

島根原子力発電所 2号炉 津波による損傷の防止

「基礎底面の傾斜による防波壁の構造成立性」

(コメント回答)

令和3年2月
中国電力株式会社

審査会合における指摘事項

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
132	R3.1.29 (本日回答)	防波壁について、傾斜が生じた場合の各部位の構造成立性を見通しを説明すること。	P.2～15

指摘事項に対する回答【No.132】

■ 指摘事項（第940回審査会合 令和3年1月29日）

【No.132 基礎底面の傾斜による防波壁の構造成立性】

防波壁について、傾斜が生じた場合の各部位の構造成立性の見通しを説明すること。

■ 回答

- 基礎地盤の安定性評価（第940回審査会合：令和3年1月29日）において、改良地盤に支持される防波壁（逆T擁壁）は目安値（1/30）を満足するものの、岩盤に支持されるその他の施設に比べて、大きな傾斜を生じる結果となった。
- 設置許可基準規則第3条第2項より、施設は変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならないことから、防波壁に要求される安全機能を担保するため、基礎底面の傾斜に対する設計方針を整理し、構造成立性の見通しについて確認した。
- 構造成立性の確認に当たっては、防波壁（逆T擁壁）の各部位が損傷して要求機能を喪失する事象を抽出し、地盤の安定解析で用いた動的FEM解析（全応力解析）に加えて、防波壁の構造成立性で用いた動的FEM解析（有効応力解析）も用いて確認した結果、防波壁（逆T擁壁）の各部位は許容限界を満足することから、防波壁は構造成立することを確認した。

1. 耐震重要施設及び常設重大事故等対処施設の基礎底面の傾斜

- 基礎地盤の安定性評価（第940回審査会合：令和3年1月29日）において、評価対象施設を4つのグループに分類している（次頁）。このうち防波壁については、グループC（T.P.+15m盤以下、防波壁、杭基礎）及びグループD（T.P.+15m盤以下、防波壁、直接基礎）に分類し、それぞれ影響要因及び簡便法による最小すべり安全率を比較検討した結果、代表施設として防波壁（多重鋼管杭式擁壁）及び防波壁（逆T擁壁）を選定している。
- 代表施設について動的FEM解析（全応力解析）結果に基づいて基礎底面の傾斜を算定した結果、2号炉原子炉建物等は審査ガイドの目安値（基本設計段階の目安値：1/2,000）を下回っていることを確認している。
- 防波壁については、津波防護上要求される安全機能に基づいて評価基準値の目安値を設定し、同様に算定した結果、改良地盤に支持される防波壁（逆T擁壁）は目安値（1/30）を満足するものの、岩盤に支持されるその他の施設に比べて、大きな傾斜を生じる結果となった。
- 以上のことから、設置許可基準規則第3条第2項において、施設は変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならないことから、防波壁に要求される安全機能を担保するため、基礎底面の傾斜に対する設計方針を整理し、最も傾斜が厳しくなった防波壁（逆T擁壁）の構造成立性の見通しについて確認する。

地殻変動解析による最大傾斜及び地震動による最大傾斜の重ね合わせ結果

対象断層	評価施設	①地殻変動による傾斜		②地震動による最大傾斜		①+② 地殻変動及び地震動を 考慮した最大傾斜※
		最大傾斜	傾斜方向	最大傾斜	傾斜方向	
陸域活断層 (宍道断層)	2号炉原子炉建物	1/17,000 (不確かさケース(断層傾斜角))	西方向	1/22,000 (S _S -D)	北方向	1/9,000
	ガスタービン発電機建物	1/15,000 (不確かさケース(断層傾斜角))	西方向	1/28,000 (S _S -D)	北方向	1/9,000
海域活断層 (F-Ⅲ～F-V断層)	2号炉原子炉建物	1/19,000 (下降最大ケース)	東方向	1/22,000 (S _S -D)	北方向	1/10,000
	ガスタービン発電機建物	1/18,000 (下降最大ケース)	東方向	1/28,000 (S _S -D)	北方向	1/10,000
陸域活断層 (宍道断層)	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	1/22,000 (不確かさケース(すべり角))	北方向	1/39,000 (S _S -D)	北方向	1/14,000
	防波壁 (逆T擁壁)	1/17,000 (不確かさケース(断層傾斜角))	東方向	1/59 (S _S -D)	西方向	1/58
海域活断層 (F-Ⅲ～F-V断層)	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	1/22,000 (上昇最大ケース)	北方向	1/39,000 (S _S -D)	北方向	1/14,000
	防波壁 (逆T擁壁)	1/17,000 (下降最大ケース)	西方向	1/59 (S _S -D)	西方向	1/58

