

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 06
提出年月日	2022年6月21日

津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料

2022年6月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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

1.2 遡上・浸水域の評価の考え方

1.2 遡上・浸水域の評価の考え方

(1) 遡上・浸水域の評価の考え方

遡上・浸水域の評価にあたっては、遡上解析を実施して、遡上波の回り込みを含め敷地への遡上の可能性を検討する必要がある。

遡上・浸水域の評価においては、遡上・浸水域が広めの評価（安全側の評価）となるよう、以下のとおり、基準地震動 S_s 及び基準津波による影響の有無を検討し、影響要因として設定したうえで、遡上解析を実施する。

a. 基準地震動 S_s 及び基準津波による被害想定 of 考慮

基準地震動 S_s 及び基準津波に伴う地形変化、標高変化による影響の有無について以下のとおり検討を行った。これらの検討を行った後に、「1.2(6) 津波評価条件」に結果を示す。

(a) 敷地周辺斜面の崩壊に関する検討【1.2(2)】

防波壁両端部の地山については、基準地震動 S_s 及び基準津波による斜面崩壊の有無を検討し、斜面崩壊が想定される場合には、入力津波を設定する際の影響要因として設定する。

防波壁両端部の地山以外の敷地周辺斜面については、基準地震動 S_s による斜面崩壊を想定した場合の入力津波への影響の有無を検討し、入力津波の設定に影響を与える場合には、影響要因として設定する。

(b) 敷地の地盤変状に関する検討【1.2(3)】

敷地の地盤変状については、基準地震動 S_s による地盤変状を想定した場合の入力津波への影響の有無を検討し、入力津波の設定に影響を与える場合には、影響要因として設定する。

(c) 防波堤損傷に関する検討【1.2(4)】

防波堤の損傷については、基準地震動 S_s による防波堤の損傷を想定した場合の入力津波への影響の有無を検討し、入力津波の設定に影響を与える場合には、影響要因として設定する。

(d) 津波による洗堀に関する検討【1.2(5)】

基準津波による遡上域の洗堀の有無を検討し、遡上域の洗堀が想定される場合には、入力津波を設定する際の影響要因として設定する。

b. 遡上解析のモデルについて

基準津波による敷地周辺の遡上・浸水域の評価における遡上解析モデルについて、計算領域は、対馬海峡付近から間宮海峡付近に至る東西方向約 1,300km、南北方向約 2,100km を設定した。

また、計算格子間隔については、敷地に近づくにしたがって最大 800m から最小 6.25m まで徐々に細かい格子サイズを用い、津波の挙動が精度よく計算できるよう

適切に設定した。敷地近傍及び敷地については、海底・海岸地形、敷地の構造物等の規模や形状を考慮し、格子サイズ 6.25m でモデル化している。

(a) 敷地及び敷地周辺の地形及び標高

敷地近傍及び敷地については、海域では一般財団法人日本水路協会（2008～2011）、深淺測量等による地形データを使用し、陸域では、国土地理院（2013）等による地形データ等を用いた。また、取水路・放水路等の諸元及び敷地標高については、発電所の竣工図等を用いた。

(b) 伝播経路上の人工構造物

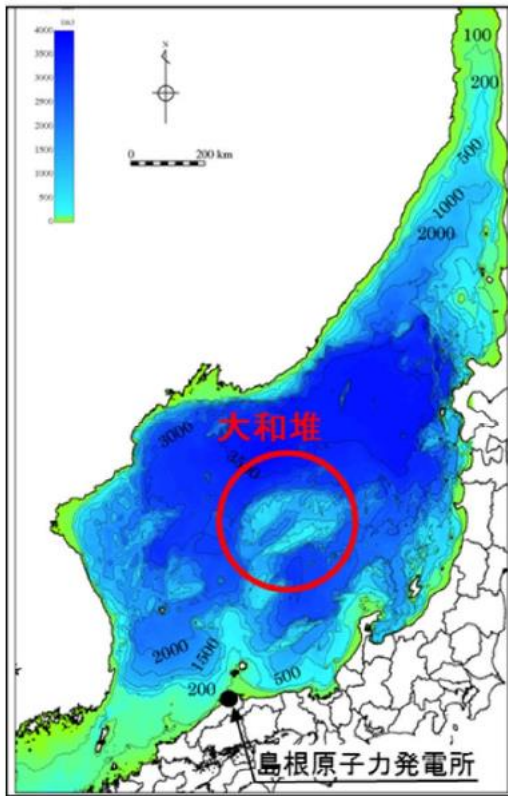
既設の構造物については、発電所の竣工図等で調査し、将来設置される計画がある人工構造物については、計画図等により調査した。

竣工図等による調査において確認した人工構造物は、現場のウォークダウンにより竣工図と相違ないことを確認した。また、竣工図等に反映されていない人工構造物は、遡上解析に影響する変更がないことを確認した。

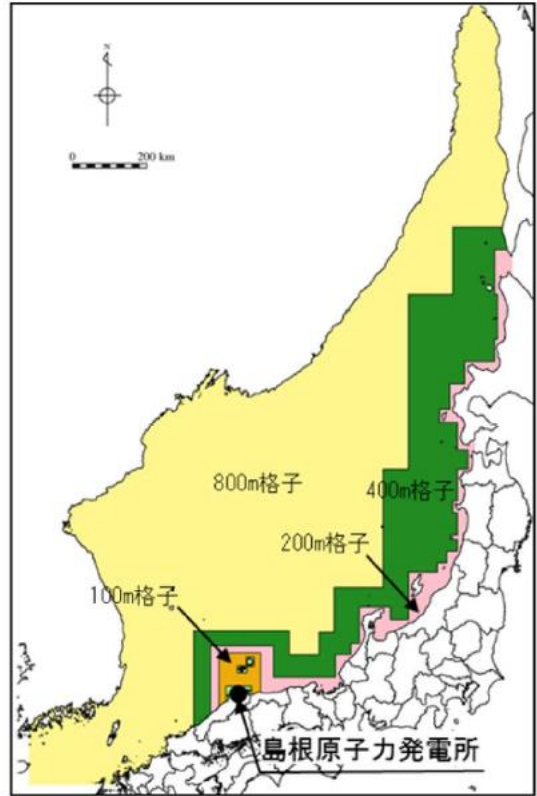
(c) 遡上解析における解析モデルの作成

上記 (b) において実施した調査結果を踏まえ、遡上解析に影響を及ぼす人工構造物を考慮し、遡上・伝播経路の状態に応じてモデルを作成した。

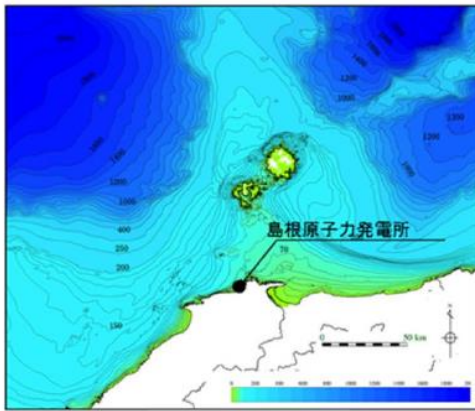
図 1.2-1 に遡上解析モデルにおける計算格子分割を示す。



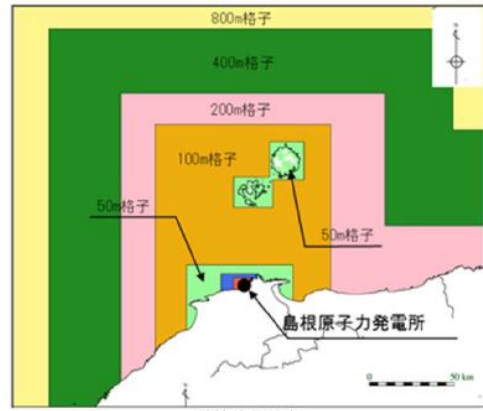
海底地形



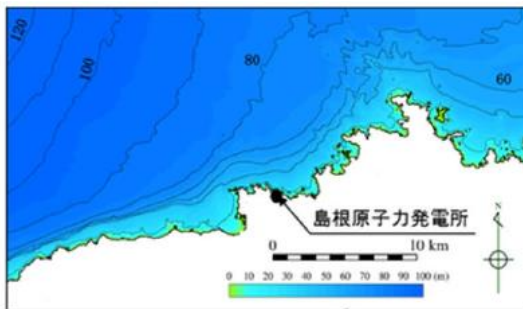
計算格子分割



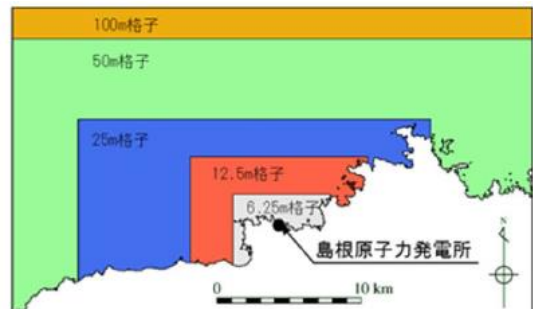
海底地形



計算格子分割



海底地形



計算格子分割

図 1.2-1 遡上解析モデルにおける水深と計算格子分割

(2) 敷地周辺斜面の崩壊に関する検討

検討にあたっては、防波壁（東端部）及び防波壁（西端部）は双方とも地山斜面（岩盤）に擦り付き、これらの地山が津波の敷地への地上部からの到達に対して障壁となっていることから、地山の耐震、耐津波設計上の位置付けも整理したうえで、基準地震動及び基準津波に対する健全性の確保について確認する。

a. 津波遡上高の分布を踏まえた津波防護上の地山範囲の特定について

敷地は EL 15.0m の防波壁に取り囲まれており、その両端部は地山に擦り付き、その地山は津波防護上の障壁となっている（図 1.2-2）。

津波防護上の地山範囲は、設計基準対象施設の津波防護対象設備を内包する建物が敷地 EL 8.5m 盤にあることを踏まえ、水位上昇側の基準津波の中で、防波壁（東端部）付近及び防波壁（西端部）付近において水位 EL 8.5m 以上が広範囲に分布する基準津波 1（防波堤有り及び無し）の最大水位上昇量分布を基に検討する。水位上昇側の基準津波である基準津波 1（防波堤有り及び無し）、基準津波 2（防波堤有り）及び基準津波 5（防波堤無し）の最大水位上昇量分布図を図 1.2-3 に示す。

設計基準対象施設の津波防護対象設備を内包する建物が敷地 EL 8.5m 盤にあることを踏まえ、防波壁（東端部）及び防波壁（西端部）における敷地への遡上の可能性のある水位 EL 8.5m 以上の最大水位上昇量分布を図 1.2-4 に示す。基準津波 1（防波堤有り及び無し）の最大水位上昇量分布を踏まえ、津波防護上の地山範囲を図 1.2-5 に示すとおり特定した。

津波防護上の地山範囲における地形断面図を図 1.2-6 に示す。

防波壁（東端部）の地山は、南東側の標高が高く、幅が広がっている。A-A' 断面（高さ：26m、幅：63m）は、B-B' 断面（高さ：44m、幅：145m）及び C-C' 断面（高さ：69m、幅：396m）と比較して標高が低く、幅が狭いことから、津波防護の観点で最も厳しい断面と考え、津波防護を担保する地山斜面の検討対象は A-A' 断面付近の範囲とする。津波防護を担保する地山斜面の検討対象（A-A' 断面付近）は、防波壁等に影響するおそれのある周辺斜面（赤枠）に概ね対応する。

防波壁（西端部）の地山は、幅が広く、南西側の標高が高い。D-D' 断面（高さ：27m、幅：139m）は、E-E' 断面（高さ：56m、幅：208m）及び F-F' 断面（高さ：77m、幅：185m）と比較して標高が低く、幅が狭いことから、津波防護の観点で最も厳しい断面と考え、津波防護を担保する地山斜面の検討対象は D-D' 断面付近の範囲とする。津波防護を担保する地山斜面の検討対象（D-D' 断面付近）は、防波壁等に影響するおそれのある斜面（赤枠）に概ね対応する。D-D' 断面の西方の岬部分は、津波の敷地への到達に対して直接的な障壁となっていないことから、津波防護を担保する地山斜面の検討対象外とし、岬

の東側付根の入り江以東を検討対象とする。なお、この断面は、表層の一部を厚さ約 2m 撤去する方針を示しているため、撤去する範囲を考慮し、以降の検討を実施する。

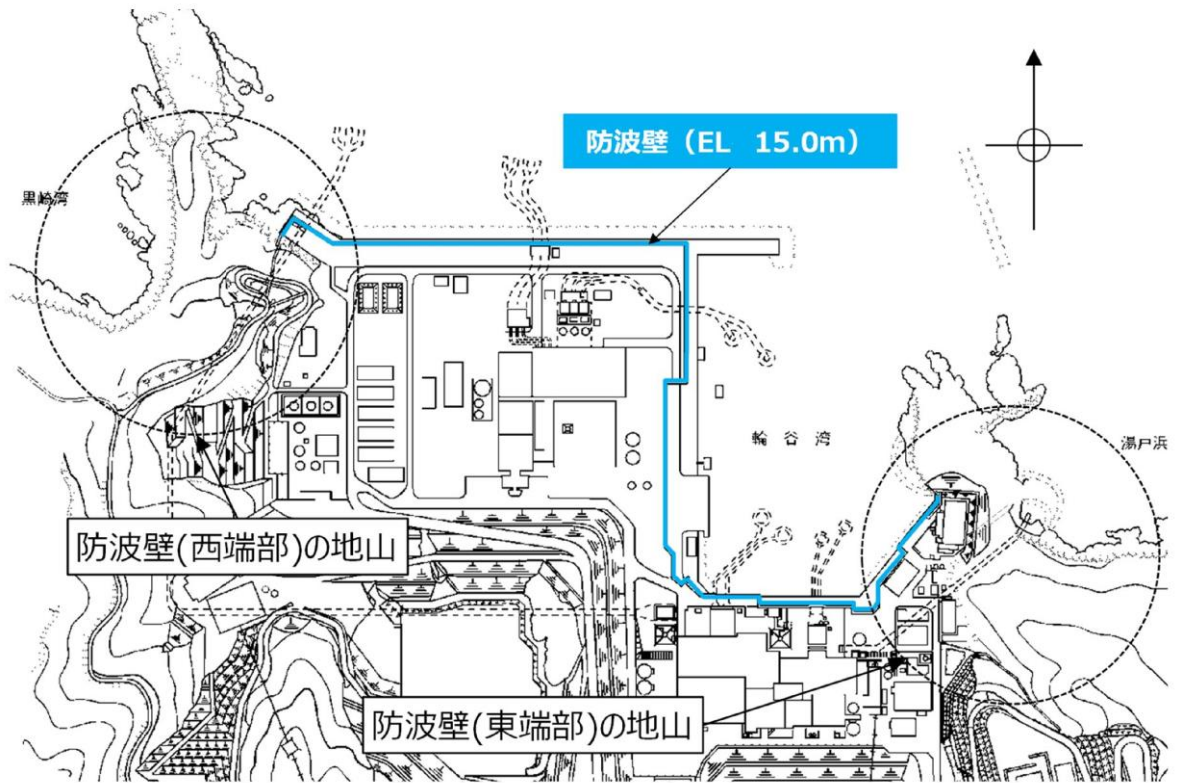


図 1.2-2 地山位置図

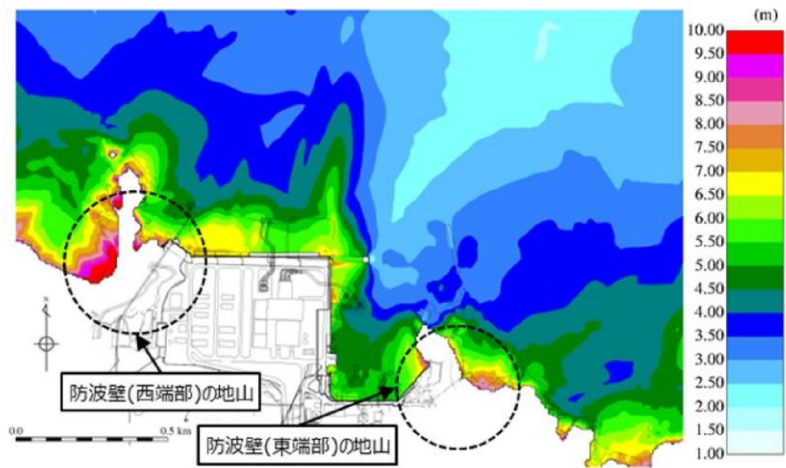


図 1.2-3(1) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 1 : 防波堤有り)

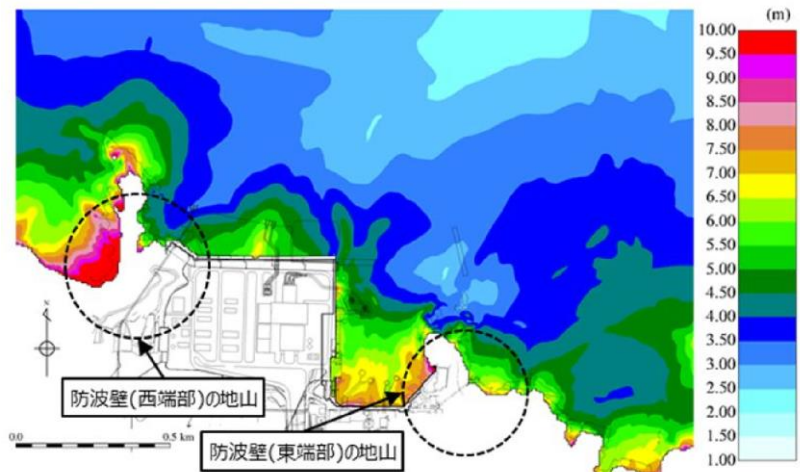


図 1.2-3(2) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 1 : 防波堤無し)

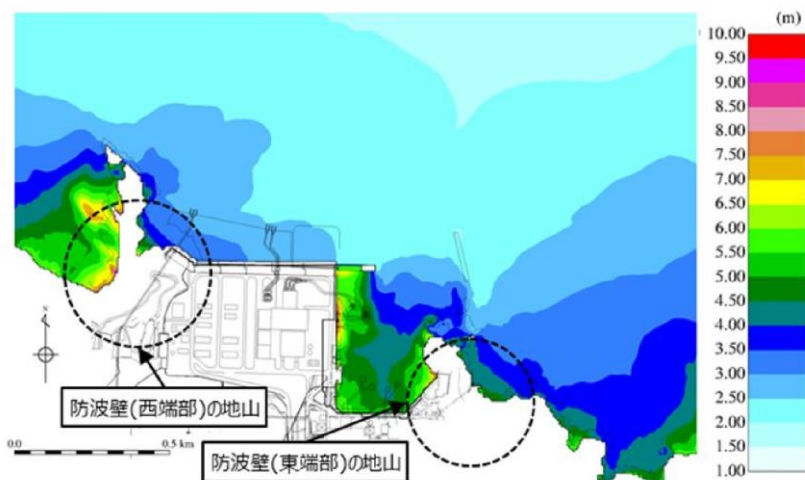


図 1.2-3(3) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 2 : 防波堤有り)

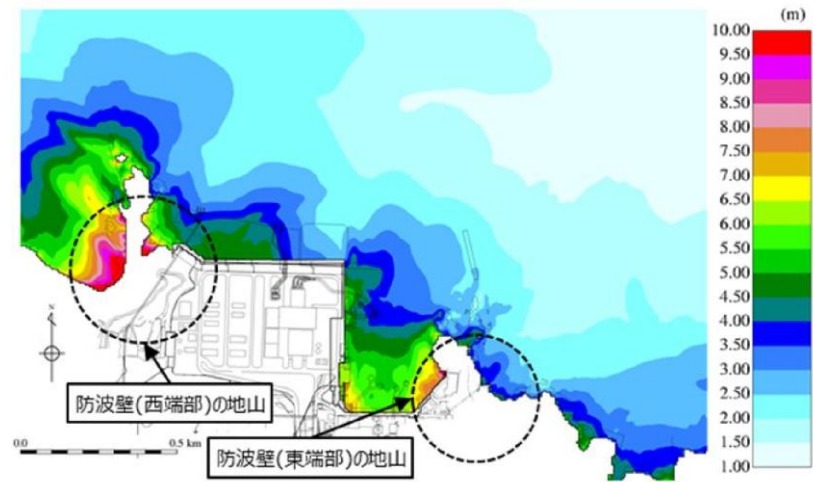


図 1.2-3(4) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 5 : 防波堤無し)

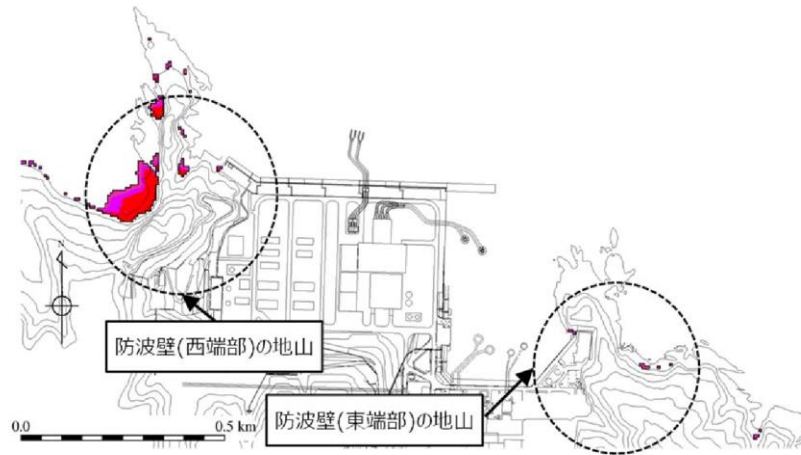


図 1.2-4(1) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 1 : 防波堤有り)
(EL 8.5m 以上表示)

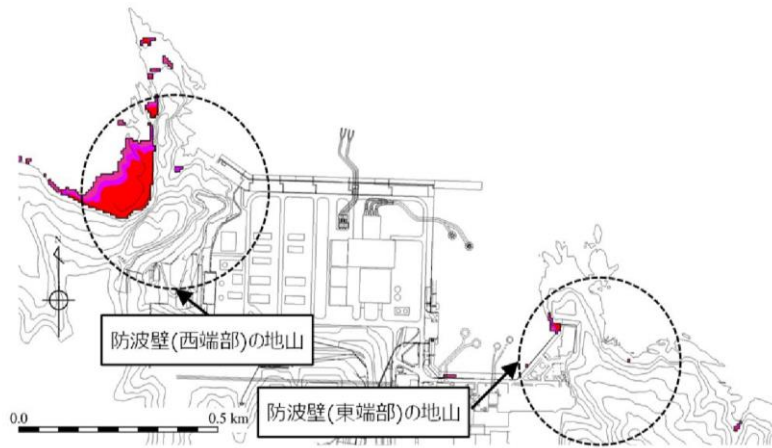


図 1.2-4(2) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 1 : 防波堤無し)
(EL 8.5m 以上表示)

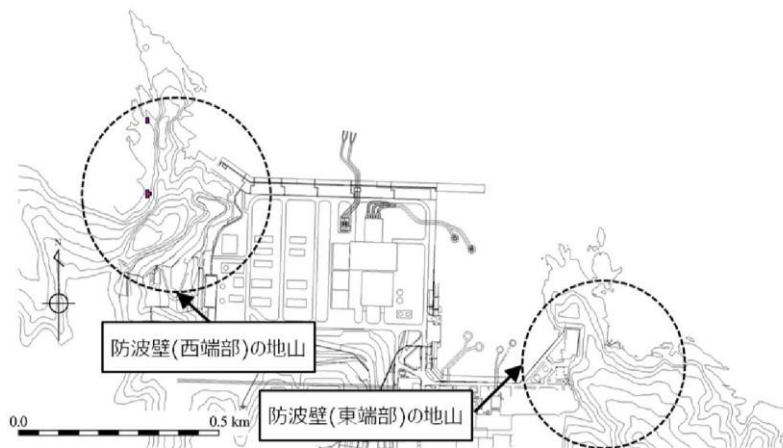


図 1.2-4(3) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 2 : 防波堤有り)
(EL 8.5m 以上表示)

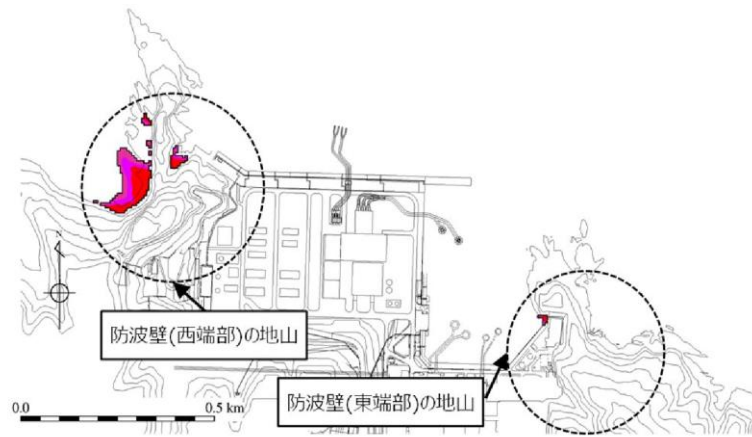
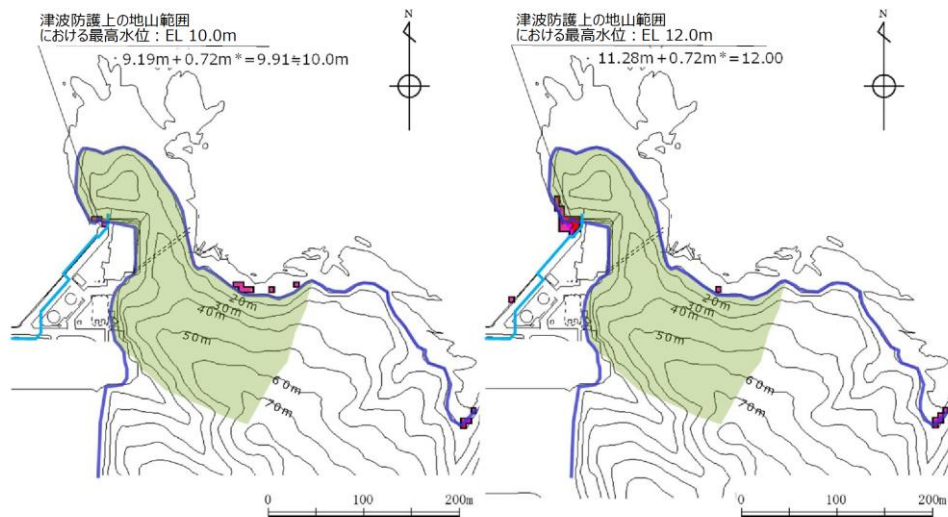
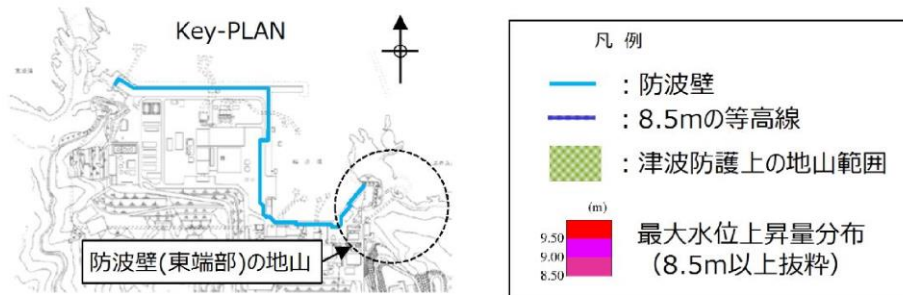


図 1.2-4(4) 最大水位上昇量分布図 (基準津波 5 : 防波堤無し)
(EL 8.5m 以上表示)



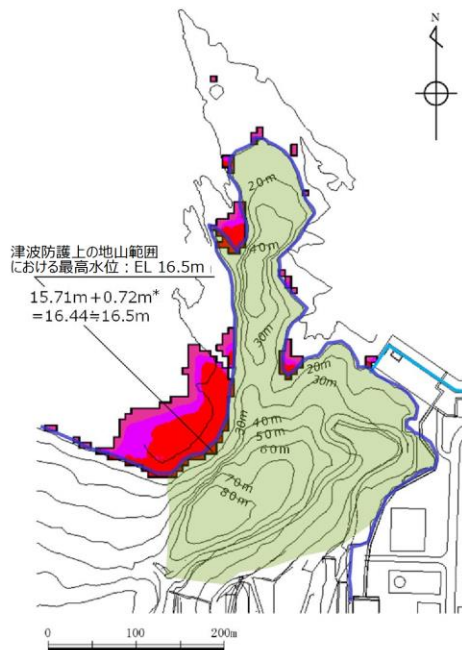
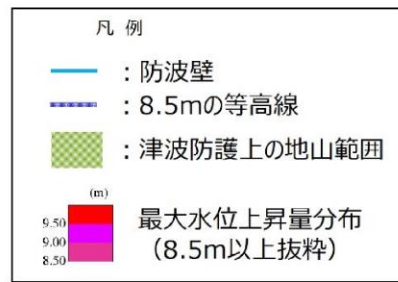
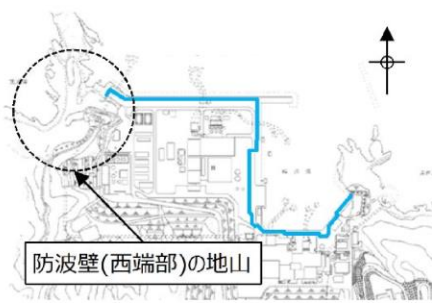
基準津波 1 (防波堤有り)

基準津波 1 (防波堤無し)

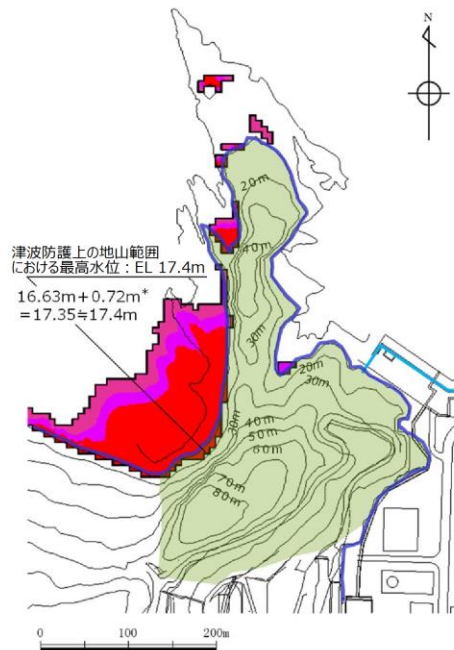
注記* : 朔望平均満潮位+0.58m, 潮位のばらつき 0.14m を併せて+0.72m を考慮

図 1.2-5(1) 防波壁 (東端部) の地山 : 基準津波 1

(左 防波堤有り, 右 防波堤無し)



基準津波1 (防波堤有り)



基準津波1 (防波堤無し)

注記* : 朔望平均満潮位+0.58m, 潮位のばらつき 0.14m を併せて+0.72m を考慮

図 1.2-5(2) 防波壁 (西端部) の地山 : 基準津波 1

(左 防波堤有り, 右 防波堤無し)

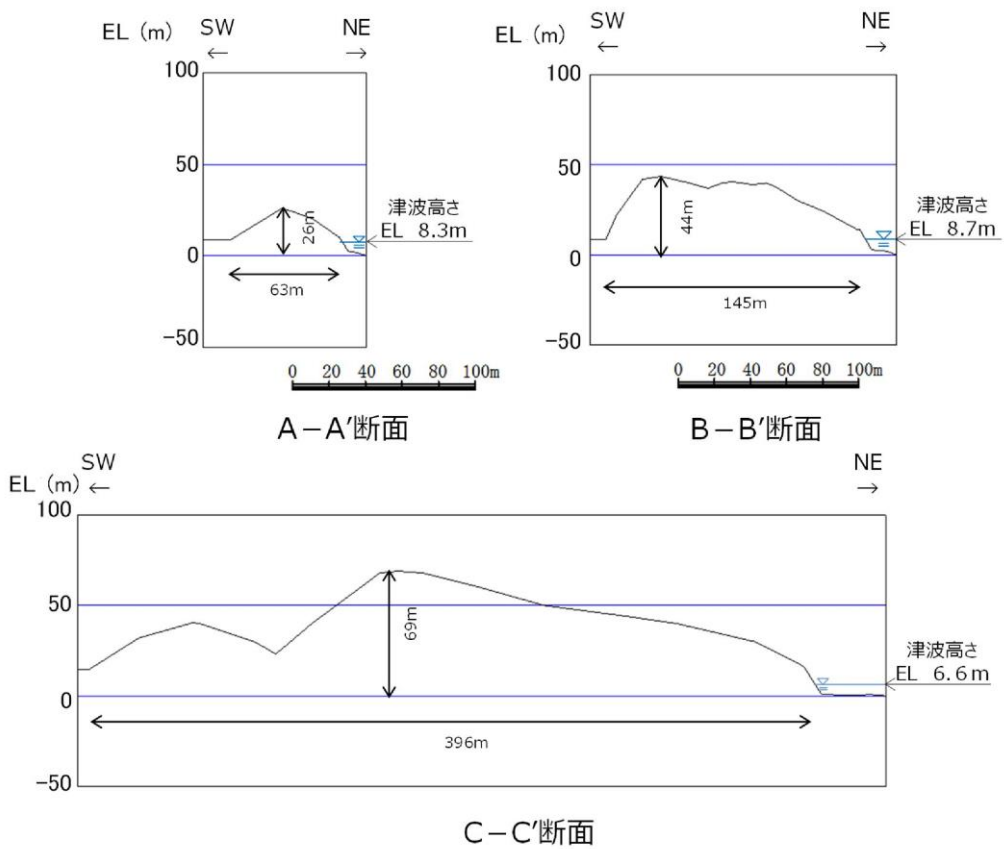
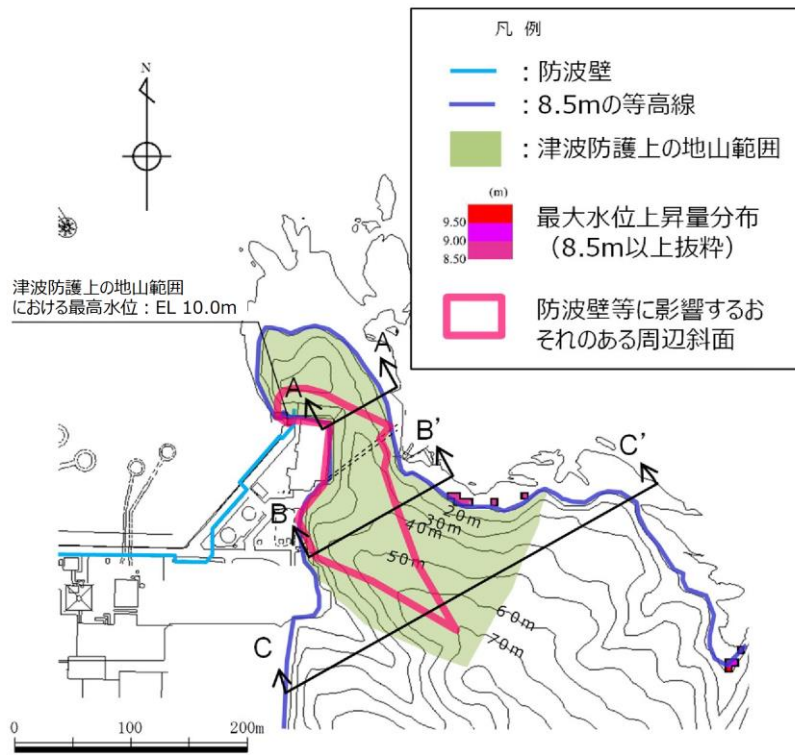
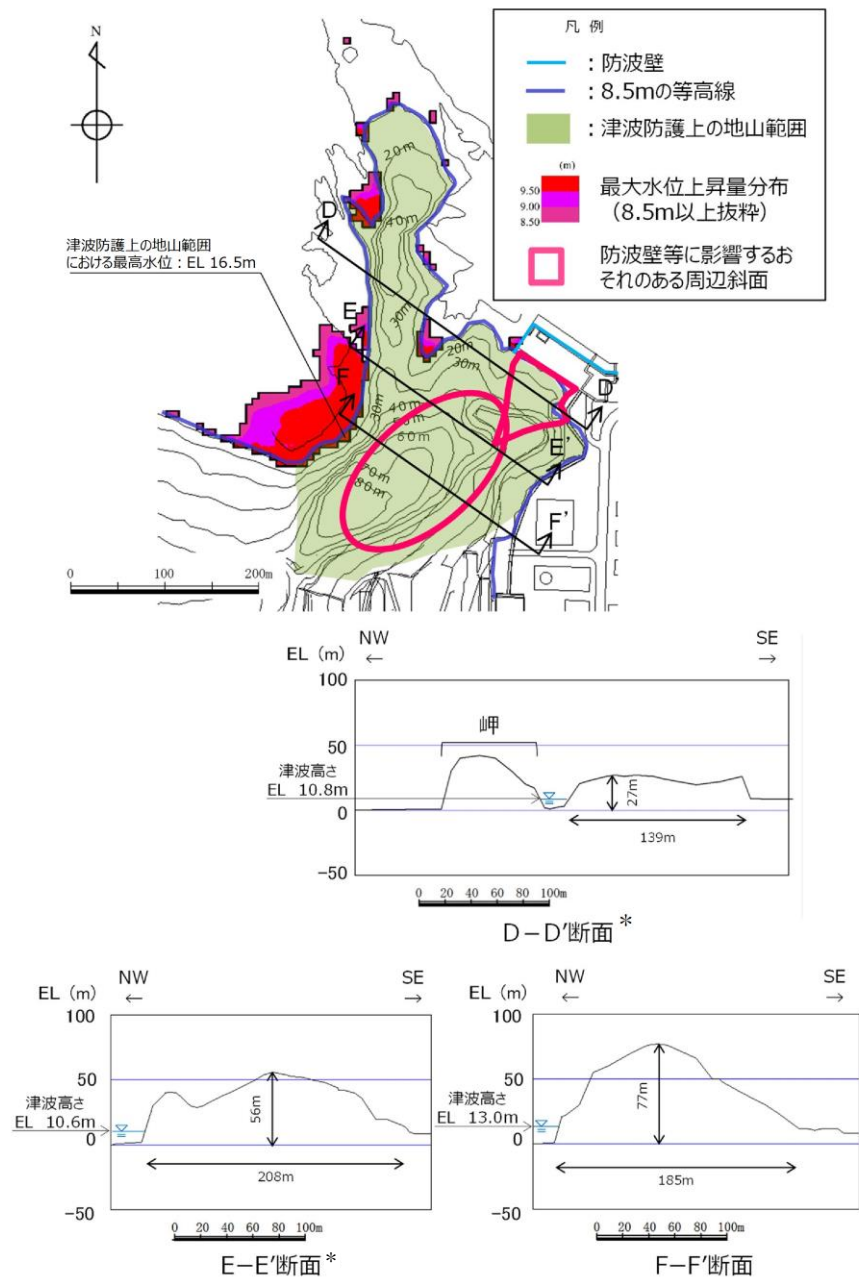


図 1.2-6(1) 防波壁（東端部）の地形断面図



注記*：地形形状は、礫質土・粘性土を切り取る前の形状。

図 1.2-6(2) 防波壁（西端部）の地形断面図

b. 地山の地質構造，防波壁擦り付け部の構造・仕様

津波防護上の地山の地質構造について述べるとともに，防波壁端部の擦り付け部の構造及び防波壁の仕様について，以下に示す。

(a) 敷地内の地質・地質構造

島根原子力発電所の敷地内の地質図を図 1.2-7 に示す。敷地内の地質は，新第三紀中新世の堆積岩類からなる成相寺層と貫入岩類及びそれらを覆う第四系の崖錐堆積物等から構成される。敷地に分布する成相寺層は，下位より下部頁岩部層，火砕岩部層，上部頁岩部層の3つの部層に区分される。

防波壁（東端部）の地山においては、主として凝灰岩、凝灰角礫岩よりなる「火砕岩部層」及び黒色頁岩よりなる「上部頁岩部層」が分布し、安山岩の貫入が認められる。防波壁（西端部）の地山においては、「火砕岩部層」が分布する。

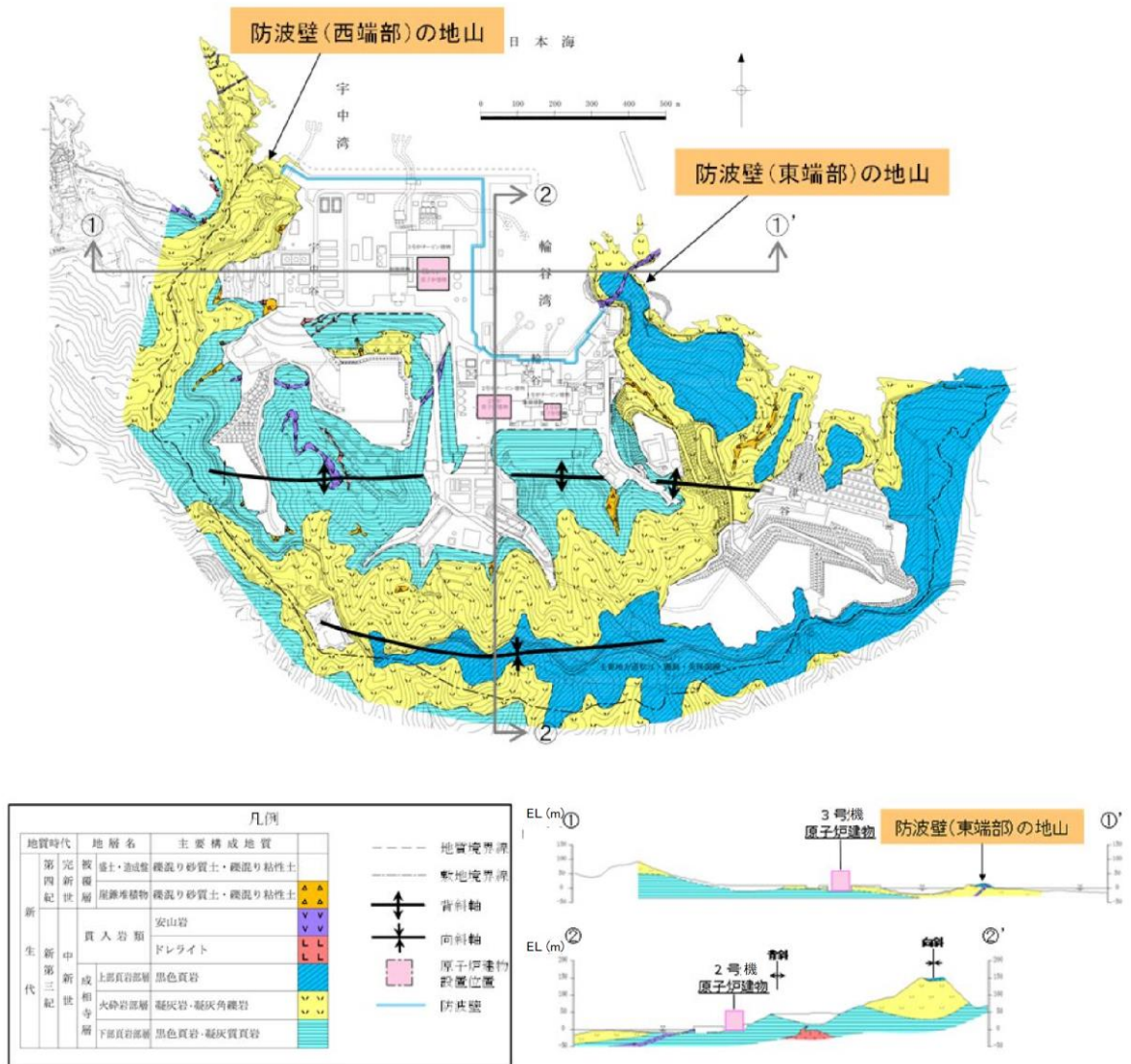


図 1.2-7 島根原子力発電所敷地内地質図

(b) 防波壁端部の擦り付け部の構造及び防波壁の仕様

防波壁（東端部）及び防波壁（西端部）の擦り付け部の構造図及び状況写真を図 1.2-8～図 1.2-13 に示す。

防波壁（波返重力擁壁）東端部（a-a 断面）については、地震及び津波による沈下やずれを生じさせないため、岩盤を露出させ、H 鋼（H-350×350×12×19）を 1m 間隔で打設し、重力擁壁を堅硬な地山に直接設置する設計とした。ま

た、防波壁の前面及び背面において、露出した岩盤を保護する目的でコンクリートで被覆した。

防波壁（波返重力擁壁）西端部（b－b断面）については、東端部同様、地震及び津波による沈下やずれを生じさせないため、岩盤を露出させ、H鋼（H-350×350×12×19）を1m間隔で打設し、重力擁壁を堅硬な地山に直接設置する設計とした。また、防波壁の前面及び背面において、露出した岩盤を保護する目的でコンクリートで被覆した。

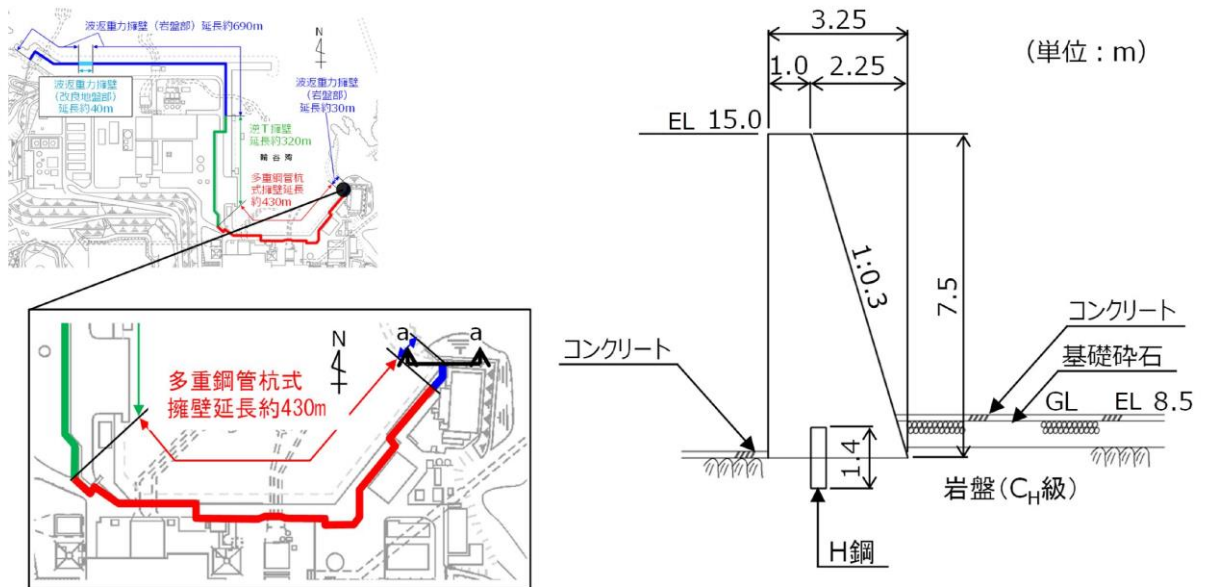


図 1.2-8 防波壁（波返重力擁壁）東端部（a－a断面）断面図

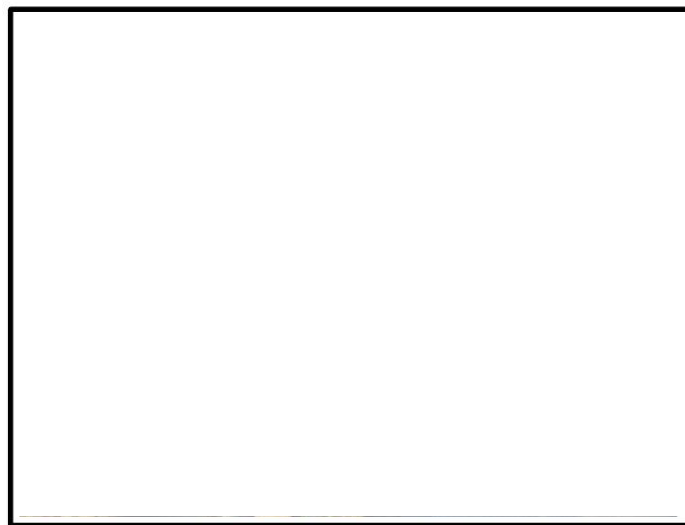


図 1.2-9 防波壁東端部 状況写真



图 1.2-10 防波壁東端部 岩盤露出状況

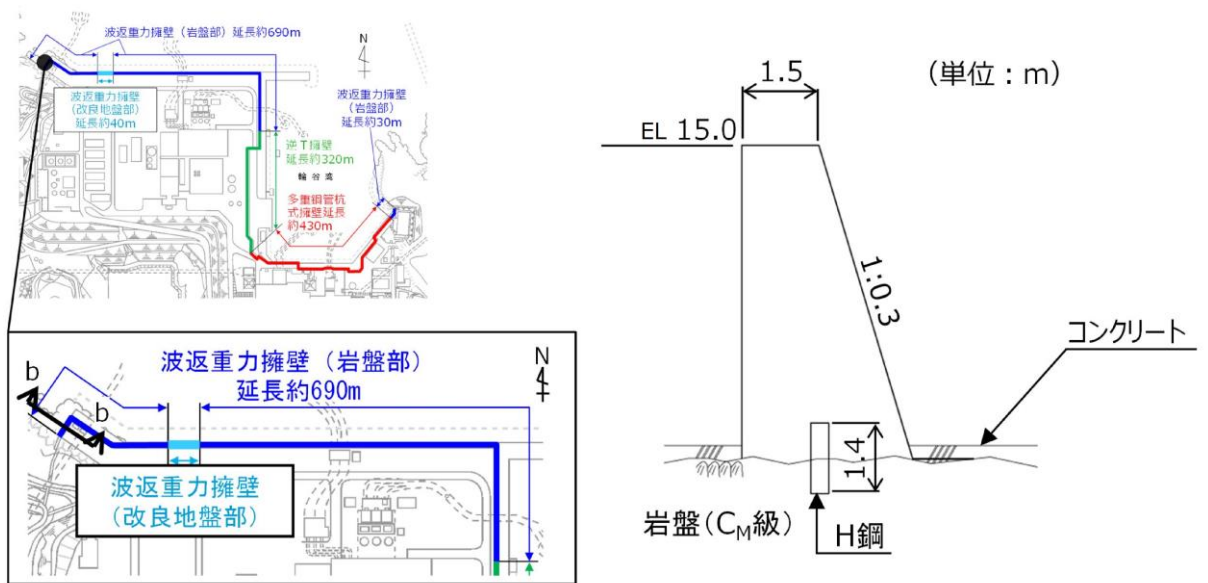


图 1.2-11 防波壁（波返重力擁壁）西端部（b - b 断面） 断面図



図 1.2-12 防波壁西端部 状況写真

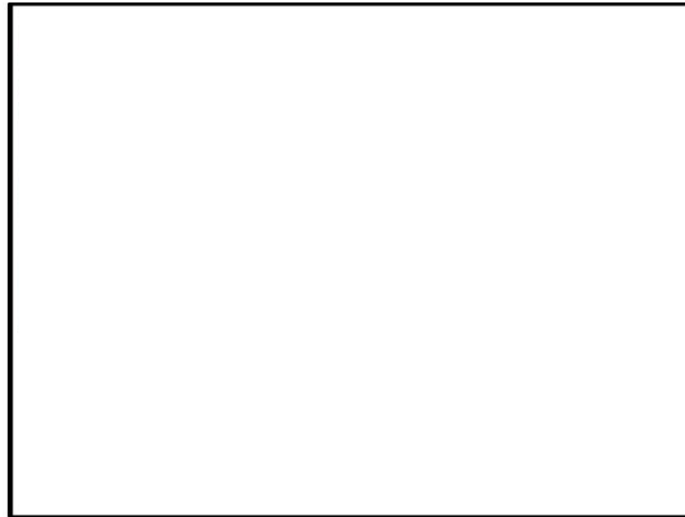


図 1.2-13 防波壁西端部 岩盤露出状況

c. 地山の耐震，耐津波設計上の位置付け

防波壁両端部の地山について，耐震，耐津波設計上の位置付けを表 1.2-1 に整理した。これを踏まえ，以下の検討を行う。

- ・ 検討 1：津波防護施設と同等の機能を有する斜面において，基準地震動 S_s による地山のすべり安定性評価を行い，基準地震動に対する健全性を確保していることを説明する。
- ・ 検討 2：津波防護施設同等の機能を有する斜面において，波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性の確認及び基準津波による地山の安定性評価を行い，基準津波に対する健全性を確保していることを説明する。

このほかに、当該地山については、防波壁の支持地盤としての地山及び防波壁の周辺斜面としての役割もあるため、耐震、耐津波設計上の位置付けを整理した。

表 1.2-1 防波壁両端部の地山の耐震、耐津波設計上の位置付け

設計上の役割	耐震設計上の位置付け	耐津波設計上の位置付け
①津波防護を担保する地山斜面 (6条)	・津波防護施設と同等の機能を有する地山斜面は、基準地震動による地震力に対して、要求される津波防護機能を保持できるようにする。【検討1】	・津波防護施設と同等の機能を有する地山斜面は、波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性並びにすべり及び転倒に対する安定性を評価し、入力津波に対する津波防護機能が保持できるようにする。【検討2】
②防波壁の支持地盤としての地山 (4条)	・防波壁と地山との擦り付け部は、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状を考慮しても、施設の安全機能が損なわれるおそれがないようにする。 ⇒「(2) b. (b) 防波壁端部の擦り付け部の構造及び防波壁の仕様」に示すとおり、堅硬な岩盤に支持されていることから、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状は発生しない。	・防波壁と地山との擦り付け部は、構造不連続による相対変位、ずれ等が構造健全性、安定性、止水性や水密性に影響を及ぼさないようにする。 ⇒「(2) b. (b) 防波壁端部の擦り付け部の構造及び防波壁の仕様」に示すとおり、岩盤を露出させ、H鋼を打設し、重力擁壁を堅硬な岩盤に直接設置していることから、構造不連続による相対変位、ずれ等は発生しない。
③防波壁の周辺斜面 (5条)	・防波壁の周辺斜面（「(2) a. 津波遡上高の分布を踏まえた津波防護上の地山範囲の特定について」参照）は、想定される地震動の地震力により崩壊し、当該施設の安全機能が重大な影響を受けないようにする。	—

d. 基準地震動に対する健全性確保

周辺斜面については、基準地震動 S_s に対して斜面の崩壊のおそれがないことを確認している。

e. 基準津波に対する健全性確保

検討2の基準津波に対する健全性確保として、波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性の確認及び基準津波による地山の安定性評価を行った。

(a) 波力による侵食及び洗掘に対する抵抗性の確認

津波防護上の地山は、図 1.2-14 及び図 1.2-15 に示すとおり岩盤から構成され一部はコンクリートに覆われていることから、波力による侵食及び洗掘による地形変化は生じない。

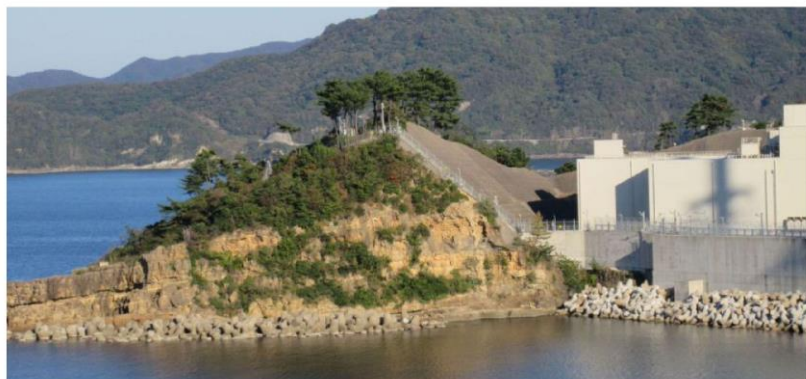


図 1.2-14 防波壁（東端部）地山状況



図 1.2-15 防波壁（西端部）地山状況

(b) 基準津波に対する地山の安定性評価

基準津波に対する地山の安定性評価は、地山を津波防護施設と考え、直立の構造物に作用する力を保守的に津波波力として設定し、地山のせん断抵抗力と比較することで、基準津波に対する健全性を確認する。

津波波力を算出するにあたり、防波壁（東端部）は擦り付け部で水位が最大となる基準津波 1（防波堤無し）、防波壁（西端部）は擦り付け部で水位が最大となる基準津波 1（防波堤有り）を対象とする。

防波壁擦り付け部付近の地山における津波高さは、防波壁（東端部）については図 1.2-16 右に示す EL 12.0m、防波壁（西端部）については図 1.2-16 左に示す EL 10.7m と設定した。

地山のせん断面は、防波壁の擦り付け部から断面長さが最小となる位置を設定した。防波壁（東端部）については図 1.2-16 右に示す地山の EL 8.5m 位置における最小幅である約 95m、防波壁（西端部）については図 1.2-16 左に示す地山の EL 8.5m 位置における最小幅である約 80m と設定した。

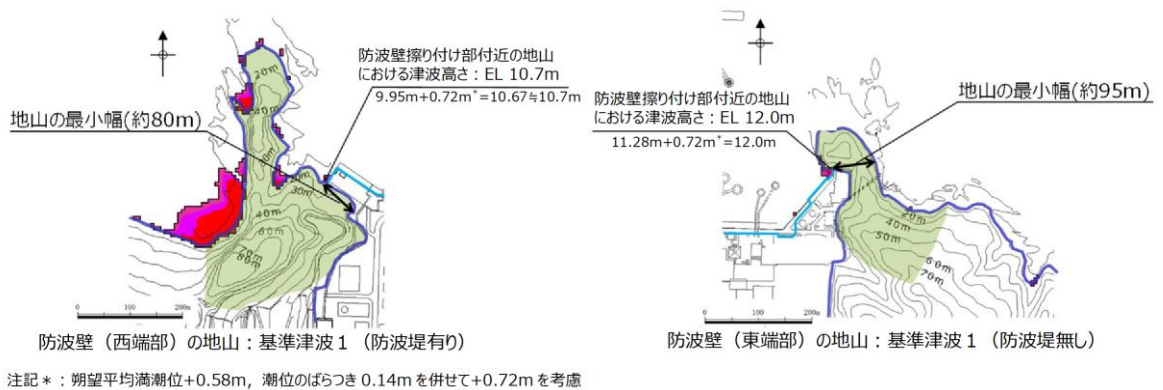


図 1.2-16 津波高さ及び地山のせん断面検討位置

基準津波の波力は、「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）」に示される谷本式に基づき、波力を算定する。

谷本式は式 2-1，式 2-2 と示される。ここでは、地山に作用する波力を等変分布荷重とし、これを式 2-3 と表す。

$$\eta^* = 3.0 a_1 \quad \text{式 2-1}$$

$$P_1 = 2.2 \rho_0 g a_1 \quad \text{式 2-2}$$

$$P = P_1 \times \eta^* \times (1/2) \quad \text{式 2-3}$$

ここで、

η^* : 静水面上の波圧作用高さ

a_1 : 入射津波の静水面上の高さ（振幅）

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量（10.1kN/m³）

P_1 : 静水面における波圧強度

P : 地山に作用する波力

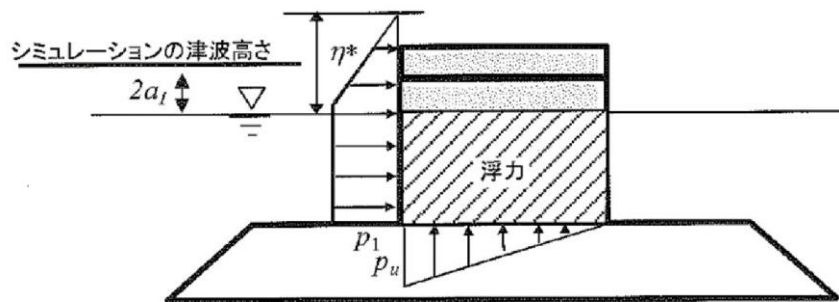


図 1.2-17 地山に作用する波力等の分布図

基準津波による波力の計算を以下に示す。計算に用いた津波高さを表 1.2-2 に示す。

- 防波壁

$$\eta^* = 3.0 a_1 = 3.0 \times 6.5 \text{m} = 19.5 \text{m}$$

$$P_1 = 2.2 \rho_0 g a_1 = 2.2 \times 10.1 \text{kN/m}^3 \times 6.5 \text{m} = 144.43 \text{kN/m}^2 \approx 145 \text{kN/m}^2$$

$$P = P_1 \times \eta^* \times (1/2) = 145 \text{kN/m}^2 \times 19.5 \text{m} \times (1/2) = 1,501.5 \text{kN/m} \approx 1,502 \text{kN/m}$$

地山のせん断強度は、防波壁端部の地山の大部分を構成する C_H級岩盤を対象にブロックせん断試験より求めた値（地山のせん断強度：1,140kN/m²）を設定した。

地山のせん断抵抗力は下記計算で算出される。

- 防波壁（東端部）の地山のせん断抵抗力

$$1,140 \text{kN/m}^2 \text{（地山のせん断強度）} \times 95 \text{m（地山の最小幅）} = 108,300 \text{kN/m}$$

- 防波壁（西端部）の地山のせん断抵抗力
 $1,140\text{kN/m}^2$ （地山のせん断強度） $\times 80\text{m}$ （地山の最小幅） $=91,200\text{kN/m}$
 算出した結果を表 1.2-2 に示す。地山に作用する波力は、防波壁で
 $1,502\text{kN/m}$ となった。また、地山のせん断抵抗力は防波壁（東端部）で
 $108,300\text{kN/m}$ 、防波壁（西端部）で $91,200\text{kN/m}$ となり、地山のせん断抵抗力は
 波力と比較して十分に大きいため（図 1.2-18）、基準津波に対する健全性を
 確認した。

表 1.2-2 防波壁擦り付け部付近の地山に作用する波力及び地山のせん断抵抗力

	シミュレーションによる津波高さ* ($2a_1$)	振幅 (a_1)	地山に作用する波力	地山のせん断抵抗力
防波壁（東端部）	13m[12.64m]	6.5m	1,502kN/m	108,300kN/m
防波壁（西端部）				91,200kN/m

注記*：防波壁擦り付け部付近の地山における最高水位 12.0m に、参照する裕度 0.64m を考慮し、安全側に設定

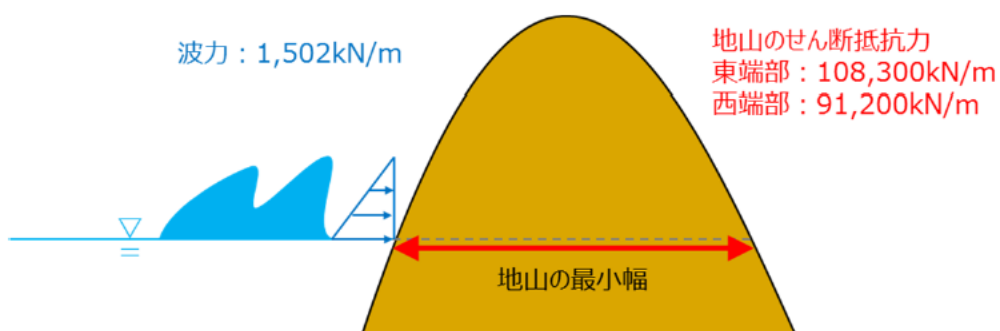


図 1.2-18 波力と地山のせん断抵抗力の比較計算に関するイメージ

f. まとめ

防波壁両端部の津波防護上の障壁となっている地山に対して、基準地震動及び基準津波に対する健全性を確保していることを確認した。

以上のことから、防波壁両端部の地山斜面の崩壊は、入力津波を設定する際の影響要因として設定しない。

g. 敷地周辺斜面の崩壊に関する検討

防波壁両端部の地山以外に、入力津波の設定に影響する地形変化を生じさせる敷地周辺斜面として、地滑り地形が判読されている地山の斜面崩壊についても検討する。

検討にあたっては、地滑り土塊が海側に突入する可能性が考えられる「敷地北西方の地滑り地形 (Ls23)」、 「⑤北西の地滑り地形 (Ls24)」、 「地滑り地形⑤ (Ls25)」の斜面を対象にする。(図 1.2-19, 図 1.2-20 参照)

