

柏崎刈羽原子力発電所 6 号及び 7 号炉

液状化影響の検討方針について
(耐震)

これまでの経緯及び本検討の位置づけ

「柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性について」において、取水路等を支持する古安田層※に対する支持性能の補足として、以下のように説明をしている。

- 支持地盤（古安田層）は、シルト主体の地層であり、液状化が懸念される地盤ではないと判断できる。
- 道路橋示方書・同解説（H14）や建築基礎構造設計指針（2001）では、地表面から20m以浅の沖積層を液状化判定が必要な土層としており、古安田層の一部に分布する砂層は、中期更新世の地層かつ深度20m以深の非常に密な地盤であることから、その対象とはならない。
- ただし、この古安田層の砂層については、詳細設計段階において基準地震動 S_s に対する液状化に関する詳細な検討を行う。

本検討は、耐震設計・耐津波設計基本方針における液状化の構造物への影響評価の考え方についてとりまとめたものである。また、構造物影響評価の考え方を説明する上で、詳細設計段階における評価の前提となる液状化試験結果について併せて説明する。なお、液状化に対する構造物への影響評価の見通しについても説明する。

※ 安田層下部層の MIS10～MIS7 と MIS6 の境界付近の堆積物については、本資料では『古安田層』と仮称する。

※ 本資料では、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」という）で用いられている『洪積層』という用語を使用する。なお、道路橋示方書では、洪積層について「第四紀のうち古い地質時代（更新世）における堆積物による土層に概ね対応すると考えてよい」とされている。

目次

1. 液状化評価の基本方針	・・・	3
2. 液状化評価対象層の抽出	・・・	7
3. 液状化試験位置とその代表性		
3. 1 液状化試験位置の選定	・・・	19
3. 2 液状化試験選定個所の代表性確認	・・・	25
3. 3 追加調査位置	・・・	50
4. 液状化試験結果		
4. 1 液状化試験方法	・・・	54
4. 2 液状化試験結果の分類に対する基本的考え方	・・・	58
4. 3 試験結果の分類	・・・	63
5. 基準地震動 S_s に対する液状化判定 (FL 法)	・・・	83
6. 基準地震動 S_s に対する液状化試験の妥当性確認	・・・	89
7. 液状化強度特性の設定	・・・	104
8. 液状化影響の検討方針	・・・	113
9. 設置許可段階における構造物評価の見通し		
9. 1 代表構造物の抽出	・・・	115
9. 2 取水路	・・・	117
9. 3 常設代替交流電源設備基礎	・・・	149
10. 参考文献	・・・	171
11. 参考資料		
11. 1 評価対象構造物の断面図	・・・	172
11. 2 荒浜側の古安田層中の砂層に関する補足	・・・	181
11. 3 液状化に関連する基本物性に関する補足	・・・	191
11. 4 液状化関連の文献整理	・・・	198
11. 5 新潟県中越沖地震時の地盤変状	・・・	217

1. 液状化評価の基本方針

第 11-1-1 図に液状化評価の流れ，第 11-1-1 表に液状化評価の基本方針を示す。

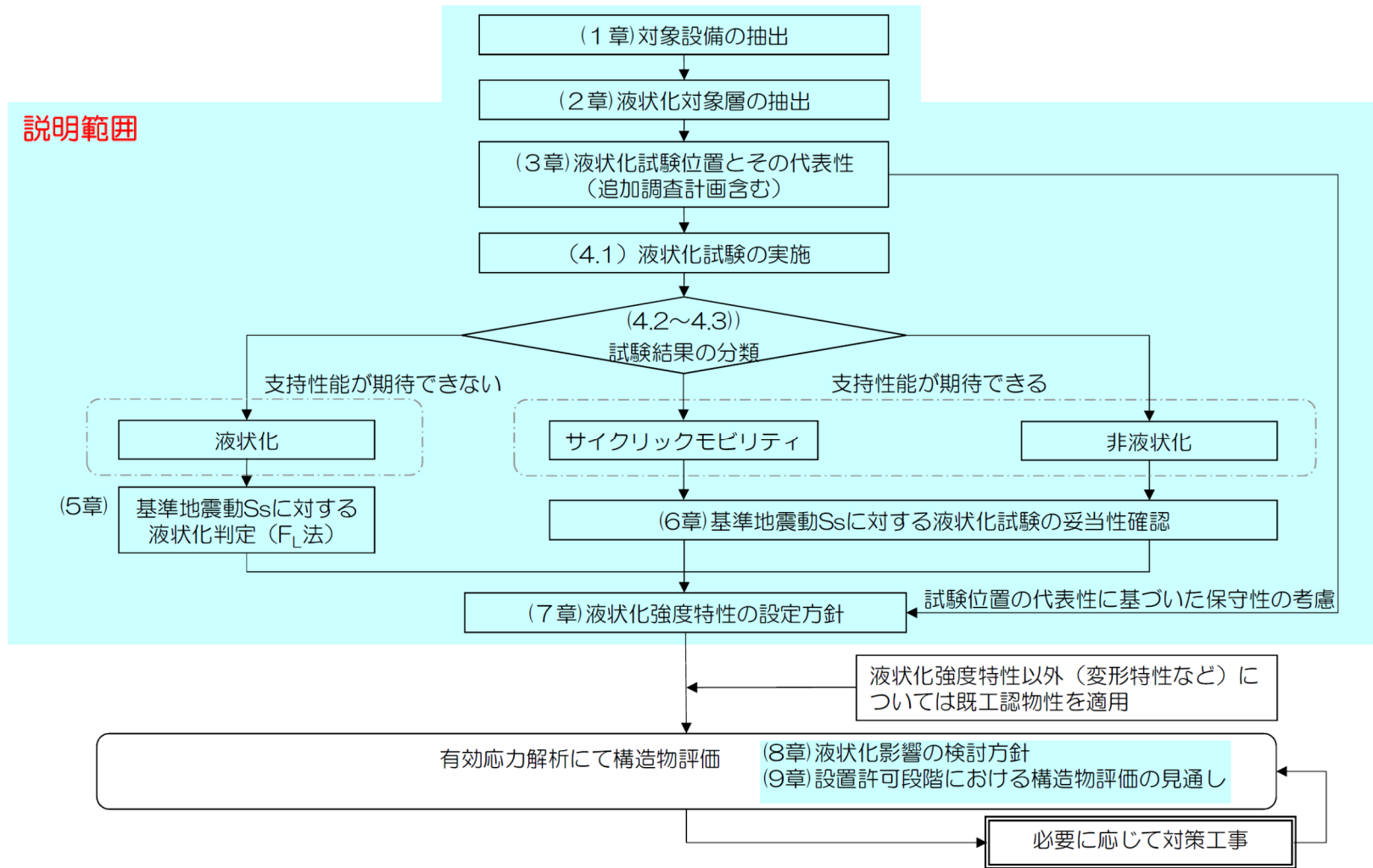
液状化評価については道路橋示方書を基本として，道路橋示方書において液状化評価の対象外となっている洪積層についても液状化試験を実施し，液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施する。液状化試験に基づいて，地震時の地盤の状態を『液状化』、『サイクリックモビリティ』及び『非液状化』と判定する。

それぞれの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し，構造物への影響評価を実施する。なお，試験結果が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。設定した液状化強度特性については，試験結果を基本に設定するが，基本物性のばらつきも考慮して保守的な設定とする。

液状化評価の対象となる施設は，屋外の設計基準対象施設（屋外重要土木構造物，津波防護施設）及び重大事故等対処施設を対象に抽出した。第 11-1-2 表に液状化評価の対象設備を示す。また，荒浜側には液状化評価の対象となる施設はないが，津波評価の前提となる液状化に伴う地盤の沈下等を評価するために，荒浜側に分布する砂層については，荒浜側防潮堤の縦断方向の地質断面図を代表例として，液状化対象層の抽出を行った。

なお，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基本方針は，波及的影響評価の中で整理を行う。

説明範囲



第 11-1-1 図 液状化評価の流れ

第 11-1-1 表 液状化評価の基本方針

本検討の対象砂層			道路橋示方書における液状化評価の対象	当社評価		
地層名	堆積年代	調査地点名 土層名		液状化試験による判定	液状化強度特性の設定の考え方	液状化強度特性の保守性
埋戻土層	—	A-1 埋戻土層	○ 対象	液状化	試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。	試験結果を基本として、基本物性のばらつきも考慮して保守的な設定とする。
新期砂層 ・沖積層	完新世 (沖積層)	A-3 新期砂層・沖積層		サイクリック モビリティ		
古安田層 (古安田層 中の砂層が 対象)	更新世 (洪積層)	新しい	× 対象外	非液状化	※	
		古い		A-2 洪積砂層 I		
				A-2 洪積砂層 II		
0-1 洪積砂質土層 I 洪積砂質土層 II						

※ A-2 地点の洪積砂層 I については非液状化であると考えられるが、A-1 地点の洪積砂層 I・II と同時代に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

第 11-1-2 表 液状化評価の対象設備

設備分類		設備名称	構造概要	支持層
設計基準対象施設	屋外重要土木構造物	スクリーン室	鉄筋コンクリート構造	古安田層
		取水路	鉄筋コンクリート構造	古安田層
		補機冷却用海水取水路 ^{※1}	鉄筋コンクリート構造	西山層
		海水貯留堰 ^{※2}	鋼管矢板構造	古安田層, 西山層
		軽油タンク基礎	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
		燃料移送系配管ダクト	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
	津波防護施設	海水貯留堰 ^{※2}	鋼管矢板構造	古安田層, 西山層
重大事故等対処施設		常設代替交流電源設備基礎	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層
		格納容器圧力逃がし装置基礎	鉄筋コンクリート + 杭基礎構造	西山層

※1：マンメイドロックを介して西山層に直接支持，※2：海水貯留堰は屋外重要土木構造物と津波防護施設の兼用。海水貯留堰の周辺には液状化評価対象層は存在しないことから，液状化評価対象設備からは除外する。

2. 液状化評価対象層の抽出

第 11-2-1 表に敷地の地質層序表を示す。敷地の地質は、下位から新第三系の寺泊層及び椎谷層、新第三系鮮新統～第四系下部更新統の西山層、下部更新統の灰爪層、それらを不整合で覆う中部更新統の古安田層、上部更新統の大湊砂層及び番神砂層、完新統の新时期砂層・沖積層からなる。

評価対象範囲の地盤に分布する砂層としては、古安田層中の砂層、新时期砂層・沖積層、埋戻土層がある。

古安田層は、敷地のほぼ全域にわたって分布し、主に粘土～シルトからなり、砂、砂礫等を挟在する。また、本層は、MIS10～MIS7 と MIS6 との境界付近の海進、海退に伴う堆積物を含むものと推定され、中部更新統と判断される。

敷地の古安田層は全域に広く分布しており、古安田層中の砂層は、主に Ata-Th テフラを含むシルト主体の MIS7 の地層に挟在している。また、MIS7 の堆積物の基底には砂礫層が分布している。第 11-2-1 図に古安田層上限面図及びボーリング柱状図を示す。

新时期砂層・沖積層は、敷地のほぼ全域にわたって下位層を覆って分布している。下位層上限面に刻まれた谷を埋めるように堆積したため、場所により層厚が大きく変化している。本層は、主に未固結の淘汰の良い細粒～中粒砂からなる。現在の海浜、砂丘を形成しており、下位層を不整合に覆う。

液状化評価対象層については、道路橋示方書に基づいて対象層を抽出した。第 11-2-2 図に液状化評価対象層の抽出フローを示す。

道路橋示方書では、沖積層を液状化評価対象層としているが、本評価では洪積層（古安田層）についても、同様に抽出対象とした。また、地表面から 20m 以深は対象外となっているが、本評価では地表から 20m 以深の砂層も抽出対象とした。

対象設備のうち、スクリーン室、取水路、軽油タンク基礎、燃料移送系配管ダクト、常設代替交流電源設備基礎の地盤には砂層が分布している。これらの施設に着目して地質断面図を作成し、砂層の分布状況について第 11-2-3 図に整理した。

6 号及び 7 号炉の取水路及び常設代替交流電源設備基礎の周辺地盤については、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが同程度の標高で広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、MIS7 の同時期に堆積した地層である。

常設代替交流電源設備及び 7 号炉軽油タンク基礎等の周辺地盤には、細粒～中粒砂からなる新时期砂層・沖積層が分布している。

6 号炉軽油タンク基礎等の周辺地盤には、古安田層中の砂層が一部分布している。この砂層は、取水路付近の砂層からは西山層の高まり等により連続していないものの、古安田層中

に挟在する砂層が同様に分布していることから、取水路付近の砂層と同様に MIS7 の同時期に堆積した地層である。

6 号及び 7 号炉の取水路の地盤については、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが同程度の標高で広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、MIS7 の同時期に堆積した地層である。

以上より、大湊側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

荒浜側に分布する砂層については、荒浜側防潮堤の縦断方向の地質断面図を代表例として、砂層の分布状況について第 11-2-4 図に整理した。

3 号炉及び 4 号炉海側の地盤には、シルト主体の古安田層中に挟在する砂層が広く分布している。この砂層が挟在するシルト層内の上部には Ata-Th テフラが広く確認されること、その下部には砂層が同程度の標高に分布していることから、大湊側と同様に MIS7 の同時期に堆積した地層である。

4 号炉海側には、古安田層の上位に新期砂層・沖積層が連続して分布している。

1 号炉及び 2 号炉海側の地盤には、3 号炉及び 4 号炉海側から連続するシルト主体の地層の上位に位置する砂層がおおむね 10m 以上の厚さで連続して分布していることから、この砂層は同時期に堆積した砂層である。なお、古安田層の基底に一部分布する砂層は、3 号炉及び 4 号炉海側に分布する MIS7 の砂層と同じ地層と想定される。

1 号炉海側の防潮堤端部には、4 号炉海側と同様に新期砂層・沖積層が分布している。

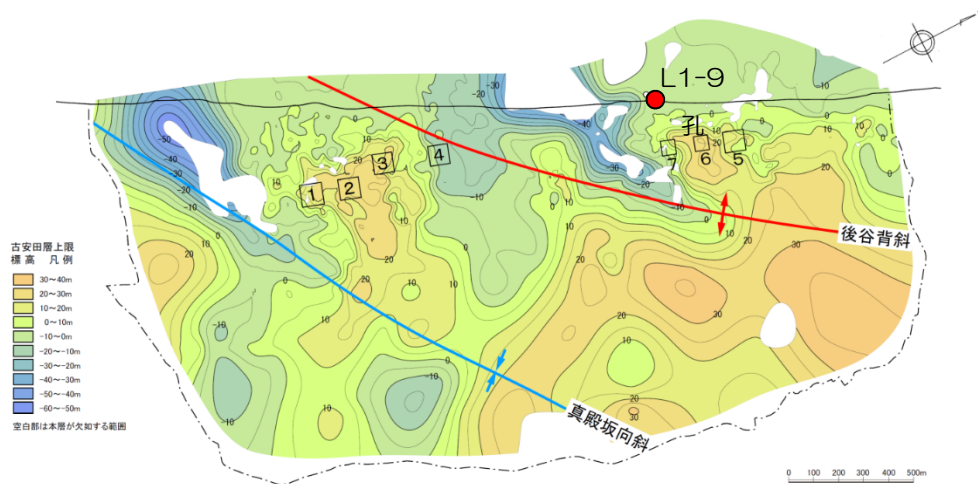
以上より、荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に 3 号炉及び 4 号炉海側に分布する古安田層中の砂層、主に 1 号炉及び 2 号炉海側に分布する古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

