

大洗研究所（南地区）
高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

主冷却機建物抑止杭の設計方針について

令和3年7月20日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

審査会合におけるコメント（１）

No.	審査会合	コメント	回答状況	ページ
1	令和2年11月6日 第382回審査会合	地下水位について、夏海湖の水面高さT.P. +29 mであるのに対し、設定地下水位はT.P. +6.7 mであり、夏海湖との関係性、他の地下水位観測データを含め、地下水位の設定の妥当性を説明すること。	3/5審査会合にてご説明	—
2	”	抑止杭の周辺地盤について、地盤と施設のどちらか、新規制基準適合上の取り扱いを説明すること。	今回ご説明	6～10
3	”	周辺地盤変状による影響について、埋戻土の液状化影響を説明すること。また、周辺地盤の変状による影響だけでなく、すべり安全率に対しては施設を横から押す起動力となることも考えられるため、抑止杭の構造、成立性にどのような影響を与えるか説明すること。	”	27
4	”	解析用地盤物性値について、HTTRとの相違点を整理し、使用した物性値が「常陽」とHTTRで本質的に変わらないことを定量的に示すこと。	次回以降ご説明	—
5	”	すべり安全率の評価結果について、最小すべり安全率発生時刻が異なるため、各発生時刻の結果を比較し、説明すること。	”	—
6	”	各断面について、建物基礎底面のみでのすべり安全率の評価結果を提示すること。	”	—
7-1	”	最小すべり安全率を示す時刻の抑止杭の応力分布を示し、応力が適切に算定されているか説明すること。	今回ご説明	30～35
7-2	”	抑止杭の応力は時々刻々深度方向に変わることから、抑止杭にとって安全側かの観点で評価方法の妥当性を説明すること。	”	30～35

No.	審査会合	コメント	回答状況	ページ
8-1	〃	抑止杭による補強前後に地盤に生じるせん断応力の変化を示し、現在の設計・評価に相互作用が影響しないか説明すること。	今回ご説明	37
8-2	〃	抑止杭と主冷却機建物が非常に近接しているため、建家と杭の相互作用（建家が地盤を介して杭にもたれる現象や杭反力が建家に過剰な荷重を与えていないか）を説明すること。	〃	38～39
8-3	〃	抑止杭設置による原子炉建物、主冷却機建物の耐震評価（建物・機器）への影響について説明すること。	〃	40
9	〃	抑止杭の対策効果を確認するため、抑止杭の設計仕様、施工方法及び施工管理項目について説明をすること。	〃	12～18
10	〃	抑止杭のモデル化について、根入れ深さが妥当であること等、設計方針を踏まえ説明すること。	〃	22
11	令和3年3月5日 第396回審査会合	地下水位は東西方向に高低差がある。解析用地下水位（T.P. +6.7m）の設定については、後段規制への影響も含め、その妥当性について説明すること。	次回以降 ご説明	—
12	〃	地下水位より上部に分布する宙水について、解析上の位置づけを明確にすること。	〃	—
13	〃	用語（洪積層）について、地質学の用語を踏まえた記載に適正化すること。	〃	—
14	〃	山元（2013）で示された夏海層、笠神層の編年について、文献等を精査し、その解釈について確認すること。	〃	—
15	〃	建物基礎下レベルの地震動評価の解析に用いた地盤モデルの物性値（解放基盤表面位置のS波速度、密度）について、基準地震動の策定において設定した物性値と異なっていることから、再検討をすること。	〃	—

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
2. 抑止杭の概要
3. 抑止杭の施工
4. 抑止杭の評価
5. 建物と抑止杭の相互作用

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
2. 抑止杭の概要
3. 抑止杭の施工
4. 抑止杭の評価
5. 建物と抑止杭の相互作用

主冷却機建物抑止杭の分類

- ・耐震重要施設（Sクラスに属する施設）を有する施設である「原子炉建物及び原子炉附属建物」、「主冷却機建物」に対しては、基準地震動Ssによる基礎地盤のすべり安全率を評価する。
- ・主冷却機建物（東西断面）は、すべり安全率が評価基準値を下回ることから、基礎地盤のすべりを防止するため、主冷却機建物に対して波及的影響を考慮すべき設備として主冷却機建物抑止杭（以下「抑止杭」）を設置する。
- ・今回、主冷却機建物、抑止杭及び地盤について、設置許可基準規則の第3条（設計基準対象施設の地盤）、第4条（地震による損傷の防止）への適合性を確認するため、条文における位置づけ、確認内容を整理した。（整理結果は次ページに示す）

<耐震重要施設（Sクラスに属する施設）を有する施設>

- ・ 原子炉建物及び原子炉附属建物
- ・ 主冷却機建物

※Sクラスに属する機器・配管系は、すべて原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物内に設置されている。

<主冷却機建物に対して波及的影響を考慮すべき設備>

- ・ 主冷却機建物抑止杭
（主冷却機建物のすべりに対する安全性を確保）

<B、Cクラスに属する施設>

- ・ 第一使用済燃料貯蔵建物
- ・ 第二使用済燃料貯蔵建物
- ・ メンテナンス建物
- ・ 廃棄物処理建物
- ・ 旧廃棄物処理建物
- ・ 放射線管理室

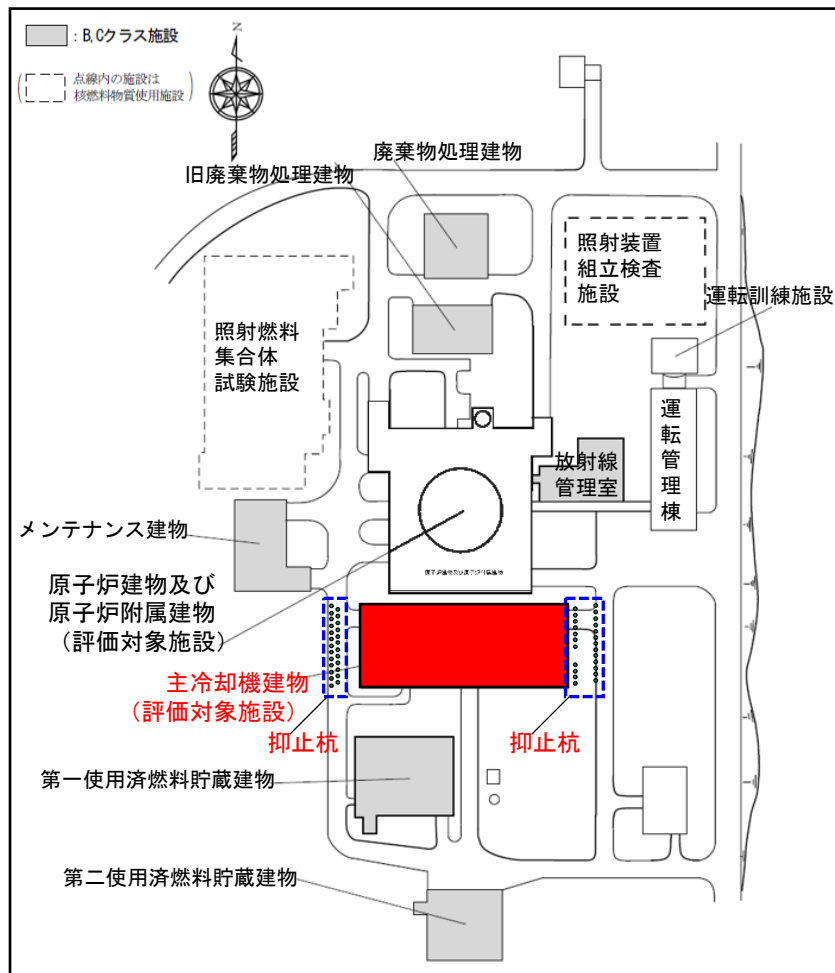


図 施設配置図

設置許可基準規則（第3条）に対する確認内容

- ・ 第3条（設計基準対象施設の地盤）の条文及び条文に対する確認内容を下表に示す。
- ・ **主冷却機建物**については、第3条第1項の確認として、**抑止杭を考慮したすべり安全率が評価基準値以上となることを確認する。**また、第3条第2項の確認として、**周辺地盤の変状により、抑止杭がすべりに抵抗する機能が損なわれるおそれがないよう設計する。**

設置許可基準規則 第3条（設計基準対象施設の地盤）		確認内容
本文	別記	
第1項 施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震力が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有すること ・ 地震力が作用することによって弱面上のずれ等が発生しないことを含め、地震力に対する支持性能が確保されていること 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 動的解析の結果に基づいて算定した基礎の接地圧が評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 動的解析の結果に基づいて算定したすべり安全率が評価基準値以上となることを確認する。主冷却機建物は、地盤に抑止杭を設置し、すべりに対する安全性を確保する。 ・ 動的解析の結果に基づいて算定した基礎底面の傾斜が評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 基礎地盤が液状化するおそれがないことを確認する。
第2項 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。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓みにより、施設の安全機能が損なわれるおそれがないこと ・ 地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状により、施設の安全機能が損なわれるおそれがないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震発生に伴う地殻変動によって生じる地盤の傾斜を算出し、地震動による地盤の傾斜も考慮した最大傾斜が、評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 地震発生に伴う周辺地盤の変状（不等沈下、液状化、揺すり込み沈下等）により、評価対象施設の安全機能が影響を受けないことを確認する。 ・ 周辺地盤の変状（地盤の中抜け、液状化）により、抑止杭の機能（すべり抵抗）が損なわれるおそれがないよう設計する。
第3項 施設は変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面が生じるおそれがないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象施設が設置される地盤には、将来活動する可能性のある断層等が存在しないことを確認する。

設置許可基準規則（第4条）に対する確認内容

- ・ 第4条（地震による損傷の防止）の条文及び条文に対する確認内容を下表に示す。
- ・ **抑止杭**については、第4条第3項の確認として、**基準地震動による地震力に対して終局耐力が妥当な安全余裕を有していることを確認する。**

設置許可基準規則 第4条（地震による損傷の防止）		確認内容
本文	別記	
<p>第3項 施設は基準地震動による地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 建物・構築物について、基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件に対して、構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していること 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 抑止杭について、基準地震動による地震力に対して終局耐力が妥当な安全余裕を有していることを確認する。
<p>第4項 施設は斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基準地震動による安定解析を行い、崩壊のおそれがないことを確認する ・ 崩壊のおそれがある場合には、当該部分の除去あるいは敷地内土木工作物による斜面の保持等の措置を講ずる ・ 地質・地盤の構造、地盤等級区分、液状化の可能性及び地下水の影響等を考慮する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基準地震動による地震力により、評価対象施設に重大な影響を与える周辺斜面が存在しないことを確認する。

抑止杭を考慮したすべり評価の評価項目、評価基準値

- ・主冷却機建物、抑止杭及び地盤について、すべり評価の評価項目、評価基準値を下表に示す。
- ・第3条に対しては、**抑止杭を考慮したすべり安全率が評価基準値1.5以上**であることを確認する。
- ・第4条に対しては、**基準地震動による地震力に対する抑止杭の応力が短期許容応力度以下**であることを確認する。

表 抑止杭を考慮したすべり評価の評価項目、評価基準値

部位	機能	第3条（設計基準対象施設の地盤）	第4条（地震による損傷の防止）
		すべりに対する安全性	耐震性
地盤	基礎地盤	評価項目 : すべり安全率 評価基準値 : 1.5以上	—
	周辺地盤		—
施設	抑止杭		評価項目 : 応力（曲げ、せん断） 評価基準値 : 短期許容応力度以下

※すべり評価の与条件として、地盤の中抜けが起こらないよう、杭間隔を設定し、周辺地盤が液状化するおそれがないことを確認する。また、杭が地盤のすべりに抵抗できるよう、必要な根入れ深さを基礎底面以深に確保する。

