

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-01-0080_改0
提出年月日	2021年7月7日

漂流物防護工の追加, 防潮堤の詳細設計結果に関する説明資料

2021年7月7日
東北電力株式会社

1. 本日のご説明内容
2. 漂流物防護工の追加
3. 防潮堤の耐震・強度評価
4. 防潮堤の耐震・強度評価結果
5. まとめ

(参考資料)

- 参考1 防潮堤の概要
- 参考2 防潮堤に関する新規制基準への適合性
- 参考3 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の概要
- 参考4 防潮堤の縦断図及び断面図
- 参考5 防潮堤の強度評価における荷重作用図
- 参考6 止水ジョイント部材設計相対変位量の算出方法
- 参考7 浸透流解析による地盤中からの回り込み防止の確認

1. 本日のご説明内容

- 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)において説明した主要説明項目における『詳細設計段階における設計変更内容No.1-1 漂流物防護工の追加』及び『詳細設計送り事項No.2-8 防潮堤の詳細設計結果』について説明する。

詳細設計段階における設計変更内容(第876回審査会合資料抜粋)

No.	項目	変更内容
1-1	漂流物防護工の追加	防潮堤及び屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の詳細設計の結果を踏まえて、施設前面に漂流物防護工を追加設置する。 【設置変更許可申請書 添付書類八(浸水防護設備)関連】

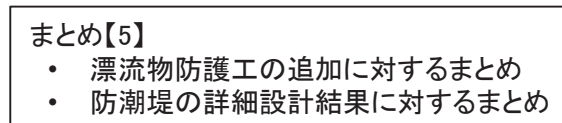
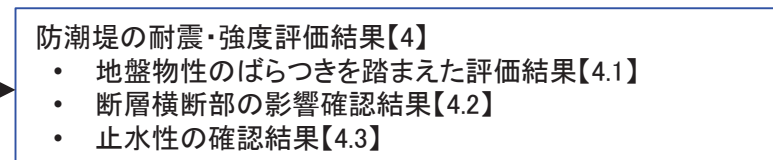
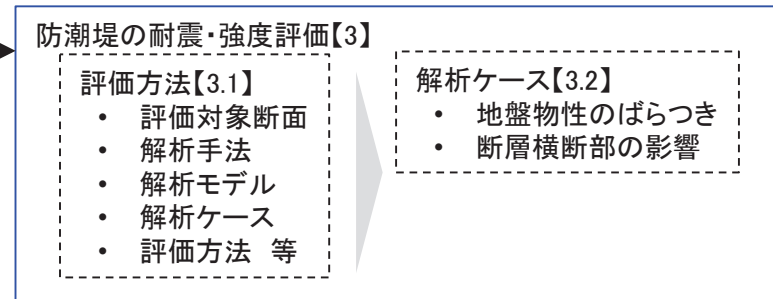
詳細設計送り事項(第876回審査会合資料抜粋)

No.	項目	概要
2-8	防潮堤の詳細設計結果	設置許可段階において、構造成立性及び詳細設計段階における設計方針を説明している防潮堤について、断層横断部の影響や、地盤物性のばらつき影響評価等の詳細設計の結果を説明する。

- 2章において、以下の内容を説明する。

【2.1】 防潮堤	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 漂流物防護工の追加設置を踏まえた全体構造 ← ✓ 漂流物防護工の役割, 性能目標 ←
【2.2】 屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 漂流物防護工の追加設置を踏まえた全体構造 ✓ 漂流物防護工の役割, 性能目標

- 3, 4章において、以下の内容を説明する。



【 】内は章番号を示す。

2. 漂流物防護工の追加

2.1 防潮堤(全体構造)

- 津波による遡上波が敷地に到達，流入することを防止するため，入力津波による浸水高さ(O.P.+24.4m*)に対して余裕を考慮した天端高さ(O.P.+29.0m*)の防潮堤(津波防護施設)を敷地前面に設置する。
- 防潮堤は，構造形式により鋼管式鉛直壁(一般部)，鋼管式鉛直壁(岩盤部)及び盛土堤防に分類される。
- 設置許可段階においては，漂流物衝突荷重が確定していなかったため，漂流物衝突荷重に対しては漂流物防護工により対応可能であることを示した上で，防潮堤の構造成立性を説明した
- 詳細設計段階では，漂流物衝突荷重(2000kN)に対して十分耐えるよう，鋼管式鉛直壁(一般部)及び鋼管式鉛直壁(岩盤部)に，漂流物防護工(架台及び防護工)の部位を追加設置し，鋼製遮水壁及び止水ジョイントに直接漂流物が衝突しない設計とする。
- なお，設置許可段階において部位の一つであった頂部はりについては撤去し，漂流物防護工の追加によって防潮堤の全体重量が増加しない設計とする(防潮堤(鋼管式鉛直壁)の設置許可段階と詳細設計段階の比較は参考1に示す)。

注記*：防潮堤を含む耐津波設計においては，平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い，牡鹿半島全体で約1mの地盤沈下が発生していることを考慮した設計とし，地盤沈下を考慮した地盤高さや施設高さ等を記載する。

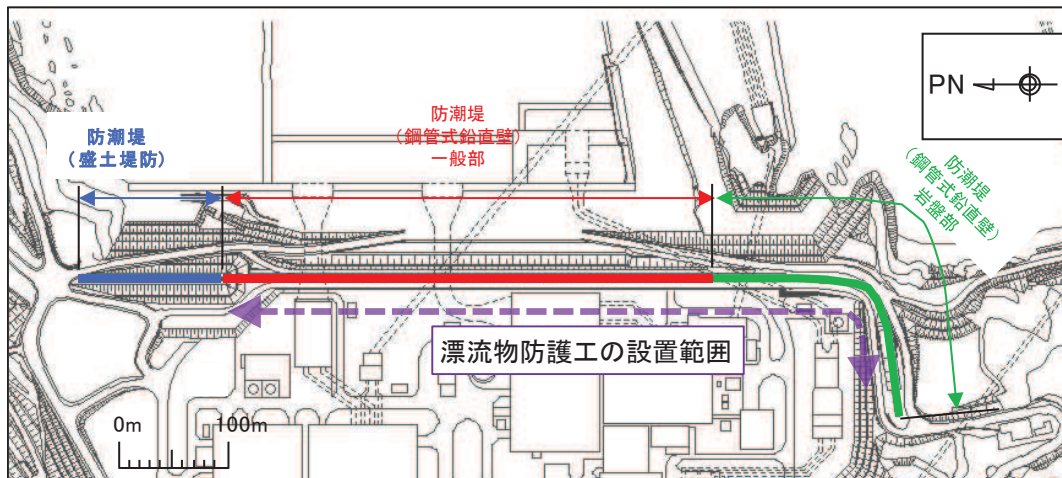


図1 防潮堤配置図

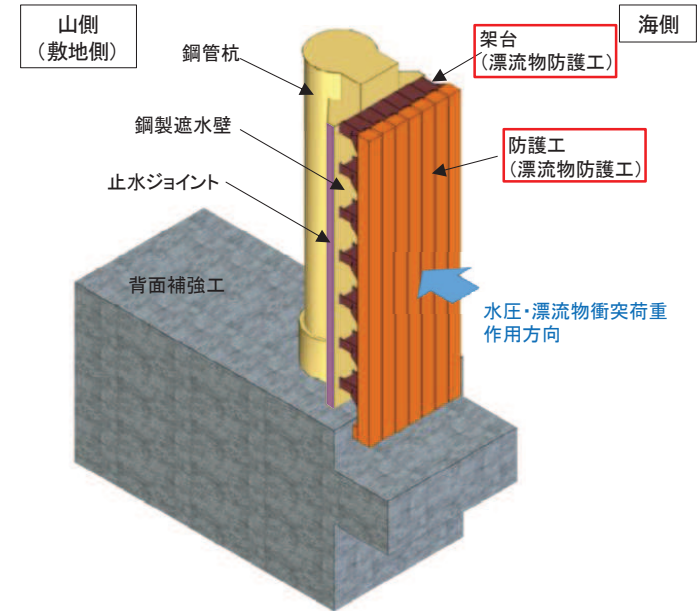


図2 防潮堤(一般部)の漂流物防護工の構造概要

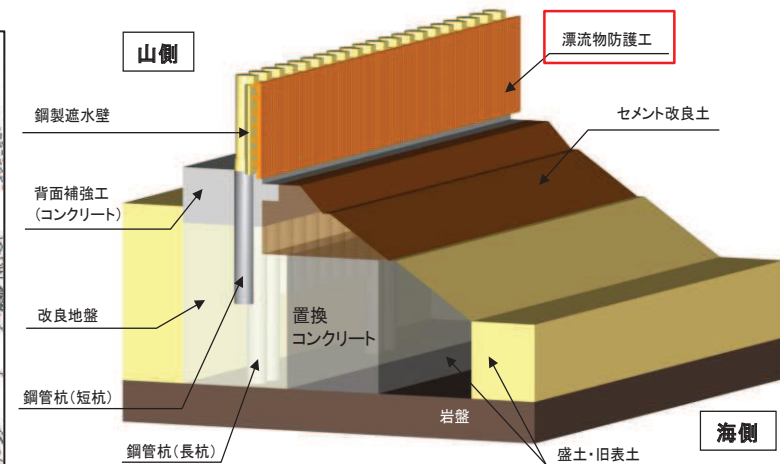


図3 防潮堤(鋼管式鉛直壁)のうち一般部の構造概要図

2. 漂流物防護工の追加

2.1 防潮堤(役割, 性能目標及び評価方法)

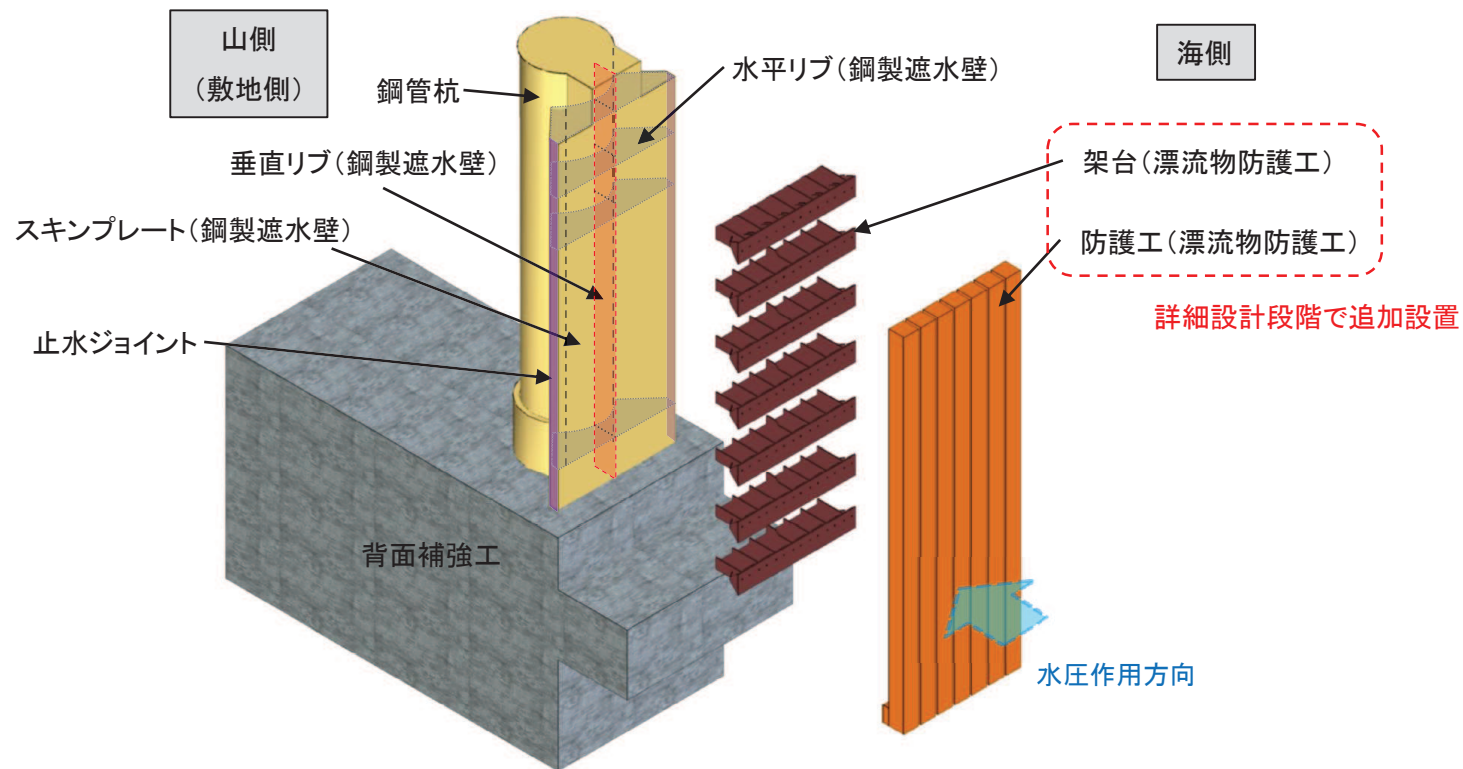
【漂流物防護工の役割*】

- 漂流物防護工は、防護工及び架台で構成されており、防護工は架台に取り付け、架台はスキムプレート(鋼製遮水壁)を挟んで水平リブ(鋼製遮水壁)と同じ高さに取り付けることとしている。
- そのため、津波時において、漂流物防護工は漂流物による衝突を直接受けて、水平リブ(鋼製遮水壁)及び鋼管杭に荷重を伝達することで、スキムプレート(鋼製遮水壁)及び止水ジョイントに漂流物を直接衝突させない構造となっている。

【漂流物防護工の性能目標及び評価方法*】

- 防潮堤全体の健全性及び止水性を保持するために、漂流物防護工はおおむね弾性状態にとどまることを性能目標とする。
- また、上記性能目標を満足するため、曲げ軸力、せん断力に対する発生応力が許容限界(短期許容応力度)以下であることを確認する(照査結果を4章に示す)。

注記*: 漂流物防護工以外の部位の役割, 性能目標及び評価方法については参考2に示す。

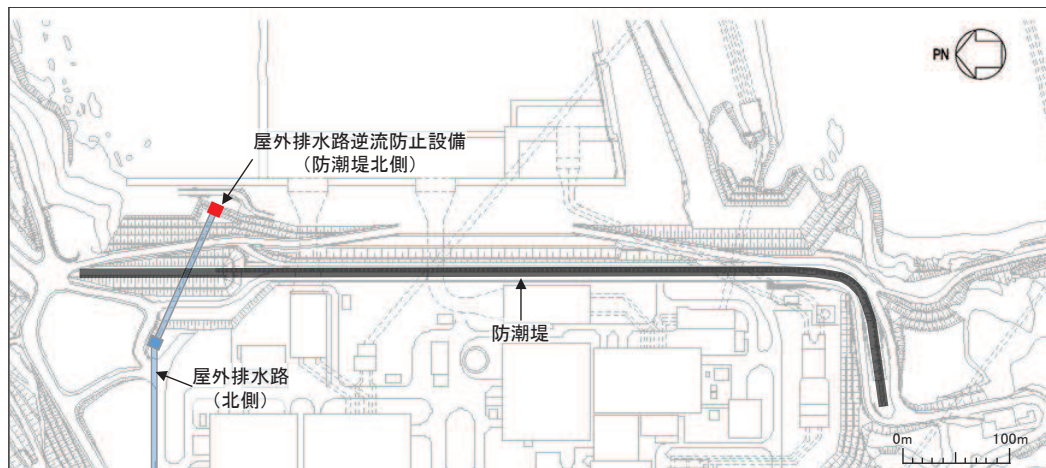


防潮堤(鋼管式鉛直壁)に追加設置する漂流物防護工の構造

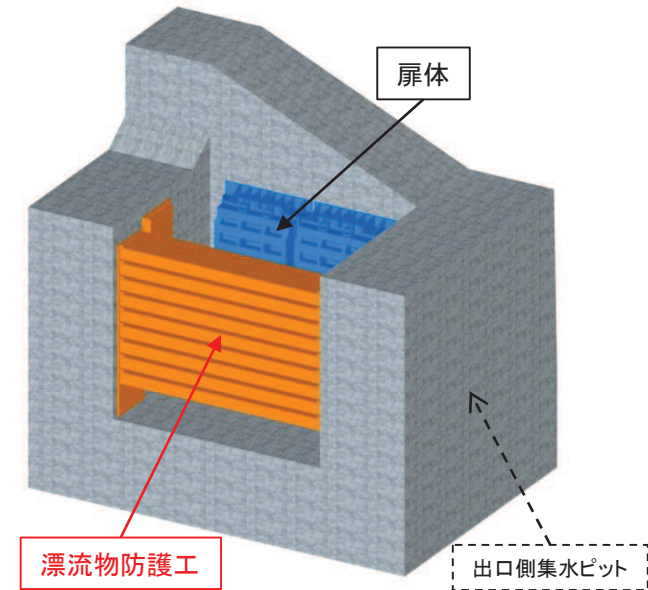
2. 漂流物防護工の追加

2.2 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)(全体構造)

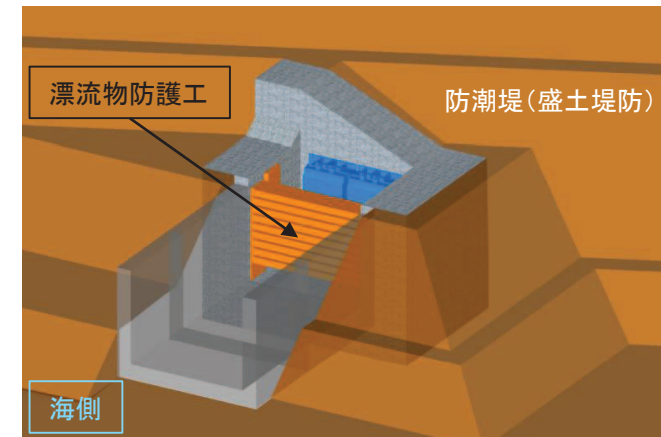
- 防潮堤(盛土堤防)を横断する屋外排水路(北側)の海側出口には、津波の流入を防止するため屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)(浸水防止設備)を設置する。
- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の海側には、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の部位の一部として漂流物防護工を設置し、扉体等に漂流物が衝突しない構造とする。
- なお、漂流物防護工を含む屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)は間接支持構造物である出口側集水ピットに支持される。
- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)を構成する部位の詳細については参考3に示す。



屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)配置図



屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の構造イメージ



屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の設置イメージ

2. 漂流物防護工の追加

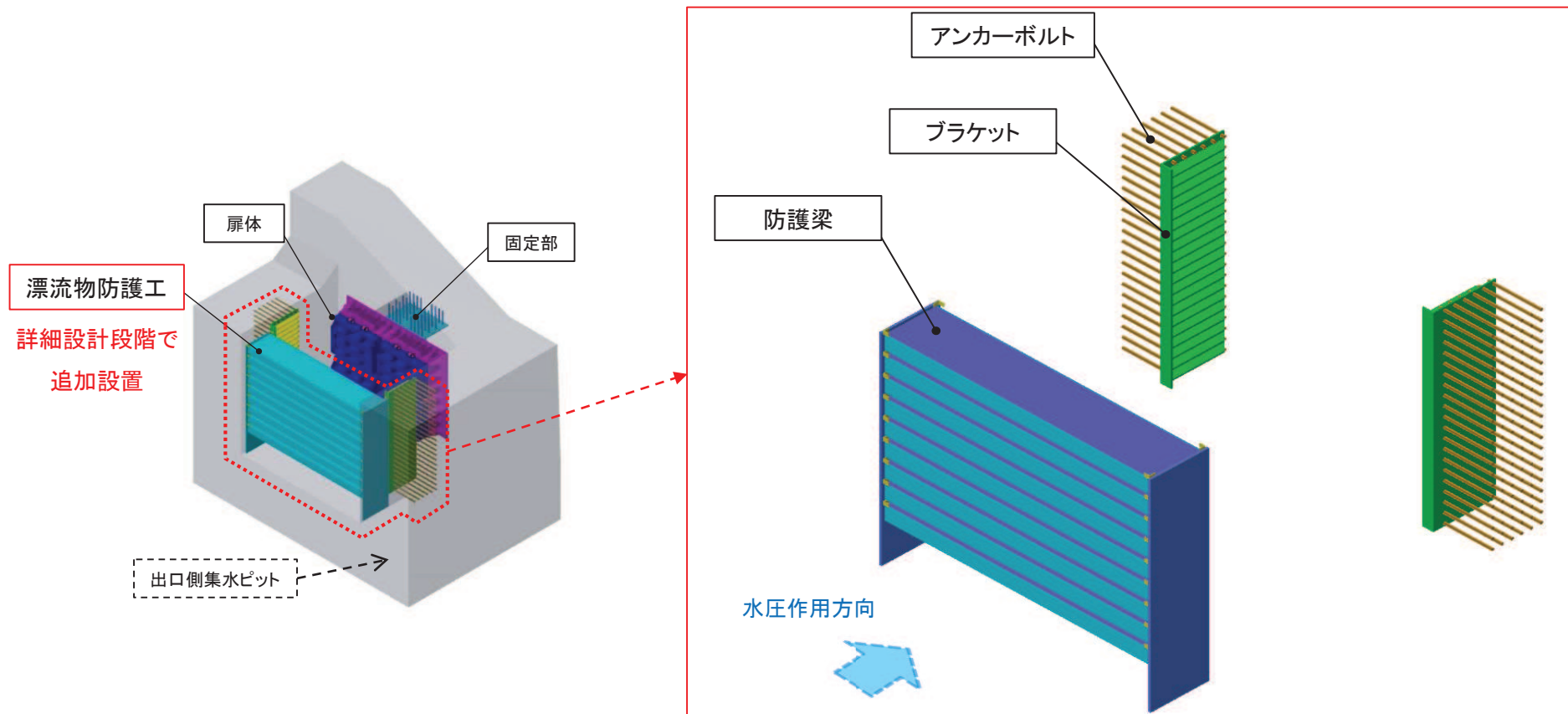
2.2 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)(役割, 性能目標及び評価方法)

