

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PD-2-10 改3
提出年月日	平成29年6月13日

東海第二発電所

津波による損傷の防止

平成29年6月
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、 は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目 次

第 1 部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第 2 部

- I. はじめに
- II. 耐津波設計方針
 1. 基本事項
 - 1.1 設計基準対象施設の津波防護対象の選定
 - 1.2 敷地及び敷地周辺における地形及び施設の配置等
 - 1.3 基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域
 - 1.4 入力津波の設定
 - 1.5 水位変動・地殻変動の評価
 - 1.6 設計または評価に用いる入力津波
 2. 設計基準対象施設の津波防護方針
 - 2.1 敷地の特性に応じた津波防護の基本方針
 - 2.2 敷地への浸水防止（外郭防護 1）
 - (1) 遡上波の地上部からの到達，流入防止
 - (2) 取水路，放水路等の経路からの津波の流入防止
 - 2.3 漏水による重要な安全機能への影響防止（外郭防護 2）
 - 2.4 重要な安全機能を有する施設の隔離（内郭防護）
 - (1) 浸水防護重点化範囲の設定
 - (2) 浸水防護重点化範囲における浸水対策
 - 2.5 水位変動に伴う取水性低下による重要な安全機能への影響防止
 - (1) 非常用海水冷却系の取水性
 - (2) 津波の二次的な影響による非常用海水冷却系の機能保持確認
 - 2.6 津波監視設備

3. 施設・設備の設計方針
- 3.1 津波防護施設の設計
- 3.2 浸水防止設備の設計
- 3.3 津波監視設備
- 3.4 施設・設備の設計・評価に係る検討事項

添付資料

- 1 審査ガイドとの整合性（耐津波設計方針）
- 2 設計基準対象施設の津波防護対象設備とその配置について
- 3 耐津波設計における現場確認プロセスについて
- 4 津波シミュレーションに用いる数値計算モデルについて
- 5 敷地内の遡上経路の沈下量算定評価について
- 6 管路解析のモデルについて
- 7 管路解析のパラメータスタディについて
- 8 港湾内の局所的な海面の励起について
- 9 入力津波に用いる潮位条件について
- 10 津波防護対策の設備の位置付けについて
 - (17) 常用海水ポンプ停止の運用手順について
 - (18) 残留熱除去系海水ポンプの水理実験結果について
 - (19) 貯留堰設置位置及び天端高さの決定の考え方について
 - (20) 基準津波に伴う砂移動評価
 - (21) 非常用海水ポンプ軸受の浮遊砂耐性について
 - (22) 津波漂流物の調査要領について
 - () 漂流物の評価に考慮する津波の流向，流速について
 - (23) 燃料等輸送船の係留索の耐力について
 - (24) 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について
 - (15) 耐津波設計における余震荷重と津波荷重の組合せについて
 - () 耐津波設計において考慮する荷重の組合せについて
 - (11) 防潮堤及び貯留堰における津波荷重の設定方針について
 - () 基準類における衝突荷重の算定式
 - () 防潮堤の構造及び仕様について
 - (25) 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の設計方針について**
 - () 防潮堤の地山への寄り付き部の設計について
 - () 防潮堤の支持性能について
 - () 防潮堤の耐震設計について
 - () 防潮扉の設計と運用について
 - () 放水路ゲートの設計と運用について
 - () 貯留堰の構造及び仕様について
 - () 貯留堰継ぎ手部の漏水量評価について
 - (16) 貫通部止水対策箇所について
 - () 防波堤の破損による影響評価について
 - (12) 日立港日立港区及び常陸那珂港区の整備計画に基づく防波堤等

モデル化した津波遡上解析結果について

- (13) 防波堤の有無による敷地南側の津波高さについて
- (14) 防潮堤設置に伴う隣接する周辺の原子炉施設への影響について

注：採番されていない資料は、今後追加予定の添付資料

(11)～(25)は、今後追加される添付資料により、添付資料番号が変更になる。

東海第二発電所

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の設計方針について

目次

1. 防潮堤の要求機能と設計方針について
 - (1) 防潮堤に要求される機能
 - (2) 防潮堤高さの設定方針
 - (3) 設計方針
 - 1) 構造概要
 - 2) 設計手順
 - 3) 杭構造形式（支持方式）の選定に係る方針
 - 4) 杭間隔の設定方針
 - 5) 群杭効果の設定方針
 - 6) 上部工（鉄筋コンクリート壁）の設計方針
 - 7) 止水ジョイントの変形量評価方針
 - 8) 支持地盤の健全性評価方針
 - 9) 圧密沈下の評価方針
2. 原位置杭載荷試験（引抜き試験）
 - (1) 目的
 - (2) 杭の施工方法
 - (3) 原位置試験位置の選定方針
 - (4) 原位置試験杭の仕様
3. 施工実績（一列杭構造）
4. 道路橋示方書の適用性
 - (1) 適用性検討の評価方針
 - 1) 検討対象位置
 - 2) 東海第二発電所の地盤の基本固有周期
 - 3) 道路橋示方書の加速度応答スペクトル
 - 4) 東海第二発電所の加速度応答スペクトル
 - 5) 基準地震動 S_s 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の比較
5. 杭構造基礎に関する設計基準類

1. 防潮堤の要求機能と設計方針について

(1) 防潮堤に要求される機能

防潮堤に求められる要求機能及び機能設計上の性能目標等について表1に示す。

防潮堤に求められる要求機能としては、繰返しの襲来を想定した遡上波及び基準地震動 S_s に対して、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、津波による浸水及び漏水を防止することで止水性を維持することがあげられる。

このような防潮堤としての機能を確保するためには、遡上津波に対して余裕を考慮した防潮堤高さを確保するとともに、漏水防止のため止水ジョイントの設置を行う必要がある。また、基準地震動 S_s に対して、止水性を損なわない構造強度を有した構造物とする必要がある。

表1 鋼管杭鉄筋コンクリート壁に関する要求機能と設計評価方針

津波防護に関する施設は、津波の発生に伴い、津波防護対象設備がその安全性又は重大事故に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないような設計とする。「津波防護に関する施設の設計について」の要求機能、機能設計、構造強度設計を以下に示す。

施設名	要求機能			機能設計		構造強度設計			機能損傷モード		許容限界	
	設置許可基準規則	工認審査ガイド	要求機能	機能設計上の性能目標	機能設計	評価対象部位	構造強度機能上の性能目標	評価方針	応力等の状態	限界状態		
鋼管杭鉄筋コンクリート壁	<p>(津波による損傷の防止)</p> <p>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。</p> <p>(地震による損傷の防止)</p> <p>第四条 設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。</p> <p>2 前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。</p> <p>3 耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」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。</p> <p>4 耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある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> <p>(設計基準対象施設の地盤)</p> <p>第三条 設計基準対象施設は、次条第二項の規定により算定する地震力（設計基準対象施設のうち、地震の発生によって生ずるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの（以下「耐震重要施設」という。）にあっては、同条第三項に規定する基準地震動による地震力を含む。）が作用した場合においても当該設計基準対象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。</p> <p>2 耐震重要施設は、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。</p> <p>3 耐震重要施設は、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。</p>	<p>耐津波設計に係る工認審査ガイド</p> <p>4.1 津波防護施設の設計方針</p> <p>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、越流時の耐力にも配慮した上で、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。</p> <p>耐震設計に係る工認審査ガイド</p> <p>6.1 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備の設計審査方針</p> <p>津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備が、基準地震動Ssに対して耐震設計上の十分な余裕を含めるために各施設・設備の機能損傷モードに対応した荷重について十分な余裕を考慮して設計されていることを確認する。</p>	<p>・防潮堤は、繰返しの襲来を想定した入力津波に対して、余震、漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した場合においても、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、津波による浸水及び漏水を防止することが要求される。</p> <p>・防潮堤は、基準地震動Ssに対して、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、地震に対する構造強度を有していることが要求される。</p>	<p>・防潮堤は、繰返しの襲来を想定した遡上波に対して、余震、漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した場合においても、想定される津波高さに余裕を考慮した防潮堤高さ（浸水高さ T.P.+15.4m～T.P.+17.9mに余裕を考慮した天端高さ T.P.+18m～T.P.+20m）の設定により、敷地を取り囲むように設置する設計とする。</p> <p>・防潮堤は、基準地震動Ssに対して、止水性を損なわない余裕を有した構造物とすること止水性を維持する。</p>	<p>・防潮堤は、繰返しの襲来を想定した遡上波に対して、余震、漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した場合においても、想定される津波高さに余裕を考慮した防潮堤高さ（浸水高さ T.P.+15.4m～T.P.+17.9mに余裕を考慮した天端高さ T.P.+18m～T.P.+20m）の設定により、敷地を取り囲むように設置する設計とする。</p> <p>・防潮堤は、基準地震動Ssに対して、止水性を損なわない余裕を有した状態が許容限界以下である設計とする。</p>	下部工	支持地盤	防潮堤は、基準地震動Ssや繰返しの襲来を想定した入力津波等に対して、(1)上部工は、鋼製の杭及び鉄筋コンクリートで主要な構造部材の構造健全性を維持する設計とする。	荷重(※1)に対し、支持力の観点から構造物全体の安定性を損なわせない設計とするため、鋼管杭の周面摩擦力や杭先端支持力を評価対象とし、これらが極限支持力に対し、妥当な裕度を有することを計算により確認する。	押込力、引抜力、せん断抵抗力	支持力、せん断抵抗力不足による変形	「道路橋示方書・同解説（I共通編・IV下部構造編）」を踏まえた極限支持力以下とする。
							鋼管杭	(2)下部工は、鋼製の杭で、主要な構造部材の構造健全性を維持する設計とする。	荷重(※1)に対し、主要な構造部材の構造健全性を維持する設計とするため、構造部材である鋼管杭が、弾性状態に留まることを計算により確認する。	曲げ、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「道路橋示方書・同解説（I共通編・IV下部構造編）」を踏まえた短期許容応力度以下とする。
							鉄筋コンクリート	(3)主要な構造体の境界部に設置するジョイントについては、伸縮性のあるゴムジョイント等で、有意な漏えいが生じない変形に留める設計とする。	荷重(※1)に対し、主要な構造部材の構造健全性を維持する設計とするため、構造部材である鉄筋コンクリートが、弾性状態に留まることを計算により確認する。	曲げ、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「道路橋示方書・同解説（I共通編・V耐震設計編）」を踏まえた降伏モーメント及びせん断耐力以下とする。
							鋼管杭		荷重(※1)に対し、主要な構造部材の構造健全性を維持する設計とするため、構造部材である鋼管杭が、おおむね弾性状態に留まることを計算により確認する。	曲げ、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「道路橋示方書・同解説（I共通編・IV下部構造編）」を踏まえた短期許容応力度以下とする。
							止水ゴム等		荷重(※1)に対し、止水機能を損なわないよう、相対変位の追従する設計とするために、漏えいが想定される間隙に設置する材料である止水ゴム等を評価対象部位として、必要に応じて実施する性能試験等により確認した変形量以下であることを計算により確認する。	変形	有意な漏えいに至る変形	メーカー保証の変形量や必要に応じた性能試験により止水可能な変形量以下とする。
							アンカー		また、止水ゴム等を固定するアンカー及び漂流物対策工が破断しない設計とするため、弾性状態に留まることを計算により確認する。	引張り、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「各種合成構設計指針・同解説」を踏まえた短期許容応力度以下とする。
							漂流物対策工			曲げ、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	鋼材の短期許容応力度以下とする。
							地盤高さの嵩上げ			変形	有意な変形に至り原形状を留めない状態	地震時応答解析（有効応力解析）の結果、残留変形形状が崩壊形状でないこととする。
							地盤改良			せん断	改良体自体のせん断破壊	改良体内に発生するせん断応力が、改良体のせん断強度以下とする。

※1 基準地震動Ssや、繰返しの襲来を想定した遡上波の浸水時の津波高さに応じた津波荷重、余震、漂流物の衝突、風及び積雪による荷重

(2) 防潮堤高さの設定方針

防潮堤は、防潮堤の設計に用いる津波高さ（入力津波高さ）に対して余裕をもった防潮堤高さを設定している。入力津波高さと防潮堤高さの関係を表2に示す。

表2 入力津波高さと防潮堤高さの関係

	敷地側面 北側	敷地前面 東側	敷地側面 南西側
入力津波高さ (潮位のばらつき等考慮)	T. P. +15.4m	T. P. +17.9m	T. P. +15.6m
防潮堤高さ	T. P. +18.0m	T. P. +20.0m	T. P. +18.0m
設計裕度	2.6m	2.1m	2.4m

防潮堤の高さが入力津波高さを下回らないようするため、支持地盤については、液状化の可能性の検討や粘性土層の過圧密比の確認を行う。また、地震や津波等の外力に対する構造上の強度を確保するために、部位毎の機能損傷モードを明確にし、許容限界内の設計を行う。

(3) 設計方針

1) 構造概要

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤は、鋼管杭を地盤に対して一列に打設し上部工は鋼管杭と鉄筋コンクリートを連結させ、敷地全体に設置する。また、上部工には伸縮性を有する止水ジョイント及び漂流物対策工を一定間隔で設置するとともに、異種構造物間の境界部にも止水性維持のため止水ジョイント及び漂流物対策工を設置する。

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の平面位置図を図1に、正面図

及び断面図を図2に示す。

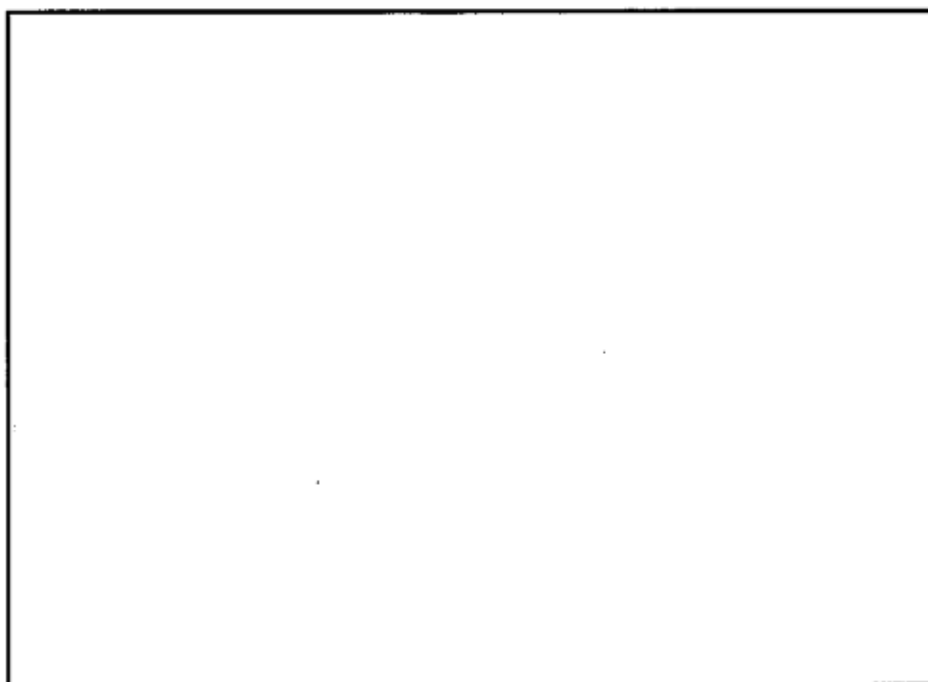


図1 平面位置図

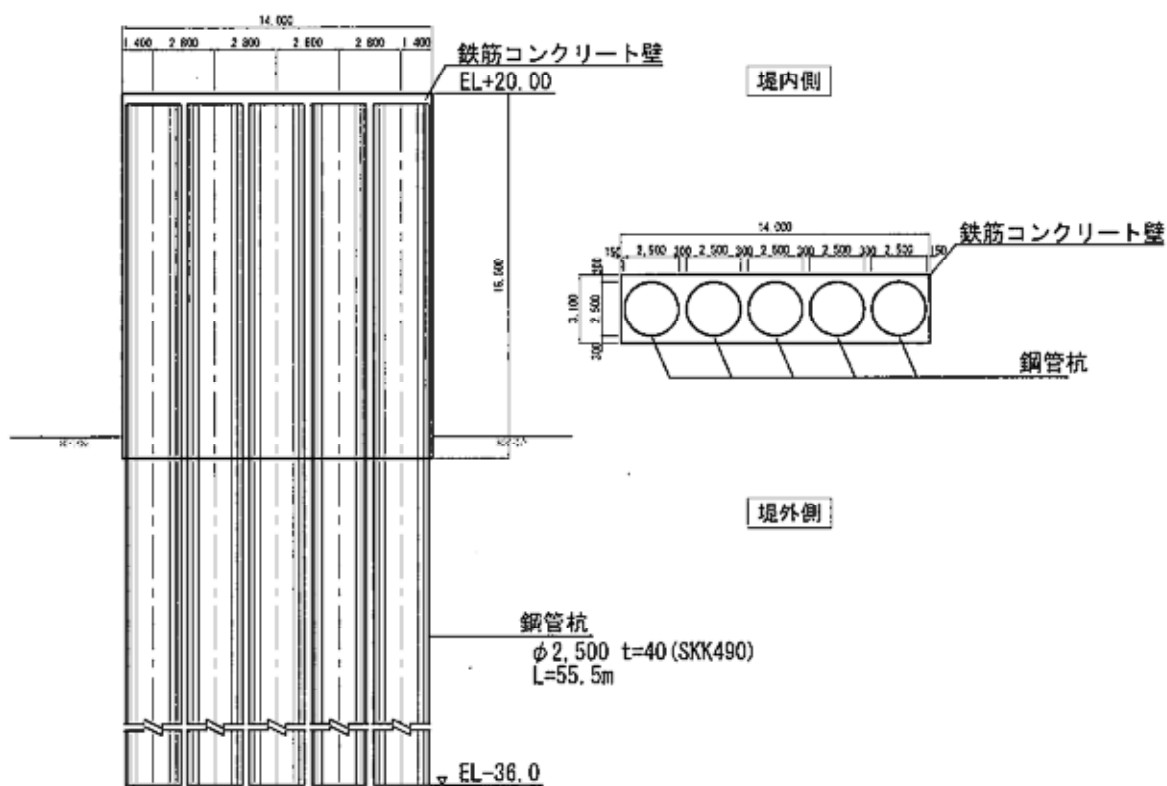


図2 正面図及び断面図（摩擦杭構造）

2) 設計手順

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤は、設計基準対象施設においてSクラス施設である津波防護施設に分類される。