敷地周辺の地形のうち、地滑り Ls23, Ls24 及び Ls25 の地滑り地形の概略の土塊量を表 1.2-3 に示す。

地滑りの土塊量は Ls25 の地滑りが大きいことから、Ls25 の地滑りを対象に検討する。検討にあたっては、Ls25 の近くに Ls24 が位置することから、これらの地滑りが同時崩壊することを仮定し、安全側に Ls24+Ls25 の地滑りが崩壊した後の地形を対象に津波評価を実施する。

地滑りが崩壊した後の地形については、津波評価の陸上地滑りの検討で実施した二層流モデルを用いて決定する。

地滑り発生前後の地形断面図を図 1.2-21 に示す。

検討ケースの評価水位を表 1.2-4 に、検討ケースの最大水位上昇量分布図又は最大水位下降量分布図を図 1.2-22 に示す。

津波解析の結果、斜面崩壊させた場合、水位上昇側の施設護岸又は防波壁の水位は、どのケースについても基本ケースと同じもしくは基本ケースの方が大きい。一方、水位下降側の 2 号機取水口の水位については、一部、基準津波 3 で斜面崩壊有りの方が水位が低下しているが、この差は僅か (-0.03m) であり、大半は、基本ケースの方が斜面崩壊有りのケースに対して水位が低下している。

以上より、地震による地形変化(斜面崩壊)は入力津波を設定する際の影響要因として考慮しない。

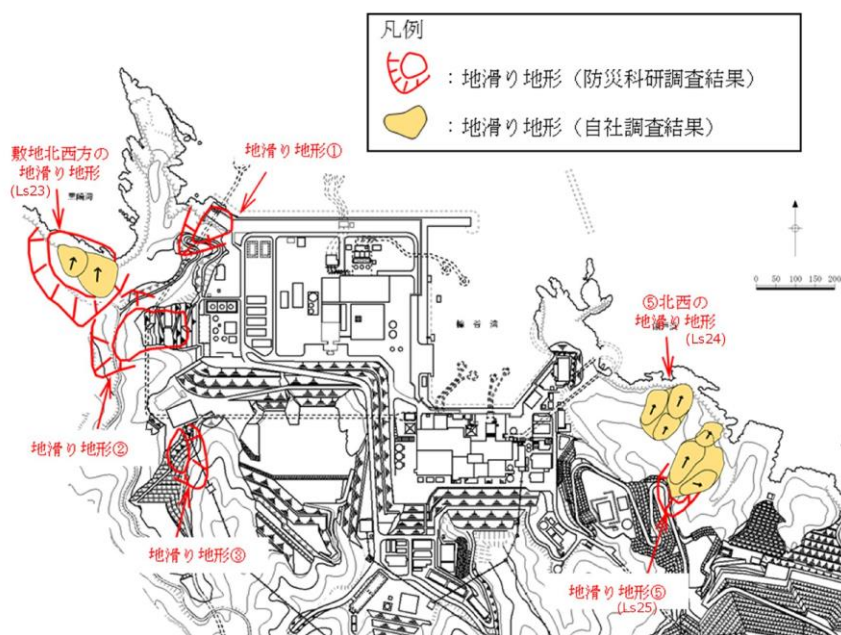
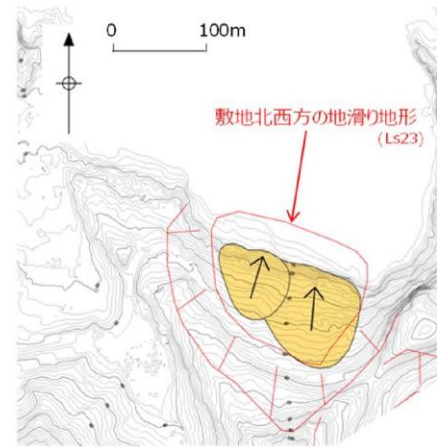
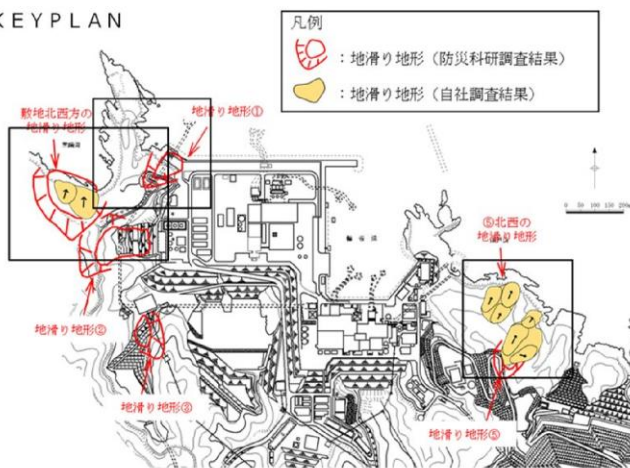
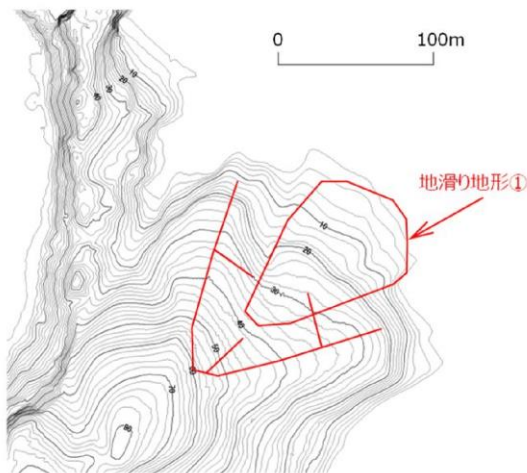


図 1.2-19 敷地周辺地滑り位置図

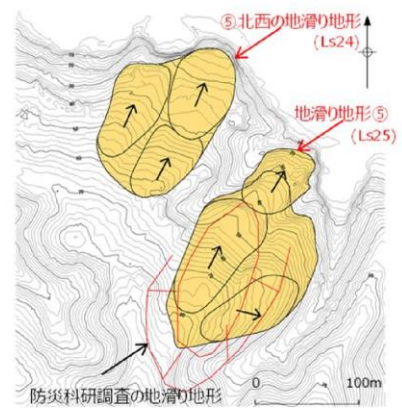
KEY PLAN



敷地北西方の地滑り地形周辺の旧地形図



地滑り地形①周辺の旧地形図



地滑り地形⑤及び
⑤北西の地滑り地形周辺の
旧地形図

図 1.2-20 敷地周辺地滑り拡大図

表 1.2-3 敷地周辺地滑りの規模の比較

地すべり	長さ L(m)	幅 b(m)	厚さ t(m)	土塊量 Vs(m ³)
Ls23	125	170	25	531,250
Ls24	172	80	16	220,160
Ls25	265	140	20	742,000

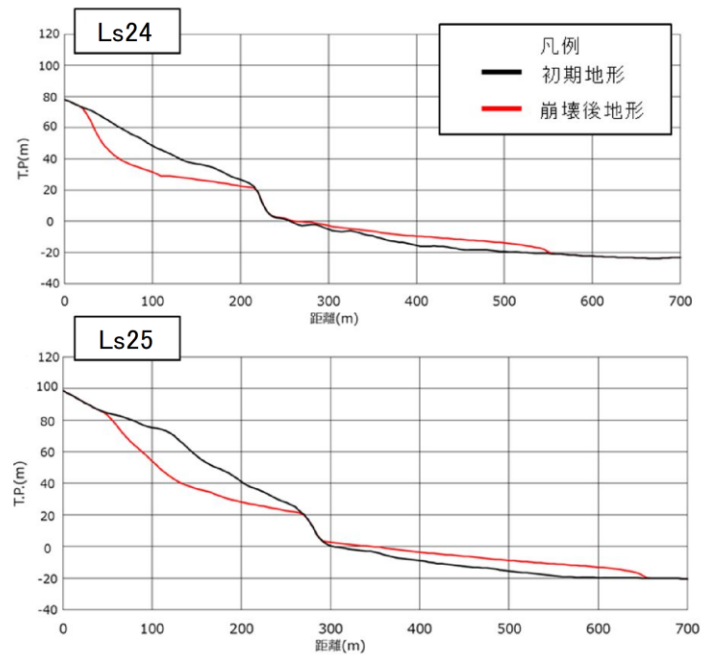
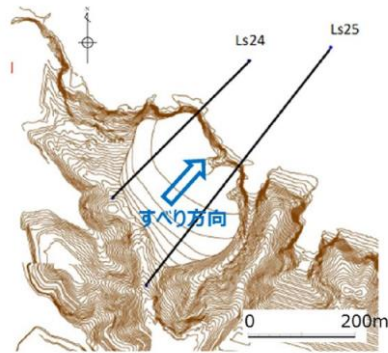
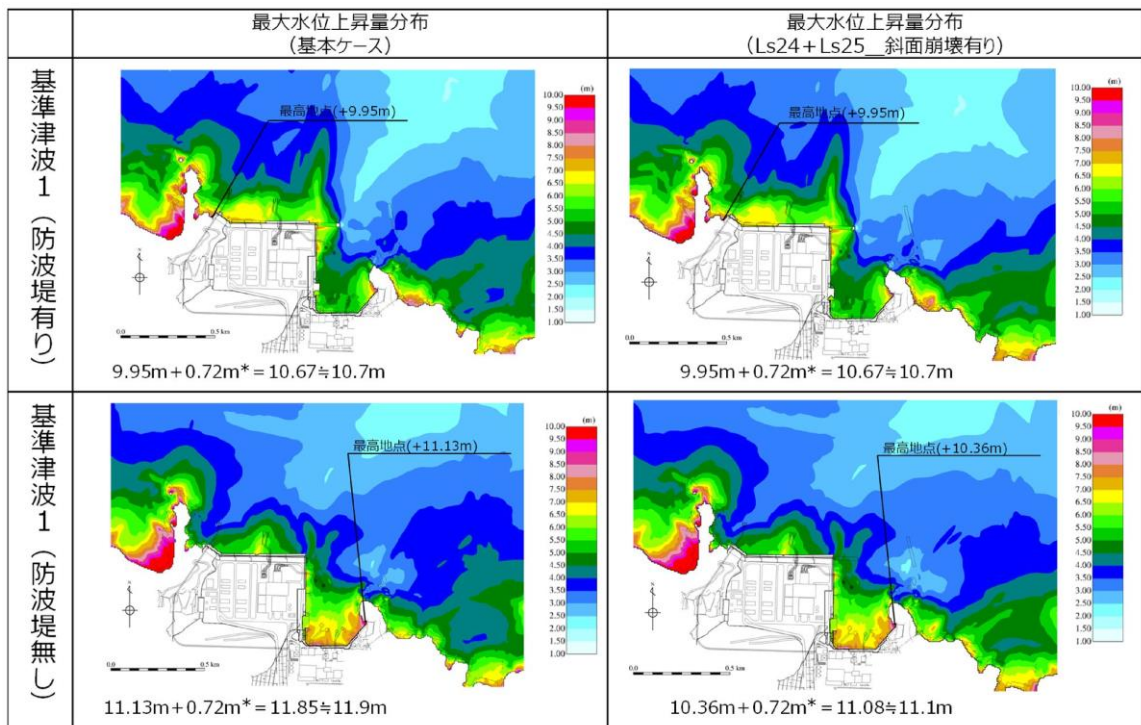


図 1.2-21 Ls24・Ls25 の断面図

表 1.2-4 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による水位比較

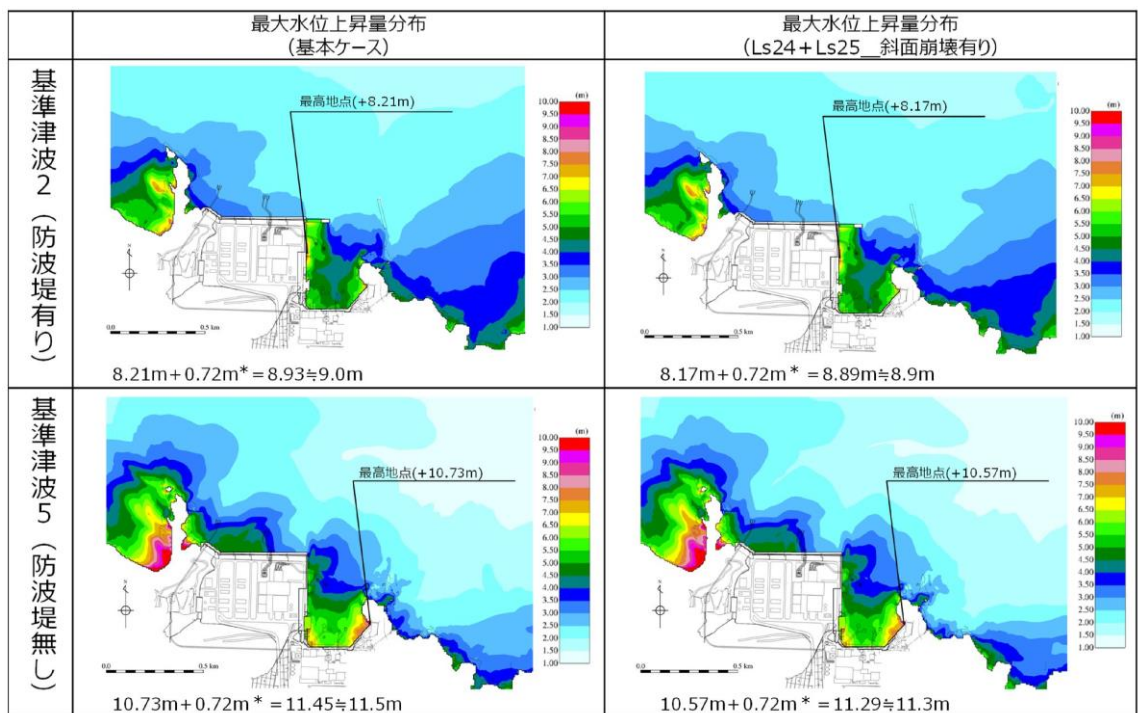
	【水位上昇側】施設護岸又は防波壁*1			【水位下降側】2号機取水口(東)*2		
	基本ケース (A)	斜面崩壊有り (B)	差異 (B-A)	基本ケース (A)	斜面崩壊有り (B)	差異 (B-A)
基準津波 1 (防波堤有り)	+10.7m (+10.67m)	+10.7m (+10.67m)	0.0m (0.00m)	-5.2m (-5.13m)	-5.0m (-4.98m)	+0.2m (+0.15m)
基準津波 1 (防波堤無し)	+11.9m (+11.85m)	+11.1m (+11.08m)	-0.8m (-0.77m)	-6.1m (-6.01m)	-5.8m (-5.79m)	+0.3m (+0.22m)
基準津波 2 (防波堤有り)	+9.0m (+8.93m)	+8.9m (+8.89m)	-0.1m (-0.04m)			
基準津波 3 (防波堤有り)				-4.7m (-4.63m)	-4.7m (-4.66m)	0m (-0.03m)
基準津波 4 (防波堤有り)				-4.1m (-4.04m)	-4.1m (-4.04m)	0m (0.00m)
基準津波 4 (防波堤無し)				-4.3m (-4.25m)	-4.3m (-4.24m)	0m (+0.01m)
基準津波 5 (防波堤無し)	+11.5m (+11.45m)	+11.3m (+11.29m)	-0.2m (-0.16m)			
基準津波 6 (防波堤無し)				-6.1m (-6.08m)	-6.0m (-5.99m)	+0.1m (+0.09m)

注記 *1 : 期望平均満潮位+0.58m, 潮位のばらつき 0.14m を併せて+0.72m を考慮 *2 : 期望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき 0.17m を併せて-0.19m を考慮



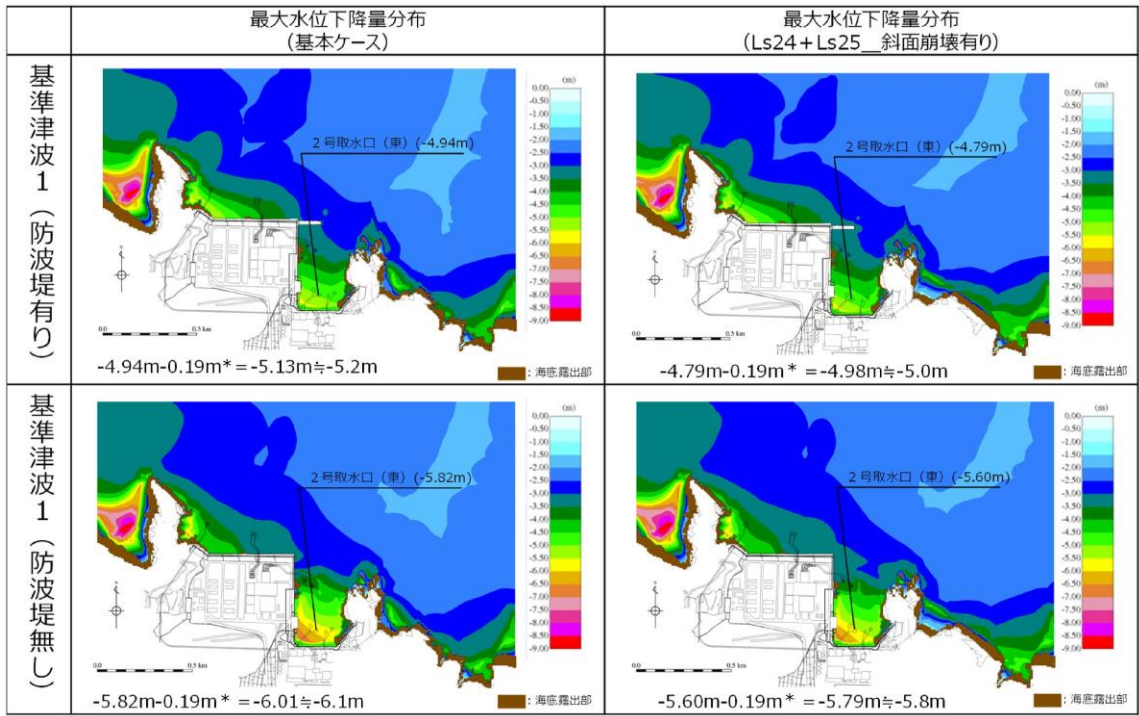
注記*：朔望平均満潮位+0.58m，潮位のばらつき0.14mを併せて+0.72mを考慮

図 1.2-22(1) 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による最大水位上昇量分布の比較
(基準津波 1 (防波堤有り) 及び基準津波 1 (防波堤無し))



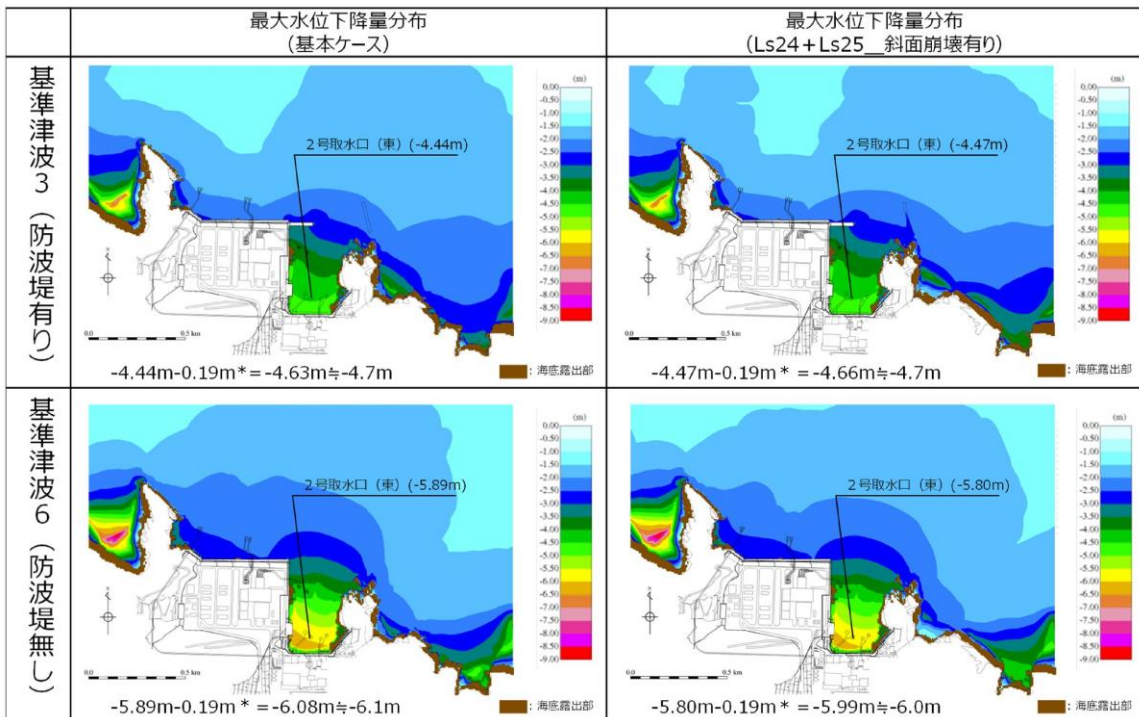
注記*：朔望平均満潮位+0.58m，潮位のばらつき0.14mを併せて+0.72mを考慮

図 1.2-22(2) 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による最大水位上昇量分布の比較
(基準津波 2 (防波堤有り) 及び基準津波 5 (防波堤無し))



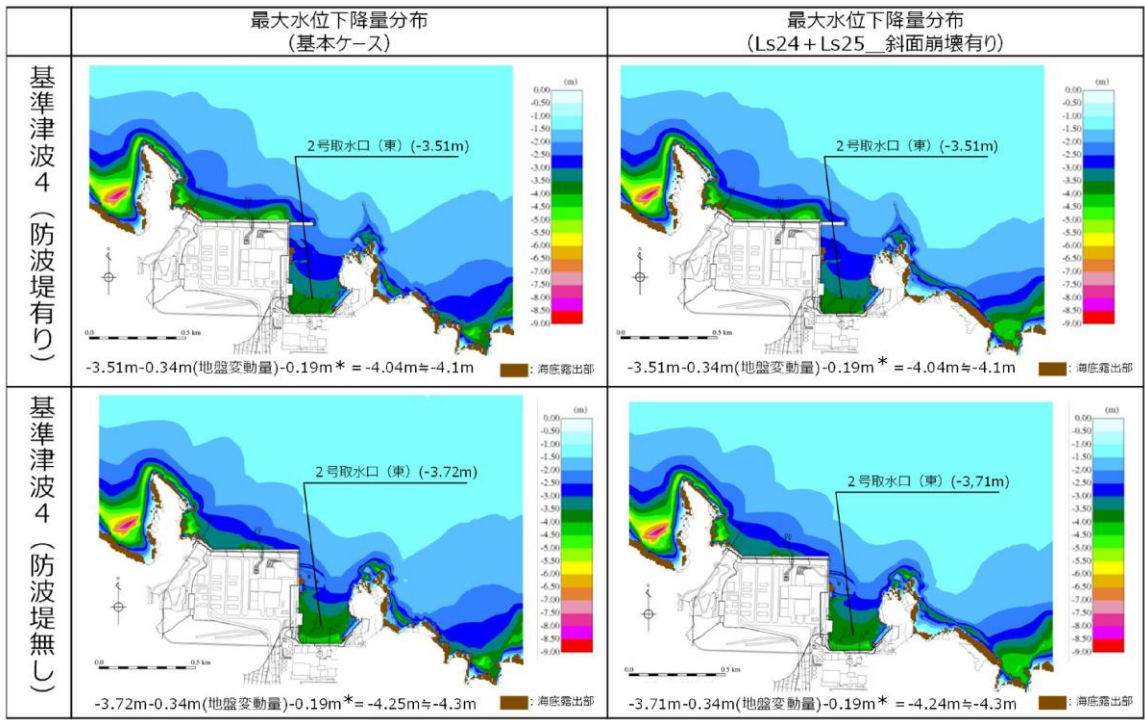
注記* : 朔望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-22(3) 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による最大水位下降量分布の比較 (基準津波1 (防波堤有り) 及び基準津波1 (防波堤無し))



注記* : 朔望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-22(4) 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による最大水位下降量分布の比較 (基準津波3 (防波堤有り) 及び基準津波6 (防波堤無し))



注記* : 朔望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-22(5) 斜面崩壊 (Ls24+Ls25) の有無による最大水位下降量分布の比較
(基準津波4 (防波堤有り) 及び基準津波4 (防波堤無し))

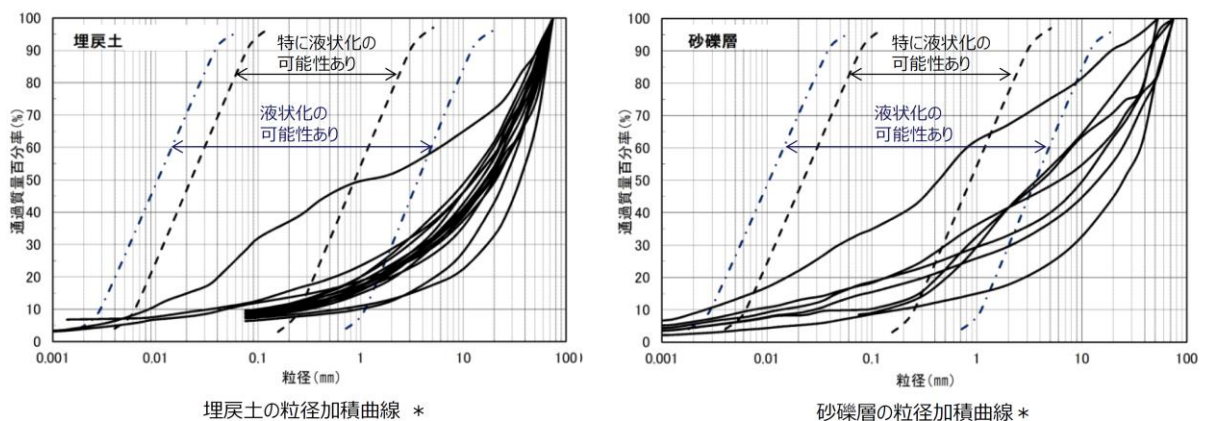
(3) 敷地の地盤変状に関する検討

防波壁は、堅固な岩盤（一部、改良地盤）に支持されていることから、地震に伴う沈下は発生しない。一方、防波壁前面に存在する埋戻土及び砂礫層は、地震時の液状化による沈下及び揺すり込みによる沈下が発生する可能性があるため、防波壁前面の沈下量算定の対象層とする。

埋戻土及び砂礫層の土質区分を図 1.2-23 に示す。埋戻土は、粒径 10mm 以上の礫が主体であるが、粒径 2mm 未満の砂も含む土層である。砂礫層は、50%粒径が 10mm 以下、かつ 10%粒径が 1mm 以下であり、細粒分含有率が 35%以下の土層である。

また、護岸に使用している埋戻土（粘性土）については液状化評価対象層ではないが、入力津波の設定における影響要因の検討の際には安全側に沈下量算定の対象層とする。

津波解析にあたっては、沈下量を算定し、地形モデルに反映する。なお、沈下量は、液状化及び揺すり込みに伴う沈下並びに液状化に伴う側方流動による沈下に分けて算出し、これらを合わせて設定する。



注記*：港灣の施設の技術上の基準・同解説（上巻）（社）日本港湾協会，H19）の「粒度による液状化判定」に粒径加積曲線を追記

地層名	50%粒径 (平均) (mm)	10%粒径 (平均) (mm)	細粒分含有率 (平均) (%)
埋戻土	16.5	-	-
砂礫層	9.1	0.0651	15.6

図 1.2-23 埋戻土及び砂礫層の土質区分

a. 液状化及び揺すり込みに伴う沈下

(a) 検討概要

敷地の地質は、新第三紀中新世の堆積岩類からなる成相寺層及び貫入岩類、並びにそれらを覆う被覆層から構成される。成相寺層は海成層で、下位より下部頁岩部層、火砕岩部層及び上部頁岩部層に区分される。被覆層は、崖錐・海

底堆積物及び盛土からなる。崖錐・海底堆積物は主に礫混じり砂質土及び礫混じり粘性土からなる。敷地の被覆層である盛土は、埋戻土と埋戻土（粘性土）に分類している。敷地の被覆層である崖錐・海底堆積物は、砂礫層として分類している。

液状化及び揺すり込みに伴う沈下量は、図 1.2-24 に示す流れに従って、地質断面図により算定した。相対密度は、図 1.2-25 のとおり、港湾基準に基づき、マイヤホフにより提案された N 値と相対密度の関係式を用いて算出する。

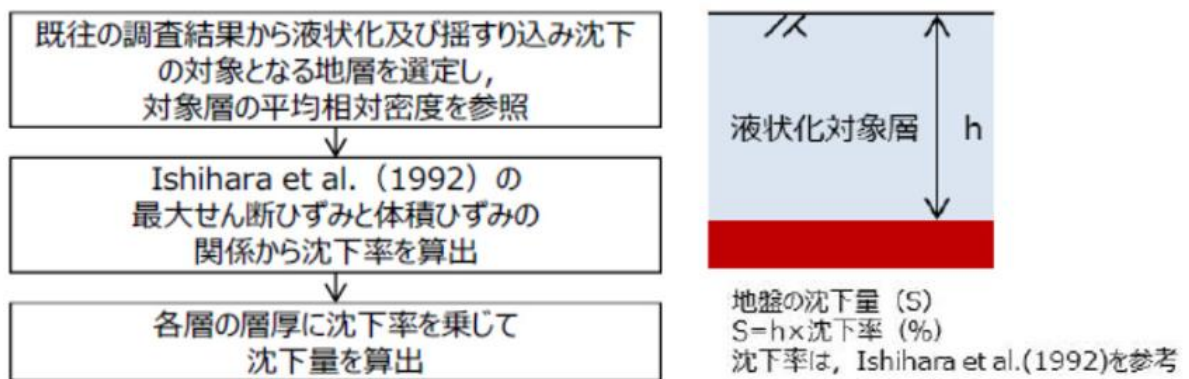


図 1.2-24 液状化及び揺すり込みに伴う沈下量の算定フロー

$$Dr = 21 \cdot \left(\frac{100 \cdot N}{\sigma'_{v0} + 70} \right)^{0.5}$$

Dr: 相対密度 (%)
 N: 標準貫入試験値
 σ'_{v0} : 標準貫入試験値を測定した深度における有効土被り圧 (= $\gamma \times h$) (kN/m²)
 γ : 単位体積重量 (kN/m³)
 h: 標準貫入試験値を測定した深度

図 1.2-25 マイヤホフにより提案された N 値と相対密度の関係式

(b) 評価対象層の選定及び相対密度の設定

沈下量算定の対象層としては、埋戻土、埋戻土（粘性土）及び砂礫層を選定した。なお、埋戻土（粘性土）は、粘性土のため液状化しないが、安全側に埋戻土に置き換えて沈下量を算出する。砂礫層は、粒径加積曲線が埋戻土と同様な傾向を示すことから、埋戻土に置き換えて沈下量を算出する。埋戻土、埋戻土（粘性土）及び砂礫層の分布を図 1.2-26 に示す。沈下率は、Ishihara et al. (1992) の地盤の相対密度に応じた最大せん断ひずみと体積ひずみ（沈下率）の関係から設定した。相対密度は、図 1.2-27 に示す位置において調査を実施し、図 1.2-28 に示すとおり平均で 71.3% となり、ばらつきを考慮すると 54.1% となる。

Ishihara et al. (1992) の関係については、細粒分及び粗粒分が少なく粒径が比較的揃った液状化し易いきれいな砂による沈下率を示しており、埋戻土と

比較すると沈下率が大きくなると判断できるため、埋戻土の沈下率を Ishihara et al. (1992) の関係より算定することにより保守的な評価を実施する。

沈下率は図 1.2-29 に示すとおり、安全側に地震時の最大せん断ひずみを考慮せず、相対密度の平均値 71.3% をもとに 2.5% となるが、ばらつきを考慮し算出した相対密度 54.1% をもとに、安全側に 3.5% と評価する。

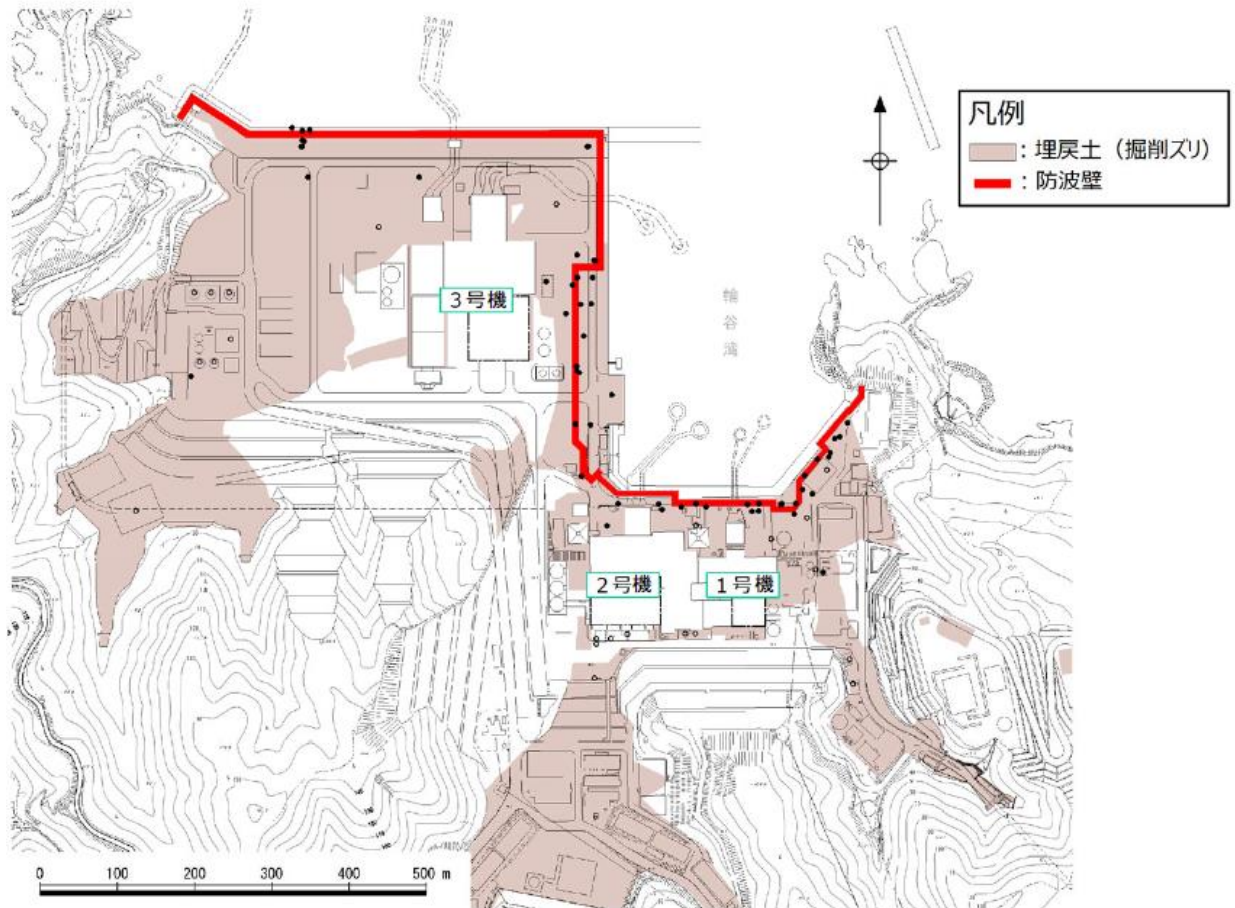


図 1.2-26(1) 埋戻土分布図

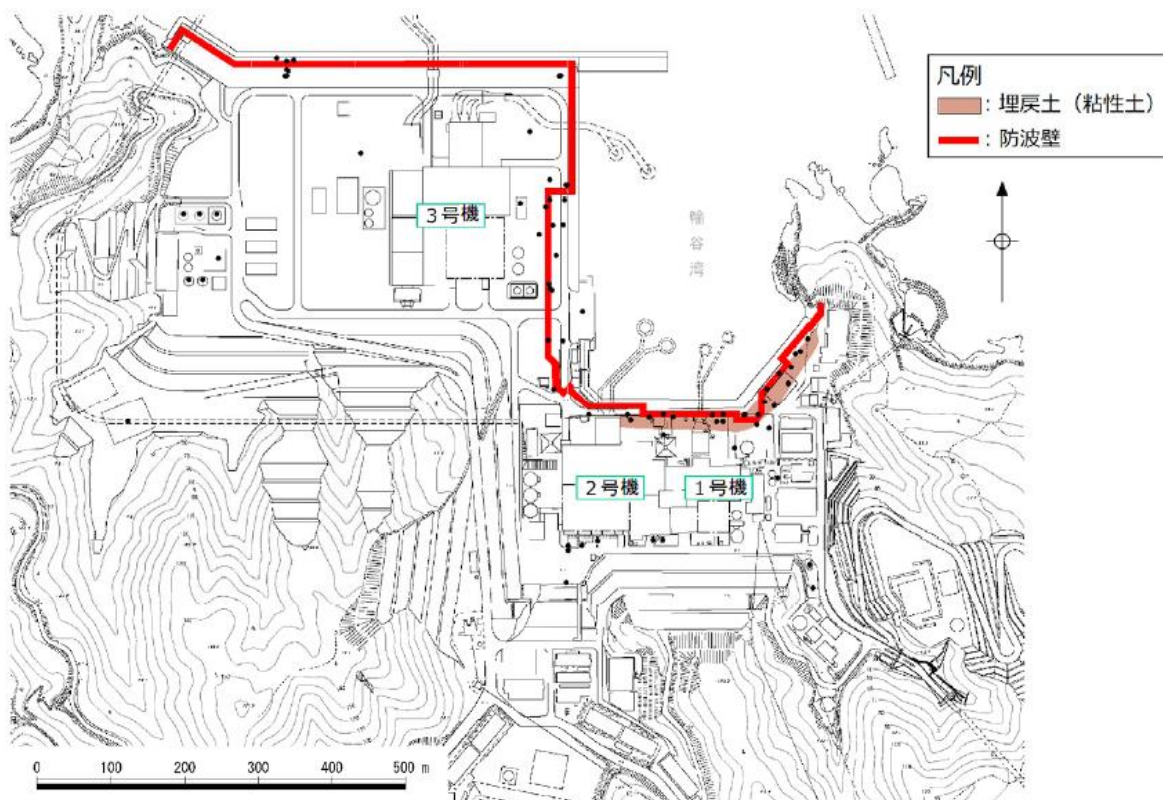


图 1.2-26(2) 埋戻土 (粘性土) 分布图

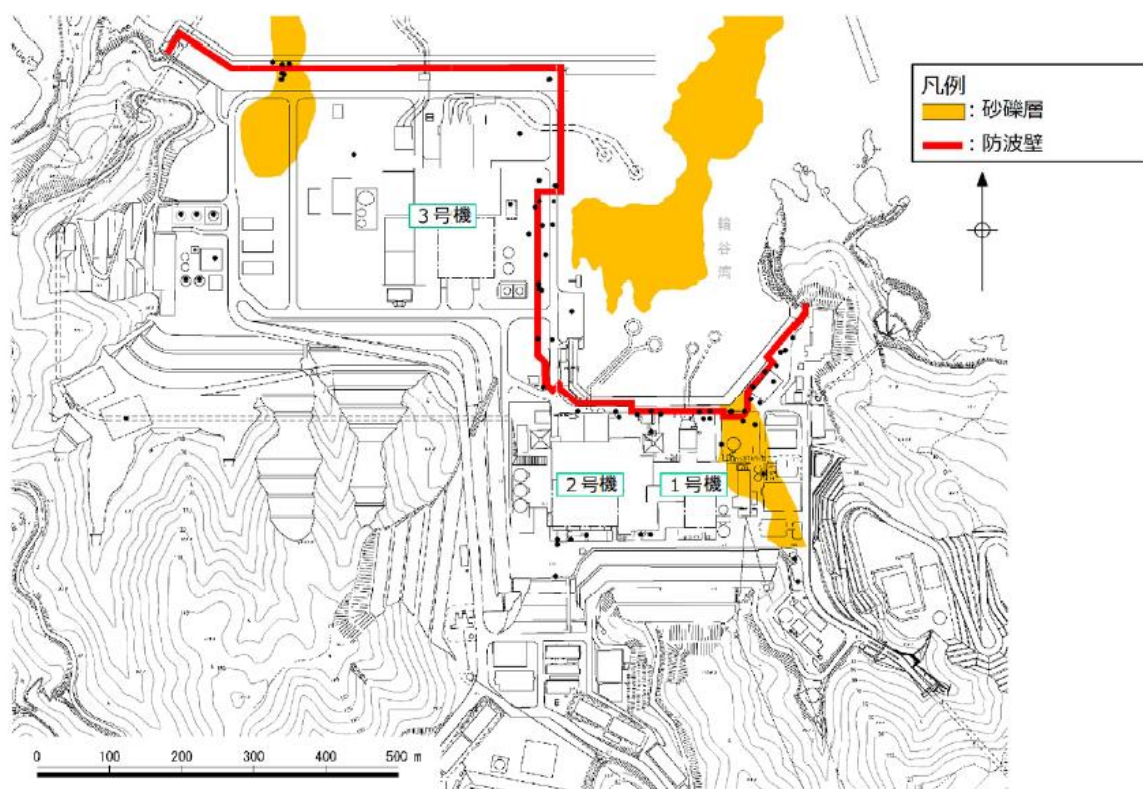


图 1.2-26(3) 砂礫層分布图

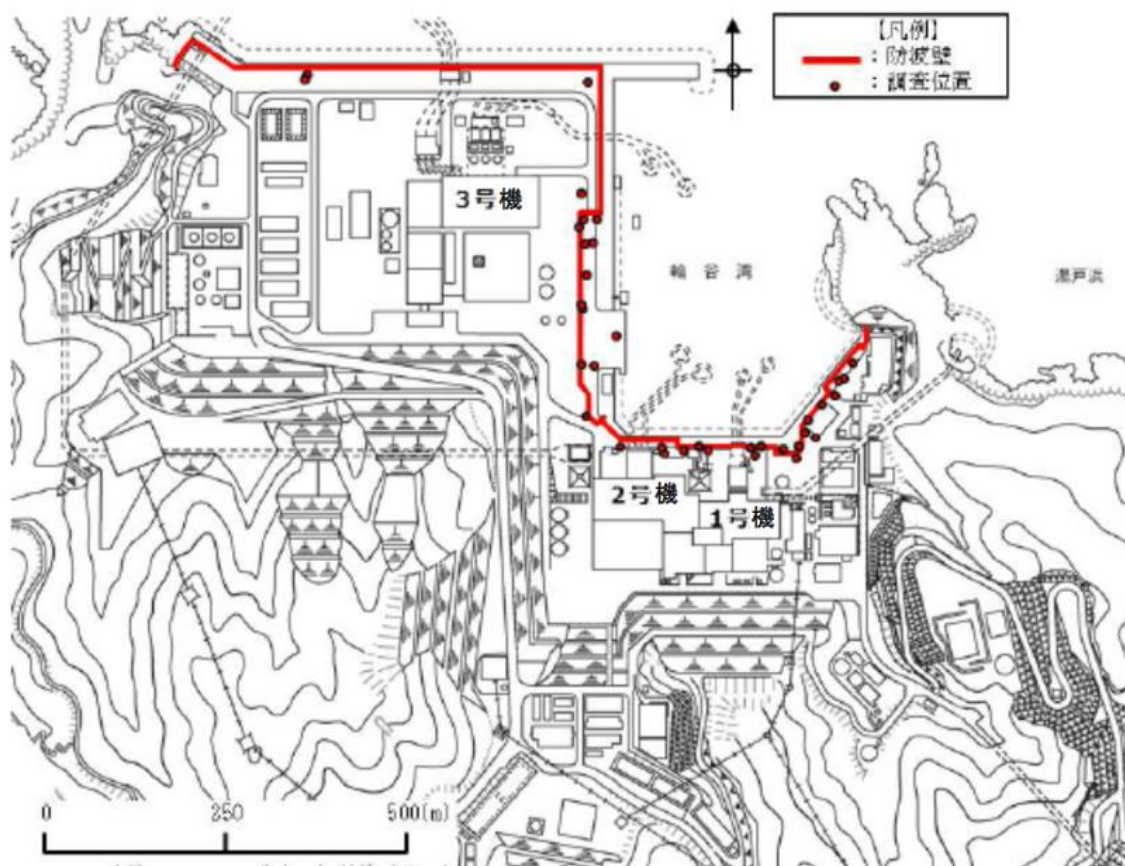
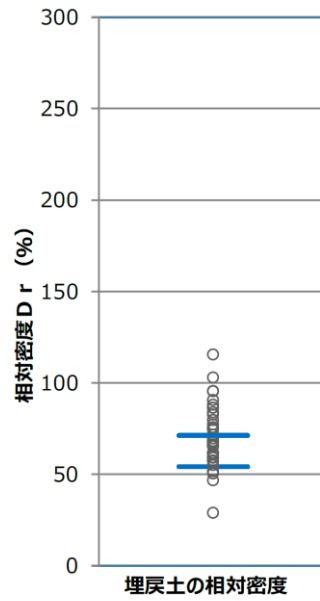


図 1.2-27 相対密度の調査位置



	相対密度 D_r (%)	
	平均	平均- 1σ
埋戻土	71.3	54.1

図 1.2-28 埋戻土の相対密度

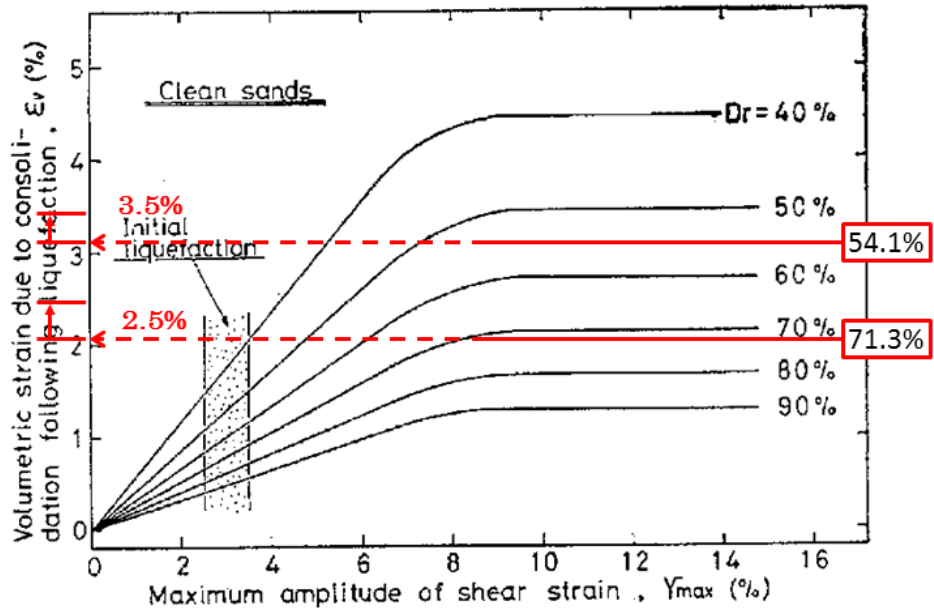


図 1.2-29 Ishihara et al. (1992) の地盤の最大せん断ひずみと体積ひずみの関係から設定した沈下率

(c) 沈下量

防波壁前面の沈下量は、防波壁前面に沈下量算定の対象層が存在する3号機東側エリア及び1, 2号機北側エリアの地質断面図に基づき算定した。敷地平面図を図 1.2-30 に、沈下量算定の対象層が防波壁前面に分布する3号機東側エリア及び1, 2号機北側エリアの地質断面図を図 1.2-31 に示す。

図 1.2-31 に示すとおり、3号機東側エリアには、沈下量算定の対象層である埋戻土が EL 8.5m から EL-9.6m に存在する。1, 2号機北側エリアには、沈下量算定の対象層が EL 8.5m から EL-14.1m に存在する。なお、1, 2号機北側エリアの防波壁前面の砂礫層地盤改良範囲を考慮した液状化層厚は、地盤改良部において 17.1m 施設護岸部において 14.4m となる。

1, 2号機北側エリアの断面図を図 1.2-32 に示す。1, 2号機北側エリアに存在する砂礫層は地盤改良（①地盤改良部）されているが、防波壁前面において一部地盤改良されていない範囲（②施設護岸部）があるため、沈下量を算定する層厚を算定した。その結果、1, 2号機北側エリアにおける防波壁前面の沈下量を算定する層厚は地盤改良部において 17.1m、施設護岸部において 14.4m となり、3号機東側エリアにおける層厚 18.1m を上回らないことを確認した。

以上より、層厚が最大となるよう EL 8.5m から EL-9.6m を考慮し、沈下量を算定するための層厚は 18.1m とした。

沈下量は、上記層厚及び Ishihara et al. (1992) の関係を用いて相対密度の平均値にばらつきを考慮して安全側に設定した沈下率 3.5%より 0.65m*を安全側に考慮する。

注記*：層厚 18.1m×沈下率 3.5%≒沈下量 0.65m

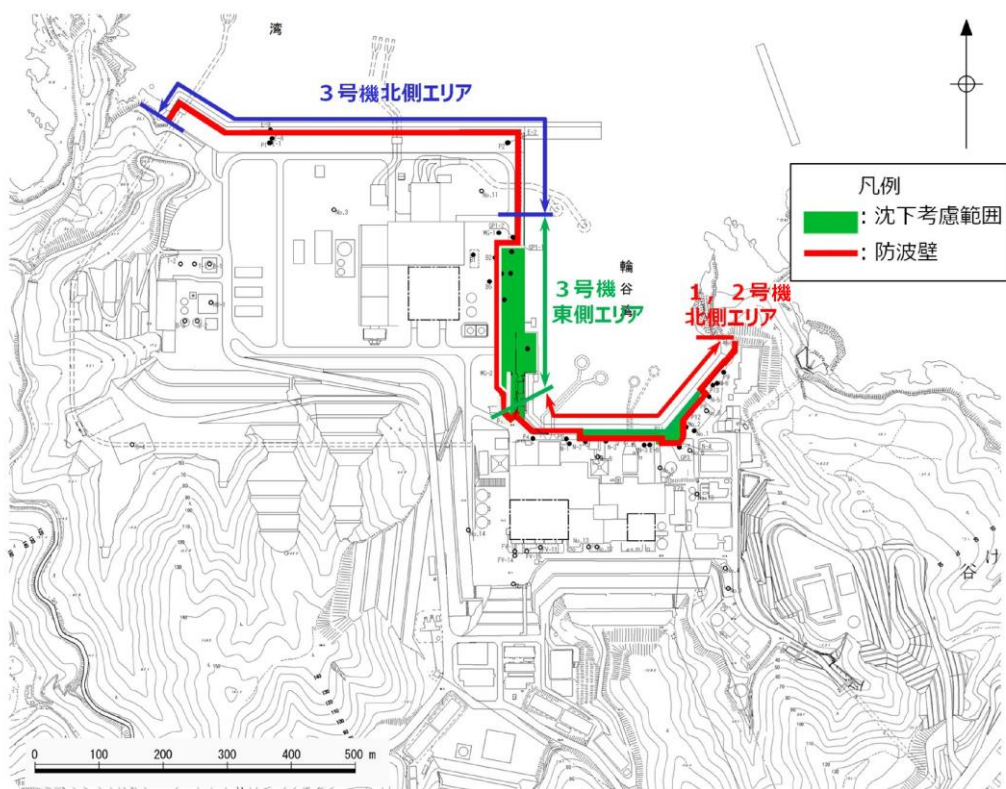


図 1.2-30 敷地平面図

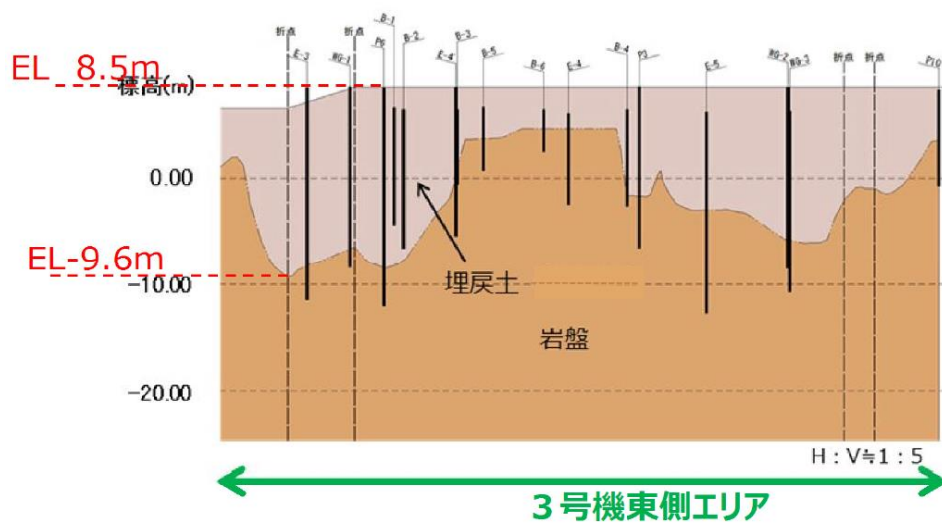


図 1.2-31(1) 地質断面図 (3号機東側エリア)

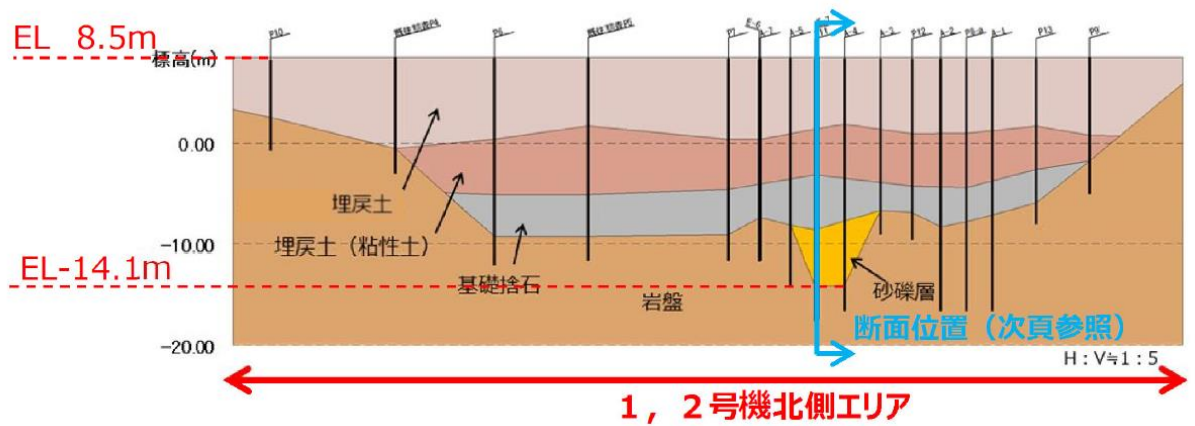


図 1.2-31(2) 地質断面図 (1, 2号機北側エリア)

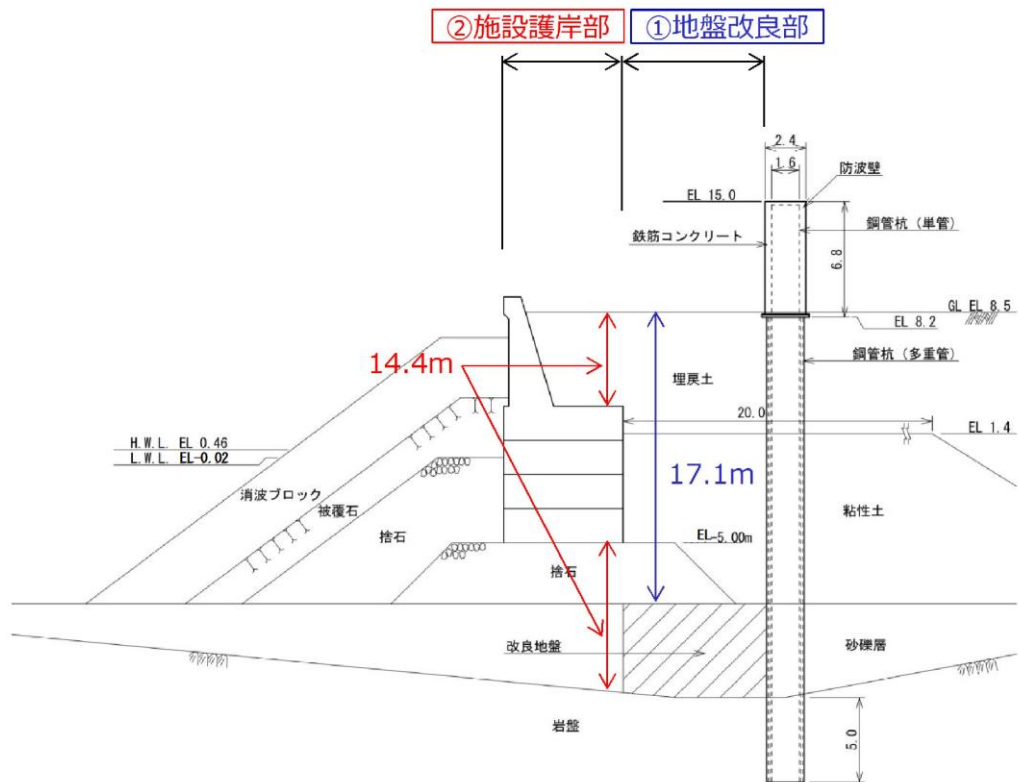


図 1.2-32 断面図 (1, 2号機北側エリア)

b. 液状化に伴う側方流動による沈下

(a) 評価方針

地震時の地盤の液状化に伴う側方流動が想定されることから、二次元有効応力解析 (解析コード「FLIP Ver.7.1.9」) により側方流動による沈下量を算定する。評価を行う解析断面は、以下の観点から3号機東側エリアの沈下による

遡上の影響が大きいと判断し、3号機東側エリアを対象として、有効応力解析を実施する。

- 1, 2号機北側エリアと比較して埋戻土の分布が広範囲かつ層厚が厚いこと
 - 1, 2号機北側エリアと比較して基準津波遡上範囲が広いこと
- 3号機東側の解析断面位置図を図 1.2-33 に示す。

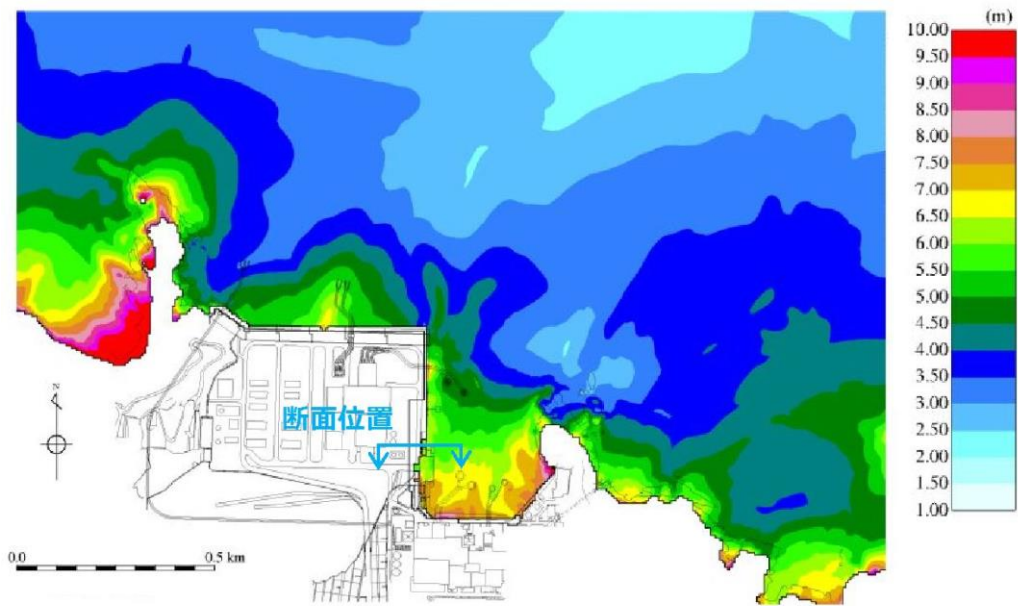


図 1.2-33 解析断面位置図

(b) 解析条件

3号機東側断面の解析モデル図を図 1.2-34 に示す。地盤は、地質区分に基づき平面ひずみ要素でモデル化し、防波壁は、線形はり要素でモデル化した。

地下水位は、防波壁周辺の朔望平均満潮位 (EL 0.46m) 前後であることから、港湾基準に準じて EL 0.14m* とする。

入力地震動は、表 1.2-5 に示すとおり、基準地震動のうち、繰返し応力及び繰返し回数に着目し、水平加速度が大きく、継続時間が長い地震動が液状化評価において最も厳しいと考えられることから、S_s-Dを選定する。したがって、基準地震動 S_s-D を、一次元波動論によって解析モデル下端位置で評価した波形を用いた。

注記* : $L. W. L. EL - 0.02m + 1/3 \times (H. W. L. EL 0.46m - L. W. L. EL - 0.02m) = EL 0.14m$

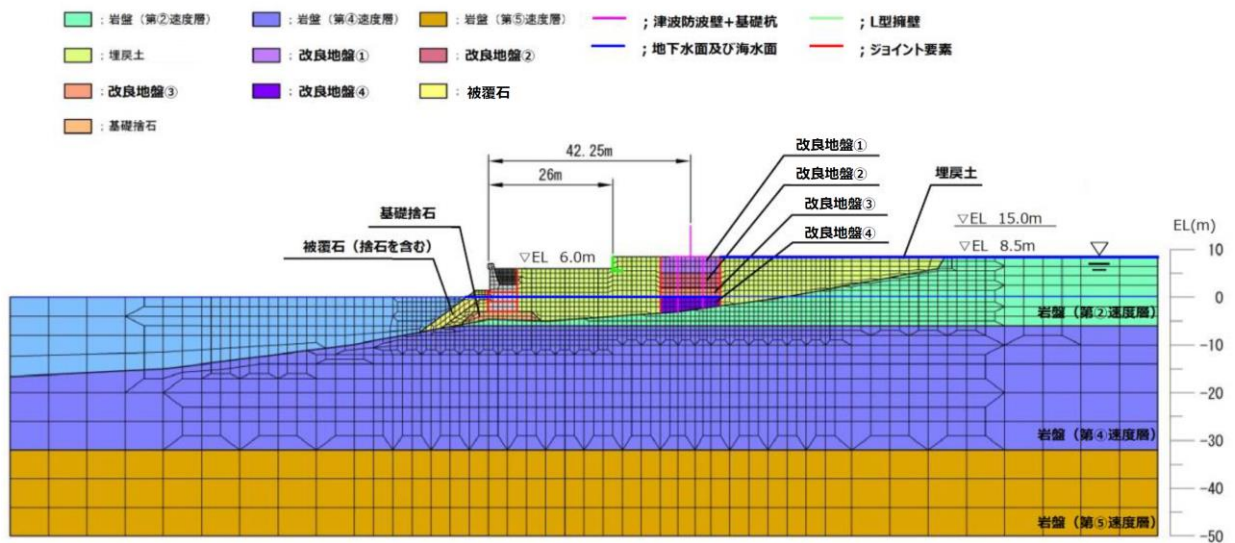


図 1.2-34 解析モデル図（3号機東側断面）

表 1.2-5 基準地震動の加速度時刻歴波形

基準地震動		水平方向（NS成分）	水平方向（EW成分）	鉛直方向
S s - D	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔応答スペクトル手法による基準地震動〕			
S s - F 1	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔断層モデル手法による基準地震動 突道断層による地震の中越中 地震の短期間レベルの不確かさ 破断起点5〕			
S s - F 2	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動 〔断層モデル手法による基準地震動 突道断層による地震の中越中 地震の短期間レベルの不確かさ 破断起点6〕			
S s - N 1	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2004年北海道留萌支庁南部地震（K-NET）港町の検討結果に保守性を考慮した地震動〕			
S s - N 2	震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 〔2000年鳥取県西部地震の質祥ダム（監査所）の観測記録〕			

注*：表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形〔縦軸：加速度，横軸：時間(s)〕

液状化の評価対象として取り扱う埋戻土及び砂礫層の有効応力解析に用いる液状化パラメータは、液状化試験結果（繰返し非排水せん断試験結果）に基づき、地盤のばらつき等を考慮し、安全側に簡易設定法により設定した。

