

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-018-02 改13
提出年月日	2023年1月19日

津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料

2023年1月

中国電力株式会社

補足説明資料目次

今回提出範囲：

1. 入力津波の評価
 - 1.1 潮位観測記録の評価
 - 1.2 遡上・浸水域の評価の考え方
 - 1.3 港湾内の局所的な海面の励起
 - 1.4 管路解析のモデル
 - 1.5 入力津波の不確かさの考慮
 - 1.6 遡上解析のモデル
 - 1.7 入力津波の流路縮小工による水位低減効果の考慮
2. 津波防護対象設備
 - 2.1 津波防護対象設備の選定及び配置
 - 2.2 タービン建物(Sクラスの設備を設置するエリア)及び取水槽循環水ポンプエリアにおけるSクラス設備に対する浸水影響
3. 取水性に関する考慮事項
 - 3.1 砂移動による影響確認
 - 3.2 原子炉補機海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの波力に対する強度評価
 - 3.3 除じん装置の取水性への影響
 - 3.4 循環水ポンプ停止手順
4. 漂流物に関する考慮事項
 - 4.1 設計に用いる遡上波の流速
 - 4.2 漂流物による影響確認
 - 4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力
 - 4.4 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係
 - 4.5 漂流物による衝突荷重
5. 浸水防護施設の設計における補足説明
 - 5.1 耐津波設計における現場確認プロセス
 - 5.2 津波監視設備の設備構成及び電源構成
 - 5.3 津波による溢水に対して浸水対策を実施する範囲の考え方
 - 5.4 循環水ポンプ出口弁及び復水器水室出口弁の津波に対する健全性
 - 5.5 屋外タンク等からの溢水影響評価

4. 漂流物に関する考慮事項

4.1 設計に用いる遡上波の流速

4.1 設計に用いる遡上波の流速

(1) はじめに

津波による漂流物の漂流速度は、津波の流速に支配される。文献*によると漂流物の最大漂流速度は津波の浸水流速より小さくなっているが、安全側に漂流速度として津波の流速を用いる。

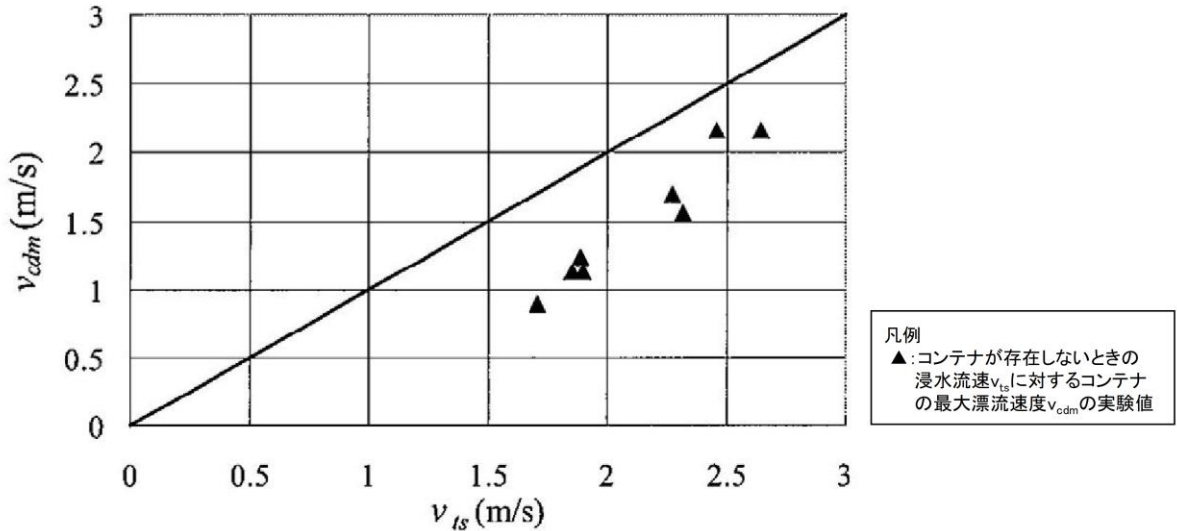


図 4.1-1 浸水流速 v_{ts} と最大漂流速度 v_{cdm} の関係

注記*：有川太郎，大坪大輔，中野史丈，下迫健一郎，石川信隆（2007）：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 54 巻，P846-850（凡例は追記）

漂流物の衝突速度は、防波壁付近の流速に依存すると考えられるため、発電所近傍の海域における流速により、漂流物の衝突速度を設定する。漂流物が各施設に衝突する際の荷重の大きさは、基準津波来襲時の発電所近傍の海域における全方向最大流速を抽出し、これに不確かさを考慮して、安全側の評価を実施する。全方向最大流速は、各地点において V_x 及び V_y の流速時刻歴から全方向での流速が最大となる時刻のものを抽出して求めた。また、防波壁は広範囲にわたるため、地点により流速が異なるが、設計に用いる漂流物の衝突荷重として、安全側に発電所近傍の海域における最大流速を用いる。

なお、設計に用いる遡上波の流速は、漂流物荷重の大きさは構造物に対して法線方向の流速による影響が大きいため、本来は法線方向の速度値に着目するが、安全側の評価を実施するため、ここでは全ての方向の流速ベクトルを含めた中での最大流速の数値を切り上げた値を設定する。

(2) 日本海東縁部に想定される地震による津波における漂流速度

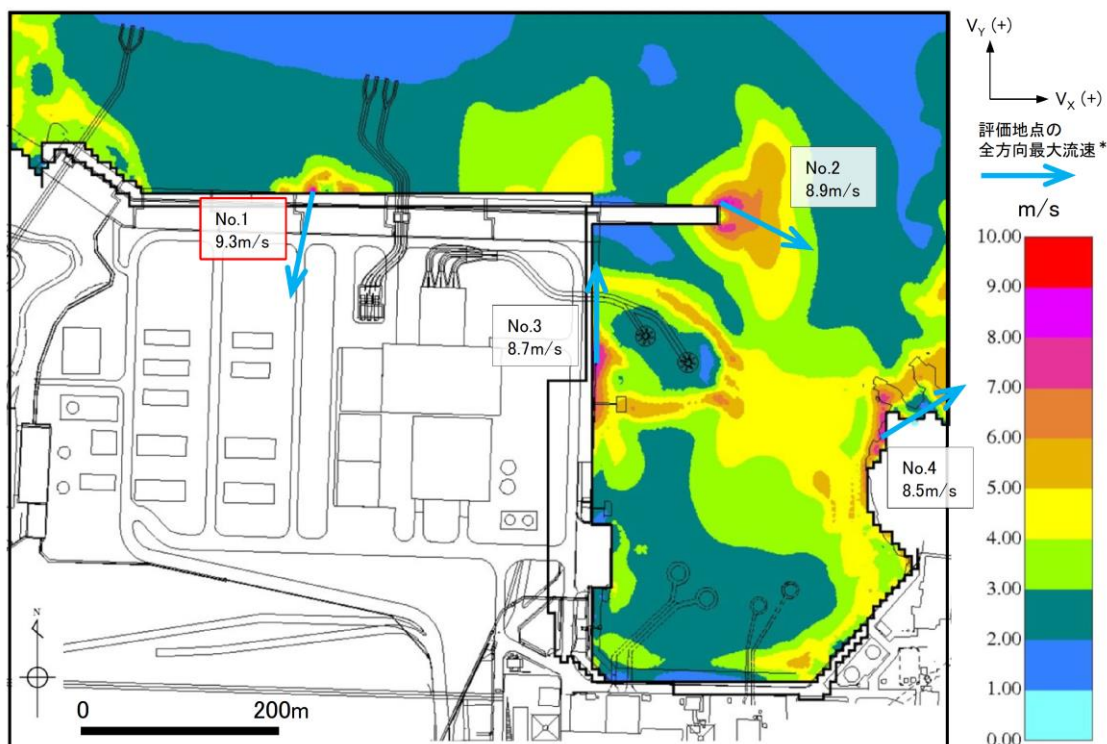
基準津波 1～6 のうち、日本海東縁部に想定される地震による津波である基準津波 1, 2, 3, 5 及び 6 について、全方向最大流速分布を図 4.1-2 に示す。また、全方向最大流速分布において、全方向最大流速地点及び全方向流速が 8.0m/s 以上のコンターの高まりから評価地点を選定し、それぞれの最大流速を表 4.1-1 に整理した。

結果としては、日本海東縁部に想定される地震による津波における最大流速は 9.3m/s が抽出されたことから、安全側に 10.0m/s を日本海東縁部に想定される地震に伴う津波による防波壁付近における衝突荷重評価に用いる漂流速度として設定する。

表 4.1-1 基準津波来襲時（日本海東縁部）における全方向最大流速

No.	波源	防波堤 有無	全方向最大流速(m/s)			
			V _x	V _y	全方向流速 ($\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$)	
1	日本海 東縁部	有り	-1.9	-9.0	9.3	
2			7.9	-4.0	8.9	
3			0.0	8.7	8.7	
4			7.1	4.5	8.5	
5			無し	0.0	-8.8	8.8
6				6.8	6.1	9.2
7				-1.7	-8.4	8.7
8				8.7	-2.4	9.1
9		有り		0.0	8.2	8.2
10				8.1	3.8	8.9
11		有り		6.3	2.0	6.7
12		無し		0.1	8.3	8.4
13			7.1	4.5	8.5	
14			-2.5	-8.2	8.6	
15		無し	-1.2	-8.2	8.3	
16			5.6	5.9	8.2	

注1: 各ケースの全方向最大流速地点及び全方向流速が8.0m/s以上のコンターの高まりから評価地点を選定している。
 2: 切上げの関係で値が合わない場合がある。
 3: 日本海東縁部に想定される地震による津波における最大値を赤枠で示す。



注記* : 日本海東縁部に想定される地震による津波における最大値を赤枠で示す。

図 4.1-2(1) 基準津波 1 (防波堤有り, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

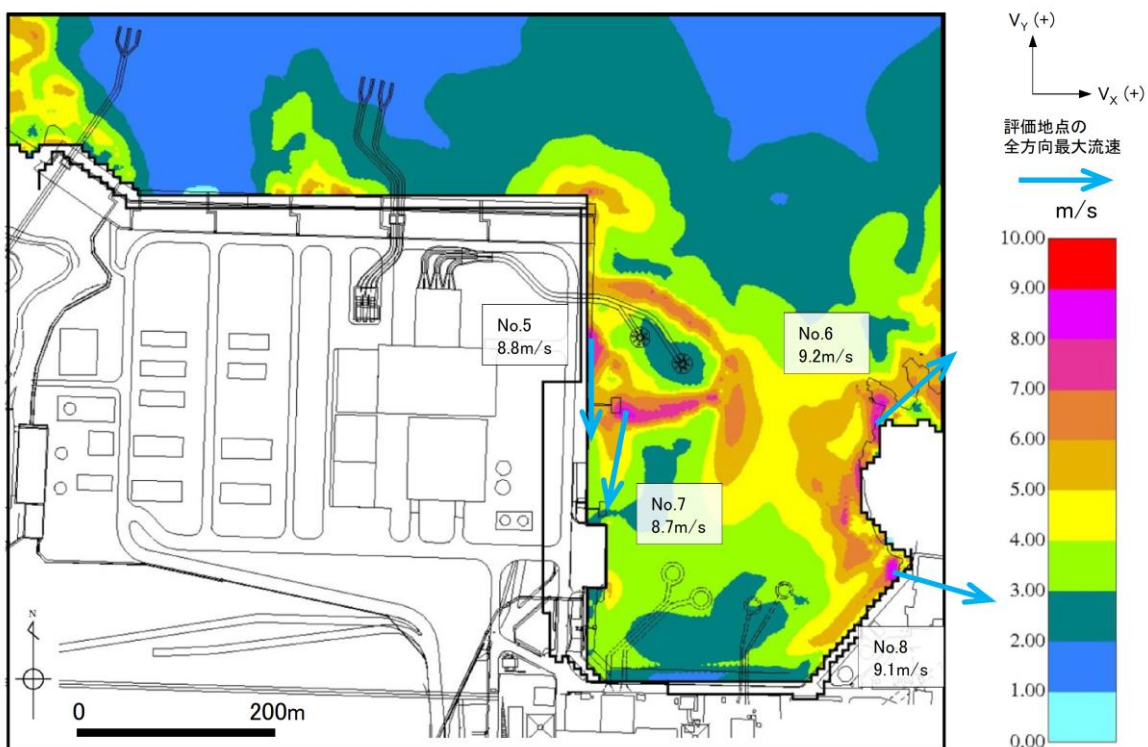


図 4.1-2(2) 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

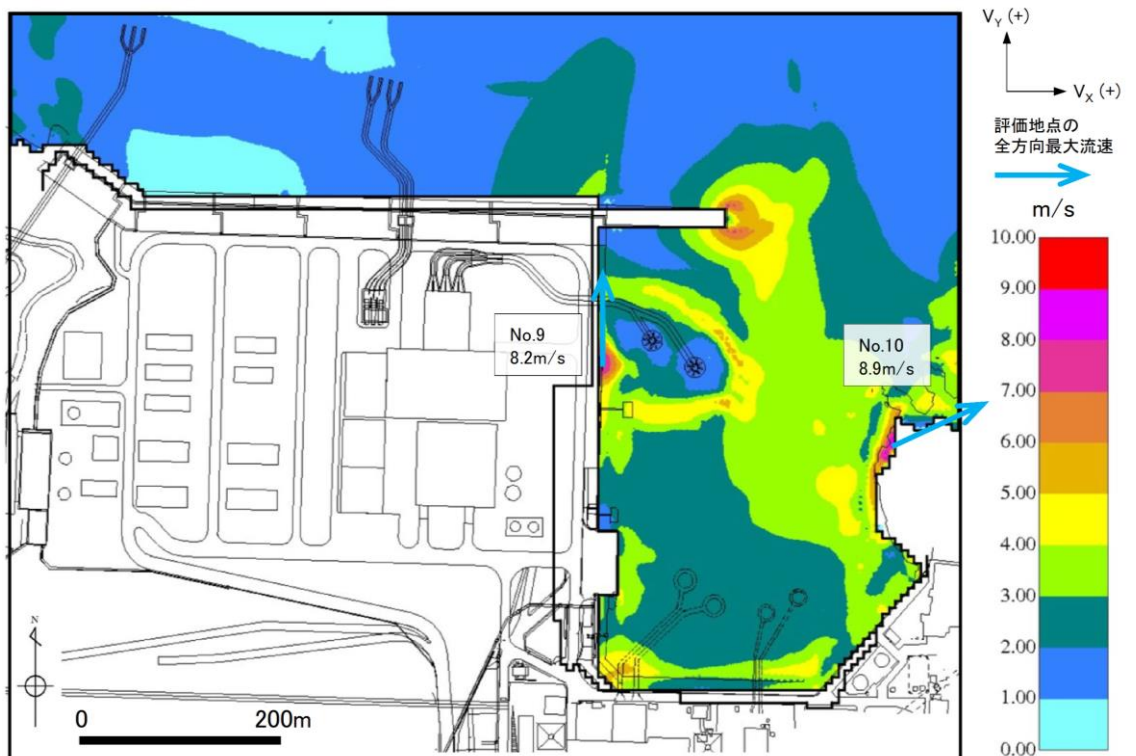


図 4.1-2(3) 基準津波 2 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

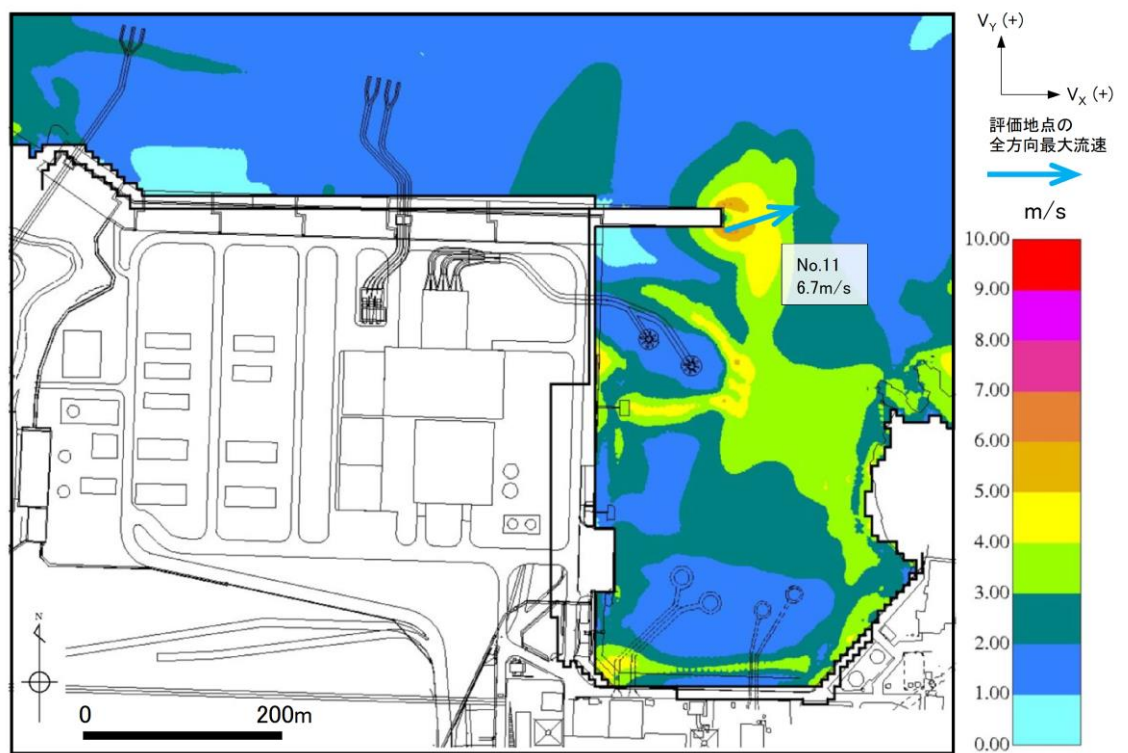


図 4.1-2(4) 基準津波 3 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

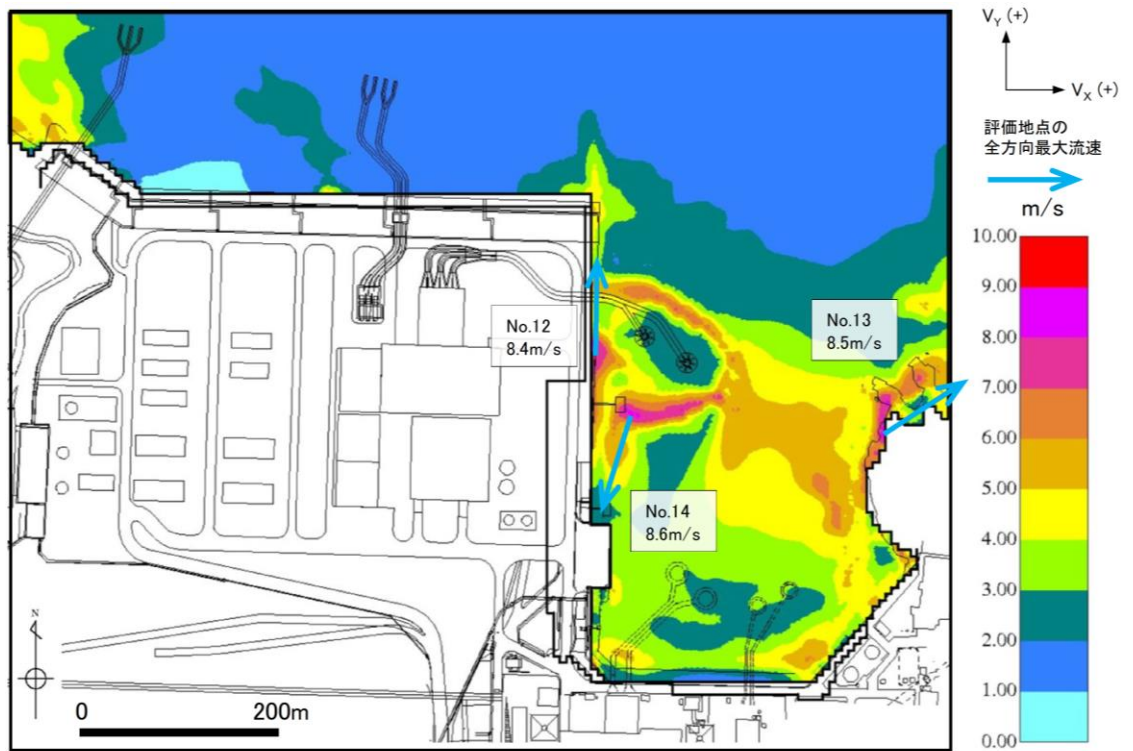


図 4.1-2(5) 基準津波 5 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

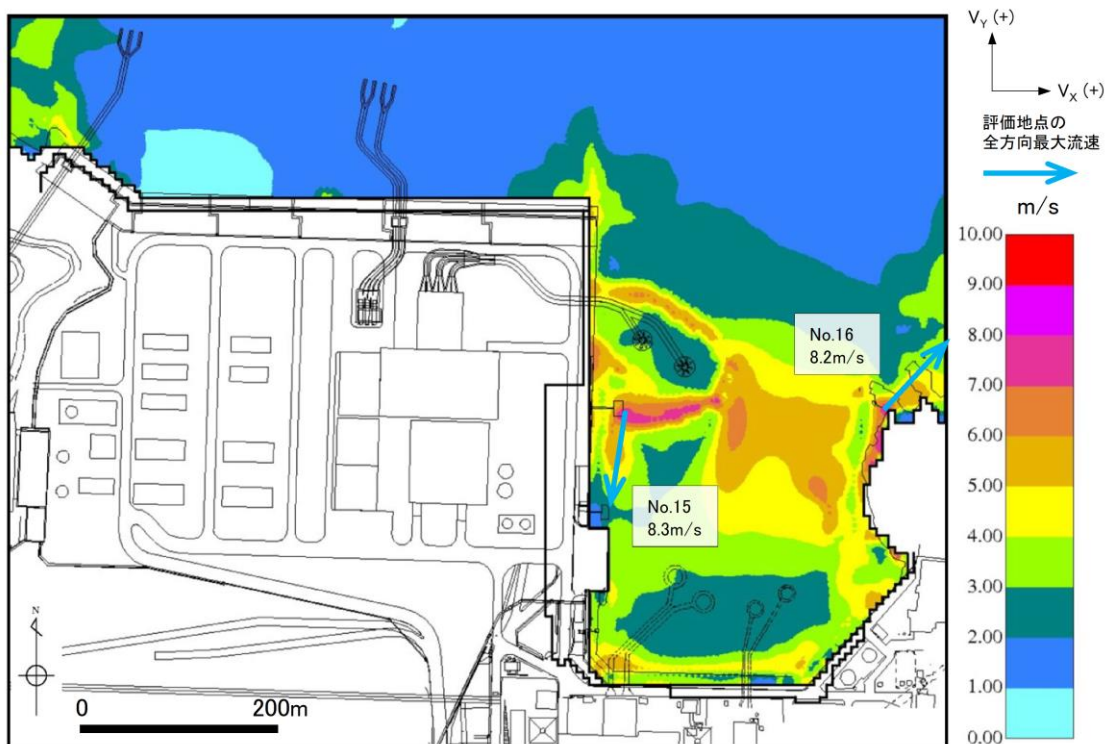


図 4.1-2(6) 基準津波 6 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

(3) 海域活断層から想定される地震による津波における漂流速度

基準津波 1～6 のうち、海域活断層から想定される地震による津波である基準津波 4 及び海域活断層上昇側最大ケースについて、全方向最大流速分布を図 4.1-3 に示す。また、全方向最大流速分布において、全方向最大流速地点及び全方向流速が 5.0m/s 以上のコンターの高まりから評価地点を選定し、それぞれの最大流速を表 4.1-2 に整理した。

海域活断層から想定される地震による津波における最大流速は 5.8m/s が抽出されたことから、安全側に 6.0m/s を海域活断層から想定される地震に伴う津波による防波壁付近における衝突荷重評価に用いる漂流速度として設定する。

表 4.1-2 基準津波来襲時（海域活断層）における全方向最大流速

No.	波源		防波堤 有無	全方向最大流速 (m/s)		
				V _x	V _y	全方向流速 ($\sqrt{V_x^2 + V_y^2}$)
17	海域 活断層	基準津波4	有り	4.7	3.2	5.7
18			無し	1.4	5.6	5.8
19				-0.8	-5.2	5.3
20		海域活断層上昇側 最大ケース	有り	3.9	2.7	4.8
21			無し	1.0	4.5	4.6

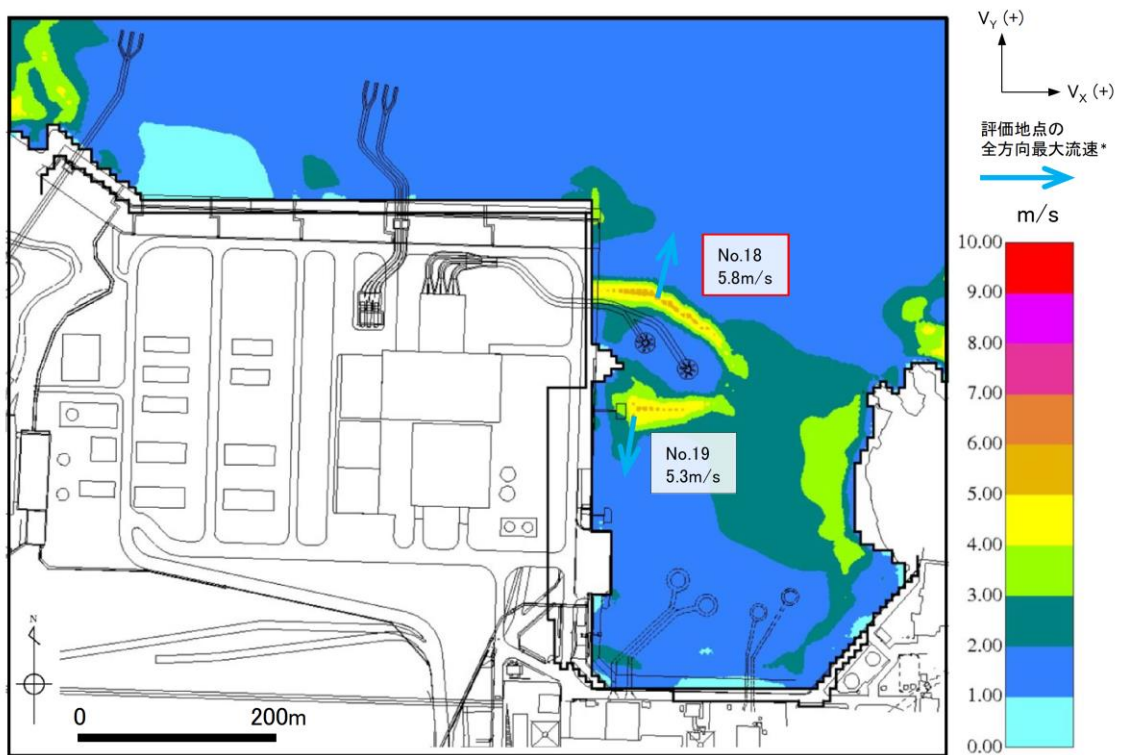
注1:各ケースの全方向最大流速地点及び全方向流速が5.0m/s以上のコンターの高まりから評価地点を選定している。

2:切上げの関係で値が合わない場合がある。

3:海域活断層から想定される地震による津波における最大値を赤枠で示す。



図 4.1-3(1) 基準津波 4 (防波堤有り, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)



注記* : 海域活断層から想定される地震による津波における最大値を赤枠で示す。

図 4.1-3(2) 基準津波 4 (防波堤無し, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

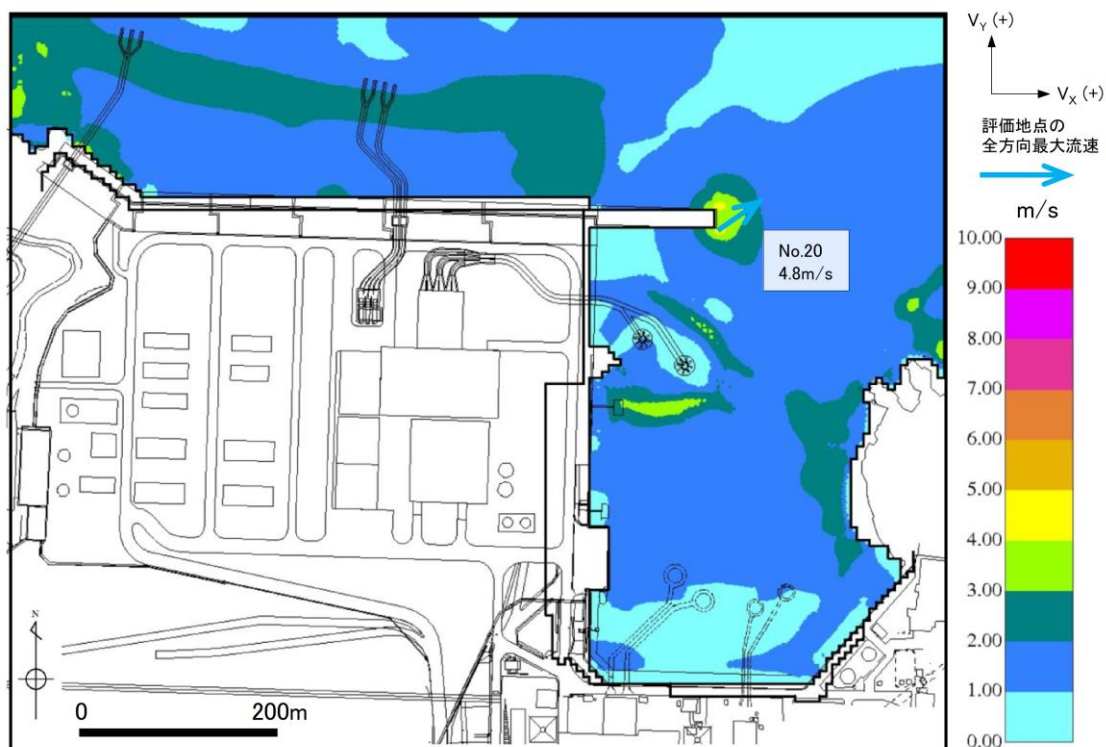


図 4.1-3(3) 海域活断層上昇側最大ケース（防波堤有り，沈下無し）
全方向最大流速分布（全時刻）

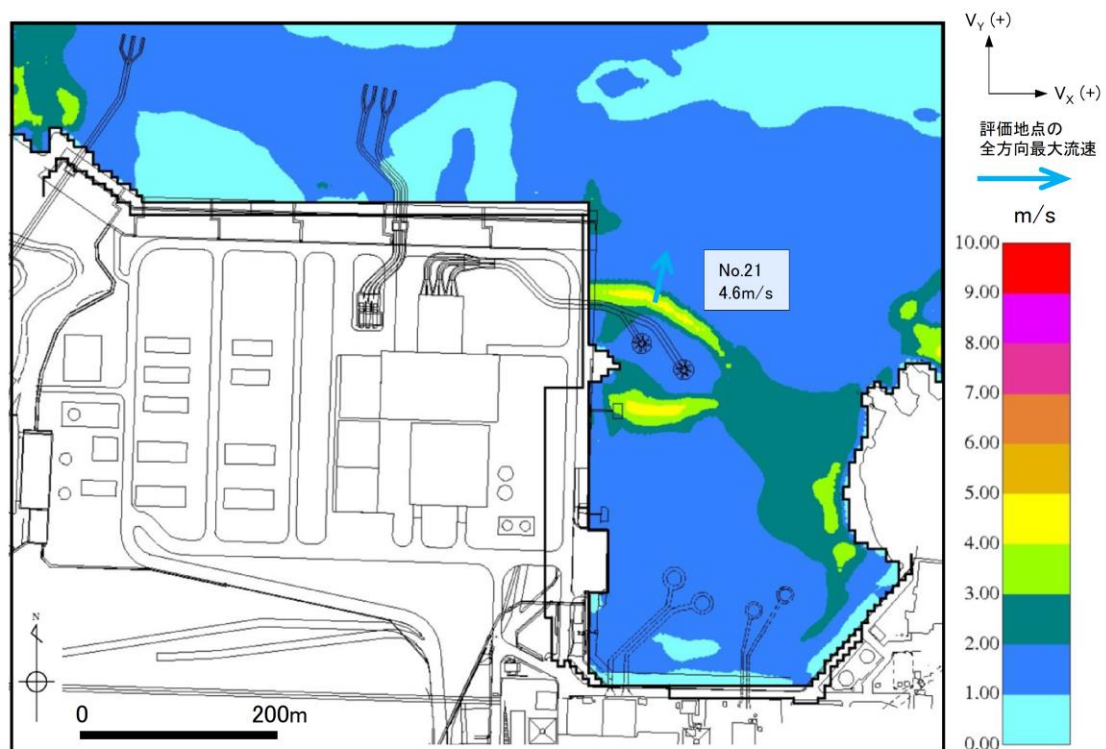
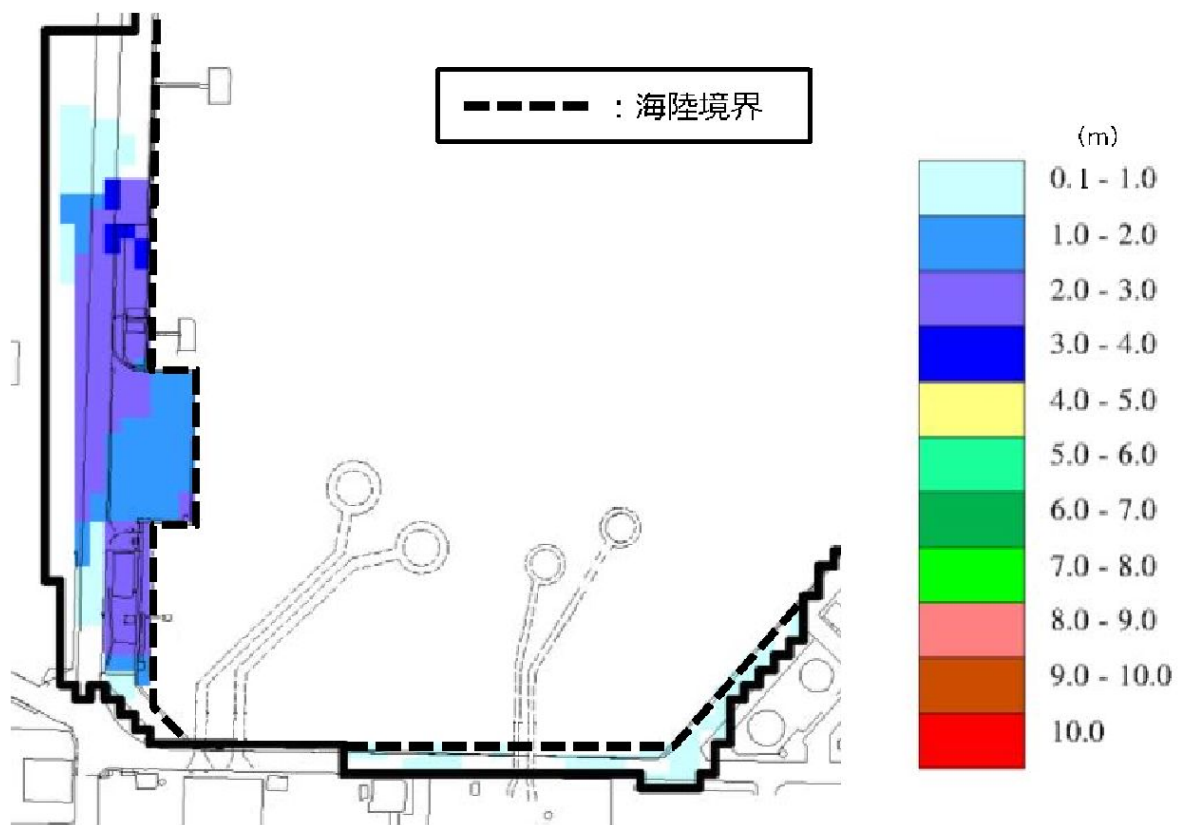


図 4.1-3(4) 海域活断層上昇側最大ケース（防波堤無し，沈下無し）
全方向最大流速分布（全時刻）

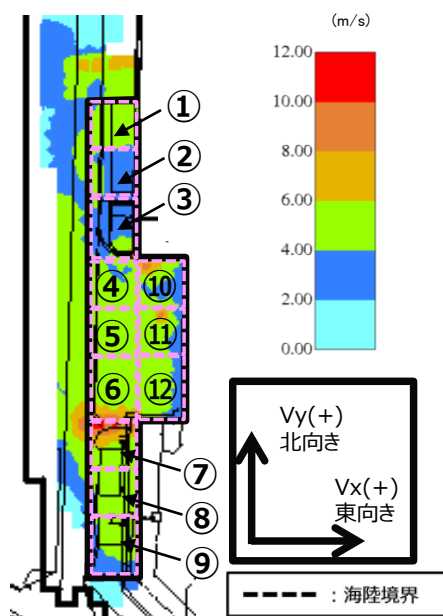
(4) 荷揚場周辺における漂流速度

荷揚場周辺における浸水範囲が広い基準津波 1（防波堤無し）について、浸水範囲を安全側に設定するため、地震による荷揚場周辺の沈下（液状化及び揺すり込みに伴う沈下量 0.65m に側方流動による沈下量 0.35m を加えた 1m を一律に設定）及び初期潮位（朔望平均満潮位 EL 0.58m と潮位のばらつき EL 0.14m）を考慮した場合の荷揚場周辺における最大浸水深分布及び流速を図 4.1-4 に示す。

結果として、荷揚場周辺に遡上した津波により最大流速 11.9m/s が確認されたことから、「4.5.2 津波に関するサイト特性」において発生要因について分析し、その結果を踏まえ、荷揚場周辺における漂流速度を設定する。



基準津波 1（防波堤無し，1m 沈下）



各地点の流速評価結果

地点	Vx方向 最大流速 (m/s)	Vy方向 最大流速 (m/s)	全方向最大流速(m/s)		
			Vx方向 流速	Vy方向 流速	全方向流速 ($\sqrt{Vx^2+Vy^2}$)
1	-4.2	2.1	-4.2	1.9	4.6
2	-4.0	2.5	-4.0	1.4	4.2
3	-6.7	2.1	-6.7	-0.8	6.8
4	-3.6	3.7	-3.2	3.4	4.6
5	-3.6	3.8	-3.6	3.7	5.1
6	-5.5	4.1	-5.5	2.7	6.1
7	-11.8	3.4	-11.8	1.1	11.9
8	-5.3	1.5	-5.3	1.3	5.4
9	-5.9	1.9	-5.9	1.6	6.1
10	4.8	-7.6	4.8	-7.6	9.0
11	-8.9	2.5	-8.9	-1.2	9.0
12	-2.7	5.1	-1.4	5.1	5.3

(切上げの関係で値があわない場合がある)

図 4.1-4 基準津波 1（防波堤無し，1m 沈下）における荷揚場周辺の最大浸水深分布及び流速（全時刻）

(5) 狭隘な場所における漂流速度

狭隘な場所における漂流速度については、その設置状況に応じた漂流物、流向を踏まえ、「4.5 漂流物による衝突荷重」において漂流速度を設定する。

4.5 漂流物による衝突荷重

目 次

今回提出範囲：

4.5.1	衝突荷重を考慮する施設・設備の選定	1
4.5.2	津波に関するサイト特性	8
4.5.3	衝突荷重として考慮する漂流物の選定	21
4.5.4	浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法	30
4.5.5	漂流物による衝突荷重の算定における設計上の配慮について	37
4.5.6	漂流物による衝突荷重の算定	39

添付資料 1 島根原子力発電所の周辺海域で操業する漁船について

添付資料 2 津波防護施設に考慮する漂流物の選定

添付資料 3 島根原子力発電所におけるFRP船舶に係る衝突解析条件の妥当性

添付資料 4 FEMA(2012)によるFRP製船舶の衝突荷重

添付資料 5 建築物荷重指針・同解説(2015)を参考にした静的設計荷重の算定例

添付資料 6 FRP製船舶の機関部における衝突影響の確認

添付資料 7 FRP船舶の衝突解析に関する新規制基準審査実績との比較

添付資料 8 漂流物衝突荷重算定における総トン数19トン船舶の代表性確認

添付資料 9 漂流物衝突荷重の載荷方法

添付資料 10 剛壁配置による衝突荷重への影響確認

添付資料 11 衝突荷重の非対称性に関する確認

添付資料 12 衝突解析による荷重評価の保守性

添付資料 13 FRP製船舶に対する各算定方法による衝突荷重の整理

添付資料 14 FRP製船舶における衝突荷重の算定に関する先行サイトとの比較

添付資料 15 枕木による衝突荷重の算定における設計上の配慮及び算定結果

4.5.1 衝突荷重を考慮する施設・設備の選定

津波防護施設、浸水防止設備、津波監視設備及びその他のうち、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備については、各施設・設備の設置位置を踏まえて、防波壁及び防波壁通路防波扉に加え、屋外排水路逆止弁及び漂流防止装置を選定した。

津波防護施設、浸水防止設備、津波監視設備及びその他として考慮する漂流防止装置の平面位置図を図4.5.1-1に、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定フローを図4.5.1-2に、選定結果を表4.5.1-1に、選定された施設・設備の設置概念図を図4.5.1-3に示す。表4.5.1-1より、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備として、津波防護施設が対象となる。

なお、漂流防止装置は、日本海東縁部に想定される地震による津波来襲時、船舶（燃料等輸送船）を緊急退避させるため、漂流防止機能に期待しないことから、漂流物の衝突荷重を考慮しないこととする。また、漂流防止装置は、海域活断層から想定される地震による津波の入力津波高さより高い箇所に位置することから、海域活断層の津波による漂流物の衝突荷重を考慮しないこととする。

津波防護施設における、漂流物による衝突荷重を考慮した津波時の検討フローを図4.5.1-4に示す。

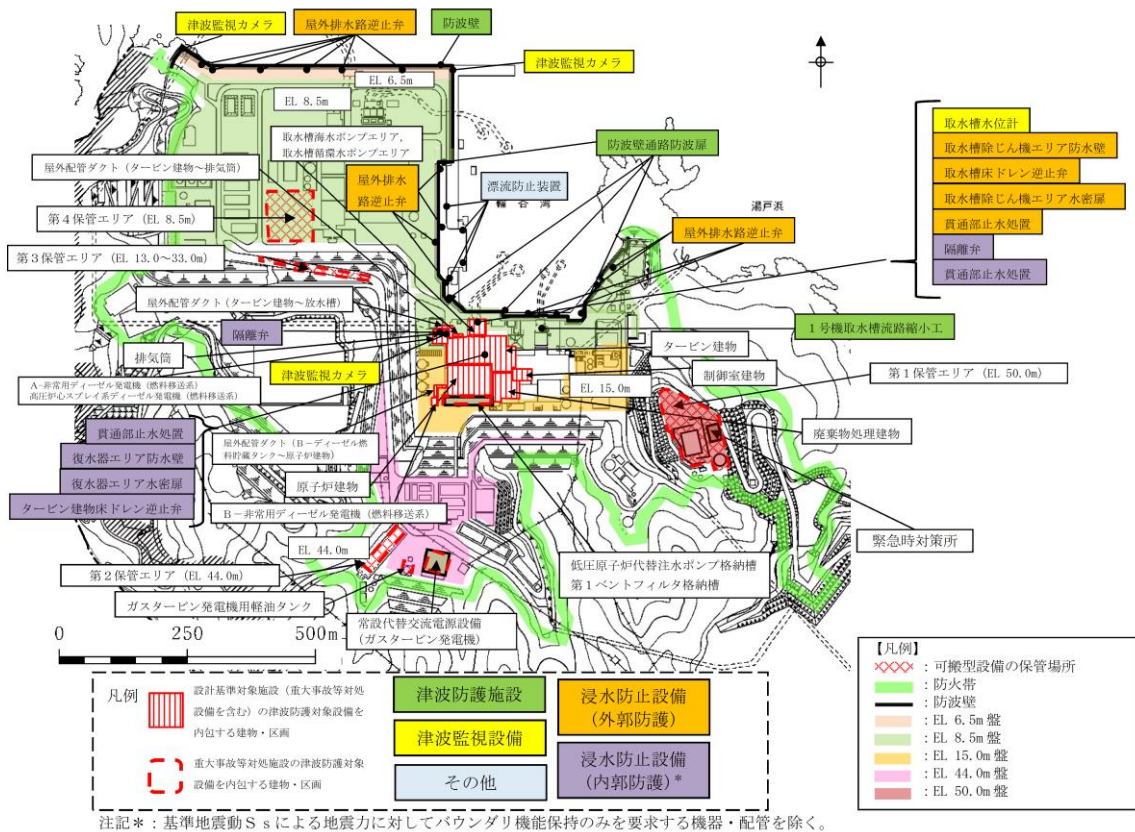


図 4.5.1-1 津波防護施設、浸水防止設備、津波監視設備及びその他の平面位置図

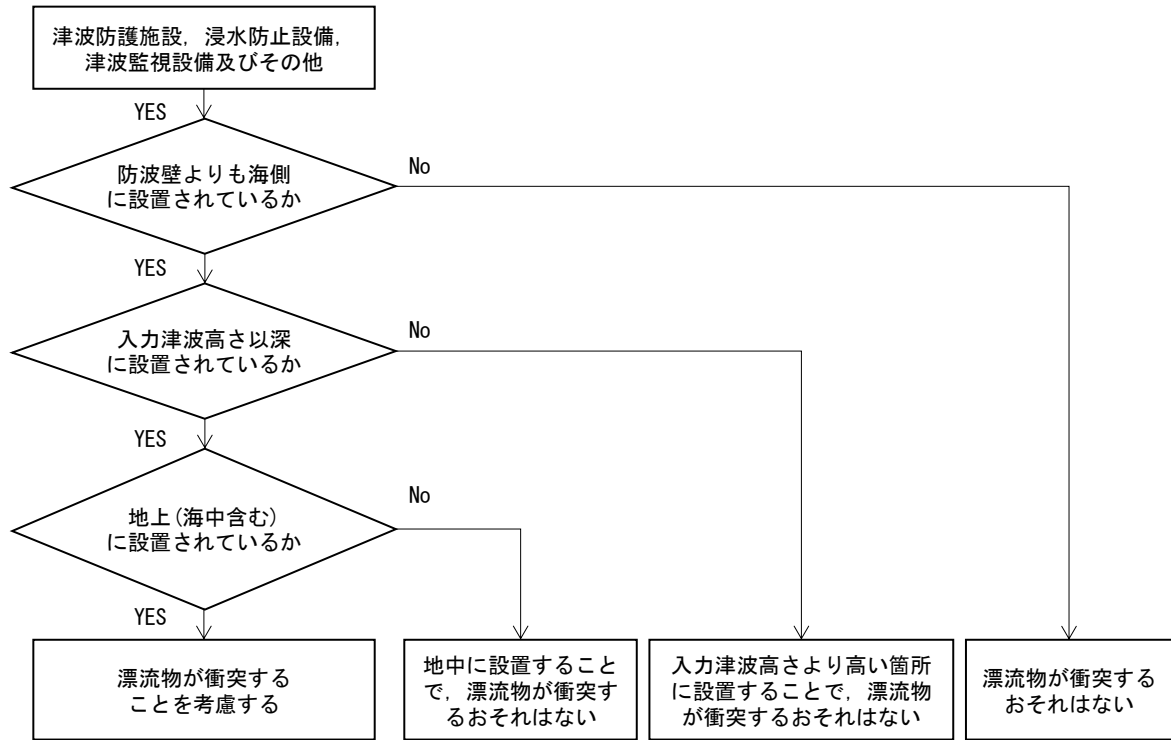


図 4.5.1-2 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定フロー

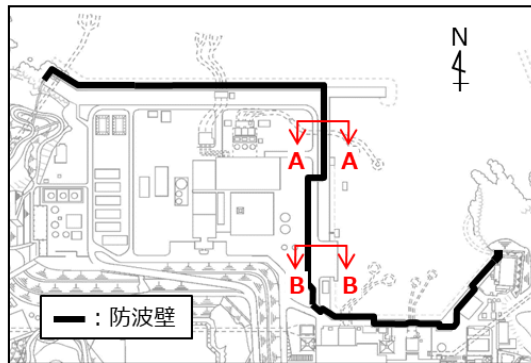
表 4.5.1-1 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定結果

施設・設備		防波壁よりも海側に設置されているか	入力津波高さ 以深に設置 されているか		地上(海中含む)に設置されているか	評価 (衝突荷重の 考慮)	
津波防護施設	防波壁(波返重力擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以深		考慮する	
	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以深		考慮する	
	防波壁(逆T擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高 EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以上		考慮しない	
	防波壁通路防波扉 (荷揚場南, 3号機東側)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高 EL 15.0m)	考慮しない*	
		海域活断層	以上	考慮しない			
防波壁通路防波扉 (1号機北側, 2号機北側)	—	日本海東縁	以深	地上 (上端標高 EL 11.7m)	考慮する*2		
		海域活断層	以上		考慮しない		
1号機取水槽流路縮小工		敷地側				考慮しない	
浸水防止設備	屋外排水路逆止弁		海側	日本海東縁	以深	地中	考慮しない
				海域活断層	以深		考慮しない
			敷地側				考慮しない
	取水槽	防水壁	敷地側				考慮しない
		水密扉	敷地側				考慮しない
		床ドレン逆止弁	敷地側				考慮しない
		貫通部止水処置	敷地側				考慮しない
		隔離弁, ポンプ 及び配管	敷地側				考慮しない
	タービン建物他	防水壁	敷地側				考慮しない
		水密扉	敷地側				考慮しない
		床ドレン逆止弁	敷地側				考慮しない
		貫通部止水処置	敷地側				考慮しない
		隔離弁, 配管	敷地側				考慮しない
	放水槽	貫通部止水処置	敷地側				考慮しない
	津波監視設備	津波監視カメラ		敷地側			考慮しない
取水槽水位計		敷地側			考慮しない		

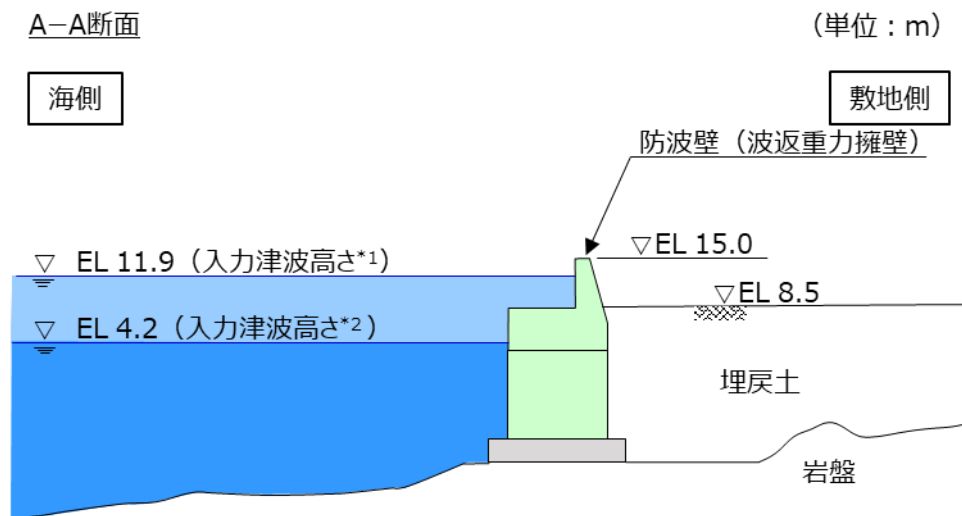
注記*1: 防波壁通路防波扉(荷揚場南, 3号機東側)においては, 漂流物の衝突を防止するため, 防波壁通路防波扉の前面に漂流物対策工を設置することから, 漂流物による衝突荷重を考慮しない。なお, 漂流物対策工は漂流物衝突荷重を考慮する。

*2: 防波壁通路防波扉(1号機北側, 2号機北側)は, 防波壁の壁面(海側)より奥まった狭隘な場所に設置するため, 船舶は衝突しない。枕木による漂流物衝突荷重を考慮する。

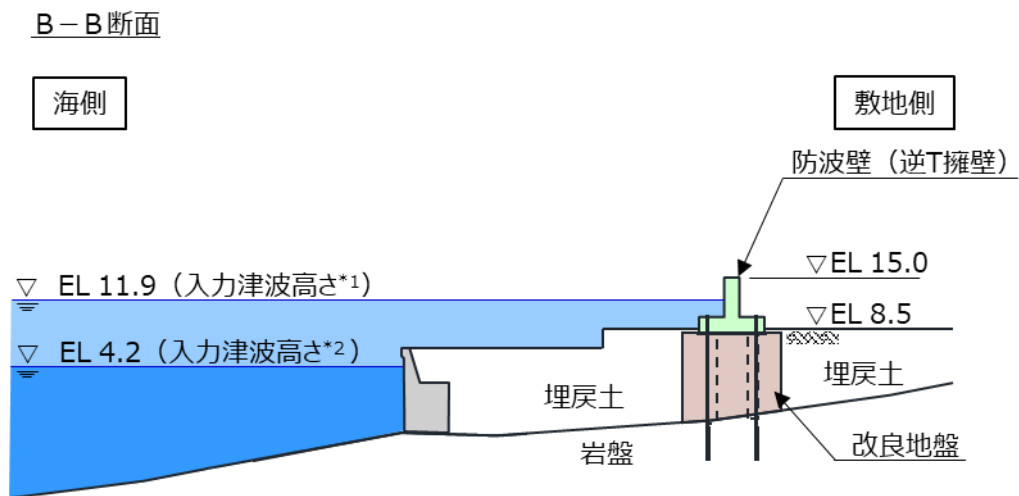
KEY-PLAN



【防波壁（波返重力擁壁）】



【防波壁（逆T擁壁）】

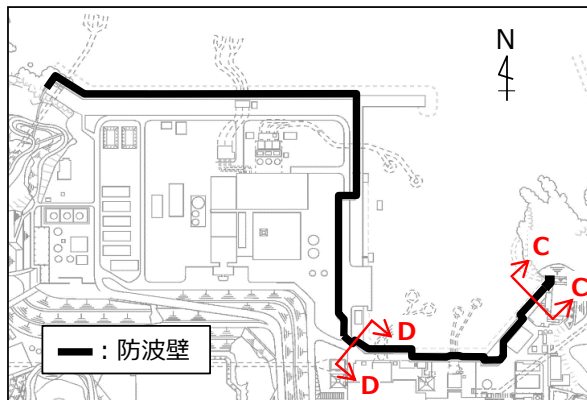


注記*1：日本海東縁部に想定される地震による津波
*2：海域活断層から想定される地震による津波

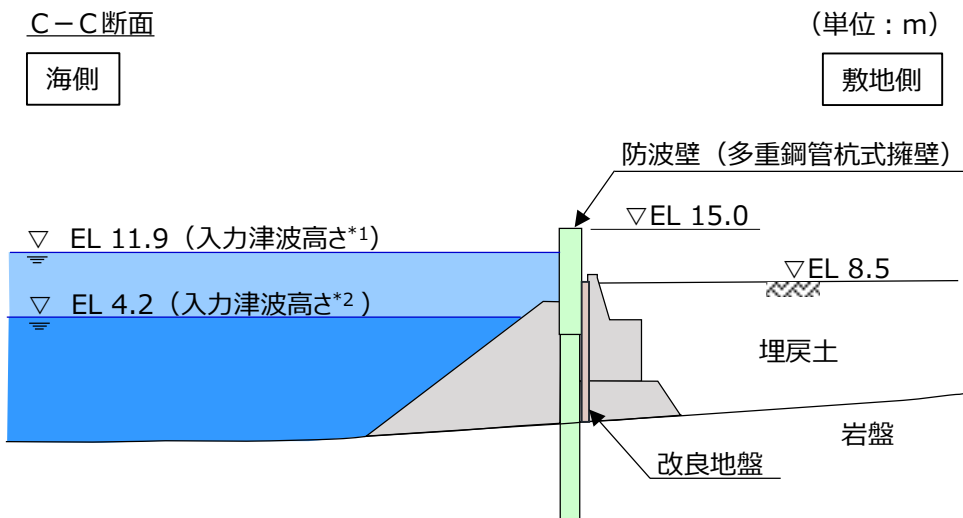
■：施設

図 4.5.1-3(1) 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の設置概念図

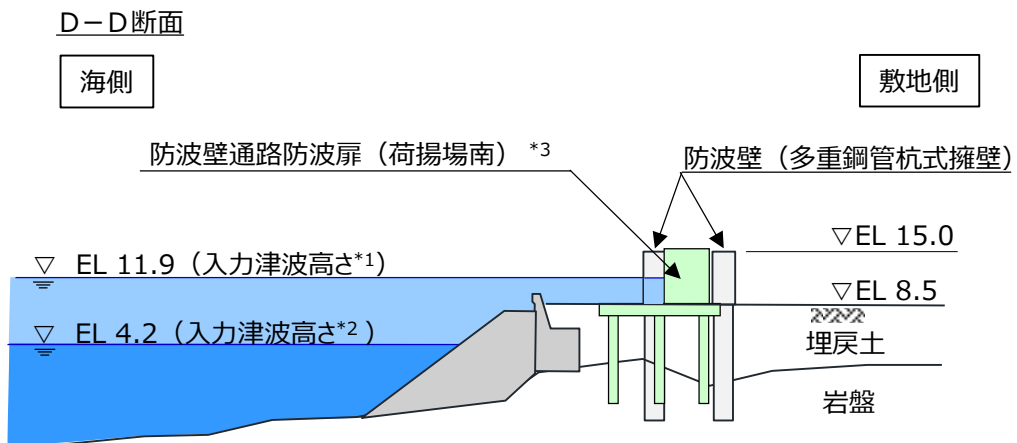
KEY-PLAN



【防波壁（多重鋼管杭式擁壁）】



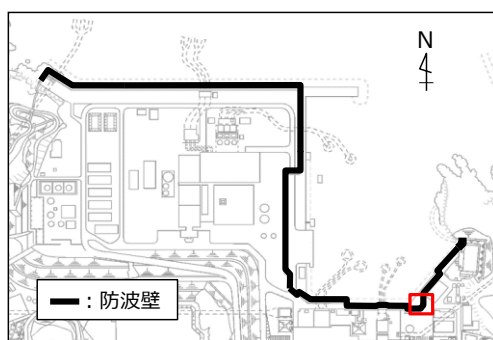
【防波壁通路防波扉（荷揚場南）】



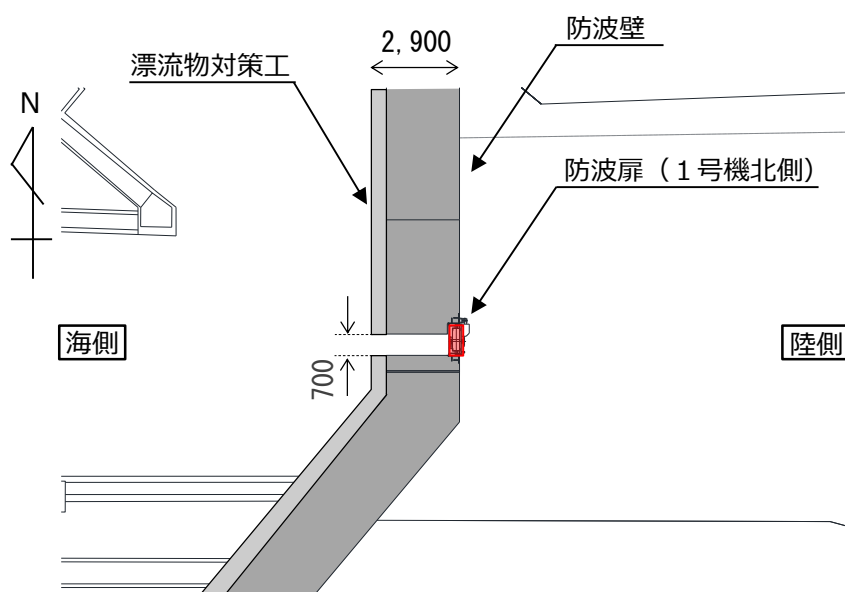
- 注記 * 1 : 日本海東縁部に想定される地震による津波
- * 2 : 海域活断層から想定される地震による津波
- * 3 : 防波壁通路防波扉においては、漂流物の衝突を防止するため、防波壁通路防波扉の前面に漂流物対策工を設置することから、漂流物による衝突荷重を考慮しない。
- : 施設及び設備

