資料２－２

泊発電所３号炉審査資料	
資料番号	DB05　r.3.43
提出年月日	令和6年1月29日

泊発電所３号炉

設置許可基準規則等への適合状況について
（設計基準対象施設等）

第5条　津波による損傷の防止

令和６年１月
北海道電力株式会社

別添資料１

泊発電所３号炉
耐津波設計方針について

目 次

Ⅰ. はじめに
Ⅱ. 耐津波設計方針
1. 基本事項
1.1 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・地殻変動の考慮
1.6 設計又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 敷地への流入防止（外郭防護１）
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）
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
2.6 津波監視

3. 重大事故等対処施設の津波防護方針
3.1 敷地の特性に応じた津波防護の基本方針
3.2 敷地への流入防止（外郭防護１）
3.3 漏水による重大事故等に対処するために必要な機能への影響防止（外郭防護２）
3.4 重大事故等に対処するために必要な機能を有する施設の隔離（内郭防護）
3.5 水位変動に伴う取水性低下による重大事故等に対処するために必要な機能への影響防止
3.6 津波監視

4. 施設・設備の設計・評価の方針及び条件
4.1 津波防護施設の設計
4.2 浸水防止設備の設計
4.3 津波監視設備の設計
4.4 施設・設備等の設計・評価に係る検討事項

今回提出範囲

（添付資料）

1．基準津波に対して機能を維持すべき設備とその配置
2．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
3．基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域について
4．港湾内の局所的な海面の励起について
5．管路解析の詳細について
6．入力津波に用いる潮位条件について
7．津波防護対策の設備の位置づけについて
8．内郭防護において考慮する溢水の浸水範囲，浸水量について
9．海水ポンプの水理試験について
10．貯留量の算定について
11．浸水防護重点化範囲の境界における浸水対策の設置位置，実施範囲及び施工例
12．基準津波に伴う砂移動評価について
13．泊発電所周辺海域における底質土砂の分析結果について
14．海水ポンプ軸受の浮遊砂耐性について
15．津波漂流物の調査要領について
16．漂流物の評価に考慮する津波の流速・流向について
17．津波の流況を踏まえた防波堤の取水口到達及び閉塞可能性評価について
18．燃料等輸送船の係留索の耐力について
19．燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について
20．津波監視設備の監視に関する考え方
21．耐津波設計において考慮する荷重の組合せについて
22．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
23．基準類における衝突荷重算定式及び衝突荷重について
24．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
25．防潮堤の設計方針及び構造成立性評価結果について
26．貯留堰の構造及び仕様について
27．鋼管矢板継手部の漏水量評価について
28．水密扉の運用管理について
29．屋外排水路に関する設計方針について
30．輸送物及び輸送車両の漂流物評価について
31．１号及び２号炉取水路流路縮小工について
32．１号及び２号炉放水路逆流防止設備について
33．３号炉放水ピット流路縮小工について
34．発電所敷地外の車両について
35．取水性への影響評価及び衝突荷重の設定に用いる対象漁船について
36．３号炉取水ピットスクリーン室防水壁及び水密扉の設計方針について
37．水位変動・流向ベクトルについて

38. ３号炉原子炉補機冷却海水放水路逆流防止設備について
39. 津波発生時の運用対応について
40. モニタリングポスト及びモニタリングステーションについて
41. 構外海域の漂流物が施設護岸及び取水口へ到達する可能性について
42. 入力津波に対する水位分布について
43. 審査ガイドとの整合性（耐津波設計方針）

（参考資料）

－１　泊発電所３号炉津波評価について

津波の流況を踏まえた防波堤の取水口到達及び閉塞可能性評価について

1．はじめに

津波の流況を踏まえた漂流物の取水口到達可能性については，「別添１　２．５（２）ｅ．基準津波に伴う取水口付近の漂流物に対する取水性確保」にて評価している。このうち，防波堤については，津波影響軽減施設としての設計は行っていないことも踏まえ，地震及び津波時の越流による洗掘による損傷状態を考慮した上で，津波波力を受けることにより，漂流，滑動及び転倒が生じる可能性を検討し，取水口への到達及び閉塞可能性について評価した。

2．防波堤の被災メカニズム

（1）防波堤構造

防波堤の構造として，防波堤と３号炉取水口の配置を図１に，北防波堤の構造を表１及び図２に，南防波堤の構造を表２及び図３に示す。

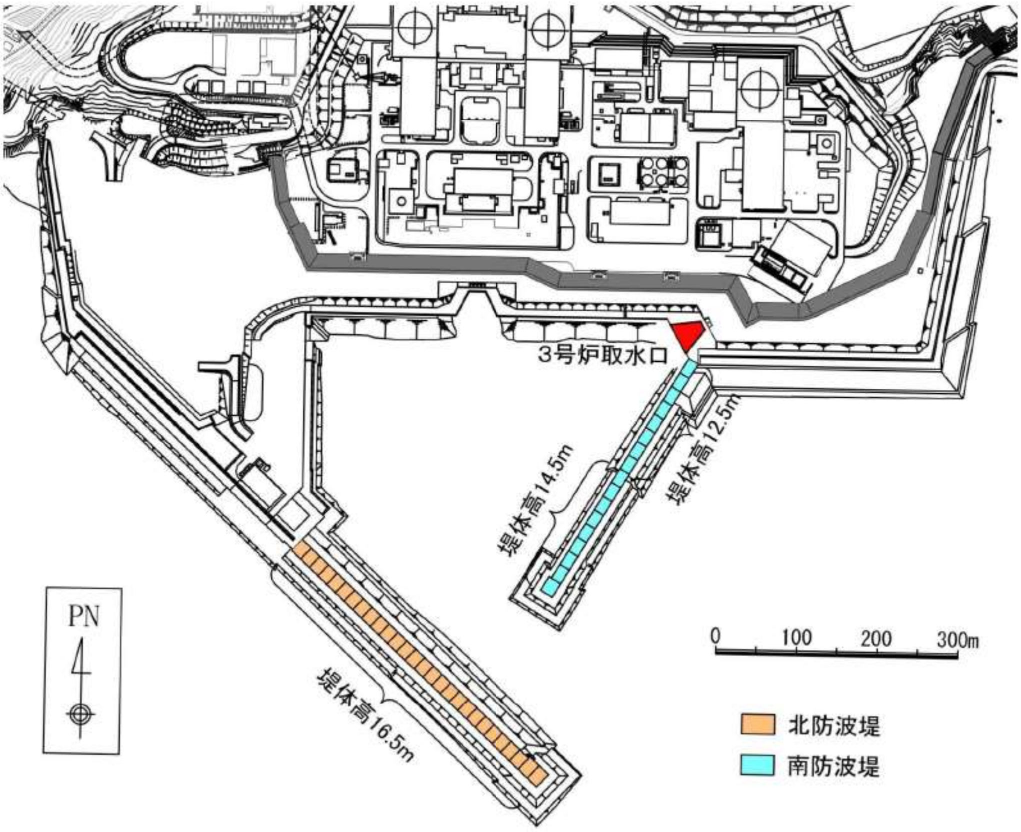
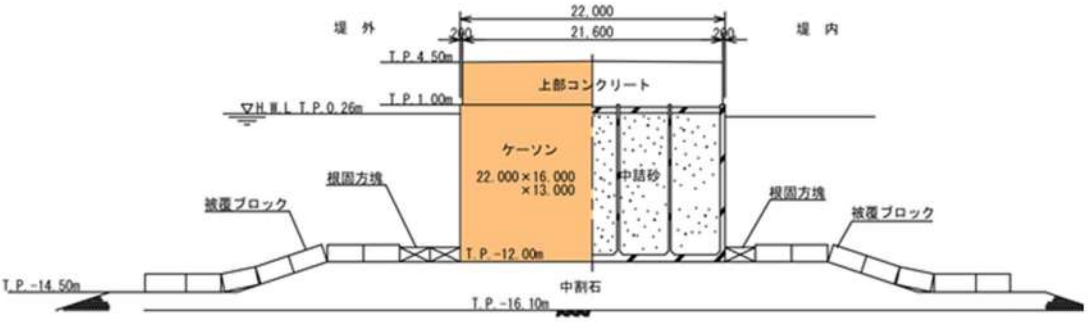


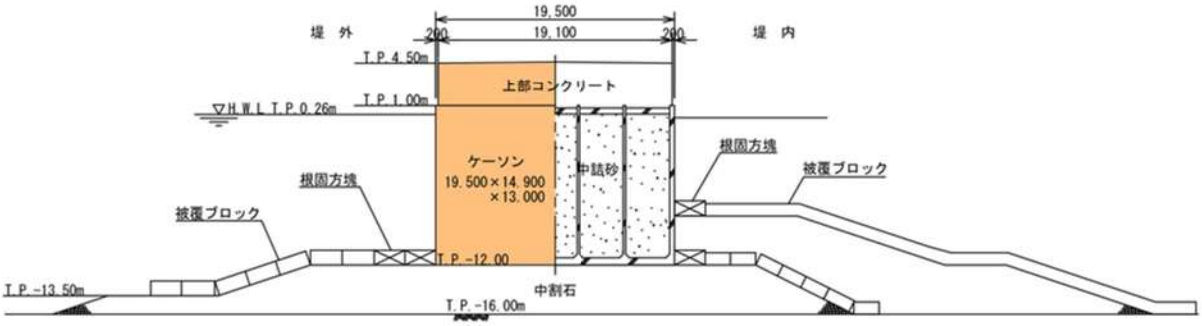
図１　防波堤と３号炉取水口の配置

表１　北防波堤構造

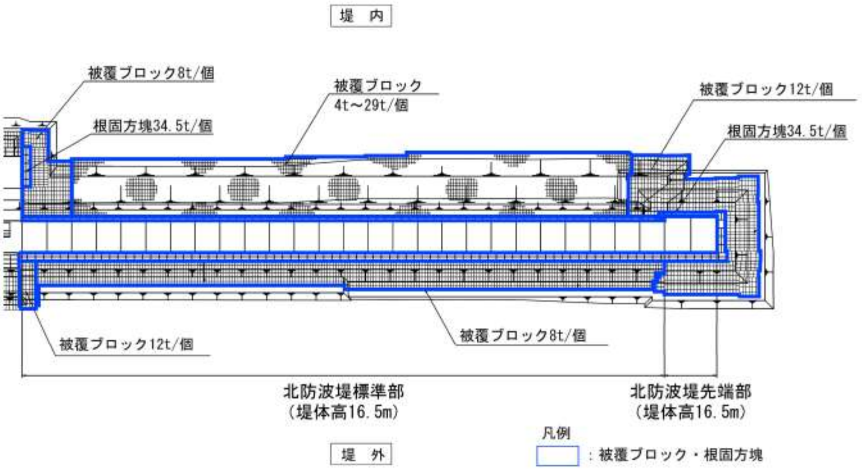
構造物	仕　様
ケーソン	【先端部】計２函 ・22.0m（B）×16.0m（L）×13.0m（H）：9,700t※以上 ※中詰砂の単位体積重量は 2t/m³ として算出 【標準部】計 26 函 ・19.5m（B）×14.9m（L）×13.0m（H）：8,000t※以上 ※中詰砂の単位体積重量は 2t/m³ として算出
上部コンクリート	【先端部】 21.6m（B）×3.5m（H）：2,900t 以上 【標準部】 19.1m（B）×3.5m（H）：2,400t 以上
根固方塊	34.5t/個
被覆ブロック	４～29t/個
中割石 （基礎マウンド）	30～300kg/個



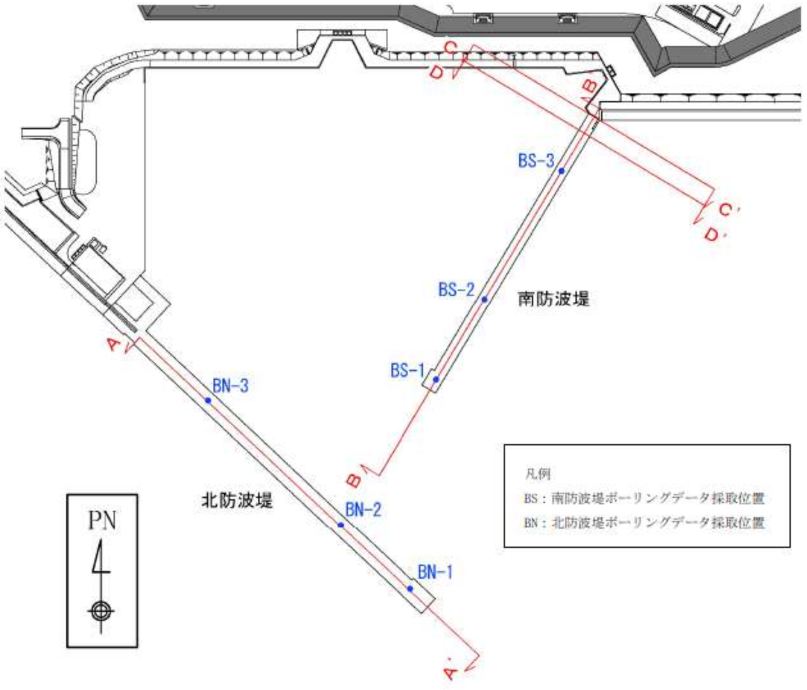
（ａ）　北防波堤先端部断面図



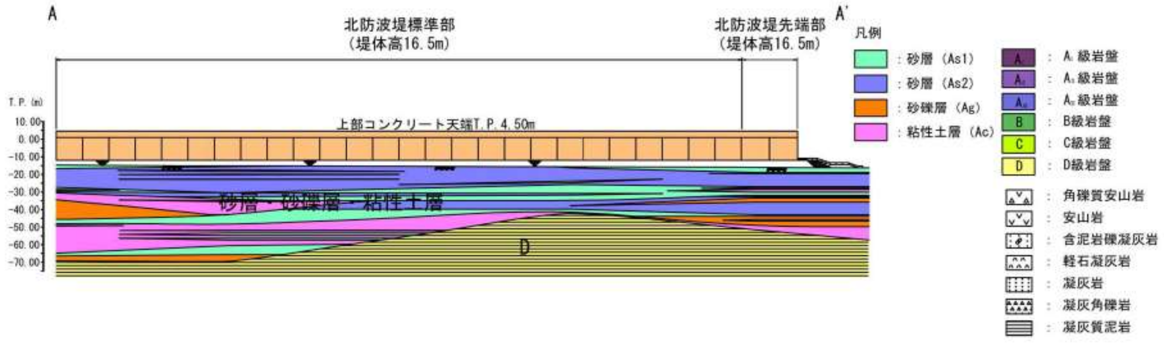
（ｂ）　北防波堤標準部断面図



（ｃ）　北防波堤平面図



（ｄ）　断面位置図

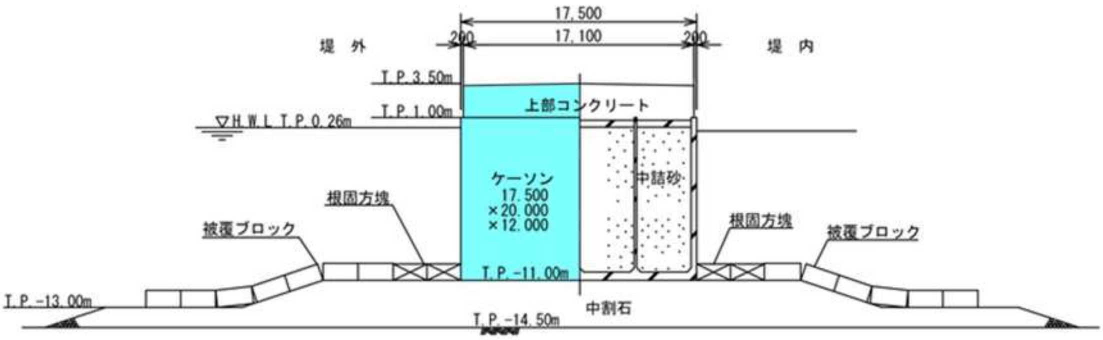


（ｅ）　北防波堤地質断面図（A―A’断面）

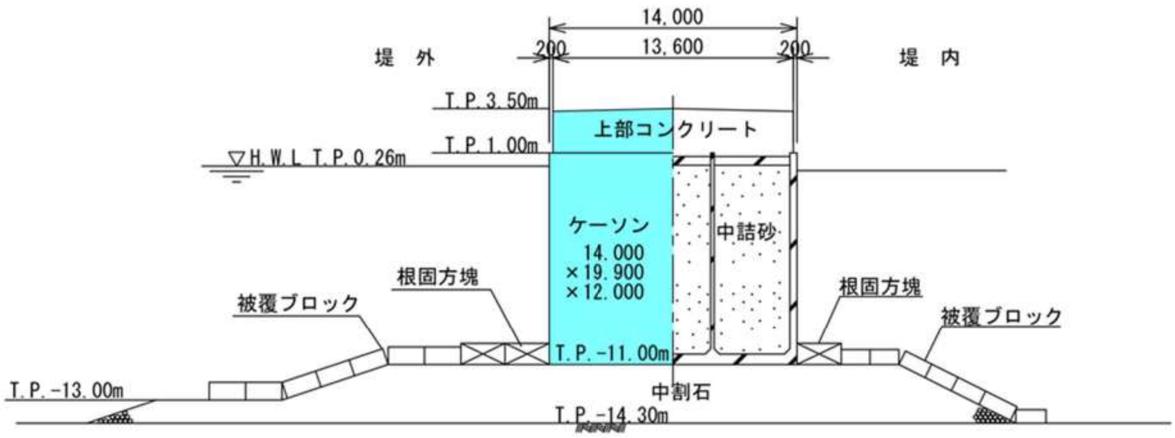
図２　北防波堤構造

表２　南防波堤構造

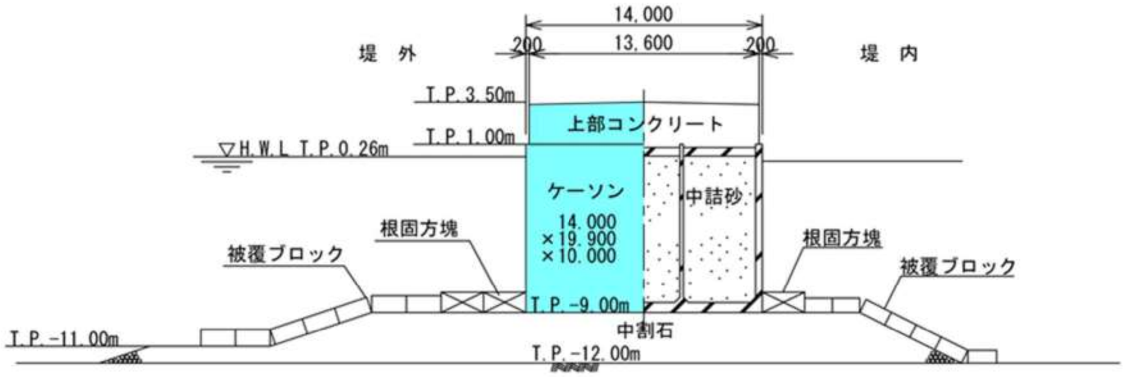
構造物	仕　様
ケーソン	【先端部】計１函 ・17.5m (B)×20.0m (L)×12.0m (H)：8,800t※以上 ※中詰砂の単位体積重量は 2t/m³ として算出 【標準部および基部】計 16 函 ・堤体高 14.5m　計８函 14.0m (B)×19.9m (L)×12.0m (H)：7,000t※以上 ・堤体高 12.5m　計８函（基部含む） 14.0m (B)×19.9m (L)×10.0m (H)：5,900t※以上 ※中詰砂の単位体積重量は 2t/m³ として算出
上部コンクリート	【先端部】 17.1m (B)×2.5m (H)：2,100t 以上 【標準部および基部】 13.6m (B)×2.5m (H)：1,600t 以上
消波ブロック	32～40t/個
根固方塊	34.5t/個
被覆ブロック	２～８t/個
中割石 （基礎マウンド）	30～300kg/個