試験結果等から設定した解析上の液状化強度曲線を図 1.2-35 に示す。

液状化パラメータ以外の解析用物性値についても、簡易設定法を用いて設定した。

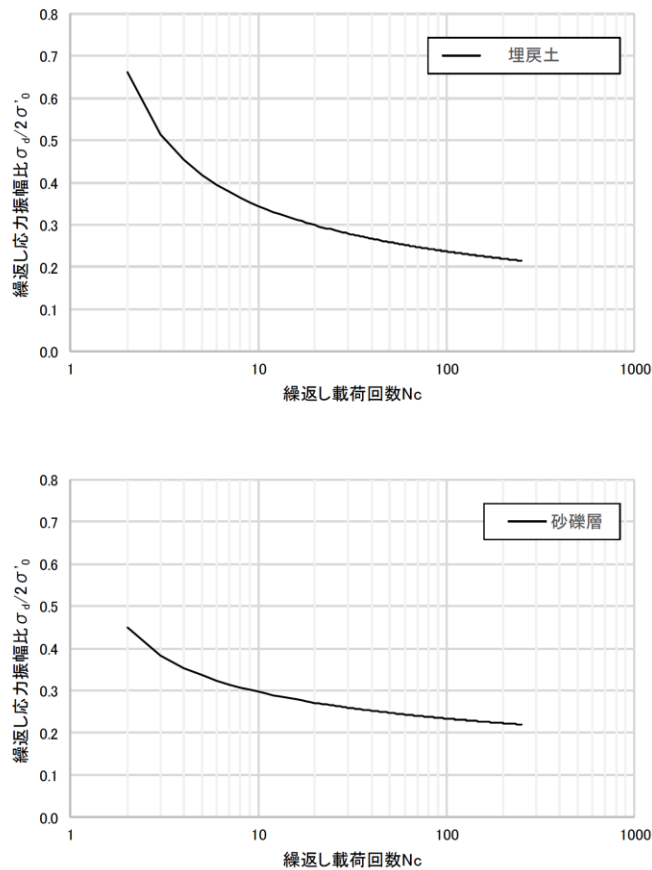


図 1.2-35 液状化強度曲線

(c) 評価結果

基準地震動 S_s-D による 3 号機東側の残留変形量を図 1.2-36 に示す。防波壁より海側では、L 型擁壁までの EL 8.5m 盤において、防波壁直下の改良地盤と埋戻土の境界部を中心とした比較的大きな沈下が確認される。これは、地震による L 型擁壁の海側への傾きに伴い、埋戻土が自立する改良地盤から海側へ側方流動したことに起因するものである。

なお、解析条件については、以下のとおり安全側に設定する。

- 敷地内の地下水位については、防波壁より海側の地下水位を海水位に、防波壁より陸側の地下水位を地表面に設定する。
- 埋戻土の液状化強度特性は敷地全体の N 値に基づく簡易設定法*により設定する。

津波が浸水する EL 6.0m 盤における沈下量は 0.04m 程度であるが、海岸線から離れた EL 8.5m 盤では改良地盤近傍で局所的に 1~2m 程度の沈下が生じている。このため、側方流動による EL 6.0m 盤から EL 8.5m 盤全体の沈下量としては、EL 6.0m 盤から EL 8.5m 盤の埋戻土の各節点における沈下量を節点数で割った平均沈下量 (0.33m 程度) を考慮し、安全側に 0.35m とする。

注記*：簡易設定法による液状化強度特性は、埋戻土の液状化試験結果（ロータリー式三重管サンプラー及び表層試料採取）による液状化強度特性よりも十分保守的である。

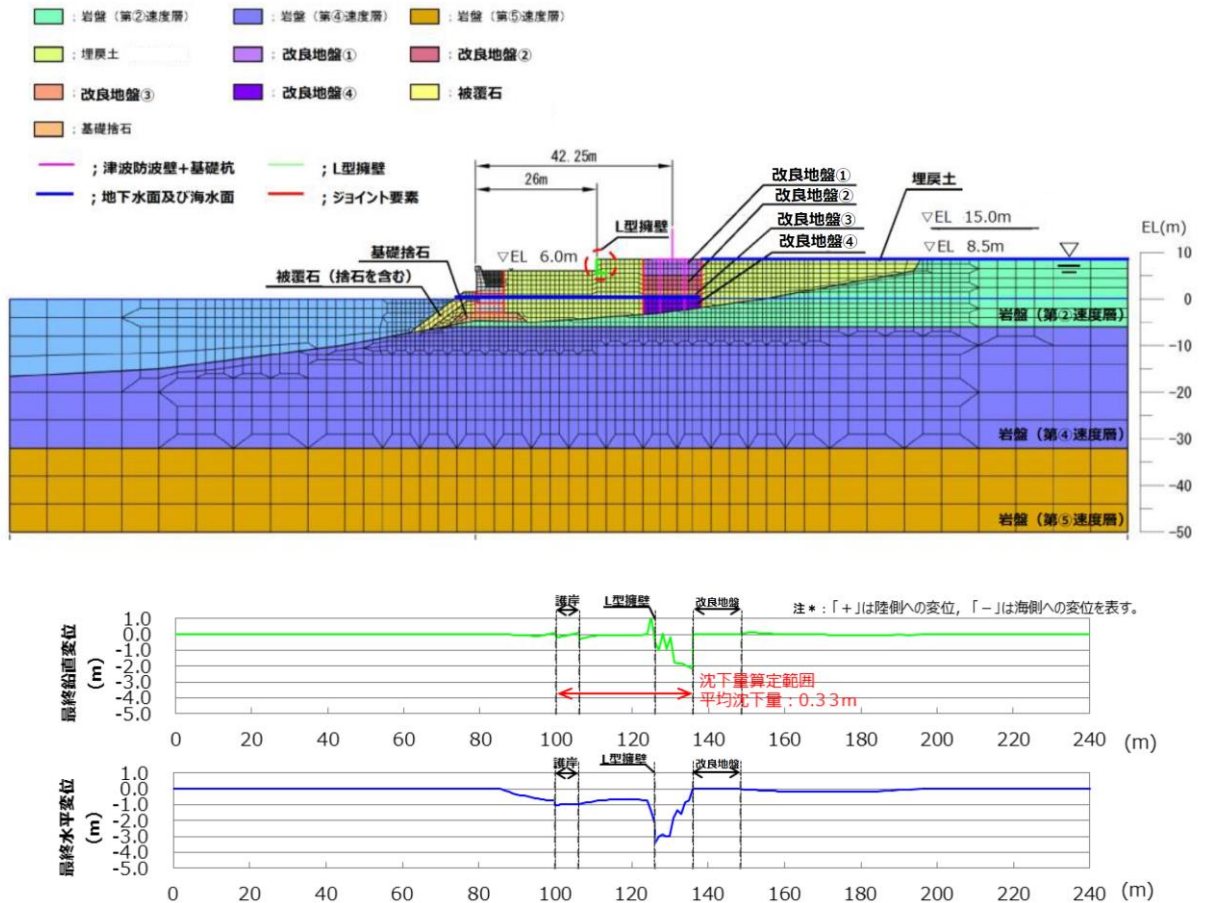


図 1.2-36 基準地震動の S_s-D による地表面残留変形量（3号機東側断面）

c. 津波解析における沈下量の設定

津波解析における沈下は、沈下考慮範囲を対象とする（図 1.2-37）。また、荷揚場は一部岩着し、沈下しない範囲もあるが、本検討では、安全側に荷揚場全体が沈下する前提で検討を行い、護岸のパラペットについてもモデル化を行わないこととする。なお、防波壁周辺については、地盤改良を実施していることから、沈下しないこととする。

液状化及び揺すり込みに伴う沈下量を相対密度の平均値から求まる沈下率（2.5%）による 0.5m としていたが、安全側にばらつきを考慮した相対密度から求まる沈下率（3.5%）による 0.65m を採用し、側方流動による沈下量 0.35m を加え、1m とした。

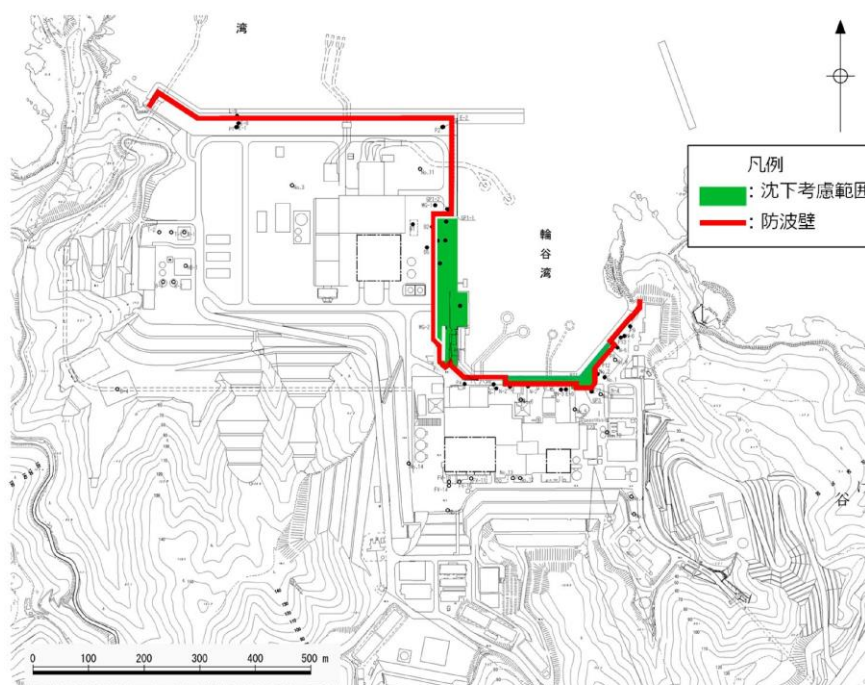


図 1.2-37 津波評価において沈下を考慮する範囲

d. 地盤変状を考慮した津波解析

a. ～c. を踏まえ、沈下量を安全側に 1m と設定し、津波解析を実施した。

基準津波 1～6 のケースを対象に基本ケース及び 1m 沈下させたケースを比較し、その差異を表 1.2-6 に示す。また、最大水位上昇量分布を図 1.2-38 に示す。

津波解析の結果、1m 沈下させた場合、水位上昇側の施設護岸又は防波壁の水位は、どのケースについても基本ケースと同じもしくは基本ケースの方が大きい。また、水位下降側の 2 号機取水口の水位については全ケースで同じ水位となった。

以上より，地震による地形変化（地盤変状）は，入力津波を設定する際の影響要因として考慮しない。

表 1.2-6 基本ケースと地盤変状を考慮したケースの水位比較

	【水位上昇側】施設護岸又は防波壁*1			【水位下降側】2号機取水口(東)*2		
	基本ケース (沈下無し)(A)	沈下有り1m (B)	差異 (B-A)	基本ケース (沈下無し)(A)	沈下有り1m (B)	差異 (B-A)
基準津波 1 (防波堤有り)	+10.7m (+10.67m)	+10.7m (+10.67m)	0.0m (0.00m)	-5.2m (-5.13m)	-5.2m (-5.13m)	0.0m (0.00m)
基準津波 1 (防波堤無し)	+11.9m (+11.85m)	+11.9m (+11.85m)	0.0m (0.00m)	-6.1m (-6.01m)	-6.1m (-6.01m)	0.0m (0.00m)
基準津波 2 (防波堤有り)	+9.0m (+8.93m)	+9.0m (+8.92m)	0.0m (-0.01m)			
基準津波 3 (防波堤有り)				-4.7m (-4.63m)	-4.7m (-4.63m)	0.0m (0.00m)
基準津波 4 (防波堤有り)				-4.1m (-4.04m)	-4.1m (-4.04m)	0.0m (0.00m)
基準津波 4 (防波堤無し)				-4.3m (-4.25m)	-4.3m (-4.25m)	0.0m (0.00m)
基準津波 5 (防波堤無し)	11.5m (+11.45m)	11.5m (+11.45m)	0.0m (0.00m)			
基準津波 6 (防波堤無し)				-6.1m (-6.08m)	-6.1m (-6.08m)	0.0m (0.00m)

注記*1: 朔望平均満潮位+0.58m, 潮位のばらつき0.14mを併せて+0.72mを考慮 *2: 朔望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

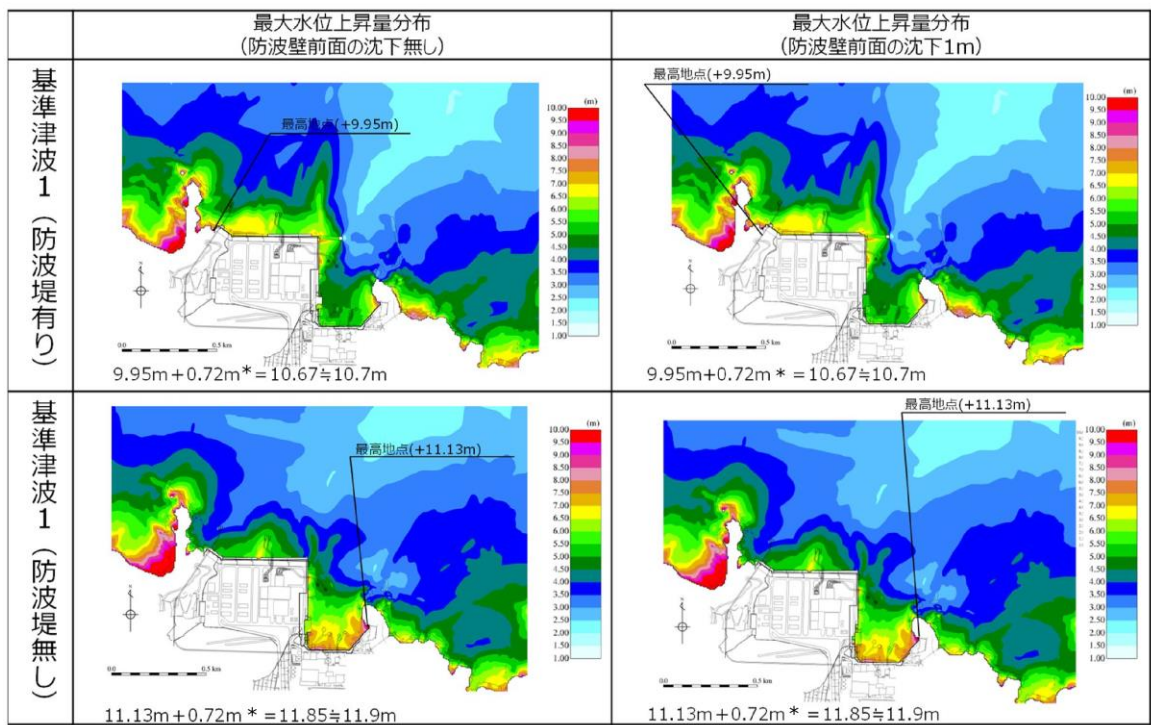
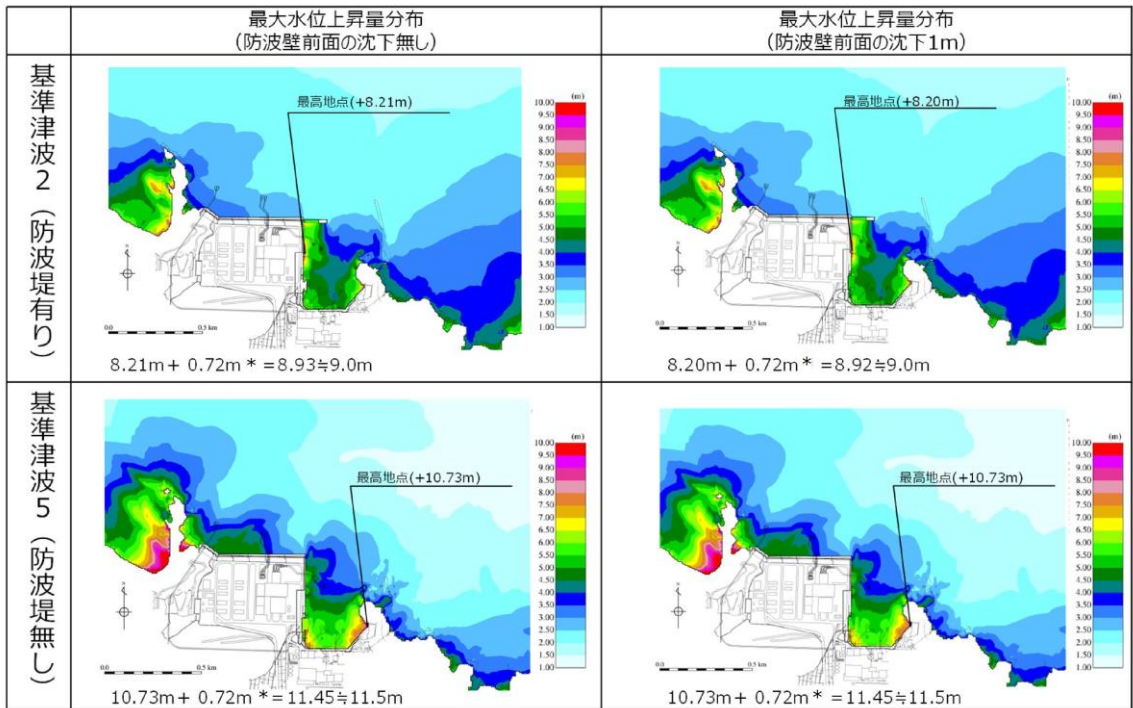
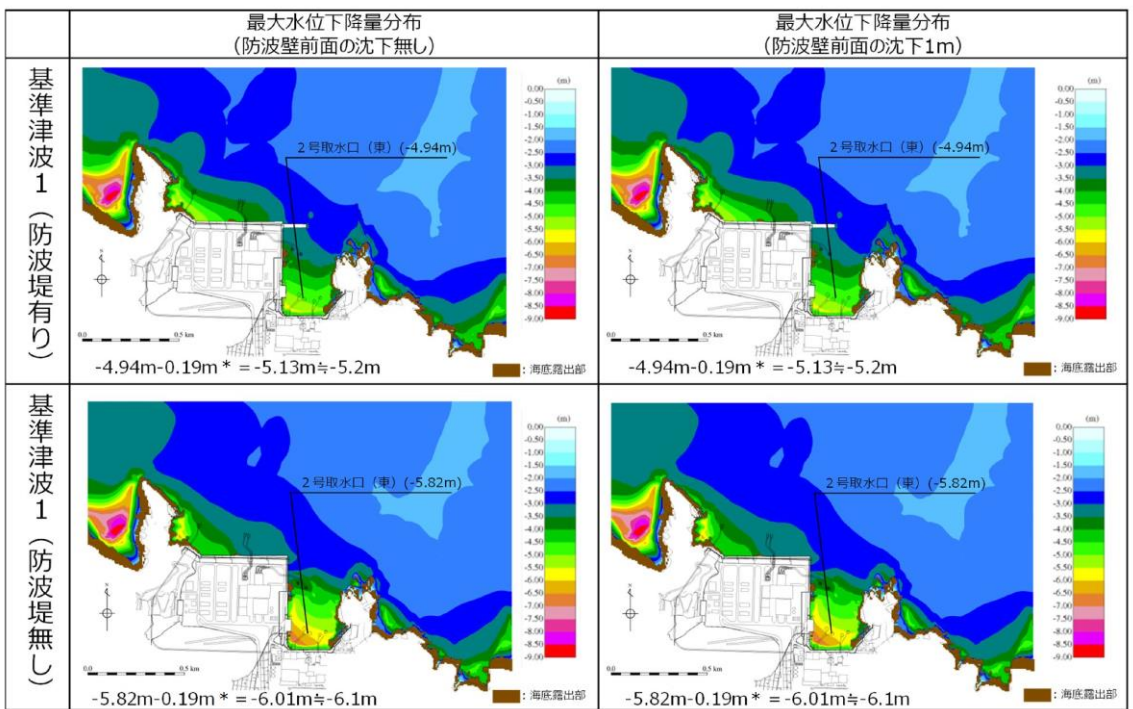


図 1.2-38(1) 地盤変状の有無による最大水位上昇量分布の比較
(基準津波 1 (防波堤有り) 及び基準津波 1 (防波堤無し))



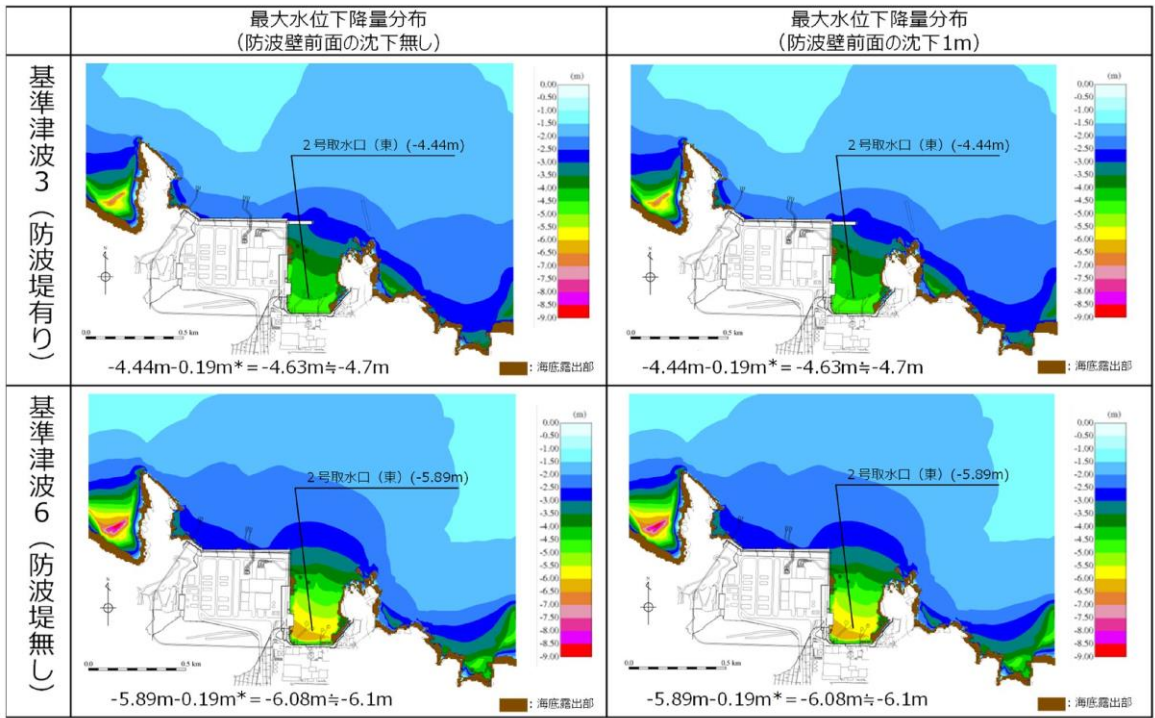
注記* : 朔望平均満潮位+0.58m, 潮位のばらつき0.14mを併せて+0.72mを考慮

図 1.2-38 (2) 地盤変状の有無による最大水位上昇量分布の比較
(基準津波 2 (防波堤有り) 及び基準津波 5 (防波堤無し))



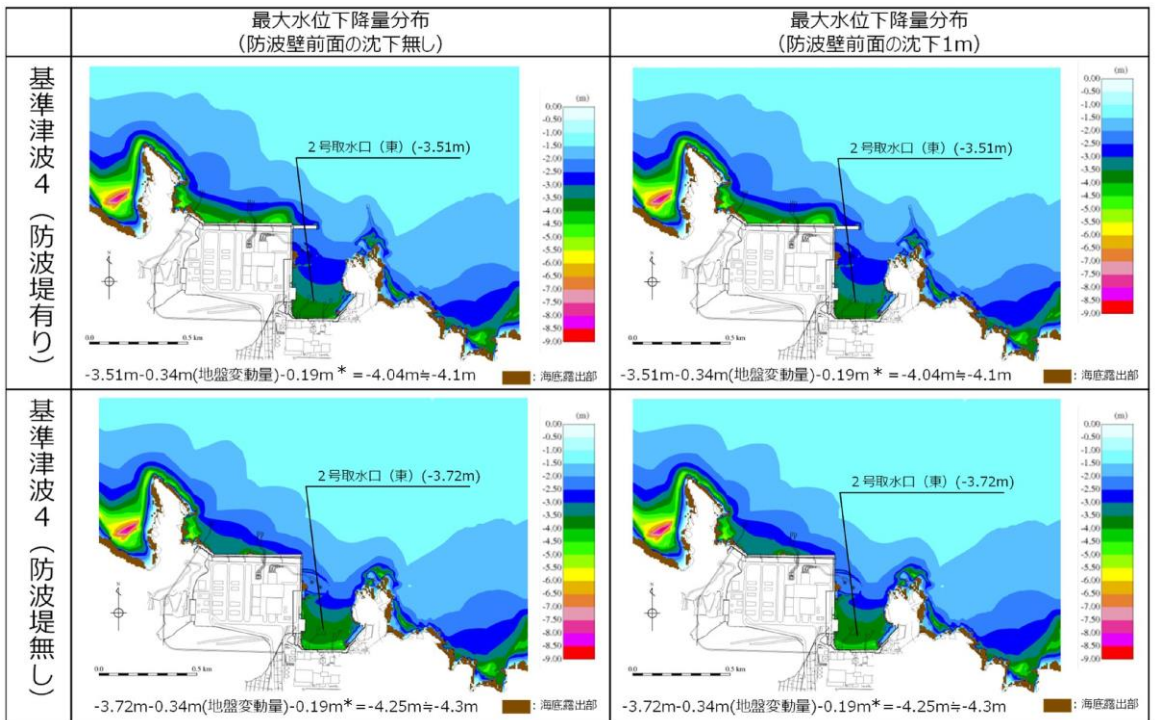
注記* : 朔望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-38 (3) 地盤変状の有無による最大水位下降量分布の比較
(基準津波 1 (防波堤有り) 及び基準津波 1 (防波堤無し))



注記* : 期望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-38(4) 地盤変状の有無による最大水位下降量分布の比較
(基準津波3(防波堤有り)及び基準津波6(防波堤無し))



注記* : 期望平均干潮位-0.02m, 潮位のばらつき0.17mを併せて-0.19mを考慮

図 1.2-38(5) 地盤変状の有無による最大水位下降量分布の比較
(基準津波4(防波堤有り)及び基準津波4(防波堤無し))

(4) 防波堤損傷に関する検討

島根原子力発電所では、輪谷湾に防波堤及び東防波堤を設置しており、これら防波堤は、敷地周辺の地震により損傷する可能性は否定できないことから、防波堤の状態による入力津波への影響の有無を検討する。検討にあたっては、津波高さと津波高さ以外に区分して、実施する。

a. 検討結果

(a) 津波高さ

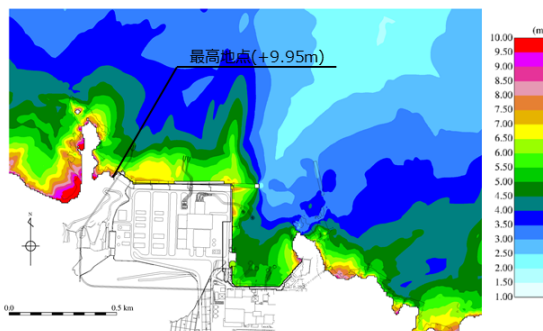
基準津波策定の際に、防波堤の有無により津波高さに有意な差を与えることを確認した（表 1.2-7、図 1.2-39）。

(b) 津波高さ以外（流況等）

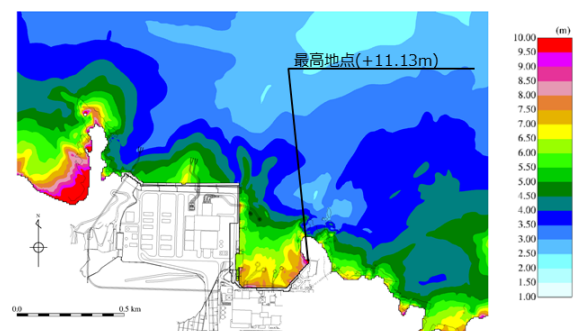
発電所沖合については、防波堤の有無により流況の変化が認められない（図 1.2-40）。また、港湾内及び港湾外については、防波堤の有無により流況の変化が認められる。（図 1.2-41）

表 1.2-7 防波堤の有無による最大水位上昇量の比較

検討対象 基準津波	防波堤	最大水位上昇量(m)
		施設護岸又は防波壁
基準津波 1	有り	+10.0 (+9.95m)
	無し	+11.2 (+11.13m)

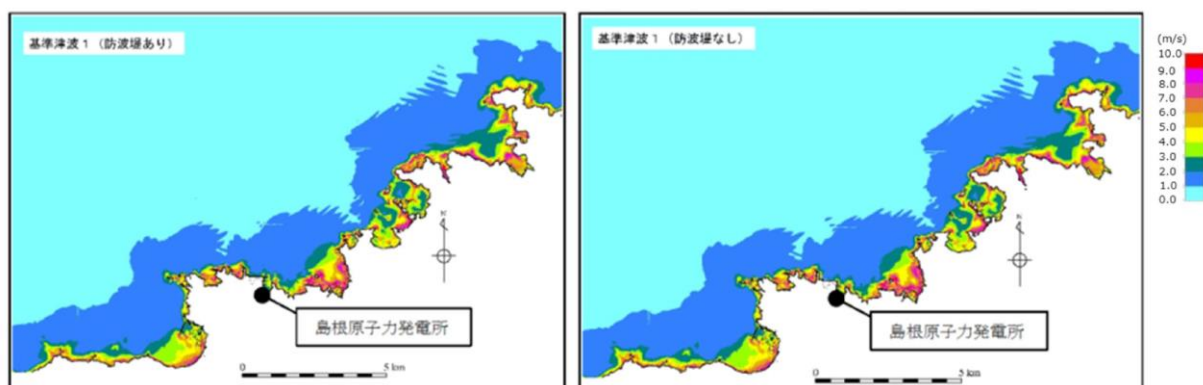


最大水位上昇量分布図
（防波堤有り最大ケース:基準津波1）



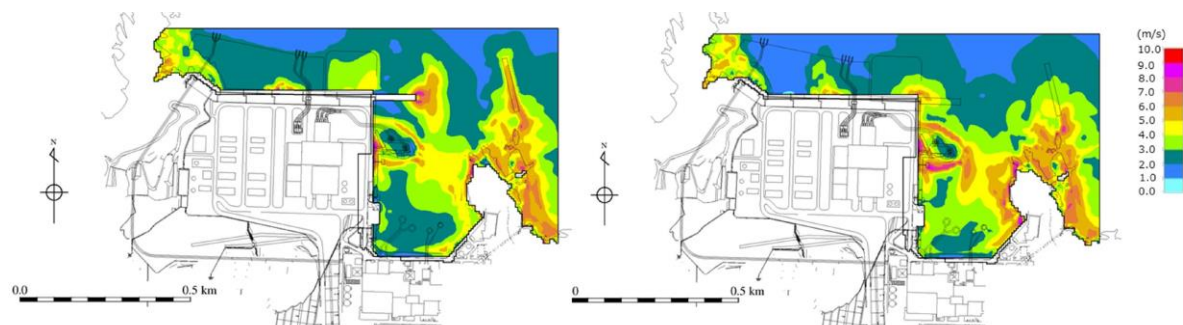
最大水位上昇量分布図
（防波堤無し最大ケース:基準津波1）

図 1.2-39 防波堤の有無による最大水位上昇量分布の比較



最大流速分布（基準津波1 防波堤有り） 最大流速分布（基準津波1 防波堤無し）

図 1.2-40 発電所沖合の流況



最大流速分布（基準津波1 防波堤有り） 最大流速分布（基準津波1 防波堤無し）

図 1.2-41 港湾内及び港湾外の流況

(5) 津波による洗掘に関する検討

遡上域となる荷揚場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。文献*によるとアスファルト部で8m/sの流速に対して洗掘の耐性があるとされている。遡上域の範囲（最大浸水深分布）を評価するため、地震による荷揚場周辺の沈下及び初期潮位を考慮した津波解析を実施した。検討にあたっては、荷揚場付近の浸水範囲が広い基準津波1（防波堤無し）を対象とした。図1.2-42に荷揚場における最大浸水深分布図、図1.2-43に最大流速分布図、図1.2-44に流速が最大（11.9m/s）となった地点における浸水深・流速時刻歴波形を示す。図1.2-44より、アスファルト部で耐性があるとされる8m/sの流速を越える時間は限定的であるが、図1.2-43に示す8m/sの流速を越える地点付近についてはコンクリート舗装等の対策工を行うことから洗掘は生じない。

注記*：津波防災地域づくりに係る技術検討報告書，津波防災地域づくりに係る技術検討会，p.33，2012

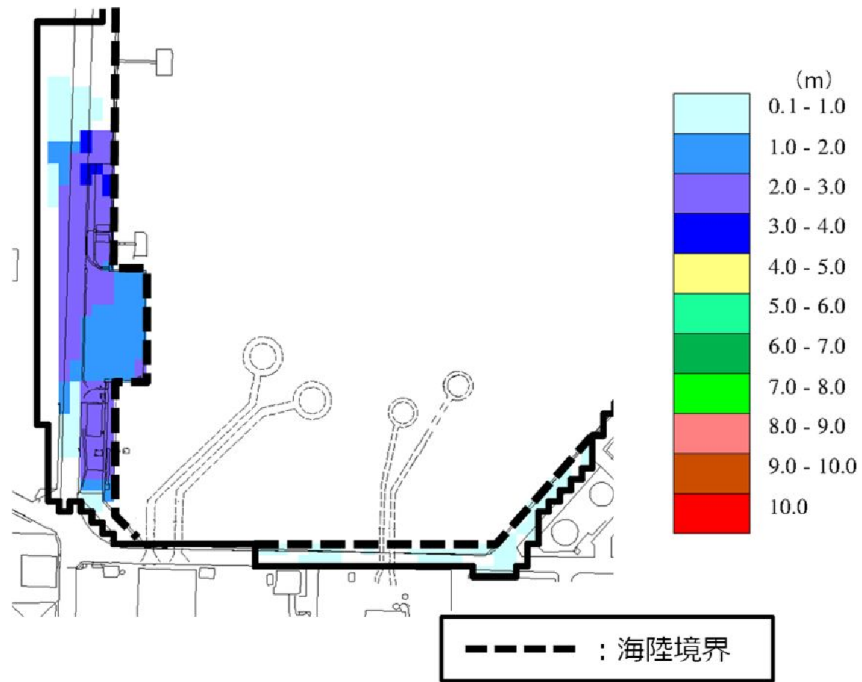


图 1.2-42 最大浸水深分布图 (基準津波 1 (防波堤無し))

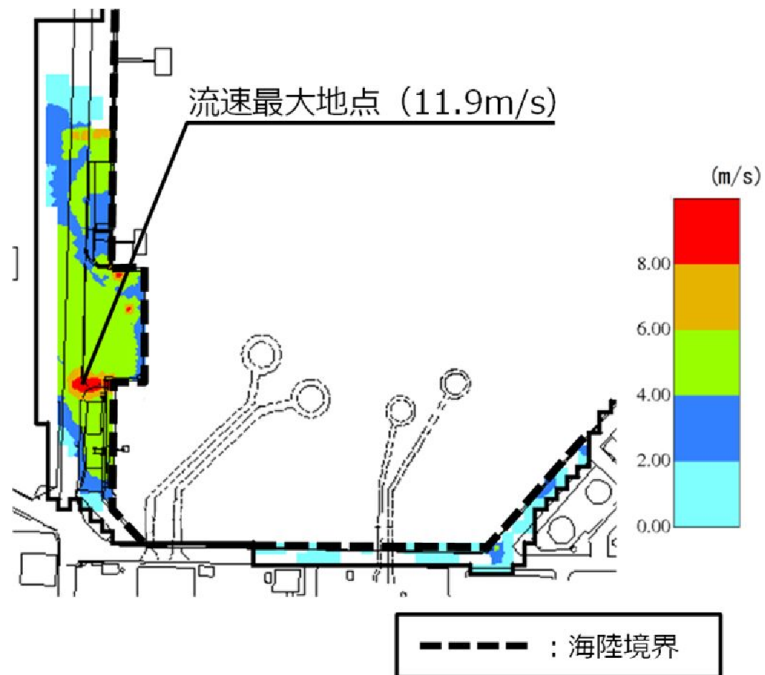


图 1.2-43 最大流速分布图 (基準津波 1 (防波堤無し))

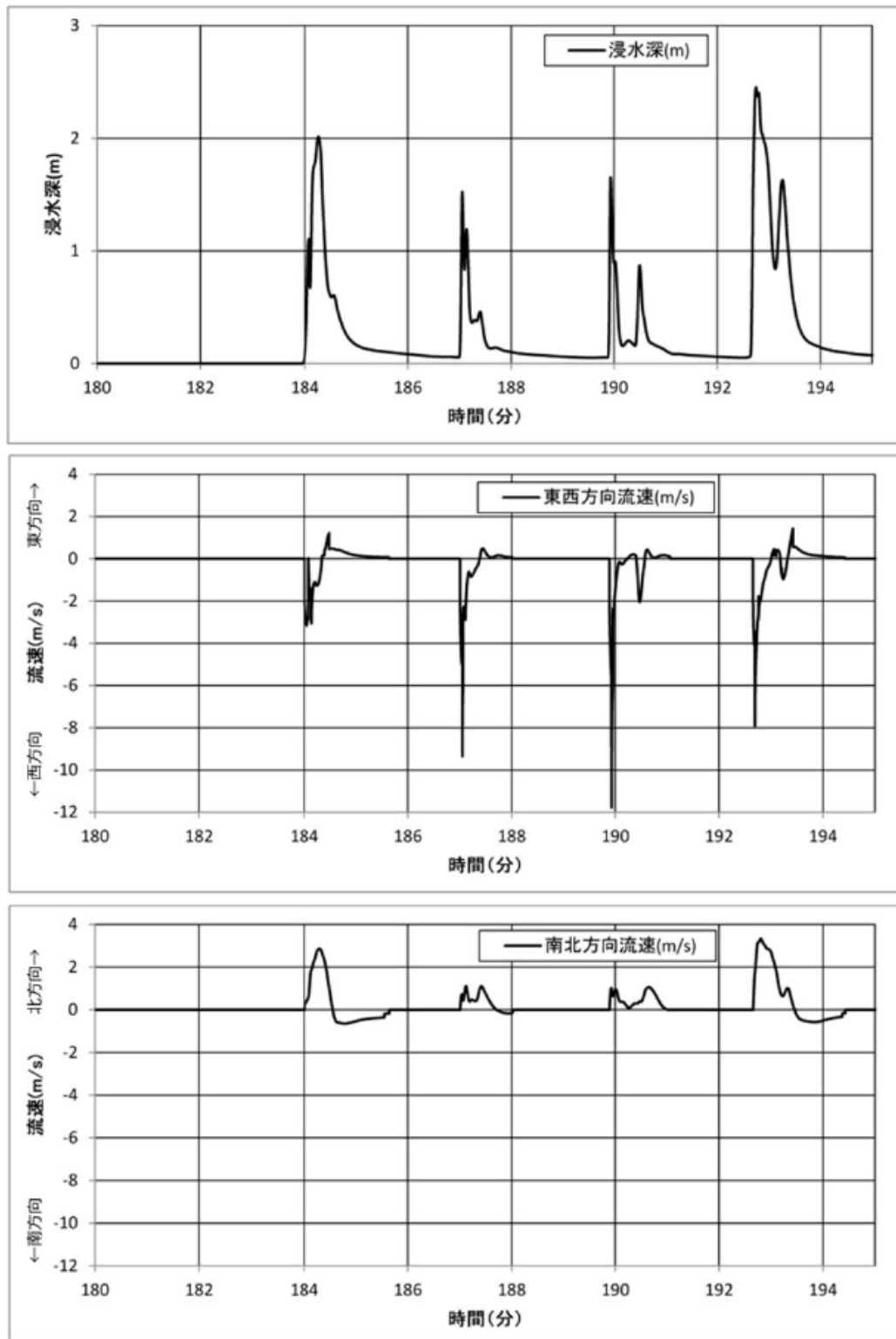


図 1.2-44 流速最大地点における浸水深・流速時刻歴波形

(6) 津波評価条件

基準地震動 S_s 及び基準津波に伴う地形変化及び標高変化による影響の有無に関する検討結果の一覧を表 1.2-8 に示す。

表 1.2-8 基準地震動 S_s 及び基準津波による影響検討結果

影響要因	検討結果
斜面崩壊	<ul style="list-style-type: none">防波壁両端部の斜面については、基準地震動 S_s 及び基準津波に対する健全性を確保していることを確認したことから、<u>影響要因として考慮しない</u>。防波壁両端部の地山以外の斜面については、地滑り地形が判読されている地山の斜面崩壊を考慮した津波解析の結果、斜面崩壊の有無による津波高さの差異が十分小さいことから、<u>影響要因として考慮しない</u>。
地盤変状	<ul style="list-style-type: none">防波壁前面に存在する埋戻土については、地震時の液状化による地盤沈下を考慮した津波解析の結果、地盤沈下の有無による津波高さの差異が十分小さいことから、<u>影響要因として考慮しない</u>。
防波堤損傷	<ul style="list-style-type: none">津波高さについては、防波堤の有無によって有意な差異があることから、<u>影響要因として考慮する</u>。津波高さ以外については、発電所沖合は防波堤の有無による流況の変化が認められないことから<u>影響要因として考慮しない</u>。一方、港湾内及び港湾外は防波堤の有無による流況の変化が認められることから、<u>影響要因として考慮する</u>。
洗堀	<ul style="list-style-type: none">基準津波による遡上域の洗堀が生じないようにコンクリート舗装等の対策工を行うことから、<u>影響要因として考慮しない</u>。

以上の結果を踏まえ、入力津波設定において考慮する地形の条件は以下のとおり。

- 防波堤損傷に関する検討の結果、津波高さについては、防波堤の有無による差異が認められることから、影響要因として考慮する。また、津波高さ以外については、発電所沖合は防波堤の有無による最大流速分布に差異が認められないことから影響要因として考慮しない。一方、港湾内及び港湾外は最大流速分布に差異が認められることから、影響要因として考慮する。

(参考資料 1)防波堤の位置付け・モデル化

(1) 防波堤の位置付け

島根原子力発電所では、輪谷湾に防波堤及び東防波堤を設置している（図 1-1）。これら防波堤は、敷地周辺の地震により損傷する可能性は否定できないことから、津波影響軽減施設とせず、自主設備とする。基準津波 5, 6 は自主設備である防波堤の有無が基準津波の選定に影響が有ることから選定した。

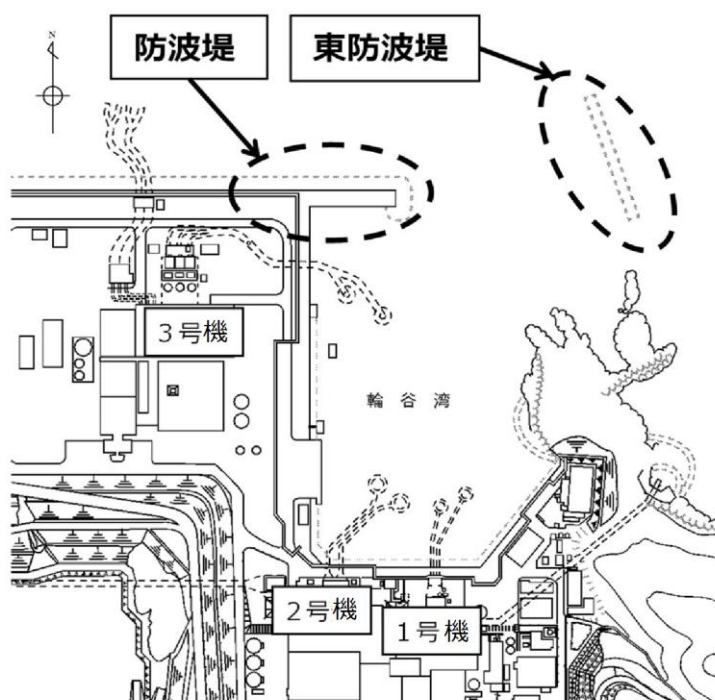


図 1-1 防波堤位置

(2) 防波堤のモデル化

防波堤の有無によるモデル化については、防波堤有り条件では、防波堤ケーソン、捨石マウンドをモデル化しており、防波堤無し条件では、防波堤ケーソン、捨石マウンドを全て取り除いた状態で実施している（図 1-2）。なお、消波ブロック*は、透過性を有するため、防波堤有り条件においては、安全側の評価となるよう消波ブロックをモデル化しないものとしている。

また、消波ブロックをモデル化した場合の津波への影響を検討するため、東防波堤の EL 4.9m～EL 1.8m 区間の消波ブロックをモデル化し、消波ブロックの透過率を施工実績より算出し 50%と設定し、防波堤有り条件のうち、施設護岸又は防波壁で最大水位上昇量を示した基準津波 1 を対象に実施した。

その結果、消波ブロックをモデル化した場合、消波ブロックをモデル化しない場合と比較し、津波の敷地への影響は小さいことから、消波ブロックをモデル化しな

い津波解析は安全側の評価となることを確認した。水位の影響については、表 1-1 及び図 1-3 に示す。また、流向・流速の影響については、図 1-4 に示す。

注記*：一般に消波ブロックは短周期の波浪に対する軽減効果を持つとされており、土木学会（2016）においても構造物（消波ブロック）が無いものとして取り扱うことが多いと記載されている。

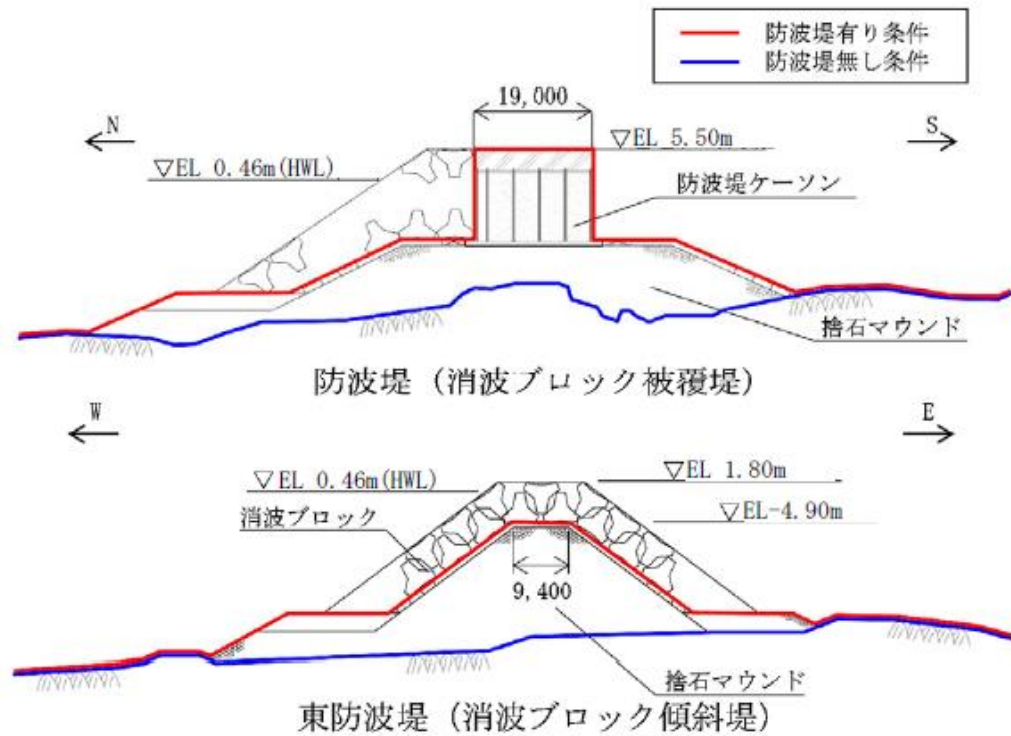
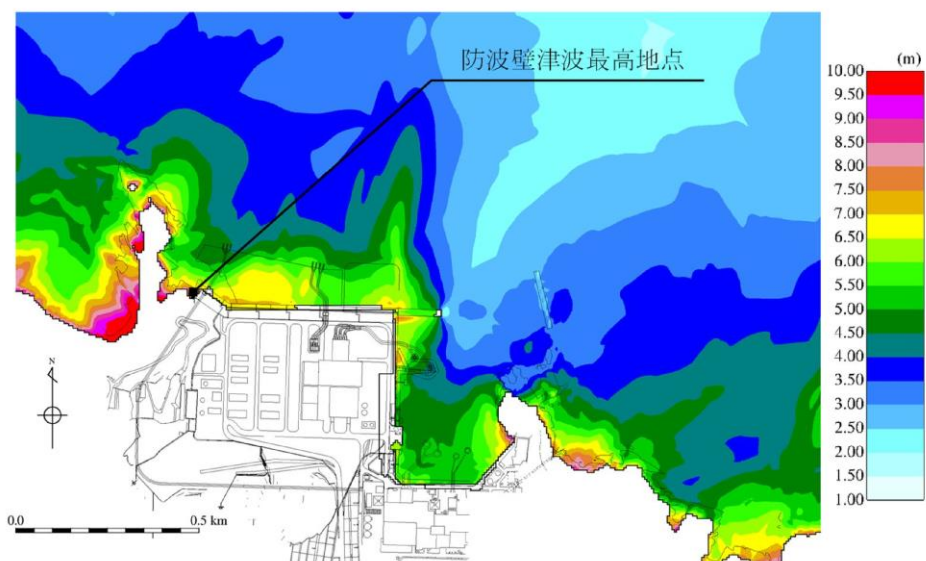


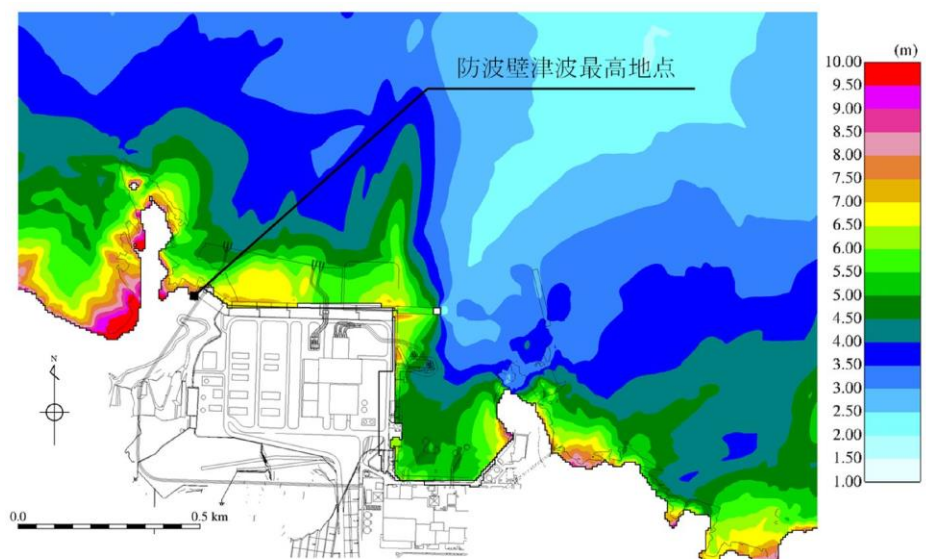
図 1-2 防波堤断面図

表 1-1 消波ブロックのモデル化検討結果

基準津波	消波ブロックのモデル化	評価水位 (EL m)		
		上昇側	下降側	
		施設護岸又は防波壁	2号機取水口 (東)	2号機取水口 (西)
基準津波 1 (防波堤有り)	消波ブロックをモデル化	+10.4	-4.8	-4.8
	消波ブロックをモデル化しない	+10.5	-5.0	-5.0

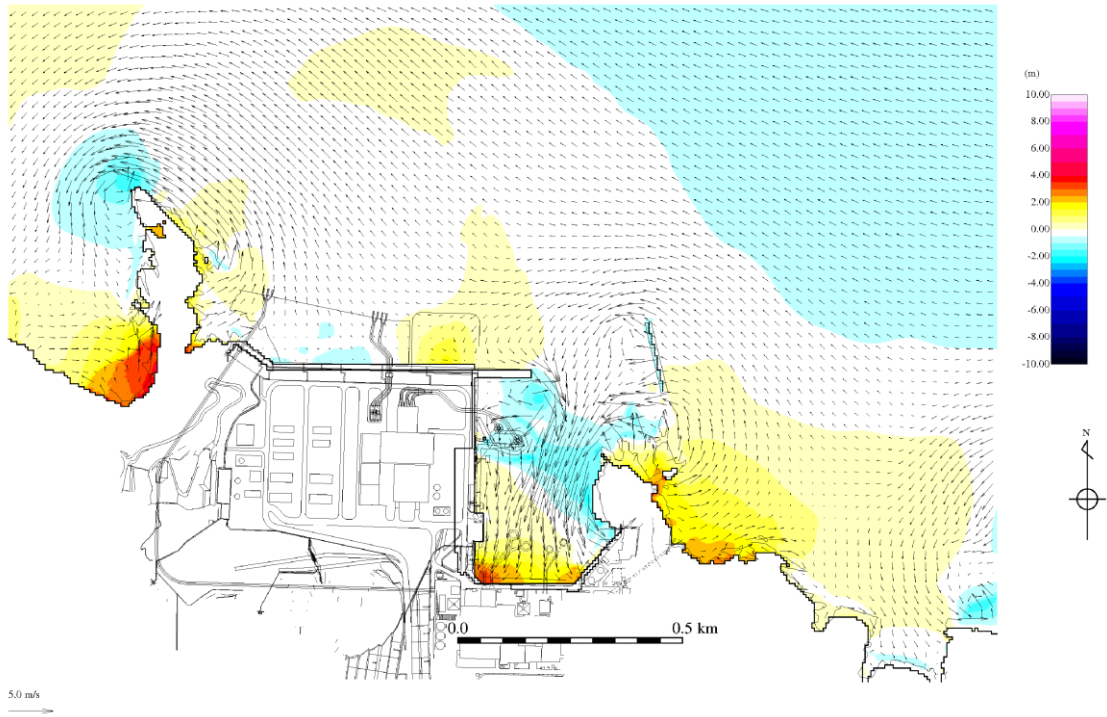


最大水位上昇量分布図
(消波ブロックをモデル化)

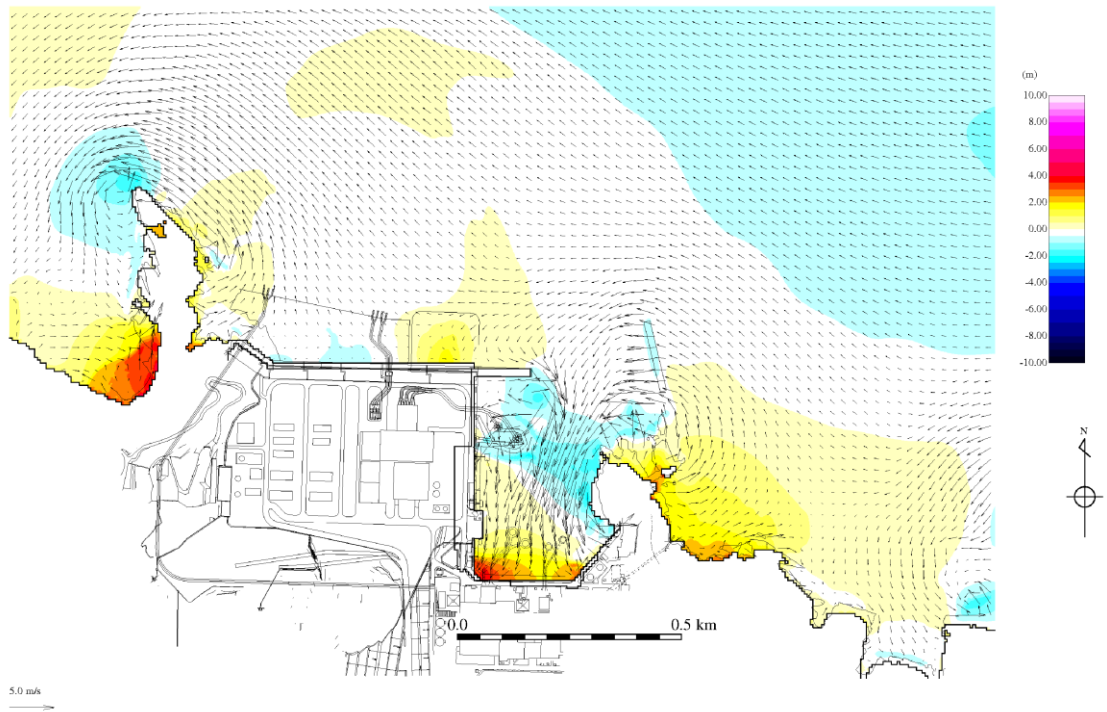


最大水位上昇量分布図
(消波ブロックをモデル化しない: 基準津波1)

図 1-3 最大水位上昇量分布図比較

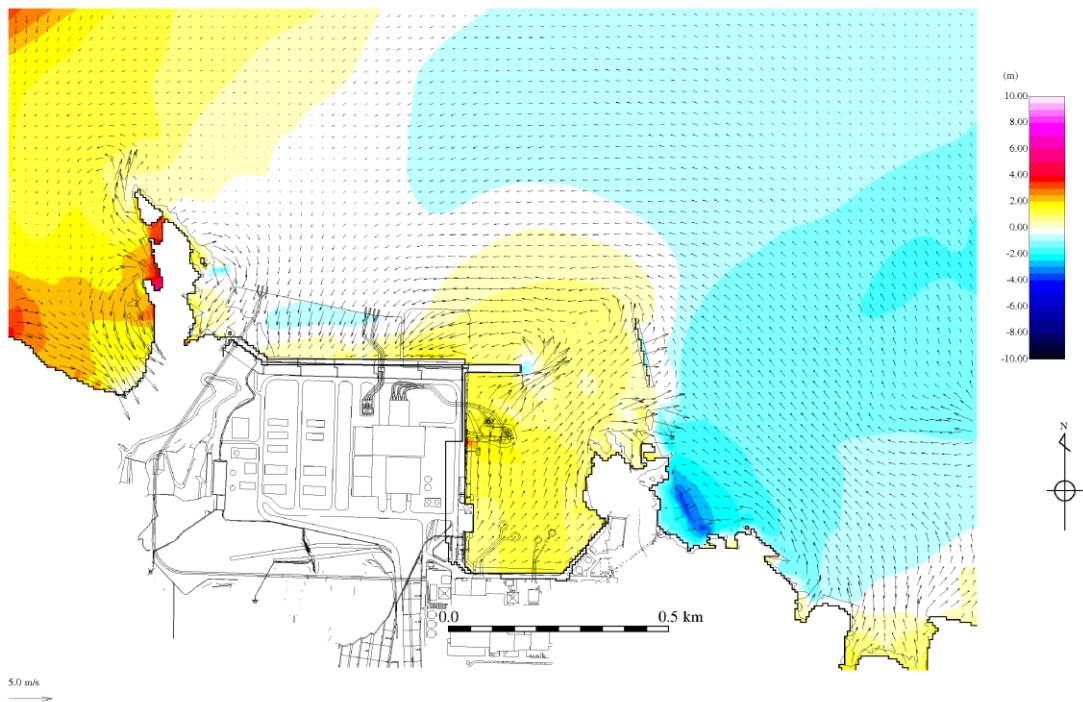


地震発生後 190 分（消波ブロックをモデル化）

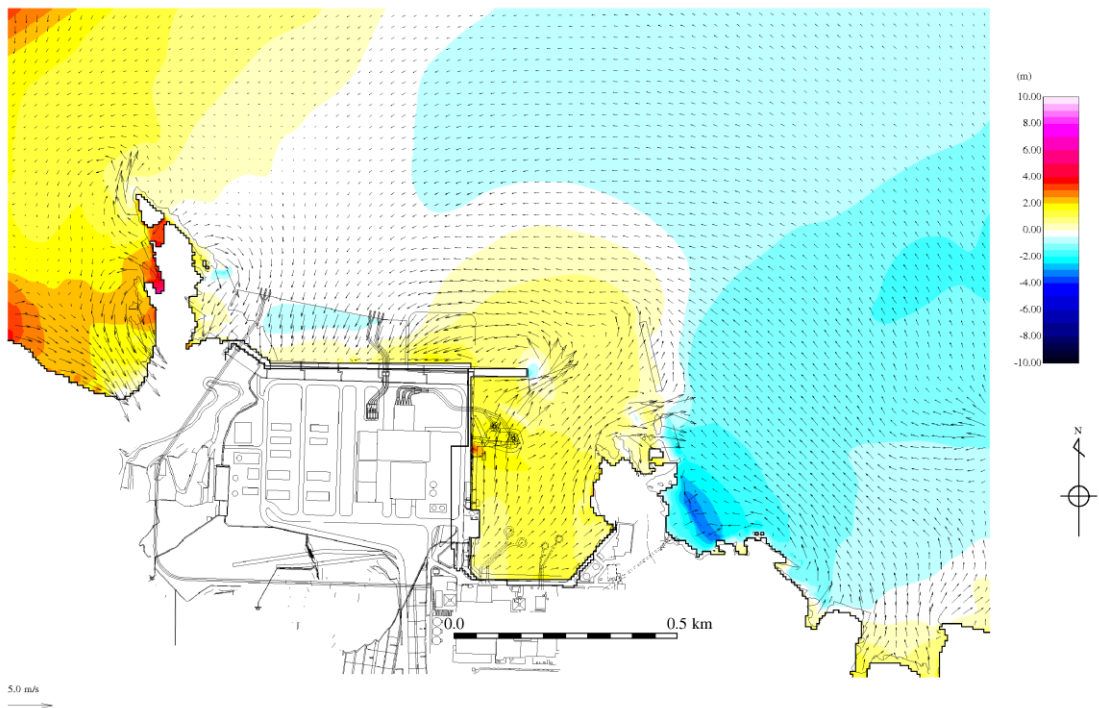


地震発生後 190 分（消波ブロックをモデル化しない）

図 1-4(1) 流向・流速分布図比較

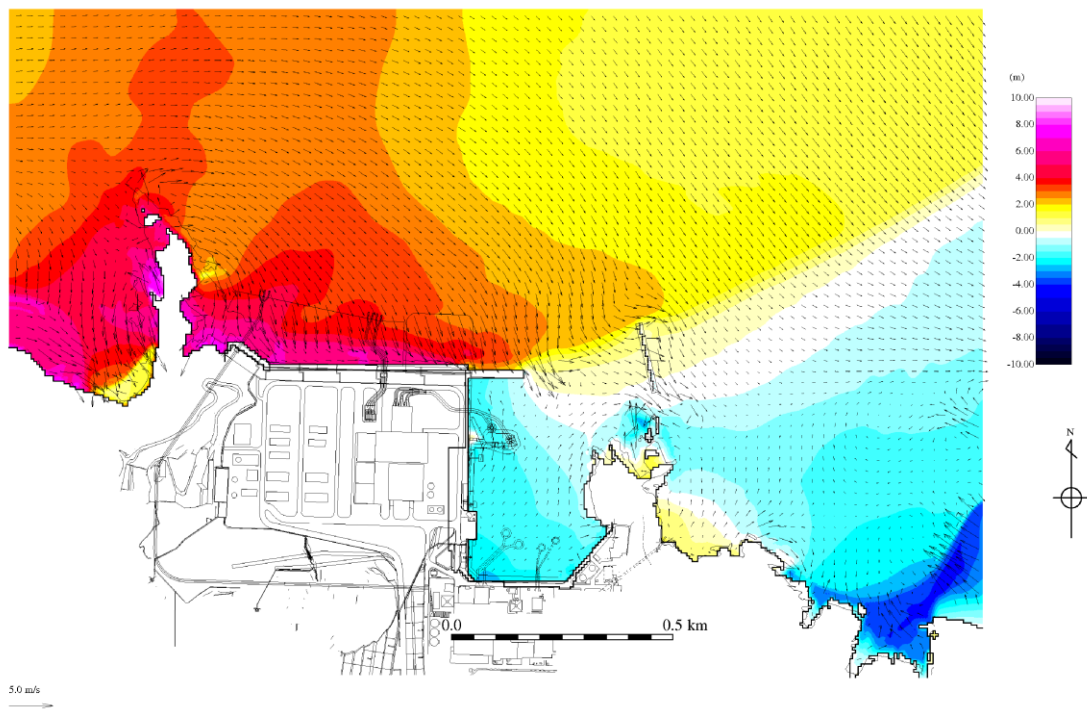


地震発生後 191 分（消波ブロックをモデル化）

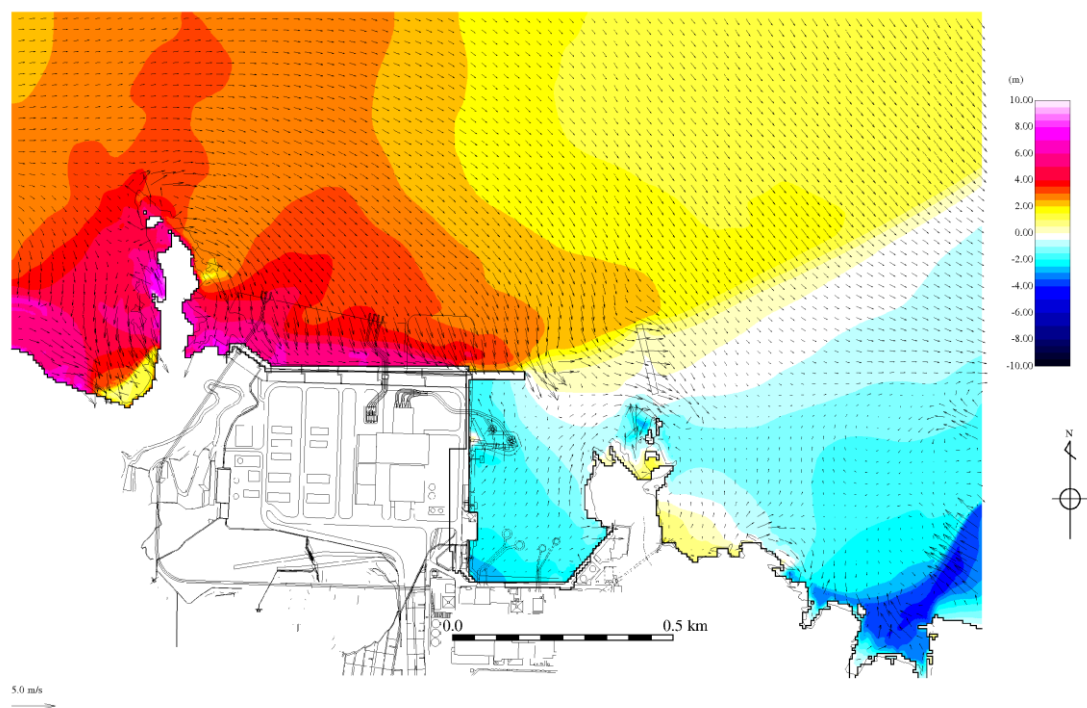


地震発生後 191 分（消波ブロックをモデル化しない）

図 1-4(2) 流向・流速分布図比較

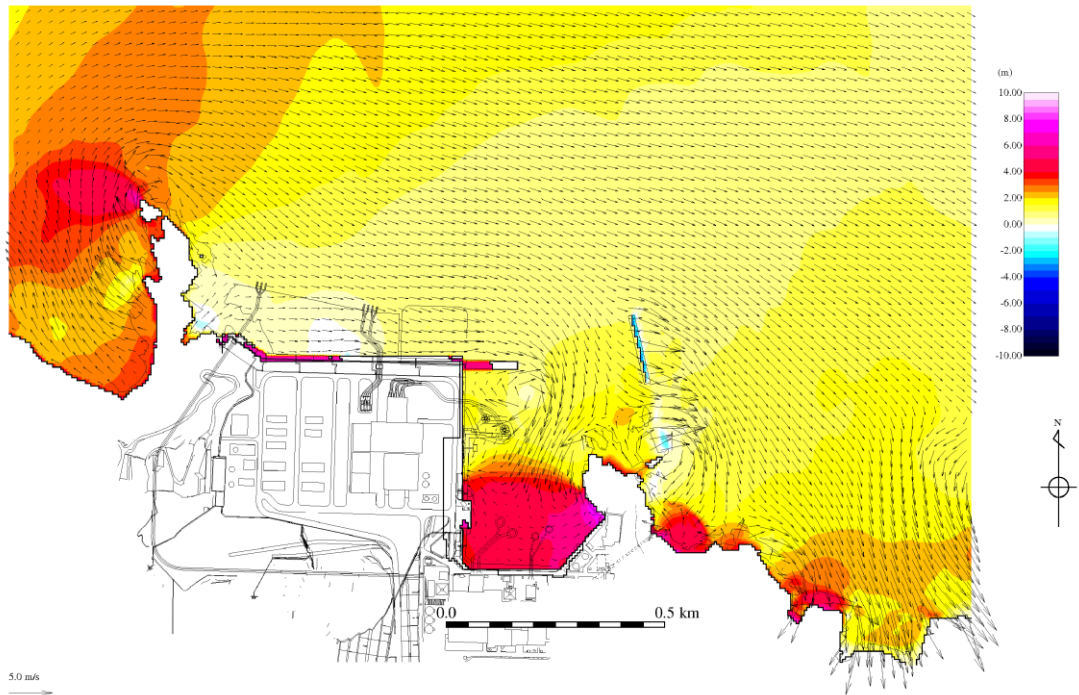


地震発生後 192 分（消波ブロックをモデル化）

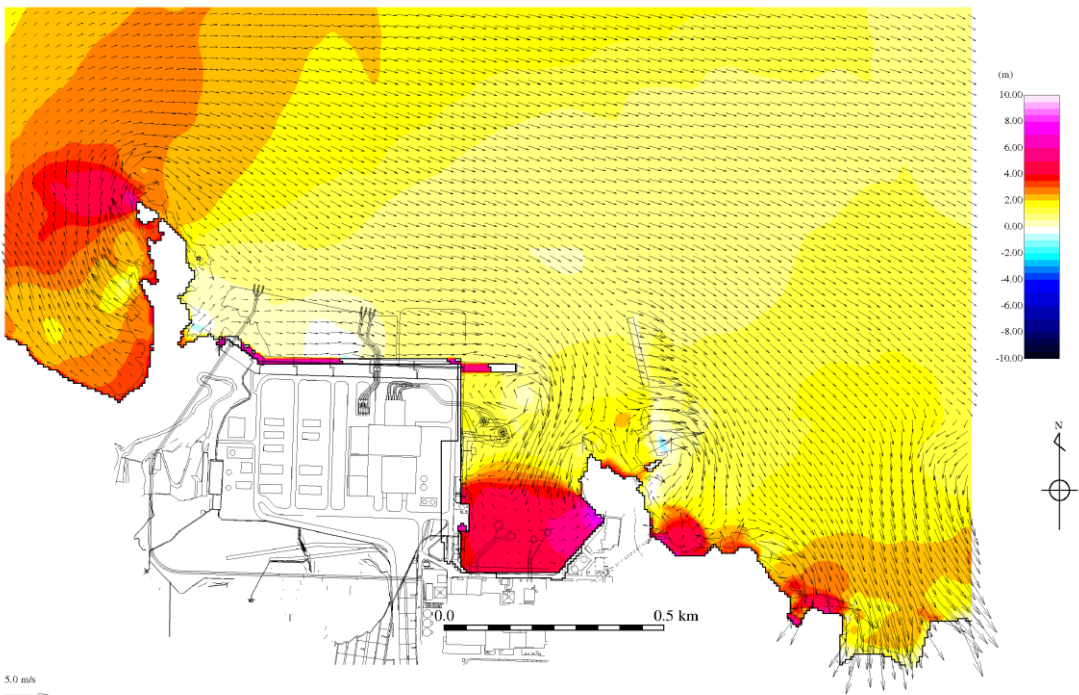


地震発生後 192 分（消波ブロックをモデル化しない）

図 1-4(3) 流向・流速分布図比較



地震発生後 193 分（消波ブロックをモデル化）



地震発生後 193 分（消波ブロックをモデル化しない）

図 1-4(4) 流向・流速分布図比較

1.7 入力津波の流路縮小工による水位低減効果の
考慮について

1.7 入力津波の流路縮小工による水位低減効果の考慮について

(1) 流路縮小工による水位低減効果に関する検討の方針

1号機取水管端部に設置する流路縮小工について、設置前後の管路解析結果を比較することにより、その水位低減効果を確認する。1号機取水口、取水管及び取水槽の平面図、断面図及び管路解析モデルについては、「1.4 管路解析のモデルについて」に示す。