【漂流物防護工の役割】

- 漂流物防護工は、防護梁、ブラケット等で構成し、扉体及び固定部に漂流物を直接衝突させないよう扉体よりも海側に設置する。
- そのため、津波時において、防護梁が漂流物による衝突を直接受けて、漂流物防護工の各部に荷重を伝達し、最終的には間接支持構造物の出口側集水ピットの側壁に荷重を伝達する。

【漂流物防護工の性能目標及び評価方法】

- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の健全性を保持するために、漂流物防護工はおおむね弾性状態にとどまることを性能目標とする。
- また、上記性能目標を満足するため、曲げ軸力、せん断力に対する発生応力が許容限界(短期許容応力度)以下であることを確認する。

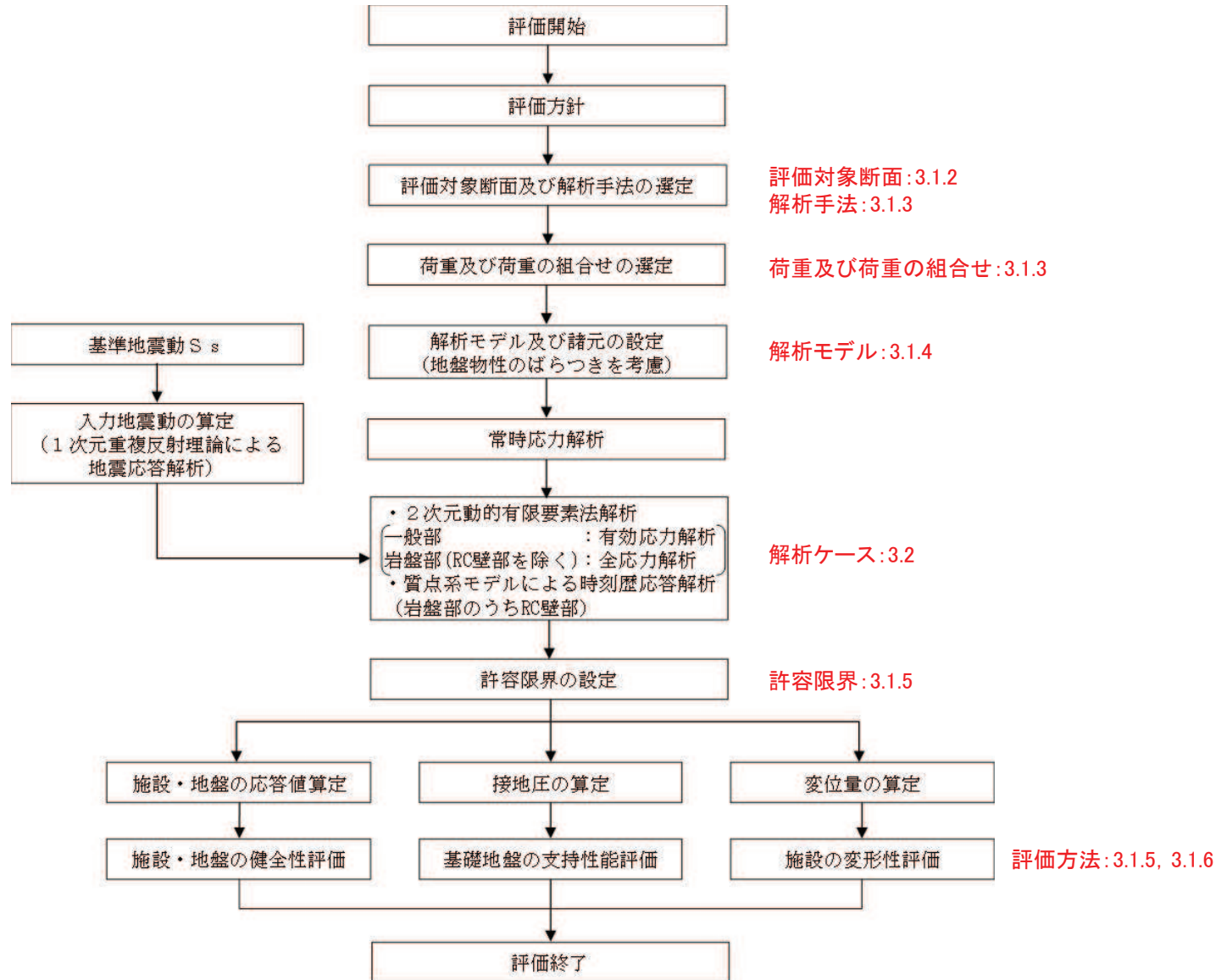


屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)に設置する漂流物防護工の構造

3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1 評価方法

- 防潮堤の耐震・強度評価は、設置許可段階と同様、耐震評価・強度評価のフローに基づき実施する。防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震評価フローの例と説明箇所を下図に示す。



3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1.1 詳細設計段階における考慮事項について

- 防潮堤の耐震・強度評価に当たり、詳細設計段階における考慮事項を以下に示す(赤字は設置許可段階で示した構造成立性評価からの追加反映事項を示す)。
- なお、詳細設計段階で漂流物防護工を追加したことについては、2章のとおり。

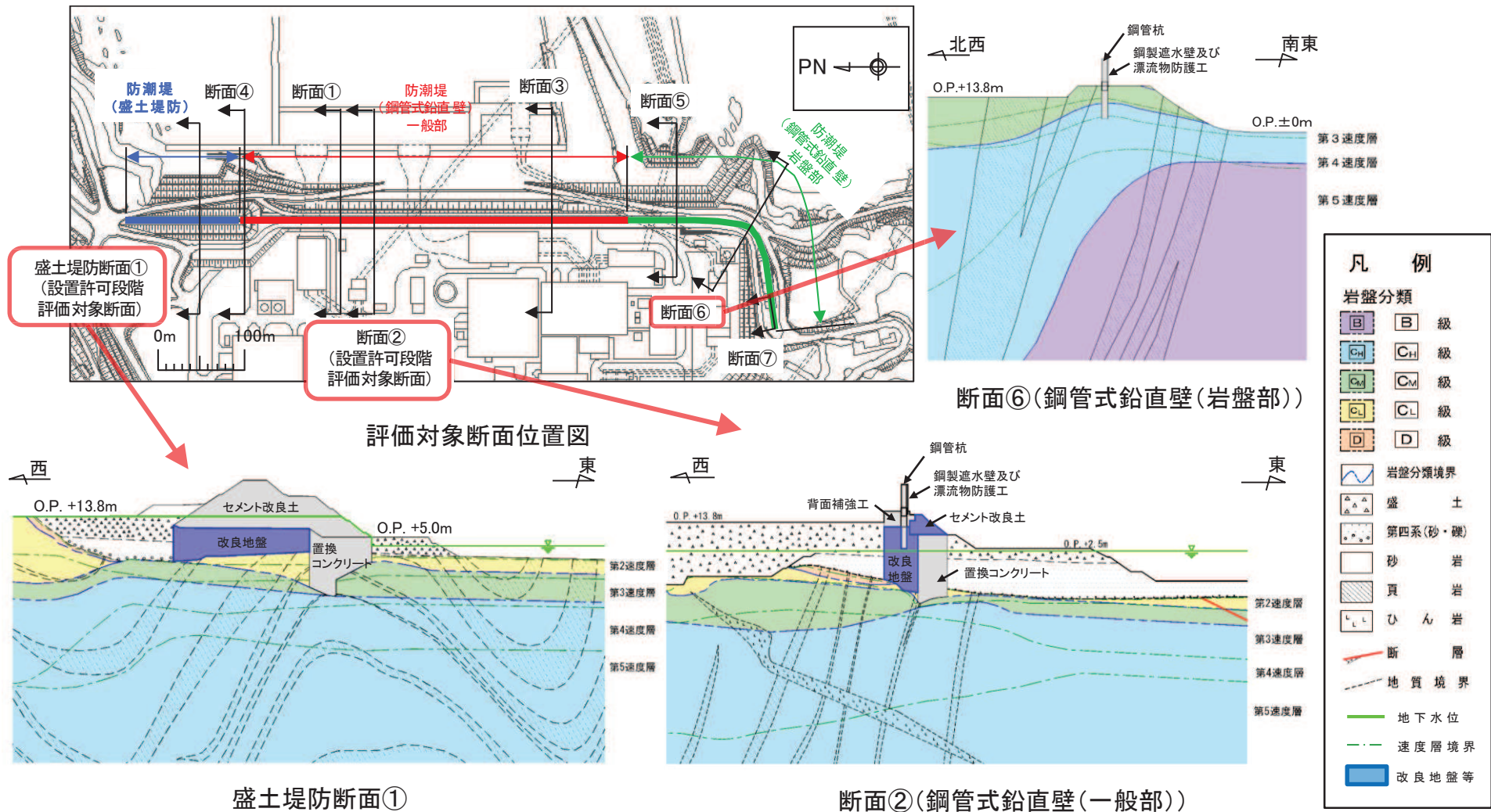
項目	設置許可段階	詳細設計段階
評価対象断面*	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部):1断面 ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):- (解析方針のみ) ➢ 盛土堤防:1断面 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部):1+3断面 ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):3断面 ➢ 盛土堤防:1断面
解析手法*	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部)及び盛土堤防:二次元FEMによる有効応力解析を実施 ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):全応力解析を実施する方針の説明 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部)及び盛土堤防:二次元FEMによる有効応力解析を実施 ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):二次元FEM及び質点系モデルによる全応力解析を実施
設計用地下水位*	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部):朔望平均満潮位(O.P.+1.43m) ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):地表面(解析方針のみ) ➢ 盛土堤防:海側は朔望平均満潮位(O.P.+1.43m), 山側は地表面 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 鋼管式鉛直壁(一般部):朔望平均満潮位(O.P.+1.43m) ➢ 鋼管式鉛直壁(岩盤部):地表面 ➢ 盛土堤防:海側は朔望平均満潮位(O.P.+1.43m), 山側は地表面
評価対象地震動	(地震時) <ul style="list-style-type: none"> ➢ 基準地震動Ss(7波)のうち、構造物への影響が大きい地震動(2波)を構造成立性評価地震動として選定 (余震重畳時) <ul style="list-style-type: none"> ➢ 弾性設計用地震動Sd-D2を構造成立性評価地震動として選定 	(地震時) <ul style="list-style-type: none"> ➢ 基準地震動Ss7波(位相反転考慮) (余震重畳時) <ul style="list-style-type: none"> ➢ 弾性設計用地震動Sd-D2(位相反転考慮)
解析ケース	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地盤物性のばらつき係数(0.9)を設定し、裕度を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 地盤物性ばらつきとして、剛性のばらつき(平均値$\pm 1\sigma$)による影響評価を実施 ➢ 断層横断部の影響評価を実施
評価方法	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 解析に基づき算定した発生応力より、設定した許容限界以下であることを確認 ➢ 止水ジョイントについては、詳細設計段階で確定する方針 ➢ 止水性については、各部位の健全性を確認した上で、異種材料間に貫通した水みちが形成されないことを確認 ➢ また、地盤中からの回り込みについて、透水係数を保守的に設定した二次元浸透流解析により、敷地に津波が流入しないことを確認 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 解析に基づき算定した発生応力より、設定した許容限界以下であることを確認 ➢ 止水ジョイントについて、構造同一部と構造境界部に区分した上で、地震時・津波時・津波+余震重畳時で最大相対変位を算定し、許容限界以下であることを確認 ➢ 止水性については、詳細設計の結果を反映して各部位の健全性を確認した上で、異種材料間に貫通した水みちが形成されないことを確認 ➢ また、地盤中からの回り込みについて、透水係数を保守的に設定した二次元浸透流解析により、敷地に津波が流入しないことを確認

注記*:第979回審査会合において説明

3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1.2 評価対象断面

- 評価断面は、第979回審査会合において説明のとおり、構造的特徴、周辺地盤状況、地下水位等を考慮し、耐震評価上最も厳しくなると考えられる断面を選定する。
- 設置許可段階における2断面(鋼管式鉛直壁(一般部)1断面、盛土堤防1断面)を含め、評価対象断面位置図に示す鋼管式鉛直壁(一般部)4断面、鋼管式鉛直壁(岩盤部)3断面及び盛土堤防1断面の計8断面を選定。断面図の例を下図に示す(全断面については、参考4に示す)。



盛土堤防断面①

断面②(鋼管式鉛直壁(一般部))

3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1.3 解析手法, 荷重及び荷重の組合せ

【解析手法】

- 防潮堤は、周辺の地盤状況により地震時及び津波時(余震重畳時を含む)の応答及び評価が影響を受けることから、地震時及び津波時ともに、構造物と地盤の相互作用を考慮できる二次元有限要素法により解析を行うことを基本とする。
- 解析は、第979回審査会合において説明のとおり、液状化による側方流動の影響を受ける可能性がある鋼管式鉛直壁(一般部)及び盛土堤防については有効応力解析により実施する。また、岩盤内に設置されており液状化の影響を受けない鋼管式鉛直壁(岩盤部)については全応力解析により評価を実施する。

【荷重の組合せ】

- 考慮する荷重は以下のとおり。強度評価(津波時及び津波+余震重畳時)の荷重作用図を参考5に示す。

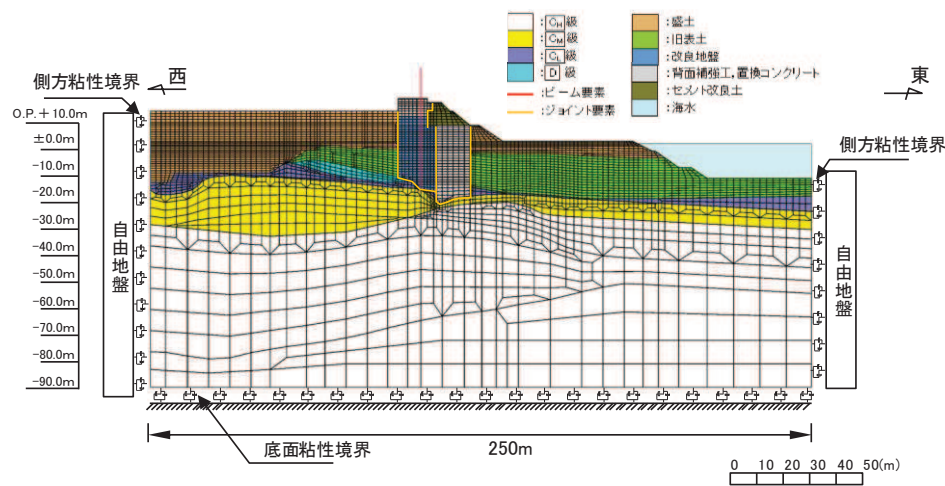
	固定荷重	積載荷重 (積雪荷重を 含む)	風荷重	地震荷重 (基準地震動 Ss)	津波荷重*	漂流物 衝突荷重 (2000kN)	余震荷重 (弾性設計用 地震動 Sd-D2)
地震時	○	○	○	○	—	—	—
津波時	○	○	○	—	○	○	—
津波+余震重畳時	○	○	○	—	○	—	○

注記* : 津波荷重は入力津波水位O.P.+24.4mに余裕を考慮してO.P.+25.0mの水位として算定する。

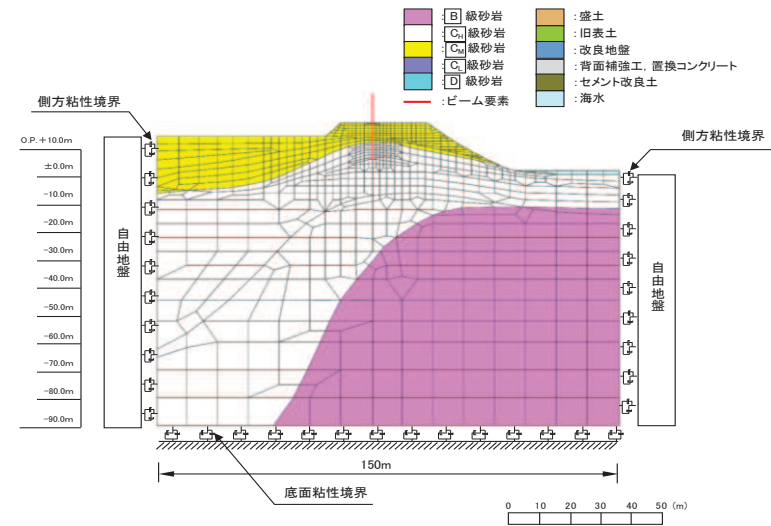
3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1.4 解析モデル

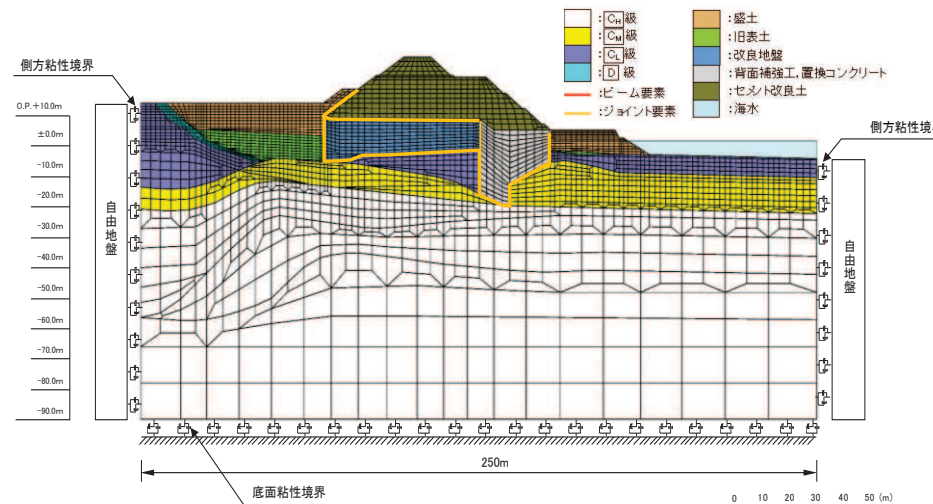
- 地震応答解析モデルは、境界条件の影響が構造物及び地盤の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分に広い領域とする。解析モデルの例を下図に示す。



解析モデル例(鋼管式鉛直壁(一般部)断面②)



解析モデル例(鋼管式鉛直壁(岩盤部)断面⑥)



解析モデル例(盛土堤防断面①)

3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.1.5 許容限界及び評価方法

【許容限界】

- 許容限界は、各部位の役割を踏まえて整理した性能目標に基づき、以下のように設定する。各部位の役割、性能目標及び許容限界の整理については参考2に示す。

各部位の許容限界

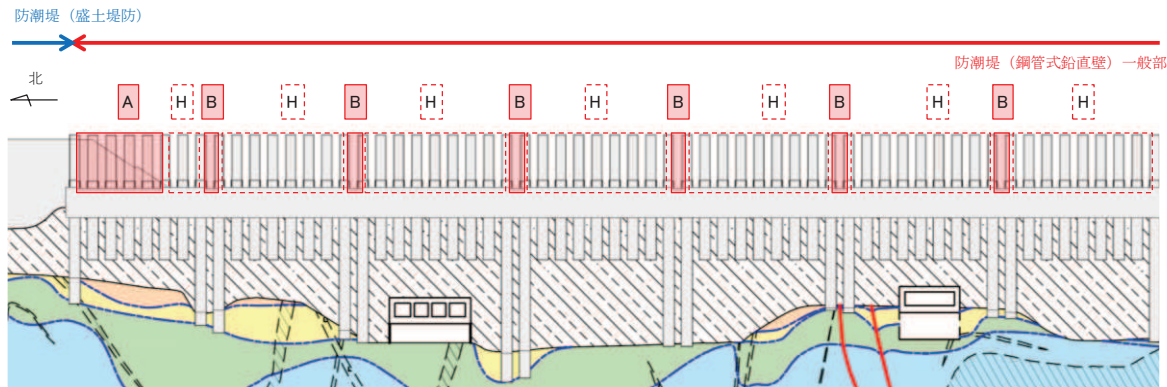
評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界
構造強度を有すること 止水性を損なわないこと	施設・地盤の健全性	鋼管杭 鋼製遮水壁 漂流物防護工	曲げ軸力、せん断力に対する発生応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		背面補強工 置換コンクリート 改良地盤 セメント改良土	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率1.2以上
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する応力(接地圧)が許容限界以下であることを確認	極限支持力
	構造物の変形性	止水ジョイント部材	発生変形量が許容限界以下であることを確認	有意な漏えいが生じないことを確認した変形量

【評価方法】

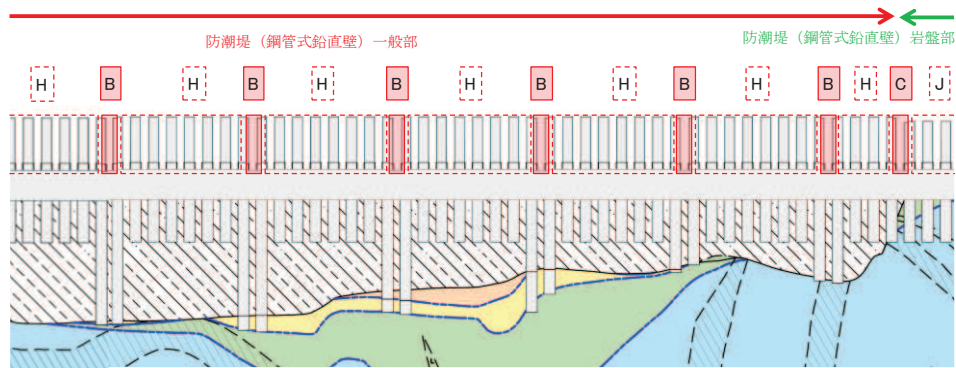
- 耐震・耐津波評価は、応答解析に基づき算定した発生応力が設定した許容限界以下であることを確認する。
- すべり安全率により評価する項目については、断面力照査により評価する項目と同様に応答解析に基づき、想定したすべり線上の応力状態をもとに、すべり線上のせん断抵抗力の和をせん断力の和で除した値として時々刻々求め、最小すべり安全率を算定して確認する。
- 止水ジョイント部材は変形量により評価を行い、比較的変位量が大きくなる構造境界部にゴムジョイントを、変位量がほとんど生じない構造同一部にはウレタンシリコン目地を設置する。止水ジョイント部材の設置位置を次頁に示す。また、止水ジョイントの構造を参考1に示す。
- 止水ジョイント部材の評価に用いる設計相対変位量の算出方法を参考6に示す。

