

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-24-0015_改1
提出年月日	2021年8月25日

女川原子力発電所第2号機  
地下水位の設定，耐震評価における断面選定  
(指摘事項に対する回答)及び  
後施工せん断補強筋(CCb工法)の適用性について

2021年8月25日  
東北電力株式会社

# 目次

1. 本日のご説明内容
2. 地下水位低下設備の耐震評価結果
3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性
4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果
5. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の適用性
6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果
7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果
8. 地下水位が低い場合の影響確認結果
9. まとめ

(参考資料)

参考1 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の室内模型実験

参考2 浮上りの評価フロー

# 1. 本日のご説明内容

## 第876回審査会合からの流れ

- 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)において主な説明事項として説明した「No.2-1 地下水位の設定, 耐震評価における断面選定」及び「No.2-7 後施工せん断補強筋(CCb工法)の適用性」について説明する。(下表の赤枠部分)
- No.2-1については, 第952回審査会合(令和3年3月2日)及び第979回審査会合(令和3年6月1日)で一部説明しており, 未説明の内容として, 設計用地下水位の前提条件となる地下水位低下設備の耐震性と, 設計用地下水位が評価に直接影響する屋外アクセスルートの浮上り評価結果について説明する。

### 詳細設計申送り事項(第876回審査会合資料抜粋)

主な説明事項 No.	項目	概要	説明頁	目次
2-1	地下水位の設定, 耐震評価における断面選定	女川特有の地下水位低下設備の設備構成, 設計用地下水位の設定結果, 設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法及び地震応答解析断面の選定結果について説明する*。なお, 地下水位低下設備の耐震性やアクセスルート評価については今後説明する。	p.5~7 p.32~35	2. 地下水位低下設備の耐震評価結果 7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果
2-7	後施工せん断補強筋(CCb工法)の適用性	設置許可段階において, 詳細設計段階における設計方針を説明しているCCb工法について, 面内・面外荷重作用時の影響を数値実験の結果に基づき説明する。	p.19~22	5. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の適用性

: 今回説明範囲

注記\* : 第952回審査会合(令和3年3月2日)及び第979回審査会合(令和3年6月1日)において説明(p.3参照)

# 1. 本日のご説明内容

## 第952回及び第979回審査会合の指摘事項に対する回答

- 第952回審査会合(令和3年3月2日)及び第979回審査会合(令和3年6月1日)において、「No.2-1 地下水位の設定, 耐震評価における断面選定」について説明し, 以下の指摘があったことから, 指摘事項に対する回答内容を説明する。

### 審査会合における指摘事項一覧

指摘事項No.	審査会合	指摘事項	回答頁	目次
1	第979回審査会合 (令和3年6月1日)	3.11地震後に発電所敷地の護岸で計測された水平変位を踏まえ, 有効応力解析の妥当性及び液状化強度特性の保守性について検証し, 説明すること。	p.8~11	3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性
2	第979回審査会合 (令和3年6月1日)	解析手法選定フロー④における液状化等の影響を受けないことを定量的に確認できた施設について, 影響を受けなかった要因を分析した上で, 評価結果を説明すること。	p.12~18	4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果
3	第979回審査会合 (令和3年6月1日)	解析手法選定フロー⑤で示す施設について, 地盤改良及び後施工せん断補強筋等の効果を踏まえた耐震評価の結果並びに浮上りの評価及び地下水位が低い場合の影響評価の結果を説明すること。	p.23~31  p.36~40	6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果  8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 (検討結果を説明)*
4	第952回 審査会合 (令和3年3月2日)	設計用地下水位を高め設定していることを踏まえ, 地下水位が低い場合の影響を整理して説明すること。	p.36~40	8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 (検討結果を説明)*

注記\* : 第979回審査会合において検討方針を説明

# 1. 本日のご説明内容 説明の流れ

▶ 耐震評価の手順に基づき、以下の事項について説明する。

耐震評価の手順	これまでの審査会合における説明内容	本日の説明事項
<p>地下水位の設定</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位低下設備の設備構成</li> <li>浸透流解析による設計用地下水位の設定</li> </ul>	<p>2. 地下水位低下設備の耐震評価結果 [主な説明事項No.2-1]</p>
<p>地盤の液状化強度特性</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>盛土及び旧表土の液状化強度試験結果と繰返し軟化特性</li> <li>液状化強度試験結果を基に液状化強度特性を保守的に設定</li> </ul>	<p>3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性 [指摘事項No.1]</p>
<p>評価対象断面の選定 解析手法の選定</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>施設の設置・地盤状況や設計用地下水位を踏まえ保守的な評価となる断面を選定</li> <li>液状化影響の考慮が必要な施設(有効応力解析)と不要な施設(全応力解析)を分類する解析手法の選定フロー</li> </ul>	<p>4. 全応力解析で評価可能と判断した施設(解析手法選定フロー④)に対する液状化影響の定量評価結果 [指摘事項No.2]</p>
<p>対策工事の検討</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>変形抑制や液状化対策を目的に施工した地盤改良</li> </ul>	<p>5. 後施工せん断補強工法(CCb工法)の適用性 [主な説明事項No.2-7]</p>
<p>耐震評価 浮上りの評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>液状化の影響を受けるか否かの判断が難しい施設(解析手法選定フロー⑤)については全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を実施。あわせて浮上り評価も実施</li> <li>設計用地下水位の設定結果を踏まえて、屋外アクセスルートに対する浮上り評価を実施</li> <li>設計用地下水位を高め設定していることを踏まえて、地下水位が低い場合の影響確認方針を整理</li> </ul>	<p>6. 全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を行う施設(解析手法選定フロー⑤)に対する、補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 [指摘事項No.3]</p> <p>7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果 [主な説明事項No.2-1]</p> <p>8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 [指摘事項No.4]</p>

### ■ 主な説明事項2-1

女川特有の地下水位低下設備の設備構成，設計用地下水位の設定結果，設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法及び地震応答解析断面の選定結果について説明する\*。なお，**地下水位低下設備の耐震性**やアクセスルート評価については今後説明する。

：本章の説明範囲

注記\*：第952回審査会合（令和3年3月2日）及び第979回審査会合（令和3年6月1日）において説明

### ■ 説明要旨

（背景）

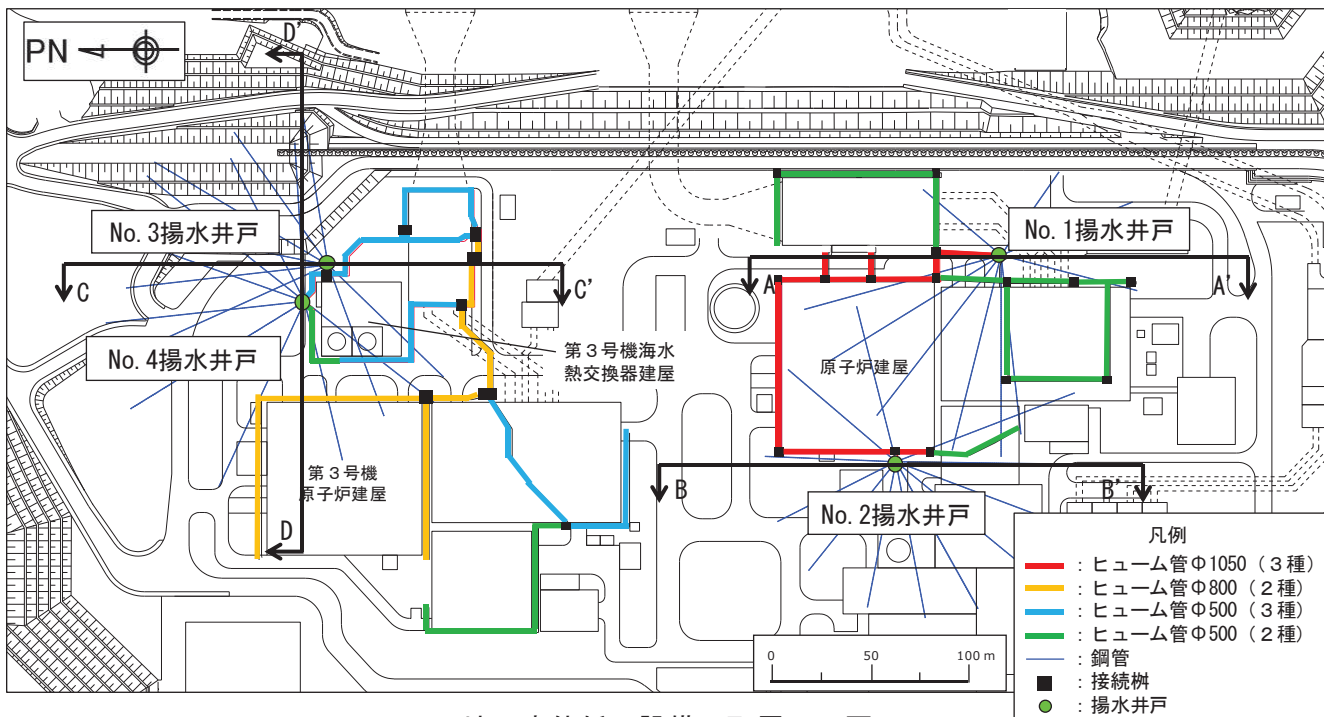
- これまでの審査会合において，地下水位低下設備の設備構成と，地下水位低下設備の機能に期待した浸透流解析結果について説明したうえで，浸透流解析結果に基づく設計用地下水位の設定について説明している。
- 今回，設計用地下水位の前提条件となる，基準地震動 $S_s$ に対する地下水位低下設備の耐震性について説明する。

（結論）

- 地下水位低下設備を構成する設備毎に耐震性の評価を実施し，基準地震動 $S_s$ に対し機能が損なわれないことを確認した。
  - ✓ 地下水位低下設備の各機能を構成する多数の設備について，設備毎に耐震性の評価を実施し，基準地震動 $S_s$ に対し機能が損なわれないことを確認した。
  - ✓ 多数の設備のうち，液状化の影響を考慮するため全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を実施している揚水井戸を代表として耐震評価結果を説明する。
  - ✓ 評価の結果，液状化の発生範囲は局所的で，両手法による照査値は同等か，有効応力解析の方が厳しい結果が得られたが，いずれの手法においても安全機能が維持されることを確認した。

## 2. 地下水位低下設備の耐震評価結果 地下水位低下設備の配置および設備構成

- 地下水位低下設備は、集水機能や排水機能等、多くの機能を有するため、各機能に対し多種の設備から構成される。
- 設備毎に耐震評価を行い、基準地震動 $S_s$ に対し機能が維持されることを確認した。



地下水位低下設備の配置平面図

地下水位低下設備の要求機能及び構成

機能	設備構成
集水機能	ドレーン (ヒューム管, 鋼管)
	接続樹
支持・閉塞 防止機能	揚水井戸
	蓋
排水機能	揚水ポンプ
	配管
監視・制御 機能	水位計
	制御盤
電源機能	電源盤



## 2. 地下水位低下設備の耐震評価結果 揚水井戸の耐震性評価結果

- 地下水位低下設備のうち、地下水位以深の盛土と接しており、液状化の影響を考慮するため全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を実施している揚水井戸を代表として耐震評価結果を説明する。
- 揚水井戸のうち、設計用地下水位が最も高く、地下水位の影響を受けやすいNo.2揚水井戸を代表として、耐震評価結果を示す。
- 揚水井戸は、基準地震動Ssに対して十分な耐震性を有していることを確認した。

### <耐震評価結果>

- ・ 揚水井戸から離れて局所的に分布している旧表土において液状化が発生した。
- ・ 照査値は、有効応力解析と全応力解析で同等、もしくは有効応力解析の方がやや厳しい傾向がみられたが、最大でも照査値は0.6程度であり、十分な耐震性を有していることを確認した。

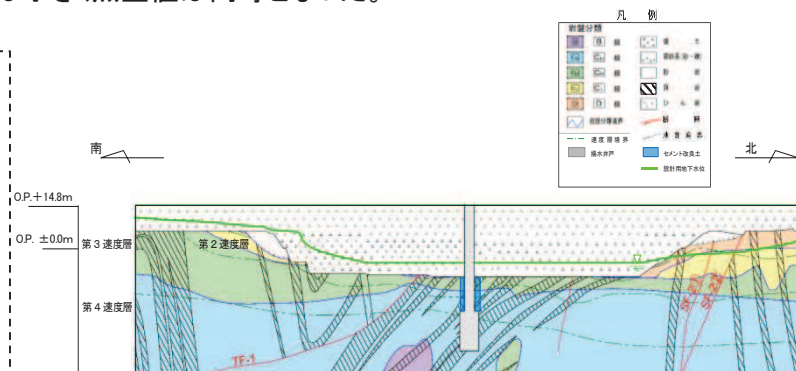
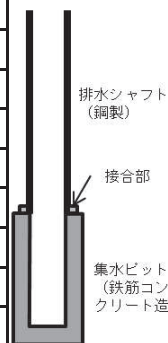
### <評価手法による照査値の相違に関する考察>

- ・ 排水シャフトは盛土内に配置されており、地盤変位の影響を直接受けるため、液状化の影響を考慮する有効応力解析による照査値の方が厳しい傾向を確認した。
- ・ 接合部も、排水シャフトを介して地盤変位の影響を間接的に受けるため有効応力解析による照査値の方が厳しい傾向を確認した。
- ・ 集水ピットについては岩盤内の深い位置に設置されるため、解析手法による差は小さく照査値は同等となった。

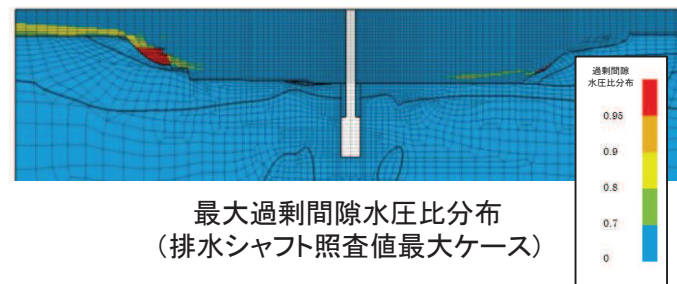
No.2揚水井戸耐震評価結果

部位	照査項目	解析手法	発生値	許容限界	照査値
排水シャフト	曲げ・軸力	有効応力	209N/mm <sup>2</sup>	367.5N/mm <sup>2</sup>	0.57
		全応力	164N/mm <sup>2</sup>	382.5N/mm <sup>2</sup>	0.43
	せん断	有効応力	35kN	210kN	0.17
		全応力	31kN	217.5kN	0.15
接合部	曲げ・軸力	有効応力	143N/mm <sup>2</sup>	400N/mm <sup>2</sup>	0.36
		全応力	118N/mm <sup>2</sup>	400N/mm <sup>2</sup>	0.30
	せん断	有効応力	57kN	230.9kN	0.25
		全応力	53kN	230.9kN	0.23
集水ピット	曲げ・軸力	有効応力	184N/mm <sup>2</sup>	324N/mm <sup>2</sup>	0.57
		全応力	190N/mm <sup>2</sup>	324N/mm <sup>2</sup>	0.59
	せん断	有効応力	1123kN	2384kN	0.48
		全応力	1192kN	2384kN	0.50
	支持力	有効応力	1.2N/mm <sup>2</sup>	13.7N/mm <sup>2</sup>	0.09
		全応力	1.2N/mm <sup>2</sup>	13.7N/mm <sup>2</sup>	0.09

照査部位



No.2揚水井戸地質断面図



最大過剰間隙水圧比分布  
(排水シャフト照査値最大ケース)



#### ■ 指摘事項No.1

3.11地震後に発電所敷地の護岸で計測された水平変位を踏まえ、有効応力解析の妥当性及び液状化強度特性の保守性について検証し、説明すること。



#### ■ 回答1

##### (背景)

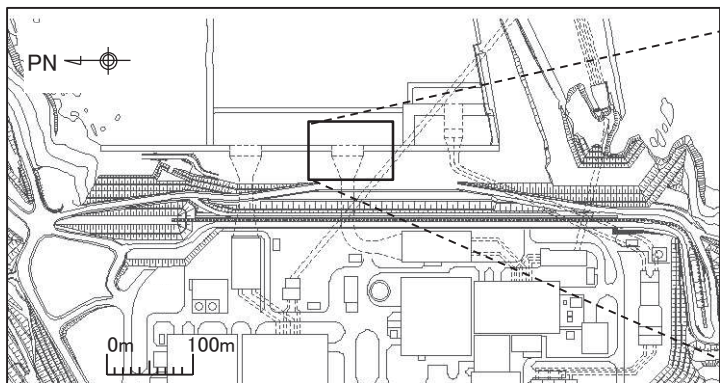
- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下「3.11地震」という。)後に、取水口側面の矢板護岸の海側への水平変位が確認されている。
- 有効応力解析の妥当性の確認として、液状化強度特性を液状化強度試験の平均値とした有効応力解析による矢板護岸の水平変位と実測値の比較により検証する。
- 液状化強度特性の保守性の確認として、液状化強度特性を液状化強度試験の下限値とした有効応力解析による矢板護岸の水平変位と実測値の比較により検証する。

##### (検証結果)

- 液状化強度試験の平均値に対する検証解析の結果、地盤の液状化の影響により矢板護岸に水平変位が発生し、地震後に実測された水平変位の傾向を解析上表現できていることから、有効応力解析の妥当性を確認した。
- 液状化強度試験の下限値に対する検証解析の結果、矢板護岸の水平変位量は、実測値を大きく上回ることから、耐震評価上、側方流動の影響を考慮する観点も踏まえ、女川の液状化強度特性の設定が保守性を有していることを確認した。

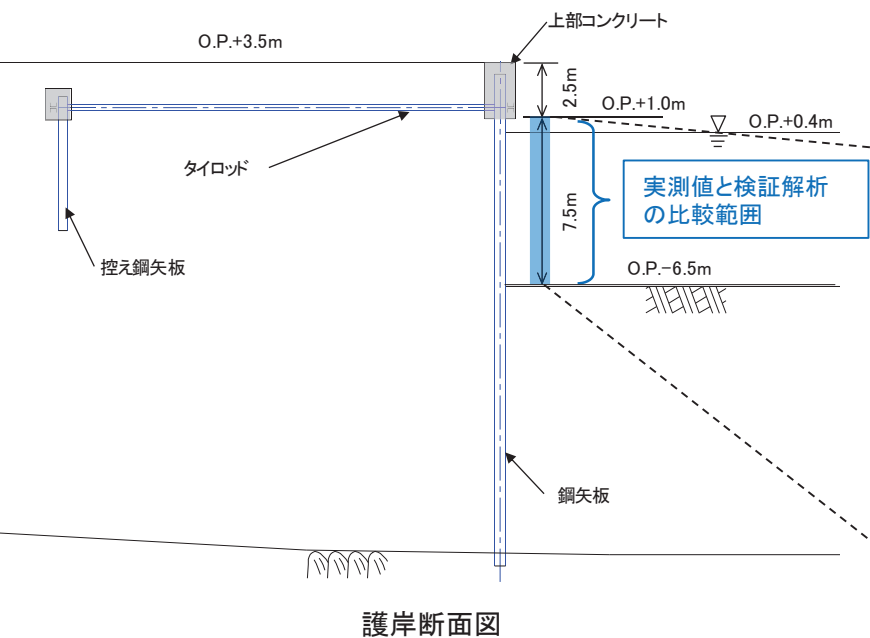
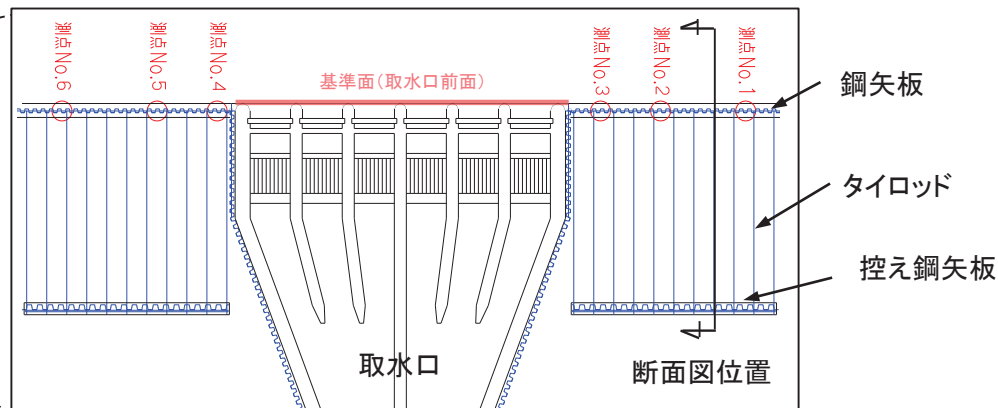
### 3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性 護岸の水平変位実測値

