

泊発電所3号炉

防潮堤の構造成立性評価方針について

(止水ジョイントの設計方針及び指摘事項に対する回答)

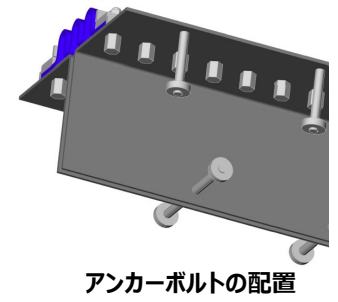
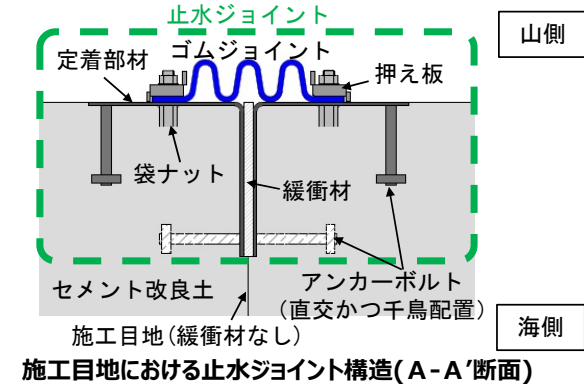
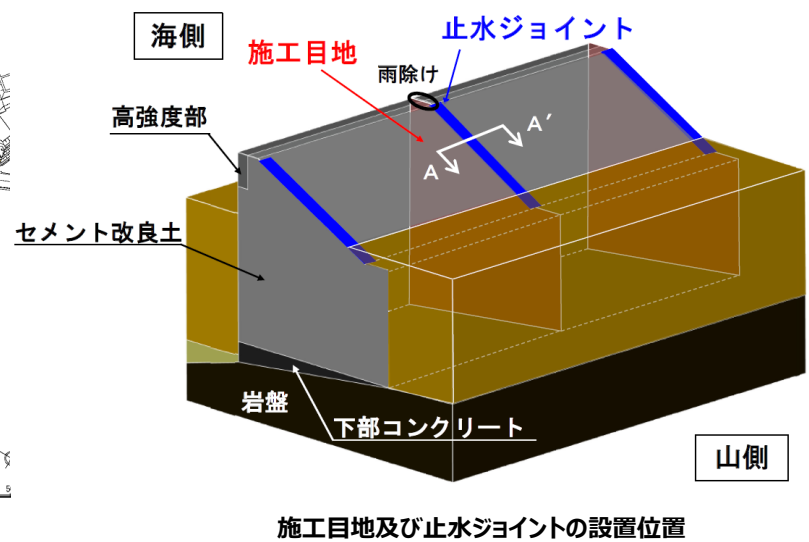
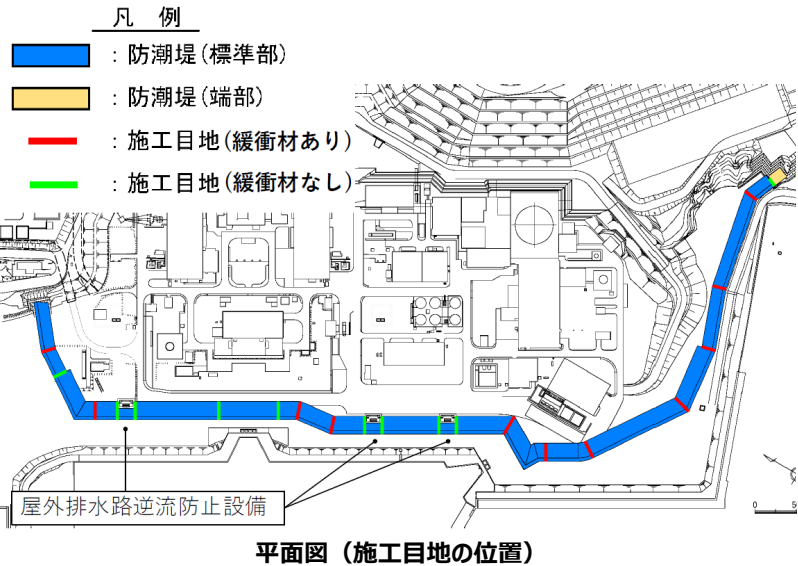
令和5年12月7日
北海道電力株式会社

1. 説明経緯と止水ジョイントの構造概要	3
2. 本日の説明主旨	4
3. アンカーボルトの設計フロー	5
(1) 「各種合成構造設計指針」の適用性有無の確認	6
(2) 指針を参考にすることの妥当性	7
(3) 仕様・配置の検討	13
(4) 作用荷重の算出	18
(5) 照査の実施	19
4. まとめ	20
審査会合における指摘事項に対する回答【指摘事項 221101-04】	21
補足説明資料1 高強度部のアンカーボルトの仕様及び配置計画	22

1. 説明経緯と止水ジョイントの構造概要

- アンカーボルトの性能試験に関する説明経緯を以下に示す。
 - 第1111回審査会合で、アンカーボルトの性能試験は単体配置のアンカーボルトを想定して実施することを説明した。
 - 第1192回審査会合で、防潮堤高さの変更に伴い、止水目地構造を変更することを説明した。
- 施工目地は応力集中に配慮した防潮堤のブロック間の境界であり、津波の水の流入を防止するために施工目地に止水ジョイント※1を設置する。
- 施工目地における津波による地中部の透水力に対しては、止水ジョイントの根入れ深さの延長又はその他の対策を設置変更許可段階で説明する。
- 止水ジョイントは、防潮堤間の変位に追従して遮水性を保持するためのゴムジョイントを、定着部材とアンカーボルトを用いてセメント改良土に固定する。
- 定着部材は、津波時及び重畳時に生じるゴムジョイントの張力をアンカーボルトに伝達する役割を有する。
- アンカーボルトは、アンカーボルトの本数増加によるせん断耐力の向上を目的に定着部材を用いて直交かつ千鳥で配置する。

※1: 今回、止水目地の名称を「止水ジョイント」に変更する。



2. 本日の説明主旨

○ 本日の説明主旨は、以下のとおりである。

- 泊発電所の止水ジョイントの設計について、先行炉実績との相違点(止水ジョイントを法面に設置すること、直交方向に配置したアンカーボルトを用いて固定すること、セメント改良土にアンカーボルトを用いて固定すること及び定着部材を使用すること)を踏まえた設計上の確認事項を下表のとおり抽出した。
- 抽出した先行炉実績との相違点を踏まえた設計上の確認事項のうち、泊発電所特有の評価方法が必要である確認事項②及び確認事項③をアンカーボルトの設計フローに従い説明する※1。

