

島根原子力発電所 2号炉 防波壁の構造成立性評価結果について

令和 2 年 2 月
中国電力株式会社

目次

1.	構造成立性評価の基本方針	2
2.	構造成立性評価断面の選定	8
3.	構造成立性評価地震波の選定	16
4.	構造成立性評価における解析条件	22
5.	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)	62
6.	防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部)	67
7.	防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：輪谷部)	75
8.	防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)	80
9.	止水性に係る検討結果（2次元浸透流解析）	86
10.	まとめ	89

1. 構造成立性評価の基本方針

1. 構造成立性評価の基本方針

1.1 構造成立性評価の概要

- 島根原子力発電所防波壁の設計方針については、第790回審査会合（令和元年10月31日）及び今回審査会合資料「論点3 防波壁の設計方針について」で説明した。
- 今回、設置許可段階において、基本設計の成立性を確認するため、防波壁の基本構造が設置許可基準規則の各条文（第3条※¹、第4条、第5条）に適合する見通しであること（構造成立性）を示すため、地震時、津波時における評価を実施した。
- なお、荷重等の評価条件は現時点のものであり、今後変更になった場合は設計に反映することとする※²。

※1 本資料は、主に第4条、第5条への適合性についてまとめている。第3条の適合性については、基礎地盤の安定性評価の審査において別途説明予定である。

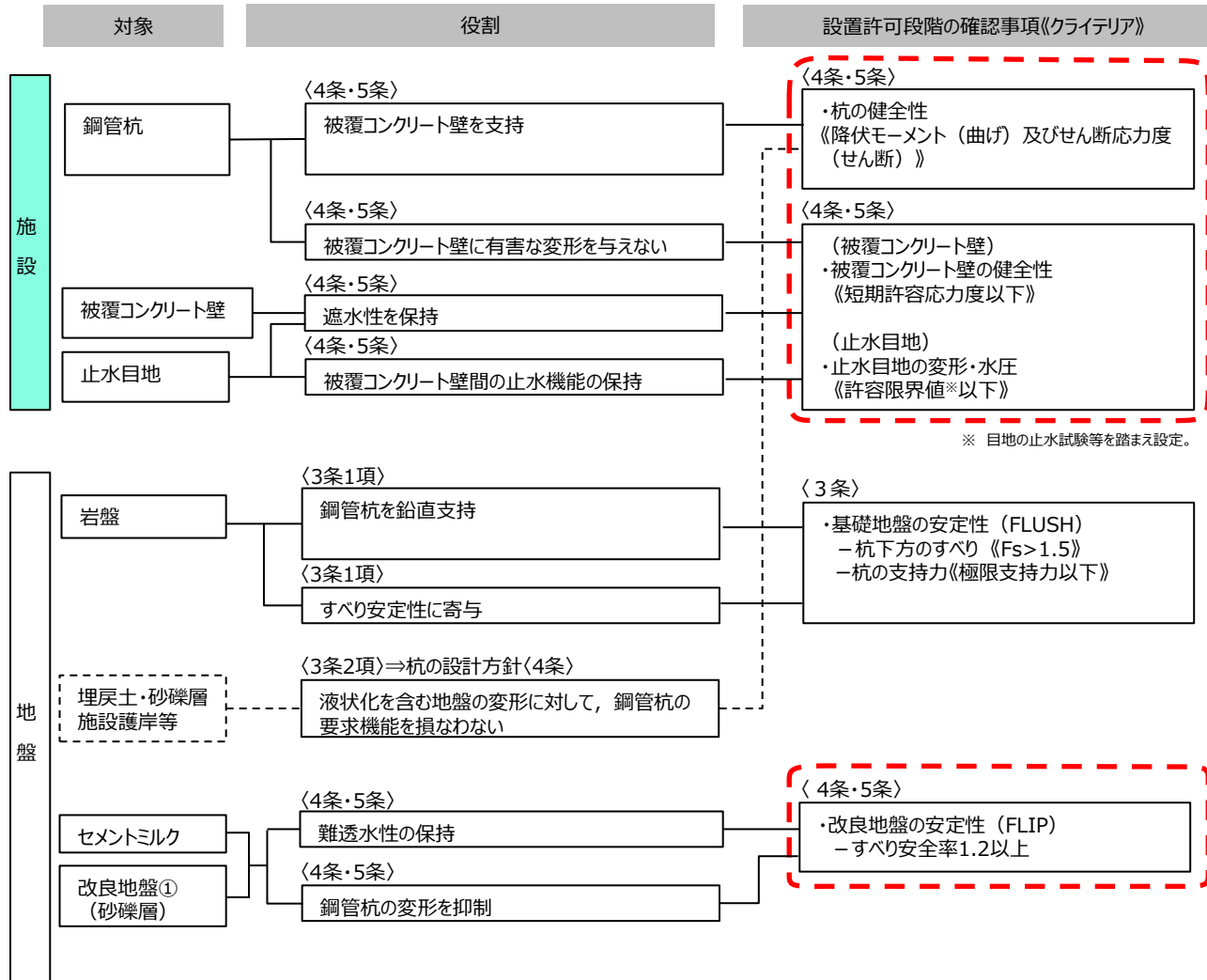
※2 詳細設計段階で万一裕度が確保できなくなった場合には、追加の裕度向上対策の実施により対応する。

1. 構造成立性評価の基本方針

1.2 構造成立性評価における確認項目（防波壁（多重鋼管杭式擁壁））

■ 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における設置許可段階の確認項目を示す。

 : 本資料における確認項目(4・5条)

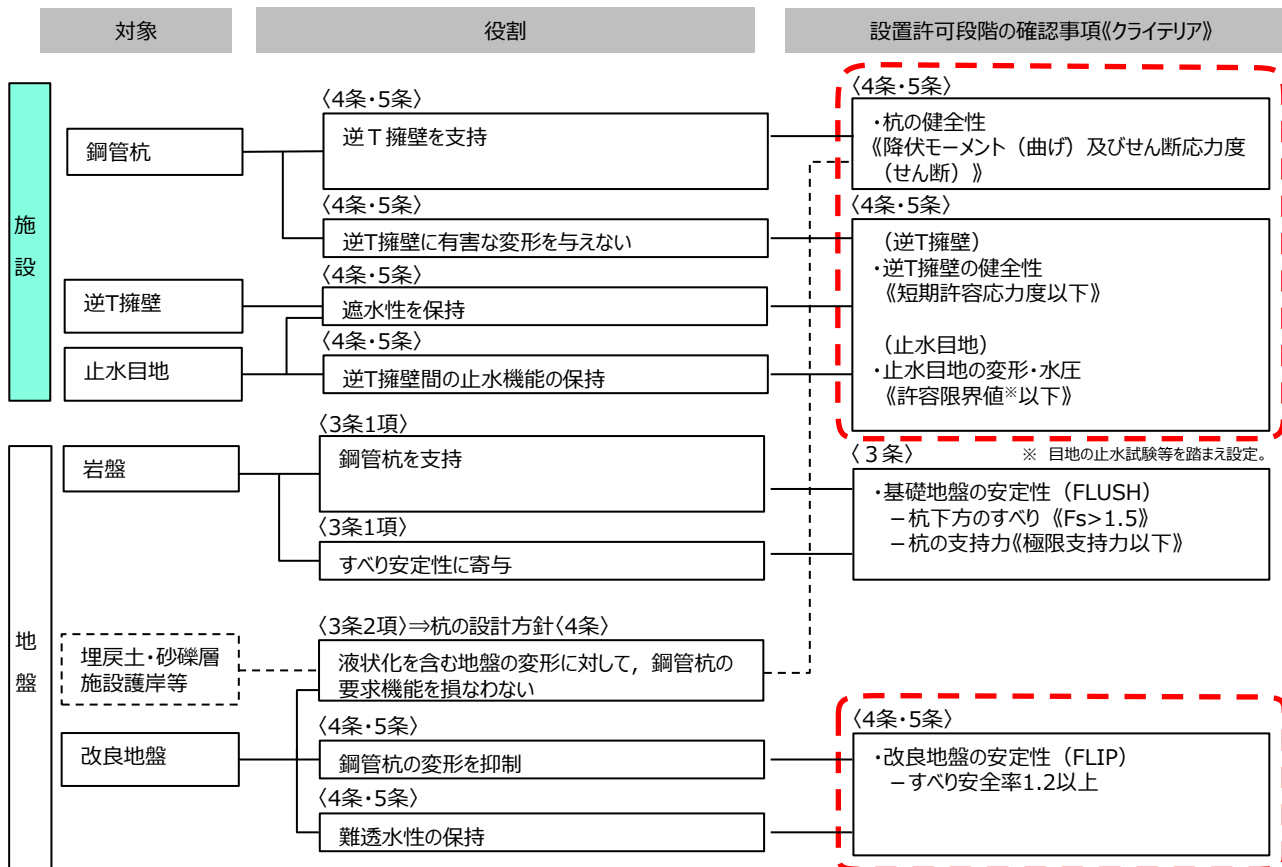


1. 構造成立性評価の基本方針

1.2 構造成立性評価における確認項目（防波壁（鋼管杭式逆T擁壁））

■ 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）における設置許可段階の確認項目を示す。

 : 本資料における確認項目(4・5条)

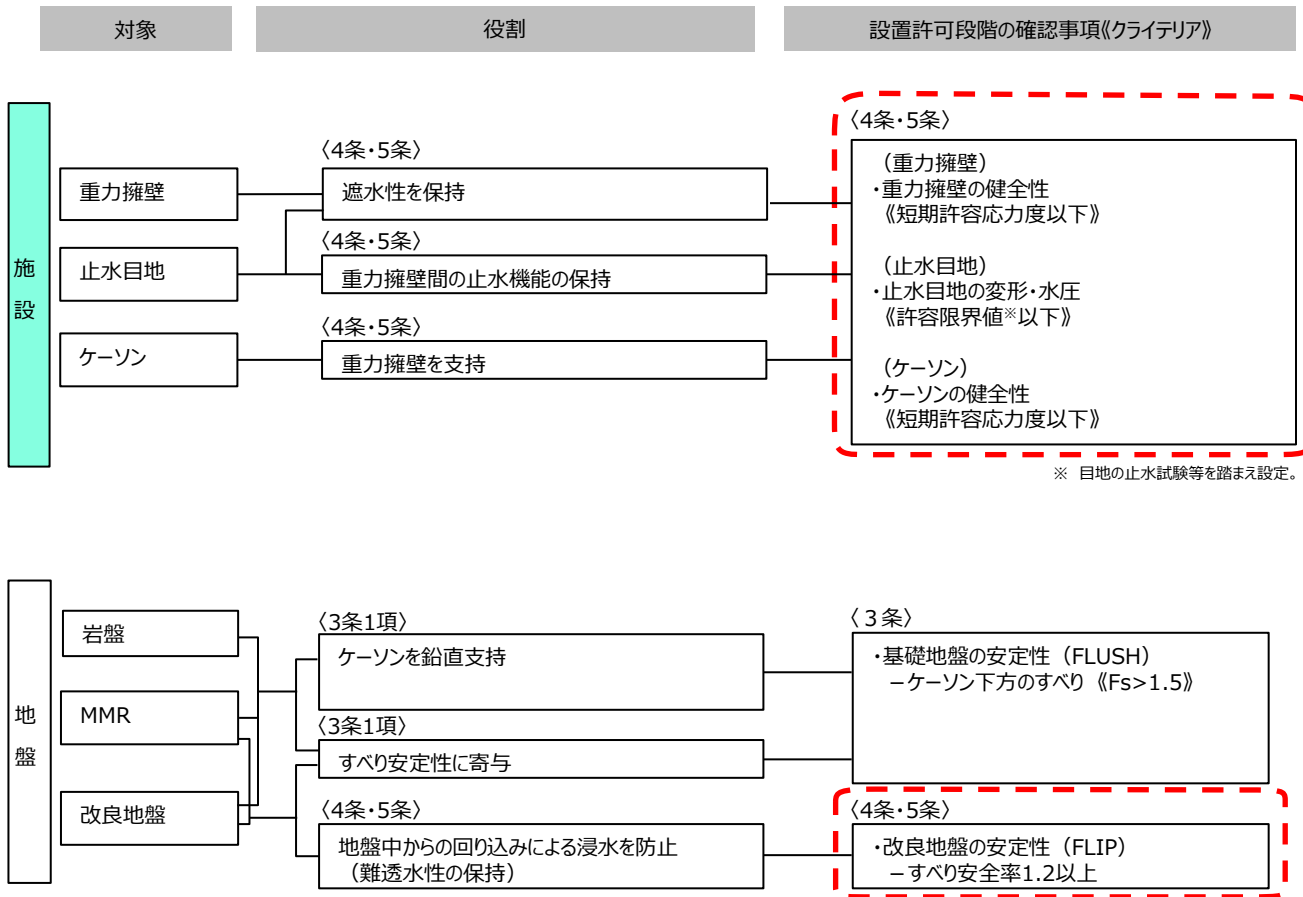


1. 構造成立性評価の基本方針

1.2 構造成立性評価における確認項目（防波壁（波返重力擁壁））

■ 防波壁（波返重力擁壁）における設置許可段階の確認項目を示す。

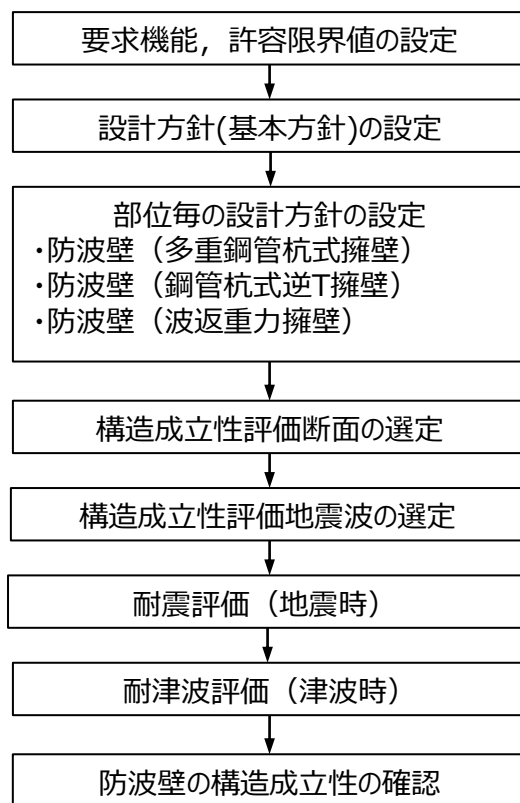
 : 本資料における確認項目(4・5条)



1. 構造成立性評価の基本方針

1.3 構造成立性見直し確認方針

- 防波壁の構造成立性を確認するため、「耐津波設計に係る工認審査ガイド」等に基づき、基準地震動 $S_s - D$ 及び基準津波による荷重等に対して、防波壁の施設としての構造部材が十分な余裕があること、補強により対策可能であること等を確認する。
- なお、詳細設計段階で万一余裕が確保できなくなった場合には、追加の余裕向上対策(改良地盤範囲の拡大等)の実施により対応する。



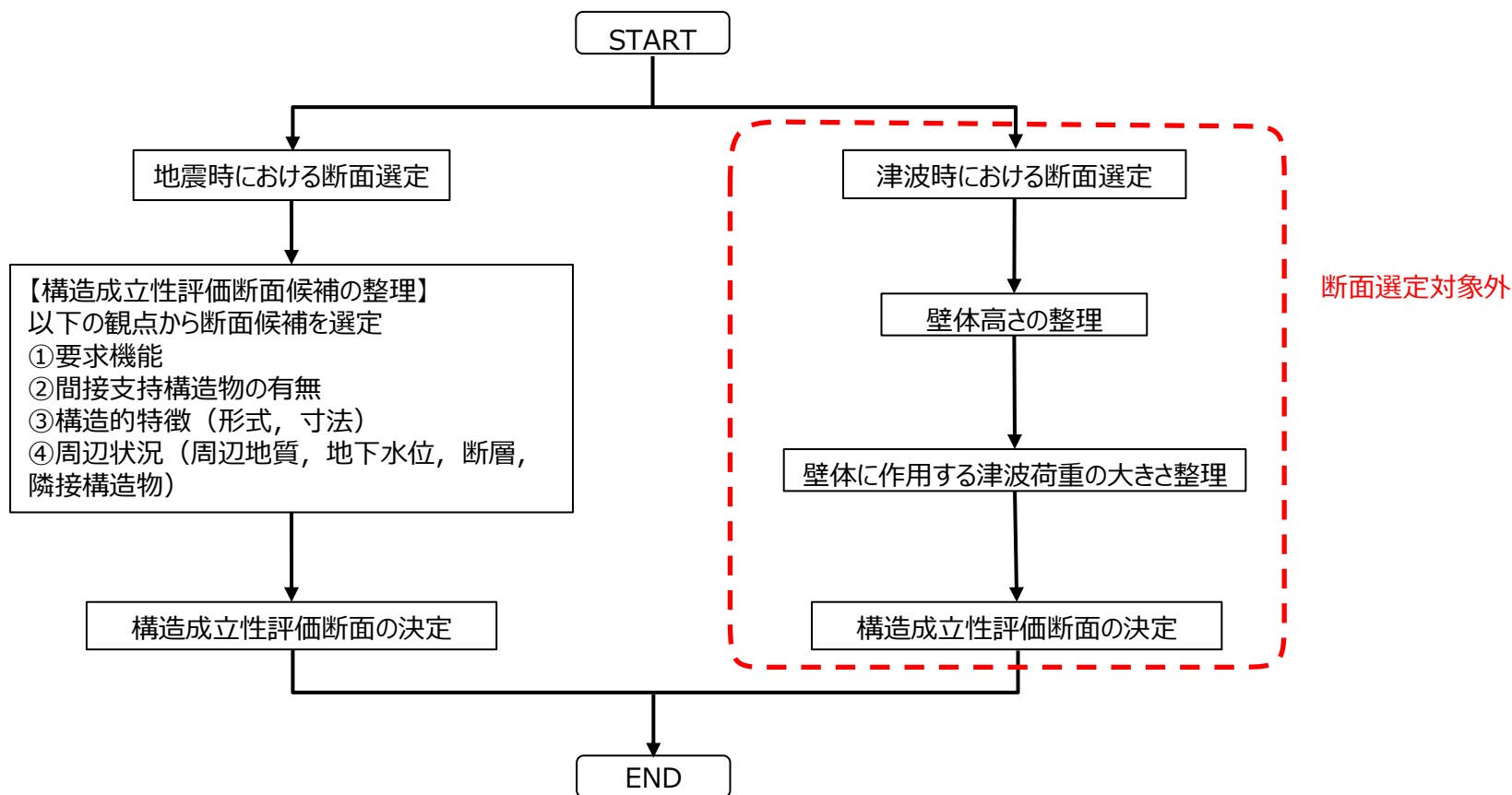
防波壁の構造成立性評価の流れ

2. 構造成立性評価断面の選定

2. 構造成立性評価断面の選定

2.1 構造成立性評価断面選定フロー

- 防波壁は敷地前面に広範囲にわたり設置することから、構造的特徴や周辺地質状況等を踏まえて、以下のフローに基づき構造成立性における評価断面を選定する。
- なお、詳細設計段階では、必要に応じて構造成立性確認において選定した地点以外の断面も選定し評価を行う。



構造成立性評価断面選定フロー

2. 構造成立性評価断面の選定

2.2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）①

- 下表のとおり①要求機能，②間接支持する設備，③上部工，④下部工，⑤周辺地盤の観点にて構造成立性評価断面候補を整理した。
- その結果，④下部工の構造的特徴及び⑤周辺地盤の特徴を踏まえた候補断面を選定することとした。

構造成立性評価断面候補の整理（防波壁（多重鋼管杭式擁壁））

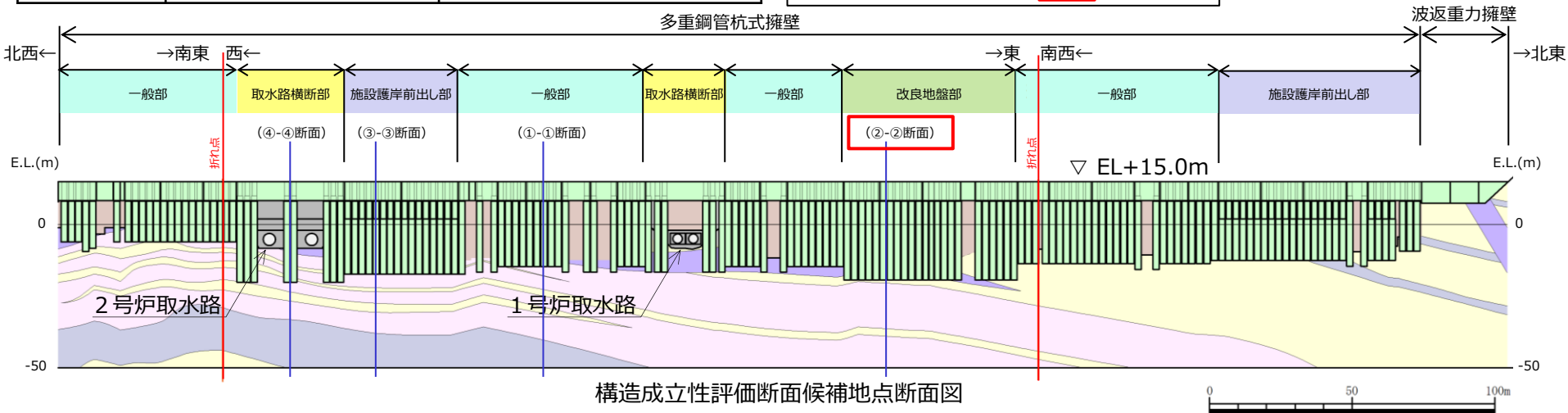
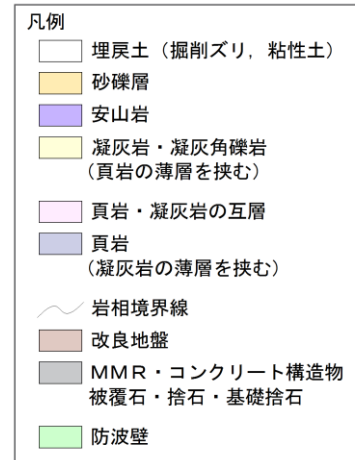
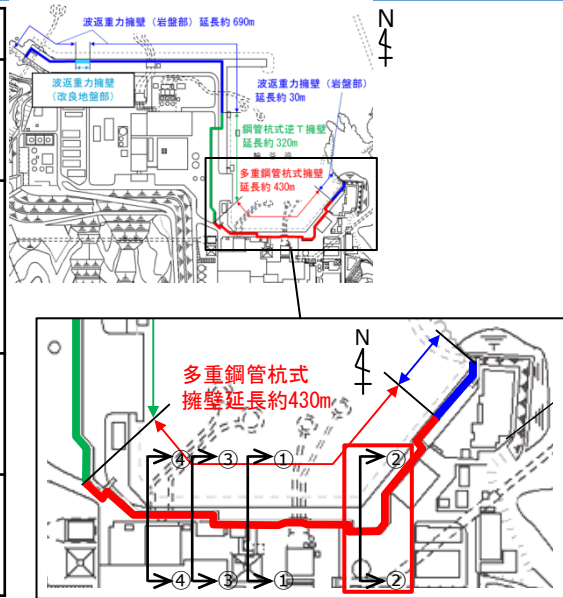
		防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	要求機能及び観点による整理
①要求機能		津波防護施設	・要求機能による断面選定は不要である。
②間接支持する設備		・なし	・間接支持する設備による断面選定は不要である。
③上部工	構造概要	・線状構造物 ・下部の鋼管杭から連続する鋼管杭を鉄筋コンクリートで被覆	・同一の断面となっており，構造的特徴による断面選定は不要である。
	寸法	・幅2.40m，高さ6.80m	
④下部工	構造概要	・多重鋼管杭 ・根入れ深さ5.0m～7.0m程度	・位置に応じて杭長が異なるため，候補断面の選定が必要である。
	寸法	・φ1.60～2.20m ・岩盤までの深さ：16.8m～22.9m	
⑤周辺地盤	地質概要	・主にCM級岩盤またはCH級岩盤に鋼管杭を打設 ・周辺地質は，埋戻土（掘削ズリ）・埋戻土（粘性土）及び砂礫層が分布し，一部基礎砕石の下側を地盤改良	・位置に応じて岩盤深さ，改良地盤の有無等，周辺状況が異なるため，候補断面の選定が必要である。

上記より，下部工の構造的特徴及び周辺地盤の特徴を踏まえた候補断面を抽出する。

2. 構造成立性評価断面の選定

2.2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）②

着目点	構造的特徴	周辺状況
①-①断面	・施設護岸の背面に、鋼管杭4,5本程度を標準とした壁体を連続して設置。	・地表面から岩盤までの深さ：18.1m ・鋼管杭を根入れ深さ5.0m程度で主にCM級岩盤に打設し、支持。
②-②断面	・施設護岸の背面に、鋼管杭6本程度を標準とした壁体を連続して設置。	・地表面から岩盤までの深さ：22.9m ・鋼管杭を根入れ深さ5.0m程度で主にCM級岩盤に打設し、支持。 ・岩盤が最も深部に存在する断面。 ・基礎捨石の下側に改良地盤及び砂礫層が存在する断面。
③-③断面	・施設護岸の前面に、鋼管杭8本程度を標準とした壁体を連続して設置。	・地表面から岩盤までの深さ：20.8m ・鋼管杭を根入れ深さ5.0m程度で主にCM級岩盤に打設し、支持。
④-④断面	・取水管を横断するため、鋼管杭を2列配置し、16本程度を標準とした壁体を連続して設置。	・地表面から岩盤までの深さ：16.8m ・鋼管杭を根入れ深さ7.0m程度で主にCM級及びCH級岩盤に打設し、支持。