図 4.5.1-3(2) 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の設置概念図

KEY-PLAN

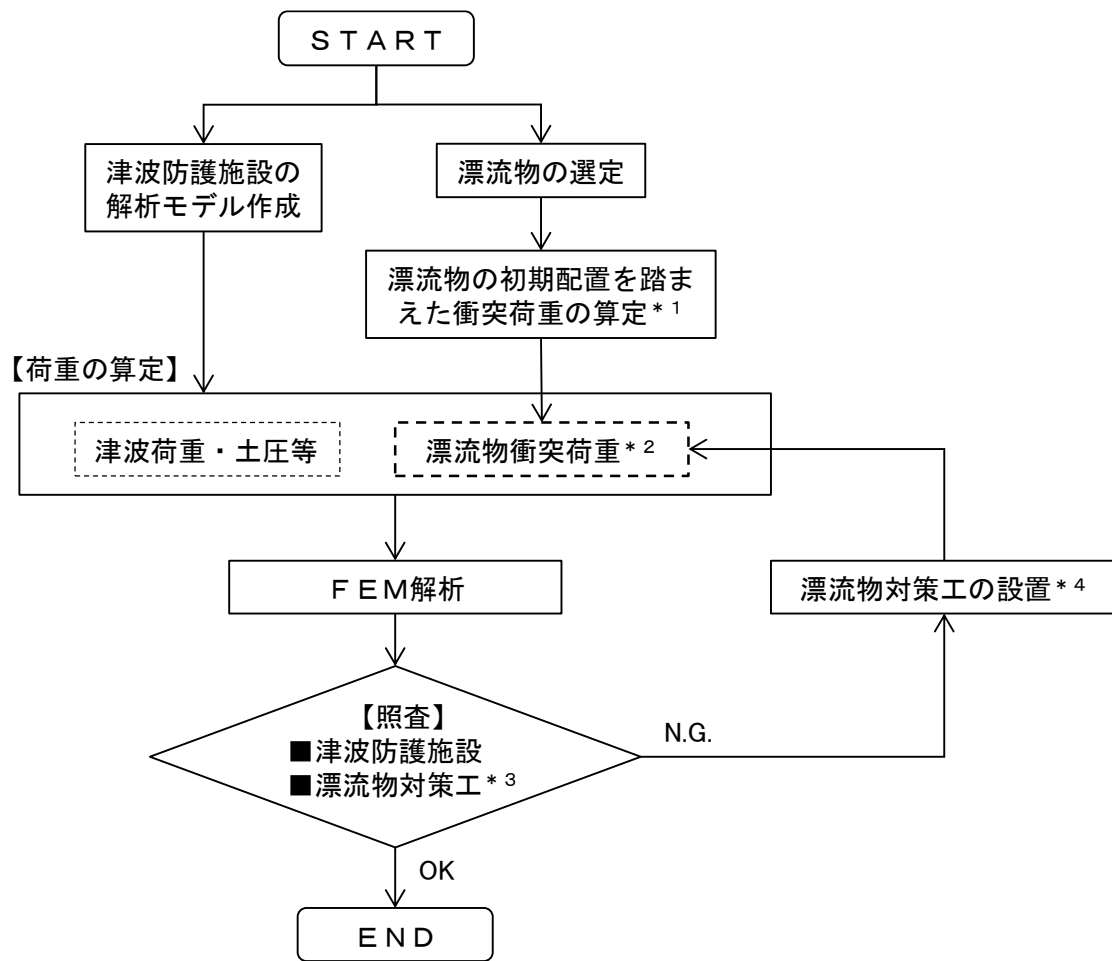


【防波壁通路防波扉（1号機北側）位置図（平面図）】



注：防波扉（1号機北側，2号機北側）は，防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置するため，船舶は衝突しない。枕木による漂流物衝突荷重を考慮する。

図 4.5.1-3(3) 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の設置概念図



- 注記*1：漂流物衝突荷重の算定方法の選定は図4.5.4-1を参照
 *2：漂流物対策工を設置する場合，漂流物対策工による荷重分散を考慮
 *3：漂流物対策工を設置する場合，漂流物対策工の照査を実施
 *4：漂流物対策工の仕様設定及びモデル作成

図 4.5.1-4 津波防護施設における津波時の検討フロー

4.5.2 津波に関するサイト特性

(1) 発電所周辺地形の把握

島根原子力発電所は、島根半島の中央部で日本海に面した位置に立地している。島根原子力発電所の周辺は、東西及び南側を標高 150m 程度の高さの山に囲まれており、発電所東西の海沿いには漁港がある。島根原子力発電所の周辺地形について、図 4.5.2-1 に示す。



図 4.5.2-1 発電所周辺の地形

(2) 敷地及び敷地周辺に来襲する津波の特性（流速及び水位）の把握

敷地及び敷地周辺に来襲する津波の特性については、「4.1 設計に用いる遡上波の流速」及び「4.2.1.1 b. 敷地及び敷地周辺に来襲する津波の特性の把握」に示すとおりである。

これらの特性のうち漂流物による衝突荷重の算定及び作用位置の設定に用いる内容を以下に示す。

a. 漂流物による衝突荷重の算定に用いる流速

(a) 日本海東縁部に想定される地震による津波の最大流速

日本海東縁部に想定される地震による津波における最大流速は、基準津波 1（防波堤有り）により 9.3m/s が抽出されたことから、安全側に 10.0m/s を衝突荷重の算定に用いる漂流物の衝突速度として設定する。9.3m/s を抽出した基準津波 1（防波堤有り）の全方向最大流速分布及び評価地点を図 4.5.2-2 に示す。

(b) 海域活断層から想定される地震による津波の最大流速

海域活断層から想定される地震による津波における最大流速は、基準津波 4（防波堤無し）により 5.8m/s が抽出されたことから、安全側に 6.0m/s を衝突荷重の算定に用いる漂流速度として設定する。5.8m/s を抽出した基準津波 4（防波堤無し）の全方向最大流速分布及び評価地点を図 4.5.2-3 に示す。

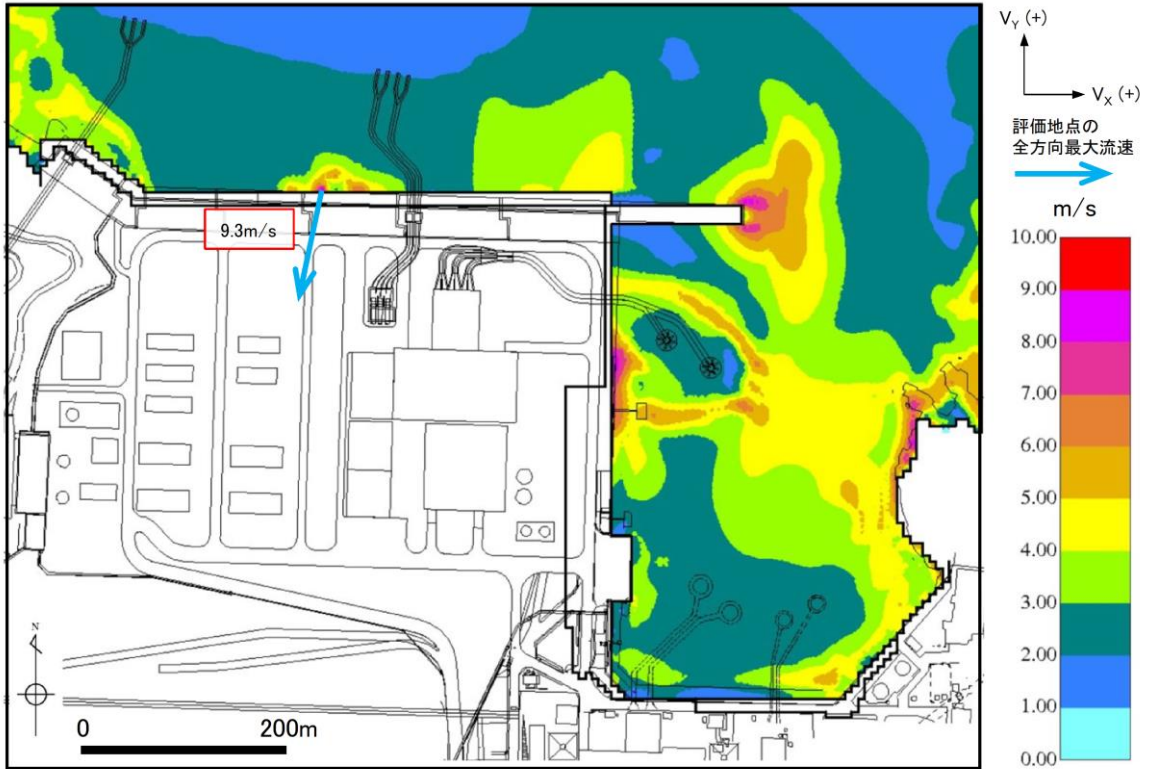


図 4.5.2-2 基準津波 1 (防波堤有り, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

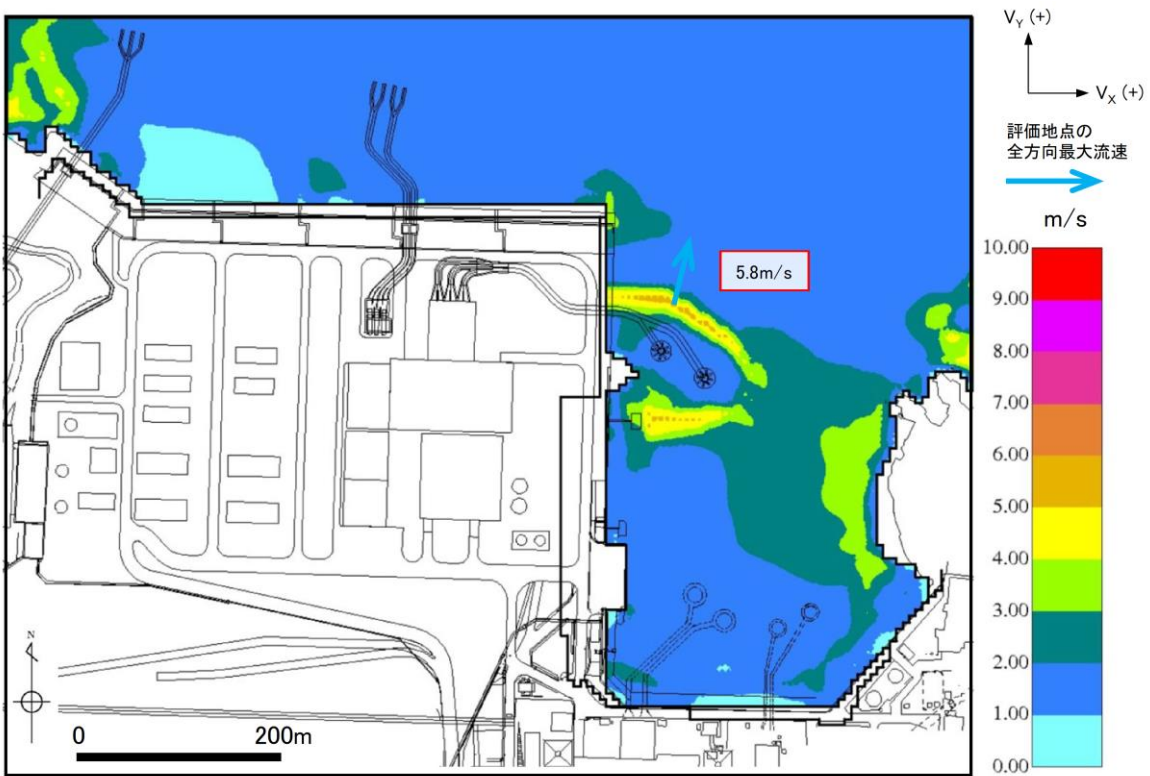


図 4.5.2-3 基準津波 4 (防波堤無し, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

(c) 荷揚場周辺に遡上した津波による流速の扱い

「(a) 日本海東縁部に想定される地震による津波の最大流速」及び「(b) 海域活断層から想定される地震による津波の最大流速」は、地震による地盤沈下を考慮しない条件において発電所近傍の海域で最大流速を抽出したものである。一方、荷揚場周辺の浸水範囲を安全側に評価するため、地震による地盤沈下として防波壁前面を1m沈下させた条件では、10m/sを超える流速(11.9m/s)が抽出されたことから、その発生要因及び特性について分析を行った。

防波壁前面の沈下範囲を図4.5.2-4に、沈下範囲における最大浸水深分布を図4.5.2-5に、沈下範囲における最大流速分布を図4.5.2-6に、最大流速発生時の水位変動、流向ベクトル及び浸水深を図4.5.2-7及び図4.5.2-8に示す。最大流速が抽出された箇所は、荷揚場の隅角部から津波が遡上する地点であり、波が隅角部に集中して水位が上昇した後、荷揚場へ押し波として遡上したことにより、西方向に卓越した大きな流速(11.9m/s)が局所的に生じたものとする。

この押し波による最大浸水深は1.7mであり、その水位はEL 6.7mであることから、地震による地盤沈下を考慮した敷地高さ(EL 7.5m)に到達しない(図4.5.2-9)ことを確認している。

以上の分析結果より、荷揚場周辺における最大流速(11.9m/s)が抽出された押し波は、敷地高さ(EL 7.5m)に到達しないことを確認したことから、衝突荷重を考慮する施設・設備への漂流速度として適用しないが、荷揚場周辺における施設・設備等が滑動する可能性を検討するうえで用いる流速として適用する。

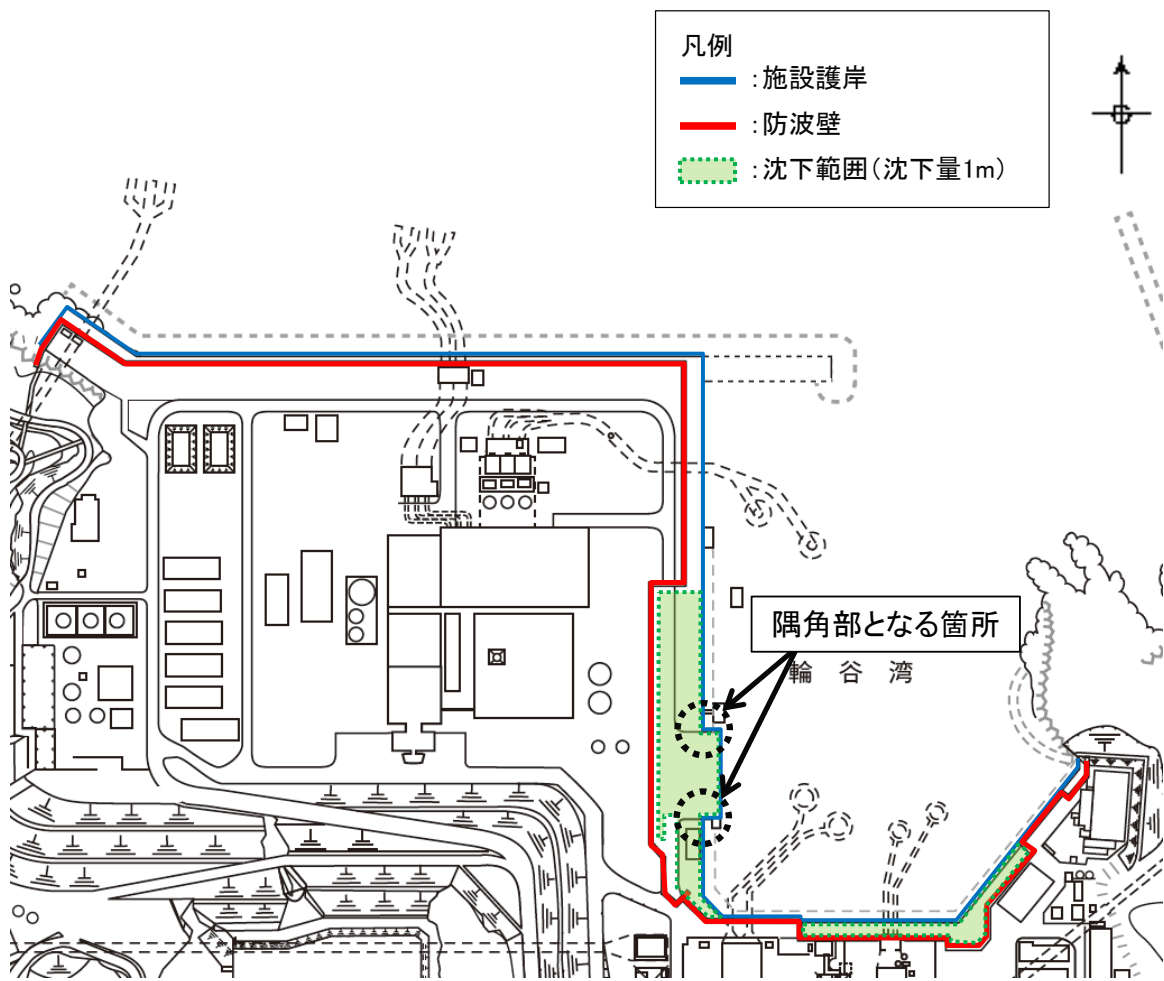


図 4.5.2-4 防波壁前面の沈下範囲

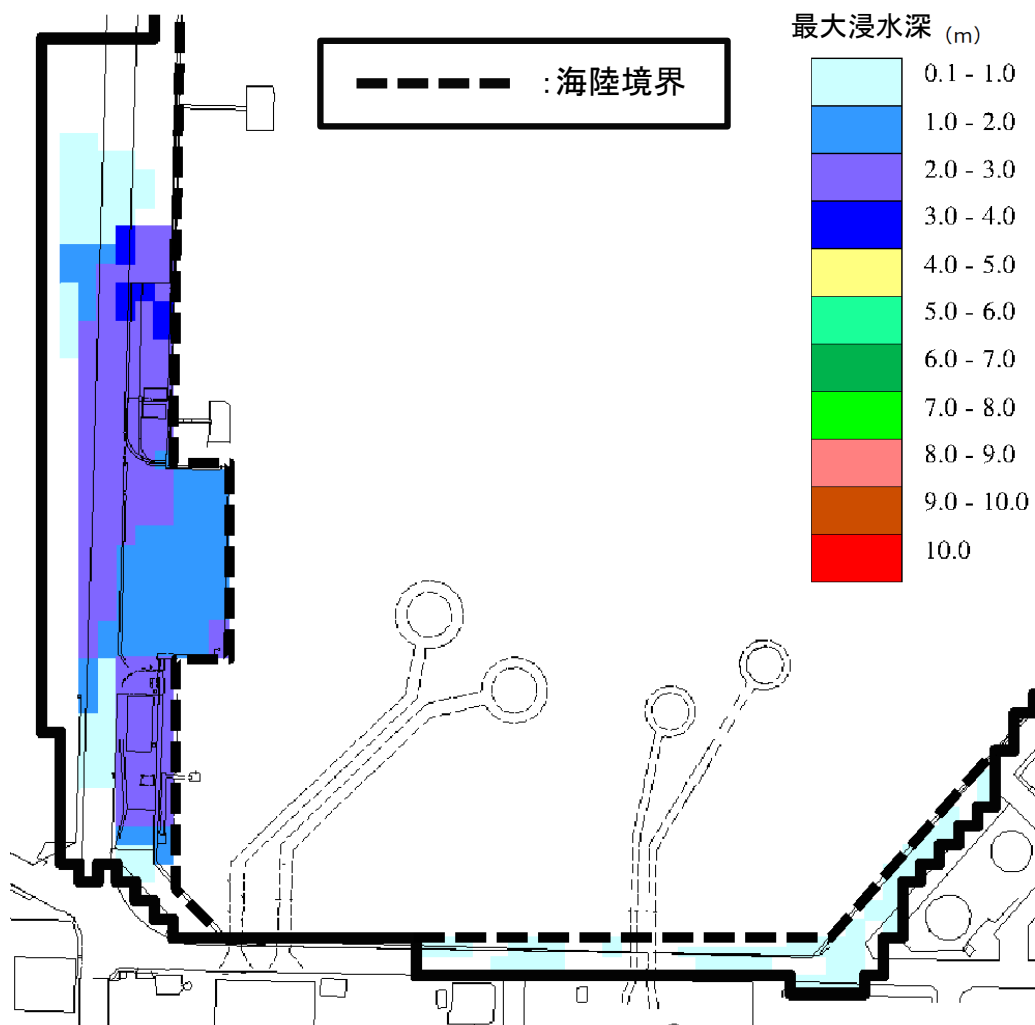


図 4.5.2-5 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による沈下範囲の最大浸水深分布

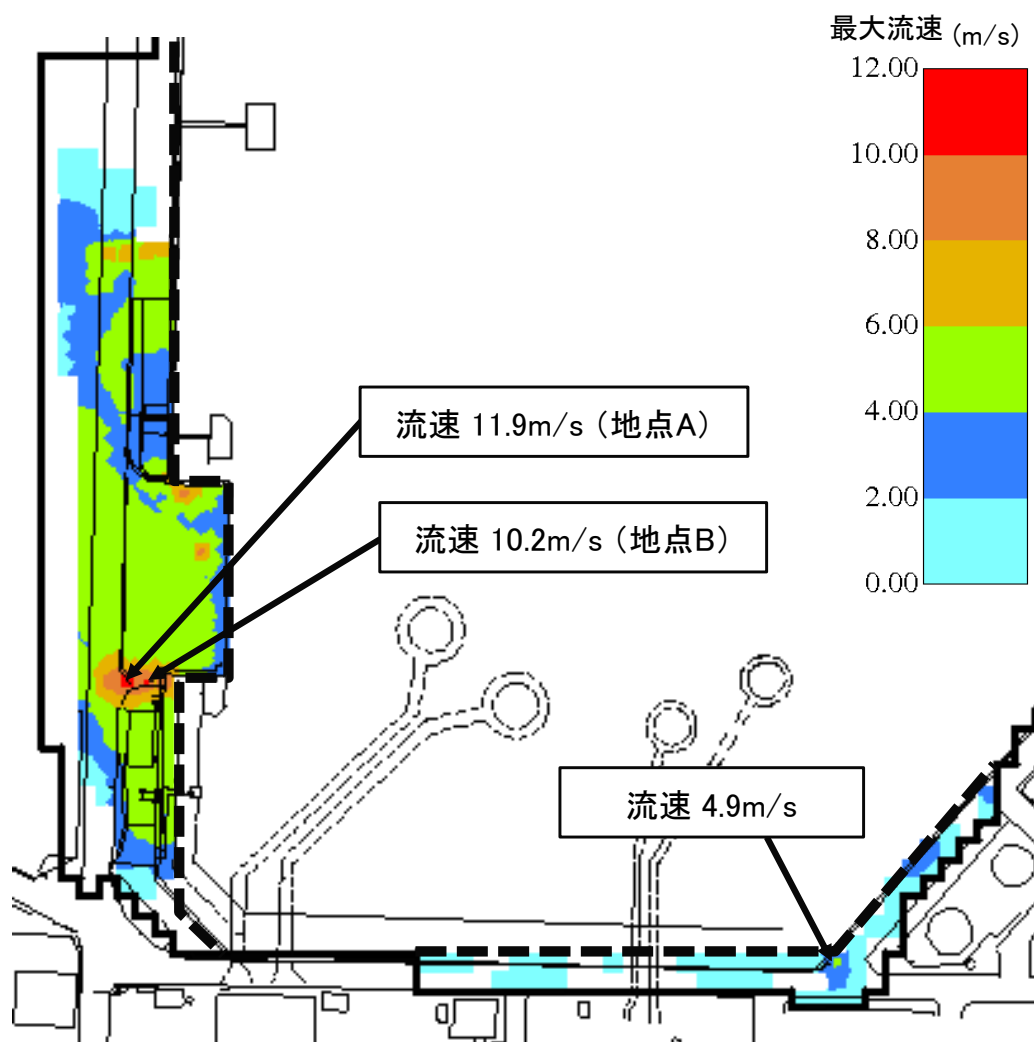


図 4.5.2-6 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による沈下範囲の最大流速分布

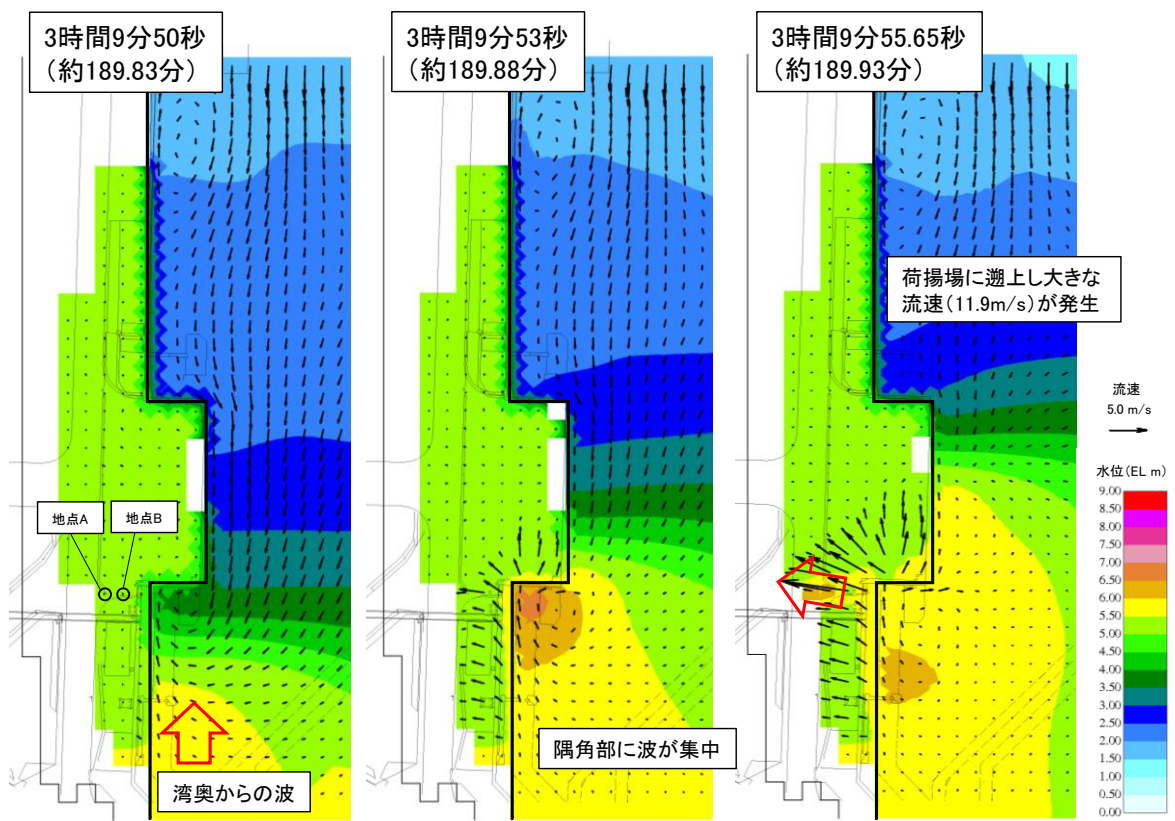


図 4.5.2-7 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による荷揚場周辺の水位変動及び流向ベクトル

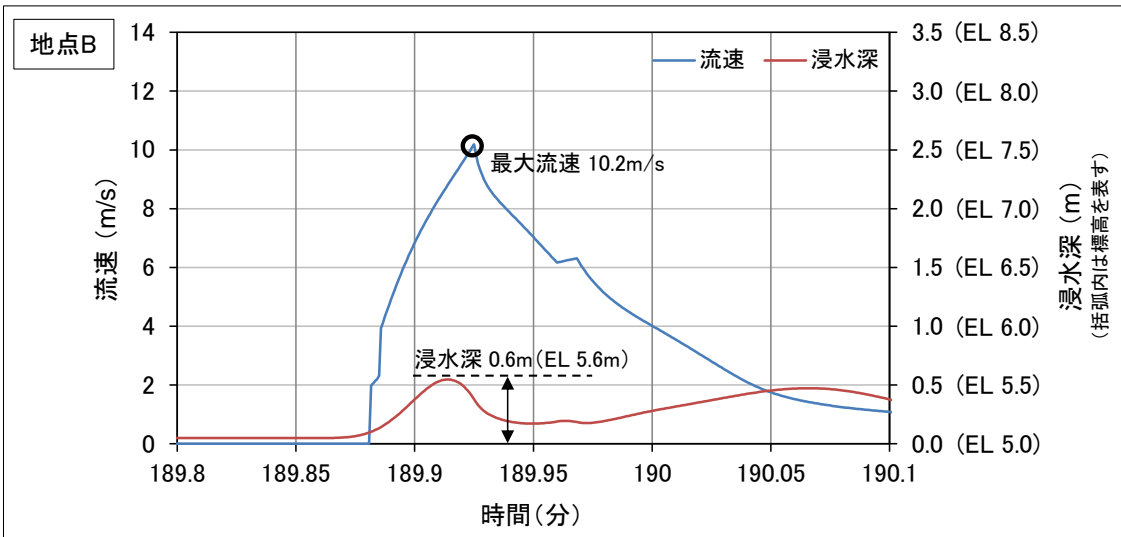
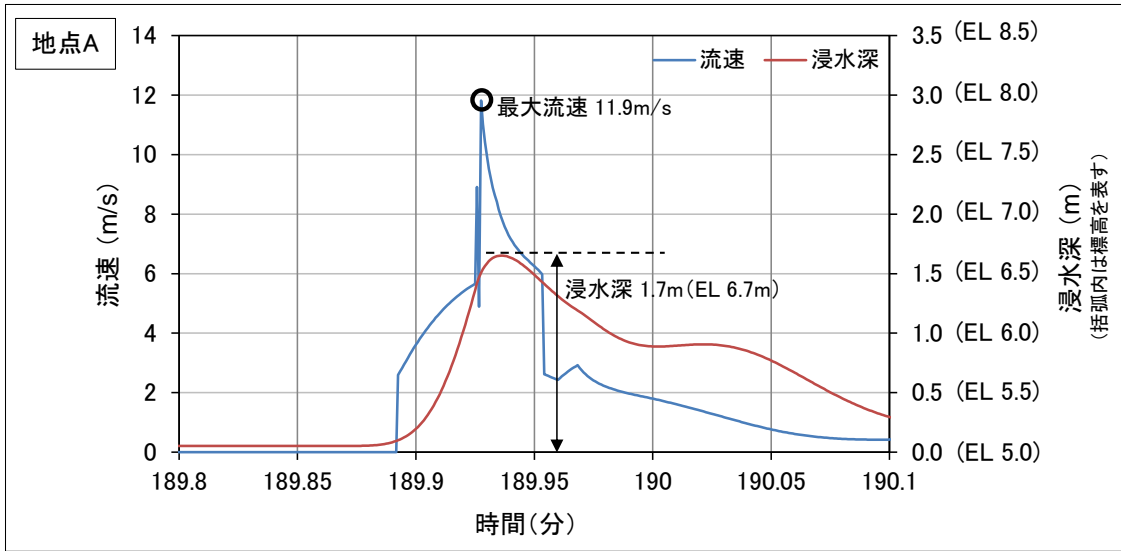
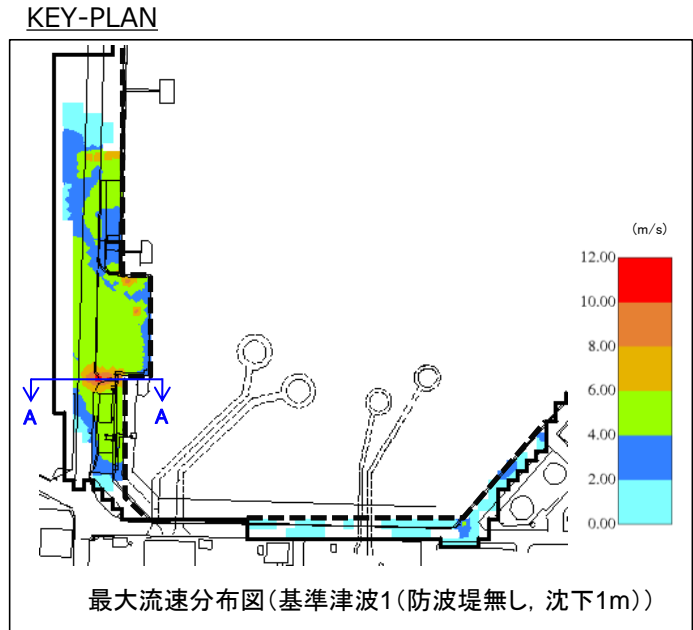
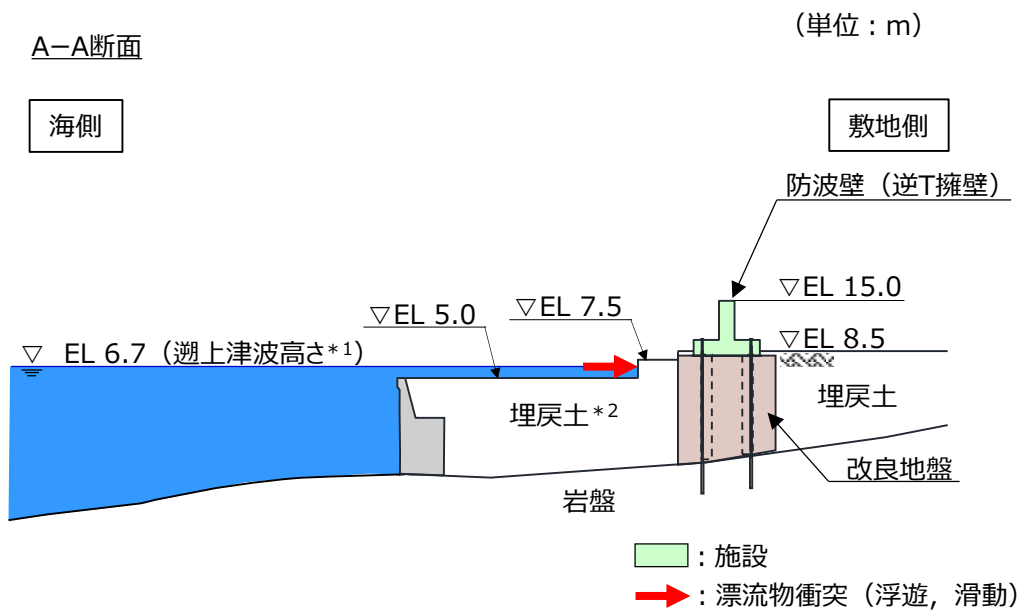


図 4.5.2-8 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による地点 A 及び
地点 B における流速及び浸水深の時刻歴波形



【防波壁（逆T擁壁）】



注記 *1 : 荷揚場周辺の最大流速発生時における津波高さ
 *2 : 地震による地盤沈下 (1m) を考慮した高さ

図 4.5.2-9 直近陸域（荷揚場周辺）の地盤沈下を考慮した敷地形状と津波高さの概念図

b. 漂流物による衝突荷重の作用位置の設定に用いる水位

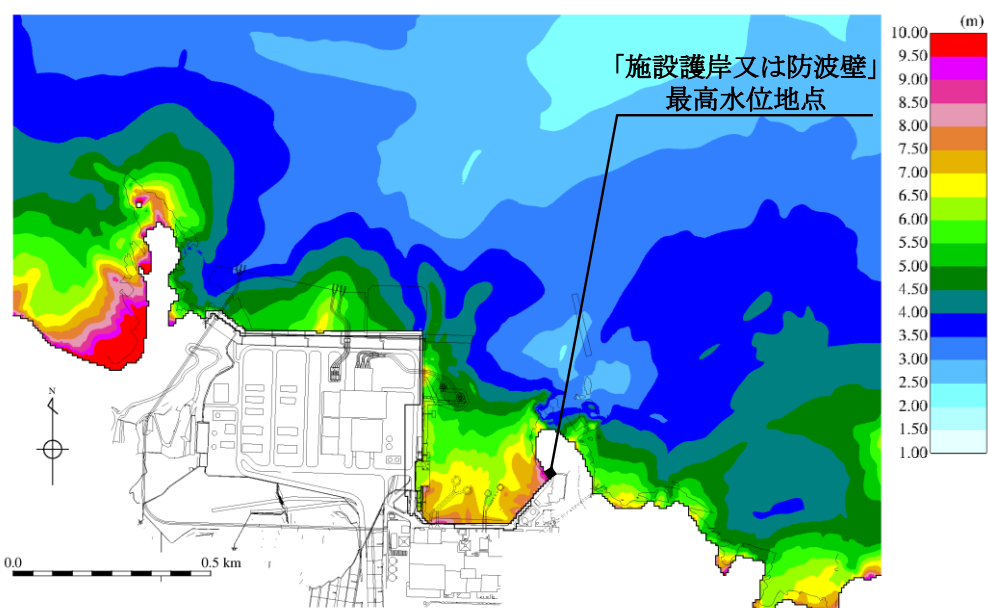
以下に示す最高水位に高潮ハザードを考慮した参照する裕度（0.64m）を加えた津波高さを考慮する。

(a) 日本海東縁部に想定される地震による津波の水位

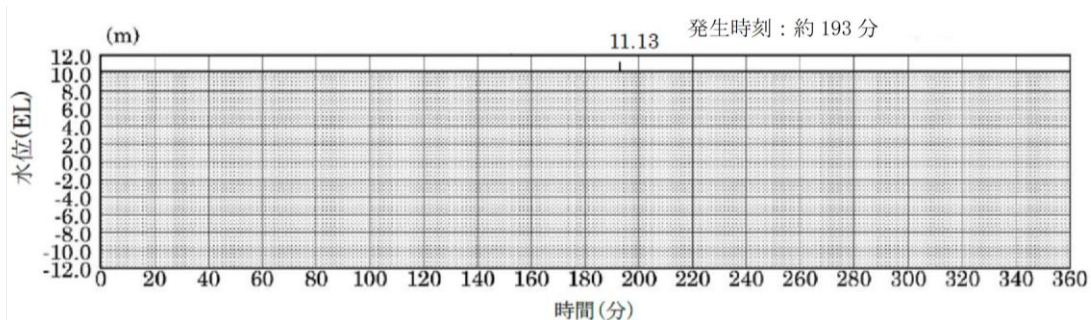
水位上昇側の最高水位は、基準津波 1（防波堤無し）の EL 11.9m（発生時刻：約 193 分，潮位 0.58m 及び潮位のばらつき+0.14m を考慮）であり，高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた EL 12.6m とする。遡上域における基準津波 1（防波堤無し）の時刻歴波形を図 4.5.2-10 に示す。

(b) 海域活断層から想定される地震による津波の水位

水位上昇側の最高水位は、海域活断層上昇側最大ケース（防波堤有り）の EL 4.2m（発生時刻：約 6 分 30 秒，潮位 0.58m 及び潮位のばらつき+0.14m を考慮）であり，高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた EL 4.9m とする。遡上域における海域活断層上昇側最大ケース（防波堤有り）の時刻歴波形を図 4.5.2-11 に示す。なお，荷揚場（EL 6.0m）については，地震による地盤沈下（1m）を考慮しても，海域活断層から想定される地震による津波は遡上しない。



最大水位上昇量分布図
(基準津波1, 防波堤無し)

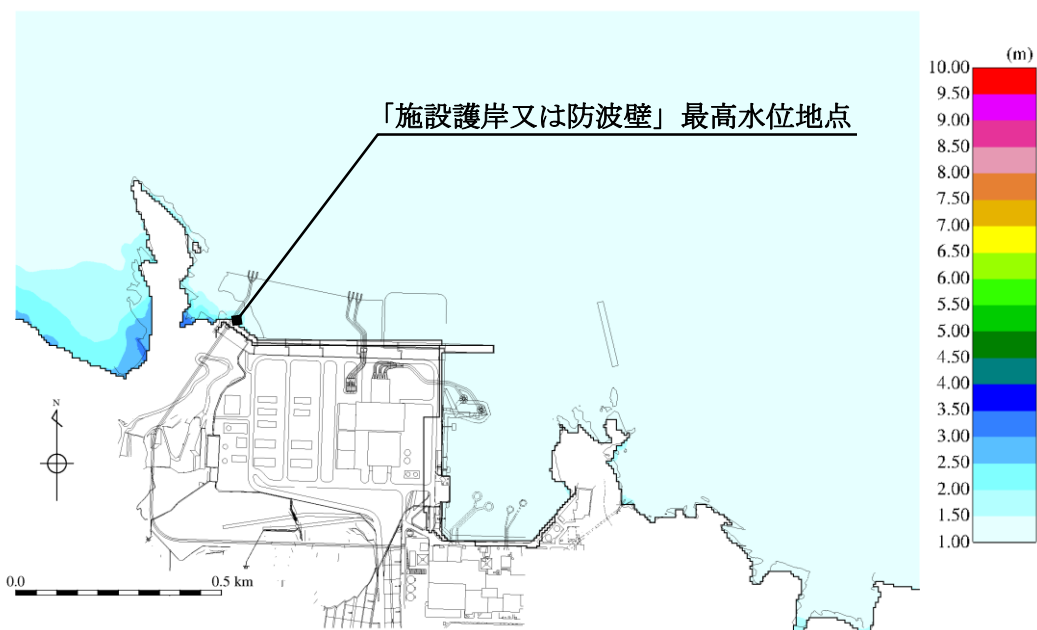


最大水位上昇量 11.13m + 朔望平均満潮位 0.58m + 潮位のばらつき 0.14m \div EL 11.9m

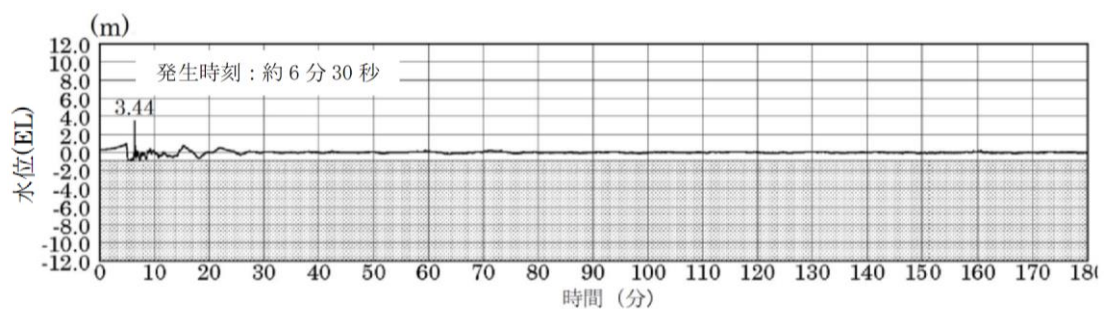
施設護岸又は防波壁 (基準津波1, 防波堤無し)

注: 灰色の網掛けは最高水位地点の標高以下の範囲を示す。

図 4.5.2-10 遡上域における時刻歴波形 (基準津波1, 防波堤無し)



最大水位上昇量分布図
(海域活断層上昇側最大ケース，防波堤有り)



最大水位上昇量 3.44m + 朔望平均満潮位 0.58m + 潮位のばらつき 0.14m = EL 4.2m
施設護岸又は防波壁 (海域活断層上昇側最大ケース，防波堤有り)

注：灰色の網掛けは最高水位地点の標高以下の範囲を示す。

図 4.5.2-11 遡上域における時刻歴波形 (海域活断層上昇側最大ケース，防波堤有り)

4.5.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定

「4.2 漂流物による影響確認」における、漂流（浮遊）して施設護岸又は輪谷湾に到達する可能性があると評価した漂流物及び発電所構内陸域（荷揚場周辺）で滑動する漂流物の配置場所を表 4.5.3-1 に整理した上で、衝突荷重として考慮する漂流物を選定した。

なお、防波壁より海側の敷地はアスファルト又はコンクリートで地表面を舗装されている。防波壁より海側の敷地のアスファルト舗装が津波により洗掘されることによる骨材が、非常に寸法の小さな漂流物として懸念されるが、津波解析よりアスファルトの洗掘の可能性がある流速 8m/s を超える地点付近はコンクリート舗装等の対策工を実施することから、アスファルト舗装又はコンクリート舗装は洗掘されず、非常に小さな寸法の漂流物は選定しない。

表 4.5.3-1 施設護岸又は輪谷湾に到達する可能性があると評価した漂流物及び発電所構内陸域（荷揚場周辺）で滑動する漂流物

調査対象		漂流物	重量等	考慮する津波*1	到達形態
発電所 構内	海 域	作業船	総トン数：約 10 トン	海域	浮遊
		漁船	総トン数：約 0.7 トン	東縁，海域	浮遊
	陸 域	荷揚場詰所 (壁材 (ALC版))	— (がれき化して漂流)	東縁	浮遊
		デリッククレーン試験用 ウエイト	約 22t	東縁	滑動
		変圧器・ポンプ制御盤	約 0.1t	東縁	滑動
		防舷材	約 1t	東縁	浮遊
		エアコン室外機	約 0.2t	東縁	滑動
		枕木	約 12kg	東縁	浮遊
発電所 構外	海 域	漁船 (500m 以内 (操業))	総トン数：3 トン未満	東縁，海域	浮遊
		漁船 (500m 以遠 (操業)) *2	総トン数：約 19 トン*3	東縁，海域	浮遊

注記*1：「東縁」は日本海東縁部に想定される地震による津波，「海域」は海域活断層から想定される地震による津波を表す。

*2：4.2 の漂流物評価において施設護岸又は輪谷湾に到達しないと評価しているが，発電所周辺漁港の漁船であることから抽出。

*3：施設護岸から 500m 付近で操業するイカ釣り漁船（総トン数：10 トン）を含む。

(1) 漂流物を考慮する範囲

漂流物による衝突荷重の設定においては、漂流物の配置場所が重要な要因となるため、表 4.5.3-1 に示す漂流物について、配置場所の区分を行った。

日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波 1）の流向・流速の分析の結果、3号北側防波壁から約 50m 以内の水深が約 20m の浅い位置で 5m/s 以上の速い流速が確認されたことから、安全側に施設護岸から 500m 以内にあ

る漂流物は津波の第一波により漂流し、施設護岸又は輪谷湾に到達する可能性があると考え、施設護岸から約 500m 以内の海域を「直近海域」として区分する。また、発電所構内陸域（荷揚場周辺）で浮遊する漂流物の配置場所については、施設護岸に到達することから、「直近海域」とする。

施設護岸から 500m 以遠については、日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波 1）の流向・流速の分析の結果、ほとんどの海域において流速は速くて 2m/s 程度であることから、この範囲にある漂流物は津波の第一波により漂流し、施設護岸又は輪谷湾に到達する可能性は低いと考え、この範囲を「前面海域」として区分する。

発電所構内陸域（荷揚場周辺）の滑動する漂流物については、滑動して荷揚場周辺の津波防護施設に到達する可能性があるため、発電所構内陸域（荷揚場周辺）を「直近陸域」として区分する。

配置場所の区分を図 4.5.3-1 に示す。また、表 4.5.3-1 の漂流物の配置場所の区分を整理した結果を表 4.5.3-2 に示す。

なお、発電所周辺における津波来襲時の流況について考察すると、日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波 1）は最大水位・流速を示す時間帯が地震発生後約 180 分～200 分であり、海域活断層から想定される地震による津波（基準津波 4）は、最大水位・流速を示す時間帯が地震発生後約 5 分～7 分である。最大流速は、いずれも施設護岸から 500m 以内の海域で生じていることから、直近海域からの漂流物の影響が大きくなることが考えられる。

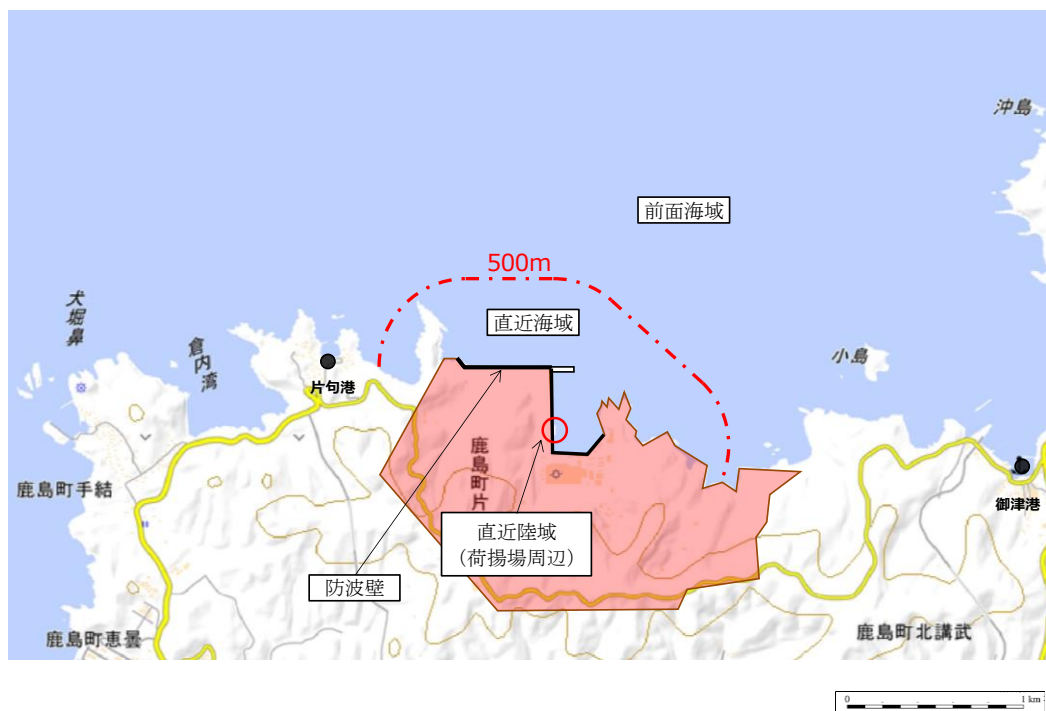


図 4.5.3-1 漂流物を考慮する範囲の区分

表 4.5.3-2 漂流物の配置場所の区分及び到達の有無

調査対象	到達する漂流物	重量等	考慮する津波	到達形態	配置場所	到達の有無	
発電所 構内	海域	作業船	総トン数：約 10 トン	海域	浮遊	直近海域	○
		漁船	総トン数：約 0.7 トン	東縁 海域	浮遊	直近海域	○
	陸域	荷揚場詰所 (壁材 (ALC 版))	— (がれき化して漂流)	東縁	浮遊	直近海域	○
		デリッククレーン 試験用ウエイト	約 22t	東縁	滑動	直近陸域	×
		変圧器・ポンプ 制御盤	約 0.1t	東縁	滑動	直近陸域	×
		防舷材	約 1t	東縁	浮遊	直近海域	○
		エアコン室外機	約 0.2t	東縁	滑動	直近陸域	×
枕木	約 12kg	東縁	浮遊	直近海域	○		
発電所 構外	海域	漁船 (500m 以内 (操業))	総トン数：約 3 トン未満	東縁 海域	浮遊	直近海域	○
		漁船 (500m 以遠 (操業))	総トン数：約 19 トン	東縁 海域	浮遊	前面海域	○

(2) 敷地形状を踏まえた衝突荷重として考慮する漂流物の選定

漂流物の配置場所の区分及び敷地形状を踏まえ、衝突荷重として津波防護施設に考慮する漂流物の選定を行う。衝突荷重として津波防護施設に考慮する漂流物は、考慮する津波及び配置場所の区分毎に重量又は質量（以下「重量等」という。）、材質及び既往の衝突荷重算定式を用いた衝突荷重を踏まえて選定する。

a. 日本海東縁部に想定される地震による津波に伴う漂流物

表 4.5.3-2 より、津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が直近海域となる漂流物は、漁船（総トン数 0.7 トン、3 トン）、壁材（ALC 版）、防舷材（約 1 t）及び枕木（約 12kg）に加え、漁船の作業区域及び航行の不確かさ（添付資料 1 参照）を考慮して、漁船（総トン数 19 トン）を対象とする。

津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が前面海域となる漂流物は、漁船（総トン数 19 トン）を対象とする。

対象とした漂流物について、その初期配置、重量等及び材質を踏まえ、既往の算定式による衝突荷重を比較した結果、漂流物による衝突荷重が最大となる漁船（総トン数 19 トン）を津波防護施設の評価において考慮する漂流物として選定する（添付資料 2 参照）。

なお、直近陸域において地盤沈下を考慮した場合に局所的に大きな流速（11.9m/s）が抽出されているが、図 4.5.2-9 に示すとおり、津波高さ（EL 6.7m）が敷地高さ（EL 7.5m）に到達しないことから、図 4.5.3-2 に示すデリッククレーン試験用ウエイト等の滑動する漂流物は衝突荷重を考慮する施設・設備に衝突しない。

また、防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置され、船舶が衝突しない場合は、枕木を津波防護施設の評価において考慮する漂流物として選定する（図 4.5.3-3）。

b. 海域活断層に想定される地震による津波に伴う漂流物

表 4.5.3-2 より、津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が直近海域となる漂流物は、作業船（総トン数 10 トン）又は漁船（総トン数 0.7 トン及び 3 トン）に加え、漁船の作業区域及び航行の不確かさ（添付資料 1 参照）を考慮して、総トン数 19 トンの漁船を対象とする。

津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が前面海域となる漂流物は、漁船（総トン数 19 トン）を対象とする。

対象とした漂流物について、その初期配置、重量等及び材質を踏まえ、既往の算定式による衝突荷重を比較した結果、漂流物による衝突荷重が最大となる漁船（総トン数 19 トン）を津波防護施設の評価において考慮する漂流物として選定する（添付資料 2 参照）。

なお、直近陸域における漂流物については、4.5.2 b. (b)に示すとおり、津波が配置場所へ遡上しないため選定しない。

海域活断層から想定される地震による津波による津波高さと防波壁（逆T擁壁）及び防波壁通路防波扉の位置関係を図4.5.3-4に示す。図に示すとおり、防波壁（逆T擁壁）及び防波壁通路防波扉は、地中又はEL 8.5m以上の地上に設置されていることから、海域活断層から想定される地震による津波は到達しない。

以上より、衝突荷重として考慮する漂流物は、直近海域及び前面海域における総トン数19トンの漁船（57t）を選定する。衝突荷重として考慮する漂流物及び施設・設備を表4.5.3-3に示す。

また、防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置され、船舶が衝突しない場合は、枕木を津波防護施設の評価において考慮する漂流物として選定する。衝突荷重として考慮する漂流物（枕木）及び施設・設備を表4.5.3-4に示す。

