

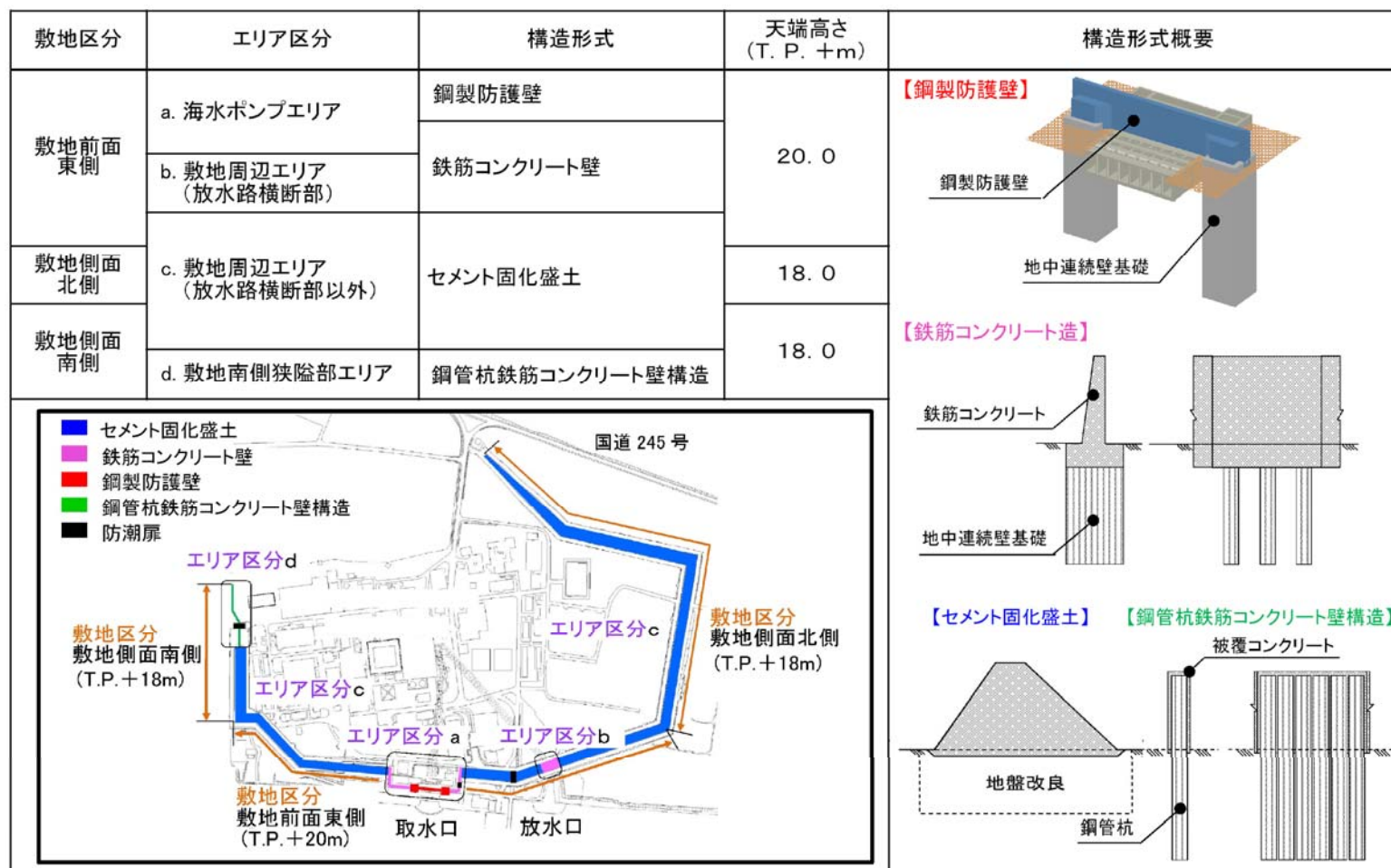
東海第二発電所
防潮堤に係る「セメント固化盛土構造」の
「鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造」への変更について

平成29年4月13日
日本原子力発電株式会社

1. 東海第二発電所の申請時(H26.5.20)における防潮堤構造について



- ◆東海第二発電所における津波に対する浸水防止(外郭防護)は、防潮堤を設置することにより対応する。
- ◆申請当時(H26.5.20)において、防潮堤の構造は、「鋼製防護壁」、「鉄筋コンクリート壁」、「セメント固化盛土」、「鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造」の4種類を計画し、それぞれの配置は以下の通りであった。



現地調査(H28.8.23)における説明資料より抜粋(一部加筆)

 ガンダム

- ### 変更前

セメント固化盛土構造

セメント固化盛土
+
地盤改良

(断面図)