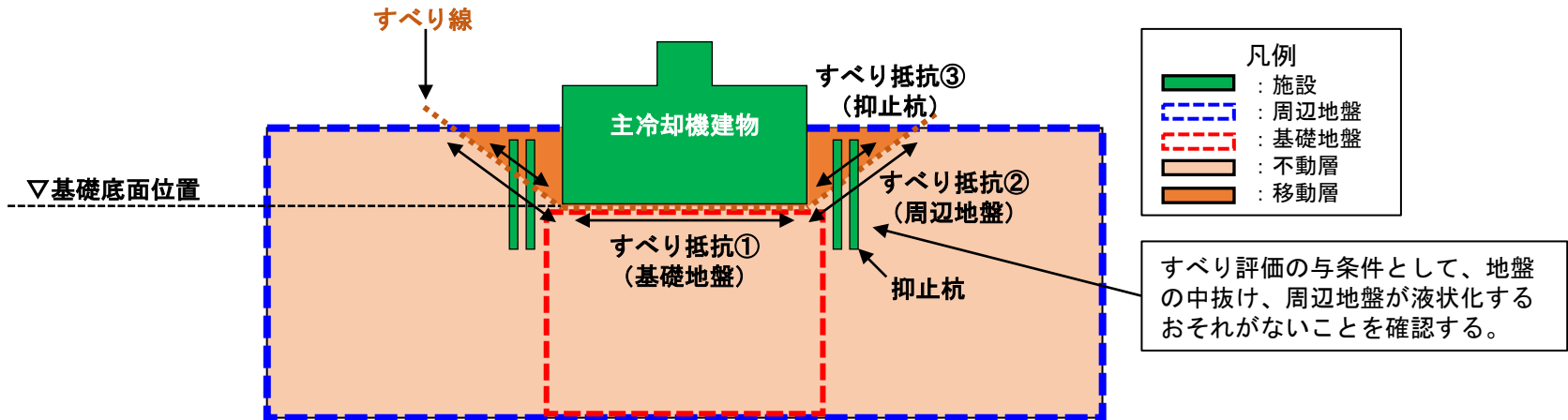
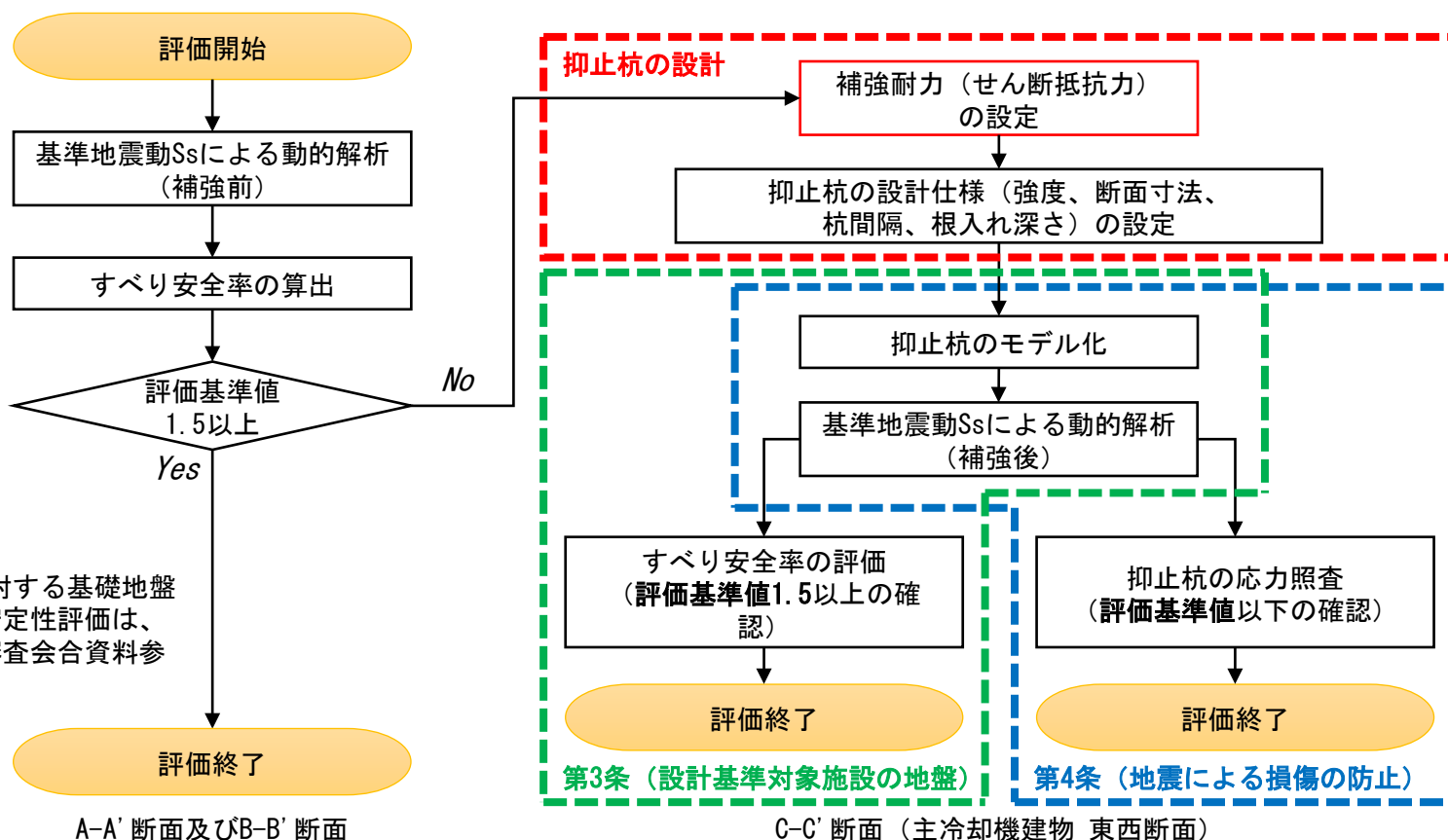


図 各部位の区分

第3条、第4条に対する抑止杭の評価について

- ・ 第3条、第4条に対する抑止杭の評価フローを下図に示す。
- ・ 設置許可段階において、**評価基準値であるすべり安全率1.5以上となる補強耐力を設定し、それを満足するよう抑止杭の設計仕様を設定する。**
- ・ 設定した設計仕様をもとに抑止杭をモデル化し、第3条に対するすべり安全率の評価を実施する。また、第4条に対する抑止杭の応力照査を実施する。



※C-C' 断面以外に対する基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価は、令和2年11月6日審査会合資料参照。

図 第3条、第4条に対する抑止杭の評価フロー

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
- 2. 抑止杭の概要**
3. 抑止杭の施工
4. 抑止杭の評価
5. 建物と抑止杭の相互作用

・ 抑止杭の適用規格、設計仕様を下表に示す。

■適用規格

- ・ 最新斜面・土留め技術総覧（最新斜面・土留め技術総覧編集委員会）
- ・ 地すべり鋼管杭設計要領（斜面防災対策技術協会）
- ・ 杭基礎施工便覧（日本道路協会）
- ・ 道路橋示方書・同解説（日本道路協会）

■抑止杭の設計仕様

部位	期待する効果	部位 (材質)	仕様	杭断面詳細図
抑止杭	すべりが発生した際に生じるせん断力に対して、鋼管杭及びH鋼でせん断力を負担する。	・ 鋼管杭	鋼管杭 : SKK490 (JIS A 5525) 断面寸法 : 外径800 mm、厚さ16 mm※1 ※1 鋼管の外径1 mmを腐食しろとして考慮	<p>杭断面詳細図</p> <p>中詰モルタル ※2</p> <p>t=16</p> <p>H鋼 428×407×20×35</p> <p>鋼管 800</p>
		・ H鋼	H鋼 : SM490A (JIS G 3106) 断面寸法 : 428 mm×407 mm×20 mm×35 mm	

※2 鋼管の空隙は中詰モルタルにより充填するが、強度は見込まない。

2. 抑止杭の概要

抑止杭の配置計画 平面図

- 抑止杭は主冷却機建物の東西断面のすべりに対する安定性を確保することを目的に、建物の東側、西側に配置する。
(東側24本、西側25本)
- 杭の間隔は「最新斜面・土留め技術総覧」(下表)に基づき、移動層の厚さ(主冷却機建物の基礎底面までの深さ: 20 m)に応じ、3.0 m以下とする。
「これらの数値は経験や実験結果にもとづいて定められたものであり、削孔による地盤のゆるみや乱れの影響が重複せず、したがって土塊の中抜けを起こさず、杭に所定の地すべり力が作用するための条件の目安として用いることができる」とされている。

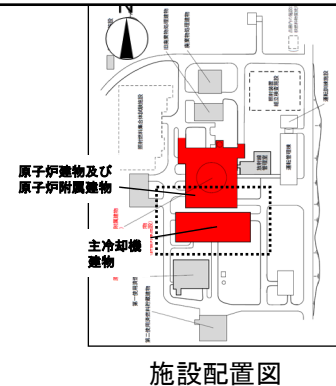
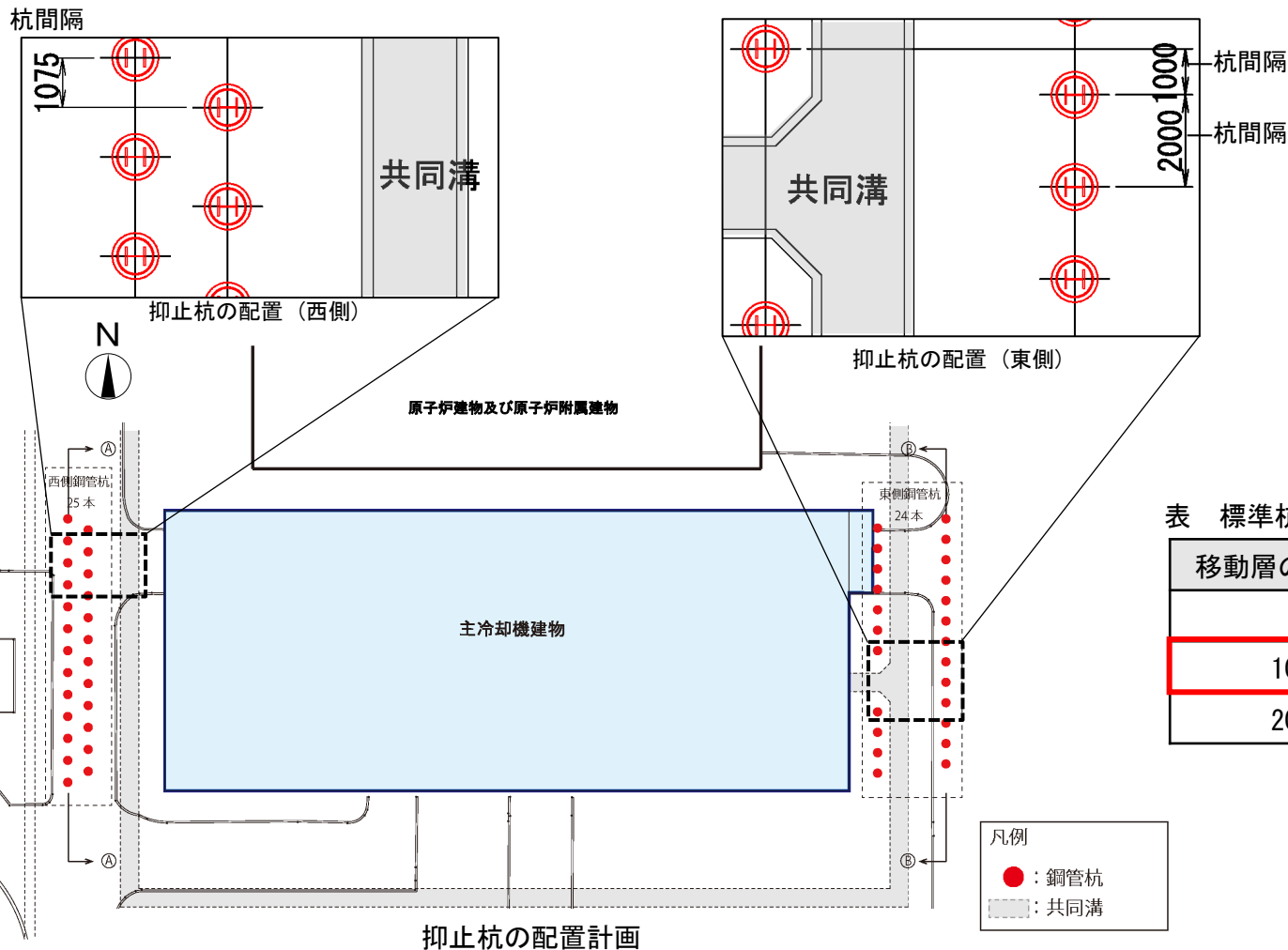


表 標準杭間隔 (最新斜面・土留め技術総覧)

移動層の厚さ (m)	杭の間隔 (m)
~10	2.0以下
10~20	3.0以下
20以上	4.0以下

凡例

- : 鋼管杭
- : 共同溝

抑止杭の配置計画

※抑止杭の設計仕様・配置計画は基本設計段階の情報に基づく。

2. 抑止杭の概要

抑止杭の配置計画 断面図

- 抑止杭の根入れは「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき算定した根入れ深さ（11.9 m）以上を不動層（すべり線以深）に確保する。

「最新斜面・土留め技術総覧」より、根入れ深さは以下の大きい方とする。

① 杭全長の1/3 ≒ 10 m

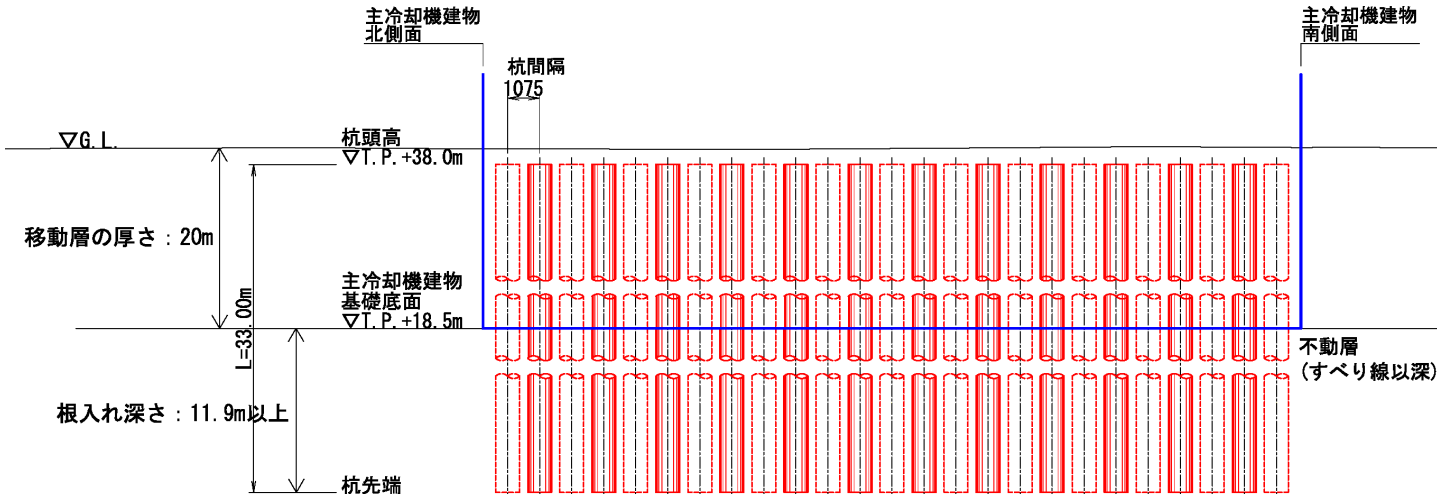
② $1.5\pi/\beta = 11.9$ m
ここで、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}$$