3. 防潮堤の耐震・強度評価

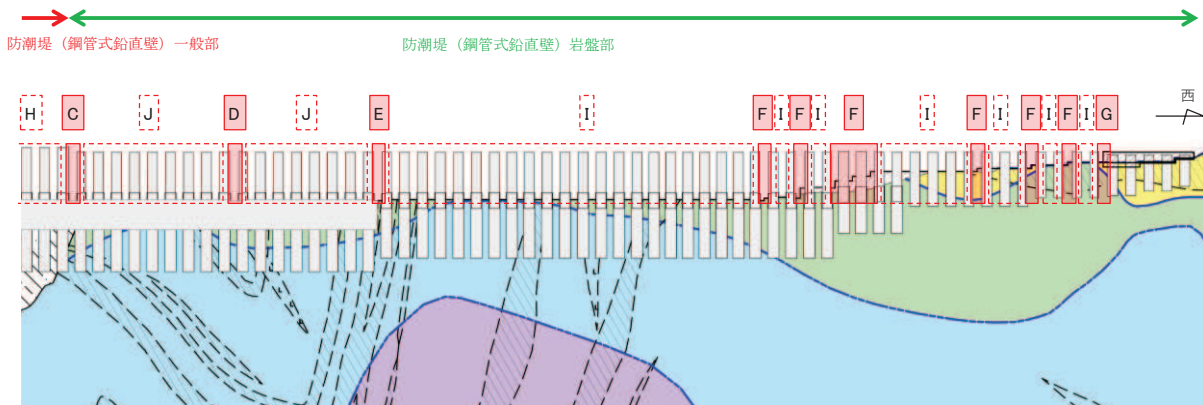
3.1.6 評価方法－止水ジョイント部材の設置位置



- 止水ジョイント部材は、ゴムジョイントとウレタンシリコーン目地の2種類あり、比較の変位量が大きくなる構造境界部にゴムジョイント、変位量がほとんど生じない構造同一部にはウレタンシリコーン目地を設置する。
- 設計相対変位量については、耐震評価及び強度評価でそれぞれ考慮する荷重の特徴を踏まえ、保守的になるよう算出する(詳細は参考6)。



	記号(区間)	止水ジョイント部材
構造境界部	A (一般部のうち突出長変化部)	ゴムジョイント
	B (一般部のうち背面補強工間)	ゴムジョイント
	C (一般部と岩盤部の境界)	ゴムジョイント
	D (岩盤部のうち背面補強工間)	ゴムジョイント
	E (岩盤部のうち背面補強工端部)	ゴムジョイント
	F (岩盤部のうち突出長変化部)	ゴムジョイント
	G (岩盤部のうちRC壁との境界)	ゴムジョイント
構造同一部	H (一般部のうち背面補強工内)	ウレタンシリコーン目地
	I (岩盤部のうち突出長同一部)	ウレタンシリコーン目地
	J (岩盤部のうち背面補強工内)	ウレタンシリコーン目地



凡例

岩盤分類

B級	盛土
C ₁ 級	第四系(砂・礫)
C ₂ 級	砂
C ₃ 級	頁岩
C ₄ 級	ひん岩
D級	断層
岩盤分類境界	地質境界
	改良地盤

* : 鋼管杭下方の[C₂]級岩盤部はMMRにより置換。

止水ジョイント部材の設置位置図

3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.2 解析ケース

【地盤物性のばらつき】

- 耐震評価及び強度評価においては、地盤物性のばらつきを考慮し、以下のケースの解析を実施する。

解析ケース	ケース①	ケース②	ケース③
	基本ケース	地盤物性のばらつき(+1 σ)を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき(-1 σ)を考慮した解析ケース
地盤物性	平均値	平均値+1 σ	平均値-1 σ
地震時	基準地震動Ss7波 (位相反転考慮)	基本ケースにおいて照査値が最も厳しい地震動	
津波時	○	○	○
津波+余震重畳時	弾性設計用地震動Sd-D2 (位相反転考慮)	基本ケースにおいて照査値が最も厳しい地震動	

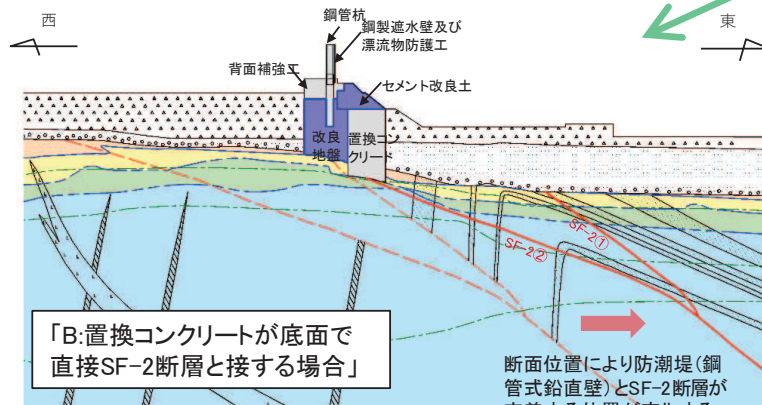
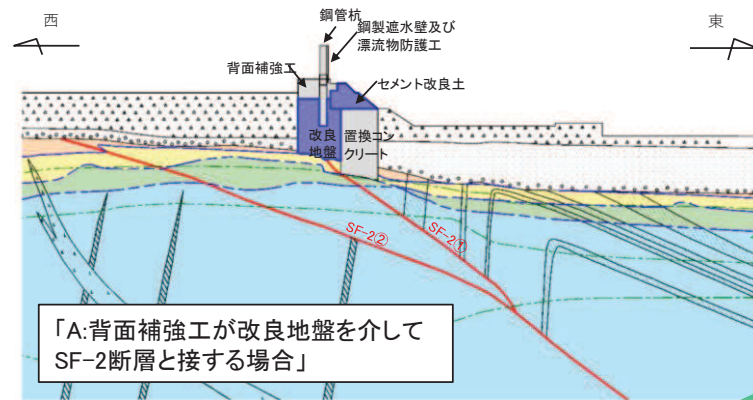
【断層横断部の影響】

- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)を横断するSF-2断層が耐震評価に与える影響を確認する。評価内容の詳細を次頁に示す。
- なお、岩盤の深さや周辺の盛土・旧表土の層厚は地震時や津波時の応答に直接影響するため評価対象断面の選定基準としているが、構造物直下の断層についてはモデル化すると地震時の応答加速度が小さくなるため、耐震評価及び強度評価に与える影響が小さいと判断したことから評価対象断面として選定していない。

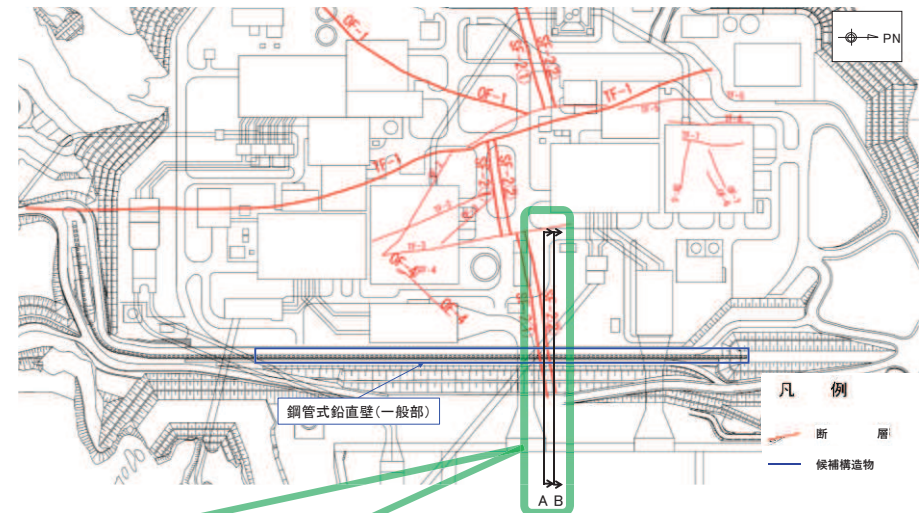
3. 防潮堤の耐震・強度評価

3.2.1 断層横断部の影響

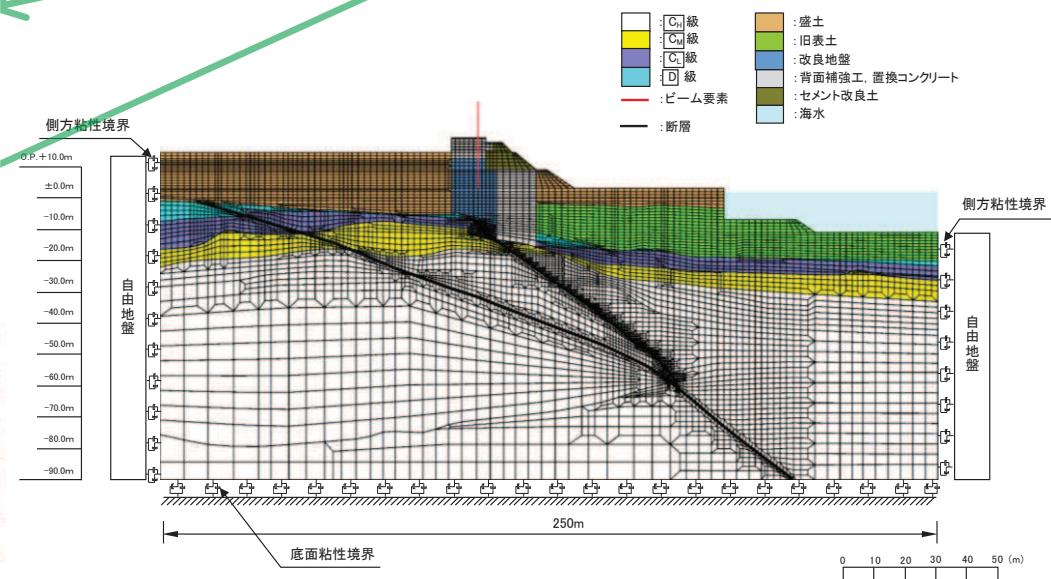
- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)の直下をSF-2断層が横断し、断面位置により防潮堤(鋼管式鉛直壁)とSF-2断層が交差する位置が漸次的に変化する。
- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)とSF-2断層の交差は、「A:背面補強工が改良地盤を介してSF-2断層と接する場合(断面A)」及び「B:置換コンクリートが底面で直接SF-2断層と接する場合(断面B)」に分類されるため、この2パターンでSF-2断層が防潮堤(鋼管式鉛直壁)の耐震性に与える影響を確認する。



防潮堤(鋼管式鉛直壁)とSF-2断層の交差イメージ



防潮堤と断層の位置関係



解析モデル例

(断面A, 背面補強工が改良地盤を介してSF-2断層と接する場合)

4. 耐震・強度評価結果

4.1 地盤物性のばらつきを踏まえた評価結果(鋼管式鉛直壁—耐震評価)

- 鋼管式鉛直壁の耐震評価について、各部位における照査値最大となる断面の照査値を記載する。ただし、すべり安全率で照査する項目は、最小すべり安全率となる断面について記載する。
- すべての断面・部位において許容値を満足することを確認した。

部位	照査項目	断面	発生値	許容値	照査値
鋼管杭	曲げ・軸力	断面②	151(N/mm ²)	247(N/mm ²)	0.62* ¹
	せん断	断面②	67(N/mm ²)	217(N/mm ²)	0.31
鋼製遮水壁	水平リブ曲げ (照査値最大)	—(各断面の最大 震度包絡)	27(N/mm ²)	315(N/mm ²)	0.09
漂流物防護工	架台せん断 (照査値最大)	—(各断面の最大 震度包絡)	13(N/mm ²)	180(N/mm ²)	0.08
RC遮水壁	コンクリート曲げ・軸力	断面⑦	0.8(N/mm ²)	21(N/mm ²)	0.04
	鉄筋曲げ・軸力		68(N/mm ²)	294(N/mm ²)	0.24
	コンクリートせん断		0.1(N/mm ²)	0.82(N/mm ²)	0.13
背面補強工	すべり安全率	断面④	(最小すべり安全率)		11.6* ²
置換コンクリート	すべり安全率	断面①	(最小すべり安全率)		4.2* ²
改良地盤	すべり安全率	断面①	(最小すべり安全率)		2.5* ²
セメント改良土	すべり安全率	断面④	(最小すべり安全率)		2.7* ²
基礎地盤	接地圧	断面④	4.8(N/mm ²)	11.4(N/mm ²)	0.43

注記*1: 漂流物防護工の偏心による影響を考慮。

*2: すべり安全率の照査においては、照査値 \geq 1.2が許容値。

部位	止水ジョイント種類	評価区間* ³	地震時最大変位 (mm)	許容限界 (mm)
止水ジョイント部材	ゴムジョイント部材	B区間及びC区間	209.5	350
	ウレタンシリコン目地	H区間	18.8	30

注記*3: 評価区間の詳細はp.13に示す。

4. 耐震・強度評価結果

4.1 地盤物性のばらつきを踏まえた評価結果(鋼管式鉛直壁—強度評価)

- 鋼管式鉛直壁の強度評価について、津波＋余震重畳時を含め、各部位における照査値最大となる断面の照査値を記載する。ただし、すべり安全率で照査する項目は、最小すべり安全率となる断面について記載する。
- すべての断面・部位において許容値を満足することを確認した。

部位	照査項目	断面	検討ケース	発生値	許容値	照査値
鋼管杭	曲げ・軸力	断面①	津波＋余震重畳時	288(N/mm ²)	382(N/mm ²)	0.76
	せん断	断面⑤	津波時	105(N/mm ²)	217(N/mm ²)	0.49
鋼製遮水壁	スキンプレート (照査値最大)	－(各断面の最大 荷重包絡)	津波＋余震重畳時	284(N/mm ²)	315(N/mm ²)	0.91
漂流物防護工	防護工せん断 (照査値最大)	－(各断面の最大 荷重包絡)	津波時	179(N/mm ²)	217(N/mm ²)	0.83
背面補強工	すべり安全率	断面③	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		10.8* ¹
置換コンクリート	すべり安全率	断面③	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		12.0* ¹
改良地盤	すべり安全率	断面①	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		2.4* ¹
セメント改良土	すべり安全率	断面④	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		6.8* ¹
基礎地盤	接地圧	断面④	津波＋余震重畳時	1.3(N/mm ²)	4.4(N/mm ²)	0.30

注記*1: すべり安全率の照査においては、照査値 \geq 1.2が許容値。

部位	検討ケース	止水ジョイント種類	評価区間* ¹	設計相対変位量* ² (mm)	許容限界 (mm)
止水ジョイント部材	津波時	ゴムジョイント部材	B区間及びC区間	125.0	350
		ウレタンシリコーン目地	H区間	22.6	30
	津波＋余震重畳時	ゴムジョイント部材	B区間及びC区間	168.5	350
		ウレタンシリコーン目地	H区間	18.9	30

注記*2: 評価区間の詳細はp.13に示す。

*3: 地震時最終変位を含む(詳細は参考6)。

4. 耐震・強度評価結果

4.1 地盤物性のばらつきを踏まえた評価結果(盛土堤防－耐震評価・強度評価)

- 盛土堤防の耐震評価及び強度評価について、各部位において最も厳しい照査値を記載する。
- すべての部位において許容値を満足することを確認した。

①耐震評価

部位	照査項目	断面	発生値	許容値	照査値
セメント改良土	すべり安全率	盛土堤防断面①	(最小すべり安全率)		3.0*
置換コンクリート	すべり安全率	盛土堤防断面①	(最小すべり安全率)		6.3*
改良地盤	すべり安全率	盛土堤防断面①	(最小すべり安全率)		3.4*
基礎地盤	接地圧	盛土堤防断面①	2.8(N/mm ²)	11.4(N/mm ²)	0.25

②強度評価

部位	照査項目	断面	検討ケース	発生値	許容値	照査値
セメント改良土	すべり安全率	盛土堤防断面①	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		5.5*
置換コンクリート	すべり安全率	盛土堤防断面①	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		12.8*
改良地盤	すべり安全率	盛土堤防断面①	津波＋余震重畳時	(最小すべり安全率)		5.2*
基礎地盤	接地圧	盛土堤防断面①	津波＋余震重畳時	2.1(N/mm ²)	11.4(N/mm ²)	0.19

注記* : すべり安全率の照査においては、照査値>1.2が許容値。

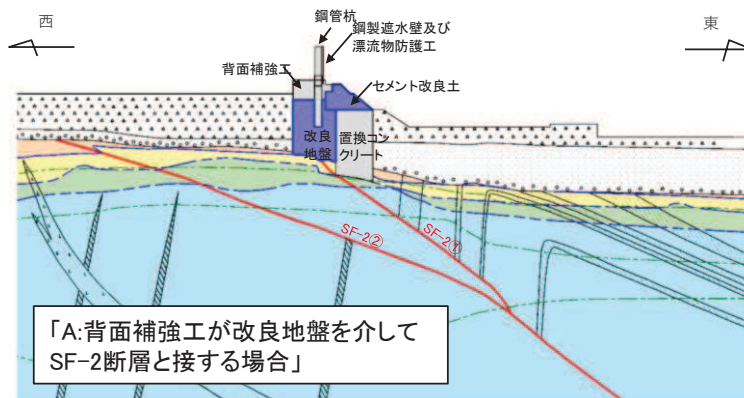
4. 耐震・強度評価結果

4.2 断層横断部の影響確認結果

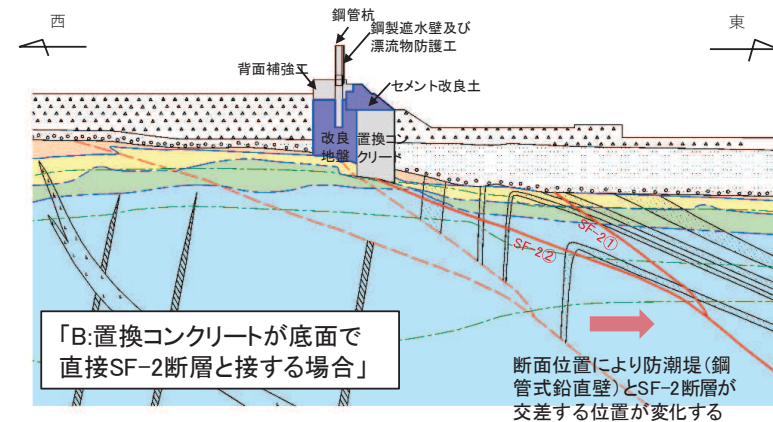
- 断層横断部の影響確認結果について、最も厳しい照査結果となった鋼管杭の曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果を示す。
- 断面Aでは照査値0.41，断面Bでは照査値0.42となっており，断面②における同条件での照査値0.47よりも小さく，断層横断部の影響は他の地盤条件の影響よりも小さいことを確認した。

断面	地震動(位相)		曲げ圧縮 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s/σ_{sa}
A	Ss-D2	(++)	99	247	0.41*
B	Ss-D2	(++)	102	247	0.42*
断面②	Ss-D2	(++)	116	247	0.47*

注記*：漂流物防護工の偏心の影響を考慮しない場合。



(断面A)

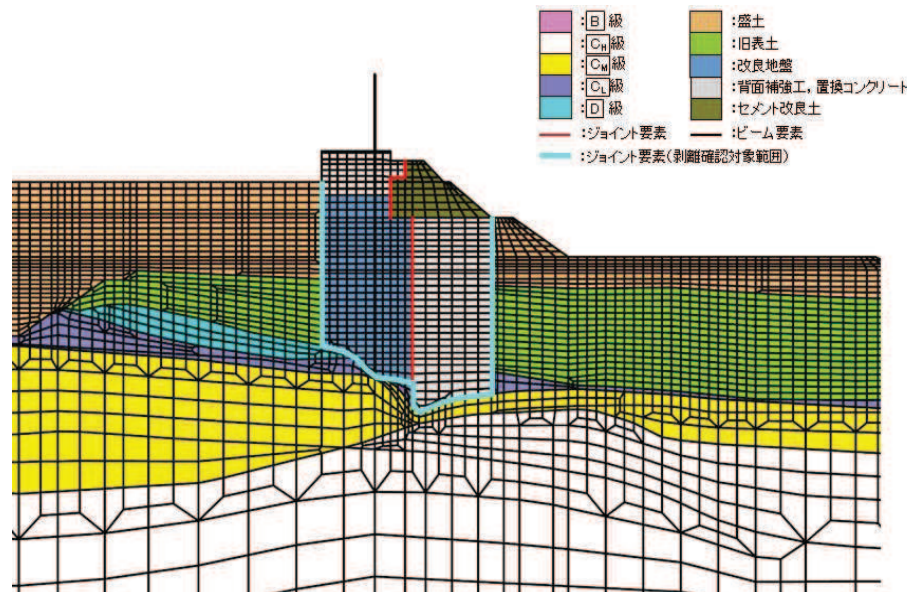


(断面B)

4. 耐震・強度評価結果

4.3 止水性の確認(1)

- 防潮堤の止水性については、鋼製遮水壁、背面補強工及び止水ジョイントで遮水性を担保し、改良地盤、置換コンクリート及びセメント改良土で地盤中からの回り込みによる浸水を防止(難透水性の保持)する。
- これらの部位の遮水性又は難透水性については、それぞれの部位の健全性により確認できている。
- また、置換コンクリート、改良地盤及びセメント改良土について透水係数を保守的に設定した浸透流解析により、津波の滞留時間中に地盤中からの回り込みによる浸水が防止されることを確認している(詳細を参考7に示す)。
- ここでは、部位間の構造境界部の剥離状況を確認し、津波が敷地に流入しないことを確認する。
- 具体的には、解析において部位間には材料と施工状況を考慮した上で剥離を考慮できるジョイント要素を設定しており、その剥離状況を確認する。
- 検討対象断面は、水みちの発生に対する厳しさを考慮して、幅の小さい断面①、②、③、⑤とする。
- 例として、断面②の解析モデル及びジョイント要素の配置図を示す。



