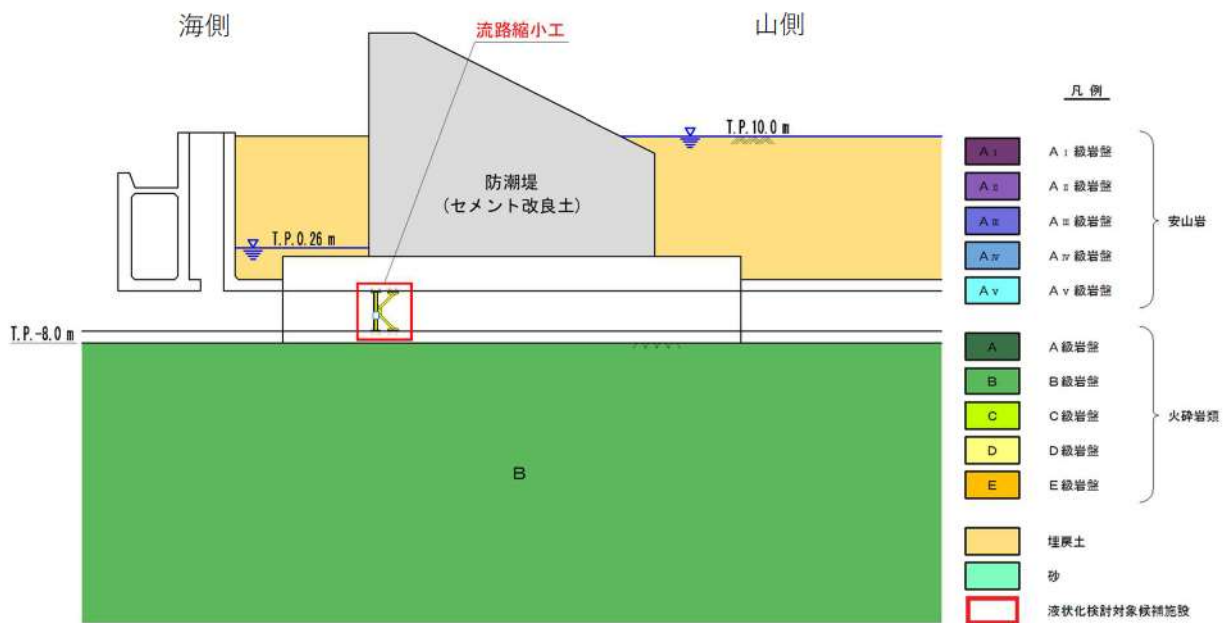
※下部コンクリートは、防潮堤の高さ・止水性維持を目的として設置する無筋コンクリートであり、施設として扱う。

第 3.2-18 図 屋外排水路逆流防止設備断面図

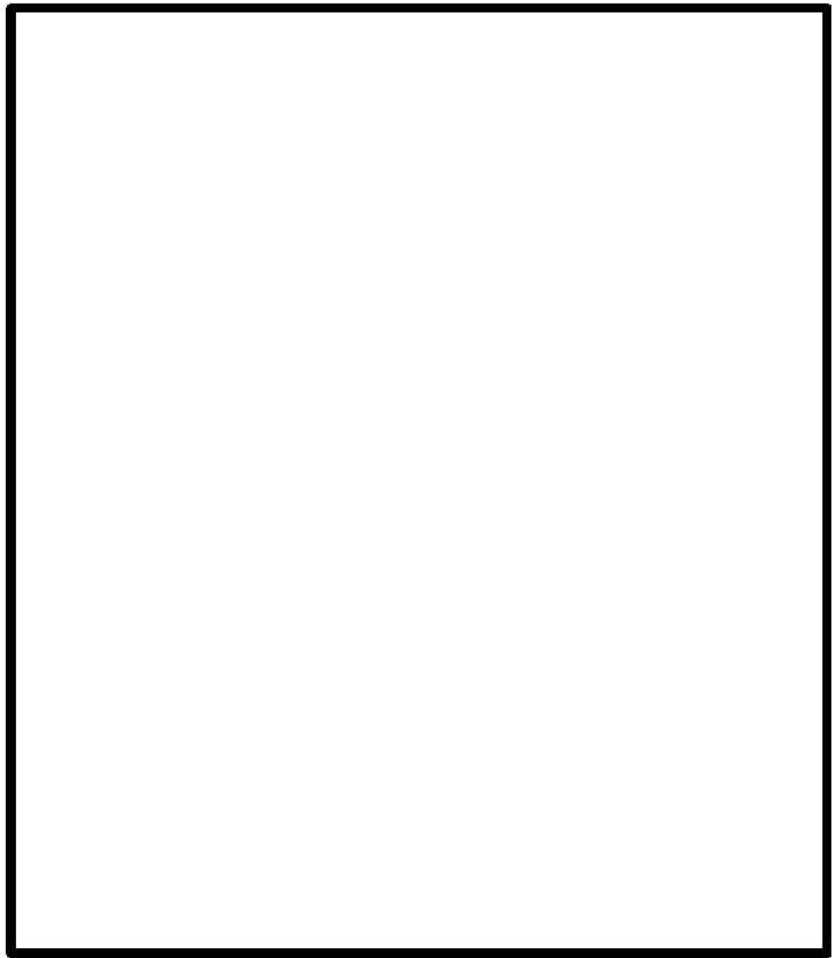


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図

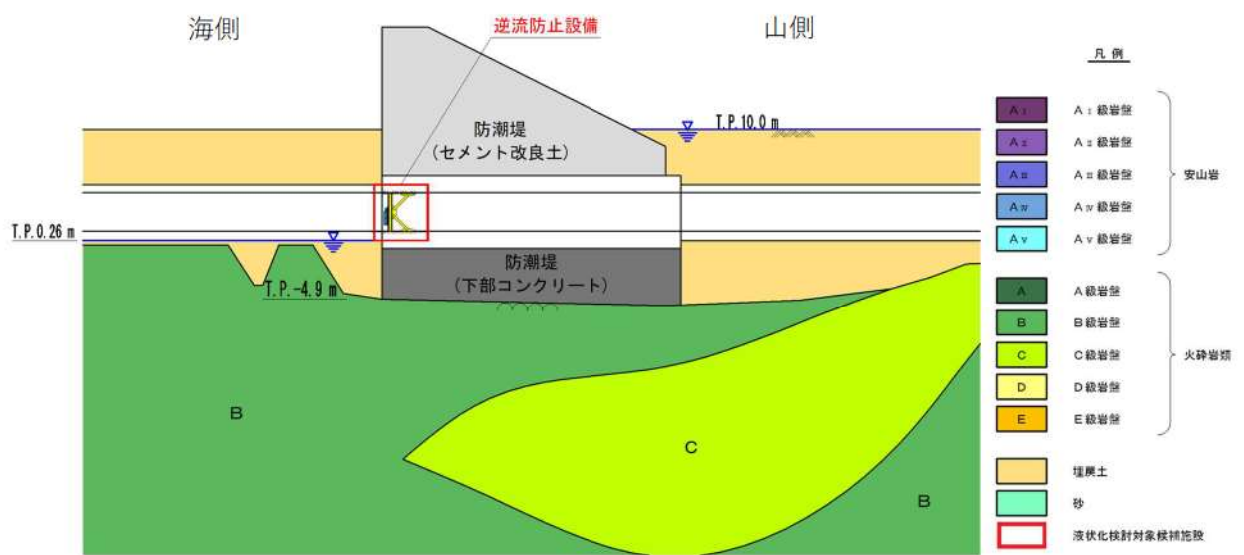


第 3.2-19 図 1 号及び 2 号炉取水路流路縮小工断面図



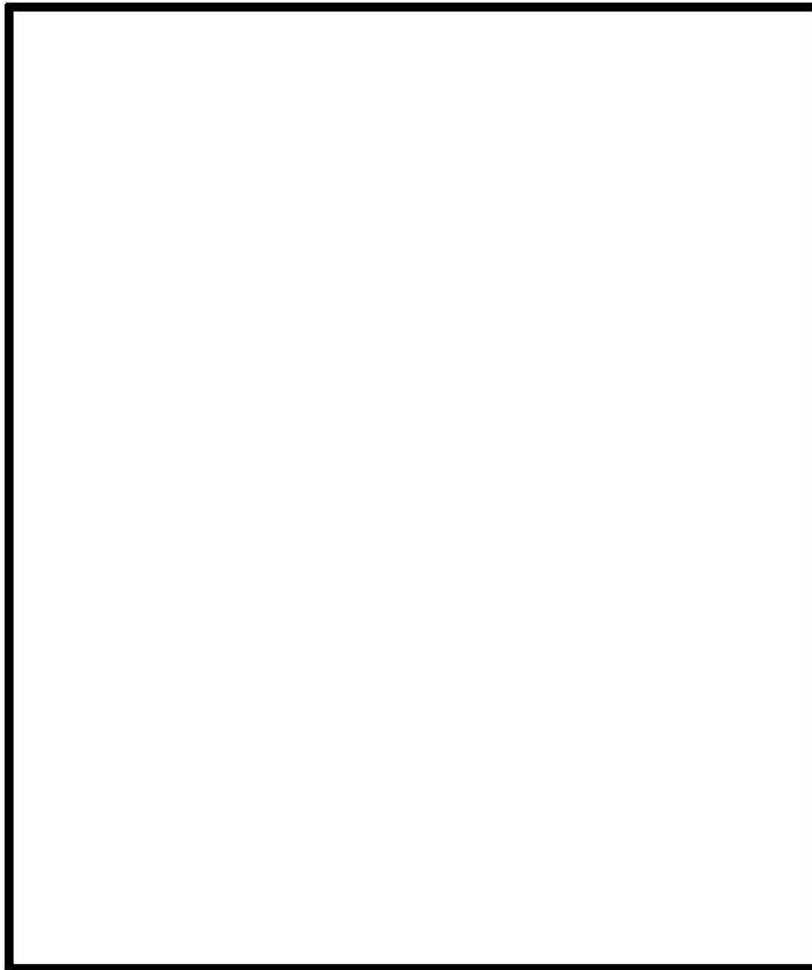
□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



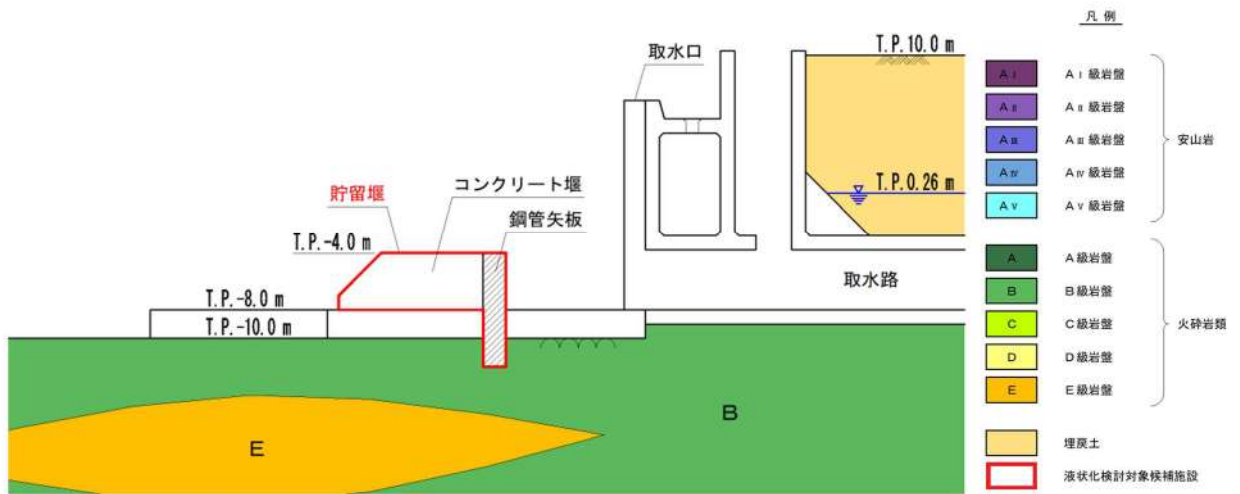
※下部コンクリートは、防潮堤の高さ・止水性維持を目的として設置する無筋コンクリートであり、施設として扱う。

第 3.2-20 図 1 号及び 2 号炉放水路逆流防止設備断面図



□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

対象施設位置図



※貯留堰は構造検討中であり、今後変更となる可能性がある。

第 3.2-21 図 貯留堰部断面図

4. 液状化強度試験の試料採取位置選定とその代表性

4.1 試料採取位置の選定及び代表性確認の方針

液状化強度試験位置の代表性については、以下の方針に基づいて確認する。

- ・液状化強度試験の試料採取位置とその周辺で実施したボーリング調査位置(以下「周辺調査位置」という)の物理特性の比較により代表性を確認する。
- ・代表性確認の対象土層は、液状化検討対象層である 1, 2 号埋戻土, 3 号埋戻土並びに As1 層及び As2 層とする。
- ・現状の液状化強度試験位置では、液状化検討対象施設近傍が網羅されていないと判断される場合は、追加調査を実施する。

4.2 試料採取位置の選定

敷地内に残存する液状化検討対象層(埋戻土・砂層)について、採取可能な試料採取位置の選定を行った。

埋戻土の液状化強度試験に用いる試料採取位置は、第 4.2-1 図～第 4.2-3 図に示すとおり、「ボーリングが実施可能であること」、「試料採取が可能な位置及び深度であること」を条件に、飽和した埋戻土が分布する範囲を網羅する 10 地点(1, 2 号埋戻土)と 7 地点(3 号埋戻土)を選定した。供試体は 1, 2 号埋戻土及び 3 号埋戻土の地下水位前後からサンプリングしている。

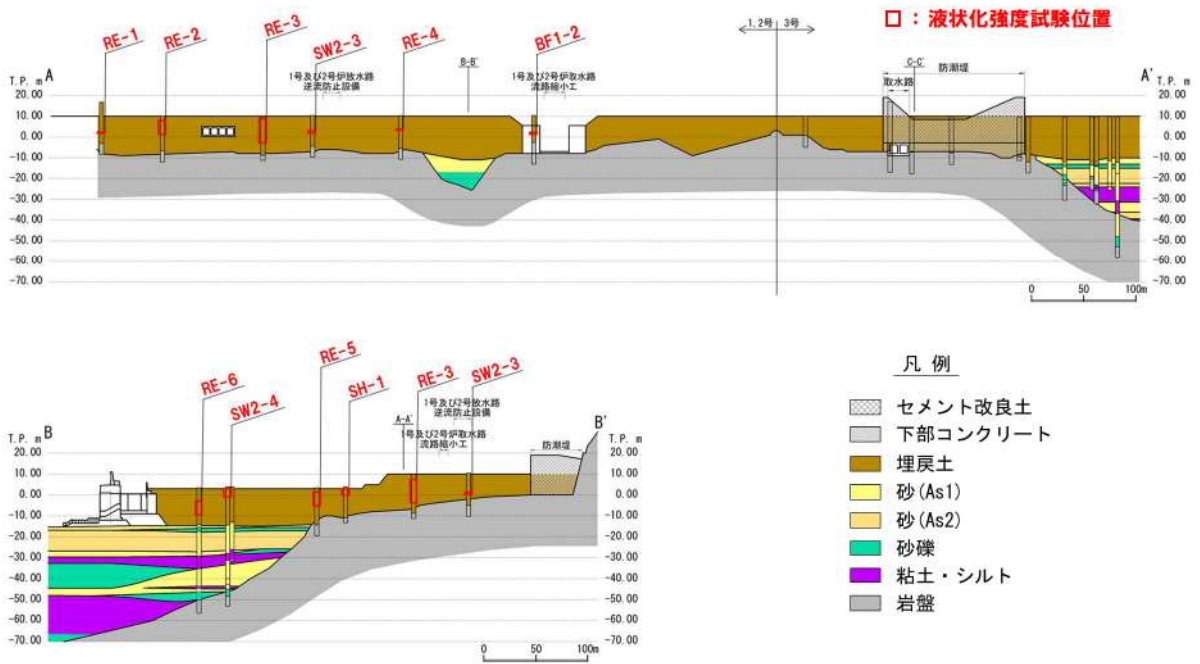
埋戻土及び砂層の周辺調査位置の物理特性に関する評価は添付資料 3 に示す。

砂層については、第 4.2-4 図及び第 4.2-5 図に示すとおり、「ボーリングが実施可能であること」、「試料採取が可能な位置及び深度であること」、「試料採取可能な層厚を有していること」を条件に、砂層が分布する範囲を網羅する 7 地点を選定した。

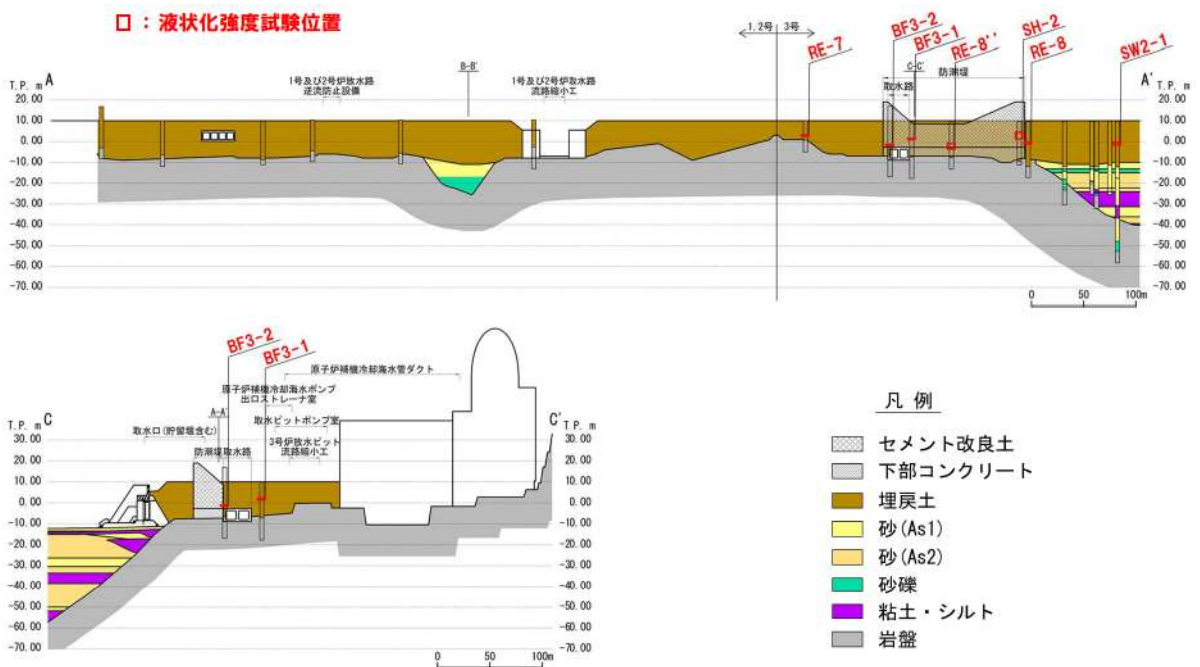


: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 4.2-1 図 液状化強度試験に用いる試料採取位置平面図(埋戻土)



第 4.2-2 図 液状化強度試験に用いる試料採取位置断面図(1, 2号埋戻土)

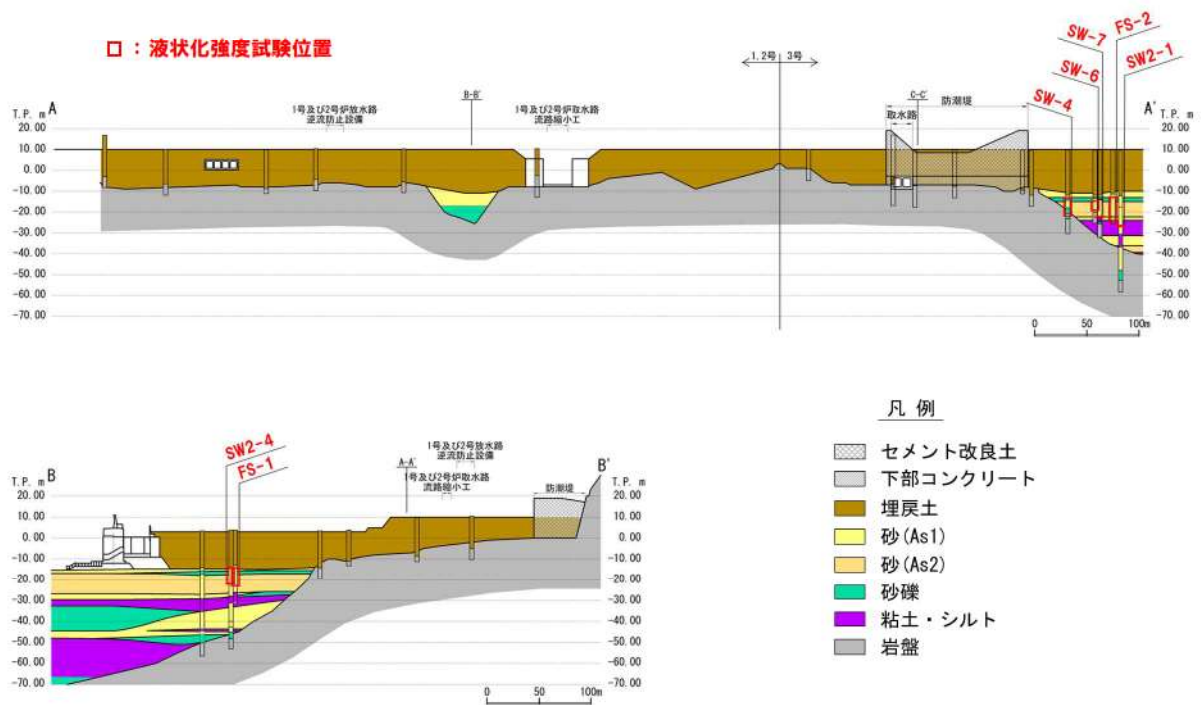


第 4.2-3 図 液状化強度試験に用いる試料採取位置断面図(3号埋戻土)



□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 4.2-4 図 液状化強度試験に用いる試料採取位置平面図(砂層)



第 4.2-5 図 液状化強度試験に用いる試料採取位置断面図(砂層)

4.3 試料採取位置の代表性について

選定した埋戻土と砂層の液状化試験試料の採取位置が発電所敷地内の液状化強度を代表できることを示す。

埋戻土及び砂層について、液状化強度比 R_L と相関性のある指標を抽出の上、液状化強度試験位置と敷地全体における指標の比較を行うことにより、その妥当性を確認した。

