

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密
又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の設計方針について

平成29年6月29日
日本原子力発電株式会社

目次 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の設計方針について

1. 概要
2. 耐津波設計方針に関する設置許可基準規則の要求事項について
3. 評価対象施設
4. 防潮堤の概要
5. 防潮堤の評価対象部位
6. 照査項目と設計方針
7. 設計方針(設計手順)
8. 施工実績(本設杭構造)
9. 道路橋示方書の適用性について

(参考)

摩擦杭形式と支持杭形式の比較検討

1. 概要

- 津波防護施設として防潮堤に求められる要求機能は、繰返しの襲来を想定した遡上波に対して浸水を防止すること、基準地震動 S_s に対し要求される機能を損なう恐れがないよう構造物全体としての変形能力に対し十分な構造強度を有することである。
- 上記の機能を確保するための性能目標は、遡上津波に対し余裕を考慮した防潮堤高さを確保するとともに、構造物の境界部等の止水性を維持し基準地震動 S_s に対し止水性を損なわない構造強度を有した構造物とすることである。
- 防潮堤の計画にあたっては、敷地の大部分において鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁を配置することとしているため、当該資料では鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の設計方針について説明する。
- 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、大口径で厚い肉厚の鋼管杭を地震・津波荷重に耐える構造躯体とし、杭間からの津波の浸水を防止する観点で、鋼管杭に鉄筋コンクリートを被覆する上部構造とした。この上部構造は、漂流物の衝突荷重や津波荷重に耐える鉄筋コンクリート梁壁と鋼管杭鉄筋コンクリート(SRC造)を一体化した構造とした。
- また、鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の杭の支持形式については、敷地の地盤の特徴を踏まえ南部では岩盤に支持させる岩着杭形式を、北部は非液状化層である過圧密粘土層だけでも必要な支持力を確保できる摩擦杭形式とした。

2. 耐津波設計方針に関する設置許可基準規則の要求事項について

設置許可基準規則

(津波による損傷の防止)

第五条 設計基準対象施設は、その供用中に当該設計基準対象施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波(以下「基準津波」という。)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。

設置許可基準規則解釈

(別記3)

第5条(津波による損傷の防止)

五 津波防護施設及び浸水防止設備については、入力津波(施設の津波に対する設計を行うために、津波の伝播特性及び浸水経路等を考慮して、それぞれの施設に対して設定するものをいう。以下同じ。)に対して津波防護機能及び浸水防止機能が保持できること。

基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド

5. 施設・設備の設計・評価の方針及び条件

5.1 津波防護施設の設計

【規制基準における要求事項等】

津波防護施設については、その構造に応じ、波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性並びにすべり及び転倒に対する安定性を評価し、越流時の耐性にも配慮した上で、入力津波に対する津波防護機能が十分に保持できるよう設計すること。

5.4 施設・設備等の設計・評価に係る検討事項

5.4.1 津波防護施設、浸水防止設備等の設計における検討事項

【規制基準における要求事項等】

津波防護施設、浸水防止設備の設計及び漂流物に係る措置に当たっては、次に示す方針(津波荷重の設定、余震荷重の考慮、津波の繰り返し作用の考慮)を満足すること。

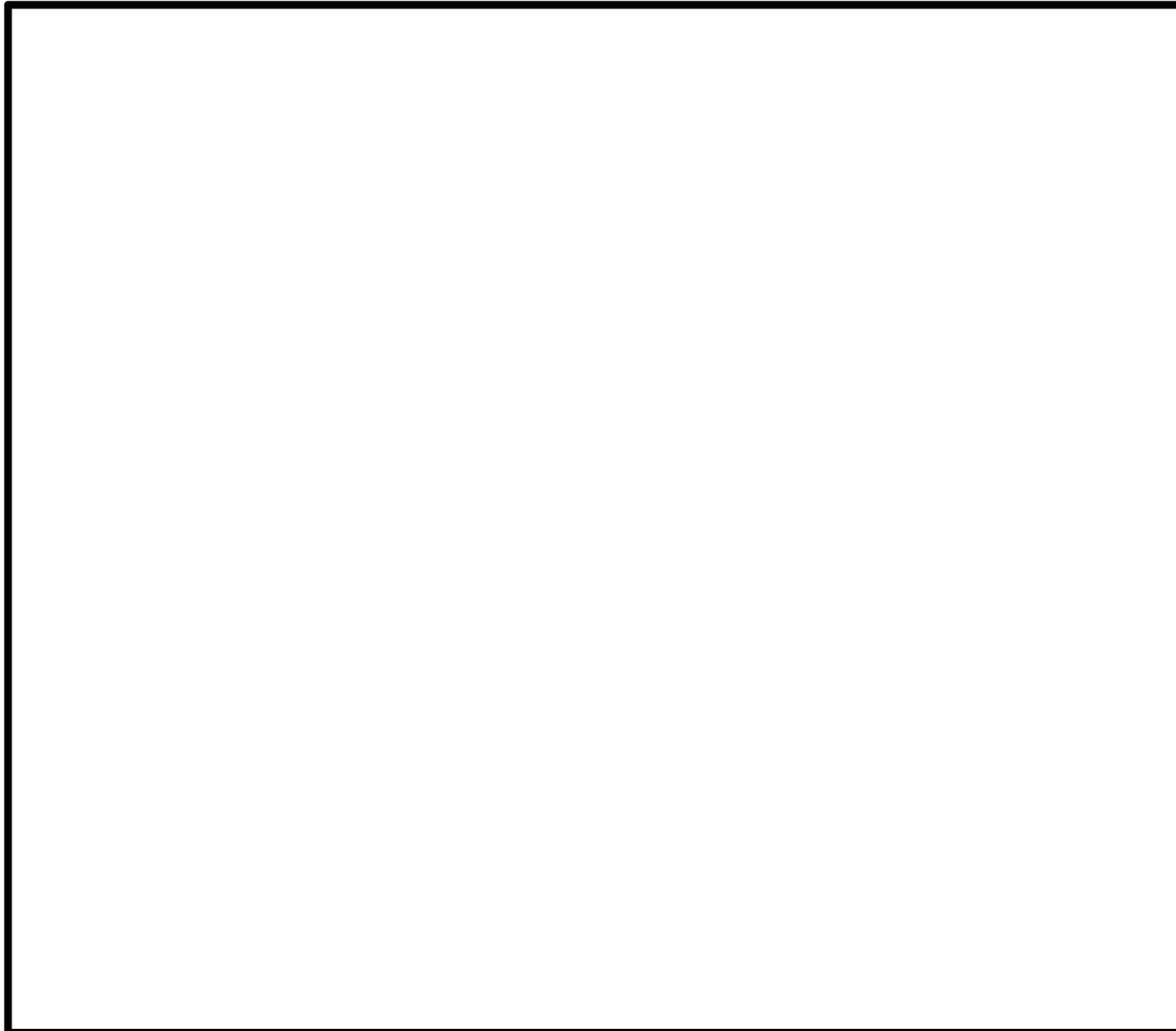
5.4.2 漂流物による波及的影響の検討

【規制基準における要求事項等】

津波防護施設の外側の発電所敷地内及び近傍において建物・構築物、設置物等が破損、倒壊、漂流する可能性について検討すること。

3. 津波防護対象施設

設置許可基準規則5条及び40条の対象となる「津波防護施設」を以下に示す。



津波防護施設の平面配置

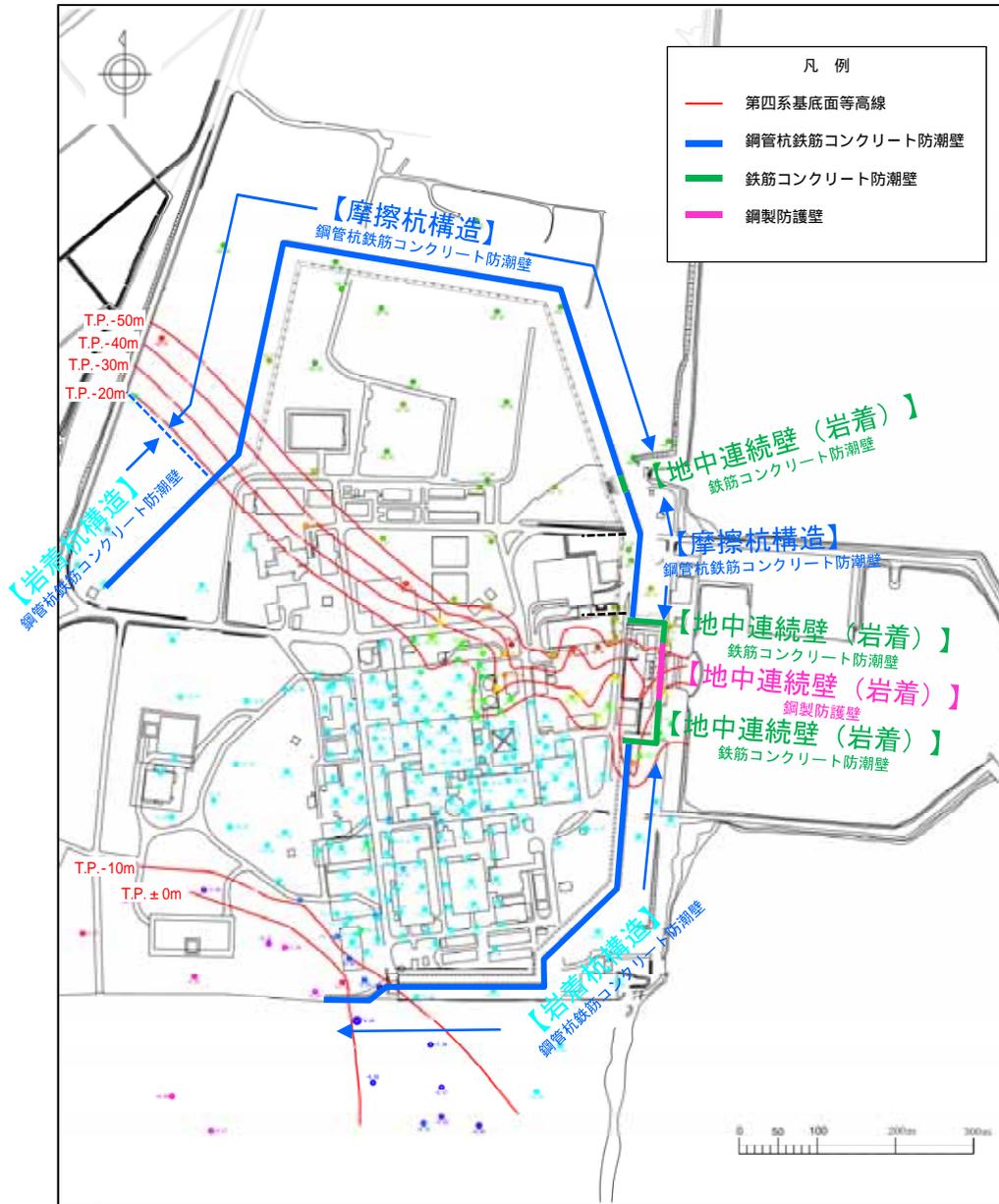
[]は、耐震重要施設を支持する建物・構築物を示す。

設計基準対象施設
原子炉建屋
タービン建屋
取水構造物(取水路, 海水ポンプ室)
非常用海水系配管(屋外二重管)
非常用ガス処理系排気筒(排気筒)
使用済燃料乾式貯蔵建屋
軽油貯蔵タンク

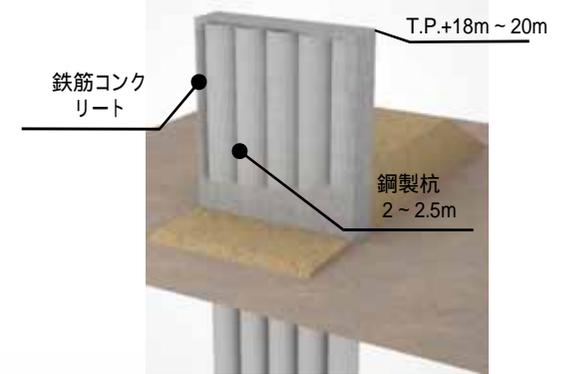
重大事故等対処施設
原子炉建屋
取水構造物(取水路, 海水ポンプ室)
非常用海水系配管(屋外二重管)
SA用海水ピット取水塔
海水引込み管
SA用海水ピット
緊急用海水取水管
緊急用海水ポンプピット
格納容器圧力逃がし装置格納槽
常設低圧代替注水系格納槽
接続口
常設代替高圧電源装置置場
軽油貯蔵タンク
可搬型設備保管場所
緊急時対策所

設計基準対象施設及び重大事故等対処施設
原子炉建屋
取水構造物(取水路, 海水ポンプ室)
非常用海水系配管(屋外二重管)
軽油貯蔵タンク

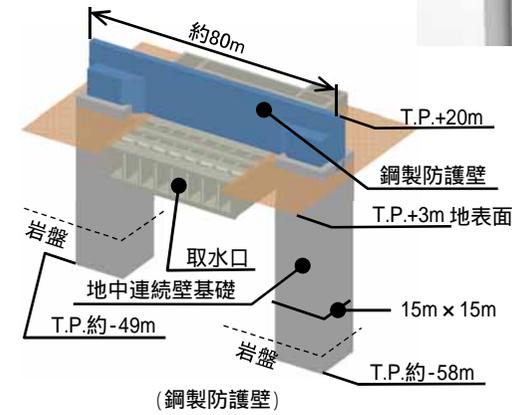
4. 防潮堤の概要



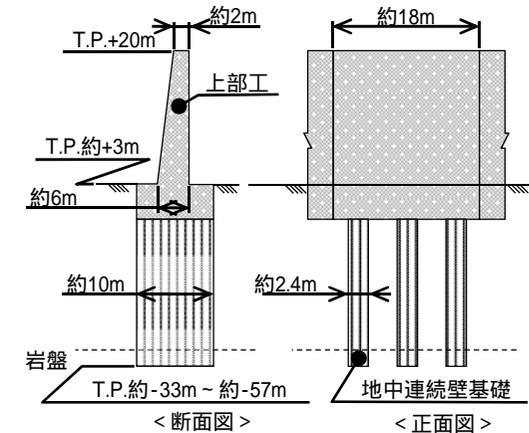
鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁



鋼製防護壁



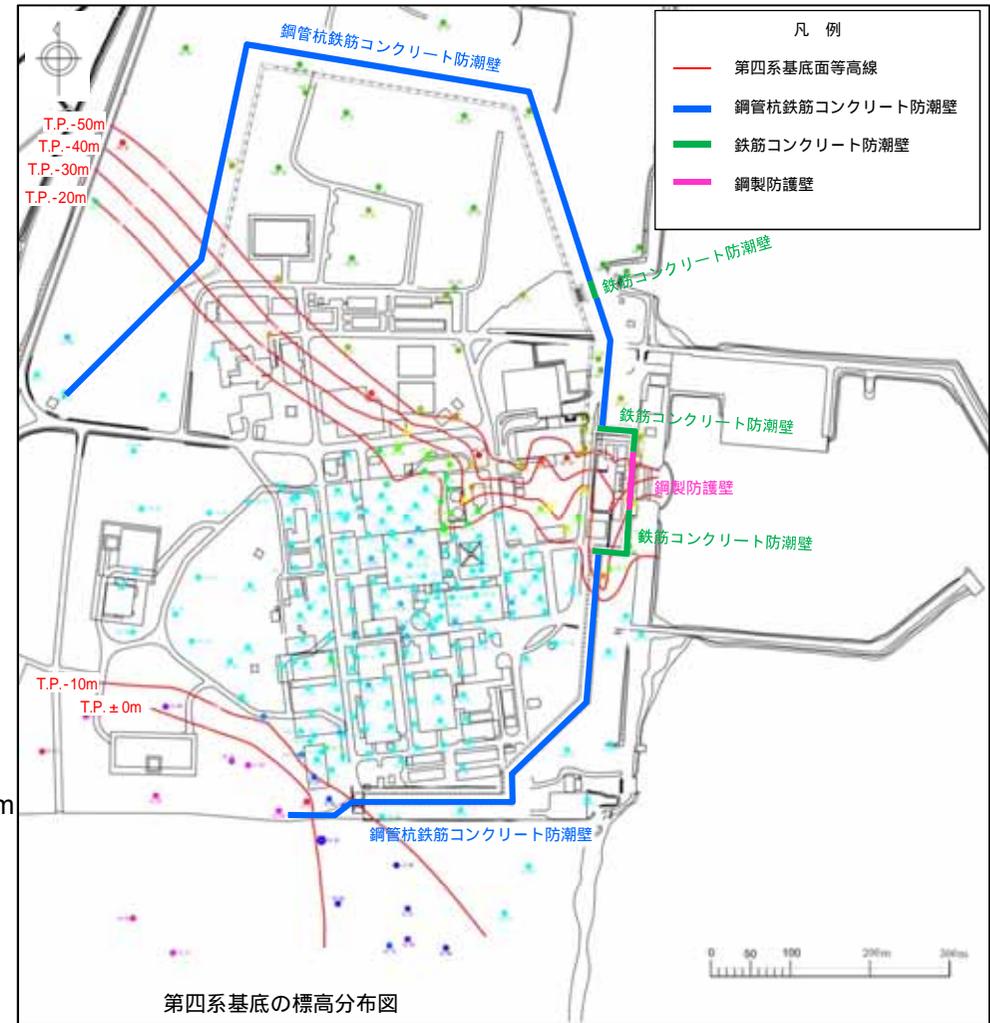
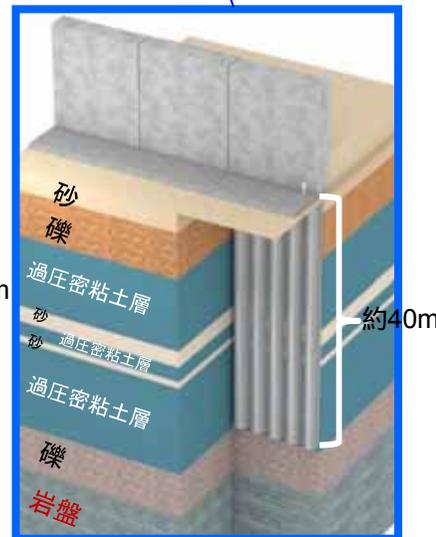
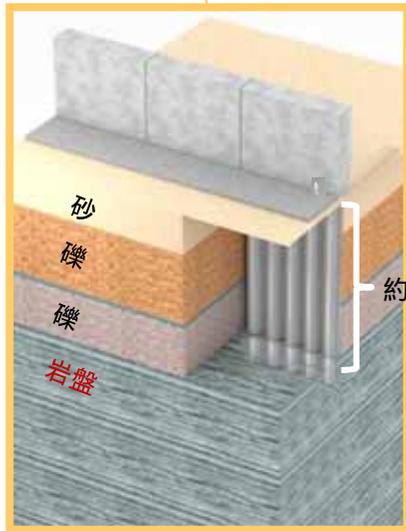
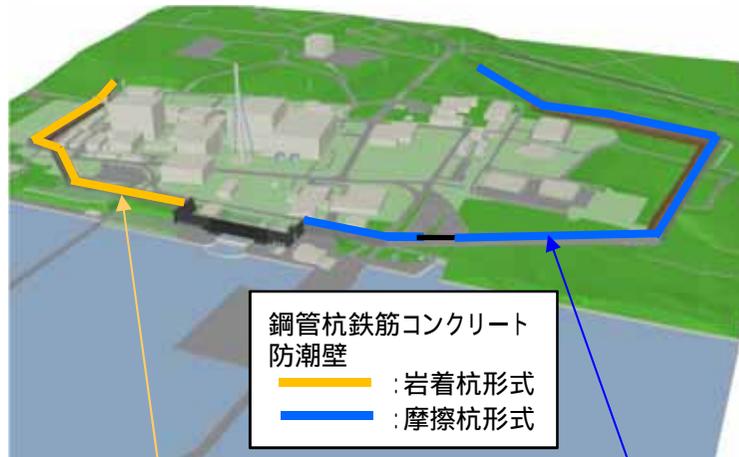
鉄筋コンクリート防潮壁



4. 防潮堤の概要 (鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁)

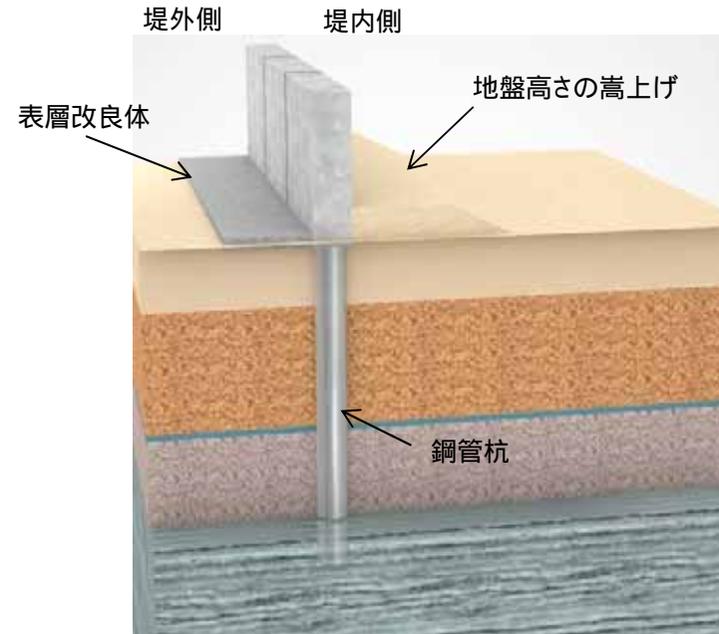
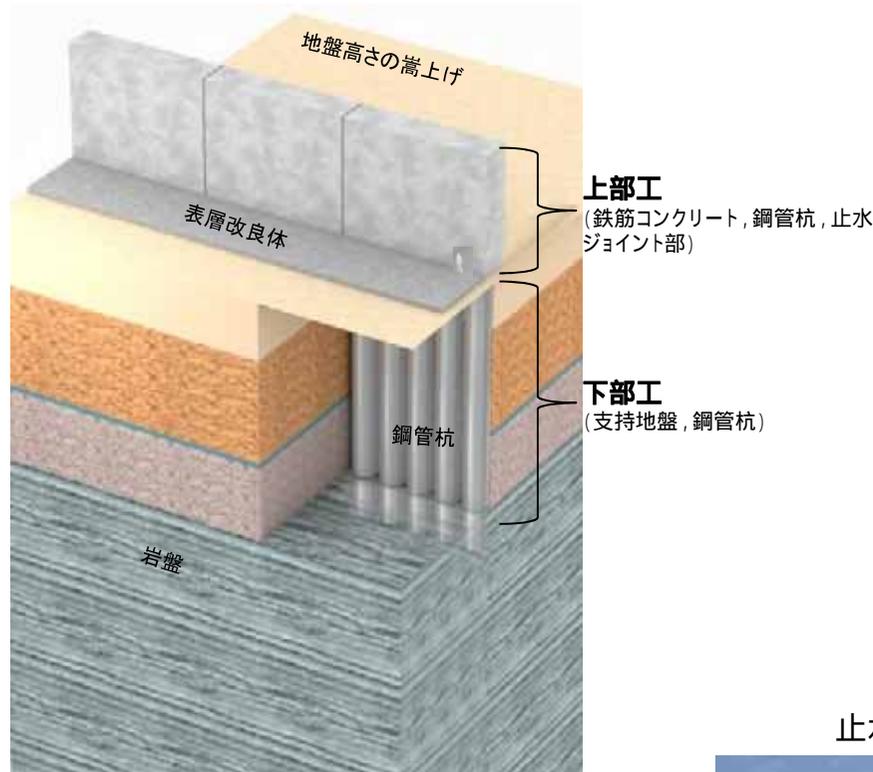
防潮堤は、設計基準対象施設の津波防護対象設備 (津波防護施設、浸水防止設備、津波監視設備及び非常用取水設備を除く。) の設置される敷地を含め、敷地全体を取り囲む形で設置する。
敷地の第四系基底 (岩盤上面) の標高分布及び防潮堤の構造形式とその配置を示す。

防潮堤鳥瞰図



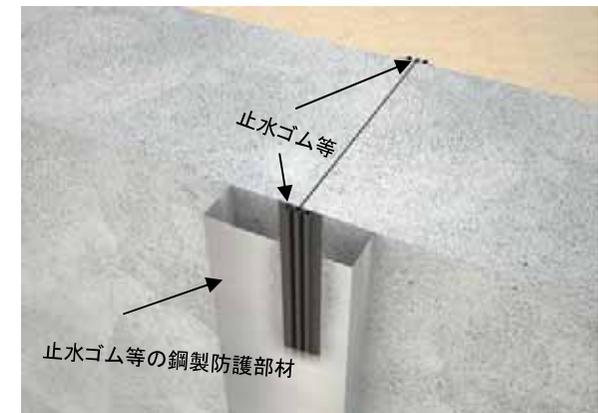
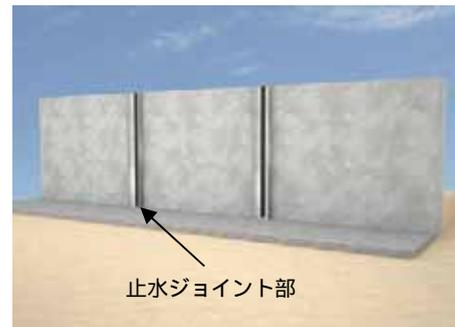
5. 防潮堤の評価対象部位