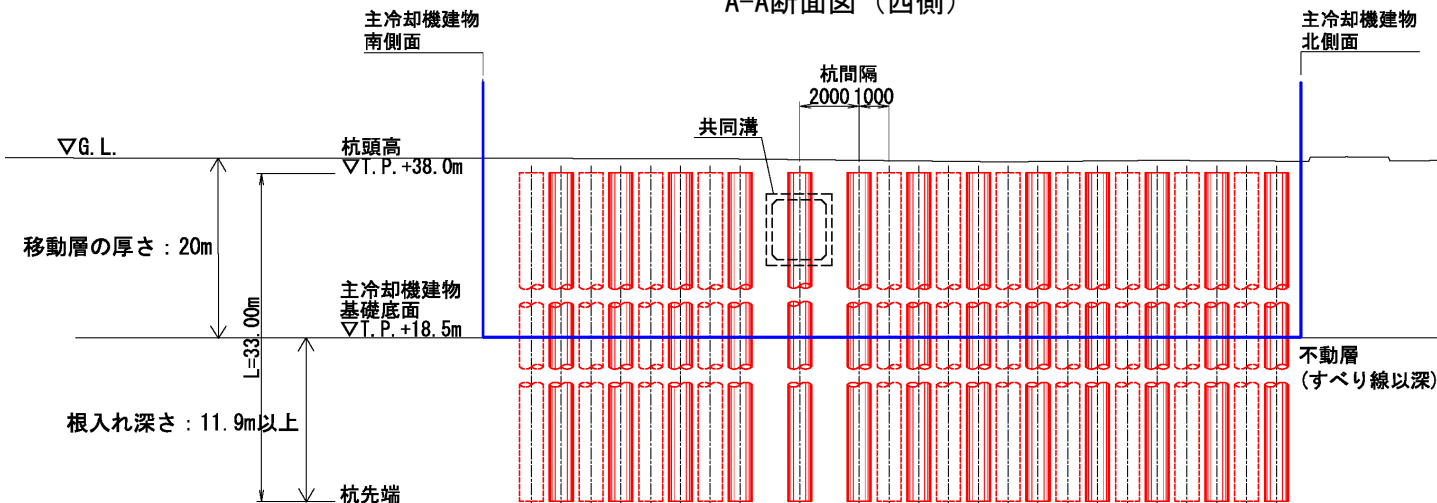
E_s : 不動層の変形係数

E : 杭の弾性係数

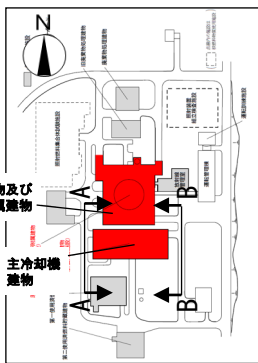
I : 杭の断面2次モーメント



A-A断面図 (西側)



B-B断面図 (東側)



施設配置図

抑止杭を考慮したすべり評価への反映項目

- 抑止杭を考慮したすべり評価に対しては、抑止杭の設計仕様・配置計画に基づき、下表に示す項目を解析モデルに反映する。

項目	設定値	設定方法	管理項目
抑止杭の根入れ深さ	11.9 m	「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき、以下の大きい方とする。 ① 杭全長の1/3 \cong 10 m ② $1.5\pi/\beta = 11.9$ m $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}$: 杭の特性値 Es: 不動層の変形係数 E : 杭の弾性係数 I : 杭の断面2次モーメント	・ 杭頭レベル ・ 杭の部材長
抑止杭の間隔	3.0 m以下	「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき、移動層の厚さ（主冷却機建物の基礎底面までの深さ：20 m）に応じ、3.0 m以下とする。建物西側に25本、東側に24本の抑止杭を設定する。	・ 杭間隔 ・ 杭本数
抑止杭のせん断抵抗力	8,500 kN/本	「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき、鋼管とH鋼のせん断抵抗力を累加し、杭1本当たり8,500 kNとする。 $S_k = \frac{\tau_P A_P}{\alpha} + \tau_H A_H$ Sk: 抑止杭1本のせん断抵抗力 τ_P : 鋼管の許容応力度（短期）（157.5 N/mm ² ） Ap: 鋼管のせん断断面積（腐食しろ1 mm考慮：3.690 × 10 ⁻² m ² ） α : 鋼管の形状係数（=2.0） τ_H : H鋼の許容応力度（短期）（157.5 N/mm ² ） AH: H鋼の断面積（3.607 × 10 ⁻² m ² ）	・ 杭の強度 ・ 杭の断面寸法

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
2. 抑止杭の概要
- 3. 抑止杭の施工**
4. 抑止杭の評価
5. 建物と抑止杭の相互作用

抑止杭の施工方法（例）

- ・ 現在想定している抑止杭の施工手順（例）を以下に示す。
- ・ 施工はオールケーシング工法を想定しており、本工法はケーシングを建込ながらケーシング内掘削土をハンマーグラブで掘削し、鋼管杭、H鋼建込後、モルタルを打設する。

表 施工方法（例）



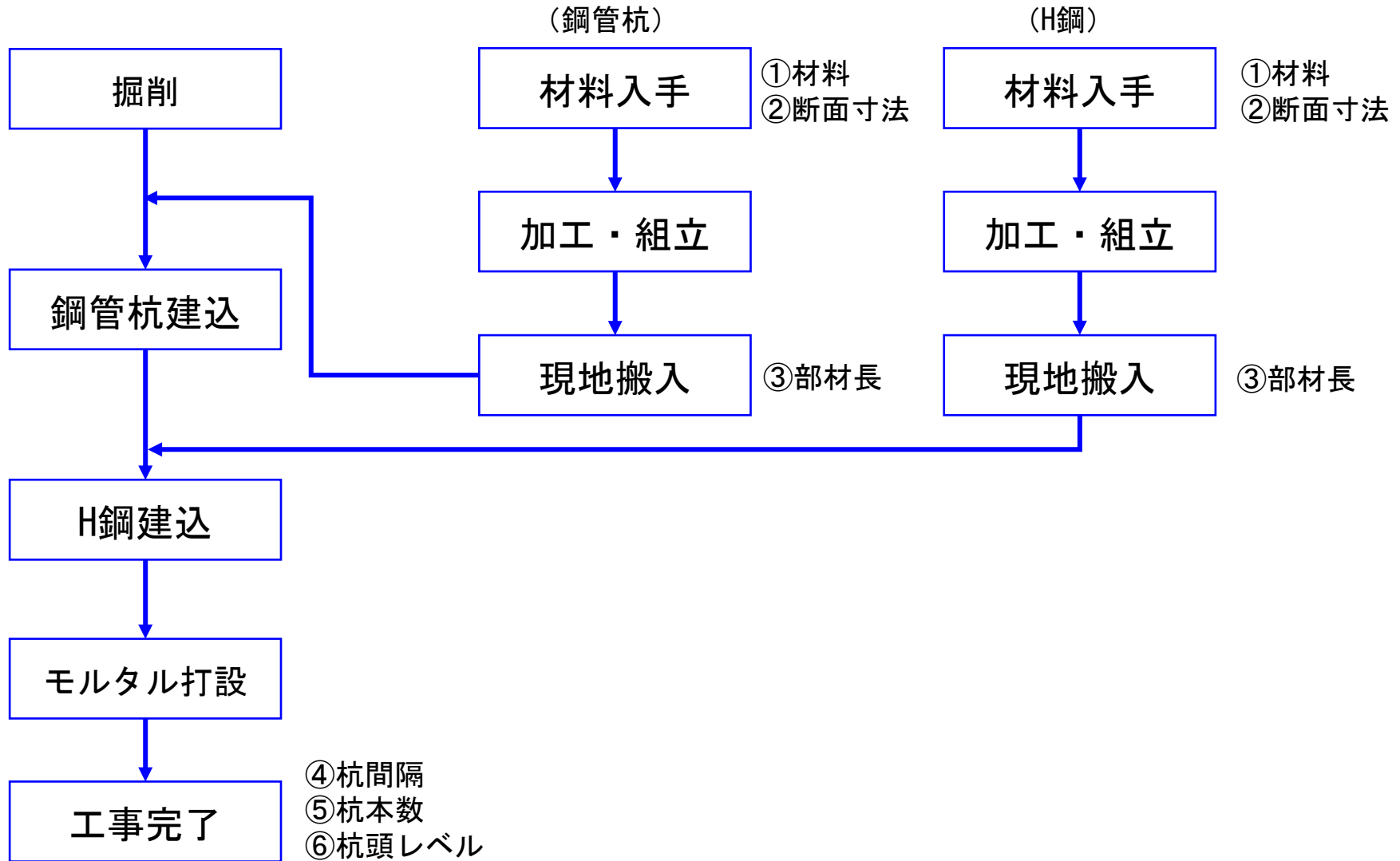
オールケーシング工法の施工例

<p>ケーシング建込掘削</p>	<p>ケーシング建込完了掘削完了</p>	<p>鋼管杭建込</p>	<p>H鋼建込</p>	<p>鋼管杭、H鋼設置完了後、モルタル打設、ケーシング引抜き</p>

※抑止杭の施工方法・管理項目は基本設計段階の情報に基づく。今後の検討により変更する場合がある。

抑止杭の工事フロー及び管理項目（案）

- 抑止杭の工事フロー及び管理項目（案）を以下に示す。
- 詳細は後段規制（設工認）において説明する。



※抑止杭の施工方法・管理項目は基本設計段階の情報に基づく。今後の検討により変更する場合がある。

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
2. 抑止杭の概要
3. 抑止杭の施工
- 4. 抑止杭の評価**
5. 建物と抑止杭の相互作用

■評価方針

- ・ 基準地震動 S_s による抑止杭を考慮したすべり評価を実施する。
- ・ すべり評価は、想定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すべり線上のせん断力の和で除して求めたすべり安全率が評価基準値1.5を上回ることを確認する。
- ・ 抑止杭を考慮したすべり安全率は、すべり線上のせん断抵抗力に抑止杭のせん断抵抗力を累加して評価する。

抑止杭を考慮したすべり評価 解析条件

■地震応答解析手法

・2次元動的FEM解析（等価線形化法）を使用し、応力状態を算出する。

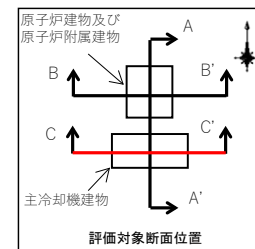
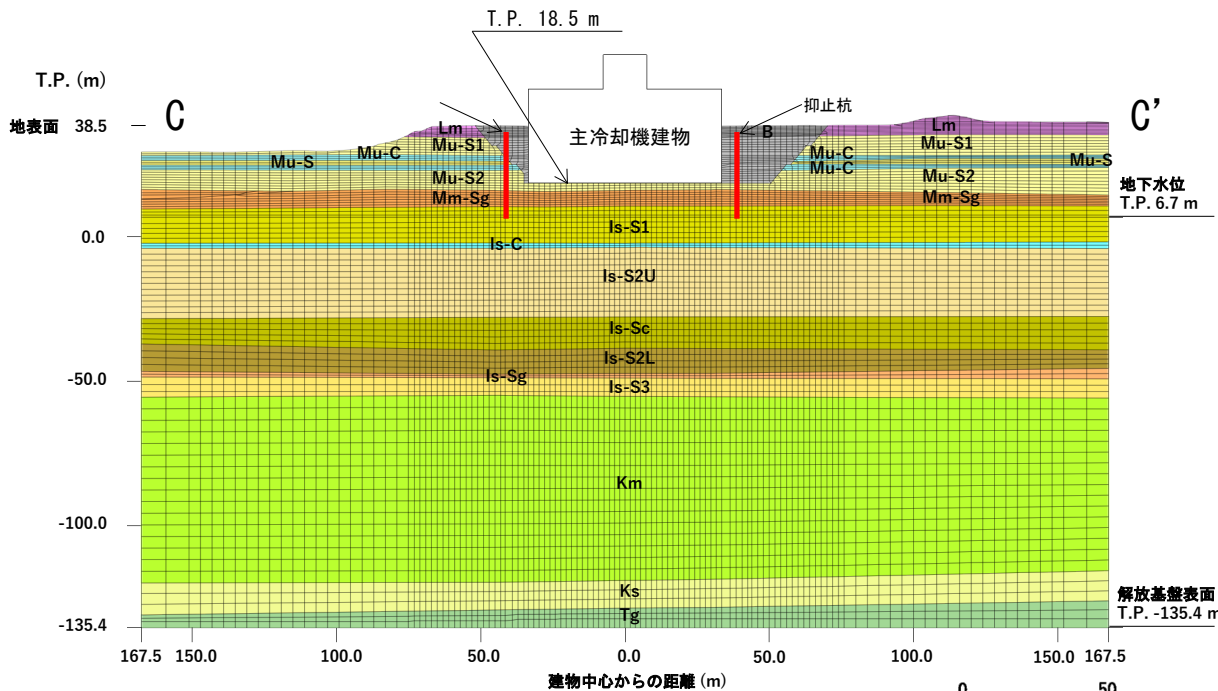
■入力地震動

