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構造成立性について

平成29年8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構造成立性について

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. 代表検討断面の選定
8. 設計方針（鉄筋コンクリート）
9. 設計方針（鉄筋コンクリート）
10. 設計方針（止水ジョイント部）
11. 地盤の嵩上げ部（改良体），シートパイル，表層地盤改良の設計方針
12. まとめ

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Ss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，構造体の境界部等の止水性を維持し基準地震動Ss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（RC梁壁とSRC造の一体構造）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。

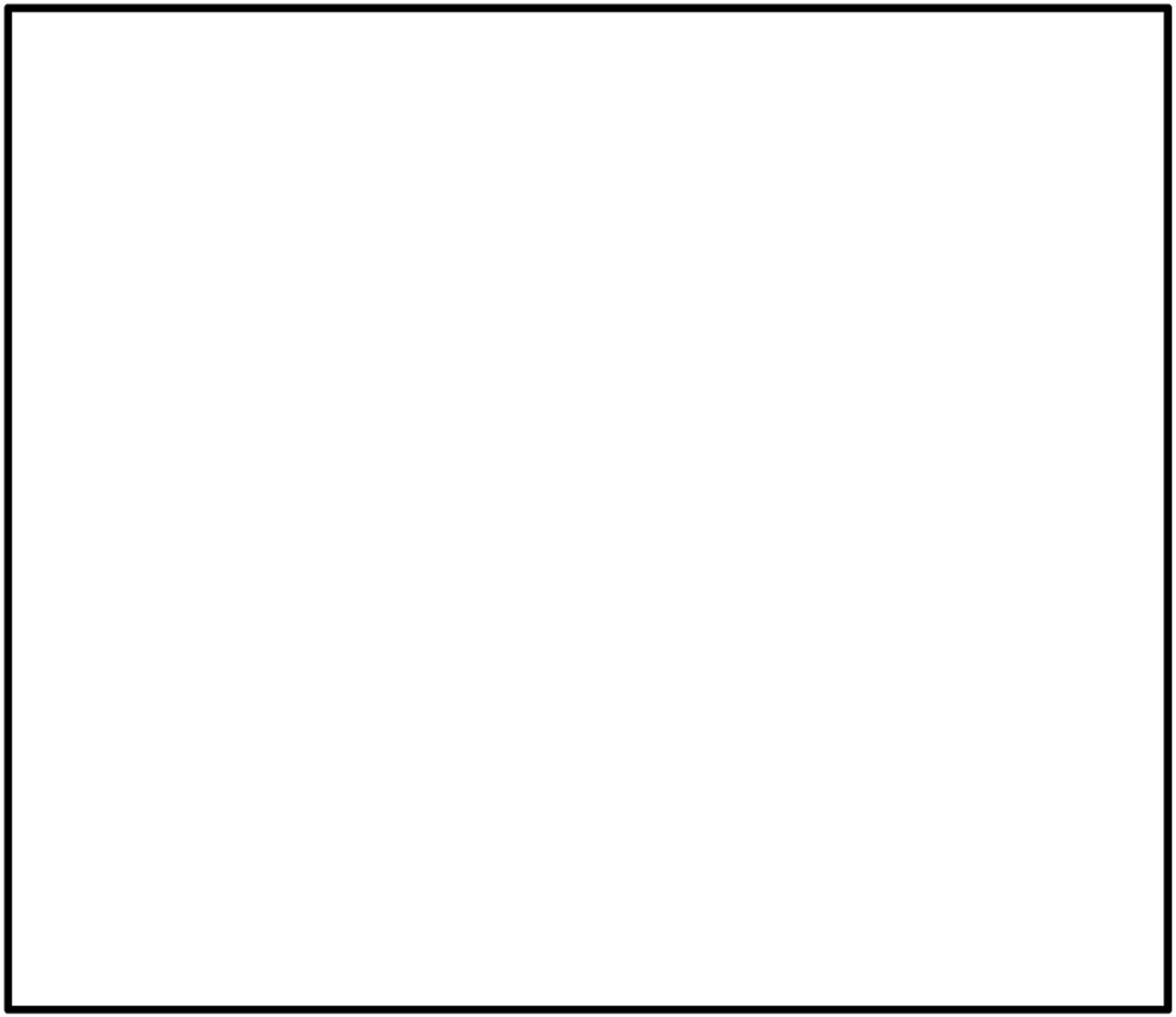
基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド
5. 施設・設備の設計・評価の方針及び条件
5.1 津波防護施設の設計
【規制基準における要求事項等】
津波防護施設については、その構造に応じ、波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性並びにすべり及び転倒に対する安定性を評価し、越流時の耐性にも配慮した上で、入力津波に対する津波防護機能が十分に保持できるよう設計すること。

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

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

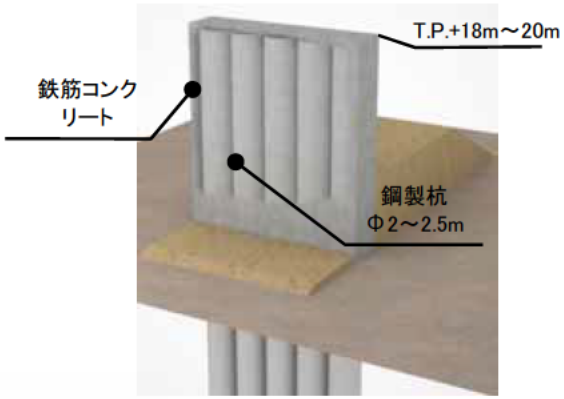
重大事故等対処施設
原子炉建屋
取水構造物（取水路，海水ポンプ室）
非常用海水系配管（屋外二重管）
SA用海水ピット取水塔
海水引込み管
SA用海水ピット
緊急用海水取水管
緊急用海水ポンプピット
格納容器圧力逃がし装置格納槽
常設低圧代替注水系格納槽
接続口
常設代替高圧電源装置置場
軽油貯蔵タンク
可搬型設備保管場所
緊急時対策所

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

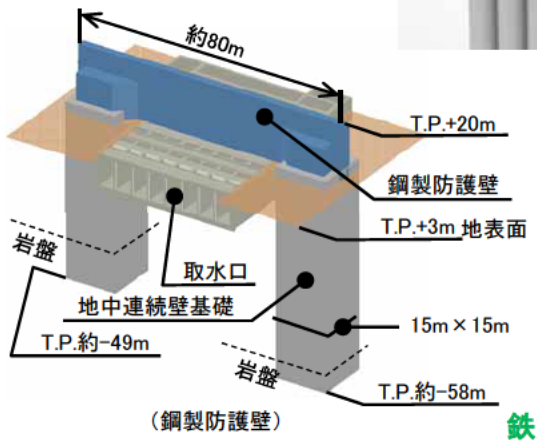
【　】は，耐震重要施設を支持する建物・構築物を示す。

4. 防潮堤の概要

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁

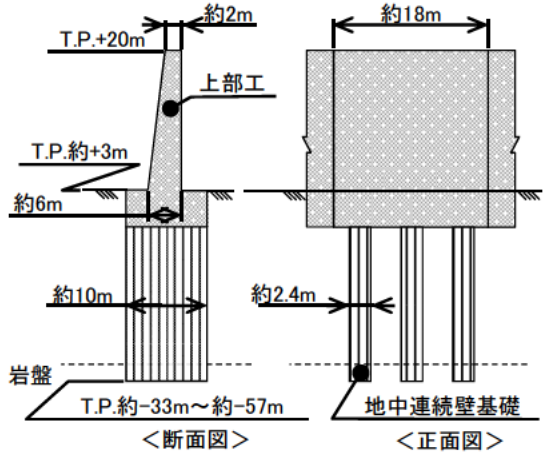


鋼製防護壁



（鋼製防護壁）

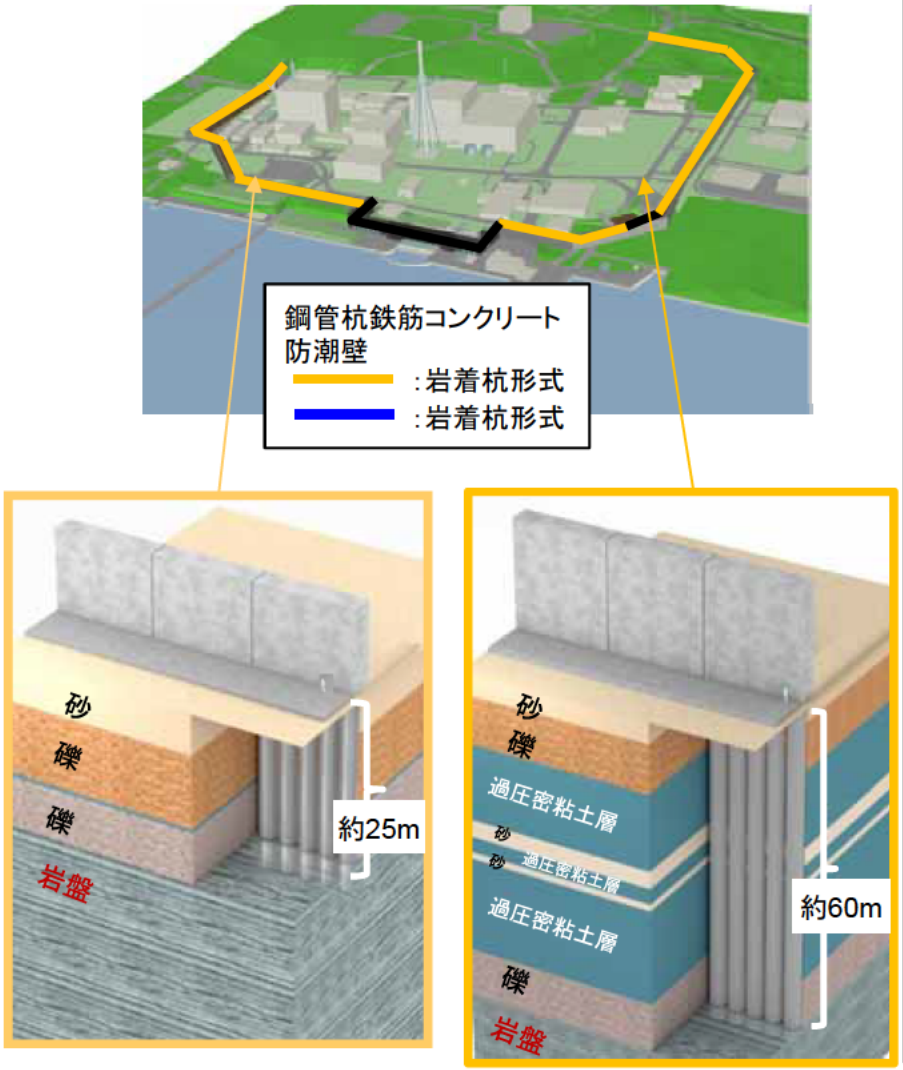
鉄筋コンクリート防潮壁



4. 防潮堤の概要（鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁）

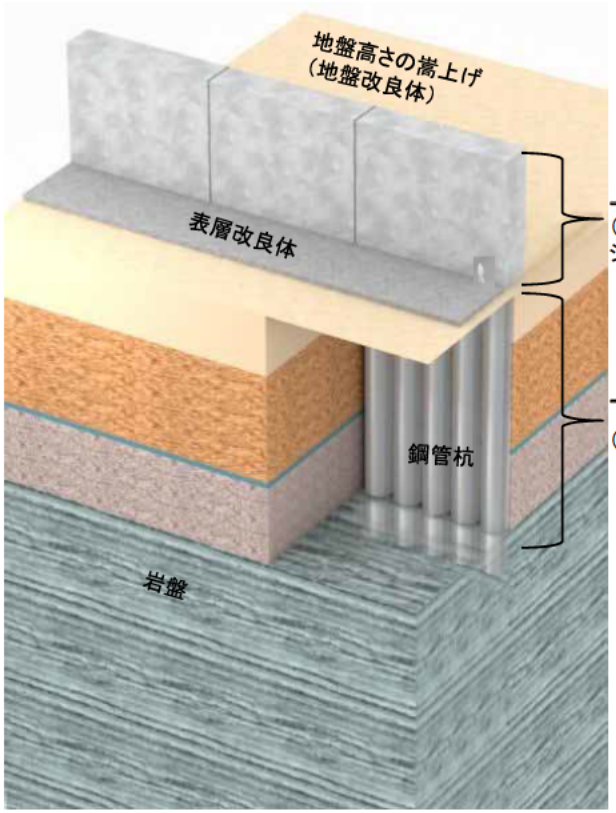
■ 防潮堤は，設計基準対象施設の津波防護対象設備（津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備及び非常用取水設備を除く。）の設置される敷地を含め，敷地全体を取り囲む形で設置する。
■ 敷地の第四系基底（岩盤上面）の標高分布及び防潮堤の構造形式とその配置を示す。

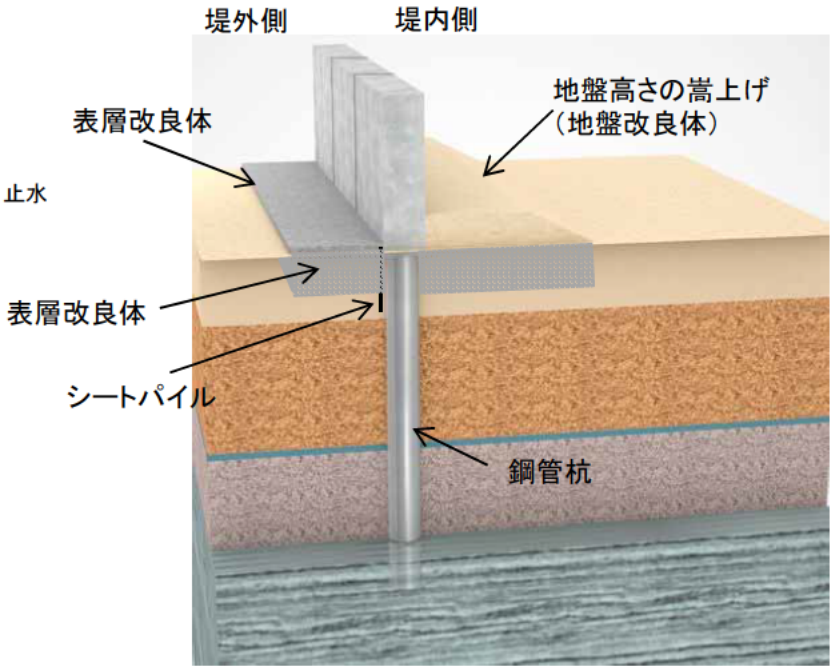
防潮堤鳥瞰図



5. 防潮堤の評価対象部位

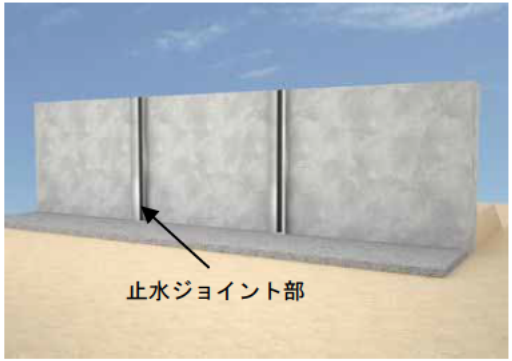
■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の評価対象部位を下図に示す。

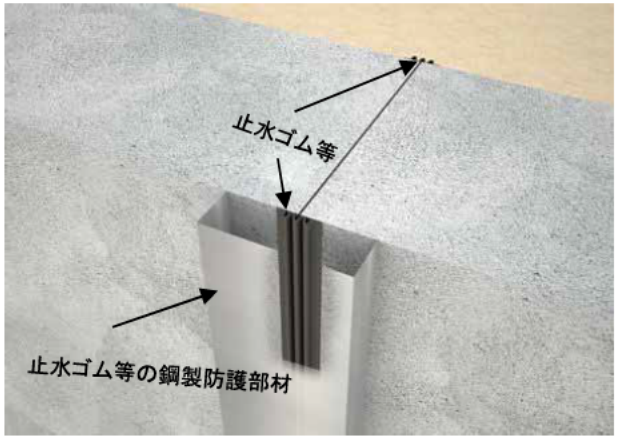




評価対象部位		役割
上部工	鉄筋コンクリート	止水機能の保持
	止水ジョイント部	施行ブロック間の止水機能
上部工 下部工	鋼管杭	津波・地震荷重に耐える構造躯体であり，上部工・下部工を兼ねる
表層改良体		洗掘防止
地盤高さの嵩上げ(改良体)		荷重に対する上部工の変位の抑制
シートパイル		ボイリング対策

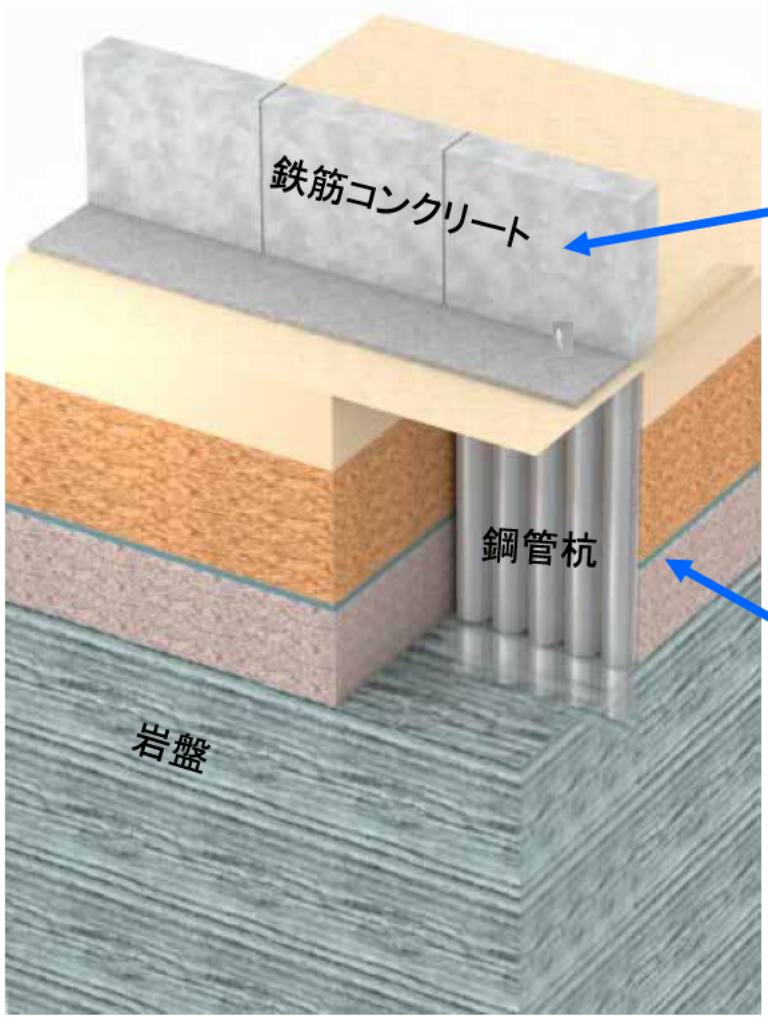
止水ジョイント部





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】

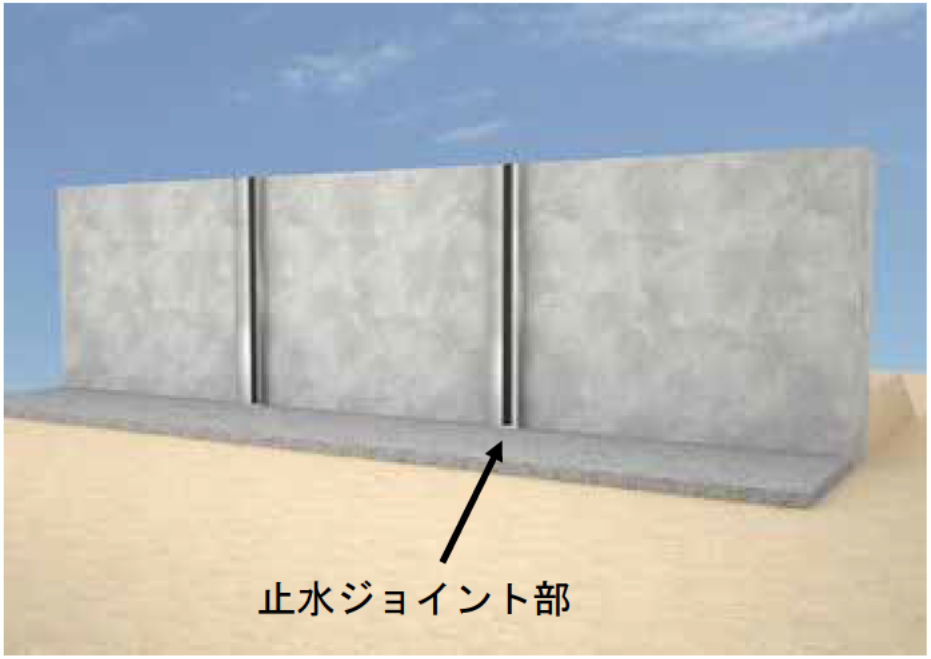
・津波荷重，漂流物衝突荷重等に対し耐える。
・津波による浸水を防止する。

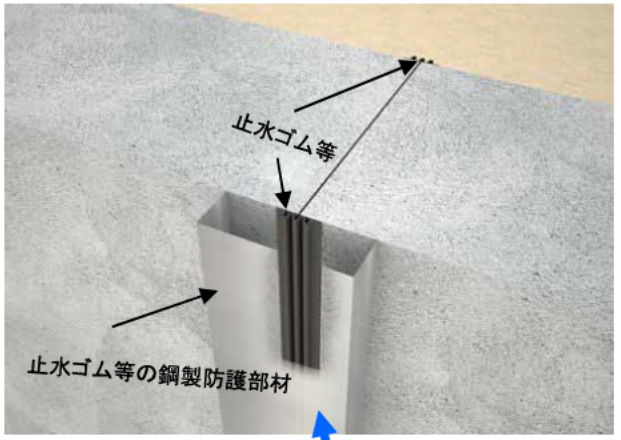
【鋼管杭】

・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



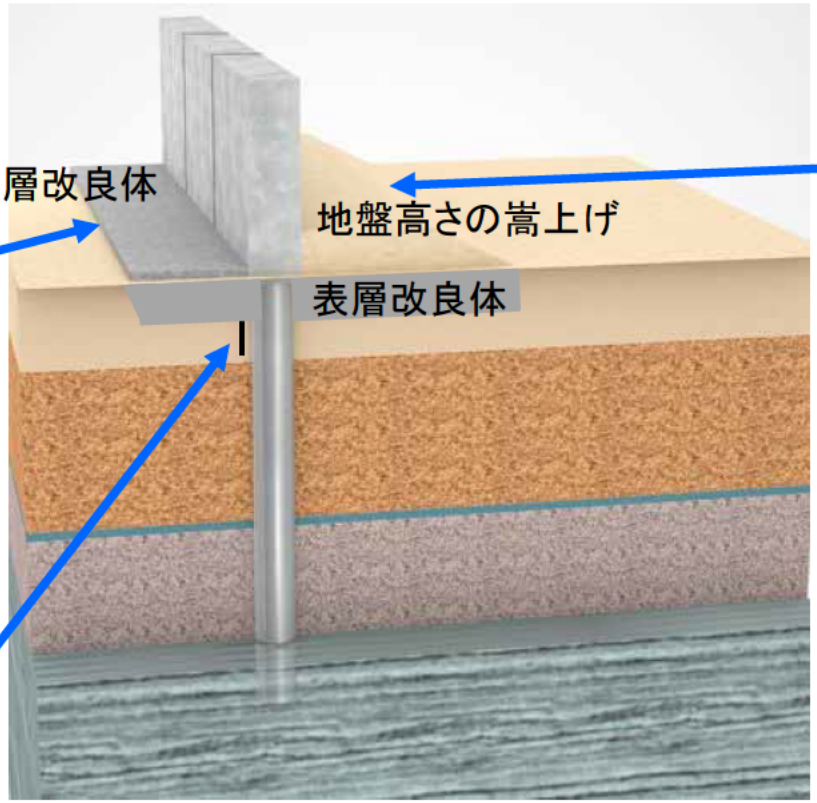


【止水ジョイント部】

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



【地盤高さの嵩上げ】

津波等の水平荷重が防潮壁に作用する際，防潮壁背面で受働抵抗を与える。

【表層改良体】

津波による防潮壁前面地盤の洗掘やボイリングを防止する。

【シートパイル】
地中からの浸水を防止する。

鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁に関する要求機能と設計評価方針

赤字：荷重条件
緑字：要求機能
青字：対応方針

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						上段:設計に用いる許容限界 下段:おおむね弾性の使用限界
	審査ガイド	要求機能	性能目標	機能設計方針	性能目標	構造強度設計 (評価方針)	評価対象部位		応力等の状態	損傷モード	
鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁	基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド 5.1 津波防護施設の設計 津波防護施設については、その構造に応じ、波力による慣性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。 (1)要求事項に適合する設計方針であることを確認する。 (2)設計方針の確認に加え、入力津波に対して津波防護機能が十分保持できる設計がなされることの見通しを得るため、以下の項目について、設定の考え方を確認する。確認内容を以下に例示する。 ① 荷重組合せ a)余震が考慮されていること。耐津波設計における荷重組合せ:常時＋津波、常時＋津波＋地震(余震) ② 荷重の設定 a)津波による荷重(波圧、衝撃力)の設定に関して、考慮する知見(例えば、国交省の暫定指針等)及びそれらの適用性。 b)余震による荷重として、サイト特性(余震の震源、ハザード)が考慮され、合理的な頻度、荷重レベルが設定される。 c)地震により周辺地盤に液状化が発生する場合、防潮堤基礎杭に作用する側方流動力等の可能性を考慮すること。 ③ 許容限界 a)津波防護機能に対する機能保持限界として、当該構造物全体の変形能力(終局耐力時の変形)に対して十分な余裕を有し、津波防護機能を保持すること。(なお、機能損傷に至った場合、補修にある程度の期間が必要となることから、地震、津波後の再使用性に着目した許容限界にも留意する必要がある。) 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド 6.3 津波防護施設、浸水防止設備等 津波防護機能を有する施設、浸水防止機能を有する設備及び敷地における津波監視機能を有する設備のうち建物及び構築物は、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動による地震力の組合せに対して、当該建物・構築物が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するとともに、その施設に要求される機能(津波防護機能、浸水防止機能)を保持すること	・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、地震後の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。 ・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、基準地震動S_sに対し、津波防護施設が要求される機能を損なう恐れがないよう、構造物全体としての変形能力(終局耐力時の変形)に対し、十分な構造強度を有した構造であることが要求される。	・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、地震後の繰返しの襲来を想定した遡上波に対し、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の設定及び構造体の境界部等への止水処置により止水性を保持することを機能設計上の性能目標とする。 ・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、基準地震動S_sに対し、主要な構造部材の構造健全性を維持することで、津波時の止水性を保持することを機能設計上の性能目標とする。	・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、地震後の繰返しの襲来を想定した遡上波に対し、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、 ①想定される津波高さに余裕を考慮した防潮堤高さ(津水高さTP.+15.4m～TP.+17.9m に余裕を考慮した天端高さTP.+18.0m～TP.+20.0m)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。 ②防潮堤の上部工は、原則として5本の上部構造の天端から連続する鋼製の杭を鉄筋コンクリートで一体化させた壁を構築し、止水性を保持する設計とする。 ③防潮堤は、鉄筋コンクリート製の上部構造と上部構造の天端から連続する鋼製の杭で、十分な支持性能を有する地盤に支持する設計とする。 ④上部構造の内側の地盤高さを嵩上げすることにより止水性を保持する設計とする。 ⑤上部構造の施工境界部や異種構造物間との境界部は、波圧による変形に追随する止水性を確保した止水ゴム等を設置することによる止水処置を講ずる設計とする。 ⑥津波の波力による浸食や洗掘、地盤内からの浸水に対して耐性を有する表層改良により、止水性を保持する設計とする。 ・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、基準地震動S_sに対し、 ⑦鋼製や鉄筋コンクリート製の耐性のある部材を使用することで止水性能を保持する設計とする。 ⑧上部構造は、杭を梁で連結させる構造とすることで変位を抑制し、鉄筋コンクリートによる止水性を保持する設計とする。 ⑨上部構造の施工境界部や異種構造物間との境界部は、試験等により地震時の変形に追随し止水性を確認した止水ゴム等を設置することによる止水処置を講じる設計とする。 ⑩上部構造の内側の地盤高さの嵩上げが地震時に滑動・内部すべりを起こさない幅や強度を確保することで、津波時における止水性を保持する設計とする。 ⑪表層改良は、セメント系の改良体とすることで、地震時に損壊しない設計とする。 ⑫シートパイルは、鋼材を連結し連続する構造とし、ボイリングによる地中からの止水性を保持する設計とする。	・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、鋼製の杭、鉄筋コンクリート製の上部構造、地盤高さの嵩上げ、セメント系の表層改良体で構成し、津波後の再使用性を考慮し、主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とし、十分な支持性能を有する地盤に設置する設計とするとともに、主要な構造体の境界部や防潮壁前面の地盤には、止水ゴム等や表層改良体を設置し、有意な漏えいを生じない設計とすることを構造強度設計上の性能目標とする。 ・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は、基準地震動S_sによる地震時荷重に対し、鋼製の杭、鉄筋コンクリート製の上部構造、地盤高さの嵩上げ、セメント系の表層改良体で構成し、津波時においても主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とするとともに、主要な構造体の境界部や防潮壁前面の地盤には、止水ゴム等や表層改良体を設置し、有意な漏えいを生じない設計とすることを構造強度設計上の性能目標とする。	基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、十分な支持性能を有する地盤に支持される設計とするため、作用する押し込み力や引抜力が許容支持力以下に留まることを確認する。	下部工	基礎地盤	押込力、引抜力	支持機能を喪失する状態	「道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編」を踏まえ、極限支持力以下とする。 極限支持力以下
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とするために、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。 降伏応力度以下
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とするために、構造部材である鉄筋コンクリートが、おおむね弾性状態に留まることを確認する。	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	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
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とするために、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確認する。		鋼管杭(鋼管杭鉄筋コンクリート)	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」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
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、主要な構造部材の構造健全性を保持する設計とするために、主要な構造体の境界部に設置する部材を有意な漏えいを生じない変形に留める設計とするため、境界部に設置するゴムジョイント、シートジョイントが有意な漏えいを生じない変形量以下であることを確認する。 また、止水ゴム等が止水性能を保持するための係止アンカーや鋼製防護部材は、おおむね弾性状態に留まることを確認する。		止水ジョイント部	止水ゴム等	変形、引張り	有意な漏えいに至る変形、引張り	メーカー規格及び基準並びに必要に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。 メーカー規格及び基準並びに必要に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。
								鋼製アンカー	引張り、せん断、引抜き	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「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	部材が弾性域に留まらず塑性域に入る状態	「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
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、地盤として滑動しない抵抗性を保持する設計とするため、地盤高さの嵩上げ部底面が滑動しないこと及び受動領域角にすべりが発生しないことを確認する。	地盤高さの嵩上げ(改良体)		すべり(滑動)	地盤高さの嵩上げ部の底面が滑動に至る状態、上部構造背面の地盤がすべりに至る状態	「道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編・Ⅳ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
						基準地震動S_sによる地震時荷重、地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重、余震や漂流物の衝突、風及び積雪を考慮した荷重に対し、洗掘防止対策やボイリング対策としての機能を保持するため、表層改良体にせん断破壊が生じないことを確認する。	表層改良体		せん断	表層改良体がせん断破壊に至る状態	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
						基準地震動S_sによる地震時荷重に対し、ボイリング対策としての機能を保持するため、鋼矢板にせん断破壊が生じないことを確認する。	シートパイル		せん断	部材がせん断破壊に至る状態	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

構造成立性を確認するための地震動は、基準地震動S_sのうち構造物への影響が大きいことを確認した2波(S_s-D1及びS_s-31)とする。

6. 照査項目と設計方針

鋼管杭の設置目的

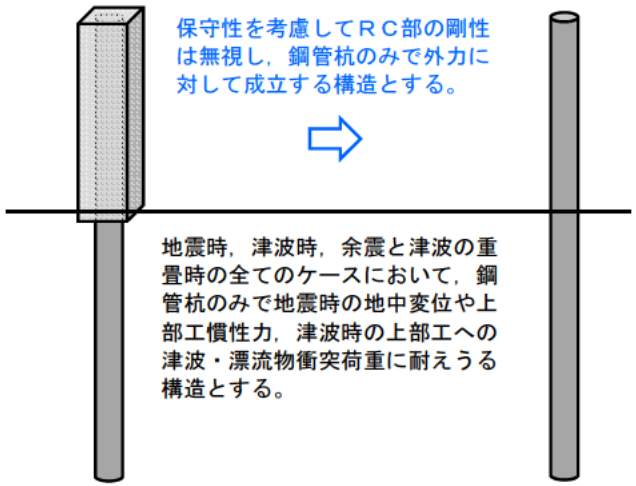
地震時や津波時の荷重に対する防潮壁としての構造健全性を確保する。

■ 下部工は鋼管杭，上部工はRC梁壁･SRC一体構造で構築されるが，保守性を考慮してRC部の剛性は無視し，鋼管杭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（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）
支持地盤	支持力	極限支持力以下	道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）