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価対象部位を下図に示す。



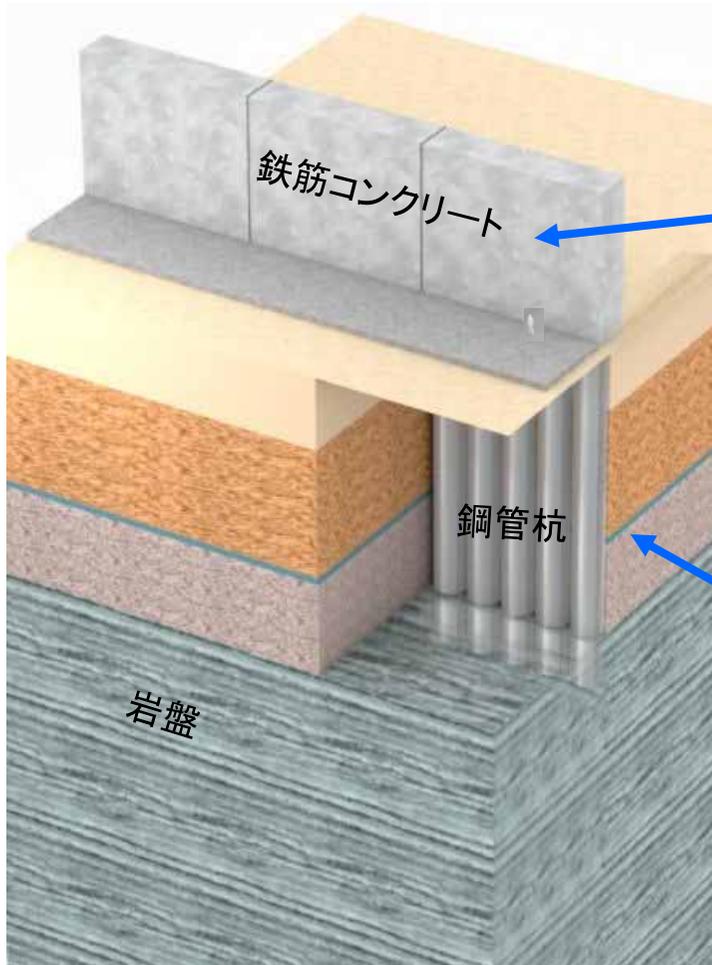
評価対象部位		役割
上部工	鉄筋コンクリート	止水機能の保持
	止水ジョイント部	施工ブロック間の止水機能
上部工 下部工	鋼管杭	津波・地震荷重に耐える構造躯体であり、上部工・下部工を兼ねる
表層改良体		洗掘防止
地盤高さの嵩上げ		荷重に対する上部工の変位の抑制

止水ジョイント部



5. 防潮堤の評価対象部位

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価対象部位の役割



【鉄筋コンクリート】

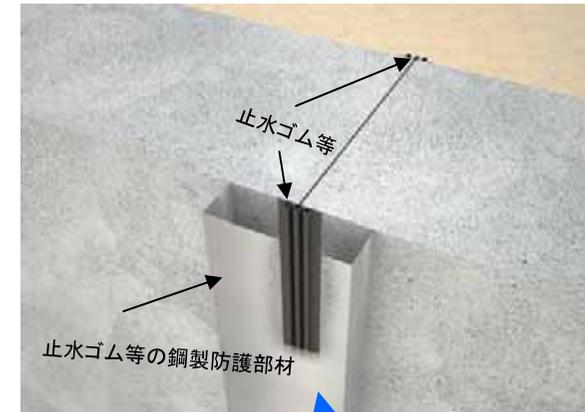
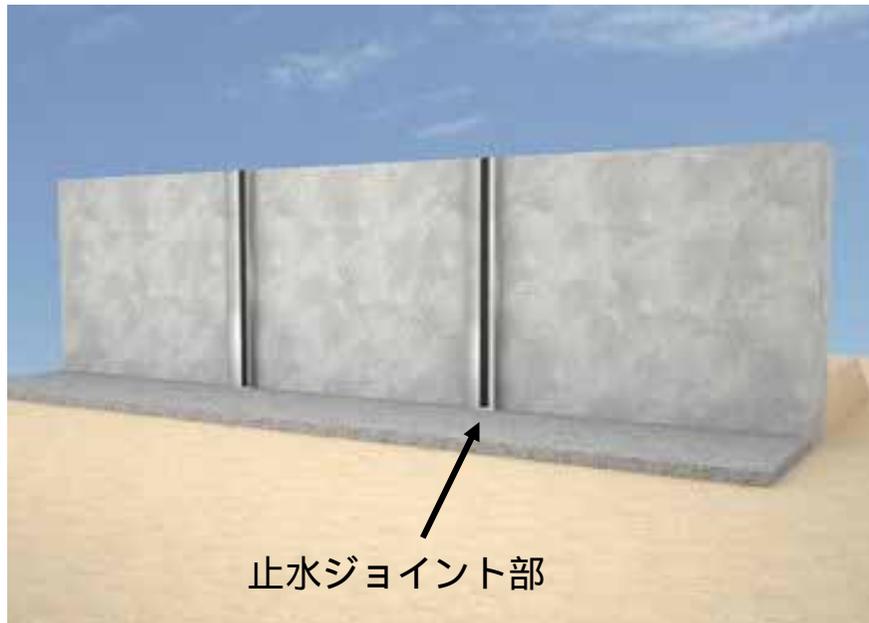
- ・津波荷重, 漂流物衝突荷重等に対し, せん断等の損傷を生じない。
- ・鋼管杭間からの津波の浸水を防止する。

【鋼管杭】

- ・地震や津波等による荷重に対し構造躯体として耐える。

5. 防潮堤の評価対象部位

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価対象部位の役割

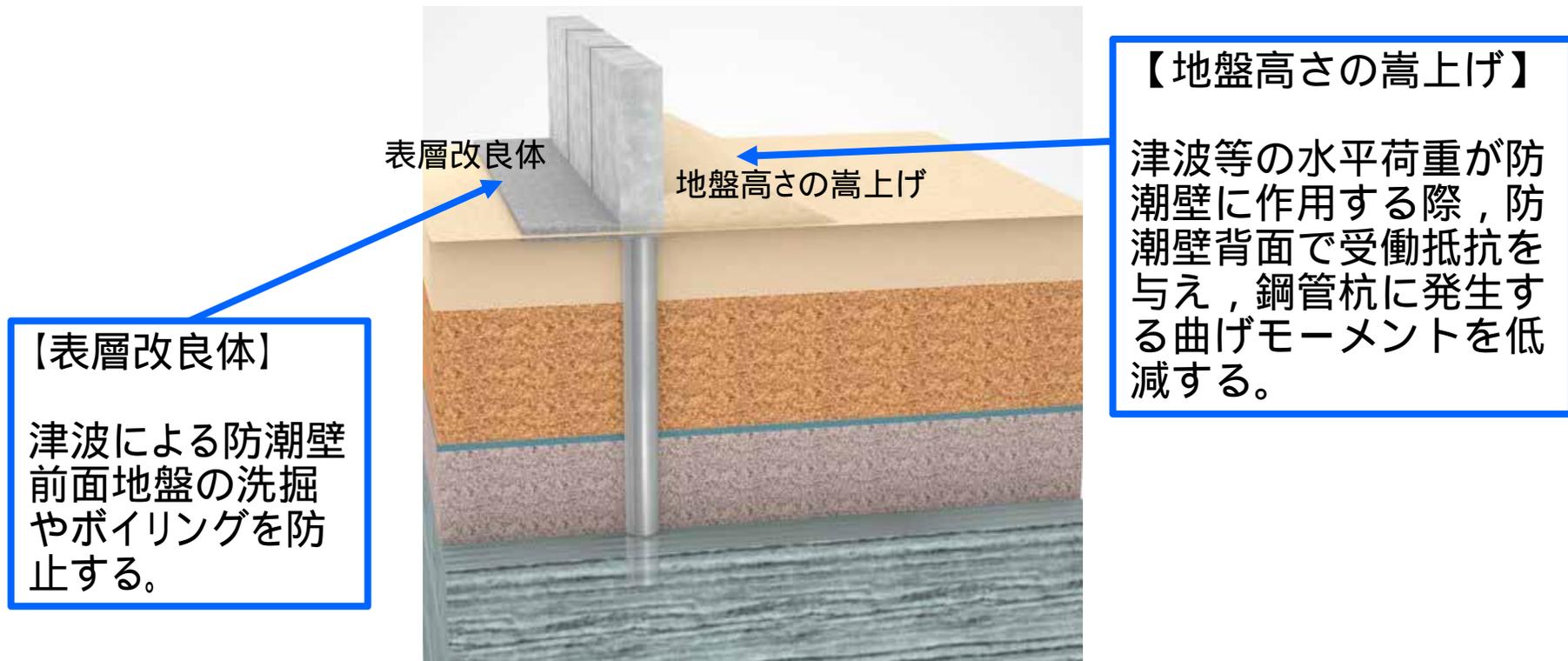


【止水ジョイント部】

地震時や津波時の変形量に追
随し、防潮壁間や異種構造物間
の浸水を防止する。

5. 防潮堤の評価対象部位

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価対象部位の役割



鋼管杭

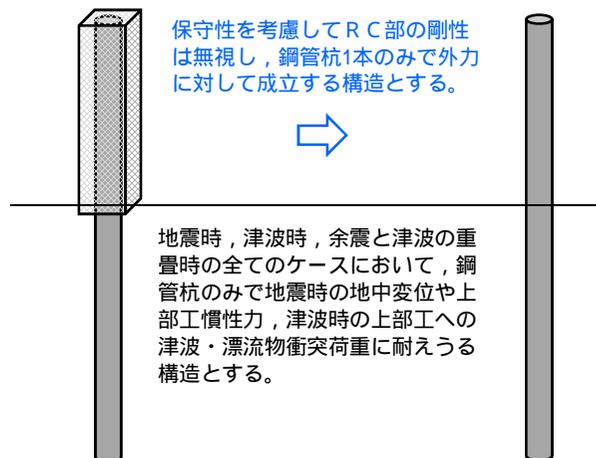
鋼管杭の設置目的

地震時や津波時の荷重に対する防潮壁としての構造健全性を確保する。

- 下部工は鋼管杭，上部工はSRC構造で構築されているが，保守性を考慮してRC部の剛性は無視し，鋼管杭1本のみで外力に対して成立する構造とする（地震時，津波時，余震と津波の重畳時の全てのケースにおいて，鋼管杭のみで成立する構造とする）。
- 漂流物荷重は鋼管杭に発生する曲げモーメントが最大となる天端に作用させる。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鋼管杭	曲げ，せん断	短期許容応力度以下	道路橋示方書・同解説(共通編・ 下部構造編)
支持地盤	押込力，引抜力	極限支持力以下	道路橋示方書・同解説(共通編・ 下部構造編)

【保守性を考慮した設計】



(1) 基準地震動 S_s による地震荷重

鋼管1本で躯体慣性力，地中変位に対して短期許容応力度以下であることを確認する。

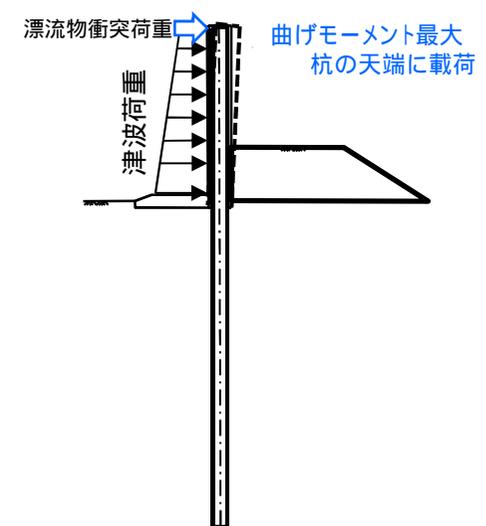
(2) 津波荷重 + 漂流物衝突荷重

鋼管1本あたりの分担面積荷重に対して，短期許容応力度以下であることを確認する。

(3) 余震 + 津波荷重

鋼管1本で余震+津波荷重に対して短期許容応力度以下であることを確認する。

【保守性を考慮した設計】



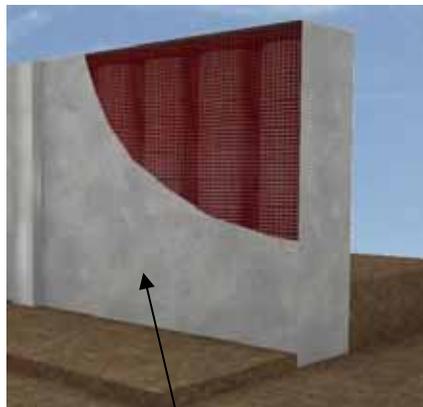
例：津波荷重+漂流物衝突荷重

鉄筋コンクリート

鉄筋コンクリートの設置目的

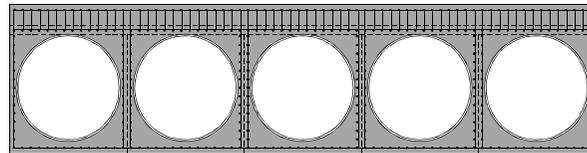
津波時において鋼管杭間の止水性を確保するため、鋼管杭に鉄筋コンクリートを被覆する。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
鉄筋コンクリート	曲げ, せん断	短期許容応力度以下	「道路橋示方書・同解説(共通編・ 耐震設計編)」及び「鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説」を踏まえた短期許容応力度以下とする。 (コンクリート標準示方書【構造性能照査編】でも確認)



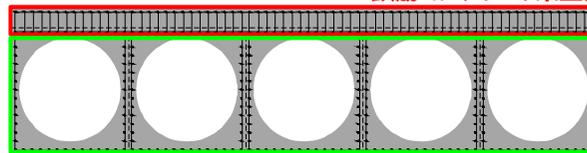
鉄筋コンクリートで被覆し止水性を確保

鉄骨鉄筋コンクリート



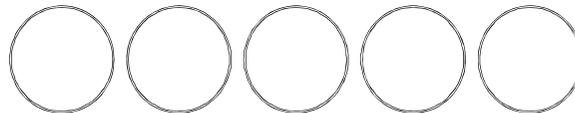
鉄筋コンクリート

「鉄筋コンクリート梁壁」



鋼管杭鉄筋コンクリート(SRC造)

鉄骨(鋼管杭)



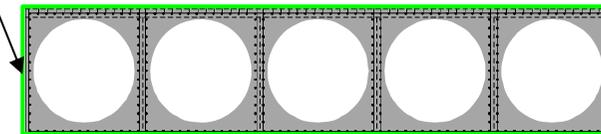
【保守性を考慮した設計】

上部工前面の「鉄筋コンクリート梁壁」(鉄筋コンクリート梁の主筋を密に配置し, せん断耐力筋で補強した壁部材)のみをモデル化し, 地震時, 津波時, 余震と津波の重畳時の全てのケースにおいて, 「鉄筋コンクリート梁壁」のみで成立する構造とする(実際には「鉄筋コンクリート梁壁」背面にあるSRC構造である「鋼管杭鉄筋コンクリート」との合成断面で抵抗することになる)。



【保守性を考慮した設計】

「鋼管杭鉄筋コンクリート」(下部工の鋼管杭から上部工に連続する鋼管を被覆した部材)には, コンクリート標準示方書に基づく最小鉄筋量を配置する。
念のため, 静的三次元解析を実施し, 二次元梁モデルの妥当性を検討する。

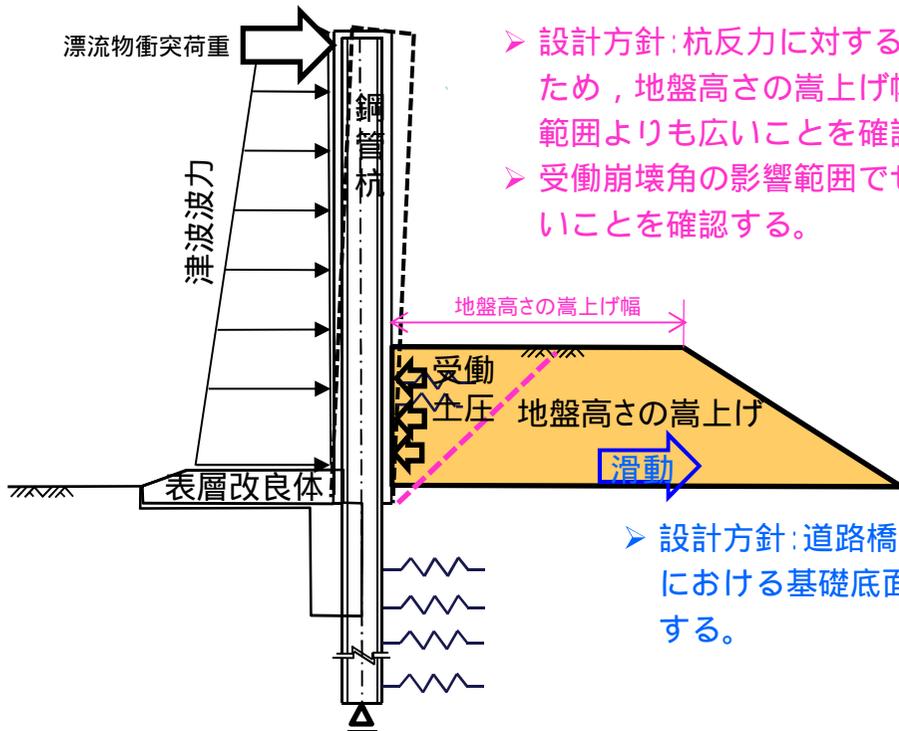


地盤高さの嵩上げ

地盤高さの嵩上げの目的

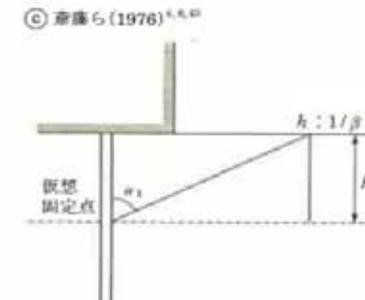
津波等の荷重が防潮壁に作用する際、防潮壁背面で受働抵抗を期待でき、鋼管杭に発生する曲げモーメントの低減を図る。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
嵩上げ幅	杭の仮想固定点1/ の範囲の下端から受働崩壊角で地表面まで伸ばした線が、地盤高さの嵩上げ幅以内	地盤高さの嵩上げ幅以上	建築基礎構造設計指針
すべり (滑動)	<ul style="list-style-type: none"> 受働崩壊角の影響範囲でせん断破壊が発生しないことの有無 杭から受ける反力による地盤高さの嵩上げ部底面の滑動の有無 	すべり安全率以上	道路橋示方書 下部工編 耐津波設計に係る工認審査ガイド



- 設計方針: 杭反力に対する受働抵抗を發揮するため、地盤高さの嵩上げ幅が受働崩壊角の影響範囲よりも広いことを確認する。
- 受働崩壊角の影響範囲でせん断破壊が発生しないことを確認する。

- 設計方針: 道路橋示方書・同解説 下部構造編の直接基礎における基礎底面地盤のせん断抵抗力の照査方法を適用する。



建築基礎構造設計指針

$$\left(\begin{array}{l} \alpha_1 : \text{受働崩壊角} \\ \alpha_2 : \text{主動} \end{array} \right) = \begin{array}{l} 45 + \frac{\phi}{2} \\ 45 - \frac{\phi}{2} \end{array}$$

受働崩壊角の設定

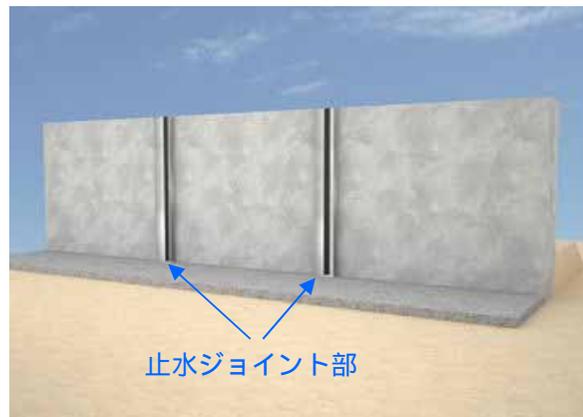
止水ジョイント部

止水ジョイント部の目的

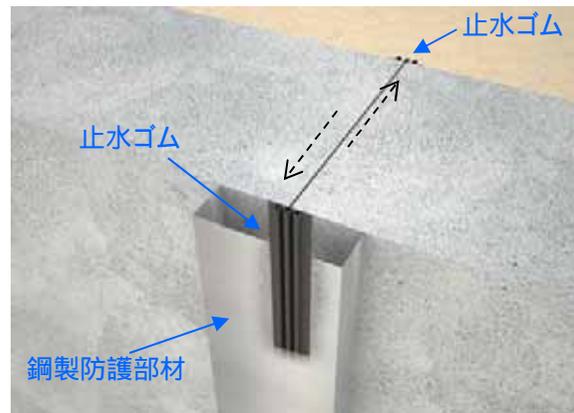
地震時や津波時の変形量に追随し、防潮壁間や異種構造物間の止水を図る。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
止水ゴム, 止水シート	ゴム等止水材の引張, 変形量	メーカー規格及び基準並びに必要なに応じて実施する性能試験設計から設定した許容変形量, 許容引張強度	メーカー規格及び基準並びに必要なに応じて実施する性能試験
鋼製アンカー	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋コンクリート壁に定着させる鋼製アンカーの引張, せん断 定着側のコンクリートに対して, 引張り, せん断, コーンせん断, 支圧 	許容引張応力度, 許容せん断応力度, 許容押抜きせん断応力度, 支圧応力度 鋼製アンカーの引張応力, 付着応力, コーンせん断の照査は引張照査に含む	各種合成構設計指針・同解説
止水ゴム等の鋼製防護部材	漂流物が衝突した際の鋼材の圧縮, 引張り及びせん断, 座屈	許容圧縮応力度, 許容引張応力度及び許容せん断応力度	鋼構造設計基準

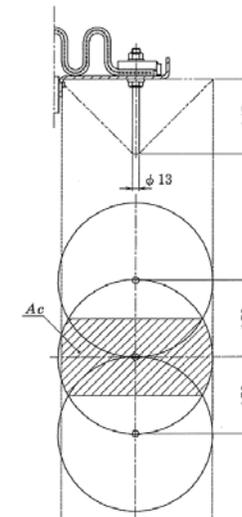
止水ジョイント部



施工ブロック間の変位例



コーンせん断の照査



表層改良体

表層改良体の目的

津波による防潮壁前面地盤の洗掘やボイリングによる浸水に対して表層地盤を改良し、堤内への浸水対策とする。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界	適用基準
表層改良体	表層改良体のせん断	安全裕度を考慮したせん断強度以下	室内試験により確認

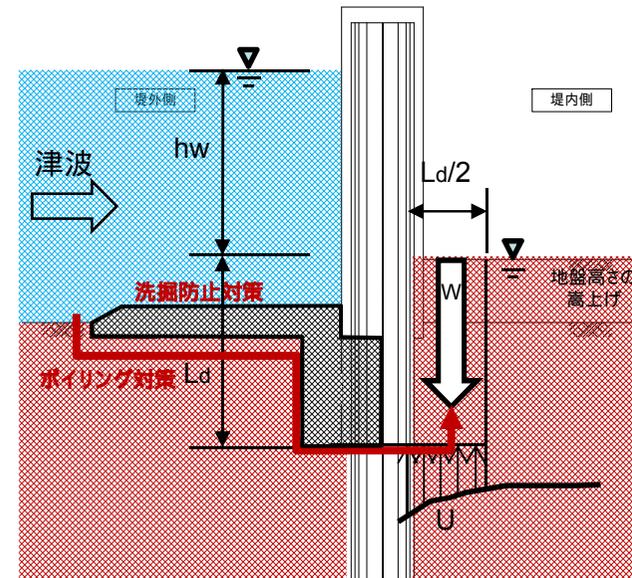
- 洗掘防止対策

堤外地盤の表層に対してセメント改良を実施し、津波波力よりも強度の高い地盤とすることで、洗掘防止対策とする。

$$\left(\begin{array}{l} \text{津波波力: } P_{\max} = 464 \text{ kN/m}^2 \\ \text{セメント改良: } q_u = 1000 \text{ kN/m}^2 \end{array} \right)$$

- ボイリング検討

表層改良体を設置し、津波に伴う堤内側との水頭差に対して抵抗する。



W: 土の水中重量

U: 水の浸透力

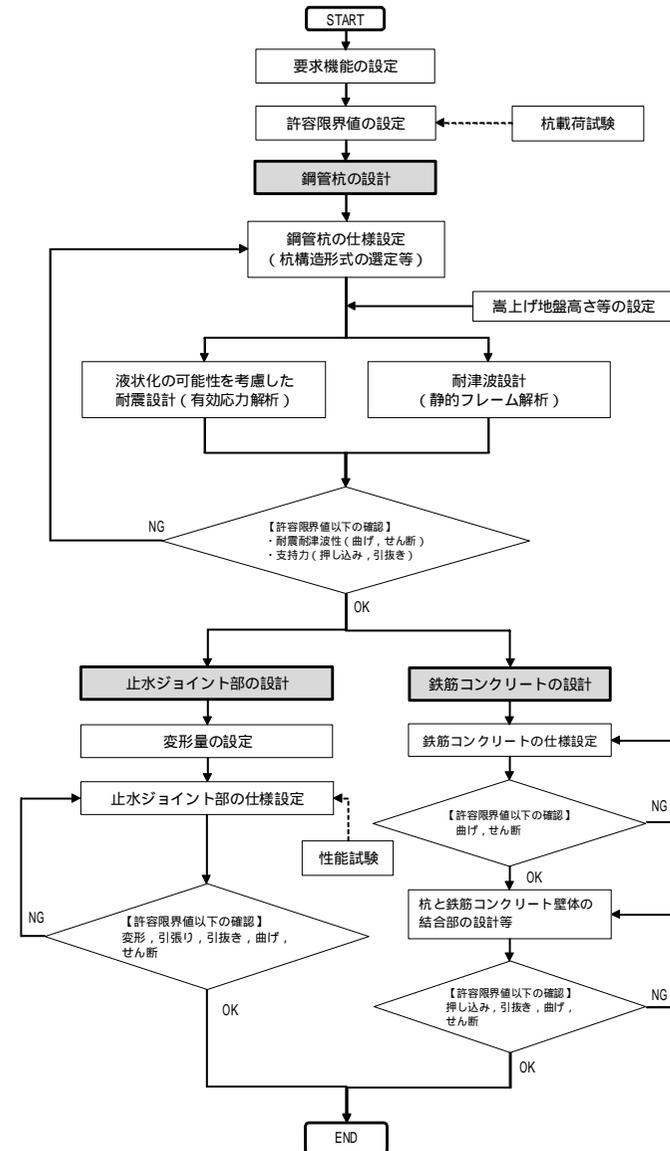
$$\text{安全率 } F_s = W/U \quad 1.2 \sim 1.5$$