設置許可段階における構造成立性評価の断面は、「岩盤が最も深部に位置し、かつ基礎捨石の下側に改良地盤及び砂礫層が存在する②-②断面」を選定する。

2. 構造成立性評価断面の選定

2.3 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）①

- 下表のとおり①要求機能，②間接支持する設備，③上部工，④下部工，⑤周辺地盤の観点にて構造成立性評価断面候補を整理した。
- その結果，④下部工の構造的特徴及び⑤周辺地盤の特徴を踏まえた候補断面を選定することとした。

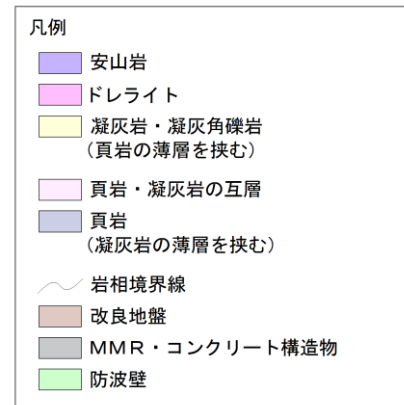
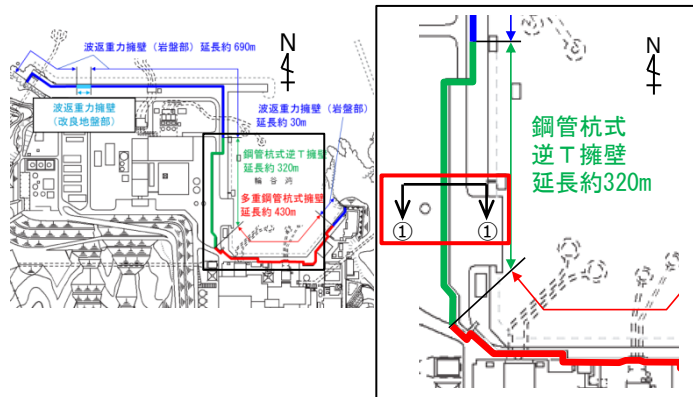
構造成立性評価断面候補の整理（防波壁（鋼管杭式逆T擁壁））

		防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）	要求機能及び観点による整理
①要求機能		津波防護施設	・要求機能による断面選定は不要である。
②間接支持する設備		・なし	・間接支持する設備による断面選定は不要である。
③上部工	構造概要	・線状構造物 ・鉄筋コンクリート構造物	・同一の断面となっており，構造的特徴による断面選定は不要である。
	寸法	・幅8.5m，高さ7.0m	
④下部工	構造概要	・鋼管杭（横断方向に2列） ・根入れ深さ0.5m程度	・位置に応じて杭長が異なるものの，周囲を地盤改良することから，応答特性に大きな差異はないと考えられるため，断面選定は不要である。
	寸法	・φ1.3m ・岩盤までの深さ：10.9m	
⑤周辺地盤	地質概要	・主にCM級岩盤に鋼管杭を打設 ・周辺地質は埋戻土（掘削ズリ）が分布し，防波壁周辺を地盤改良	・位置に応じて岩盤深さ，岩級区分，改良地盤厚さ等，周辺状況が異なるものの，周囲を地盤改良することから，応答特性に大きな差異はないと考えられるため，断面選定は不要である。

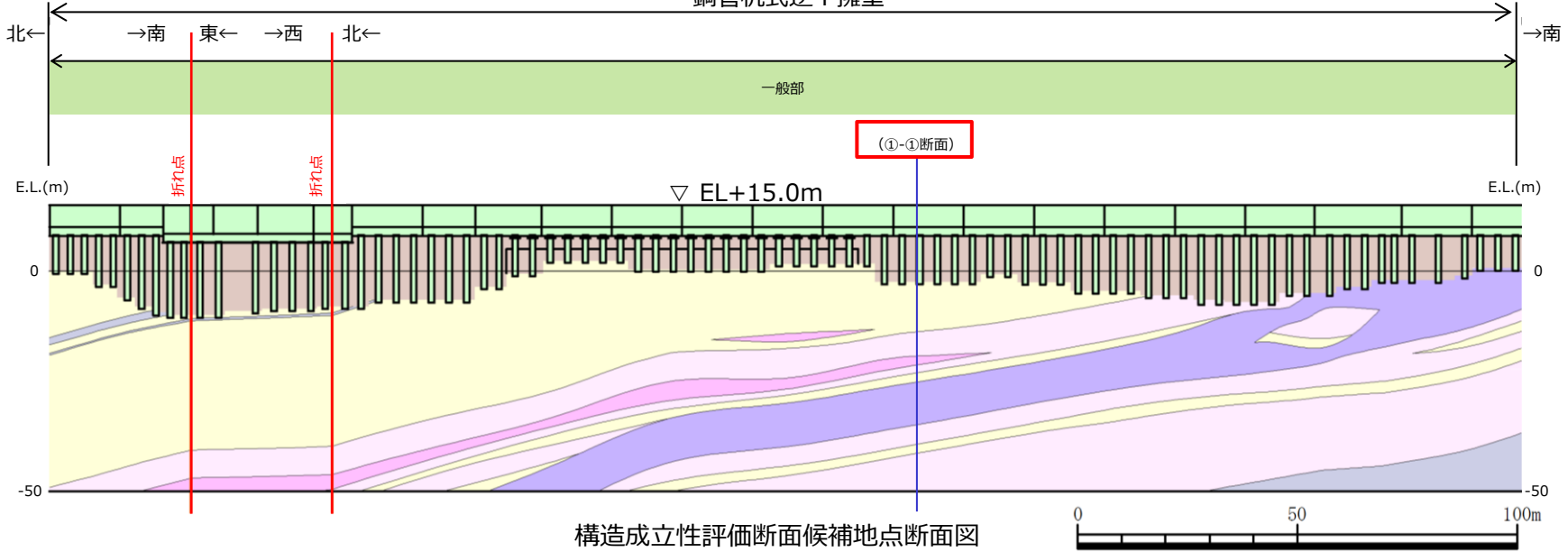
上記より，断面位置による応答特性に大きな差異はないと考えられることから，標準断面を検討断面とする。

2. 構造成立性評価断面の選定

2.3 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）②



鋼管杭式逆T擁壁



構造成立性評価断面候補地点断面図

設置許可段階における構造成立性評価の断面は、「標準断面として①-①断面」を選定する。

2. 構造成立性評価断面の選定

2.4 防波壁（波返重力擁壁）①

- 下表のとおり①要求機能，②間接支持する設備，③上部工，④下部工，⑤周辺地盤の観点にて構造成立性評価断面候補を整理した。
- その結果，④下部工の構造的特徴及び④周辺状況のうち周辺地質状況を踏まえた候補断面を選定することとした。

耐震評価候補断面の整理（防波壁（波返重力擁壁））

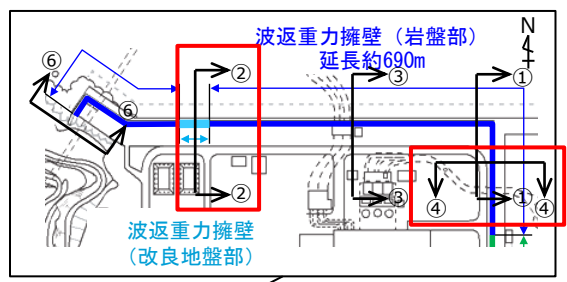
		防波壁（波返重力擁壁）	要求機能及び観点による整理
①要求機能		津波防護施設	・要求機能による断面選定は不要である。
②間接支持する設備		・なし	・間接支持する設備による断面選定は不要である。
③上部工	構造概要	・線状構造物 ・鉄筋コンクリート造 ・一部，端部にかけて岩盤に擦り付く。	・ほぼ同一の断面となっており，構造的特徴による断面選定は不要である。
	寸法	・幅1.50m，高さ6.5m～8.5m（地上部のみ）	
④下部工	構造概要	・ケーソン	・位置に応じてケーソンの有無，高さが異なるため，候補断面の選定が必要である。
	寸法	・幅13m～15m ・岩盤までの深さ：16.3m～29.0m	
⑤周辺地盤	地質概要	・ケーソンを介して主にCM級またはCH級岩盤に支持 ・一部，CM級またはCH級岩盤に上部工を直接支持 ・周辺地質は，埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層が分布し，一部，ケーソンの下側を地盤改良	・位置に応じて岩盤深さ，岩級区分，改良地盤の有無等，周辺状況が異なるため，候補断面の選定が必要である。

上記より，下部工の構造的特徴及び周辺地盤の特徴を踏まえた候補断面を抽出する。

2. 構造成立性評価断面の選定

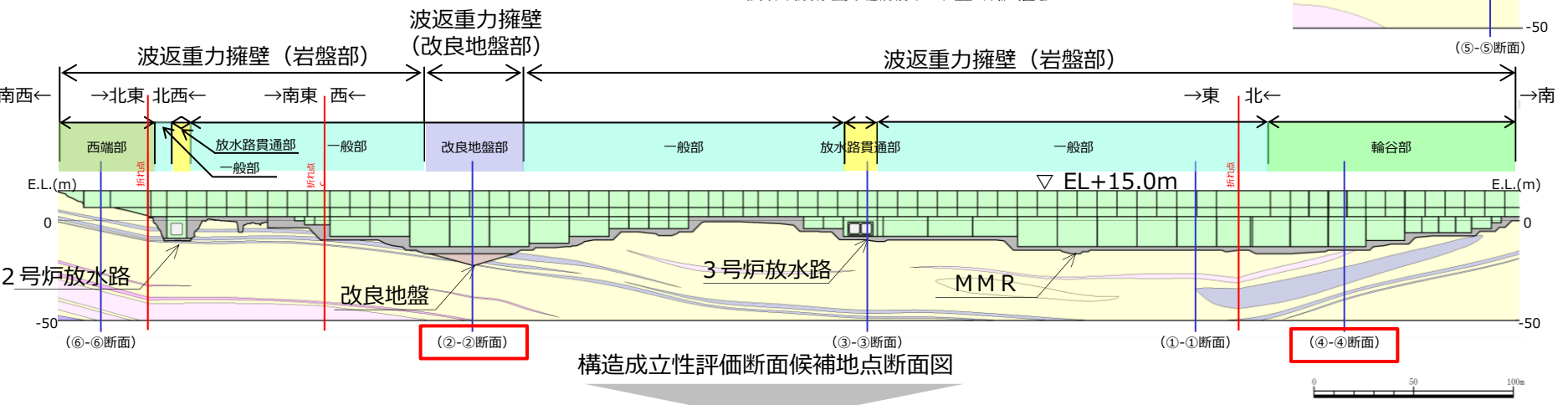
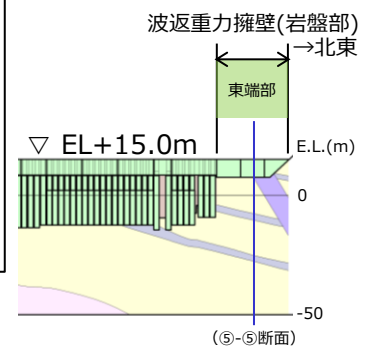
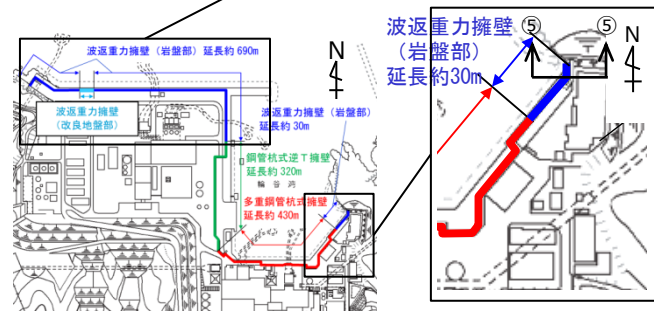
2.4 防波壁（波返重力擁壁）②

着目点	構造的特徴	周辺状況
①-①断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。	・地表面から岩盤までの深さ：21.2m ・ケーソンを介して主にCM級岩盤に支持される。
②-②断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。	・地表面から岩盤までの深さ：29.0m ・ケーソンを介して主にCM級岩盤または改良地盤に支持される。 ・高圧噴射攪拌工法により地盤改良を実施している改良地盤部が存在する。 ・周辺に砂礫層が分布している。
③-③断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。	・地表面から岩盤までの深さ：16.3m ・ケーソンを介して主にCH級岩盤に支持される。
④-④断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。	・地表面から岩盤までの深さ：23.2m ・ケーソンを介して主にCM級岩盤に支持される。
⑤-⑤断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。 ・端部にかけて岩盤に擦り付く。	・主にCH級岩盤に直接支持される。
⑥-⑥断面	・約10mを1ブロックとした鉄筋コンクリート造の壁体を連続で設置。 ・端部にかけて岩盤に擦り付く。	・CM級岩盤に直接支持される。



凡例

- 安山岩
- ドレイait
- 凝灰岩・凝灰角礫岩 (頁岩の薄層を挟む)
- 頁岩・凝灰岩の互層
- 頁岩 (凝灰岩の薄層を挟む)
- 岩相境界線
- 改良地盤
- MMR・コンクリート構造物
- 防波壁



構造成立性評価断面候補地点断面図

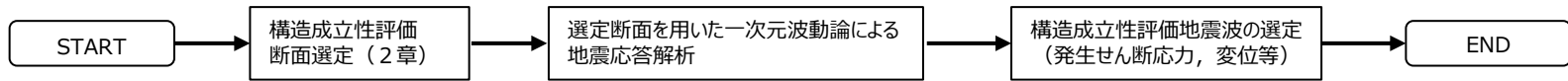
設置許可段階における構造成立性評価の断面は、「南北方向断面で岩盤が他地点と比較し相対的に最も深部に存在し、改良地盤及び砂礫層が分布する②-②断面」、及び「東西方向断面で岩盤が最も深部に存在する④-④断面」を選定する。

3. 構造成立性評価地震波の選定

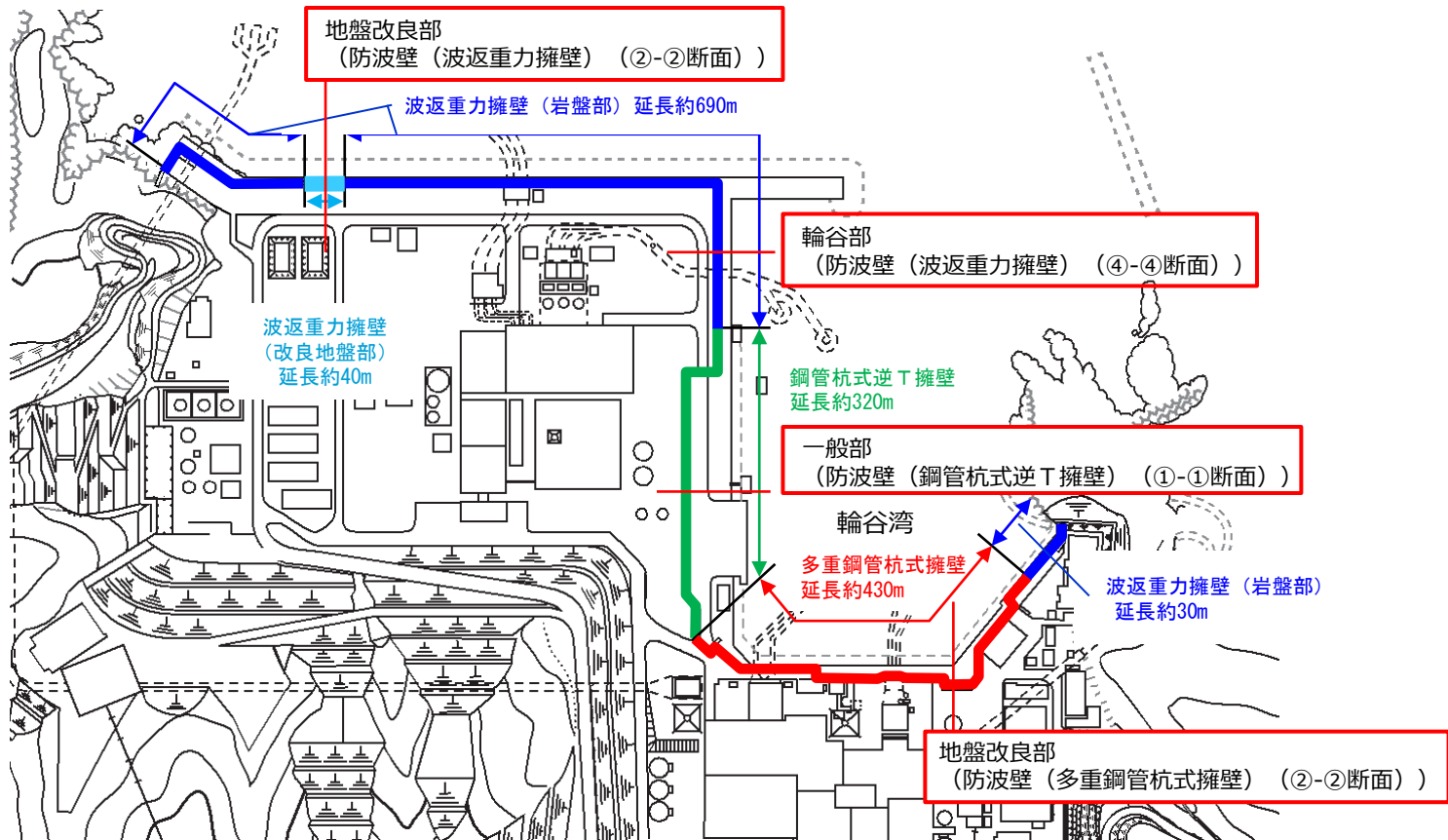
3. 構造成立性評価地震波の選定

3.1 構造成立性評価地震波選定フロー

- 構造成立性評価のための地震波選定フローを以下に示す。
- 2章で設定した構造成立性評価断面（地点）における基準地震動5波の応答結果から、構造成立性評価地震波を選定する。



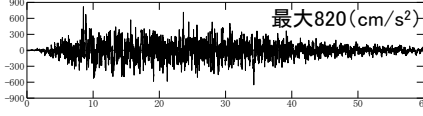
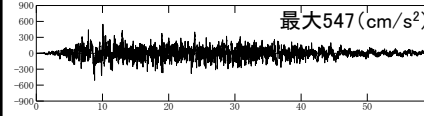
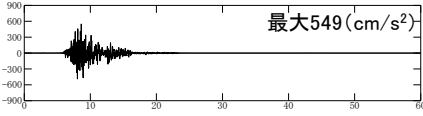
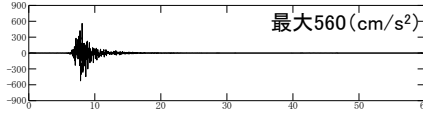
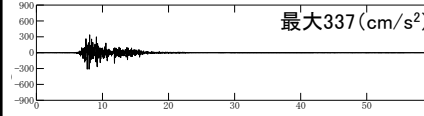
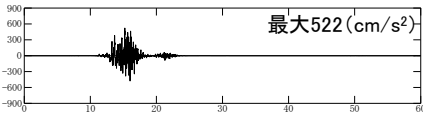
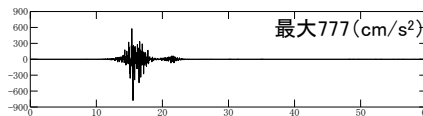
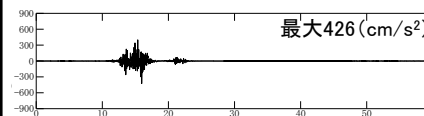
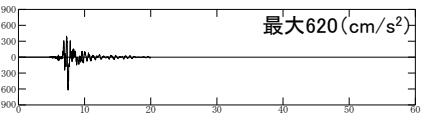
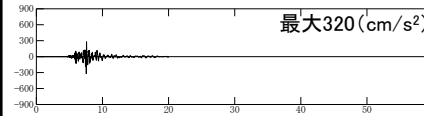
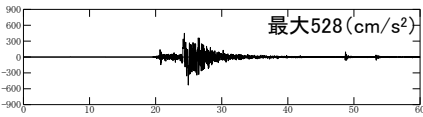
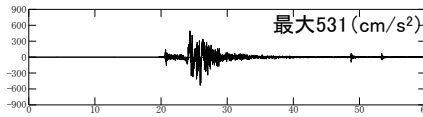
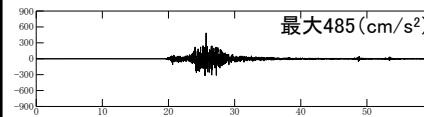
構造成立性評価地震波選定フロー



構造成立性地震波選定地点

3. 構造成立性評価地震波の選定

3.2 基準地震動 S s ①

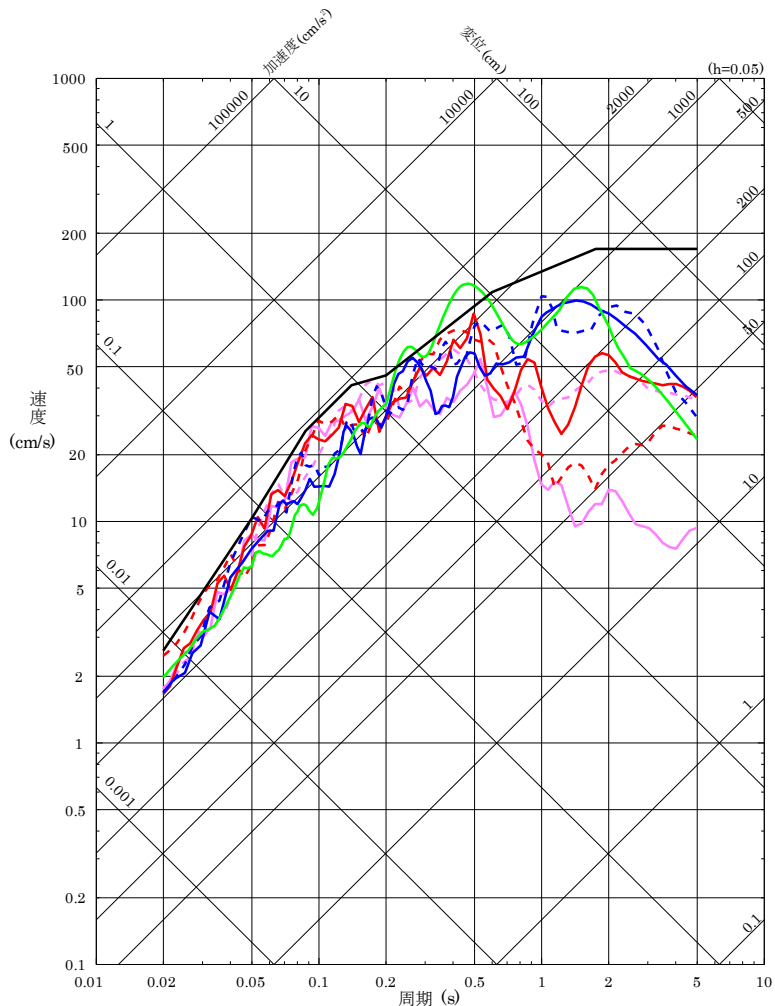
基準地震動		水平方向 (NS成分)	水平方向 (EW成分)	鉛直方向
S s - D	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔応答スペクトル手法による基準地震動〕			
S s - F 1	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 断層モデル手法による基準地震動 〔穴道断層による地震の中越沖地震の短周期レベルの不確かさ破壊開始点5〕			
S s - F 2	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 断層モデル手法による基準地震動 〔穴道断層による地震の中越沖地震の短周期レベルの不確かさ破壊開始点6〕			
S s - N 1	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) の検討結果に保守性を考慮した地震動〕			
S s - N 2	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2000年鳥取県西部地震の賀禰ダム (監査廊) の観測記録〕			

※ 表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形〔縦軸: 加速度 (cm/s²), 横軸: 時間 (s)〕