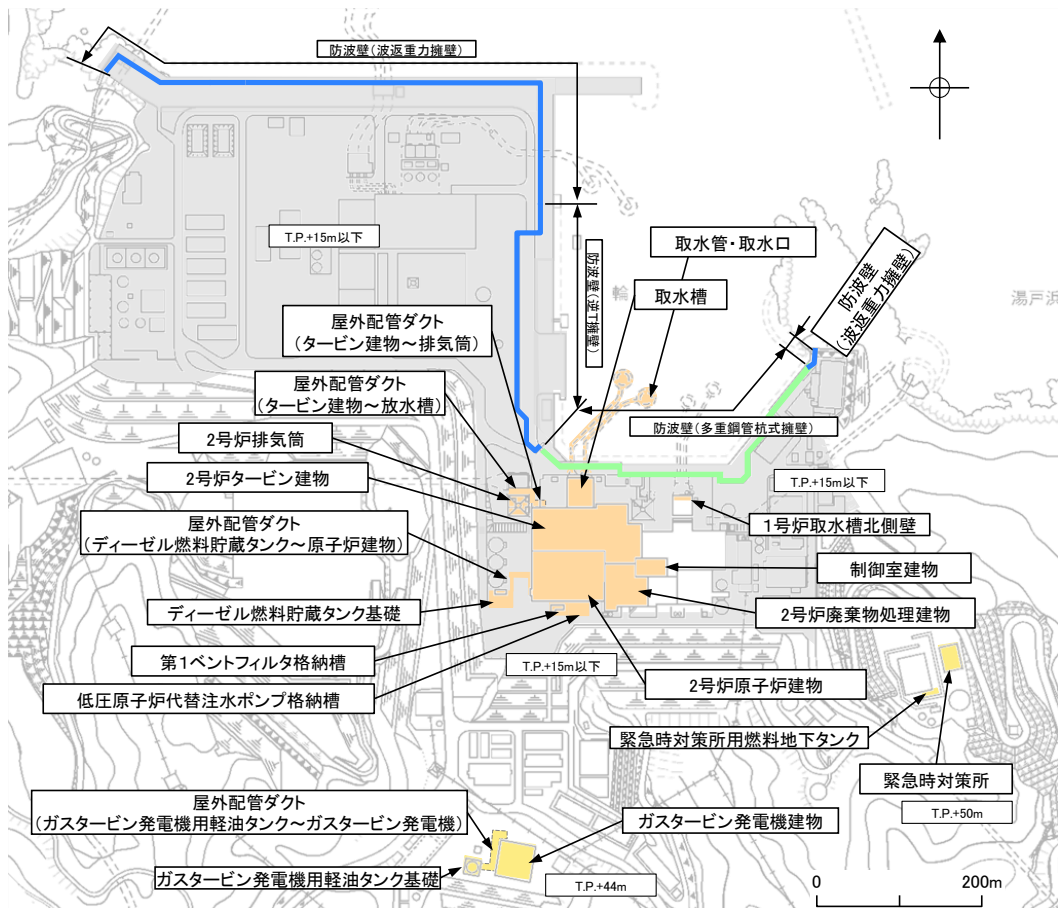
※ ①と②の傾斜方向が異なる場合も、保守的に①と②の傾斜を足し合わせることで評価を実施する。

(参考) 基礎地盤の安定性評価 評価対象施設のグループ分け

・評価対象施設は、以下の観点からグループ分けを行う。

- ①液状化範囲の検討結果及び地震増幅特性の違いを踏まえ、T.P.+8.5～15m盤に設置されている評価対象施設とT.P.+44～50m盤に設置されている評価対象施設に区分する。
- ②線状構造物の背後に埋戻土が広く分布する防波壁については、液状化の影響が大きいと考えられるため、防波壁とそれ以外に区分する。
- ③基礎形式による基礎地盤への荷重伝達メカニズムの違いを踏まえ、杭基礎と直接基礎に区分する。

・上記に従いグループ分けを行った結果、グループA(T.P.+15m盤以下、防波壁以外、直接基礎)、グループB(T.P.+44～50m盤、防波壁以外、直接基礎)、グループC(T.P.+15m盤以下、防波壁、杭基礎)、グループD(T.P.+15m盤以下、防波壁、直接基礎)の4つのグループに分類した。



グループ分類	①設置標高	②施設区分	③基礎形式
グループA	T.P.+15m盤以下	防波壁以外	直接基礎
グループB	T.P.+44～50m盤	防波壁以外	直接基礎
グループC	T.P.+15m盤以下	防波壁	杭基礎
グループD	T.P.+15m盤以下	防波壁	直接基礎