【保守性を考慮した設計】

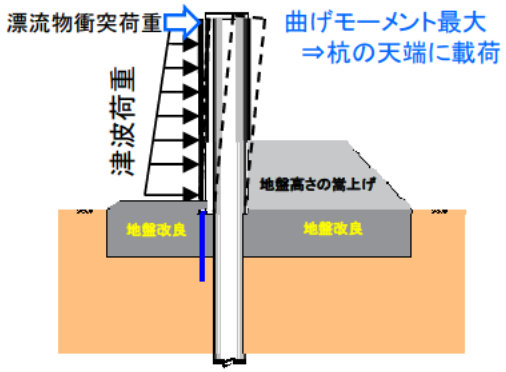


(1) 基準地震動Ｓｓによる地震荷重
鋼管で躯体慣性力，地中変位に対して短期許容応力度以下であることを確認する。

(2) 津波荷重＋漂流物衝突荷重
鋼管の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】

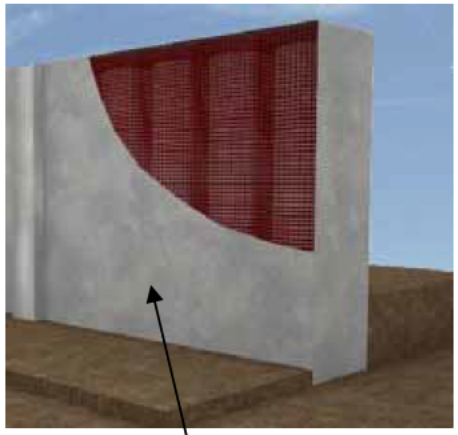


例：津波荷重+漂流物衝突荷重

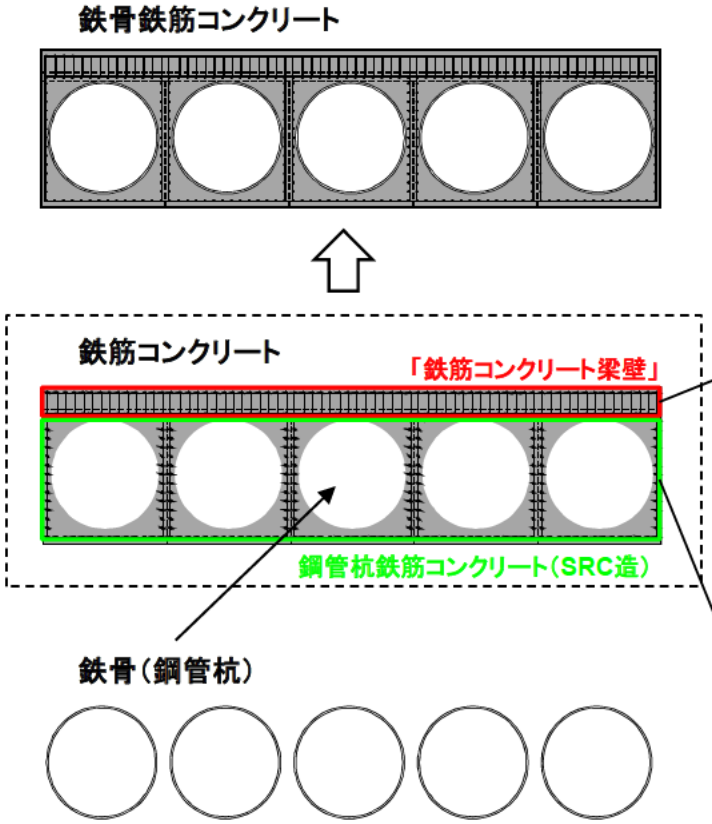
鉄筋コンクリート

鉄筋コンクリート梁壁の設置目的　津波に対する止水性を確保し，津波波圧や漂流物衝突荷重によるせん断力を全て受け持てるよう，SRC造の前面に一体化した鉄筋コンクリート梁壁を設置する。

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（Ⅰ共通編・Ⅴ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）



SRC造の前面に一体化した鉄筋コンクリート梁壁のみでも止水性を確保（実際には，RC梁壁とSRC造は一体であり，両方とも止水性を有する（二重の止水効果））



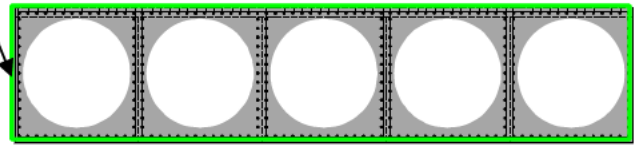
【保守性を考慮した設計】

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（RC梁壁）」と背面にある「鋼管杭鉄筋コンクリート（SRC造）」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必要鉄筋量を配置する。

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についても検討する。

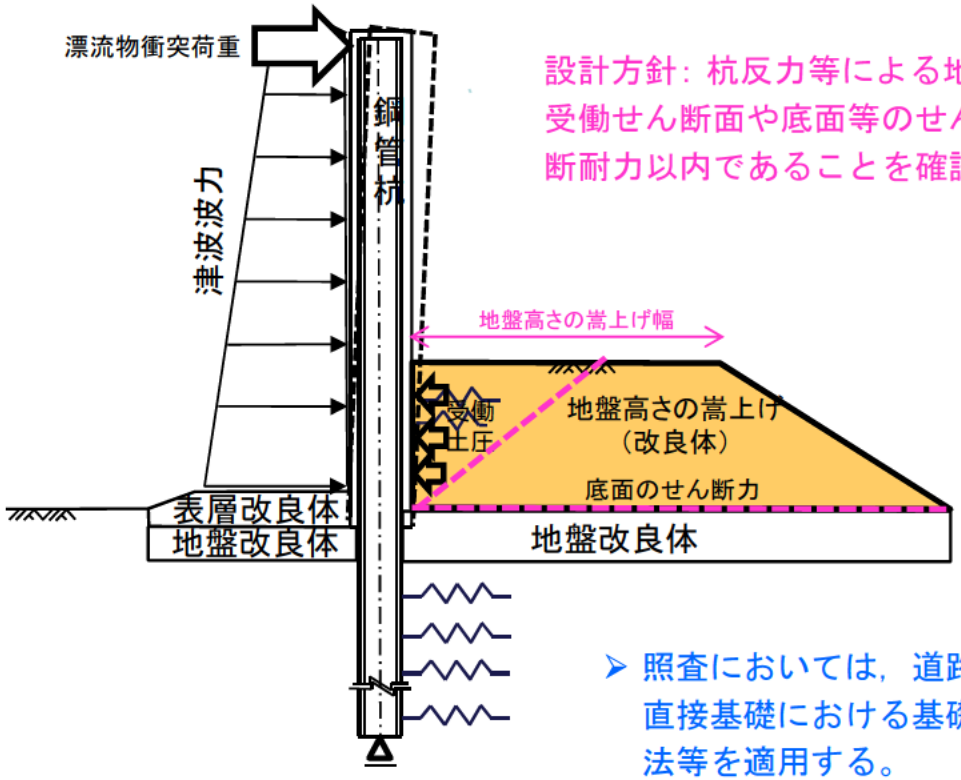


地盤高さの嵩上げ

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
せん断	地盤高さの嵩上げ部（改良体）の受動せん断面や底面等のせん断力がせん断耐力以内	改良体のせん断耐力以内	道路橋示方書Ⅳ下部工編 耐津波設計に係る工認審査ガイド



設計方針：杭反力等による地盤高さの嵩上げ部の受働せん断面や底面等のせん断力が改良体のせん断耐力以内であることを確認する。

- 照査においては，道路橋示方書・同解説Ⅳ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等を適用する。

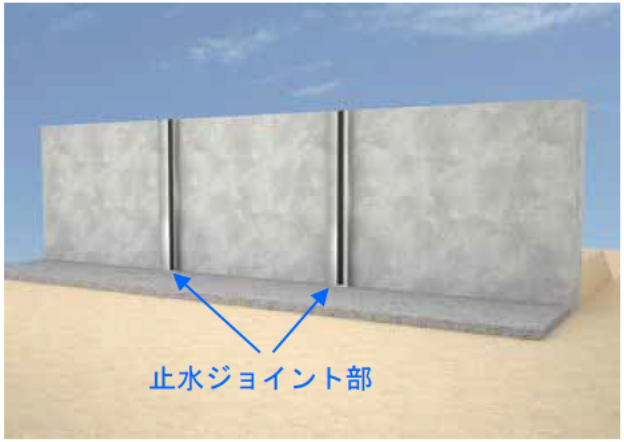
止水ジョイント部

止水ジョイント部の目的

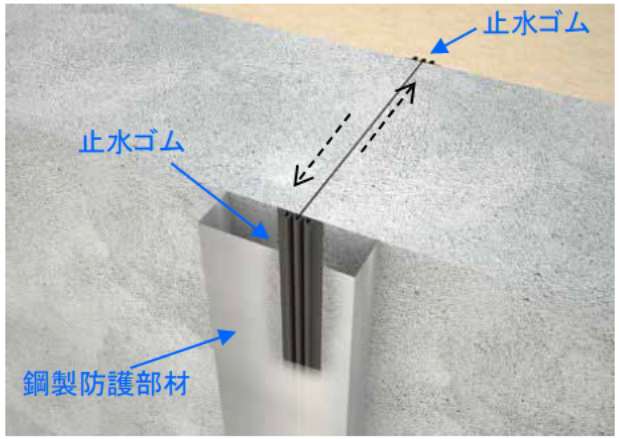
地震時や津波時の変形量に追随し，防潮壁間や異種構造物間の止水を図る。

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に応じて実施する性能試験
鋼製アンカー	• 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

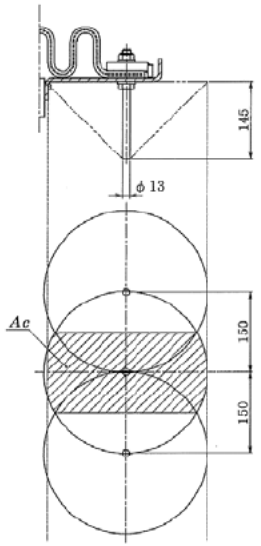
止水ジョイント部



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浸透圧に対して，表層地盤の改良等で対応し，堤内への浸水を防止する。

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

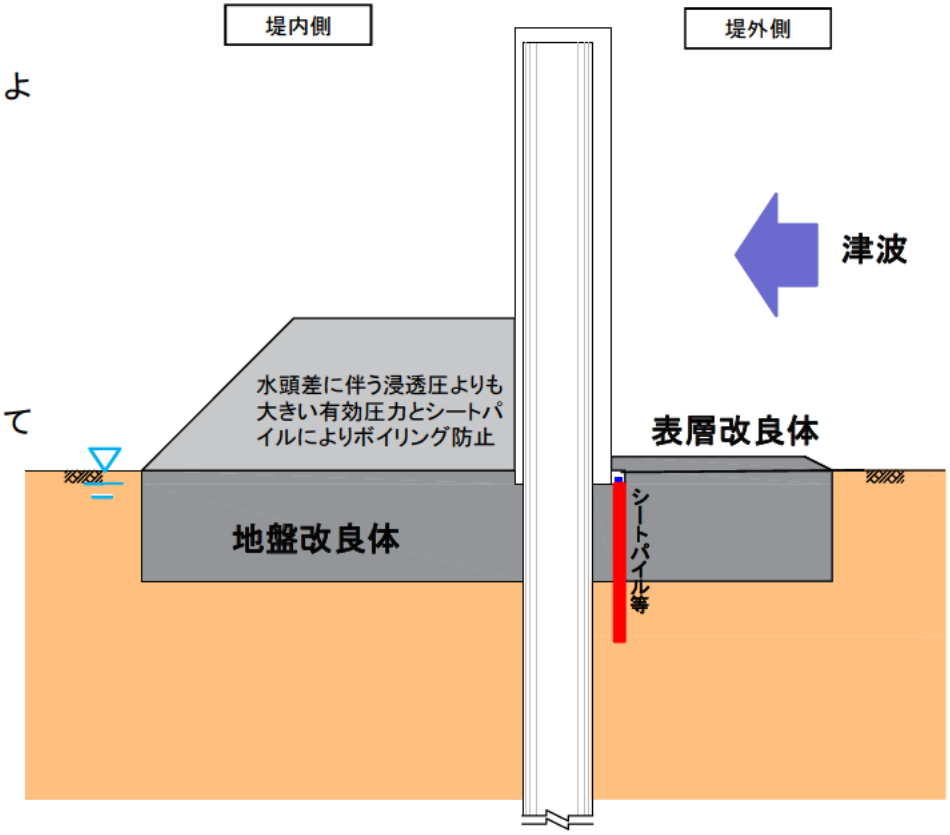
  堤外地盤の表層に対してセメント改良を実施し，津波波力よりも強度の高い地盤とすることで，洗掘防止対策とする。

$$P_{max} < q_u/2$$

（P_{max} ：津波波力，
q_u ：改良体の一軸圧縮強度）

- 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。



シートパイル等

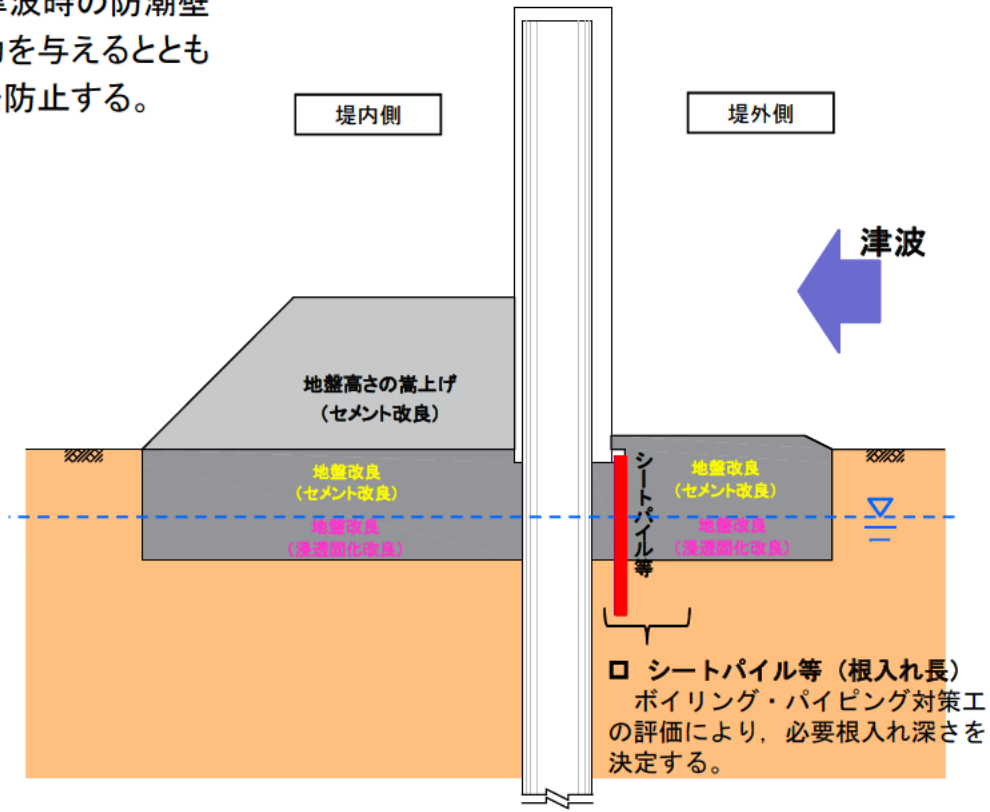
シートパイル等の目的

ボイリング対策として，津波時の防潮壁前面と背面の水位差によって，堤内側に上向きの浸透流が生じ，この浸透圧が堤内側の有効重量を超えることを防止する。

対象	照査項目	設計で用いる許容限界
シートパイル等	シートパイル等のせん断	安全裕度を考慮したせん断強度以下

- ボイリング検討

地盤高さの嵩上げ部や表層改良体により，津波時の防潮壁内外の水頭差に伴う浸透圧よりも大きい有効圧力を与えるとともに，シートパイル等を設置することで，ボイリングを防止する。



ロ シートパイル等（根入れ長）
ボイリング・パイピング対策工の評価により，必要根入れ深さを決定する。

7. 代表検討断面の選定

代表断面選定における着目点と代表断面の選定結果

■東二の地質の特徴や遡上津波の特性，防潮堤の設置位置を踏まえ，考慮が必要な着目点を抽出し，それらを網羅的に考慮したパラメータスタディを行う。

NO.	着目点	概要	選定される地点
1	過圧密粘土層の層厚の影響	防潮堤は敷地全域に渡り設置されるが，地質調査は全てのエリアを十分に網羅していない可能性を考え，地質分布の不確かさを考慮して，特に過圧密粘土層の層厚の変化が地震応答解析へ与える影響を評価する。	過圧密粘土層が厚く分布している地点，薄く分布している地点を選定する。 地点①，地点②，地点③
2	岩盤の深度（下部工長さ）	敷地の岩盤上面深度は，敷地南部では約T.P.−15mであり，北部では約T.P.−60mであることから，構造物の設置位置により，構造物直下の岩盤深度の差異が地震応答解析に与える影響を評価する。	岩盤深度が深い地点および浅い地点を選定する。 岩盤深度が深い地点 地点①，地点②，地点③ 岩盤深度が浅い地点 地点⑤
3	岩盤の傾斜	敷地の第四系は概ね水平に堆積しているが，岩盤上面の深度が変化する区間が存在するため，岩盤の傾斜による構造物への影響を検討する必要がある。 傾斜による地盤の差異が構造物へ影響を与える影響を評価する。	岩盤の傾斜が急であるほど，1ユニット内における杭の応答の差異及び上部工への影響の可能性が考えられることから，傾斜角が最も大きい地点を選定する。 地点④

一次元応答解析に基づく地表面の応答値

地点	最大相対変位量（cm）	最大応答加速度（cm/s2）
①	20	500
②	20	500
③	20	600
④	7	750
⑤	5	800

代表断面の選定

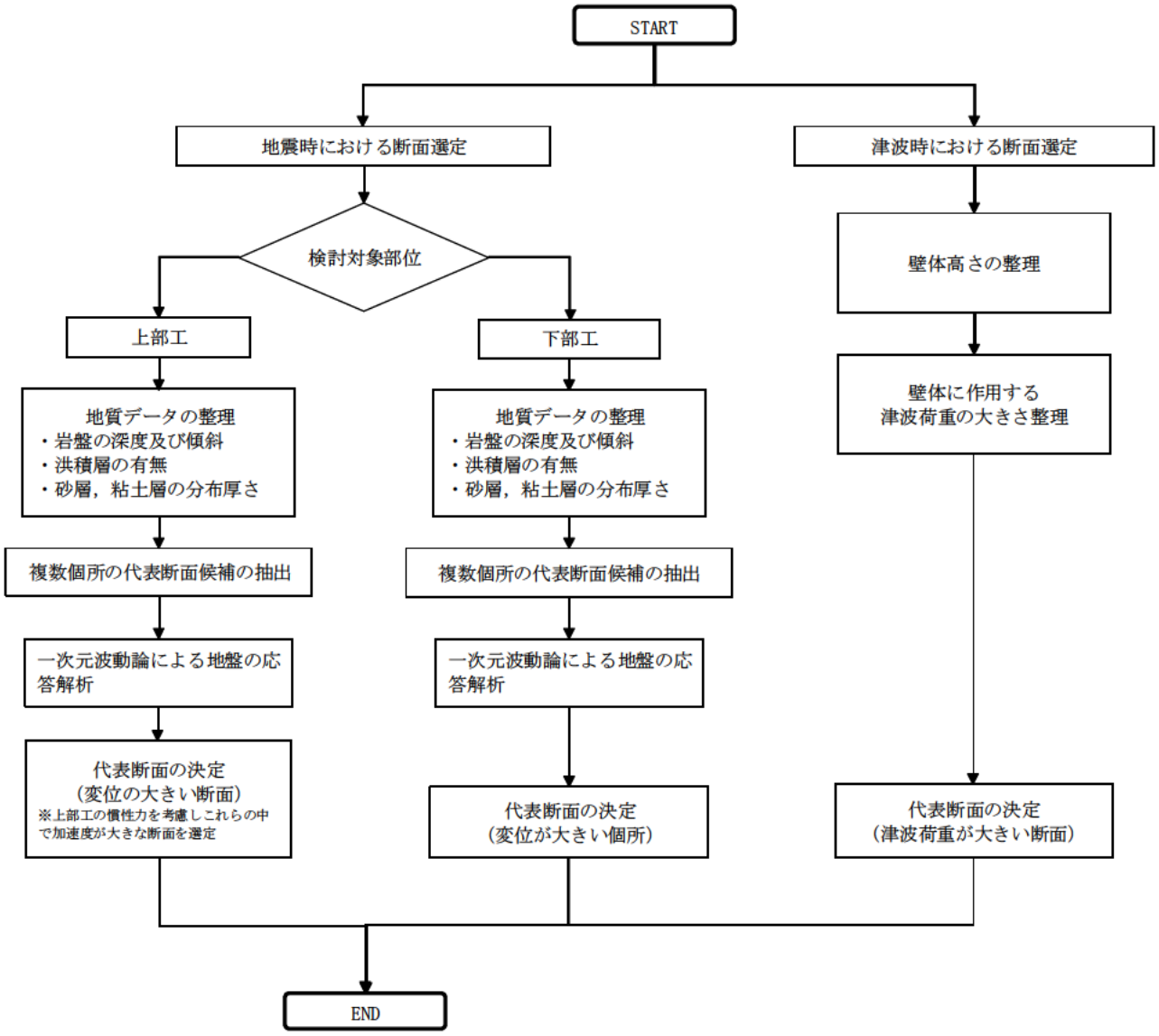
（1）津波時

上部工長さが最も長く，津波波力が最も大きい汀線沿いの**断面③**が代表断面となる。

（2）地震時

- 上部工：杭長が最も長く，地盤の変位量・加速度が最も大きくなる**断面③**が代表断面となるが，岩盤傾斜の影響を考慮し**断面④**の検討も実施する。
- 下部工：地盤の変位量が最も大きい**断面③**が代表断面となる。

評価断面選定フロー

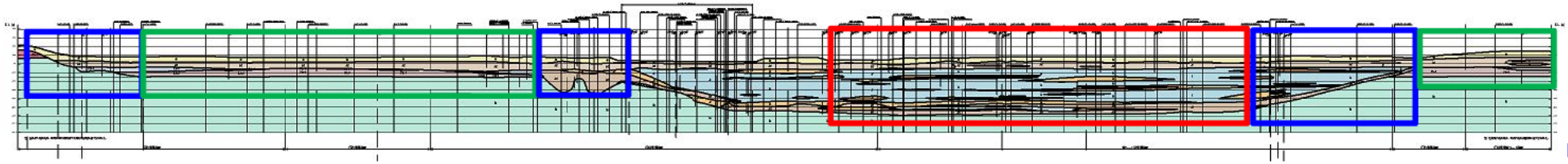


- 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は敷地の全域に渡り設置することから，岩盤の深度や地質分布の不確かさを考慮して，種々の解析条件で評価を行う。
- 敷地の地質・地質構造の特徴や遡上津波の特性等を踏まえ，地震時及び津波時において防潮堤に作用する荷重の相違や，防潮堤の基礎の地質等の相違により，防潮堤へ与える影響が異なると考えられるため，構造成立性評価に当たっては代表となる断面を選定する。
- 津波時については，津波高さによって判別し，設計用波圧の大きいものを代表断面とする。
- 地震時については，上部工と下部工で個別に設定する。地質データの整理から複数の代表断面候補を抽出し，一次元波動論による地震動の引き上げ計算を実施し，変位の大きい個所を代表断面とする。上部工については，最大加速度を慣性力として用いるため，選ばれた断面の加速度が最大であるかを確認した後，代表断面とする。

代表検討断面（候補地点）

- 代表断面における着目点および評価断面の選定フローに基づき、検討断面として地点①～地点⑤を選定した。

緑線：洪積層分布区間（岩盤が浅部に存在）
赤線：砂層，粘土層分布区間（岩盤が深部に存在）
青線：岩盤傾斜部



地質データの整理(過圧密粘土層の層厚)

地 質 構 成 表

地質時代		地質区分		記号	岩相	備考
第四紀	完新世	砂丘砂層		du	砂	敷地全体に広く分布する。
		沖積層	a2	Ag2	砂礫	敷地全体に広く分布する。
			a1	Ac	粘土	久慈川が侵食した凹状の谷を埋めて分布する。
				As	砂	
				Ag1	砂礫	
	更新世	段丘堆積物	D2	D2c-3	シルト	敷地南部に分布する。
				D2s-3	砂	
				D2g-3	砂礫	
				D2c-2	シルト	
				D2g-2	砂礫	
			D1	lm	ローム	敷地南西部に分布する。
				D1c-1	シルト	
				D1g-1	砂礫	
新第三紀	鮮新世	久米層		Km	砂質泥岩	敷地の基盤岩である。

不整合

:液状化検討対象層

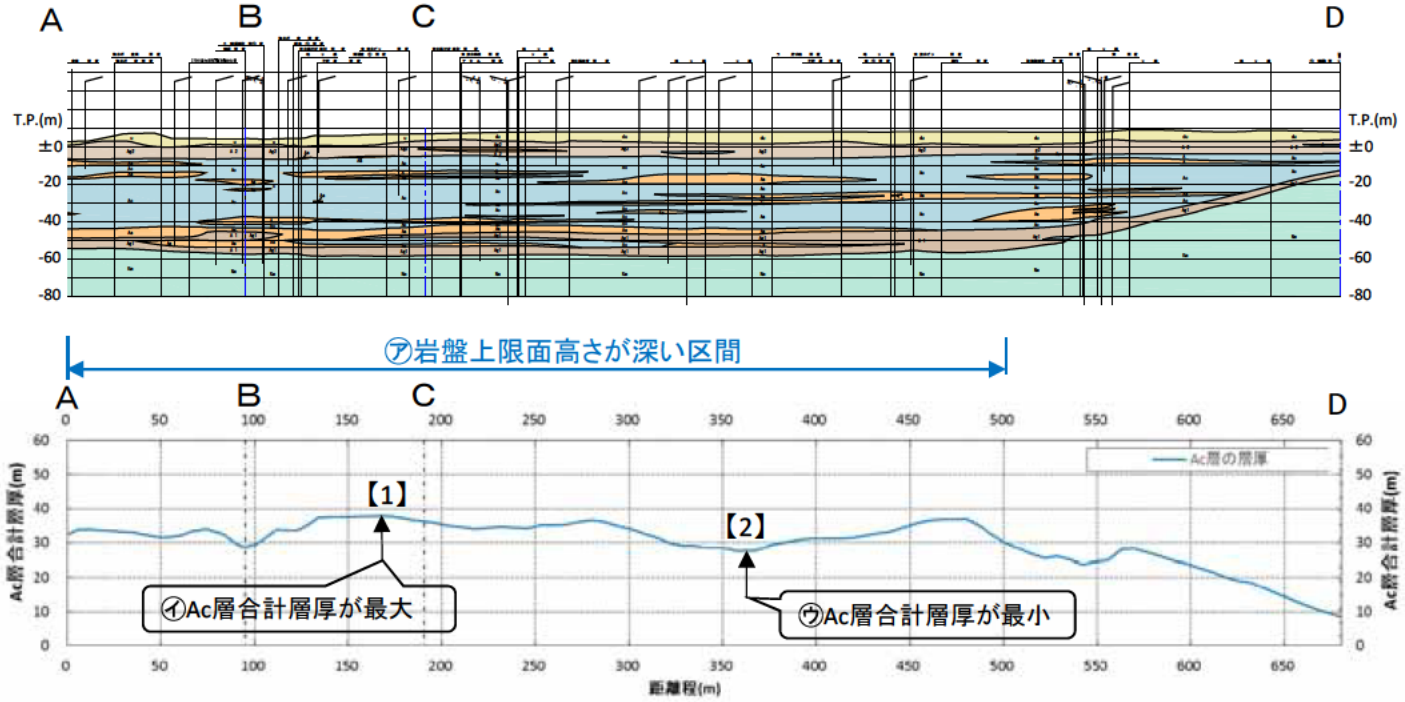
■ 過圧密粘土層(Ac層)の厚さについて

過圧密粘土層(Ac層)が厚く分布している区間(第四紀層の層厚が厚い北側エリア)を対象として検討した.

㋐ 非液状化層である過圧密粘土層(Ac層) が厚く分布し, 岩盤上限面高さが深い(T.P.約－57m～T.P.約－58m)の区間において検討する.

㋑ ㋐の区間において, 非液状化層であるAc層の合計層厚が最大となる断面を選定.

㋒ ㋐の区間において, 非液状化層であるAc層の合計層厚が最小, すなわち液状化検討対象層厚がほぼ最大となる断面を選定.



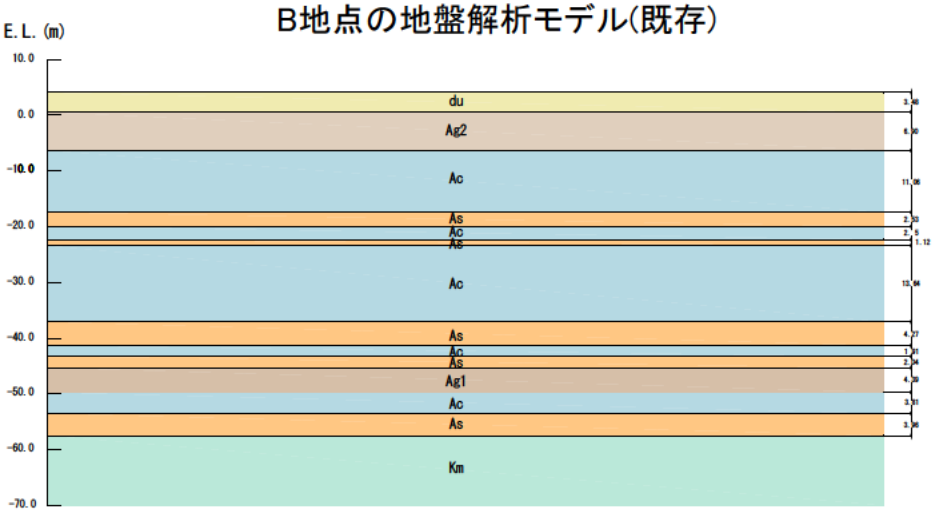
地質データの整理(過圧密粘土層の層厚)

■地盤解析モデル

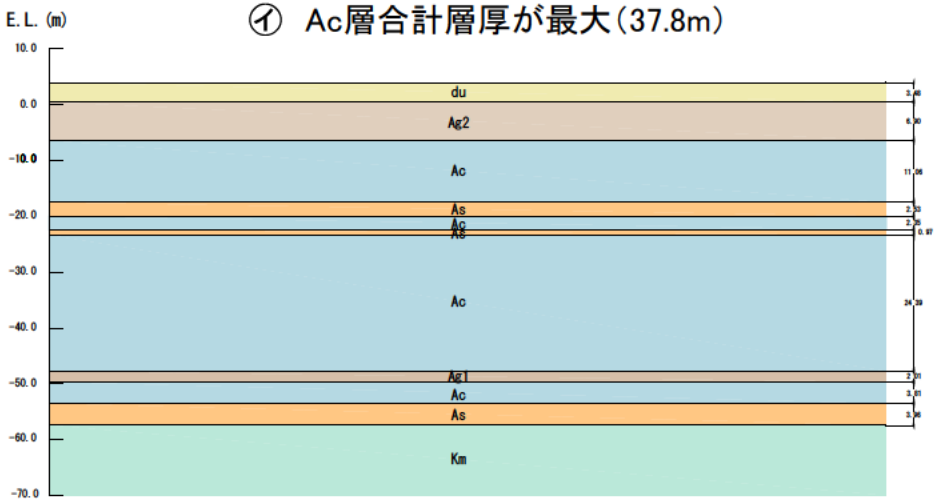
- 液状化による影響が最も大きいと考えられる※ B地点の地盤解析モデルを用いて，Ac層合計層厚を最大値・最小値に修正した地盤解析モデルを作成する。

※液状化による影響が大きいと考えられる条件
- ・岩盤の上限面の高さが深い区間
- ・液状化検討対象層の分布層厚が最も厚い位置
- ・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の単位長さ当りの重量が重い区間

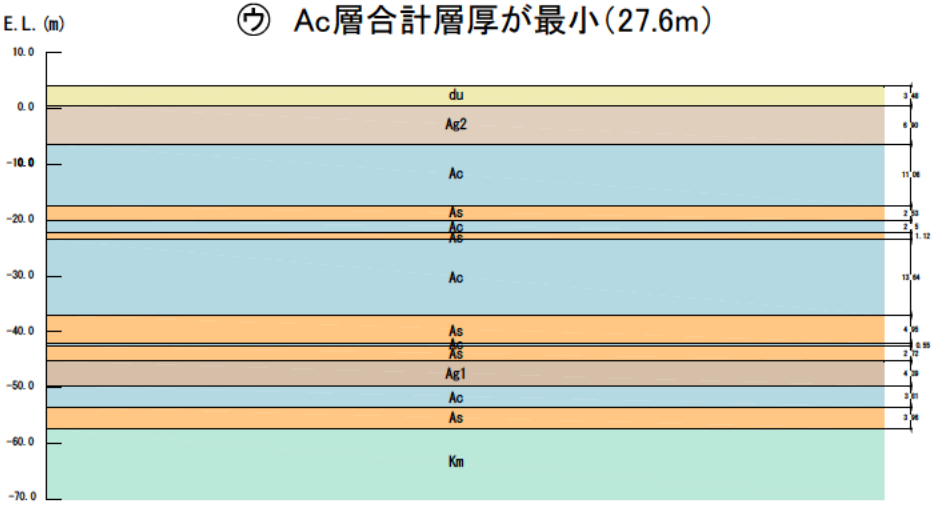
B地点の地盤解析モデル(既存)



㋑ Ac層合計層厚が最大(37.8m)



㋒ Ac層合計層厚が最小(27.6m)