(2) 計算条件

管路解析の計算条件については、「1.4 管路解析のモデルについて」に示す。流路縮小工は、1号機取水槽と取水管の境界において、急縮・急拡損失として考慮する。なお、検討対象は基準津波1, 2, 4及び5とする。

(3) 計算結果

流路縮小工設置前後の1号機取水槽における入力津波高さを比較した結果を表1.7-1に示す。この結果より、流路縮小工設置による効果として、入力津波高さが平均で約0.9m低減すること、また、最高水位EL7.0mに外郭防護の裕度評価において参照する高さである0.64mを考慮しても、1号機取水槽の天端高さであるEL8.80mを越えないことを確認した。

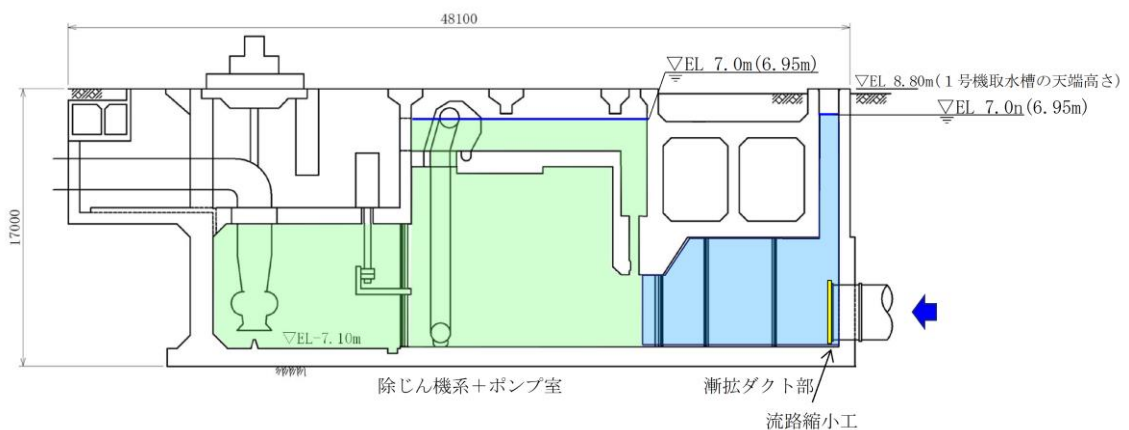
1号機取水槽の浸水範囲を図1.7-1に、最大水位上昇量を示したケースの時刻歴波形を図1.7-2に示す。なお、流路縮小工設置前の取水槽の時刻歴波形を図1.7-3に示す。

表 1.7-1 基準津波による取水槽水位の結果

波源		防波堤 有無	貝付着 有無	循環水ポンプ 運転状況 ^{*1}	入力津波高さ EL (m)	
					1号機取水槽	
					流路縮小工設置後 ^{*2}	(参考) 流路縮小工設置前
日本海 東縁部	基準津波 1	有り	有り	停止	6.3	7.2
			無し	停止	6.4	7.7
		無し	有り	停止	6.8	8.2
			無し	停止	7.0	9.2
	基準津波 2	有り	有り	停止	6.0	6.8
			無し	停止	6.1	7.3
	基準津波 5	無し	有り	停止	6.4	7.6
			無し	停止	6.7	8.1
海域活 断層	基準津波 4	有り	有り	停止	2.7[2.61]	3.0
			無し	停止	2.7[2.68]	3.0
		無し	有り	停止	2.5	3.4
			無し	停止	2.7[2.67]	3.8
	海域活断層 上昇側最大と なるケース	有り	有り	停止	2.5	2.6
			無し	停止	2.5	2.6
		無し	有り	停止	2.5	3.2
			無し	停止	2.6	3.5

注記*1：1号機取水槽は流路縮小工を設置することにより、循環水ポンプに必要な通水量が確保できないことから運転は行わない。

*2：下線を引いた箇所が日本海東縁部及び海域活断層それぞれの最大ケース



注：漸拡ダクト部，除じん機系+ポンプ室の最高水位（括弧内の数値は小数第二位まで記載）を図に示す。（基準津波 1，防波堤無し，貝付着無し）

図 1.7-1 1号機取水槽流路縮小工による浸水範囲

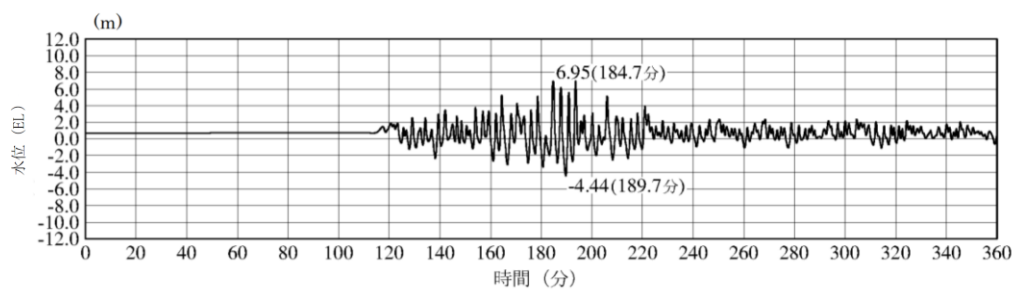


図 1.7-2 流路縮小工設置後の 1 号機取水槽における時刻歴波形
(基準津波 1, 防波堤無し, 貝付着無し)

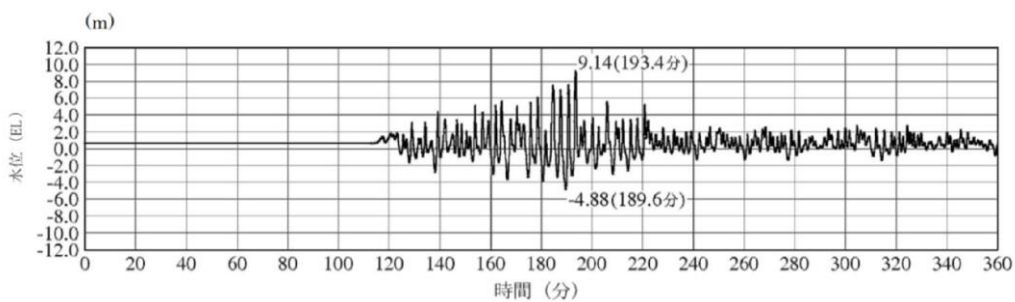


図 1.7-3 流路縮小工設置前の 1 号機取水槽における時刻歴波形
(基準津波 1, 防波堤無し, 貝付着無し)

(参考資料 1)

1号機取水槽に設置する流路縮小工に関する水理模型実験について

(1) 概要

1号機取水槽に設置する流路縮小工について、生じる損失水頭は電力土木技術協会(1995)⁽¹⁾、作用する流水圧は日本港湾協会(2018)⁽²⁾に基づいて設定している。

損失水頭の算定に用いる損失係数及び流水圧の算定で用いる抗力係数の設定値の妥当性を、水理模型実験により確認する。

模型実験イメージ図を図1-1に、流路縮小工の構造概要図を図1-2に、損失水頭及び流水圧の算定式を表1-1に示す。

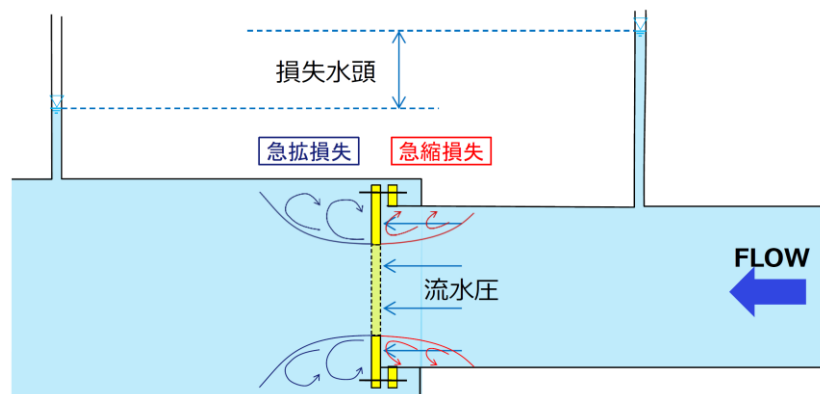


図 1-1 模型実験イメージ図

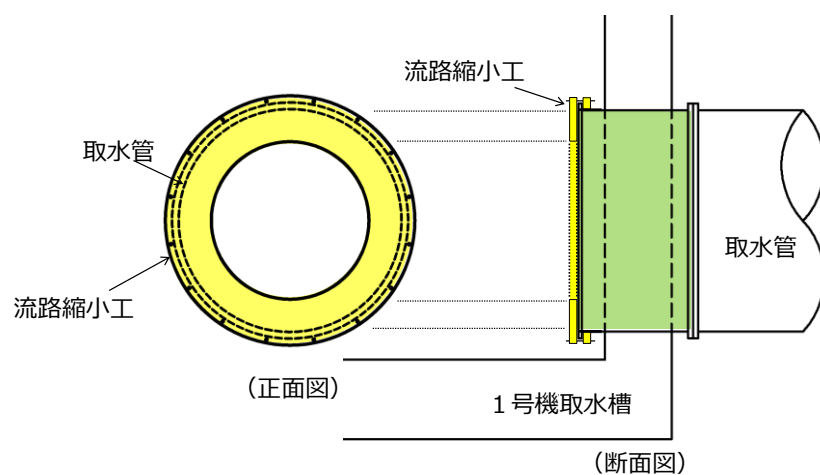


図 1-2 流路縮小工の構造概要図

表 1-1 損失水頭及び流水圧の算定式

項目	算定式*
損失水頭	$h = f \frac{v^2}{2g}$ <p>h: 損失水頭 (m), f: 損失係数, v: 流速 (m/s), g: 重力加速度 (m/s²)</p>
流水圧	$F_d = \frac{1}{2} C_D \rho_0 A U^2$ <p>F_d: 物体に作用する流れ方向の抗力 (kN), C_D: 抗力係数, ρ_0: 水の密度 (t/m³), A: 流れの方向の物体の投影面積 (m²), U: 流速 (m/s)</p>

注記*: 下線部が妥当性を確認するパラメータ

(2) 実験条件

津波による最大水位上昇時は満管状態の流れになることから、実験においても満管状態の流れを想定する。

また、模型実験の相似則はフルード則を適用し、実験縮尺（幾何縮尺）は 1/10 程度とする。

実験条件の概要を表 1-2 に、実機とフルード則より設定した模型値を表 1-3 に示す。

表 1-2 実験条件の概要

実験条件	内 容
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 損失水頭 ・ 流水圧
流れ状態	管路流れ (満管状態の流れ)
流路縮小工開口率	50%
相似則	フルード則
実験縮尺	1/10 程度

表 1-3 実機とフルード則より設定した模型値

	実機	模型	備考
流量 (m ³ /s)	43.0	0.136	フルード則より $Q_m = Q_p / 10^{5/2} = Q_p / 316$ Q_m : 模型の流量, Q_p : 実機の流量
取水管口径 (m)	3.35	0.336	
流路縮小工口径 (m)	2.35	0.240	

(3) 実験模型

a. 模型範囲

模型により再現する範囲は、流路縮小工を含む 1 号機取水管 (東側) 約 40m 程度と 1 号機取水槽 (東側半分) とする。

1 号機取水槽の模型範囲を図 1-3 に示す。

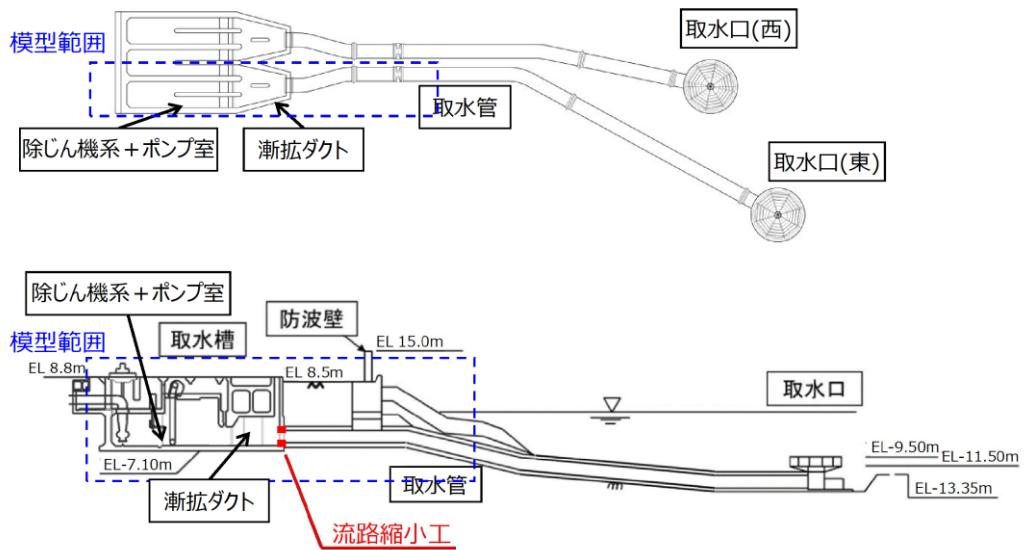


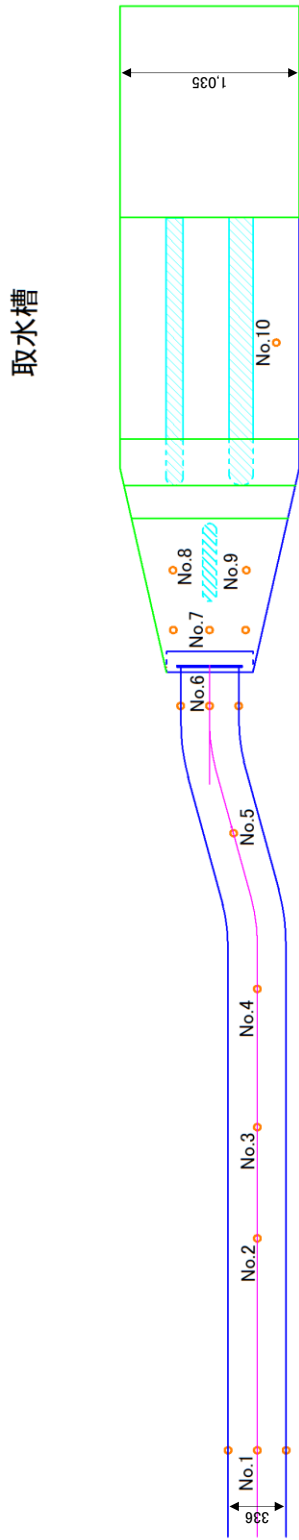
図 1-3 1 号機取水槽の模型範囲

b. 模型仕様

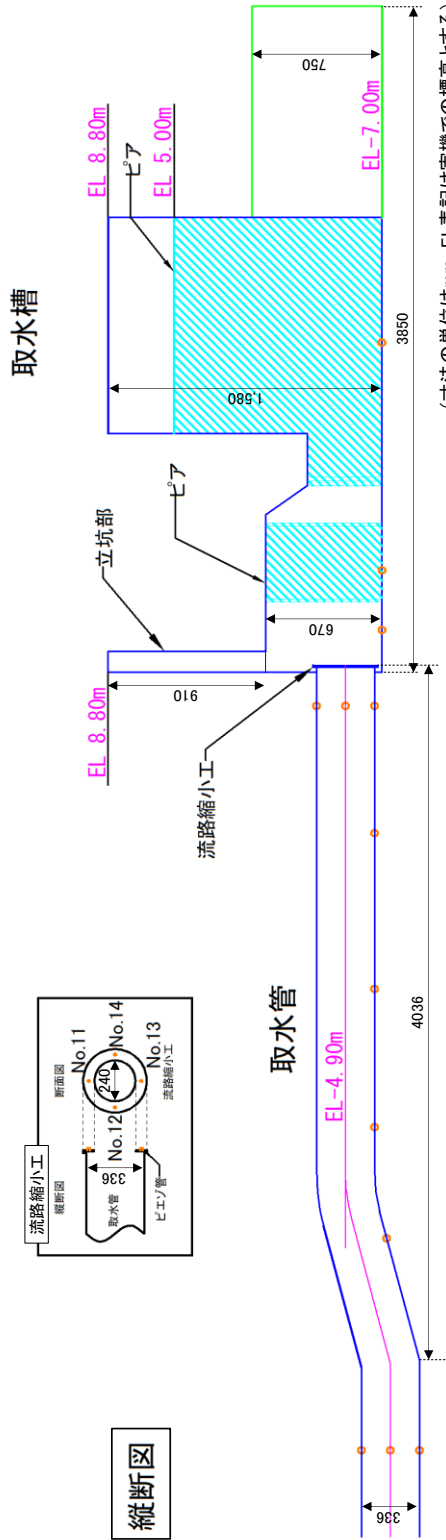
実験模型は、取水管長を約 4m、取水槽部を約 1.6m×約 1.0m×約 3.9m の大きさとする。また、模型内の 14 点 (No. 1~No. 14) において、水位及び圧力をマンメーターにより計測する。

実験模型の構造概要図を図 1-4 に、実験模型の写真を図 1-5 に示す。

平面図



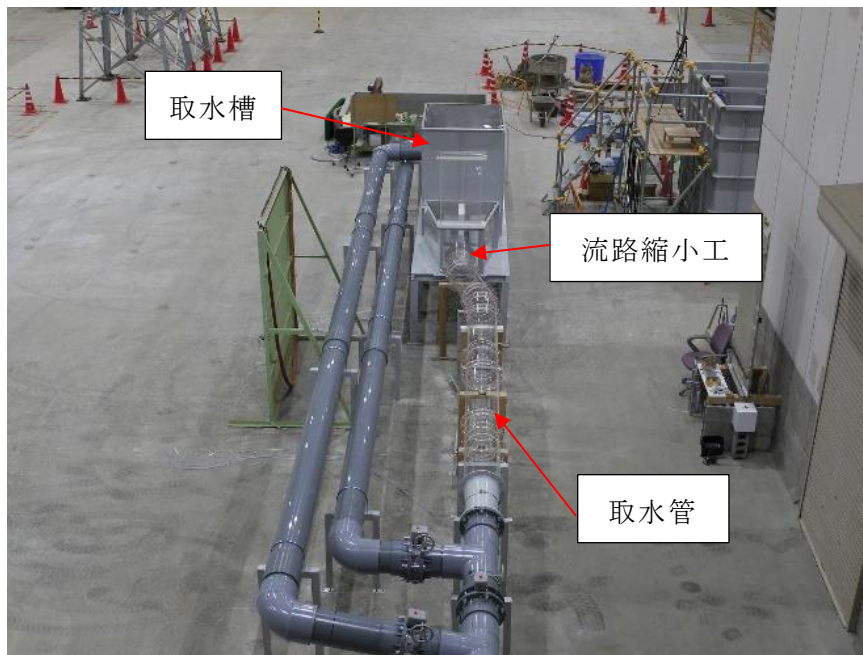
縦断面図



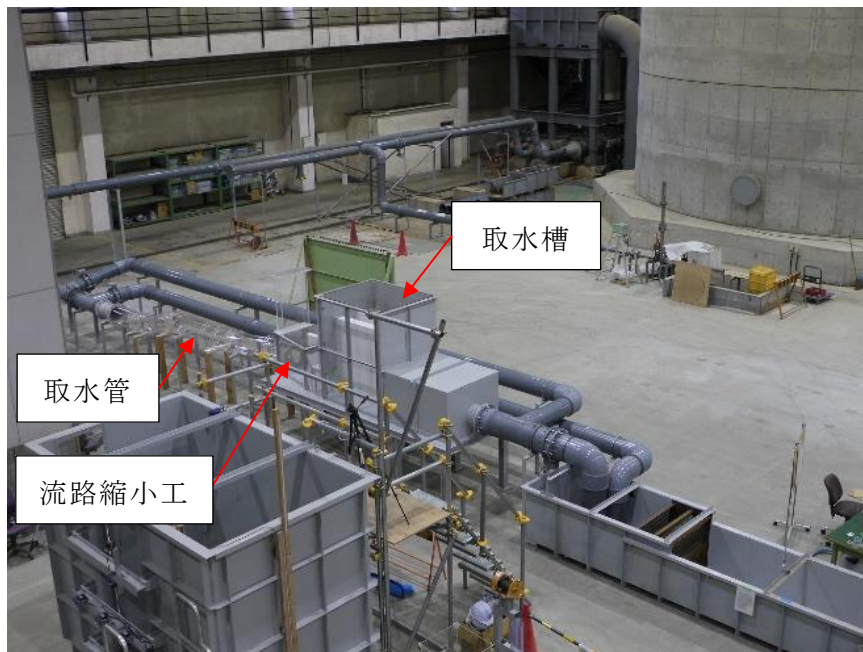
(寸法の単位はmm, EL表記は実機での標高とする)

- 線【床・側面(片方)・天板(立坑部付近以外)】は鉄製とする。
- -線はアクリル製とする。
- 線(ピア)は木製とする。

図 1-4 実験模型の構造概要図

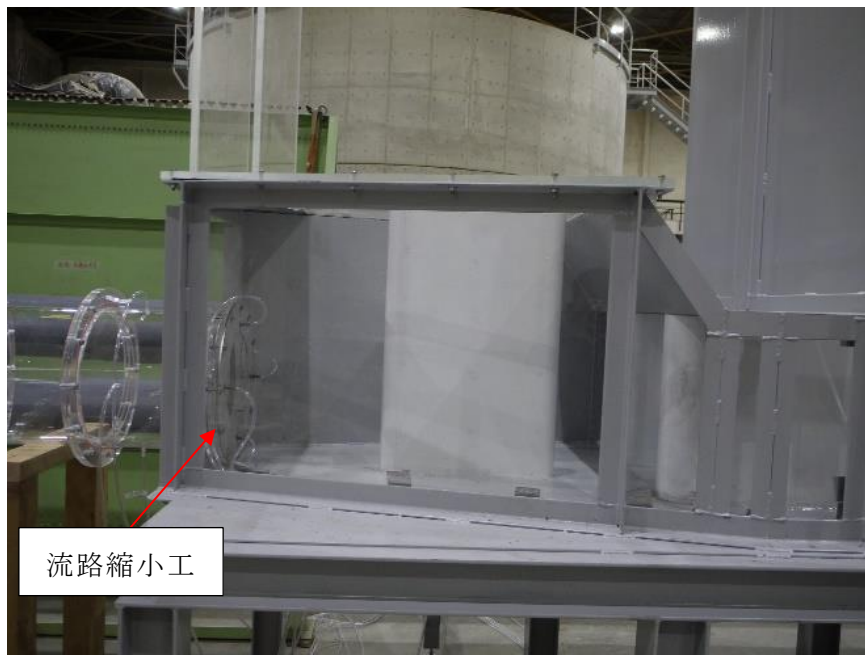


取水管～取水槽（上流より）



取水管～取水槽（下流より）

図 1-5-1 実験模型写真

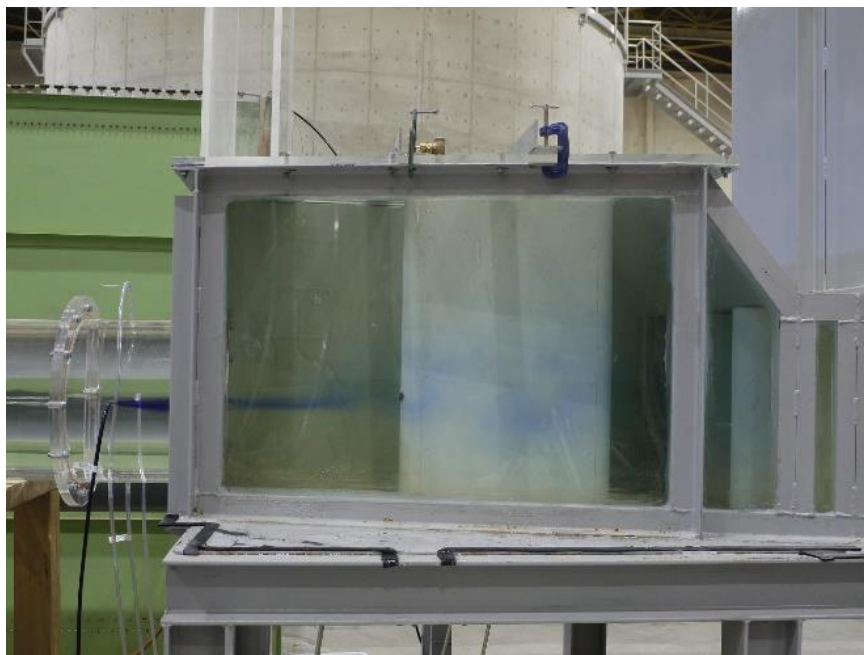


流路縮小工設置位置付近

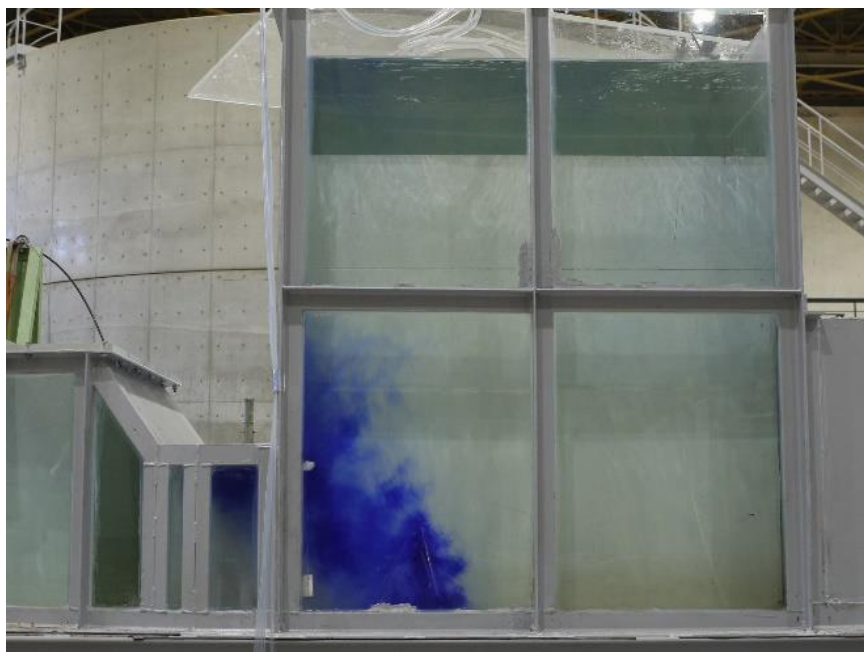


取水槽

図 1-5-2 実験模型写真



流路縮小工設置位置付近（通水時）



取水槽（通水時）

注：ウォーターブルーにより流況を可視化

図 1-5-3 実験模型写真

(4) 水理模型実験の結果

実験結果より，流路縮小板上流（No. 6）と流路縮小板下流（No. 7）の全水頭の差から求まる損失水頭は9.9mであることから，流路縮小工設置箇所の損失係数は2.15となった。

また，流路縮小板の4箇所（No. 11～No. 14）における流水圧の最大値は6.0kN/m²であることから，流路縮小板の抗力係数は0.51となった。

各測点における水頭の分布図を図 1-6 に，流路縮小板における流水圧を図 1-7 に示す。

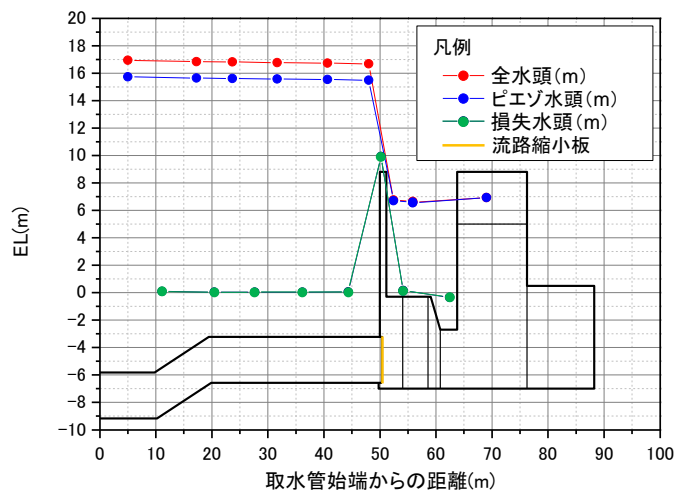
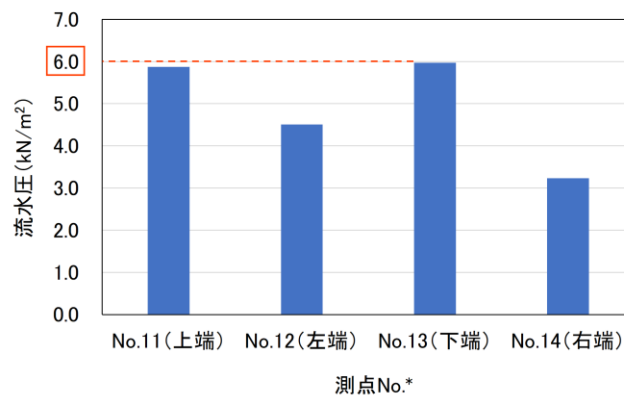


図 1-6 実験模型における水頭分布図



注記*：括弧内は下流側から見た位置を示す。

図 1-7 流路縮小板における流水圧

(5) 設定値の妥当性

管路解析の算定に用いる損失係数及び流水圧の算定で用いる抗力係数について、実験結果と比較し、その妥当性を以下のとおり検討した。比較結果を表 1-4 に示す。

a. 損失係数

流路縮小工設置箇所の損失係数は、急縮・急拡の損失係数として 1.04 を設定値としている。一方、実験結果に基づく算定値は 2.15 であることから、設定値よりも大きい。この値は、円管内オリフィス（開口率 50%）の損失係数^{(3), (4)}である約 2.1 とほぼ同値となることから、実験では円管内オリフィス相当の損失係数が算定されたと考える。

以上のことから、急縮・急拡の損失係数である設定値は、実験結果に基づく算定値よりも小さく、保守的な値であることを確認した。

b. 抗力係数

流路縮小板の抗力係数は、日本港湾協会（2018）で示される抗力係数の標準値のうち、最大値である平板（縦横比=∞）の抗力係数の 2.01 を設定値としている。一方、実験結果に基づく算定値は 0.51 であることから、設定値よりも小さい。流路縮小板は中空円形であり、流れに対する抗力が平板（縦横比=∞）よりも小さいことから、設定値よりも小さい抗力係数が算定されたと考える。

以上のことから、平板（縦横比=∞）の抗力係数である設定値は、実験結果に基づく算定値よりも大きく、保守的な値であることを確認した。

表 1-4 損失係数及び抗力係数の比較

	設定値	実験結果に基づく算定値
損失係数	1.04	2.15
抗力係数	2.01	0.51

(6) 参考文献

- (1) (一社) 電力土木技術協会 (1995) : 火力・原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版—
- (2) (公社) 日本港湾協会 (2018) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説
- (3) 立花規良・小池哲 (1997) : 管オリフィスを通る流れと損失, 福井大学工学部研究報告, 45 巻, 2 号, p. 339-355
- (4) 長谷川猛虎・平井英二 (1957) : 粘性流体のオリフィス流量計における差圧とレイノルズ数の関係について, 21 巻, 10 号, p. 660-665

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。

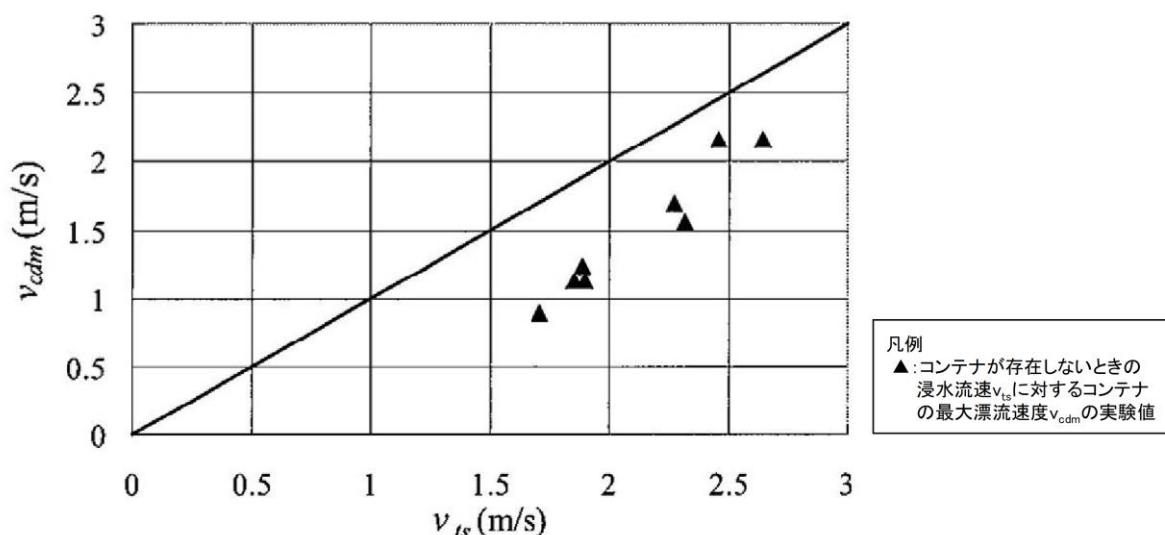


図 4.1-1 浸水流速 v_{ts} と最大漂流速度 v_{cdm} の関係

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。

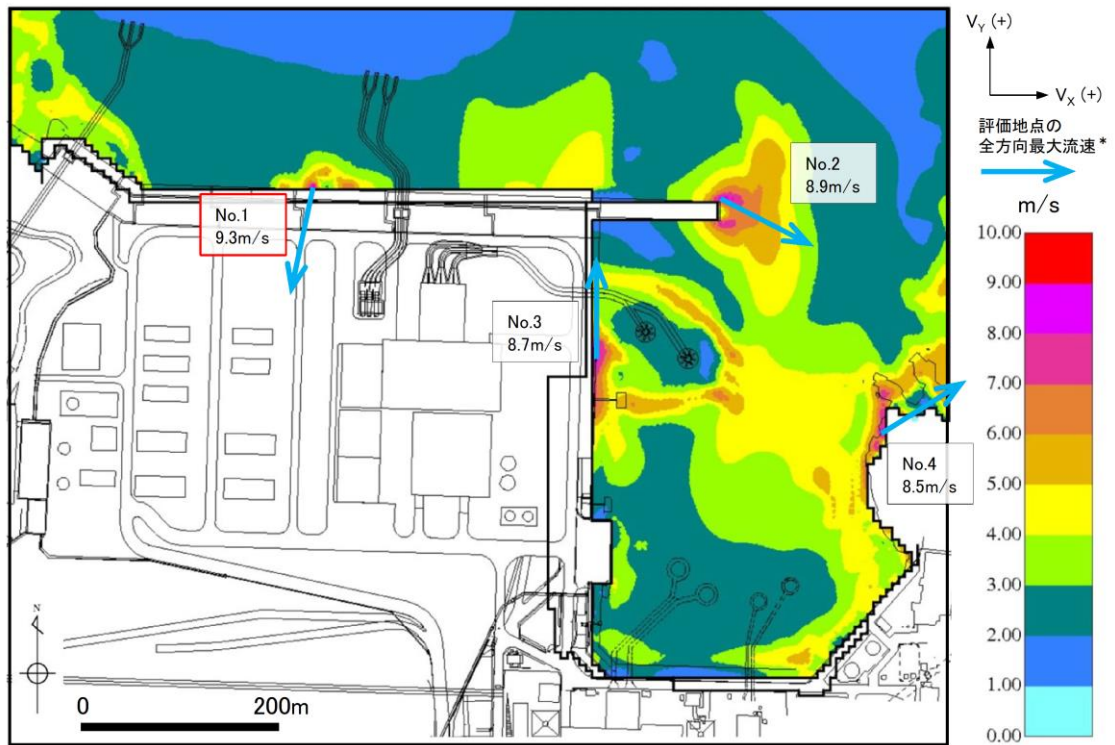
表 4.1-1 基準津波来襲時（日本海東縁部）における全方向最大流速

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)

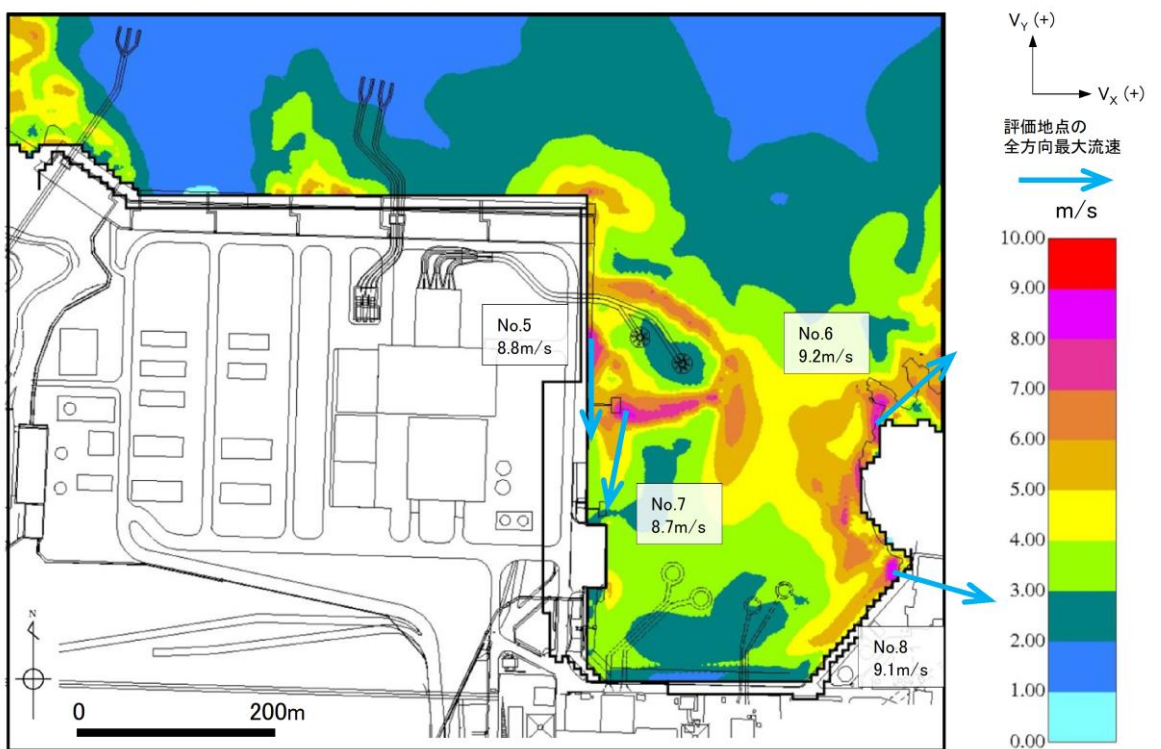


図 4.1-2(2) 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

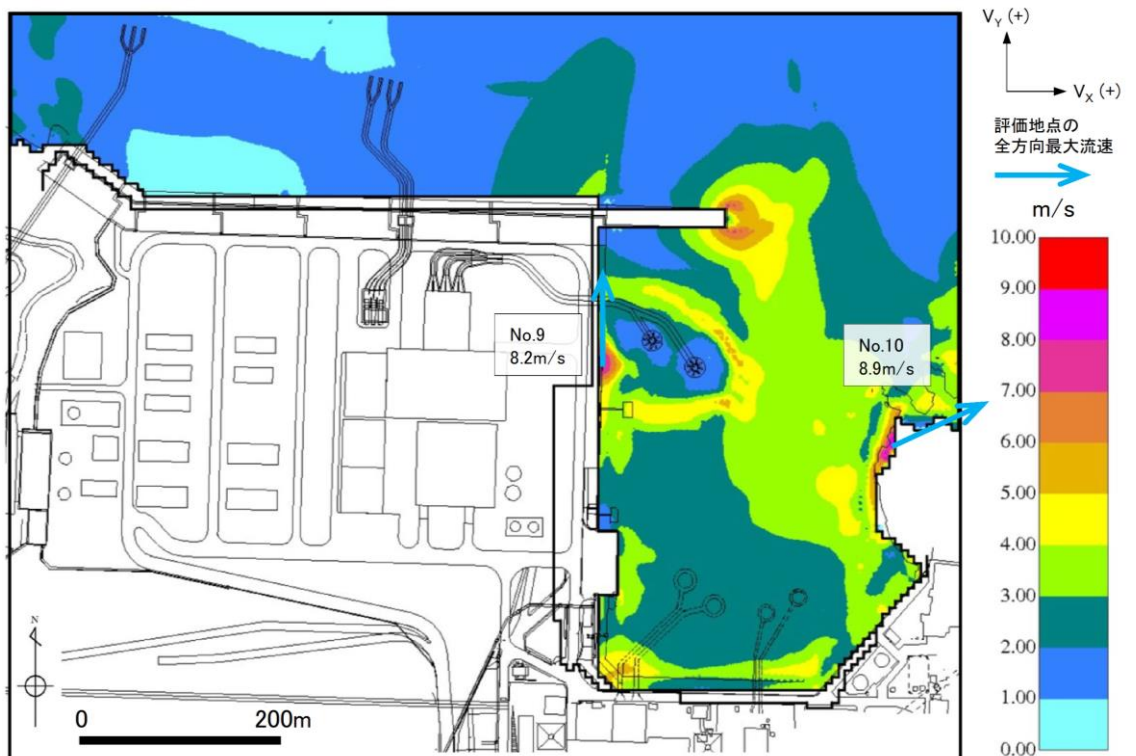


図 4.1-2(3) 基準津波 2 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

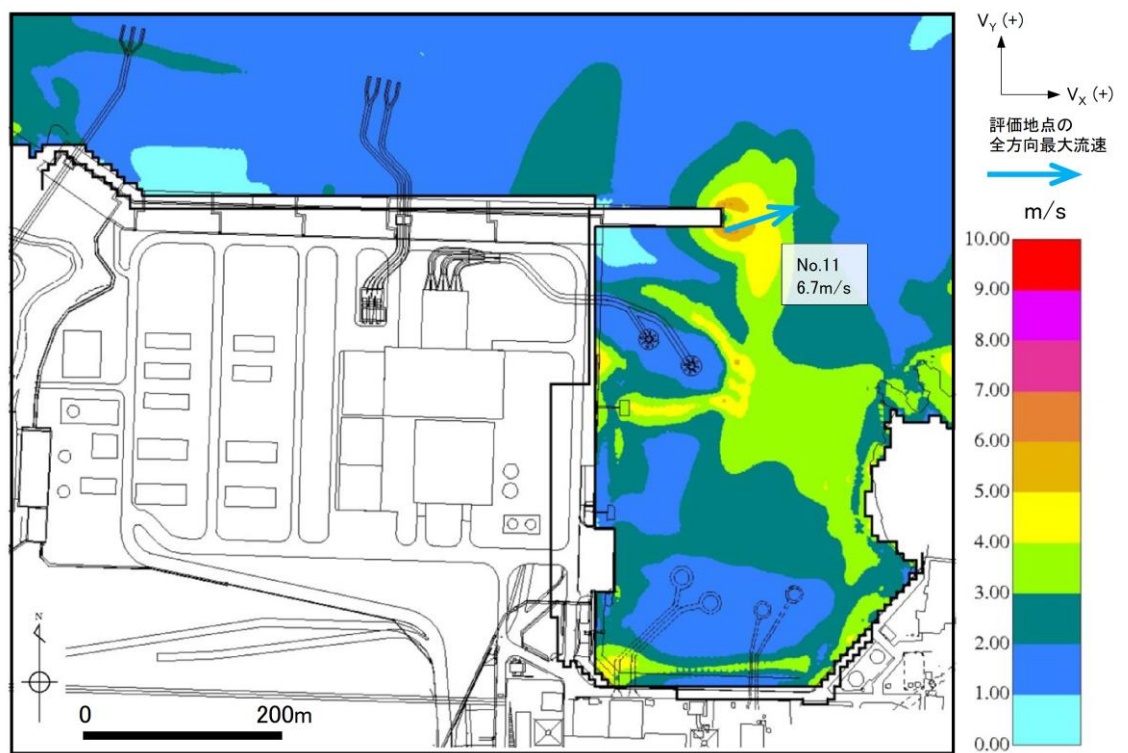


図 4.1-2(4) 基準津波 3 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

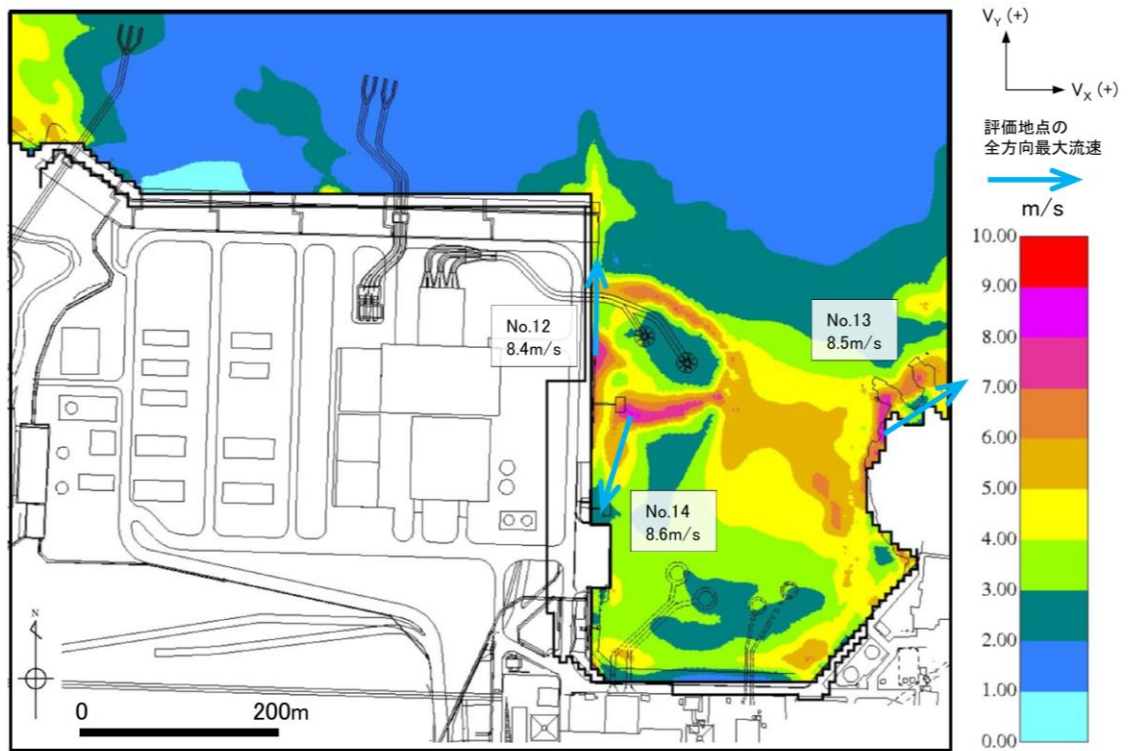


図 4.1-2(5) 基準津波 5 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

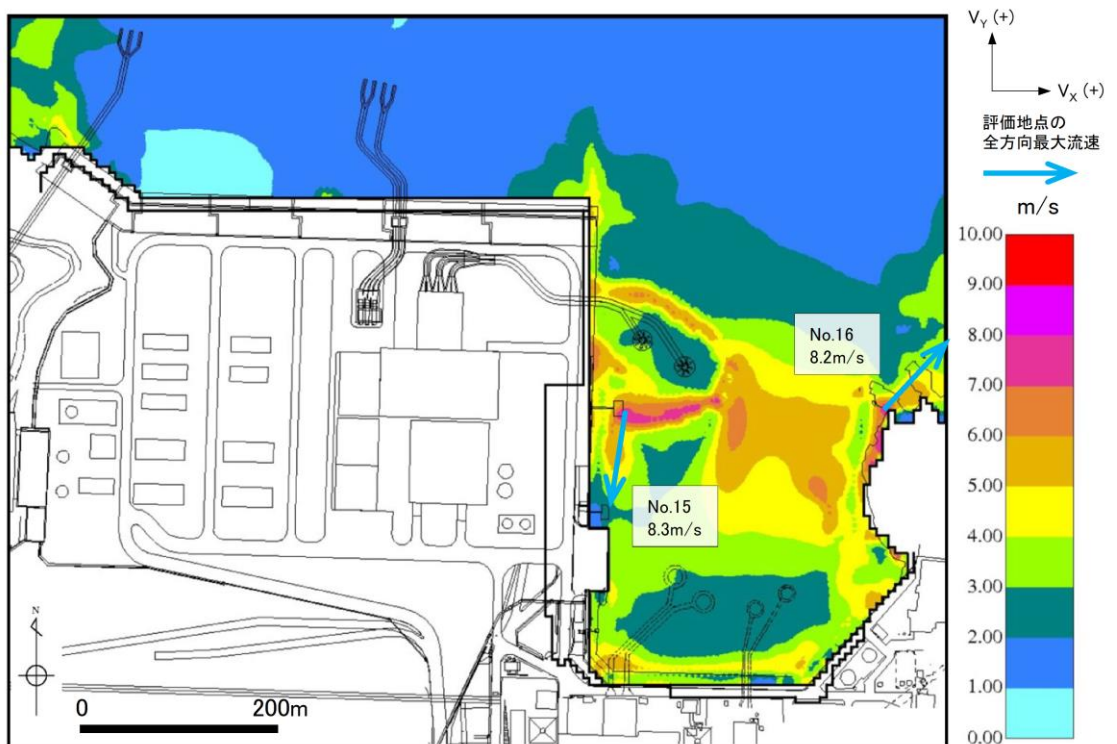


図 4.1-2(6) 基準津波 6 (沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

(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

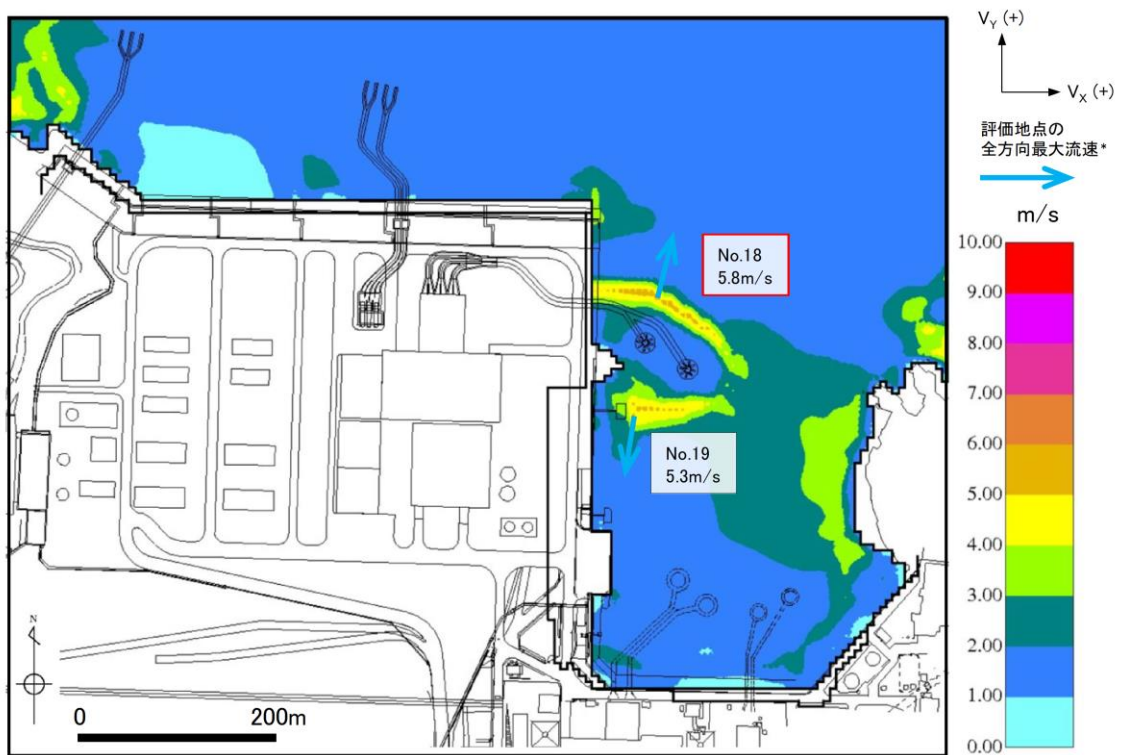
注1:各ケースの全方向最大流速地点及び全方向流速が5.0m/s以上のコンターの高まりから評価地点を選定している。

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)

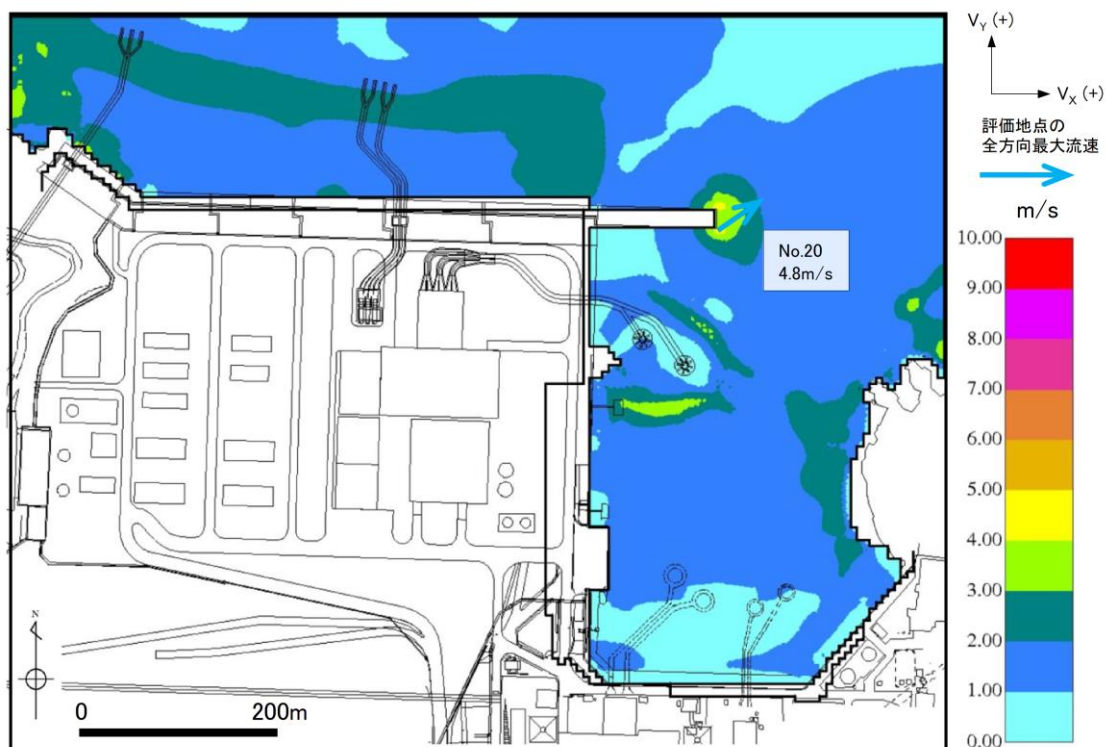


図 4.1-3(3) 海域活断層上昇側最大ケース（防波堤有り，沈下無し）
全方向最大流速分布（全時刻）

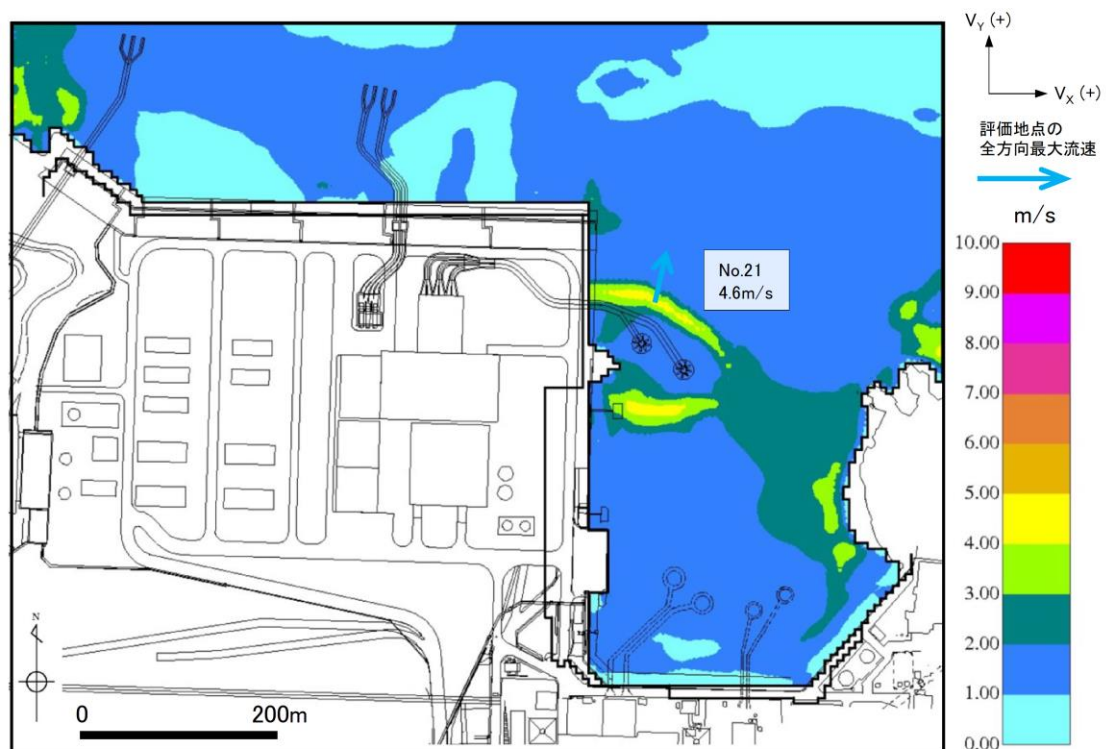
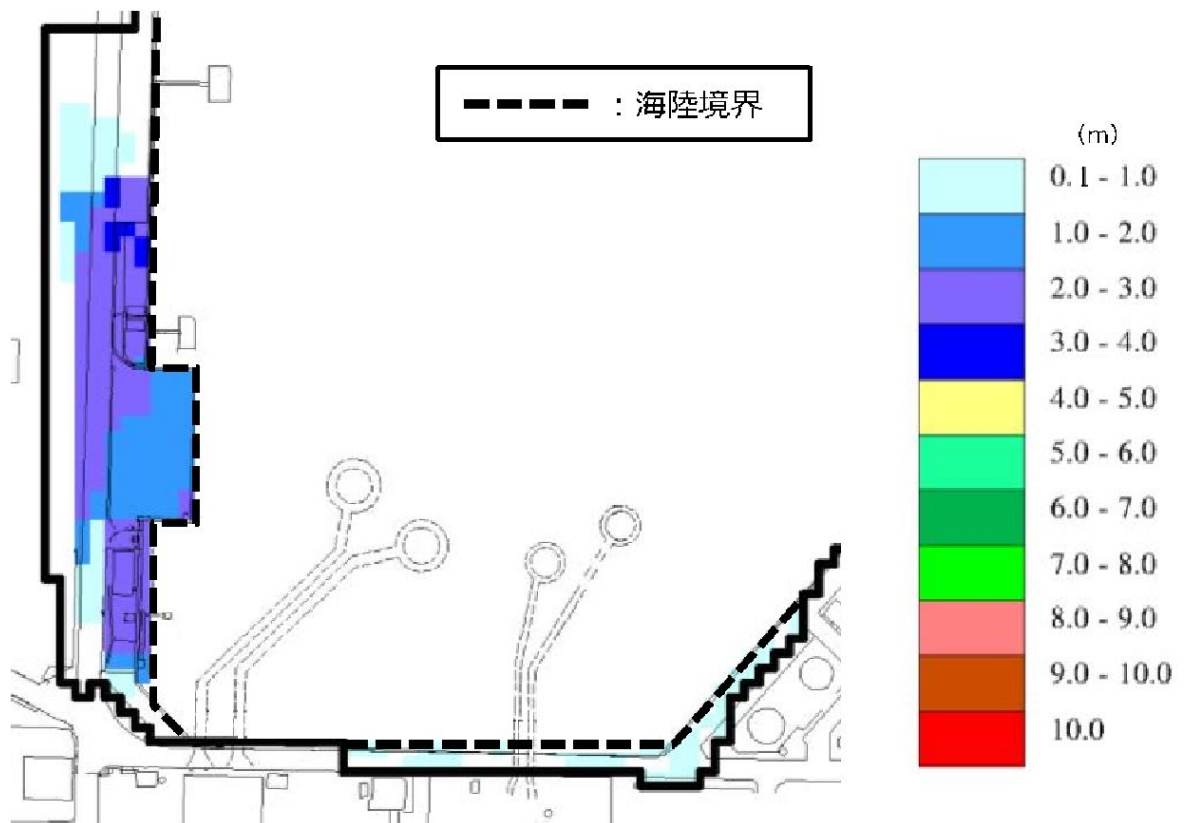