【凡例】

- :グループA(T.P.+15m盤以下, 防波壁以外, 直接基礎)
- :グループB(T.P.+44～50m盤, 防波壁以外, 直接基礎)
- :グループC(T.P.+15m盤以下, 防波壁, 杭基礎)
- :グループD(T.P.+15m盤以下, 防波壁, 直接基礎)

2. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による性能目標と設計評価方針

- 設置許可基準規則の各条文に対して、防波壁の耐震性（第4条）及び耐津波性（第5条）については第909回審査会合（令和2年10月15日）において、基礎地盤の支持力及びすべり（第3条）については第940回審査会合（令和3年1月29日）において、それぞれ説明している。
- 今回、基礎底面の傾斜（第3条）について、防波壁の要求機能を担保するため、防波壁（逆T擁壁）の各部位に対する性能目標及び設計方針（損傷モード、許容限界等）を以下のとおり整理し、逆T擁壁、止水目地及びグラウンドアンカーの構造成立性について確認する。
- 構造成立性の確認に当たっては、地盤の安定解析で用いた動的FEM解析（全応力解析）の結果に加えて、防波壁の構造成立性で用いた動的FEM解析（有効応力解析）の結果も参考に確認する。

：本資料において、構造成立性を確認する部位

要求機能	評価対象部位	傾斜による性能目標 (第3条)	応力等の状態	損傷モード	設計に用いる許容限界	
・防波壁は、地震後の繰返しの入力津波に対して、津波による漏水及び浸水を防止することが要求される。 ・防波壁（逆T擁壁）は、基準地震動 S_s に対し、津波防護施設が要求される機能を損なう恐れがないよう、十分な構造強度を有した構造であることが要求される。	逆T擁壁	構造部材の健全性を保持するために、逆T擁壁が概ね弾性状態に留まること。	曲げ・せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「コンクリート標準示方書、構造性能照査編、2002年制定」を踏まえた短期許容応力度とする。	
	止水目地	止水目地	逆T擁壁間から有意な漏えいを生じないために、止水目地の変形性能を保持すること。	変形・水圧	有意な漏えいに至る変形・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。
		止水目地の鋼製部材	逆T擁壁及び改良地盤の滑動・転倒抑止のために設計アンカー力を確保すること。	曲げ・せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「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。
	グラウンドアンカー	構造部材の健全性を保持するために、逆T擁壁が概ね弾性状態に留まること。	変位	グラウンドアンカーが伸張り、逆T擁壁が滑動・転倒	「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説（平成24年5月）」	
地盤	改良地盤	基礎地盤のすべり安定性を確保するため、十分なすべり安全性を保持すること。	支持力	鉛直支持機能を喪失する状態	「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」を踏まえ、妥当な安全余裕を考慮した極限支持力度とする。	
			すべり安全率	すべり破壊し、難透水性を喪失する状態	「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を準用してすべり安全率1.2以上とする。	
			支持力	鉛直支持機能を喪失する状態	「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編（平成14年3月）」を踏まえ、妥当な安全余裕を考慮した極限支持力度とする。	
岩盤						

3. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による要求機能を喪失する事象の抽出（1 / 2）

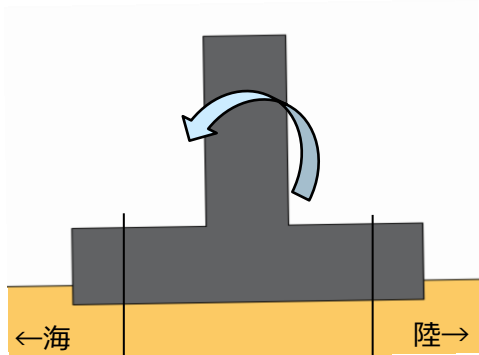
- 防波壁（逆T擁壁）の各部位が、損傷して要求機能を喪失する事象を抽出し、それに対する設計・施工上の配慮について整理した。

部位の名称	要求機能を喪失する事象	想定ケース※1	設計・施工上の配慮	照査※2
逆T擁壁	<ul style="list-style-type: none"> 地盤が傾斜することにより曲げ・せん断破壊し、遮水性を喪失する。 	①	<ul style="list-style-type: none"> 逆T擁壁の発生応力度が、許容応力度以下であることを確認する。 	○
	<ul style="list-style-type: none"> 地盤が傾斜することにより逆T擁壁の隣接する躯体同士が相互に支圧することにより破壊し、遮水性を喪失する。 	②	<ul style="list-style-type: none"> 逆T擁壁の支圧応力度が、許容応力度以下であることを確認する。 	○