3. 構造成立性評価地震波の選定

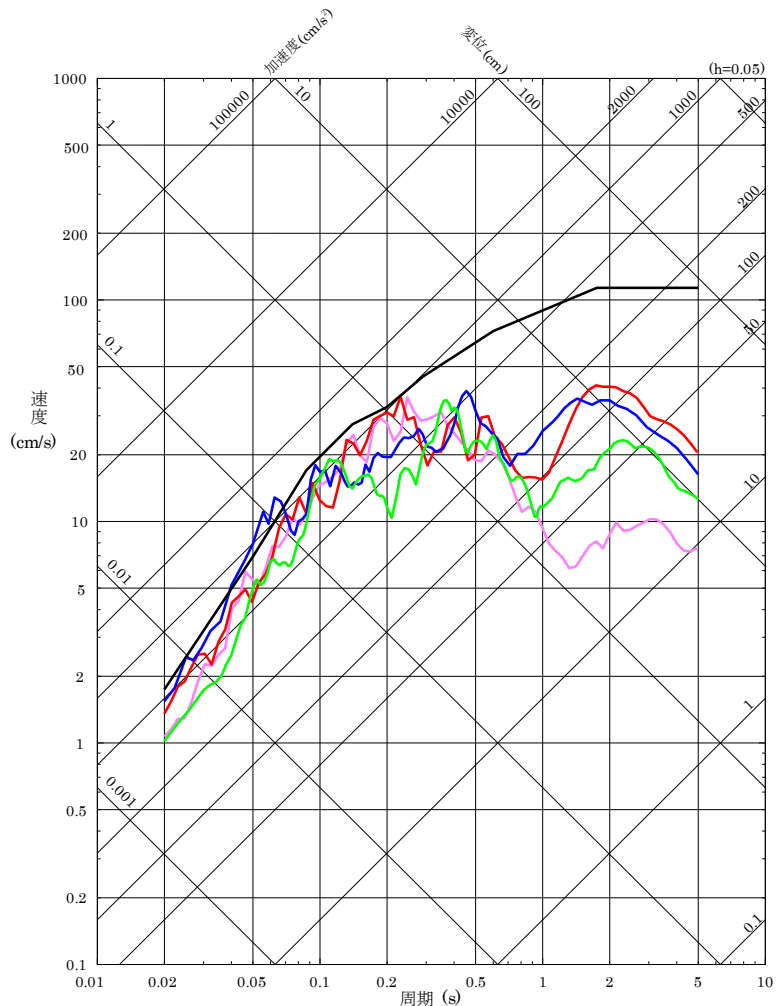
3.2 基準地震動 S s ②

- 基準地震動Ss-DH
- 基準地震動Ss-F1H (NS成分)
- - 基準地震動Ss-F1H (EW成分)
- 基準地震動Ss-F2H (NS成分)
- - 基準地震動Ss-F2H (EW成分)
- 2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) 保守性考慮した地震動 [基準地震動Ss-N1H]
- 2000年鳥取県西部地震 (賀祥ダム観測記録: NS成分) [基準地震動Ss-N2H (NS成分)]
- - 2000年鳥取県西部地震 (賀祥ダム観測記録: EW成分) [基準地震動Ss-N2H (EW成分)]



水平方向

- 基準地震動Ss-DV
- 基準地震動Ss-F1V
- 基準地震動Ss-F2V
- 2004年北海道留萌支庁南部地震 (K-NET港町) 保守性考慮した地震動 [基準地震動Ss-N1V]
- 2000年鳥取県西部地震 (賀祥ダム観測記録) [基準地震動Ss-N2V]

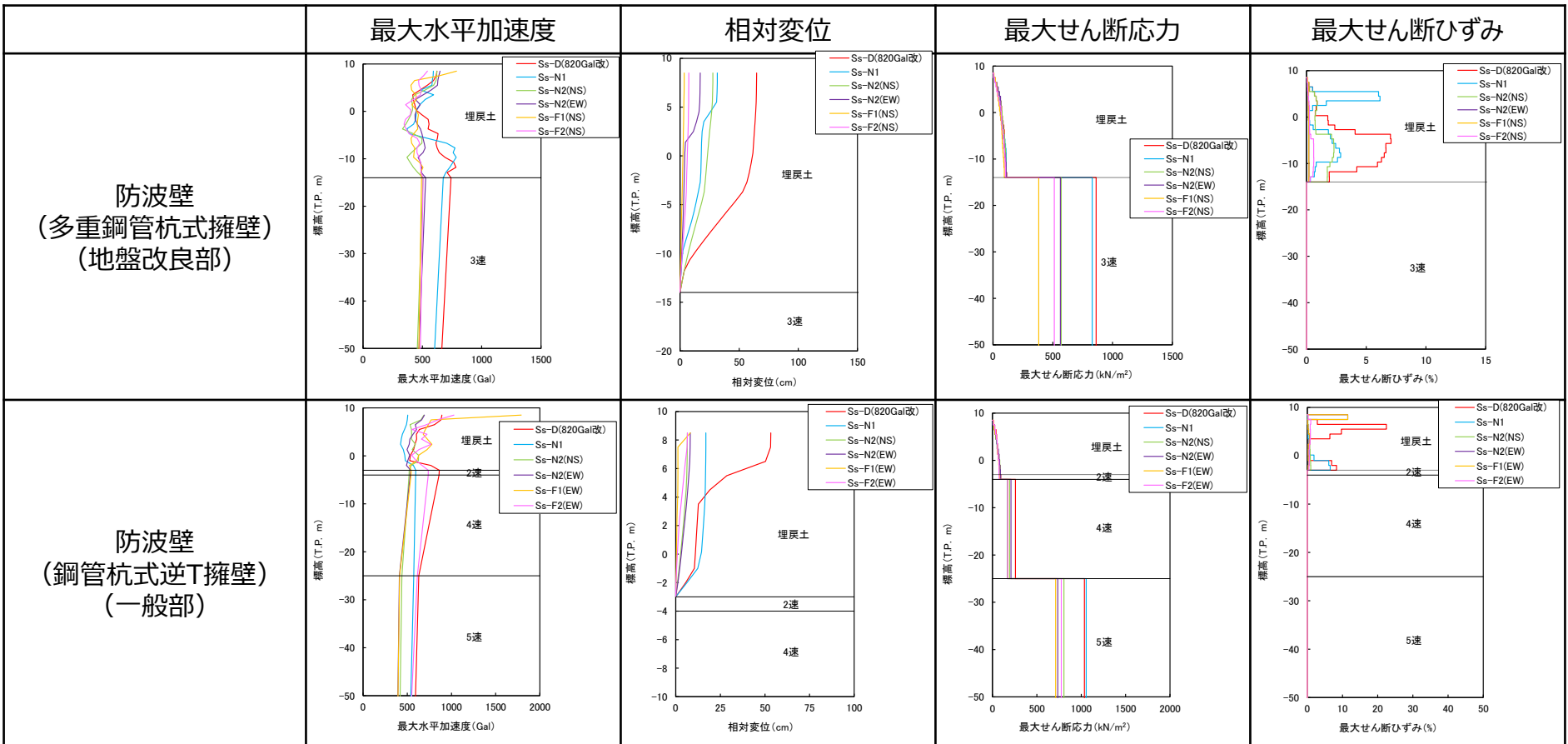


鉛直方向

3. 構造成立性評価地震波の選定

3.3 構造成立性評価地震波の選定結果①

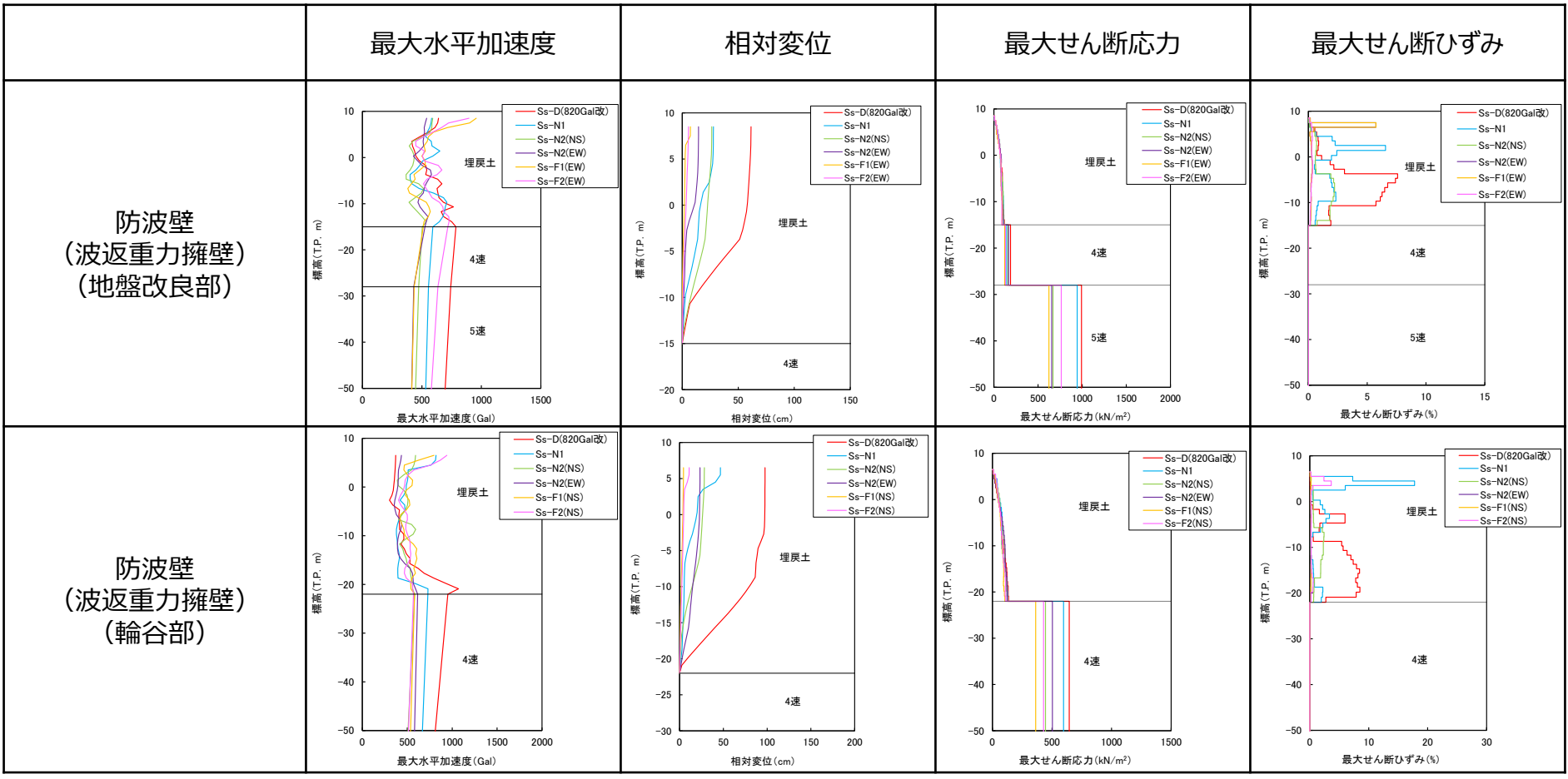
- 2章で設定した構造成立性評価断面における基準地震動 S s 5波の一次元波動論による地震応答解析結果（最大水平加速度， 相対変位， 最大せん断応力， 最大ひずみ）を示す。
- 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）（改良地盤部）では， 相対変位及び最大せん断ひずみについて， 鋼管杭の周辺地盤である埋戻土における S s - D及び S s - N 1 の応答が相対的に大きい。 周辺地盤の液状化等の影響も考慮し， 上記 2 波のうち， 継続時間の長い S s - D を構造成立性評価地震波として選定した。
- 防波壁（鋼管杭式逆 T 擁壁）（一般部）については， 鋼管杭の周辺地盤である埋戻土における S s - D の応答が相対的に大きいため， S s - D を構造成立性評価地震波として選定した。



3. 構造成立性評価地震波の選定

3.3 構造成立性評価地震波の選定結果②

- 防波壁（波返重力擁壁）の2断面については、周辺地盤である埋戻土におけるSs-D、Ss-N1、Ss-F1の応答が相対的に大きい。周辺地盤の液状化等の影響も考慮し、上記2波のうち、継続時間の長いSs-Dを構造成立性評価地震波として選定した。
- 以上を踏まえ、2章で設定した構造成立性評価断面において、構造成立性評価地震波として選定したSs-Dにより評価を行うこととする。



4. 構造成立性評価における解析条件

4.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）

4.2 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）

4.3 防波壁（波返重力擁壁）

4. 構造成立性評価における解析条件

4.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）

4.2 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）

4.3 防波壁（波返重力擁壁）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.1 地震時①

解析の目的（2次元動的FEM解析（有効応力解析））

- 鋼管杭，被覆コンクリート壁等の施設及び埋戻土，岩盤等の地盤を含めた全体の動的挙動評価。
- 地盤物性及び液状化対象層を考慮した影響評価。

モデル条件

- 鋼管杭は線形はり要素でモデル化する。
- 岩盤及び施設護岸は線形平面要素でモデル化する。
- 埋戻土（掘削ズリ），埋戻土（粘性土），砂礫層，改良地盤，被覆石及び基礎捨石はマルチスプリング要素でモデル化する。消波ブロックは荷重でモデル化する。
- 液状化評価対象層である埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層は液状化パラメータを設定する。
- 海水は流体要素でモデル化する。
- 防波壁と背後地盤など，要素間の滑り・剥離を考慮する箇所は，ジョイント要素でモデル化する。

モデル化領域

- 鉛直方向は，下端から十分な距離を確保するためEL-50mまでモデル化する。
- 水平方向は，海側，陸側とも十分な領域を確保するよう全幅220mでモデル化する。

地盤要素の要素高さ

- 地盤の要素高さは，最大周波数及び地盤のせん断波速度 V_s より求まる最大要素高さを上回らないように設定する。

$$H_{max} = \frac{1}{m} \cdot \lambda = \frac{1}{m} \cdot \frac{V_s}{f_{max}}$$

H_{max} : 最大要素高さ(m)

λ : せん断波の波長(m)

V_s : せん断波の速度(m/s)

f_{max} : 考慮する地震動の最大周波数(Hz)

m : 分割係数(=5とした)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件



4.1.1 地震時②

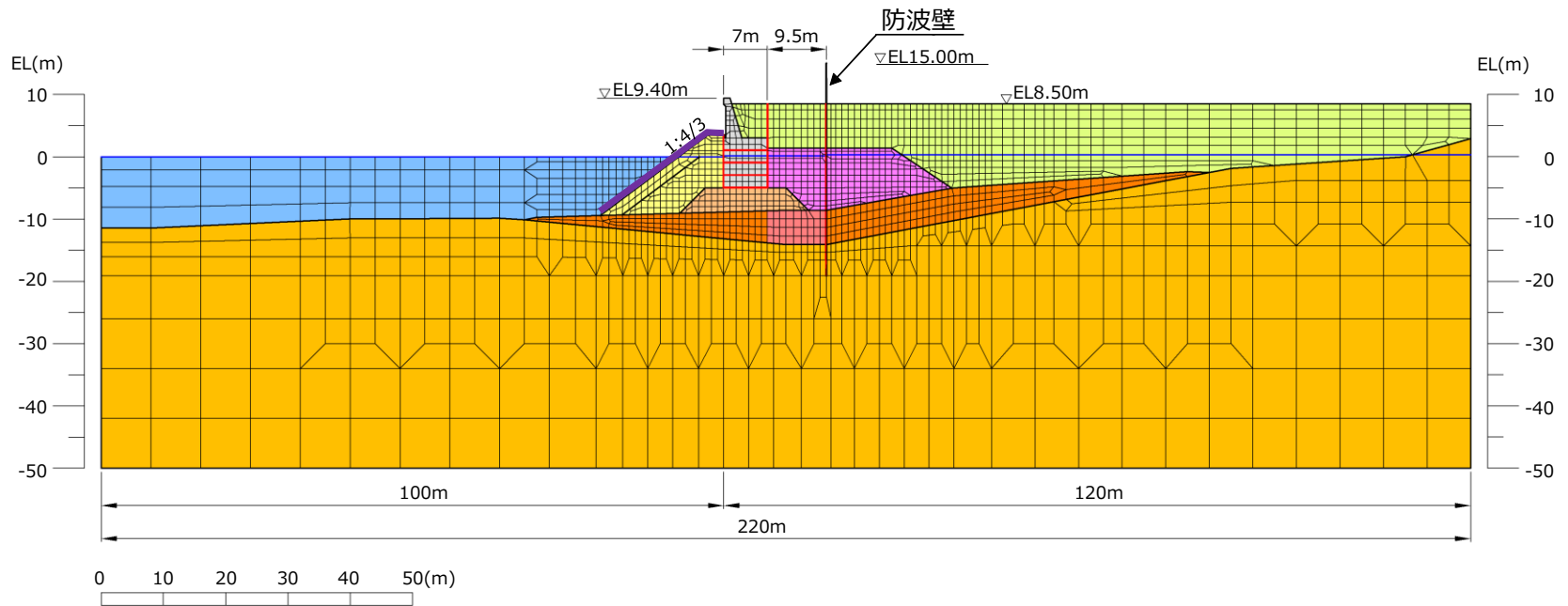
ジョイント要素

- 防波壁と背後地盤など、施設と地盤の間の滑り・剥離を考慮する箇所は、ジョイント要素を設定する。

境界条件

- 動的解析では、半無限地盤へのエネルギー散逸を評価するため、モデル側方及び底面に粘性境界を設ける。

- | | | | |
|--|--|--|--|
|  ; 岩盤 |  ; 砂礫層 |  ; 埋戻土（粘性土） |  ; ジョイント要素 |
|  ; 埋戻土（掘削ズリ） |  ; 改良地盤 |  ; 被覆石（捨石を含む） |  ; 消波ブロック荷重 |
|  ; 基礎捨石 |  ; 施設護岸 | | |



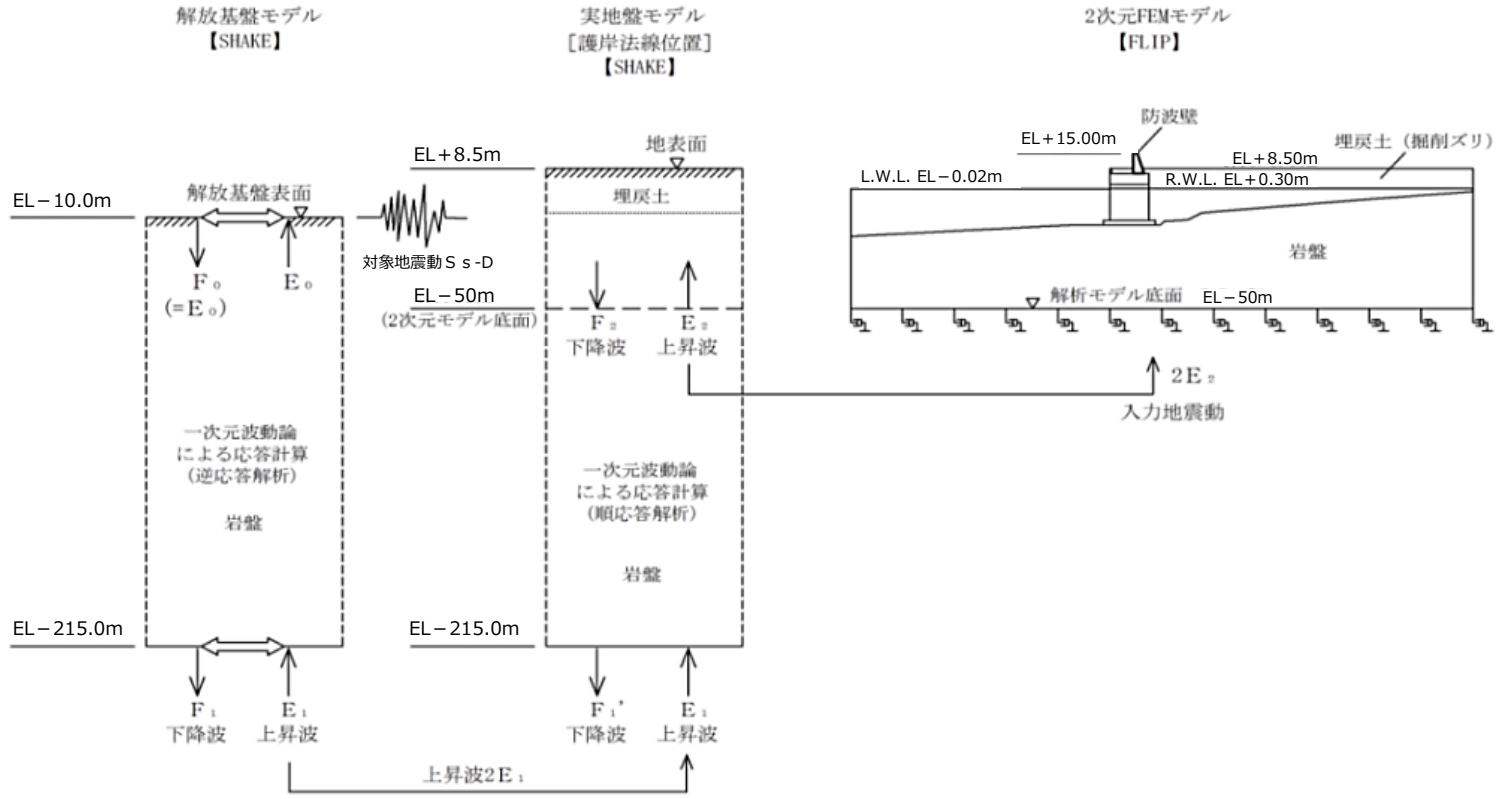
防波壁（多重鋼管杭式擁壁）（地盤改良部）の解析モデル

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.1 地震時③

入力地震動

- 入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s-D を、一次元波動論により解析モデル下端で評価し、水平方向及び鉛直方向に同時に与える。



減衰定数











- 減衰特性は、港湾構造物設計事例集に基づき、Rayleigh減衰による剛性比例型減衰とする。なお、地盤の非線形性を考慮するマルチスプリング要素（埋戻土（掘削ズリ）、埋戻土（粘性土）、砂礫層、改良地盤、被覆石及び基礎捨石）は履歴減衰も考慮する。

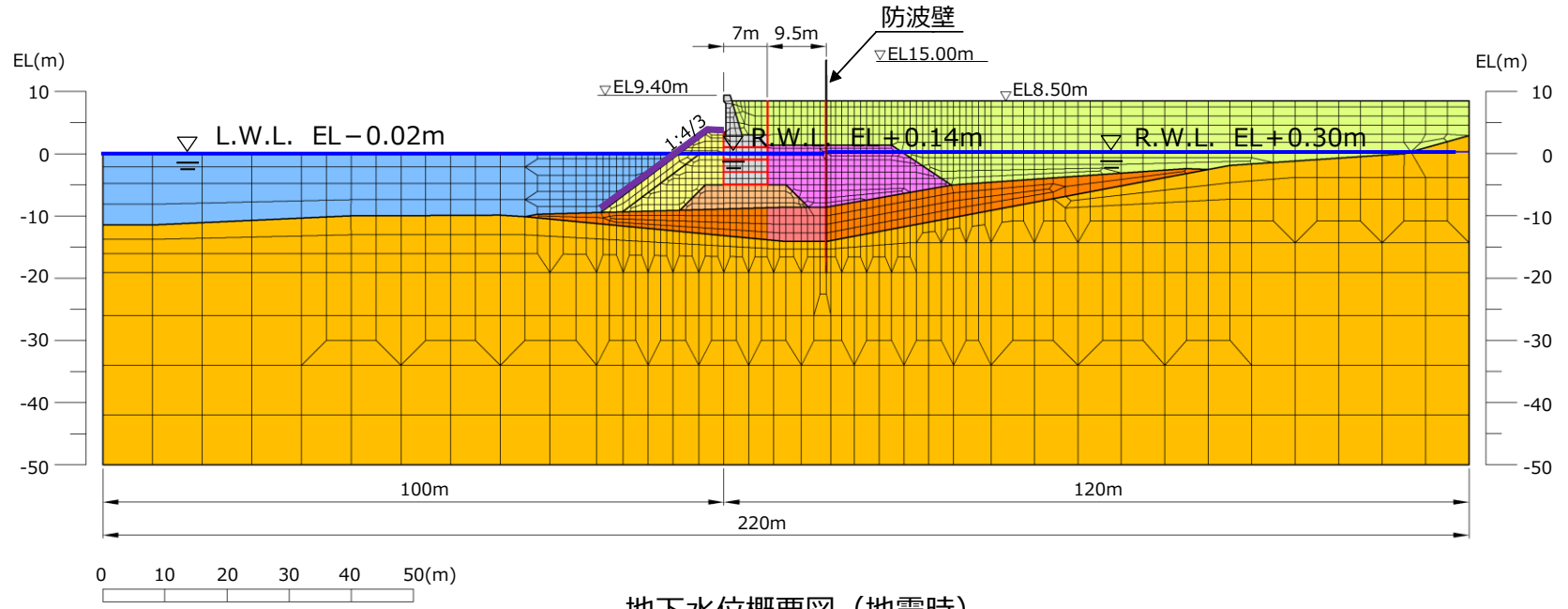
4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.1 地震時④

地下水位の設定

- 構造成立性評価における地下水位の設定に当たっては、港湾基準に基づく残留水圧を考慮するため、護岸前面は朔望平均干潮位（L.W.L.）とし、護岸より陸側の地下水位は残留水位（R.W.L.）を設定する。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、設定する。

- | | | | |
|--|--|--|--|
|  ; 岩盤 |  ; 砂礫層 |  ; 埋戻土（粘性土） |  ; ジョイント要素 |
|  ; 埋戻土（掘削ズリ） |  ; 改良地盤 |  ; 被覆石（捨石を含む） |  ; 消波ブロック荷重 |
|  ; 基礎捨石 |  ; 施設護岸 | | |