4.3.1 埋戻土の代表性について

埋戻土については、建設時に発生した岩砕が主体であり、締固め管理して施工した地盤である。

埋戻土の液状化強度試験位置の代表性を確認することを目的として、液状化強度試験位置と敷地全体における指標を比較し検討を行った。

代表性確認において比較する指標として、設置許可段階においては、液状化強度比 R_L と相関性のある(a)粒度分布、(b)細粒分含有率を選定した。

また、設工認段階においては、同じく液状化強度比 R_L と相関性のある(c)相対密度を代表性確認指標に追加して説明する。

なお、N値については、標準貫入試験用サンプラーの径を上回る礫が埋戻土に多く含まれているため、標準貫入試験では適正な評価が困難であることから、代表性確認指標に選定しない(詳細は添付資料4に示す)。

また、せん断波速度は、泊発電所の埋戻土において液状化強度との明確な相関関係が認められないことから、代表性確認指標に選定しない。

指標の選定理由を以下に示す。また、各基準類における液状化強度比 R_L と粒度分布、N値及び細粒分含有率の相関性を第4.3-1表に示す。

(a) 粒度分布

粒径加積曲線から求められる粒度分布は、基本的な土の物性値であり、各基準類における液状化判定に用いられており、液状化強度比の相関が高いことから選定した。

(b) 細粒分含有率

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 との相関が高いことから選定した。

(c) 相対密度

ダイレイタンシー特性(繰返しせん断に伴う体積変化)に直接関連する指標であり、液状化強度比 R_L との相関が高いことから選定した。

第 4.3-1 表 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	液状化判定に用いる物性値	R_L 算定に用いる主物性	R_L 補正に用いる物性
道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, (社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月	平均粒径 D_{50} 10% 粒径 D_{10} 細粒分含有率 F_c	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), (社) 日本港湾協会, 2007 (部分改訂, 2012)	粒度分布		
建築基礎構造設計指針, (社) 日本建築学会, 2001	細粒分含有率 F_c 粘土分含有率 P_c 塑性指数 I_p		
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, 2012	平均粒径 D_{50} 10% 粒径 D_{10} 細粒分含有率 F_c 粘土分含有率 P_c		
港湾の施設の技術上の基準・同解説 (社) 日本港湾協会, 2007	粒度分布		

(1) 1, 2号埋戻土の代表性確認状況

1, 2号埋戻土の液状化強度試験位置並びに周辺調査位置を第4.3-1図に示す。

1, 2号埋戻土の液状化強度試験位置での各指標(粒度分布, 細粒分含有率)に対する代表性の確認状況は以下のとおりである(第4.3-2図)。

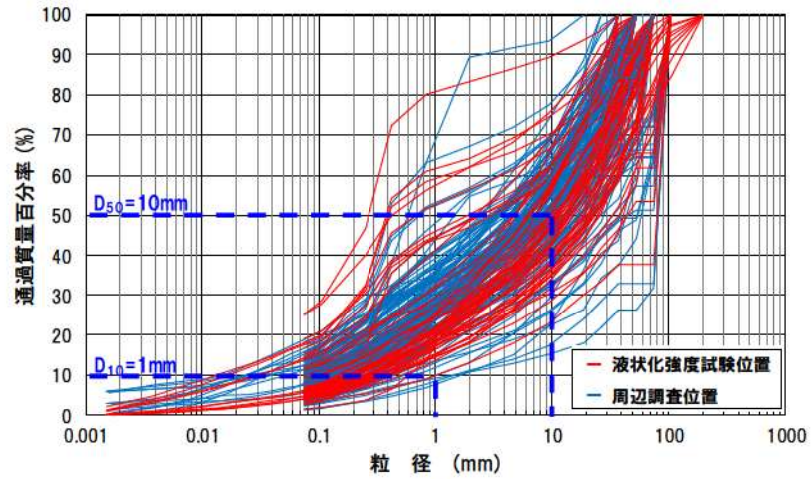
- ・液状化強度試験位置の粒度分布については, 礫質土及び砂質土が認められ, 液状化強度試験位置は概ね周辺調査位置の範囲に含まれている。
- ・液状化強度試験位置の細粒分含有率については, 液状化強度試験位置と周辺調査位置と範囲が同程度である。

ただし, 1, 2号埋戻土の液状化強度試験の試料採取位置については, 現状の試料採取位置では, 液状化検討対象施設近傍が網羅されていないため, 追加調査が必要であると判断した。

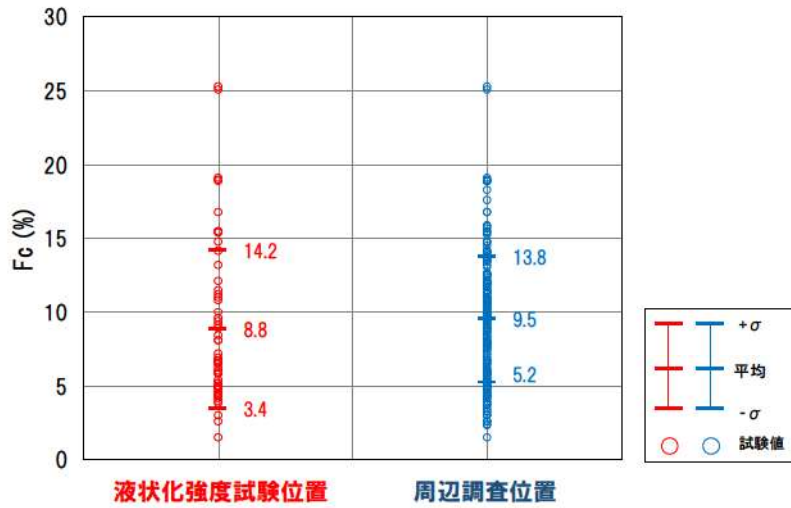


: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第4.3-1図 液状化強度試験位置並びに周辺調査位置(1, 2号埋戻土)



(a) 粒度分布



(b) 細粒分含有率

第 4.3-2 図 液化強度試験位置の基本物性の比較(1, 2 号埋戻土)

(2) 3号埋戻土の代表性確認状況

3号埋戻土の液状化強度試験位置並びに周辺調査位置を第4.3-3図に示す。

3号埋戻土の液状化強度試験位置での各指標(粒度分布, 細粒分含有率)に対する代表性の確認状況は以下のとおりである(第4.3-4図)。

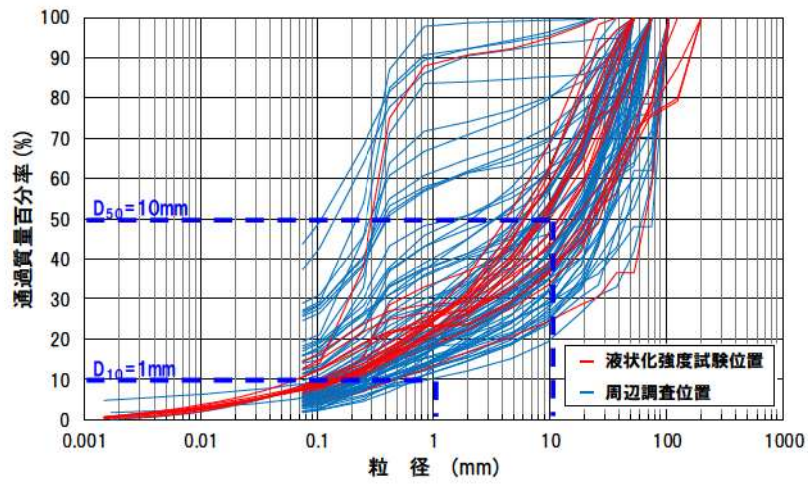
- ・液状化強度試験位置の粒度分布については, 礫質土及び砂質土が認められ, 液状化強度試験位置は概ね周辺調査位置の範囲に含まれている。
- ・液状化強度試験位置の細粒分含有率については, 液状化強度試験位置と周辺調査位置と範囲が同程度である。

ただし, 3号埋戻土の液状化強度試験の試料採取位置については, 現状の試料採取位置では, 液状化検討対象施設近傍が網羅されていないため, 追加調査が必要であると判断した。

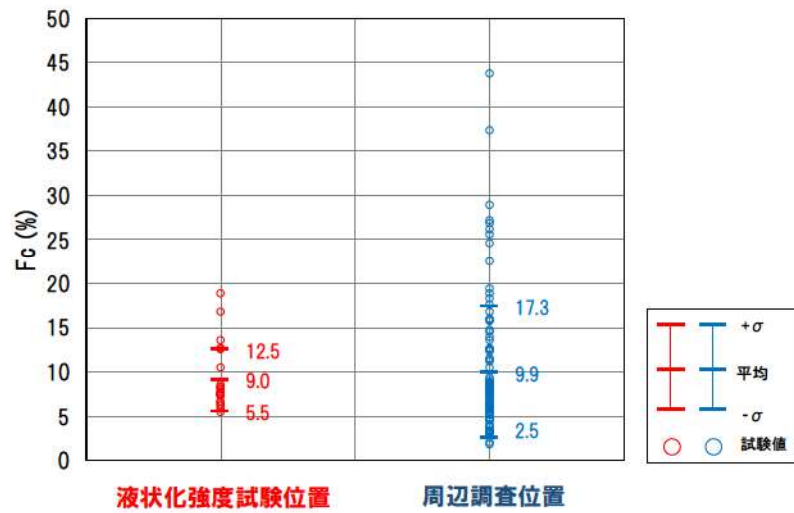


□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第4.3-3図 液状化強度試験位置並びに周辺調査位置(3号埋戻土)



(a) 粒度分布



(b) 細粒分含有率

第 4.3-4 図 液状化強度試験位置の基本物性の比較(3号埋戻土)

4.3.2 砂層の代表性確認

砂層の液状化強度試験位置の代表性を確認することを目的として、液状化強度試験位置と敷地全体における指標を比較し検討を行った。

代表性確認において比較する指標として、(a)粒度分布、(b)細粒分含有率、(c)N値を選定した。

なお、各種試験は、JISに基づき実施した。

各指標の選定理由を以下に示す。

(a) 粒度分布

粒径加積曲線から求められる粒度分布は、基本的な土の物性値であり、各基準類における液状化判定において平均粒径、10%粒径が用いられており、液状化強度比との相関が高いことから選定した。

(b) 細粒分含有率

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 との相関が高いことから選定した。

(c) N 値

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、有効応力解析コード (FLIP) の簡易パラメータ設定法に N 値が用いられており、液状化強度比との相関が高いことから選定した。

砂層の液状化強度試験位置並びに周辺調査位置を第 4.3-5 図に示す。

砂層の液状化強度試験位置での各指標(粒度分布, 細粒分含有率及び N 値) に対する代表性の確認結果は以下のとおりである(第 4.3-6 図, 第 4.3-7 図)。

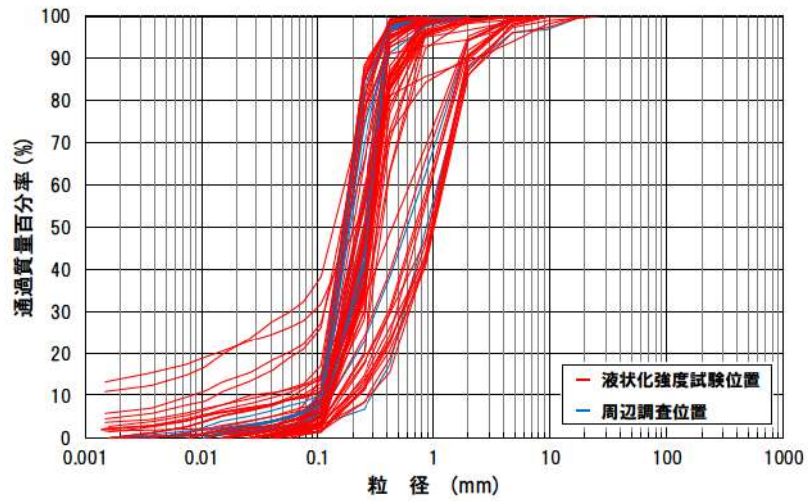
- ・液状化強度試験位置の粒度分布は, 概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。
- ・液状化強度試験位置の細粒分含有率は, 概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。
- ・液状化強度試験位置の N 値は, 概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。

上記の結果から, 砂層の液状化強度試験の試料採取位置は, 敷地に対して代表性を有していると評価した。

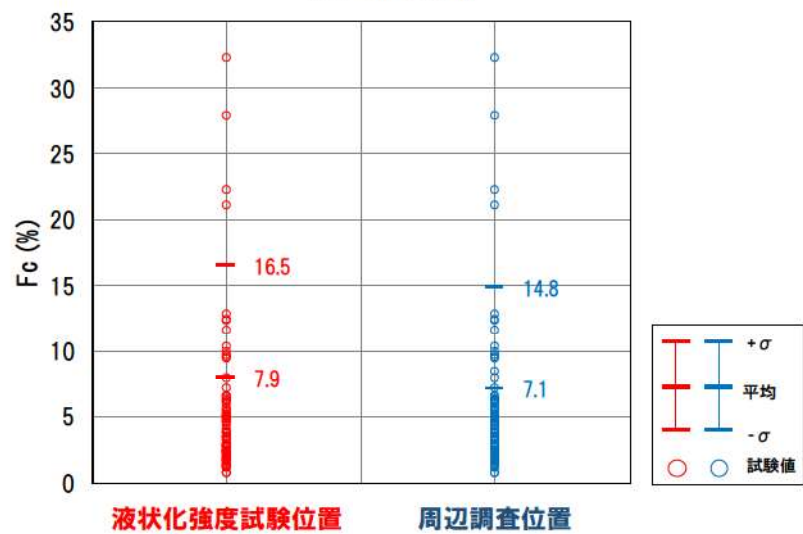


: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

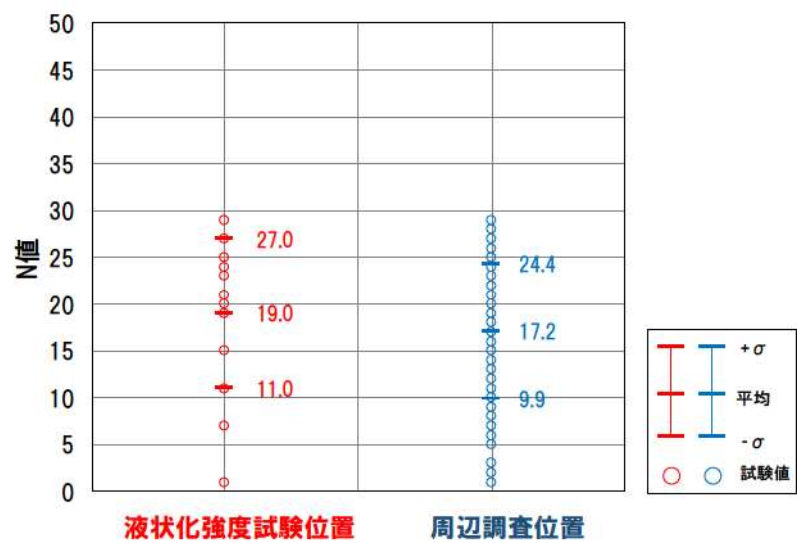
第 4.3-5 図 液状化強度試験位置並びに周辺調査位置(砂層)



(a) 粒度分布

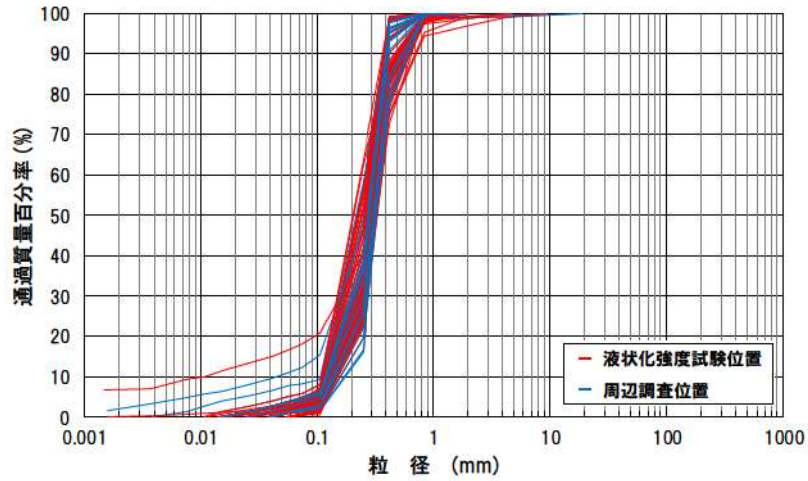


(b) 細粒分含有率

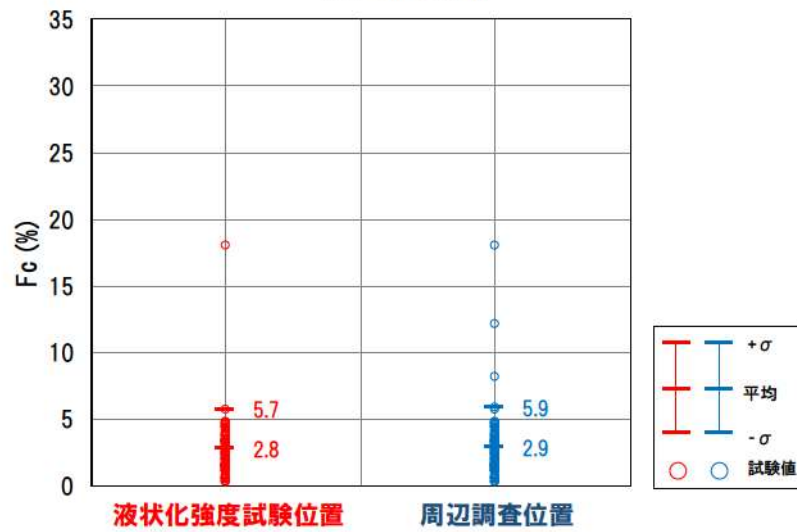


(c) N値

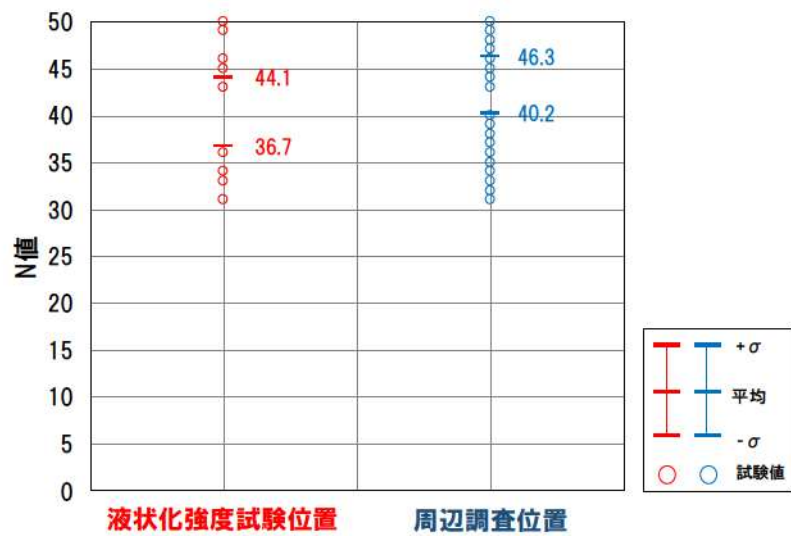
第 4.3-6 図 液化強度試験位置の基本物性の比較 (As1 層)



(a) 粒度分布



(b) 細粒分含有率



(c) N 値

第 4.3-7 図 液化強度試験位置の基本物性の比較 (As2 層)

4.3.3 試料採取位置の代表性のまとめ

埋戻土及び砂層の液状化強度試験の試料採取位置の代表性について確認を行った結果を以下に示す。

① 埋戻土

【粒度分布】

液状化強度試験位置の粒度分布は、礫質土及び砂質土の特性が認められるが、液状化強度試験位置は礫質土及び砂質土ともに概ね粒度試験結果全体の範囲にある。

【細粒分含有率】

液状化強度試験位置の細粒分含有率は、概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。

ただし、埋戻土の液状化強度試験の試料採取位置については、現状の試料採取位置では、液状化検討対象施設近傍が網羅されていないため、追加調査が必要であると判断した。

② 砂層

【粒度分布】

液状化強度試験位置の粒度分布は、概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。

【細粒分含有率】

液状化強度試験位置の細粒分含有率は、概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。

【N値】

液状化強度試験位置のN値は、概ね周辺調査位置の範囲と同程度の範囲にある。

以上より、砂層の液状化強度試験の試料採取位置は、敷地に対して代表性を有していると評価した。

なお、埋戻土の液状化強度試験の試料採取位置の代表性確認に当たっては、粒度分布、細粒分含有率及び相対密度を代表性確認指標に用いて、設工認段階で説明する。

4.4 追加調査の必要性検討

液状化強度試験の試料採取が、液状化検討対象施設近傍を網羅していないと判断したことから、追加調査を実施するものとし、追加調査の候補位置は、液状化検討対象施設の近傍から採取すること及び埋戻方法や埋立材料の違いを考慮して選定する。

既往の液状化強度試験の試料採取位置を第 4.4-1 図に示す。



:枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 4.4-1 図 既往の液状化強度試験の試料採取位置及び液状化検討対象施設