変更後

**鋼管杭
鉄筋コンクリート壁構造**

鉄筋コンクリート壁
+
鋼管杭

(断面図)

2. 鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造区への変更について(2/2)

◆ 各構造における設計上のポイントを以下に示す。

変更前

セメント固化盛土構造

〔セメント固化盛土
+
地盤改良〕

(断面図)

主な確認項目	・基礎地盤の安定性 ・セメント固化盛土堤体のすべりに対する安定性
設計のポイント	✓ 地下深部の液状化検討対象層の液状化判定。 ✓ 粘性土の圧密沈下を考慮した防潮堤高さの設定。 ✓ 発生応力に対してセメント固化土の設計強度を見直す場合、その設定においては信頼性確保のため、多数の試験データが必要。
迅速かつ柔軟な設計対応	○

↓

変更後

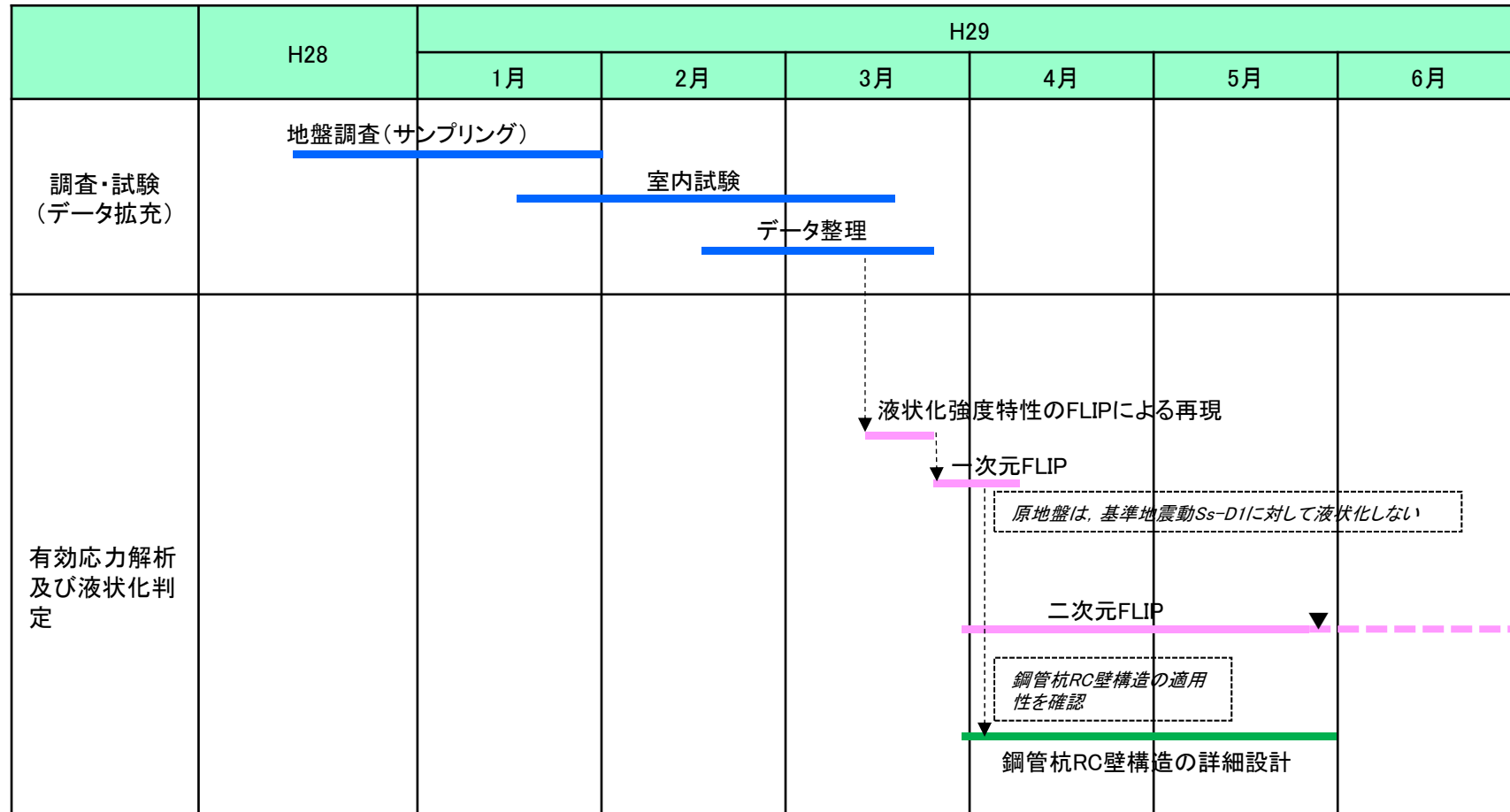
鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造