➤ 3.11地震による取水口側面の矢板護岸の水平変位計測箇所及び水平変位量の実測値を以下に示す。

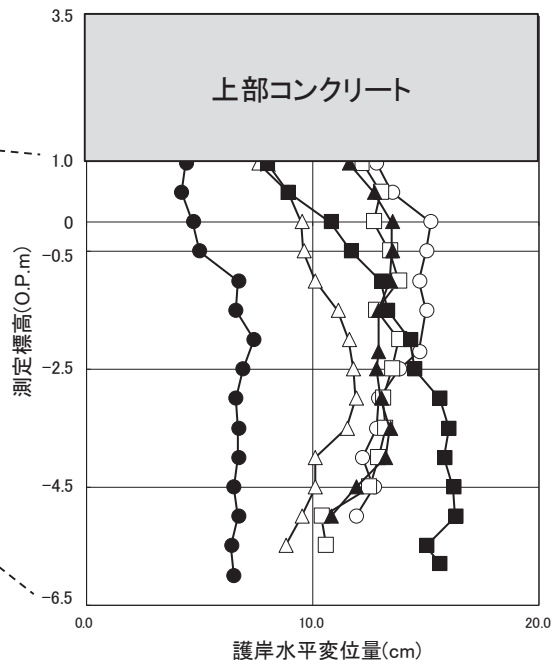


平面図\*

注記\* : 平面図は防潮堤を含めた安全対策工事完了後を示す



護岸断面図

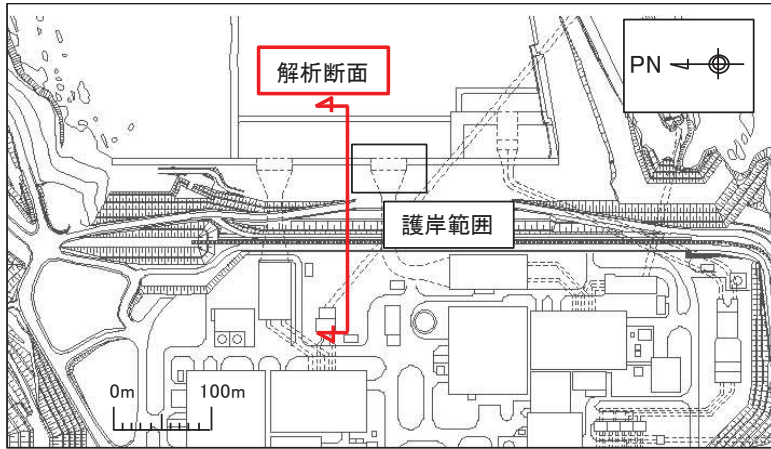


測定箇所	6箇所
測定結果	最大16.3cm (測点No.5)

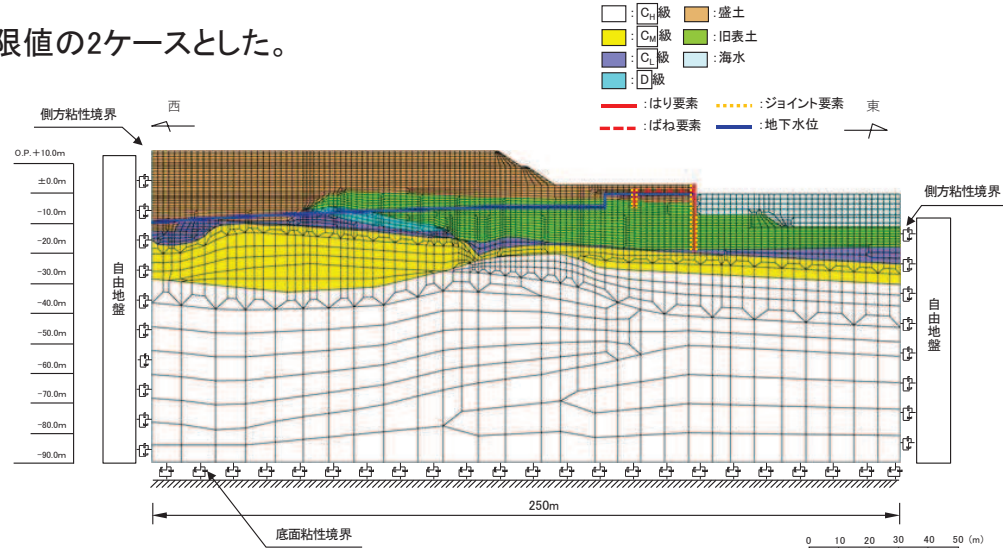


### 3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性 検証解析条件

- 3.11地震の検証解析条件を以下に示す。
- 液状化強度特性は液状化強度試験結果の平均値及び下限値の2ケースとした。



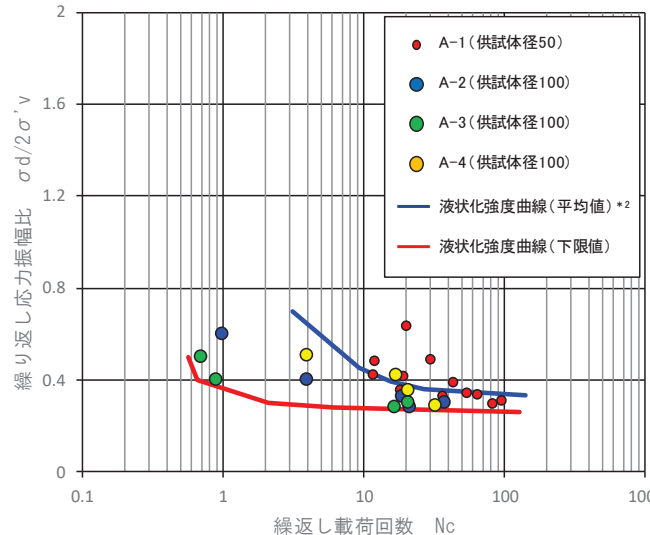
平面図 \*1



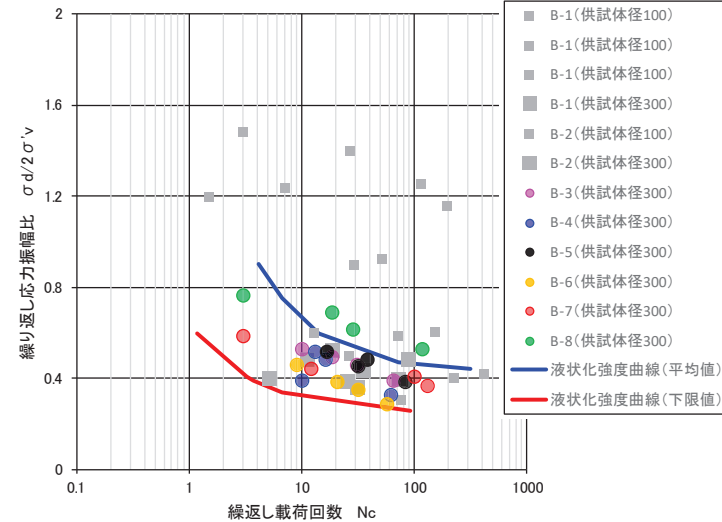
解析モデル(3.11地震時点での断面)

#### 解析条件

項目	解析条件
解析断面	・ 取水口護岸近傍断面
対象地震動	・ 3.11地震観測波 (東西方向, 鉛直方向)
地下水位	・ 観測記録を基に設定
液状化強度特性	・ 平均値 ・ 下限値(工認設計の条件)



液状化強度特性(旧表土)

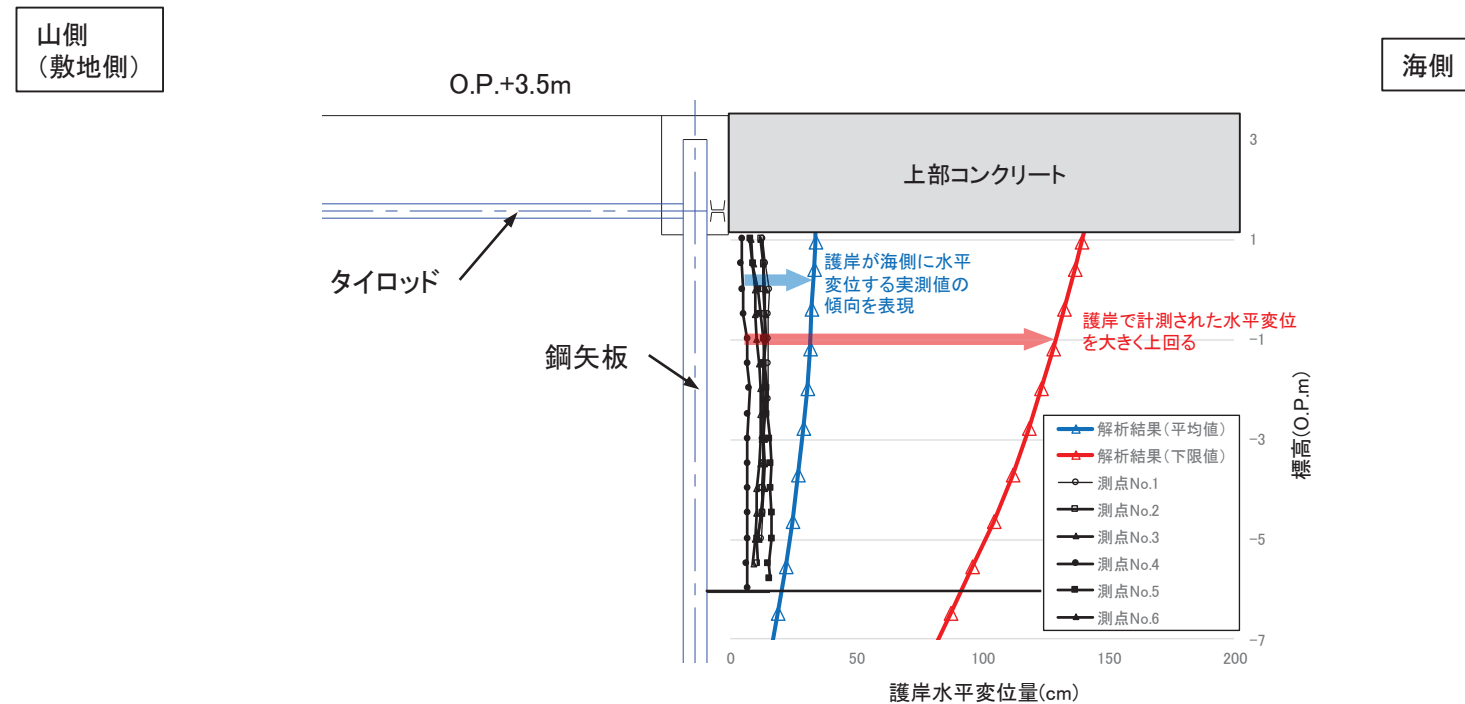


液状化強度特性(盛土)

注記 \* 1: 平面図は防潮堤を含めた安全対策工事完了後を示す  
\* 2: 液状化強度特性平均値はA-1及びA-3供試体データより設定

### 3. 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性 検証解析結果と実測値の比較

- 液状化強度特性を平均値としたケースにおいては、矢板護岸が海側へ水平変位を生じる実測値の傾向を解析上で表現できていることから、有効応力解析を用いた評価は妥当であると判断した。
- 液状化強度特性を下限値としたケースにおいては、耐震評価上、側方流動の影響を考慮する観点において、矢板護岸の残留水平変位実測値を大きく上回る結果が得られていることから、女川の液状化強度特性の設定(液状化強度試験の下限値)は保守的な設定であると判断した。



3.11地震の検証解析結果と矢板護岸の水平変位実測値の比較

##### ■ 指摘事項No.2

解析手法選定フロー④における液状化等の影響を受けないことを定量的に確認できた施設について、影響を受けなかった要因を分析した上で、評価結果を説明すること。



##### ■ 回答2

###### (背景)

- 解析手法選定フロー④の施設は、評価断面に地下水位以深の盛土や旧表土が局所的に分布し、液状化等の影響を受けないことを定量的に確認することにより、全応力解析による耐震評価が適用可能と判断する施設である。
- 解析手法選定フロー④の施設のうち、評価断面に地表面の傾斜が含まれることで、液状化による側方流動の影響が考えられ、かつ、施設周辺に液状化検討対象層が局所的に分布している海水ポンプ室を代表として、液状化の影響に対する定量的な確認内容を説明する。

###### (定量的な確認結果)

- 海水ポンプ室には地表面傾斜部の側方流動の影響が及ばず、かつ施設近傍の地盤では液状化が発生しないことが定量的に確認できたことから、全応力解析による耐震評価が適用可能であると判断した。
  - ✓ 海水ポンプ室を通る防潮堤を対象とした二次元有効応力解析の結果を引用し、海側護岸(O.P.+3.5m盤)が液状化して地表面の傾斜部には側方流動の影響が確認されるものの、海水ポンプ室には影響が及ばないことを確認した。
  - ✓ 海水ポンプ室近傍の盛土に対する一次元有効応力解析の結果、液状化は発生しないことから、海水ポンプ室が地盤の液状化の影響や浮上りの影響を受ける可能性がないことを確認した。

###### (海水ポンプ室が液状化の影響を受けない要因分析)

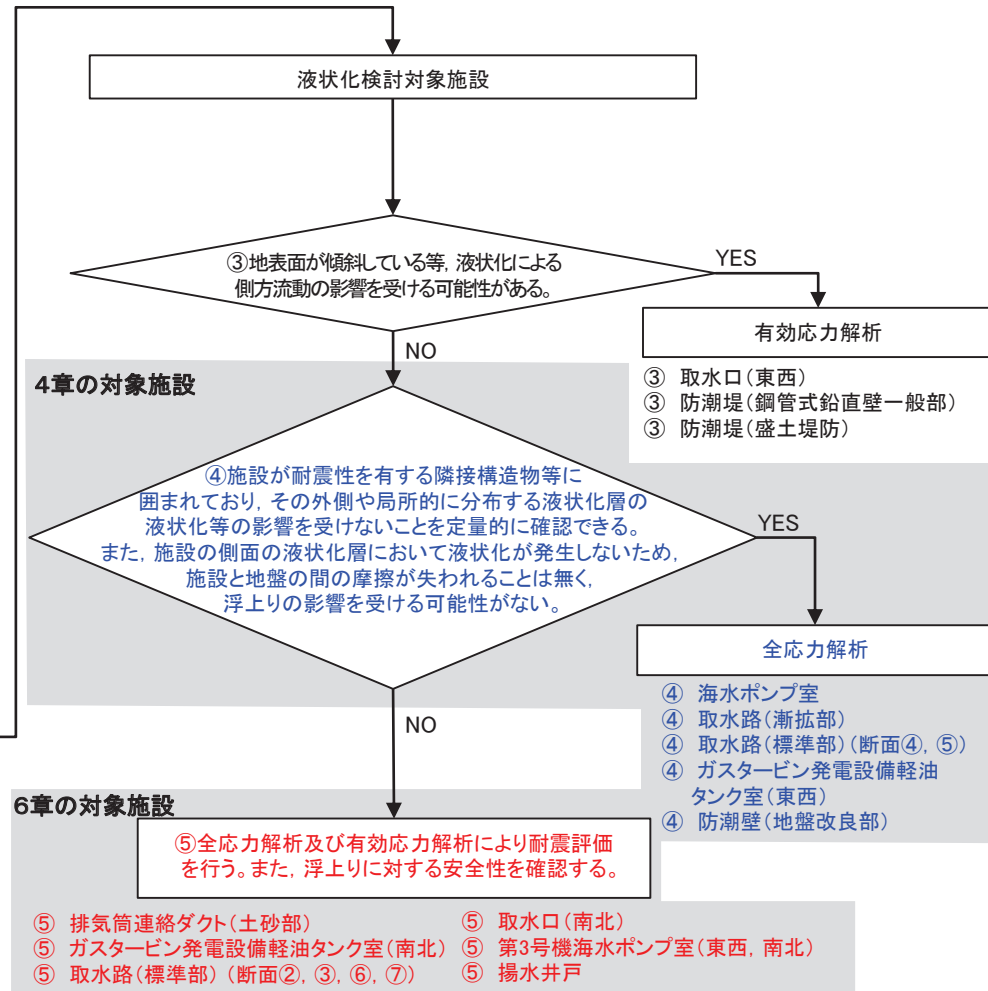
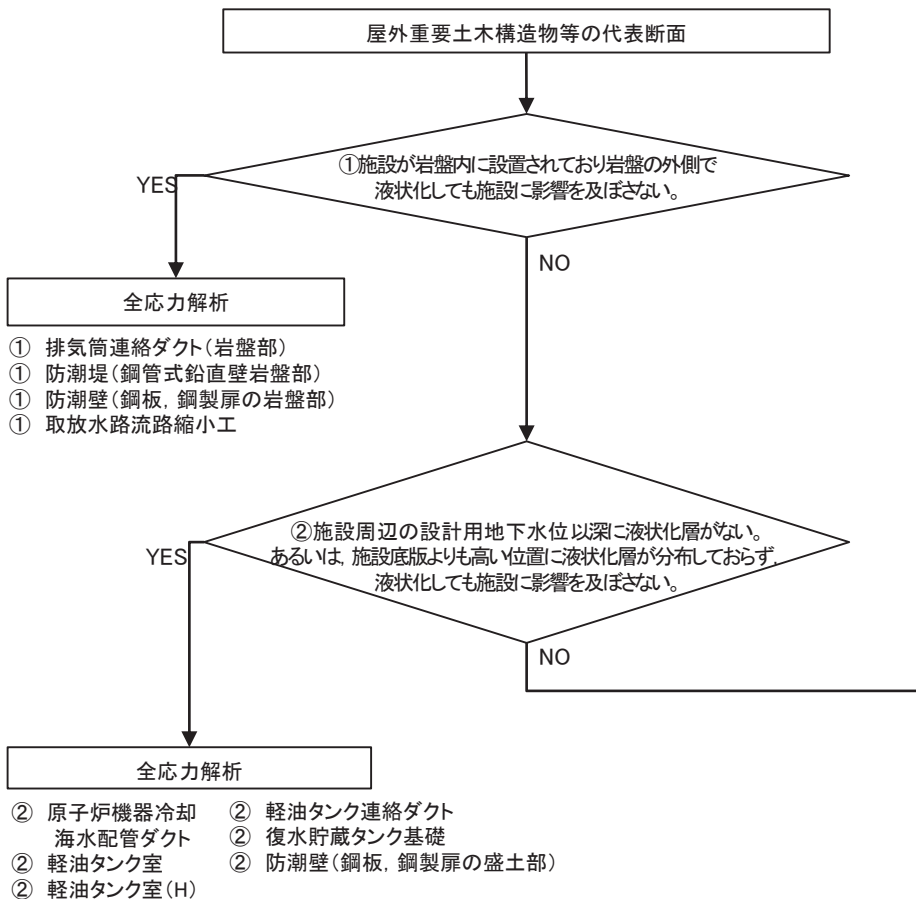
- 海側護岸の液状化と斜面の側方流動の影響は、防潮堤の設置及び海水ポンプ室周辺の地盤改良効果により、海水ポンプ室には影響は及ばないと分析した。
- 海水ポンプ室近傍の盛土で液状化が発生しない要因は、盛土は締固め度の高い密詰め状態であり、繰返し荷重に対する有効応力の減少が少しずつしか進まない、いわゆる繰返し軟化を示すことや、地下水位低下設備により地下水位が下げられているため、有効拘束圧が大きく、液状化抵抗が大きいと分析した。