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の耐震・耐津波評価は、設計基準対象施設として、表3の鋼管杭の評価項目に示す通り、構造部材の健全性評価と止水ジョイント部の変形量評価を行う。

構造部材の健全性評価については、地震時応答解析に基づく、鋼管杭及び鉄筋コンクリートの発生応力が許容限界を超えないことを確認する。

また、止水ジョイントの変形量を算定し、許容限界を超えないことを確認する。

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の耐震・耐津波評価の検討フローを図4に示す。

表3 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の評価項目

評価対象部位	評価項目	機能損傷モード		許容限界
		応力等の状態	評価方法	
下部工	支持地盤	強度を有していること	押込力、引抜力、せん断抵抗力	極限支持力以下
	鋼管杭	構造強度を有すること	曲げ、せん断	弾性範囲内 (短期許容応力度以下)
上部工	鉄筋コンクリート	止水性を損なわないこと	曲げ、せん断	発生応力が許容限界を超えないことを確認 弾性範囲内 (短期許容応力度以下)
	鋼管杭		曲げ、せん断	弾性範囲内 (短期許容応力度以下)
	止水ゴム		変形	変形量が許容限界を超えないことを確認 メーカー保証の変形量や必要に応じた試験に基づいた止水可能な変形量以下
	アンカー		引張り、せん断	発生応力が許容限界を超えないことを確認 弾性範囲内 (短期許容応力度以下)
	漂流物対策工		曲げ、せん断	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態 弾性範囲内 (短期許容応力度以下)
地盤高さの嵩上げ	地盤	強度を有していること	変形	変形量が原形状を保っていることを確認 崩壊形状でない
地盤改良	地盤改良体	止水性を損なわないこと	せん断	改良体がせん断破壊しないことを確認 改良体のせん断強度以下

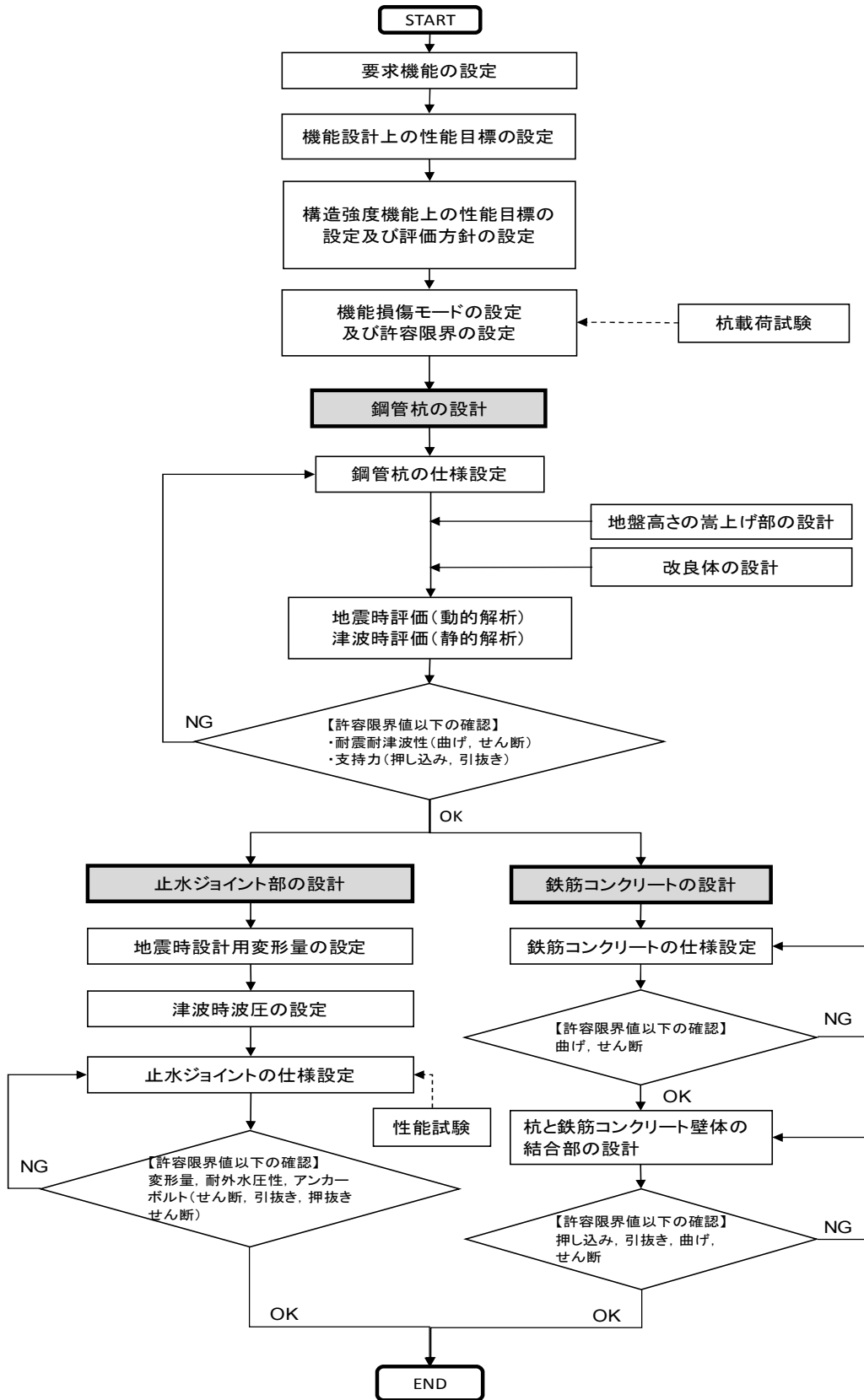


図4 耐震・耐津波評価の検討フロー

3) 杭構造形式（支持方式）の選定に係る方針

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤は鋼管杭基礎となるため、鋼管杭の支持方式の選定を行う必要がある。

鋼管杭は支持方式によって、支持杭と摩擦杭に分けられる。支持杭の場合は、先端を支持層に到達させ、主として杭の先端に上向きに働く先端支持力によって荷重を支える。摩擦杭の場合は、先端を支持層まで到達させず、主として杭の側面と地盤との間に働く周面摩擦力によって荷重を支える。杭の支持方式に係るイメージを図5に示す。

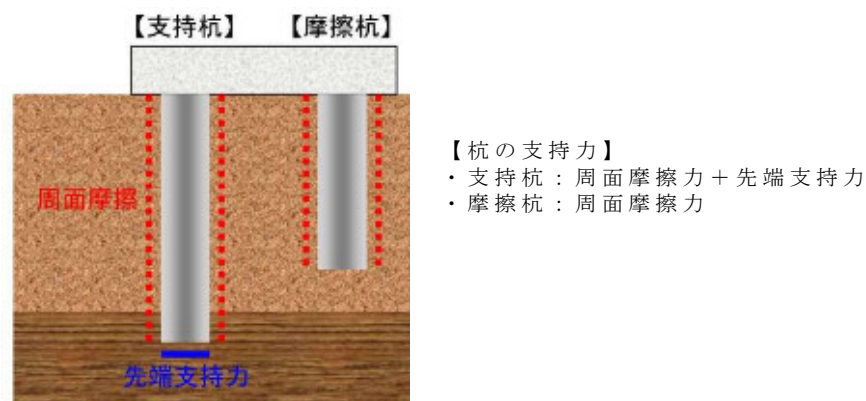
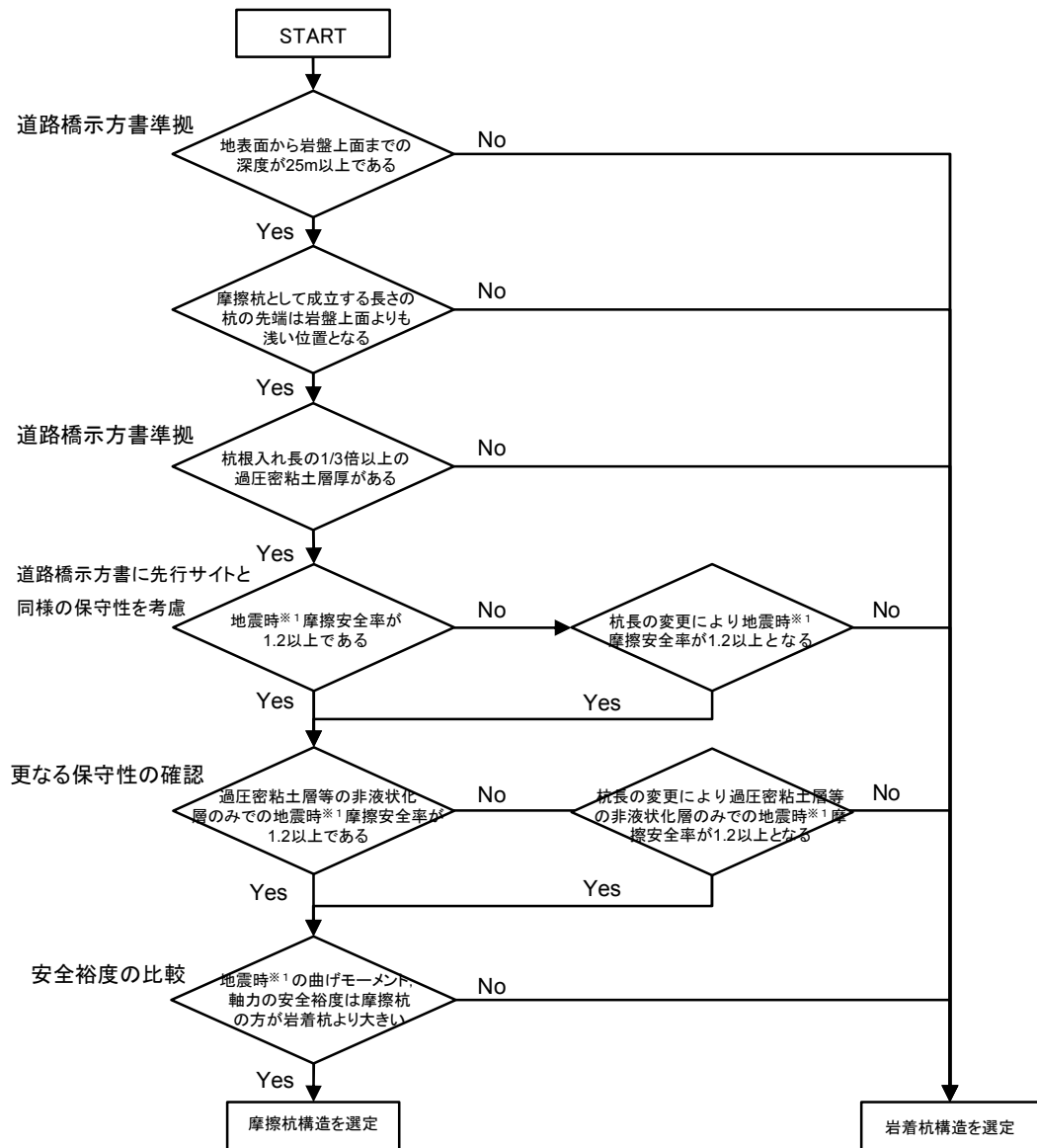


図5 杭の支持方式に係るイメージ

道路橋示方書には、支持力に対する安全率が支持杭と摩擦杭の構造形式の違いによりそれぞれ設定されているが、支持杭と同一の安全率を適用できる摩擦杭の条件を以下のように設定している。

- ① 著しい地盤沈下が現在進行中でないこと及び将来とも予想されないこと
- ② 杭の根入れ長が杭径の25倍（杭径1m以上の杭については25m）程度以上あること
- ③ 粘性土地盤においては、杭の根入れ長の1/3以上が過圧密地盤に根入れされていること。

東海第二発電所の敷地には、岩盤が浅い区間と深い区間があり、深い区間には、非液状化層でありかつ基礎杭の摩擦支持力を有する過圧密粘土層が存在する等の特長があるため、摩擦杭を視野に入れた基礎構造の選定を行う。図6に基礎杭構造の選定フローを示す。



※1 基準地震動Ss入力時

図6 基礎杭構造の選定フロー

4) 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必要がある。

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になっている。図 7 に杭の中心間隔の考え方を示す。

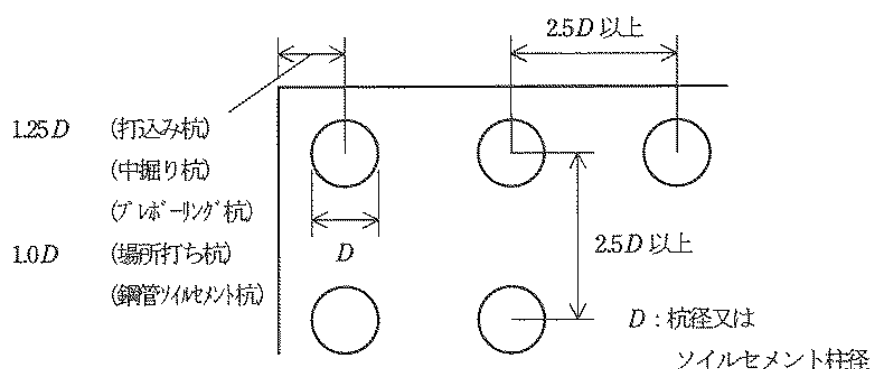


図 7 杭の最小中心間隔及びフーチング縁端距離

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤においては、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。

5) 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、道路橋示方書に示された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慮して支持力の上限值を算定する。仮想ケーソン基礎のイメージを図8に示す。

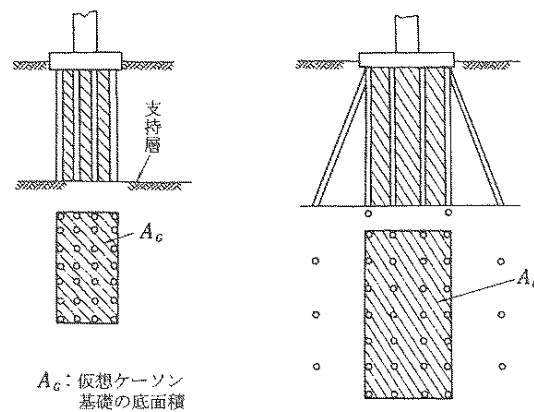


図8 仮想ケーソン基礎（道路橋示方書）

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤のように1列杭の場合においても、同様に図9の考え方を適用する。

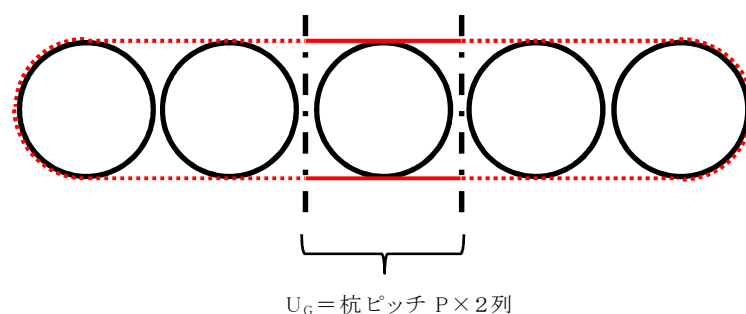


図9 仮想ケーソン基礎の考え方による群杭の周長

- ・ 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。

$$Q_f = U_G \sum L_i \tau_i$$

Q_f ：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本の杭に対して図9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)

