

設備※1	部位	応力分類	①-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ○：影響あり △：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	①-1の影響有無の説明	①-2 水平方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×：発生しない ○：発生する	左記の振動モードの影響がないこと理由 新たな応力成分が発生しないこと理由
スカート支持たて置円筒形容器	胴板	一次一般膜応力	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
		一次+二次応力	△	B	同上。		
	スカート	一次応力(組合せ)	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。		
		一次+二次応力(座屈)	△	B	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大点は地震方向で異なるため影響は軽微である。		
	基礎ボルト	一次応力(引張)	△	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震動の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
		一次応力(せん断)	△	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。		
一次応力(組合せ)		△	C	上記の引張応力及びせん断応力は水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。			
その他電源設備	取付ボルト	一次応力(引張)	△	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料7】	×	-
		一次応力(せん断)	△	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料7】		
		一次応力(組合せ)	△	C	上記の引張応力及びせん断応力は水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。		
配管本体, サポート(多質点梁モデル解析)	配管, サポート	一次応力	○	-	水平2方向入力の影響がある。	○	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		一次+二次応力	○	-	同上。		
矩形構造の架構設備(静的触媒式水素再結合装置, 架台を含む)	各部位	各応力分類	○	-	水平2方向入力の影響がある。	×	-

設備※1	部位	応力分類	①-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ○：影響あり △：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	①-1の影響有無の説明	①-2 水平方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×：発生しない ○：発生する	左記の振動モードの影響がないこと理由 新たな応力成分が発生しないこと理由
ガスタービン発電機	転倒評価	応答変位	△	C	車輛の転倒は、走行直角方向のみが対象となるため、水平1方向のみの地震力が支配的であり、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
	取付ボルト	一次応力(引張)	△	C	ボルトは矩形配置であり、水平2方向入力による対角方向への転倒を想定し検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料7】		
		一次応力(せん断)	△	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。【補足説明資料7】		
		一次応力(組合せ)	△	C	上記の引張応力及びせん断応力は水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。		
通信連絡設備(アンテナ類)	ボルト	一次応力(引張)	△	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震動の方向毎に最大応力の発生点異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
		一次応力(せん断)	△	C	水平2方向入力時のボルトに発生するせん断応力を検討した結果、水平2方向地震力の最大応答の非同時性を考慮することにより、影響は軽微となる。		
		一次応力(組合せ)	△	C	上記の引張応力及びせん断応力は水平2方向の影響が軽微のため、組合せ応力も水平2方向の影響は軽微である。		
取水槽水位計	取付ボルト	一次応力(引張)	○	-	水平2方向の影響がある。	×	-
		一次応力(せん断)	△	A	水平1方向及び鉛直方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。		
		一次応力(組合せ)	○	-	水平2方向の影響がある。		
監視カメラ	据付ボルト	一次応力(引張)	○	-	水平2方向入力の影響がある。	×	-
		一次応力(せん断)	△	A	壁掛けのボルトは、壁と平行方向の水平地震力と鉛直地震力のみによりせん断力が発生するため、水平2方向入力の影響はない。		
		一次応力(組合せ)	○	-	水平2方向入力の影響がある。		
	据付部材	一次応力(組合せ)	○	-	水平2方向入力の影響がある。		
貫通部止水処置	シール材	シール材に生じる変位	△	C	対象となる貫通部は建屋軸に沿った配置となっていることから、シール材に加わるせん断方向及び圧縮方向の変位は、水平1方向の地震力の応答が支配的であり、他の水平方向の地震力による応答は小さいため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
浸水防止ダクト	各部位	各応力分類	○	-	水平2方向入力の影響がある。	×	-
床ドレンライン浸水防止治具	各部位	各応力分類	○	-	水平2方向入力の影響がある。	×	-
原子炉ウェル遮へいプラグ	本体	せん断応力度	△	C	鉛直方向荷重が支配的であるため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-

設備※1	部位	応力分類	①-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ○：影響あり △：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	①-1の影響有無の説明	①-2 水平方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×：発生しない ○：発生する	左記の振動モードの影響がないこと理由 新たな応力成分が発生しないこと理由
原子炉圧力容器支持構造 原子炉本体の基礎	円筒部(内筒) 円筒部(外筒)	せん断	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。	×	-
		組合せ	△	B	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大応力点は地震方向で異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
	円筒部(たてリブ)	せん断	△	B	円筒形状であり水平地震の方向毎に最大応力発生箇所が異なるため、水平2方向入力の影響は軽微である。		
		組合せ	△	B	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大応力点は地震方向で異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
	アンカボルト	引張	△	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震動の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
	コンクリート	基礎ボルトの引張荷重	△	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震動の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
	ベアリングプレート	曲げ	△	B	ボルトは円周状に配置され、水平地震動の方向毎に最大応力の発生点が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
	ブラケット部	せん断	△	B	円筒形状であり水平地震の方向毎に最大応力発生箇所が異なるため、水平2方向入力の影響は軽微である。		
		曲げ	△	B	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大応力点は地震方向で異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。		
ブラケット部下面の水平プレート	曲げ	△	A	支配的な応力は水平地震による曲げ応力であり、曲げ応力の最大応力点は地震方向で異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。			
燃料取替機	燃料取替機構造物フレーム ブリッジ脱線防止ラグ(本体) トロリ脱線防止ラグ(本体) 走行レール 横行レール	一次応力(せん断)	△	A	すべり方向とすべり直角方向では、それぞれの水平方向地震力を受けた場合の挙動が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料6】	○	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		一次応力(曲げ)	△	A	同上。		
		一次応力(組合せ)	△	A	同上。		
	ブリッジ脱線防止ラグ(取付ボルト) トロリ脱線防止ラグ(取付ボルト)	一次応力(せん断)	△	A	すべり方向とすべり直角方向では、それぞれの水平方向地震力を受けた場合の挙動が異なるため、方向毎に発生応力が異なる。したがって、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料6】		
		吊具	吊具荷重	△	C	鉛直荷重のみ作用し、水平荷重が作用しないため、水平2方向入力の影響はない。	×

設備※1	部位	応力分類	①-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無 (3.2.4項(1)に対応) ○：影響あり △：影響軽微	影響軽微とした分類 A：水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B：水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C：水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D：従来評価にて、水平2方向の地震力を考慮しているもの	①-1の影響有無の説明	①-2 水平方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
						振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×：発生しない ○：発生する	左記の振動モードの影響がないこと、理由 新たな応力成分が発生しないこと、理由
原子炉建屋クレーン	クレーン本体ガード	一次応力(せん断)	△	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。	○	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		一次応力(曲げ)	△	D	同上。		
		浮上り量	△	D	同上。		
	脱線防止ラグ	一次応力(圧縮)	△	A	すべり方向とすべり直角方向では水平2方向で異なる挙動を示すため、水平2方向の影響は軽微である。	×	—
	トロリストッパ	一次応力(せん断)	△	A	同上。	○	3次元のモデルを用いた解析により、従来よりねじれモードを考慮した耐震評価を実施している。
		一次応力(曲げ)	△	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。		
		一次応力(組合せ)	△	D	同上。		
	トロリ	浮上り量	△	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。	○	
吊具	吊具荷重	△	D	水平2方向及び鉛直方向の地震力を組み合わせた評価を実施している。			
原子炉遮蔽壁	一般胴部 開口集中部	せん断	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
		圧縮	△	C	鉛直方向荷重のみ作用し、水平方向荷重が作用しない構造となっている。したがって、水平2方向入力の影響はない。		
		曲げ	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。		
		組合せ	△	B	評価部位は円形の一様断面であることから、水平地震動の方向毎に最大応力点が異なる。したがって、水平2方向の地震力を組み合わせた場合でも水平2方向入力の影響は軽微である。		

表2 動的/電氣的機能維持評価

機種	①-1 水平2方向の地震力の重複による影響の有無(3.2.4項(1)に対応) ○:影響あり △:影響軽微	影響軽微とした分類 A:水平2方向の地震力を受けた場合でも、構造により水平1方向の地震力しか負担しないもの B:水平2方向の地震力を受けた場合、構造により最大応力の発生箇所が異なるもの C:水平2方向の地震を組み合わせても1方向の地震による応力と同等といえるもの D:従来評価にて保守性を考慮しており水平2方向の地震力を考慮しても影響が軽微であるもの	①-1の影響有無の説明	①-2 水平方向とその直交方向が相関する振動モード(ねじれ振動等)が生じる観点(3.2.4項(2)に対応)	
				振動モード及び新たな応力成分の発生有無 ×:発生しない ○:発生する	左記の振動モードの影響がないこと の理由 新たな応力成分が発生しないこと の理由
立形ポンプ	○	—	軸受は円周に均等に地震力を受け持つため、水平2方向入力の影響を受ける。	○	現在考慮している、X,Y方向振動モードではねじれ振動モードは現れない。よって、ねじれ振動モードが高次にて現れる可能性はあるが、有意な応答ではないため、影響がないと考えられる。
横形ポンプ	△	A	現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*で最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直角方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
ポンプ駆動用タービン	△	B	現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*で最弱部である弁箱(主蒸気止め弁ヨーク部(立置き))に対して、水平2方向による最大応力の発生箇所が異なるため影響は軽微である。	×	—
立形機器用電動機	△	D	最弱部である軸受に対し、現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*において十分な裕度が確認されており、水平2方向入力による応答増加の影響は軽微である。	×	—
横形機器用電動機	△	D	最弱部であるフレームに対し、現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*において十分な裕度が確認されており、水平2方向入力による応答増加の影響は軽微である。	×	—
空調ファン	△	A	現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*で最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直角方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
非常用ディーゼル発電機(機関本体)	△	A	現行の機能維持確認済加速度における詳細評価*で最弱部である軸系に対して、曲げに対して軸直角方向の水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
非常用ディーゼル発電機(ガバナ)	○	—	ガバナについては水平2方向合成による応答増加の影響がある。ただし、JEAG4601に記載の機能確認済加速度は1.8Gであるが、旧JNES試験より4Gまでの機能維持を確認しているため、2方向合成加速度が4G未満であれば問題ない。	×	—
弁	○	—	弁については水平2方向合成による応答増加の影響があるが、2方向合成応答加速度が試験にて確認した機能維持確認済加速度未満であれば問題ない。	×	—
制御棒挿入性	○	—	水平2方向の影響がある。	×	—
電気盤	△	A	電気盤、制御盤等に取付けられているリレー、遮断器等の電気品は、基本的に1次元的な接点のON-OFFに関わる比較的単純な構造をしている。加えて、基本的には全て梁、扉等の強度部材に強固に固定されているため、器具の非線形応答はないと考えられる。したがって、電気品は水平1方向の地震力のみを負担し、他の水平方向の地震力は負担しないため、水平2方向入力の影響は軽微である。【補足説明資料8】	×	—
伝送器・指示計	△	A	伝送器・指示計の掃引試験結果において、X、Y各成分に共振点はなく、出力変動を生じないことを確認していることから、X、Y2方向成分にも共振点は無いと考えられる。よって、X、Y2方向入力に対しても応答増加は生じないものと考えられることから、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
取水槽水位計	△	A	水位計の掃引試験結果において、X、Y各成分に共振点はなく、出力変動を生じないことを確認していることから、X、Y2方向成分にも共振点は無いと考えられる。よって、X、Y2方向入力に対しても応答増加は生じないものと考えられることから、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
監視カメラ	△	A	監視カメラ本体の掃引試験結果において、X、Y各成分に共振点はなく、出力変動を生じないことを確認していることから、X、Y2方向成分にも共振点は無いと考えられる。よって、X、Y2方向入力に対しても応答増加は生じないものと考えられることから、水平2方向入力の影響は軽微である。	×	—
ガスタービン発電機	○	—	水平2方向の影響がある。	×	—
通信連絡設備(アンテナ類)	○	—	水平2方向の影響がある。	×	—

※JEAG4601で定められた評価部位の裕度評価

別紙1 補足説明資料

目次

1. 水平2方向同時加振の影響評価について（原子炉圧力容器スタビライザ）	1
2. 水平2方向同時加振の影響評価について（蒸気乾燥器支持ブラケット）	4
3. 水平2方向同時加振の影響評価について（制御棒・破損燃料貯蔵ラック）	6
4. 水平2方向同時加振の影響評価について（円筒形容器）	8
5. 水平2方向同時加振の影響評価について（ダイヤフラムフロア）	20
6. 水平2方向同時加振の影響評価について（燃料取替機）	24
7. 水平2方向同時加振の影響評価について（矩形配置されたボルト）	25
8. 水平2方向同時加振の影響評価について（電気盤）	31

1 水平2方向同時加振の影響評価について（原子炉压力容器スタビライザ）

1.1 はじめに

本項は、原子炉压力容器スタビライザ（以下「RPV スタビライザ」という。）に対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

1.2 現行評価の手法

RPV スタビライザは、周方向 45° 間隔で 8 体配置されており、図 1-1 に地震荷重と各 RPV スタビライザが分担する荷重の関係を示す。

水平方向の地震荷重に関して現行評価では、RPV スタビライザ 6 体に各水平方向地震力（X 方向、Y 方向）の最大地震力が負荷されるものとしている。

$$f = \text{MAX} \left(\frac{F_x}{4}, \frac{F_y}{4} \right)$$

ここで、

f : RPV スタビライザ 1 個が受けもつ最大地震荷重

F_x : X 方向地震よりスタビライザ全体に発生する荷重

F_y : Y 方向地震よりスタビライザ全体に発生する荷重

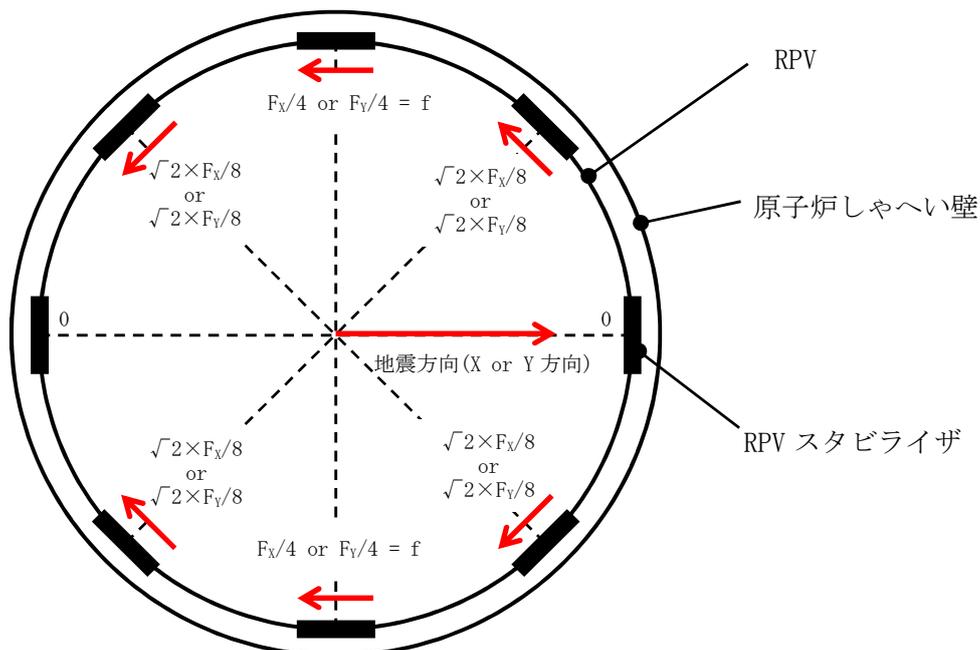


図 1-1 原子炉压力容器スタビライザの水平地震荷重の分担（水平 1 方向）

1.3 水平2方向同時加振の影響

RPV スタビライザは、水平2方向の地震力を受けた場合においても、図 1-2 及び表 1-1 に示す通り方向別地震荷重 F (F_x または F_y) に対する最大反力を受け持つ部位が異なる。

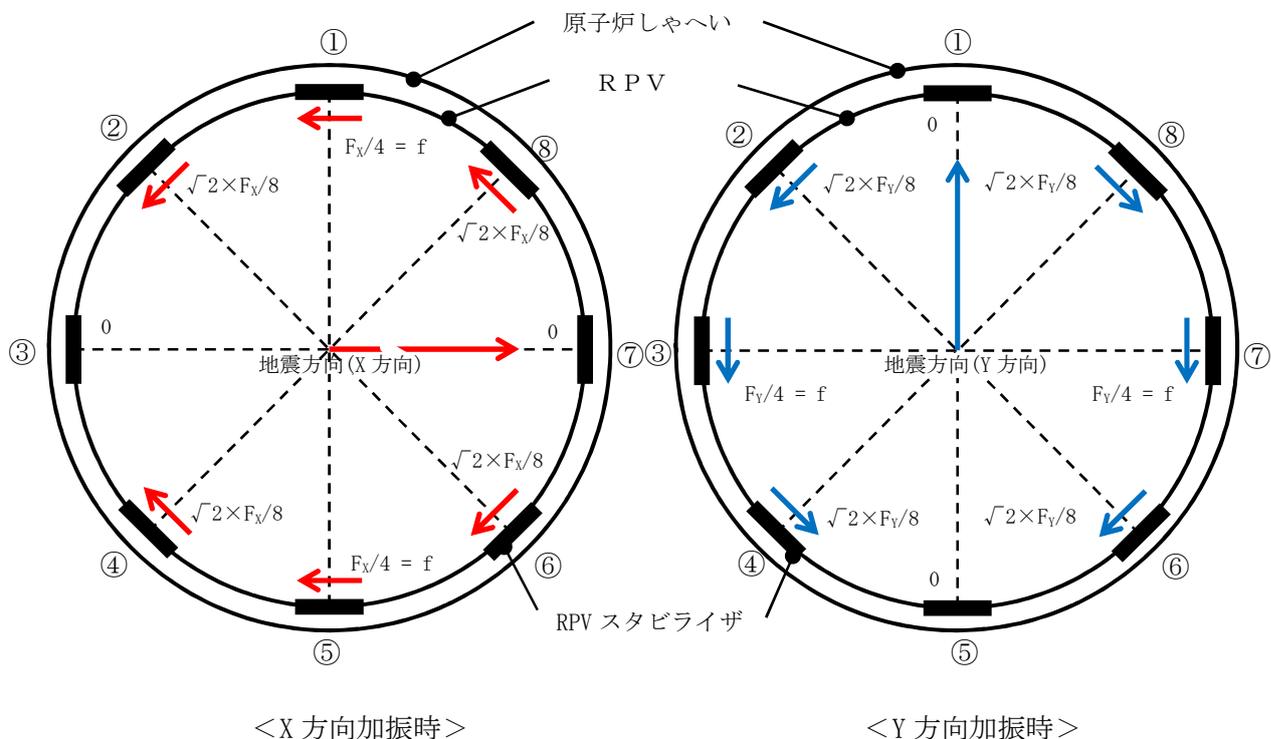


図 1-2 原子炉压力容器スタビライザの水平地震荷重の分担

表 1-1 原子炉压力容器スタビライザ各点での分担荷重

位置		方向別地震力 F に対する反力	
		X 方向	Y 方向
①	0°	$F_x/4$	0
②	45°	$\sqrt{2} \times F_x/8$	$\sqrt{2} \times F_y/8$
③	90°	0	$F_y/4$
④	135°	$\sqrt{2} \times F_x/8$	$\sqrt{2} \times F_y/8$
⑤	180°	$F_x/4$	0
⑥	225°	$\sqrt{2} \times F_x/8$	$\sqrt{2} \times F_y/8$
⑦	270°	0	$F_y/4$
⑧	315°	$\sqrt{2} \times F_x/8$	$\sqrt{2} \times F_y/8$
最大		$F_x/4=f$	$F_y/4=f$

水平2方向地震力の組合せの考慮については、表1-1に示した水平1方向反力を用いて、X方向・Y方向同時には最大の地震力が発生しないと仮定し、以下の2つの方法にて検討を行った。

- ① 組合せ係数法： $F_Y=0.4F_X$ と仮定し、X方向・Y方向のそれぞれの水平1方向応答結果を算術和する
- ② 最大応答の非同時性を考慮したSRSS法： $F_Y=F_X$ と仮定し、X方向・Y方向のそれぞれの水平1方向応答結果を二乗和平方根にて合成する

上記検討の結果を表1-2に示す。いずれの検討方法を用いても、水平2方向反力の組合せ結果の最大値は f となり、これは水平1方向反力の最大値と同値である。

したがって、RPVスタビライザに対して水平2方向の影響はない。

表1-2 原子炉圧力容器スタビライザ各点における水平2方向の考慮

位置		①組合せ係数法を用いた 水平2方向反力の組合せ ($F_Y=0.4F_X$)	②SRSS法を用いた 水平2方向反力の組合せ ($F_Y=F_X$)
①	0°	$F_X/4=f$	$F_X/4=f$
②	45°	$\sqrt{2} \times F_X/8 + \sqrt{2} \times F_Y/8 = \sqrt{2} \times 1.4 \times F_X/8$ $=0.990 \times F_X/4 < f$	$\sqrt{((\sqrt{2} \times F_X/8)^2 + (\sqrt{2} \times F_Y/8)^2)}$ $F_X/4=f$
③	90°	$F_Y/4=0.4 \times F_X/4 < f$	$F_Y/4=F_X/4=f$
④	135°	$\sqrt{2} \times F_X/8 + \sqrt{2} \times F_Y/8 = \sqrt{2} \times 1.4 \times F_X/8$ $=0.990 \times F_X/4 < f$	$\sqrt{((\sqrt{2} \times F_X/8)^2 + (\sqrt{2} \times F_Y/8)^2)}$ $F_X/4=f$
⑤	180°	$F_X/4=f$	$F_X/4=f$
⑥	225°	$\sqrt{2} \times F_X/8 + \sqrt{2} \times F_Y/8 = \sqrt{2} \times 1.4 \times F_X/8$ $=0.990 \times F_X/4 < f$	$\sqrt{((\sqrt{2} \times F_X/8)^2 + (\sqrt{2} \times F_Y/8)^2)}$ $F_X/4=f$
⑦	270°	$F_Y/4=0.4 \times F_X/4 < f$	$F_Y/4=F_X/4=f$
⑧	315°	$\sqrt{2} \times F_X/8 + \sqrt{2} \times F_Y/8 = \sqrt{2} \times 1.4 \times F_X/8$ $=0.990 \times F_X/4 < f$	$\sqrt{((\sqrt{2} \times F_X/8)^2 + (\sqrt{2} \times F_Y/8)^2)}$ $F_X/4=f$
最大		f	f

2 水平2方向同時加振の影響評価について（蒸気乾燥器支持ブラケット）

2.1 はじめに

本項は、蒸気乾燥器支持ブラケットに対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

2.2 現行評価の手法

蒸気乾燥器支持ブラケットは、4体配置されており、位置関係は図2-1の通りとなる。

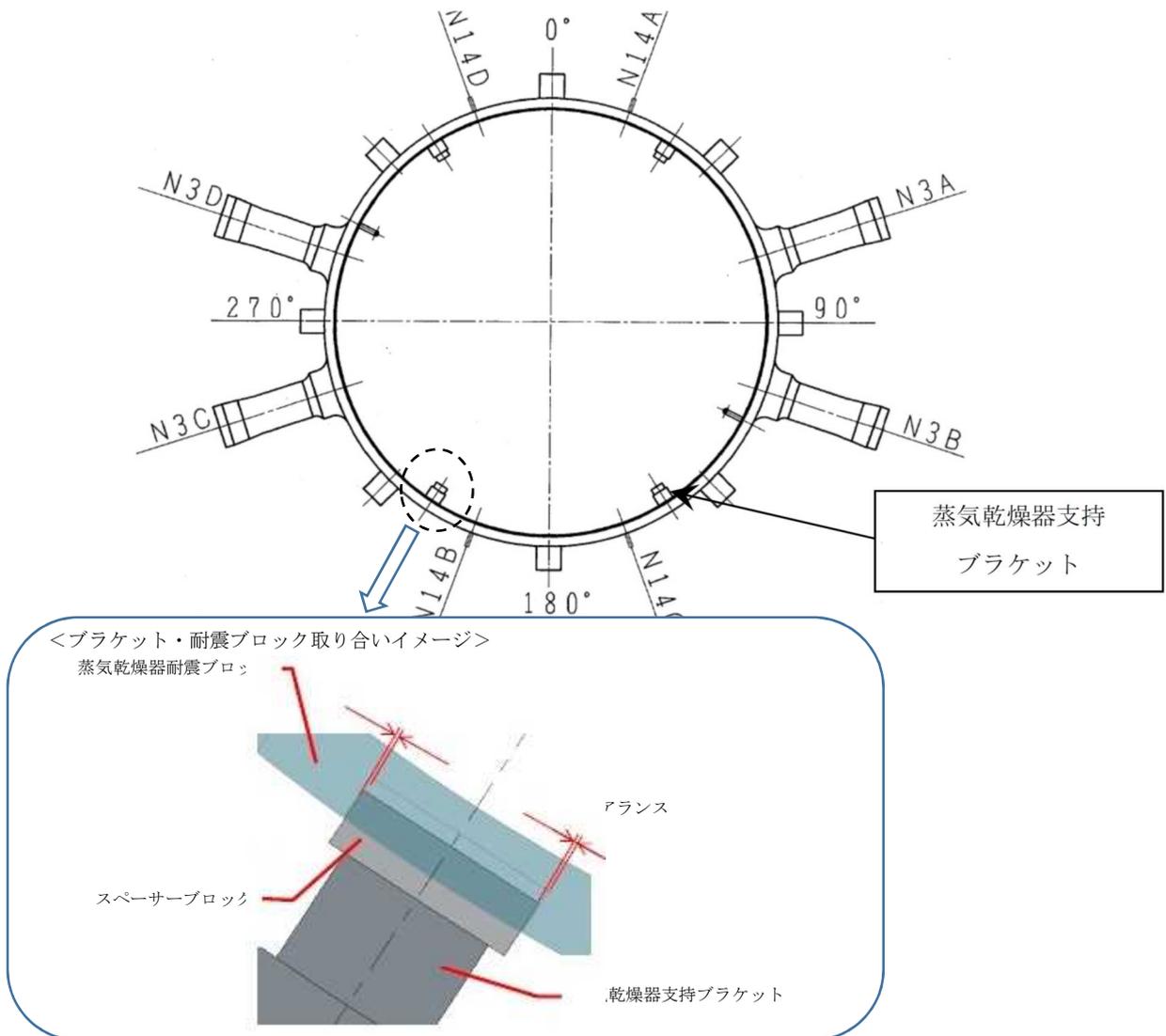


図2-1 蒸気乾燥器支持ブラケットの位置

蒸気乾燥器支持ブラケットは、4体で耐震用ブロックを介し蒸気乾燥器を支持する設計である。しかし、耐震用ブロックと蒸気乾燥器支持ブラケットの間にはクリアランスが存在し、水平地震動の入力方向によっては、4体のうち対角のブラケット2体のみがその荷重を負担する可能性があるため、現行評価では対角のブラケット2体により、水平2方向の地震荷重を支持するものとして評価している。

図 2-2 に評価においてブラケットに負荷される水平方向の地震荷重を示す。

$$F = \max\left(\frac{F_x}{2}, \frac{F_y}{2}\right)$$

F : 蒸気乾燥器から受ける地震荷重

F_x : X 方向地震よりブラケットに発生する荷重

F_y : Y 方向地震よりブラケットに発生する荷重

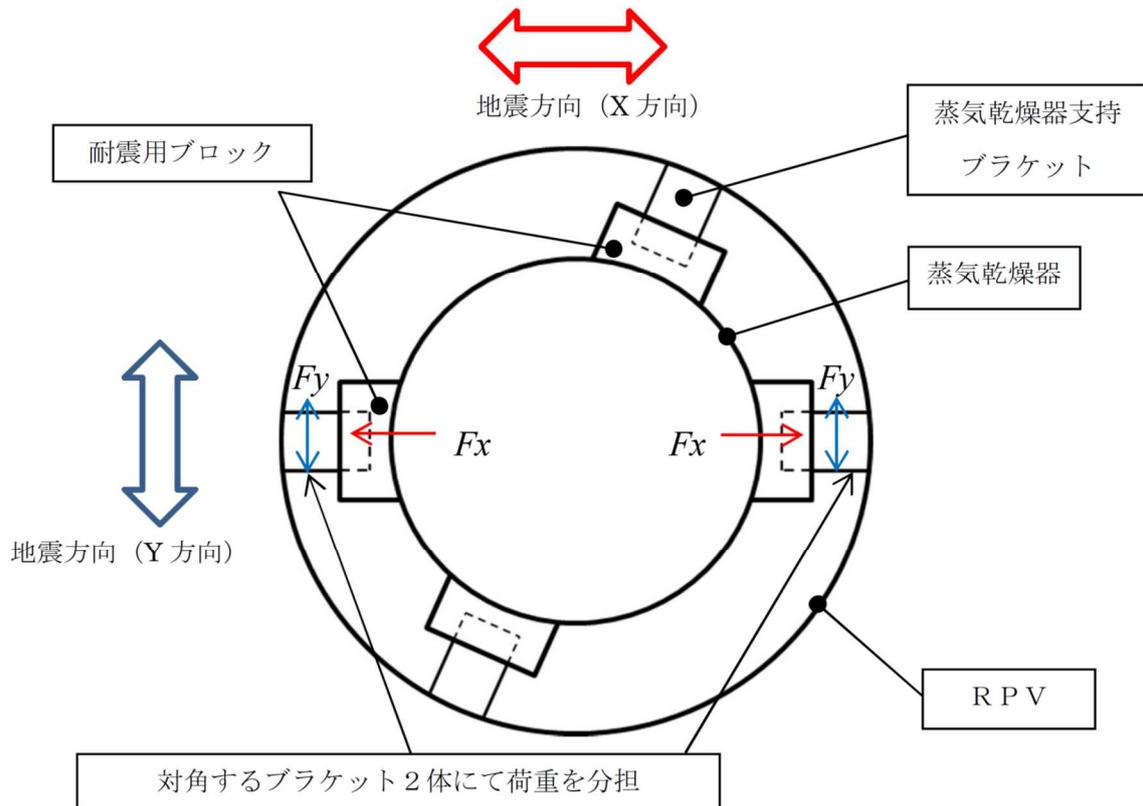


図 2-2 評価におけるブラケットの負荷荷重

2.3 水平 2 方向同時加振の影響

蒸気乾燥器支持ブラケットは、現行評価において、水平 2 方向の地震荷重を同時に考慮し、ブラケットと耐震ブロックの接触状態として想定される最も厳しい状態として 4 体のブラケットのうち 2 体でその荷重を支持すると評価しており、水平 2 方向同時加振による現行の評価結果への影響はない。

3 水平2方向同時加振の影響評価について（制御棒・破損燃料貯蔵ラック）

3.1 はじめに

本項は、制御棒・破損燃料貯蔵ラック（以下「ラック」という。）のサポートに対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

3.2 サポートの構造

本サポートは、ラックの耐震上弱軸方向となる短辺方向の転倒防止を目的として、使用済燃料貯蔵プール壁面から腕を張り出す形で設置されており、ラックの短辺方向側を支持し、長辺方向側は荷重を受けない構造となっている（図 3-1）。

3.3 水平2方向の地震力による影響について

現行評価において、サポートの応力は、地震力によりラックから入力される荷重(反力)、サポート自身の荷重(自重及び自身の慣性力)と、部材の断面特性を用いて下記の地震条件時のそれぞれについて求めている。

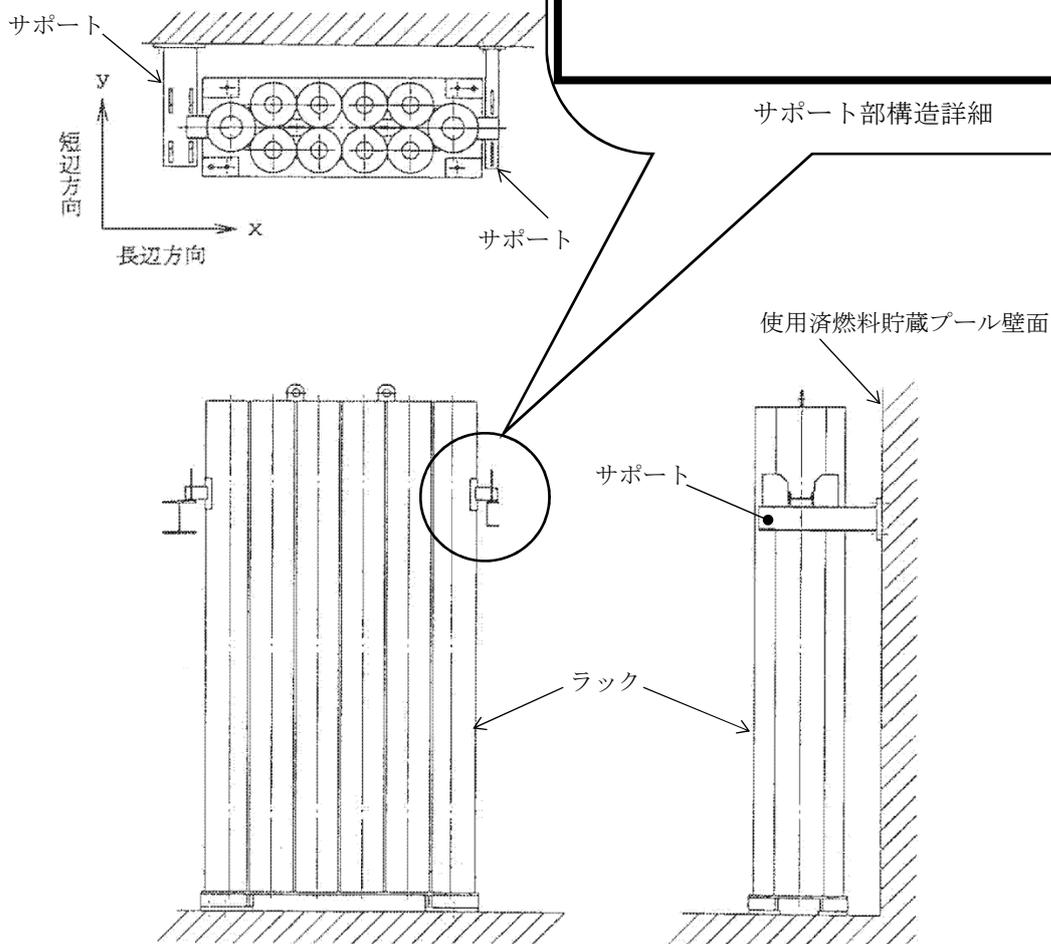
- ・長辺方向(水平 x 方向) + 鉛直方向
- ・短辺方向(水平 y 方向) + 鉛直方向

長辺方向(x方向)の地震の場合、サポートはラックを支持していないため、ラックから入力される荷重(反力)は生じず、サポート自身の慣性力による応力のみが発生する。短辺方向(y方向)の地震の場合、サポートには、ラックからの反力と自身の慣性力による応力が発生する。ラック自身の慣性力は、いずれの方向の地震においても、ラックからの反力と比較して小さい。

したがって、サポートの応力は、水平1方向（短辺方向(y方向)）の地震力の応答が支配的であり、他の水平方向の地震力による応答は小さいため、水平2方向入力の影響は軽微である。

[サポート取合部の説明]

- 短辺方向側は、ラック付のサポート座を支持用プレートではさみ込むように拘束して支持されている。
- 長辺方向側は、拘束する構造となっていない。



全景

図 3-1 制御棒・破損燃料貯蔵ラック設置状態

4 水平2方向同時加振の影響評価について（円筒形容器）

4.1 はじめに

本項は、水平地震動が水平2方向に作用した場合の円筒容器に対する影響検討結果をFEMで確認した結果をまとめたものである。

容器については、別紙2にて説明している通り、X方向地震とY方向地震とでは最大応力点が異なるため、それぞれの地震による応力を組合せても影響軽微としている。本項には、別紙2にて説明していることを解析にて確認することを目的として、円筒形容器のFEMモデルを用いた解析を実施した結果を示す。ここで、本検討は軸方向応力、周方向応力及びせん断応力の組合せに基づく胴の応力強さを対象としたものである。

具体的な確認項目として、以下2点を確認した。

- ①X方向地震とY方向地震とで最大応力点が異なることの確認
- ②最大応力点以外に、X方向地震とY方向地震による応力を組合せた場合に影響のあるような点があるかを確認

4.2 影響評価検討

評価検討モデルを図4-1に示す。検討方法を以下に示す。

- ・検討方法：水平地震力1GをX方向へ入力し、周方向の0°方向から90°方向にかけて応力分布を確認する。また、水平1方向地震による応力を用いて水平2方向地震による応力を評価する。
- ・検討モデル：たて置き円筒形容器をシェル要素にてモデル化
- ・拘束点：容器基部を拘束
- ・荷重条件：モデル座標のX方向に水平地震力1Gを負荷
- ・解析手法：静的解析
- ・対象部位及び応力：容器基部における応力強さ
- ・水平2方向同時加振時の考慮方法
 - ・組合せ係数法（最大応答の非同時性を考慮）
 - ・SRSS法（最大応答の非同時性を考慮）

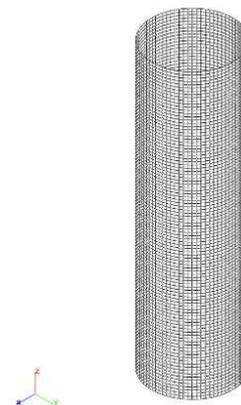


図4-1 評価検討モデル

4.3 検討結果

4.3.1 軸方向応力 σ_x

容器基部における水平地震時の軸方向応力コンター図を図 4-2 に示す。

この結果より、最大応力点は $0^\circ / 180^\circ$ 位置に発生していることが分かる。円筒形容器のため評価部位が円形の一様断面であることから、Y 方向から水平地震力を入力した場合においても、最大応力点は $90^\circ / 270^\circ$ 位置に発生することは明白であるため、水平方向地震動の入力方向により最大応力点は異なる。

また、表 4-1 に X 方向、Y 方向、2 方向入力時の軸方向応力分布を示す。

中間部 ($0^\circ / 90^\circ$ 方向以外) において 2 方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及び SRSS 法のそれぞれを用いた水平 2 方向入力時の応力 $\sigma_{x,c}(\theta)$ 及び $\sigma_{x,s}(\theta)$ は、水平 1 方向入力時の軸方向応力解析結果 (X 方向入力時応力 $\sigma_{x,X}(\theta)$ 、Y 方向入力時応力 $\sigma_{x,Y}(\theta)$) により、以下の通り算出する。

<組合せ係数法>

$$\sigma_{x,c}(\theta) = \max(\sigma_{x,c(X)}(\theta), \sigma_{x,c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\sigma_{x,c(X)}(\theta)$ は $\sigma_{x,X}(\theta)$ に 1、 $\sigma_{x,Y}(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの軸応力を組合せた応力、 $\sigma_{x,c(Y)}(\theta)$ は $\sigma_{x,Y}(\theta)$ に 1、 $\sigma_{x,X}(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組合せた応力であり、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \sigma_{x,c(X)}(\theta) &= \sigma_{x,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{x,Y}(\theta) \\ \sigma_{x,c(Y)}(\theta) &= 0.4 \times \sigma_{x,X}(\theta) + \sigma_{x,Y}(\theta) \end{aligned}$$

<SRSS 法>

$$\sigma_{x,s}(\theta) = \sqrt{\sigma_{x,X}(\theta)^2 + \sigma_{x,Y}(\theta)^2}$$

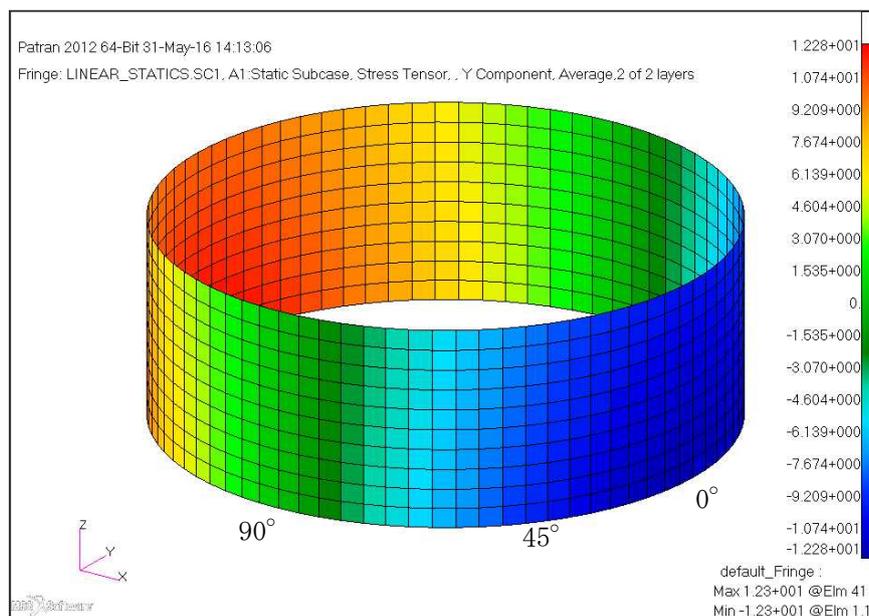


図 4-2 水平地震時軸方向応力コンター図

表 4-1 水平地震時の軸方向応力分布

角度	x 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,x}(\theta)$	y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{x,y}(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{x,c}(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_{x,s}(\theta)$
0° 方向	12.28	0.00	12.28 $\sigma_{x,c(X)}(0^\circ)=12.28$ $\sigma_{x,c(Y)}(0^\circ)=4.91$	12.28
22.5° 方向	11.34	4.70	13.22 $\sigma_{x,c(X)}(22.5^\circ)=13.22$ $\sigma_{x,c(Y)}(22.5^\circ)=9.24$	12.28
45° 方向	8.68	8.68	12.15 $\sigma_{x,c(X)}(45^\circ)=12.15$ $\sigma_{x,c(Y)}(45^\circ)=12.15$	12.28
67.5° 方向	4.70	11.34	13.22 $\sigma_{x,c(X)}(67.5^\circ)=9.24$ $\sigma_{x,c(Y)}(67.5^\circ)=13.22$	12.28
90° 方向	0.00	12.28	12.28 $\sigma_{x,c(X)}(90^\circ)=4.91$ $\sigma_{x,c(Y)}(90^\circ)=12.28$	12.28

4.3.2 周方向応力 σ_ϕ

容器基部における水平地震時の周方向応力コンター図を図 4-3 に、周方向応力分布を表 4-2 に示す。軸方向応力同様に最大応力点は 0°/180°位置に発生しており、最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2 方向入力時の影響についても軸方向応力と同様に中間部 (0° /90° 方向以外) において 2 方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及び SRSS 法のそれぞれを用いた水平 2 方向入力時の応力 $\sigma_{\phi,c}(\theta)$ 及び $\sigma_{\phi,s}(\theta)$ は、水平 1 方向入力時の軸方向応力解析結果 (X 方向入力時応力 $\sigma_{\phi,x}(\theta)$ 、Y 方向入力時応力 $\sigma_{\phi,y}(\theta)$) により、以下の通り算出する。

<組合せ係数法>

$$\sigma_{\phi,c}(\theta) = \max(\sigma_{\phi,c(X)}(\theta), \sigma_{\phi,c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\sigma_{\phi,c(X)}(\theta)$ は $\sigma_{\phi,x}(\theta)$ に 1、 $\sigma_{\phi,y}(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの軸応力を組合せた応力、 $\sigma_{\phi,c(Y)}(\theta)$ は $\sigma_{\phi,y}(\theta)$ に 1、 $\sigma_{\phi,x}(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組合せた応力であり、以下のように表される。

$$\sigma_{\phi,c(X)}(\theta) = \sigma_{\phi,x}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{\phi,y}(\theta)$$

$$\sigma_{\phi,c(Y)}(\theta) = 0.4 \times \sigma_{\phi,x}(\theta) + \sigma_{\phi,y}(\theta)$$

<SRSS 法>

$$\sigma_{\phi,s}(\theta) = \sqrt{\sigma_{\phi,X}(\theta)^2 + \sigma_{\phi,Y}(\theta)^2}$$

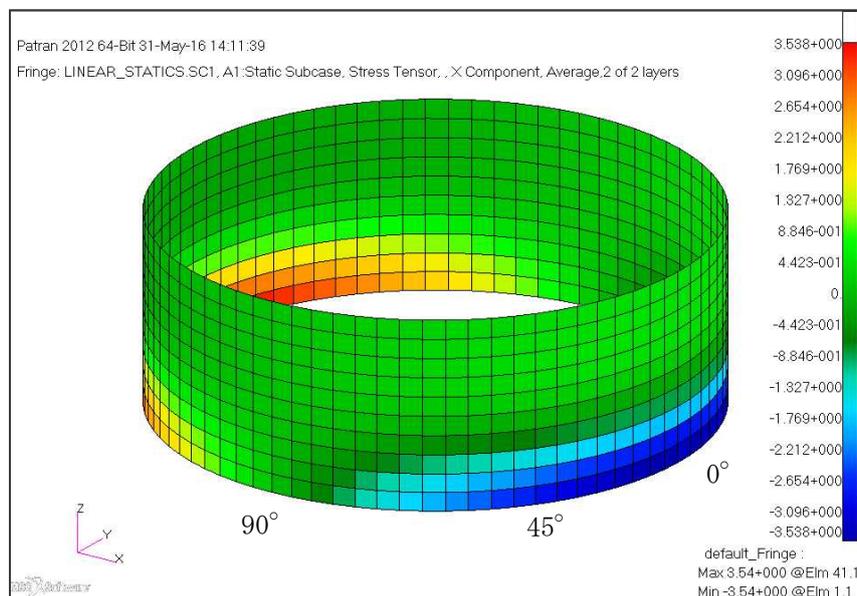


図 4-3 水平地震時周方向応力コンター図

表 4-2 水平地震時の周方向応力分布

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{\phi,X}(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\sigma_{\phi,Y}(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_{\phi,c}(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_{\phi,s}(\theta)$
0° 方向	3.54	0.00	3.54 $\sigma_{x,c(X)}(0^\circ)=3.54$ $\sigma_{x,c(Y)}(0^\circ)=1.42$	3.54
22.5° 方向	3.27	1.35	3.81 $\sigma_{x,c(X)}(22.5^\circ)=3.81$ $\sigma_{x,c(Y)}(22.5^\circ)=2.66$	3.54
45° 方向	2.50	2.50	3.50 $\sigma_{x,c(X)}(45^\circ)=3.50$ $\sigma_{x,c(Y)}(45^\circ)=3.50$	3.54
67.5° 方向	1.35	3.27	3.81 $\sigma_{x,c(X)}(67.5^\circ)=2.66$ $\sigma_{x,c(Y)}(67.5^\circ)=3.81$	3.54
90° 方向	0.00	3.54	3.54 $\sigma_{x,c(X)}(90^\circ)=1.42$ $\sigma_{x,c(Y)}(90^\circ)=3.54$	3.54

4.3.3 せん断応力 τ

容器基部における水平地震時のせん断応力コンター図を図 4-4 に示し、せん断応力分布を表 4-3 に示す。せん断応力は軸方向及び周方向応力とは異なり、最大応力は $90^\circ / 270^\circ$ 位置に生じているが、最大応力と最小応力の生じる点が回転しているのみで応力の傾向として最大応力点が異なることについて確認できる。

また、2 方向入力時の影響についても軸方向応力、周方向応力と同様に中間部 ($0^\circ / 90^\circ$ 方向以外) において 2 方向入力時の影響が確認できる。なお、組合せ係数法及び SRSS 法のそれぞれを用いた水平 2 方向入力時の応力 $\tau_c(\theta)$ 及び $\tau_s(\theta)$ は、水平 1 方向入力時の軸方向応力解析結果 (X 方向入力時応力 $\tau_x(\theta)$ 、Y 方向入力時応力 $\tau_y(\theta)$) により、以下の通り算出する。

<組合せ係数法>

$$\tau_c(\theta) = \max(\tau_{c(X)}(\theta), \tau_{c(Y)}(\theta))$$

ただし、 $\tau_{c(X)}(\theta)$ は $\tau_x(\theta)$ に 1、 $\tau_y(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの軸応力を組合せた応力、 $\tau_{c(Y)}(\theta)$ は $\tau_y(\theta)$ に 1、 $\tau_x(\theta)$ に 0.4 の係数を乗じて X・Y 方向入力時それぞれの応力を組合せた応力であり、以下のように表される。

$$\tau_{c(X)}(\theta) = \tau_x(\theta) + 0.4 \times \tau_y(\theta)$$

$$\tau_{c(Y)}(\theta) = 0.4 \times \tau_x(\theta) + \tau_y(\theta)$$

<SRSS 法>

$$\tau_s(\theta) = \sqrt{\tau_x(\theta)^2 + \tau_y(\theta)^2}$$

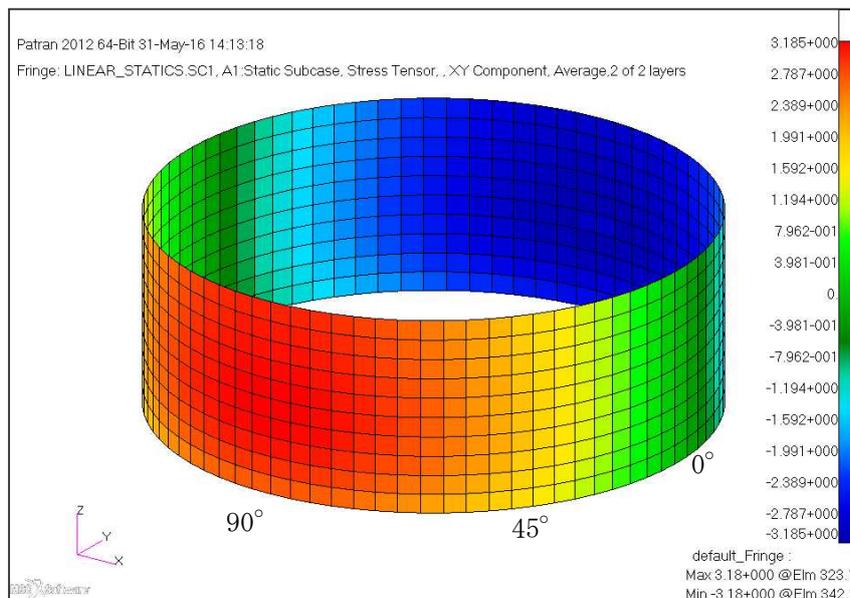


図 4-4 水平地震時せん断応力コンター図

表 4-3 水平地震時のせん断応力分布

角度	X 方向入力時 応力 (MPa) $\tau_x(\theta)$	Y 方向入力時 応力 (MPa) $\tau_y(\theta)$	2 方向入力時応力 (MPa)	
			組合せ係数法 $\tau_c(\theta)$	SRSS 法 $\tau_s(\theta)$
0° 方向	0.00	2.70	2.70 $\tau_{c(X)}(0^\circ)=1.08$ $\tau_{c(Y)}(0^\circ)=2.70$	2.70
22.5° 方向	1.03	2.49	2.91 $\tau_{c(X)}(22.5^\circ)=2.03$ $\tau_{c(Y)}(22.5^\circ)=2.91$	2.70
45° 方向	1.91	1.91	2.67 $\tau_{c(X)}(45^\circ)=2.67$ $\tau_{c(Y)}(45^\circ)=2.67$	2.70
67.5° 方向	2.49	1.03	2.91 $\tau_{c(X)}(67.5^\circ)=2.91$ $\tau_{c(Y)}(67.5^\circ)=2.03$	2.70
90° 方向	2.70	0.00	2.70 $\tau_{c(X)}(90^\circ)=2.70$ $\tau_{c(Y)}(90^\circ)=1.08$	2.70

4.3.4 組合せ応力強さ σ

胴の組合せ応力強さ σ は、表 4-1~3 に示した X 方向、Y 方向、2 方向入力時それぞれの軸方向応力 σ_x 、周方向応力 σ_ϕ 及びせん断応力 τ を組合せ、耐震評価結果として用いている。

<水平 1 方向のうち、X 方向入力時の組合せ応力強さ $\sigma_x(\theta)$ >

主応力 $\sigma_{1,X}(\theta)$ 、 $\sigma_{2,X}(\theta)$ 、 $\sigma_{3,X}(\theta)$ は以下の通りに表される。

$$\sigma_{1,X}(\theta) = \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,X}(\theta) + \sigma_{\phi,X}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,X}(\theta) - \sigma_{\phi,X}(\theta))^2 + 4\tau_X(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{2,X}(\theta) = \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,X}(\theta) + \sigma_{\phi,X}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,X}(\theta) - \sigma_{\phi,X}(\theta))^2 + 4\tau_X(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{3,X}(\theta) = 0$$

各主応力により、応力強さ $\sigma_x(\theta)$ は以下の通りとなる。

$$\sigma_x(\theta) = \max(|\sigma_{1,X}(\theta) - \sigma_{2,X}(\theta)|, |\sigma_{2,X}(\theta) - \sigma_{3,X}(\theta)|, |\sigma_{3,X}(\theta) - \sigma_{1,X}(\theta)|)$$

なお、Y 方向入力時の組合せ応力強さ $\sigma_y(\theta)$ は、上記の式における X を Y に置き換えた式により算出する。

ここで $\theta=0^\circ$ の場合、表 4-1 より $\sigma_{x,x}(0^\circ)=12.28$ 、表 4-2 より $\sigma_{\phi,x}(0^\circ)=3.54$ 、表 4-3 より $\tau_x(0^\circ)=0$ であるため

$$\sigma_{1,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \right) = 12.28$$

$$\sigma_{2,x}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(0)^2} \right) = 3.54$$

$$\sigma_{3,x}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって、

$$\sigma_x(0^\circ) = \max(|12.28 - 3.54|, |3.54 - 0|, |0 - 12.28|) = 12.28$$

< 組合せ係数法による、水平 2 方向同時加振を考慮した組合せ応力強さ $\sigma_c(\theta)$ >
 $\sigma_c(\theta)$ の算出フローを図 4-5 に示す。

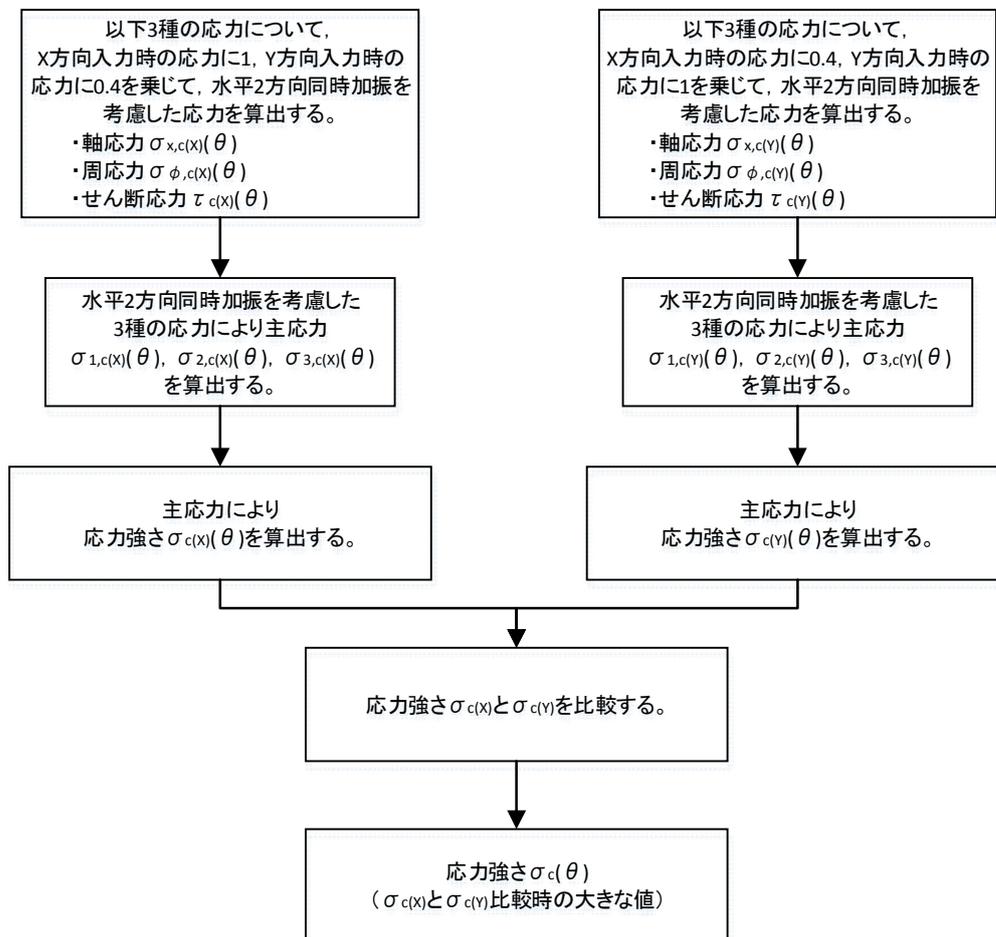


図 4-5 組合せ係数法による組合せ応力算出フロー

X 方向入力時の応力に 1, Y 方向入力時の応力に 0.4 を乗じて組み合わせた水平 2 方向同時加振を考慮した応力は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned}\sigma_{x,c(X)}(\theta) &= \sigma_{x,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{x,Y}(\theta) \\ \sigma_{\phi,c(X)}(\theta) &= \sigma_{\phi,X}(\theta) + 0.4 \times \sigma_{\phi,Y}(\theta) \\ \tau_{c(X)}(\theta) &= \tau_X(\theta) + 0.4 \times \tau_Y(\theta)\end{aligned}$$

水平 2 方向同時加振を考慮した各応力により, 主応力強さ $\sigma_{1,c(X)}(\theta)$, $\sigma_{2,c(X)}(\theta)$, $\sigma_{3,c(X)}(\theta)$ は以下の通りに表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{1,c(X)}(\theta) &= \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,c(X)}(\theta) + \sigma_{\phi,c(X)}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,c(X)}(\theta) - \sigma_{\phi,c(X)}(\theta))^2 + 4\tau_{c(X)}(\theta)^2} \right) \\ \sigma_{2,c(X)}(\theta) &= \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,c(X)}(\theta) + \sigma_{\phi,c(X)}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,c(X)}(\theta) - \sigma_{\phi,c(X)}(\theta))^2 + 4\tau_{c(X)}(\theta)^2} \right) \\ \sigma_{3,c(X)}(\theta) &= 0\end{aligned}$$

各主応力により, 応力強さ $\sigma_{c(X)}(\theta)$ は以下の通りとなる。

$$\sigma_{c(X)}(\theta) = \max(|\sigma_{1,c(X)}(\theta) - \sigma_{2,c(X)}(\theta)|, |\sigma_{2,c(X)}(\theta) - \sigma_{3,c(X)}(\theta)|, |\sigma_{3,c(X)}(\theta) - \sigma_{1,c(X)}(\theta)|)$$

同様に, Y 方向入力時の応力に 1, X 方向入力時の応力に 0.4 を乗じて組み合わせた水平 2 方向同時加振を考慮した応力により, 応力強さ $\sigma_{c(Y)}(\theta)$ を算出する。

この応力強さ $\sigma_{c(X)}(\theta)$ と $\sigma_{c(Y)}(\theta)$ を比較し, 大きな値を $\sigma_c(\theta)$ とする。

$$\sigma_c(\theta) = \max(\sigma_{c(X)}(\theta), \sigma_{c(Y)}(\theta))$$

ここで $\theta=0^\circ$ の場合, 表 4-1 より $\sigma_{x,X}(0^\circ)=12.28$, 表 4-2 より $\sigma_{\phi,X}(0^\circ)=3.54$, 表 4-3 より $\tau_X(0^\circ)=1.08$ であるため,

$$\begin{aligned}\sigma_{1,c(X)}(0^\circ) &= \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \right) = 12.41 \\ \sigma_{2,c(X)}(0^\circ) &= \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(1.08)^2} \right) = 3.41 \\ \sigma_{3,c(X)}(0^\circ) &= 0\end{aligned}$$

となる。したがって, 応力強さ $\sigma_{c(X)}(0^\circ)$ は以下のように算出される。

$$\sigma_{c(X)}(0^\circ) = \max(|12.41 - 3.41|, |3.41 - 0|, |0 - 12.41|) = 12.41$$

同様に, 表 4-1 より $\sigma_{x,Y}(0^\circ)=4.91$, 表 4-2 より $\sigma_{\phi,Y}(0^\circ)=1.42$, 表 4-3 より $\tau_Y(0^\circ)=2.70$ であるため

$$\begin{aligned}\sigma_{1,c(Y)}(0^\circ) &= \frac{1}{2} \left(4.91 + 1.42 + \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 6.38 \\ \sigma_{2,c(Y)}(0^\circ) &= \frac{1}{2} \left(4.91 + 1.42 - \sqrt{(4.91 - 1.42)^2 + 4(2.70)^2} \right) = -0.05 \\ \sigma_{3,c(Y)}(0^\circ) &= 0\end{aligned}$$

となる。したがって、応力強さ $\sigma_{c(Y)}(0^\circ)$ は以下のように算出される。

$$\sigma_{c(Y)}(0^\circ) = \max(|6.38 - (-0.05)|, |-0.05 - 0|, |0 - 6.38|) = 6.43$$

応力強さ $\sigma_{c(X)}(0^\circ)$ と $\sigma_{c(Y)}(0^\circ)$ により、組合せ係数法による水平 2 方向同時加振時を考慮した応力強さ $\sigma_c(0^\circ)$ は

$$\sigma_c(0^\circ) = \max(12.41, 6.43) = 12.41$$

となる。

<SRSS 法による、水平 2 方向同時加振を考慮した組合せ応力強さ $\sigma_s(\theta)$ >

主応力 $\sigma_{1,s}(\theta)$, $\sigma_{2,s}(\theta)$, $\sigma_{3,s}(\theta)$ を以下の通りに表される。

$$\sigma_{1,s}(\theta) = \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,s}(\theta) + \sigma_{\phi,s}(\theta) + \sqrt{(\sigma_{x,s}(\theta) - \sigma_{\phi,s}(\theta))^2 + 4\tau_s(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{2,s}(\theta) = \frac{1}{2} \left(\sigma_{x,s}(\theta) + \sigma_{\phi,s}(\theta) - \sqrt{(\sigma_{x,s}(\theta) - \sigma_{\phi,s}(\theta))^2 + 4\tau_s(\theta)^2} \right)$$

$$\sigma_{3,s} = 0$$

各主応力により、応力強さ $\sigma_s(\theta)$ は以下の通りとなる。

$$\sigma_s(\theta) = \max(|\sigma_{1,s}(\theta) - \sigma_{2,s}(\theta)|, |\sigma_{2,s}(\theta) - \sigma_{3,s}(\theta)|, |\sigma_{3,s}(\theta) - \sigma_{1,s}(\theta)|)$$

ここで $\theta=0^\circ$ の場合には、表 4-1 より $\sigma_{x,s}(0^\circ)=12.28$ 、表 4-2 より $\sigma_{\phi,s}(0^\circ)=3.54$ 、表 4-3 より $\tau_s(0^\circ)=2.70$ であるため、

$$\sigma_{1,s}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 + \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 13.05$$

$$\sigma_{2,s}(0^\circ) = \frac{1}{2} \left(12.28 + 3.54 - \sqrt{(12.28 - 3.54)^2 + 4(2.70)^2} \right) = 2.77$$

$$\sigma_{3,s}(0^\circ) = 0$$

となる。したがって、

$$\sigma_s(0^\circ) = \max(|13.05 - 2.77|, |2.77 - 0|, |0 - 13.05|) = 13.05$$

$\theta=0^\circ$ の場合に SRSS 法、組合せ係数法を用いて算出した応力強さを表 4-4 にまとめる。

表 4-4 SRSS 法, 組合せ係数法を用いて算出した応力強さ ($\theta=0^\circ$)

	X	Y	SRSS 法	組合せ係数法	
				$1.0 \times X + 0.4 \times Y$	$0.4 \times X + 1.0 \times Y$
$\sigma_x(\theta)$	12.28	0.00	$\sqrt{(12.28^2 + 0.00^2)} =$ 12.28	$12.28 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 12.28	$12.28 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 4.91
$\sigma_\phi(\theta)$	3.54	0.00	$\sqrt{(3.54^2 + 0.00^2)} =$ 3.54	$3.54 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 3.54	$3.54 \times 1.0 + 0.00 \times 0.4 =$ 1.42
$\sigma_\tau(\theta)$	0.00	2.70	$\sqrt{(0.00^2 + 2.70^2)} =$ 2.70	$0.00 \times 1.0 + 2.70 \times 0.4 =$ 1.08	$0.00 \times 1.0 + 2.70 \times 0.4 =$ 2.70
$\sigma_1(\theta)$	-	-	$1/2 \times [12.28 + 3.54 +$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 13.04	$1/2 \times [12.28 + 3.54 +$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 1.08^2\}}] =$ 3.41	$1/2 \times [4.91 + 1.42 +$ $\sqrt{\{(4.91 - 1.42)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 6.38
$\sigma_2(\theta)$	-	-	$1/2 \times [12.28 + 3.54 -$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ 2.77	$1/2 \times [12.28 + 3.54 -$ $\sqrt{\{(12.28 - 3.54)^2 + 4 \times 1.08^2\}}] =$ 12.41	$1/2 \times [4.91 + 1.42 -$ $\sqrt{\{(4.91 - 1.42)^2 + 4 \times 2.70^2\}}] =$ -0.05
$\sigma_3(\theta)$	-	-	0	0	0
$\sigma(\theta)$	-	-	MAX ($ 13.04 - 2.77 $, $ 2.77 - 0 $, $ 0 - 13.04 $) = 13.04	MAX ($ 3.41 - 12.41 $, $ 12.41 - 0 $, $ 0 - 3.41 $) = 12.41	MAX ($ -0.05 - 6.38 $, $ 6.38 - 0 $, $ 0 - (-0.05) $) = 6.43
				Max(12.41, 6.43) = 12.41	

算出した応力強さの分布及び分布図を表 4-5, 図 4-6 に示す。

表 4-5 水平地震時の組合せ応力強さ分布

角度	X 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_x(\theta)$	Y 方向入力時 応力強さ (MPa) $\sigma_y(\theta)$	2 方向入力時応力強さ (MPa)	
			組合せ係数法 $\sigma_c(\theta)$	SRSS 法 $\sigma_s(\theta)$
0° 方向	12.28	5.40	12.41	13.04
22.5° 方向	11.47	6.03	13.64	13.04
45° 方向	9.22	9.22	12.91	13.04
67.5° 方向	6.03	11.47	13.64	13.04
90° 方向	5.40	12.28	12.41	13.04