## 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 解析手法の選定フロー

➤ 第979回審査会合で説明した解析手法の選定フローの④に該当する施設は、評価断面に地下水位以深の盛土や旧表土が局所的に分布し、液状化等の影響を受けないことを定量的に確認することにより、全応力解析による耐震評価が適用可能と判断する施設である。(下図、青字部に該当)

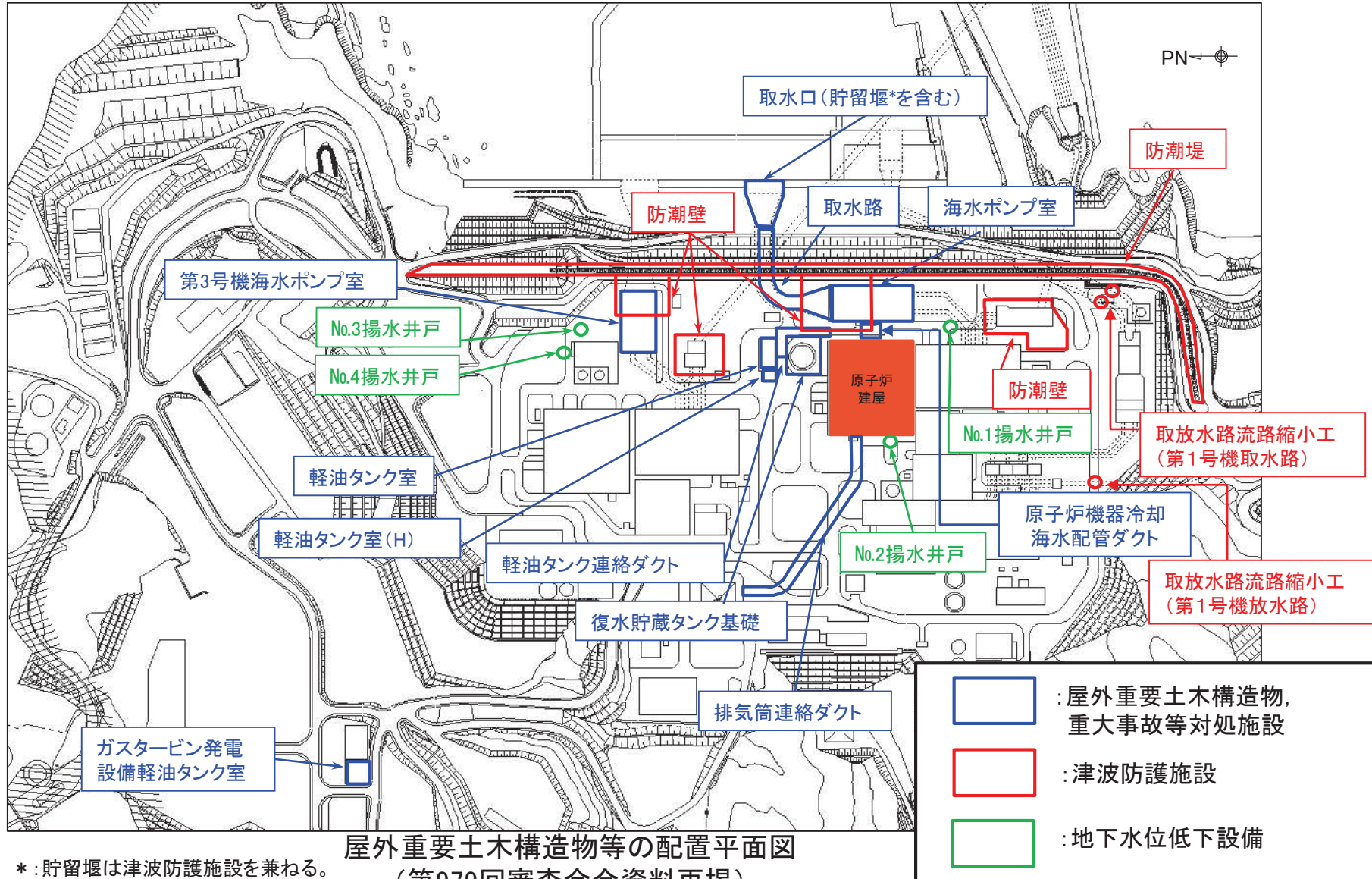
解析手法の選定フロー  
(第979回審査会合資料、一部加筆)





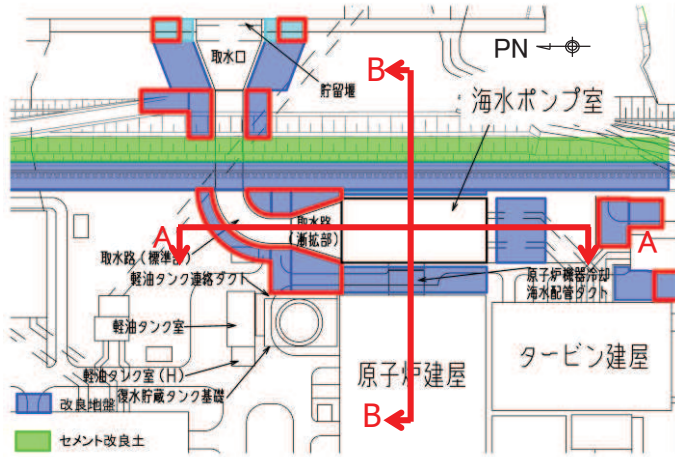
#### 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 屋外重要土木構造物等配置平面図

➤ 第979回審査会合で説明のとおり、解析手法の選定で対象とした構造物は、耐震評価において、地盤の液状化の影響が直接及ぶ土圧が支配的要因である地中構造物(屋外重要土木構造物等)であり、配置平面図を以下に示す。



## 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 液状化影響の評価対象

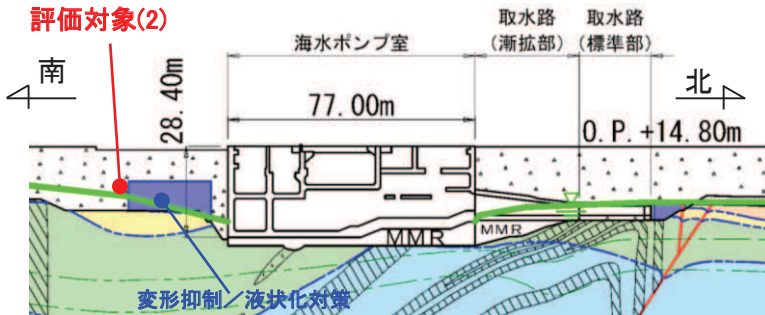
- 解析手法選定フロー④の施設のうち、海水ポンプ室の評価断面には以下の2項目の液状化に対する評価対象が含まれることから、海水ポンプ室を代表として、施設が液状化等の影響を受けないことを定量的に確認した内容を説明する。



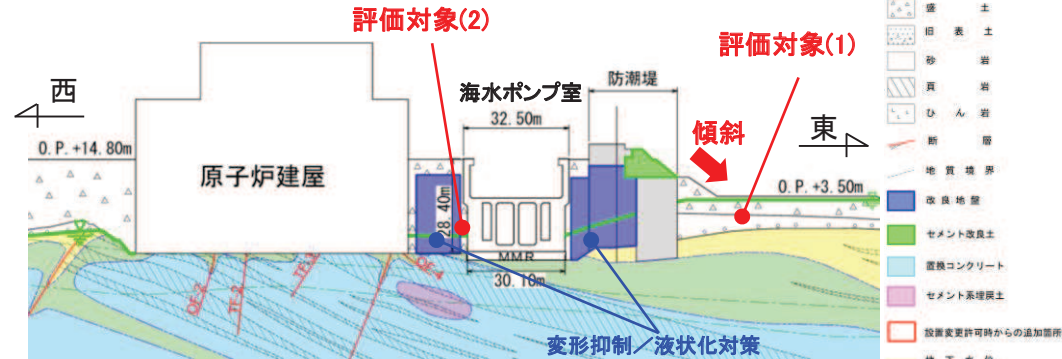
海水ポンプ室の配置図と地盤改良範囲

### 液状化影響の評価対象

	液状化による影響
評価対象(1)	海側護岸 (O.P.+3.5m盤) の盛土・旧表土が液状化し、傾斜部が側方流動すると、防潮堤等の変形が海水ポンプ室に及ぶ可能性がある。
評価対象(2)	海水ポンプ室近傍の局所的な盛土が液状化し、海水ポンプ室の地震時応答や浮上りに影響が及ぶ可能性がある。



縦断面 (A-A断面)



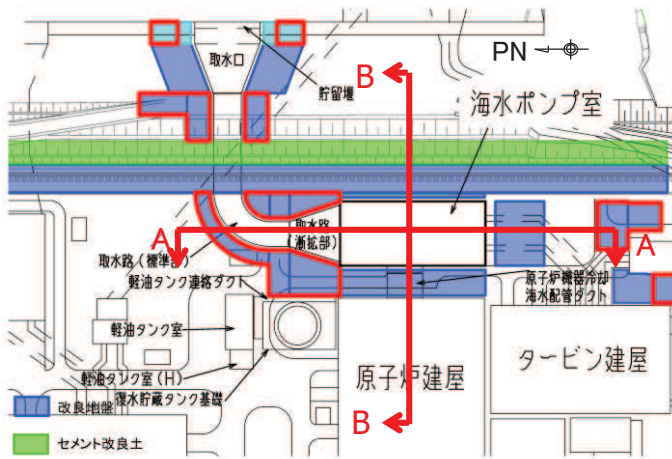
横断面 (B-B断面)



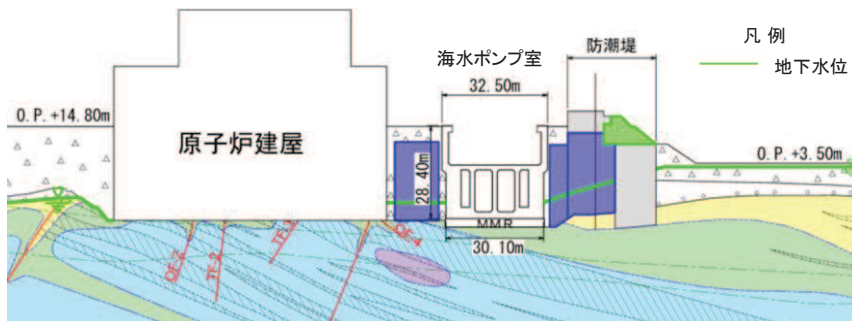


## 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 評価対象(1) の評価結果

- 評価対象(1)であるO.P.+3.5m盤の液状化の影響を確認するため、海水ポンプ室を通る防潮堤B-B断面の有効応力解析結果を引用する。
- O.P.+3.5m盤では、旧表土が液状化し、残留変位が認められたが、海水ポンプ室が設置されるO.P.+14.8m盤では、残留変位が認められず、O.P.+3.5m盤の液状化の影響は及ばないと判断した。
- 海側護岸の液状化と斜面の側方流動は、防潮堤の設置及び海水ポンプ室周辺の地盤改良効果により、海水ポンプ室には影響は及ばないと分析した。

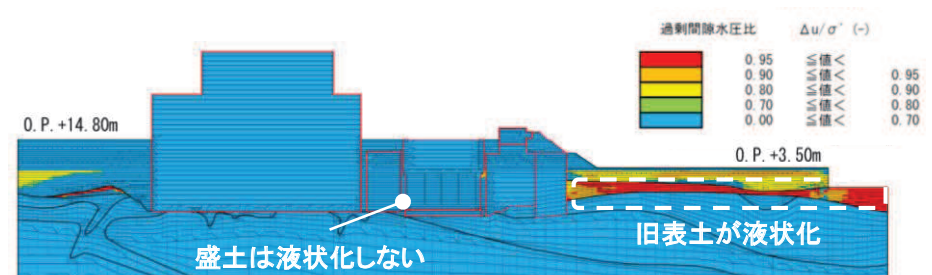


解析断面位置図(B-B断面)



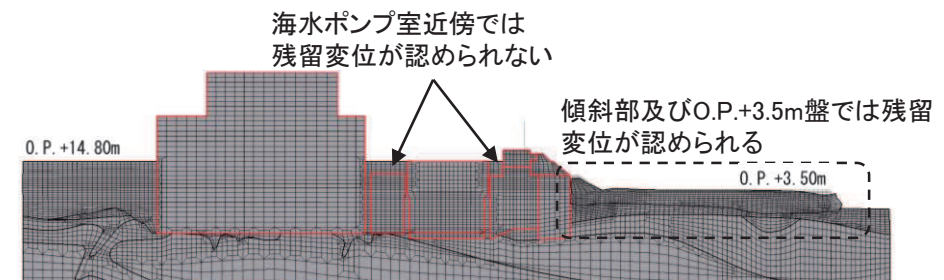
B-B断面の地質断面図

B-B断面の有効応力解析による過剰間隙水圧比分布では、傾斜部の下方を含むO.P.+3.5m盤の旧表土が液状化している。海水ポンプ室近傍の盛土は液状化していない。



注記: O.P.+14.8m盤の地下水位は保守的にO.P.+2.43mとしている。

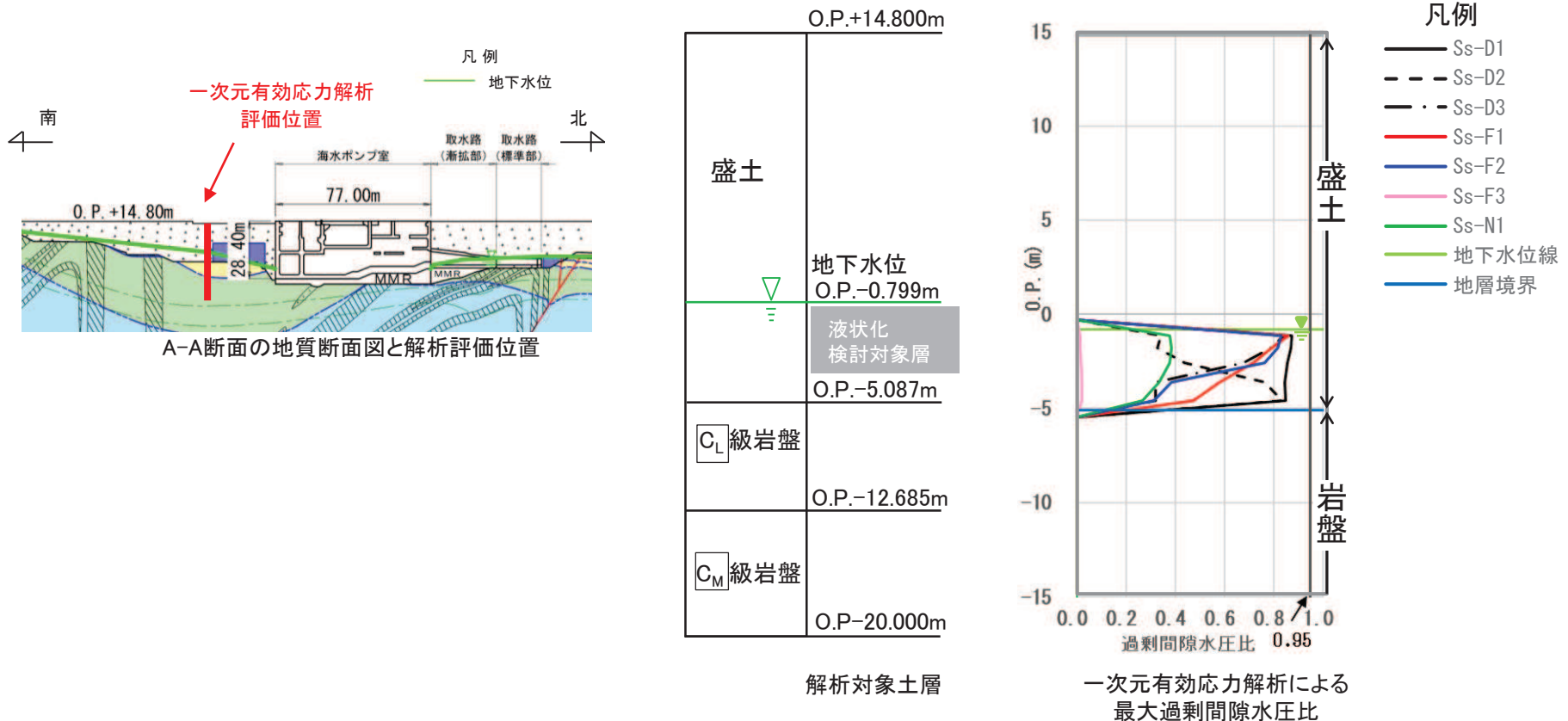
B-B断面の最大過剰間隙水圧比分布( $S_s-D1(++)$ )



B-B断面の残留変形図( $S_s-D1(++)$ ), 変形倍率2倍)

#### 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 評価対象(2)の評価結果

- 評価対象(2)のうち海水ポンプ室近傍の盛土は、前頁の有効応力解析の結果において、液状化は認められなかった。
- 海水ポンプ室近傍より地下水位が高く、液状化しやすいと考えられる海水ポンプ室南側の盛土を対象に、地盤の応答が保守的に評価される一次元有効応力解析を実施した結果、液状化は発生しない結果が得られた。
- したがって、海水ポンプ室近傍の評価対象(2)の盛土は液状化せず、海水ポンプ室の耐震性や浮上りに影響を及ぼさないと判断した。
- 海水ポンプ室には地表面傾斜部の側方流動の影響が及ばず(評価対象(1)), かつ施設近傍の地盤では液状化が発生しない(評価対象(2))ことが定量的に確認できたことから、全応力解析による耐震評価が適用可能であると判断した。



## 4. 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果 O.P.+14.8m盤の盛土が液状化しない要因

- 海水ポンプ室近傍のO.P.+14.8m盤の盛土が液状化しない要因について分析した。
- 海水ポンプ室近傍の盛土で液状化が発生しない要因は、盛土は締固め度の高い密詰め状態であり、繰返し荷重に対する有効応力の減少が少しずつしか進まない、いわゆる繰返し軟化を示すことや、地下水位低下設備により地下水位が下げられているため、有効拘束圧が大きく、液状化抵抗が大きいと分析した。