※1: 指摘事項221101-04「止水目地のアンカーボルトBの性能試験結果を踏まえた許容限界を含む設計の考え方」について回答する。

先行炉実績との相違点を踏まえた設計上の確認事項及び確認事項に対する止水ジョイントの設計方針

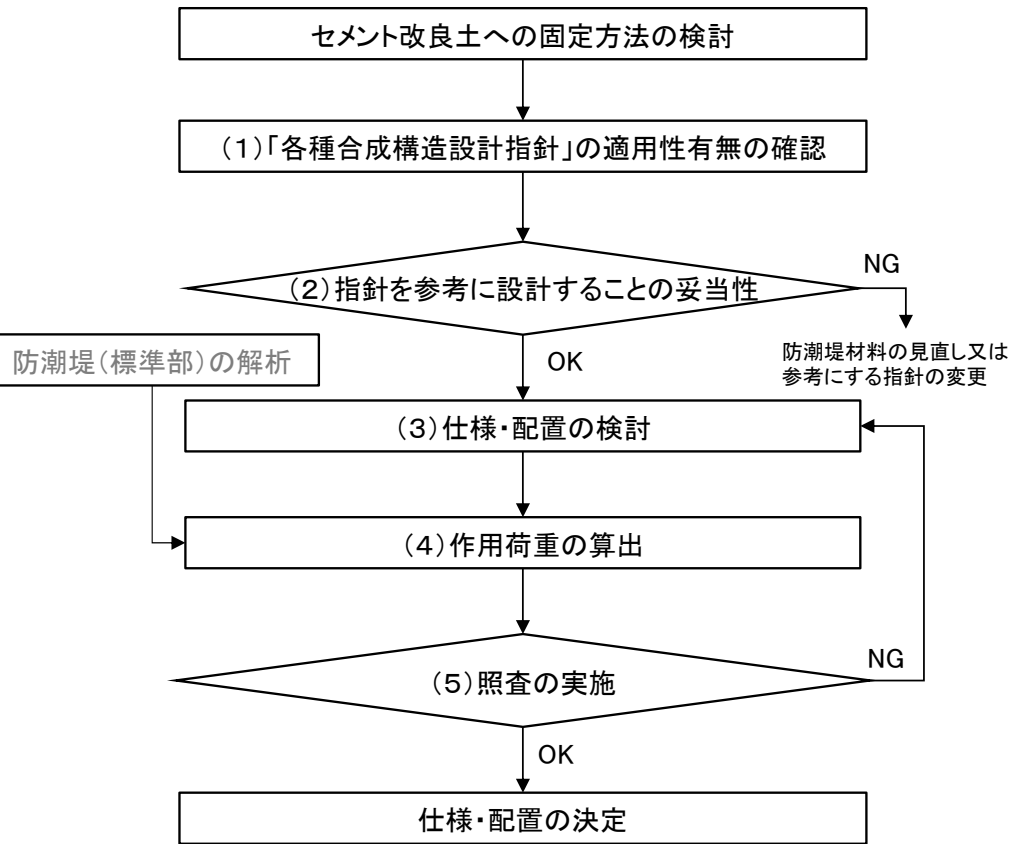
	先行炉実績との相違点	先行炉実績との相違点を踏まえた設計上の確認事項	確認事項に対する止水ジョイントの設計方針	説明資料
設計上の確認事項①	止水ジョイントを法面に設置すること	地震時、津波時及び重畳時に止水ジョイントに発生する応力を求めるため、止水ジョイントを法面に設置することを考慮した評価を行う。	2次元動的FEM解析、3次元静的FEM解析において、法面に定着部材をモデル化することで考慮する。	先行サイトと同様のモデル化方法を用いるため、「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性結果について 7. 2. 1. (4)解析モデル」で説明
設計上の確認事項②	直交方向に配置したアンカーボルトを用いて固定すること	直交方向に配置するアンカーボルトの設計方針を示す。	作用荷重に対して引張方向及びせん断方向が混在するため、荷重分担を考慮して引張方向のアンカーボルトの照査、せん断方向のアンカーボルトの照査及び引張力とせん断力の同時作用を考慮した組合せの照査を実施する。	泊発電所特有の評価方法が必要であるため、本資料(p13～p16)で説明
設計上の確認事項③	セメント改良土にアンカーボルトを用いて固定すること	セメント改良土に固定するアンカーボルトの引張耐力及びせん断耐力の確認を行う。	アンカーボルトの性能試験により、アンカーボルトの設計において「各種合成構造設計指針・同解説、日本建築学会、2010年」の耐力算定式を用いることの妥当性を確認する。	泊発電所特有の評価方法が必要であるため、本資料(p7～p12)で説明
設計上の確認事項④	定着部材を使用すること	ゴムジョイントの張力による定着部材の曲げ及びせん断の評価を行う。	定着部材に作用する外力を整理したうえで、定着部材を鋼材として照査する。	先行サイトと同様の鋼材の照査方法を用いるため、「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性結果について 7. 2. 1. (5)定着部材の評価」で説明

※2: 以降、「各種合成構造設計指針・同解説、日本建築学会、2010年」を「各種合成構造設計指針」という。

3. アンカーボルトの設計フロー

○ アンカーボルトの設計フローを下図に示し、各項目の詳細を次頁以降に示す。

アンカーボルトの設計フロー



(1)「各種合成構造設計指針」の適用性有無の確認

○アンカーボルトの仕様等について適用性有無を確認し、セメント改良土の強度が適用範囲を満たしていないため、性能試験を実施することを説明【p6参照】

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

○性能試験で得られる耐力と破壊形式が、「各種合成構造設計指針」を参考としたときの耐力以上かつ破壊形式と一致することを説明【p7～12参照】

(3) 仕様・配置の検討

○せん断耐力の向上のために直交配置とし、直交するアンカーボルトについて荷重分担を考慮した照査方針を説明【p13～15参照】

○仕様・配置を検討しアンカーボルトの降伏が先行すること若しくはセメント改良土が弾性範囲内で十分な裕度を有することを満足した許容限界値を設定【p16参照】

○アンカーボルトに荷重が作用した際のセメント改良土の応力が十分に分散し、隣接するアンカーボルトによる応力が3次的に干渉しないことを確認【設計及び工事計画認可段階で説明】

(4) 作用荷重の算出

○解析で得られた反力・変位から作用荷重の算出【p18参照】

(5) 照査の実施

○作用荷重に対して抵抗方向に引張方向及びせん断方向が混在するため、以下の照査方法により許容限界値以下であることを確認【p19参照】

- ・アンカーボルトの引張方向の照査
- ・引張方向の照査において同時にせん断力が作用することを考慮した組合せ荷重の照査
- ・アンカーボルトのせん断方向の照査

(1) 「各種合成構造設計指針」の適用性有無の確認

- 「各種合成構造設計指針」の適用範囲とアンカーボルトの仕様を比較し、「各種合成構造設計指針」の適用性の有無を確認する。
 - アンカーボルトを固定する構造物に関して、セメント改良土はコンクリートと類似した特性がある※1が、セメント改良土の設計基準強度が適用範囲から外れることから「×：適用範囲外」としたため、「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認する。
 - アンカーボルトの仕様に関して、「各種合成構造設計指針」の仕様を満足するように止水ジョイントのアンカーボルトの呼び径、頭部の種類、頭部の径、埋込み長さ、へりあき及び配置間隔を設定するため、「○：適用性がある」とした。
 - 隣接するアンカーボルトの配置の影響に関して、直交方向に配置するアンカーボルトの設計方針は「各種合成構造設計指針」に明記されていないことから「△：適用性が不明確」としたため、「(3-2)アンカーボルトの配置の考え方」に示す設計上の配慮が必要である。
- セメント改良土の設計基準強度(6.5N/mm²)に固定したアンカーボルトを「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性は、アンカーボルトの性能試験で確認し、詳細は「(2)指針を参考に設計することの妥当性」で示す。

※1:セメント改良土はコンクリートと類似した特性があることの詳細は、「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について 7.3.5(3)「各種合成構造設計指針」に示されている適用性の整理」で示す。

「各種合成構造設計指針」の適用範囲と止水ジョイントのアンカーボルトの仕様の比較 凡例 ○:適用範囲内 △:適用性が不明確 ×:適用範囲外

項目		「各種合成構造設計指針」の適用範囲	止水ジョイントのアンカーボルトの仕様	「各種合成構造設計指針」の適用性
アンカーボルトを固定する構造物		鉄筋コンクリート又は鉄骨鉄筋コンクリート※2(設計基準強度:18~48N/mm ²)	セメント改良土(設計基準強度:6.5N/mm ²)	×
アンカーボルトの仕様	呼び径	9mm以上25mm以下	24mm	○
	頭部の種類	頭付きアンカーボルト、鉄筋アンカーボルト、基礎アンカーボルト(先付け工法)、接着系アンカーボルト(後打ち工法)	頭付きアンカーボルト(先付け工法)	○
	頭部の径	アンカーボルトの呼び径の1.6倍以上	65mm (24mm × 1.6 ≒ 39mm以上)	○
	埋込み長さ	アンカーボルトの呼び径の4倍以上	200mm (24mm × 4 = 96mm以上)	○
	へりあき	アンカーボルトの呼び径の3倍以上	232mm以上 (24mm × 3 = 72mm以上)	○
	配置間隔	アンカーボルトの呼び径の7.5倍以上かつ600mm以下	525mm (24mm × 7.5 = 180mm以上かつ600mm以下)	○
隣接するアンカーボルトの配置の影響		アンカーボルトを隣接して複数本配置する場合の引張耐力の評価にあたって、コーン状破壊により引張耐力が決まる場合には、群効果を考慮する必要がある。	コーン状破壊の群効果を考慮不要な配置とすること	△

※2:「各種合成構造設計指針」は、無筋コンクリートを試験条件としている論文を参考文献にしていることから、無筋コンクリートに対しても適用性はあると考えられる。

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-1) アンカーボルトの性能試験の方針

- 「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認するため、アンカーボルトの性能試験で得られる耐力と破壊形式が指針を参考としたときの耐力以上を有することかつ破壊形式が一致することを確認する。
- アンカーボルトの性能試験で確認する「各種合成構造設計指針」の耐力算定式は以下のとおりである。
 - 引張方向のアンカーボルトに荷重が偏ることを考慮した照査に用いる許容引張力の算定式
 - せん断方向のアンカーボルトが負担し得る最大の荷重を考慮した照査に用いる許容せん断力の算定式
- アンカーボルトの許容引張力及び許容せん断力は、以下のいずれかを満足した設計とするため、作用荷重に対するアンカーボルトの引張方向及びせん断方向に生じる変位量が弾性範囲内であることを確認する。
 - アンカーボルトが先行して降伏すること
 - セメント改良土が弾性範囲内で十分な裕度を持つこと
- アンカーボルトの性能試験は、止水ジョイント及び高強度部のアンカーボルトを対象として実施する(高強度部のアンカーボルトの仕様及び配置計画は、補足説明資料1参照)。

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-2) アンカーボルトの性能試験の試験方法及び試験条件

- アンカーボルトの性能試験の試験方法は、「あと施工アンカーの施工手引き，日本建築あと施工アンカー協会，1994年」及び「あと施工アンカーの試験方法の標準化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1999年」を参考にし，p6に示すアンカーボルトの仕様でアンカーボルトの引張試験及びせん断試験を実施した。
- 下表の参考値は，セメント改良土の圧縮強度を設計基準強度(6.5N/mm²)と設定して「各種合成構造設計指針」に従い算出すると，引張耐力は83.0kNで破壊形式はアンカーボルトの降伏になり，せん断耐力は40.2kNで破壊形式は支圧破壊になる。
- 試験当日のセメント改良土の圧縮強度を用いて各試験体の耐力を算出したうえで，引張試験の破壊形式がアンカーボルトの降伏であること，せん断試験の破壊形式が支圧破壊であること及び「各種合成構造設計指針」の算定式による耐力以上を有することを確認する。