〔鉄筋コンクリート壁
+
鋼管杭〕

<断面図> <正面図>

主な確認項目	・基礎地盤の安定性 ・鋼管杭及び鉄筋コンクリートのせん断、曲げ ・支持地盤の周面摩擦力、水平・鉛直支持力 ・施工ブロック間の相対変位
設計のポイント	✓ 地下深部の液状化検討対象層の液状化判定。 ✓ 粘性土の圧密沈下を考慮した一部支持杭による対応。 ✓ 発生応力に対して鋼材等の強度を見直す場合でも、鋼管杭や鉄筋は、規格品として工場製作であり、その許容応力度は改めて試験による確認不要。 ✓ 道路橋示方書等の既に確立された技術基準により設計が可能である。
迅速かつ柔軟な設計対応	◎

3. 検討の経緯



添付資料

「セメント固化盛土構造」及び「鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造」
の適用性確認結果

◆盛土構造物の評価に係る適用ガイド

耐津波設計に係る工認審査ガイドにおける「盛土構造物」の評価方法に関する記載は以下のとおり。
評価項目としては、設置する基礎地盤及び斜面の安定性である。

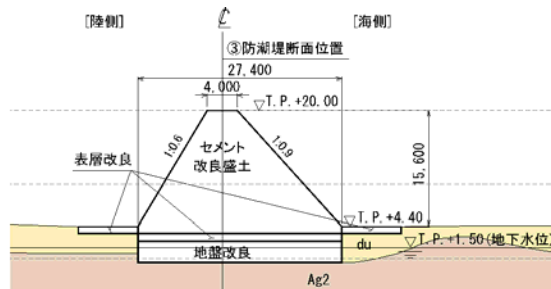
	耐津波設計に係る工認審査ガイド	備考
4.2 使用材料及び材料定数	(2)盛土構造物については、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」及び「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造評価に係る審査ガイド」に準じて設定されていること。	「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に係る適用内容 ・基礎地盤の安定性（すべり，支持力，傾斜） ・斜面の安定性
4.4 許容限界	b) 盛土による防潮堤や河川堤防等の盛土・地山斜面については、「 <u>基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド</u> 」に準じ、周辺斜面の評価に用いるすべり安全率による評価基準値を許容限界値としていることを確認する。また、入力津波や地震荷重等に対する盛土法面の損傷防護のための表面覆工等についても適切と認められる規格及び基準等に基づいて許容限界を設定していることを確認する。	
4.5 荷重評価	③ 盛土構造の防潮堤等への作用荷重の算定 a)盛土構造の防潮堤や河川堤防等の盛土、地山斜面に作用する地震荷重については、「 <u>基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド</u> 」に準じて、地震応答解析等により求めていることを確認する。 b)また、当該施設に作用する津波荷重については、水理試験や遡上解析、既往の波圧・波力算定式等を用い、適用性に留意して当該施設の設計上、科学的合理性をもって厳しめの荷重評価が行われていることを確認する。	
4.6 構造設計手法	② 盛土構造の防潮堤等の解析手法 a)盛土構造の防潮堤や河川堤防等の盛土、地山斜面に関する解析手法については、「 <u>基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド</u> 」に準じて検討されていることを確認する。	
4.7 入力津波による荷重に対する設計	④ 盛土構造の防潮堤等の設計審査における留意事項 a)盛土構造の防潮堤や河川堤防等の盛土・地山斜面については、津波の洗掘作用によって、法面や天端の流出が無いよう、法面（表面・裏面）及び天端被覆工などによって対策が講じられていることを確認する。 b)盛土構造の防潮堤や河川堤防等の盛土・地山斜面に関する安定性の評価については、「 <u>基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド</u> 」に準ずるものとする。	