### O.P.+14.8m盤の盛土の液状化特性

- 締固め度90%以上の密詰め地盤
- 液状化強度試験では繰返し载荷を受けても、有効平均主応力が少しずつしか低下せず、ゼロにはならない、ねばり強い挙動を示す。いわゆる繰返し軟化を示す。(図1参照)
- 地下水位低下設備により地下水位が低下しており、液状化検討対象層の拘束圧(上載土圧)が大きい。
- 粘土やシルト等の細粒分を8-18%含む。(図2参照)
- 液状化強度試験の結果、液状化強度が大きく、累積損傷度理論に基づく基準地震動 $S_s$ により発生するせん断応力レベルは、液状化強度に達しない。(図3参照)

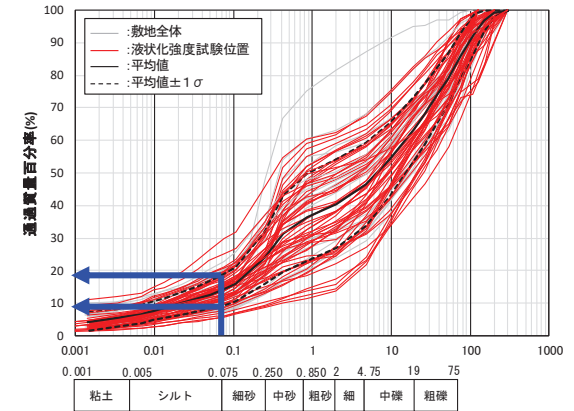


図2 粒径加積曲線\*1

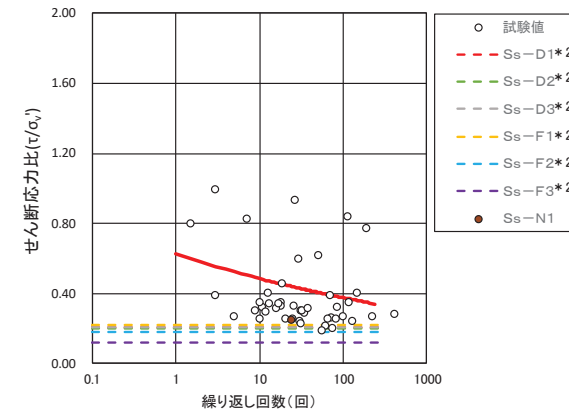
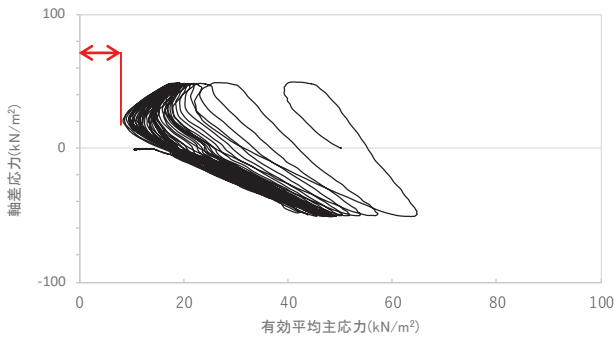
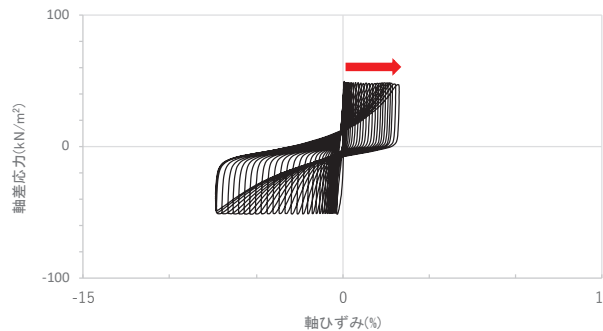


図3 累積損傷度理論に基づくせん断応力レベルと液状化強度曲線(O.P.+14.8m盤の盛土層)



繰返し荷重を载荷しても、有効応力がゼロになることはなく、液体状になることはない。また、せん断応力(軸差応力)作用時に、有効応力は回復し、ねばり強い挙動を示す。



ひずみは徐々に大きくなるが、急に増大しないため、脆性的な破壊は生じず、ねばり強い挙動を示す。

図1 液状化強度試験の結果\*1

### ■ 主な説明事項2-7

設置許可段階において、詳細設計段階における設計方針を説明しているCCb工法について、面内・面外荷重作用時の影響を数値実験の結果に基づき説明する。



### ■ 説明要旨

#### (背景)

- 後施工せん断補強筋工法(CCb工法, セラミックキャップバー工法)(以下「CCb工法」という。)は, 面外荷重(壁面に垂直に作用する荷重)に対する耐震裕度向上を目的に適用する。
- 箱形の地中構造物などでは, 面外荷重に加えて(支配的な荷重ではないものの)面内荷重の作用が想定されることから, 設置許可段階において, 数値実験により面内荷重が作用した際のCCbへの影響を検討することとしていた。
- 壁全面にCCb工法が適用されている部材のうち, CCb工法の効果に支配的な要因である壁厚が小さい軽油タンク室の壁を対象とした数値実験により, 面内荷重(壁面に並行方向に作用する荷重)が重畳した場合の, CCb工法の効果への影響について検証した。

#### (検証結果)

- 面外荷重と面内荷重の作用順序に係わらず面内荷重は, CCb工法の効果に影響を及ぼさないことを確認した。
  - ✓ CCb工法を適用した壁に面外荷重を作用させた荷重状態を模擬し, 次に面内荷重を載荷したところ, CCbの軸力等への影響は生じなかった。(検証①)
  - ✓ CCb工法を適用した壁に面内荷重を作用させた荷重状態を模擬し, 次に面外荷重を載荷したところ, 面外荷重のみを載荷した場合と同等のせん断耐力が確認できた。(検証②)

#### (詳細設計への反映)


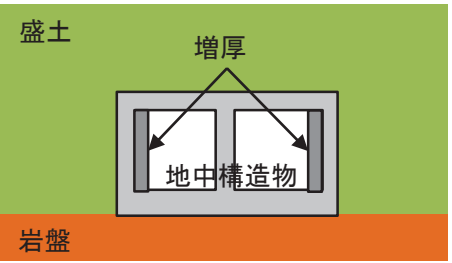
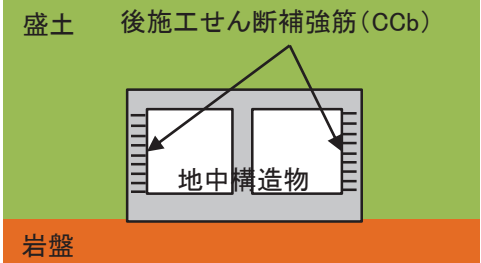
- 面内荷重の作用が想定される部材にCCb工法を適用する場合は, 設計で考慮する面内荷重が今回の検証範囲(750 $\mu$ )に収まることを確認することとする。



## 5. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の適用性 女川の土木構造物に対する耐震補強方法

- 耐震裕度向上を目的に実施した主な耐震補強は、地盤改良、増厚補強、後施工せん断補強筋工法がある。
- 後施工せん断補強筋工法は、先行プラントにおいてPHb工法(ポストヘッドバー工法)の実績があるが、CCb工法は実績がないことから、設置許可段階において、適用性と妥当性の説明を行った。
- 女川では三次元構造解析を採用する箱形構造物があり、部材に面内・面外荷重が作用することが想定されることから、数値実験により適用性を確認することとしており、以降の審査会合で確認結果を説明する旨について、第876回審査会合で説明していた。

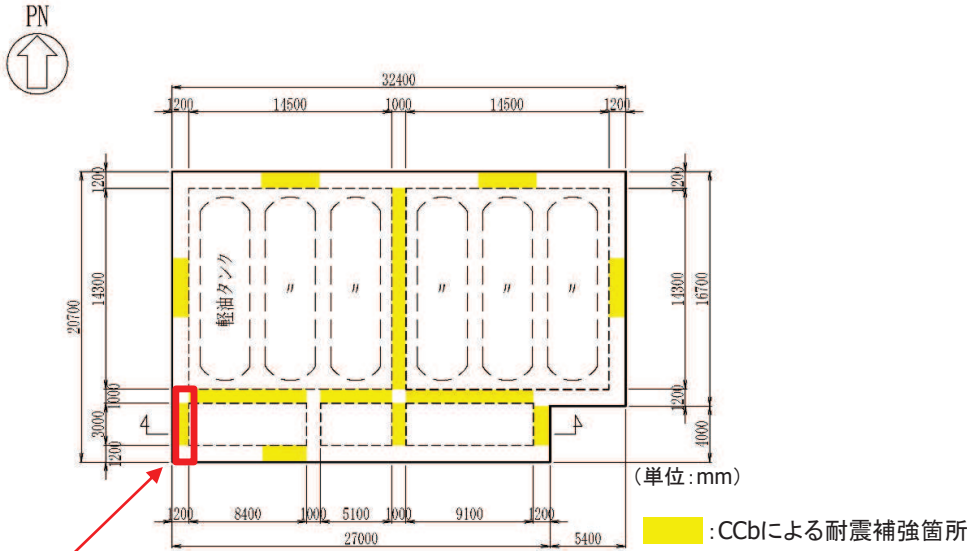
女川の土木構造物に対する耐震補強方法

	地盤改良	増厚補強	後施工せん断補強筋工法
概要	<p>セメントミルクを高圧攪拌することで、地中にセメント改良体を造成し、地盤の剛性を高めることにより、構造物側面の地盤の地震時の変形を抑制し、構造物に作用する土圧を低減する。</p> 	<p>既設の鉄筋コンクリート部材表面に鉄筋コンクリートを追加することにより、断面厚さを増やし、地震時の曲げ変形を抑制する。また、せん断耐力の向上にも寄与する。</p> 	<p>既設の鉄筋コンクリート部材を削孔してせん断補強鉄筋を設置(後施工)し、部材のせん断耐力を向上する工法。 CCb工法は、付着性能を向上させるために、鉄筋端部にセラミックを付けている。</p> 
先行プラントでの実績	多くの先行プラントで採用されており、実績は多数ある。	玄海3号や柏崎6号で地中構造物に対する実績がある。	美浜3号や柏崎6/7号でPHb(ポストヘッドバー)工法の実績がある。 CCb工法とはせん断補強筋の形式が異なる。
女川2号機の設置許可審査での説明	特になし。	特になし。	PHb工法と同様にCCb工法の適用性・妥当性を説明。 詳細設計段階で、面内・面外荷重が作用する部材の数値実験とディープビーム部材の模型実験*を実施し、それぞれの場合に対してCCb工法の適用性を確認することとした。

注記\*： ディープビーム部材の模型実験については、参考1に示す。

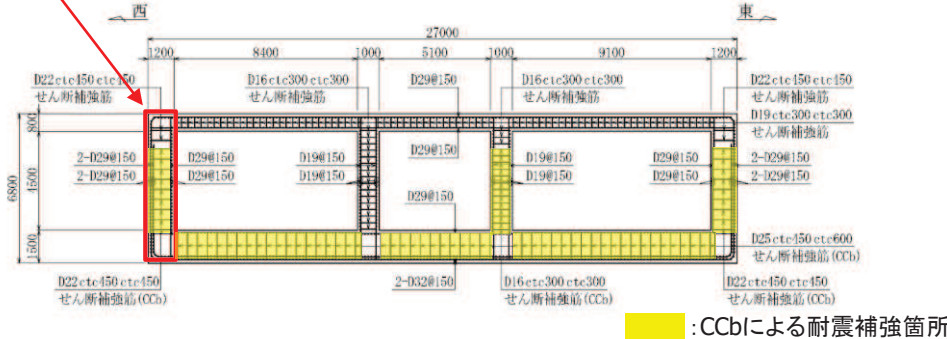
## 5. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の適用性 数値実験の条件

- 数値実験の対象部材は、壁全面にCCb工法が適用されており、面外荷重として土圧及び慣性力が作用する壁のうち、CCb工法の効果に支配的な要因である壁厚が小さい軽油タンク室の側壁を対象とした。
- 設置許可段階に検討したCCbのモデル化方法に基づき、部材厚さ方向に3区間に分類して数値解析モデルを作成した。

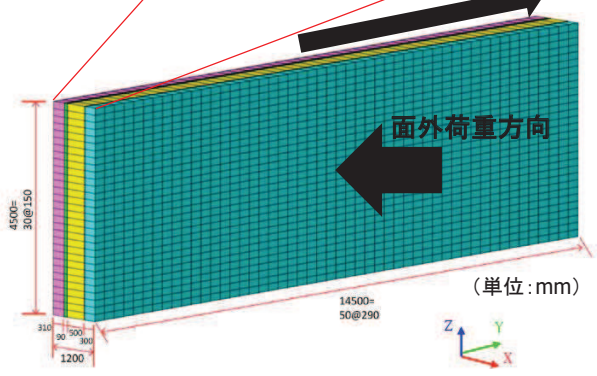
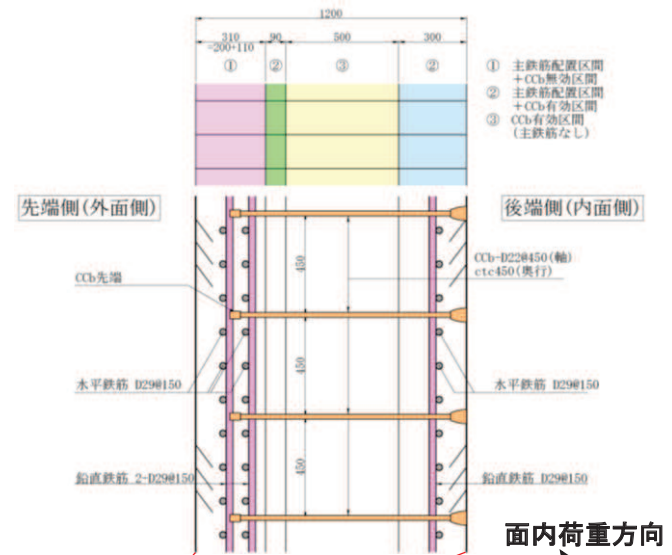


数値実験対象部材

軽油タンク室平面図とCCb補強箇所



軽油タンク室縦断図とCCb補強箇所 (単位: mm)

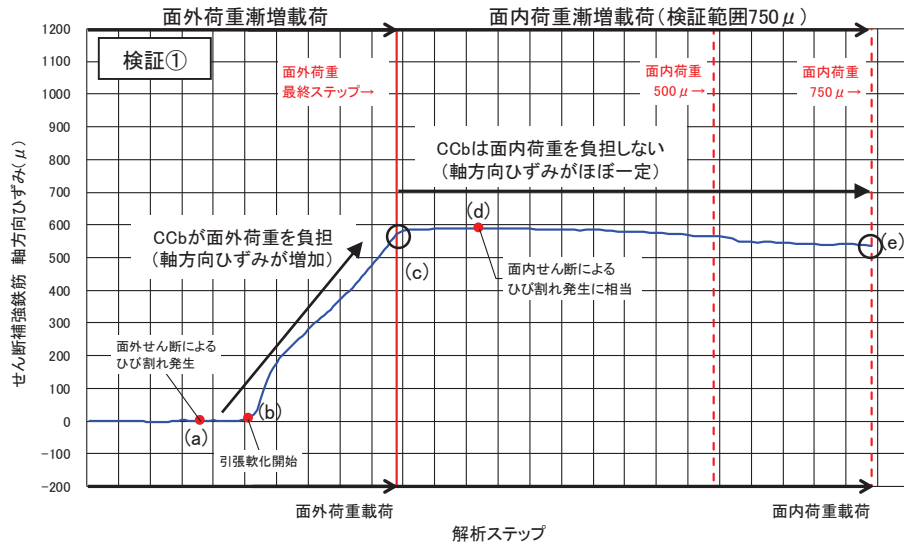


数値解析モデル

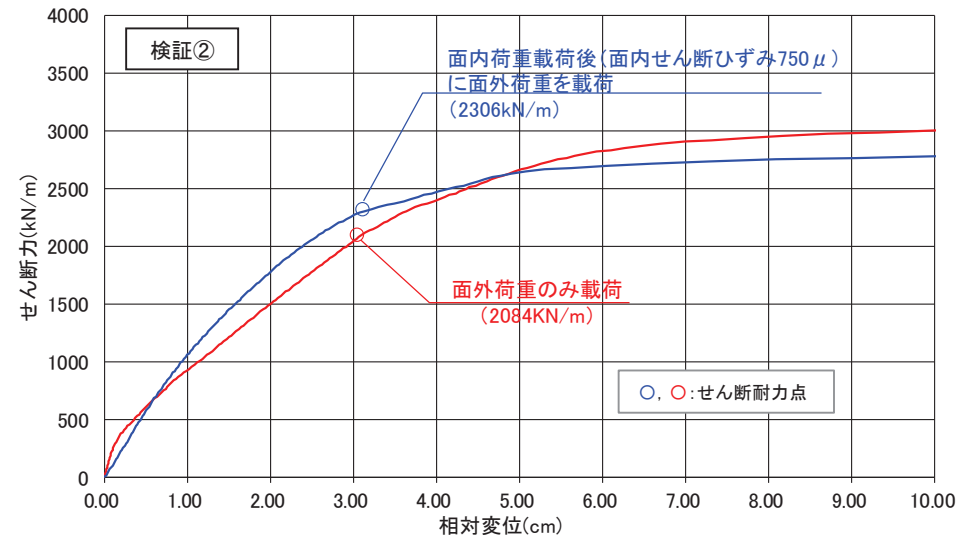
## 5. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の適用性 数値実験の結果

- 数値実験は、面外荷重と面内荷重の載荷順序を考慮し、「検証①:面外荷重載荷後に面内荷重を載荷」と、「検証②:面内荷重載荷後に面外荷重載荷」の2ケースを実施した。
- 数値実験の結果、面内荷重が作用しても、CCb工法の効果に影響を及ぼさないことが確認された。
- 面内荷重の作用が想定される部材にCCb工法を適用する場合は、設計で考慮する面内荷重が今回の検証範囲(750 $\mu$ )に収まることを確認することとする。

- 検証①の結果、面外荷重(ピーク時相当荷重の80%程度)載荷後に面内荷重を作用させても、CCbが負担する荷重に変化は無く、面内荷重の影響が及ばないことを確認した。



- 検証②の結果、面外荷重のみを載荷したせん断耐力と同等の耐力を得たことから、面内荷重の影響が及ばないことを確認した。



CCb工法の適用条件

No.	適用条件	備考
1	曲げひび割れの進展により鉄筋の定着が弱まる可能性を考慮し、 <b>おおむね弾性となる部材に適用</b> する。	設置許可段階に設定
2	ディープビーム形態の部材に対しても、せん断耐力は保守的に <b>棒部材形態に対するせん断耐力評価式</b> で評価する。	同上
3	施工精度によるばらつきを考慮し、 <b>余裕をもった設計(目標照査値:おおむね0.8程度)</b> とする。	同上
4	面内荷重が作用する部材については、面内荷重によるひび割れの影響を考慮し、 <b>面内せん断ひずみが検証範囲(750<math>\mu</math>)に収まる部材に適用</b> する。	詳細設計段階で設定

## 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果

### ■ 指摘事項No.3

解析手法選定フロー⑤で示す施設について、地盤改良及び後施工せん断補強筋等の効果を踏まえた耐震評価の結果並びに浮上りの評価及び地下水位が低い場合の影響評価の結果を説明すること。