7. 設計方針 (設計手順)

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の耐震・耐津波評価は、津波防護施設であること、Sクラスの設計基準対象施設であることを踏まえ、評価項目に示す通り、各構造部材の構造健全性評価を行う。

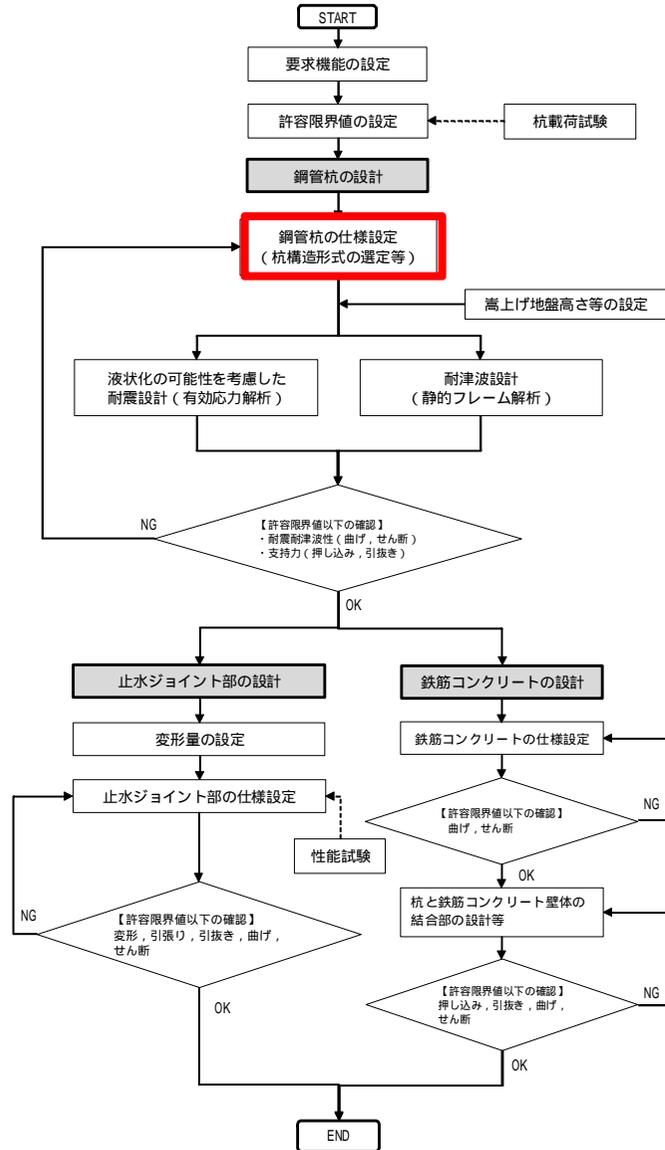
構造強度設計			設計に用いる許容限界	
評価対象部位		応力等の状態		
下部工	支持地盤	押込力, 引抜き	「道路橋示方書・同解説(共通編・下部構造編)」を踏まえ、極限支持力以下とする。 極限支持力以下	
	鋼管杭	曲げ, せん断	「道路橋示方書・同解説(共通編・下部構造編)」を踏まえた短期許容応力度以下とする。 降伏応力度以下	
上部工	鉄筋コンクリート(鉄筋コンクリート梁壁)	曲げ, せん断	「道路橋示方書・同解説(共通編・耐震設計編)」を踏まえた短期許容応力度以下とする。(コンクリート標準示方書【構造性能照査編】でも確認。) 降伏応力度以下 せん断強度以下	
	鋼管杭(鋼管杭鉄筋コンクリート)	曲げ, せん断	「道路橋示方書・同解説(共通編・下部構造編)」及び「鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説」を踏まえた短期許容応力度以下とする。 降伏応力度以下	
	止水ジョイント部	止水ゴム等	変形, 引張り	メーカー規格及び基準並びに必要な応じて実施する性能試験を参考に定める許容変形量及び許容引張り力以下とする。 許容変形量以下 許容引張り力以下
		鋼製アンカー	引張り, せん断, 引抜き	「各種合成構造設計指針・同解説」を踏まえた短期許容応力度以下とする。 降伏応力度以下 せん断強度以下
		止水ゴム等の鋼製防護部材	曲げ, 引張り, せん断	「鋼構造設計基準」を踏まえた短期許容応力度以下とする。 降伏応力度以下 せん断強度以下
地盤高さの 高上げ	すべり(滑動)	「道路橋示方書・同解説(共通編・下部構造編)」及び「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を踏まえ、滑動に対する許容抵抗力以下、すべり安全率以上とする。 滑動に対する抵抗力以下 すべりに対するせん断強度以下		
表層改良体	せん断	安全裕度を考慮したせん断強度以下とする。 せん断強度以下		

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の評価項目



構造健全性評価の検討フロー

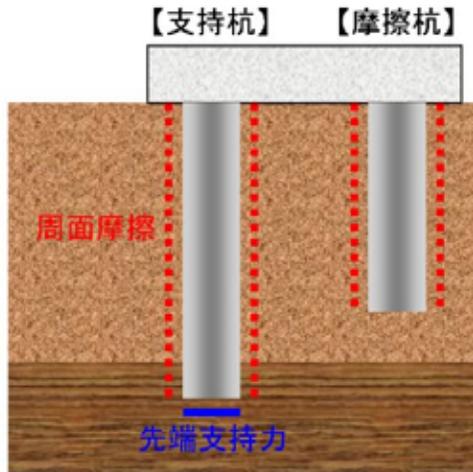
7. 設計方針 (設計手順)



7. 設計方針 (設計手順)

鋼管杭の仕様設定方針

- 杭基礎の構造形式の選定については、杭構造形式の選定フローに基づき実施する。
- なお、摩擦杭構造を選定する最後の段階においては、有効力解析による液状化判定の結果、基礎地盤は液状化しないものと判定された場合においても、**更なる保守的な仮定として、砂礫層の杭周面摩擦力を全てゼロとにおいて、恒久的な非液状化層である過圧密粘土層のみで所要の安全率をもって鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁構造を支持可能であるか照査する。**
- これにより、東海第二発電所の岩盤が深い区間については、最大限保守側に砂礫層の杭周面摩擦力を全てゼロと仮定しても、摩擦杭構造の成立性を見通せるか確認する。

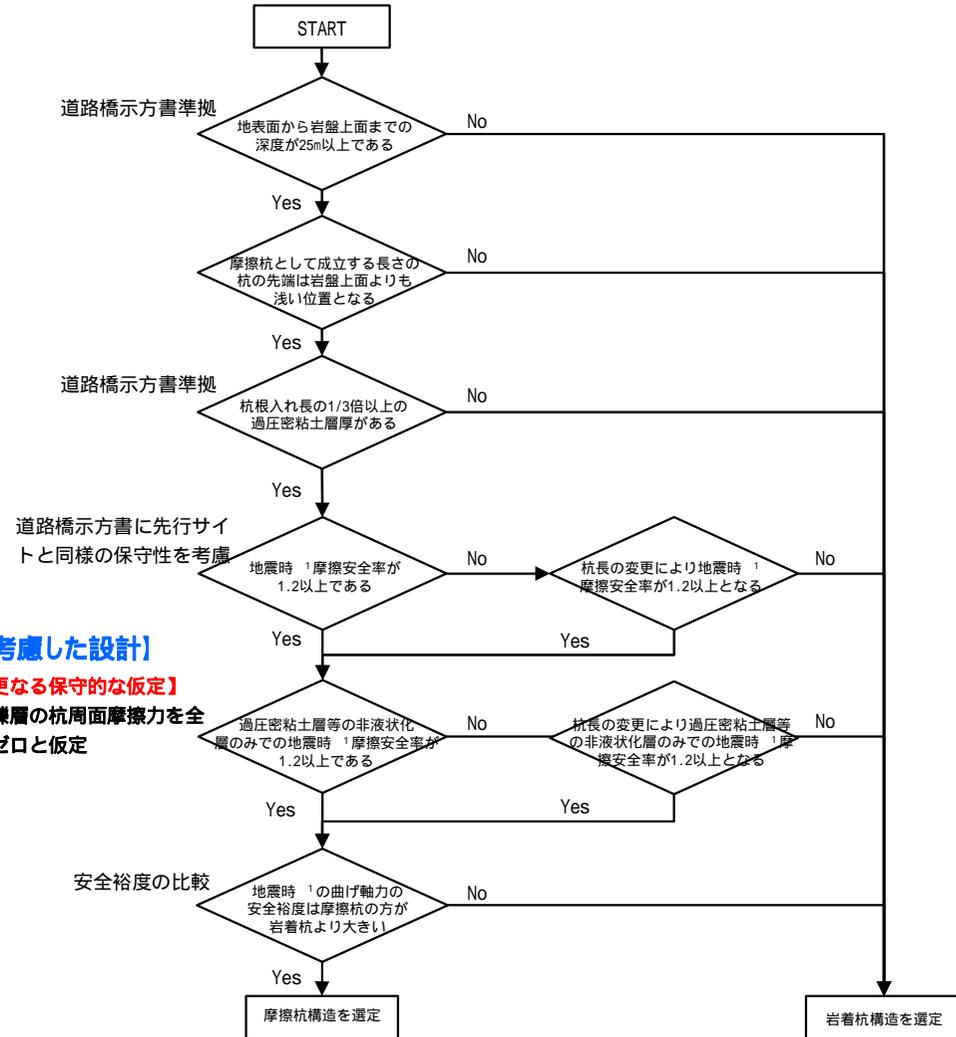


【杭の支持力】

- ・ 支持杭：周面摩擦力 + 先端支持力
- ・ 摩擦杭：周面摩擦力

【保守性を考慮した設計】

【更なる保守的な仮定】
砂礫層の杭周面摩擦力を全てゼロと仮定



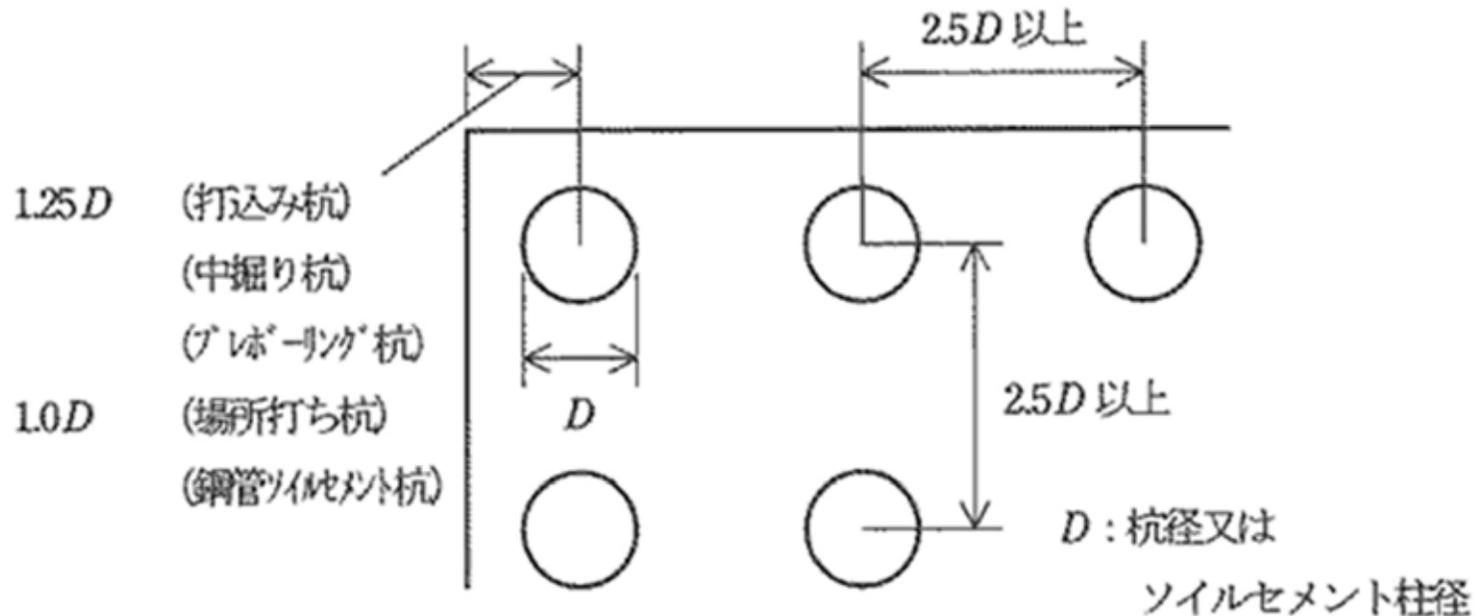
1 基準地震動 Ss入力時

【杭構造形式選定フロー】

7. 設計方針(設計手順)

杭間隔の設定方針

- 杭の配列については、上部工の形状や寸法、杭の寸法や本数、群杭の影響、施工条件等を考慮し決定する。
- 道路橋示方書では、杭の最小中心間隔が杭径の2.5倍未満である場合において群杭効果を考慮し、杭の軸方向支持力、水平方向地盤反力係数等を単杭の場合より低減することが規定されている。
- 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の設計においては、繰返し襲来する津波の波圧や基準地震動 S_s 等による荷重及びこれらに耐え得る大口径、高強度の鋼管杭の仕様を考慮した上で、適切な杭配置を検討するが、**杭の最小中心間隔が2.5倍未満となる場合は、群杭効果を見込んだ設計を行う。**

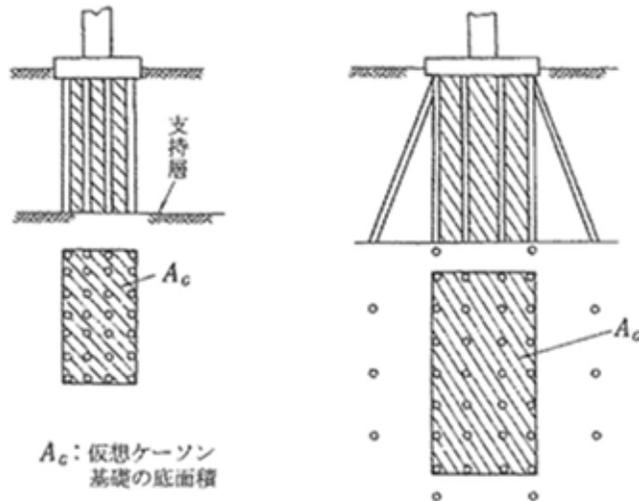


杭の最小中心間隔及びフーチング縁端距離

7. 設計方針(設計手順)

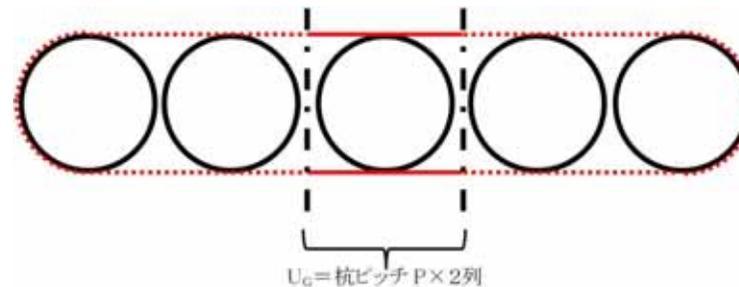
群杭効果の設定方針

- 摩擦杭における群杭の支持力は、杭中心間隔に応じた群杭の影響を考慮して、道路橋示方書の仮想ケーソン基礎の考え方を適用する。
- 杭中心間隔がある程度より密になると、杭と杭間の土塊が一体となってあたかも1基のケーソン基礎としての挙動を示すようになり、杭1本当たりの支持力が低下するため、杭基礎を仮想ケーソン基礎と考えて支持力の上限值を算定する。



仮想ケーソン基礎(道路橋示方書)

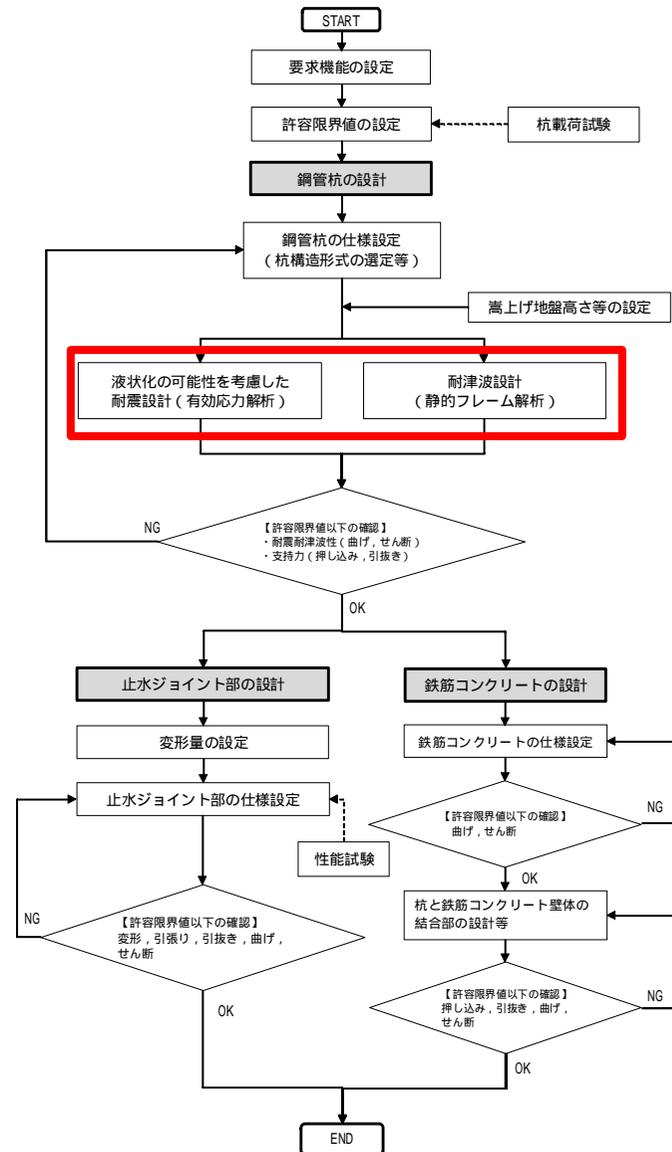
- ・単杭の周長 $U = \pi \times D$
- ・群杭を考慮した場合の周長 $U_G = 2 \times P$
ここに、P: 杭ピッチ(m)
- 群杭を考慮した場合の摩擦力は下式とする。
 $Q_i = U_G \cdot L_i \cdot \tau_i$



仮想ケーソン基礎の考え方による群杭の周長

- Q_i : 群杭を考慮した場合の摩擦力(kN)
- U_G : 斜線を施した部分の周長(m)
(1本の杭に対して上図の2本の赤線とする)
- L_i : 壁体底面から先端土層までの各層の厚層(m)
- τ_i : 各層の土のせん断抵抗力度(kN / m²)

7. 設計方針(設計手順)

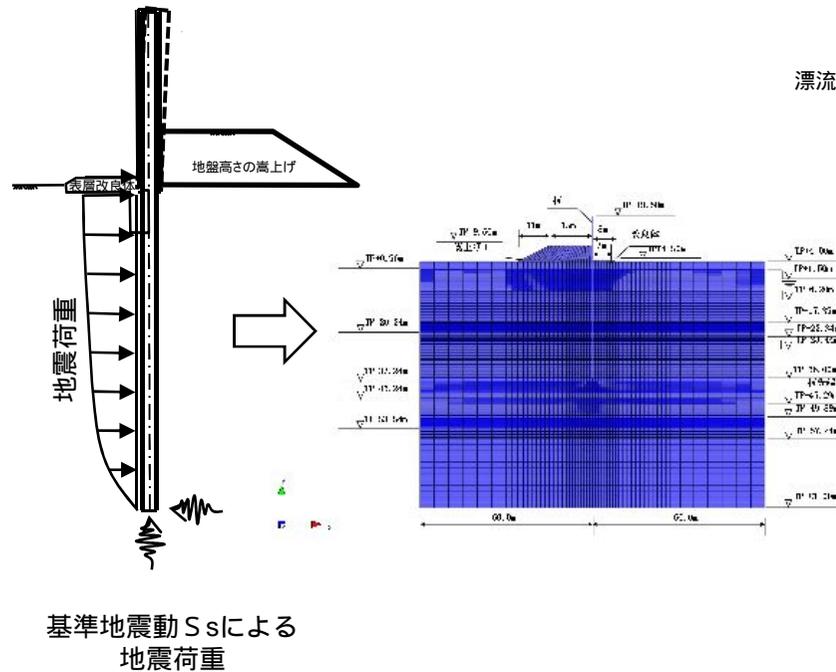


7. 設計方針(設計手順)

鋼管杭の設計方針

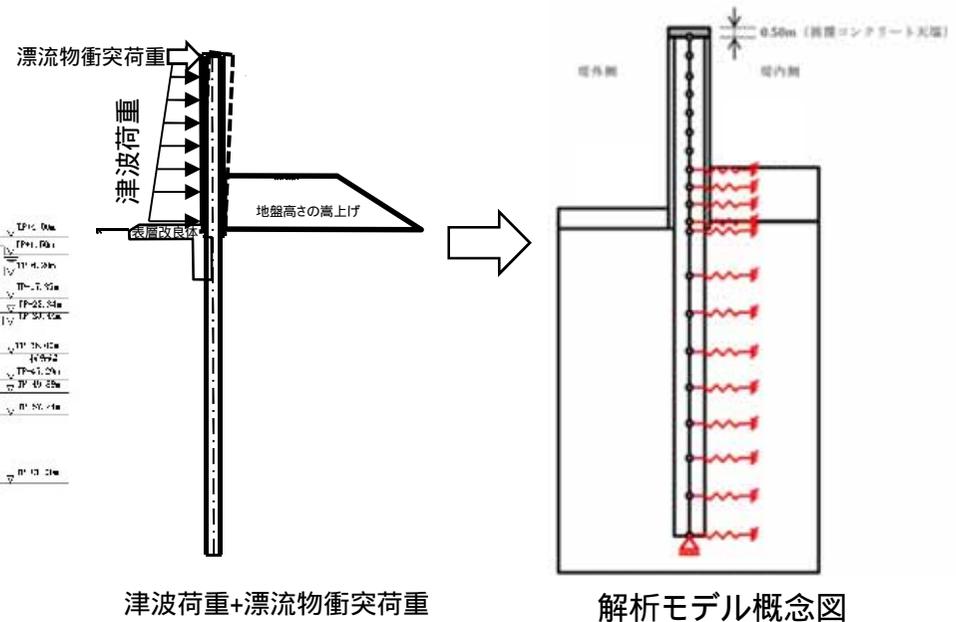
液状化の可能性を考慮した耐震設計(有効応力解析)

- 二次元地震応答解析を行い、地震時の鋼管杭の構造健全性について検討する。検討は、有効応力の変化に伴う地盤の挙動の変化を考慮することができる有効応力解析を用いる。
- 地震応答解析により算定された杭体の断面力を用いて、曲げモーメント・軸力に対する照査、せん断に対する照査を行い、許容限界以下であることを確認する。

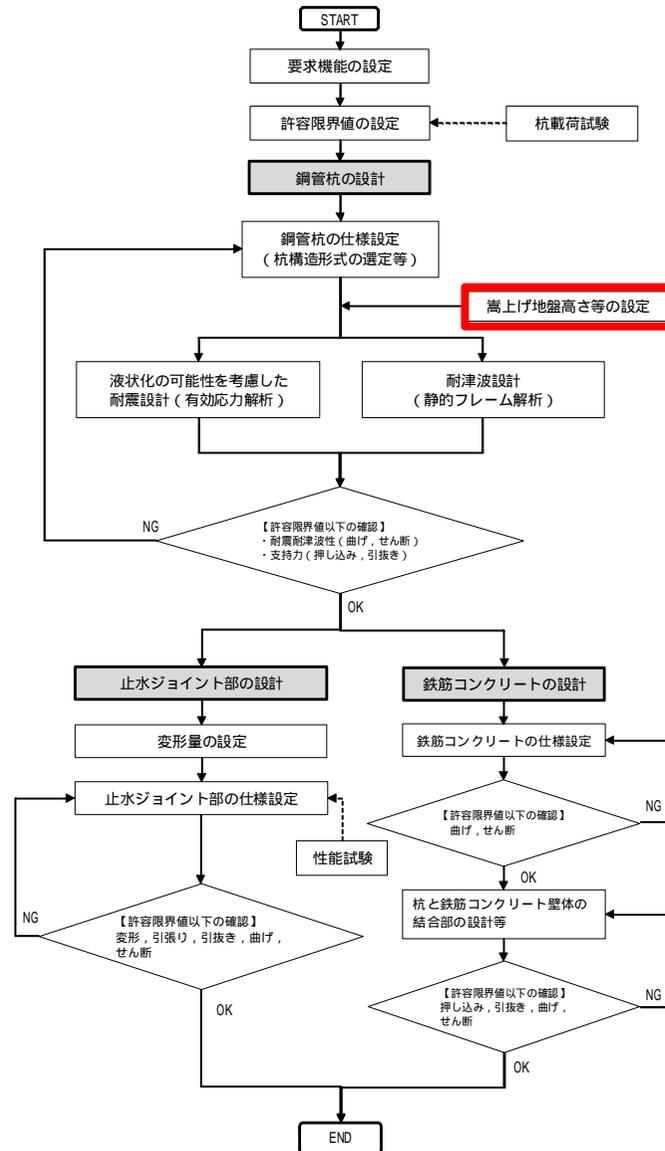


耐津波設計(静的フレーム解析)

- 鋼管杭を二次元梁要素とし、地盤バネを接続したモデルで静的フレーム解析を行う。死荷重及び積雪の長期荷重、津波による波力と漂流物衝突荷重、余震荷重等を外力として入力する。地盤バネは静的物性及びせん断強度により計算する。
- 津波荷重に対しては、鋼管杭1本あたりの分担面積に対して加わる荷重に弾性範囲内で耐えうる設計とする。
- 二次元静的フレーム解析に用いる地盤ばねは、道路橋示方書 下部工編に従い水平方向地盤反力係数を求め、上限値を設定するバイリア型とする。
- 杭先端の境界条件は鉛直ピン結合、水平ローラーとする。