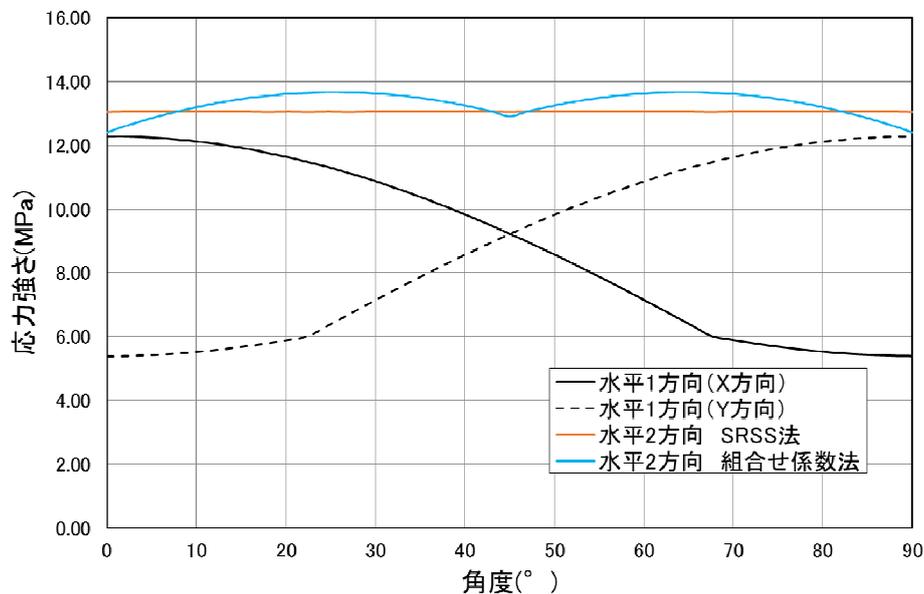


図 4-6 水平地震時組合せ応力強さ分布図

組合せ応力強さは SRSS 法では全方向において一定であるのに対して、組合せ係数法では 24.75°/65.25° 方向に 2 つのピークをもつ分布となった。組合せ応力強さは 0°/45°/90° 方向付近では SRSS 法の方が組合せ係数法に比べ大きな値となるのに対して、組合せ係数法がピークを持つ 24.75°/65.25° 方向付近では SRSS 法を約 5% 上回る結果となった。

水平 2 方向入力時の SRSS 法による組合せ最大応力強さは水平 1 方向入力時の最大応力強さに対して 6% 上回る程度であり (表 4-6 参照), 水平 2 方向による影響は軽微と言える。一方, 水平 2 方向入力時の組合せ係数法による組合せ最大応力強さについては, 水平 1 方向入力時の最大応力強さに対して 11% 上回る結果となった。これは水平 2 方向の影響軽微と

判断する基準（応力の増分が1割）を超えているが，本検討においては水平地震力のみを考慮しており，実際の耐震評価においては水平地震力以外に自重，内圧及び鉛直地震力等を考慮して評価を実施することから，水平2方向を考慮した際の応力強さの増分は小さくなる。このため，水平2方向による影響は軽微であると考えられる。

表 4-6 水平地震時の最大組合せ応力強さ及び水平2方向による影響

		最大組合せ応力強さ [MPa]	水平2方向／水平1方向 最大応力強さ比
水平1方向入力		12.28	1.00
水平2方向入力	SRSS法	13.04	1.06
	組合せ係数法	13.67	1.11

5 水平2方向同時加振の影響評価について（ダイヤフラムフロア）

5.1 はじめに

本項は、ダイヤフラムフロアに対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

5.2 ダイヤフラムフロアの構造

ダイヤフラムフロアは鉄筋コンクリート製格納容器（以下、「RCCV」と呼ぶ。）をドライウエルとサプレッションチェンバに仕切る構造物である。ダイヤフラムフロアは鉄筋コンクリート製のスラブであり、RCCV及び原子炉本体基礎で支持されている。ダイヤフラムフロアとRCCVの接合部にはシアプレートが放射状に設置されており、円周方向及び鉛直方向の力の伝達を行う。原子炉本体基礎との接合部には、ダイヤフラムフロアが原子炉本体基礎に上載する構造とし、原子炉本体基礎上面にシアプレート及び頭付きスタッドが放射状に設置されており、円周・半径方向力の伝達を行う（図5-1）。

5.3 現行評価の手法

ダイヤフラムフロアに作用する地震力は、NS、EW方向のうち最大となるものを用いる。

鉄筋コンクリートスラブは軸力、曲げ応力により発生する引張応力度、圧縮応力度と面外せん断力について評価を実施している。

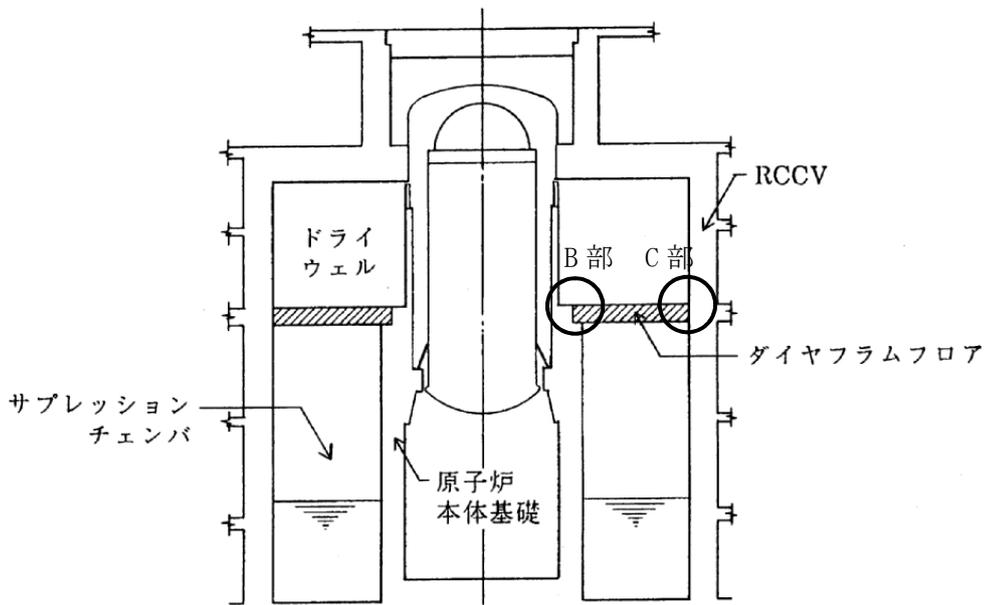
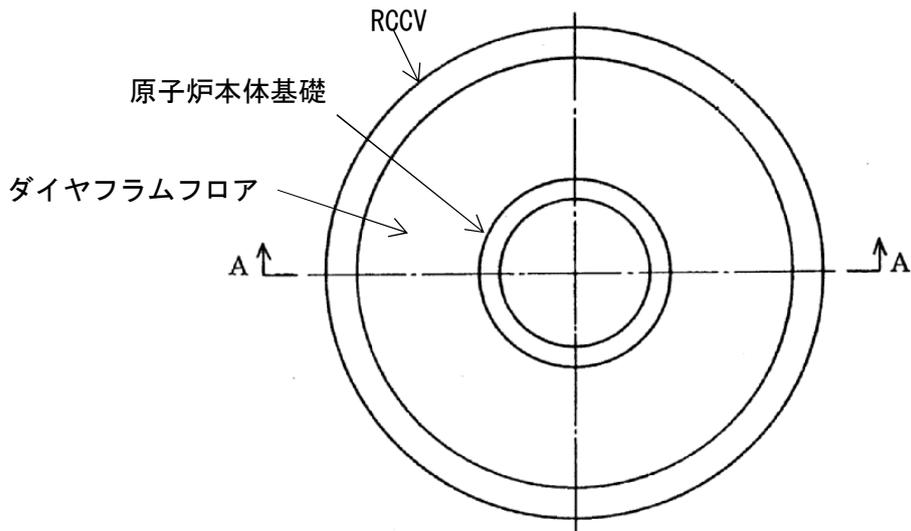
シアプレート及び頭付きスタッドは、地震時の水平力または鉛直力によるせん断応力度と曲げモーメントによる曲げ応力度について評価を実施している。

5.4 水平2方向同時加振の影響

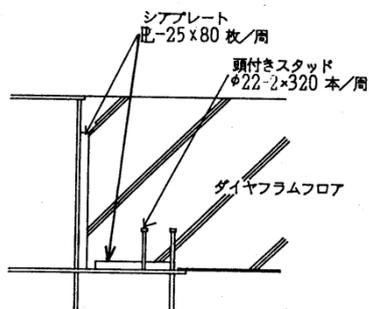
鉄筋コンクリートスラブに作用する荷重は鉛直方向の荷重が支配的であり、水平2方向の地震を組み合わせた場合でも、引張応力度、圧縮応力度及び面外せん断力に与える影響は軽微である。

地震時にダイヤフラムフロア全体に加わる水平力 Q とした場合、ダイヤフラムフロア端部に加わる水平力 q は \sin 分布として与えている（図5-2）ため、地震方向との角度 θ が 90° の位置で最大となることから、NS、EW方向で最大となる地震力の位置は異なる（図5-3）。

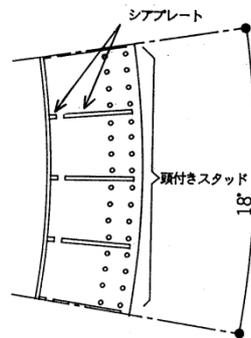
さらに、水平2方向同時加振時の水平力の合力は、水平1方向加振時の最大の水平力と比較し、SRSS法を用いた場合は同値、組合せ係数法を用いた場合は最大で約1.08倍の値となる（図5-4）ため、水平2方向同時加振の影響は軽微である。



A-A断面図

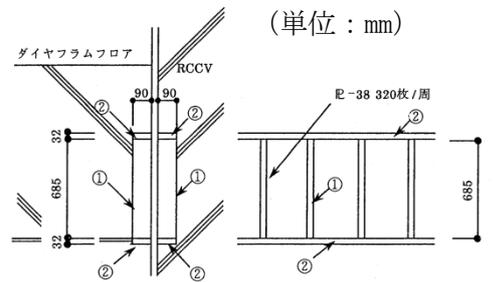


断面図



平面図

B部詳細

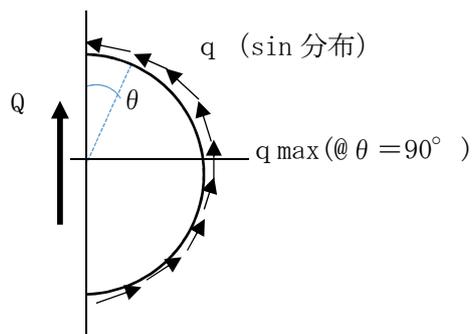


(単位：mm)

注 ①：地震時水平力伝達用シアプレート
②：鉛直力伝達用シアプレート

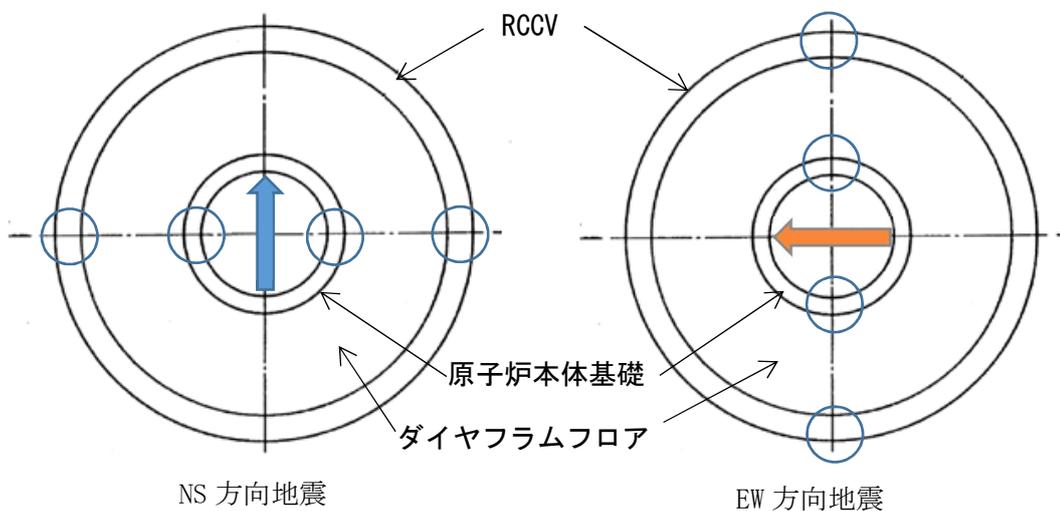
C部詳細

図 5-1 ダイヤフラムフロアの構造



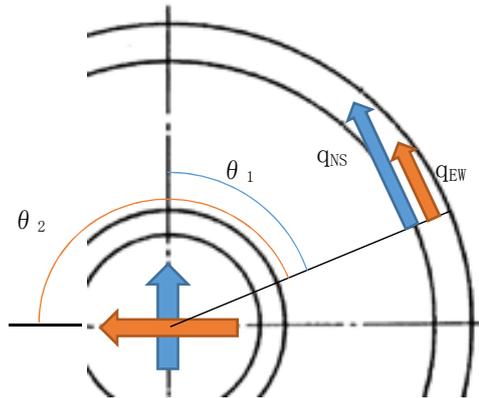
Q:地震時にダイヤフラムフロア全体が受ける水平力
 q:ダイヤフラム端部に作用する水平力

図 5-2 ダイヤフラムフロア端部における水平力の分布



○ 地震時にシアプレート及び頭付きスタッドが受ける水平力が最大となる位置

図 5-3 シアプレート及び頭付きスタッドに与える各方向地震による最大水平力発生点



NS 加振時水平力： $q_{NS} = Q / \pi r \times \sin \theta_1$
 EW 加振時水平力： $q_{EW} = Q / \pi r \times \sin \theta_2$
 $= Q / \pi r \times \sin(\pi/2 + \theta_1)$
 $= Q / \pi r \times \cos \theta_1$

← : NS 方向加振時 ← : EW 方向加振時

< 組合せ係数法を用いた 2 方向加振時水平力 >

$$q = \max(q_{NS} + 0.4 \times q_{EW}, 0.4 \times q_{NS} + q_{EW})$$

$$= Q / \pi r \times \max(\sin \theta_1 + 0.4 \times \cos \theta_1, 0.4 \times \sin \theta_1 + \cos \theta_1)$$

< SRSS 法を用いた 2 方向加振時水平力 >

$$q = \sqrt{q_{NS}^2 + q_{EW}^2}$$

$$= \sqrt{(Q / \pi r \times \sin \theta_1)^2 + (Q / \pi r \times \cos \theta_1)^2}$$

$$= Q / \pi r$$

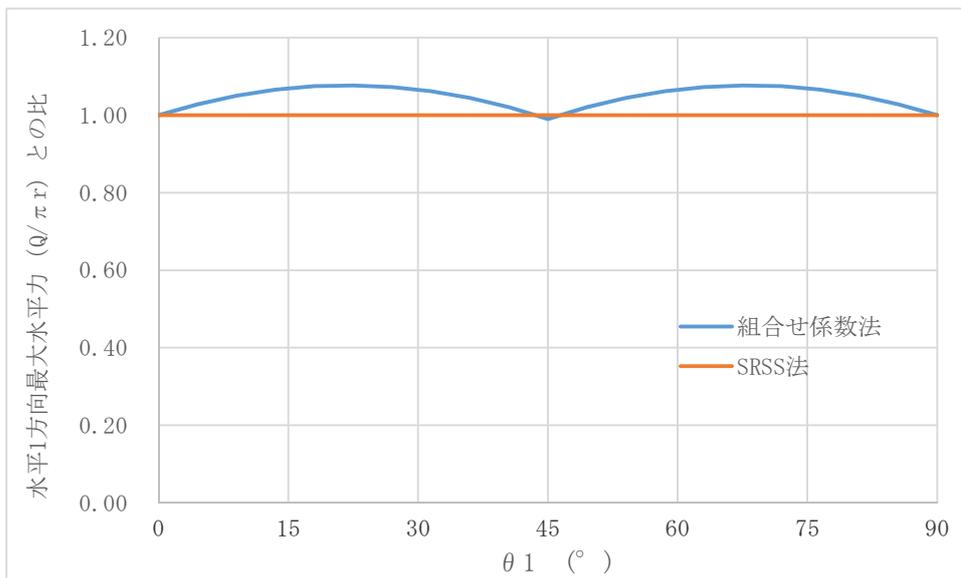


図 5-4 水平 2 方向同時加振時の水平力分布について

6 水平2方向同時加振の影響評価について（燃料取替機）

6.1 はじめに

本項は、燃料取替機（以下、FHM という。）に対する水平2方向同時加振の影響についてまとめたものである。

6.2 現行評価の手法

FHM はレール上で車輪で移動する構造であるため、基本的には建屋との固定はないが、地震時に横行方向（走行レールに対し直角方向）にすべりが生じた場合は、レールに沿って取り付けられている脱線防止ラグがレールの側面と接触し、FHM のすべりを制限する構造となっている。つまり、ラグとレールが接触し、FHM が横行方向に建屋と固定された体系では、地震入力がFHM 本体へそのまま伝達されることが想定される。

一方、走行方向（走行レールの長手方向）については、FHM の車輪とレールの接触面（踏面）を介してFHM 本体へと荷重が伝達される構造であり、その荷重は摩擦力により制限されるため、地震入力により生じる荷重は軽微（FHM 本体への影響は軽微）と考えられる。

上記より、FHM 本体の耐震評価では横行方向に対する地震応答が支配的であり、走行方向に対しては比較的軽微であると考えられるため、水平2方向同時加振の考慮として、耐震性評価で走行方向の地震応答を追加で組み合わせたとしても、従来評価の応答結果への影響は小さいと考えられる。

なお、FHM については、鉛直地震動が従来の静的地震力から動的地震力へ変更となっていることを踏まえ、水平2方向及び鉛直方向同時加振を想定した場合の現行評価の妥当性について今後の詳細検討において行うこととする。

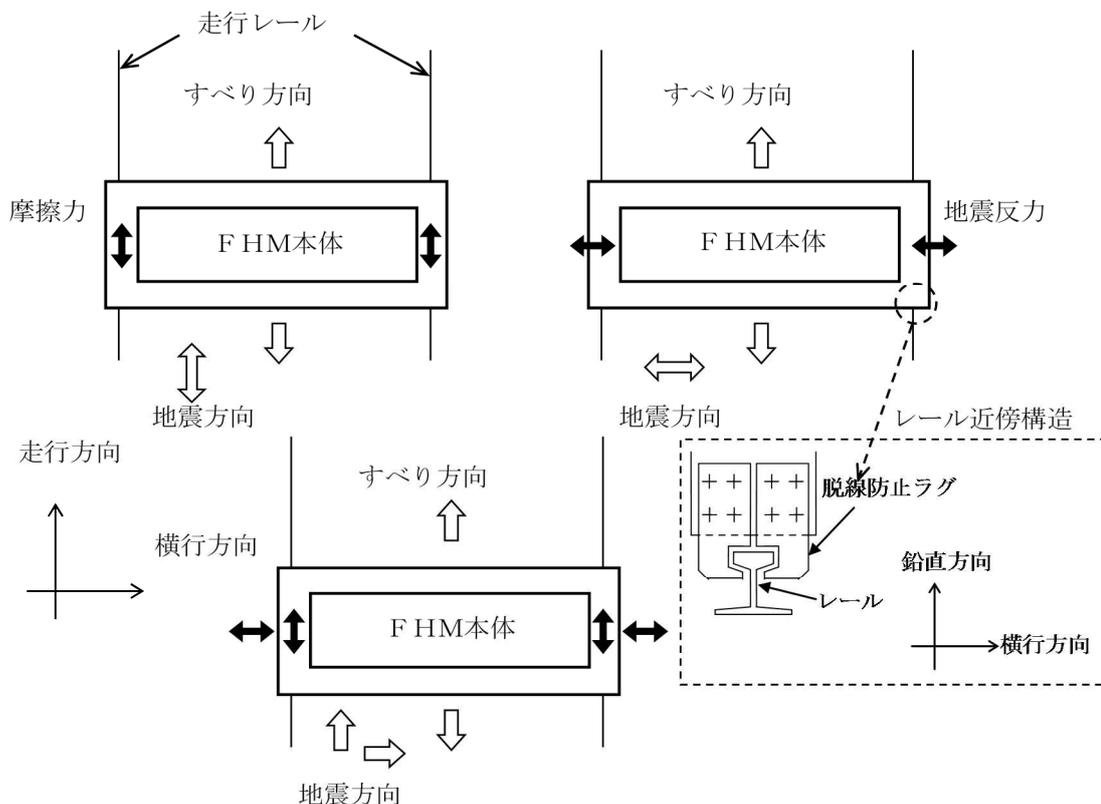


図 6-1 燃料取替機の負担する水平地震荷重

7 水平2方向同時加振の影響評価について（矩形配置されたボルト）

7.1 はじめに

本項は、水平2方向に地震力が作用した場合の矩形配置されたボルトに対する影響検討結果をまとめたものである。強軸・弱軸が明確なものについては、弱軸方向に応答し水平2方向地震力による影響が軽微であるため、機器の形状を正方形として検討をおこなった。

7.2 引張応力への影響

水平1方向に地震力が作用する場合と水平2方向に地震力が作用する場合のボルトへの引張力の違いを考察する。なお、簡単のため機器の振動による影響は考えないこととする。

(1) 水平1方向に地震力が作用する場合

図7-1のようにX方向に震度 C_H が与えられる場合を考慮する。

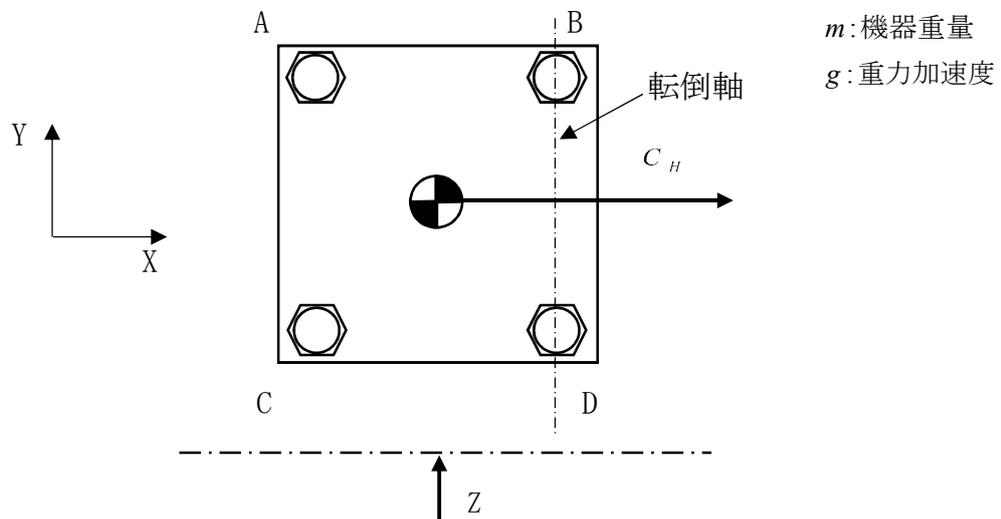


図7-1 水平1方向の地震力による応答（概要）

この場合、対象としている系の重心に作用する水平方向の力 F_H は

$$F_H = mgC_H$$

と表せ、 F_H によりボルトBとボルトDの中心を結んだ軸を中心に転倒モーメントを生じる。

この転倒モーメントはボルトA、Cにより負担される。

このとき、系の重心に生じる力は、図 7-2 に示すとおりである。

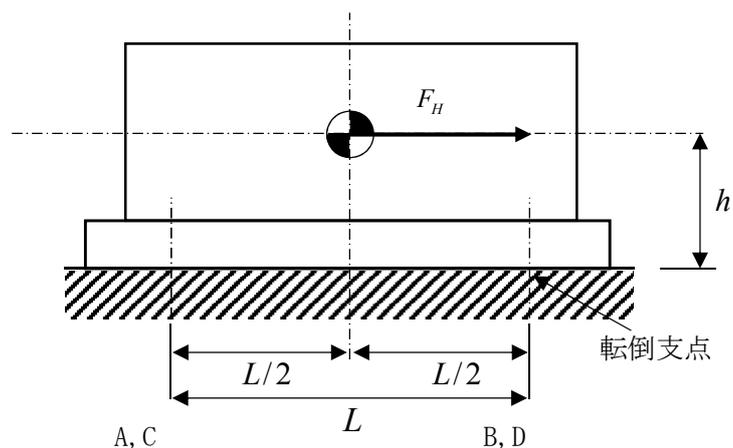


図 7-2 水平 1 方向の地震力による力 (Z 矢視図)

図 7-2 より、水平方向地震動による引張力は

$$F_b = \frac{1}{L}(mgC_H h)$$

である。

ボルトに掛かる引張応力 σ_b は全引張力を断面積 A_b のボルト n_f 本で受けると考え、

$$\sigma_b = \frac{F_b}{n_f A_b}$$

である。水平 1 方向地震力を考慮する場合、ボルト A, C で全引張力を負担することから、

$n_f = 2$ であるため、ボルトに掛かる引張応力 σ_b は

$$\sigma_b = \frac{F_b}{2A_b} = \frac{mgC_H h}{2A_b L}$$

となる。

(2) 水平2方向に地震力が作用する場合

図7-3のようにX方向とY方向にそれぞれ震度 C_x 、 C_y が作用する場合を考慮する。なお、本検討においては、X方向とY方向に同時に最大震度が発生する可能性は低いと考え、X方向の震度とY方向の震度を1:0.4 ($0.4C_x = C_y$)と仮定する。

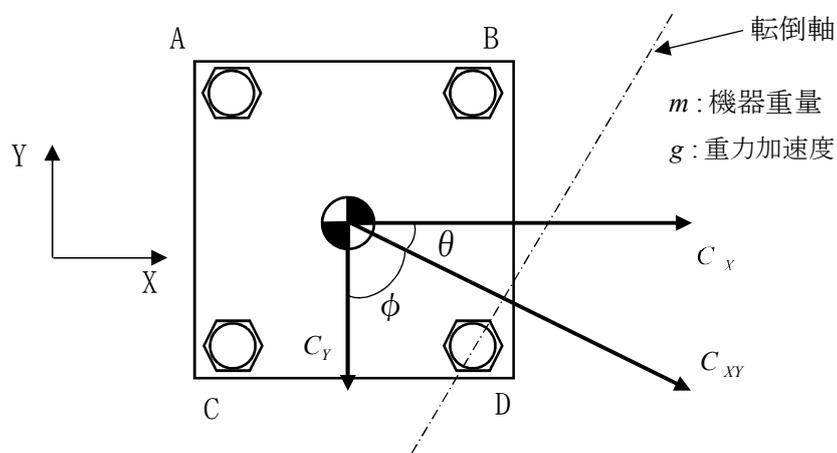


図7-3 水平2方向の地震力による応答 (概要)

この時 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{4}{10}\right)$ であることから、水平方向の震度 C_{XY} は

$$\begin{aligned} C_{XY} &= C_x \cos \theta + C_y \cos \phi \\ &= \frac{5}{\sqrt{29}} C_x + 0.4 \times \frac{2}{\sqrt{29}} C_x \\ &= \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x \end{aligned}$$

と表せる。この時、対象としている系の重心に作用する水平方向の力 F_H は

$$F_H = mg C_{XY} = mg \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x$$

となる。この F_H により、転倒軸を中心に転倒モーメントが生じ、ボルトA,B,Cにより負担される。

水平2方向の地震力を受け対角方向に応答する場合、各ボルトにかかる引張力を F_A 、 F_B 、 F_C とし、図7-5に示すようにボルトDの中心を通る直線を転倒軸とすると、

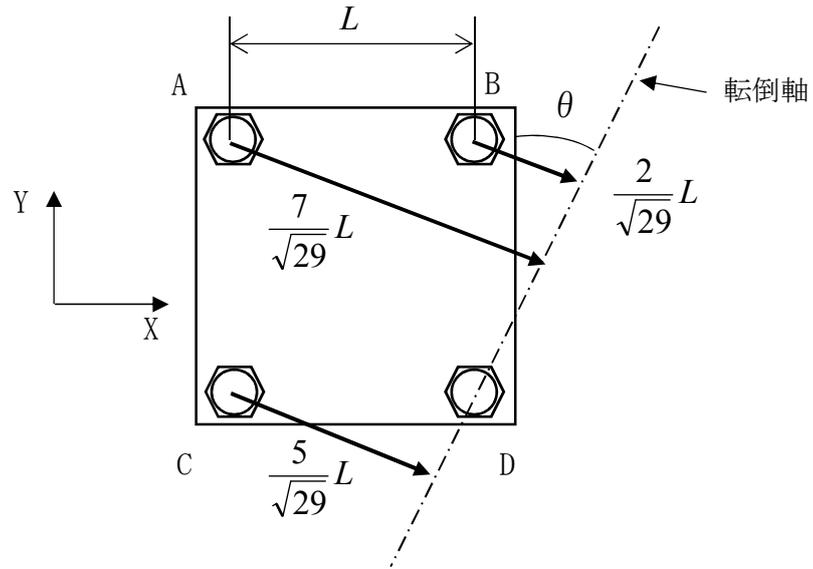


図 7-5 対角方向に応答する場合の転倒軸からの距離

転倒軸からの距離により,

$$F_A : F_B : F_C = 7 : 2 : 5$$

であり, 転倒軸周りのボルトの軸力により発生するモーメント M は,

$$\begin{aligned} M &= \frac{7}{\sqrt{29}} L F_A + \frac{2}{\sqrt{29}} L F_B + \frac{5}{\sqrt{29}} L F_C \\ &= \frac{7}{\sqrt{29}} L \times F_A + \frac{2}{\sqrt{29}} L \times \frac{2}{7} F_A + \frac{5}{\sqrt{29}} L \times \frac{5}{7} F_A \\ &= \frac{78}{7\sqrt{29}} L F_A \end{aligned}$$

である。

転倒しない場合, 転倒軸周りのボルトの軸力により発生するモーメント M と, 水平方向地震力によるモーメントが釣り合っているので,

$$mgC_{xy}h = \frac{78}{7\sqrt{29}} L F_A$$

であり, 引張力 F_A は以下の通りとなる。

$$F_A = \frac{7\sqrt{29}}{78L} (mgC_{xy}h)$$

以上より、最も発生応力の大きいボルト A に発生する応力 σ_b' は

$$\sigma_b' = \frac{F_A}{A_b} = \frac{7\sqrt{29}}{78A_bL} (mgC_{xy}h)$$

であり、水平 1 方向地震動を考慮した場合のボルトにかかる応力 σ_b

$$\sigma_b = \frac{F_b}{2A_b} = \frac{1}{2A_bL} (mgC_Hh)$$

に対して、震度 $C_{XY} = \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_H$ であることから

$$\begin{aligned}\sigma_b' &= \frac{7\sqrt{29}}{39 \times 2A_bL} (mgC_{xy}h) \\ &= \frac{7\sqrt{29}}{39 \times 2A_bL} \times \frac{5.8}{\sqrt{29}} (mgC_Hh) \\ &= \frac{40.6}{39} \sigma_b \\ &\cong 1.04\sigma_b\end{aligned}$$

となる。したがって、水平 2 方向地震を考慮した場合、ボルトに発生する引張応力は増加するが、その影響は軽微である。

7.3 せん断応力への影響

せん断力は全基礎ボルト断面で負担するが、全ボルトに対するせん断力 Q_b は、

$$Q_b = F_H$$

であり、せん断応力 τ_b は断面積 A_b のボルト全本数 n でせん断力 Q_b を受けるため、

$$\tau_b = \frac{Q_b}{nA_b}$$

となる。

水平 1 方向の地震力を考慮した場合のせん断力 Q_b 及び水平 2 方向の地震力を考慮した場合

のせん断力 Q_b' はそれぞれ

$$Q_b = mgC_x$$

$$Q_b' = mg \frac{5.8}{\sqrt{29}} C_x \cong 1.08mgC_x$$

となる。水平 1 方向及び水平 2 方向地震時に断面積 A_b 及びボルト全本数 n は変わらないため、水平 2 方向地震を考慮した場合、ボルトに発生するせん断応力は増加するが、その影響は軽微である。

8 水平 2 方向同時加振の影響評価について（電気盤）

8.1 はじめに

本項は、電気盤に取り付けられている器具に対する水平 2 方向入力の影響をまとめたものである。

8.2 水平 2 方向加振の影響について

電気盤に取り付けられている器具については、1 次元的な接点の ON-OFF に関わる比較的単純な構造をしている。加えて、基本的にはすべて梁、扉等の強度部材に強固に固定されているため、器具の非線形応答もなく、水平 2 方向の加振に対しては独立に扱うことで問題ないものとする。さらに器具の誤動作モードは、水平 1 方向を起因としたモードであるため、水平 2 方向加振による影響は軽微であるとする。

次頁より、メタクラ取付器具を代表とし、器具の構造から検討した結果をまとめる。

なお、メタクラ以外の器具については、今後の詳細検討において構造・型式等の観点から網羅的に整理し、影響が軽微であることを確認することとする。

8.2.1 補助リレー

(1) 構造，作動機構の概要

図 8-1 に補助リレーの構造及び作動機構を示す。補助リレーはコイルに通電されることにより生じる電磁力でアマチュア部を動作させ，接点の開閉を行うものである。

補助リレーのうち，固定鉄心，固定接点（A，B 接点）はいずれも強固に固定されており，可動接点は左右方向にのみ動くことのできる構造になっている。

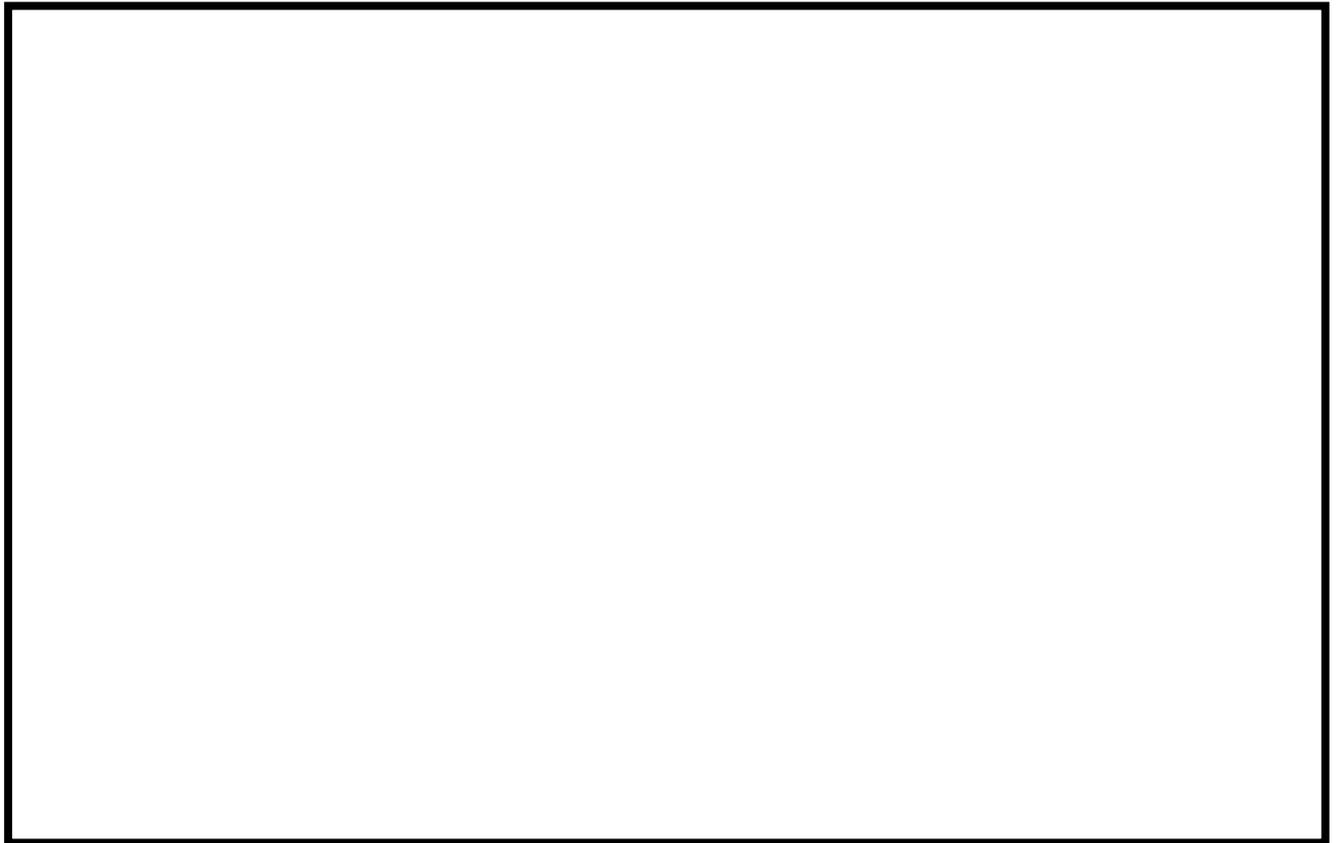


図 8-1 補助リレー構造図

(2) 水平 2 方向地震力に対する影響検討

図 8-1 から，器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・地震力で可動接点が振動することにより，接点が誤接触，または誤開放（左右方向）

ただし，補助リレーは取付部をボルト固定していること，また，器具の可動部は左右方向にのみ振動することから，誤動作にいたる事象に多次元的な影響はないと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と補助リレーの既往試験での確認済加速度及び試験結果を表 8-1 に示す。

表 8-1 補助リレーの発生加速度及び機能確認済加速度

方向	前後	左右	上下
発生加速度 (G)	0.70	0.83	0.83
確認済加速度 (G)			

8.2.2 ノーヒューズブレーカ (MCCB)

(1) 構造, 作動機構の概要

図 8-2 に MCCB の構造及び作動機構を示す。配線用遮断器には熱動電磁式と完全電磁式がある。下記に代表して熱動電磁式の動作原理と内部構造を示す。

熱動電磁式は、過電流が流れるとバイメタルが彎曲し、トリップ桿によりラッチの掛け合いが外れ、キャッチがバネにより回転し、リンクに連結された可動接点が作動し回路を遮断する。また、短絡電流等の大電流が流れた場合は、固定鉄心の電磁力で可動鉄心が吸引されトリップ桿が作動し、以降は上述と同じ動作により回路を遮断する。



図 8-2 MCCB 構造図

(2) 水平2方向地震力に対する影響検討

図 8-2 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・ハンドルが逆方向へ動作する（上下方向）
- ・接点が乖離する（前後方向、左右方向）
- ・ラッチが外れてトリップする（前後方向、上下方向）

上記より、MCCBの誤動作として2方向の振動の影響が考えられる。ただし、ハンドルは1方向にしか振動できないこと、前後-左右の接点乖離は各々独立であること（前後方向は接触-非接触、左右方向はずれによる）から、これらについては誤動作に至る事象は多次元的な影響はないものと考えられる。

ラッチ外れについては2軸（前後方向、上下方向）の影響は無視できないと考えられるが、左右方向はラッチ外れに影響を与える誤動作モードではないため、水平2方向の影響はないものと考えられる。

なお、既往試験においては、ハンドルの移動に起因する誤動作事象は発生していない。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度とMCCBの既往試験での確認済加速度及び試験結果を表 8-2 に示す。

表 8-2 MCCBの発生加速度及び機能確認済加速度

方向	前後	左右	上下
発生加速度 (G)	0.70	0.83	0.83
確認済加速度 (G)			

8.2.3 過電流リレー（保護リレー）

（1）構造，作動機構の概要

図 8-3 に過電流リレー（保護リレー）の構造を示す。過電流リレーは，電流コイル 1 個を持つ電磁石が動作トルクを発生し，永久磁石の制動により限時特性を得る円板形リレーであり，タップ値以上の過電流が流れると接点が動作し，警報や遮断器引き外しを行う。なお，過電流リレーはボルトにて，盤の扉面に強固に取り付けられている。



図 8-3 過電流リレー構造図

(2) 水平2方向地震力に対する影響検討

図 8-3 から、器具の誤動作モードとして以下が考えられる。

- ・誘導円板が接触し、固渋する（上下方向）
- ・可動接点が振動し、接点の誤接触が生じる（前後、左右方向）

誘導円板の固渋については上下方向のため、水平2方向の影響はない。

接点の誤接触については、昭和 56 年の日本機械学会講演論文集「誘導円板型リレーの地震時誤動作に関する研究」において、誘導円板が水平2方向入力により、回転し接点接触により、誤動作が生じることが報告されている。しかし、平成 13 年度に行われた電力共通研究「鉛直地震動を受ける設備の耐震評価手法に関する研究」において、水平2方向加振時に鉛直方向加振を加えた試験を実施しており、正弦波加振試験では誘導円板の回転挙動が発生したが、地震波加振試験では誘導円板の回転挙動が発生しないことを確認している。したがって、地震波による水平2方向の影響はないものと考えられる。

(3) 機能確認済加速度

参考として、発生加速度と過電流リレーの既往試験での確認済加速度及び試験結果を表 8-3 に示す。

表 8-3 過電流リレーの発生加速度及び機能確認済加速度

方向	前後	左右	上下
発生加速度(G)	0.70	0.83	0.83
確認済加速度(G)			

荷重の組み合わせによる応答特性が想定される部位の抽出に関する補足説明

1. はじめに

本資料は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組み合わせに関する検討において、荷重の組み合わせによる応答特性が想定される部位の抽出について、部材の特性より影響を考慮しないとした部位について、抽出根拠が明確になるよう、代表的な建屋について、対象部位の図面を示すものである。

対象部位の図面を示す建屋として、原子炉建屋（6号炉）及びタービン建屋（6/号炉）を代表として示す。

2. 荷重の組み合わせによる応答特性が想定される部位の抽出に関する補足説明

2-1. 原子炉建屋（6号炉）

原子炉建屋（6号炉）の断面図及び平面図を図 2-1-1 及び図 2-1-2 に示す。なお、平面図については基準階として 1 階（T.M.S.L. 12.3）並びに上部構造のクレーン取付階伏図（T.M.S.L. 38.2）を代表として示す。

a. 柱

独立した隅柱は直交する地震荷重が同時に作用するが、図 2-1-2 に示すとおり、原子炉建屋の隅柱は耐震壁付きの隅柱であり直交する水平 2 方向の荷重による影響は小さい。

b. 梁

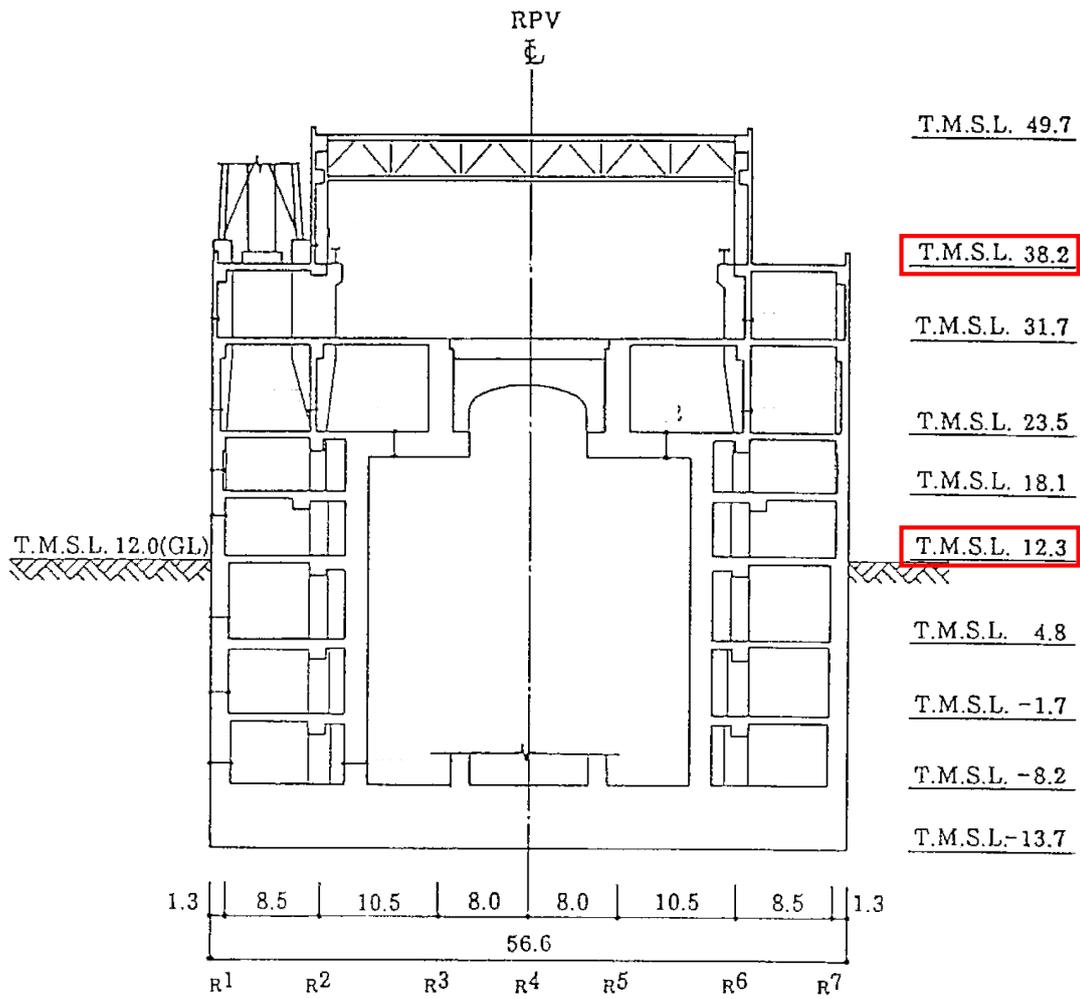
梁については、1 方向のみ荷重を負担することが基本であり、また図 2-1-2 に示す通り原子炉建屋の梁は床および壁に拘束されているため、面外荷重負担による影響は小さい。

c. 壁

壁については、1 方向のみ荷重を負担することが基本であり、また、図 2-1-2 に示す通り原子炉建屋の耐震壁は直交方向に釣り合いよく配置されているため、直交する水平 2 方向の荷重による影響は小さい。

d. 床及び屋根

床及び屋根については、図 2-1-2 に示す通り四辺を壁及び梁で拘束されているため、水平方向に変形しにくい構造となっており、水平地震力の影響は小さい。



赤枠内の平面図を示す

図 2-1-1 原子炉建屋 (6号炉) 断面図 (単位: m)

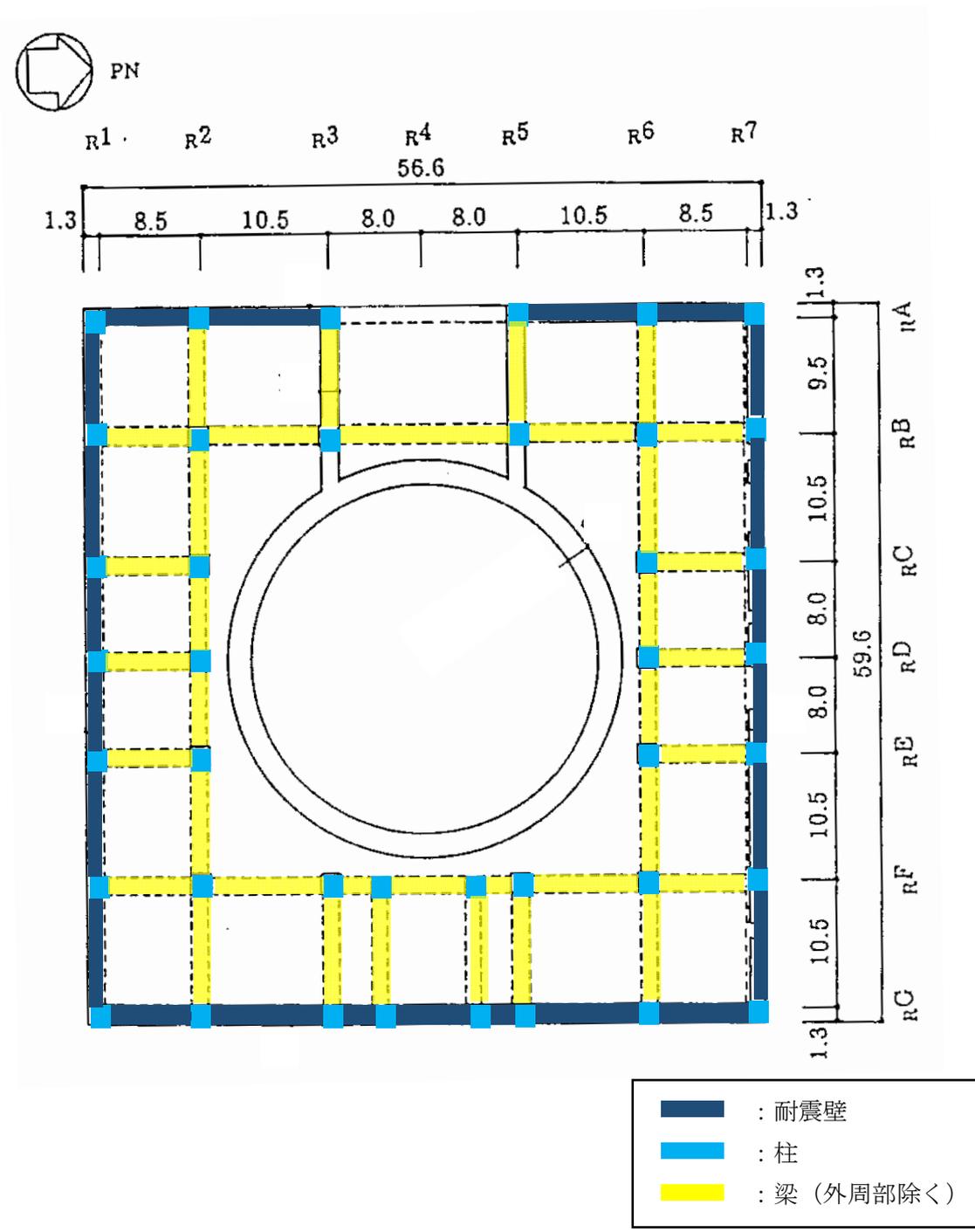


図 2-1-2 原子炉建屋 1 階伏図 (T.M.S.L.12.3) (単位 : m)

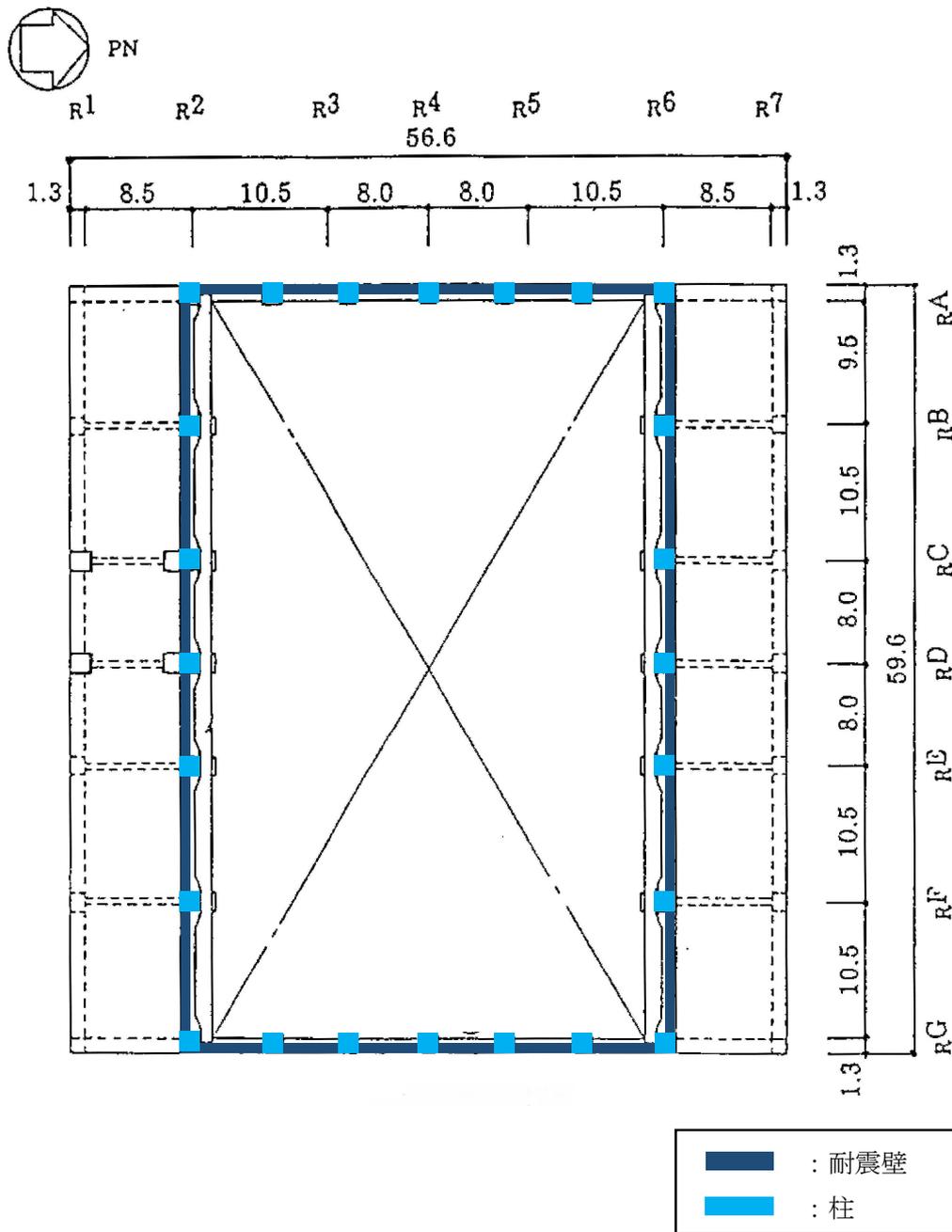


図 2-1-2 原子炉建屋 クレーン取付階伏図 (T.M.S.L.38.2) (単位 : m)

2-2. タービン建屋（6号炉）

タービン建屋（6号炉）の断面図及び平面図を図 2-2-1 及び図 2-2-2 に示す。なお、平面図については基準階として1階（T.M.S.L. 12.3）並びに上部構造の3階（T.M.S.L. 30.9）を代表として示す。

a. 柱

独立した隅柱は直交する地震荷重が同時に作用するが、図 2-2-2 に示すとおり、タービン建屋（6号炉）の隅柱は耐震壁又は鉄骨ブレース付きの隅柱であり直交する水平2方向の荷重による影響は小さい。

b. 梁

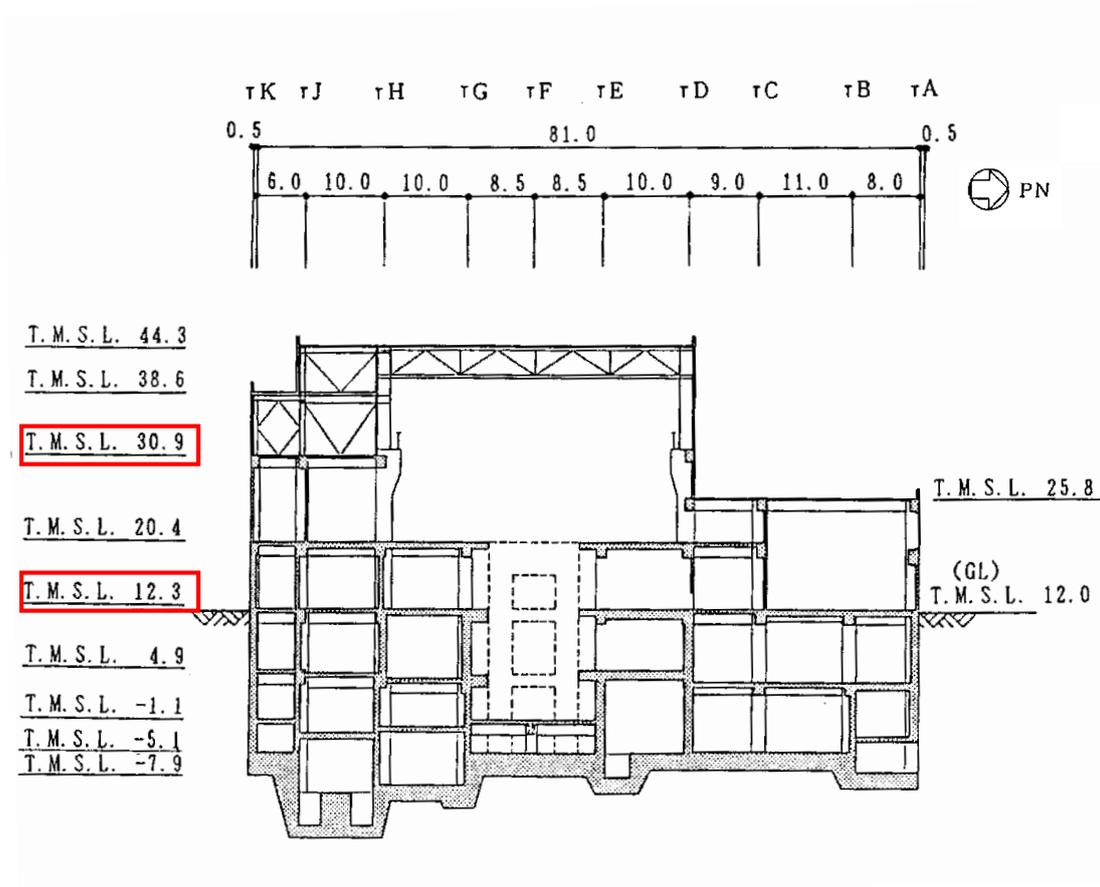
梁については、1方向のみ荷重を負担することが基本であり、また図 2-2-2 に示す通りタービン建屋（6号炉）の梁は床および壁に拘束されているため、面外荷重負担による影響は小さい。

c. 壁

壁については、1方向のみ荷重を負担することが基本であり、また、図 2-2-2 に示す通りタービン建屋（6号炉）の耐震壁は直交方向に釣り合いよく配置されているため、直交する水平2方向の荷重による影響は小さい。

d. 床及び屋根

床及び屋根については、図 2-2-2 に示す通り四辺を壁及び梁で拘束されているため、水平方向に変形しにくい構造となっており、水平地震力の影響は小さい。



赤枠内の平面図を示す

図 2-2-1 タービン建屋 (6号炉) 断面図 (単位 : m)

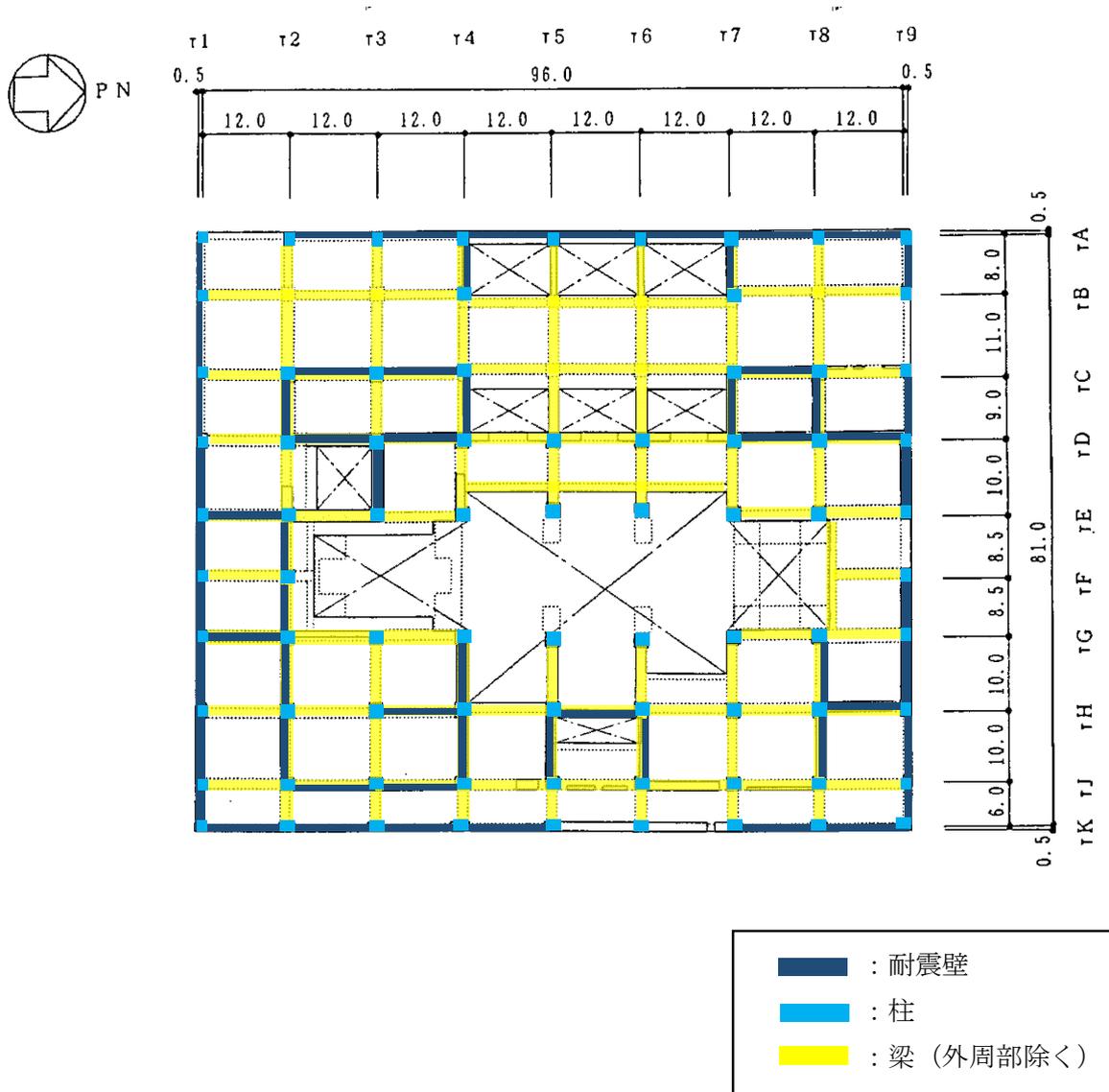


図 2-2-2 タービン建屋 (6号炉) 1階伏図 (T.M.S.L. 12.3) (単位 : m)

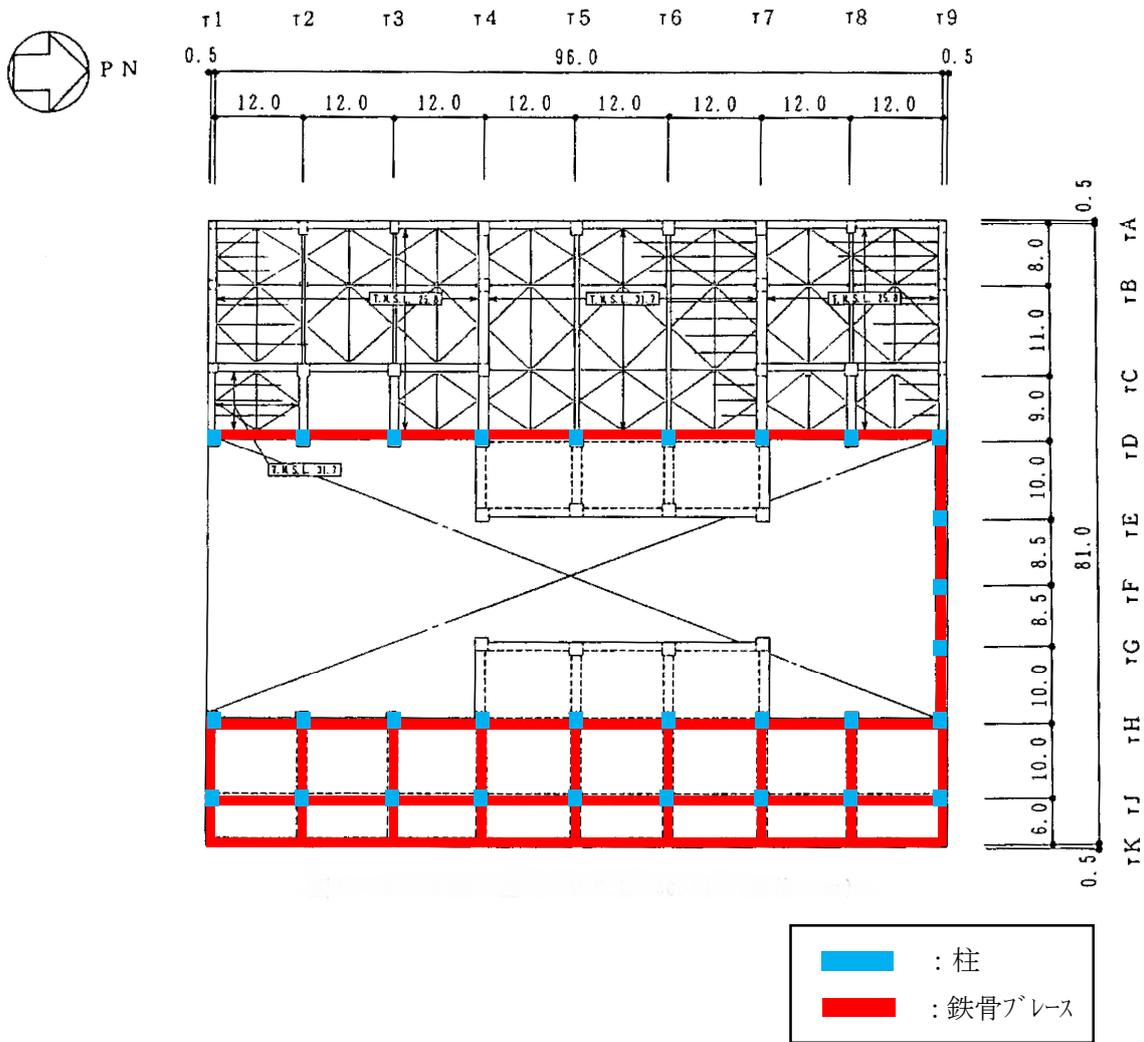


図 2-2-2 タービン建屋 (6号炉) 3階伏図 (T.M.S.L. 30.9) (単位 : m)

水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合わせに対する梁の力学的特性

1. はじめに

本資料は、水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合わせに対する評価対象部位として梁（一般部・鉄骨トラス）を抽出しない理由について、梁の力学的特性を補足説明するものである。

2. 梁の力学的特性

(1) 梁（一般部）

鉛直方向の地震荷重に対して設計されており、直交する水平方向の地震荷重に対しては床スラブで拘束されているため、梁には大きな応力は生じない。

(2) 鉄骨トラス

鉛直方向の地震荷重に対して設計されており、直交する水平方向の地震荷重に対しては床スラブやつなぎばりで拘束されているため、鉄骨トラスには大きな応力は生じない。

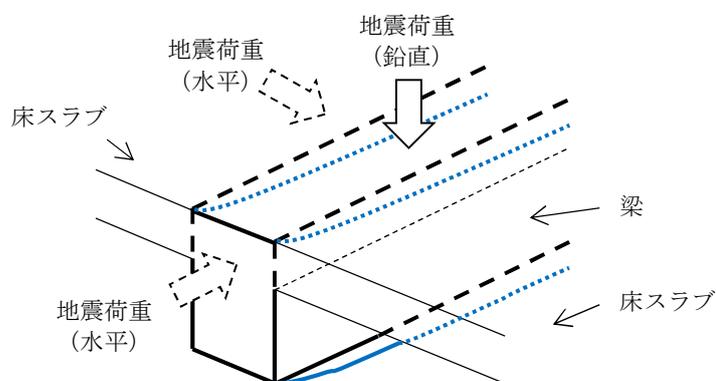


図1 地震荷重に対する梁の力学的特性

3. まとめ

梁は直交方向の地震力に対しては有効となる直交部材が存在することから、「荷重の組合せによる応答特性が想定される部位」として抽出しない。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせの影響評価に用いる 模擬地震波の作成方針

1. はじめに

応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動 Ss-1 及び Ss-3 並びに「震源を特定せず策定する地震動」として策定された基準地震動 Ss-8 については、水平方向の地震動に方向性がないことから、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う場合、水平 2 方向のうち 1 方向について模擬地震波を作成し入力する等の方法が考えられる。本資料は、模擬地震波の作成方針を示すものである。

2. 模擬地震波の作成方針

応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動 Ss-1 及び Ss-3 並びに「震源を特定せず策定する地震動」として策定された基準地震動 Ss-8 の水平方向の模擬地震波の作成方針を下記に示す。