### ■ 回答3

(補強効果を踏まえた耐震評価結果)

- 解析手法選定フロー⑤の施設は、解析手法の選定フロー(p.13, 赤字部)において、地盤の液状化の影響が施設に影響するか否か判断がつかないことから、全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を行う施設である。
- 解析手法選定フロー⑤の施設のうち、改良地盤及びCCb工法による補強を実施していて、構造が比較的単純な取水路(標準部)を代表として、補強の効果を踏まえた耐震評価結果を説明する。
- 取水路(標準部)の耐震評価の結果、基準地震動 $S_s$ に対して、改良地盤外側の旧表土が液状化したが、全応力解析と有効応力解析の照査値は同等となり、いずれの手法でも取水路の要求機能を満足する結果となった。また、CCb工法適用部材についても、適用条件を満足することを確認した。
- 全応力解析と有効応力解析で照査値が同等となったことから、改良地盤が有効に機能し、施設に液状化の影響が及ばないことが確認できた。

(浮上りの評価)

- 施設の周囲に改良地盤がなく、土被り厚の小さい部分を含む排気筒連絡ダクト(土砂部)を代表として説明する。
- 地下水位以深の盛土が液状化し抵抗力を失うと仮定しても、浮上りに対する安全性が確保できることを確認した。また、有効応力解析の結果、排気筒連絡ダクト(土砂部)の側面において液状化は発生しないことを確認した。

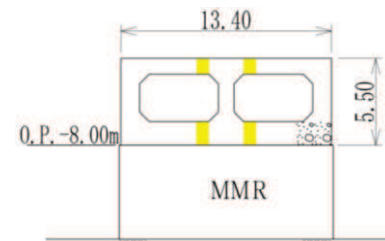
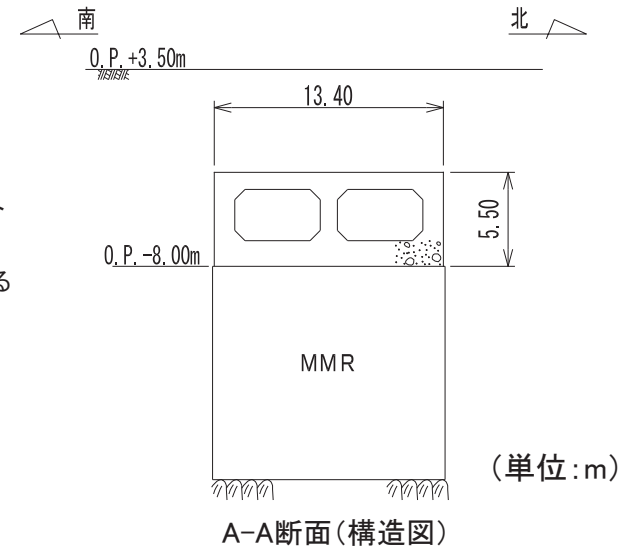
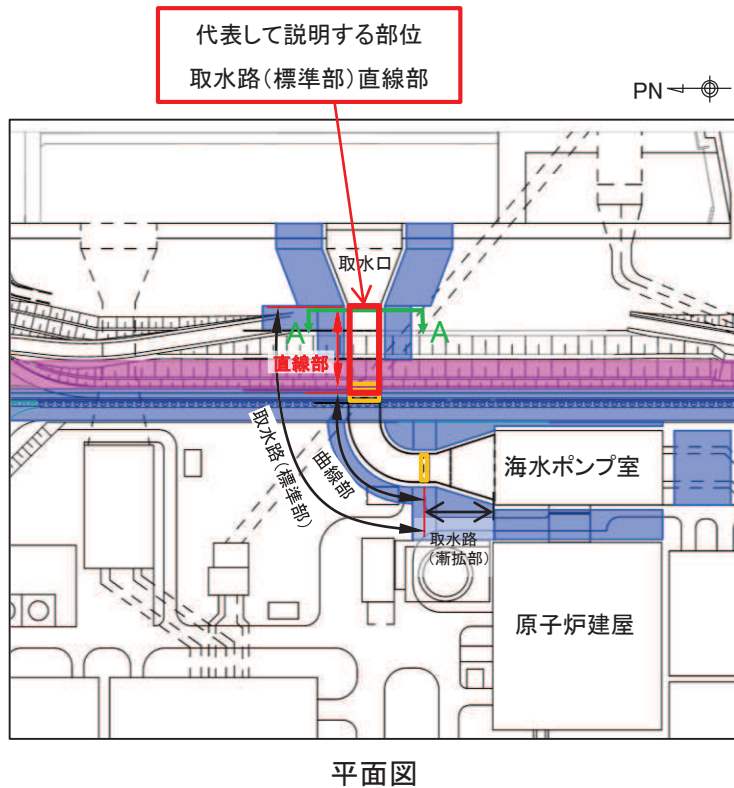
(地下水位が低い場合の影響評価結果)

- 8章で他の施設と合わせて説明する。



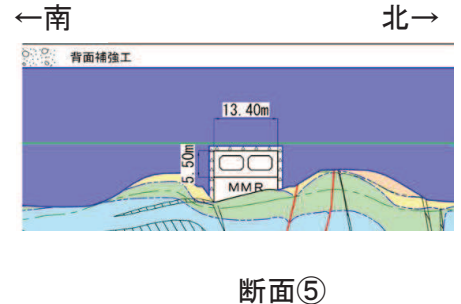
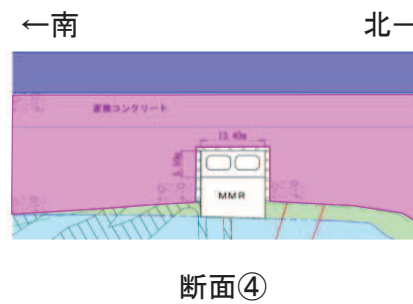
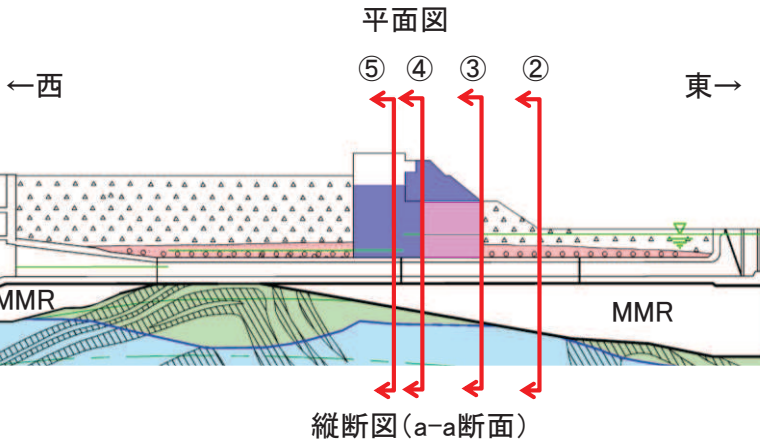
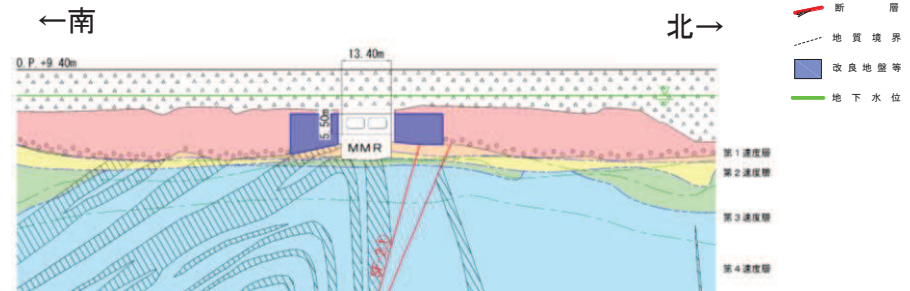
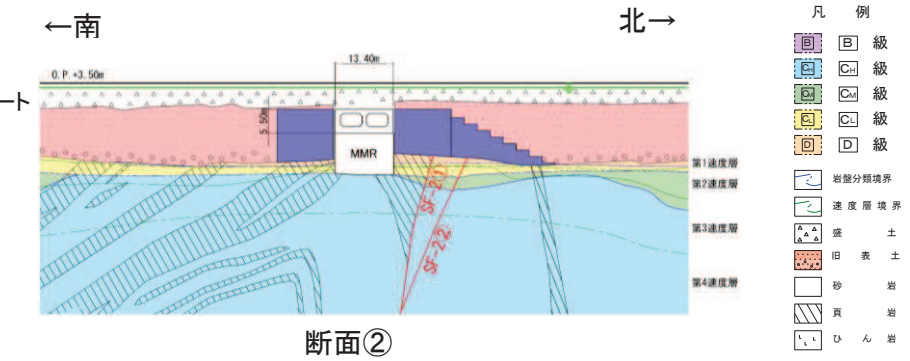
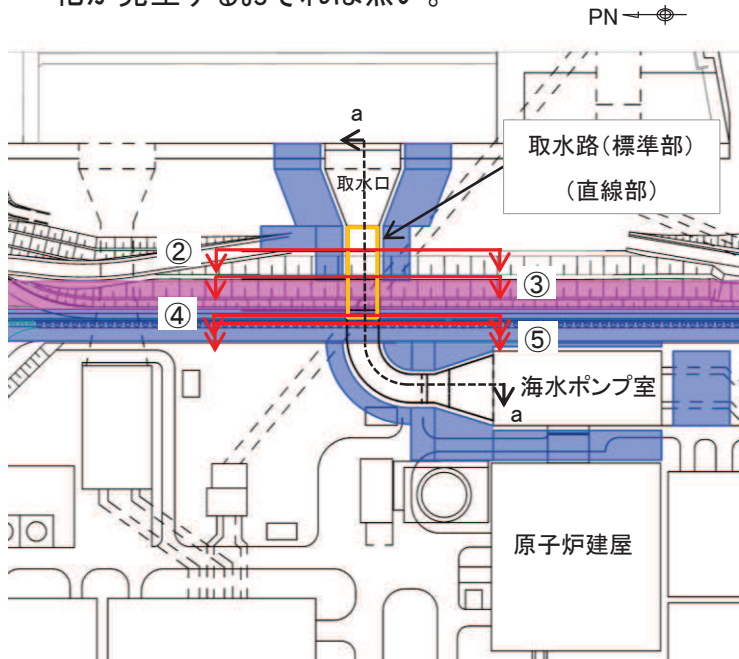
## 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 構造及び耐震補強の概要

- 解析手法選定フロー⑤の施設は、解析手法の選定フロー(p.13, 赤字部)において、地盤の液状化の影響が施設に影響するか否か判断がつかないことから、全応力解析及び有効応力解析により耐震評価を行う施設である。
- 解析手法選定フロー⑤の施設のうち、地盤改良やCCb工法の耐震補強の効果を踏まえた耐震評価結果として、比較的単純な構造である取水路(標準部)直線部を代表として説明する。
- 取水路(標準部)は、取水口と取水路(漸拡部)を結ぶ鉄筋コンクリート造二連ボックスカルバート構造で延長方向に断面が一様な地中構造物である。取水口～防潮堤間が直線部であり、MMR を介して十分な支持性能を有する岩盤に設置されている。
- 通水機能は全部材に、貯水機能は貯留堰天端標高(O.P.+5.30m)以下の側壁及び底版に要求される。



# 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震補強の概要(改良地盤)

- 取水路の周囲は、断面②\*及び断面③\*に示すとおり、地盤の変形抑制及び液状化対策を目的として地盤改良を行っている。
- 断面④\*及び断面⑤\*は、防潮堤直下の断面であり、取水路の周囲は、防潮堤の置換コンクリートや改良地盤で囲まれており、液状化が発生するおそれは無い。

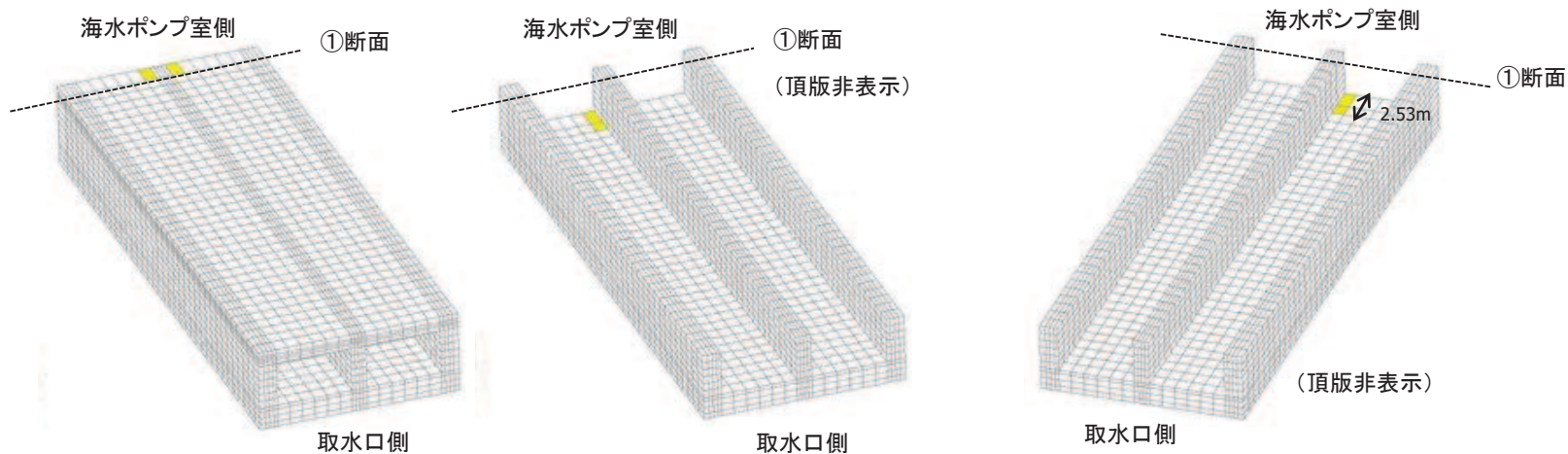


注記\*: 各断面の番号は、第979回審査会合で説明した断面の番号である。

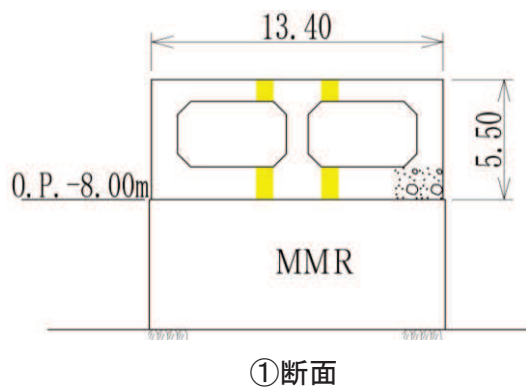


# 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震補強の概要(CCb工法)

➤ せん断破壊に対する耐震補強として、直線部の一部の区間\*（直線部と曲線部の境界付近）において、CCb工法を適用した。



CCb工法による耐震補強の位置図



■ : CCbによる耐震補強箇所

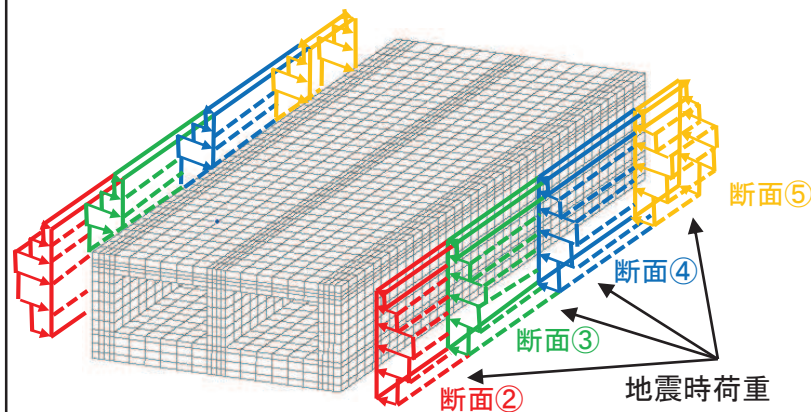
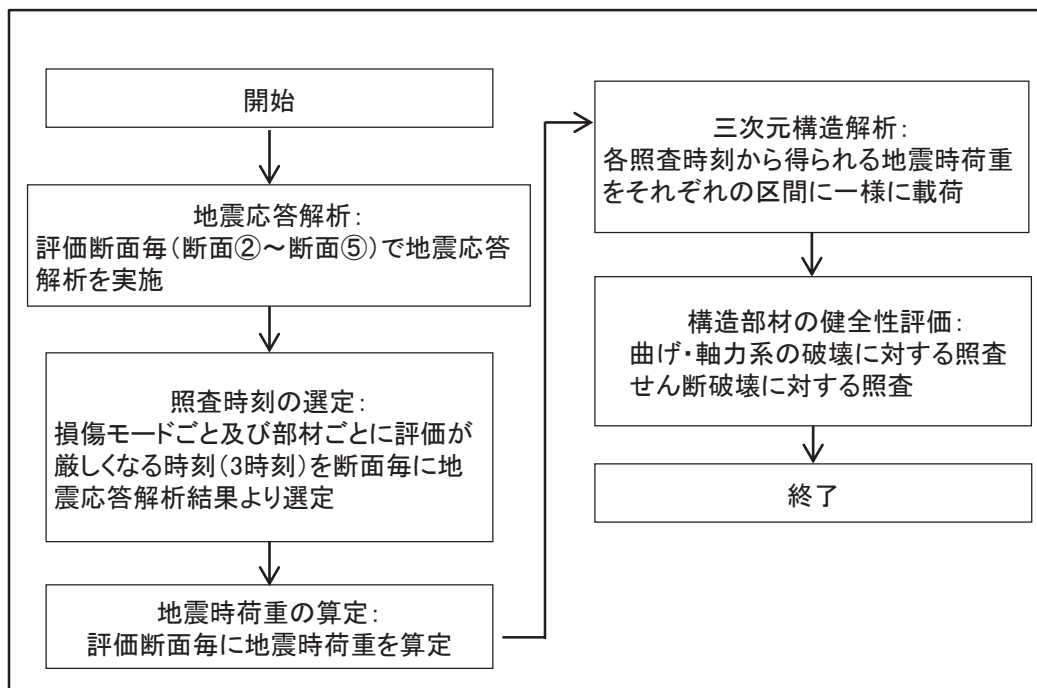
CCb工法を適用する部材の諸元

部材	部材厚 (mm)	CCb径及び間隔
頂版	1000	D25@150
底版	1500	D22@150

注記\* : 構造細目に則り、計算上、CCb補強が必要となる区間の外側にも、部材の有効高さ分の範囲にCCbを配置する。

## 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震評価フロー

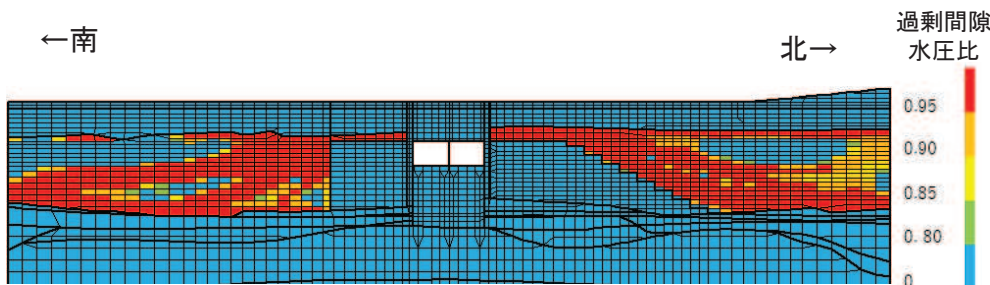
- 取水路(標準部)直線部の耐震評価は、耐震評価断面毎に地震応答解析により地震時荷重を評価し、三次元モデルに地震時荷重を載荷して、三次元構造解析による照査を行う。
- 三次元構造解析においては、各照査時刻から得られる地震時荷重を断面②～断面⑤のそれぞれの区間ごとに一様に作用させ、基準地震動 $S_s$ 毎に耐震評価を行う。