・基準地震動6波（Ss-D、Ss-1~5）を使用し、解析モデル下端（解放基盤表面）に水平及び鉛直地震動を同時入力する。

■解析モデルの設定

・解析モデルの設定方法を以下に示す。

項目	設定方法
モデル領域	境界条件の影響が地盤及び建物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。
境界条件	エネルギーの逸散効果を評価するため、側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とする。
地盤のモデル化	平面ひずみ要素でモデル化する。
抑止杭のモデル化	ビーム要素でモデル化する。



凡例					
B	埋戻土	Mm-Sg	礫質土	Km	砂質泥岩
Lm	ローム	Is-S1	砂質土	Ks	砂岩
Mu-S1	砂質土	Is-C	粘性土	Tg	砂岩泥岩互層
Mu-C	粘性土	Is-S2U	砂質土		
Mu-S	砂質土	Is-S2L	砂質土		
Mu-S2	砂質土	Is-Sg	礫質土		
		Is-S3	砂質土		

※詳細な解析条件は令和2年11月6日審査会合資料に示す。

図 解析モデル (C-C' 断面)

抑止杭のモデル化

- ・ 抑止杭は東側、西側に配置した2列の中心位置にビーム要素としてモデル化する。
- ・ 杭と地盤は同一座標に節点同士を剛結合として設定する。
- ・ 杭の根入れは「最新斜面・土留め技術総覧」から算定した根入れ深さ11.9 mに基づきモデル化する。

「最新斜面・土留め技術総覧」より、根入れ深さは以下の大きい方とする。

- ① 杭全長の1/3 ≒ 10 m
- ② $1.5\pi/\beta = 11.9$ m

ここで、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}} : \text{杭の特性値}$$

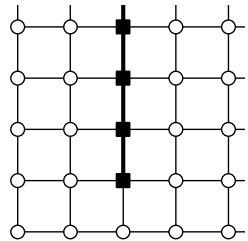
E_s : 不動層の変形係数

E : 杭の弾性係数

I : 杭の断面2次モーメント



図 抑止杭の配置計画 (平面図)



東西で配置した杭の中心位置にビーム要素として抑止杭を設定する。

- 地盤を構成する節点
- 抑止杭を構成する節点 (同一座標の○と節点を共有)
- 抑止杭 (ビーム要素)

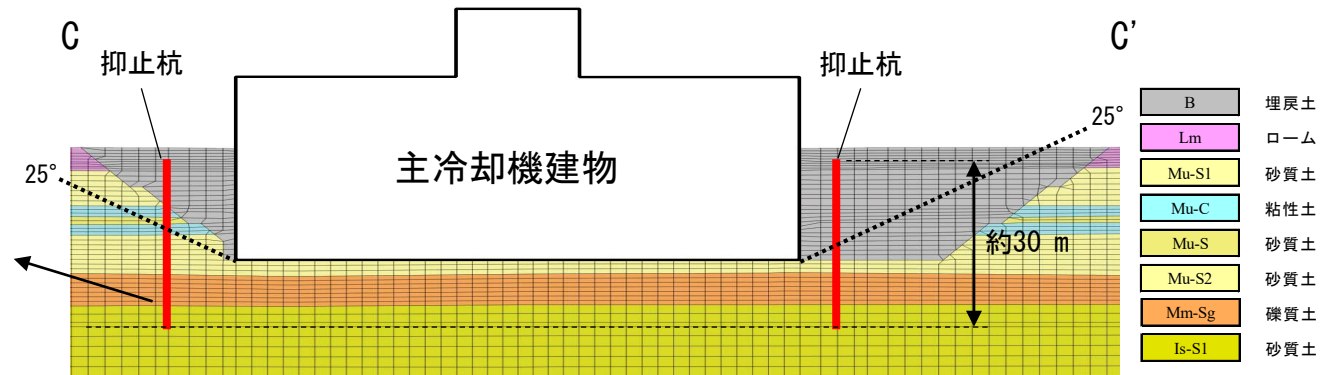



図 抑止杭周辺拡大図 (C-C' 断面)



抑止杭の解析用物性値

- ・ 抑止杭1本当たりの解析用物性値を下表に示す。
- ・ 鋼管およびH鋼ともに、解析に用いる物性値は腐食しろ0mmの全断面積を用いる。

※抑止杭の設計仕様は基本設計段階の情報に基づく。

表 鋼管：φ800，厚さt=16（SKK490）

杭径（外径）	板厚 (m)	断面積 (m ²)	断面2次 モーメント I (m ⁴)	ヤング率 E (kN/m ²)	曲げ剛性 EI (kNm ²)
800φ	0.016	3.941×10^{-2}	3.030×10^{-3}	2.000×10^8	6.060×10^5

表 H鋼：H-428x407x20x35（SM490A）

断面積 (m ²)	断面2次 モーメント I (m ⁴)	ヤング率 E (kN/m ²)	曲げ剛性 EI (kNm ²)
3.607×10^{-2}	1.190×10^{-3}	2.000×10^8	2.380×10^5

表 中詰モルタル

外径 (m)	断面積 (m ²)	断面2次 モーメント I (m ⁴)	ヤング率 E (kN/m ²)	曲げ剛性 EI (kNm ²)
0.768	4.272×10^{-1}	1.590×10^{-2}	2.200×10^7	3.500×10^5

※中詰モルタル：抑止杭の強度として見込まない。

抑止杭を考慮したすべり安全率の算出方法

- ・ 抑止杭を考慮したすべり安全率は、地盤のすべり安全率（せん断抵抗力、発生せん断力）に、抑止杭のせん断抵抗力、発生せん断力を累加して算出する。
- ・ 抑止杭のせん断抵抗力は適用規格に基づき、下式により鋼管及びH鋼の許容応力を加算して算出する。許容応力算出にあたり、中詰モルタルに覆われていない鋼管杭について、腐食しろ1mmを考慮する。

抑止杭を設置する基礎地盤のすべり安全率の算出方法

$$FS' = \frac{S + S_k}{Q + Q_k}$$

- FS' : 抑止杭を考慮したすべり安全率
 S : 想定すべり線上の地盤のせん断抵抗力
 S_k : 単位奥行当りの抑止杭のせん断抵抗力
 Q : 想定すべり線上の地盤に生じるせん断力
 Q_k : 単位奥行当りの抑止杭に生じる最大せん断力

抑止杭のせん断抵抗力 S_k を考慮することにより、すべり安全率が向上する

抑止杭のせん断抵抗力※1

$$S_k = \frac{\tau_P A_P}{\alpha} + \tau_H A_H$$

- S_k : 抑止杭1本のせん断抵抗力
 τ_P : 鋼管の許容応力度（短期）（157.5 N/mm²）※2
 A_P : 鋼管のせん断断面積（腐食しろ1 mm考慮：3.690 × 10⁻² m²）
 α : 鋼管の形状係数（=2.0）
 τ_H : H鋼の許容応力度（短期）（157.5 N/mm²）※2
 A_H : H鋼の断面積（3.607 × 10⁻² m²）

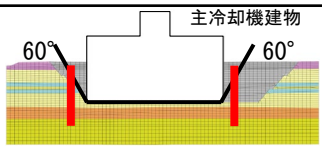
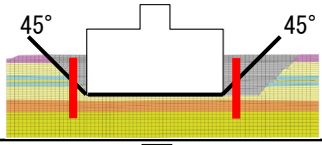
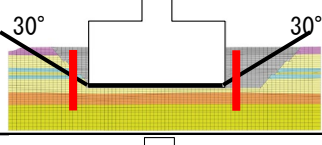
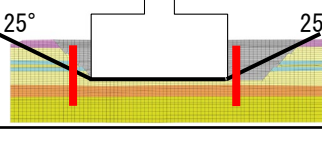
※1 最新斜面・土留め技術総覧

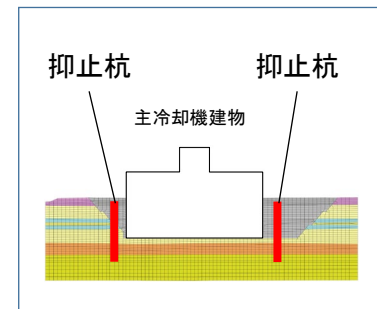
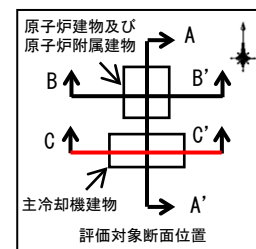
※2 道路橋示方書・同解説 I1鋼橋編

抑止杭を考慮したすべり評価 評価結果

- ・ 想定すべり線 番号1~4に対して最小すべり安全率（基本モデル）は**評価基準値1.5を上回る**。
- ・ 上記の結果が最小となったケース（番号4：すべり線の立ち上がり角度が25°）に対して、地盤強度のばらつきを考慮した場合、解析用地下水位を地表面とした場合でも、最小すべり安全率が**評価基準値1.5を上回る**。

表 すべり安全率の評価結果

番号	想定すべり線形状	地震動※1	すべり安全率※2		
			基本モデル	地盤強度ばらつき考慮	地下水位変動考慮(地表面)
1		Ss-D (+, -)	2.9 [46.64]	—	—
2		Ss-D (+, -)	2.7 [46.64]	—	—
3		Ss-D (+, -)	2.4 [46.65]	—	—
4		Ss-D (+, -)	2.3 [46.65]	2.1 [46.65]	2.2 [46.67]



※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転
 ※2 [] は発生時刻(秒)、すべり安全率は抑止杭による抵抗力を考慮した値を示す。

抑止杭を考慮したすべり評価 補強前後の比較

- ・ 抑止杭による補強を行うことにより、せん断抵抗力が大きくなり、**すべり安全率は最小1.3から2.1に向上した。**

	想定すべり線形状	地震動※	すべり安全率		
			基本モデル	地盤強度ばらつき考慮	地下水位変動考慮(地表面)
補強前		Ss-D (+, -)	1.5	1.3	1.4
↓					
補強後		Ss-D (+, -)	2.3	2.1	2.2

※ (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

抑止杭周辺の地盤に対する液状化の有無の確認

■適用規格

(1) 「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」では「建物及び構築物が設置される地盤が第四紀層等の砂地盤又は砂礫地盤で地下水位が高い場合には、液状化の可能性を検討していること。」とされている。

(2) 日本建築学会の「建築基礎構造設計指針」では、建物・構築物の支持地盤について、**液状化判定を行う必要がある飽和土層**として、**地表面から20 m程度以浅の以下の条件を満たす土層**が記載されている。

- ① 沖積層で、細粒分含有率が35%以下の土層
- ② 埋立地盤、盛土地盤において、粘土分含有率が10%以下又は塑性指数が15%以下の土層
- ③ 細粒土を含む礫又は透水性の低い土層に囲まれた礫

・ 抑止杭周辺の埋戻土は、地盤調査より**不飽和土**であることを確認しており、**飽和土層に該当しない**。

・ 抑止杭周辺の地山は、**第四系更新統**であり、**沖積層に該当しない**。

したがって、**抑止杭周辺の地盤は液状化のおそれがなく、抑止杭の機能が損なわれないことを確認した**。

※地盤調査結果、地下水位の設定については、令和3年3月5日審査会合資料に示している。

表 抑止杭周辺の地盤に対する液状化判定

抑止杭周辺の地盤		液状化判定が必要な土層に該当するかの判定
地質記号	地層区分 (主な層相)	
B	(埋戻土)	「飽和土層」ではないため該当しない。
Mu-S1 Mu-S Mu-C Mu-S2 Mm-Sg Is-S1	第四系更新統 (砂質土) (砂質土) (粘性土) (砂質土) (礫質土) (砂質土)	「沖積層」ではないため該当しない。

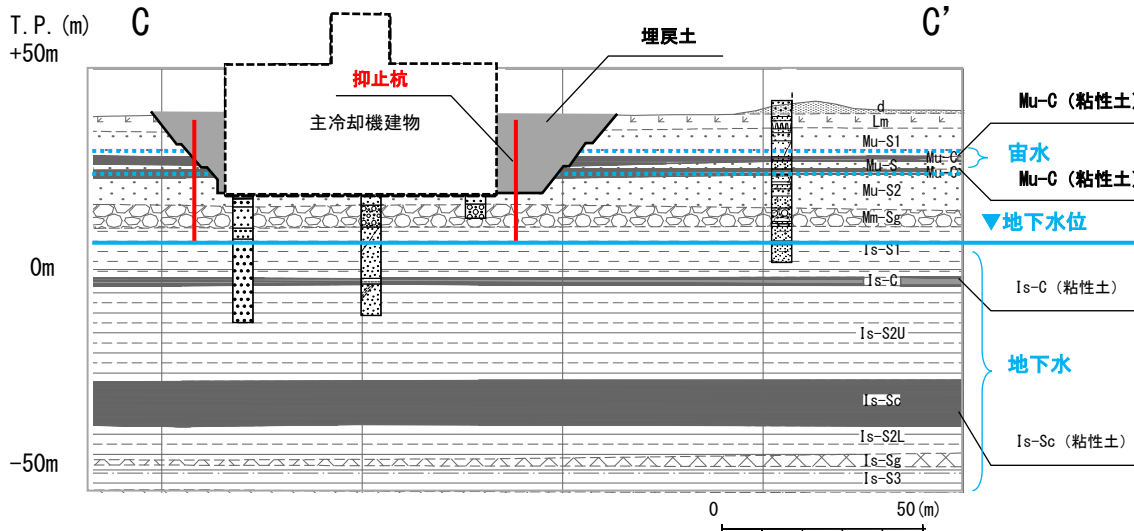


図 地質断面図 (C-C' 断面)