追加調査候補位置の選定に当たり、液状化検討対象施設近傍の液状化強度試験の実施状況を確認し、追加調査を実施する施設を第 4.4-1 表に整理した。

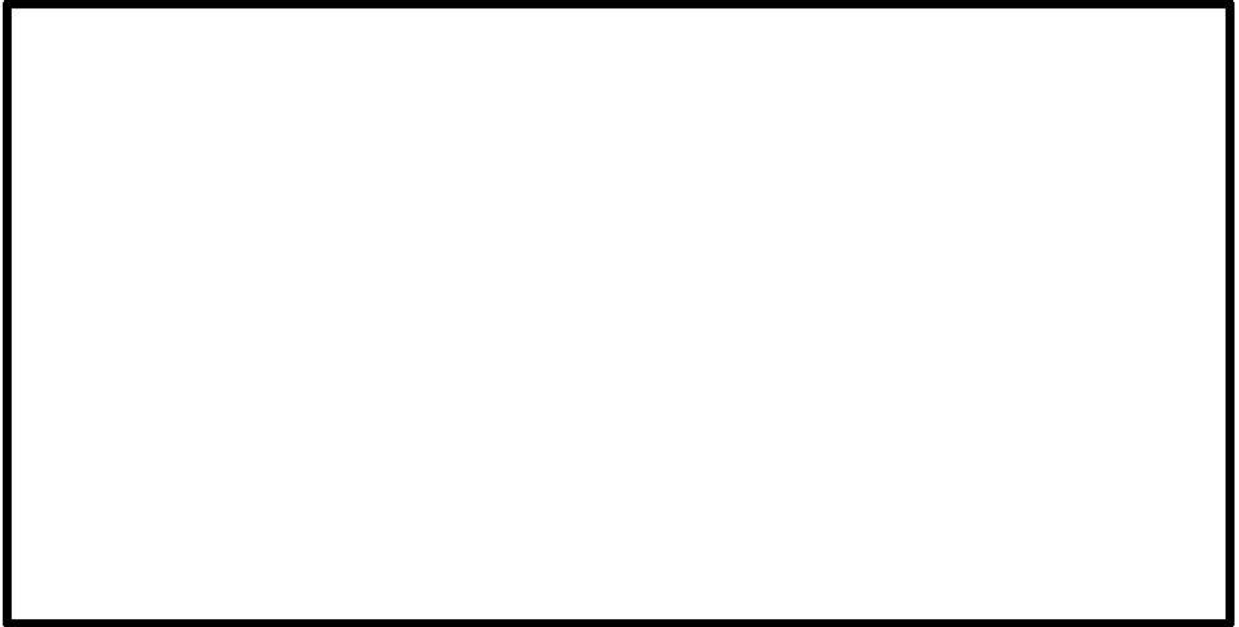
現状で既に液状化強度試験を実施している施設は追加調査は不要とし、施設近傍で液状化強度試験が実施されていない施設及び防潮堤のように施設延長が長く埋戻施工の時期が異なる範囲が存在する施設に対してデータ拡充を目的とした追加調査を実施することとし、追加調査の候補位置は、第 4.4-2 図に示す 12 地点を選定した。

第 4.4-1 表 液状化検討対象施設近傍の液状化強度試験の実施状況と追加調査候補位置

施設名称	施設近傍の液状化強度試験の実施状況	追加調査の必要性検討結果	追加調査候補位置
取水口	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	①⑪⑫
取水路	(BF3-2)※	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	①⑫
取水ピットスクリーン室 3号炉取水ピットスクリーン室防水壁	BF3-1	対象施設近傍で液状化強度試験を実施しているため不要。	—
取水ピットポンプ室	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	②
原子炉補機冷却海水ポンプ出口ストレナ室	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	②
原子炉補機冷却海水管ダクト	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	③④⑤
B1, B2-ディーゼル発電機燃料油貯油槽 トレンチ	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑤
1, 2号埋戻土近傍の防潮堤	SW2-3, RE-4	対象施設近傍で液状化強度試験を実施しているが、1, 2号埋戻土の施工時期が異なる範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑥⑦
3号埋戻土近傍の防潮堤	RE-8, RE-8”, SH-2, BF3-1, RE-7	対象施設近傍で液状化強度試験を実施しているが、3号埋戻土の施工時期が異なる範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑧
3号炉放水ピット流路縮小工	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑨
3号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備	■	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑨
屋外排水路逆流防止設備	RE-4, RE-7	1号炉, 3号炉系統近傍で液状化強度試験を実施しているが、2号炉系統近傍において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑦⑪
1号及び2号炉取水路流路縮小工	—	対象施設建設時(1, 2号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑥
1号及び2号炉放水路逆流防止設備	SW2-3	対象施設近傍で液状化強度試験を実施しているため不要。	—
貯留堰	—	対象施設建設時(3号炉建設時)の施工範囲において、データ拡充を目的とした追加が必要。	①⑫
アクセスルートのうち盛土構造による道路部	—	対象施設直下において、データ拡充を目的とした追加が必要。	⑩

■ : 追加調査を必要と判断した施設

※BF3-2の液状化強度試験の試料については、3号炉建設時に路盤材として使用した礫混じりシルトを採取した可能性があることを踏まえ参考値とし、BF3-2の代替として追加調査候補位置⑫を追加する。



: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 4.4-2 図 追加調査候補位置

5. 液状化強度試験結果と液状化強度特性の設定

5.1 液状化強度試験方法

埋戻土及び砂層に対し、地盤工学会が定める「土の繰返し非排水三軸試験方法(JGS0541)」及び「土の変形特性を求めるための中空ねじりせん断試験方法(JGS0543)」に基づき試験を実施する。試料採取は、試料の乱れを抑制するためにゲルプッシュ・サンプリングやトリプルチューブサンプリング、凍結サンプリングにより実施した。

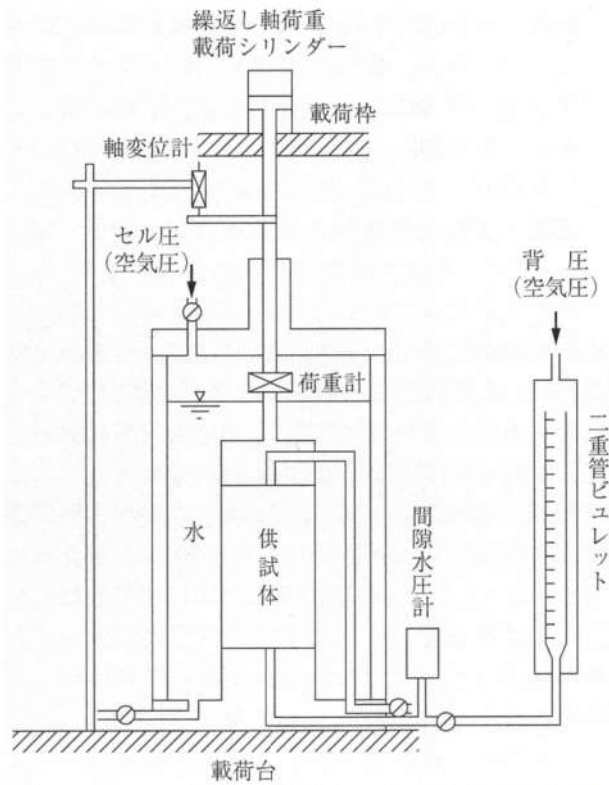
繰返し非排水三軸試験装置及び中空ねじりせん断試験装置の概要を第 5.1-1 図、第 5.1-2 図に示す。

【埋戻土】

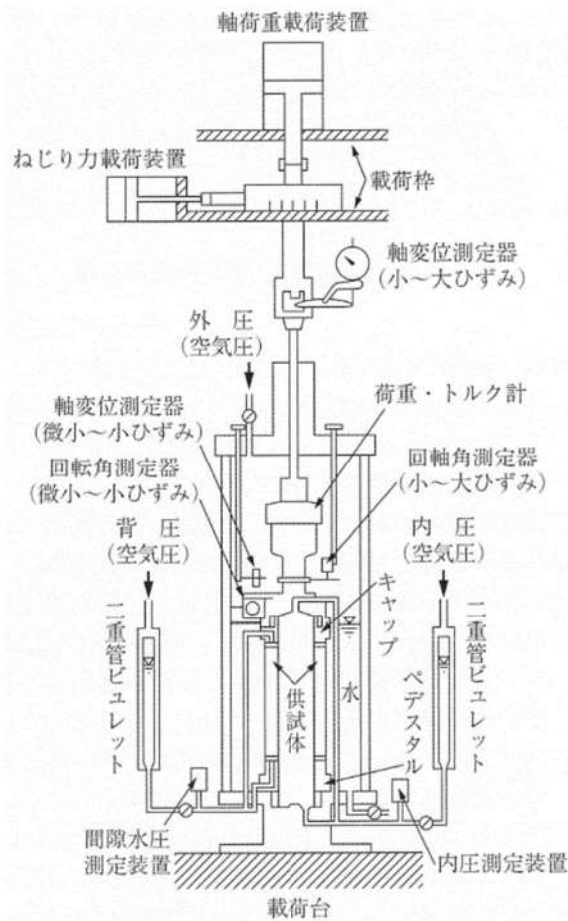
- ・液状化強度試験方法：繰返し非排水三軸試験
- ・試料採取方法：GP サンプリング
- ・供試体寸法：①直径 100mm, 高さ 200mm ②直径 300mm, 高さ 600mm
- ・載荷波形：正弦波(0.1Hz)
- ・圧密応力：200kPa(供試体は地下水位前後からサンプリングしていることから、埋戻土の層厚約 10m(地表面(T.P.10m), 地下水位(T.P.0.26m))と、埋戻土の単位体積重量約 20kN/m³(1,2号埋戻土(17.6520kN/m³), 3号埋戻土(23.0456kN/m³))から一律に設定。
- ・その他：「地盤材料試験の方法と解説」に基づき、繰返し回数 200 回を上限として、両振幅軸ひずみ 10%に達するまで試験を実施。せん断応力比を 0.200～0.908 の間で設定。

【砂層】

- ・液状化強度試験方法：繰返し非排水三軸試験，中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験
- ・試料採取方法：GP サンプリング，トリプルチューブサンプリング，凍結サンプリング
- ・供試体寸法：(三軸)直径 50mm, 高さ 100mm(ねじり)外径 70mm, 内径 30mm, 高さ 100mm
- ・載荷波形：正弦波(0.1Hz, 0.2Hz)
- ・圧密応力：190～450kPa(液状化試験ごとに供試体採取平均深度の有効上載圧を考慮して設定)
- ・その他：「地盤材料試験の方法と解説」に基づき、繰返し回数 200 回を上限として、両振幅軸ひずみ 10%(ねじりせん断試験は両振幅せん断ひずみ 15%)に達するまで試験を実施。せん断応力比を 0.152～0.686 の間で設定。



第 5. 1-1 図 繰返し非排水三軸試験装置の概要



第 5. 1-2 図 中空ねじりせん断試験装置の概要

5.2 液状化強度試験結果の分類に対する基本的考え方

泊発電所の敷地地盤は掘削岩砕を埋め戻して造成しており、液状化に対する抵抗性が比較的高いと考えられる。

また、砂層のうち特にAs2層についてはN値が30以上と比較的大きい。

以上から泊発電所の液状化検討対象層は液状化によって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「ゆるい砂」や「埋立地盤」とは異なり、ひずみの増大に伴って体積膨張を起し、ある程度の剛性と強度を回復する「ねばり」をもった挙動をされると考えられる。

そこで、泊発電所の液状化検討対象層が地震時にどのような挙動をするかを把握する目的で、液状化強度試験結果を「液状化」、「繰返し軟化(サイクリックモビリティを含む)」、「非液状化」に分類した。

液状化強度試験結果は、「①間隙水圧が上昇・蓄積する。(過剰間隙水圧比 95%を超える。）」、「②有効応力がゼロまで低下する。」、「③液体状となり流動する。(ひずみが急増する。）」、「④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。）」の4項目に該当するかどうかを判定し、第5.2-1表に基づいて分類する。

第5.2-1表 液状化強度試験結果の判定項目と分類

○：該当する
×：該当しない

判定項目 ^{※1}	液状化	繰返し軟化		非液状化
			サイクリックモビリティ	
① 間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○	○	○	×
② 有効応力がゼロまで低下する。	○	×	○	×
③ 液体状となり流動する。 (ひずみが急増する。)	○	×	×	×
④ 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。)	×	○	○	○ or × ^{※2}

※1 土木学会地震工学委員会の定義に基づき判定項目を策定したが、液状化強度試験の結果に対して判定できるよう、括弧内の判断項目を補足した。

※2 項目の判定はするものの、「非液状化」の分類に影響は及ぼさない。

なお、液状化強度試験結果は以下に示すとおり、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」活動成果報告書を参考に分類した。

【土木学会地震工学委員会(2003)の報告書より】

(狭義の)液状化

地震の繰返しせん断力等によって、飽和した砂や砂礫等の緩い非粘性土からなる地盤内で間隙水圧が上昇・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」ともなう現象、又は「流動ポテンシャル」をもった地盤となる現象。

広義の液状化

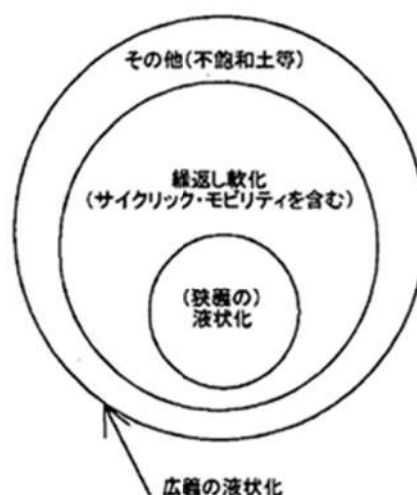
緩い砂地盤や砂礫地盤に限定せず、密な砂地盤や密な砂礫地盤さらに粘性土地盤でも地震等を含む種々の外力によって有効応力が低下し、地盤の強度又は剛性の低下により有害な沈下や変形等が起こる現象。一般に飽和地盤が多いが、不飽和地盤においても起こる類似の現象(ただし、そのメカニズムは必ずしも解明されていない)も含むものとする。

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、土のもつダイレイタンシ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。

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、正のダイレイタンシ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シー特性が著しい土において顕著に現れる。



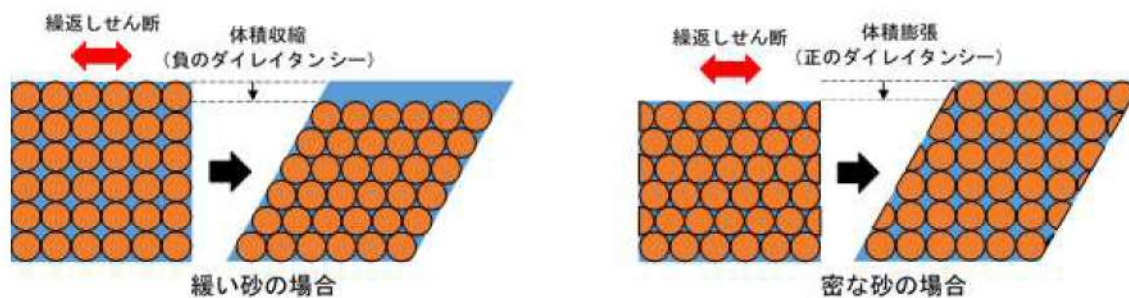
第 5.2-1 図 液状化に関連する言葉の定義
(土木学会地震工学委員会(2003)の報告書より引用)

既往文献による液状化に関する記述を第 5. 2-2 表に示す。

第 5. 2-2 表 既往文献による液状化に関する記述

文献	液状化に関する記載内容(抜粋)
土質工学用語辞典 (1985)	間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果, 飽和砂質土がせん断強さを失うことを液状化という。
地盤工学会(2006)	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をサイクリックモビリティといい, 液状化とは区別して用いられることがある。
安田(1991)	密詰めの場合には大ひずみは生じない。一時的に有効拘束圧が0になっても, その後にせん断力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効拘束圧が増加(回復)し, 有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。この現象を“サイクリックモビリティ”と呼んで液状化と区別することもある。
石原(2017)	間隙水圧は徐々に上昇しているが, 最終的にこれが初期の拘束圧力 σ'_{v0} に等しくなっている時点が厳密な意味で液状化の発生ということになる。 砂質土は, その密度や細粒分の含有率によって同じ振幅の繰返し軸荷重を加えても, 間隙水圧の上昇そして軸ひずみ発生の様相が多少変わってくる。 細粒分が多い場合, 軸ひずみは増大しても間隙水圧は100%上昇しないことが多い。しかし, 土は著しく軟化し, 繰返し強度が低下しているため, 実用上この場合も液状化とみなすことが多い。本来は“繰返し軟化”というべき。
井合(2008)	密な砂地盤が繰返しせん断を受け, 過剰間隙水圧の増加に伴って, せん断ひずみ振幅が徐々に増大する現象である。 地盤の液状化は, ゆるい砂地盤が繰返しせん断を受け, せん断振幅が急増し, 地盤全体が泥水状態となり, 噴砂や噴水を伴うことが多いので, 現象的にサイクリックモビリティとは異なる。
吉見(1991)	ゆるい砂の液状化と異なる点は, 密な砂では, せん断ひずみがある限度を超えると, せん断によって体積が膨張しようとする傾向(正のダイレイタンス)が現れるので, 非排水条件のもとでは, せん断ひずみが大きくなると間隙水圧が減少し, したがって有効応力が回復することである。 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には有効応力が存在するので, 間隙水圧比が100%に達した後でも, 繰返しせん断に対して相当な剛性を保持する。 密な砂では, ゆるい砂でみられるような破局的なクイックサンドは起こらず, 有限なひずみ振幅を持つせん断変形が繰り返されるにすぎない。

なお、地盤のダイレイタンシー特性の概要を第 5.2-2 図に示す。



第 5.2-2 図 地盤のダイレイタンシー特性の概要

液状化となる試験結果の例を第 5.2-3 図に、繰返し軟化(サイクリックモビリティ)となる試験結果の例を第 5.2-4 図に示す。

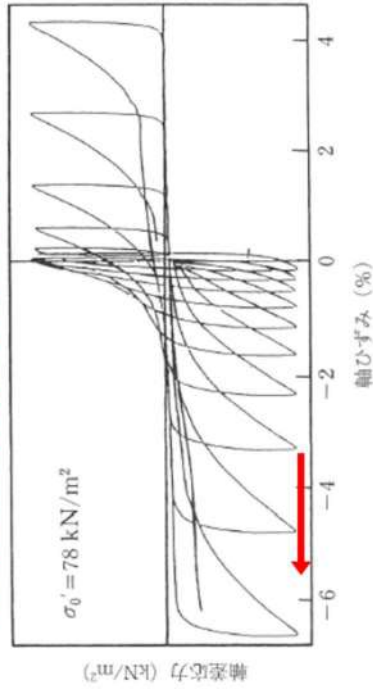
液状化に分類される事例

試験結果		液状化の判断
①	間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○
②	有効応力がゼロまで低下する。	○
③	液体状となり流動する。 (ひずみが増す。)	○
④	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。)	×

※1 地盤工学会 (2009) : 地盤材料試験の方法と解説

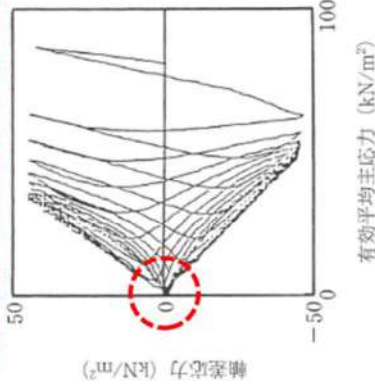
※2 井合 (2008) : サイクリックモビリティ, 地盤工学会誌

ひずみが急に増大し、脆性的な破壊が生じる。



③④ 軸差応力-軸ひずみ関係※1

有効応力がゼロになり、液体状になる。



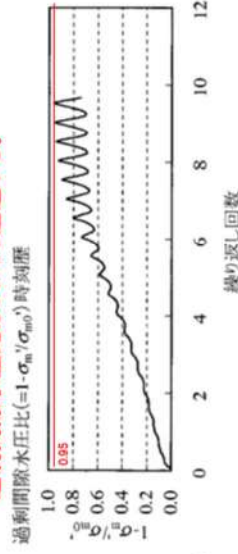
② 有効応力経路※1

過剰間隙水圧比の95%超過に伴い、急激に増加



③④ せん断ひずみ-繰返し回数関係※2

過剰間隙水圧比は95%を超過する。



① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係※2

第 5.2-3 図 液状化に分類される事例

繰返し軟化(サイクリックモビリティ)に分類される事例

試験結果		液状化の判断
①	間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○
②	有効応力がゼロまで低下する。	○
③	液体状となり流動する。 (ひずみが増加する。)	×
④	正のダイレイタンスン特性により せん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	○

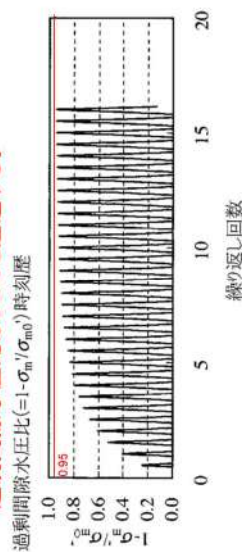
※1 地盤工学会(2009):地盤材料試験の方法と解説

※2 井合(2008):サイクリックモビリティ, 地盤工学会誌



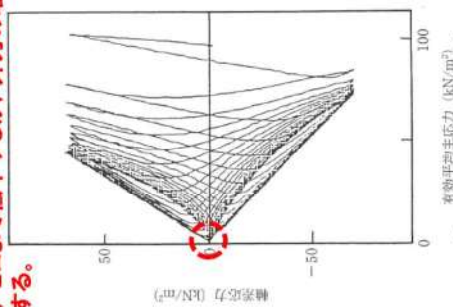
③④ せん断ひずみ-繰返し回数関係

過剰間隙水圧比は95%を超える。

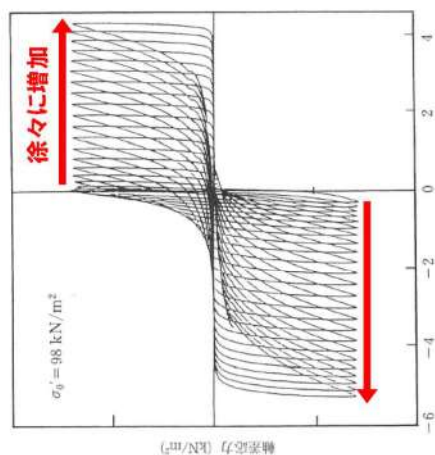


① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

一時的に、ゼロまで低下するが、外力の増加とともに回復する。



② 有効応力経路



③④ 軸差応力-軸ひずみ関係

第 5.2-4 図 繰返し軟化(サイクリックモビリティ)に分類される事例

5.3 液状化強度試験結果

埋戻土及び砂層の液状化強度試験箇所平面図を第 5.3-1 図，第 5.3-2 図に示す。



: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 5.3-1 図 液状化強度試験箇所平面図(埋戻土)



: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

第 5.3-2 図 液状化強度試験箇所平面図(砂層)

5.3.1 埋戻土の液状化強度試験結果

1, 2 号埋戻土及び 3 号埋戻土に対する液状化強度試験の試験ケース，試験結果を第 5.3-1 表，第 5.3-2 表に示す。

なお，各試験ケースの個別データについては，添付資料 1 液状化強度試験結果データ集に示す。

埋戻土の液状化強度試験の結果は，すべての試験ケース(81 ケース)において，有効応力がゼロとなり液体状になるケースは無かった。また，繰返し载荷に伴い，ひずみは徐々に大きくなるが，急には増大せず，脆性的な破壊は生じなかった。繰返し载荷に伴い過剰間隙水圧が蓄積する傾向は見られたものの，せん断応力の作用によって有効応力は回復した。また，過剰間隙水圧比は，95%を超過しないケースと超過するケースが確認された。