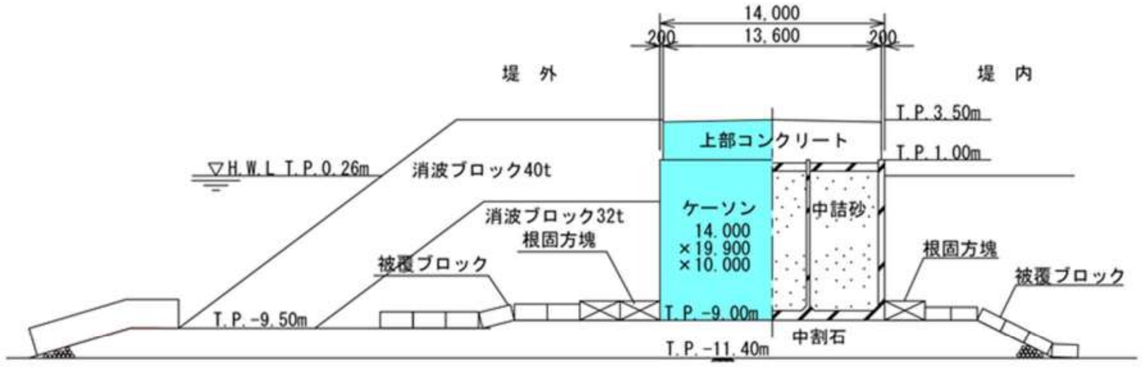
（ａ）　南防波堤先端部断面図



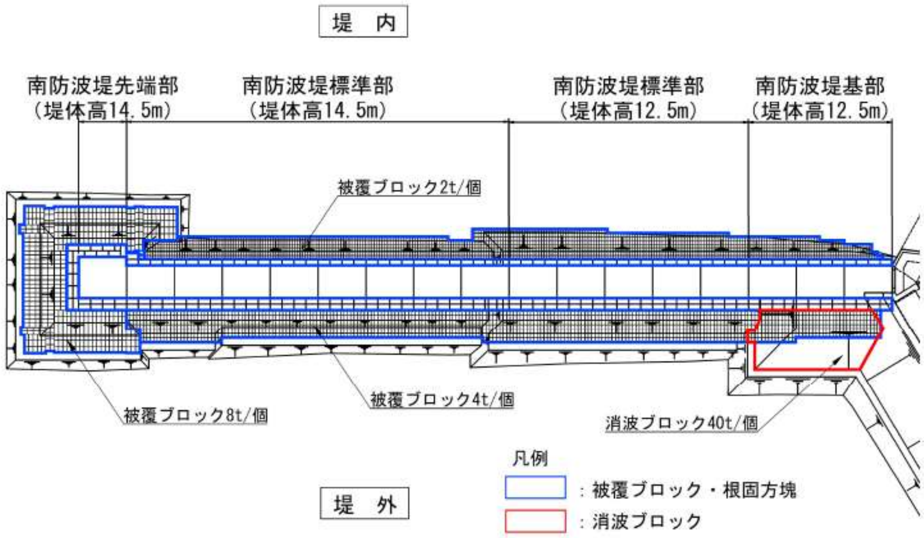
（ｂ）　南防波堤標準部断面図（堤体高14.5m）



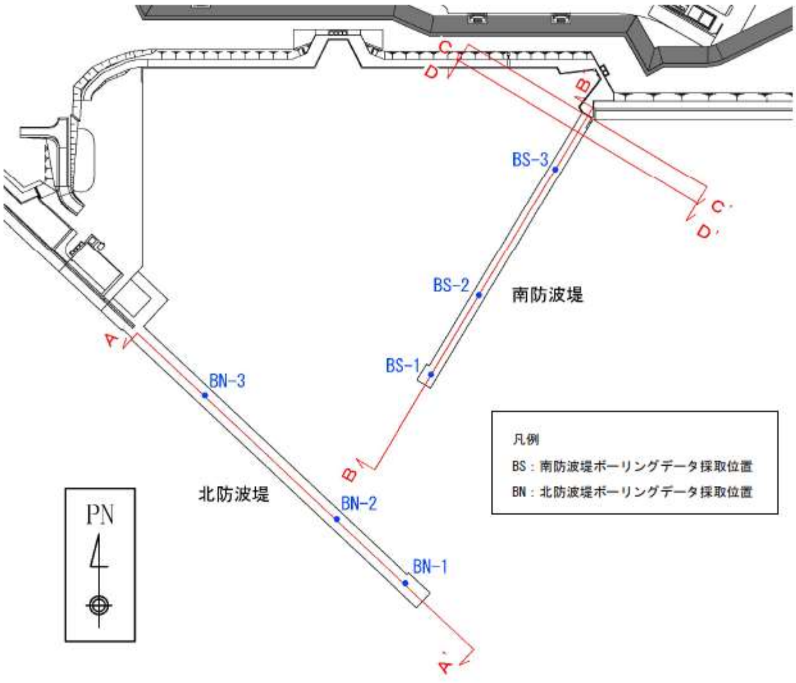
（ｃ）　南防波堤標準部断面図（堤体高12.5m）



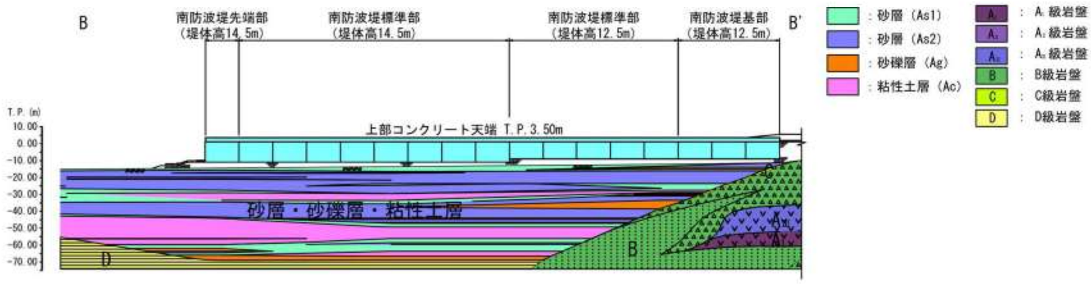
（ｄ）　南防波堤基部断面図（堤体高12.5m）



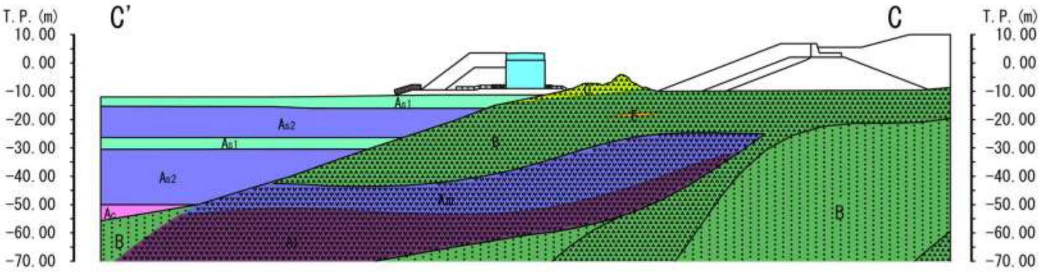
（e）　南防波堤平面図



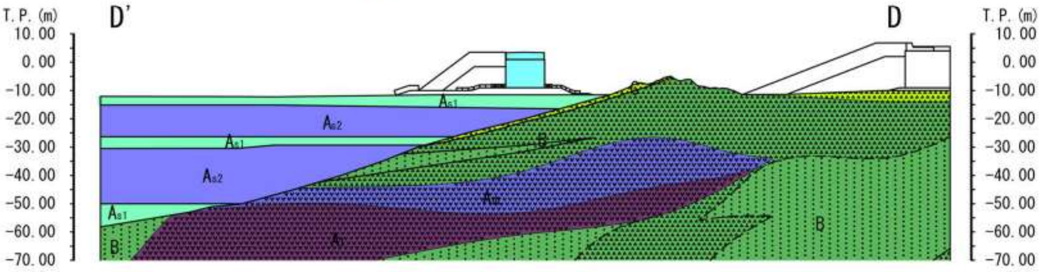
（f）　断面位置図



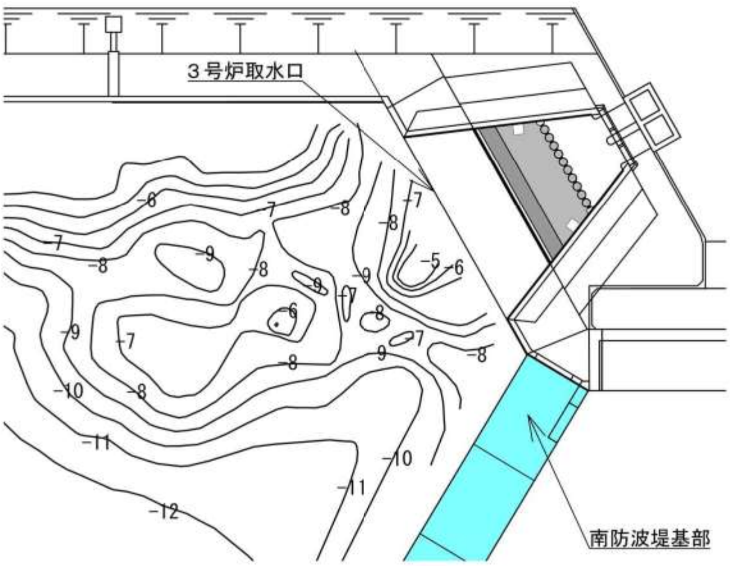
（g）　南防波堤地質断面図（B－B’断面）



（ｈ）　南防波堤地質断面図（Ｃ－Ｃ’断面）



（ｉ）　南防波堤地質断面図（Ｄ－Ｄ’断面）



（ｊ）　３号炉取水口前面の海底地盤コンター図（値はT.P.　ｍを示す）

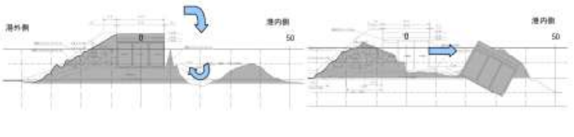
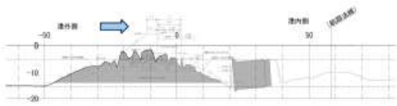
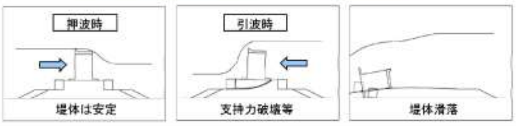
図３　南防波堤構造

（２）防波堤の被災事例

東北地方太平洋沖地震の地震及び津波による防波堤の被災の主な原因について，「防波堤の耐津波設計ガイドライン（平成 27 年 12 月一部改訂）（以下，「防波堤のガイドライン」という。）」[1)] では，津波の波力による直立部の滑動，越流による港内側の基礎マウンドや海底地盤の洗掘による支持力の喪失，あるいはこれらの複合的な作用によるものとしている。

「第３回　東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会（2011）」[2)] では，数値シミュレーションに基づき津波波力を算出して断面照査を実施し，被災パターンを表３の４つに分類している。なお，「東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災（2013）」[3)] では，津波波力型について，「津波そのものの大きさよりも，防波堤の前面と背面の水位差がどれだけ大きくなるかが重要であり，防波堤法線に対して直角に近い角度の場合に水位差が大きくなりやすく被災を受けやすい。逆に言えば，非常に大きな津波でも，開口部等から港内にも津波が侵入し，水位差が大きくならない場合には，防波堤は移動しない。」としている。

表３　津波波力による防波堤の被災パターン[2)]

	分類	被災の概要	主な被災施設	被災状況
防波堤	越流洗掘型	内外水位差等による津波力だけでは、ケーソンの安定性に影響を与えるに至らないが、津波の流れや越流に伴う渦等の影響でケーソン背面（港内側）のマウンドまたは地盤面が洗掘を受け、最終的に堤体の支持力不足によりケーソンが滑動、滑落したもの	八戸港八太郎防波堤（中央部）	
	津波波力型	内外水位差等による直接的な津波力により、ケーソンが不安定となり滑動、転倒、支持力破壊が生じたもの	八戸港八太郎防波堤（ハネ部） 釜石港湾口防波堤（北） 大船渡港湾口防波堤 相馬港沖防波堤	
	堤頭部洗掘型	堤頭部周辺の流れにより、基礎マウンドが洗掘を受け、ケーソンの滑落が生じたもの	宮古港竜神崎防波堤 宮古港藤原防波堤 八戸港中央防波堤 八戸港第二中央防波堤	
	引波水位差型	第一波の押波時の津波力や越流に伴う洗掘だけでは、不安定までには至らないが、引波時における内外水位差により、ケーソンが不安定となり滑動、転倒、支持力破壊が生じたもの	女川港防波堤	

また，東北地方太平洋沖地震の地震及び津波による防波堤の被災実績として，「東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告（2015）」[4)] では，図４に示す上部コンクリートの飛散が見られたとしている。

「東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設（防波堤）被災状況とその原因について（2012，八木ら）」[5)] では，図５に示すように防波堤の移動距離が最大で 150m 程度となったことを確認している。

表４に津波による防波堤被災メカニズムを示す。

最大移動距離が 150m となった田老漁港は，津波による強い水平力が要因で被災したものと推定されており，直接的な津波力により施設の安定性が損なわれ被災（滑動，転倒）した「津波波力（水位差）型」の被災メカニズムに分類される。

表４　津波による防波堤被災メカニズム[5)]

分類	被災概要	主な被災漁港（被災数）
津波波力（水位差）型	内外水位･段波等の直接的な津波力により，施設の安定性が損なわれた被災（滑動，転倒）	三沢，田老(2)，山田，女川(2)，松川浦(2)
堤頭部洗掘型	堤頭部周辺の流れの影響で，基礎マウンドが洗掘され，施設の安定性が損なわれた被災	三沢
引波水位差型	津波波力･洗掘だけでは不安定までに至らない施設が引波時の内外水位差により施設の安定性が損なわれた被災（滑動，転倒）	女川(2)
越流洗掘型	越流に伴う渦等の影響で施設背後のマウンド･地盤が洗掘され，施設の安定性が損なわれた被災	大槌,志津川

外港地区　南防波堤
（平成 23 年 3 月 23 日撮影⑤）
上部工 欠落

図４　仙台塩釜港　仙台港区　外港地区　南防波堤[4)]

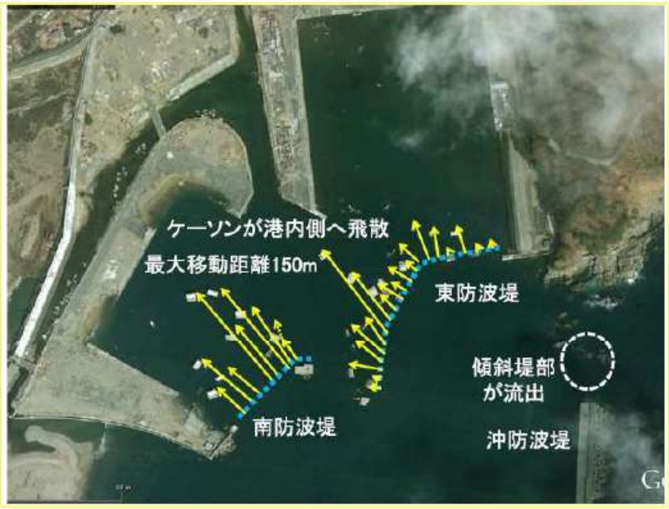


図５　田老漁港　東防波堤及び防波堤 5)

（３）津波時の流況

東北地方太平洋沖地震の被災事例を踏まえると，防波堤が被災する可能性は否定できないため，３号炉取水口への到達及び閉塞可能性を評価するに当たり，泊発電所に想定する基準津波時の流況について整理する。

表３のうち，越流洗掘型，津波波力型は堤内外水位差と直接的な津波の波力によるものが要因であると考えられるため，堤内外水位差が最大となる波源及び堤内外水位差最大時の水平波力と堤外水位最大時の水平波力を比較し，最大となる波源の流況を示す。３号炉取水口に対し北防波堤より南防波堤が近接していること及び北防波堤より南防波堤の重量が小さく津波波力の影響を受けることを踏まえ，南防波堤が健全な地形である防波堤損傷なし地形及び北防波堤損傷地形を対象とする。

南防波堤における各波源の防波堤堤内外水位差最大時の水平波力を表５，堤外水位最大時の水平波力を表６に示す。

各波源における最大堤内外水位差は「基準津波（波源Ａ（防波堤損傷なし））」で 10.52m であるが，最大堤内外水位差発生時の堤外水位に着目すると，防波堤天端高さ（T.P.3.5m）以下であり防波堤を越流しない流況のため，ケーソンに作用する水平波力が比較的小さくなること及び防波堤の越流が要因である越流洗掘型による被災パターンの可能性が低くなると考えられることから，最大水位差発生時に津波が防波堤を越流している波源である「基準津波（波源Ｉ（防波堤損傷なし））」の流況を図７に示す。

各波源における最大水平波力は 1,067kN/m である「基準津波（波源Ｆ，北防波堤損傷）」になることから流況を図８に示す。

また，表３のうち，堤頭部洗掘型は流速が要因であると考えられるため，港湾内の最大流速を選定する。港湾内の「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」の 17.63m/s であったため，流況を図９に示す。

３号炉取水口前面における水位を図６に示す。

なお，水平波力の算出については，「防波堤のガイドライン」[1)] の 津波波力の算定手順に従い，防波堤を越流するときは静水圧差による算定式を用い，越流しない場合は谷本式を用い算定した。

表5　南防波堤における最大堤内外水位差一覧

基準津波	抽出箇所	堤外水位 (T.P.m)	堤内水位 (T.P.m)	堤内外水位差 (m)	水平波力 (kN/m)	越流の有無
波源A（防波堤損傷なし）	基部	2.38	-8.15	10.52	685	無
波源B（防波堤損傷なし）	基部	8.84	3.21	5.63	859	有
波源B（北防波堤損傷）	基部	5.23	1.04	4.18	599	有
波源C（防波堤損傷なし）	基部	8.79	3.66	5.13	802	有
波源D（防波堤損傷なし）	基部	5.15	0.99	4.16	594	有
波源D（北防波堤損傷）	基部	5.19	1.01	4.18	597	有
波源F（北防波堤損傷）	標準部	8.24	2.07	6.17	1,067	有
波源H（北防波堤損傷）	基部	8.16	3.72	4.43	710	有
波源I（防波堤損傷なし）	基部	4.27	-5.50	9.77	875	有
波源K（防波堤損傷なし）	基部	5.03	0.51	4.52	620	有
波源L（北防波堤損傷）	基部	5.34	1.50	3.84	572	有

表6　南防波堤における堤外水位最大時の水平波力一覧

基準津波	抽出箇所	堤外水位 (T.P.m)	堤内水位 (T.P.m)	堤内外水位差 (m)	水平波力 (kN/m)
波源A（防波堤損傷なし）	基部	8.28	5.99	2.28	468
波源B（防波堤損傷なし）	基部	11.00	7.49	3.51	659
波源B（北防波堤損傷）	基部	11.62	9.82	1.81	478
波源C（防波堤損傷なし）	基部	9.38	6.22	3.16	588
波源D（防波堤損傷なし）	基部	8.51	7.01	1.50	383
波源D（北防波堤損傷）	基部	9.10	8.75	0.35	264
波源F（北防波堤損傷）	基部	11.48	9.49	1.99	495
波源H（北防波堤損傷）	基部	11.19	9.21	1.99	490
波源I（防波堤損傷なし）	基部	9.92	7.36	2.56	531
波源K（防波堤損傷なし）	基部	8.18	8.17	0.01	209
波源L（北防波堤損傷）	基部	9.89	9.14	0.75	324

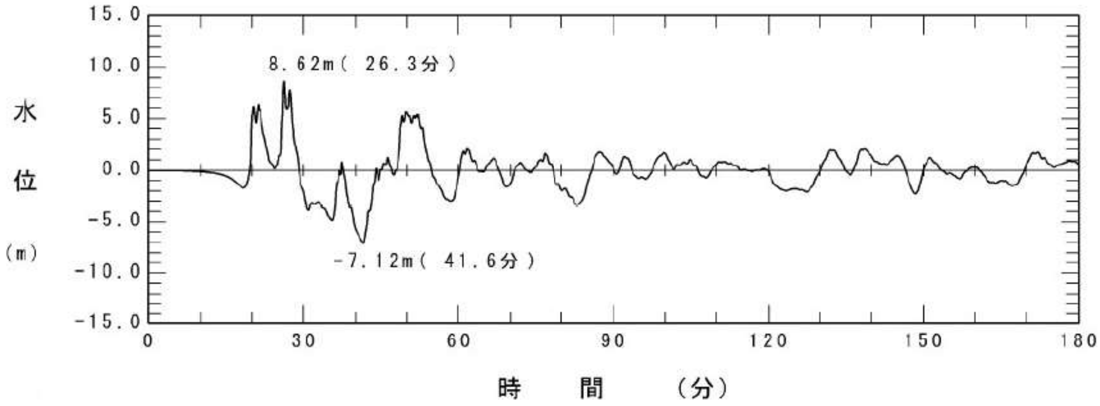


図６（ａ）　「基準津波（波源Ｉ（防波堤損傷なし））」による３号炉取水口前面の水位変化

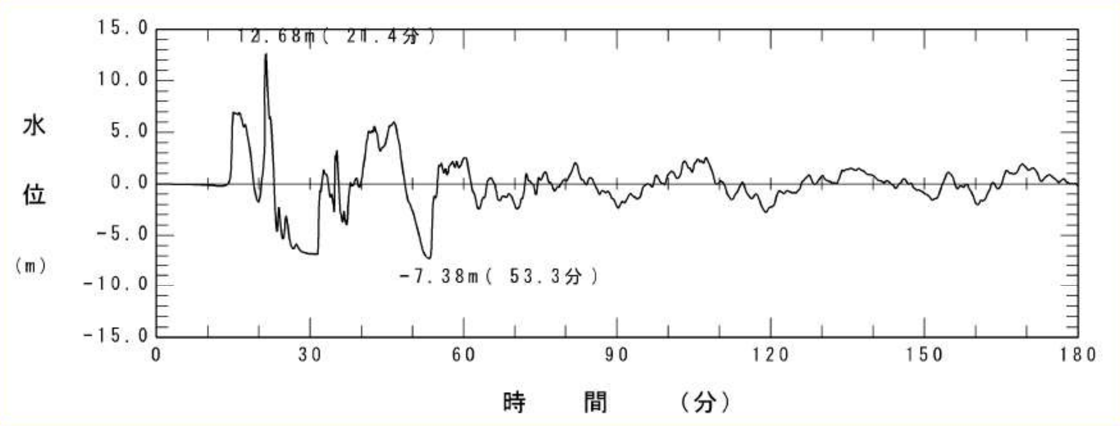


図６（ｂ）　「基準津波（波源Ｆ（北防波堤損傷））」による３号炉取水口前面の水位変化

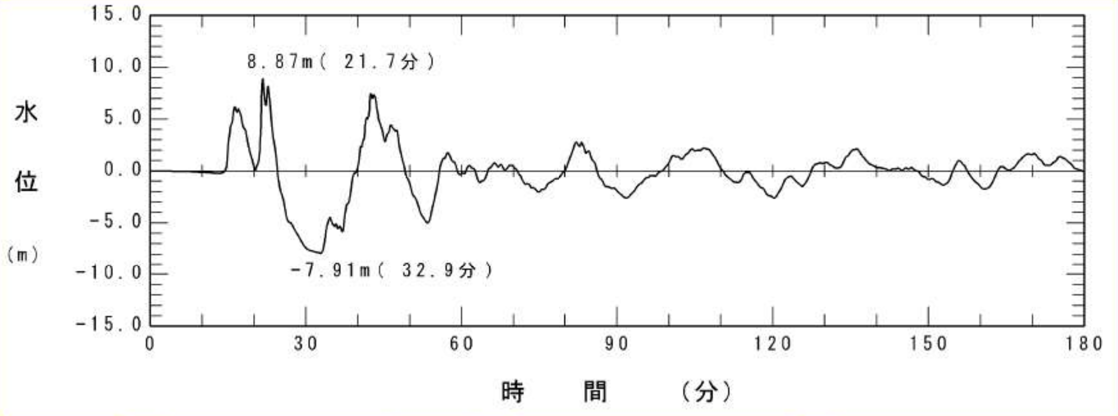


図６（ｃ）　「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」による３号炉取水口前面の水位変化

a．南防波堤堤内外の最大水位差発生時に防波堤を越流する津波の水位差・流速・流向

防波堤周辺の水位・流速・流向並びに海底地形変化を図7に示す。

「基準津波（波源Ⅰ（防波堤損傷なし））」による津波は，地震発生後約40分頃の引き潮時に，港湾内の水位が低下した後に来襲する押し波成分の津波が北防波堤側を回り込みながら南防波堤基部に到達することで，表4に示す防波堤堤内外の最大水位差が発生する。防波堤堤内外に明瞭な水位差が発生する時間は，地震発生後42分～42分30秒の約30秒程度である。

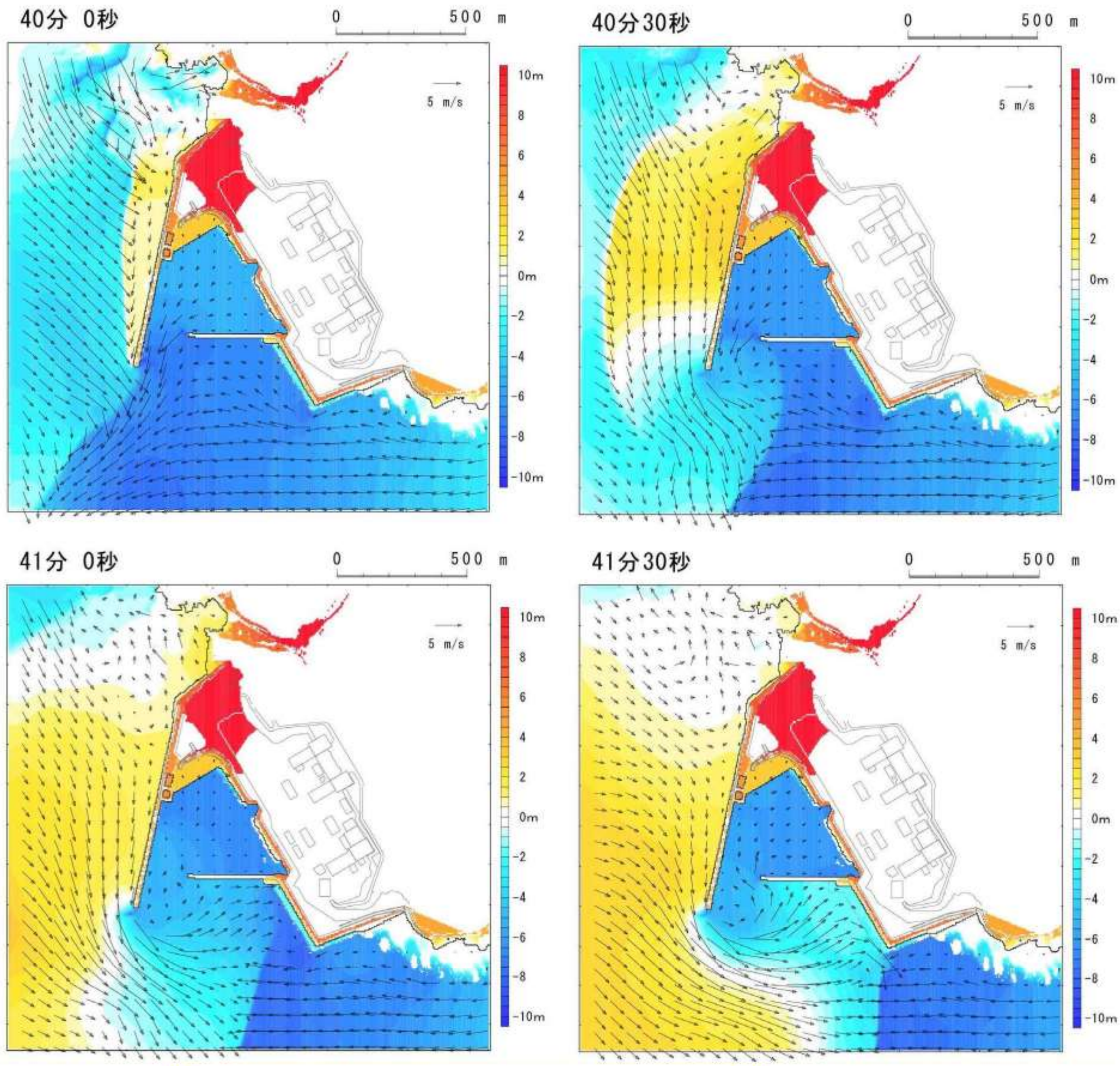


図7（a） 「基準津波（波源Ⅰ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大水位差発生時の水位・流速・流向