6) 上部工（鉄筋コンクリート壁）の設計方針

防潮堤のうち鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤構造は、鋼管杭を一列に配置し下部工とするとともに、鋼管杭5本毎を1ブロックとして、1ブロック分の鋼管杭を鉄筋コンクリート壁にて一体化した上部工構造としている。

鉄筋コンクリート壁に要求される性能は、杭間の止水性と鋼材の腐食防止のための被覆である。設計においては、保守的に最も厳しい条件となる杭間に津波荷重や漂流物衝突荷重を作用させ、断面力が許容応力度以下であることを確認する。

外力に対する変形挙動としては、線状構造物であることから、弱軸方向に同一の揺れあるいは変位が卓越するが、1ブロック内で変位差が生じたとしても、鉄筋コンクリート壁が弾性強度を有する必要があるため、鋼管杭との接合部を含む鉄筋コンクリート壁の照査を行う。図10に鉄筋コンクリート壁の配筋図を示す。

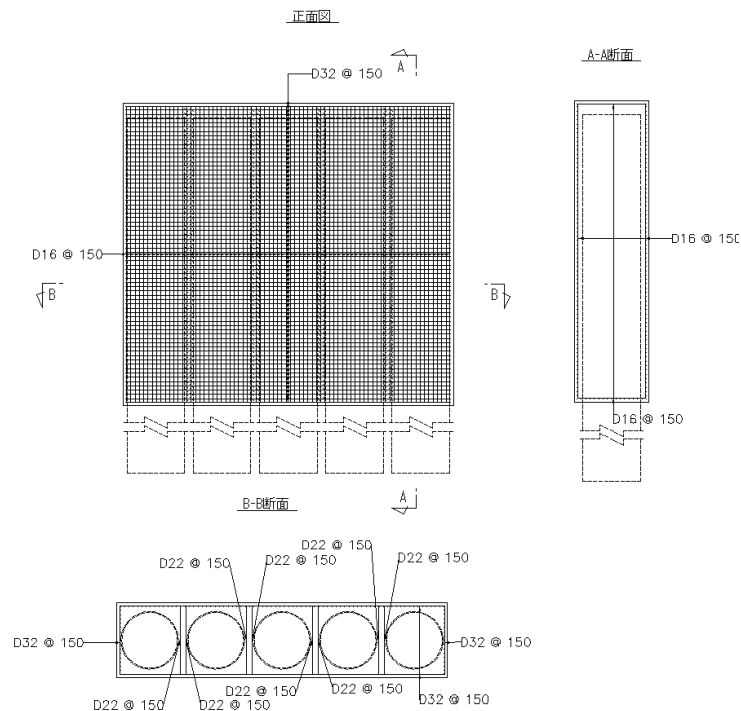


図10 鉄筋コンクリート壁の配筋図

上部工の設計手順を図 1 1 に示す。

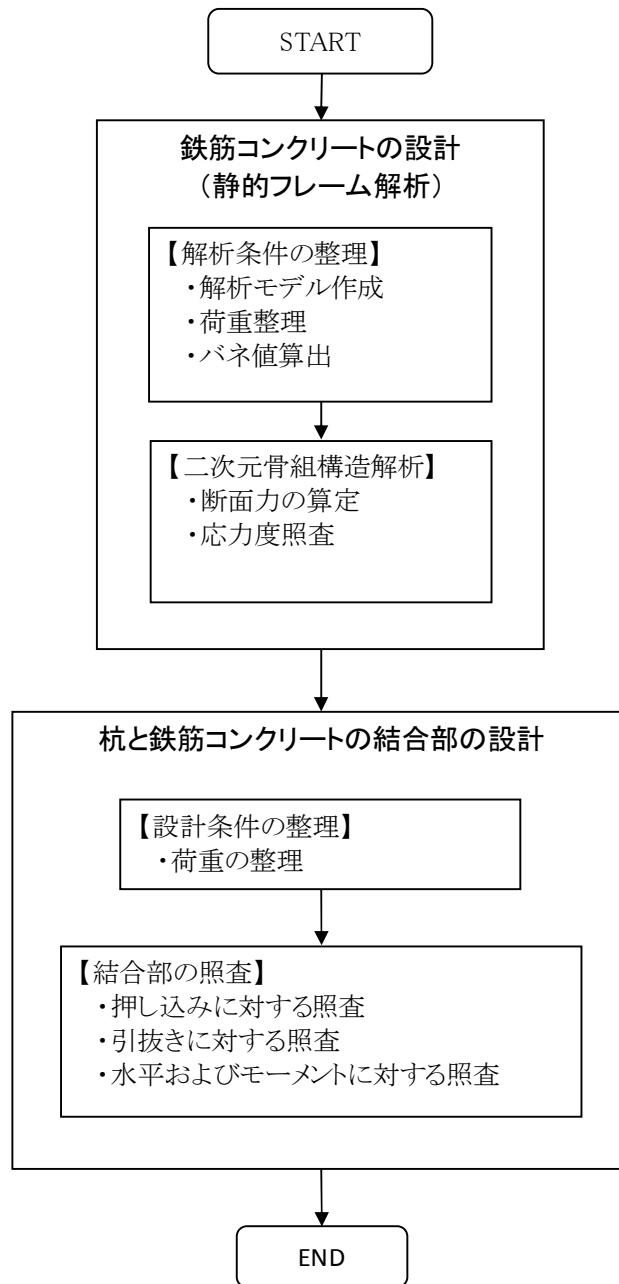


図 1 1 上部工の設計手順

① 鋼管杭と鉄筋コンクリートのモデル化

鉄筋コンクリートを弾性床土上の梁でモデル化し配置する鉄筋の仕様を決定する。鋼管杭のバネは道路橋示方書に基づき鉛直、水平バネの諸元を設定する。解析モデル概念図を図 1 2 に示す。

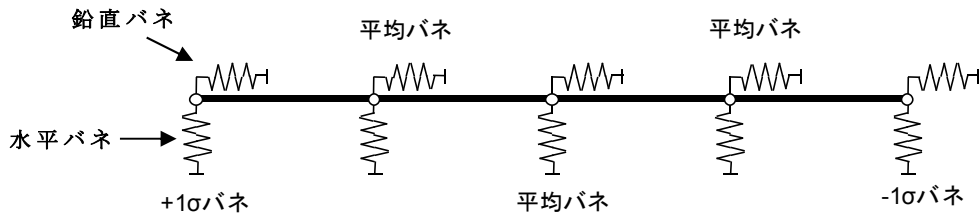


図 1 2 解析モデル概念図

鉛直バネは、次式により算出。

$$K_v = a \frac{A_p E_p}{L}$$

ここで、 A_p ：杭の純断面積（ mm^2 ）

E_p ：鋼管のヤング係数（ kN/mm^2 ）

L ：杭長（ m ）

a ：施工法別に杭の根入れ比（ L/D ）から決まる係数

杭の水平バネ（軸直角方向バネ）定数（ kN/m ）は、以下の式より算出。

$$K_1 = \frac{3EI\beta^3}{(1 + \beta h)^3 + 0.5} \quad , \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}}$$

EI ：杭の曲げ剛性

H ：設計上の地盤面から上の杭の軸方向長さ

β ：杭の特性値

k_H ：水平方向地盤反力係数

D ：杭径

水平バネに用いる水平方向地盤反力係数については、以下の式により算出。

$$k_{HE} = \eta_k \cdot \alpha_k \cdot k_H$$

η_k ：群杭効果を考慮した水平方向地盤反力係数の補正係数 (=2/3)

α_k ：単杭における水平方向地盤反力係数の補正係数 (=1.5)

k_H ：地震時の水平方向地盤反力係数 (kN/m³)

地盤バネについては、安全側の設計とするため、地盤のばらつきを考慮し、両端それぞれに+1 σ 、-1 σ に対応するバネを設置して、中央部分は平均値とする。

水平方向のバネは、杭の特性値 β が考慮されるため、地盤の剛性が考慮されることになり、 β を算出する際に地盤反力係数が用いられるが、これに地盤の変形係数 E_0 が考慮されているため、この部分にはばらつきを与える。すなわち、地盤物性値として与えられている初期せん断剛性 G_0 の+1 σ 、-1 σ 物性値を用いて+1 σ 、-1 σ 時の変形係数を算出し、地盤反力係数へ反映する。

$$E_0 = 2(1 + \nu_a)G_0$$

E_0 ：変形係数

ν_a ：動ポアソン比

G_0 ：地盤の剛性

津波時の設計については、防潮堤位置における津波荷重をビームに分布荷重として載荷するとともに、漂流物衝突荷重も加えて評価する。津波荷重載荷時の概念図を図 1 3 に示す。

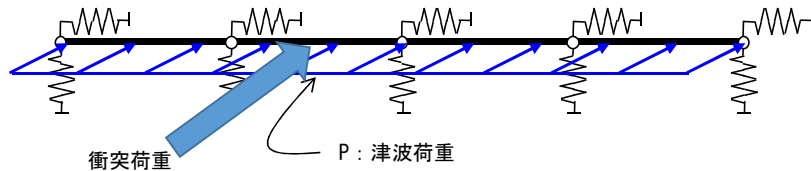


図 1 3 津波荷重載荷概念図

地震時については、各鋼管杭位置に一次元波動理論に基づく地震応答解析より算定した地表面応答変位を強制変位として鋼管杭バネ位置に面外へ載荷する。

鉄筋コンクリート壁の慣性力については、水平方向及び鉛直方向の両方を分布荷重として載荷する。地震時に考慮する荷重及び変位の概念図を図 1 4 に示す。

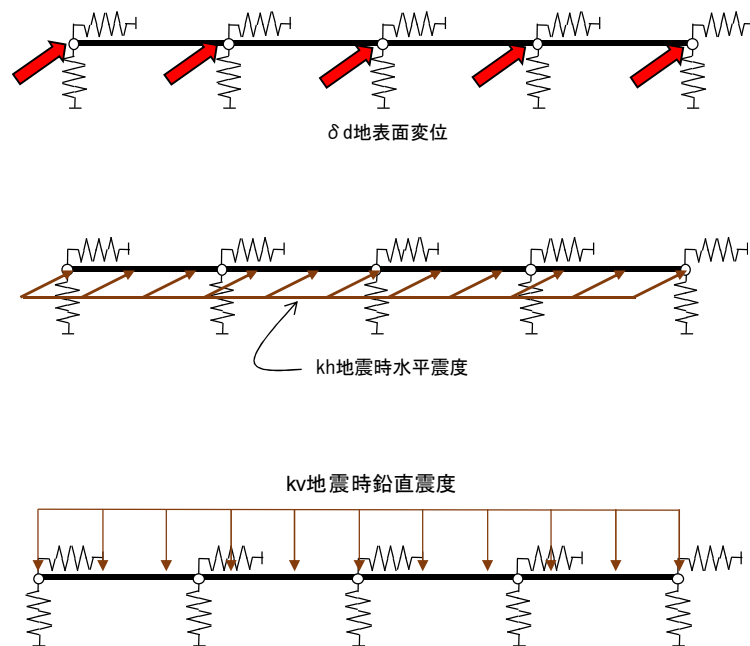


図 1 4 地震時に考慮する荷重概念図

②照査方法

面外方向の断面力を算出して、鉄筋コンクリート壁の水平方向断面についての断面計算より照査する。また、壁の頂部については、杭からの押し込みに対する照査として、押抜きせん断の照査を行う。また、曲げ及びせん断に対しては、許容応力度法により照査する。

鉄筋コンクリート壁に作用する断面力を図15に示す。

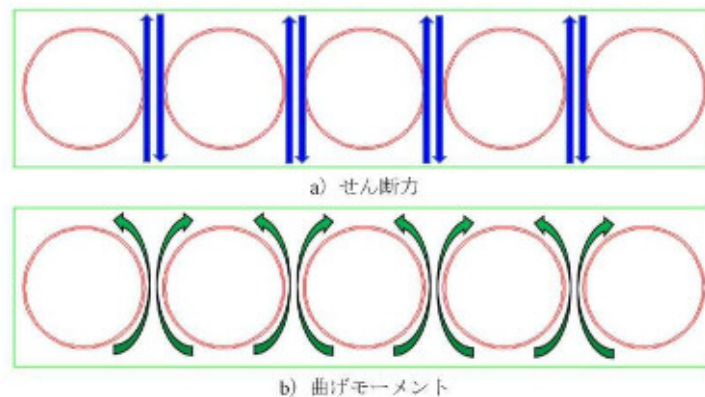


図15 鉄筋コンクリート壁に作用する断面力

a. 曲げモーメント・軸力に対する照査

曲げモーメント・軸力に対する照査は、断面計算より部材の応力度を計算し、その応力度が鉄筋及びコンクリートの許容応力度以下であることを検討する。

b. せん断に対する照査

せん断に対する照査は、以下の式で算出する。

- ・斜め引張鉄筋（せん断補強筋）の計算をしない場合

$$\tau = \frac{V}{b_w j d}$$

τ : せん断応力度, V : せん断力, b_w : 断面幅

j : $= 7/8$, d : 断面有効高さ

- ・斜め引張鉄筋（せん断補強筋）の計算をする場合

$$V_a = V_c + V_s$$

$$V_c = \frac{1}{2} \tau_{al} b_w j d$$

$$V_s = \frac{A_w \cdot \sigma_{sa} \cdot j \cdot d}{s}$$

V_a : 許容せん断耐力

V_c : 斜め引張鉄筋以外が受けるせん断力

V_s : スターラップが受けるせん断力

τ_{al} : 許容せん断応力度

b_w : 断面幅

j : $= 7/8$

d : 断面有効高さ

A_w : 区間 s におけるスターラップの総断面積

σ_{sa} : 鉄筋の許容引張応力度

s : スターラップの部材軸方向の間隔

③ 鋼管杭と鉄筋コンクリートとの接合部

鋼管杭と鉄筋コンクリートの接合部は、鉄筋コンクリートが鋼管杭に生ずる曲げモーメント及び杭軸力に追随し、杭軸方向に互いにズレない設計とする。

なお、鋼管杭と鉄筋コンクリート間のズレ(せん断応力)はコンクリートの付着力で鋼管に伝わるものとして評価し、杭周りのせん断応力度が許容応力度内であることを確認する。杭周りのせん断応力イメージ図を図16に示す。

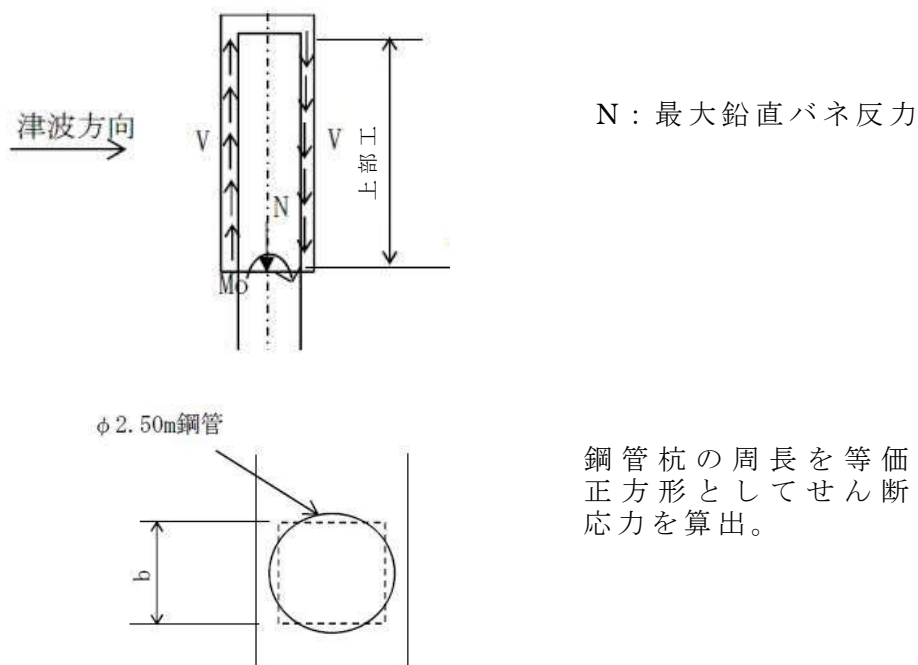


図16 杭周りのせん断応力算出図

なお、更に保守的な検討として、鋼管杭と鉄筋コンクリートの接合部の付着力が0の場合を想定し、杭頭部の照査を行う。

鋼管杭と鉄筋コンクリート壁との結合部については、道路橋示方書で示される結合方法Aによる設計（杭頭を鉄筋コンクリート壁躯体へ埋込み、埋込んだ部分によって杭頭拘束曲げモーメントに抵抗

する方法)を参照し、杭頭部に作用する押し込み力、引抜き力、水平力及びモーメントのすべての外力に対して安全であることを照査する。すなわち、鉄筋コンクリート壁を構成するコンクリートの垂直支圧応力度、押抜きせん断応力度、引抜きせん断応力度を照査し、更に端部の鋼管杭については、水平押抜きせん断応力度及び支圧応力度を照査する。杭頭に作用する荷重分布図を図17に示す。