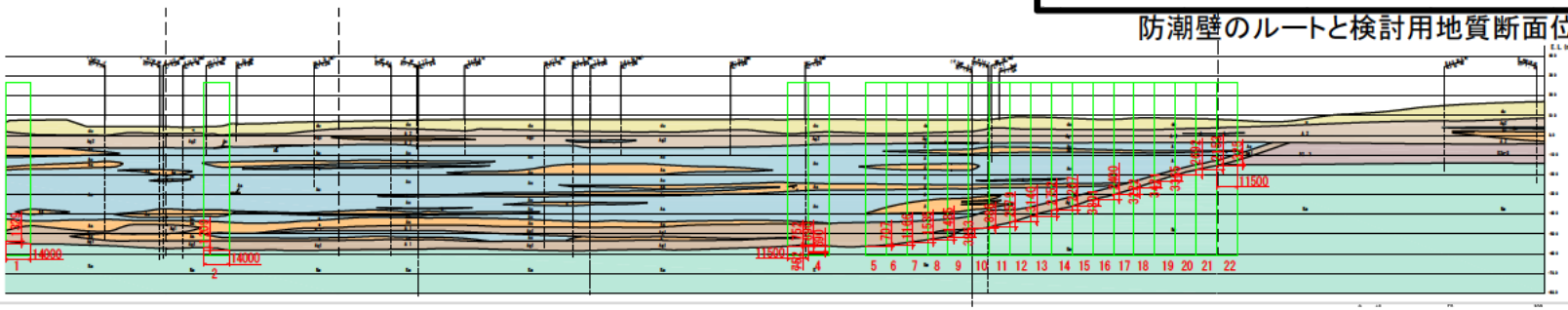
地質データの整理(岩盤の傾斜角)

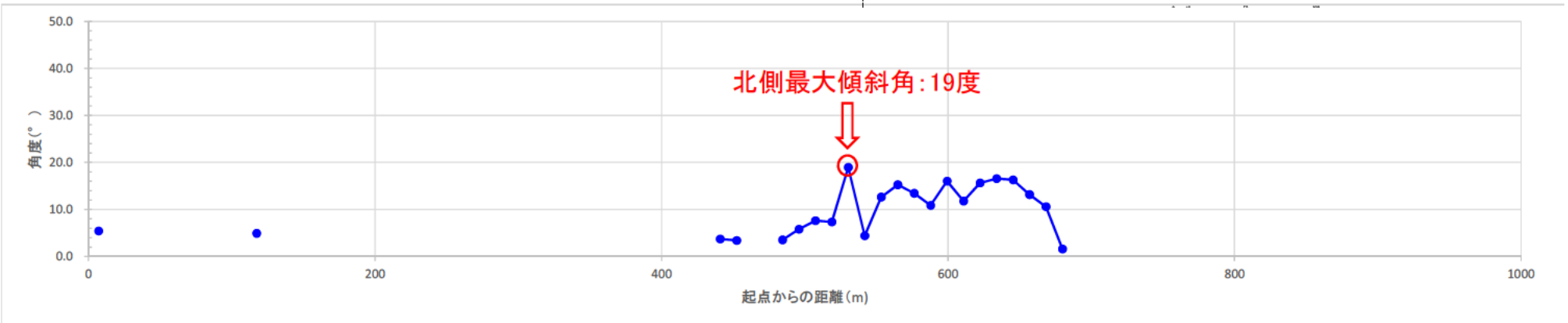
・ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の北側区間において，基礎岩盤の傾斜分布を整理した結果を示す。

防潮壁のルートと検討用地質断面位置

【北側断面】

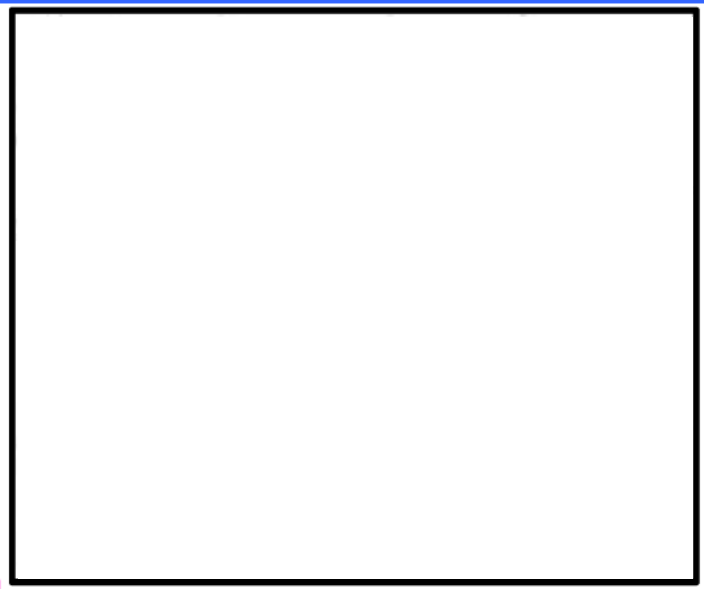
φ2500mm　幅14m　　φ2000mm　幅11.5m





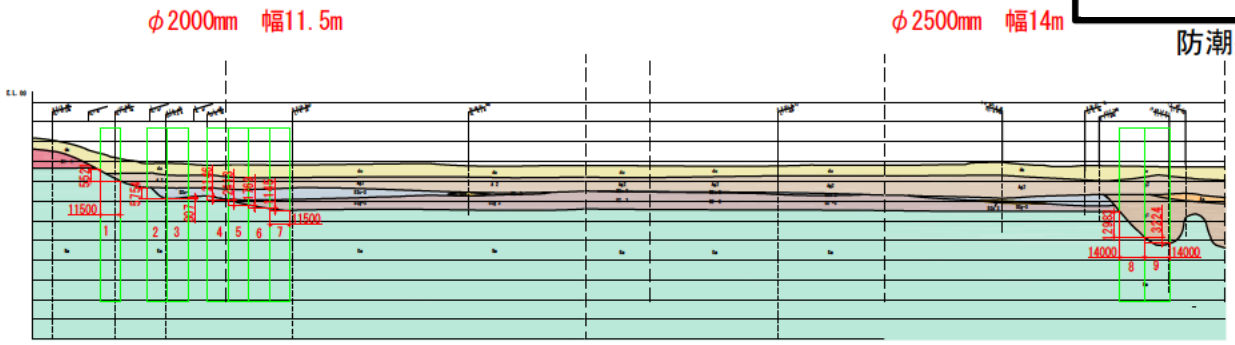
地質データの整理(岩盤の傾斜角)

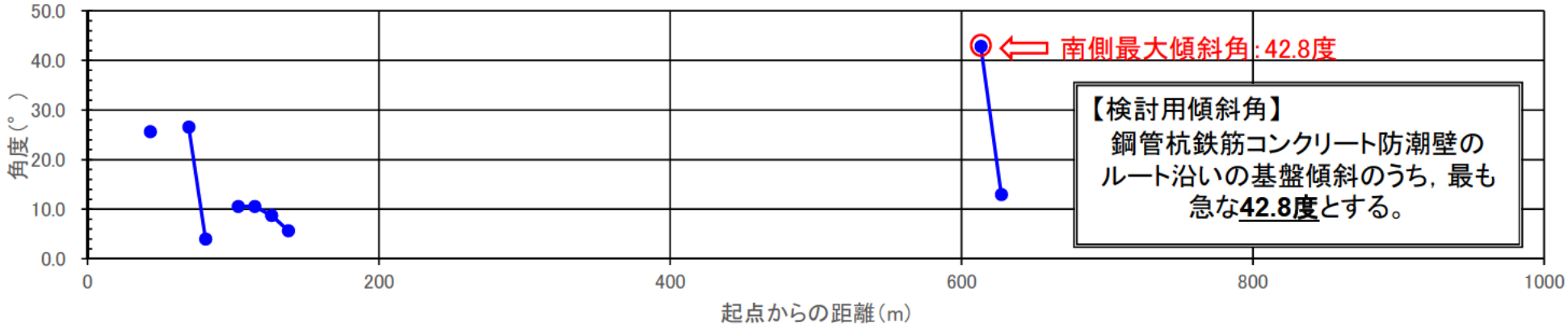
・ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の南側区間において，基礎岩盤の傾斜分布を整理した結果を示す。



防潮壁のルートと検討用地質断面位置

【南側断面】





【検討用傾斜角】
鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁のルート沿いの基盤傾斜のうち，最も急な**42.8度**とする。

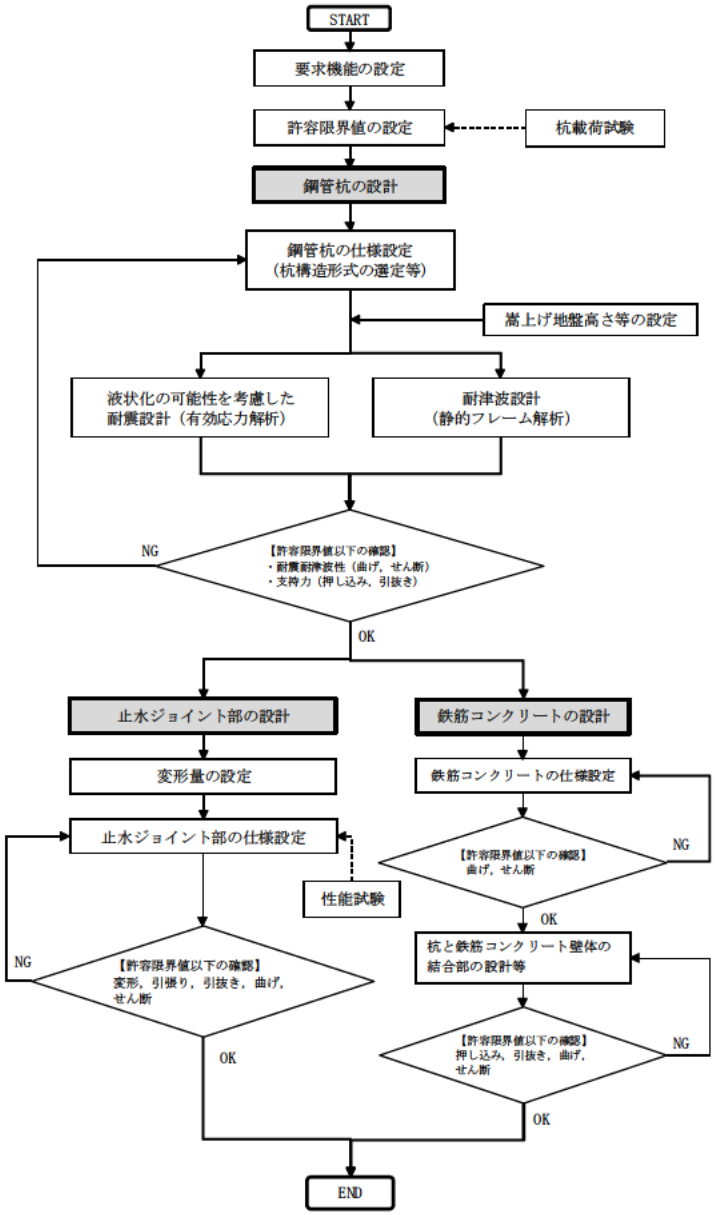
8. 設計方針（鋼管杭）

8. 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。

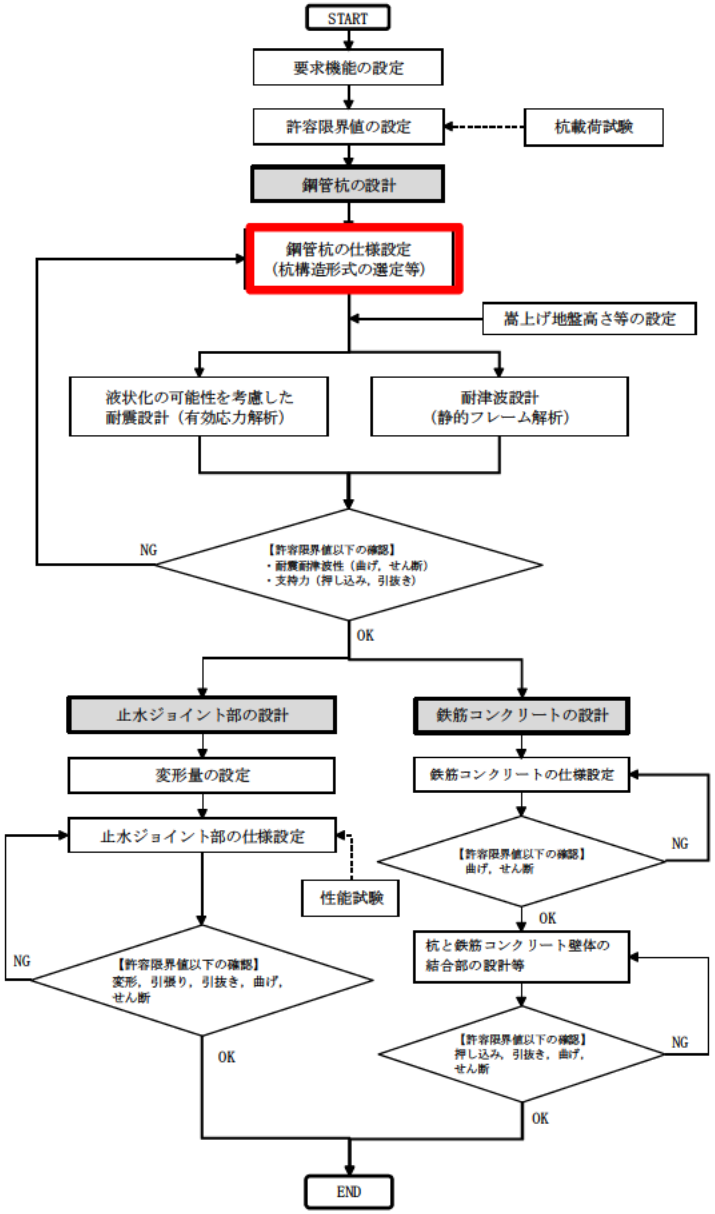
評価対象部位			設計荷重	応力等の状態	設計に用いる許容限界 （上段：設計に用いる許容限界，下段：概ね弾性の使用限界）
下部工	基礎地盤		基準地震動Ssによる地震時荷重，地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重，余震や漂流物の衝突，風及び積雪を考慮した荷重	押込力，引抜力	「道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）」を踏まえ，極限支持力以下とする。
					極限支持力以下
	鋼管杭			曲げ，せん断	「道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）」を踏まえた短期許容応力度以下とする。
					降伏応力度以下
上部工	鉄筋コンクリート（鉄筋コンクリート梁壁）			曲げ，せん断	「道路橋示方書・同解説（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。（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（Ⅰ共通編・Ⅳ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に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，せん断	「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
地盤高さの嵩上げ（改良体）				すべり（滑動）	「道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ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，すべり安全率以下とする。
					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
シートパイル			基準地震動Ssによる地震時荷重	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

8. 設計方針(鋼管杭)


START
要求機能の設定
許容限界値の設定
杭載荷試験
鋼管杭の設計
鋼管杭の仕様設定
(杭構造形式の選定等)
嵩上げ地盤高さ等の設定
液状化の可能性を考慮した
耐震設計(有効応力解析)
耐津波設計
(静的フレーム解析)
NG
【許容限界値以下の確認】
・耐震耐津波性(曲げ,せん断)
・支持力(押し込み,引抜き)
OK
止水ジョイント部の設計
鉄筋コンクリートの設計
変形量の設定
鉄筋コンクリートの仕様設定
止水ジョイント部の仕様設定
【許容限界値以下の確認】
曲げ,せん断
NG
性能試験
OK
杭と鉄筋コンクリート壁体の
結合部の設計等
NG
【許容限界値以下の確認】
変形,引張り,引抜き,曲げ,
せん断
【許容限界値以下の確認】
押し込み,引抜き,曲げ,
せん断
NG
OK
OK
END

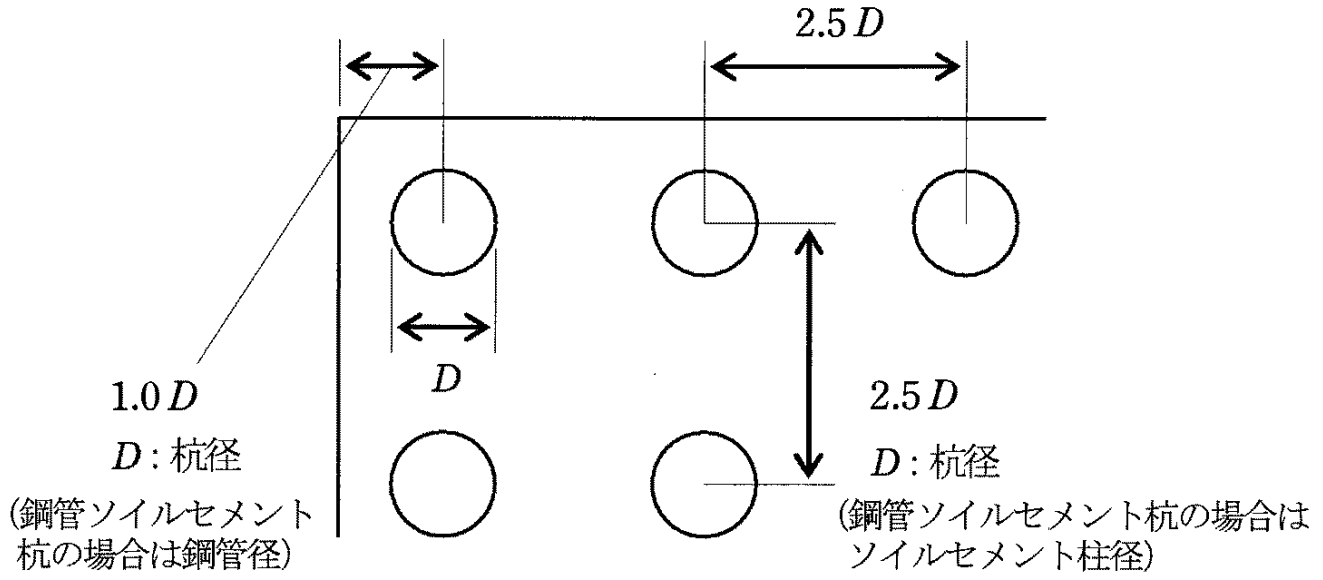
杭構造形式(支持方式)の選定に係る方針及び杭間隔の設定方針

杭構造形式(支持方式)の選定

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の支持方式としては，十分な支持力を有する岩盤(Km層)に杭を根入れさせる岩着支持構造を選定する。

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Ss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。

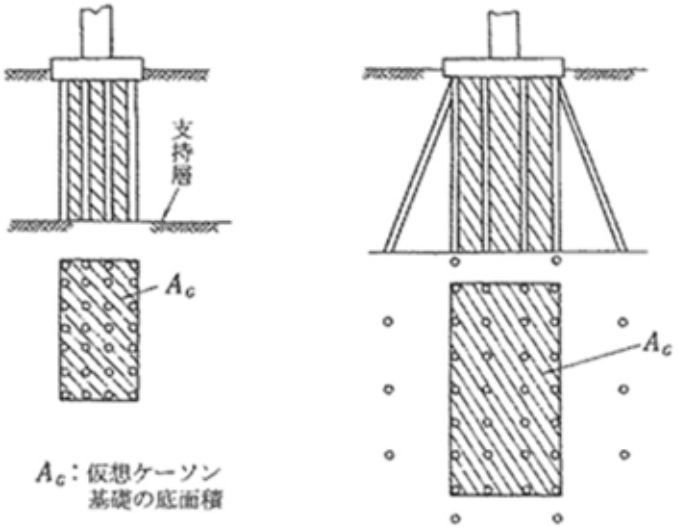


杭の最小中心間隔及びフーチング縁端距離

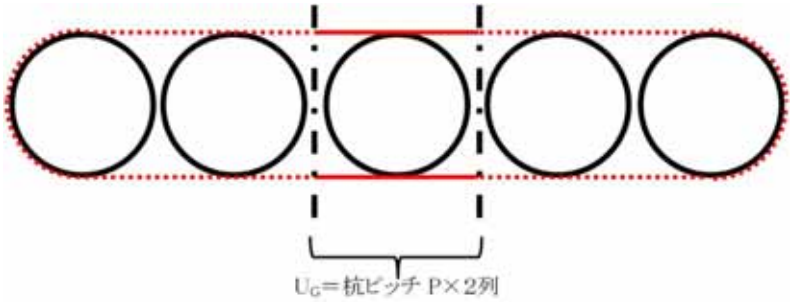
群杭効果の設定方針

■ 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値を算定する。



仮想ケーソン基礎(道路橋示方書)



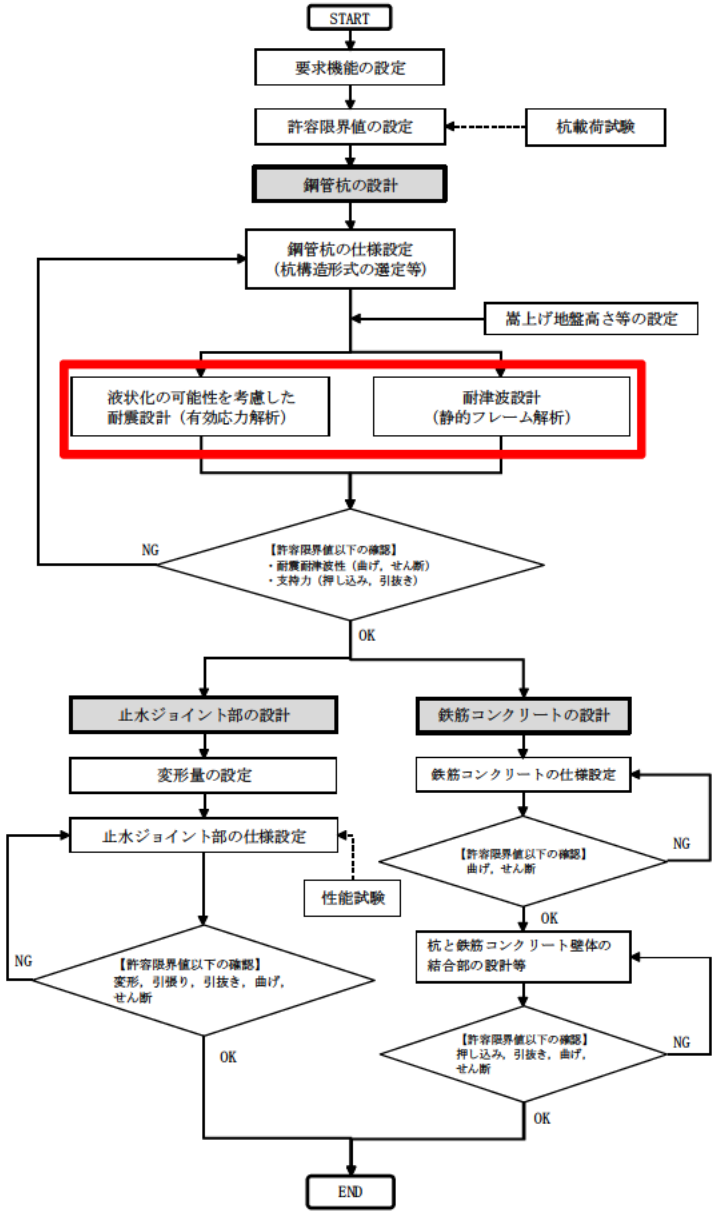
仮想ケーソン基礎の考え方による群杭の周長

・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。

$$Q_f=U_G \Sigma L_i \tau_i$$

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／m^2)

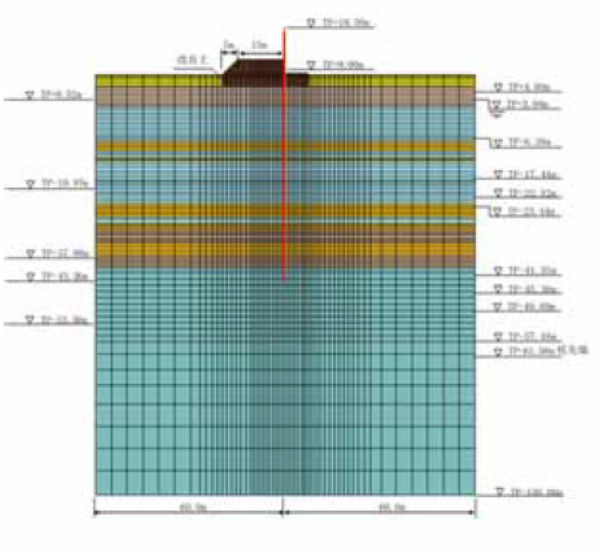
設計手順(鋼管杭)


START
要求機能の設定
許容限界値の設定
杭載荷試験
鋼管杭の設計
鋼管杭の仕様設定
(杭構造形式の選定等)
嵩上げ地盤高さ等の設定
液状化の可能性を考慮した
耐震設計（有効応力解析）
耐津波設計
(静的フレーム解析)
NG
【許容限界値以下の確認】
・耐震耐津波性（曲げ，せん断）
・支持力（押し込み，引抜き）
OK
止水ジョイント部の設計
鉄筋コンクリートの設計
変形量の設定
鉄筋コンクリートの仕様設定
止水ジョイント部の仕様設定
【許容限界値以下の確認】
曲げ，せん断
NG
性能試験
OK
杭と鉄筋コンクリート壁体の
結合部の設計等
NG
【許容限界値以下の確認】
変形，引張り，引抜き，曲げ，
せん断
【許容限界値以下の確認】
押し込み，引抜き，曲げ，
せん断
NG
OK
OK
END

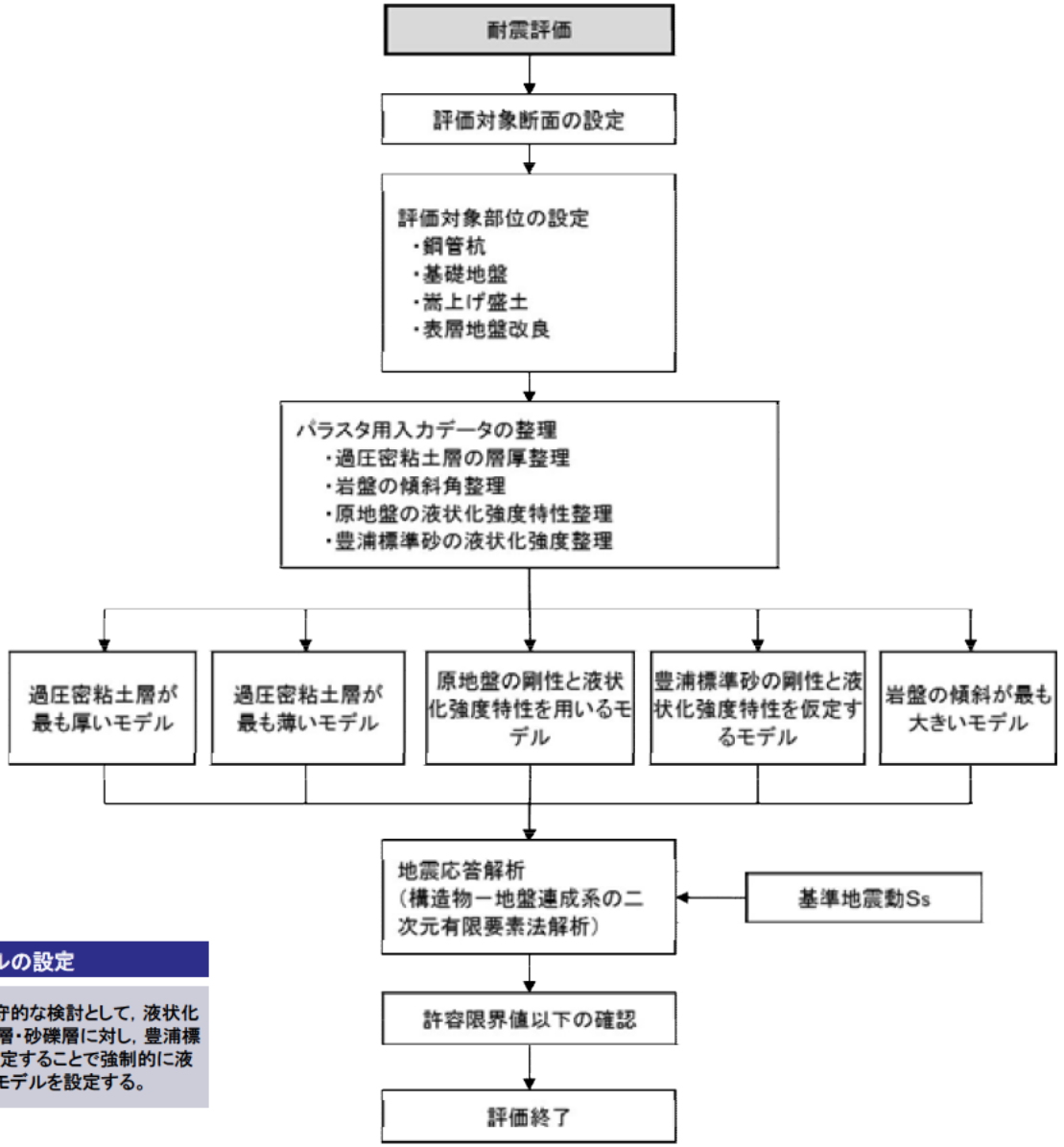
鋼管杭の設計手順（地震時評価）

■ 二次元有効応力解析を実施し，杭体応力度と支持力等の照査を行い許容限界以下であることを確認する。

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は敷地の全域に渡り設置することから，岩盤の深度や地質分布の不確かさを考慮し，種々の保守的な解析条件で評価を行う。



着目点	概要	解析モデルの設定
地質分布の不確かさ	敷地に分布する第四系の砂礫層については全て液状化検討対象として扱い，液状化強度試験と有効応力解析により，基準地震動Ssに対して液状化しないことを確認したが，地質分布の不確かさを考慮して，仮に液状化させた場合の構造物への影響を評価する。	液状化の影響に対する保守的な検討として，液状化検討対象層である全ての砂層・砂礫層に対し，豊浦標準砂の液状化強度特性を仮定することで強制的に液状化する条件を与えた解析モデルを設定する。

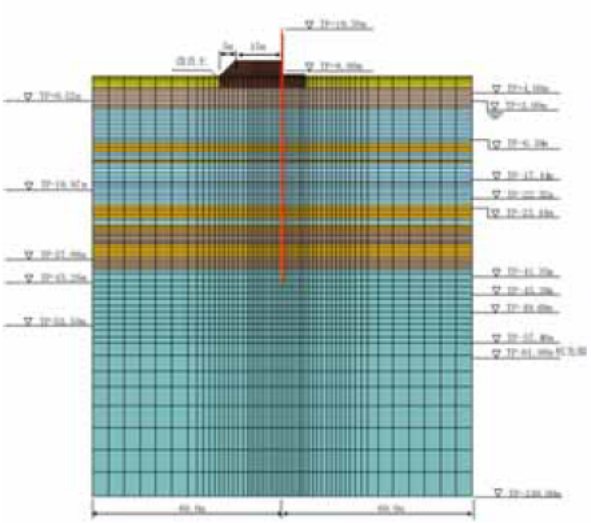


鋼管杭の構造成立性の確認のための耐震評価の検討フロー

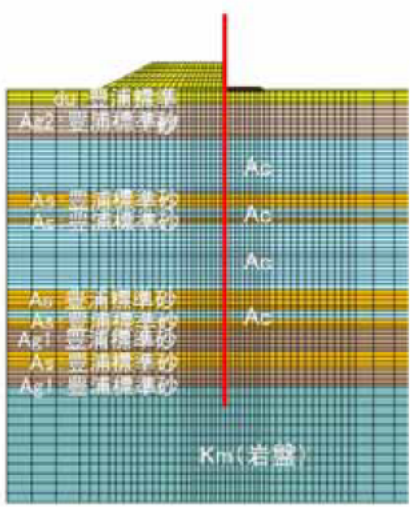
評価結果（地震時評価）

■有効応力解析により，過圧密粘土層の層厚の大小による評価及び豊浦標準砂の地盤物性を用いて評価を実施した。

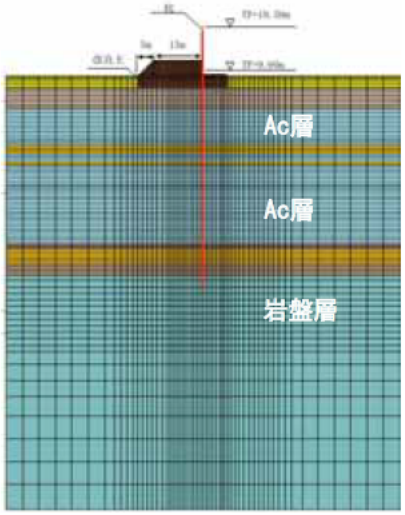
評価ケース	内容
1	原地盤の剛性と液状化強度特性を用いるモデル
2	豊浦標準砂の剛性と液状化強度特性を仮定したモデル
3	過圧密粘土層が最も厚いモデル
4	過圧密粘土層が最も薄いモデル
5	過圧密粘土層が最も厚いモデル＋豊浦標準砂の剛性と液状化強度特性を仮定したモデル
6	過圧密粘土層が最も薄いモデル＋豊浦標準砂の剛性と液状化強度特性を仮定したモデル
7	岩盤の傾斜が最も大きいモデル