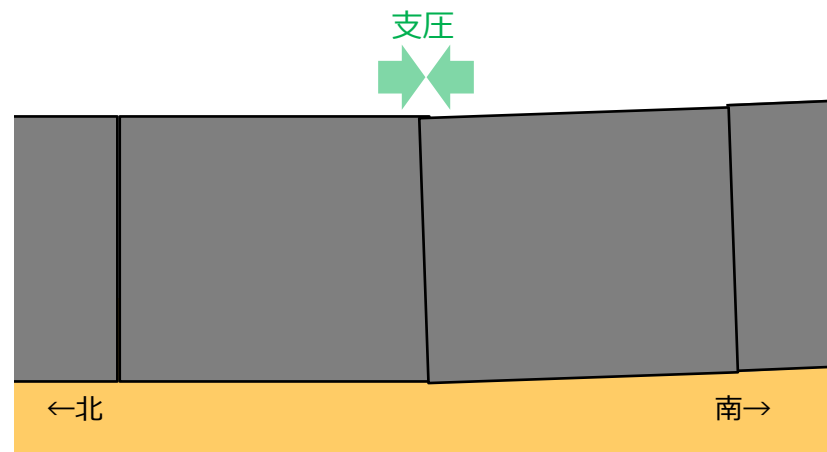
※1 喪失する事象の想定ケース

※2 照査を実施する場合は○。照査不要と判断している場合は（-）。

①逆T擁壁の損傷



②隣接する躯体同士の支圧による損傷



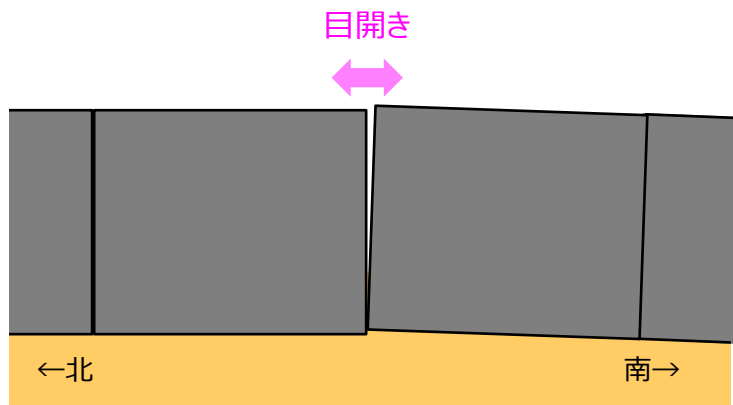
3. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による要求機能を喪失する事象の抽出（2 / 2）

部位の名称	要求機能を喪失する事象	想定ケース※1	設計・施工上の配慮	照査※2
止水目地 (支持部含む)	<ul style="list-style-type: none"> 地盤が傾斜することにより隣接する躯体間（法線方向、法線直交方向）の相対変形により、止水目地の許容変形量を超える変形が生じ、遮水性を喪失する。 	③	<ul style="list-style-type: none"> メーカー規格及び性能試験に基づく許容変形量及び許容水圧以下であることを確認する。 	-
グラウンドアンカー	<ul style="list-style-type: none"> 地盤が傾斜することによりグラウンドアンカーが破損し、逆T擁壁が転倒する。 	④	<ul style="list-style-type: none"> 地盤の傾斜による変位量が、グラウンドアンカーの弾性変位量以下であることを確認する。 	○
			<ul style="list-style-type: none"> 試験施工（品質保証試験）により設計アンカー力以上を確保していることを確認する。 定期点検により設計アンカー力以上のアンカー力が作用していることを確認する。 	-