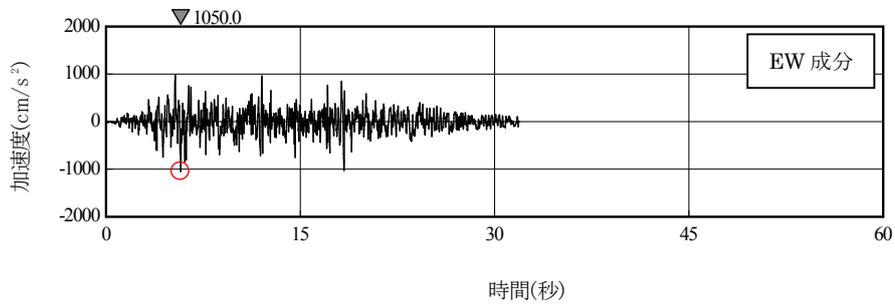
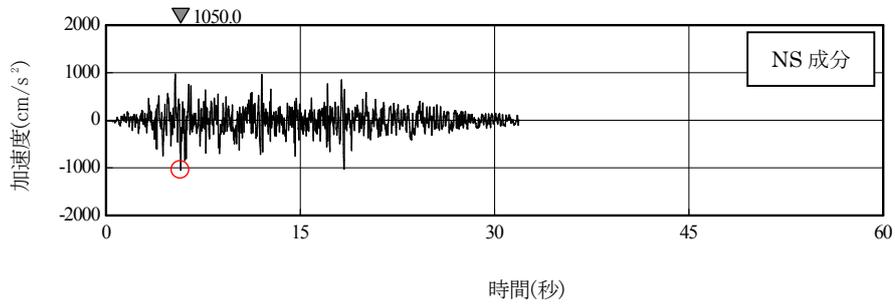
(1) 応答スペクトルに基づく地震動として策定された基準地震動に対する模擬地震波

基準地震動 Ss-1 及び Ss-3 の模擬地震波について、全く同じ地震動が同時に水平 2 方向に入力されることは現実的に考えにくいことから、基準地震動を作成した方法と同一の方法で、位相角を一様乱数とした正弦波を重ね合わせ、目標とする応答スペクトルに適合する位相の異なる模擬地震波を作成する。

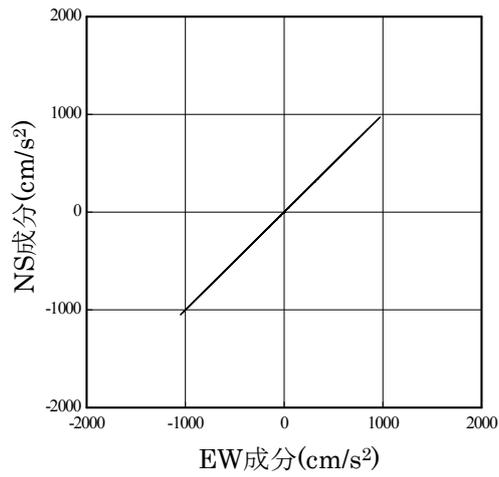
なお、念のために大湊側鉛直アレイ観測点 (T.M.S.L.-180m) の観測記録より、当該サイトにおいて、水平 2 方向の地震波で位相差が生じる傾向を確認した。確認の方法として、基準地震動 Ss-1 を同時に水平 2 方向に入力した場合のオービット (図 1) と、観測記録の水平 2 方向のオービット (図 2,3) との比較を行った。図 1 より、全く同じ地震動を同時に水平 2 方向に入力した場合、オービットは現実的に考えにくい 45° 方向に直線的な軌跡を示す。一方、図 2,3 より観測記録ではオービットは位相差によって生じるランダムな軌跡を示すことを確認した。

(2) 「震源を特定せず策定する地震動」として策定された基準地震動に対する模擬地震波

基準地震動 Ss-8 は「震源を特定せず策定する地震動」として、2004 年北海道留萌支庁南部地震の観測記録より策定された地震動である。基準地震動 Ss-8 における水平方向の地震動は、観測記録から推定される解放基盤相当位置の地震動に基づき敷地地盤の物性等を踏まえて作成されている。模擬地震波については、基準地震動 Ss-8 の作成方法と同一の方法で、基準地震動 Ss-8 で用いた観測記録と水平方向に直交する観測記録から作成する。

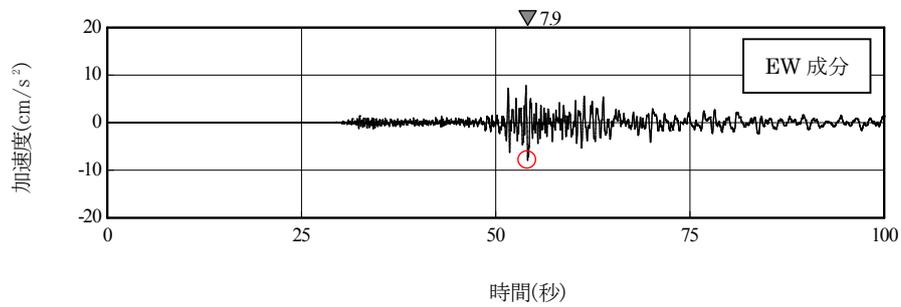
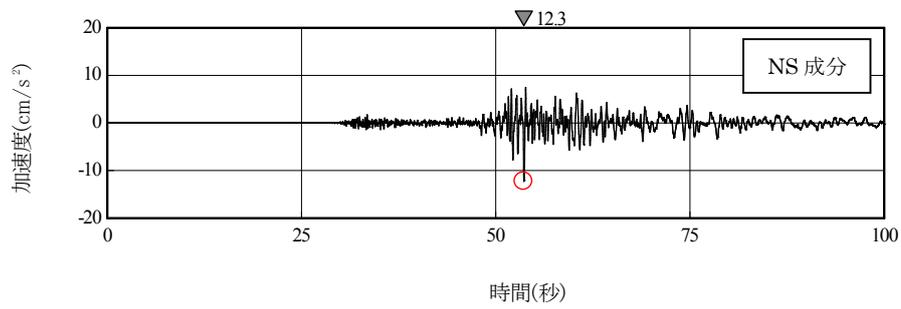


(a) 加速度時刻歴波形

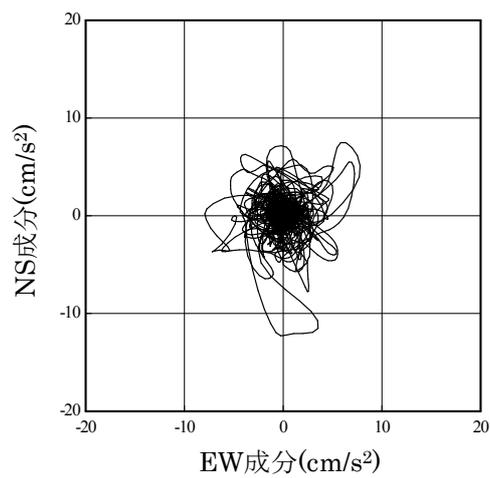


(b) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図 1 基準地震動 Ss-1H

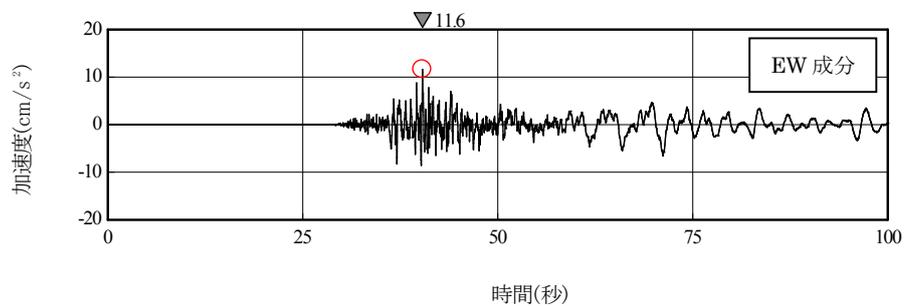
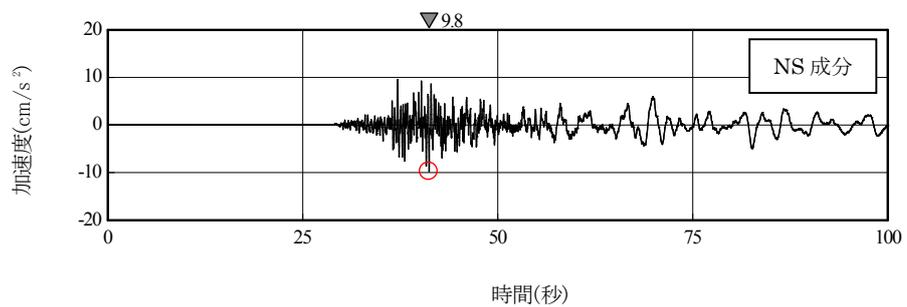


(a) 加速度時刻歴波形

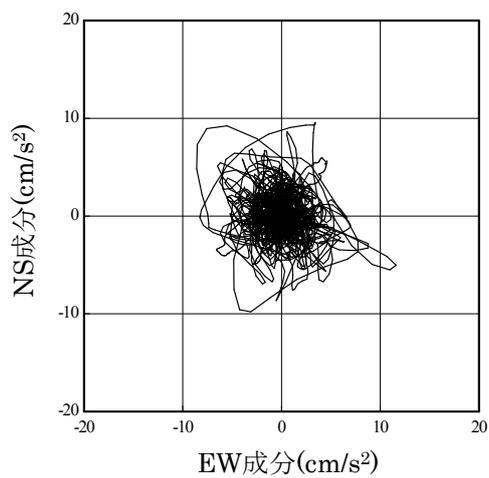


(b) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図 2 2007 年能登半島地震観測記録 (大湊側鉛直アレイ観測点 T.M.S.L.-180m)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 水平 2 方向の加速度成分のオービット

図 3 2011 年長野県北部地震観測記録 (大湊側鉛直アレイ観測点 T.M.S.L.-180m)

柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉

基礎地盤傾斜が1/2,000を超えることに
対する耐震設計方針について
(耐震)

1. 概要

「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に「許容される傾斜が各建物及び構築物に対する要求性能に応じて設定されており、動的解析の結果に基づいて求められた基礎の最大不等沈下量及び残留不等沈下量による傾斜が許容値を超えてないことを確認する。一般建築物の構造的な障害が発生する限界（亀裂の発生率、発生区間等により判断）として建物の変形角を施設の傾斜に対する評価の目安に、1/2,000 以下となる旨の評価していることを確認する。なお、これは、基本設計段階での目安値であり、機器、設備等の仕様が明らかになる詳細設計段階において詳細に評価を行うこととなる。」との記載があるが、柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び7号炉において、基礎地盤の安定性評価の結果、原子炉建屋の傾斜が基準地震動 S_s に対し一時的に1/2,000を超える結果となっていることから建物・構築物及び機器・配管系が傾斜する影響を検討する。

2. 基礎地盤傾斜に対する影響検討

2. 1 影響検討対象

基礎地盤傾斜の影響は、以下を対象として検討する。

- (1) 設計基準対象施設のうち、耐震重要度分類の S クラスに属する設備
- (2) (1)の間接支持構造物である建物・構築物
- (3) 屋外重要土木構造物
- (4) 重大事故等対処施設のうち、常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備
- (5) (4)の間接支持構造物である建物・構築物
- (6) (1)～(5)に対する波及的影響防止のために耐震性評価を実施する施設

2. 2 影響検討方針

基礎地盤傾斜の影響検討フローを図1に示す。

検討対象に対して、基準地震動による地震時の最大傾斜と地殻変動による傾斜を算定し、合算値が目安値である 1/2,000 を超えるかを判断する。ただし、応答スペクトルに基づく基準地震動 (S_s-1 , S_s-3) 及び震源を特定せず策定する基準地震動 (S_s-8) については、地殻変動による最大傾斜が想定できないことから、基準地震動の最大傾斜のみで判断する。傾斜が 1/2,000 を超える対象については、傾斜の影響を考慮した耐震性評価を実施する。なお、表1に示す通り、地殻変動による傾斜は建屋を問わず、各基準地震動で同程度の大きさであること、検討対象は全て大湊側の建物・構築物であることから、検討用の地殻変動による傾斜として各基準地震動における 5 号炉、6 号炉又は 7 号炉原子炉建屋傾斜の最大値を用いる。

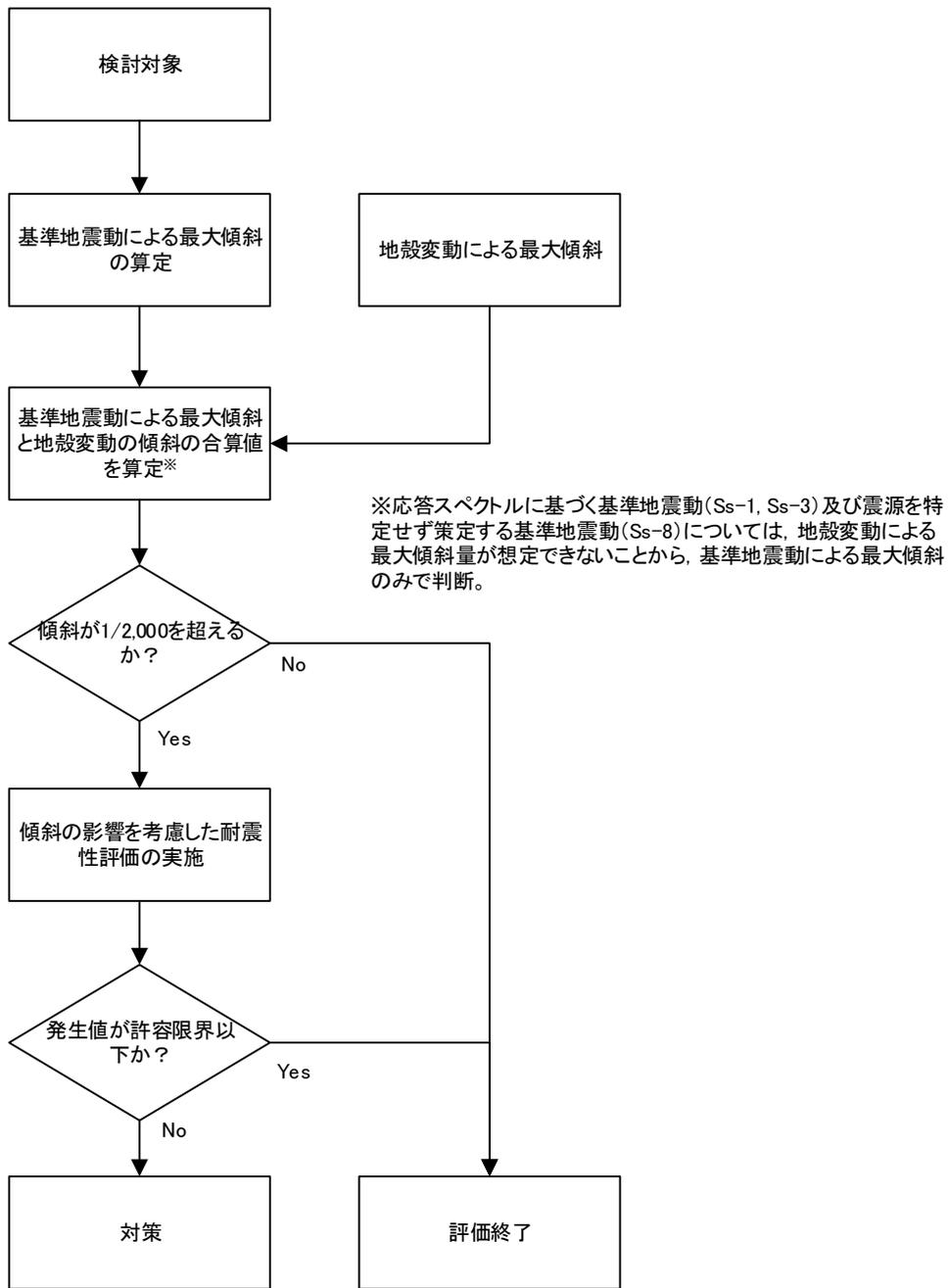


図1 基礎地盤傾斜の影響検討フロー

表 1 地殻変動の傾斜*

断層	F-B断層 〔Ss-2〕	長岡平野西縁断層帯 (傾斜角50度) 〔Ss-4〕	長岡平野西縁断層帯 (傾斜角35度) 〔Ss-5〕	長岡平野西縁断層～山 本山断層～十日町断層 帯西部の連動 (傾斜角50度) 〔Ss-6〕	長岡平野西縁断層～山 本山断層～十日町断層 帯西部の連動 (傾斜角35度) 〔Ss-7〕
6号炉 原子炉建屋	1/19,900	1/13,200	1/6,100	1/9,100	1/5,000
7号炉 原子炉建屋	1/20,000	1/13,300	1/6,000	1/9,200	1/4,900
5号炉 原子炉建屋	1/19,800	1/13,200	1/6,100	1/9,400	1/5,100

* 柏崎刈羽原子力発電所 6号炉及び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（平成28年12月26日，第425回審査会合資料1-3-1）より抜粋

3. 原子炉建屋を例とした基礎地盤傾斜に対する影響検討

6号炉及び7号炉原子炉建屋を例とした基礎地盤傾斜に対する影響検討を示す。

原子炉建屋の基礎地盤の安定性評価結果を表2及び表3に示す。表2に示す基準地震動による地震時の最大傾斜と地殻変動による傾斜の合算値の最大値 1/1,900 及び表3に示す基準地震動による最大傾斜の6号炉の最大値 1/1,600，7号炉の最大値 1/1,700 を包絡する 1/1,000 を検討用の傾斜とする。また，建屋傾斜が 1/2,000 を超えるのは最大不等沈下による一時的なものである（図2及び図3参照）が，基礎地盤の残留不等沈下が 1/1,000 という仮定で行う。

表 2 原子炉建屋の基準地震動による最大傾斜と地殻変動による傾斜の合算値*

断層		F-B断層 〔Ss-2〕	長岡平野西縁断層帯 (傾斜角50度) 〔Ss-4〕	長岡平野西縁断層帯 (傾斜角35度) 〔Ss-5〕	長岡平野西縁断層帯～ 山本山断層帯～十日町 断層帯西部の連動 (傾斜角50度) 〔Ss-6〕	長岡平野西縁断層帯～ 山本山断層帯～十日町 断層帯西部の連動 (傾斜角35度) 〔Ss-7〕
6号炉 原子炉建屋	①地殻変動による 最大傾斜	1/19,900	1/13,200	1/6,100	1/9,100	1/5,000
	②地震動による 最大傾斜	1/2,500	1/4,200	1/4,100	1/4,000	1/4,200
	①+② 最大傾斜	1/2,200	1/3,200	1/2,500	1/2,800	1/2,300
7号炉 原子炉建屋	①地殻変動による 最大傾斜	1/20,000	1/13,300	1/6,000	1/9,200	1/4,900
	②地震動による 最大傾斜	1/2,700	1/3,200	1/3,500	1/2,900	1/3,000
	①+② 最大傾斜	1/2,400	1/2,600	1/2,200	1/2,200	1/1,900
5号炉 原子炉建屋	①地殻変動による 最大傾斜	1/19,800	1/13,200	1/6,100	1/9,400	1/5,100
	②地震動による 最大傾斜	1/4,000	1/5,200	1/4,400	1/5,600	1/5,300
	①+② 最大傾斜	1/3,300	1/3,700	1/2,600	1/3,500	1/2,600

※ ② 地震動による最大傾斜は、各断層モデルに対応する基準地震動Ssを入力地震動としたケースの最大傾斜

表 3 原子炉建屋の基準地震動による最大傾斜*

評価対象	上段：最大相対変位 (cm)， 下段：最大傾斜										
	Ss-1		Ss-2	Ss-3		Ss-4	Ss-5	Ss-6	Ss-7	Ss-8	
6号炉 原子炉建屋 汀線平行断面	2.8 〔6.79〕	3.0 (正,逆) 〔6.78〕	2.2 〔23.56〕	2.4 〔35.69〕	—	1.3 〔51.87〕	1.4 〔51.88〕	1.4 〔51.87〕	1.2 〔51.43〕	3.5 〔8.01〕	—
	1/2,000	1/1,800	1/2,500	1/2,300	—	1/4,200	1/4,100	1/4,000	1/4,700	1/1,600	—
6号炉 原子炉建屋 汀線直交断面	1.5 〔5.76〕	—	1.4 〔22.52〕	1.2 〔25.00〕	1.5 (正,逆) 〔17.49〕	1.2 〔51.96〕	1.1 〔46.56〕	1.2 〔54.60〕	1.4 〔46.97〕	1.7 〔8.02〕	1.7 (逆,正) 〔8.01〕
	1/3,900	—	1/4,300	1/4,900	1/4,000	1/5,000	1/5,100	1/5,000	1/4,200	1/3,500	1/3,400
7号炉 原子炉建屋 汀線平行断面	3.3 〔5.77〕	—	1.9 〔21.54〕	2.8 〔19.15〕	—	1.2 〔51.91〕	1.4 〔46.56〕	1.6 〔51.92〕	1.2 〔46.58〕	3.3 〔8.07〕	—
	1/1,700	—	1/2,900	1/2,000	—	1/4,500	1/4,100	1/3,600	1/4,600	1/1,700	—
7号炉 原子炉建屋 汀線直交断面	2.4 〔5.74〕	—	2.2 〔20.83〕	1.9 〔19.12〕	2.1 (正,逆) 〔17.50〕	1.8 〔52.57〕	1.7 〔46.54〕	2.0 〔51.94〕	1.9 〔46.95〕	2.5 〔8.03〕	—
	1/2,500	—	1/2,700	1/3,000	1/2,800	1/3,200	1/3,500	1/2,900	1/3,000	1/2,400	—
5号炉 原子炉建屋 汀線平行断面	2.5 〔18.79〕	—	1.9 〔23.54〕	2.1 〔36.55〕	2.1 (正,逆) 〔19.61〕	1.3 〔51.87〕	1.4 〔46.49〕	1.1 〔51.88〕	1.0 〔46.49〕	3.0 〔8.00〕	3.1 (逆,正) 〔7.99〕
	1/3,200	—	1/4,400	1/3,900	1/3,900	1/6,300	1/5,900	1/7,500	1/8,200	1/2,700	1/2,700
5号炉 原子炉建屋 汀線直交断面	2.3 〔9.18〕	—	2.1 〔22.53〕	1.6 〔37.21〕	1.8 〔17.51〕	1.6 〔51.96〕	1.9 〔46.56〕	1.5 〔51.96〕	1.6 〔46.96〕	2.3 〔8.03〕	—
	1/3,600	—	1/4,000	1/5,200	1/4,500	1/5,200	1/4,400	1/5,600	1/5,300	1/3,600	—

※ 下線は、各号炉における最大相対変位及び最大傾斜の最大値を示す。 ※ Ss-1, 3, 8の左側に、位相反転なしの場合の最大相対変位及び最大傾斜を記載。
 ※ Ss-1, 3, 8の右側に、位相反転ありの場合の最大相対変位及び最大傾斜が位相反転なしの場合の最大相対変位及び最大傾斜を上回った場合の最大相対変位及び最大傾斜を記載。
 ※ Ss-1, 3, 8の右側に記載の、(逆,正)は水平反転、(正,逆)は鉛直反転、(逆,逆)は水平反転かつ鉛直反転を示す。 ※ () は、発生時刻 (秒) を示す。

* 柏崎刈羽原子力発電所 6号炉及び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 (平成 28 年 12 月 26 日, 第 425 回審査会合資料 1-3-1) より抜粋

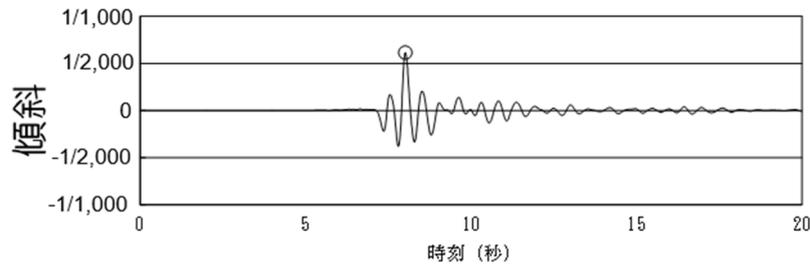


図2 6号炉原子炉建屋の傾斜 (Ss-8) *

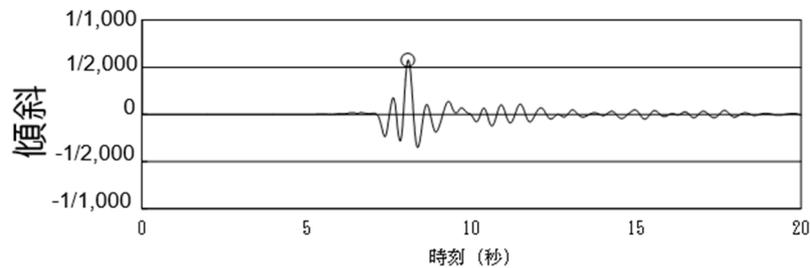


図3 7号炉原子炉建屋の傾斜 (Ss-8) *

* 柏崎刈羽原子力発電所6号炉及び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 (平成28年12月26日, 第425回審査会合資料1-3-1) より抜粋

3. 1 基礎地盤傾斜による地震荷重及び地震と組み合わせるべき荷重への影響

基準地震動 Ss と組み合わせるべき荷重は死荷重, 圧力荷重及び機械的荷重が挙げられる。以降で各荷重に対する建屋傾斜の影響を検討する。

3. 1. 1 基準地震動 Ss により定まる地震力への影響

耐震性評価用のせん断力, 曲げモーメント及び床応答スペクトル等の地震力は地震による加速度を入力として算定される。そこで, 建屋傾斜の有無による地震加速度への影響を検討する。

建屋傾斜が発生している状況の地震加速度を図4に示す。検討用の傾斜 (1/1,000) により水平方向, 鉛直方向の地震加速度はそれぞれ以下のように表される。

○傾斜時に発生する水平地震加速度:

$$C_H \cos\theta + C_V \sin\theta = \frac{1000}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_H + \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_V \cong 0.999 C_H + 0.001 C_V \cong C_H$$

○傾斜時に発生する鉛直地震加速度:

$$C_V \cos\theta - C_H \sin\theta = \frac{1000}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_V - \frac{1}{\sqrt{1^2 + 1000^2}} C_H \cong 0.999 C_V - 0.001 C_H \cong C_V$$

傾斜が発生している場合の水平地震加速度及び鉛直地震加速度は傾斜が発生していない

場合の地震加速度と同等であり、傾斜が発生している場合の地震力についても、傾斜が発生していない場合と同等になると考えられる。

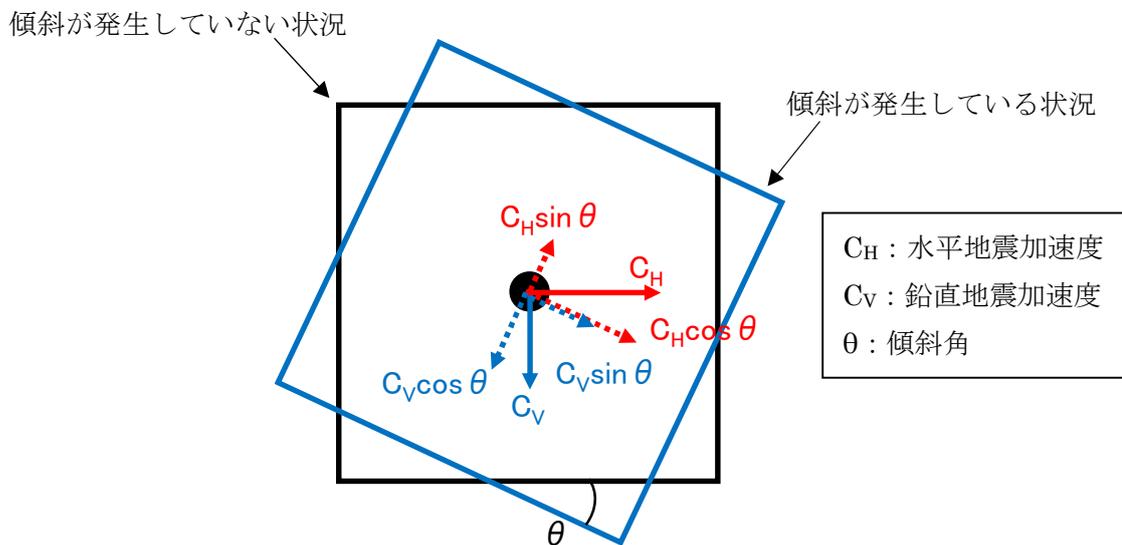


図4 傾斜が発生している状況での地震加速度概念図

3. 1. 2 死荷重への影響

建屋傾斜が発生している状況での死荷重を図5に示す。傾斜が発生していない場合、死荷重は鉛直方向のみに作用する。傾斜が発生している場合、水平方向に自重の分力が発生し、鉛直方向は水平方向に分力されるため、従来作用していた荷重より小さくなる。すなわち、傾斜を考慮すると水平方向の曲げモーメント及びせん断力が新たに発生し、鉛直方向の荷重は $mg\cos\theta$ となり、従来作用していた荷重 mg よりも減少する。

○傾斜時に新たに発生する曲げモーメント : $mg\sin\theta \times h$

○傾斜時に新たに発生するせん断力 : $mg\sin\theta$

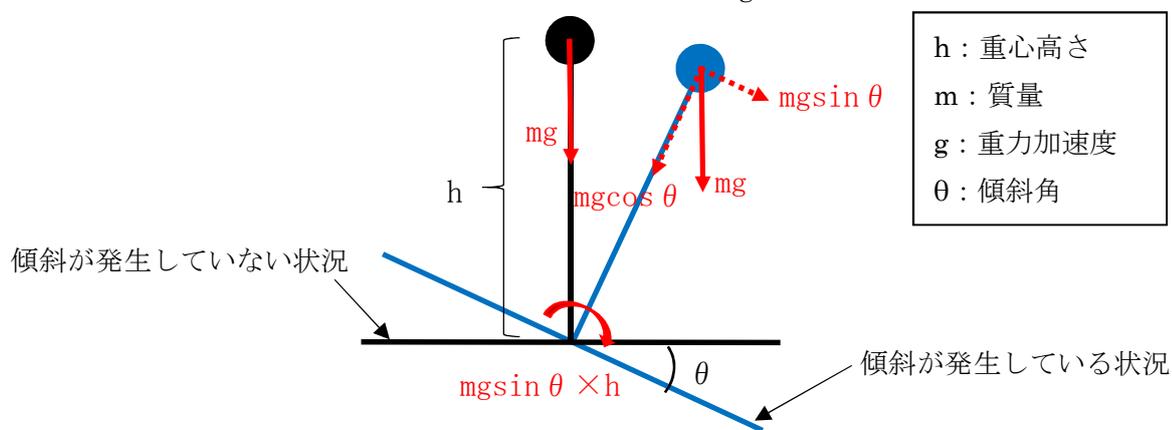


図5 傾斜が発生している状況での荷重概念図

3. 1. 3 圧力荷重及び機械的荷重への影響

圧力荷重は傾斜による影響が無いいため変化しない。また、機械的荷重は、安全弁吹出し時の反力荷重、スクラム反力及びポンプの振動等があるが傾斜による影響が無いため変化しない。

3. 1. 4 建屋傾斜による荷重への影響検討結果

建屋傾斜による荷重への影響検討結果を表4に示す。建屋傾斜が発生している状況では、死荷重による曲げモーメント及びせん断力が水平方向に新たに発生する。

表4 建屋傾斜による荷重への影響検討結果

	水平方向	鉛直方向
Ss による地震力	地震加速度は傾斜が発生している場合と傾斜が発生していない場合を比較すると同等であるため、Ss による地震力も同等である。	同左
死荷重	基礎地盤が傾くことにより新たに、曲げモーメント ($mg\sin\theta \times h$)、せん断力 ($mg\sin\theta$) が発生する。	軸力が mg から $mg\cos\theta$ に減少する。
圧力荷重 機械的荷重	変化なし	変化なし

3. 2 耐震設計における原子炉建屋基礎地盤傾斜による影響の考慮方針の検討

残留不等沈下による基礎地盤の傾斜が 1/1,000 という仮定をした場合に、死荷重により新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を耐震設計で考慮する。建屋傾斜を考慮すべき対象について耐震性評価手法を分類し、評価手法毎に基礎地盤の傾きにより新たに発生する荷重の反映方針を検討する。なお、傾斜時の死荷重による鉛直方向の荷重については傾斜がない場合よりも小さくなるため、設計で考慮しない。評価手法の分類を図6に示す。

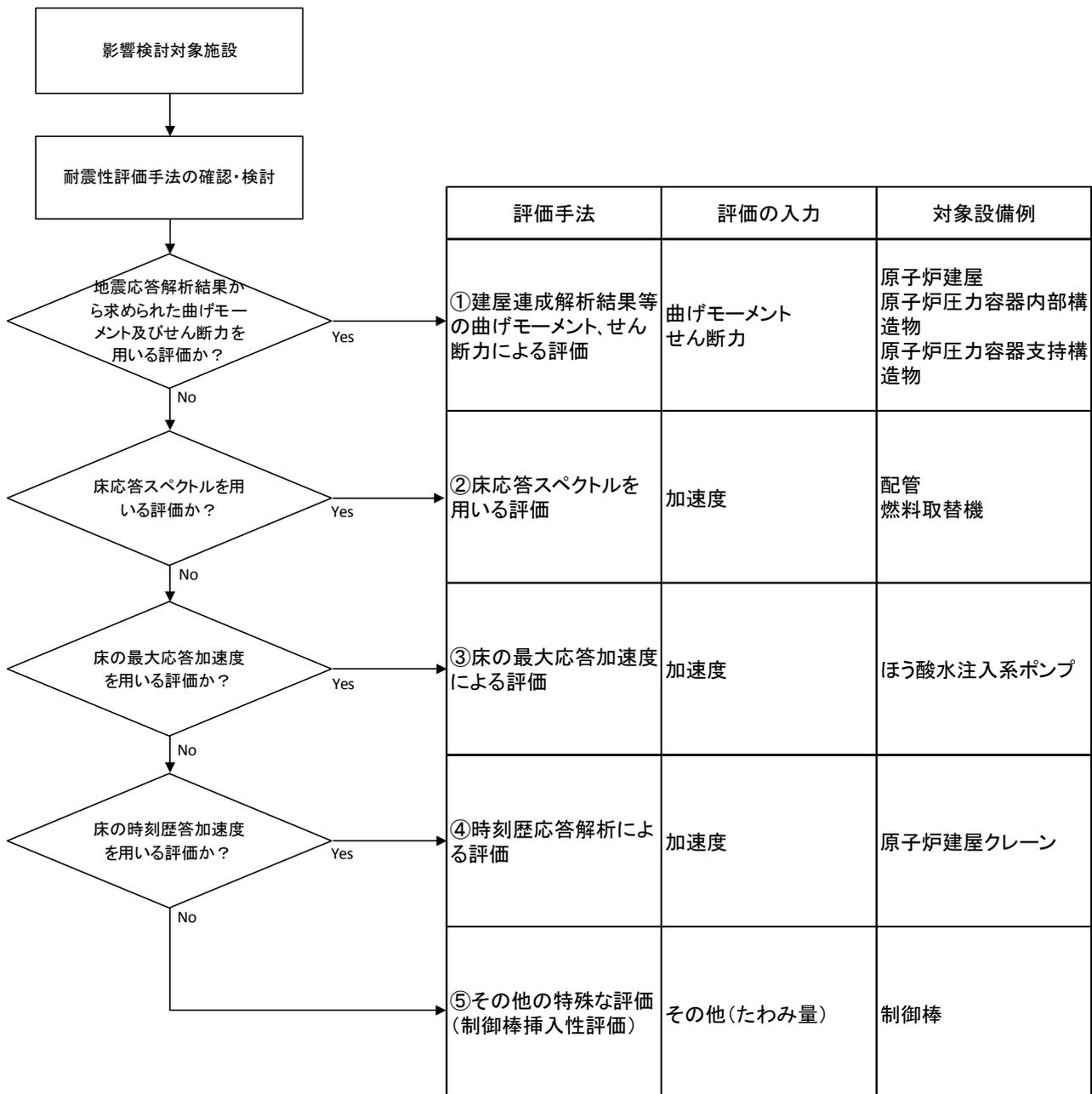


図6 耐震性評価手法の分類

3. 2. 1 入力条件毎の反映方法の検討

評価手法を整理した結果、耐震性評価の入力として曲げモーメント及びせん断力を用いる評価と加速度を用いる評価に大きく分類される。それぞれに対する反映方法を検討する。

3. 2. 1. 1 曲げモーメント及びせん断力を入力とする評価

基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を算定し、傾斜を考

慮せずに算定した曲げモーメント及びせん断力に上乗せする。

3. 2. 1. 2 加速度を入力とする評価

基礎地盤の傾きにより新たに発生するせん断力及び曲げモーメントは図7に示す通り、水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が発生した状態と等価であることから、傾斜を考慮せずに算定した水平加速度に $g \sin \theta$ を上乗せする。

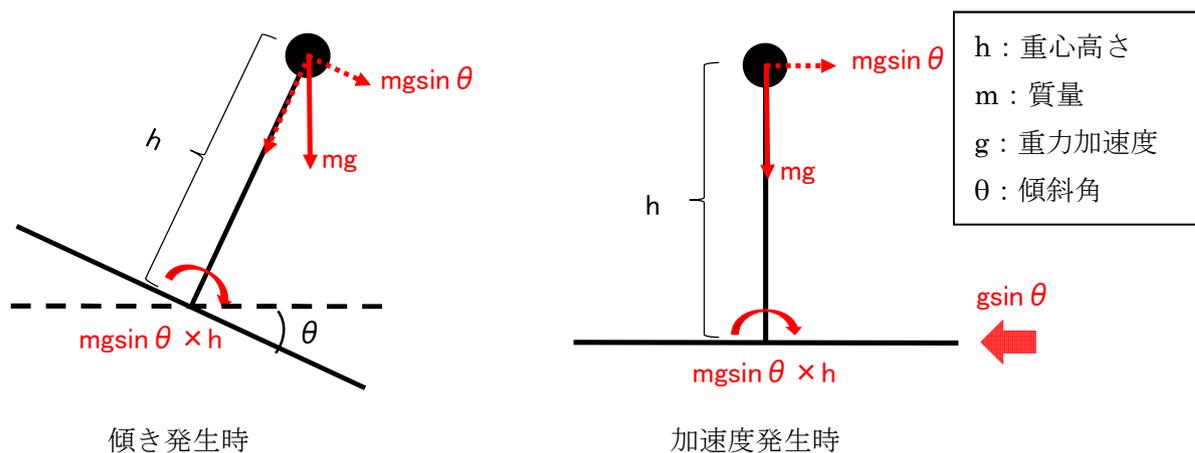


図7 傾き発生時と加速度発生時の荷重状態

3. 2. 2 耐震性評価手法毎の反映方法の検討

図6にて分類した評価手法毎の反映方法を検討する。

3. 2. 2. 1 建屋連成解析結果等の曲げモーメント及びせん断力による評価(図6の①)

原子炉建屋内の原子炉压力容器, 原子炉遮蔽壁, 原子炉本体基礎等の大型機器・構造物は, 原子炉建屋基礎版やダイヤフラムフロアを介して原子炉建屋からの地震の入力があることを考慮して, 図8に示すように連成させたモデルを使用し, 基準地震動 S_s による地震応答解析を実施することによって大型機器・構造物の評価用曲げモーメントやせん断力を算定している。

原子炉本体基礎を例として算定した曲げモーメントやせん断力が伝達されるイメージと基礎地盤の傾きにより発生する曲げモーメント及びせん断力を図9に示す。

建屋傾斜による影響の反映方法として, 基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメントやせん断力を地震応答解析で算定した値に加算する。なお, 基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメントやせん断力は水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が負荷されている状態と等価であるため, $g \sin \theta$ を入力とした静的解析を実施することにより算定する。

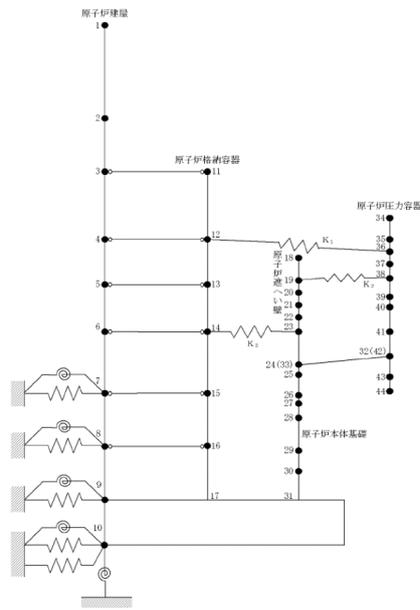
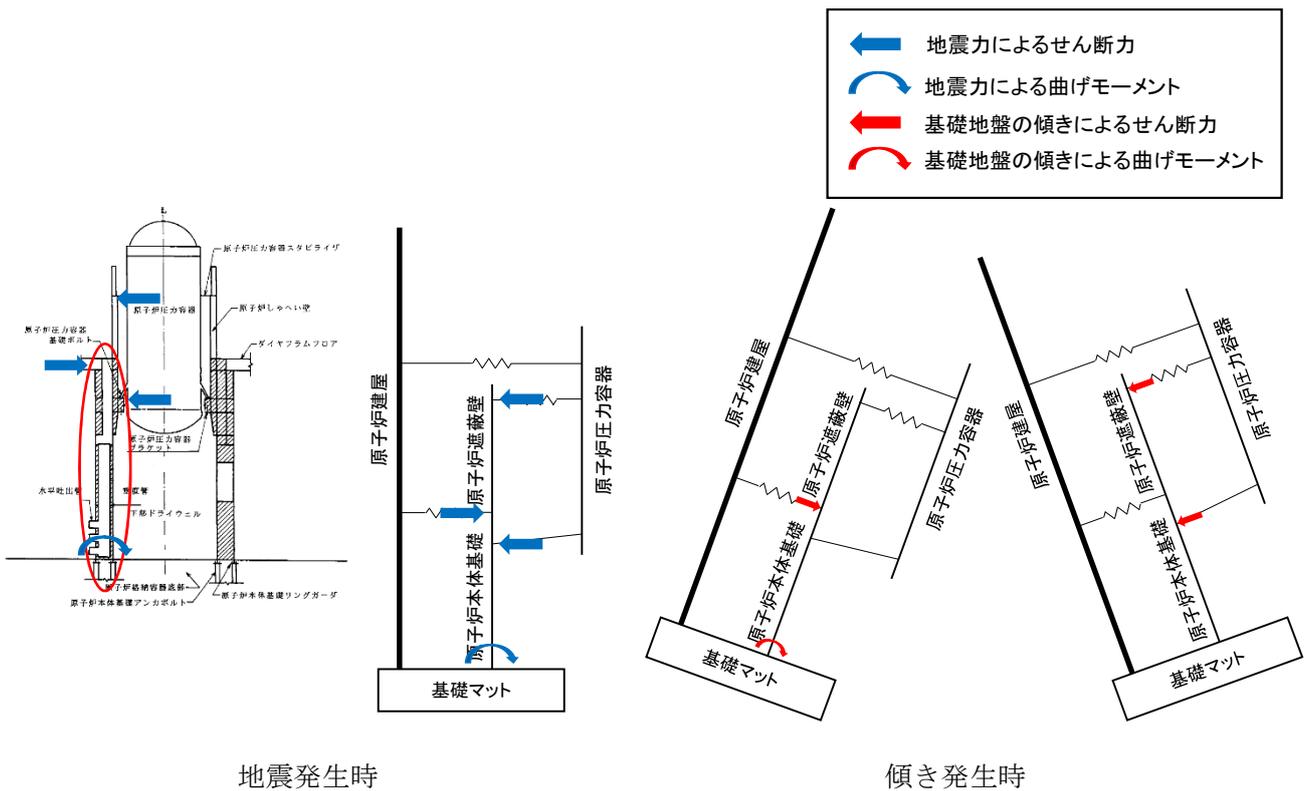


図8 原子炉建屋と大型機器を連成させた地震応答解析モデル例



地震発生時

傾き発生時

図9 原子炉本体基礎に作用する曲げモーメント及びせん断力のイメージ

3. 2. 2. 2 床応答スペクトルを用いる評価 (図6の②)

配管や燃料取替機は床応答スペクトルを入力として評価している。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を、

加速度として水平方向の床応答スペクトルの全周期に $g \sin \theta$ を加算する。加算するイメージを図10に示す。

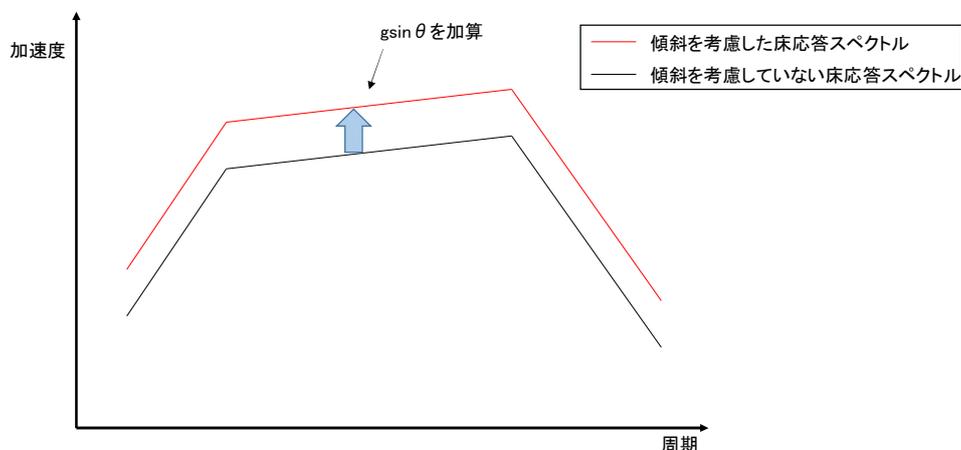


図10 傾斜を考慮した床応答スペクトルのイメージ

3. 2. 2. 3 床の最大応答加速度による評価 (図6の③)

剛な設備の構造健全性評価や動的機器の機能維持評価に床の最大応答加速度を用いている。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を、水平方向加速度として床の最大応答加速度に $g \sin \theta$ を加算する。

3. 2. 2. 4 時刻歴応答解析による評価 (図6の④)

原子炉建屋クレーンは浮き上がりを考慮するため、クレーンガーダの各車輪にギャップ要素を持つ非線形 FEM 解析モデルを用いて時刻歴応答解析を行う。建屋傾斜による影響の反映方法として、基礎地盤の傾きにより新たに発生する曲げモーメント及びせん断力を加速度として上乗せするために、入力として用いる時刻歴応答加速度を係数倍する。係数倍するイメージを図11に示す。

係数については、図12に示すように、建屋傾斜の影響を考慮した時刻歴応答加速度による床応答スペクトルが、建屋傾斜の影響を考慮していない時刻歴応答加速度による床応答スペクトルより、設備に影響を与える周期帯において $g \sin \theta$ 以上大きくなるように設定する。

なお、原子炉建屋クレーンについては、自重解析及び時刻歴応答解析を実施するが、自重解析に傾斜を考慮すると鉛直方向の荷重が小さくなるため、建屋傾斜の影響は時刻歴応答解析の入力条件として考慮する。

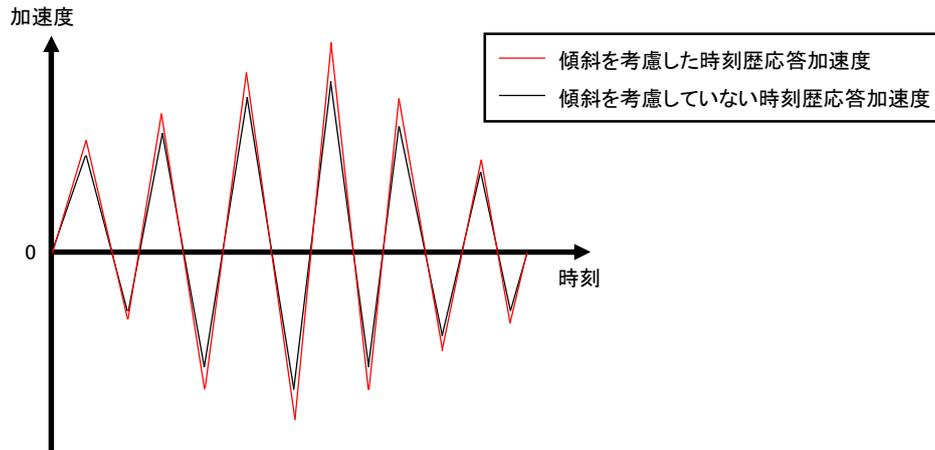


図 1 1 傾斜を考慮した時刻歴応答加速度のイメージ

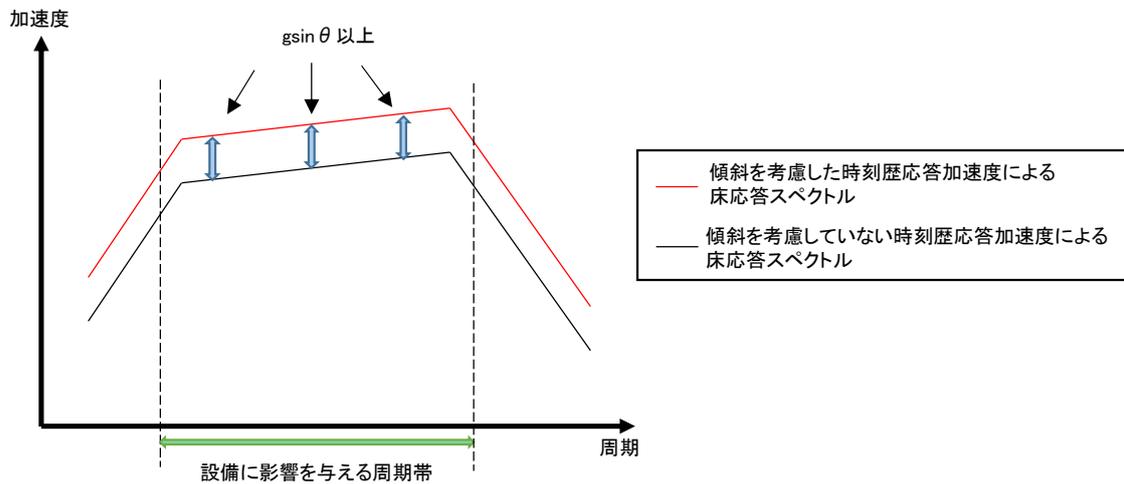


図 1 2 傾斜を考慮した時刻歴応答加速度による床応答スペクトルのイメージ

3. 2. 2. 5 その他の特殊な評価（制御棒挿入性評価）（図 6 の⑤）

制御棒挿入ラインを形成する各機器の設置状況を図 1 3 に示す。燃料集合体は下部では燃料支持金具に、上部では上部格子板で支持され、燃料支持金具は制御棒案内管上に設置され、制御棒案内管は制御棒駆動機構ハウジングを介して原子炉圧力容器に接続され、制御棒駆動機構ハウジングは原子炉圧力容器に溶接接続されている。また、制御棒は制御棒駆動機構ハウジングに内蔵された制御棒駆動機構によって駆動する。なお、柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉では改良型制御棒駆動機構（図 1 4 参照）が使用されている。改良型制御棒駆動機構は、通常時はモータによってボールネジを回転させることでボールナット・中空ピストンを上昇させ制御棒を挿入し、スクラム時は水圧によって中空ピストンを上昇させ制御棒を挿入する精密な駆動機構となっており、制御棒と制御棒駆動機構はボールネジ、ボールナット及び中空ピストンを介して接続されていることから、1/1,000 程度の建屋傾斜に

よる影響はないと考えられる。

したがって、燃料集合体、燃料支持金具、制御棒案内管、制御棒駆動機構ハウジング、制御棒駆動機構、制御棒、原子炉压力容器は、一体的な構造となっている。

なお、制御棒挿入性を確保するため周辺機器には下記のクリアランスが設定されている。

- ① 制御棒挿入ラインとしての燃料集合体間のクリアランス (図 1 3 中①)

(制御棒の厚さ:)

- ② 制御棒挿入ラインとしての燃料支持金具内の空隙の幅 (図 1 3 中②)

(制御棒の幅:)

- ③ 制御棒挿入ラインとしての制御棒案内管の内径 (図 1 3 中③)

(制御棒の幅:)

制御棒は通常運転時の全引抜状態においても、その頂部が燃料集合体に一部挿入されている状態であり、スクラム時には原子炉緊急停止系からのスクラム信号によりアキユムレータに充填された高圧水によって、制御棒は約 4m のストロークを 2.8 秒以内に強制的に挿入される。

スクラムにおける制御棒挿入時の主な抵抗要因としては以下が挙げられる。

- ① 地震時の燃料集合体のたわみによる燃料集合体と制御棒間の摩擦力

制御棒は燃料集合体間に挿入されるため、地震力により燃料集合体がたわみ制御棒挿入ラインが変形することで、制御棒と燃料集合体の摩擦力が増加し、制御棒挿入時の抵抗となる。

- ② 制御棒挿入ラインにおける機器のガタつきによる抵抗

制御棒挿入ラインとそれを形成する各機器の中心軸のズレ (ガタつき) が、制御棒挿入時の抵抗となる。

制御棒挿入性評価においては、図 1 5 に示すような燃料集合体、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉遮蔽壁、原子炉本体基礎、原子炉压力容器、原子炉压力容器内部構造物及び原子炉压力容器支持構造物等を連成させたモデルを用いて基準地震動 S_s に対する地震応答解析により燃料集合体の最大たわみ量を計算する。別途、実機の制御棒挿入ラインを形成する各機器の中心軸のズレを模擬した実規模試験体での加振試験で規定時間内に制御棒が全挿入されることが確認されたたわみ量を許容たわみ量とする (図 1 6 参照)。解析により求めた最大たわみ量と試験にて設定した許容たわみ量を比較することで、制御棒挿入性評価を行う。

以上より、制御棒挿入性に対する建屋傾斜の影響検討は、前述したスクラム時における制御棒挿入時の 2 つの抵抗要因に対して行うこととする。

- ① 燃料集合体のたわみによる燃料集合体と制御棒間の摩擦力への影響検討

建屋傾斜の影響により燃料集合体のたわみが新たに発生することにより、燃料集合体

と制御棒の摩擦が増えると考えられるが、両機器が制御棒のローラを介して接触している場合は摩擦自体が小さく、ローラ以外で接触する場合でもスクラム力と比較してその摩擦は十分に小さい値となると考えられる。

建屋傾斜の影響により新たに発生する燃料集合体のたわみ量を地震応答解析で算定した最大たわみ量に加算し評価することで建屋傾斜の影響を考慮した評価となる。建屋傾斜により新たに発生するたわみのイメージを図17に示す。なお、建屋傾斜により新たに発生するたわみ量は水平方向に加速度 $g \sin \theta$ が負荷されている状態と等価であるため、 $g \sin \theta$ を入力とした静的解析を実施することにより算定する。

試験にて規定時間内の制御棒挿入性が確認されている燃料集合体のたわみ量は40mmである。一方、基準地震動 S_s による燃料集合体の最大たわみ量は30mm程度(暫定値)、1/1,000の建屋傾斜による加速度 $g \sin \theta$ が約 $0.01m/s^2$ であり、燃料集合体のたわみ量は0.1mm未満と見込まれるため、燃料集合体のたわみによる燃料集合体と制御棒間の摩擦への影響は小さく制御棒挿入性は確保されることが考えられる。

② 制御棒挿入ラインにおける機器のガタつきによる抵抗

制御棒挿入ラインにおける機器のうち制御棒案内管と制御棒駆動機構ハウジングの接合部は芯出しを目的としてテーパ形状及び球面座にて接触しているため、建屋傾斜の影響によりその相対位置がずれることは無い(図18参照)。

一方、制御棒案内管と炉心支持板孔との接合部は、の嵌め合い公差が存在するため(図19参照)、建屋傾斜によって機器が片寄せとなる可能性がある(図20参照)ものの、制御棒挿入試験での動的な加振力は1/1,000程度の傾斜にて発生するわずかな力よりはるかに大きいものであり、従来の試験にて包絡されているとみなせる。また、嵌め合い公差は機器自体の形状によって定まる値であり、建屋傾斜の影響を受けるものではない。

そもそも、制御棒挿入ラインには、制御棒のサイズに対して数mm程度のクリアランスが存在しており(図13参照)、の嵌め合い公差によるガタつきが制御棒挿入性に影響を及ぼすことはない。

以上を踏まえて、建屋傾斜による制御棒挿入性への影響については軽微であり、基準地震動 S_s における制御棒挿入性は確保されることが考えられるが、上記検討内容の詳細については今後の詳細設計において説明を行うこととする。

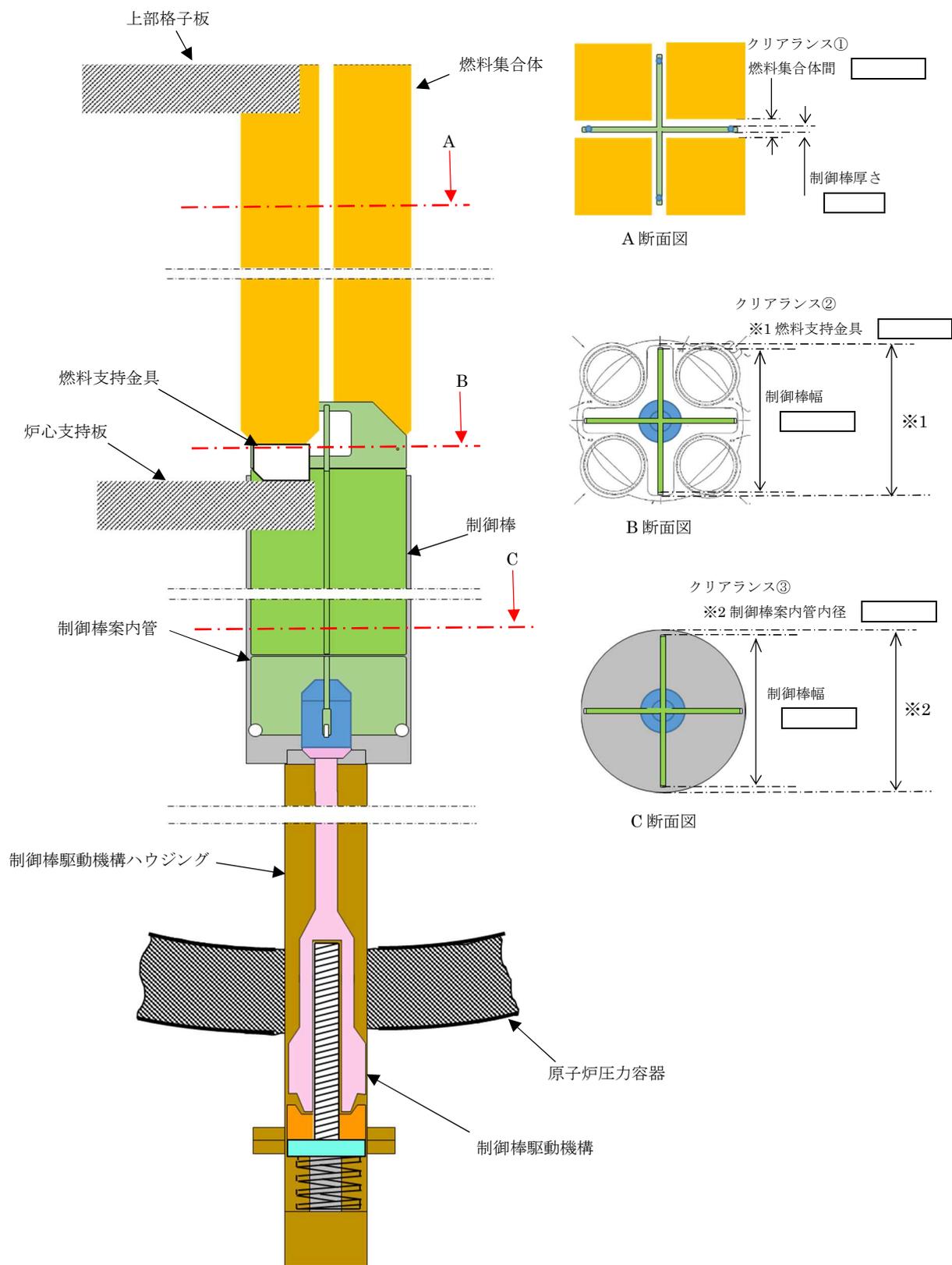


図 1 3 制御棒挿入ライン関連機器配置概念図

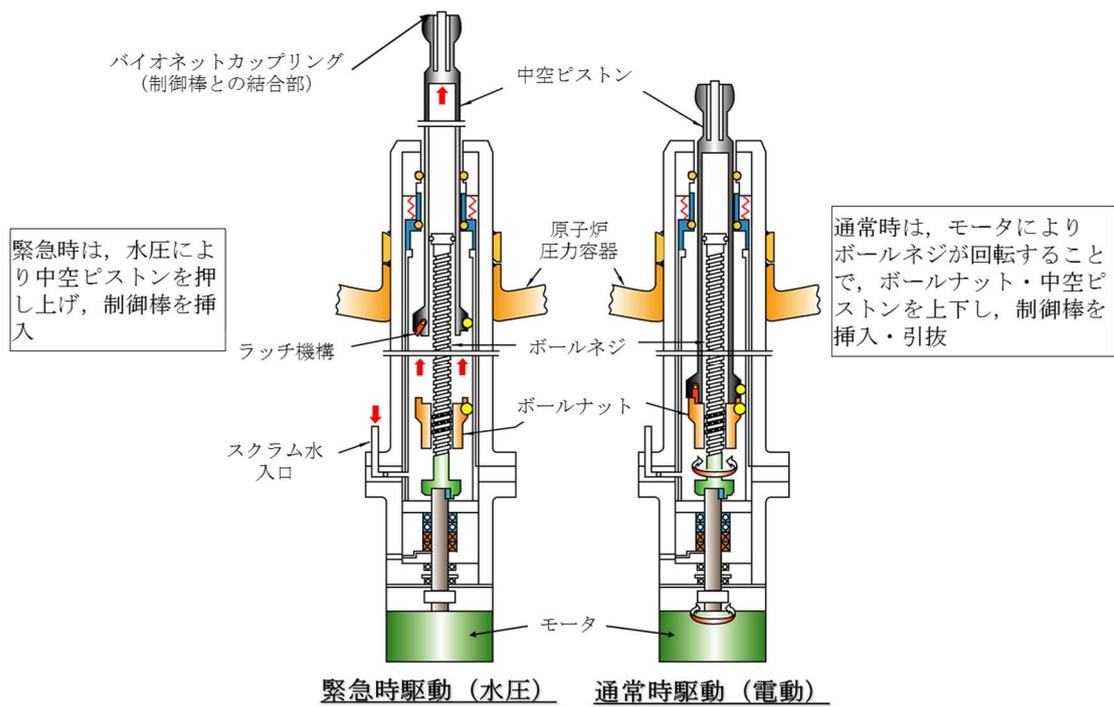


図 1 4 改良型制御棒駆動機構 動作概念図

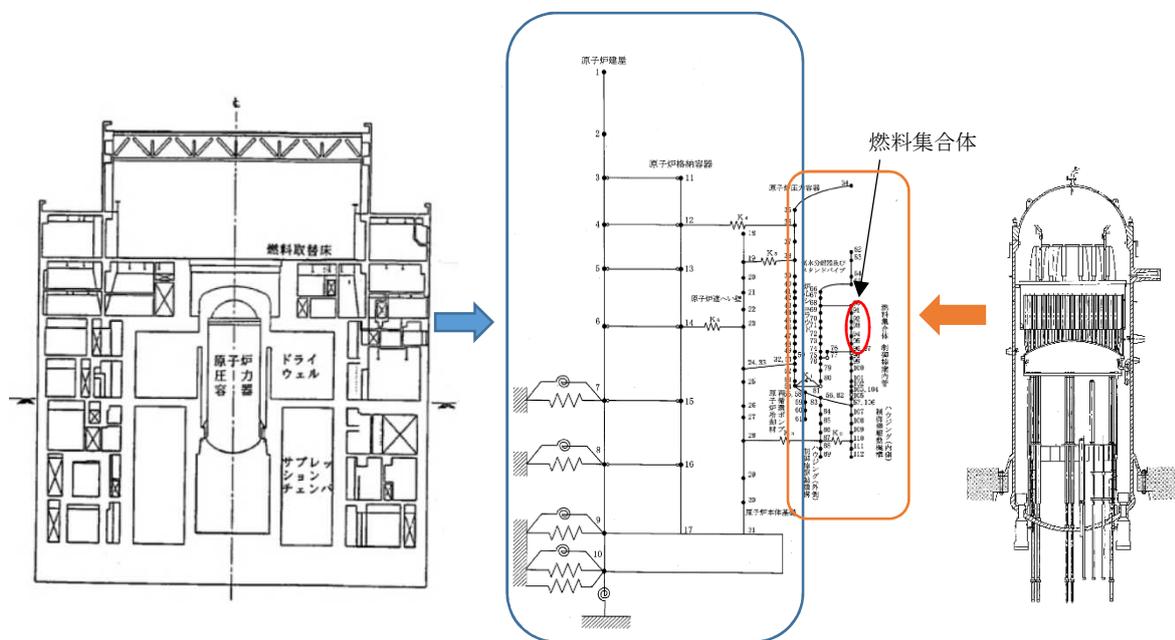
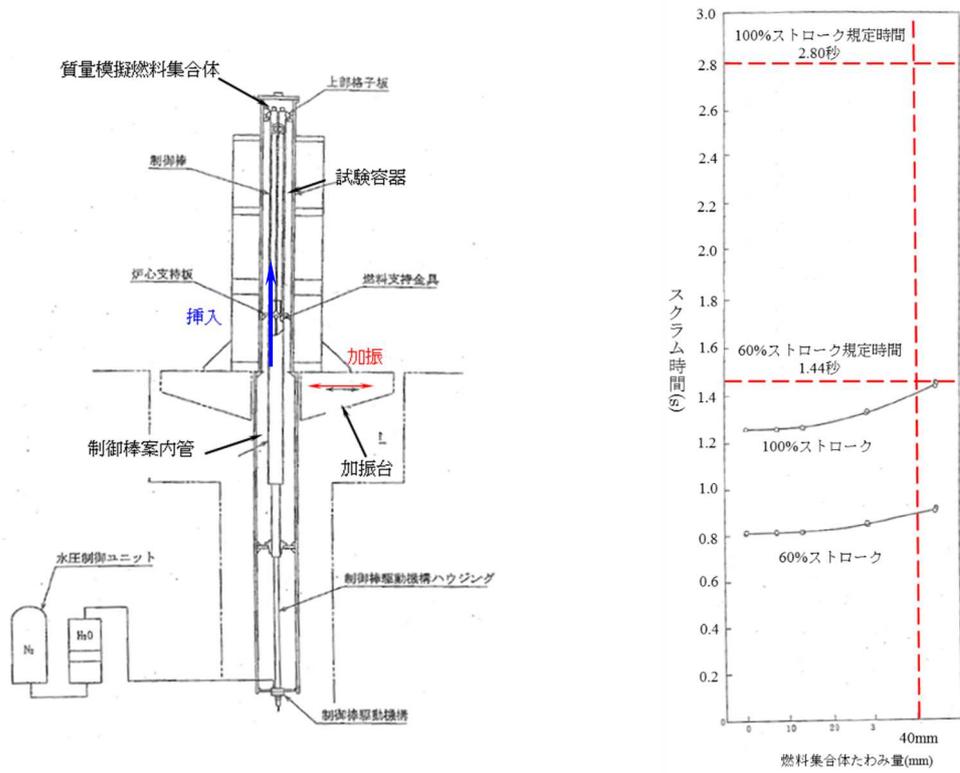