断面②の解析モデル及びジョイント要素の配置図

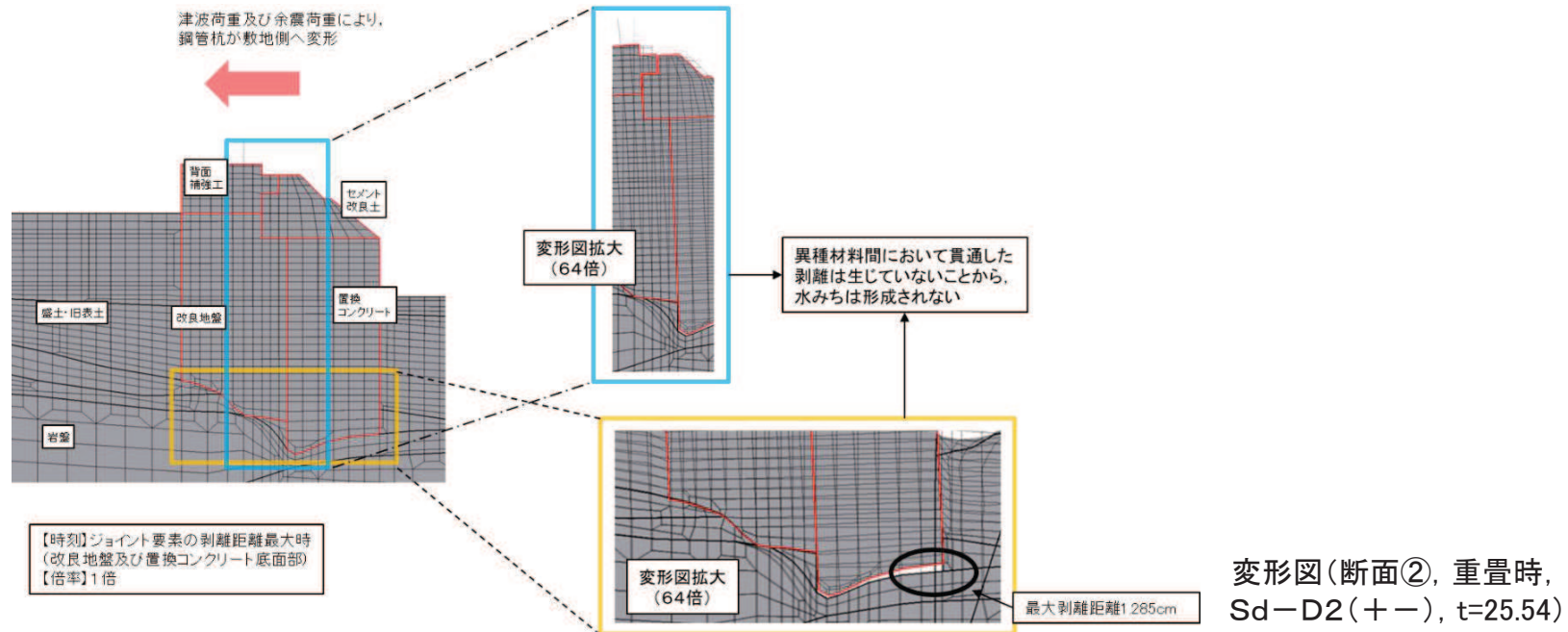
4. 耐震・強度評価結果

4.3 止水性の確認(2)

- 代表として、断面②における地震時、津波時及び津波＋余震重畳時の剥離状況を示す。
- 以下に示すとおり、地震時(最終ステップ)、津波時及び津波＋余震重畳時にいずれにおいても剥離は貫通しておらず、水みちは発生していないことを確認した。

断面	検討ケース		最大剥離長		剥離貫通*2の有無	最大剥離要素数	
	事象	地震動(位相)	時刻(s)	剥離長*1(cm)		時刻(s)	要素数
断面②	地震時	Ss-N1(-+)	最終ステップ	0.482	無	最終ステップ	59/176
	津波時	-	-	0.016	無	-	27/138
	津波＋余震重畳時	Sd-D2(++)	25.55	1.240	無	25.54	59/138
		Sd-D2(-+)	25.35	1.168	無	17.80	60/138
		Sd-D2(+)	25.54	1.285	無	7.87	67/138
	Sd-D2(--)	25.35	1.216	無	8.48	60/138	

注記*1:剥離長はジョイント要素の鉛直方向の剥離長(変位)を示したものの。
*2:全ジョイント要素が剥離した場合、剥離貫通と判断する。



5. まとめ

【漂流物防護工の追加】

- 漂流物衝突荷重(2000kN)に十分耐えるように防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼製遮水壁前面に漂流物防護工を設置し、鋼製遮水壁及び止水ジョイントに直接漂流物が衝突しない設計とした。
- 同様に、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)に漂流物防護工を設置し、扉体等には直接漂流物が衝突しない設計とした。

【防潮堤の詳細設計結果】

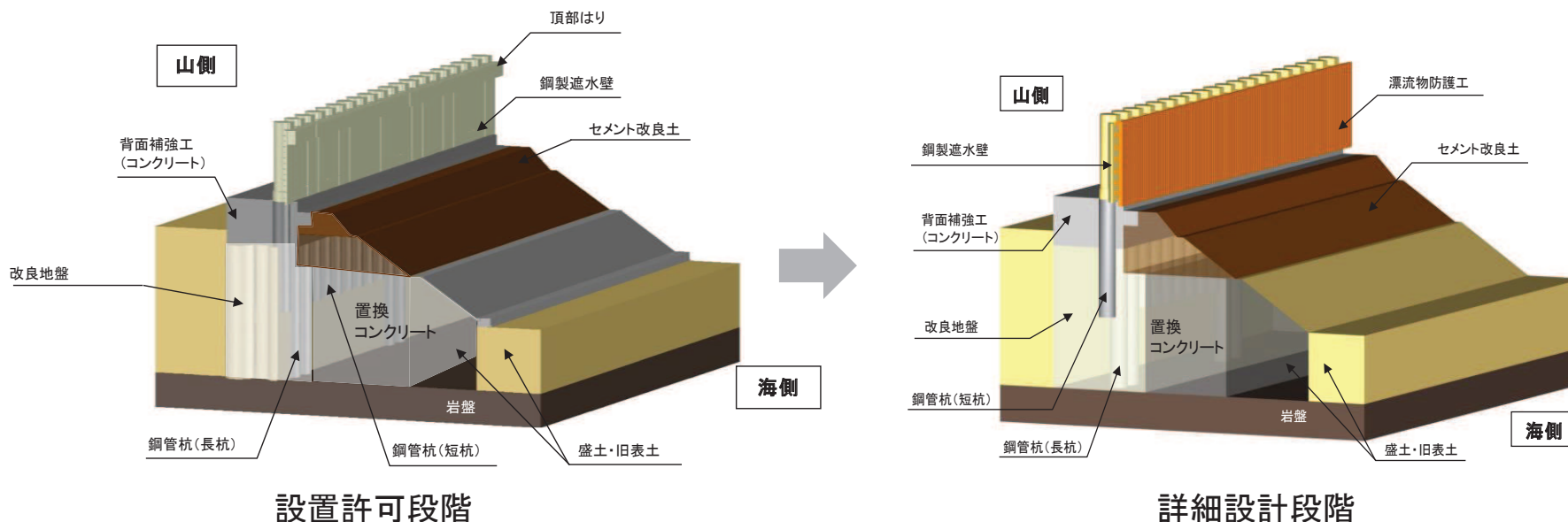
- 設置許可段階の方針を踏襲し、検討対象断面を追加した上で、地盤物性ばらつきの影響や断層横断部の影響を含めて耐震・強度評価を行った。
- その結果、漂流物防護工を含め、各部位の健全性を確認した。
- また、防潮堤の要求機能である止水性について、地盤中からの回り込みによる浸水を含めて津波の侵入を防止できることを確認した。
- 以上から、防潮堤は基準津波及び基準地震動に対して要求機能を満足できることを確認した。

【参考資料】

- 参考1 防潮堤の概要
- 参考2 防潮堤に関する新規制基準への適合性
- 参考3 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の概要
- 参考4 防潮堤の縦断図及び断面図
- 参考5 防潮堤の強度評価における荷重作用図
- 参考6 止水ジョイント部材設計相対変位量の算出方法
- 参考7 浸透流解析による地盤中からの回り込み防止の確認

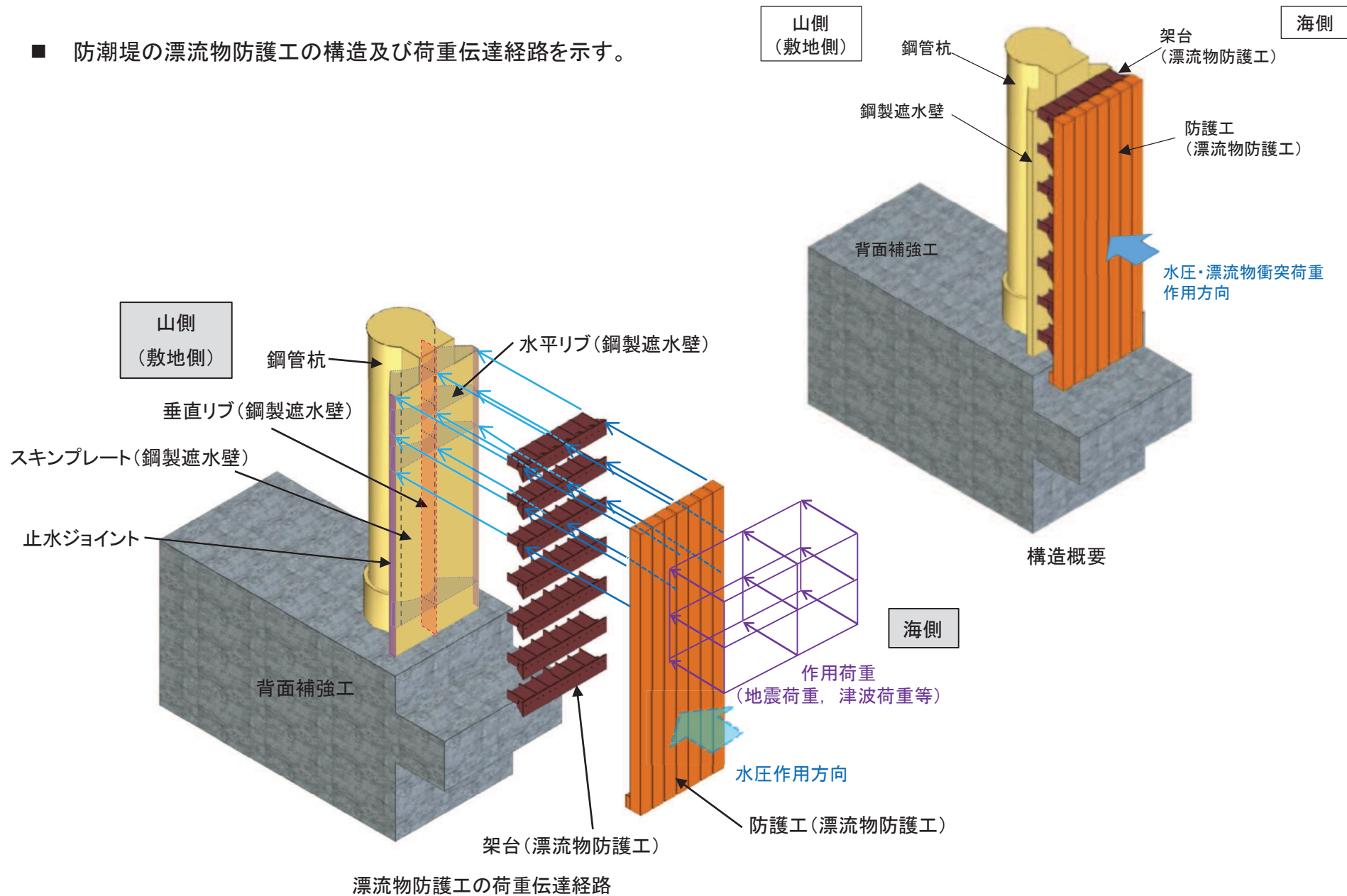
【設置許可段階と詳細設計段階の比較】

- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)のうち一般部の構造概要について、設置許可段階と詳細設計段階の比較を下図に示す。なお、縦断面図及び横断面図を参考4に示す。
- 設置許可段階においては、漂流物衝突荷重が確定していなかったため、漂流物衝突荷重に対しては漂流物防護工により対応可能であることを示した上で、防潮堤の構造成立性を説明した
- 詳細設計段階では、漂流物衝突荷重を保守的に2000kNと設定した上で、荷重に十分耐えるように防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼製遮水壁前面に漂流物防護工を設置し、鋼製遮水壁及び止水ジョイントに直接漂流物が衝突しない設計とする。なお、頂部はりについては撤去し、防潮堤の全体重量が増加しない設計とする。
- 漂流物防護工は防潮堤(鋼管式鉛直壁)の一部として、鋼製遮水壁と一体になるよう設置する。



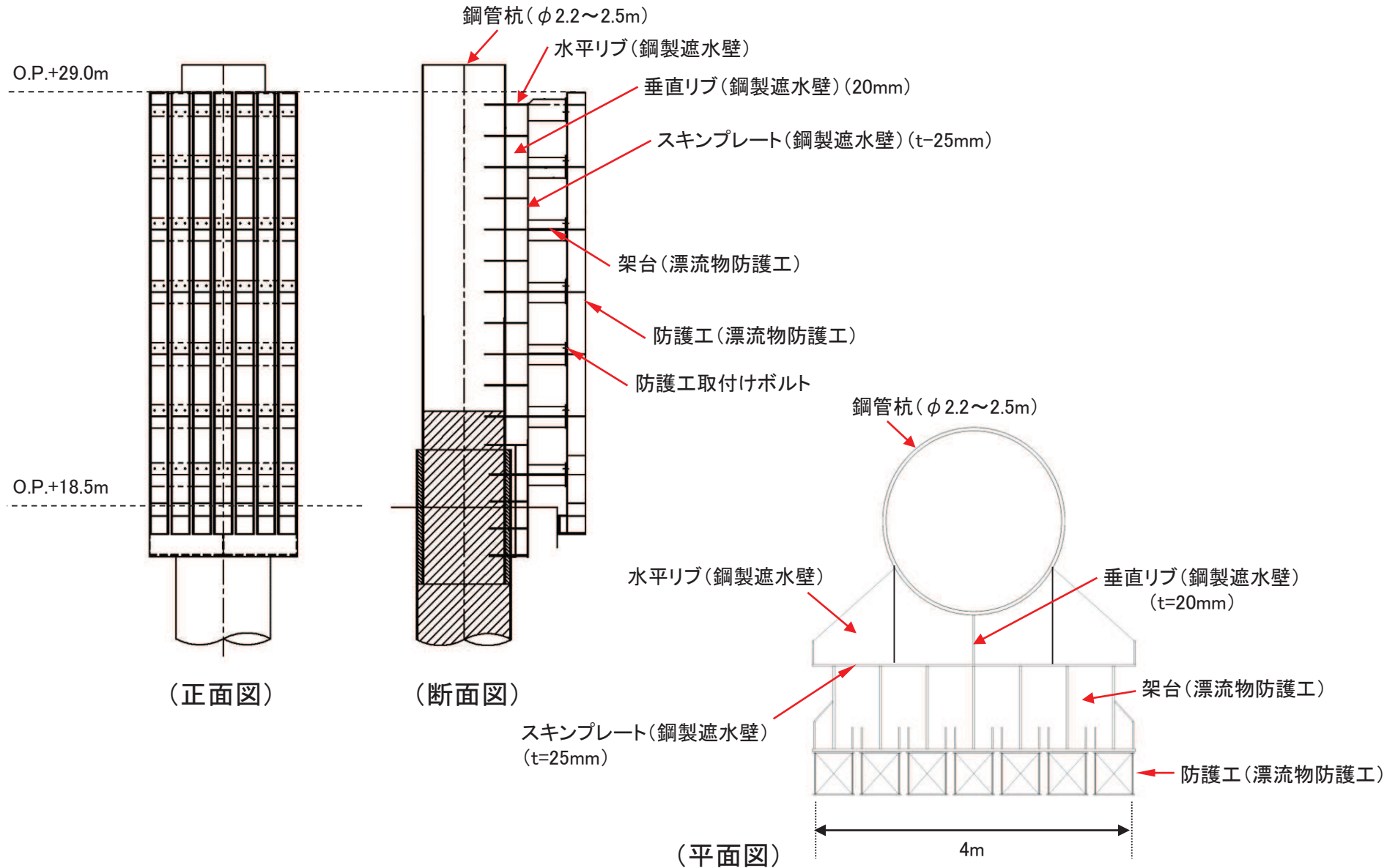
防潮堤(鋼管式鉛直壁)のうち一般部の構造概要図

■ 防潮堤の漂流物防護工の構造及び荷重伝達経路を示す。

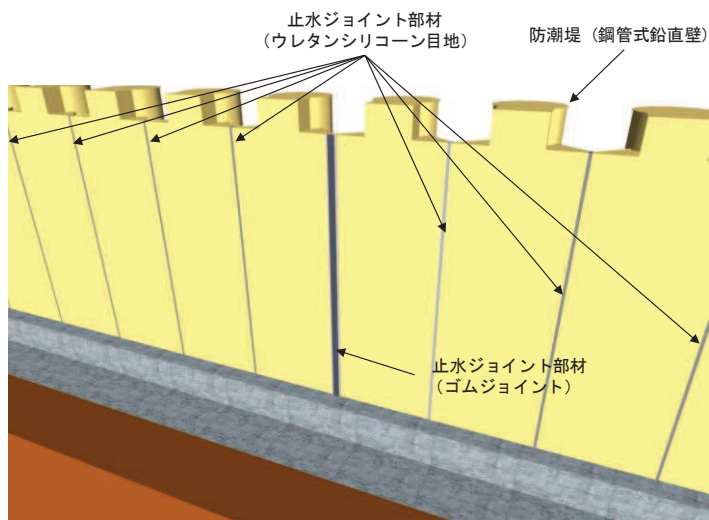


【参考1】防潮堤の概要(3/4)

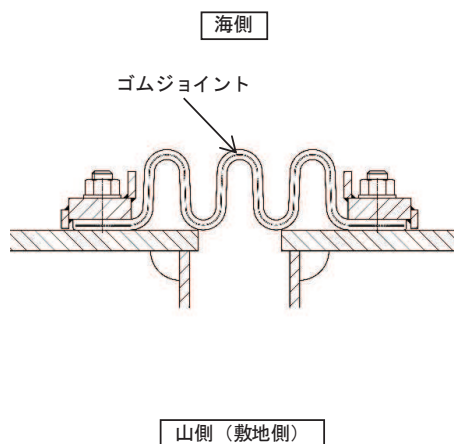
■ 防潮堤の漂流物防護工の構造図を示す。



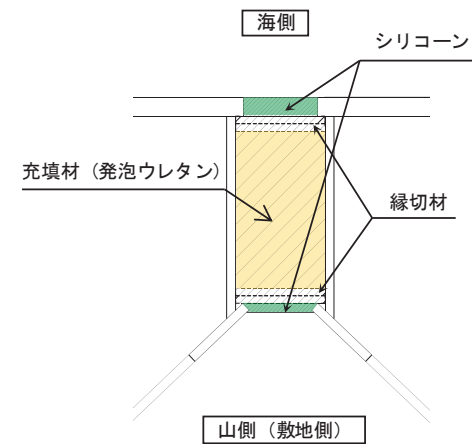
- 止水ジョイント部材の構造を示す。鋼製遮水壁間及び背面補強工間は、止水ジョイント部材を設置することにより遮水性を確保する。
- 止水ジョイント部材は、設置箇所の構造及び設計相対変位量により、ゴムジョイント部材とウレタンシリコーン目地の2種類を使用する。



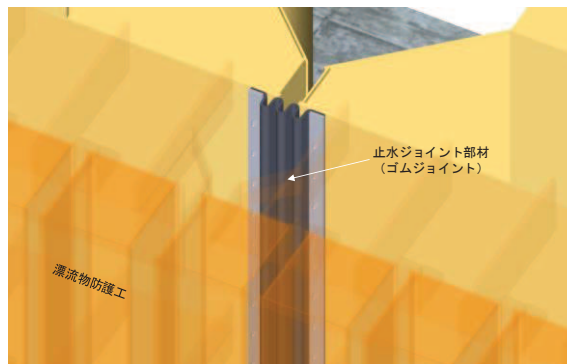
止水ジョイント部材の設置イメージ



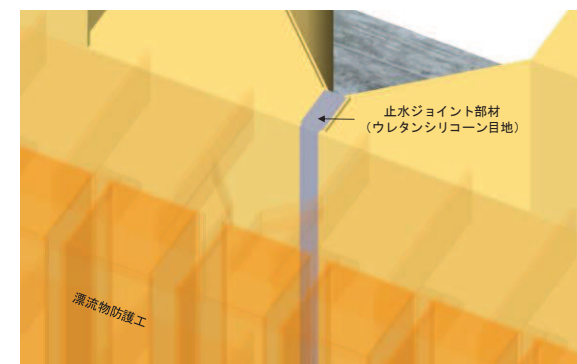
ゴムジョイント部材の構造図



ウレタンシリコーン目地の構造図



ゴムジョイント部材の設置イメージ



ウレタンシリコーン目地の設置イメージ

【防潮堤の要求機能】

- 防潮堤は、津波防護施設として基準津波による遡上波に対して余裕を考慮した防潮堤高さを確保することが要求される。
- また、構造体の境界部等の止水性を維持し、基準地震動 S_s に対して止水性を損なわない構造強度を有した構造物とすることが要求される。