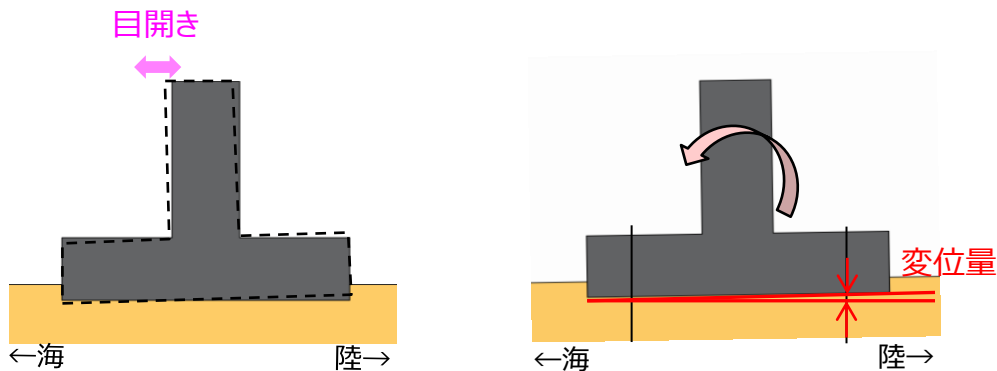
※1 喪失する事象の想定ケース

※2 照査を実施する場合は○。照査不要と判断している場合は（-）。

③防波壁間の変形による止水目地の損傷



④グラウンドアンカーの破損

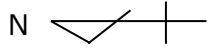
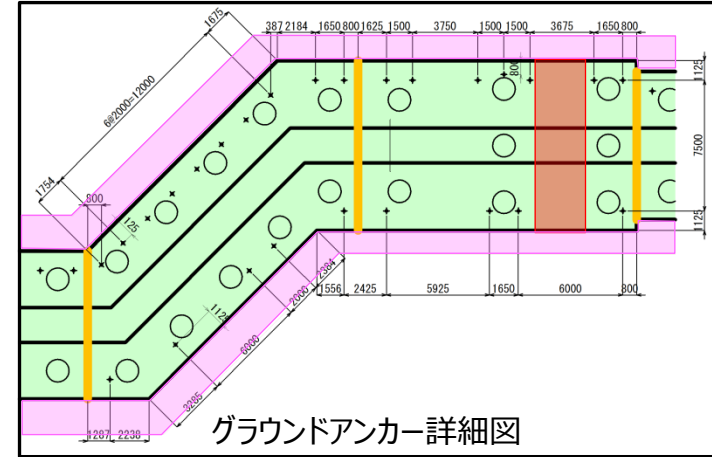


(参考) 防波壁 (逆T擁壁) の平面図

■ 防波壁 (逆T擁壁) の平面図 (止水目地位置含む) を以下に示す。

凡例

- 防波壁
- 施設護岸
- 鋼管杭
- + グラウンドアンカー
- 止水目地※
- 防波扉基礎
- 改良地盤
- 改良地盤 (追加実施)
- 屋外排水路横断面



荷揚場

逆T擁壁幅8.5m

38.0m

58.0m

RC床板

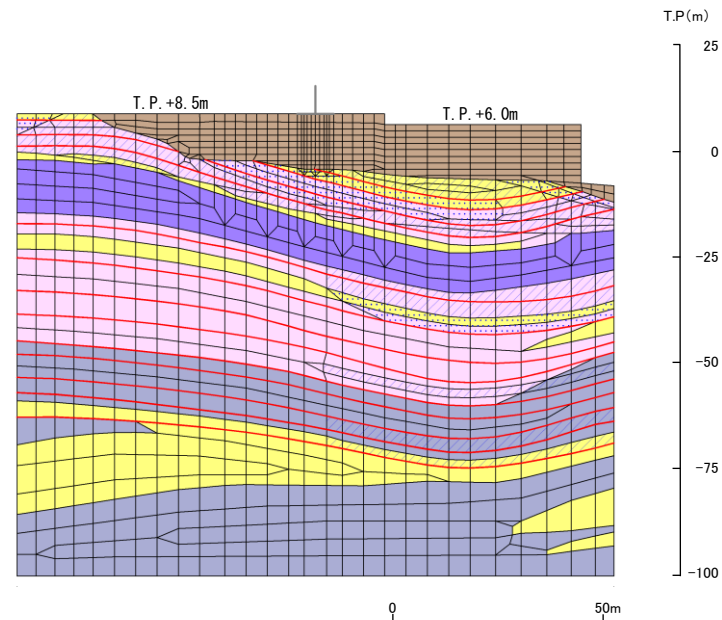


※止水目地の設置高さ及び根入れ長については、敷地の地盤高さ及び入力津波高さを踏まえて設定する。

4. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による構造成立性検討

①逆T擁壁の損傷

- 地殻変動及び地震動の傾斜による逆T擁壁の損傷については、地殻変動による傾斜が1/17,000と十分小さいことから、地震動による傾斜について確認する。
- 地盤の安定解析に用いた動的FEM解析（全応力解析）の解析モデル図を右図に示す。なお、改良地盤の解析用物性値については、保守的に埋戻土（掘削ズリ）とする。
- 地震時の照査結果から、逆T擁壁に作用する曲げ・せん断は短期許容応力度以下であることを確認した。
- また、防波壁の構造成立性に用いた動的FEM解析（有効応力解析）による地震時の照査結果から、曲げ・せん断は短期許容応力度以下であることを確認した（次頁）。