（地震発生後40分～44分30秒のうち40分～41分30秒）

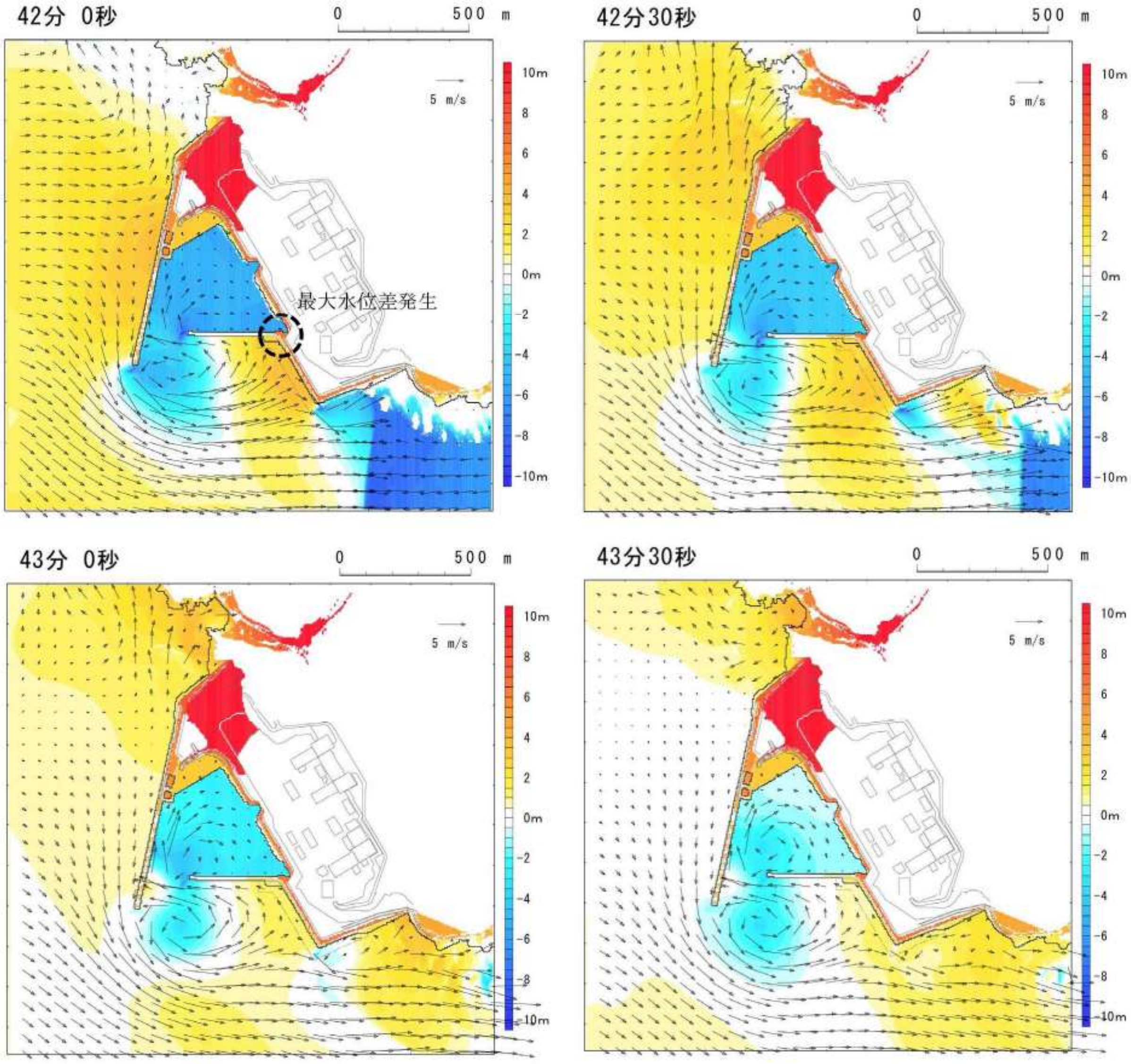


図７（ｂ） 「基準津波（波源Ｉ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大水位差発生時の水位・流速・流向
（地震発生後 40 分～44 分 30 秒のうち 42 分～43 分 30 秒）

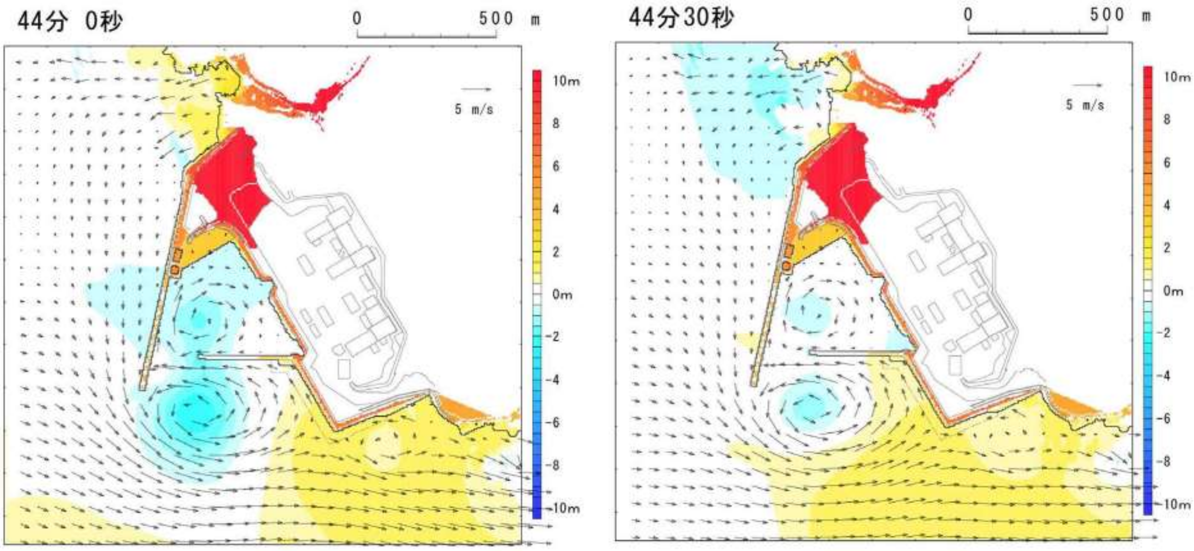


図７（ｃ）「基準津波（波源Ｉ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大水位差発生時の水位差・流速・流向
（地震発生後 40 分～44 分 30 秒のうち 44 分～44 分 30 秒）

b．南防波堤の最大水平波力発生時の水位差・流速・流向

防波堤周辺の水位・流速・流向並びに海底地形変化を図８に示す。

「基準津波（波源Ｆ（北防波堤損傷））」による津波は，地震発生後約 21 分頃に，表４に示す最大水平波力が発生する。防波堤に最大水平波力が発生する時間は，地震発生後 21 分～21 分 30 秒の 30 秒程度である。

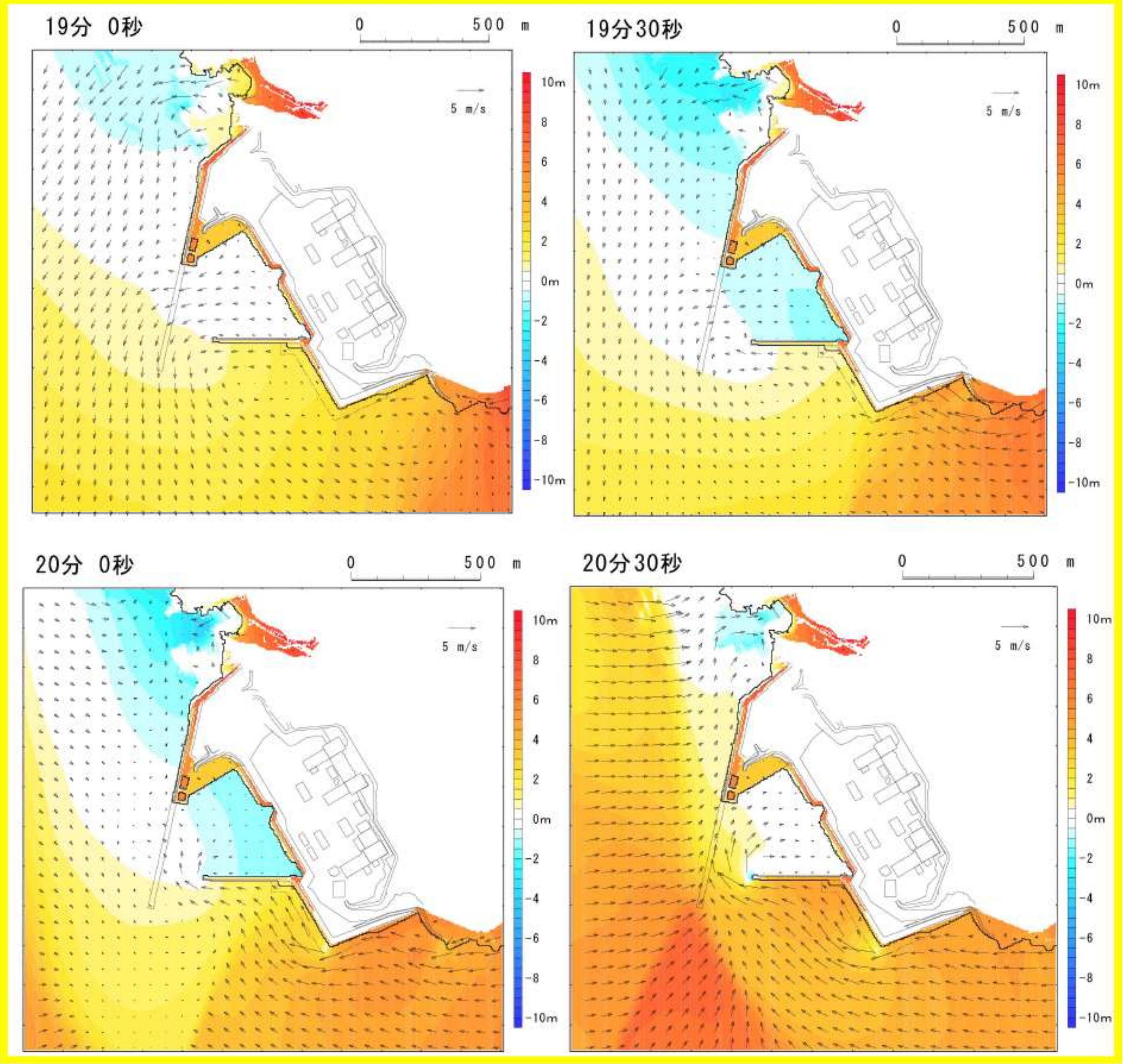


図８（ａ）　「基準津波（波源Ｆ（北防波堤損傷））」による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向

（地震発生後 19 分～23 分 30 秒のうち 19 分～20 分 30 秒）

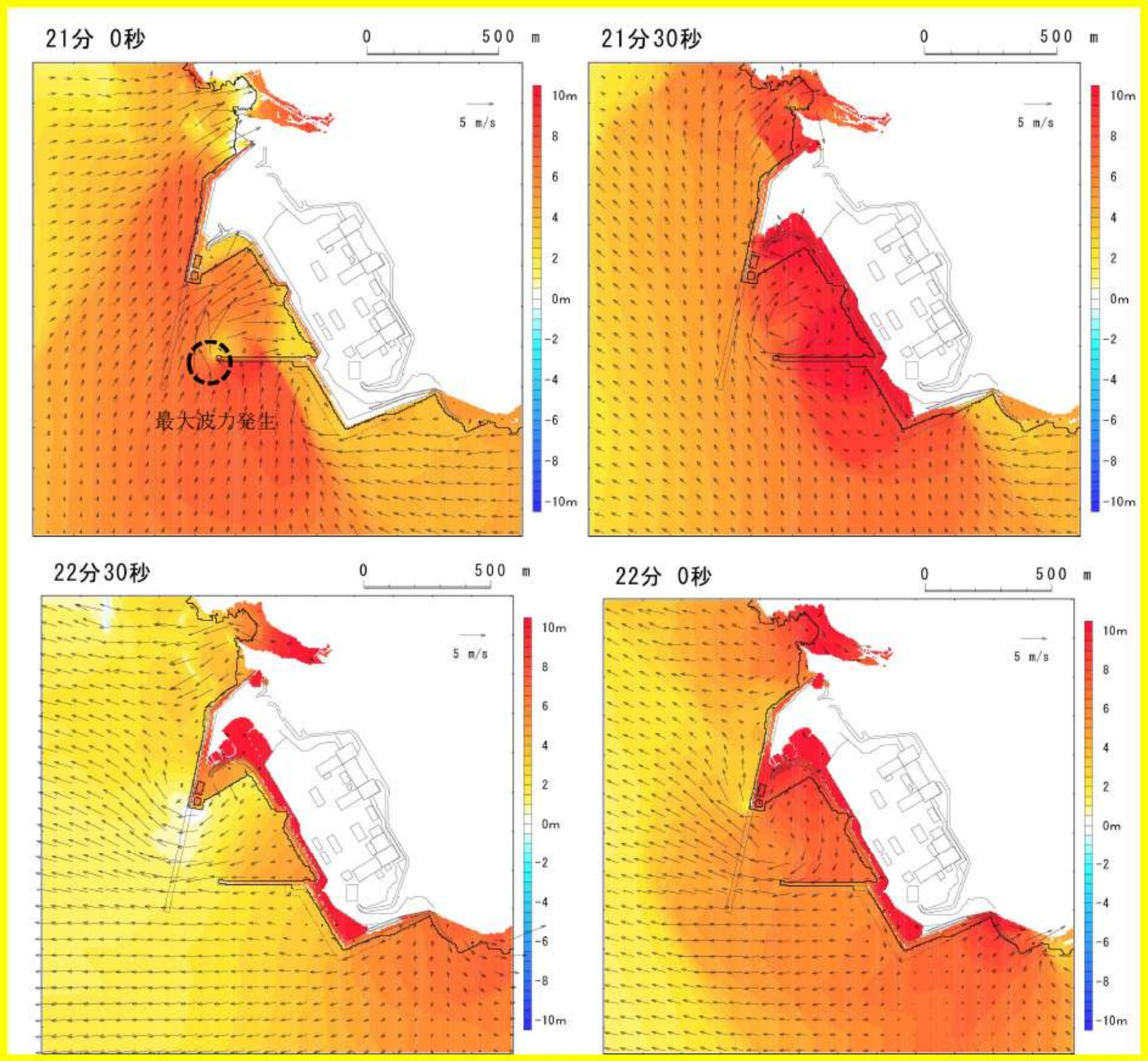


図８（ｂ）　「基準津波（波源Ｆ（北防波堤損傷））」による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向

（地震発生後 19 分～23 分 30 秒のうち 21 分～22 分 30 秒）

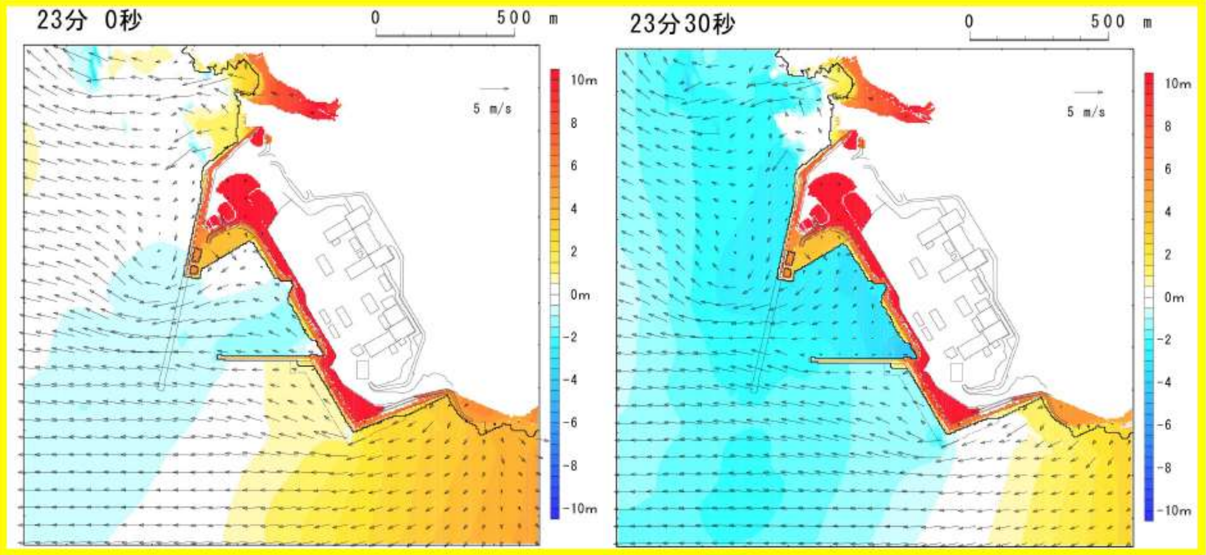


図８（ｃ）　基準津波（波源Ｆ（北防波堤損傷））による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向
（地震発生後 19 分～23 分 30 秒のうち 23 分～23 分 30 秒）

ｃ．最大流速発生時の水位・流速・流向及び地形変化

（ａ）最大流速発生時の水位・流速・流向

防波堤周辺の水位・流速・流向並びに海底地形変化を図９に示す。

「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」による津波は，地震発生後約33分頃の引き潮時に，港湾内の水位が低下した後に来襲する押し波成分の津波が北防波堤を回り込み，北防波堤先端付近で大きな流速が発生する。最大流速が発生する時間は地震発生後35分～36分30秒の約１分30秒程度である。