図 4.1-3(4) 海域活断層上昇側最大ケース（防波堤無し，沈下無し）
全方向最大流速分布（全時刻）

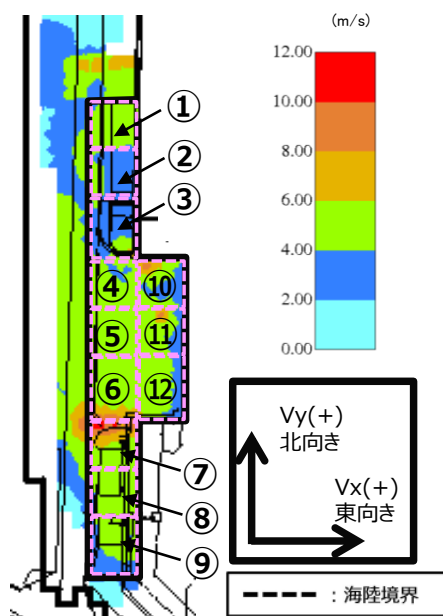
(4) 荷揚場周辺における漂流速度

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）

4.5 漂流物による衝突荷重の設定

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	6
4.5.3	衝突荷重として考慮する漂流物の選定	19
4.5.4	浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法	26
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	32
4.5.6	漂流物による衝突荷重の算定	34

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

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。

なお，屋外排水路逆止弁は，防波壁よりも敷地側又は地中に設置しているため，漂流物による衝突荷重を考慮しないこととする。漂流防止装置については，日本海東縁部の地震に想定される津波来襲時には，燃料等輸送船を緊急退避させることから評価は実施しないこととし，海域活断層の地震に想定される津波来襲時には，入力津波高さ以上の位置に設置するため，漂流物による衝突荷重を考慮しないこととする。

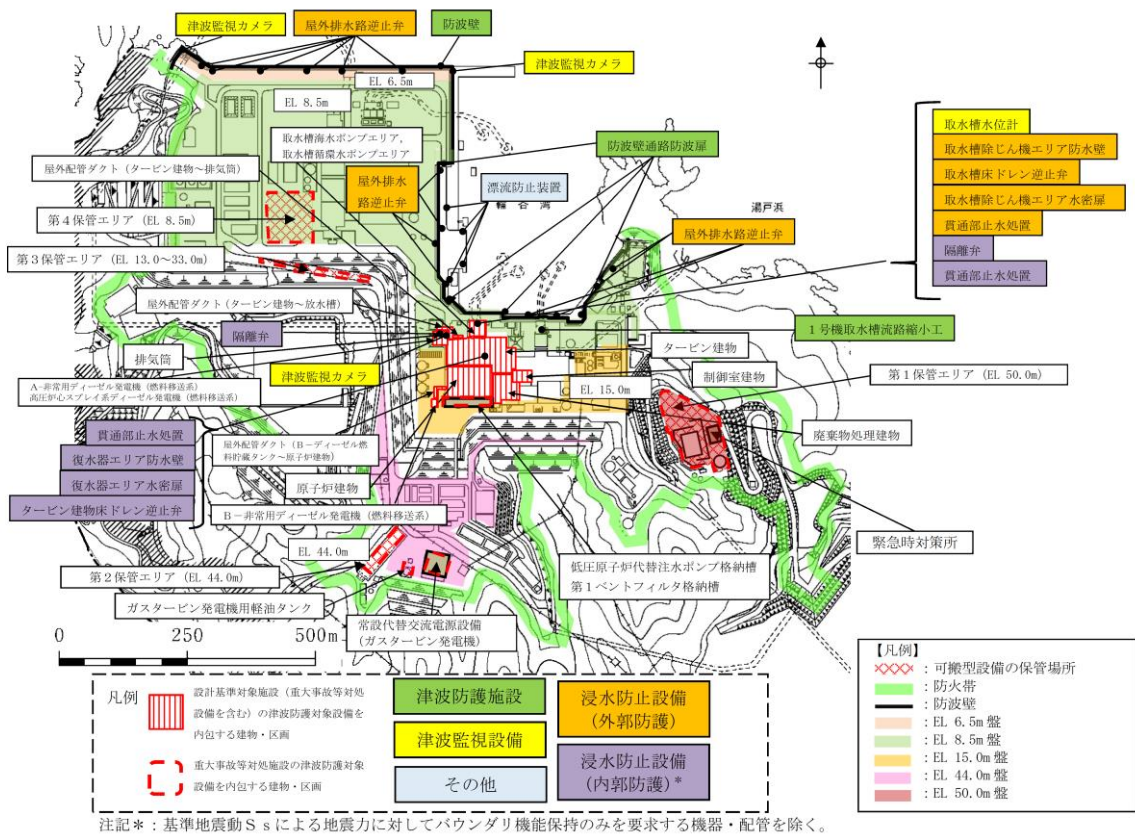


図 4.5.1-1 津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備及びその他の平面位置図

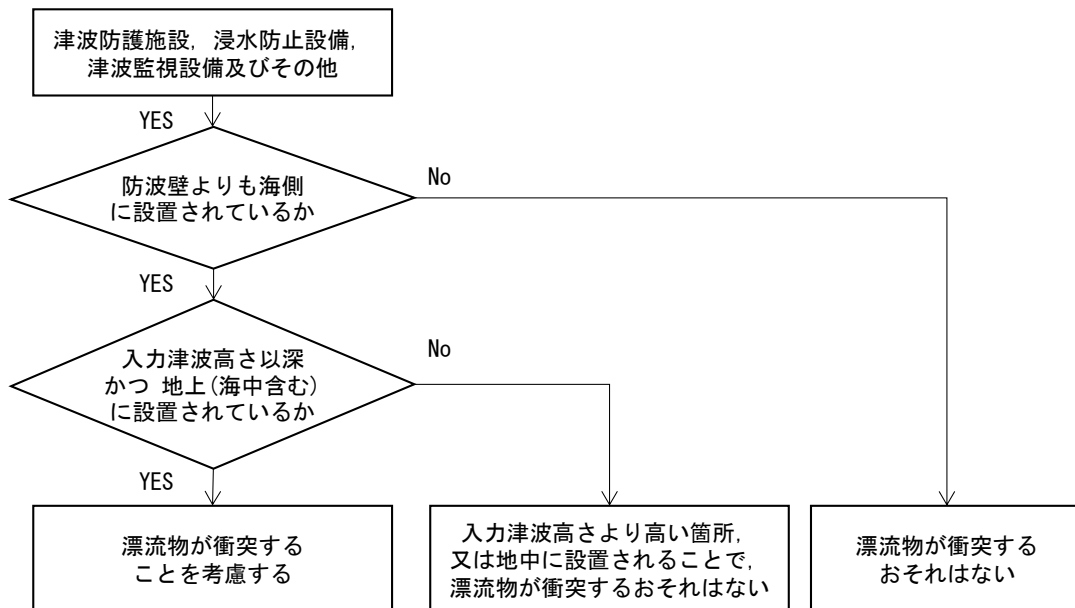


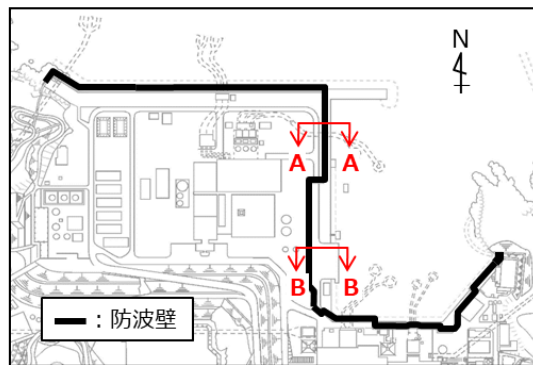
図 4.5.1-2 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定フロー

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

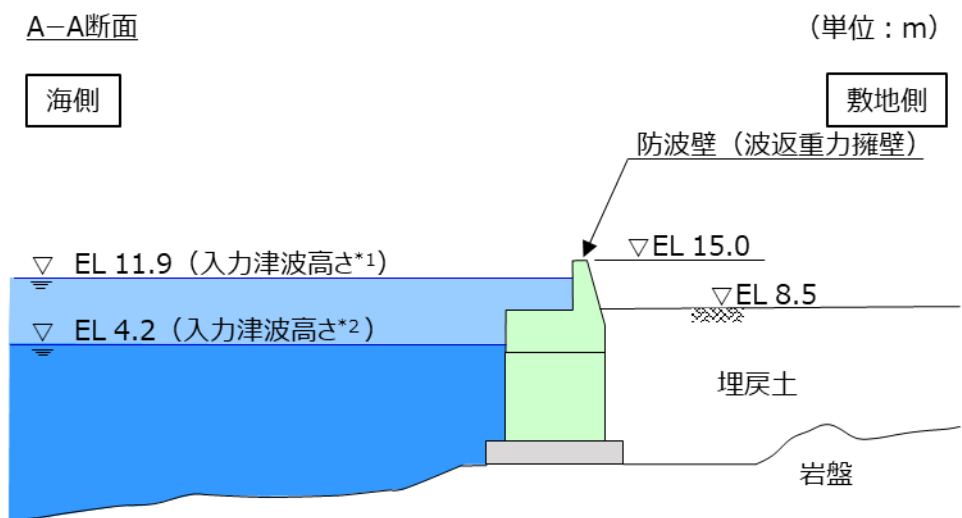
施設・設備		防波壁よりも海側に設置されているか	入力津波高さ 以深に設置されているか		地上(海中含む)に設置されているか	評価 (衝突荷重の考慮)	
津波防護施設	防波壁(波返重力擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以深		考慮する	
	防波壁 (多重鋼管杭式擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以深		考慮する	
	防波壁(逆T擁壁)	—	日本海東縁	以深	地上 (天端標高 EL 15.0m)	考慮する	
			海域活断層	以上		—	考慮しない
防波壁通路防波扉	—	日本海東縁	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	
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	—	地上 (下端標高EL 15.0m)	考慮しない
取水槽水位計		敷地側	—	—	考慮しない		
その他	漂流防止装置		海側	日本海東縁	以深	地上 (下端標高EL 6.0m)	—*
				海域活断層	以上		—

注記*：日本海東縁部の地震に想定される津波来襲時には、燃料等輸送船を緊急退避させるため、機能維持に期待しないことから、評価を実施しない。

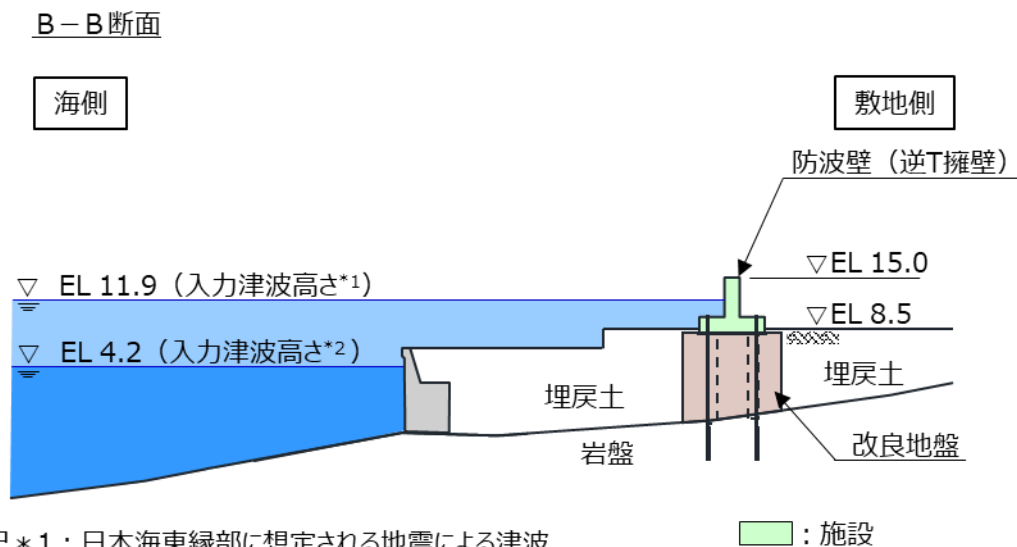
KEY-PLAN



【防波壁（波返重力擁壁）】



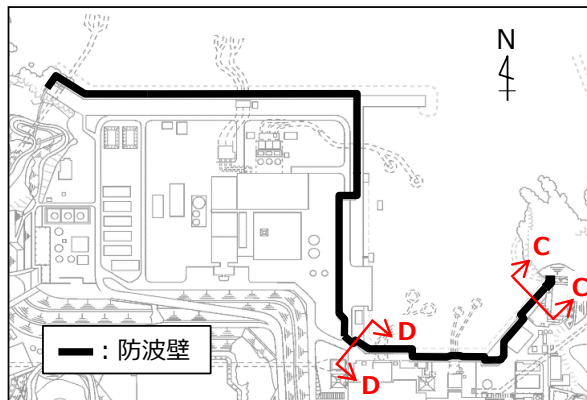
【防波壁（逆T擁壁）】



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

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



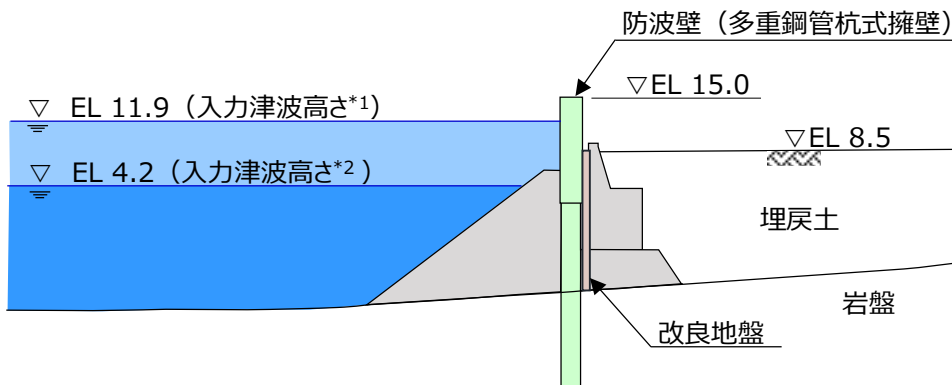
【防波壁（多重鋼管杭式擁壁）】

C-C断面

海側

(単位：m)

敷地側

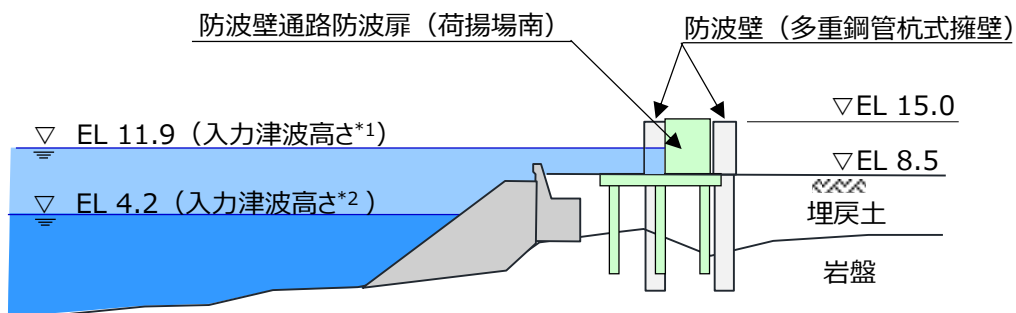


【防波壁通路防波扉（荷揚場南）】

D-D断面

海側

敷地側



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

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について」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。

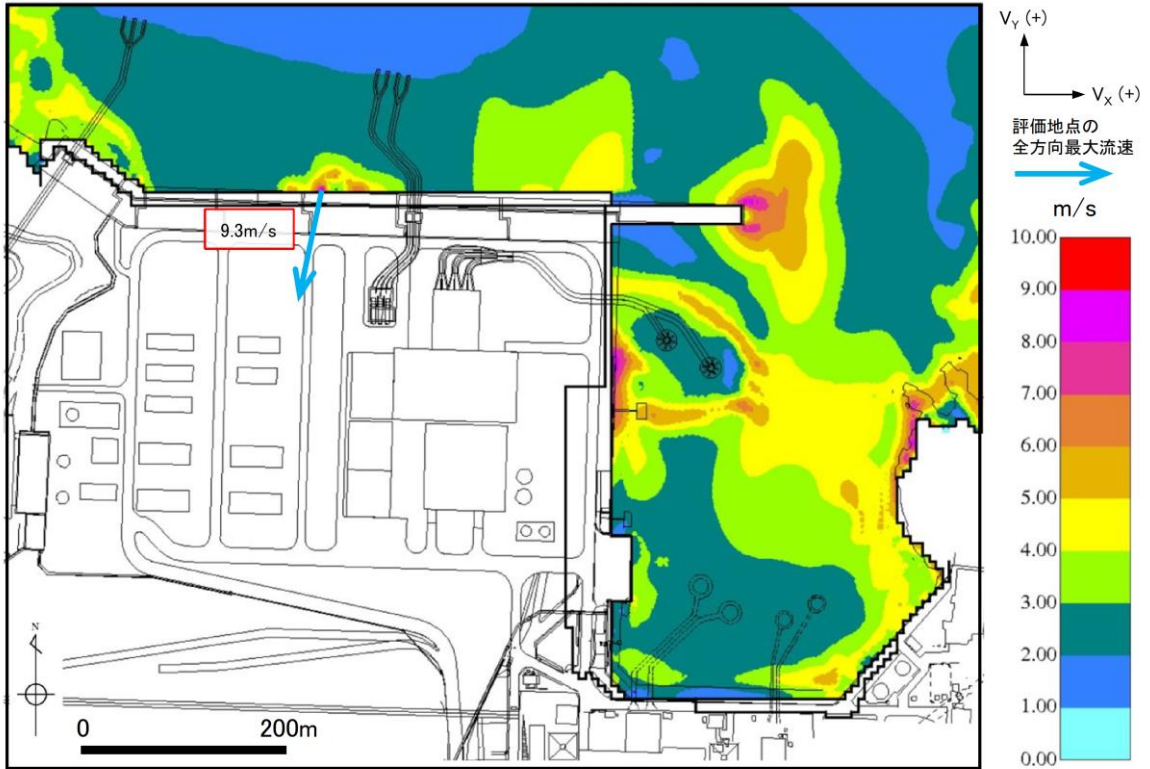


図 4.5.2-2 基準津波 1 (防波堤有り, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

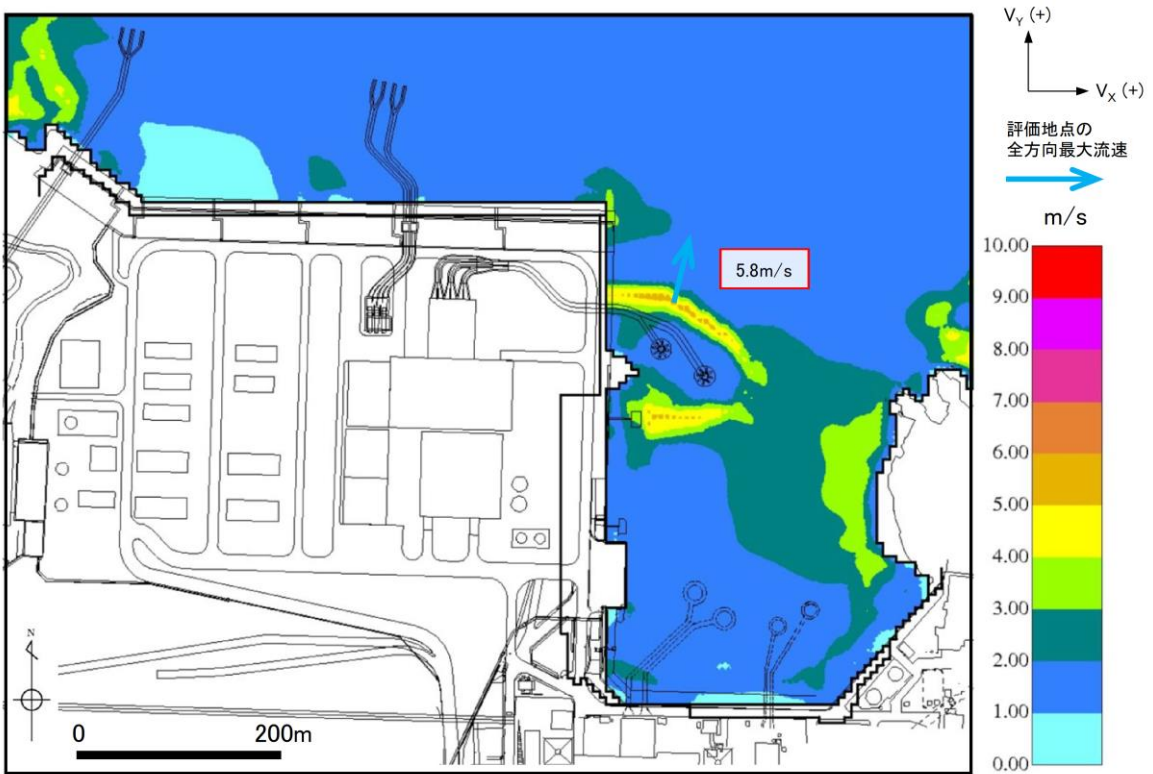


図 4.5.2-3 基準津波 4 (防波堤無し, 沈下無し) 全方向最大流速分布 (全時刻)

(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考えられる。

この押し波による最大浸水深は1.7mであり、その水位はEL6.7m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(EL7.5m)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(EL7.5m)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。

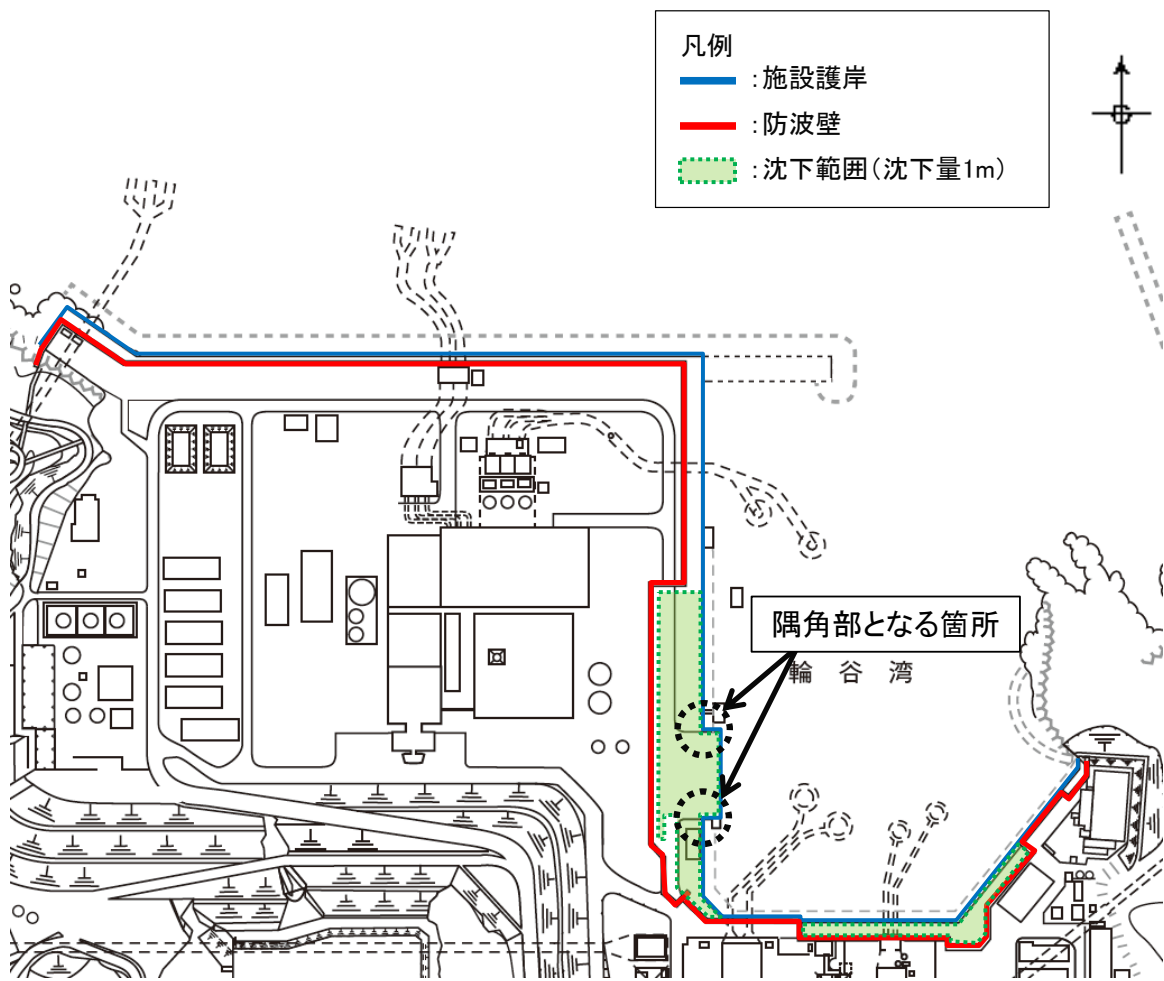


図 4.5.2-4 防波壁前面の沈下範囲

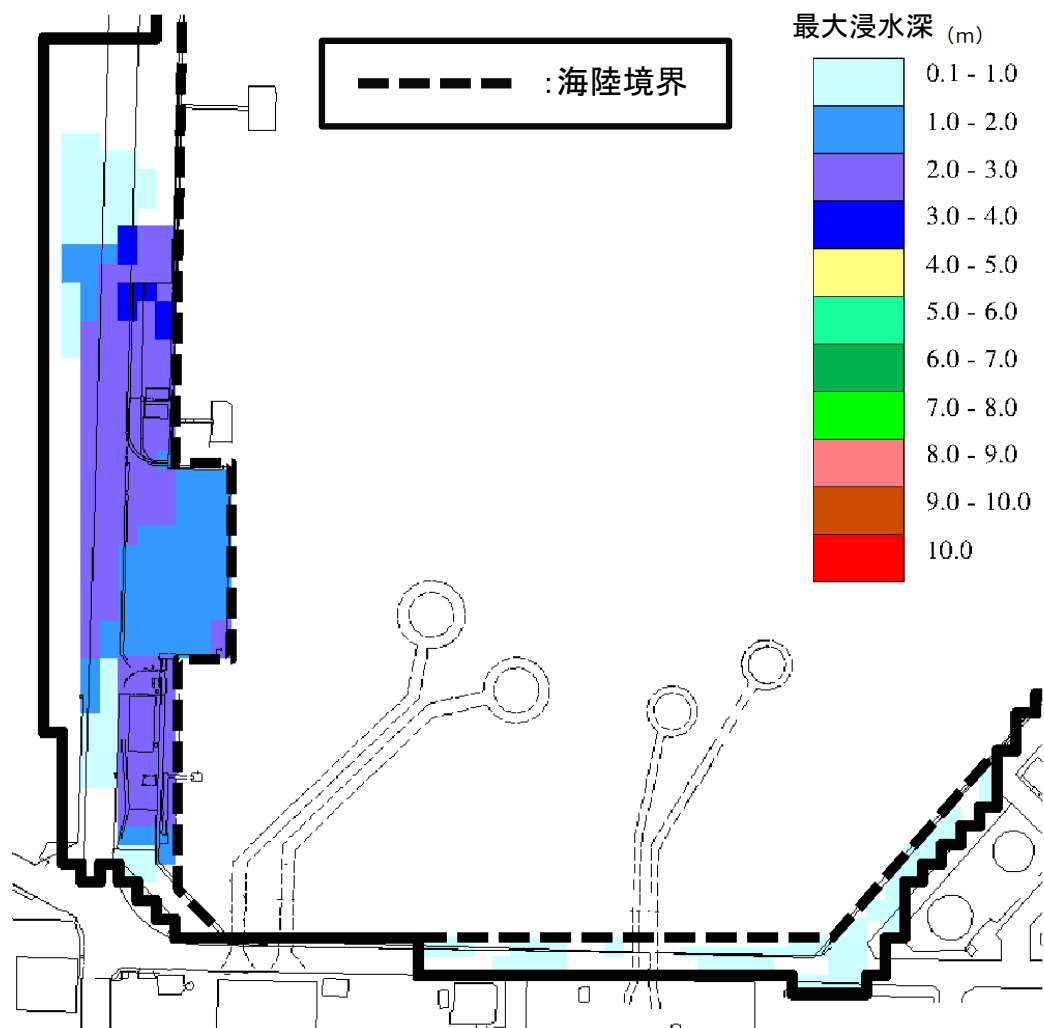


図 4.5.2-5 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による沈下範囲の最大浸水深分布

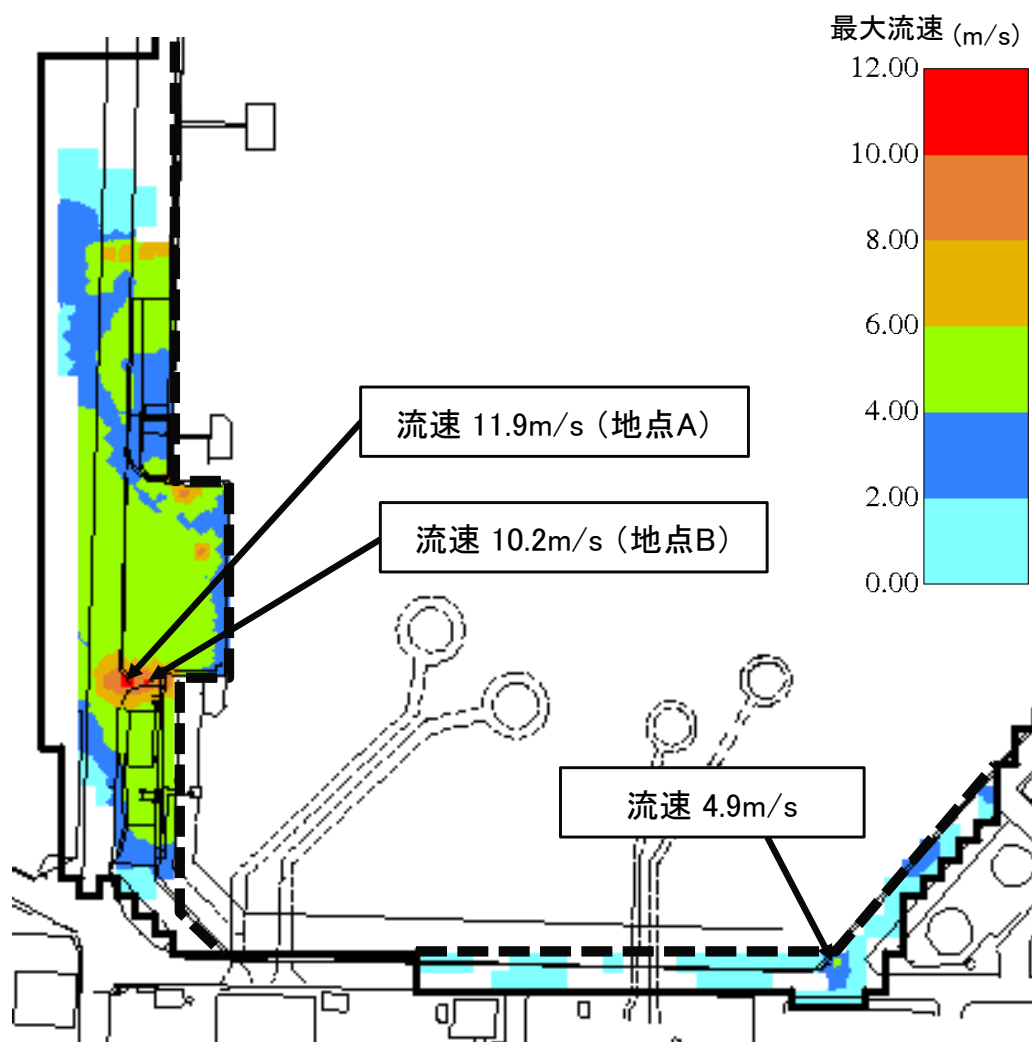


図 4.5.2-6 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による沈下範囲の最大流速分布

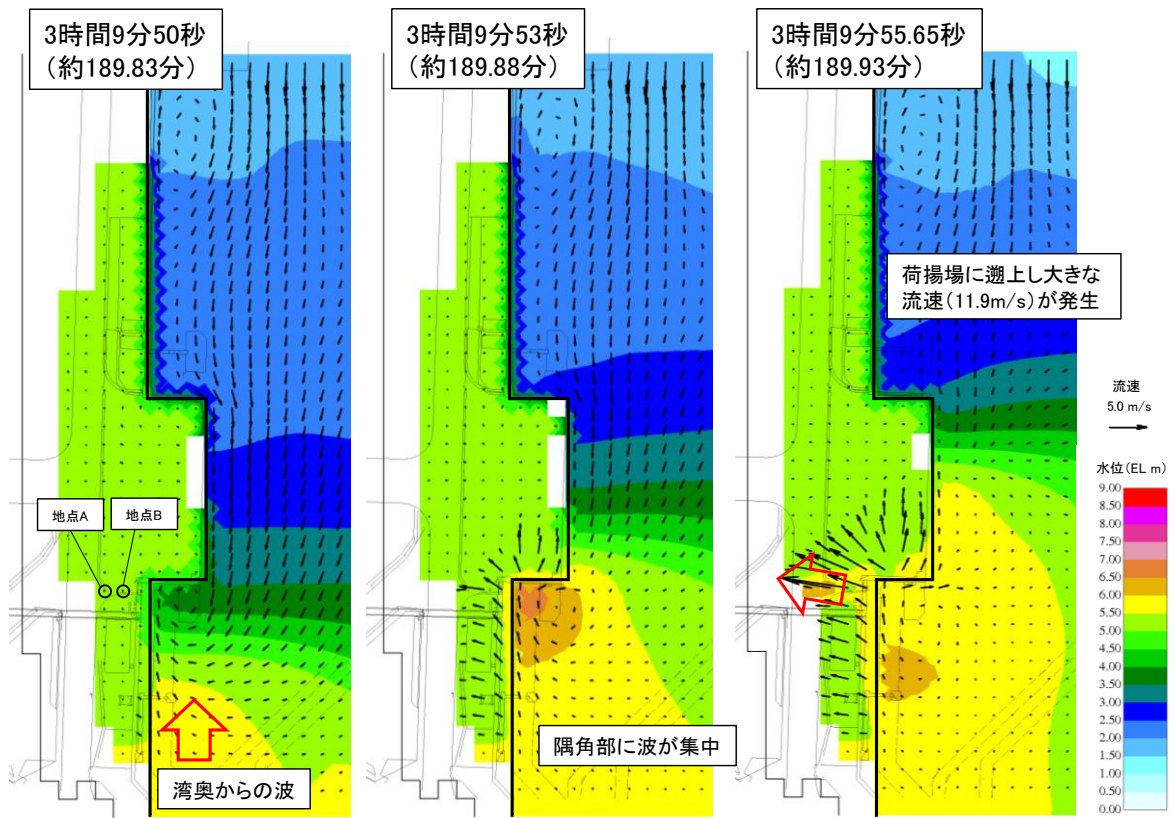


図 4.5.2-7 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による荷揚場周辺の
水位変動及び流向ベクトル

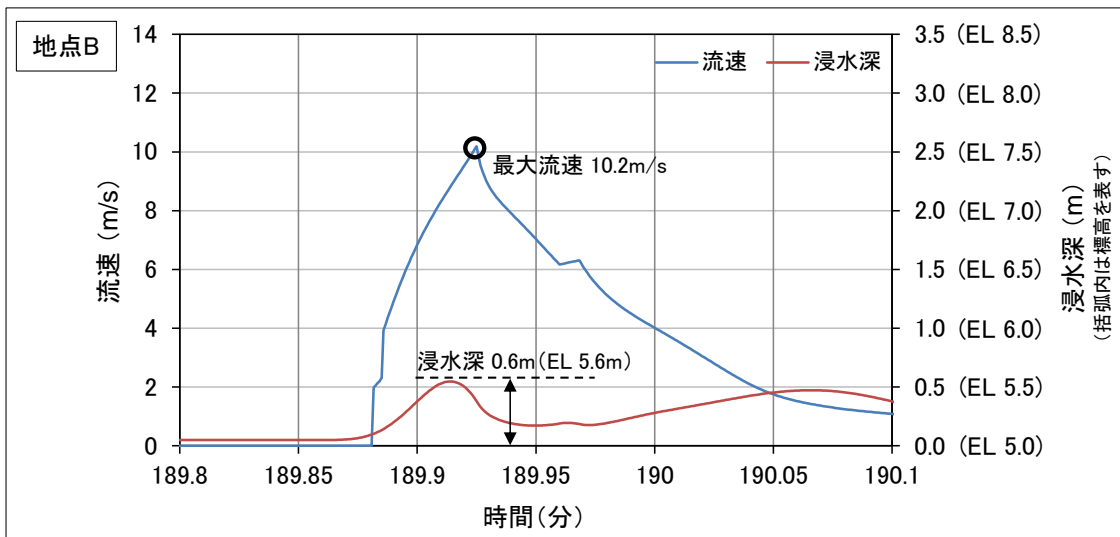
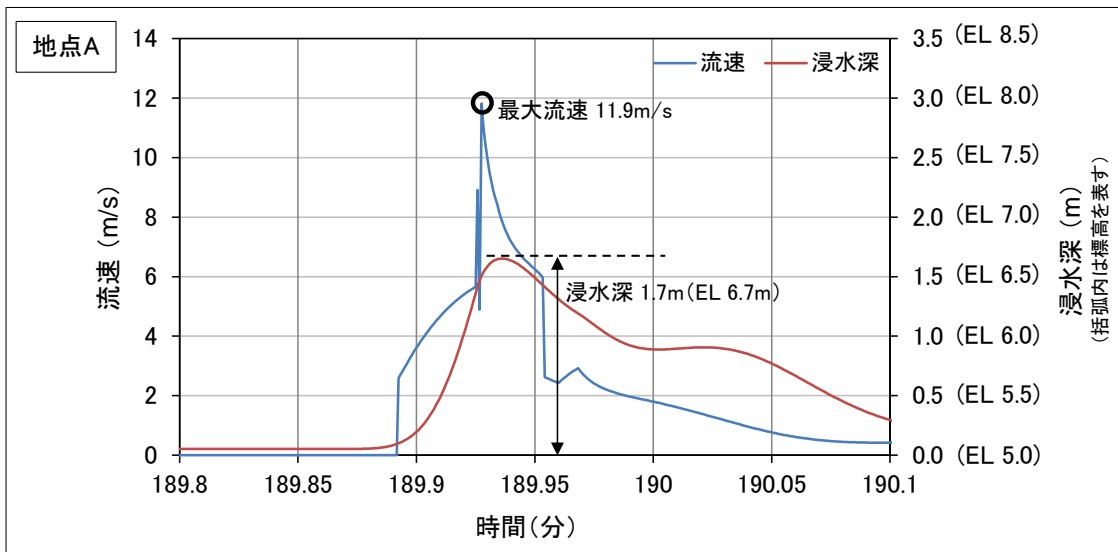
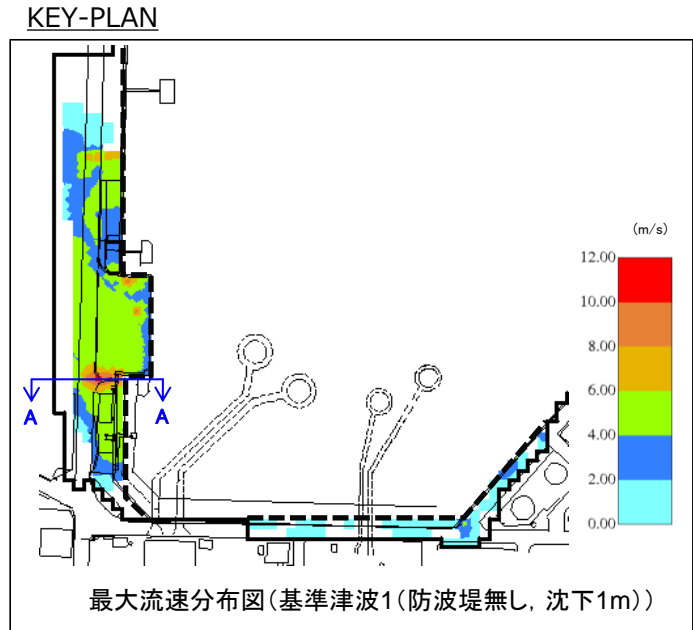
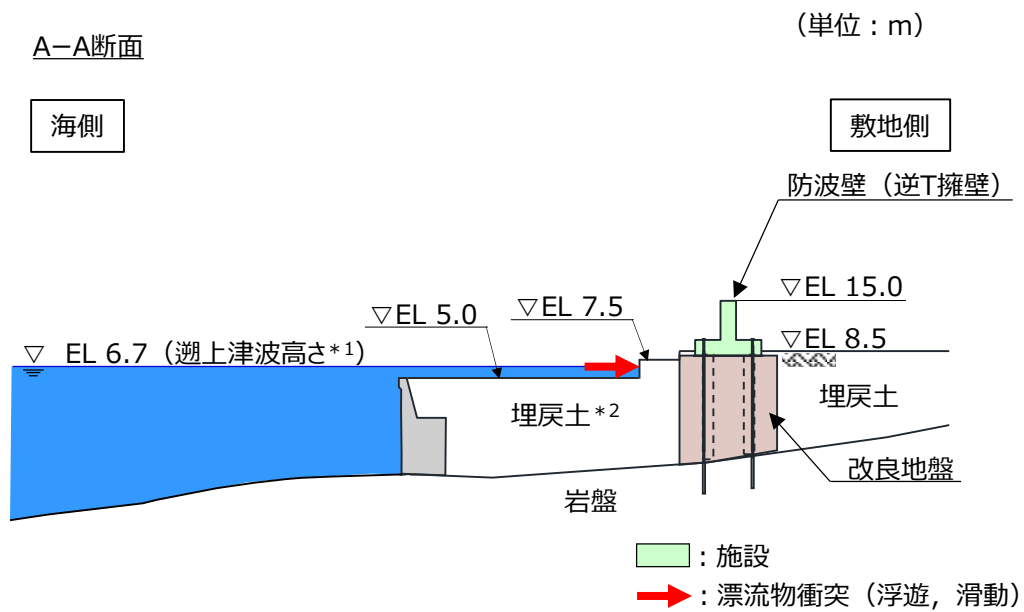


図 4.5.2-8 基準津波 1 (防波堤無し, 沈下 1m) による地点 A 及び
地点 B における流速及び浸水深の時刻歴波形



【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

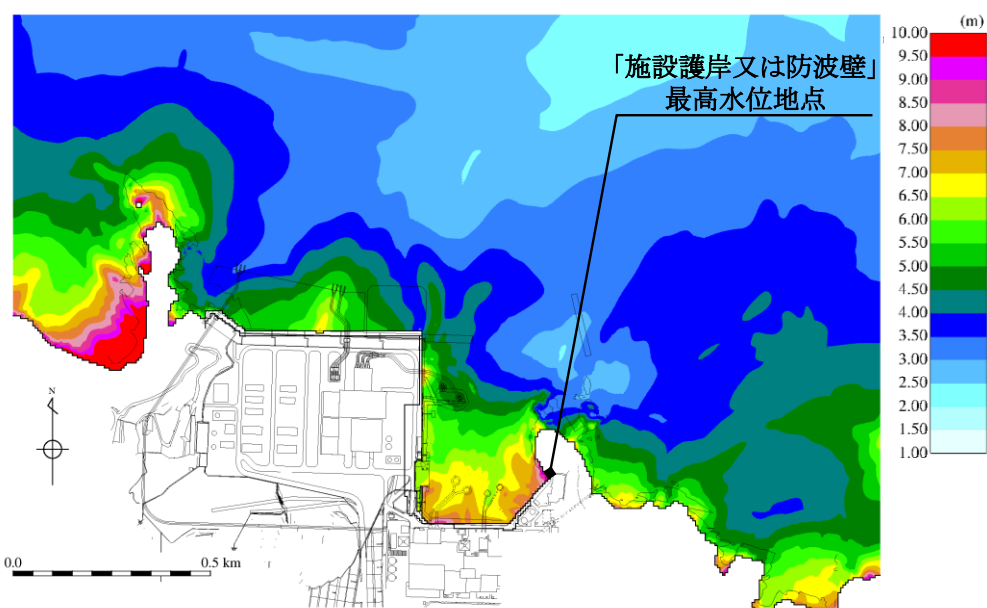
以下に示す最高水位に高潮ハザードによる裕度(0.64m)を加えた津波高さを考慮する。

(a) 日本海東縁部に想定される地震による津波の水位

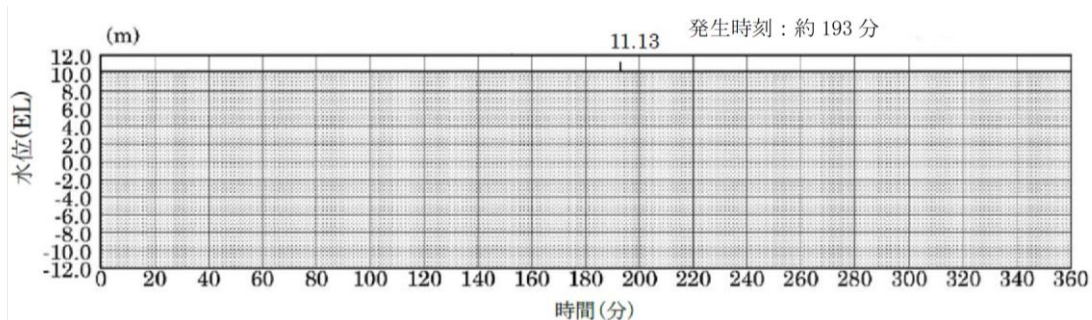
水位上昇側の最高水位は、基準津波1(防波堤無し)のEL 11.9m(発生時刻:約193分,潮位0.58m及び潮位のばらつき+0.14mを考慮)であり、高潮ハザードによる裕度を加えたEL 12.6mとする。遡上域における基準津波1(防波堤無し)の時刻歴波形を図4.5.2-10に示す。

(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、高潮ハザードによる裕度を加えた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。



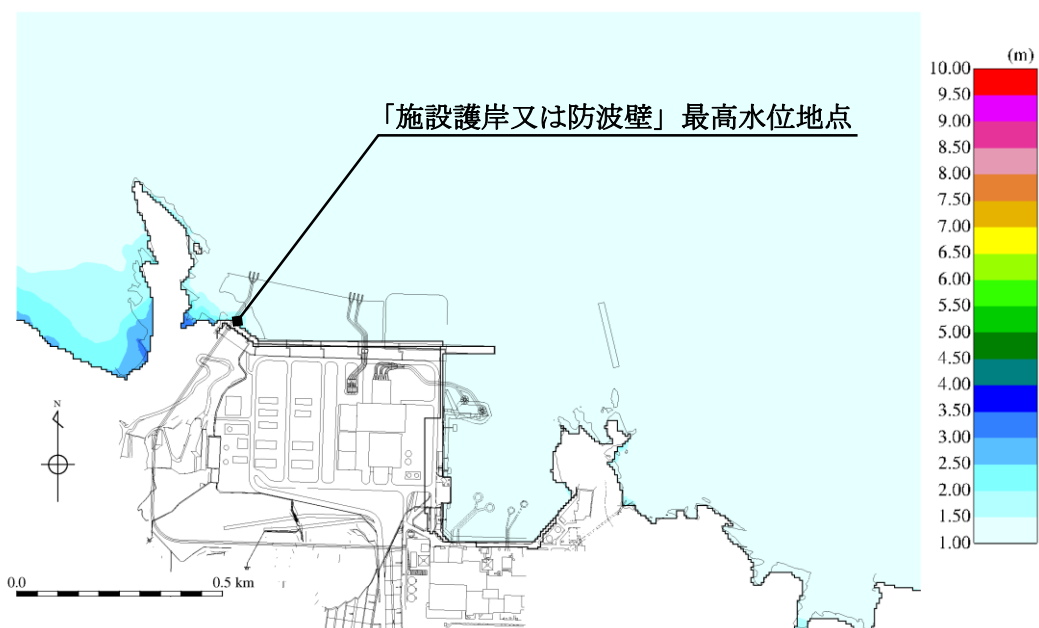
最大水位上昇量分布図
(基準津波1, 防波堤無し)



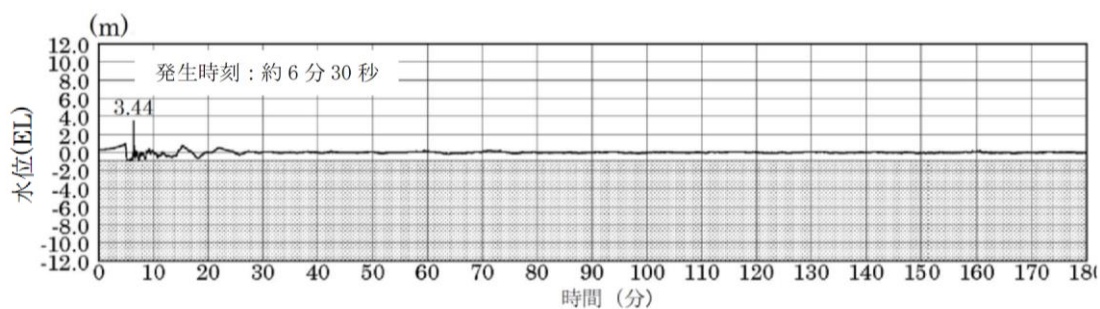
最大水位上昇量 11.13m + 朔望平均満潮位 0.58m + 潮位のばらつき 0.14m ≒ EL 11.9m
施設護岸又は防波壁 (基準津波1, 防波堤無し)

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，防波堤無し)



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 \div 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ついて」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して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。

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して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。

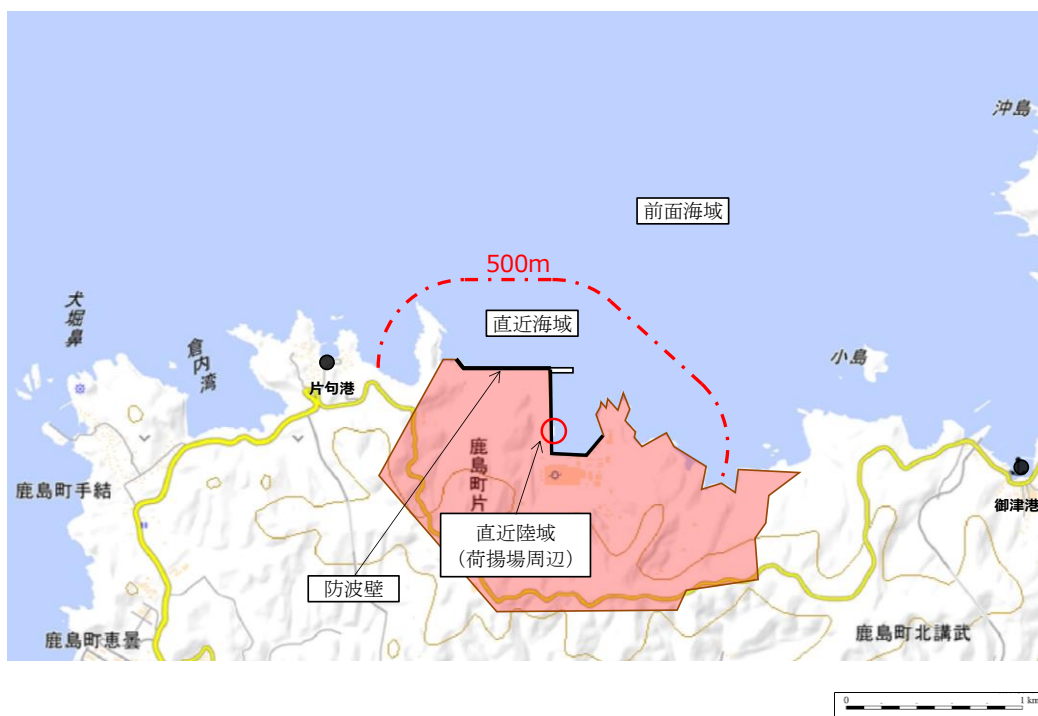


図 4.5.3-1 漂流物を考慮する範囲の区分

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、衝突荷重として考慮する漂流物の選定を行う。衝突荷重として考慮する漂流物は、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

日本海東縁部に想定される地震による津波における浮遊状態で到達するもののうち、漂流物の影響が大きくなることが考えられる配置場所が直近海域で最大重量となる漂流物は、総トン数 10 トンの作業船であるが、津波到達までに退避できるため、総トン数 3 トンの漁船となる。ただし、前面海域の漁船については、操業区域及び航行の不確かさ（添付資料 1 参照）があることから、総トン数 19 トンの漁船を直近海域の漂流物として評価する。したがって、漂流物の重量等及び材質を踏まえ、既往の衝突荷重算定式から求めた衝突荷重を比較した結果、総トン数 19 トンの漁船を漂流物として選定する（漂流物による衝突荷重の詳細は添付資料 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。

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

海域活断層に想定される地震による津波における浮遊状態で到達するもののうち、漂流物の影響が大きくなることが考えられる配置場所が直近海域で最大重量となる漂流物は、総トン数 10 トンの作業船となる。ただし、前面海域の漁船については、操業区域及び航行の不確かさがあることから、総トン数 19 トンの漁船を直近海域の漂流物として評価する。したがって、漂流物の重量等及び材質を踏まえ、既往の衝突荷重算定式から求めた衝突荷重を比較した結果、総トン数 19 トンの漁船を漂流物として選定する（漂流物による衝突荷重の詳細は添付資料 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 4.5.3-3 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。

漂流物の配置場所の区分及び敷地形状を踏まえた上で、衝突荷重を考慮する施設・設備への漂流物の到達の有無を表 4.5.3-2 に示す。

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。

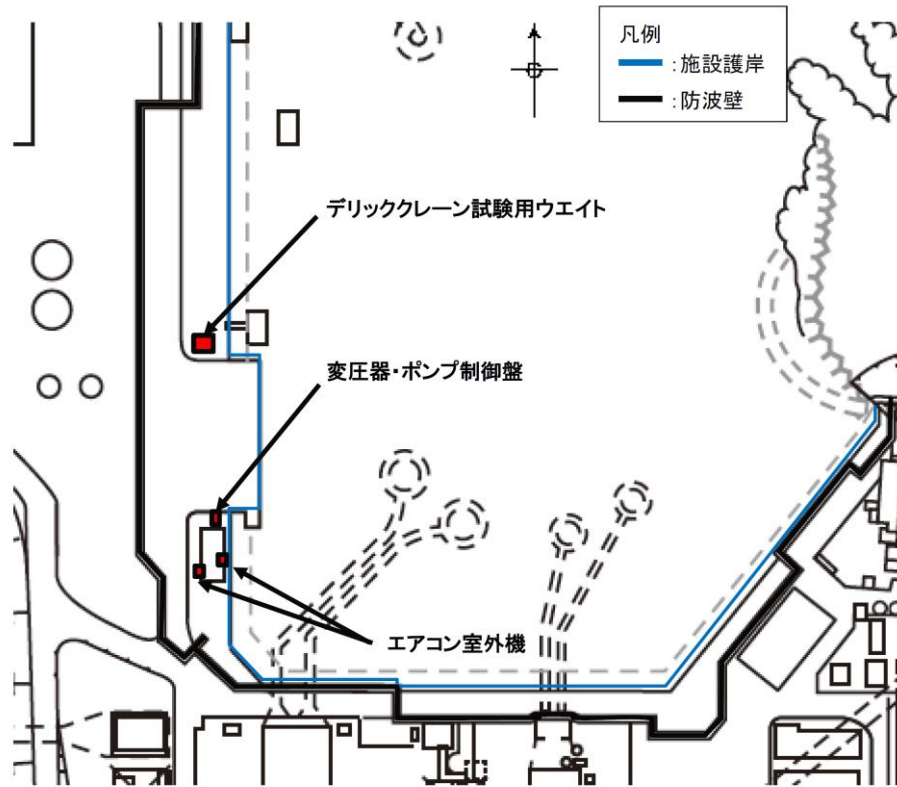
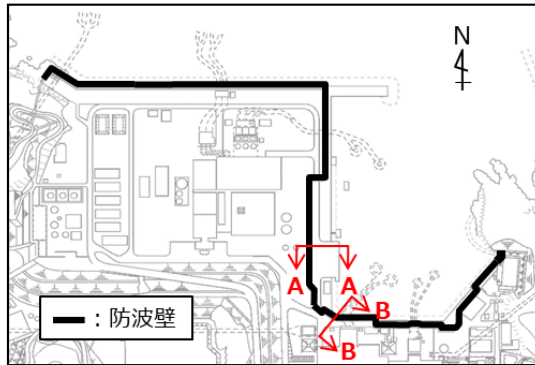


図 4.5.3-2 直近陸域における漂流物（滑動）の配置

KEY-PLAN



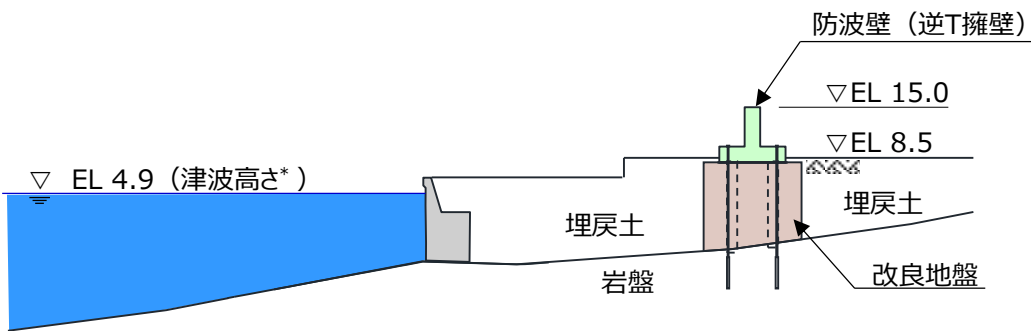
【防波壁（逆T擁壁）】

(単位：m)

A-A断面

海側

敷地側

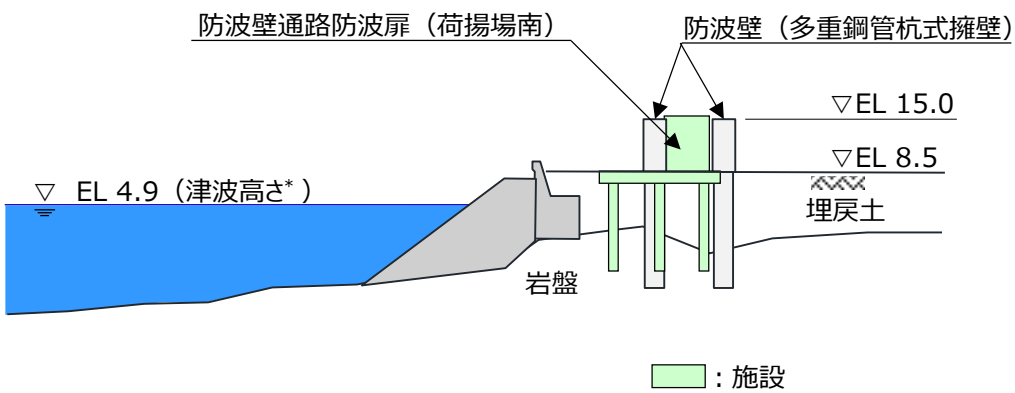


【防波壁通路防波扉（荷揚場南）】

B-B断面

海側

敷地側



注記＊：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の裕度を加えた津波高さ

図 4.5.3-3 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
							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	○	○	○	○
						前面海域	○	○	○	○
				海域活断層 【EL 4.9m】*2	6.0	直近海域	○	—*3	○	—*3
						前面海域	○	—*3	○	—*3

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(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。

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	松置 (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。 $F_m = 1.6C_{MA}(V_{90}/gD)^{0.5} \{1.2(C_{D1}/V_{10})^{0.4} (yD^2L) \}$ F_m : 衝突力, C_{MA} : 見かけの質量係数, V_{90} : 流木の衝突速度, D : 流木の直径, L : 流木の長さ, σ_r : 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: 305~8615g) ・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。 $F_H = SC_{MA}(V_H/g)^{0.25} D^{0.25} L^{0.25} \{2.5(GM) \}$ 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	「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、衝突板を受圧板前面80cm(現地換算30m)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	漂流物が落下(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。 $E = E_0 = \frac{WV^2}{(2g)}, W = W_0 + W', W_0 = \text{排水トン数}, W' = \text{付加重量}, D = \text{喫水}$ 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、支柱及び漂流物相対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	漂流するコンテナの衝突荷重を提案している。 $F_t = 1.3 v_{max} \sqrt{cm(1+c)}$ F_t : 衝突力, v_{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。 $F_m = 2 \rho_w v_{90} E_c V_x^2 + (WV_x / gdt)$ F_m : 漂流衝突力, dt : 衝突時間, η_w : 最大湖上水位, ρ_w : 水の密度, B : 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, 湖上流速: 1.0m/s以下, 材質: アクリル
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。 $F = \gamma_{PK} \left(\frac{5}{4} m \right)^{0.5} v^2, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi k_1 + k_2}, k = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ F : 衝突力, a : 衝突面半径の1/2 (コンテナ衝突面の総横長さの平均の1/4), B : ヤング率, v : ボアソン比, 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松置 (1999)」にない、上式において $\sigma = C_{90}$ (C_{90} : 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0.152m, 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
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, p
p. 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	F E M A (2012)	流木 コンテナ FRP製 部材	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。
⑧	衝突解析	鋼製部材 FRP製 部材 木材等	直近陸域 直近海域	衝突速度	新規制基準適合性審査において、竜巻時の車両や鋼製材の衝突荷重算定の実績を有するとともに、津波時のFRP製船舶の衝突荷重算定に用いられていることから、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製の漁船及び作業船（以下「船舶」という。）に対する、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。