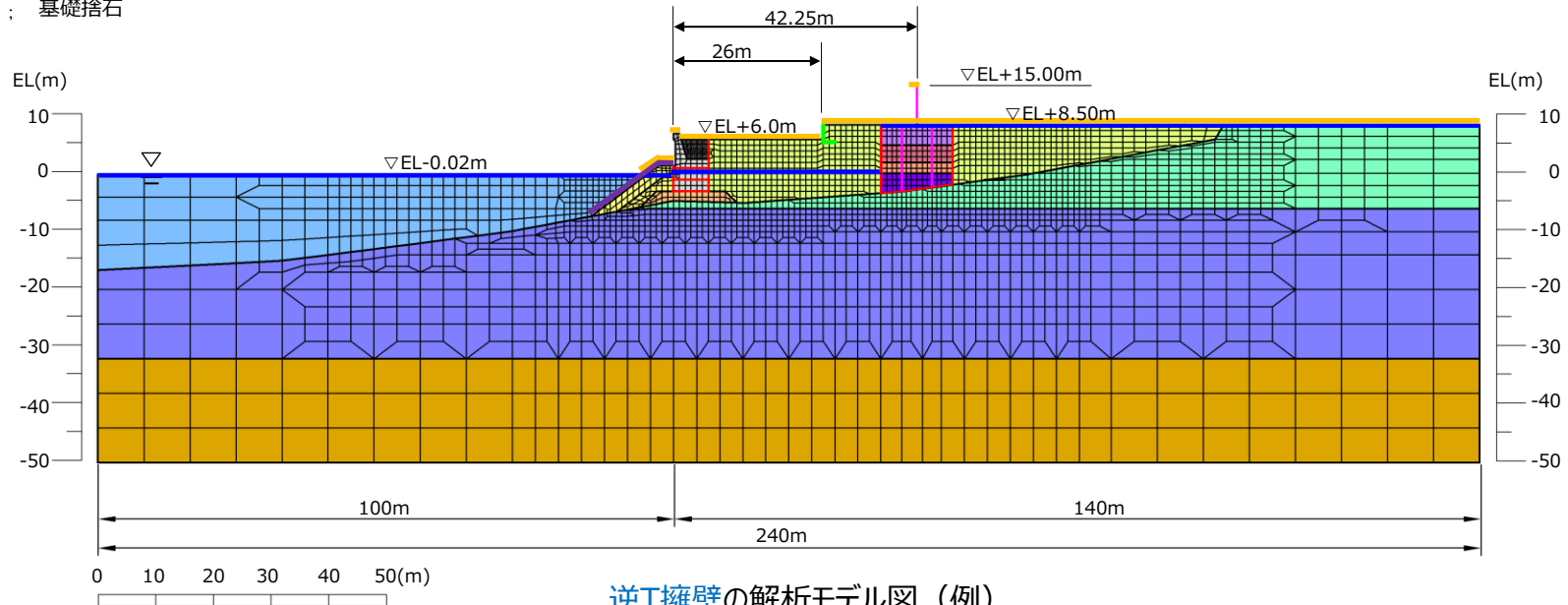
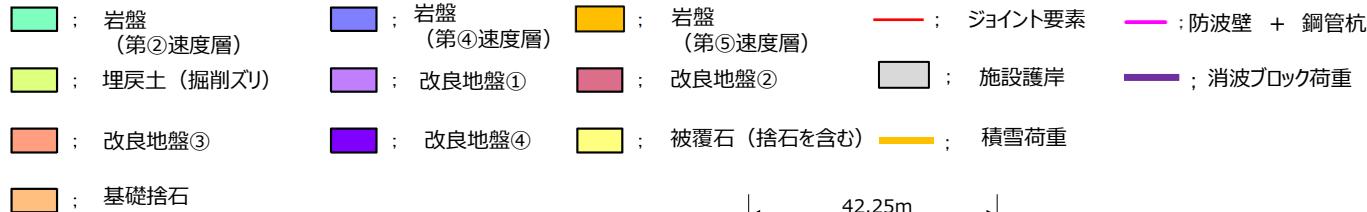
■ 短期許容応力に対する照査（全応力解析）

評価部位	照査項目	地震動	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)
縦壁	曲げ・軸力	S s - D	曲げ圧縮応力度 σ_c	1.7	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	18	10.58	OK
			引張応力度 σ_s	108	許容引張応力度 σ_{sa}	323	2.99	OK
	せん断		せん断応力度 τ	0.07	許容せん断応力度 τ_a	0.9	12.85	OK
底板	曲げ・軸力		曲げ圧縮応力度 σ_c	4.0	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	18	4.5	OK
			引張応力度 σ_s	234	許容引張応力度 σ_{sa}	323	1.38	OK
	せん断		せん断応力度 τ	0.25	許容せん断応力度 τ_a	0.9	3.6	OK

(参考) 防波壁 (逆T擁壁) の2次元FEM解析 (有効応力解析)

モデル化方針 (逆T擁壁)