4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.1 地震時⑤

材料種別		物理特性		強度特性			変形特性			設定根拠	
		単位体積重量		粘着力 C (kN/m ²)	せん断 抵抗角 Φ _f (°)	せん断強度 T _f ^{※1,2} (kN/m ²)	せん断弾性係数 G ^{※1,3,4} (ヤング率 E) ^{※5} (kN/m ²)	ポア ソン 比 ν	最大 減衰定数 h _{max}		
		飽和, 湿潤 γ _{sat,γt} (kN/m ³)	水中 γ' (kN/m ³)								
地盤	埋戻土 (掘削スリ)	気中	19.6	-	0	40.05	σ' _m sin40.05°	94550(σ' _m /98) ^{0.5}	0.24	(単位体積重量) ・埋戻土（掘削スリ）、砂礫層、改良地盤は現地調査結果により設定 ・埋戻土（粘性土）は『港湾基準』に準拠し設定 (粘着力) ・埋戻土（掘削スリ, 粘性土）、砂礫層は『設計事例集』に準拠し設定 ・改良地盤は『浸透固化処理工法技術マニュアル』に準拠し設定 (せん断抵抗角) ・埋戻土（掘削スリ）は液状化パラメータ設定支援環境 FLIPSIM(Ver.3.0.1)により算定 ・埋戻土（粘性土）：『設計事例集』に準拠し設定 ・地盤改良は原地盤相当（埋戻土（掘削スリ））の値を設定 (せん断強度) ・『FLIP取扱説明書』に示された定義式に基づき設定 (せん断弾性係数) ・液状化パラメータ設定支援環境 FLIPSIM(Ver.3.0.1)により基準せん断弾性係数G _{ma} を算出し、『FLIP取扱説明書、p.8-2』に示された定義式に基づき設定 (ポアソン比) ・『設計事例集』に準拠し設定 (最大減衰定数) ・国土技術政策総合研究所HP公開の『一次元FLIP入力データ作成プログラム1D-MAKER 操作マニュアル』に準拠し設定	
		水中	20.7	10.6	0	39.18	σ' _m sin39.18°	72420(σ' _m /98) ^{0.5}			
	埋戻土 (粘性土) ^{※5} (施設護岸～鋼管杭間)	気中	16.7	-	0	30.00	σ' _m sin30.00°	12750(σ' _m /112.3) ^{0.5}	0.20		
		水中	16.7	6.6	0	30.00	σ' _m sin30.00°	12750(σ' _m /141.8) ^{0.5}			
	埋戻土 (粘性土) ^{※5} (鋼管杭背面)	気中	16.7	-	0	30.00	σ' _m sin30.00°	12750(σ' _m /111.3) ^{0.5}	0.33		
		水中	16.7	6.6	0	30.00	σ' _m sin30.00°	12750(σ' _m /140.2) ^{0.5}			
	砂礫層 (施設護岸～鋼管杭間)	20.7	10.6	0	38.48	σ' _m sin38.48°	55540(σ' _m /98) ^{0.5}	0.24			
砂礫層 (鋼管杭背面)	20.7	10.6	0	38.49	σ' _m sin38.49°	55760(σ' _m /98) ^{0.5}					
改良地盤①（砂礫層）	20.7	10.6	1677	38.00	1677 cos38.00° +σ' _m sin38.00°	751900(σ' _m /98) ^{0.5}					
護岸構成材	施設護岸 (パラペット)	24.0	-	-	-	-	(E=2.330×10 ⁷)	0.20	-	(単位体積重量) ・施設護岸は『港湾基準』及び『コンクリート標準示方書』に準拠し設定 (粘着力) ・石材（被覆石, 基礎捨石）は『港湾基準』に準拠し設定 ・石材（被覆石, 基礎捨石）は『設計事例集』に準拠し設定 (せん断抵抗角) ・石材（被覆石, 基礎捨石）は『設計事例集』に準拠し設定 (せん断強度) (せん断弾性係数) ・地盤と同様 (ポアソン比) ・石材（被覆石, 基礎捨石）は『設計事例集』に準拠し設定 ・護岸は『コンクリート標準示方書』に準拠し設定 (最大減衰定数) ・国土技術政策総合研究所HP公開の『一次元FLIP入力データ作成プログラム1D-MAKER 操作マニュアル』に準拠し設定	
	施設護岸 (上部コンクリート)	22.6	-	-	-	-	(E=2.040×10 ⁷)				
	施設護岸 (セルラーブロック) (コンクリート詰)	気中	23.0	-	-	-	-				(E=2.330×10 ⁷)
		水中	23.0	12.9	-	-	-				(E=2.330×10 ⁷)
	施設護岸 (セルラーブロック) (栗石詰)	22.0	11.9	-	-	-	-				(E=2.330×10 ⁷)
	被覆石（捨石を含む） (気中)	18.0	-	20	35.00	20 cos35.00° +σ' _m sin35.00°	180000(σ' _m /98) ^{0.5}				0.33
基礎捨石・被覆石 (捨石を含む) (水中)	20.0	9.9	20	35.00	20 cos35.00° +σ' _m sin35.00°	180000(σ' _m /98) ^{0.5}	0.33	0.24			

※1 σ'_mは各要素における平均有効拘束圧
 ※2 せん断強度式はτ_f=σ'_m sinφ_f + C cos φ_f
 ※3 せん断弾性係数の式はG=G_{ma}(σ'_m/σ'_{ma})^{mG}。ここにG_{ma}は基準平均有効拘束圧における基準せん断弾性係数、σ'_{ma}は基準平均有効拘束圧、mGは拘束圧依存性のパラメータ(標準値=0.5)。
 ※4 せん断弾性係数を求める際の基準平均有効拘束圧については、粘性土は層中央部における平均有効拘束圧を設定し、粘性土以外については一律98kN/m²(標準値)とする。
 ※5 線形材料については、変形特性としてヤング率を設定する。

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.1 地震時⑥

荷重及び荷重の組合せ

■ 地震時の2次元動的有限要素解析（有効応力）に用いる荷重の組合せを以下に示す。

検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物 荷重	動水圧
地震時	○	○	○	○	○	○	—	—	—	○

・積雪荷重

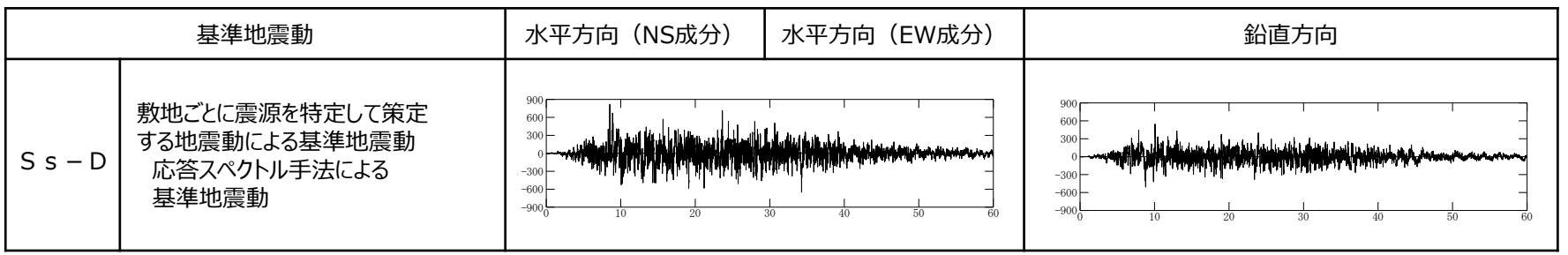
積雪荷重は0.7kN/m²とし、解析領域表面（海水を除く）に作用させる。

・風荷重

風荷重は、建築物の構造関係技術基準解説書に準拠して設定する。

・地震荷重

解析に用いた地震波は、3章で選定したS s -Dである。



※ 表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形[縦軸:加速度 (cm/s²), 横軸:時間(s)]

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

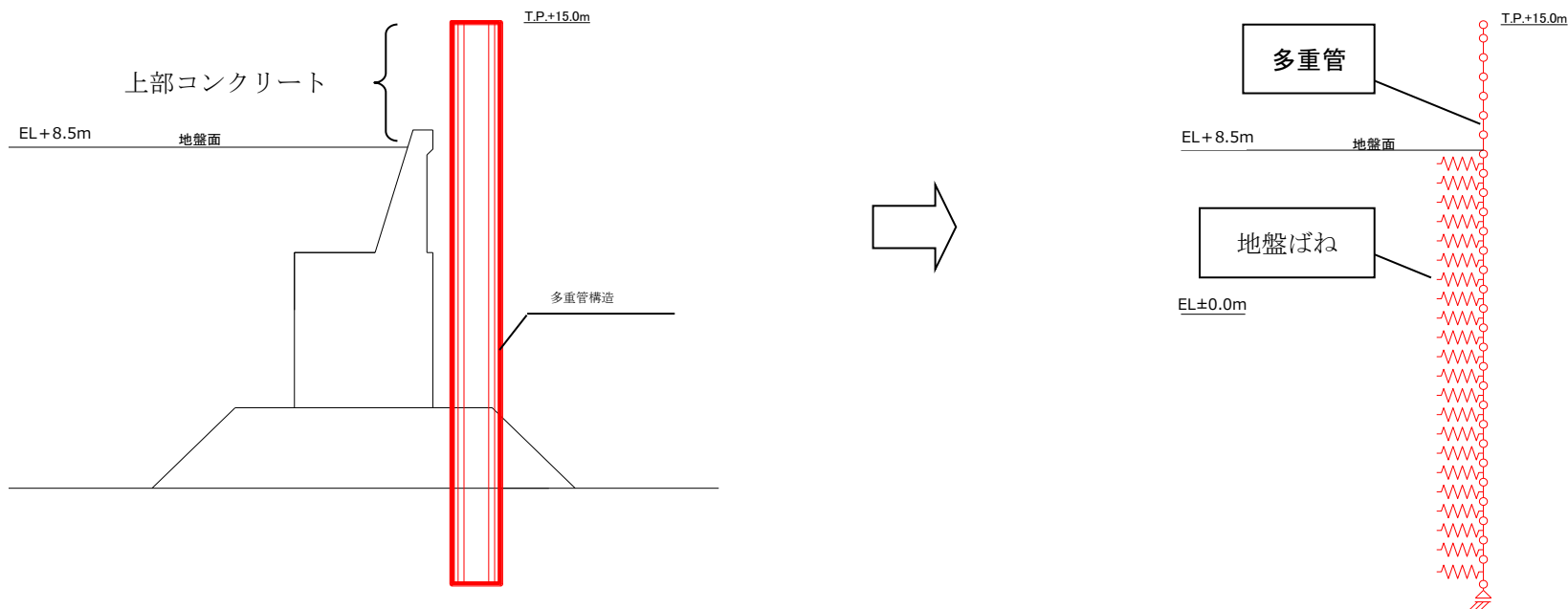
4.1.2 津波時①

解析の目的（2次元静的フレーム解析）

- 鋼管杭の挙動評価（津波時）

モデル条件

- 多重管構造を2次元静的フレームでモデル化し、1本の梁として計算する。
- 地盤は受働土圧を上限とした線形ばねでモデル化する。
- 上部コンクリートおよび内部の中詰コンクリートの剛性および強度は考慮しない。

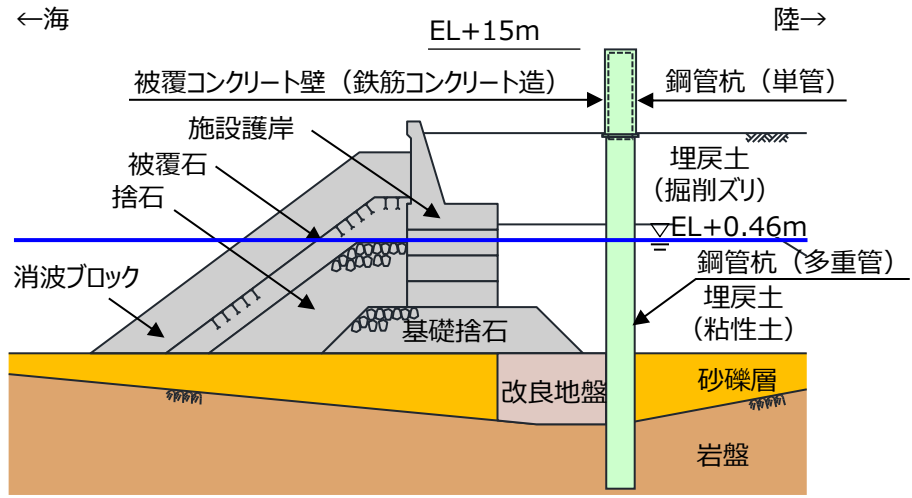


4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.2 津波時②

地下水位の設定

- 津波荷重の算定潮位は朔望平均満潮位（H.W.L.）とし，津波時の構造成立性評価における地下水位は，朔望平均満潮位（H.W.L.）とする。
- 詳細設計段階においては，浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上，設定する。



地下水位概要図（津波時）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.2 津波時③

荷重及び荷重の組合せ

■ 津波時の2次元静的フレーム解析に用いる荷重の組合せを以下に示す。

検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物 荷重	動水圧
津波時	○	—*	—*	○	○	—	—	○	○	—

※ 津波時の積雪荷重及び風荷重については、影響が軽微のため考慮しない。

・津波荷重及び漂流物荷重

構造成立性検討にあたっては、基準津波による津波荷重及び漂流物荷重を上回る津波荷重を保守的に設定する。防波壁に作用する津波荷重は、港湾基準に示されている式により算定し、擁壁の海側から作用させる。

$$\eta^* = 3.0 \times a_1$$

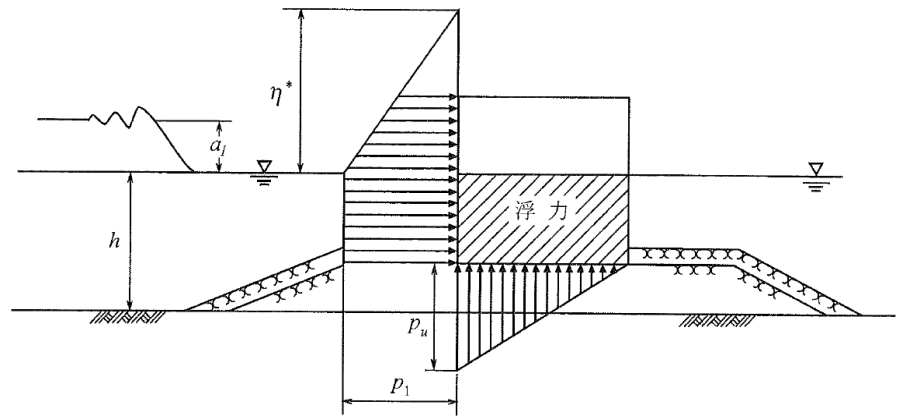
η^* : 静水面上の波圧作用高さ(m)
 a_1 : 入射津波の静水圧上の高さ(振幅)(m)

$$P_1 = 2.2 \times \rho g \times a_1$$

P_1 : 静水面における波圧強度(kN/m²)
 ρg : 海水の単位体積重量(kN/m³)

$$P_u = P_1$$

P_u : 前面下端における揚圧力(kN/m²)



4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

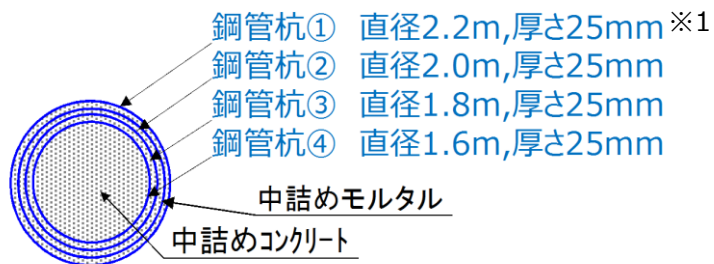
4.1.3 鋼管杭の評価条件①

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	(曲げ) 降伏モーメント (せん断) せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 (平成14年3月)
	津波時	2次元静的フレーム解析			

モデル化方針

- 多重鋼管杭は，各鋼管を中詰めコンクリート及びモルタルで充填することにより，一体として挙動し，荷重を分担できる構造とした。
- 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の2次元動的FEM解析にあたっては，多重鋼管杭はビーム要素でモデル化し，単一の断面積及び断面二次モーメント（各管の断面二次モーメントの合計）を設定する。



※1 最外管については，セメントミルクで周囲を覆われており腐食する環境ではないと判断できるが，保守的に厚さに腐食代1mmを考慮し，断面積・断面二次モーメントを算定する。ここで，腐食代は，港湾基準に示されている鋼材の腐食速度の標準値(陸側土中部，残留水位より下)を使用し，耐用年数を50年として算出した。

$$\text{断面二次モーメント } I^{*2} = I_{①} + I_{②} + I_{③} + I_{④}$$

$$\text{断面積 } A^{*2} = A_{①} + A_{②} + A_{③} + A_{④}$$

※2 添え字は鋼管杭の番号

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.3 鋼管杭の評価条件②

応力度照査

鋼管杭については、杭に発生する最大曲げモーメント M_{max} と降伏モーメント M_y との比が1以下となることを確認する。
また、せん断応力度 τ と降伏せん断応力度 τ_y との比が1以下となることを確認する。

【曲げ】

$$\frac{M_{max}}{M_y} \leq 1$$

M_{max} : 最大曲げモーメント (kN・m)

M_y : 降伏モーメント (kN・m)

【せん断】

$$\frac{\tau}{\tau_y} \leq 1$$

τ : 発生せん断応力度 (N/mm²)

τ_y : 降伏応力度 (N/mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.4 止水目地の評価

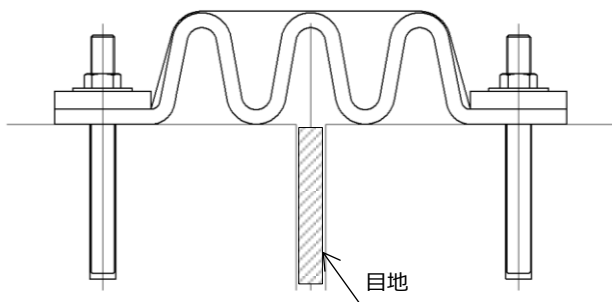
- 鋼管杭間の相対変位は、隣接する鋼管杭の杭長が概ね同等となることから、ほぼ生じないと想定される。
- 止水目地の許容変形量は、ゴムジョイントで460mm、シートジョイントで990mmであり、想定される変形量に応じた設置が可能であることから、遮水性は確保可能である。
- また、選択した止水目地が発生水圧に対して十分遮水できることを、詳細設計段階で試験等により確認する。

詳細設計段階における照査項目、許容限界

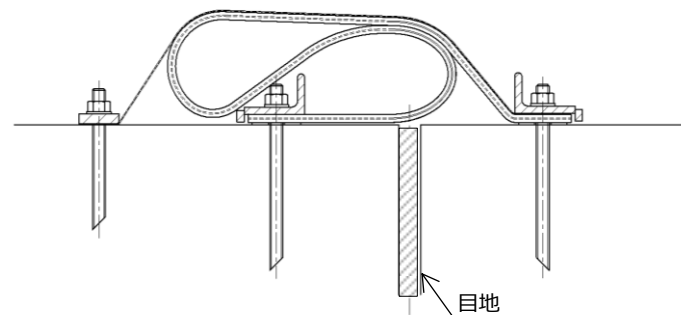
評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
止水目地	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	変形・水圧	設計で用いる許容限界	メーカー規格及び今後必要に応じて実施する性能試験に基づく許容変形量及び許容水圧以下とする。
	津波時	2次元静的フレーム解析			
止水目地の 鋼製部材	地震時	—	曲げ・せん断	設計で用いる許容限界	「建築基準法施行令2006年6月」を踏まえた許容応力度とする。
	津波時	—			

止水目地の選定について

被覆コンクリート壁間の止水目地は、想定される変形量に応じ仕様を決定する。



ゴムジョイント（許容変形量：460mm）



シートジョイント（許容変形量：990mm）

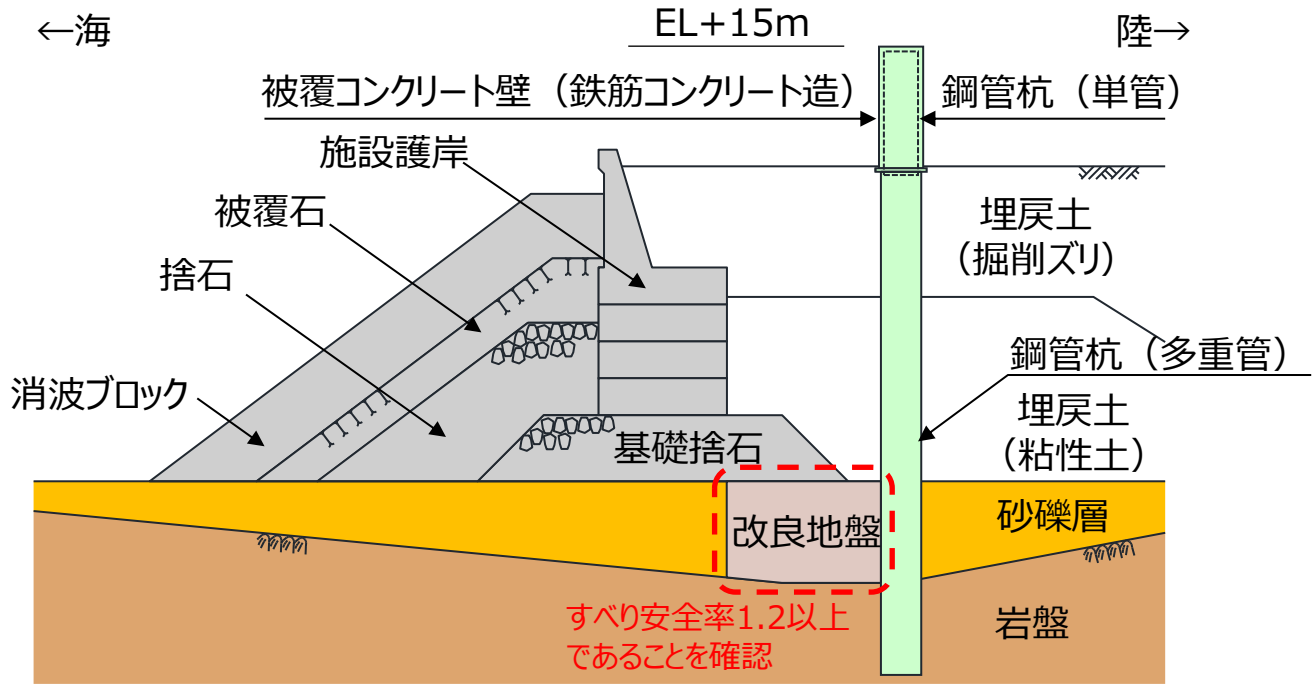
止水目地の設定例

4. 構造成立性評価における解析条件 4.1防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の解析条件

4.1.5 改良地盤①（砂礫層）の評価条件

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
改良地盤① (砂礫層)	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	すべり安全率	すべり安全率1.2以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド



2次元動的FEM解析での確認内容

- 4. 構造成立性評価における解析条件
 - 4.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）
 - 4.2 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）**
 - 4.3 防波壁（波返重力擁壁）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.1 地震時①

解析の目的（2次元FEM解析（有効応力解析））

- 鋼管杭，逆T擁壁等の施設及び埋戻土，岩盤等の地盤を含めた全体の動的挙動評価。
- 地盤物性及び液状化対象層を考慮した影響評価。

モデル条件

- 防波壁及び鋼管杭は線形はり要素でモデル化する。
- 岩盤及び施設護岸は線形平面要素でモデル化する。
- 埋戻土（掘削ズリ），改良地盤，被覆石及び基礎捨石はマルチスプリング要素でモデル化する。
- 液状化評価対象層である埋戻土（掘削ズリ）は液状化パラメータを設定する。
- 海水は流体要素でモデル化する。
- 防波壁と背後地盤など，要素間の滑り・剥離を考慮する箇所は，ジョイント要素でモデル化する。

モデル化領域

- 鉛直方向は，下端から十分な距離を確保するためEL-50mまでモデル化する。
- 水平方向は，海側，陸側とも十分な領域を確保するよう全幅240mでモデル化する。

地盤要素の要素高さ

- 地盤の要素高さは，最大周波数及び地盤のせん断波速度 V_s より求まる最大要素高さを上回らないように設定する。

$$H_{max} = \frac{1}{m} \cdot \lambda = \frac{1}{m} \cdot \frac{V_s}{f_{max}}$$

H_{max} : 最大要素高さ(m)

λ : せん断波の波長(m)