図 1 5 原子炉圧力容器及び原子炉圧力容器内部構造物の地震応答解析モデル例



< 試験装置例 >

< 試験結果イメージ >

図 16 制御棒挿入試験の概要

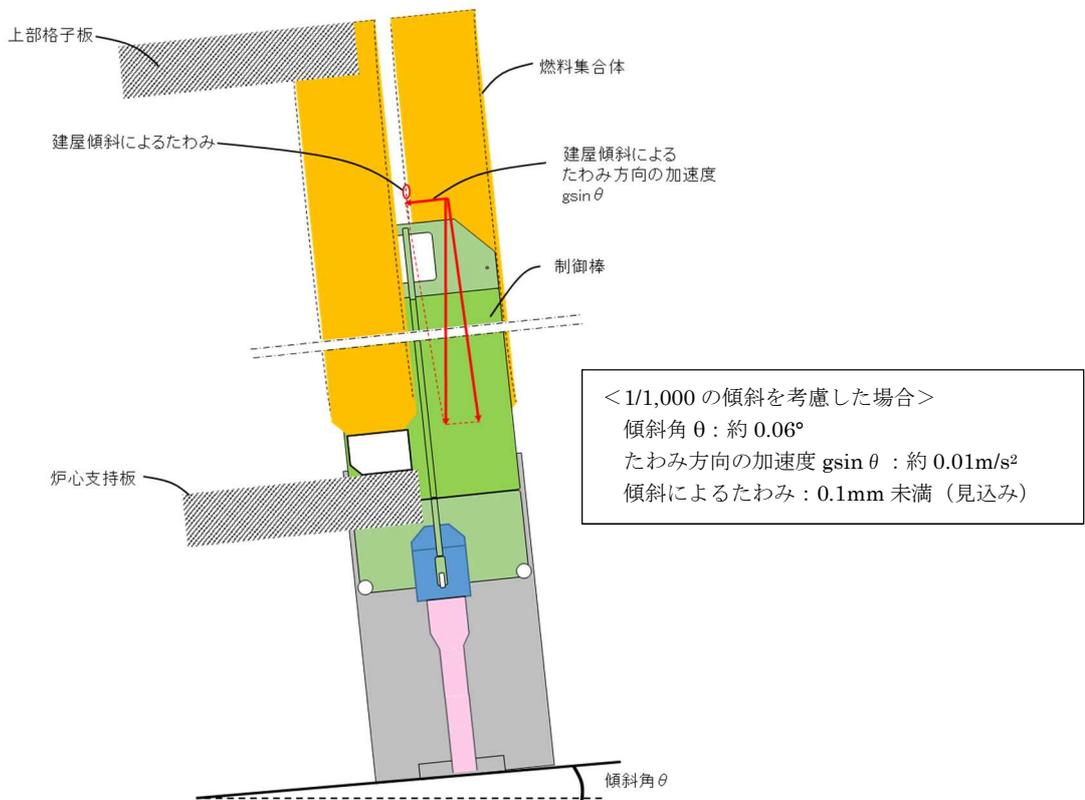


図 17 建屋傾斜が発生している状況での燃料集合体のたわみのイメージ

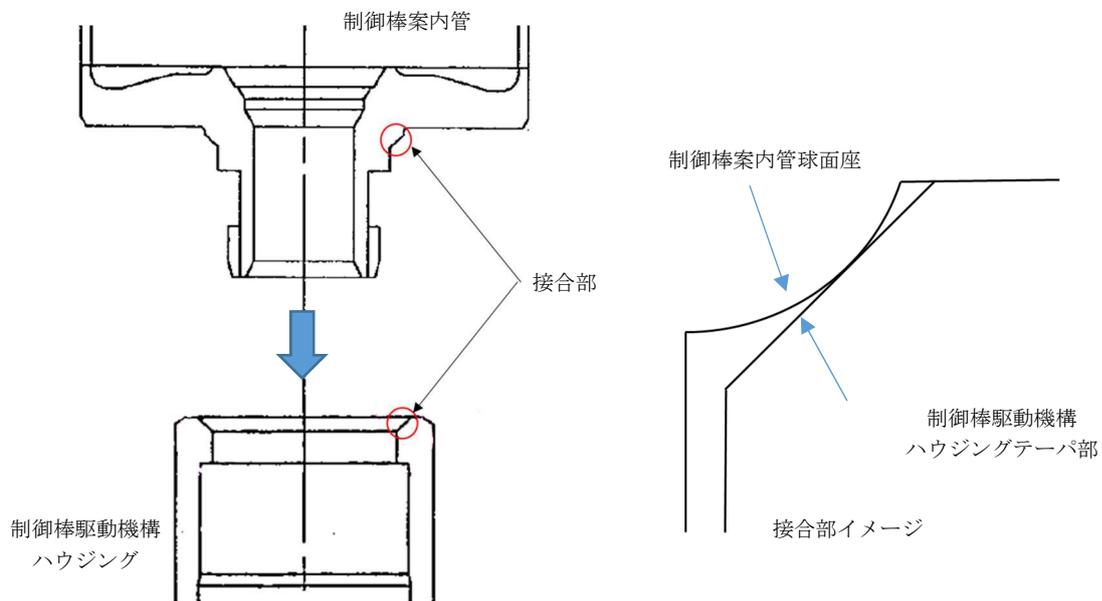


図 1 8 制御棒案内管・制御棒駆動機構ハウジング接合部概念図

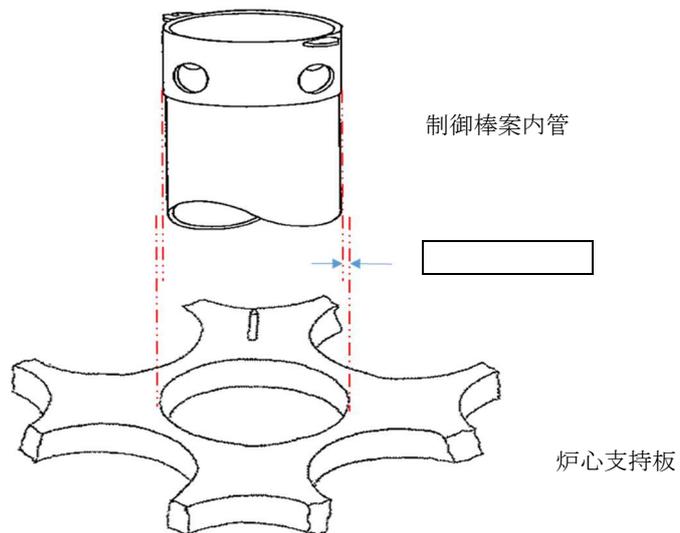


図 1 9 制御棒案内管・炉心支持板接合部概念図

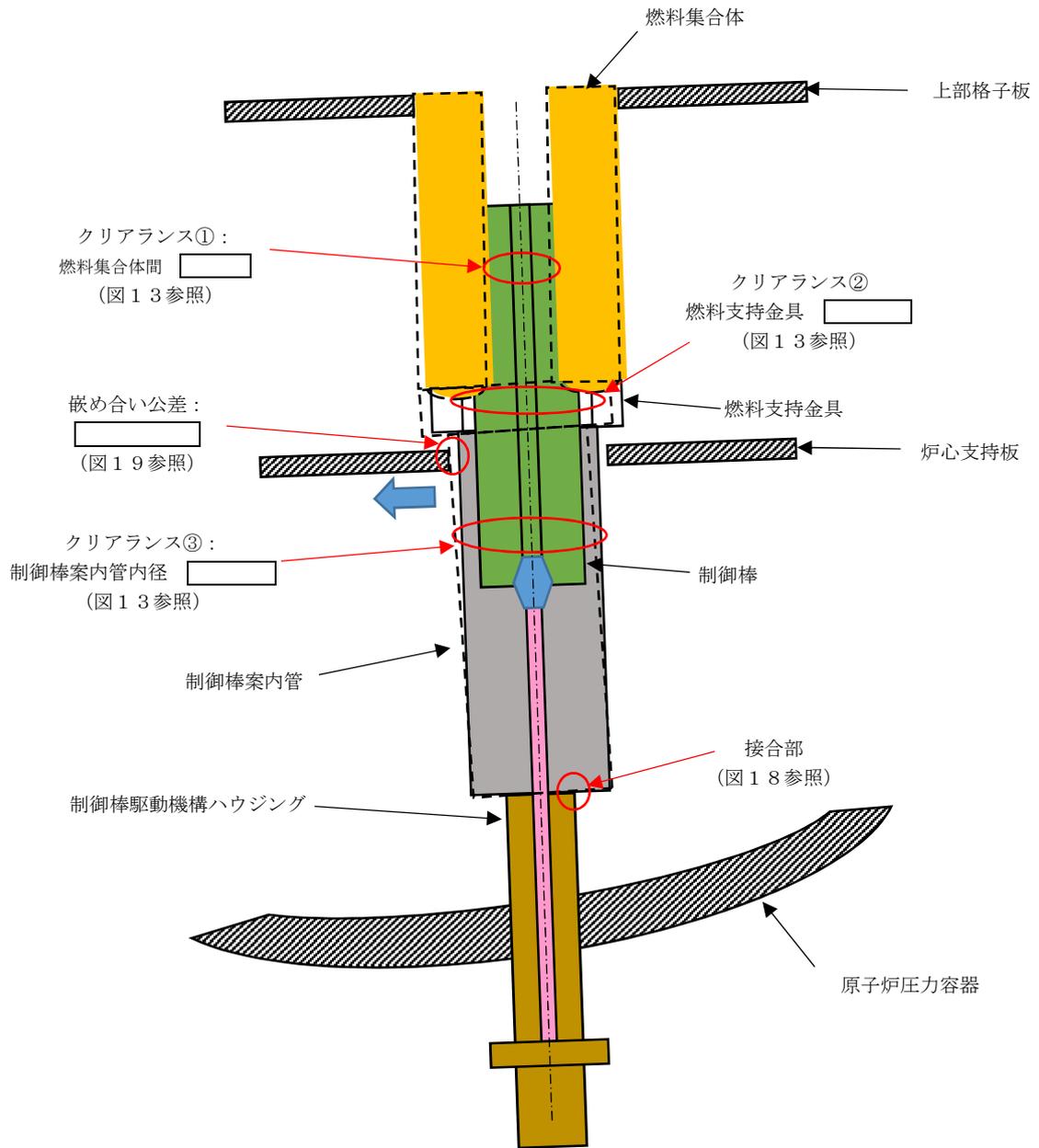


図20 建屋傾斜時における機器のガタつきの発生状況 (イメージ)

柏崎刈羽原子力発電所 6 号炉及び 7 号炉

液状化影響の検討方針について
(耐震)

これまでの経緯および本検討の位置づけ

第 336 回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合（平成 28 年 3 月 4 日）の原子炉建屋等の基礎地盤及び周辺斜面の安定性において、取水路などを支持する古安田層※に対する支持性能の補足として、以下のようにご説明をしている。

- 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ご説明する上で、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あわせてご説明する。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ご説明する。

※ 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。

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 液状化試験選定箇所の代表性確認	・・・	25
3. 3 追加調査	・・・	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	・・・	190
11. 4 液状化関連の文献整理	・・・	196
11. 5 新潟県中越沖地震時の地盤変状	・・・	215

1. 液状化評価の基本方針

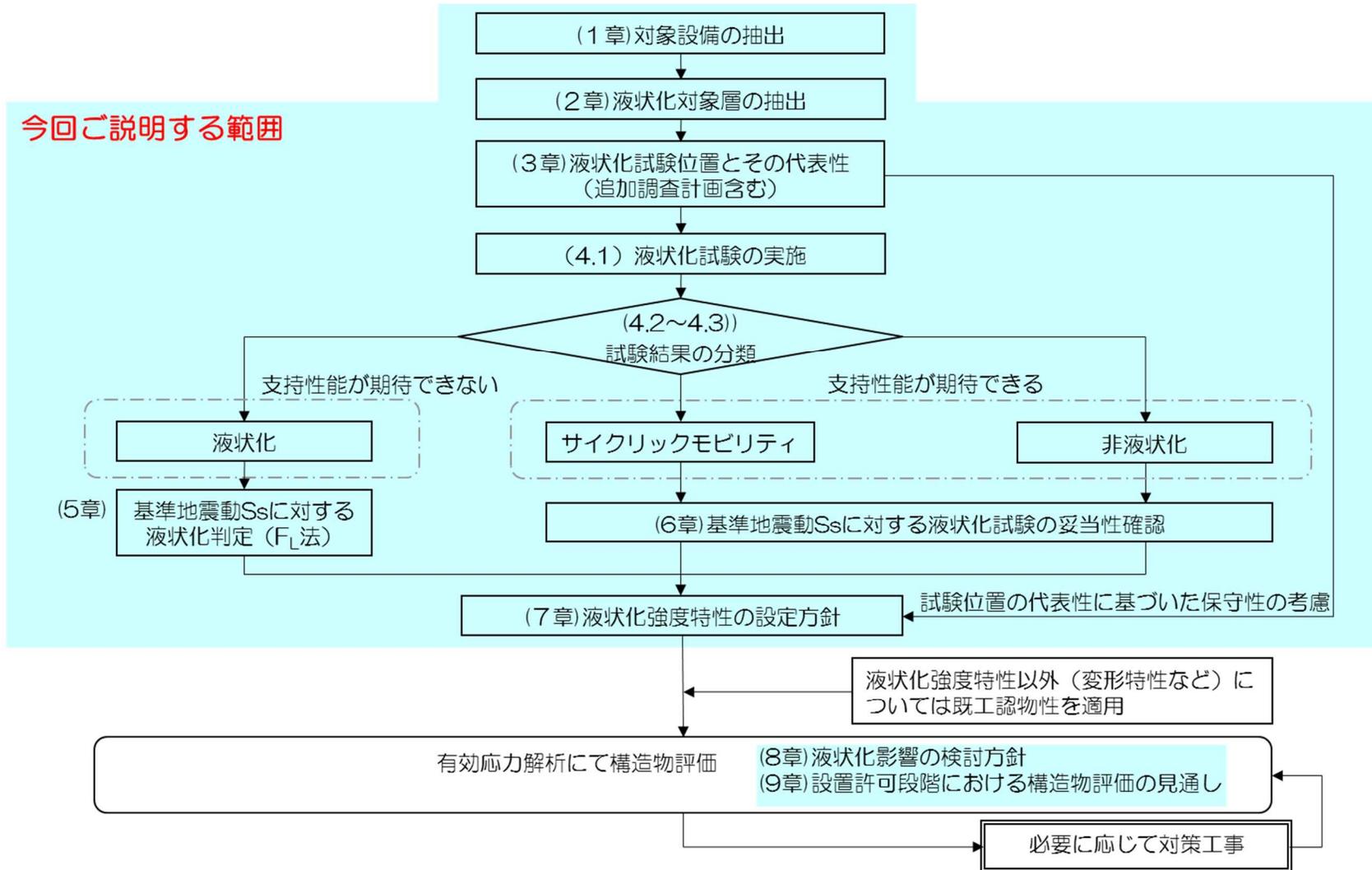
第 11-1-1 図に液状化評価の流れ，第 11-1-1 表に液状化評価の基本方針を示す。

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』および『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，基本物性のバラツキ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）およ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などを評価するために，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。



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、基本物性のバラツキ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	※	
					A-1 洪積砂層 I 洪積砂層 II	
		古い		A-2 洪積砂層 II	0-1 洪積砂質土層 I 洪積砂質土層 II	非液状化であると考えられるが、保守的な構造物評価を実施するため、液状化強度特性を設定する。

※ 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およ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・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）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 号炉および 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号炉および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号炉および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号炉および2号炉海側の地盤には、3号炉および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概ね 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号炉および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。

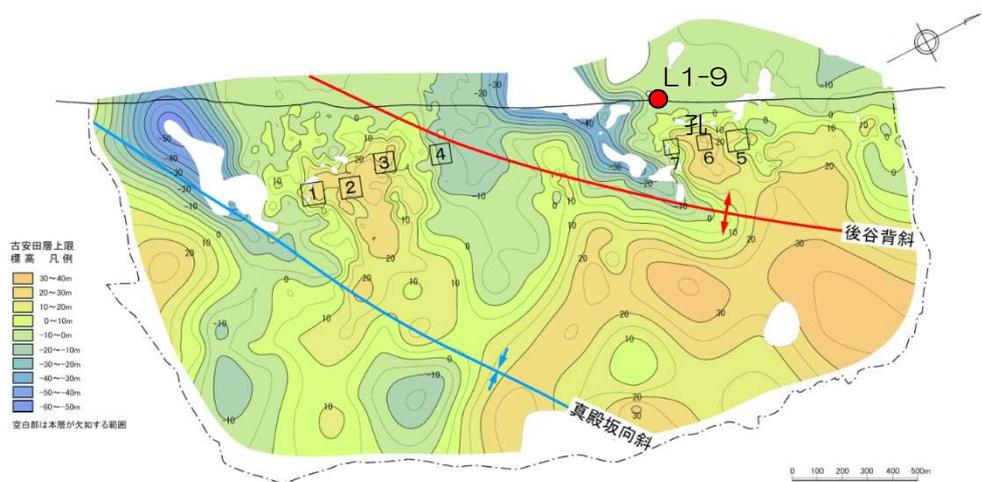
以上より、荒浜側の液状化評価対象層として、砂層の分布状況から、主に3号炉および4号炉海側に分布する古安田層中の砂層、主に1号炉および2号炉海側に分布する古安田層中の砂層、新期砂層・沖積層及び埋戻土層を抽出した。

第 11-2-1 表 敷地の地質層序表

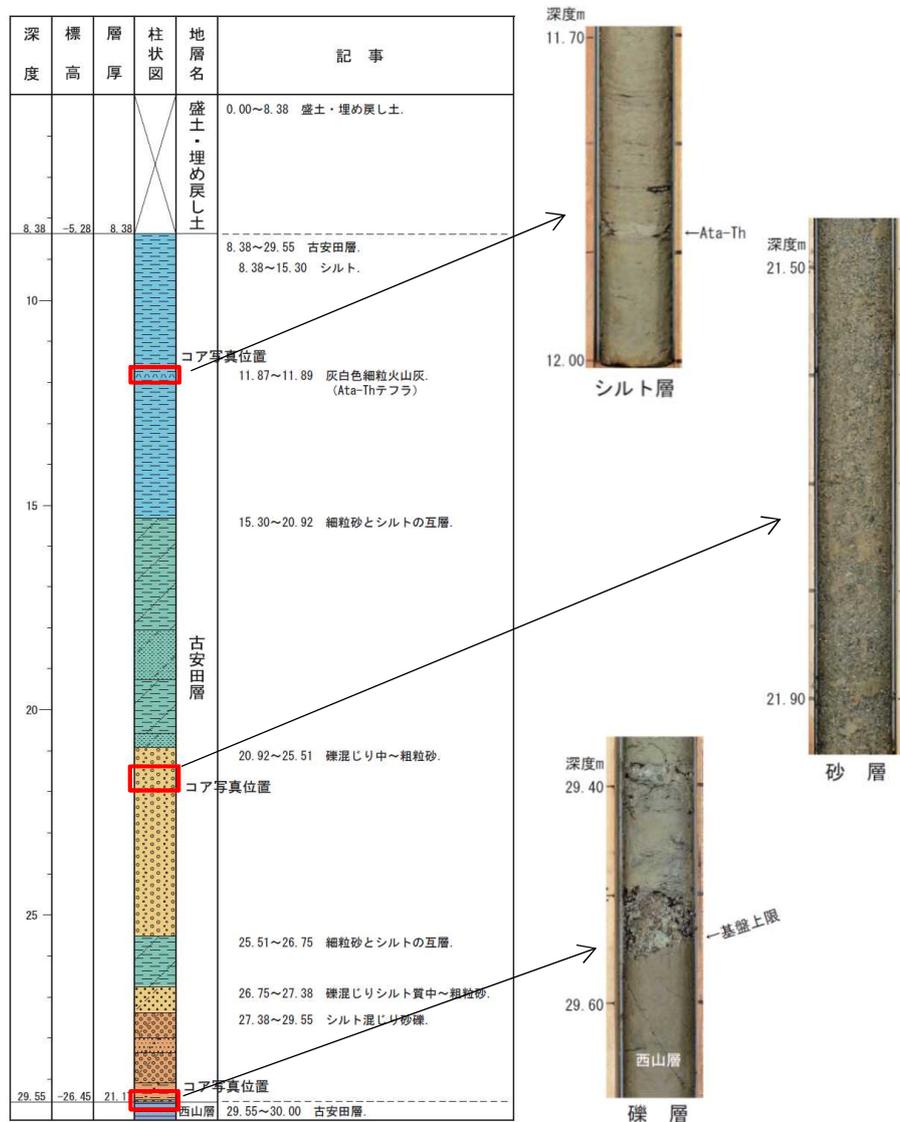
時代	地層名	主な層相・岩質	テフラ・放射年代	
第四紀	完新世	新期砂層・沖積層	上部は灰白色の細～中粒砂 下部は茶褐色の細～中粒砂，腐植物を含む ← 腐植 (6, 150±170年)	
	後期	番神砂層	灰白色～赤褐色の中～粗粒砂	
		大湊砂層	褐色～黄褐色の中～粗粒砂， シルトの薄層を含む ← NG(約13万年前)	
	中期	古安田層	A ₄ 部層	最上部は砂 粘土～シルト，砂を多く挟む ← γ-1(約20万年前)
			A ₃ 部層	粘土～シルト 縞状粘土，有機物，砂を伴う，貝化石を含む
			A ₂ 部層	粘土～シルト 砂，厚い砂礫，有機物を挟む ← Ata-Th(約24万年前)
			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

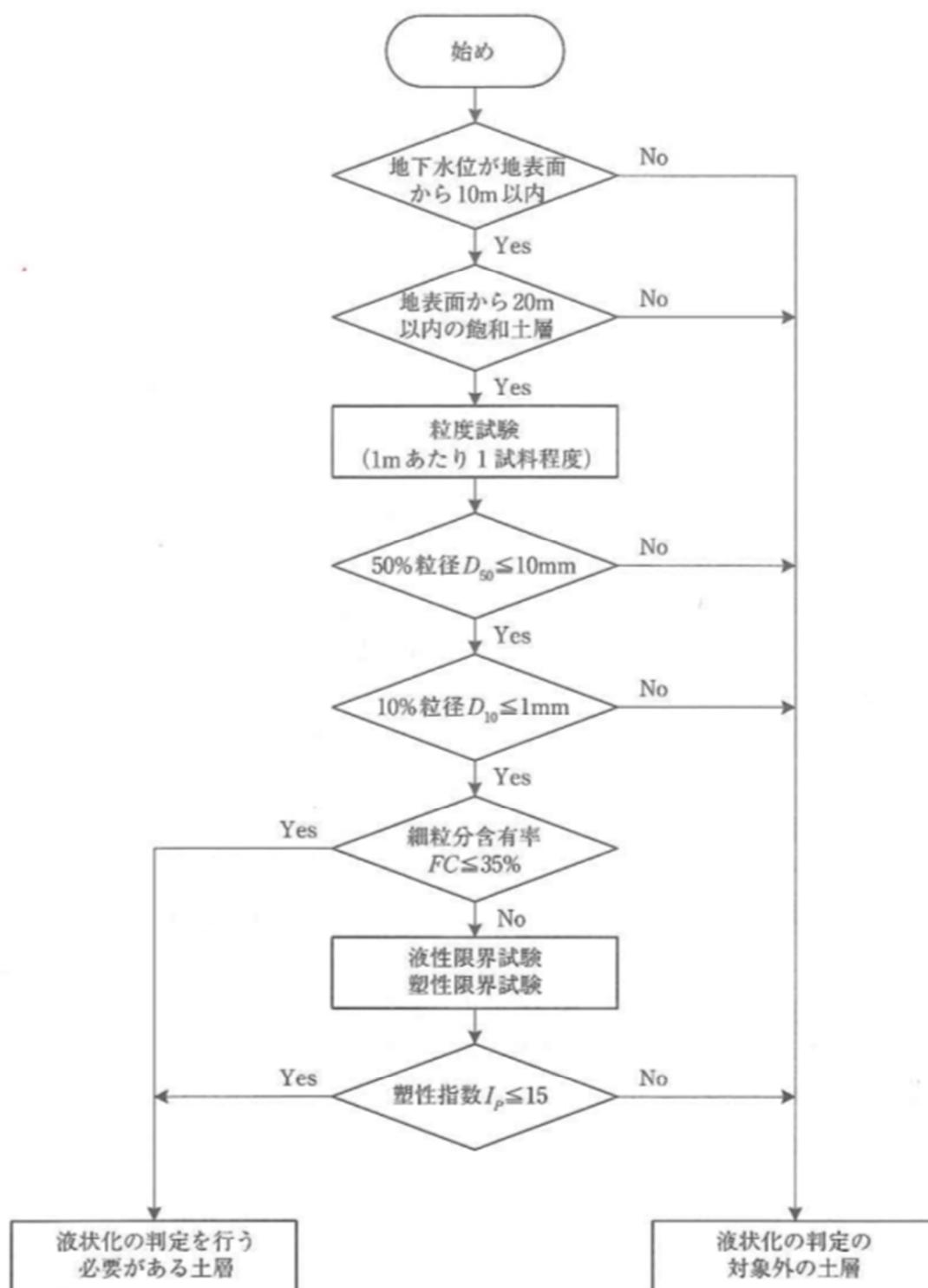


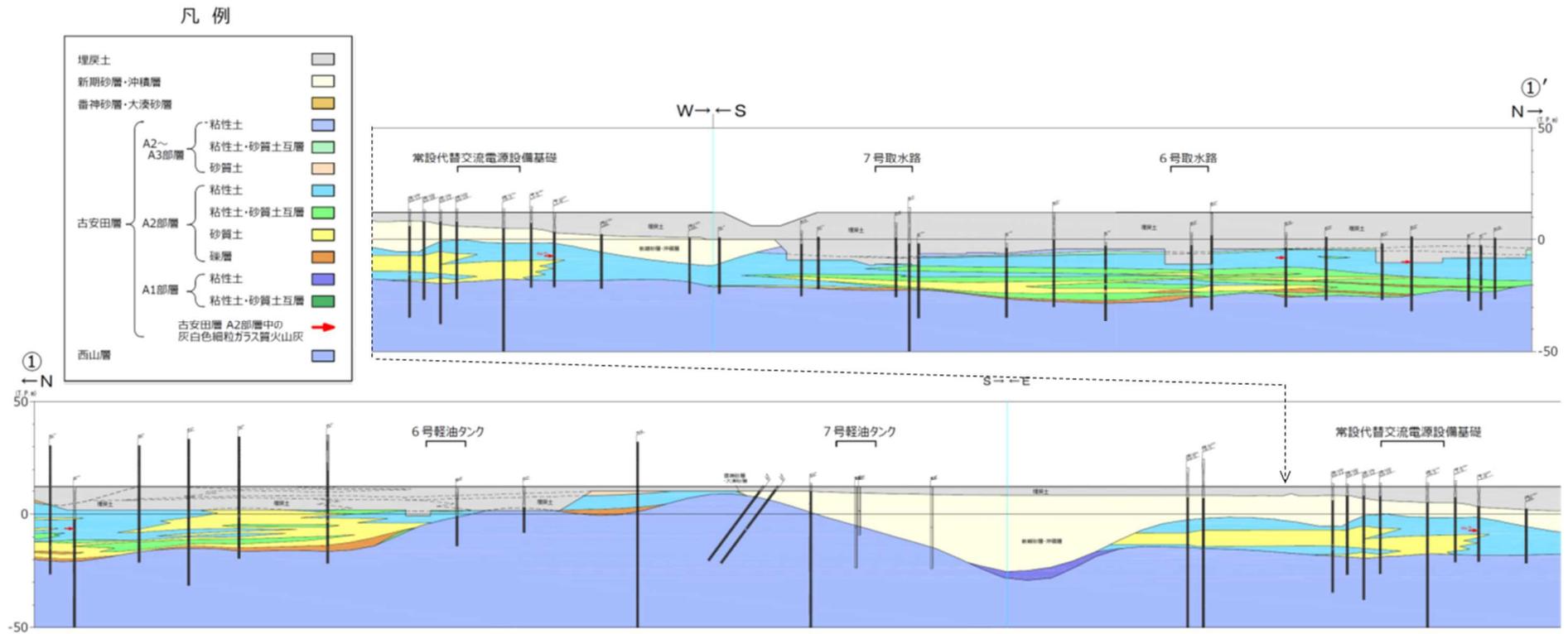
図-解8.2.1 液状化の判定を行う必要がある土層の評価の手順

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）

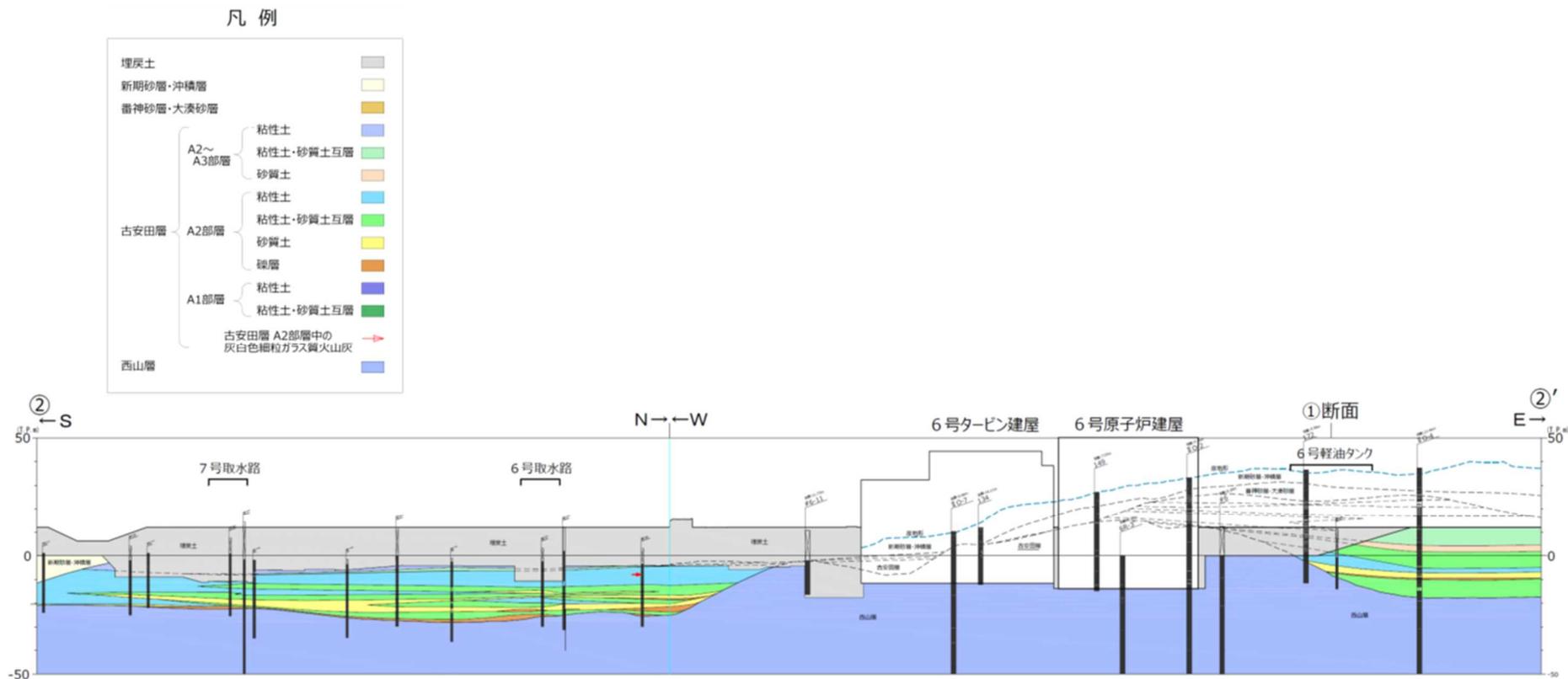


第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布

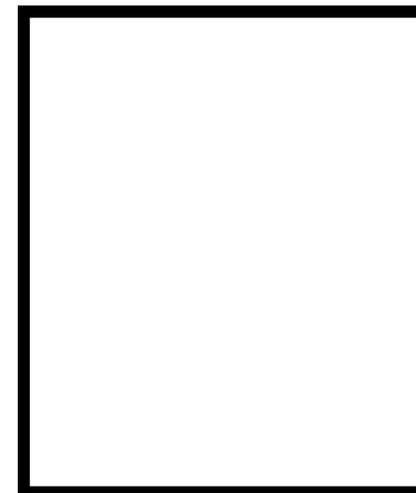
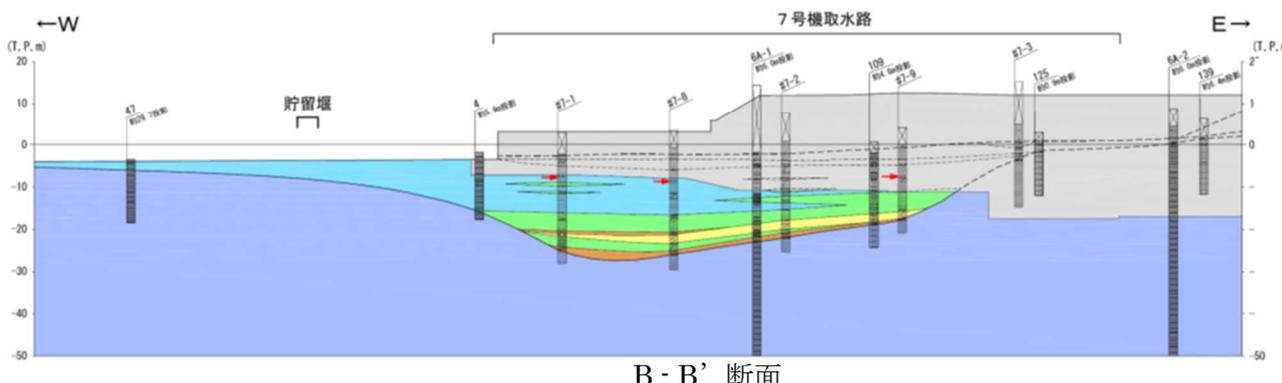
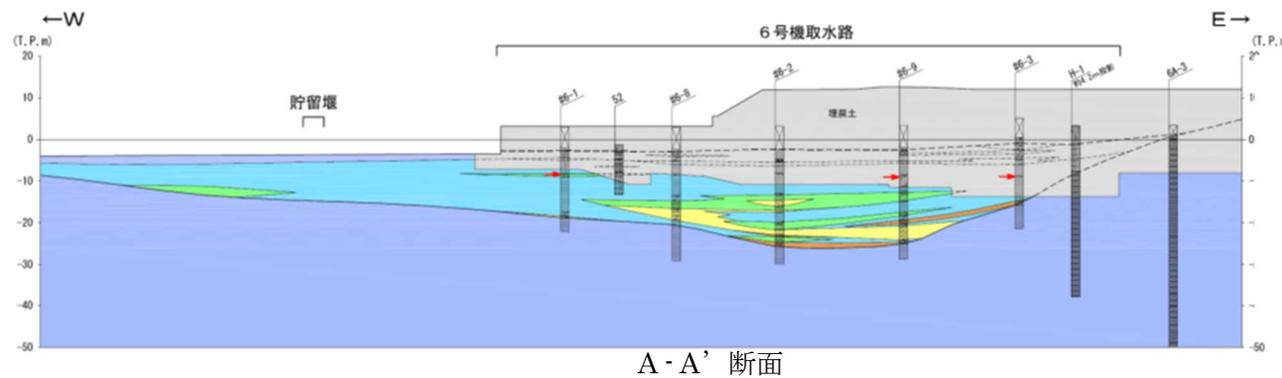
(a) 大湊側 全体平面図



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



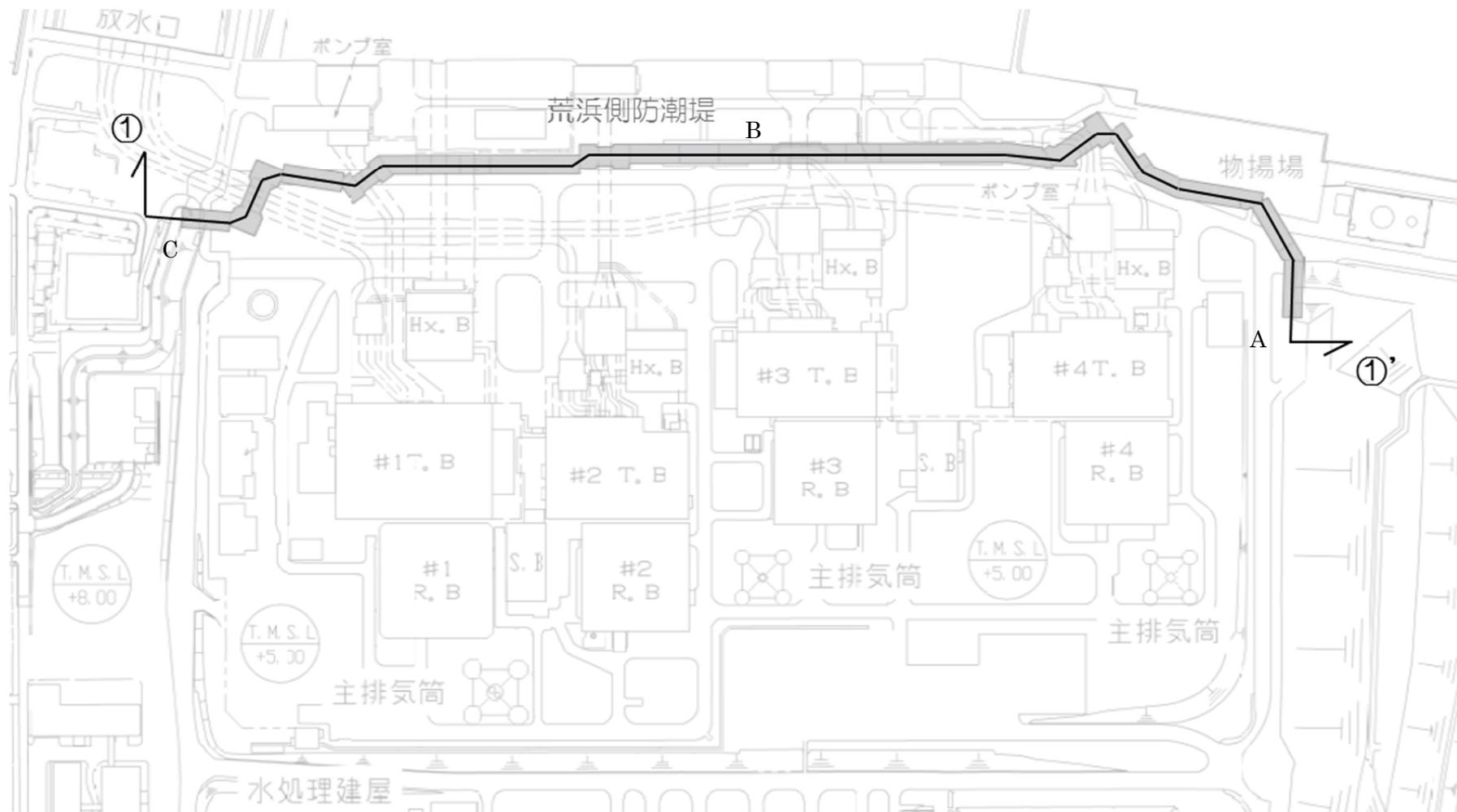
第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布  
(c) 地質断面図 ② - ②' 断面



凡 例

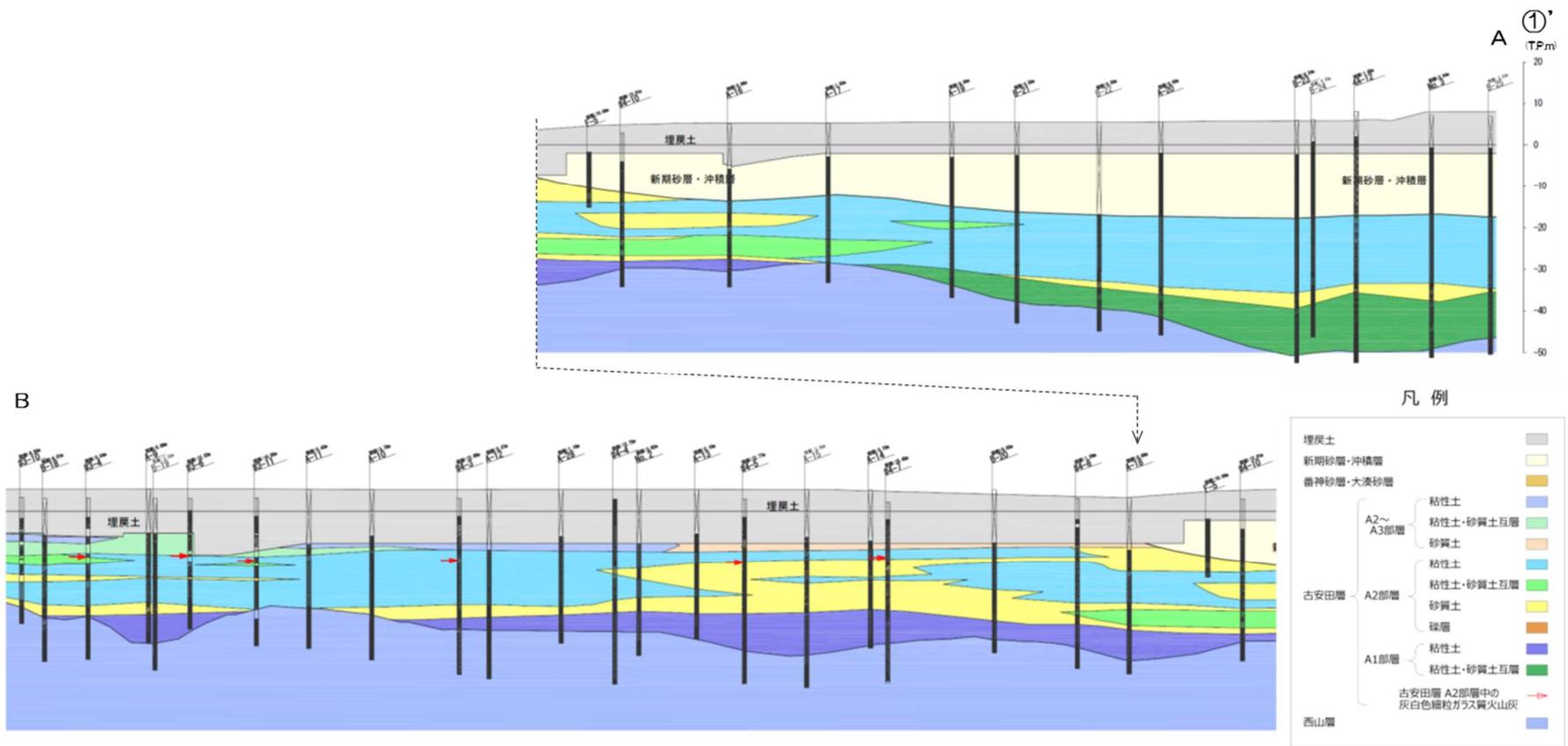
|                         |              |           |
|-------------------------|--------------|-----------|
| 埋戻土                     | 埋戻土          |           |
| 新期砂層・沖積層                | 新期砂層・沖積層     |           |
| 番神砂層・大湊砂層               | 番神砂層・大湊砂層    |           |
| 古安田層                   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

第 11-2-3 図 大湊側の砂層分布 (c) 地質断面図 取水路縦断面



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



### 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。

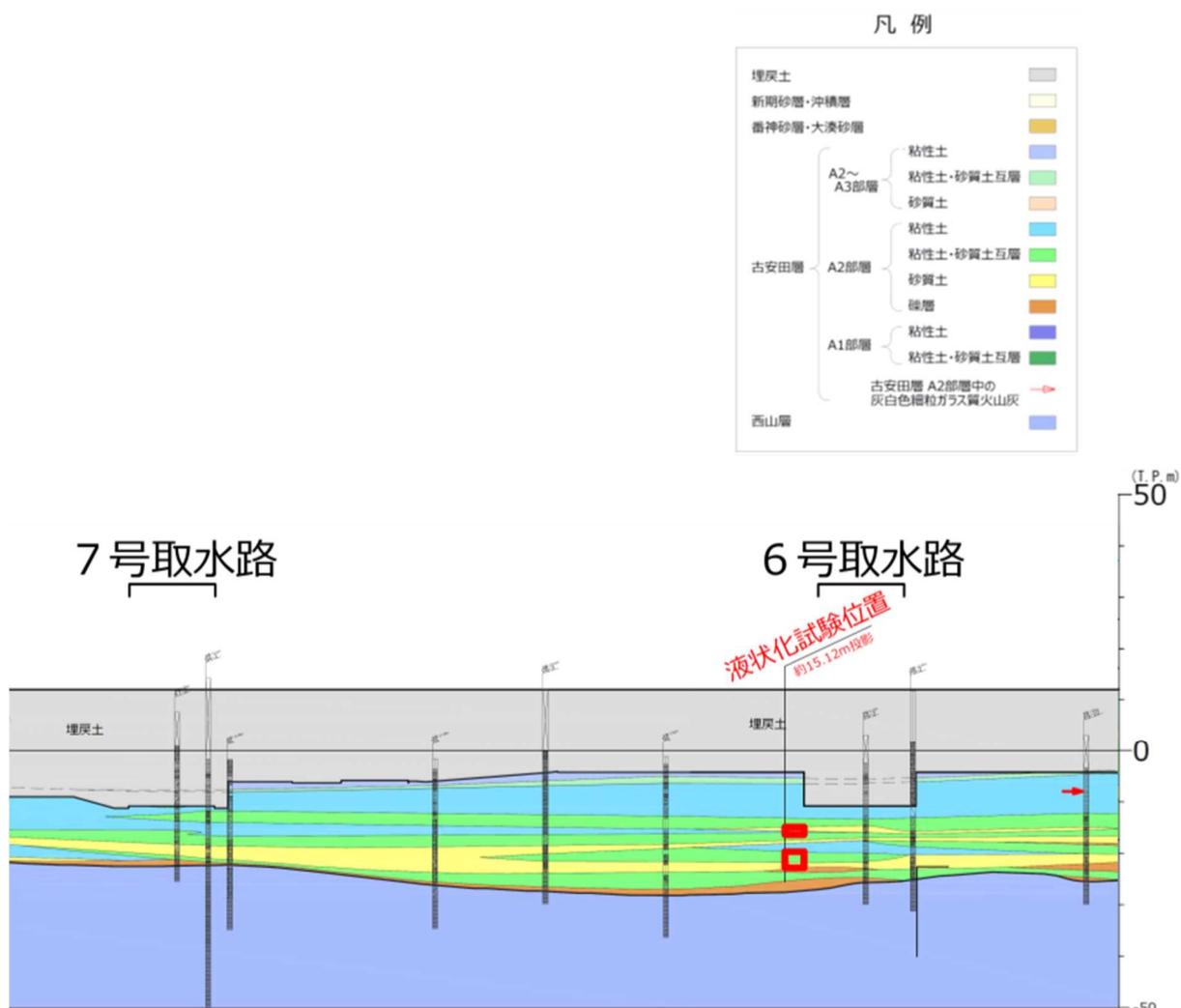
荒浜側については、砂層の分布状況から以下のとおり地点を選定し、試料を採取して液状化試験を実施した。

- 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）。

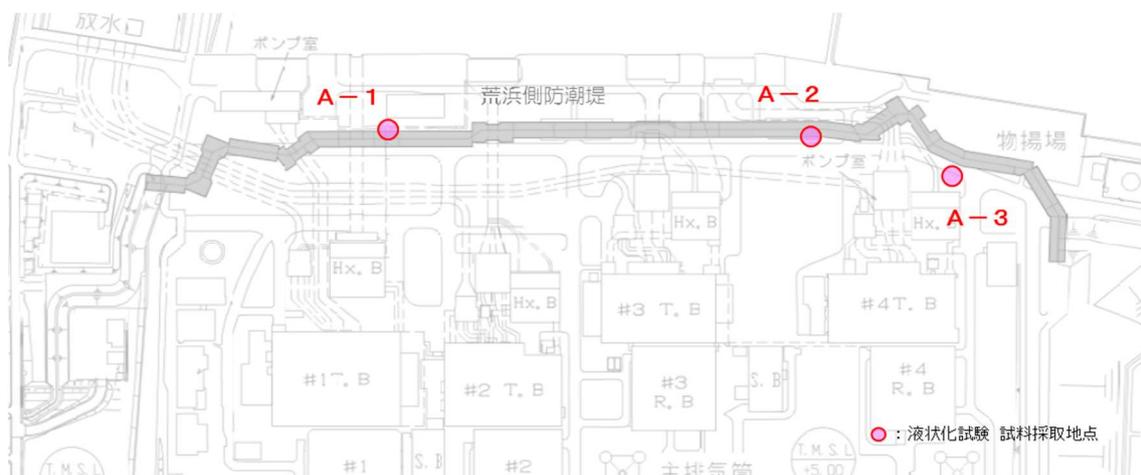


(a) 平面図

第 11-3-1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)



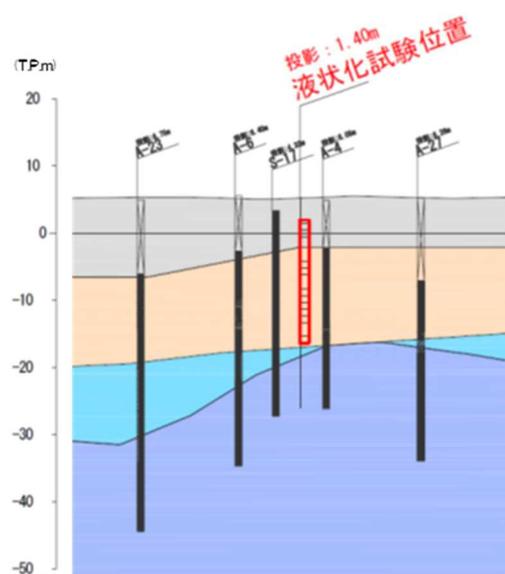
第 11-3-1 図 大湊側 試料採取地点位置図 (O-1)



(a) 平面図

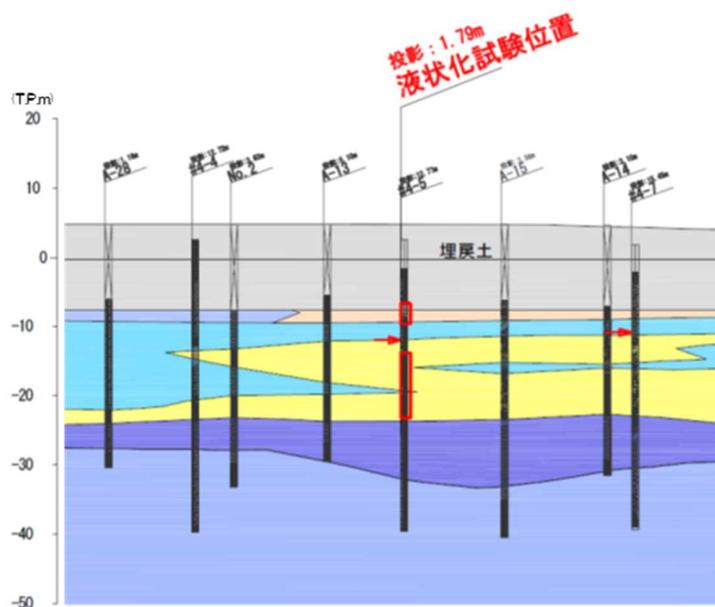
第 11-3-2 図 荒浜側 試料採取地点位置図 (A-1, 2, 3)

凡例



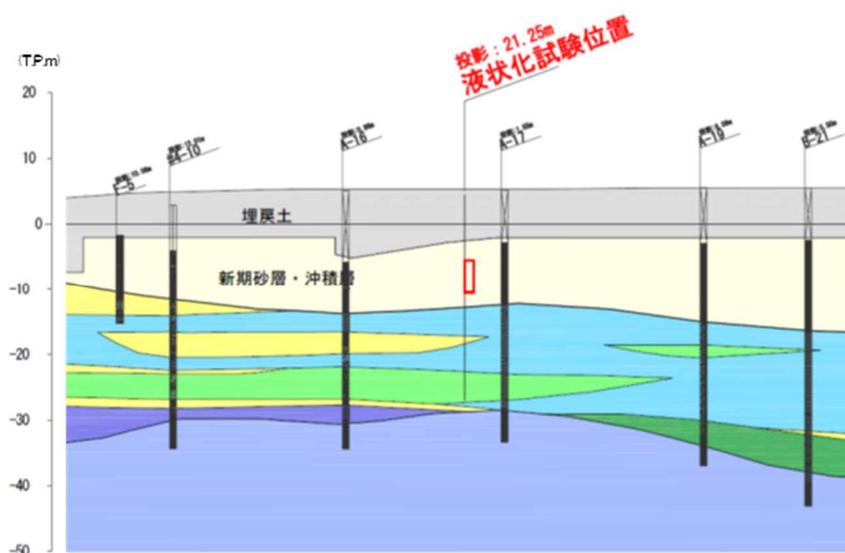
(b) 断面図 (A-1)

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 液状化試験選定箇所の代表性確認

液状化試験箇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，液状化試験選定箇所の代表性確認を目的に，液状化試験箇所と周辺調査箇所の比較，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・同解説（2012）」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などに応じて設定するという考え方が示されている。

液状化試験箇所と周辺調査箇所の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・同解説（2012）】

- 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うえで、当該地盤の平均的な値と考えられるものを求めることが原則である。
- 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。

各液状化試験箇所とその対象地層の周辺調査箇所における基本物性を整理した。第 11-3-7 図に液状化試験箇所と周辺調査箇所の位置図、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、周辺調査箇所と比べて、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、周辺調査箇所と比べて、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、周辺調査箇所と比べて、N 値及び細粒分含有率が同程度も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

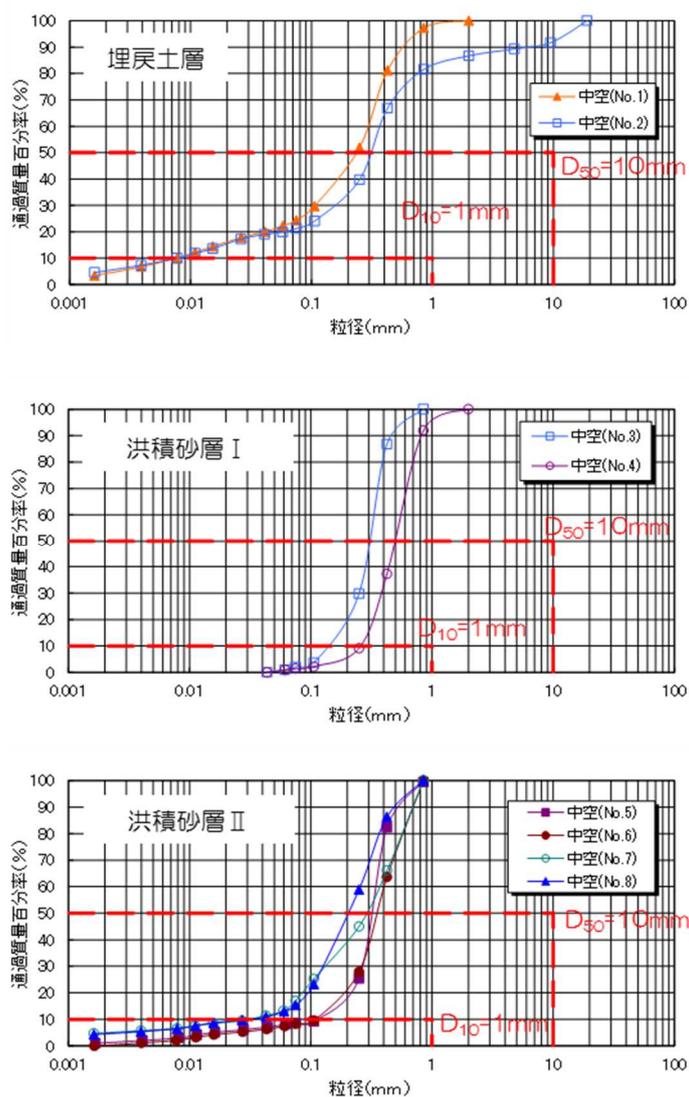
ィを示すA－1地点の洪積砂層Ⅰ，Ⅱ及びA－2地点の洪積砂層Ⅰの下位に分布する砂層であり，より古い時代に堆積した砂層である。

○－1地点の洪積砂質土層Ⅰ，Ⅱは，周辺調査箇所と比べて，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，液状化試験箇所の粒径加積曲線が周辺調査箇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，荒浜側の周辺調査箇所と比べて，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，試験は保守的な箇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，大湊側の周辺調査箇所と比べて，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。

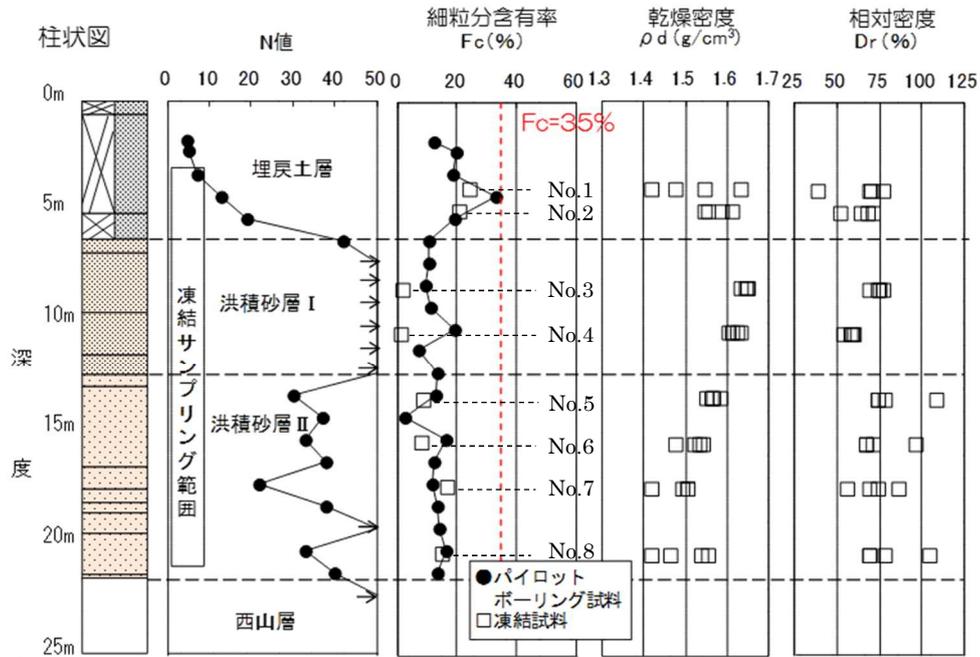
A－1地点の埋戻土層は，N値のみの比較ではあるものの，液状化強度との相関が最も高いN値が周辺調査箇所と比べて小さく下限付近であることから，試験は保守的な箇所で実施していると評価した。



(a) 粒径加積曲線

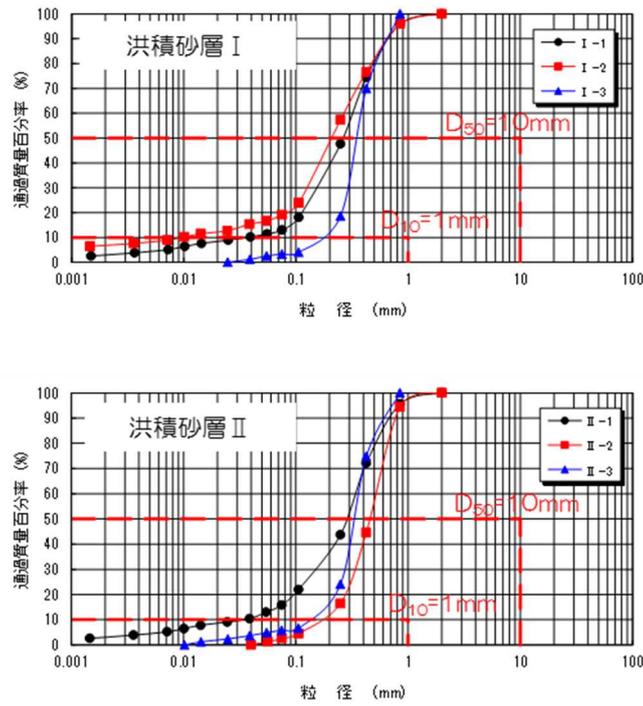
第 11-3-3 図 液状化試験箇所の基本物性 (A-1)

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）

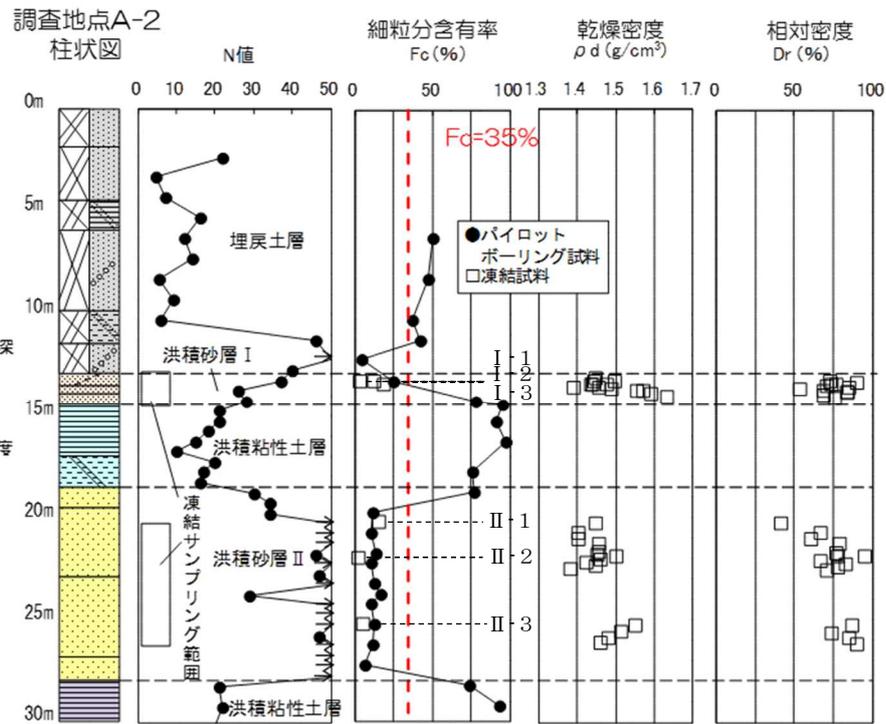


※古安田層中の砂層は、N値50以上の砂層（洪積砂層 I）とN値50以下の地層（洪積砂層 II）に区分して試験を実施した。

(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 液状化試験箇所の基本物性（A-1）



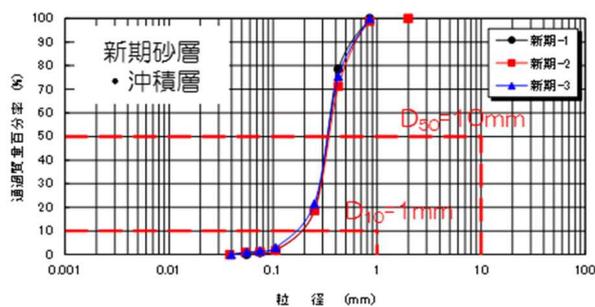
(a) 粒径加積曲線



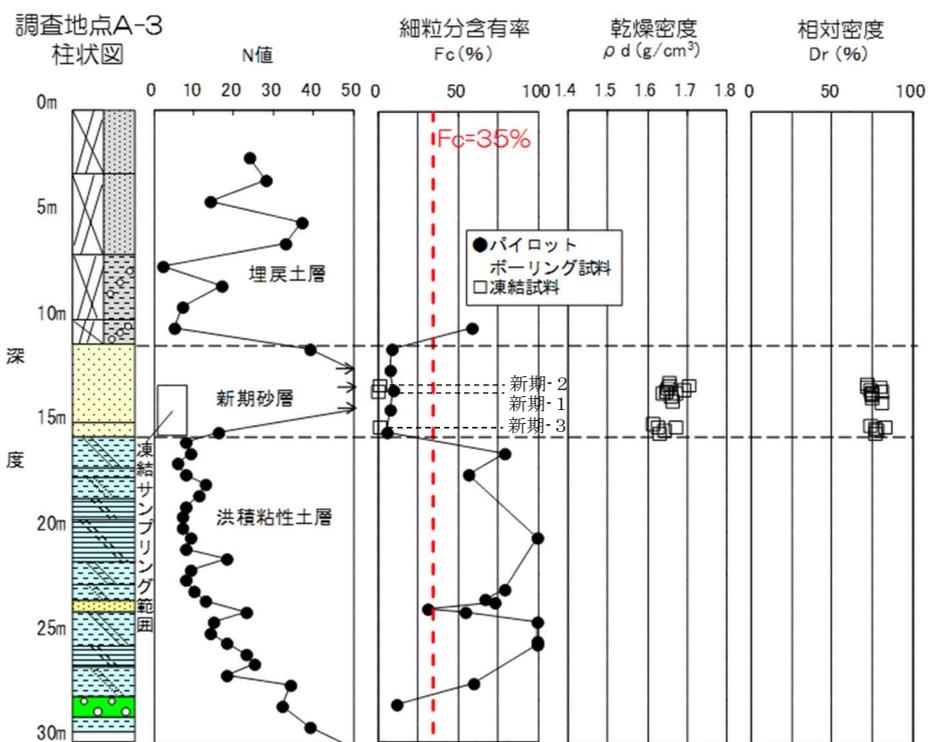
※古安田層中の砂層は、上から洪積砂層 I と洪積砂層 II に区分して試験を実施した。

(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

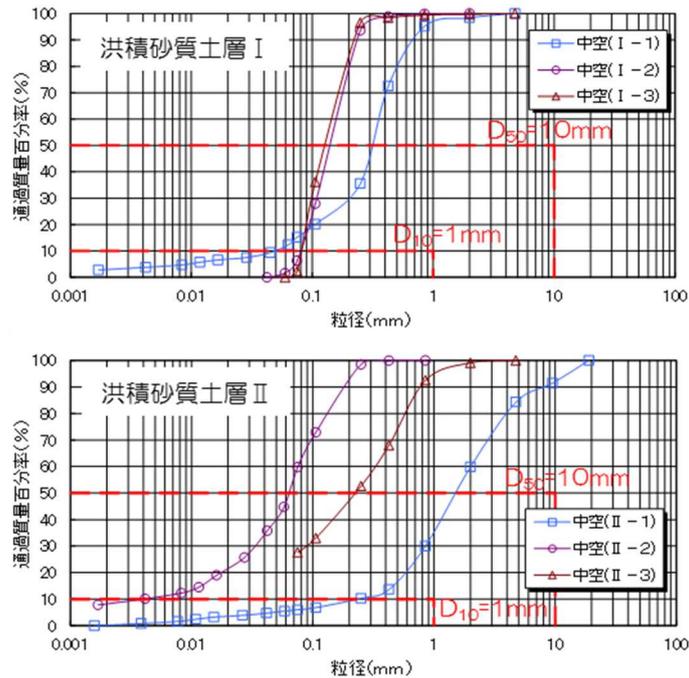
第 11-3-4 図 液状化試験箇所の基本物性 (A-2)