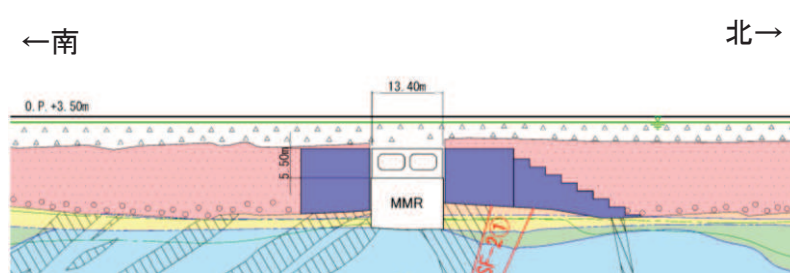
三次元モデルへの荷重載荷の概念図

# 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震評価結果

- 有効応力解析の結果、防潮堤より海側の断面においては、地下水位以深の旧表土の広範囲に液状化が発生している。地下水位が地表面近傍にあり、液状化が発生しやすい断面②の最大過剰間隙水圧分布比を下図に示す。
- 構造強度を有すること、通水機能を有することの確認において、基準地震動Ss1に対する全応力解析と有効応力解析の照査値を比較すると、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊の照査とも、ほぼ同等の結果となった。
- 両解析手法において、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊の照査とともに、許容限界を下回ることを確認した。



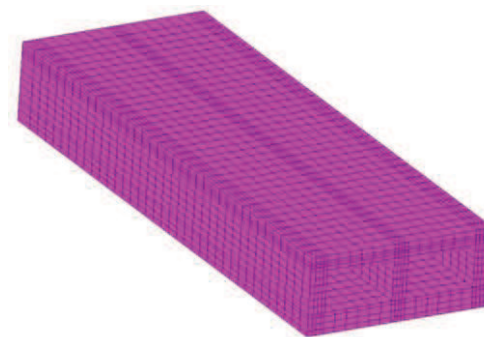
照査値最大ケースの最大過剰間隙水圧比分布 (断面②)



地質断面図(断面②)

## 最大照査値の一覧 (構造強度及び通水機能を有することの確認)

解析手法	要求機能	曲げ・軸力系の破壊に対する照査			せん断破壊に対する照査				
		部材	照査用ひずみ(μ)	限界ひずみ(μ)	照査値	部材	照査用せん断力(kN/m)	せん断耐力(kN/m)	照査値
全応力解析	構造強度を有すること、通水機能を有すること	隔壁	632	10000	0.07	底版	1847	2060	0.90
有効応力解析*	構造強度を有すること、通水機能を有すること	隔壁	567	10000	0.06	底版	1851	2043	0.91



構造強度及び通水機能を有することの確認における評価対象範囲(全部材)

注記\* : 断面④, ⑤は周辺が防潮堤の置換コンクリート及び改良地盤に囲まれており、液状化の影響はないことから、断面④, ⑤の地震時荷重算出は全応力解析で実施する。

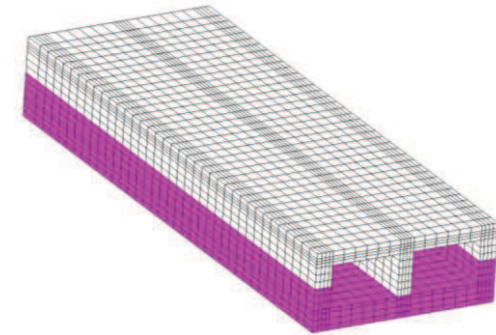
## 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震評価結果

- 貯水機能を損なわないことの確認において、基準地震動 $S_s$ に対する全応力解析と有効応力解析の照査値を比較すると、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊の照査とも、ほぼ同等の結果となった。
- 両解析手法において、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊の照査ともに、許容限界を下回ることを確認した。

最大照査値の一覧（貯水機能を損なわないことの確認）

解析手法	要求機能	曲げ・軸力系の破壊に対する照査					せん断破壊に対する照査			
		部材		照査用ひずみ( $\mu$ )	限界ひずみ( $\mu$ )	照査値	部材	照査用せん断力(kN/m)	せん断耐力(kN/m)	照査値
全応力解析	貯水機能を損なわないこと	コンクリートの圧縮ひずみ	側壁	326	2000	0.17	底版	1847	2060	0.90
		主筋ひずみ	底版	297	1725	0.18				
有効応力解析*	貯水機能を損なわないこと	コンクリートの圧縮ひずみ	側壁	310	2000	0.16	底版	1851	2043	0.91
		主筋ひずみ	底版	226	1725	0.14				

注記\*：断面④、⑤は周辺が防潮堤の置換コンクリート及び改良地盤に囲まれており、液状化の影響はないことから、断面④、⑤の地震時荷重算出は全応力解析で実施する。



貯水機能を損なわないことの確認における評価対象範囲(着色部)

## 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 耐震評価結果

- Ccb工法を適用する箇所について、両解析手法でCcb工法の全ての適用条件を満足することを確認した。

最大照査値の一覧（Ccb工法の適用箇所）

解析手法	適用条件No.1 おおむね弾性となる部材の確認					適用条件No.3 余裕をもった設計の確認			
	部材		照査用ひずみ(μ)	限界ひずみ(μ)	照査値	部材	照査用せん断力(kN/m)	せん断耐力(kN/m)	照査値
全応力解析	コンクリートの圧縮ひずみ	頂版	338	2000	0.17	頂版	1706	2371	0.72
	主筋ひずみ	頂版	498	1725	0.29				
有効応力解析*	コンクリートの圧縮ひずみ	頂版	304	2000	0.16	底版	1811	3184	0.57
	主筋ひずみ	頂版	328	1725	0.20				

注記\*：断面④、⑤は周辺が防潮堤の置換コンクリート及び改良地盤に囲まれており、液状化の影響はないことから、断面④、⑤の地震時荷重算出は全応力解析で実施する。

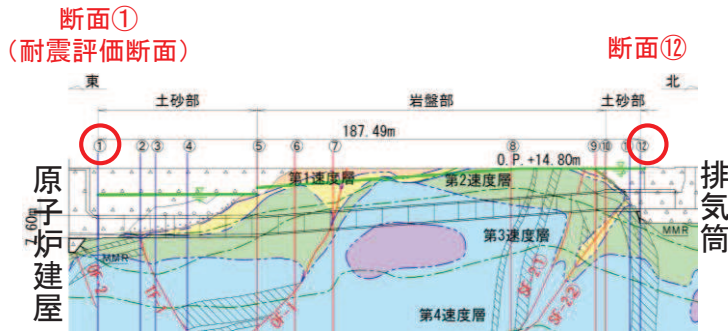
Ccb工法の適用性の確認

No.	適用条件	確認結果
1	曲げひび割れの進展により鉄筋の定着が弱まる可能性を考慮し、 <b>おおむね弾性となる部材に適用</b> する。	照査用コンクリート圧縮ひずみは最大で338μ、照査用主筋ひずみは最大で498μであり、おおむね弾性範囲となる部材に適用していることを確認した。
2	ディープビーム形態の部材に対しても、せん断耐力は保守的に <b>棒部材形態に対するせん断耐力評価式で評価</b> する。	取水路はディープビーム形式の部材が無いため、対象外。
3	施工精度によるばらつきを考慮し、 <b>余裕をもった設計(目標照査値:おおむね0.8程度)</b> とする。	Ccb工法を用いる部材の照査値は0.72であり、余裕をもった設計(目標照査値:おおむね0.8程度)としていることを確認した。
4	面内荷重が作用する部材については、面内荷重によるひび割れの影響を考慮し、 <b>面内せん断ひずみが検証範囲(750μ)に収まる部材に適用</b> する。	取水路は面内せん断を受ける部材ではないことから、対象外。



# 6. 解析手法選定フロー⑤の施設に対する補強効果を踏まえた耐震評価結果及び浮上り評価結果 浮上り評価結果

- 浮上り評価は、施設の周囲に改良地盤がなく、土被り厚の小さい部分を含む排気筒連絡ダクト(土砂部)を代表として説明する。
- 浮上り評価\*1は、耐震評価断面である断面①、及び上載土の荷重等が小さく、浮上りの評価において厳しい断面となる断面⑫の2断面を評価断面とし、トンネル標準示方書に基づき行い、保守的な設定として、地下水位以深は液状化するものとして地盤のせん断抵抗及び構造物側面の摩擦抵抗を考慮しない評価条件とする。
- 浮上りの評価の結果、いずれの評価断面も許容限界を満足し、浮上りに対する安全性が確保できることを確認した。また、有効応力解析の結果、施設側面には液状化が発生しないことを確認した。

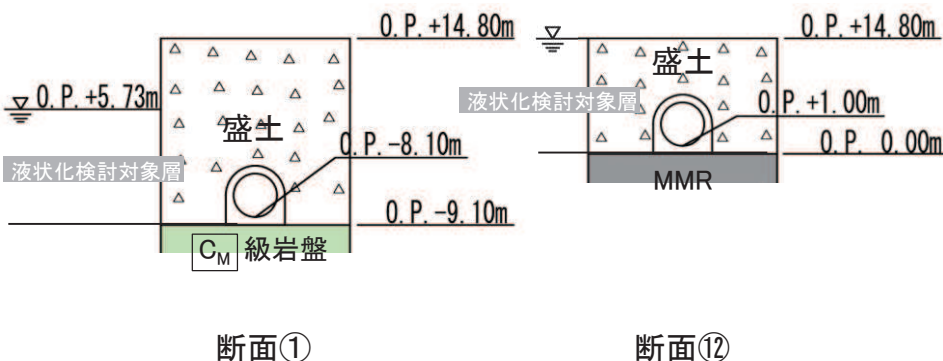


排気筒連絡ダクト地質縦断図

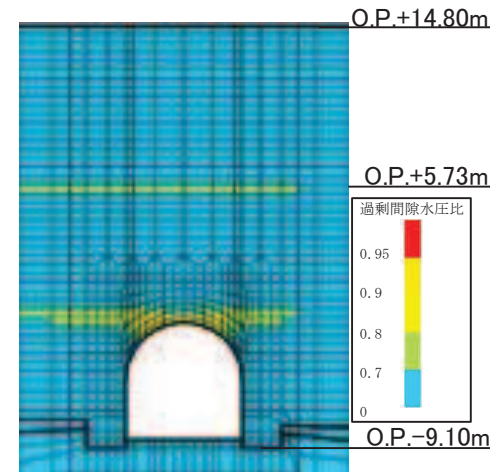


浮上りの評価結果

浮上り評価断面	浮上り安全率 $F_s$	判定 $F_s \geq 1.1^{*2}$
断面①	4.99	○
断面⑫	1.72	○



浮上り評価地質図



断面①  
最大過剰間隙水圧比分布図

注記\*1: 浮上りの評価フローを参考2に示す。

\*2: 浮上り評価の許容限界はトンネル標準示方書( $F_s \geq 1.0$ )より保守的な共同溝設計指針を用いる。



## ■ 主な説明事項2-1

女川特有の地下水位低下設備の設備構成，設計用地下水位の設定結果，設計用地下水位を踏まえた各施設の解析手法及び地震応答解析断面の選定結果について説明する\*。なお，地下水位低下設備の耐震性や**アクセスルート評価**については今後説明する。

：本章の説明範囲

注記\*：第952回審査会合（令和3年3月2日）及び第979回審査会合（令和3年6月1日）において説明



## ■ 説明要旨

（背景）

- 屋外アクセスルートの評価のうち，屋外アクセスルート直下に設置されている構造物の浮上り評価については，設計用地下水位を踏まえて評価する必要があることから，設計用地下水位確定後に審査会合で説明する旨を第876回審査会合で説明していた。

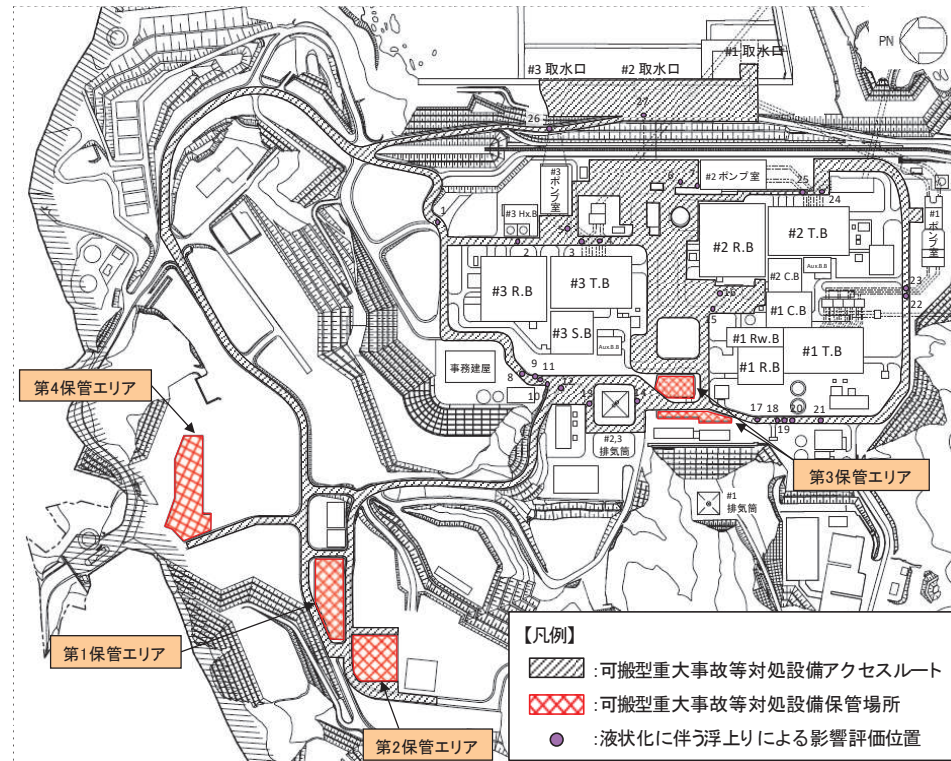
（評価結果）

- 屋外アクセスルート直下にある27構造物が，地震による周辺地盤の液状化の影響を受け，浮上りが生じることがないことを確認し，屋外アクセスルートの機能に影響を及ぼさないことを確認した。
  - ✓ 評価対象構造物のうち24構造物は，地下水位以深の地盤は液状化するとの保守的な仮定に基づく簡易評価により浮上りが発生しないことを確認した。
  - ✓ 2T-6ダクト（C部）及びT-10ダクト（A部）は，一次元有効応力解析による過剰間隙水圧比を考慮した詳細評価により浮上りが発生しないことを確認した。
  - ✓ T-10ダクト（B部）は，上載土の施工により浮上り対策を実施することにより，浮上りが発生しないことを確認した。

## 7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果 屋外アクセスルートの浮上り評価

- 屋外アクセスルート直下の地中埋設構造物が、地震による周辺地盤の液状化の影響を受け、浮上りが生じることがないことを確認し、屋外アクセスルートの機能に影響を及ぼさないことを確認した。
- 評価手順\*は、まず、地下水位以深の地盤は液状化するとの保守的な仮定のもと、トンネル標準示方書に基づく簡易評価を行い、評価基準値を超過する場合は、詳細評価として、一次元有効応力解析により液状化発生の有無と過剰間隙水圧比を確認し、過剰間隙水圧比を考慮した浮上り評価を実施した。

浮上り評価対象構造物(27構造物)



浮上り評価位置

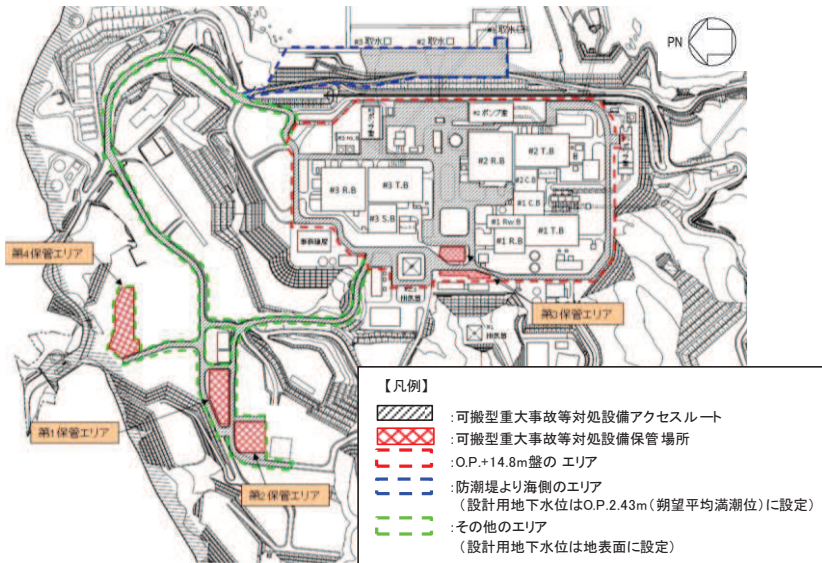
No.	名称	No.	名称
1	北側排水路(A部)	15	第2号機排気筒連絡ダクト(E部)
2	3T-9ダクト	16	第2号機排気筒連絡ダクト(F部)
3	第3号機取水管路(1号)	17	275kV開閉所連絡洞道
4	第3号機放水管路(2号)	18	2T-6ダクト(C部)
5	第3号機取水管路(A部)	19	第1号機排気筒連絡ダクト
6	第2号機取水路(B部)	20	T-10ダクト(A部)
7	第2号機取水路(A部)	21	T-10ダクト(B部)
8	3T-2ダクト	22	T-8ダクト
9	第3号機排気筒連絡ダクト(A部)	23	第1号機取水管路
10	第3号機排気筒連絡ダクト(B部)	24	第2号機放水管路
11	電源ケーブルダクト	25	第2号機取水管路
12	CVケーブル洞道	26	第3号機取水路
13	第3号機排気筒連絡ダクト(C部)	27	第2号機取水路
14	第2号機排気筒連絡ダクト(A部)		