- 防波壁及び鋼管杭は線形はり要素でモデル化する。なお、鋼管杭先端については、岩盤からのせん断抵抗に期待しないモデル化とする。
- 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。消波ブロックは分布荷重で考慮する。
- 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。
- 防波壁と周辺地盤、鋼管杭先端と岩盤など、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。
- グラウンドアンカーについては、実態に合ったモデル化を実施し、詳細設計段階において説明する。



逆T擁壁の解析モデル図 (例)

(参考) 防波壁 (逆T擁壁) の2次元FEM解析 (有効応力解析)

- 防波壁 (逆T擁壁) (荷揚護岸北側部) 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	9.17	曲げ圧縮応力度 σ_c	5.6	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	18	3.21	OK
			9.17	引張応力度 σ_s	242.3	許容引張応力度 σ_{sa}	323	1.33	OK
	せん断		23.91	せん断応力度 τ	0.32	許容せん断応力度 τ_a	0.9	2.81	OK
底板	曲げ・軸力		9.17	曲げ圧縮応力度 σ_c	5.4	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	18	3.33	OK
			9.17	引張応力度 σ_s	262.8	許容引張応力度 σ_{sa}	323	1.22	OK
	せん断		23.91	せん断応力度 τ	0.46	許容せん断応力度 τ_a	0.9	1.95	OK

4. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による構造成立性検討

②隣接する躯体同士への支圧による損傷

- 防波壁境界部は空隙を設けない構造とすることから、隣接する躯体同士が相互に支圧することによる逆T擁壁の損傷について、相互の支圧力に対して、許容応力度以下であることを確認する。
- 逆T擁壁に作用する支圧応力度は許容応力度以下であることを確認した。

○逆T擁壁に働く慣性力 F

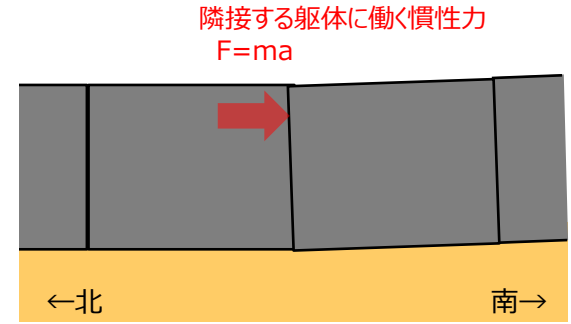
$$F = ma$$

m : 逆T擁壁の質量
 a : 地震時加速度

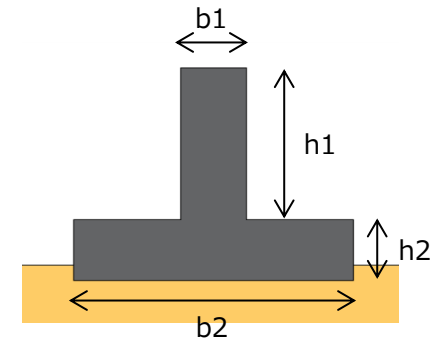
○逆T擁壁側の支圧応力度 σ_{cv}

$$\sigma_{cv} = F \div \sum b_i \cdot h_i \leq \sigma_{ca}$$

b_i : 防波壁の幅
 h_i : 防波壁の高さ
 σ_{ca} : 支圧応力度の許容応力度



逆T擁壁の相互の支圧イメージ図

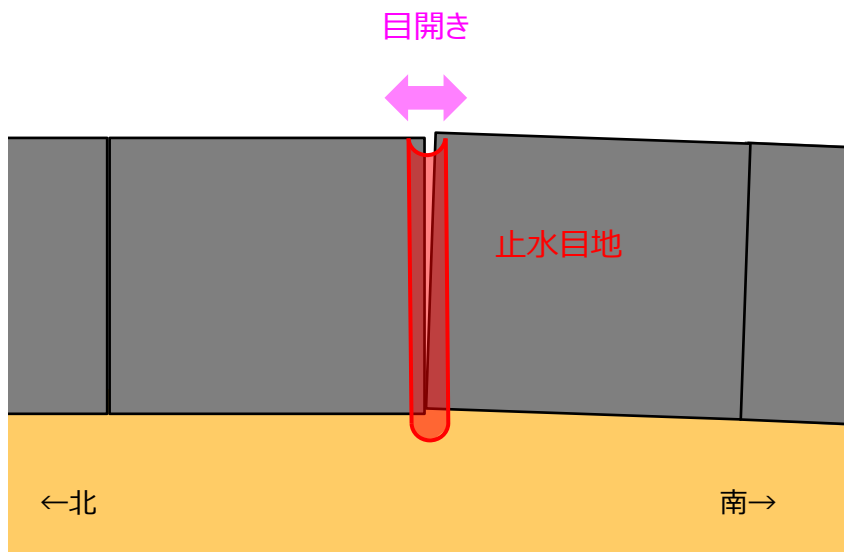


評価部位	照査項目	地震動	支圧応力度 (N/mm ²)		支圧応力度の許容応力度 (N/mm ²)		最小安全率 (許容応力 / 発生応力)	判定 (> 1.0)
逆T擁壁	支圧	S s -D	支圧応力度 σ_{cv}	0.81	圧縮応力度 σ_{ca}	10.8	13.3	OK