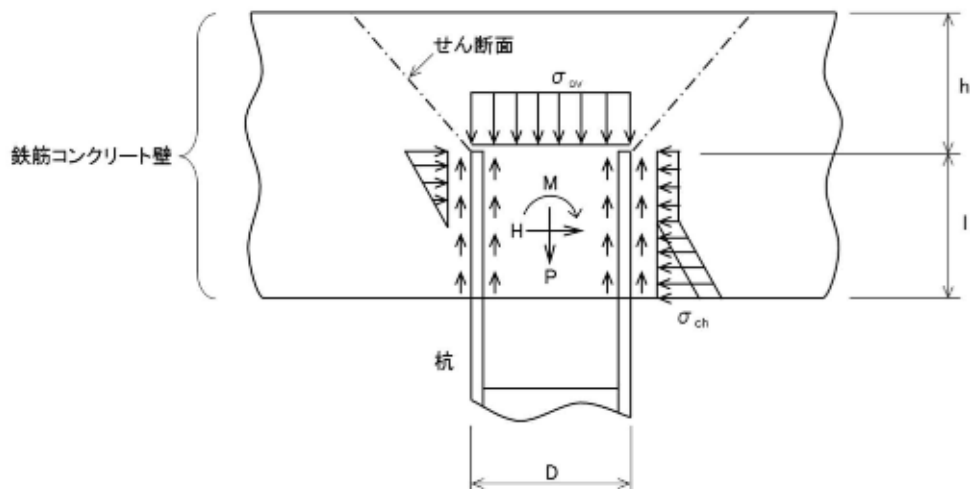


図17 杭頭部に作用する荷重分布図

7) 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堤の上部工は、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堤と鉄筋コンクリート壁等、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概念図を図18に示す。

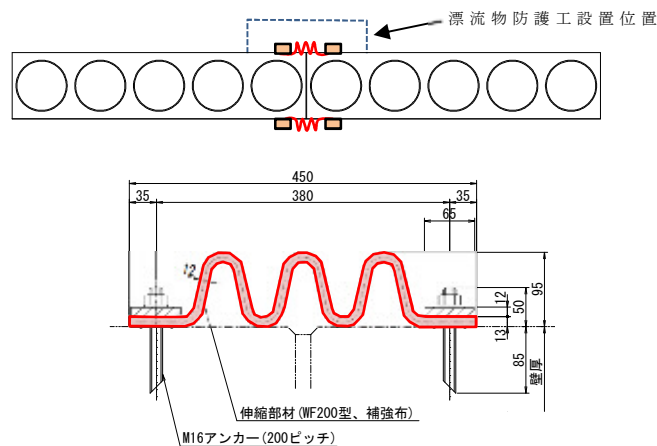


図18 止水ジョイントの概念図

これら止水ジョイントを設置する防潮堤の構造部材及び止水ジョイントの健全性評価については、地震応答解析に基づく鋼材及び鉄筋コンクリートの発生応力が降伏モーメント及びせん断耐力以下であることを確認する。また、止水ジョイント部のアンカーの発生応力が許容応力度以下であること、止水ゴムの等変形量が許容変形量以下であることを確認する。

なお、止水ゴム等の許容変形量については、必要に応じて試験を実施し確認する。

8) 支持地盤の健全性評価方針

防潮堤の基礎地盤については、液状化の有無を有効応力解析により判定する。

また、敷地内には粘性土層が分布しているため、過圧密もしくは正規圧密状態かの評価を行うとともに、防潮堤を設置した際の圧密沈下量の評価を行う。

津波時においては、繰り返し襲来する津波に対する防潮堤前面の洗掘を防止するため、表層地盤を 1m 程度地盤改良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、地表面から 1m 程度地盤に根入れする。防止対策図を図 19 に示す。

なお、敷地南西部においては、防潮堤が丘陵地に接合することから、接合部の地山の洗掘対策防止として、接合部地山を地盤改良等の対策を行う。

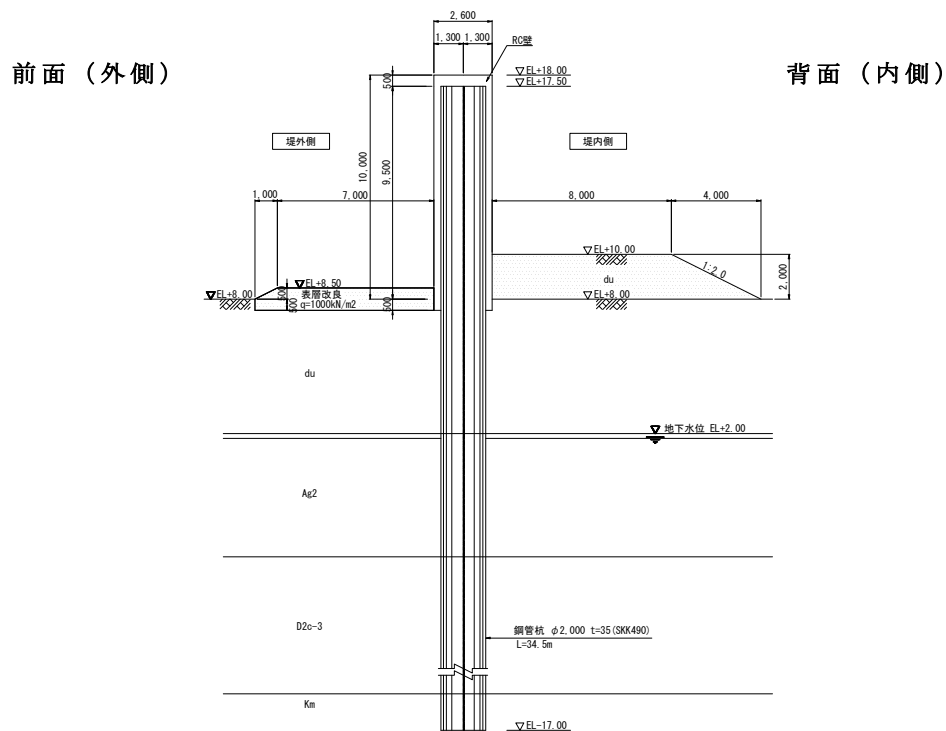


図 19 洗掘に係る防止対策

9) 圧密沈下の評価方針

敷地内に分布する粘性土層（Ac層等）の土質試験を実施し過圧密比を確認するとともに，その結果を用いて防潮堤設置時に杭先端付近において保守的な平均 -1σ の圧密降伏応力評価基準線以内の荷重増分であるか否か等について評価する。

① 評価方法

防潮堤設置時の杭先端付近の圧密荷重の算定は，道路橋示方書に基づき杭周面から伝播される増加荷重で求められる。杭構造物の場合の荷重分散の考え方は，杭先端から杭長 L の $1/3$ の根入れから荷重分散されるものとする。なお，分散角度は道路橋示方書に従い 30° とする。杭先端の形状は杭の面積に等価な正方形として算出する。

道路橋示方書に示される荷重図を図20に示す。

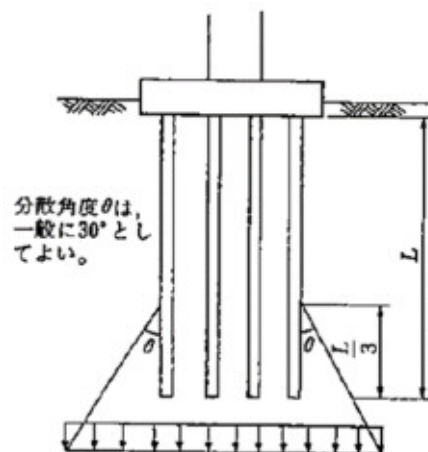


図20 杭構造物の荷重伝播の考え方（道路橋示方書）

② 原地盤の粘性土層の圧密状態の確認

圧密試験により圧密降伏応力 P_c を求め、有効土被り圧との比である過圧密比により、原地盤に分布する粘性土層の圧密状態を確認した。

その結果、原地盤の粘性土層は過圧密比が1を超えていることから、過圧密状態であると判断される。

圧密試験実施箇所を図2-1に、有効土被り圧と圧密降伏応力の関係を図2-2に示す。

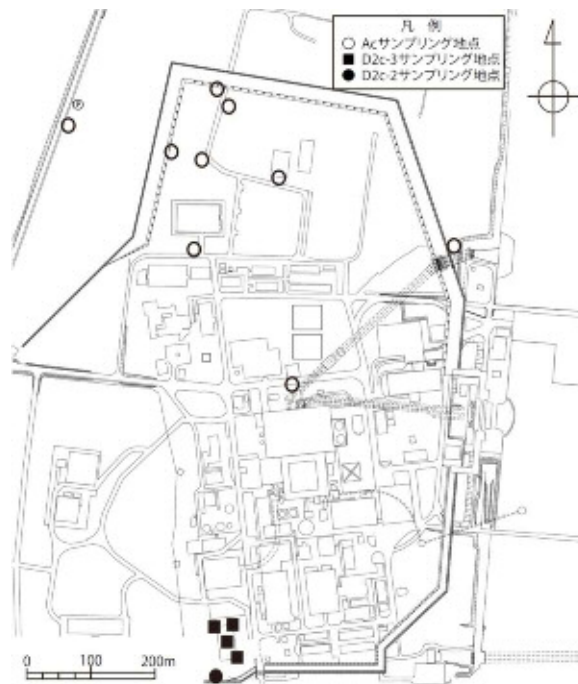


図 2 1 圧密試験実施箇所

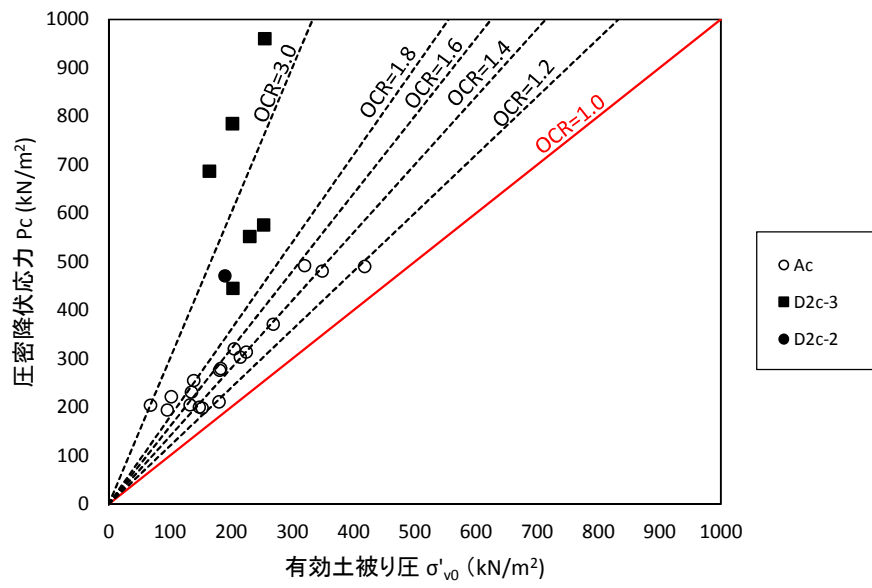


図 2 2 有効土被り圧と圧密降伏応力の関係

2. 原位置杭載荷試験（引抜き試験）

（1）目的

杭周面に働く最大周面摩擦力度は、杭の施工方法、地盤種別によって表4に示す値となる。

表4 最大周面摩擦力度（道路橋示方書）

表-解 12.4.5 最大周面摩擦力度 (kN/m²)

施工方法	地盤の種類	
	砂質土	粘性土
打込み杭工法 (打撃工法, バイブロハンマ工法)	2N (≤100)	c又は10N (≤150)
場所打ち杭工法	5N (≤200)	c又は10N (≤150)
中掘り杭工法	2N (≤100)	0.8c又は8N (≤100)
プレボーリング杭工法	5N (≤150)	c又は10N (≤100)
鋼管ソイルセメント杭工法	10N (≤200)	c又は10N (≤200)

ただし、cは地盤の粘着力 (kN/m²)、Nは標準貫入試験のN値

基本的には道路橋示方書に基づき、敷地内で取得されている地盤物性値を用いた最大周面摩擦力度の算定を行うため、適切な評価結果が得られると考えられるが、念のため原位置の複数地点で杭載荷試験を実施することで、より精度の高い最大周面摩擦力度を確認することができる。

（2）杭の施工方法

杭の施工方法には、打込み杭工法（打撃工法、バイブロハンマ工法、油圧ハンマ工法他）、オールケーシング工法、中掘り杭工法、回転圧入工法等がある。

杭の施工方法の分類を図23に示す。

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の杭の施工方法は、これらの工法から地盤の周面摩擦力を適切に確保できる打込み杭工法（打撃工法を主とし、必要に応じてバイブロハンマ工法を併用）で行う。した

がって、原位置試験においても同工法を採用する。

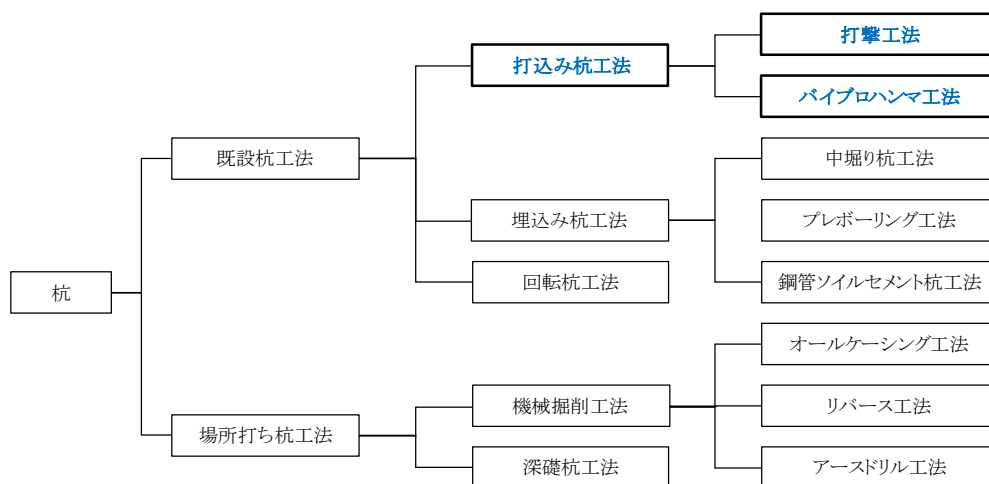


図 2 3 杭の施工方法の分類

(3) 原位置試験位置の選定方針

摩擦杭は、粘性土層が厚く分布する敷地の北部で用いることから、敷地北側において実施する。

道路橋示方書での最大周面摩擦力度は、N 値や粘着力 c を用いて算定するため、データが豊富にある N 値に着目して試験箇所を選定した。

試験位置を図 2 4 に、試験位置付近の土層分布状況を図 2 5 ~ 図 2 7 に示す。また、沖積粘性土層 (Ac 層) の敷地内全調査孔の N 値と試験位置近傍調査孔の N 値の分布状況を図 2 8 に示す。

その結果、No. 1 地点 ~ No. 3 地点付近の土層の N 値は、敷地内全データと比較してほぼ同等の値又は若干小さい値を示すことから、当該位置での試験は妥当であると判断した。