V_s : せん断波の速度(m/s)

f_{max} : 考慮する地震動の最大周波数(Hz)

m : 分割係数(=5とした)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.1 地震時②

ジョイント要素

■ 防波壁と背後地盤など、施設と地盤の間の滑り・剥離を考慮する箇所は、ジョイント要素を設定する。

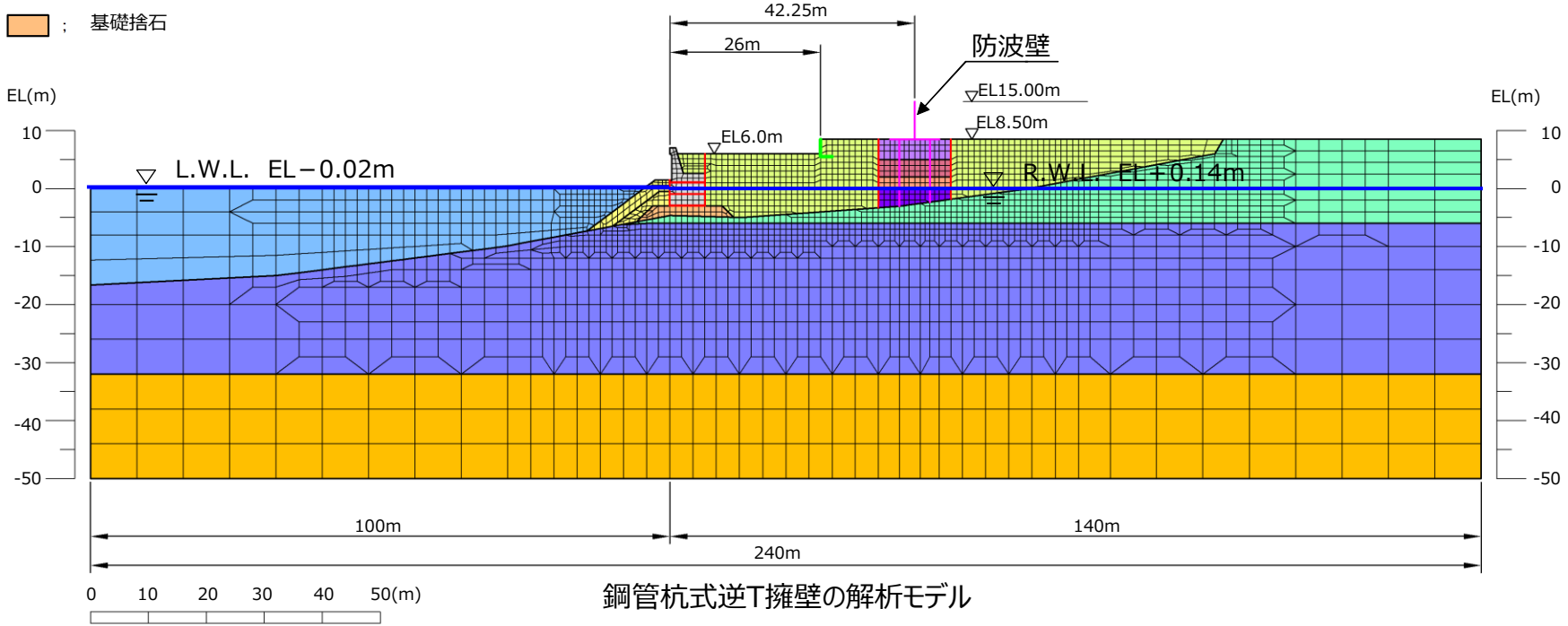
境界条件

■ 動的解析では、半無限地盤へのエネルギー散逸を評価するため、モデル側方及び底面に粘性境界を設ける。

入力地震動及び減衰定数

■ 入力地震動及び減衰係数については、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）と同様に設定する。

- 岩盤 (第①速度層)
- 岩盤 (第②速度層)
- 岩盤 (第③速度層)
- ジョイント要素
- 津波防波壁+基礎杭
- 埋戻土 (掘削ズリ)
- 改良地盤①
- 改良地盤②
- 施設護岸
- L型擁壁
- 改良地盤③
- 改良地盤④
- 被覆石 (捨石を含む)
- 基礎捨石

















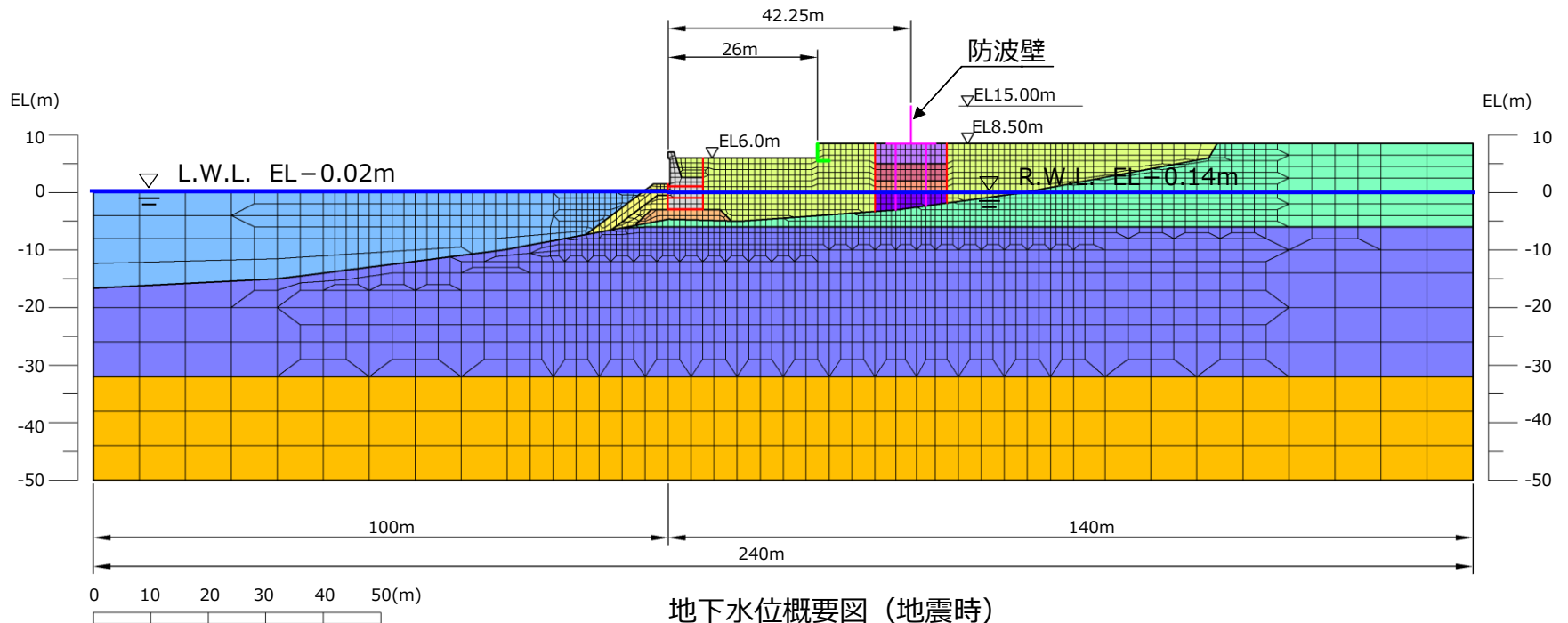
4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.1 地震時③

地下水水位の設定

- 構造成立性評価における地下水水位の設定に当たっては、港湾基準に基づく残留水圧を考慮するため、護岸前面は朔望平均干潮位（L.W.L.）とし、護岸より陸側の地下水水位は残留水位（R.W.L.）を設定する。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、設定する。

- | | | | | |
|--|---|--|---|---|
|  ; 岩盤（第①速度層） |  ; 岩盤（第②速度層） |  ; 岩盤（第③速度層） |  ; ジョイント要素 |  ; 津波防波壁+基礎杭 |
|  ; 埋戻土（掘削スリ） |  ; 改良地盤① |  ; 改良地盤② |  ; 施設護岸 |  ; L型擁壁 |
|  ; 改良地盤③ |  ; 改良地盤④ |  ; 被覆石（捨石を含む） | | |
|  ; 基礎捨石 | | | | |



4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.1 地震時④

材料種別		物理特性		強度特性			変形特性			設定根拠	
		単位体積重量		粘着力 C (kN/m ²)	せん断抵抗角 Φ _i (°)	せん断強度 T _r *1,2 (kN/m ²)	せん断弾性係数 G*1,3,4 (ヤング率 E)*5 (kN/m ²)	ポアソン比 ν	最大減衰定数 h _{max}		
		飽和, 湿潤 γ _{sat} , γ _t (kN/m ³)	水中 γ' (kN/m ³)								
地盤	埋戻土 (掘削スリ) T.P.+6.0m盤	気中	19.6	-	0	40.86	σ' _m sin40.86°	116700(σ' _m /98) ^{0.5}	0.33	0.24	(単位体積重量) ・埋戻土（掘削スリ），砂礫層，改良地盤は現地調査結果により設定 (粘着力) ・埋戻土（掘削スリ）は『設計事例集』に準拠し設定 ・改良地盤は『浸透固化処理工法技術マニュアル』に準拠し設定 (せん断抵抗角) ・埋戻土（掘削スリ）は液状化パラメータ設定支援環境FLIPSIM(Ver.3.0.1)により算定 ・地盤改良は原地盤相当（埋戻土（掘削スリ））の値を設定 (せん断強度) ・『FLIP取扱説明書』に示された定義式に基づき設定 (せん断弾性係数) ・液状化/ラメータ設定支援環境 FLIPSIM(Ver.3.0.1) により基準せん断弾性係数G _{ma} を算出し、『FLIP取扱説明書，p.8-2』に示された定義式に基づき設定 (ポアソン比) ・『設計事例集』に準拠し設定 (最大減衰定数) ・国土技術政策総合研究所HP公開の『一次元FLIP入力データ作成プログラム1D-MAKER 操作マニュアル』に準拠し設定
		水中	20.7	10.6	0	39.07	σ' _m sin39.07°	69650(σ' _m /98) ^{0.5}			
	埋戻土 (掘削スリ) T.P.+8.5m盤	気中	19.6	-	0	40.54	σ' _m sin40.54°	107600(σ' _m /98) ^{0.5}			
		水中	20.7	10.6	0	38.72	σ' _m sin38.72°	61240(σ' _m /98) ^{0.5}			
	改良地盤（上部） （気中）	19.6	-	628	38.00	628 cos38.00° +σ' _m sin38.00°	404600(σ' _m /98) ^{0.5}				
	改良地盤（中部） （気中）	19.6	-	490	40.54	490 cos40.54° +σ' _m sin40.54°	327900(σ' _m /98) ^{0.5}				
	改良地盤（下部） （気中）	19.6	-	1140		1140 cos40.54° +σ' _m sin40.54°	742900(σ' _m /98) ^{0.5}				
改良地盤 （水中）	20.7	10.6	1253	38.71	1253 cos38.71° +σ' _m sin38.71°	777300(σ' _m /98) ^{0.5}					
護岸構成材	施設護岸 （バラベツト）	24.0	-	-	-	-	(E=2.330×10 ⁷)	0.20	-	(単位体積重量) ・施設護岸は『港湾基準』及び『コンクリート標準示方書』に準拠し設定 (せん断弾性係数) ・地盤と同様 (ポアソン比) ・護岸は『コンクリート標準示方書』に準拠し設定	
	施設護岸 （上部コンクリート）	22.6	-	-	-	-	(E=2.040×10 ⁷)				
	施設護岸 （セルラーブロック） （コンクリート詰）	気中	23.0	-	-	-	-				(E=2.330×10 ⁷)
		水中	23.0	12.9	-	-	-				(E=2.330×10 ⁷)
施設護岸 （セルラーブロック） （栗石詰）	22.0	11.9	-	-	-	-	(E=2.330×10 ⁷)				

※1 σ'_mは各要素における平均有効拘束圧
 ※2 せん断強度式はτ_f=σ'_m sinφ_f + C cos φ_f
 ※3 せん断弾性係数の式はG=G_{ma}(σ'_m/σ'_{ma})^{mG}。ここにG_{ma}は基準平均有効拘束圧における基準せん断弾性係数，σ'_{ma}は基準平均有効拘束圧，mGは拘束圧依存性のパラメータ(標準値=0.5)。
 ※4 せん断弾性係数を求める際の基準平均有効拘束圧については，粘性土は層中央部における平均有効拘束圧を設定し，粘性土以外については一律98kN/m²(標準値)とする。
 ※5 線形材料については，変形特性としてヤング率を設定する。

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.1 地震時⑤

荷重及び荷重の組合せ

■ 地震時の2次元動的有限要素解析（有効応力）に用いる荷重の組合せを以下に示す。

検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物 荷重	動水圧
地震時	○	○	○	○	○	○	-	-	-	○

・積雪荷重

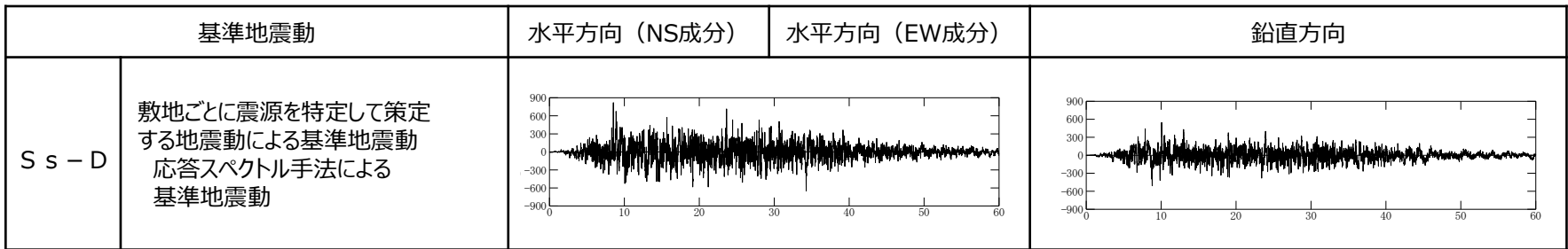
積雪荷重は0.7kN/m²とし、解析領域表面（海水を除く）に作用させる。

・風荷重

風荷重は、建築物の構造関係技術基準解説書に準拠して設定する。

・地震荷重

解析に用いた地震波は、3章で選定したS s -Dである。



※ 表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形[縦軸:加速度(cm/s²), 横軸:時間(s)]

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

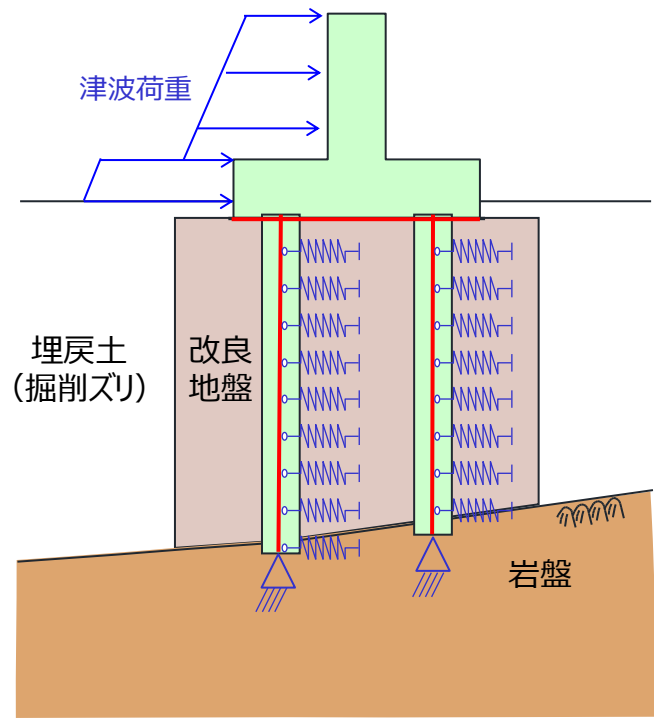
4.2.2 津波時①

解析の目的（2次元静的フレーム解析）

- 鋼管杭及び逆T擁壁の静的挙動評価（津波時）

モデル条件

- 作用荷重，断面力算定，部材照査は法線方向の杭間隔単位（4 m）で実施する。
- 津波による外力は杭の押し込み支持力，水平抵抗力で受け持つものとする。



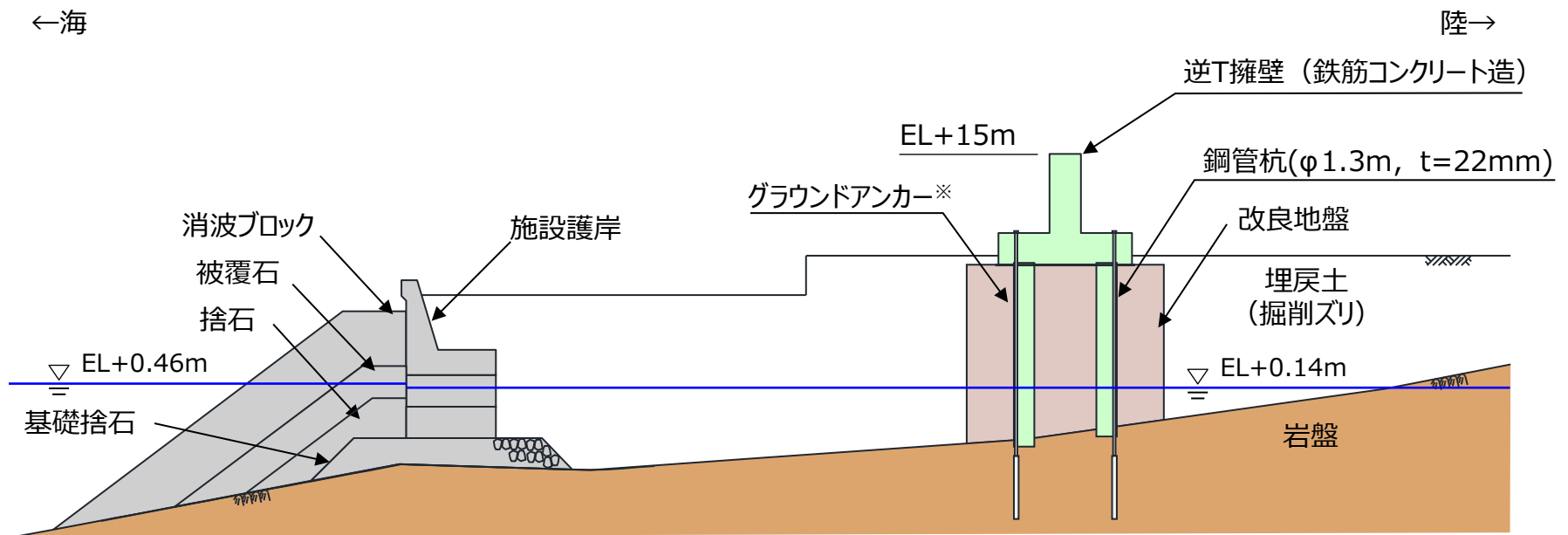
骨組計算モデル図（標準部）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.2 津波時②

地下水位の設定

- 津波荷重の算定潮位は朔望平均満潮位（H.W.L.）とし，津波時の構造成立性評価における地下水位は，施設護岸から逆T擁壁まで距離があることを考慮し，残留水位（R.W.L.）とする。
- 詳細設計段階においては，浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上，設定する。



※ グラウンドアンカーの効果を期待しなくても，耐震・耐津波安全性を担保している。

地下水位概要図（津波時）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.2 津波時③

荷重及び荷重の組合せ

■ 津波時の2次元静的フレーム解析に用いる荷重の組合せを以下に示す。

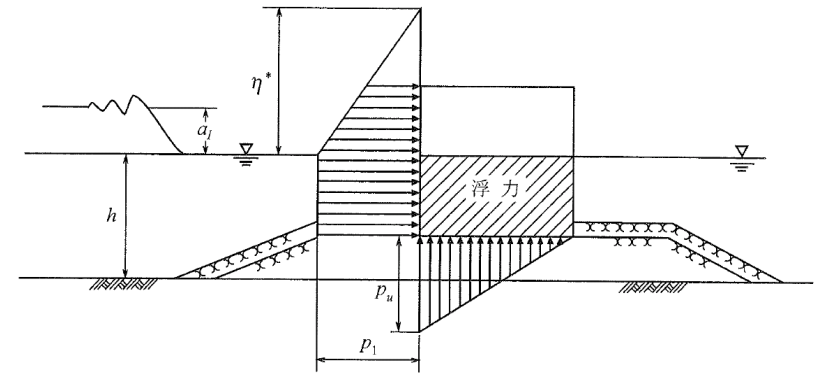
検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物 荷重	動水圧
津波時	○	—*	—*	○	○	—	—	○	○	—

※ 津波時の積雪荷重及び風荷重については、影響が軽微のため考慮しない。

・津波荷重及び漂流物荷重

構造成立性検討にあたっては、基準津波による津波荷重及び漂流物荷重を上回る津波荷重を保守的に設定する。防波壁に作用する津波荷重は、港湾基準に示されている式により算定し、擁壁の海側から作用させる。

- $\eta^* = 3.0 \times a_I$
- η^* : 静水面上の波圧作用高さ(m)
- a_I : 入射津波の静水圧上の高さ(振幅)(m)
- $P_1 = 2.2 \times \rho g \times a_I$
- P_1 : 静水面における波圧強度(kN/m²)
- ρg : 海水の単位体積重量(kN/m³)
- $P_u = P_1$
- P_u : 前面下端における揚圧力(kN/m²)



4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.3 鋼管杭の評価条件

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	(曲げ) 降伏モーメント (せん断) せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 (平成14年3月)
	津波時	2次元静的フレーム解析			

応力度照査

鋼管杭については，杭に発生する最大曲げモーメント M_{max} と降伏モーメント M_y との比が1以下となることを確認する。
また，せん断応力度 τ と降伏せん断応力度 τ_y との比が1以下となることを確認する。

【曲げ】

$$\frac{M_{max}}{M_y} \leq 1$$

M_{max} : 最大曲げモーメント (kN・m)
 M_y : 降伏モーメント (kN・m)

【せん断】

$$\frac{\tau}{\tau_y} \leq 1$$

τ : 発生せん断応力度 (N/mm²)
 τ_y : 降伏応力度 (N/mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.4 逆T擁壁の評価条件①

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
逆T擁壁	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書，構造性能照査編 2002年制定
	津波時	2次元静的フレーム解析			

応力度照査

コンクリートについては，曲げ圧縮応力度 σ_c と許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca} との比，およびせん断応力度 τ と許容せん断応力度 τ_a との比がそれぞれ 1 以下となることを確認する。

鉄筋については，引張応力度 σ_s と許容引張応力度 σ_{sa} との比が 1 以下となることを確認する。

【コンクリート】

【鉄筋】

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} \leq 1$$

σ_c : 曲げ圧縮応力度 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容曲げ応力度 (N/mm²)

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{sa}} \leq 1$$

σ_s : 引張応力度 (N /mm²)
 σ_{sa} : 許容引張応力度 (N/mm²)

$$\frac{\tau}{\tau_a} \leq 1$$

τ : せん断応力度 (N/mm²)
 τ_a : 許容せん断応力度 (N/mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.4 逆T擁壁の評価条件②

杭頭に対する断面照査

鋼管杭式逆T擁壁の杭頭に対する断面照査は、『杭基礎設計便覧（平成18年度改訂版）』に従い、せん断力Q及び軸力Nが作用する杭頭部での垂直方向と水平方向の支圧応力度（ σ_{cv} 、 σ_{ch} ）及び押抜きせん断応力度（ τ_v 、 τ_h ）を算定し、それぞれ許容応力度との比が1以下であることを確認する。

$$\frac{\sigma_{cv}}{\sigma_{ba}} \leq 1 \quad \frac{\sigma_{ch}}{\sigma_{ba}} \leq 1$$

σ_{cv} : 杭頭部での垂直方向の支圧応力度 (N/mm²)

σ_{ch} : 杭頭部での水平方向の支圧応力度 (N/mm²)

σ_{ba} : 杭頭部での許容支圧応力度 (N/mm²)

$$\frac{\tau_v}{\tau_{va}} \leq 1 \quad \frac{\tau_h}{\tau_{ha}} \leq 1$$

τ_v : 杭頭部での垂直方向の押抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_h : 杭頭部での水平方向の押抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_{va} : 杭頭部での垂直方向の許容押抜きせん断応力度 (N/mm²)

τ_{ha} : 杭頭部での水平方向の許容押抜きせん断応力度 (N/mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の解析条件

4.2.5 止水目地の評価

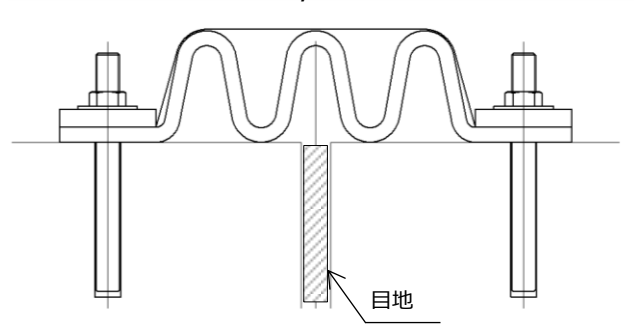
- 鋼管杭間の相対変位は、隣接する鋼管杭の杭長が概ね同等となることから、ほぼ生じないと想定される。
- 止水目地の許容変形量は、ゴムジョイントで460mm、シートジョイントで990mmであり、想定される変形量に応じた設置が可能であることから、遮水性は確保可能である。
- また、選択した止水目地が発生水圧に対して十分遮水できることを、詳細設計段階で試験等により確認する。

詳細設計段階における照査項目，許容限界

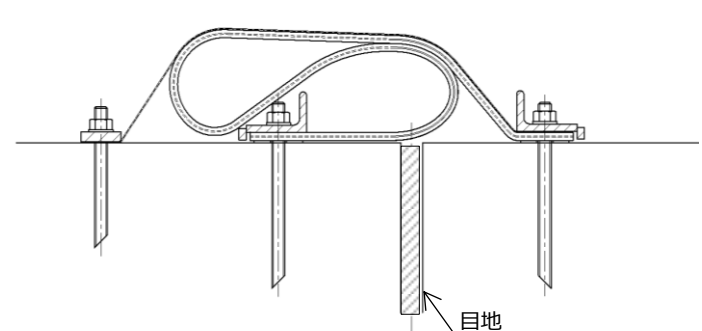
評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
止水目地	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	変形・水圧	設計で用いる許容限界	メーカー規格及び今後必要に応じて実施する性能試験に基づく許容変形量及び許容水圧以下とする。
	津波時	2次元静的フレーム解析			
止水目地の鋼製部材	地震時	—	曲げ・せん断	設計で用いる許容限界	「建築基準法施行令2006年6月」を踏まえた許容応力度とする。
	津波時	—			