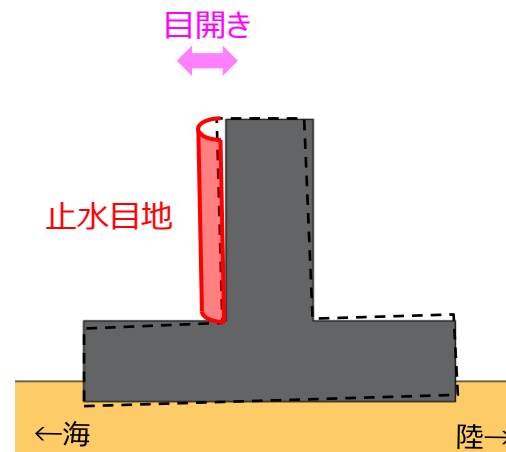
4. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による構造成立性検討

③防波壁間の目開き

- 躯体間の変形による止水目地の損傷については、傾斜による変形に追従し、メーカー規格及び性能試験に基づく許容変形量及び許容水圧以下であることを確認した止水目地を設置する。



逆T擁壁の目開き（法線方向）
イメージ図



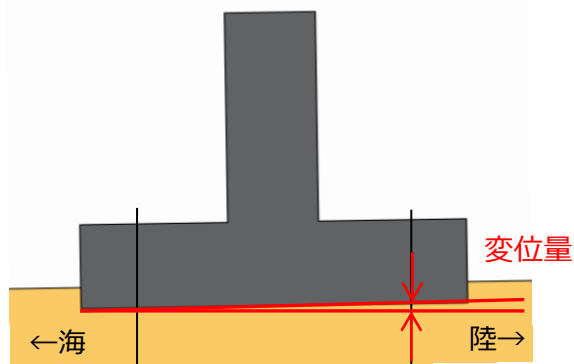
逆T擁壁の目開き（法線直交方向）
イメージ図

4. 防波壁（逆T擁壁）の傾斜による構造成立性検討

④グラウンドアンカーの破損

- 基礎底面の傾斜によりグラウンドアンカー位置に発生する変位量を確認し、グラウンドアンカーの弾性挙動を示す弾性変位量以下であることを確認する。
- グラウンドアンカーの理論上から求まる弾性変位量 u は、グラウンドアンカーの仕様から $u = \text{約}133\text{mm}$ となる。
- 地盤の安定解析に用いた動的FEM解析（全応力解析）における最大傾斜時の変位量は弾性変位量以下であることを確認した。
- また、防波壁の構造成立性に用いた動的FEM解析（有効応力解析）における最大傾斜時の変位量においても弾性変位量以下であることを確認した。なお、詳細設計段階において、万一裕度が確保できなくなった場合には、グラウンドアンカーを追加設置する。

評価部位	照査項目	地震動	変位量 (mm)		弾性変位量 (mm)		最小安全率 (弾性変位/最大変位)	判定 (> 1.0)
			全応力解析	有効応力解析	全応力解析	有効応力解析		
グラウンドアンカー	変位	S s-D	全応力解析	102	弾性変位量	133	1.30	OK
			有効応力解析	16	弾性変位量	133	8.31	OK



逆T擁壁の傾斜イメージ図

グラウンドアンカー変位量 u グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（平成24年5月）

$$u = \frac{T \cdot l_{sf}}{A_s \cdot E_s}$$

項目	記号	備考
計画最大荷重	T	2,400kN (テンドン降伏荷重)
テンドン自由長	l_{sf}	16,220mm
テンドン弾性係数	E_s	191kN/mm ²
テンドン断面積	A_s	1,525.7mm ²
弾性変位量	u	133mm

5. まとめ

- 基礎底面の傾斜に対して防波壁に要求される安全機能，並びに防波壁（逆T擁壁）の設計方針（損傷モード，許容限界等）を整理した。
- 基礎底面が傾斜することにより，防波壁（逆T擁壁）の各部位が損傷し，要求機能を喪失する事象を抽出した。
- 損傷事象に対する照査の結果，防波壁（逆T擁壁）の各部位は許容限界を満足することから，防波壁は構造成立することを確認した。