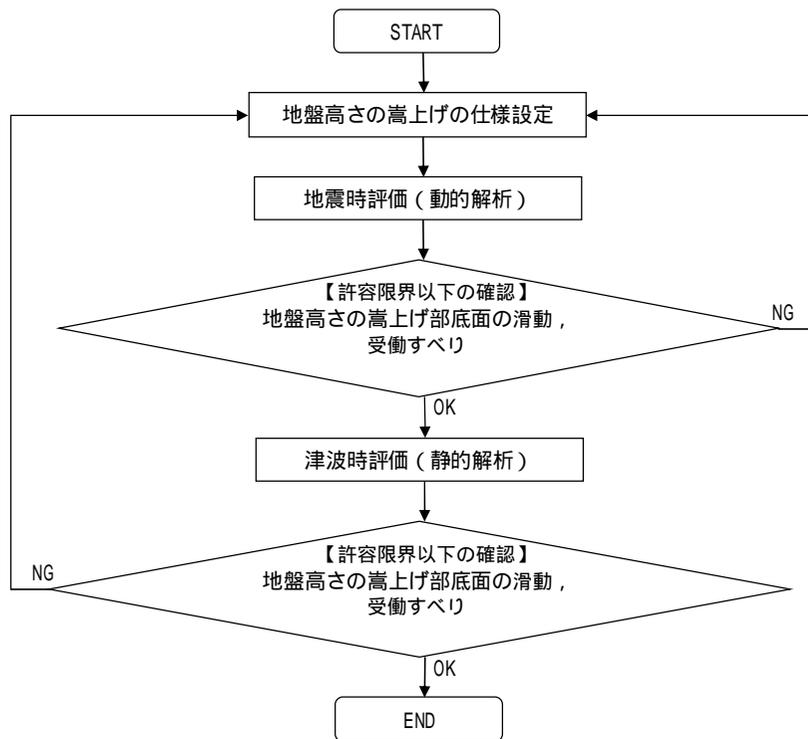
7. 設計方針(設計手順)



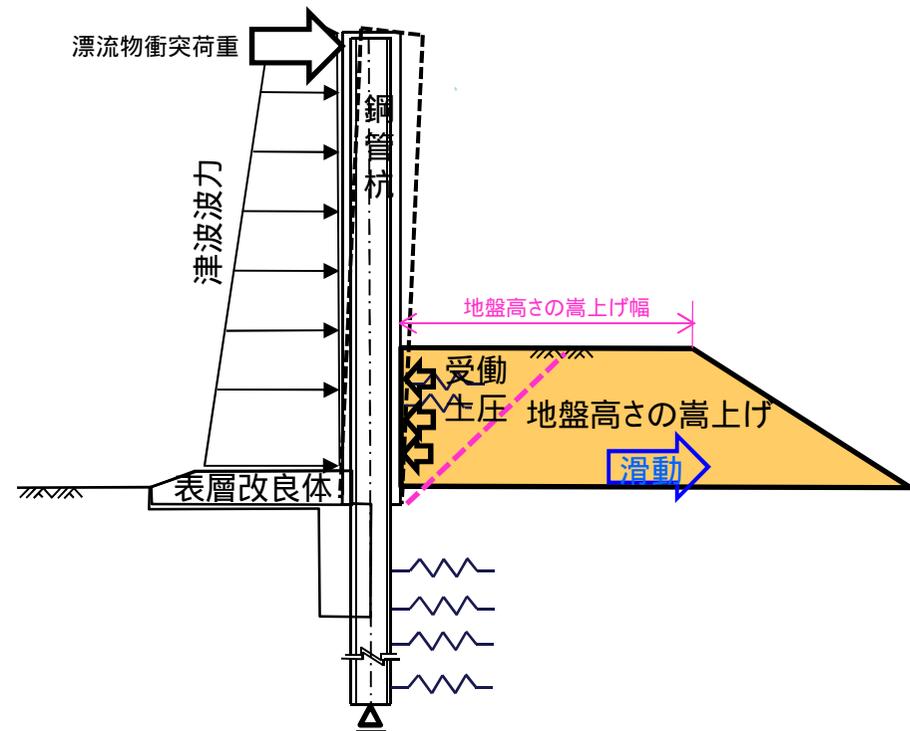
7. 設計方針(設計手順)

地盤高さの嵩上げの設計方針

- 地盤高さの嵩上げは、津波荷重に対する上部工の変位の抑制を目的とした地盤である。
- したがって、地震時及び津波時に地盤高さの嵩上げ部底面が滑動しないこと及び上部工背面の地盤が滑りに至らないことを照査する。
- 地盤高さの嵩上げ部の滑動の照査は、地震時と津波時に対して行うこととし、道路橋示方書・同解説(共通編・ 下部構造編)の直接基礎における基礎底面地盤のせん断抵抗力の照査方法を適用する。
- 地盤高さの嵩上げ部のうち上部工背面の地盤のすべりの照査については、地震時と津波時に対して行うこととし、所要のすべり安全率以上であることを確認する。



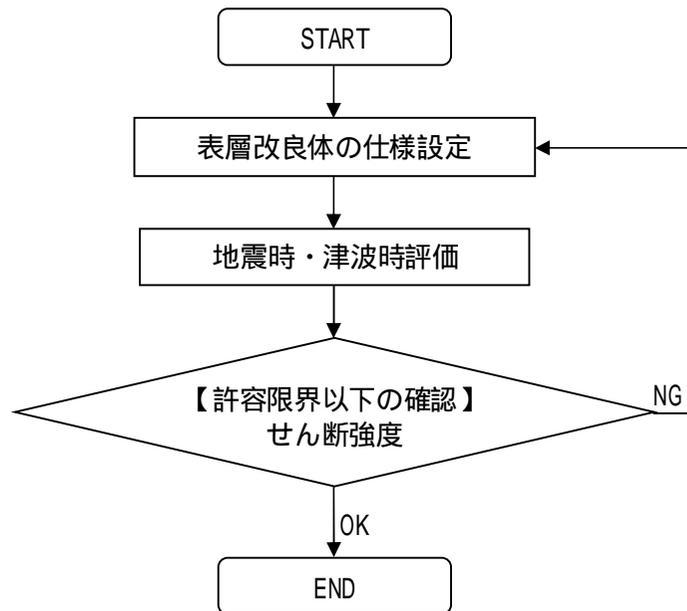
地盤高さの嵩上げの検討フロー



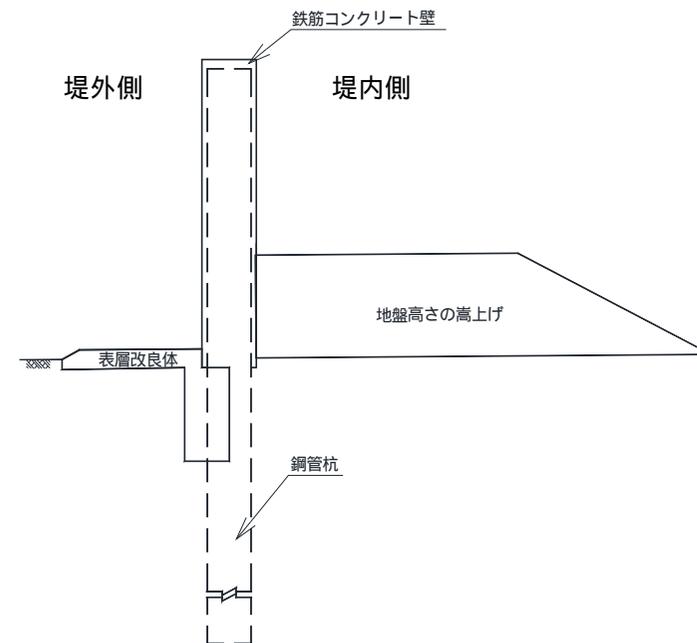
7. 設計方針(設計手順)

表層改良体の設計方針(洗掘防止対策)

- 繰り返し襲来する津波に対する防潮堤前面の洗掘防止やボイリングを防止するため、表層地盤を1m程度地盤改良し、更に杭間を数m閉塞することにより対策を行う。更に上部工の鉄筋コンクリート壁は、改良体表面から1m程度地盤に根入れする。
- 表層改良体は、地震時においてせん断破壊が生じない設計とするため、地震時における表層改良体に発生するせん断応力が安全裕度を考慮した許容せん断応力以下であることを確認する。
- また、津波時における洗掘に対しても、津波波力に対して十分な抵抗性があることを確認する。

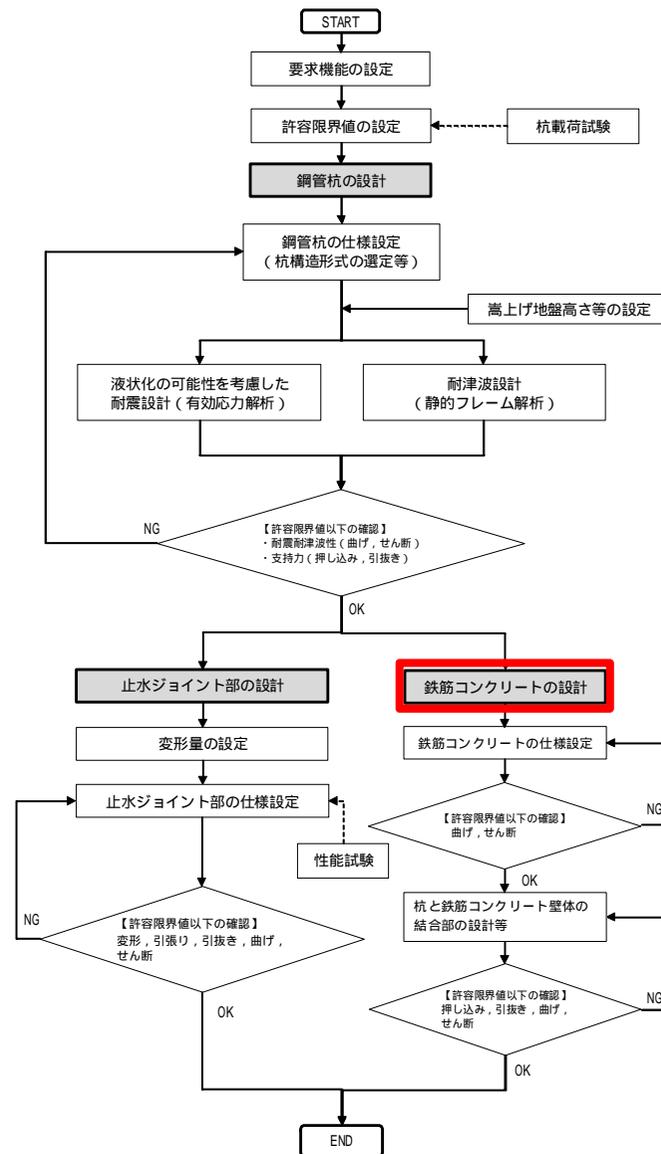


表層改良体の検討フロー



洗掘防止対策

7. 設計方針(設計手順)

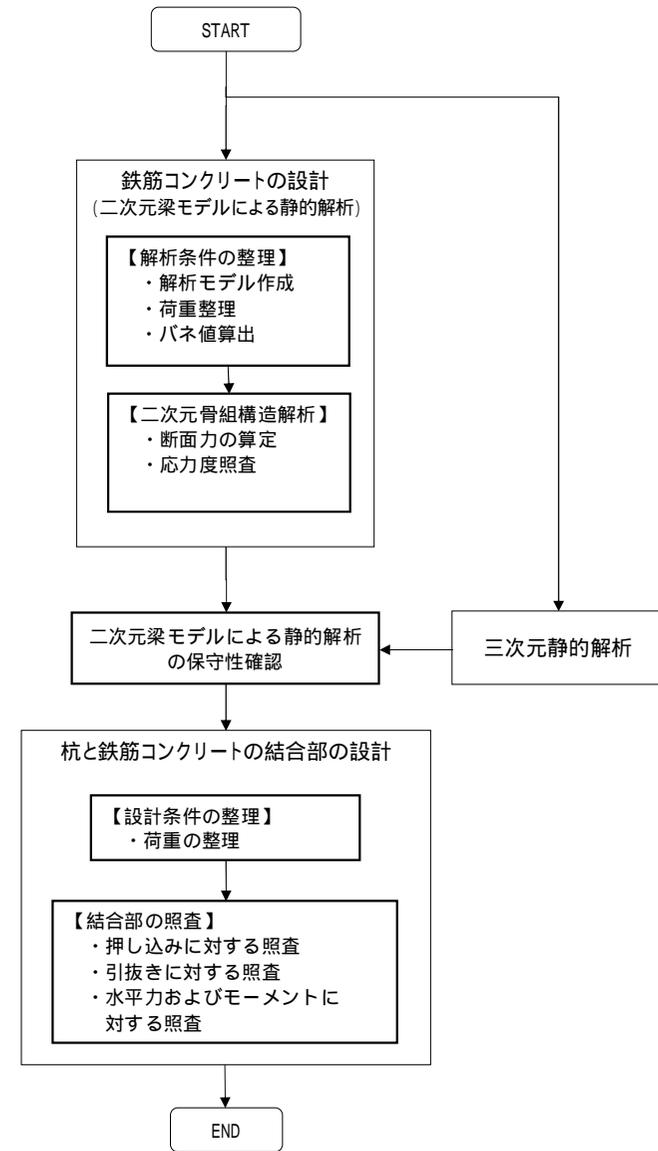
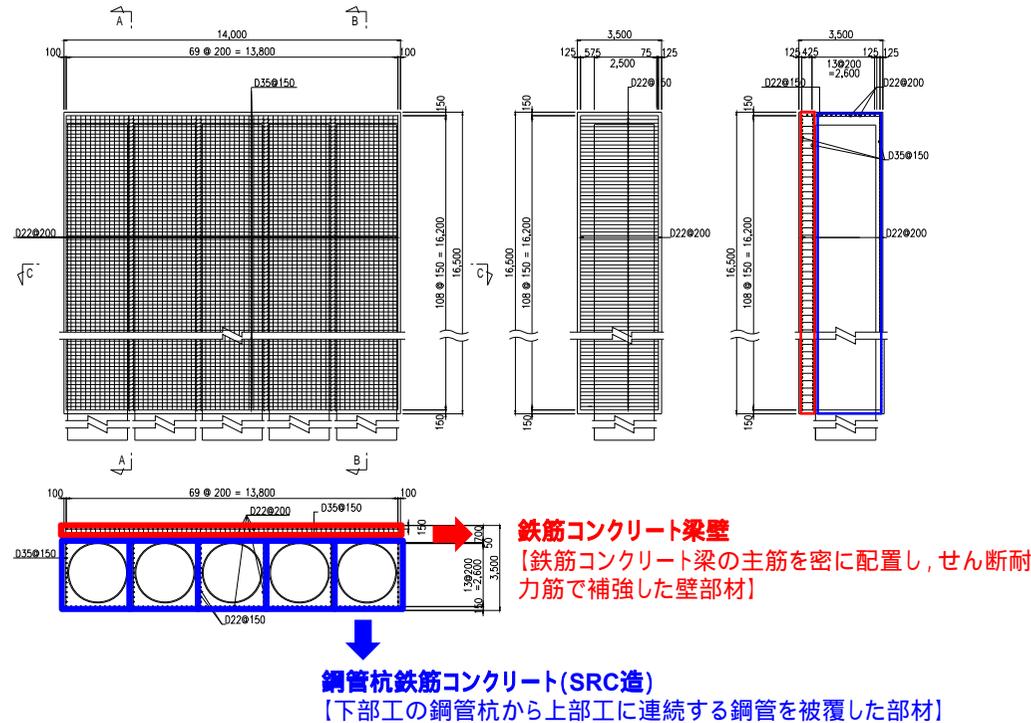


7. 設計方針(設計手順)

上部工(鉄筋コンクリート壁)

- 鉄筋コンクリート壁に要求される性能は、杭間の止水性を確保するものである。そのため、繰返し襲来する津波荷重が作用した場合の杭間に生じる荷重に対して弾性状態に留まる必要がある。
- 鋼管杭を地震・津波荷重に耐える構造躯体とし、杭間からの津波の浸水を防止する観点で、鋼管杭に鉄筋コンクリートを被覆する上部構造とした。この上部構造は、漂流物の衝突荷重や津波荷重に耐える鉄筋コンクリートの梁壁と鋼管杭の鉄筋コンクリート(SRC造)を一体化した構造とした。

上部工(鉄筋コンクリート, 鋼管杭)



上部工の設計手順

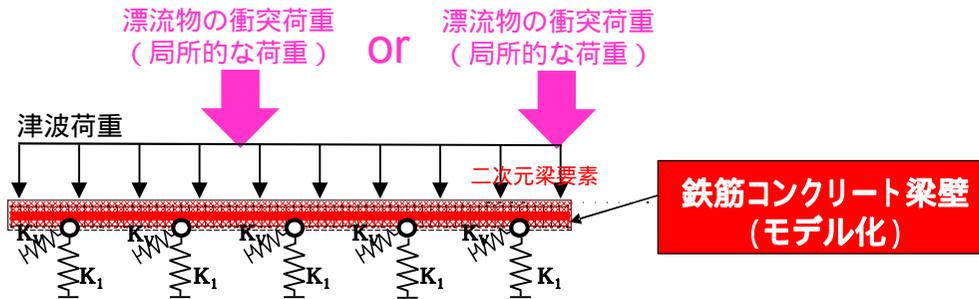
二次元梁モデルの概要

モデル化方針

「鉄筋コンクリート梁壁」のみを、二次元の梁でモデル化し(鉄筋コンクリート梁壁を一本の梁要素に集約し、鋼管杭の剛性を考慮しないモデル)、構造評価を行う。

【保守性を考慮した設計】

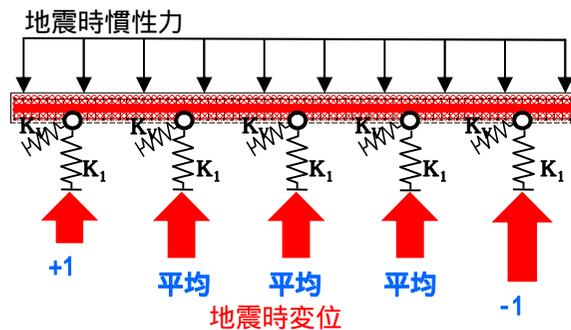
漂流物の衝突荷重は曲げモーメントが最大となる位置に載荷



津波時漂流物の載荷イメージ図

- 二次元梁モデルは津波や漂流物の衝突荷重に耐える構造である鉄筋コンクリート梁壁のみをモデル化する。
- 各支点(鋼管杭の中央部)には地盤の水平抵抗及び鉛直抵抗を模擬するバネを設置する。
- バネと梁要素はピン結合され、水平方向バネには水平方向反力、鉛直方向バネには鉛直方向反力が伝わる。
- 津波荷重は、地表面付近の最大荷重を梁モデルに載荷する。
- 津波と漂流物の重畳時については、津波荷重を分布荷重として載荷し、漂流物荷重は、最も曲げモーメントが大きくなる位置に載荷する。(例えば、支間中央部分あるいは片持梁となる端部)

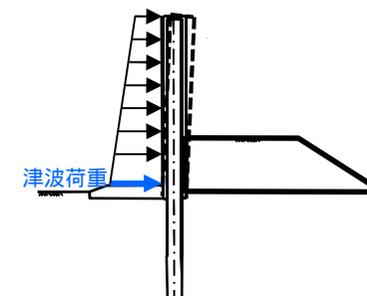
【保守性を考慮した設計】



地震時相対変位の載荷イメージ図

- 地盤のばらつきについて、杭バネとして梁モデルに付加する。
- 左右にそれぞれ、+1 に相当するバネ、-1 に相当するバネとしてモデル化する。
- ±1 バネの設定する位置は最も曲げモーメントが大きくなる位置に付与する。

【保守性を考慮した設計】

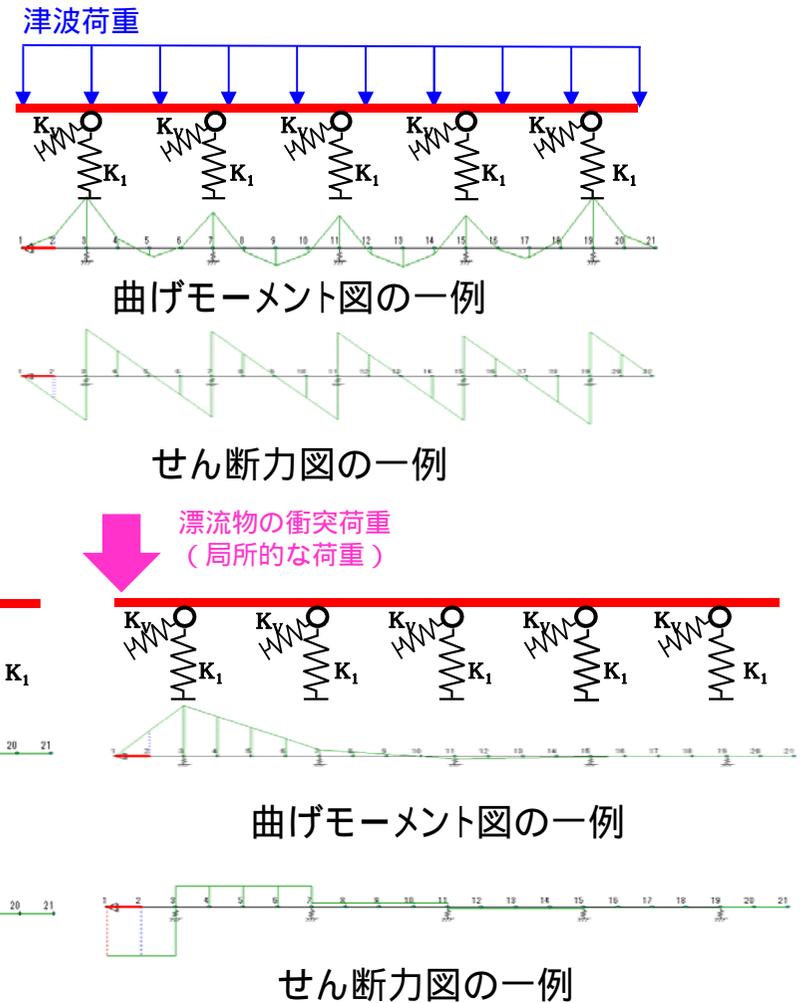
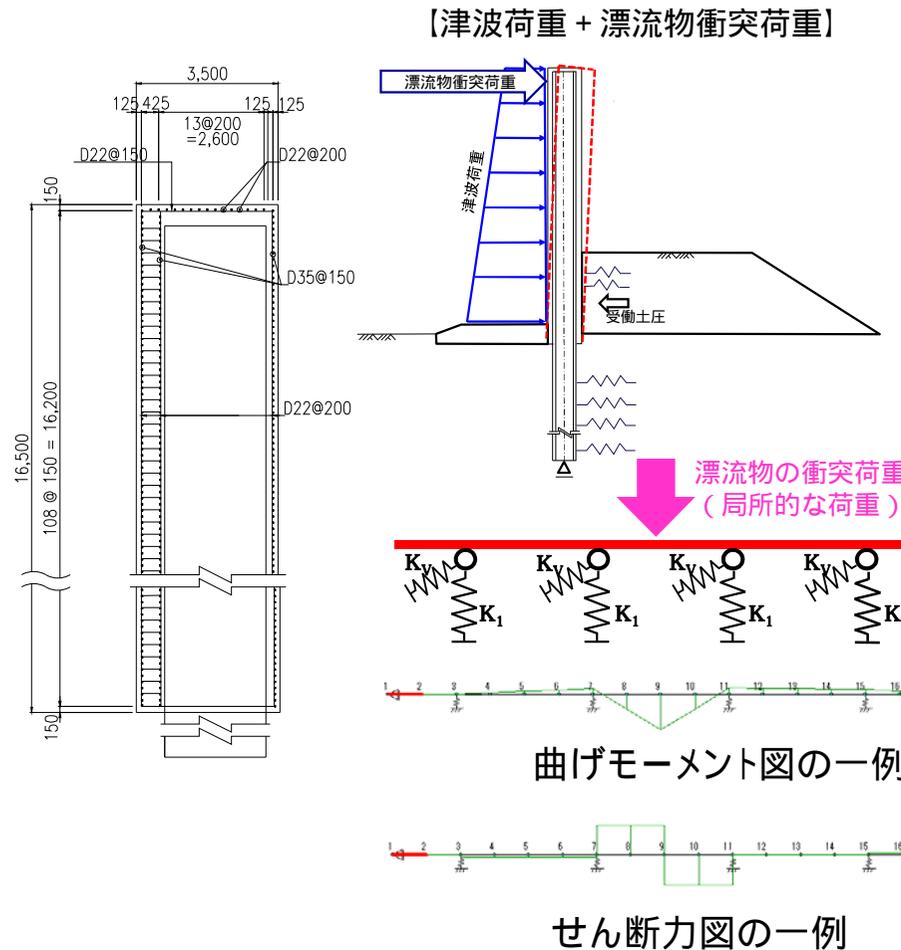


上部工の照査(漂流物の衝突)

確認事項

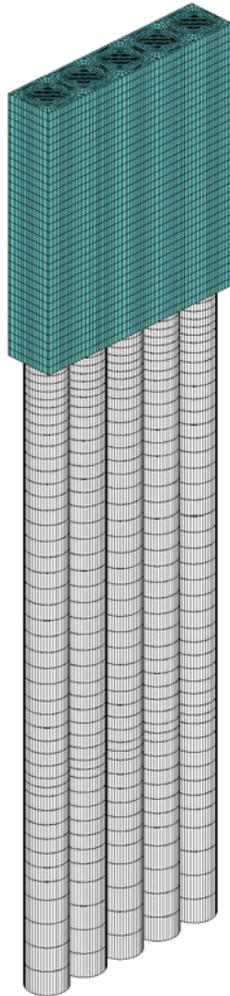
上部構造体に津波荷重や漂流物衝突荷重が作用した場合の鉄筋コンクリート梁壁や鋼管コンクリートに生じるコンクリート圧縮・せん断応力や鉄筋の引張・せん断応力を照査する。