第 11-2-1 表 敷地の地質層序表

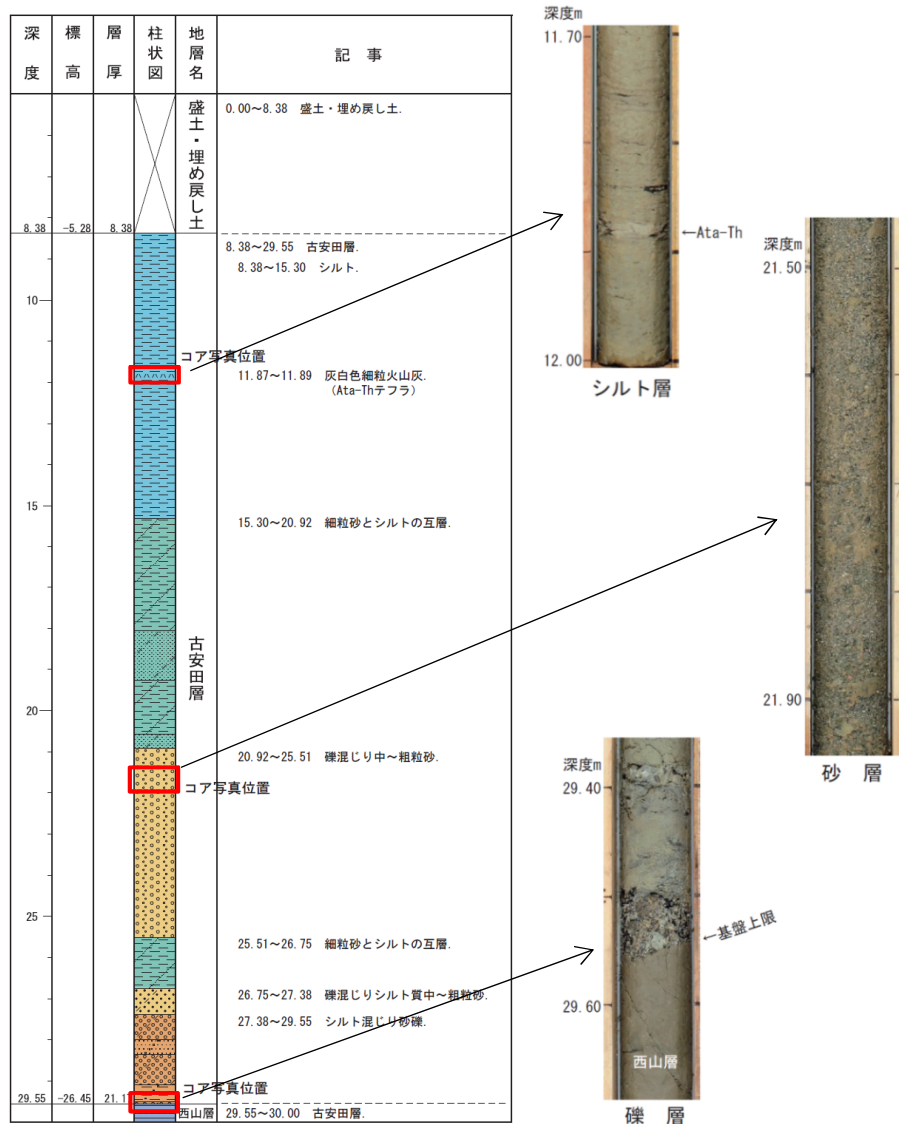
時代	地層名	主な層相・岩質	テフラ・放射年代	
第四紀	完新世	新期砂層・沖積層	上部は灰白色の細～中粒砂 下部は茶褐色の細～中粒砂，腐植物を含む ← 腐植 (6, 150±170年)	
	後期	番神砂層	灰白色～赤褐色の中～粗粒砂	
		大湊砂層	褐色～黄褐色の中～粗粒砂， シルトの薄層を含む ← NG (約13万年前)	
	中期	古安田層	A ₄ 部層	最上部は砂 粘土～シルト，砂を多く挟む ← γ-1 (約20万年前)
			A ₃ 部層	粘土～シルト 縞状粘土，有機物，砂を伴う，貝化石を含む
			A ₂ 部層	粘土～シルト 砂，厚い砂礫，有機物を挟む ← Ata-Th (約24万年前)
			A ₁ 部層	粘土～シルト 砂，砂礫を挟む ← Kkt (約33-34万年前)
	前期	西山層	灰爪層	凝灰質泥岩，凝灰質砂岩，凝灰岩 ← Iz (約1.5Ma)
			N ₃ 部層	砂質泥岩 砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む 貝化石を含む
			N ₂ 部層	シルト質泥岩 縞状泥岩，凝灰岩，ノジュールを多く挟む ← Fup (約2.2Ma) ← Tsp (約2.3Ma) ← Az (約2.4Ma)
	鮮新世	後期	N ₁ 部層	シルト質～粘土質泥岩 砂岩，凝灰岩，ノジュールを挟む 珪質海綿化石を含む ← Nt-17 (340±20万年) ← Nt-7 (350±20万年)
			椎谷層	砂岩，砂岩・泥岩互層，細礫岩等を挟む
		中新世	中期	寺泊層

~~~~~ 不整合

※ MIS : 海洋酸素同位体ステージ (Marine oxygen Isotope Stage)



(a)古安田層上限面図



(b)古安田層ボーリング柱状図 (L1-9 孔)

第 11-2-1 図 古安田層中の砂層について

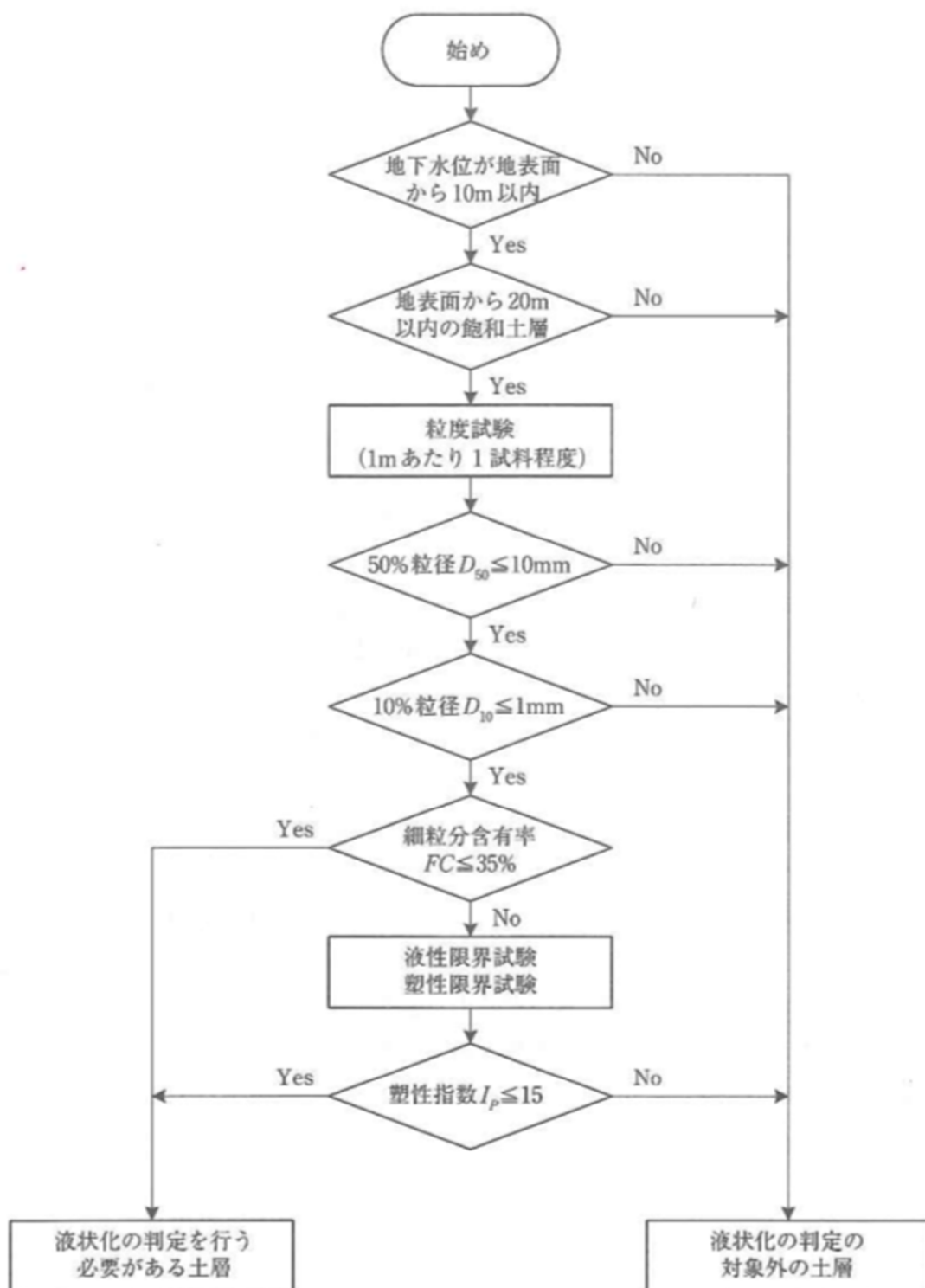
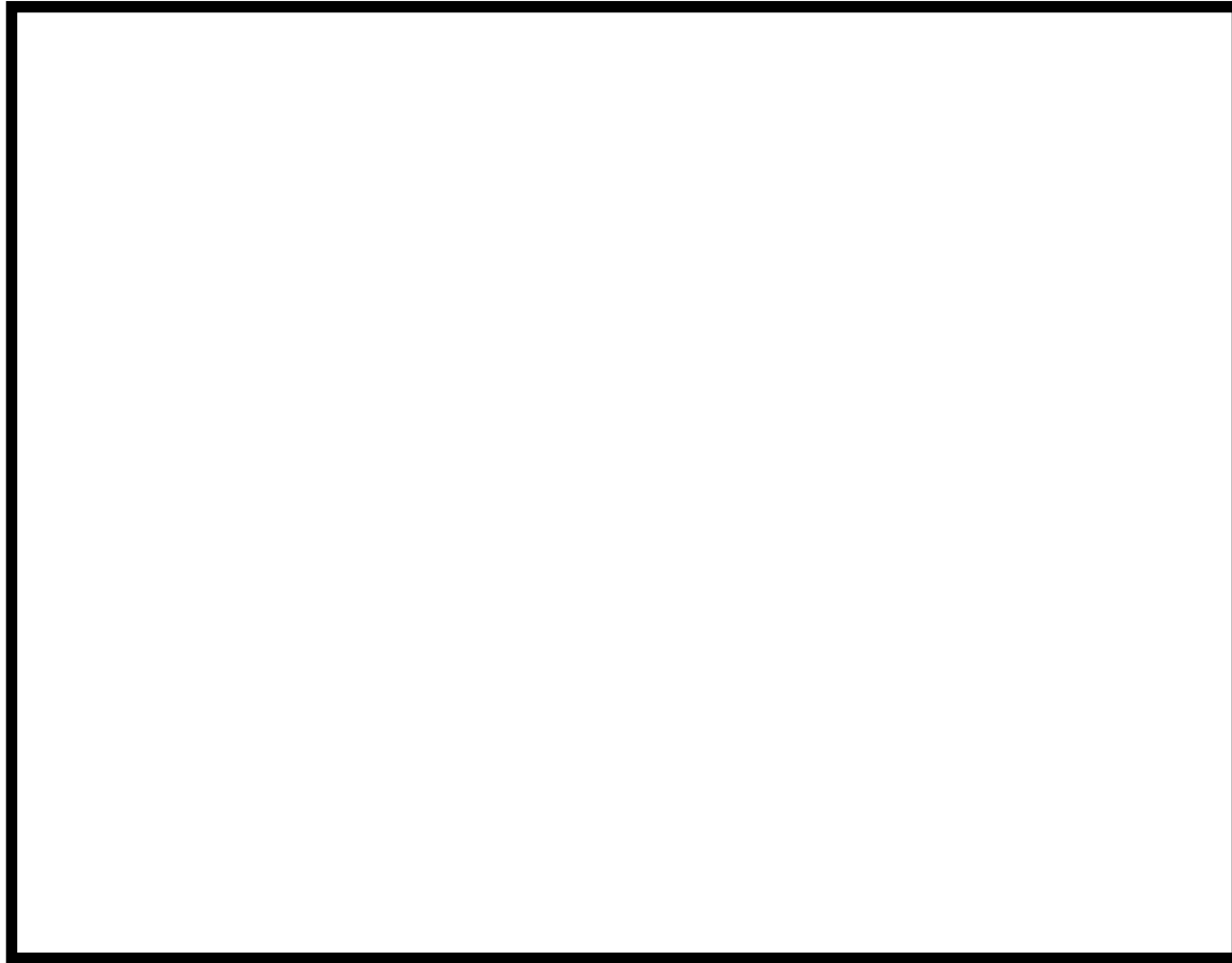


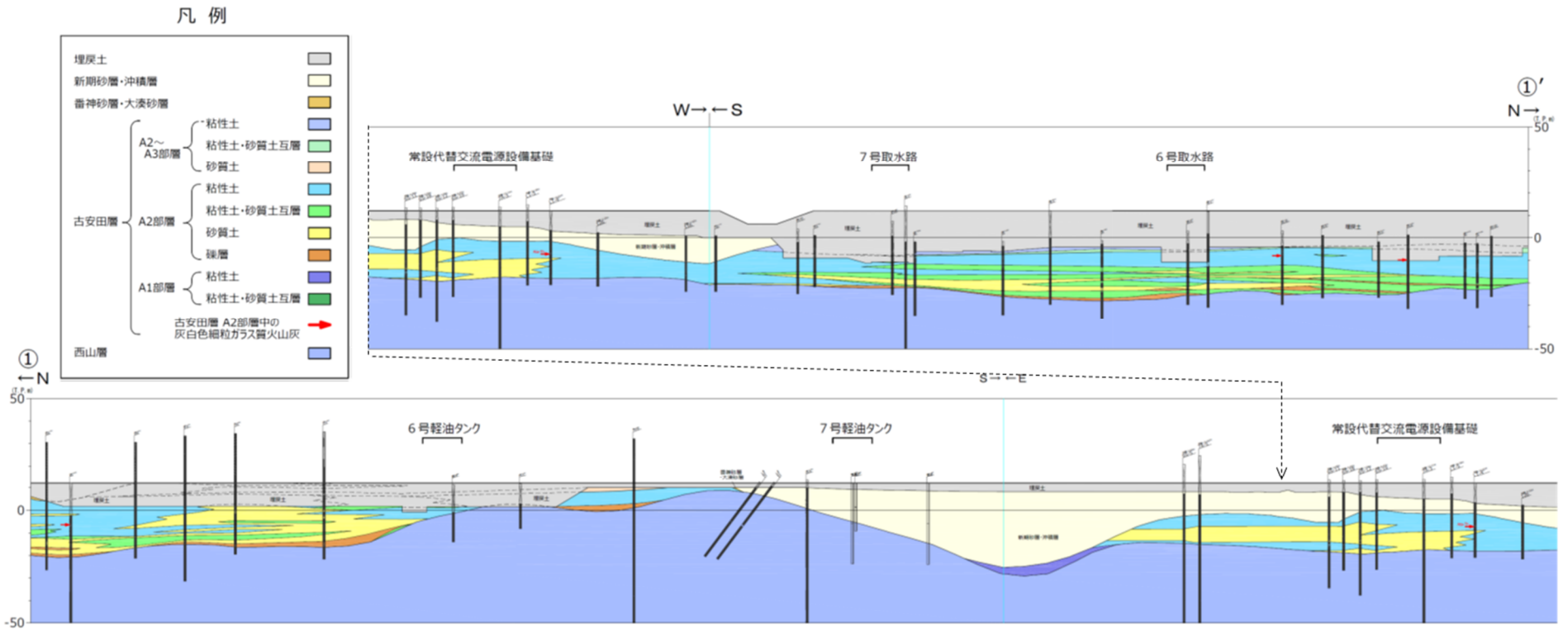
図-解8.2.1 液状化の判定を行う必要がある土層の評価の手順

第 11-2-2 図 液状化評価の対象層の抽出フロー  
 道路橋示方書・同解説（V耐震設計編）（社）日本道路協会， H24.3）



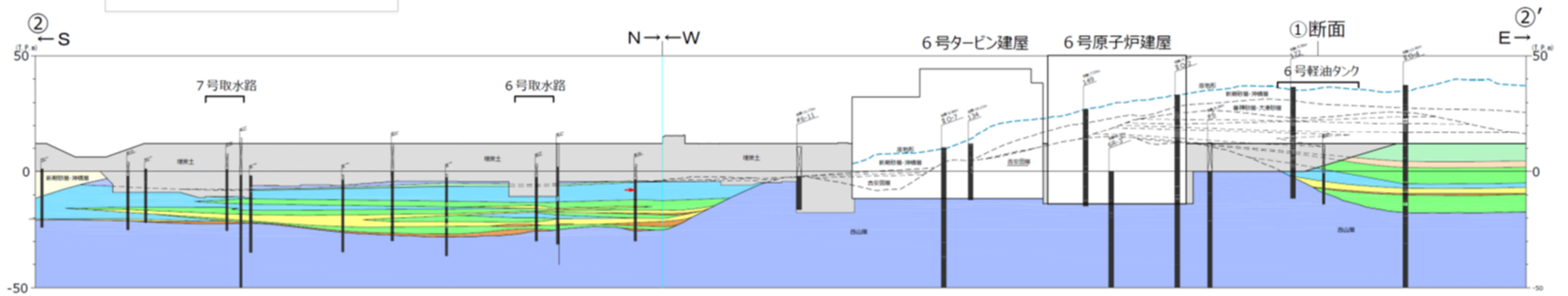
第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布

(a) 大湊側 全体平面図

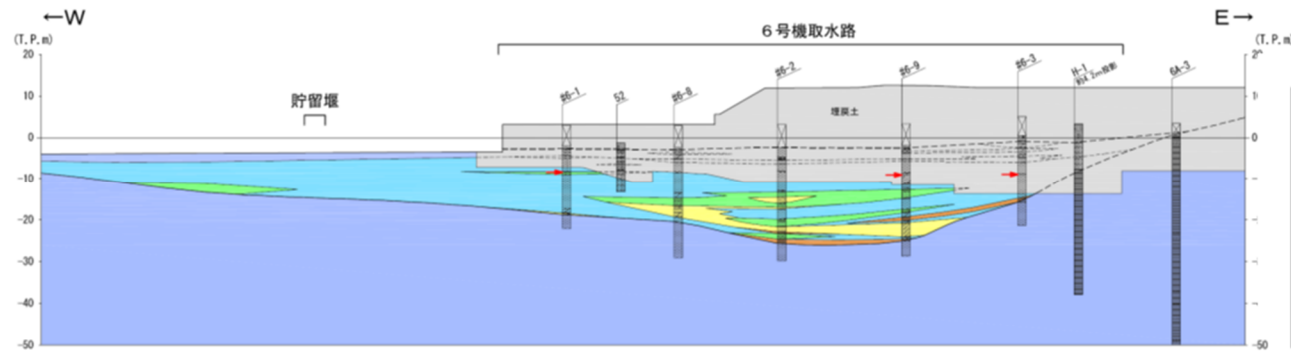


第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布  
(b) 地質断面図 ① - ①' 断面

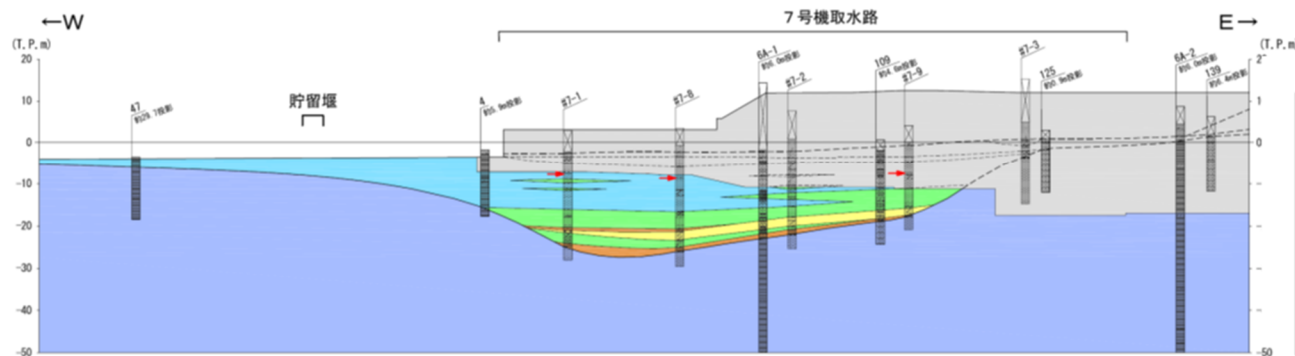
凡例



第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布  
(c) 地質断面図 ② - ②' 断面

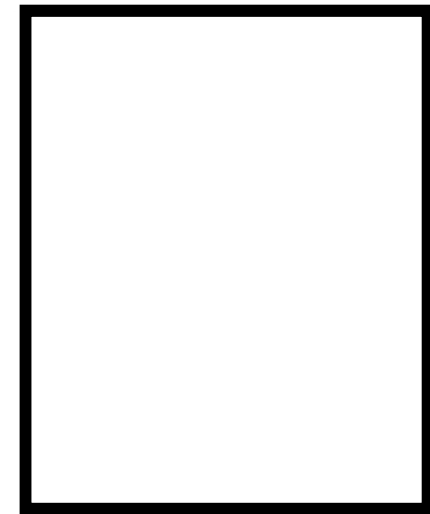


A - A' 断面



B - B' 断面

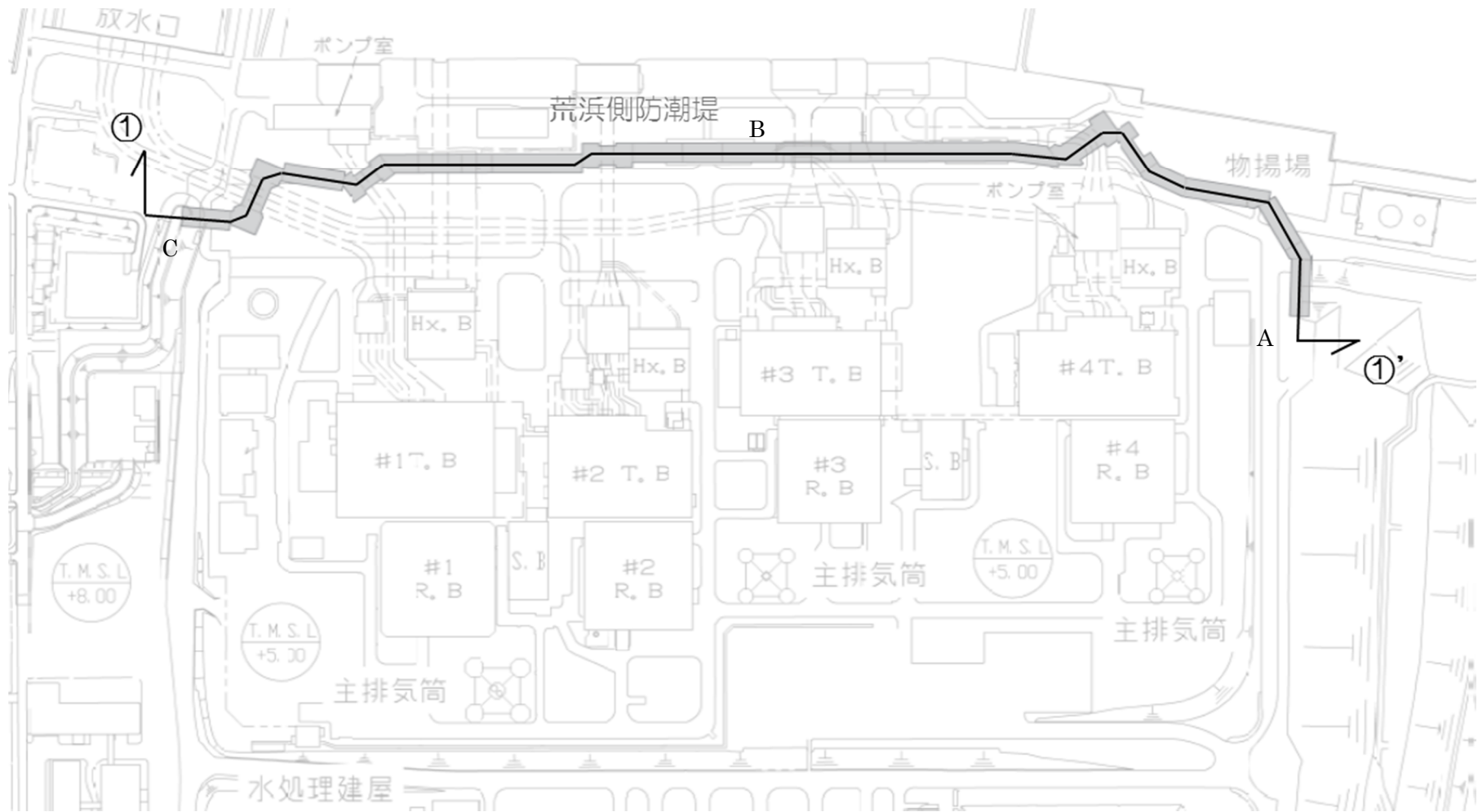
第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布 (d) 地質断面図 取水路縦断面



凡例

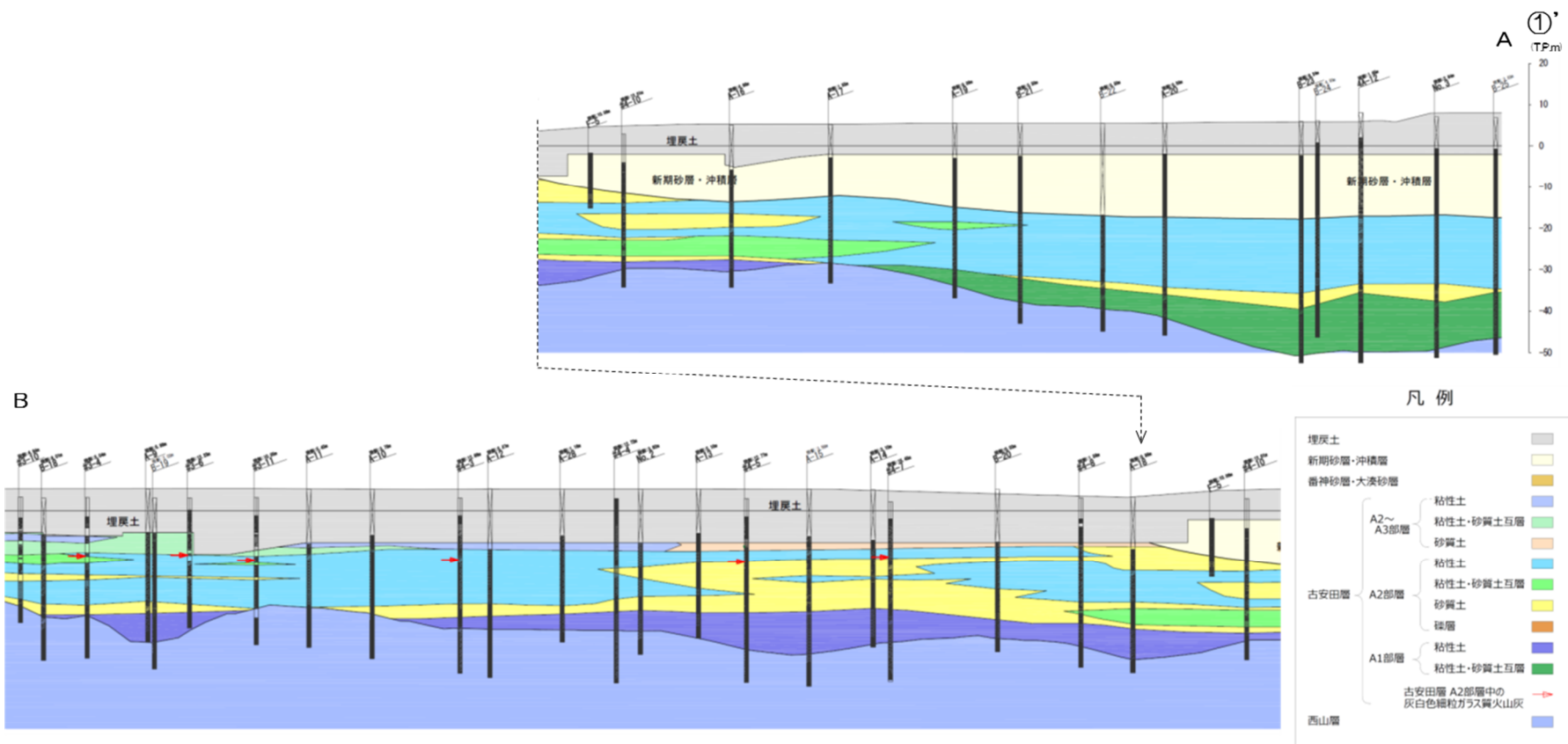




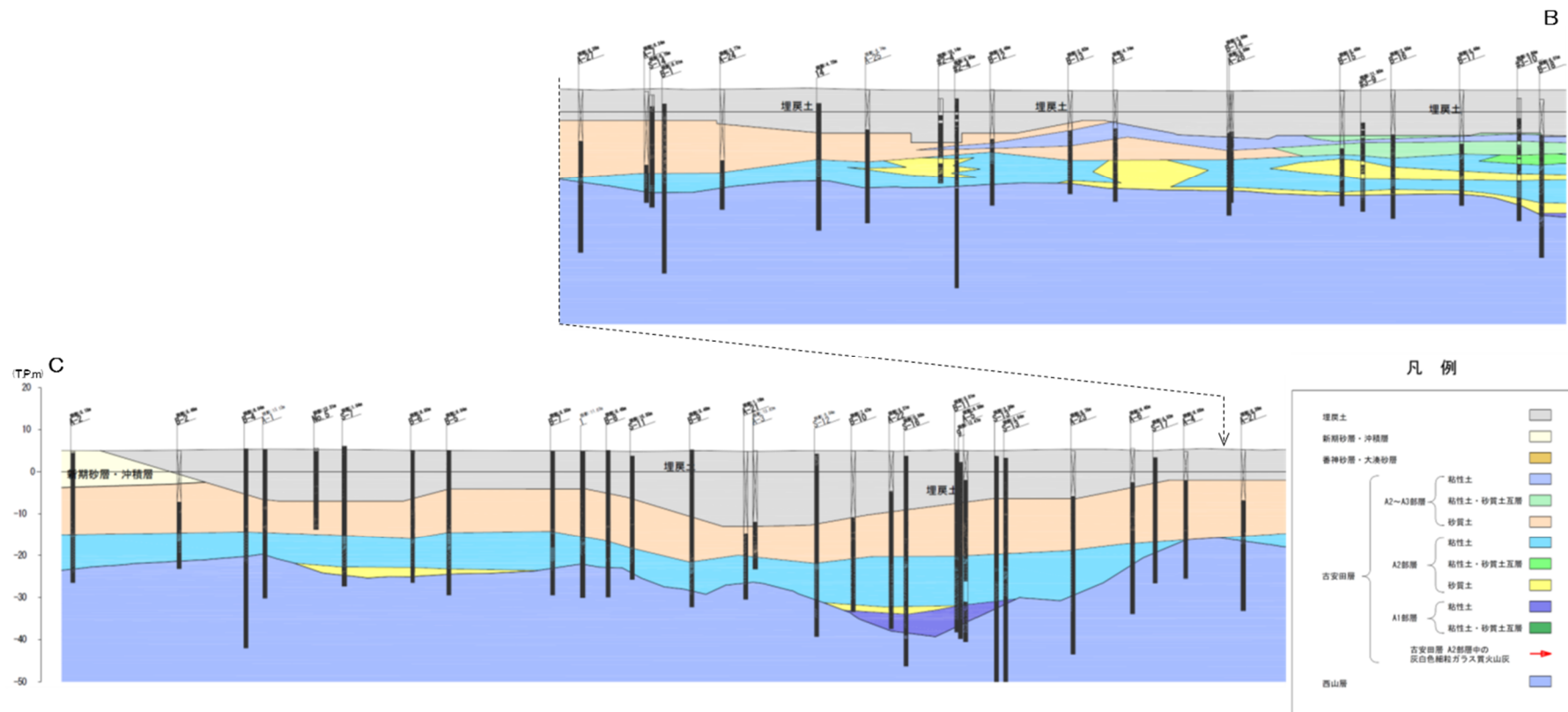


第 11-2-4 図 荒浜側の砂層分布

(a) 荒浜側 全体平面図



第 11-2-4 図 荒浜側の砂層分布  
(b) ① - ①' (A~B) 断面



第 11-2-4 図 荒浜側の砂層分布

(c) ① - ①' (B~C) 断面

### 3. 液状化試験位置とその代表性

#### 3.1 液状化試験位置の選定

大湊側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

液状化試験については、砂層の分布状況から比較的砂層が厚く堆積している6号炉取水路付近の地点を選定し（O-1）、試料を採取して液状化試験を実施した。

常設代替交流電源設備基礎や7号炉軽油タンク基礎等の周辺地盤に分布している新期砂層・沖積層については、敷地の全域に分布していることから4号炉で確認している新期砂層・沖積層と連続する地層であると想定される。

第11-3-1図に大湊側の試料採取地点位置図（O-1）を示す。

荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に3～4号炉海側に分布する古安田層中の砂層、主に1～2号炉海側に分布する古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

荒浜側については、砂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試験を実施した。

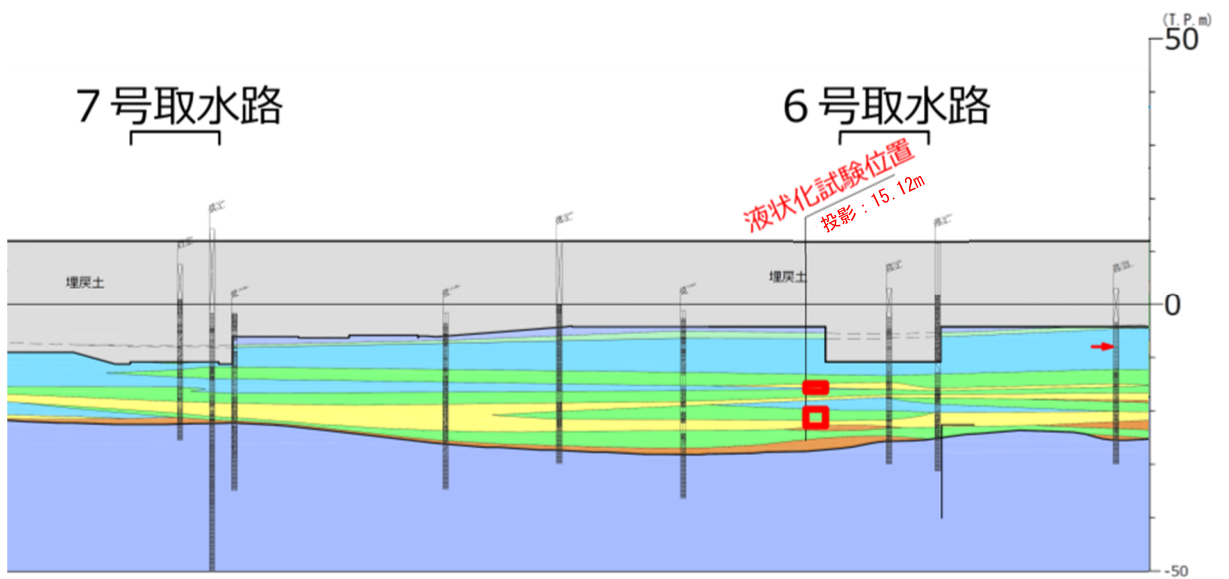
- 1～2号炉海側の古安田層中の砂層は、3～4号炉海側から連続するシルト主体の地層の上位に位置する砂層が連続して分布していることから、1号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-1）。
- 3～4号炉海側の古安田層中の砂層は、その分布状況から4号側の比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-2）。
- 新期砂層・沖積層は、10m以上の層厚で連続して分布していることから、比較的砂層が厚く堆積している地点を選定した（A-3）。



(a) 平面図

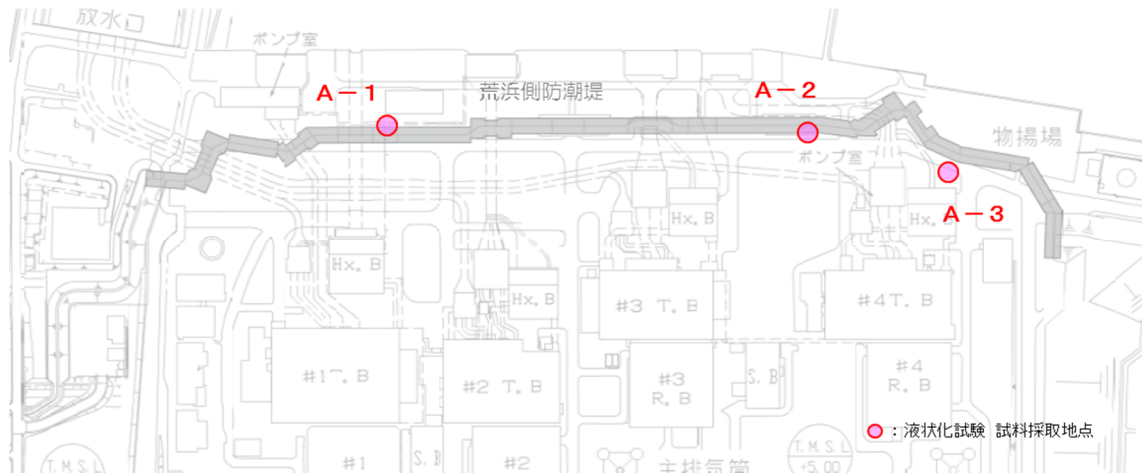
第 11-3-1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)

凡例



(b) 断面図

第 11-3-1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)

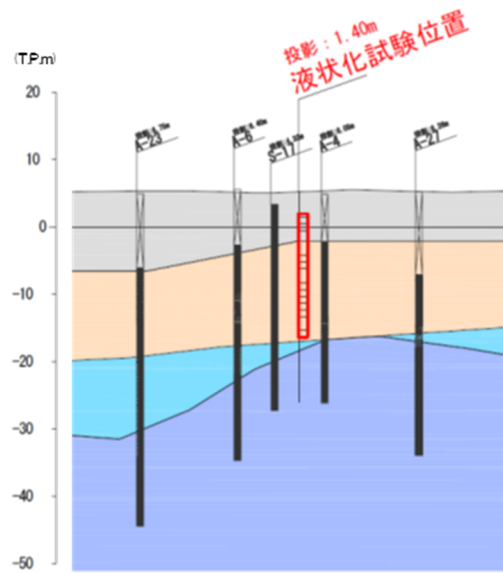


(a) 平面図

第 11-3-2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)