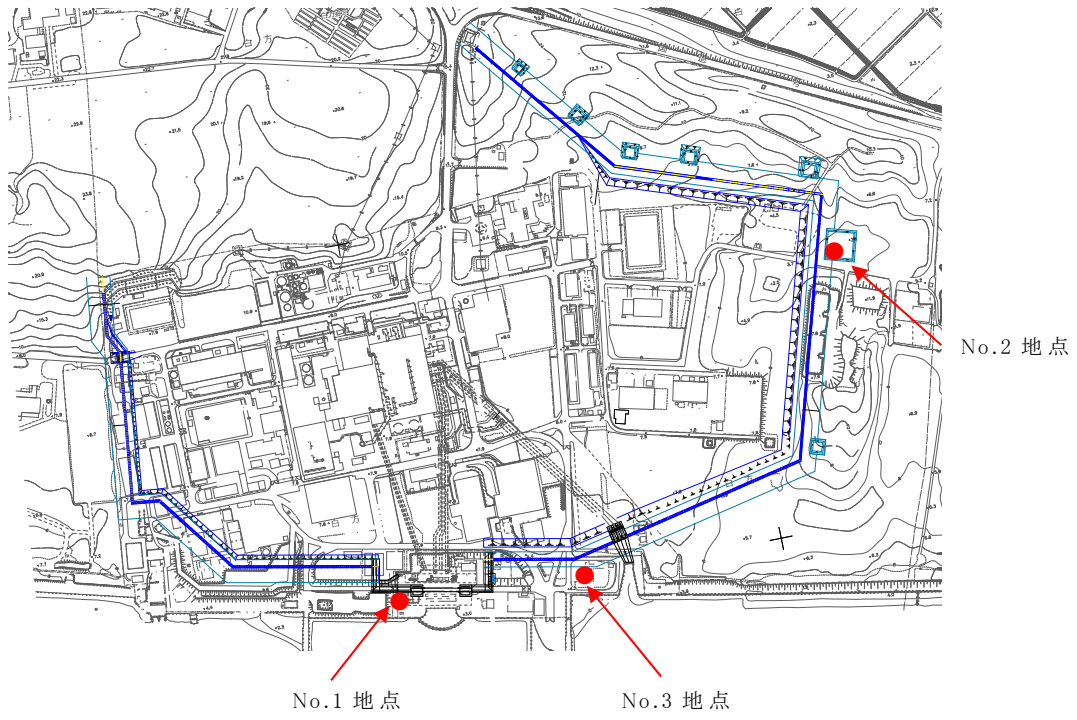


図 2 4 試験実施位置図

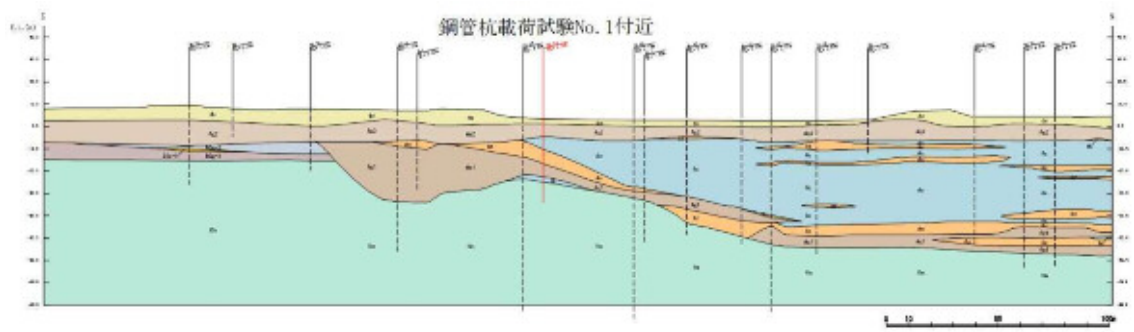


図 2 5 No. 1 地点付近の土層断面

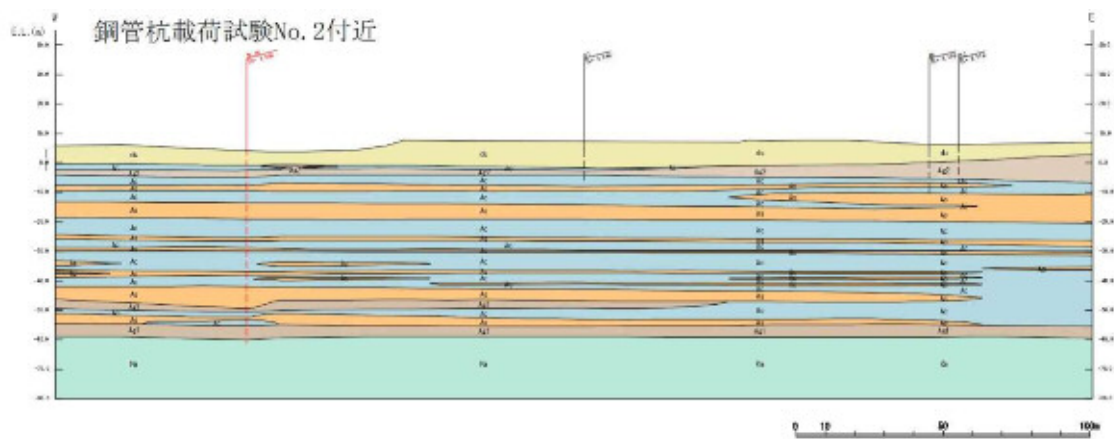


図 2 6 No. 2 地点付近の土層断面

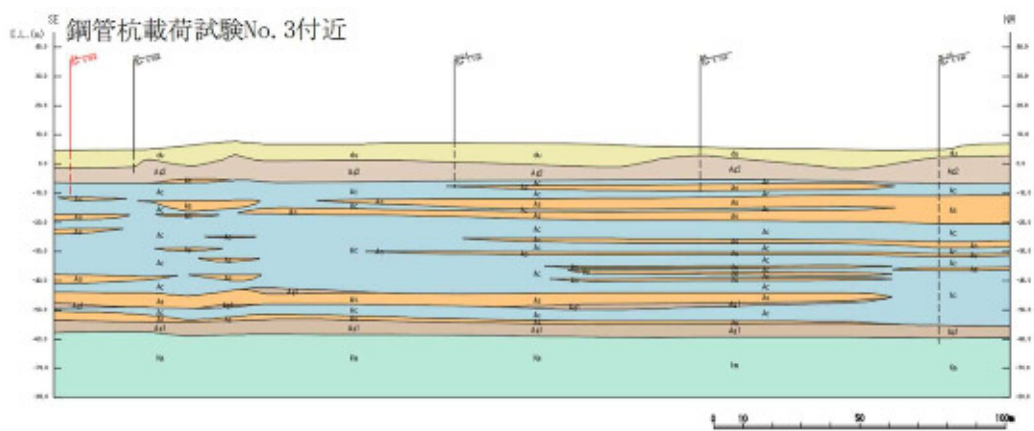


図 2 7 No. 3 地点付近の土層断面

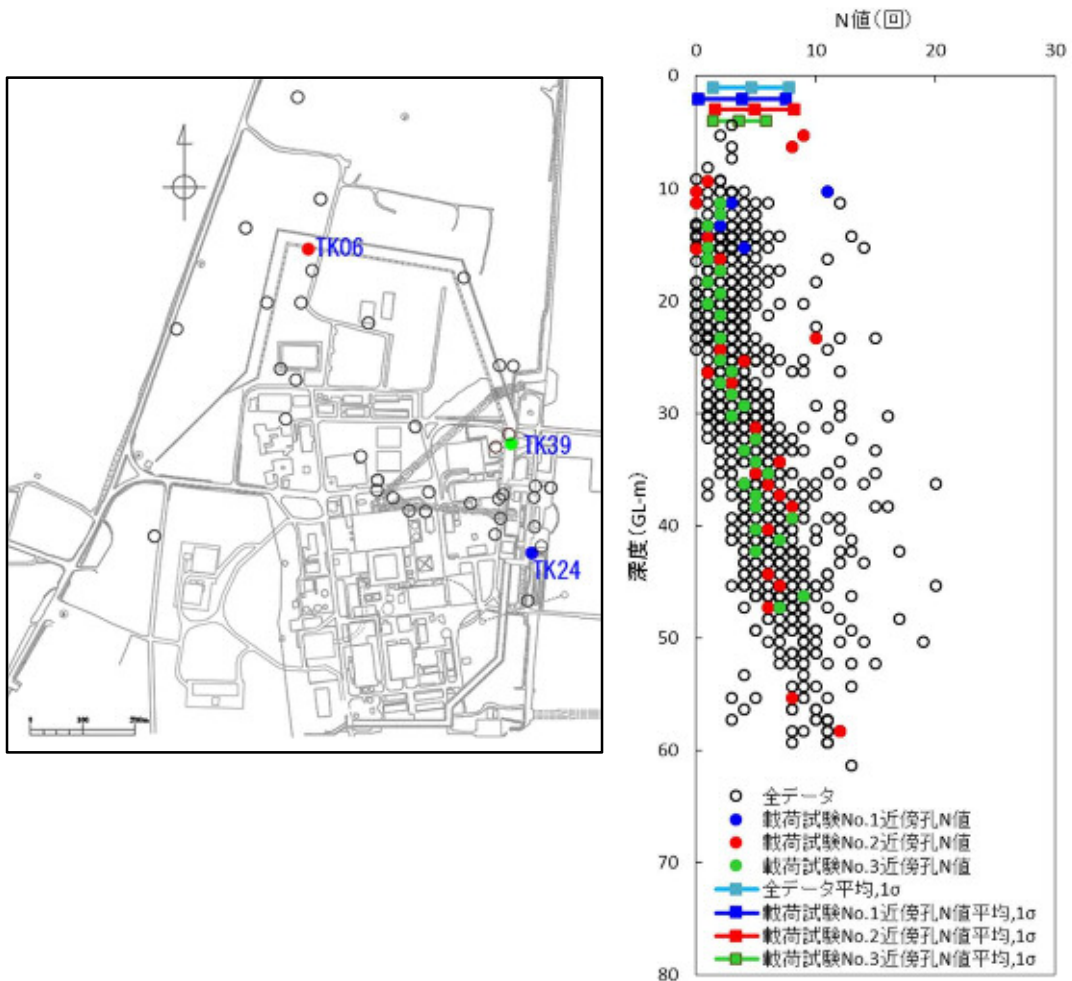


図 2 8 敷地内の N 値と試験位置近傍の N 値比較

(4) 原位置試験杭の仕様

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮堤の杭は、敷地の側面南側及び北側では $\phi 2,000\text{mm}$ 、 $t=35\text{mm}$ とし、敷地の前面東側では $\phi 2,500\text{mm}$ 、 $t=40\text{mm}$ を使用する計画である。

原位置試験では、各地盤の周面摩擦力度を確認することを目的としており、周面摩擦力度の算定は杭径や肉厚に依存するものではなく、単位面積当たりの地盤の周面摩擦力を算定するものである。

したがって、原位置試験の杭については、実施工で計画している杭径や肉厚ではないが、原位置試験で杭の打撃等に耐え得る適切な仕様を選定した。原位置試験杭の仕様を表5に示す。

表5 原位置試験（引抜き試験）杭の仕様

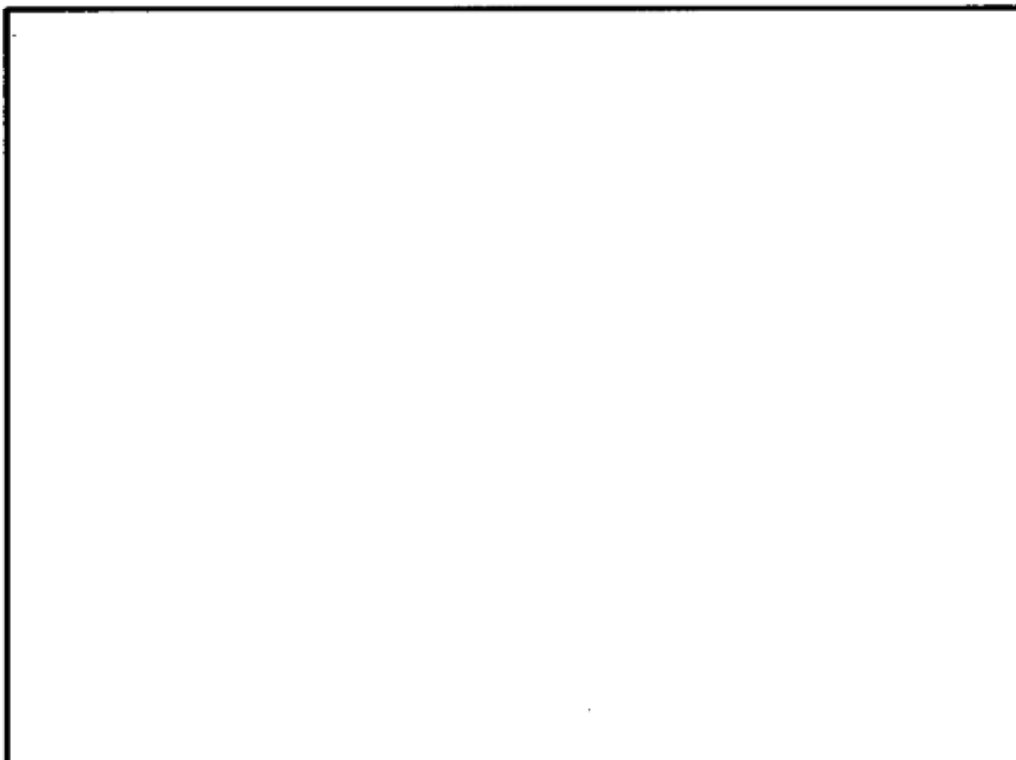
杭種	鋼管径 ϕ (mm)	杭長 L(m)	板厚 t (mm)	材質
No.1 地点	1,200	66.0	25	SKK490
No.2 地点	1,200	28.5	14	SKK490
No.3 地点	1,200	41.0	14	SKK490

3. 施工実績（一列杭構造）

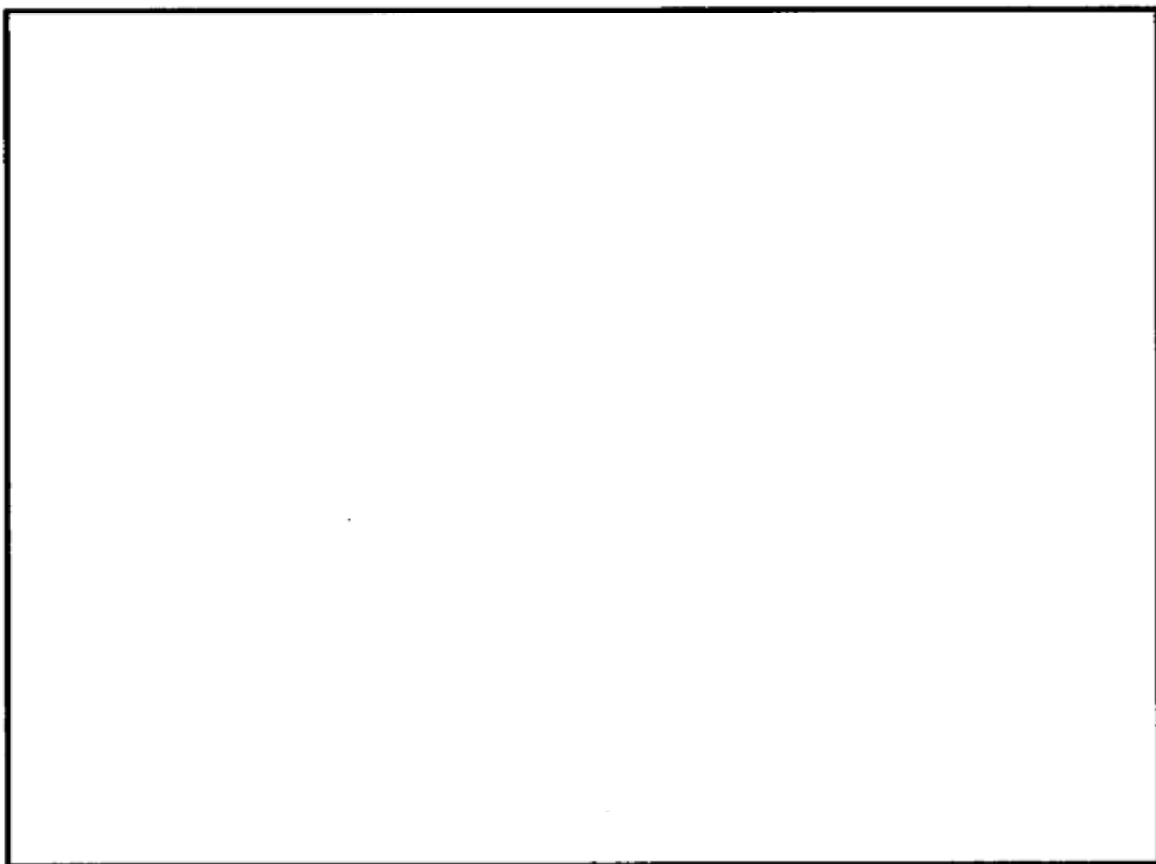
杭の最小中心間隔が 2.5D 未満の場合でかつ一列杭の本設構造物の実績を調査した結果を表 6 に、施工事例写真を以下に示す。