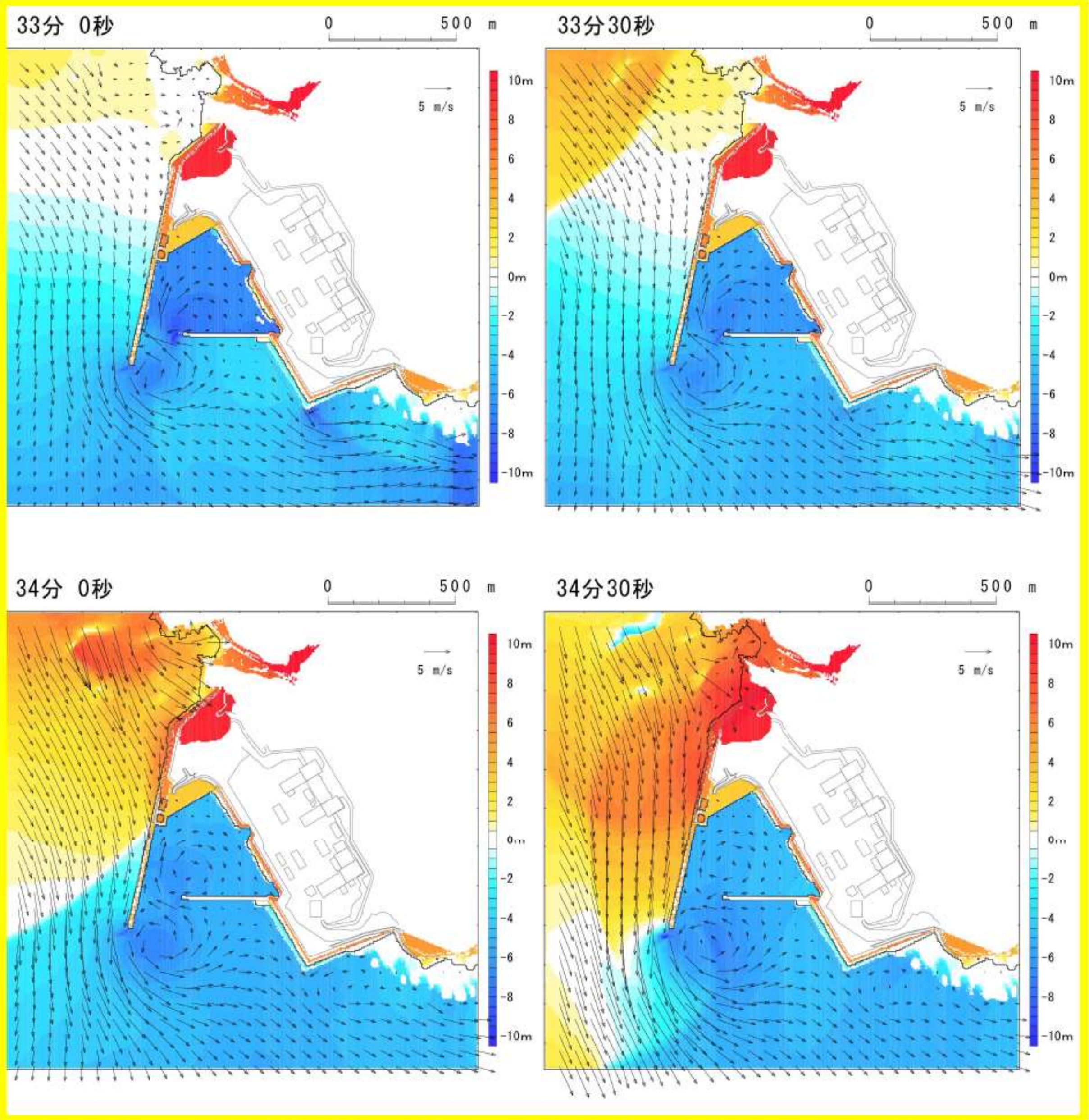


図９（ａ）　「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向

（地震発生後 33 分～37 分 30 秒のうち 33 分～34 分 30 秒）

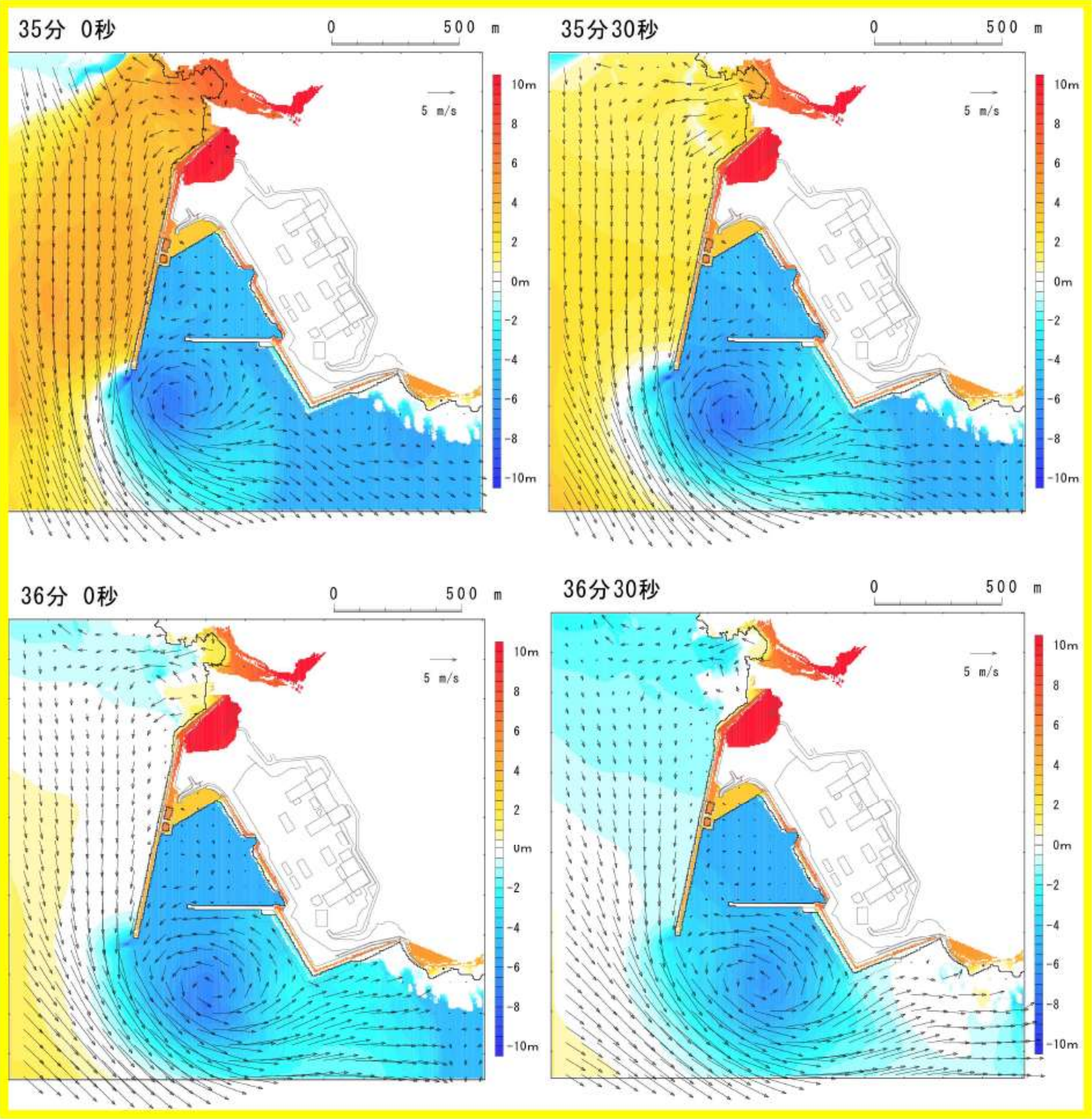


図９（ｂ）　「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向

（地震発生後 33 分～37 分 30 秒のうち 35 分～36 分 30 秒）

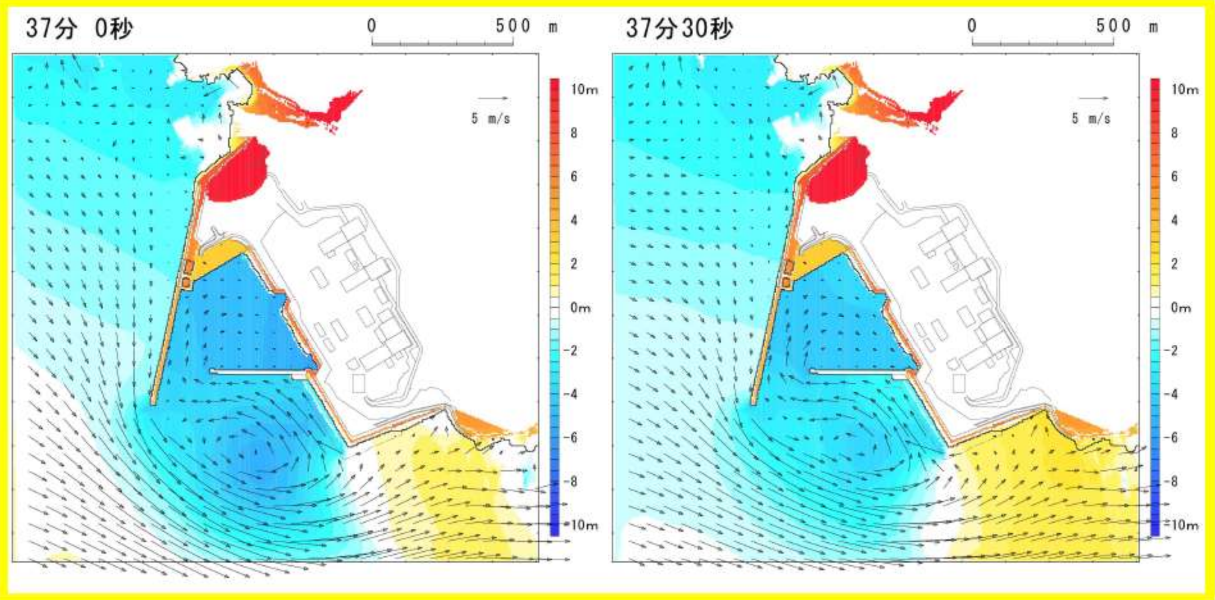


図９（ｃ）　「流速最大波源（波源Ｋ（防波堤損傷なし））」による防波堤堤内外の最大流速発生時の水位・流速・流向
（地震発生後 33 分～37 分 30 秒のうち 37 分～37 分 30 秒）

（ｂ）最大流速発生時の海底地形変化

追而
（基準津波の審査結果を踏まえて記載する）

（4）防波堤の被災形状の検討結果

東北地方太平洋沖地震及び津波による被災状況等に関する知見，基準津波来襲時の流況及び防波堤の構造的特徴を踏まえた想定される被災形状を表7に示す。

表7　防波堤の被災形状の想定

構造物	仕様	想定される 被災形状	想定理由
ケーソン	・北防波堤（標準部） 19.5m（B）×14.9m （L）×13.0m（H）：8,000t以上/函 ・南防波堤（標準部）： 14.0m（B）×19.9m （L）×10.0m（H）：5,900t以上/函	転倒 ・ 滑動	追而 （基準津波に審査結果を踏まえて記載する）
上部コンクリート	・北防波堤（標準部）： 19.1m（B）×3.5m（H）： 2,400t 以上 ・南防波堤（標準部）： 13.6m（B）×2.5m（H）： 1,600t 以上	飛散	・東北地方太平洋沖地震及び津波で被災実績あり。
消波ブロック	・南防波堤：32～40t/個	飛散	・東北地方太平洋沖地震及び津波で被災を受けた防波堤同様の被災が想定される。
根固方塊	34.5t/個	飛散	・東北地方太平洋沖地震及び津波で被災を受けた防波堤同様の被災が想定される。
被覆ブロック	・北防波堤：４～29t/個 ・南防波堤：２～８t/個	飛散	・東北地方太平洋沖地震及び津波で被災を受けた防波堤同様の被災が想定される。
中割石	30～300kg/個	飛散	・東北地方太平洋沖地震及び津波で被災を受けた防波堤同様の被災が想定される。

３．防波堤の取水口到達及び閉塞可能性評価について

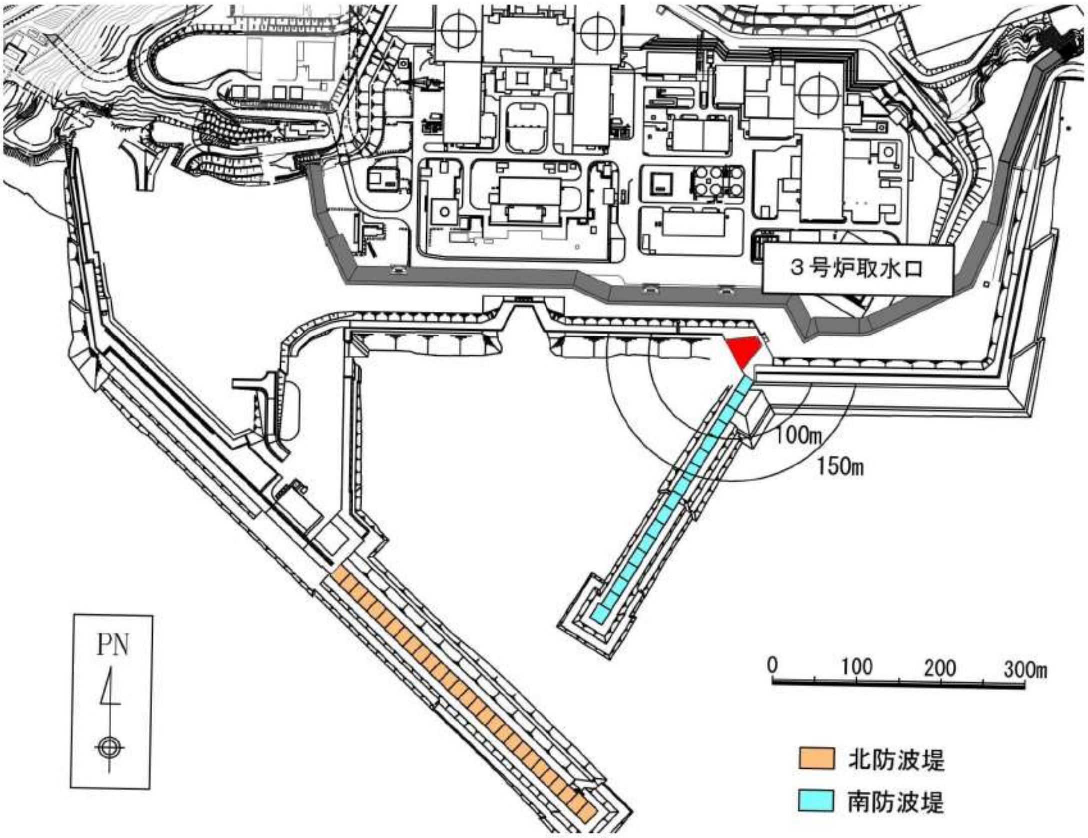
南防波堤基部と３号炉取水口の離隔を図 10 に示す。

南防波堤基部と３号炉取水口との離隔距離は 7.7m であるため，防波堤は取水口と近接している。

東北地方太平洋沖地震の被災事例を踏まえると，防波堤が被災する可能性は否定できないため，漂流及び滑動する可能性について検討した上で，検討結果に関わらず，水理模型実験により滑動又は転倒による取水口到達及び閉塞可能性を評価する。

漂流及び滑動の検討対象は北防波堤及び南防波堤とする。水理模型実験については,検討対象の防波堤は取水口と最も近接している南防波堤基部とし,北防波堤は被災事例から防波堤の移動量である 150m 以上離れているため，検討対象としない。

防波堤ケーソンの被災形状は，表 7 に示すとおり基礎マウンドからの転倒・滑動が考えられ，その被災パターンは表 4 で示される越流洗掘型，津波波力型，堤頭部洗掘型及び引波水位差型の４通りに分類される。取水口閉塞の観点で最も影響の大きい被災パターンを想定する。ここで，越流洗掘型は参考１で説明する理由からケーソンの移動量を抑制すると考えられること，堤頭部洗掘型は防波堤の堤頭部が対象であり取水口に対して十分な離隔があること，引波水位差型はケーソンを取水口方向と逆方向へ移動させることから，これらの被災パターンは取水口閉塞には有意に寄与しない。一方，津波波力型は当該事象が生じた場合は取水口方向に移動が生じる可能性がある。したがって，４通りの被災パターンのうち、津波波力型が取水口閉塞の観点で最も影響の大きい被災パターンと考えられることから，取水口到達及び閉塞可能性の評価は津波波力型を対象として検討する。



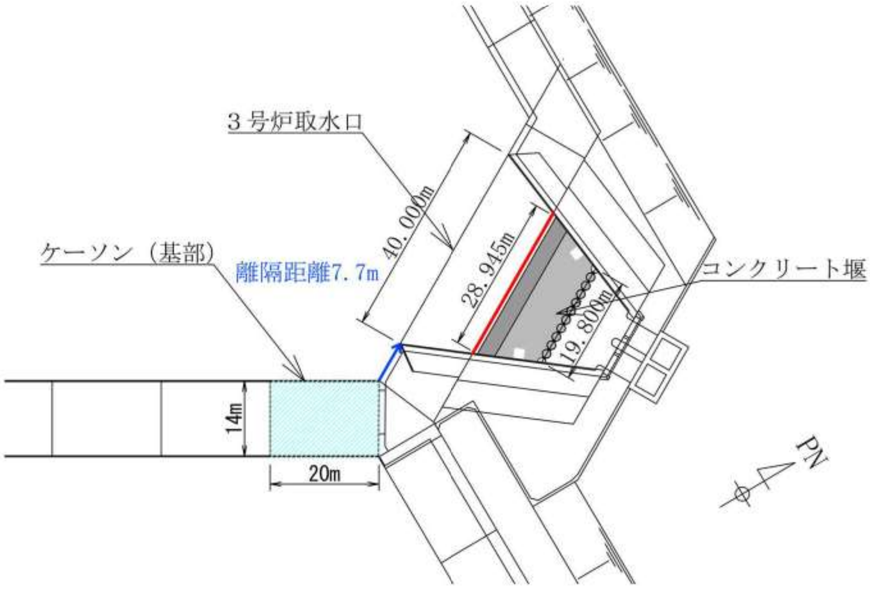


図 10　南防波堤基部と３号炉取水口の離隔

（１）漂流に対する検討結果

漂流に対する検討結果を表８に示す。

防波堤のケーソン，上部コンクリート，消波ブロック，根固方塊，被覆ブロック及び中割石の比重は海水の比重より大きいことから，漂流して取水口に到達することはない。

表８　漂流に対する検討結果

対象構造物	主材料	重量	比重※1	評価結果
ケーソン	コンクリート・砂	5,900t 以上	2.15※2	海水の比重より大きいことから漂流して取水口に到達することはない。
上部コンクリート	コンクリート	1,600t 以上	2.34	
消波ブロック	コンクリート	32～40t/個	2.34	
根固方塊	コンクリート	34.5t/個	2.34	
被覆ブロック	コンクリート	2～29t/個	2.34	
中割石	石材	30～300kg/個	2.29	

※１コンクリートの比重は「道路橋示方書・同解説（2002)」より設定，砂及び石材の比重は「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007)」より設定

※２北防波堤及び南防波堤の比重のうち，最も小さいものを示す

（2）滑動に対する検討結果

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）」[6)]の流れに対する被覆材の所要質量の評価手法に基づき，ケーソン及び上部コンクリート，消波ブロック，根固方塊，被覆ブロック及び中割石の安定流速を算定し，滑動可能性を評価する。

なお，同手法は石を別の石の上に乗せた状態における流体力と摩擦力のつり合い式及び流体力と重力によるモーメントのつり合い式から導出されており，流れに対する被覆材の安定質量を求めるものであることから，津波来襲時における対象物の滑動可能性評価に適用可能であると考える。

1．7．3　流れに対する被覆石及びブロックの所要質量

(1) 一般

水の流れに対するマウンドの捨石等の被覆材の所要質量は、一般的に、適切な水理模型実験又は次式によって算定することができる。式中において、記号γはその添字に関する部分係数であり、添字k及びdはそれぞれ特性値及び設計用値を示す。

$$M_d = \frac{\pi \rho_r U_d^{\,6}}{48 g^3 (y_d)^6 (S_r - 1)^3 (\cos\theta - \sin\theta)^3} \qquad (1.7.18)$$

ここに、

M：捨石等の安定質量（t）
ρ_r：捨石等の密度（t/m^3）
U：捨石等の上面における水の流れの速度（m/s）
g：重力加速度（m/s^2）
y：イスバッシュ(Isbash)の定数（埋め込まれた石にあっては1.20,露出した石にあっては0.86）
S_r：捨石等の水に対する比重
θ：水路床の軸方向の斜面の勾配（°）

図11　港湾の施設の技術上の基準・同解説(抜粋)

滑動に対する検討結果（表9）より，ケーソン，上部コンクリート，消波ブロック，根固方塊，被覆ブロック及び中割石の安定流速は発電所の港湾内の最大流速18m/s（図9）よりも小さいことから，滑動する可能性があるものの，３号炉取水口は港湾内より６m高い位置にある（３号炉取水口底版コンクリート：T.P.-8.0m，港湾内：T.P.-14.0m）ことと，３号炉取水口に近接している南防波堤基部設置されている構造物については防波堤マウンド側より約１m高い位置にある（３号炉取水口底版コンクリート：T.P.-8.0m，防波堤マウンド：T.P.-9.0m）ことから，滑動して３号炉取水口に到達することはない。

追而
（基準津波の審査結果を踏まえて記載する）

表9　安定流速の算定結果

対象構造物	密度 (t/m³)	質量 (t)	イスバッシュの定数	水に対する比重	斜面の勾配 (°)	安定流速 (m/s)
ケーソン	2.15	5,900	0.86	2.09	0	16.5
上部コンクリート	2.34	1,600	0.86	2.27	0	14.1
消波ブロック	2.34	32～40	0.86	2.27	0	7.4～7.6
根固方塊	2.34	34.5	0.86	2.27	0	7.4
被覆ブロック	2.34	2～29	0.86	2.27	0	4.6～7.2
中割石	2.29	0.03～0.3	0.86	2.22	0	2.2～3.3

（３）水理模型実験に基づく取水口到達及び閉塞可能性評価

（２）項では，防波堤のケーソン及び上部コンクリートを除く構造物に対し，既往文献に基づき滑動に関する評価を行った。

一方，防波堤のケーソン及び上部コンクリートについては水理模型実験より滑動，転倒の有無を評価するため，地震及び津波による防波堤の損傷状態における影響やサイト特性の観点も踏まえた科学的根拠に基づいた確認を行うために，水理模型実験による防波堤の取水口到達及び閉塞可能性評価を行う。

水理模型実験では津波波力型の被災パターンを対象として検討する。２．（２）項に示すとおり，津波波力型においては防波堤堤内外水位差と防波堤への直接的な津波の波力が防波堤の被災に対して支配的な要因となることが報告されている[3)]。水理模型実験においては，水平波力に着目し，水理模型実験により得られた取水口に到達及び閉塞し得ない水平波力と基準津波から想定される水平波力を比較し，防波堤が取水口に到達し閉塞する可能性を評価する。

なお，実験条件の検討に当たっては，地震及び津波による防波堤の損傷状態やサイト特性の観点から防波堤の移動量に及ぼす要因について整理し，保守的な結果が得られる実験条件を設定する。

ａ．代表波源の選定結果

東北地方太平洋沖地震における被災事例を踏まえると，防波堤の移動量は，津波の水平波力による影響が大きいと考えられるため，基準津波全18波のうち南防波堤が健全状態の11波から，水平波力の影響要因である堤内外水位差，堤外水位及び流速を比較した。

代表波源選定フローを図12に示す。

表５，表６から堤内外水位差最大時及び堤外水位最大時の水平波力を確認した結果，水平波力最大は「基準津波（波源Ｆ，北防波堤損傷）」の南防波堤先端部で発生した1,067kN/mとなったが，南防波堤基部における水平波力が最大となる「基準津波（波源Ｉ，防波堤損傷なし）」を選定した。最大となる波形の南防波堤の堤内外位置の時刻歴波形を図13に，水位・流速の抽出位置及び水平波力発生箇所を図14に示す。

なお，表９から南防波堤における最大流速はケーソン及び上部コンクリートのイスバッシュ式による安定流速を比較し，十分小さいため実験において考慮しない。南防波堤における最大流速を表10に示す。