凡例

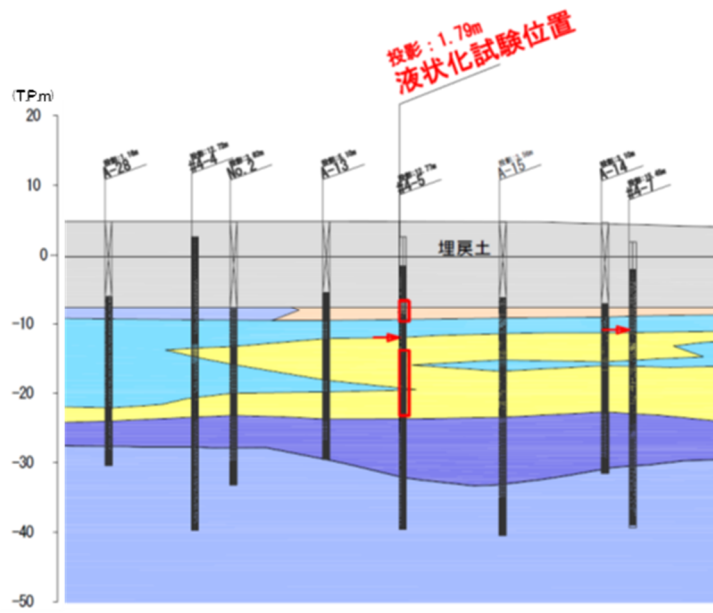
|             |           |                             |  |
|-------------|-----------|-----------------------------|--|
| 埋炭土         |           | 粘性土                         |  |
| 新期砂層・沖積層    |           | 粘性土・砂質土互層                   |  |
| 番神砂層・大湊砂層   |           | 砂質土                         |  |
| A2～<br>A3部層 | 粘性土       | 粘性土・砂質土互層                   |  |
|             |           | 砂質土                         |  |
|             |           | 粘性土                         |  |
|             | A2部層      | 粘性土・砂質土互層                   |  |
|             |           | 砂質土                         |  |
|             |           | 礫層                          |  |
| A1部層        | 粘性土       |                             |  |
|             | 粘性土・砂質土互層 |                             |  |
| 西山層         |           | 古安田層 A2部層中の<br>灰白色細粒ガラス質火山灰 |  |



(b) 断面図 (A-1)

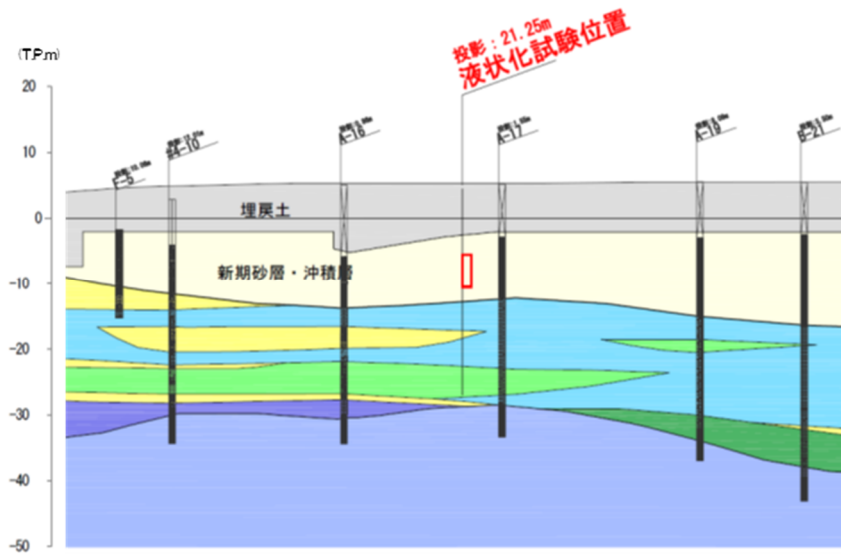
第 11-3-2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)





(c) 断面図 (A-2)

第 11-3-2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)



(d) 断面図 (A-3)

第 11-3-2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)

### 3.2 液状化試験選定個所の代表性確認

液状化試験個所における基本物性（粒径加積曲線，N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度）について，第11-3-3～6図に示す。

これらの基本物性について，液状化試験選定個所の代表性確認を目的に，液状化試験個所と周辺調査個所の比較，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し，参考指標として粒径加積曲線及び密度（相対密度，乾燥密度）を選定した。第11-3-1表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）の簡易パラメータ設定法に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，指標として選定した。

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，液状化強度比との相関が高いと考えられることから，指標として選定した。

粒径加積曲線や密度（相対密度，乾燥密度）は，基本的な土の物性値であることから，参考指標として選定した。

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 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（2006）」や「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）」，道路橋示方書によると，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に応じて設定するという考え方が示されている。

液状化試験個所と周辺調査個所の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」と称す）」について整理した。

#### 【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（2006）】

- 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。
- 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。
- 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。

#### 【港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）】

- 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。
- 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。
- 特性値は、導出値のばらつきに関する補正係数  $b_1$  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にする。

#### 【道路橋示方書】

- 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顧慮した上で、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。
- 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。

各液状化試験個所とその対象地層の周辺調査個所における基本物性を整理した。第 11-3-7 図に液状化試験個所と周辺調査個所の位置図、第 11-3.8～14 図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。

A-1 地点の洪積砂層 I は、周辺調査個所と比べて、N 値が同程度であり細粒分含有率が小さいこと、A-1 の洪積砂層 II は、細粒分含有率が若干大きいものの N 値が小さいことから、代表性を有していると評価した。ただし、当該地層は層厚が厚く分布範囲が広いことを踏まえ、データ拡充を目的とした追加調査を実施する。