表 6 一列杭の本設構造物の実績

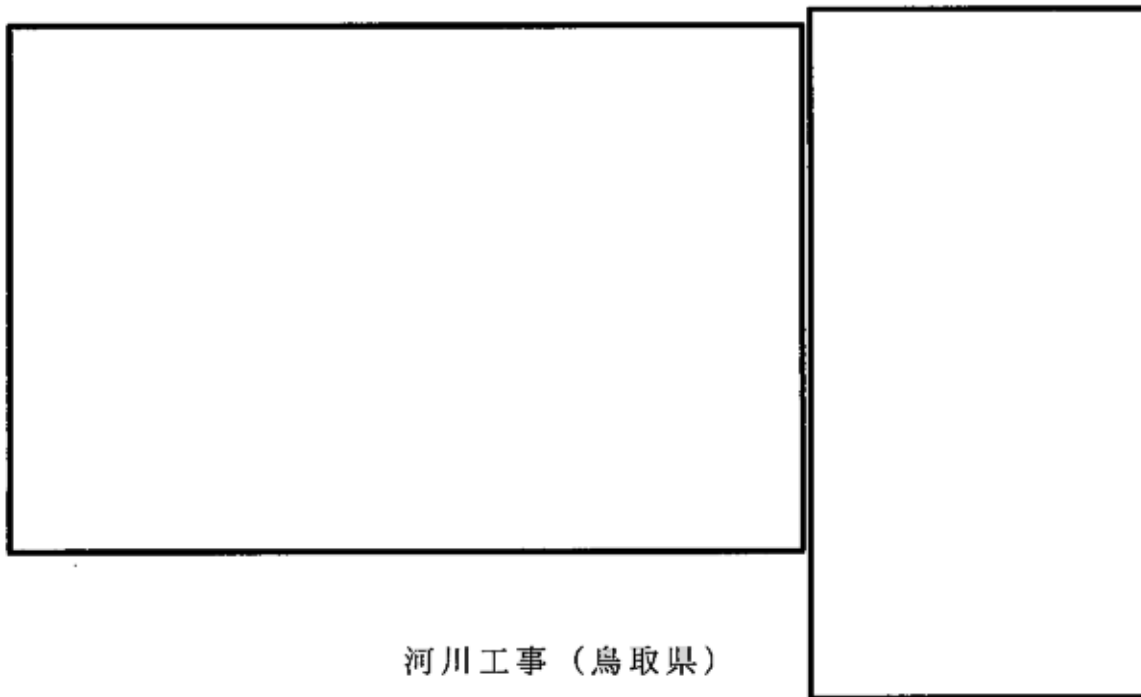
工事区分	件数			計
	国土交通 省等	都道府県	民間 (高速道路, 鉄 道, ガス等)	
河川護岸	10 件	115 件	1 件	126 件
海岸岸壁	38 件	47 件	1 件	86 件
道路（高速道路, 橋梁, トンネル等）	13 件	54 件	25 件	92 件
造成 (擁壁, 法面, 改良等)	2 件	8 件	3 件	13 件
その他	2 件	5 件	5 件	12 件



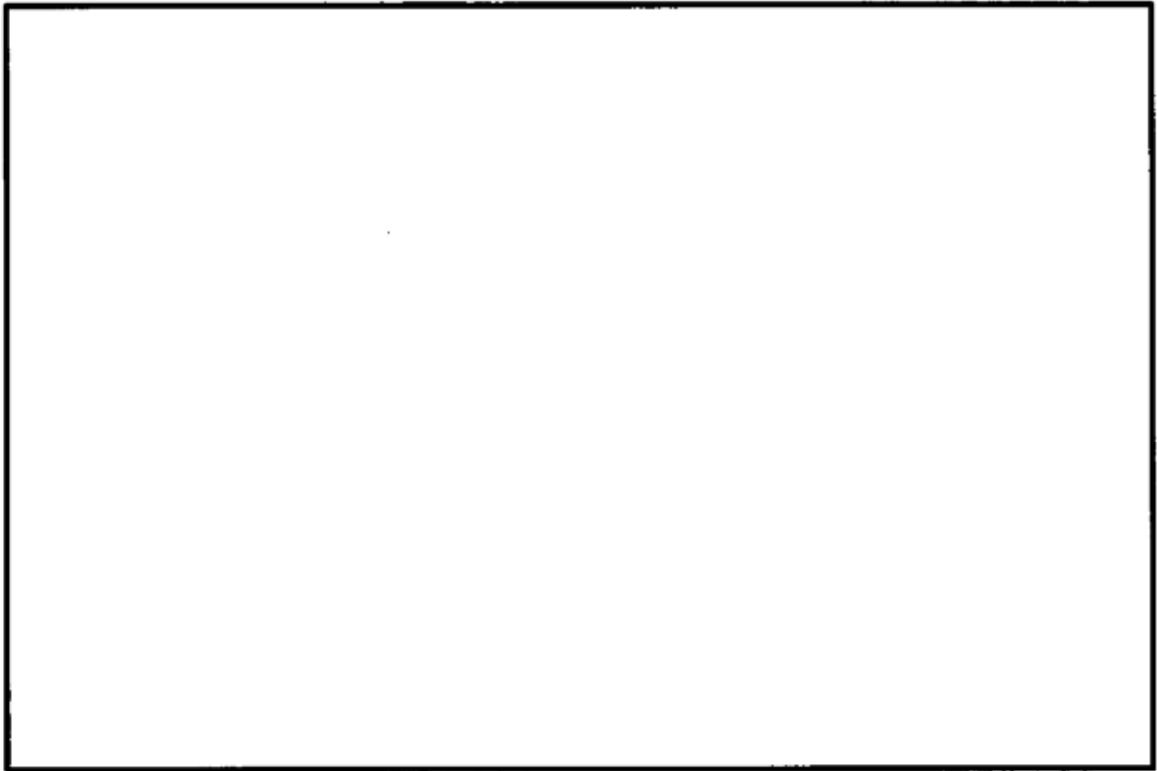
国道工事（国土交通省）



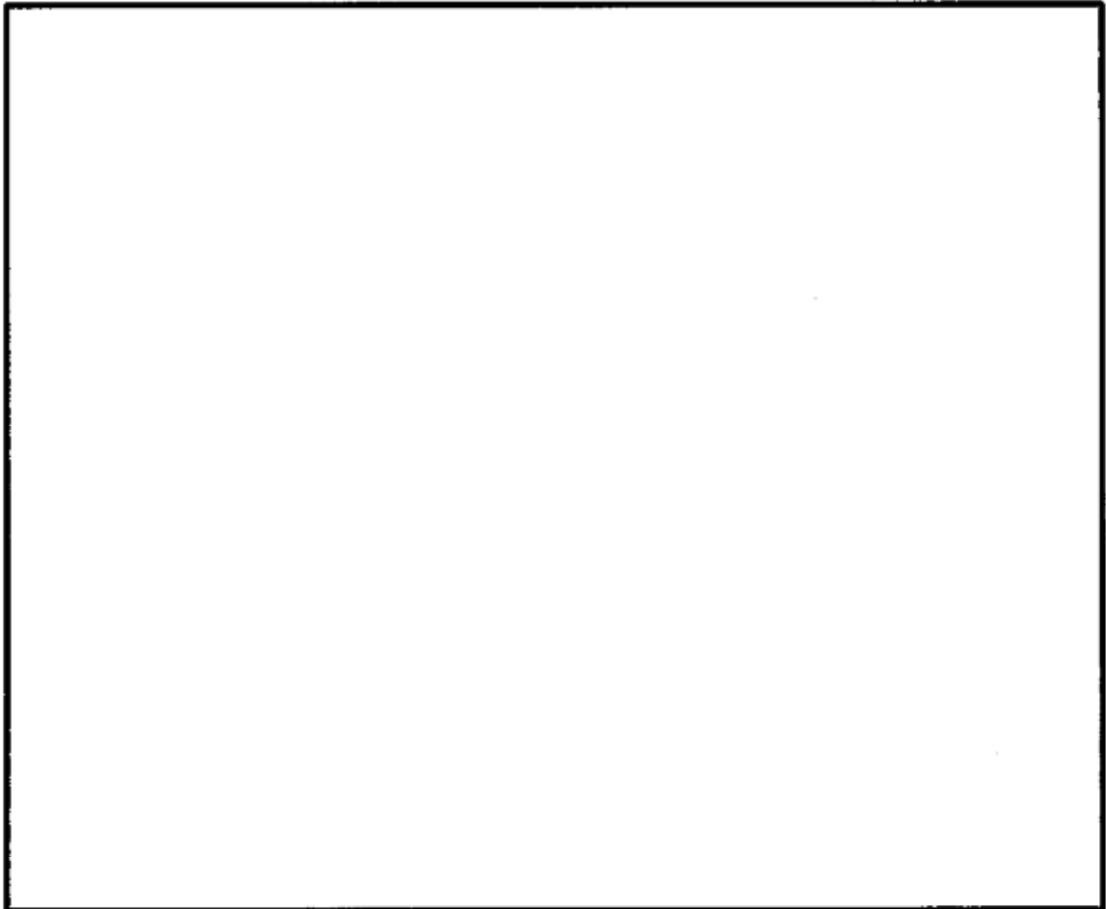
法面工事（神奈川県）



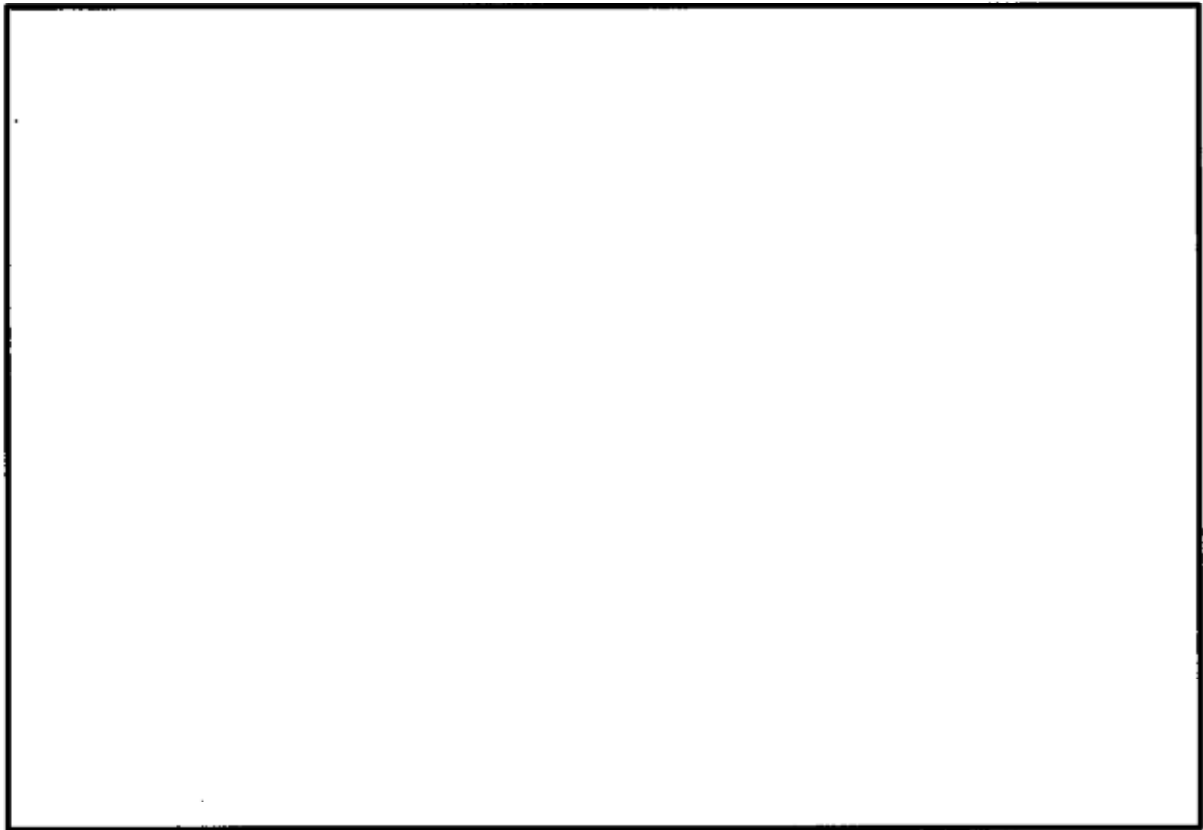
河川工事（鳥取県）



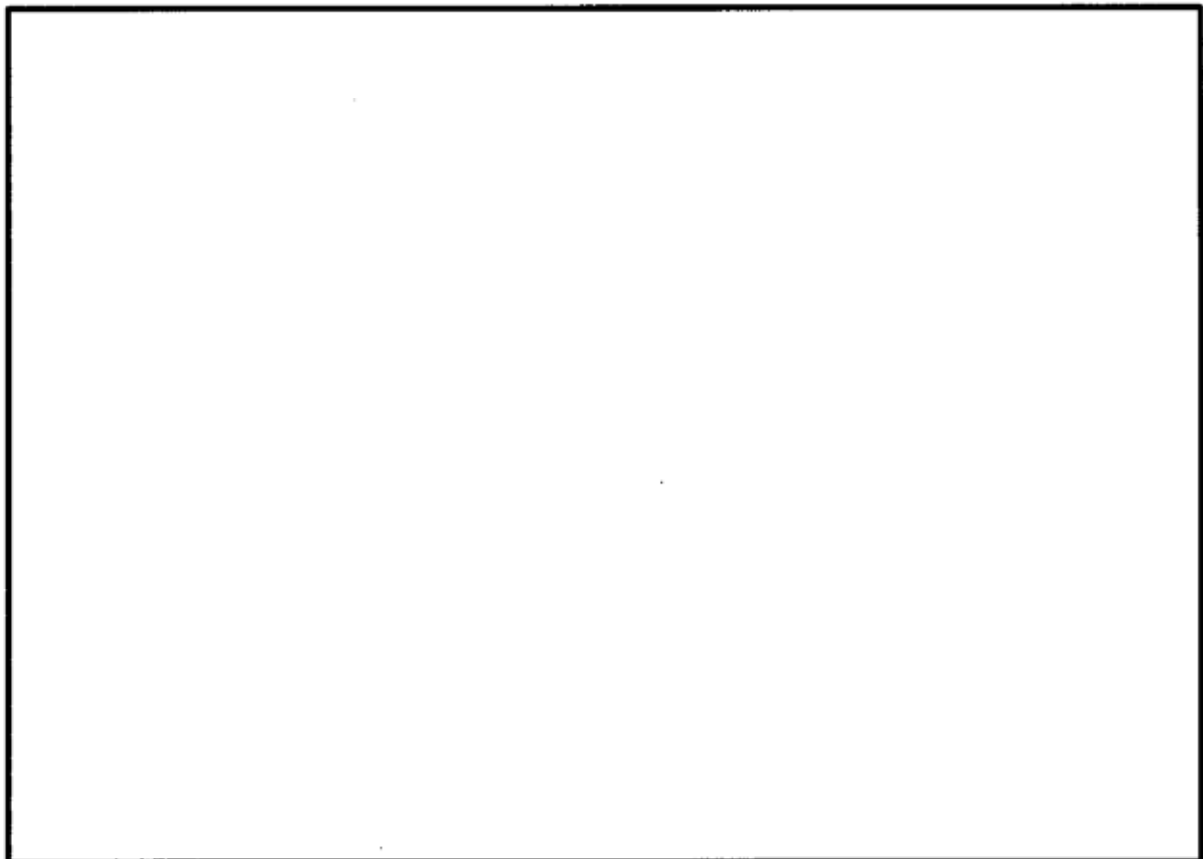
港湾工事（兵庫県）



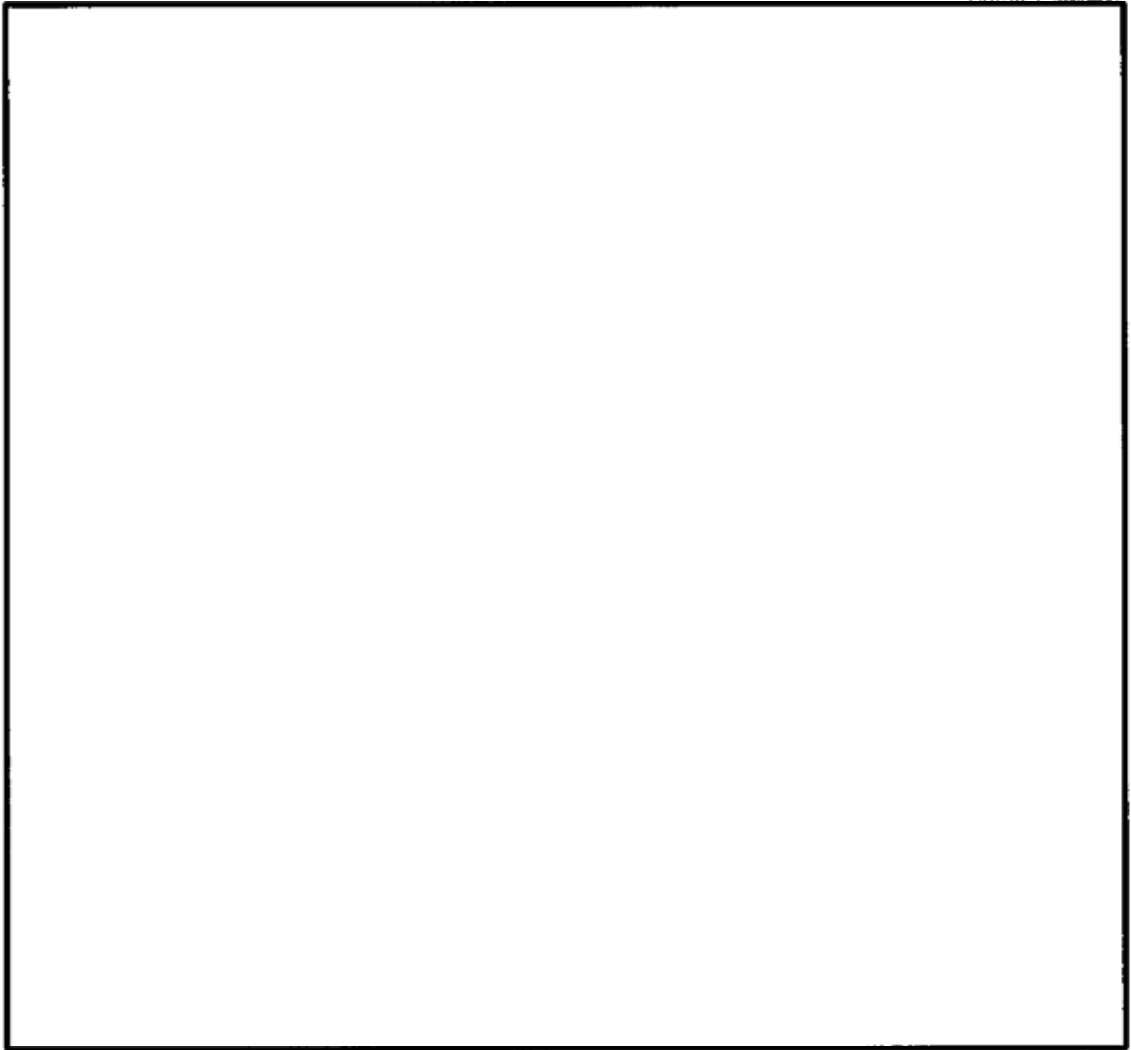
港湾築堤工事（東京都）



河川護岸耐震工事（大阪府）



海岸岸壁の災害復旧工事（宮城県）



なお、これら施工実績の中で、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。

4. 道路橋示方書の適用性について

(1) 適用性検討の評価方針

基準地震動 S_s は、敷地内及び周辺の調査結果に基づき、周辺活断層やサイト特有の地盤状況等を考慮して策定することから、その個別のスペクトルは、道路橋示方書で示される地盤種別毎の包絡スペクトルとは比較する性質のものではないが、杭構造の設計において道路橋示方書の考え方を適用することから、その適用性の観点で加速度応答スペクトルのレベルを比較することで、道路橋示方書の適用性について評価することとする。