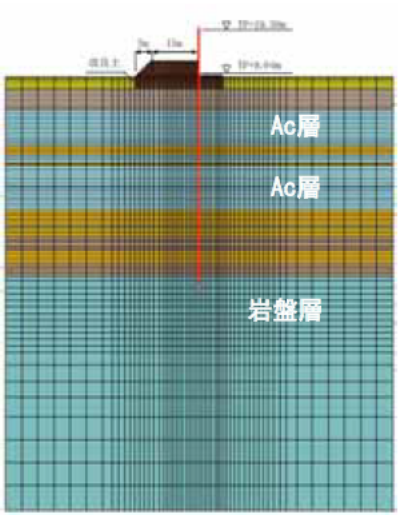
ケース1



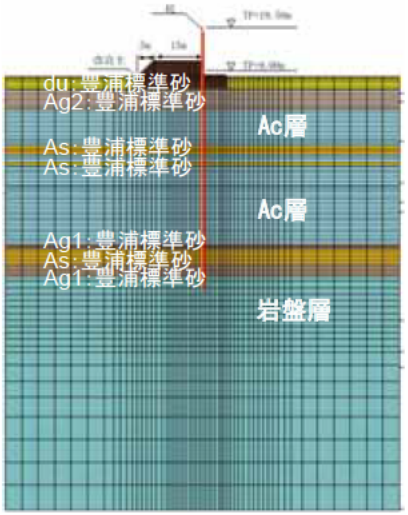
ケース2



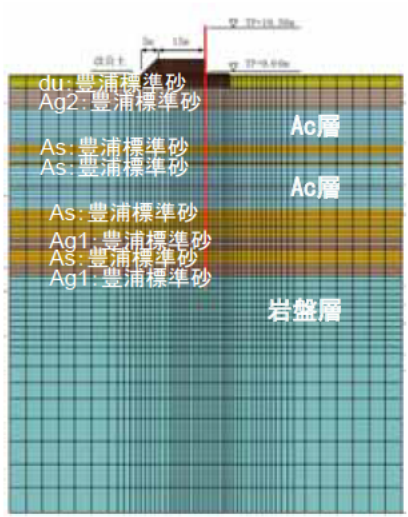
ケース3



ケース4

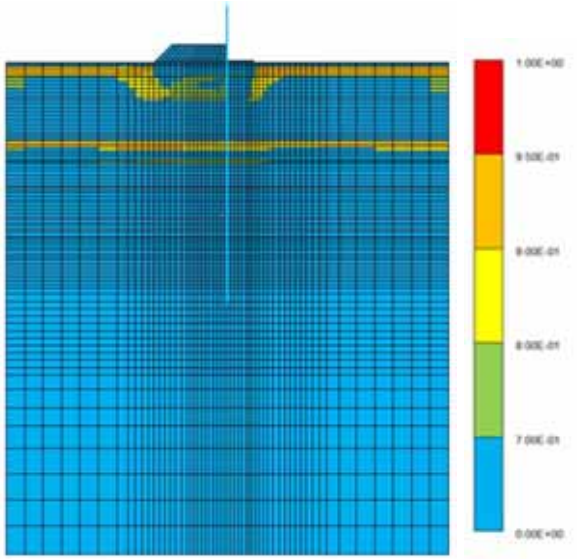


ケース5

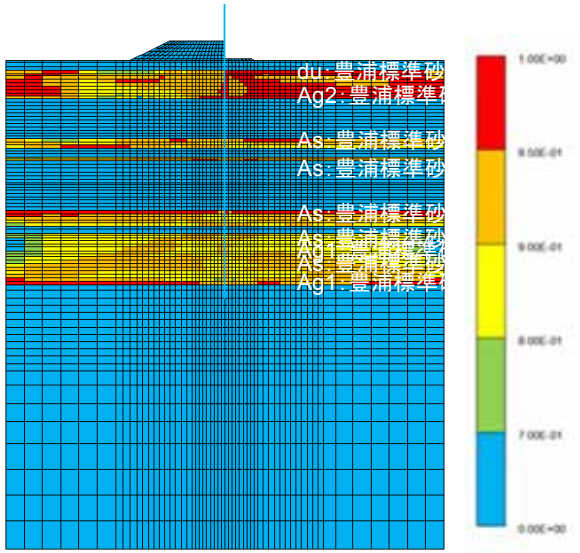


ケース6

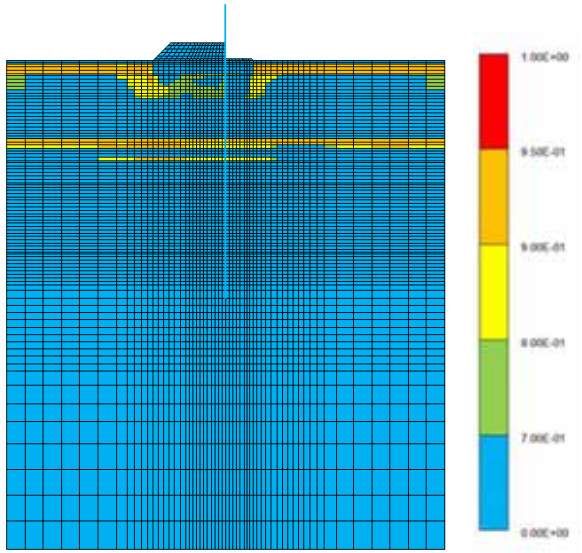
評価結果(過剰間隙水圧比分布図)



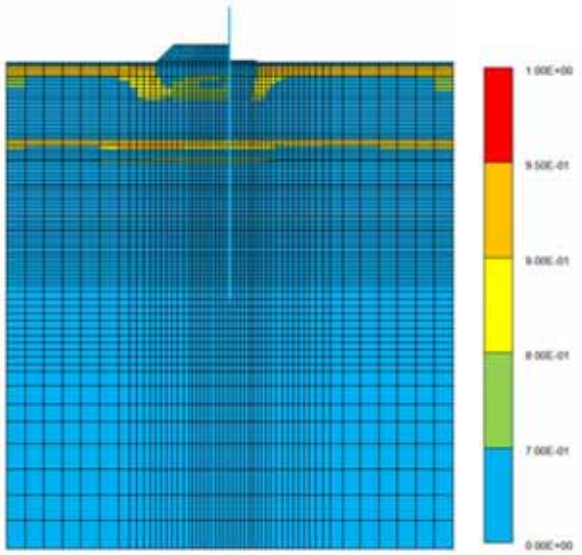
ケース1



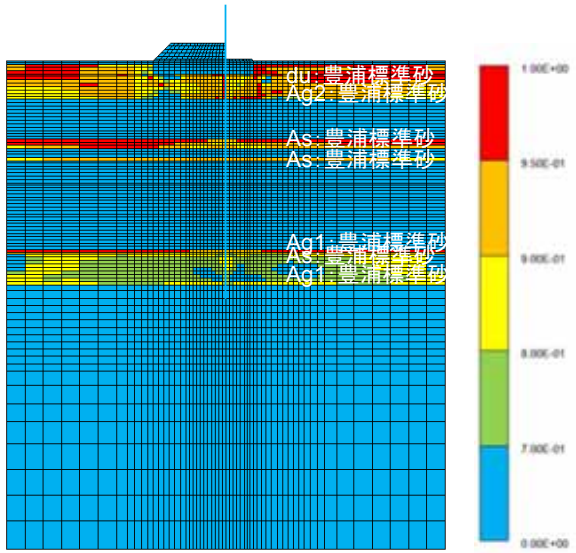
ケース2



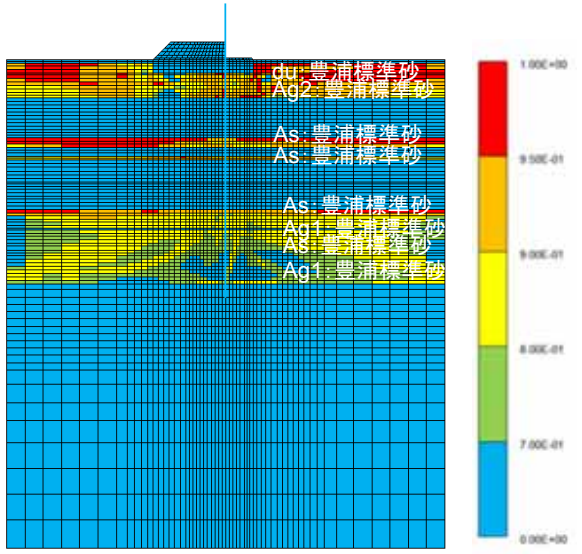
ケース3



ケース4

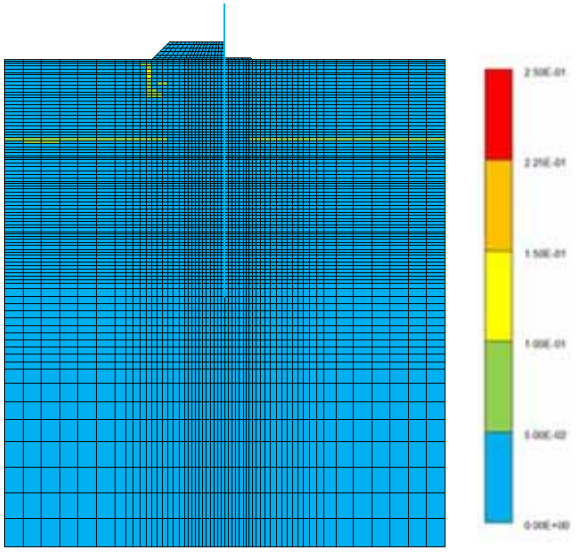


ケース5

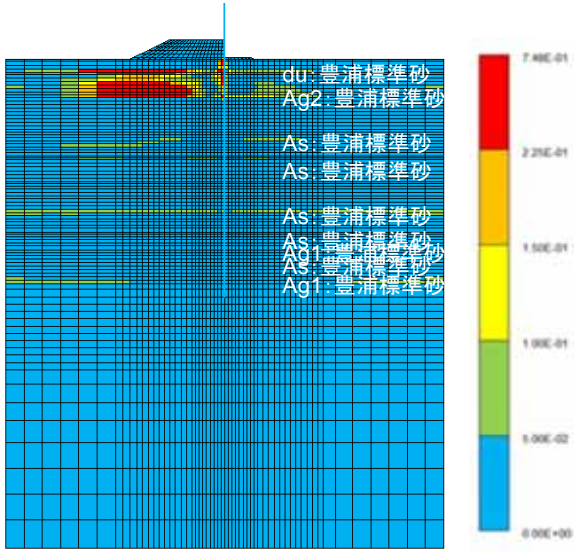


ケース6

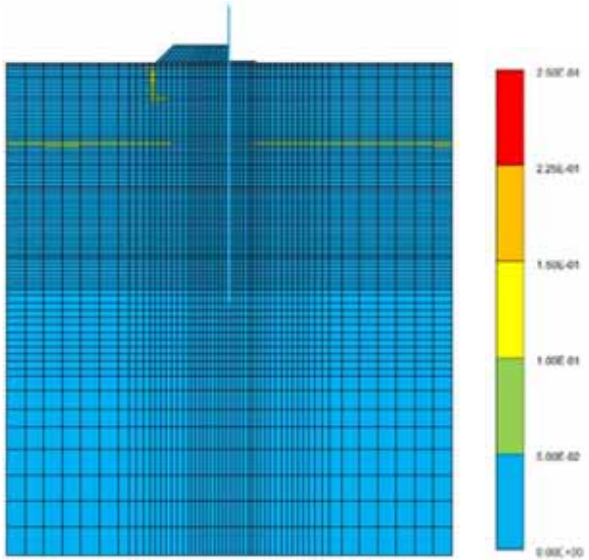
評価結果(最大せん断ひずみ分布図)



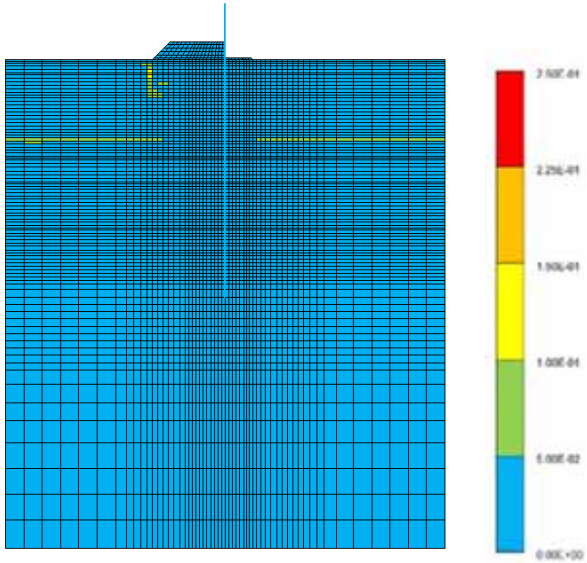
ケース1



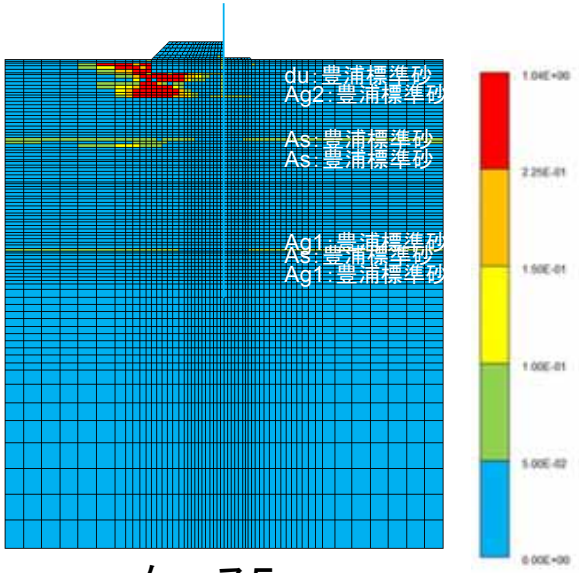
ケース2



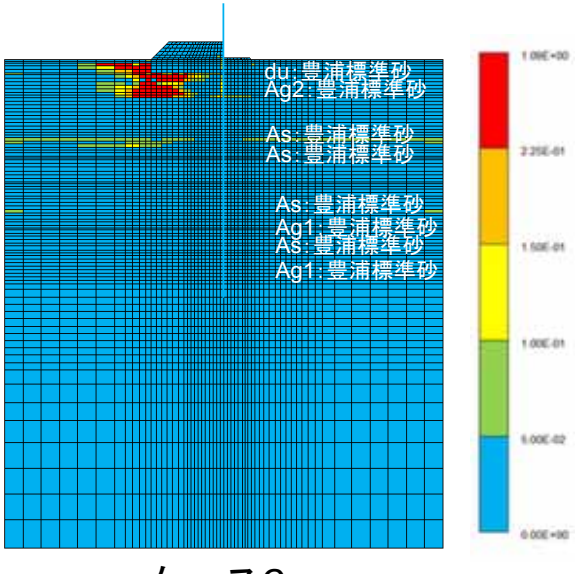
ケース3



ケース4



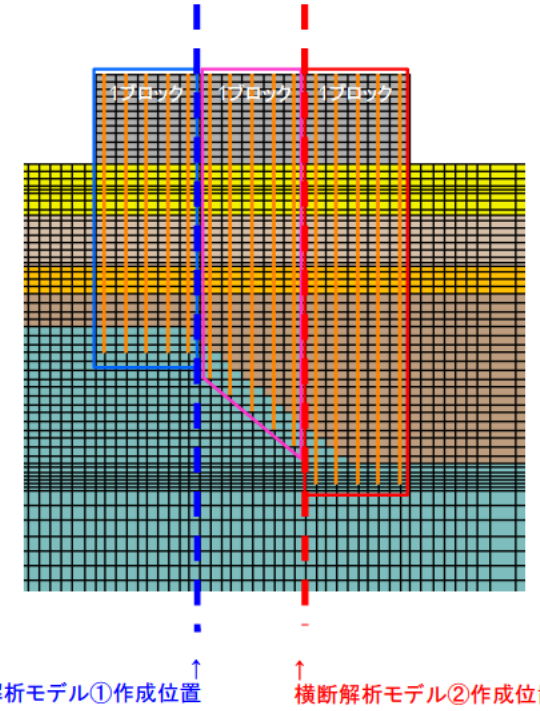
ケース5



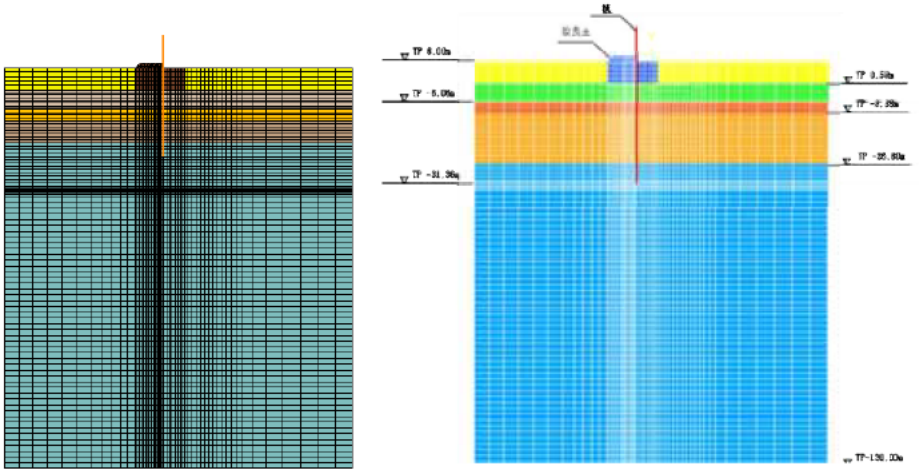
ケース6

岩盤傾斜部(地震時評価，ケース7)

・ 検討用傾斜角を反映した1ユニット内での岩盤上限面高さ分布に基づき作成した防潮堤横断解析モデルを用いて，FLIPによる地震応答解析を実施し，下部構造の照査を行う。



横断解析モデル作成位置



横断解析モデル

評価結果（地震時評価）

- 地震時の各種ケースにおいても，杭の構造成立性を確認した。
- 過圧密粘土層の層厚は，厚い断面と薄い断面で10m程度の相違があることから，過圧密粘土層の分布のバラツキがあったとしても，解析評価結果に大きな影響を及ぼすものではないと判断される。

曲げ・軸力に対する照査

	発生応力度 σ(N/mm2) (M/Z+P/A)	許容応力度 σsa(N/mm2) (SKK490)	安全率 σsa/σ	判定
ケース1	131	278	2.1	OK
ケース2	167	278	1.7	OK
ケース3	135	278	2.1	OK
ケース4	131	278	2.1	OK
ケース5	145	278	1.9	OK
ケース6	124	278	2.2	OK
ケース7(北端部)		278		
ケース7(南端部)		278		

せん断に対する照査

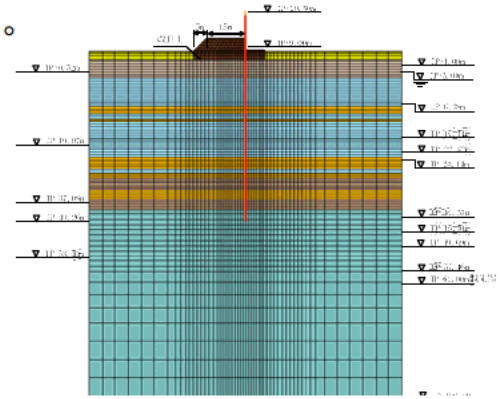
	発生応力度 τ(N/mm2)	許容応力度 τsa(N/mm2) (SKK490)	安全率 τsa/τ	判定
ケース1	14	158	11.3	OK
ケース2	31	158	5.1	OK
ケース3	14	158	11.0	OK
ケース4	14	158	11.3	OK
ケース5	19	158	8.1	OK
ケース6	19	158	8.2	OK
ケース7(北端部)		158		
ケース7(南端部)		158		

残留変位量

		水平変位(m)	鉛直変位(m)
ケース1	上部工天端～上部工下端の相対変位量	-0.0434	-0.0078
ケース2		0.1090	0.00
ケース3		-0.0452	-0.0078
ケース4		-0.0431	-0.0078
ケース5		-0.0304	-0.0162
ケース6		-0.0470	-0.0104
ケース7(北端部)			
ケース7(南端部)			

杭の仕様について

■ 構造成立性の検討にあたっては、杭の仕様をSKK490をベースとしているが、安全裕度を損ねることなく杭の軽量化を図れることから杭の材質をSM570とした場合について、ケース1のモデルを用いて構造が成立する仕様を算定した。



杭の仕様

材質	杭径	厚さ
SKK490	2.5m	40mm
SM570	2.5m	29mm

曲げ・軸力に対する照査

	発生応力度	許容応力度	安全率	判定
杭材料の仕様	σ (N/mm2) (M/Z+P/A)	σsa (N/mm2)	σsa/σ	
SKK490	131.30	277.5	2.11	OK
SM570	153.31	382.5	2.49	OK

せん断に対する照査

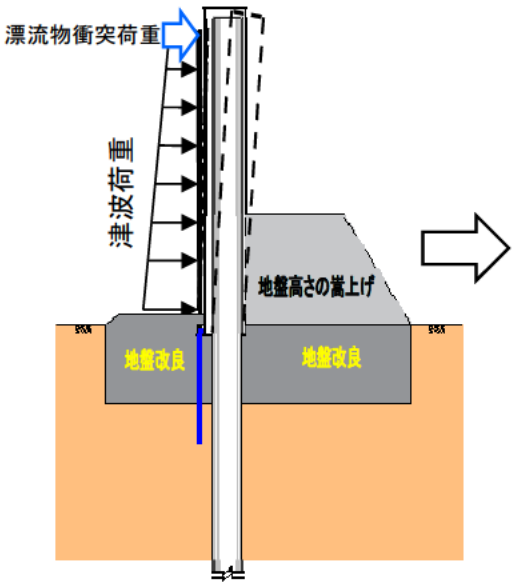
	発生応力度	許容応力度	安全率	判定
杭材料の仕様	τ (N/mm2)	τsa (N/mm2)	τsa/τ	
SKK490	13.93	157.5	11.31	OK
SM570	18.36	217.5	11.85	OK

杭の仕様については詳細設計において確定することとする。

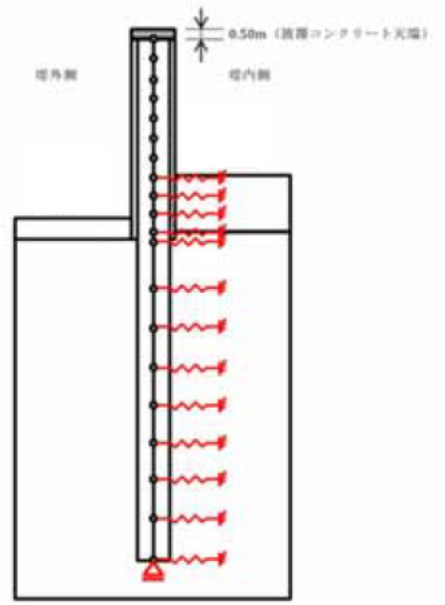
鋼管杭の設計手法（津波時評価）

➢ 耐津波設計（静的フレーム解析）

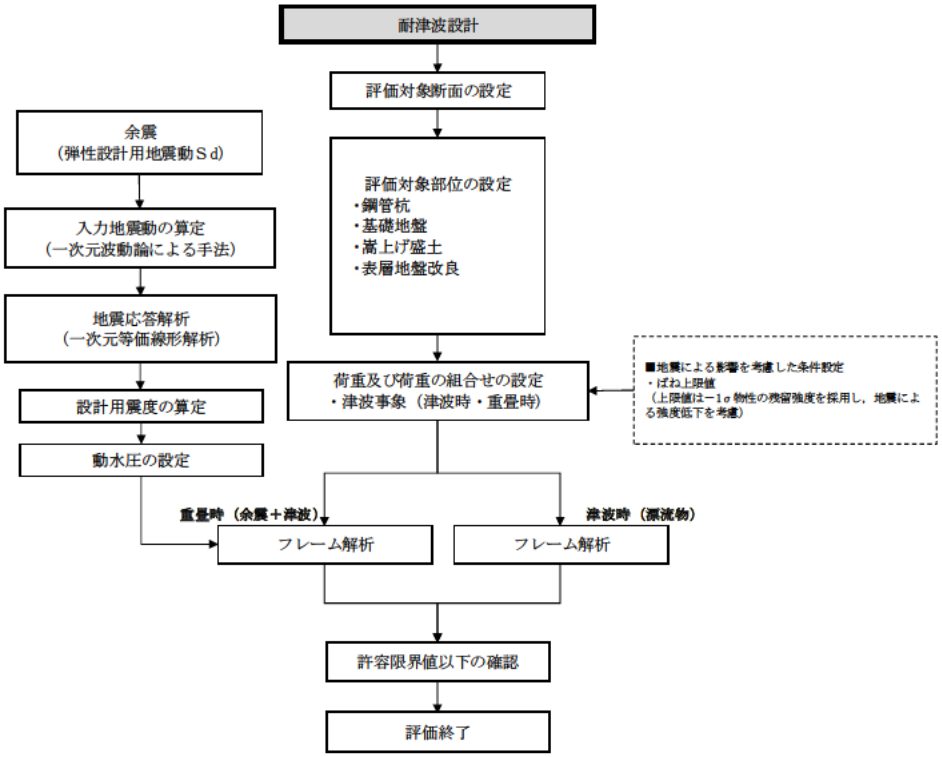
- ■ 鋼管杭を二次元梁要素とし，地盤バネを接続した解析モデルで静的フレーム解析を行う。死荷重及び積雪の長期荷重，津波による波力と漂流物衝突荷重，余震荷重等を外力として入力する。地盤バネは静的物性及びせん断強度により計算する。
- ■ 津波荷重に対しては，鋼管杭に対して加わる荷重に弾性範囲内で耐え得る設計とする。
- ■ 二次元静的フレーム解析に用いる地盤バネは，道路橋示方書Ⅳ下部構造編に従い水平方向地盤反力係数を求め，上限値を設定するバイリニア型とする。
- ■ 杭先端の境界条件は鉛直ピン結合，水平ローラとする。



津波荷重+漂流物衝突荷重



解析モデル概念図

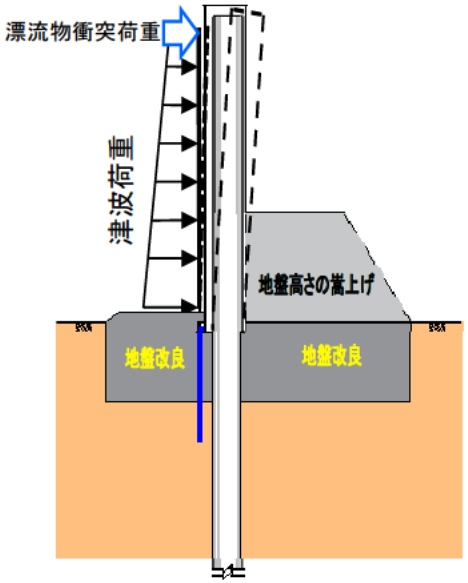


鋼管杭の耐津波評価の検討フロー

評価結果（津波時評価）

➢ 耐津波設計（静的フレーム解析）

- 津波時及び余震＋津波時の評価の結果においても，杭の構造成立性を確認した。



津波荷重+漂流物衝突荷重

曲げ・軸力に対する照査

	発生応力度 σ(N/mm2) (M/Z+P/A)	許容応力度 σsa(N/mm2) (SKK490)	安全率 σsa/σ	判定
津波時※1	212	278	1.3	OK
余震＋津波※2	74	278	3.8	OK

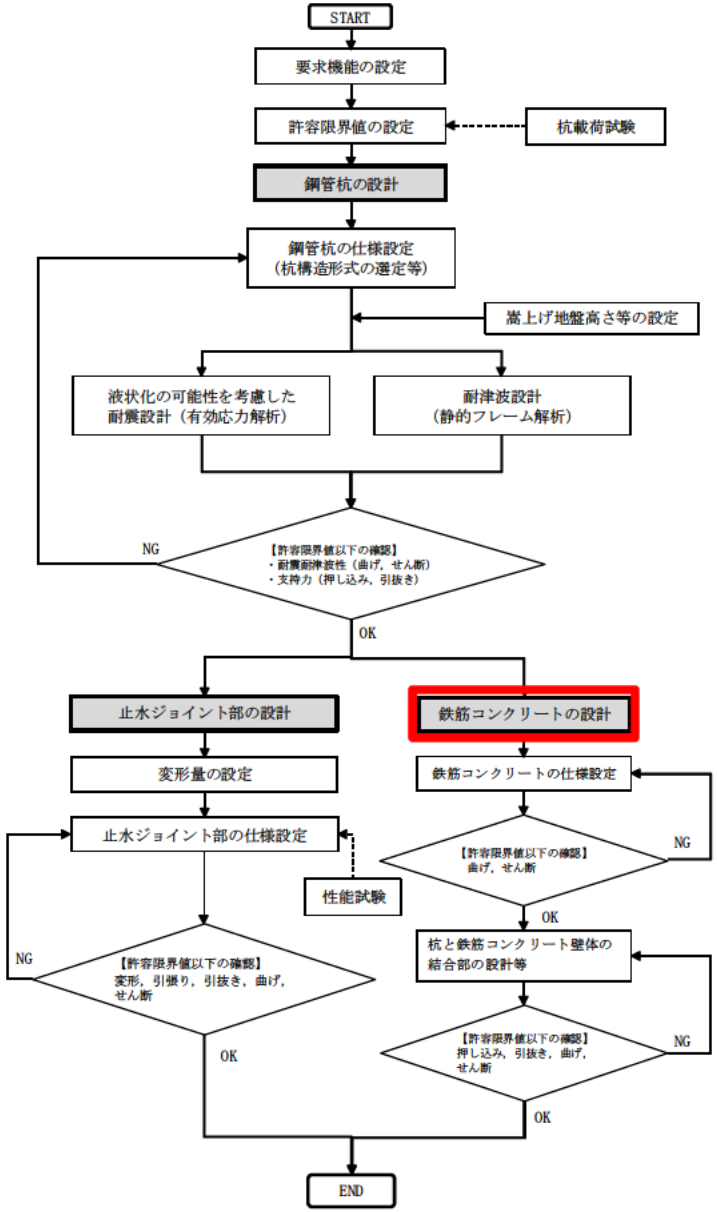
せん断に対する照査

	発生応力度 σ(N/mm2) (M/Z+P/A)	許容応力度 σsa(N/mm2) (SKK490)	安全率 σsa/σ	判定
津波時※1	28	158	5.6	OK
余震＋津波※2	10	158	16.3	OK

※１　津波時の検討に当たっては，基準津波による津波荷重の５倍相当の荷重を用いた（水理模型実験および数値シミュレーション結果に基づき算出した津波荷重の５倍相当）
地盤高さの嵩上げの高さは，検討見直し後（余震＋津波時モデルよりも高さが低い）で設定している。
※２　検討用津波荷重は，防潮堤天端からの静水圧を使用した。

9. 設計方針（鉄筋コンクリート）

9. 設計方針（上部工：鉄筋コンクリート）

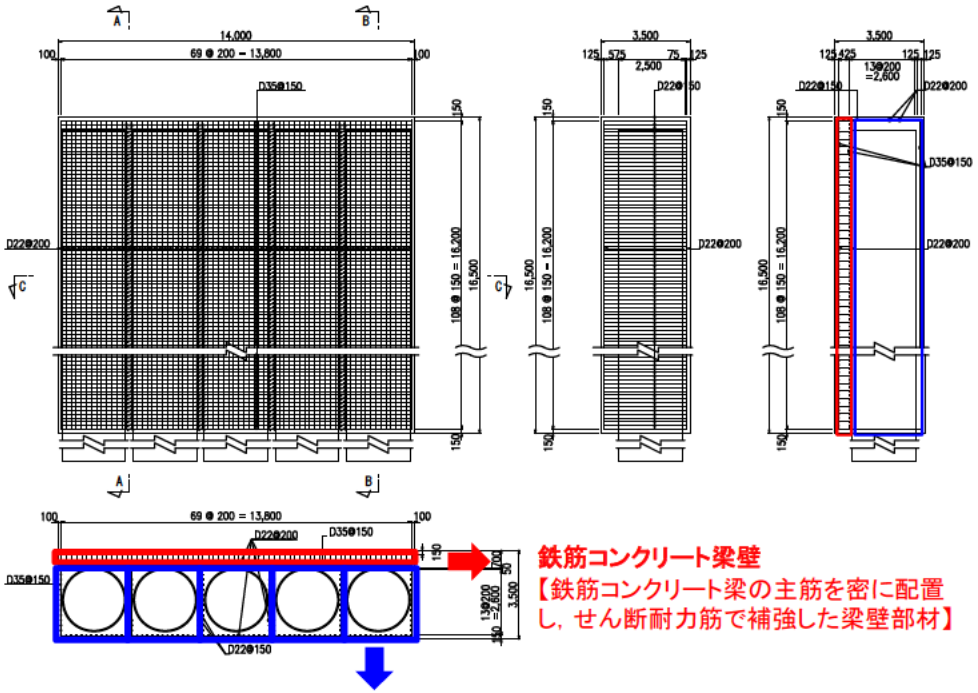


鉄筋コンクリートの設計手法

■ SRC造の前面に一体化して設置する鉄筋コンクリート梁壁に要求される性能は，津波に対する止水性を確保し，津波波圧や漂流物衝突荷重によるせん断力を全て受け持てることである。このため，津波荷重等が作用した場合の杭間に生じる荷重に対して，RC梁壁として弾性状態に留まるよう配慮する。