津波荷重に加えて、漂流物衝突荷重を集中荷重として与え、鉄筋コンクリート梁壁内の引張鉄筋、せん断耐力鉄筋の照査を行う。



三次元FEM解析による検討

- ・ 鋼管杭, 鉄筋コンクリート梁壁及び鋼管杭鉄筋コンクリート部が合成された構造物の健全性については, 三次元FEM解析により照査する。
- ・ 三次元解析モデルにおける地盤の抵抗については, 地盤バネによって評価する。



三次元解析モデル

津波時

- ・ 1ブロックあたりに作用する津波荷重を三次元的に載荷する。
- ・ 漂流物荷重については, 応力が最大となる位置に載荷する。
- ・ 杭に付与する地盤バネについては, 地盤のばらつきを考慮する。

地震時

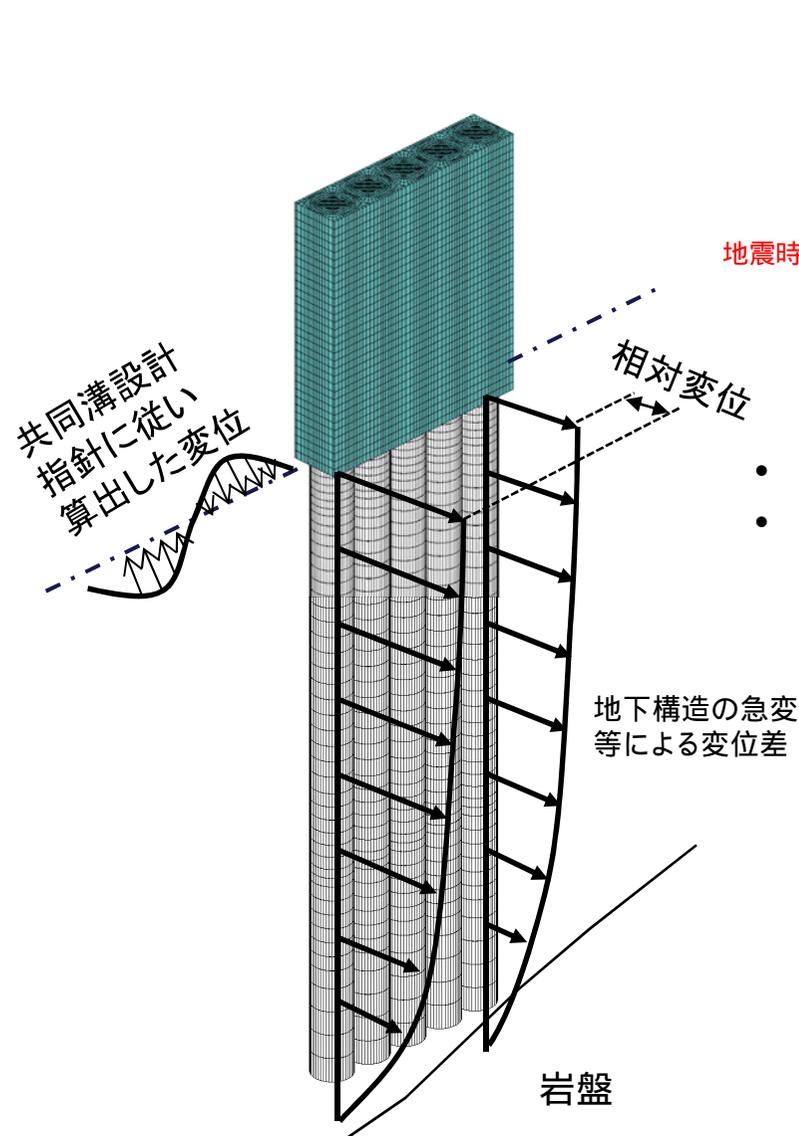
- ・ 上部工には地震時慣性力を与える。
- ・ 地中変位を地盤バネを介して載荷する。地中変位は地盤のばらつきを考慮する。

余震+津波時

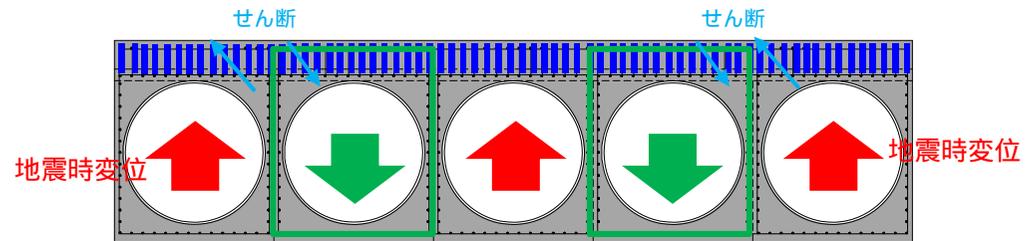
- ・ 上部工には余震時慣性力を与える。
- ・ 津波荷重は三次元的に載荷する。
- ・ 地中変位を地盤バネを介して載荷する。地中変位は地盤のばらつきを考慮する。

地震時相対変位の検討

地盤の不整形性や表面波による鋼管杭間の相対変位の影響を確認する。



鉄筋コンクリート壁梁のせん断抵抗力で抵抗する。
(青色, 緑色: せん断耐力鉄筋)



- 表面波による変位は共同溝設計指針に従い算出する。
- 地盤の不整形性等による相対変位の影響については、一次元波動論による入力動の検討を行い、部位毎の相対変位量等を把握する。



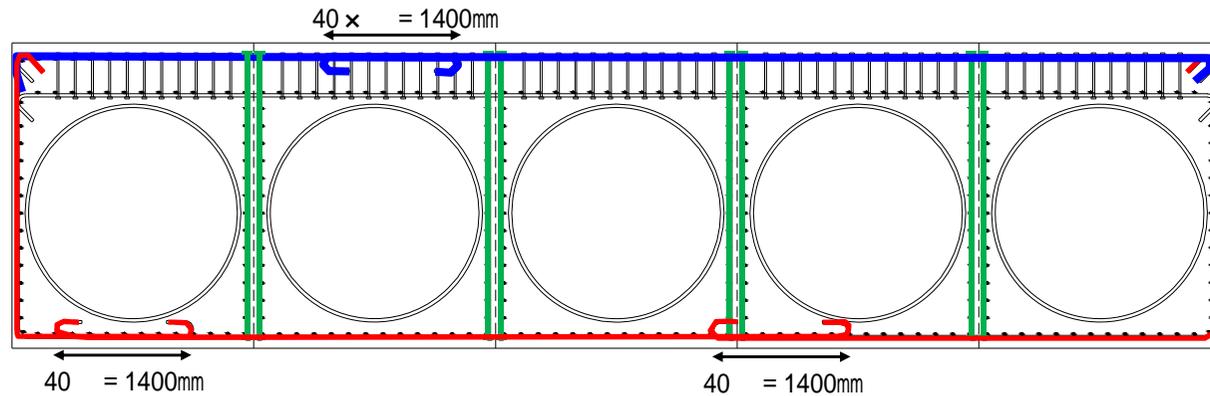
必要に応じて三次元有限要素法解析と鉄筋コンクリート躯体を骨組みモデルで表現した二次元骨組みモデルとを比較し、後者の保守性の検証を実施する。

鉄筋コンクリート梁壁と鋼管杭鉄筋コンクリートの一体化

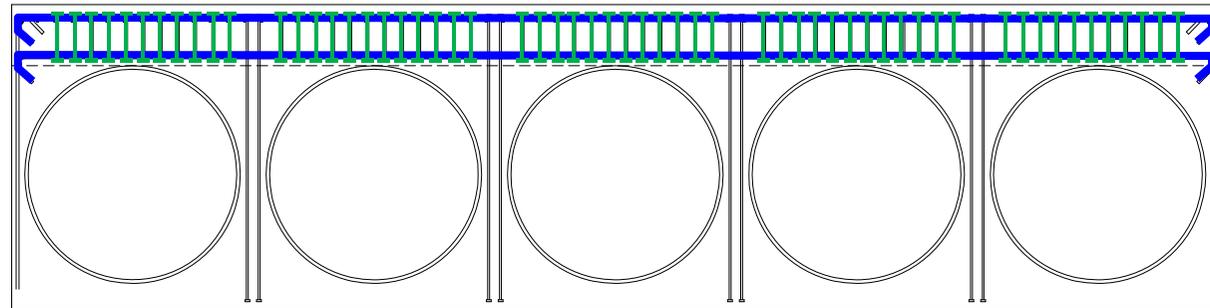
鉄筋コンクリートの配筋

「5本の柱を束ねる鉄筋」および「梁壁の鉄筋」は鉄筋により結合される。

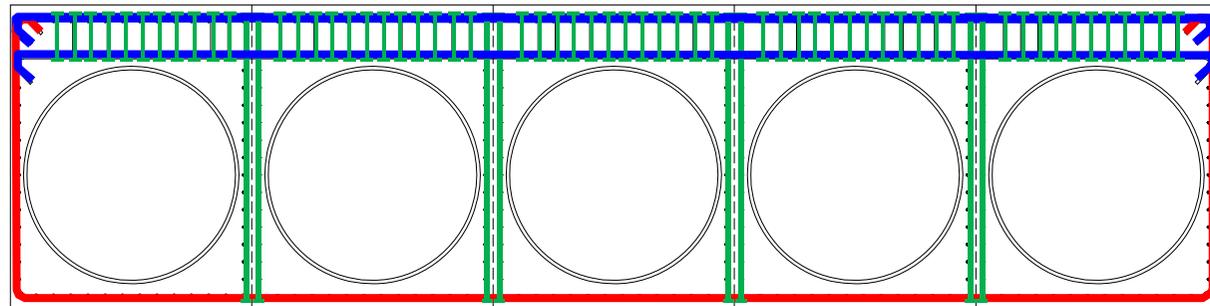
鉄管コンクリート構造の鉄筋
(5本の柱を束ねる鉄筋)



梁壁の鉄筋
(主筋およびせん断補強筋)

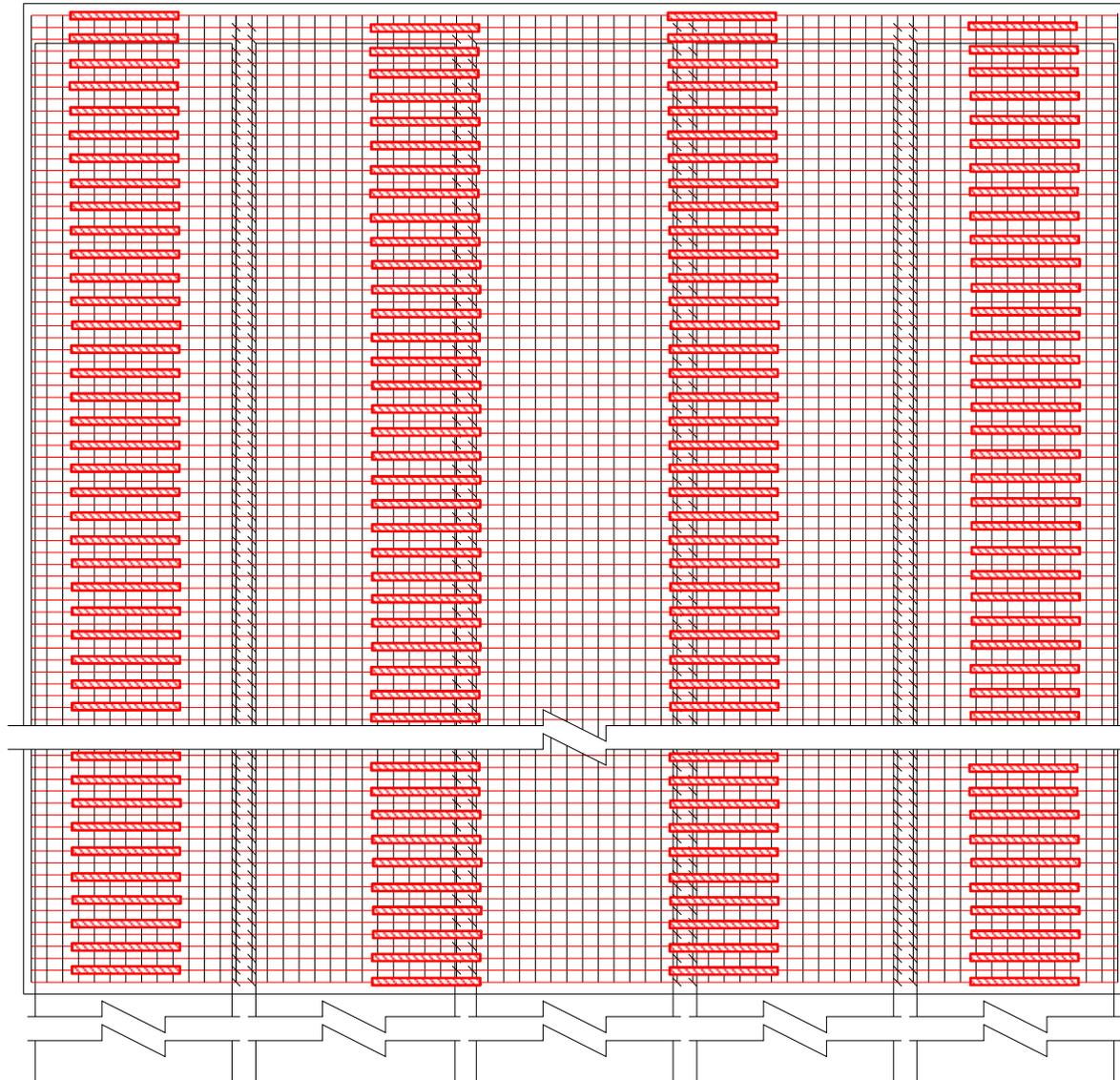


両方の鉄筋は、一部を共有して配置される。



鉄筋コンクリート梁壁と鋼管杭鉄筋コンクリートの一体化

配筋図(側面図)

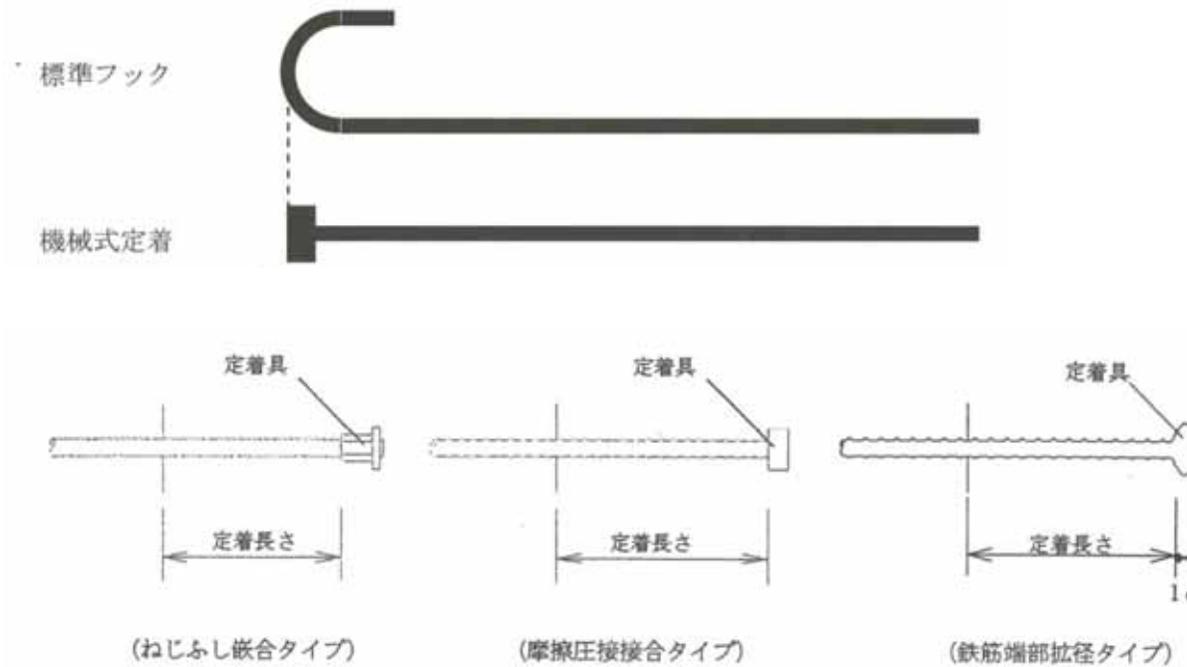


- : 鉄管コンクリート構造の鉄筋
(5本の柱を束ねる鉄筋)
- ▨ : 鉄筋継手位置
(40 × =1400mm・千鳥配置)

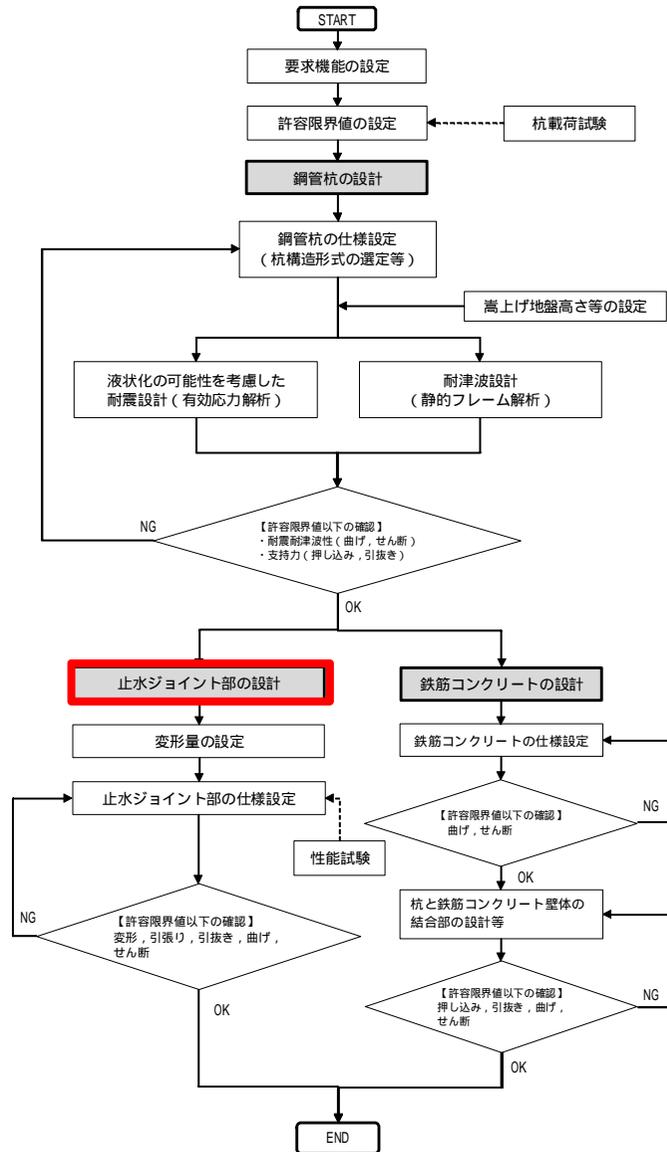
7. 設計方針(設計手順)

鉄筋コンクリート梁壁と鋼管杭鉄筋コンクリートの一体化

せん断補強鉄筋の端部には，機械式定着を適用する。



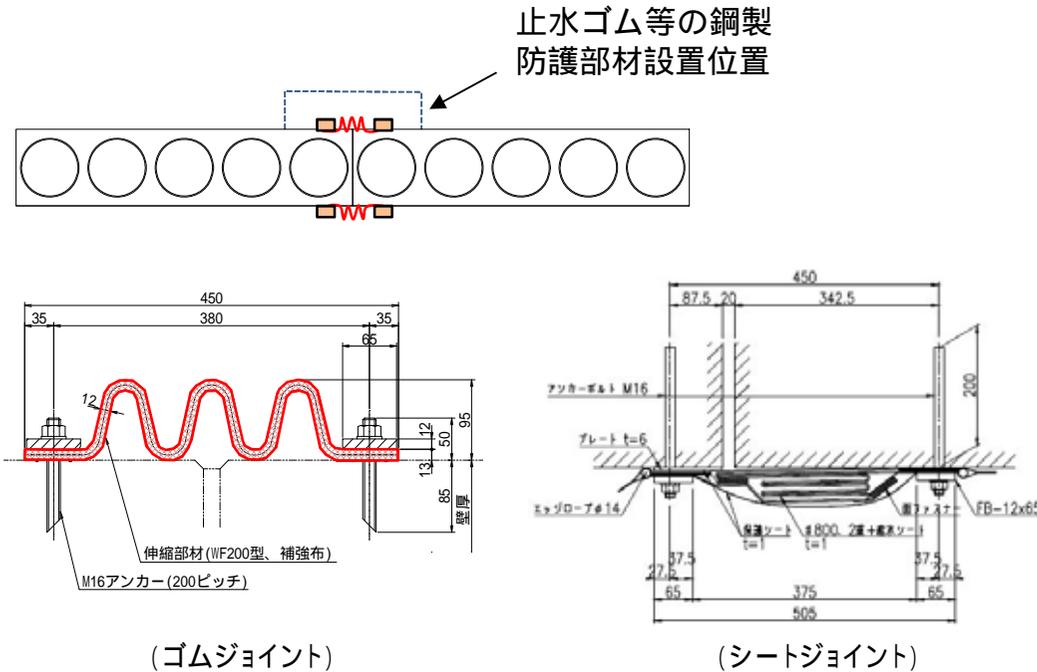
7. 設計方針 (設計手順)



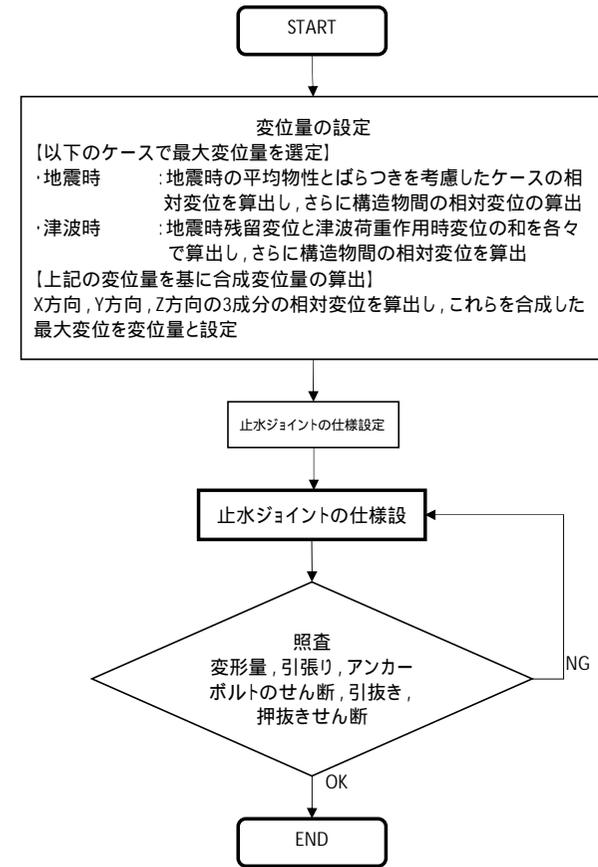
7. 設計方針(設計手順)

止水ジョイントの変形量評価方針

- 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の上部工は、鉄筋コンクリートからなるが、ひび割れ防止等の観点で一定間隔の施工ブロックを設定しその境界に伸縮性を有する止水ジョイントを設置する必要がある。
- また、鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁と地中連続壁タイプの鉄筋コンクリート防潮壁等、異種構造物間の境界にも止水ジョイントを設置する。
- 止水ジョイント部の構造健全性評価については、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析及び津波荷重を用いた静的フレーム解析に基づく止水ゴム等の変形量及び鋼製アンカーに発生する応力が短期許容応力度以下であることを確認する。
- また、漂流物衝突荷重による鋼製防護部材に発生する曲げ及びせん断応力が短期許容応力度以下であることを確認する。



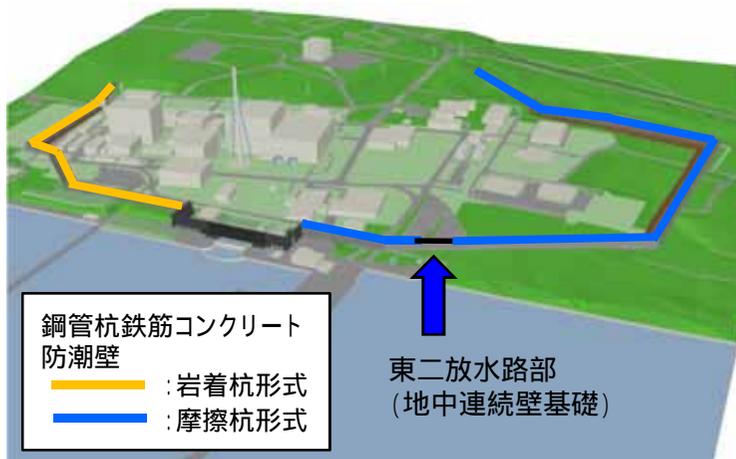
止水ジョイント部の概念図



止水ジョイント部の検討フロー

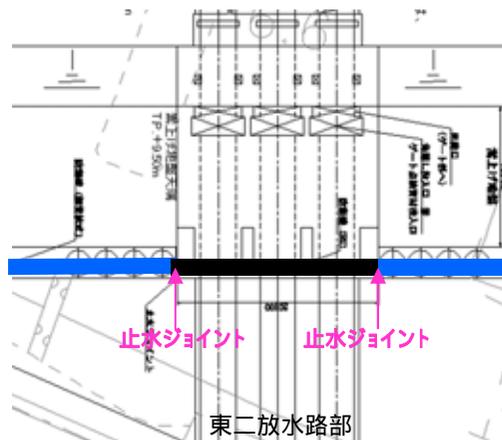
止水ジョイントの変形量評価方針

東海第二発電所 放水路部防潮堤間のジョイント(異種構造物間)