■ 評価方針

- ・ 抑止杭について、基準地震動 S_s が作用した場合に、すべりに抵抗する機能が維持されることを確認するため、耐震性評価を実施する。
- ・ 耐震性評価は、地震応答解析により抑止杭に発生する応力が許容限界を下回ることを照査する。

評価対象断面、地震応答解析手法、入力地震動、解析モデルの設定、解析条件は「抑止杭を考慮したすべり評価」と同じである。

抑止杭の耐震性評価 許容限界

・杭1本当たりの許容せん断力、許容曲げ応力度は、下式により算出する。

表 抑止杭の許容限界

照査項目	単位	許容限界
せん断	kN/本	8,500※3
曲げ	N/mm ²	277※2

- ※1 最新斜面・土留め技術総覧
- ※2 道路橋示方書・同解説 II鋼橋編
- ※3 抑止杭の許容せん断力 S_k

$$S_k = \frac{\tau_P A_P}{\alpha} + \tau_H A_H$$

- ※4 抑止杭に発生する曲げ応力度 σ_{\max}

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A_P + A_H} + \frac{M_{\max}}{Z_P + Z_H}$$

S_k :抑止杭1本のせん断抵抗力

τ_P :鋼管の許容応力度 (短期) (157.5 N/mm²) ※2

A_P :鋼管のせん断断面積 (腐食しろ1 mm考慮 : 3.690 × 10⁻² m²)

α :鋼管の形状係数 (=2.0)

τ_H :H鋼の許容応力度 (短期) (157.5 N/mm²) ※2

A_H :H鋼の断面積 (3.607 × 10⁻² m²)

σ_{\max} :抑止杭1本に発生する曲げ応力

N_{\max} :抑止杭1本に発生する最大軸力

M_{\max} :抑止杭1本に発生する最大曲げモーメント

Z_P :鋼管の断面係数 (腐食しろ1 mm考慮 : 7.090 × 10⁻³ m³)

Z_H :H鋼の断面係数 (5.570 × 10⁻³ m³)

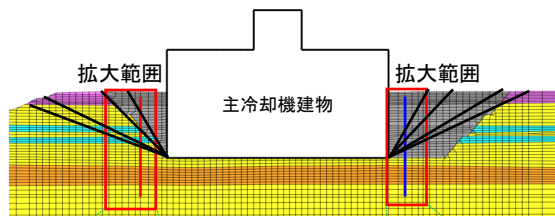
抑止杭の耐震性評価 応力照査結果

- ・ 抑止杭の応力分布が最大となるSs-D (+, +) の応力照査結果を示す。応力照査では、保守的に全時刻、全深度で最大となる発生応力（軸力、せん断、曲げモーメント）を用いている。
- ・ **応力照査より、抑止杭の最大発生応力が許容限界を下回ることから、抑止杭が破断せずにすべりに対する安定性が確保できることを確認した。**各地震動の地震応答解析結果を次ページ以降に示す。

表 抑止杭の応力照査結果

照査項目	単位	許容限界	最大発生応力
せん断	kN/本	8,500	269
曲げ	N/mm ²	277	58※

※最大発生応力度を示す。曲げについては応力度に鋼管の腐食しる1mmを考慮。



抑止杭(西側)

抑止杭(東側)

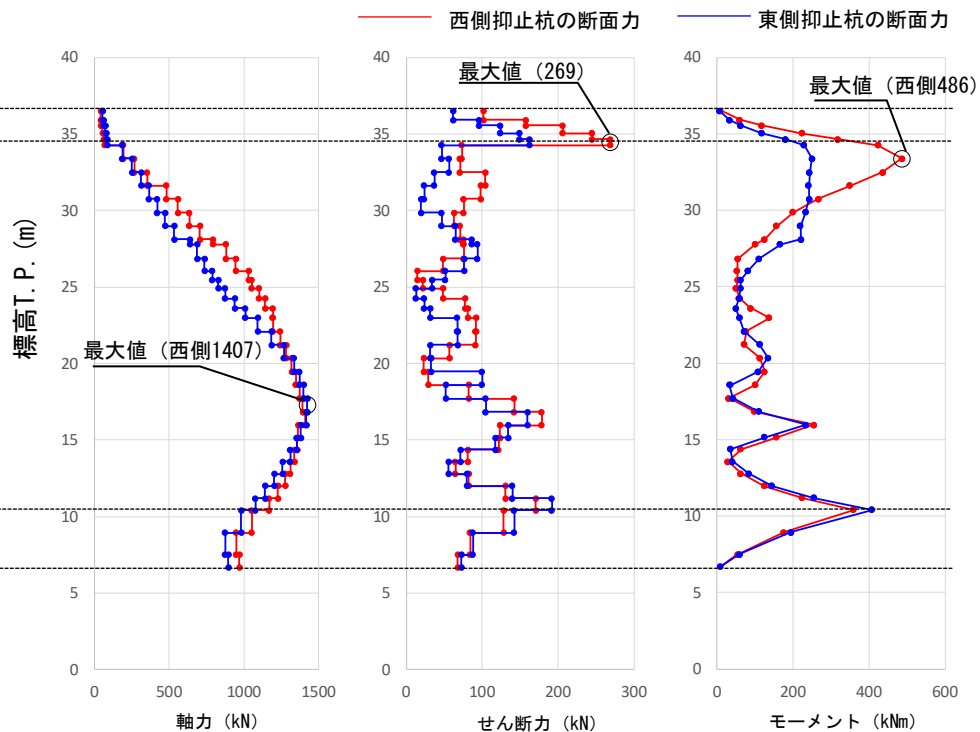
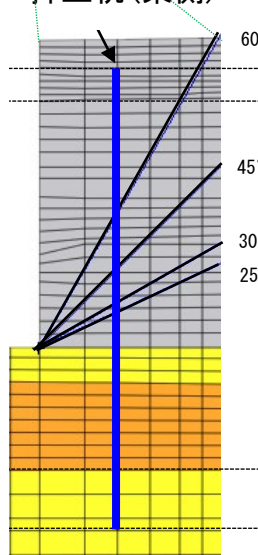
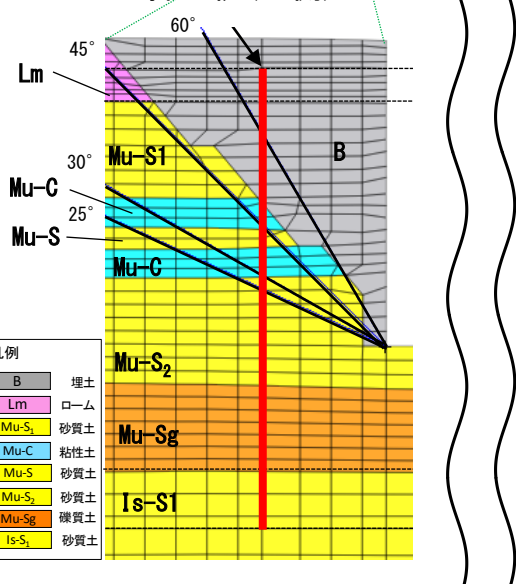


図 基準地震動※1 : Ss-D (+, +) の抑止杭の応力分布※2

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、
 (+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 ○で囲んだ部分が最大値

抑止杭の耐震性評価 応力分布(1)

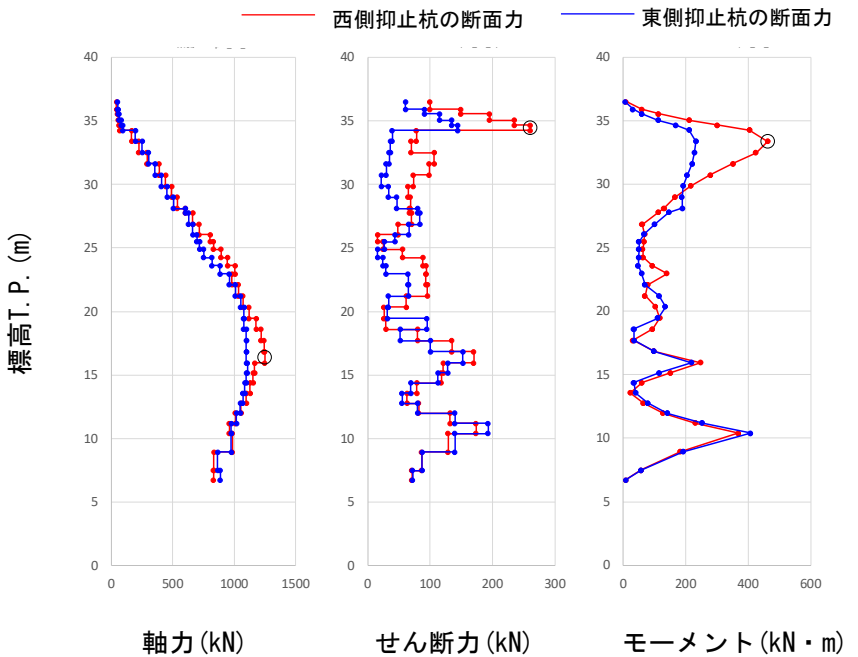
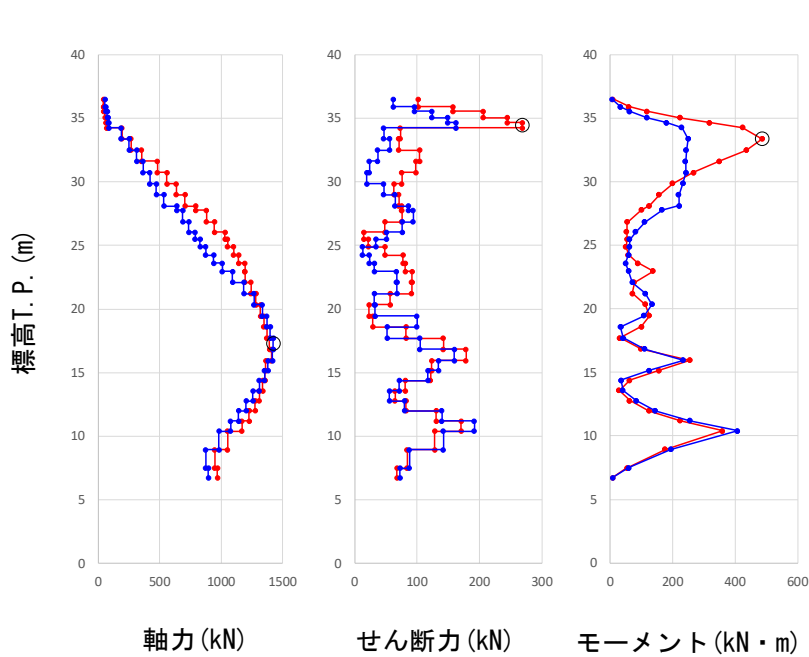


図 基準地震動^{※1} Ss-D (+, +)における抑止杭の応力分布^{※2}

図 基準地震動^{※1} Ss-D (+, -)における抑止杭の応力分布^{※2}

表 抑止杭の最大応力値Ss-D (+, +)

Ss-D (+, +)		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1407	22.76	1422	22.75
せん断力	(kN)	269	46.72	192	39.66
モーメント	(kN・m)	486	46.72	407	46.64

表 抑止杭の最大応力値Ss-D (+, -)

Ss-D (+, -)		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1248	49.37	1106	41.93
せん断力	(kN)	261	46.69	193	39.65
モーメント	(kN・m)	462	46.76	407	39.66

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 ○で囲んだ部分が最大値

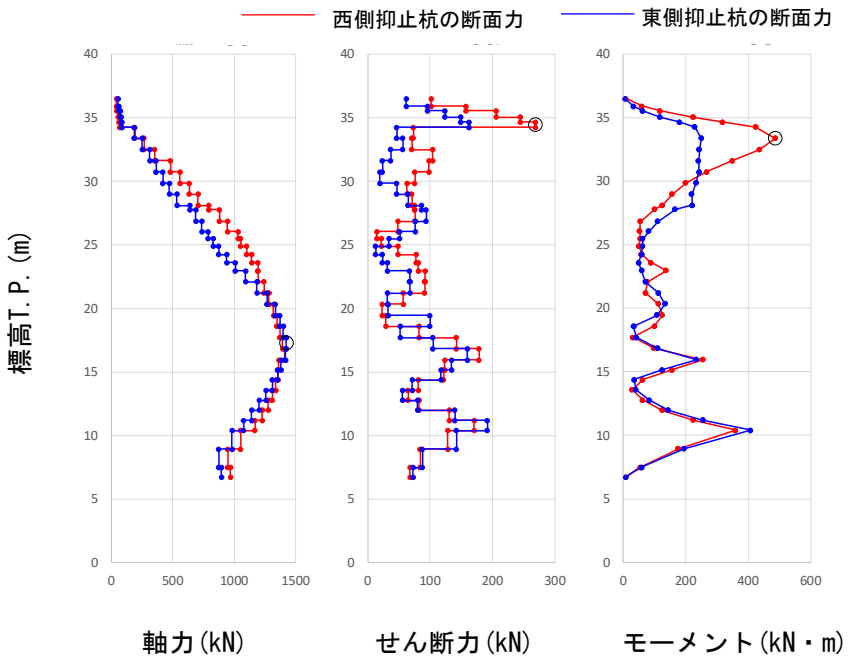
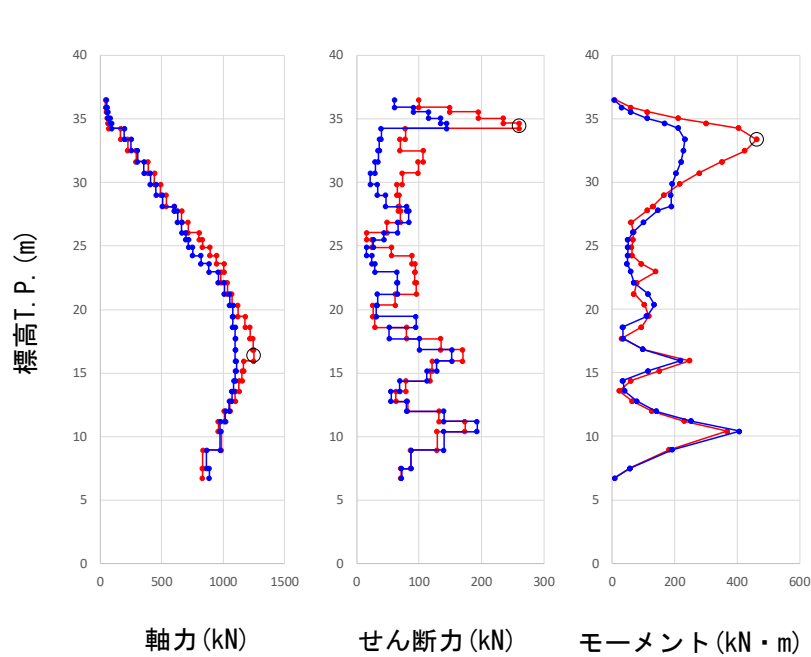