添2 セメント固化盛土構造の設計検討

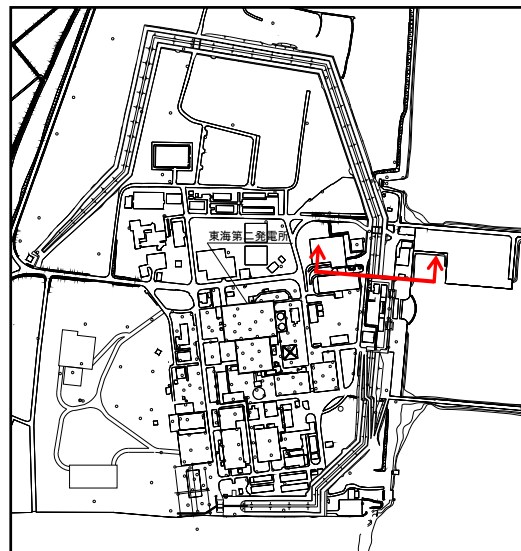


◆基礎地盤の安定性

- ・二次元等価線形解析を用いて、防潮堤(セメント固化盛土構造)基礎地盤の安定性について評価した。

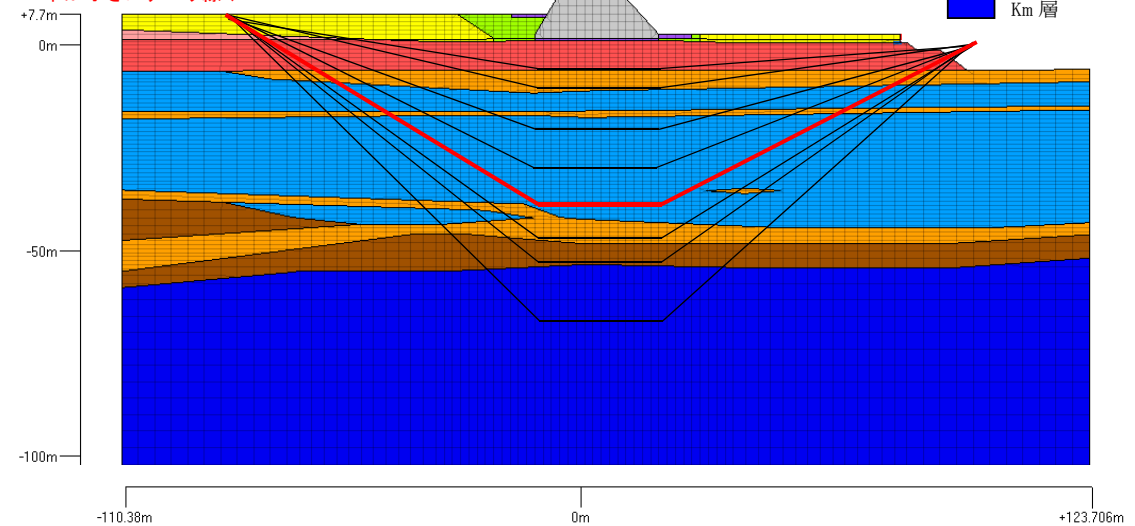


防潮堤(セメント固化盛土構造)断面図



解析断面平面位置図

設定したすべり線の内、最もすべり安全率が小さいすべり線↓



防潮堤(セメント固化盛土構造)要素分割図と最小すべり安全率となるすべり線

基準地震動Ssによる安定性評価結果

入力地震動	安全率	発生時刻	判定
Ss-D1	2.1	23.34 sec	≥ 1.5

- ・基準地震動Ssを入力した解析結果のうち、最小すべり安全率を示す。
- ・物性のばらつきを考慮した強度(平均-1 σ 強度)を用いた。

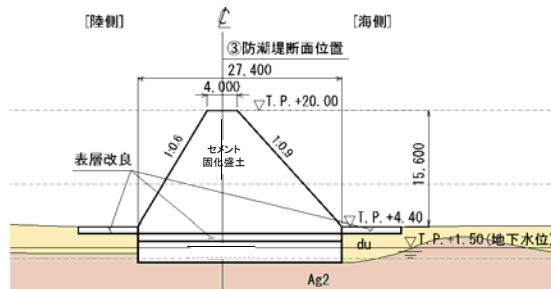
検討の結果、防潮堤基礎地盤の安定性を確認した。

添3 セメント固化盛土構造の設計検討

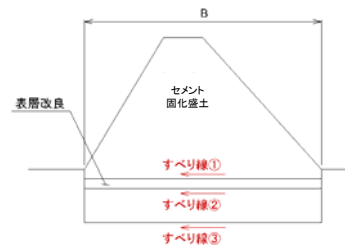


防潮堤(セメント固化盛土構造)の地震時, 津波時における安定性について検討結果を以下に示す。

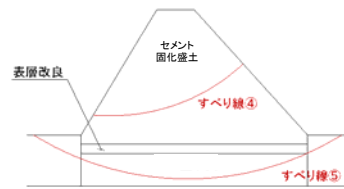
- ・地震時, 津波時とも, 静的計算にて算定した(地震波の引き上げは一次元等価線形解析)。
- ・津波高さは, 津波PRAにおける評価の前提条件(防潮堤耐力)であるTP+24mとした。