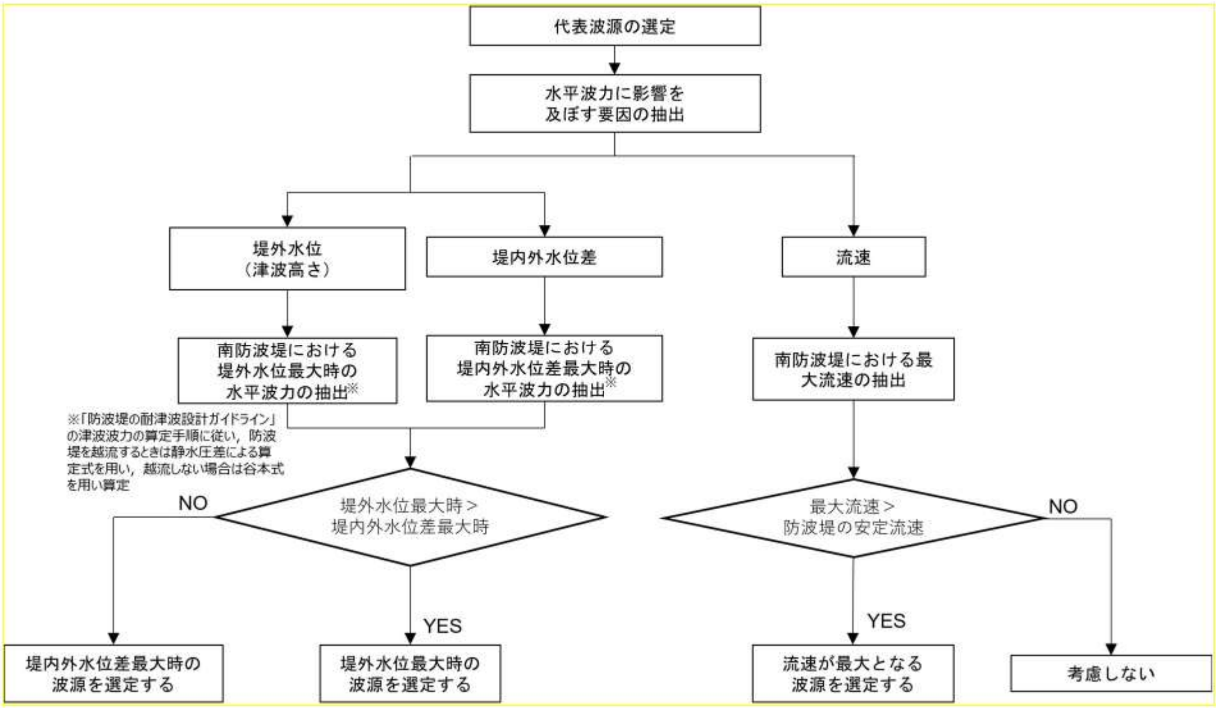


図 12　代表波源選定フロー

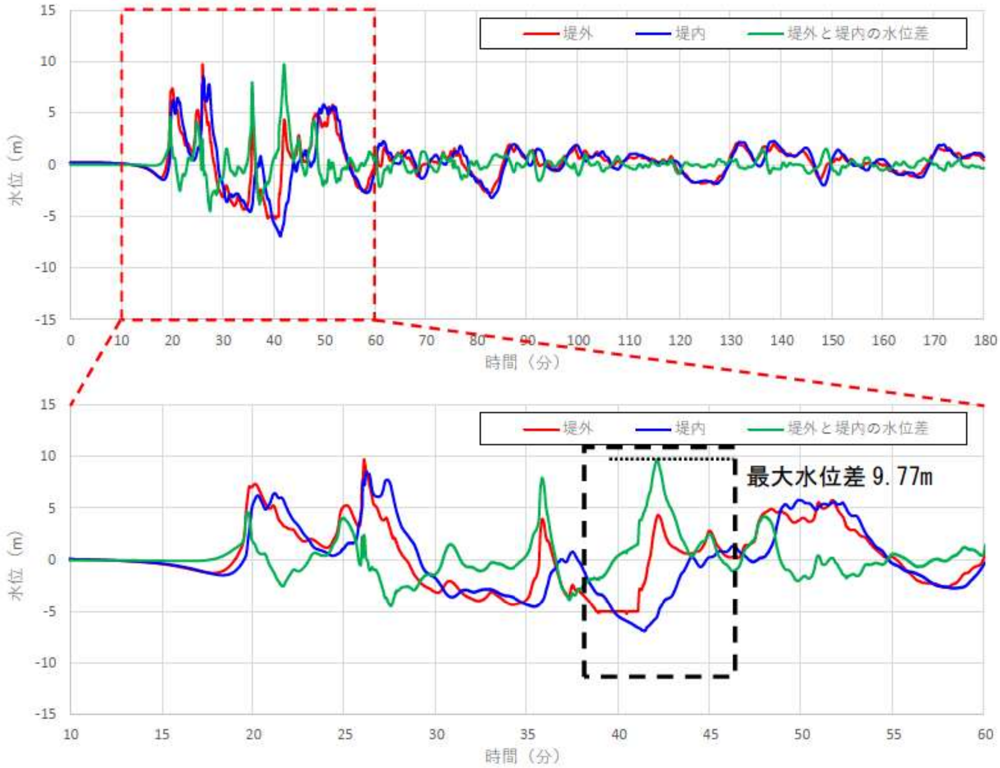


図 13　基準津波のうち，南防波堤における水平波力が最大となる堤内外水位差最大の波形（「基準津波（波源Ｉ，防波堤損傷なし）」）の波形抽出位置における時刻歴波形

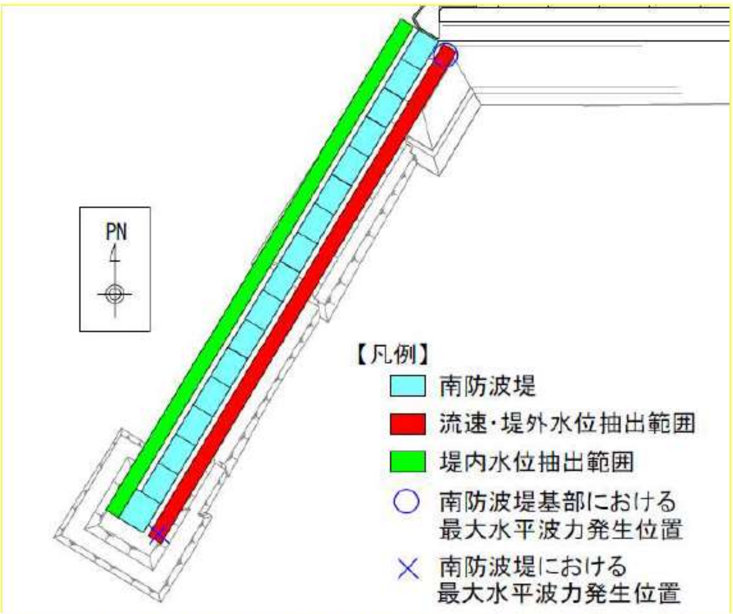


図 14　水位，流速の抽出範囲及び水平波力発生箇所

表 10　南防波堤における最大流速一覧

基準津波	南防波堤における最大流速 (m/s)
波源Ａ（防波堤損傷なし）	7.00
波源Ｂ（防波堤損傷なし）	8.33
波源Ｂ（北防波堤損傷）	6.43
波源Ｃ（防波堤損傷なし）	6.44
波源Ｄ（防波堤損傷なし）	8.14
波源Ｄ（北防波堤損傷）	6.68
波源Ｆ（北防波堤損傷）	6.20
波源Ｈ（北防波堤損傷）	6.50
波源Ｉ（防波堤損傷なし）	7.72
波源Ｋ（防波堤損傷なし）	8.14
波源Ｌ（北防波堤損傷）	6.61

b．実験条件

（a）実験条件の設定

水理模型実験の条件設定フローを図 15 に示す。

防波堤が３号炉取水口に到達し閉塞しないことを確認するため，地震及び津波による防波堤の損傷状態の観点から，防波堤の移動量に影響を及ぼす要因を整理し，保守的な結果が得られる条件を水理模型実験へ反映する。地震及び津波による防波堤の損傷状態が移動量に及ぼす影響と水理実験条件への反映結果を表 11 に，サイト特性から想定される実験結果への影響と水理模型実験条件への反映結果を表 12 に，基準津波から想定される実験結果への影響と水理模型実験条件への反映結果を表 13 示す。

また，漂流物荷重を考慮した防波堤の３号炉取水口への到達及び閉塞可能性の評価については参考４に示す。

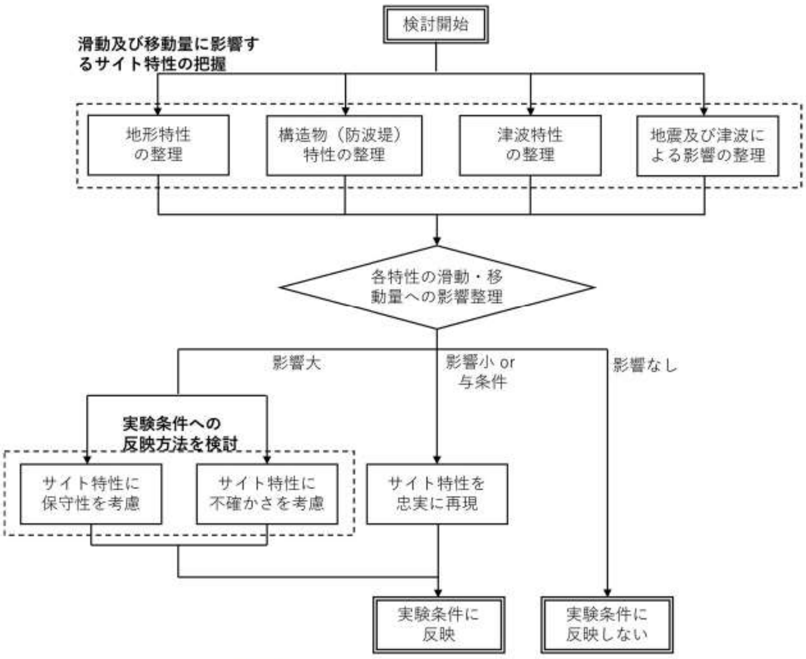


図 15　実験条件設定フロー

表 11　地震及び津波による防波堤の損傷状態が移動量に及ぼす影響と
水理模型実験条件への反映結果※

<table>
<tr><th colspan="2">防波堤の損傷状態</th><th>移動量に及ぼす影響</th><th>実験条件への反映結果</th></tr>
<tr><td>地震による損傷</td><td>基礎マウンド及び基礎地盤の不等沈下によるケーソンの傾斜</td><td>３号炉取水口前面にはＣ級岩盤の高まりが分布していることから，不等沈下が生じることで，Ｃ級岩盤に対する防波堤の位置が低くなるため，移動量は抑制される。</td><td rowspan="3">移動量が抑制されることから，基礎マウンド及び基礎地盤の損傷状態は考慮しない。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">津波による損傷</td><td>基礎マウンド及び基礎地盤の洗掘</td><td rowspan="2">３号炉取水口前面にはＣ級岩盤の高まりが分布していることから，洗掘範囲に転倒することで，Ｃ級岩盤に対する防波堤の位置が低くなるため，移動量は抑制される。</td></tr>
<tr><td>基礎マウンド及び基礎地盤の支持力破壊</td></tr>
</table>

※地震及び津波による防波堤の損傷状態が防波堤の移動量に及ぼす影響の詳細は参考１に示す。

表 12　サイト特性による想定される実験結果への影響と
水理模型実験条件への反映結果

分類	項目	サイト特性	想定される実験結果への影響	実験条件への反映結果
地形	周辺地形	防波堤堤内側にＣ級岩盤の高まりが分布	防波堤堤内側に分布するＣ級岩盤の高まりが移動量を抑制する	・防波堤堤内側の海底地盤は平坦としてもモデル化
構造物（防波堤）	設置位置	取水口から150m 以内に設置	取水口に近接する防波堤が閉塞させる可能性が最も大きい。	・取水口との離隔距離が小さい南防波堤基部（１函目）でモデル化
	天端高さ	T. P. 3. 5m	天端高さが高い方が防波堤に作用する全面波力が大きくなる	・上部コンクリートの安定流速（14. 1m／ｓ）が南防波堤（堤外側）の最大流速（8. 33m／ｓ）を上回っているため一体化としてモデル化
	基礎マウンド	堤内側マウンド法肩までが平坦形状	堤内側マウンド法肩までの平坦部は滑動抵抗に寄与している	・滑動が生じた際の移動が大きくなるよう堤内側マウンド平坦形状を傾斜形状に変更してモデル化
	消波ブロック	消波ブロックあり（南防波堤基部のみ）	消波ブロックは，防波堤に作用する津波波力の低減効果がある	・消波ブロックなしの場合に津波は直接防波堤に作用するため，消波ブロックなしが保守的な設定と考えられる
	根固方塊及び被覆ブロック	根固方塊及び被覆ブロックあり	防波堤堤内側の根固方塊及び被覆ブロックは滑動抵抗に寄与している	・根固方塊及び被覆ブロックは防波堤の滑動抵抗力に寄与してることから，根固方塊及び被覆ブロックなしが保守的な設定と考えられる

表 13　基準津波による想定される実験結果への影響と
水理模型実験条件への反映結果

分類	項目	想定される実験結果への影響	実験条件への反映結果
津波(基準津波)	堤内外水位差	堤内外水位差が大きい方が防波堤に作用する水平波力は大きくなるため，滑動しやすくなり移動量も増加する。	実験波形は堤内水位を堤内側の水圧を小さくするため，実験模型で再現可能な最低水位である T.P.－8.0mに固定し，防波堤が滑動し，移動量が大きくなるような堤外水位を設定した。実験ケースは，想定される基準津波を包絡する堤内外水位差で 4 ケースを設定した
	津波高さ	堤外水位（津波高さ）が高いほど水平波力は大きくなるため，滑動した少なり移動量も増加する。	
	波形（周期）	周期が長い方がケーソンに作用する水平波力の持続時間が長くなるため，滑動しやすく，移動量も大きくなる	最大波力が生じる波形の周期を実験周期が上回るように設定
	流速	流速が大きくなるとケーソンに作用する水平波力は大きくなる	南防波堤における流速がケーソンの安定流速に比べ十分小さいことから，考慮しない
	津波繰り返し回数	・東日本大震災の被災事例を踏まえると、ケーソンの滑動は津波の最大水平波力によるものと考えられるため、最大波に着目した実験を行う。 ・堤内外水位差が大きくなる波形を作用させ，ケーソンが滑動しなかった場合は，それ以下となる津波を繰り返し作用させても滑動しない。 ・ケーソンが滑動した場合は，滑動により堤内外水位差が発生しにくくなるため，津波を繰り返し作用させても移動量に及ぼす影響は小さい。	津波の繰り返し回数については考慮しない

（b）実験模型

水理模型実験の対象平面図及び断面図を図 16，図 17 に，実験模型概要を図 18 に示す。

実験縮尺（幾何縮尺）は実験装置の規模と性能を踏まえて 1/64 とし，フルード相似則に従い現地を再現する。実験模型諸元を表 14 に示す。

基礎マウンドは，ケーソンに作用する揚圧力を適切に再現するため，砕石で再現する。基礎マウンドが洗掘した場合，ケーソンの移動量が抑制されると考えられる（表 11 参照）ことから，基礎マウンドが洗掘しないよう砕石の流出を防ぐため，基礎マウンドの表面は金網で覆う。基礎マウンドを砕石で再現することの妥当性については，参考２に示す。

表 7 から上部コンクリートの滑動については安定流速が 14.1m/s となっており，表 10 から南防波堤における最大流速は 8.33m/s となり，安定流速が上回っていることから，上部コンクリートは滑動する可能性が低いことからケーソンと一体化してモデル化した。

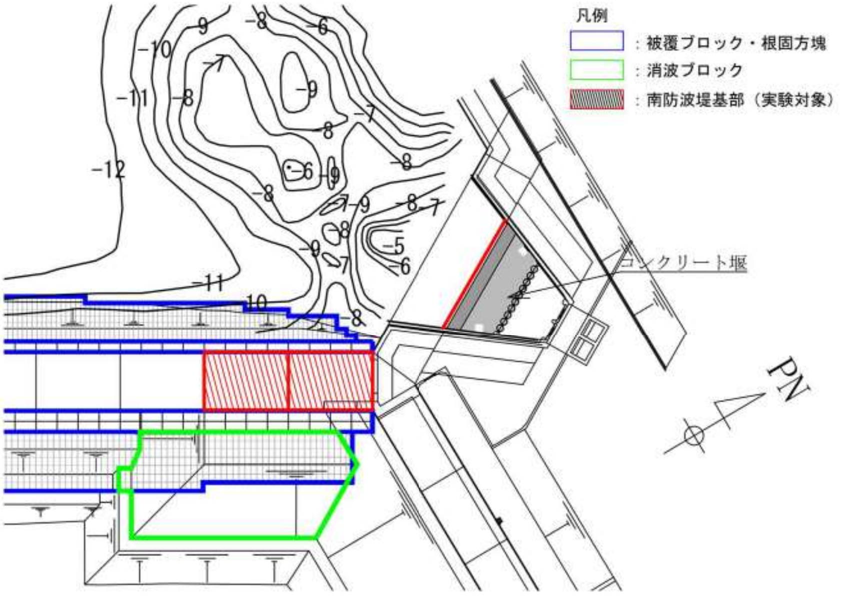


図 16　実験対象平面図（南防波堤）

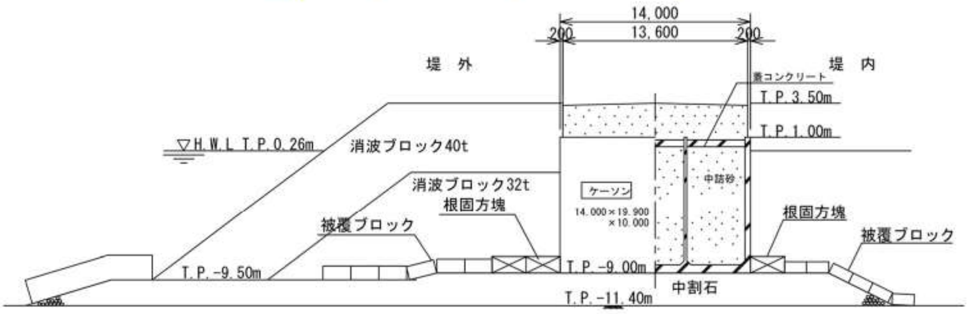


図 17　実験対象断面（南防波堤基部）

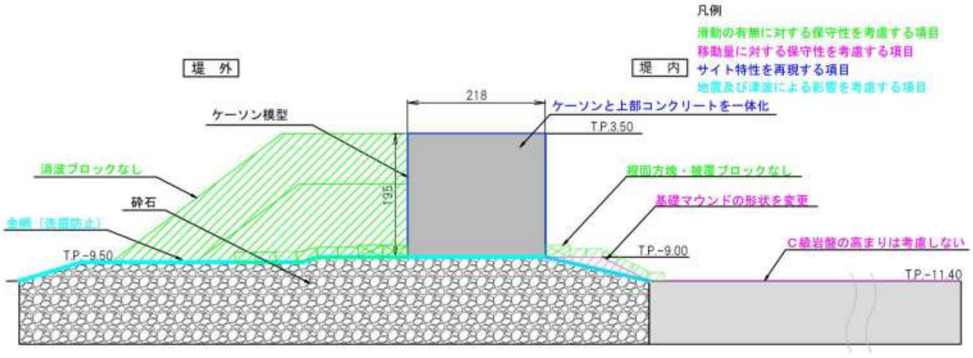


図 18　実験模型概要

表 14　実験模型諸元

諸元	実物値	実験模型値
高さ	12.5m	195mm
幅	19.9m	310mm
長さ	14.0m	218mm
重量	7,500t	27.77kg

（c）実験ケース

実験波形は堤内水位を堤内側の水圧を小さくするため，実験模型で再現可能な最低水位であるT.P.-8.0mに固定し，防波堤が滑動し，移動量が大きくなるような堤外水位を設定した。実験ケースでは想定される水平波力の2倍相当までの4ケースを設定した。実験ケースを表15に示す。

また，移動量に影響を及ぼす津波の周期（継続時間）については想定される基準津波を包絡するような周期を設定する。

表15　実験ケース

ケース	堤外水位 (T.P.m)	堤内水位 (T.P.m)	堤内外 水位差（m）
ケース1 (堤内外水位差11.5m)	3.5	-8.0	11.5
ケース2 (堤内外水位差17.0m)	9.0		17.0
ケース3 (堤内外水位差17.5m)	9.5		17.5
ケース4 (堤内外水位差18.0m)	10.0		18.0

（d）実験装置

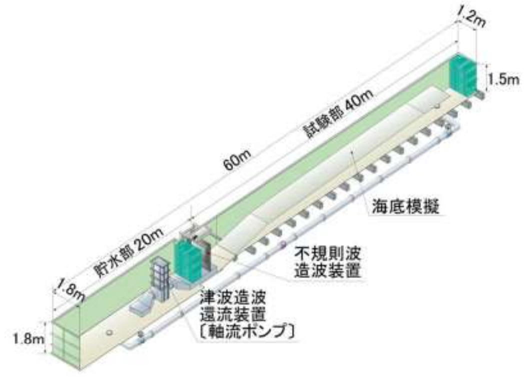
実験装置概要を図19，波力及び水位計測位置図を図20に示す。

実験装置は，長さ60m×幅1.2m×高さ1.5mの断面二次元水路を用い，実験装置の水路幅方向には，ケーソンを5函配置する。

実験では，堤内外位置での水位差が目標とする水位差以上となること及び造波の再現性があることを確認するため，波圧及び水位を計測し，次に，造波した波形を使用し，ケーソンの移動量を計測する。

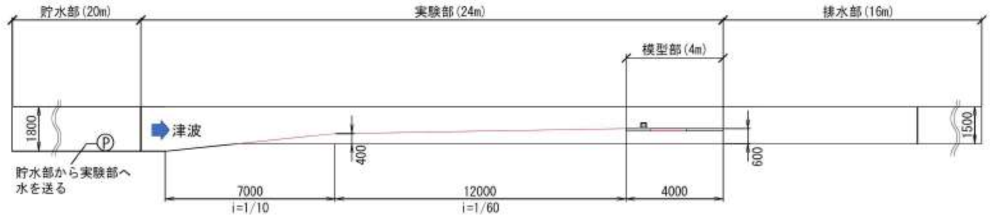
波圧及び水位計測時は，5函のケーソンを全て固定し，中央の実験模型に設置した波圧計により，ケーソンに作用する波圧を計測する。

両端部のケーソン2函は水路側壁からの摩擦等の影響を受け移動量が抑制される可能性があることから，移動量計測時には固定し，中央のケーソン3函は実験対象とし，固定しない。

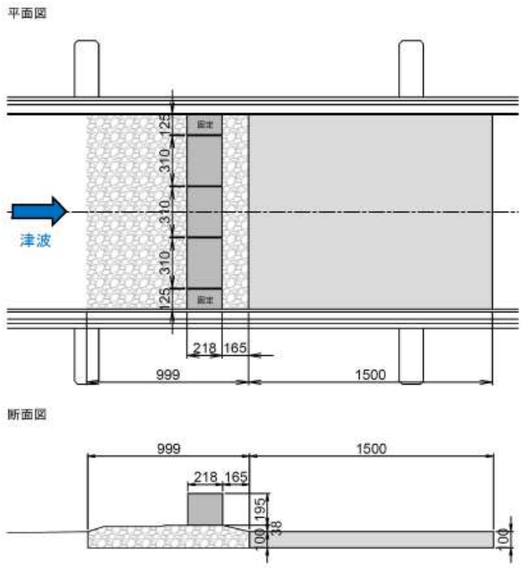


（全体概要図）

（全体図　平面図）

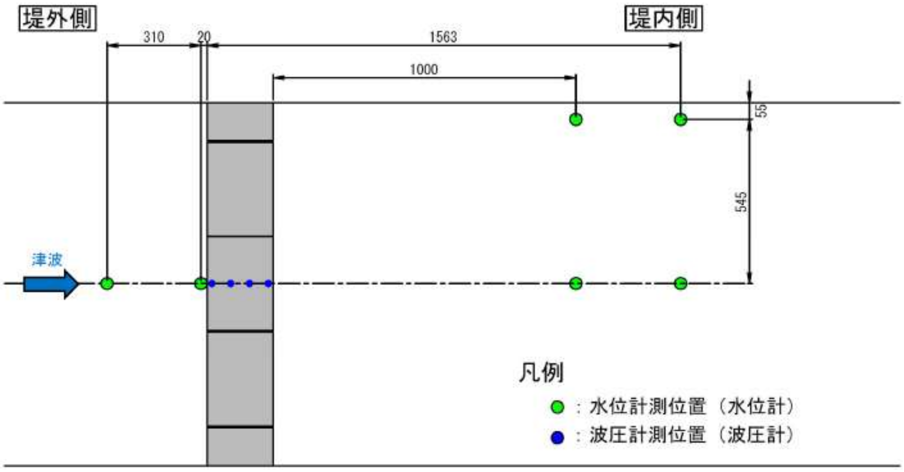


（全体図　断面図）

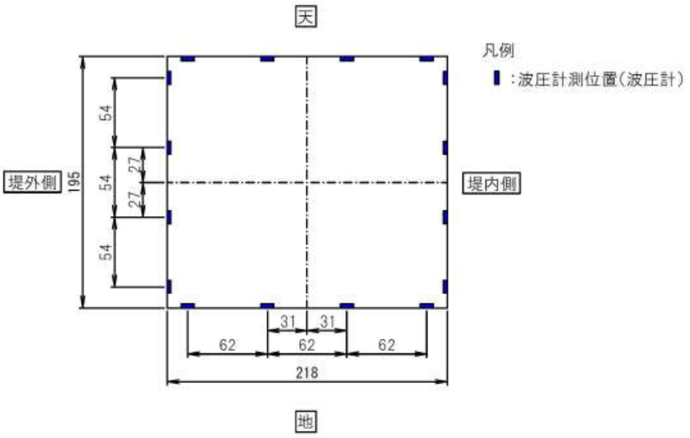


（模型部詳細）

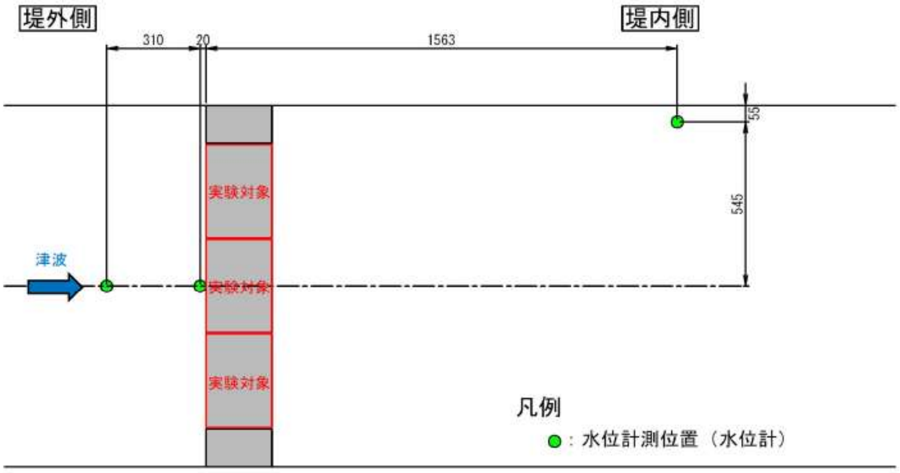
図 19　実験装置　概要図



（波圧及び水位計測時）



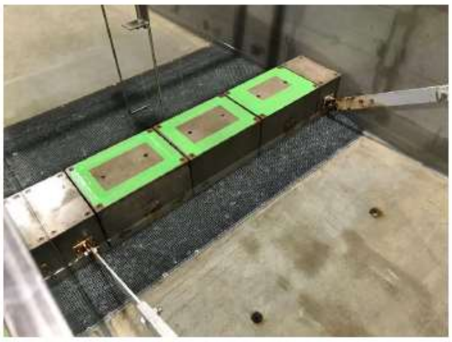
（波圧計設置位置）



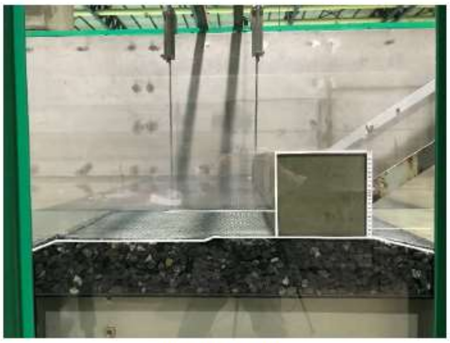
（移動量計測時）

図 20　波圧及び水位計測位置図

実験装置全体図



実験模型全体図



実験模型断面

波圧計設置

写真１　実験装置

c．実験結果

（a）波圧及び水位（固定時）

堤内外位置での水位差が目標とする水位差以上となること及び造波の再現性があることを確認するため，波圧及び水位の計測を行った。

計測結果を表16に示す。表16において，堤外水位・堤内水位・堤内外水位差については，堤外水位が最大となる時刻の値を，水平波力・鉛直波力・滑動抵抗力及び滑動安全率については，水平波力が最大となる時刻の値をそれぞれ示している。