埋戻土に対する液状化強度試験の結果は，多くのケースが「繰返し軟化」に分類されることから，液体状となり支持力を完全に喪失するような事象は発生せず，ひずみが漸増するねばり強い挙動を示すことを確認した。

埋戻土の液状化強度試験結果の代表例として，RE-3(2) 試料の供試体 No. 7 及び RE-7 試料の供試体 No. 21 の試験結果を第 5.3-3 図，第 5.3-4 図に示す。

RE-3(2) 試料の No. 7 供試体は，有効応力がゼロになることはなく，地盤が支持力を失い液状化するような事象は発生しなかった。繰返し荷重により，ひずみは漸増するものの，急に増大することはない，脆性的な破壊は生じていないと考えられる。また，過剰間隙水圧は 95%を超過せず，せん断応力作用時には正のダイレイタンシーの効果により，過剰間隙水圧は低下し，有効応力が回復していることから非液状化と判断される。

RE-7 試料の No. 21 供試体は，有効応力がゼロになることはなく，地盤が支持力を失い液状化するような事象は発生しなかった。繰返し荷重により，ひずみは漸増するものの，急に増大することはない，脆性的な破壊は生じていないと考えられる。また，過剰間隙水圧は 95%を超過するものの，頭打ちとなり 100%に達しない。せん断応力作用時には正のダイレイタンシーの効果により，過剰間隙水圧は低下し，有効応力が回復していることから繰返し軟化と判断される。

埋戻土の液状化強度試験結果に基づく繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数との関係を第 5.3-5 図に示す。

第 5.3-1 表(1/2) 液状化強度試験結果(1, 2 号埋戻土)

試料番号		SW2-3 (φ100)				SW2-4 (φ100)				BF1-2 (φ100)			
サンプリング方法		GPサンプリング				GPサンプリング				GPサンプリング			
地表からの深度 (m)		9.90~11.15				3.03~4.45				10.45~11.25			
有効上載圧 (kN/m ²)		207				74				210			
標高 T.P. (m)		0.5~-0.75				0.87~-0.55				-0.05~-0.85			
供試体No.		16	17	18	19	5	7	8	25	26	27	28	
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.681				2.741				2.706			
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		200				200				200			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ^c		0.608	0.836	0.727	0.501	0.759	0.615	0.823	0.726	0.508	0.618	0.574	
繰返し 両振幅 幅の 繰返 回数	DA = 1%	12.9	0.4	0.9	6.0	2.0	9.0	0.7	1.5	19.8	2.0	3.5	
	DA = 2%	27.7	0.9	2.5	13.8	12.9	28.8	3.0	5.0	39.4	4.5	8.0	
	DA = 5%	42.6	3.5	9.0	38.1	32.6	55.2	12.9	12.7	77.1	9.5	16.8	
	DA = 10%	—	7.5	18.9	98.7	33.8	67.7	26.0	20.6	98.9	12.8	23.6	
	過剰間隙水圧比95% N _{u95}	11.0	2.0	2.0	6.0	6.0	6.0	2.0	3.0	23.0	3.0	6.0	

試料番号		RE-1 (φ100)		RE-2 (1) (φ100)		RE-2 (2) (φ100)			RE-2 (3) (φ100)			
サンプリング方法		GPサンプリング		GPサンプリング		GPサンプリング			GPサンプリング			
地表からの深度 (m)		17.35~17.55		4.80~5.00		8.73~10.73			10.73~11.73			
有効上載圧 (kN/m ²)		353		98		195			211			
標高 T.P. (m)		-0.65~-0.85		5.30~5.10		1.37~-0.63			-0.63~-1.63			
供試体No.		25		6		9	13	14	15	16	17	18
地盤材料の工学的分類		礫質土		砂質土		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.652		2.781		2.704	2.667	2.717	2.725	2.740	2.738	2.735
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		200		200		200			200			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ^c		0.333		0.252		0.501	0.602	0.554	0.704	0.555	0.481	0.459
繰返し 両振幅 幅の 繰返 回数	DA = 1%	17.6		9.5		68.9	1.5	0.9	0.5	0.9	2.5	3.0
	DA = 2%	30.5		13.8		99.3	5.0	3.5	0.9	3.0	7.5	6.5
	DA = 5%	45.7		19.1		123.9	13.5	10.9	3.0	10.0	23.9	15.6
	DA = 10%	—		23.7		—	—	—	—	—	—	—
	過剰間隙水圧比95% N _{u95}	22.0		19.0		38.0	4.0	2.0	2.0	3.0	6.0	5.0

試料番号		RE-3 (1) (φ100)				RE-3 (2) (φ100)				RE-3 (3) (φ100)			
サンプリング方法		GPサンプリング				GPサンプリング				GPサンプリング			
地表からの深度 (m)		2.80~4.23				4.40~5.70				7.45~15.56			
有効上載圧 (kN/m ²)		71				101				210			
標高 T.P. (m)		7.00~5.57				5.40~4.10				2.35~-5.76			
供試体No.		3	5	1'	2'	6	7	8	9	11	14	18	
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.706	2.688	2.708	2.698	2.703	2.765	2.756	2.750	2.709	2.717	2.728	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		200				200				200			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ^c		0.503	0.428	0.401	0.383	0.401	0.502	0.451	0.413	0.502	0.381	0.352	
繰返し 両振幅 幅の 繰返 回数	DA = 1%	1.0	0.9	4.0	2.0	18.7	1.0	1.5	2.0	0.7	0.8	3.5	
	DA = 2%	3.0	2.5	10.0	4.5	45.5	4.0	3.5	5.0	1.5	2.0	7.5	
	DA = 5%	5.5	5.5	26.4	8.5	75.9	11.1	9.5	14.7	3.5	4.5	18.7	
	DA = 10%	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	過剰間隙水圧比95% N _{u95}	4.0	2.0	10.0	4.0	—	—	—	—	—	5.0	6.0	

□: 試験結果を例示したケース

第 5.3-1 表(2/2) 液状化強度試験結果(1, 2 号埋戻土)

試料番号		RE-4 (φ100)		RE-5 (1) (φ100)			RE-5 (2) (φ100)				RE-5 (3) (φ100)				
サンプリング方法		GPサンプリング		GPサンプリング			GPサンプリング				GPサンプリング				
地表からの深度 (m)		9.75~9.95		3.03~3.43			3.43~10.05				4.15~6.60				
有効上載圧 (kN/m ²)		197		65			100				86				
標高 T.P. (m)		0.55~0.35		0.47~0.07			0.07~-6.55				-0.65~-3.1				
供試体No.		17		6	7		8	9	18		20	10	13	16	17
地盤材料の工学的分類		礫質土		礫質土	礫質土		礫質土	礫質土	礫質土		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.691		2.787	2.791		2.665	2.670	2.728		2.748	2.663	2.677	2.792	2.785
圧密応力 σ [~] c (kN/m ²)		200		200			200				200				
繰返応力振幅比 σ _d /2σ [~] o		0.705		0.702	0.908		0.349	0.503	0.653		0.756	0.402	0.553	0.450	0.433
繰返し載荷回数	繰返す際の両振幅	DA = 1%		1.5	11.8	0.5	25.7	9.5	0.9	0.2	10.5	0.8	2.0	2.0	
		DA = 2%		7.5	49.8	1.5	39.8	27.7	4.0	0.4	27.2	2.5	5.0	4.5	
		DA = 5%		19.8	99.0	5.5	56.7	53.6	18.6	1.0	67.1	8.5	12.8	11.3	
		DA = 10%		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅		5.0	—	2.0	35.0	48.0	1.0	1.0	15.0	3.0	3.0	4.0	

試料番号		RE-6 (φ100)				SH-1 (1) (φ300)				SH-1 (2) (φ300)					
サンプリング方法		GPサンプリング				GPサンプリング				GPサンプリング					
地表からの深度 (m)		7.50~14.15				1.55~2.15				2.90~3.55					
有効上載圧 (kN/m ²)		141				37				65					
標高 T.P. (m)		-4.00~-10.65				2.25~1.65				0.90~0.25					
供試体No.		16	17	18	20	1-1	1-4	1-5	1-6	2-2	2-3	2-4	2-6		
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	砂質土	砂質土	砂質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土		
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.751	2.639	2.618	2.724	2.745	2.761	2.760	2.736	2.725	2.711	2.716	2.712		
圧密応力 σ [~] c (kN/m ²)		200				200				200					
繰返応力振幅比 σ _d /2σ [~] o		0.404	0.503	0.374	0.361	0.311	0.235	0.200	0.212	0.311	0.359	0.440	0.328		
繰返し載荷回数	繰返す際の両振幅	DA = 1%		3.5	0.5	2.5	2.0	2.0	9.0	61.9	45.9	8.0	15.9	6.0	23.6
		DA = 2%		10.0	1.5	5.5	5.0	3.5	11.0	69.7	52.7	11.6	22.8	11.6	29.2
		DA = 5%		26.2	4.5	12.6	14.0	5.5	14.0	76.0	59.2	16.6	28.9	16.8	34.8
		DA = 10%		45.0	9.5	20.6	24.6	6.5	16.8	80.9	64.9	19.8	—	—	37.9
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅		10.0	2.0	5.0	6.0	—	—	64.0	55.0	15.0	22.0	—	28.0

試料番号		SH-1 (3) (φ300)					
サンプリング方法		GPサンプリング					
地表からの深度 (m)		4.40~5.00					
有効上載圧 (kN/m ²)		82					
標高 T.P. (m)		-0.6~-1.2					
供試体No.		3-2	3-3	3-4	3-5		
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土		
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.750	2.757	2.744	2.774		
圧密応力 σ [~] c (kN/m ²)		200					
繰返応力振幅比 σ _d /2σ [~] o		0.358	0.423	0.490	0.328		
繰返し載荷回数	繰返す際の両振幅	DA = 1%		10.9	4.0	1.5	14.9
		DA = 2%		21.1	10.0	5.5	24.5
		DA = 5%		40.1	21.7	15.3	39.6
		DA = 10%		60.7	—	27.9	61.8
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅		19.0	12.0	—	23.0

第 5.3-2 表 液状化強度試験結果(3号埋戻土)

試料番号		SW2-1 (φ100)				BF3-1 (φ100)	BF3-2 (φ100)		RE-7 (φ100)	RE-8 (φ100)		
サンプリング方法		GPサンプリング				GPサンプリング	GPサンプリング		GPサンプリング	GPサンプリング		
地表からの深度 (m)		10.05~11.30				8.60~8.80	18.65~19.05		8.05~8.25	9.78~10.48		
有効上載圧 (kN/m ²)		201				174	367		163	196		
標高 T.P. (m)		-0.35~-1.60				1.20~1.00	-1.95~-2.35		2.05~1.85	-0.08~-0.78		
供試体No.		12	13	14	15	11	21	22	21	19'	20'	21'
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	砂質土	礫質土	礫質土	礫質土
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.761				2.779	2.688		2.947	2.681	2.659	2.700
圧密応力 σ ⁻ _c (kN/m ²)		200				200	200		200	200		
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.757	0.651	0.542	0.435	0.785	0.670	0.651	0.336	0.500	0.399	0.376
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅											
	DA = 1%	1.0	0.9	3.5	48.8	0.4	1.5	4.5	5.5	0.9	3.0	4.0
	DA = 2%	5.5	4.0	8.5	65.7	0.9	9.5	14.8	10.7	3.0	7.5	9.0
	DA = 5%	15.0	14.6	22.7	104.9	6.5	19.2	32.8	17.3	8.0	19.6	20.7
	DA = 10%	28.7	42.8	44.8	—	13.7	25.4	55.5	21.8	—	—	—
過剰間隙水圧比95% N ₉₅		4.0	9.0	8.0	67.0	2.0	17.0	30.0	11.0	5.0	5.0	9.0

試料番号		RE-8'' (1) (φ100)				RE-8'' (2) (φ100)				SH-2 (φ300)			
サンプリング方法		GPサンプリング				GPサンプリング				GPサンプリング			
地表からの深度 (m)		11.12~11.80				12.25~13.45				4.77~8.40			
有効上載圧 (kN/m ²)		210				224				132			
標高 T.P. (m)		-1.32~-2.00				-2.45~-3.65				4.98~1.30			
供試体No.		3	4	1'	3'	5	6	4'	5'	1-5	1-6	3-1	3-4
地盤材料の工学的分類		礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土	礫質土
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.633	2.651	2.628	2.626	2.633	2.654	2.622	2.655	2.738	2.751	2.683	2.675
圧密応力 σ ⁻ _c (kN/m ²)		200				200				200			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.401	0.351	0.374	0.454	0.400	0.502	0.602	0.706	0.438	0.485	0.526	0.359
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅												
	DA = 1%	1.5	2.0	3.5	1.5	9.5	2.0	0.8	0.7	11.8	13.7	0.6	49.6
	DA = 2%	5.0	10.0	8.5	6.5	42.8	10.5	3.0	2.0	16.6	17.7	2.0	57.0
	DA = 5%	12.8	49.6	17.9	27.5	150.4	39.2	15.1	8.5	21.0	21.9	6.0	67.0
	DA = 10%	22.0	82.8	33.2	50.8	—	74.9	36.9	—	—	24.9	—	—
過剰間隙水圧比95% N ₉₅		8.0	5.0	8.0	7.0	18.0	6.0	3.0	2.0	22.0	20.0	—	52.0

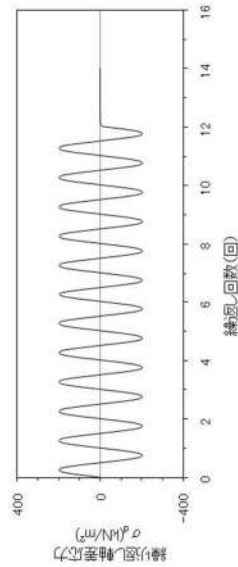
□: 試験結果を例示したケース

液状化強度試験結果(1, 2号埋戻土の非液状化の例)

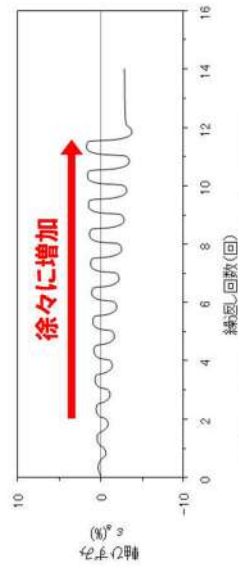
試験条件	
供試体	No.7
地表からの深度 (m)	4.40~5.70
有効上載圧 (kN/m ²)	101
圧密応力 σ'_c (kN/m ²)	200
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$	0.502
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	×
有効応力がゼロまで低下する。	×
液体状となり流動する。 (ひずみが増す。)	×
正のダイレイタンシー特性により せん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	○
液状化の判断	
非液状化	



試験後の供試体

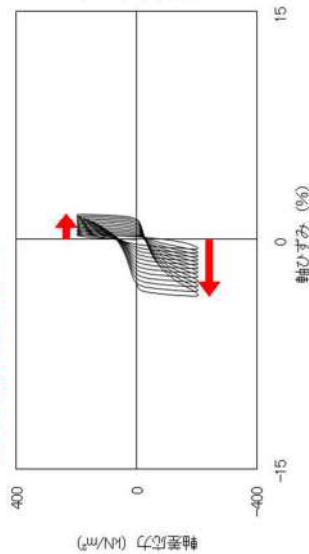


軸差応力-繰返し回数関係



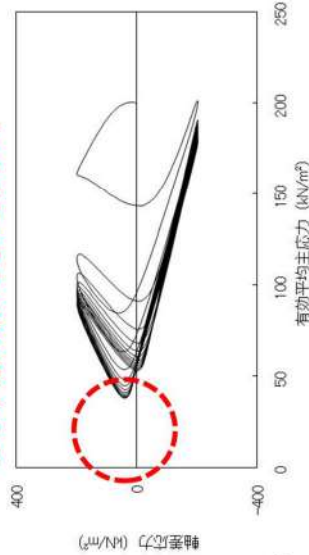
③④ 軸ひずみ-繰返し回数関係

せん断剛性が保持され、ひずみが急激に進行することがない。



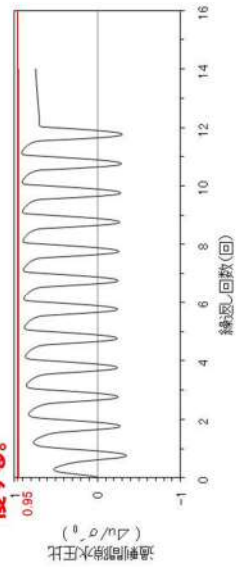
③④ 軸差応力-軸ひずみ関係

繰返し載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。



② 有効応力経路

過剰間隙水圧比は95%を超えない。
せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し、有効応力が回復する。



① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

液状化強度試験結果(3号埋戻土の繰返し軟化の例)

試験条件	
供試体	No.21
地表からの深度 (m)	8.05~8.25
有効上載圧 (kN/m ²)	163
圧密応力 σ'_c (kN/m ²)	200
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$	0.336
試験結果	
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。 (ひずみが増す。)	×
正のダイレイタンスー特性により せん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	○
液状化の判断	
繰返し軟化	



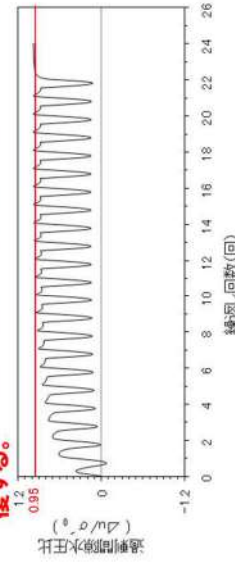
試験後の供試体

軸差応力-繰返し回数関係



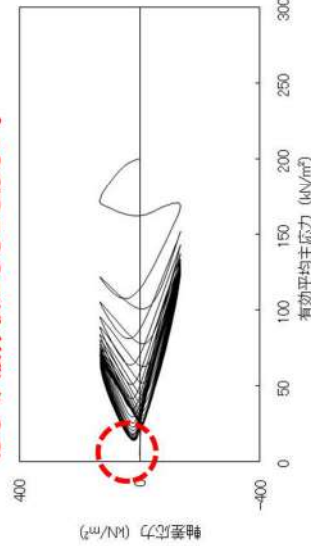
③④ 軸ひずみ-繰返し回数関係

過剰間隙水圧比は95%を超過する。
せん断応力作用時には、正のダイレイタンスー効果により、過剰間隙水圧は低下し、有効応力が回復する。



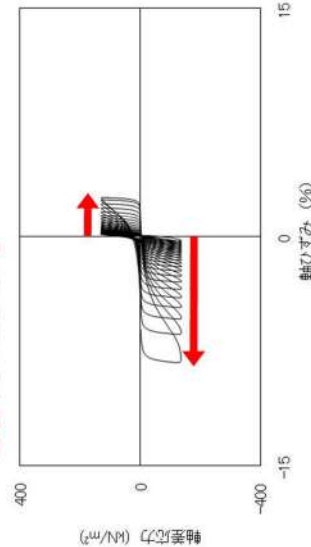
① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

繰返し載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。



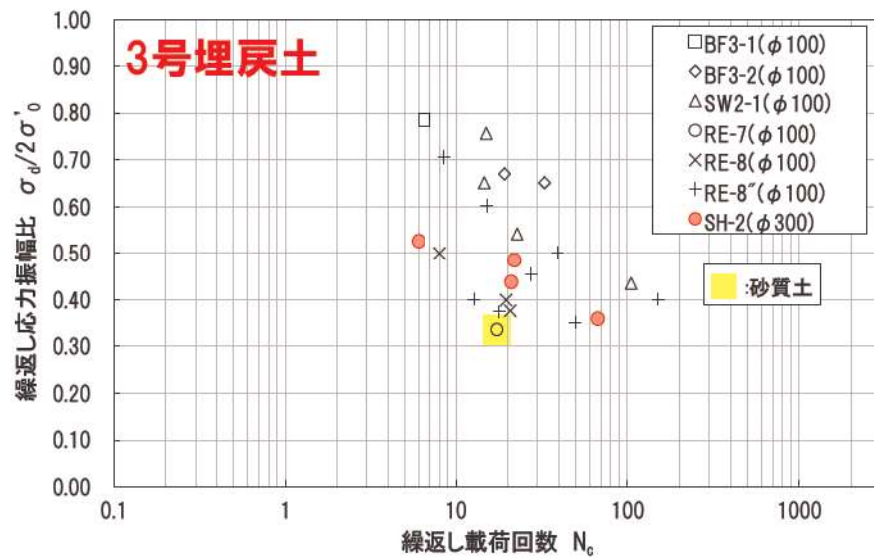
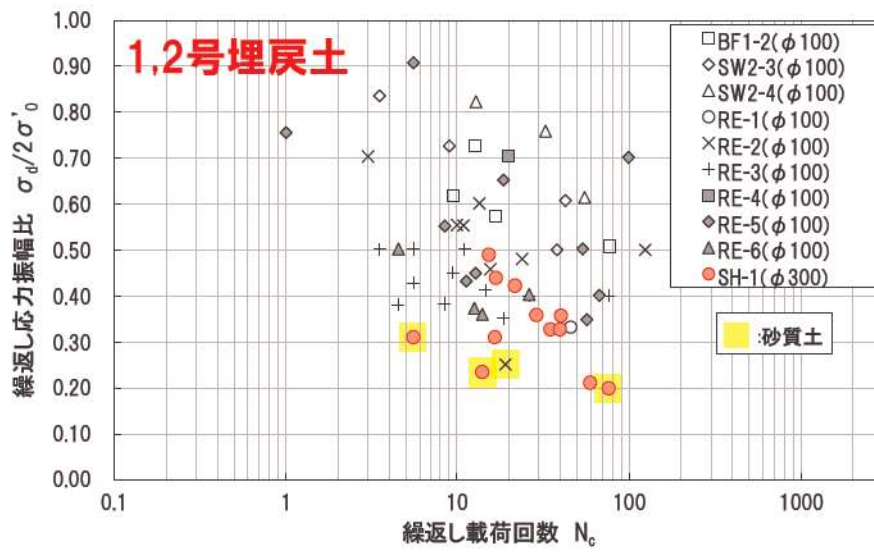
② 有効応力経路

せん断剛性が保持され、ひずみが急激に進行することがない。



③④ 軸差応力-軸ひずみ関係

第 5.3-4 図 3号埋戻土の液状化強度試験結果(RE-7 試料, 供試体 No. 21)