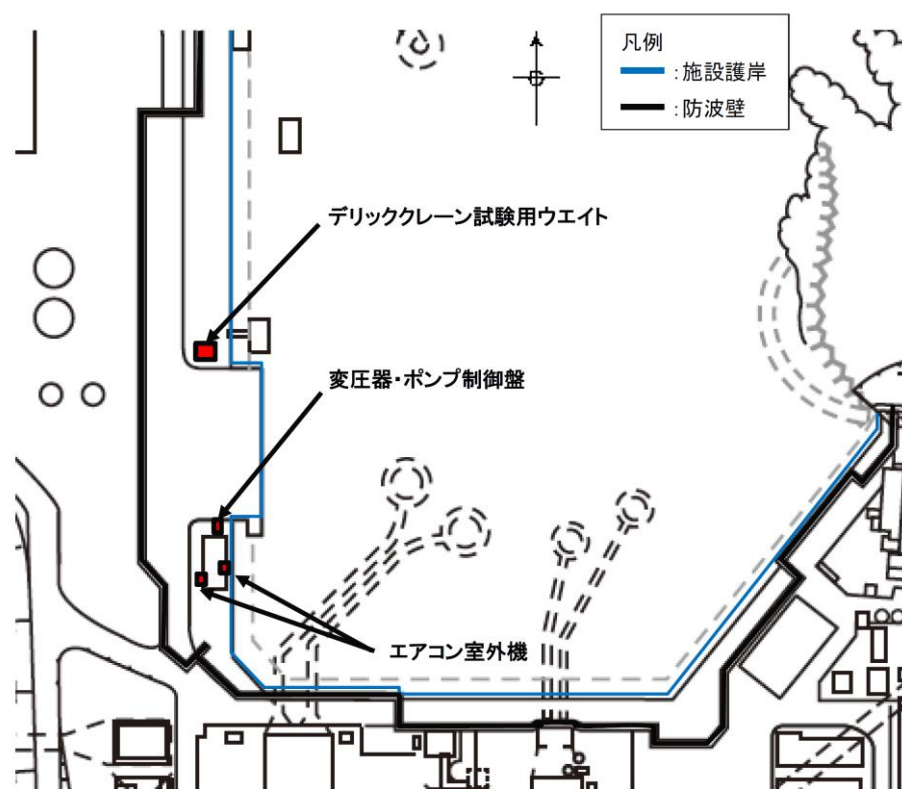
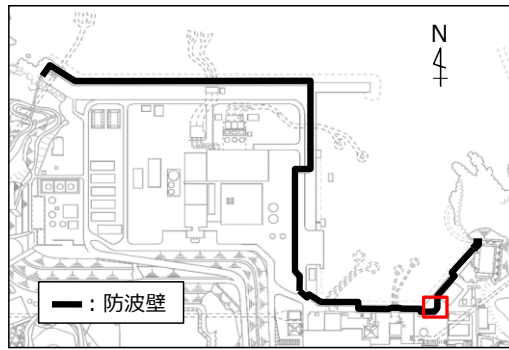
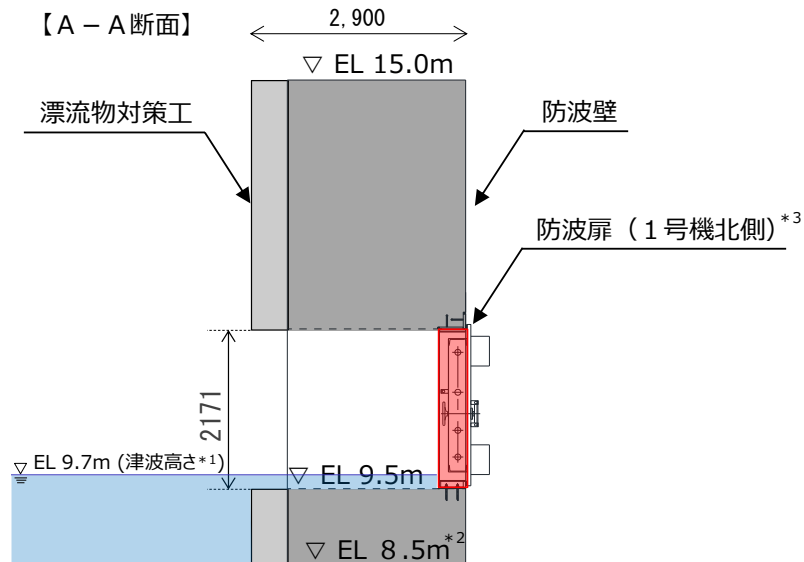
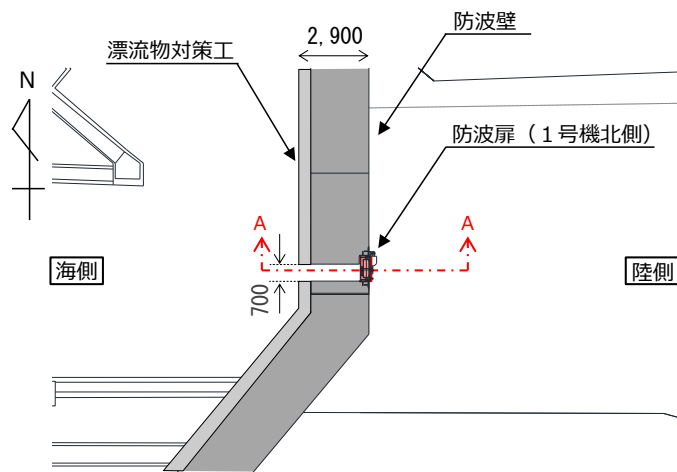


図4.5.3-2 直近陸域における漂流物（滑動）の配置

KEY-PLAN



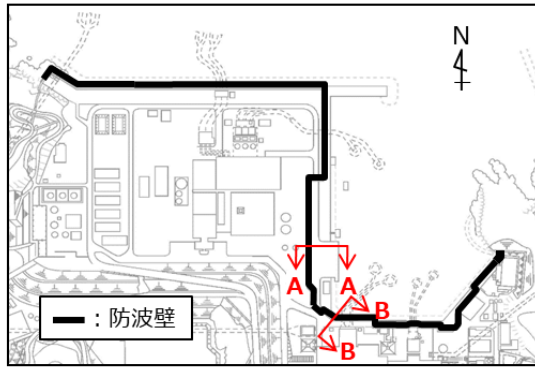
【防波壁通路防波扉（1号機北側）位置図（平面図）】



- 注記 *1 : 防波扉（1号機北側）前面における最高水位に高潮ハザードを考慮した参照する余裕を加えた津波高さ
 *2 : 防波壁前面は海底面まで沈下すると仮定
 *3 : 防波扉（1号機北側，2号機北側）は，防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置するため，船舶は衝突しない。枕木による漂流物衝突荷重を考慮する。

図 4.5.3-3 防波扉（1号機北側）の設置場所及び日本海東縁部に想定される津波による津波高さの概念図

KEY-PLAN



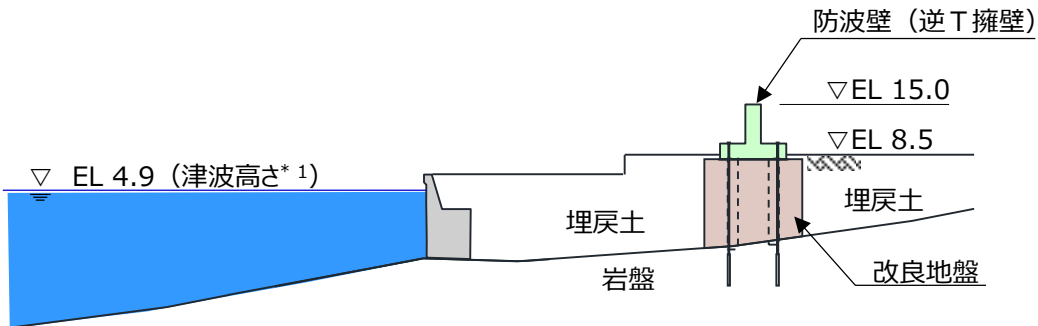
【防波壁（逆T擁壁）】

A-A断面

(単位：m)

海側

敷地側

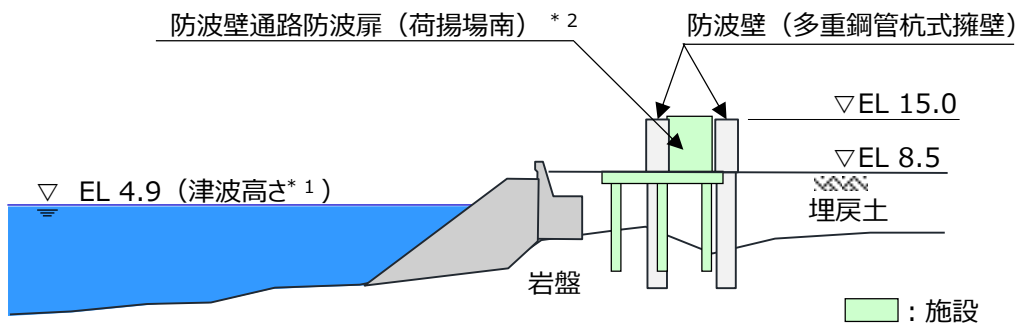


【防波壁通路防波扉（荷揚場南）】

B-B断面

海側

敷地側



注記 * 1： 海域活断層から想定される地震による津波に高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた津波高さ

* 2： 防波壁通路防波扉においては、漂流物の衝突を防止するため、防波壁通路防波扉の前面に漂流物対策工を設置することから、漂流物による衝突荷重を考慮しない。

図 4.5.3-4 防波壁（逆T擁壁）及び防波壁通路防波扉と
海域活断層から想定される津波による津波高さの概念図

表 4.5.3-3 衝突荷重として考慮する漂流物及び施設・設備

衝突荷重として考慮する漂流物				衝突荷重を考慮する施設・設備						
衝突する可能性のある漂流物	重量 (t)	材質	到達形態	対象津波【津波高さ】	漂流速度 (m/s)	初期配置	防波壁	防波壁通路防波扉 (荷揚場南, 3号機東側)		
							波返重力擁壁			
							逆T擁壁			
							多重鋼管杭式擁壁			
漁船 (総トン数19トン)	57.0	FRP	浮遊	日本海東縁 【EL 12.6m】*1	10.0	直近 海域	○	○	—*3	
						前面 海域	○	○	—*3	
				海域活断層 【EL 4.9m】*2	6.0	直近 海域	○	—*4	○	—*4
						前面 海域	○	—*4	○	—*4

注記*1: 基準津波1の入力津波高さEL 11.9mに高潮ハザードの裕度を加えた津波高さ。

*2: 海域活断層上昇側最大ケースの入力津波高さEL 4.2mに高潮ハザードの裕度を加えた津波高さ。

*3: 防波壁通路防波扉においては、漂流物の衝突を防止するため、漂流物対策工を設置することから、防波壁通路防波扉の前面に漂流物対策工を設置することから、漂流物による衝突荷重を考慮しない。なお、漂流物対策工は漂流物衝突荷重を考慮する。

*4: 防波壁(逆T擁壁)及び防波壁通路防波扉は地中又はEL 8.5m以上の地上に設置されていることから、津波高さがEL 4.9mである海域活断層から想定される地震による津波は到達しないため、漂流物は衝突しない。

表 4.5.3-4 衝突荷重として考慮する漂流物（枕木）及び施設・設備

衝突する可能性のある漂流物	衝突荷重として考慮する漂流物					衝突荷重を考慮する施設・設備	
	重量 (kg)	材質	到達形態	対象津波【津波高さ】	漂流速度 (m/s)		初期配置
枕木	12.0	木材	浮遊	日本海東縁【EL 12.6m】*1	0.6	直近海域	防波壁通路防波扉 (1号機北側, 2号機北側)*2
							○

注記*1: 基準津波1の入力津波高さEL 11.9mに高潮ハザードの裕度を加えた津波高さ。

*2: 防波壁の壁面(海側)より奥まった狭隘な場所に設置するため、船舶は衝突しない。

4.5.4 浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法

浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法としては、運動量理論に基づく推定式や実験に基づく推定式等を用いた既往の衝突荷重算定式による算定又は陽解法により解析対象物の大変形挙動を時刻歴で材料非線形性を考慮した「非線形構造解析（以下「衝突解析」という。）」による算定が考えられる。

(1) 既往の衝突荷重算定式の整理

既往の衝突荷重算定式では、対象漂流物の種類、仕様、初期配置等により適用性が異なる。既往の荷重算定式の整理一覧を表 4.5.4-1 に示す。

表 4.5.4-1 漂流物による既往の荷重算定式の整理一覧

No	出典	種類	概要	算定式の根拠 (実験条件)
①	松重 (1999)	流木	円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の衝突荷重を提案している。 $F_m = 1.6CMA\sqrt{V_{A0}/(gD)}^{0.5}1.2(\sigma_f/\gamma L)^{0.4}(V^2D^2L)$ F_m : 衝突力, C_m : 見かけの質量係数, V_{A0} : 流木の衝突速度, D : 流木の直径, L : 流木の長さ, σ_f : 流木の降伏応力, γ : 流木の単位体積重量, g : 重力加速度	「実験に基づく推定式」 ・見かけの質量係数に関する水路実験 (実験: 高さ0.5m, 幅0.3m, 長さ11.0m, 流木(丸太)の直径: 4.8~12cm, 流木質量: 305~8615gf) ・衝突荷重に関する空中での実験 水理模型実験及び空中衝突実験において、流木(楕生林ではない丸太)を被衝突体の前面(2.5m以内)に設置した状態で衝突させている。
②	池野・田中 (2003)	流木	円柱以外にも角柱、球の形状をした木材による衝突荷重を提案している。 $F_H = SCMA\sqrt{W_H/g}^{0.5}D^{0.25}[0.25]^{2.5}(gM)$ F_H : 漂流物の衝突力, S : 係数 (5.0), C_m : 見かけの質量係数, V_H : 段波速度, D : 漂流物の代表高さ, L : 漂流物の長さ, M : 漂流物の質量, g : 重力加速度	「実験に基づく推定式」(縮尺1/100の模型実験) 漂流物の形状: 円柱, 角柱, 球 漂流物重量: 0.588N~29.792N 受圧板を陸上構造物と想定し, 衝突体を受圧板前面80cm(現地換算80m)離れた位置に設置した状態で衝突させた実験である。模型縮尺(1/100)を考慮した場合, 現地換算で直径2.6~8mの仮定となる。
③	道路橋示方書 (2002)	流木等	橋(橋脚)に自動車, 流木あるいは船舶等が衝突する場合の衝突荷重を定めている。 $P = 0.1 W v$ P : 衝突力, W : 流送物の重量, v : 表面流速 船舶の仮想重量と漂流物流速から衝突エネルギーを提案している。 $E = E_0 = \frac{WV^2}{(2g)}, W = W_0 + W' = W_0 + (\pi/4)(D^2)L\gamma_w$ E : 衝突エネルギー, W : 仮想重量, V : 漂流物速度, W_0 : 排水トン数, W' : 付加重量, D : 喫水, L : 横付けの場合は船の長さ, 縦付けの場合は船の幅, γ_w : 海水の単位体積重量, g : 重力加速度 船の回転により衝突エネルギーが消費される (1/4点衝突) 場合 $E = E' = (4g)$ E : 衝突エネルギー, W : 漂流物の質量, c : 付加重量係数, k : 漂流物の有効剛性	「実験に基づく推定式」(縮尺1/100の模型実験) 漂流物が流下(漂流)してきた場合に, 表面流速(津波流速)を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できる。
④	津波漂流物対策施設設計ガイドライン (2014)	船舶等	「運動方程式に基づく衝突力方程式」 非減衰系の振動方程式に基づいており, 衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で, かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることから, 衝突時に塑性変形を伴う漂流物の衝突荷重算定では, 個別の漂流物に対して, 表現象を再現するよう剛性を適切に定める必要がある。 「実験に基づく推定式」(縮尺1/75の模型実験) 使用コンテナ: 長さ20ftと40ft, コルテナ 湖上流速: 1.0m/s以下, 材質: アクリル 被衝突体の直近のエプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めた算定式である。衝突体と水塊が一体とならずに衝突し, 衝突前の運動量が全て力種として作用するものとして考えた算定式であり, 右辺の第1項は付加重量による荷重を表している。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/75の模型実験) 使用コンテナ: 長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m, 衝突速度: 1.0~2.5m/s程度, 材質: 鋼製 水理模型実験では, コルテナを被衝突体の全面1.21m(現地換算6.05m)に設置して衝突力を求めた算定式である。
⑤	FEMA (2012)	流木 コンテナ	漂流するコンテナの衝突荷重を提案している。 $F_m = 2\rho_w h_m B_c V_x^2 + (WV_x/g)dt$ F_m : 漂流衝突力, dt : 衝突時間, ρ_w : 水の密度, B_c : コンテナ幅, V_x : コンテナの漂流速度, W : コンテナ重量, g : 重力加速度	「実験に基づく推定式」(縮尺1/5の模型実験) 使用コンテナ: 長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m, 衝突速度: 1.0~2.5m/s程度, 材質: 鋼製 水理模型実験では, コルテナを被衝突体の全面1.21m(現地換算6.05m)に設置して衝突力を求めた算定式である。
⑥	水谷ほか (2005)	コンテナ	コンクリート構造物に鋼製構造物(コンテナ等)が漂流衝突する際の衝突荷重を提案している。 $F = \gamma_p k^2 \left(\frac{5}{4} m \right) v^2, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, k = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ F : 衝突力, a : 衝突面半径の1/2 (コンテナ衝突面の縦横長さの平均の1/4), E : ヤング率, m : ボアソン比, m_1 : 質量, v : 衝突速度, γ_p : 塑性によるエネルギー減衰効果 m や k の添え字は衝突体と被衝突体を示す。 また, 「①松重(1999)」にならない, 上式において $m=C_{0m}$ (C_{0m} : サージタイプの1.7) とすること で, 流木のコンクリート版に対する衝突力を評価できるとしている。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/5の模型実験) 使用コンテナ: 長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m, 衝突速度: 1.0~2.5m/s程度, 材質: 鋼製 水理模型実験では, コルテナを被衝突体の全面1.21m(現地換算6.05m)に設置して衝突力を求めた算定式である。
⑦	有川ほか (2007, 2010)	コンテナ 流木	コンクリート構造物に鋼製構造物(コンテナ等)が漂流衝突する際の衝突荷重を提案している。 $F = \gamma_p k^2 \left(\frac{5}{4} m \right) v^2, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, k = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ F : 衝突力, a : 衝突面半径の1/2 (コンテナ衝突面の縦横長さの平均の1/4), E : ヤング率, m : ボアソン比, m_1 : 質量, v : 衝突速度, γ_p : 塑性によるエネルギー減衰効果 m や k の添え字は衝突体と被衝突体を示す。 また, 「①松重(1999)」にならない, 上式において $m=C_{0m}$ (C_{0m} : サージタイプの1.7) とすること で, 流木のコンクリート版に対する衝突力を評価できるとしている。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/5の模型実験) 使用コンテナ: 長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m, 衝突速度: 1.0~2.5m/s程度, 材質: 鋼製 水理模型実験では, コルテナを被衝突体の全面1.21m(現地換算6.05m)に設置して衝突力を求めた算定式である。

- No1 松富英夫 (1999) 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文
集, No621, pp. 111-127
- No2 池野正明・田中寛好 (2003) 陸上遡上波と漂流物の衝突力に関する実験的
研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 721-725
- No3 道路橋示方書・同解説 I 共通編 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
- No4 津波漂流物対策施設設計ガイドライン (沿岸技術研究センター, 寒地研究セ
ンター, 平成 26 年)
- No5 FEMA (2012) Guidelines for Design of Structures for Vertical E
vacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA P-646
- No6 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005) エプロン上
のコンテナに作用する津波波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集,
第 52 巻, pp. 741-745
- No7 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆 (2007) 遡上津波
によるコンテナ漂流力に関する大規模実験 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.
846-850
- 有川太郎・鷺崎誠 (2010) 津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関
する大規模実験, 土木学会論文集 B2, Vol. 66, No. 1, pp. 781-785

(2) 漂流物による衝突荷重の算定方法の選定

既往の衝突荷重算定式及び衝突解析に対して、「4.5.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定」において区分した、漂流物の初期配置（「直近海域」、「前面陸域」及び「直近陸域」）及び適用流速の観点も加えた整理結果を表 4.5.4-2 に示す。

表 4.5.4-2 漂流物による衝突荷重算定方法の整理

No	算定方法	種類	漂流物の初期配置	適用流速	適用性
①	松富 (1999)	流木	直近海域 直近陸域	衝突速度	個別の流木(丸太)の種類等に応じて、実現象を再現できるパラメータを適切に設定することが可能であれば、直近陸域又は直近海域からの流木に対して適用可能と判断する。
②	池野・田中 (2003)	流木	直近陸域	段波速度	流木を対象とした算定式であるが、実験の模型縮尺(1/100)を考慮すると、原子力発電所における漂流物衝突事象への適用は困難と判断する。
③	道路橋示方書 (2002)	流木 FRP製 船舶等	前面海域	表面流速	漂流物が流下(漂流)して来た場合に、表面流速(津波流速)を与えることで漂流流速に対する漂流物荷重を算定できる。新規制基準適合性審査(東北電力(株)女川原子力発電所等)において、適用実績があるため、初期配置が前面海域の漂流物に対して適用可能と判断する。
④	津波漂流物 対策施設設計 ガイドライン (2014)	船舶等	前面海域 直近海域	漂流物速度	船舶、車両、流木、コンテナ等の漂流物を対象としているが、鋼管杭等の支柱の変形及びワイヤロープの伸びにより衝突エネルギーを吸収する考え方であり、弾性設計においての適用は困難であると判断する。
⑤	F E M A (2012)	流木 コンテナ FRP製 船舶	直近海域	最大流速	個別の漂流物に対して、実現象を再現できるパラメータ(軸剛性等)を適切に設定することが必要である。新規制基準適合性審査(東北電力(株)女川原子力発電所)において、初期配置が直近海域の総トン数5トンのFRP製船舶の船首方向衝突に対して適用実績がある。FRP製船舶の軸剛性を適切に設定できる場合においては、適用可能と判断する。
⑥	水谷ほか (2005)	コンテナ	直近陸域	漂流速度	エプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めるという特殊な実験により得られた式であることに留意する必要があるが、直近陸域からのコンテナに対して適用可能と判断する。
⑦	有川ほか (2007, 2010)	流木 コンテナ	直近海域 直近陸域	衝突速度	剛性に係る k 値を適切に定める必要があり、対象としている種類以外への適用性がある k 値に係る k1 及び k2 の値が不明であるため、現状は当該式が対象としている種類(流木、コンテナ)以外への適用は困難と判断する。したがって、直近陸域又は直近海域からの流木及びコンテナに対して適用可能と判断する。
⑧	衝突解析	鋼製部材 FRP製 船舶 木材等	直近陸域 直近海域	衝突速度	漂流物の3次元FEMモデルを適切に作成する必要がある。新規制基準適合性審査(東北電力(株)女川原子力発電所等)において、初期配置が直近海域の総トン数5トンのFRP製船舶に対して適用実績がある。衝突荷重の妥当性を検証できる場合においては、適用可能と判断する。

また、「4.5.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定」から、対象漂流物として選定されたFRP製の漁船（以下「船舶」という。）における、衝突荷重の算定方法を選定する。なお、表4.5.4-2の整理結果より、船舶への適用性が期待できる、既往の衝突荷重算定式の「道路橋示方書（2002）」、「FEMA（2012）」及び「衝突解析」の中から選定する。漂流物による衝突荷重の算定方法の選定フローを図4.5.4-1に示す。

- ・「道路橋示方書（2002）」は、漂流物が津波の流れに乗って流下（漂流）して衝突する場合に、表面流速（津波流速）を与えることで衝突荷重を算定できる。新規制基準適合性審査（東北電力（株）女川原子力発電所等）では、初期配置が前面海域の船舶（総トン数19トン）に対する適用実績がある。

以上より、船舶の初期配置が前面海域の場合においては、「道路橋示方書（2002）」を衝突荷重の算定方法として選定する。

- ・「FEMA（2012）」は、漂流物が津波の先端に乗って衝突する場合に、非減衰系の振動方程式に基づき、最大流速を与えることで衝突物及び被衝突物の両方を完全弾性体とした条件で衝突荷重を算定できる。ただし、衝突時に塑性変形を伴う漂流物による衝突荷重の算定では、個別の漂流物に対して実現象を再現できるような軸剛性を適切に定める必要がある。新規制基準適合性審査（東北電力（株）女川原子力発電所）では、初期配置が直近海域の船舶（総トン数5トン）に対して、衝突荷重を算定した適用実績がある。現時点ではFRP製船舶の船首部の複雑な形状及び構造を再現できる軸剛性の設定方法が確立されていないことから、FRP製船舶における衝突荷重の算定方法として選定しない。

参考として、既往文献を基に船首方向の衝突解析で求めた、最大衝突荷重及び最大衝突荷重発生時刻に対する船首先端からの船体破壊長さから設定した平均的な軸剛性を用いて、「FEMA（2012）」による衝突荷重を算定する（添付資料4及び添付資料13参照）。

- ・「衝突解析」は、漂流物が津波の先端に乗って衝突する場合に、衝突速度を与えることで、陽解法により解析対象物の大変形挙動を時刻歴で材料非線形性を考慮した解析が可能であり、漂流物を3次元でモデル化することで衝突形態の不確かさを考慮した衝突荷重が算定できる。新規制基準適合性審査（東北電力（株）女川原子力発電所）では、初期配置が直近海域の船舶（総トン数5トン）に対する適用実績がある。先行サイトの審査以降の新たな文献である「豊田ほか（2022）」*において、FRP製船舶を用いた衝突実験が初めて実施され、衝突実験における衝突現象に対して衝突解析を実施し、衝突実験による衝突荷重に対する再現性があることが確認されたことから、船舶の初期配置が直近海域の場合においては、「衝突解析」を衝突荷重の算定方法として選定する。

注記*：豊田真・南波宏介・甲斐田秀樹・栗山透 FRP船舶の衝突解析手法に関する研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.78，No.2，301-315，2022.

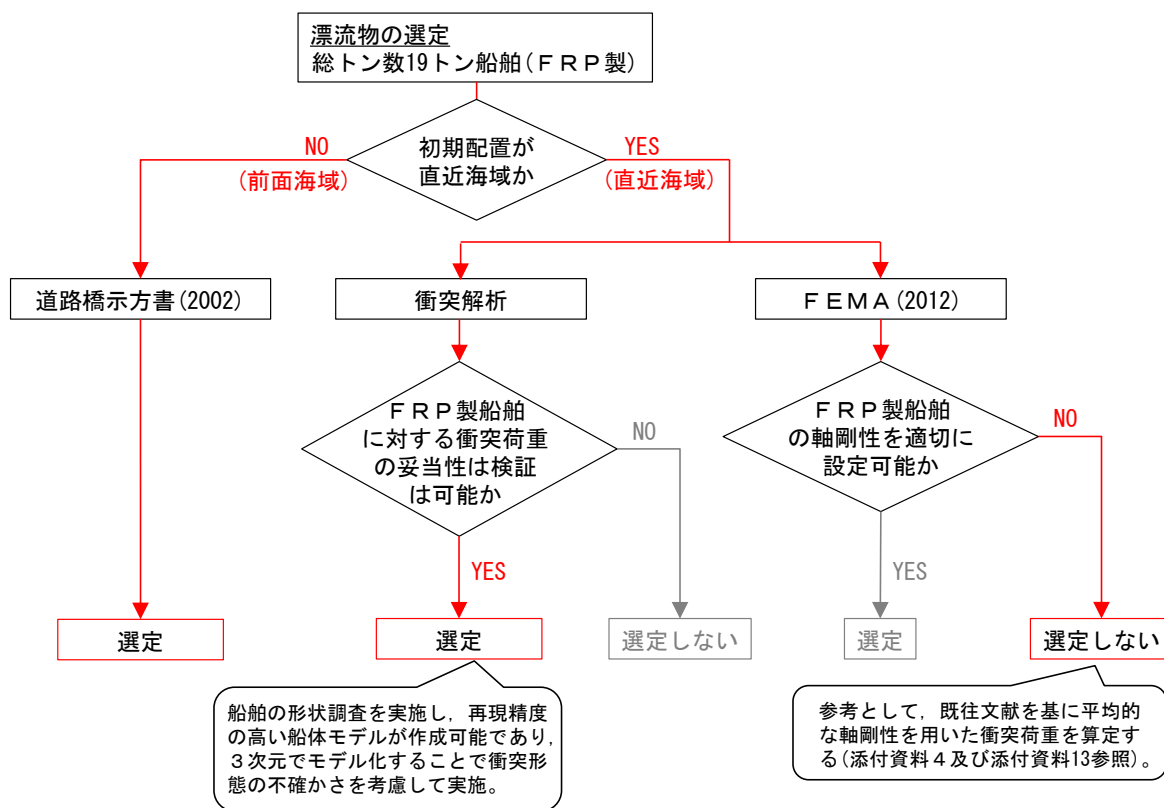


図 4.5.4-1 漂流物による衝突荷重の算定方法の選定フロー

4.5.5 漂流物による衝突荷重の算定における設計上の配慮について

漂流物による衝突荷重の算定において、以下の項目を配慮して設定する。

なお、枕木による衝突荷重の算定における設計上の配慮については、添付資料 15 に示す。

(1) 衝突荷重として考慮する漂流物

「4.5.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定」より、衝突荷重として考慮する漂流物は、設計上の配慮として、島根原子力発電所周辺海域で操業する漁船の、漁業法の制限等を踏まえた総トン数、操業区域及び航行の不確かさを考慮した、総トン数 19 トンのFRP製の漁船を対象とする。

(2) 漂流物による衝突荷重算定用の流向

漂流物による衝突荷重は、漂流物が被衝突物に対して直交方向に作用する際に最大となると考えられる。「4.5.2 津波に関するサイト特性」で示したとおり、被衝突物である防波壁及び防波壁通路防波扉前面での最大流速は、被衝突物に対する直交方向の流向と一致していない箇所も存在する。そのため、設計上の配慮として、被衝突物となる構造物の特徴を踏まえて、安全側の評価となる衝突方向を選定する。

(3) 漂流物による衝突荷重算定用の流速

漂流物による衝突荷重は、漂流物の衝突速度（流速）の増加に伴い大きくなるため、設計上の配慮として、衝突荷重の算定に用いる流速は、被衝突物に対して影響が大きい方向に対する最大流速を漂流物の衝突速度として用いる。

また、津波流速は、「4.5.2 津波に関するサイト特性」で示したとおり、日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波 1）の最大流速は 9.3m/s、海域活断層から想定される地震による津波（基準津波 4）の最大流速は 5.8m/s となる。そのため、設計上の配慮として、安全側に日本海東縁部に想定される地震による津波及び海域活断層から想定される地震による津波ともに、漂流物の衝突速度を 10.0m/s とする。

(4) 漂流物による衝突荷重の作用方法

被衝突物に対する、漂流物による衝突荷重の鉛直方向の作用位置は、「4.5.2 津波に関するサイト特性」で示したとおり、日本海東縁部に想定される地震による津波（基準津波1）の入力津波高さ EL 11.9mに高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた津波高さ EL 12.6m及び海域活断層から想定される地震による津波（海域活断層上昇側最大ケース）の入力津波高さ EL 4.2mに高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた津波高さ EL 4.9mを基本とするが、設計上の配慮として、安全側に各構造物の部位に対して評価が厳しくなる作用位置を設定する。漂流物が衝突する際は船体幅及び深さに応じた範囲に荷重が分散すると考えられることを踏まえ、各構造物の評価において安全側となるよう荷重作用方法を採用する。また、漂流物による衝突荷重の水平方向の作用位置も同様に安全側に各構造物に対して評価が厳しくなる作用位置を設定する。

(5) 漂流物による衝突荷重と津波荷重との重畳

漂流物による衝突荷重と津波荷重の組合せについて、実際に施設に作用する荷重としては、津波による最大荷重と漂流物衝突による最大荷重が同時に作用する可能性は小さいと考えられるが、漂流物による衝突荷重と津波荷重が重畳する可能性を否定できないため、設計上の配慮として、津波高さに応じた津波荷重と漂流物による衝突荷重を重畳させる。

4.5.6 漂流物による衝突荷重の算定

浮遊状態の漂流物として選定した船舶の衝突荷重は、「4.5.4 浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法」より、島根原子力発電所における衝突荷重算定の適用性を考慮した上で、漂流物の初期配置が直近海域にある場合の船舶（総トン数19トン）は衝突解析により、漂流物の初期配置が前面海域にある場合の船舶（総トン数19トン）は「道路橋示方書（2002）」により衝突荷重を算定する。漂流物による衝突荷重の算定フローを図4.5.6-1に示す。

なお、枕木による衝突荷重の算定については、添付資料15に示す。

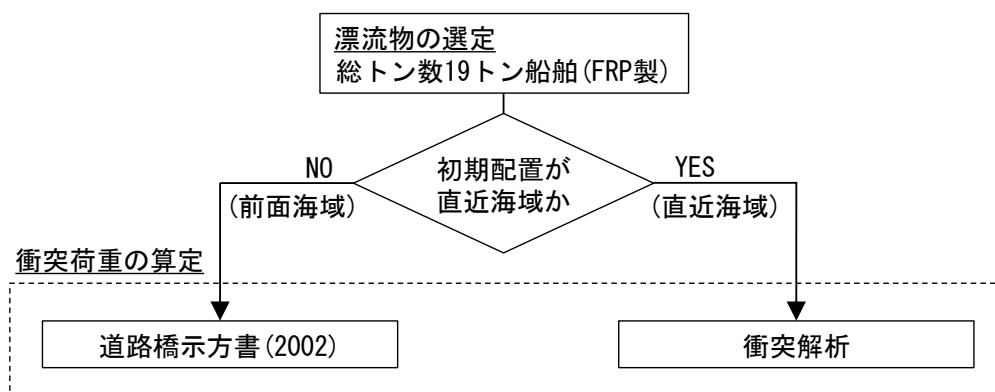


図 4.5.6-1 漂流物による衝突荷重の算定フロー

(1) 漂流物の初期配置が直近海域の場合の衝突荷重の算定

a. 検討方針

船舶は車両やコンテナと比較して、長軸と短軸が明瞭ではあるが、漂流物となって来襲する際に回転の影響を受け、複雑な挙動となる可能性がある。一方、既往の衝突荷重の算定式は、長軸である船首方向からの衝突を想定していると考えられるため、衝突解析により3次元FEMでモデル化した船舶を用いて、船首方向の衝突に加え、船尾、真横及び斜め45°（船首、船尾）からの衝突荷重を算定することで、衝突形態の不確かさを考慮する（詳細を「d. 解析ケース」に示す）。

被衝突物は、鉄筋コンクリート造又は鋼製であり、衝突に伴う変形及び移動により衝突エネルギーを吸収することが考えられるが、安全側に変形及び移動をしない剛壁とし、衝突荷重は剛壁に作用する荷重の時刻歴から算定する。なお、被衝突物である防波壁の固有振動数は最大で30Hz程度であるため、被衝突物の応答に影響しない、100Hz以上の周波数を通過するローパスフィルタ処理を行う。

また、この衝突荷重は、瞬間的な最大荷重を静的な衝突荷重として考慮すること（添付資料5参照）及び衝突直前の反射波による減速を考慮しないことの保守性を有している。なお、衝突解析は気中衝突を模擬しているため、水中衝突の場合、漂流物とともに運動する水塊（付加質量）の影響を考慮する必要があるが、「4.5.5 (5) 漂流物による衝突荷重と津波荷重との重畳」で示したとおり、衝突荷重と津波荷重（津波高さに応じた波力）は重畳させる方針であり、付加質量の影響は津波による荷重に含まれるため、衝突解析の結果では考慮しない。

衝突解析による衝突荷重の算定フローを図4.5.6-2に示す。

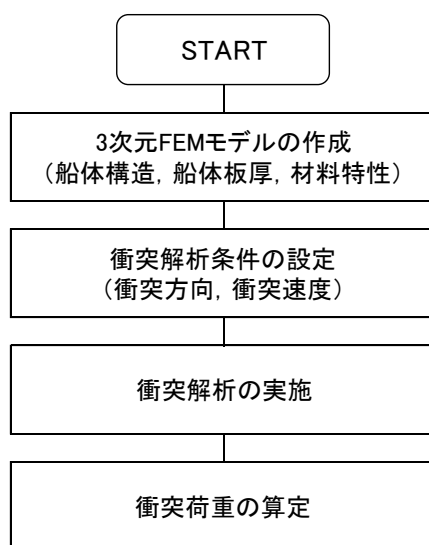


図 4.5.6-2 衝突解析による衝突荷重の算定フロー

b. 解析コード

船舶における衝突解析の解析コードは、「LS-DYNA Ver. 971」を用いる。

c. 船舶の3次元FEMモデル

衝突解析においては、衝突解析に用いる船舶の船体形状が、衝突荷重に与える影響が大きいため、3次元FEMモデルの精緻化が重要となる。そこで、対象船舶の再現精度の向上を図るために、詳細調査（船体情報に係る資料の収集及び対象船舶の調査結果）を基に、船舶の3次元FEMモデルを、シェル要素でモデル化する。対象船舶は、恵曇漁港のイカ釣り漁船（総トン数 19 トン）とする。

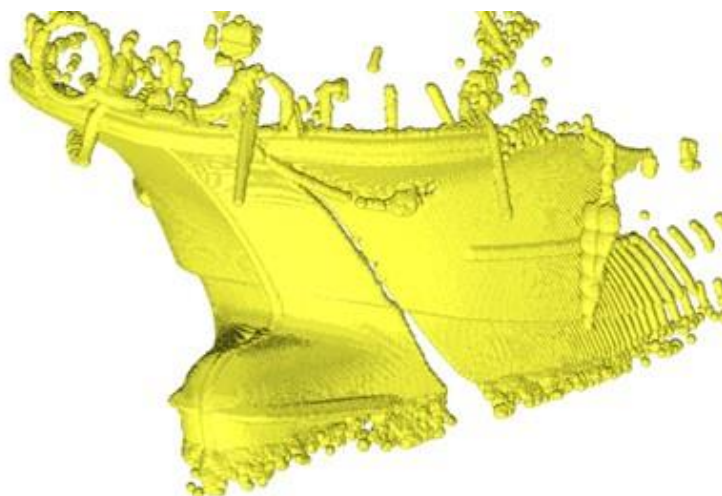
船舶は海水からの流れの抵抗を低減するために、船体の船首から船尾に向けて流線形の複雑な形状となっている。そこで、船舶外形の再現精度を向上させるために、対象船舶に対する巻尺等による測定に加え、3Dレーザースキャナによる3次元測定を行い（図 4.5.6-3）、船体外形の3次元点群データを取得し、3次元FEMモデルの作成に反映した（図 4.5.6-4）。

また、船体情報に係る資料に記載がなく、かつ測定が不可能な箇所は船体寸法、船体の板厚、FRP部材の材料特性については、既往の文献を基に設定する。

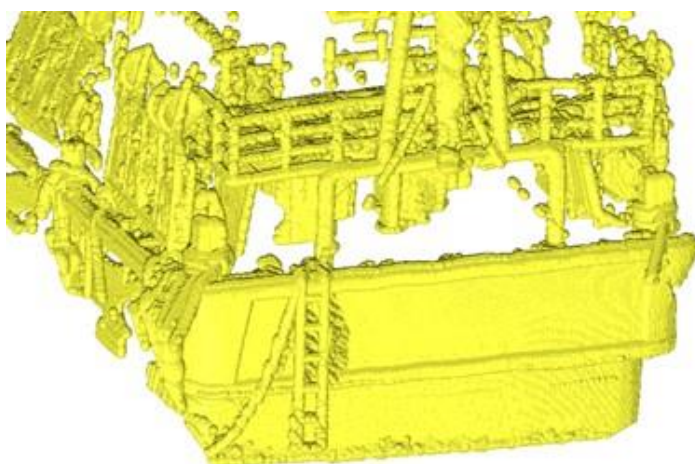


図 4.5.6-3 3Dレーザースキャナによる計測状況

【船首】



【船尾】



【船側】

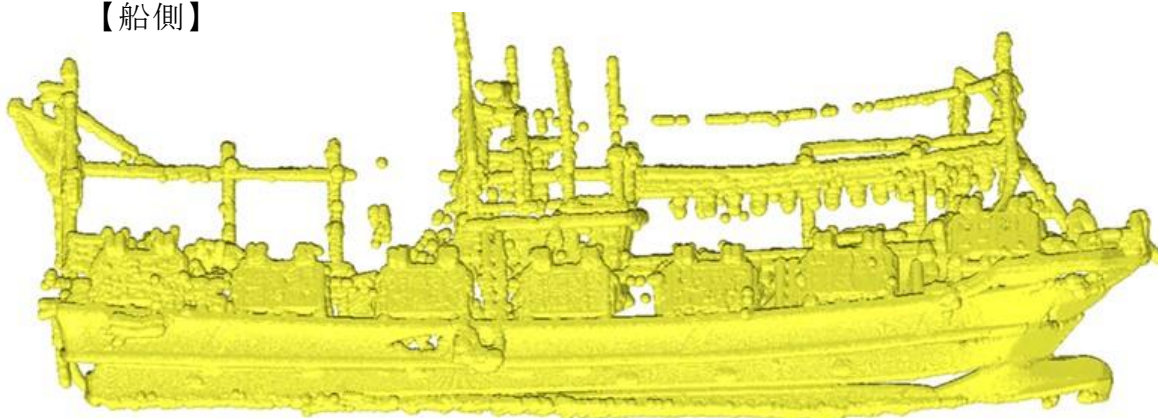


図 4.5.6-4 3Dレーザースキャナによる計測結果（例）

(a) 船体構造

船舶の3次元FEMモデルの作成に当たり、主要な船体構造寸法及び根拠を表4.5.6-1に示す。また、対象船舶の側面図及び平面図を図4.5.6-5に、衝突解析用3次元FEMモデルを図4.5.6-6に、隔壁及び船尾の船体面積を図4.5.6-7に示す。なお、甲板上のブリッジ及び船体内の機関部はモデル化をしないが、船首・船尾以外の船殻の密度を増大させることにより、船体質量として考慮し、船体質量57.0tを確保する。

表 4.5.6-1 主要な船体構造寸法及び根拠

項目	値	根拠
全長(m)	24.72	対象船舶の測定結果
全幅(m)	5.20	対象船舶の測定結果
計画最大 満載喫水(m)	2.20	「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(2014)」 総トン数(G.T.)20トン漁船の喫水の最大値を採用
質量(t)	57.0	「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(2014)」 漁船質量=総トン数×3倍=19×3=57.0
登録長さ* ¹ (m)	19.40	対象船舶の船舶検査手帳* ⁴
登録幅* ² (m)	4.42	対象船舶の船舶検査手帳* ⁴
登録深さ* ³ (m)	1.85	対象船舶の船舶検査手帳* ⁴

注記*1：上甲板の下面における船首材の前面から船尾材の後面までの長さ
(船舶法施行細則)

*2：船体最広部におけるフレームの外間幅 (船舶法施行細則)

*3：登録長の中央におけるキール(竜骨)上面から上甲板の下面に至る長さ
(船舶法施行細則)

*4：日本小型船舶検査機構(JCI)が国の代行機関として実施する、総トン数20トン未満の小型船舶を対象とした、船舶検査に合格した船舶に対して交付される、船舶の長さ等が記載された手帳

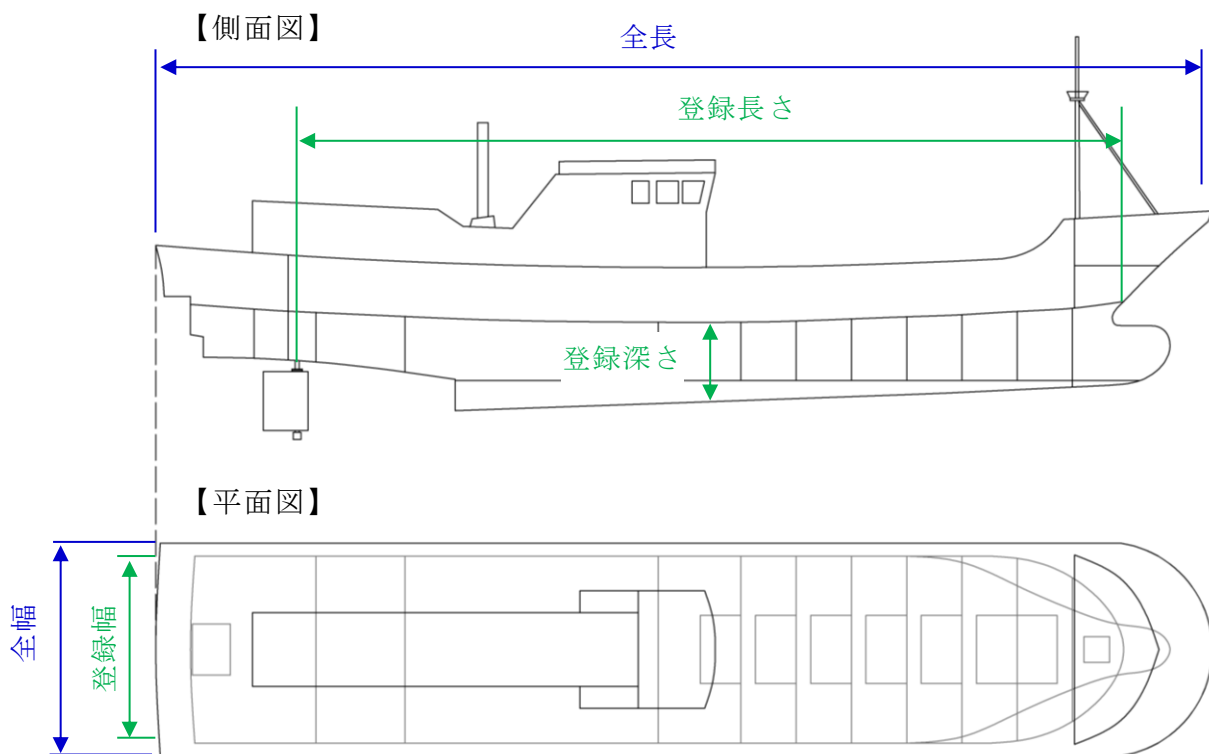
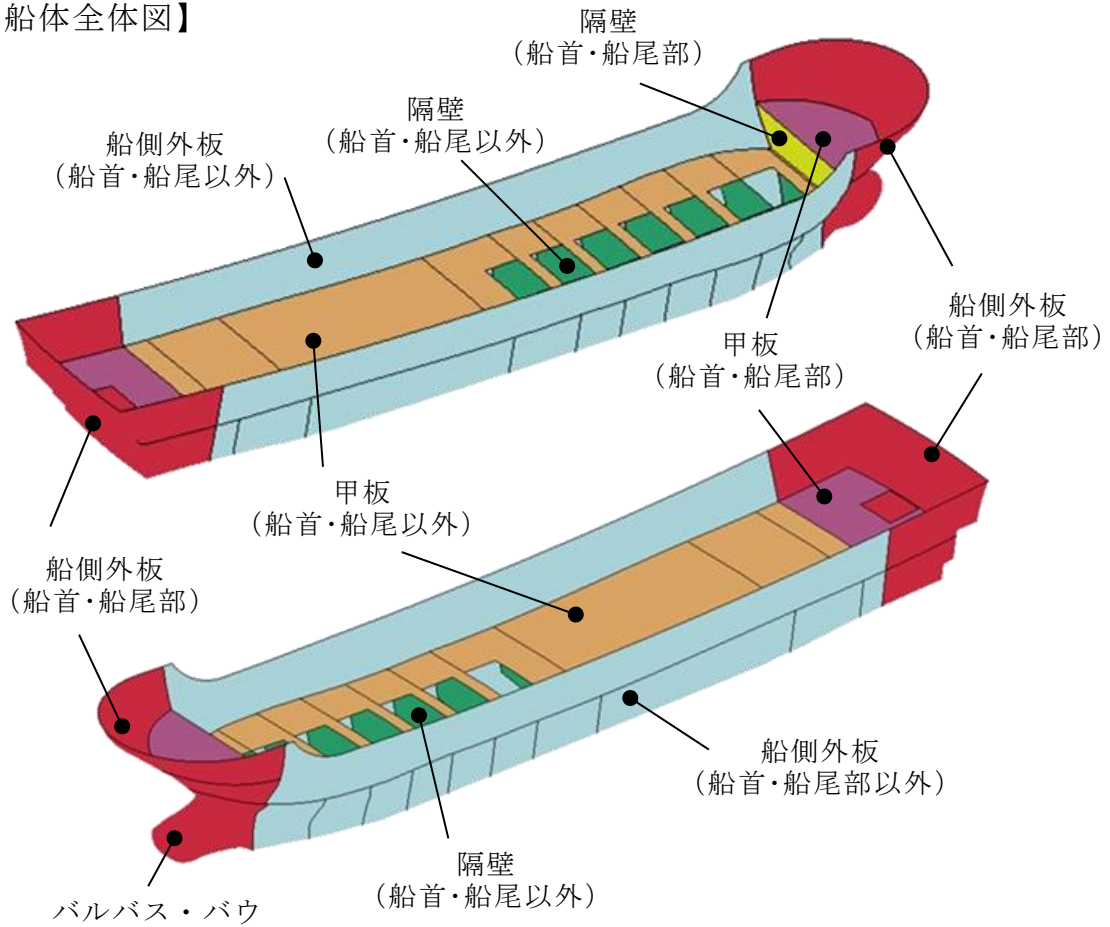
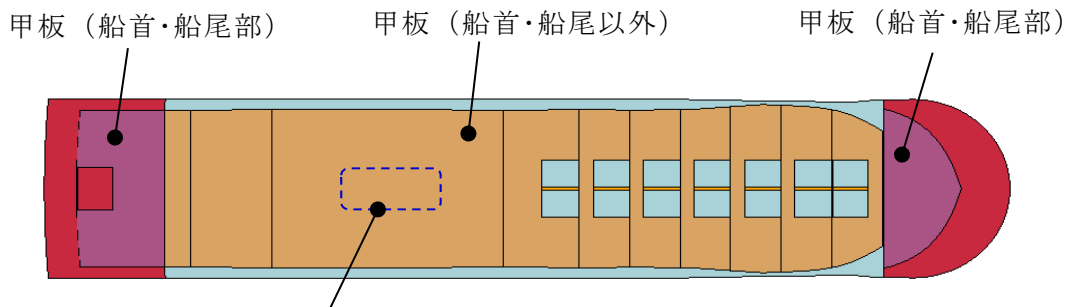


図 4.5.6-5 対象船舶の側面図及び平面図

【船体全体図】



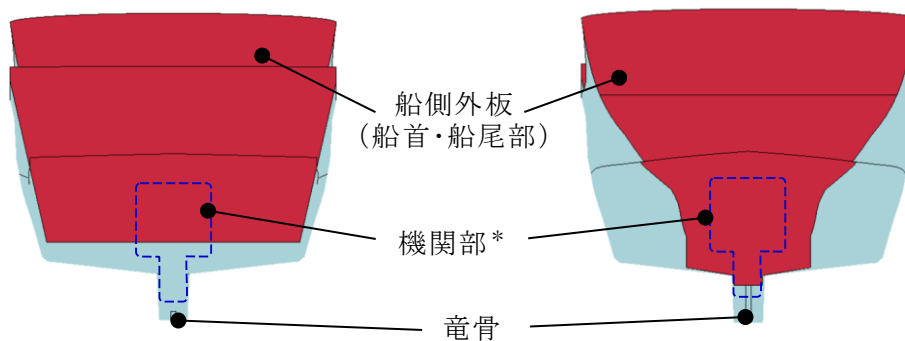
【船体平面 (上面)】



機関部 (エンジン寸法:長さ≒2.7m,幅≒1.2m,高さ≒1.9m) *

【船体正面 (船首)】

【船体後面 (船尾)】



注記* : 概略位置を示す。

図 4.5.6-6 3次元FEMモデル

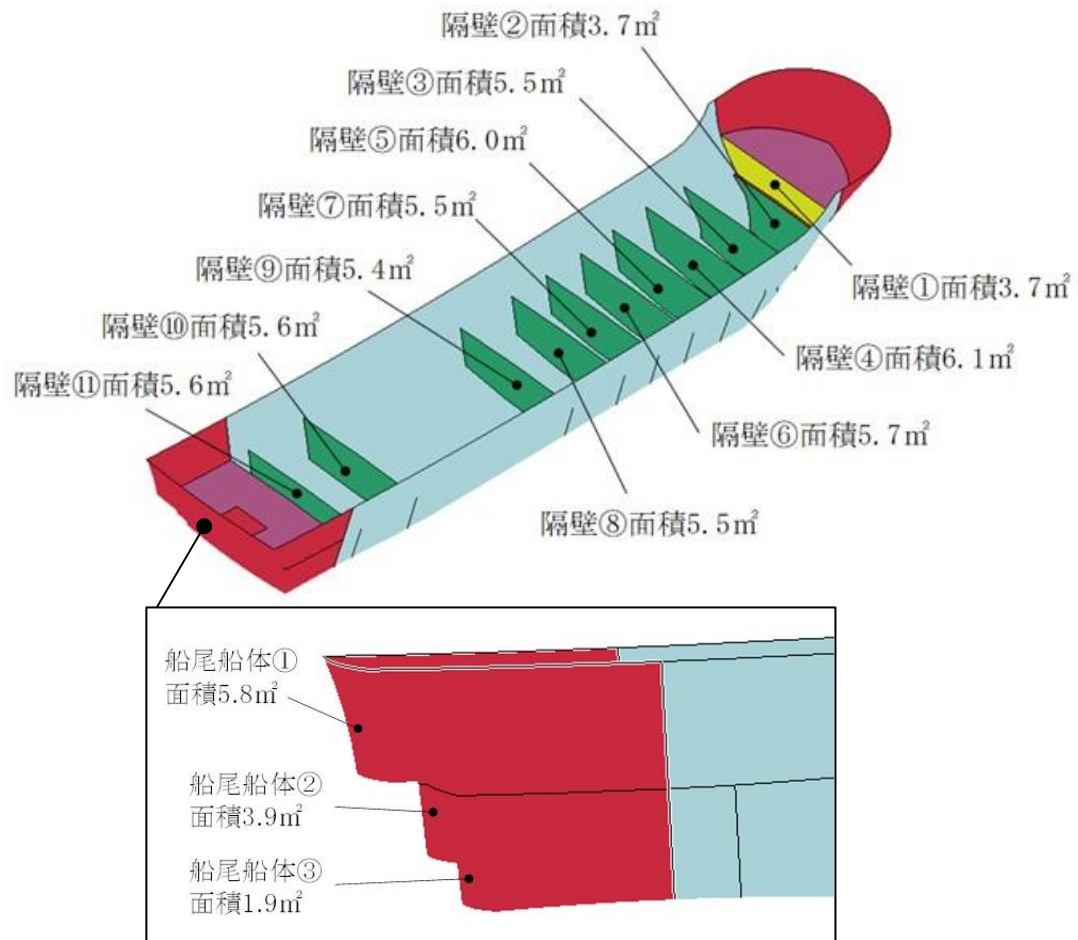


図 4.5.6-7 隔壁及び船尾の船体面積

なお、「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」では、全漁業種類の漁船の平均値が図 4.5.6-8 のとおり示されており、総トン数 20 トンにおける船の長さ（L=17.0m）及び船の幅（B=4.3m）に対して、対象船舶（総トン数 19 トン）の登録長さ（L=19.4m）及び登録幅（B=4.42m）は、おおむね同等であることから、対象船舶は代表性があることを確認した。

船型 (G.T.)	船の長さ (L)	船の幅 (B)	喫水	
			最大 (dmax)	最小 (dmin)
1	7.0m	1.8m	1.0m	—m
2	8.0	2.2	1.2	—
3	9.0	2.4	1.4	—
4	10.0	2.6	1.6	—
5	11.0	2.8	1.8	—
10	13.0	3.5	2.0	1.9
20	17.0	4.3	2.2	2.1
30	20.0	4.7	2.5	2.3
40	22.0	5.2	2.7	2.5
50	24.0	5.5	2.9	2.6
100	30.0	6.5	3.7	3.2
150	35.0	7.2	4.2	3.5
200	40.0	7.6	4.6	3.8
300	46.0	8.4	5.2	4.2
400	52.0	8.9	5.6	4.5
500	55.0	9.4	5.9	4.8

図 4.5.6-8 漁船の諸元
 （「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」に一部加筆）

(b) 船体質量

船舶の3次元FEMモデルの作成に当たり、船体質量は「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(2014)」より、総トン数19トンの3倍である57.0tとする。ただし、3次元FEMモデルを構成する船殻(船側、外板、甲板、隔壁及び竜骨)の質量は約8.7tであるため、船体質量57.0tに対する差分については密度を増大させることにより考慮する。なお、差分質量は艀装重量や漁獲物等が支配的であるため、船首・船尾以外の船殻を対象とする。

図4.5.6-9にFRP密度の増大範囲を示す。



図 4.5.6-9 FRP密度の増大範囲

FRPの密度増大による影響として、衝撃力を受ける弾性体の密度が大きくなると、弾性体内の応力伝搬速度は小さくなる関係にあるため、本解析の3次元FEMモデルにおいて、FRPの密度を増大した船体中央部の応力伝搬速度は実際のFRPの応力伝搬速度より小さくなる。

後述する衝突解析結果より、船首、船尾、斜め船首及び斜め船尾からの衝突においては、まず密度を増大していない船首部又は船尾部から衝突し、船首部又は船尾部の破壊後、密度を増大している船体中央部の破壊へ進展する。各部位の破壊状況については、剛壁との接触箇所から破壊しており、密度の違いによる差異は見られない。真横からの衝突においては、他の衝突形態と比較して船体が剛壁と接触した直後に最大衝突荷重が発生していることから、応力伝搬速度による違いによる影響が見られず、他の衝突形態と同様に船体は剛壁との接触箇所から破壊しており、破壊状況においても密度の違いによる差異は見られない。

以上のことから、本解析において設定される密度増大による応力伝搬速度の差異による影響は見られない。

また、船体の破壊は剛壁との接触箇所において発生しているため、剛壁から抽出している衝突荷重に対する応力伝搬速度の影響はないと判断する。

(c) 船体板厚

船舶の3次元FEMモデルの作成に当たり、船体板厚の設定結果を表4.5.6-2及び図4.5.6-10に示す。

表 4.5.6-2 船体板厚の設定

板厚 t		引用文献等を基にした設定・算定根拠	引用文献算定値 (mm)	採用値 (mm)
船首・船尾	船側外板 隔壁 甲板	「強化プラスチック船規則(2018, 日本海事協会)」 【板厚算定式】 $t=15 \times s \times (d + 0.026 \times L)^{1/2} \times 0.85$ s: 肋骨の心距=0.5m d: 計画最大満載喫水=2.20m L: 登録長さ=19.40m ・引用文献の算定値に対して、縦、横肋骨のモデルを省略していることから、板厚の割増しを行い12.00mmを採用	10.48	12.00
船首・船尾以外	船側外板 隔壁 甲板 竜骨	「強化プラスチック船規則(2018, 日本海事協会)」 【板厚算定式】 $t=15 \times s \times (d + 0.026 \times L)^{1/2}$ s: 肋骨の心距=0.5m d: 計画最大満載喫水=2.20m L: 登録長さ=19.40m ・引用文献の算定値に対して、縦、横肋骨のモデルを省略していることから、板厚の割増しを行い14.00mmを採用	12.33	14.00