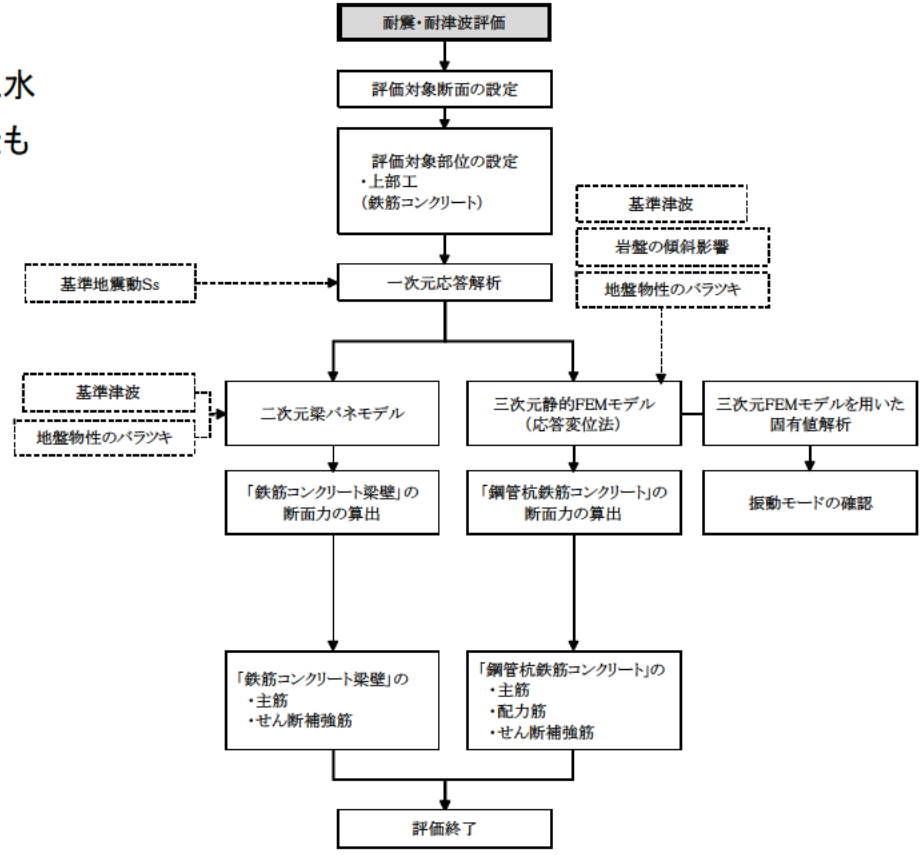
■ SRC造の前面に一体化して設置する鉄筋コンクリート梁壁のみでも止水性を確保するが，鉄筋コンクリート梁壁とSRC造は一体であり，両方とも止水性を有していることから，二重の止水効果がある。

上部工（鉄筋コンクリート，鋼管杭）



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梁壁部材】

鋼管杭鉄筋コンクリート（SRC造）
【下部工の鋼管杭から上部工に連続する鋼管を鉄筋コンクリートで被覆した部材】



上部工の構造成立性の確認のための設計フロー

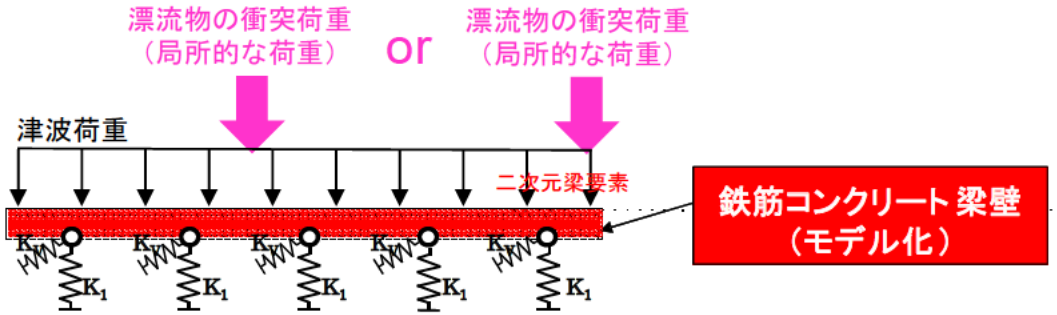
二次元梁モデルの概要

●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，保守的に鋼管杭の剛性を考慮しないモデル），構造評価を行う。

【安全側の設計】

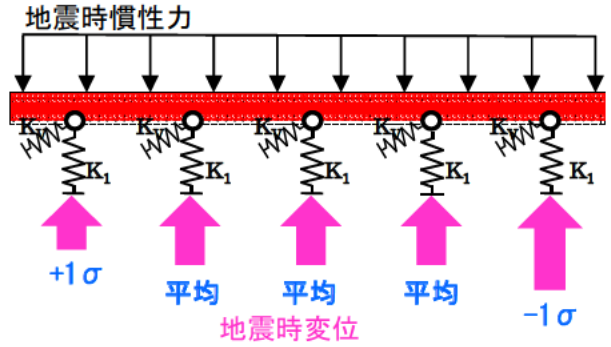
漂流物の衝突荷重は曲げモーメントが最大となる位置に載荷



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とす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）

【安全側の設計】



地震時相対変位の載荷イメージ図

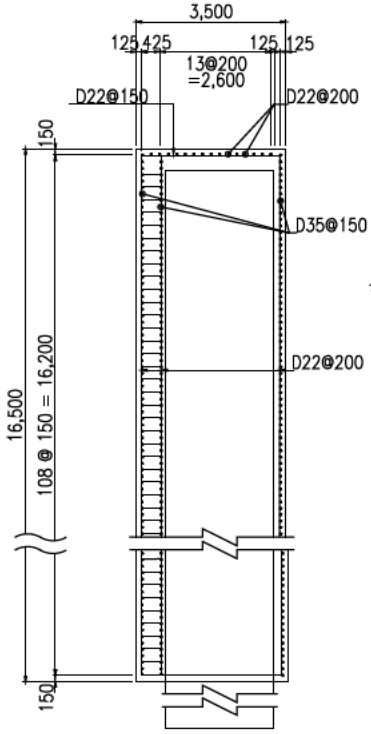
着目点	概要	解析モデルの設定
地盤剛性のばらつき	防潮堤は5本の杭を束ね1ユニットとすることを基本としている。第四系の堆積構造は敷地全体で概ね水平であるが，地盤剛性のばらつきにより，1ユニット内にて杭の応答が異なることにより構造物へ与える影響を評価する。	• 地盤のばらつきについて，水平方向バネとして梁モデルに付加する。 • 左右にそれぞれ，+1σに相当するバネ，-1σに相当するバネとしてモデル化する。 • ±1σバネの設定では，最も曲げモーメントが厳しくなるように位置を考慮して付与する。

二次元梁モデルによる耐津波設計（漂流物の衝突）

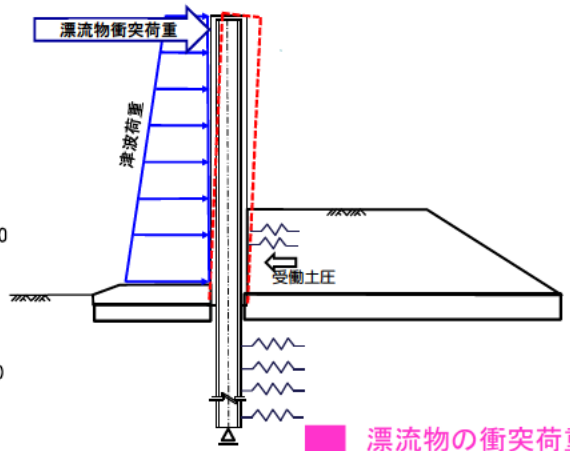
●確認事項

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・せん断応力を照査し，許容限界値以下であることを確認する。

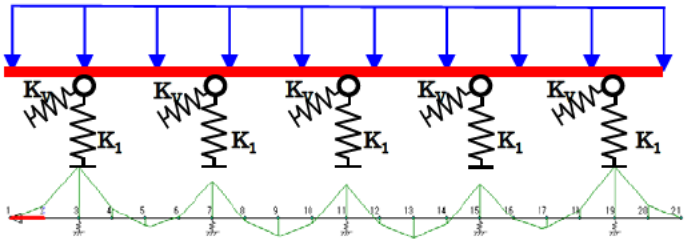
津波荷重に加えて，漂流物衝突荷重を集中荷重として与え，鉄筋コンクリート梁壁内の引張鉄筋，せん断耐力鉄筋の照査を行う。



【津波荷重＋漂流物衝突荷重】



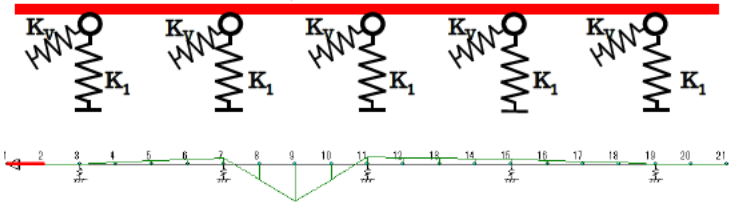
津波荷重



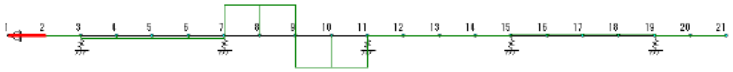
曲げモーメント図の一例

せん断力図の一例

漂流物の衝突荷重
（局所的な荷重）

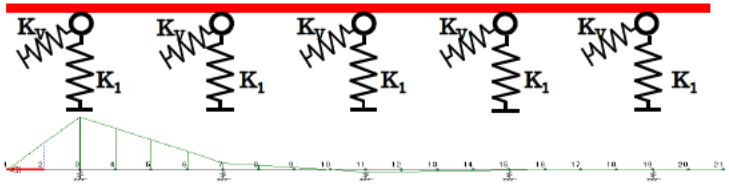


曲げモーメント図の一例



せん断力図の一例

漂流物の衝突荷重
（局所的な荷重）



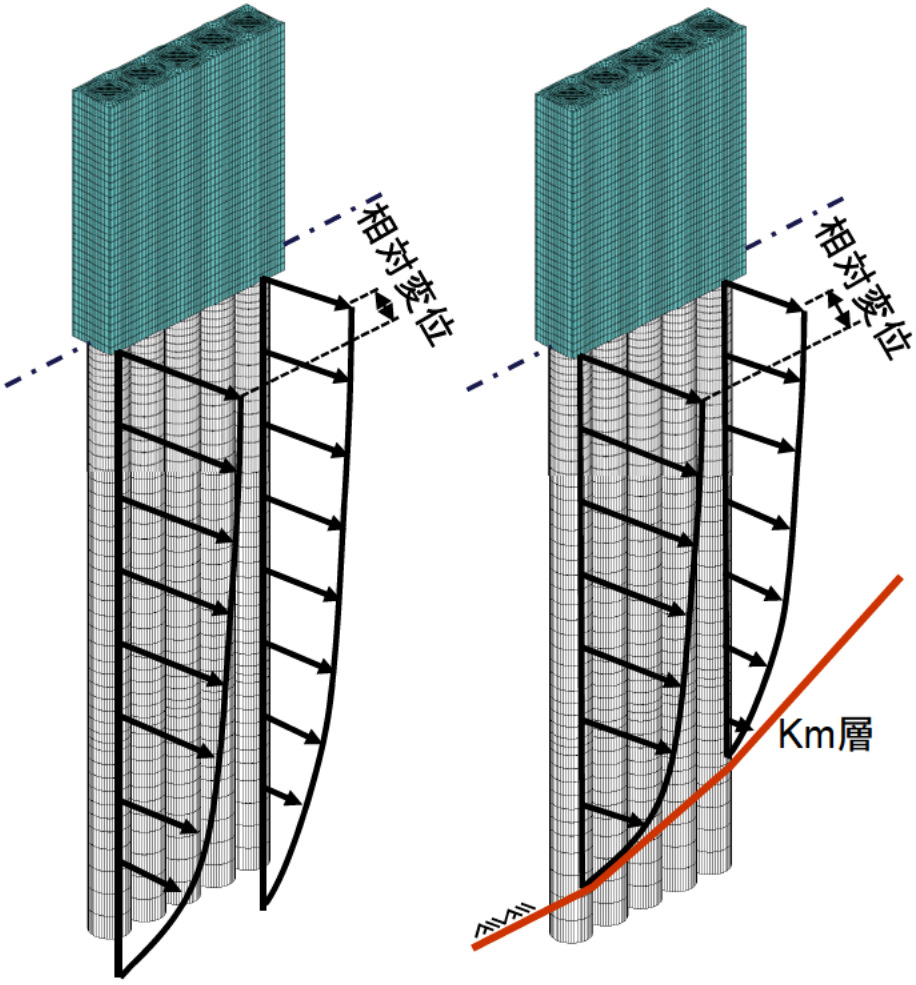
曲げモーメント図の一例

せん断力図の一例

三次元FEM解析モデルを用いた検討

●確認事項

- 有限要素法に基づく三次元解析モデルによる照査は，二次元梁モデルの保守性の検証を目的とする。
- 上部工の照査を実施し，許容限界値以下であることを確認する。



検討内容

【一般部】

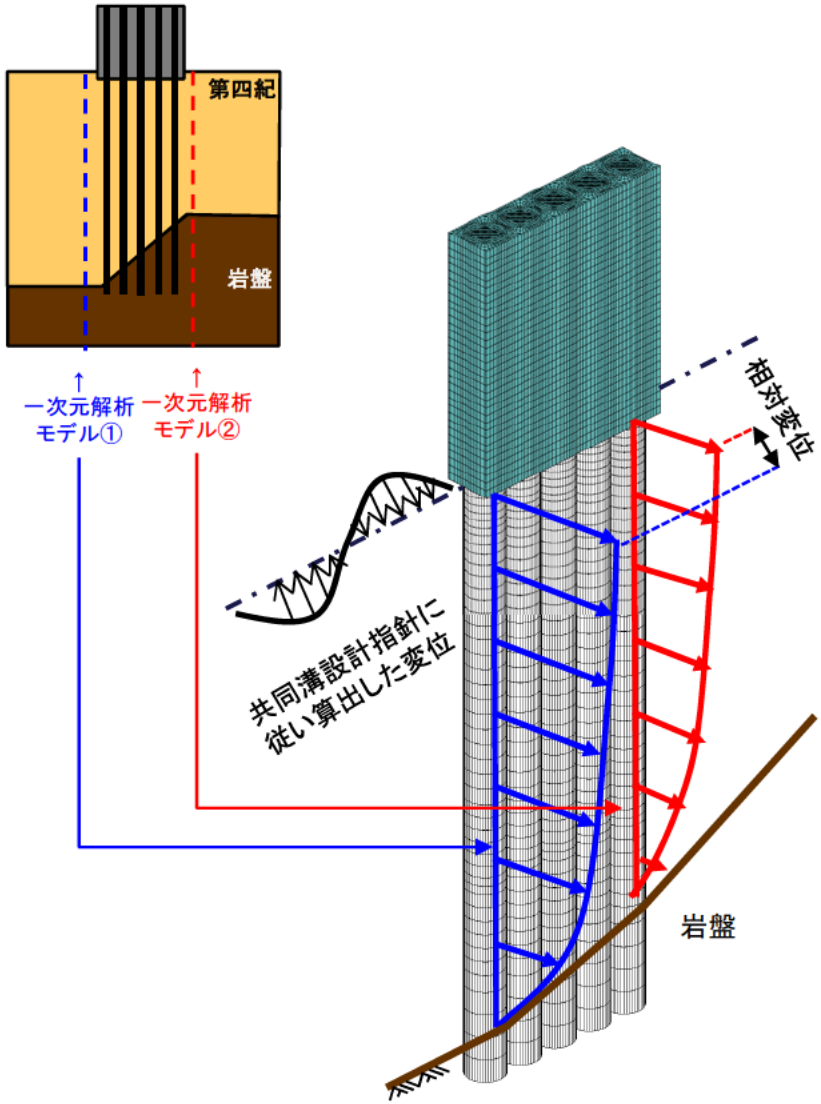
- 三次元FEM解析モデルを構築し，杭体には地盤の剛性の影響を考慮するため，水平方向地盤バネを配置する。
- 地盤の剛性のばらつきを考慮するため，両端部の杭に−1σ物性及び+1σ物性に相当するバネを配置する。
- 応答変位法に用いる変位のうち，両端部については±1σ物性を用いた際の地盤の変位をバネを返して杭体に与える。中央部の杭には平均物性による地盤変位を与える。
- 杭及び上部工に作用させる地震時慣性力についても，上記と同様の方法で算出した加速度を与える。

【岩盤傾斜部】

- 岩盤傾斜部について，最も傾斜の厳しい場所を選定する。
- 傾斜部の検討では平均物性に対して実施し，Km層の深度を変化させる。また，それに応じた地盤変位と慣性力を一次元地震応答解析より抽出する。

三次元FEM解析モデルを用いた評価

■岩盤傾斜部による上部構造への影響を検討するため，三次元FEM解析モデルを用いた評価を行う。



三次元FEMFEM解析モデル

【一次元地震応答解析】

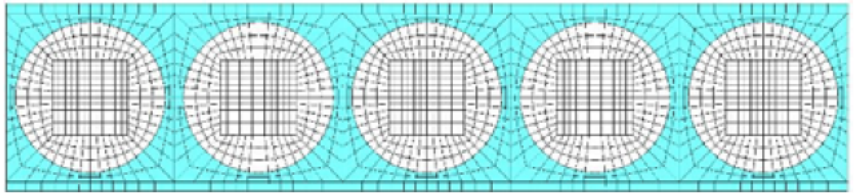
- 検討用岩盤傾斜角を考慮し，岩盤の深度を変化させた解析モデルにより，一次元地震応答解析を実施することで，傾斜部を考慮した地盤変位と慣性力を算定する。
- また，共同溝設計指針に従い算定した表面波による相対変位と比較し，厳しい方を採用する。

【三次元FEM解析モデル】

- 三次元FEM解析モデルに対し，検討用岩盤傾斜角を考慮した岩盤の深部分布に基づき，地盤バネを配置する。
- 応答変位と応答加速度については，上記の一次元地震応答解析結果に基づき，対応する位置の応答を入力する。

鉄筋コンクリート梁壁・SRC造の一体構造の有効性確認

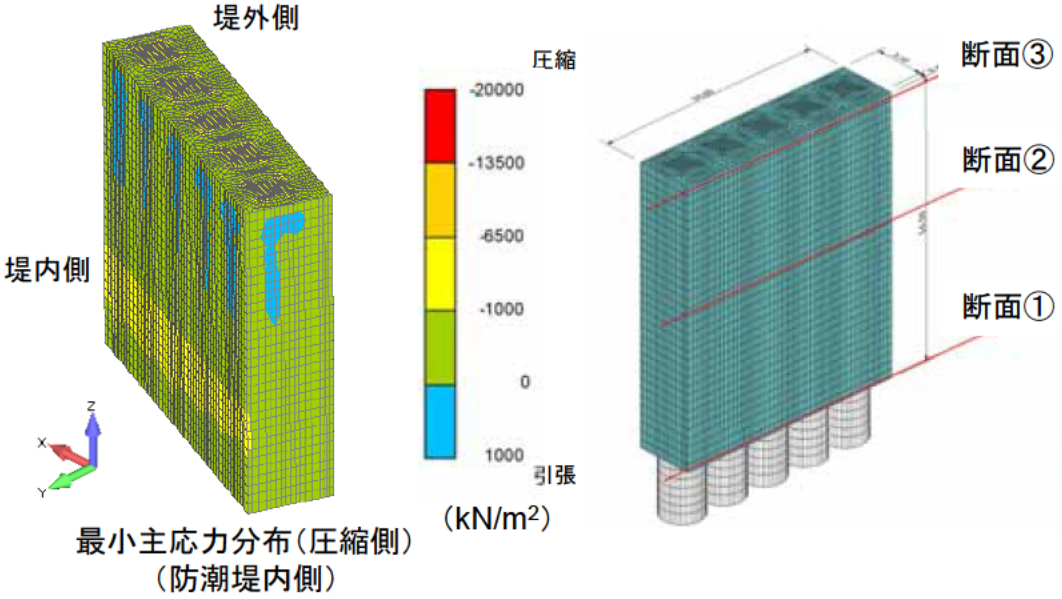
- 上部工内の応力分布を確認し，鉄筋に生じる引張応力，せん断応力が短期許容応力度以内であることを確認する。



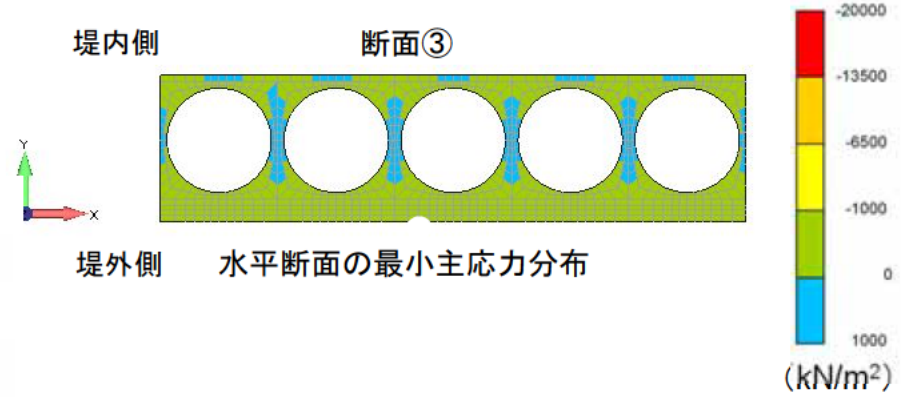
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

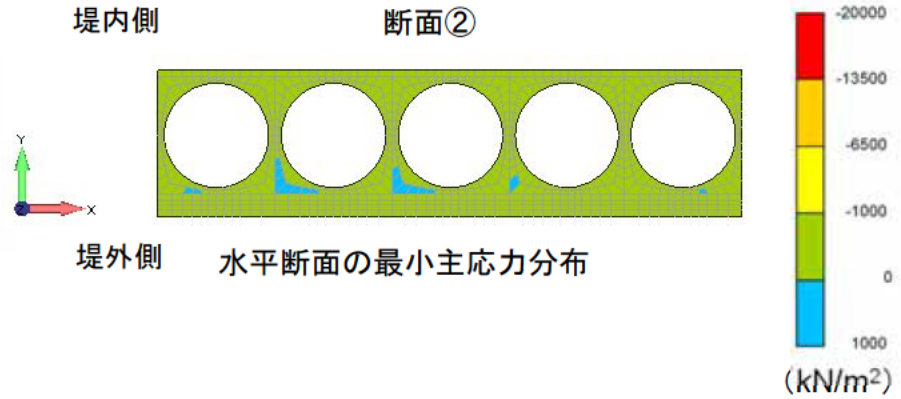
■地震時の解析結果

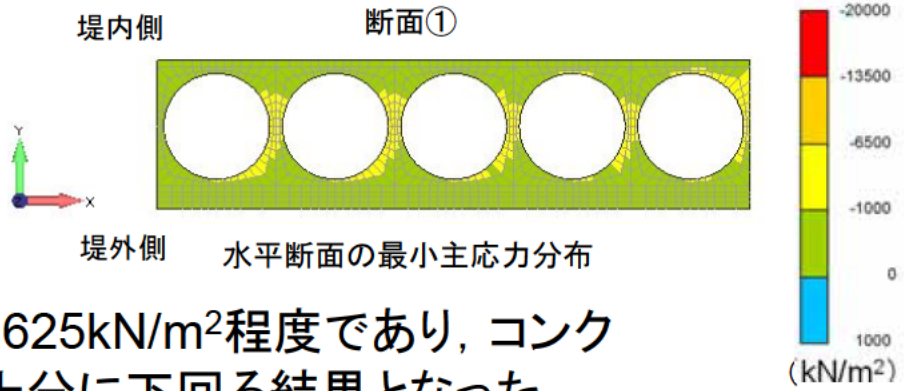
（1）最小主応力分布（圧縮側）



最小主応力分布（圧縮側）
（防潮堤内側）







最小主応力（最大断面）

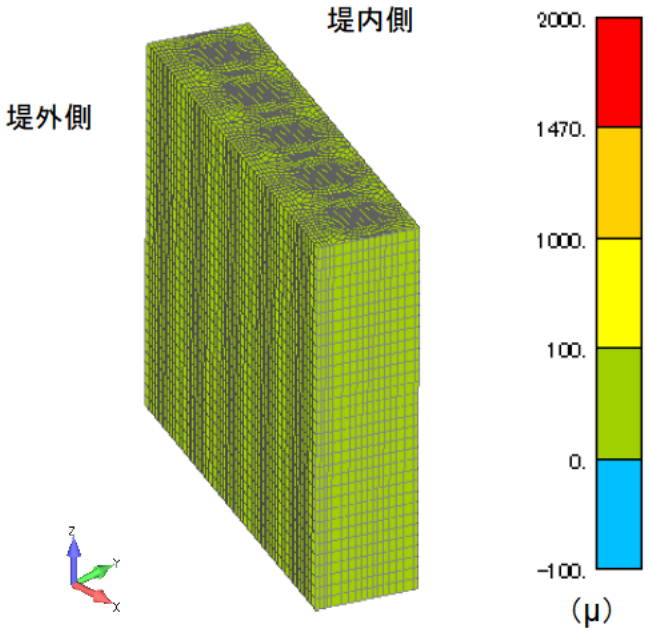
位置	最小主応力(kN/m2)
断面①	−1,625
断面②	−215
断面③	−1,222

●発生する最小主応力は，圧縮側の最大で1,625kN/m²程度であり，コンクリート圧縮強度 24N/mm²(24,000kN/m²) を十分に下回る結果となった。

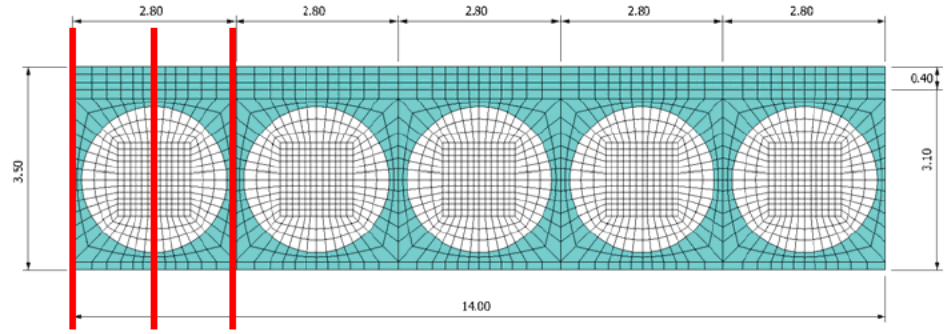
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■地震時の解析結果

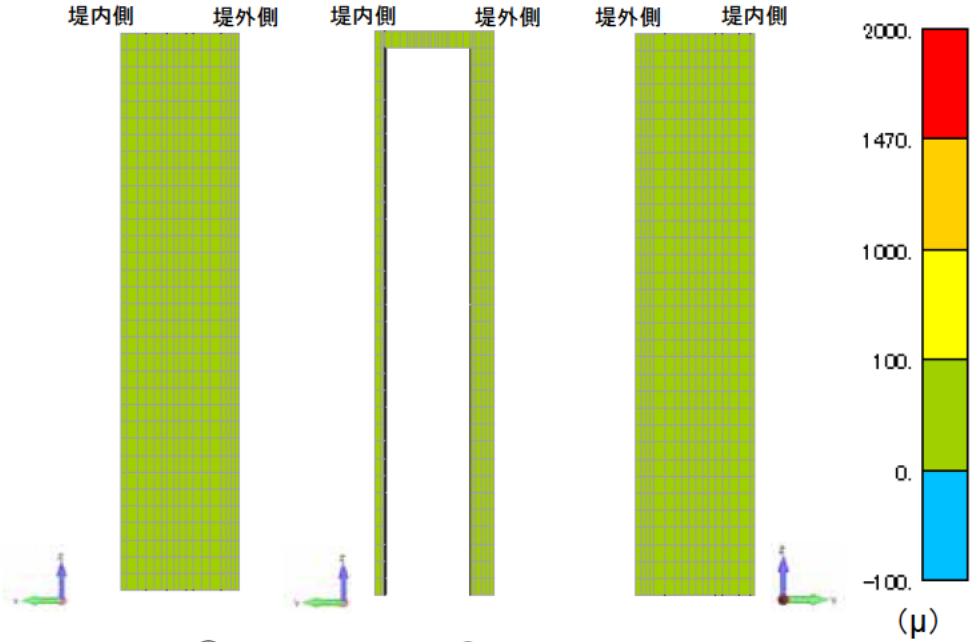
（2）最大主ひずみ分布（引張側）



最大主ひずみ分布（引張側）
（防潮堤外側）



断面① 断面② 断面③



縦断面の最大主ひずみ分布図

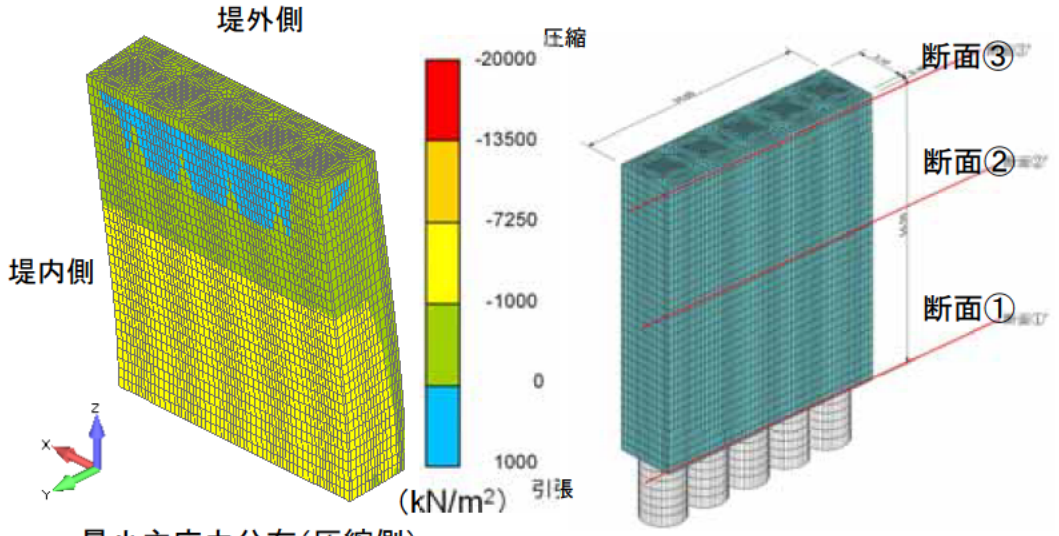
●発生する最大主ひずみは，最大で100μ以下程度であり，RC壁体はRC部材として弾性範囲内である。

（参考）鉄筋の短期引張許容応力度：σ_{st}=294N/mm^{2}であることから，これを鉄筋の弾性係数で割り，短期許容引張応力度のひずみを算定すると1470μとなる。

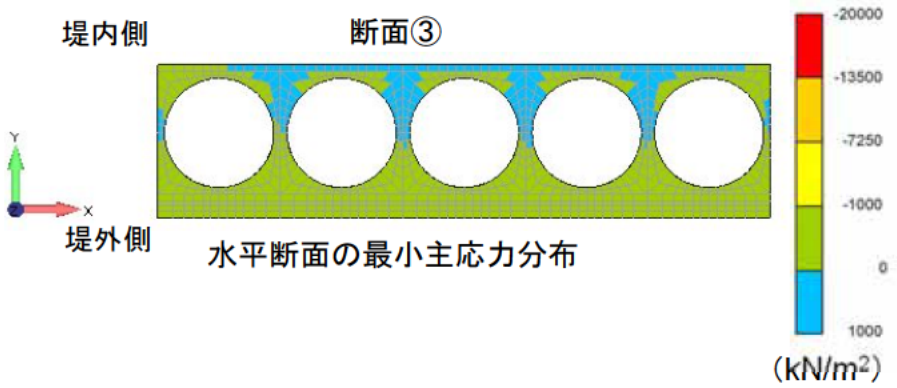
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

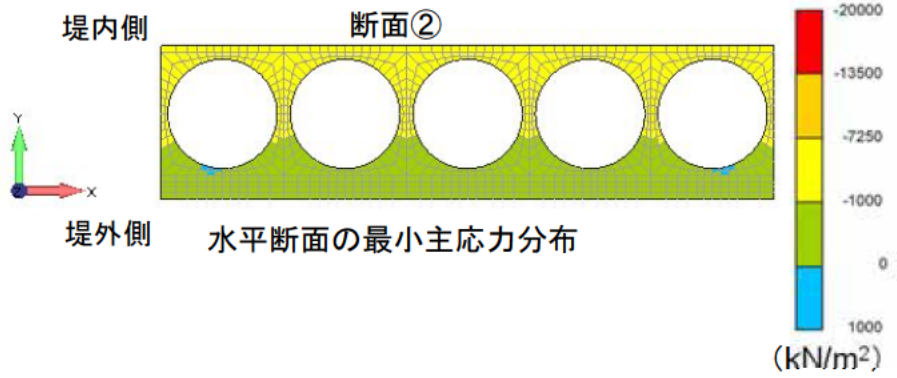
■津波時の解析結果

（1）最小主応力分布（圧縮側）



最小主応力分布（圧縮側）
（防潮堤内側）





最小主応力（最大断面）

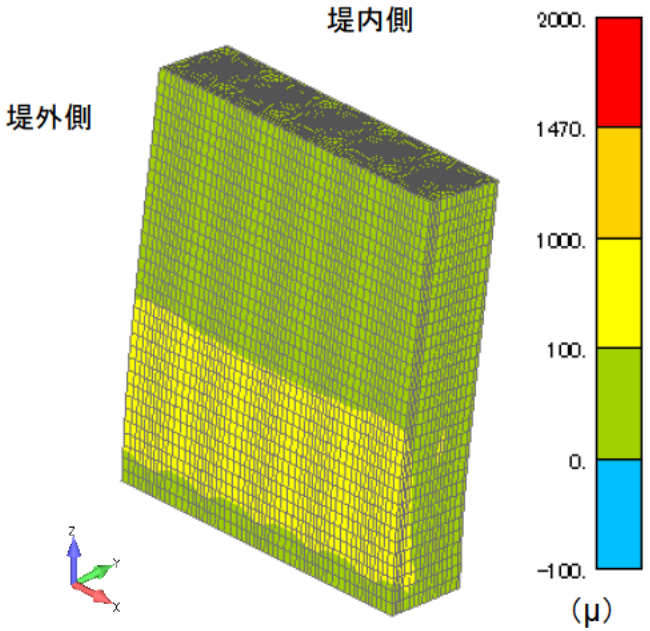
位置	最小主応力(kN/m2)
断面①	−4,423
断面②	−1,808
断面③	−1,389