止水目地の選定について

逆T擁壁間の止水目地は、想定される変位量に応じ仕様を決定する。



ゴムジョイント（許容変形量：460mm）



シートジョイント（許容変形量：990mm）

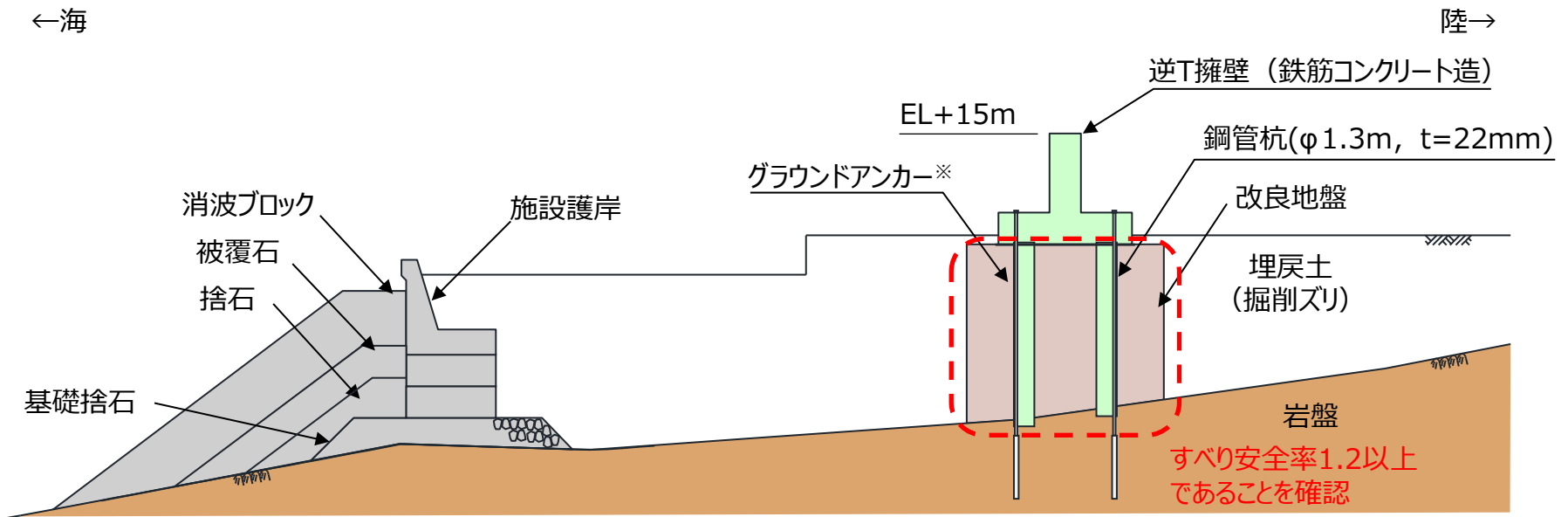
止水目地の設定例

4. 構造成立性評価における解析条件 4.2 (鋼管杭式逆T擁壁) の解析条件

4.2.6 改良地盤の評価条件

照査項目, 許容限界

評価部位	検討ケース※	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
改良地盤	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	すべり安全率	すべり安全率1.2以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド



※ グラウンドアンカーの効果을期待しなくても, 耐震・耐津波安全性を担保している。

2次元動的FEM解析での確認内容

- 4. 構造成立性評価における解析条件
 - 4.1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）
 - 4.2 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）
 - 4.3 防波壁（波返重力擁壁）**

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.1 地震時①

解析の目的（2次元FEM解析（有効応力解析））

- 重力擁壁，ケーソン等の施設及び埋戻土，岩盤等の地盤を含めた全体の動的挙動評価。
- 地盤物性及び液状化対象層を考慮した影響評価。

モデル条件

- 波返重力擁壁はケーソン護岸と一体化した構造のため線形平面要素でモデル化する。
- 岩盤及びMMRは線形平面要素でモデル化する。
- 埋戻土（掘削ズリ），砂礫層，改良地盤はマルチスプリング要素でモデル化する。
- 液状化評価対象層である埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層は液状化パラメータを設定する。
- 海水は流体要素でモデル化する。
- 防波壁と背後地盤など，要素間の滑り・剥離を考慮する箇所は，ジョイント要素でモデル化する。

モデル化領域

- 鉛直方向は，下端から十分な距離を確保するためEL-50mまでモデル化する。
- 水平方向は，海側，陸側とも十分な領域を確保するよう全幅240mでモデル化する。

地盤要素の要素高さ

- 地盤の要素高さは，最大周波数及び地盤のせん断波速度 V_s より求まる最大要素高さを上回らないように設定する。

$$H_{max} = \frac{1}{m} \cdot \lambda = \frac{1}{m} \cdot \frac{V_s}{f_{max}}$$

H_{max} : 最大要素高さ(m)
 λ : せん断波の波長(m)
 V_s : せん断波の速度(m/s)
 f_{max} : 考慮する地震動の最大周波数(Hz)
 m : 分割係数(=5とした)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）

4.3.1 地震時②

ジョイント要素

- 防波壁と背後地盤など、施設と地盤の間の滑り・剥離を考慮する箇所は、ジョイント要素を設定する。

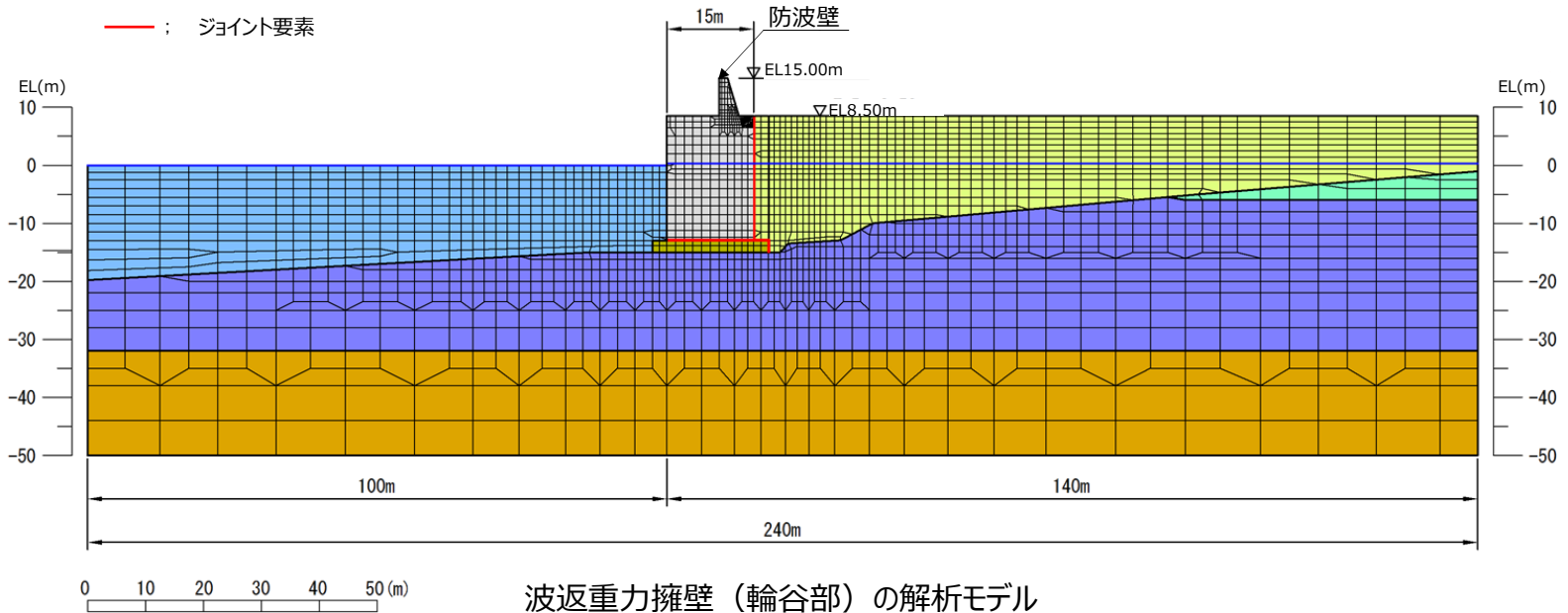
境界条件

- 動的解析では、半無限地盤へのエネルギー散逸を評価するため、モデル側方及び底面に粘性境界を設ける。

入力地震動及び減衰定数

- 入力地震動及び減衰係数については、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）及び防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）と同様に設定する。

- 岩盤（第①速度層）
- 岩盤（第②速度層）
- 岩盤（第③速度層）
- 埋戻土（掘削ズリ）
- MMR
- ジョイント要素



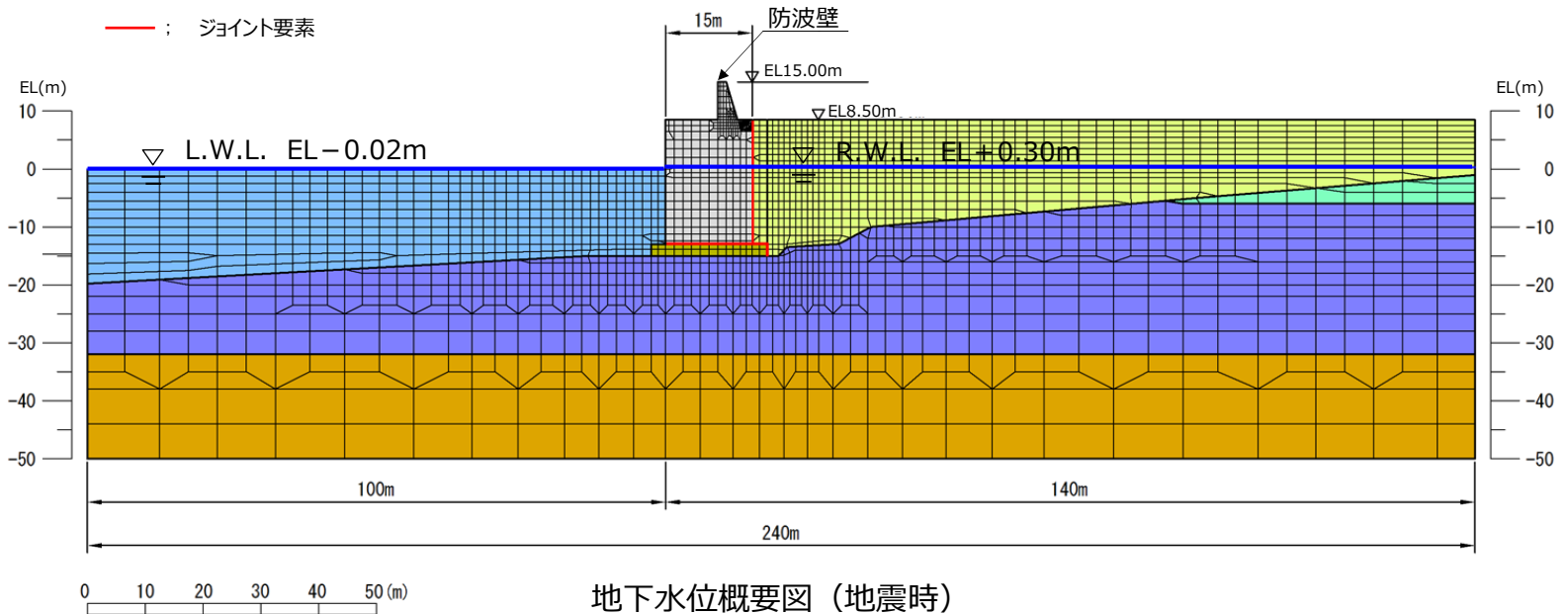
4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.1 地震時③

地下水位の設定

- 構造成立性評価における地下水位の設定に当たっては、港湾基準に基づく残留水圧を考慮するため、護岸前面は朔望平均干潮位（L.W.L.）とし、護岸より陸側の地下水位は残留水位（R.W.L.）を設定する。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、設定する。

- 岩盤（第①速度層）
- 岩盤（第②速度層）
- 岩盤（第③速度層）
- 埋戻土（掘削ズリ）
- MMR
- ジョイント要素



4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.1 地震時④

材料種別		物理特性		強度特性			変形特性			設定根拠	
		単位体積重量		粘着力 C (kN/m ²)	せん断抵抗角 Φ _f (°)	せん断強度 T _f ^{※1,2} (kN/m ²)	せん断弾性係数 G ^{※1,3,4} (ヤング率 E) ^{※5} (kN/m ²)	ポアソン比 ν	最大減衰定数 h _{max}		
		飽和, 湿潤 γ _{sat,γt} (kN/m ³)	水中 γ' (kN/m ³)								
地盤	埋戻土 (掘削スリ) (輪谷部) T.P.+8.5m盤	気中	19.6	-	0	41.16	σ' _m sin41.16°	125100(σ' _m /98) ^{0.5}	0.33	0.24	(単位体積重量) ・埋戻土（掘削スリ）は現地調査結果により設定 ・砂礫層，改良地盤は『港湾基準』に準拠し設定 (粘着力) ・埋戻土（掘削スリ），砂礫層は『設計事例集』に準拠し設定 ・改良地盤は『ジェットグラウト工法 技術資料（第23版），p.21』に準拠し設定 (せん断抵抗角) ・埋戻土（掘削スリ）は液化化パラメータ設定支援環境 FLIPSIM(Ver.3.0.1)により算定 ・攪拌系の改良である高圧噴射攪拌工法による改良のため，安全側である0°に設定 (せん断強度) ・『FLIP取扱説明書』に示された定義式に基づき設定 (せん断弾性係数) ・液化化パラメータ設定支援環境 FLIPSIM(Ver.3.0.1)により基準せん断弾性係数G _{ma} を算出し，『FLIP取扱説明書，p.8-2』に示された定義式に基づき設定 (ポアソン比) ・『設計事例集』に準拠し設定 (最大減衰定数) ・国土技術政策総合研究所HP公開の『一次元FLIP入力データ作成プログラム1D-MAKER 操作マニュアル』に準拠し設定
		水中	20.7	10.6	0	39.23	σ' _m sin39.23°	73560(σ' _m /98) ^{0.5}			
	埋戻土 (掘削スリ) (地盤改良部) T.P.+6.5m盤	気中	19.6	-	0	41.44	σ' _m sin41.44°	133200(σ' _m /98) ^{0.5}			
		水中	20.7	10.6	0	39.52	σ' _m sin39.52°	80890(σ' _m /98) ^{0.5}			
	埋戻土 (掘削スリ) (地盤改良部) T.P.+8.5m盤	気中	19.6	-	0	41.16	σ' _m sin41.16°	125100(σ' _m /98) ^{0.5}			
		水中	20.7	10.6	0	39.27	σ' _m sin39.27°	74450(σ' _m /98) ^{0.5}			
	砂礫層		20.0	9.9	0	38.49	σ' _m sin38.49°	55870(σ' _m /98) ^{0.5}			
	改良地盤		20.0	9.9	500	0	500	93980(σ' _m /98) ^{0.5}			
人工リーフ		20.0	9.9	20	35.00	20 cos35.00° +σ' _m sin35.00°	180000(σ' _m /98) ^{0.5}				
施設	重力擁壁 (上部)		24.0	-	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)	0.20	-	(単位体積重量) ・構造物は『港湾基準』及び『コンクリート標準示方書』に準拠し設定 (せん断弾性係数) ・地盤と同様 (ポアソン比) ・構造物は『コンクリート標準示方書』に準拠し設定
	重力擁壁 (下部)		22.6	-	-	-	-	(E=2.200×10 ⁷)			
	ケーソン (地盤改良部)	気中	22.9	-	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)			
		水中	22.9	12.8	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)			
	ケーソン (輪谷部)	気中	20.9	-	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)			
		水中	20.9	10.8	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)			
	MMR		24.0	13.9	-	-	-	(E=2.500×10 ⁷)			
消波ブロック (空隙率=50%)		11.3	6.3	-	-	-	(E=1.100×10 ⁷)				

※1 σ'_mは各要素における平均有効拘束圧
 ※2 せん断強度式はτ_f=σ'_m sinφ_f + C cos φ_f
 ※3 せん断弾性係数の式はG=G_{ma}(σ'_m/σ'_{ma})^{mG}。ここにG_{ma}は基準平均有効拘束圧における基準せん断弾性係数，σ'_{ma}は基準平均有効拘束圧，mGは拘束圧依存性のパラメータ(標準値=0.5)。
 ※4 せん断弾性係数を求める際の基準平均有効拘束圧については，粘性土は層中央部における平均有効拘束圧を設定し，粘性土以外については一律98kN/m²(標準値)とする。
 ※5 線形材料については，変形特性としてヤング率を設定する。

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.1 地震時⑤

荷重及び荷重の組合せ

■ 地震時の2次元動的有限要素解析（有効応力）に用いる荷重の組合せを以下に示す。

検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物 荷重	動水圧
地震時	○	○	○	○	○	○	—	—	—	○

・積雪荷重

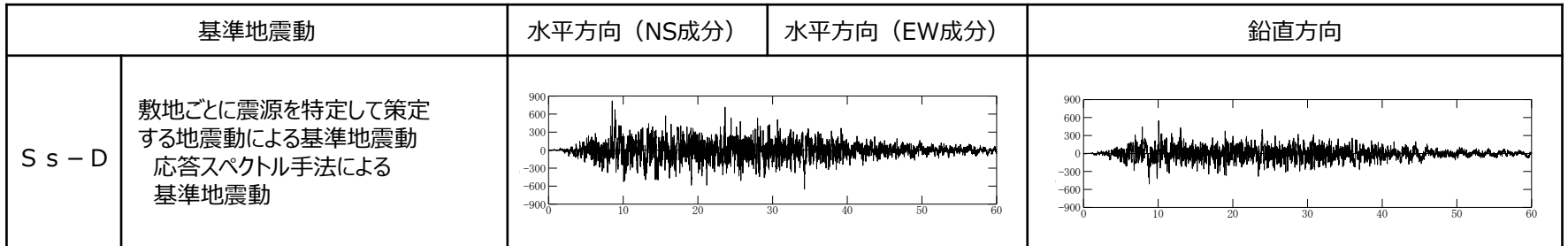
積雪荷重は0.7kN/m²とし、解析領域表面（海水を除く）に作用させる。

・風荷重

風荷重は、建築物の構造関係技術基準解説書に準拠して設定する。

・地震荷重

解析に用いた地震波は、3章で選定したS s -Dである。



※ 表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形[縦軸:加速度 (cm/s²), 横軸:時間 (s)]

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.2 津波時①

解析の目的（静的解析）

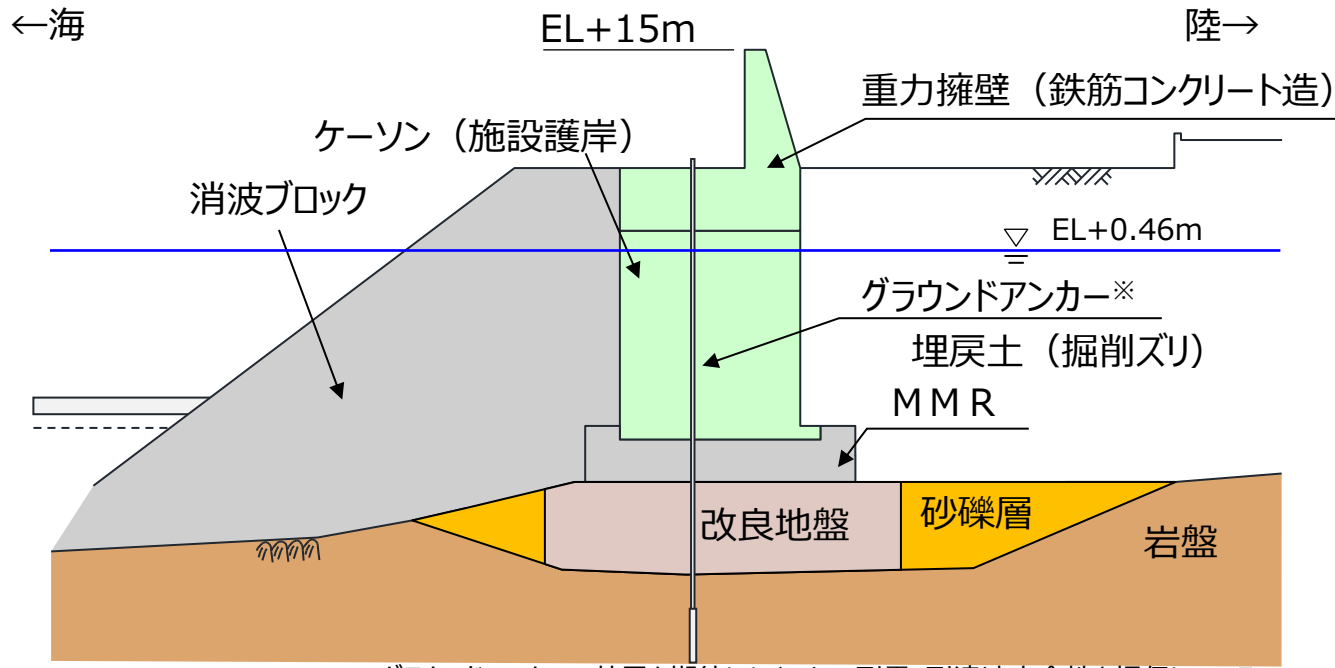
- 防波壁の静的挙動評価（津波時）

荷重モデル

- 津波防護壁の部材照査は、押波時の荷重を考慮する。津波時の荷重モデルを以下に示す。

地下水位の設定

- 津波荷重の算定潮位は朔望平均満潮位（H.W.L.）とし、津波時の構造成立性評価における地下水位は、朔望平均満潮位（H.W.L.）とする。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ、保守性を確認の上、設定する。



※ グラウンドアンカーの効果を期待しなくても、耐震・耐津波安全性を担保している。

地下水位概要図（津波時）

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.2 津波時②

荷重及び荷重の組合せ

■ 津波時の静的解析に用いる荷重の組合せを以下に示す。

検討 ケース	常時荷重					短期荷重				
	自重	積雪荷重	風荷重	土圧	水圧	地震荷重	余震荷重	津波荷重	漂流物荷重	動水圧
地震時	○	-※	-※	○	○	-	-	○	-	-

※ 津波時の積雪荷重及び風荷重については、影響が軽微のため考慮しない。

・津波荷重

構造成立性検討にあたっては、基準津波による津波荷重及び漂流物荷重を上回る津波荷重を保守的に設定する。防波壁に作用する津波荷重は、港湾基準に示されている式により算定し、擁壁の海側から作用させる。

$$\eta^* = 3.0 \times a_I$$

η^* : 静水面上の波圧作用高さ(m)

a_I : 入射津波の静水圧上の高さ(振幅)(m)

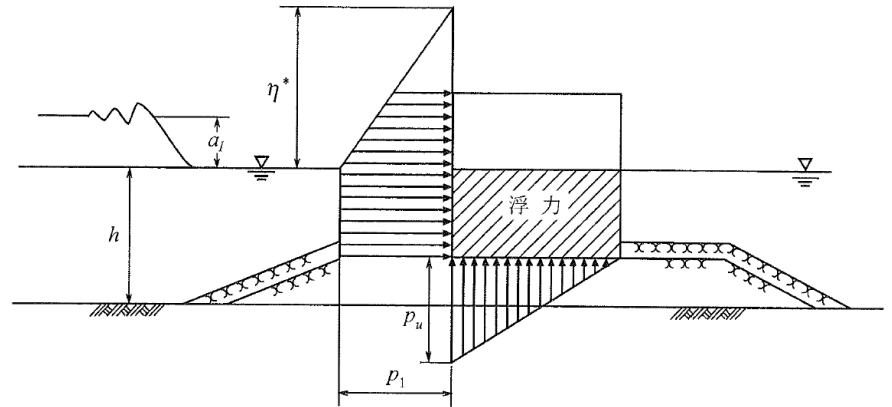
$$P_1 = 2.2 \times \rho g \times a_I$$

P_1 : 静水面における波圧強度(kN/m²)

ρg : 海水の単位体積重量(kN/m³)

$$P_u = P_1$$

P_u : 前面下端における揚圧力(kN/m²)



・漂流物荷重

構造成立性検討に用いる津波荷重が、基準津波による津波荷重 + 漂流物荷重よりも十分大きいことから、構造成立性検討においては、漂流物荷重は考慮しない。

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.3 重力擁壁の評価条件

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
重力擁壁	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書，構造性能照査編 2002年制定
	津波時※	静的解析			

※ 津波時の検討断面は，基準津波の津波高さが比較的高い輪谷部とする。

応力度照査

コンクリートについては，曲げ圧縮応力度 σ_c と許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca} との比，およびせん断応力度 τ と許容せん断応力度 τ_a との比がそれぞれ 1 以下となることを確認する。

鉄筋については，引張応力度 σ_s と許容引張応力度 σ_{sa} との比が 1 以下となることを確認する。

【コンクリート】

【鉄筋】

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} \leq 1$$

σ_c : 曲げ圧縮応力度 (N/mm²)
 σ_{ca} : 許容曲げ応力度 (N /mm²)