## 7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果 屋外アクセスルートの設計用地下水位

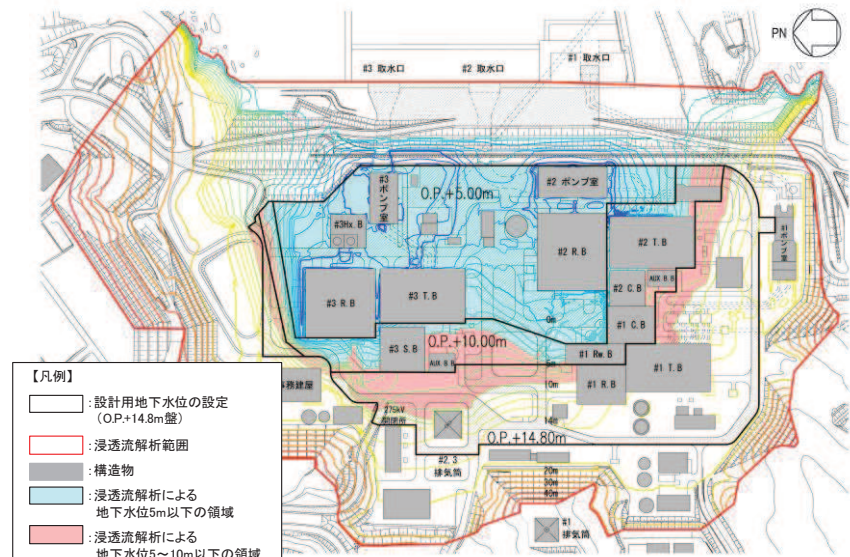
- 屋外アクセスルートの設計用地下水位は、①O.P.+14.8m盤、②防潮堤より海側のエリア、③その他のエリアに区分し設定する。
- O.P.+14.8m盤の設計用地下水位は、第988回審査会合(令和3年7月6日)で説明のとおり、浸透流解析により、地下水位低下設備の機能喪失から2ヵ月後の水位上昇を考慮した地下水位分布に対して、エリア毎に設定した。

屋外アクセスルートの設計用地下水位の設定

エリア区分	設計用地下水位の設定	
	設置許可段階	詳細設計段階
① O.P.+14.8m盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O.P.+5.0m</li> <li>• 工事計画認可段階で行う浸透流解析結果を反映する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 浸透流解析により設定</li> <li>• 解析水位分布に応じて設計用地下水位をO.P.+5.0m, O.P.+10.0m, O.P.+14.8mの領域に設定</li> </ul>
② 防潮堤より海側のエリア	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O.P.+2.43m(朔望平均満潮位)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置許可段階を踏襲</li> </ul>
③ その他のエリア	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地表面</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 設置許可段階を踏襲</li> </ul>



設計用地下水位のエリア区分



O.P.+14.8m盤の設計用地下水位

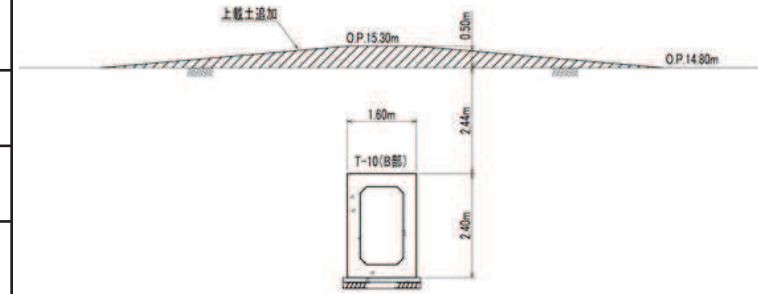


## 7. 屋外アクセスルートに対する浮上り評価結果 浮上り評価結果

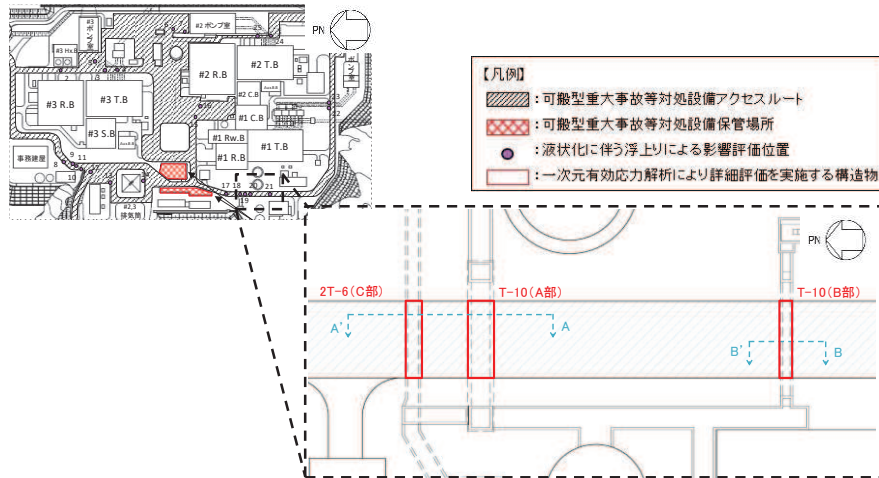
- トンネル標準示方書に基づく浮上り評価により、下記の3構造物を除く構造物については、浮上りが発生しない結果を得た。
- T-10ダクト(B部)については、詳細評価の結果、現状構造では浮上りが発生する結果となったことから、浮上り対策として、屋外アクセスルートに高さ0.5mの上載土を施工することとした。対策後の浮上り安全率は0.71であり、浮上りは発生しないことを確認した。
- 2T-6ダクト(C部)及びT-10ダクト(A部)は、過剰間隙水圧比を考慮した浮上り安全率により、浮上らない評価結果を得た。

詳細評価を実施した構造物の評価結果

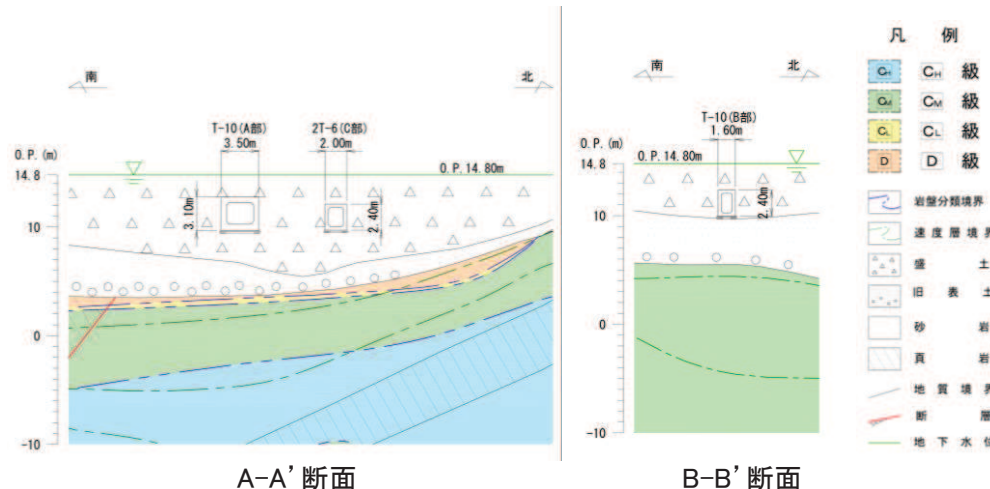
No.	名称	構造物底面周辺の過剰間隙水圧比	過剰間隙水圧比を考慮した浮上り安全率	評価結果
18	2T-6ダクト(C部)	0.05	0.67	浮上りは発生しない
20	T-10ダクト(A部)	0.05	0.68	浮上りは発生しない
21	T-10ダクト(B部) 現状構造	1.00	—	浮上り対策を実施
	T-10ダクト(B部) 対策工考慮	—	0.71 (簡易評価)	浮上りは発生しない



T-10ダクト(B部)における浮上り対策



一次元有効応力解析により詳細評価を実施する構造物



A-A' 断面

B-B' 断面

### ■ 指摘事項No.4

設計用地下水位を高めを設定していることを踏まえ、地下水位が低い場合の影響を整理して説明すること。



### ■ 回答4

(背景)

- 第979回審査会合(令和3年6月1日)において、地下水位が低い場合の影響をパターンA～Cの3つに分類し、パターンごとに検討対象施設と検討条件を説明した。
- 今回、影響検討結果として、パターンA(構造物(基礎版等)に作用する水圧が減少する)に対する原子炉建屋、パターンB(地盤応答が変化する)とパターンC(構造物周辺に水位差が生じる)に対する排気筒連絡ダクト(土砂部)、パターンC(構造物周辺に水位差が生じる)に対する防潮堤の結果を説明する。

(影響確認結果)

- 影響検討の結果、いずれのパターンも地下水位の変化が、施設の耐震性に及ぼす影響は小さく、施設の安全機能に影響を及ぼすことは無いことを確認した。

## 8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 検討対象施設と影響検討内容

- 第979回審査会合(令和3年6月1日)において、地下水位が低い場合に耐震性へ影響を与える事象としてパターンA～Cを整理し、パターンごとに検討対象施設及び検討条件を説明した。

### 検討対象施設(第979回審査会合資料抜粋, 一部加筆)

パターン	耐震性への影響	耐震設計に影響する可能性がある施設(赤枠は検討対象施設)	検討対象施設の選定理由	検討条件
パターンA	構造物(基礎版等)に作用する水圧が減少する	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉建屋</li> <li>制御建屋</li> <li>第3号機海水熱交換器建屋</li> <li>緊急時対策建屋</li> <li>緊急用電気品建屋</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計用揚圧力と浸透流解析結果の差が大きい。</li> <li>建屋直下のドレイン新設により平常時の建屋基礎版に作用する揚圧力が大きく低減する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>揚圧力を0とした場合の解析を実施して応力分布等への影響を確認する。</li> </ul>
パターンB	地盤応答が変化する(単位体積重量, 液状化を含めた周辺地盤の挙動)	<ul style="list-style-type: none"> <li>排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>防潮堤</li> <li>地下水位低下設備 No.1～No.4揚水井戸</li> <li>浸水防止蓋の間接支持揚水井戸(第3号機海水ポンプ室防潮壁区画内)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ダクト縦断方向の水位分布も考慮して設計用地下水位を設定するため, 断面によって設計用地下水位と浸透流解析結果の差が大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位を岩盤表面まで下げた解析を実施する。</li> </ul>
パターンC	構造物周辺に水位差が生じる	<ul style="list-style-type: none"> <li>排気筒連絡ダクト(土砂部)</li> <li>防潮堤 鋼管式鉛直壁(一般部) 盛土堤防</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩盤上に設置した線状構造物であり, 地下水をせき止め偏水圧が生じる可能性がある。</li> <li>設計用地下水位は設置変更許可段階の方針を踏襲し, 山側・海側ともに朔望平均満潮位としているが, 山側において浸透流解析結果との差が大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物片側の地下水位を頂版高さ, もう一方の地下水位を岩盤表面とした解析を実施する。</li> <li>山側水位を岩盤表面まで下げた解析を実施する。</li> </ul>



## 8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 パターンA 原子炉建屋基礎版

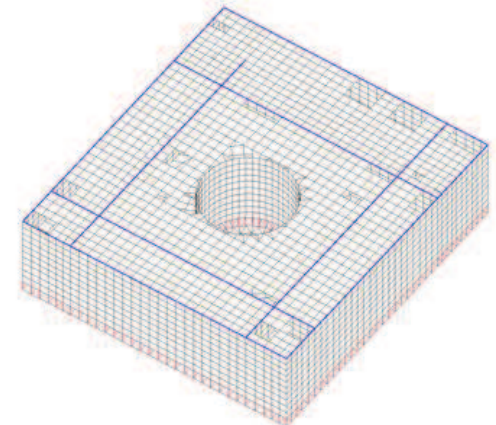
- 原子炉建屋基礎版の評価において、浮力の算定にあたっては、既工認実績も踏まえて、地下水位を基礎版中央レベルに設定している。一方で、浸透流解析の結果は原子炉建屋基礎版よりも低い位置であることから、パターンAとして地下水位を基礎版下端レベルに設定した場合の影響を検討した。
- 検討の結果、鉛直方向上向きのケースでは発生値は減少傾向にあり、鉛直方向下向きのケースでは発生値は変わらない結果となった。いずれのケースでも発生値は許容限界を下回っており、地下水位の変化が原子炉建屋基礎版が有する耐震性への影響は無いことを確認した。
- なお、接地圧の評価においては、地下水位を考慮しないSRモデルによる地震応答解析結果を用いて評価を行うため、評価結果への影響はない。

地下水位を基礎版下端レベルとした場合(パターンA)

評価項目		組合せケース	発生値	許容限界
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直方向上向き	0.592	3.00
		鉛直方向下向き	0.0779	3.00
	鉄筋圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直方向上向き	0.354	5.00
		鉛直方向下向き	0.0575	5.00
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉛直方向上向き	1.92	2.42
		鉛直方向下向き	1.16	2.42

地下水位を基礎版中央レベルとした場合(設計水位)

評価項目		組合せケース	発生値	許容限界
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直方向上向き	0.690	3.00
		鉛直方向下向き	0.0779	3.00
	鉄筋圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	鉛直方向上向き	0.472	5.00
		鉛直方向下向き	0.0575	5.00
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉛直方向上向き	2.36	2.42
		鉛直方向下向き	1.16	2.42



原子炉建屋基礎版 解析モデル

パターンAの解析条件

項目	解析条件
解析手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>静的弾塑性解析</li> </ul>
地震動 及び 解析ケース	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準地震動Ss7波の包絡荷重</li> <li>荷重組合せケース4(鉛直上向き)及びケース11(鉛直下向き):鉛直上向き及び下向きの組合せでそれぞれ検定比が最も大きいケースを選定</li> </ul>
地下水位	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎版下端レベルO.P.-14.1m (設計用地下水位:基礎版中央レベルO.P.-11.1m)</li> </ul>

## 8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 パターンB及びパターンC 排気筒連絡ダクト(土砂部)

- 排気筒連絡ダクト(土砂部)の評価において、設計用地下水位は、高めに評価される浸透流解析の結果に基づき設定するが、実際には地下水位が低い場合(パターンB)や施設の左右で地下水位が異なる場合(パターンC)があることから、耐震性に及ぼす影響を検討した。
- 評価の結果、地下水位の違いによる施設の耐震性への影響は小さく、地下水位の変化が施設の安全性に影響を及ぼさないことを確認した。

評価結果

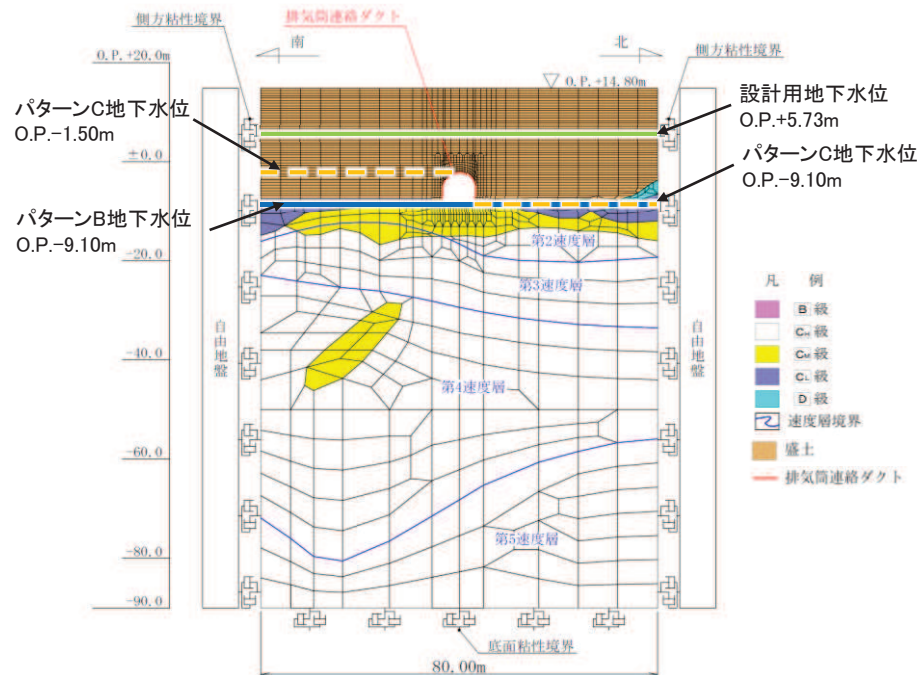
照査項目	水位条件	発生値	許容限界	照査値
曲げ・軸力	設計水位	1353 $\mu$	1725 $\mu$	0.79
	パターンB	1201 $\mu$		0.70
	パターンC	1204 $\mu$		0.70
せん断	設計水位	2239kN	1640kN	1.37 【0.87】*1
	パターンB	2062kN	1641kN	1.26*2
	パターンC	2159kN	1640kN	1.32*2
支持性能	設計水位	3.2N/mm <sup>2</sup>	13.7N/mm <sup>2</sup>	0.24
	パターンB	3.0N/mm <sup>2</sup>		0.22
	パターンC	3.0N/mm <sup>2</sup>		0.22

注記\*1: 詳細評価に基づく許容限界に対する値。

\*2: 簡易評価式に基づく許容限界に対する値であり、設計水位の照査値より小さいことから、詳細評価を行えば照査値1.0未満となる。

解析条件

項目	解析条件	備考
評価断面	・ 断面①	設計用地下水位と浸透流解析の差が最大となる断面
解析手法	・ 全応力解析	有効応力解析と全応力解析で評価が厳しかった解析手法により影響検討を実施
地震動及び解析ケース	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Ss-D2(++) : 曲げ・軸力</li> <li>・ Ss-N1(++) : せん断, 支持性能</li> </ul>	-



解析モデルと地下水位

## 8. 地下水位が低い場合の影響確認結果 パターンC 防潮堤鋼管式鉛直壁(一般部)

- 防潮堤鋼管式鉛直壁(一般部)の評価において、設計用地下水位は、高めに評価される浸透流解析の結果に基づき設定するが、実際には施設の前後で地下水位が異なる場合(パターンC)があることから、耐震性に及ぼす影響を検討した。
- 評価の結果、施設前後の地下水位差が大きくなる場合の施設の耐震性への影響は小さく、地下水位の変化が施設の安全性に影響を及ぼさないことを確認した。

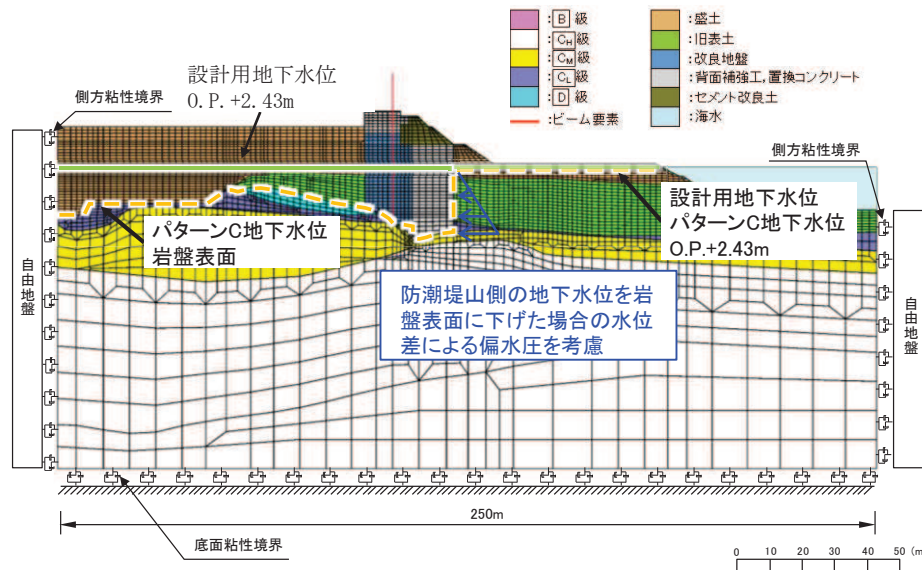
評価結果

部位	照査項目	水位条件	応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )	照査値
鋼管杭	曲げ・軸力	設計水位	123	247	0.50
		パターンC	130	247	0.53
	せん断	設計水位	61	217	0.29
		パターンC	64	217	0.30