第 5.3-5 図 埋戻土の液状化強度試験結果

5.3.2 砂層の液状化強度試験結果

砂層に対する液状化強度試験の試験ケース，試験結果を第 5.3-3 表，第 5.3-4 表に示す。

なお，各試験ケースの個別データについては，添付資料 1 液状化強度試験結果データ集に示す。

砂層の液状化強度試験の結果は，すべての試験ケース(203 ケース)のうち，有効応力がゼロとなり液体状になるケースはほとんど無かった。また，繰返し载荷に伴い，ひずみは徐々に大きくなるが，急には増大せず，脆性的な破壊は生じなかった。繰返し载荷に伴い過剰間隙水圧が蓄積する傾向は見られたものの，せん断応力の作用によって有効応力は回復した。また，過剰間隙水圧比は，95%を超過しないケースと超過するケースが確認された。

砂層に対する液状化強度試験の結果は，一部が「液状化」に分類されるものの大部分が「繰返し軟化」に分類されることから，全体としては液体状となり支持力を完全に喪失するような事象は発生せず，ひずみが漸増するねばり強い挙動を示すことを確認した。

砂層の液状化強度試験結果の代表例として，FS-1-④ (A-2) 三軸試料の供試体 No. 1-38-7 図，第 5.3-8 図に示す。

FS-1-④ (A-2) 三軸試料の No. 1-38 供試体は，有効応力がゼロになることはなく，地盤が支持力を失い液状化するような事象は発生しなかった。繰返し荷重により，ひずみは漸増するものの，急に増大することはないと考えられる。また，過剰間隙水圧は 95%を超過せず，せん断応力作用時には正のダイレイタンスーの効果により，過剰間隙水圧は低下し，有効応力が回復していることから非液状化と判断される。

SW2-4' (1) 試料の No. 21 供試体は，有効応力がゼロになることはなく，地盤が支持力を失い液状化するような事象は発生しなかった。繰返し荷重により，ひずみは漸増するものの，急に増大することはないと考えられる。また，過剰間隙水圧は 95%を超過するものの，頭打ちとなり 100%に達しない。せん断応力作用時には正のダイレイタンスーの効果により，過剰間隙水圧は低下し，有効応力が回復していることから繰返し軟化と判断される。

SW-7-10 試料の No. 4 供試体は，過剰間隙水圧が 95%を超え，有効応力がほぼゼロとなり，繰返し荷重によりひずみが急に増大していることから液状化と判断される。

砂層の液状化強度試験結果に基づく繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数の関係を第 5.3-9 図に示す。

第 5.3-3 表(1/3) 液状化強度試験結果(As1 層)

試料番号		SW-4-1 (φ50)		SW-4-7 (φ50)		SW-4-10 (φ50)				SW-6-5 (φ50)									
サンプリング方法		トリプルチューブサンプリング		トリプルチューブサンプリング		トリプルチューブサンプリング				トリプルチューブサンプリング									
地表からの深度 (m)		21.90~22.80		27.65~28.65		30.65~31.65				25.70~26.70									
有効上載圧 (kN/m ²)		311		373		400				354									
標高 T.P. (m)		-12.20~-13.10		-17.95~-18.95		-20.95~-21.95				-16.00~-17.00									
供試体No.		2	4	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4						
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.719		2.754		2.789				2.749									
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		310		370		400				350									
繰返し載荷回数		0.292		0.243	0.188		0.233	0.250		0.226	0.182		0.202	0.257		0.213	0.192		0.171
繰返し載荷回数	繰返し載荷回数	繰返すみの	DA = 1%	0.9	17.0	40.7	0.4	2.5	1.5	41.7	27.7	0.8	10.8	19.7	66.8				
		繰返すみの	DA = 2%	2.0	28.8	44.9	0.9	4.0	2.5	48.7	33.0	2.0	13.6	21.6	70.7				
		繰返すみの	DA = 5%	4.5	40.9	50.9	4.0	6.0	4.0	55.5	39.7	5.0	18.9	24.7	76.8				
		繰返すみの	DA = 10%	7.5	43.9	57.1	10.3	8.5	6.0	59.7	43.5	11.6	35.6	28.9	90.3				
		繰返すみの	過剰間隙水圧比95% N ₉₅	5.0	37.0	49.0	4.0	6.0	4.0	52.0	33.0	5.0	17.0	24.0	73.0				

試料番号		SW-6-6 (φ50)				SW-6-7 (φ50)							
サンプリング方法		トリプルチューブサンプリング				トリプルチューブサンプリング							
地表からの深度 (m)		26.70~27.70				27.70~28.70							
有効上載圧 (kN/m ²)		363				372							
標高 T.P. (m)		-17.00~-18.00				-18.00~-19.00							
供試体No.		1	2	3	4	1	2	3	4				
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.743				2.744							
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		360				370							
繰返し載荷回数		0.256		0.213	0.160		0.182	0.255		0.212	0.160		0.187
繰返し載荷回数	繰返し載荷回数	繰返すみの	DA = 1%	1.5	4.5	125.9	22.9	0.6	5.5	48.6	24.5		
		繰返すみの	DA = 2%	3.0	5.5	131.9	25.5	1.5	7.5	53.5	27.8		
		繰返すみの	DA = 5%	5.5	8.0	138.7	28.8	2.5	10.6	58.8	33.6		
		繰返すみの	DA = 10%	10.0	10.5	144.7	31.5	4.0	13.8	63.7	40.9		
		繰返すみの	過剰間隙水圧比95% N ₉₅	5.0	7.0	135.0	27.0	3.0	10.0	55.0	31.0		

試料番号		SW-7-10 (φ50)				SW2-4 (2) (φ50)				SW2-4 (4) (φ50)					
サンプリング方法		トリプルチューブサンプリング				GPサンプリング				GPサンプリング					
地表からの深度 (m)		32.00~33.00				22.15~22.55				26.63~26.73					
有効上載圧 (kN/m ²)		412				259				298					
標高 T.P. (m)		-22.20~-23.20				-18.25~-18.65				-22.73~-22.83					
供試体No.		1	2	3	4	37	38	39	40	55					
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.718				2.704				2.738					
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		410				260				300					
繰返し載荷回数		0.236		0.196	0.218		0.171	0.295		0.264	0.232		0.250	0.220	
繰返し載荷回数	繰返し載荷回数	繰返すみの	DA = 1%	0.7	13.6	3.0	144.7	3.0	2.0	55.6	18.0	8.5			
		繰返すみの	DA = 2%	1.5	16.6	4.5	153.8	5.0	4.0	70.6	24.3	10.8			
		繰返すみの	DA = 5%	3.0	21.0	8.5	166.0	10.9	15.4	90.6	43.0	14.6			
		繰返すみの	DA = 10%	5.0	27.7	17.5	179.6	11.6	69.9	90.7	48.6	18.6			
		繰返すみの	過剰間隙水圧比95% N ₉₅	3.0	19.0	7.0	157.0	6.0	9.0	64.0	27.0	14.0			

□: 試験結果を例示したケース

第 5.3-3 表(2/3) 液状化強度試験結果(As1 層)

試料番号		FS-1-② (1) 三軸 (φ50)				FS-1-② (2) 三軸 (φ50)				FS-1-② (3) 三軸 (φ50)			
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング			
地表からの深度 (m)		18.21~18.41				18.36~18.56				18.51~18.71			
有効上載圧 (kN/m ²)		185				185				185			
標高 T.P. (m)		-14.41~-14.61				-14.56~-14.76				-14.71~-14.91			
供試体No.		1-7	2-6	3-6	4-6	1-8	2-7	3-7	4-7	1-9	2-8	3-8	4-8
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.669	2.681	2.692	2.658	2.687	2.687	2.653	2.662	2.626	2.640	2.686	2.659
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		190				190				190			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.251	0.216	0.298	0.391	0.253	0.301	0.447	0.348	0.455	0.254	0.358	0.549
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅												
	DA = 1%	5.5	39.0	1.5	0.5	9.5	3.5	0.3	1.5	0.3	20.0	1.5	0.3
	DA = 2%	8.5	45.0	3.0	1.5	14.0	7.5	0.7	3.0	0.6	27.0	4.5	0.7
	DA = 5%	14.0	56.0	6.0	4.5	28.0	15.0	2.5	8.0	2.0	40.0	13.0	3.0
	DA = 10%	24.0	62.0	11.0	7.5	41.0	25.0	4.5	13.0	4.5	61.0	17.0	6.5
過剰間隙水圧比95% N ₉₅		15.0	52.0	8.5	-	25.0	15.0	-	11.0	-	37.0	-	-

試料番号		FS-1-② (A-1) 三軸 (φ50)				FS-1-② (A-2) 三軸 (φ50)				FS-1-④ (A-2) 三軸 (φ50)			
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング			
地表からの深度 (m)		19.95~20.21				20.20~20.42				26.85~27.11			
有効上載圧 (kN/m ²)		200				200				260			
標高 T.P. (m)		-16.15~-16.41				-16.4~-16.62				-23.05~-23.31			
供試体No.		2-13	3-14	1-15	4-14	2-14	3-15	4-15	1-16	4-41	1-38	3-40	2-40
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.670	2.677	2.689	2.659	2.675	2.674	2.652	2.670	2.713	2.720	2.724	2.720
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		190				190				250			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.254	0.203	0.229	0.173	0.251	0.304	0.347	0.277	0.462	0.375	0.308	0.206
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅												
	DA = 1%	4.0	26.0	6.0	813.0	21.0	4.0	0.4	5.0	0.1	0.4	0.8	0.8
	DA = 2%	5.5	30.0	9.0	823.0	29.0	8.0	0.8	9.0	0.2	0.7	2.0	4.0
	DA = 5%	10.0	38.0	14.0	835.0	44.0	17.0	4.0	17.0	0.6	4.0	4.0	11.0
	DA = 10%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
過剰間隙水圧比95% N ₉₅		9.0	35.0	13.0	827.0	37.0	14.0	4.0	14.0	-	-	-	9.0

試料番号		FS-1-② (1) 中空 (φ70)				FS-1-② (2) 中空 (φ70)				FS-1-② (3) 中空 (φ70)			
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング			
地表からの深度 (m)		18.70~19.26				18.81~19.01				18.96~19.20			
有効上載圧 (kN/m ²)		188				188				188			
標高 T.P. (m)		-14.90~-15.46				-15.01~-15.21				-15.16~-15.40			
供試体No.		4-12	1-10	2-9	3-9	4-10	1-11	2-10	3-10	4-11	1-12	3-11	2-11
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.652	2.671	2.688	2.705	2.684	2.694	2.662	2.658	2.682	2.746	2.689	2.676
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		190				190				190			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.354	0.505	0.302	0.404	0.352	0.304	0.231	0.277	0.281	0.352	0.251	0.316
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅												
	DA = 1%	1.5	0.6	69.0	1.5	2.5	6.5	173.0	14.0	13.0	2.0	29.0	3.5
	DA = 2%	3.0	1.5	77.0	2.5	6.0	8.5	181.0	17.0	16.0	3.0	33.0	5.0
	DA = 5%	5.5	3.5	90.0	8.5	12.0	16.0	191.0	27.0	22.0	6.0	40.0	8.5
	DA = 10%	11.0	11.0	112.0	26.0	22.0	32.0	205.0	48.0	32.0	13.0	54.0	15.0
過剰間隙水圧比95% N ₉₅		6.0	5.0	87.0	7.0	10.0	13.0	186.0	22.0	20.0	6.0	37.0	8.0

□: 試験結果を例示したケース

第 5.3-3 表(3/3) 液状化強度試験結果(As1 層)

試料番号		FS-1-④ (1) 中空 (φ70)				FS-1-④ (2) 中空 (φ70)				FS-1-④ (3) 中空 (φ70)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		26.06~26.36				26.21~26.51				26.44~26.68				
有効上載圧 (kN/m ²)		255				255				255				
標高 T.P. (m)		-22.26~-22.56				-22.41~-22.71				-22.64~-22.88				
供試体No.		2-36	1-34	4-37	3-36	2-37	1-35	4-38	3-37	1-36	4-39	3-38	2-38	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.647	2.706	2.724	2.680	2.674	2.684	2.695	2.730	2.678	2.706	2.719	2.696	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		250				250				250				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.301	0.390	0.346	0.323	0.354	0.428	0.392	0.369	0.296	0.445	0.252	0.191	
繰返し載荷回数	繰返すみの両振幅	DA = 1%	117.0	1.0	4.0	4.5	46.0	0.2	3.0	4.0	4.0	0.2	10.0	272.0
		DA = 2%	132.0	2.5	6.5	7.0	62.0	0.6	5.0	7.0	5.0	0.4	13.0	279.0
		DA = 5%	151.0	4.0	10.0	12.0	92.0	1.5	8.0	15.0	7.0	1.0	15.0	284.0
		DA = 10%	175.0	6.5	15.0	20.0	136.0	3.5	12.0	33.0	9.0	2.0	18.0	288.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	147.0	5.0	11.0	12.0	87.0	3.0	10.0	16.0	8.0	-	15.0	282.0
試料番号		FS-2-③ (1) 三軸 (φ50)				FS-2-③ (2) 三軸 (φ50)				FS-2-③ (3) 三軸 (φ50)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		22.19~22.46				22.39~22.70				22.59~22.90				
有効上載圧 (kN/m ²)		326				326				326				
標高 T.P. (m)		-12.39~-12.66				-12.59~-12.90				-12.79~-13.10				
供試体No.		1-7	2-5	3-5	4-8	1-8	2-6	4-9	3-6	1-9	2-7	4-10	3-7	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.710	2.723	2.711	2.702	2.675	2.689	2.675	2.695	2.682	2.688	2.702	2.694	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		330				330				330				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.301	0.252	0.197	0.227	0.251	0.153	0.202	0.223	0.250	0.202	0.152	0.177	
繰返し載荷回数	繰返すみの両振幅	DA = 1%	0.5	10.0	35.0	8.0	2.0	1062.0	15.0	14.0	2.0	10.0	87.0	37.0
		DA = 2%	1.0	13.0	38.0	11.0	3.0	1071.0	18.0	17.0	2.5	12.0	90.0	40.0
		DA = 5%	4.0	18.0	44.0	15.0	7.0	1088.0	24.0	23.0	4.0	15.0	94.0	44.0
		DA = 10%	8.0	23.0	53.0	21.0	14.0	1104.0	30.0	27.0	7.0	18.0	101.0	53.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	4.0	15.0	39.0	12.0	6.0	1073.0	20.0	20.0	4.0	13.0	90.0	41.0
試料番号		FS-2-⑤ (1) 中空 (φ70)				FS-2-⑤ (1) 中空 (φ70)				FS-2-⑤ (2) 中空 (φ70)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		24.42~24.95				27.98~28.23				28.13~28.48				
有効上載圧 (kN/m ²)		345				379				379				
標高 T.P. (m)		-14.62~-15.15				-18.18~-18.43				-18.33~-18.68				
供試体No.		1-16	1-15	4-16	3-13	4-32	3-30	2-31	1-32	4-33	3-31	1-33	2-33	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.749	2.735	2.720	2.755	2.698	2.741	2.719	2.737	2.750	2.695	2.737	2.736	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		330				380				380				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.351	0.301	0.254	0.277	0.300	0.251	0.278	0.402	0.257	0.354	0.303	0.274	
繰返し載荷回数	繰返すみの両振幅	DA = 1%	6.0	8.0	25.0	58.0	6.5	42.0	44.0	0.6	79.0	2.5	2.0	43.0
		DA = 2%	8.5	11.0	29.0	68.0	8.5	52.0	50.0	1.5	84.0	4.0	3.0	45.0
		DA = 5%	14.0	17.0	35.0	84.0	13.0	73.0	59.0	3.0	89.0	8.0	5.0	48.0
		DA = 10%	26.0	30.0	44.0	116.0	18.0	118.0	68.0	5.0	94.0	18.0	6.5	50.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	16.0	17.0	34.0	80.0	14.0	66.0	58.0	4.0	90.0	10.0	6.0	49.0

第 5.3-4 表(1/3) 液状化強度試験結果(As2 層)

試料番号		SW-6-2 (φ 50)			SW2-1 (T5) (φ 50)			SW2-4 (1) (φ 50)		SW2-4 (3) (φ 50)			
サンプリング方法		GPサンプリング			トリプルチューブサンプリング			GPサンプリング		GPサンプリング			
地表からの深度 (m)		23.40~24.40			36.00~37.00			18.15~18.35		23.05~24.03			
有効上載圧 (kN/m ²)		334			448			223		255			
標高 T.P. (m)		-13.70~-14.70			-26.30~-27.30			-14.25~-14.45		-19.15~-20.13			
供試体No.		2	3	4	1	2	3	20	21	42	43	44	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.729			2.794			2.746		2.728			
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		330			450			220		260			
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.214	0.285	0.186	0.294	0.318	0.234	0.309	0.277	0.332	0.297	0.316	
繰返し載荷回数	繰返す際の振幅	DA = 1%	16.6	1.5	25.0	0.8	0.9	30.7	4.5	6.5	0.8	5.0	5.0
		DA = 2%	19.9	2.5	28.7	3.5	5.0	42.8	8.0	10.0	2.5	18.4	13.0
		DA = 5%	25.8	4.5	35.1	12.9	22.9	49.6	17.6	17.5	6.0	74.2	29.7
		DA = 10%	-	6.5	46.2	-	57.6	49.7	-	26.7	11.5	-	39.6
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	21.0	4.0	31.0	8.0	11.0	50.0	10.0	12.0	5.0	46.0	17.0

試料番号		FS-1-③ (1) 三軸 (φ 50)			FS-1-③ (2) 三軸 (φ 50)			FS-1-③ (3) 三軸 (φ 50)		
サンプリング方法		凍結サンプリング			凍結サンプリング			凍結サンプリング		
地表からの深度 (m)		21.99~22.44			22.47~22.70			22.62~22.85		
有効上載圧 (kN/m ²)		221			221			221		
標高 T.P. (m)		-18.29~-18.74			-18.44~-19.00			-18.92~-19.15		
供試体No.		1-18	3-17		1-19	2-18		1-20	2-19	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.692	2.694		2.681	2.678		2.682	2.668	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		220			220			220		
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.551	0.453		0.437	0.356		0.376	0.340	
繰返し載荷回数	繰返す際の振幅	DA = 1%	0.6	0.6	0.6	7.0	0.6	0.6		
		DA = 2%	0.6	0.7	0.6	21.0	0.7	0.6		
		DA = 5%	0.8	10.0	0.8	56.0	6.0	0.7		
		DA = 10%	6.0	16.0	7.0	62.0	21.0	3.0		
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	-	-	4.0	49.0	8.0	2.0		

試料番号		FS-1-④ (1) 三軸 (φ 50)				FS-1-④ (2) 三軸 (φ 50)				FS-1-④ (3) 三軸 (φ 50)		
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング		
地表からの深度 (m)		25.12~25.49				25.27~25.64				25.42~25.79		
有効上載圧 (kN/m ²)		247				247				247		
標高 T.P. (m)		-21.42~-21.79				-21.57~-21.94				-21.72~-22.09		
供試体No.		1-30	2-32	3-31	4-32	1-31	2-33	3-32	4-33	1-32	3-33	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.712	2.690	2.718	2.712	2.701	2.708	2.697	2.786	2.764	2.690	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		250				250				250		
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.405	0.454	0.376	0.502	0.409	0.306	0.562	0.351	0.353	0.402	
繰返し載荷回数	繰返す際の振幅	DA = 1%	1.0	0.5	0.8	0.1	0.4	34.0	0.1	0.6	2.5	0.3
		DA = 2%	8.5	0.9	4.5	0.3	0.8	50.0	0.3	1.5	8.5	0.6
		DA = 5%	28.0	4.5	17.0	0.7	3.5	71.0	0.7	8.5	20.0	2.0
		DA = 10%	31.0	11.0	34.0	2.5	5.5	96.0	2.0	20.0	38.0	5.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	-	-	20.0	2.5	-	63.0	2.5	8.5	20.0	4.0

試料番号		FS-1-③ (A-1) 三軸 (φ 50)				FS-1-④ (A-1) 三軸 (φ 50)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		22.06~22.55				24.34~24.95				
有効上載圧 (kN/m ²)		215				238				
標高 T.P. (m)		-18.36~-18.85				-20.64~-21.25				
供試体No.		2-17	1-17	3-28	4-27	1-25	2-27	4-30	4-29	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.670	2.659	2.696	2.750	2.719	2.726	2.729	2.723	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		220				250				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.467	0.522	0.307	0.350	0.413	0.513	0.407	0.459	
繰返し載荷回数	繰返す際の振幅	DA = 1%	0.5	0.3	0.7	0.7	0.7	0.8	0.4	0.4
		DA = 2%	1.0	0.6	5.0	8.0	10.0	10.0	0.8	0.8
		DA = 5%	10.0	6.0	21.0	24.0	56.0	44.0	5.0	6.0
		DA = 10%	-	-	-	-	-	-	-	-
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	-	-	18.0	19.0	51.0	43.0	-	-

□: 試験結果を例示したケース

第 5.3-4 表(2/3) 液状化強度試験結果(As2 層)

試料番号		FS-1-③ (1) 中空 (φ70)				FS-1-③ (2) 中空 (φ70)				FS-1-③ (3) 中空 (φ70)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		23.06~23.36				23.29~23.81				23.70~23.96				
有効上載圧 (kN/m ²)		231				231				231				
標高 T.P. (m)		-19.36~-19.66				-19.59~-20.11				-20.00~-20.26				
供試体No.		4-22	2-21	3-21	2-20	3-23	2-22	3-22	2-24	4-23	1-21	3-25	2-25	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.751	2.715	2.716	2.718	2.737	2.746	2.724	2.737	2.742	2.750	2.741	2.730	
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		220				220				220				
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.497	0.593	0.396	0.351	0.542	0.326	0.403	0.445	0.494	0.597	0.551	0.686	
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	3.0	0.7	4.0	60.0	0.6	81.0	4.0	1.5	8.5	0.6	2.0	0.2
		DA = 2%	8.0	2.0	8.5	75.0	2.0	97.0	8.0	4.0	23.0	1.5	8.0	0.6
		DA = 5%	21.0	8.5	22.0	97.0	13.0	123.0	17.0	10.0	60.0	17.0	48.0	2.0
		DA = 10%	52.0	24.0	48.0	130.0	99.0	199.0	32.0	26.0	-	91.0	142.0	4.5
		過剰間隙水圧比95% N _{US}	26.0	16.0	22.0	95.0	23.0	120.0	18.0	13.0	61.0	30.0	56.0	4.0