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{sa}} \leq 1$$

σ_s : 引張応力度 (kN・m)
 σ_{sa} : 許容引張応力度 (kN・m)

$$\frac{\tau}{\tau_a} \leq 1$$

τ : せん断応力度 (N /mm²)
 τ_a : 許容せん断応力度 (N /mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.4 ケーソンの評価条件

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
ケーソン	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書，構造性能照査編， 2002年制定
	津波時	—	—	—	—

応力度照査

ケーソンについては，ケーソン内に発生するせん断応力度 τ とコンクリートのみで負担できる許容せん断応力度 f_s との比が1以下となることを確認する。

$$\frac{\tau}{f_s} \leq 1$$

τ : せん断応力度 (N/mm²)

f_s : コンクリートのみで負担できる許容せん断応力度 (N/mm²)

4. 構造成立性評価における解析条件 4.3防波壁（波返重力擁壁）の解析条件

4.3.5 止水目地の評価条件

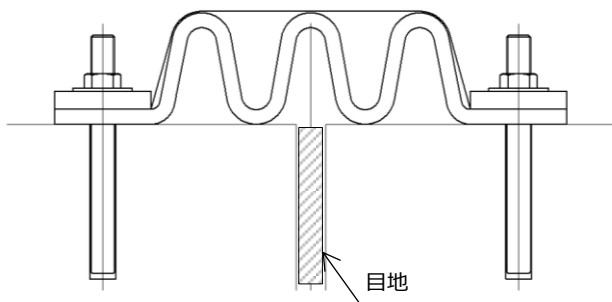
- ケーソン間の相対変位は、隣接するケーソンの高さが概ね同等となることから、ほぼ生じないと想定される。
- 止水目地の許容変形量は、ゴムジョイントで460mm、シートジョイントで990mmであり、想定される変形量に応じた設置が可能であることから、遮水性は確保可能である。
- また、選択した止水目地が発生水圧に対して十分遮水できることを、詳細設計段階で試験等により確認する。

詳細設計段階における照査項目、許容限界

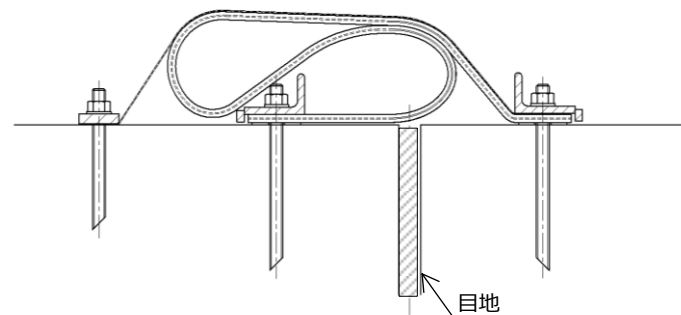
評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
止水目地	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	変形・水圧		メーカー規格及び今後必要に応じて実施する性能試験に基づく許容変形量及び許容水圧以下とする。
	津波時	静的解析			
止水目地の 鋼製部材	地震時	—	曲げ・せん断		「建築基準法施行令2006年6月」を踏まえた許容応力度とする。
	津波時	—			

止水目地の選定について

重力擁壁間の止水目地は、想定される変位量に応じ仕様を決定する。



ゴムジョイント（許容変形量：460mm）



シートジョイント（許容変形量：990mm）

止水目地の設定例

5. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果
（断面：地盤改良部）

5. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部) 5.1鋼管杭

5.1.1 地震時

- 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）（地盤改良部）のうち、鋼管杭の地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- 鋼管杭に厳しい損傷モード（曲げ、せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても、構造成立性が確保されることを確認した。

【鋼管杭】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	(曲げ)降伏モーメント (せん断)せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 (平成14年3月)

- 降伏モーメントに対する照査（最小安全率時）

評価部位	最小安全率となる部位	地震動	時刻 (s)	最大曲げモーメント M_{max} (kN・m)	降伏モーメント M_y (kN・m)	最小安全率 M_y/M_{max}	判定 (> 1.0)
鋼管杭	地中部※ 【4重管構造】	S s-D	17.63	15,427	23,679	1.53	OK

- 降伏応力に対する照査（最小安全率時）

評価部位	最小安全率となる部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 τ (N/mm ²)	降伏応力 τ_y (N/mm ²)	最小安全率 τ_y/τ	判定 (> 1.0)
鋼管杭	地中部※ 【4重管構造】	せん断	S s-D	17.63	13	182	14.00	OK

※ 地中部【4重管構造】は、照査値が最も大きくなる外側から2つ目の鋼管杭φ2000(SKK490)の数値を示す。

5. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部) 5.1鋼管杭

5.1.2 津波時

- 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）（地盤改良部）のうち，鋼管杭の津波時における照査結果を以下に示す。
- 津波時においても，構造成立性が確保されることを確認した。

【鋼管杭】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	津波時	2次元静的フレーム解析	曲げせん断	(曲げ)降伏モーメント (せん断)せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）

- 降伏モーメントに対する照査

評価部位	最小安全率となる部位	最大曲げモーメント M_{max} (kN・m)	降伏モーメント M_y (kN・m)	最小安全率 M_y/M_{max}	判定 (> 1.0)
鋼管杭	地上部 【1重管構造】	6,119	14,530	2.37	OK

- 降伏応力に対する照査

評価部位	最小安全率となる部位	照査項目	発生応力 τ (N/mm ²)	降伏応力 τ_y (N/mm ²)	最小安全率 τ_y/τ	判定 (> 1.0)
鋼管杭	地上部 【1重管構造】	せん断	17	182	10.70	OK

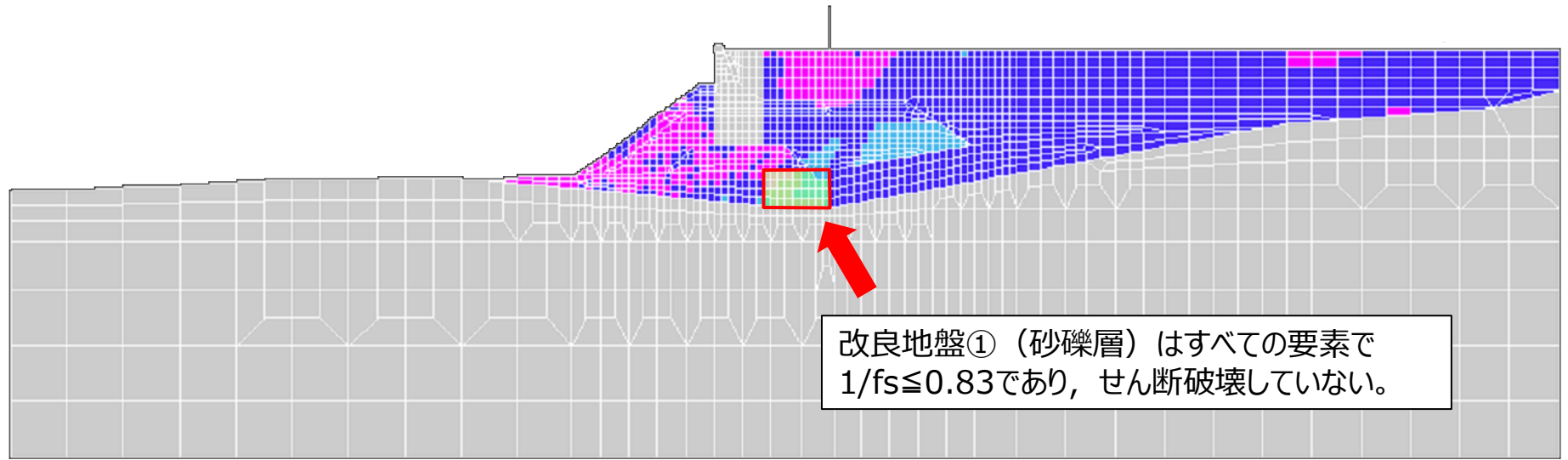
5. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

5.2 改良地盤①（砂礫層）

- 改良地盤①（砂礫層）の地震時における全時刻での局所安全率の逆数(1/fs)の分布を以下に示す。
- 改良地盤①（砂礫層）は、局所安全率の逆数1/fsがすべての要素で $1/fs \leq 0.83$ ($fs \geq 1.2$) であり、破壊領域が存在しないことから、すべり安全率1.2以上を確保できる。

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
改良地盤① (砂礫層)	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	すべり安全率	すべり安全率1.2以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド

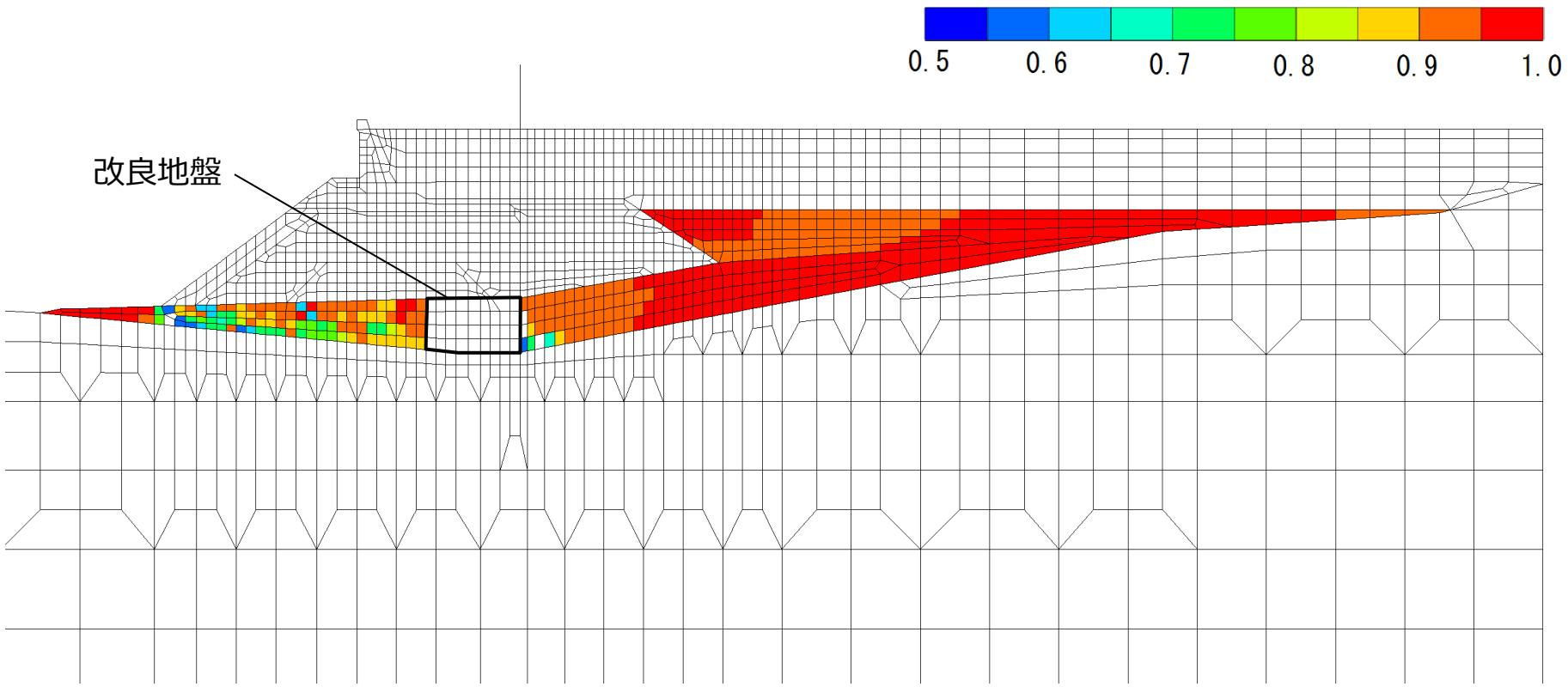


全時刻での局所安全率の逆数の分布

5. 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

5.3 周辺地盤の液状化状況

- 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）（地盤改良部）の地震時における全時刻での過剰間隙水圧比の分布を以下に示す。
- 防波壁周辺の地盤のうち、地下水位以深の埋戻土（掘削ズリ）、砂礫層において液状化をしていることを確認した。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、地下水位を設定する。



過剰間隙水圧比分布図（時刻歴最大値）※

※過剰間隙水圧比0.95を超えている層で液状化している。

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果
（断面：一般部）

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部) 6.1鋼管杭

6.1.1 地震時

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）のうち，鋼管杭の地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- 鋼管杭に厳しい損傷モード（曲げ，せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても，構造成立性が確保されることを確認した。

【鋼管杭】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	(曲げ)降伏モーメント (せん断)せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編 (平成14年3月)

- 降伏モーメントに対する照査（最小安全率時）

評価部位	地震動	時刻 (s)	最大曲げモーメント M_{max} (kN・m)	降伏モーメント M_y (kN・m)	最小安全率 M_y/M_{max}	判定 (> 1.0)
鋼管杭	S s -D	8.59	857	6,732	7.85	OK

- 降伏応力に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 τ (N/mm ²)	降伏応力 τ_y (N/mm ²)	最小安全率 τ_y/τ	判定 (> 1.0)
鋼管杭	せん断	S s -D	19.19	8	182	22.75	OK

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部) 6.1鋼管杭

6.1.2 津波時

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）のうち，鋼管杭の津波時における照査結果を以下に示す。
- 津波時においても，構造成立性が確保されることを確認した。

【鋼管杭】

■ 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	地震時	2次元動的フレーム解析	曲げせん断	(曲げ)降伏モーメント (せん断)せん断応力度	道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）

■ 降伏モーメントに対する照査

評価部位	最大曲げモーメント M_{max} (kN・m)	降伏モーメント M_y (kN・m)	最小安全率 M_y/M_{max}	判定 (> 1.0)
鋼管杭	1,668	7,158	4.29	OK

■ 降伏応力に対する照査

評価部位	照査項目	発生応力 τ (N/mm ²)	降伏応力 τ_y (N/mm ²)	最小安全率 τ_y/τ	判定 (> 1.0)
鋼管杭	せん断	21	182	8.66	OK

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部) 6.2逆T擁壁

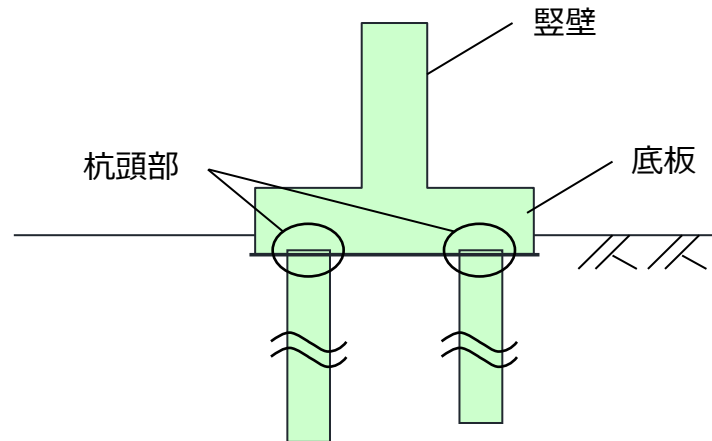
6.2.1 地震時①

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）のうち，逆T擁壁の地震時における最小安全率時刻での照査結果を次頁に示す。
- 逆T擁壁に厳しい損傷モード（曲げ，せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても，構造成立性が確保されることを確認した。

【逆T擁壁】

■ 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
逆T擁壁	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書， 構造性能照査編， 2002年制定



逆T擁壁の評価部位

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部) 6.2逆T擁壁

6.2.1 地震時②

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）のうち，逆T擁壁の地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- 逆T擁壁に厳しい損傷モード（曲げ，せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても，構造成立性が確保されることを確認した。

■ 短期許容応力に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
豎壁	曲げ・軸力	S s - D	19.19	曲げ圧縮応力度 σ_c	3.9	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	4.61	OK
			19.19	引張応力度 σ_s	194.9	許容引張応力度 σ_{sa}	323	1.65	OK
	せん断		29.65	せん断応力度 τ	0.26	許容せん断応力度 τ_a	0.9	3.46	OK
底板	曲げ・軸力		29.65	曲げ圧縮応力度 σ_c	4.1	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	4.39	OK
			29.65	引張応力度 σ_s	184.2	許容引張応力度 σ_{sa}	323	1.75	OK
	せん断		29.65	せん断応力度 τ	0.49	許容せん断応力度 τ_a	0.9	1.83	OK
杭頭部	押込み力に対する照査		29.65	垂直支圧応力度 σ_{cv}	4.8	許容支圧応力度 σ_{ba}	14.4	3.00	OK
			29.65	押抜きせん断応力度 τ_v	0.37	許容押抜きせん断応力度 τ_{va}	0.9	2.43	OK
	水平力に対する照査		19.19	水平支圧応力度 σ_{ch}	2.5	許容支圧応力度 σ_{ba}	14.4	5.76	OK
		19.19	押抜きせん断応力度 τ_h	0.19	許容押抜きせん断応力度 τ_{ha}	0.9	4.73	OK	

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部) 6.2逆T擁壁

6.2.2 津波時

【逆T擁壁】

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）のうち、逆T擁壁の津波時における照査結果を以下に示す。
- 津波時においても、構造成立性が確保されることを確認した。

■ 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
逆T擁壁	津波時	2次元静的フレーム解析	曲げせん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書， 構造成立性照査編， 2002年制定

■ 短期許容応力に対する照査

評価部位	照査項目	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力/発生応力)	判定 (> 1.0)
豎壁	曲げ・軸力	曲げ圧縮応力度 σ_c	3.6	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	5.00	OK
		引張応力度 σ_s	153.6	許容引張応力度 σ_{sa}	323	2.10	OK
	せん断	せん断応力度 τ	0.39	許容せん断応力度 τ_a	0.9	2.30	OK
杭頭部	押込み力に対する照査	垂直支圧応力度 σ_{cv}	2.8	許容支圧応力度 σ_{ba}	14.4	5.14	OK
		押抜きせん断応力度 τ_v	0.22	許容押抜きせん断応力度 τ_{va}	0.9	4.09	OK
	水平力に対する照査	水平支圧応力度 σ_{ch}	6.6	許容支圧応力度 σ_{ba}	14.4	2.18	OK
		押抜きせん断応力度 τ_h	0.50	許容押抜きせん断応力度 τ_{ha}	0.9	1.80	OK

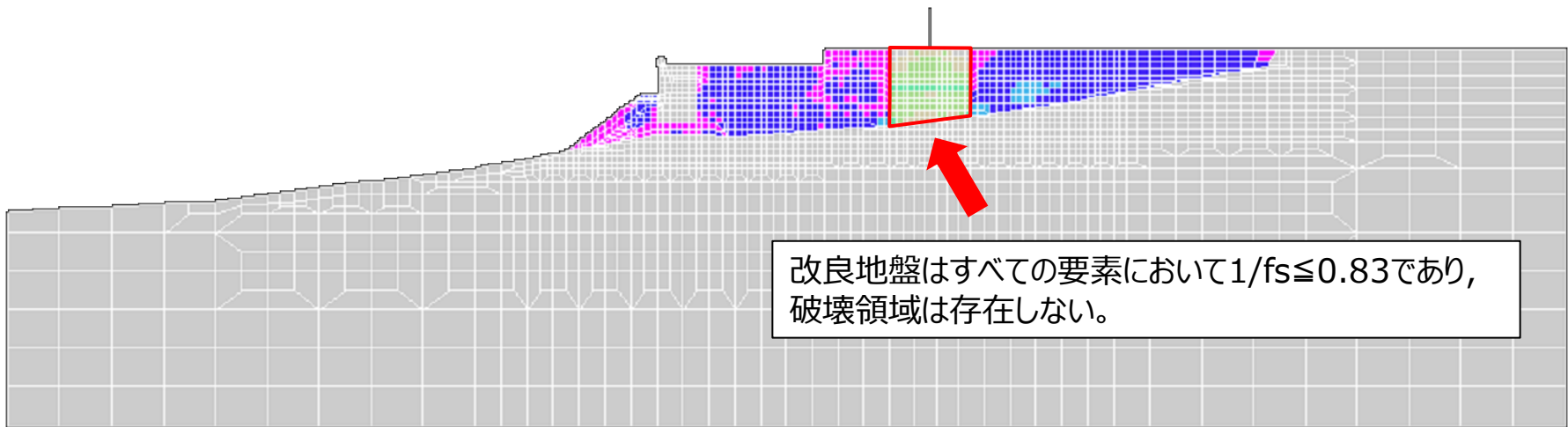
6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部)

6.3 改良地盤

- 改良地盤の地震時における全時刻での局所安全率の逆数($1/f_s$)の分布を以下に示す。
- 改良地盤は、局所安全率の逆数 $1/f_s$ がすべての要素で $1/f_s \leq 0.83$ ($f_s \geq 1.2$) であり、破壊領域が存在しないことから、すべり安全率1.2以上を確保できる。

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
改良地盤	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	すべり安全率	すべり安全率1.2以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド

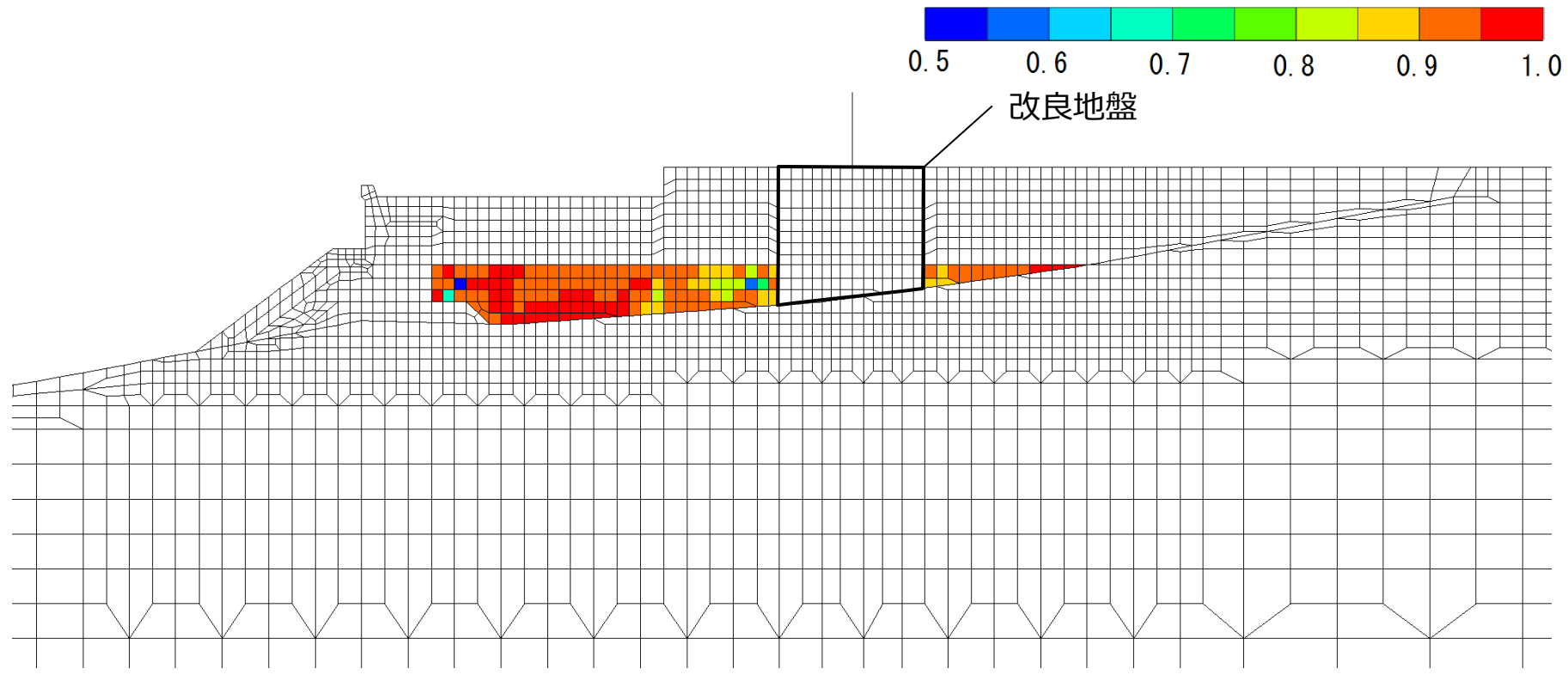


全時刻での局所安全率の逆数の分布

6. 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）の構造成立性検討結果(断面：一般部)

6.4 周辺地盤の液状化状況

- 防波壁（鋼管杭式逆T擁壁）（一般部）の地震時における全時刻での過剰間隙水圧比の分布を以下に示す。
- 防波壁周辺の地盤のうち、地下水位以深の埋戻土（掘削ズリ）において液状化をしていることを確認した。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、地下水位を設定する。



過剰間隙水圧比分布図（時刻歴最大値）※

※過剰間隙水圧比0.95を超えている層で液状化している。

7. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果 (断面：輪谷部)

7. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：輪谷部) 7.1重力擁壁

7.1.1 地震時

- 防波壁（波返重力擁壁）（輪谷部）のうち，重力擁壁の地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- 重力擁壁に厳しい損傷モード（曲げ，せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても，構造成立性が確保されることを確認した。

【重力擁壁】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
重力擁壁	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書， 構造性能照査編， 2002年制定

- 短期許容応力度に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
重力擁壁	曲げ・軸力	S s -D	25.75	曲げ圧縮応力度 σ_c	1.5	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	12.00	OK
			25.75	引張応力度 σ_s	72.7	許容引張応力度 σ_{sa}	323	4.44	OK
	19.18		せん断応力度 τ	0.19	許容せん断応力度 τ_a	0.90	4.73	OK	

7. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：輪谷部) 7.1重力擁壁

7.1.2 津波時

- 防波壁（波返重力擁壁）（輪谷部）のうち，重力擁壁の津波時における照査結果を以下に示す。
- 津波時においても，構造成立性が確保されることを確認した。

【重力擁壁】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
重力擁壁	津波時	静的解析	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書， 構造性能照査編， 2002年制定

- 短期許容応力度に対する照査

評価部位	照査項目	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力／ 発生応力)	判定 (> 1.0)
重力擁壁	曲げ・軸力	曲げ圧縮応力度 σ_c	2.8	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	6.42	OK
		引張応力度 σ_s	126.6	許容引張応力度 σ_{sa}	323	2.55	OK
	せん断	せん断応力度 τ	0.35	許容せん断応力度 τ_a	0.90	2.57	OK

7. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：輪谷部)

7.2 ケーソン

- 防波壁（波返重力擁壁）（輪谷部）のうち、ケーソンの地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- ケーソンに厳しい損傷モード（せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても、構造成立性が確保されることを確認した。

【ケーソン】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
ケーソン	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書，構造性能照査編， 2002年制定
	津波時	—	—	—	—

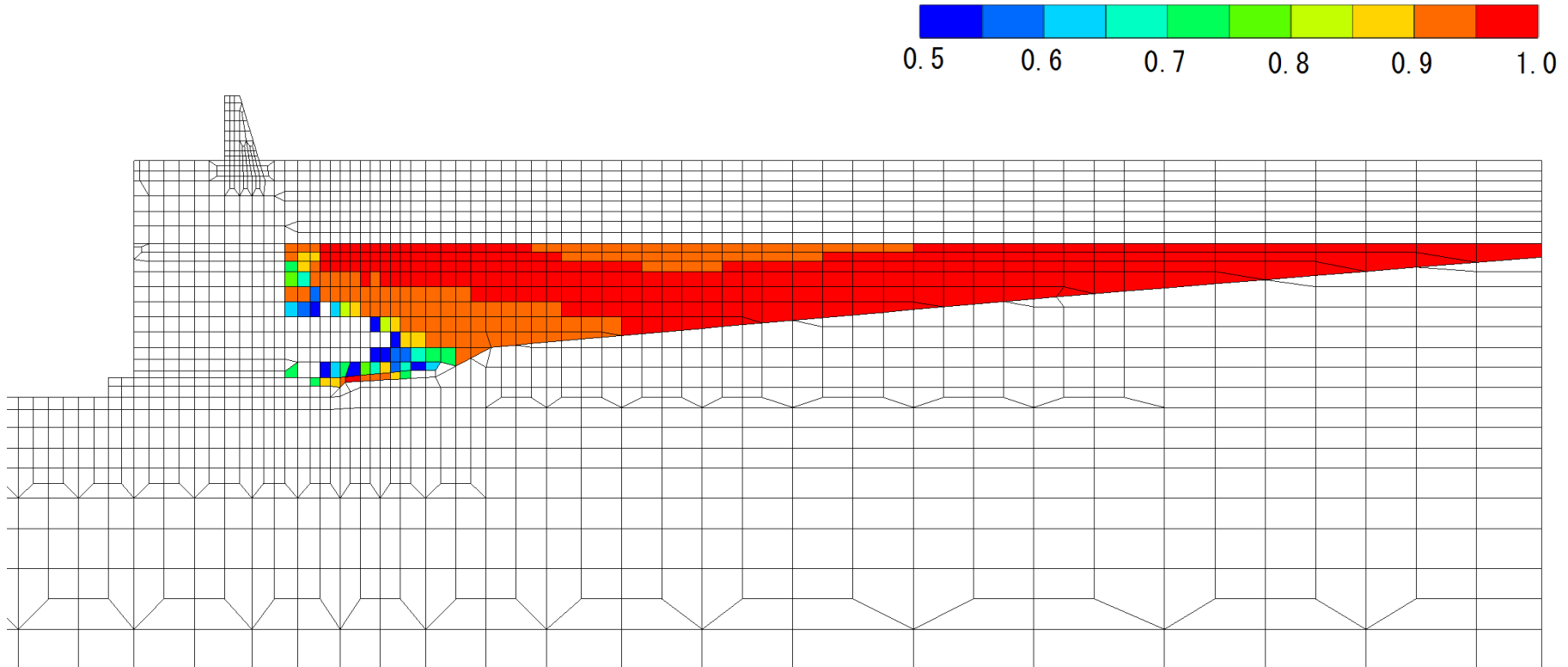
- 短期許容応力度に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
				せん断応力度 τ	0.66	許容せん断 応力度 f_s	0.90		
ケーソン	せん断	S s -D	14.47	せん断応力度 τ	0.66	許容せん断 応力度 f_s	0.90	1.36	OK

7. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：輪谷部)

7.3 周辺地盤の液状化状況

- 防波壁（波返重力擁壁）（輪谷部）の地震時における全時刻での過剰間隙水圧比の分布を以下に示す。
- 防波壁周辺の地盤のうち、地下水位以深の埋戻土（掘削ズリ）において液状化をしていることを確認した。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、地下水位を設定する。



過剰間隙水圧比分布図（時刻歴最大値）※

※過剰間隙水圧比0.95を超えている層で液状化している。

8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果 （断面：地盤改良部）

8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

8.1 重力擁壁

- 防波壁（波返重力擁壁）（地盤改良部）のうち、重力擁壁の地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- 重力擁壁に厳しい損傷モード（曲げ、せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても、構造成立性が確保されることを確認した。

【重力擁壁】

■ 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
重力擁壁	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	曲げ せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書, 構造性能照査編, 2002年制定

■ 短期許容応力度に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
重力擁壁	曲げ・軸力	S s -D	28.10	曲げ圧縮応力度 σ_c	2.3	許容曲げ応力度 σ_{ca}	18	7.82	OK
			28.10	引張応力度 σ_s	118.1	許容引張応力度 σ_{sa}	323	2.73	OK
	せん断		28.10	せん断応力度 τ	0.24	許容せん断応力度 τ_a	0.90	3.75	OK

8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

8.2 ケーソン

- 防波壁（波返重力擁壁）（地盤改良部）のうち、ケーソンの地震時における最小安全率時刻での照査結果を以下に示す。
- ケーソンに厳しい損傷モード（せん断照査の最小安全率時刻）を想定しても、構造成立性が確保されることを確認した。

【ケーソン】

- 照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
ケーソン	地震時	2次元動的FEM解析 (有効応力解析)	せん断	短期許容応力度	コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002年制定
	津波時	—	—	—	—

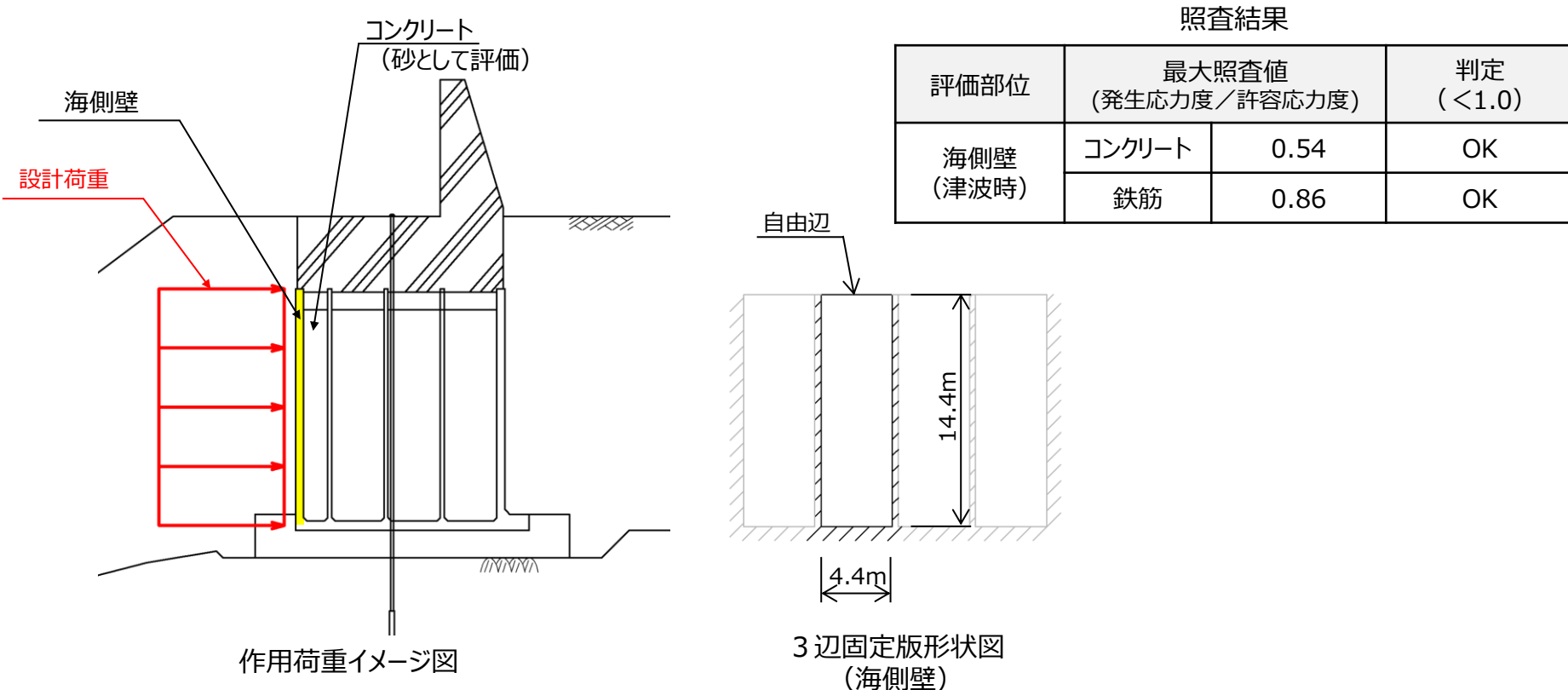
- 短期許容応力度に対する照査（最小安全率時）

評価部位	照査項目	地震動	時刻 (s)	発生応力 (N/mm ²)		許容応力 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
				せん断応力度 τ	0.611	許容せん断 応力度 f_s	0.90		
ケーソン	せん断	S s-D	9.00	せん断応力度 τ	0.611	許容せん断 応力度 f_s	0.90	1.47	OK

8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

8.2 ケーソン【参考資料】

- 防波壁（波返重力擁壁）（地盤改良部）のケーソンについて、海側壁の照査を行った。
- 海側壁においては、地震時に作用する中詰材の地震時土圧よりも津波時に作用する津波波圧の方が大きいため、構造成立性の照査に当たっては津波時の照査を行う。
- なお、照査に当たっては、海側第1隔室内はコンクリートを充填しているが、保守的に砂として評価する。
- また、海側壁の断面力は、隔壁及び底版で支持された3辺固定版として算出し、許容限界を短期許容応力度として、コンクリートの圧縮応力度及び鉄筋の引張応力度について照査を行った。
- 照査結果を以下に示す。最大照査値が1.0を下回り、海側第1隔室内の中詰材をコンクリートと評価した場合は更に十分な裕度が確保できることを確認した。



8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

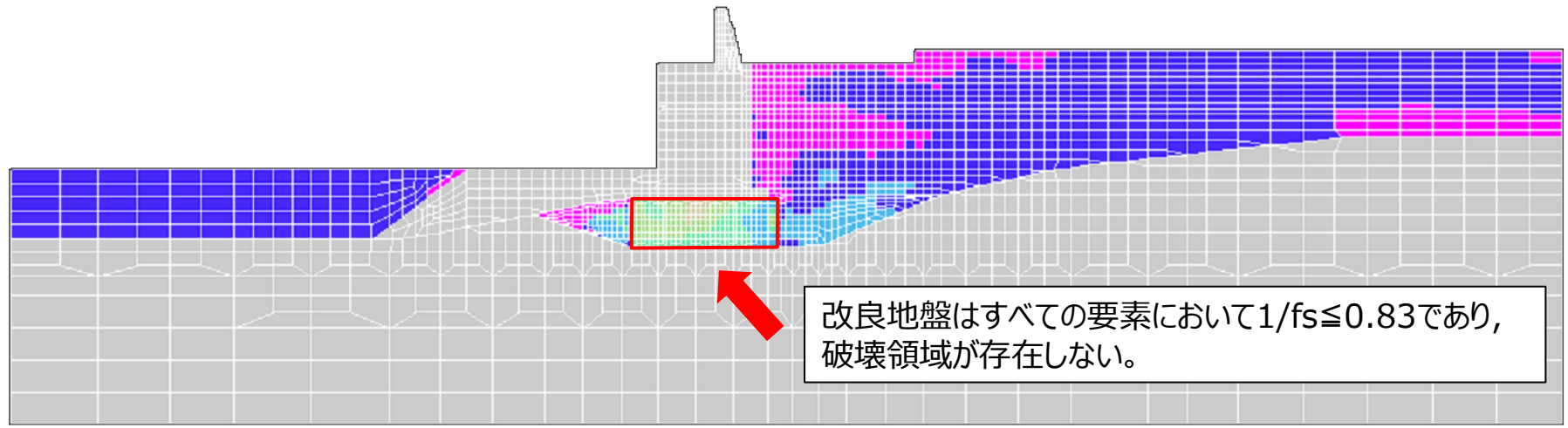
8.3 改良地盤

- 改良地盤の地震時における全時刻での局所安全率の逆数(1/fs)の分布を以下に示す。
- 改良地盤は、局所安全率の逆数1/fsがすべての要素で $1/fs \leq 0.83$ ($fs \geq 1.2$) であり、破壊領域が存在しないことから、すべり安全率1.2以上を確保できる。

照査項目，許容限界

評価部位	検討ケース※	解析方法	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
改良地盤	地震時	2次元動的 F E M解析 (有効応力解析)	すべり安全率	すべり安全率1.2以上	耐津波設計に係る工認審査ガイド

※ 津波荷重は上部工にのみ作用することから、地盤改良部への影響は地震時に比べて小さいと考えられるため、検討を省略する。

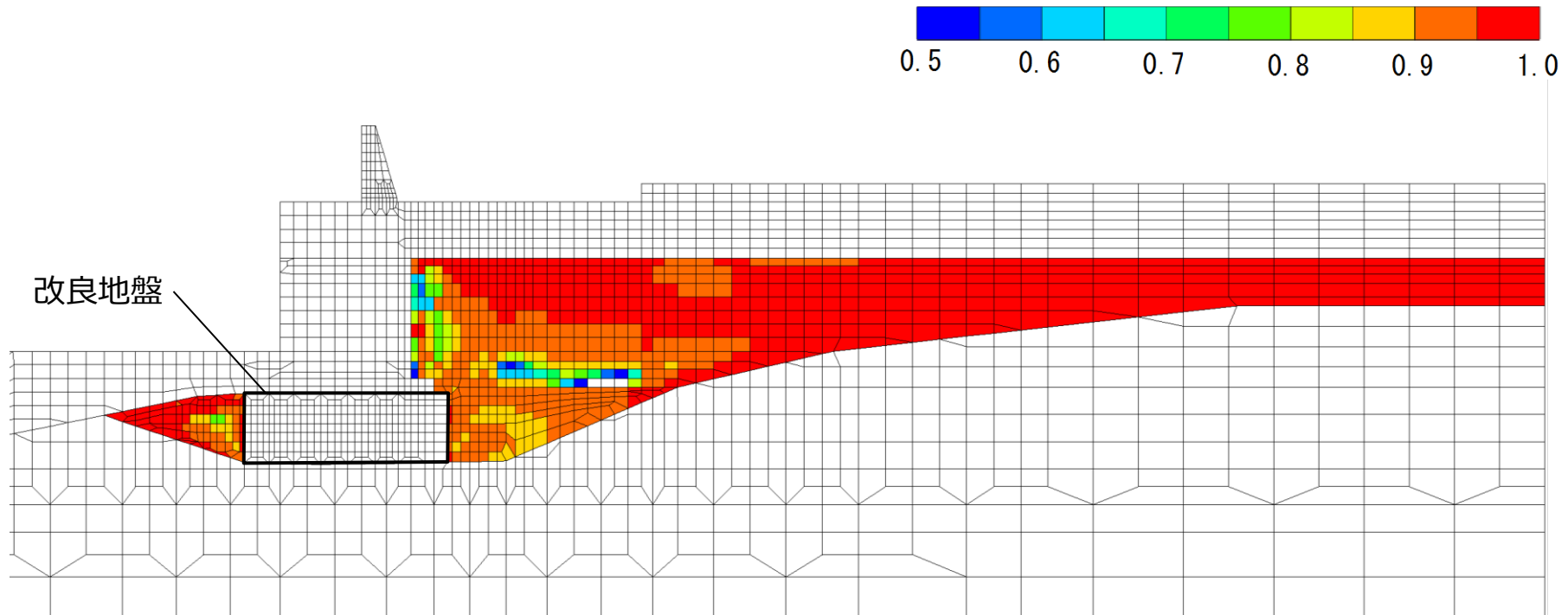


全時刻での局所安全率の逆数の分布

8. 防波壁（波返重力擁壁）の構造成立性検討結果(断面：地盤改良部)

8.4 周辺地盤の液状化状況

- 防波壁（波返重力擁壁）（地盤改良部）の地震時における全時刻での過剰間隙水圧比の分布を以下に示す。
- 防波壁周辺の地盤のうち、地下水位以深の埋戻土（掘削ズリ）、砂礫層において液状化をしていることを確認した。
- 詳細設計段階においては、浸透流解析の結果を踏まえ保守性を確認の上、地下水位を設定する。



過剰間隙水圧比分布図（時刻歴最大値）※

※過剰間隙水圧比0.95を超えている層で液状化している。

9. 止水性に係る検討結果（2次元浸透流解析）

9. 止水性に係る検討結果（2次元浸透流解析）

9.1 浸透流解析の概要

- 防波壁の止水性については、コンクリート壁、逆T擁壁、重力擁壁、止水目地等の施設で遮水を担保し、改良地盤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。
- そのうち、地盤中からの回り込みによる浸水防止（難透水性の保持）について、2次元浸透流解析により確認する。
- 地盤における改良地盤の割合が最も支配的となる鋼管杭式逆T擁壁を対象とし、保守的な条件により解析を実施する。

[検討条件]

《津波水位》

保守的な水位として防波壁高さ（EL15m）の津波を考慮

《解析手法》

2次元浸透流解析（非定常解析）

《計算時間》

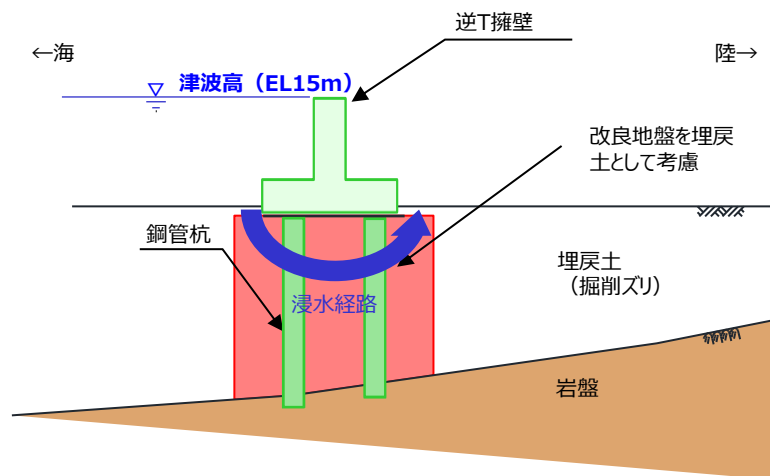
保守的な津波の継続時間※として計算時間を30分とする。

《初期水位》

EL+0.14m（構造成立性検討と同一の条件）

《透水係数》

透水係数は下表の通り、改良地盤部分については、周辺の埋戻土（掘削ズリ）と同一の透水係数を設定する。



解析条件の概要

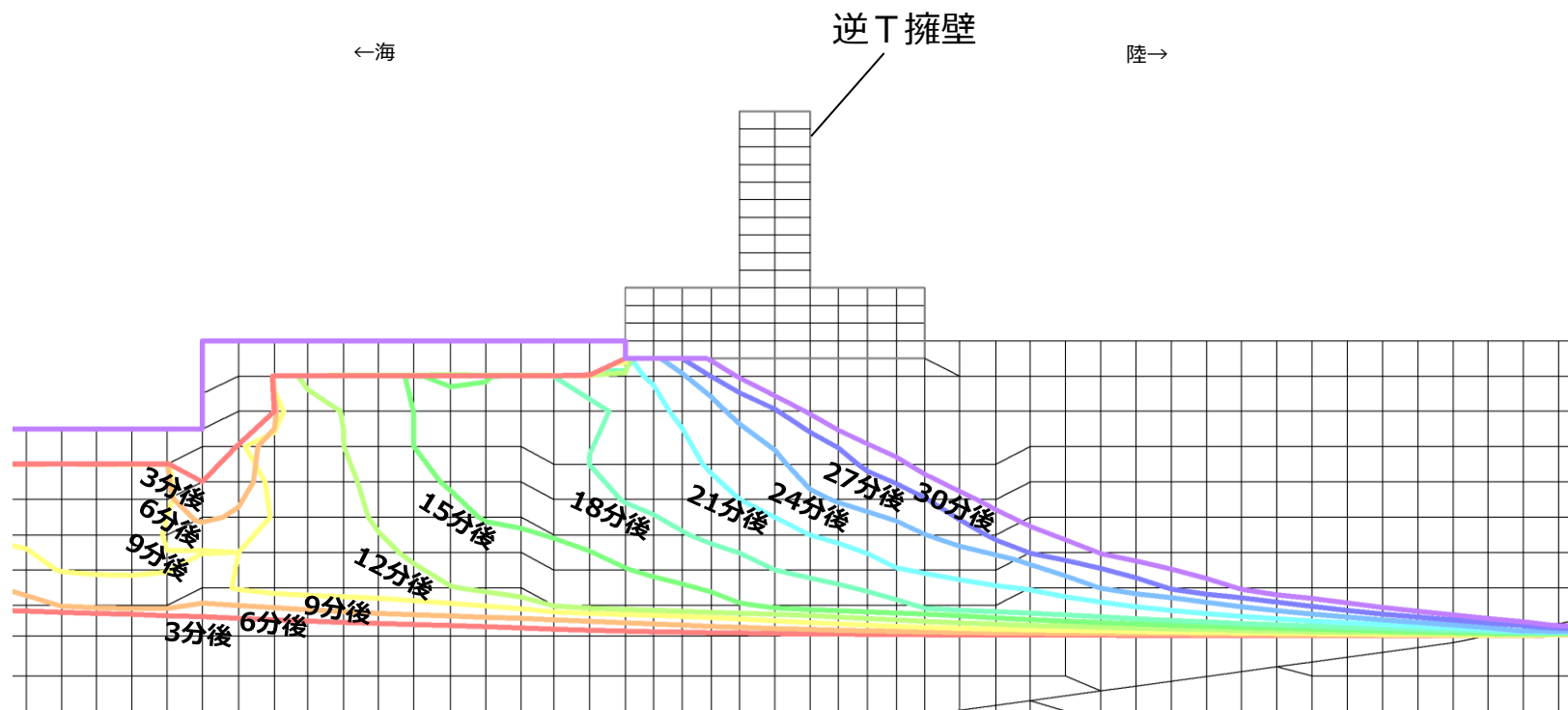
地盤材料	透水係数(m/s)	摘要
岩盤	1×10^{-5}	CL級岩盤と仮定
コンクリート	1×10^{-11}	
埋戻土	2×10^{-3}	
改良地盤	2×10^{-3}	埋戻土と仮定

※ 基準津波1の敷地前面における周期は約4分

9. 止水性に係る検討結果（2次元浸透流解析）

9.2 浸透流解析の結果

- 津波来襲より30分経過後においても、防波壁より敷地側に浸水は認められないことから、施設及び地盤を含む範囲について、保守的な条件により2次元浸透流解析を実施した場合においても、地盤中からの回り込みにより敷地が浸水するおそれはない。



2次元浸透流解析（非定常解析）結果

10. まとめ

10. まとめ

- 島根原子力発電所防波壁の設計方針に基づき、防波壁の構造成立性について確認した。
- 設置許可段階において、基本設計の成立性を確認するため、防波壁の基本構造が設置許可基準規則の各条文（第3条※¹、第4条、第5条）に適合する見通しであること（構造成立性）を示すため、地震時、津波時において損傷モードを想定しても構造成立性が確保されることを確認した。
- また、施設及び地盤を含む範囲の2次元浸透流解析を行い、地盤中から回り込みによる浸水が防止されること（難透水性の保持）を確認した。
- 以上の検討から、防波壁は要求性能を喪失せず、基本構造が設置許可基準規則の各条文（第4条、第5条）に適合する見通し（構造成立性）を確認した。
- なお、荷重等の評価条件は現時点のものであり、今後変更となった場合は設計に反映することとする※²。

※1 本資料は、主に第4条、第5条への適合性についてまとめている。第3条の適合性については、今後の基礎地盤の安定性評価の審査において別途説明予定である。

※2 詳細設計段階で万一裕度が確保できなくなった場合には、追加の裕度向上対策の実施により対応する。