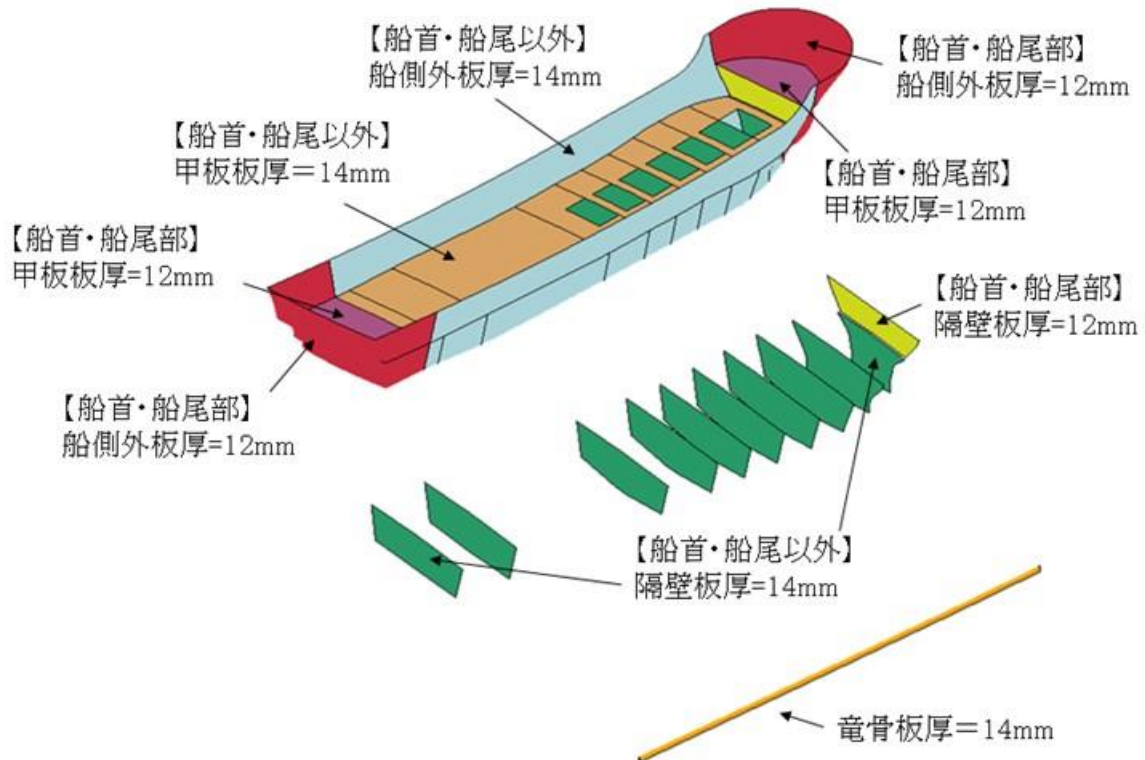


図 4.5.6-10 船体板厚の設定

(d) 材料特性

F R Pの材料特性の設定に当たり、ヤング係数(曲げ剛性)、ポアソン比、曲げ強度、単位体積重量及び破壊ひずみについて、文献を基に適用性を踏まえて設定を行った(添付資料3参照)。

本解析に用いる、F R Pの材料特性の設定を表4.5.6-3に示す。

表 4.5.6-3 F R Pの材料特性の設定

項目	単位	採用値	採用理由(添付資料3参照)
ヤング率 (曲げ弾性)	GPa	12	ヤング率(曲げ弾性)の増加に伴い船体衝突荷重も増加すると考えられるため、文献に記載の最大値を採用
ポアソン比	—	0.358	ポアソン比の増加に伴い船体衝突荷重も増加すると考えられるため、文献に記載の最大値を採用
曲げ強度	MPa	260	曲げ強度の増加に伴い船体衝突荷重も増加すると考えられるため、文献に記載の最大値を採用
単位体積重量	t/m ³	1.6	単位体積重量の増加に伴い船体衝突荷重も増加すると考えられるため、文献に記載の最大値を採用
破壊ひずみ	%	5 完全弾塑性材料	破壊ひずみ: 文献より最大で3%程度になると考えられるが、破壊ひずみの増加に伴い、船体衝突荷重も増加すると考えられるため、安全側に5%を採用 応力-ひずみ関係: 文献よりおおむね弾性材料としての破壊挙動となると考えられるが、塑性を考慮することで船体衝突荷重が増加すると考えられるため完全弾塑性材料として取り扱う

本解析におけるF R Pの構成則(応力-ひずみ関係)としては、表4.5.6-3に示すとおり、曲げ強度到達後もひずみが増加する完全弾塑性材料とし、破壊ひずみに到達した後にシェル要素を削除する設定とした。F R P材料の応力-ひずみ関係を図4.5.6-11に示す。

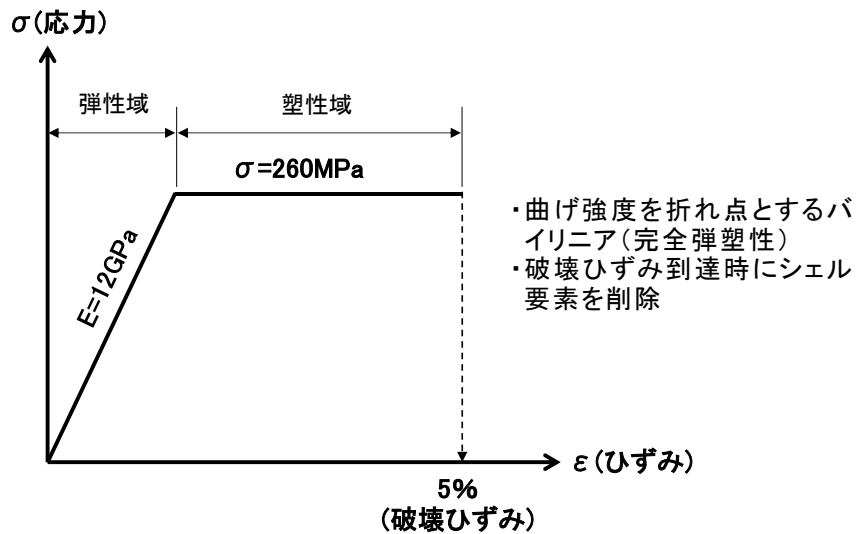


図 4.5.6-11 応力-ひずみ関係

(e) 被衝突物

被衝突物は、鉄筋コンクリート造又は鋼製であり、衝突に伴う変形及び移動により衝突エネルギーを吸収することが考えられるが、安全側に変形及び移動をしない剛壁とする。剛壁の材質はコンクリートとし、コンクリートと船体間の摩擦係数については、港湾基準より、コンクリート同士の摩擦係数である 0.50 を採用した。

被衝突物の材料特性を表 4.5.6-4 に示す。

表 4.5.6-4 被衝突物の材料特性

被衝突物	材質	コンクリート
	要素	シェル要素
	ヤング率【GPa】	25
	ポアソン比	0.2
	密度【t/m ³ 】	2.45
摩擦係数		0.50

d. 解析ケース

解析ケースの選定にあたり、船舶の衝突形態について整理を行う。船舶は長軸と短軸が明瞭ではあるが、漂流物となって来襲する際に、回転の影響を受けて複雑な挙動となる可能性がある。既往の文献として、「構造物の衝撃挙動と設計法（（社）土木学会, 1994）（以下「土木学会（1994）」という。）」と「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」に以下の記載がある。

- ・ 「土木学会（1994）」によれば、実験の結果から、漂流船の衝突は図 4.5.6-12 に示すような衝突形態が想定されるとしており、「航路直角面への正面衝突は、海洋構造物近傍の潮流の Shear-flow による船体の漂流方向の変更、並びに風による船体の横向き漂流現象によりあまりあり得ない。」とし、「一番頻度の高い衝突形態は、海洋構造物の隅角部への船首、船側及び船尾の衝突である。」としている。
- ・ 「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」によれば、「土木学会（1994）」と同じ衝突形態の図（図 4.5.6-12 と同じ）を示しており、衝突形態③は船の回転によりエネルギーが消費されるため、衝突形態①の半分の衝突エネルギーであるとし、衝突形態②は衝突形態①又は衝突形態③と同じ衝突エネルギーであるとしている。

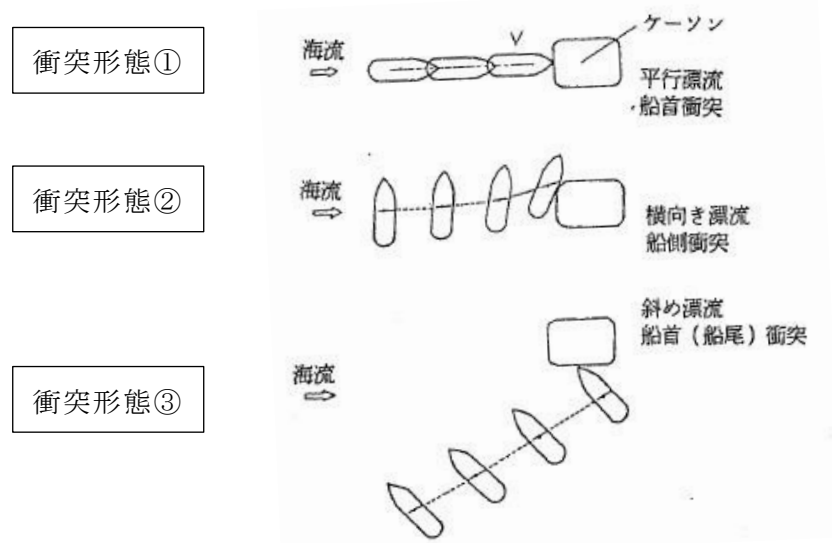


図 4.5.6-12 漂流による衝突形態（「土木学会（1994）」に一部加筆）

「土木学会（1994）」及び「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」で示されている衝突形態の被衝突物は海中に孤立した構造物（流れが構造物に堰き止められない）を想定している。一方、被衝突物である評価対象構造物（以下「施設」という。）は、来襲する津波を堰き止める壁状の構造物として設置されていることから、来襲した津波は跳ね返され、その反射波の影響により漂流速度は減速するが、本検討においては、安全側に衝突速度が減速しないと仮定し、衝突速度は「4.5.5 (3) 漂流物による衝突荷重算定用の流速」より、 10.0m/s とする。

船舶の平面方向の傾き（ヨーイング）による衝突形態の整理結果を表 4.5.6-5 に示す。施設に津波が直角方向に来襲し、船舶の衝突向きが船体の中心軸である長軸又は短軸に対して、直角方向に衝突するパターン A（船首、船尾及び船側（真横））では、施設に対して船体 1 箇所での衝突が生じるが、斜め方向から衝突するパターン B（斜め船首及び斜め船尾）では、船体の 2 箇所以上で衝突が生じ、衝突荷重が分散される。そのため、パターン B の衝突荷重は、パターン A の船体 1 箇所での衝突するケースに包絡される事象であると考えられる。また、施設に津波が斜め方向に来襲し、船舶の衝突向きが船体の中心軸である長軸又は短軸に対して、斜め方向に衝突するパターン C 及び D（斜め船首及び斜め船尾）においても、船体の 2 箇所以上で衝突が生じるため、衝突荷重が分散され、パターン A の衝突荷重に包絡される事象であると考えられる。ただし、パターン C については、局所的な衝突荷重が生じる可能性がある、津波の来襲方向と衝突向きが船体の長軸方向と同方向となるため、その影響について確認する。なお、「池野ら（2015）」*では木材（丸太）の気中衝突実験を行っており、縦衝突に対して斜め衝突にした場合に衝突力は減少することが示されており、特に衝突角度 20 度を超えた場合には最大で半分程度の衝突力になることが示されている。

上記の結果より、船舶の平面方向における衝突形態の不確かさによる衝突荷重の影響を確認するため、パターン A の船首、船尾及び真横からの衝突ケースに加えて、パターン C の斜め船首及び斜め船尾からの衝突ケースを加えた 5 ケースについて衝突解析を実施する。

注記*：池野正明・高島大輔・木原直人・甲斐田秀樹・宮川義範・柴山淳（2015）
津波・氾濫流水路を用いた流木衝突実験と衝突力推定式の改良，土木学会論文集 B2, Vol.71, No.2, pp. I_1021-I_1026

表 4.5.6-5 船舶の平面方向の傾きによる衝突形態の整理

	衝突パターン	津波の 来襲方向	船舶の 衝突向き	衝突形態の特徴
A		<p>被衝突物となる施設に対して直方向から津波が来襲。</p>	<p>津波の来襲方向と同じで船首、船尾及び船側から衝突。</p>	<p>施設に対して船首、船尾及び船側が直角に1箇所衝突する。</p>
B		<p>被衝突物となる施設に対して直方向から津波が来襲。</p>	<p>被衝突物付近で衝突した後、逆側の船尾(船首)側も衝突するため、2箇所以上で衝突が生じる。</p>	<p>船首(又は船尾)付近で衝突した後、逆側の船尾(船首)側も衝突するため、2箇所以上で衝突が生じる。</p>
C		<p>被衝突物となる施設に対して斜め方向から津波が来襲。</p>	<p>津波の来襲方向と同じで船首及び船尾から衝突。</p>	<p>船首(又は船尾)付近で衝突した後、逆側の船尾(船首)側も衝突するため、2箇所以上で衝突が生じる。</p>
D		<p>被衝突物となる施設に対して斜め方向から津波が来襲。</p>	<p>津波の来襲方向と同じで船首側から衝突。</p>	<p>船首(又は船尾)付近で衝突した後、逆側の船尾(船首)側も衝突するため、2箇所以上で衝突が生じる。</p>

次に、船舶の鉛直断面方向の傾き（ピッチング及びローリング）による衝突荷重への影響について、図 4.5.6-13 に示す。衝突パターン B、C 及び D と同様に、船舶の重心位置と衝突位置の関係から、衝突後に船体が上下に回転することにより、剛壁に対して船体が 2 箇所以上で衝突し、衝突荷重が分散される。

よって、衝突荷重を安全側に算定するため、船舶の鉛直断面方向の傾きについては、船舶の重心位置と衝突位置が水平となるよう設定する。

なお、津波により船体に傾く力が作用した場合、船体は元の直立状態に戻ろうとする復原力が作用することから、船体が大きく傾いた状態で直接剛壁に衝突する衝突形態は生じないものと判断した。

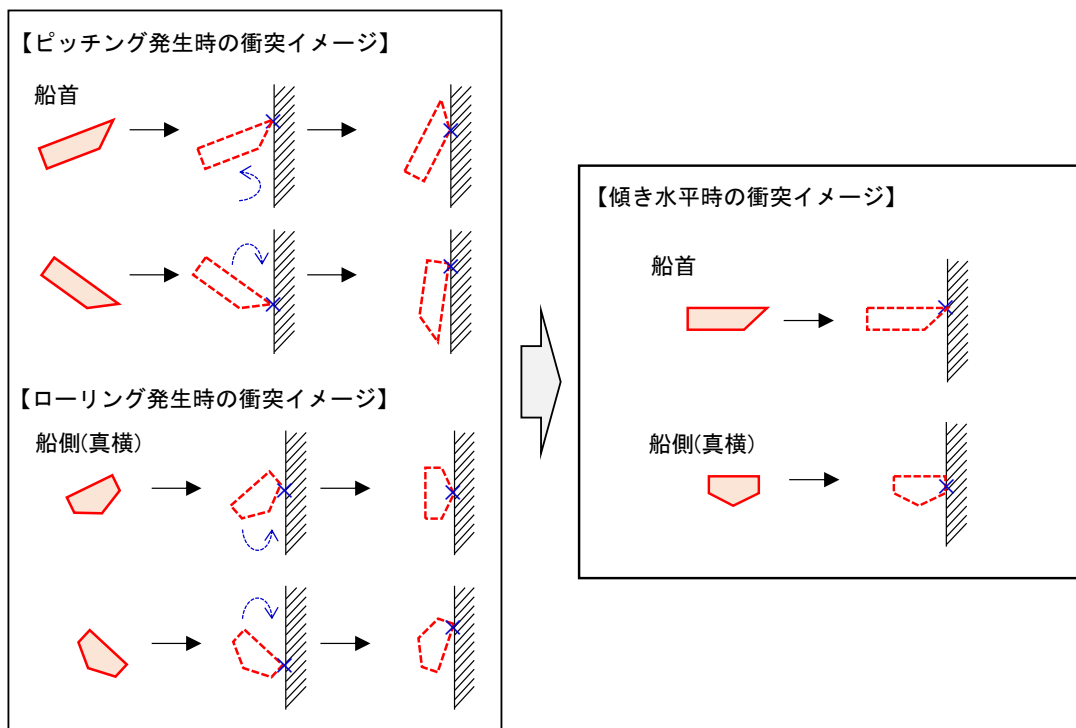


図 4.5.6-13 鉛直断面方向の傾きに対する衝突イメージ

衝突形態と解析ケース一覧を表 4.5.6-6 に、衝突解析の解析ケースと衝突イメージを図 4.5.6-14 に示す。

表 4.5.6-6 衝突形態と解析ケース一覧

ケース	衝突形態	流速
①	船首衝突	10.0 m / s
②	船尾衝突	
③	真横衝突	
④	斜め船首衝突	
⑤	斜め船尾衝突	

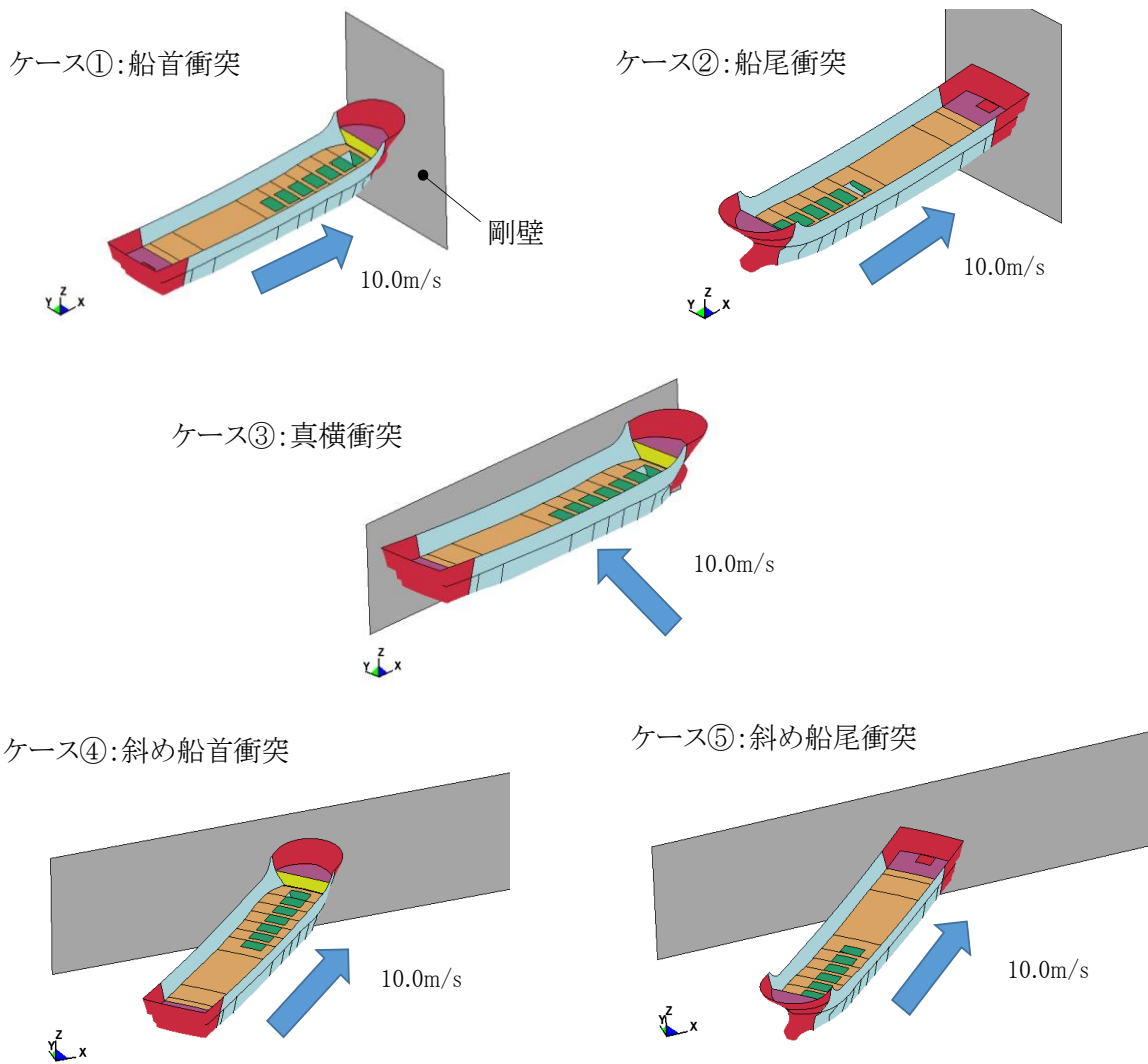


図 4.5.6-14 衝突解析の解析ケースと衝突イメージ

e. 解析結果

船舶（総トン数 19 トン）の衝突解析において，船舶が剛壁全体に作用する衝突荷重（総衝突荷重）を抽出する。また，局所的な衝突荷重の確認に当たっては，施設評価における衝突荷重の載荷方法を踏まえて，単位幅となる剛壁 1 m 当たりに作用する衝突荷重を抽出する。

(a) ケース①（船首衝突）

ケース①（船首衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-15 に衝突状況，図 4.5.6-16 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，図 4.5.6-17 に剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴，図 4.5.6-18 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布，表 4.5.6-7 に衝突荷重のまとめを示す。

- ・ 図 4.5.6-15 より，船舶が剛壁に衝突することで，船首から隔壁③まで破壊することを確認した。また，機関部（エンジン）が剛壁へ衝突していないことから，機関部の影響がないことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-16 より，各剛壁（剛壁番号①～⑥）の衝突荷重を集計し，衝突後 0.37 秒（隔壁①，②衝突時）で最大となる 3,078kN となることを確認した。
- ・ 最大衝突荷重 3,078kN が発生する衝突後 0.37 秒において，残存質量として約 99.6% であることから，衝突時の船体破壊に伴う質量低下による衝突荷重への影響は軽微と判断する。
- ・ 衝突荷重の作用時間は 1.20 秒となることを確認した。
- ・ 図 4.5.6-17 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船首の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号③において衝突後 0.37 秒（隔壁①，②衝突時）で最大となる衝突荷重 1,107kN が作用することを確認した。船首は複雑な形状をしていることから，剛壁の配置によって剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重が変わる可能性があるが，剛壁の配置による最大衝突荷重の影響がないことを確認した（添付資料 10 参照）。
- ・ 図 4.5.6-18 より，剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重は分布的に作用していることを確認した。また，ケース①（船首衝突）の最大平均衝突荷重（剛壁荷重作用幅 6m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.37 秒で 513kN/m となり，剛壁番号③，④において衝突荷重の平均値を上回る荷重が発生することを確認した。船舶の形状が左右対称であることに対して，衝突荷重が左右非対称となっている要因について，添付資料 11 に示す。

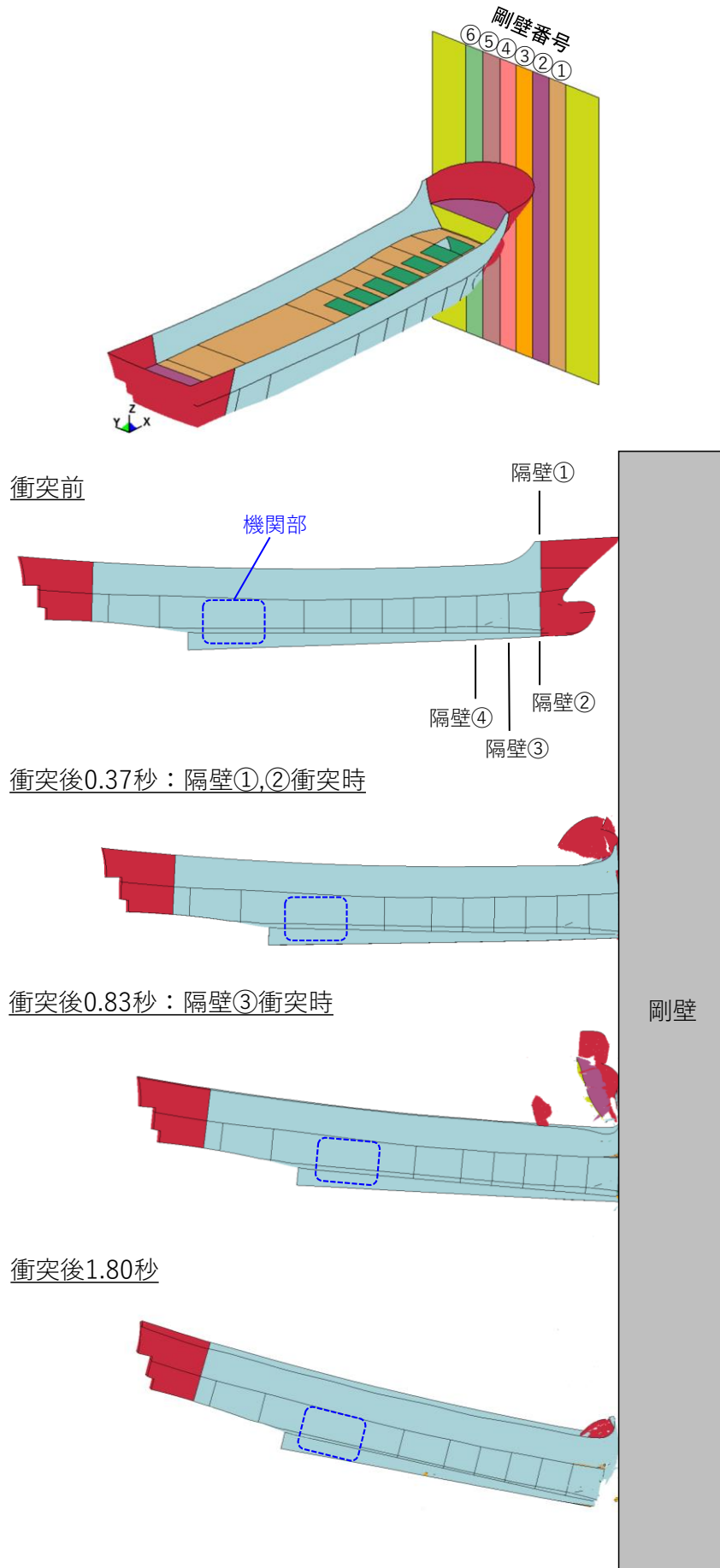


图 4.5.6-15 衝突狀況

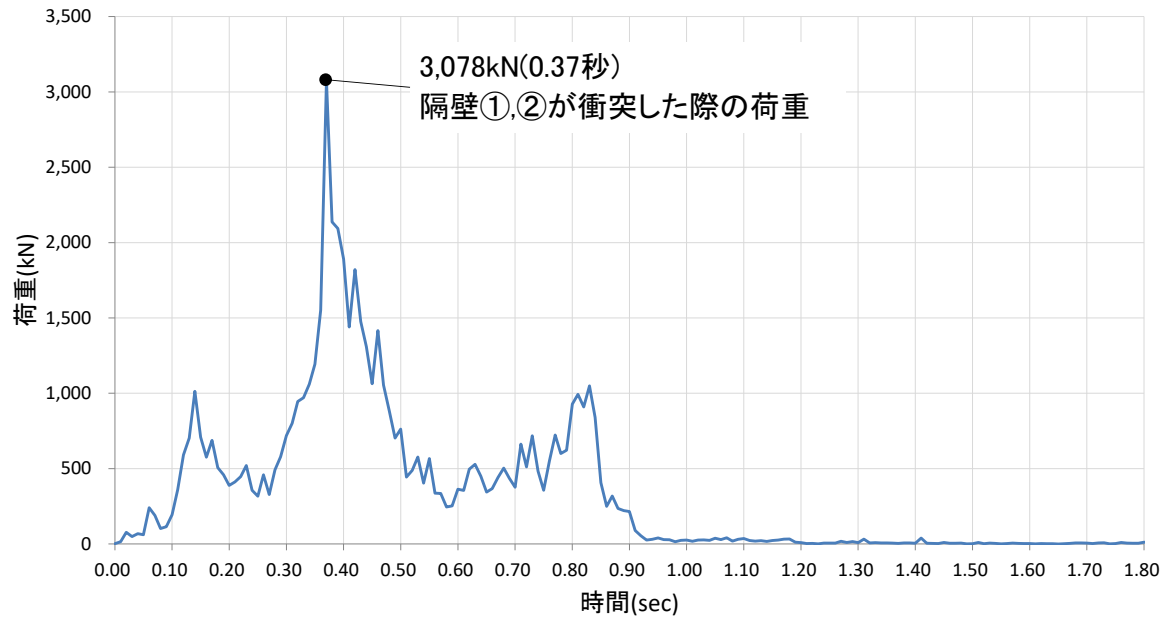
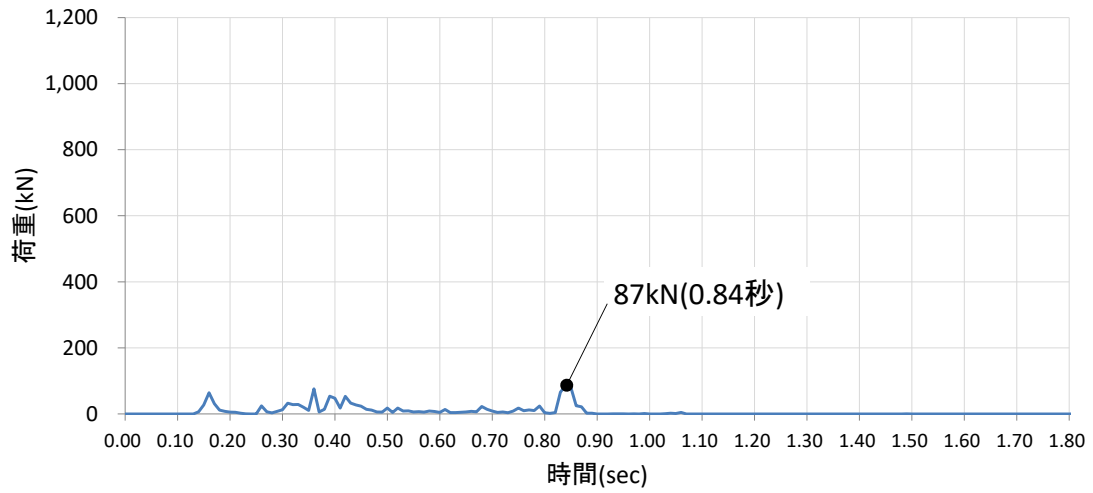
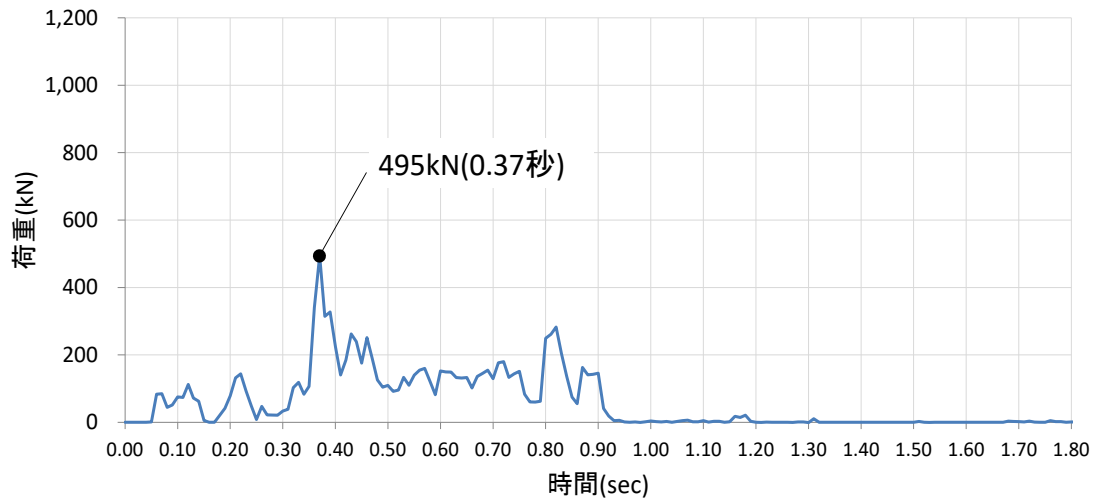


図 4.5.6-16 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

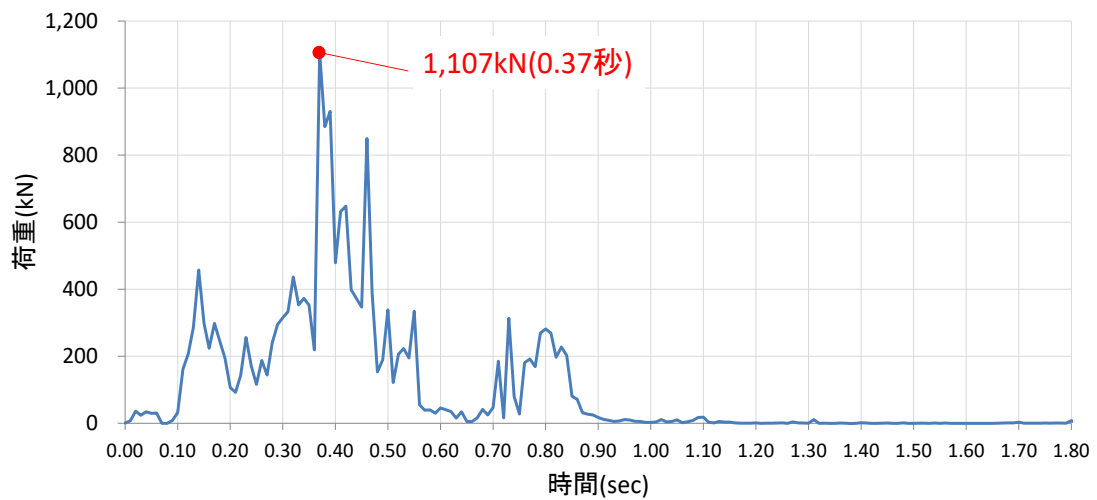
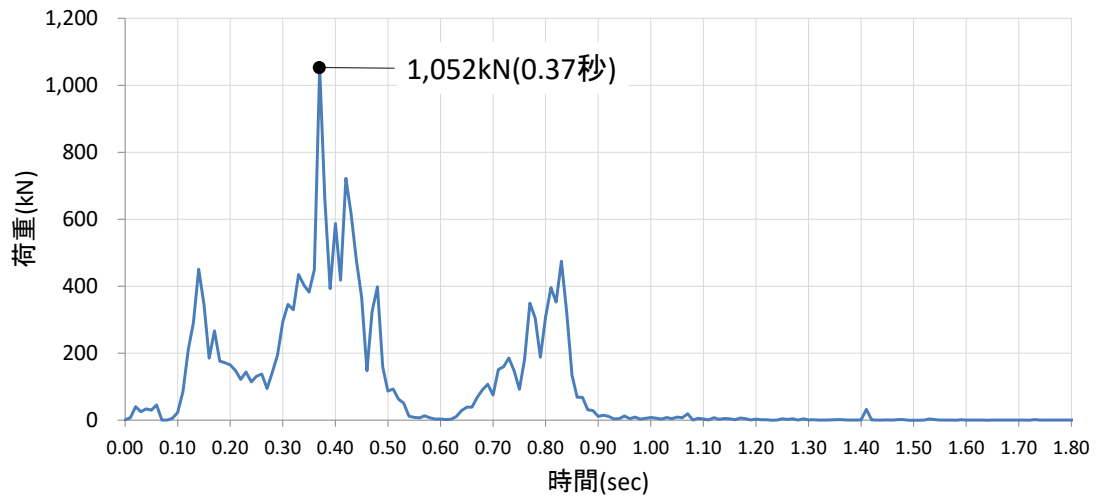
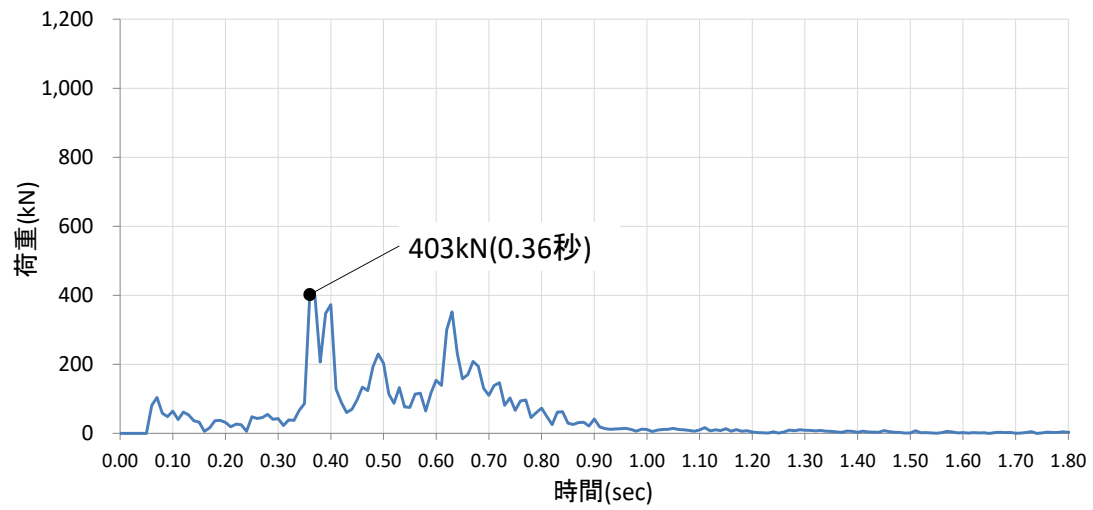


図 4.5.6-17 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

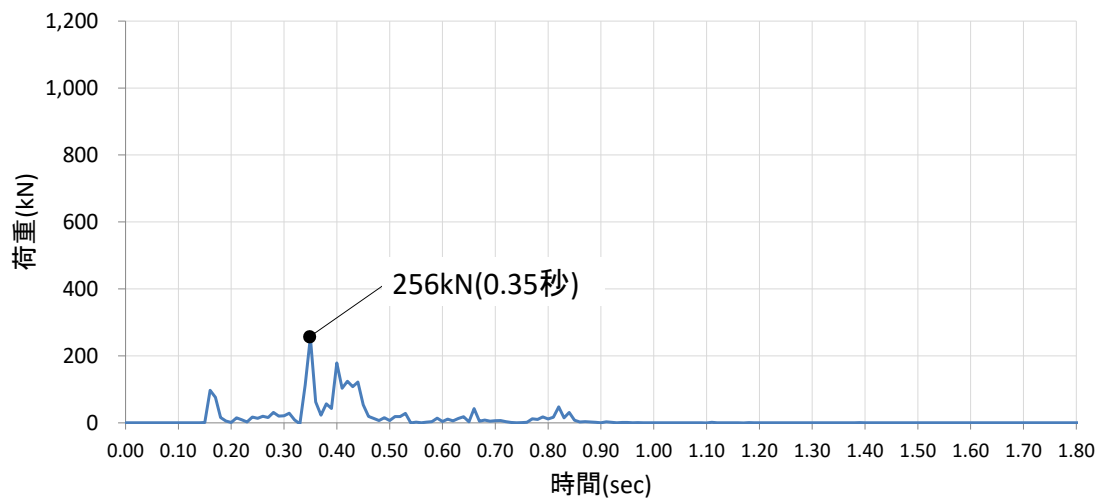


図 4.5.6-17 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

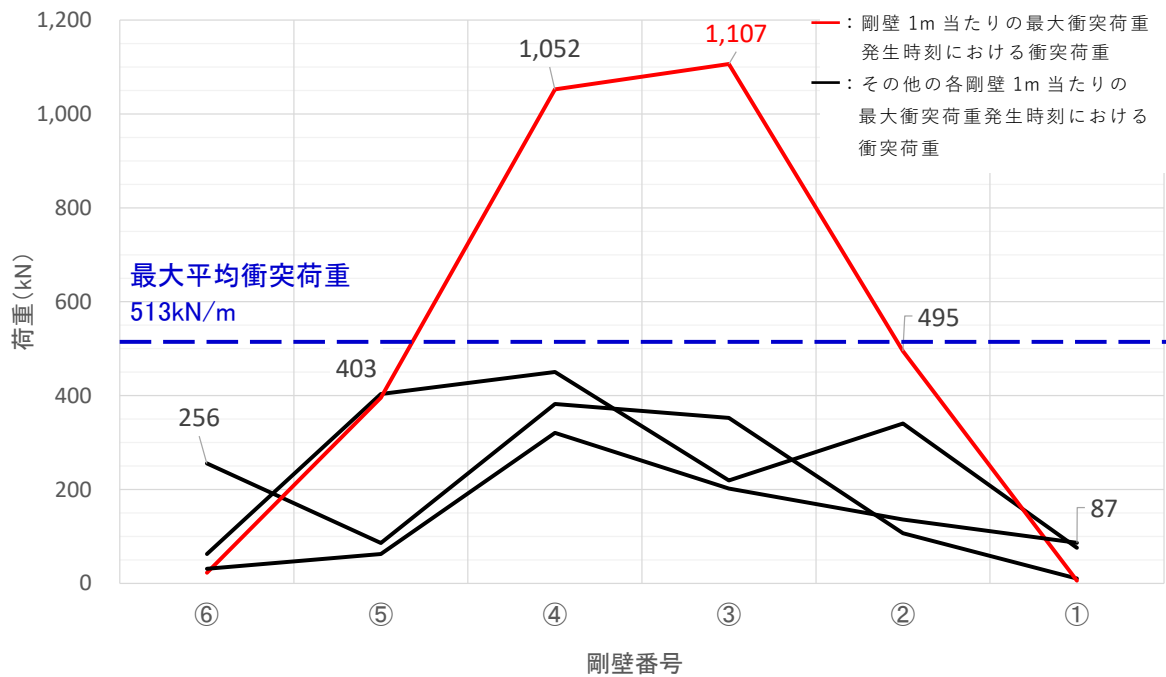


図 4.5.6-18 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

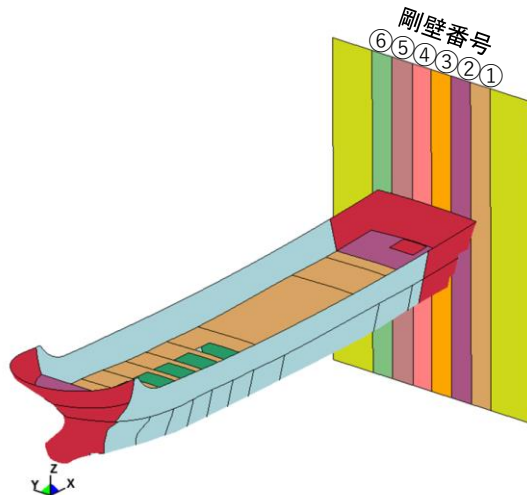
表 4.5.6-7 衝突荷重のまとめ

衝突荷重の集計値 (kN) 【時刻 (秒)】	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重 (kN) 【時刻 (秒)】
3,078 【0.37】	1,107 【0.37】

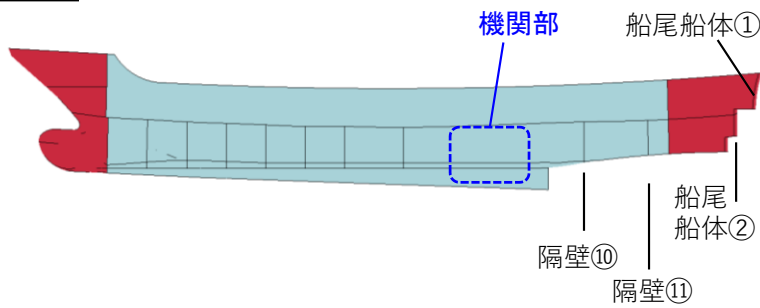
(b) ケース②（船尾衝突）

ケース②（船尾衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-19 に衝突状況，図 4.5.6-20 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，図 4.5.6-21 に剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴，図 4.5.6-22 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布，表 4.5.6-8 に衝突荷重のまとめを示す。

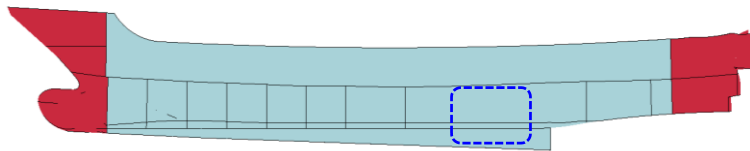
- ・ 図 4.5.6-19 より，船舶が剛壁に衝突することで，船尾から隔壁⑩付近まで破壊することを確認した。また，機関部（エンジン）が剛壁へ衝突していないことから，機関部の影響がないことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-20 より，各剛壁（剛壁番号①～⑥）の衝突荷重を集計し，衝突後 0.48 秒（隔壁⑩衝突時）で最大となる 3,019kN となることを確認した。
- ・ 最大衝突荷重 3,019kN が発生する衝突後 0.48 秒において，残存質量として約 98.8% であることから，衝突時の船体破壊に伴う質量低下による衝突荷重への影響は軽微と判断する。
- ・ 衝突荷重の作用時間は 1.57 秒となることを確認した。
- ・ 図 4.5.6-21 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船尾の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号②において衝突後 0.48 秒（隔壁⑩衝突時）で最大となる衝突荷重 937kN が作用することを確認した。なお，ケース①（船首衝突）の最大衝突荷重（3,078kN）と比較して，作用する衝突荷重が小さくなることを確認した。
- ・ 図 4.5.6-22 より，剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重は分布的に作用していることを確認した。また，ケース②（船尾衝突）の最大平均衝突荷重（剛壁荷重作用幅 6m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.48 秒で 503kN/m となり，剛壁番号①，②，④～⑥において衝突荷重の平均値を上回る荷重が発生することを確認した。



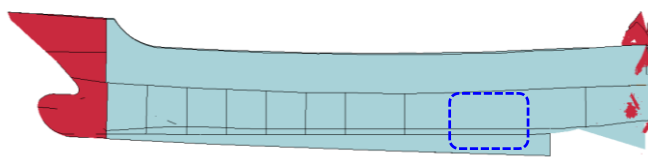
衝突前



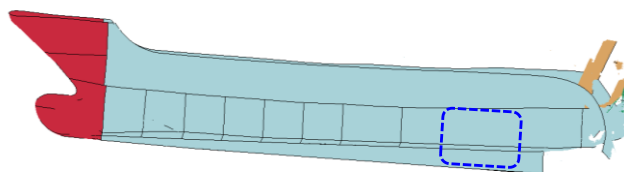
衝突後0.03秒：船尾船体①衝突時



衝突後0.48秒：隔壁⑪衝突時



衝突後1.80秒



剛壁

图 4.5.6-19 衝突状况

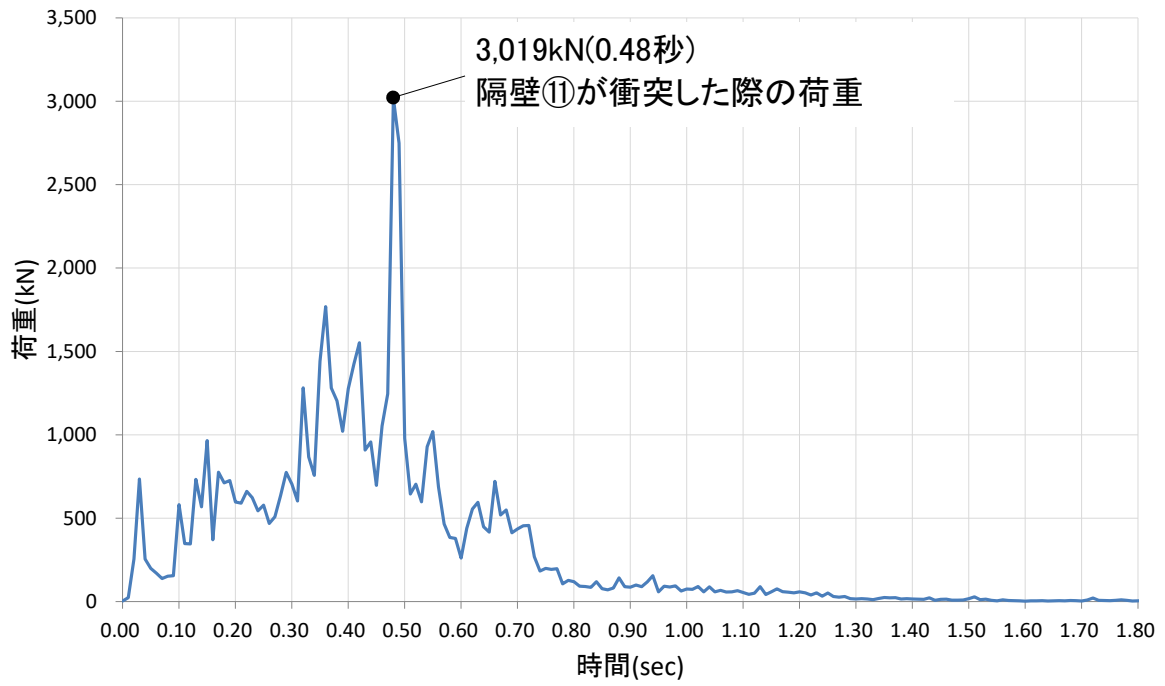
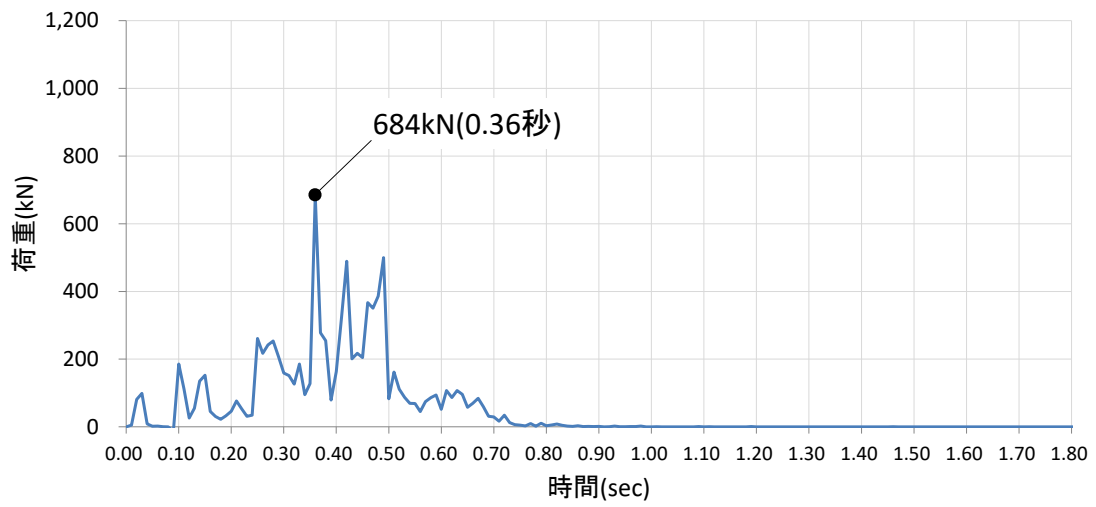
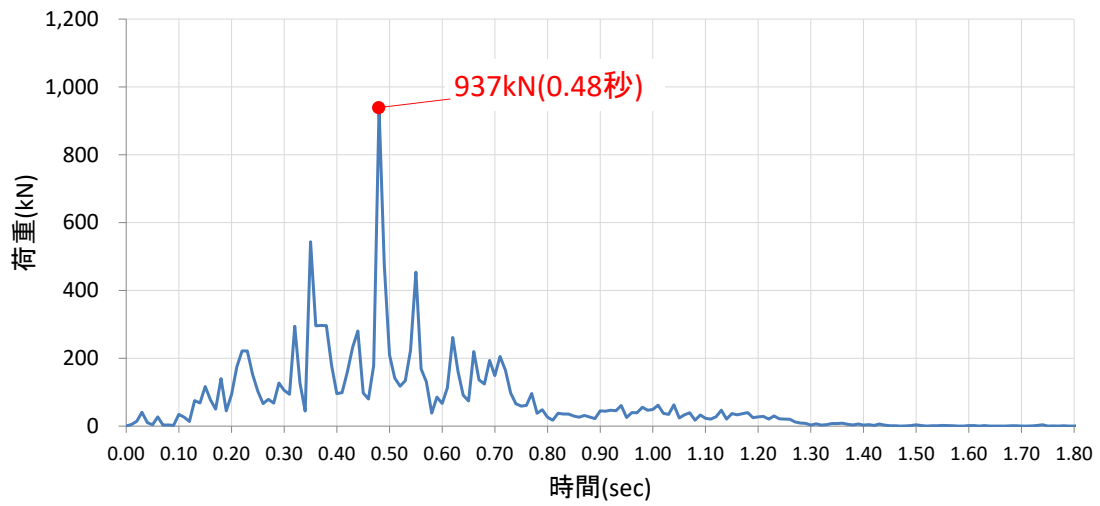


図 4.5.6-20 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

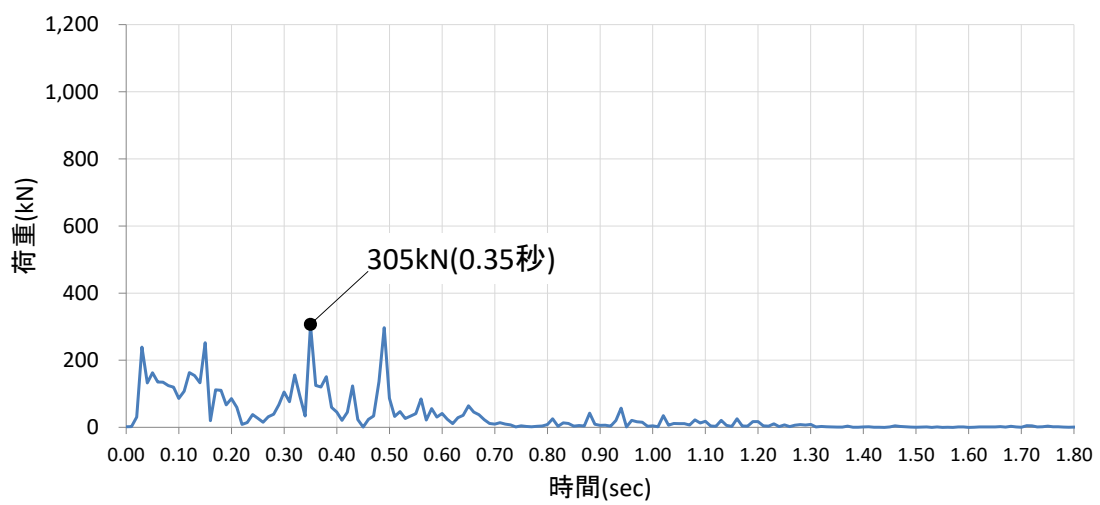
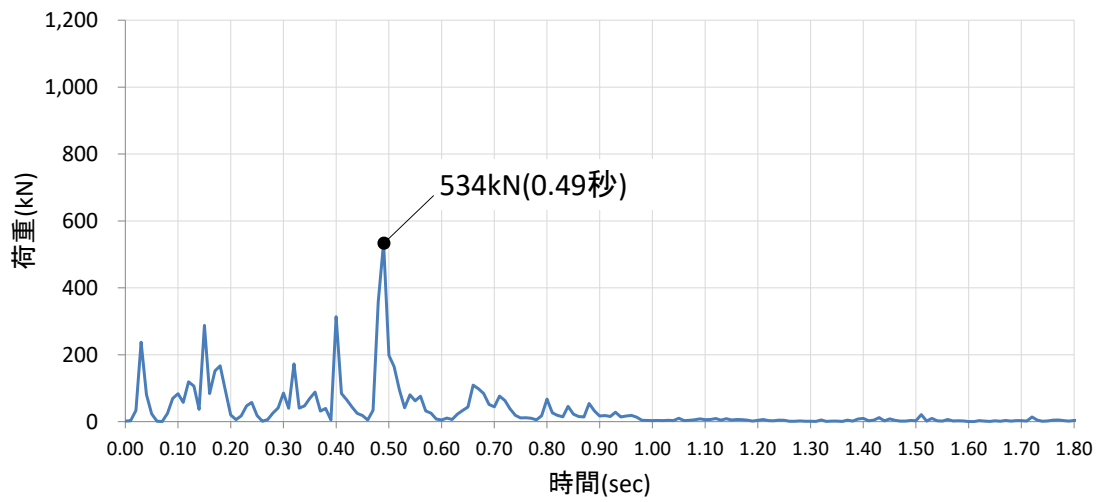
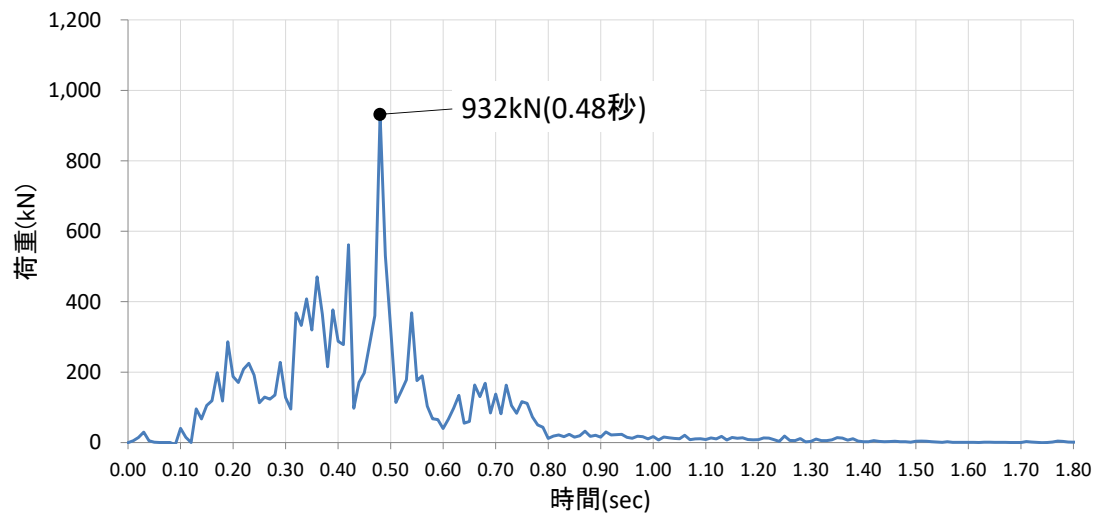