試料番号		FS-2-④ (1) 三軸 (φ50)			FS-2-④ (2) 三軸 (φ50)			FS-2-④ (3) 三軸 (φ50)		
サンプリング方法		凍結サンプリング			凍結サンプリング			凍結サンプリング		
地表からの深度 (m)		26.53~26.75			26.65~26.90			26.98~27.13		
有効上載圧 (kN/m ²)		366			366			369		
標高 T.P. (m)		-16.73~-16.95			-16.85~-17.10			-17.18~-17.33		
供試体No.		1-23	3-21		1-24	2-23	3-22	4-26		
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.728	2.733		2.790	2.930	2.911	3.007		
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		360			360			360		
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.203	0.507		0.512	0.402	0.653	0.599		
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	147.0	0.4	0.4	0.3	0.2	0.7		
		DA = 2%	154.0	0.8	0.8	0.7	0.5	3.5		
		DA = 5%	164.0	9.5	6.0	8.5	3.5	32.0		
		DA = 10%	168.0	11.0	12.0	17.0	4.5	44.0		
		過剰間隙水圧比95% N _{US}	161.0	-	12.0	12.0	-	38.0		

試料番号		FS-2-⑥ (1) 三軸 (φ50)			FS-2-⑥ (2) 三軸 (φ50)			FS-2-⑥ (3) 三軸 (φ50)		
サンプリング方法		凍結サンプリング			凍結サンプリング			凍結サンプリング		
地表からの深度 (m)		30.43~30.60			30.58~30.90			30.73~31.05		
有効上載圧 (kN/m ²)		403			403			403		
標高 T.P. (m)		-20.63~-20.80			-20.78~-21.10			-20.93~-21.25		
供試体No.		1-47	3-43		1-48	3-44	3-45	1-49	3-46	4-48
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.813	2.750		2.836	2.767	2.730	2.702	2.721	2.691
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		400			400			400		
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.255	0.353		0.377	0.612	0.454	0.255	0.605	0.451
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	8.5	0.6	0.6	0.3	0.2	3.5	0.2	0.4
		DA = 2%	40.0	2.5	3.5	0.6	0.4	5.5	0.5	0.8
		DA = 5%	170.0	18.0	30.0	4.5	0.6	10.0	2.5	11.0
		DA = 10%	-	20.0	36.0	11.0	4.0	14.0	7.0	13.0
		過剰間隙水圧比95% N _{US}	108.0	-	-	9.5	-	12.0	-	-

試料番号		FS-2-④ (A-1) 三軸 (φ50)			FS-2-⑤ (A-1) 三軸 (φ50)			FS-2-⑥ (A-1) 三軸 (φ50)			
サンプリング方法		凍結サンプリング			凍結サンプリング			凍結サンプリング			
地表からの深度 (m)		26.98~27.23			28.83~29.13			31.35~31.62			
有効上載圧 (kN/m ²)		369			385			409			
標高 T.P. (m)		-17.18~-17.43			-19.03~19.33			-21.55~-21.82			
供試体No.		1-26	3-24	2-25	1-37	3-35	4-38	4-50	1-53	3-48	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.826	2.793	2.739	2.748	2.760	2.689	2.750	2.692	2.806	
圧密応力 σ ⁻ c (kN/m ²)		360			380			400			
繰返応力振幅比 σ _d /2σ ⁻ _o		0.511	0.414	0.462	0.461	0.307	0.262	0.411	0.356	0.336	
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	0.4	0.8	0.5	0.6	0.9	127.0	0.3	0.3	0.3
		DA = 2%	0.9	12.0	3.0	3.0	5.0	166.0	0.6	0.5	0.7
		DA = 5%	7.0	29.0	21.0	15.0	15.0	208.0	4.0	4.0	6.0
		DA = 10%	-	-	-	-	-	208.0	-	-	-
		過剰間隙水圧比95% N _{US}	-	-	-	-	15.0	-	-	-	-

第 5.3-4 表(3/3) 液状化強度試験結果(As2 層)

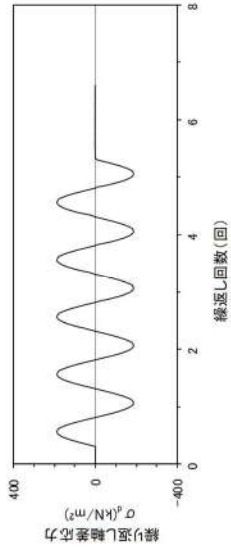
試料番号		FS-2-④ (1) 中空 (φ70)				FS-2-④ (2) 中空 (φ70)				FS-2-④ (3) 中空 (φ70)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		26.01~26.23				26.16~26.45				25.90~26.60				
有効上載圧 (kN/m ²)		362				362				362				
標高 T.P. (m)		-16.21~-16.43				-16.36~-16.65				-16.10~-16.80				
供試体No.		4-21	2-19	3-18	1-20	4-22	2-20	1-21	3-19	2-21	3-17	4-23	3-20	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.708	2.723	2.743	2.713	2.736	2.717	2.746	2.707	2.732	2.696	2.710	2.715	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		360				360				360				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.503	0.415	0.457	0.353	0.454	0.555	0.507	0.478	0.512	0.427	0.455	0.405	
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	0.6	3.5	1.5	7.5	9.0	0.8	0.8	2.0	0.5	4.0	0.9	21.0
		DA = 2%	1.5	8.0	4.0	11.0	30.0	2.0	2.0	7.5	1.0	8.0	1.5	26.0
		DA = 5%	3.5	23.0	18.0	16.0	81.0	6.5	8.0	30.0	3.0	19.0	4.0	33.0
		DA = 10%	8.0	58.0	58.0	22.0	168.0	18.0	31.0	-	6.0	45.0	6.5	43.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	7.0	29.0	25.0	17.0	88.0	11.0	14.0	41.0	-	23.0	6.0	35.0
試料番号		FS-2-⑥ (1) 中空 (φ70)				FS-2-⑥ (2) 中空 (φ70)				FS-2-⑥ (3) 中空 (φ70)				
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング				凍結サンプリング				
地表からの深度 (m)		29.98~30.18				30.13~30.33				30.28~30.56				
有効上載圧 (kN/m ²)		398				398				398				
標高 T.P. (m)		-20.18~-20.38				-20.33~-20.53				-20.48~-20.76				
供試体No.		1-44	3-40	4-44	2-43	1-45	3-41	4-45	2-44	1-46	3-42	2-45	4-46	
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.723	2.755	2.696	2.748	2.709	2.714	2.747	2.773	2.730	2.764	2.769	2.740	
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		400				400				400				
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.407	0.353	0.383	0.456	0.405	0.358	0.385	0.459	0.406	0.338	0.377	0.467	
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	2.5	30.0	10.0	2.0	2.0	28.0	3.0	1.5	2.0	14.0	56.0	0.7
		DA = 2%	6.0	44.0	25.0	5.0	5.5	43.0	6.5	4.0	4.0	20.0	86.0	2.0
		DA = 5%	16.0	75.0	64.0	13.0	12.0	76.0	16.0	11.0	9.0	32.0	139.0	6.0
		DA = 10%	34.0	121.0	136.0	30.0	24.0	135.0	40.0	28.0	19.0	50.0	-	19.0
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	22.0	74.0	68.0	19.0	17.0	79.0	21.0	16.0	12.0	34.0	140.0	11.0
試料番号		FS-2-⑥ (4) 中空 (φ70)				FS-2-⑥ (5) 中空 (φ70)								
サンプリング方法		凍結サンプリング				凍結サンプリング								
地表からの深度 (m)		34.35~34.55				34.50~34.70								
有効上載圧 (kN/m ²)		437				437								
標高 T.P. (m)		-24.55~-24.75				-24.70~-24.90								
供試体No.		4-68	2-70	3-66	1-71	4-69	2-71	3-67	1-72					
土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)		2.739	2.827	2.796	2.762	2.709	2.768	2.693	2.793					
圧密応力 σ ^c (kN/m ²)		440				440								
繰返応力振幅比 σ _a /2σ ^c		0.411	0.357	0.384	0.309	0.357	0.305	0.256	0.491					
繰返し載荷回数	軸ひずみの両振幅	DA = 1%	2.0	74.0	1.5	9.5	2.5	6.0	2041.0	0.5				
		DA = 2%	4.5	117.0	3.5	14.0	5.0	9.0	2290.0	0.9				
		DA = 5%	9.0	232.0	7.0	26.0	12.0	17.0	2511.0	3.0				
		DA = 10%	21.0	344.0	13.0	55.0	34.0	30.0	-	8.0				
		過剰間隙水圧比95% N ₉₅	14.0	204.0	10.0	28.0	17.0	19.0	2407.0	6.0				

液状化強度試験結果 (As1 層の非液状化の例)

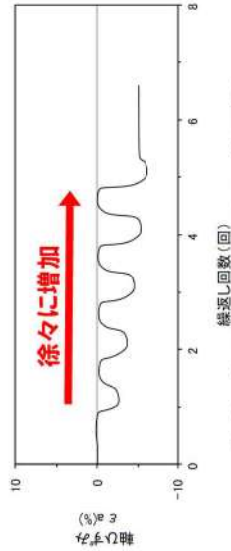
試験条件	
供試体	No.1-38
地表からの深度 (m)	26.85~27.11
有効上載圧 (kN/m ²)	260
圧密応力 σ'_c (kN/m ²)	250
繰返し応力振幅比 $\sigma_d / 2\sigma'_0$	0.375
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	×
有効応力がゼロまで低下する。 液体状となり流動する。 (ひずみが増す。)	×
正のダイレイタンシー特性により せん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	○
液状化の判断	
非液状化	



試験後の供試体

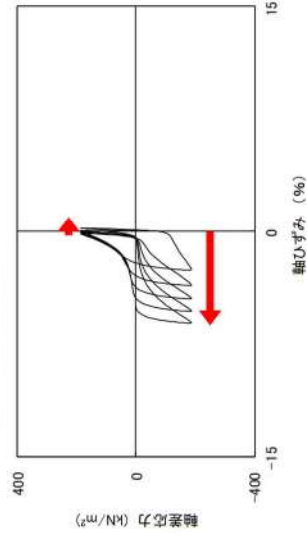


軸差応力-繰返し回数関係



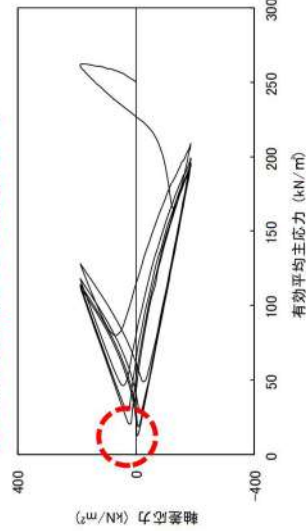
③④ 軸ひずみ-繰返し回数関係

せん断剛性が保持され、ひずみが急激に進行することがない。



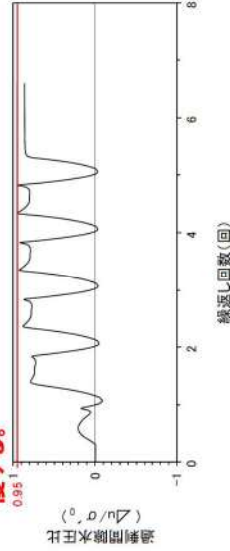
③④ 軸差応力-軸ひずみ関係

繰返し載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。



② 有効応力経路

過剰間隙水圧比は95%を超過しない。
せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し、有効応力が回復する。



① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

液状化強度試験結果 (As1 層の液状化の例)

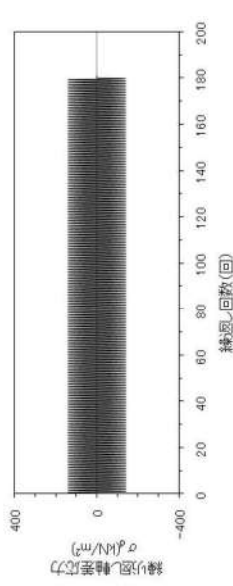
試験条件	
供試体	No.4
地表からの深度 (m)	32.00~33.00
有効上載圧 (kN/m^2)	412
圧密応力 σ'_c (kN/m^2)	410
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$	0.171
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○
有効応力がゼロまで低下する。	×
液体状となり流動する。 (ひずみが急増する。)	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	×
液状化の判断	
液状化	



試験後の供試体

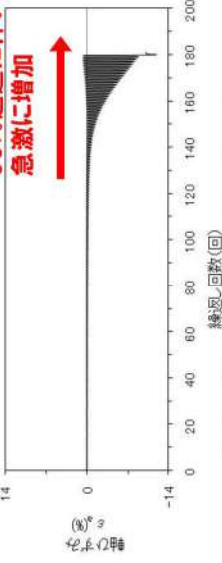
※有効応力がゼロまで低下していないが保守的に液状化に区分した。

4 条-別紙 9-84



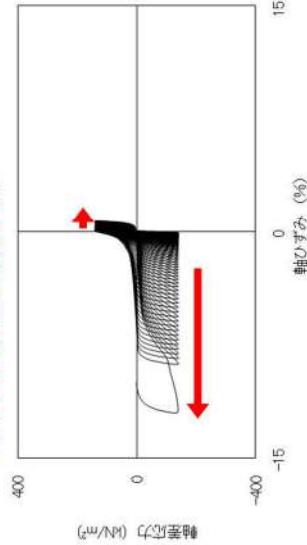
③④ 軸差応力-繰返し回数関係

過剰間隙水圧比の
95%超過に伴い、
急激に増加



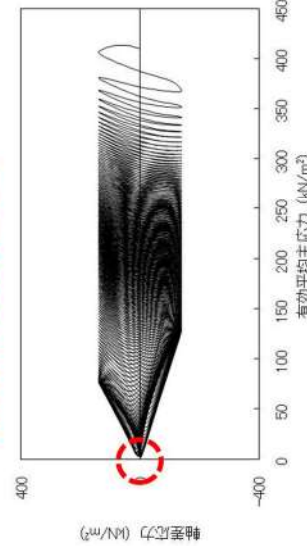
③④ 軸ひずみ-繰返し回数関係

ひずみが急激に進行する。



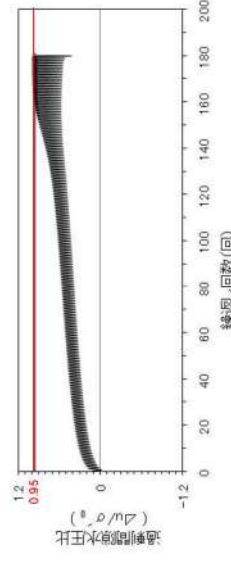
③④ 軸差応力-軸ひずみ関係

有効応力がほぼゼロになる。



② 有効応力経路

過剰間隙水圧比は95%を超過する。



① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

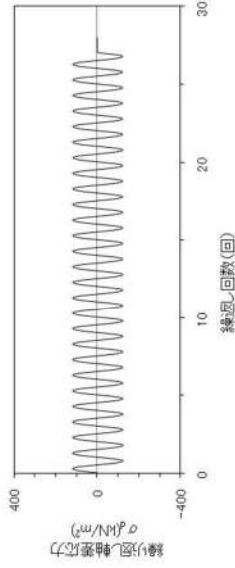
第 5.3-7 図 As1 層の液状化強度試験結果 (SW7-10, 供試体 No. 4)

液状化強度試験結果 (As2 層の繰返し軟化の例)

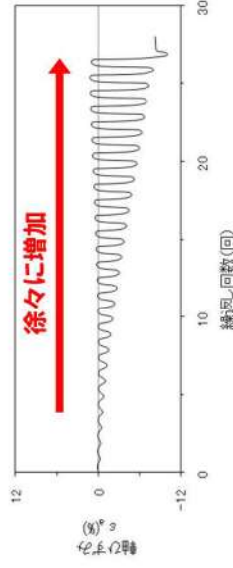
試験条件	
供試体	No.21
地表からの深度 (m)	18.15~18.35
有効上載圧 (kN/m ²)	223
圧密応力 σ'_c (kN/m ²)	220
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$	0.277
試験結果	
間隙水圧が上昇・蓄積する。 (過剰間隙水圧比95%を超える。)	○
有効応力がゼロまで低下する。	×
液体状となり流動する。 (ひずみが増加する。)	×
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。 (有効応力が回復する。)	○
繰返し軟化	
液状化の判断	
繰返し軟化	



試験後の供試体

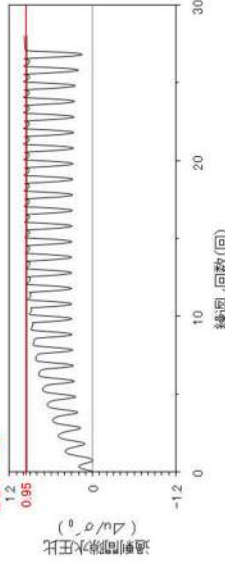


軸差応力-繰返し回数関係



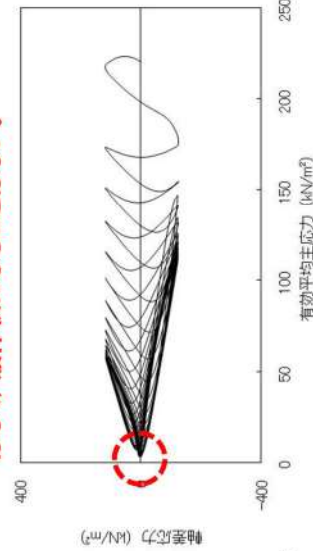
③④ 軸ひずみ-繰返し回数関係

過剰間隙水圧比は95%を超過する。せん断応力作用時には、正のダイレイタンシー効果により、過剰間隙水圧は低下し、有効応力が回復する。



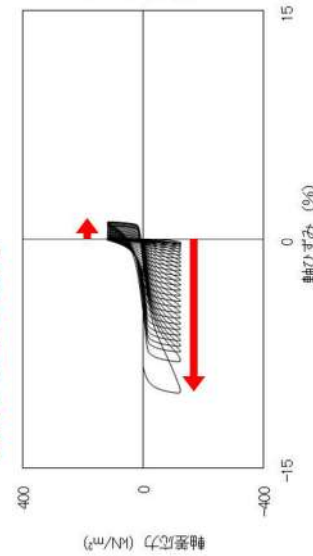
① 過剰間隙水圧比-繰返し回数関係

繰返し載荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。

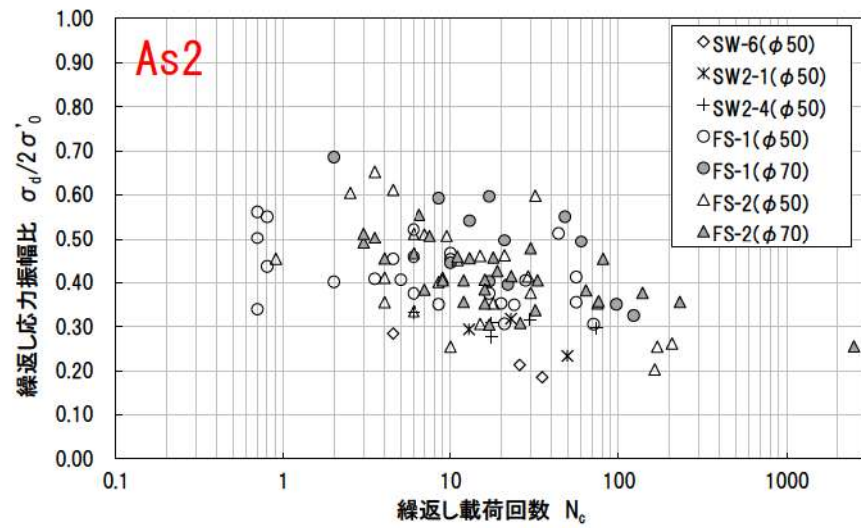
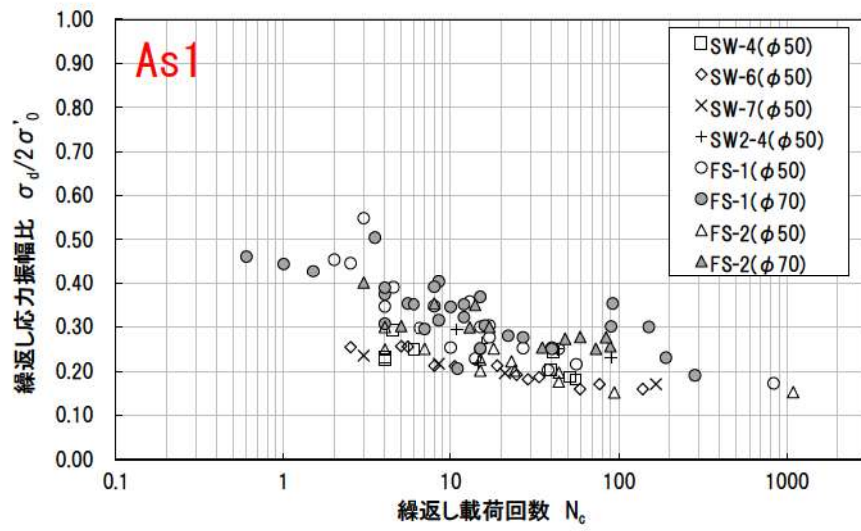


② 有効応力経路

せん断剛性が保持され、ひずみが急激に進行することがない。



③④ 軸差応力-軸ひずみ関係



第 5.3-9 図 砂層の液状化強度試験結果

5.4 基準地震動に対する液状化強度試験の妥当性確認

敷地で採取された試料を用いて実施した液状化強度試験が基準地震動 S_s 相当の地盤の状態(繰返し応力及び繰返し回数)を模擬していることを確認するため、累積損傷度理論(吉見(1991))を適用し、不規則波である基準地震動 S_s によって発生する地盤のせん断応力と等価な一定せん断応力及びその繰返し回数を求め、試験結果との比較を実施した。

累積損傷度理論に基づく評価フローを第 5.4-1 図、累積損傷度理論による等価繰返し回数の評価方法を第 5.4-2 図に示す。

基準地震動 S_s の一次元地震応答解析を実施する位置については、防潮堤位置の土層縦断図より設定するものとし、1,2 号埋戻土及び 3 号埋戻土のそれぞれから埋戻土層厚が最大層厚、平均層厚となる断面を設定する(第 5.4-3 図参照)。