 図 基準地震動^{※1} Ss-D (-, +)における抑止杭の応力分布^{※2}

 図 基準地震動^{※1} Ss-D (-, -)における抑止杭の応力分布^{※2}

表 抑止杭の最大応力値Ss-D (-, +)

Ss-D (-, +)		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1248	49.37	1106	41.93
せん断力	(kN)	261	46.69	193	39.65
モーメント	(kN・m)	462	46.76	407	39.66

表 抑止杭の最大応力値Ss-D (-, -)

Ss-D (-, -)		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1407	22.76	1422	22.75
せん断力	(kN)	269	46.72	192	39.66
モーメント	(kN・m)	486	46.72	407	46.64

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 Oで囲んだ部分が最大値

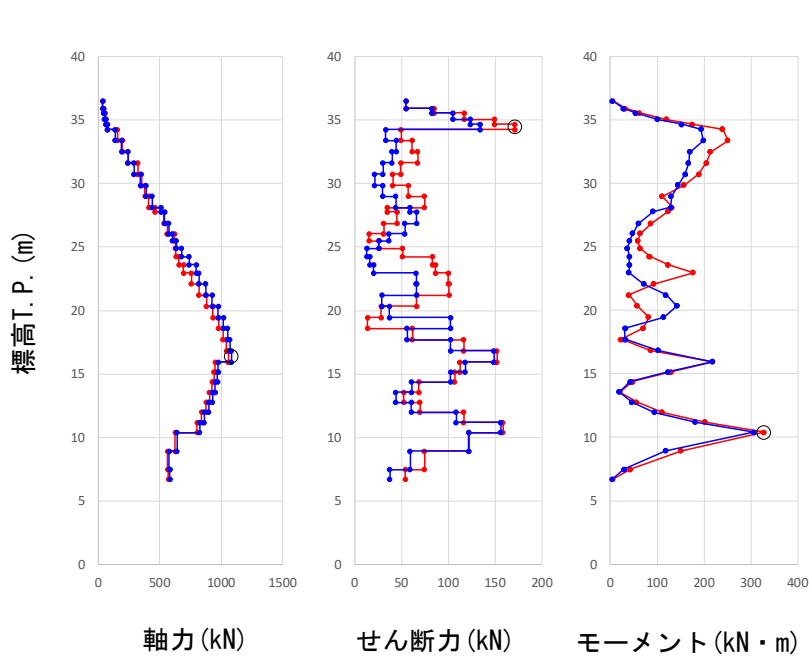


図 基準地震動※1 Ss-1における抑止杭の応力分布※2

表 抑止杭の最大応力値Ss-1

Ss-1		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1058	5.95	1083	5.95
せん断力	(kN)	171	7.12	156	7.06
モーメント	(kN・m)	328	7.06	306	7.07

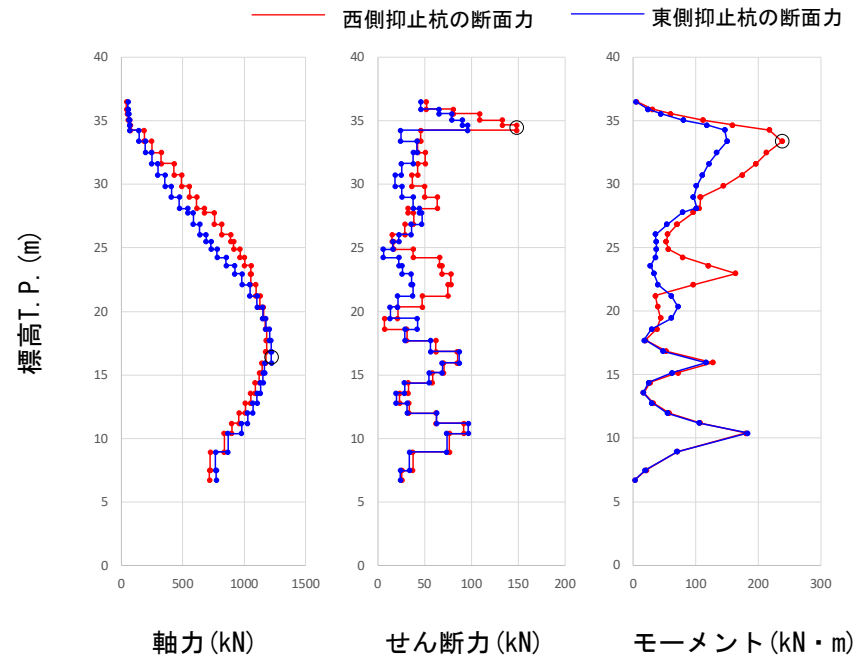


図 基準地震動※1 Ss-2における抑止杭の応力分布※2

表 抑止杭の最大応力値Ss-2

Ss-2		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1179	8.06	1221	7.46
せん断力	(kN)	149	7.90	97	7.89
モーメント	(kN・m)	238	7.91	183	7.89

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 Oで囲んだ部分が最大値

抑止杭の耐震性評価 応力分布(4)

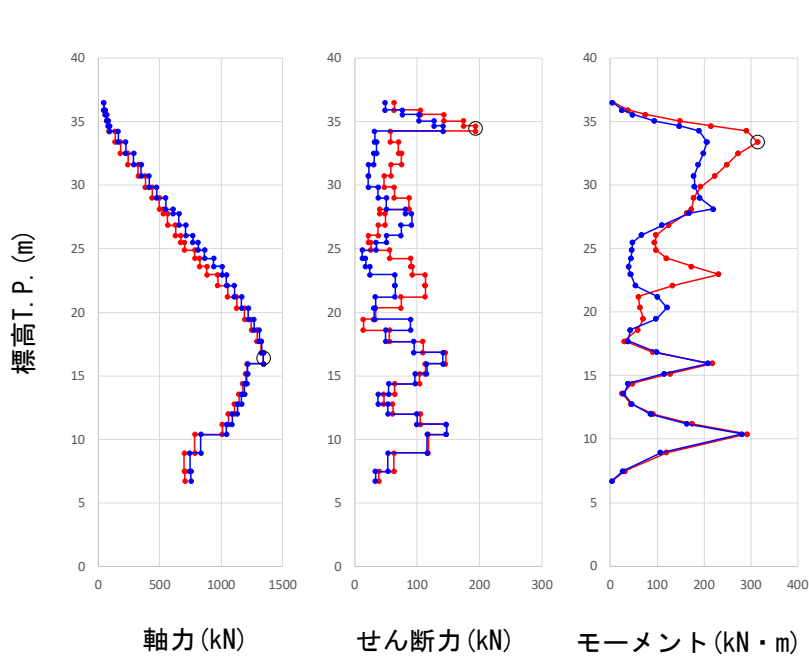


図 基準地震動※1 Ss-3における抑止杭の応力分布※2

表 抑止杭の最大応力値Ss-3

Ss-3		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1343	10.27	1343	10.27
せん断力	(kN)	194	11.07	147	14.59
モーメント	(kN・m)	314	11.09	281	11.00

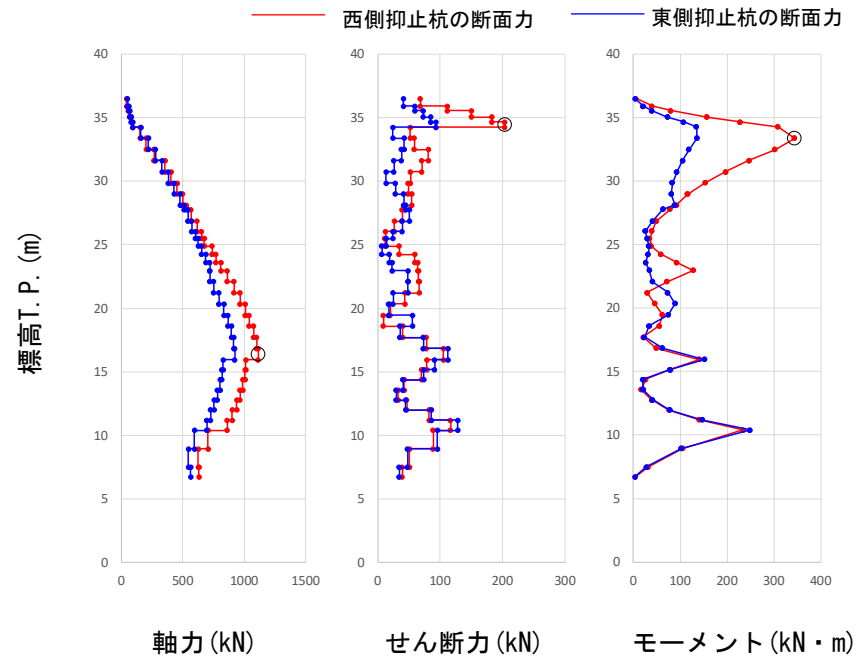


図 基準地震動※1 Ss-4における抑止杭の応力分布※2

表 抑止杭の最大応力値Ss-4

Ss-4		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	1114	7.77	921	7.30
せん断力	(kN)	204	9.40	129	8.94
モーメント	(kN・m)	344	9.40	249	8.95

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

※2 ○で囲んだ部分が最大値

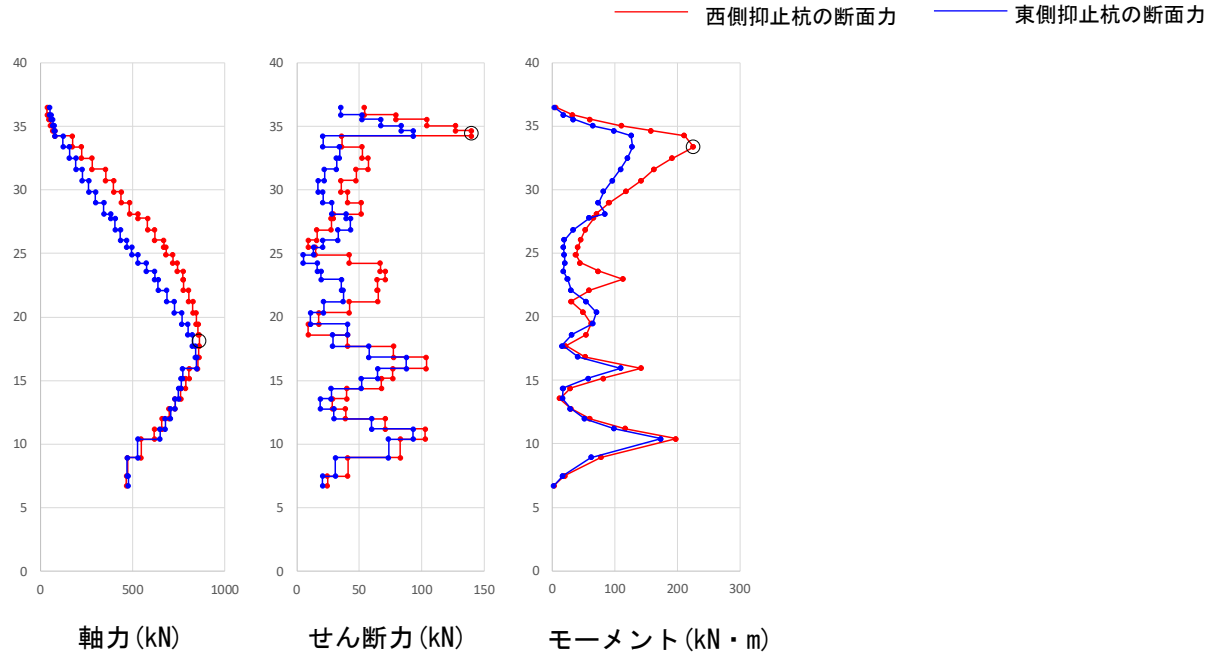


図 基準地震動^{※1} Ss-5における抑止杭の応力分布^{※2}

表 抑止杭の最大応力値Ss-5

Ss-5		西側抑止杭		東側抑止杭	
		最大値	時刻	最大値	時刻
軸力	(kN)	859	53.69	846	54.73
せん断力	(kN)	140	56.99	94	54.28
モーメント	(kN・m)	225	57.00	174	56.91