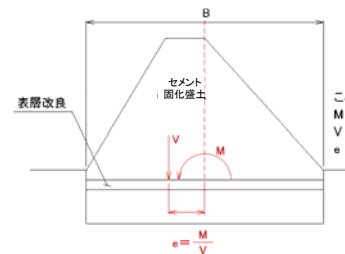
防潮堤(セメント固化盛土)断面図



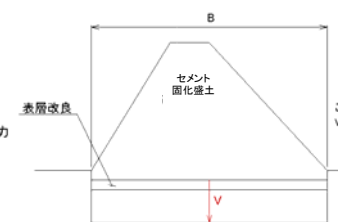
滑動の照査



円弧すべりの照査



転倒の照査



支持力の照査

◆地震時評価

照査項目		照査値	
設計震度	水平	0.49	
	鉛直	0.06	
滑動照査【円弧すべり含】 (最小すべり安全率 ≥ 1.5)		2.5	OK
転倒照査 (偏心量 $<$ 許容値B/3)	荷重の偏心量(m)	3.7	OK
	許容値B/3(m)	8.1	
支持力照査 ($V <$ 極限支持力 Q_u)	鉛直力V(kN)	6,619	OK
	極限支持力 Q_u (kN)	25,267	

◆津波時評価(津波遡上高さTP+24m)

照査項目		照査値	
津波波力(KN/m)	水平方向	3,404	
	鉛直方向	3,064	
滑動照査 (最小すべり安全率 ≥ 1.5)		3.0	OK
転倒照査 (偏心量 $<$ 許容値B/3)	荷重の偏心量(m)	0.9	OK
	許容値B/3(m)	9.1	
支持力照査 ($V <$ 極限支持力 Q_u)	鉛直力V(kN)	11,054	OK
	極限支持力 Q_u (kN)	67,349	

検討の結果, 防潮堤の安定性を確認した。

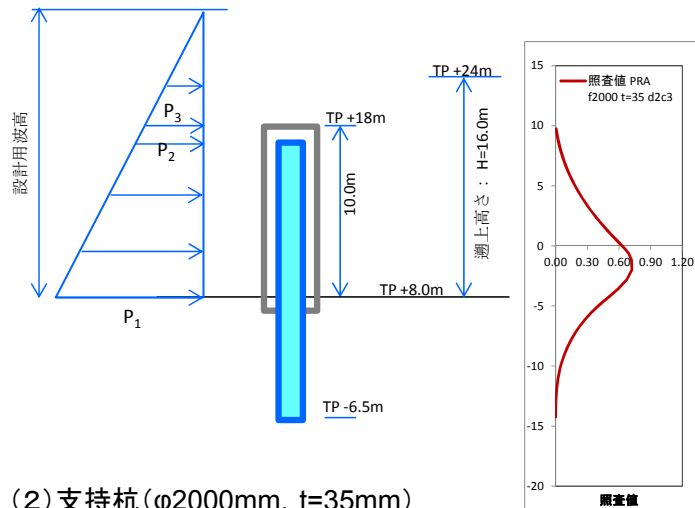
添4-1 鋼管杭鉄筋コンクリート壁区間の評価(RC壁高さが低い場合)



防潮堤(鋼管杭鉄筋コンクリート壁)の津波時における適用性について検討を行った。

津波高さは、津波PRAにおける評価の前提条件(防潮堤耐力)であるTP+24mとし、「摩擦杭」とした場合と「支持杭」とした場合で検討を行った。

(1) 摩擦杭($\phi 2000\text{mm}$, $t=35\text{mm}$)



◆支持力照査

$$P_{NU} = \min(R_U, R_{PU})$$

P_{NU} : 押込み支持力の上限值(kN)

R_U : 地盤から決まる杭の極限支持力(kN)

R_{PU} : 杭体から決まる押込み支持力の上限值(kN)

(1) 地盤から決まる杭の極限支持力

$$R_U = q_d \cdot A + U \sum L_i \cdot f_i \text{ (kN)}$$

q_d : 杭先端における単位面積あたりの極限支持力度(kN/m²)

A : 杭先端面積(m²)

U : 杭の周長(m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚(m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦応力度(kN/m²)