引張試験	セメント改良土の 圧縮強度 (N/mm ²)	「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力 ^{※1}			想定される 破壊形式
		アンカーボルト の降伏(kN)	コーン状破壊 (kN)	支圧破壊 (kN)	
参考値	6.5	83.0	131.6	111.8	
引張1-1	7.9	83.0	145.1	135.8	アンカーボルト の降伏
引張1-2	6.4	83.0	130.6	110.1	
引張1-3	6.9	83.0	135.6	118.6	
引張1-4	6.6	83.0	132.6	113.5	
引張1-5	6.7	83.0	133.6	115.2	

せん断試験	セメント改良土の 圧縮強度 (N/mm ²)	「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力 ^{※1}			想定される 破壊形式
		アンカーボルト の降伏 ^{※2} (kN)	コーン状破壊 (kN)	支圧破壊 (kN)	
参考値	6.5	194.0	65.7	40.2	
せん断1	5.4	194.0	59.9	36.9	支圧破壊
せん断2	5.4	194.0	59.9	35.8	
せん断3	5.9	194.0	62.6	40.5	

※1:「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力は，セメント改良土の解析用物性値に基づき，圧縮強度を6.5N/mm²，弾性係数を8,000N/mm²と設定し，低減係数は，試験の目標耐力であることから1.0として算出した。
 ※2: せん断のアンカーボルトの降伏耐力は，第1111回審査会合において，アンカーボルトの鋼材をSS400(規格降伏強度:235N/mm²)と設定しアンカーボルトの降伏耐力を58.1kNとした。今回，せん断試験では，アンカーボルトの鋼材をSS400と設定するとアンカーボルトの降伏耐力(58.1kN)と支圧破壊耐力(40.2kN)の差が小さいため，鋼材をSCM435(規格降伏強度:785N/mm²)としたことから，アンカーボルトの降伏耐力はSCM435の降伏強度に基づき194.0kNとした。なお，実際に使用するアンカーボルトの鋼材は設置変更許可段階で説明する。

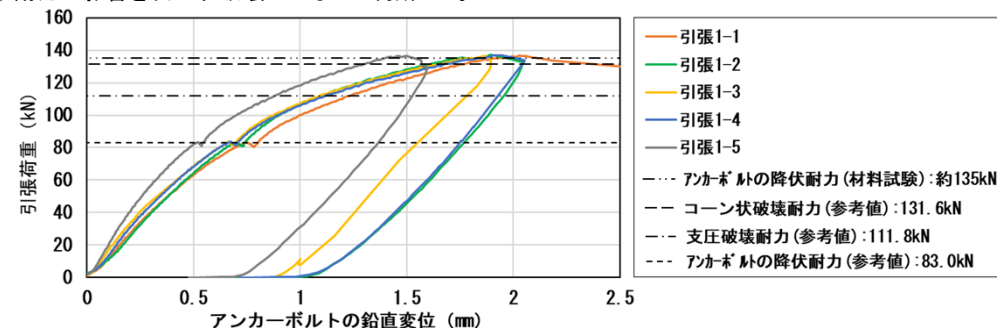
(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-3) 引張試験の結果：試験結果の概要と考察

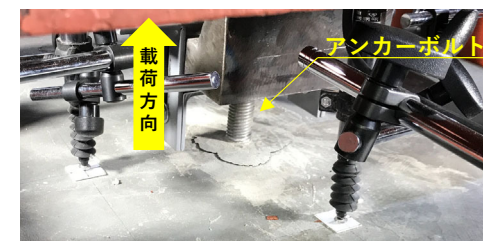
- 引張試験最大荷重は、アンカーボルトの材料試験の降伏荷重である約135kN以上となった。
- 引張荷重－アンカーボルトの鉛直変位関係より、アンカーボルトの降伏耐力83kN(規格降伏点強度を踏まえた耐力)を超える約100kNまで概ね直線であったことから、約100kNまでは弾性範囲と判断した。
- 引張荷重が136.5kNに到達するまではコーン状破壊も支圧破壊も生じなかった※1ことから、破壊形式はアンカーボルトの降伏と判断した。
- アンカーボルトの性能試験で得られた引張耐力が「各種合成構造設計指針」の耐力算定式による耐力以上を有すること及び破壊形式が「各種合成構造設計指針」から想定される破壊形式と一致していることから、「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認した。
- なお、引張1-1は、引張試験最大荷重が約135kNに到達した後も載荷を続けたが、荷重が増加することなく変位が大きくなった結果であり、以降の引張1-2～引張1-5は約135kNに到達した後に除荷した結果である。

※1: アンカーボルト周辺のセメント改良土の表面にひび割れを確認したが、ひび割れは深度方向に続いていなかったため、耐力に影響を及ぼす破壊ではないと判断した。

	セメント改良土の 圧縮強度 (N/mm ²)	「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力			引張試験 最大荷重 (kN)
		アンカーボルトの 降伏(kN)	コーン状破壊 (kN)	支圧破壊 (kN)	
参考値	6.5	83.0	131.6	111.8	
引張1-1	7.9	83.0	145.1	135.8	136.6
引張1-2	6.4	83.0	130.6	110.1	137.1
引張1-3	6.9	83.0	135.6	118.6	136.6
引張1-4	6.6	83.0	132.6	113.5	137.0
引張1-5	6.7	83.0	133.6	115.2	136.5



アンカーボルトの鉛直変位と引張荷重の関係※2



引張試験最大荷重載荷時の状況写真

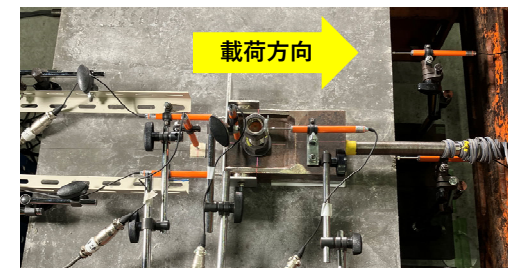
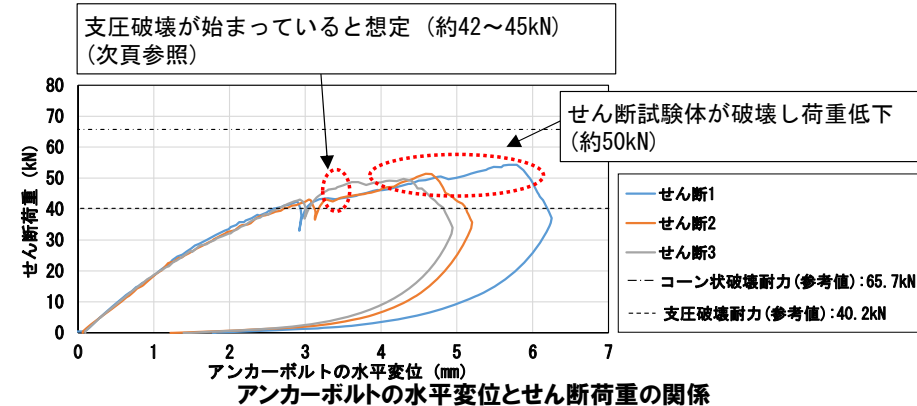
※2: アンカーボルトの鉛直変位－引張荷重の関係において外れ値があるが、ばらつきの範囲内と考える。

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-4) せん断試験の結果：試験結果の概要と考察(1/2)

- せん断試験最大荷重は、49.7kN以上となった。
- せん断荷重－アンカーボルトの水平変位関係は、せん断荷重42～45kNまでは概ね直線であったことから、約42～45kNまでは弾性範囲と判断した。
- せん断荷重が約50kNに到達すると、せん断試験体が破壊し荷重が低下し、実構造物では生じない破壊が生じたと考えられる※1。
- 実構造物での破壊形式を確認するためのせん断試験を追加実施したところ、支圧破壊が先行すると想定されたことから、破壊形式は支圧破壊と判断した(次頁参照)。
- 得られたせん断耐力が「各種合成構造設計指針」の耐力算定式による耐力以上を有すること及び破壊形式が「各種合成構造設計指針」から想定される破壊形式と一致していることから、「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認した。

※1: せん断試験で生じた破壊のメカニズムは「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について 7.3.5. アンカーボルトの性能試験(6)アンカーボルトの性能試験の結果」で示す。