各ケースで，堤内外位置での水位差が目標とする水位差以上となっていることが確認された。

波圧及び水位計測時における時刻歴データ及び水平波力最大時の波圧分布を図21～図28に示す。

図21～図28は，同一条件で実施した３回の計測結果を示しており，堤内水位に若干のずれが確認されるものの，いずれのケースも３回の計測結果に有意な差は確認されなかったことから，造波の再現性を確認した。

また，いずれのケースにおいても，100～300秒の範囲において，造波により生じる波圧及び水位の変化とみられる波形が確認されたが，300秒以降においては，過渡的な振動を伴う波形が確認された。これは堤内側の造波板による反射波を計測したものであると考えられる。したがって，ここでは100～300秒の範囲を波圧及び水位の評価対象とした。

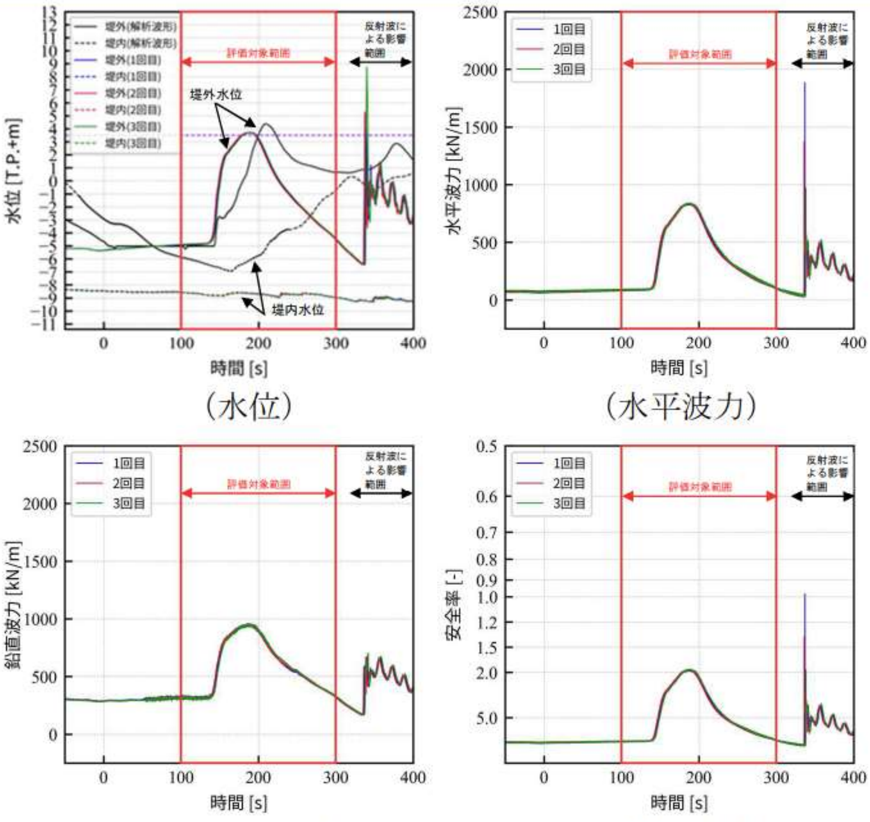
表 16　波圧及び水位計測結果

ケース		堤外水位 (T.P.m)	堤内水位 (T.P.m)	堤内外水位差 (m)	水平波力※1 (kN/m)	鉛直波力※1 (kN/m)	滑動抵抗力※1，2 (kN/m)	滑動安全率※1，3
ケース１（堤内外水位差 11.5m）	１回目	3.68	-8.65	12.33	834	939	1,618	1.94
	２回目	3.71	-8.64	12.35	838	936	1,620	1.93
	３回目	3.70	-8.67	12.37	841	944	1,616	1.92
	平均	3.70	-8.65	12.35	837	940	1,618	1.93
ケース２（堤内外水位差 17.0m）	１回目	9.18	-8.82	18.00	1,481	1,169	1,480	1.00
	２回目	9.20	-9.00	18.20	1,482	1,174	1,477	1.00
	３回目	9.19	-8.68	17.87	1,481	1,148	1,493	1.01
	平均	9.19	-8.83	18.02	1,481	1,164	1,484	1.00
ケース３（堤内外水位差 17.5m）	１回目	9.61	-8.76	18.37	1,492	1,263	1,424	0.95
	２回目	9.66	-8.71	18.37	1,496	1,241	1,437	0.96
	３回目	9.63	-8.83	18.46	1,496	1,227	1,446	0.97
	平均	9.63	-8.77	18.40	1,494	1,244	1,436	0.96
ケース４（堤内外水位差 18.0m）	１回目	10.20	-8.08	18.28	1,586	1,218	1,451	0.91
	２回目	10.24	-8.32	18.56	1,588	1,179	1,475	0.93
	３回目	10.25	-8.35	18.60	1,586	1,205	1,459	0.92
	平均	10.23	-8.25	18.48	1,587	1,201	1,462	0.92

※１算出過程を参考３に示す

※２「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）」を参考に，防波堤と基礎マウンド間の摩擦係数を 0.6 として算出

※３「防波堤のガイドライン」[1)] を参考に算出



（水位）　（水平波力）

（鉛直波力）　（滑動安全率）

図 21　時刻歴データ（ケース１（堤内外水位差 11.5m））

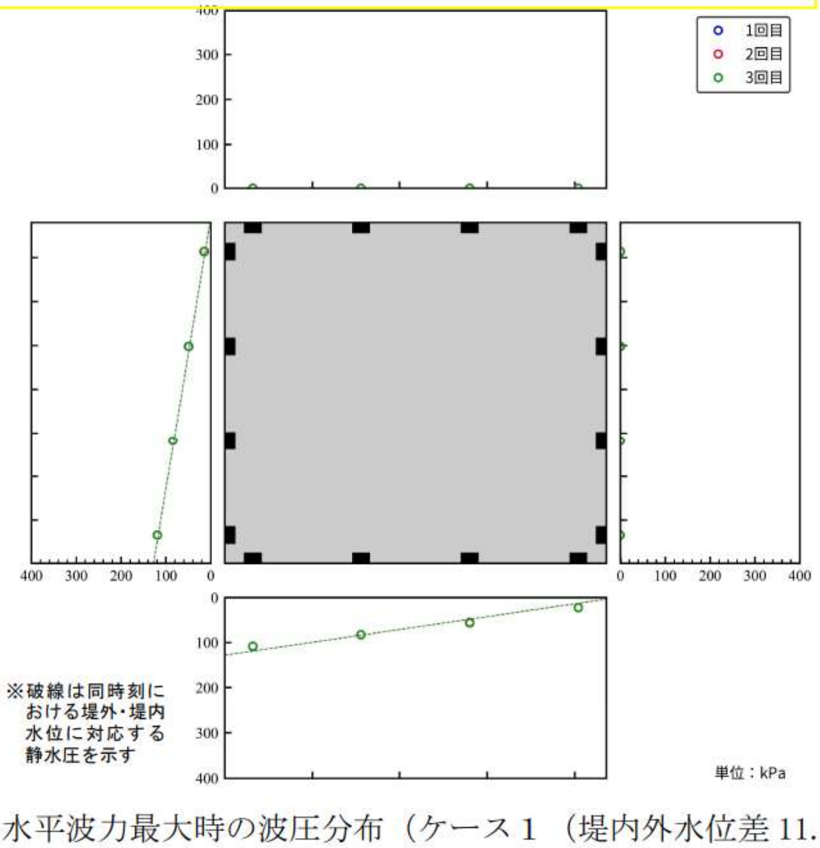


図 22　水平波力最大時の波圧分布（ケース１（堤内外水位差 11.5m））

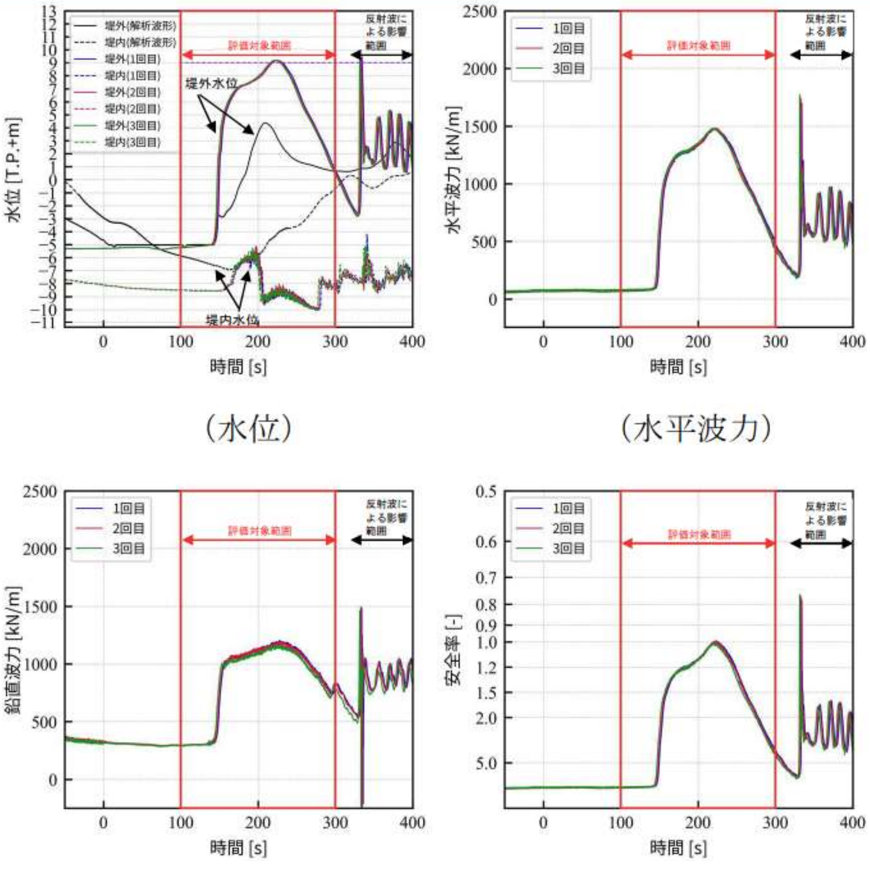


図 23　時刻歴データ（ケース２（堤内外水位差 17.0m））

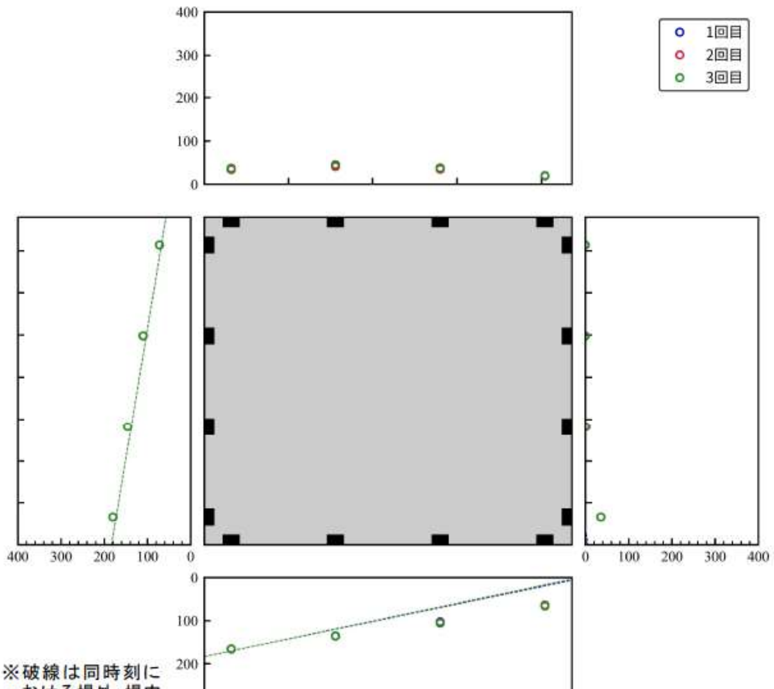


図 24　水平波力最大時の波圧分布（ケース２（堤内外水位差 17.0m））

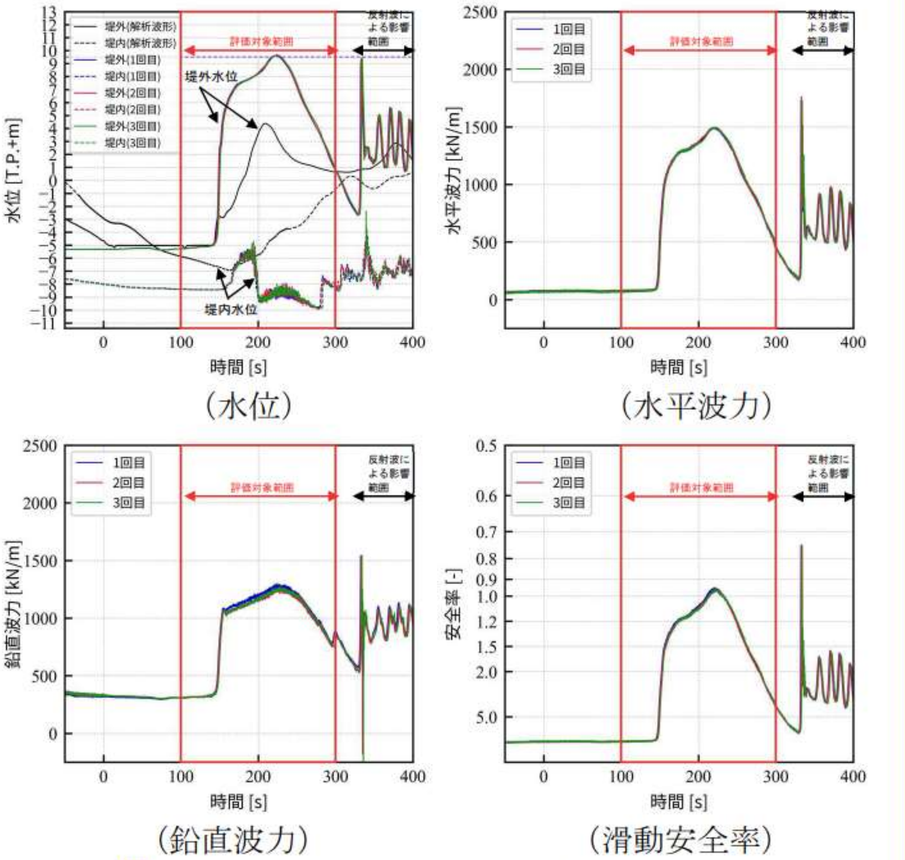


図 25　時刻歴データ（ケース３（堤内外水位差 17.5m））

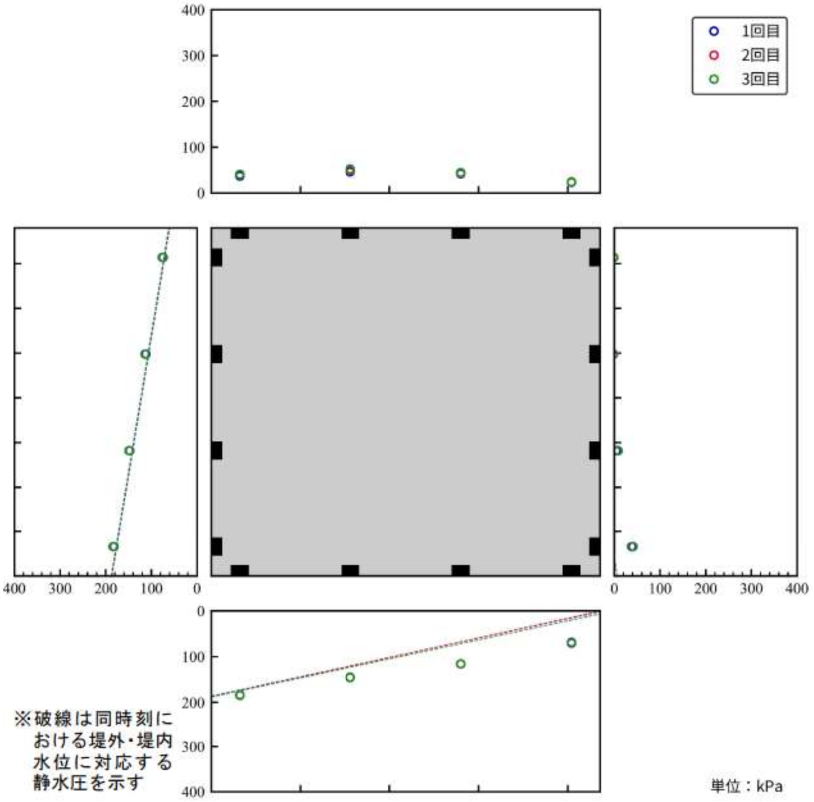


図 26　水平波力最大時の波圧分布（ケース３（堤内外水位差 17.5m））

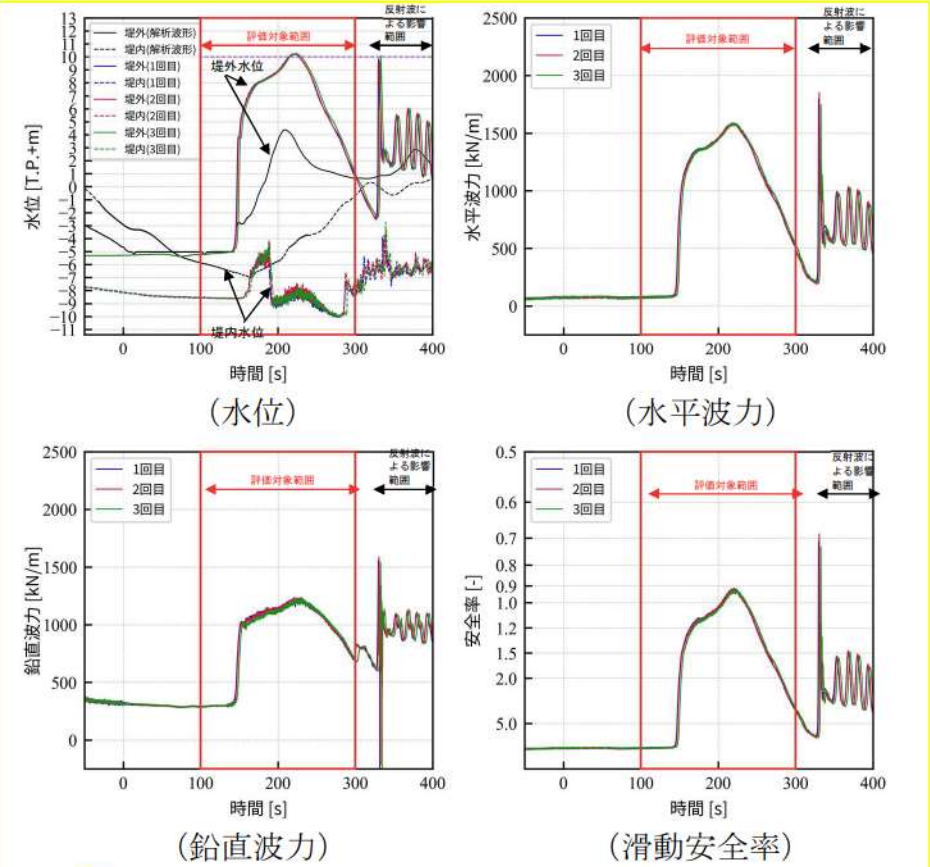


図 27　時刻歴データ（ケース４（堤内外水位差 18.0m））

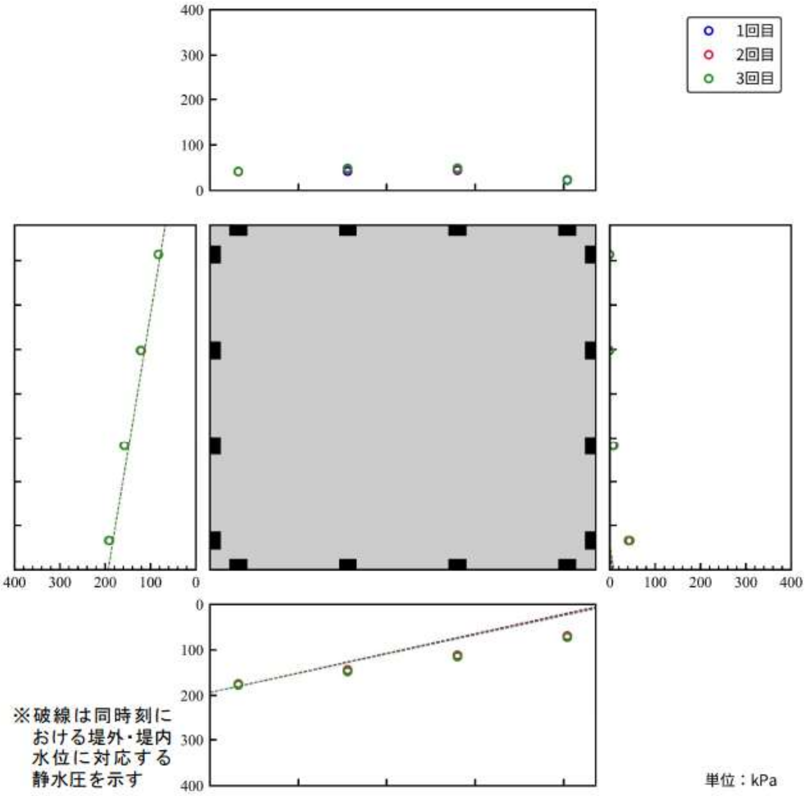


図 28　水平波力最大時の波圧分布（ケース４（堤内外水位差 18.0m））

（b）移動量

造波後のケーソンの状況及び移動量を表17～表21に，各ケースの水平波力と移動量の整理結果を表22に示す。移動量は現地を換算した値とする。表20 の堤内外水位差，水平波力，及び滑動安全率の値は，波圧及び水位計測時における計測値（表16）の平均値である。