(2) 杭体から決まる杭の支持力

$$R_{PU} = \sigma_y \cdot A_s$$

(3) 杭周面摩擦力

杭周面摩擦力は安全側に中掘り杭工法と同じ周面摩擦力度とする。

<周面摩擦力度>

・砂質土 $2 \cdot N (\leq 100\text{kN/m}^2)$

・粘性土 $0.8c$ 又は $8 \cdot N (\leq 100\text{kN/m}^2)$

◆応力度照査

(1) 曲げモーメント・軸力に対する照査

$$\sigma = M/Z + N/A$$

M : 最大曲げモーメント

Z : 断面係数

N : 軸力

A : 有効断面積

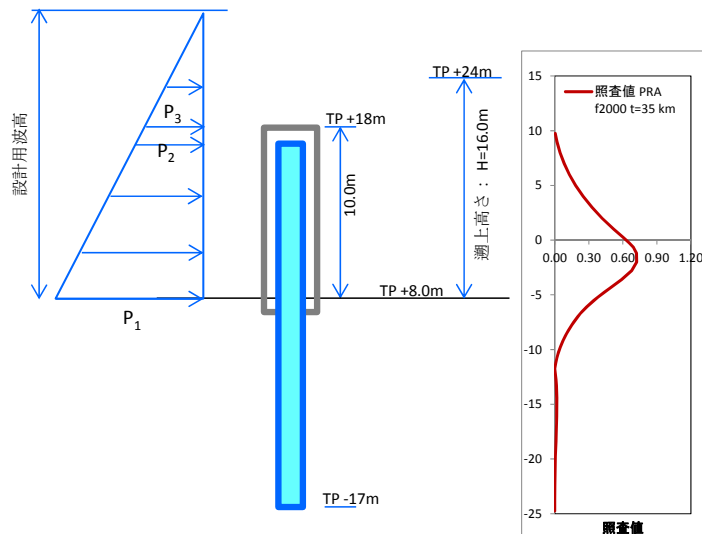
(2) セン断に対する照査

$$\tau = S/A$$

S : セン断力

A : 有効断面積

(2) 支持杭($\phi 2000\text{mm}$, $t=35\text{mm}$)



水平支持力	摩擦杭	支持杭
受動土圧強度 $Ft2$ (kN)	37,206	72,576
水平荷重 $Ft1$ (kN)	5,014	5,014
安全率($Ft2/Ft1$)	7.4	14.5

せん断	摩擦杭	支持杭
せん断強度 Ta (N/mm ²)	315	315
せん断力 T (N/mm ²)	27	27
安全率(Ta/T)	11.8	11.8

鉛直支持力	摩擦杭	支持杭
極限支持力 P_{NU} (kN)	6,843	11,111
鉛直荷重 P (kN)	1,944	2,736
安全率(P_{NU}/P)	3.5	4.1

曲げ	摩擦杭	支持杭
全塑性モーメント Mp (kNm)	41,284	41,284
モーメント M (kNm)	29,717	29,717
安全率(Mp/M)	1.4	1.4

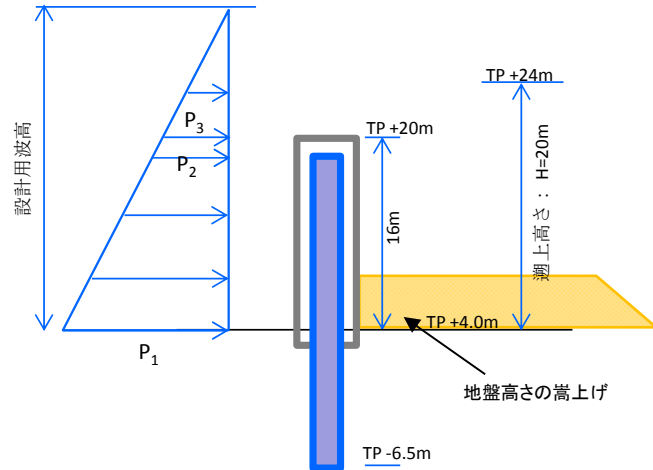
検討の結果、RC壁高さが低い区間において、摩擦杭と支持杭の両ケースで適用性を確認した。今後は、有効応力解析による詳細な地震時評価を行う。

添4-2 鋼管杭鉄筋コンクリート壁区間の評価(RC壁高さが高い場合)



鋼管杭鉄筋コンクリート壁の高さが高い場合(敷地高さが低い区間)においても、その適用性について検討した。

(1) 摩擦杭(φ2000mm, t=35mm)



◆支持力照査

$$P_{NU} = \min(R_U, R_{PU})$$

P_{NU} : 押込み支持力の上限值(kN)

R_U : 地盤から決まる杭の極限支持力(kN)

R_{PU} : 杭体から決まる押込み支持力の上限值(kN)

(1) 地盤から決まる杭の極限支持力

$$R_U = q_d \cdot A + U \sum L_i \cdot f_i \text{ (kN)}$$

q_d : 杭先端における単位面積あたりの極限支持力度(kN/m²)

A : 杭先端面積(m²)

U : 杭の周長(m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚(m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦応力度(kN/m²)