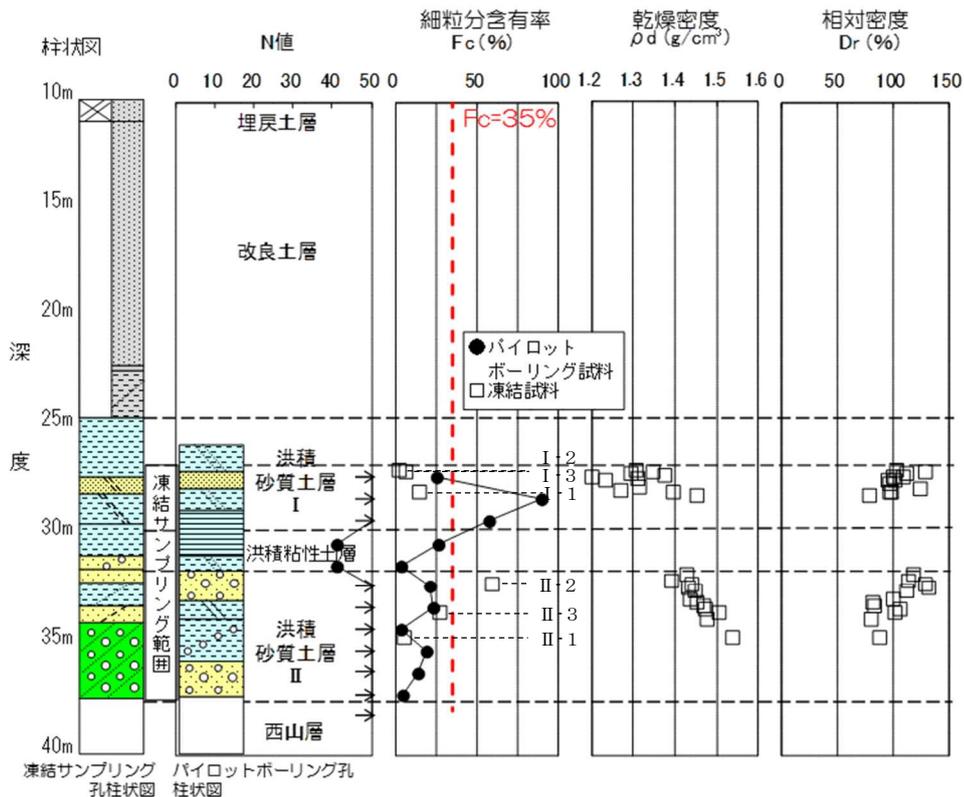
(a) 粒径加積曲線



(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 液状化試験箇所の基本物性 (A-3)



(a) 粒径加積曲線



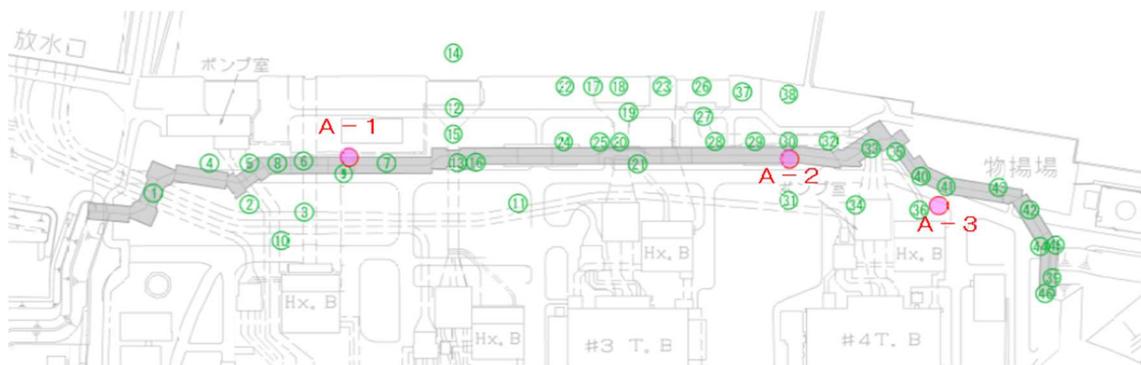
※古安田層中の砂層は同時代の地層であるが、上位を洪積砂質土層 I、下位を洪積砂質土層 II と区分し、それぞれの拘束圧に応じて液状化試験を実施した。

(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 液状化試験箇所の基本物性 (O-1)

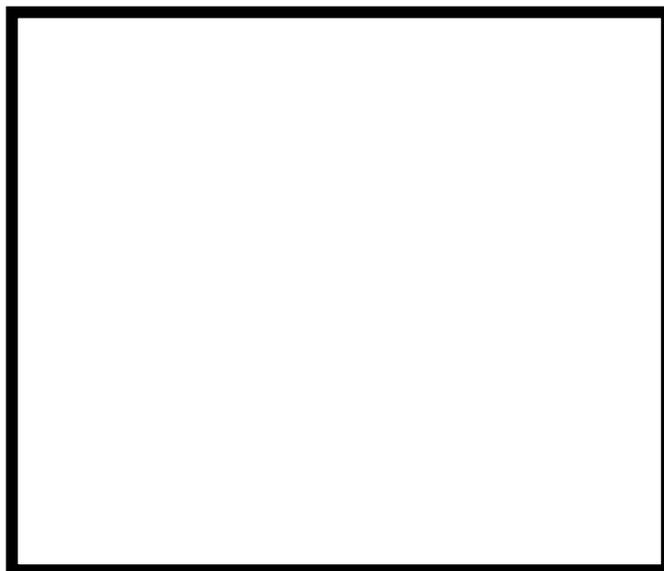
第 11-3-1 表 各基準類における液状化強度比  $R_L$  と基本物性の相関性

| 基準類名                                                                                                                                               | 液状化強度比 $R_L$ の算定<br>に用いる主物性     | 液状化強度比の補正に<br>用いる物性           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，日本道路協会，2012<br><br>（下水道施設の耐震対策指針と解説，日本下水道協会，2006）<br><br>（河川砂防技術基準（案）同解説 設計編，日本河川協会編，1997）<br><br>（高圧ガス設備等耐震設計指針，高圧ガス保安協会，2000） | <b>N 値</b><br>（有効上載圧を考慮した補正を行う） | 細粒分含有率 $F_c$                  |
| 港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置（その 2），日本港湾協会，2007<br>（部分改訂，2012）                                                                                                |                                 | 細粒分含有率 $F_c$                  |
| 建築基礎構造設計指針，日本建築学会，2001<br><br>（水道施設耐震工法指針・同解説，日本水道協会，1997）                                                                                         |                                 | 細粒分含有率 $F_c$                  |
| 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，（財）鉄道総合技術研究所，2012                                                                                                              |                                 | 細粒分含有率 $F_c$<br>平均粒径 $D_{50}$ |

- : 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)

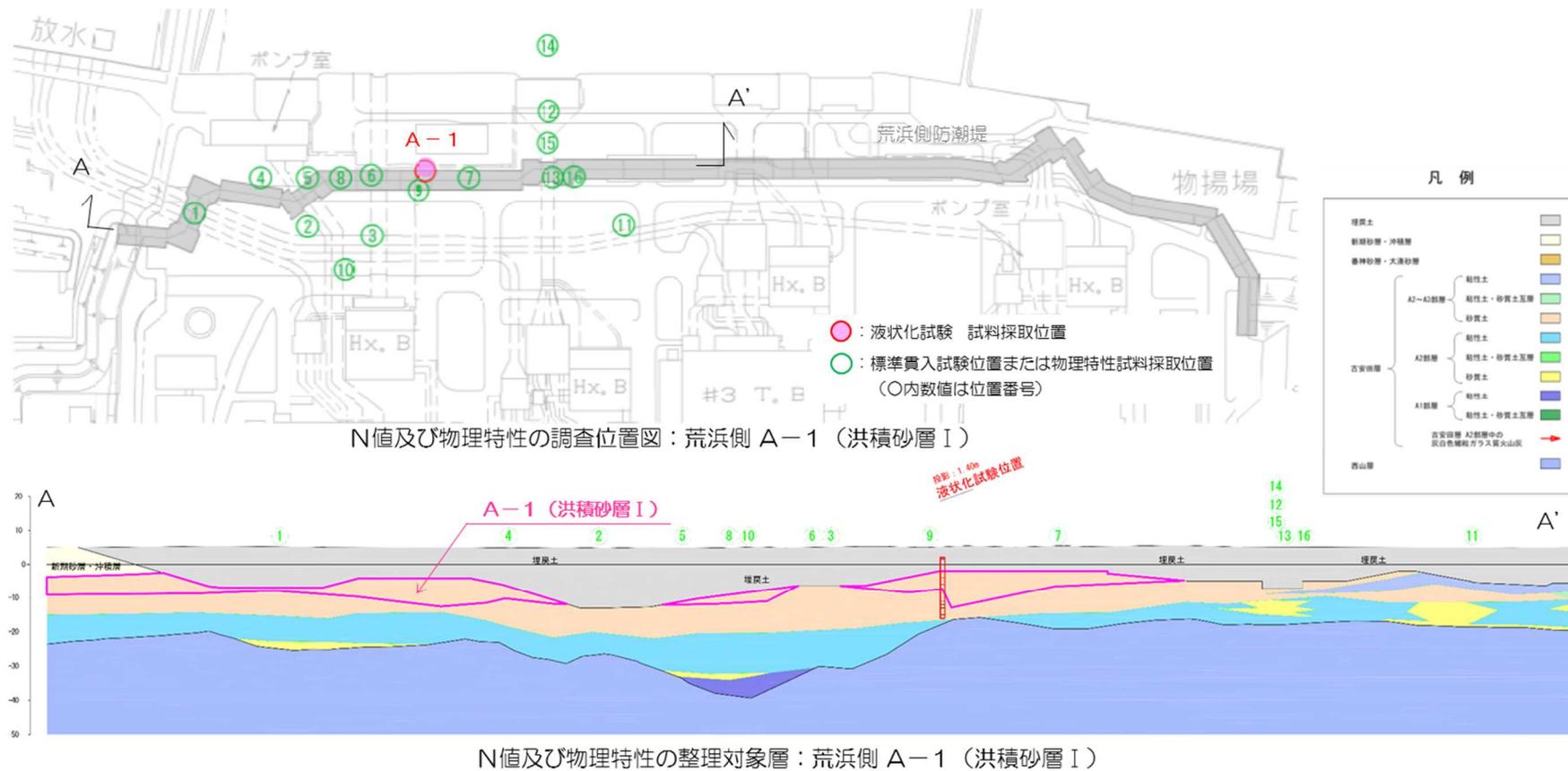


(a) 荒浜側



(b) 大湊側

第 11-3-7 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の位置図

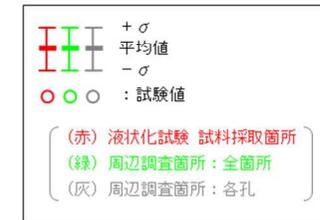
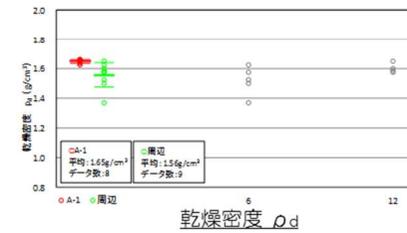
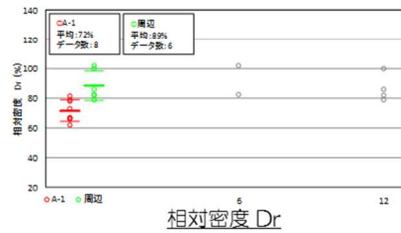
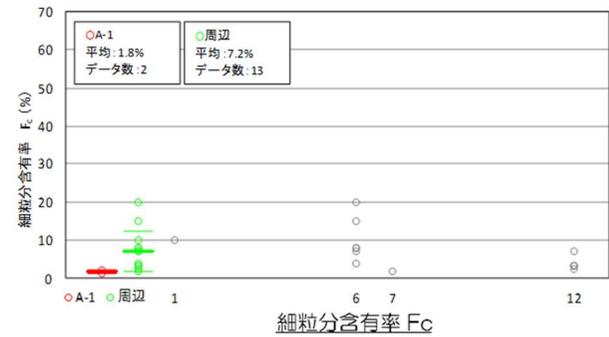
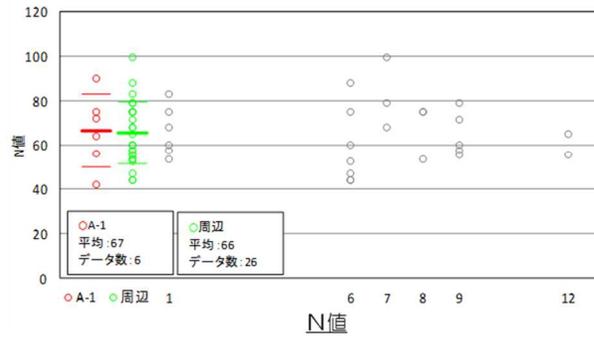
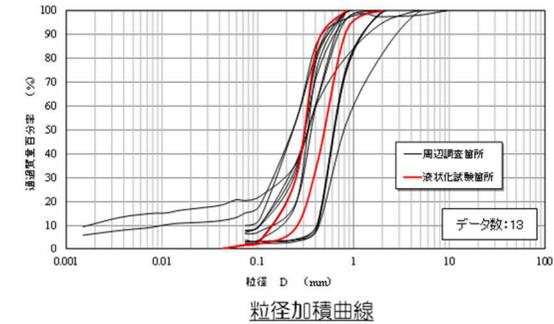


(a) 比較対象位置図

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**：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。

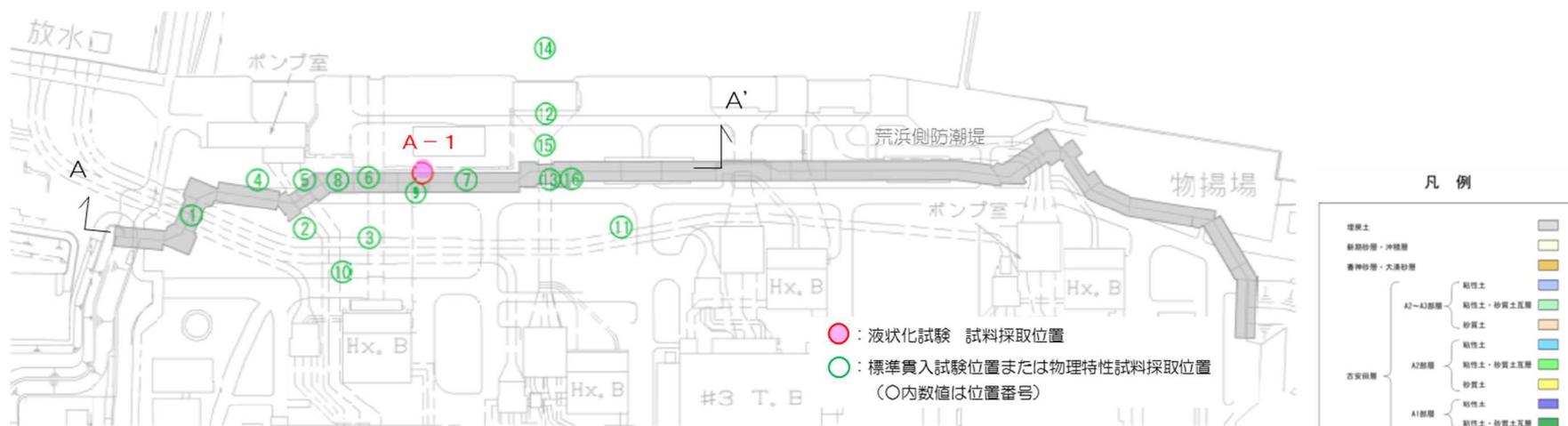
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
 相対密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。  
 乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より大きい。



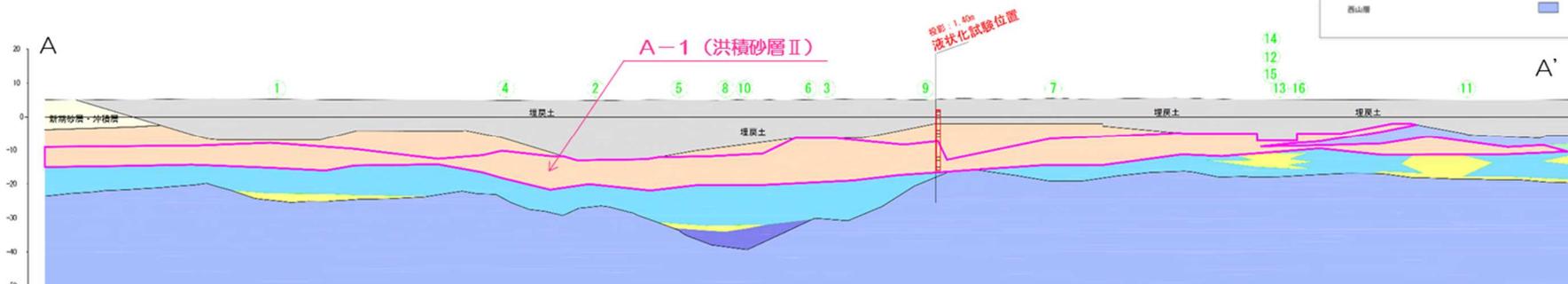
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1 (洪積砂層 I)

(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)



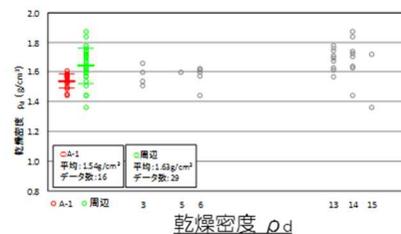
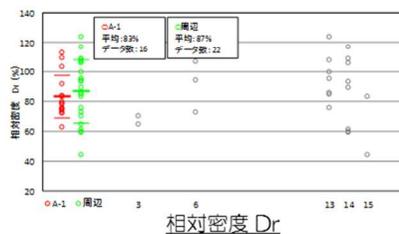
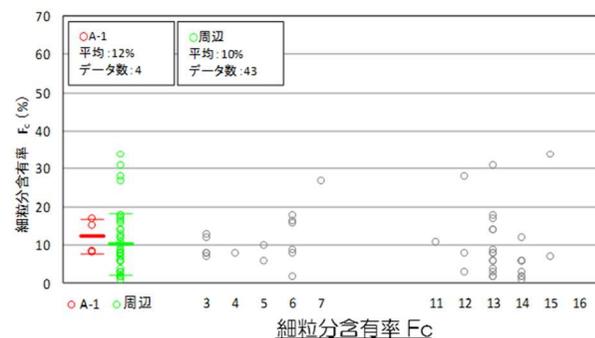
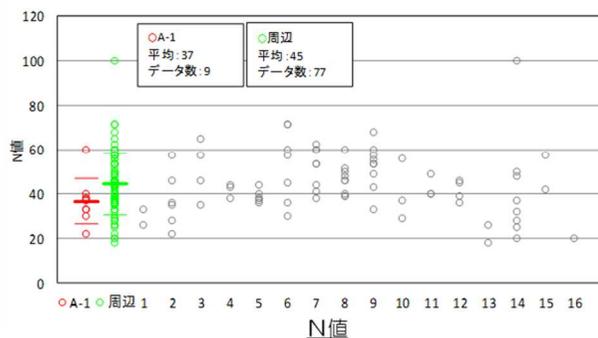
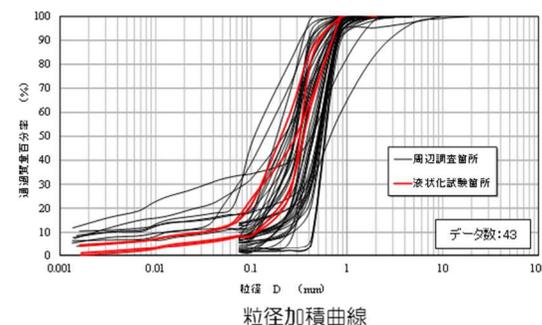
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-1 (洪積砂層Ⅱ)

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

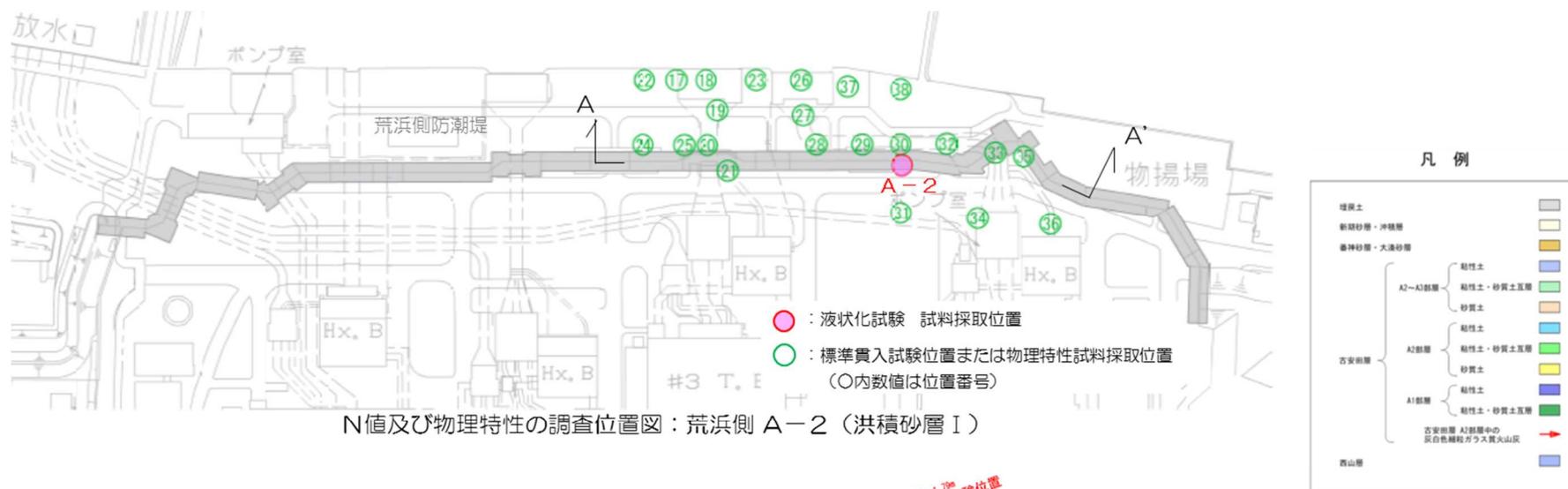
（参考）**粒径加積曲線**：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
**相対密度**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所と同程度である。  
**乾燥密度**：液状化試験箇所の平均値及び-1σ値は、周辺調査箇所より小さい。



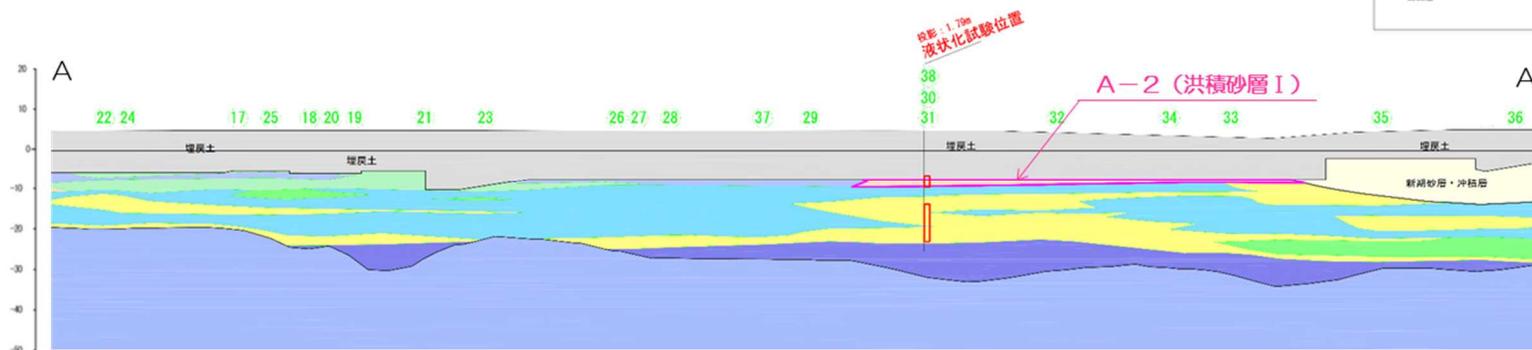
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-1 (洪積砂層II)

(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）



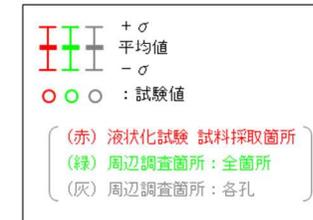
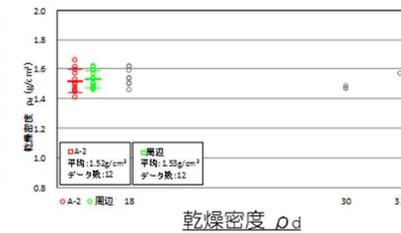
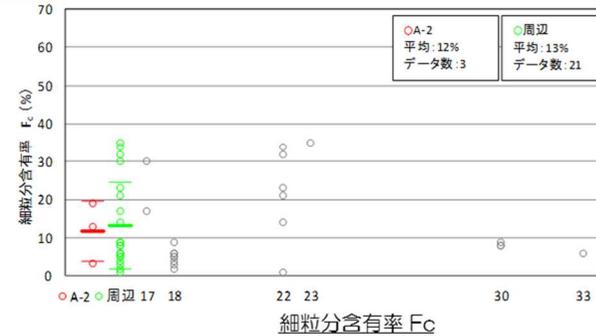
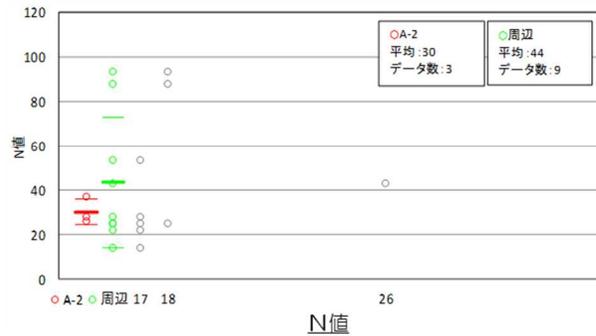
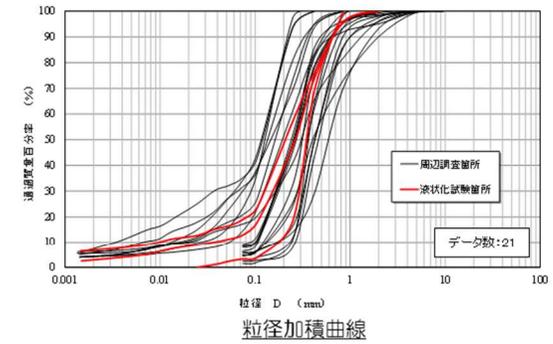
N値及び物理特性の整理対象層：荒浜側 A-2（洪積砂層 I）

(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**：液状化試験箇所（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）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（赤）の平均値は、周辺調査箇所（緑）と同程度であり、 $-1\sigma$ 値は周辺調査箇所より若干大きい。

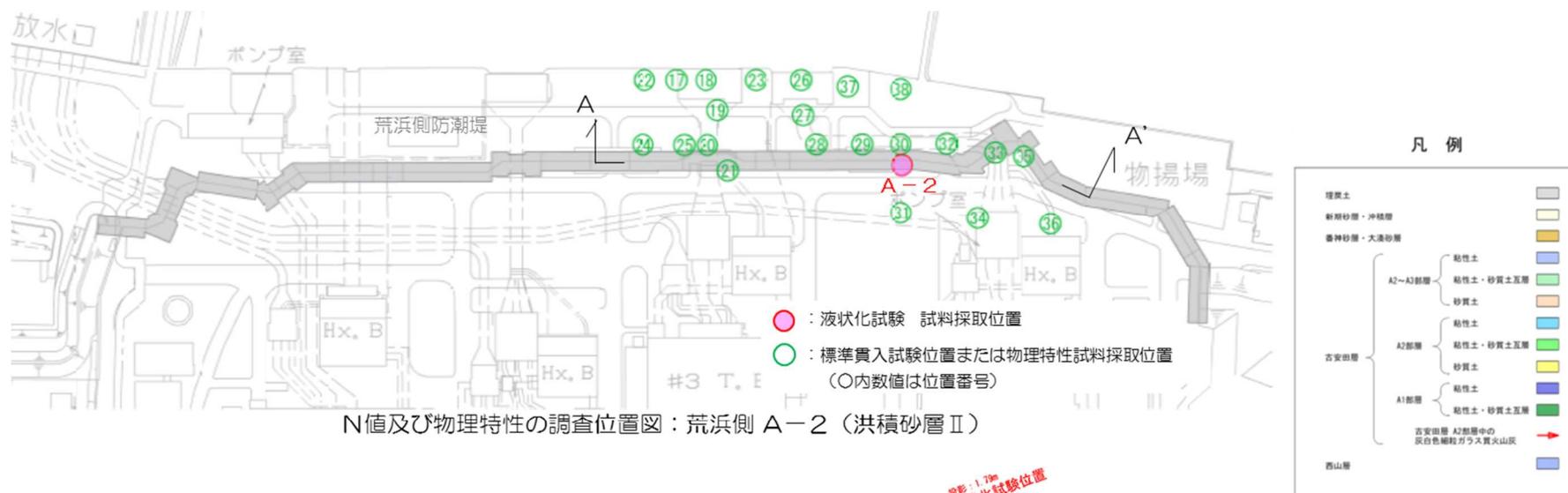
（参考）**粒径加積曲線**：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っている。  
**相対密度**：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所と同程度である。  
**乾燥密度**：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より若干小さい。



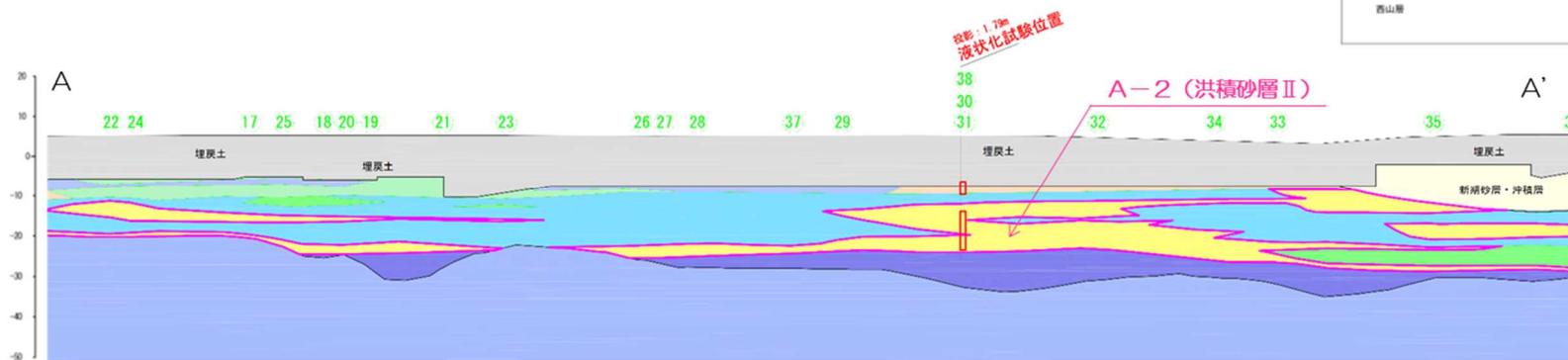
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2 (洪積砂層 I)

(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

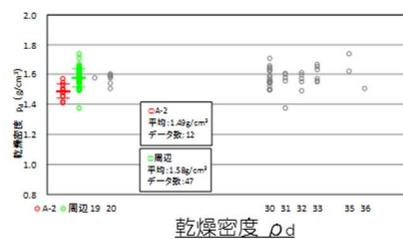
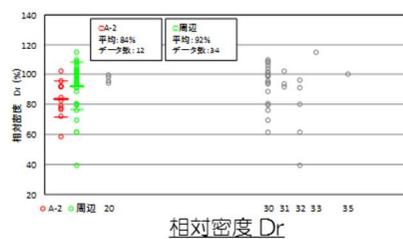
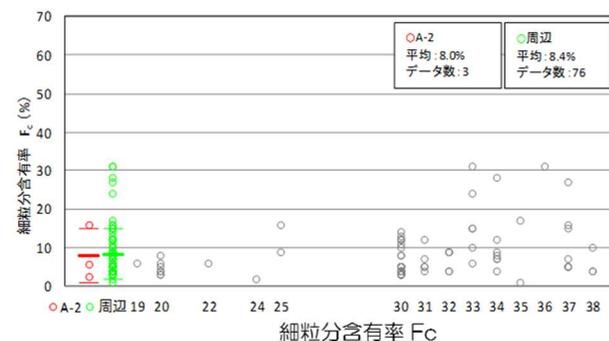
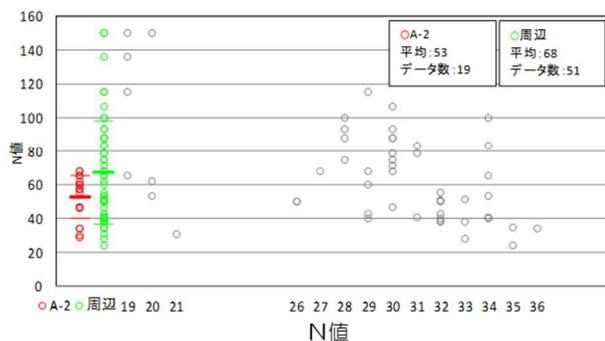
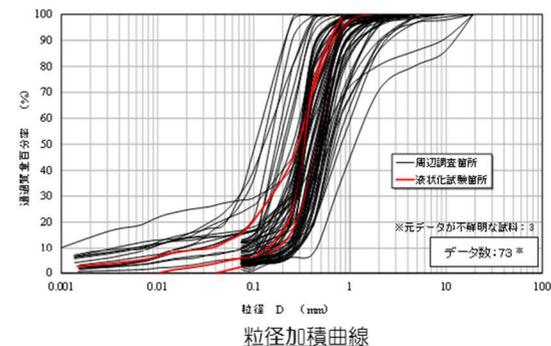
第 11-3-11 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-2 地点の洪積砂層Ⅱ）

- **N値**：液状化試験箇所（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）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（赤）の平均値は周辺調査箇所（緑）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。



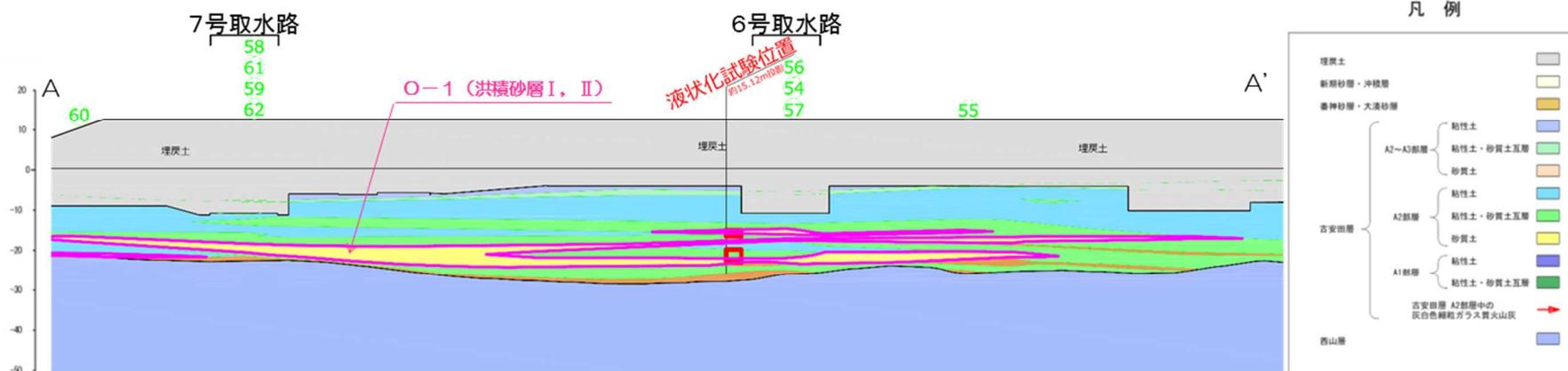
N値及び物理特性の比較 荒浜側 A-2（洪積砂層Ⅱ）

(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

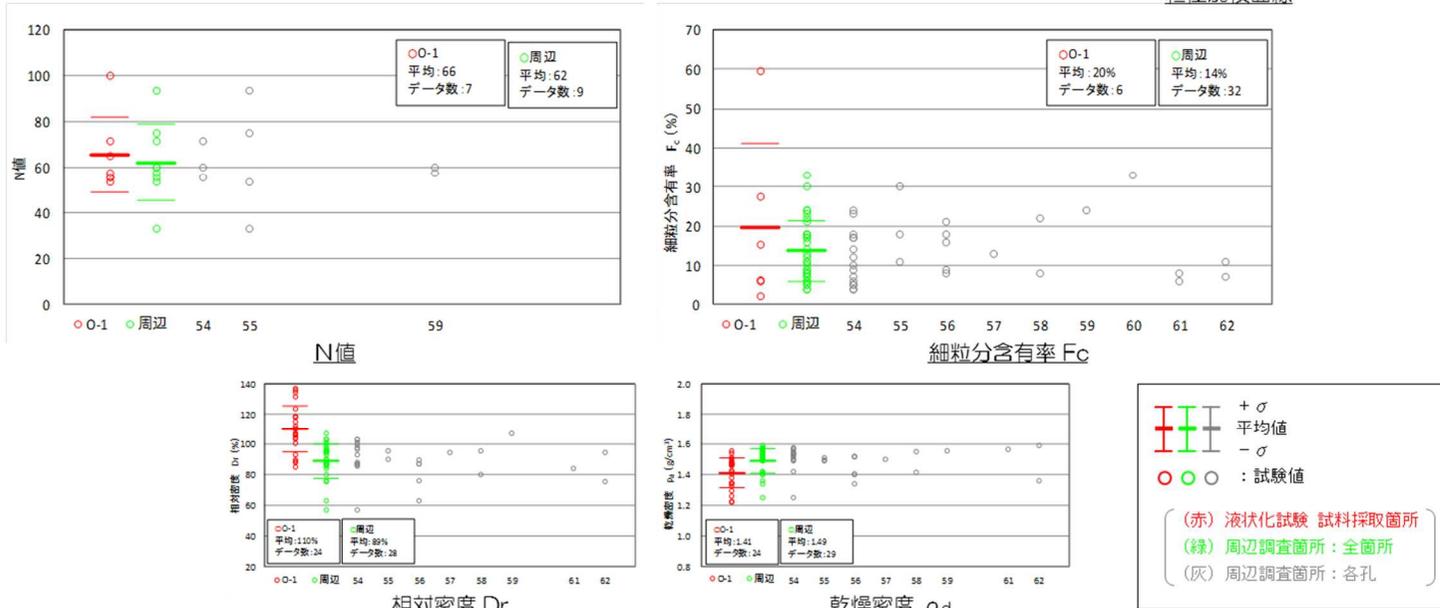
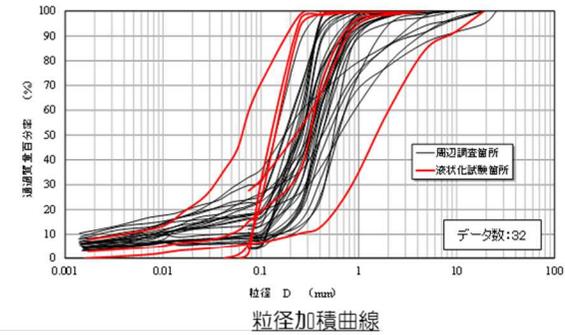
第 11-3-12 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（O-1 地点の洪積砂質土層 I, II）

- **N値**：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。

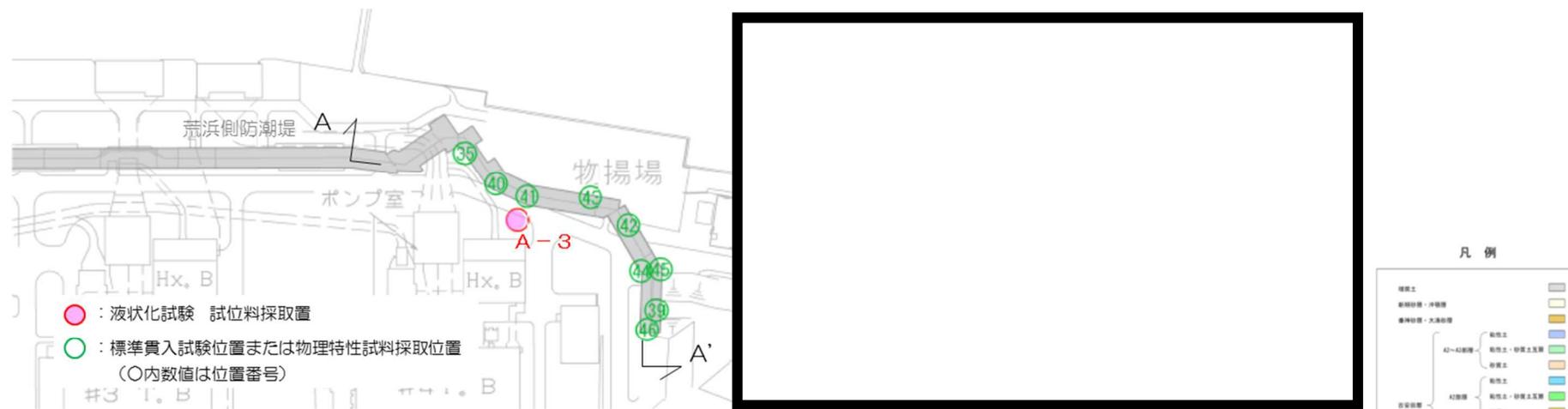
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、周辺調査箇所より小さい。



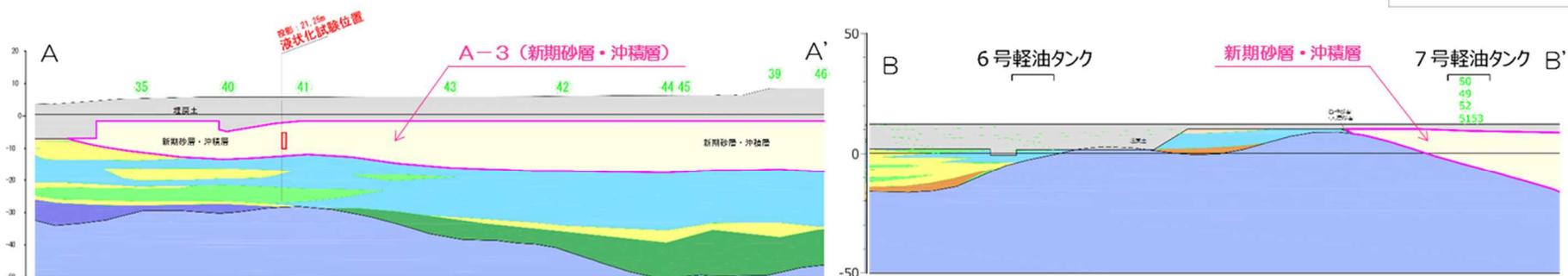
N値及び物理特性の比較 大湊側 O-1 (洪積砂質土層 I, II)

(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

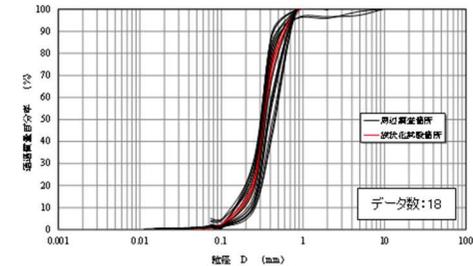
第 11-3-13 図 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較（A-3 地点の新期砂層・沖積層）

- **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。

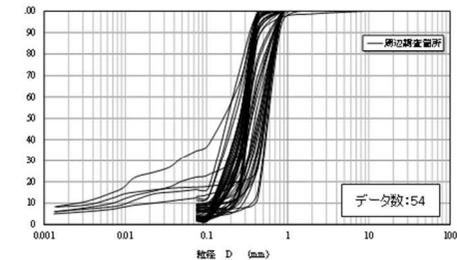
(参考) 粒径加積曲線：液状化試験箇所は周辺調査箇所のばらつきの範囲内に入っており、荒浜側はばらつきが小さく、よく一致している。

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。

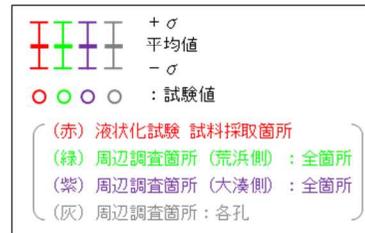
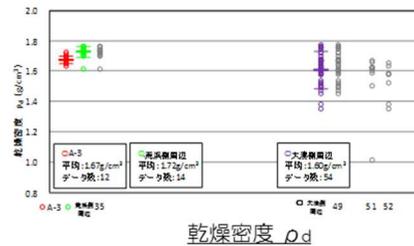
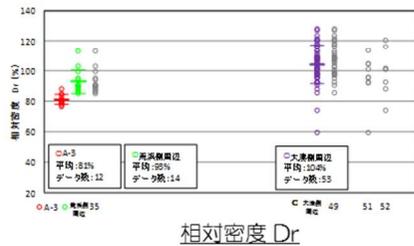
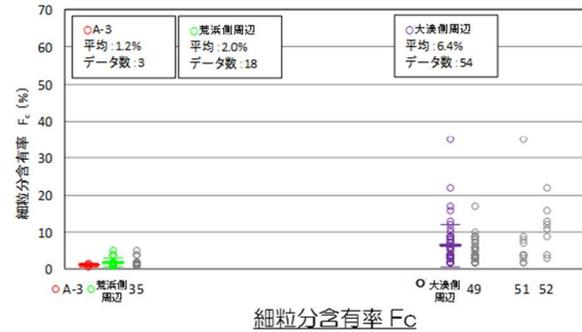
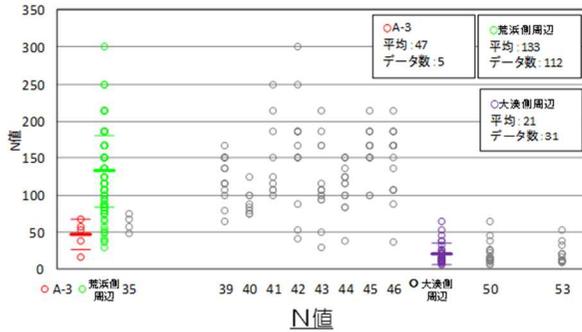
乾燥密度：液状化試験箇所の平均値及び $-1\sigma$ 値は、荒浜側の周辺調査箇所より小さく、大湊側の周辺調査箇所より大きい。



粒径加積曲線 (荒浜側)



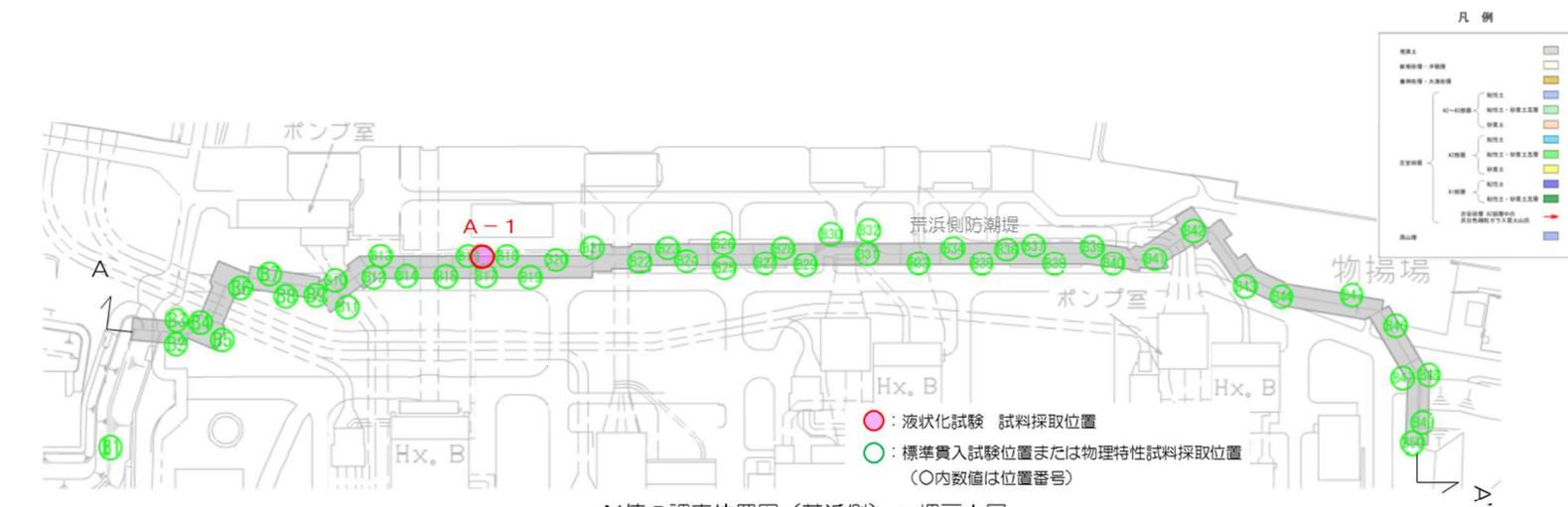
粒径加積曲線 (大湊側)



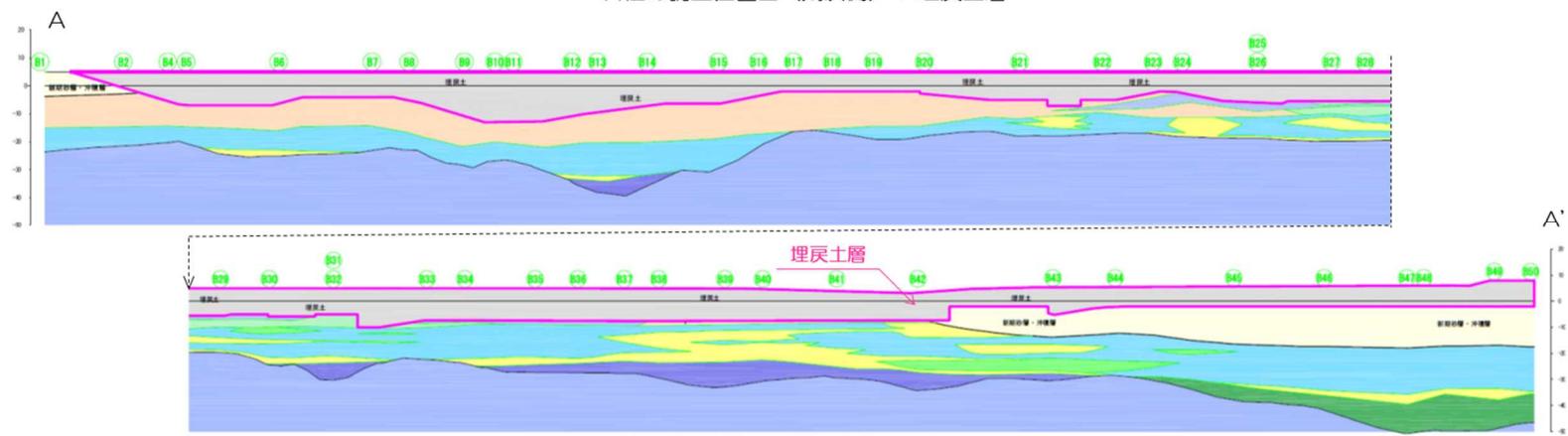
N値及び物理特性の比較 A-3 (新期砂層・沖積層)

(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)



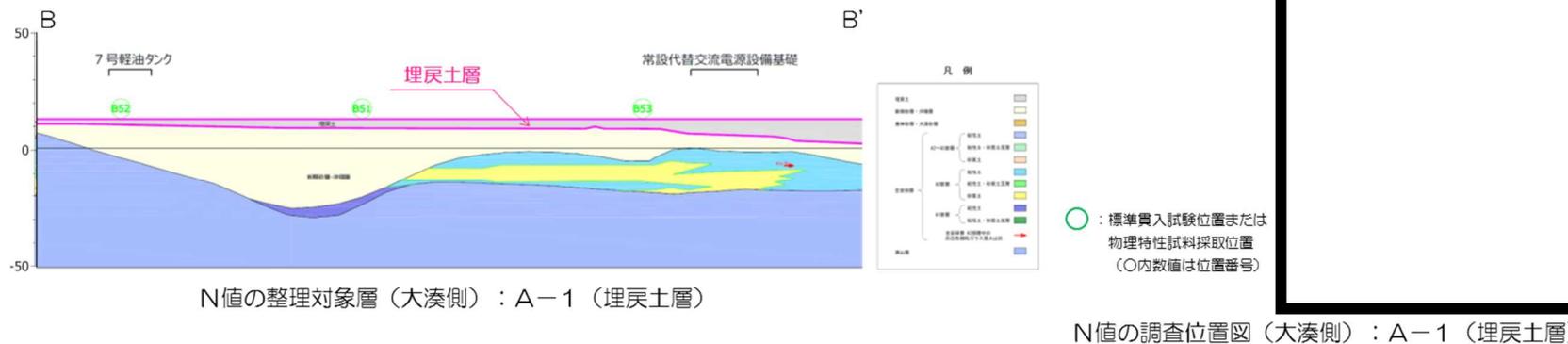
N値の調査位置図（荒浜側）：埋戻土層



N値の整理対象層（荒浜側）：埋戻土層

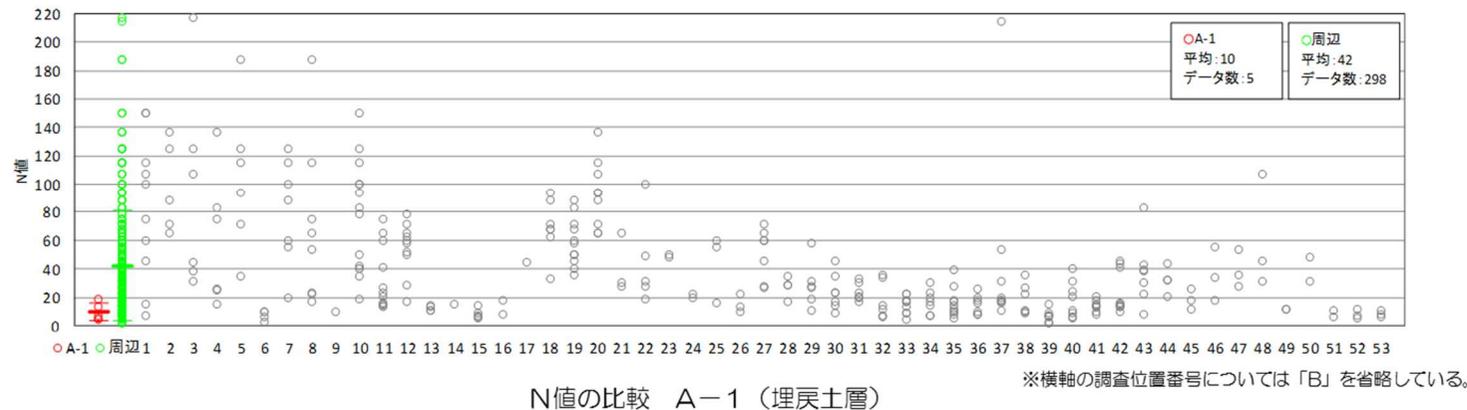
(a) 比較対象位置図（荒浜側）

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 液状化試験箇所と周辺調査箇所の基本物性比較のまとめ

| 地層区分                     |      | N値 | 細粒分<br>含有率 | 追加<br>調査<br>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

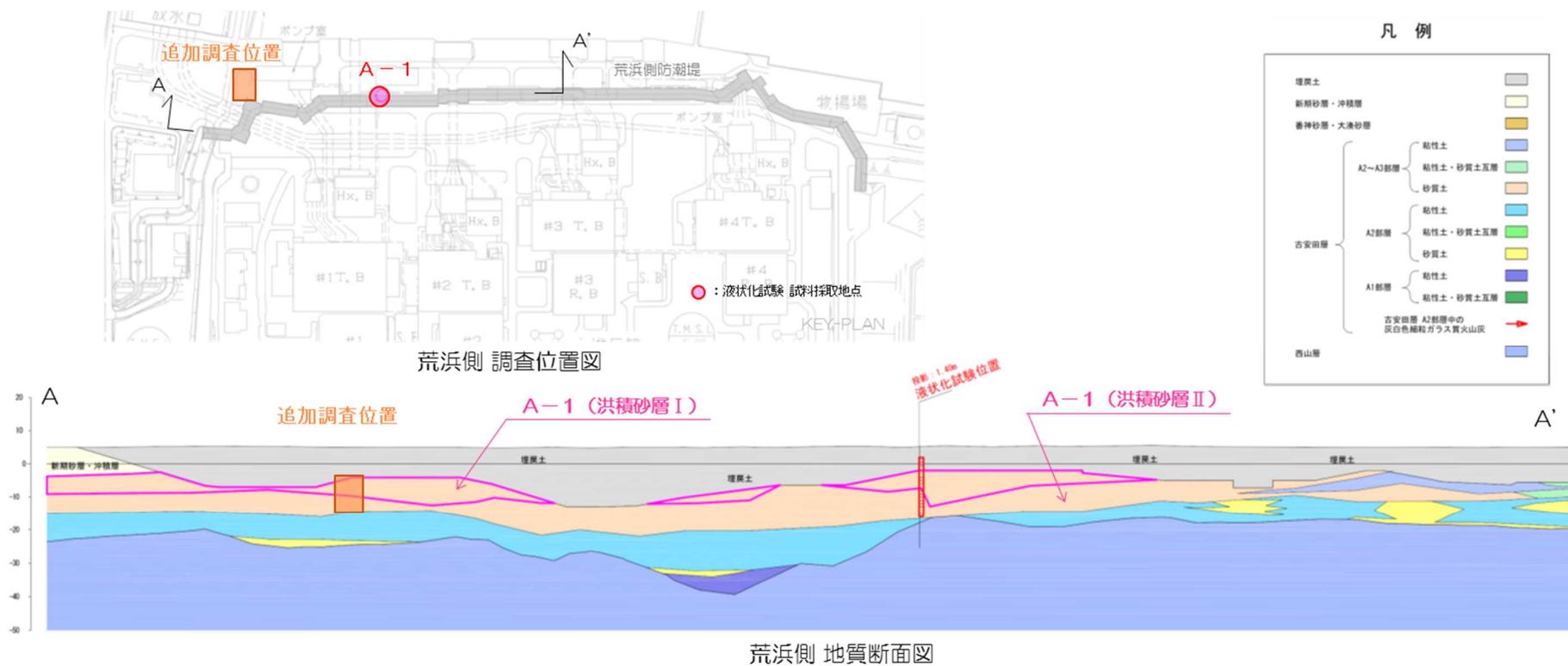
3.1 および 3.2 の検討結果を踏まえて、第 11-3-15 図に追加調査実施予定地を示す。

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箇所 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、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箇所 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、大湊側の周辺調査箇所と比べて、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。

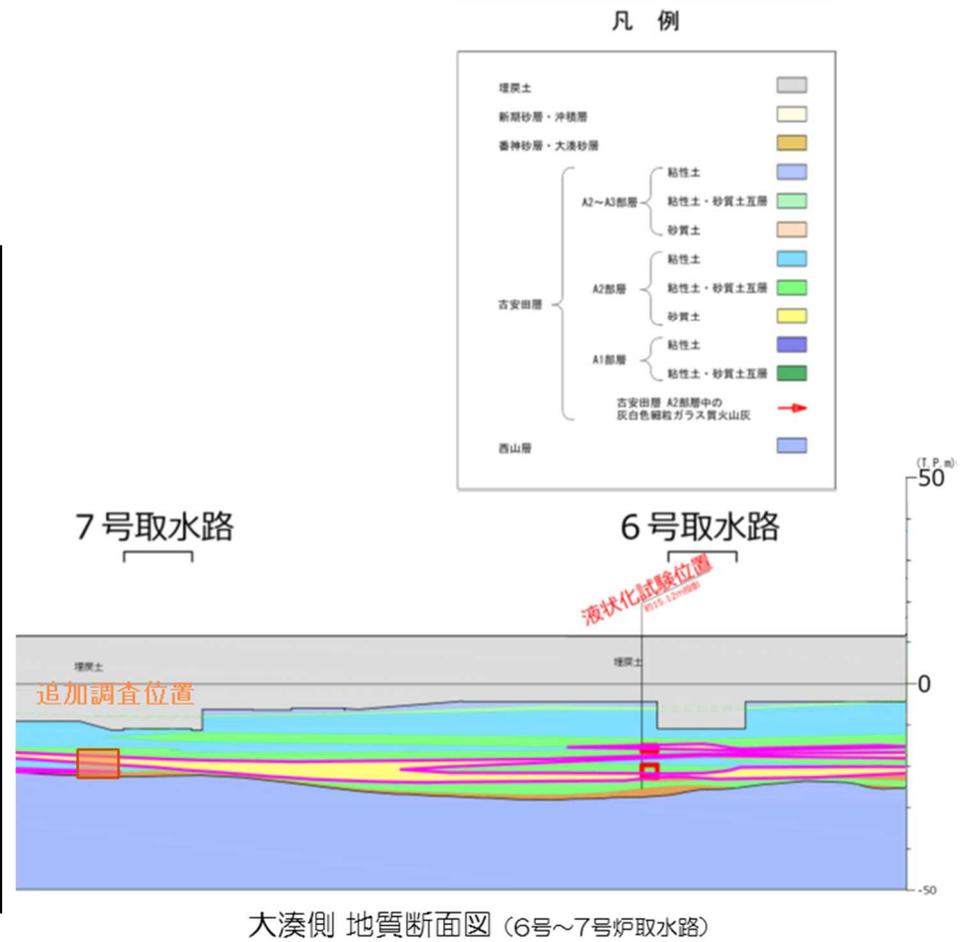
埋戻土層については、液状化試験を実施した A-1 地点の N 値が周辺調査箇所 に比べて小さく下限付近であることから、試験は保守的な箇所で実施している評価した。ただし、大湊側での N 値のデータが少ないことから、大湊側の埋戻土層の液状化強度を確認することを目的とした追加調査を実施する。追加調査位置は、事前調査を実施し、埋戻土層から試料が確実に採取できる場所を選定する。



(a) 荒浜側：A-1 地点の洪積砂層 I, II および A-2 地点の洪積砂層 I  
 第 11-3-15 図 追加調査実施予定地



大湊側 調査位置図

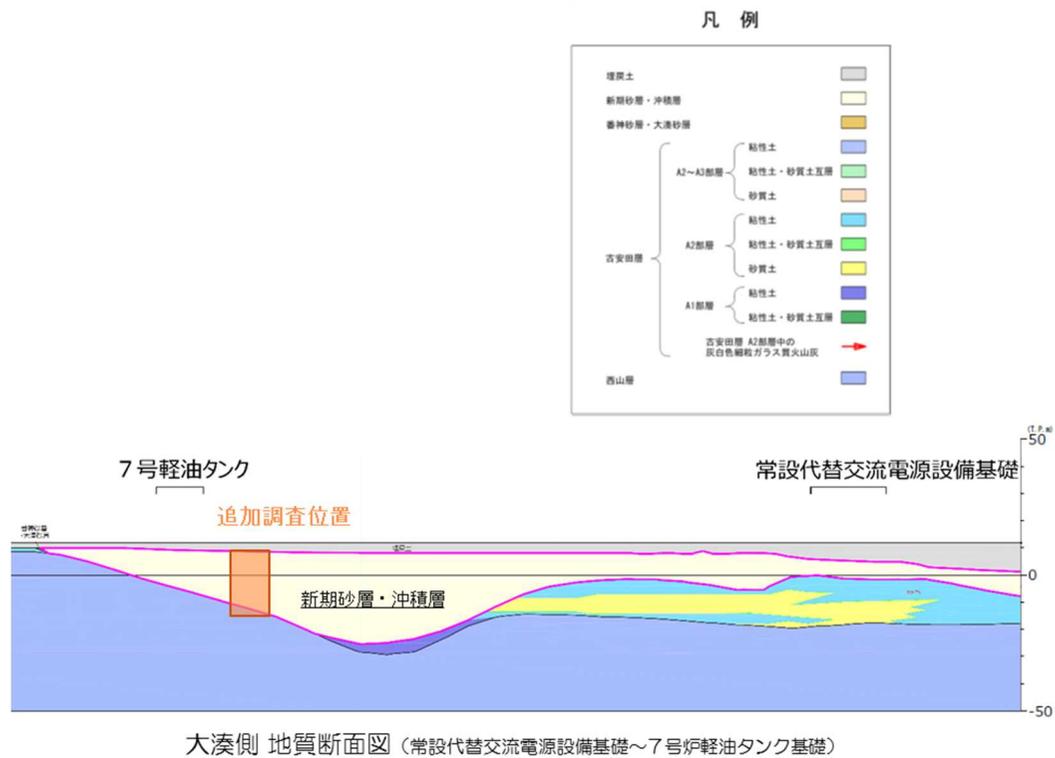


(b) 大湊側：O-1地点の洪積砂質土層 I，II および大湊側の埋戻土層

第 11-3-15 図 追加調査実施予定地



大湊側 調査位置図



(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などが用いられる。（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。

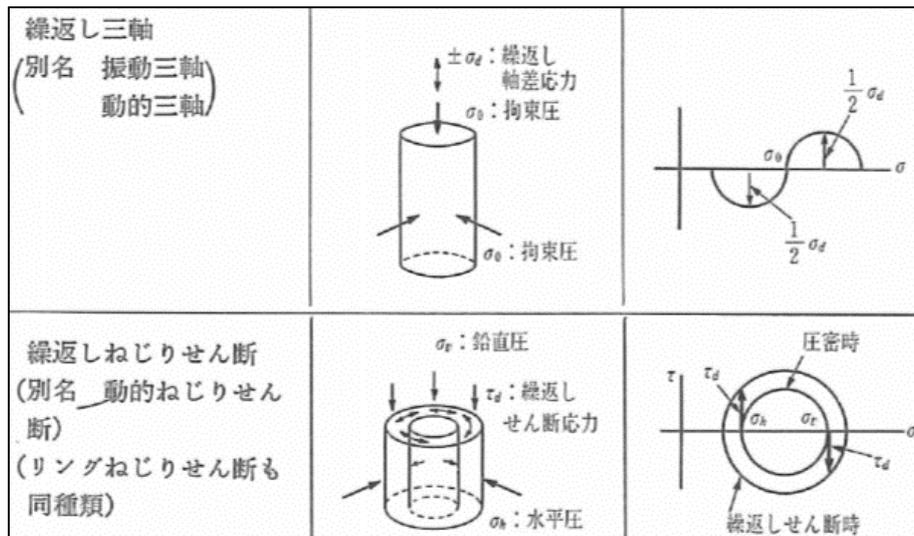
三軸試験に代表される間接型せん断試験と比較して、ねじりせん断試験は比較的広範囲な応力経路またはひずみ経路を供試体に与えられる。（地盤工学会，2009） 三軸試験では圧縮側と引張側で挙動が異なり、応力経路は上下では対称ではないし、ひずみの発生量も異なる。これに対してねじり試験では応力-ひずみ関係、応力経路ともほぼ対称な形をしている。（土木学会，2003：第 11-4-2 図）