【部位の役割】

- 防潮堤は多種の部位から構成されるため、地震時及び津波時の役割について整理する。鋼管式鉛直壁(一般部)の部位の役割の例を示す。

	部位の名称	地震時の役割	津波時の役割
施設	鋼管杭(長杭)	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁を支持する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁を支持する。
	鋼管杭(短杭)	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁を支持する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁を支持する。
	鋼製遮水壁	<ul style="list-style-type: none"> 漂流物防護工及び止水ジョイントを支持する。 	<ul style="list-style-type: none"> 漂流物防護工及び止水ジョイントを支持するとともに、遮水性を保持する。
	漂流物防護工	—	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁及び止水ジョイントに漂流物を直接衝突させない。 漂流物衝突荷重を鋼製遮水壁及び鋼管杭に伝達する。
	止水ジョイント	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁間の変位に追従する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼製遮水壁間の変位に追従し、遮水性を保持する。
	背面補強工	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭の変形を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 遮水性を保持する。 鋼管杭の変形を抑制する。
	置換コンクリート	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート強度を考慮して基礎地盤のすべり安定性を確保する。 鋼管杭の変形を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭の変形を抑制する。 地盤中からの回り込みによる浸水を防止する(難透水性を保持する)。
地盤	セメント改良土	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭の変形を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭の変形を抑制する。 地盤中からの回り込みによる浸水を防止する(難透水性を保持する)。 津波荷重を置換コンクリート等を介して岩盤に伝達する。
	改良地盤	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭(短杭)及び背面補強工を鉛直支持する(下方の岩盤に荷重を伝達する)。 基礎地盤のすべり安定性に寄与する。 鋼管杭の変形を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭(短杭)及び背面補強工を鉛直支持する(下方の岩盤に荷重を伝達する)。 鋼管杭の変形を抑制する。 地盤中からの回り込みによる浸水を防止する(難透水性を保持する)。
	岩盤	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭、背面補強工及び置換コンクリートを(改良地盤を介して)鉛直支持する。 基礎地盤のすべり安定性に寄与する。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋼管杭、背面補強工及び置換コンクリートを(改良地盤を介して)鉛直支持する。

【部位の性能目標】

- 部位の役割を踏まえた性能目標について整理する。鋼管式鉛直壁(一般部)の各部位の性能目標の例を示す。

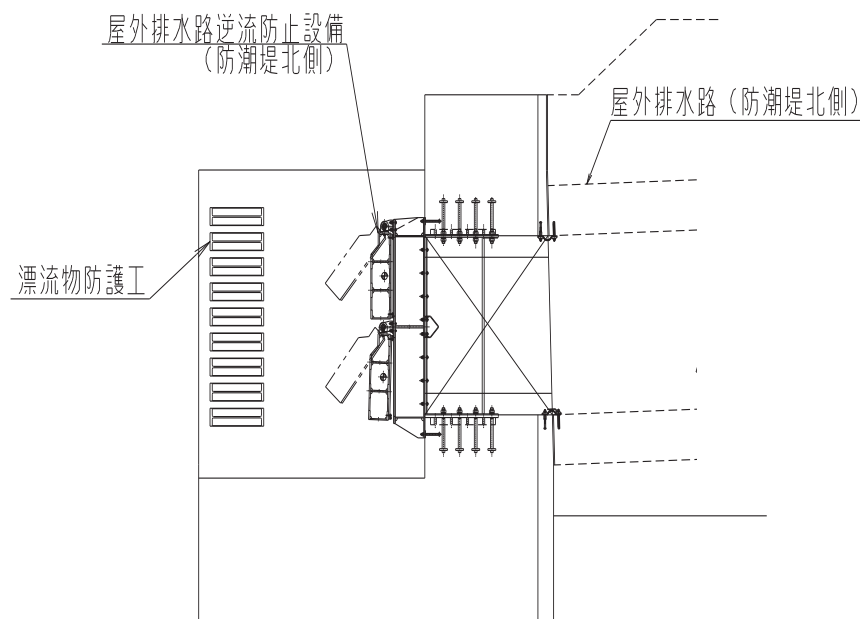
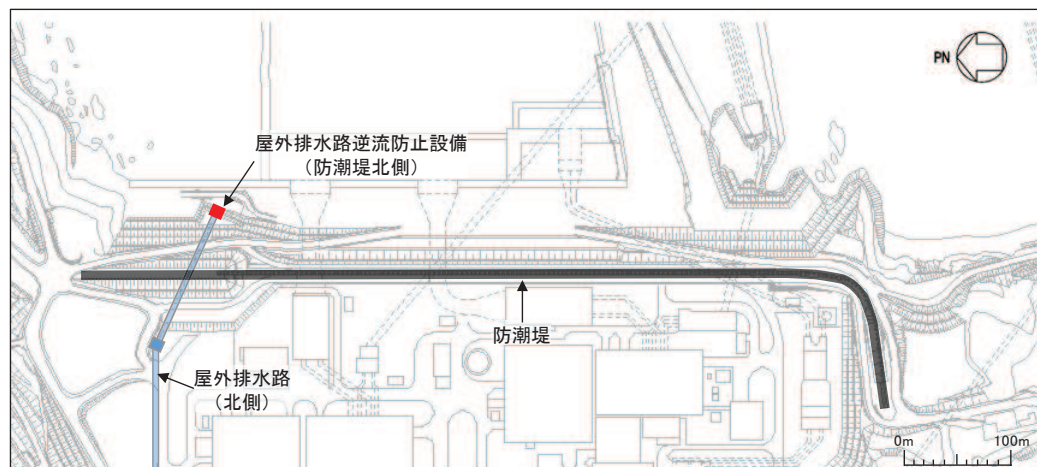
	部位	鉛直支持	すべり安定性	健全性	止水性
施設	鋼管杭	-	-	構造部材の健全性を保持するために、鋼管杭がおおむね弾性状態にとどまること。	構造部材の健全性を保持するために、鋼管杭がおおむね弾性状態にとどまること。
	鋼製遮水壁			構造部材の健全性を保持するために、鋼製遮水壁がおおむね弾性状態にとどまること。	有意な漏えいを生じないために、鋼製遮水壁がおおむね弾性状態にとどまること。
	漂流物防護工			構造部材の健全性を保持するために、漂流物防護工がおおむね弾性状態にとどまること。	構造部材の健全性を保持するために、漂流物防護工がおおむね弾性状態にとどまること。
	止水ジョイント			有意な漏えいを生じないために、止水ジョイントの性能を保持すること。	有意な漏えいを生じないために、止水ジョイントの性能を保持すること。
	背面補強工			鋼管杭の変形を抑制するため、背面補強工がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。	水みちが形成されて有意な漏えいを生じないために、背面補強工がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。
	置換コンクリート			基礎地盤のすべり安定性を確保するため、コンクリートの強度を維持し、すべり抵抗を保持すること。	鋼管杭の変形を抑制するため、置換コンクリートがすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。
地盤	セメント改良土	-	基礎地盤のすべり安定性を確保するため、置換コンクリートのすべり抵抗も考慮した上で、十分なすべり安定性を保持すること。	鋼管杭の変形を抑制するため、セメント改良土がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。	地盤中からの回り込みによる浸水を防止(難透水性を保持)するため、セメント改良土がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。
	改良地盤	鋼管杭及び背面補強工を鉛直支持するため、十分な支持力を保持すること。		鋼管杭の変形を抑制するため、改良地盤がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。	地盤中からの回り込みによる浸水を防止(難透水性を保持)するため、改良地盤がすべり破壊しないこと(内的安定を保持)。
	岩盤	鋼管杭、背面補強工及び置換コンクリートを縁固支持するため、十分な支持力を保持すること。		-	-

【部位の照査項目と許容限界】

- 部位の性能目標を踏まえた照査項目と許容限界について整理する。鋼管式鉛直壁(一般部)の各部位の照査項目と許容限界の例を示す。

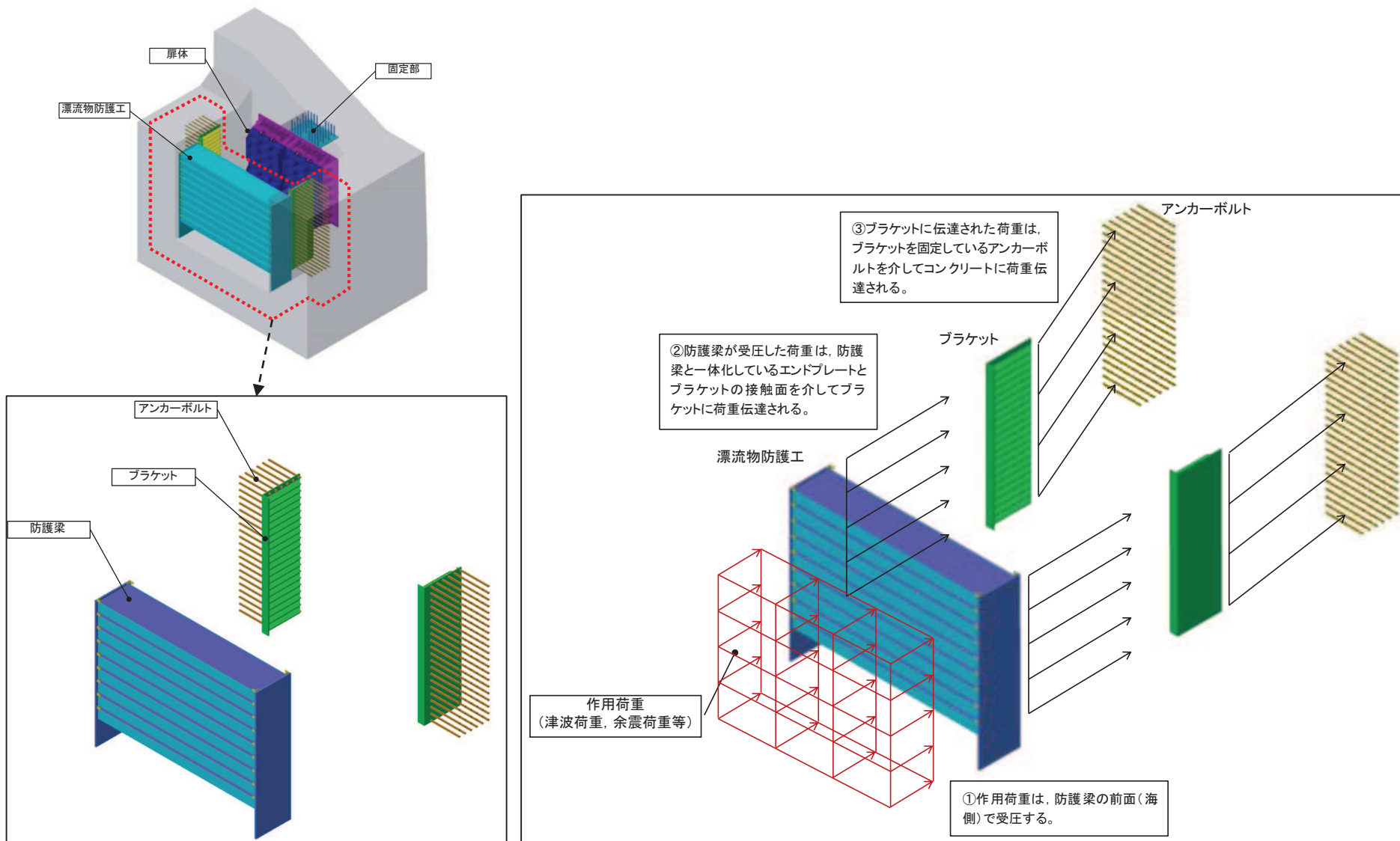
評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界
構造強度を有すること 止水性を損なわないこと	施設・地盤の健全性	鋼管杭	曲げ軸力, せん断力に対する発生応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		鋼製遮水壁	曲げ軸力, せん断力に対する発生応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		漂流物防護工	曲げ軸力, せん断力に対する発生応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		背面補強工	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率1.2以上
		置換コンクリート	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率1.2以上
		改良地盤	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率1.2以上
	セメント改良土	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率1.2以上	
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する応力(接地圧)が許容限界以下であることを確認	極限支持力
構造物の変形性	止水ジョイント部材	発生変形量が許容限界以下であることを確認	有意な漏えいが生じないことを確認した変形量	

- 防潮堤を横断する屋外排水路(防潮堤北側)の海側出口には, 津波の流入を防止するため逆流防止設備を設置する。
- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)には漂流物防護工を設置し, 扉体及び固定部には漂流物が衝突しない構造とする。
- 漂流物防護工は屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の一部として設置する。
- 屋外逆流防止設備の設置位置を右図に示す。

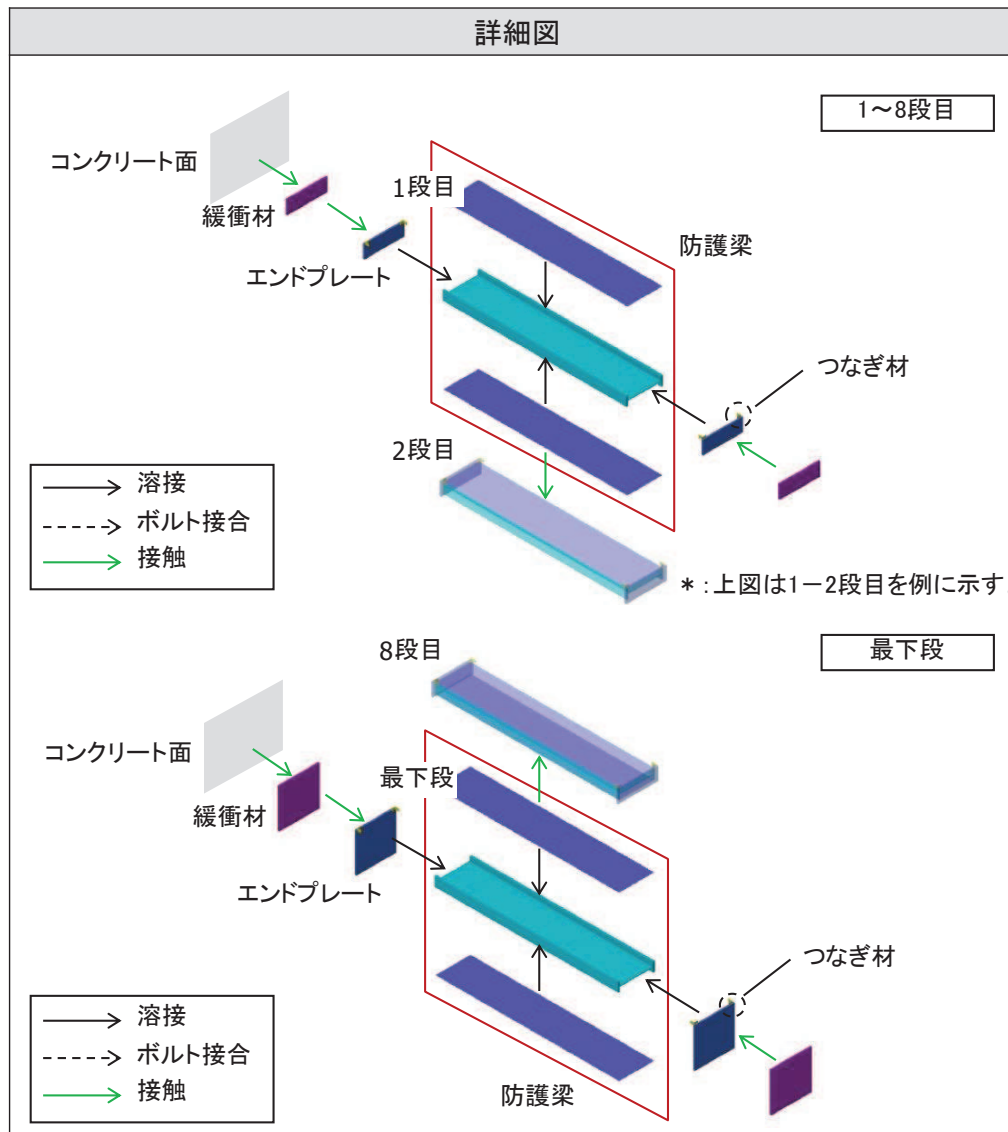
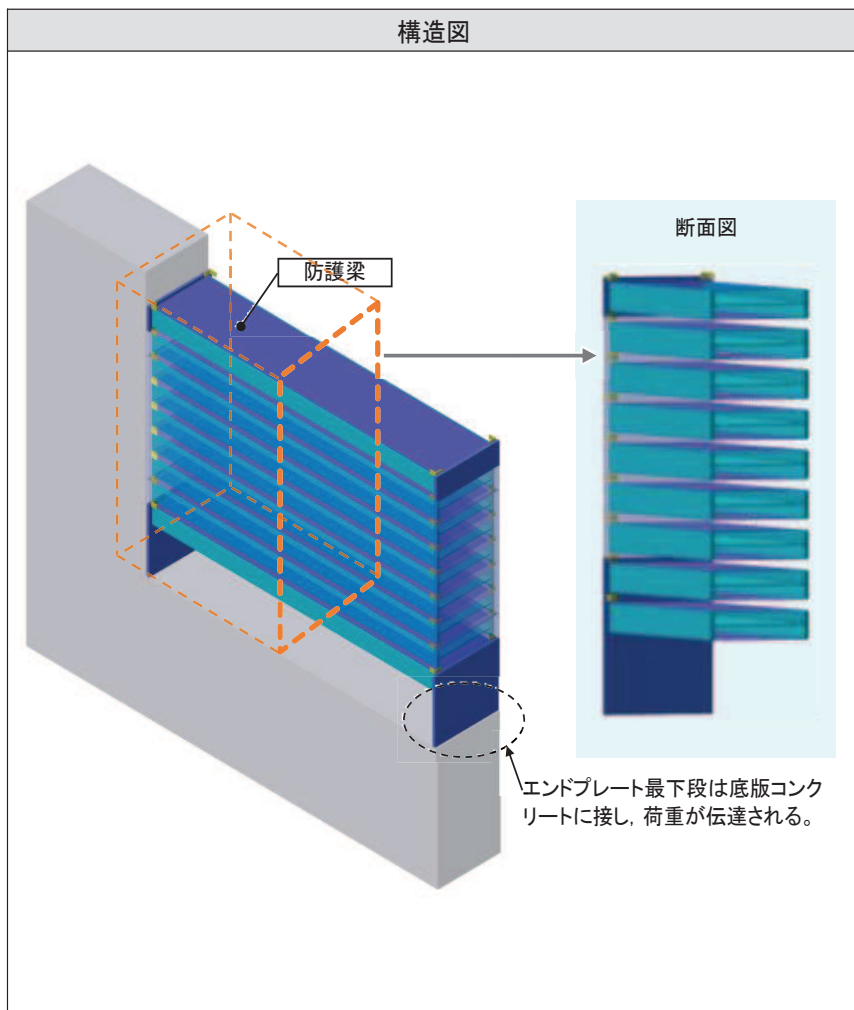


屋外排水路逆流防止設備の設置位置

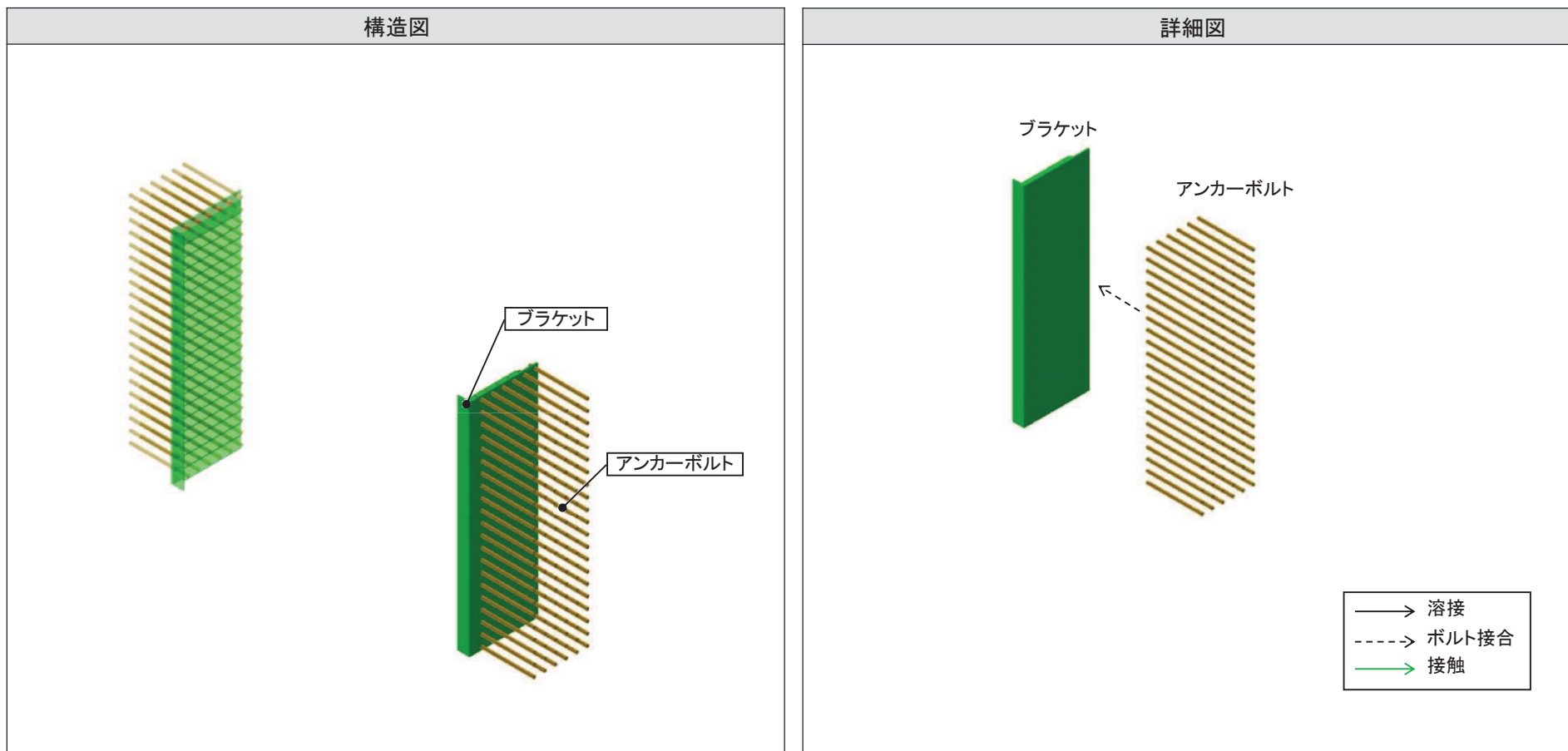
- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の構造の詳細及び荷重伝達経路を下図に示す。