A-2 地点の洪積砂層 I は、周辺調査個所と比べて、N 値及び細粒分含有率の  $-1\sigma$  値が大きいものの、液状化強度との相関が最も高い N 値の平均値は小さいことから、代表性を有していると評価した。ただし、A-2 地点の洪積砂層 I は、A-1 地点の洪積砂層 I、II と同時代に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、後述する液状化試験結果から非液状化層と評価しているものの、物性設定においては保守的にサイクリックモビリティを示す A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果を用いる方針とする。

A-2 地点の洪積砂層 II は、周辺調査個所と比べて、N 値及び細粒分含有率が同程度若しくは小さいことから、代表性を有していると評価した。なお、後述する液状化試験結果から非液状化層と評価している A-2 地点の洪積砂層 II は、主にサイクリックモビリティ

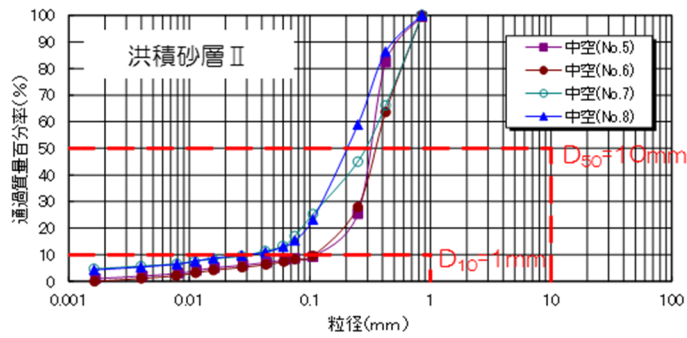
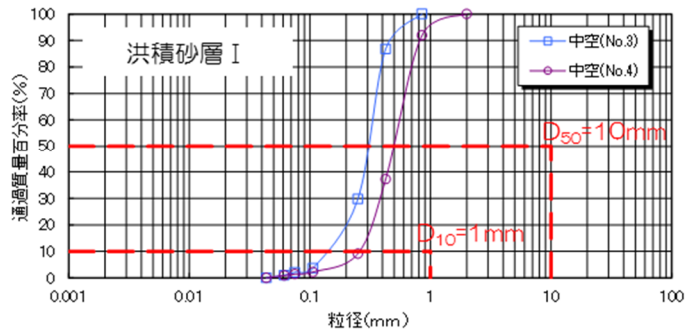
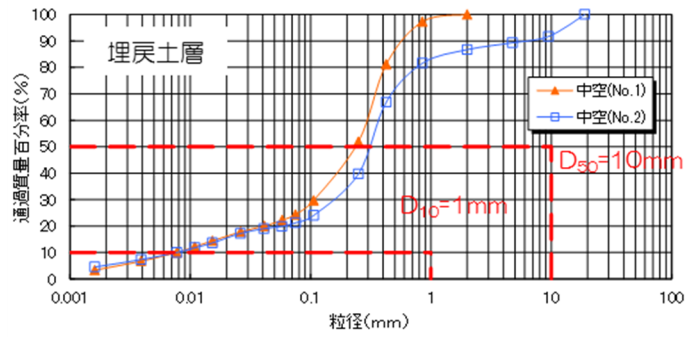
イを示すA-1地点の洪積砂層Ⅰ、Ⅱ及びA-2地点の洪積砂層Ⅰの下位に分布する砂層であり、より古い時代に堆積した砂層である。

O-1地点の洪積砂質土層Ⅰ、Ⅱは、周辺調査個所と比べて、細粒分含有率の大きい試料が1試料あることで平均値が若干大きいもののN値が同程度であることから、代表性を有していると評価した。ただし、液状化試験個所の粒径加積曲線が周辺調査個所よりばらつきが大きいこと、6、7号炉の申請であることも踏まえ、N値のデータが少ない7号取水路周辺でデータ拡充を目的とした追加調査を実施する。

A-3地点の新期砂層・沖積層は、荒浜側の周辺調査個所と比べて、N値及び細粒分含有率がいずれも小さく下限付近であることから、試験は保守的な個所で実施していると評価した。

A-3地点の新期砂層・沖積層は、大湊側の周辺調査個所と比べて、細粒分含有率が小さいものの、N値が大きいことから、大湊側の新期砂層・沖積層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。

A-1地点の埋戻土層は、N値のみの比較ではあるものの、液状化強度との相関が最も高いN値が周辺調査個所と比べて小さく下限付近であることから、試験は保守的な個所で実施していると評価した。

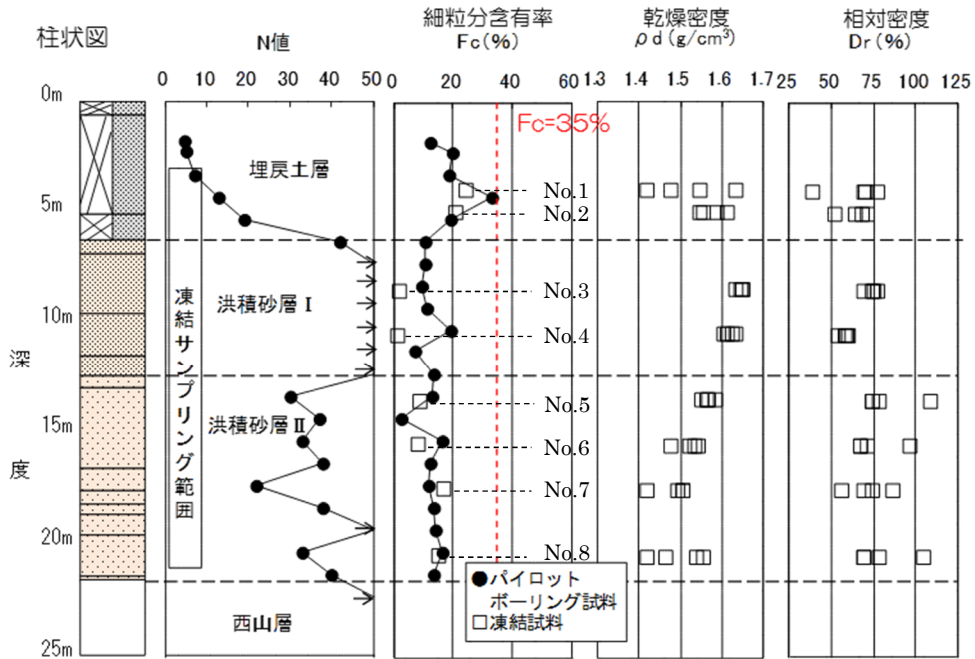


(a) 粒径加積曲線

第 11-3-3 図 液状化試験個所の基本物性 (A-1)

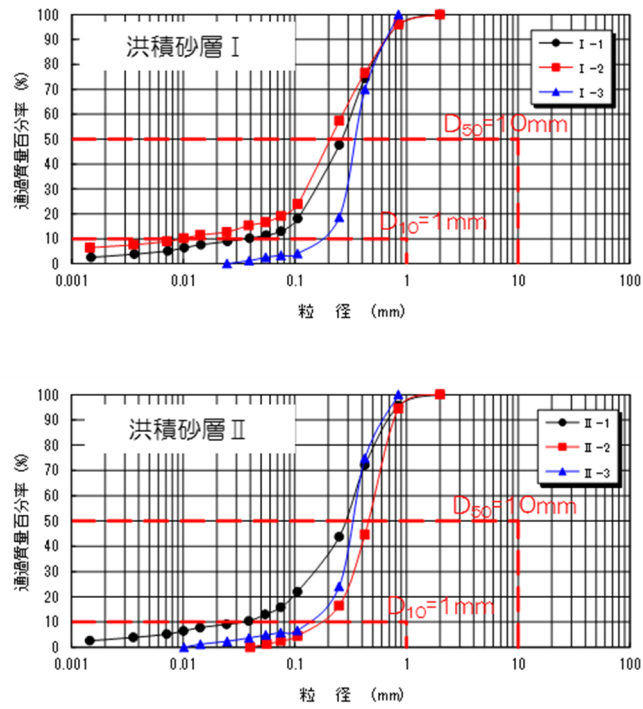
細粒分含有率：粒度0.075mm未満の土粒子の質量百分率

相対密度： $D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$ ， $e_{\max}$ ：最大間隙比， $e_{\min}$ ：最小間隙比，  
 $e$ ：間隙比（間隙の体積÷土粒子の体積）

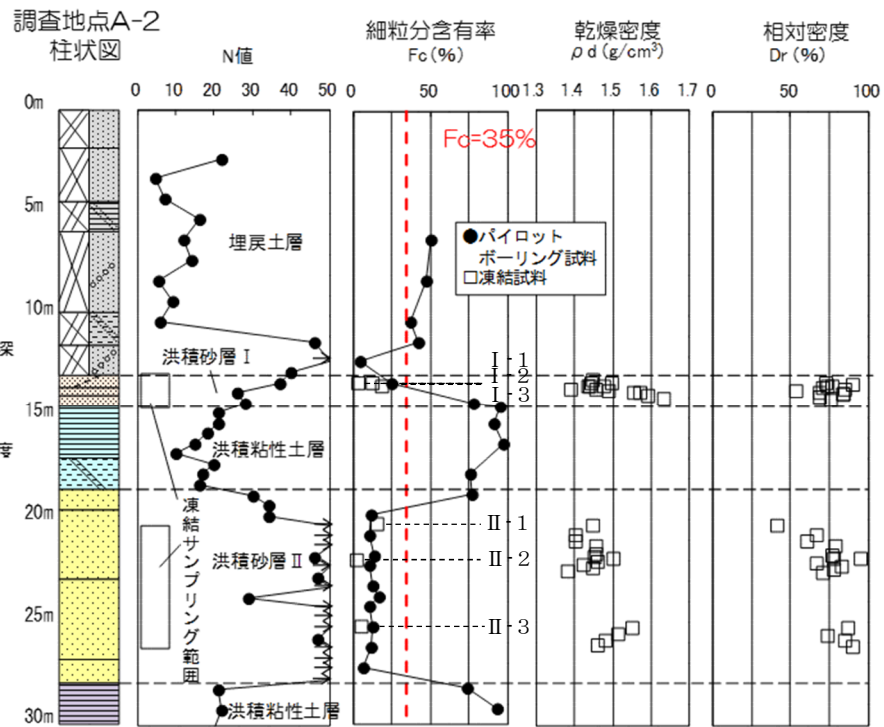


※古安田層中の砂層は、N値50以上の砂層（洪積砂層 I）とN値50以下の地層（洪積砂層 II）に区分して試験を実施した。

(b) 基本物性（N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度）の深度分布  
 第 11-3-3 図 液状化試験個所の基本物性（A-1）

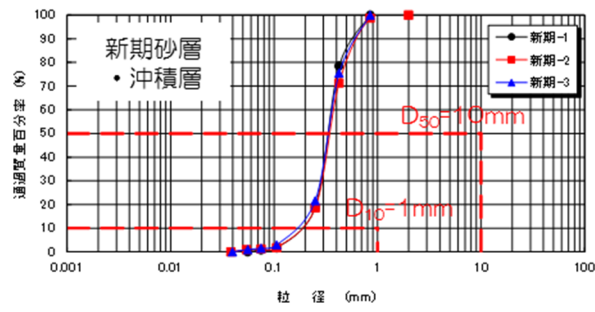


(a) 粒径加積曲線

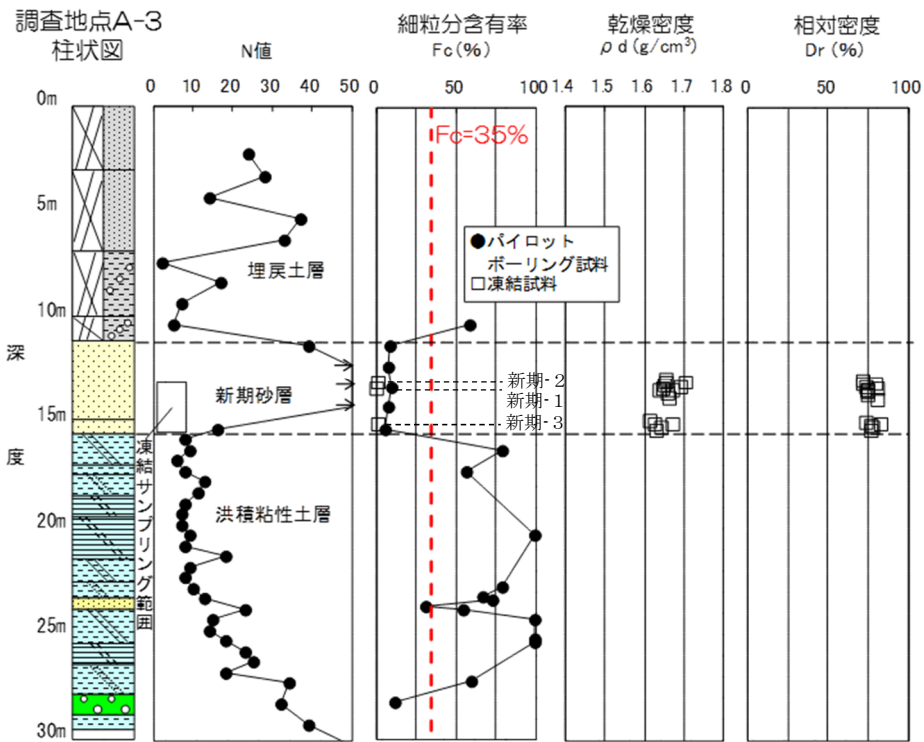


※古安田層中の砂層は、上から洪積砂層 I と洪積砂層 II に区分して試験を実施した。

(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布  
第 11-3-4 図 液状化試験個所の基本物性 (A-2)



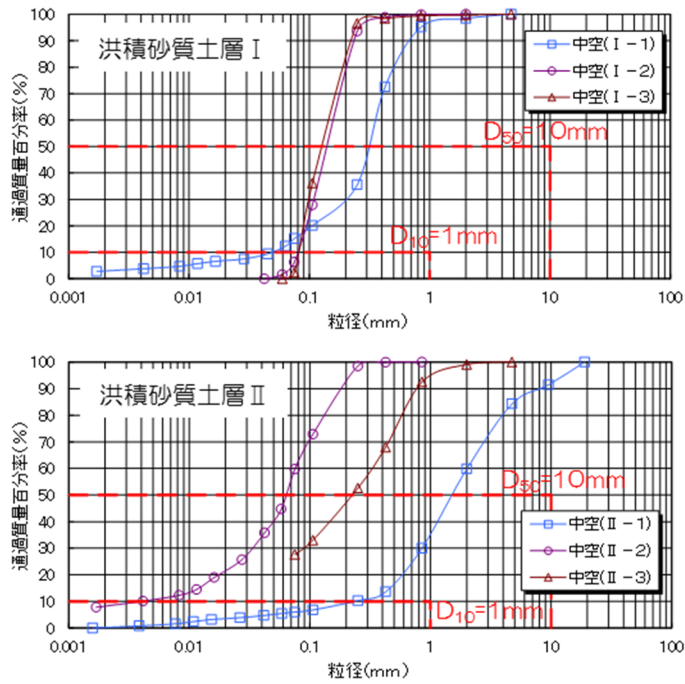
(a) 粒径加積曲線



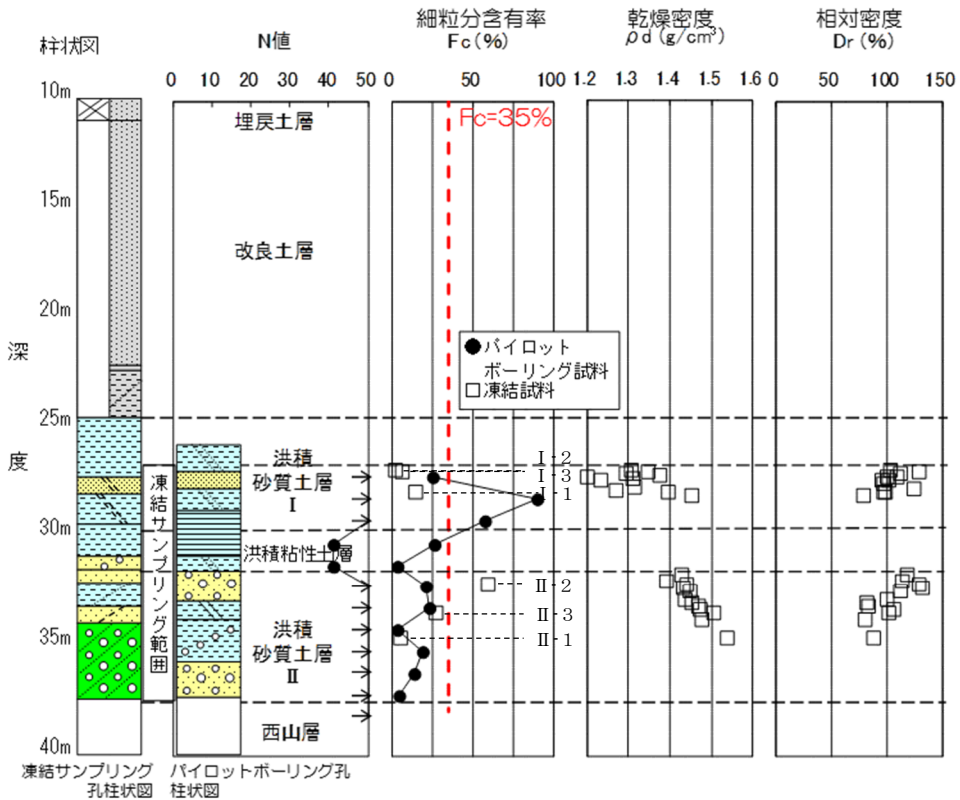
(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布

第 11-3-5 図 液状化試験個所の基本物性 (A-3)





(a) 粒径加積曲線



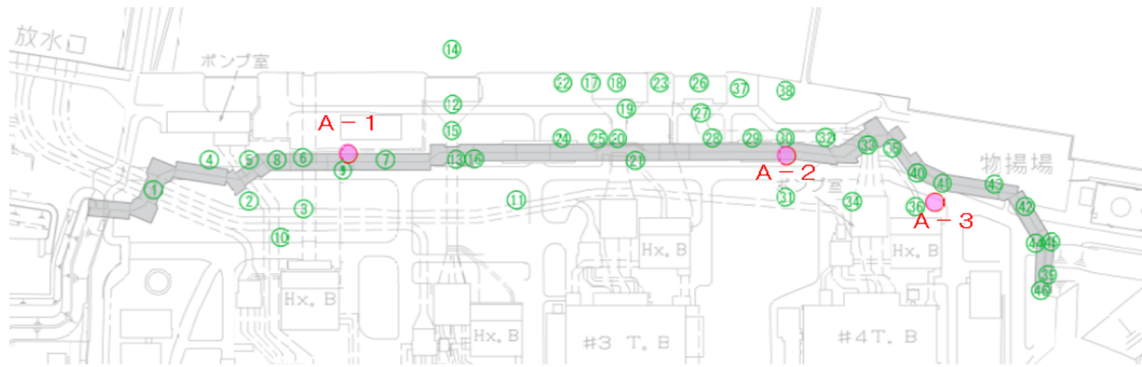
※古安田層中の砂層は同時代の地層であるが、上位を洪積砂質土層 I、下位を洪積砂質土層 II と区分し、それぞれの拘束圧に応じて液状化試験を実施した。

(b) 基本物性 (N値・細粒分含有率・乾燥密度・相対密度) の深度分布  
第 11-3-6 図 液状化試験個所の基本物性 (O-1)

第 11-3-1 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                                                                                                                                    | 液状化強度比 $R_L$ の算定に用いる主物性                   | 液状化強度比の補正に用いる物性                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <p>道路橋示方書</p> <p>(下水道施設の耐震対策指針と解説, 日本下水道協会, 2006)</p> <p>(河川砂防技術基準(案)同解説 設計編, 日本河川協会編, 1997)</p> <p>(高圧ガス設備等耐震設計指針, 高圧ガス保安協会, 2000)</p> | <p><b>N値</b></p> <p>(有効上載圧を考慮した補正を行う)</p> | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                                 |