- ・「道路橋示方書（2002）」の式は、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衝突荷重を算定でき、新規制基準適合性審査において、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。
- ・「FEMA（2012）」の式は、非減衰系の振動方程式に基づき、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評価する。一方、実現象として、衝突物より剛性の大きい被衝突物へ衝突した際は、衝突物自体が破壊することによる、衝突エネルギーの減衰効果がある。そのため、衝突時に塑性変形を伴う漂流物による衝突荷重算定では、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において、初期配置が直近海域のFRP製漁船（総トン数5トン）の船首からの衝突に対してのみ適用実績がある。
- ・「衝突解析」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解析が可能であるため、剛性の大きい被衝突物に衝突する際の衝突物の材料非線形性を考慮した衝突荷重が算定できる。この衝突解析については、船舶の詳細な形状、衝突実験等のデータを参照することにより、既往の衝突荷重の算定式に比べ精度の高い衝突荷重を算定できるとともに、3次的に船体形状をモデル化することにより、船舶の船首衝突以外の衝突形態に対しても衝突荷重を算定することができる。また、新規制基準適合性審査において、初期配置が直近海域の船舶（総トン数5トン）に対して適用された実績がある。

上記より、前面海域を対象とした船舶においては、「道路橋示方書（2002）」を衝突荷重の算定方法として選定する。

直近海域を対象とした船舶においては、対象漂流物である船舶の形状調査を行ってることから、再現精度が高い船舶の解析モデルを作成可能なこと、衝突解析による衝突荷重は衝突実験結果を再現できていること（詳細を添付資料3に示す）及び被衝突物に対する船舶の衝突形態の不確かさを考慮した衝突荷重の算定が可能であることから、衝突解析を衝突荷重の算定方法として選定する。なお、衝突解析による衝突荷重と比較するため、「FEMA（2012）」の式による衝突荷重を参考に算定する。

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。

(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）と海域活断層から想定される地震による津波（基準津波4）に対して、以下の設計上の配慮を行う。

日本海東縁部に想定される地震による津波では、発電所近傍における全方向の最大流速は 9.2m/s となることから、津波防護施設全線にわたり安全側に 10.0m/s とする。

海域活断層から想定される地震による津波では、発電所近傍における全方向の最大流速は 5.8m/s となることから、津波防護施設全線にわたり安全側に 6.0m/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に高潮ハザードの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に高潮ハザードの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。算定方法を含む、漂流物の衝突荷重設定フローを図4.5.6-1に示す。

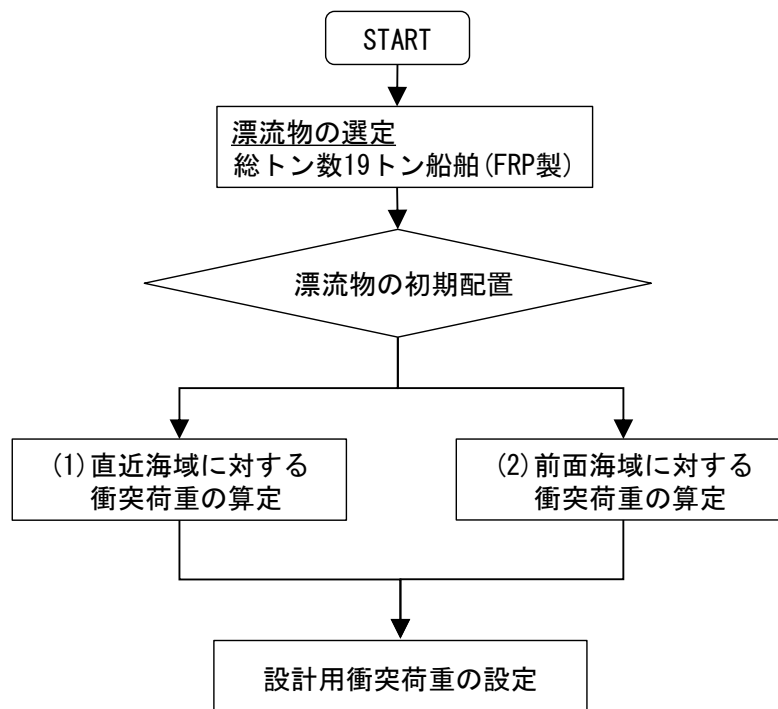


図 4.5.6-1 漂流物による衝突荷重設定フロー

(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、漂流物となつ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以上の周波数を遮断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（詳細を添付資料5に示す）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。

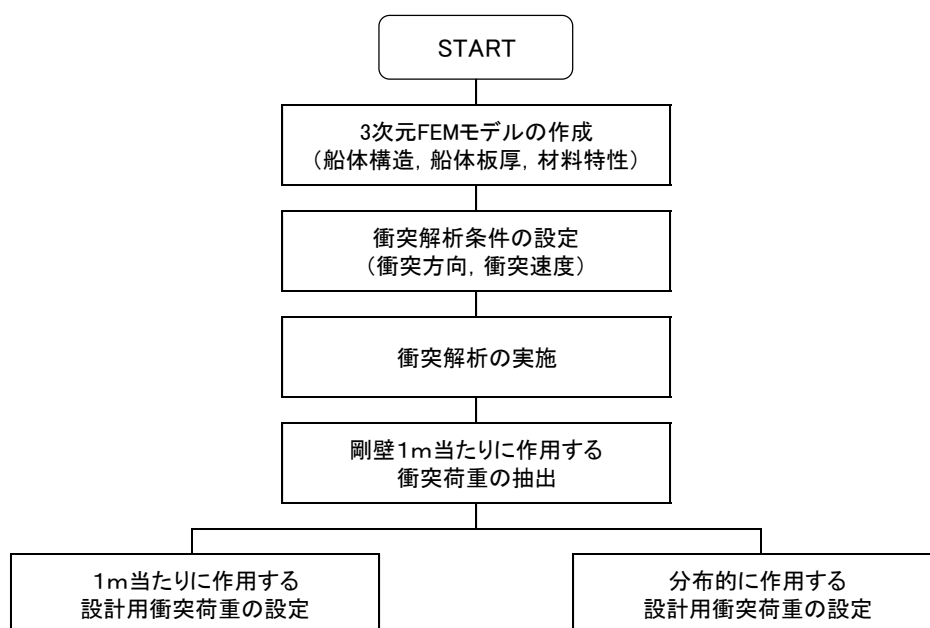


図4.5.6-2 衝突解析による衝突荷重の算定フロー

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。

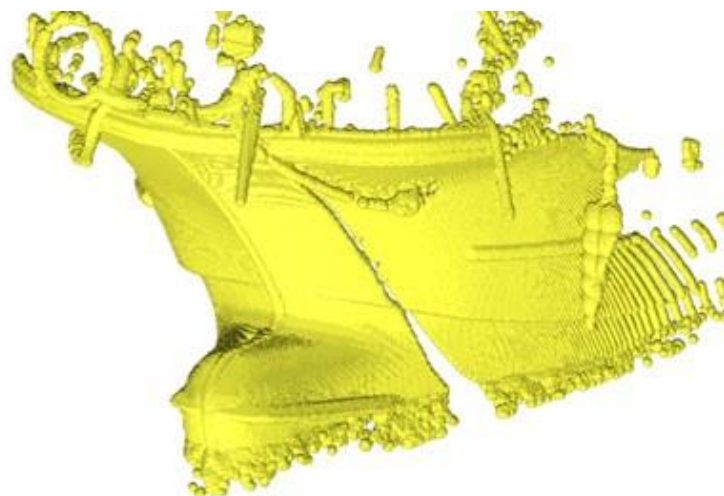
船舶は海水からの流れの抵抗を低減するために、船体の船首から船尾に向けて流線形の複雑な形状となっている。そこで、船舶外形の再現精度を向上させるために、対象船舶に対する巻尺等による測定に加え、3Dレーザースキャナによる3次元測定を行い（図4.5.6-3）、船体外形の3次元点群データを取得し、3次元FEMモデルの作成に反映した（図4.5.6-4）。

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。

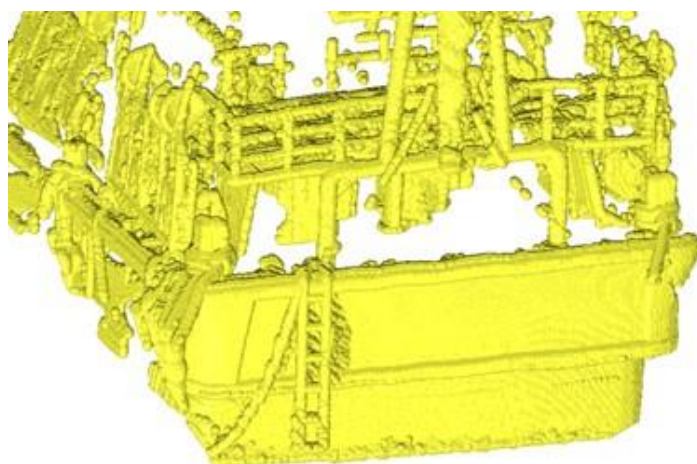


図 4.5.6-3 3Dレーザースキャナによる計測状況

【船首】



【船尾】



【船側】

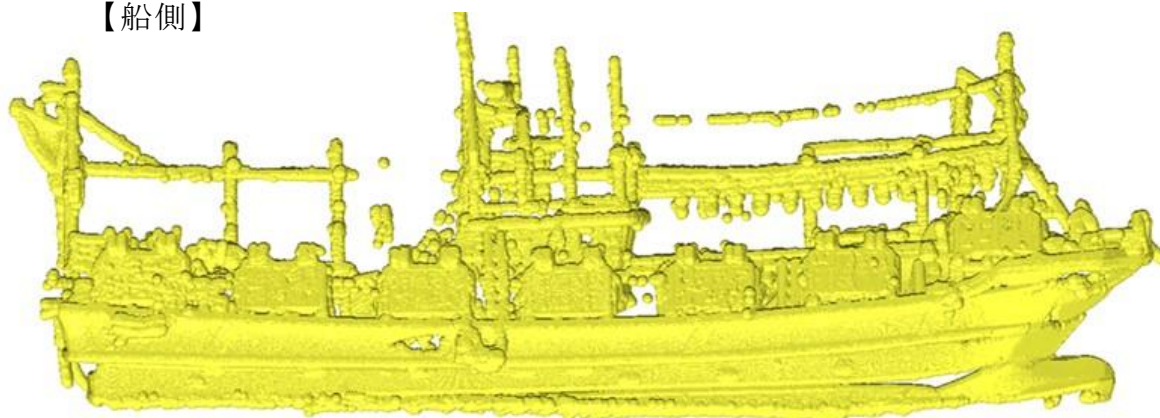


図 4.5.6-4 3Dレーザースキャナによる計測結果 (例)

(a) 船体構造

船舶の3次元FEMモデルの作成にあたり、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4.5.6-7に、隔壁及び船尾の船体面積を図4.5.6-8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、船体質量として考慮する。

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(m)	19.40	対象船舶の船舶検査手帳
登録幅(m)	4.42	対象船舶の船舶検査手帳
登録深さ(m)	1.85	対象船舶の船舶検査手帳

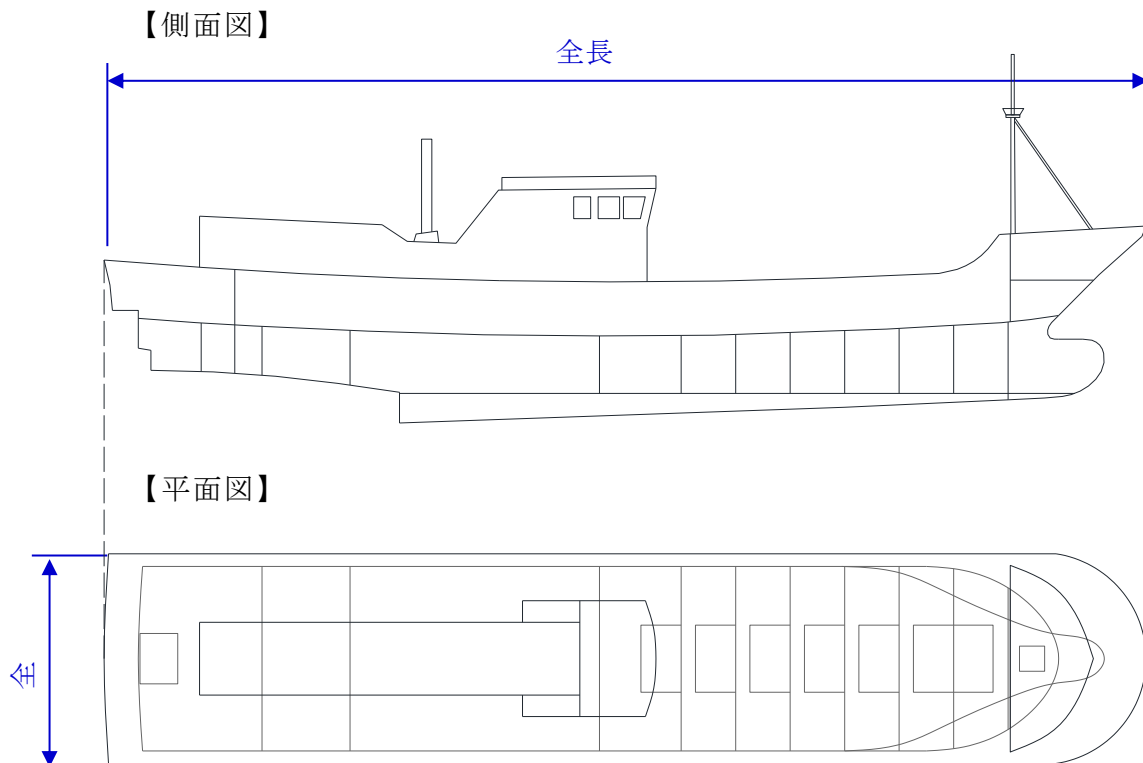


図 4.5.6-5 対象船舶の側面図及び平面図

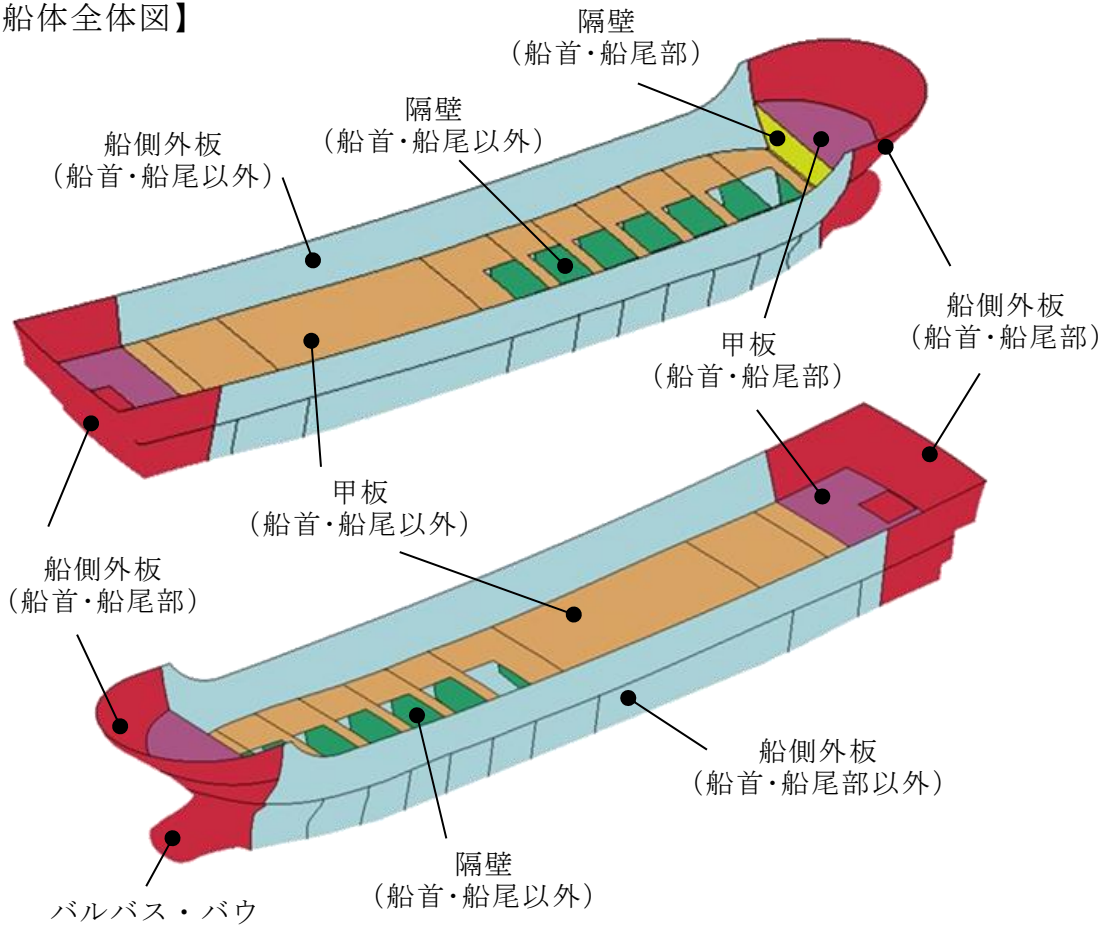
なお、図 4.5.6-6 の「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」において、全漁業種類の漁船の平均値が示されており、総トン数 20 トンにおける船の長さ（L=17.0m）及び船の幅（B=4.3m）に対して、対象船舶（総トン数 19 トン）の登録長さ（L=19.4m）及び登録幅（B=4.42m）は、おおむね同等であることから、対象船舶は代表性があることを確認した。

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

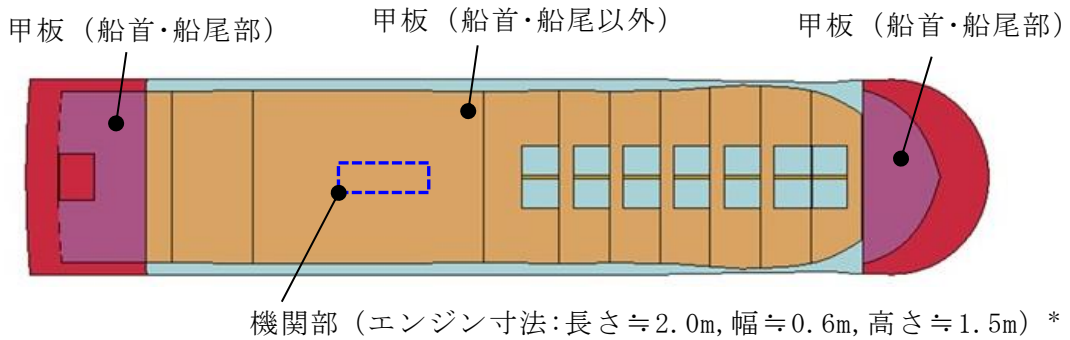
図 4.5.6-6 漁船の諸元

（「津波漂流物対策施設設計ガイドライン（2014）」に一部加筆）

【船体全体図】

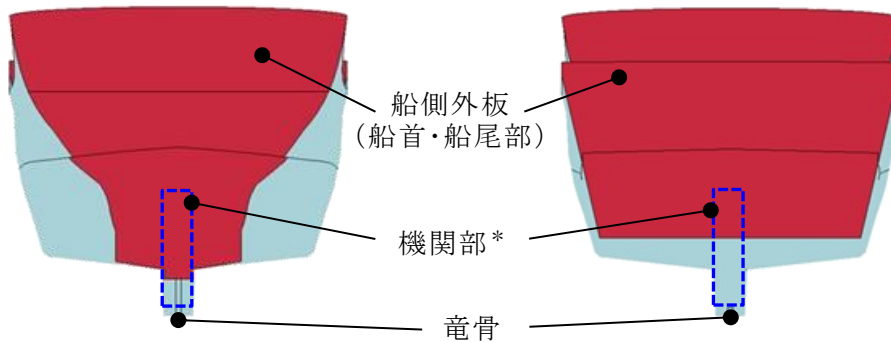


【船体平面（上面）】



【船体正面（船首）】

【船体後面（船尾）】



注記*：概略位置を示す

図 4.5.6-7 3次元FEMモデル

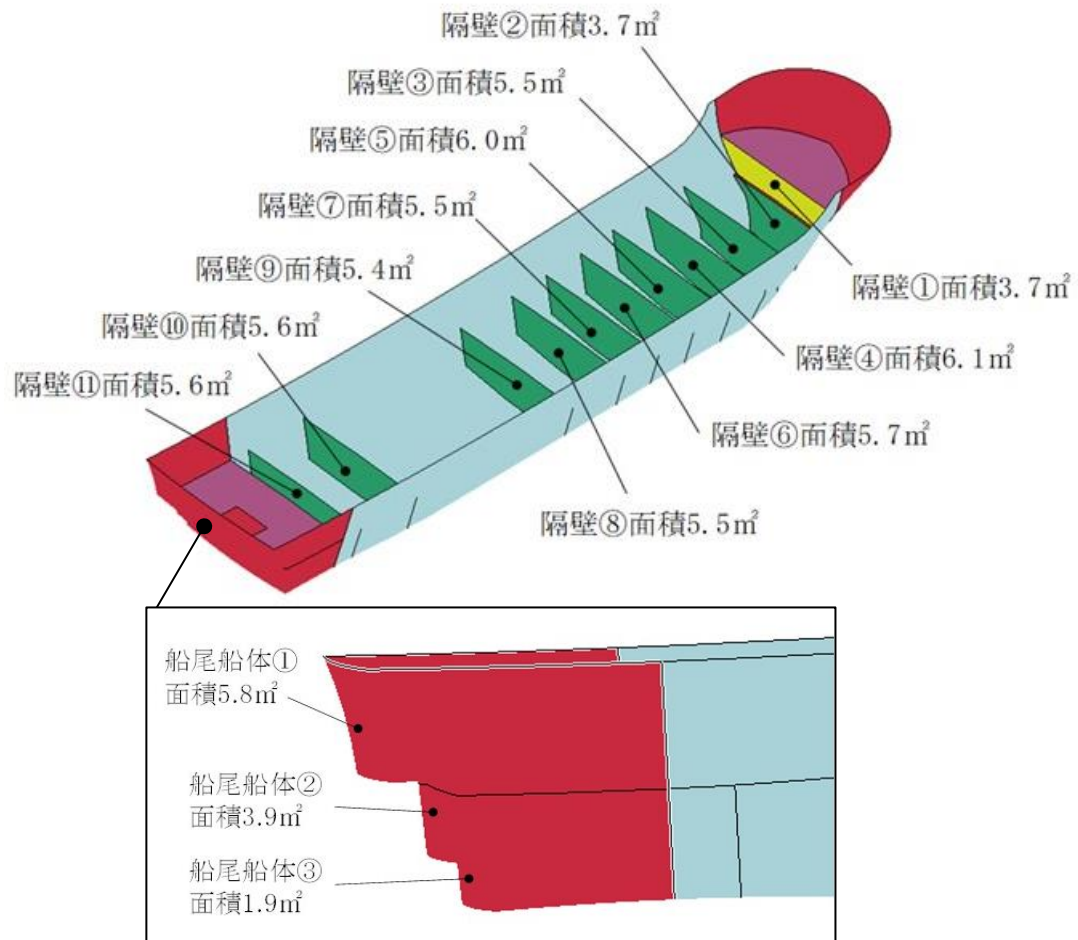


図 4.5. 6-8 隔壁及び船尾の船体面積

(b) 船体板厚

船舶の3次元FEMモデルの作成にあたり、船体板厚の設定結果を表4.5.6-2及び図4.5.6-9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

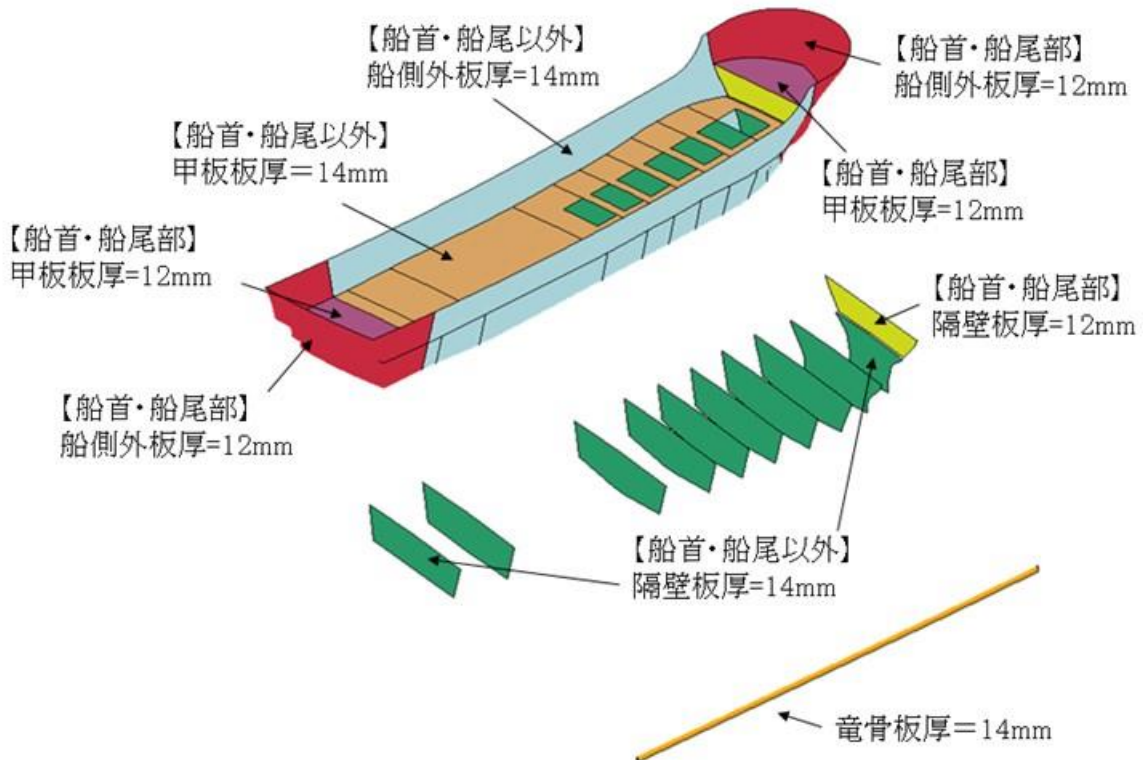


図 4.5.6-9 船体板厚の設定

(c) 材料特性

FRPの材料特性においては、既往の文献及び

を基に設定を行った(詳細を添付資料3に示す)。

本解析に用いる、FRPの材料特性の設定結果を表4.5.6-3に示す。

表 4.5.6-3 FRPの材料特性の設定結果

項目	引用文献	引用文献値	採用値
ヤング率 (曲げ弾性)	「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018)」の曲げ弾性係数の判定基準値	11,780 (N/mm ²)	12 (GPa)
	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015)」の曲げ弾性係数	9~12 (GPa)	
ポアソン比	「非金属データブック プラスチック・FRP・ゴム・接着剤・塗料・木材及び木質材料・セラミックス [改訂2版](1985)」のハンドレイアップ用ガラス繊維基材のGRPとしての力学的特性値(標準)	0.336 【0.32~0.358】	0.358
強度	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015)」の曲げ強度	200~250 (MPa)	200 (MPa)
破壊 ひずみ			
単位体積 重量	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015)」のFRPの成型法と工学的特性値の例における、ハンドレイアップの単位体積重量	1.5~1.6 (t/m ³)	1.6 (t/m ³)

ここで、FRP材の応力-ひずみ関係については、「FRP成形入門講座(日本プラスチック加工技術協会)」によると、「FRP材料は金属材料と異なり、はっきりとした降伏点を示さず、破壊寸前まではほぼ弾性変形を示し、その応力-ひずみ曲線は図のようになり、弾性吸収エネルギーが非常に大きいことが特徴で、外力の吸収が金属材料に比較して大きいため、FRP材料で作られた構造物は与えられるショックが小さい。」ことが示されている。

また、「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会, 1978)」によると、「FRPは、破壊に至るまで挙動、ヤング率、伸びは鋼材と異なっている。ヤング率は鋼の約1/20であり、伸びも小さく延性は全くない。鋼材の伸びは降伏点で約12%、破断時で約30%である。これに比べてFRPでは降伏点はなく、破断時の伸びは約1%ないし1.5%である。」「鋼構造は破壊に至るまでの吸収エネルギーが大きく、予想以上の外力が作用して大変形を生じても破壊に至ることは少ない。しかし、FRPの場合はこのような現状はなく、ある応力に達すると直ちに破壊につながる恐れがある。」ことが示されている。

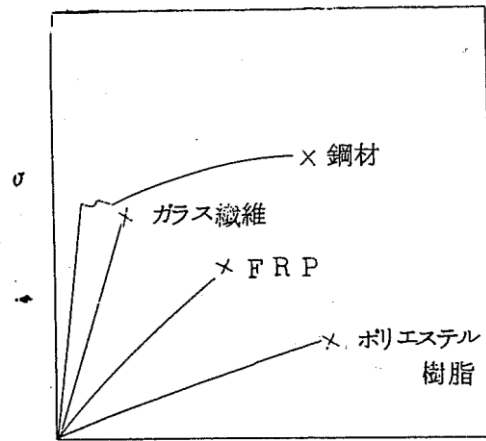
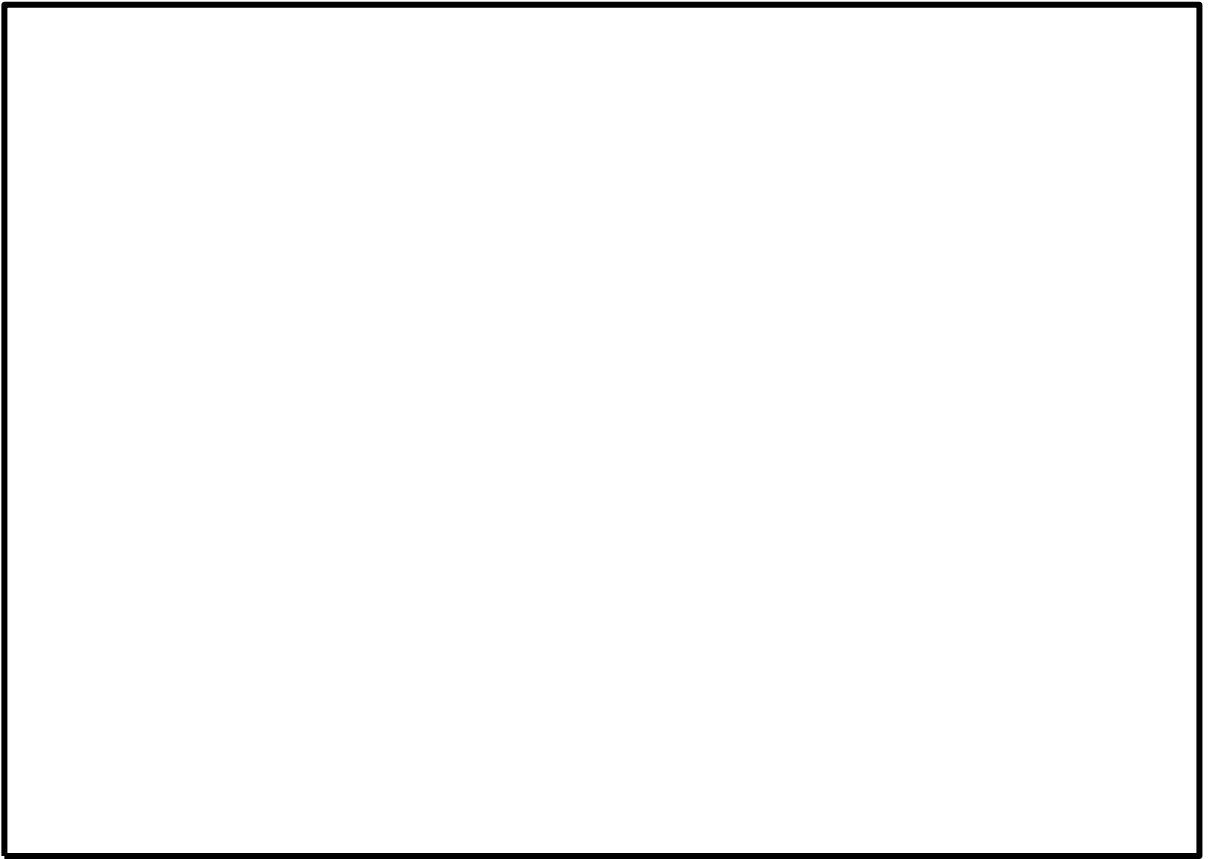


図 4.5. 6-10 FRP 他^εの応力-ひずみ曲線

(「FRP成形入門講座 (日本プラスチック加工技術協会)」より引用)



(d) 船体質量

船舶の3次元FEMモデルの作成にあたり、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。

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。

船首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から衝突し、船首部の破壊後、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、差異は見られないことから、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。

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 4.5.6-13 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 4.5.6-13 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。

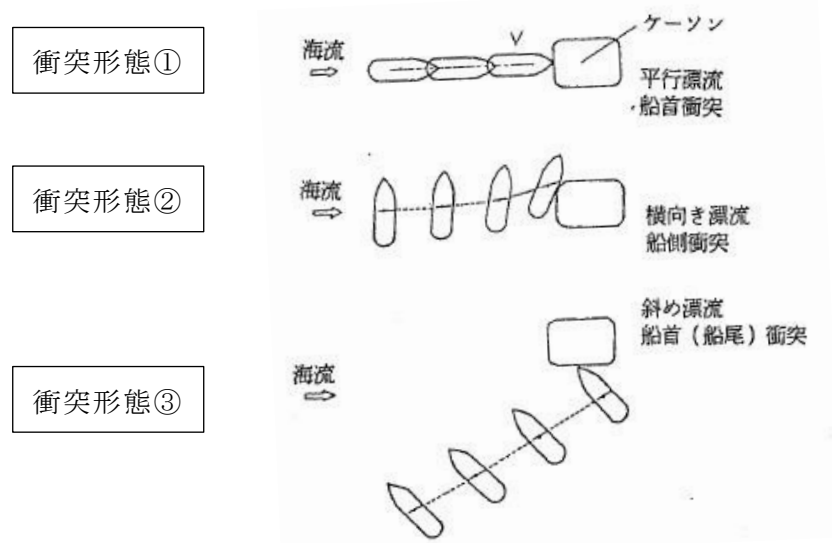


図 4.5.6-13 漂流による衝突形態（「土木学会（1994）」に一部加筆）

「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 6.0m/s の 2 ケース実施する。

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 4.5.6-4 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箇所では衝突が生じるが、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箇所では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 4.5.6-4 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 対して直角 方向から津 波が来襲。</p>	<p>津波の来と 襲方向で船 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 所で衝突する。</p>
B		<p>被衝突物と なる施設に 対して直角 方向から津 波が来襲。</p>	<p>被衝突物と なる施設に 対して斜め 方向で衝突。</p>	<p>船首（又は船尾） 付近で衝突した 後に、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>津波の来と 襲方向で船 首及び船尾 から衝突。</p>	<p>船首（又は船尾） 付近で衝突した 後に、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>津波の来と 襲方向で船 首及び船尾 から衝突。</p>	<p>船首（又は船尾） 付近で衝突した 後に、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 4.5.6-14 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。そのため、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。

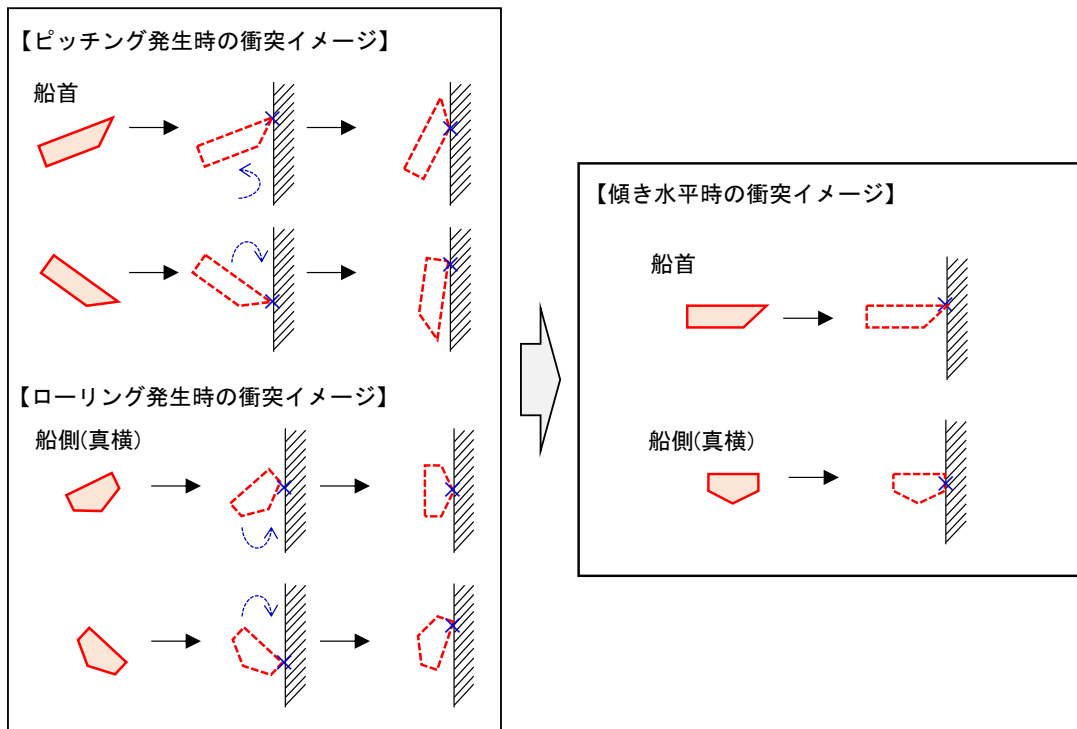


図 4.5.6-14 鉛直断面方向の傾きに対する衝突イメージ

衝突形態と解析ケース一覧を表 4.5.6-5 に、衝突解析の解析ケースと衝突イメージを図 4.5.6-15 に示す。

表 4.5.6-5 衝突形態と解析ケース一覧

ケース	衝突形態	流速	ケース	衝突形態	流速
①	船首衝突	10.0 m/s	⑥	船首衝突	6.0 m/s
②	船尾衝突		⑦	船尾衝突	
③	真横衝突		⑧	真横衝突	
④	斜め船首衝突		⑨	斜め船首衝突	
⑤	斜め船尾衝突		⑩	斜め船尾衝突	

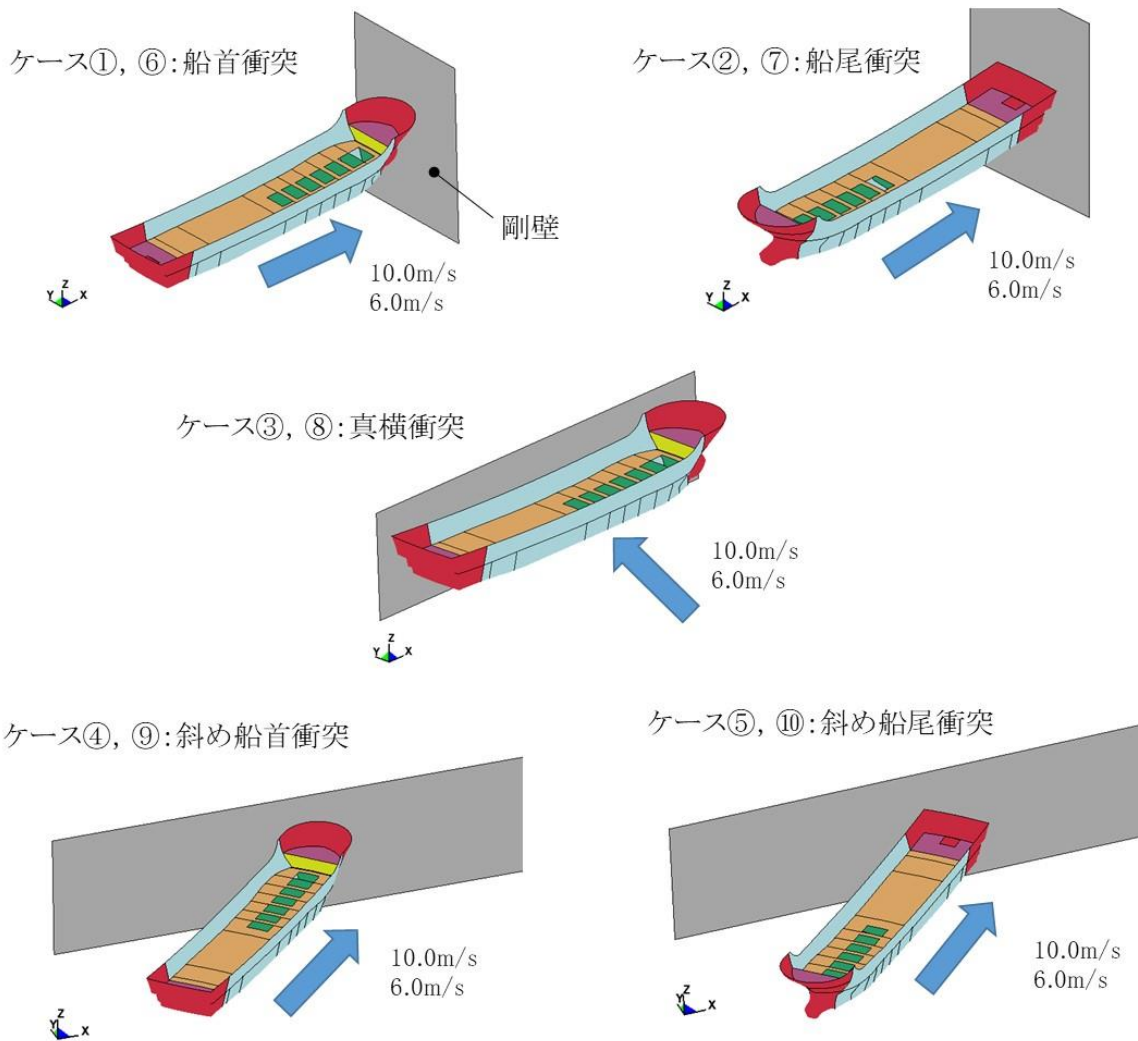


図 4.5.6-15 衝突解析の解析ケースと衝突イメージ

e. 解析結果（衝突速度：10.0m/s）

(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 4.5.6-16 に衝突状況，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，図 4.5.6-19 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，表 4.5.6-6 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめを示す。

- ・表 4.5.6-6 及び図 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 941kN が作用することを確認した。
- ・衝突荷重の作用時間は 1.40 秒程度となることを確認した。
- ・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，各剛壁の最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重の平均値（荷重作用幅 6m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.37 秒で 441kN/m となる。
- ・図 4.5.6-19 より，各剛壁（剛壁番号①～⑥）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突後 0.37 秒で最大となる 2,645kN となることを確認した。
- ・図 4.5.6-16 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。

表 4.5.6-6 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめ

剛壁番号	剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重 (kN)	衝突時刻 (秒)
①	182	0.59
②	497	0.38
③	941	0.37
④	809	0.37
⑤	466	0.40
⑥	280	0.49

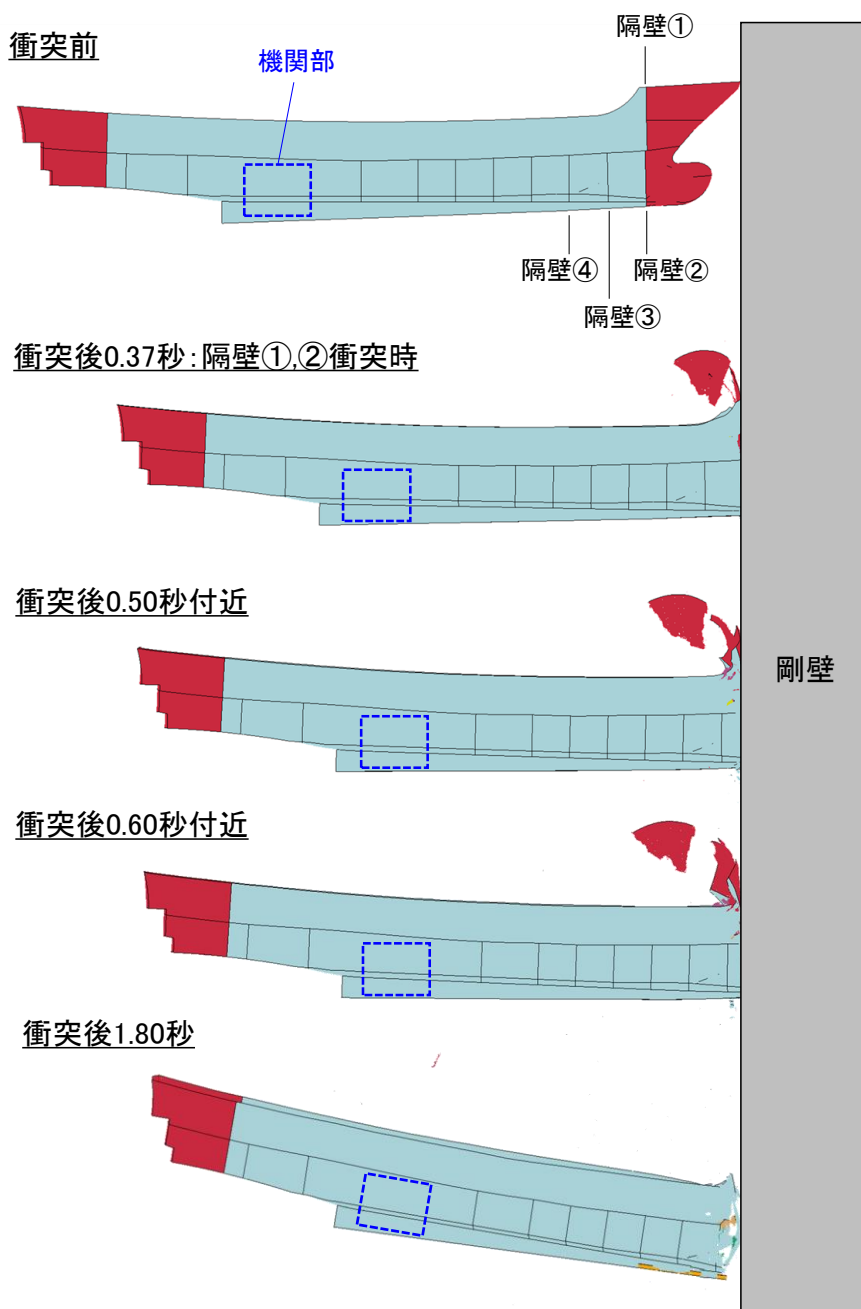
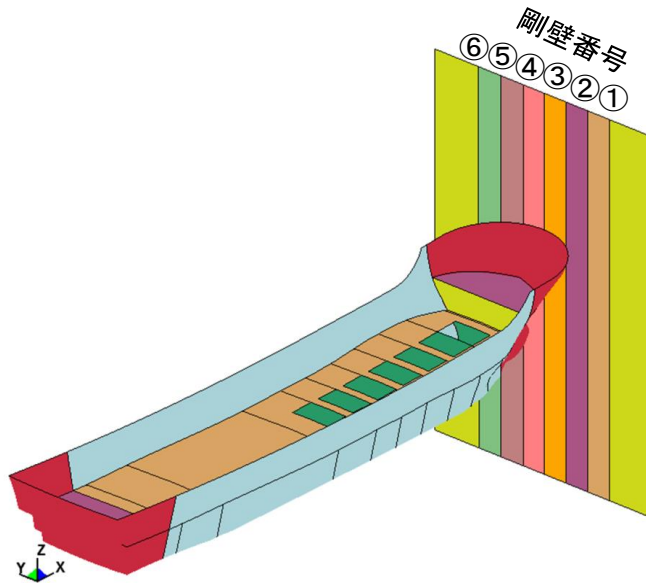
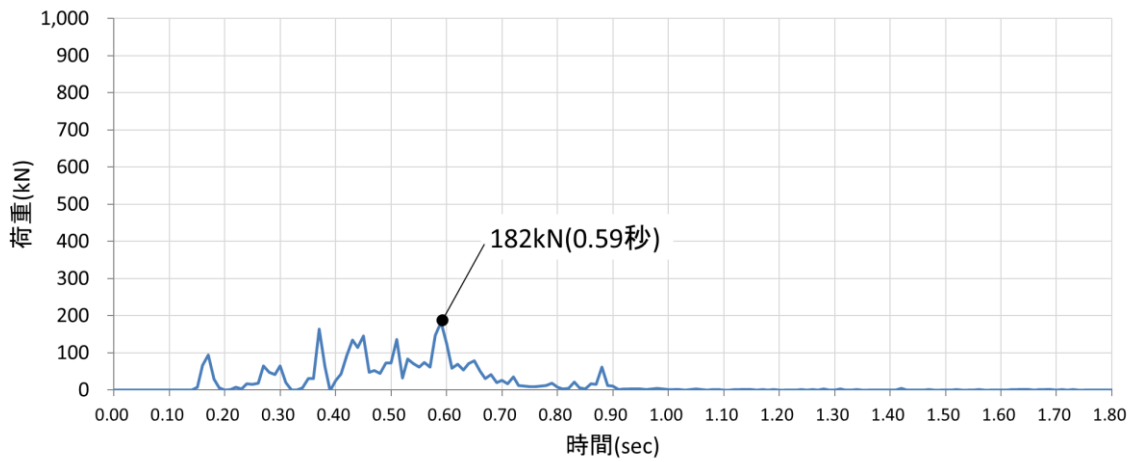
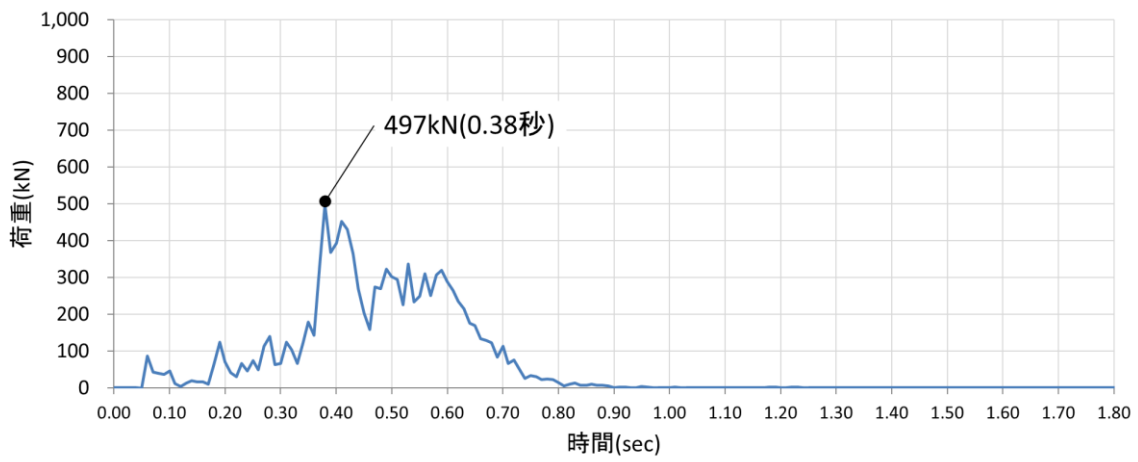


图 4.5.6-16 衝突状况

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

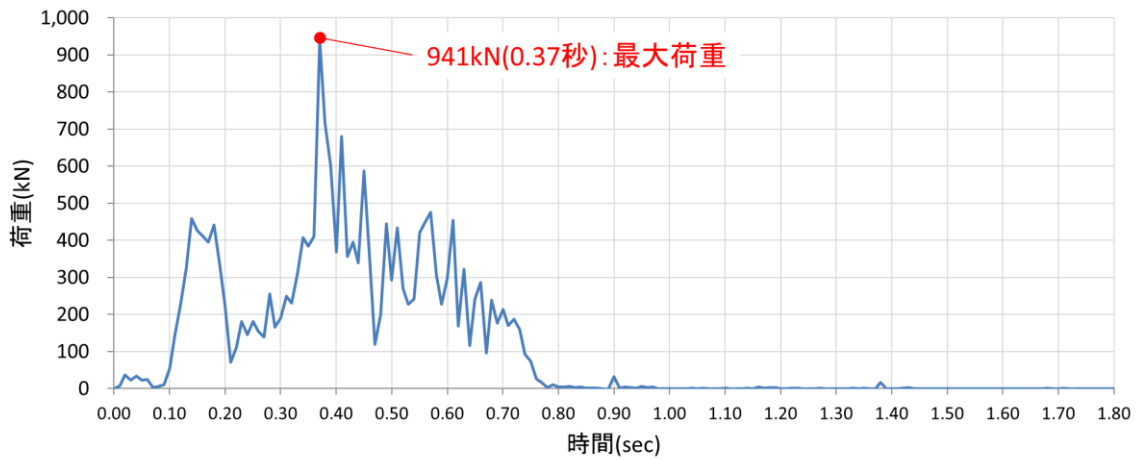
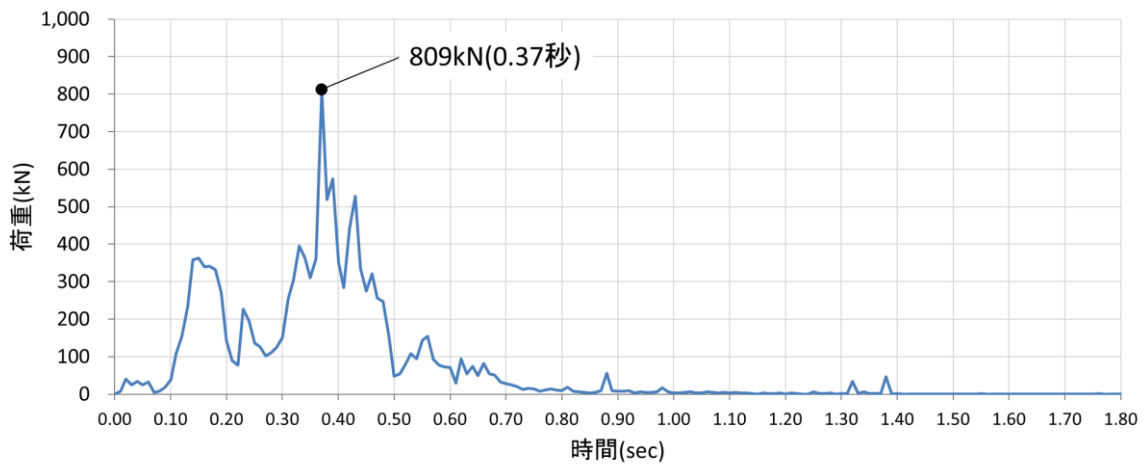
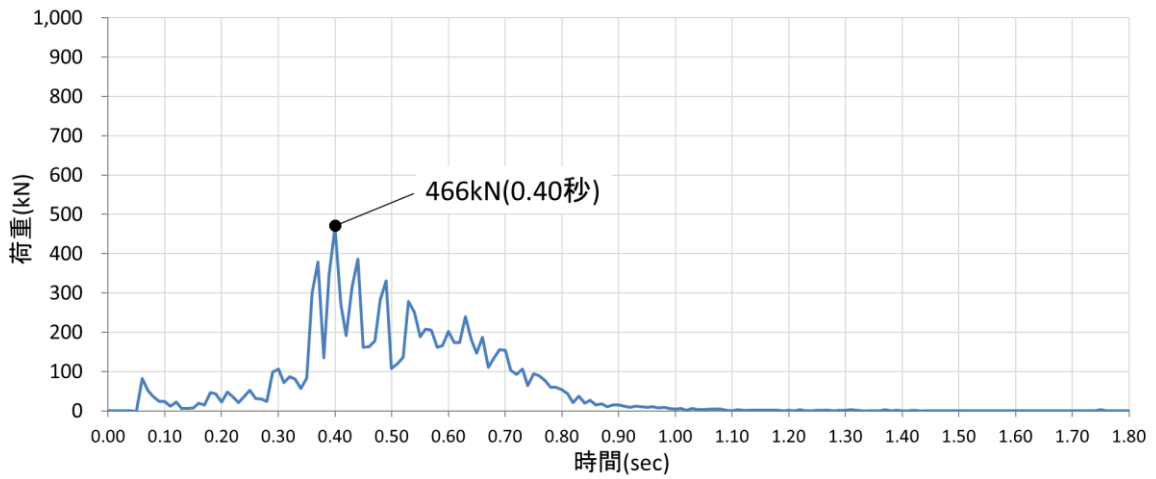


図 4.5.6-17 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

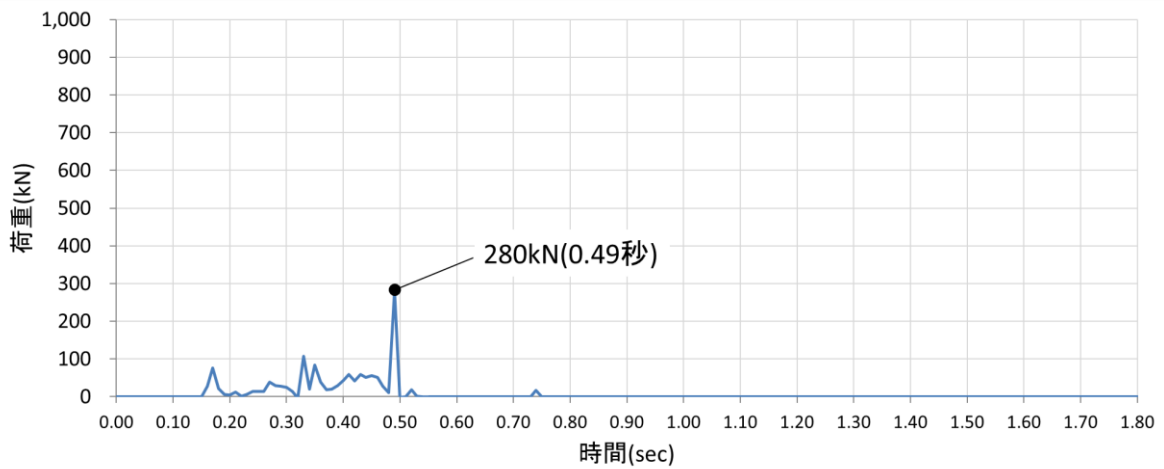


図 4.5.6-17 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

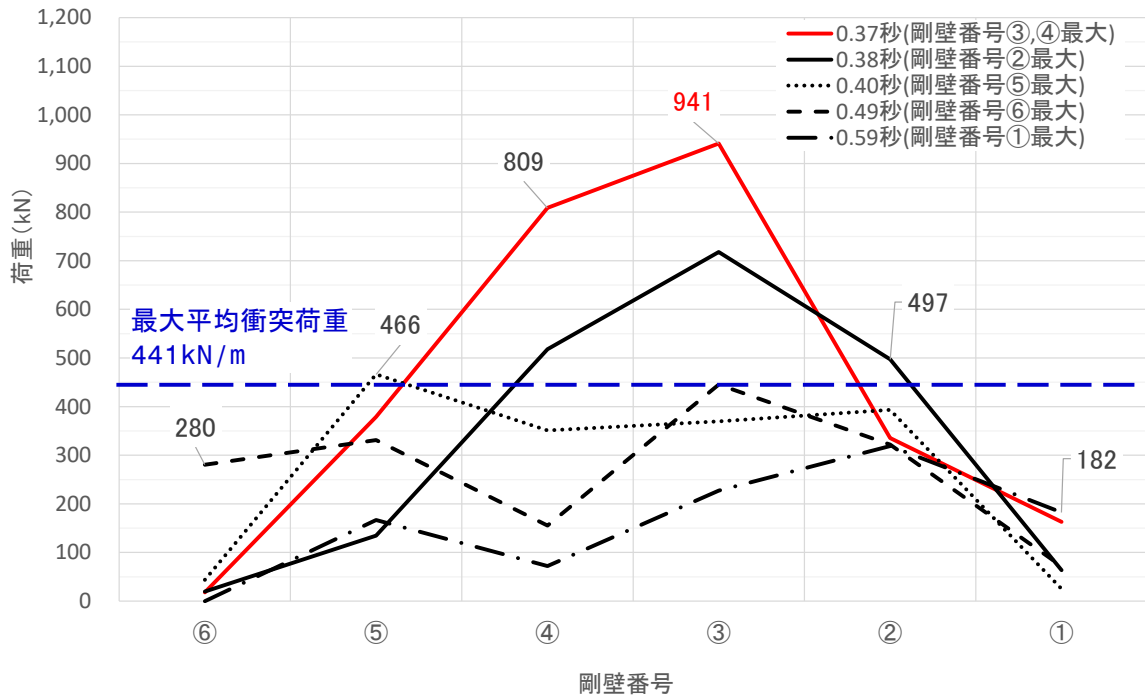


図 4.5.6-18 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

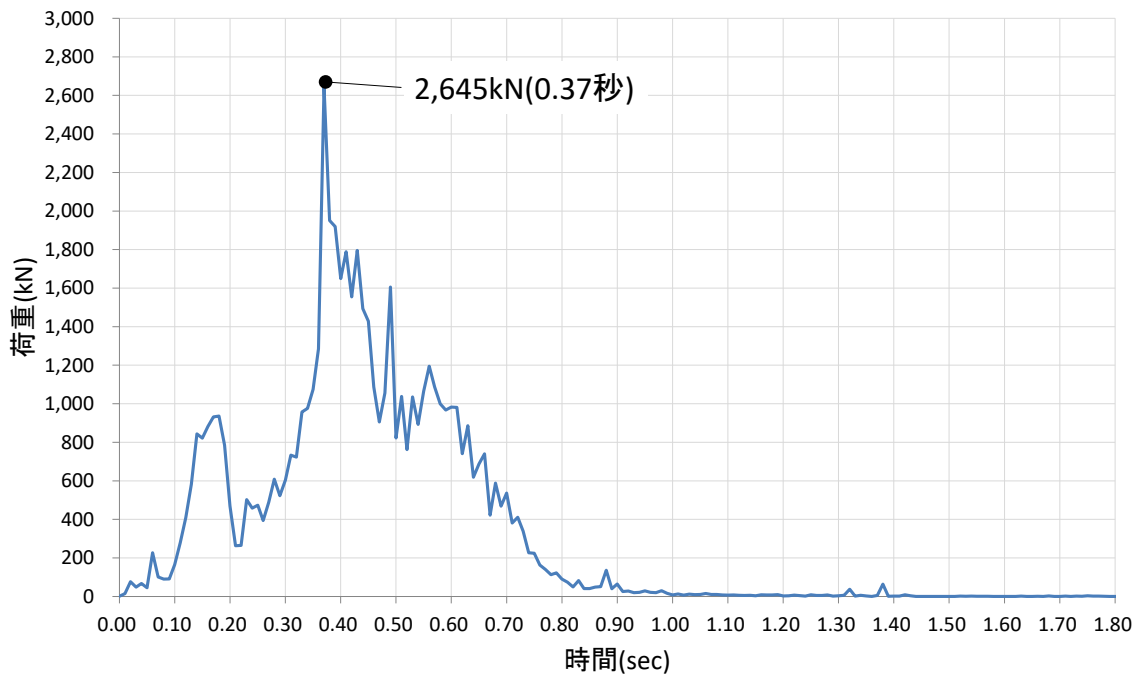


図 4.5.6-19 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

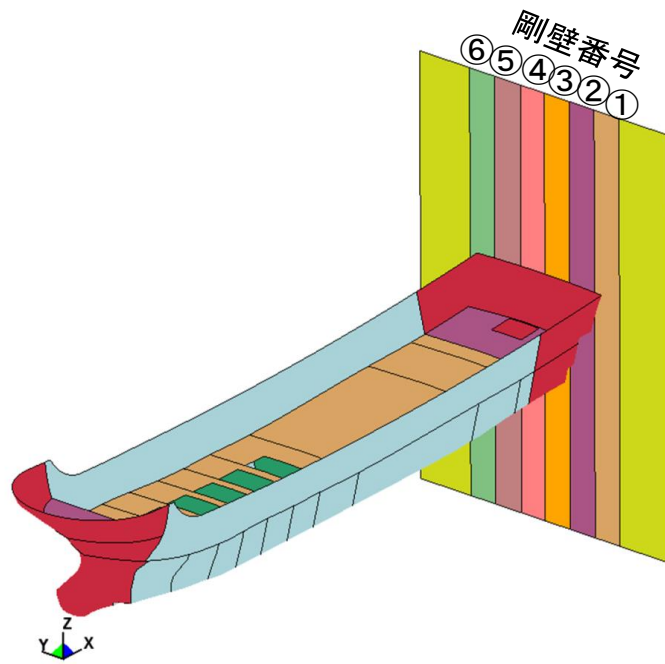
(b) ケース②（船尾衝突）

ケース②（船尾衝突）の解析結果のまとめを以下に示す。図 4.5.6-20 に衝突状況，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，図 4.5.6-23 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，表 4.5.6-7 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめを示す。