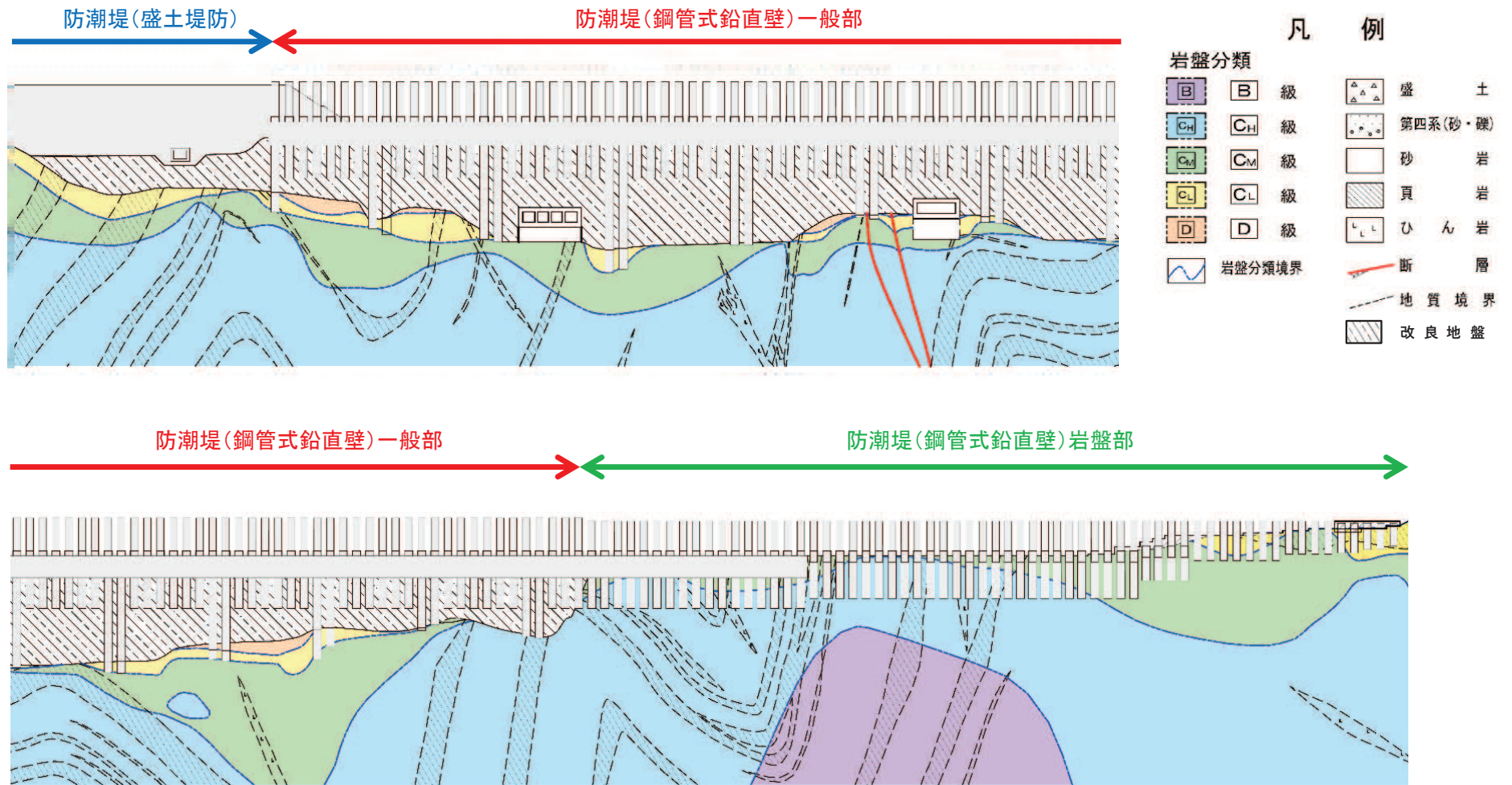


■ 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)のうち防護梁の構造を下図に示す。

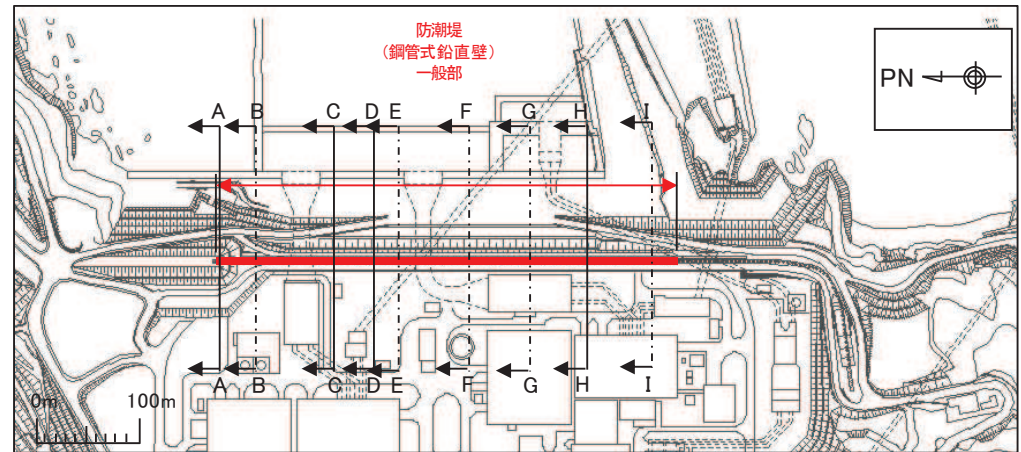


- 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)のうちブラケットの構造を下図に示す。

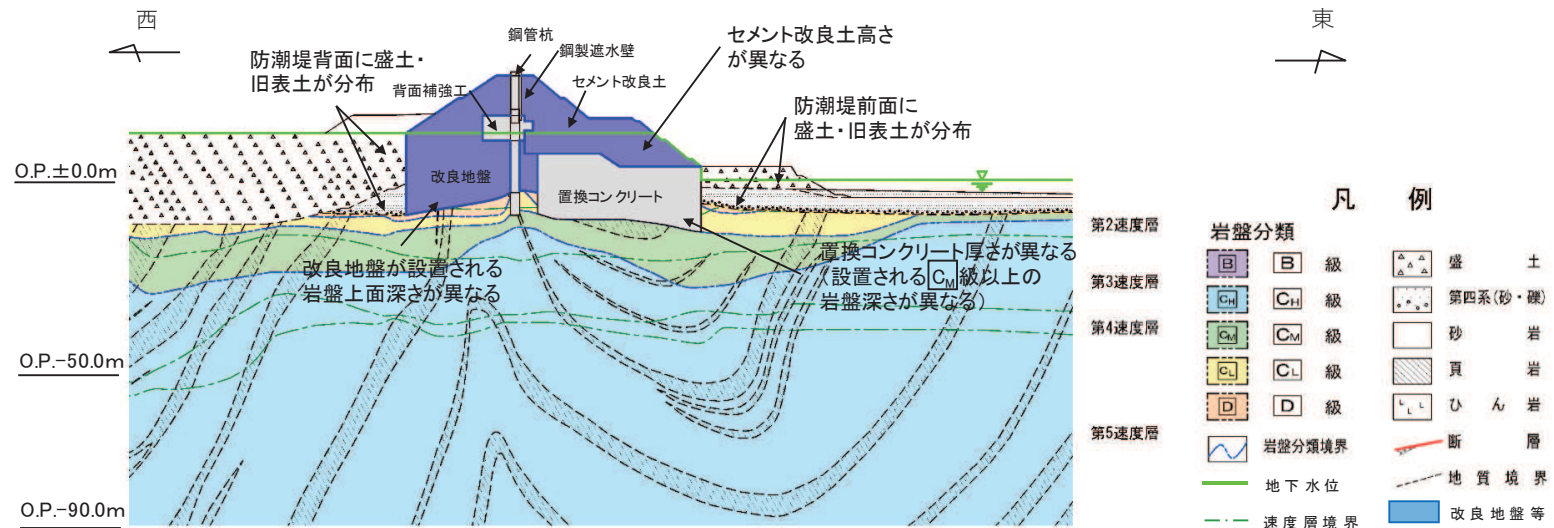




縦断図

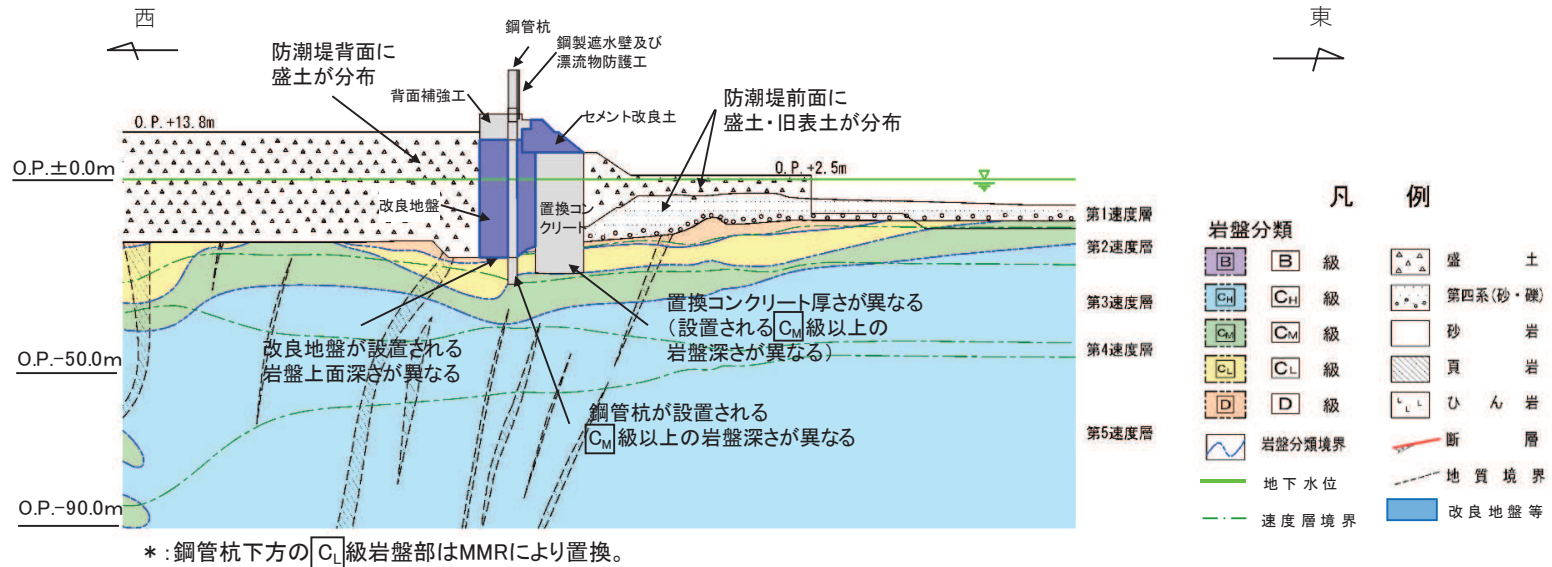
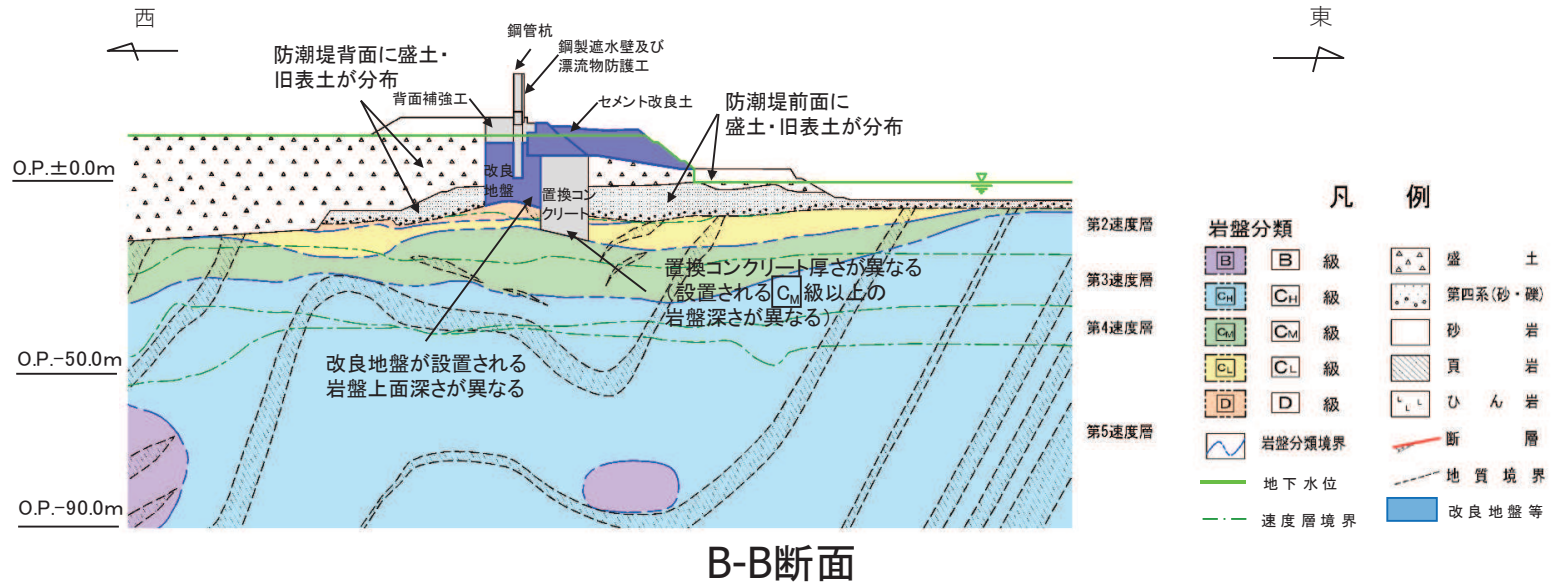


鋼管式鉛直壁(一般部)断面位置図
(実線は評価対象断面)

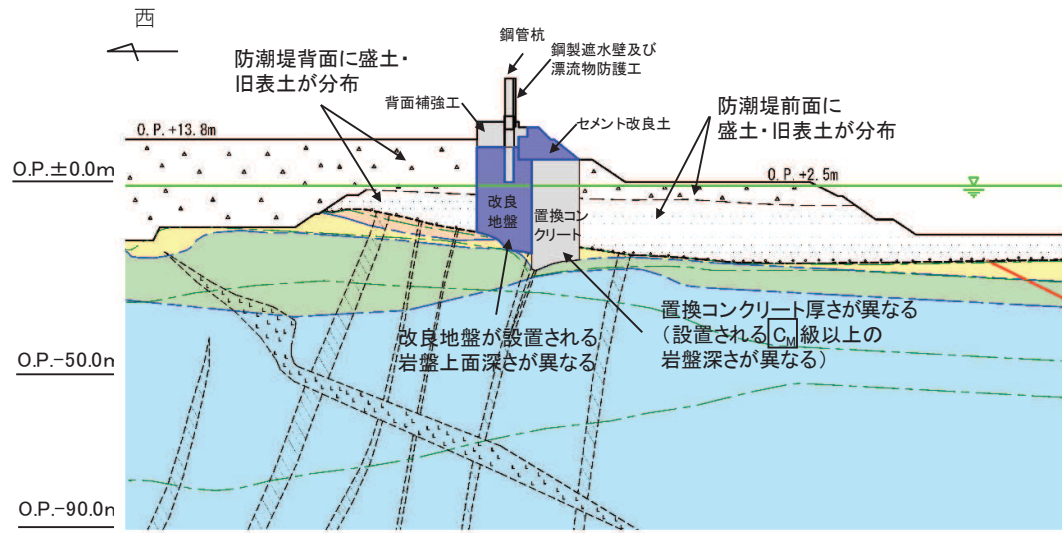


* : 鋼管杭下方の C_L 級岩盤部はMMRにより置換。

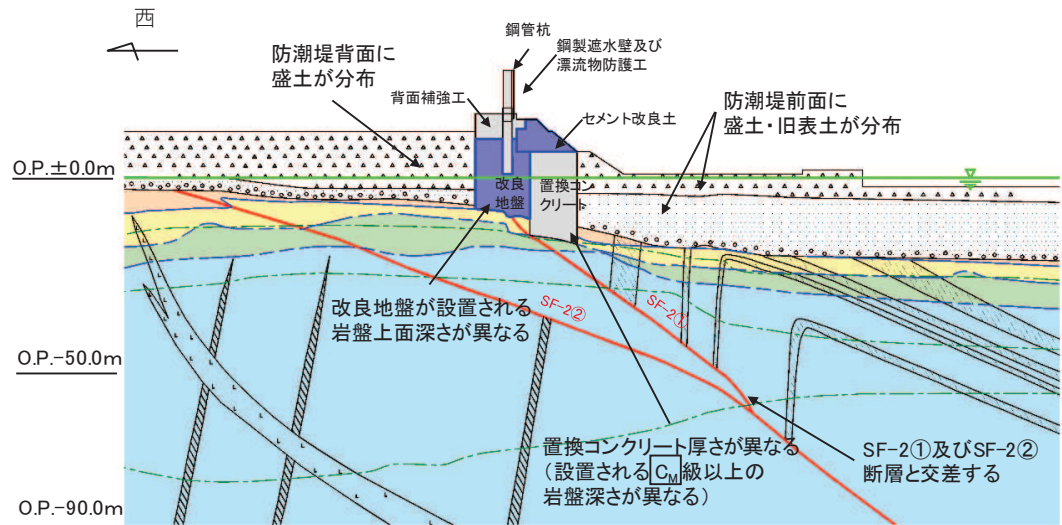
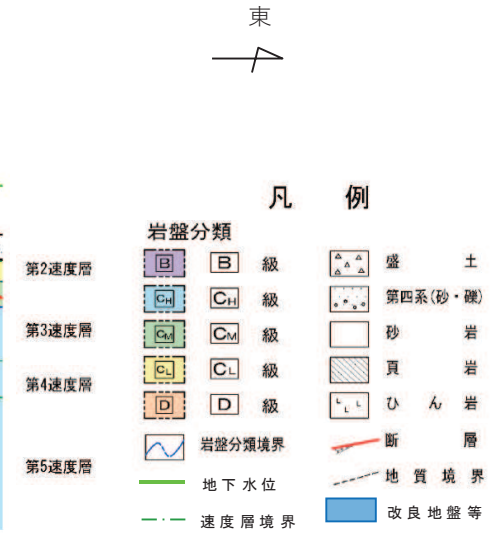
A-A断面(断面④)



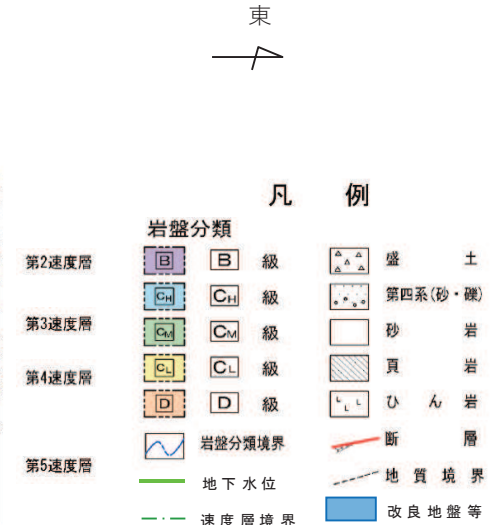
C-C断面 (断面①)

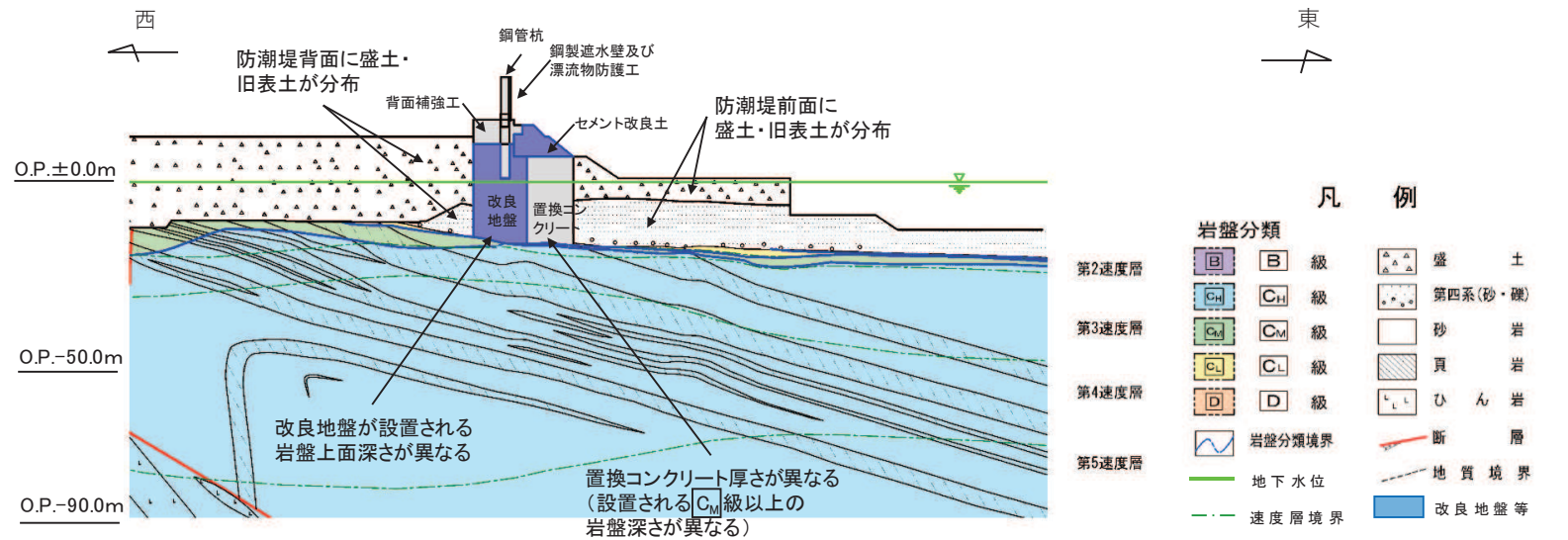


D-D断面(断面②)