せん断試験最大荷重載荷後の状況写真

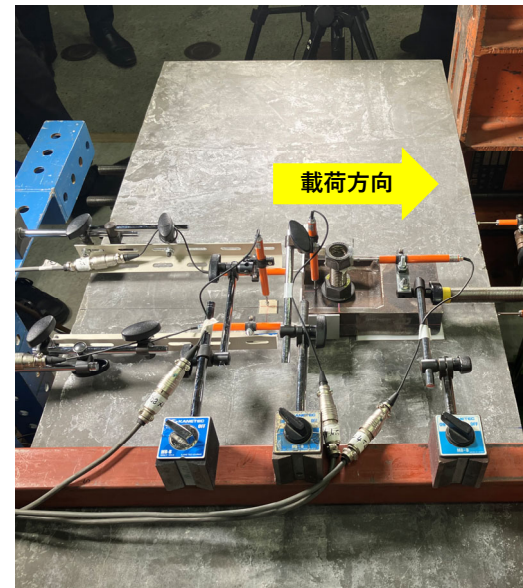
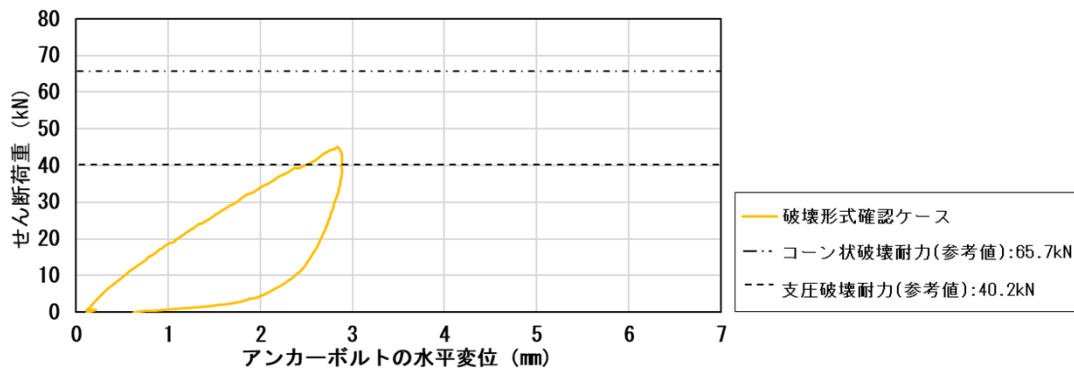
	セメント改良土の 圧縮強度 (N/mm ²)	「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力			せん断試験 最大荷重 (kN)
		アンカーボルトの 降伏 (kN)	コーン状破壊 (kN)	支圧破壊 (kN)	
参考値	6.5	194.0	65.7	40.2	
せん断1	5.4	194.0	59.9	36.9	54.3
せん断2	5.4	194.0	59.9	35.8	51.3
せん断3	5.9	194.0	62.6	40.5	49.7

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-4) せん断試験の結果：試験結果の概要と考察(2/2)

- 実構造物の破壊形式を確認するための追加試験を行った。
- 目標荷重は、せん断試験で弾性範囲と判断した約45kNとした。
- 45.0kNまで載荷した後、荷重を除荷し、載荷用治具を取り外して破壊状況を確認した。
- アンカーボルト近傍の状況を観察したところ、セメント改良土の表面がわずかに剥離していたことから、支圧破壊が始まっていることが想定された。
- 上記より、支圧破壊耐力を上回るせん断荷重では、支圧破壊が先行すると判断した。

	セメント改良土の 圧縮強度 (N/mm ²)	「各種合成構造設計指針」に従い算出した耐力			せん断試験 最大荷重 (kN)
		アンカーボルトの 降伏(kN)	コーン状破壊 (kN)	支圧破壊 (kN)	
参考値	6.5	194.0	65.7	40.2	45.0
破壊形式 確認ケース	6.2	194.0	64.1	40.2	



せん断試験最大荷重載荷後の状況写真



せん断試験後の状況写真

(2) 指針を参考に設計することの妥当性

(2-5) 許容引張力及び許容せん断力の算定式の確認

- アンカーボルトの許容引張力及び許容せん断力は、「各種合成構造設計指針」を参考に各破壊形式の耐力に低減係数を乗じたもののうち最小値(許容引張力：83kN，許容せん断力：26.8kN)を設定する。
- また、アンカーボルトの性能試験の結果から、「各種合成構造設計指針」を参考に設定する許容限界値を下回る荷重において、アンカーボルトは概ね弾性的な挙動を示すことが確認された。
- よって、アンカーボルト及びセメント改良土に要求される止水機能は、「各種合成構造設計指針」を参考に概ね弾性範囲内になるよう許容引張力及び許容せん断力を設定し、アンカーボルトに発生する引張力及びせん断力が許容引張力及び許容せん断力を満足するように設計することで確保する。
- なお、アンカーボルトの裕度確保の観点でアンカーボルトの仕様(埋込み長さ等^{※1})を変更する場合は、設計及び工事計画認可段階において変更した仕様によるアンカーボルトの性能試験を実施する。

※1：アンカーボルトの裕度向上対策及び埋込み長さや配置間隔の考え方は、「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について 7.3.7. 止水ジョイントの裕度に関する考え方」で示す。

引張の耐力及び許容引張力

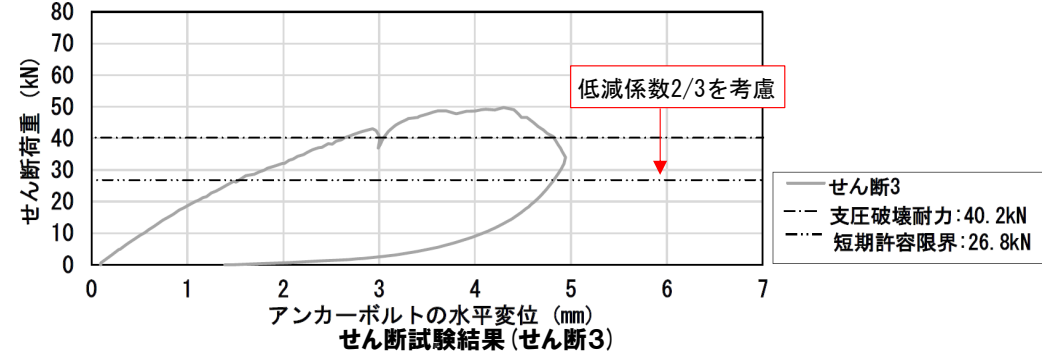
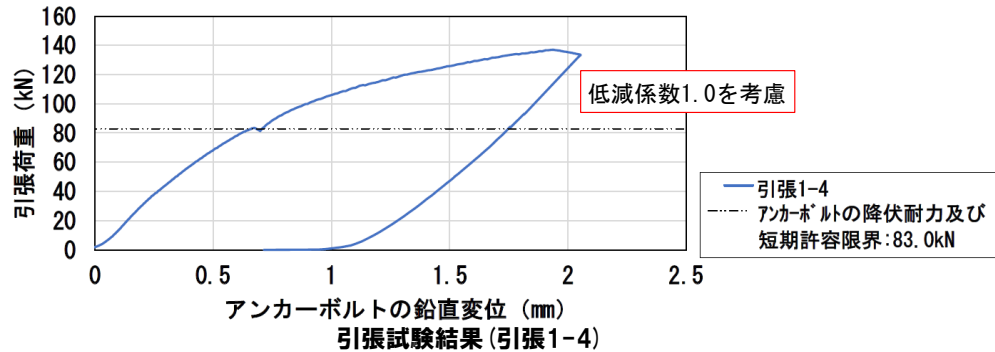
せん断の耐力及び許容せん断力

	アンカーボルトの降伏(kN)	コーン状破壊(kN)	支圧破壊(kN)		アンカーボルトの降伏(kN)	コーン状破壊(kN)	支圧破壊(kN)
耐力 ^{※2}	83.0	131.6	111.8	耐力 ^{※1}	58.1	65.7	40.2
低減係数	1.0	2/3	— ^{※3}	低減係数	1.0	2/3	2/3
許容引張力	83.0	87.7	111.8 ^{※3}	許容せん断力	58.1	43.8	26.8

※2：耐力は、セメント改良土の解析用物性値に基づき、圧縮強度を6.5N/mm²、弾性係数を8,000N/mm²と設定し、低減係数は1.0として算出した。

※3：「各種合成構造設計指針」にて、下式の頭付きアンカーボルトの許容引張力時の頭部支圧応力度(p_a/A_0)の評価式が記載されており、低減係数の記載がないため“—”とした。

$p_a/A_0 \leq f_n$ ここで、 p_a ：支圧破壊の耐力、 $A_0 = \pi(D^2 - d^2)/4$ ：アンカーボルト頭部の支圧面積 (D ：頭部の直径、 d ：軸部の直径)、 f_n ：コンクリートの支圧強度である。