図 4.5.6-21 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

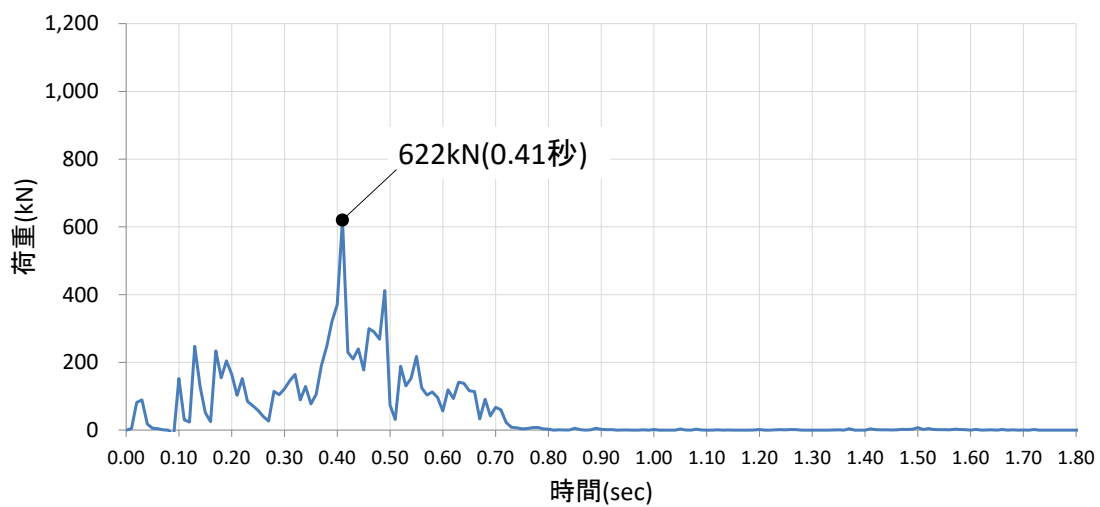


図 4.5.6-21 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

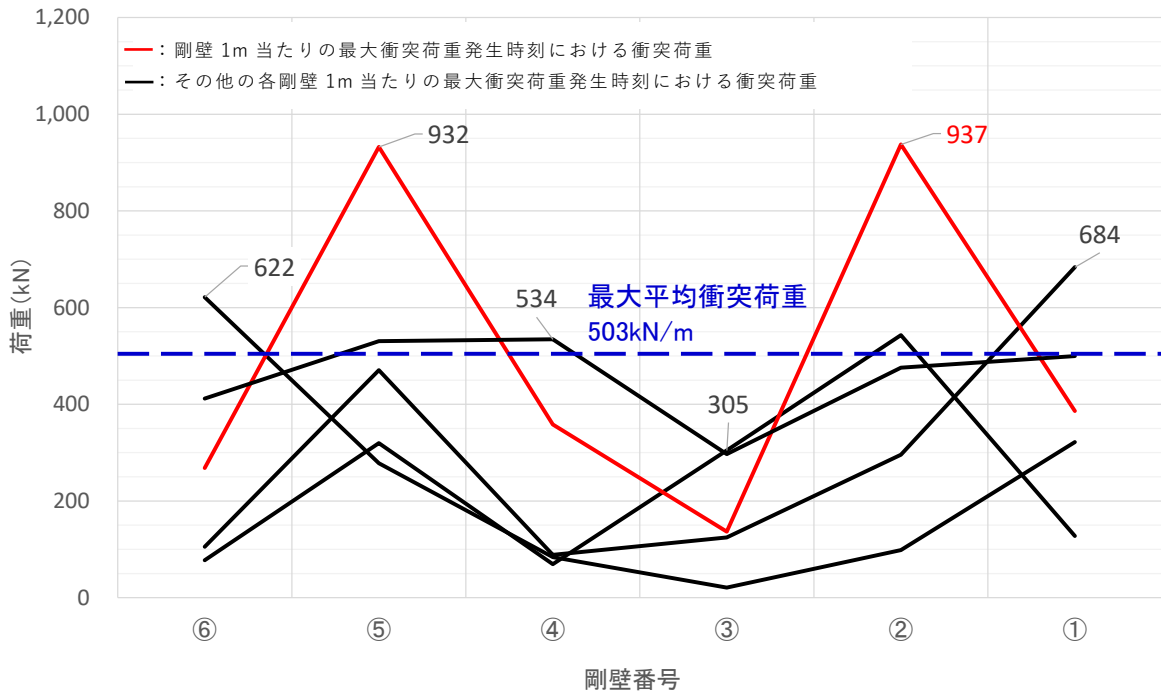


図 4.5.6-22 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

表 4.5.6-8 衝突荷重のまとめ

衝突荷重の集計値 (kN) 【時刻 (秒)】	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重 (kN) 【時刻 (秒)】
3,019 【0.48】	937 【0.48】

(c) ケース③（真横衝突）

ケース③（真横衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-23 に衝突状況，図 4.5.6-24 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，図 4.5.6-25 に剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴，図 4.5.6-26 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布，表 4.5.6-9 に衝突荷重のまとめを示す。

- ・ 図 4.5.6-23 より，機関部（エンジン）が剛壁へ衝突していないことから，機関部の影響がないことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-24 より，各剛壁（剛壁番号①～⑮）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突後 0.03 秒（船側①衝突時）で最大となる 7,395kN となることを確認した。
- ・ 最大衝突荷重 7,395kN が発生する衝突後 0.03 秒において，残存質量として約 99.9% であることから，衝突時の船体破壊に伴う質量低下による衝突荷重への影響は軽微と判断する。
- ・ 衝突荷重の作用時間は 0.71 秒となり，ケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）と比較して，衝突荷重の作用時間が短いことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-25 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船体側面の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号⑧において衝突後 0.10 秒で最大となる衝突荷重 736kN が作用することを確認した。なお，ケース③（真横衝突）は船長さ方向の衝突形態となるため，ケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）と比較して，最大衝突荷重は小さくなっているが，剛壁延長方向に対する衝突荷重の作用幅が長くなることを確認した。
- ・ 図 4.5.6-26 より，剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重は，ケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）と比較して，より分布的に作用していることを確認した。また，ケース③（真横衝突）の最大平均衝突荷重（剛壁荷重作用幅 24m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.03 秒で 308kN/m となり，剛壁番号④～⑳，㉒，㉔，㉖において衝突荷重の平均値を上回る荷重が発生することを確認した。

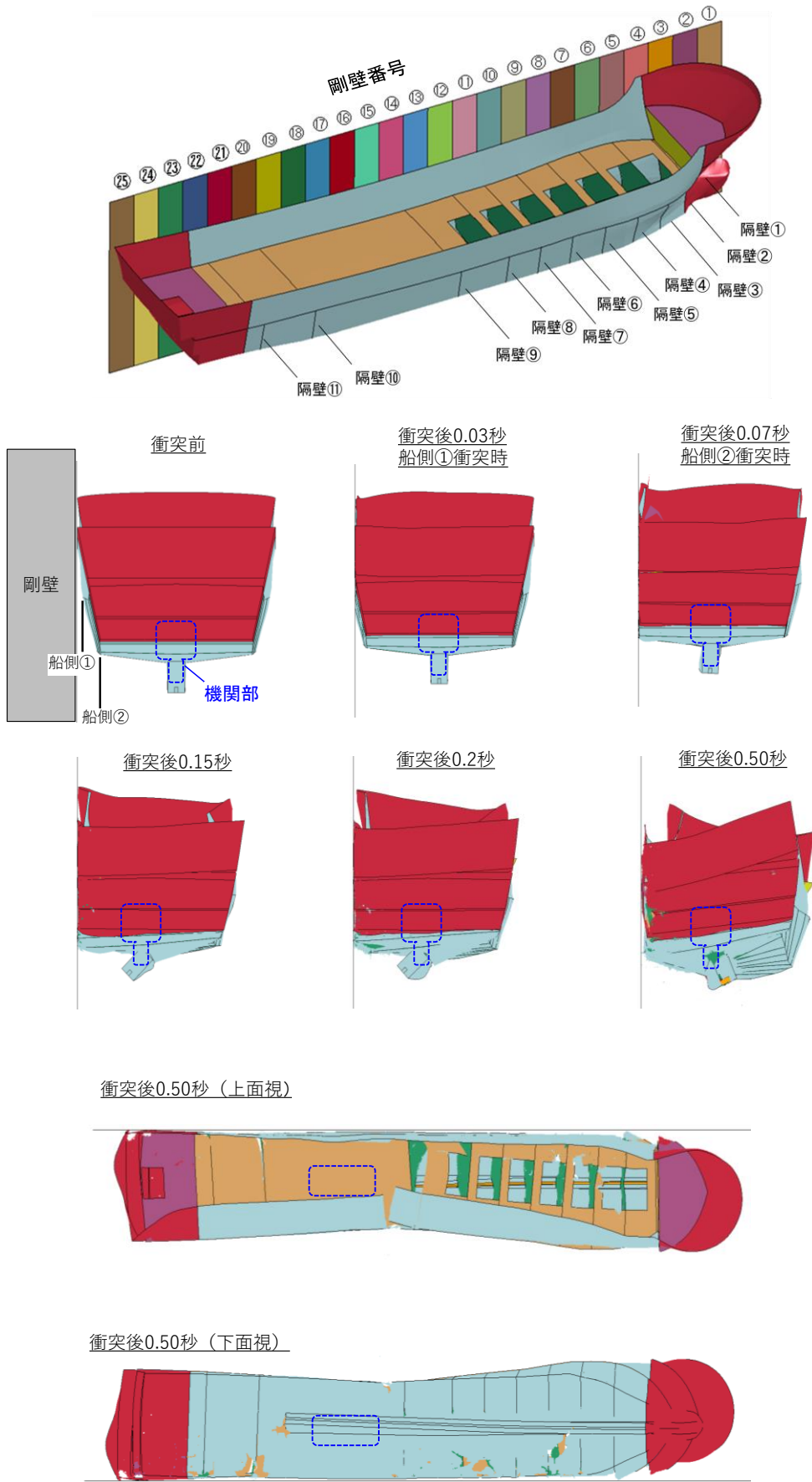


図 4.5.6-23 衝突状況

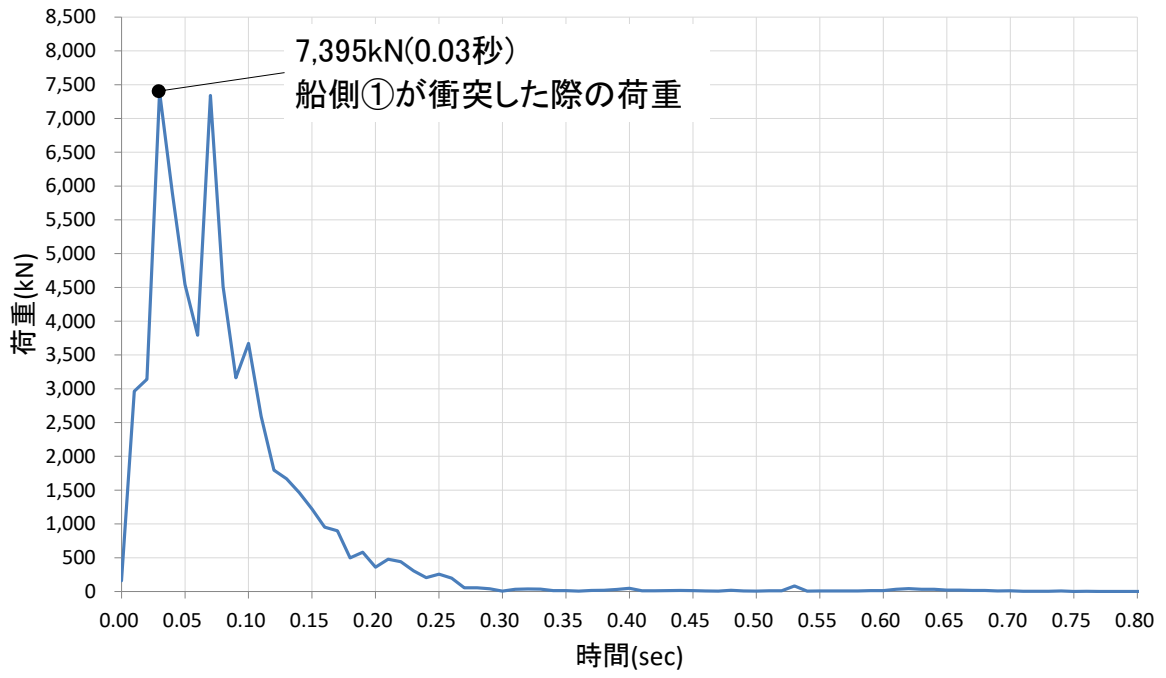
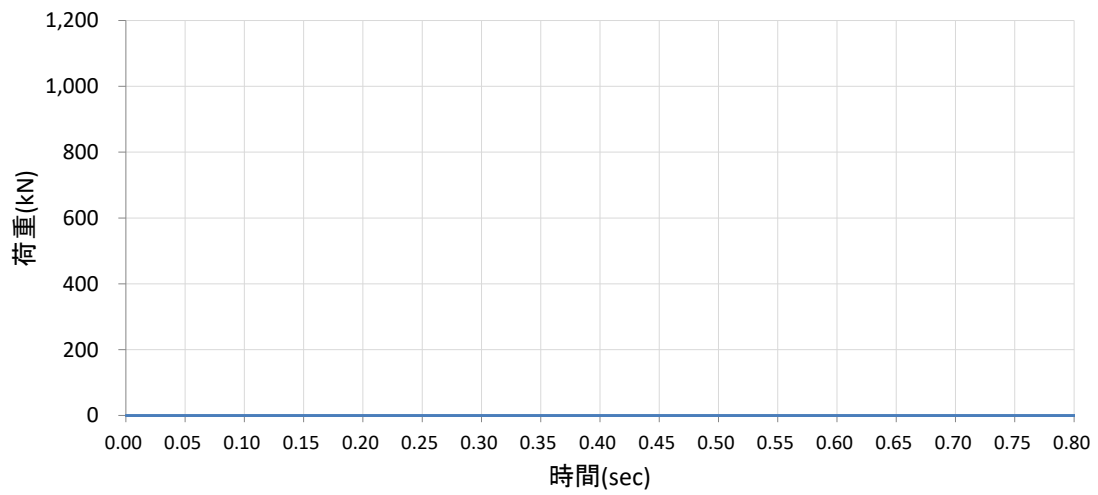
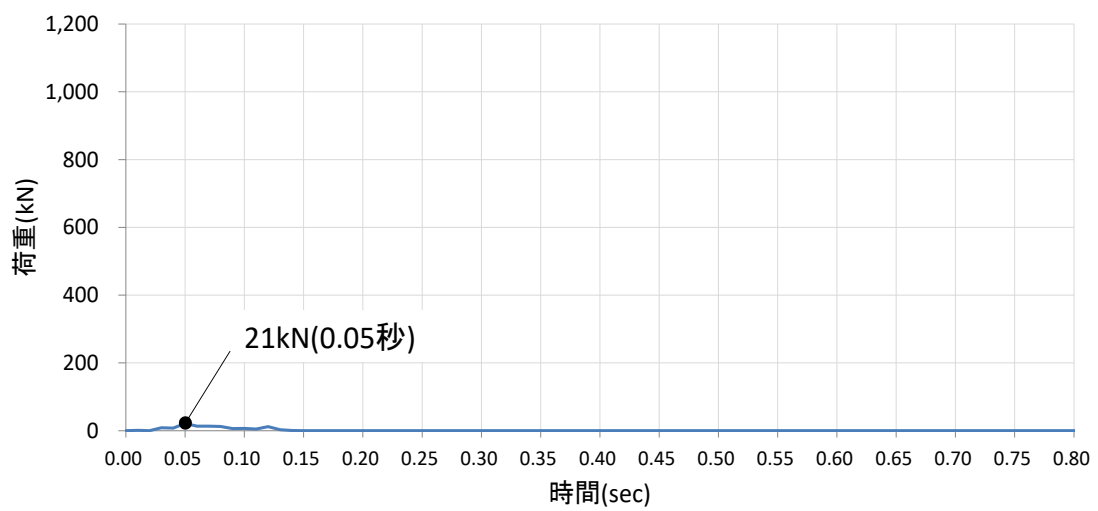


図 4.5.6-24 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

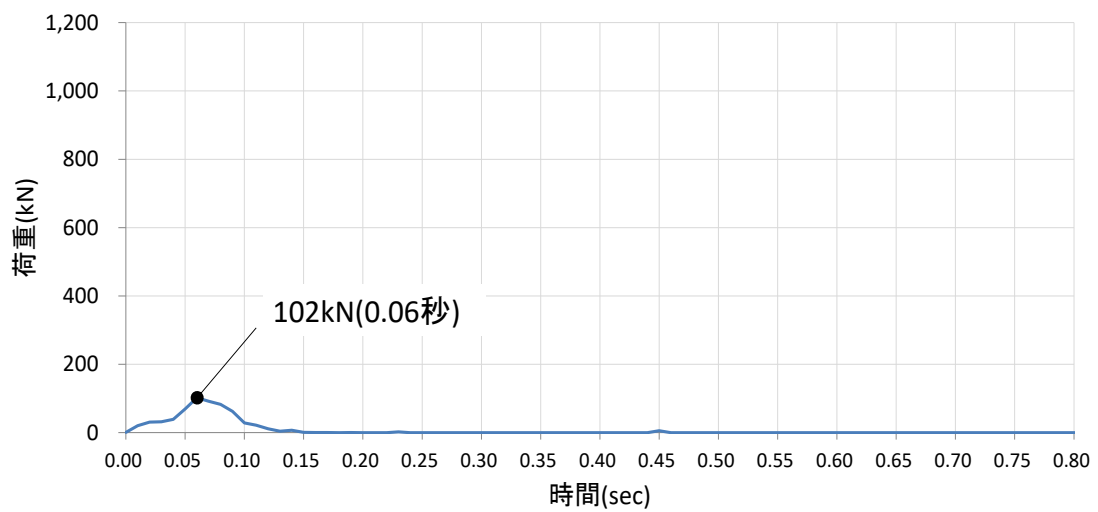
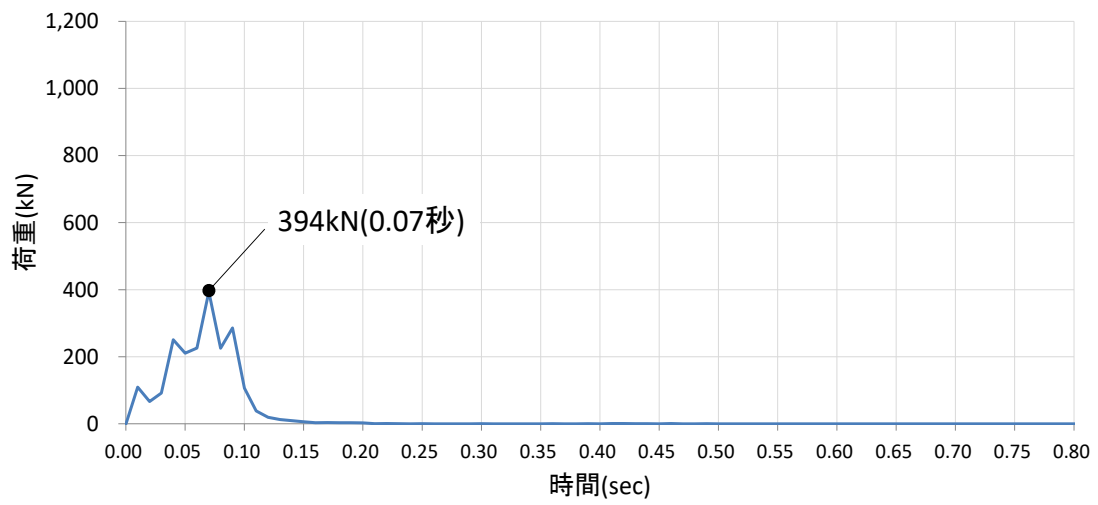
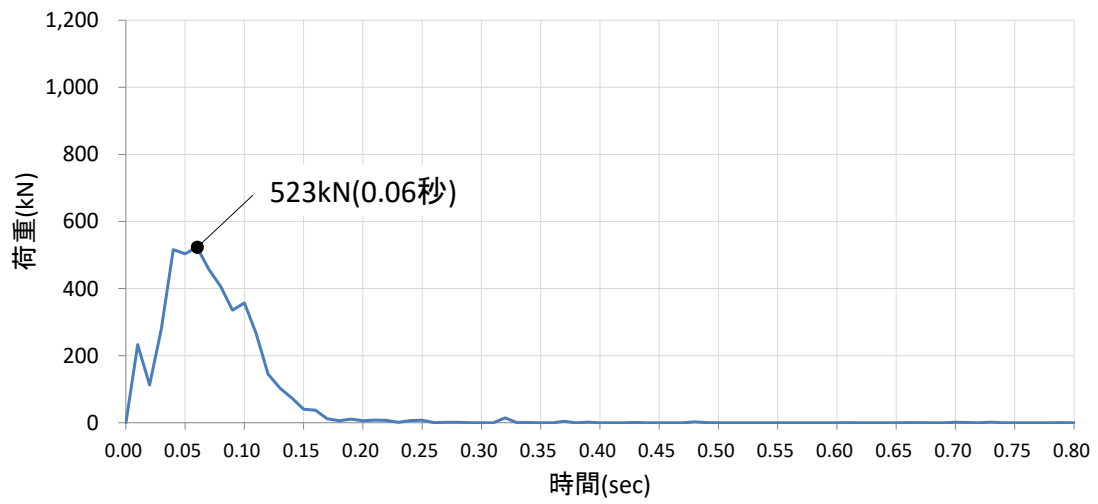


図 4.5.6-25 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

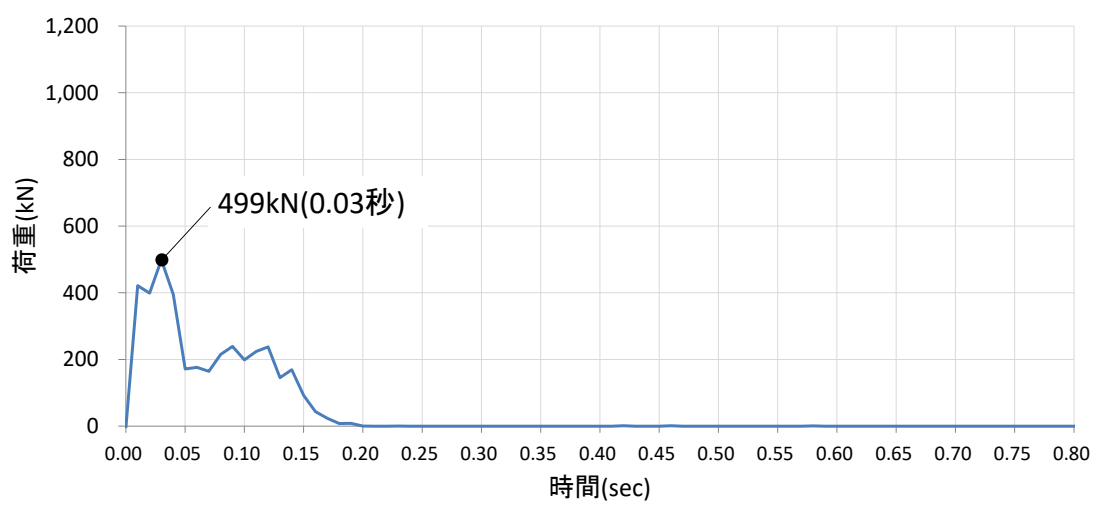
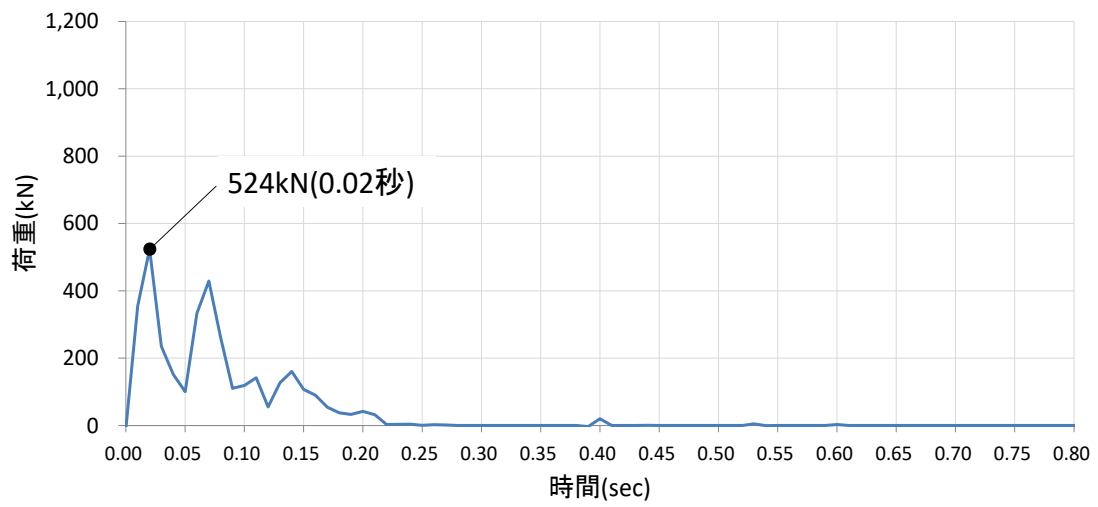
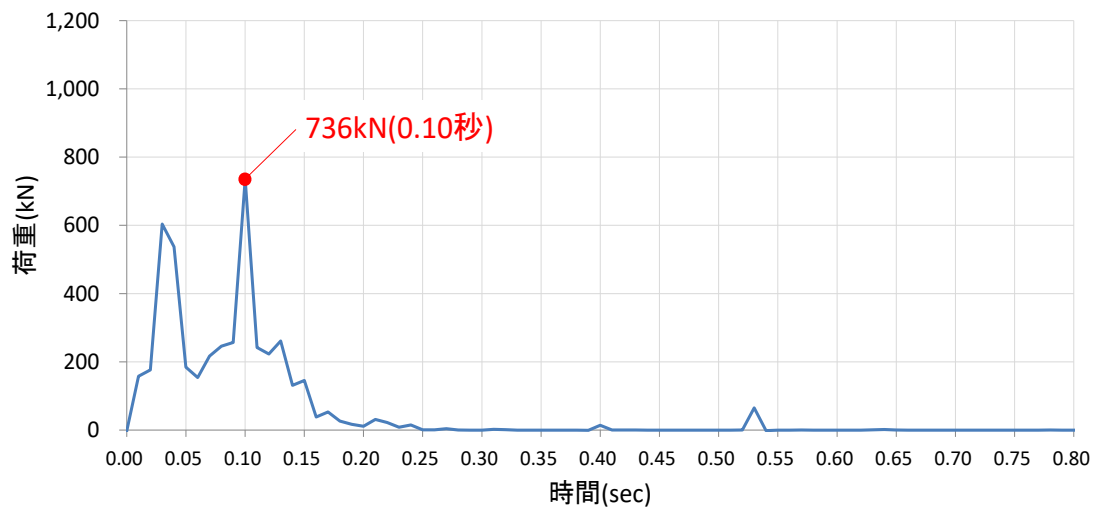


図 4.5.6-25 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑦



剛壁番号⑧



剛壁番号⑨

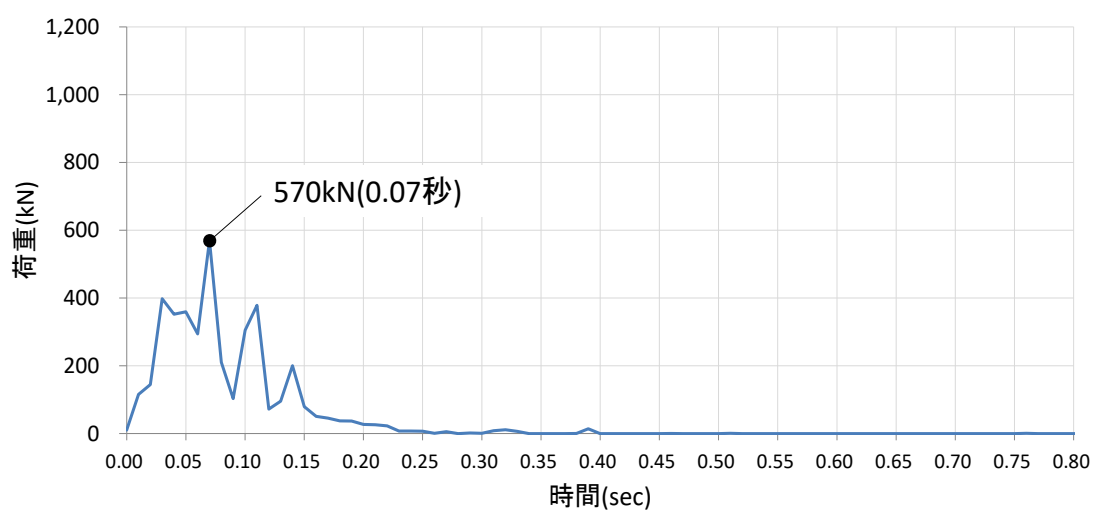
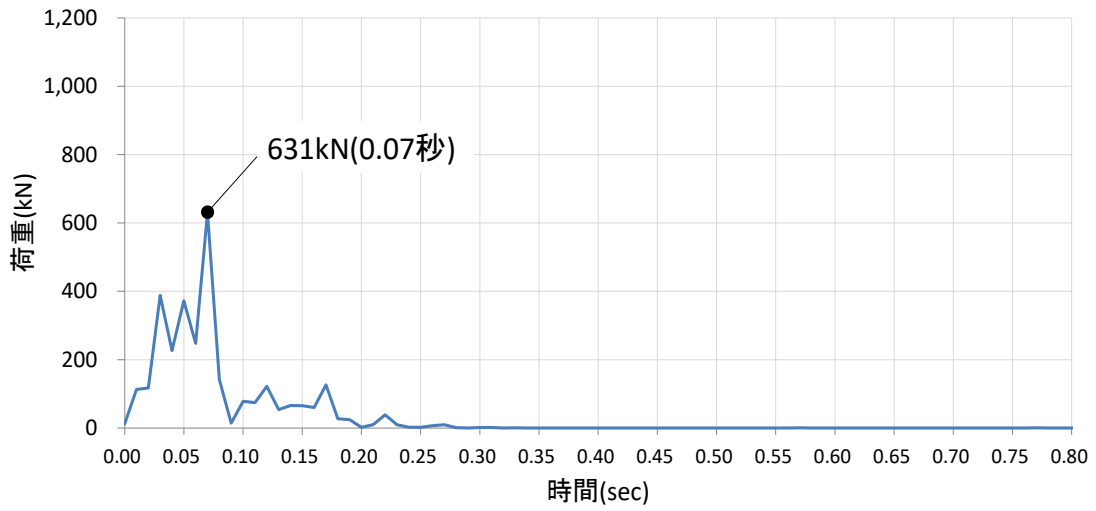
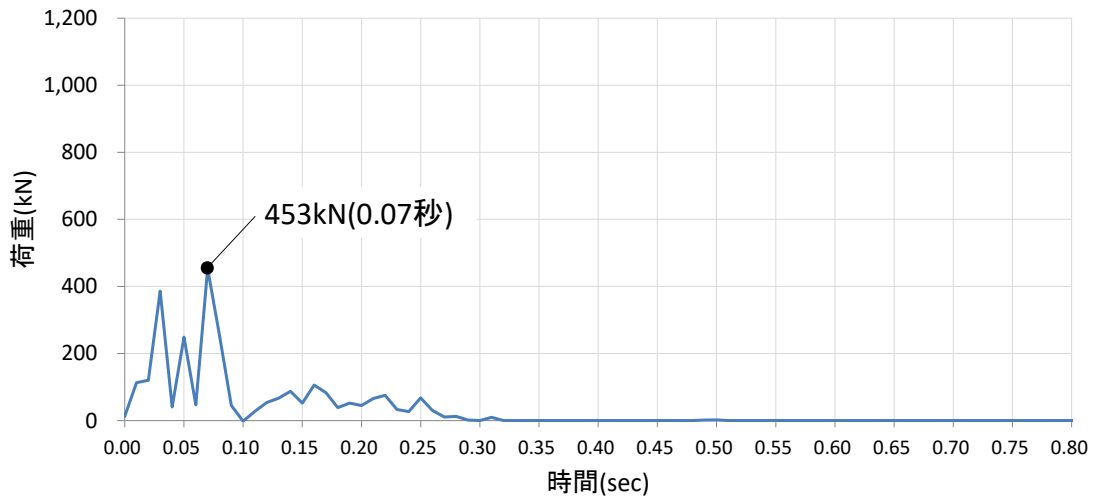


図 4.5.6-25 (3) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑩



剛壁番号⑪



剛壁番号⑫

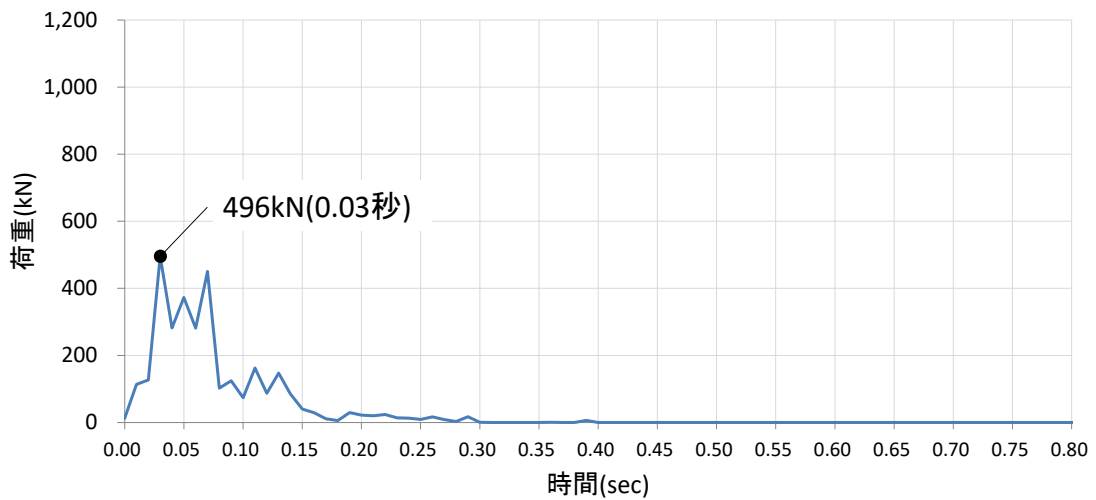
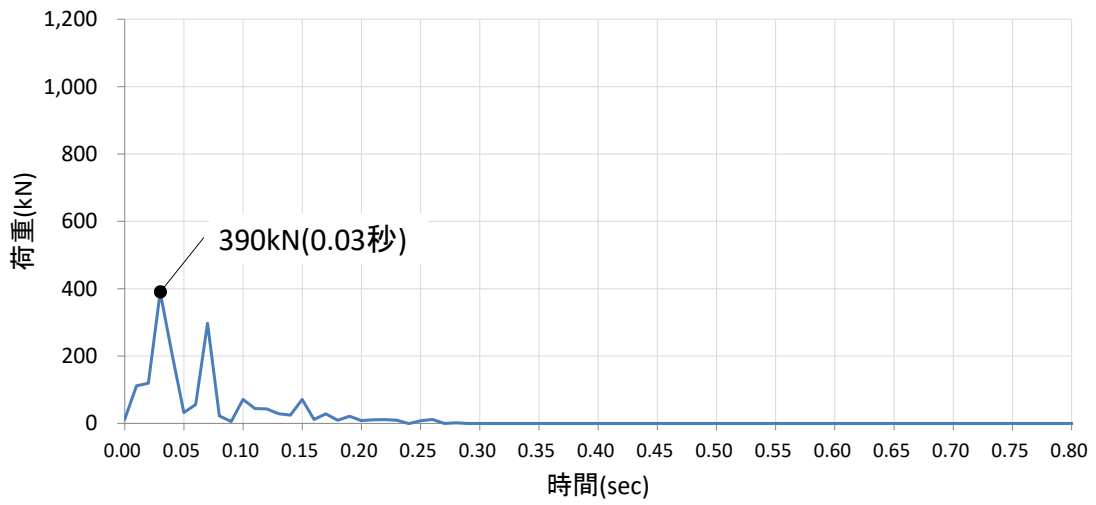
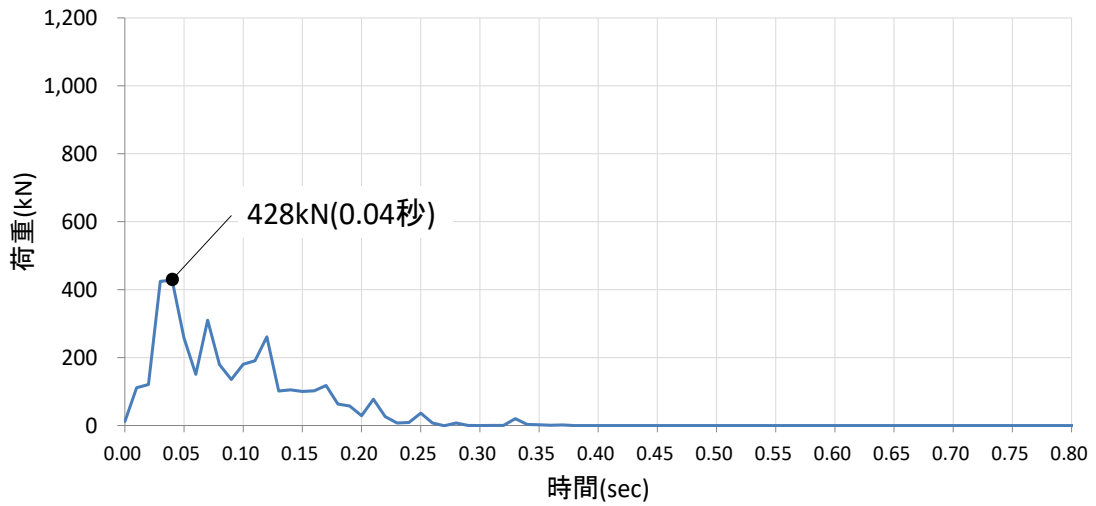


図 4.5.6-25 (4) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

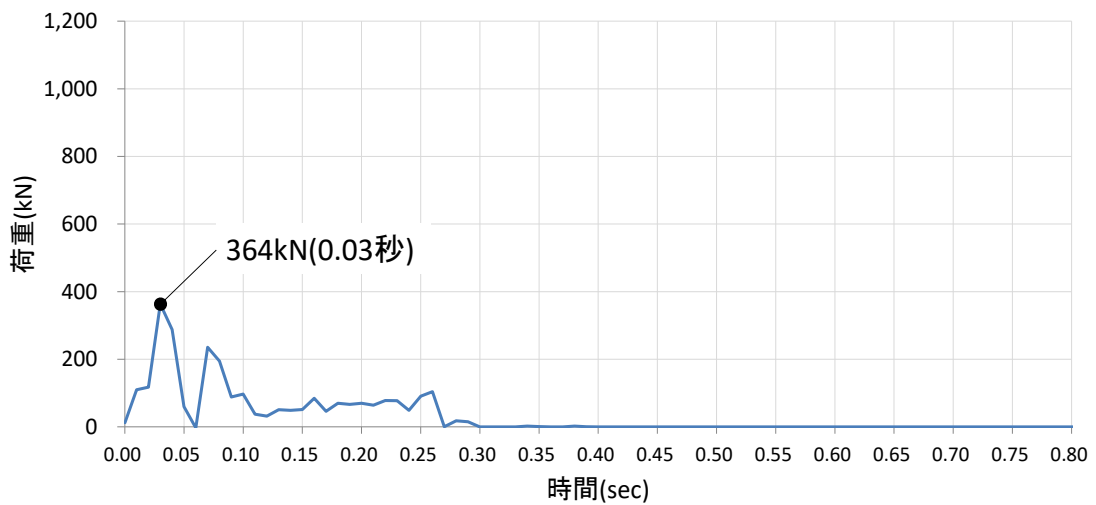
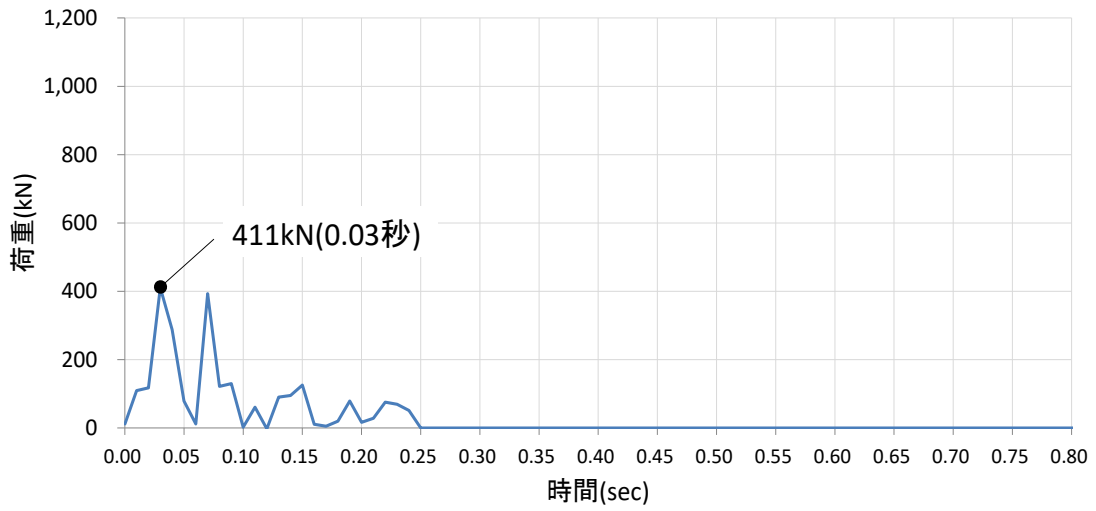
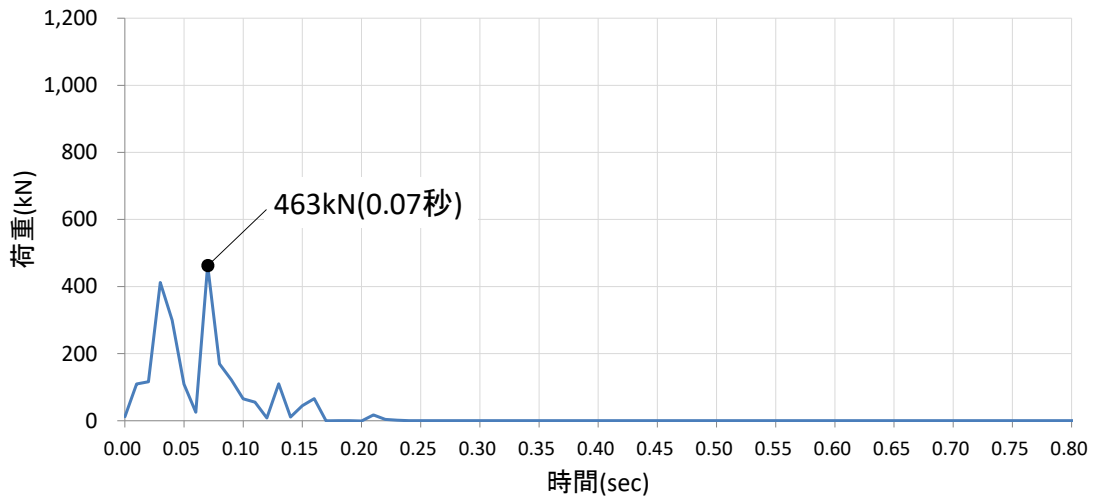


図 4.5.6-25 (5) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

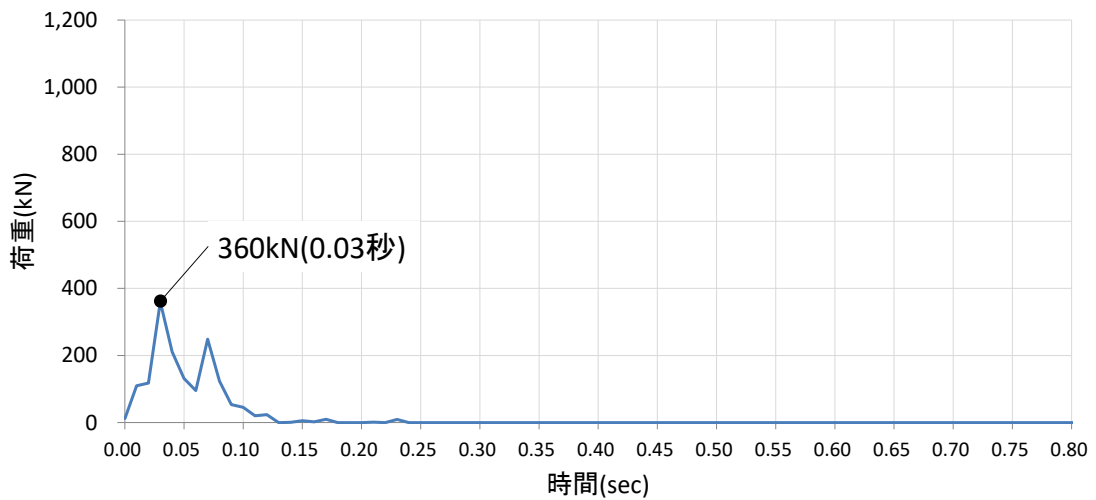
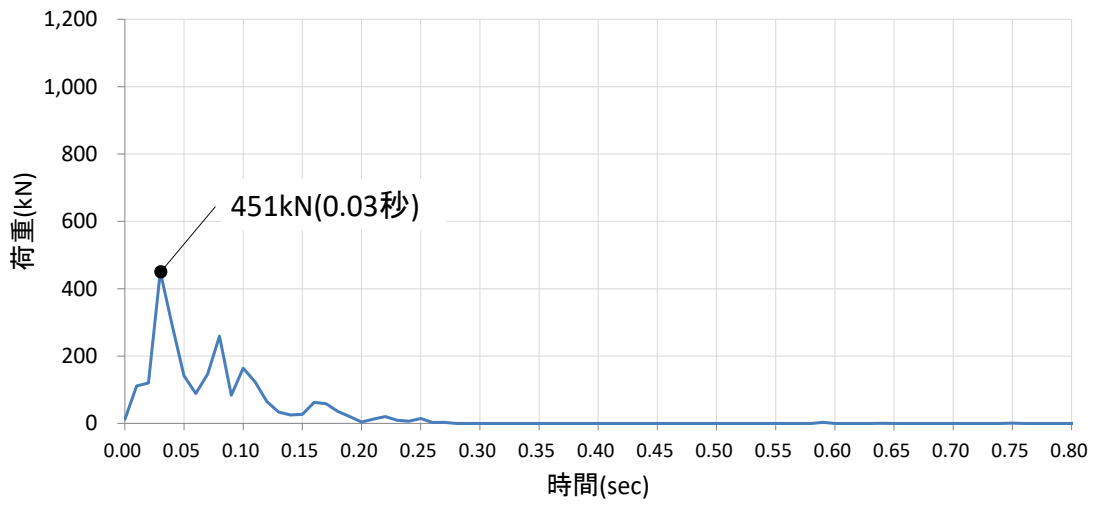
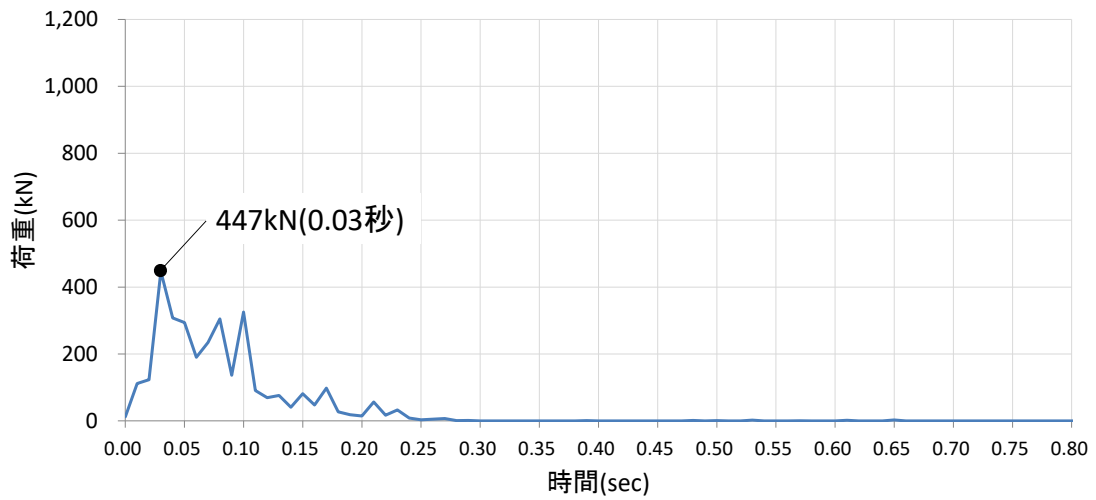


図 4.5.6-25 (6) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑱



剛壁番号㉑



剛壁番号㉒

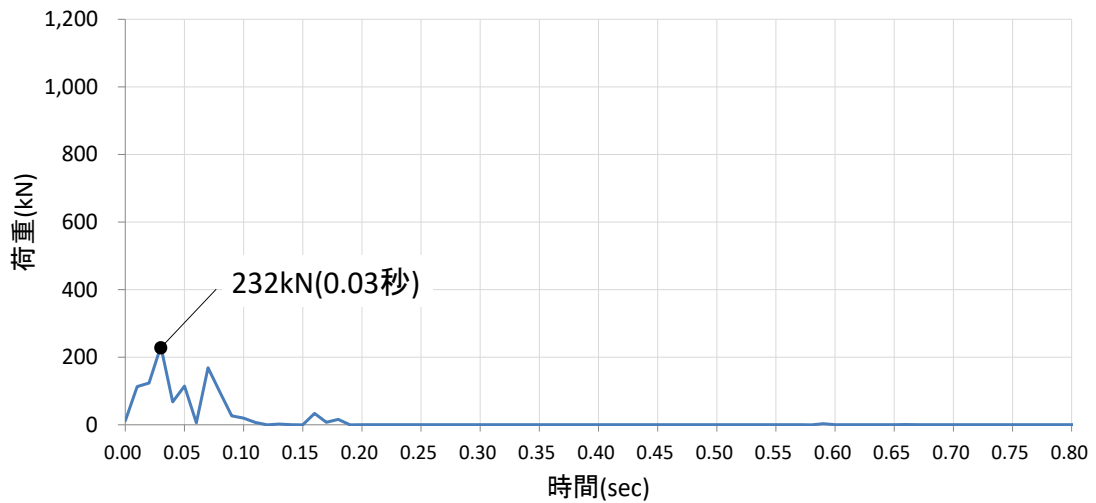
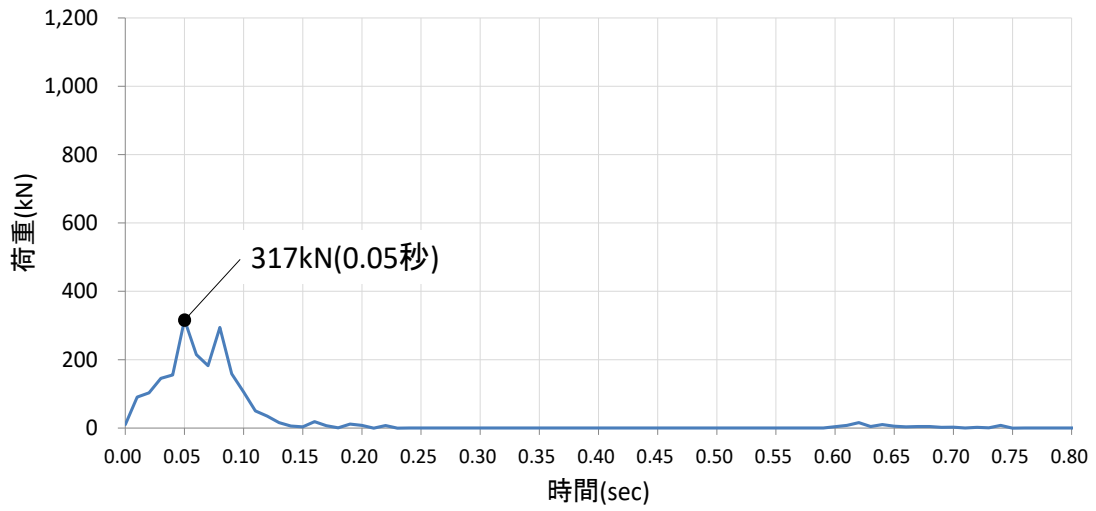
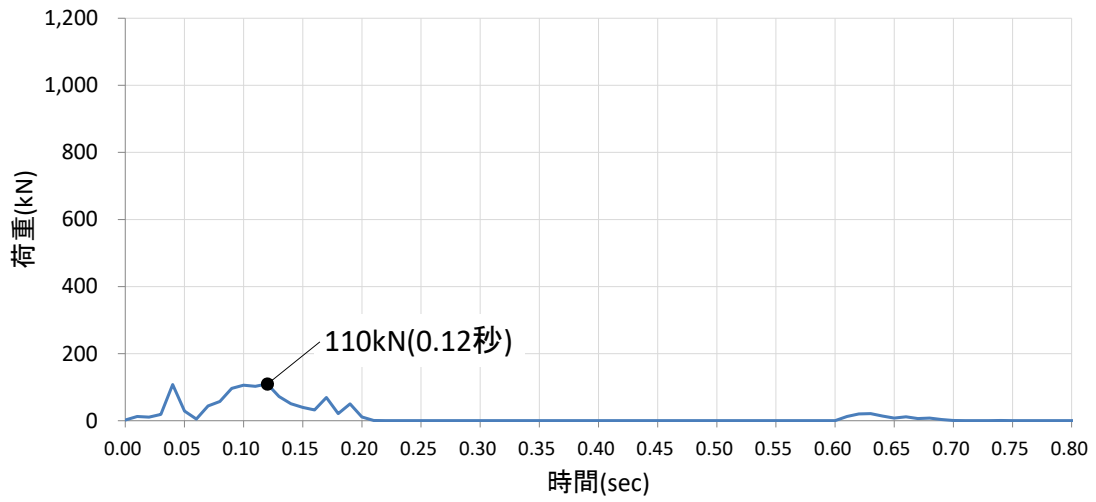