防潮堤鳥瞰図

- ・ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁側の横断方向の相対変位(上部工天端と下端)と、放水路防潮壁の相対変位をそれぞれ算出し、両者の時刻歴相対変位の最大値を地震時の水平方向の変位量とする。
- ・ 鉛直変位については両者の天端の時刻歴相対変位の最大値を算出する。
- ・ 水平方向と鉛直方向の合成変位を時刻歴で算出し、その最大値を地震時変形量とする。
- ・ 津波時は、地震時残留変位と津波荷重作用時変位の和を、両防潮壁で算出し、その差が津波時の変位量となる。
- ・ 止水ゴム等の許容限界については、地震時及び津波時のそれぞれのケースに対して許容限界を設定する。
- ・ 地震時の許容限界は、ジョイントの長さとし、**基準地震動より算定される相対変位量を上回る長さを設定する。**
- ・ 波圧が作用した際に止水ゴム等に発生する張力は、津波時の許容限界量は開き量とし、地震後の残留変位に余震による最大相対変位を加えた値が開き量を超えないこととする。



平面図(拡大図)

8. 施工実績(本設杭構造)

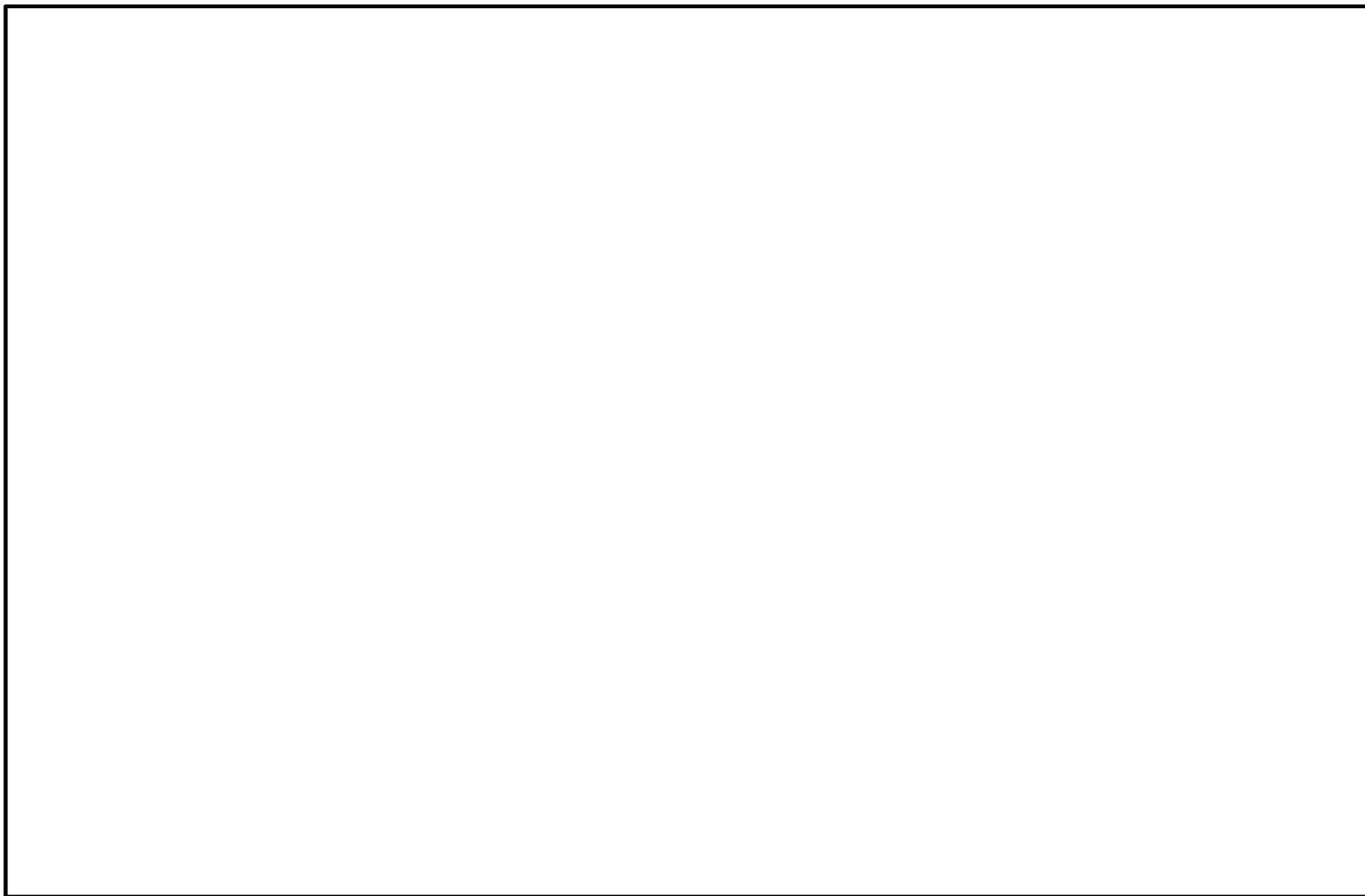
杭の最小中心間隔が2.5D未満の場合であり、かつ一列配置とした本設構造物の実績について調査した結果を示す。

一列杭の本設構造物の実績

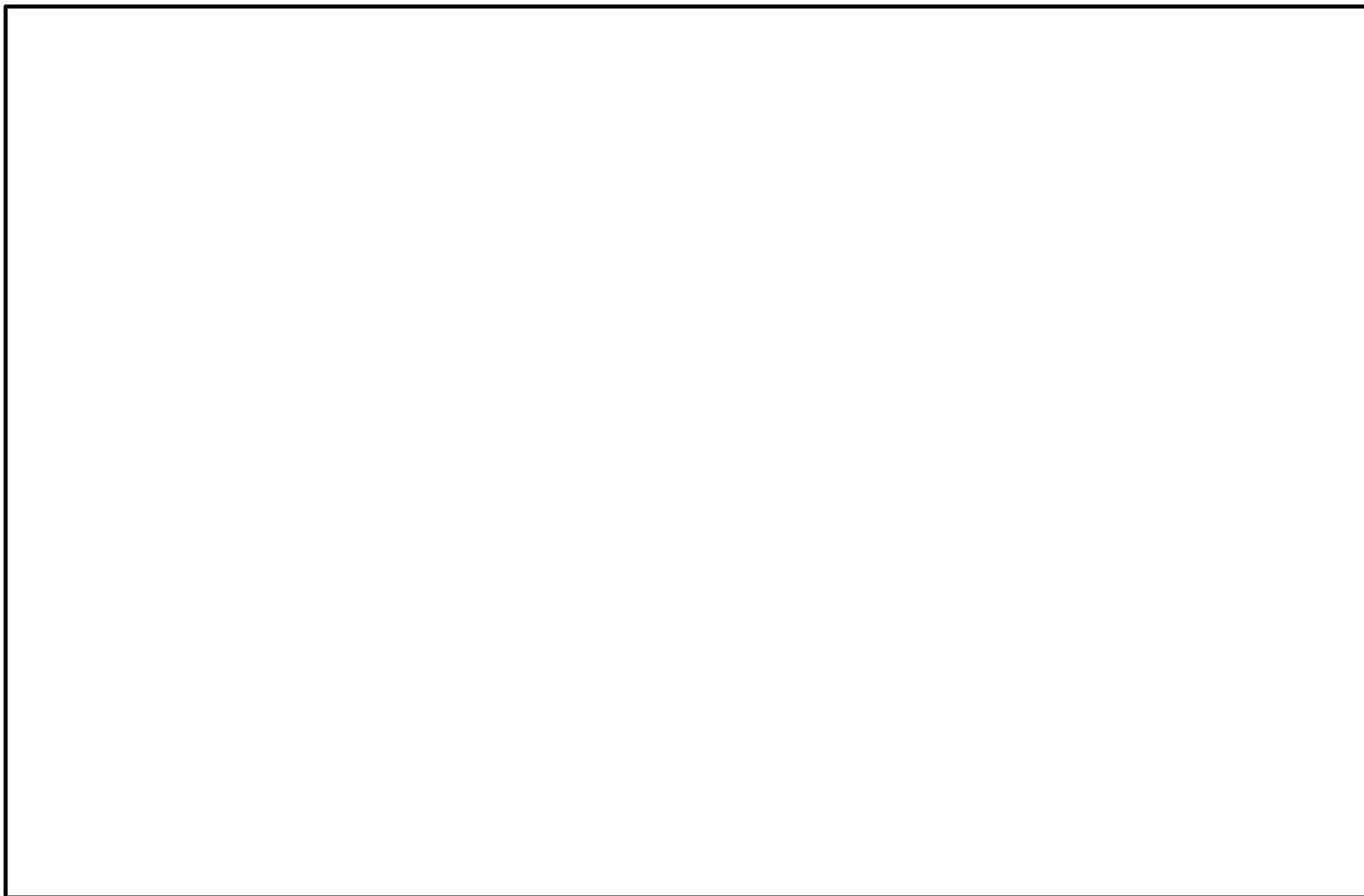
工事区分	件数			
	国土交通省等	都道府県	民間 (高速道路,鉄道, ガス等)	計
河川護岸	10件	115件	1件	126件
海岸岸壁	39件	47件	1件	87件
道路(高速道路,橋梁,トンネル等)	13件	55件	26件	94件
造成(擁壁,法面,改良等)	2件	8件	3件	13件
その他	2件	5件	7件	14件

(2017年6月 日本原子力発電(株) 調査)

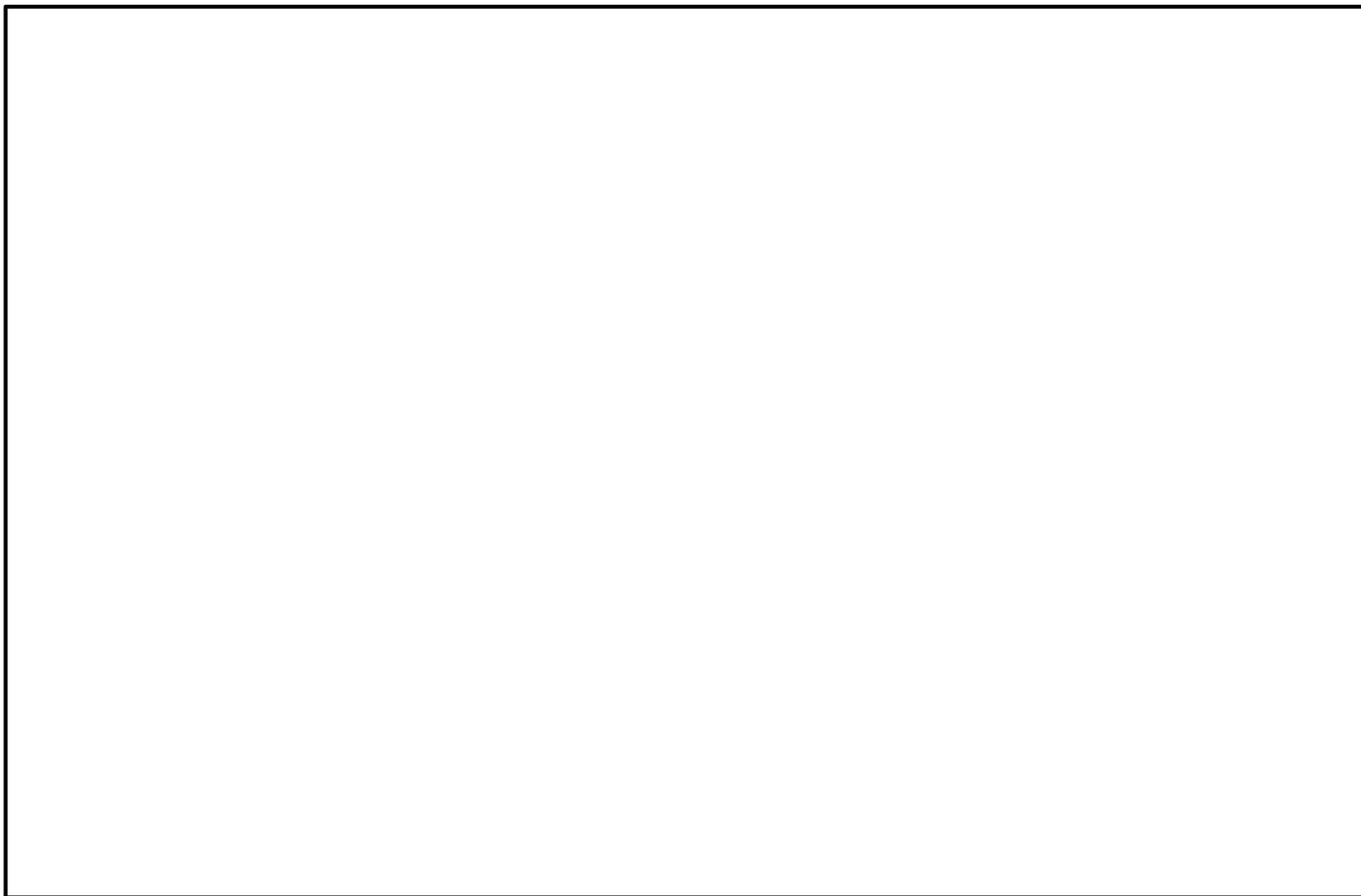
8. 施工実績(本設杭構造)



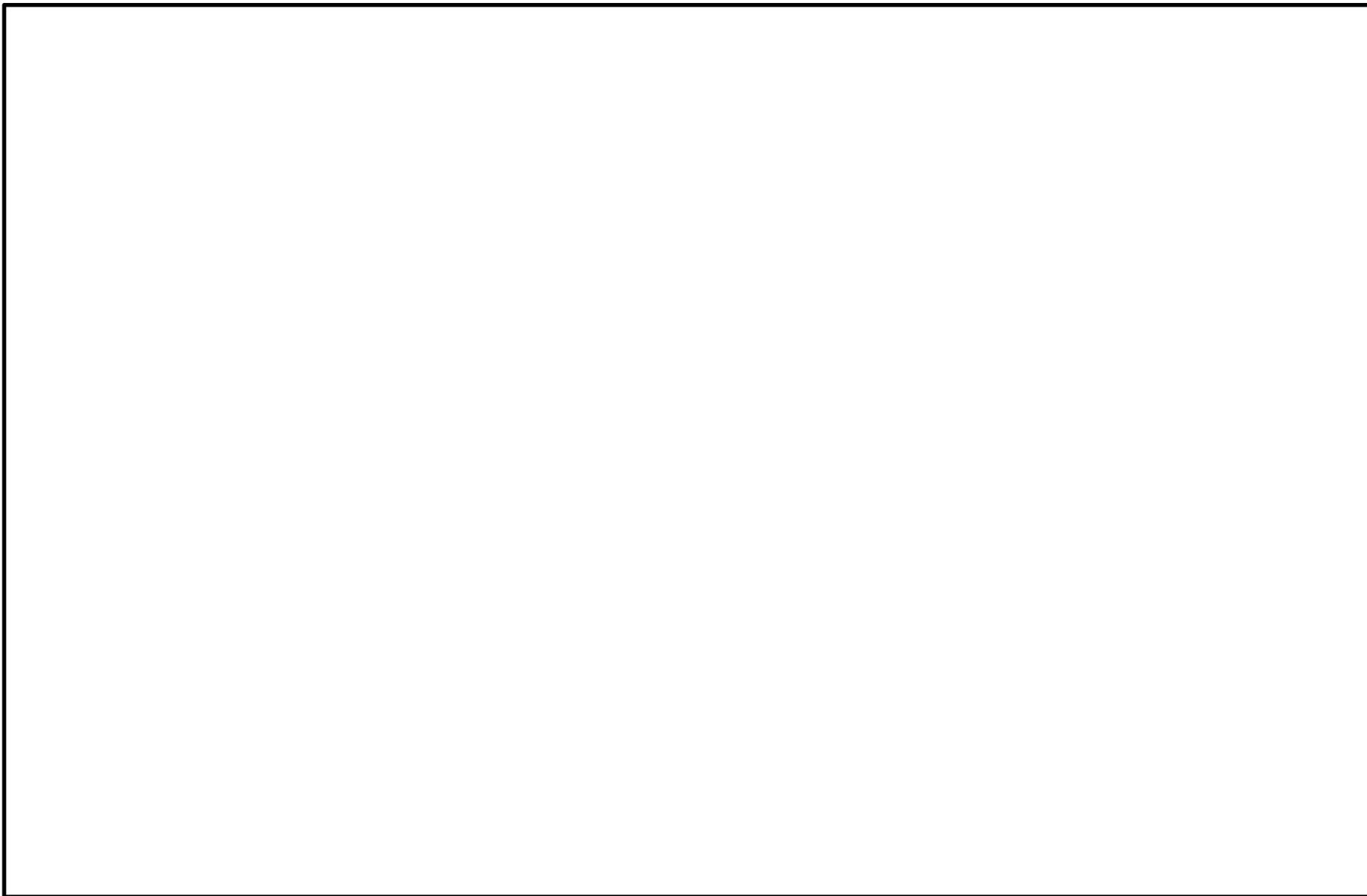
8. 施工実績(本設杭構造)



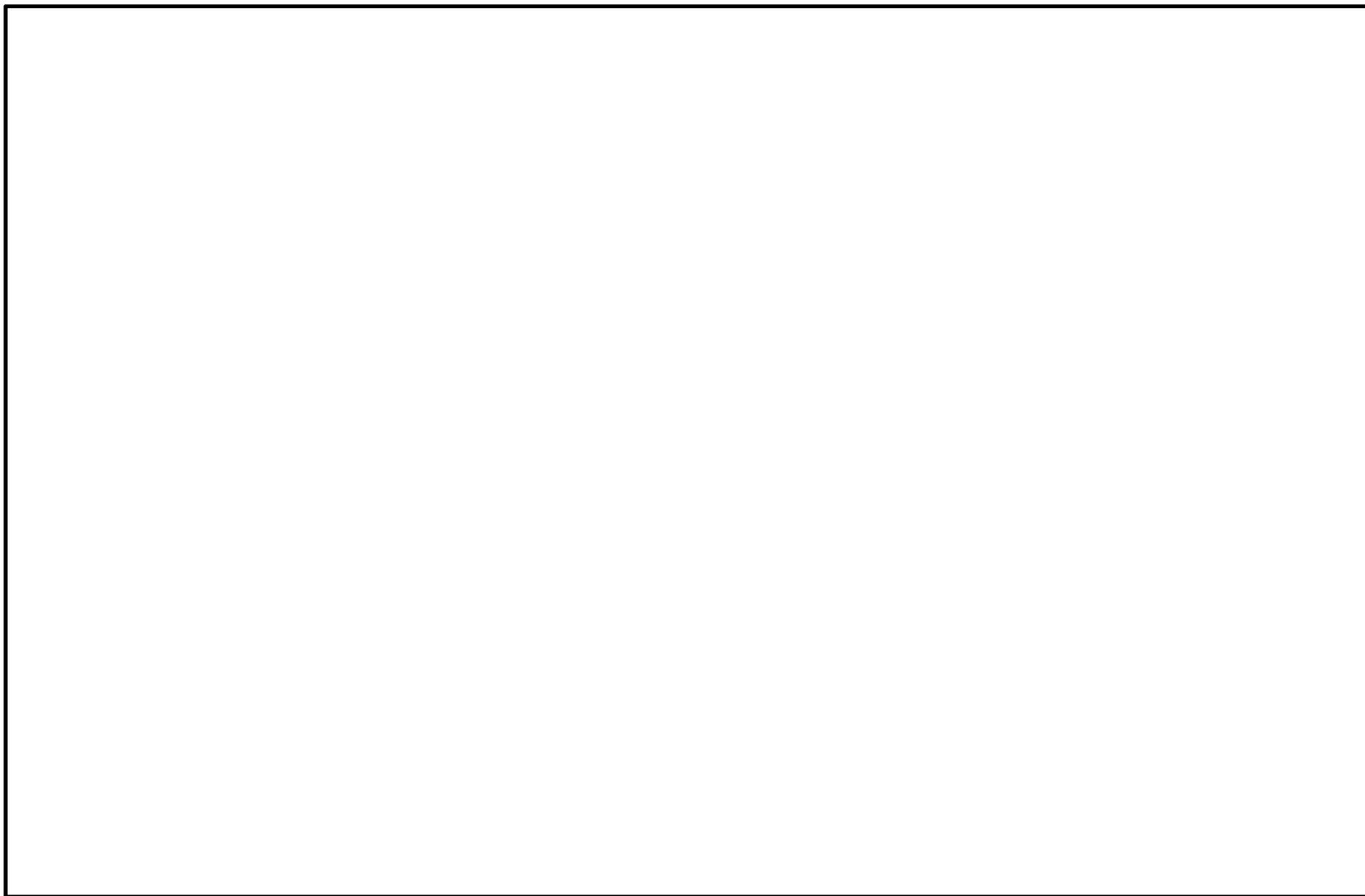
8. 施工実績(本設杭構造)



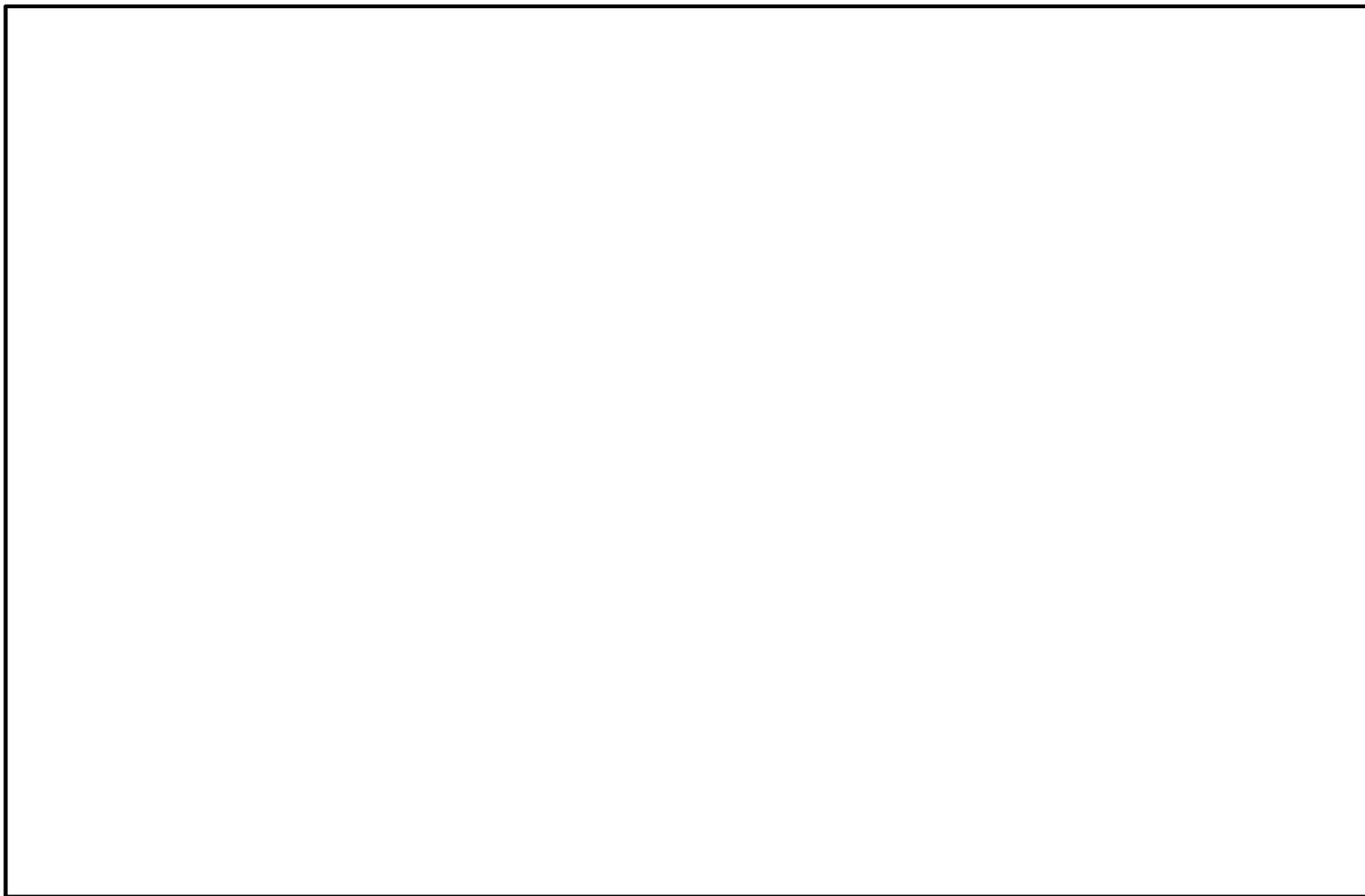
8. 施工実績(本設杭構造)