(3) 仕様・配置の検討

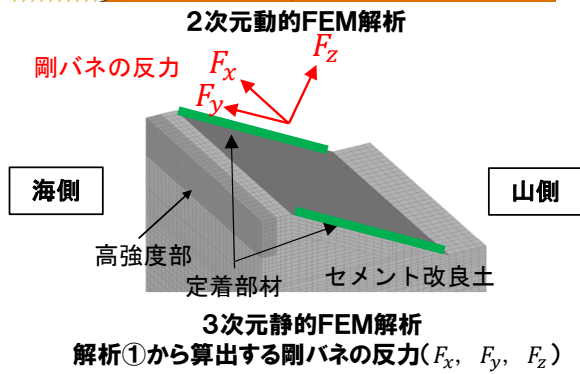
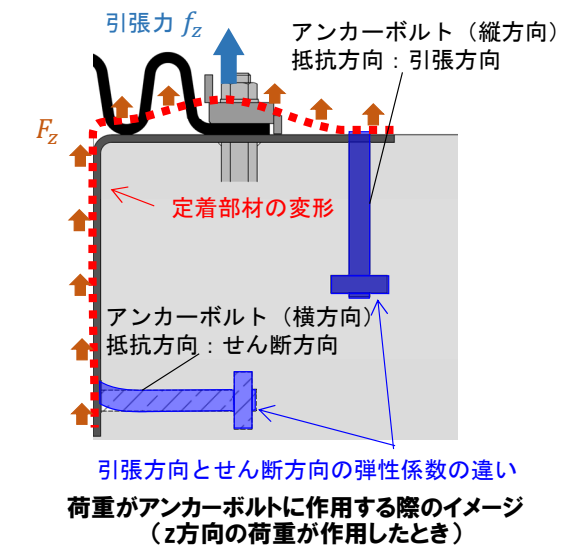
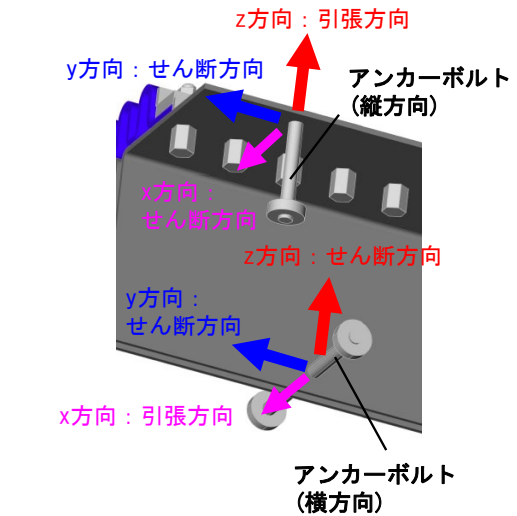
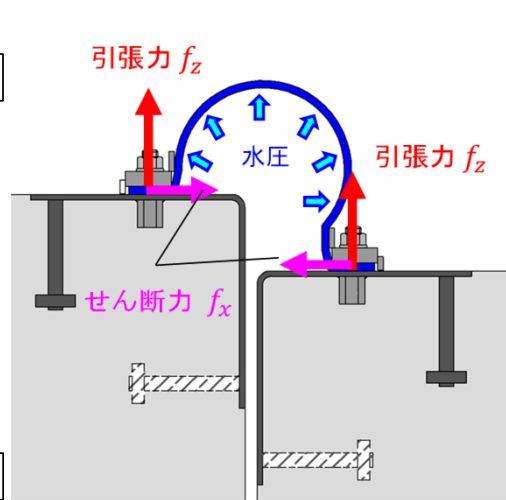
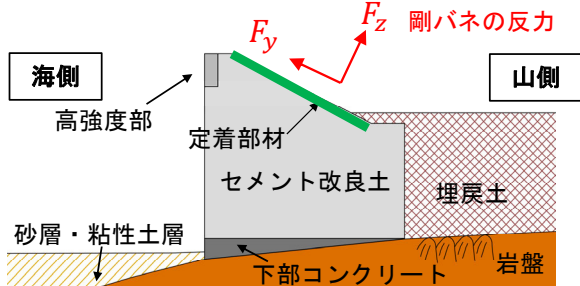
(3-1) 直交方向に配置するアンカーボルトの荷重分担を考慮した照査方針(1/3)

- アンカーボルトに作用する荷重は、以下に示す各方向^{※1}の荷重を足し合わせて、x方向に $F_x + f_x$ 、y方向に F_y 、z方向に $F_z + f_z$ である^{※2}。
 - 2次元動的FEM解析(地震時及び重畳時)若しくは3次元静的FEM解析(津波時)の解析モデルに、定着部材をモデル化した解析(解析①)で得られる剛バネの反力(F_x, F_y, F_z)^{※3}
 - ゴムジョイントの張力により定着部材に作用する引張力 f_z 、せん断力 f_x
- アンカーボルトに作用する各方向の荷重に対する抵抗方向は、x方向、z方向の荷重の作用時にアンカーボルトの引張方向とせん断方向が混在する。
- 引張方向及びせん断方向が混在するときは、作用荷重に対するアンカーボルトの引張方向及びせん断方向に生じる変位量の比率(弾性係数比)及び定着部材の変形の影響により片方のアンカーボルトに荷重が偏ることが考えられるため、アンカーボルトの荷重分担を考慮した照査を実施する。

※1: 防潮堤汀線方向をx方向、防潮堤山側法面方向をy方向、防潮堤山側法面垂直方向をz方向とする。

※2: 剛バネの設定間隔はアンカーボルトの配置間隔と異なるため、剛バネに発生する引張力及びせん断力を縦方向と横方向のアンカーボルト1組あたりの荷重に換算する。

※3: 反力 F_x は、津波時の3次元静的FEM解析のときのみ算出される。



ゴムジョイントの張力により定着部材に作用する引張力 f_z 、せん断力 f_x

アンカーボルトに作用する各方向の荷重に対する抵抗方向(引張方向, せん断方向)

引張方向とせん断方向の弾性係数の違いによる荷重がアンカーボルトに作用する際のイメージ(z方向の荷重が作用したとき)

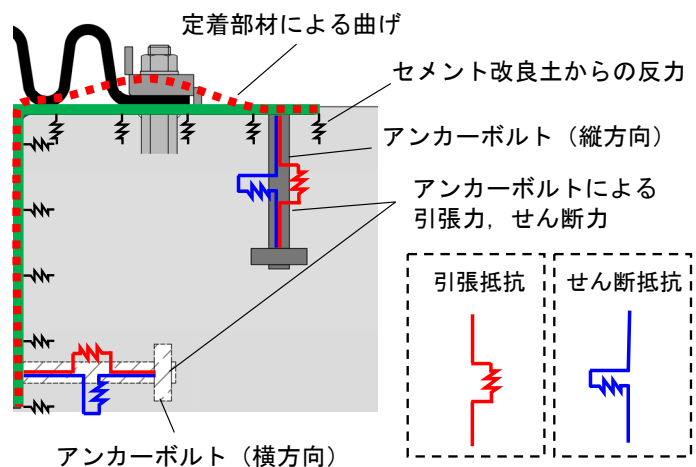
(3) 仕様・配置の検討

(3-1) 直交方向に配置するアンカーボルトの荷重分担を考慮した照査方針(2/3)

- アンカーボルトの引張方向とせん断方向の弾性係数比は、およそ(引張) : (せん断) = 9 : 1であること及びばらつきを有すること※¹を考慮すると、引張方向のアンカーボルトに荷重が偏ることが考えられる。
- 定着部材の変形の影響は、止水ジョイントに作用する荷重のうち引張力 f_z が支配的であること(p18参照)を踏まえて、以下の境界条件の定着部材(梁要素)のモデルに引張力 f_z を作用した解析(解析②)を実施し、荷重分担を求めた。
 - アンカーボルト位置の固定条件について、アンカーボルトと定着部材を溶接するため、溶接による曲げ剛性を考慮するとモデル化は固定端を基本とする。
 - 但し、モデル化における固定条件は不確かさを考慮して保守的に固定端若しくはピン支点の組合せとする。
 - セメント改良土と定着部材の付着及び摩擦力は保守的に考慮しない。
- 定着部材の短手方向の変形による影響を考慮した直交するアンカーボルトの荷重分担は右表の通りであり、アンカーボルト(縦方向)に最大74.3%、アンカーボルト(横方向)に最大45.4%作用する。

※1: 引張方向とせん断方向の変位量の比率(弾性係数比)は、アンカーボルトの性能試験の結果から算出した。なお、弾性係数算出時の標準偏差(1 σ)は、引張試験22.3%、せん断試験0.4%であった。

定着部材の変形の影響による直交するアンカーボルトの荷重(引張力 f_z)の荷重分担



解析②のモデルとセメント改良土に固定するために生じる力のイメージ図

		境界条件	荷重分担 (%)	境界条件	荷重分担 (%)	境界条件	荷重分担 (%)	境界条件	荷重分担 (%)
アンカーボルト	縦方向	固定端	74.2	固定端	74.3	ピン固定	54.6	ピン固定	54.7
	横方向	固定端	25.8	ピン固定	25.7	固定端	45.4	ピン固定	45.3
解析イメージ図									

— : 定着部材 (梁要素) : 固定端 : ピン固定

(3) 仕様・配置の検討

(3-1) 直交方向に配置するアンカーボルトの荷重分担を考慮した照査方針(3/3)

- 引張方向とせん断方向の弾性係数比と定着部材の変形の影響を考慮して以下の引張方向とせん断方向の照査を実施する。
 - 引張方向とせん断方向の弾性係数比から引張方向のアンカーボルトに荷重が偏ることを考慮した、引張方向のアンカーボルトがx方向、z方向の荷重を100%負担する照査※1
 - 引張方向の照査において、同時にせん断力が作用することを考慮した組合せ荷重の照査※2
 - 定着部材の変形によりせん断方向のアンカーボルトが負担し得る最大の荷重を考慮した、せん断方向のアンカーボルトがx方向の荷重を100%、z方向の荷重を45.4%負担する照査※3