※1 (+, +) 位相反転なし、(-, +) 水平反転、(+, -) 鉛直反転、(-, -) 水平反転かつ鉛直反転

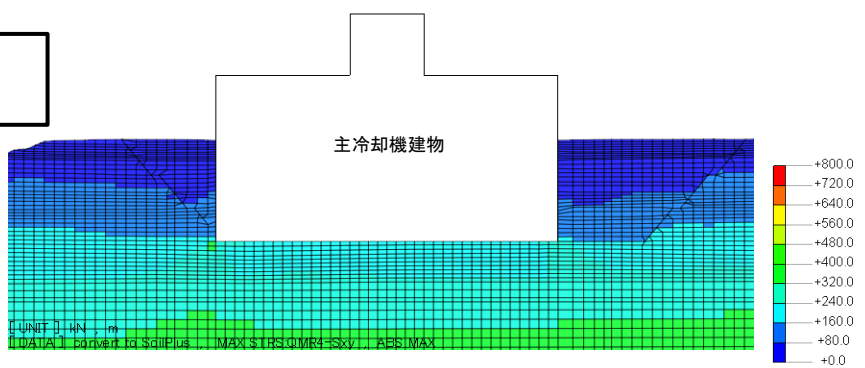
※2 ○で囲んだ部分が最大値

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い
2. 抑止杭の概要
3. 抑止杭の施工
4. 抑止杭の評価
5. 建物と抑止杭の相互作用

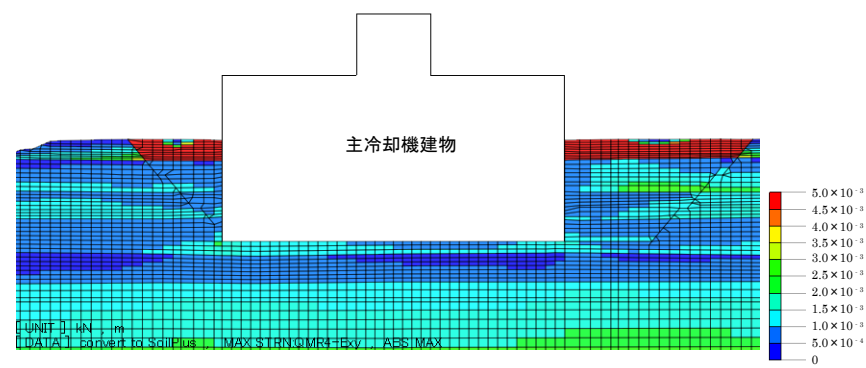
地盤のせん断応力・せん断ひずみ

抑止杭設置による建物と抑止杭の相互作用を確認するため、抑止杭補強前後における建物周辺の応答分布を比較する。抑止杭による補強前後で地盤の最大応答分布（せん断応力・せん断ひずみ）はおおむね同等であり、抑止杭を設置することによる相互作用の影響はみられない。

補強前

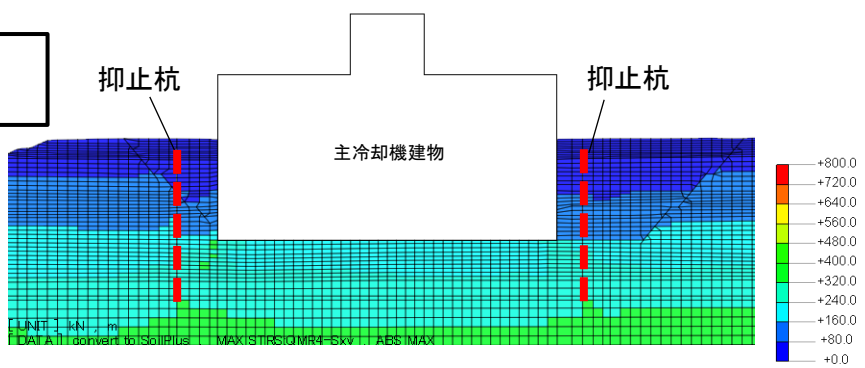


最大せん断応力 (kN/m²)

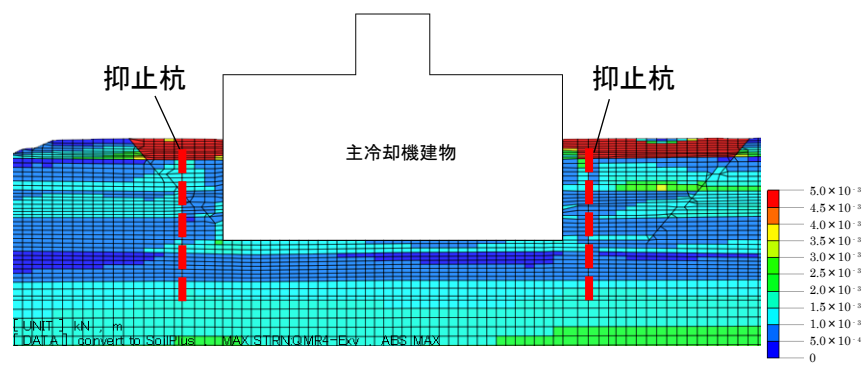


最大せん断ひずみ (一)

補強後



最大せん断応力 (kN/m²)

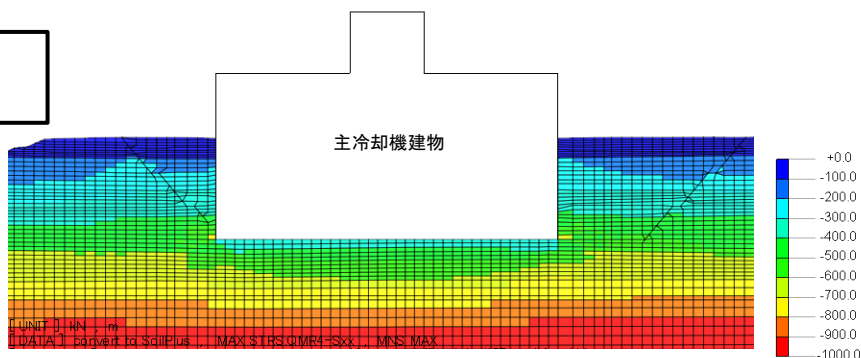


最大せん断ひずみ (一)

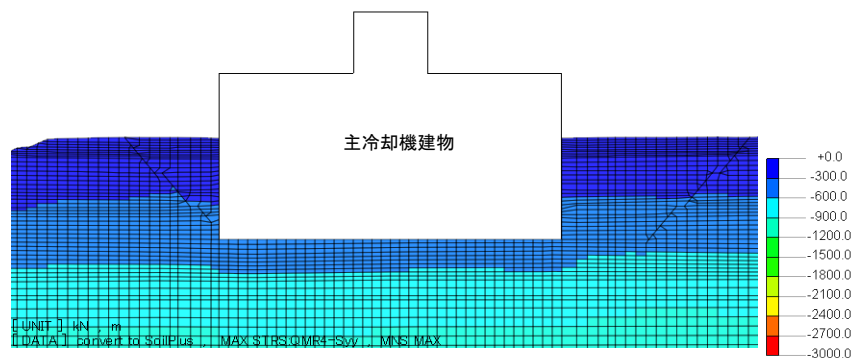
地盤の圧縮応力（水平成分・鉛直成分）

抑止杭による補強前後で地盤の圧縮応力分布（水平成分・鉛直成分）はおおむね同等であり、抑止杭を設置することによる相互作用の影響はみられない。

補強前

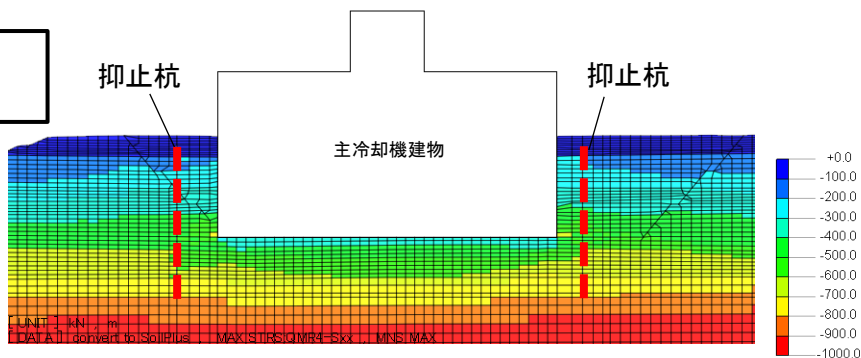


圧縮応力（水平成分）(kN/m²)

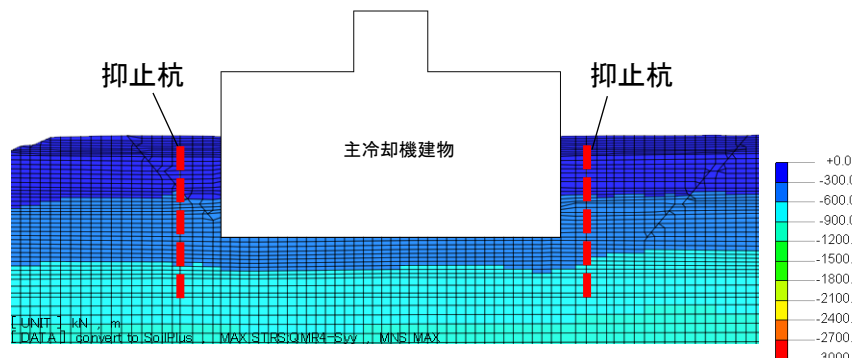


圧縮応力（鉛直成分）(kN/m²)

補強後



圧縮応力（水平成分）(kN/m²)

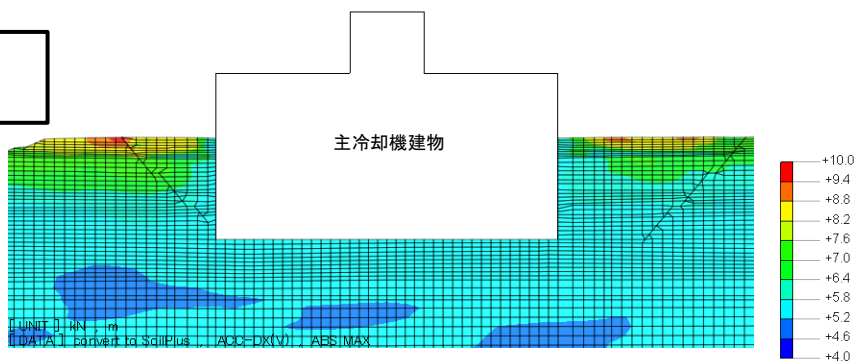


圧縮応力（鉛直成分）(kN/m²)

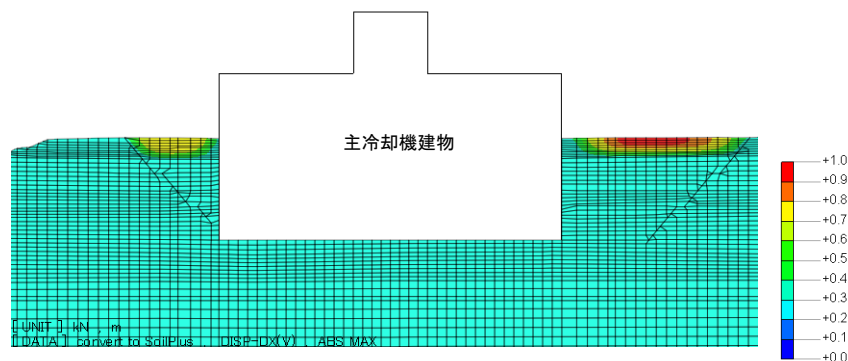
地盤の加速度・変位（水平成分）

抑止杭による補強前後で地盤の最大応答分布（水平加速度・水平変位）はおおむね同等であり、抑止杭を設置することによる相互作用の影響はみられない。

補強前

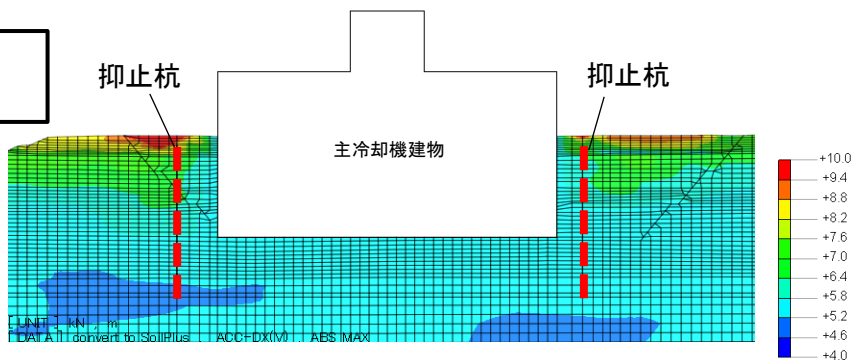


最大加速度（水平成分）(m/s²)