| <p>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, 2007</p> <p>(部分改訂, 2012)</p>                                                                        |                                           | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                                 |
| <p>建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, 2001</p> <p>(水道施設耐震工法指針・同解説, 日本水道協会, 1997)</p>                                                                   |                                           | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p>                                 |
| <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</p>                                                                                          |                                           | <p>細粒分含有率 <math>F_c</math></p> <p>平均粒径 <math>D_{50}</math></p> |

- : 液状化試験 試料採取位置
- : 標準貫入試験位置または物理特性試料採取位置  
(○内数値は位置番号, 荒浜側①~④⑥, 大湊側④⑨~⑥②)

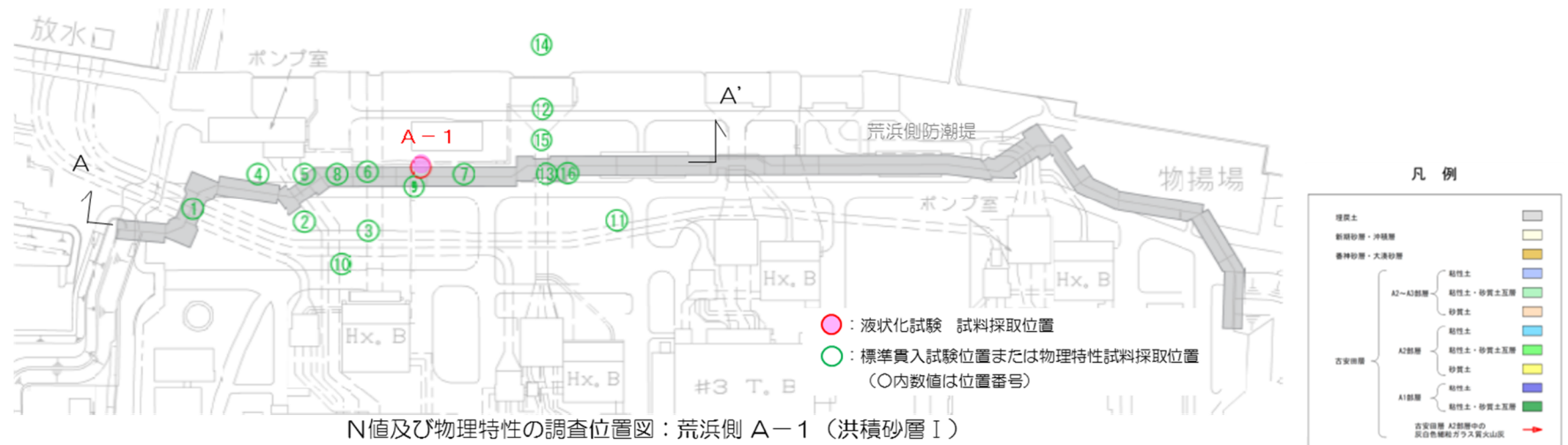


(a) 荒浜側

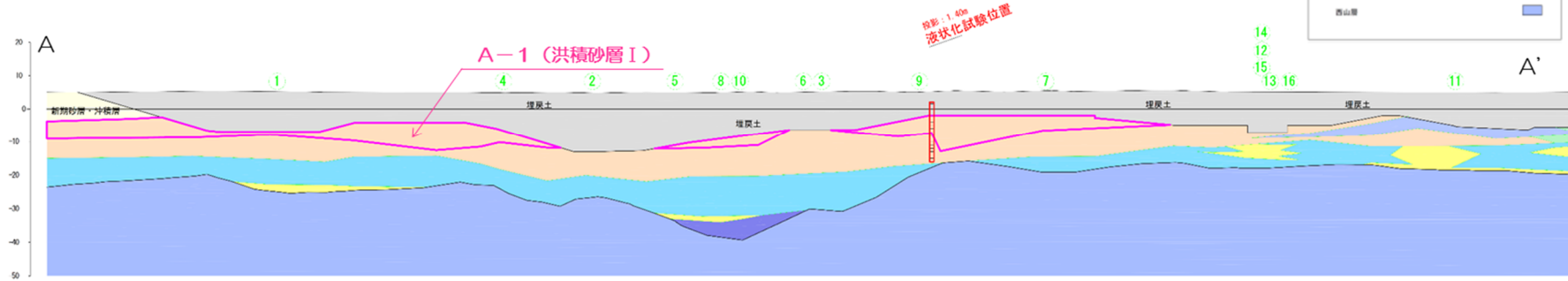


(b) 大湊側

第 11-3-7 図 液状化試験個所と周辺調査個所の位置図



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-1（洪積砂層 I）



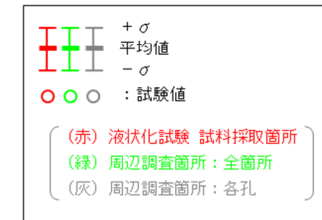
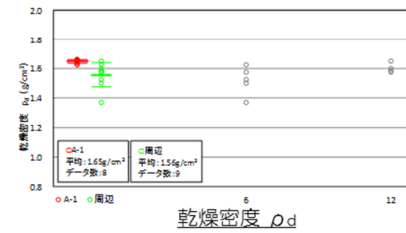
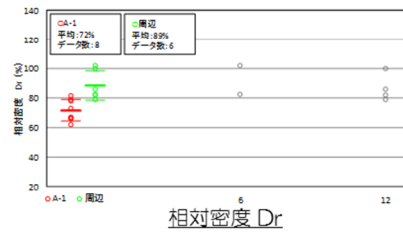
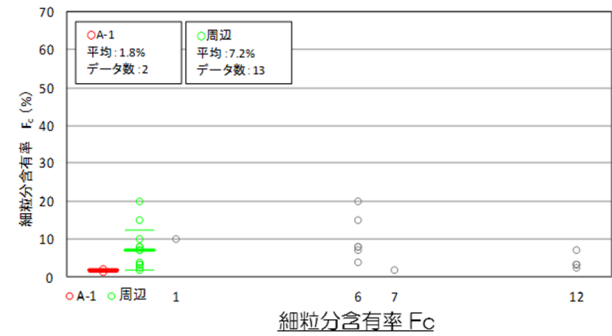
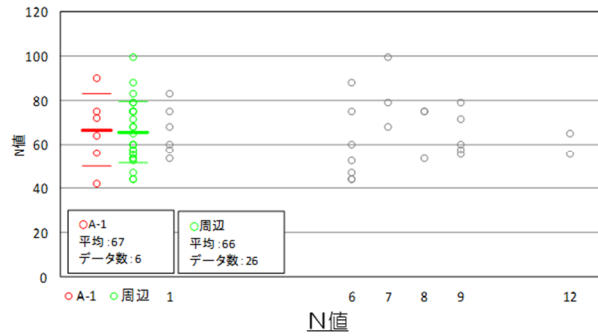
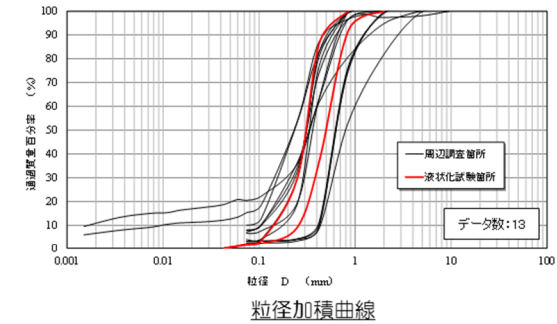
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-1（洪積砂層 I）

(a) 比較対象位置図

第 11-3-8 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（A-1 地点の洪積砂層 I）

- **N値**：液状化試験箇所と周辺調査箇所の平均値及び-1σ値は同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。

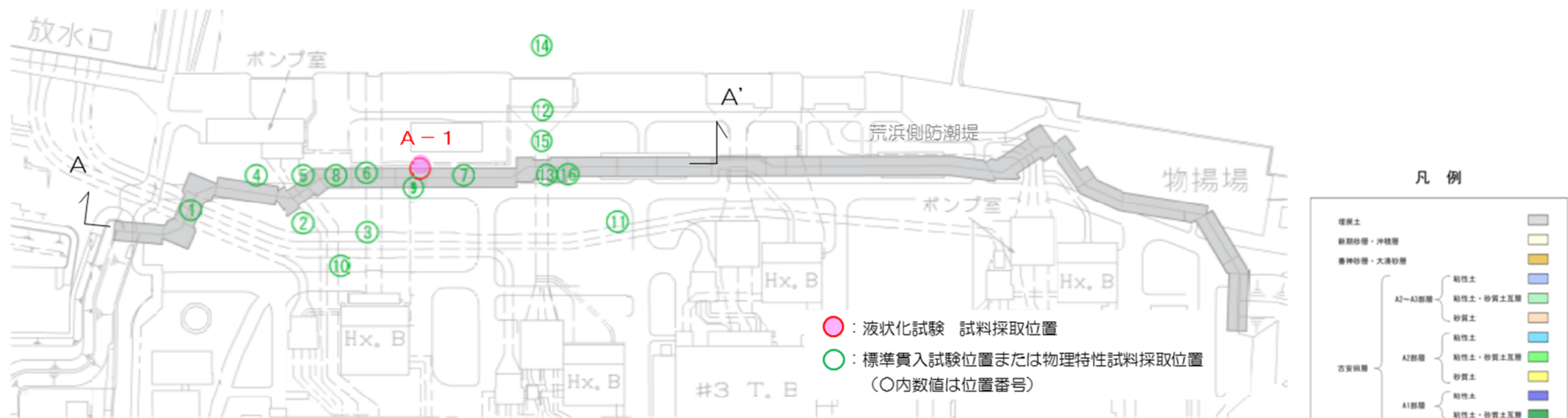
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より大きい。



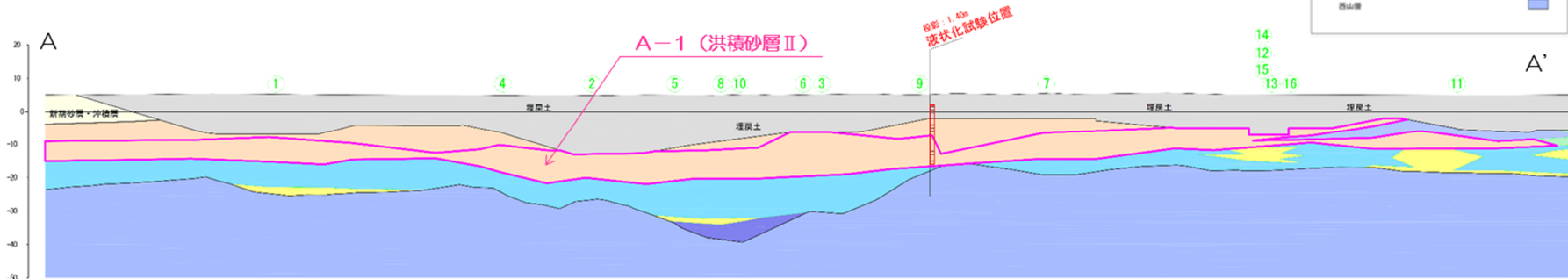
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1 (洪積砂層 I)

(b) 基本物性比較

第 11-3-8 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-1 地点の洪積砂層 I)



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-1（洪積砂層Ⅱ）



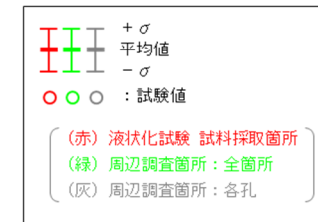
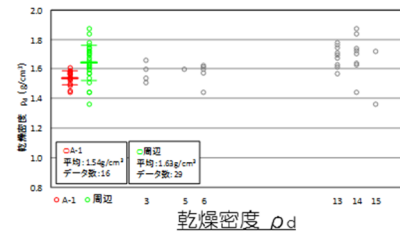
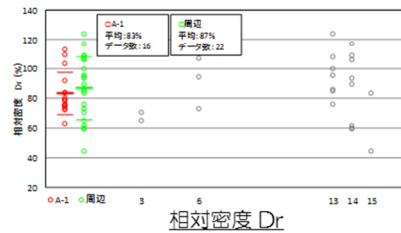
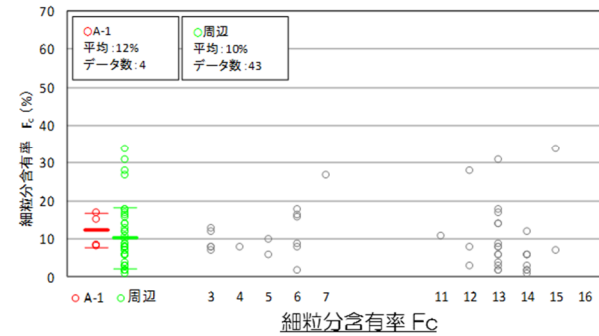
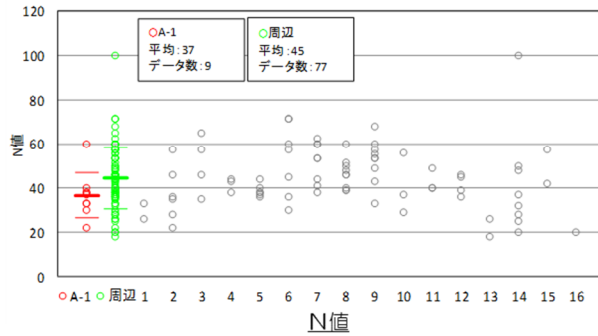
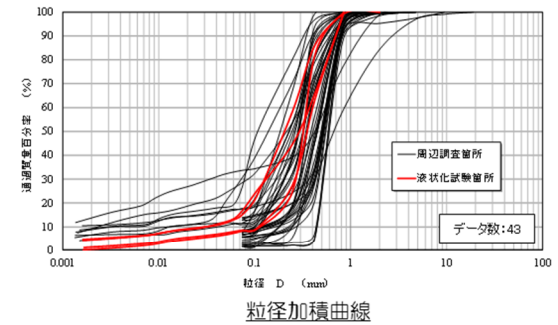
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-1（洪積砂層Ⅱ）

(a) 比較対象位置図

第 11-3-9 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（A-1 地点の洪積砂層Ⅱ）

- **N値**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は周辺調査箇所より若干大きい（ばらつきが小さい）。

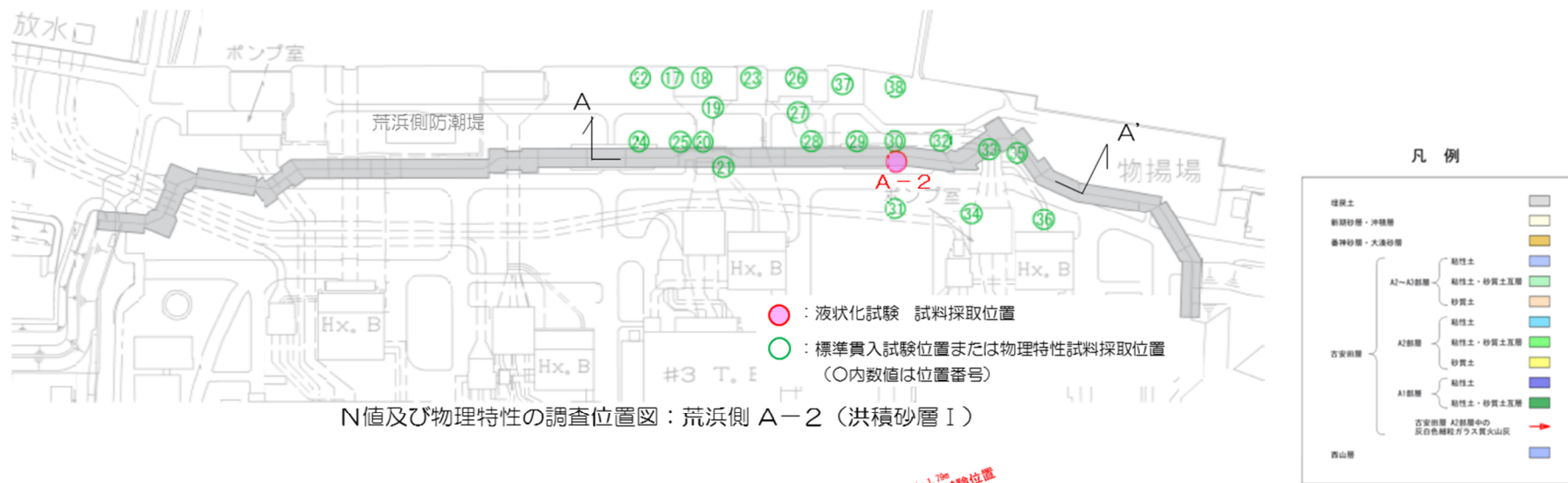
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所と同程度である。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。



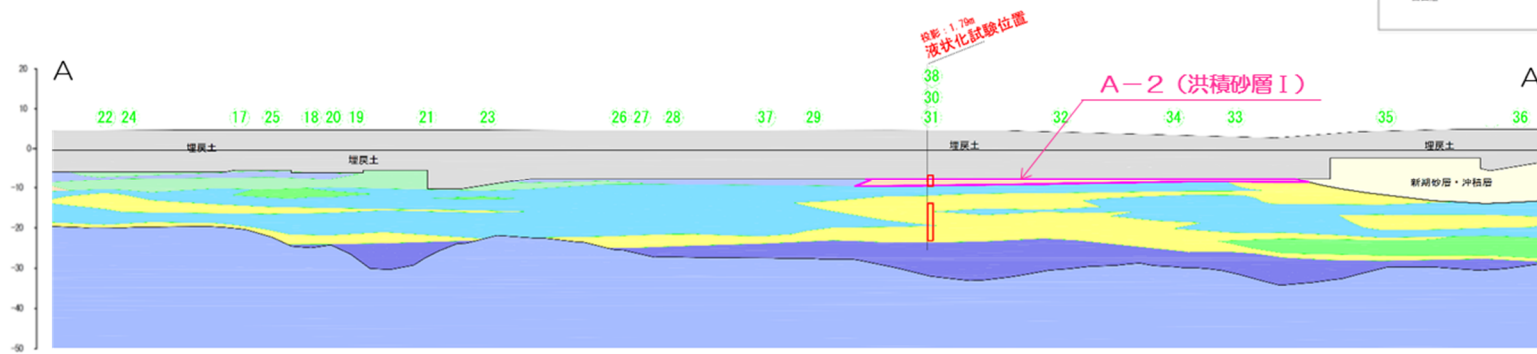
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1 (洪積砂層Ⅱ)

(b) 基本物性比較

第 11-3-9 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-1 地点の洪積砂層Ⅱ)



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-2（洪積砂層 I）



N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-2（洪積砂層 I）

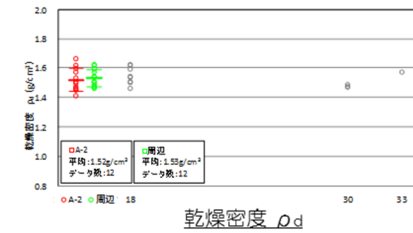
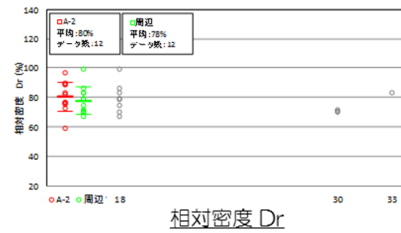
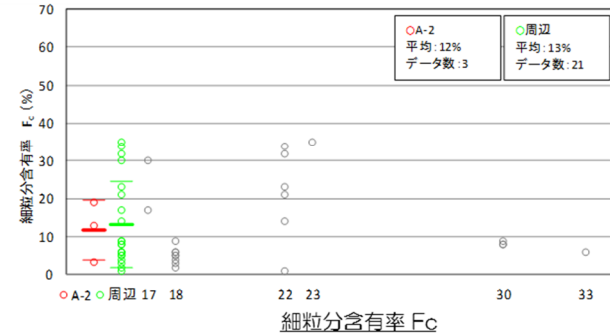
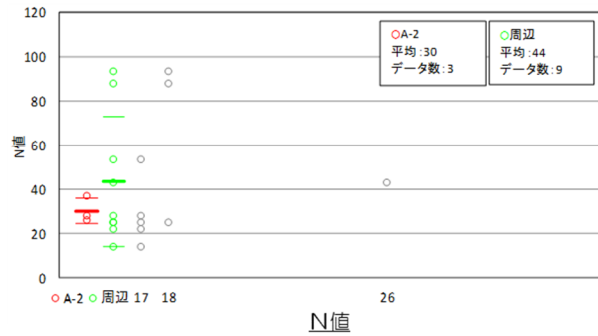