図 4.5.6-25 (7) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号②



剛壁番号③



剛壁番号④

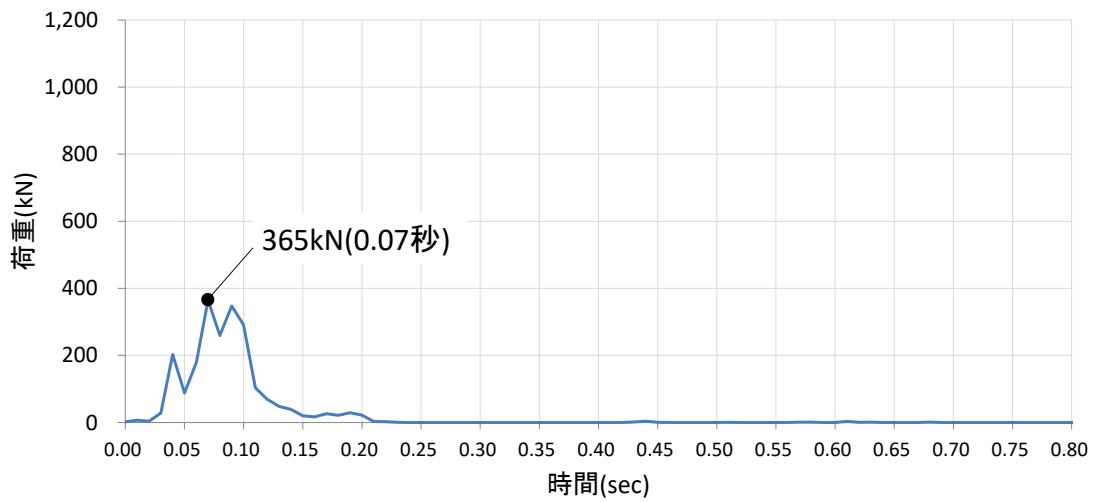


図 4.5.6-25 (8) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑮

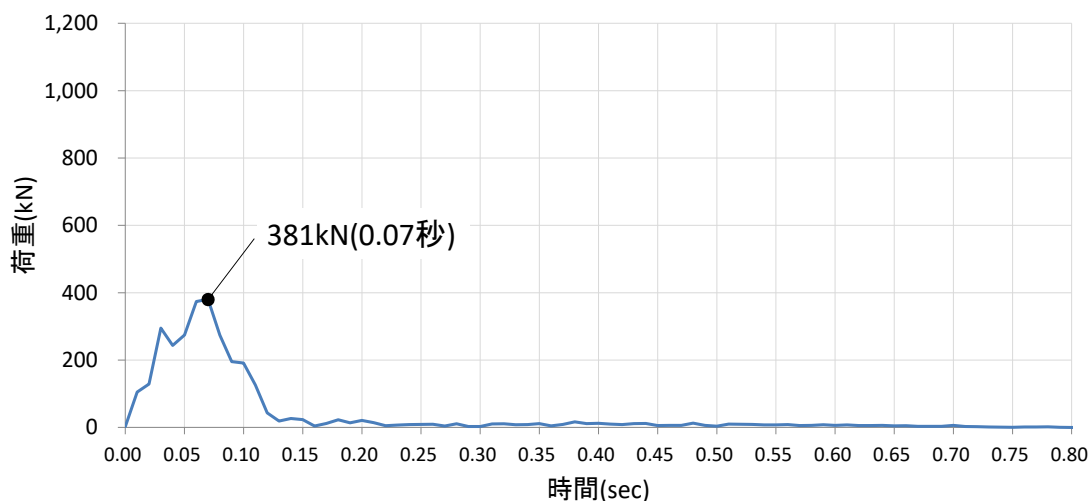


図 4.5.6-25 (9) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

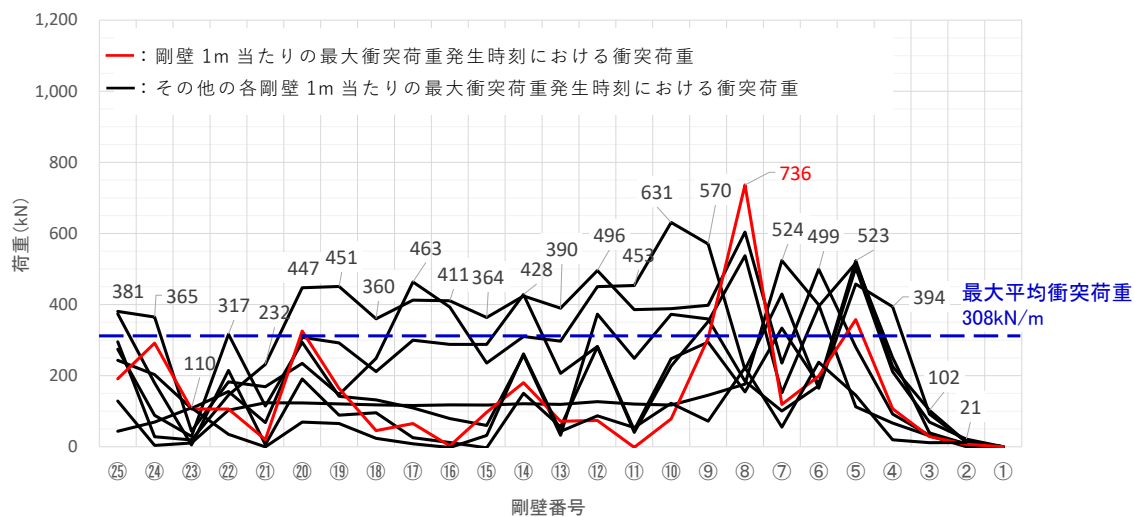


図 4.5.6-26 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

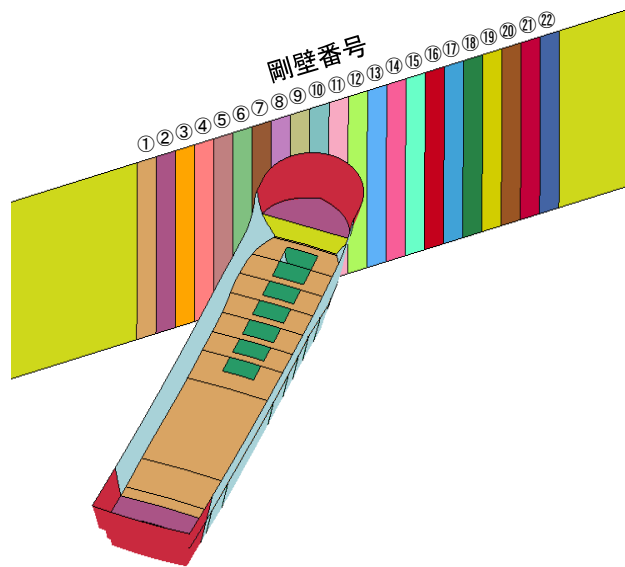
表 4.5.6-9 衝突荷重のまとめ

衝突荷重の集計値(kN) 【時刻(秒)】	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重(kN) 【時刻(秒)】
7,395 【0.03】	736 【0.10】

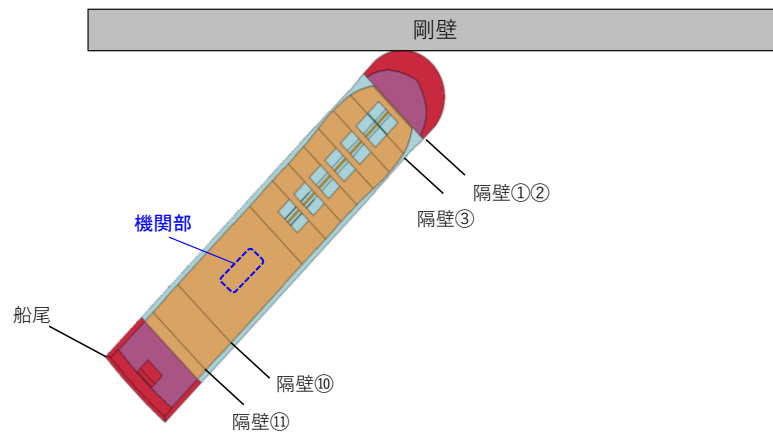
(d) ケース④（斜め船首衝突）

ケース④（斜め船首衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-27 に衝突状況，図 4.5.6-28 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，図 4.5.6-29 に剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴，図 4.5.6-30 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布，表 4.5.6-10 に衝突荷重のまとめを示す。

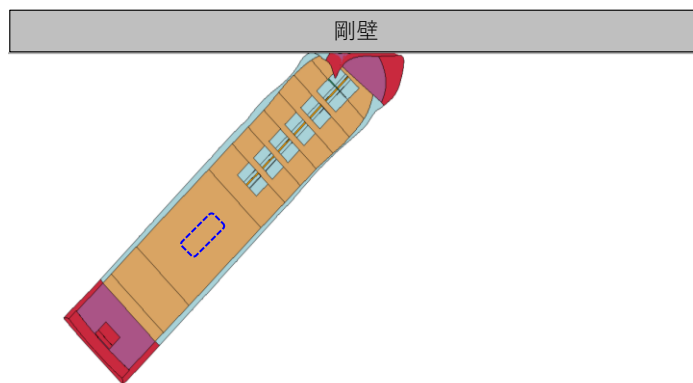
- ・図 4.5.6-27 より，機関部（エンジン）が剛壁へ衝突していないことから，機関部の影響がないことを確認した。
- ・図 4.5.6-28 より，各剛壁（剛壁番号①～⑫）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突直後から荷重が大きくなり，衝突後 0.31 秒（隔壁①，②衝突時）に最大となる 1,073kN が作用することを確認した。また，衝突後 2.27 秒（船尾，隔壁⑩，⑪衝突時）にも 541kN の荷重が作用しているが，これは斜めから衝突した後に船体が剛壁に平行となる方向に回転し，船尾付近の船体側面が衝突することにより瞬間的に生じていることを確認した。
- ・最大衝突荷重 1,073kN が発生する衝突後 0.31 秒において，残存質量として約 99.9% であることから，衝突時の船体破壊に伴う質量低下による衝突荷重への影響は軽微と判断する。
- ・衝突荷重の作用時間は 2.85 秒となり，ケース①（船首衝突），ケース②（船尾衝突）及びケース③（真横衝突）と比較して，衝突荷重の作用時間が長いことを確認した。
- ・図 4.5.6-29 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船首の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号⑪において衝突後 0.32 秒（隔壁①，②衝突時）で最大となる衝突荷重 444kN が作用することを確認した。なお，ケース④（斜め船首衝突）はケース①（船首衝突），ケース②（船尾衝突）及びケース③（真横衝突）と比較して，最大衝突荷重が小さくなっていることを確認した。
- ・図 4.5.6-30 より，衝突荷重は分布的に作用していることを確認した。また，ケース④（斜め船首衝突）は，剛壁に対して 45° に衝突し，船体が回転し，再度衝突することから，最大平均衝突荷重（剛壁荷重作用幅 5m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.31 秒で 215kN/m となり，剛壁番号⑨～⑫において衝突荷重の平均値を上回る荷重が発生することを確認した。



衝突前



衝突後0.31秒：隔壁①,②衝突時



衝突後2.27秒：船尾,隔壁⑩,⑪衝突時

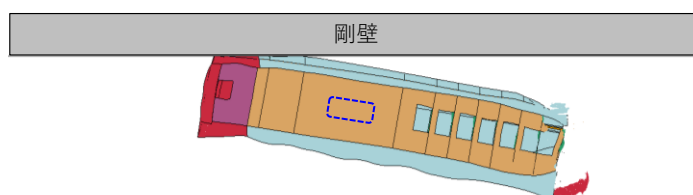


図 4.5.6-27 衝突状況

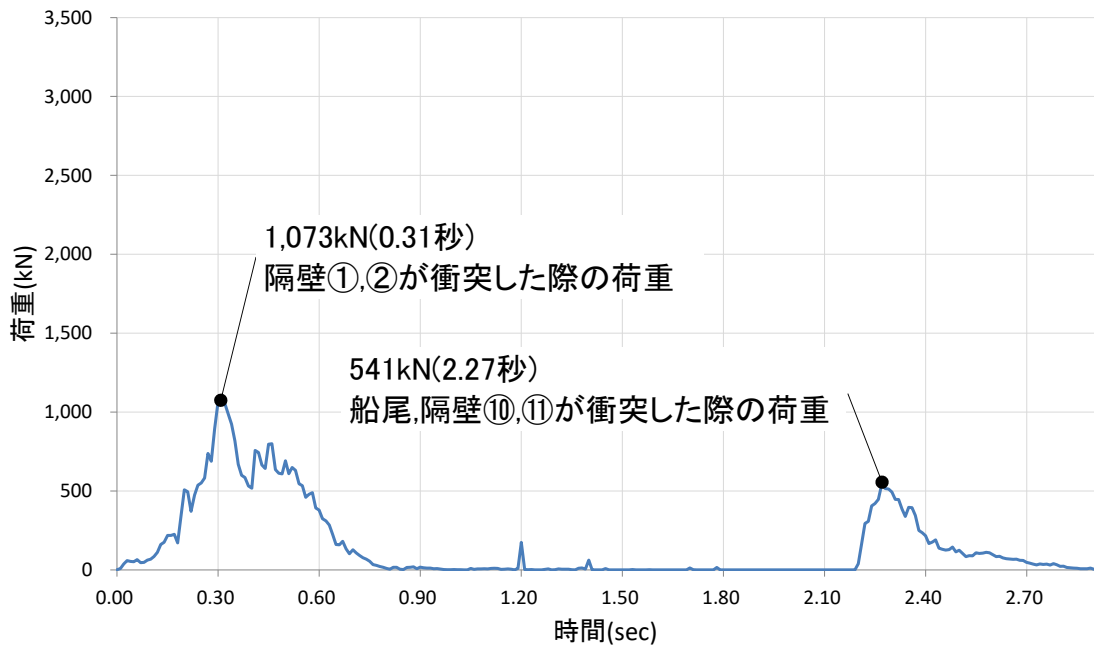
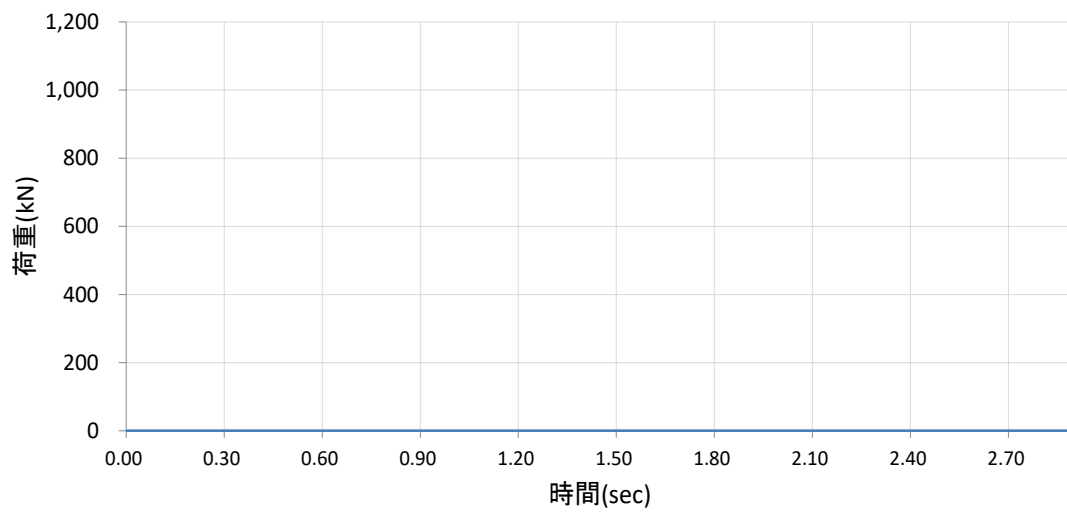
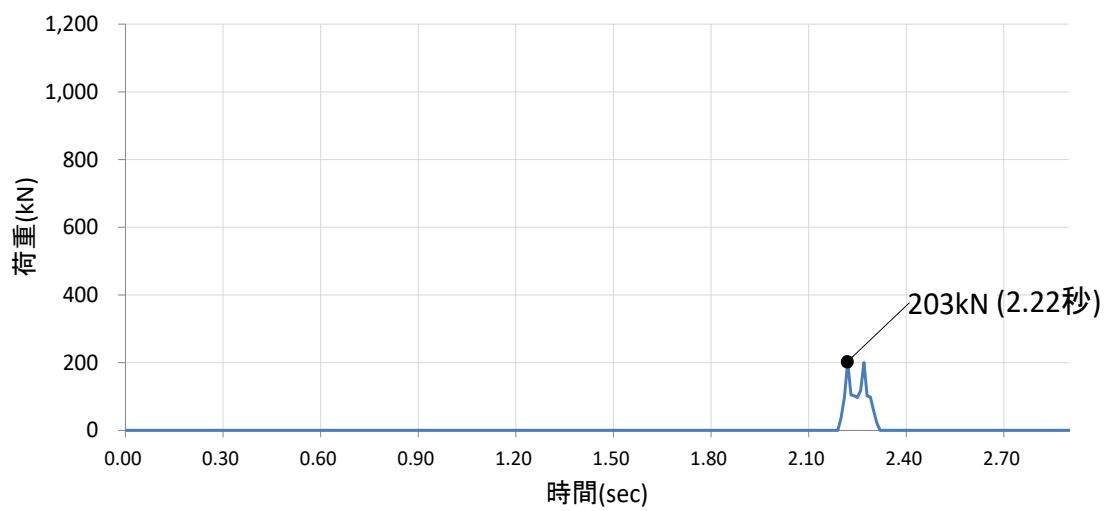


図 4.5.6-28 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

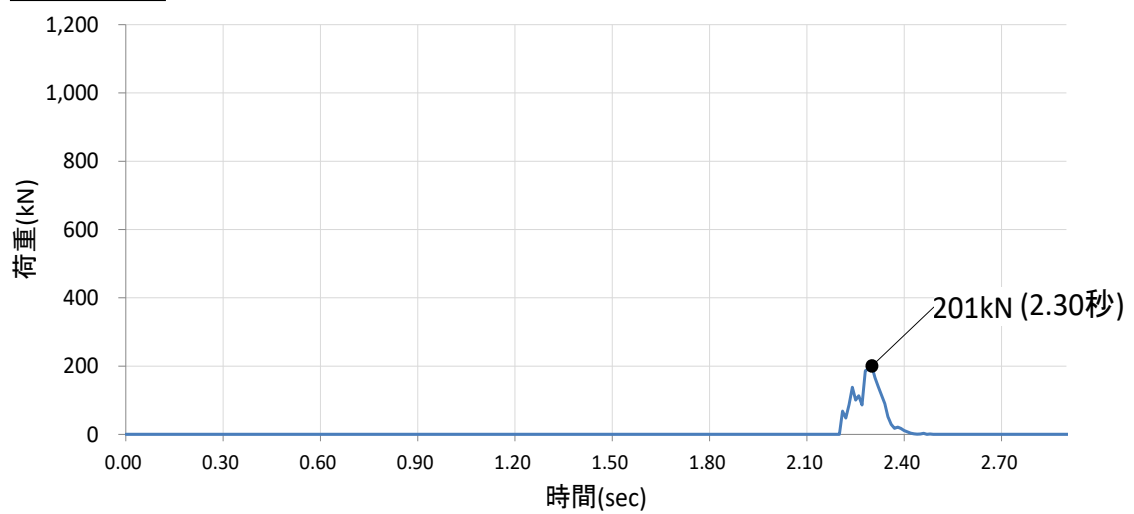
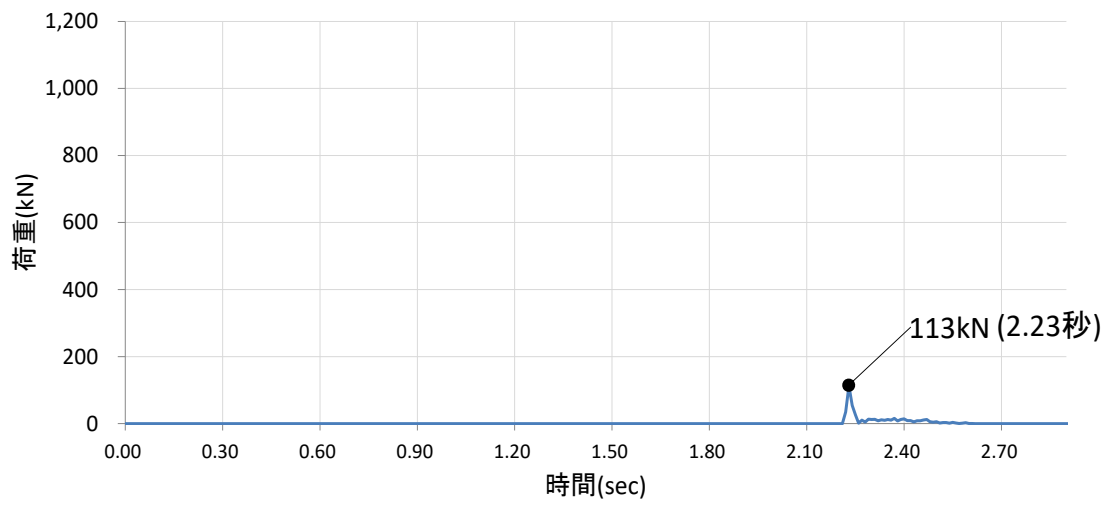
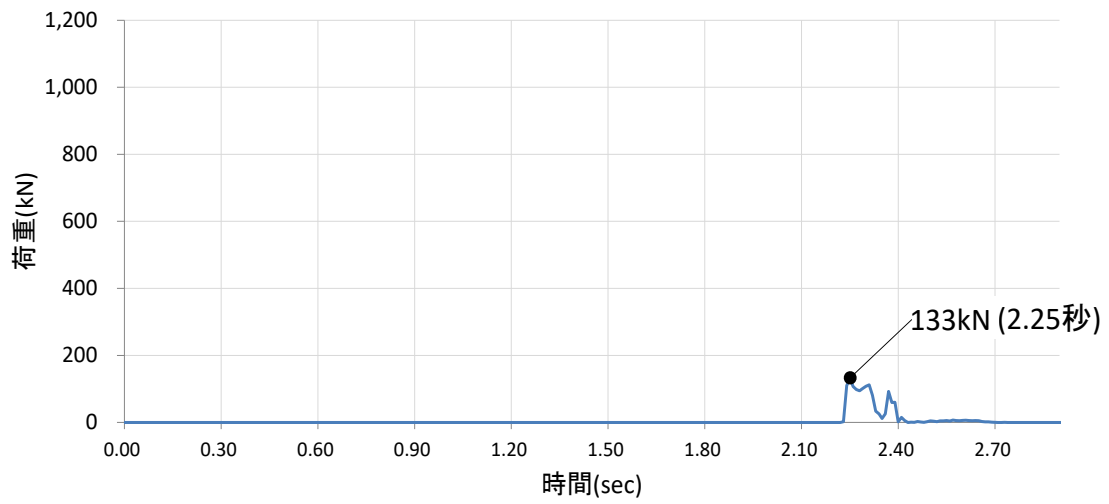


図 4.5.6-29 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

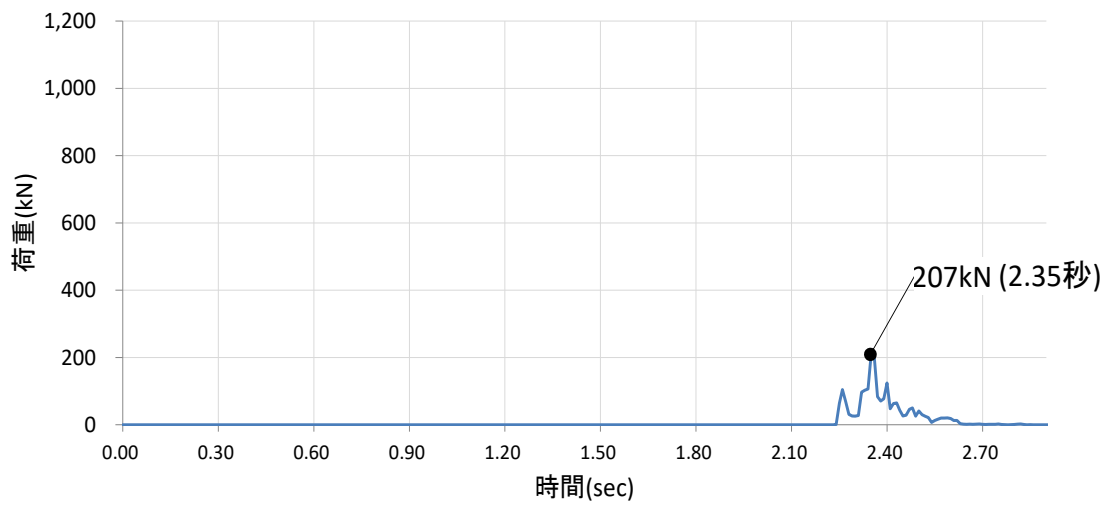
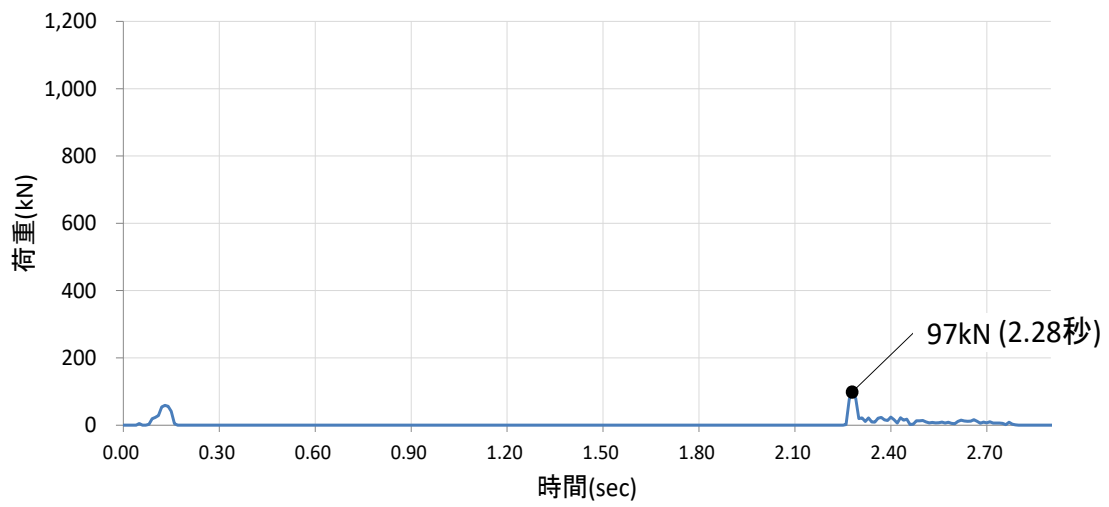
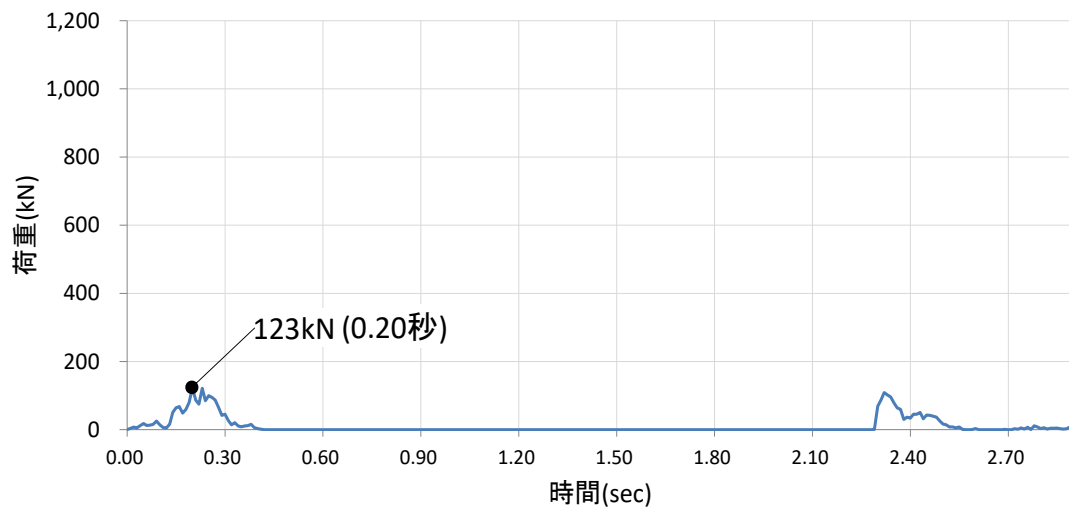


図 4.5.6-29 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑦



剛壁番号⑧



剛壁番号⑨

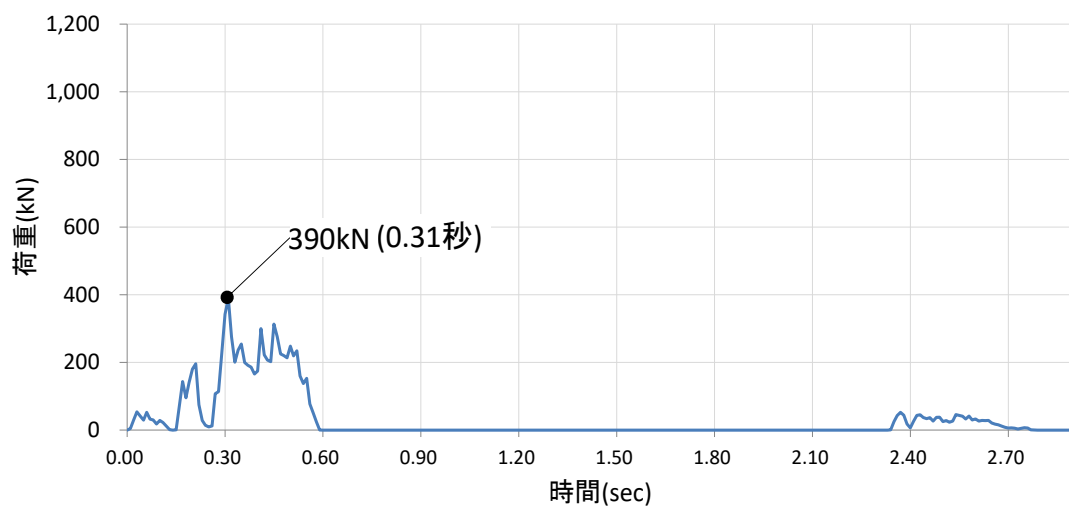
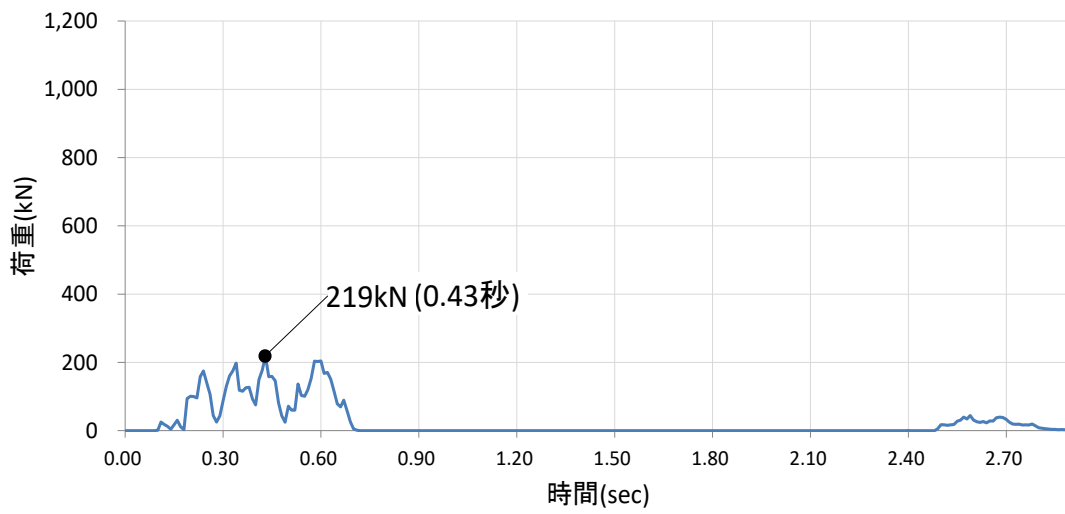
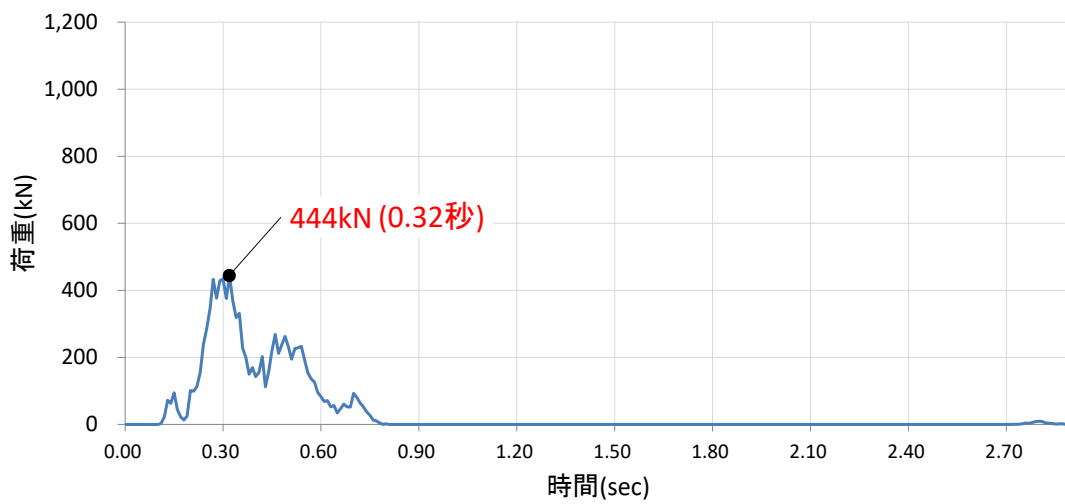


図 4.5.6-29 (3) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑩



剛壁番号⑪



剛壁番号⑫

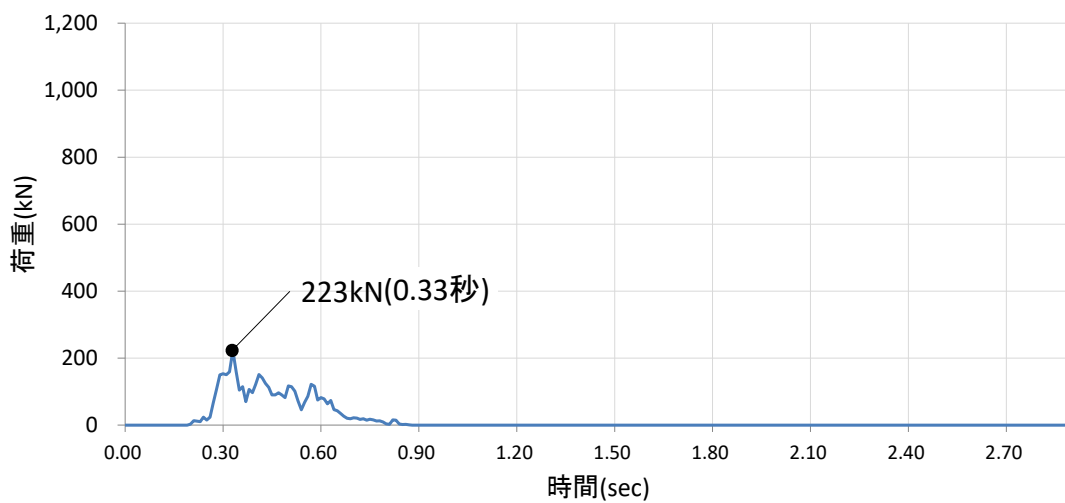
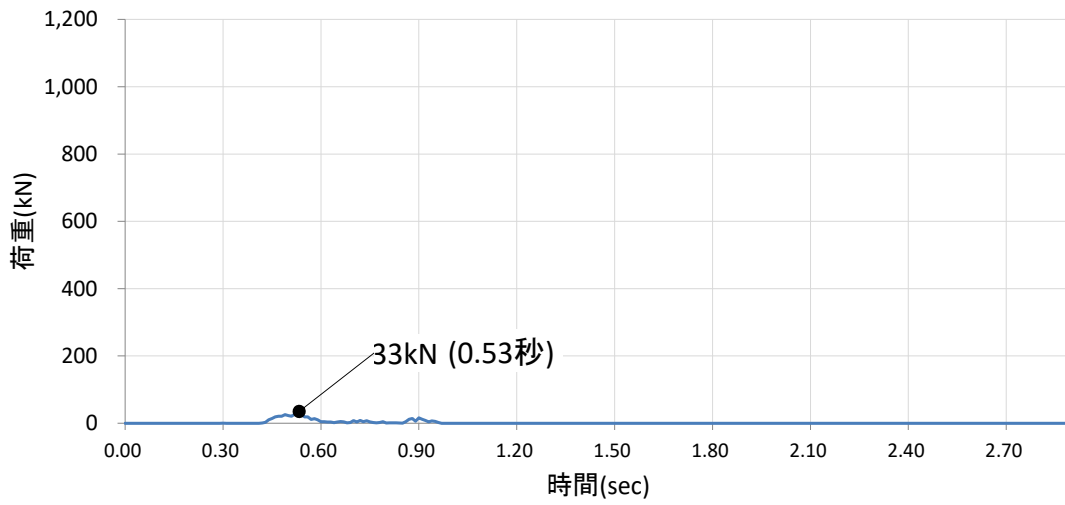
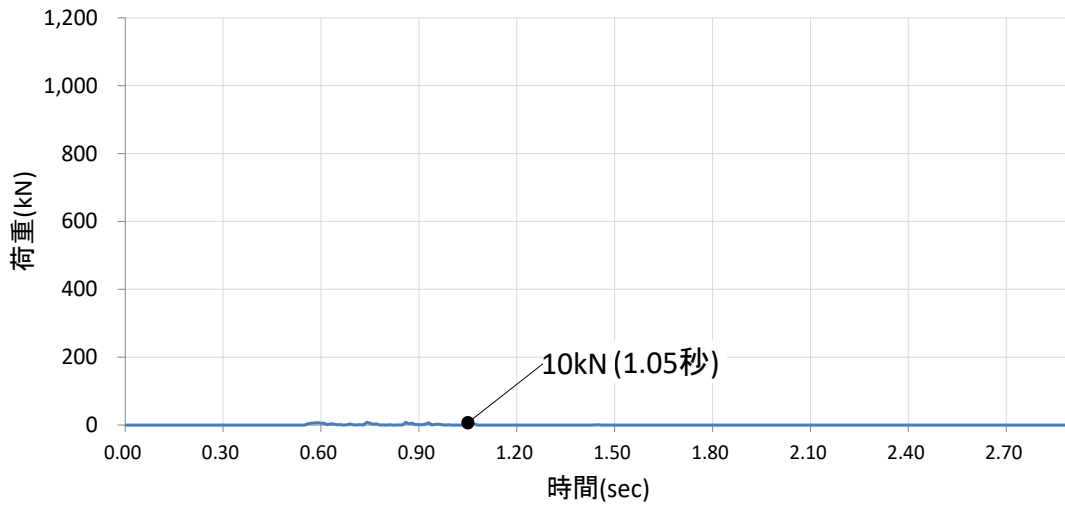


図 4.5.6-29 (4) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

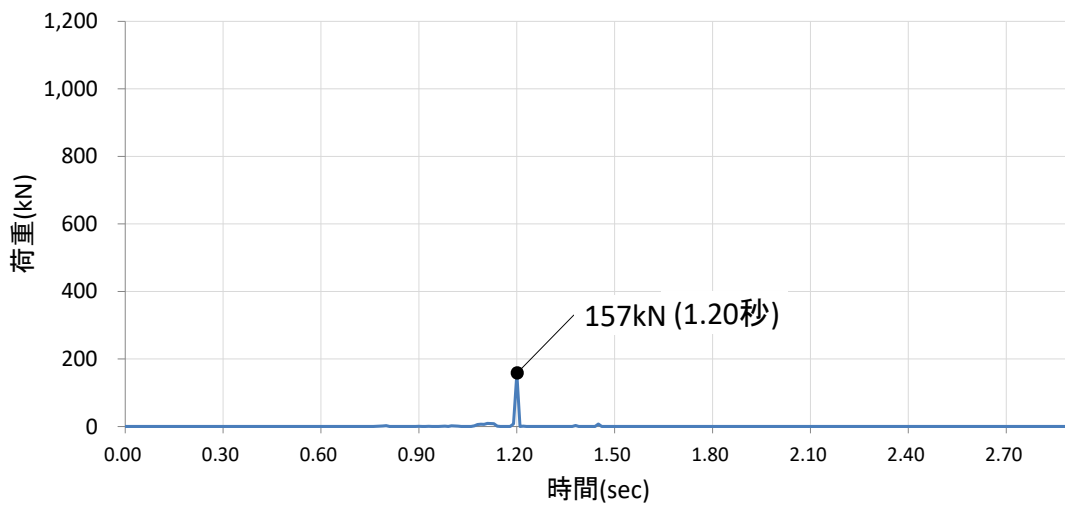
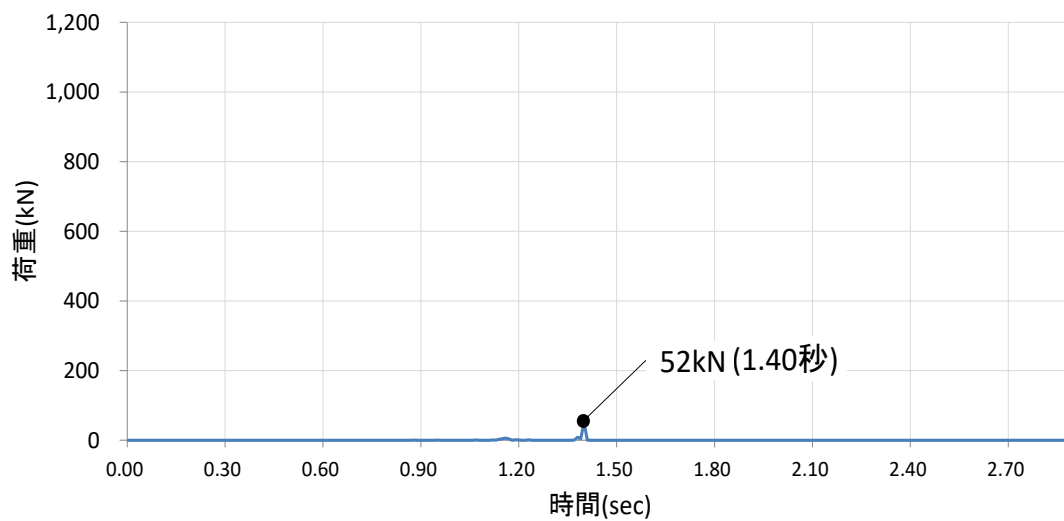
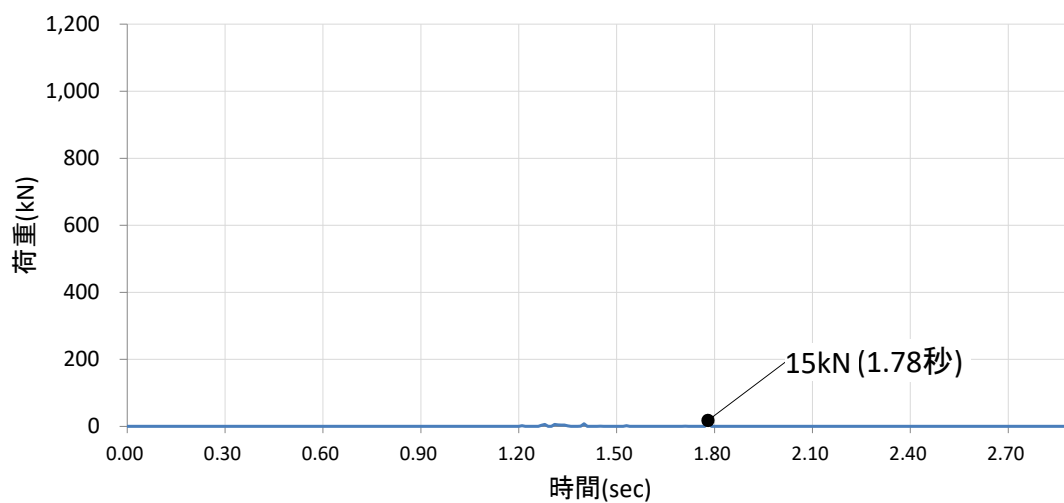


図 4.5.6-29 (5) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

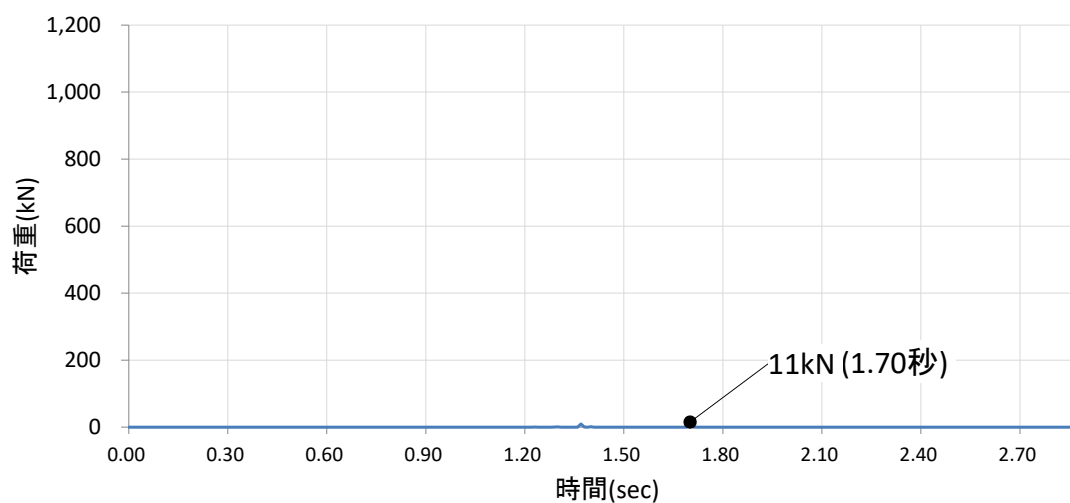
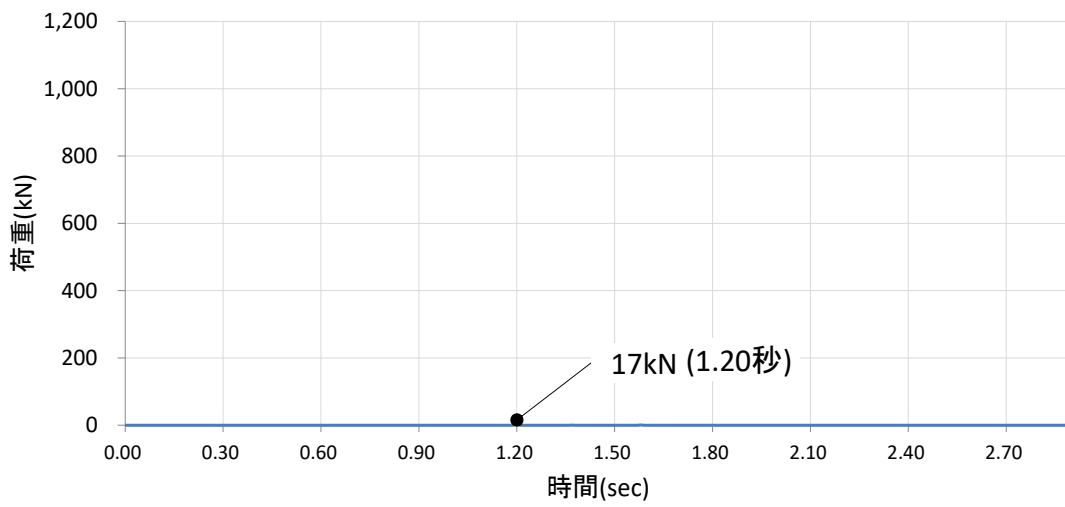
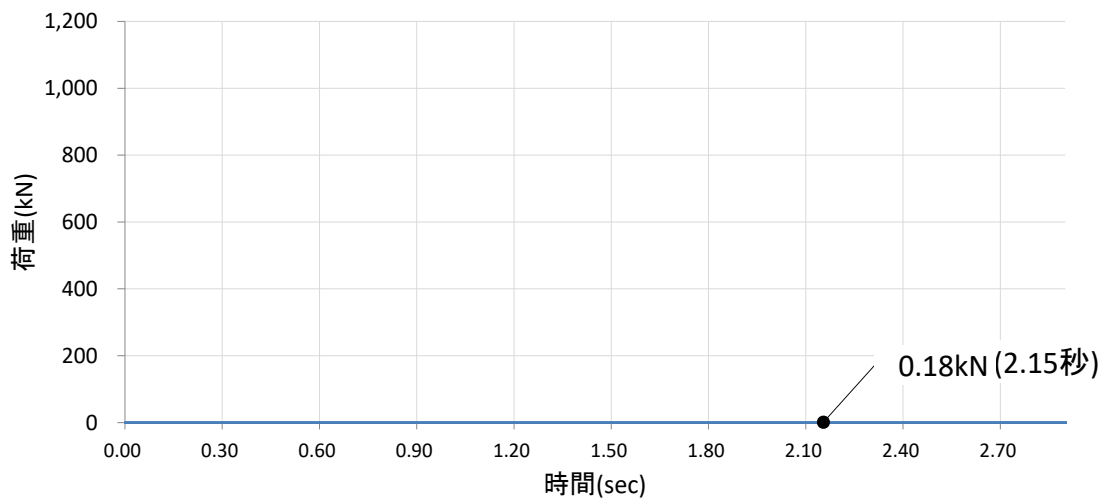


図 4.5.6-29 (6) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑱



剛壁番号㉔



剛壁番号㉕

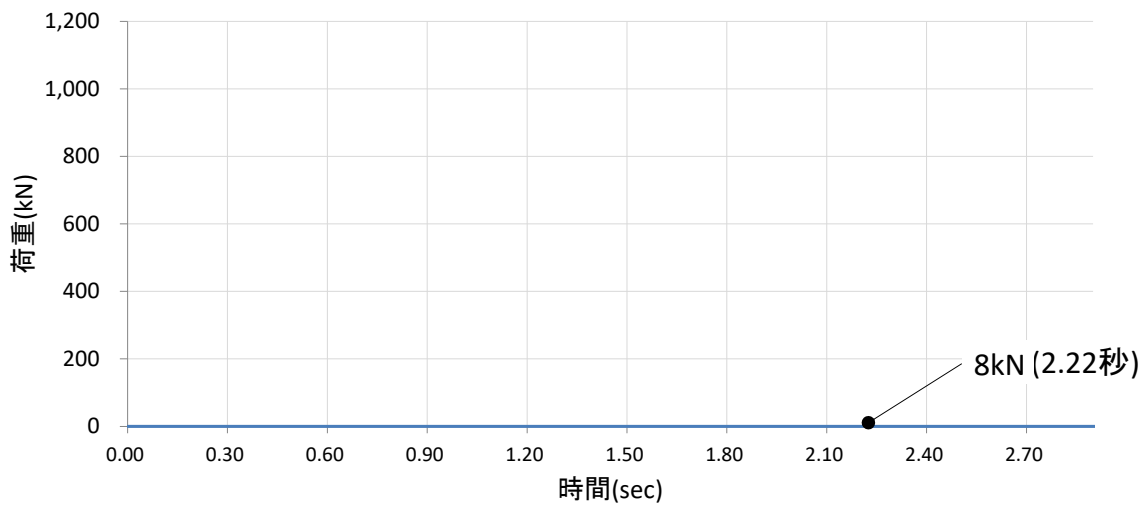


図 4.5.6-29 (7) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号②②

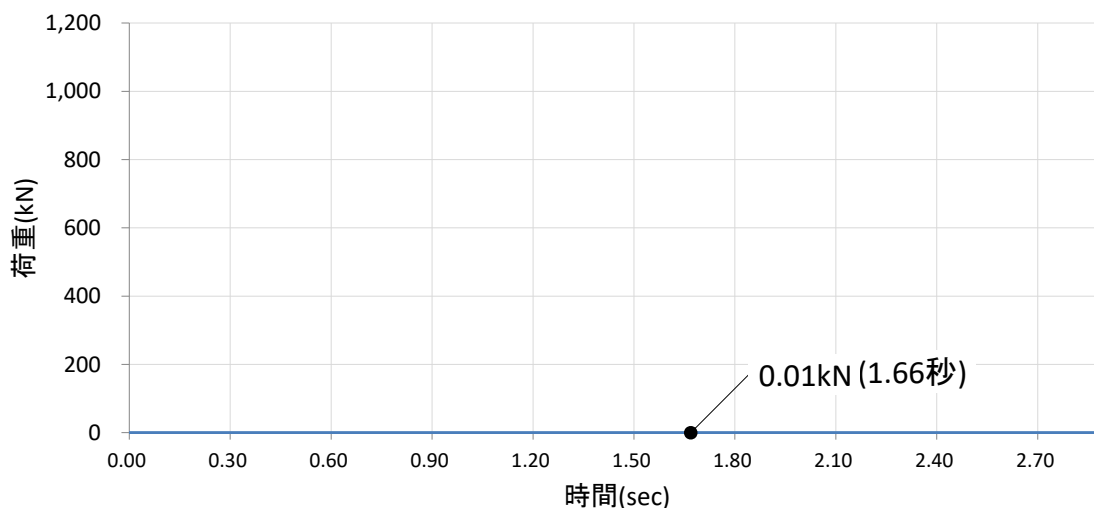


図 4.5.6-29 (8) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

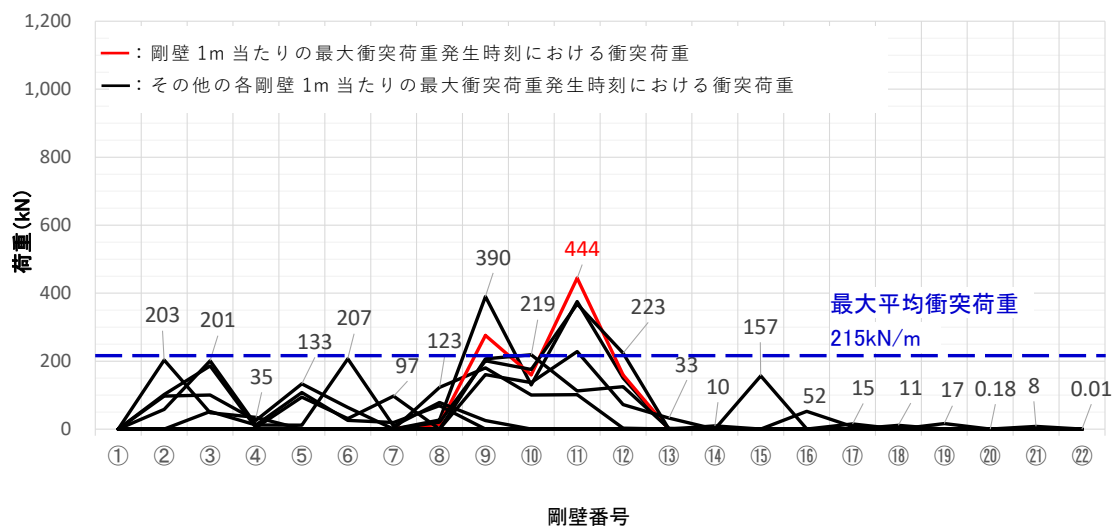


図 4.5.6-30 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

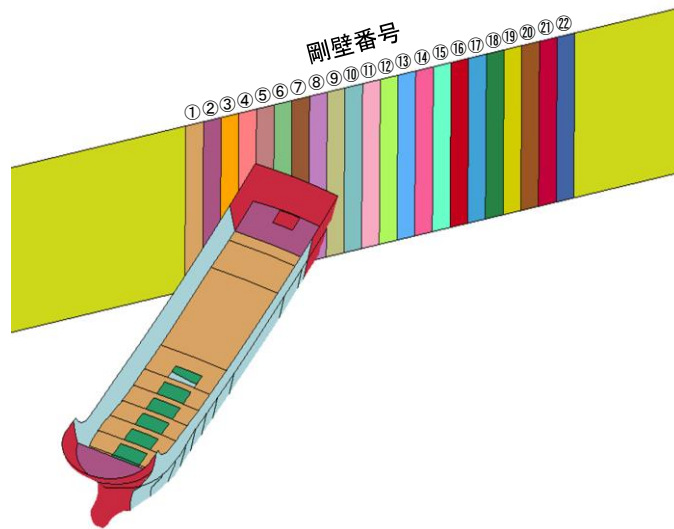
表 4.5.6-10 衝突荷重のまとめ

衝突荷重の集計値 (kN) 【時刻 (秒)】	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重 (kN) 【時刻 (秒)】
1,073 【0.31】	444 【0.32】

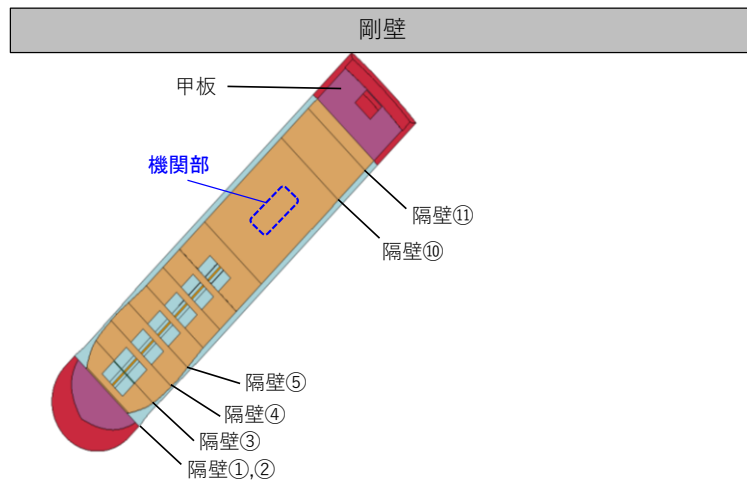
(e) ケース⑤（斜め船尾衝突）

ケース⑤（斜め船尾衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-31 に衝突状況，図 4.5.6-32 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，図 4.5.6-33 に剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴，図 4.5.6-34 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布，表 4.5.6-11 に衝突荷重のまとめを示す。

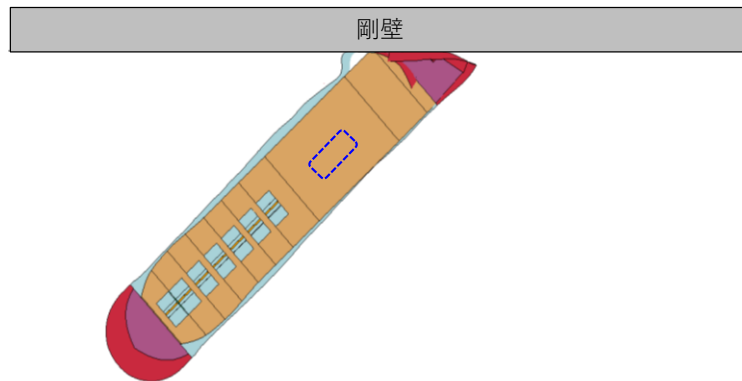
- ・ 図 4.5.6-31 より，機関部（エンジン）が剛壁へ衝突していないことから，機関部の影響がないことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-32 より，各剛壁（剛壁番号①～②）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突直後から荷重が大きくなり，衝突後 0.51 秒（船尾，隔壁①衝突時）に 685kN の荷重が作用していることを確認した。また，衝突後 2.48 秒（隔壁①～⑤付近衝突時）で最大となる 1,294kN とする荷重が作用しており，これは斜めから衝突した後に船体が剛壁に平行となる方向に回転し，船尾付近の船体側面が衝突することにより瞬間的に生じていることを確認した。
- ・ 最大衝突荷重 1,294kN が発生する衝突後 2.48 秒において，残存質量として約 96.2% であることから，衝突時の船体破壊に伴う質量低下による衝突荷重への影響は軽微と判断する。
- ・ 衝突荷重の作用時間は 2.90 秒となり，ケース①（船首衝突），ケース②（船尾衝突）及びケース③（真横衝突）と比較して，衝突荷重の作用時間が長く，ケース④（斜め船尾衝突）とおおむね同程度であることを確認した。
- ・ 図 4.5.6-33 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船尾の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号④において衝突後 2.45 秒（隔壁①～⑤付近衝突時）で最大となる衝突荷重 884kN が作用していることを確認した。なお，ケース⑤（斜め船尾衝突）はケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）と比較して最大衝突荷重が小さく，ケース③（真横衝突）及びケース④（斜め船首衝突）より最大衝突荷重が大きいことを確認した。
- ・ 図 4.5.6-34 より，衝突荷重は分布的に作用していることを確認した。また，ケース⑤（斜め船尾衝突）は，剛壁に対して 45° に衝突し，船体が回転し，再度衝突することから，最大平均衝突荷重（剛壁荷重作用幅 4m で除した等分布荷重）は，衝突後 2.49 秒で 321kN/m となり，剛壁番号④～⑥において衝突荷重の平均値を上回る荷重が発生していることを確認した。