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。

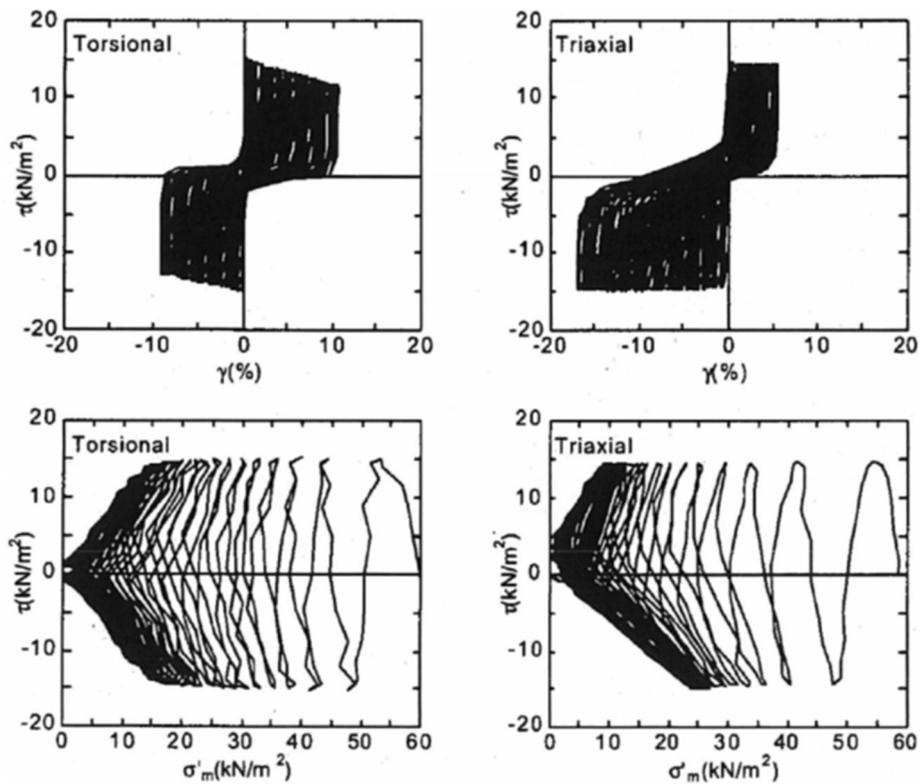
実施した中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要を第 11-4-3 図に、試料採取に用いた凍結サンプリングの概要を第 11-4-4 図に示す。

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)

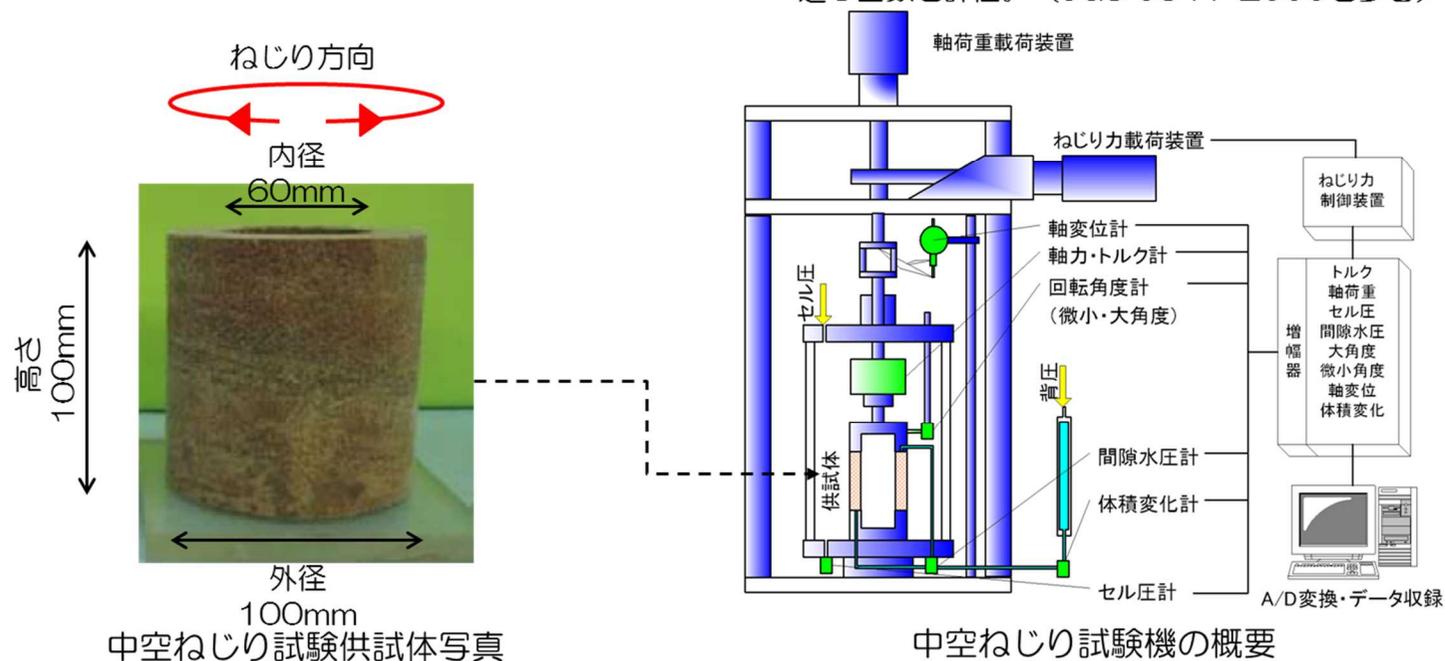
【試験の概要】

- 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】

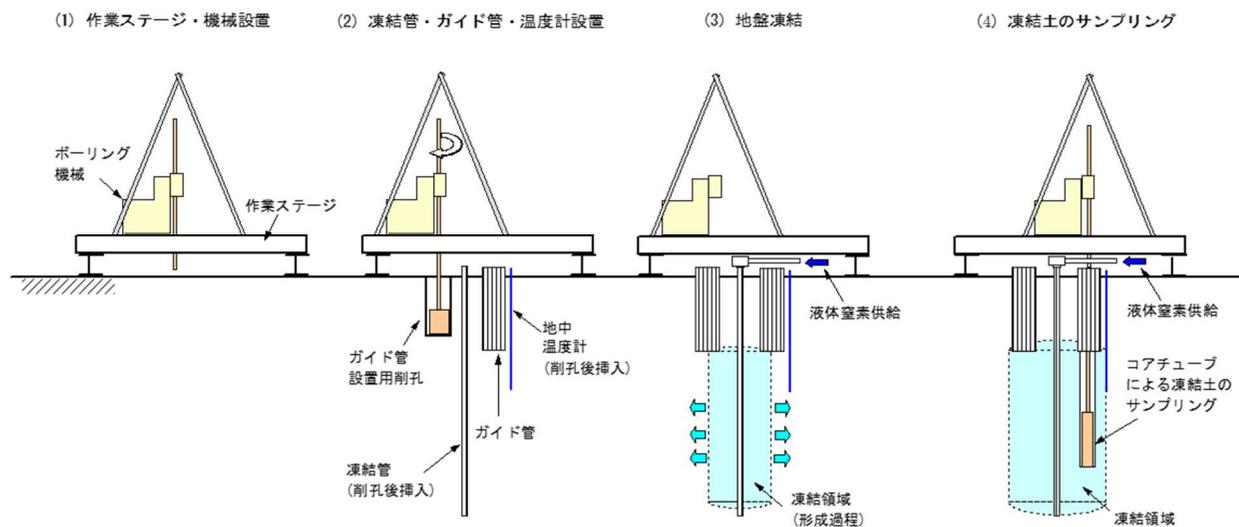
- 供試体寸法：外径100mm（内径60mm），高さ100mm（一部供試体は，外径70mm（内径30mm），高さ100mm）
- 载荷波形：正弦波（0.1Hz）
- 拘束圧：供試体平均深度の有効土被り圧を考慮して設定

- 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）

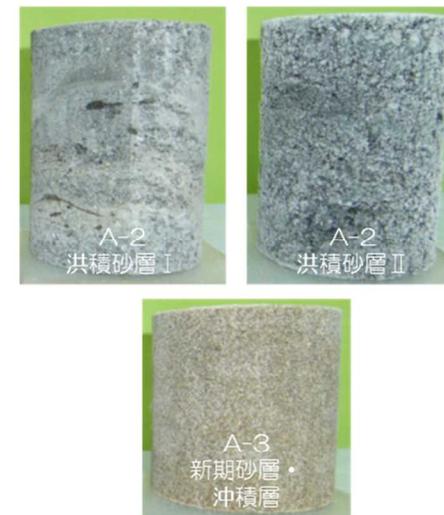


第 11-4-3 図 中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験の概要

- 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，地盤の液状化およ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図に地盤の液状化およびそれに関連する事象の概念図，第11-4-6図に地盤の強度とダイレイタンスー特性の概要を示す。

##### 【液状化】

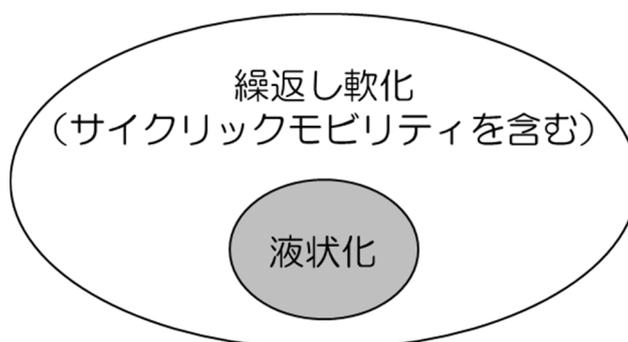
地震の繰返しせん断力などによって，飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内での間隙水圧が上昇・蓄積し，有効応力がゼロまで低下し液体状となり，その後地盤の流動を伴う現象。

##### 【サイクリックモビリティ】

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

##### 【繰返し軟化】

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

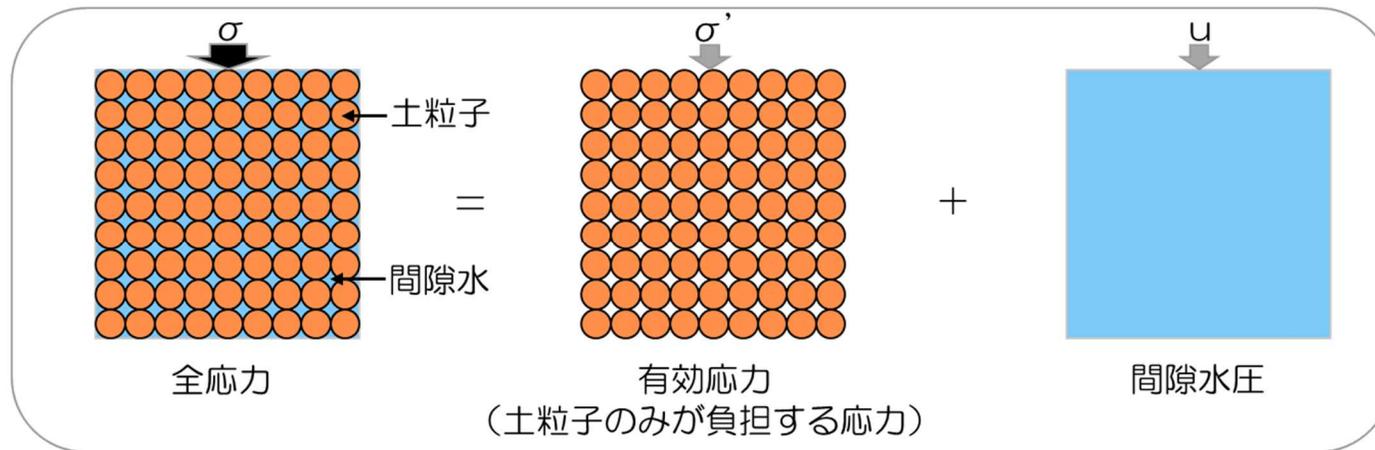


第11-4-5図 地盤の液状化およびそれに関連する事象の概念図

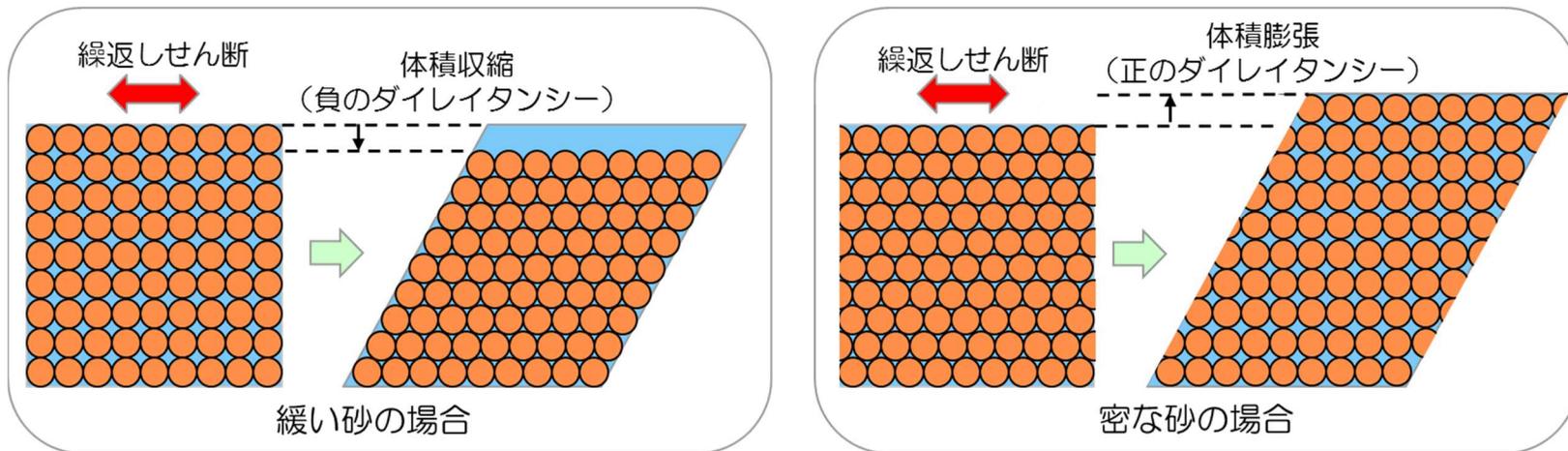
これらの事象のうちサイクリックモビリティは、その現象の違いから一般的に液状化とは区別されている。以下に既往文献におけるサイクリックモビリティの記述を示す。また、第 11-4-7 図および第 11-4-8 図に緩い砂と密な砂の液状化試験結果の比較を示し、液状化とサイクリックモビリティの違いを整理した。

- 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」および「非液状化」の3つに大別することとした。

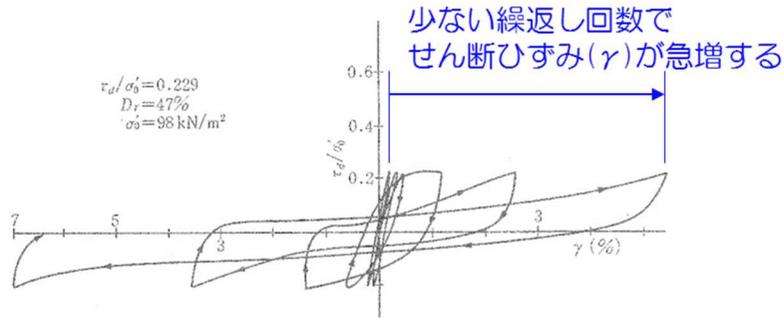


地盤の強度の概要

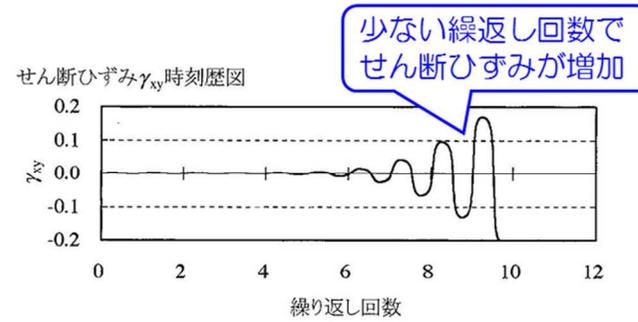


第 11-4-6 図 地盤の強度とダイレイタンス特性の概要

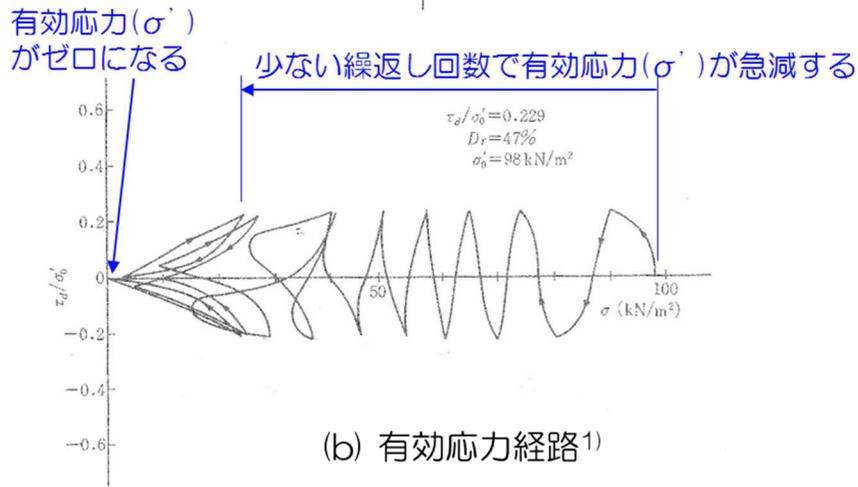
【液状化試験のイメージ (1)】



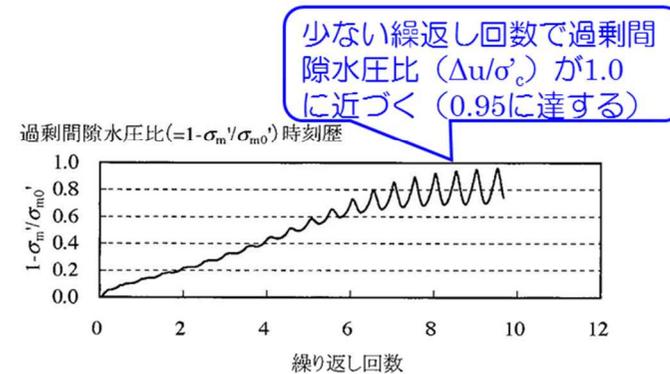
(a) せん断応力-せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>



(c) せん断ひずみ<sup>2)</sup>



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>



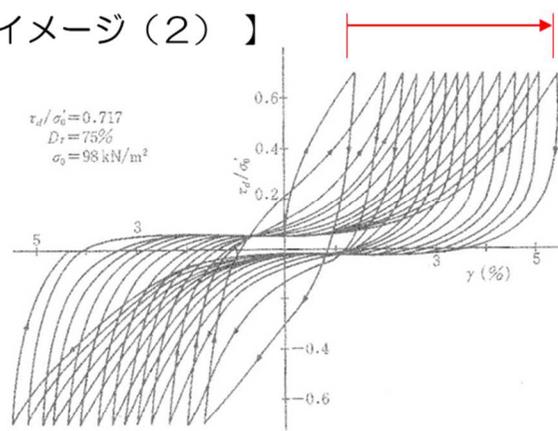
(d) 過剰間隙水圧比<sup>2)</sup>

液状化試験の例 (液状化する場合)

1) 永瀬英生：多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性，東京大学博士論文，1984  
 2) 井合進，飛田哲男，小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係，京都大学防災研究所年報，第51号，pp.291-304，2008.

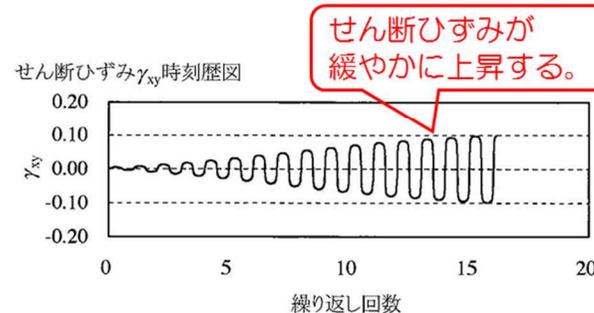
第 11-4-7 図 緩い砂の液状化試験結果

【液状化試験のイメージ (2)】

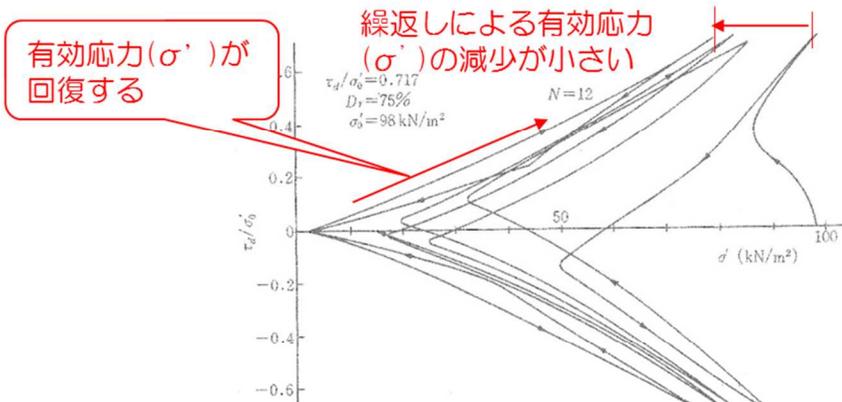


(a) せん断応力-せん断ひずみ関係<sup>1)</sup>

せん断ひずみ( $\gamma$ )が増加する  
のに繰返し回数を多く要する



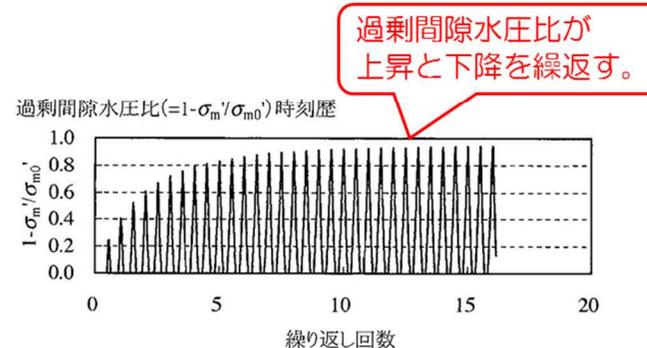
(c) せん断ひずみ<sup>2)</sup>



(b) 有効応力経路<sup>1)</sup>

繰返しによる有効応力  
( $\sigma'$ )の減少が小さい

有効応力( $\sigma'$ )が  
回復する



(d) 過剰間隙水圧比<sup>2)</sup>

液状化試験の例 (サイクリックモビリティの場合)

1) 永瀬英生: 多方向の不規則荷重を受ける砂の変形強度特性, 東京大学博士論文, 1984  
2) 井合進, 飛田哲男, 小堤治: 砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係, 京都大学防災研究所年報, 第51号, pp.291-304, 2008.

第 11-4-8 図 密な砂の液状化試験結果

#### 4.3 試験結果の分類

第 11-4-1～8 表に各土層の液状化試験結果を，第 11-4-9～16 図に各土層の液状化試験結果の例を，第 11-4-9 表に液状化試験結果のまとめを，第 11-4-17 図に液状化試験後の供試体状況を示す。

A-1 地点の埋戻土層の液状化試験結果は，過剰間隙水圧比が 1.0 に近づき (0.95 を上回り)，有効応力がゼロとなる。また，その繰り返しせん断を受けても，有効応力の回復はみられず，せん断ひずみが急激に上昇する。これらの状況から，この試験結果は液状化していると判断した。

A-3 地点の新期砂層・沖積層および A-1 地点の洪積砂層 I・II の液状化試験結果は，過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰り返し，上昇時に 1.0 に近づく (0.95 を上回る)。これに伴って，有効応力は減少するが，繰り返しせん断を受けることで回復する。また，せん断ひずみは緩やかに上昇する。これらの状況から，この試験結果はサイクリックモビリティであると判断した。

A-2 地点の洪積砂層 I・II および 0-1 地点の洪積砂質土層 I・II の液状化試験結果は，過剰間隙水圧比が 0.95 を上回ることがなく，試験実施の間，有効応力を保持している。また，せん断ひずみが緩やかに上昇し，試験終了直前で急激にせん断ひずみが増大する傾向である。A-2 地点の洪積砂層 I・II の液状化試験後の供試体状況をみると，明確なせん断破壊が確認され，このせん断ひずみの増大はせん断破壊によって発生したものと考えられる。これらの状況から，この試験結果は非液状化であると判断した。

これらの区分を整理して，第 11-4-10 表に示す。

埋戻土層以外の土層は，比較的 N 値が高く，液状化試験結果はサイクリックモビリティあるいは非液状化を示している。このことは，道路橋示方書において，一般に N 値が高く，続成作用を受けている洪積層などは，液状化に対する抵抗が高いため，一般には液状化の可能性は低いという記載に整合する。

埋戻土層については試験結果が液状化を示していることから道路橋示方書の液状化判定法 (FL 法) を実施し，基準地震動  $S_s$  作用時の液状化の有無を判定する。埋戻土層以外の土層については液状化を示さず，道路橋示方書の液状化判定方法が適用出来ないと考えられることから，液状化試験が基準地震動  $S_s$  相当の地盤の状態を模擬していることを確認する。

第 11-4-1 表 液状化試験結果 (A-1 地点の埋戻土層)

| 試料番号                                  |                          | #1-0-1              |      |      |      | #1-0-2      |            |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|------|------|------|-------------|------------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                          | 3.50~4.50           |      |      |      | 4.50~5.50   |            |      |      |     |
| 土質材料                                  |                          | 埋戻土層                |      |      |      | 埋戻土層        |            |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                          | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1           | 2          | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                          | 2.710               |      |      |      | 2.720       |            |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                          | 50                  |      |      |      | 100         |            |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_c$             |                          | 0.25                | 0.30 | 0.20 | 0.35 | <u>0.26</u> | 0.21       | 0.24 | 0.29 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅            | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 7.5  | 5.5  | 103  | 3.5         | <u>4.5</u> | 54   | 29   | 5.5 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 8.5  | 7    | 106  | 5           | <u>5</u>   | 56   | 32   | 6.5 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 10   | 9    | 111  | 7.5         | <u>6</u>   | 59   | 36   | 8   |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 16   | 15   | 119  | 27          | <u>8</u>   | 64   | 46   | 12  |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=15\%$  | 21   | 23   | 127  | 109         | <u>10</u>  | 68   | 54   | 15  |
|                                       | 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{U95}$ | 15                  | 16   | 116  | 35   | <u>9</u>    | 64         | 45   | 14   |     |

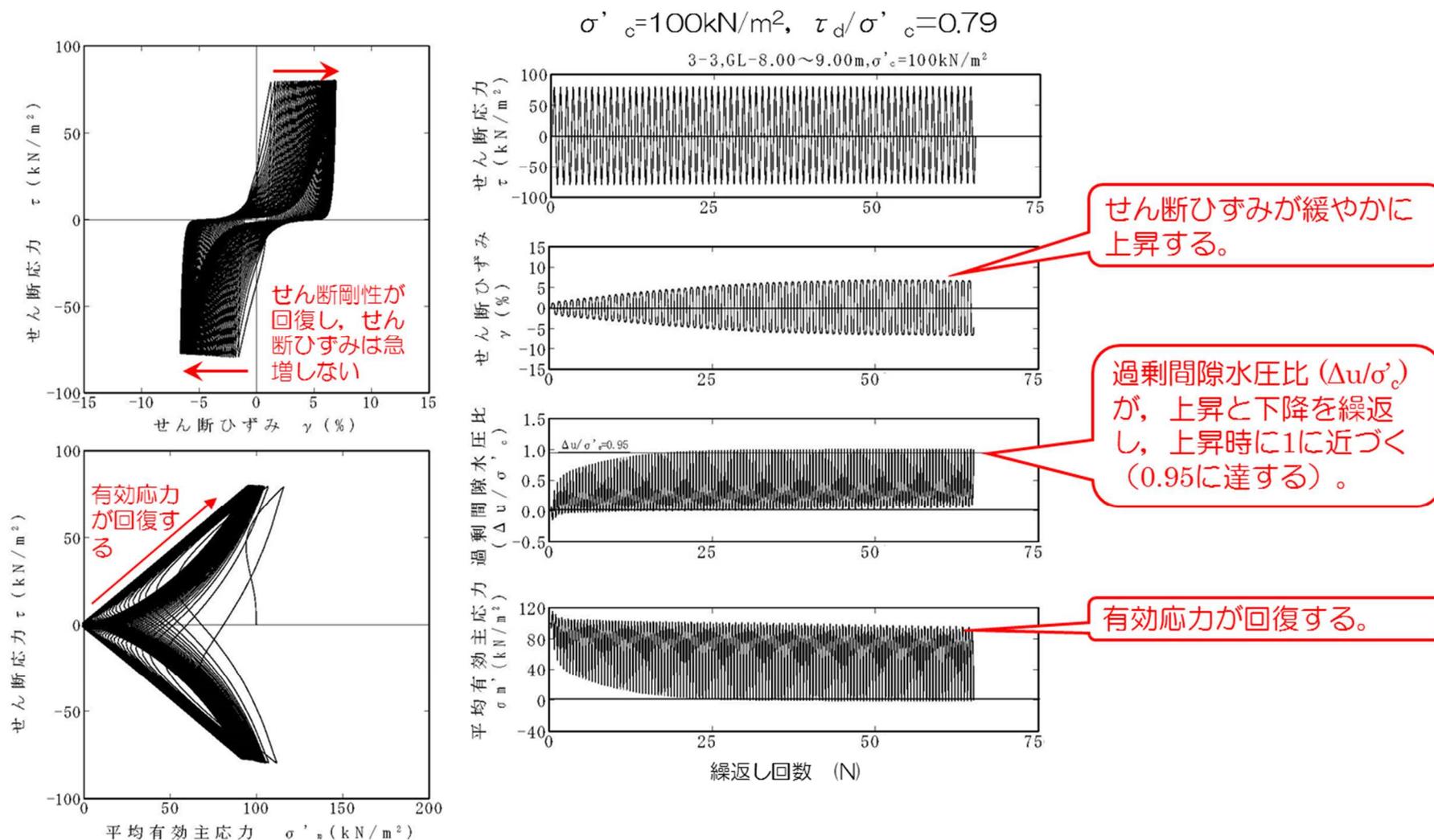
     : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



第 11-4-2 表 液状化試験結果 (A-1 地点の洪積砂層 I)

| 試料番号                                  |                                    | #1-1-1              |      |             |            | #1-1-2      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------|------|-------------|------------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                                    | 8.00~9.00           |      |             |            | 10.00~11.00 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                                    | 洪積砂層 I              |      |             |            | 洪積砂層 I      |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                                    | 1                   | 2    | <u>3</u>    | 4          | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                                    | 2.739               |      |             |            | 2.732       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                                    | 100                 |      |             |            | 150         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                                    | 0.47                | 0.59 | <u>0.79</u> | 0.97       | 0.48        | 0.61 | 0.44 | 0.39 |     |
| 繰返回数                                  | せん断 <sup>両</sup> 振幅 <sup>ひすみ</sup> | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 4    | 0.9         | <u>0.5</u> | 0.3         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 3   |
|                                       |                                    | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 6.5  | 2           | <u>0.7</u> | 0.5         | 2.5  | 0.6  | 1.5  | 5   |
|                                       |                                    | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 14   | 6.5         | <u>1</u>   | 0.7         | 5    | 0.9  | 4    | 8.5 |
|                                       |                                    | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 48   | 32          | <u>14</u>  | 9           | 18   | 7.5  | 17   | 25  |
|                                       |                                    | $\gamma_{DA}=15\%$  | 102  | 96          | —          | 41          | 53   | 23   | 41   | 48  |
| 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{U95}$              |                                    | 40                  | 31   | <u>18</u>   | 19         | 21          | 15   | 22   | 25   |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
下線 : 次ページに例示する試験結果

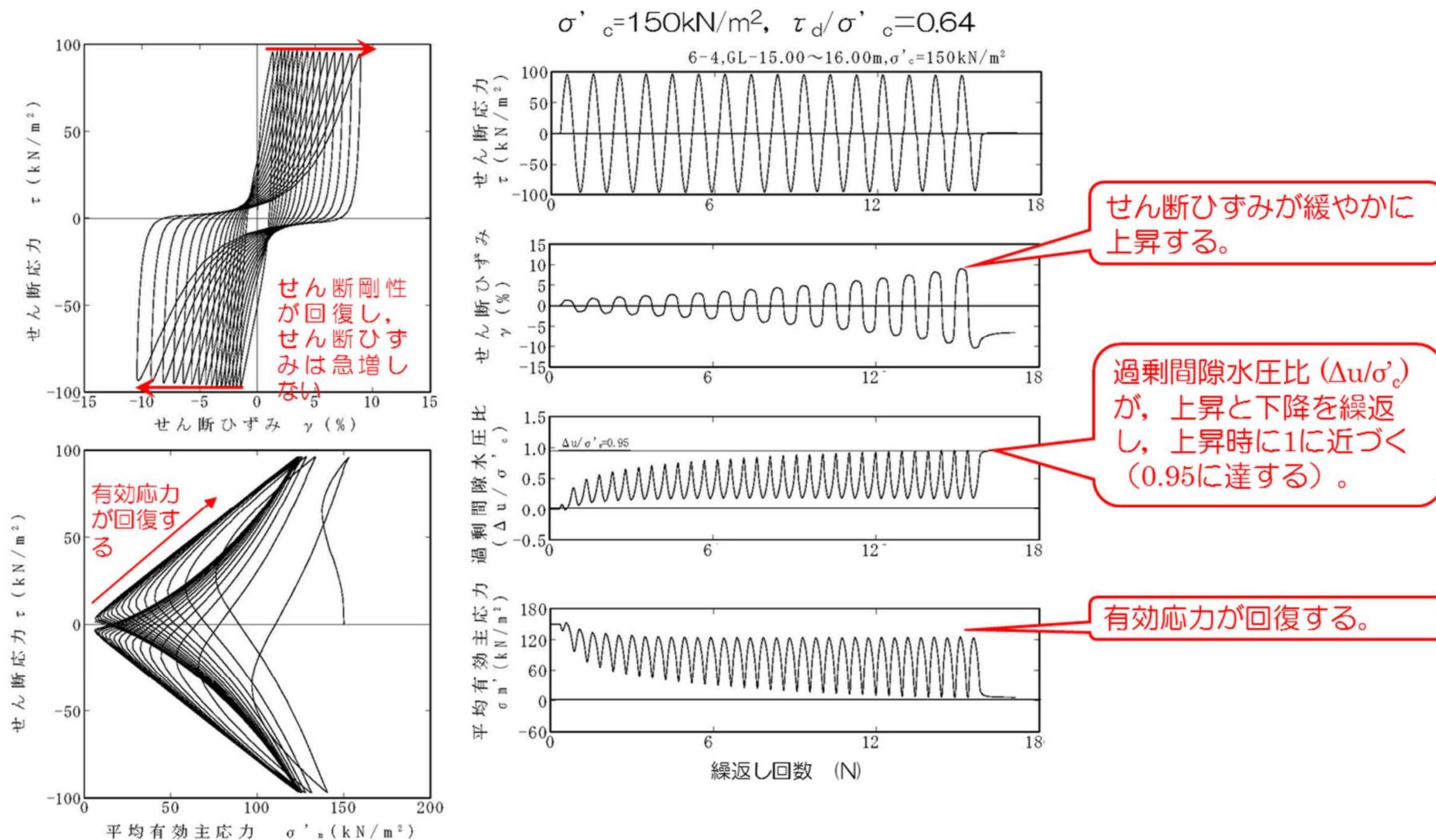


第 11-4-10 図 液状化試験結果の例 (A-1 地点の洪積砂層 I)

第 11-4-3 表 液状化試験結果 (A-1 地点の洪積砂層 II)

| 試料番号                                  |                          | #1-2-1              |      |      |      | <u>#1-2-2</u>      |      |      |             | #1-2-3      |      |      |      | #1-2-4      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|------|------|------|--------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                          | 13.00~14.00         |      |      |      | <u>15.00~16.00</u> |      |      |             | 17.00~18.00 |      |      |      | 20.00~21.00 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                          | 洪積砂層 II             |      |      |      | 洪積砂層 II            |      |      |             | 洪積砂層 II     |      |      |      | 洪積砂層 II     |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                          | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | 3    | <u>4</u>    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                          | 2.714               |      |      |      | <u>2.688</u>       |      |      |             | 2.684       |      |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                          | 150                 |      |      |      | <u>150</u>         |      |      |             | 200         |      |      |      | 200         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                          | 0.51                | 0.41 | 0.46 | 0.36 | 0.39               | 0.45 | 0.50 | <u>0.64</u> | 0.40        | 0.35 | 0.48 | 0.38 | 0.40        | 0.46 | 0.50 | 0.62 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅            | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 0.4  | 0.8  | 1    | 10                 | 2    | 1.5  | 0.8         | <u>0.5</u>  | 2    | 4.5  | 0.6  | 7           | 2    | 0.9  | 0.8  | 0.6 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 0.6  | 1    | 2    | 11                 | 2.5  | 3.5  | 1           | <u>0.7</u>  | 3.5  | 7.5  | 0.8  | 12          | 3.5  | 1.5  | 1.5  | 0.7 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 0.9  | 4    | 2.5  | 20                 | 6    | 7    | 4           | <u>1</u>    | 6.5  | 14   | 2    | 20          | 7    | 4.5  | 5    | 1.5 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 7    | 30   | 17   | 65                 | 26   | 20   | 18          | <u>7</u>    | 15   | 30   | 7    | 39          | 27   | 16   | 19   | 9   |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=15\%$  | 16   | 56   | 32   | 102                | 48   | 37   | 33          | <u>13</u>   | 22   | 43   | 13   | 56          | 52   | 25   | 31   | 18  |
|                                       | 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{U95}$ |                     | 16   | 40   | 22   | 61                 | 31   | 27   | 24          | <u>14</u>   | 19   | 33   | 13   | 42          | 31   | 22   | 30   | -   |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果

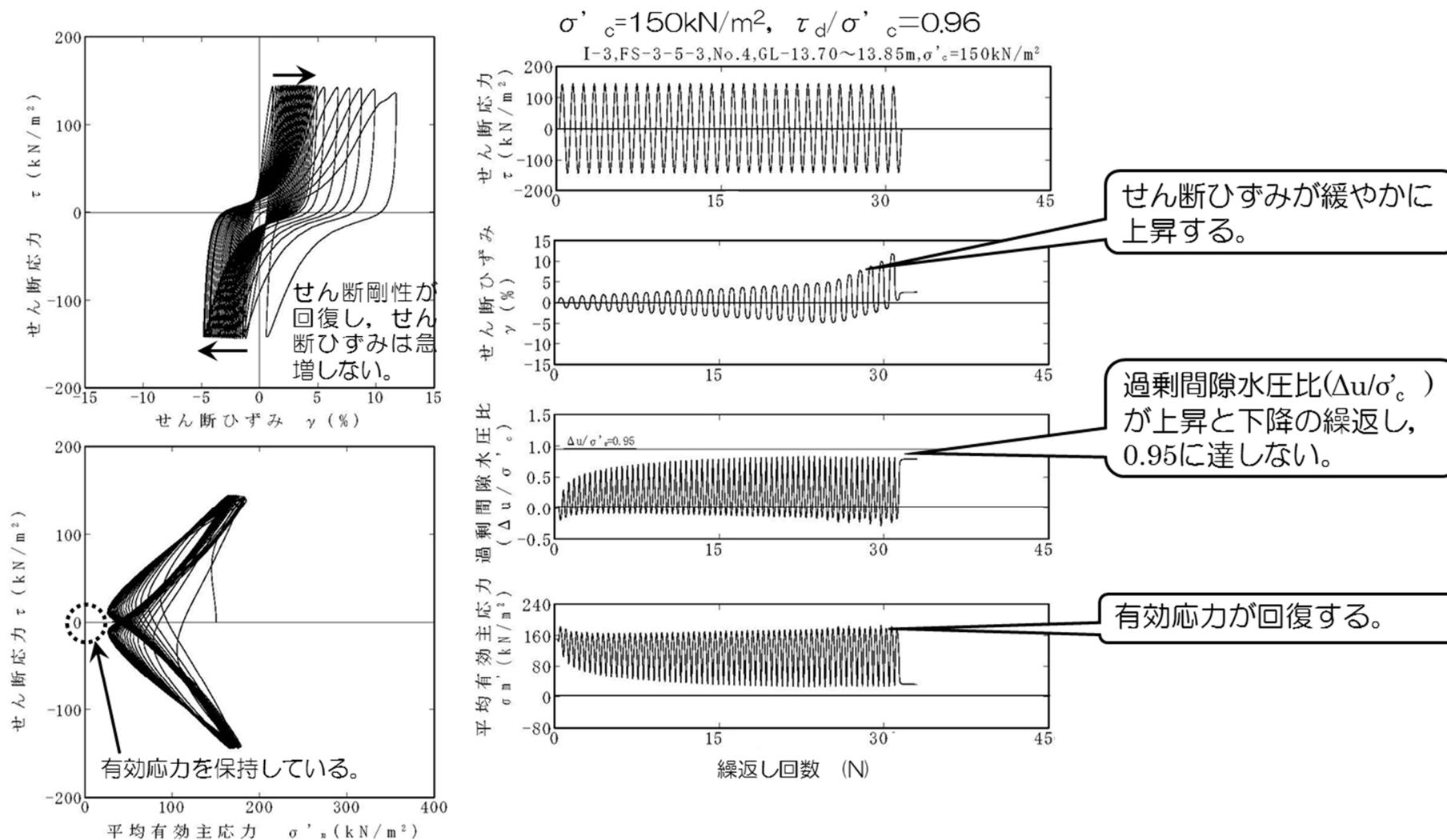


第 11-4-11 図 液状化試験結果の例 (A-1 地点の洪積砂層 II)

第 11-4-4 表 液状化試験結果 (A-2 地点の洪積砂層 I)

| 試料番号                                  |              | #4-1-1         |      |      |      | #4-1-2      |      |      |      | #4-1-3             |      |      |             |            |
|---------------------------------------|--------------|----------------|------|------|------|-------------|------|------|------|--------------------|------|------|-------------|------------|
| 深度 G.L.- (m)                          |              | 13.20~14.14    |      |      |      | 13.36~13.99 |      |      |      | <u>13.21~13.85</u> |      |      |             |            |
| 土質材料                                  |              | 洪積砂層 I         |      |      |      | 洪積砂層 I      |      |      |      | 洪積砂層 I             |      |      |             |            |
| 供試体 No.                               |              | 1              | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | 3    | 4           |            |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |              | 2.665          |      |      |      | 2.656       |      |      |      | <u>2.754</u>       |      |      |             |            |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |              | 150            |      |      |      | 150         |      |      |      | <u>150</u>         |      |      |             |            |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |              | 0.60           | 0.43 | 0.92 | 1.18 | 0.79        | 1.03 | 1.20 | 0.61 | 1.01               | 0.71 | 0.81 | <u>0.96</u> |            |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 10   | 5    | 0.7  | 0.4         | 0.9  | 0.5  | 0.4  | 9                  | 0.5  | 0.9  | 0.6         | <u>0.6</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=2.0\%$ | 23   | 9    | 1    | 0.5         | 3    | 0.6  | 0.6  | 18                 | 0.7  | 2    | 0.8         | <u>0.9</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=3.0\%$ | 44   | 21   | 4    | 0.7         | 13   | 0.9  | 0.9  | 37                 | 1    | 8    | 2           | <u>2.5</u> |
|                                       |              | $r_{DA}=7.5\%$ | 60   | 56   | 23   | 5           | 51   | 4.5  | 6.5  | 91                 | 5    | 43   | 17          | <u>18</u>  |
|                                       |              | $r_{DA}=15\%$  | 71   | 62   | 35   | -           | 63   | 7    | 9    | -                  | 7    | -    | 29          | -          |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |              | -              | -    | -    | -    | -           | -    | -    | -    | -                  | -    | -    | -           |            |

下線：次ページに例示する試験結果

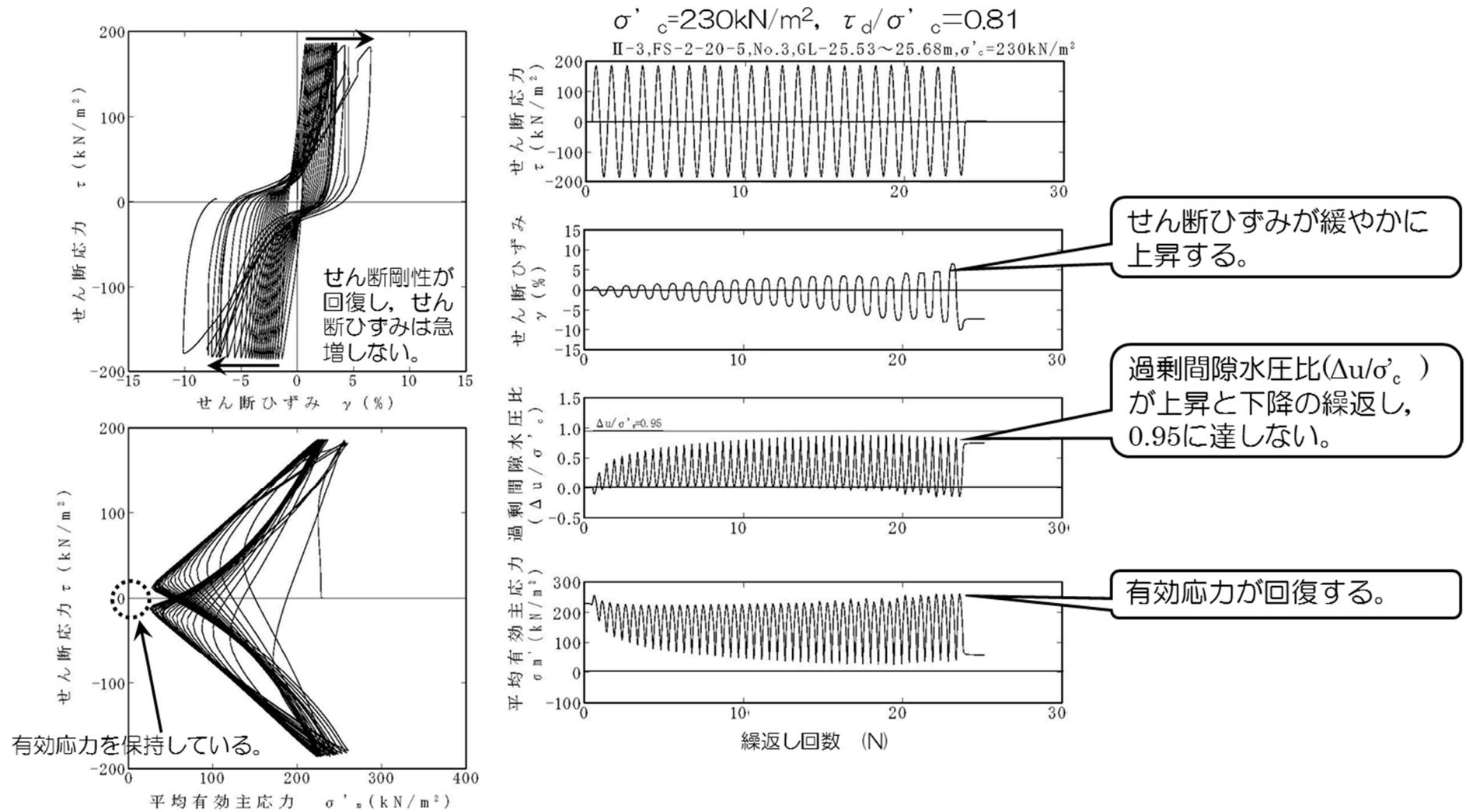


第 11-4-12 図 液状化試験結果の例 (A-2 地点の洪積砂層 I)

第 11-4-5 表 液状化試験結果 (A-2 地点の洪積砂層Ⅱ)

| 試料番号                                  |               | #4-2-1              |      |      |      | #4-2-2      |      |      |      | #4-2-3             |      |             |            |     |
|---------------------------------------|---------------|---------------------|------|------|------|-------------|------|------|------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |               | 20.20~21.96         |      |      |      | 21.96~22.62 |      |      |      | <u>25.15~26.23</u> |      |             |            |     |
| 土質材料                                  |               | 洪積砂層Ⅱ               |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ       |      |      |      | 洪積砂層Ⅱ              |      |             |            |     |
| 供試体 No.                               |               | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | 3           | 4          |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |               | 2.680               |      |      |      | 2.679       |      |      |      | <u>2.721</u>       |      |             |            |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |               | 230                 |      |      |      | 230         |      |      |      | <u>230</u>         |      |             |            |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |               | 0.42                | 0.80 | 0.63 | 0.36 | 0.57        | 0.66 | 0.80 | 0.70 | 0.71               | 0.86 | <u>0.81</u> | 0.76       |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>両振幅 | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 1.5  | 0.3  | 0.8  | 200         | 2.5  | 0.9  | 0.3  | 0.3                | 2    | 0.8         | <u>0.7</u> | 0.9 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 3.5  | 0.4  | 1.5  | -           | 6    | 2    | 0.5  | 0.4                | 5.5  | 1.5         | <u>1</u>   | 2.5 |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 7    | 0.7  | 3.5  | -           | 14   | 5.5  | 0.7  | 0.6                | 17   | 4.5         | <u>3</u>   | 6   |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 20   | 3    | 15   | -           | 46   | 22   | 3.5  | 2                  | 74   | 17          | <u>14</u>  | 22  |
|                                       |               | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | 7.5  | -    | -           | 78   | -    | 6.5  | 4.5                | 110  | -           | <u>24</u>  | 36  |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |               | -                   | -    | -    | -    | 61          | -    | -    | -    | 87                 | -    | -           | -          |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果

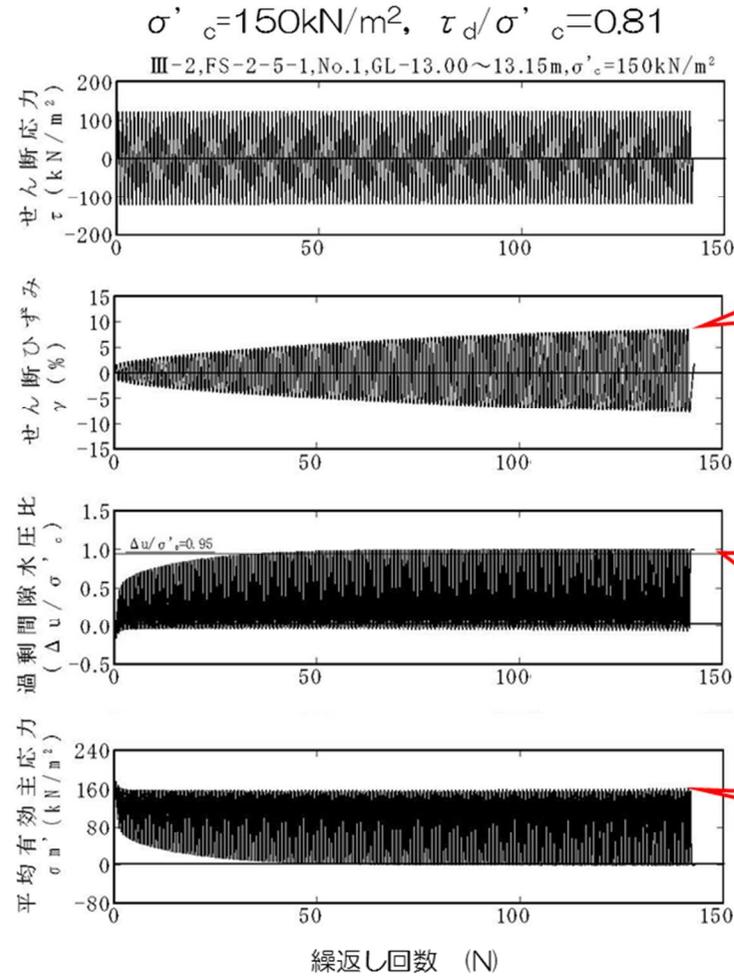
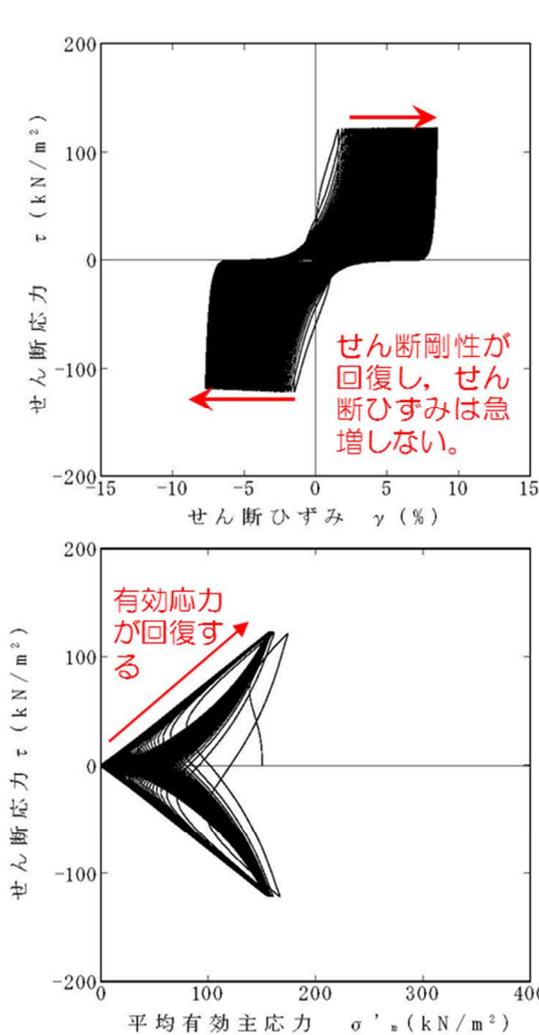


第 11-4-13 図 液状化試験結果の例 (A-2 地点の洪積砂層 II)

第 11-4-6 表 液状化試験結果 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)

| 試料番号                                  |              | #4-3-1         |      |      |      | <u>#4-3-2</u>      |            |      |      | #4-3-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------|----------------|------|------|------|--------------------|------------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |              | 13.04~13.51    |      |      |      | <u>13.00~13.68</u> |            |      |      | 14.96~15.43 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |              | 新期砂層・沖積層       |      |      |      | 新期砂層・沖積層           |            |      |      | 新期砂層・沖積層    |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |              | 1              | 2    | 3    | 4    | <u>1</u>           | 2          | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |              | 2.719          |      |      |      | <u>2.780</u>       |            |      |      | 2.685       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> ) |              | 150            |      |      |      | <u>150</u>         |            |      |      | 150         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma'_c$             |              | 0.81           | 0.70 | 0.62 | 0.49 | <u>0.81</u>        | 0.91       | 0.72 | 0.54 | 0.60        | 0.81 | 0.70 | 1.02 |     |
| 繰返し回数                                 | せん断ひずみ<br>振幅 | $r_{DA}=1.5\%$ | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 2                  | <u>0.5</u> | 0.3  | 0.6  | 0.9         | 0.8  | 0.3  | 0.7  | 0.3 |
|                                       |              | $r_{DA}=2.0\%$ | 0.6  | 0.8  | 0.9  | 3.5                | <u>0.7</u> | 0.4  | 0.8  | 1.5         | 1.5  | 0.5  | 0.9  | 0.4 |
|                                       |              | $r_{DA}=3.0\%$ | 0.9  | 2    | 2    | 8.5                | <u>1</u>   | 0.6  | 2    | 4           | 5    | 0.7  | 3    | 0.5 |
|                                       |              | $r_{DA}=7.5\%$ | 15   | 19   | 18   | 50                 | <u>24</u>  | 9    | 24   | 21          | 32   | 9    | 22   | 8   |
|                                       |              | $r_{DA}=15\%$  | 76   | 96   | 53   | 146                | <u>112</u> | 91   | 77   | 65          | 94   | 43   | 60   | 77  |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{U95}$                 |              | 28             | 28   | 30   | 40   | <u>38</u>          | 44         | 34   | 24   | 38          | 25   | 28   | 39   |     |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



せん断ひずみが緩やかに上昇する。

過剰間隙水圧比 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) が、上昇と下降を繰り返し、上昇時に1に近づく (0.95に達する)。

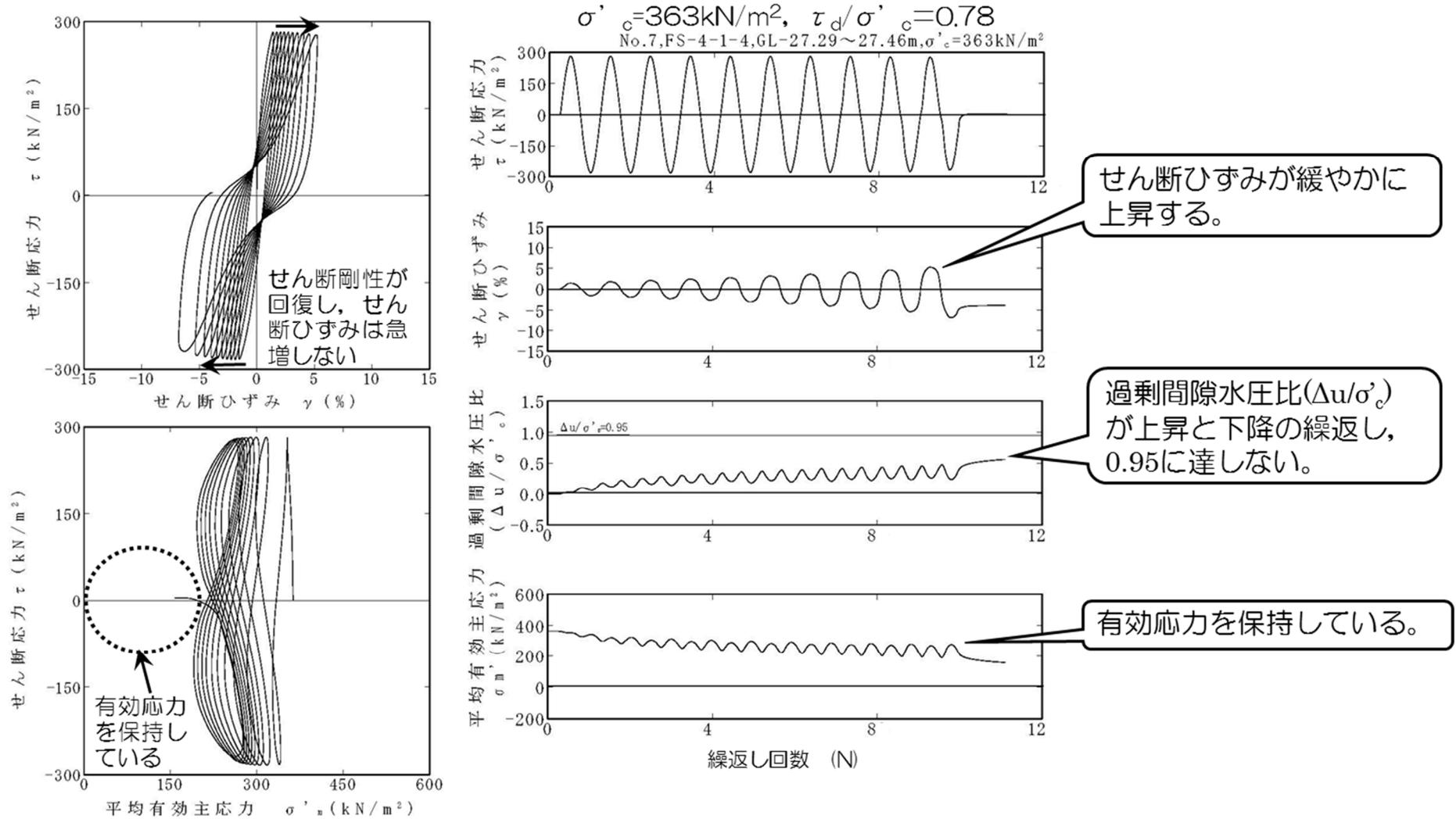
有効応力が回復する。

第 11-4-14 図 液状化試験結果の例 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)

第 11-4-7 表 液状化試験結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)

| 試料番号                                  |              | #6-1-1              |      |      |      | #6-1-2             |      |             |            | #6-1-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------|---------------------|------|------|------|--------------------|------|-------------|------------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |              | 27.68~28.16         |      |      |      | <u>26.95~27.63</u> |      |             |            | 26.88~27.48 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |              | 洪積砂質土層 I            |      |      |      | 洪積砂質土層 I           |      |             |            | 洪積砂質土層 I    |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |              | 1                   | 2    | 3    | 4    | 1                  | 2    | <u>3</u>    | 4          | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |              | 2.649               |      |      |      | <u>2.677</u>       |      |             |            | 2.669       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |              | 363                 |      |      |      | <u>363</u>         |      |             |            | 363         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |              | 0.51                | 0.60 | 0.78 | 0.64 | 0.51               | 0.61 | <u>0.78</u> | 0.68       | 0.51        | 0.46 | 0.35 | 0.64 |     |
| 繰返し回数                                 | せん断ひずみ<br>振幅 | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 8.5  | 0.9  | 0.5  | 0.7                | 0.9  | 0.7         | <u>0.5</u> | 0.5         | 0.5  | 42   | 200> | 0.9 |
|                                       |              | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 18   | 5.5  | 0.7  | 0.9                | 6    | 1           | <u>0.7</u> | 0.7         | 0.7  | 200> | -    | 3.5 |
|                                       |              | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 30   | 26   | 1.5  | 2                  | 35   | 12          | <u>1</u>   | 1           | 1    | -    | -    | 15  |
|                                       |              | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 54   | 71   | 5    | 7                  | 121  | 46          | <u>7</u>   | 6           | 8.5  | -    | -    | 45  |
|                                       |              | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | -    | -    | -                  | 127  | 53          | -          | -           | 12   | -    | -    | -   |
| 過剰間隙水圧比 95% $N_{u95}$                 |              | -                   | -    | -    | -    | -                  | -    | -           | -          | -           | -    | -    | -    |     |

: 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線: 次ページに例示する試験結果

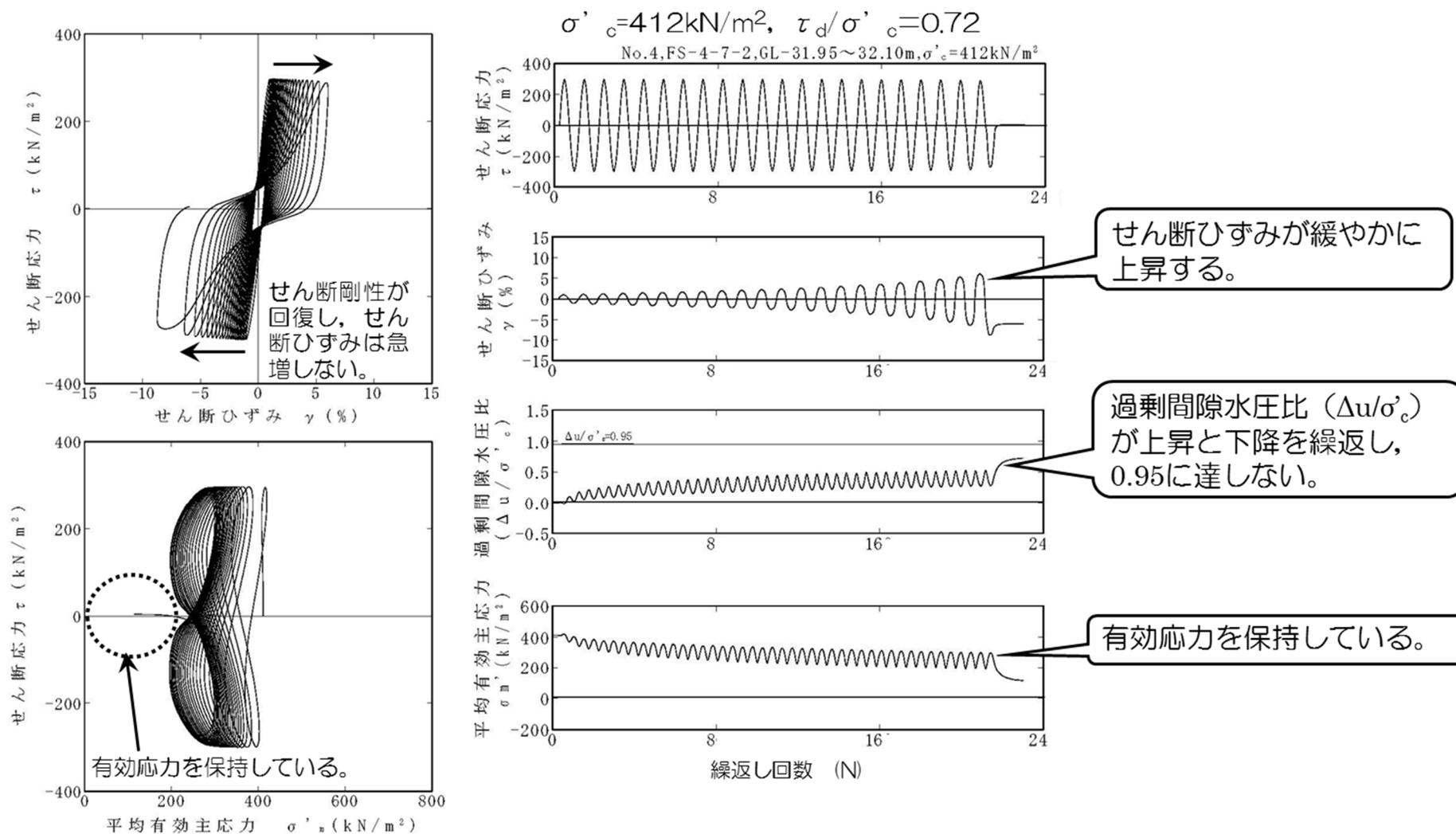


第 11-4-15 図 液状化試験結果の例 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)

第 11-4-8 表 液状化試験結果 (O-1 地点の洪積砂質土層Ⅱ)

| 試料番号                                  |                          | #6-2-1              |      |      |             | #6-2-2      |      |      |      | #6-2-3      |      |      |      |     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|------|------|-------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------|------|-----|
| 深度 G.L.- (m)                          |                          | 31.65~34.75         |      |      |             | 32.10~32.95 |      |      |      | 32.95~33.55 |      |      |      |     |
| 土質材料                                  |                          | 洪積砂質土層Ⅱ             |      |      |             | 洪積砂質土層Ⅱ     |      |      |      | 洪積砂質土層Ⅱ     |      |      |      |     |
| 供試体 No.                               |                          | 1                   | 2    | 3    | <u>4</u>    | 1           | 2    | 3    | 4    | 1           | 2    | 3    | 4    |     |
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )  |                          | 2.664               |      |      |             | 2.646       |      |      |      | 2.672       |      |      |      |     |
| 圧密圧力 $\sigma_c'$ (kN/m <sup>2</sup> ) |                          | 412                 |      |      |             | 412         |      |      |      | 412         |      |      |      |     |
| せん断応力比 $\tau_d/\sigma_c'$             |                          | 0.59                | 0.52 | 0.79 | <u>0.72</u> | 0.51        | 0.58 | 0.69 | 0.64 | 0.57        | 0.53 | 0.70 | 0.65 |     |
| 繰返回数                                  | せん断ひずみ<br>面振幅            | $\gamma_{DA}=1.5\%$ | 1.5  | 6.5  | 0.3         | <u>0.7</u>  | 5.5  | 0.8  | 0.6  | 1           | 1    | 2    | 0.7  | 0.9 |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=2.0\%$ | 5    | 11   | 0.5         | <u>1</u>    | 24   | 1.5  | 0.9  | 5.5         | 4    | 6    | 1    | 2   |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=3.0\%$ | 13   | 19   | 1           | <u>5</u>    | 61   | 7    | 2.5  | 17          | 14   | 15   | 3.5  | 5   |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=7.5\%$ | 36   | 38   | 2           | <u>17</u>   | 111  | 25   | 8.5  | 38          | 37   | 34   | 9.5  | 16  |
|                                       |                          | $\gamma_{DA}=15\%$  | -    | -    | -           | -           | 116  | 30   | -    | -           | 43   | 43   | 11   | -   |
|                                       | 過剰間隙水圧比 95%<br>$N_{L95}$ |                     | -    | -    | -           | -           | -    | -    | -    | -           | -    | -    | -    | -   |