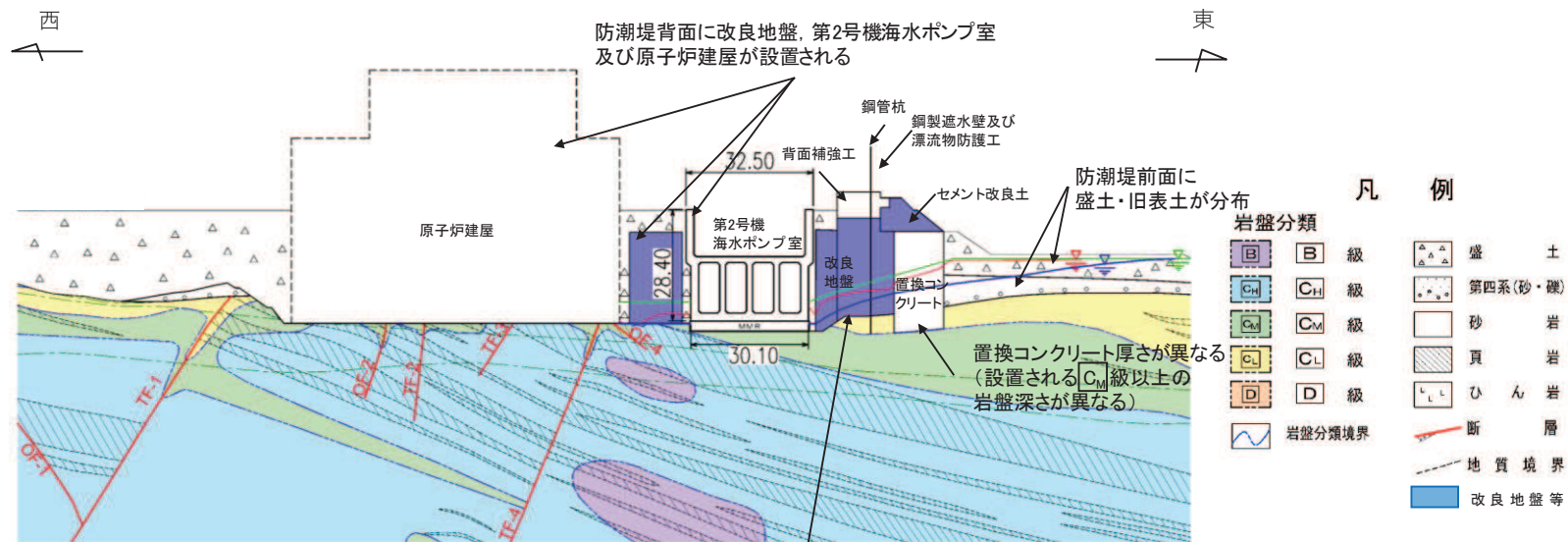


E-E断面(断層横断部として検討)

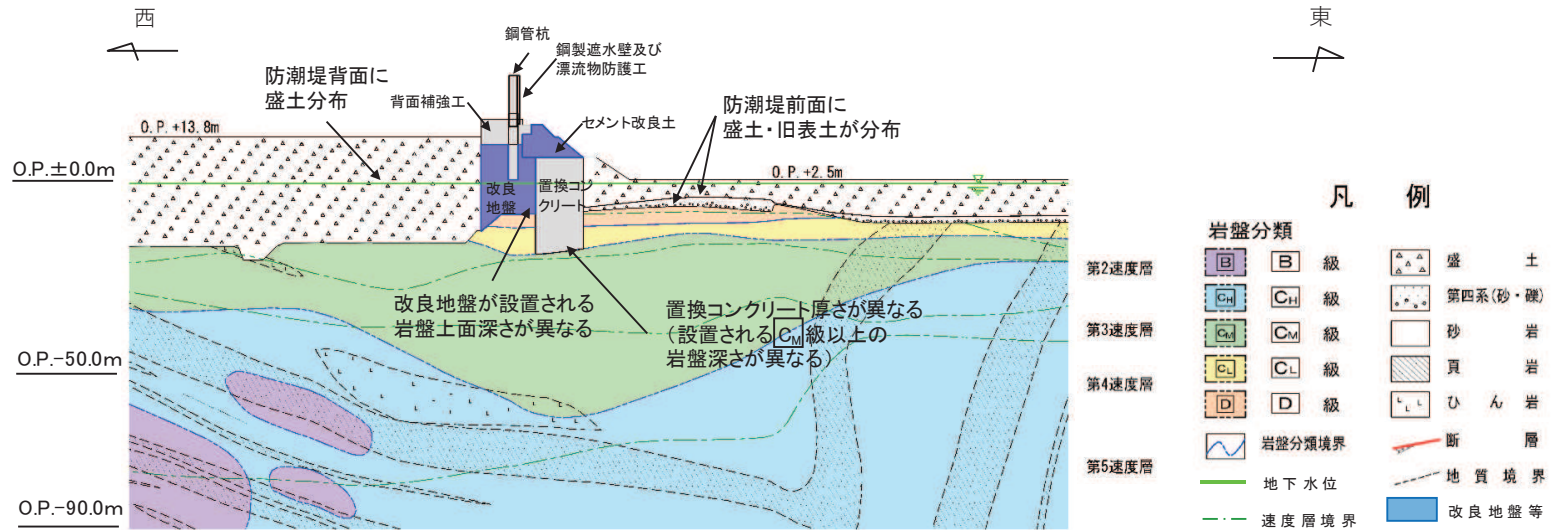




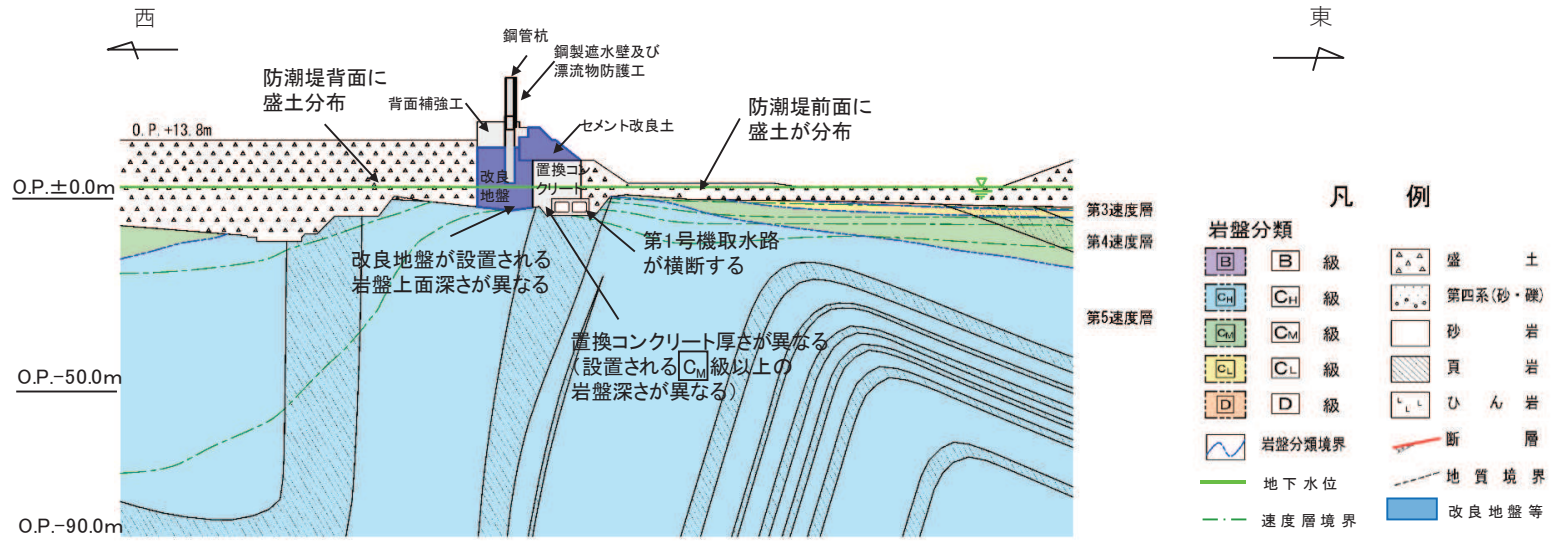
F-F断面



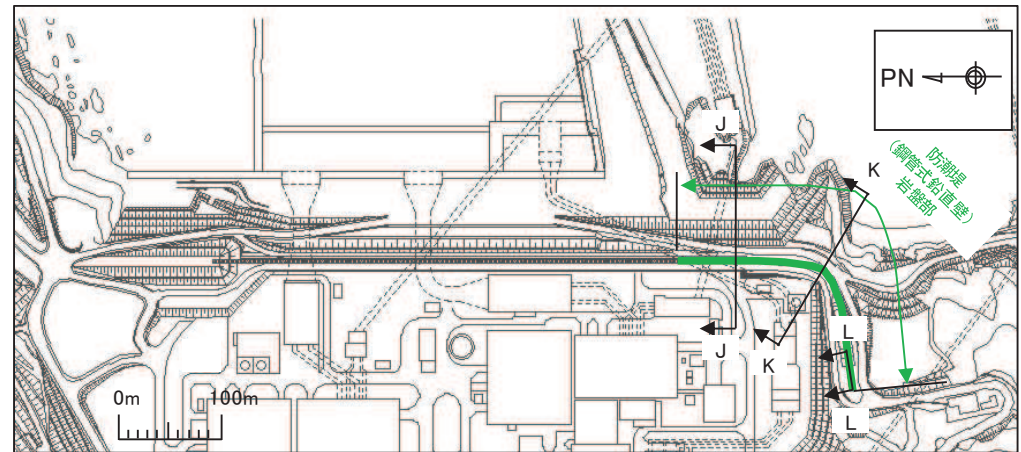
G-G断面



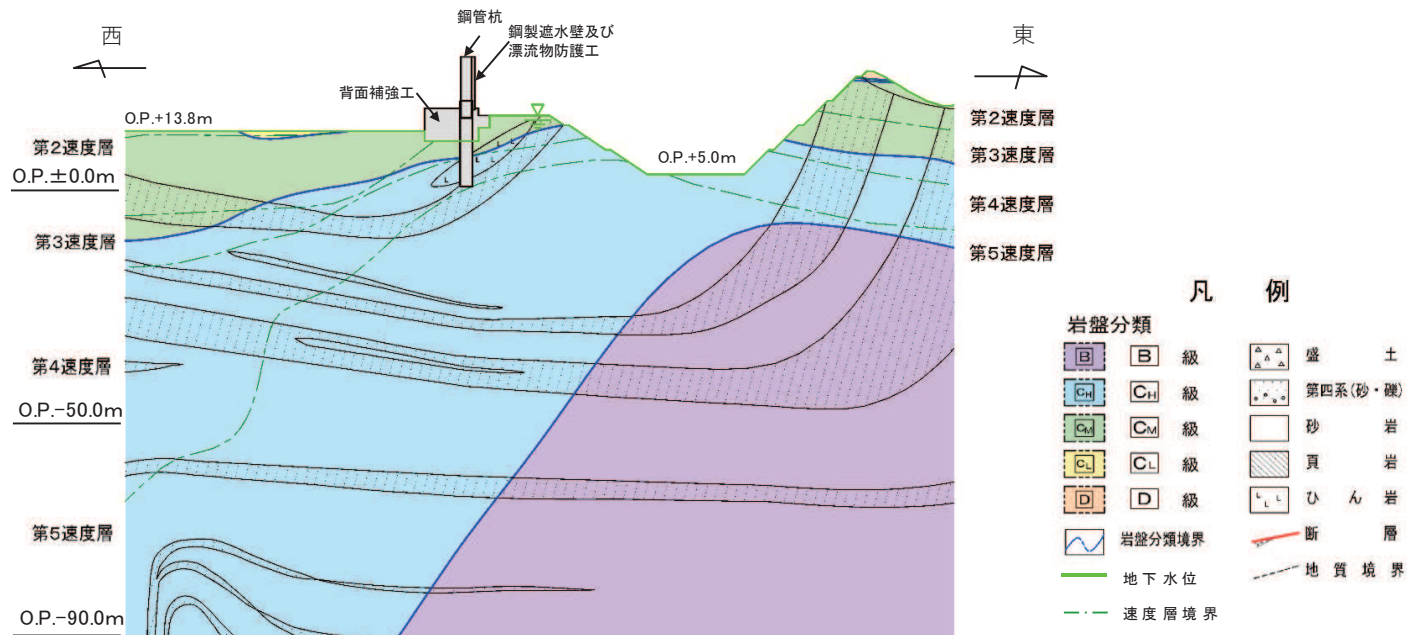
H-H断面(断面③)



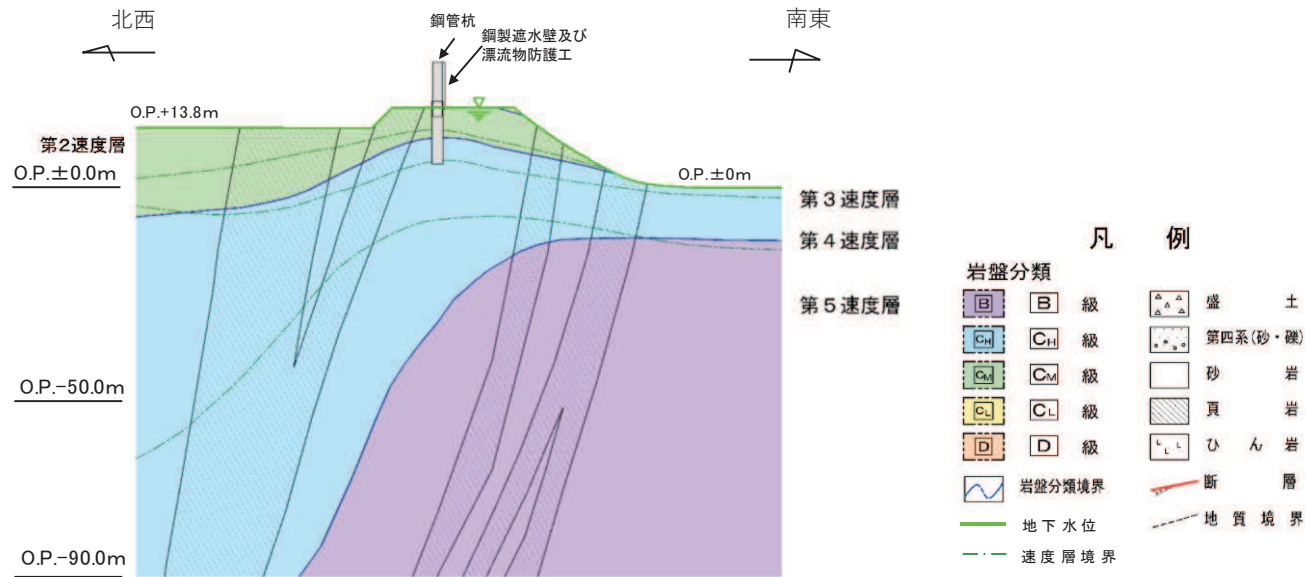
I-I断面



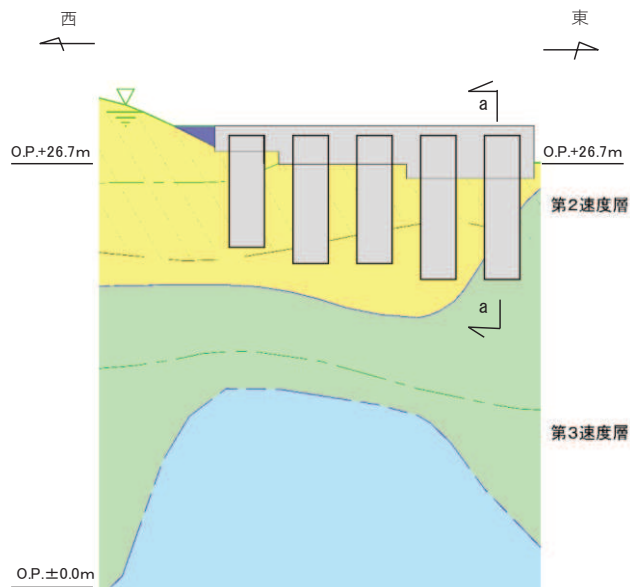
鋼管式鉛直壁(岩盤部)断面位置図
(J-J, K-K, L-Lはすべて評価対象断面)



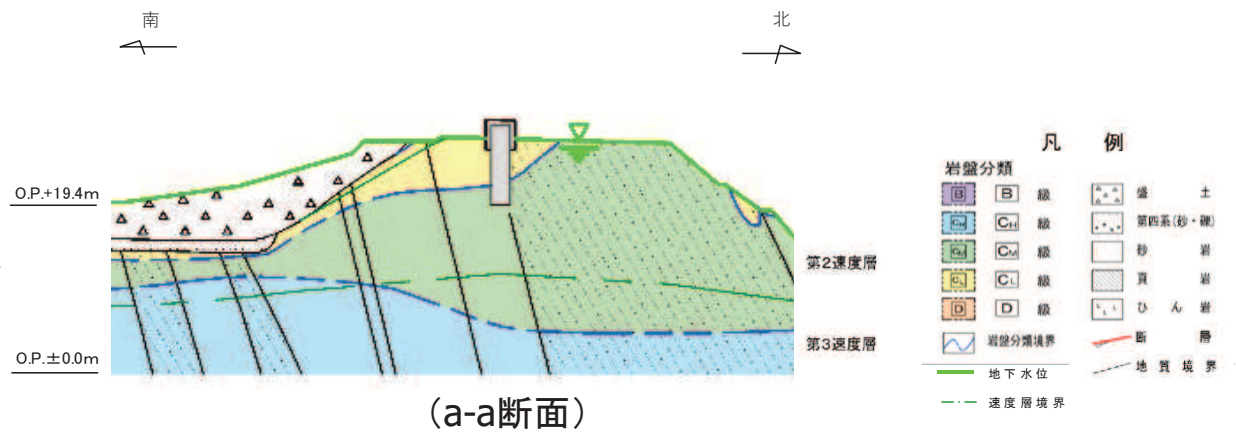
J-J断面(断面⑤)



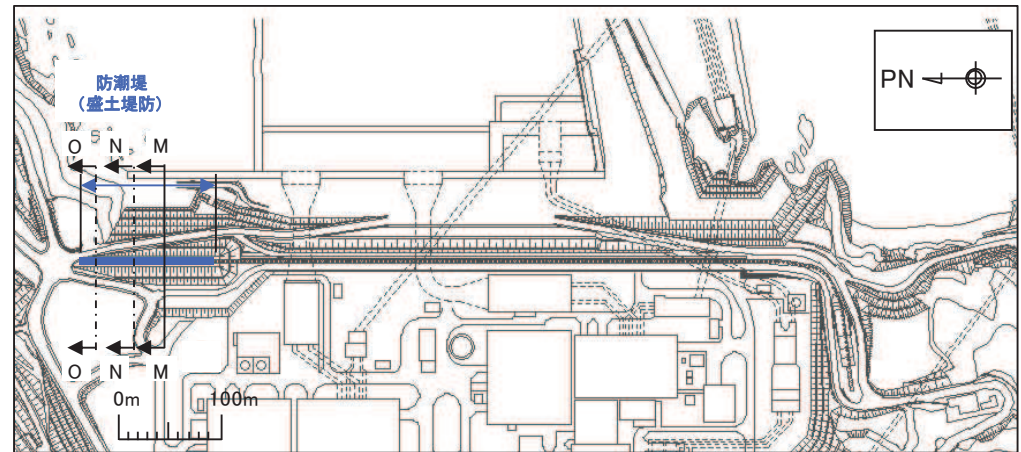
K-K断面(断面⑥)



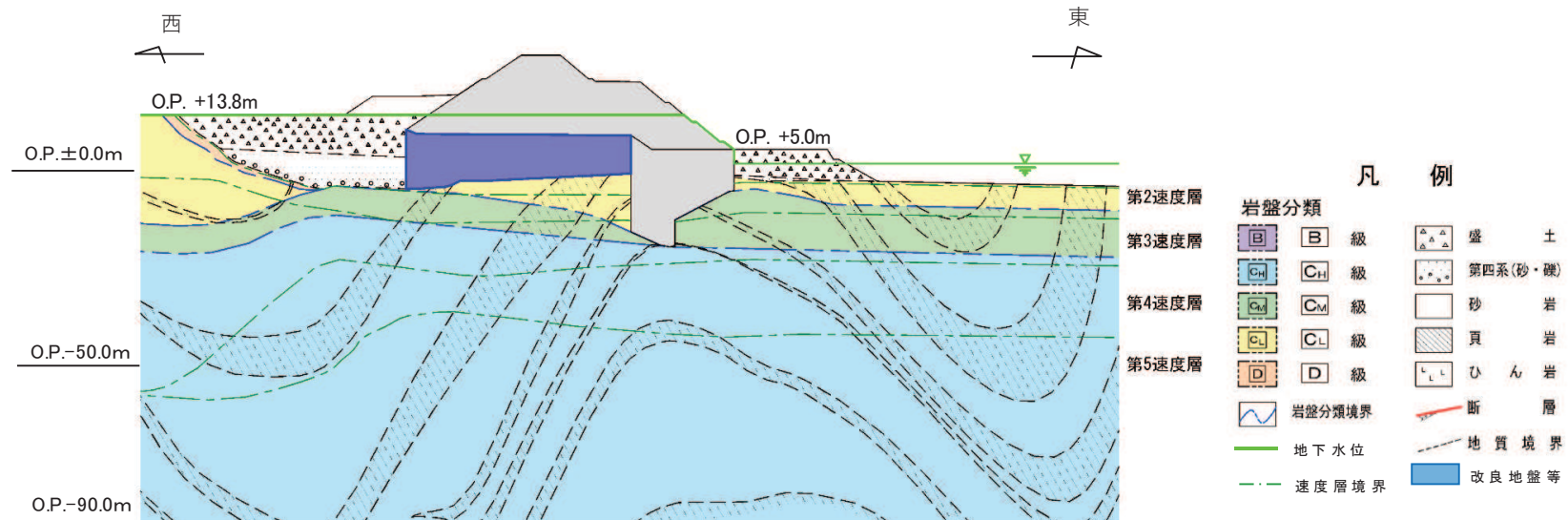
L-L断面(断面⑦)