衝突前



衝突後0.51秒：船尾,隔壁⑪衝突時



衝突後2.48秒：隔壁①～⑤付近衝突時

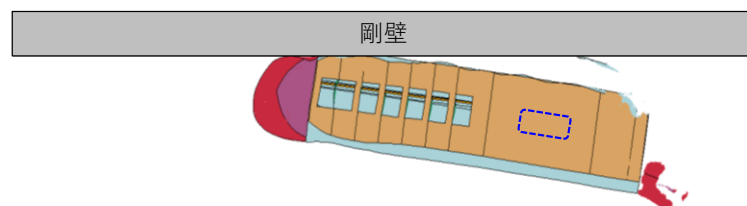


図 4.5.6-31 衝突状況

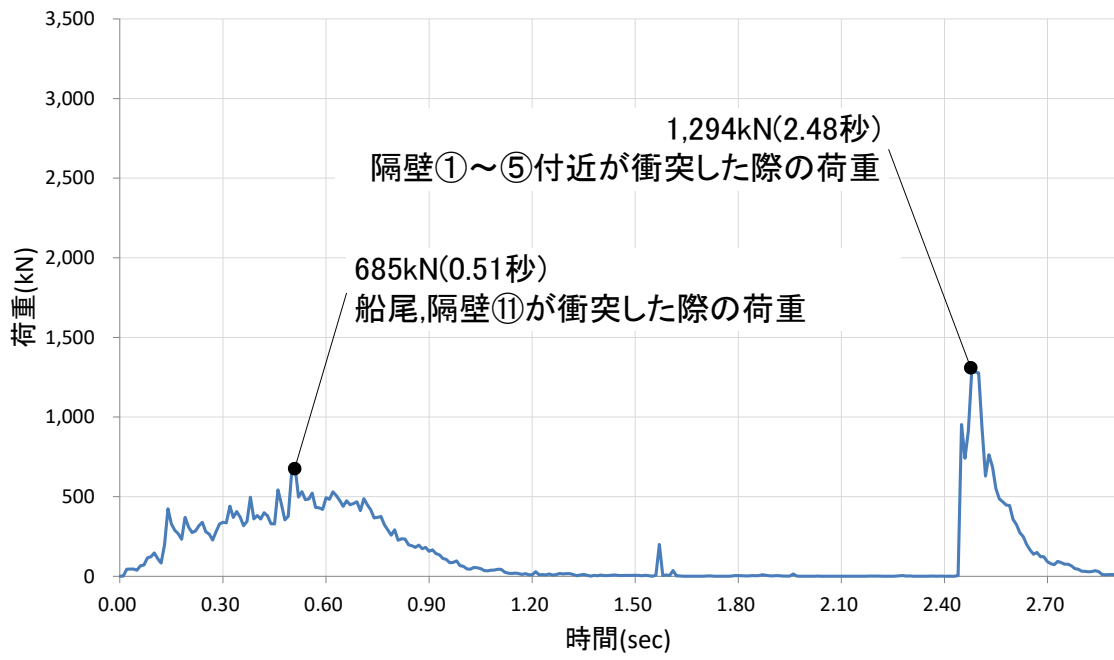
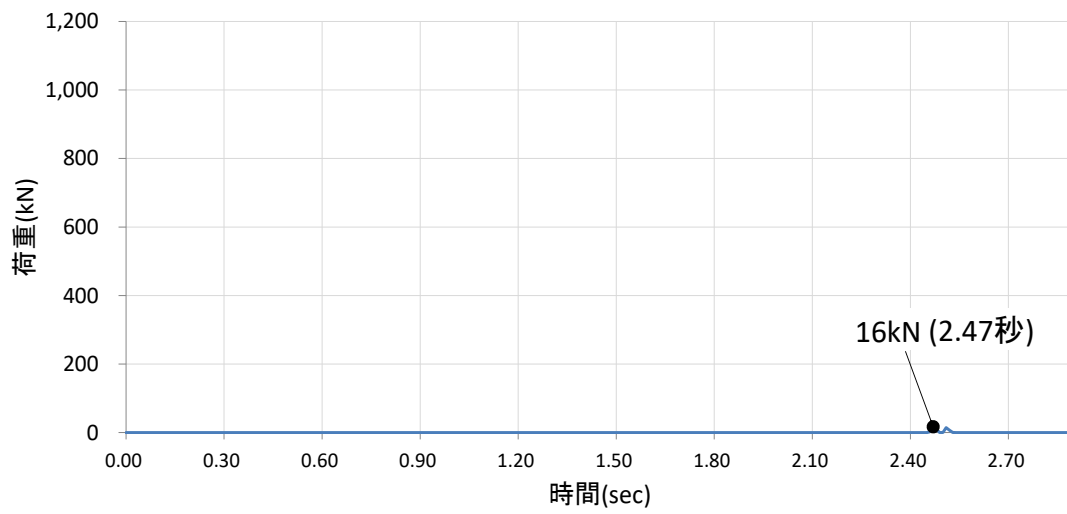
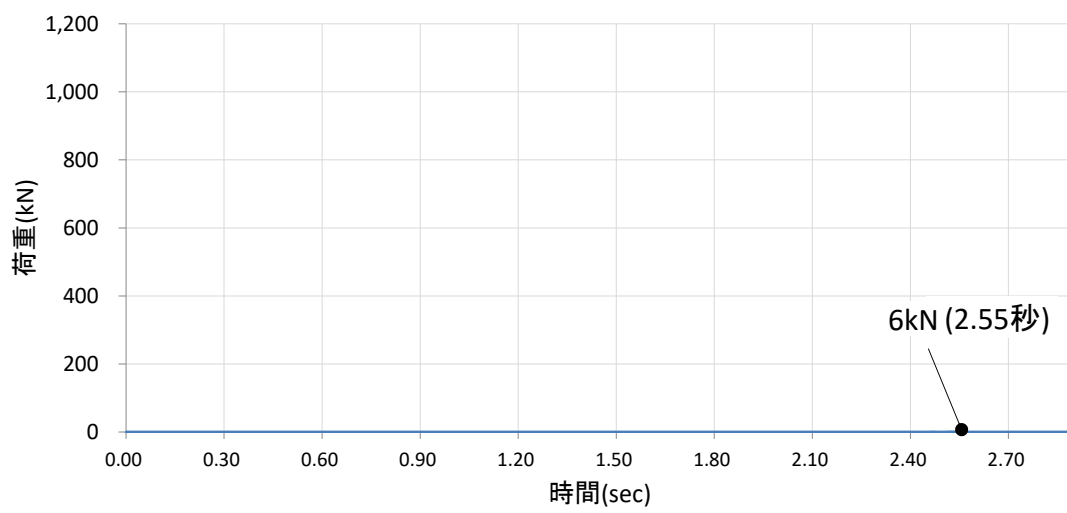


図 4.5.6-32 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

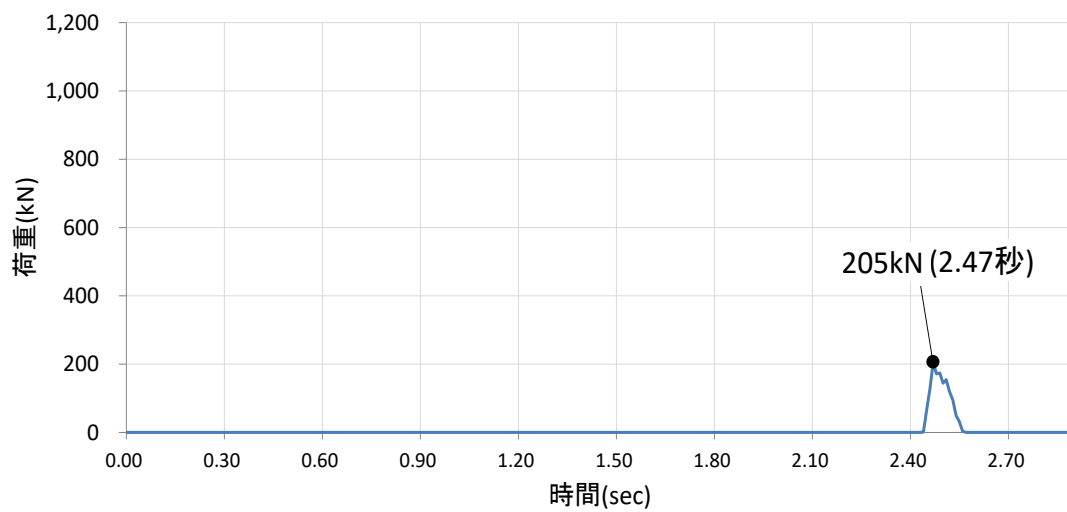
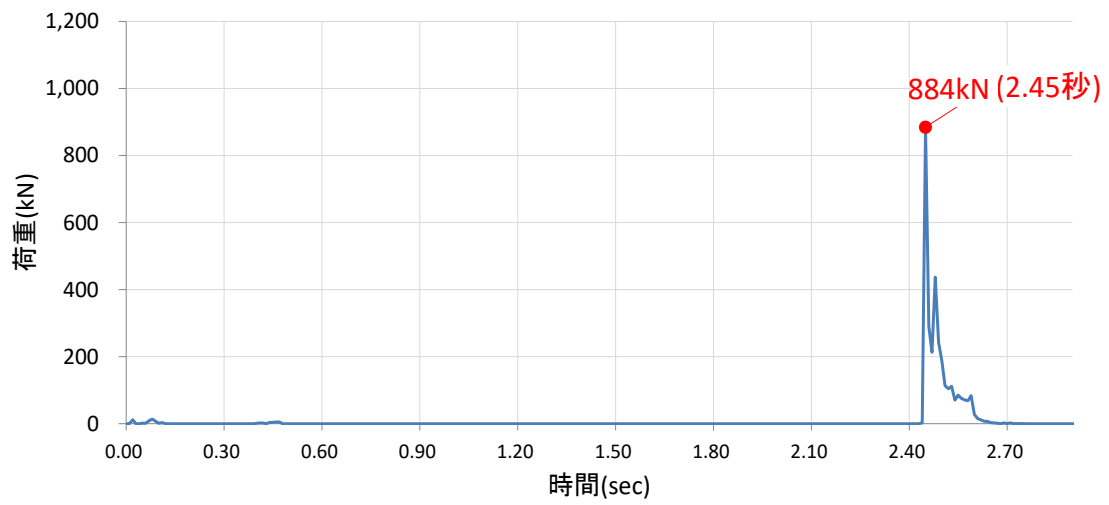
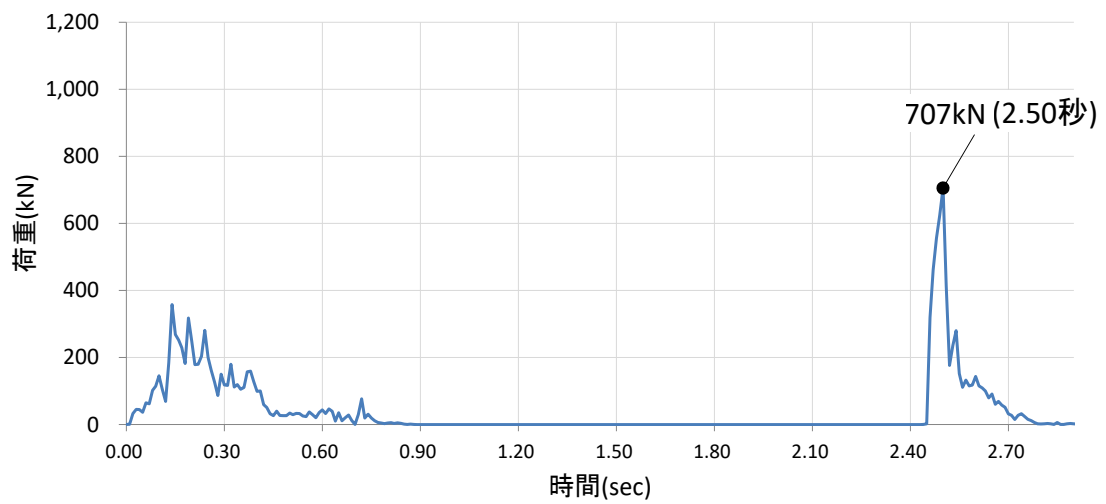


図 4.5.6-33 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

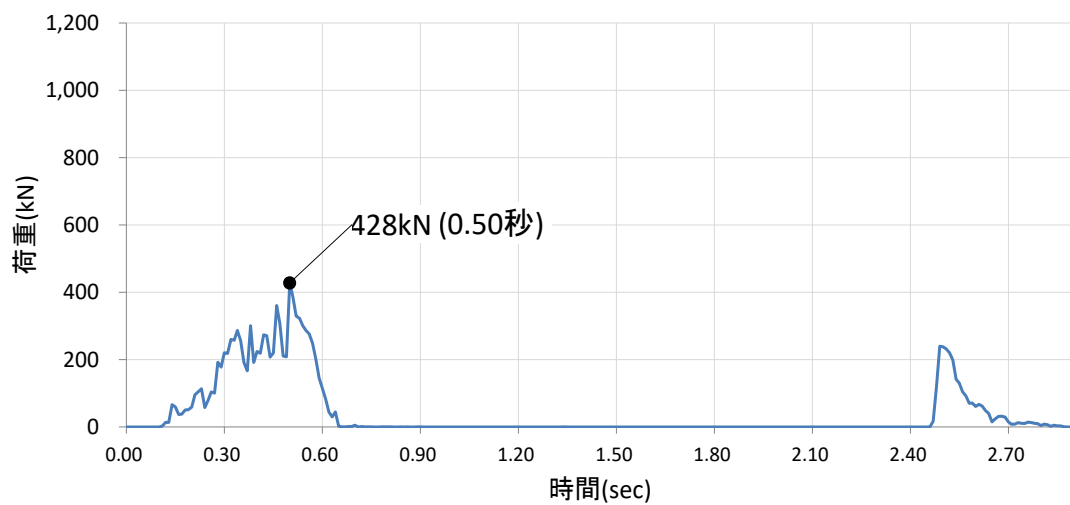
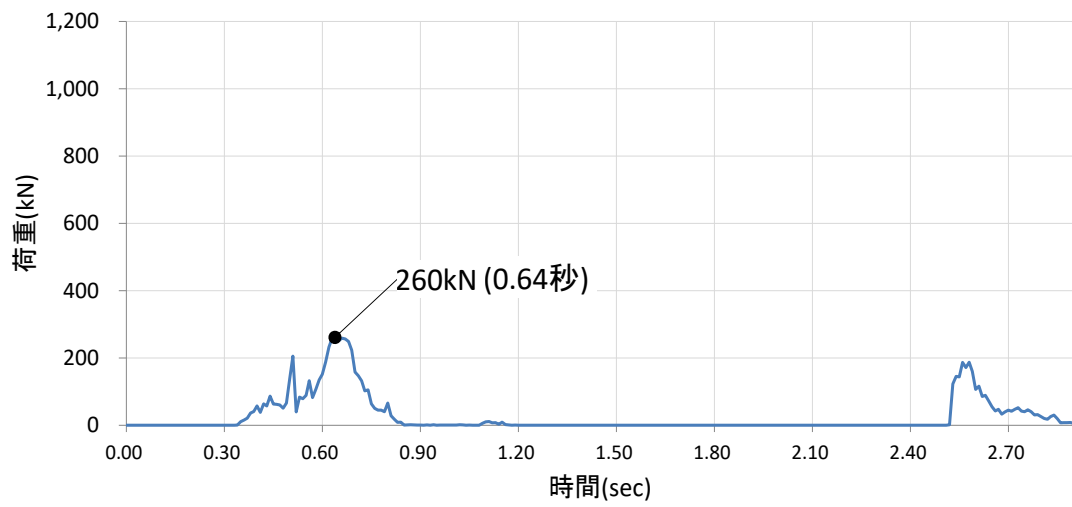
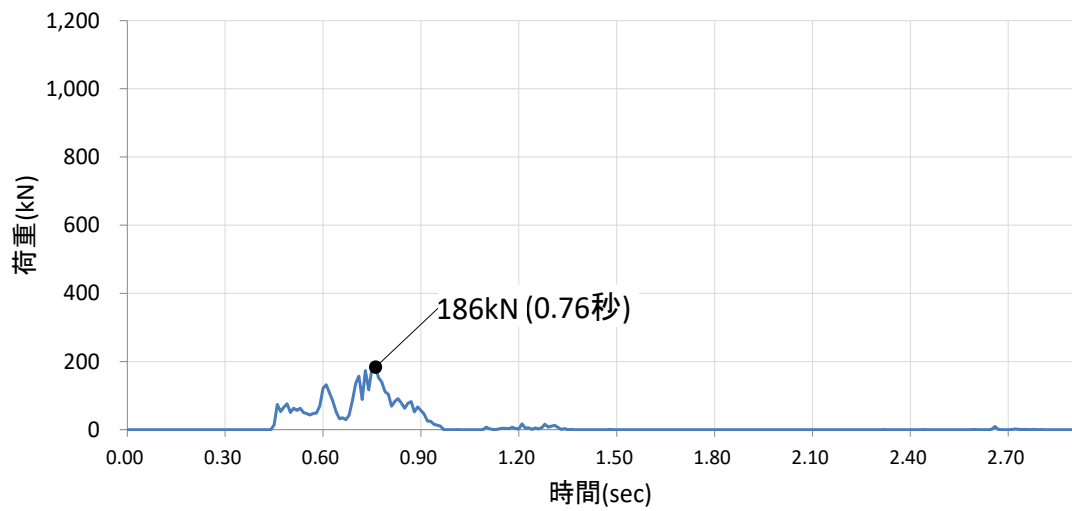


図 4.5.6-33 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑦



剛壁番号⑧



剛壁番号⑨

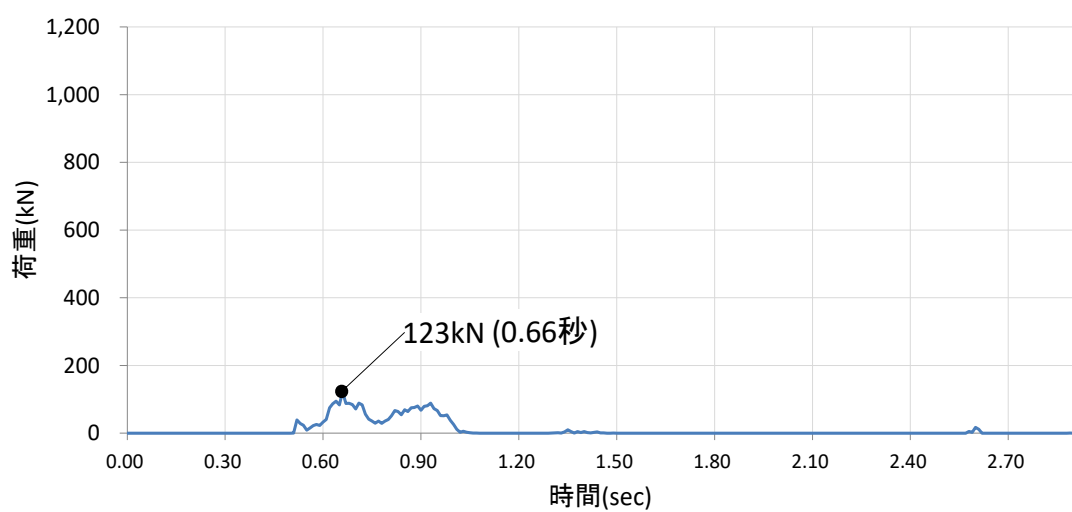
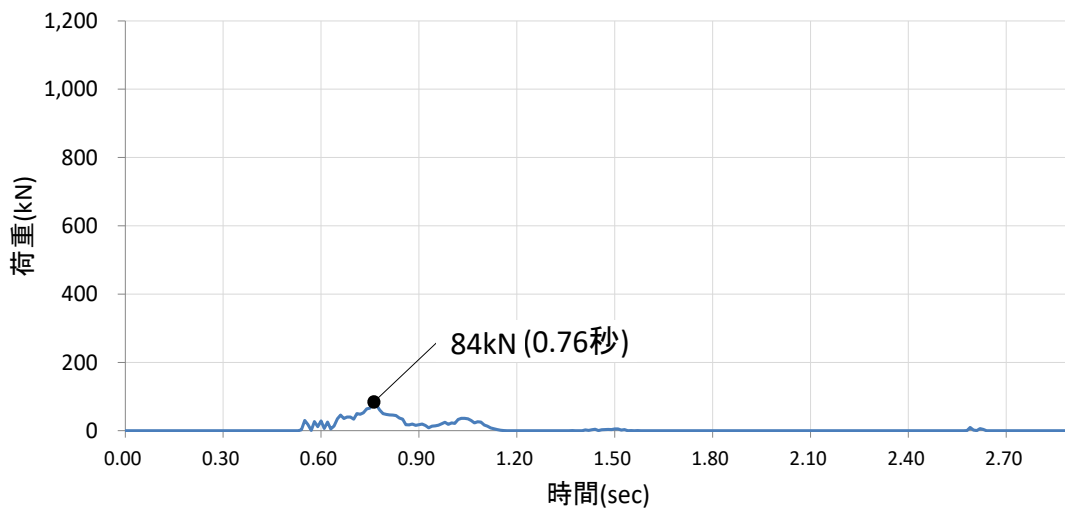
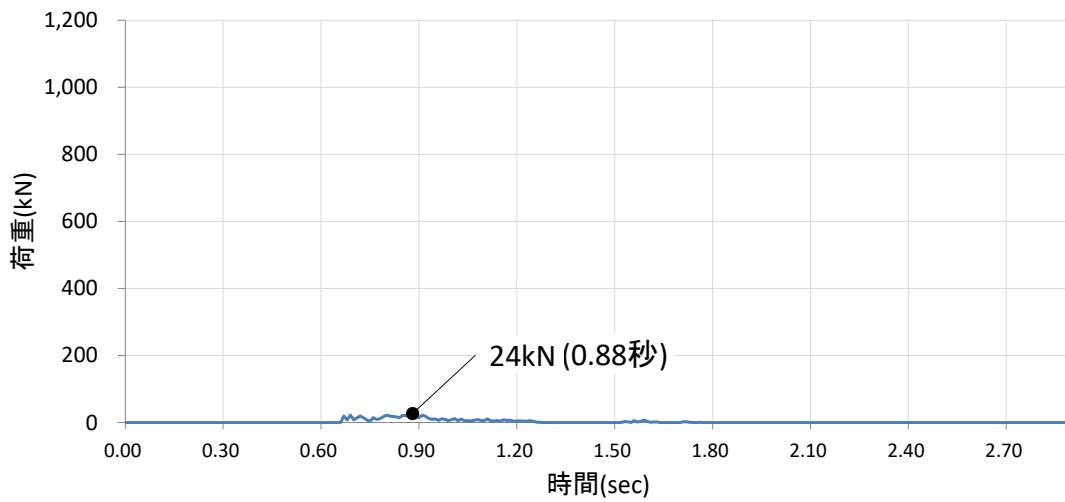


図 4.5.6-33 (3) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑩



剛壁番号⑪



剛壁番号⑫

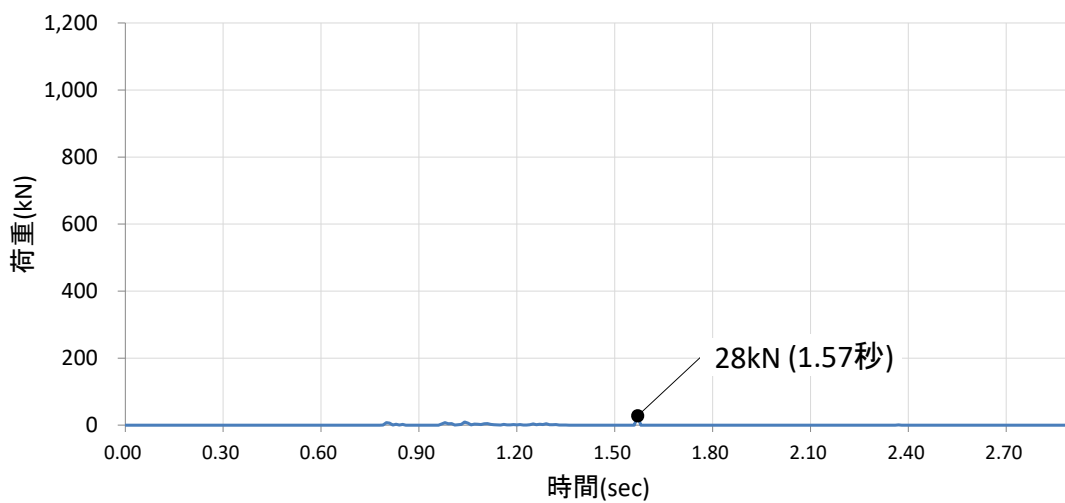
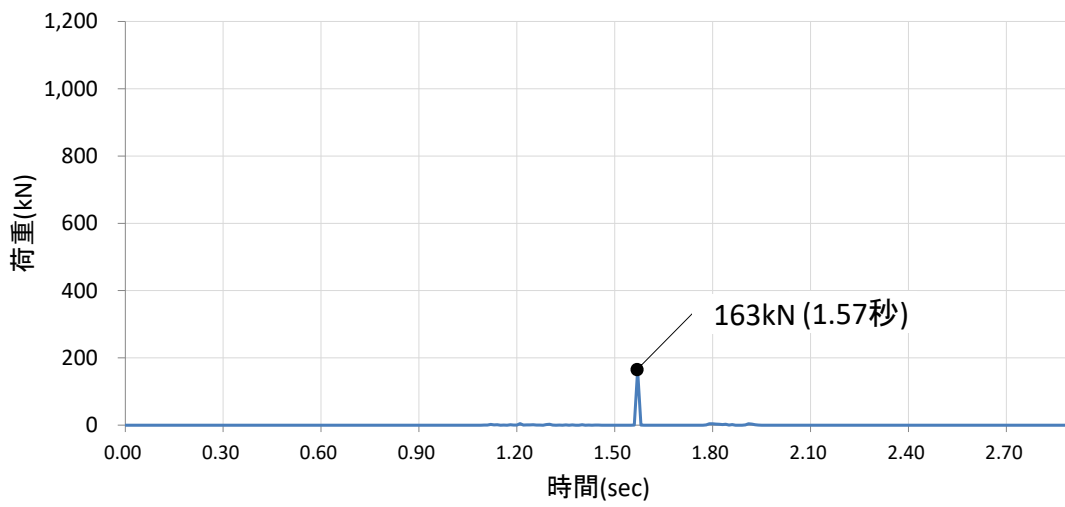
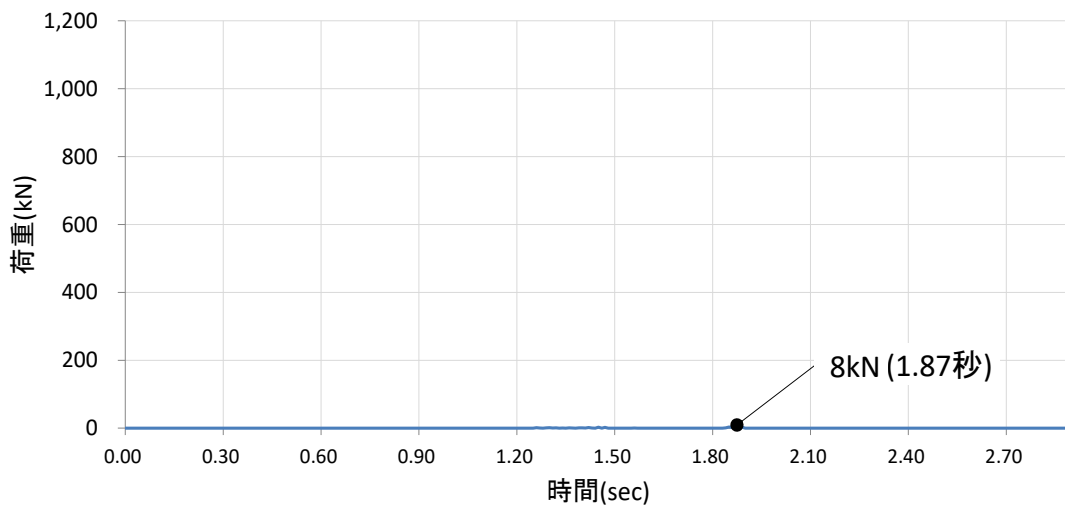


図 4.5.6-33 (4) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

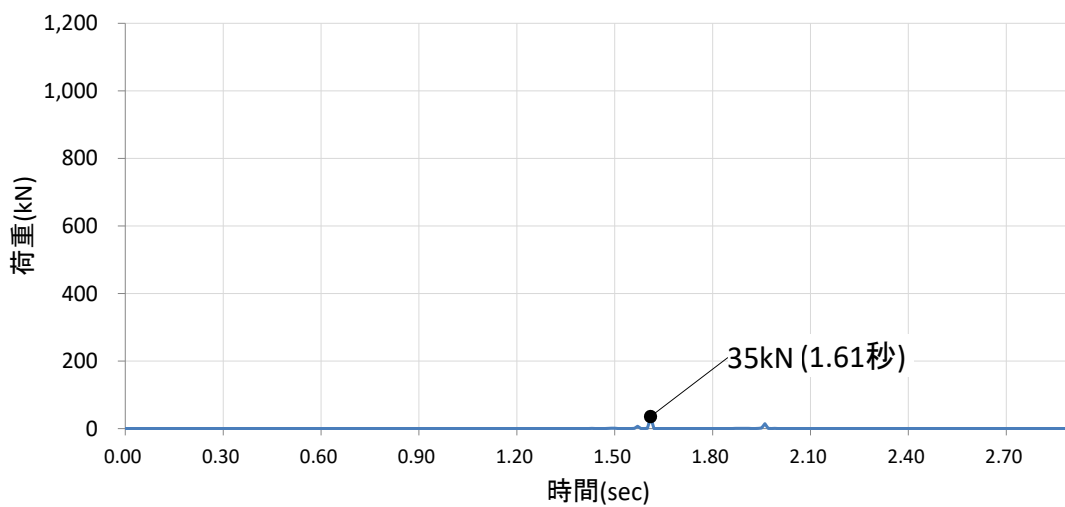
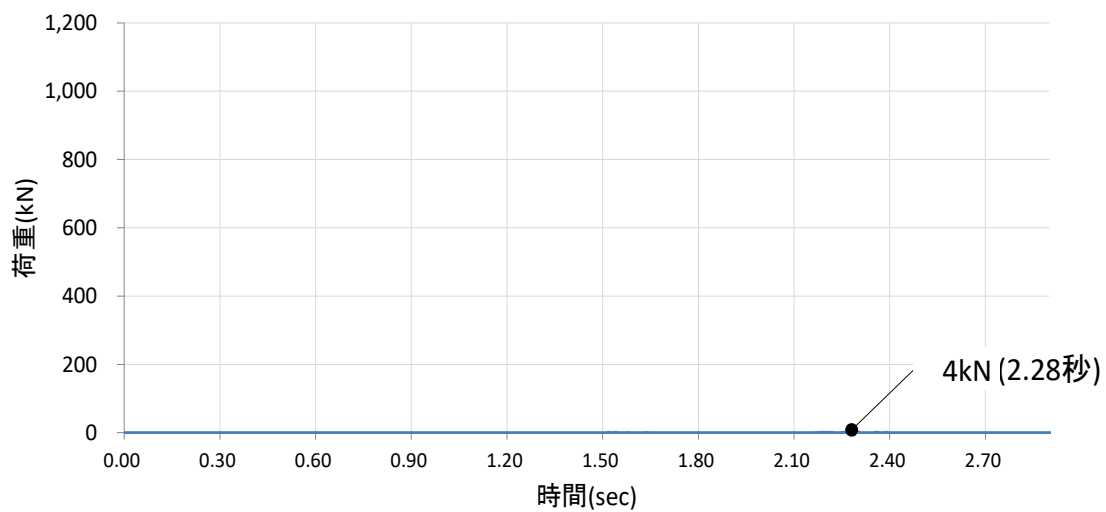
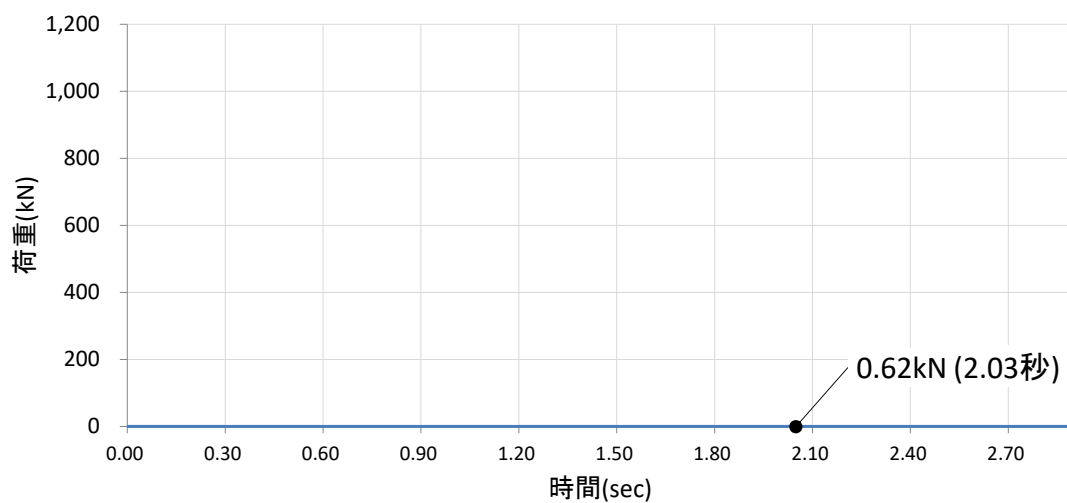


図 4.5.6-33 (5) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

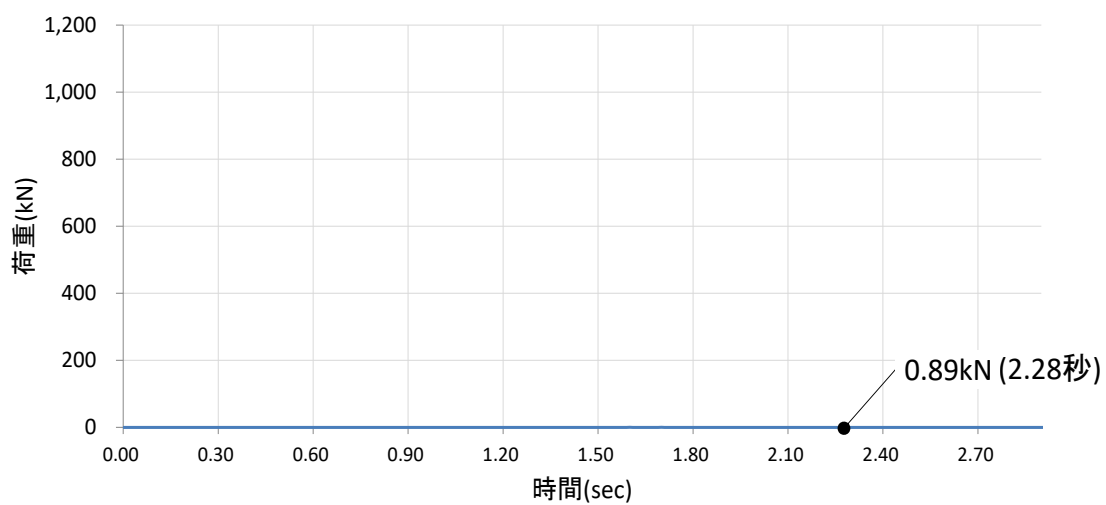
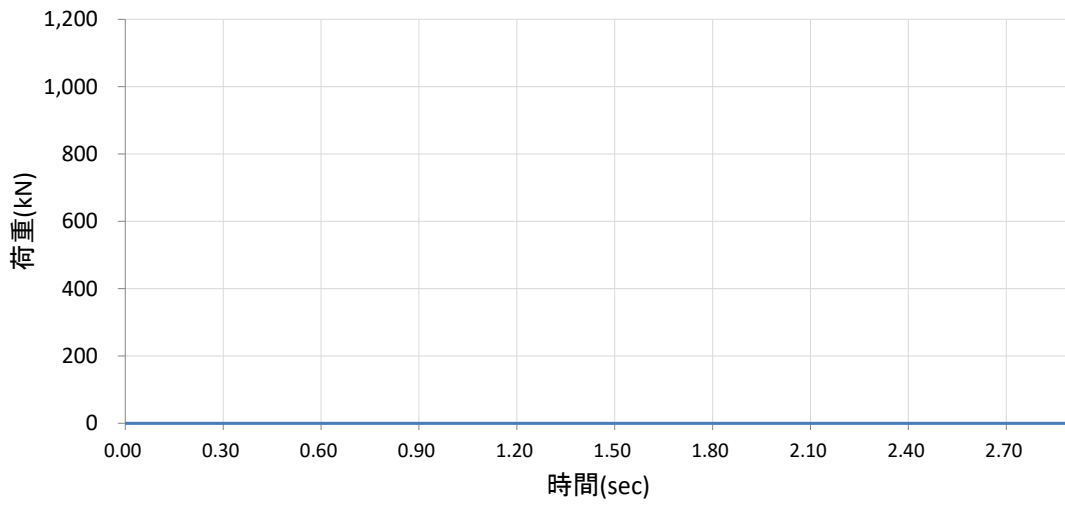
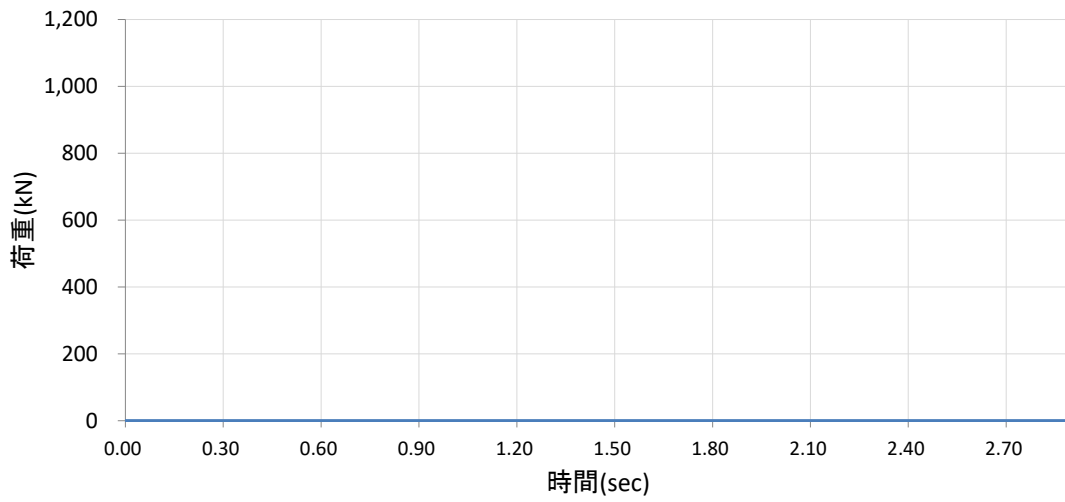


図 4.5.6-33 (6) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑱



剛壁番号㉔



剛壁番号㉑

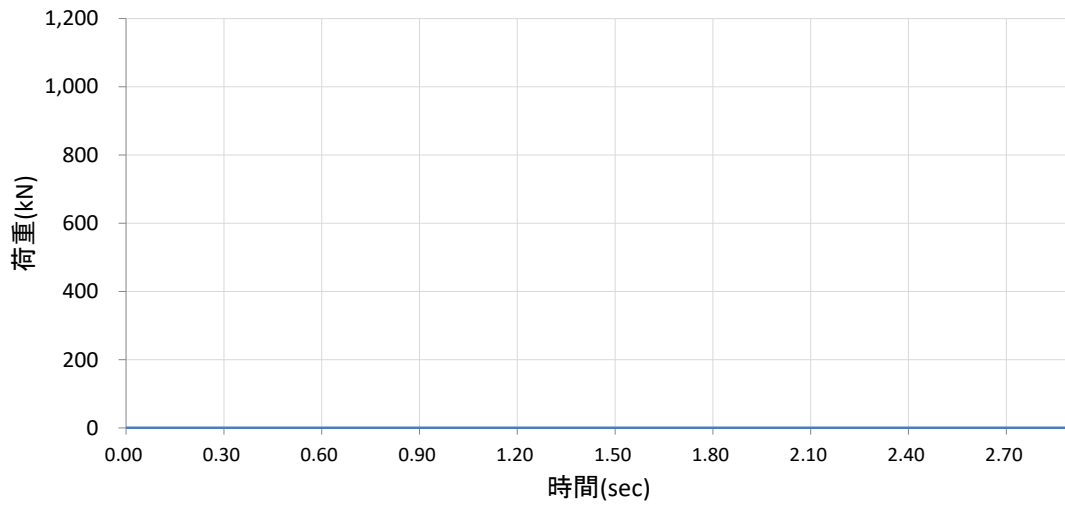


図 4.5.6-33 (7) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号②

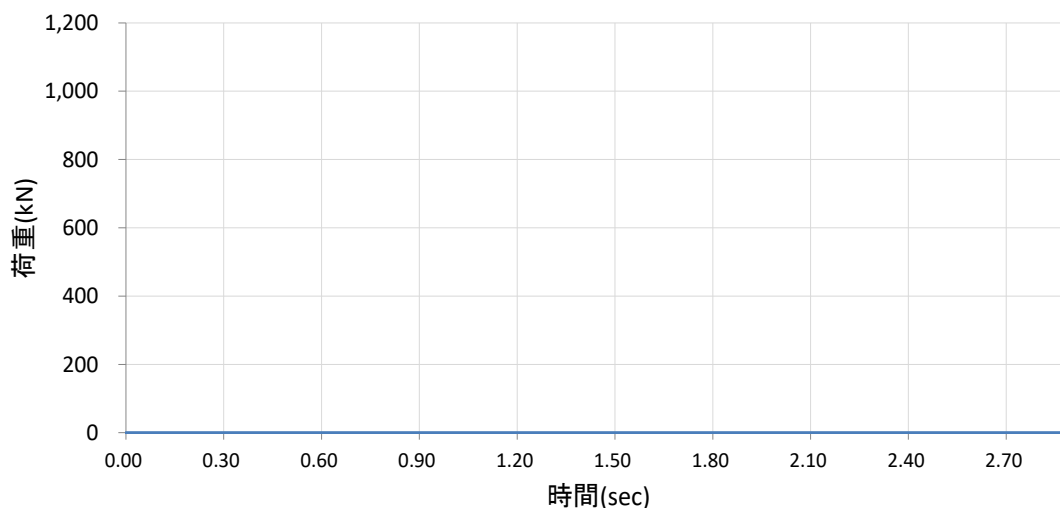


図 4.5.6-33 (8) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

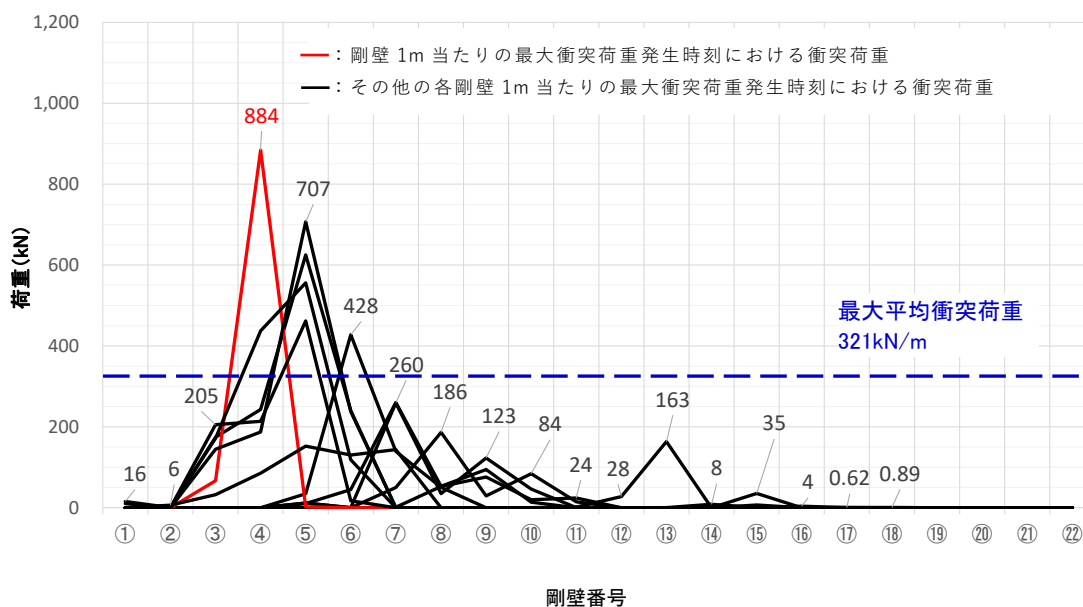


図 4.5.6-34 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

表 4.5.6-11 衝突荷重のまとめ

衝突荷重の集計値 (kN) 【時刻 (秒)】	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重 (kN) 【時刻 (秒)】
1,294 【2.48】	884 【2.45】

(f) まとめ

ケース①～⑤における衝突荷重を表 4.5.6-12 に示す。

表 4.5.6-12 より、衝突荷重の集計値は、ケース③（真横衝突）の 7,395kN が最大となることを確認した。また、剛壁 1m 当たりの衝突荷重は、ケース①（船首衝突）の 1,107kN が最大となることを確認した。

機関部（エンジン）の影響確認として、ケース①～⑤すべてのケースで機関部（エンジン）は剛壁に衝突しないことを確認した。

表 4.5.6-12 衝突荷重のまとめ（ケース①～⑤）

ケース	衝突形態	衝突荷重の集計値 【kN】	剛壁 1m 当たりの 衝突荷重 【kN】
①	船首	3,078	1,107
②	船尾	3,019	937
③	真横	7,395	736
④	斜め船首	1,073	444
⑤	斜め船尾	1,294	884

g. 衝突解析による衝突荷重の整理

船舶（総トン数 19 トン）の衝突解析のケース①（船首衝突）、ケース②（船尾衝突）、ケース③（真横衝突）、ケース④（斜め船首衝突）及びケース⑤（斜め船尾衝突）において、剛壁幅毎に作用する最大衝突荷重を図 4.5.6-35 に示す。剛壁幅毎に作用する最大衝突荷重は、各時刻における作用幅毎で集計した最大値を示している。

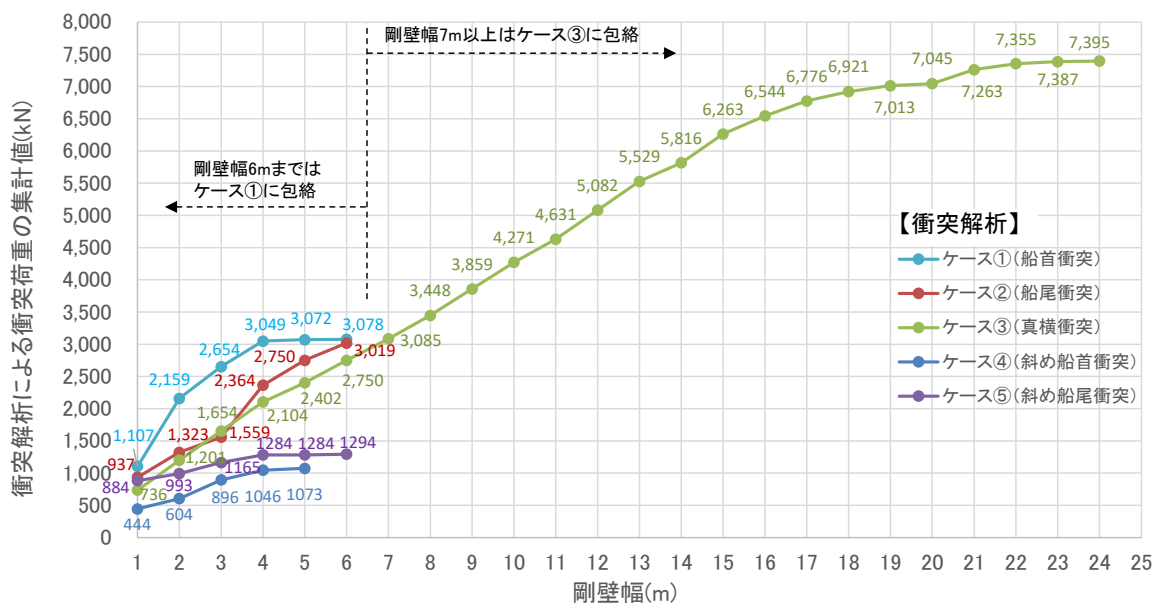


図 4.5.6-35 剛壁幅毎に作用する最大衝突荷重

衝突荷重の作用幅として、ケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）は、船幅 5.2m に相当する剛壁幅に作用している。また、ケース③（真横衝突）では、船長さ 24.72m に相当する剛壁幅に作用している。ケース④（斜め船首衝突）及びケース⑤（斜め船尾衝突）は、剛壁に対して斜め 45° に衝突し、船体が回転して再度衝突することから、剛壁幅 5～6 m に漂流物衝突荷重が作用している。

また、剛壁幅毎に作用する最大衝突荷重は、剛壁幅 6 m まではケース①（船首衝突）に包絡され、剛壁幅 7 m 以上はケース③（真横衝突）に包絡されることを確認した。

漂流物衝突による施設評価においては、施設の延長（荷重の作用幅）に応じて「施設全体に作用する衝突荷重」を設定し、施設全体の評価を実施する。

施設評価において、「施設全体に作用する衝突荷重」は平均衝突荷重の等分布荷重として表現するが、図 4.5.6-36 に示すとおり、衝突解析において平均衝突荷重を上回る局所的な荷重が生じていることから、「施設全体に作用する衝突荷重」では局所的な衝突荷重による影響を適切に評価できない。

施設の局所的な損傷を評価する観点から、施設の延長に関わらず、「局所的な衝突荷重」を設定し、施設評価を実施する。なお、最大衝突荷重は、船首衝突における隔壁①、②衝突時に発生しており、1m 以上の作用幅となっていることから、「局所的な衝突荷重」は剛壁 1m 当たりの荷重として設定する。

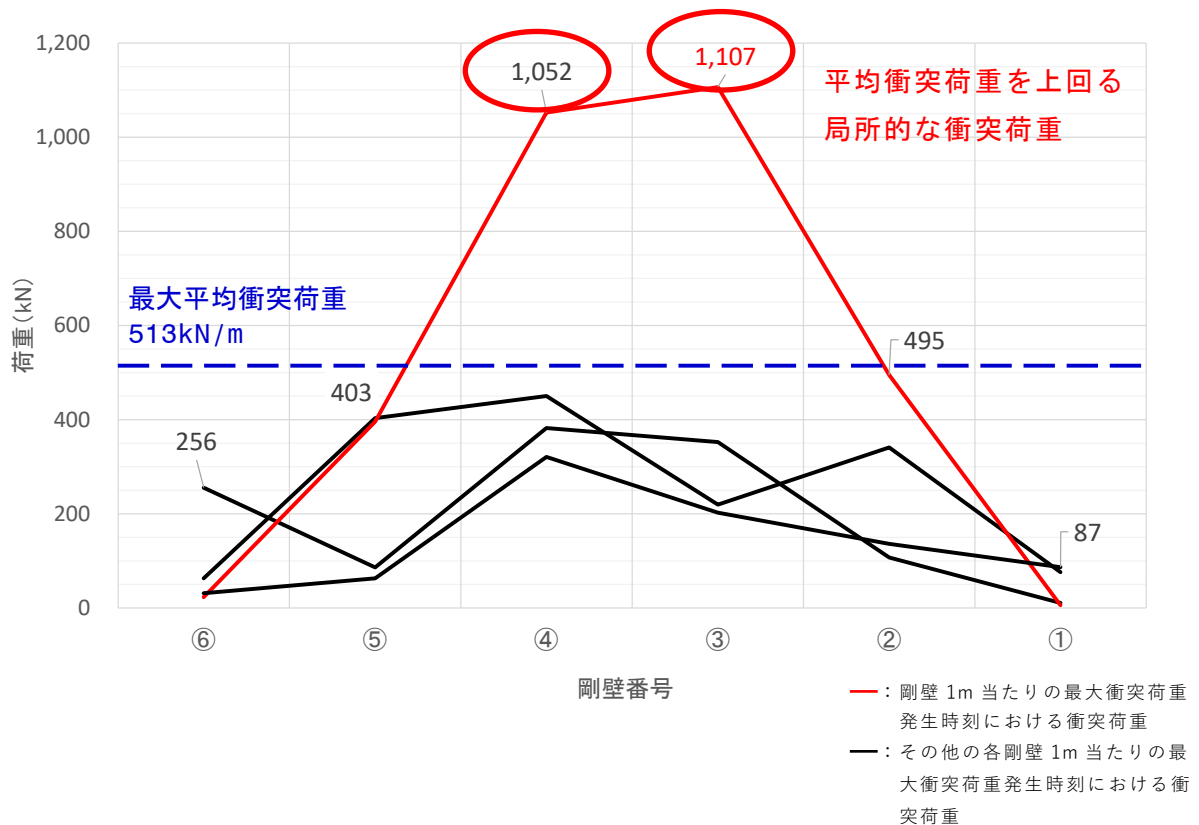


図 4.5.6-36 局所的な衝突荷重

(2) 漂流物の初期配置が前面海域の場合の衝突荷重の算定

漂流物の初期配置が前面海域の場合の衝突荷重は、既往の衝突荷重の算定式である「道路橋示方書（2002）」により算定する。

以下に算定式を示す。

【道路橋示方書(2002)算定式】

$$P = 0.1 W v$$
$$= 0.1 \times 559 \times 10.0 = 559 \text{ (kN)}$$

ここに、

P：漂流物衝突荷重

W：漂流物の重量*（=19 トン×3×9.80665≒559kN）

注記*：「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」に、船舶重量である「漁船の排水トン数は総トン数のほぼ3倍としてよい。」と記載

v：漂流物の衝突速度（=10.0m/s）

(3) 設計用衝突荷重の設定

a. 設計用衝突荷重の設定方針

島根原子力発電所においては、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備は、表 4.5.1-1 に示すとおり防波壁（鉄筋コンクリート造）である。なお、防波壁通路防波扉については、漂流物対策工（鋼製）を設置する。

漂流物衝突荷重を用いた施設評価においては、船舶（総トン数 19 トン）の衝突による「施設全体に作用する衝突荷重」を設計用衝突荷重として設定する。さらに、施設の局所的な損傷を評価する観点から、施設の延長に関わらず、「局所的な衝突荷重」も設計用衝突荷重として設定する。

島根原子力発電所の漂流物衝突荷重は、船舶（総トン数 19 トン）の初期配置を踏まえて、前面海域では「道路橋示方書（2002）」、直近海域では「衝突解析」により算定する。「衝突解析」による衝突荷重の算定に当たっては、機関部の衝突影響も考慮する。

「施設全体に作用する衝突荷重」及び「局所的な衝突荷重」の設計衝突荷重は、各算定方法による漂流物衝突荷重を包絡するように設定する。

設計用衝突荷重の設定フローを図 4.5.6-37 に示す。

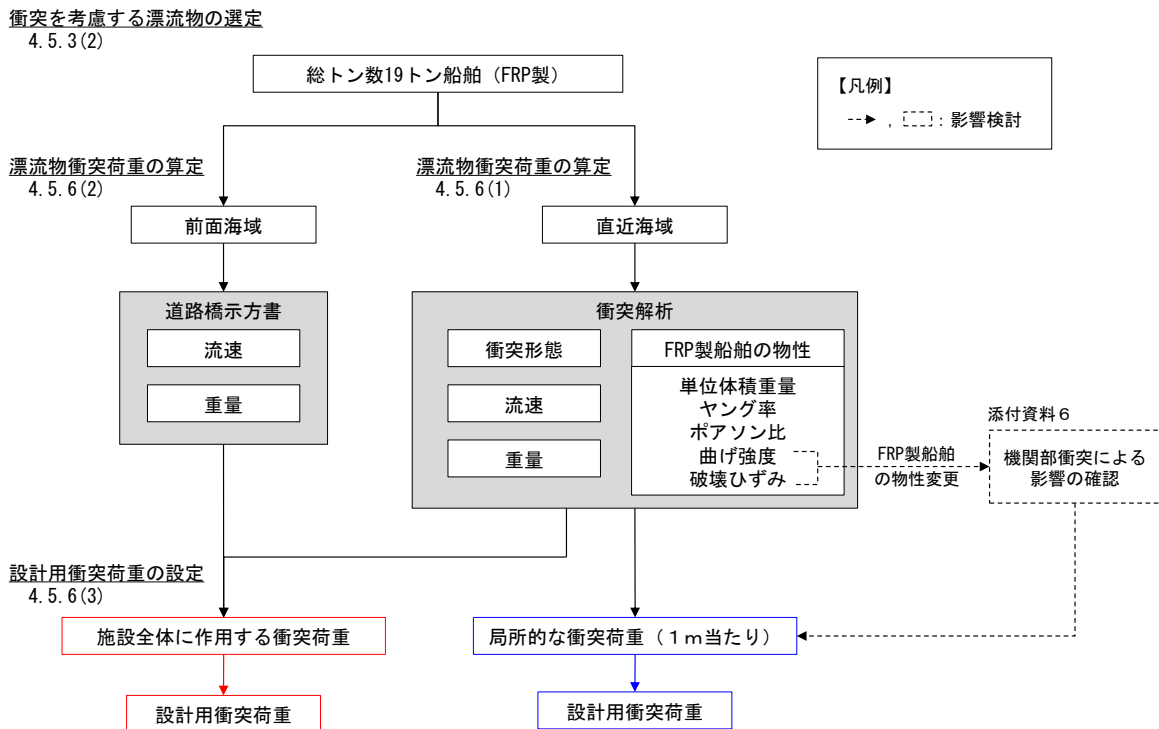


図 4.5.6-37 設計用衝突荷重の設定フロー

b. 設計用衝突荷重の設定

(a) 施設全体に作用する衝突荷重

・衝突解析

衝突解析結果より，各衝突形態による衝突荷重は，剛壁幅 6m まではケース①（船首衝突）に包絡され，剛壁幅 7m 以上はケース③（真横衝突）に包絡されることを確認したことから，衝突解析における「施設全体に作用する衝突荷重」を図 4.5.6-38 のとおり整理し，評価対象構造物の延長（作用幅）に応じて衝突荷重を設定する。