■ : 最大過剰間隙水圧比が1.0に近づく (0.95を越えるもの)  
 下線 : 次ページに例示する試験結果



第 11-4-16 図 液状化試験結果の例 (O-1 地点の洪積砂質土層 II)

|                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| A-1 (埋戻土層)                                                                         | A-3 (新期砂層・沖積層)                                                                      | A-1 (洪積砂層 I)                                                                         | A-1 (洪積砂層 II)                                                                        |
|   |   |   |   |
| 供試体側面にしわが確認される。                                                                    | 供試体側面にしわが確認される。                                                                     | 供試体側面にしわが確認される。                                                                      | 供試体側面に大きな変状は認められない。                                                                  |
| A-2 (洪積砂層 I)                                                                       | A-2 (洪積砂層 II)                                                                       | O-1 (洪積砂質土層 I)                                                                       | O-1 (洪積砂質土層 II)                                                                      |
|  |  |  |  |
| 供試体側面にせん断破壊による変状が認められる。                                                            | 供試体側面にせん断破壊による変状が認められる。                                                             | 供試体側面に大きな変状は認められない。                                                                  | 供試体側面に大きな変状は認められない。                                                                  |

第 11-4-17 図 液状化試験後の供試体状況

第 11-4-9 表 液状化試験結果のまとめ

|                          | A-1<br>埋戻<br>土層 | A-3<br>新期砂層<br>・沖積層 | A-1<br>洪積砂層Ⅰ    | A-1<br>洪積砂層Ⅱ    | A-2<br>洪積砂層Ⅰ    | A-2<br>洪積砂層Ⅱ    | O-1<br>洪積砂質土<br>層Ⅰ | O-2<br>洪積砂質土<br>層Ⅱ |
|--------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 形成時期                     | -               |                     |                 |                 |                 |                 |                    |                    |
|                          |                 | 沖積層                 | 洪積層             |                 |                 |                 |                    |                    |
| N値おおむね50以上               | ×               | ○                   | ○               | ×               | ×               | ○               | ○                  | ○                  |
| 平均相対密度80%以上              | ×               | ○                   | ○               | ○               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 液状化試験試料<br>採取深度 (GL m)   | -3.5~<br>-5.5   | -13.0~<br>-15.4     | -8.0~<br>-11.0  | -13.0~<br>-21.0 | -13.2~<br>-14.1 | -20.2~<br>-26.2 | -26.9~<br>-28.2    | -31.7~<br>-34.8    |
| 過剰間隙水圧比が<br>0.95※を上回らない。 | ×               | ×                   | ×               | ×               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 過剰間隙水圧比が回復<br>する。        | ×               | ○                   | ○               | ○               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| せん断破壊発生の有無               | ×               | ×                   | ×               | ×               | ○               | ○               | ○                  | ○                  |
| 現象の整理                    | 液状化             | サイクリック<br>モビリティ     | サイクリックモ<br>ビリティ | サイクリックモ<br>ビリティ | 非液状化            | 非液状化            | 非液状化               | 非液状化               |

※JGS 0541-2000において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としていることによる。

第 11-4-10 表 液状化試験結果の分類

| 対象層                   | A-1 (埋戻土層)                                                                                                                    | A-1 (洪積砂層Ⅰ)<br>A-1 (洪積砂層Ⅱ)<br>A-3 (新期砂層・沖積層)                                                                                                      | A-2 (洪積砂層Ⅰ)<br>A-2 (洪積砂層Ⅱ)<br>O-1 (洪積砂質土層Ⅰ)<br>O-1 (洪積砂質土層Ⅱ)                                                             |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 液状化試験の状況              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が1.0に近づく(0.95を上回る)。</li> <li>• 有効応力がゼロになる。</li> <li>• ひずみが急激に上昇する。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し、上昇時に1.0に近づく(0.95を上回る)。</li> <li>• 有効応力が減少するが、回復する。</li> <li>• ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 過剰間隙水圧比が0.95を上回らない。</li> <li>• 有効応力を保持している。</li> <li>• ひずみが緩やかに上昇する。</li> </ul> |
| 試験結果の分類               | 試験結果は、液状化である。                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 試験結果は、サイクリックモビリティである。</li> <li>• 有効応力が回復するため支持力が期待できる。</li> </ul>                                        | 試験結果は、非液状化である。                                                                                                           |
| 基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定 | 基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定( $F_L$ 法)を実施                                                                                            | 基準地震動 $S_s$ に対する液状化試験の妥当性確認                                                                                                                       |                                                                                                                          |

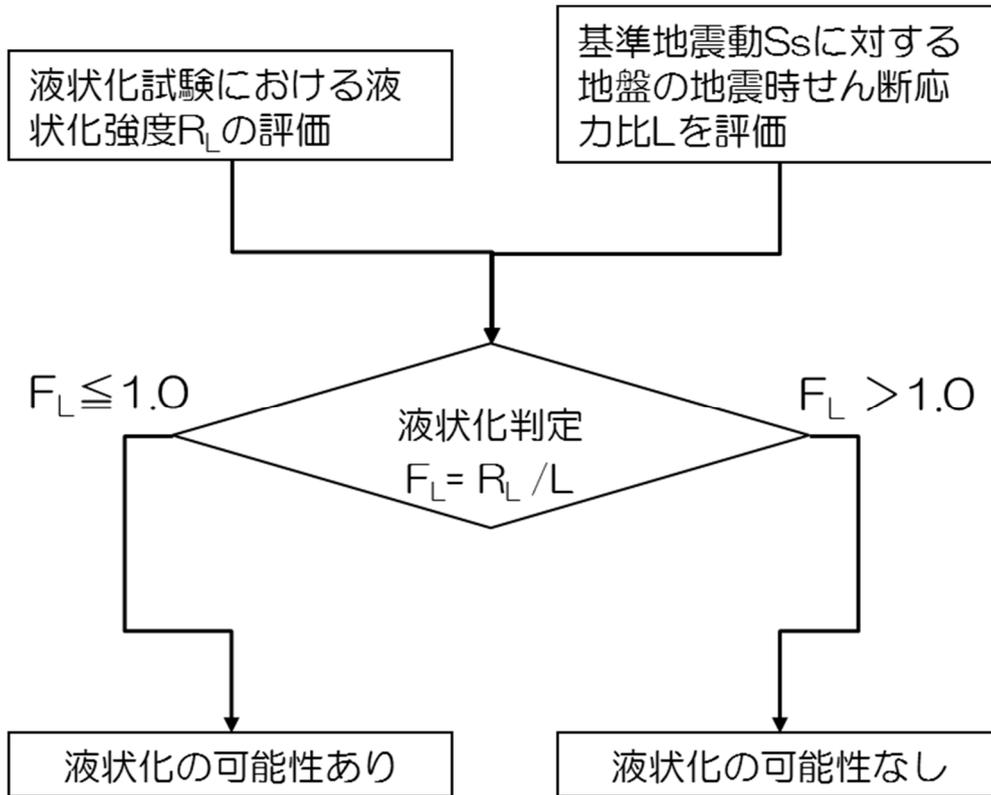
## 5. 基準地震動 $S_s$ に対する液状化判定 (FL 法)

A-1 地点の埋戻土層については液状化試験結果が液状化を示していることから道路橋示方書の液状化判定 (FL 法) を実施し、基準地震動  $S_s$  作用時の液状化の有無を判定する。第 11-5-1 図に FL 法による液状化判定のフローを示す。

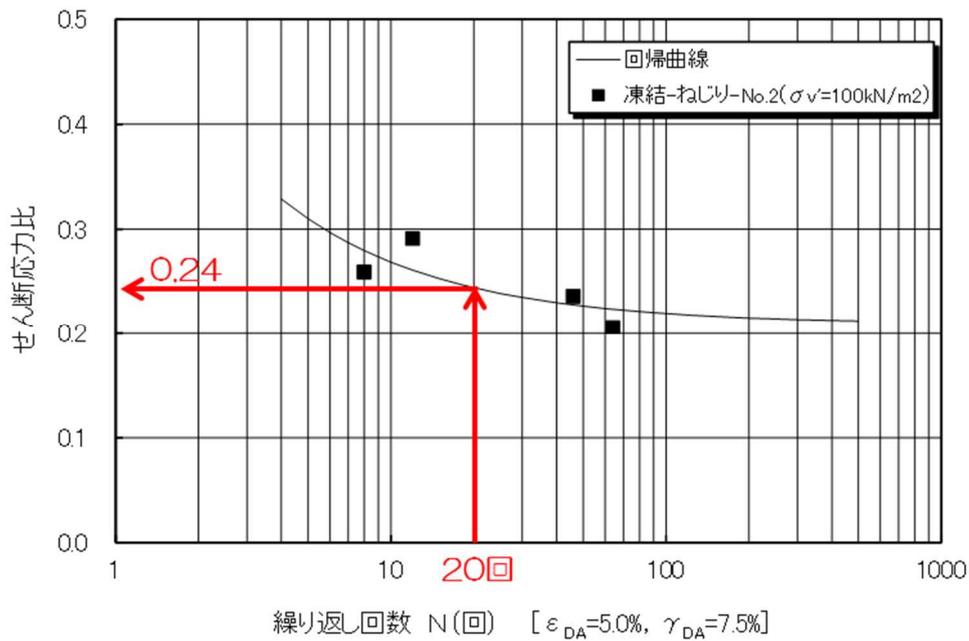
液状化判定 (FL 法) に用いる A-1 地点の埋戻土層の液状化強度  $R_L$  は、前述の液状化試験結果に基づいて設定する。第 11-5-2 図に液状化試験結果に基づく液状化強度  $R_L$  を示す。

基準地震動  $S_s$  が作用した際の A-1 地点の埋戻土層に発生するせん断応力比を一次元逐次非線形解析より求める。第 11-5-3 図に解析用物性値および解析モデルを、第 11-5-4 図に地震応答解析結果を示す。

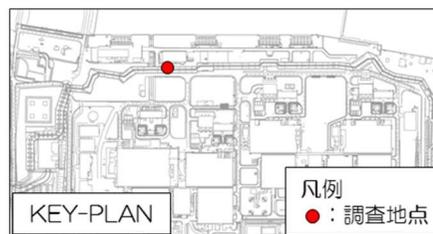
地震応答解析結果における最大せん断応力と液状化試験から求まる液状化強度  $R_L$  を比較し、第 11-5-1 表に示す。液状化判定 (FL 法) の結果、A-1 地点の埋戻土層は、全ての基準地震動  $S_s$  に対して液状化する可能性があるとして判断される。



第 11-5-1 図 FL法による液状化判定のフロー



第 11-5-2 図 液状化試験結果に基づく液状化強度 RL (埋戻土層)

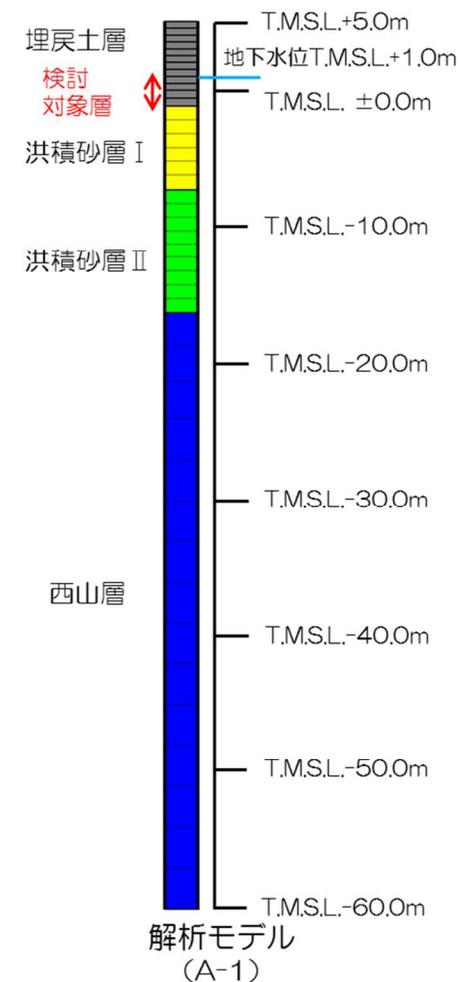


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$     | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1   | $1980 \times \sigma_v'{}^{0.667}$       | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積砂層Ⅰ                      | 19.1                                      | 0.47               | $1.53 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積砂層Ⅱ                      | 18.6                                      | 0.48               | $1.49 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-62.0m | 16.9                                      | 0.43               | $5.02 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-77.0m            | 16.9                                      | 0.43               | $5.99 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $6.62 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-128.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $7.28 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-192.0m           | 16.9                                      | 0.43               | $7.73 \times 10^5$                      |                   |
| ~T.M.S.L.-284.0m | 16.9                       | 0.43                                      | $8.20 \times 10^5$ |                                         |                   |
| 解放基盤             |                            | 16.9                                      | 0.43               | $9.17 \times 10^5$                      | —                 |

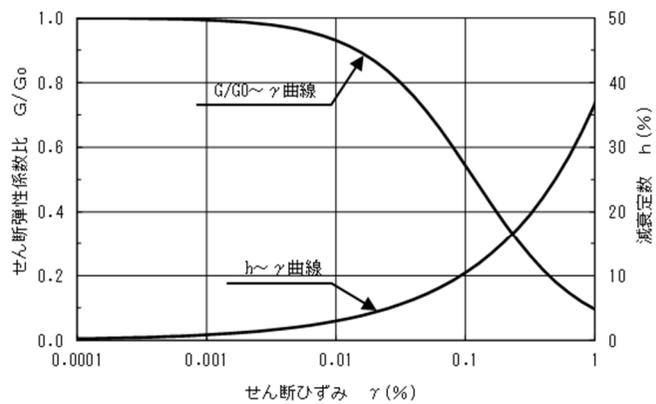
\* 1 : 地下水位以深の物性値

(既工認物性)

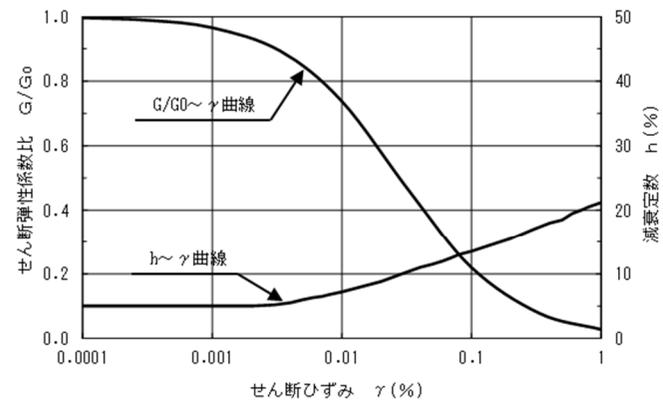


(a) 基本物性

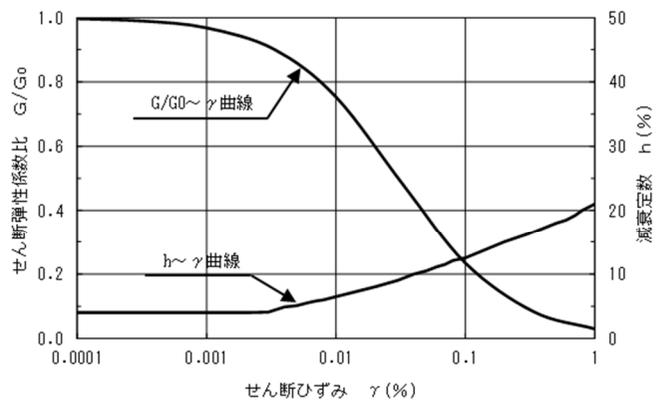
第 11-5-3 図 解析用物性値および解析モデル (A-1 地点)



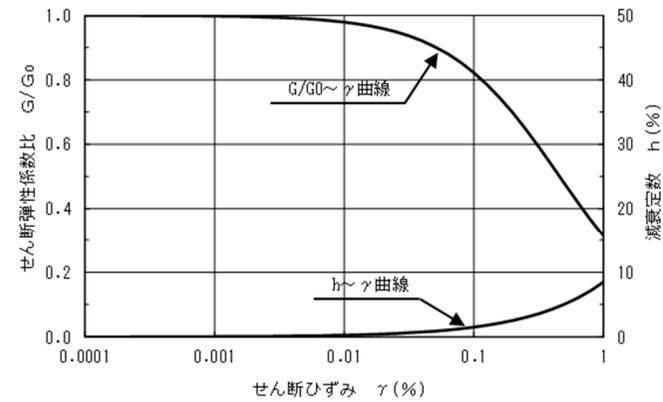
埋戻土層



洪積砂層 I



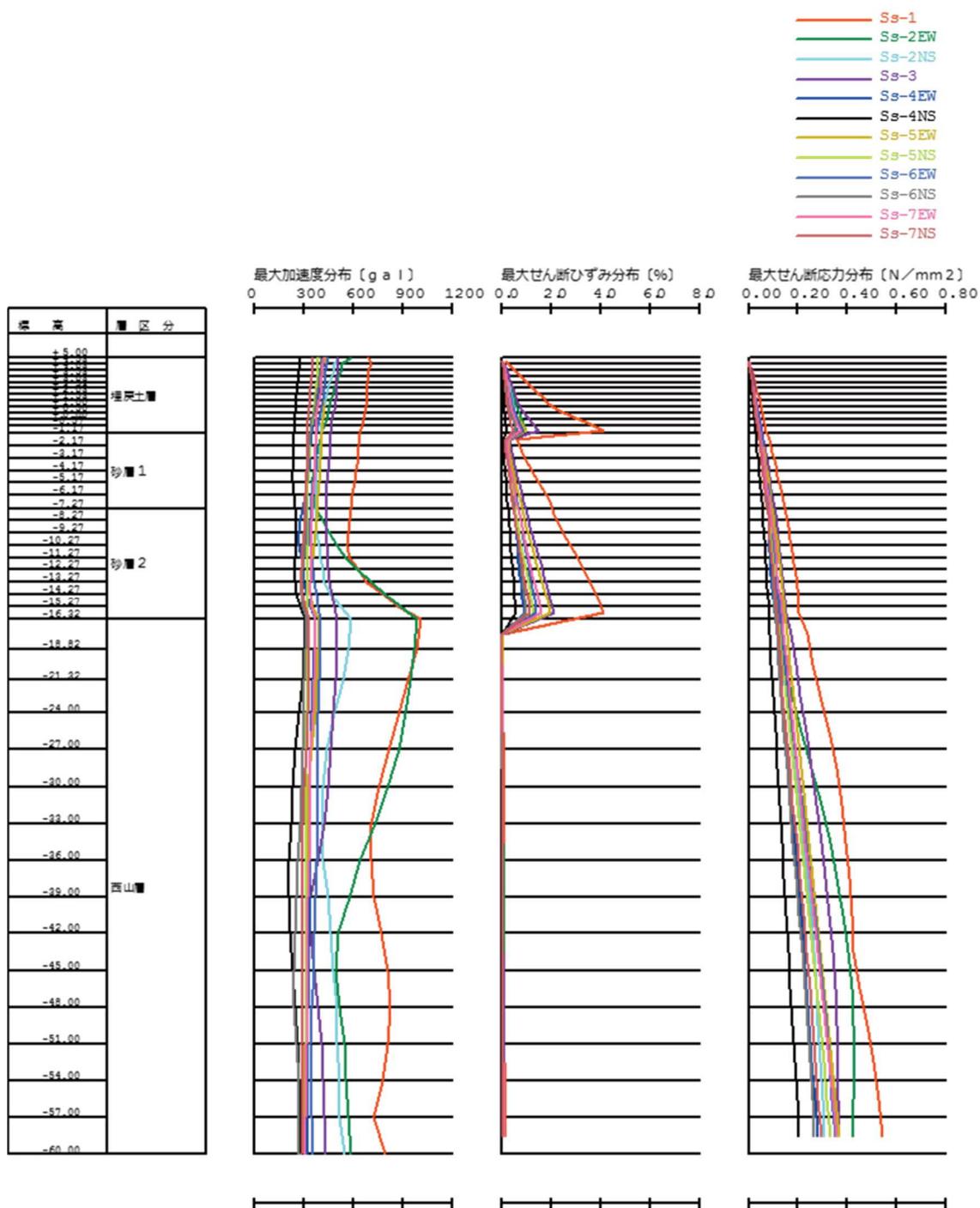
洪積砂層 II



西山層

(b) せん断剛性および減衰のひずみ依存性

第 11-5-3 図 解析用物性値および解析モデル (A-1 地点)



第 11-5-4 図 地震応答解析結果 (A-1 地点)

第 11-5-1 表 埋戻土層の液状化判定 (FL法) 結果

| 基準<br>地震動 Ss | 最大せん断応力比<br>L | 液状化強度<br>R <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> 値<br>=R <sub>L</sub> /L | 評価  |
|--------------|---------------|-------------------------|----------------------------------------|-----|
| Ss1          | 0.76          | 0.24                    | 0.32                                   | 液状化 |
| Ss2EW        | 0.51          |                         | 0.47                                   | 液状化 |
| Ss2NS        | 0.47          |                         | 0.51                                   | 液状化 |
| Ss3          | 0.57          |                         | 0.42                                   | 液状化 |
| Ss4EW        | 0.44          |                         | 0.55                                   | 液状化 |
| Ss4NS        | 0.30          |                         | 0.80                                   | 液状化 |
| Ss5EW        | 0.51          |                         | 0.47                                   | 液状化 |
| Ss5NS        | 0.44          |                         | 0.55                                   | 液状化 |
| Ss6EW        | 0.49          |                         | 0.49                                   | 液状化 |
| Ss6NS        | 0.43          |                         | 0.56                                   | 液状化 |
| Ss7EW        | 0.47          |                         | 0.51                                   | 液状化 |
| Ss7NS        | 0.40          |                         | 0.60                                   | 液状化 |

## 6. 基準地震動 $S_s$ に対する液状化試験の妥当性確認

新期砂層・沖積層および古安田層中の砂層については、試験結果が液状化を示さず、道路橋示方書の液状化判定方法が適用出来ないと考えられる。このため、液状化試験が基準地震動  $S_s$  相当の地盤の状態（繰返し応力および繰返し回数）を模擬していることを確認する。第 11-6-1 図に累積損傷度理論に基づく評価のフローを、第 11-6-2 図に累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法を示す。

なお、埋戻土層においては、5 章に示した FL 法の判定結果から、基準地震動  $S_s$  において地盤に発生するせん断応力比よりも小さいせん断応力比で液状化する結果となっている。

評価にあつて、液状化試験箇所である A-1 地点、A-2 地点、A-3 地点および O-1 地点の地盤モデルを用いて、一次元逐次非線形解析を実施した。第 11-5-3 図、第 11-6-3 図および第 11-6-4 図に各地点の解析用物性値および解析モデルを示す。また、評価結果を第 11-6-1 表および第 11-6-5～11 図に示す。

A-1 地点の洪積砂層 I について、解析結果による最大せん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動  $S_s$  相当の試験が実施出来ていると考える。低拘束圧部の基準地震動  $S_s$ -4NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。（第 11-6-5 図参照）

A-1 地点の洪積砂層 II について、解析結果による最大せん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動  $S_s$  相当の試験が実施出来ていると考える。（第 11-6-6 図参照）

A-2 地点の洪積砂層 I について、解析結果による最大せん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動  $S_s$  相当の試験が実施出来ていると考える。 $S_s$ -1、 $S_s$ -3 および  $S_s$ -5EW 以外の基準地震動  $S_s$  で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。（第 11-6-7 図参照）

A-2 地点の洪積砂層 II について、解析結果による最大せん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動  $S_s$  相当の試験が実施出来ていると考える。 $S_s$ -2NS、 $S_s$ -4EW、 $S_s$ -4NS、 $S_s$ -5NS、 $S_s$ -6EW、 $S_s$ -6NS および  $S_s$ -7NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外である

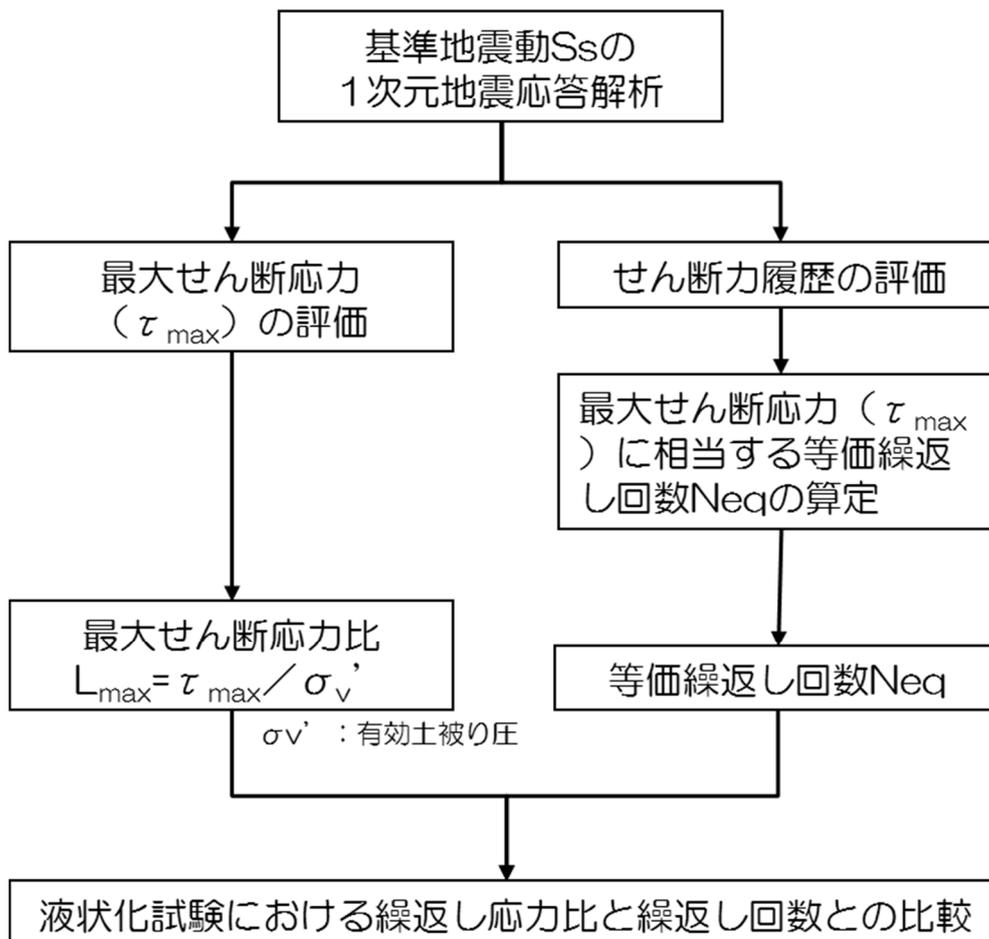
が、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 11-6-8 図参照)

A-3 地点の新期砂層・沖積層について、解析結果による最大せん断応力比と等価繰返し回数は、試験で実施したせん断応力および繰返し回数と同程度であり、概ね基準地震動 Ss 相当の試験が実施出来ていると考える。Ss-4NS で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 11-6-9 図参照)

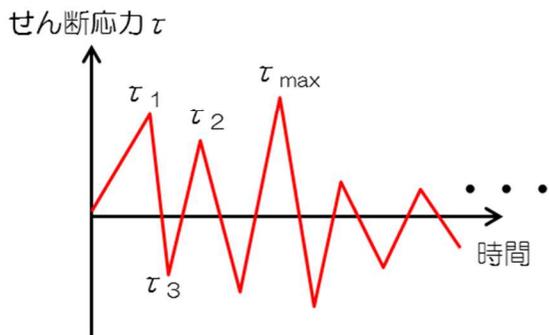
O-1 地点の洪積砂質土層 I について、全ての基準地震動 Ss で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 11-6-10 図参照)

O-1 地点の洪積砂質土層 II について、全ての基準地震動 Ss で地盤に発生するせん断応力比は、試験結果の回帰曲線で設定した下限値（繰返し回数 200 回のせん断応力比）以下となっており、等価繰返し回数の評価対象外であるが、液状化試験はこのせん断応力比を上回るレベルで実施出来ている。(第 11-6-11 図参照)

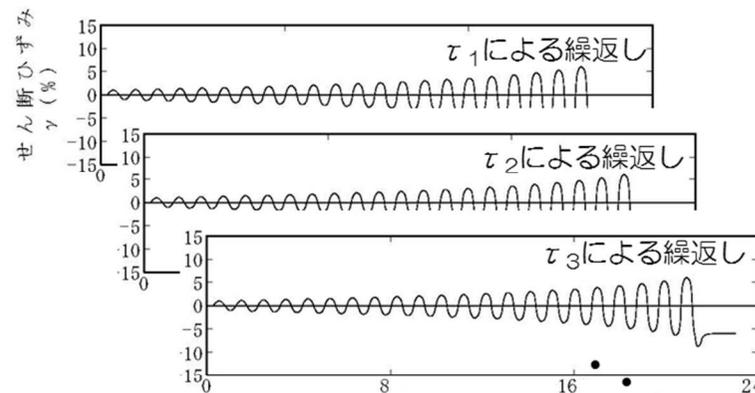
新期砂層・沖積層および古安田層中の砂層における液状化試験の結果は、基準地震動 Ss 時の最大せん断応力比および等価繰返し回数と同程度である。よって、今回実施した試験は、当該地盤に基準地震動 Ss 相当が作用した状態を概ね再現できている判断される。



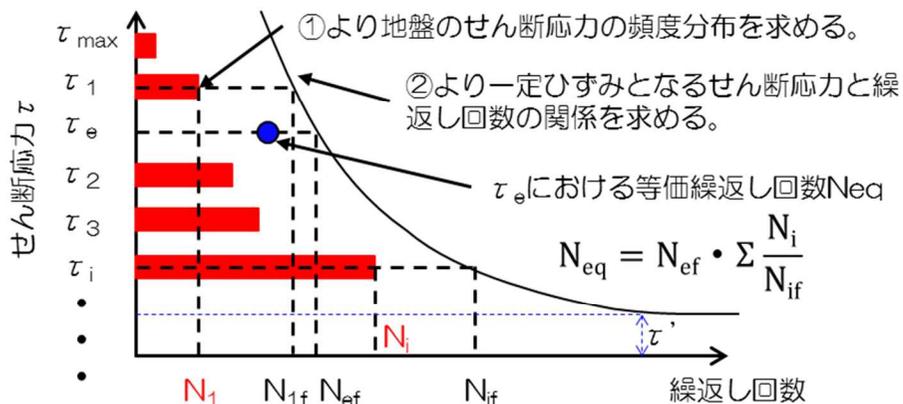
第 11-6-1 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価のフロー



①対象地盤の地震応答解析におけるせん断応力履歴

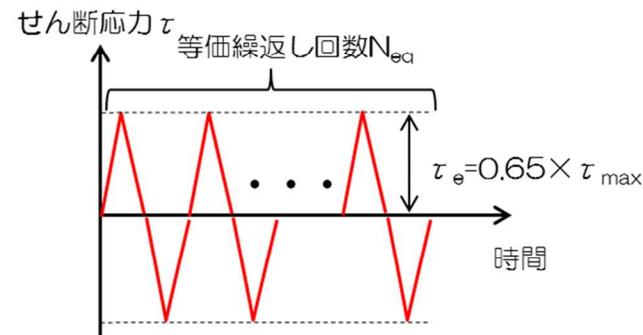


②試験による一定せん断応力振幅時の繰返し回数とせん断ひずみ



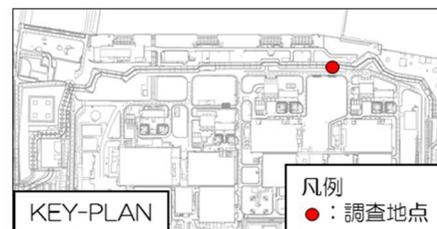
③累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

$\tau'$  : あるレベル以下のせん断応力については、累積損傷度に寄与しないため、評価対象外とする。本検討では、液状化試験の最大繰返し回数 200 回に相当するせん断応力を設定した。



④対象地盤の地震応答解析と等価な一定せん断応力比と等価繰返し回数

第 11-6-2 図 累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

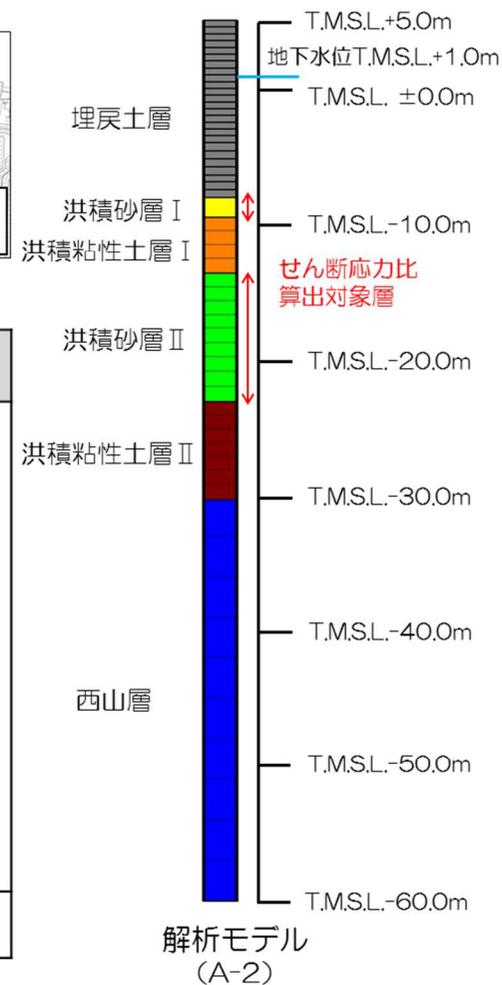


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v'^{0.667}$         | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積砂層Ⅰ                      | 18.3                                      | 0.47             | $2.29 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅰ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.24 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積砂層Ⅱ                      | 18.5                                      | 0.48             | $2.06 \times 10^5$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.74 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-66.0m | 15.6                                      | 0.46             | $3.23 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 15.8                                      | 0.45             | $3.86 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-150.0m           | 16.9                                      | 0.44             | $5.39 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-248.0m           | 17.4                                      | 0.43             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 17.8                                      | 0.41             | $9.18 \times 10^5$                      | -                 |

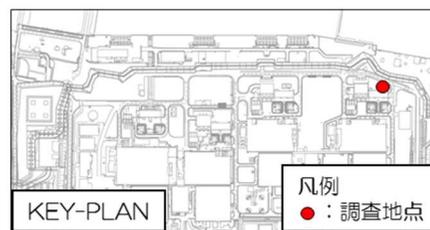
\* 1 : 地下水位以深の物性値

(既工認物性)



(a) 基本物性 (A-2 地点)

第 11-6-3 図 解析用物性値および解析モデル

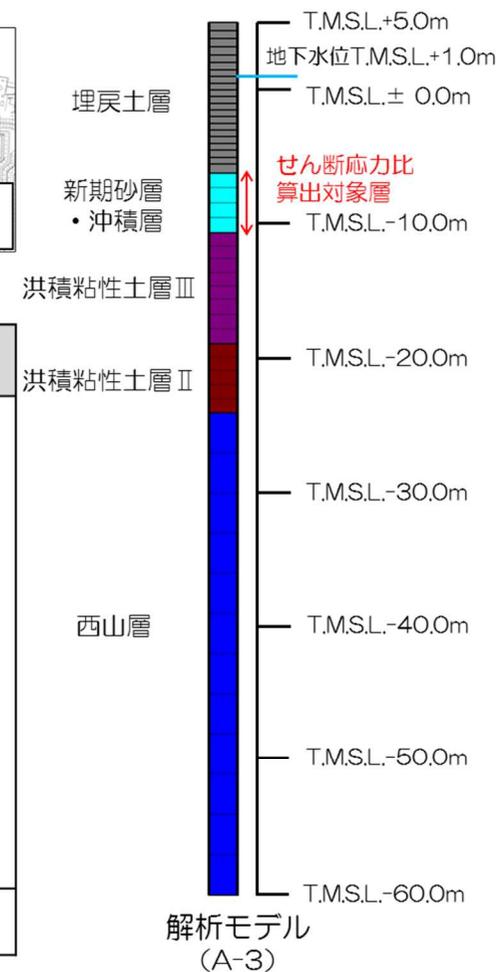


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> ) | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.33<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v'{}^{0.667}$       | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 新期砂層・沖積層         |                            | 19.9                                      | 0.48             | $1.82 \times 10^5$                      |                   |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積粘性土層Ⅲ                    | 17.8                                      | 0.49             | $8.82 \times 10^4$                      |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.8                                      | 0.48             | $1.74 \times 10^5$                      |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-66.0m | 15.6                                      | 0.46             | $3.23 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-103.0m           | 15.8                                      | 0.45             | $3.86 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-150.0m           | 16.9                                      | 0.44             | $5.39 \times 10^5$                      |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-248.0m           | 17.4                                      | 0.43             | $6.81 \times 10^5$                      |                   |
| 解放基盤             |                            | 17.8                                      | 0.41             | $9.18 \times 10^5$                      | -                 |

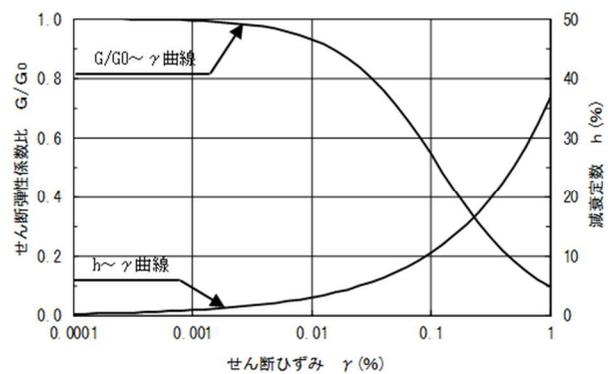
\* 1：地下水位以深の物性値

(既工認物性)

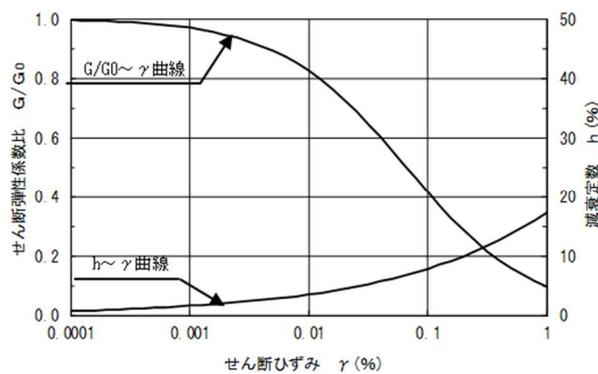


(b) 基本物性 (A-3 地点)

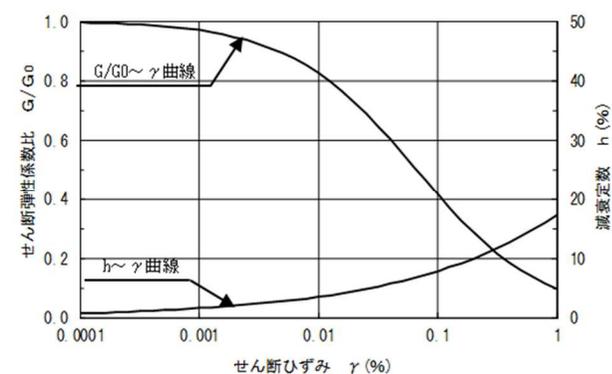
第 11-6-3 図 解析用物性値および解析モデル



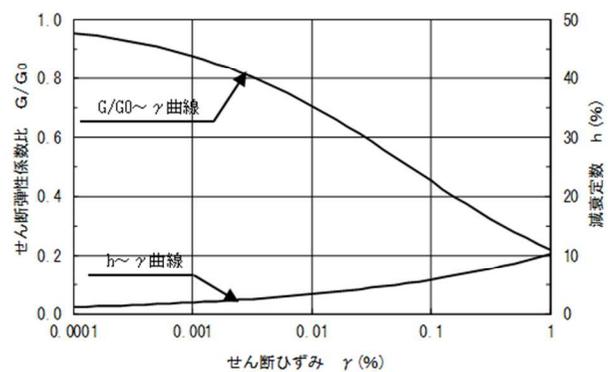
埋戻土層



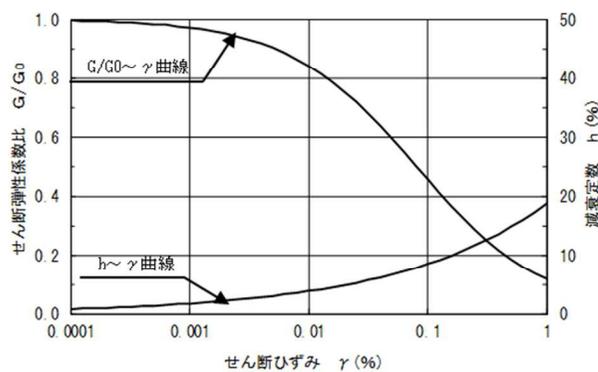
洪積砂層 I, II



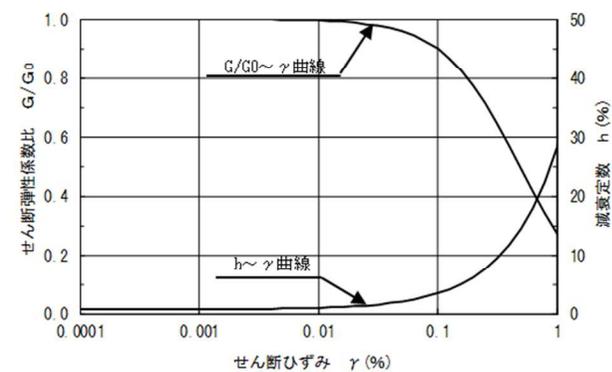
新期砂層・沖積層



洪積粘性土層 I, II



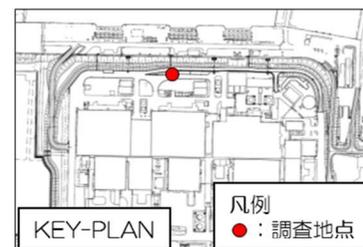
洪積粘性土層 III



西山層

(c) せん断剛性および減衰のひずみ依存性 (A-2 および A-3 地点)

第 11-6-3 図 解析用物性値および解析モデル

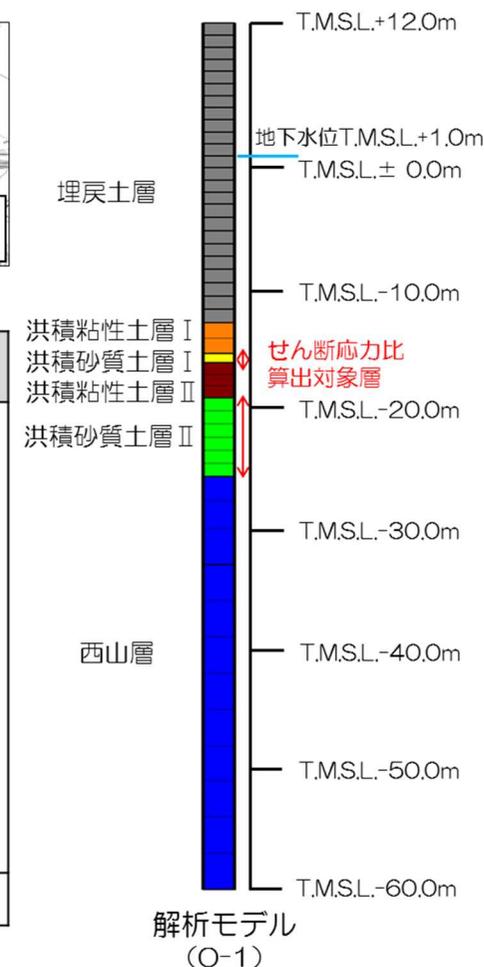


地盤物性値

| 地層区分             |                            | 単位体積重量<br>$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | ポアソン比<br>$\nu$   | 初期せん断弾性係数<br>$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )              | せん断弾性係数G<br>減衰定数h |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
| 埋戻土層             |                            | 18.6<br>(19.6)*1                          | 0.41<br>(0.49)*1 | $1980 \times \sigma_v' \text{ }^{0.667} \text{ }^*2$ | ひずみ依存性を<br>考慮     |
| 古<br>安<br>田<br>層 | 洪積粘性土層Ⅰ                    | 17.8                                      | 0.49             | $9.63 \times 10^4$                                   |                   |
|                  | 洪積砂質土層Ⅰ                    | 18.6                                      | 0.48             | $1.82 \times 10^5$                                   |                   |
|                  | 洪積粘性土層Ⅱ                    | 17.7                                      | 0.49             | $1.13 \times 10^5$                                   |                   |
|                  | 洪積砂質土層Ⅱ                    | 18.6                                      | 0.48             | $2.07 \times 10^5$                                   |                   |
| 西<br>山<br>層      | 西山層上限面 ~<br>T.M.S.L.-33.0m | 17.0                                      | 0.45             | $4.16 \times 10^5$                                   |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-90.0m            | 16.6                                      | 0.45             | $4.75 \times 10^5$                                   |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-136.0m           | 17.3                                      | 0.43             | $6.13 \times 10^5$                                   |                   |
|                  | ~T.M.S.L.-155.0m           | 19.3                                      | 0.42             | $8.33 \times 10^5$                                   |                   |
| 解放基盤             |                            | 19.9                                      | 0.42             | $1.05 \times 10^6$                                   | -                 |

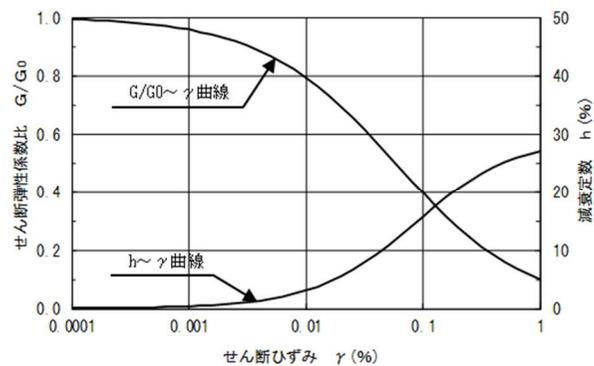
\* 1 : 地下水位以深の物性値  
\* 2 : 下限値  $2.75 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$

(既工認物性)

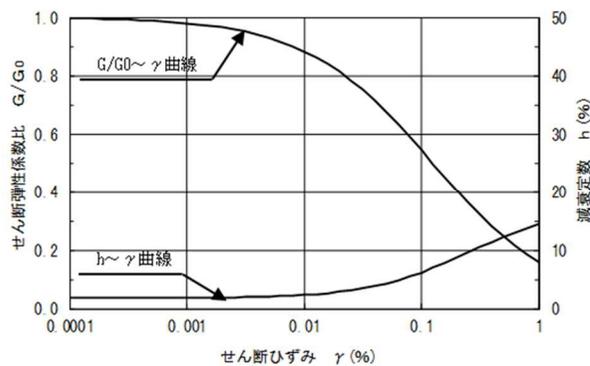


(a) 基本物性 (O-1 地点)

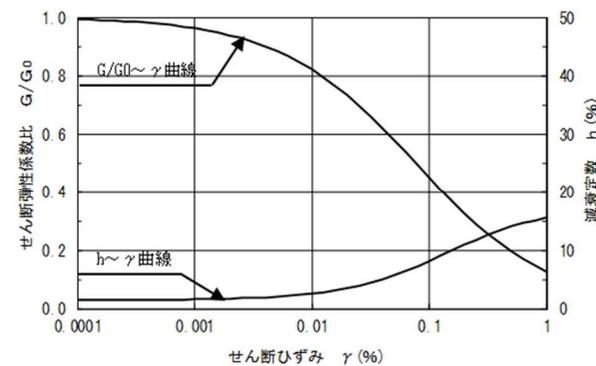
第 11-6-4 図 解析用物性値および解析モデル



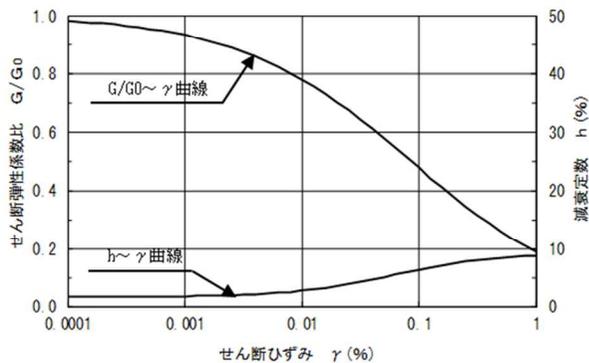
埋戻土層



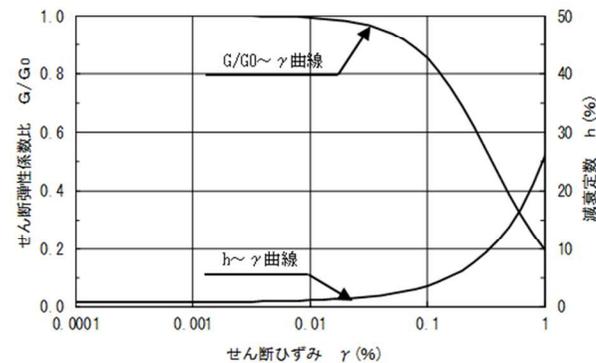
洪積粘性土層 I



洪積砂質土層 I, II



洪積粘性土層 II



西山層

(b) セン断剛性および減衰のひずみ依存性 (O-1 地点)

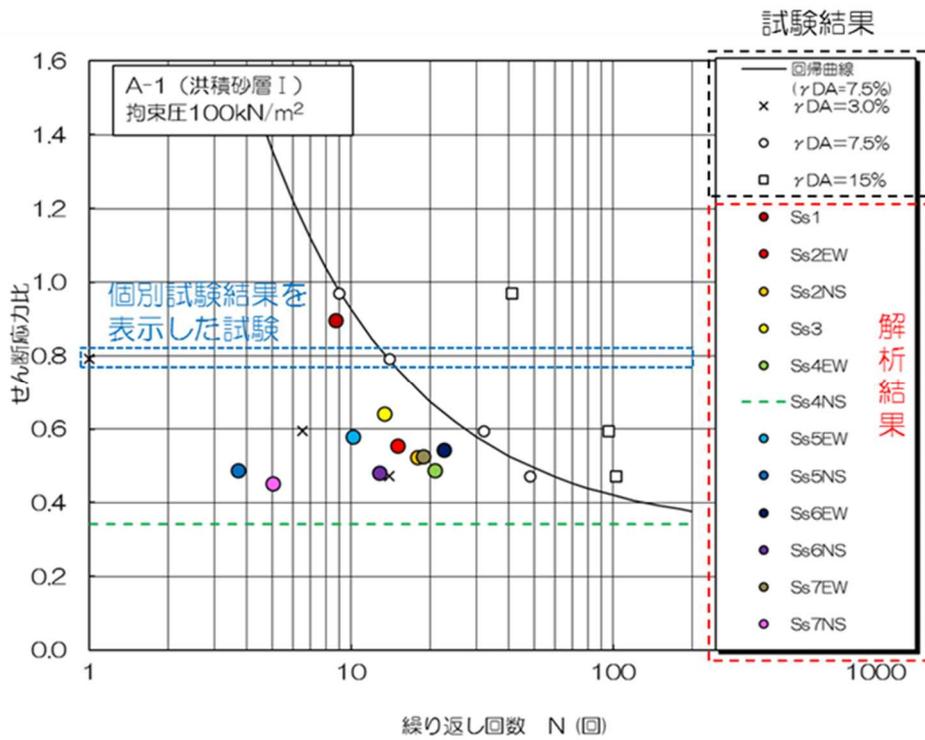
第 11-6-4 図 解析用物性値および解析モデル

第 11-6-1 表 地震応答解析における最大せん断応力と等価繰返し回数

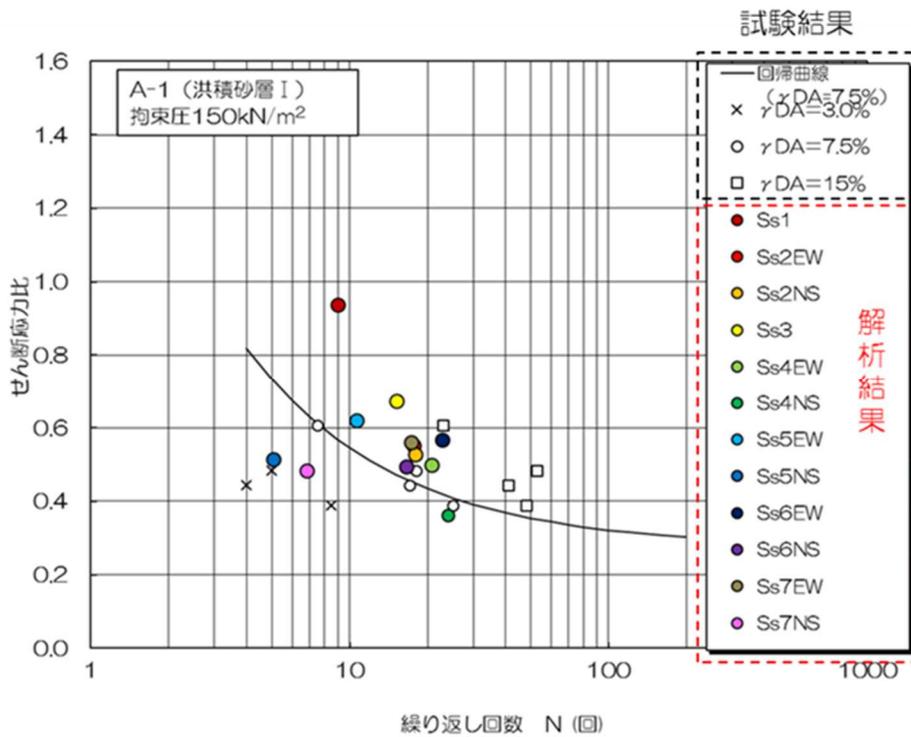
| 基準地震動Ss | A-1                                        |                 |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 | A-2              |                 |                  |                 | A-3              |                 | O-1              |                 |                  |                 |
|---------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|         | 洪積砂層Ⅰ<br>(土被り圧<br>100kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅰ<br>(土被り圧<br>150kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅱ<br>(土被り圧<br>150kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅱ<br>(土被り圧<br>200kN/m <sup>2</sup> 相当) |                 | 洪積砂層Ⅰ            |                 | 洪積砂層Ⅱ            |                 | 新期砂層・沖積層         |                 | 洪積砂質土層Ⅰ          |                 | 洪積砂質土層Ⅱ          |                 |
|         | L <sub>max</sub>                           | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> | L <sub>max</sub> | N <sub>eq</sub> |
| Ss1     | 0.90                                       | 8.7             | 0.94                                       | 9.0             | 0.96                                       | 7.4             | 0.95                                       | 7.2             | 0.88             | 6.1             | 0.91             | 8.2             | 0.98             | 6.0             | 0.43             | -※1             | 0.46             | -※1             |
| Ss2EW   | 0.55                                       | 15.0            | 0.55                                       | 17.6            | 0.52                                       | 19.1            | 0.47                                       | 24.2            | 0.53             | -※1             | 0.64             | 126.8           | 0.55             | 20.4            | 0.32             | -※1             | 0.34             | -※1             |
| Ss2NS   | 0.52                                       | 17.8            | 0.53                                       | 17.9            | 0.53                                       | 19.1            | 0.51                                       | 20.3            | 0.53             | -※1             | 0.60             | -※1             | 0.56             | 20.9            | 0.25             | -※1             | 0.25             | -※1             |
| Ss3     | 0.64                                       | 13.3            | 0.67                                       | 15.1            | 0.68                                       | 12.6            | 0.69                                       | 12.5            | 0.68             | 22.1            | 0.72             | 16.6            | 0.73             | 11.2            | 0.43             | -※1             | 0.44             | -※1             |
| Ss4EW   | 0.49                                       | 20.9            | 0.50                                       | 20.7            | 0.50                                       | 22.1            | 0.47                                       | 25.1            | 0.48             | -※1             | 0.53             | -※1             | 0.48             | 60.9            | 0.34             | -※1             | 0.37             | -※1             |
| Ss4NS   | 0.34                                       | -※1             | 0.36                                       | 23.9            | 0.37                                       | 40.9            | 0.37                                       | 31.3            | 0.39             | -※1             | 0.42             | -※1             | 0.40             | -※1             | 0.22             | -※1             | 0.23             | -※1             |
| Ss5EW   | 0.58                                       | 10.1            | 0.62                                       | 10.6            | 0.64                                       | 9.2             | 0.65                                       | 8.6             | 0.64             | 53.1            | 0.70             | 13.5            | 0.68             | 8.2             | 0.44             | -※1             | 0.48             | -※1             |
| Ss5NS   | 0.49                                       | 3.7             | 0.51                                       | 5.1             | 0.53                                       | 4.7             | 0.53                                       | 4.9             | 0.52             | -※1             | 0.61             | -※1             | 0.54             | 4.4             | 0.24             | -※1             | 0.25             | -※1             |
| Ss6EW   | 0.54                                       | 22.5            | 0.57                                       | 22.7            | 0.57                                       | 20.4            | 0.57                                       | 20.3            | 0.57             | -※1             | 0.62             | -※1             | 0.59             | 22.6            | 0.40             | -※1             | 0.44             | -※1             |
| Ss6NS   | 0.48                                       | 12.8            | 0.50                                       | 16.5            | 0.50                                       | 14.8            | 0.49                                       | 14.7            | 0.52             | -※1             | 0.57             | -※1             | 0.53             | 10.8            | 0.27             | -※1             | 0.27             | -※1             |
| Ss7EW   | 0.53                                       | 18.8            | 0.56                                       | 17.3            | 0.58                                       | 15.3            | 0.59                                       | 14.2            | 0.58             | -※1             | 0.67             | 38.7            | 0.62             | 15.1            | 0.48             | -※1             | 0.51             | -※1             |
| Ss7NS   | 0.45                                       | 5.0             | 0.48                                       | 6.8             | 0.50                                       | 5.3             | 0.50                                       | 5.5             | 0.51             | -※1             | 0.56             | -※1             | 0.52             | 7.1             | 0.29             | -※1             | 0.31             | -※1             |
| Ss8     |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 |                                            |                 |                  |                 |                  |                 |                  |                 | 0.33             | -※1             | 0.35             | -※1             |

最大せん断応力比： $L_{max} = \tau_{max} / \sigma_v'$ ， $\tau_{max}$ ：最大せん断応力， $\sigma_v'$ ：有効土被り圧， $N_{eq}$ ：等価繰返し回数

- ※1 解析から得られる最大せん断応力比 ( $L_{max}$ ) が、試験結果から設定した回帰曲線の繰返し回数200回の値よりも小さいものについては、累積損傷度理論にも基づく等価繰返し回数の評価対象外であるため「-」と表記
- ※2 試験は等方等圧試験であり、実地盤と応答解析を比較するため、静止土圧係数 ( $K_0$ ：一般値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。 $\tau_e \times 3 / (1 + 2K_0) = 0.65 \times 3 / 2 \times \tau_{max} \doteq \tau_{max}$ ， $\tau_e$ ：等価せん断応力

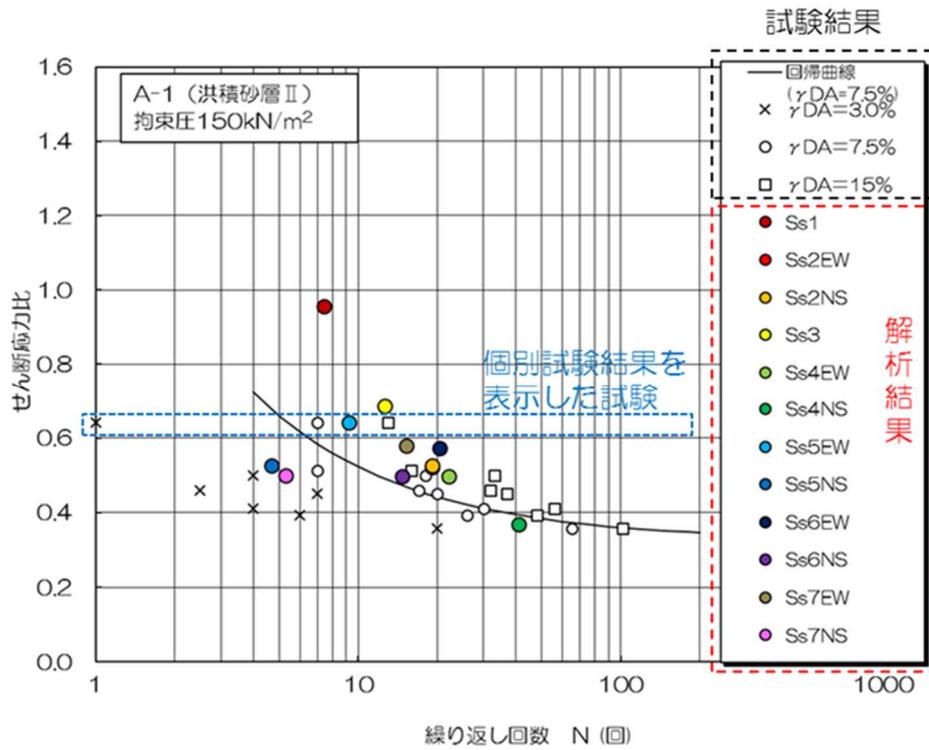


(a) 拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>

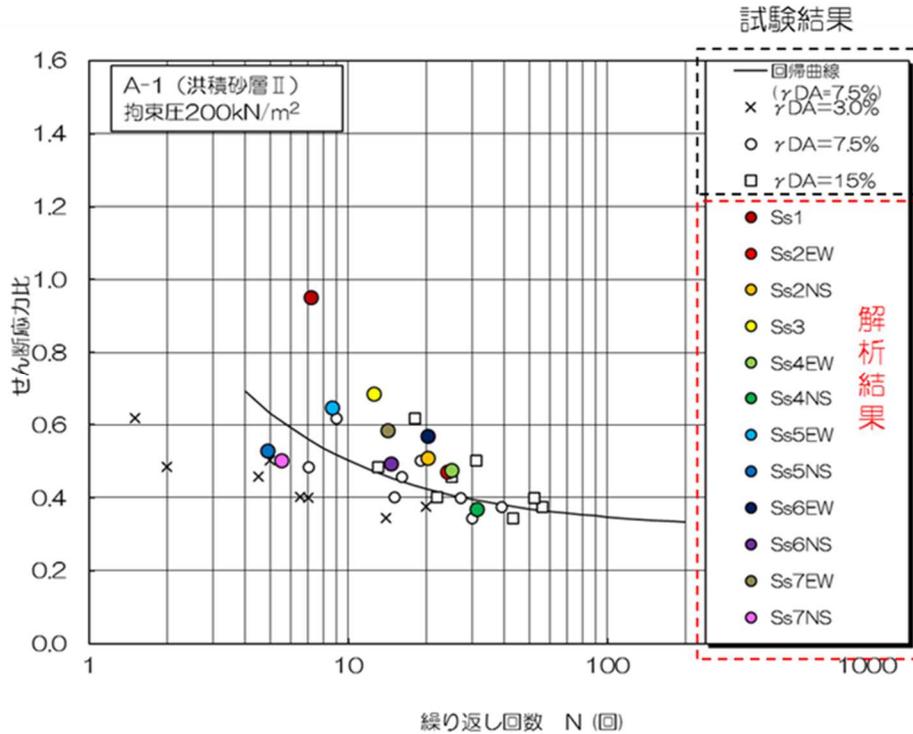


(b) 拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>

第 11-6-5 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-1 地点の洪積砂層 I)