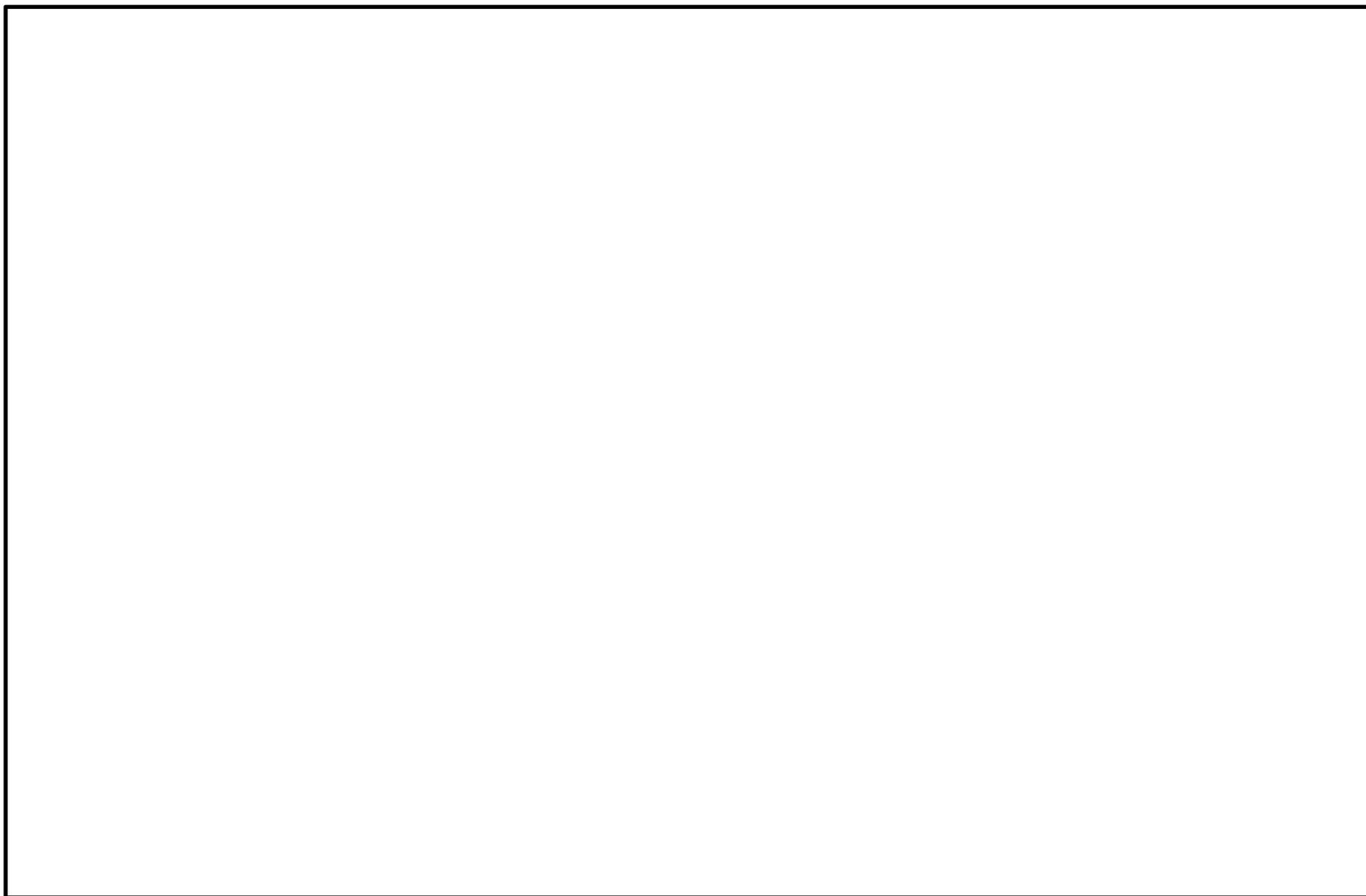
8. 施工実績(本設杭構造)



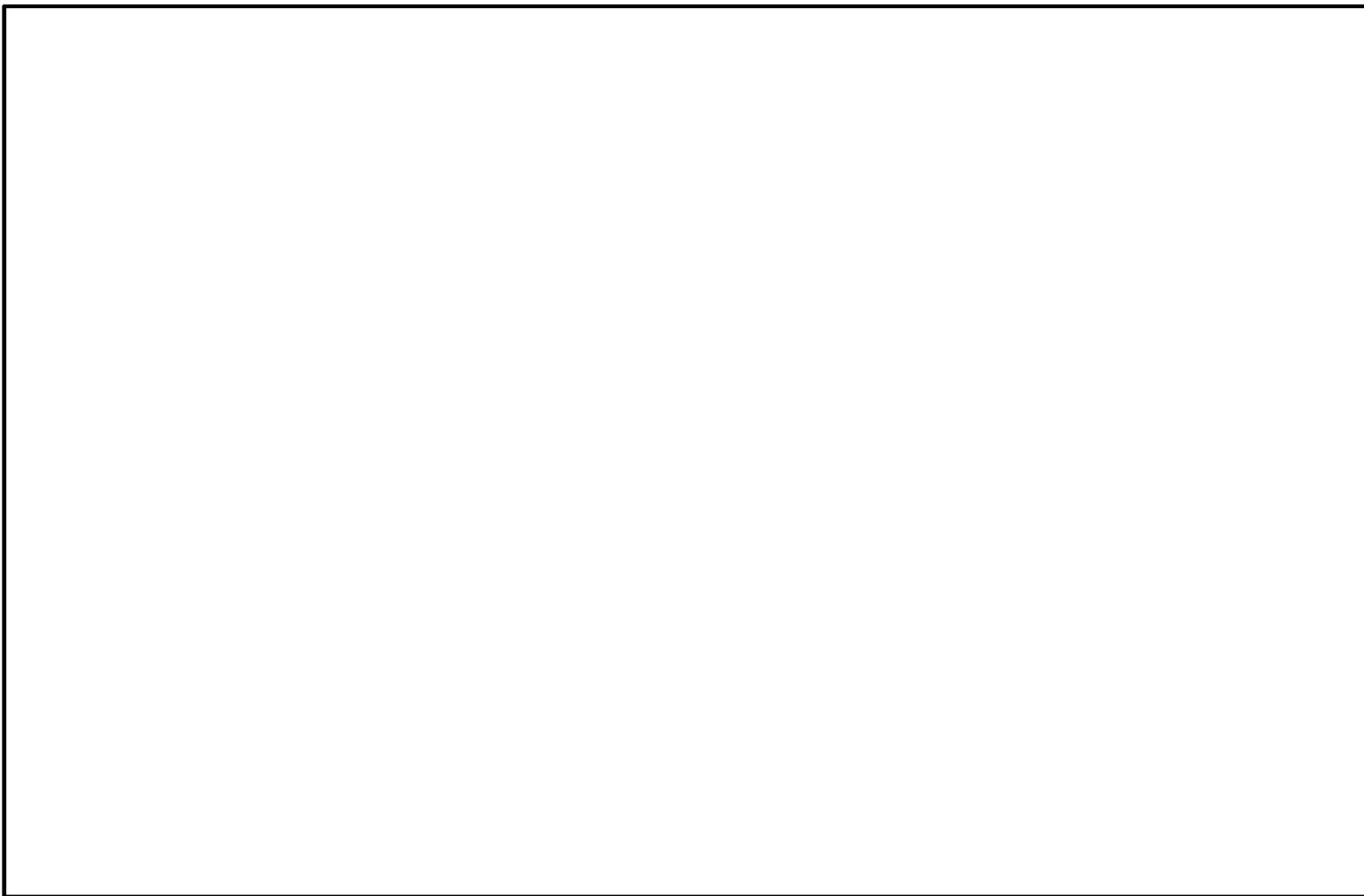
8. 施工実績(本設杭構造)



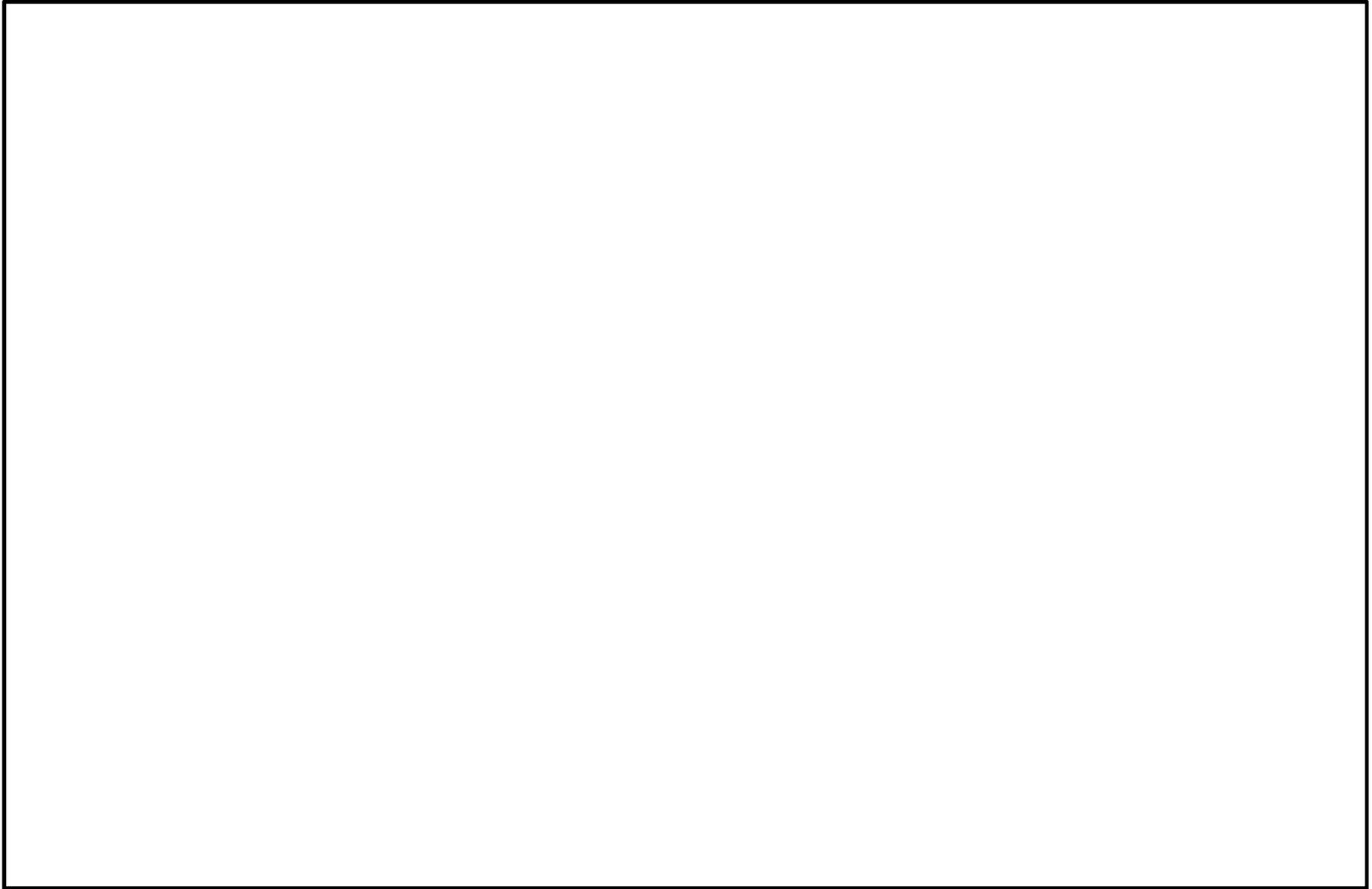
8. 施工実績(本設杭構造)



8. 施工実績(本設杭構造)



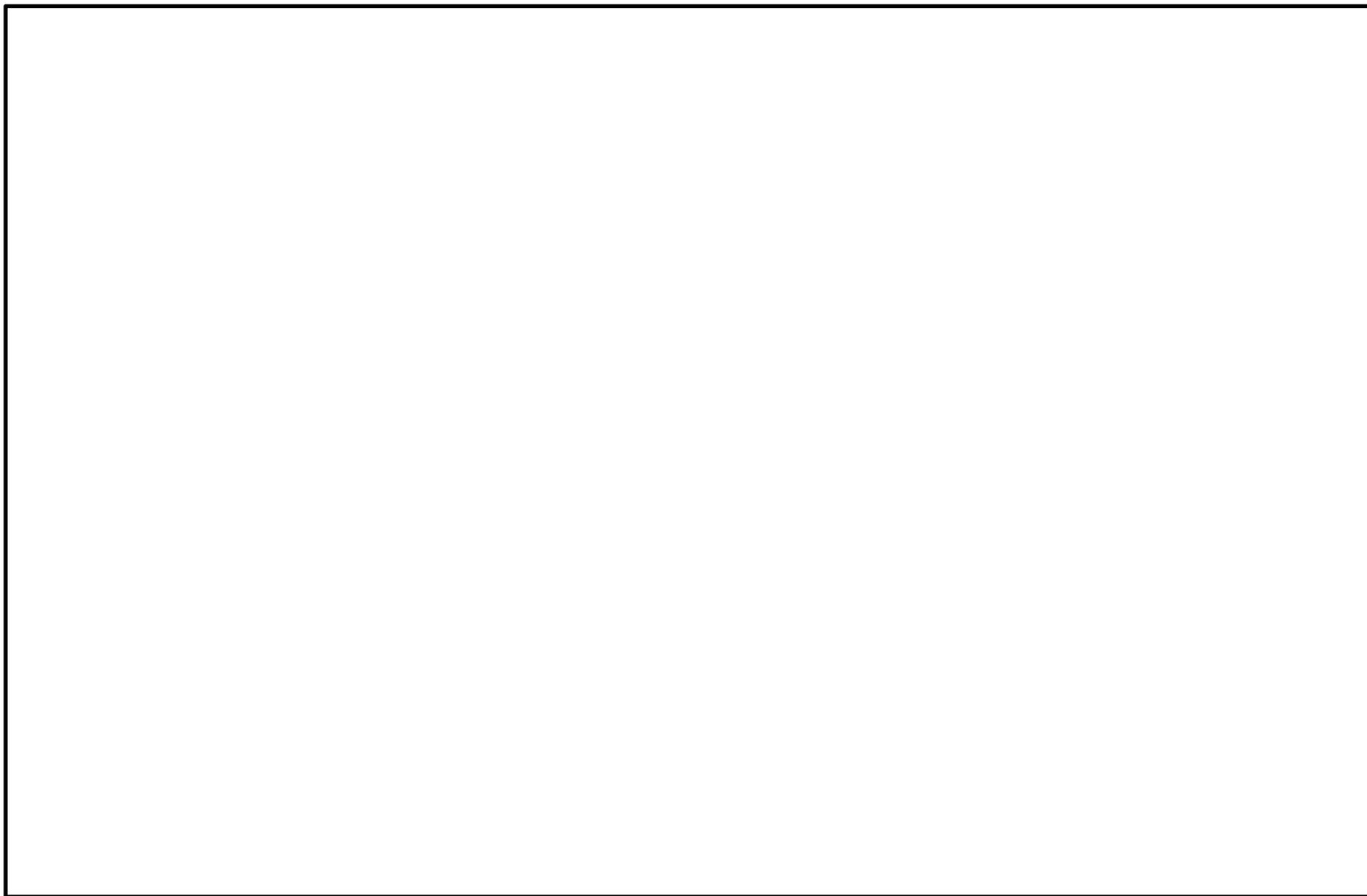
8. 施工実績(本設杭構造)



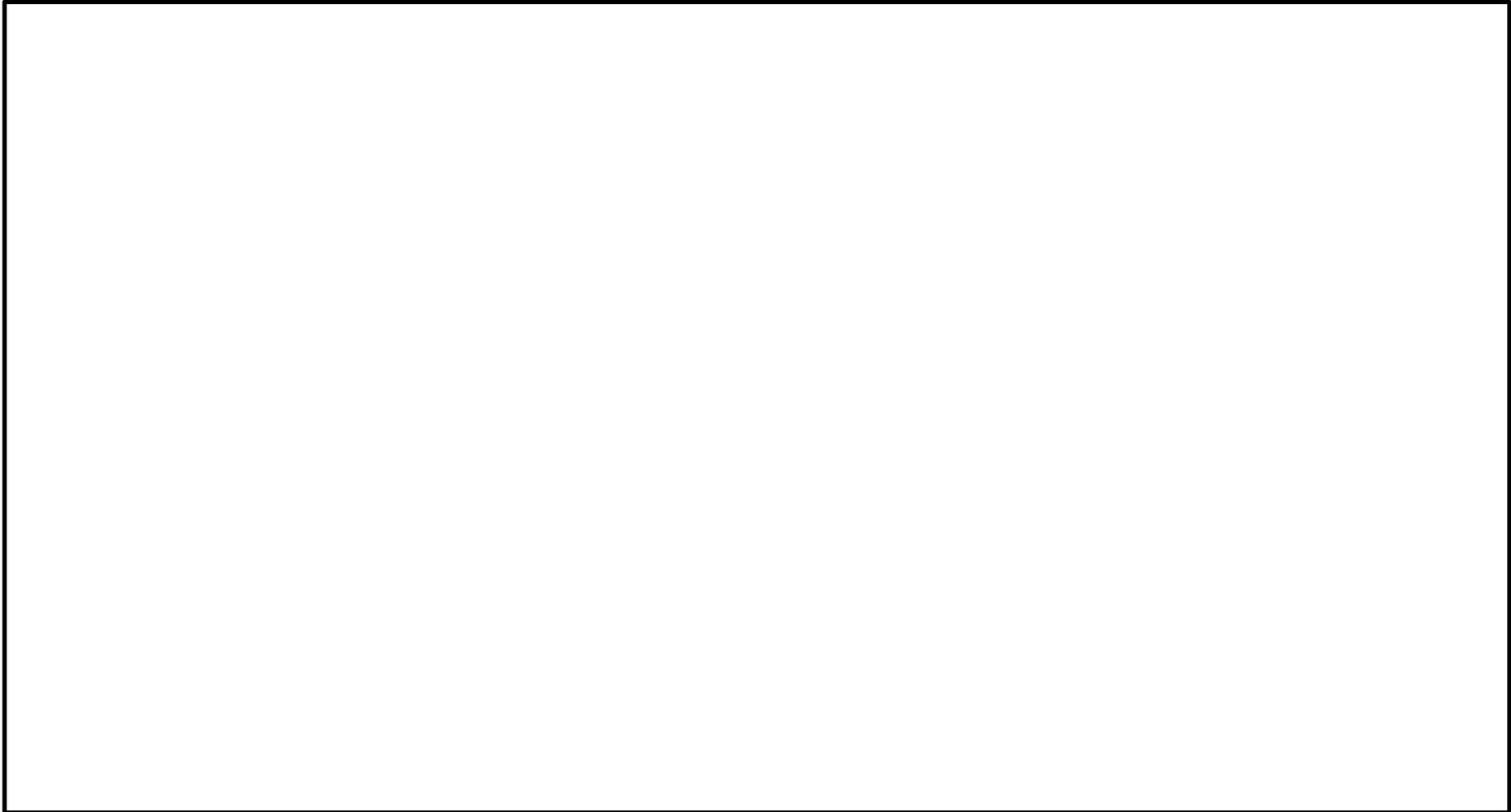
8. 施工実績(本設杭構造)



8. 施工実績(本設杭構造)



8. 施工実績(本設杭構造)



施工実績の中で、設計情報が確認できたものについては、土圧算定や地盤反力係数の算定、液状化の判定など随所にわたって道路橋示方書が引用されていることを確認した。

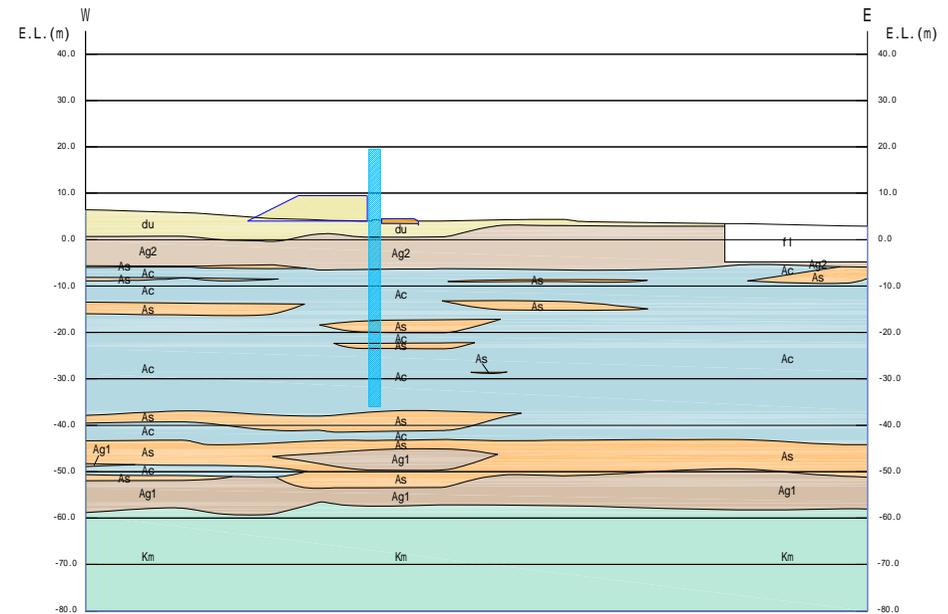
9. 道路橋示方書の適用性について

東海第二発電所における杭基礎の設計では、主に道路橋示方書を適用することから、道路橋示方書において耐震性能の照査に用いられているレベル2地震動と東海第二発電所の基準地震動 S_s の加速度応答スペクトルのレベルを比較した。

検討位置は、二次元有効応力解析等で防潮堤の強度計算を実施する断面の位置であり、摩擦杭を適用する岩盤の深い地点を選定した。



検討地点の位置図



検討地点の地質断面図

東海第二発電所の地盤の固有周期

検討地点における地盤の基本固有周期を算出して、道路橋示方書における地盤種別の判定を行う。地盤の基本固有周期は以下の式による。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}}$$

T_G : 地盤の基本固有周期 (s)

H_i : i 番目の地盤の厚さ (m)

V_{si} : i 番目の地層の平均せん断弾性波速度 (m/s)

i : 当該地盤が地表面から耐震設計上の基盤面まで n 層に区分される地表面から i 番目の地層の番号

耐震設計上の基盤面は K m層とし、それ以浅の地層を対象に地盤の固有周期を算出した。道路橋示方書における耐震設計上の地盤種別は、種地盤(固有周期1.08秒)となった。

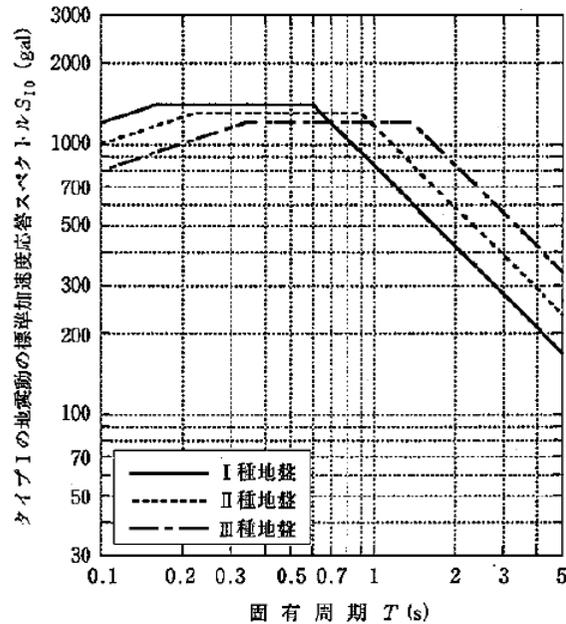
道路橋示方書の耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の基本固有周期 T_G (s)
種	$T_G < 0.2$
種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
種	$0.6 \leq T_G$

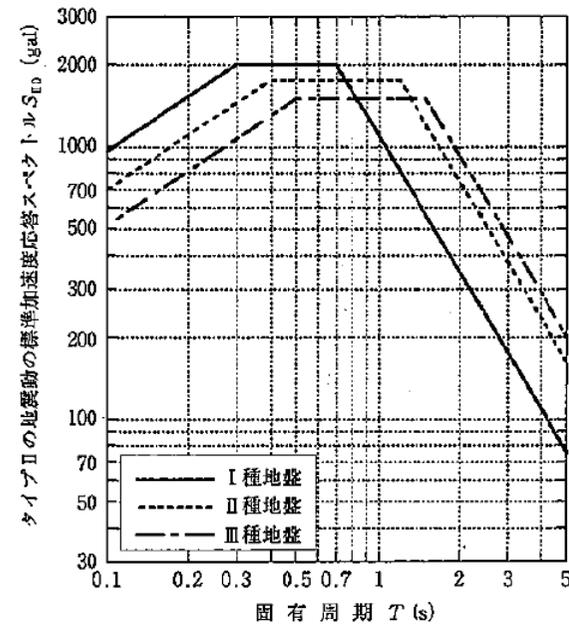
道路橋示方書のレベル2地震動の加速度応答スペクトル

道路橋示方書では、地盤種別ごとに耐震設計に用いる加速度応答スペクトルを与えている。地震動の種別もプレート境界型地震動を対象としたType I、内陸直下型地震動を想定したType IIで判別している。

道路橋示方書で示されている地震動の標準加速度応答スペクトルを示す。



(Type I 地震動)



(Type II 地震動)

地震動の標準加速度応答スペクトル（道路橋示方書）

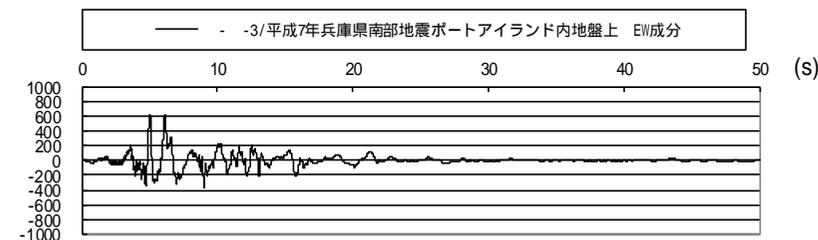
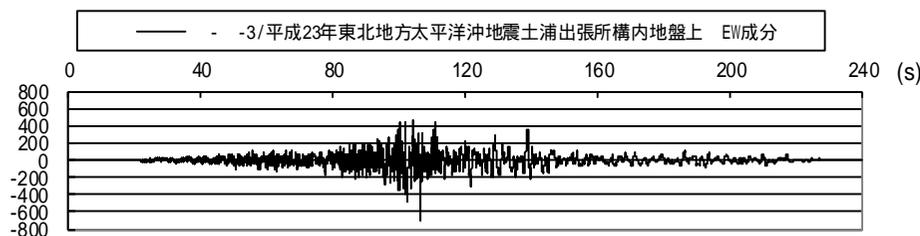
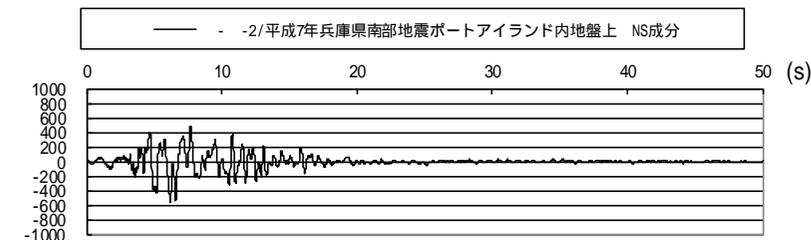
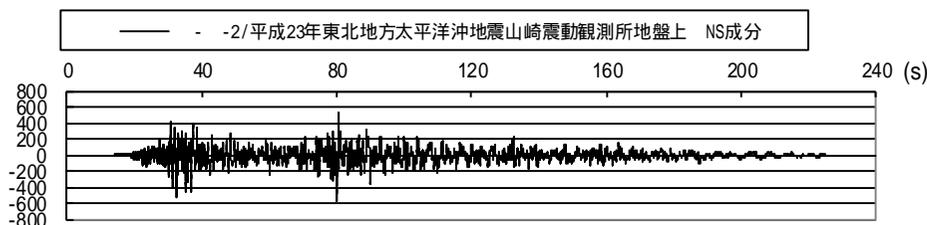
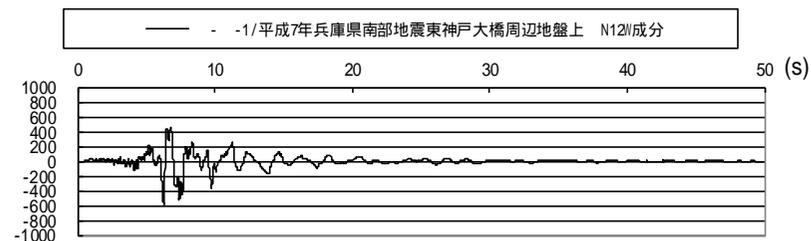
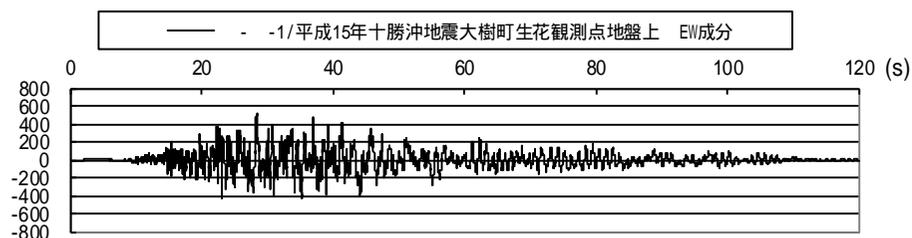
道路橋示方書の種地盤の動的解析で用いられる地震動