※1: 引張方向の照査では、定着部材の変形の影響を考慮してアンカーボルト(縦方向)の引張方向に最大74.3%の荷重が作用することも包括する。

※2: 組合せ荷重の照査については、「各種合成構造設計指針」を参考に求めた終局耐力を用いて照査する。 $(p/p_u)^a + (q/q_u)^a = 1$ ここで、 a :係数(=2とする。), p :引張耐力, q :せん断耐力, p_u :せん断力がかからない場合の引張耐力, q_u :引張力がかからない場合のせん断耐力である。

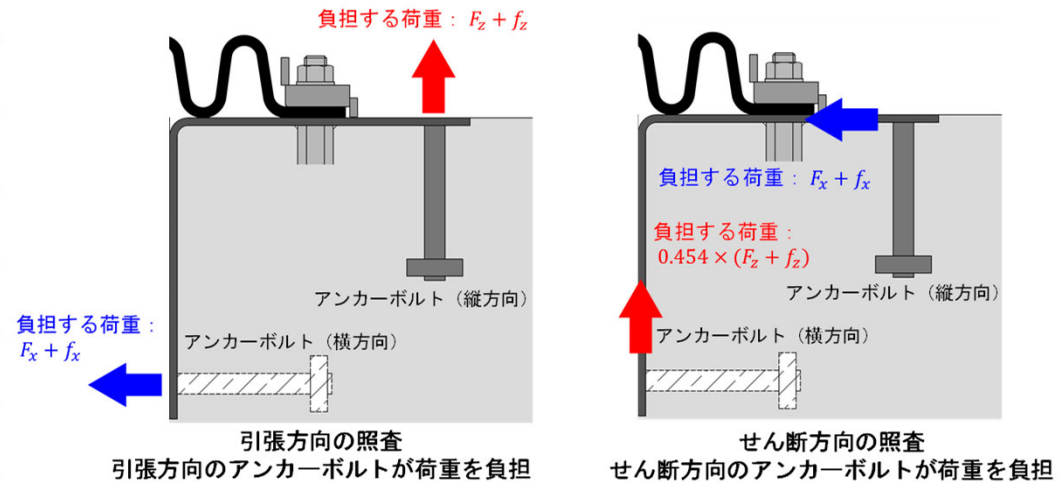
※3: 照査においては、y方向の荷重との合力を用いて照査する。

アンカーボルトの照査における荷重分担

荷重※4	アンカーボルト	抵抗方向	荷重分担 (%)	
			引張方向の照査	せん断方向の照査
x方向: $F_x + f_x$	縦方向	せん断	—	100
	横方向	引張	100	—
z方向: $F_z + f_z$	縦方向	引張	100	—
	横方向	せん断	—	45.4※5

※4: y方向の荷重については、アンカーボルトの抵抗方向がどちらもせん断方向であることを考慮して荷重分担を50%ずつとする。

※5: z方向の荷重分担を考慮すると、アンカーボルト(縦方向)にz方向の荷重の54.6%が作用するが、引張方向の照査よりアンカーボルト(縦方向)に作用する荷重が小さいため、評価を割愛する。



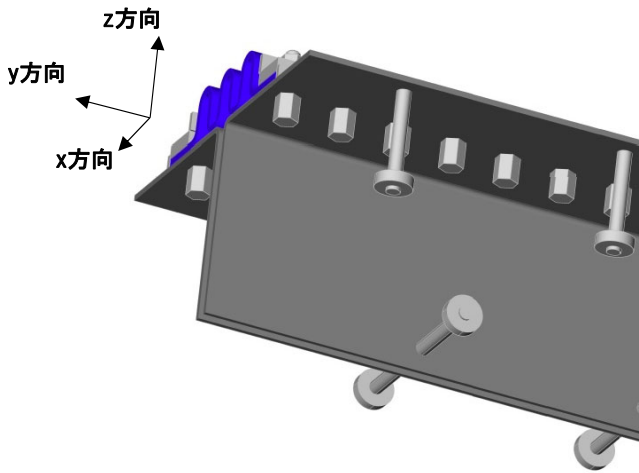
アンカーボルトの照査方法

(3) 仕様・配置の検討

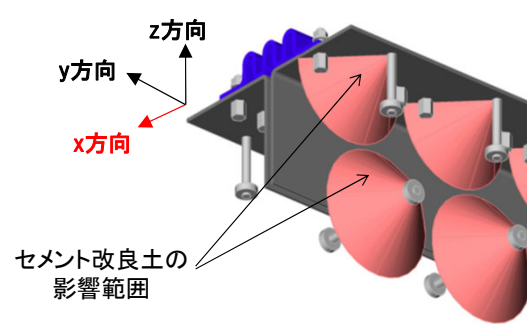
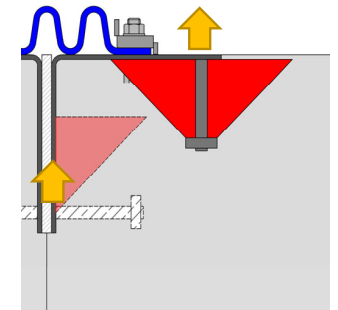
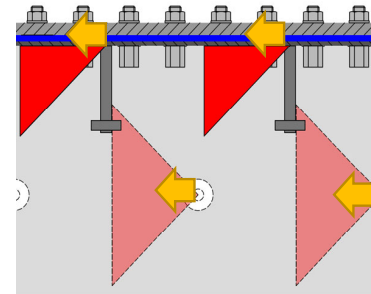
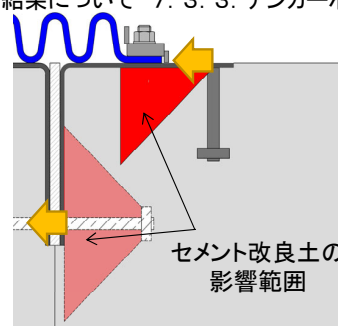
(3-2) アンカーボルトの配置の考え方

- アンカーボルトの配置は、泊発電所の止水ジョイントのアンカーボルトにおけるセメント改良土の影響範囲の考え方をういた設計上の配慮※1より、直交するアンカーボルトにx方向、y方向、z方向の荷重を作用しても、セメント改良土の影響範囲が3次元的に重複しないよう単体配置とすることが可能であり、単体のアンカーボルトとしての耐力算定式を用いることができる。
- なお、アンカーボルトの破壊形式はアンカーボルト降伏、支圧破壊及びコーン状破壊の3つであり、想定される破壊形式は引張でアンカーボルトの降伏、せん断で支圧破壊となるが、破壊領域が大きいコーン状破壊を想定して影響範囲を考慮した保守的な配置とする。
- 設計上の配慮を用いてアンカーボルトを配置することで、アンカーボルトに荷重が作用した際のセメント改良土の応力が十分に分散し、隣接するアンカーボルトによる応力が3次元的に干渉しないことを、設計及び工事計画認可段階で3次元FEM解析を用いて説明する。

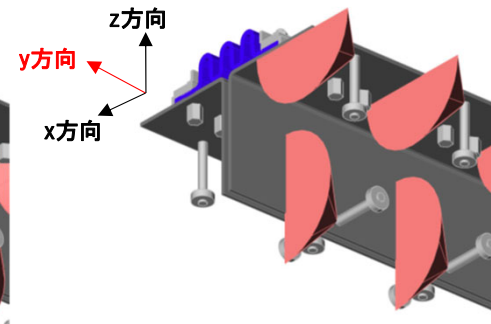
※1: 設計上の配慮の詳細は、「添付資料25 防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について 7.3.3. アンカーボルトの配置の考え方」で示す。