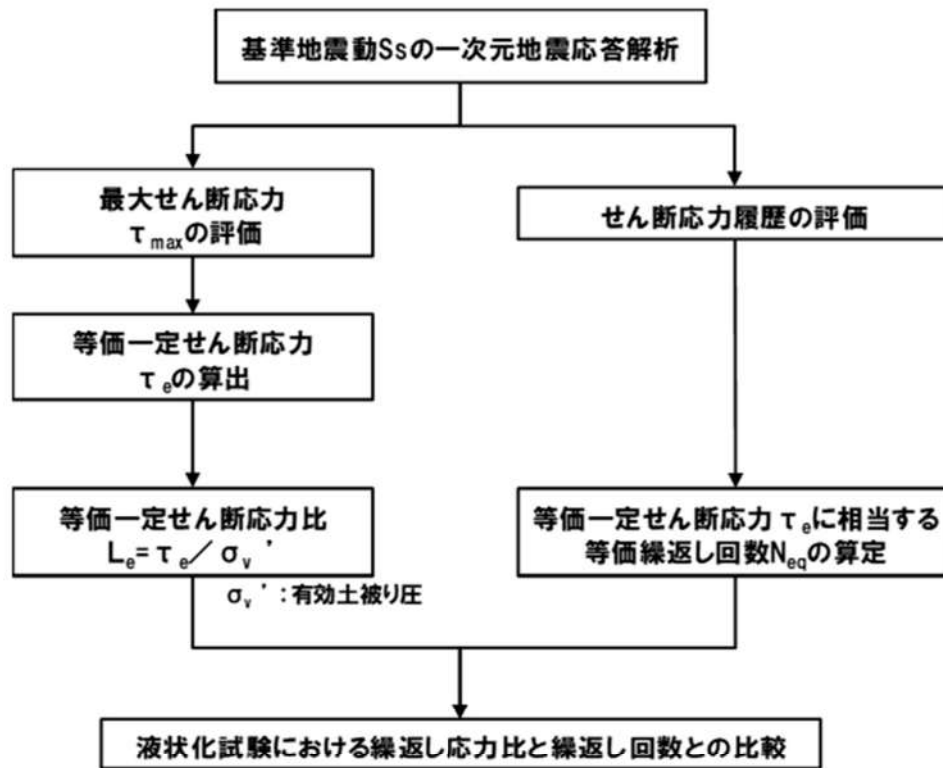
選定した位置での地盤モデルを用いて一次元地震応答解析を実施し、各位置における等価一定せん断応力と等価繰返し回数を算出した。一次元地震応答解析の解析モデルを第 5.4-1 表に、算出結果を第 5.4-2 表、第 5.4-3 表及び第 5.4-4 図～第 5.4-7 図に示す。なお、液状化強度試験は等方応力状態であり、実地盤(異方応力状態)で算出される応答解析と比較するため、静止土圧係数(K_0 : 一般値 0.5)を用いて、液状化強度試験から得られるせん断応力を補正した。

$$\tau = R \times (1+2K_0) / 3 \times \sigma_v' = R \times 2 / 3 \times \sigma_v'$$

R: 液状化強度比, σ_v' : 有効土被り圧

評価結果より、せん断応力比と等価繰返し回数は、すべての位置において液状化強度試験で実施したせん断応力比及び繰返し回数と同程度であり、おおむね基準地震動 S_s 相当の試験が実施できていることを確認した。

また、多くの基準地震動 S_s で地盤に発生するせん断応力比は、液状化強度試験の繰返し回数の上限値である 200 回に対応するせん断応力比以下となっている。この程度のせん断応力比はほとんど破壊に寄与しないため、非液状化と判断され、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化強度試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施できていることを確認した。



第 5.4-1 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価フロー

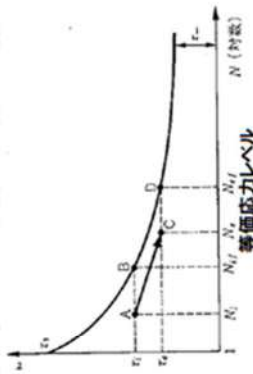
累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法:吉見(1991)を参考

繰返し荷重 τ_i が N_i 回作用したことよると同等の効果(下図のA点)を、別の応力レベル τ_e によって得るために必要な繰返し回数 N_e は以下のように定義される。

$$N_e = \frac{N_i \cdot N_{ef}}{N_{if}}$$

ここに、

- N_i : せん断応力 τ_i の繰返し回数
- N_{if} : せん断強度 τ_i での繰返し回数
- N_e : せん断応力 τ_e の繰返し回数
- N_{ef} : τ_e なる等価振幅応力を加えた場合の破壊までの繰返し回数



τ_e は、不規則波中の最大振幅の65%の値とする。

$$\tau_e = 0.65 \tau_{max}$$

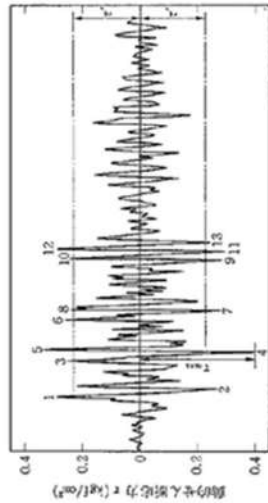
複数の τ_i を有する不規則波全体を τ_e なる単一応力レベルでの等価繰返しせん断波で置き換えるための等価繰返し回数 N_{eq} は、次式で求められる。

$$N_{eq} = \sum N_e = N_{ef} \sum \frac{N_i}{N_{if}}$$

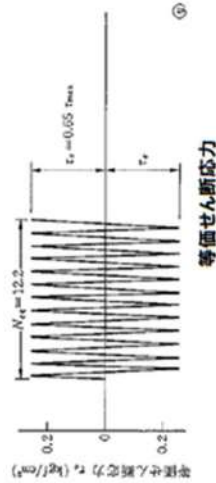
あるレベル未満のせん断応力は、ほとんど破壊に寄与しない。今回の検討では、液化化強度試験の最大繰返し回数200回に相当するせん断応力 τ' を閾値として設定し、そのせん断応力以下は対象外とした。

液化化強度試験は等方等圧試験であり、実地値と応答解析を比較するため、静止土圧係数($K_0=0.5$)により、等価せん断応力を補正して最大せん断応力を等価繰返し回数と対比する。

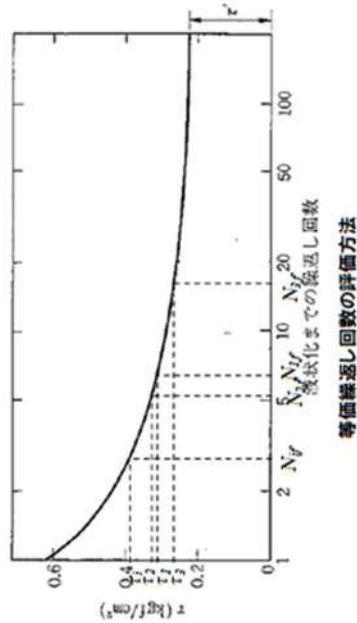
$$\tau_e \times 3 / (1 + 2K_0) = 0.65 \times 3 / 2 \times \tau_{max} \Rightarrow \tau_{max}$$



不規則波から得られたせん断応力



等価せん断応力

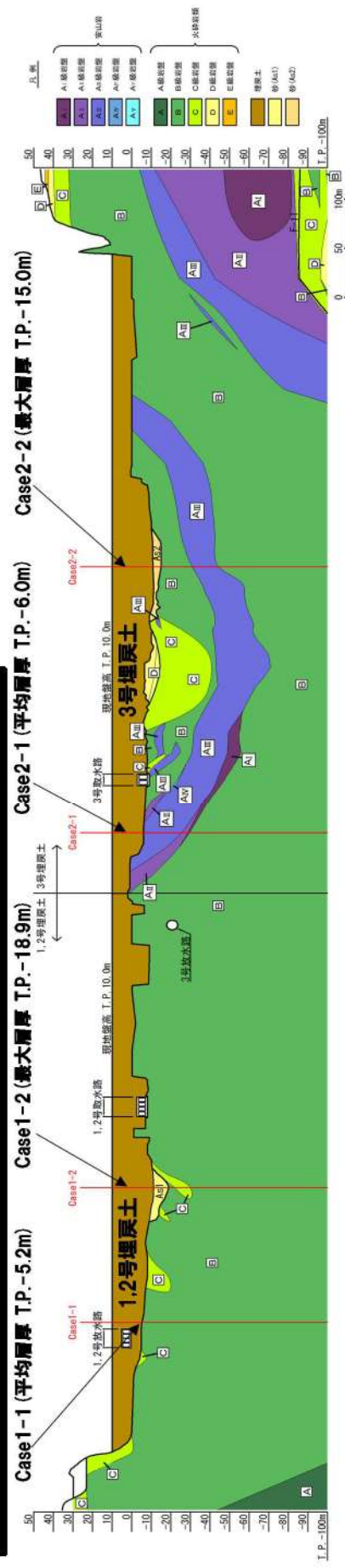


等価繰返し回数の評価方法

第5.4-2 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

□: 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

※埋戻土の平均層厚(下端標高)は以下に示すとおり算出する。
 1,2号埋戻土: 8,666m²(埋戻土, As1の面積) / 570m (埋戻土地表面延長)
 = 15.2m (埋戻土の下端標高TP-5.2m)
 3号埋戻土: 1,456m²(埋戻土, D級岩盤, As2の面積) / 654m (埋戻土地表面延長)
 = 16.0m (埋戻土の下端標高TP-6.0m)



第 5.4-3 図 一次元地震応答解析実施位置図

第 5.4-1 表 一次元地震応答解析の解析モデル

ケース名	Case 1-1	Case 1-2	Case 2-1	Case 2-2
埋戻土物性	1,2号埋戻土			
埋戻土層厚	平均層厚 (下端標高 T.P.-5.2m)	最大層厚 (下端標高 T.P.-18.9m)	平均層厚 (下端標高 T.P.-6.0m)	最大層厚 (下端標高 T.P.-15.0m)
解析モデル				

第 5.4-2 表 一次元地震応答解析による等価一定せん断応力と等価繰返し回数 (1, 2 号埋戻土)

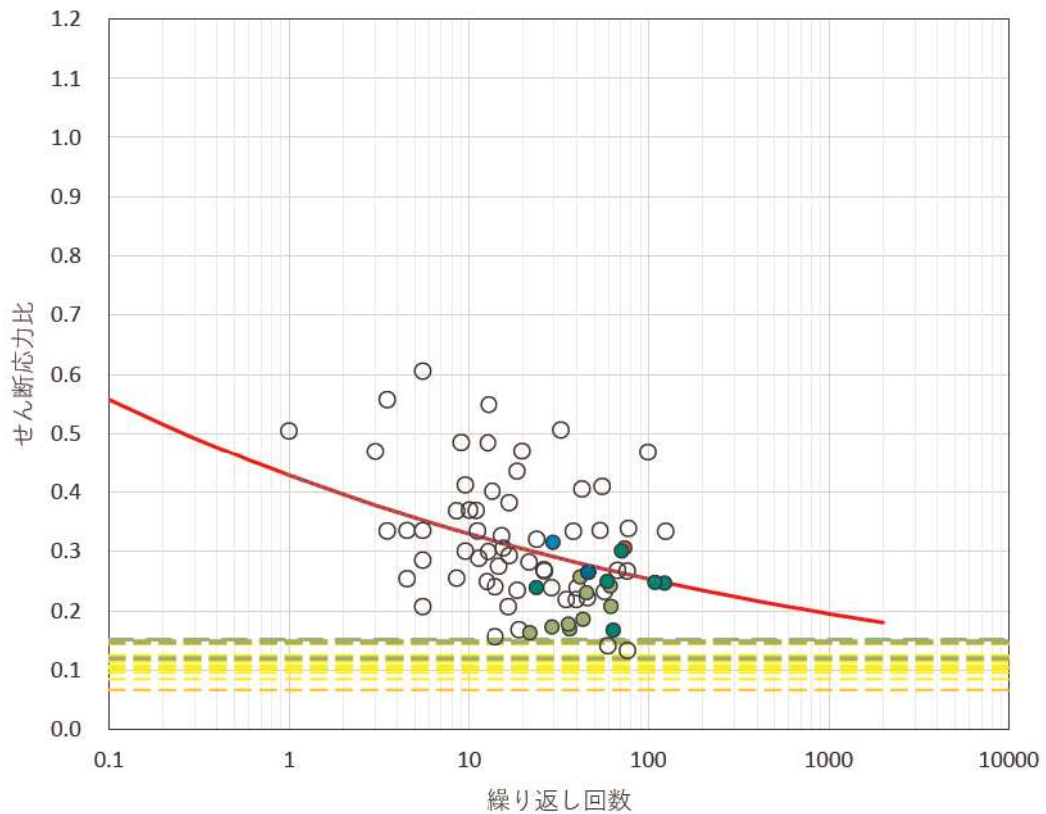
ケース名	Case1-1		Case1-2	
	1, 2 号埋戻土		1, 2 号埋戻土	
埋戻土物性				
岩盤標高	T. P. -5. 2m		T. P. -18. 9m	
基準地震動	L	Neq	L	Neq
	τ_e / σ_v'		τ_e / σ_v'	
Ss1-H	0. 31	73. 49	0. 28	55. 51
Ss2-1-NS	0. 14	—*	0. 11	—*
Ss2-1-EW	0. 07	—*	0. 07	—*
Ss2-2-NS	0. 15	—*	0. 12	—*
Ss2-2-EW	0. 08	—*	0. 07	—*
Ss2-3-NS	0. 12	—*	0. 09	—*
Ss2-3-EW	0. 10	—*	0. 07	—*
Ss2-4-NS	0. 11	—*	0. 12	—*
Ss2-4-EW	0. 13	—*	0. 10	—*
Ss2-5-NS	0. 10	—*	0. 09	—*
Ss2-5-EW	0. 12	—*	0. 13	—*
Ss2-6-NS	0. 11	—*	0. 11	—*
Ss2-6-EW	0. 11	—*	0. 09	—*
Ss2-7-NS	0. 21	61. 59	0. 17	32. 30
Ss2-7-EW	0. 15	—*	0. 18	21. 88
Ss2-8-NS	0. 26	41. 61	0. 21	61. 76
Ss2-8-EW	0. 16	21. 88	0. 13	—*
Ss2-9-NS	0. 24	61. 09	0. 18	32. 33
Ss2-9-EW	0. 17	29. 18	0. 15	—*
Ss2-10-NS	0. 23	45. 13	0. 19	26. 65
Ss2-10-EW	0. 19	43. 11	0. 16	21. 88
Ss2-11-NS	0. 17	36. 49	0. 14	—*
Ss2-11-EW	0. 18	35. 75	0. 12	—*
Ss2-12-NS	0. 15	—*	0. 12	—*
Ss2-12-EW	0. 12	—*	0. 10	—*
Ss2-13-NS	0. 12	—*	0. 07	—*
Ss2-13-EW	0. 15	—*	0. 12	—*
Ss3-1-X	0. 17	63. 65	0. 14	—*
Ss3-1-Y	0. 24	23. 83	0. 25	43. 78
Ss3-2-NS	0. 25	58. 89	0. 23	98. 08
Ss3-2-EW	0. 30	70. 52	0. 23	57. 72
Ss3-3-NS	0. 25	122. 51	0. 20	53. 36
Ss3-3-EW	0. 25	108. 32	0. 22	50. 68
Ss3-4-H	0. 32	29. 37	0. 27	51. 02
Ss3-5-H	0. 27	46. 19	0. 25	44. 29

※液状化強度試験の繰返し回数 200 回に相当するせん断応力比 (R200) から求められるせん断応力を閾値とし、そのせん断応力以下は評価対象外とするが、解析から得られる最大せん断応力 (τ_{max}) が閾値を下回る場合、当該地震動は地盤の破壊にほとんど寄与しないと判断し、その等価一定せん断応力比 (τ_e / σ_v') に相当する等価繰返し回数 (Neq) は「—」と示した。

第 5.4-3 表 一次元地震応答解析による等価一定せん断応力と等価繰返し回数(3号埋戻土)

ケース名	Case2-1		Case2-2	
	3号埋戻土		3号埋戻土	
埋戻土物性				
岩盤標高	T. P. -6.0m		T. P. -15.0m	
基準地震動	L	Neq	L	Neq
	τ_e / σ_v'		τ_e / σ_v'	
Ss1-H	0.39	57.37	0.36	56.95
Ss2-1-NS	0.27	15.07	0.21	32.37
Ss2-1-EW	0.20	15.31	0.14	—*
Ss2-2-NS	0.22	13.05	0.16	16.34
Ss2-2-EW	0.14	—*	0.13	—*
Ss2-3-NS	0.17	29.51	0.16	8.51
Ss2-3-EW	0.13	—*	0.12	—*
Ss2-4-NS	0.18	19.59	0.16	8.51
Ss2-4-EW	0.15	8.51	0.15	8.51
Ss2-5-NS	0.18	30.29	0.14	—*
Ss2-5-EW	0.14	—*	0.14	—*
Ss2-6-NS	0.18	19.44	0.13	—*
Ss2-6-EW	0.16	8.51	0.14	—*
Ss2-7-NS	0.36	30.21	0.30	42.39
Ss2-7-EW	0.30	30.61	0.22	38.65
Ss2-8-NS	0.36	51.24	0.30	32.44
Ss2-8-EW	0.29	50.62	0.26	22.35
Ss2-9-NS	0.37	47.39	0.30	39.08
Ss2-9-EW	0.35	25.85	0.26	26.25
Ss2-10-NS	0.35	28.55	0.29	21.21
Ss2-10-EW	0.37	17.78	0.27	13.77
Ss2-11-NS	0.31	55.87	0.27	22.55
Ss2-11-EW	0.33	38.59	0.24	30.15
Ss2-12-NS	0.33	27.61	0.24	14.20
Ss2-12-EW	0.19	15.48	0.16	8.51
Ss2-13-NS	0.26	21.54	0.17	15.44
Ss2-13-EW	0.32	22.95	0.25	16.95
Ss3-1-X	0.25	40.30	0.21	38.08
Ss3-1-Y	0.29	30.30	0.27	19.38
Ss3-2-NS	0.30	32.39	0.30	18.07
Ss3-2-EW	0.31	33.99	0.35	24.28
Ss3-3-NS	0.35	23.08	0.29	38.15
Ss3-3-EW	0.38	24.75	0.40	14.48
Ss3-4-H	0.50	9.83	0.46	12.98
Ss3-5-H	0.40	49.04	0.33	30.52

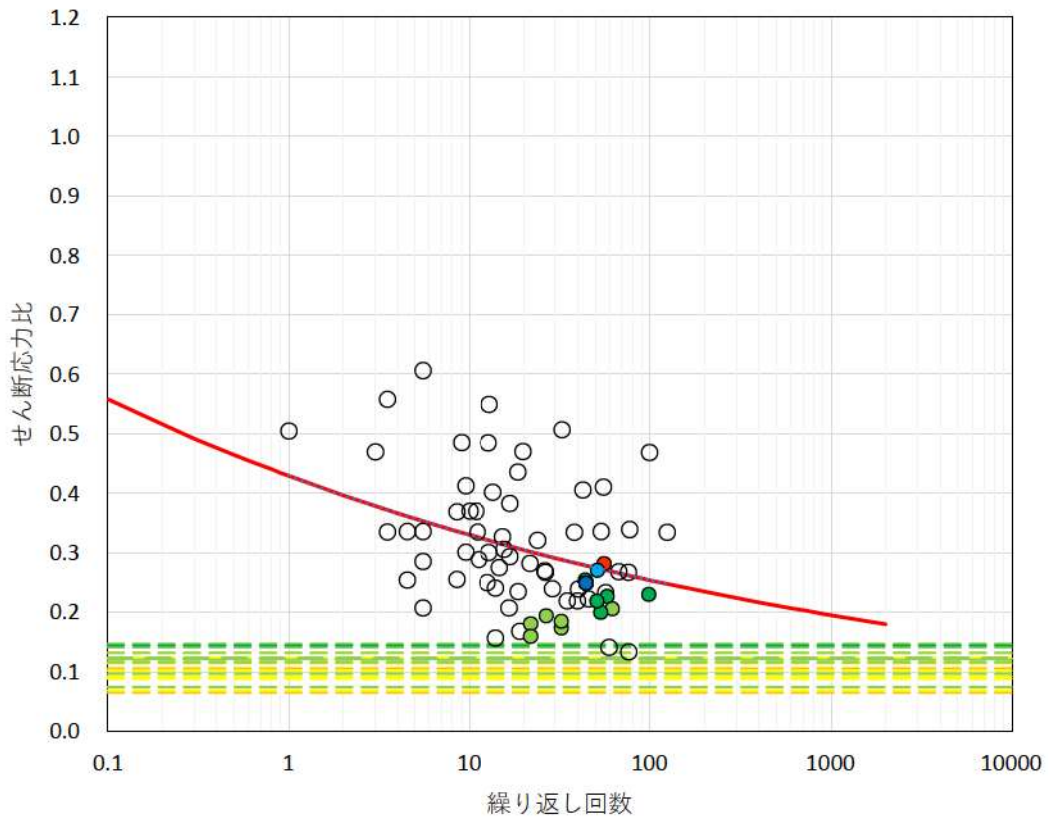
※液状化強度試験の繰返し回数 200 回に相当するせん断応力比 (R200) から求められるせん断応力を閾値とし、そのせん断応力以下は評価対象外とするが、解析から得られる最大せん断応力 (τ_{max}) が閾値を下回る場合、当該地震動は地盤の破壊にほとんど寄与しないと判断し、その等価一定せん断応力比 (τ_e / σ_v') に相当する等価繰返し回数 (Neq) は「—」と示した。



- 液状化強度試験結果
- 近似曲線(液状化強度試験)
- ① 現行Ss(Ss1)
- ② 尻別川断層による地震(Ss2-1)
- ③ Fs-10断層～岩内堆東撓曲～岩内南方背斜による地震(Ss2-2～Ss2-6)
- ④ 積丹半島北西沖の断層による地震(Ss2-7～Ss2-13)
- ⑤ 2008年岩手・宮城内陸地震(Ss3-1～Ss3-3)
- ⑥ 2004年北海道 留萌支庁南部の地震(Ss3-4)
- ⑦ 標準応答スペクトルを考慮した地震(Ss3-5)

※近似曲線(液状化強度試験)は、等方応力状態の液状化強度試験と異方応力状態の地震応答解析結果を比較するため、液状化強度試験から得られる近似曲線を補正したものである。
 ※等価一定せん断応力比の破線は、液状化強度試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数 200 回のせん断応力比に対して、地震応答解析結果から得られる最大せん断応力 τ_{max} が小さい場合の結果を示す。