種地盤の動的解析で用いられる地震動
(道路橋示方書)

Type	- -1	平成15年十勝沖地震大樹町生花観測点地盤上 EW成分
	- -2	平成23年東北地方太平洋沖地震山崎震動観測所地盤上 NS成分
	- -3	平成23年東北地方太平洋沖地震土浦出張所構内地盤上 EW成分
Type	- -1	平成7年兵庫県南部地震東神戸大橋周辺地盤上 N12W成分
	- -2	平成7年兵庫県南部地震ポートアイランド内地盤上 NS成分
	- -3	平成7年兵庫県南部地震ポートアイランド内地盤上 EW成分

9. 道路橋示方書の適用性について

道路橋示方書のレベル2地震動の加速度時刻歴波形



種地盤Type 地震動で用いられる地震波
(道路橋示方書)

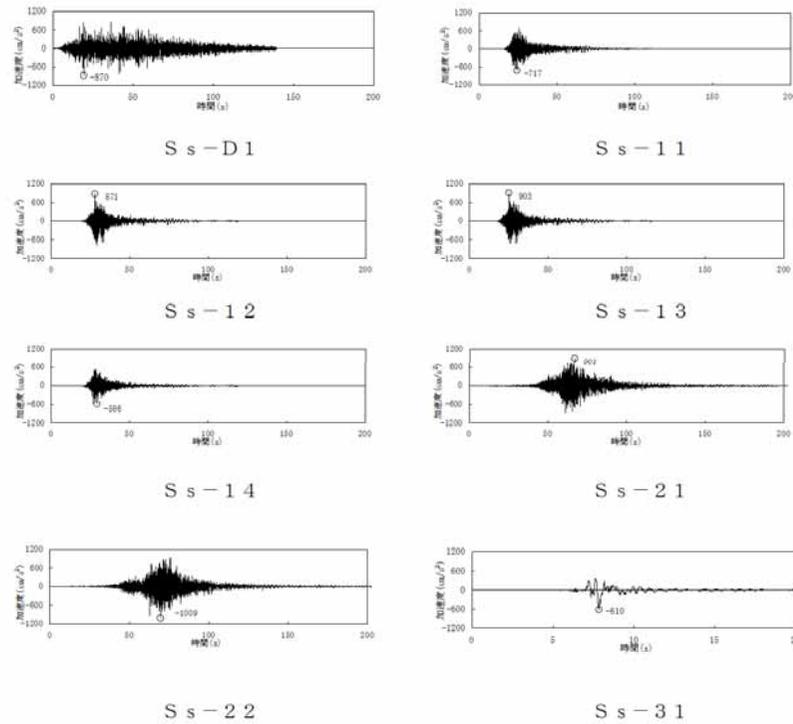
種地盤Type 地震動で用いられる地震波
(道路橋示方書)

東海第二発電所の基準地震動Ssの最大加速度

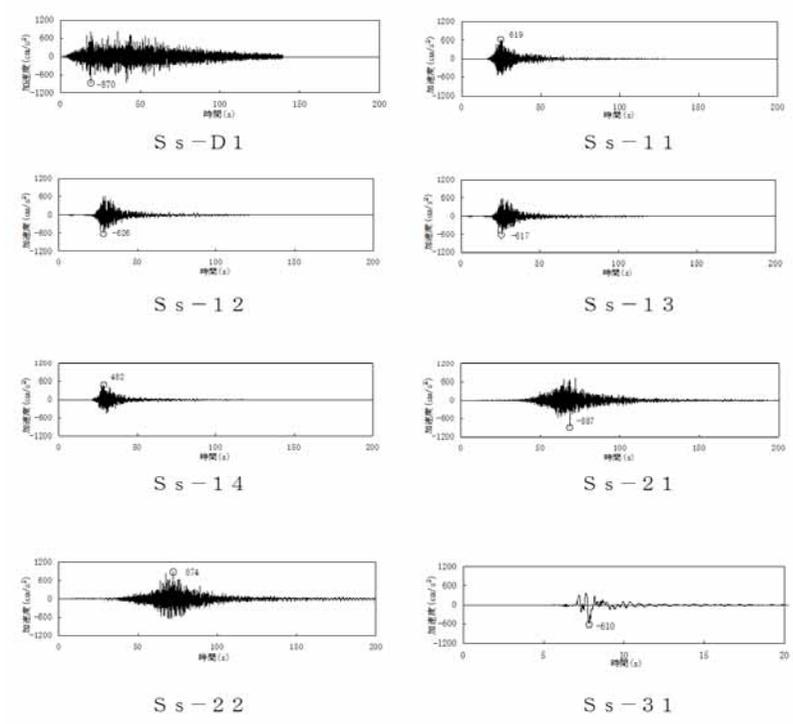
東海第二発電所の基準地震動Ss

地震動	最大加速度[cm/s ²]		
	NS成分	EW成分	UD成分
Ss-D1	870		560
Ss-11	717	619	579
Ss-12	871	626	602
Ss-13	903	617	599
Ss-14	586	482	451
Ss-21	901	887	620
Ss-22	1009	874	736
Ss-31	610		280

東海第二発電所の基準地震動Ssの加速度時刻歴波形



加速度時刻歴波形(水平(NS方向))

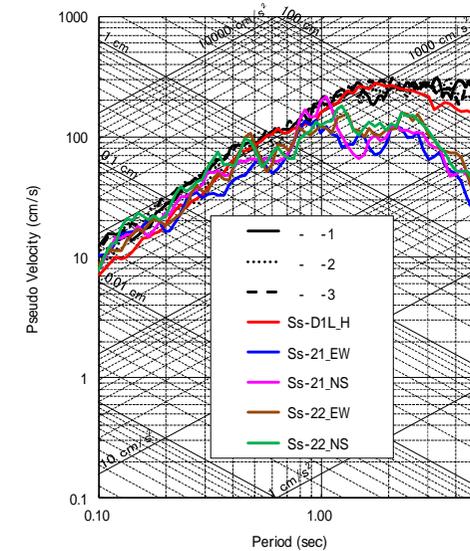
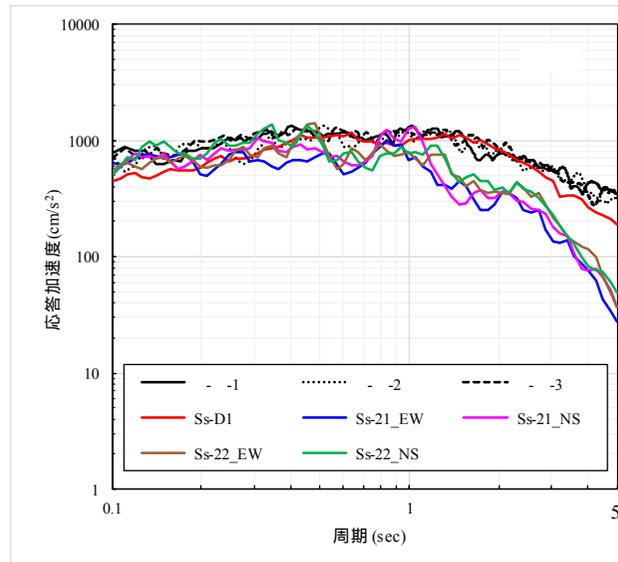


加速度時刻歴波形(水平(EW方向))

東海第二発電所の基準地震動Ssと道路橋示方書のレベル2地震動の加速度応答スペクトル比較)

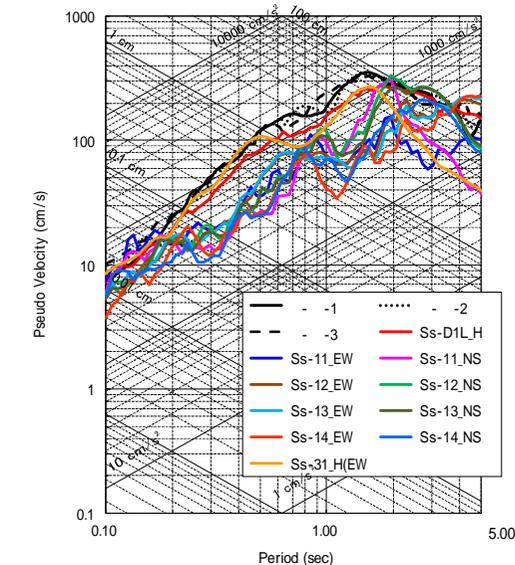
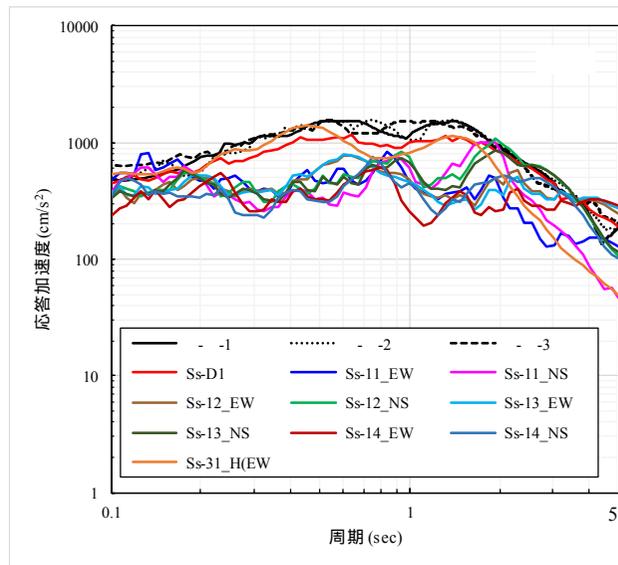
- 東海第二発電所の地震波及び道路橋示方書の地震波を用いて、加速度応答スペクトル及び疑似速度応答スペクトルを作成した。
- 応答スペクトルを比較した結果、道路橋示方書の応答スペクトルが基準地震動Ssのスペクトルを概ね包絡する結果となった。

以上より、道路橋示方書の地震動と東海第二発電所の基準地震動Ssのレベルが地表面において、ほぼ同等であることを確認した。



基準地震動SsとType 地震動との比較

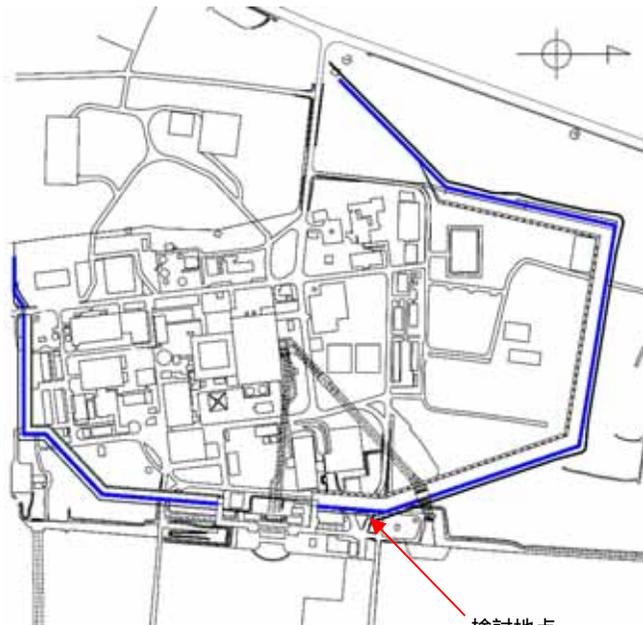
5.00



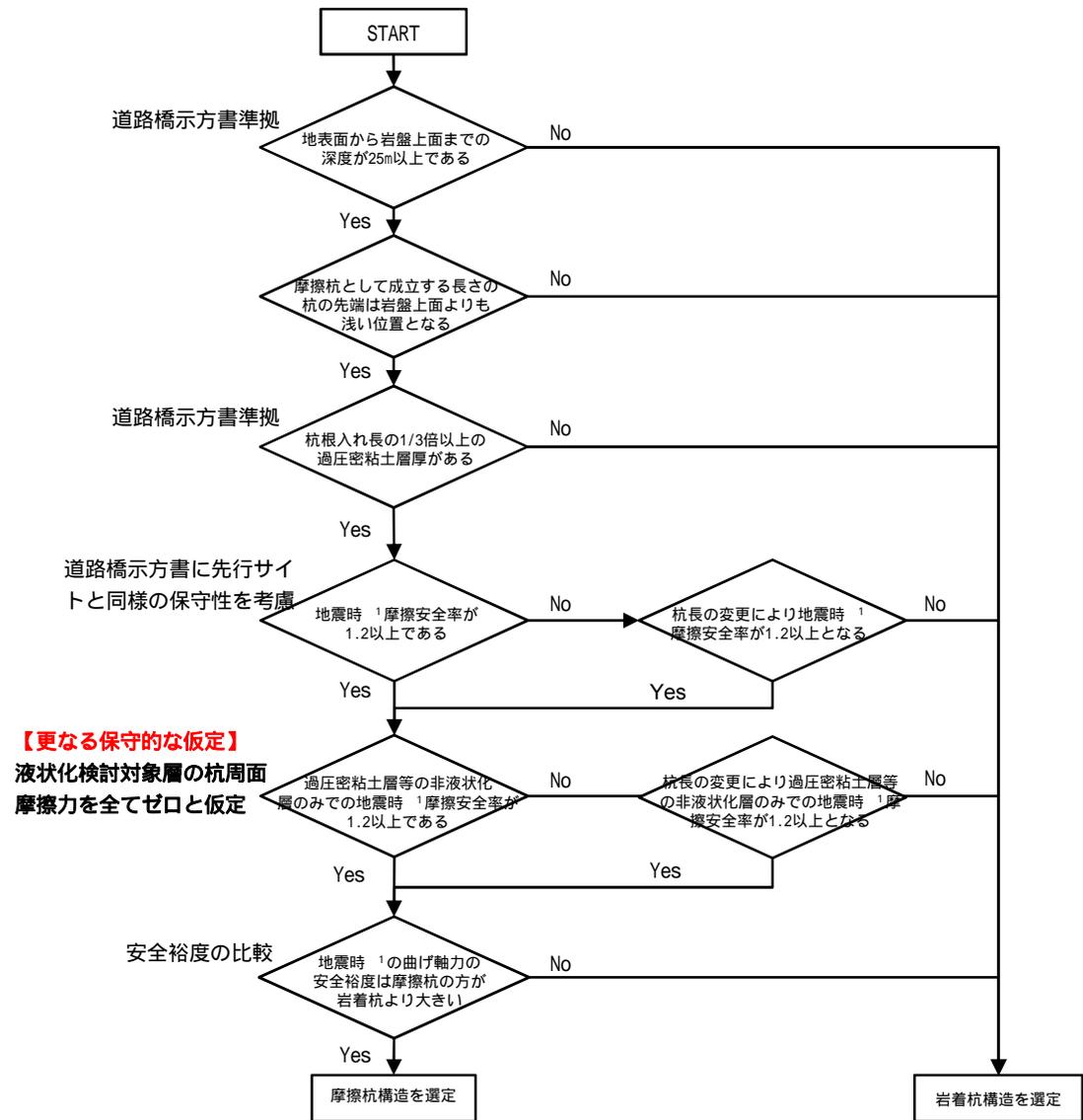
基準地震動SsとType 地震動との比較

参考 摩擦杭形式と支持杭形式の比較検討 (1/4)

構造形式選定フローに基づき、敷地北側の岩盤が深い箇所において摩擦杭の成立性が確認された地点にて、支持杭形式を採用した場合の検討を行い、安全裕度の比較を行った。



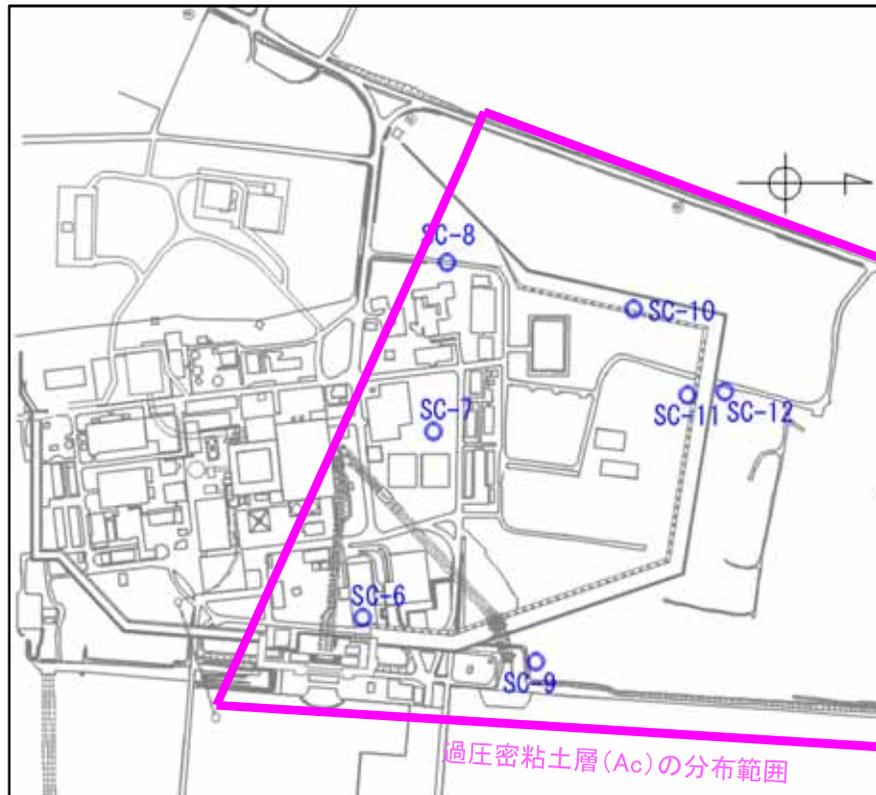
検討地点の位置図



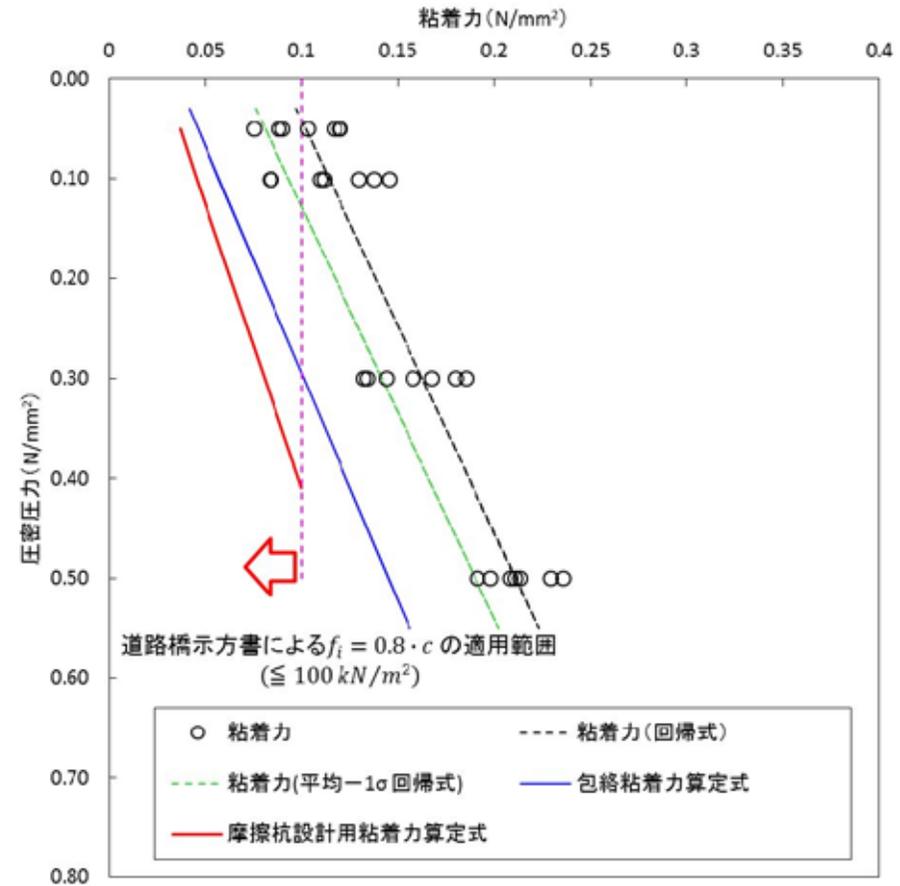
1 基準地震動 S s 入力時

参考 摩擦杭形式と支持杭形式の比較検討(2/4)

(過圧密粘土層(Ac層)の摩擦杭設計用の粘着力算定式)



三軸圧縮試験用試料サンプリング箇所



圧密圧力と粘着力の関係

- 三軸圧縮試験結果から, 包絡粘着力算定式 $c = g(p)$ を求める(右上図の青線)。
- 道路橋示方書・同解説 下部構造編の杭施工法によらず最も保守的な最大周面摩擦力度 $f_i = 0.8 \cdot c$ ($\leq 100 \text{ kN/m}^2$) を用いて, 過圧密粘土層(Ac)の摩擦杭設計用粘着力算定式を設定する(右上図の赤線)。

参考 摩擦杭形式と支持杭形式の比較検討(3/4)

- 支持杭形式と摩擦杭形式で有効応力解析を実施し、地震時の照査結果を比較した。
- 曲げ軸力やせん断の照査については、摩擦杭形式の方が支持杭構造より安全裕度が大きいことを確認した。

杭構造形式	支持杭形式	摩擦杭形式
評価断面		
杭の曲げ軸力	地震時の安全率：1.2	地震時の安全率：1.8
杭のせん断力	地震時の安全率：4.8	地震時の安全率：10.3
杭の根入れ長	根入れ全長：65.5m 粘性土層への根入れ長：29.0m	根入れ全長：40.5m 粘性土層への根入れ長：26.0m
杭の支持力	地震時の安全率： ・7.5（全地層の周面摩擦力＋先端支持力） ・5.1（粘性土層のみの周面摩擦力）	地震時の安全率： ・3.2（全地層の周面摩擦力） ・2.7（粘性土層のみの周面摩擦力）
地震時水平相対変位	地盤の平均物性とばらつきを考慮したケースの相対変位：0.06m	地盤の平均物性とばらつきを考慮したケースの相対変位：0.05m
地震時鉛直相対変位 (杭天端の最大相対変位)	地盤の平均物性とばらつきを考慮したケースの相対変位：0.00m	地盤の平均物性とばらつきを考慮したケースの相対変位：0.01m

参考 摩擦杭形式と支持杭形式の比較検討(4/4)

有効応力解析に基づく結果(基準地震動Ss-D1++)

支持杭形式

項目	評価結果	安全率	判定	
鋼管杭の照査	杭の曲げ軸力	234.5N/mm ² 277.5N/mm ²	1.2	OK
	杭のせん断力	32.8N/mm ² 157.5N/mm ²	4.8	OK
	杭支持力 (全層周面摩擦 + 先端支持力)	3,786kN/本 28,492kN/本	7.5	OK
	杭支持力 (粘性土の周面摩擦力のみ)	3,786kN/本 19,190kN/本	5.1	OK
	地震時水平相対変位	0.06m	-	-
	地震時鉛直相対変位 (杭天端の最大相対変位)	0.00m	-	-

曲げ軸力及びせん断力の比較

地震時の曲げ軸力やせん断力の安全裕度は、摩擦杭の方が支持杭より大きい結果となった。

有効応力解析に基づく結果(基準地震動Ss-D1++)

摩擦杭形式

項目	評価結果	安全率	判定	
鋼管杭の照査	杭の曲げ軸力	150.5N/mm ² 277.5N/mm ²	1.8	OK
	杭のせん断力	15.4N/mm ² 157.5N/mm ²	10.3	OK
	過圧密粘土層への根入長	粘性土層長25.97m > 粘性土層根入れ長13.33m 全層根入れ全長40.5m 40.5/3=13.5m(1/3*L以上)	-	OK
	杭支持力 (全層周面摩擦)	2,806kN/本 9,110kN/本	3.2	OK
	杭支持力 (粘性土の周面摩擦力のみ)	2,806kN/本 7,670kN/本	2.7	OK
	地震時水平相対変位	0.05m	-	-
	地震時鉛直相対変位 (杭天端の最大相対変位)	0.01m	-	-

支持力の確認

有効力解析による液状化判定の結果、基礎地盤は液状化しないものと判定されたが、**更なる保守的な仮定として**、砂礫層の杭周面摩擦力を全てゼロとおいたとしても、恒久的な非液状化層である過圧密粘土層のみで十分な安全率をもって鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁構造を支持可能であることを確認した。

以上の、より、東海第二発電所の岩盤が深い区間については、更なる保守的な仮定として砂礫層の杭周面摩擦力を全てゼロとしても、摩擦杭形式の成立性を見通せると判断した。