ケース１（堤内外水位差 11.5m）及びケース２（堤内外水位差 17.0m）をそれぞれ３回ずつ実施したところ，３回ともケーソンは移動しなかった。

ケース３（堤内外水位差 17.5m）は５回実施し，５回のうち１回は移動せず，移動した４回のうち１回は移動量はほぼ０となった。また，移動量が大きくなった３回の移動量は 35.5m～79.2m となった。

ケース４（堤内外水位差 18.0m）は４回実施し，４回ともケーソンが移動し，移動量は 38.8m～44.6m となった。

また，いずれのケースにおいてもケーソンが転倒する挙動は確認されなかった。

移動量計測時の波形を図 29 に示す。

移動が生じなかったケース１（堤内外水位差 11.5m）及びケース２（堤内外水位差 17.0m）では，水位の計測値が波圧及び水位計測時と概ね一致していることが確認された。

移動が生じたケース３（堤内外水位差 17.5m）及びケース４（堤内外水位差 18.0m）では，ケーソンが移動するまでは，波圧及び水位計測時の水位と一致していたが，ケーソンの移動に伴い，堤外水位が低下していることが確認された。

また，ケース３（堤内外水位差17.5m）において，５回のうち３回は移動量が大きくなり，２回は移動量がほぼ０と結果がばらついた。ばらついた要因はケース３の堤内外水位差がケーソンが滑動するかどうかの閾値であったため，ばらついたと考えている。

移動量がばらついた要因については，移動量が79.2m と大きくなった３回目の実験では中央のケーソンと左端のケーソン※が移動し，右端のケーソン※はほとんど移動していない（表17）。実験時の挙動を確認すると、中央のケーソンと左端のケーソン※が同時に移動しており、左側のケーソン※の堤外側水位の抜け道が少なく、水位差が他ケースと比較し長時間保たれたことで、移動量が大きくなったと考えられる。

※上流側から下流側を見た方向として記載している。

表 17　造波後のケーソンの状況及び移動量（ケース１（堤内外水位差 11.5m））

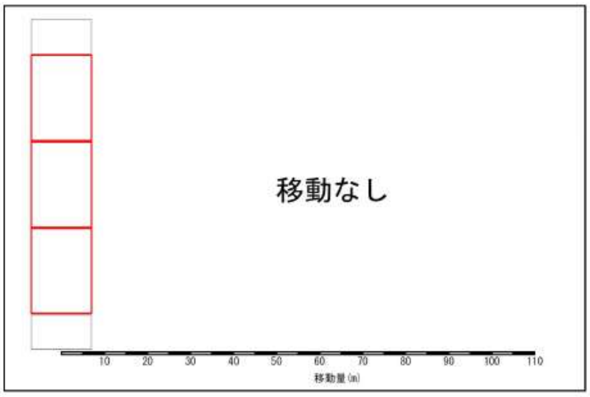
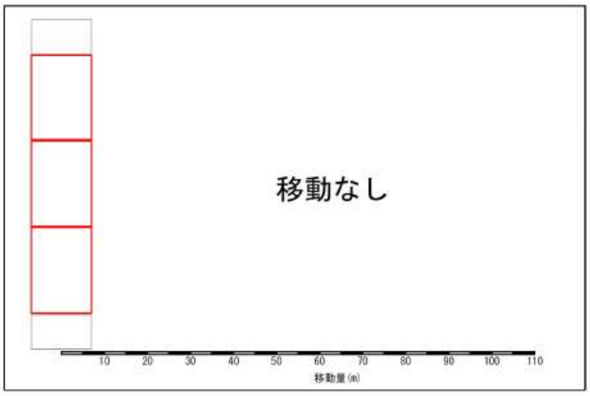
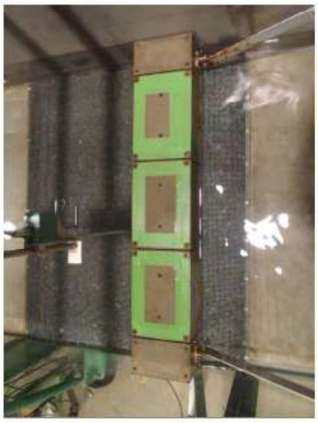
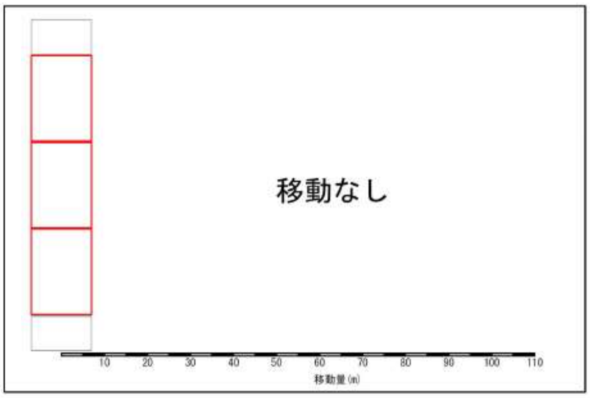
1回目		
2回目		
3回目		

表 18　造波後のケーソンの状況及び移動量（ケース２（堤内外水位差 17.0m））

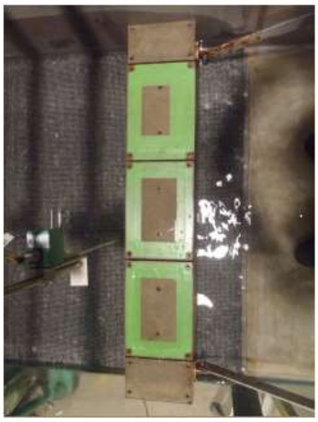
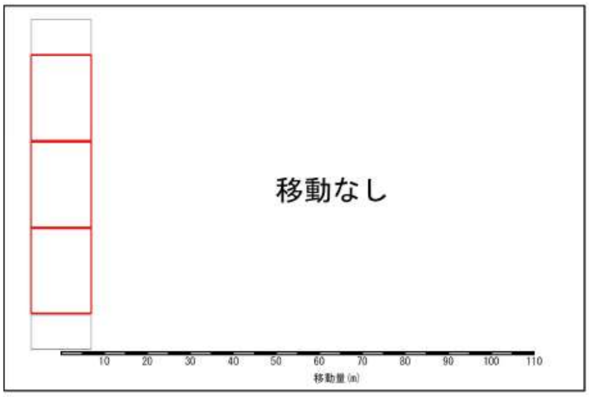
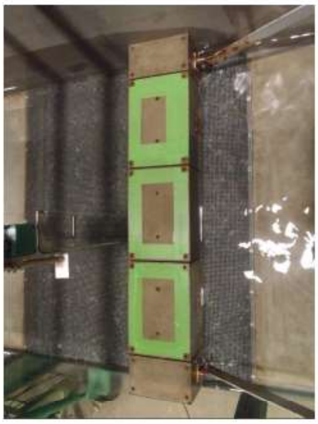
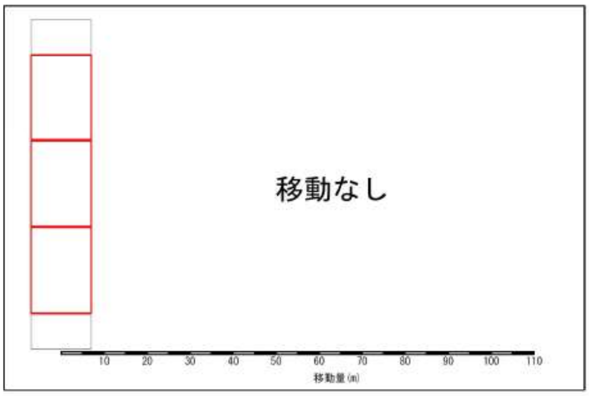
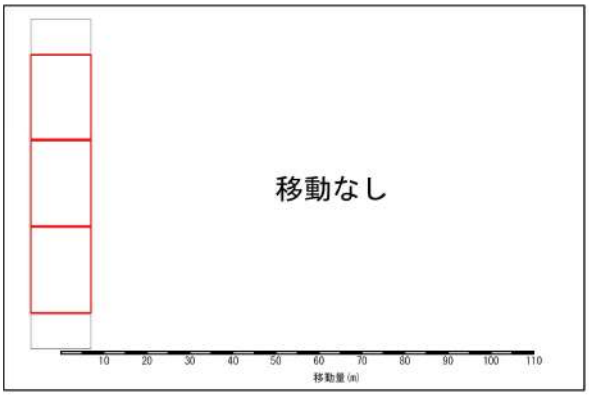
1回目		
2回目		
3回目		

表 19　造波後のケーソンの状況及び移動量（ケース３（堤内外水位差 17.5m））

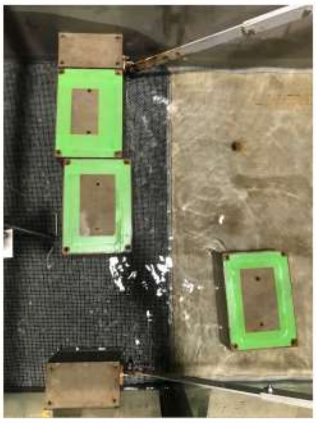
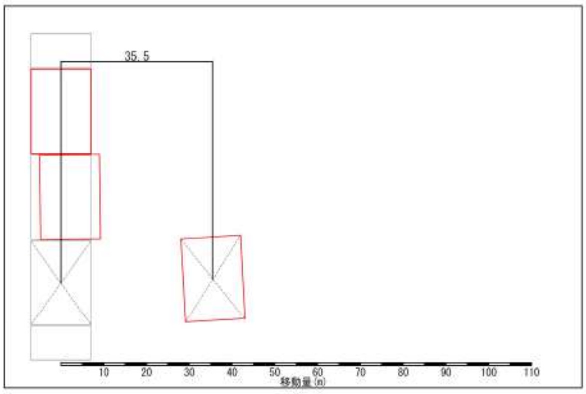
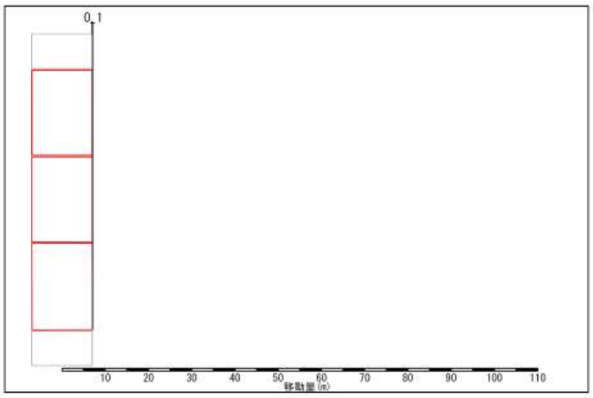
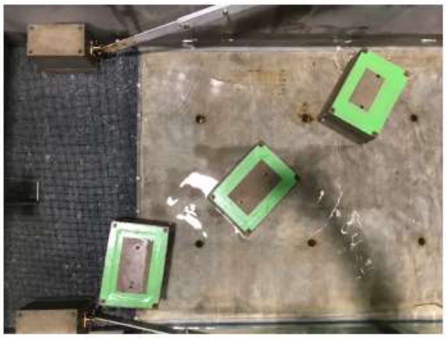
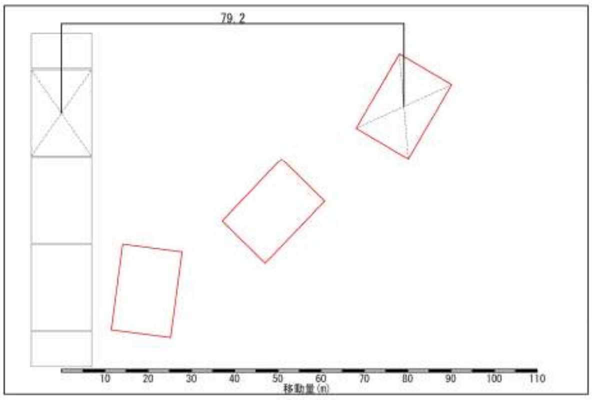
1 回 目		
2 回 目		
3 回 目		

表 20　造波後のケーソンの状況及び移動量（ケース３（堤内外水位差 17.5m））

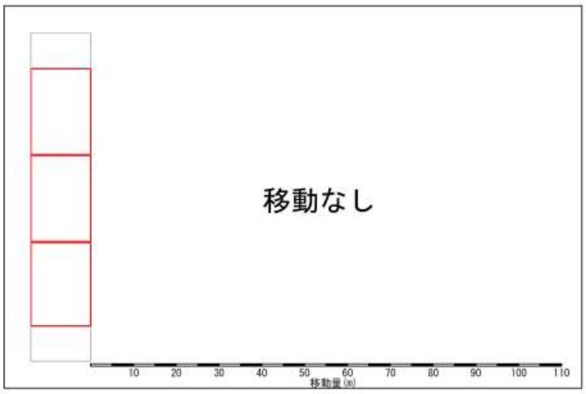
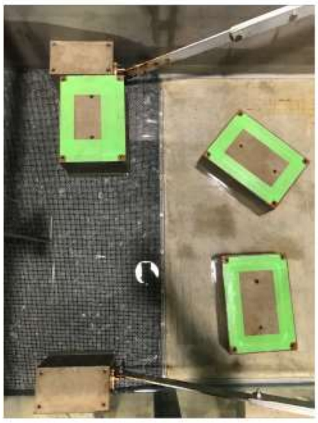
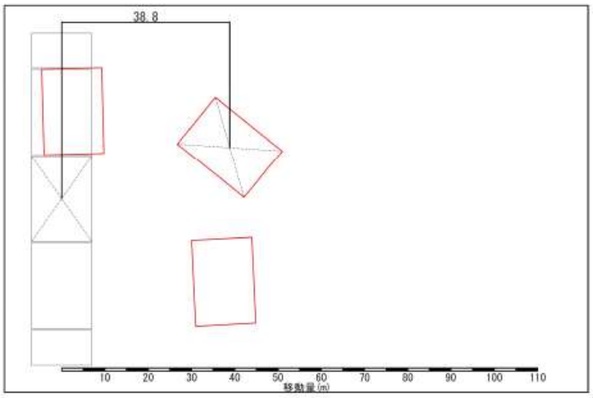
<table>
<tr>
<td>4
回
目</td>
<td> </td>
<td>
</td>
</tr>
<tr>
<td>5
回
目</td>
<td></td>
<td>
</td>
</tr>
</table>

表 21　造波後のケーソンの状況及び移動量（ケース４（堤内外水位差 18.0m））

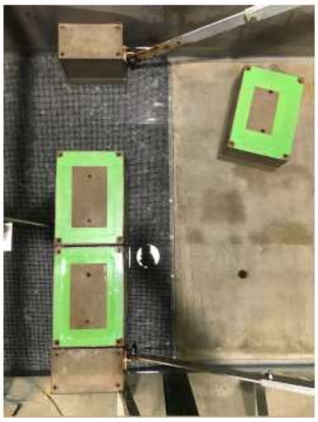
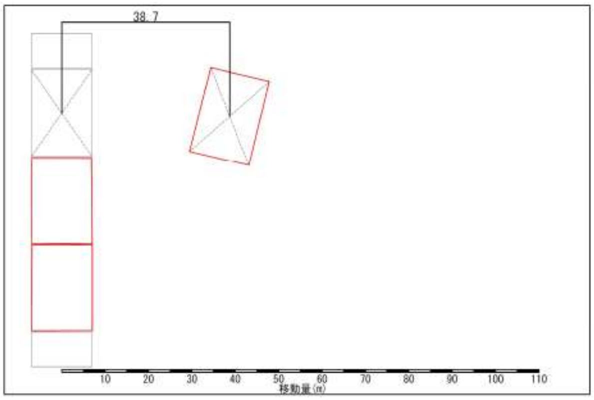
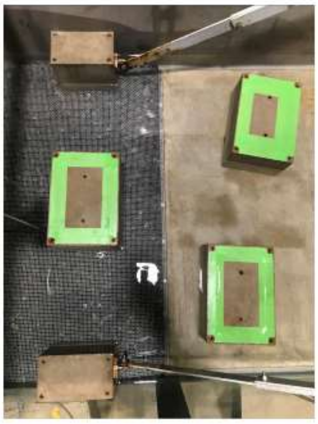
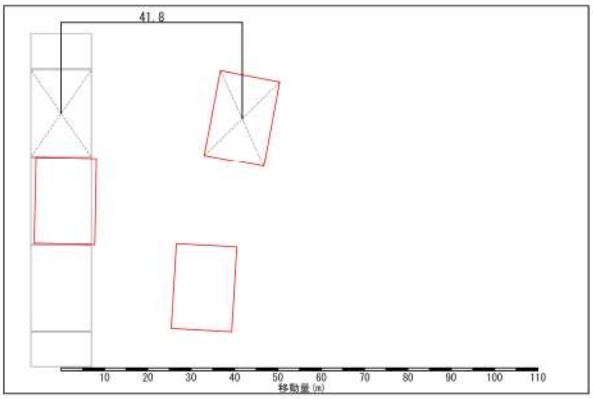
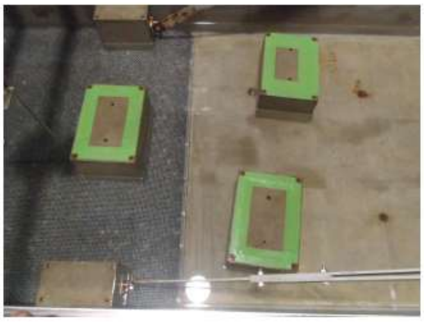
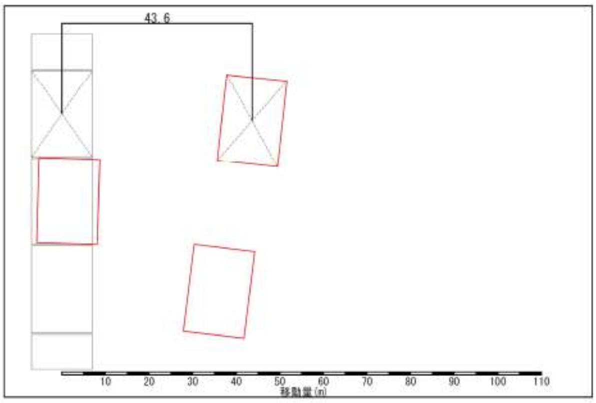
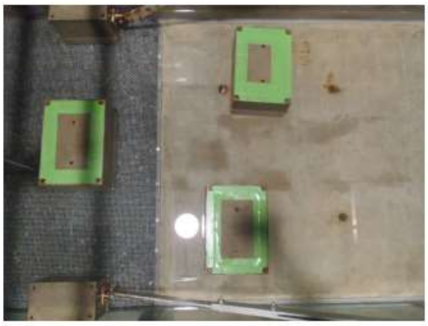
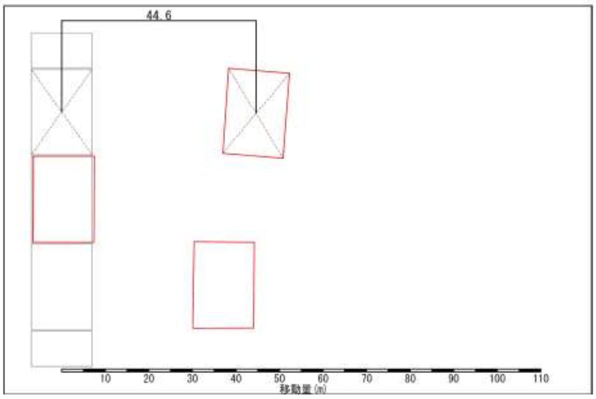
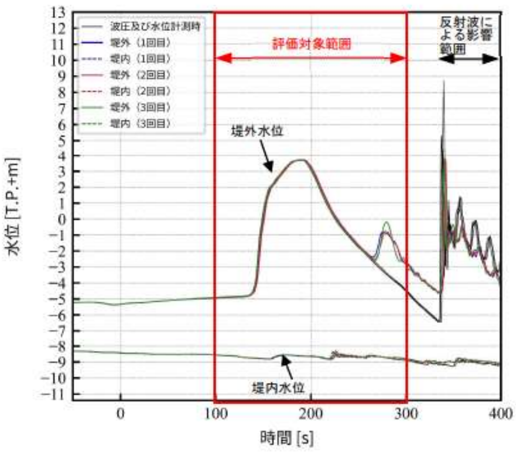
1回目		
2回目		
3回目		
4回目		

表 22　堤内外水位差と移動量の整理結果

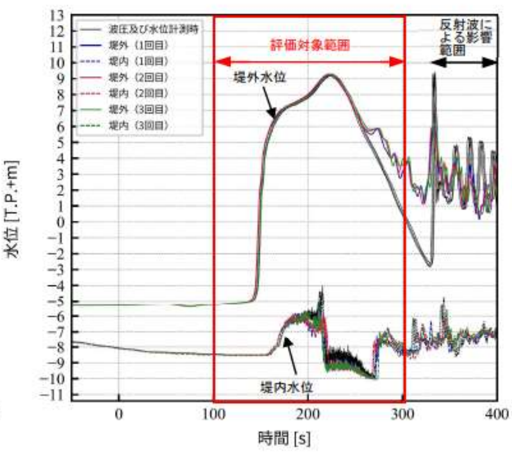
ケース	回目	通過波検定結果			移動量実験結果
		堤内外水位差※1, 2 (m)	水平波力※1, 2 (kN/m)	滑動安全率※1	移動量※2 (m)
ケース1 (堤内外水位差11.5m)	1	12.33	834	1.94	0.0
	2	12.35	838	1.93	0.0
	3	12.37	841	1.92	0.0
平均		12.35	837	1.93	0.0
ケース2 (堤内外水位差17.0m)	1	18.00	1,481	1.00	0.0
	2	18.20	1,482	1.00	0.0
	3	17.87	1,481	1.01	0.0
平均		18.02	1,481	1.00	0.0
ケース3 (堤内外水位差17.5m)	1	18.37	1,492	0.95	35.5
	2	18.37	1,496	0.96	0.1
	3	18.46	1,496	0.97	79.2
	4				0.0
	5				38.8
平均		18.40	1,494	0.96	30.8
ケース4 (堤内外水位差18.0m)	1	18.28	1,586	0.91	38.7
	2	18.56	1,588	0.93	41.8
	3	18.60	1,586	0.92	43.6
	4				44.6
平均		18.48	1,587	0.92	42.2