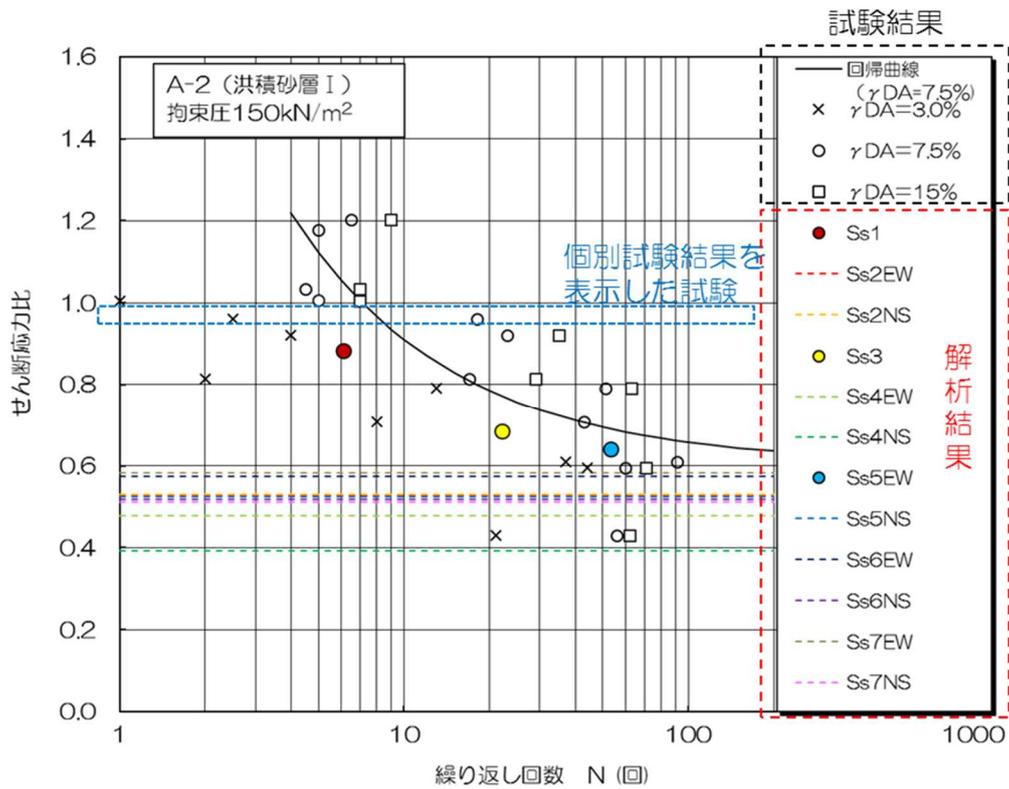


(a) 拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>

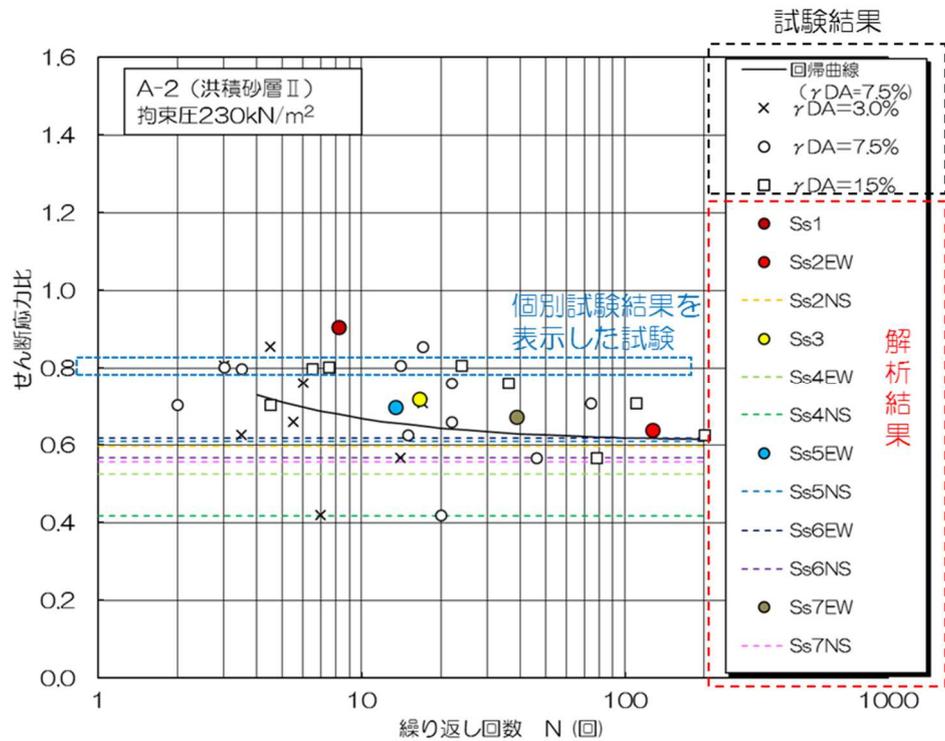


(b) 拘束圧 200kN/m<sup>2</sup>

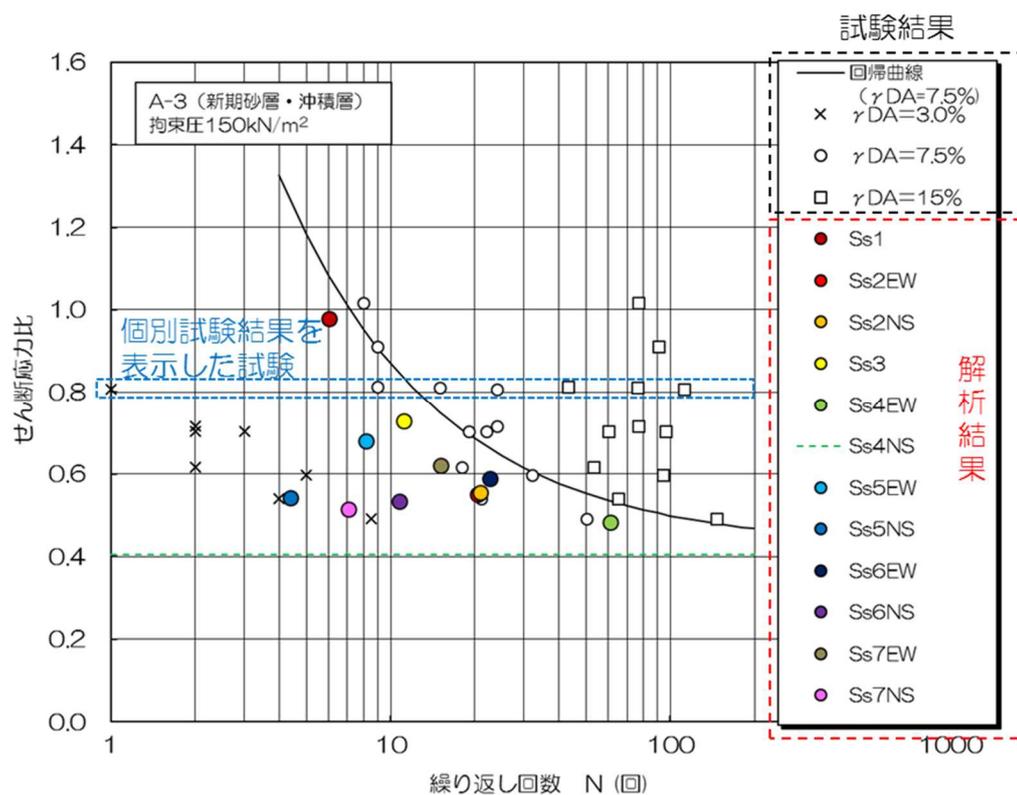
第 11-6-6 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-1 地点の洪積砂層 II)



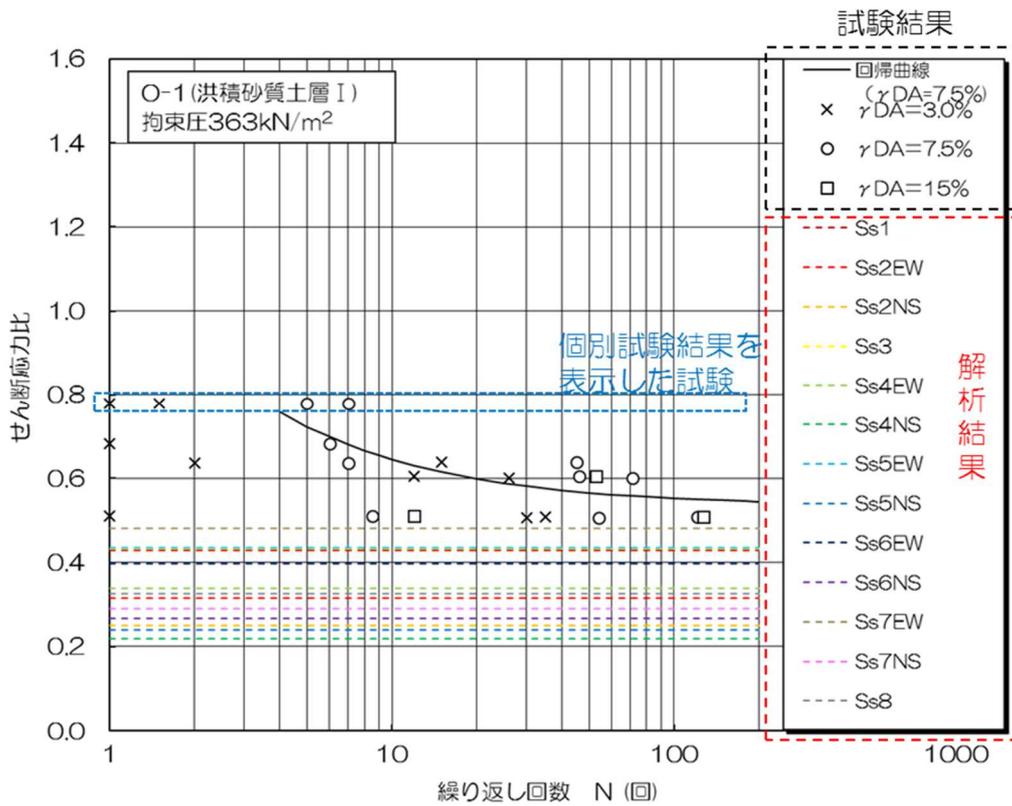
第 11-6-7 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-2 地点の洪積砂層 I)



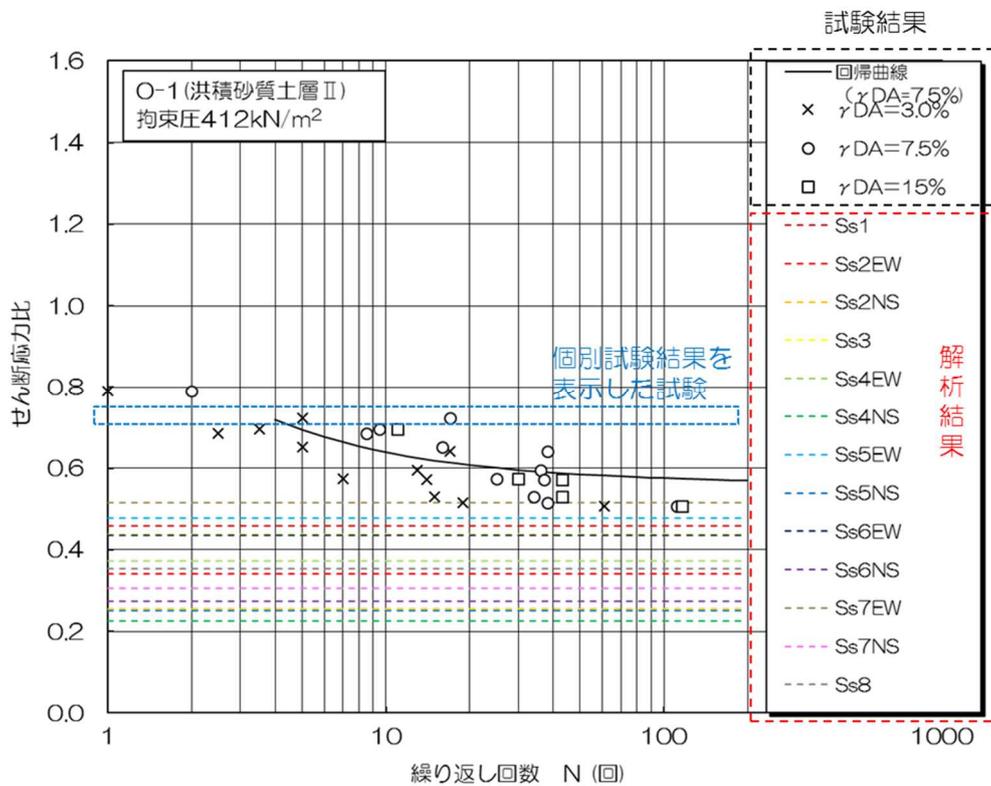
第 11-6-8 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-2 地点の洪積砂層 II)



第 11-6-9 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (A-3 地点の新期砂層・沖積層)



第 11-6-10 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 I)



第 11-6-11 図 累積損傷度理論に基づく評価結果 (O-1 地点の洪積砂質土層 II)

## 7. 液状化強度特性の設定

第2章で示した地層の同一性および第3章で示した液状化試験箇所の保守性・代表性の結果に基づいて、各土層で実施した液状化試験結果をそれぞれに適用し、各土層の液状化強度特性を設定して、構造物の影響評価を実施する。第11-7-1図に液状化強度特性の設定のフローを、第11-7-2図に地質断面の概要と調査位置の概要を、第11-7-1表に液状化強度特性を設定する土層と設定の基となる液状化試験箇所の関係を示す。

なお、試験結果が非液状化となる土層についても、念のため試験結果に基づいて液状化強度特性を設定し、保守的な構造物影響評価を実施する。3/4号炉側の古安田層中の砂層のうち比較的新しい砂層（A-2地点の洪積砂層Ⅰ）については、試験結果が非液状化であるが、地層の同一性を考慮して、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。古安田層中の砂層のうち比較的古い砂層（A-2地点の洪積砂層ⅡおよびO-1地点の洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱ）については、試験結果が非液状化であるが、それぞれの試験で得られたせん断ひずみと繰返し回数に基づいて、液状化強度特性を設定する。

各土層での液状化強度特性は、液状化試験を基本として、各土層で得られた基本物性のバラツキも考慮することで、保守的な設定とする。設定の方法について、第3章の液状化試験箇所の代表性の結果に基づいて、液状化試験箇所が周辺調査箇所に対して保守的な箇所で実施していると考えられる土層（埋戻土層、新期砂層・沖積層（荒浜側））と、液状化試験箇所が周辺調査箇所に対する代表性を有していると考えられる土層（古安田層中の砂層）に大別して設定する。

液状化試験箇所が周辺調査箇所に対して保守的な箇所で実施していると考えられる土層（埋戻土層、新期砂層・沖積層（荒浜側））については、液状化試験箇所の基本物性が、周辺調査箇所の下限相当となっていることから、試験結果を各土層の代表値とすることが保守的と考えられる。ただし、試験結果の下限に相当する液状化強度  $R_L$  を評価して、これを満足する液状化強度特性を設定することで、さらに保守的な設定とする。具体的には、試験結果においてせん断ひずみ両振幅が7.5%となる点に対して回帰曲線の評価し、この回帰曲線を下方に移動し、試験値の下限を通る曲線と、繰返し回数20回との交点を求め、液状化試験の下限値に相当する液状化強度  $R_L$  として評価する。なお、道路橋示方書では、繰返し回数20回で軸ひずみ両振幅が5%（せん断ひずみ両振幅7.5%）に達するのに要するせん断応力振幅を初期有効拘束圧で除した値を液状化強度  $R_L$  として定義している。第11-7-3図に液状化試験結果の下限に相当する液状化強度  $R_L$  の評価結果を示す。

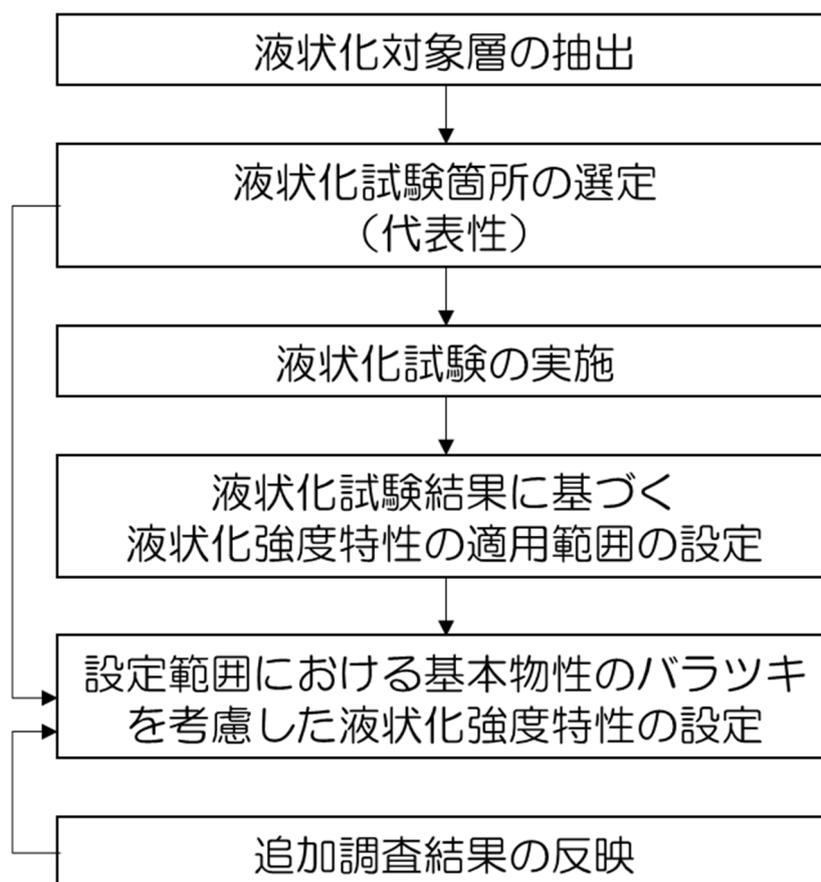
液状化試験の下限値に相当する液状化強度  $R_L$  は、A-1地点の埋戻土層で0.19、A-3地点の新期砂層・沖積層で0.55となり、構造物影響評価の解析においては、これを満足するように液状化強度特性を設定する。

液状化試験箇所が周辺調査箇所に対する代表性を有していると考えられる土層（古安田層中の砂層）については、液状化試験箇所の基本物性が、周辺調査箇所と同程度になっている

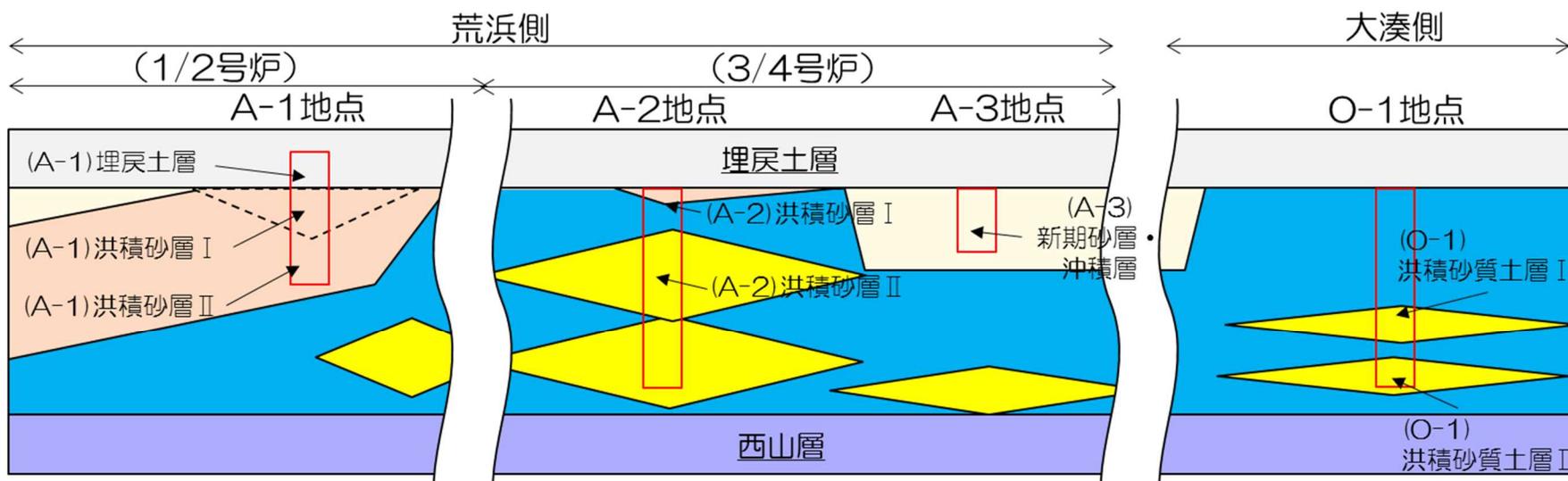
るところから、試験結果を各土層の代表値とすることは妥当であると考えられる。ただし、N 値のバラツキを液状化試験のバラツキと仮定して液状化強度  $R_L$  を保守的に低減させ、これを満足する液状化強度特性を設定する。具体的には、試験結果においてせん断ひずみ両振幅が 7.5%となる点に対して回帰曲線を求め、繰返し回数 20 回とせん断応力比を評価し、当該地層の N 値の平均値に対する平均値-1 $\sigma$  の値の比を乗して、N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  として評価する。第 11-7-4 図に N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  の評価結果を示す。

N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$  は、A-1 地点の洪積砂層 I で 0.53 (拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>) および 0.34 (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)、A-1 地点の洪積砂層 II で 0.30 (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>) および 0.29 (拘束圧 200kN/m<sup>2</sup>)、A-2 地点の洪積砂層 II で 0.36、0-1 地点の洪積砂質土層 I で 0.45、0-1 地点の洪積砂質土層 II で 0.45 となり、構造物影響評価の解析においては、これを満足するように液状化強度特性を設定する。

なお、第 3 章および第 9 章で述べるように追加試験を計画しており、追加調査の結果を適切に反映し、設定した液状化強度特性の保守性を確認する。また、必要に応じて液状化強度特性の見直しを実施する。



第 11-7-1 図 液状化強度特性の設定のフロー



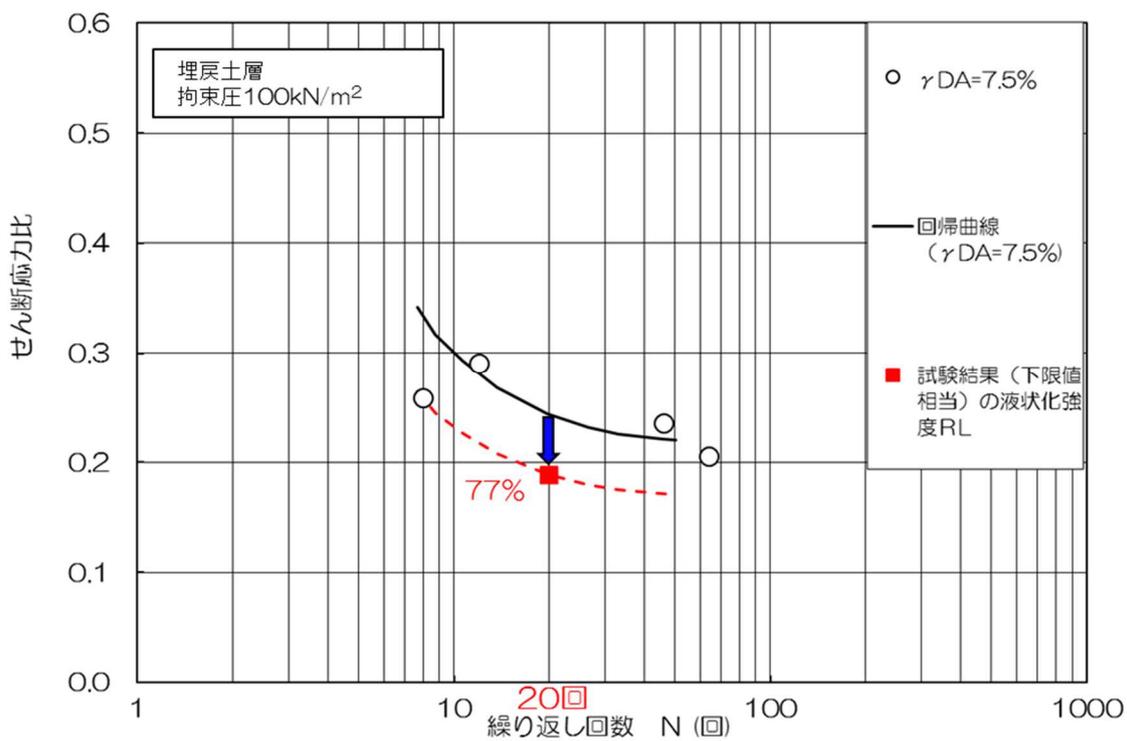
第 11-7-2 図 地質断面の概要と調査位置の概要

第 11-7-1 表 液状化強度特性を設定する土層と設定の基となる液状化試験箇所の関係

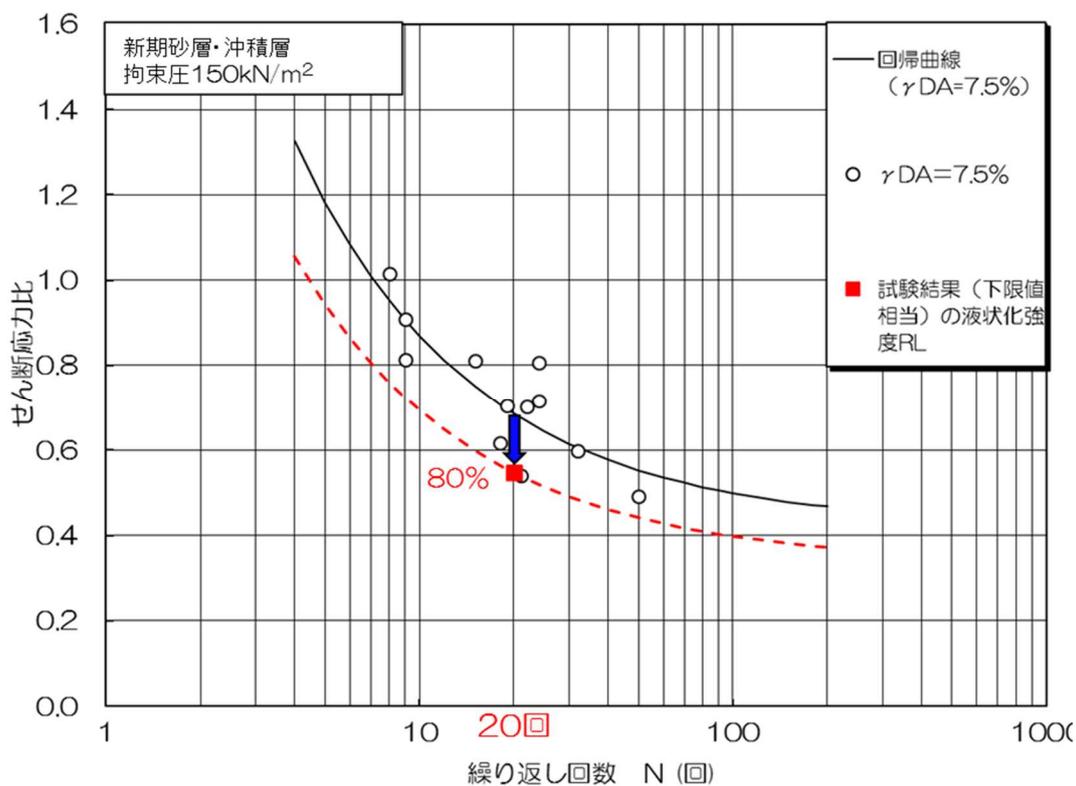
| 今回対象構造物 |          | (1号炉)            | (2号炉側)            | (3/4号炉側)           | 6/7号炉<br>取水路・軽油タンク基礎・GTG基礎など |  |
|---------|----------|------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|--|
| 対象土層    | 埋戻土層     | A-1<br>埋戻土層      |                   |                    |                              |  |
|         | 新期砂層・沖積層 | A-3<br>新期砂層・沖積層  |                   | [追加調査]<br>新期砂層・沖積層 |                              |  |
|         | 古安田層     | 比較的<br>新しい<br>砂層 | N値<br>平均50以上      | A-1<br>洪積砂層Ⅰ       | (出現しない)                      |  |
|         |          |                  | N値<br>平均50以下      | A-1<br>洪積砂層Ⅱ       |                              |  |
|         |          | 比較的古い砂層          | A-2<br>洪積砂層Ⅱ (※2) |                    | 0-1<br>洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱ (※2)        |  |
|         |          | 洪積粘性土層           | (非液状化層)           |                    |                              |  |
|         | 西山層      | (非液状化層)          |                   |                    |                              |  |

※1：3/4号炉側の古安田層中の砂層のうち比較的新しい砂層については、試験結果が非液状化であるが、地層の同一性を考慮して、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。

※2：古安田層中の砂層のうち比較的古い砂層については、試験結果が非液状化であるが、念のため液状化強度特性を設定した構造物影響評価を実施する。液状化強度特性は、荒浜側についてはA-2地点の洪積砂層Ⅱ、大湊側については0-1地点の洪積砂質土層Ⅰ・Ⅱの試験結果に基づいて液状化強度特性を設定する。

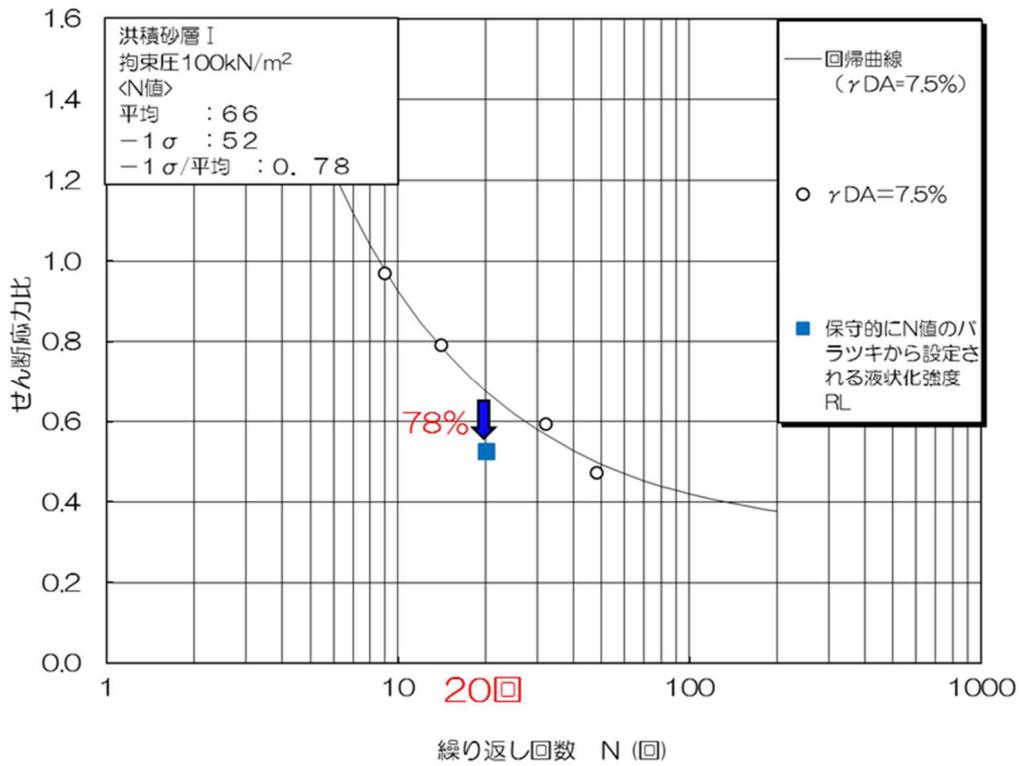


(a) 埋戻土層 (拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>)

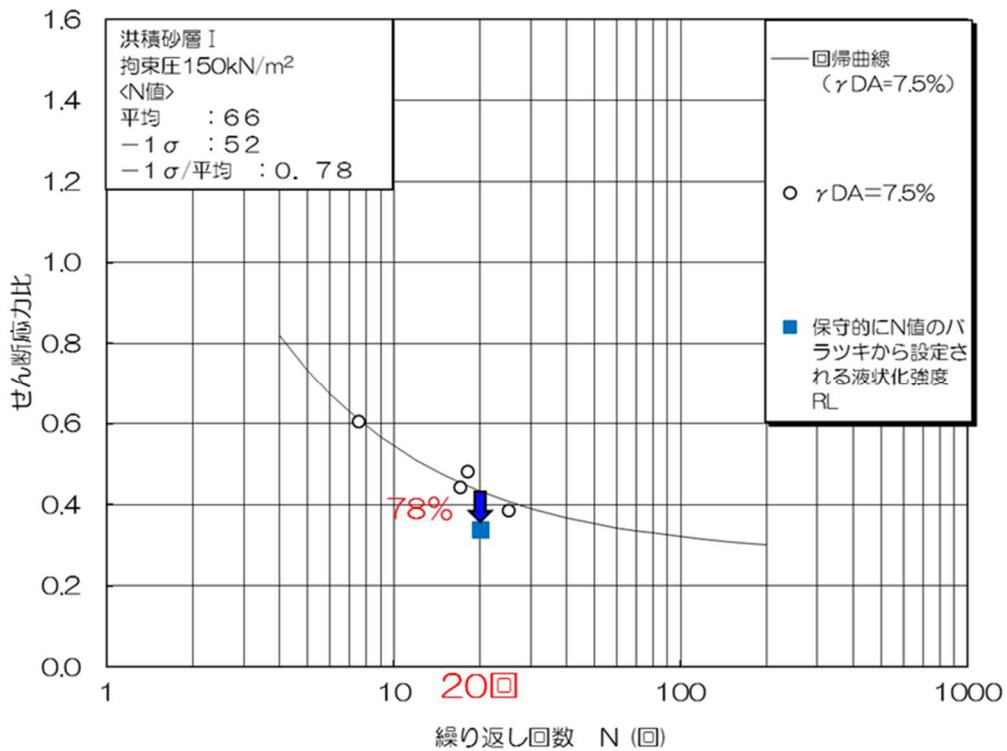


(b) 新期砂層・沖積層 (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)

第 11-7-3 図 液状化強度特性の設定  
(液状化試験結果の下限に相当する液状化強度 R<sub>L</sub>)



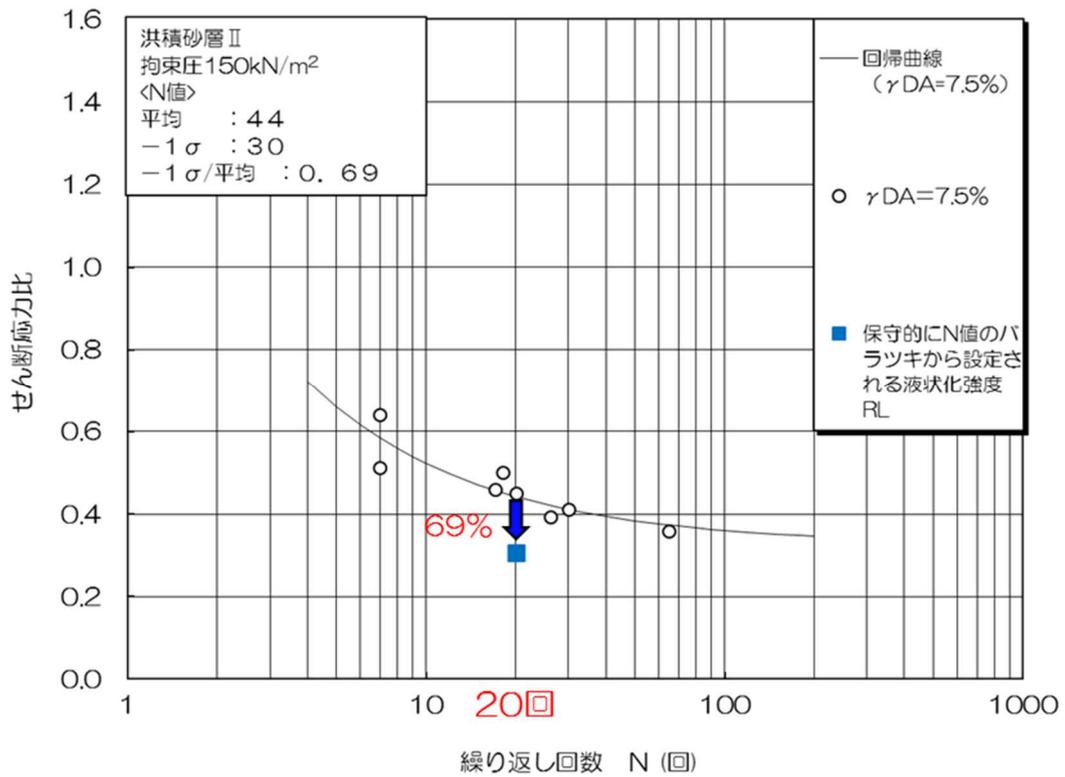
(a) A-1 地点の洪積砂層 I (拘束圧 100kN/m<sup>2</sup>)



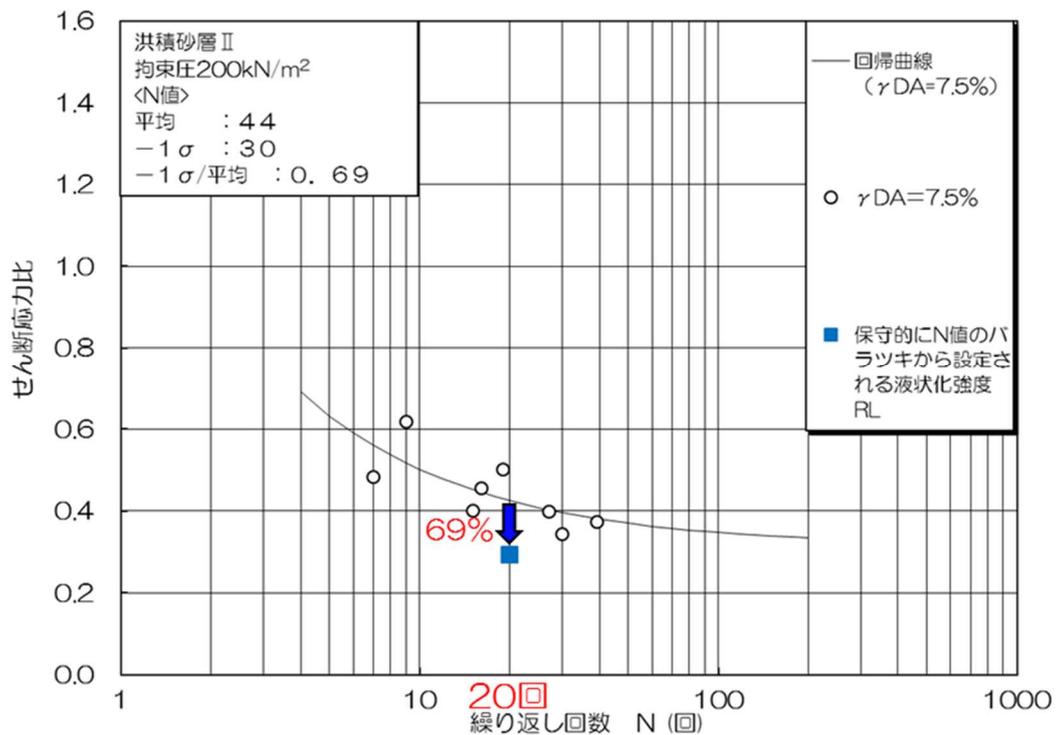
(b) A-1 地点の洪積砂層 I (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)

第 11-7-4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度 RL)

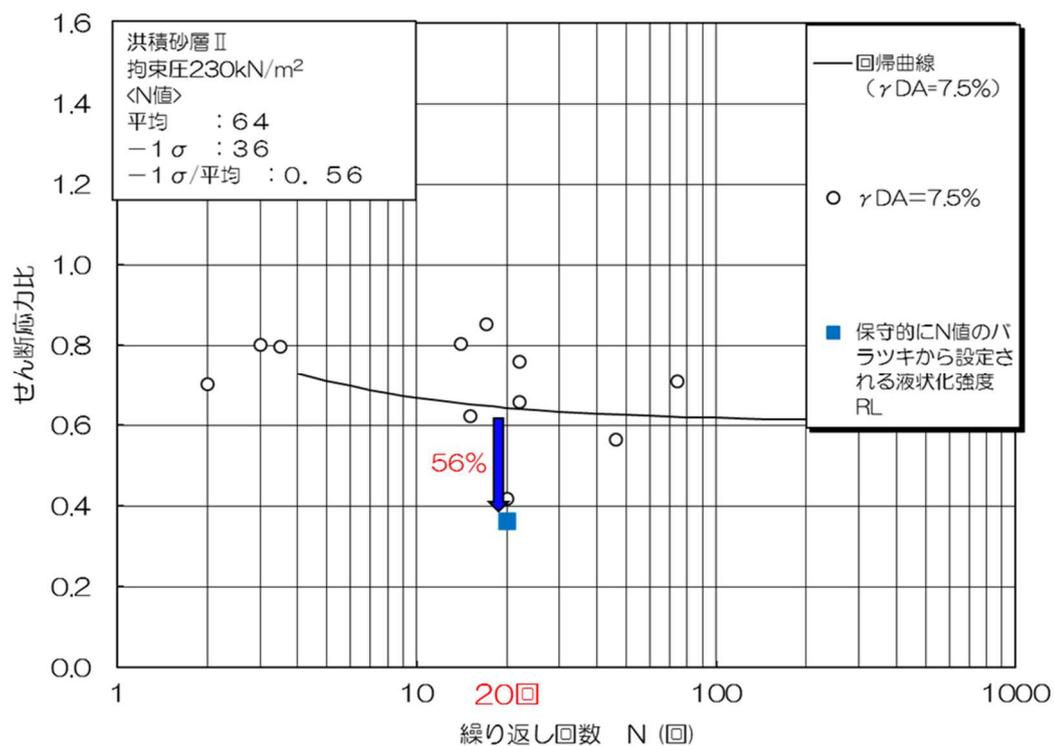


(c) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧 150kN/m<sup>2</sup>)



(d) A-1 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧 200kN/m<sup>2</sup>)

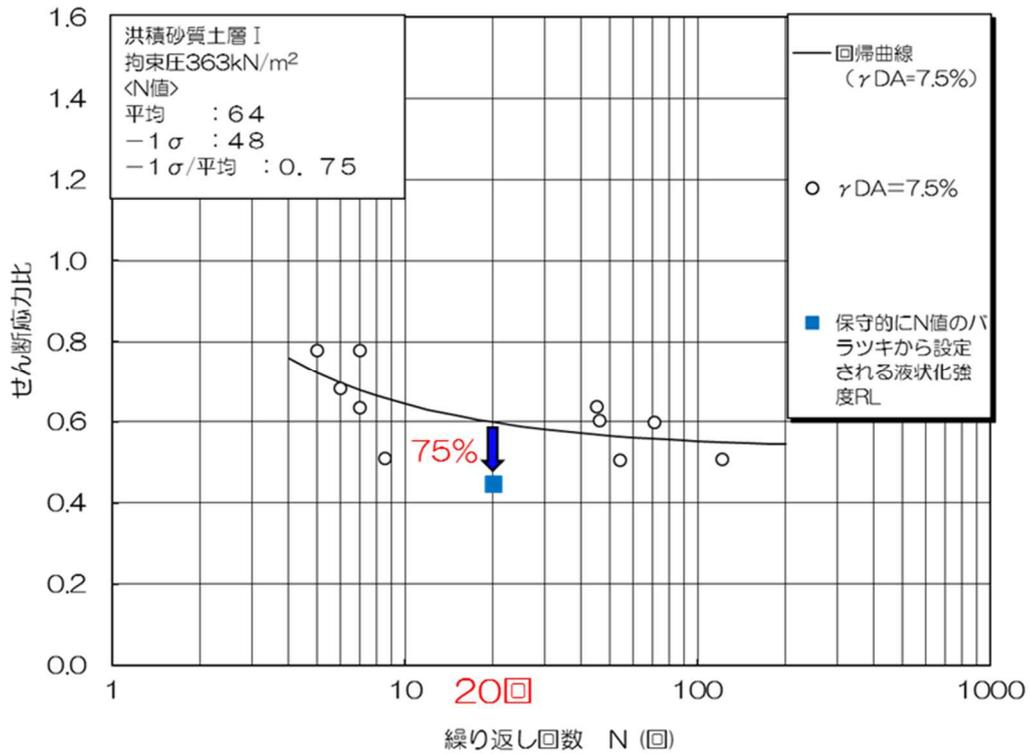
第 11-7-4 図 液状化強度特性の設定  
(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度 RL)



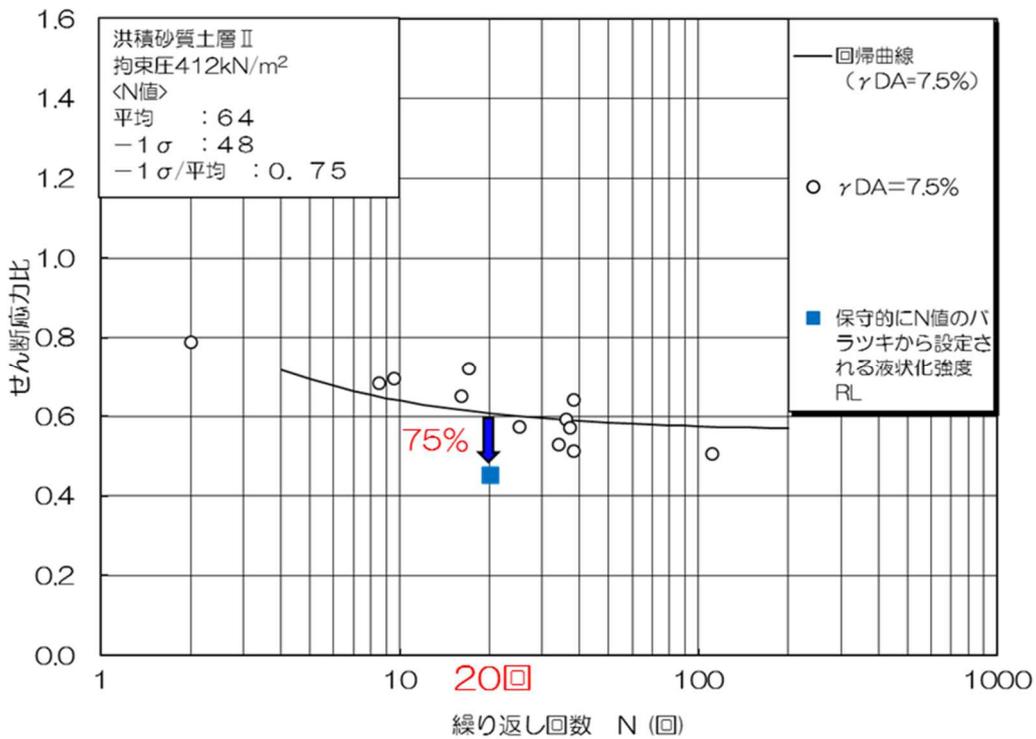
(e) A-2 地点の洪積砂層Ⅱ (拘束圧 230kN/m<sup>2</sup>)

第 11-7-4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のバラツキに基づいて低減した液状化強度 RL)



(f) O-1 地点の洪積砂質土層 I (拘束圧 363kN/m<sup>2</sup>)



(g) O-1 地点の洪積砂質土層 II (拘束圧 412kN/m<sup>2</sup>)

第 11-7-4 図 液状化強度特性の設定

(N 値のパラツキに基づいて低減した液状化強度  $R_L$ )

## 8. 液状化影響の検討方針

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した。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』および『非液状化』と判定した。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、基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。

構造物の影響評価については、液状化に伴う影響を考慮するため、有効応力解析を実施する。有効応力解析においては、解析コード「FLIP」などを用いる。液状化試験結果に基づいて保守的に設定した液状化強度  $R_L$  を満足するように、有効応力解析の液状化パラメータを設定し、構造物の影響評価を実施する。解析コード「FLIP」については、Iai et.al(1992) および Iai et.al(1995)において、液状化およびサイクリックモビリティを示す地層についての適用性が検証されている。Iai et.al(1992)においては、サイクリックモビリティが観察された砂の繰返しねじり試験結果に対して、解析コード「FLIP」を用いた解析を実施し、解析結果が室内試験結果と良い対応を示したと報告している。Iai et.al(1995)においては、解析コード「FLIP」を用いて、1993年釧路沖地震の再現解析を実施している。1993年釧路沖地震の観測波はサイクリックモビリティの影響を示すスパイク状の地震波となっており、解析コード「FLIP」において地震観測値の密な地盤の液状化パラメータを設定することで、サイクリックモビリティの影響を示す観測値を再現することができたと報告している。よって、設置許可段階における構造物評価の見通しについては、解析コード「FLIP」を用いることとした。

なお、工事認可段階における構造物評価にあたっては、今回ご説明した液状化強度特性の妥当性および採用した解析コードの適用性について、2007年新潟県中越沖地震における取水路の鉛直変位など構造物の被害状況の再現性を検証することで確認する。また、構造物評価によっては、必要に応じて追加対策を実施する。

第 11-8-1 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<br>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<br>埋戻土層     | ○<br>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、基本物性のバラツキも考慮して保守的な設定とする。                           |
| 新期砂層<br>・沖積層                  | 完新世<br>(沖積層) | A-3<br>新期砂層・沖積層 |                          | サイクリック<br>モビリティ |                        |                                                               |
| 古安田層<br>(古安田層<br>中の砂層が<br>対象) | 更新世<br>(洪積層) | 新しい             | A-1<br>洪積砂層 I<br>洪積砂層 II | ×<br>対象外        | ※                      |                                                               |
|                               |              |                 | A-2<br>洪積砂層 I            |                 |                        |                                                               |
|                               |              | 古い              | A-2<br>洪積砂層 II           |                 | 非液状化                   | 非液状化であると考<br>えられるが、保守的<br>な構造物評価を実施<br>するため、液状化強<br>度特性を設定する。 |
| 0-1<br>洪積砂質土層 I<br>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

## 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

設置許可段階における構造物評価の見通しについて、代表構造物を選定した。第 11-9-1 表に設置許可段階における構造物評価の見通しを検討する代表構造物の選定を示す。

地盤の液状化による構造物評価への影響としては、地中に埋設した構造物への影響が考えられることから、代表構造物の選定にあたっては基礎形式に着目し、直接基礎形式及び杭基礎形式のそれぞれから選定する。

直接基礎構造物には、取水路・スクリーン室、補機冷却用海水取水路がある。補機冷却用海水取水路はマンメイドロックを介して西山層に支持しているため、直接基礎の代表構造物としては、支持地盤が古安田層である「取水路・スクリーン室」を抽出する。

杭基礎構造物には、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及び格納容器圧力逃がし装置基礎がある。地盤が液状化した場合には変形が大きくなる傾向となることから、杭基礎構造物が地盤の変形の影響を受ける程度に着目すると、杭部は杭長が長いほど、鉄筋コンクリート部は地中部の側面高さが高いほど影響が大きくなると考えられる。このため、杭基礎の代表構造物としては、杭長が他の構造物よりも長く、鉄筋コンクリート部の地中高さが高い「常設代替交流電源設備基礎」を抽出する。

選定した代表構造物について代表断面を選定し、代表断面について構造物影響評価を実施する。構造物評価の成立性および必要に応じた追加対策は、代表断面における構造物評価の結果をそれ以外の位置・構造物の見通しに展開する。

第 11-9-1 表 設置許可段階における構造物評価の見通しを検討する代表構造物の選定

| 設備分類      |               | 設備名称          | 基礎形式（杭長）   | 支持地盤              | 鉄筋コンクリート部の地中部の側面高さ | 構造概要       |
|-----------|---------------|---------------|------------|-------------------|--------------------|------------|
| 設計基準対象施設  | 屋外重要<br>土木構造物 | 取水路・スクリーン室    | 直接基礎       | 古安田層              | —                  | 鉄筋コンクリート構造 |
|           |               | 補機冷却用海水取水路    | 直接基礎       | 西山層 <sup>※1</sup> | —                  | 鉄筋コンクリート構造 |
|           |               | 軽油タンク基礎       | 杭基礎（約 20m） | 西山層               | 約 1.5m             | 鉄筋コンクリート構造 |
|           |               | 燃料移送系配管ダクト    | 杭基礎（約 25m） | 西山層               | 約 3 m              | 鉄筋コンクリート構造 |
| 重大事故等対処施設 |               | 常設代替交流電源設備基礎  | 杭基礎（約 30m） | 西山層               | 約 8 m              | 鉄筋コンクリート構造 |
|           |               | 格納容器圧力逃がし装置基礎 | 杭基礎（約 30m） | 西山層               | 約 2.5m             | 鉄筋コンクリート構造 |

※1：マンメイドロックを介して西山層に支持

## 9.2 取水路

### 9.2.1 構造概要及び評価断面

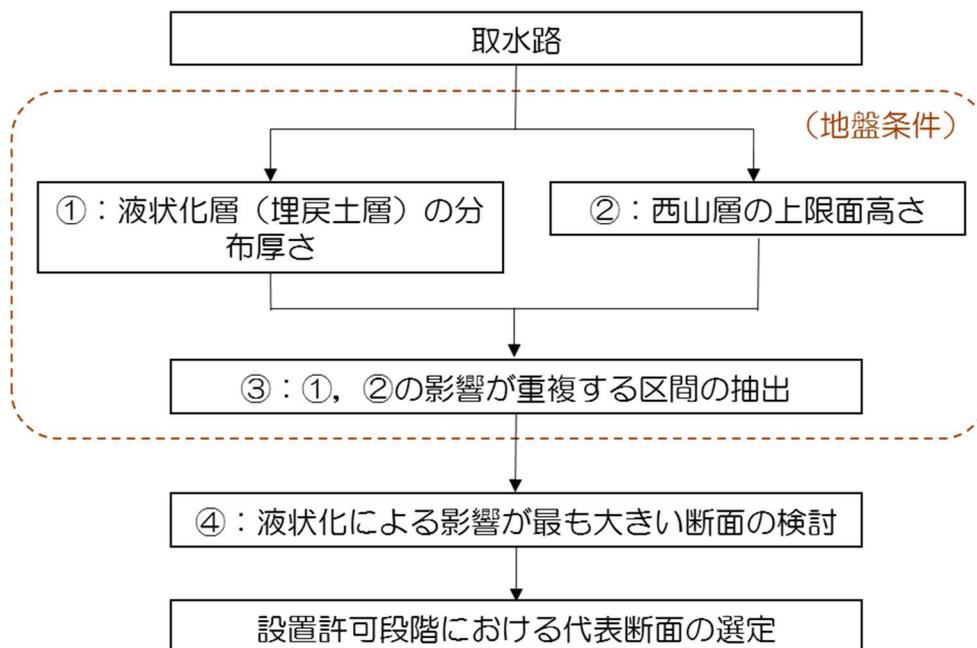
「取水路・スクリーン室」について液状化による設備への影響の見通しとして、液状化現象の影響が最も大きいと考えられる断面を選定し、構造物の評価を実施する。第 11-9-1 図に取水路における代表断面の選定フローを示す。

構造物評価への液状化の影響として、地盤条件の観点から①液状化層（埋戻土層）の分布厚さ、西山層より浅部の地盤での地震動増幅特性の観点から②西山層の上限面の高さに着目し、代表断面を選定する。

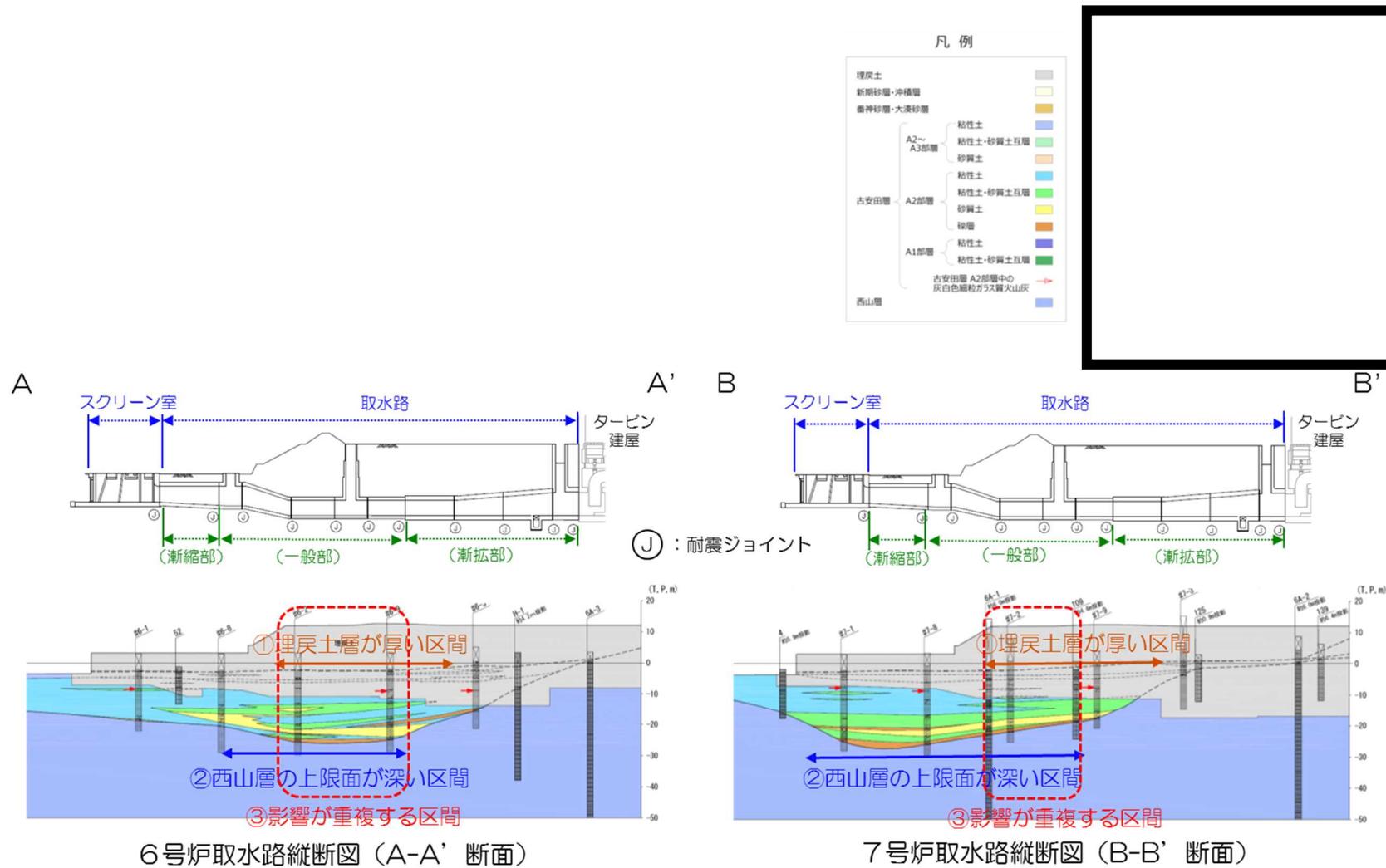
液状化層（埋戻土層）の分布厚さは、6/7号炉ともに取水路（一般部）から取水路（漸拡部）にかけて厚くなっている。西山層の上限面高さは、6号炉では取水路（一般部）において、7号炉ではスクリーン室から取水路（一般部）にかけて、深くなっている。両者の影響が重複する区間として、6/7号炉ともに取水路のうち一般部の区間が抽出される。詳細を第 11-9-2 図に示す。

6/7号炉の取水路（一般部）を比較すると、双方ともに取水路（一般部）の断面は古安田層を掘り込んでいるものの、7号炉の南側の側方は埋戻土層となっている。構造物側方に分布する古安田層の変形抑制効果を考慮すると、取水路（一般部）は、6号炉よりも7号炉の方が、液状化現象が構造物の耐震性に与える影響が大きいと考えられる。詳細を第 11-9-3 図に示す。

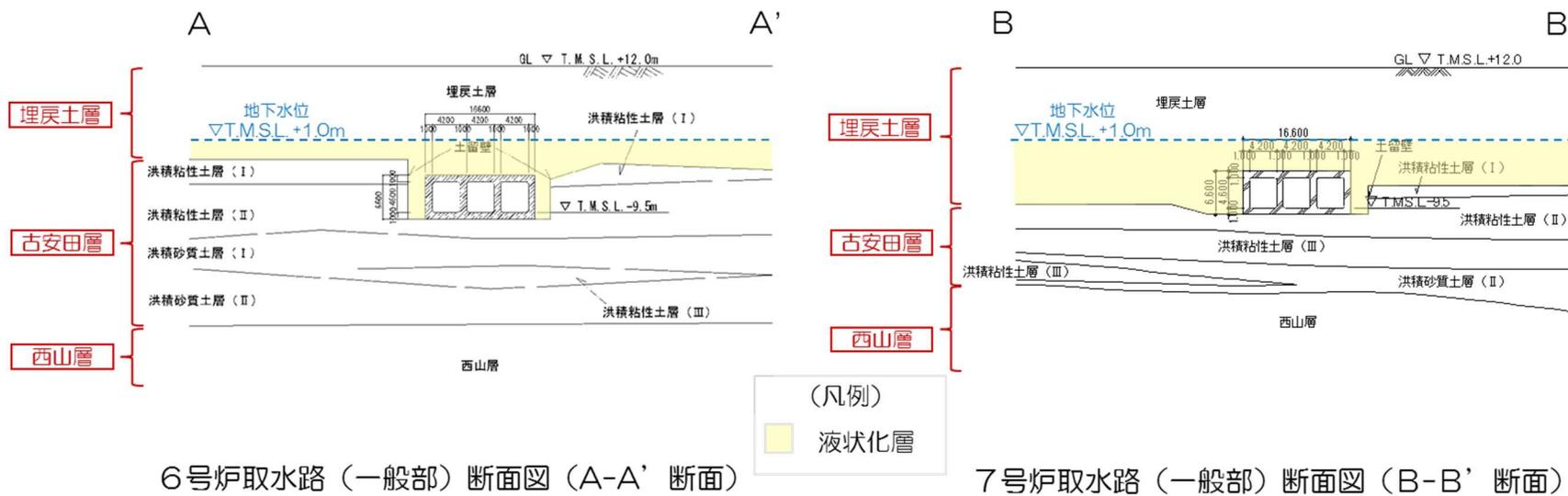
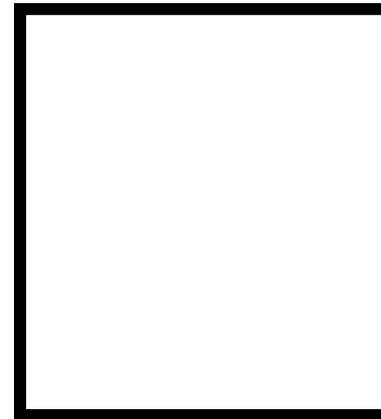
以上のことから、代表断面として、7号炉取水路（一般部）を選定し、2次元有効応力解析（FLIP）による評価を実施する。



第 11-9-1 図 取水路における代表断面の選定フロー



第 11-9-2 図 取水路における代表断面

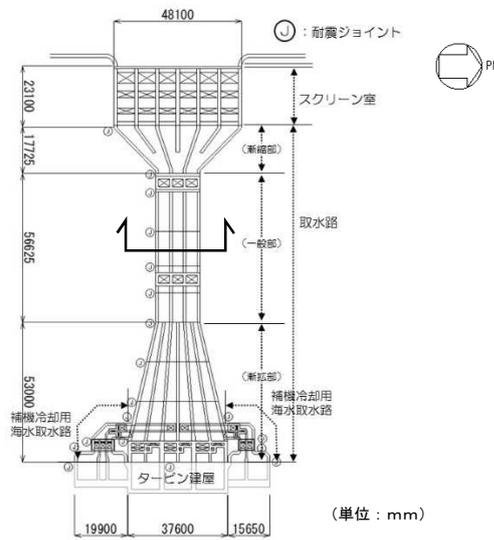


第 11-9-3 図 取水路における代表断面

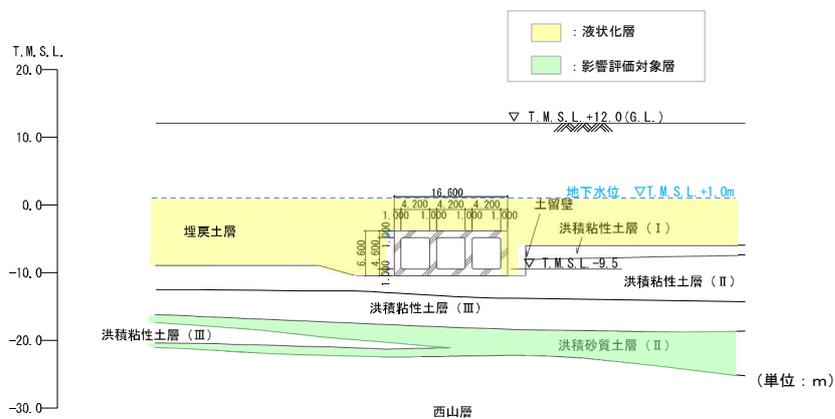
9.2.2 評価方針

取水路は、設計基準対象施設のうち屋外重要土木構造物に分類される鉄筋コンクリート製の地中埋設構造物である。7号炉取水路の平面図を第11-9-4図に、一般部の断面図を第11-9-5図に示す。

取水路の耐震評価では、設計基準対象施設として第11-9-2表の項目に示す評価を行う。構造部材の健全性評価については、地震応答解析に基づく鉄筋コンクリートの発生応力等が許容限界を超えないことを確認する。また、基礎地盤の支持性能については、鉛直方向の最大合力（最大鉛直力）が許容限界を超えないことを確認する。取水路の評価フローを第11-9-6図に示す。



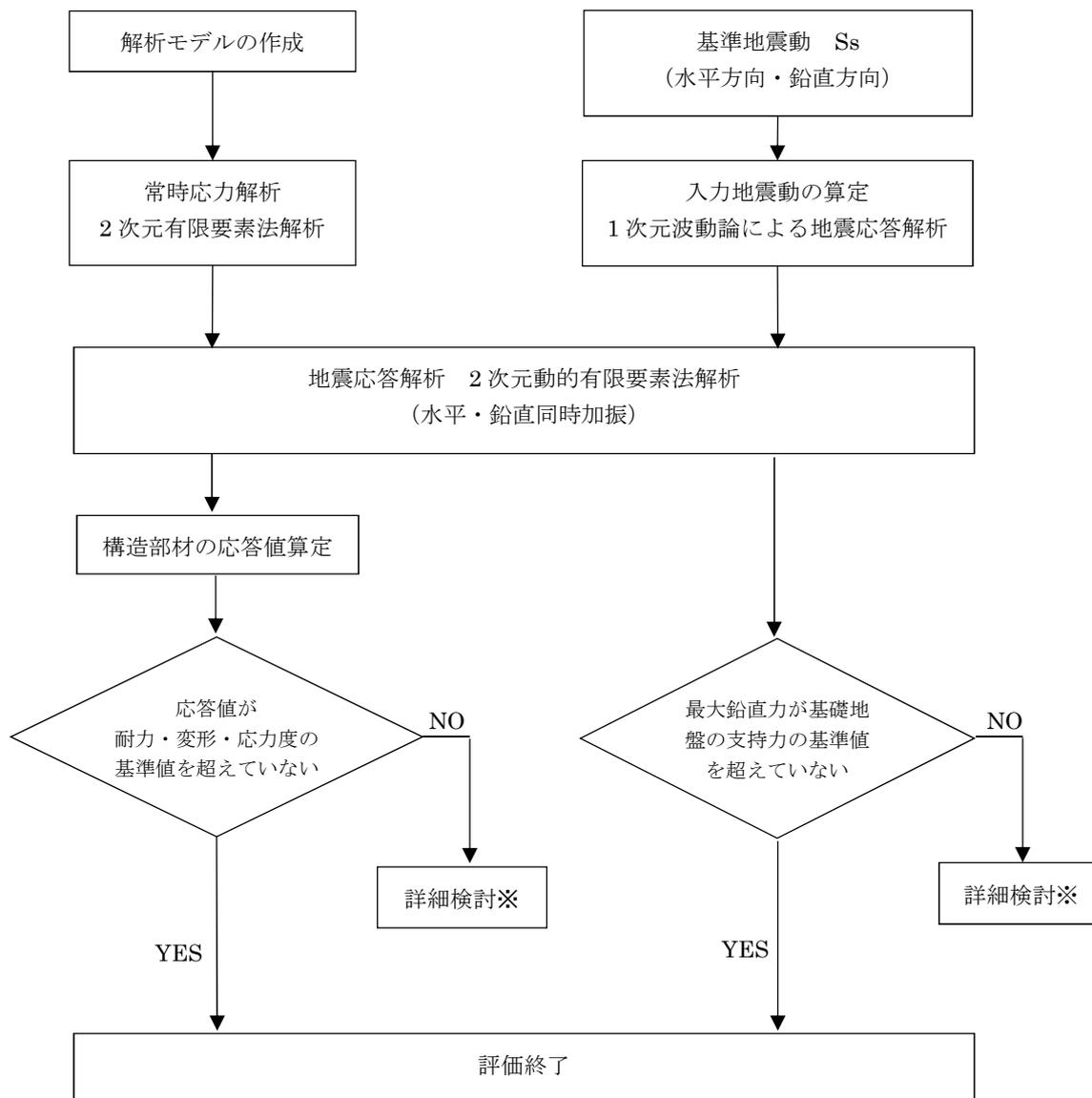
第11-9-4図 7号炉取水路平面図



第11-9-5図 7号炉取水路（一般部）断面図

第 11-9-2 表 取水路の評価項目

| 評価方針       | 評価項目      | 地震力         | 部位       | 評価方法                     | 許容限界           |
|------------|-----------|-------------|----------|--------------------------|----------------|
| 構造強度を有すること | 構造部材の健全性  | 基準地震動 $S_s$ | 鉄筋コンクリート | 発生応力等が許容限界を超えないことを確認     | 限界層間変形角, せん断耐力 |
|            | 基礎地盤の支持性能 | 基準地震動 $S_s$ | 基礎地盤     | 鉛直方向の最大合力が許容限界を超えないことを確認 | 極限支持力          |



※検討の内容に応じて、必要なプロセスへ戻る

第 11-9-6 図 取水路の評価フロー