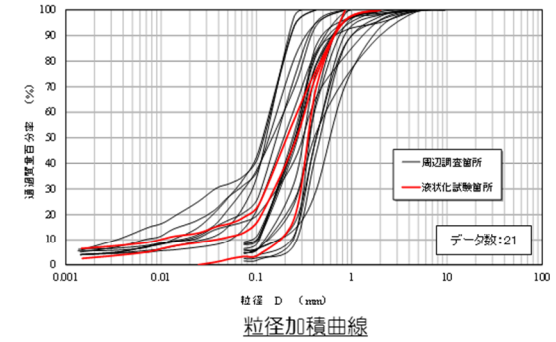
(a) 比較対象位置図

第 11-3-10 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層 I）



- **N値**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より小さく、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より大きい（ばらつきが小さい）。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は、周辺調査箇所と同程度であり、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より若干大きい。

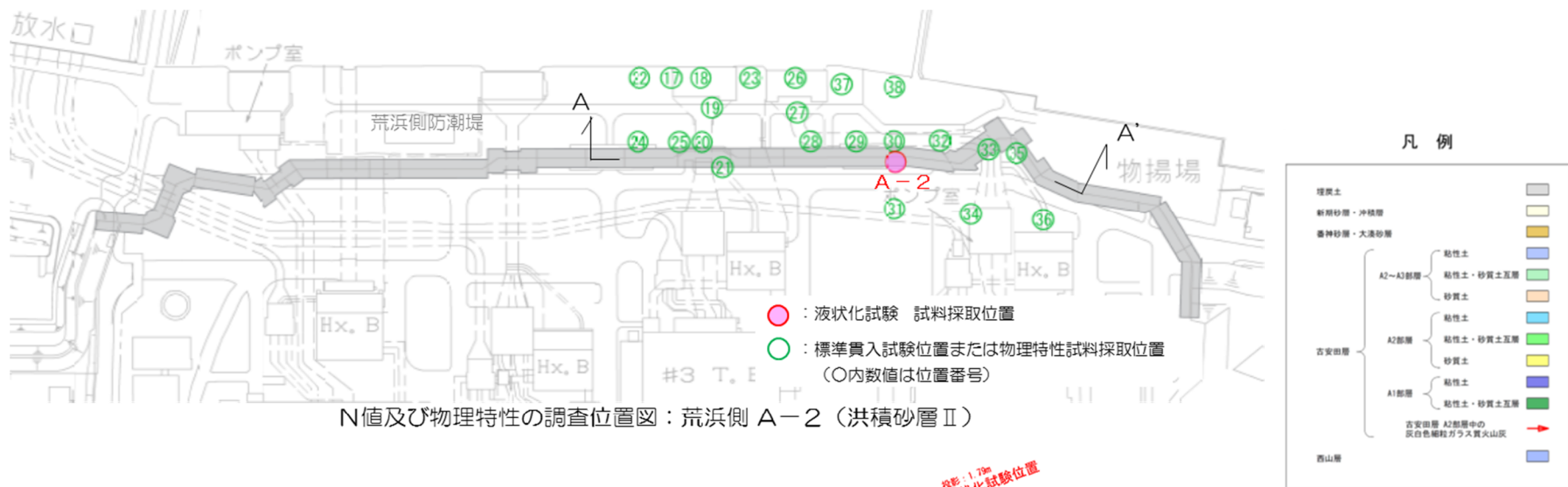
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所と同程度である。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より若干小さい。



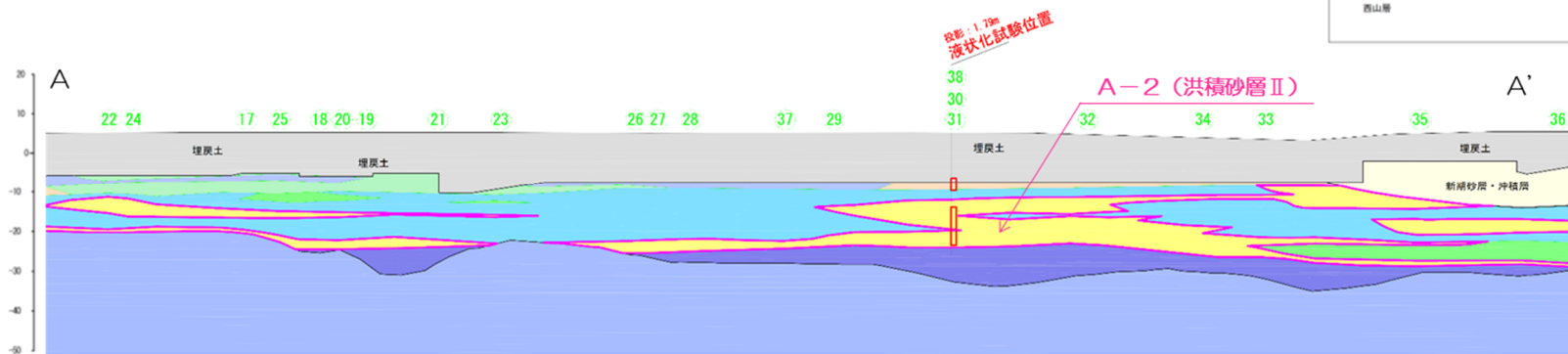
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2 (洪積砂層 I)

(b) 基本物性比較

第 11-3-10 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-2 地点の洪積砂層 I)



N値及び物理特性の調査位置図：荒浜側 A-2（洪積砂層Ⅱ）



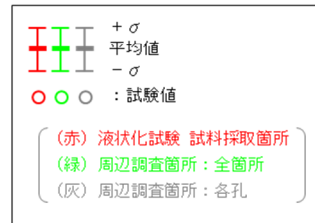
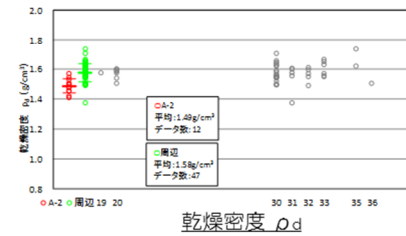
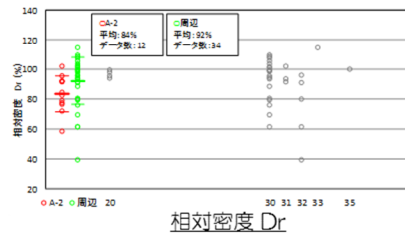
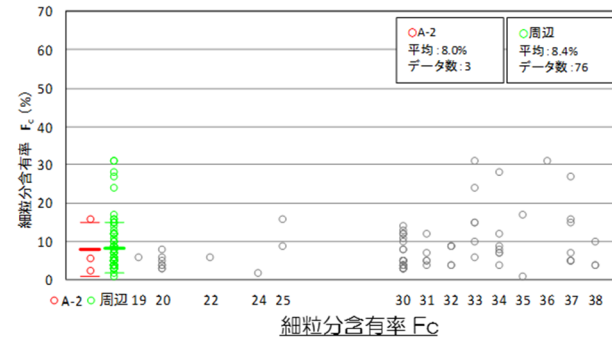
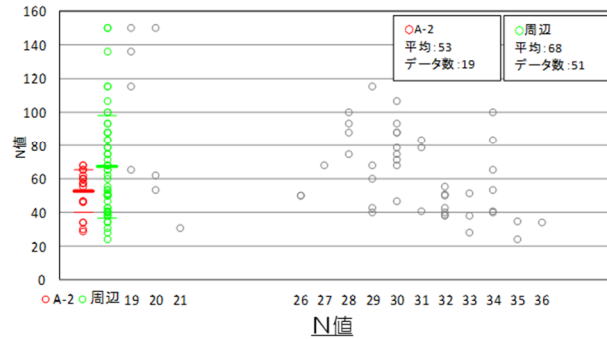
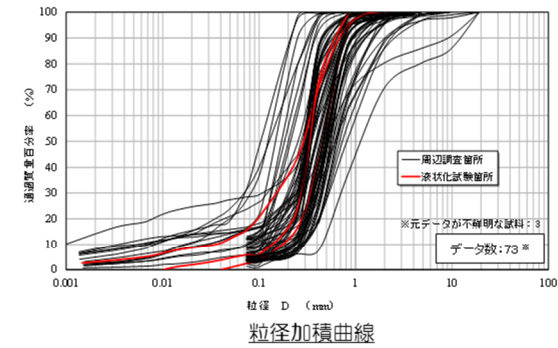
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-2（洪積砂層Ⅱ）

(a) 比較対象位置図

第 11-3-11 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層Ⅱ）

- **N値**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より小さく、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所と同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所と同程度であり、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より小さい。

(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。



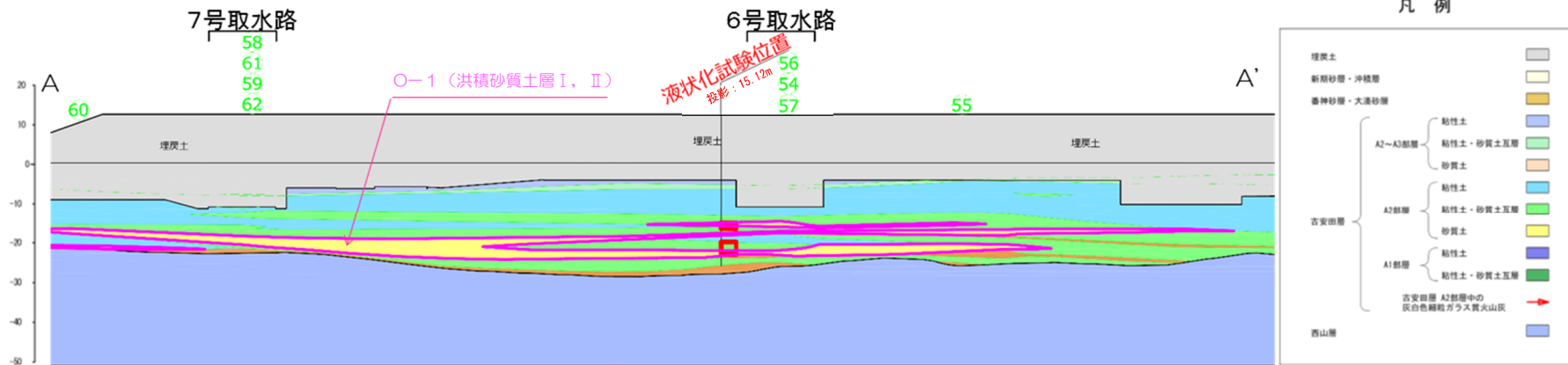
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2 (洪積砂層Ⅱ)

(b) 基本物性比較

第 11-3-11 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-2 地点の洪積砂層Ⅱ)



N値及び物理特性の調査位置図：大湊側 O-1（洪積砂質土層 I, II）



N値及び物理特性の整理対象層：大湊側 O-1（洪積砂質土層 I, II）

(a) 比較対象位置図

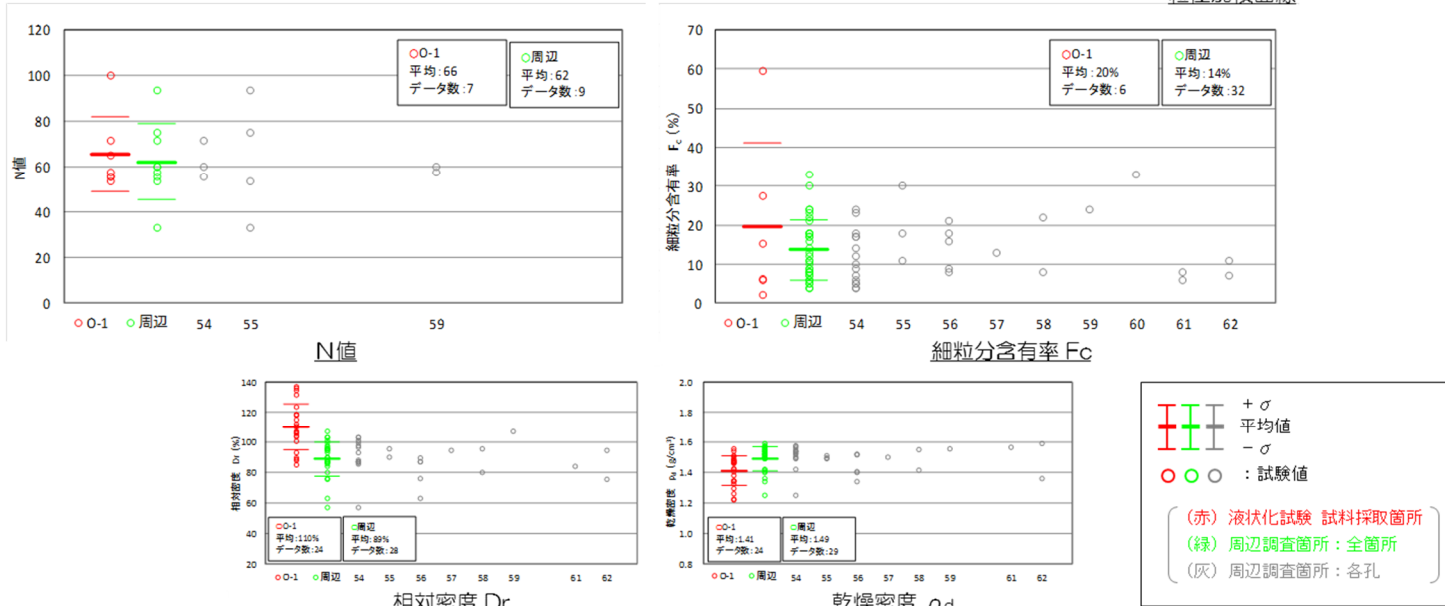
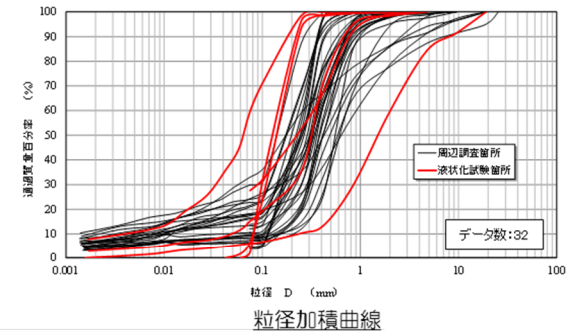
第 11-3-12 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（O-1 地点の洪積砂質土層 I, II）

- **N値**：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所と同程度である。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より大きく、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より小さい（ばらつきが大きい）。

(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所はばらつきが大きく、周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っていないデータがある。

相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より大きい。

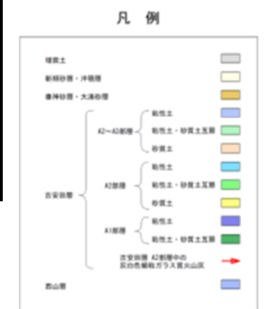
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。



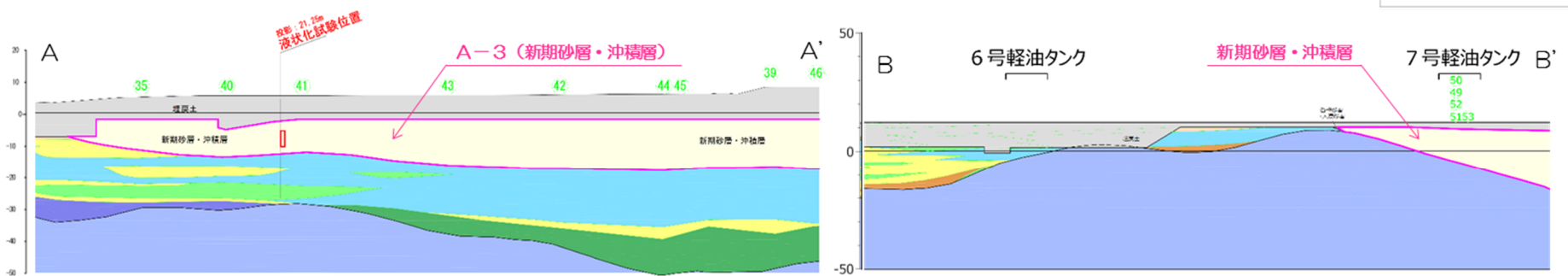
N値及び物理特性の比較 大湊側 O-1 (洪積砂質土層 I, II)

(b) 基本物性比較

第 11-3-12 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (O-1 地点の洪積砂質土層 I, II)



N値及び物理特性の調査位置図：A-3（新期砂層・沖積層）



N値及び物理特性の整理対象層：A-3（新期砂層・沖積層）

(a) 比較対象位置図

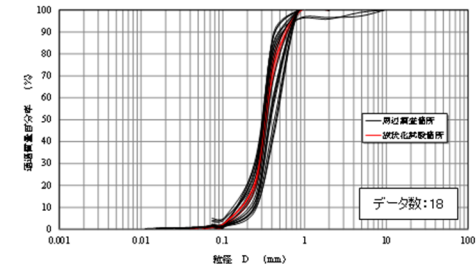
第 11-3-13 図 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較（A-3 地点の新期砂層・沖積層）

- **N値**：液状化試験箇所のN値は、荒浜側周辺調査箇所より小さく下限付近であり、大湊側の周辺調査箇所より大きい。
- **細粒分含有率**：液状化試験箇所の平均値は周辺調査箇所より小さく、 $-1\sigma$ 値は荒浜側の周辺調査箇所と同程度であり、大湊側の周辺調査箇所より小さい。

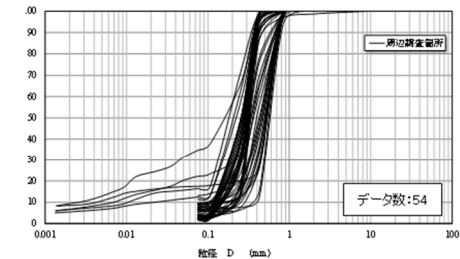