(2) 杭体から決まる杭の支持力

$$R_{PU} = \sigma_y \cdot A_s$$

(3) 杭周面摩擦力

杭周面摩擦力は安全側に中掘り杭工法と同じ周面摩擦力度とする。

<周面摩擦力度>

・砂質土 $2 \cdot N (\leq 100 \text{ kN/m}^2)$

・粘性土 $0.8c \text{ 又は } 8 \cdot N (\leq 100 \text{ kN/m}^2)$

◆応力度照査

(1) 曲げモーメント・軸力に対する照査

$$\sigma = M/Z + N/A$$

M : 最大曲げモーメント

Z : 断面係数

N : 軸力

A : 有効断面積

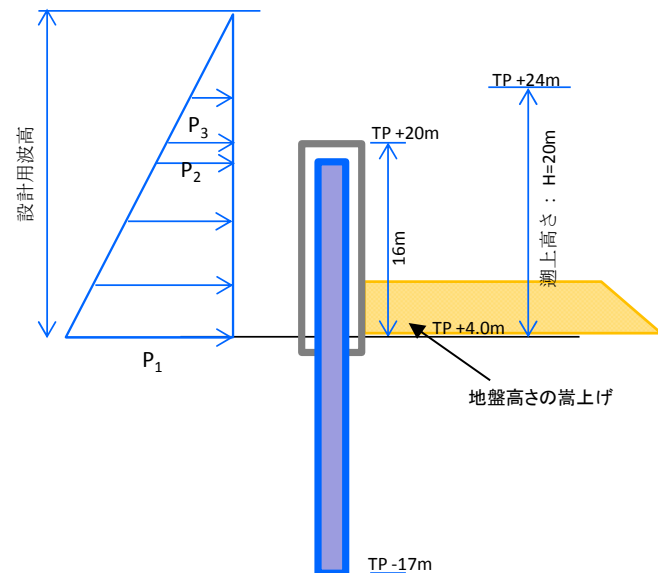
(2) せん断に対する照査

$$\tau = S/A$$

S : せん断力

A : 有効断面積

(2) 支持杭(φ2000mm, t=35mm)



水平支持力	摩擦杭	支持杭
受動土圧強度 F_{t2} (kN)	63,122	95,073
水平荷重 F_{t1} (kN)	11,307	11,307
安全率(F_{t2}/F_{t1})	5.6	8.4

せん断	摩擦杭	支持杭
せん断強度 T_a (N/mm ²)	315	315
せん断力 T (N/mm ²)	26	26
安全率(T_a/T)	12.1	12.1

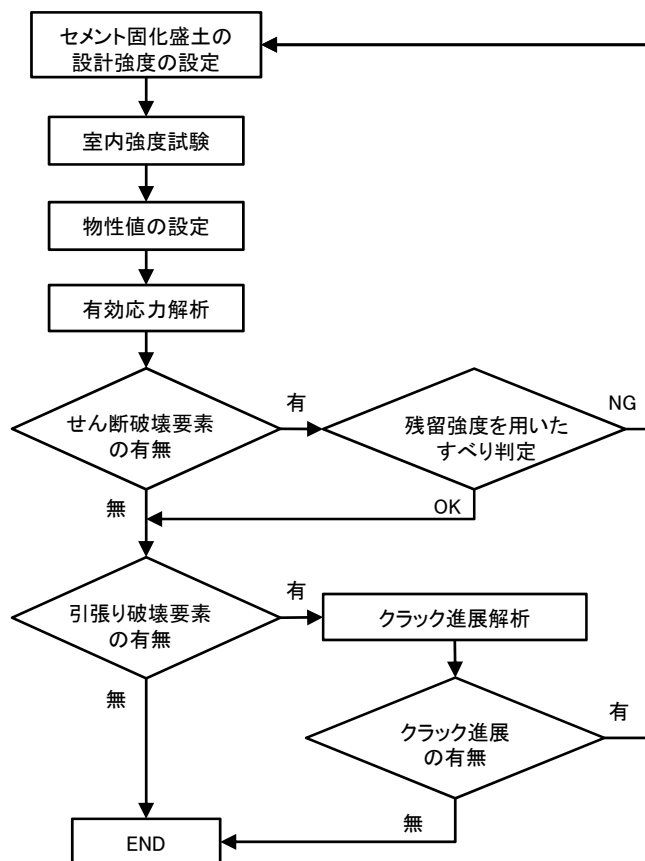
鉛直支持力	摩擦杭	支持杭
極限支持力 P_{NU} (kN)	6,843	11,111
鉛直荷重 P (kN)	2,462	3,254
安全率(P_{NU}/P)	2.8	3.4

曲げ	摩擦杭	支持杭
全塑性モーメント M_p (kNm)	41,305	41,305
モーメント M (kNm)	30,271	30,271
安全率(M_p/M)	1.4	1.4

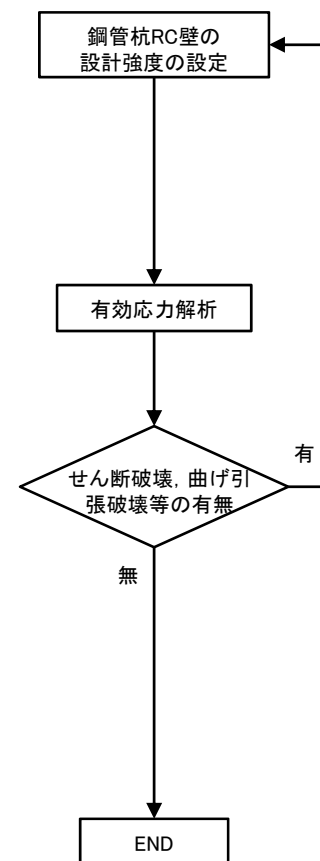
検討の結果、RC壁高さが高くなる区間においても、摩擦杭と支持杭の両ケースで適用性を確認した。今後は、有効応力解析による詳細な地震時評価を行う。