●発生する最小主応力は，圧縮側の最大で4,423kN/m²程度であり，コンクリート圧縮強度 24N/mm²(24,000kN/m²) を十分に下回る結果となった。

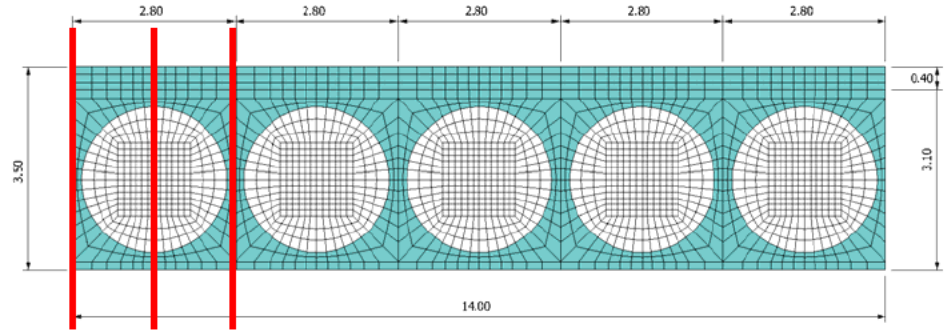
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

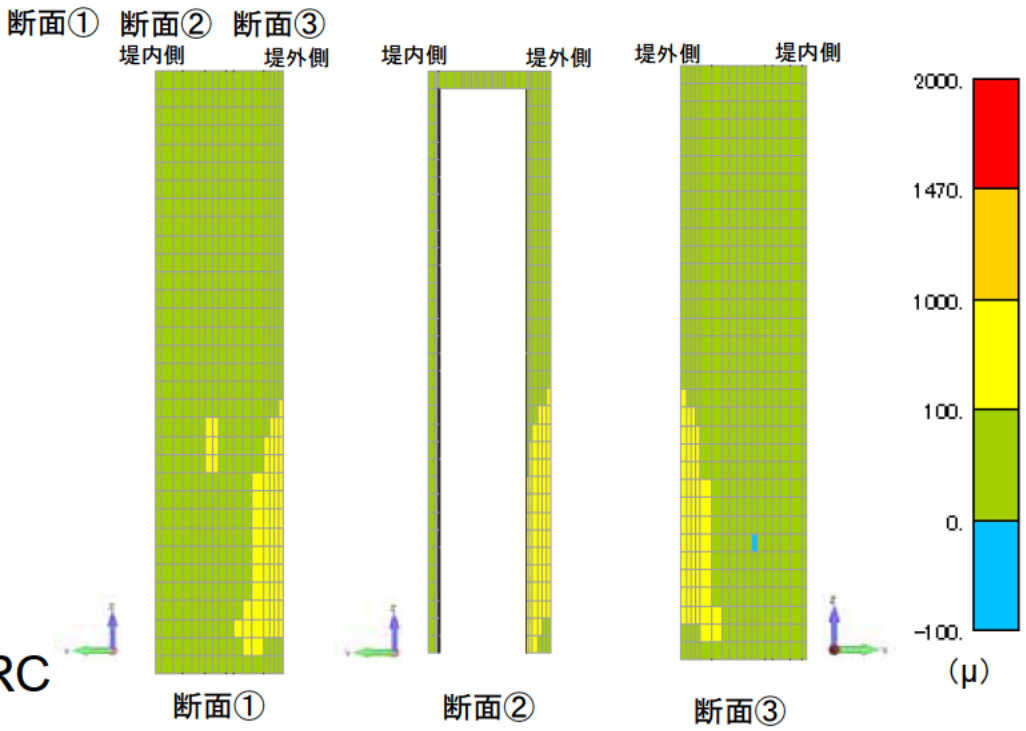
■津波時の解析結果

（2）最大主ひずみ分布（引張側）



最大主ひずみ分布（引張側）
（防潮堤外側）





縦断面の最大主ひずみ分布図

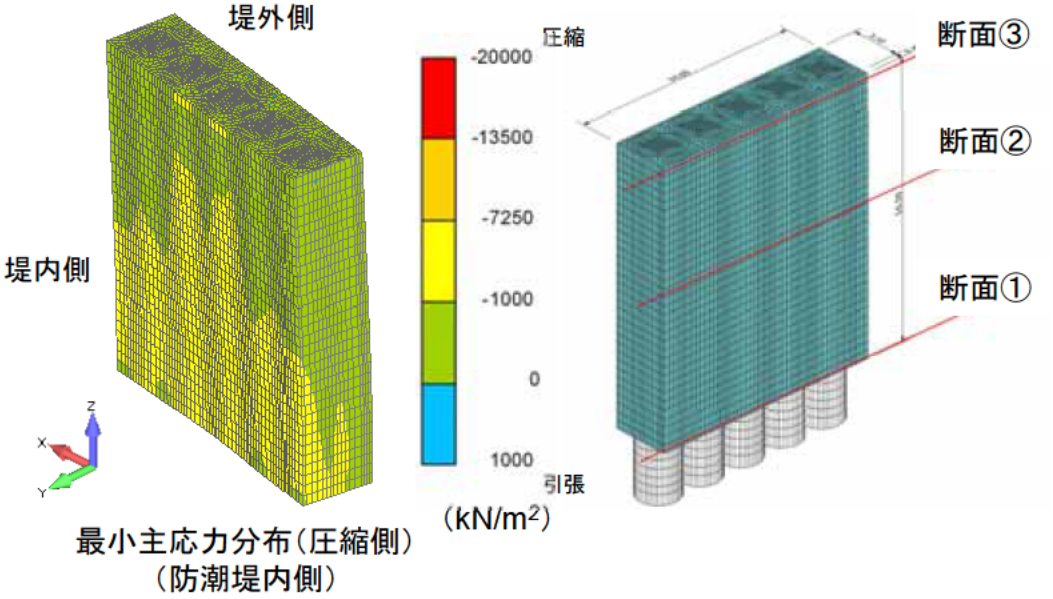
●発生する最大主ひずみは，最大で1000μ以下程度であり，RC壁体はRC部材として弾性範囲内である。

（参考）鉄筋の短期引張許容応力度：σ_{st}=294N/mm^{2}であることから，これを鉄筋の弾性係数で割り，短期許容引張応力度のひずみを算定すると1470μとなる。

三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■余震＋津波時の解析結果

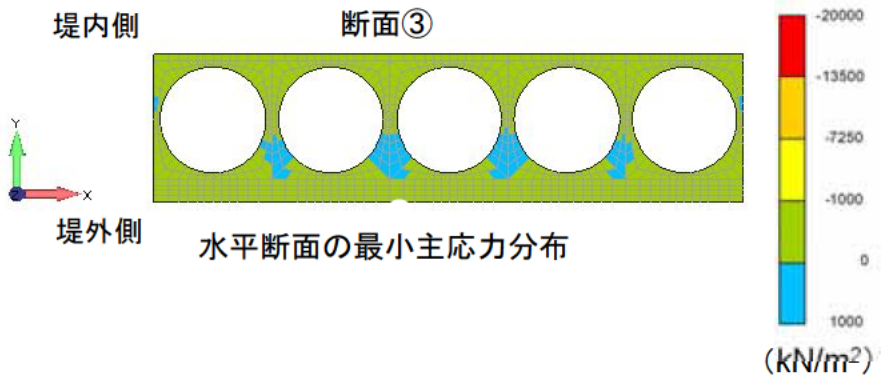
（1）最小主応力分布（圧縮側）

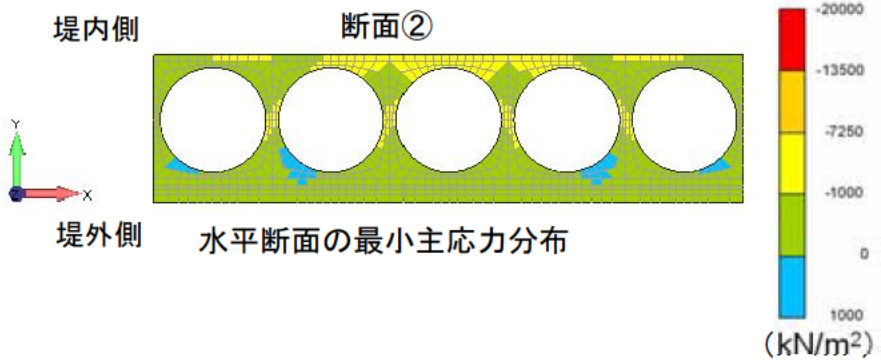


最小主応力分布（圧縮側）
（防潮堤内側）

最小主応力（最大断面）

位置	最小主応力(kN/m2)
断面①	−6,288
断面②	−2,075
断面③	−1,454



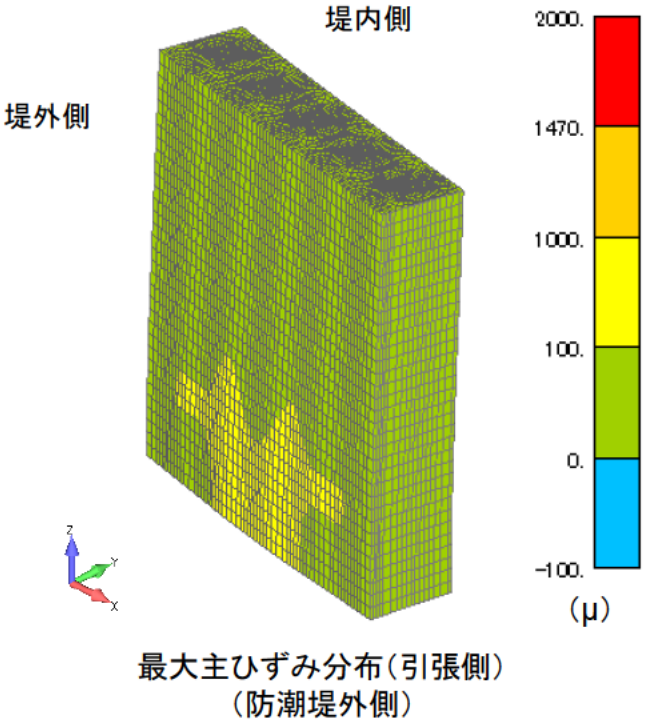


●発生する最小主応力は，圧縮側の最大で6,288kN/m²程度であり，コンクリート圧縮強度 24N/mm²(24,000kN/m²) を十分に下回る結果となった。

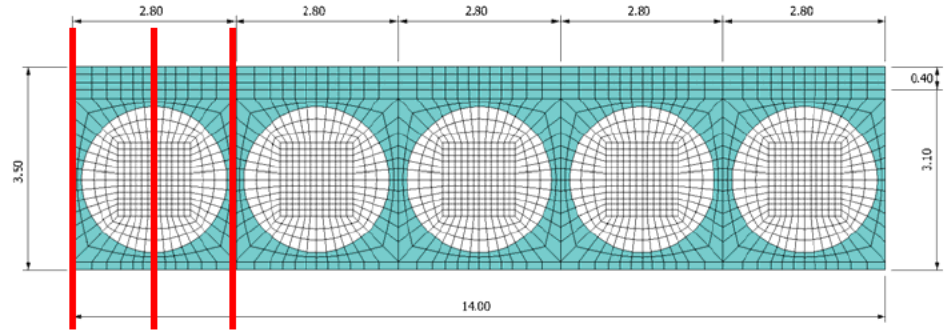
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

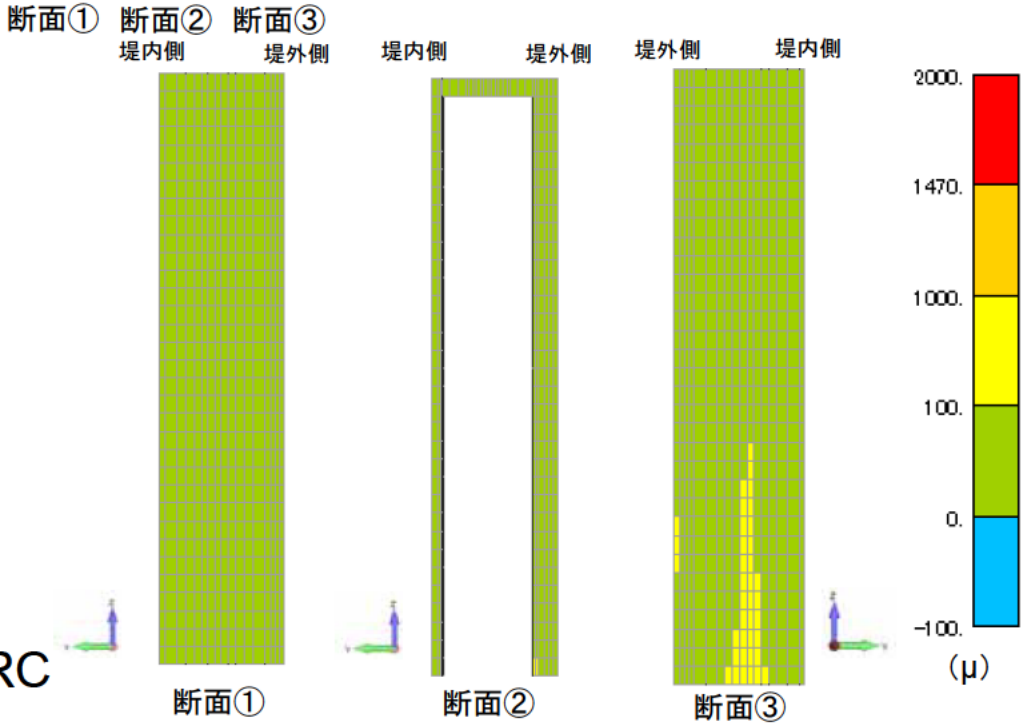
■余震＋津波時の解析結果

（2）最大主ひずみ分布（引張側）



最大主ひずみ分布（引張側）
（防潮堤外側）





縦断面の最大主ひずみ分布図

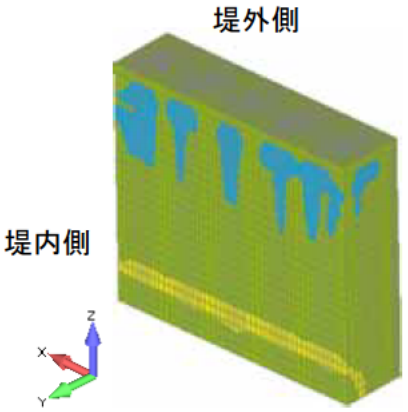
●発生する最大主ひずみは，最大で1000μ以下程度であり，RC壁体はRC部材として弾性範囲内である。

（参考）鉄筋の短期引張許容応力度：σ_{st}=294N/mm^{2}であることから，これを鉄筋の弾性係数で割り，短期許容引張応力度のひずみを算定すると1470μとなる。

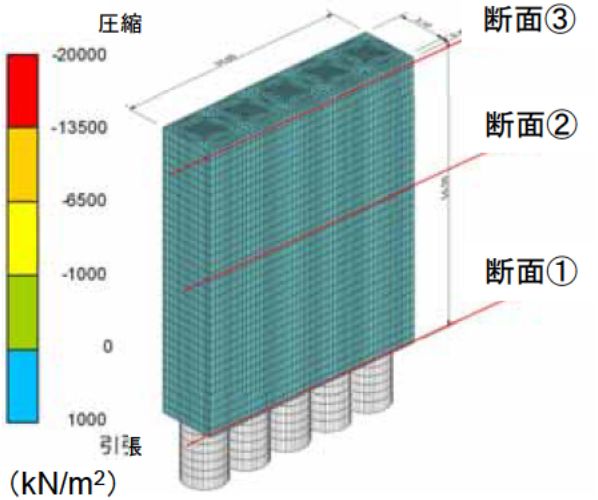
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

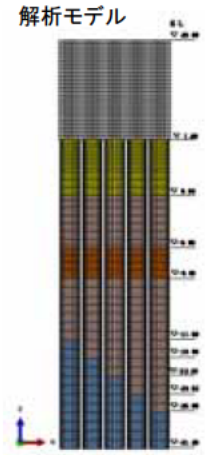
■地震時（岩盤傾斜モデル）の解析結果

（1）最小主応力分布（圧縮側）



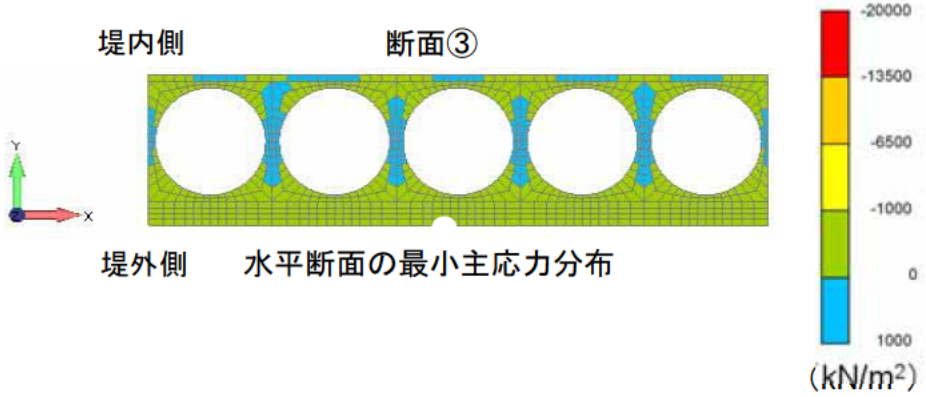
最小主応力分布（圧縮側）
（防潮堤内側）

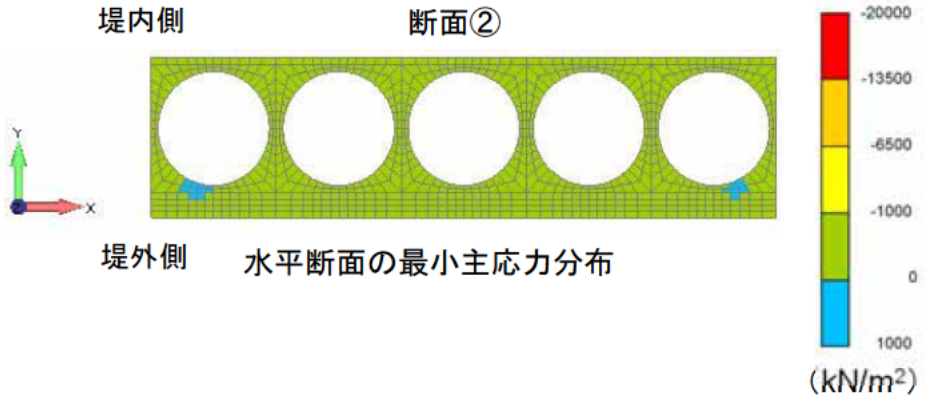


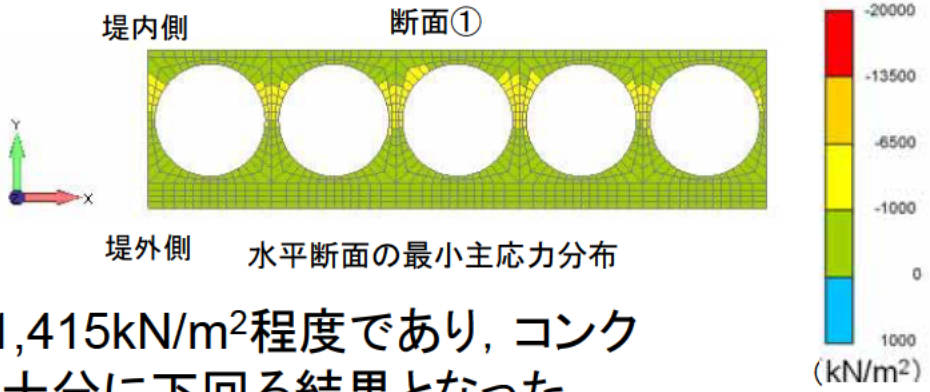


最小主応力（最大断面）

位置	最小主応力(kN/m2)
断面①	−1,415
断面②	−205
断面③	−63





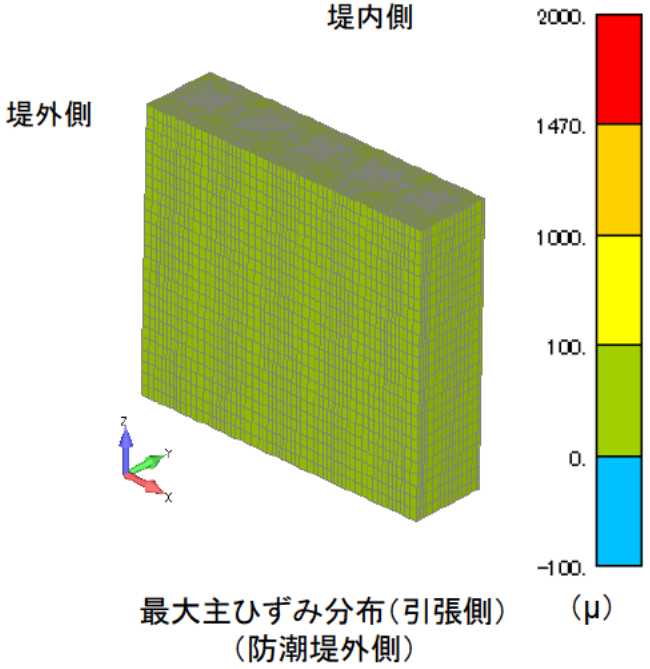


●発生する最小主応力は，圧縮側の最大で1,415kN/m²程度であり，コンクリート圧縮強度 24N/mm²(24,000kN/m²) を十分に下回る結果となった。

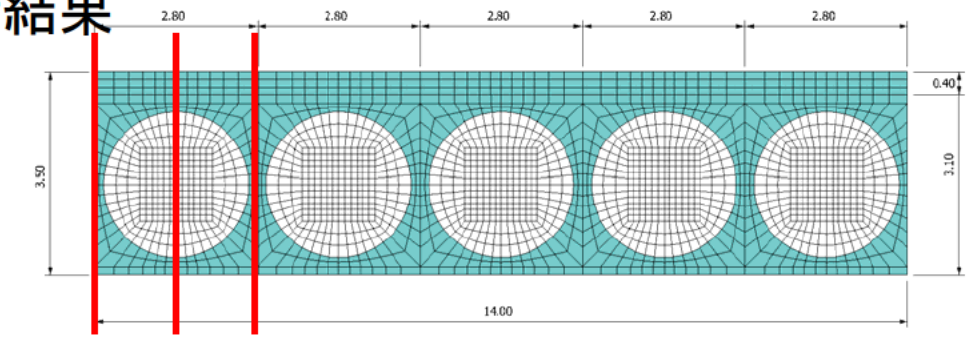
三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■地震時（岩盤傾斜モデル）の解析結果

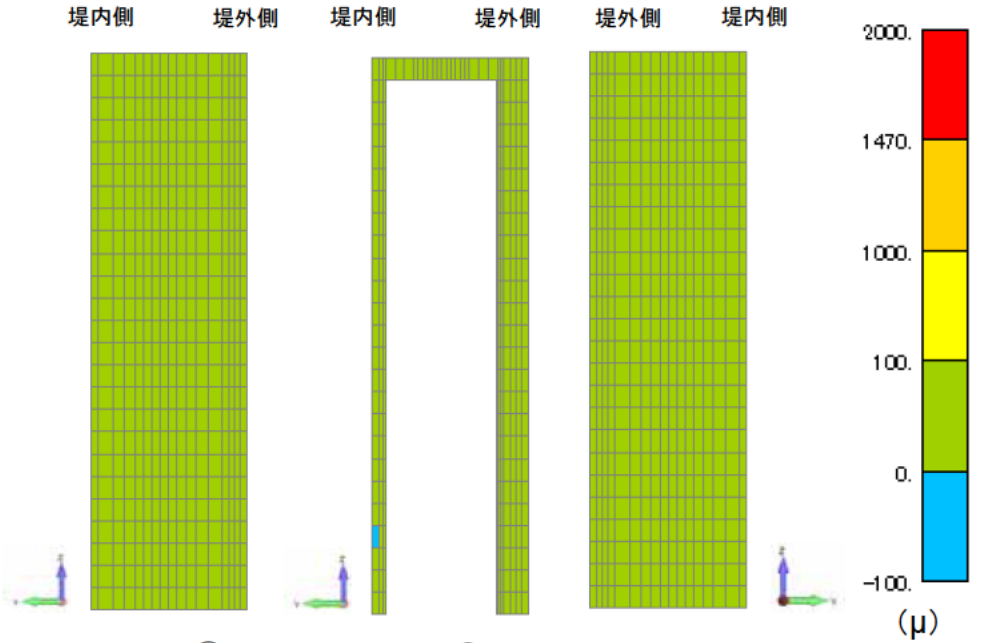
（2）最大主ひずみ分布（引張側）



最大主ひずみ分布（引張側）
（防潮堤外側）



断面① 断面② 断面③



縦断面の最大主ひずみ分布図

●発生する最大主ひずみは，最大で100μ以下程度であり，RC壁体はRC部材として弾性範囲内である。

（参考）鉄筋の短期引張許容応力度：σ_{st}=294N/mm^{2}であることから，これを鉄筋の弾性係数で割り，短期許容引張応力度のひずみを算定すると1470μとなる。

三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■地震時の照査結果

地震時の照査結果一覧

コンクリート	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	0.43	13.5	31.40	OK
鉄筋（引張）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	27.36	294	10.75	OK
鉄筋（圧縮）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	2.97	294	98.99	OK
せん断	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	0.45	0.68※	1.51	OK

※コンクリートのみの許容せん断応力度

三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■津波時の照査結果

津波時の照査結果一覧

コンクリート	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	2.94	13.5	4.59	OK
鉄筋（引張）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	58.19	294	5.05	OK
鉄筋（圧縮）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	13.75	294	21.38	OK
せん断	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	112.73※1	294※2	2.61	OK

※1せん断補強鉄筋に作用する応力度
※2せん断補強筋の許容せん断応力度

三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■余震＋津波時の照査結果

余震＋津波時の照査結果一覧

コンクリート	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	1.21	13.5	11.16	OK
鉄筋（引張）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	47.47	294	6.19	OK
鉄筋（圧縮）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	11.99	294	24.52	OK
せん断	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	237.28※1	294※2	1.24	OK

※1せん断補強鉄筋に作用する応力度
※2せん断補強筋の許容せん断応力度

三次元FEM解析モデルを用いた評価結果

■地震時（岩盤傾斜モデル）の照査結果

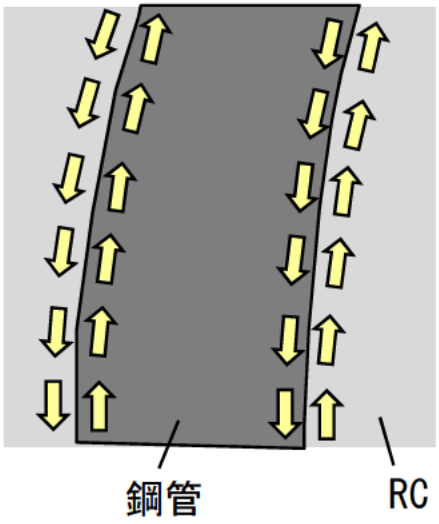
地震時（岩盤傾斜モデル）の照査結果一覧

コンクリート	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	0.55	13.5	24.55	OK
鉄筋（引張）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	17.68	294	16.63	OK
鉄筋（圧縮）	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	2.63	294	111.79	OK
せん断	発生応力度 (N/mm^2)	許容値 (N/mm^2)	安全率	判定
	0.55	0.68※	1.24	OK

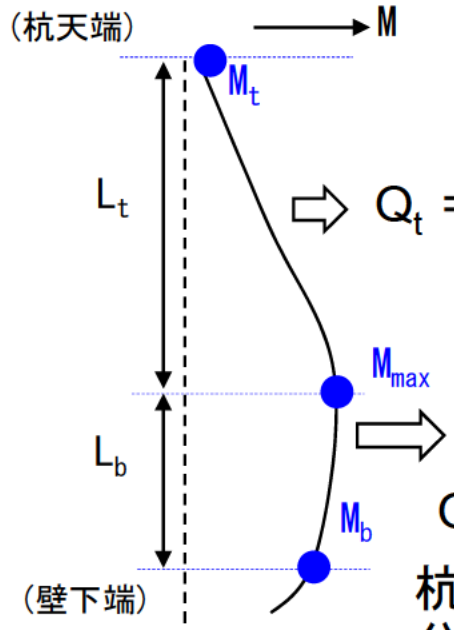
※コンクリートのみの許容せん断応力度

鋼管杭と鉄筋コンクリートの接合面の一体性確保

- 鋼管杭と鉄筋コンクリートの接合面の一体性を強固なものとするため，スタッドを配置して確実な接合を行う方針とする。
- 杭の曲げ変形により，鋼管と鉄筋コンクリートの間のせん断力に対して，ずれを生じさせないために必要なスタッドを配置する。
- せん断力は，杭の曲げモーメント分布の勾配として求め，各区間の平均的なせん断力とする。



鋼管とRCの接合面に作用するせん断力



$Q_t = (M_{max} - M_t) / L_t$

$Q_b = (M_{max} - M_b) / L_b$

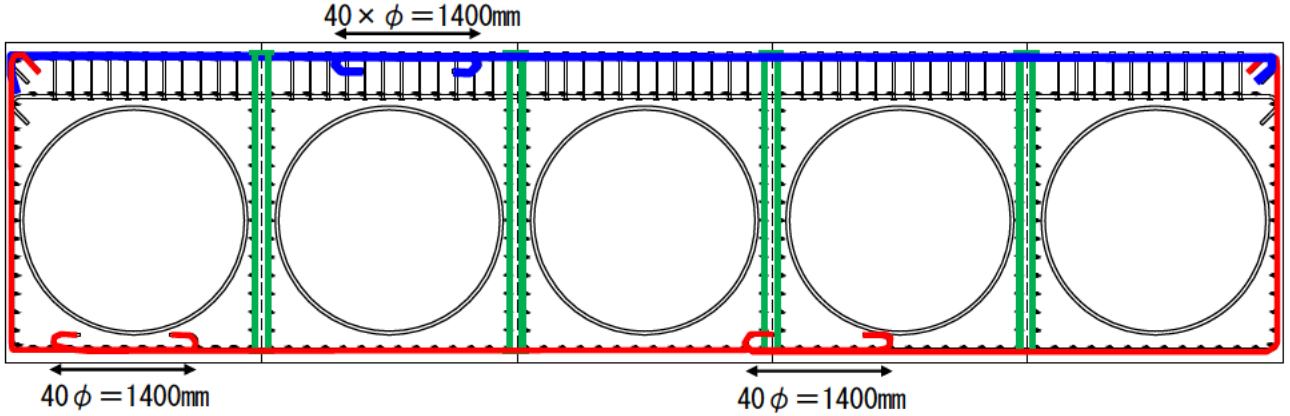
杭の曲げモーメント分布に基づくせん断力の算出方法

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

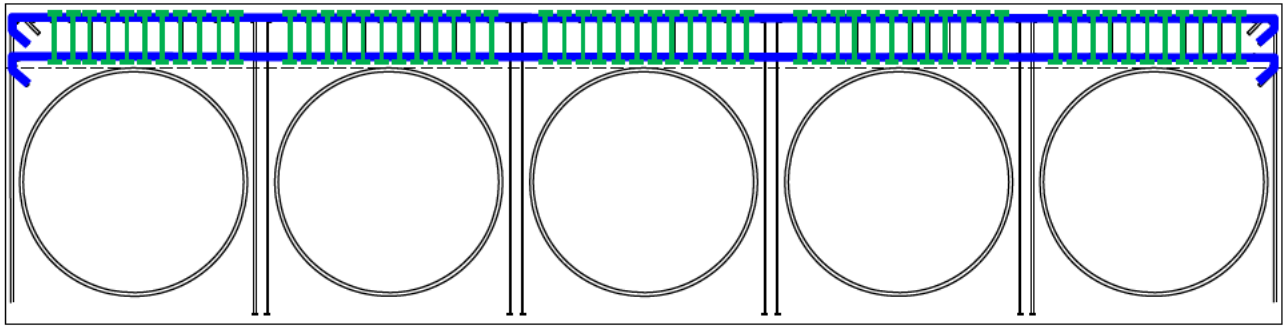
鉄筋コンクリートの配筋

「5本の柱を束ねる鉄筋」および「梁壁の鉄筋」は鉄筋により一体結合される。

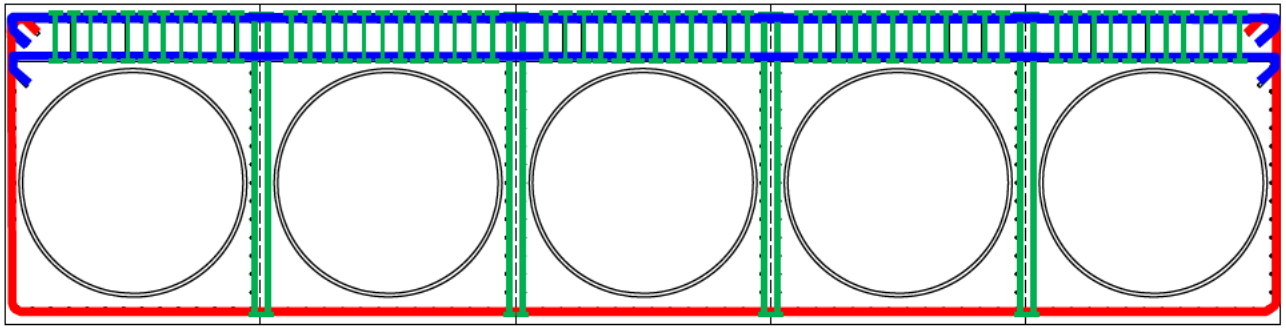
鋼管コンクリート構造の鉄筋
（5本の柱を束ねる鉄筋）



梁壁の鉄筋
（主筋およびせん断補強筋）

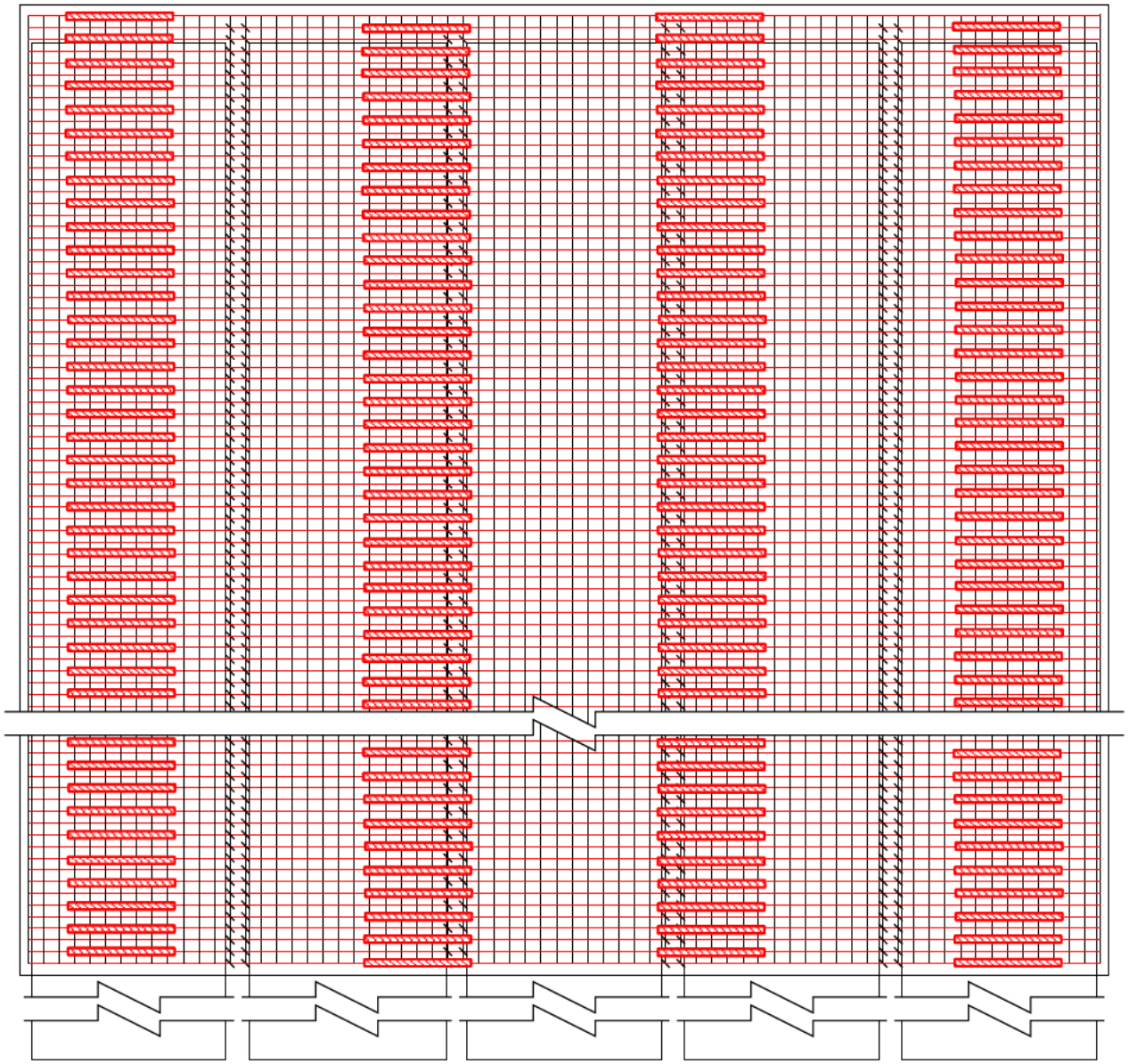


両方の鉄筋は，一部を共有して配置される。



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)