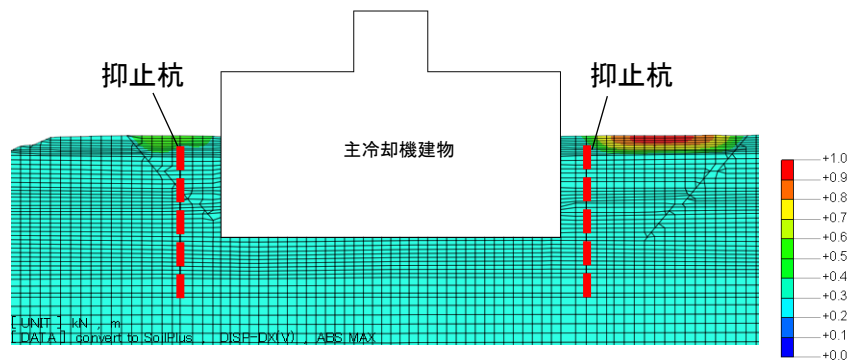


最大変位（水平成分）(m)

補強後



最大加速度（水平成分）(m/s²)



最大変位（水平成分）(m)

5. 建物と抑止杭の相互作用

建物の加速度・変位

- 主冷却機建物について、東側、西側の地盤に抑止杭を配置するため、抑止杭による建物応答への影響を確認した。
- 抑止杭による補強前後で建物質点の応答値（加速度・変位）はおおむね同等であり、抑止杭を設置することによる建物応答への影響はみられない。
- 原子炉建物及び原子炉附属建物については、主冷却機建物より抑止杭との距離がさらに離れるため、抑止杭による建物応答への影響を考慮する必要はないと判断している。

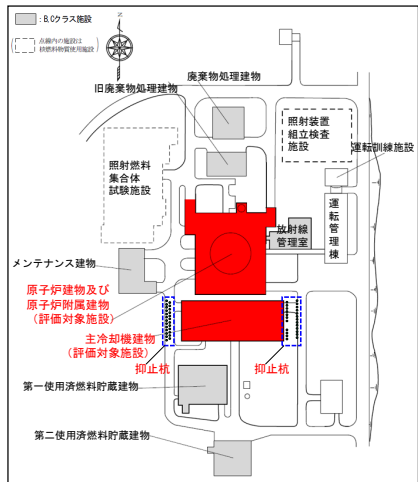
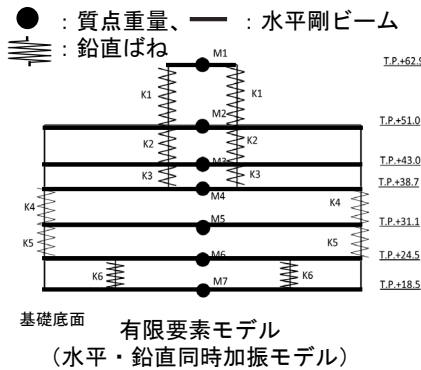


図 評価対象施設配置図

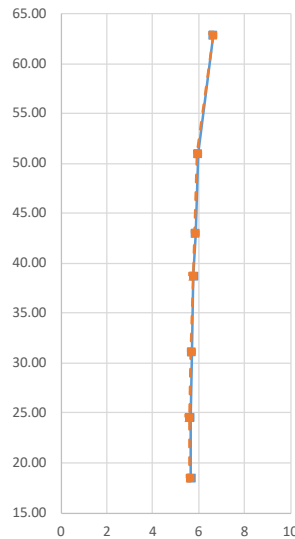
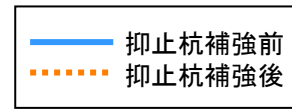
標高T.P. (m)



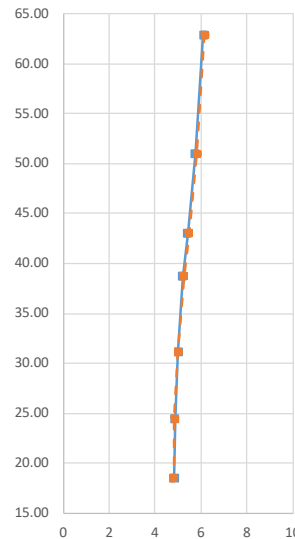
基礎底面 有限要素モデル
(水平・鉛直同時加振モデル)

C-C' 断面

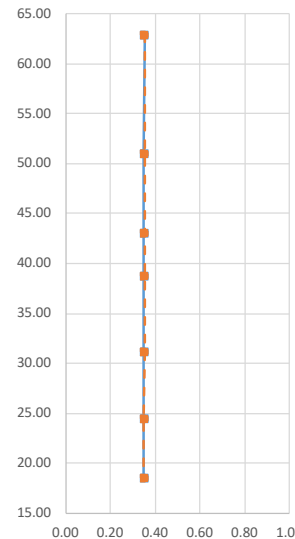
基準地震動 : Ss-D (+, -) 鉛直反転



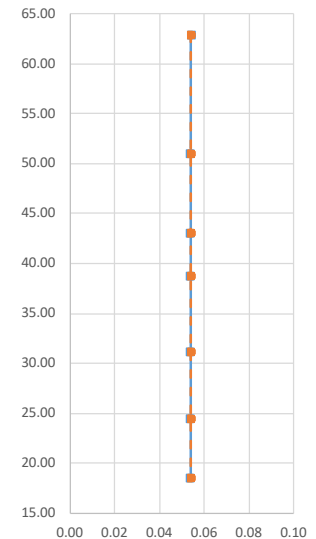
水平加速度 (m/s²)



鉛直加速度 (m/s²)



水平変位 (m)



鉛直変位 (m)

1. 新規制基準適合上の抑止杭の取り扱い

- ・抑止杭は主冷却機建物に対して波及的影響を考慮すべき設備として設置する。
- ・設置許可基準規則の条文（第3条、第4条）及び条文に対する確認内容を整理し、抑止杭に対する評価項目、評価基準値を設定した。
 - ・第3条に対して、抑止杭による補強を実施した地盤のすべり安全率を算定し、すべりに対する安定性を確認する。すべり評価の与条件として、周辺地盤の変状（地盤の中抜け、液状化）により、抑止杭の機能（すべり抵抗）が損なわれるおそれがないよう設計する。
 - ・第4条に対して、基準地震動に対する抑止杭の応力を算定し、抑止杭の耐震性を確認する。

2. 抑止杭の概要

- ・抑止杭の設計仕様は適用規格に基づき、強度、断面寸法、杭間隔、根入れ深さを設定した。

3. 抑止杭の施工

- ・抑止杭の施工方法、工事フロー、管理項目案を整理し、後段規制（設工認）における確認事項の概要を示した。

4. 抑止杭の評価

- ・抑止杭のモデル化は設計仕様に基づき、部材の寸法、根入れ深さを設定している。
- ・抑止杭周辺の埋戻土、地山について液状化の有無を確認し、液状化判定結果から液状化のおそれがなく、抑止杭の機能が損なわれないことを確認した。
- ・最小すべり安全率を示す時刻での抑止杭の応力分布を示し、応力照査では保守的に全時刻、全深度で最大となる発生応力を用いて、抑止杭の耐震性を確認した。

5. 建物と抑止杭の相互作用

- ・抑止杭による補強前後の評価結果を比較し、応答分布がおおむね同等であることから、補強前後で地盤に生じる応力への影響がないこと、抑止杭と主冷却機建物に相互作用、応答への影響がないことを確認した。

参考資料

1. 他サイト発電炉の抑止杭との比較

抑止杭の構造の類似点及び相違点



- 常陽の主冷却機建物抑止杭の構造及び設計方法に関する特徴を示すとともに、高浜発電所の抑止杭（鋼管杭）と比較を行い、類似点及び相違点を以下のとおり抽出した。
- 類似点についてはその適用性を、相違点についてはそれを踏まえた設計への反映事項をそれぞれ以下のとおり整理した。
- 発電炉の実績との類似点を踏まえた常陽の主冷却機建物抑止杭の設計方針は、発電炉と同様の補強を行うため、発電炉の設計方針が適用可能である。また、相違点を踏まえた設計への反映事例は、設置する地盤の硬さが異なるため、適用規格「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき、地盤に応じた杭の根入れ深さを設定する。
- 発電炉の実績との類似点を踏まえた常陽の主冷却機建物抑止杭設計方針は、発電炉と同じ適用規格「道路橋示方書・同解説」の許容応力度法に基づくため、発電炉の設計方針が適用可能である

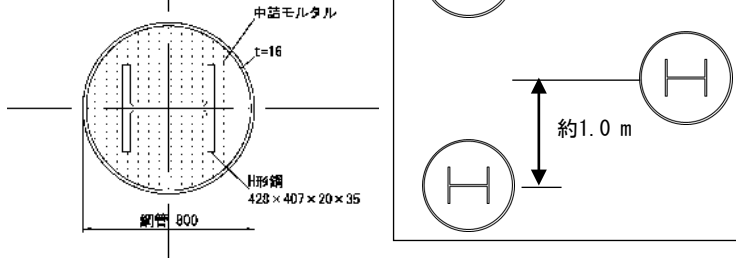
項目	常陽 主冷却機建物抑止杭	発電炉（高浜発電所） 抑止杭	常陽と発電炉の比較		発電炉実績との類似点 を踏まえた設計方針の 適用性	発電炉実績との相違点 を踏まえた設計への 反映事例
			類似点	相違点		
抑止杭の 構造	・基礎地盤のすべりを抑止するため、第四系地盤内に設置する。	・D級岩盤内のすべりを抑止するため、岩盤内に設置する。	—	・抑止杭を第四系地盤に設置。	—	・設置する地盤の硬さが異なるため、適用規格「最新斜面・土留め技術総覧」に基づき、地盤に応じた杭の根入れ深さを設定する。
	・鋼管にH鋼を挿入した杭でせん断補強を行う。	・鋼管にH鋼を挿入した杭でせん断補強を行う。	・鋼管とH鋼でせん断補強	—	・発電炉と同様の補強を行うため、発電炉の設計方針が適用可能である。	—
設計方法	・すべり安全率算定に用いる抑止杭のせん断抵抗力： （鋼管） 短期許容応力度 （H鋼） 短期許容応力度	・すべり安全率算定に用いる抑止杭のせん断抵抗力： （鋼管） 短期許容応力度 （H鋼） 短期許容応力度	・杭のせん断抵抗力の設定は許容応力度法に基づく。	—	・同じ適用規格「道路橋示方書・同解説」の許容応力度法に基づくため、発電炉の設計方針が適用可能である。	—

抑止杭の構造概要

- 常陽の主冷却機建物の抑止杭は鋼管、H鋼及び中詰モルタルからなり、類似の発電炉として、関西電力（株）高浜発電所における抑止杭と同様の構造である。

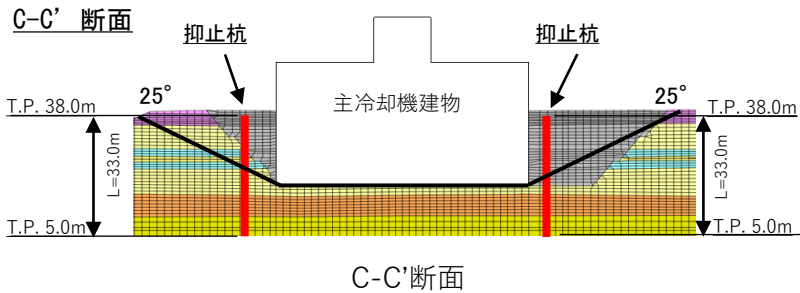
常陽の主冷却機建物

鋼管: $\phi 800$, 厚さ $t=16.0$ (SKK490)
 H鋼: H-428x407x20x35 (SM490A)



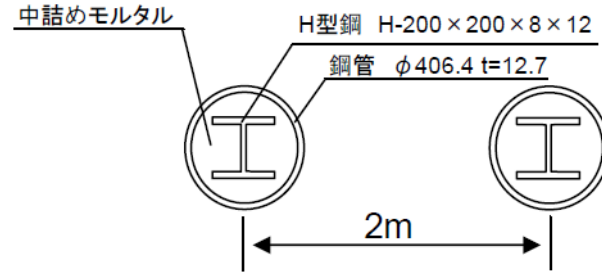
地質区分 (埋戻土と第四系地盤)

B	埋戻土	Mu-S1	砂質土	Mu-S	砂質土	Mm-Sg	礫質土
Lm	ローム	Mu-C	粘性土	Mu-S2	砂質土	Is-S1	砂質土



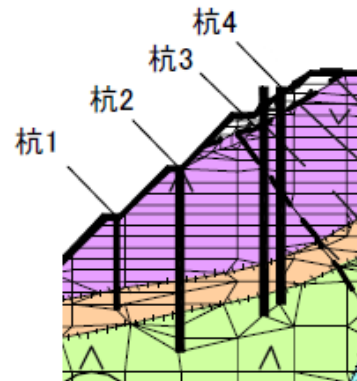
常陽の主冷却機建物における抑止杭の概要図

関西電力（株）高浜発電所

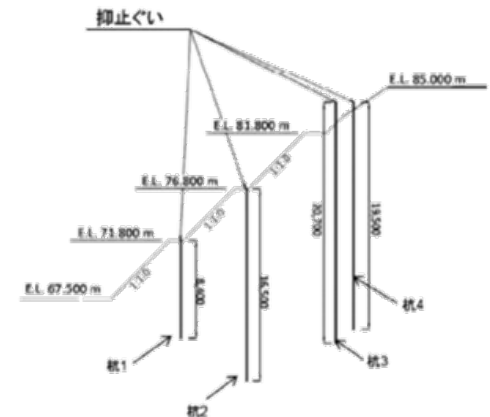


岩級区分

(D)	D級	(CM)	CM級
(CL)	CL級	(CH)	CH級以上



断面図



高浜発電所の背後斜面における抑止杭の概要図