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っており、荒浜側はばらつきが小さく、よく一致している。

相対密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。

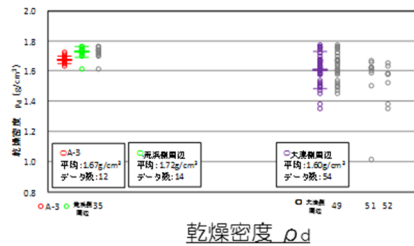
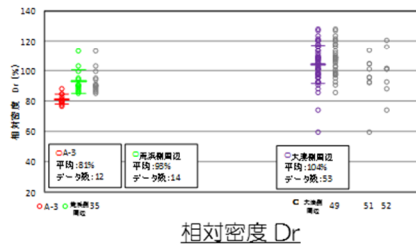
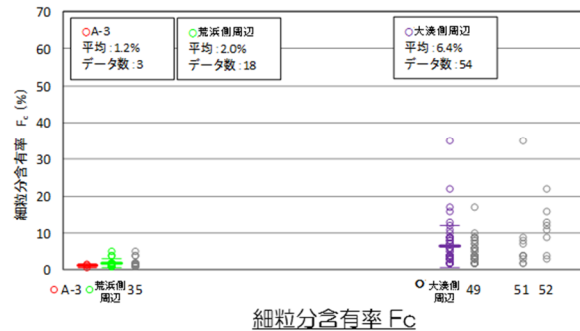
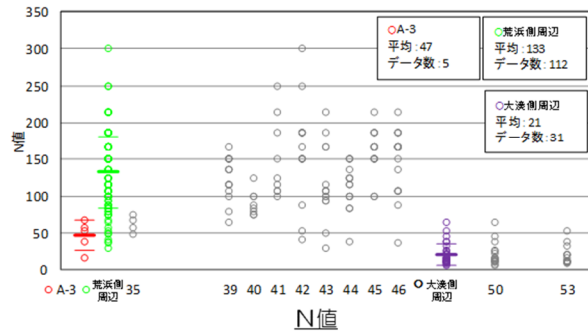
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、荒浜側の周辺調査箇所より小さく、大湊側の周辺調査箇所より大きい。



粒径加積曲線 (荒浜側)



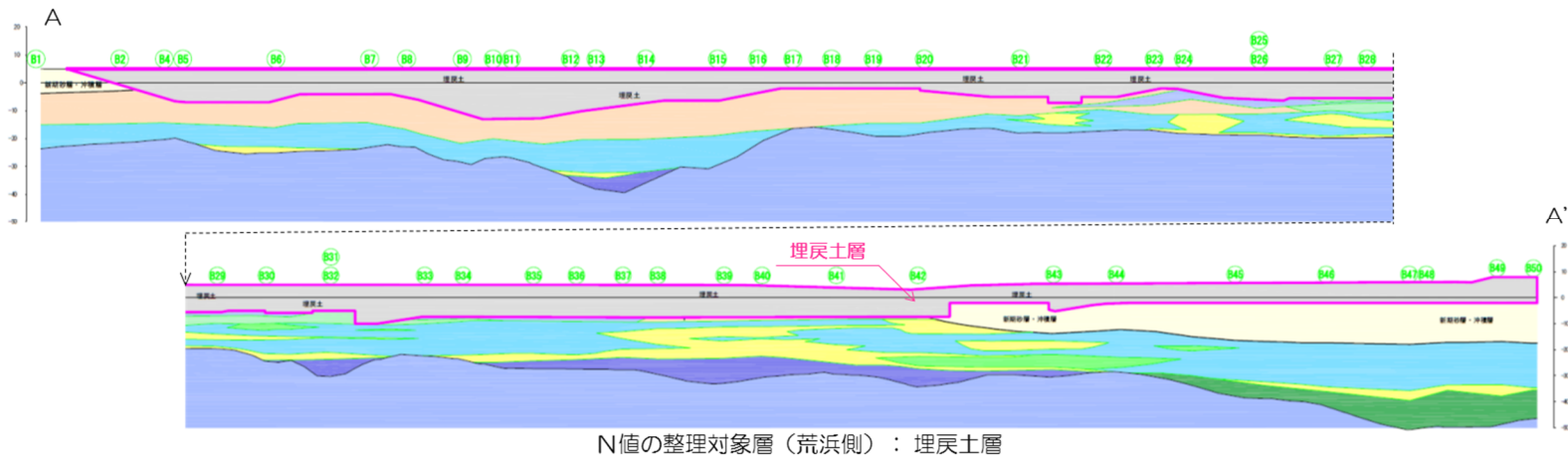
粒径加積曲線 (大湊側)



N値及び物理特性の比較 A-3 (新期砂層・沖積層)

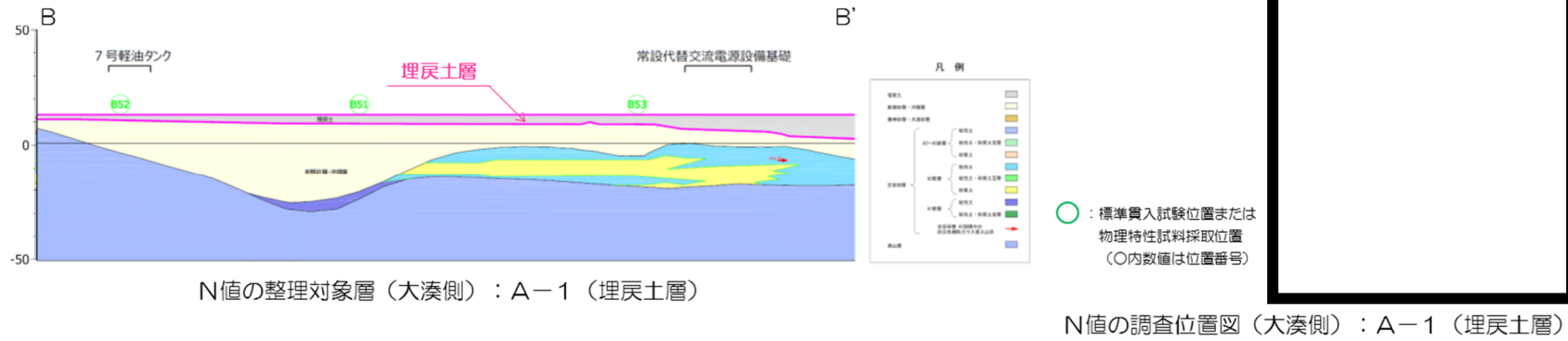
(b) 基本物性比較

第 11-3-13 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)



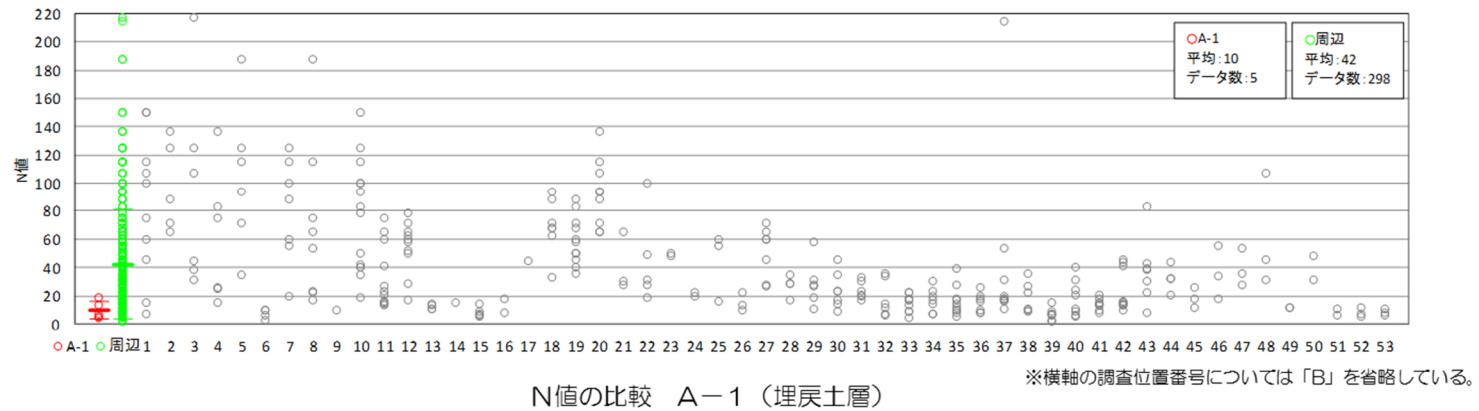
第 11-3-14 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-1 の埋戻土層）





(b) 比較対象位置図（大湊側）

■ **N値**：液状化試験箇所とのN値は、周辺調査箇所より小さく、下限付近である。



(b) 基本物性比較

第 11-3-14 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-1 の埋戻土層）

第 11-3-2 表 液状化試験個所と周辺調査個所の基本物性比較のまとめ

| 地層区分                     |      | N値 | 細粒分含有率 | 追加調査実施 |
|--------------------------|------|----|--------|--------|
| A-1<br>洪積砂層 I            | 平均値  |    |        | ○      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-1<br>洪積砂層 II           | 平均値  |    |        | ○      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-2<br>洪積砂層 I            | 平均値  |    |        | ※      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-2<br>洪積砂層 II           | 平均値  |    |        | -      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| O-1<br>洪積砂質土層 I,<br>II   | 平均値  |    |        | ○      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-3<br>新期砂層・沖積層<br>(荒浜側) | 平均値  |    |        | -      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-3<br>新期砂層・沖積層<br>(大湊側) | 平均値  |    |        | ○      |
|                          | -1σ値 |    |        |        |
| A-1<br>埋戻土層              | 平均値  |    | -      | ○      |
|                          | -1σ値 |    | -      |        |

：周辺調査箇所に対して液状化試験箇所が小さい  
(変動率 < -10%)

：周辺調査箇所と液状化試験箇所が同程度  
(-10% ≤ 変動率 ≤ 10%)

：周辺調査箇所に対して液状化試験箇所が大きい  
(変動率 > 10%)

※ 液状化強度特性の設定は、保守的に A-1 (洪積砂層 II) の液状化試験結果を用いる。

### 3.3 追加調査位置

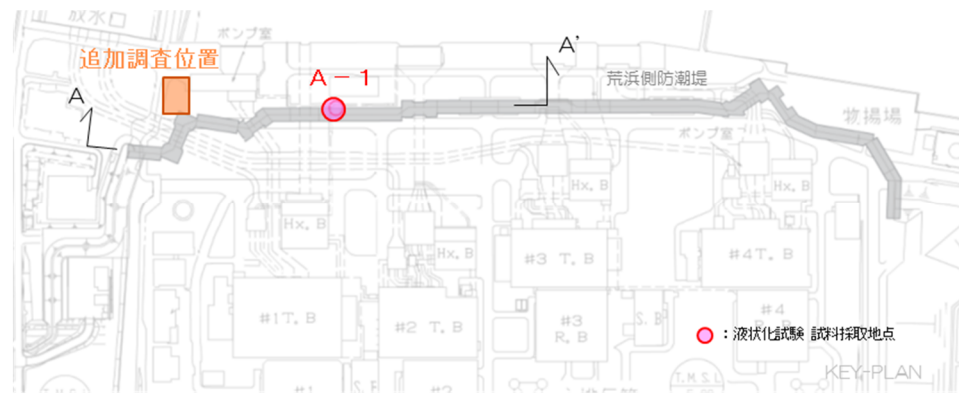
3.1 及び 3.2 の検討結果を踏まえて、第 11-3-15 図に追加調査実施予定地を示す。

荒浜側における A-1 地点の洪積砂層 I, II 及び A-2 地点の洪積砂層 I は、地質の連続性等の評価や周辺調査個所の N 値や細粒分含有率の比較から代表性を有していると評価した。ただし、層厚が厚く分布範囲が広いことを踏まえ、データ拡充を目的とした追加調査を実施する。なお、A-2 地点の洪積砂層 I は、A-1 地点の洪積砂層 I, II と同時に堆積した地層であること、N 値が A-1 地点の洪積砂層 II と同程度であることを踏まえ、物性設定においては保守的に A-1 地点の洪積砂層 II の試験結果を用いる方針とする。追加調査位置は、事前調査を実施し、A-1 地点の洪積砂層 I, II の両層を採取できる場所を選定する。

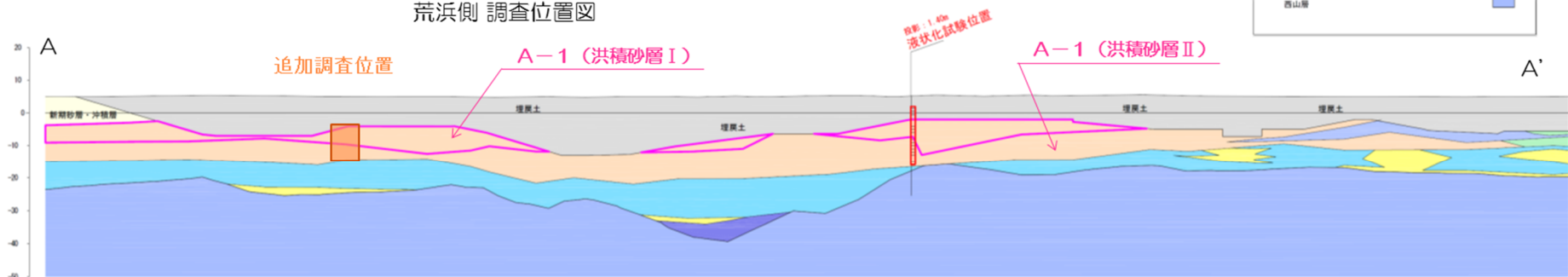
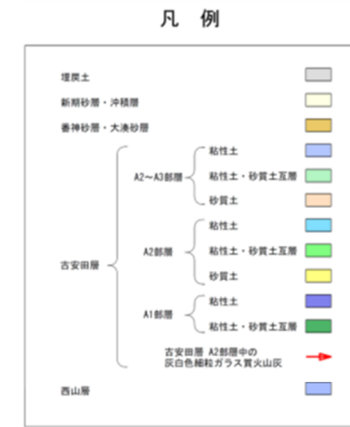
O-1 地点の洪積砂質土層 I, II は、地質の連続性等の評価や周辺調査個所の N 値や細粒分含有率の比較から代表性を有していると評価した。ただし、6, 7 号炉の申請であることを踏まえ、7 号取水路周辺でデータ拡充を目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、古安田層中に挟在する砂層から試料が確実に採取できる場所を選定する。

A-3 地点の新期砂層・沖積層は、大湊側の周辺調査個所と比べて、細粒分含有率が小さいものの、N 値が大きいことから、大湊側の新期砂層・沖積層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、新期砂層・沖積層から試料が確実に採取できる場所を選定する。