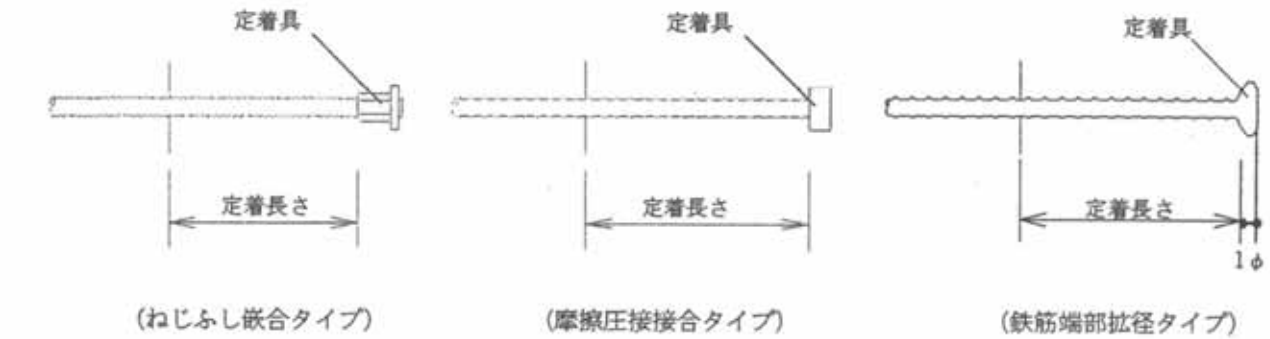
：鋼管コンクリート構造の鉄筋
（5本の柱を束ねる鉄筋）

：鉄筋継手位置
（40×φ=1400㎜・千鳥配置）

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。

壁部材への適用状況



土木地中構造物への適用状況

防潮壁間の相互の支圧力に関する照査

■ 標準部，隅角部及び異種構造物の継目部において，地震時に防潮壁どうしが相互に支圧する可能性があることを考慮し，地震時の相互の支圧力に対して，RC壁体が損傷しないことを確認する。

■ 具体的には，反対側防潮壁あるいはポンプ室側の竪壁の慣性力を防潮壁側面に載荷して，支圧応力の照査を実施する。

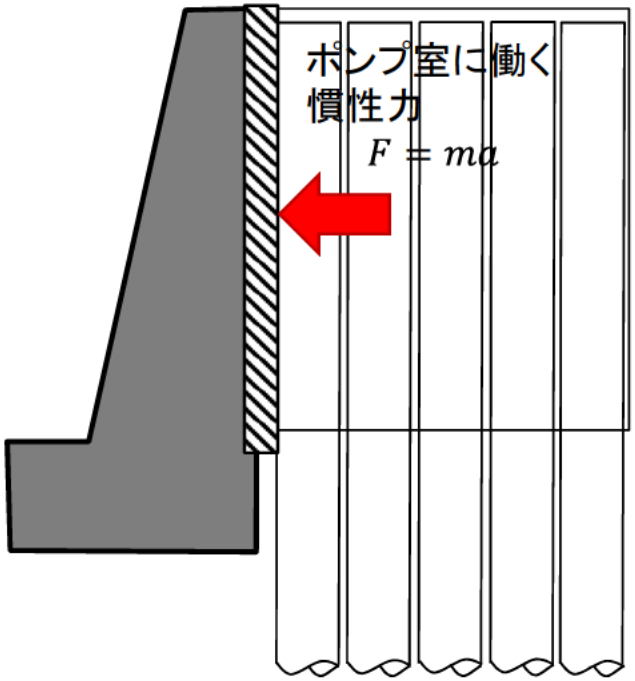
鉄筋コンクリート壁体に働く慣性力：$F = ma$
ここに，mはポンプ室側慣性力，aは地震時加速度

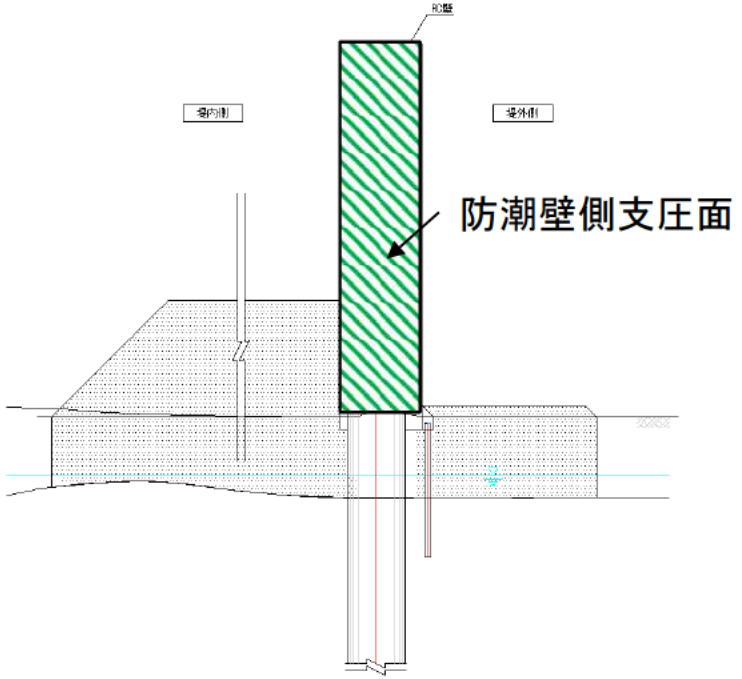
防潮壁側支圧応力度σ_{cv}

$$\sigma_{cv} = \frac{F}{b \cdot h} \leq \sigma_{ca}$$

ここに，bは防潮壁の幅，hは防潮壁高さ

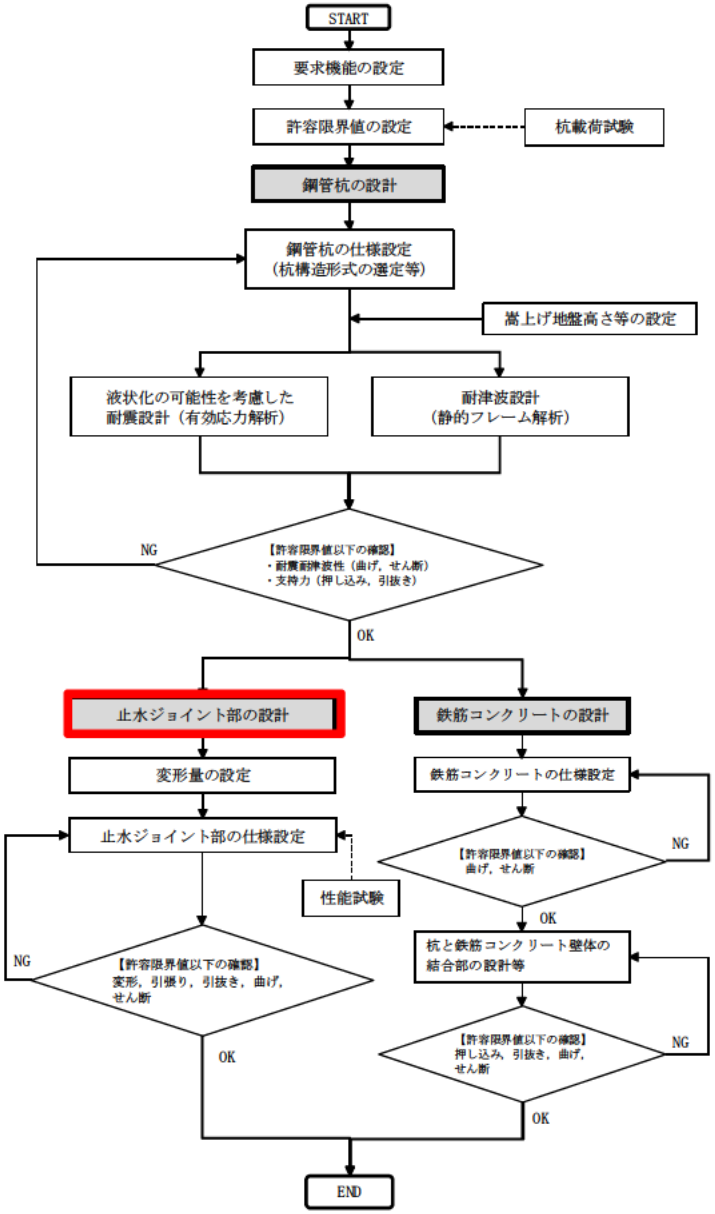
支圧応力度の許容応力度は道示Ⅳ下部構造編に準じる





10. 止水ジョイント部の設計方針

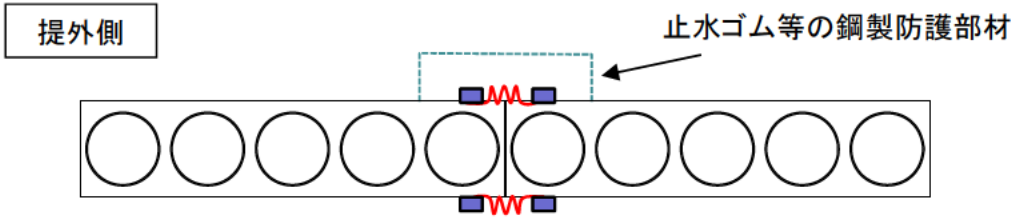
10. 設計方針（設計手順）

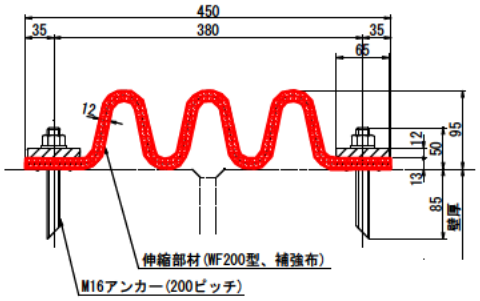

START
要求機能の設定
許容限界値の設定
杭載荷試験
鋼管杭の設計
鋼管杭の仕様設定
（杭構造形式の選定等）
嵩上げ地盤高さ等の設定
液状化の可能性を考慮した
耐震設計（有効応力解析）
耐津波設計
（静的フレーム解析）
NG
【許容限界値以下の確認】
・耐震耐津波性（曲げ，せん断）
・支持力（押し込み，引抜き）
OK
止水ジョイント部の設計
鉄筋コンクリートの設計
変形量の設定
鉄筋コンクリートの仕様設定
止水ジョイント部の仕様設定
【許容限界値以下の確認】
曲げ，せん断
NG
性能試験
OK
NG
【許容限界値以下の確認】
変形，引張り，引抜き，曲げ，
せん断
杭と鉄筋コンクリート躯体の
結合部の設計等
OK
【許容限界値以下の確認】
押し込み，引抜き，曲げ，
せん断
NG
OK
END

止水ジョイント部―概要―

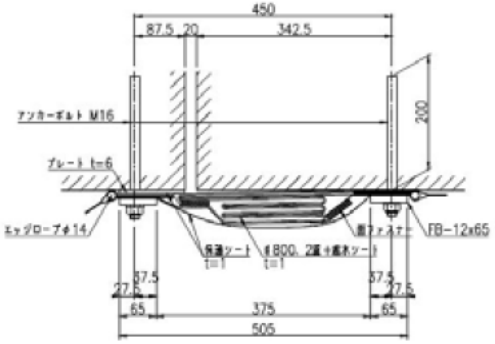
■ 主要な構造体の境界部には，想定される荷重の作用を考慮し，試験等にて止水性を確認した止水ジョイント等で止水処置を講ずる設計とする。

- ✓ 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，その境界に止水性を確保するための止水ジョイント部を設ける。
- ✓ 止水ジョイント部は，地震時に構造物間に生じる相対変位と，その後の津波や余震により構造物間に生じる相対変位に対して止水性を確保するため，伸縮性を有するものとし，堤内側及び堤外側の両面に止水ゴム等を設置する。
- ✓ 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堤内側及び堤外側の両面に止水ゴム等を設置する。
- ✓ なお，堤外側の止水ジョイント部には，止水ゴム等における漂流物防止対策として，止水ゴム等の鋼製防護部材を設置する。





ゴムジョイント



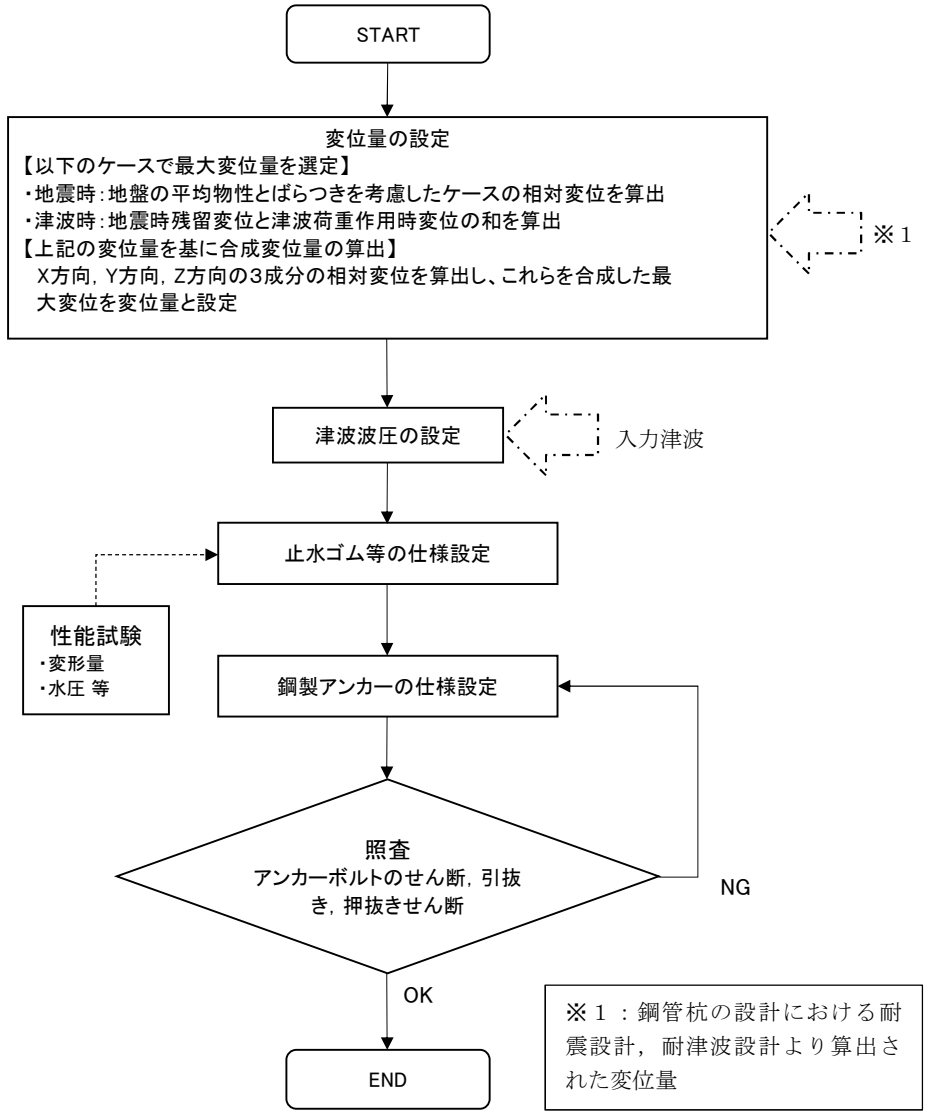
シートジョイント

止水ジョイント部の設計方針

■ 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より算出された変位量及び入力津波を用い津波波圧式より算出した津波波圧に対し，止水ゴム等の止水性が維持できることを確認し，止水ゴム等の仕様を設定する。

■ 止水ゴム等の仕様設定は，性能試験（漏水試験・変形試験）により津波波圧に耐え，止水機能を維持できる変形量となるよう設定するとともに，構造物間に生じる相対変位に対し追従可能な材料を設定する。

■ なお，止水ゴム等の取り付け部の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とともに，止水ゴム等における漂流物防止対策として，止水ゴム等の鋼製防護部材を設置し発生する曲げ及びせん断応力等が短期許容応力度以下であることを確認する。



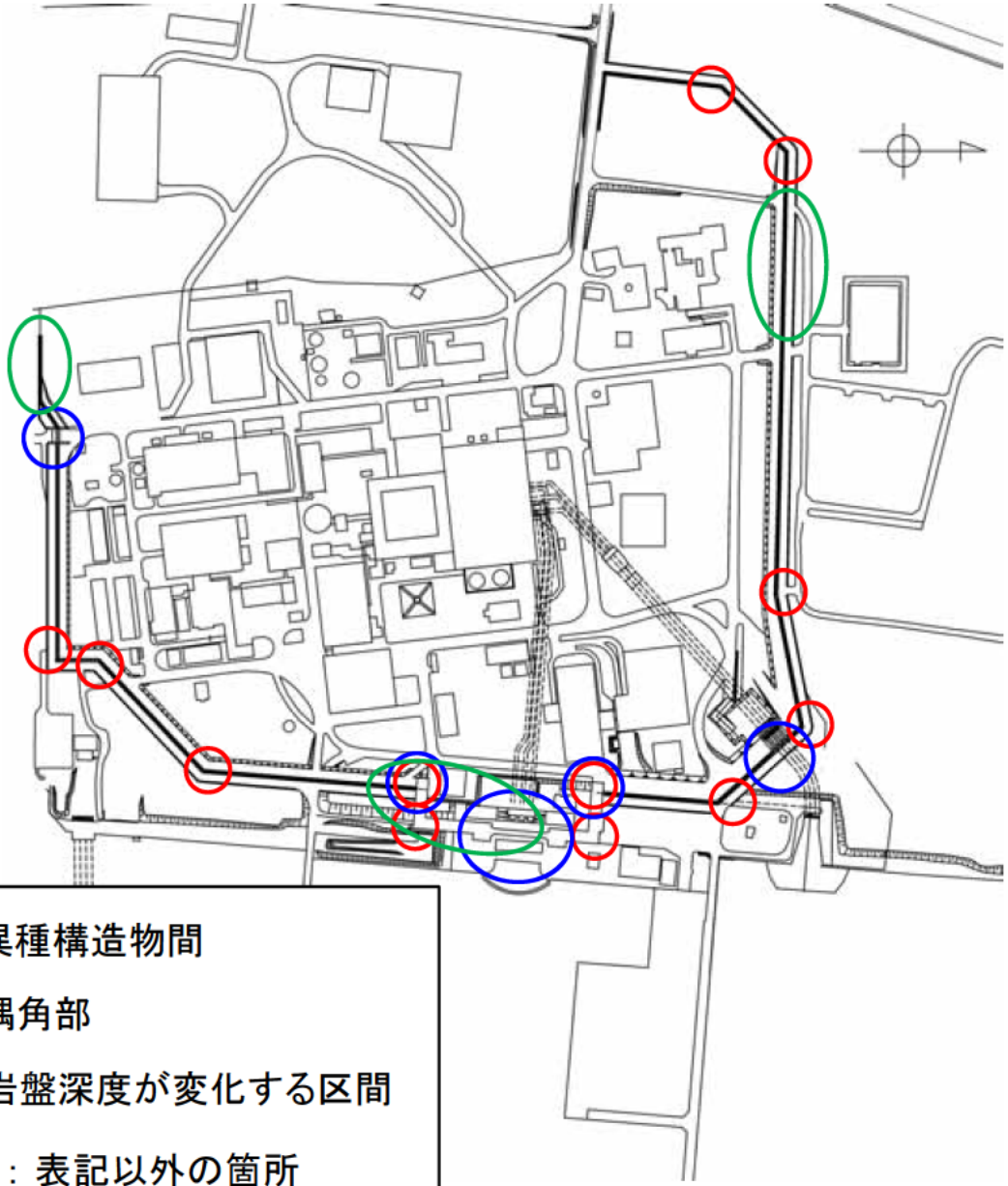
相対変位の設定方針

【鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁標準部】

- 地震時における変位量の設定は，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を算出して設定する。
- 津波時における変位量の設定は，地震時残留変位と津波荷重作用時変位の和を算出して設定する。
- さらに，地震時及び津波時の変位量による合成変位量は，X方向，Y方向，Z方向の3成分の相対変位を算出し，これらを合成した最大変位量として設定する。

【隅角部，異種構造物】

- 隅角部及び異種構造物間の変位量の設定は，標準部と同様に最大変位量を設定する。



止水ゴム等の適用方針及び性能確認について

適用方針

■ 止水ゴム等は，津波波圧に耐えうる材料を選定する。
■ また，止水ゴム等は構造物間に生じる相対変位に対し，その相対変位に追従可能な材料を選定することとする。
■ 止水ゴム等は，変位量に応じゴムジョイント，シートジョイントの使い分けを計画している。

性能確認

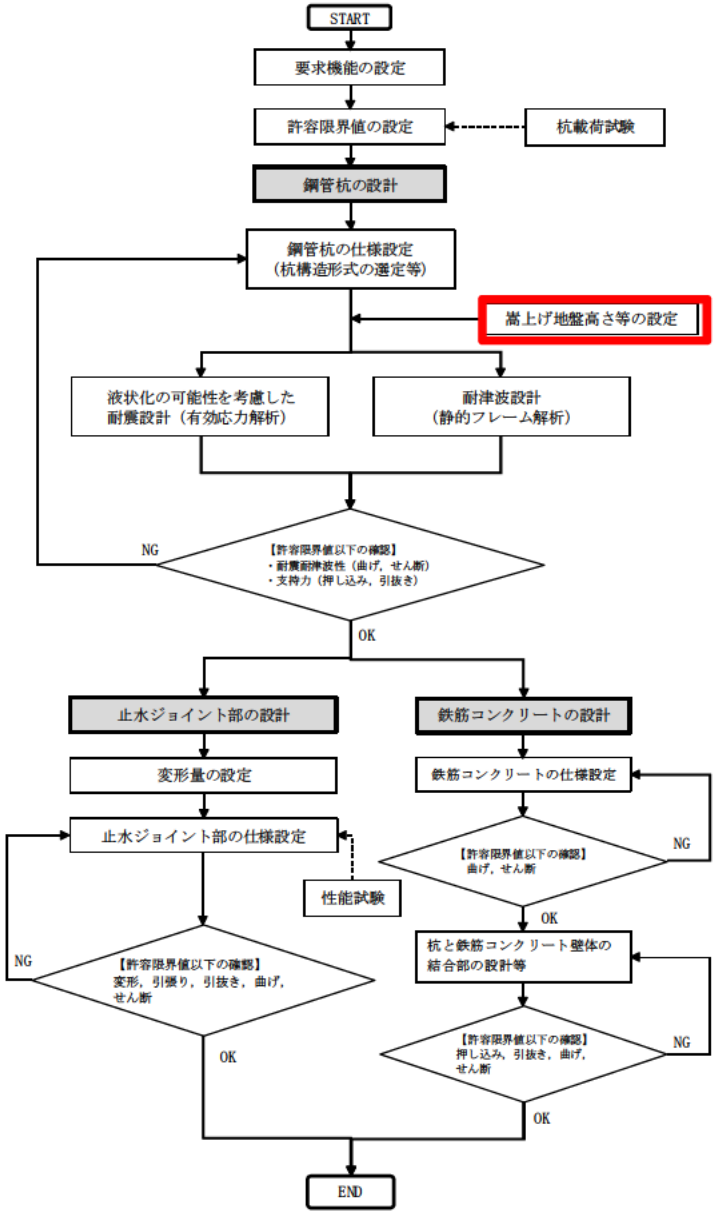
■ 止水ジョイント（ゴムジョイント，シートジョイント）について，下表の通り性能試験を実施した。
　✓ ゴムジョイントの0.55MPa耐圧試験に関しても実施を計画中。
　✓ 耐候性試験についても，保全プログラムへの反映等が可能なように，試験を計画中。

試験結果

止水ゴム等	試験内容	試験結果
シートジョイント	耐圧試験（0.26MPa，1hr）	良
	耐圧試験（0.55MPa，1hr）	良
	継続載荷試験（56.45KN/30cm，10分）	良
	繰返載荷試験（56.45KN/30cm，10回）	良
	継続載荷試験（56.45KN/30cm，10分，取付角45°）	良
	繰返載荷試験（56.45KN/30cm，10回，取付角45°）	良
	耐候性試験	計画中
ゴムジョイント	耐圧試験（0.26MPa，1hr，伸び250mm）	良
	耐圧試験（0.26MPa，1hr，剪断300mm）	良
	耐圧試験（0.26MPa，1hr，伸び125mm，剪断150mm）	良
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，伸び250mm）	計画中
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，剪断300mm）	計画中
	耐圧試験（0.55MPa，1hr，伸び125mm，剪断150mm）	計画中

11. 地盤の嵩上げ部(改良体), シートパイル, 表層地盤改良の設計方針

11. 設計方針(設計手順)


START
要求機能の設定
許容限界値の設定
杭載荷試験
鋼管杭の設計
鋼管杭の仕様設定
(杭構造形式の選定等)
嵩上げ地盤高さ等の設定
液状化の可能性を考慮した
耐震設計（有効応力解析）
耐津波設計
(静的フレーム解析)
NG
【許容限界値以下の確認】
・耐震耐津波性（曲げ，せん断）
・支持力（押し込み，引抜き）
OK
止水ジョイント部の設計
鉄筋コンクリートの設計
変形量の設定
鉄筋コンクリートの仕様設定
止水ジョイント部の仕様設定
【許容限界値以下の確認】
曲げ，せん断
NG
性能試験
OK
杭と鉄筋コンクリート壁体の
結合部の設計等
NG
【許容限界値以下の確認】
変形，引張り，引抜き，曲げ，
せん断
【許容限界値以下の確認】
押し込み，引抜き，曲げ，
せん断
NG
OK
OK
END

表層地盤改良及びシートパイル等の設定方針

■鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁周りの表層付近の地盤においては，地震時における変形や津波による洗掘などに対して，浸水防護をより確実なものとするために，地盤改良を実施する。

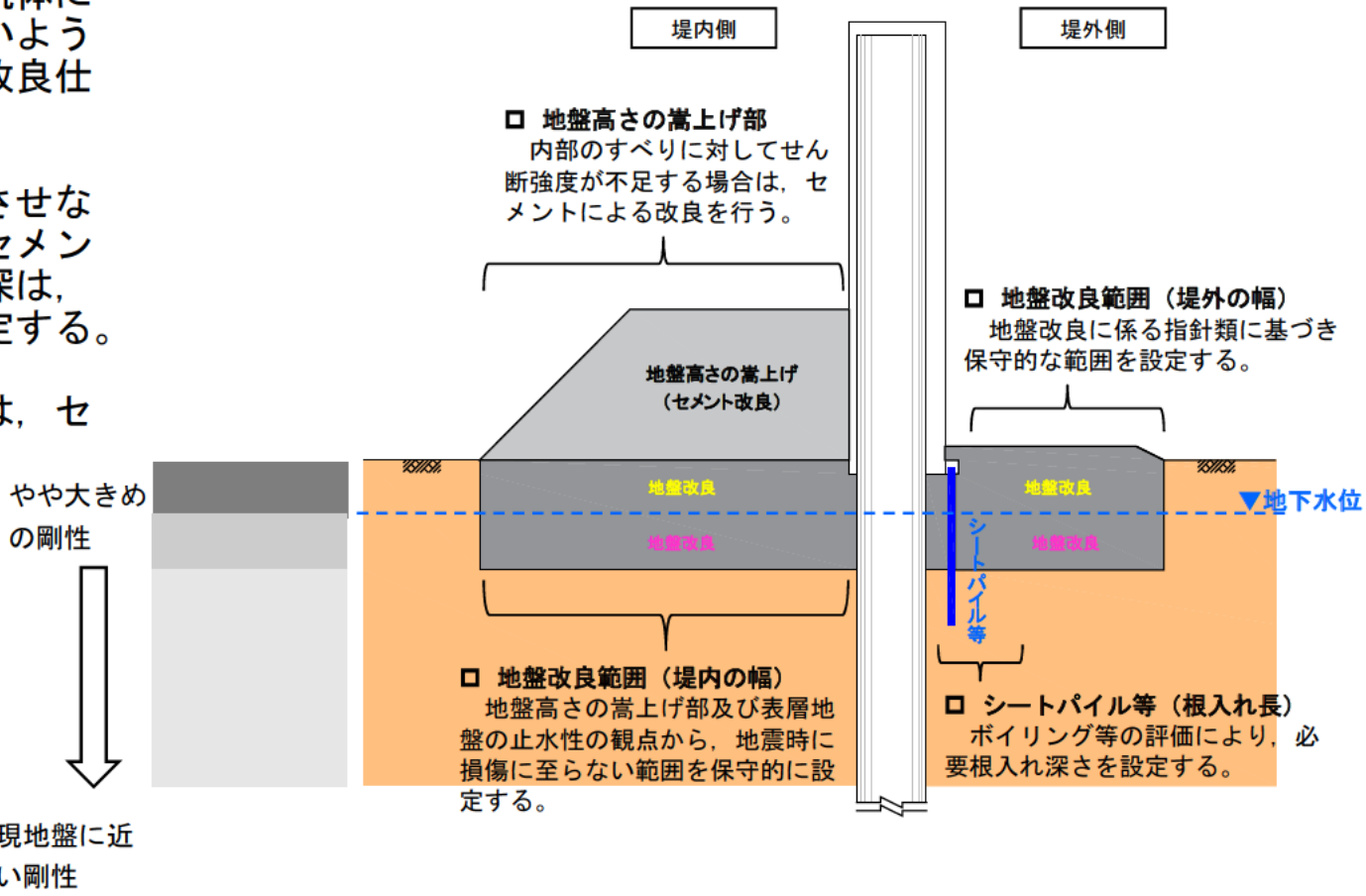
■地盤改良範囲（深さ方向）
表層地盤の過剰間隙水圧比が比較的高い範囲や杭体に生じる断面力の低減等を考慮し，深さ方向の改良範囲を保守的に設定する。