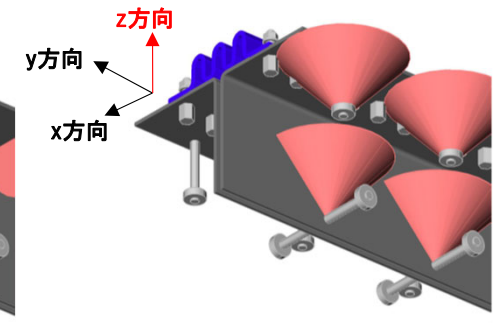
止水ジョイントの構造図



x方向の荷重作用時



y方向の荷重作用時



z方向の荷重作用時

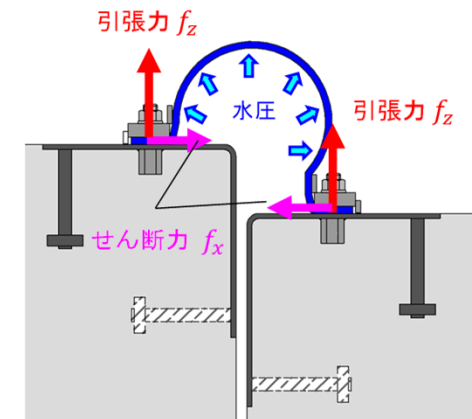
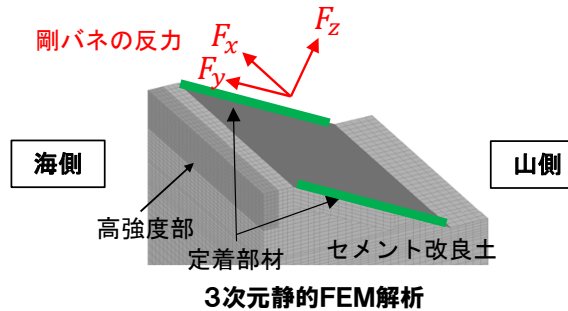
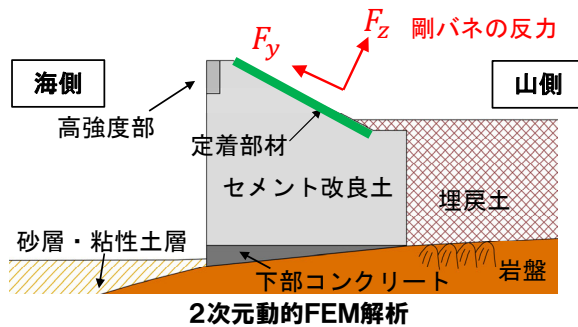
セメント改良土の影響範囲を考慮したアンカーボルトの配置の考え方

余白

(4) 作用荷重の算出

- アンカーボルトの作用荷重は以下に示すとおりである※1。
- 作用荷重のうち、ゴムジョイントの張力により定着部材に作用する引張力 f_z が支配的である。

※1: アンカーボルトの作用荷重は暫定値であり、詳細は防潮堤の構造成立性評価結果とともに示す。



解析①から算出する剛バネの反力(F_x, F_y, F_z)

ゴムジョイントの張力により定着部材に作用する引張力 f_z 、せん断力 f_x

アンカーボルトの作用荷重

評価部位	検討ケース	作用荷重(kN)※2				
		F_x	F_y	F_z	せん断力 f_x	引張力 f_z
アンカーボルト	地震時	※3	8.1	2.2	—※4	—※4
	津波時	0.1	10.1	全圧縮	0.0	29.8
	重畳時	※3	7.9	0.4	0.0	29.8

※2: 作用荷重は縦方向と横方向のアンカーボルト1組あたりの荷重に換算した。

※3: 防潮堤は作用荷重(地震荷重、余震荷重及び津波荷重)に対して強軸、弱軸断面が明確であるため、弱軸断面の面外力である剛バネの反力 F_x は考慮しない。

※4: 地震時はゴムジョイントに張力が生じないため、ゴムジョイントの張力によるせん断力 f_x 、引張力 f_z は生じない。

(5) 照査の実施

- アンカーボルトの照査は、作用荷重のうちゴムジョイントの張力により定着部材に作用する引張力 f_z が支配的であること(p18参照)を踏まえて、作用荷重に対して主にアンカーボルト(縦方向)の引張方向が抵抗することを考慮したアンカーボルトの引張方向とせん断方向の照査を実施する。
- 下表の照査結果※¹から、以下のとおり止水ジョイントのアンカーボルトの構造成立性が確保されていることを確認した。
 - 引張方向のアンカーボルトに荷重が偏ることを考慮して、引張方向のアンカーボルトがx方向、z方向の荷重を100%負担した引張方向の照査において、照査値が0.37以下であること
 - 引張方向の照査において同時にy方向のせん断力が作用することを考慮した組合せ荷重の照査においても、照査値が0.17以下であること
 - 定着部材の変形によりせん断方向のアンカーボルトが負担し得る最大の荷重を考慮したせん断方向の照査においても、照査値が0.55以下であること

※1: アンカーボルトの照査結果は暫定値であり、詳細は2024年1月末の防潮堤の構造成立性評価結果とともに示す。

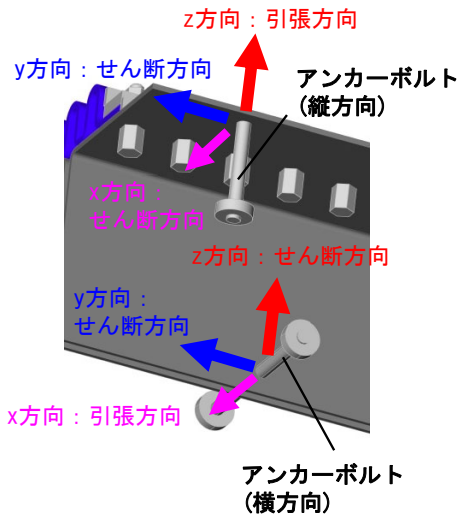
アンカーボルト(縦方向)の照査結果

評価部位	検討ケース	引張方向の照査 引張許容力: 83.0kN/本		組合せ荷重の照査 許容せん断力: 26.8kN/本			せん断方向の照査 許容せん断力: 26.8kN/本		判定 1.0以下
		引張力(z方向) $F_z + f_z$	z方向の照査値①	せん断力(y方向) $0.5F_y$ ※ ²	y方向の照査値②	組合せ荷重の照査値※ ³	せん断力の合力 $\sqrt{(F_x + f_x)^2 + (0.5F_y)^2}$	照査値	
アンカーボルト (縦方向)	地震時	2.2	0.03	4.1	0.16	0.03	4.1	0.16	OK
	津波時	29.8	0.36	5.1	0.20	0.17	5.1	0.20	OK
	重畳時	30.2	0.37	4.0	0.15	0.16	4.0	0.15	OK

アンカーボルト(横方向)の照査結果

評価部位	検討ケース	引張方向の照査 引張許容力: 83.0kN/本		組合せ荷重の照査 許容せん断力: 26.8kN/本			せん断方向の照査 許容せん断力: 26.8kN/本		判定 1.0以下
		引張力(x方向) $F_x + f_x$	x方向の照査値①	せん断力(y方向) $0.5F_y$ ※ ²	y方向の照査値②	組合せ荷重の照査値※ ³	せん断力の合力 $\sqrt{(0.454 \times (F_z + f_z))^2 + (0.5F_y)^2}$	照査値	
アンカーボルト (横方向)	地震時	-	-	4.1	0.16	0.03	4.2	0.16	OK
	津波時	0.1	0.01	5.1	0.20	0.05	14.5	0.55	OK
	重畳時	0.0	0.00	4.0	0.15	0.03	14.3	0.54	OK

※2: y方向の荷重はアンカーボルトの抵抗方向がどちらもせん断方向であることを考慮して荷重分担を50%ずつとするため、せん断力(y方向)はy方向の荷重に0.5を乗じる。
 ※3: 組合せ荷重の照査は、「各種合成構造設計指針」を参考に、(x方向若しくはz方向の照査値①)² + (y方向の照査値②)²が1.0を下回ることを確認する。



アンカーボルトに作用する各方向の荷重に対する抵抗方向(引張方向, せん断方向)

4. まとめ

- アンカーボルトを固定するセメント改良土の設計基準強度(6.5N/mm^2)が「各種合成構造設計指針」の適用範囲外であったが、アンカーボルトの性能試験で得られた引張耐力及びせん断耐力が「各種合成構造設計指針」の耐力算定式による耐力以上を有すること及び破壊形式が「各種合成構造設計指針」から想定される破壊形式と一致したことから、「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認した。
- せん断耐力の向上のためにアンカーボルトを直交配置としたが、作用荷重の方向によってはアンカーボルトの引張とせん断の抵抗方向が混在することから、片方のアンカーボルトに荷重が偏ることを考慮した照査(引張方向の照査, 引張方向の照査において同時にせん断力が作用することを考慮した組合せ荷重の照査, せん断方向の照査)を実施し、構造成立性が確保されていることを確認した。

【指摘事項 221101-04】

止水目地の構造の一部であるアンカーボルトBの設計について、性能試験の結果を踏まえ、許容限界を含む設計の考え方を説明すること。なお、説明に当たっては、以下の事項を含めて説明すること。