施設評価においては，「施設全体に作用する荷重」は等分布荷重とすることから，最大平均衝突荷重（施設全体に作用する荷重／作用幅）を図 4.5.6-39 に示す。

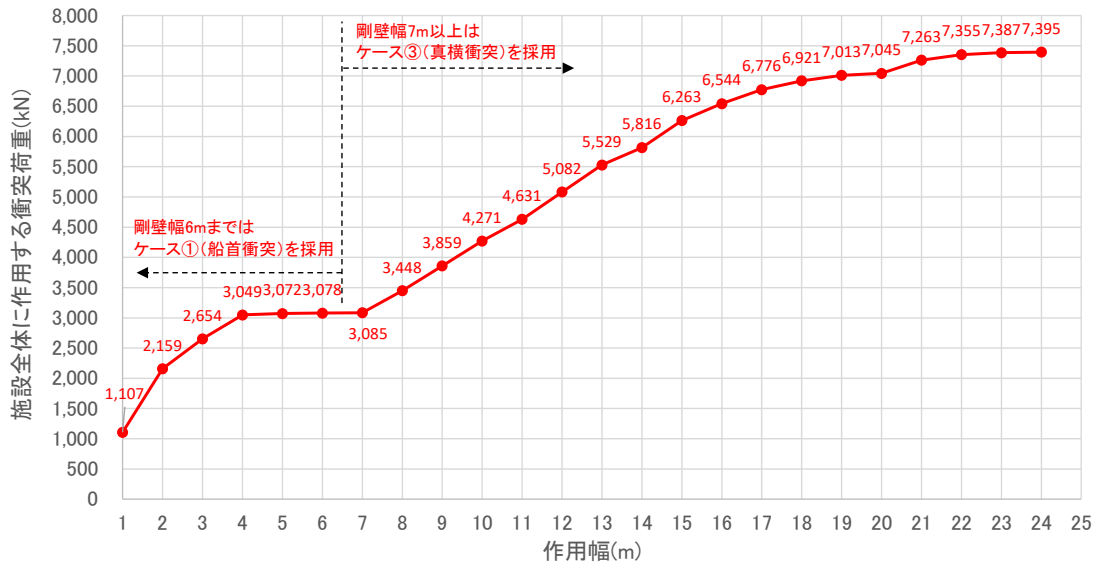


図 4.5.6-38 施設全体に作用する衝突荷重（衝突解析）

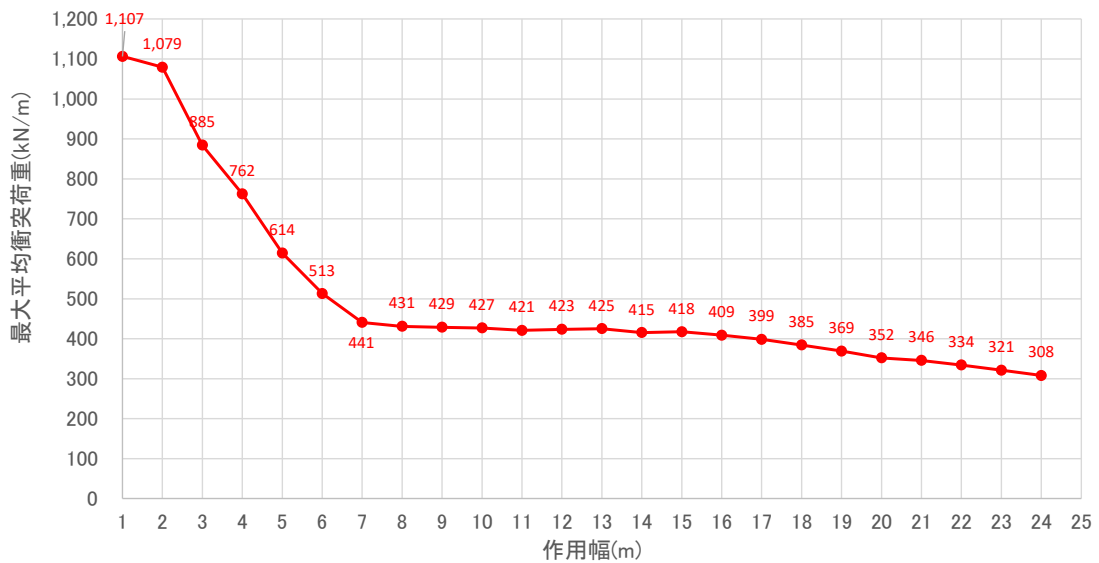


図 4.5.6-39 最大平均衝突荷重（衝突解析）

・道路橋示方書（2002）

漂流物の初期配置が前面海域にある場合は、「道路橋示方書（2002）」により衝突荷重を算定する。本算定式による衝突荷重は、船舶の総重量を基に算定することから、船舶全体の衝突荷重である「施設全体に作用する衝突荷重」に相当すると考える。「道路橋示方書（2002）」により算定される衝突荷重を表 4.5.6-13 に示す。

なお、衝突荷重の詳細な算定方法は、4.5.6(2)に記載している。

表 4.5.6-13 「道路橋示方書（2002）」により算定される衝突荷重

算定方法	衝突荷重【kN】
道路橋示方書 (2002)	559

「施設全体に作用する衝突荷重」のうち、「衝突解析」及び「道路橋示方書（2002）」の作用幅毎の衝突荷重を図 4.5.6-40 に示す。なお、「道路橋示方書（2002）」には衝突形態の概念がないことから、衝突解析において衝突荷重が大きくなる船首方向と真横方向からの衝突として整理している。

図 4.5.6-40 より、「衝突解析」による衝突荷重が他の算定方法から算定される衝突荷重を包絡していることを確認したことから、設計用衝突荷重の設定においては「衝突解析」の結果を考慮する。

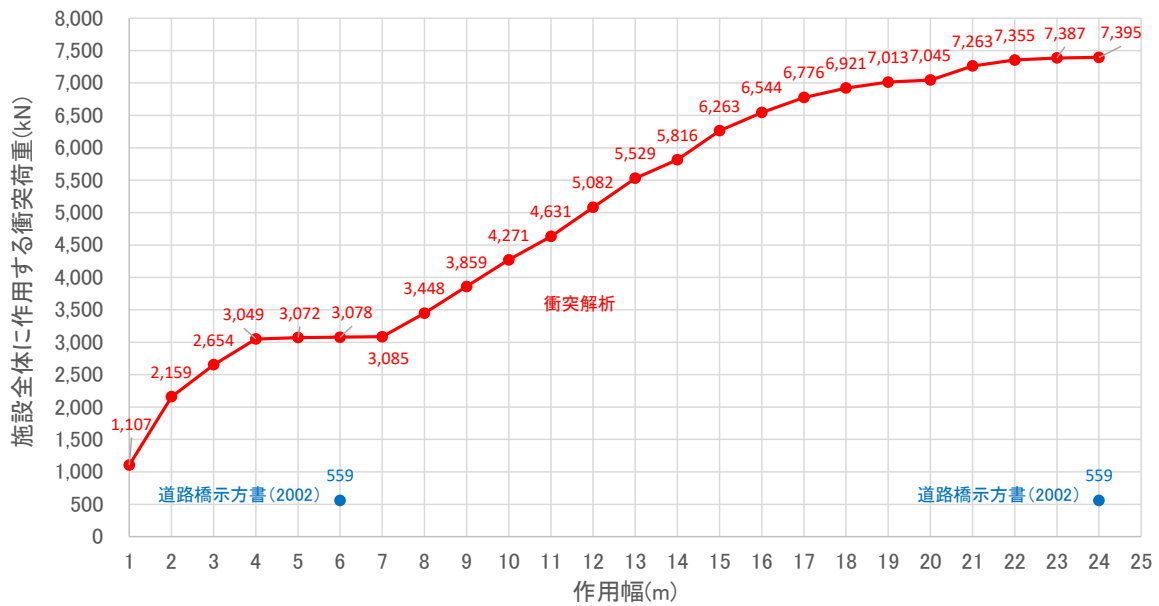


図 4.5.6-40 各算定方法による施設全体に作用する衝突荷重

(b) 局所的な衝突荷重

施設の局所的な損傷を評価する観点から、局所的な荷重（1m 当たり）を設計用衝突荷重として設定する。

表 4.5.6-14 に、各衝突形態において発生する剛壁 1m 当たりの衝突荷重を示す。最も大きな衝突荷重（1m 当たり）となる船首から衝突した場合の衝突荷重（ケース①）を考慮して、設計用衝突荷重を設定する。なお、添付資料 6 に示す機関部による影響を考慮した衝突荷重 445kN を包絡していることを確認した。

表 4.5.6-14 衝突荷重における局所的な衝突荷重

衝突形態		1m 当たりの 衝突荷重【kN】
①	船首	1,107 (最大値)
②	船尾	937
③	真横	736
④	斜め船首	444
⑤	斜め船尾	884
(参考) 機関部の衝突による影響		445

(c) まとめ

「施設全体に作用する衝突荷重」は、「衝突解析」及び「道路橋示方書」から算定される荷重を比較した結果、「衝突解析」により算定される衝突荷重が最も大きくなることから、「衝突解析」より算定される荷重を踏まえ、設計用衝突荷重を設定する。「施設全体に作用する衝突荷重」は、評価対象構造物の延長に応じた作用幅より設計用衝突荷重を設定する。例えば、防波壁（波返重力擁壁）のケーソン1函の延長が約20mであることから、衝突解析から算定される7,045kNを踏まえ、防波壁（波返重力擁壁）の設計用衝突荷重は保守的に7,200kNを設定する。

「局所的な衝突荷重」として、船首から衝突した場合の衝突荷重である1,107kNを踏まえ、設計用衝突荷重は保守的に1,200kNを設定する。

総トン数19トンの漁船における設計用衝突荷重のまとめを図4.5.6-41に示す。評価対象構造物の延長に応じて設定する「船体寸法に応じた分布的な衝突荷重」の設計用衝突荷重を表4.5.6-15に示す。

評価対象構造物に対する漂流物衝突荷重の載荷方法を添付資料9に示す。漂流物対策工を設置した評価対象構造物については、漂流物対策工による荷重の分散を考慮して評価を実施する。

衝突を考慮する漂流物の選定
4.5.3(2)

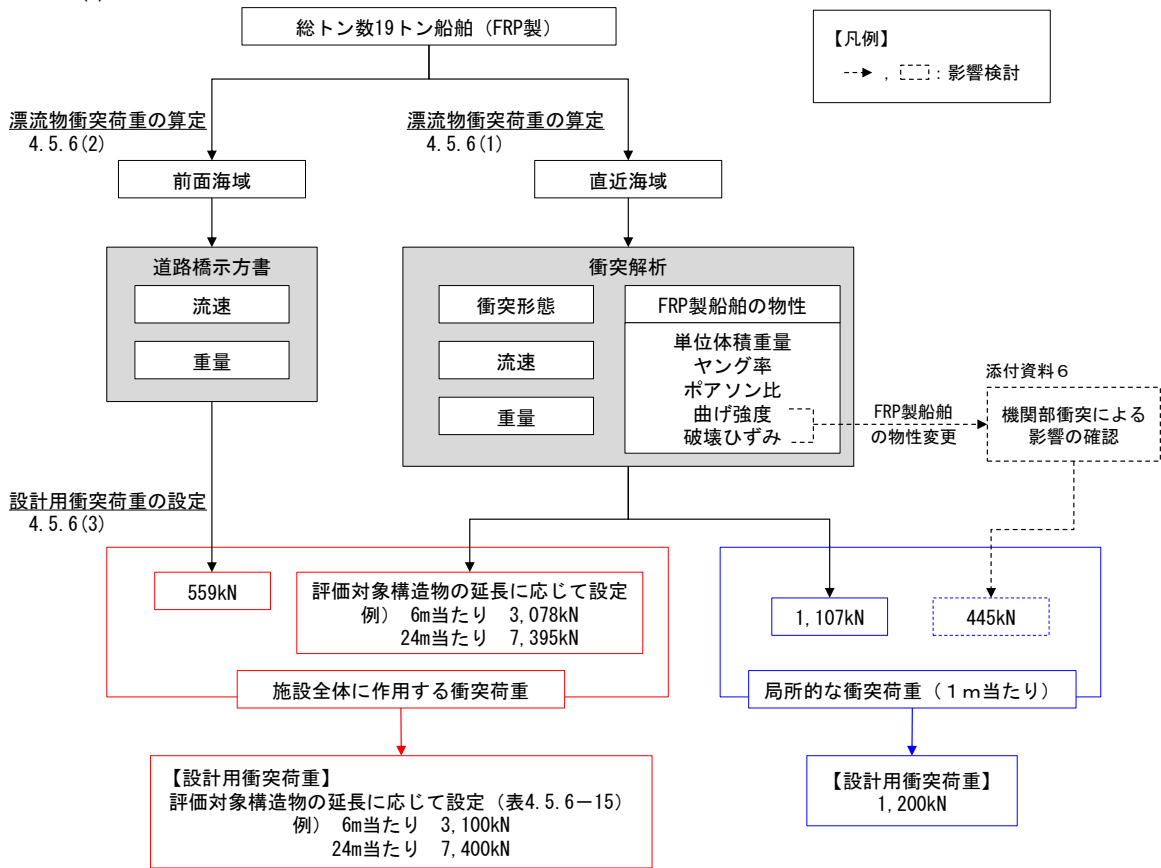


図 4.5.6-41 総トン数 19 トン船舶における設計用衝突荷重のまとめ

表 4.5.6-15 評価対象構造物に対する設計用衝突荷重

評価対象構造物の延長	m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
衝突解析から算定される衝突荷重	kN	1,107	2,159	2,654	3,049	3,072	3,078	3,085	3,448	3,859	4,271	4,631	5,082
衝突解析から算定される衝突荷重を 評価対象構造物の延長で除した値	kN/m	1,107	1,080	885	762	614	513	441	431	429	427	421	424
設計用平均衝突荷重 (設計用平均衝突荷重×評価対象 構造物の延長)	kN/m (kN)	1,200 (1,200)	1,100 (2,200)	890 (2,670)	770 (3,080)	620 (3,100)	520 (3,120)	450 (3,150)	440 (3,520)	430 (3,870)	430 (4,300)	430 (4,730)	430 (5,160)
評価対象構造物の延長	m	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
衝突解析から算定される衝突荷重	kN	5,529	5,816	6,263	6,544	6,776	6,921	7,013	7,045	7,263	7,355	7,387	7,395
衝突解析から算定される衝突荷重を 評価対象構造物の延長で除した値	kN/m	425	415	418	409	399	385	369	352	346	334	321	308
設計用平均衝突荷重 (設計用平均衝突荷重×評価対象 構造物の延長)	kN/m (kN)	430 (5,590)	420 (5,880)	420 (6,300)	410 (6,560)	400 (6,800)	390 (7,020)	370 (7,030)	360 (7,200)	350 (7,350)	340 (7,480)	330 (7,590)	310 (7,440)

津波防護施設に考慮する漂流物の選定

1. 概要

津波防護施設に到達すると評価された漂流物において、既往の算定式を用いて漂流物による衝突荷重を比較し、津波防護施設に考慮する漂流物を選定する。

2. 津波防護施設に到達する漂流物

津波防護施設に到達する漂流物一覧を表 1 に示す。

表 1 津波防護施設に到達する漂流物の評価結果

調査対象		到達する漂流物	重量等	考慮する津波*	到達形態	配置場所
発電所 構内	海 域	作業船	総トン数：約 10 トン	海域	浮遊	直近海域
		漁船	総トン数：約 0.7 トン	東縁 海域	浮遊	直近海域
	陸 域	荷揚場詰所 (壁材 (ALC 版))	— (がれき化して漂流)	東縁	浮遊	直近海域
		防舷材	約 1t	東縁	浮遊	直近海域
		枕木	約 12kg	東縁	浮遊	直近海域
発電所 構外	海 域	漁船 (500m 以内 (操業))	総トン数：約 3 トン未満	東縁 海域	浮遊	直近海域
		漁船 (500m 以遠 (操業))	総トン数：約 19 トン	東縁 海域	浮遊	前面海域

注記*：「東縁」は日本海東縁部に想定される地震による津波、「海域」は海域活断層から想定される地震による津波を表す。

表 1 に記載されている発電所構内の陸域における漂流物のうち、壁材 (ALC 版) においては、がれき化して細分化されること、防舷材においては、ゴム製の外層内に空気を注入している防舷材であり剛性が著しく小さいことから、これらの漂流物による衝突荷重はその他の漂流物による衝突荷重に包絡されると判断した。

したがって、漂流物選定のために実施する、既往の算定式による衝突荷重の比較においては、枕木及び船舶 (作業船・漁船) を対象とする。

また、発電所構外の海域における漂流物のうち、漁船 (500m 以内 (操業)) については、操業区域及び航行の不確かさを考慮して、発電所周辺漁港で最大となる漁船である、総トン数 19 トンの漁船を考慮する。

津波防護施設に考慮する漂流物の選定に当たり、既往の算定式による衝突荷重を比較する漂流物のまとめを表 2 に示す。

表 2 既往の算定式により衝突荷重を算定し比較を行う漂流物

配置場所	考慮する津波*1	漂流物	質量*2	材質
直近海域	東縁	船舶 (総トン数 0.7 トン)	2.1t	FRP
		船舶 (総トン数 3 トン)	9t	
		船舶 (総トン数 19 トン)	57t	
		枕木	12kg	
	海域	船舶 (総トン数 0.7 トン)	2.1t	FRP
		船舶 (総トン数 3 トン)	9t	
		船舶 (総トン数 10 トン)	30t	
		船舶 (総トン数 19 トン)	57t	
前面海域	東縁	船舶 (総トン数 19 トン)	57t	FRP
	海域	船舶 (総トン数 19 トン)	57t	FRP

注記*1: 「東縁」は日本海東縁部に想定される地震による津波, 「海域」は海域活断層から想定される地震による津波を表す。

*2: 漁船及び作業船の質量は, 「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(2014)」に「漁船の排水トン数は総トン数のほぼ3倍として良い」と記載があり, 排水トン数は質量と同意義であるため, 総トン数の3倍の値を採用する。

3. 既往の算定式による衝突荷重の算定

津波防護施設に考慮する漂流物の選定に当たり, 漂流物による既往の荷重算定式の整理一覧を表3, 漂流物による衝突荷重算定方法の整理を表4に示す。

表 3 漂流物による既往の荷重算定式の整理一覧

No	出典	種類	概要	算定式の根拠 (実験条件)
1	松富 (1999)	流木	円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の衝突荷重を提案している。 $F_m = 1.6 C_{MA} \{V_{Ao}/(gD)\}^{0.5} \{1/2(\sigma_f \gamma L)\}^{0.4} (\rho D^2 L)$ F_m : 衝突力, C_{MA} : 見かけの質量係数, V_{Ao} : 流木の衝突速度, D : 流木の直径, L : 流木の長さ, σ_f : 流木の降伏応力, γ : 流木の単位体積重量, g : 重力加速度	「実験に基づく推定式」 ・見かけの質量係数に関する水路実験 (実験: 高さ0.5m, 幅0.3m, 長さ11.0m, 流木(丸太)の直径: 4.8~12cm, 流木質量: 305~8615gf) ・衝突荷重に関する空中での実験 ・物理模型実験及び空中衝突実験において、流木(植生林ではない丸太)を被衝突体の前面(2.5m以内)に設置した状態で衝突させている。
2	池野・田中 (2003)	流木	円柱以外にも角柱、球の形状をした木材による衝突荷重を提案している。 $F_H = SC_{MA} \{V_H/g\}^{0.5} D^{0.25} 10^{2.5} (GM)$ F_H : 漂流物の衝突力, S : 係数 (5.0), C_{MA} : 見かけの質量係数, V_H : 段波速度, D : 漂流物の代表高さ, L : 漂流物の代表長さ, M : 漂流物の質量, g : 重力加速度 橋(橋脚)に自動車、流木あるいは船舶等が衝突する場合の衝突荷重を定めている。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/100の模型実験) 漂流物の形状: 円柱、角柱、球 漂流物重量: 0.588N~29.792N 受圧板を陸上構造物と想定し、衝突体を受圧板前面80cm(現地換算80m)離れた位置に設置した状態で衝突させた実験である。模型縮尺(1/100)を考慮した場合、現地換算で直径2.6~8mの仮定となる。
3	道路橋示方書 (2002)	流木等	$P = 0.1 W v$ P : 衝突力, W : 流送物の重量, v : 表面流速	漂流物が流下(漂流)してきた場合に、表面流速(津波流速)を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できる。
4	津波漂流物対策施設設計ガイドライン (2014)	船舶等	船舶の仮想重量と漂流物流速から衝突エネルギーを提案している。 $E = E_0 = \frac{WV^2}{(2g)}, W = W_0 + W' = W_0 + (\pi/4)(D^2 L \gamma_w)$ E : 衝突エネルギー, W : 衝突エネルギーが消費される (1/4点衝突) 場合 $E = E' = \frac{WV^2}{(4g)}$ E : 衝突エネルギー, W : 仮想重量, V : 漂流物速度, W_0 : 排水トン数, W' : 付加重量, D : 喫水, L : 横付けの場合は船の長さ、縦付けの場合は船の幅, γ_w : 海水の単位体積重量, g : 重力加速度	「漁港・漁場の施設の設計の手引」(2003)に記載されている、接岸エネルギーの算定式に対して、接岸速度を漂流物速度とすることで、衝突エネルギーを算定できる。 漁船の他、車両・流木・コンテナの衝突エネルギーに対して、支柱及び漂流物捕捉スクリーンの変形でエネルギーを吸収させることにより、漂流物の進入を防ぐための津波漂流物対策施設の設計に適用される式である。
5	FEMA (2012)	流木 コンテナ	$F_I = 1.3 u_{max} \sqrt{km(1+c)}$ F_I : 衝突力, u_{max} : 最大流速, m : 漂流物の質量, c : 付加質量係数, k : 漂流物の有効剛性	「運動方程式に基づく衝突力方程式」 非減衰系の振動方程式に基づいており、衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で、かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることかから、衝突時に塑性変形を伴う漂流物の衝突荷重算定では、個別の漂流物に対して、実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要がある。
6	水谷ほか (2005)	コンテナ	漂流するコンテナの衝突荷重を提案している。 $F_m = 2 \rho_w \eta_m B_c V_x^2 + (WV \times gdt)$ F_m : 漂流衝突力, dt : 衝突時間, η_m : 最大遡上水位, ρ_w : 水の密度, B_c : コンテナ幅, V_x : コンテナの漂流速度, W : コンテナ重量, g : 重力加速度	「実験に基づく推定式」(縮尺1/75の模型実験) 使用コンテナ: 長さ20ftと40ft, コンテナ重量: 0.2N~1.3N程度, 遡上流速: 1.0m/s以下, 材質: アクリル 被衝突体の直近のエプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めた算定式である。衝突体と水塊が一体となって衝突し、衝突前の運動量が全て力積として作用するものとして考えた算定式であり、右辺の第1項は付加質量による荷重を表している。
7	有川ほか (2007, 2010)	コンテナ 流木	コンクリート構造物に鋼製構造物(コンテナ等)が漂流衝突する際の衝突荷重を提案している。 $F = \gamma_p x^2 \left(\frac{5}{4} m \right)^3 \frac{1}{v^5}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi k_1 + k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{\pi E}, m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ F : 衝突力, a : 衝突面半径の1/2 (コンテナ衝突面の縦横長さの平均の1/4), E : ヤング率, v : ポアソン比, m : 質量, v : 衝突速度, γ_p : 塑性によるエネルギー減衰効果 m や k の添え字は衝突体と被衝突体を示す。 また、「①松富(1999)」にならない、上式において $m=C_{MA} m$ (C_{MA} : サージタイプの1.7) とすること で、流木のコンクリート版に対する衝突力を評価できるとしている。	「実験に基づく推定式」(縮尺1/5の模型実験) 使用コンテナ: 長さ1.21m, 高さ0.52m, 幅0.49m, 衝突速度: 1.0~2.5m/s程度, 材質: 鋼製 物理模型実験では、コンテナを被衝突体の全面1.21m(現地換算6.05m)に設置して衝突力を求めた算定式である。

- No1 松富英夫 (1999) 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No621, pp. 111-127
- No2 池野正明・田中寛好 (2003) 陸上遡上波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 721-725
- No3 道路橋示方書・同解説 I 共通編 ((社) 日本道路協会, 平成 14 年 3 月)
- No4 津波漂流物対策施設設計ガイドライン (沿岸技術研究センター, 寒地研究センター, 平成 26 年)
- No5 FEMA (2012) Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA P-646
- No6 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005) エプロン上のコンテナに作用する津波波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 741-745
- No7 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆 (2007) 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 846-850
有川太郎・鷺崎誠 (2010) 津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験, 土木学会論文集 B2, Vol. 66, No. 1, pp. 781-785

表 4 漂流物による衝突荷重算定方法の整理

No	算定方法	種類	漂流物の初期配置	適用流速	適用性
1	松富 (1999)	流木	直近海域 直近陸域	衝突速度	個別の流木(丸太)の種類等に応じて、実現象を再現できるパラメータを適切に設定することが可能であれば、直近陸域又は直近海域からの流木に対して適用可能と判断する。
2	池野・田中 (2003)	流木	直近陸域	段波速度	流木を対象とした算定式であるが、実験の模型縮尺(1/100)を考慮すると、原子力発電所における漂流物衝突事象への適用は困難と判断する。
3	道路橋示方書 (2002)	流木 FRP製 船舶等	前面海域	表面流速	漂流物が流下(漂流)して来た場合に、表面流速(津波流速)を与えることで漂流流速に対する漂流物荷重を算定できる。新規制基準適合性審査(東北電力(株)女川原子力発電所等)において適用実績があるため、初期配置が前面海域の漂流物に対して適用可能と判断する。
4	津波漂流物 対策施設設計 ガイドライン (2014)	船舶等	前面海域 直近海域	漂流物速度	船舶、車両、流木、コンテナ等の漂流物を対象としているが、鋼管杭等の支柱の変形及びワイヤロープの伸びにより衝突エネルギーを吸収する考え方であり、弾性設計における適用は困難であると判断する。
5	FEMA (2012)	流木 コンテナ FRP製 船舶	直近海域	最大流速	個別の漂流物に対して、実現象を再現できるパラメータ(軸剛性等)を適切に設定することが必要である。新規制基準適合性審査(東北電力(株)女川原子力発電所)において、初期配置が直近海域の総トン数5トンのFRP製船舶の船首方向衝突に対して適用実績があるため、FRP製船舶の船首方向衝突に対して適用可能と判断する。
6	水谷ほか (2005)	コンテナ	直近陸域	漂流速度	エプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めるという特殊な実験により得られた式であることに留意する必要はあるが、直近陸域からのコンテナに対して適用可能と判断する。
7	有川ほか (2007, 2010)	流木 コンテナ	直近海域 直近陸域	衝突速度	剛性に係るk値を適切に定める必要があり、対象としている種類以外への適用性があるk値に係るk1及びk2の値が不明であるため、現状は当該式が対象としている種類(流木、コンテナ)以外への適用は困難と判断する。したがって、直近陸域又は直近海域からの流木及びコンテナに対して適用可能と判断する。

表 3 及び表 4 の整理結果を基に、各漂流物による衝突荷重の比較結果のまとめを表 5 に示す。漂流物による衝突荷重は、対象となる漂流物の初期配置の適用性を考慮して、既往の算定式を選定する。

【船舶】

船舶の初期配置は、直近海域又は前面海域となる。表 4 より、既往の算定式の適用性を考慮して、初期配置が直近海域の場合は、「F E M A (2012)」, 初期配置が前面海域の場合は、「道路橋示方書 (2002)」により衝突荷重を算定して比較する。

なお、F E M A (2012) による衝突荷重の算定に当たっては、衝突物の軸剛性を設定する必要があり、船舶の船首方向における軸剛性は、添付資料 4 に記載のとおり「構造物の衝撃挙動と設計法 ((社)土木学会, 1994)」を基に設定が可能である。この軸剛性は、総トン数が大きくなると船体寸法、板厚及び質量が大きくなることで軸剛性も大きくなるが、本検討においては、安全側に総トン数 19 トンにおける船首方向の軸剛性 ($1.71 \times 10^5 \text{N/m}$) を船舶の代表値として設定する。

【枕木】

枕木の初期配置は、直近陸域となる。表 4 より、既往の算定式の適用性を考慮して、「松富 (1999)」, 「F E M A (2012)」及び「有川ほか (2007, 2010)」により衝突荷重を算定して比較する。

表 5 漂流物による衝突荷重の比較結果のまとめ

考慮する津波	配置場所*1	漂流物	質量	衝突荷重 (kN)	算定式	衝突速度 (m/s)
東縁	直近海域	船舶 (総トン数 0.7 トン)	2.1t	348*2	F E M A (2012)	10.0
		船舶 (総トン数 3 トン)	9t	721*2		
		船舶 (総トン数 19 トン)	57t	1,815		
		枕木	12 kg	158	松富(1999)	
				133	有川ほか (2007, 2010)	
	99			F E M A (2012)		
前面海域	船舶 (総トン数 19 トン)	57t	559	道路橋示方書 (2002)		
海域	直近海域	船舶 (総トン数 0.7 トン)	2.1t	209*2	F E M A (2012)	6.0
		船舶 (総トン数 3 トン)	9t	433*2		
		船舶 (総トン数 10 トン)	30t	790*2		
		船舶 (総トン数 19 トン)	57t	1,089		
	前面海域	船舶 (総トン数 19 トン)	57t	336	道路橋示方書 (2002)	

注記*1: 「東縁」は日本海東縁部に想定される地震による津波, 「海域」は海域活断層から想定される地震による津波を表す。

*2: 衝突荷重の算定に当たり, 最大となる総トン数 19 トンの船首方向の軸剛性を用いているため, 各船舶の総トン数に応じた衝突荷重に対して安全側の値となっている。

4. 津波防護施設に考慮する漂流物の選定結果

津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が直近海域となる漂流物は、作業船（総トン数 10 トン）及び漁船（総トン数 0.7 トン及び 3 トン）、壁材（ALC版）、防舷材（約 1t）及び枕木（約 12kg）に加え、漁船の操業区域及び航行の不確かさを考慮して、総トン数 19 トンの漁船を考慮する。これらのうち、既往の算定式を用いて漂流物による衝突荷重を比較した結果より、総トン数 19 トンの漁船を初期配置が直近海域における漂流物として評価する。なお、初期配置が直近海域において対象となる漂流物のうち、壁材（ALC版）においては、がれき化して細分化されること、防舷材においては、ゴム製の外層内に空気を注入している防舷材であり剛性が著しく小さいことから、これらの漂流物による衝突荷重はその他の漂流物による衝突荷重に包絡されると判断した。

津波防護施設に到達する漂流物のうち、初期配置が前面海域となる漂流物は、船舶（総トン数 19 トン）を評価する。

以上より、津波防護施設に考慮する漂流物の選定に当たり、対象漂流物となる枕木及び船舶（作業船・漁船）において、対象漂流物の初期配置、重量等及び材質を踏まえた適用性を考慮し、既往の算定式による衝突荷重を比較した結果、漂流物による衝突荷重が最大となる船舶（総トン数 19 トン）を津波防護施設に考慮する漂流物として選定する。

なお、防波壁の壁面（海側）よりも奥まった狭隘な場所に設置され、船舶が衝突しない場合は、枕木を津波防護施設に考慮する漂流物として選定する。

枕木による衝突荷重の算定における設計上の配慮及び算定結果

1. 狭隘な設置場所への衝突荷重として考慮する漂流物

津波防護施設の評価において考慮する漂流物としては、衝突荷重を踏まえて船舶を選定した。一方、防波扉（1号機北側，2号機北側）については、図-1に示すように防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置されており、設置位置に船舶が到達しないことから、設計上の配慮として、枕木を津波防護施設に考慮する漂流物として選定する。

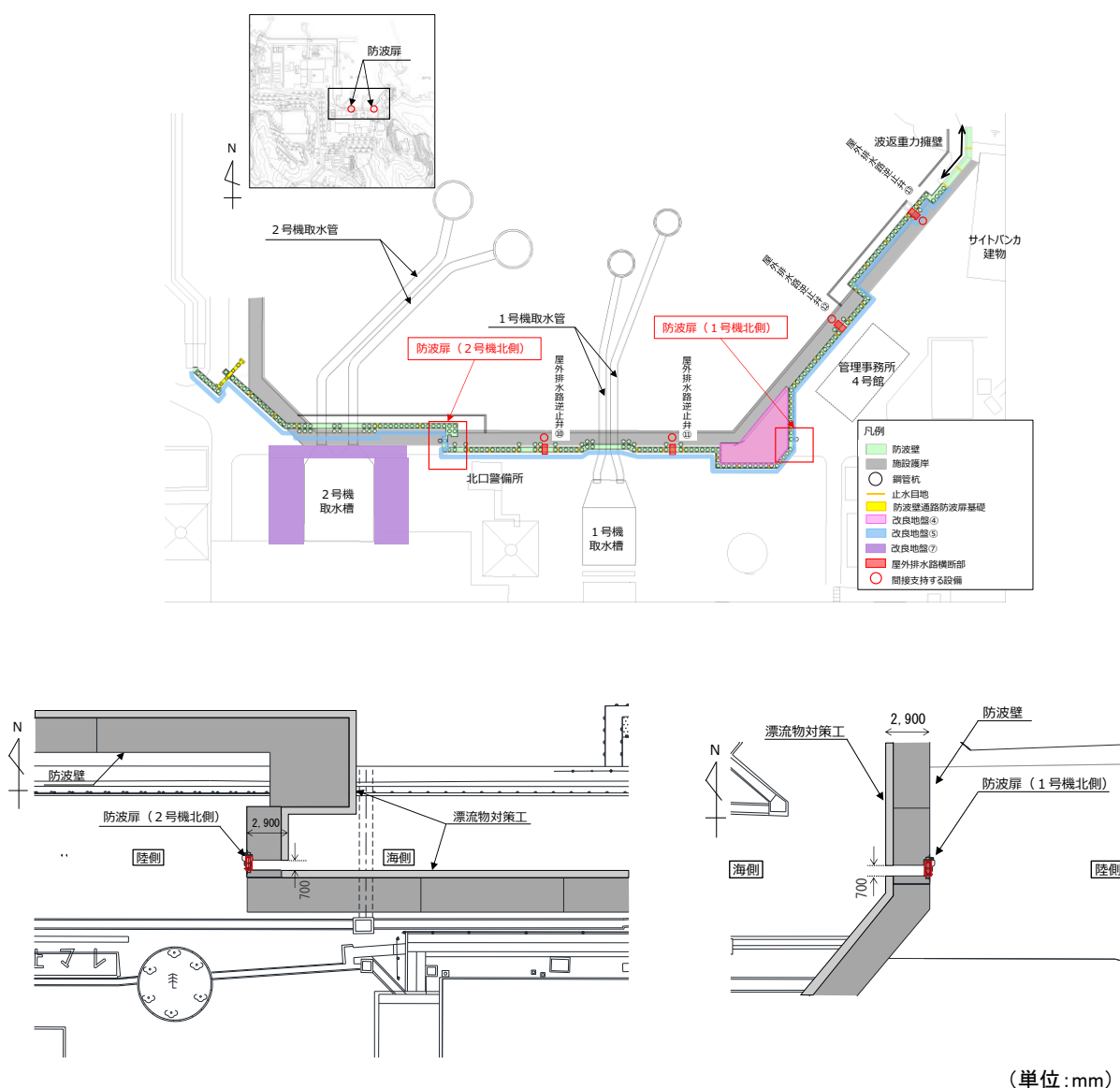


図-1 防波扉（1号機北側，2号機北側）の位置図

2. 枕木による衝突荷重算定用の流向

防波扉（1号機北側，2号機北側）については，図-1に示すように防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置されていることから，被衝突物に対して直交方向が最も影響が大きい流向と判断した。そのため，設計上の配慮として，防波扉（1号機北側）は東方向，防波扉（2号機北側）は西方向の流向を対象として衝突荷重を設定する。

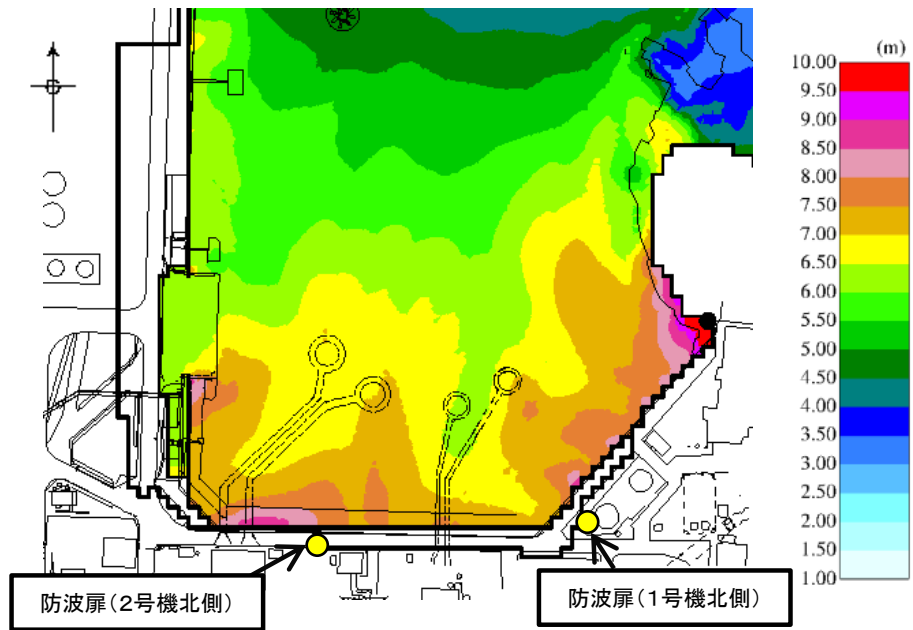
3. 枕木による衝突荷重算定用の流速

基準津波来襲時において，防波扉（1号機北側，2号機北側）前面の1，2号機北側エリア（地盤高さ：EL 8.5m）に津波は遡上しないことから，防波扉（1号機北側，2号機北側）の設置位置（下端高さ：EL 9.5m）に津波は到達しない（図-2(1)）。

一方，1，2号機北側エリアは海底面まで沈下すると仮定して沈下量を設定し，3号機東側エリアは沈下量を1mとした場合の津波解析においては，防波扉（1号機北側）前面で最大水位上昇量8.3mが確認された（図-2(2)）。この最大水位上昇量に，朔望平均満潮位（0.58m），潮位のばらつき（0.14m）及び高潮ハザードを考慮した参照する裕度（0.64m）を加えると，設置位置の下端高さ（EL 9.5m）を上回ることから，この押し波による流速を確認した。なお，流速は防波扉（1号機北側）に影響が大きい流向である東方向を対象に抽出した。

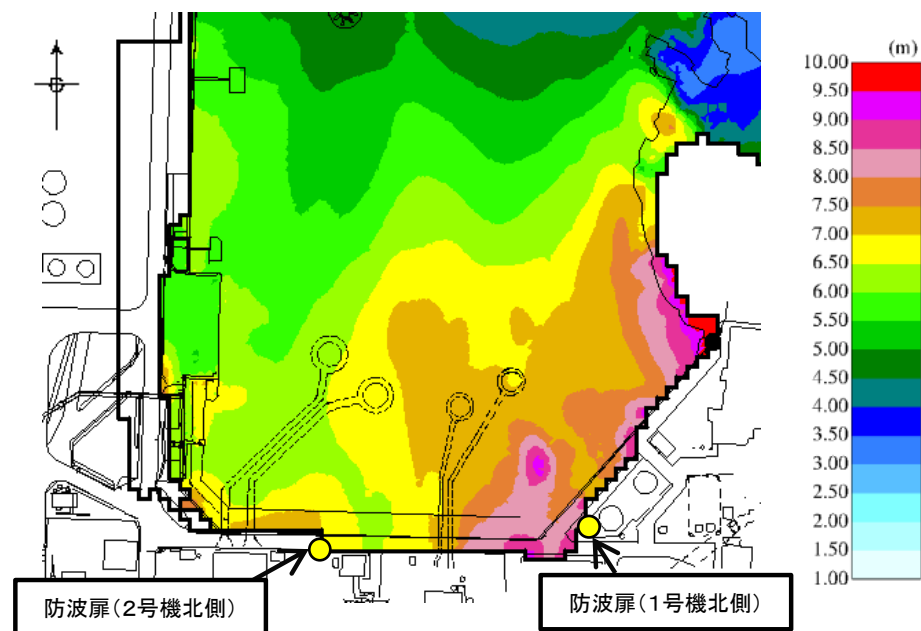
防波扉（1号機北側，2号機北側）前面における流況図を図-3に，水位及び流速の時系列分布を図-4に，津波高さの概念図を図-5に示す。流況図より，防波壁の隅角部で水位が高くなった後，防波扉（1号機北側）設置位置前面において防波壁に沿った流れが生じていることを確認した。設置位置の下端高さ（EL 9.5m）を上回る時間は1秒程度であり，その時間における最大流速は0.6m/sであった。

以上より，設計上の配慮として，枕木の衝突速度を0.6m/sと設定して衝突荷重を算定する。



最大水位上昇量分布図
 基準津波 1 (防波堤無し)
 (防波壁前面の沈下無し)

図-2(1) 防波扉 (1号機北側, 2号機北側) 前面における最大水位上昇量



最大水位上昇量分布図
 基準津波 1 (防波堤無し)
 (3号機東側エリア: 1m沈下
 1, 2号機北側エリア: 海底面まで沈下)

図-2(2) 防波扉 (1号機北側, 2号機北側) 前面における最大水位上昇量

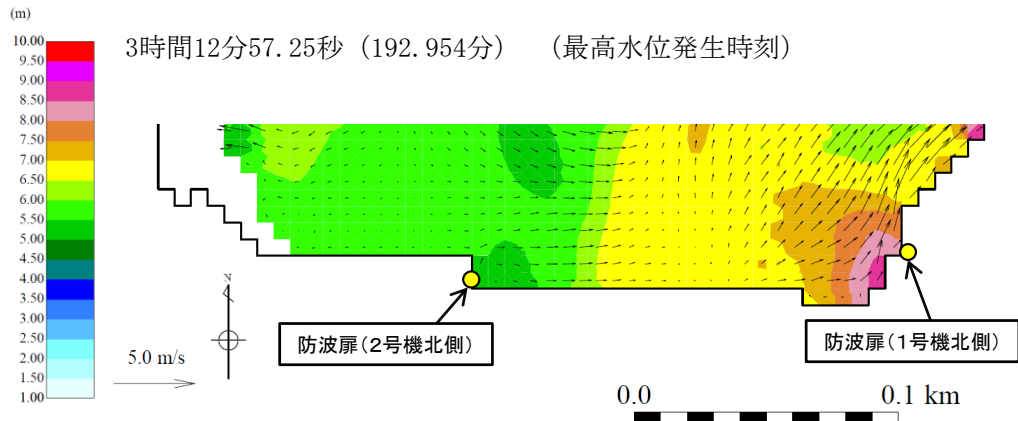
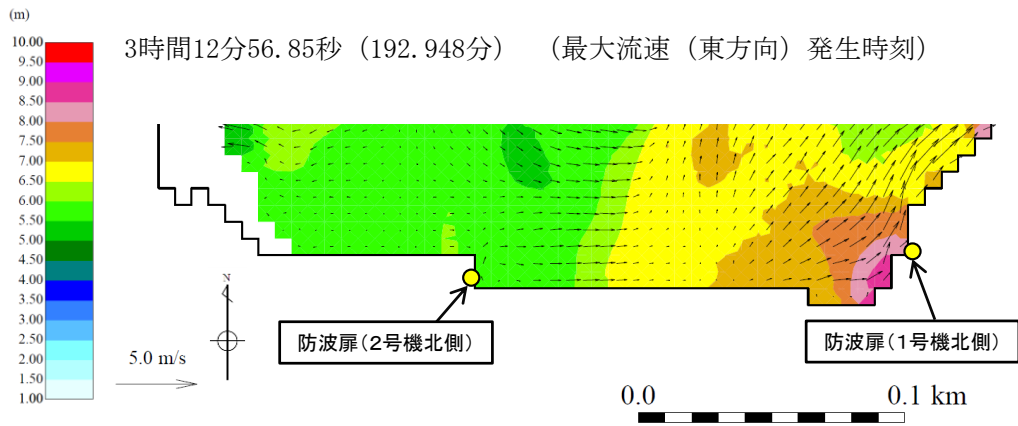
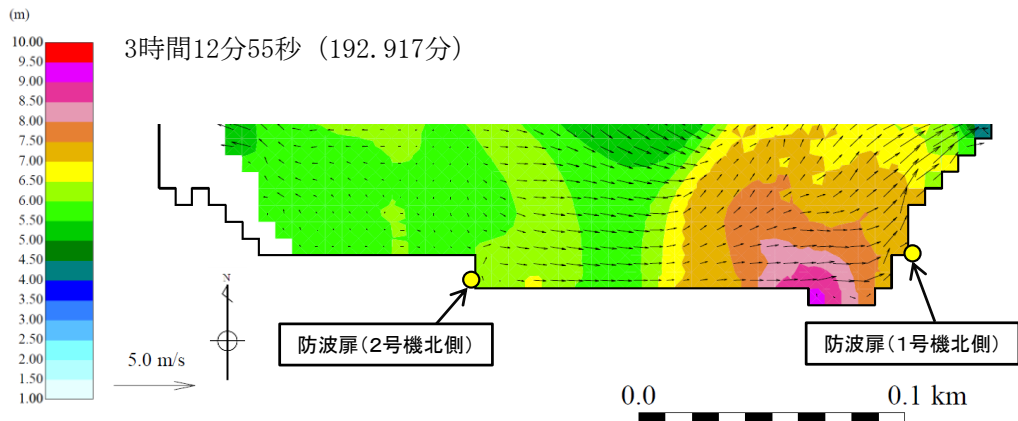
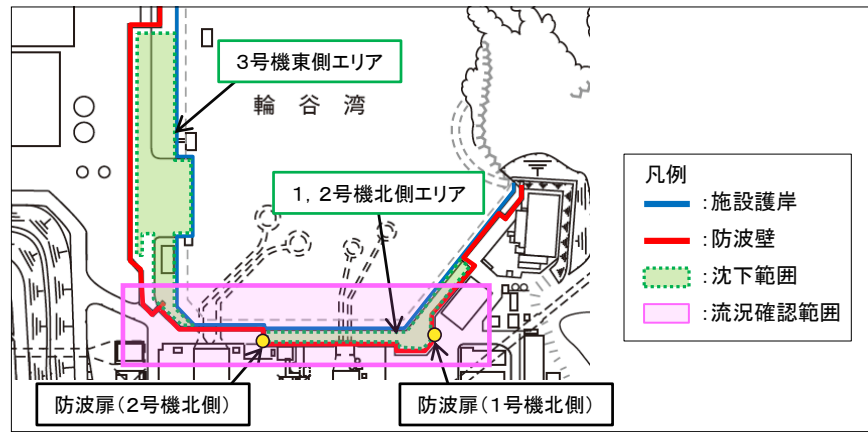
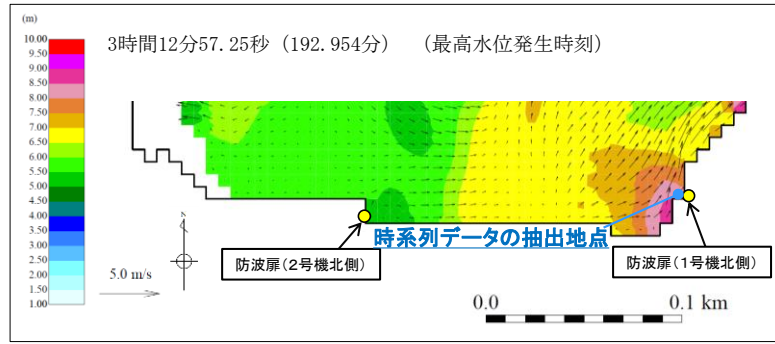
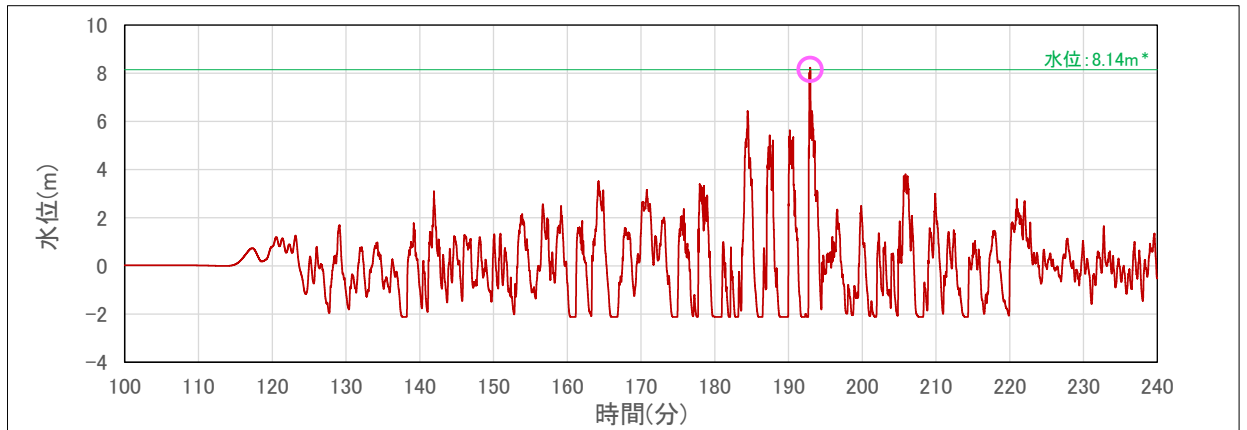


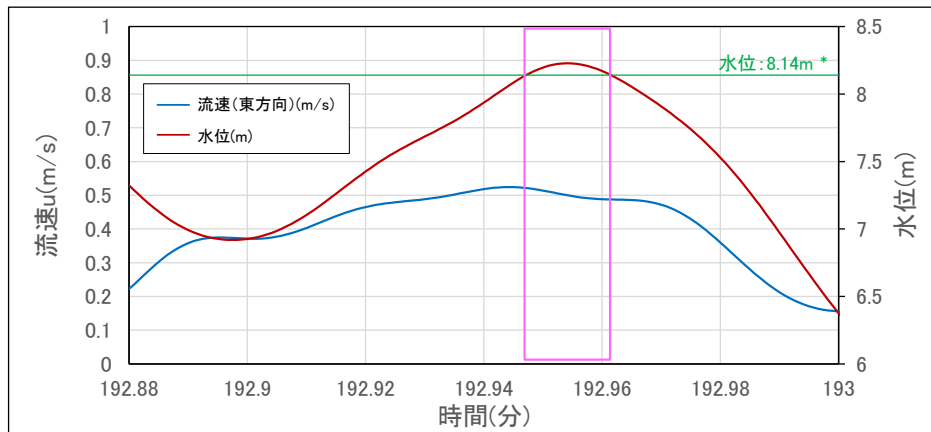
図-3 防波扉(1号機北側, 2号機北側)前面における流況図
(3号機東側エリア: 1m沈下, 1, 2号機北側エリア: 海底面まで沈下)



時系列データの抽出地点の位置図



防波扉（1号機北側）前面における水位の時系列データ



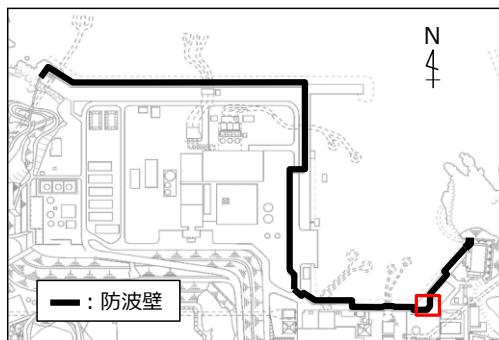
防波扉（1号機北側）前面における水位及び流速の時系列データ

注記*：朔望平均満潮位、潮位のばらつき及び高潮ハザードを考慮した参照する裕度を加えた場合に、防波扉（1号機北側，2号機北側）の設置位置の下端高さEL 9.5mを上回る水位

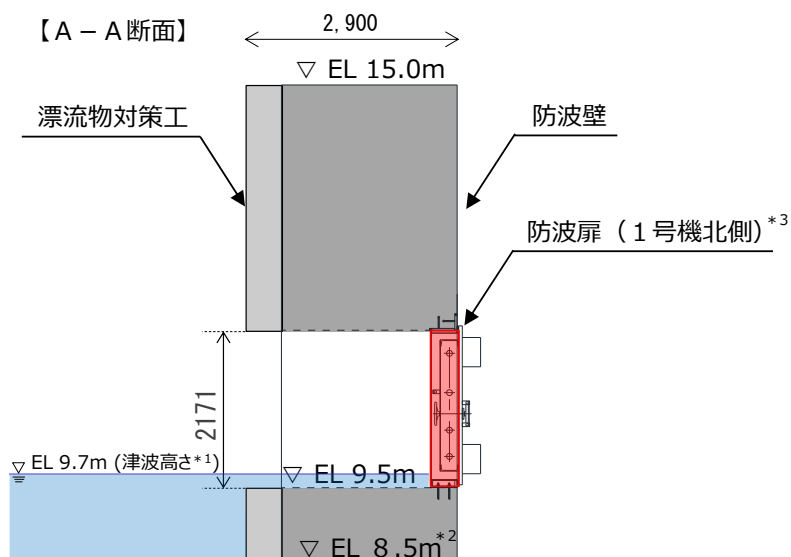
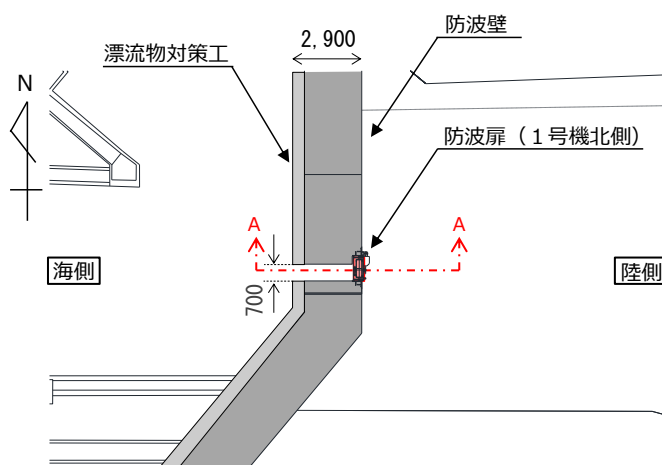
図-4 防波扉（1号機北側，2号機北側）前面における水位及び流速の時系列分布図

（3号機東側エリア：1m沈下，1，2号機北側エリア：海底面まで沈下）

KEY-PLAN



【防波壁通路防波扉（1号機北側）位置図（平面図）】



注記 * 1 : 防波扉（1号機北側）前面における最高水位に高潮ハザードを考慮した参照する余裕を加えた津波高さ

* 2 : 防波壁前面は海底面まで沈下すると仮定

* 3 : 防波扉（1号機北側，2号機北側）は，防波壁の壁面（海側）より奥まった狭隘な場所に設置するため，船舶は衝突しない。枕木による漂流物衝突荷重を考慮する。

図－5 防波扉（1号機北側，2号機北側）における津波高さの概念図

4. 枕木による衝突荷重の作用方法

被衝突物に対する，漂流物による衝突荷重の鉛直方向及び水平方向の作用位置は，設計上の配慮として，安全側に防波扉（1号機北側，2号機北側）の評価が厳しくなる作用位置を設定する。

5. 枕木による衝突荷重と津波荷重との重畳

漂流物による衝突荷重と津波荷重の組合せについて，実際に施設に作用する荷重としては，津波による最大荷重と漂流物衝突による最大荷重が同時に作用する可能性は小さいと考えられるが，漂流物による衝突荷重と津波荷重が重畳する可能性を否定できないため，設計上の配慮として，津波高さに応じた津波荷重と漂流物による衝突荷重を重畳させる。

6. 枕木による衝突荷重の算定

枕木による衝突荷重は，添付資料2で評価した枕木の衝突荷重と同様に，既往の算定式の適用性を考慮して，「松富（1999）」，「FEMA（2012）」及び「有川ほか（2007，2010）」により衝突荷重を算定して比較した。その結果，最大衝突荷重は6kNであったことを踏まえ，枕木による衝突荷重としては6kNを設定する。

枕木による衝突荷重の比較結果のまとめを表-1に示す。

表-1 枕木による衝突荷重の比較結果のまとめ

考慮する津波	配置場所	漂流物	質量	衝突荷重 (kN)	算定式	衝突速度 (m/s)
東縁	直近海域	枕木	12 kg	6	松富(1999)	0.6m/s
				6	有川ほか(2007, 2010)	
				6	FEMA(2012)	