東海第二発電所には、液状化検討対象層があるため、有効応力解析を実施し防潮堤の設計強度が安全側に設定されていることを確認する。
セメント固化盛土の設計強度については、今後実施する有効応力解析の結果により、配合の設定や強度のばらつき評価まで多数の試験が必要となる。

セメント固化盛土の強度設定フロー



鋼管杭鉄筋コンクリート壁の強度設定フロー



鋼管杭鉄筋コンクリート壁の強度設定を行う際は、工場製品の組合せにより、迅速かつ柔軟に設計外力へ対応した設計が可能となる。

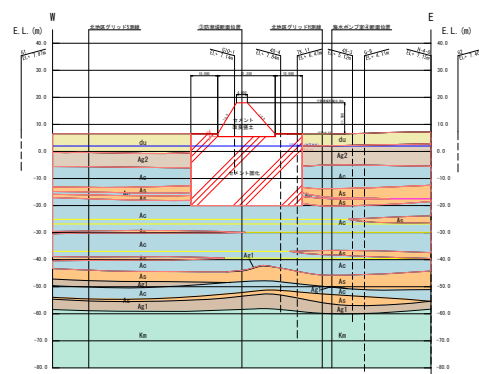
添6 粘性土の圧密沈下対策(サイト固有事項)



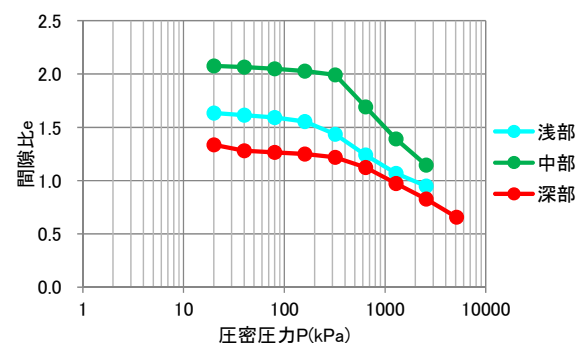
東海第二発電所敷地の北側には、沖積層の粘性土が堆積している。

したがって、防潮堤の設計に当たっては圧密沈下を考慮する必要がある、セメント固化盛土区間について長期的な圧密沈下を評価した。

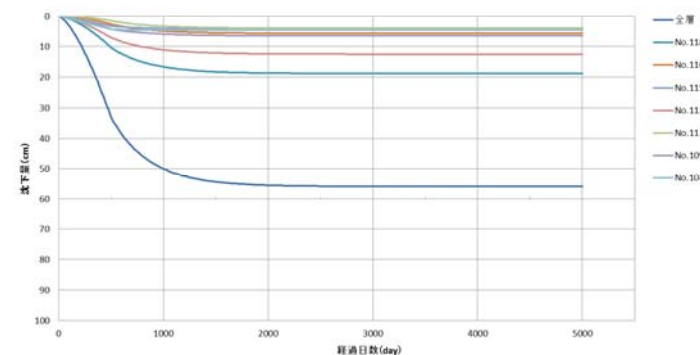
セメント固化盛土の単位体積重量は配合試験値を用い、基礎地盤の地盤改良はTP-20mまでと仮定した。また、圧密特性については、既往の試験結果をとりまとめた(深度別に3区分)。



圧密沈下評価断面図(粘性土最厚断面)



圧密特性(e-logp曲線)



時間-沈下量曲線

	セメント固化盛土	鋼管杭鉄筋コンクリート壁
圧密沈下量評価	・最終沈下量は約56cm(約1,500日) 【Cc法による圧密沈下量計算】	—
対策案	圧密沈下量を考慮した防潮堤高さを設定する。	鋼管杭は摩擦杭と支持杭の併用を検討している。 (ブロック毎に1本程度の支持杭を含めた構造で検討予定)

東海第二発電所固有の課題である圧密沈下への対応については、鋼管杭鉄筋コンクリート壁構造の杭支持により、防潮堤の長期的な安定性を確保する。

添7 液状化強度特性のFLIPによる再現結果



液状化検討対象層の液状化強度特性は、液状化強度試験結果の平均と標準偏差を考慮した保守的設定（平均 -1σ 設定）とし、一次元及び二次元有効応力解析に用いる。