- 性能試験の結果から判定される、アンカーボルトB及びセメント改良土の破壊モード
- 上記破壊モードを踏まえた、止水目地及びセメント改良土に要求される止水機能

【回答】

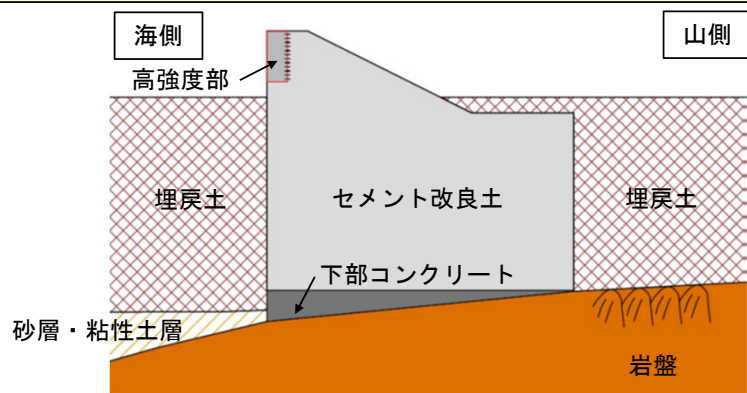
- 第1192回審査会合で説明した止水ジョイント※¹構造において、止水ジョイントをセメント改良土に固定する方法としてアンカーボルト※²を用いる。
- アンカーボルトを固定するセメント改良土の設計基準強度(6.5N/mm²)が「各種合成構造設計指針」の適用範囲外であったが、アンカーボルトの性能試験で得られた引張耐力及びせん断耐力が「各種合成構造設計指針」の耐力算定式による耐力以上を有すること及び破壊形式が「各種合成構造設計指針」から想定される下記に示す破壊形式と一致したことから、「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認した。
 - 引張の破壊形式：アンカーボルトの降伏
 - せん断の破壊形式：セメント改良土の支圧破壊
- 止水ジョイント及びセメント改良土に要求される止水機能は、「各種合成構造設計指針」を参考に概ね弾性範囲内(アンカーボルトの降伏が先行すること若しくはセメント改良土が弾性範囲内で十分な裕度を有することを)になるよう許容引張力及び許容せん断力を設定し、アンカーボルトに発生する引張力及びせん断力が許容引張力及び許容せん断力を満足するように設計することで確保する。
- せん断耐力の向上のためにアンカーボルトを直交配置としたが、作用荷重の方向によってはアンカーボルトの引張とせん断の抵抗方向が混在することから、片方のアンカーボルトに荷重が偏ることを考慮した照査(引張方向の照査、引張方向の照査において同時にせん断力が作用することを考慮した組合せ荷重の照査、せん断方向の照査)を実施し、構造成立性が確保されていることを確認した。

※1: 今回、止水目地の名称は「止水ジョイント」に変更した。

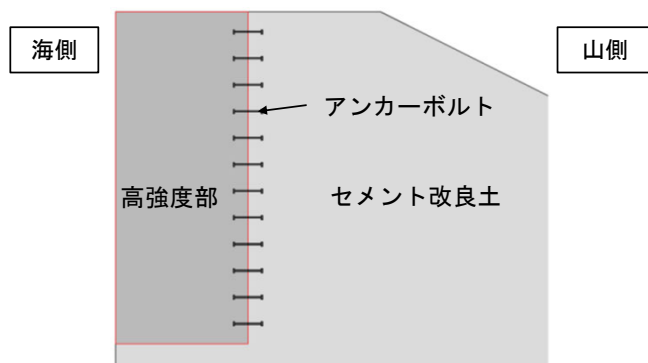
※2: 今回、止水ジョイントにおいてセメント改良土に固定するアンカーボルトの名称は「アンカーボルトB」から「アンカーボルト」に変更した。

補足説明資料1 高強度部のアンカーボルトの仕様及び配置計画(1/2)

- 漂流物対策工としての高強度部は、アンカーボルトを用いてセメント改良土と一体化させる構造である。
- 高強度部に用いるアンカーボルトは、第1111回審査会合で説明したアンカーボルト性能試験で用いるアンカーボルトと同じ仕様を計画している。
- 次頁において、高強度部のアンカーボルトの仕様の「各種合成構造設計指針」の適用性について確認する。

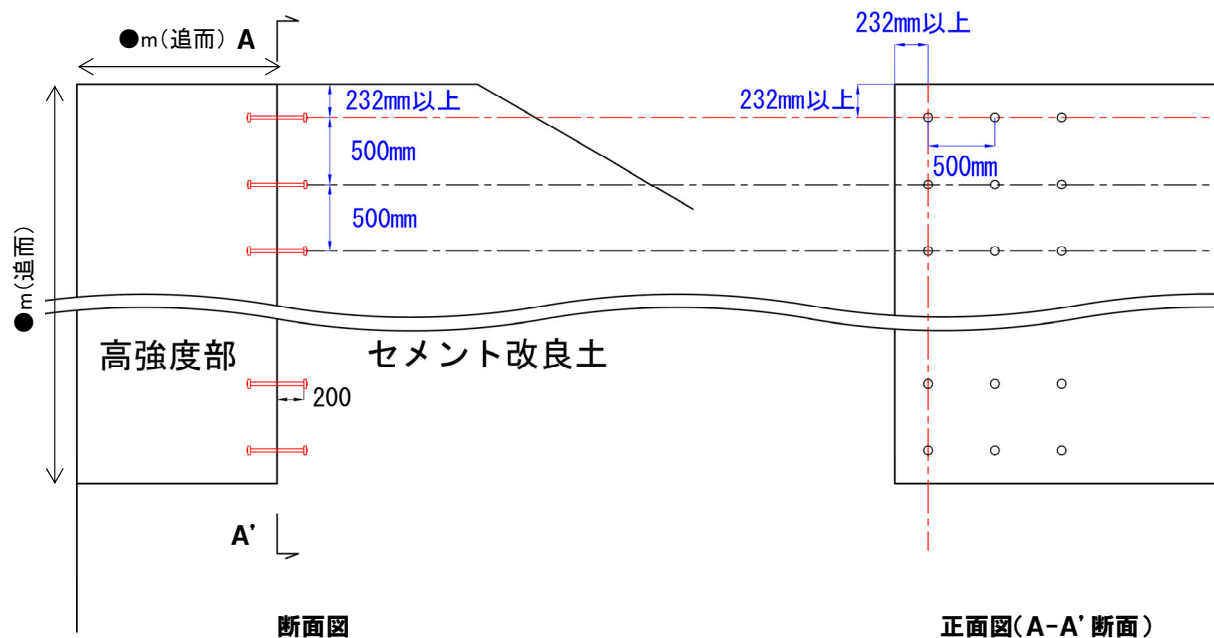


セメント改良土 (高強度部含む) 概略図



高強度部拡大図 (イメージ図)

(第1111回審査会合資料1-2-1-p115再掲)



アンカーボルト配置計画図*

※: 高強度部の詳細は、設置変更許可段階において構造成立性評価結果を説明する。

補足説明資料1 高強度部のアンカーボルトの仕様及び配置計画(2/2)

- 「各種合成構造設計指針」の適用範囲と高強度部のアンカーボルトの仕様を比較し、「各種合成構造設計指針」の適用性を検討する。
 - アンカーボルトを固定する構造物に関して、高強度部の設計基準強度(40N/mm²)は適用範囲内であるが、セメント改良土の設計基準強度(6.5N/mm²)が適用範囲から外れることから「×：適用範囲外」としたため、アンカーボルトの性能試験で「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を確認する。
 - アンカーボルトの仕様に関して、「各種合成構造設計指針」の仕様を満足するように止水ジョイントのアンカーボルトの呼び径、頭部の種類、頭部の径、埋込み長さ、へりあき及び配置間隔を設定するため、「○：適用性がある」とした。
 - 隣接するアンカーボルトの配置の影響に関して、「各種合成構造設計指針」の群効果を考慮不要な配置を満足するように配置するため、「○：適用性がある」とした。
- セメント改良土の設計基準強度(6.5N/mm²)において「各種合成構造設計指針」の耐力算定式を参考に設計することの妥当性を、「(2)指針を参考に設計することの妥当性」で確認したことから、高強度部のアンカーボルトも「各種合成構造設計指針」を参考に設計する。

「各種合成構造設計指針」の適用範囲と高強度部のアンカーボルトの仕様の比較

凡例 ○：適用性がある ×：適用範囲外

項目	「各種合成構造設計指針」の適用範囲	高強度部のアンカーボルトの仕様	「各種合成構造設計指針」の適用性	
アンカーボルトを固定する構造物	鉄筋コンクリート又は鉄骨鉄筋コンクリート※ ¹ (設計基準強度:18~48N/mm ²)	高強度部(設計基準強度:40N/mm ²)	○	
		セメント改良土(設計基準強度:6.5N/mm ²)	×	
アンカーボルトの仕様	呼び径	9mm以上25mm以下	24mm	○
	頭部の種類	頭付きアンカーボルト、鉄筋アンカーボルト、基礎アンカーボルト(先付け工法)、接着系アンカーボルト(後打ち工法)	頭付きアンカーボルト(先付け工法)	○
	頭部の径	アンカーボルトの呼び径の1.6倍以上	65mm(24mm×1.6≒39mm以上)	○
	埋込み長さ	アンカーボルトの呼び径の4倍以上	200mm(24mm×4=96mm以上)	○
	へりあき	アンカーボルトの呼び径の3倍以上	232mm以上(24mm×3=72mm以上)	○
	配置間隔	アンカーボルトの呼び径の7.5倍以上かつ600mm以下	500mm(24mm×7.5=180mm以上かつ600mm以下)	○
隣接するアンカーボルトの配置の影響	アンカーボルトを隣接して複数本配置する場合の引張耐力の評価にあたって、コーン状破壊により引張耐力が決まる場合には、群効果を考慮する必要がある。	コーン状破壊の群効果を考慮不要な配置とすること	○	

※1:「各種合成構造設計指針」は、無筋コンクリートを試験条件としている論文を参考文献にしていることから、無筋コンクリートに対しても適用性はあると考えられる。