1) 検討対象位置

検討断面位置は，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。検討地点の位置図を図29に，断面図を図30に示す。

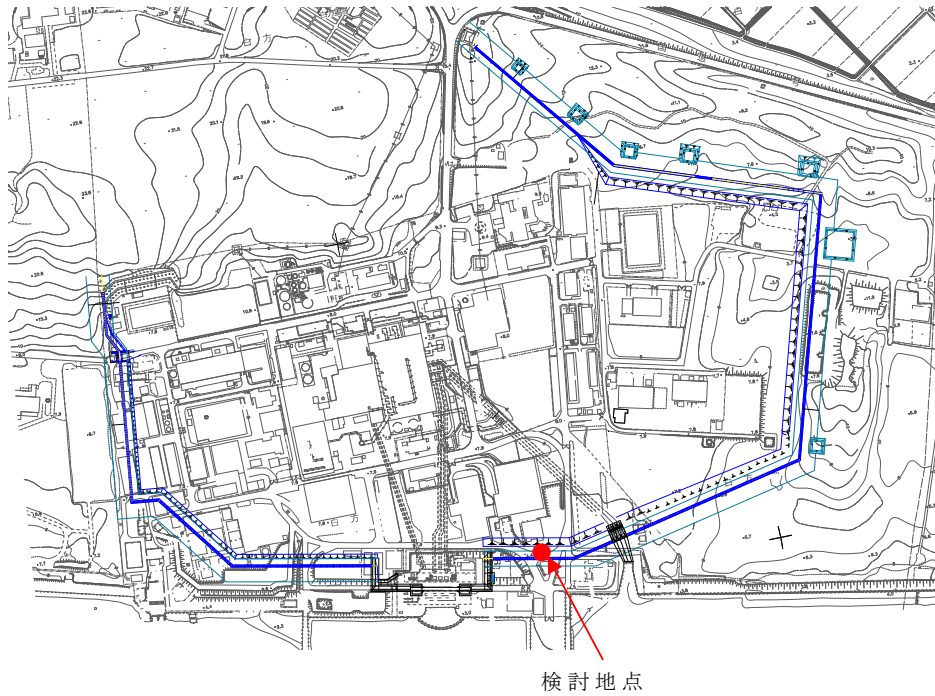


図29 検討地点の位置図

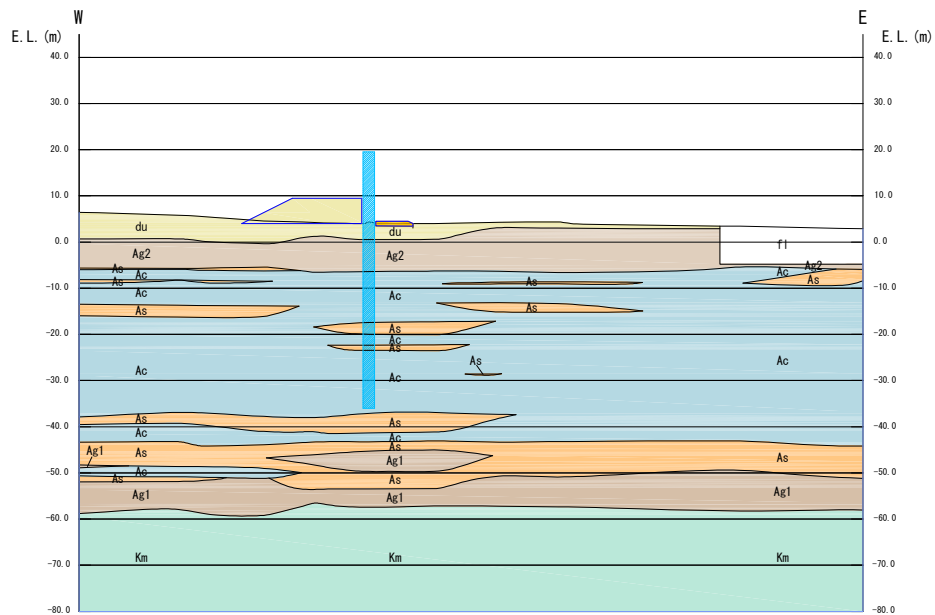


図30 検討地点の地質断面図

2) 東海第二発電所の地盤の基本固有周期

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

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 Km 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、表 7 に基づき行い、Ⅲ種地盤（固有周期 1.08 秒）となった。

表 7 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)
I 種	$T_G < 0.2$
II 種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III 種	$0.6 \leq T_G$

3) 道路橋示方書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。また、地震動の種別もプレート境界型地震動を対象にした Type I と断層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図 3 1 に示す。

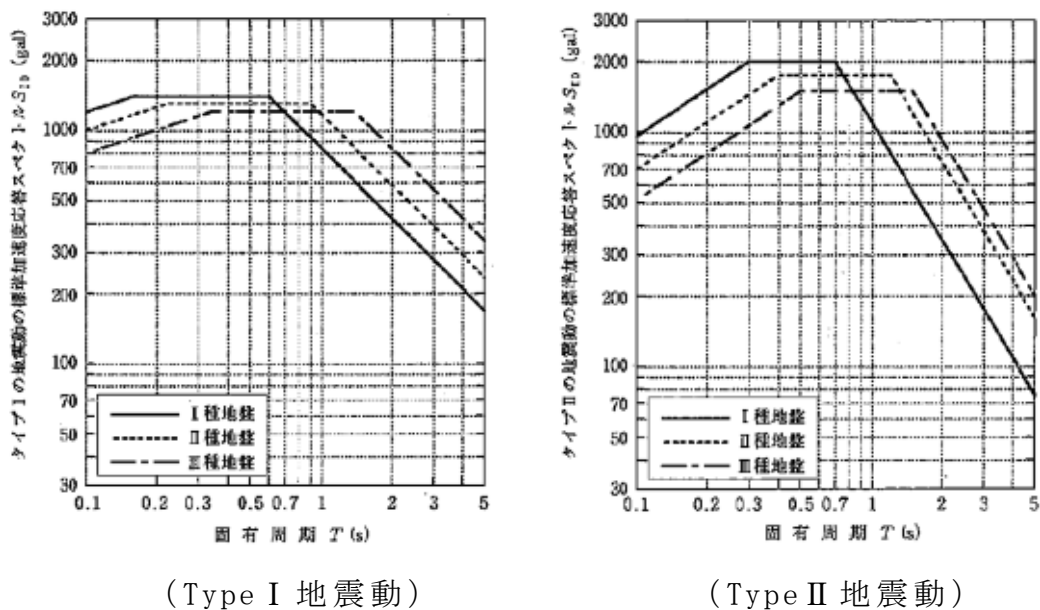


図 3 1 地震動の標準加速度応答スペクトル（道路橋示方書）

なお、道路橋示方書の耐震設計では、観測された波形を図 3 1 に示したスペクトルに近い特性を有するように振幅調整を行い用いている。

Ⅲ種地盤の地点の構造物に用いられている地震動は表 8 に示すとおりであり、3波の平均値で照査を行うとしている。また、それぞれの地震波を図 3 2 及び図 3 3 に示す。

表 8 III種地盤の動的解析で用いられる地震動

(道路橋示方書)

Type I	I-III-1	平成 15 年十勝沖地震大樹町生花観測点地盤上 EW 成分
	I-III-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
	I-III-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 II	II-III-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
	II-III-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
	II-III-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

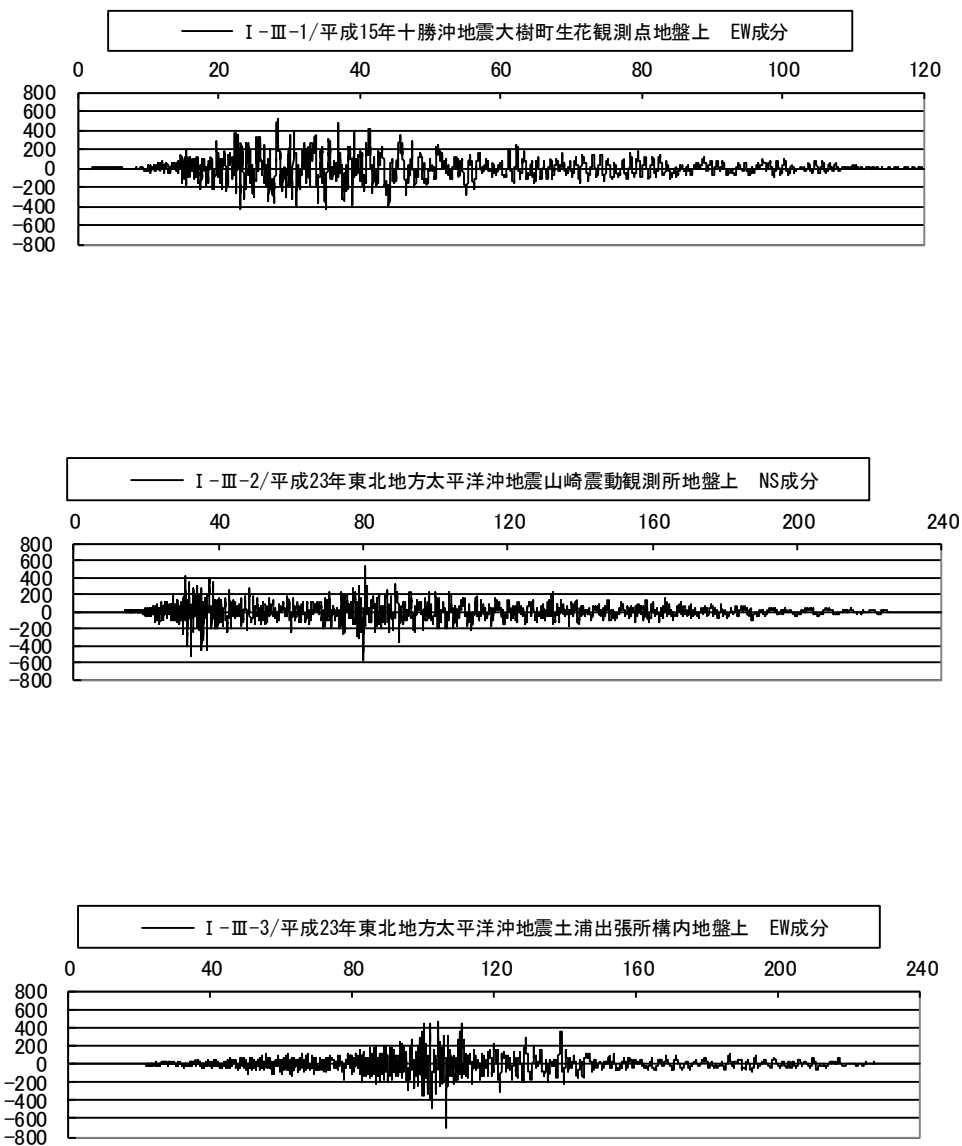


図 3 2 III種地盤 Type I 地震動で用いられる地震波
(道路橋示方書)

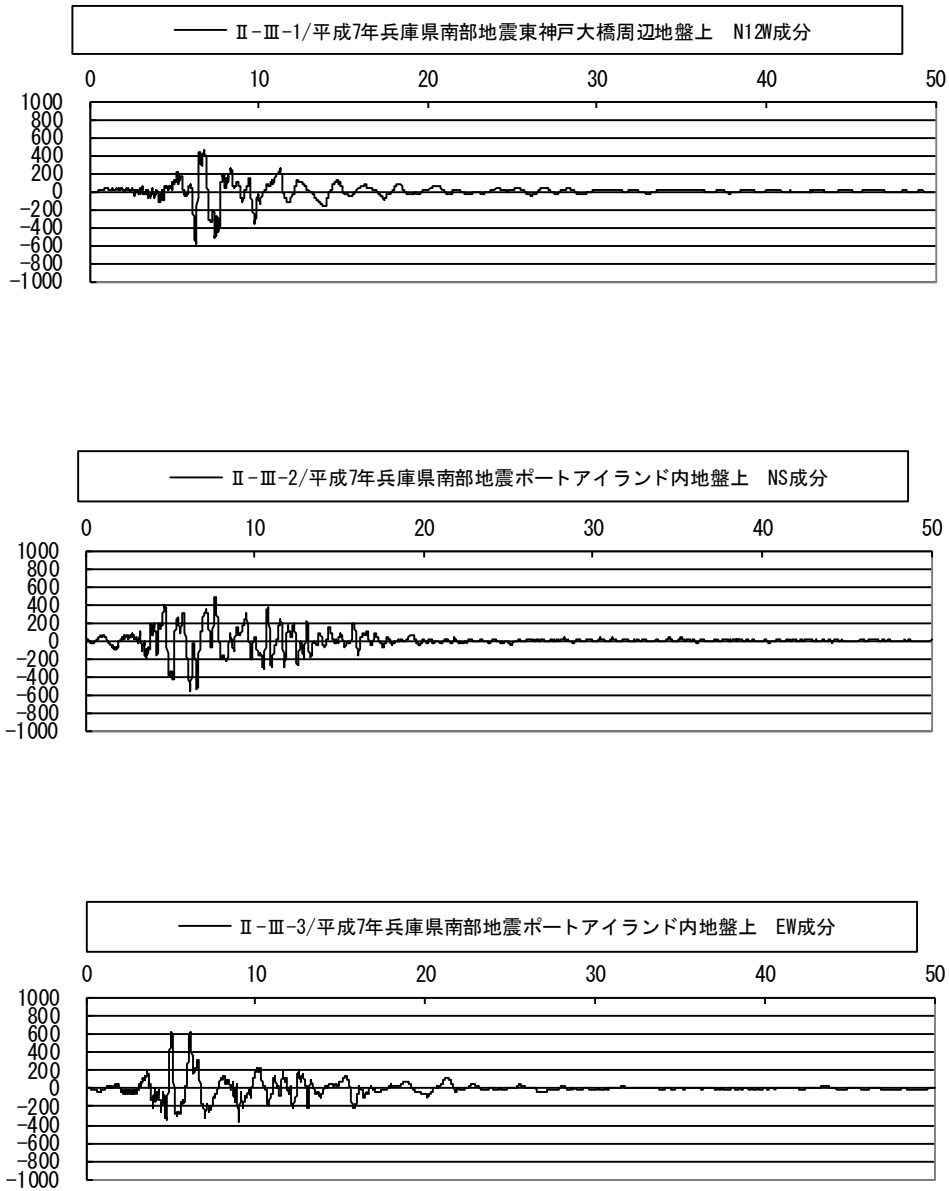


図 3 3 III種地盤 Type II 地震動で用いられる地震波
(道路橋示方書)

4) 東海第二発電所の加速度応答スペクトル

東海第二発電所の基準地震動 S_s の一覧表を表 9 に、加速度時刻歴波形を図 3 4 及び図 3 5 に示す。

表 9 東海第二発電所の基準地震動 S_s

地震動	最大加速度 [cm/s ²]		
	NS 成分	EW 成分	UD 成分
S _s -D1L	870		560
S _s -11	717	619	579
S _s -12	871	626	602
S _s -13	903	617	599
S _s -14	586	482	451
S _s -21	901	887	620
S _s -22	1009	874	736
S _s -31	610		280