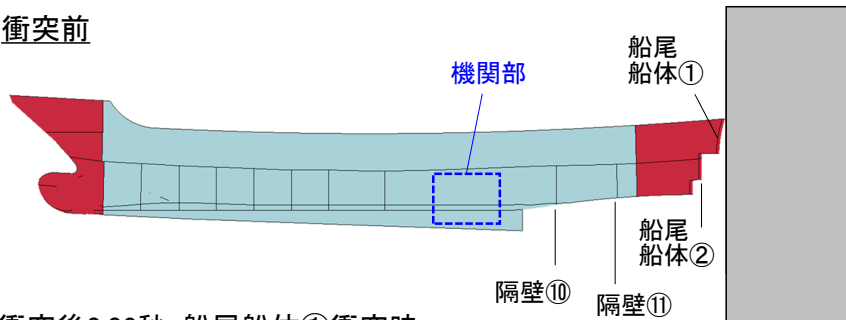
- ・表 4.5.6-7 及び図 4.5.6-21 より，剛壁 1m 当たりに作用する衝突荷重は，船尾の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号⑥において衝突後 0.40 秒（隔壁⑩衝突時付近）で最大となる衝突荷重 663kN が作用することを確認した。なお，ケース①の最大衝突荷重（941kN）と比較して，作用する衝突荷重が小さくなることを確認した。
- ・衝突荷重の作用時間は 1.50 秒程度であり，ケース①（船首衝突）と同程度となることを確認した。
- ・図 4.5.6-22 より，剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重は分布的に作用していることを確認した。また，各剛壁の最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重の平均値（荷重作用幅 6m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.44 秒で 337kN/m となる。
- ・図 4.5.6-23 より，各剛壁（剛壁番号①～⑥）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突後 0.44 秒で最大となる 2,021kN となることを確認した。
- ・図 4.5.6-20 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。

表 4.5.6-7 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめ

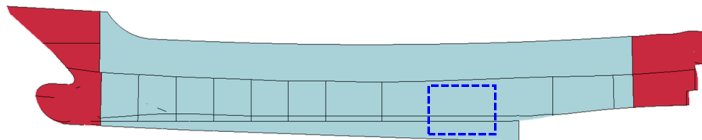
剛壁番号	剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重 (kN)	衝突時刻 (秒)
①	650	0.46
②	568	0.39
③	627	0.44
④	341	0.36
⑤	574	0.47
⑥	663	0.40



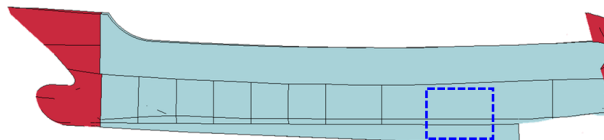
衝突前



衝突後0.03秒：船尾船体①衝突時



衝突後0.44秒：隔壁⑪付近衝突時



衝突後1.80秒

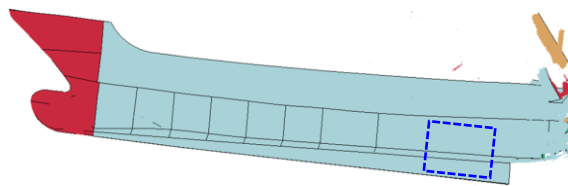
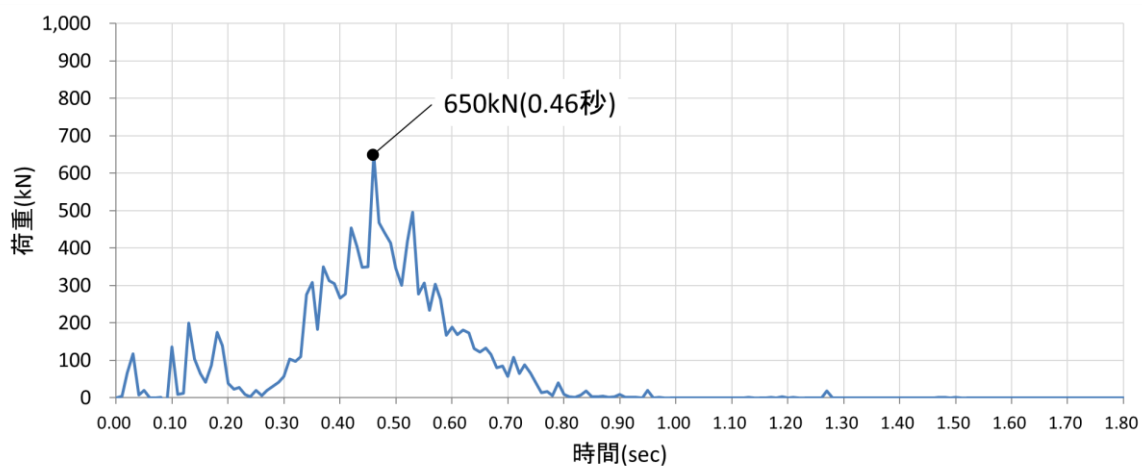
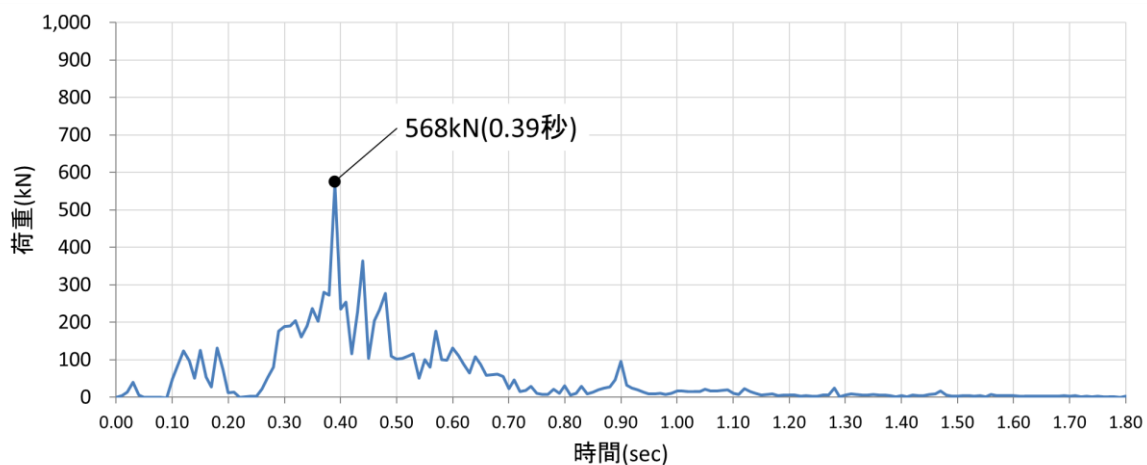


图 4.5.6-20 衝突状况

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

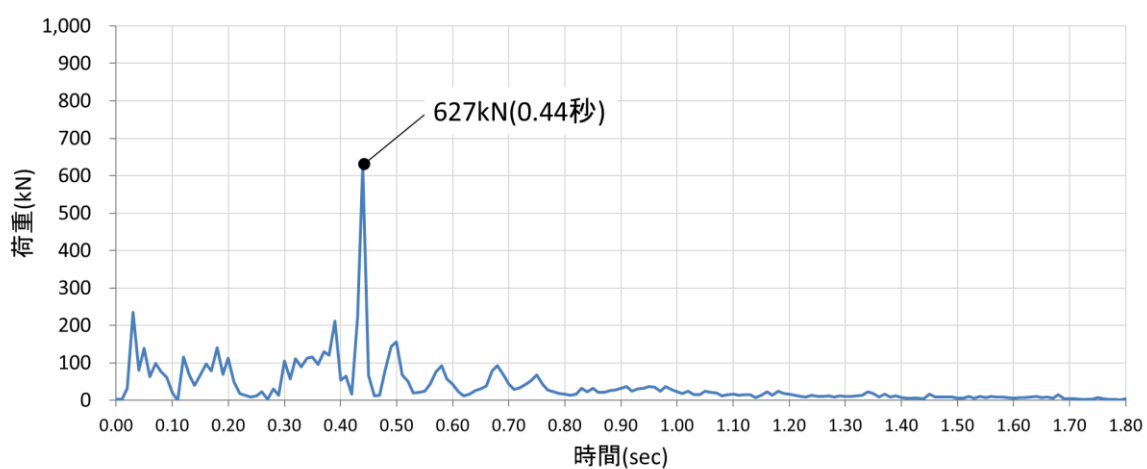
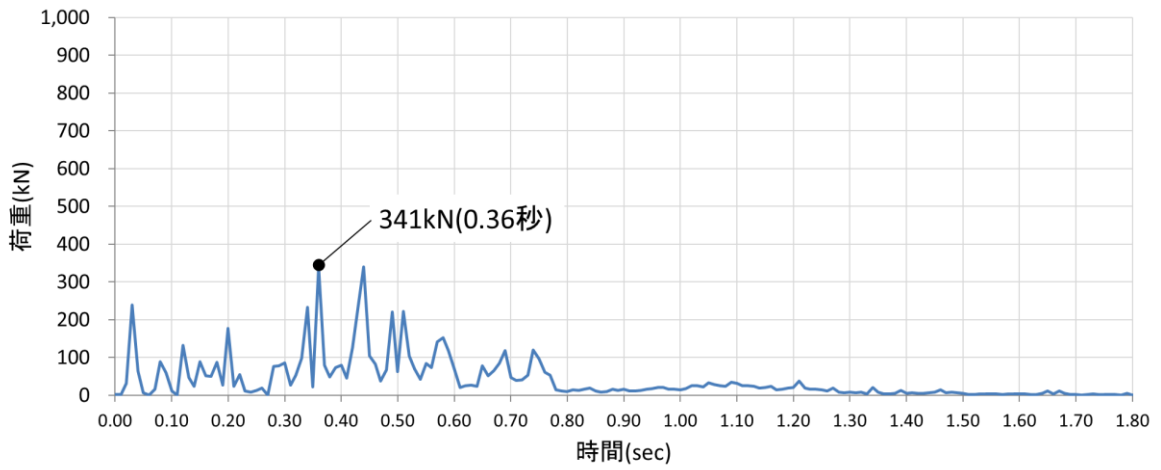
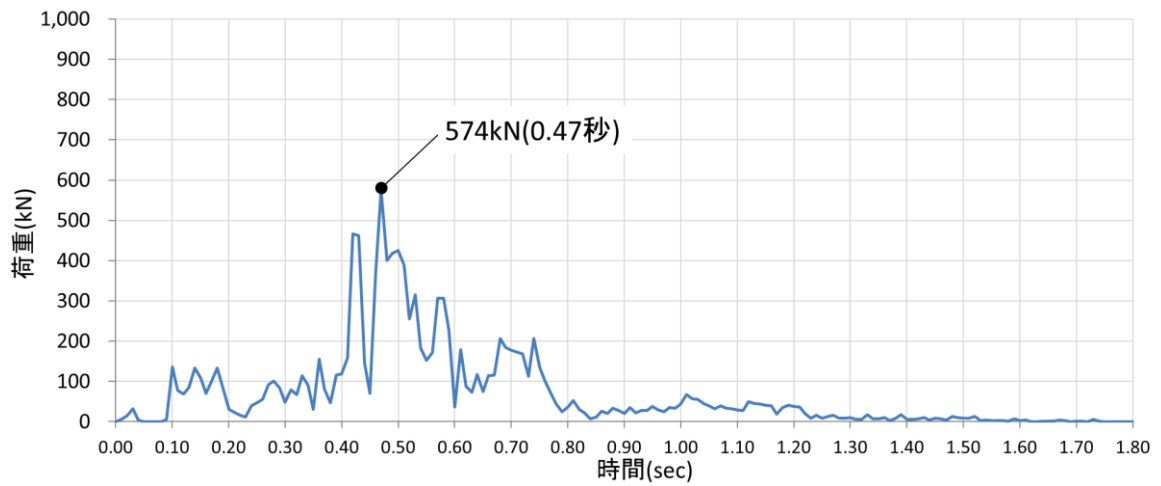


図 4.5.6-21 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

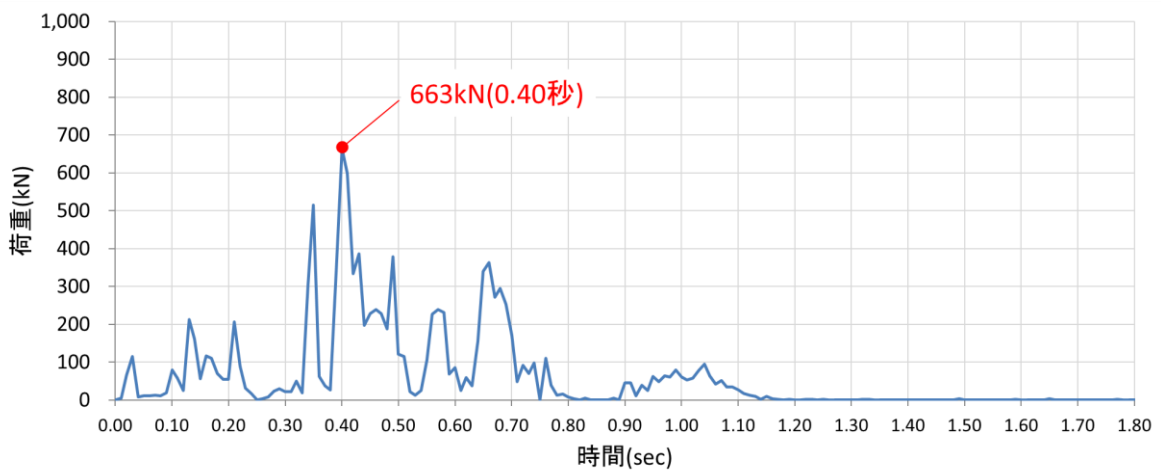


図 4.5.6-21 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

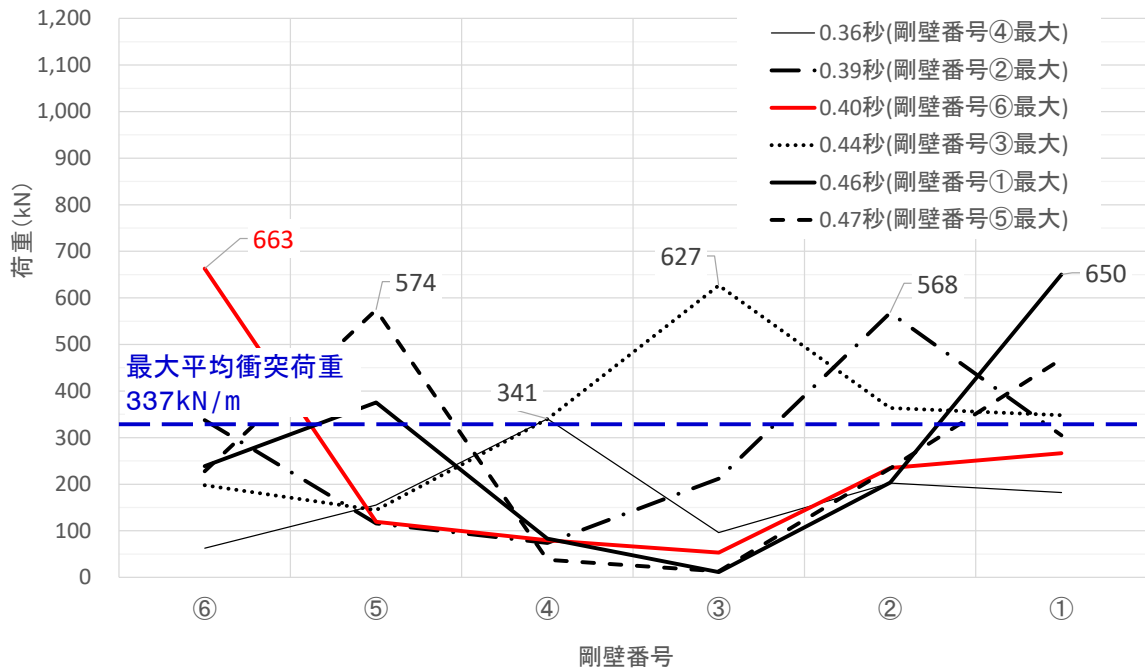


図 4.5.6-22 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

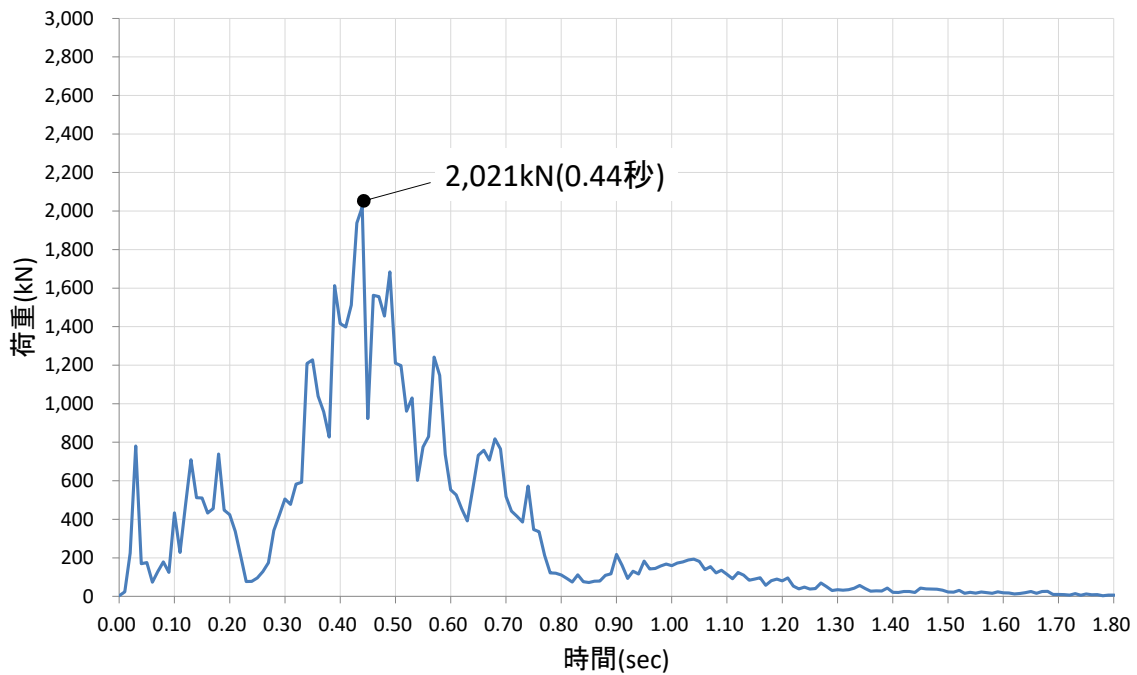


図 4.5.6-23 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

(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 4.5.6-24 に衝突状況，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，図 4.5.6-27 に各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴，表 4.5.6-8 に剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめを示す。

- ・表 4.5.6-8 及び図 4.5.6-25 より，剛壁 1m 当たりの衝突荷重は，船体側面の破壊に伴い大きくなり，剛壁番号⑩において衝突後 0.07 秒（船側②衝突時）で最大となる衝突荷重 599kN 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。
- ・衝突荷重の作用時間は 0.40 秒程度となり，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 4.5.6-26 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，各剛壁の最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重の平均値（荷重作用幅 24m で除した等分布荷重）は，衝突後 0.03 秒で 335kN/m となる。
- ・図 4.5.6-27 より，各剛壁（剛壁番号①～⑤）の衝突荷重を集計した場合においては，衝突後 0.03 秒で最大となる 8,033kN となることを確認した。
- ・図 4.5.6-24 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。

表 4.5.6-8 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重のまとめ

剛壁 番号	剛壁 1m 当たりの 最大衝突荷重 (kN)	衝突時刻 (秒)
①	0	—
②	23	0.05
③	90	0.06
④	252	0.07
⑤	474	0.04
⑥	508	0.03
⑦	461	0.02
⑧	558	0.03
⑨	548	0.07
⑩	599	0.07
⑪	399	0.03
⑫	528	0.03
⑬	455	0.03
⑭	485	0.03
⑮	462	0.03
⑯	552	0.03
⑰	551	0.03
⑱	489	0.03
⑲	497	0.03
⑳	479	0.03
㉑	297	0.07
㉒	340	0.07
㉓	128	0.08
㉔	302	0.09
㉕	380	0.09

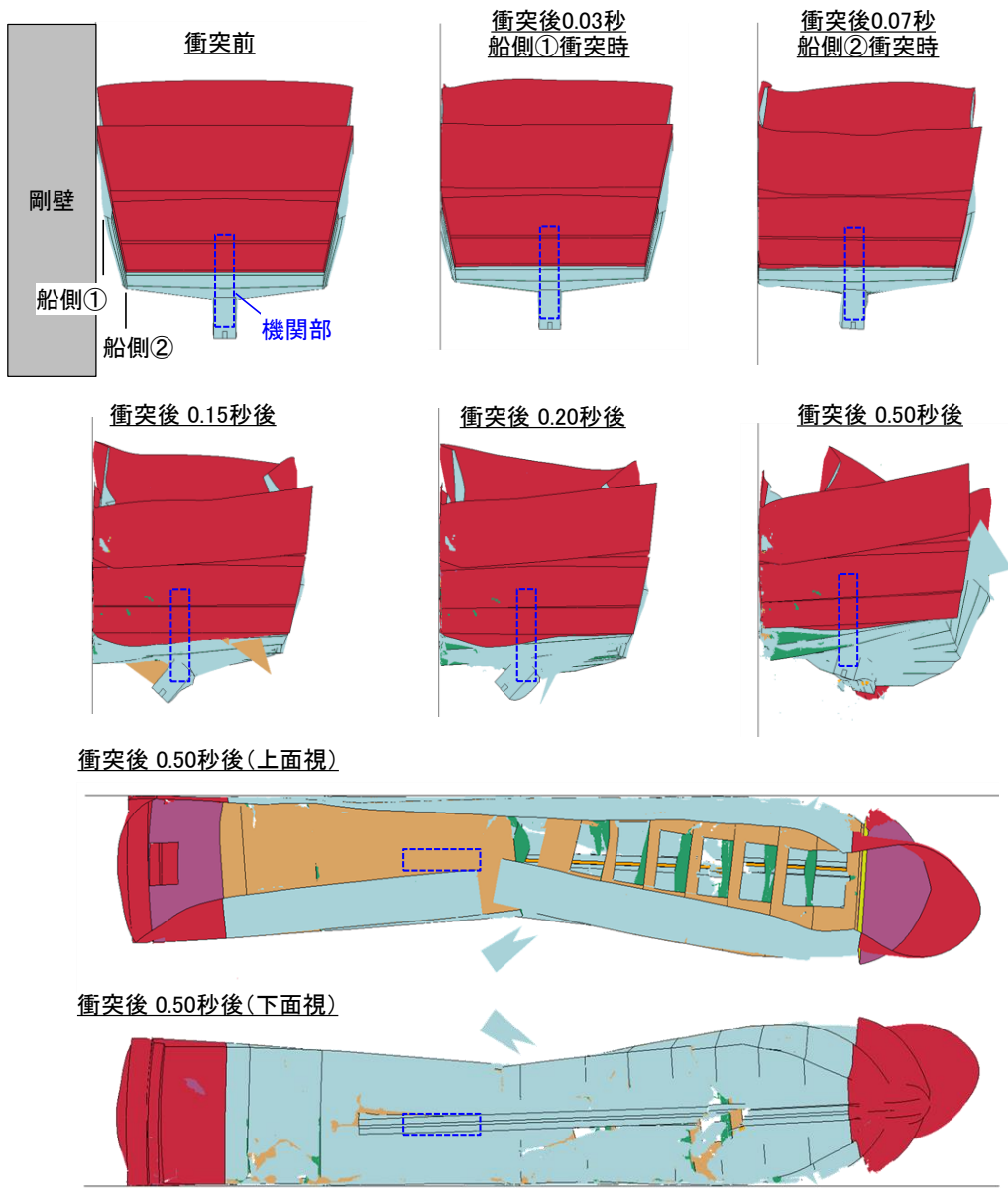
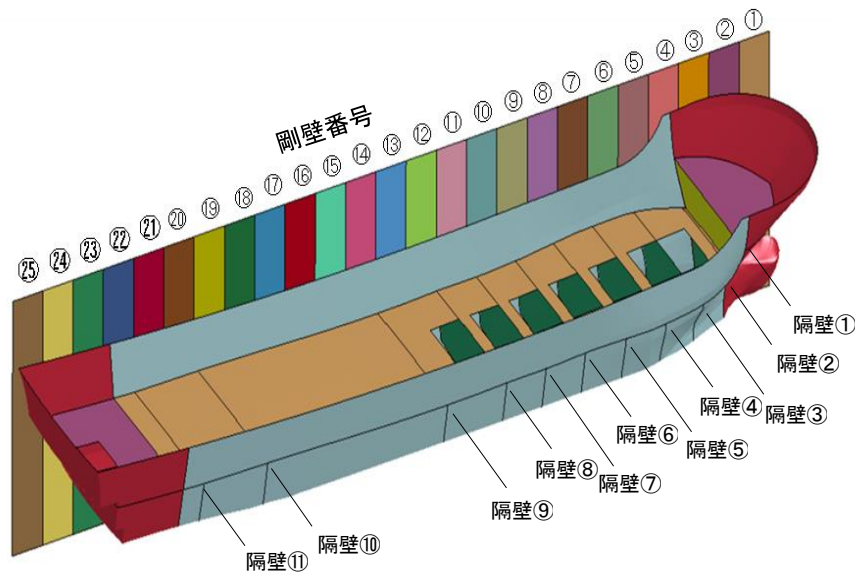
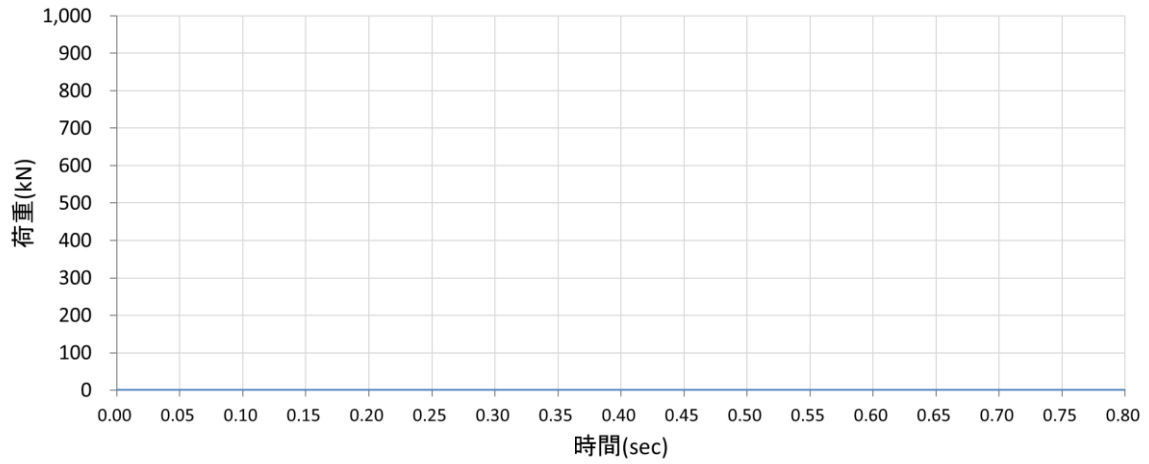
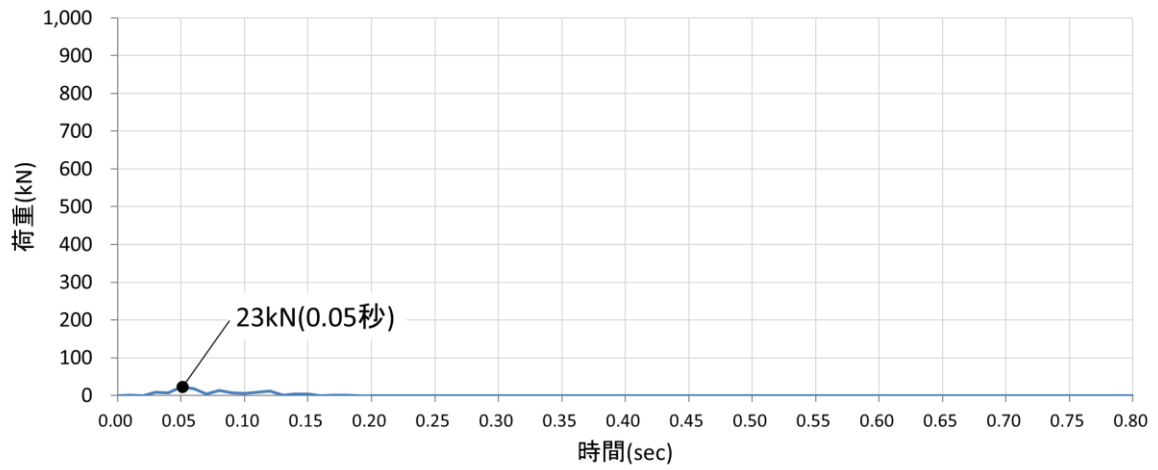


图 4.5.6-24 衝突狀況

剛壁番号①



剛壁番号②



剛壁番号③

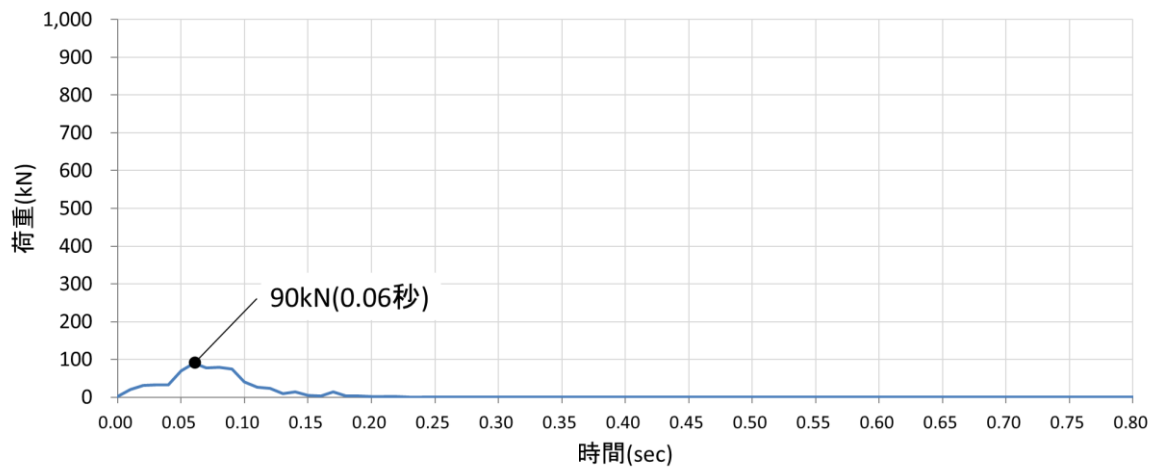
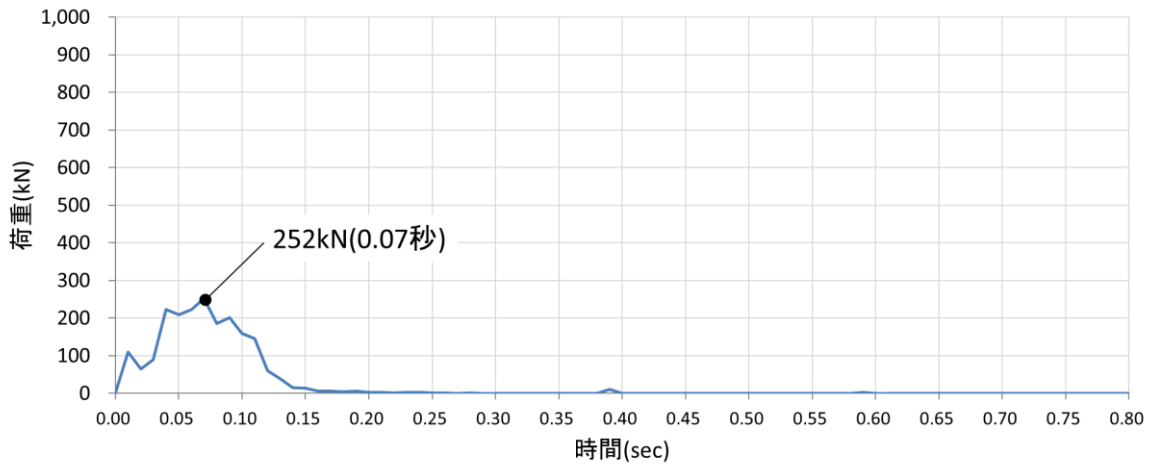
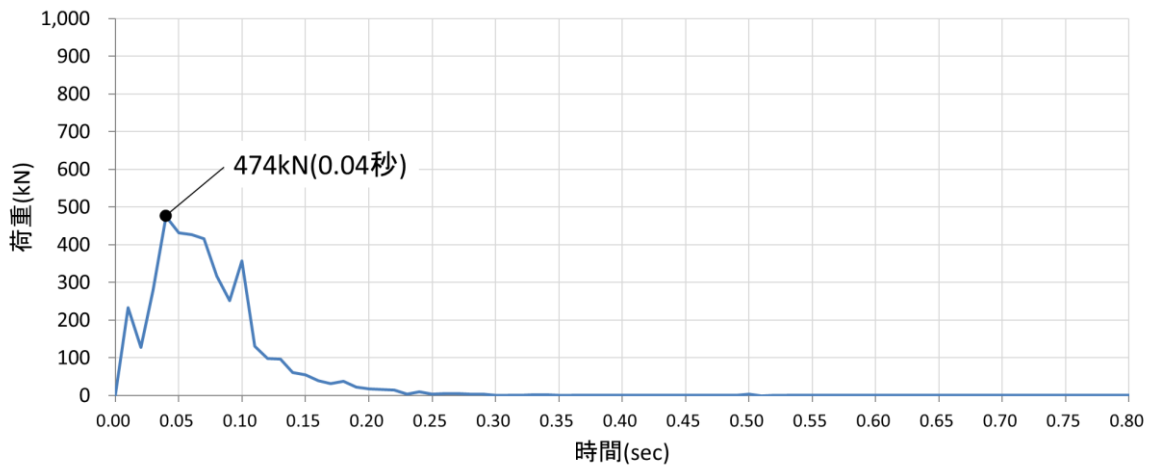


図 4.5.6-25 (1) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号④



剛壁番号⑤



剛壁番号⑥

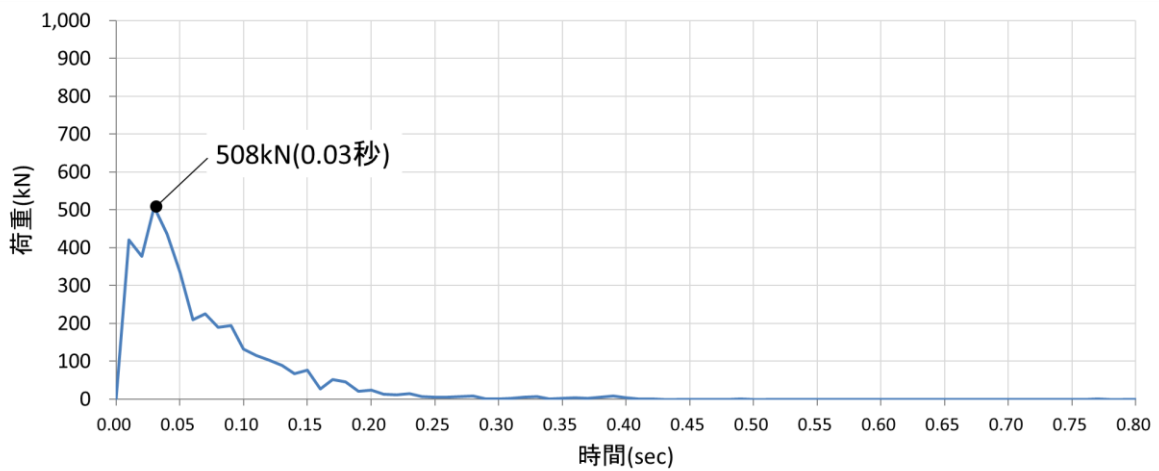
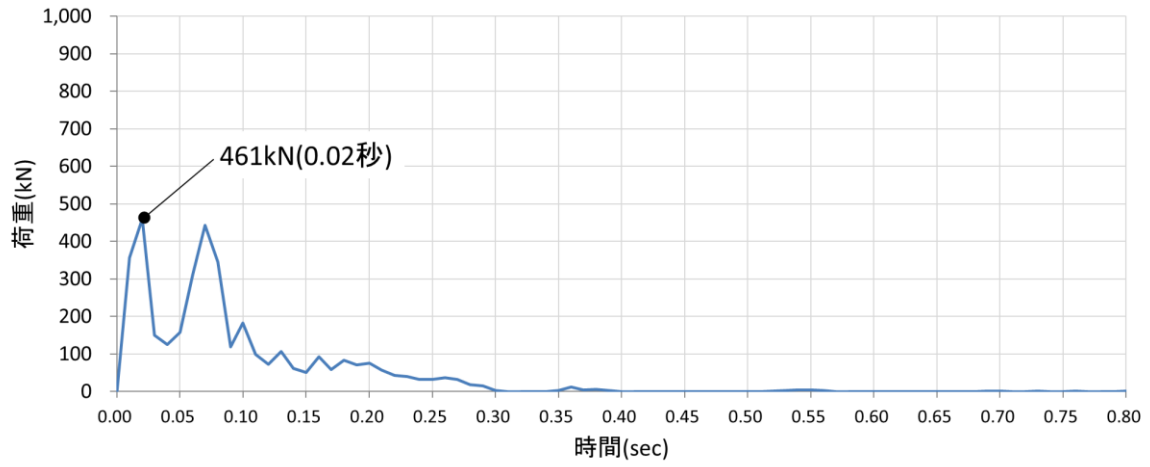
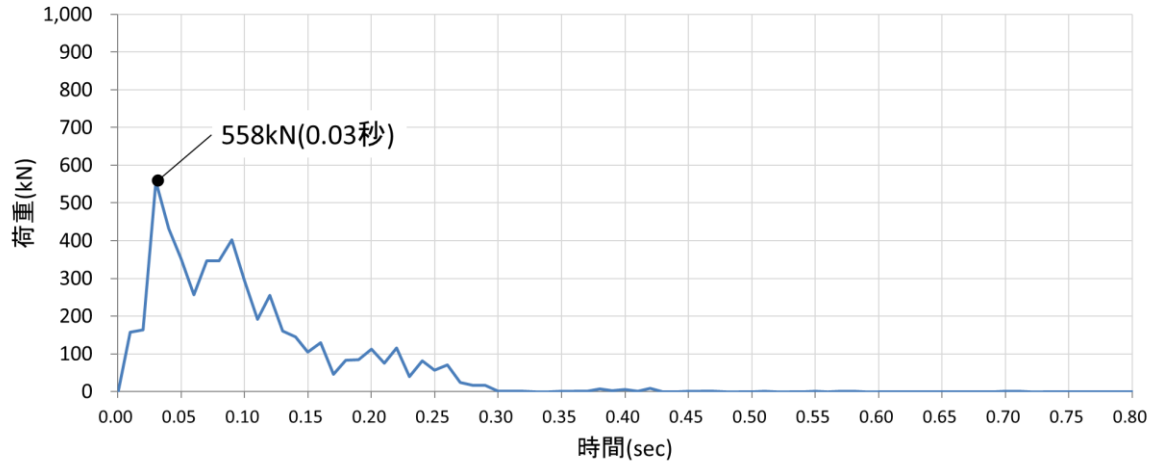


図 4.5.6-25 (2) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑦



剛壁番号⑧



剛壁番号⑨

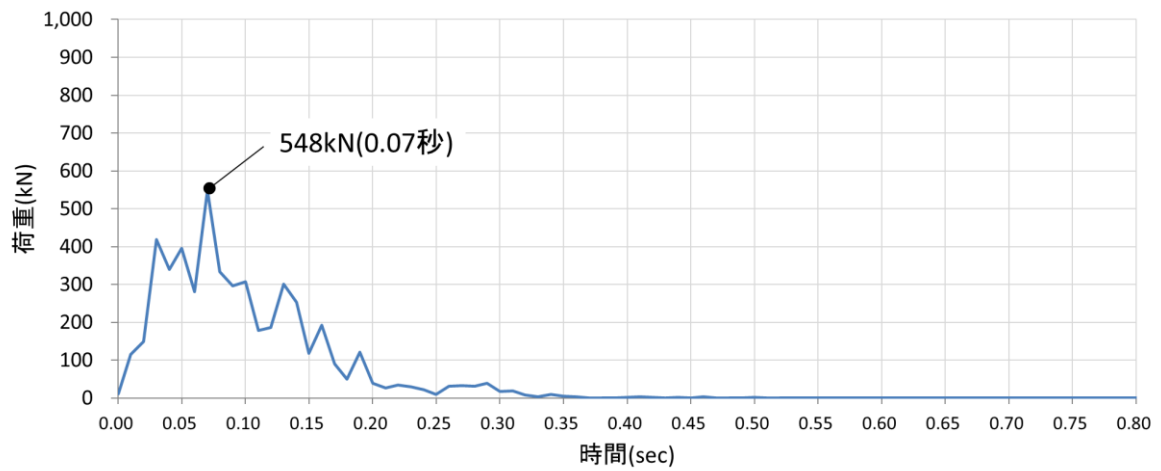
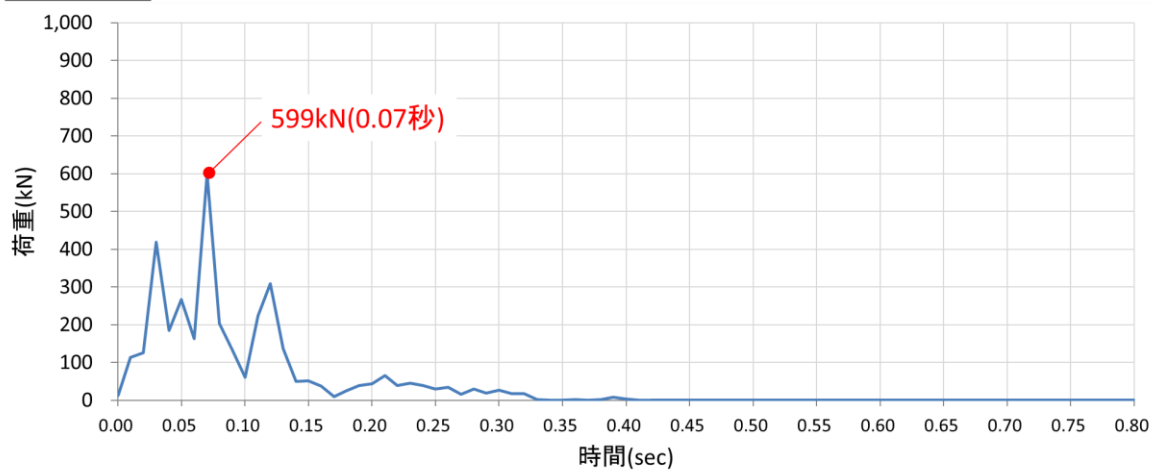
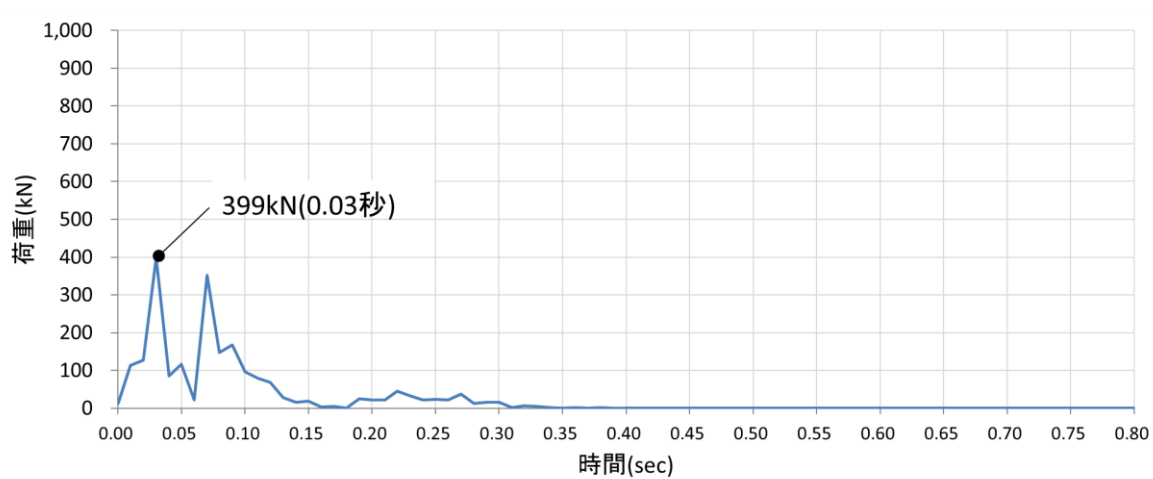


図 4.5.6-25 (3) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑩



剛壁番号⑪



剛壁番号⑫

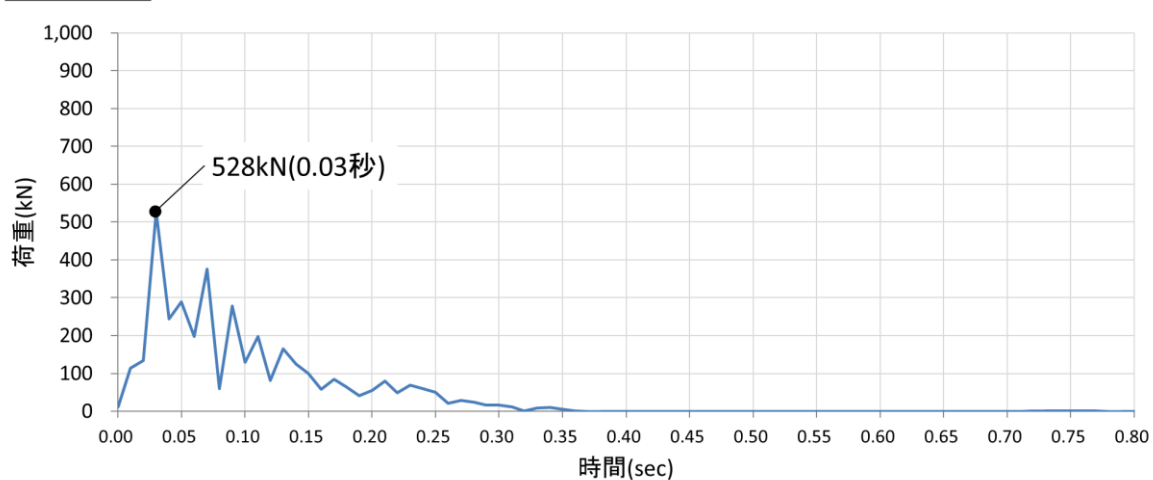
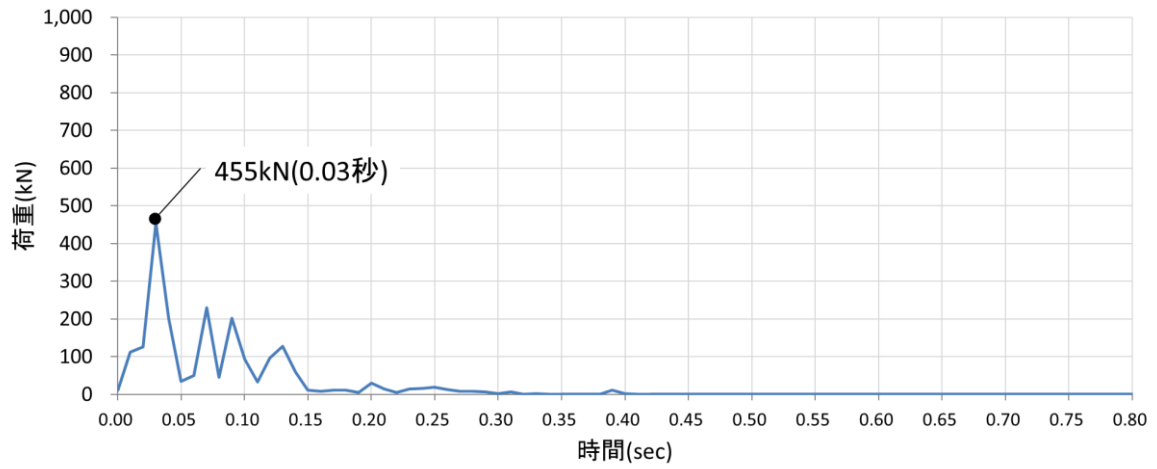
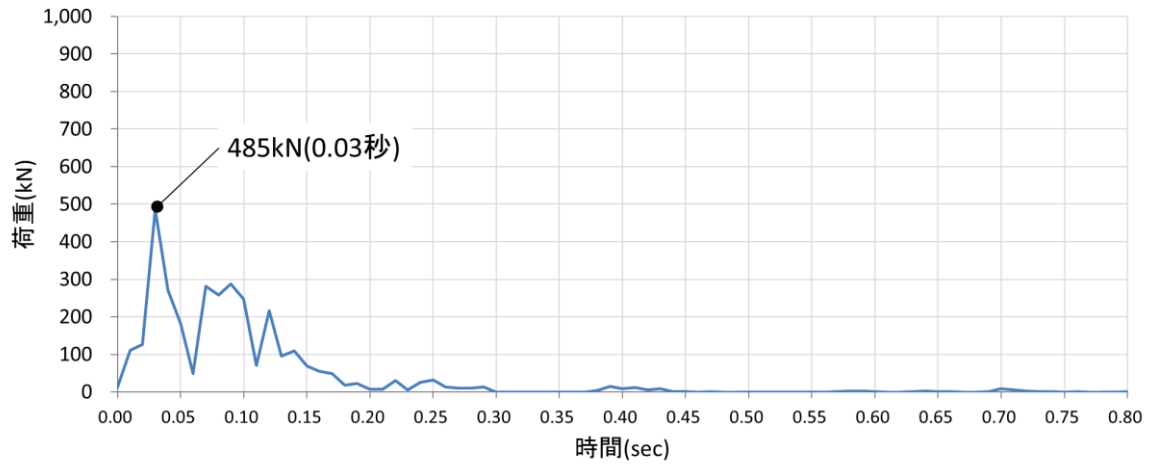


図 4.5.6-25 (4) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

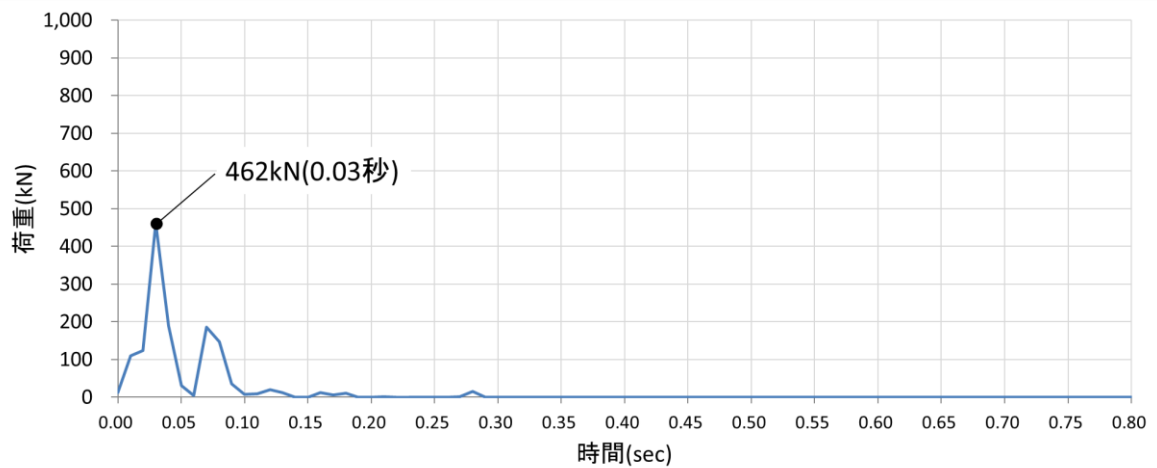
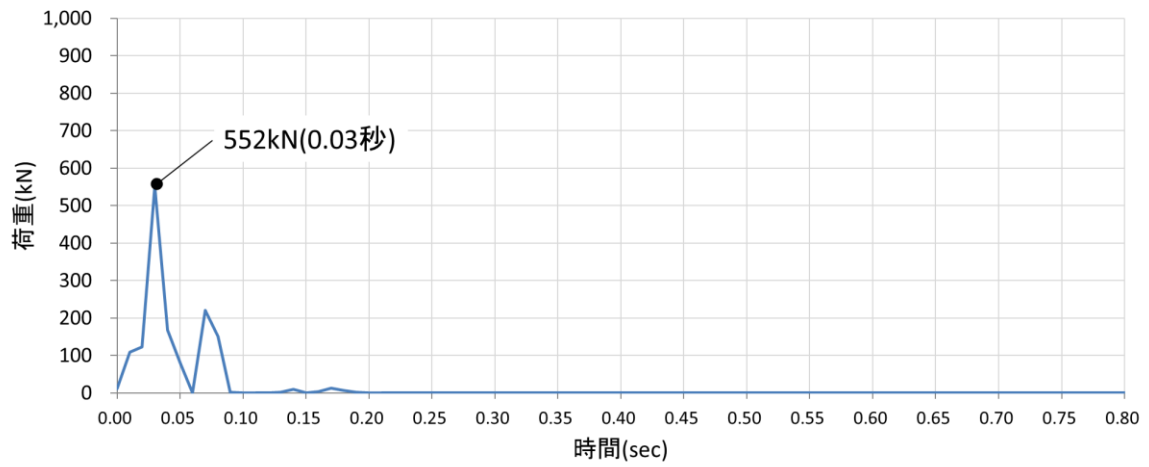
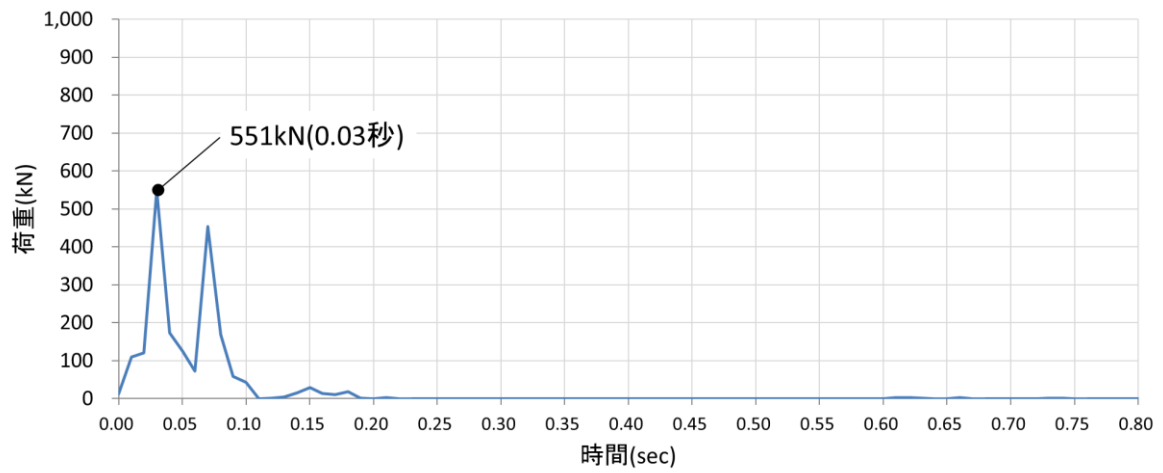


図 4.5.6-25 (5) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑬



剛壁番号⑭



剛壁番号⑮

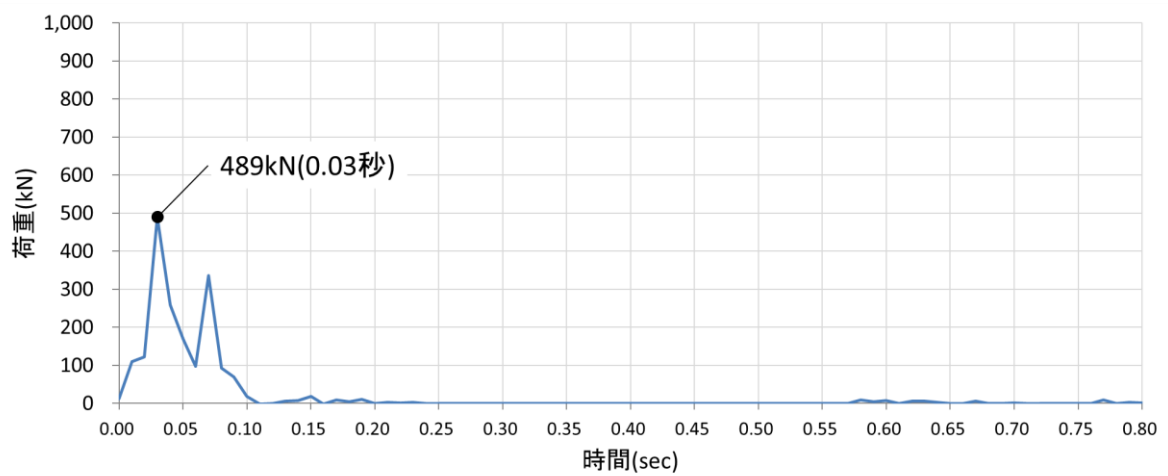
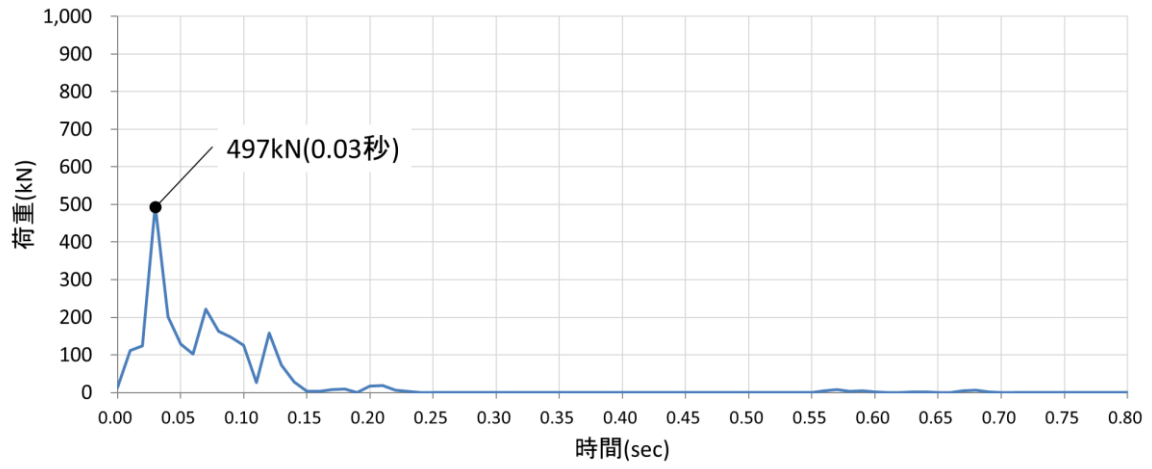
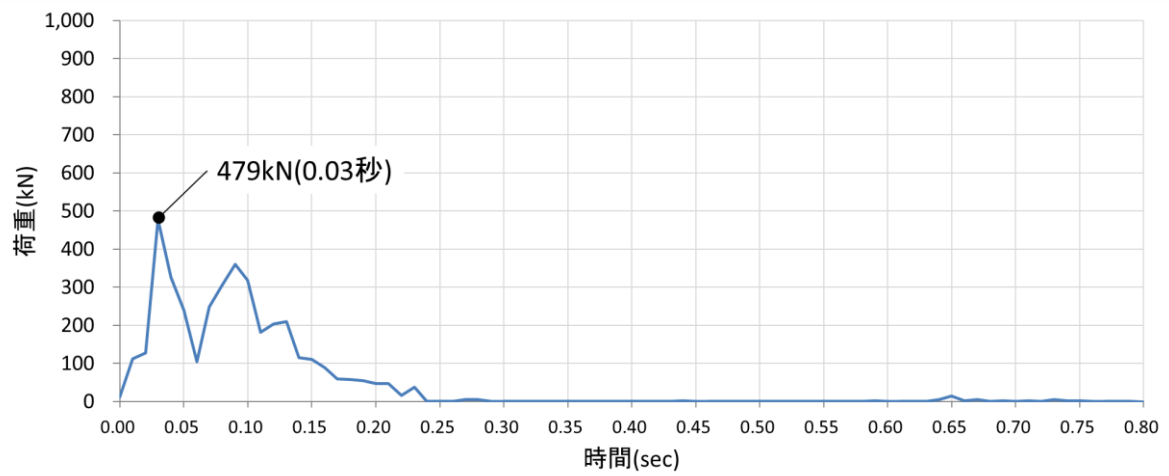


図 4.5.6-25 (6) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑱



剛壁番号㉑



剛壁番号㉒

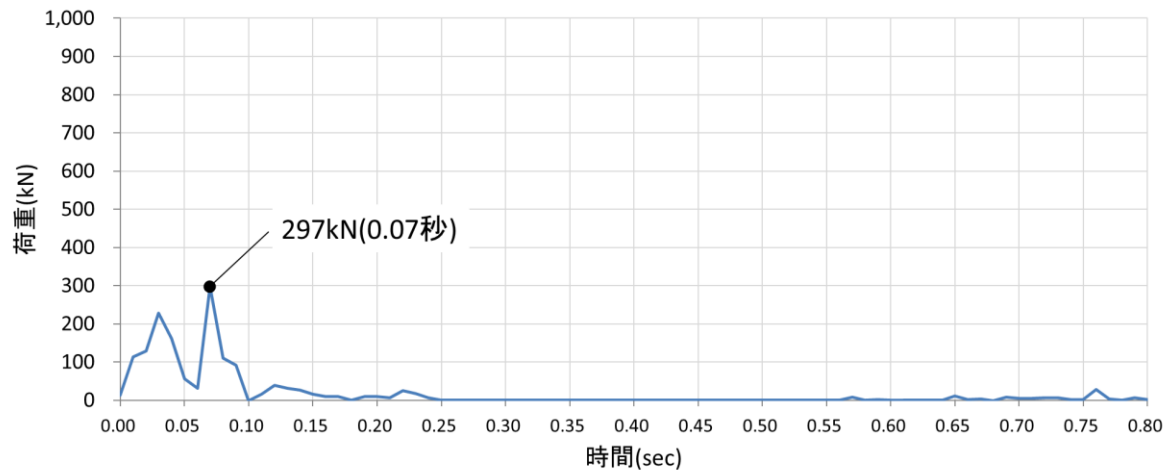
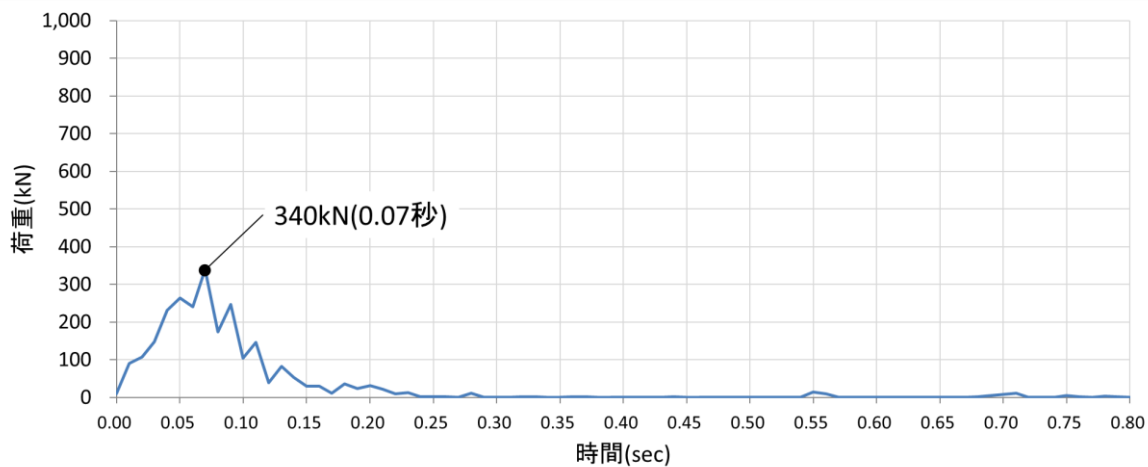
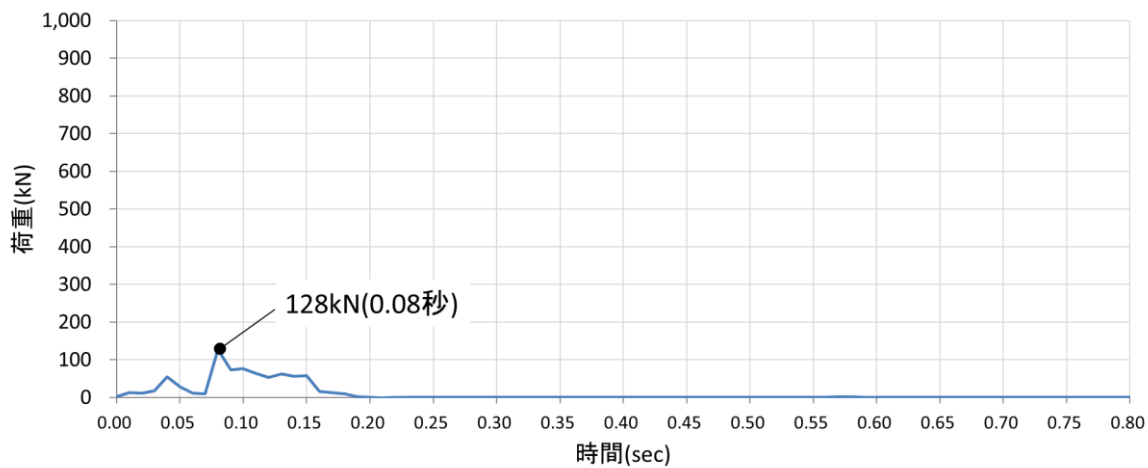