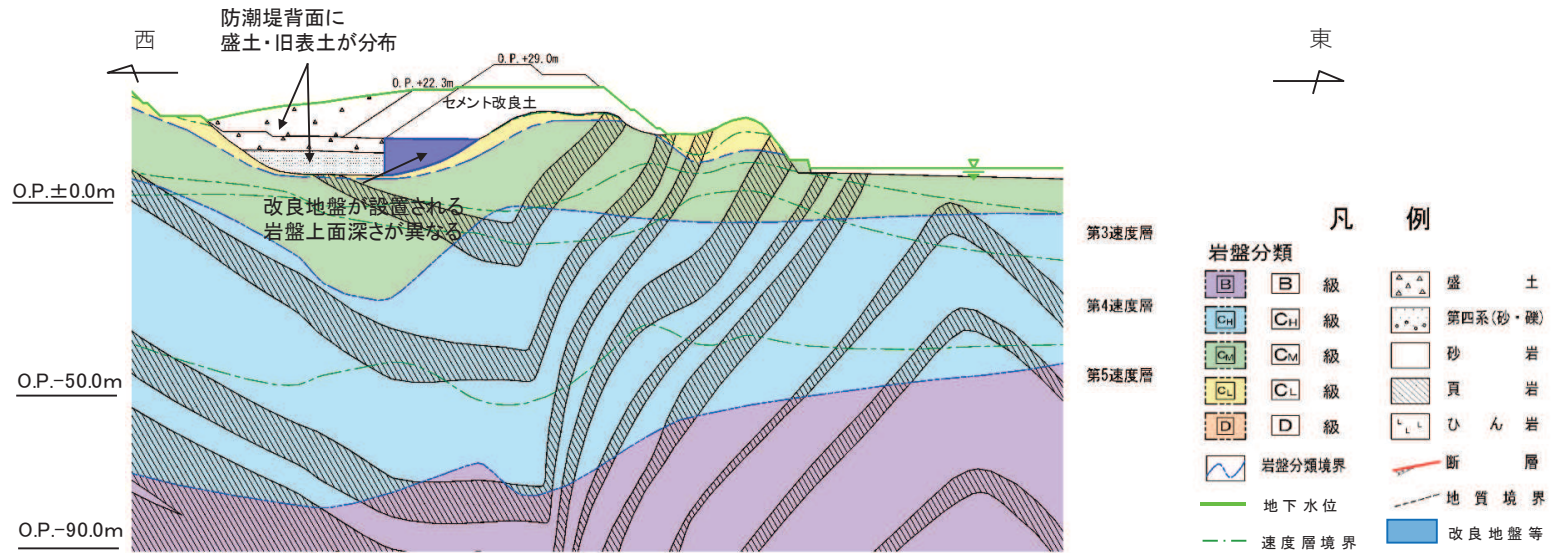
(a-a断面)



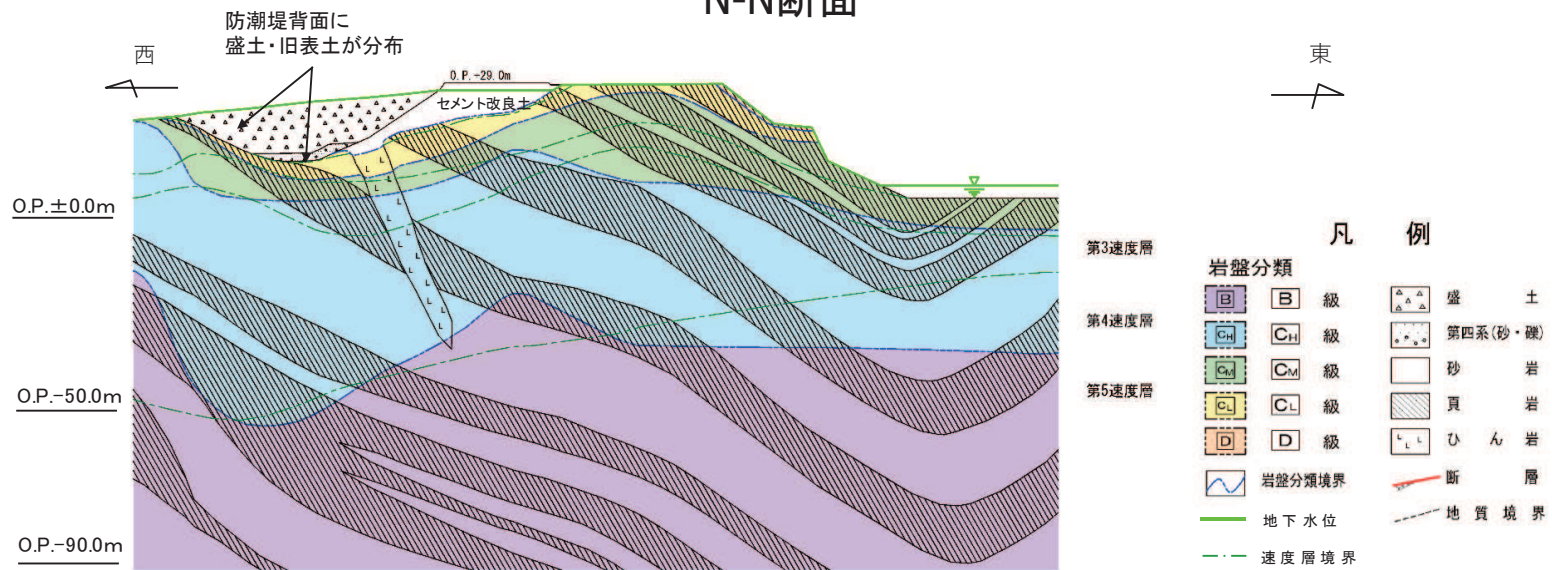
盛土堤防断面位置図
(実線は評価対象断面)



M-M断面(盛土堤防断面①)



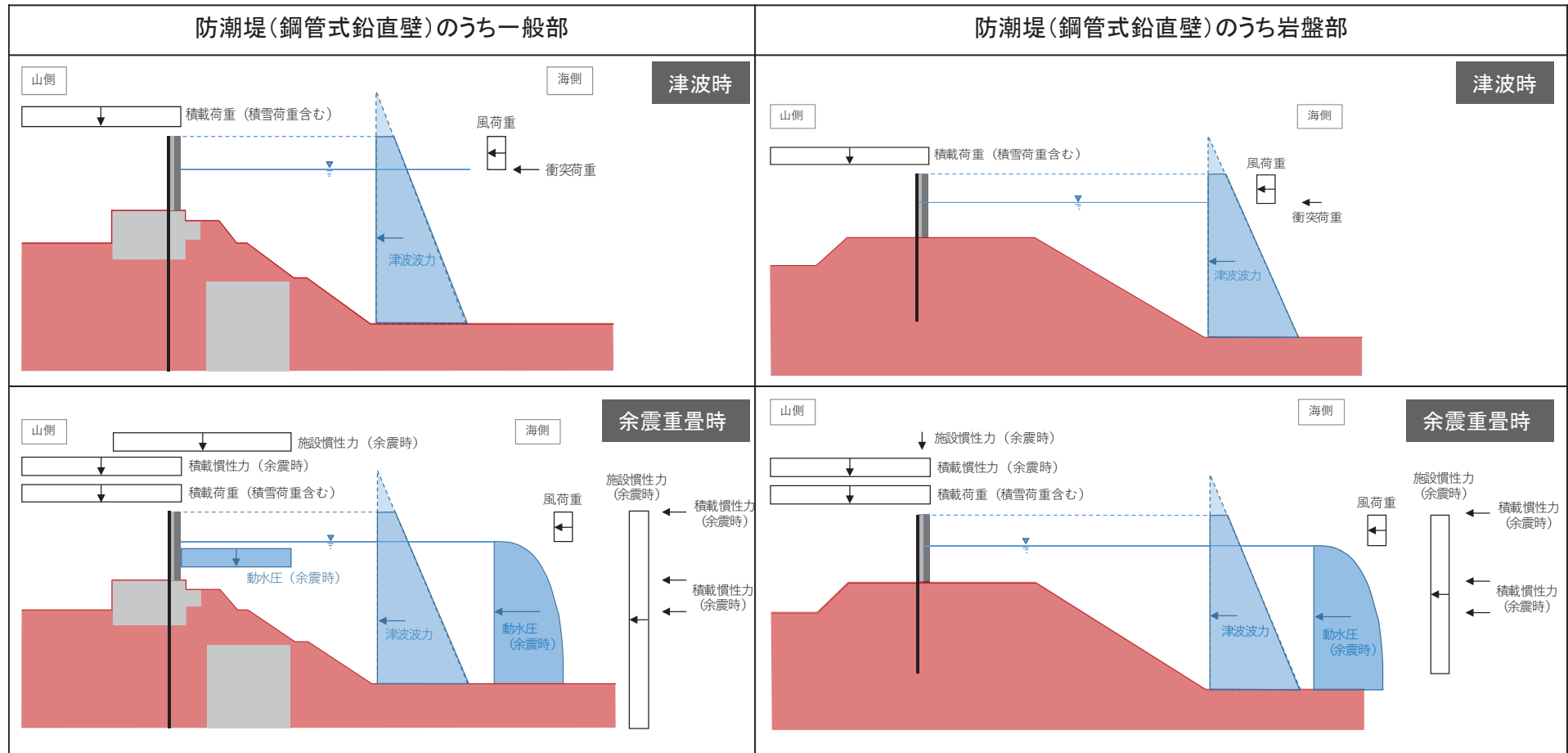
N-N断面



O-O断面

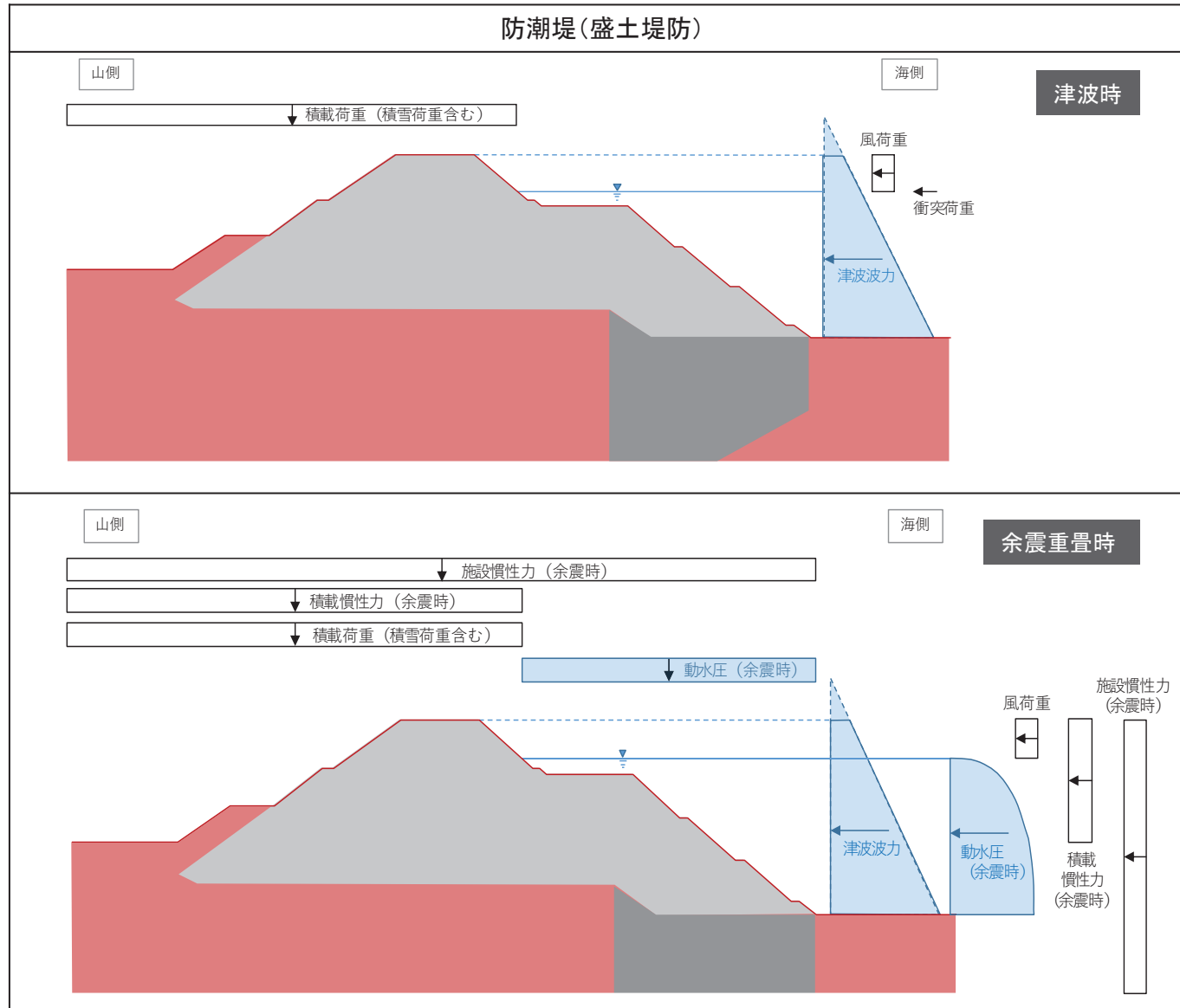
【参考5】防潮堤の強度評価における荷重作用図(1/2)

- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)のうち一般部及び岩盤部の荷重作用図(津波時及び余震重畳時)を示す。



【参考5】防潮堤の強度評価における荷重作用図(1/2)

- 防潮堤(盛土堤防)の荷重作用図(津波時及び余震重畳時)を示す。



- 止水ジョイント部材の設計相対変位量については、考慮する荷重の特徴を踏まえ、保守的になるよう算出する。
- 津波時及び津波＋余震重畳時の変位は、地震による残留変位を考慮する。
- 構造境界部における地震による変位は、保守的に逆位相となることを考慮する。
- 設計相対変位量(防潮堤の軸直交方向)の算出方法を下表に示す。

	地震時	津波時	津波＋余震重畳時
構造同一部	<p>基準地震動S_sによる時刻歴相対変位*1</p> <p>ウレタンシリコーン目地</p>	<p>地震時最終変位</p> <p>衝突荷重による変位*2</p> <p>ウレタンシリコーン目地</p>	<p>基準地震動S_d-D2による時刻歴相対変位*1</p> <p>地震時最終変位</p> <p>ウレタンシリコーン目地</p>
構造境界部	<p>基準地震動S_sによる変位*2</p> <p>基準地震動S_sによる変位*2</p> <p>ゴムジョイント</p>	<p>地震時最終変位*3</p> <p>遡上津波荷重による変位*2</p> <p>衝突荷重による変位*2</p> <p>ゴムジョイント</p>	<p>地震時最終変位*3</p> <p>弾性設計用地震動S_d-D2による変位*2</p> <p>ゴムジョイント</p>

注記*1:基本ケースと地盤物性のばらつきケースの時刻歴相対変位とする。
 *2:基本ケースと地盤物性のばらつきケースの最大変位とする。
 *3:構造境界部であることを踏まえ、地震時最終変位を2倍する。

- 地盤中からの回り込みにより敷地に津波が流入しないことを、二次元浸透流解析によって確認する。
- 解析条件を下表に示す。

止水性確認のための二次元浸透流解析における解析条件概要

検討ケース		津波水位	初期水位	遮水壁	継続時間
ケース1	対策工を忠実にモデル化	防潮堤高さ (O.P.+29.0m)	HWL一定 (O.P.+1.43m)	考慮 しない	30分※
ケース2	改良地盤・置換コンクリート、セメント改良土の透水係数＝盛土・旧表土相当と仮定				
ケース3	背面補強工及び改良地盤とセメント改良土及び置換コンクリート間の水みち形成を想定し、背面補強工と改良地盤のすぐ海側に一律O.P.+29.0mの海水が滞水と仮定				

注記* : 基準津波の半周期が約10分であることを踏まえ、10分以上を基本とし、保守的に30分とした。

- 検討ケース及び各ケースにおける透水係数を示す。

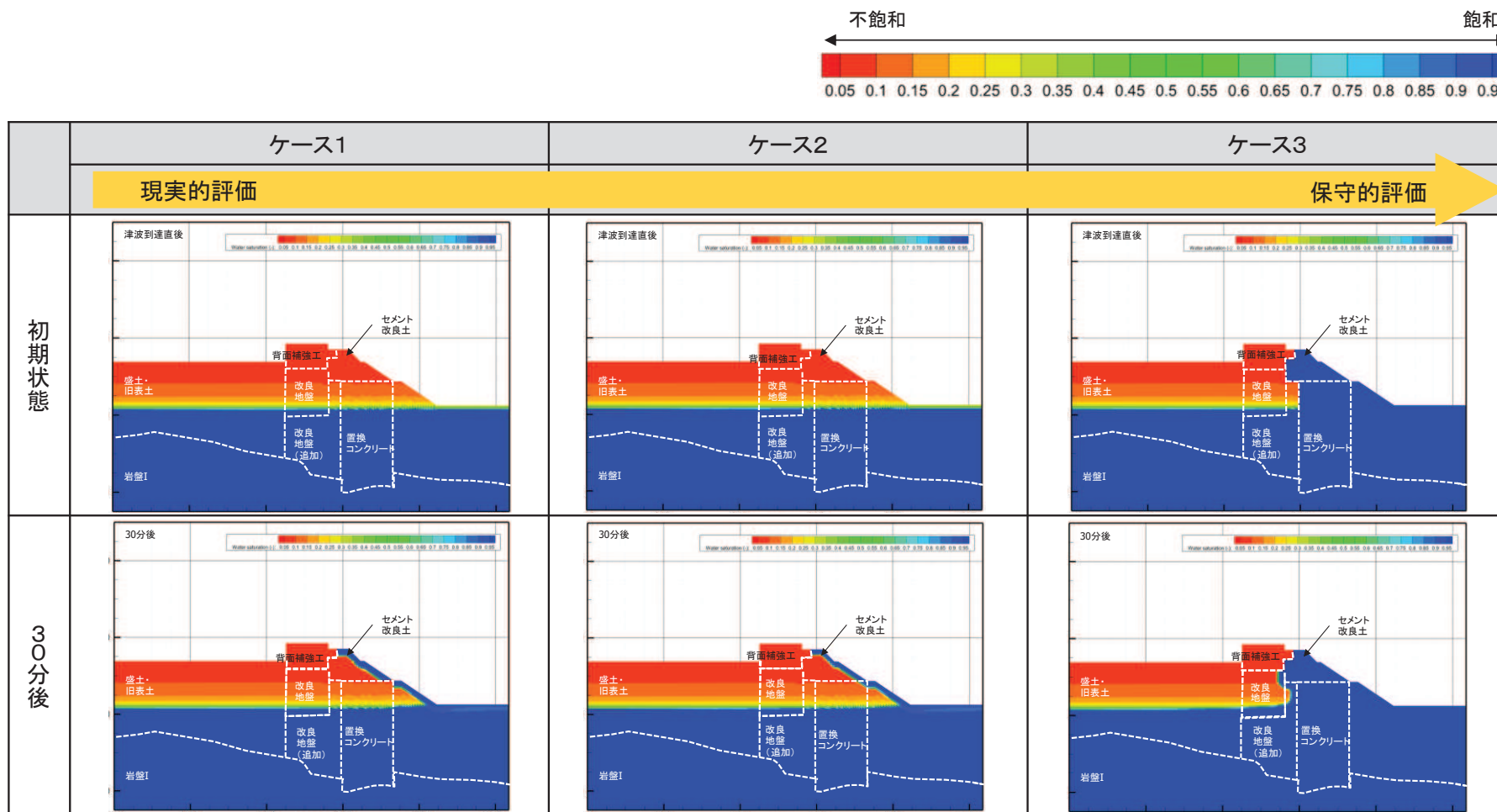
止水性確認のための二次元浸透流解析における検討ケース

ケース1	ケース2	ケース3
現実的評価		保守的評価
<p>(解析上の前提条件)</p> <ul style="list-style-type: none"> 背面補強工－改良地盤間は、改良地盤上面を清掃の上で背面補強工を施工しており、浸水経路化しない。 改良地盤(既設)－改良地盤(新設)間は、空隙が残らないよう施工することから、浸水経路化しない。 前章までの二次元有効応力解析で改良地盤、置換コンクリート及びセメント改良土に破壊領域が広範囲に連続しないことを確認済 		<p>(保守的となる条件)</p> <ul style="list-style-type: none"> 改良地盤の透水係数を盛土・旧表土相当と仮定。(前章までの二次元有効応力解析で当該地盤に破壊領域が広範囲に連続しないことを確認済) 背面補強工及び改良地盤とセメント改良土及び置換コンクリート間に水みちが出来ることを想定し、背面補強工と改良地盤のすぐ海側に海水が滞水すると仮定。(地震時の残留変形図にて、背面補強工及び改良地盤とセメント改良土及び置換コンクリート間に水みちとなるような空隙が発生していないことを確認しているが、念のための検証)
<p>水位が地表面に達しないことを確認する</p>	<p>水位が地表面に達しないことを確認する</p> <p>改良地盤、置換コンクリート及びセメント改良土の透水係数を盛土・旧表土相当と仮定</p>	<p>水位が地表面に達しないことを確認する</p> <p>改良地盤の透水係数を盛土・旧表土相当と仮定</p>

各ケースにおける透水係数(単位:m/s)

		盛土・旧表土	岩盤		背面補強工	置換コンクリート	改良地盤	セメント改良土
			I層	II層				
透水係数	ケース1	3.0 × 10 ⁻⁵	2.0 × 10 ⁻⁷	1.0 × 10 ⁻⁷	1.0 × 10 ⁻¹¹	1.0 × 10 ⁻¹¹	2.0 × 10 ⁻⁷	2.0 × 10 ⁻⁷
	ケース2					3.0 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁵	3.0 × 10 ⁻⁵
	ケース3					非常に大きな値(数値的無限大)	3.0 × 10 ⁻⁵	非常に大きな値(数値的無限大)

- 各検討ケースにおける二次元浸透流解析結果(初期状態及び津波30分継続後)を下図に示す。
- 津波来襲より30分後の浸透(飽和)範囲は限定的であり、防潮堤敷地側については、初期状態からの水位上昇は見られない。以上のことから、地盤中からの回り込みによる浸水が防止されることを確認した。



二次元浸透流解析結果(飽和度)