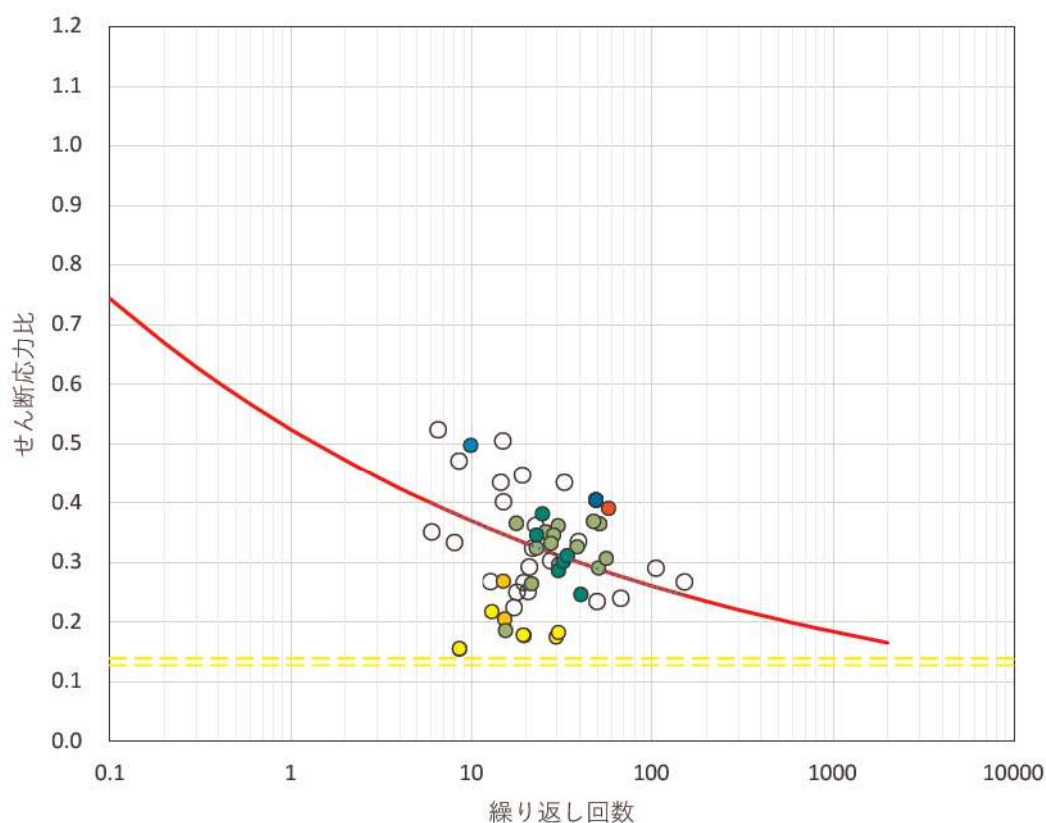
第 5.4-4 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (Case1-1 : 1, 2 号埋戻土 T.P. -5.2m)



- 液状化強度試験結果
- 近似曲線(液状化強度試験)
- ① 現行Ss(Ss1)
- ② 尻別川断層による地震(Ss2-1)
- ③ Fs-10断層～岩内堆東撓曲～岩内南方背斜による地震(Ss2-2～Ss2-6)
- ④ 積丹半島北西沖の断層による地震(Ss2-7～Ss2-13)
- ⑤ 2008年岩手・宮城内陸地震(Ss3-1～Ss3-3)
- ⑥ 2004年北海道 留萌支庁南部の地震(Ss3-4)
- ⑦ 標準応答スペクトルを考慮した地震(Ss3-5)

※近似曲線(液状化強度試験)は、等方応力状態の液状化強度試験と異方応力状態の地震応答解析結果を比較するため、液状化強度試験から得られる近似曲線を補正したものである。
 ※等価一定せん断応力比の破線は、液状化強度試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数 200 回のせん断応力比に対して、地震応答解析結果から得られる最大せん断応力 τ_{max} が小さい場合の結果を示す。

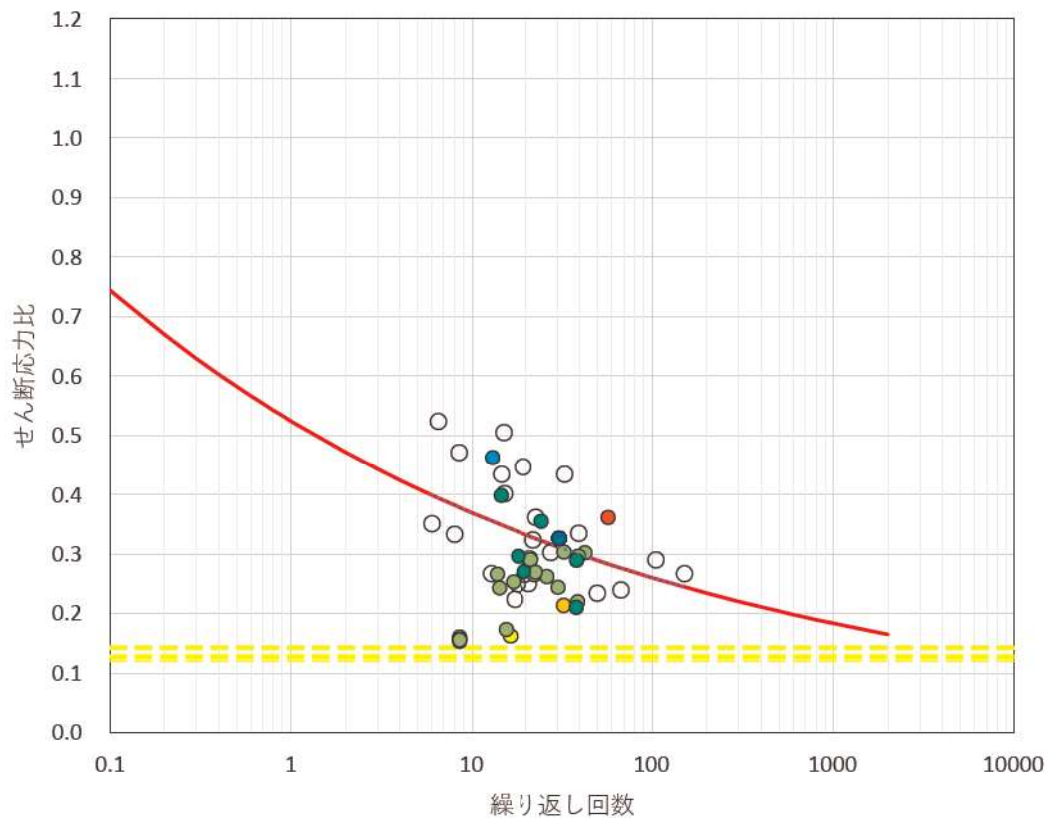
第 5.4-5 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (Case1-2 : 1, 2 号埋戻土 T.P. -18.9m)



- 液状化強度試験結果
- 近似曲線(液状化強度試験)
- ① 現行Ss(Ss1)
- ② 尻別川断層による地震(Ss2-1)
- ③ Fs-10断層～岩内堆東撓曲～岩内南方背斜による地震(Ss2-2～Ss2-6)
- ④ 積丹半島北西沖の断層による地震(Ss2-7～Ss2-13)
- ⑤ 2008年岩手・宮城内陸地震(Ss3-1～Ss3-3)
- ⑥ 2004年北海道 留萌支庁南部の地震(Ss3-4)
- ⑦ 標準応答スペクトルを考慮した地震(Ss3-5)

※近似曲線(液状化強度試験)は、等方応力状態の液状化強度試験と異方応力状態の地震応答解析結果を比較するため、液状化強度試験から得られる近似曲線を補正したものである。
 ※等価一定せん断応力比の破線は、液状化強度試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数 200 回のせん断応力比に対して、地震応答解析結果から得られる最大せん断応力 τ_{max} が小さい場合の結果を示す。

第 5.4-6 図 累積損傷度理論に基づく評価結果(Case2-1 : 3号埋戻土 T.P. -6.0m)



- 液状化強度試験結果
- 近似曲線(液状化強度試験)
- ① 現行Ss(Ss1)
- ② 尻別川断層による地震 (Ss2-1)
- ③ Fs-10断層～岩内堆東撓曲～岩内南方背斜による地震 (Ss2-2～Ss2-6)
- ④ 積丹半島北西沖の断層による地震 (Ss2-7～Ss2-13)
- ⑤ 2008年岩手・宮城内陸地震 (Ss3-1～Ss3-3)
- ⑥ 2004年北海道 留萌支庁南部の地震 (Ss3-4)
- ⑦ 標準応答スペクトルを考慮した地震 (Ss3-5)

※近似曲線(液状化強度試験)は、等方応力状態の液状化強度試験と異方応力状態の地震応答解析結果を比較するため、液状化強度試験から得られる近似曲線を補正したものである。
 ※等価一定せん断応力比の破線は、液状化強度試験におけるせん断応力比と繰返し回数の関係から求まる繰返し回数 200 回のせん断応力比に対して、地震応答解析結果から得られる最大せん断応力 τ_{max} が小さい場合の結果を示す。

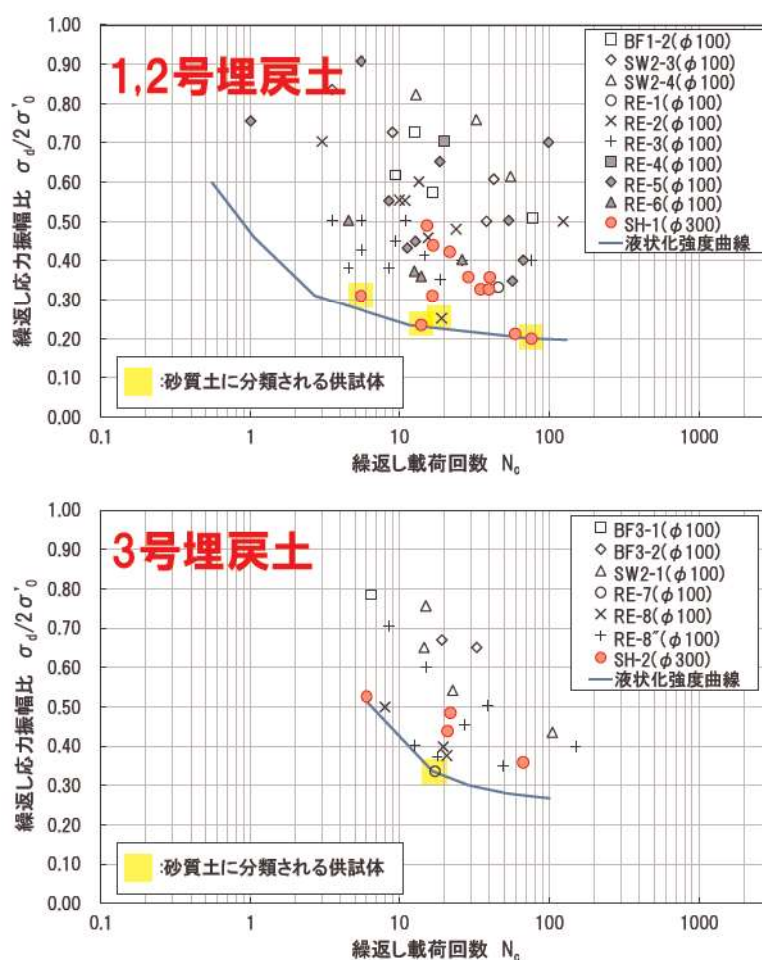
第 5.4-7 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (Case2-2 : 3 号埋戻土 T.P. -15.0m)

5.5 液状化強度特性の設定

液状化強度試験結果に基づく繰返し応力振幅比と繰返し载荷回数との関係を第 5.5-1 図、第 5.5-2 図に示す。

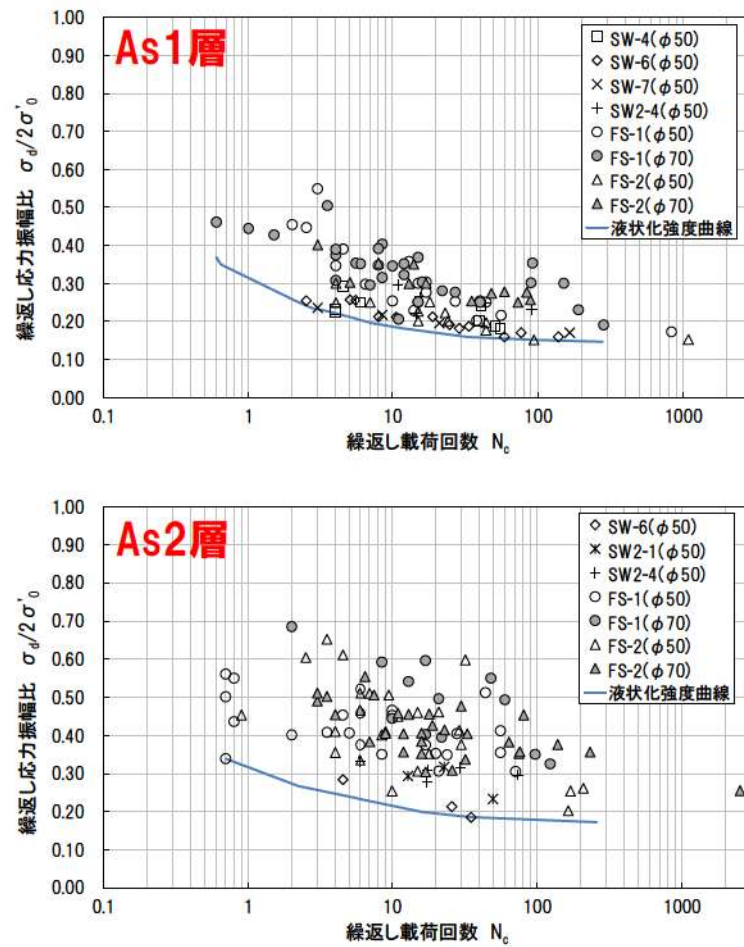
液状化強度試験結果の特徴として、埋戻土では第 5.5-1 図に示すとおり、供試体径 $\phi 100\text{mm}$ の試験結果はばらつきが大きく、 $\phi 300\text{mm}$ の試験結果はばらつきが小さい結果となっている。これは、径の小さい供試体 ($\phi 100\text{mm}$) は礫の占める比率が大きくなりやすく、液状化強度に与える影響も大きくなるため、 $\phi 100\text{mm}$ の試験は $\phi 300\text{mm}$ の試験と比較して礫の入り方のばらつきによる影響が大きいことが要因であると考えられる。また、砂質土に分類される埋戻土の液状化強度特性は低く、礫質土に分類される埋戻土の液状化強度は砂質土より高い値を示す傾向がある。

砂層については、対象施設に近い陸側で試料採取しているものの採取可能範囲が限定的である。



第 5.5-1 図 液状化強度試験結果に基づく埋戻土の液状化強度曲線(下限値設定)

以上より、設置許可段階における液状化強度特性は、埋戻土の液状化検討対象施設近傍の試料採取が網羅されていないことも踏まえ、現時点の液状化強度試験結果を用いて保守的に設定することとし、1,2号埋戻土、3号埋戻土及び砂層(As1層及びAs2層)の各土層の下限値に設定する。なお、埋戻土の液状化強度特性については、有効応力解析による防潮堤の構造成立性を評価するために、保守的な評価となるように、1,2号埋戻土の液状化強度特性を用いることとする。



第 5.5-2 図 液状化強度試験結果に基づく砂層の液状化強度曲線(下限値設定)

6. 液状化影響の検討方針

泊発電所における施設の耐震評価においては、下記事項に基づき液状化影響を評価する。

- ・液状化影響評価については、道路橋示方書の評価方法を基本とするが、道路橋示方書においては対象外とされている G.L. -20m 以深の土層等についても液状化強度試験を実施し、すべての埋戻土、砂層を液状化検討対象層とすることで保守的な構造物の評価を実施する。
- ・設置許可段階における埋戻土の代表性確認指標は粒度分布及び細粒分含有率を用いる。
- ・砂層の代表性確認指標は N 値、粒度分布及び細粒分含有率を用いる。
- ・現状の液状化強度試験位置では、液状化検討対象施設近傍が網羅されていないと判断したため、液状化検討対象施設近傍での施工範囲を考慮して液状化強度試験等の追加調査を実施する。
- ・設置許可段階における施設の有効応力解析に用いる液状化強度特性は、現時点の液状化強度試験結果を用いて、液状化強度特性を保守的に設定するものとし、1,2号埋戻土、3号埋戻土及び砂層(As1層及びAs2層)の各層の下限值に設定する。
- ・埋戻土の液状化強度特性については、有効応力解析による防潮堤の構造成立性を評価するため、保守的な評価となるように、1,2号埋戻土の液状化強度特性を用いる。
- ・有効応力解析においては、解析コード「FLIP」を用いることとし、解析に用いる液状化パラメータは保守的に設定した液状化強度を満足するように設定する。

なお、設工認段階においては以下の検討結果に基づく液状化影響の評価を実施する。

- ・緊急時対策所、空調上屋及び燃料タンク(SA)室の設計地下水位は、防潮堤設置後における地下水排水設備が機能しない状態が継続した場合の定常的な地下水位分布を予測した三次元浸透流解析の結果を使用する。
- ・埋戻土の液状化強度試験の試料採取位置の代表性確認に当たっては、粒度分布、細粒分含有率及び相対密度を代表性確認指標に用いて説明する。
- ・有効応力解析に用いる液状化強度特性は、追加の液状化強度試験結果を含めて、液状化検討対象層の各層の下限值に設定する。ただし、取放水設備工事によって埋戻仕様が規定されたエリアとそれ以外のエリアに細分化することが可能である場合は、そのエリアごとの液状化強度試験結果の下限值に設定することを検討する。
- ・施設の耐震評価に用いる解析手法は、「液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定フロー」にしたがい、施設の周辺状況に応じた液状化の影響を踏まえて選定する。
- ・有効応力解析を選定する場合は、有効応力解析に加え、液状化が発生しない場合の影響を確認するために全応力解析での耐震評価も実施する。
- ・液状化検討対象施設の耐震評価において、全応力解析を選定する場合は、全応力解析に加え、有効応力解析により液状化の影響(浮上り等)が施設に及ばないことも確認する。

添付資料9 設工認段階におけるエリア分け
の検討方針(案)

1. 埋戻土のエリア分けの検討方針(案)

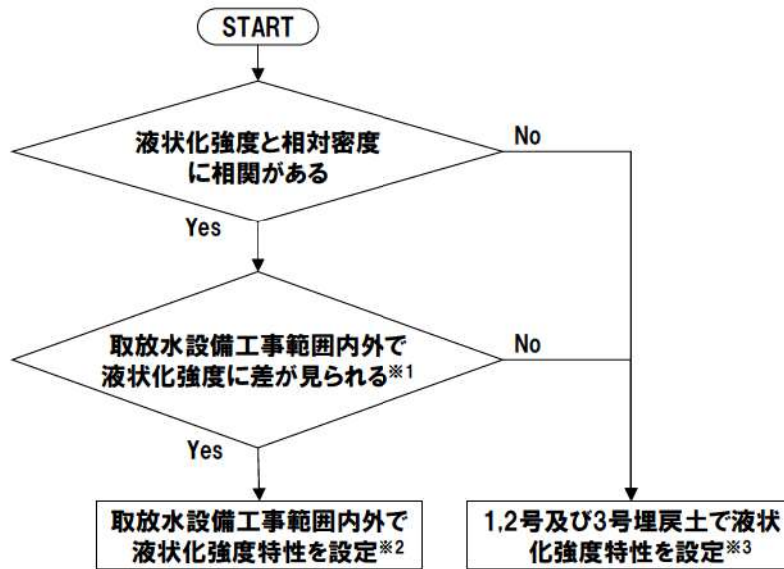
施設の耐震評価における液状化強度特性の設定方針において、設工認段階における有効応力解析に用いる液状化強度特性は、追加の液状化強度試験結果を含めて、取放水設備工事によって埋戻仕様が規定されたエリアとそれ以外のエリアに細分化することが可能か検討することとしている(エリアを細分化しない場合は、設置許可段階と同様の液状化検討対象層の各層の下限值に設定する)。

本添付資料は、設工認段階で行う埋戻土のエリア分けの検討方針(案)を示すものであり、エリアの細分化に用いる指標やエリアの細分化の検討結果に応じた液状化強度特性設定の考え方を示すものである。

以下に、埋戻土のエリア分けの検討方針を示す。

【埋戻土のエリア分けの検討方針(案)】

- ・発電所敷地の液状化強度特性については、敷地造成時期と埋戻材料が1,2号建設時と3号建設時で異なることから1,2号埋戻土と3号埋戻土に分ける。
- ・設工認段階における液状化強度特性は、添付9-1図に示す検討フローにしたがい1,2号埋戻土及び3号埋戻土それぞれの中で、取放水設備工事によって埋戻仕様が規定されたエリア(添付9-2図参照)とそれ以外のエリアに細分化することが可能か検討する。
- ・相対密度を指標に用いて液状化強度との相関があることを確認した上で、取放水設備工事によって埋戻仕様が規定されたエリアとそれ以外のエリアの液状化強度に差が確認できる場合、液状化強度特性をエリアごとに設定する。
- ・エリア分けの検討結果より、埋戻土の液状化強度特性は添付9-1表に示すエリア区分により設定する。



- ※1 液状化強度に明確な差が確認できない場合はエリアの細分化は行わない（フローの「No」に進む）。
- ※2 液状化強度特性は、エリア毎の液状化強度試験結果の下限値に設定する。
- ※3 追加の液状化強度試験結果が設置許可段階の下限値を下回らなければ、設置許可段階の液状化強度特性を用いる。

添付 9-1 図 エリアの細分化検討フロー(案)



□ : 枠囲みの内容は機密情報に属しますので公開できません。

添付 9-2 図 調査位置平面図

添付 9-1 表 埋戻土の液状化強度特性のエリア区分

		1, 2号埋戻土	
		エリアを細分化する	エリアを細分化しない
3号埋戻土	細分化する エリアを	1, 2号埋戻土及び3号埋戻土とも取放水設備工事範囲内外に区分する(敷地全体で4エリアに区分)。	1, 2号埋戻土は区分せず, 3号埋戻土は取放水設備工事範囲内外に区分する(敷地全体で3エリアに区分)。
	細分化しない エリアを	1, 2号埋戻土は取放水設備工事範囲内外に区分, 3号埋戻土は区分しない(敷地全体で3エリアに区分)。	1, 2号埋戻土及び3号埋戻土とも取放水設備工事範囲内外の区分はしない(敷地全体で2エリアに区分)。