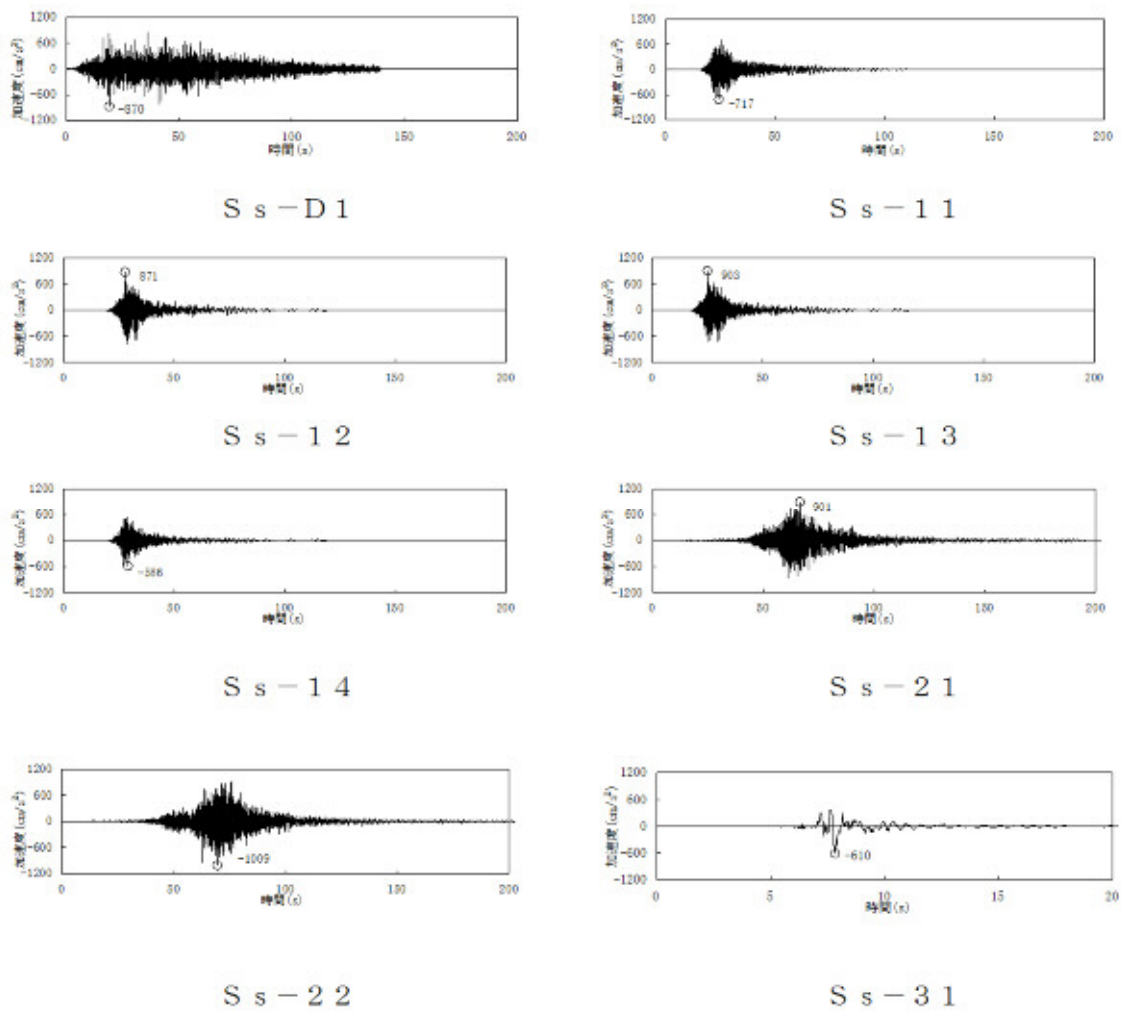


図 3 4 東海第二発電所の加速度時刻歴波形（水平（N S 方向））

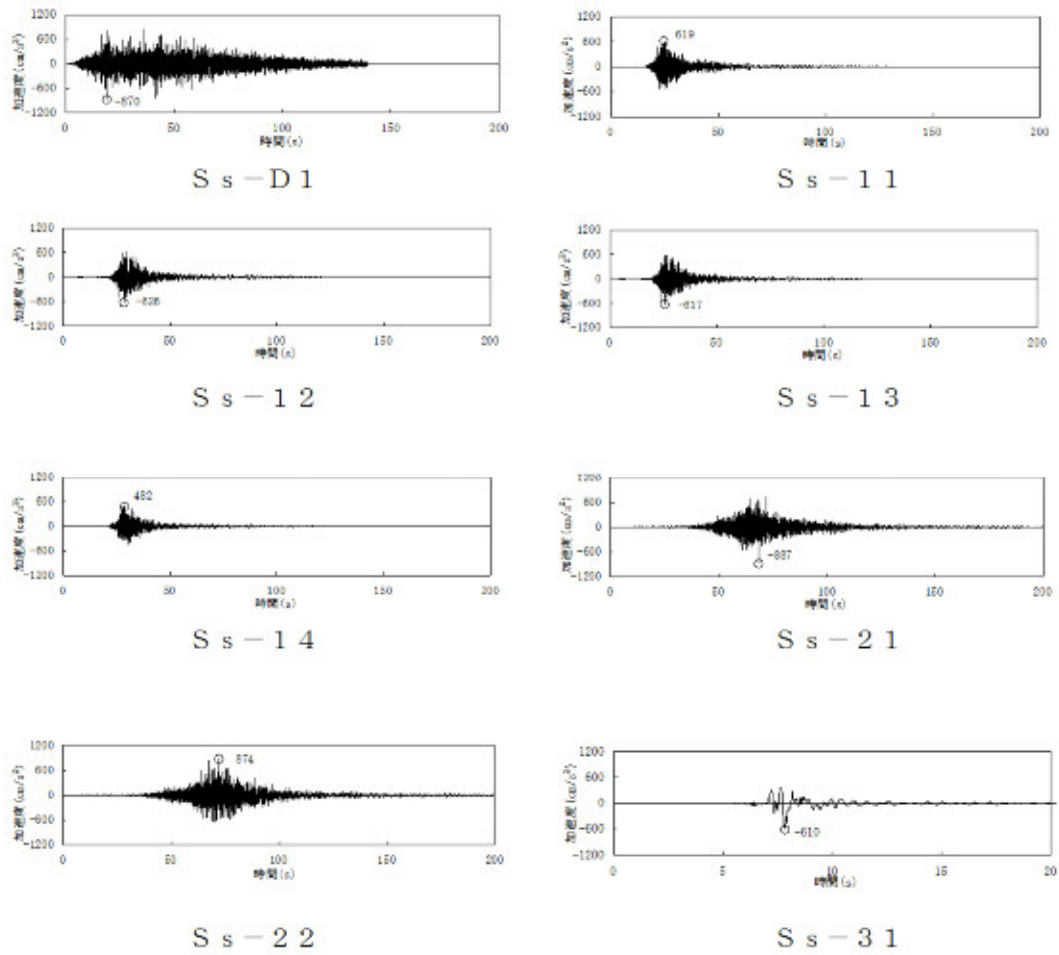


図 3 5 東海第二発電所の加速度時刻歴波形（水平（E W方向））

5) 基準地震動 S_s 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の比較

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。

東海第二発電所で用いる地震動は、検討地点の地層構成を基に、一次元等価線形解析により地表面まで引き上げた時刻歴応答加速度を用いて応答スペクトルを作成した。

また、応答スペクトルを比較する際、道路橋示方書の Type I 地震動については、プレート境界型地震動であるため東海第二発電所の S_s -21 及び S_s -22 を対象とし、Type II 地震動については、内陸直下型地震動を対象としているため東海第二発電所の S_s -11～ S_s -14 及び S_s -31 波と比較した。なお、東海第二発電所の S_s -D1 波については Type I、Type II 両方と比較した。スペクトル解析結果を図 3 6 及び図 3 7 に示す。

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全ての地震動を概ね包含する結果となった。

以上より、道路橋示方書で使用している地震動は東海第二発電所の施設設計で用いる地震動と概ね同等であるといえることから、地震動レベルの観点からの道路橋示方書の適用は問題ものと判断される。

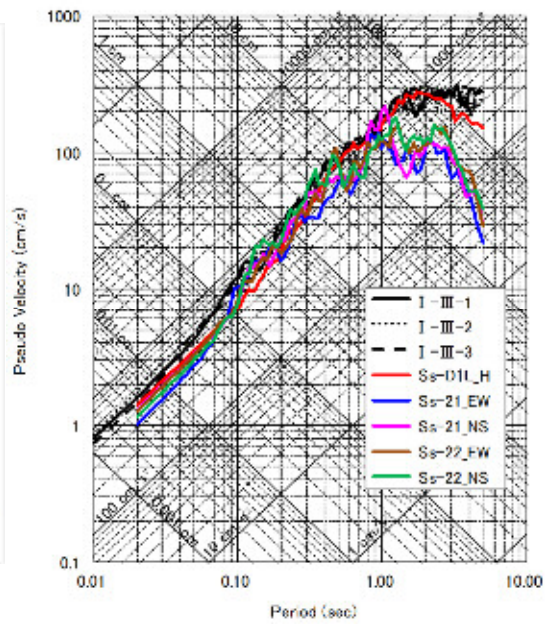
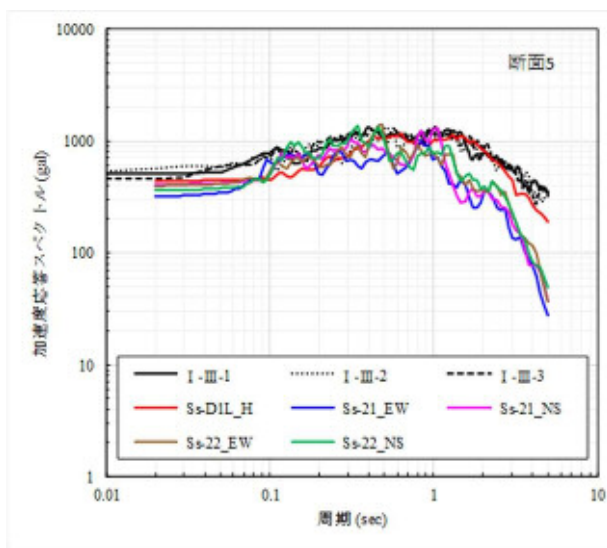


図 3 6 基準地震動 S s と Type I 地震動との比較

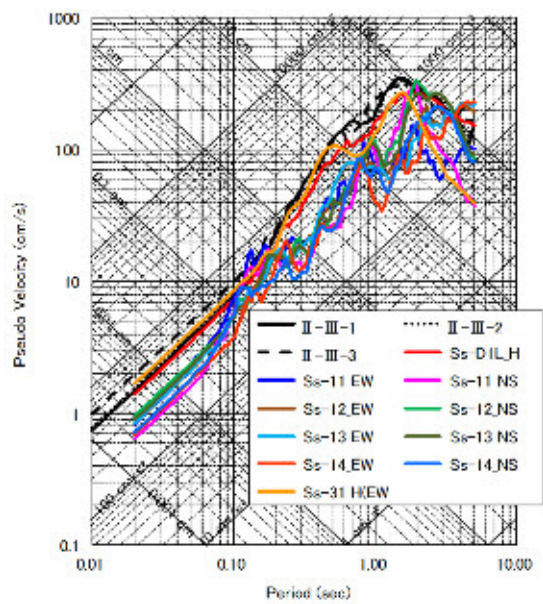
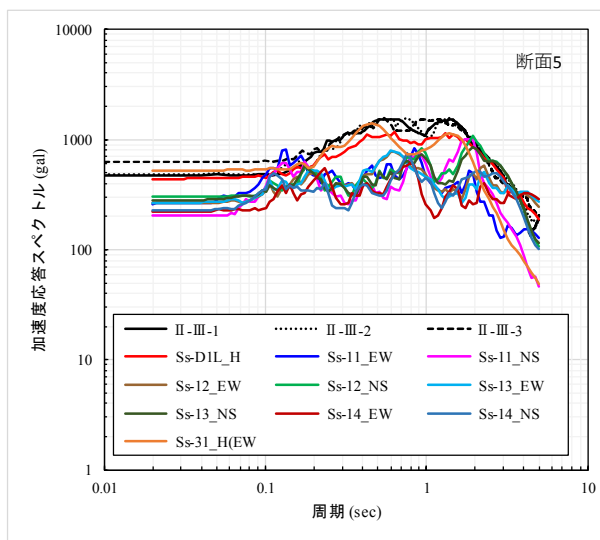


図 3 7 基準地震動 S s と Type II 地震動との比較

5. 杭構造基礎に関する設計基準類

杭構造基礎に係る設計基準としては、道路橋示方書・同解説（社日本道路協会）の他、杭基礎設計便覧（社日本道路協会）、杭基礎施工便覧（社日本道路協会）に代表される。

（1）道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編（社日本道路協会）

橋梁下部構造の基礎として、杭基礎の種類や選定方法、設計手法等がとりまとめられており、橋梁下部構造以外の土木構造物の杭基礎においても、同基準を参考として計画・設計している。下部構造の技術基準の変遷を表 10 に示す。

（2）杭基礎設計便覧

道路橋示方書・同解説を補完するものとして、道路橋示方書の背景や設計の基本的な考え方、新しい研究成果等を紹介したもの。

（3）杭基礎施工便覧

道路橋示方書・同解説を補完するものとして、道路橋示方書の規定の解説や既存工法の説明、施工計画に関するもの、施工管理の具体的な内容、施工上のトラブル事例と対策等について紹介したもの。

杭基礎設計便覧・杭基礎施工便覧

昭和 61 年	杭基礎設計便覧	刊行
平成 4 年	杭基礎設計便覧	改訂
	杭基礎施工便覧	刊行
平成 18 年	杭基礎設計便覧	改訂
	杭基礎施工便覧	改訂
	（現段階での最新基準）	

表 10 下部構造の技術基準の変遷

年・月	名称	内容
S39.3(1964)	道路橋下部構造設計指針 くい基礎設計編	設計の一般事項
S41.11(1966)	道路橋下部構造設計指針 調査及び設計一般	クローン土圧による土圧計算 粘性土に粘着力を考慮 許容応力度・許容支持力の規定
S43.3(1968)	道路橋下部構造設計指針 橋台・橋脚設計篇 直接基礎設計篇	斜橋の橋台に働く土圧,地震荷重の統一的な算定方法を規定 直接基礎の設計の規定
S43.10(1968)	道路橋下部構造設計指針 くい基礎の施工篇	鉄筋コンクリート杭,PC杭,鋼杭を中心に規定 継手,杭頭仕上げについて規定
S45.3(1970)	道路橋下部構造設計指針 ケーソン基礎設計篇	くい基礎・ケーソン基礎・直接基礎の範囲を示す 鉛直,水平の荷重分担要素の明確化 ケーソンの設計に必要な項目の規定
S48.1(1973)	道路橋下部構造設計指針 場所打ち杭の設計 施工篇	場所打ち杭の定義(深礎も場所打ち杭) 杭の設計径,コンクリートのヤング係数,許容支持力度を 規定具体的な施工手引きとして,機械掘削・人力掘削に 分けた。
S55.5(1980)	道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編の刊行	部材照査方法に関してコンクリート橋編と整合 杭基礎の鉛直支持力の算定方法を改訂 中掘り杭工法の設計施工規定
H2.2(1990)	道路橋示方書 IV 下部 構造編	各種基礎の設計法の適用範囲に関する解説の充実 地盤反力係数の算定式やフーチングの剛体判定式の統 合 岩盤上直接基礎の許容支持力度や弾性体基礎の許容 変位量の規定 高強度水中コンクリートや太径鉄筋の規定 暴風時の取り扱いの見直し
H5.11(1993)	道路橋示方書 IV 下部 構造編	下部構造の設計における活荷重の載荷方法の見直し 胸壁設計における断面力算定式の見直し
H8.12'(1996)	道路橋示方書 IV 下部 構造編	橋梁の各部位に地震時保有水平耐力法を導入したこと に伴う照査方法の規定 部材のじん性向上のための細目 建設費縮減のための構造形状の単純化 鋼管矢板基礎の規定 ケーソン基礎設計法の改訂
H14.3(2002)	道路橋示方書 IV 下部 構造編	死荷重作用時の鉄筋の許容応力度の規定 コンクリート部材の塩害対策規定 フーチングの曲げ及びせん断に対する設計法の見直し 直接基礎の極限支持力算定式の見直し プレボーリング杭工法,鋼管ソイルセメント杭工法,パイプロ ハンマ杭工法の規定 場所打ち杭,中掘り杭,鋼管矢板基礎及び地中連続壁 基礎の支持力推定式の見直し
H24.3(2012)	道路橋示方書 IV 下部 構造編	従来よりも降伏点の高い鉄筋SD390,SD490を規定 橋台部ジョイントレス構造の設計を規定 橋台背面アプローチ部の規定 道路橋基礎に求められる基本事項を規定 回転杭工法の規定