埋戻土層については、液状化試験を実施した A-1 地点の N 値が周辺調査個所に比べて小さく下限付近であることから、試験は保守的な個所で実施している評価した。ただし、大湊側での N 値のデータが少ないことから、大湊側の埋戻土層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、埋戻土層から試料が確実に採取できる場所を選定する。



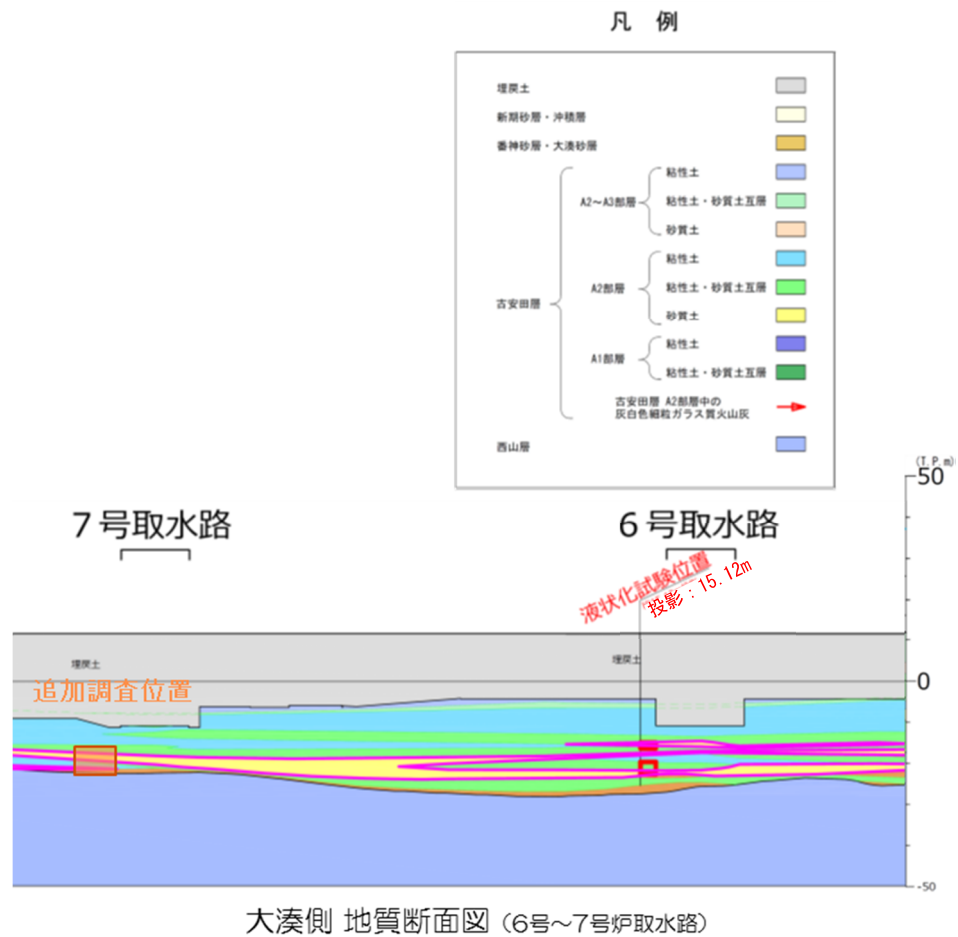
荒浜側 調査位置図



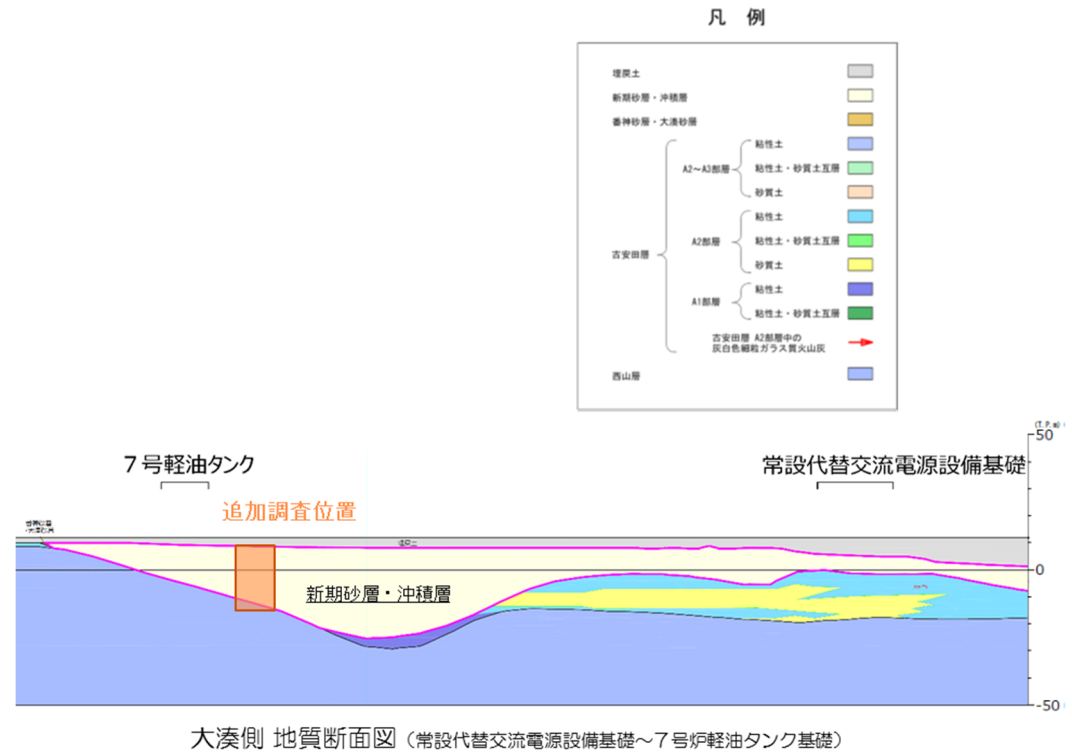
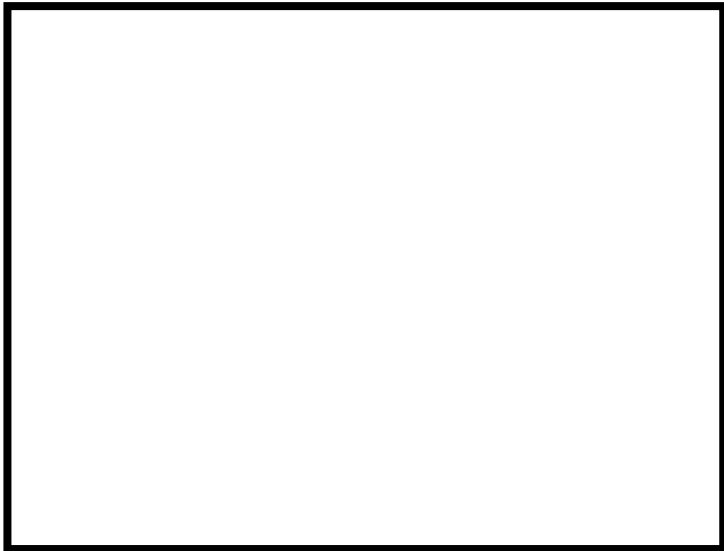
荒浜側 地質断面図

(a) 荒浜側：A-1 地点の洪積砂層 I, II 及び A-2 地点の洪積砂層 I

第 11-3-15 図 追加調査実施予定地



(b) 大湊側：O-1地点の洪積砂質土層 I, II 及び大湊側の埋戻土層  
第 11-3-15 図 追加調査実施予定地



(c) 大湊側：新期砂層・沖積層  
 第 11-3-15 図 追加調査実施予定地

#### 4. 液状化試験結果

##### 4.1 液状化試験方法

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）が規程されている。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，1991） 第 11-4-1 図に一般的な液状化試験方法の例を示す。

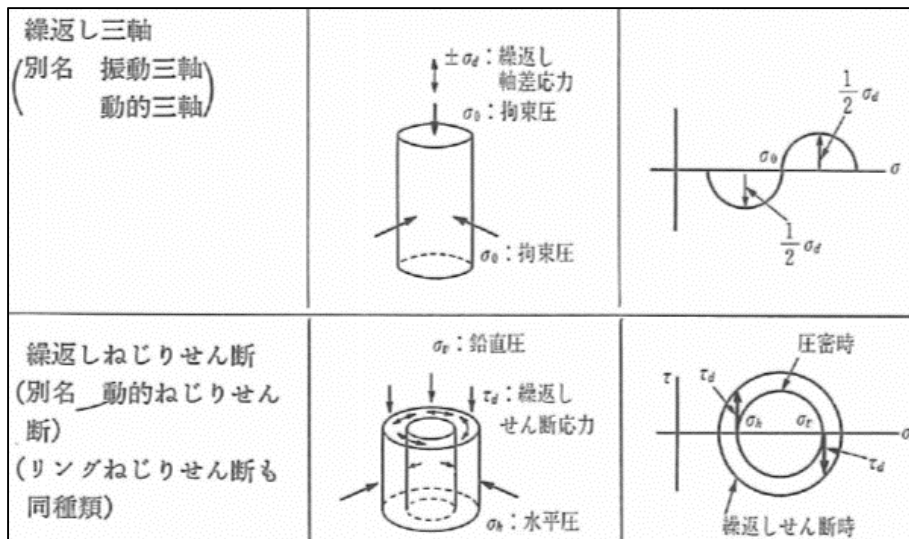
三軸試験に代表される間接型せん断試験と比較して、ねじりせん断試験は比較的広範囲な応力経路又はひずみ経路を供試体に与えられる。（地盤工学会，2009） 三軸試験では圧縮側と引張側で挙動が異なり、応力経路は上下では対称ではないし、ひずみの発生量も異なる。これに対してねじり試験では応力-ひずみ関係、応力経路ともほぼ対称な形をしている。（土木学会，2003：第 11-4-2 図）

以上を踏まえ、洪積層である古安田層中の砂層や N 値の比較的大きい新期砂層・沖積層を対象とした試験を実施するにあたり、高せん断応力比の液状化試験を実施する必要があることから、中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験を採用した。

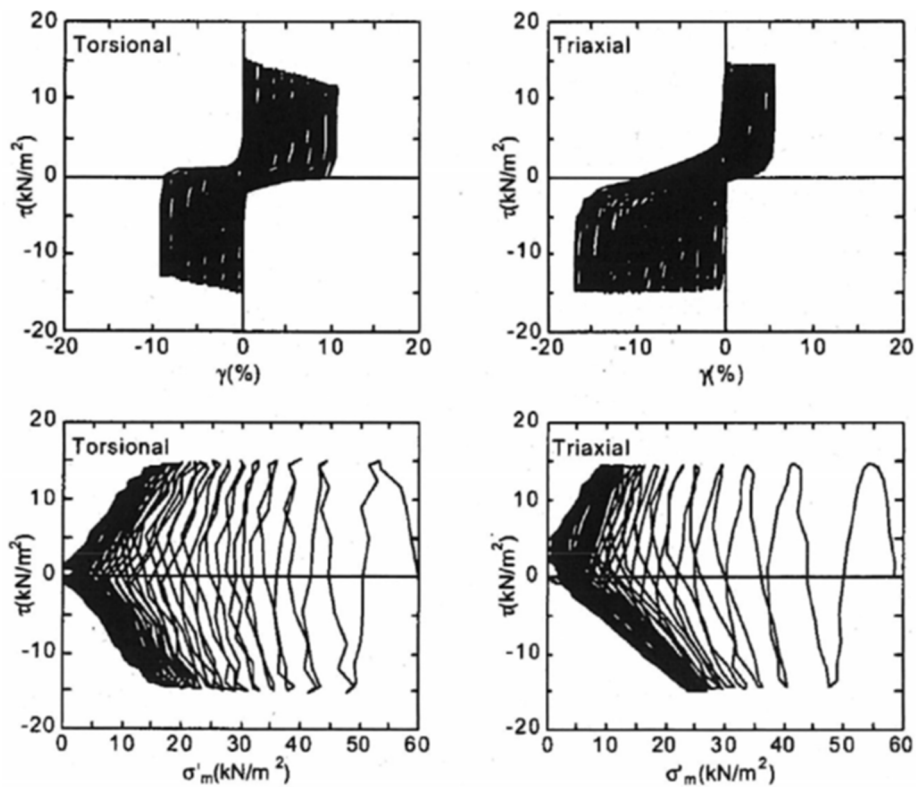
実施した中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要を第 11-4-3 図に、試料採取に用いた凍結サンプリングの概要を第 11-4-4 図に示す。

載荷状況

応力状態



第 11-4-1 図 一般的な液状化試験方法の例  
(安田, 1991 抜粋)



(a) 繰返しねじりせん断試験

(b) 繰返し三軸試験

第 11-4-2 図 液状化試験結果の例  
[上図: 応力-ひずみ関係, 下図: 応力経路]  
(土木学会, 2003)

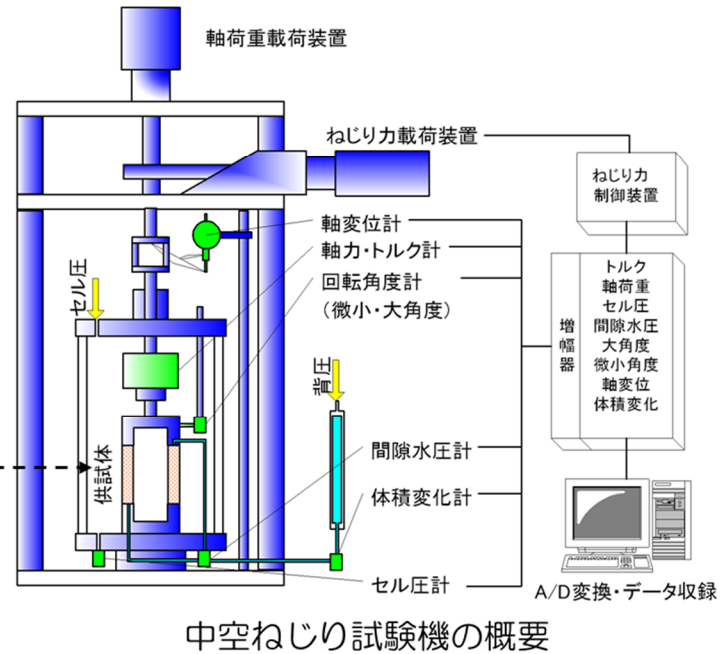
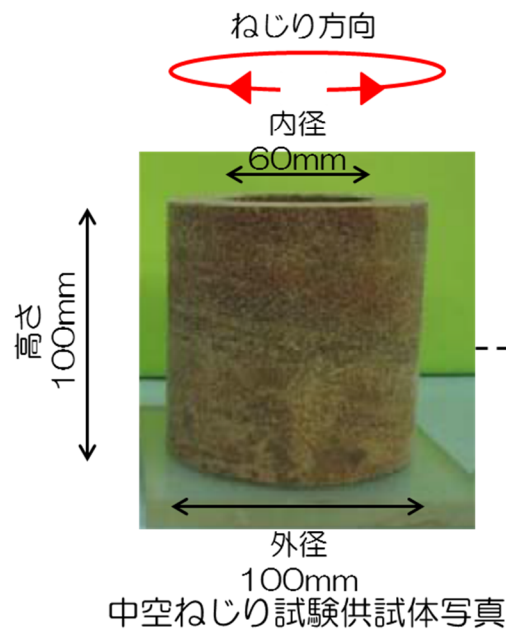


【試験の概要】

- 土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法（地盤工学会：JGS 0543-2000）（以下、中空ねじり試験という。）を参考に実施。

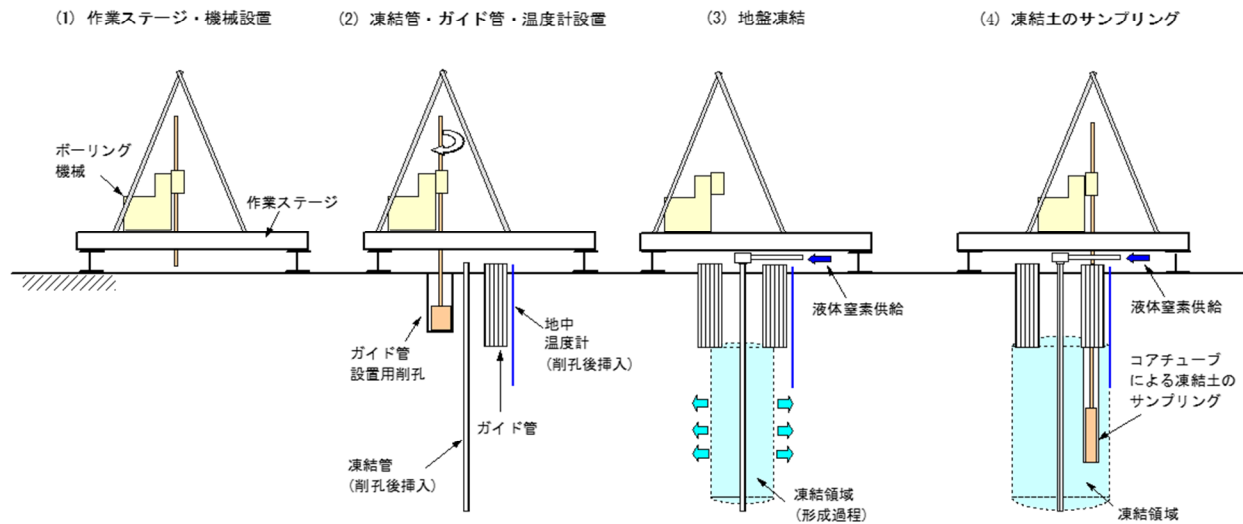
【試験条件】

- 供試体寸法：外径100mm（内径60mm），高さ100mm（一部供試体は，外径70mm（内径30mm），高さ100mm）
- 载荷波形：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
- 繰返し回数200回を上限として，過剰間隙水圧比0.95および両振幅せん断ひずみ15%に達するまで試験を実施。（JGS 0541-2000を参考）
- 所定の両振幅せん断ひずみ（1.5%，2%，3%，7.5%，15%）および過剰間隙水圧比0.95の繰返し回数を評価。（JGS 0541-2000を参考）

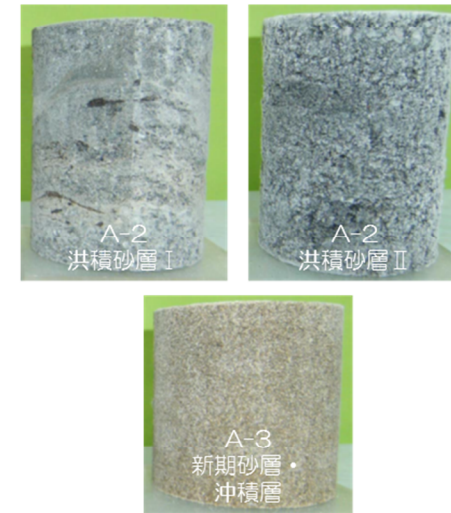


第 11-4-3 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要

- 凍結サンプリングは、砂・砂質土地盤や砂礫地盤を対象に高品質な不攪乱試料を採取する手法。
- 凍結管に液体窒素を流し込み、ゆっくりと地盤を凍結させた後に、コアサンプリングを行う。
- サンプリング手順は以下の通り
  - ① 既往調査より対象土層の厚い箇所を確認し、凍結サンプリング計画地点を決定。
  - ② 凍結サンプリング計画地点近傍にてパイロットボーリング（孔径φ86mm）を行い、サンプリング対象層の深度を確認。
  - ③ 液体窒素を流し込み、地中温度計が0度付近になるまで地盤の凍結を行う。
  - ④ 凍結が確認された後、コアチューブによる試料のサンプリングを行う。



凍結サンプリングの概要



試験供試体例  
 (左上：洪積砂層 I 右上：洪積砂層 II  
 下：新期砂層・沖積層 )

第 11-4-4 図 凍結サンプリングの概要

#### 4.2 液状化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，2003）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。第11-4-5図に地盤の強度とダイレイタンス特性の概要を示す。

##### 【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，土のもつダイレイタンス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。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、第 11-4-6 図及び第 11-4-7 図に緩い砂と密な砂の液状化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, 2006)
- 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。(井合, 2008)
- 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, 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, 1991)

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