部位	照査項目	水位条件	許容限界	すべり安全率
背面補強工	すべり安全率	設計水位	1.2以上	21.0
		パターンC		19.8
置換コンクリート		設計水位		5.3
		パターンC		5.5
改良地盤		設計水位		3.7
		パターンC		3.3
セメント改良土		設計水位		3.7
		パターンC		3.6

解析条件

項目	解析条件	備考
評価断面	・ 断面②	設計用地下水位と浸透流解析の差が最大となる断面
解析手法	・ 有効応力解析	—
地震動及び解析ケース	・ Ss-D2(---)	—



解析モデルと地下水位

## 9. まとめ

## 主な説明事項に係るまとめ

- 第876回審査会合(令和2年7月14日)において主な説明事項としていた以下の2項目について説明した。

主な説明事項	説明要旨
No.2-1 地下水位低下設備の耐震評価結果と屋外アクセスルートの浮上り評価結果	<p>(地下水位低下設備の耐震評価結果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位低下設備を構成する設備毎に耐震性の評価を実施し、No.2揚水井戸を代表に基準地震動<math>S_s</math>に対し機能が損なわれないことを説明した。</li> </ul> <p>(屋外アクセスルートの浮上り評価結果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>屋外アクセスルート直下にある27構造物について、地震による周辺地盤の液状化の影響を受け、浮上りが生じることがないことを確認し、屋外アクセスルートの機能に影響を及ぼさないことを確認した。</li> </ul>
No.2-7 面内荷重と面外荷重が作用する部材へのCCb工法の適用性	<p>(背景)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>面外荷重に対する耐震裕度向上を目的に適用する後施工せん断補強筋工法(CCb工法)について、面外荷重に加えて面内荷重が作用した際のCCbへの影響を数値実験により確認した。</li> </ul> <p>(検証結果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>数値解析の結果、面外荷重と面内荷重の作用順序に係わらず面内荷重は、CCb工法の効果に影響を及ぼさないことを確認した。</li> </ul> <p>(詳細設計への反映)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>面内荷重の作用が想定される部材にCCb工法を適用する場合は、設計で考慮する面内荷重が今回の検証範囲(750<math>\mu</math>)に収まる部材に適用することとする。</li> </ul>



## 9. まとめ

## 指摘事項に係るまとめ(1/2)

- 第952回審査会合(令和3年3月2日)及び第979回審査会合(令和3年6月1日)に説明した、「No.2-1 地下水位の設定, 耐震評価における断面選定」への指摘事項に対して以下を回答した。

指摘事項	回答要旨
No.1 有効応力解析の妥当性と液状化強度特性の保守性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3.11地震時に確認された取水口側面の矢板護岸の海側への水平変位を対象として, 有効応力解析を用いた検証解析を実施した。</li> <li>• 液状化強度試験の平均値に対する検証解析の結果, 地盤の液状化の影響により矢板護岸に水平変位が発生し, 地震後に実測された水平変位の傾向を解析上表現できていることから, 有効応力解析の妥当性を確認した。</li> <li>• 液状化強度試験の下限値に対する検証解析の結果, 矢板護岸の水平変位量は, 実測値を大きく上回ることから, 女川の液状化強度特性の設定が保守性を有していることを確認した。</li> </ul>
No.2 解析手法選定フロー④の施設に対する液状化影響の定量評価結果	<p>(施設に液状化影響が及ばないことの定量評価)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 解析断面に地表面の傾斜を含み, かつ, 施設の周囲に液状化検討対象層が局所的に分布する海水ポンプ室を代表として, 施設に対する液状化影響の定量評価を実施した。</li> <li>• 海水ポンプ室には地表面傾斜部の側方流動の影響が及ばず, かつ施設近傍の地盤では液状化が発生しないことが定量的に確認できたことから, 全応力解析による耐震評価が適用可能であると判断した。</li> </ul> <p>(海水ポンプ室が液状化の影響を受けない要因分析)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 海側護岸の液状化と斜面の側方流動の影響は, 防潮堤の設置及び海水ポンプ室周辺の地盤改良効果により, 海水ポンプ室には影響は及ばないと分析した。</li> <li>• 海水ポンプ室近傍の盛土で液状化が発生しない要因は, 盛土は締固め度の高い密詰め状態であり, 繰返し荷重に対する有効応力の減少が少しずつしか進まない, いわゆる繰返し軟化を示すことや, 地下水位低下設備により地下水位が下げられているため, 有効拘束圧が大きく, 液状化抵抗が大きいと分析した。</li> </ul>

## 9. まとめ

## 指摘事項に係るまとめ(2/2)

- 第952回審査会合(令和3年3月2日)及び第979回審査会合(令和3年6月1日)に説明した、「No.2-1 地下水位の設定, 耐震評価における断面選定」への指摘事項に対して以下を回答した。

指摘事項	回答要旨
No.3 解析手法選定フロー ⑤の施設に対する 補強効果を踏まえた 耐震評価結果及び浮 上り評価結果	<p>(補強効果を踏まえた耐震評価結果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地盤改良及びCCb工法による補強を実施している取水路(標準部)を代表として、補強の効果を踏まえた耐震評価結果を説明した。</li> <li>改良地盤外側の旧表土が液状化したが、全応力解析と有効応力解析の照査値は同等となり、いずれの手法でも基準地震動Ssに対し、耐震性を有し、要求機能を満足することを確認した。また、CCb工法適用部材についても、適用条件を満足することを確認した。</li> </ul> <p>(浮上り評価結果)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>施設の周囲に改良地盤がなく、土被り厚の小さい部分を含む排気筒連絡ダクト(土砂部)を代表として、地下水位以深の盛土が液状化し抵抗力を失うと仮定しても、浮上りに対する安全性が確保できることを確認した。</li> </ul>
No.4 地下水位が低い場合 の影響確認結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水が低い場合の影響について、パターンA(構造物に作用する水圧が減少する)、パターンB(地盤応答が変化する)、パターンC(構造物周辺に水位差が生じる)の、いずれのパターンも地下水位の変化が、施設の耐震性に及ぼす影響は小さく、施設の安全機能に影響を及ぼすことは無いことを確認した。</li> </ul>

### 参考資料

- 参考1 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の室内模型実験
- 参考2 浮上りの評価フロー

### ■ 設置許可段階での説明(背景)

- 鉄筋コンクリート梁は、形状により棒部材とディープビームに分類され、一般に、ディープビーム的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力は、棒部材的な破壊形態が想定される場合のせん断耐力よりも大きい。
- CCb工法は、建設技術審査証明報告書において、棒部材を対象とした試験により性能確認を行っており、ディープビームを対象とした実験は行われていない。
- このことから、女川2号機では、CCb工法を適用する部材のせん断耐力は、棒部材に対するせん断耐力により照査することとしている。
- 詳細設計段階において、ディープビーム的な破壊形態が想定される部材のせん断耐力を棒部材式により算定することの保守性を、室内模型実験の結果に基づき確認することとしていた。



### ■ 確認結果

- CCb工法を適用したディープビームとなる部材を対象として、せん断スパン比、せん断補強鉄筋比を変化させて室内模型実験を行い、せん断耐力を計測した。
- 室内模型実験から得られるせん断耐力と設計で用いている棒部材式によるせん断耐力を比較し、棒部材式によるせん断耐力よりも大きなせん断耐力が得られることを確認した。
- ディープビームとなる部材のせん断耐力を、棒部材式により算定することの保守性を確認した。



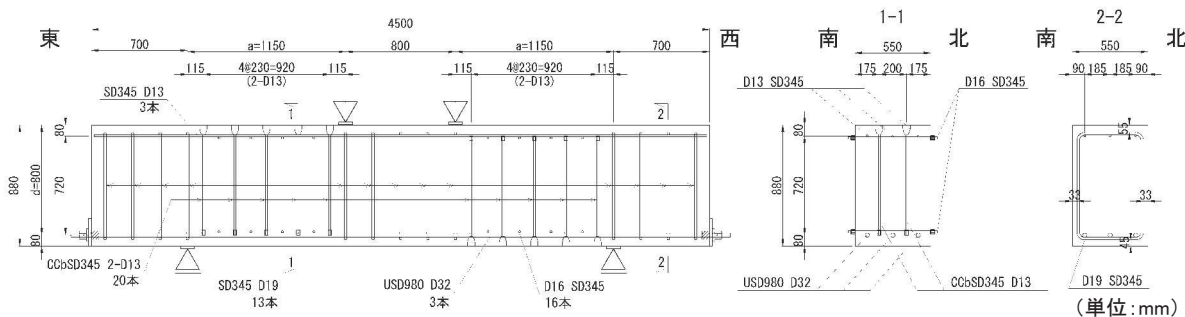
# 参考1. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の室内模型実験 室内模型実験のケース

- CCb工法を適用した部材については、ディープビーム形式の部材の耐力も保守的に棒部材式によるせん断耐力を適用することとしているが、ディープビーム形式の室内実験を実施し、その耐力と棒部材式によるせん断耐力の比較を行い、その妥当性を確認した。
- 室内模型実験の実施ケースは、下表に示すとおり、せん断スパン比とせん断補強鉄筋比を変えて3ケースの実験を実施した。

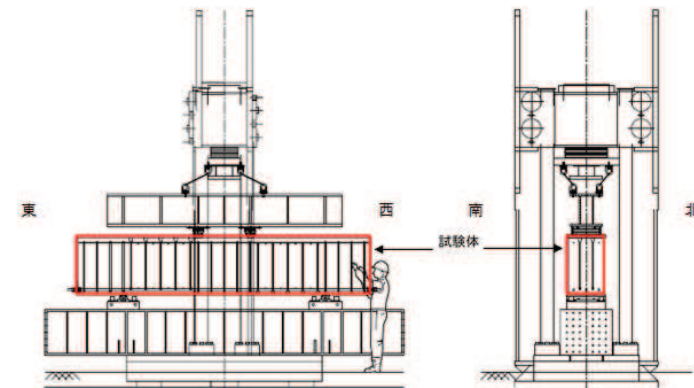
実験ケースの概要

	ケースの概要	せん断補強鉄筋の種類	せん断スパン比 (a/d)	せん断補強鉄筋比 ( $p_w$ )	検討目的
CASE1	基本ケース	CCb	1.44	0.20	CCbによりせん断補強を行った構造物のうちディープビームとなる部材の適用性を確認
CASE2	せん断スパン比(a/d)の違い	CCb	<u>1.00</u> *	0.20	CASE1(a/d=1.44)との比較により、せん断スパン比の違いによるCCbのせん断補強効果を確認
CASE3	せん断補強鉄筋比( $p_w$ )の違い	CCb	1.44	<u>0.55</u> *	CASE1( $p_w=0.20\%$ )との比較により、せん断補強鉄筋比の違いによるCCbのせん断補強効果を確認

注記\* : 下線は、CASE1(基本ケース)との違いを示す。



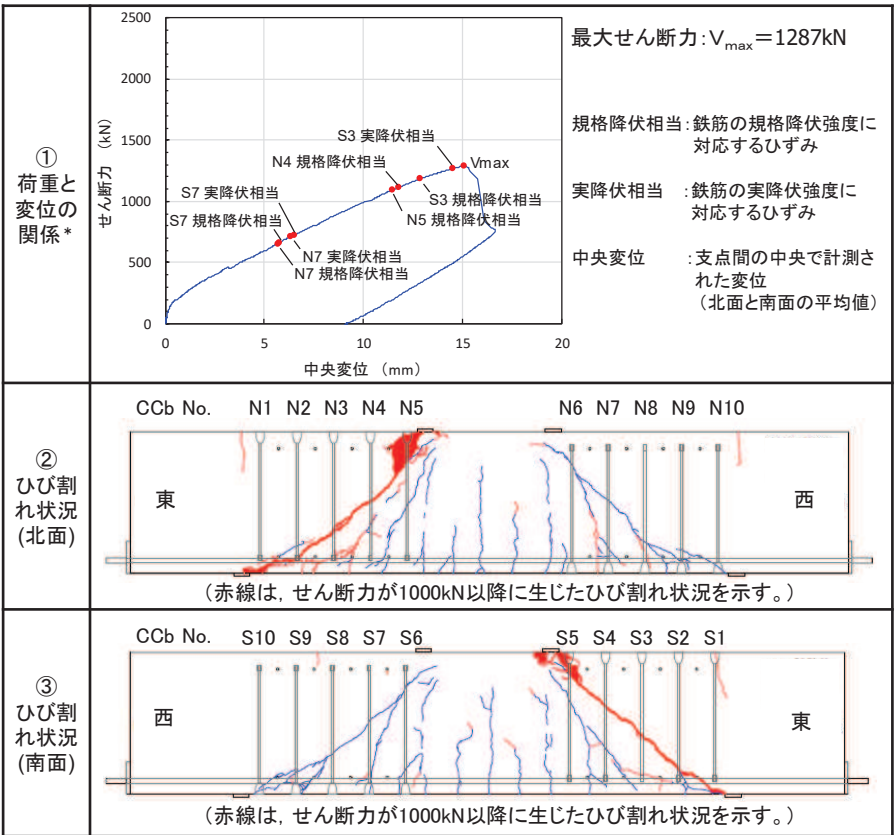
試験体概要 (CASE1の例)



試験装置概要

# 参考1. 後施工せん断補強筋工法(CCb工法)の室内模型実験 室内模型実験結果

- 室内模型実験結果の代表として、CASE1(基本ケース)の結果を示す。
- 载荷に伴い、载荷点と支点を結ぶ圧縮ストラットの下方に発生した斜めひび割れが進展し、最大せん断力に到達後、载荷点近傍の圧縮破壊により急激に耐力が低下するディープビーム的な破壊が確認された。
- 実験の結果、設計に用いる棒部材式によるせん断耐力は、実験結果に対し37%以上の保守性を有することが確認できた。



せん断耐力の比較(実験式と棒部材式)

No.	ケースの概要	せん断スパン比 ( $a/d$ )	せん断補強鉄筋比 ( $\rho_w$ )	せん断耐力 (kN)	
				実験	せん断耐力評価式*1.2 (棒部材式*3 (参考) ディープビーム式*3)
CASE1	基本ケース	1.44	0.20	1287	583 (2.21) / 777 (1.66)
CASE2	せん断スパン比 ( $a/d$ )の違い	1.00	0.20	1972	663 (2.97) / 1053 (1.87)
CASE3	せん断補強鉄筋比 ( $\rho_w$ )の違い	1.44	0.55	1396	1021 (1.37) / 1122 (1.24)

注記\*1: 土木学会マニュアル2005による評価式

\*2: 安全係数を  $\gamma_c=1.3$ ,  $\gamma_s=1.0$ ,  $\gamma_{bc}=1.3$ ,  $\gamma_{bs}=1.1$ として算出

ここに、 $\gamma_c$ : 材料係数(コンクリート)

$\gamma_s$ : 材料係数(鉄筋)

$\gamma_{bc}$ : 部材係数(コンクリート)

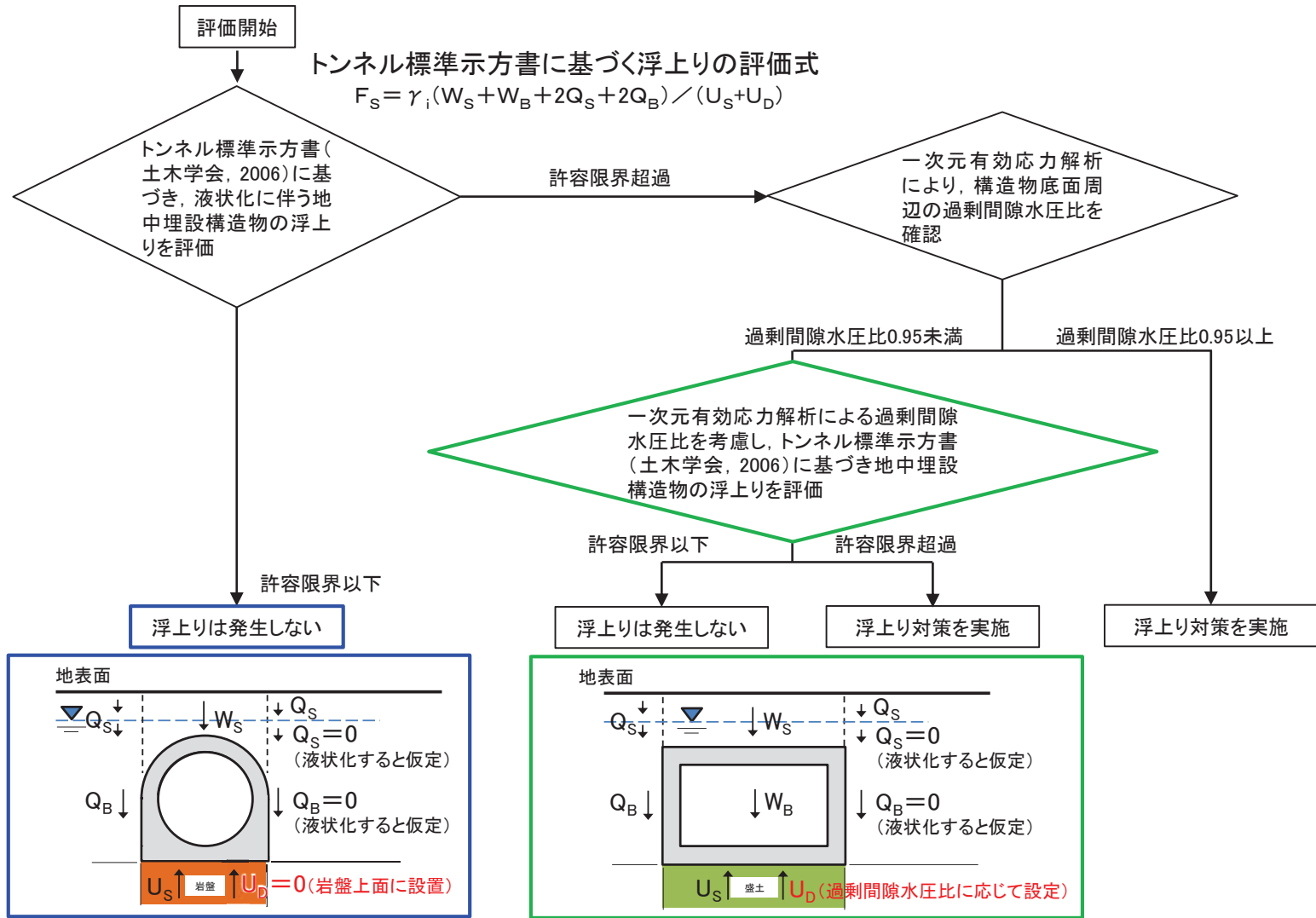
$\gamma_{bs}$ : 部材係数(鉄筋)

\*3: 各ケースの括弧内の数値は、せん断耐力評価式によるせん断耐力に対する実験値の比率を示す。

注記\*: グラフ中の記号及び番号(N7, S3等)は、ひび割れ状況(②・③)に示す北面及び南面それぞれのCCbのNo.を表す。

荷重-変位の関係及び実験終了時のひび割れ状況  
(CASE1 (CCb,  $a/d=1.44$ ,  $\rho_w=0.20\%$ ))

土木構造物及び屋外アクセスルートの中埋設構造物に対する浮上りの評価は以下のフローに基づき行う。



浮上り評価の概念図(排気筒連絡ダクト)

浮上り評価の概念図(屋外アクセスルート)  
(2T-6ダクト(C部), T-10ダクト(A部), T-10ダクト(B部))