※1 波圧及び水位計測時における計測結果の平均値を示す

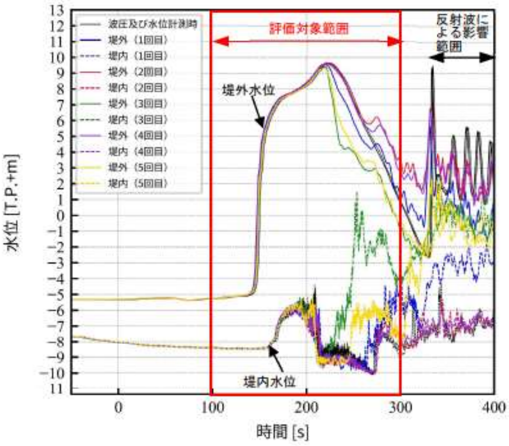
※2 現地換算



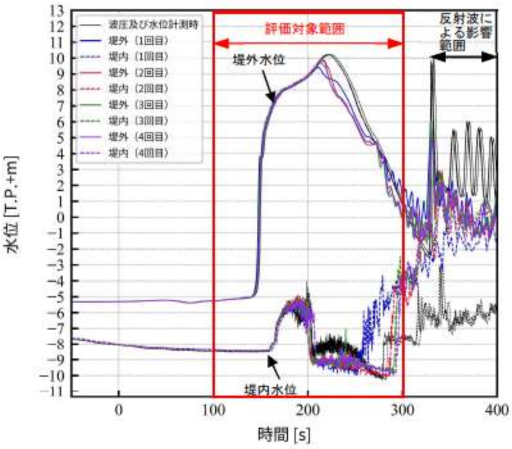
（ケース１）



（ケース２）



（ケース３）



（ケース４）

図 29　移動量計測時の時刻歴波形

（c）実験結果　まとめ

水理模型実験により防波堤の移動量を計測した結果，防波堤への堤内外水位差 17.0m（水平波力 1,481kN/m）以内の実施ケース（ケース１及びケース２）では防波堤の移動は確認されず，堤内外水位差 17.5m（水平波力 1,494kN/m）以上の実施ケース（ケース３及びケース４）で移動が確認された。

移動が生じたケース３及びケース４は，波圧及び水位計測時に計測した波力より求められる滑動安全率が 1.0 を下回っていることから，津波波力が滑動抵抗力を上回り，滑動が生じたと考えられる。

また，ケース３と比較し，水位差の大きいケース４の方が滑動した回数が多くなり，移動量もばらつきがあるものの概ね増加傾向であったことから，水平波力及び堤内外水位差が大きいほど移動量が増加することが確認できた。

d．評価結果

防波堤のケーソン及び上部コンクリートについては水理模型実験により滑動，転倒の有無を評価するため，地震及び津波による防波堤の損傷による影響やサイト特性の観点も踏まえた科学的根拠に基づいた確認を行うために，水理模型実験による防波堤の取水口到達及び閉塞可能性評価を実施した。

水理模型実験は津波波力型の被災パターンを対象とし，津波波力型において支配的な要因となる防波堤堤内外水位差と堤外水位に着目し，水理模型実験により得られた取水口に到達し得ない防波堤堤内外の水平波力を確認した。

水理模型実験の結果，堤内外水位差17.0m（水平波力1,481kN/m）以内の実施ケース（ケース　１及びケース２）では防波堤の移動が確認されなかった。また，いずれのケースでも転倒は生じないことが確認できた。

上記結果に対して，基準津波における水平波力は875kN/m（基準津波（波源Ⅰ，防波堤損傷なし））であり，移動が確認されなかったケース２よりも大きく下回り，1,481kN/mから1.6倍程度の裕度を有している。

以上のことから，基準津波の水平波力により防波堤に滑動及び転倒が生じる可能性がないことから，防波堤が３号炉取水口に到達し，閉塞する可能性はない。

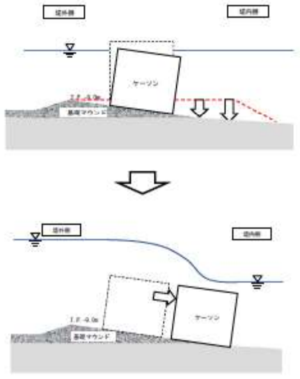
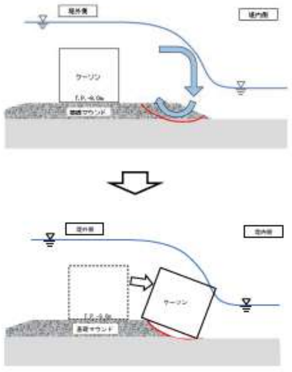
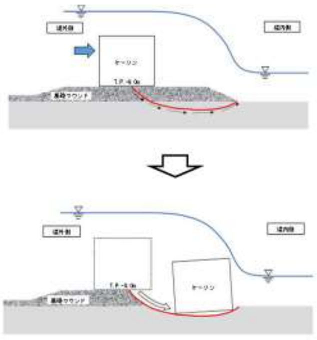
地震及び津波による損傷が防波堤の移動量に及ぼす影響について

１．被災事例を踏まえた防波堤の損傷

２．（２）に示した被災事例を踏まえると，防波堤の取水口の到達及び閉塞に有意な影響を及ぼすのは，ケーソンの滑動及び転倒と考えられるため，ケーソンの滑動及び転倒に及ぼす影響を整理した。

地震及び津波による防波堤の損傷状態を整理した結果を表１に示す。

表１　地震及び津波による防波堤の損傷状態

防波堤の損傷状態	地震による損傷	津波による損傷	
	基礎マウンド及び基礎地盤の不等沈下によるケーソンの傾斜	基礎マウンド及び基礎地盤の洗掘	基礎マウンド及び基礎地盤の支持力破壊
概要図			
ケーソンの滑動及び転倒に及ぼす影響	ケーソンが滑動又は転倒しやすくなる		

（１）地震による損傷

表１より防波堤の基礎地盤は，砂層，砂礫層及び粘土層で構成されるため，地震による液状化に伴い，不等沈下する可能性がある。

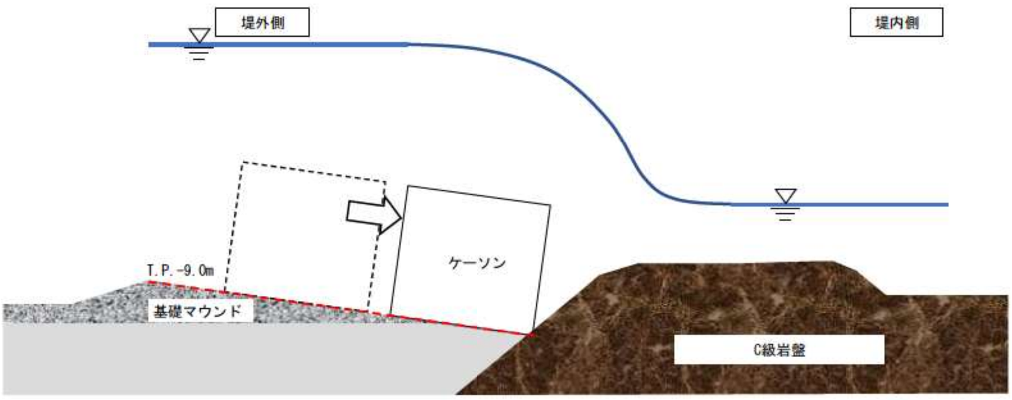
基礎マウンド，若しくは，基礎地盤が不等沈下することで，防波堤は堤内側若しくは堤外側へ傾斜すると考えられる。

堤外側へ傾斜する場合は，取水口と逆方向へ滑動又は転倒しやすくなるため，取水口の到達可能性への影響はないと考えられる。

堤内側へ傾斜する場合は，取水口方向へ滑動又は転倒しやすくなると考えられる。

一方，３号炉取水口前面にはＣ級岩盤の高まりが分布していることから，不等

沈下が生じることで，Ｃ級岩盤に対する防波堤の位置が低くなるため，基礎マウンド及び基礎地盤の不等沈下による防波堤の移動量は抑制されると考えられる。

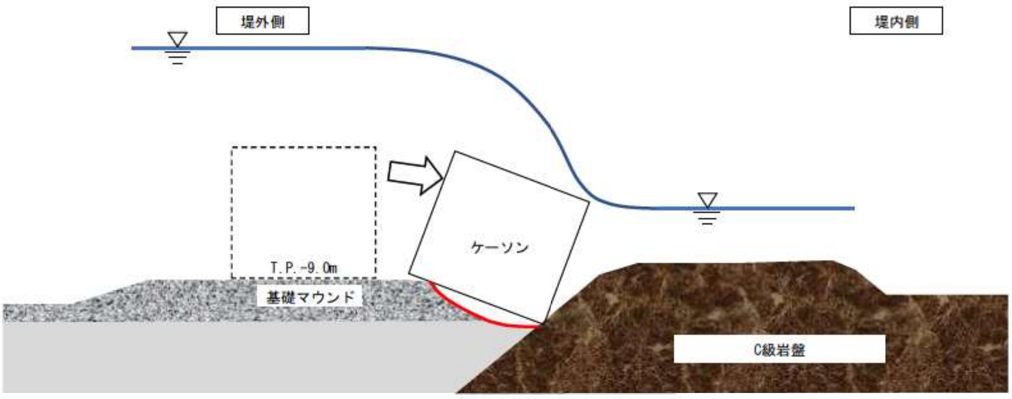


参考図１－１　地震に伴う基礎マウンド及び基礎地盤の不等沈下

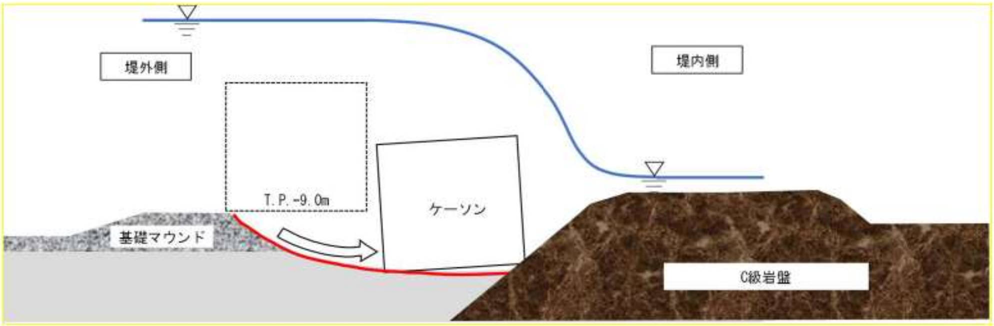
2．津波による損傷

表１より津波が防波堤を越流することにより，防波堤背面の基礎マウンド，若しくは，基礎地盤の洗掘が生じる可能性がある。また，津波の波力により基礎マウンド及び基礎地盤の支持力破壊が生じる可能性がある。

基礎マウンド及び基礎地盤の支持力破壊及び洗掘が生じることで，滑動又は洗掘範囲に転倒しやすくなると考えられるが，３号炉取水口前面にはＣ級岩盤の高まりが分布していることから，滑動又は洗掘範囲に転倒すると，Ｃ級岩盤に対する防波堤の位置が低くなるため，基礎マウンド及び基礎地盤の洗掘又は支持力破壊に伴う移動量は抑制されると考えられる。



参考図１－２　津波の越流による基礎マウンド及び基礎地盤の洗掘

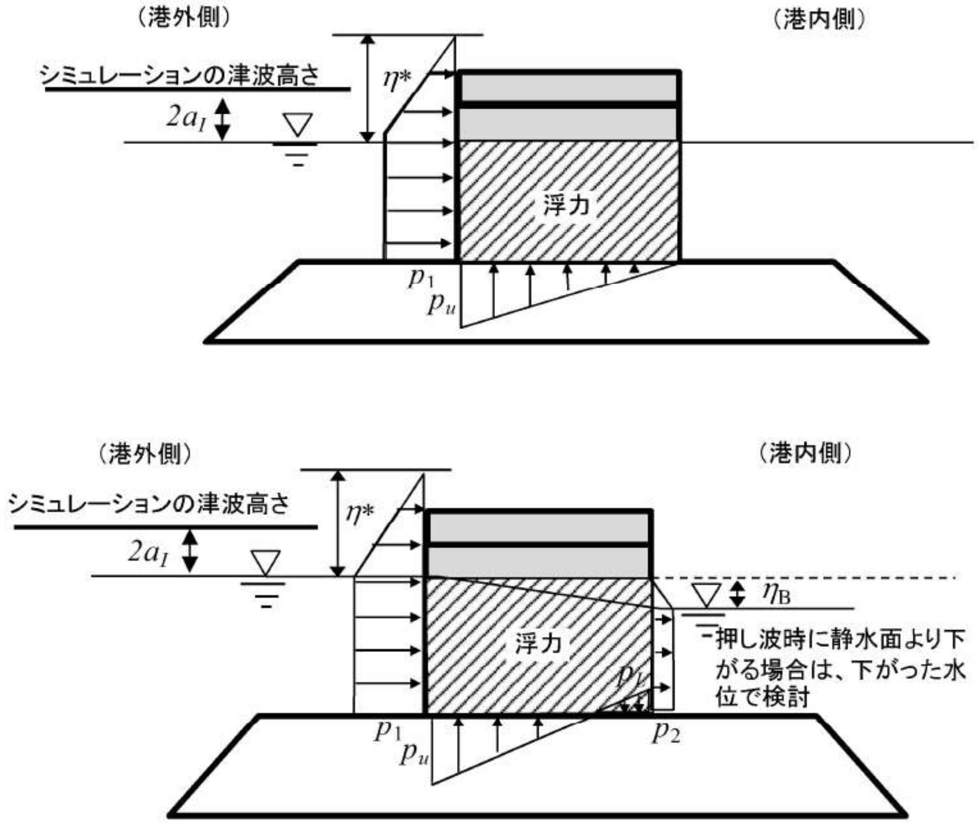


参考図１－３　津波の波力による基礎マウンド及び基礎地盤の支持力破壊

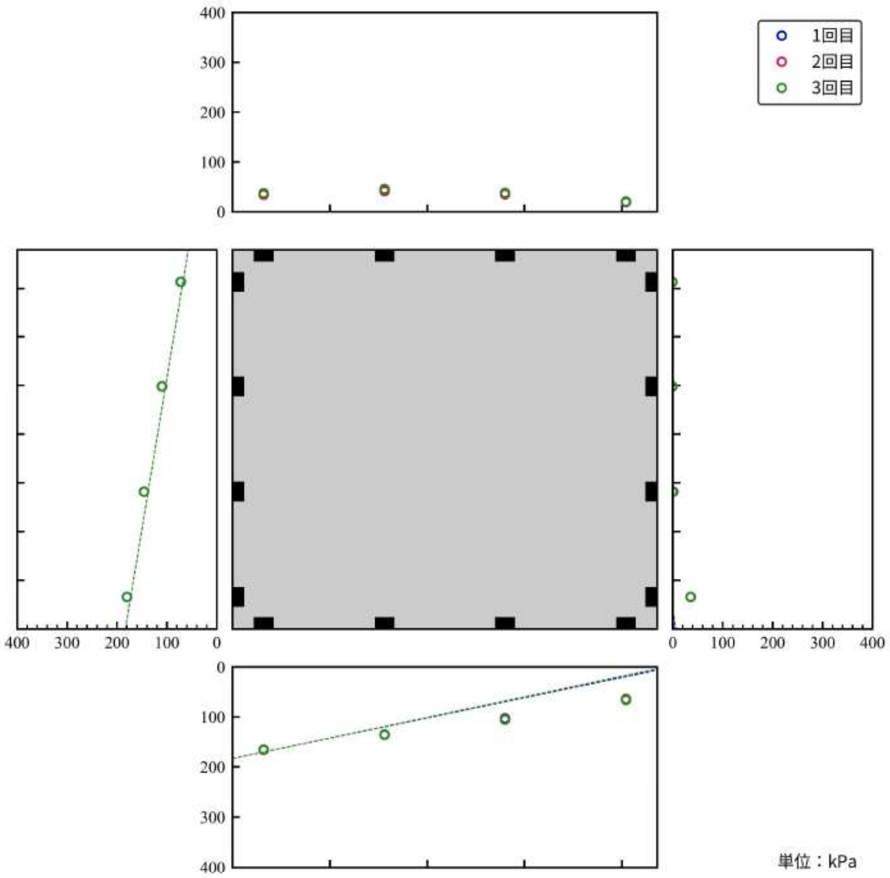
基礎マウンドを砕石で再現することの妥当性について

本実験では，基礎マウンドが洗掘しない条件となるようマウンド模型を金網（目の大きさ約6.5mm）で覆っている。マウンド模型の材料には金網からの流出が生じないよう５号砕石（13～20mm）を使用した。波圧計測の結果（参考図２－２）から，基礎マウンドに水が浸透し揚圧力が発生していることが確認されている。

計測されたケーソン底版に作用する揚圧力の分布は，ケーソンの堤外・堤内両側面下端の波圧を結ぶような分布となっている。これは，港湾の施設の技術上の基準・同解説や防波堤の耐津波設計ガイドラインなどで採用されている谷本式・修正谷本式（参考図２－１）など既存の評価式と整合しており，妥当な実験設定となっていることが確認できる。



参考図２－１　谷本式・修正谷本式による揚圧力
（防波堤の耐津波設計ガイドライン P.24）



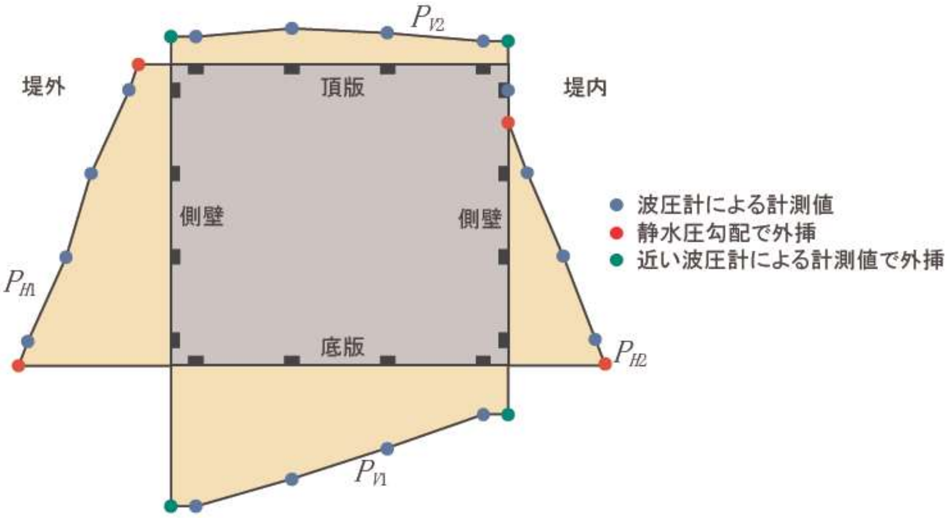
参考図２－２　波圧測定結果（ケース２（堤内外水位差 17.0m））

水理模型実験に基づく評価で使用した波力，滑動抵抗力及び滑動安全率の算出について

水理模型実験の滑動安全率の算出に用いた水平波力及び鉛直波力は，最大水平波力発生時刻の波圧の計測値を積分することにより算出した。ここで，波圧計と隣接する波圧計の間の波圧は，両波圧計による計測値を線形内挿した分布であると仮定した。また，各面の際端部の波圧計からケーソン端部までの波圧分布については，以下のように仮定している。波圧分布のイメージを参考図３－１に示す。

側壁：深さ方向に静水圧の勾配で圧力が変化するとして外挿
頂版・底版：際端部の波圧計の計測値で一定として外挿

水平波力を算出する際，防波堤にかかる波圧は水位が防波堤を越流する場合は防波堤天端まで，防波堤を越流しない場合は水面までの高さとしている。



参考図３－１　計測結果に基づく波圧分布仮定イメージ

滑動安全率は，以下の式によって算出した。

$F_S = f(W - P_V)/P_H$ ※1

$P_V = P_{V1} - P_{V2}$，$P_H = P_{H1} - P_{H2}$ ※1

F_S：滑動安全率，ｆ：摩擦係数（＝0.6）※2，Ｗ：ケーソンの単位幅当たりの重量，P_V：鉛直波圧，P_H：水平波圧，P_{V1}：底版に作用する鉛直波圧，P_{V2}：頂版に作用する鉛直波圧，P_{H1}：堤外側側壁に作用する水平波圧，P_{H2}：堤内側側壁に作用する水平波圧

※１「防波堤のガイドライン」に基づいて算出

※２「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）」を参考に，防波堤と基礎マウンド間の摩擦係数を0.6として算出

漂流物荷重による防波堤の滑動影響について

漂流物荷重が作用した場合に防波堤に及ぼす影響を確認するため，南防波堤における最大堤内外水位差が発生し，防波堤を越流する基準津波（波源Ｉ（防波堤損傷なし））の水平波力に漂流物荷重を考慮した場合の影響を検討する。

漂流物荷重2,000kN※をケーソン幅19.9mで考慮した漂流物荷重101kN/mを水平波力に加算する。

漂流物荷重を考慮したときの水平波力を表１に，漂流物荷重を考慮した水平波力イメージ図を参考図４－１に示す。

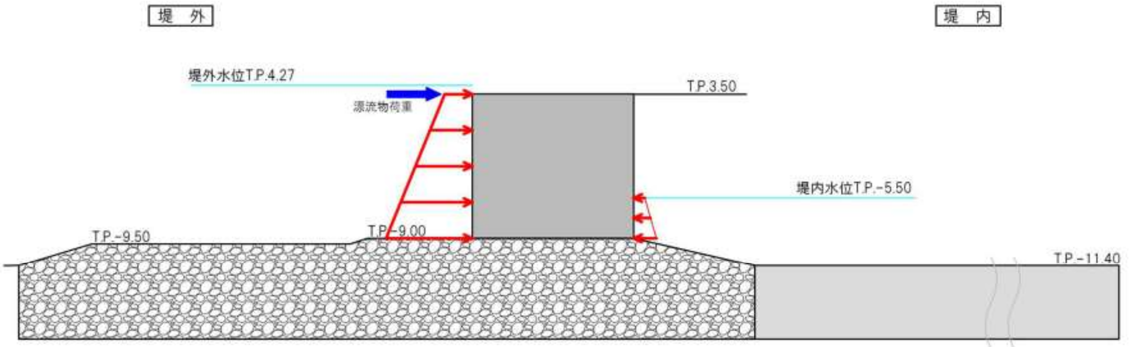
漂流物荷重を考慮すると，水平波力は976kN/mとなるが，移動が確認されなかったケース２（堤内外水位差17.0m）の水平波力1,481kN/mを大きく下回ることを確認した。

以上のことから，防波堤に漂流物荷重が作用した場合でも津波により，防波堤は３号炉取水口に到達及び閉塞する可能性は低いと考える。

※防潮堤の構造成立性評価に用いる荷重

表１　漂流物荷重を考慮したときのケーソンの滑動安全率

衝突荷重考慮	堤外水位(T.P.m)	堤内水位(T.P.m)	堤内外水位差(m)	水平波力(kN/m)
無	4.27	-5.50	9.77	875
有 101kN/m	4.24	-5.50	9.77	976



参考図４－１　漂流物荷重を考慮した水平波力イメージ図

【参考文献】

1）国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン（平成27年12月一部改訂），2015.

2）国土交通省　東北地方整備局　港湾空港部：第3回　東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会，資料-3　pp. 2，2011.

3）下迫健一郎：東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災，ながれ第32巻，pp. 27-32，2013.

4）港湾空港技術研究所：平成23年(2011年）東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告，港湾技術研究所資料，No. 1291，2015.

5）東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設（防波堤）被災状況とその原因について（2012，八木ら）

6）(社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），pp. 561，2007.