■地盤改良工法の選定
地盤の剛性急変部により，杭体に局所的な応力を生じさせないように地盤改良工法を選定し，改良仕様を設定する。

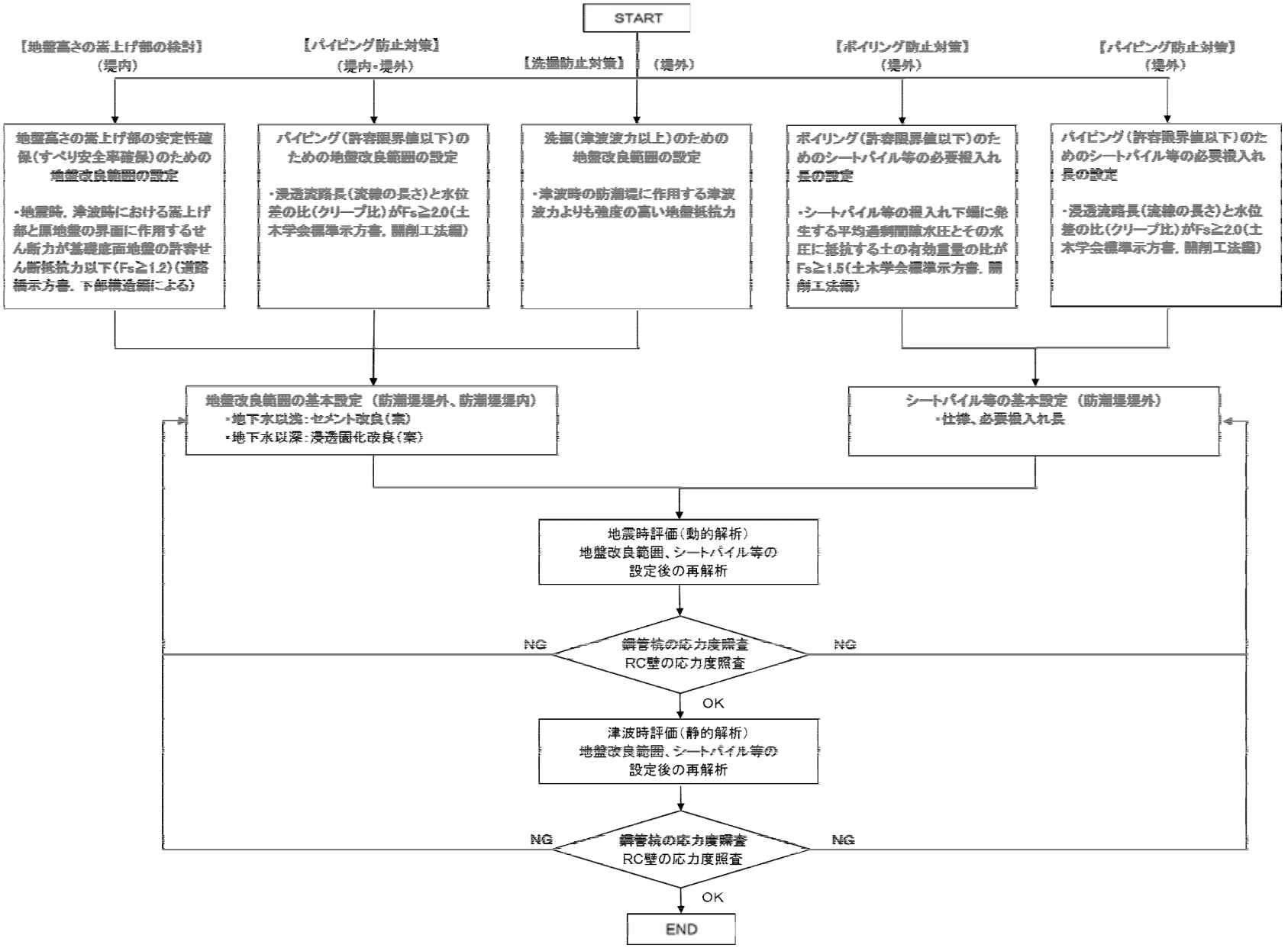
現地盤に剛性急変部を生じさせないように，地下水位以浅はセメント改良工法を，地下水位以深は，浸透固化工法を基本的に選定する。

また，地盤高さの嵩上げ部は，セメント改良工法を実施する。

地盤剛性が，上層から下層に向けて，やや大きめの剛性から現地盤に近い剛性に移行するような改良仕様を設定する。



表層地盤改良及びシートパイル等の設定方針



表層地盤改良及びシートパイル等の設定に係るフロー（洗掘防止等防止対策）

ボイリング，パイピング防止対策の検討方針（1／3）

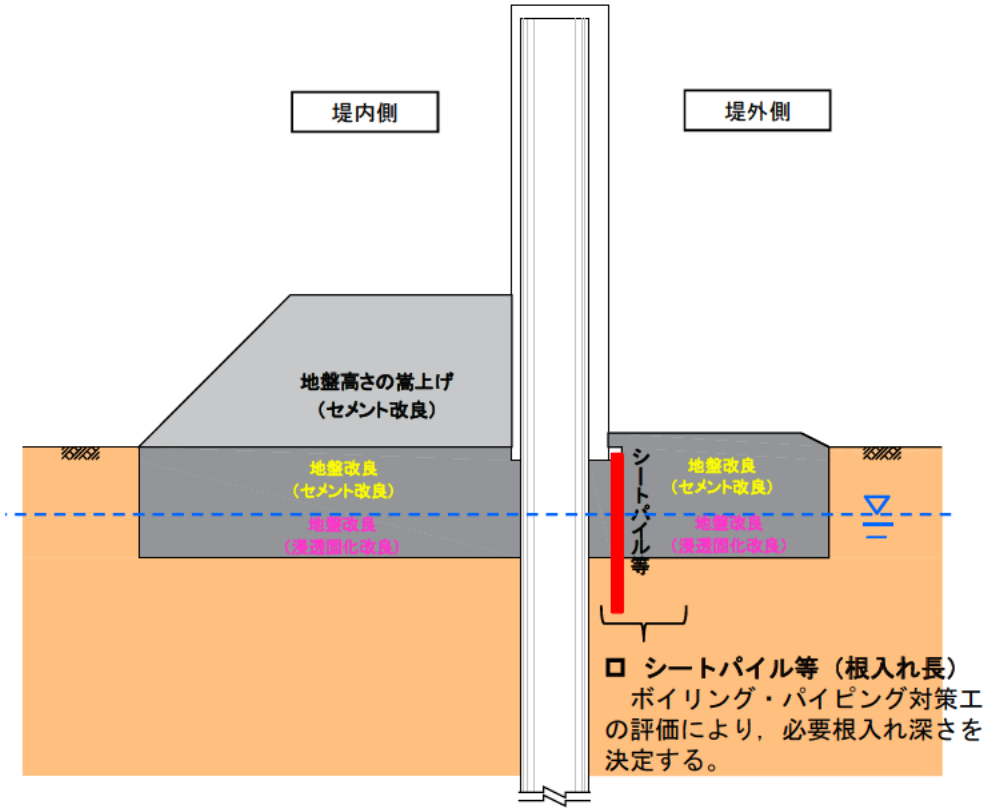
■鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁は，津波時において堤外側と堤内側に水位差を考慮し，ボイリング，パイピングが生じないように対策を講じる。

【ボイリング対策内容】

・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の堤外側にシートパイル等を設置し，堤内側の土の重量とシートパイル等の先端位置に作用する水圧との比から必要根入れ深さを設定する。

【パイピング対策内容】

・鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の堤外側，堤内側の表層地盤に対して地盤改良を実施すると共に堤外側にシートパイル等を設置し，浸透流路長を増加させる。



ボイリング, パイピング防止対策の検討方針(2／3)

■ボイリングの検討

ボイリングは, 津波時の防潮壁前面と背面の水位差によって, 堤内側に上向きの浸透流が生じ, この浸透圧が堤内側の有効重量を超えると発生する。
よって, 堤内側の土の重量とシートパイル先端位置に作用する平均過剰水圧との比を取って下式より照査する。

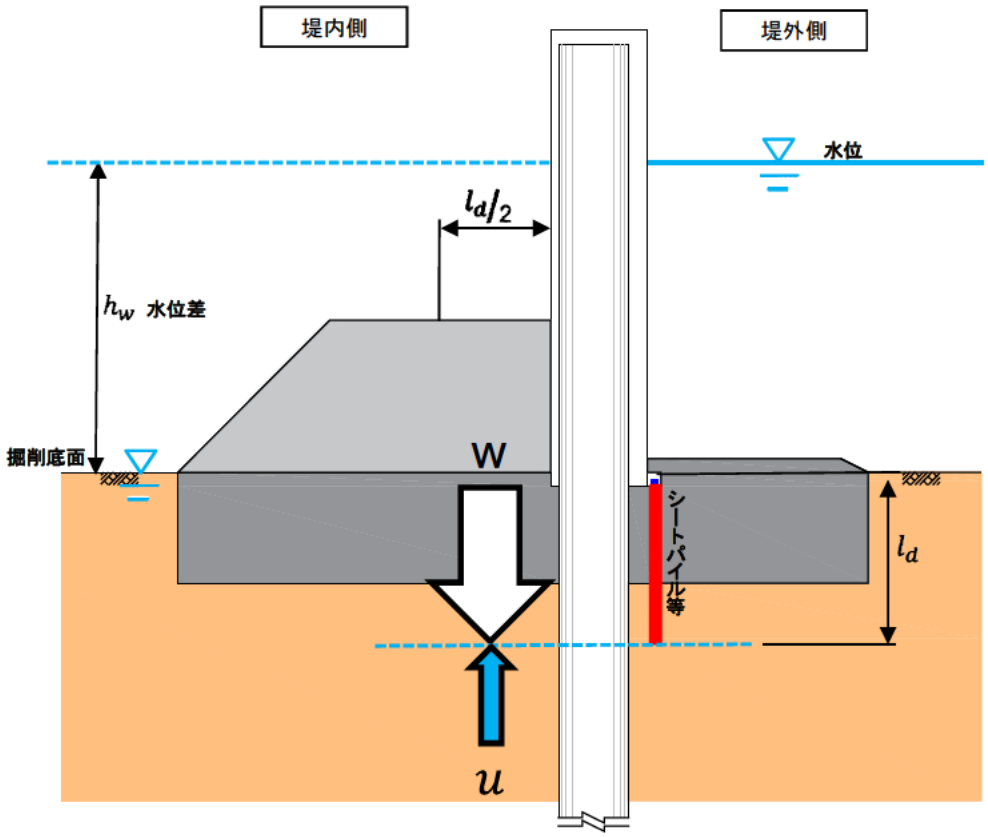
$$F_s = \frac{w}{u}$$

ここに,
u:土止め壁先端に作用する平均過剰間隙水圧
w:土の有効重量で下式による

$$w = \gamma' l_d$$

ここに,
γ':土の水中単位体積重量
l_d:土止め壁の根入れ深さ

なお, 安全率は, 土木学会トンネル標準示方書開削編に従い, F_s=1.5以上を確保する。



ボイリング, パイピング防止対策の検討方針(3／3)

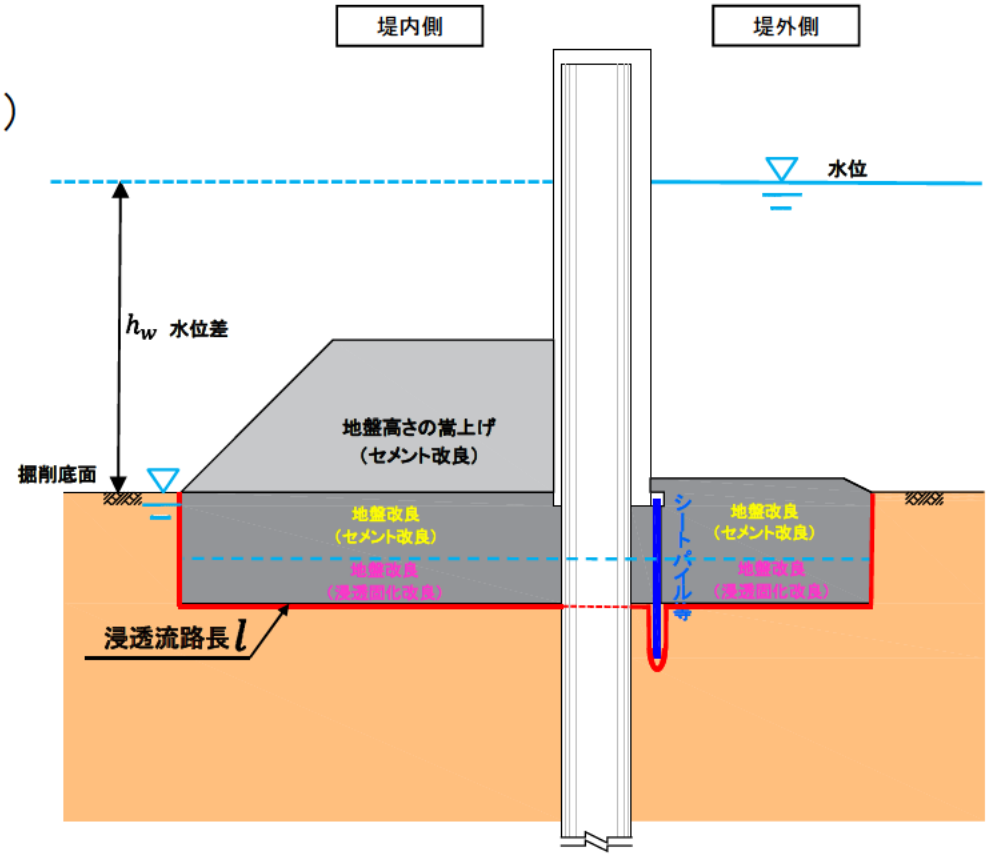
■パイピングの検討

パイピングに対する検討は, 浸透流路長と
水位差の比を考慮した下式により算出する。

$$l/h_w \geq 2$$

ここに,
l:浸透流路長
h_w:水面から掘削底面までの高さ(水位差)

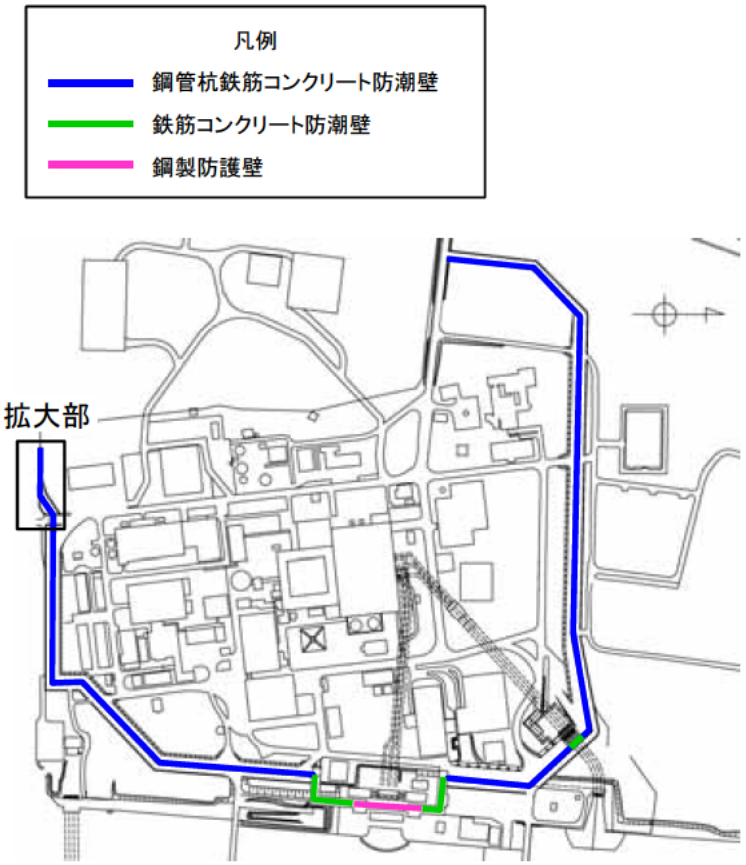
安全率は, 土木学会トンネル標準示方書
開削編に従い, Fs=2.0以上を確保する。

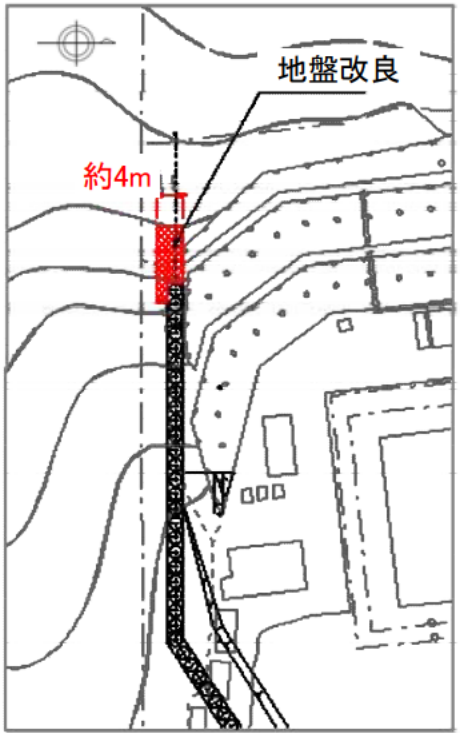


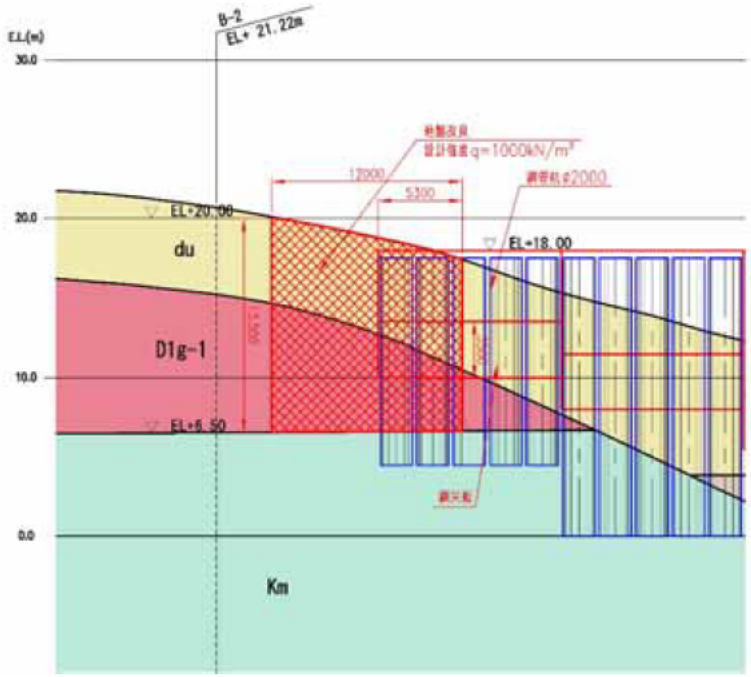
洗掘防止対策の検討方針

■ 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁と南側斜面の摺り付け部において, 津波による洗掘対策として表層地盤の地盤改良を実施する。

■ 地盤改良の対象は, 非常に硬い洪積礫層であるD1g-1層の上位に堆積する完新統のdu層, D1g-1層とし, 防潮堤天端であるT.P.+18mに余裕を持たせてT.P.+20mまでの範囲を対象とする。







鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁底部の地盤根入れ長の設計方針

■鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁底部の根入れ長は, 地震時に生じる地表面の沈下量に基づき設定する。

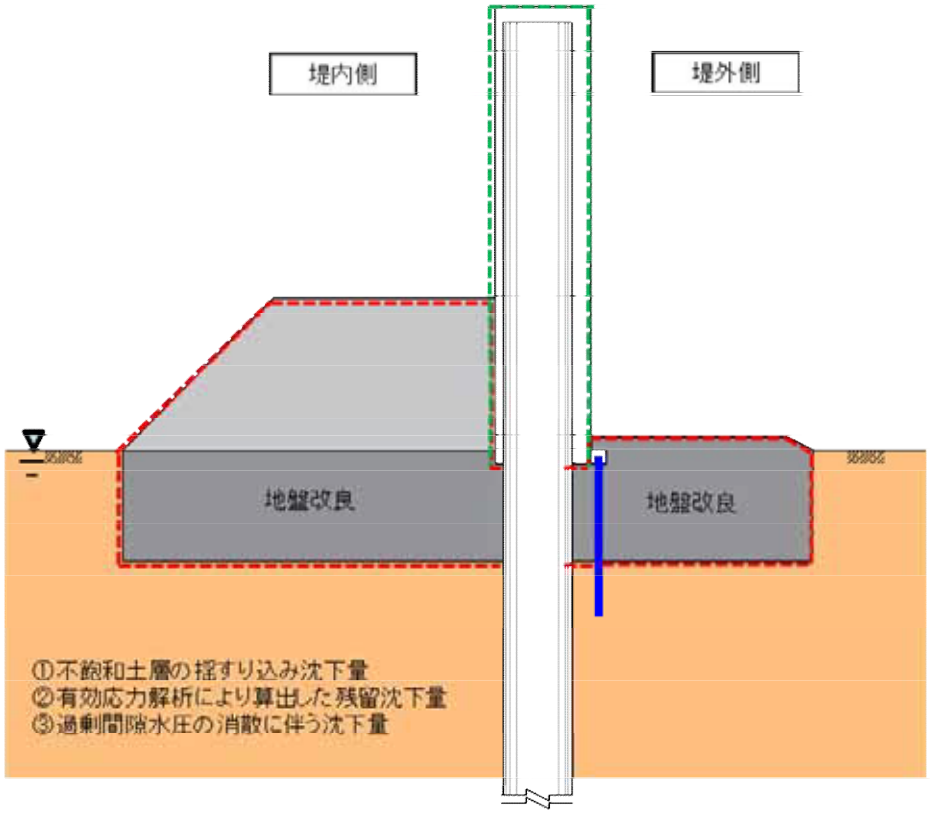
考慮する地震時の沈下量は,

① 不飽和土層のゆすり込み沈下量

② FLIPにより算出された残留沈下量

③ 過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量

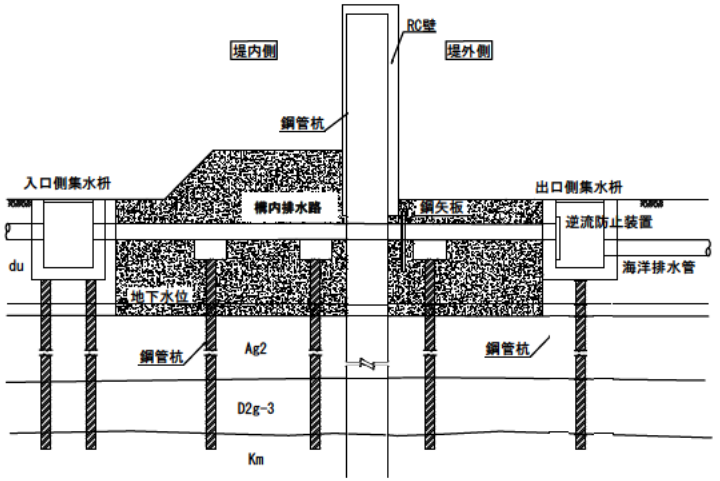
鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁底部の地盤根入れ長 ＞ 地震による地表面沈下量＝①＋②＋③

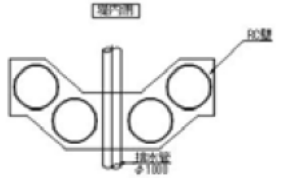


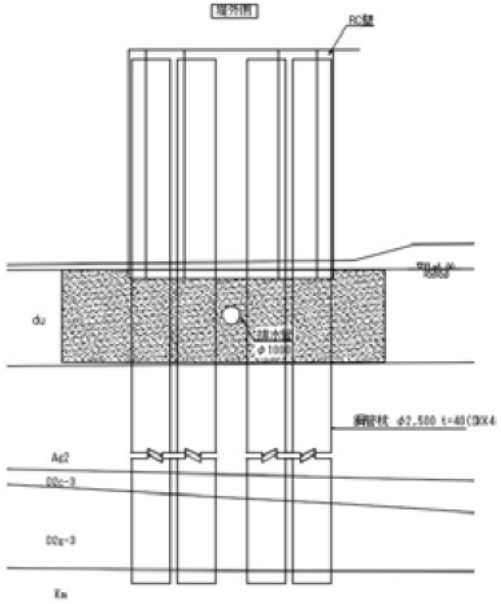
地震時及び地震後

構内排水路と防潮堤の交差部

- 構内排水路は直径約1mの鋼製の管路であり, 鋼管杭鉄筋コンクリートはこれを跨いで設置する。
- 構内排水路交差部の鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の鋼管杭は杭を一部重ねて配置し, 標準部の防潮壁よりも断面性能が高くなるよう設計する。





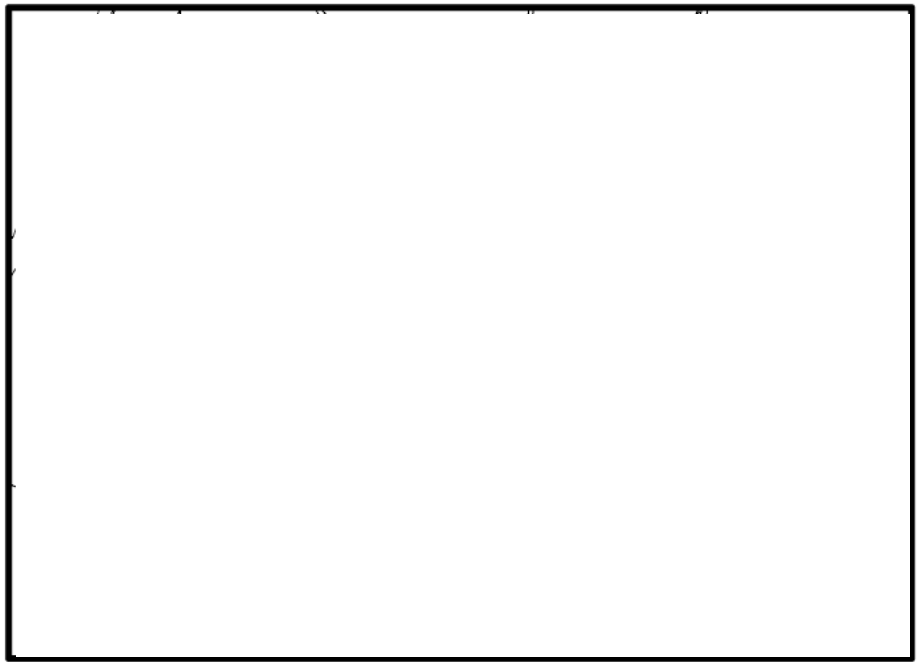


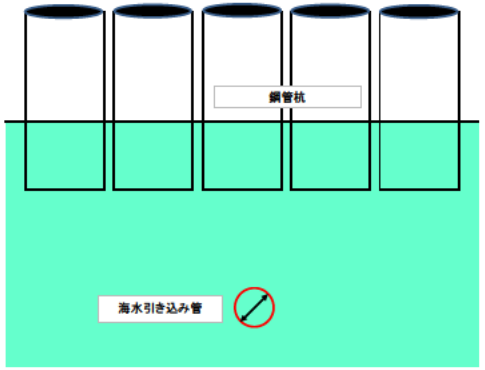
構内排水路設置位置図

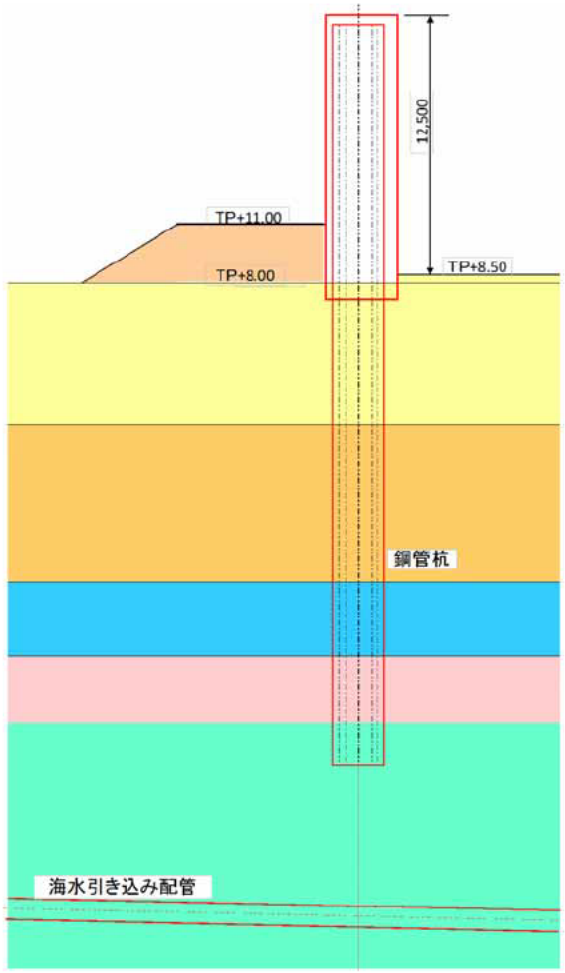
海水引き込み管と防潮堤の交差部

■ 海水引き込み管は，鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の下部構造である鋼管杭先端より深い位置に設置される。

■ 鋼管杭の先端と海水引き込み管天端の離隔は，『トンネル標準示方書　シールド工法編』を参照し、地震時応答解析に基づき、安全な離隔を設定する。

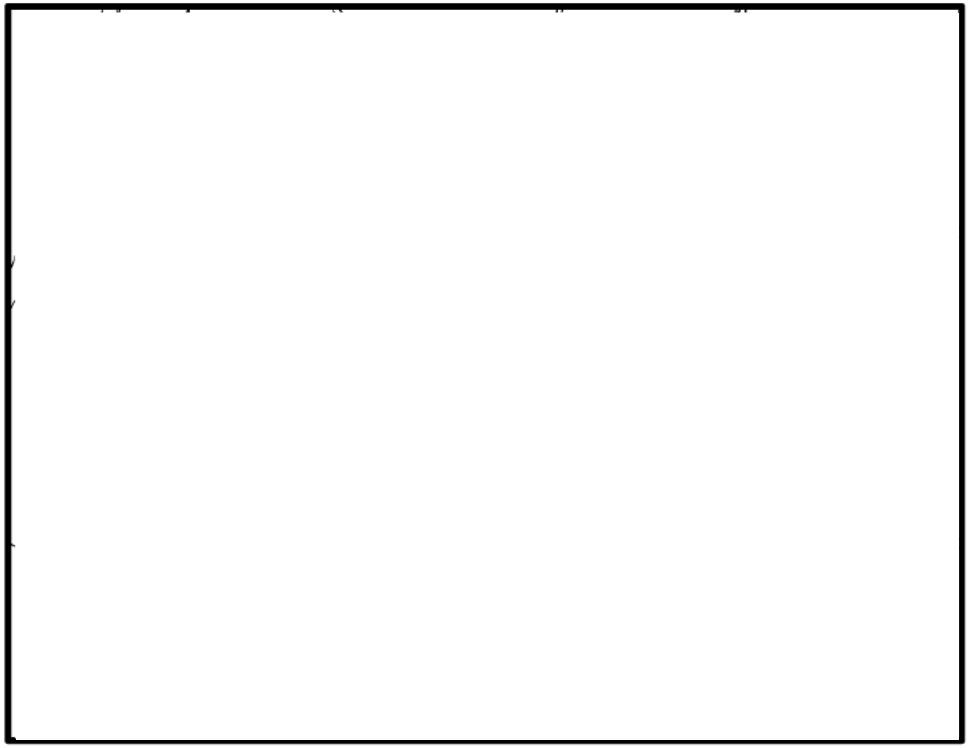


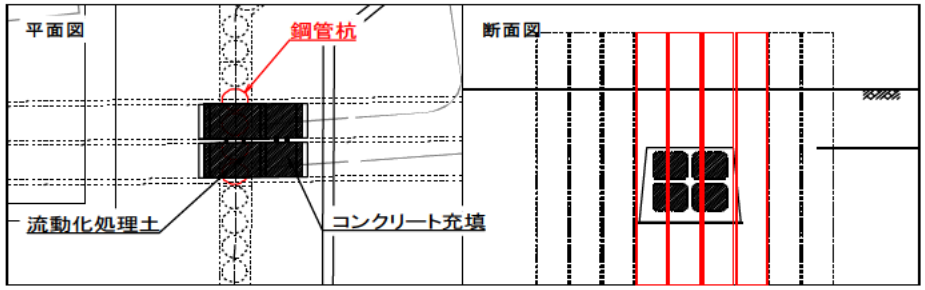




東Ⅰ取・放水路と防潮堤の交差部

- 東Ⅰ取・放水路は，鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁の南東部で交差する。
- 鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁と干渉する取・放水路の範囲は，基本的に撤去する。
- 防潮堤の設置する範囲の前後においては，鉄筋コンクリートによる止水壁を設置することで止水性を高める設定とする。
- また，取・放水路の内空は，鋼管杭を設置する止水壁間を流動化処理土により埋め戻し，海側の止水壁間はコンクリートを充填することで，津波に対してより一層の止水防護構造を設定する。





12. まとめ

- 東海第二発電所の防潮堤の代表的な構造である「鋼管杭鉄筋コンクリート防潮壁」を対象に，地震時や津波時の構造成立性を確認した。
- 敷地内の地質分布の特性等を踏まえ，防潮壁に対して厳しい条件においても検討を行った。
- 各種ケースの評価においても，防潮壁の構造成立性を確認した。
- 今後，詳細設計段階においても，防潮壁の基礎杭の安全裕度を考慮し，杭の仕様をより適切に設定していくこととする。