図 4.5.6-25 (7) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑳



剛壁番号㉓



剛壁番号㉔

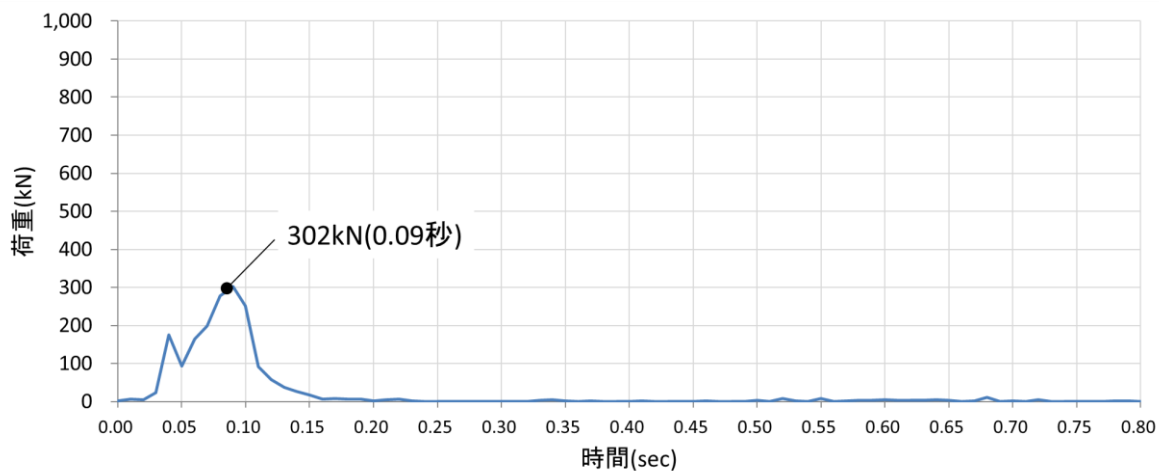


図 4.5.6-25 (8) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

剛壁番号⑫

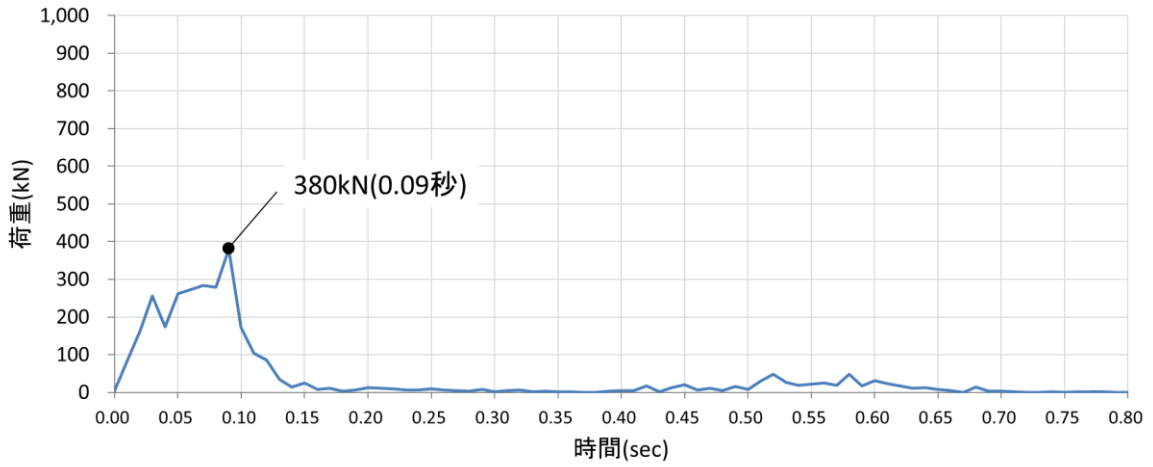


図 4.5.6-25 (9) 剛壁 1m 当たりの衝突荷重の時刻歴

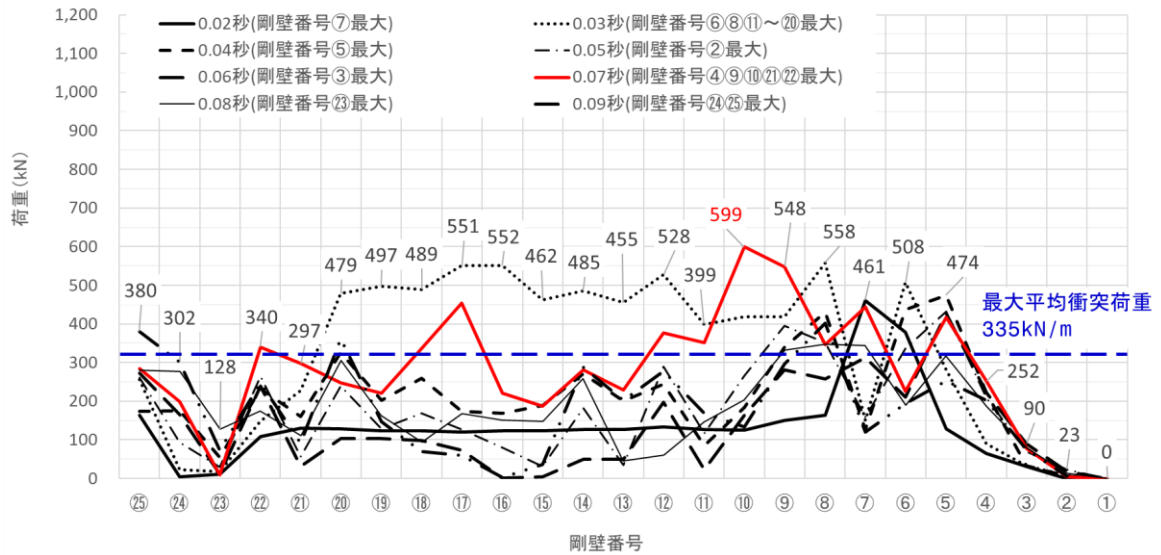


図 4.5.6-26 剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重発生時刻における衝突荷重分布

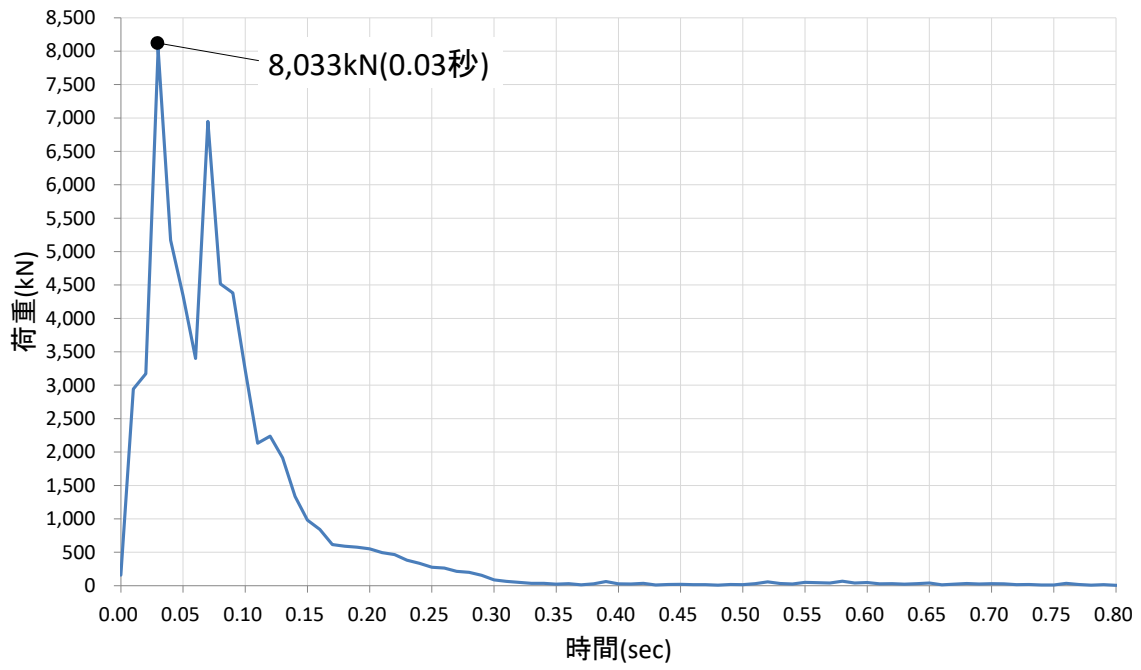


図 4.5.6-27 各剛壁の衝突荷重を集計した時刻歴

(d) ケース④ (斜め船首衝突)

追而

(e) ケース⑤ (斜め船尾衝突)

追而

(f) まとめ（衝突速度 10.0m/s）

表 4.5.6-9 に衝突荷重のまとめとして、ケース①～⑤における剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重を示す。

表 4.5.6-9 より、剛壁 1m 当たりの衝突荷重は、ケース①（船尾衝突）の 941kN が最大となることを確認した。

衝突荷重の発生状況として、ケース①（船首衝突）及びケース②（船尾衝突）は、船幅（約 6m）が剛壁面に直角となる衝突形態であるため、局所的に大きな衝突荷重が発生するのに対して、ケース③（真横衝突）は、船長さ（約 25m）が剛壁面に直角となる衝突形態であるため、剛壁の広範囲にわたって分布的な衝突荷重が発生していることを確認した。

機関部（エンジン）の影響確認として、ケース①～③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 4.5.6-9 衝突荷重のまとめ（ケース①～⑤）

ケース	衝突形態	剛壁 1m 当たりの 衝突荷重 【kN】
①	船首	941
②	船尾	663
③	真横	599
④	斜め船首	追而
⑤	斜め船尾	追而

f. 解析結果（衝突速度：6.0m/s）

(a) ケース⑥（船首衝突）

追而

(b) ケース⑦ (船尾衝突)

追而

(c) ケース⑧ (真横衝突)

追而

(d) ケース⑨ (斜め船首衝突)

追而

(e) ケース⑩ (斜め船尾衝突)

追而

(f) まとめ (衝突速度 6.0m/s)

追而

g. 衝突解析による衝突荷重のまとめ

衝突速度 10.0m/s（ケース①～⑤）及び 6.0m/s（ケース⑥～⑩）の衝突荷重のまとめとして、剛壁 1m 当たりの最大衝突荷重を表 4.5.6-10 及び表 4.5.6-11 に示す。

また、衝突解析による衝突荷重と比較するため、「FEMA（2012）」による衝突荷重を参考として算定した。

「FEMA（2012）」による衝突荷重は、「土木学会（1994）」の文献等を用いて、船首形状寸法等から船首方向の有効軸剛性を設定して算定した結果、衝突速度 10.0m/s で 1,815kN（添付資料 4）となった。なお、「FEMA（2012）」による衝突荷重は荷重作用幅に関する規定がないため、衝突解析による剛壁 1m 当たりの衝突荷重（船首）941kN と比較すると大きな荷重となった。

表 4.5.6-10 衝突速度 10.0m/s の衝突荷重のまとめ（ケース①～⑤）

算定方法	衝突形態	剛壁 1m 当たりの衝突荷重【kN】
衝突解析	① 船首	941
	② 船尾	663
	③ 真横	599
	④ 斜め船首	追而
	⑤ 斜め船尾	追而
【参考】FEMA（2012）	船首	1,815

表 4.5.6-11 衝突速度 6.0m/s の衝突荷重のまとめ（ケース⑥～⑩）

算定方法	衝突形態	剛壁 1m 当たりの衝突荷重【kN】
衝突解析	⑥ 船首	追而
	⑦ 船尾	追而
	⑧ 真横	追而
	⑨ 斜め船首	追而
	⑩ 斜め船尾	追而
【参考】FEMA（2012）	船首	追而

(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「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】（衝突速度：10.0m/s）

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

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）

【道路橋示方書(2002)算定式】（衝突速度：6.0m/s）

$$P = 0.1 W v \\ = 0.1 \times 559 \times 6.0 = 335.4 = 336 \text{ (kN)}$$

ここに、

P：漂流物衝突荷重

W：漂流物の重量（=559kN）

v：漂流物の衝突速度（=6.0m/s）

(3) 設計用の漂流物衝突荷重の設定

a. 漂流物衝突荷重による施設評価

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及び防波壁通路防波扉であり、それぞれ鉄筋コンクリート造又は鋼製で構成された構造物であることから、「各部材による照査」又は「施設全体による照査」を行う。

「各部材による照査」では、各部材に対して評価が厳しくなる位置に局所的な衝突荷重を作用させて評価する。

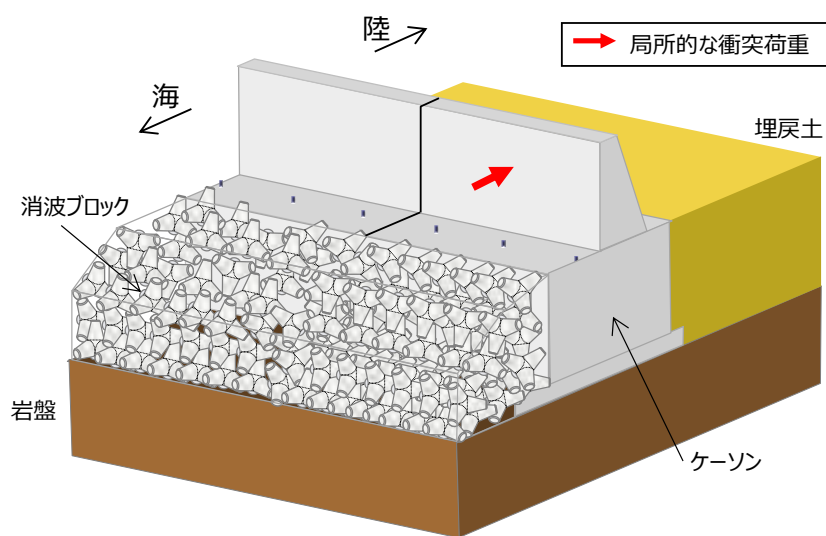


図 4.5.6-28 局所的に作用する衝突荷重状況 (例)

また、「施設全体による照査」では、施設全体に分布的な衝突荷重を作用させて、部材に対しては「各部材による照査」と比較し、影響が大きい場合について評価するとともに、施設全体の安定性による評価を行う。

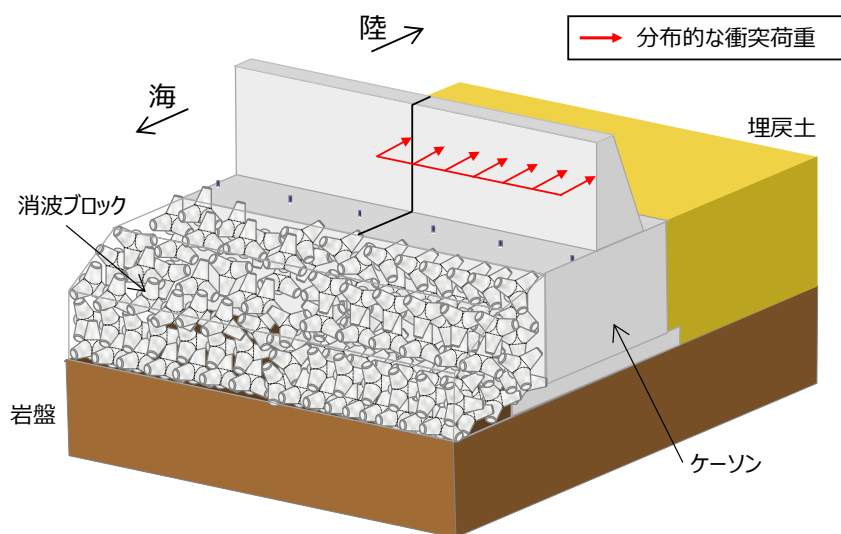


図 4.5.6-29 分布的に作用する衝突荷重状況 (例)

b. 設計用衝突荷重の設定

設計用衝突荷重は、漂流物の初期配置を踏まえて安全側の評価となる設定を行う。また、衝突解析による衝突荷重は、衝突形態に応じて「剛壁に対して局所的な衝突荷重」又は「船長さ又は船幅に対して分布的な衝突荷重」が生るため、施設の特徴に応じて2種類の設計用衝突荷重を設定する。

設計用衝突荷重 (1)

剛壁に対して局所的 (1m 当たり) に生じる衝突荷重として、漂流物の初期配置が直近海域にある場合は、衝突解析により衝突荷重を算定することができる。また、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ことができるが、本算定式による衝突荷重は荷重作用幅に関する規定がないため、剛壁 1m 当たりの衝突荷重に相当すると考える。

そのため、剛壁に対して局所的 (1m 当たり) に作用する設計用衝突荷重 (1) は、衝突解析による衝突荷重と「道路橋示方書 (2002)」による衝突荷重を比較して、安全側の評価となる衝突荷重を踏まえて設定する。なお、参考として「FEMA (2012)」による衝突荷重を示す。

表 4.5.6-12 及び表 4.5.6-13 に衝突荷重のまとめと設計用衝突荷重を示す。

表 4.5.6-12 衝突荷重のまとめと設計用衝突荷重 (衝突速度: 10.0m/s)

算定方法	衝突形態	剛壁 1m 当たりの衝突荷重 【kN】	漂流物の初期配置
衝突解析	① 船首	941	直近海域
	② 船尾	663	
	③ 真横	599	
	④ 斜め船首	追而	
	⑤ 斜め船尾	追而	
道路橋示方書 (2002)	—	559	前面海域
設計用衝突荷重		追而	—
【参考】 FEMA (2012)	船首	1,815	直近海域

表 4.5.6-13 衝突荷重のまとめと設計用衝突荷重（衝突速度：6.0m/s）

算定方法	衝突形態	剛壁 1m 当たりの衝突荷重【kN】	漂流物の初期配置
衝突解析	⑥ 船首	追而	直近海域
	⑦ 船尾	追而	
	⑧ 真横	追而	
	⑨ 斜め船首	追而	
	⑩ 斜め船尾	追而	
道路橋示方書（2002）	—	336	前面海域
設計用衝突荷重		追而	—
【参考】FEMA（2012）	船首	追而	直近海域

設計用衝突荷重（2）

衝突解析において、船長さ又は船幅に対して分布的な衝突荷重は、剛壁 1 m 当たりの衝突荷重の集計値で表すことができる。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）において各剛壁幅に応じた衝突荷重の集計値を図 4.5.6-30 に示す。

ケース①とケース②を比較すると、剛壁幅に応じた衝突荷重の集計値はケース①がケース②を包絡する結果となった。

ケース①とケース③を比較すると、剛壁幅 1 ～ 5 m まではケース①が、剛壁幅 6 m 以上ではケース③がそれぞれ包絡する結果となった。

そのため、分布的に作用する設計用衝突荷重（2）は、各ケースにおける剛壁幅に応じた衝突荷重の集計値を包絡する衝突荷重を設定する。

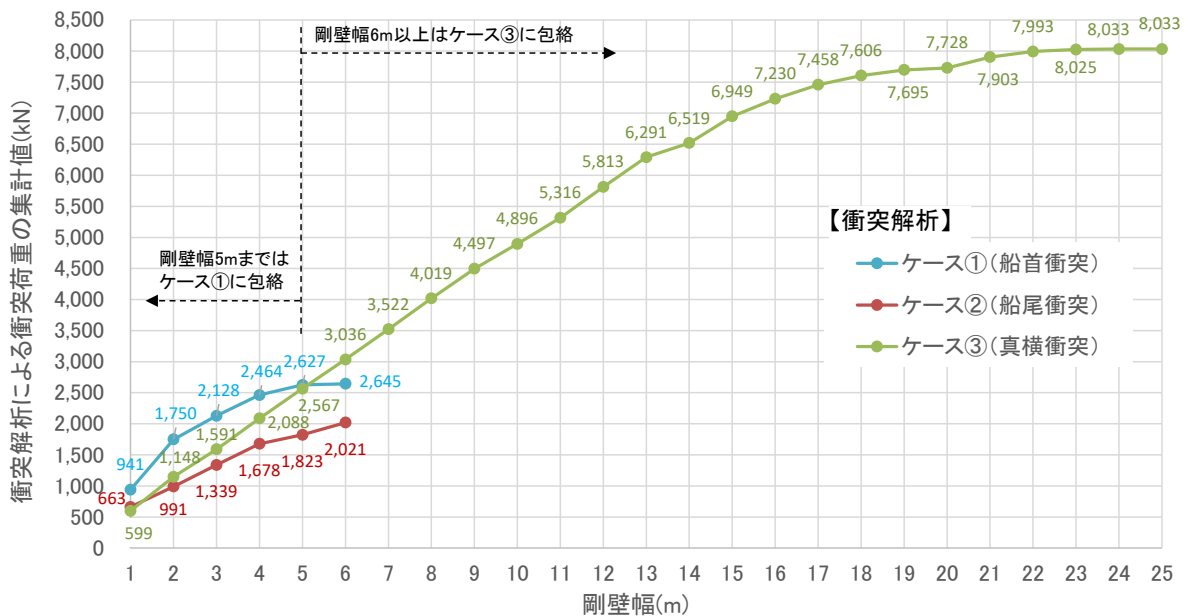


図 4.5.6-30 剛壁幅に応じた衝突荷重の集計値

以上のことから，対象施設に対する設計用衝突荷重（1）及び設計用衝突荷重（2）を表 4.5.6-14 に示す。

表 4.5.6-14 対象施設に対する設計用衝突荷重のまとめ

対象漂流物	重量 (t)	材質	対象 津波	流速 衝突 速度 (m/s)	初期 配置	衝突荷重 算定手法	設計用衝突荷重				
							波返重力 擁壁	防波壁 逆T 擁壁	多重鋼管 杭式擁壁	防波壁 通路 防波扉	
漁船 (総トン数19トン)	57.0	FRP	日本海 東縁	10.0	直近 海域	衝突解析	設計用衝突 荷重(1)	追而	追而	追而	追而
							設計用衝突 荷重(2)	追而	追而	追而	追而

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

1. 検討概要

島根原子力発電所においては、FRP船舶による衝突に対し、3次元非線形構造解析を用いて衝突荷重を算定している。

小型船舶（総トン数20トン以下）は、その多くがFRP製船舶であり、津波により陸上に打ち上げられる事例が多く記録されている。

FRP製船舶を対象とした衝突荷重の算定に係る評価手法は確立されていないが、FRP船舶による衝突荷重の算定について、FRP製の船舶を用いた落下衝突実験における衝突荷重の計測及び3次元非線形構造解析を用いた衝突荷重算定に関する研究より、衝突解析による衝突荷重の推定方法の妥当性を確認する。

さらに、島根原子力発電所におけるFRP製船舶に係る衝突解析条件の妥当性を確認した。本添付資料における検討フローを図1-1に示す。

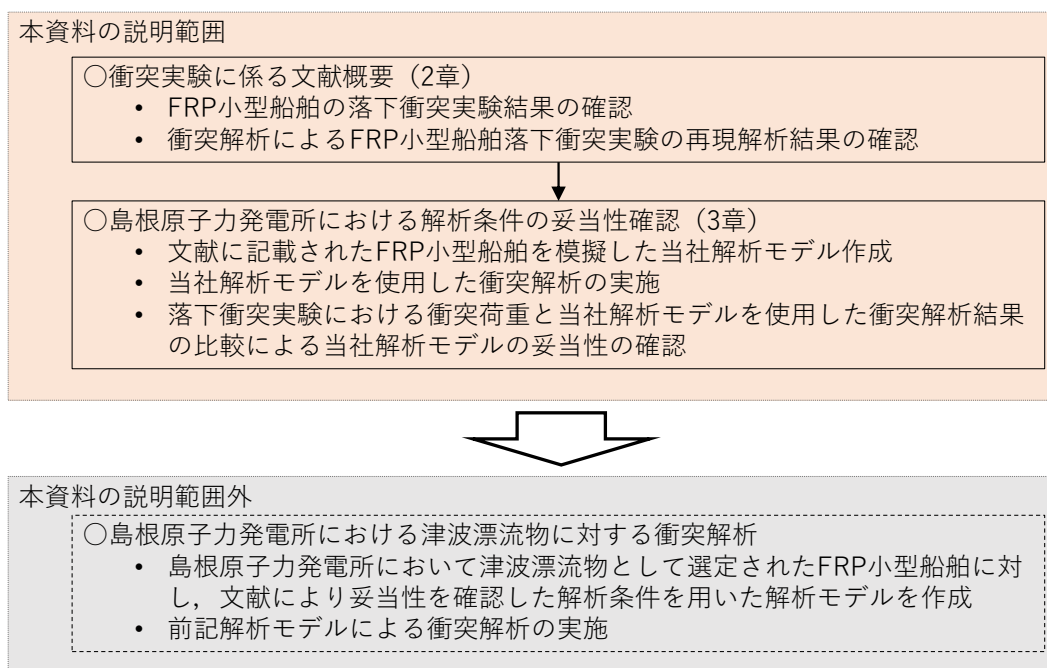
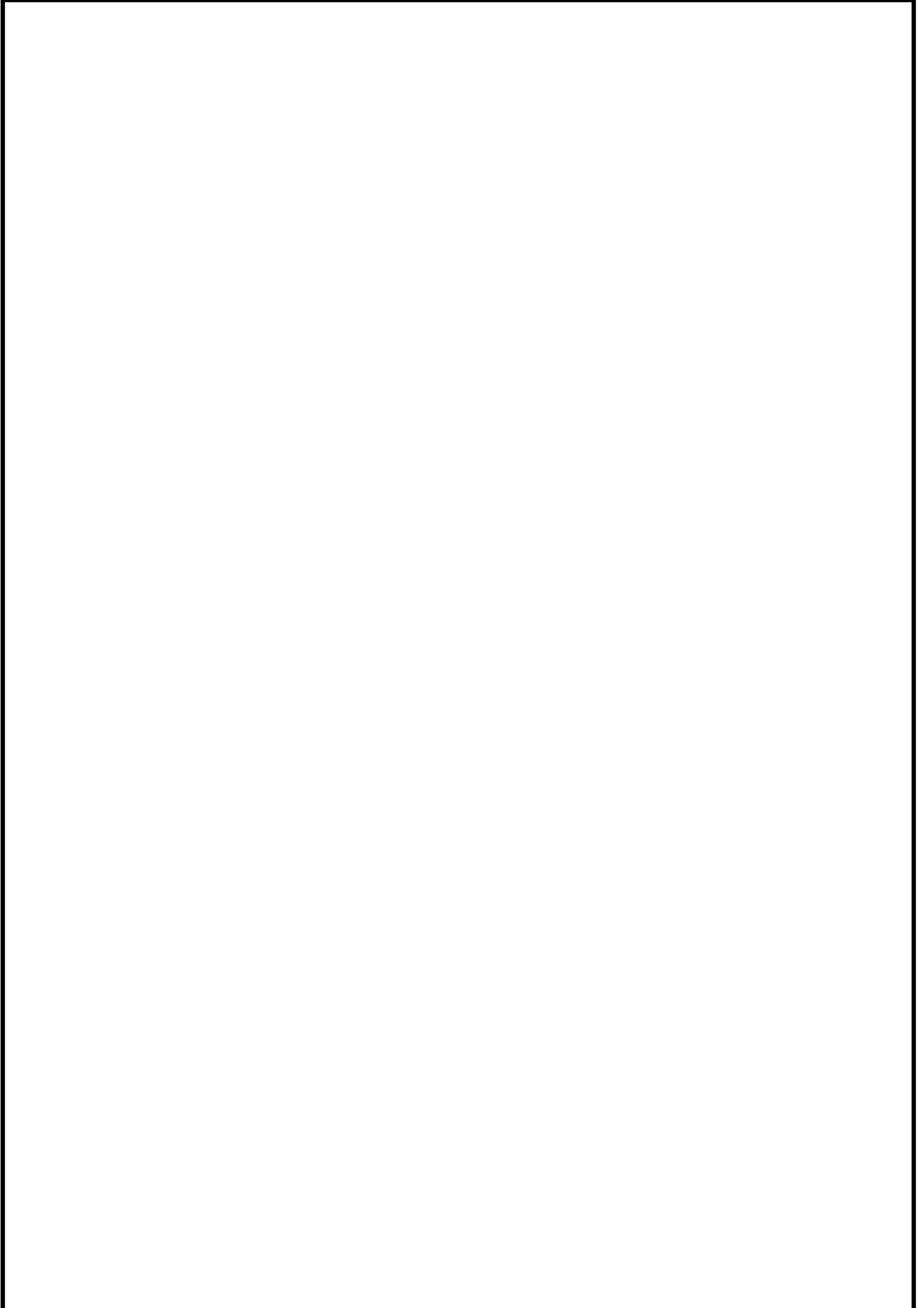
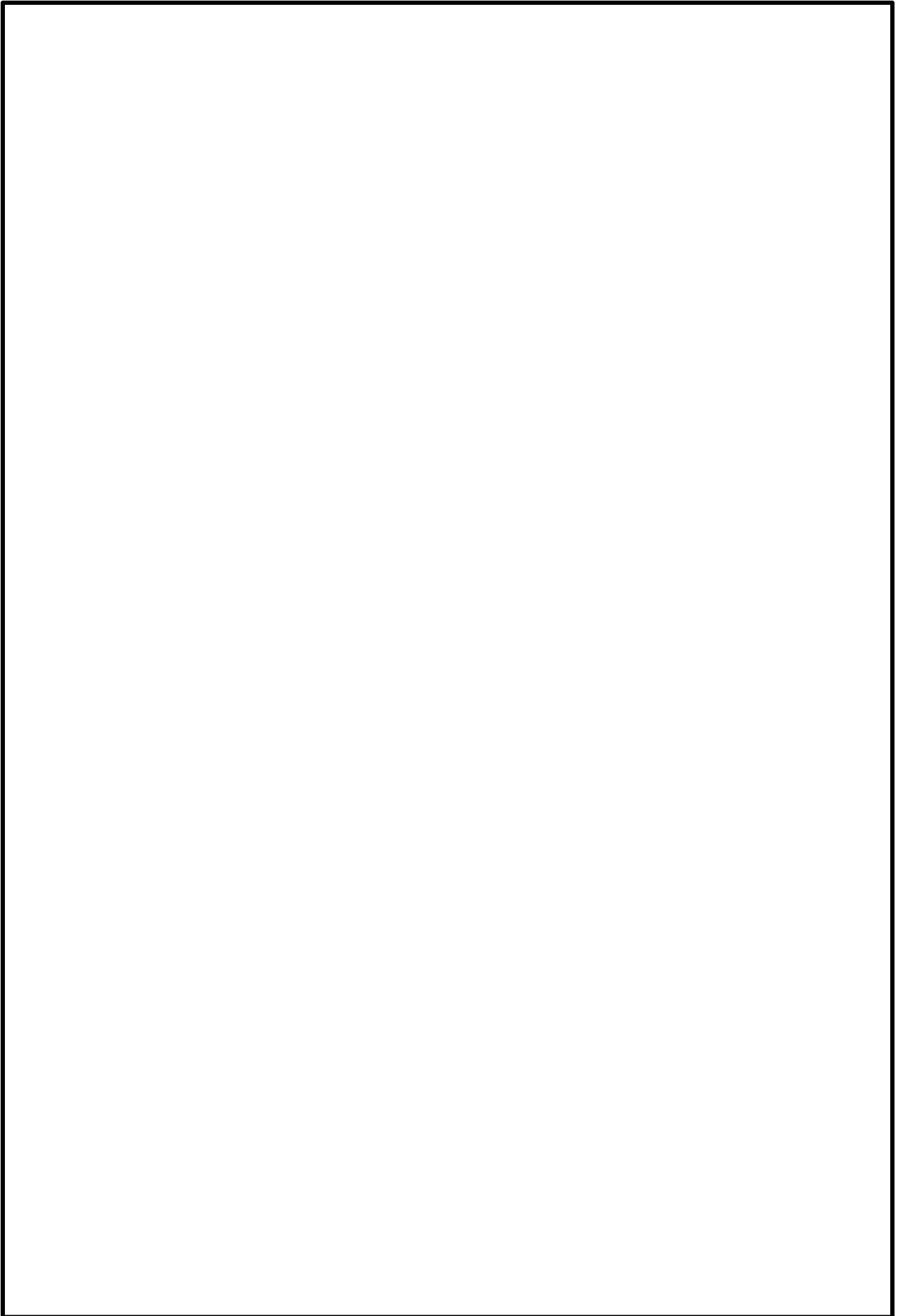
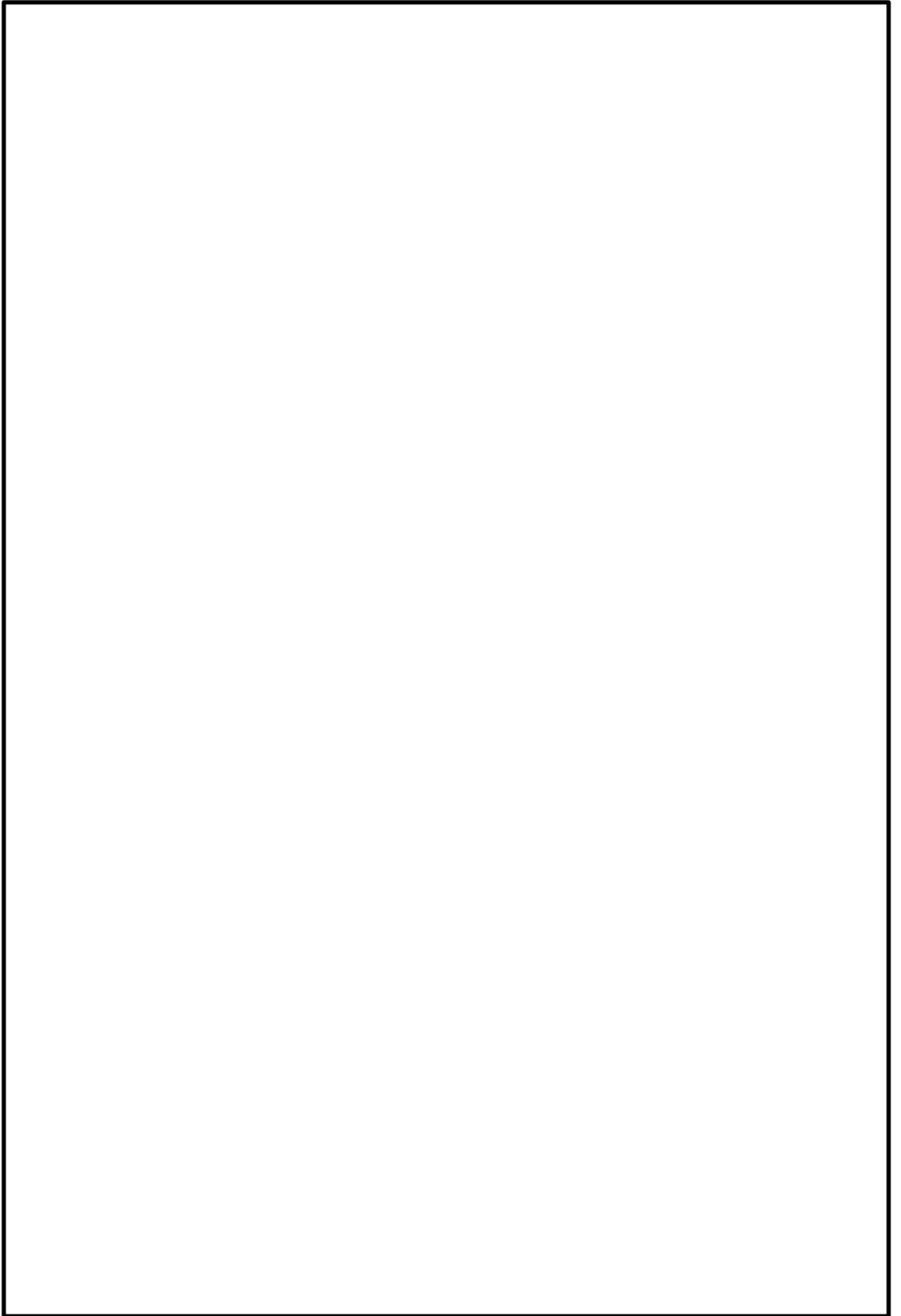


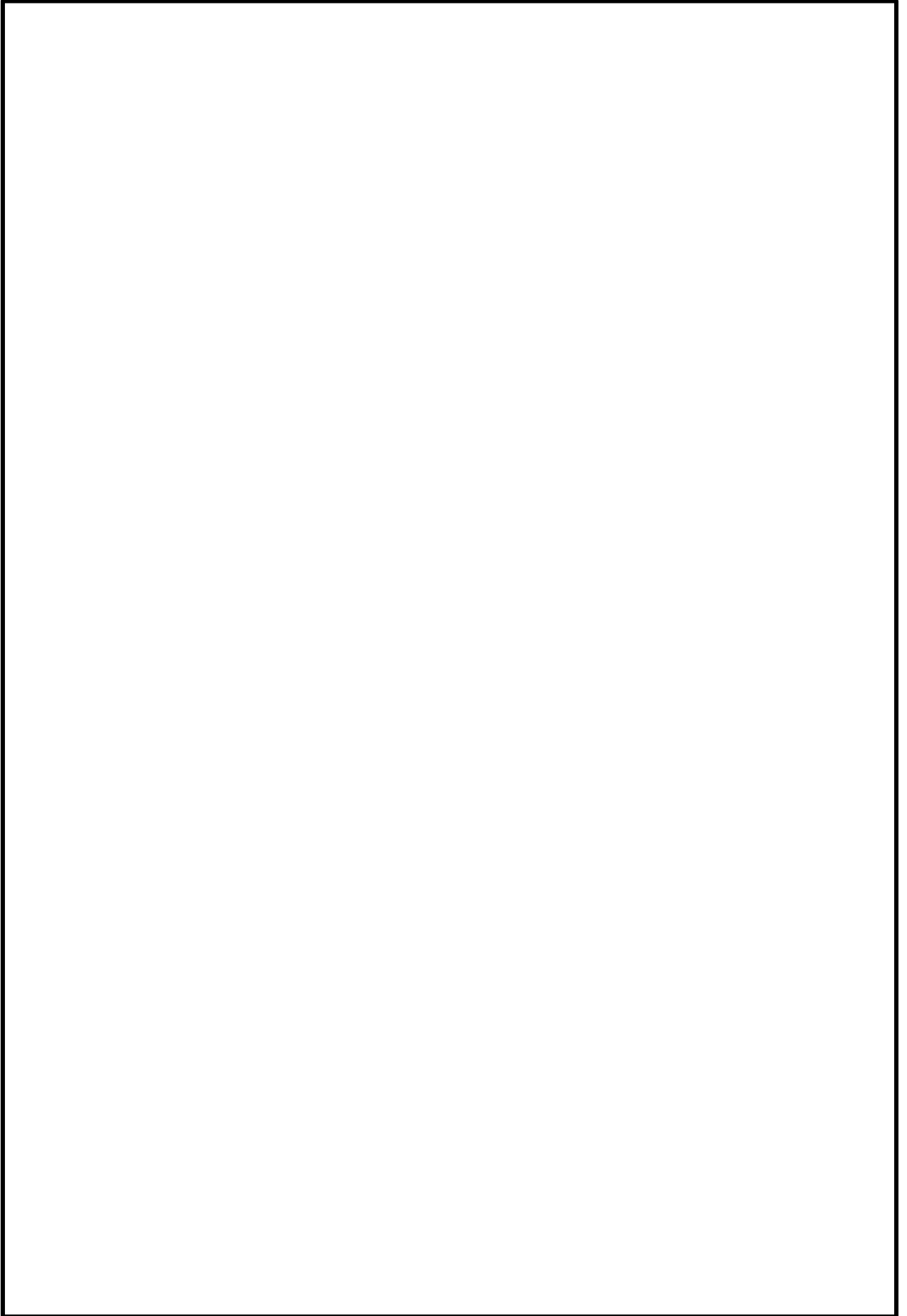
図1-1 衝突解析による衝突荷重の妥当性検討フロー

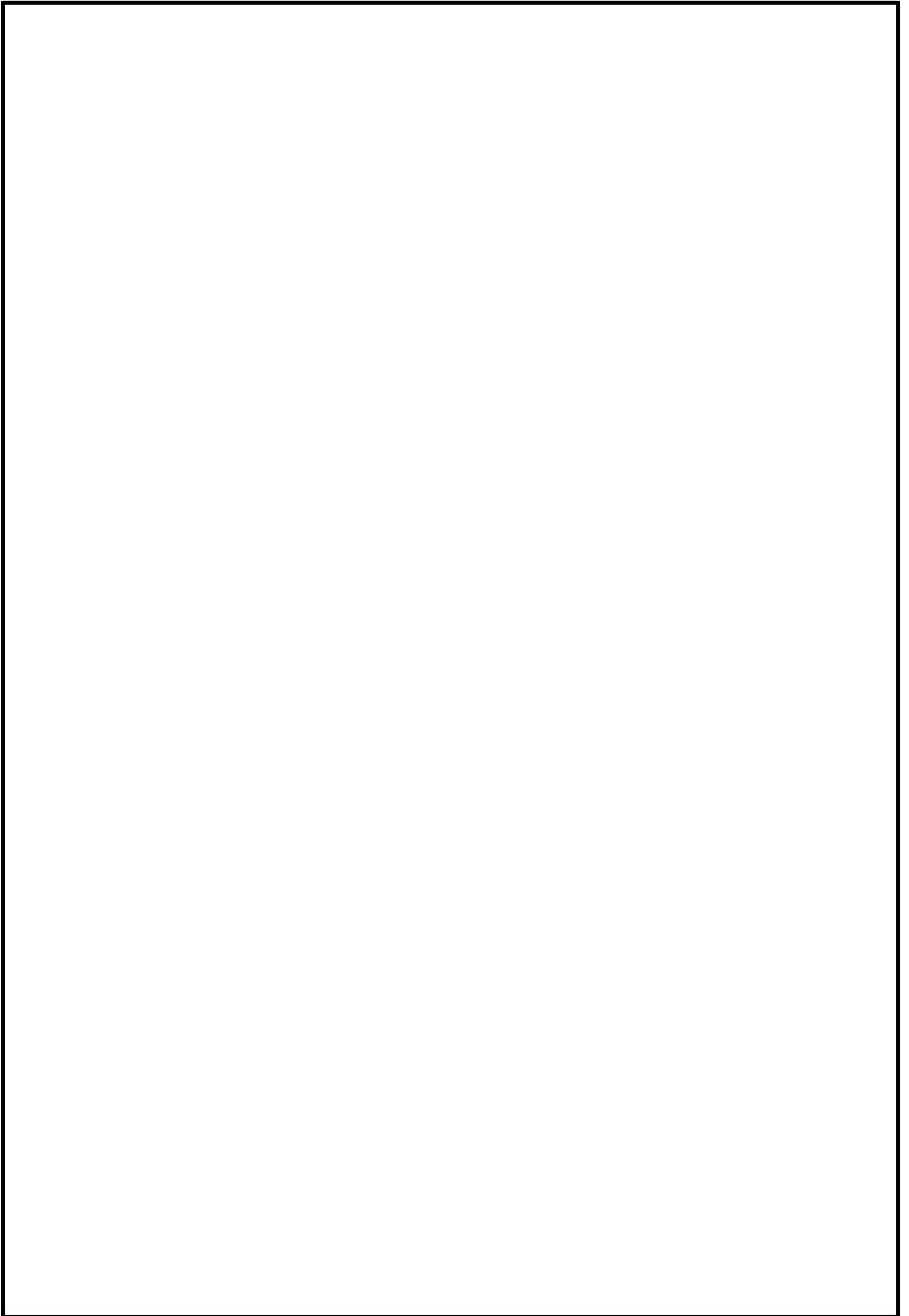
2. 衝突実験に係る文献概要

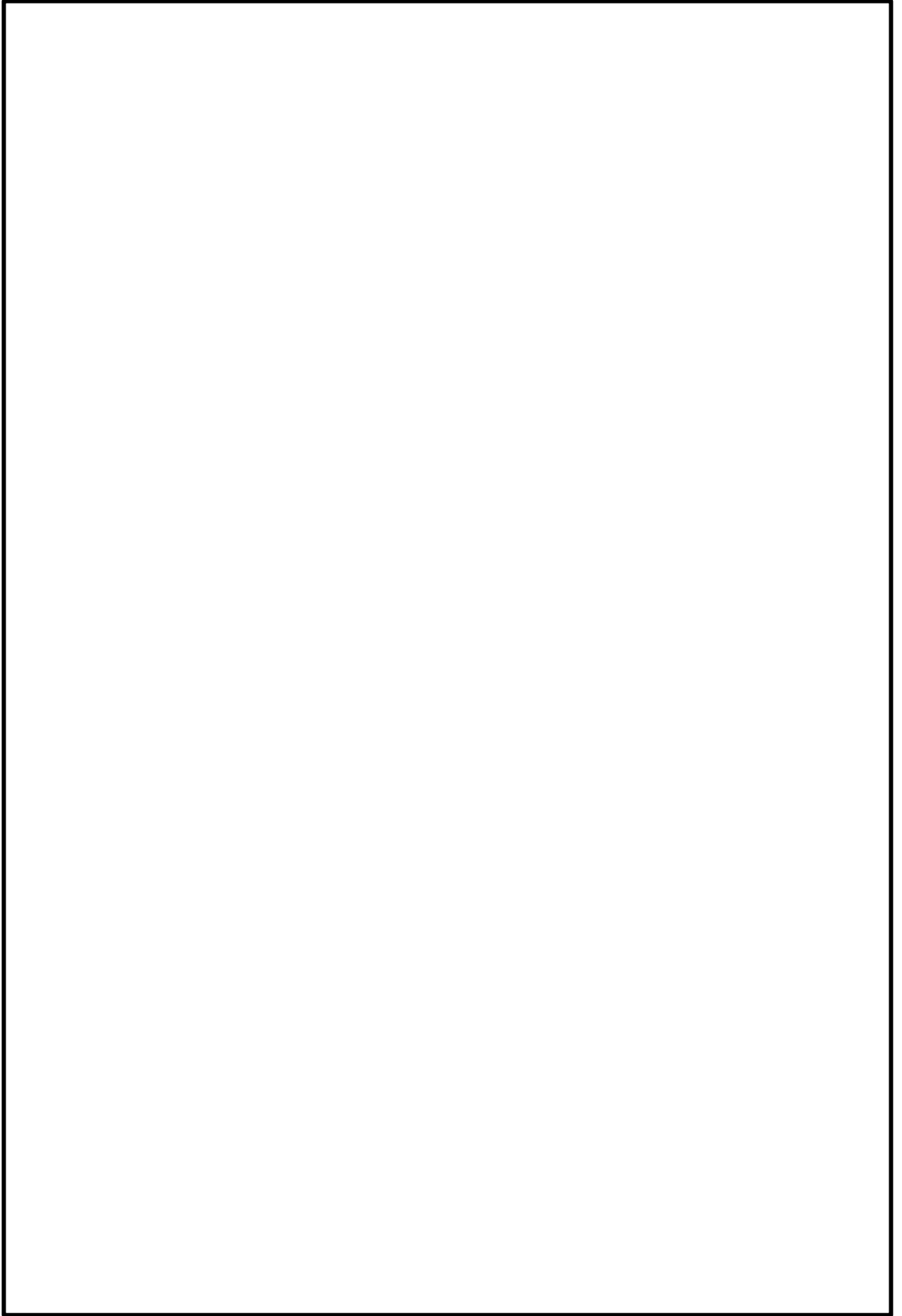


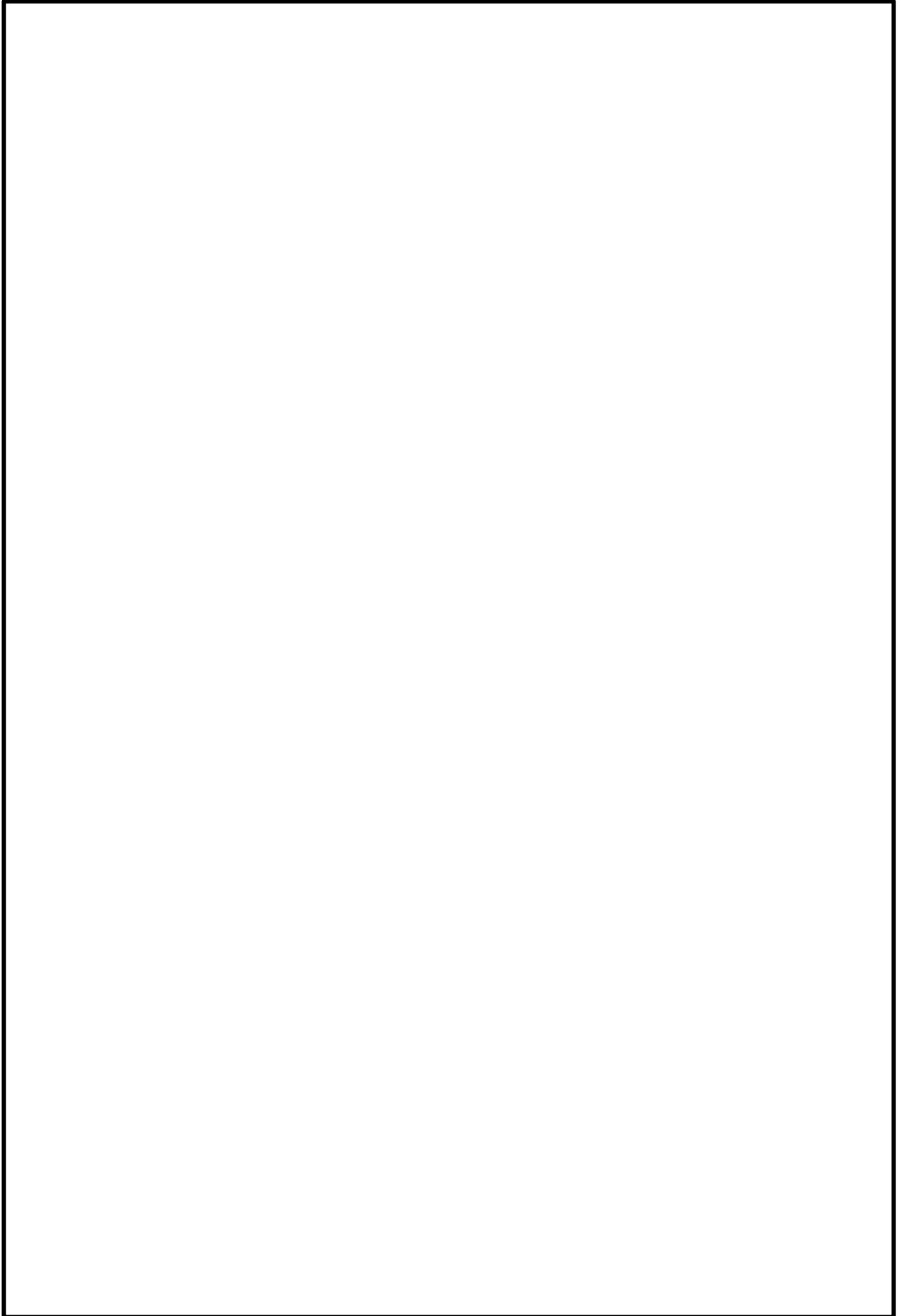


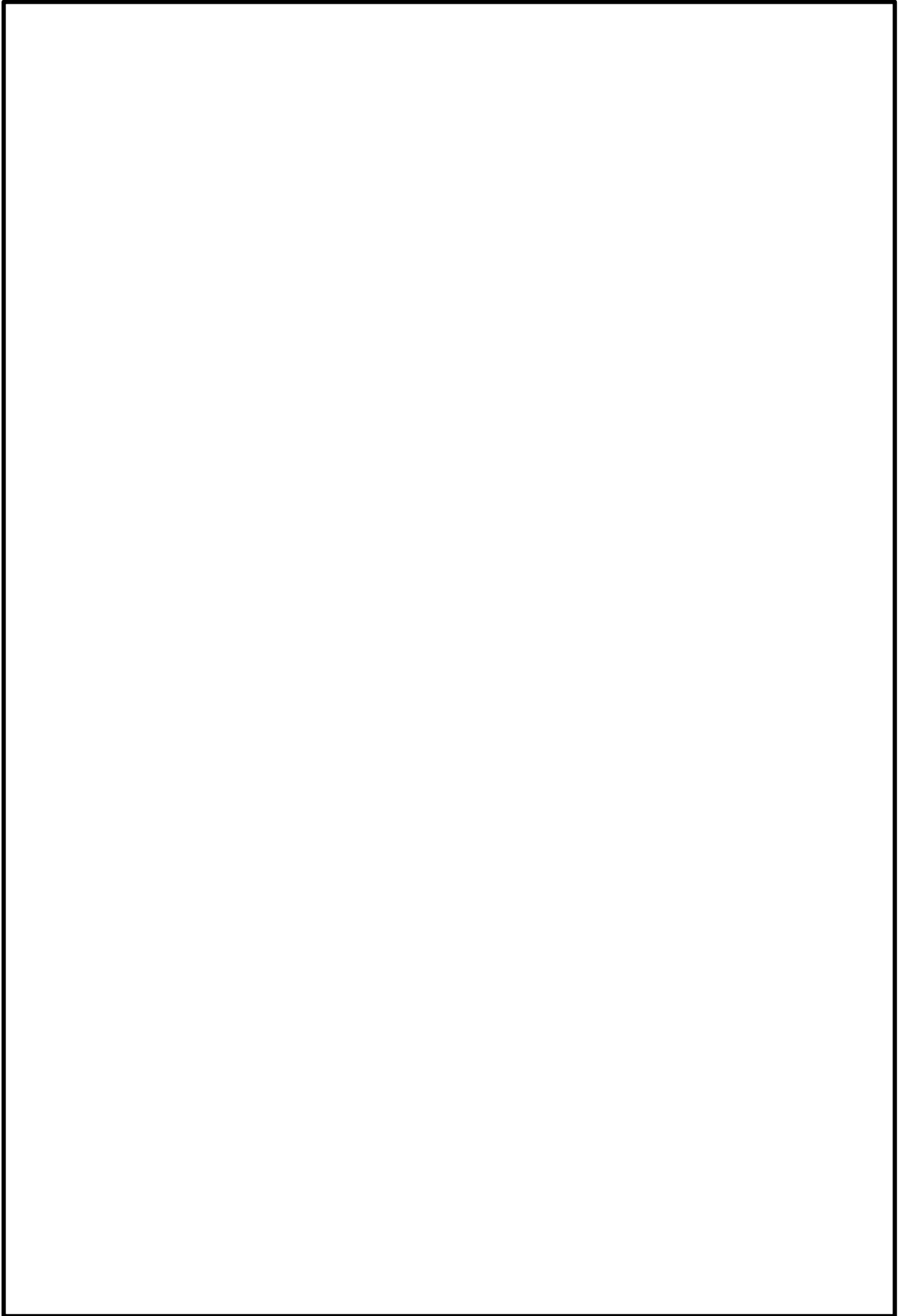


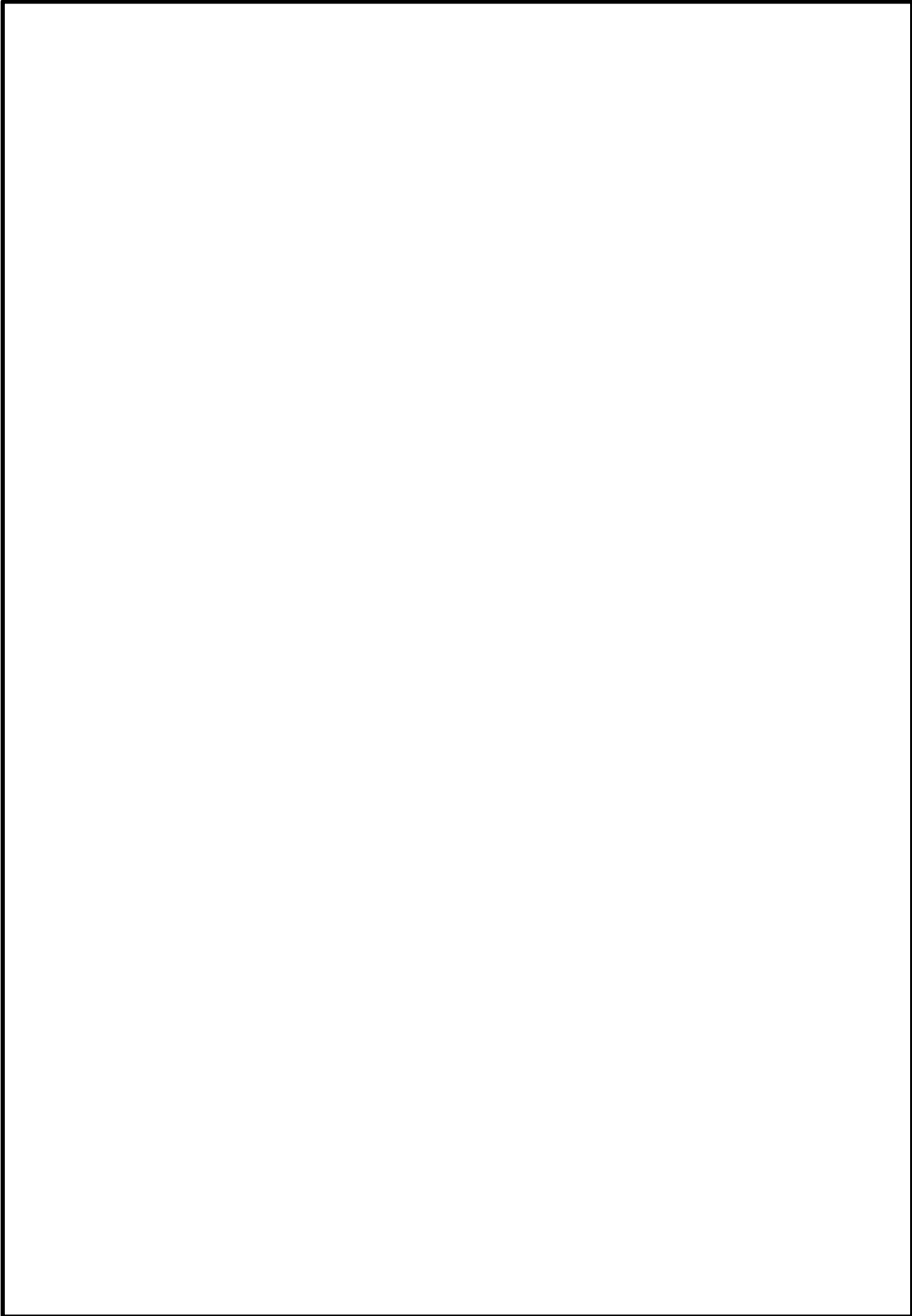


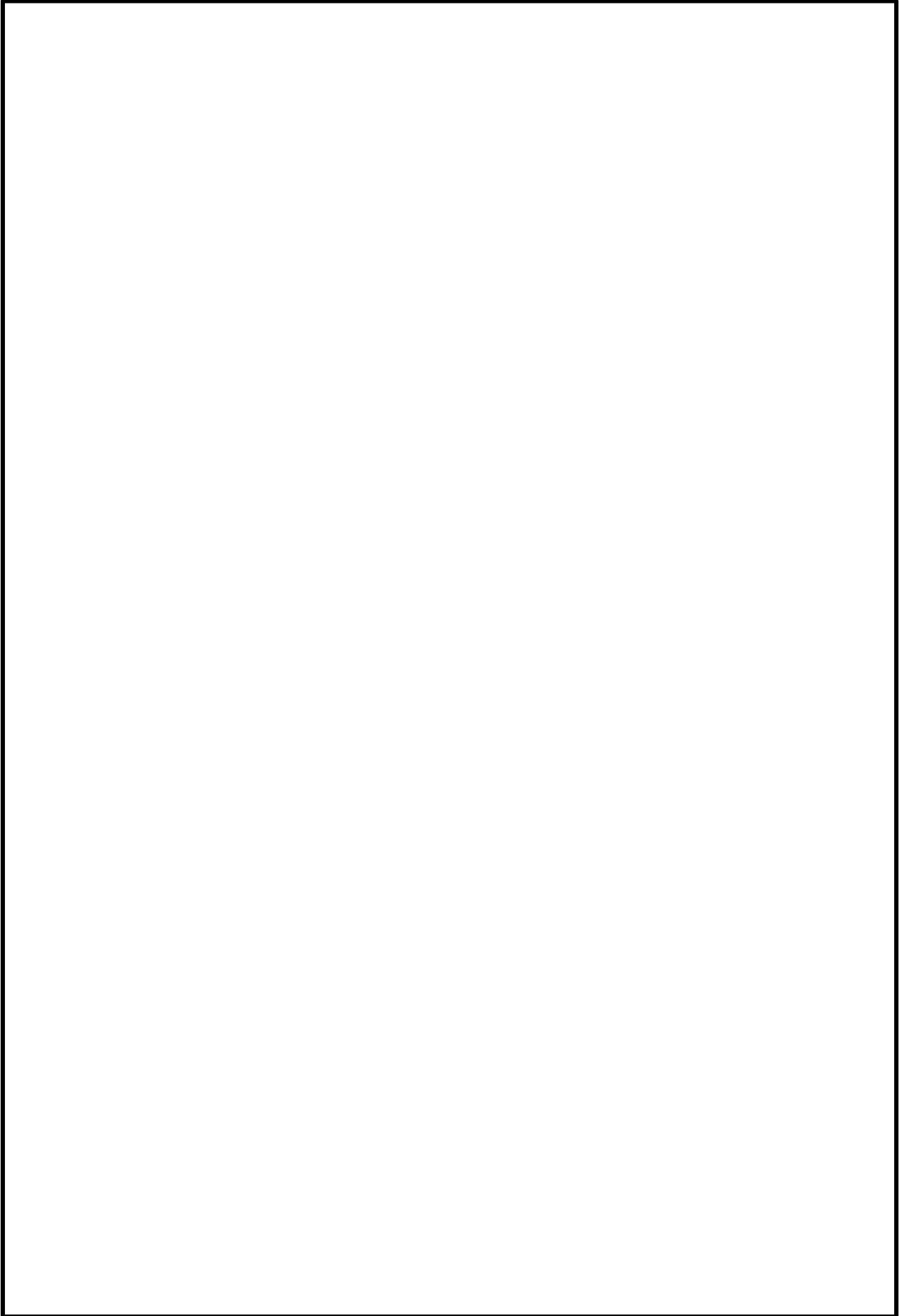


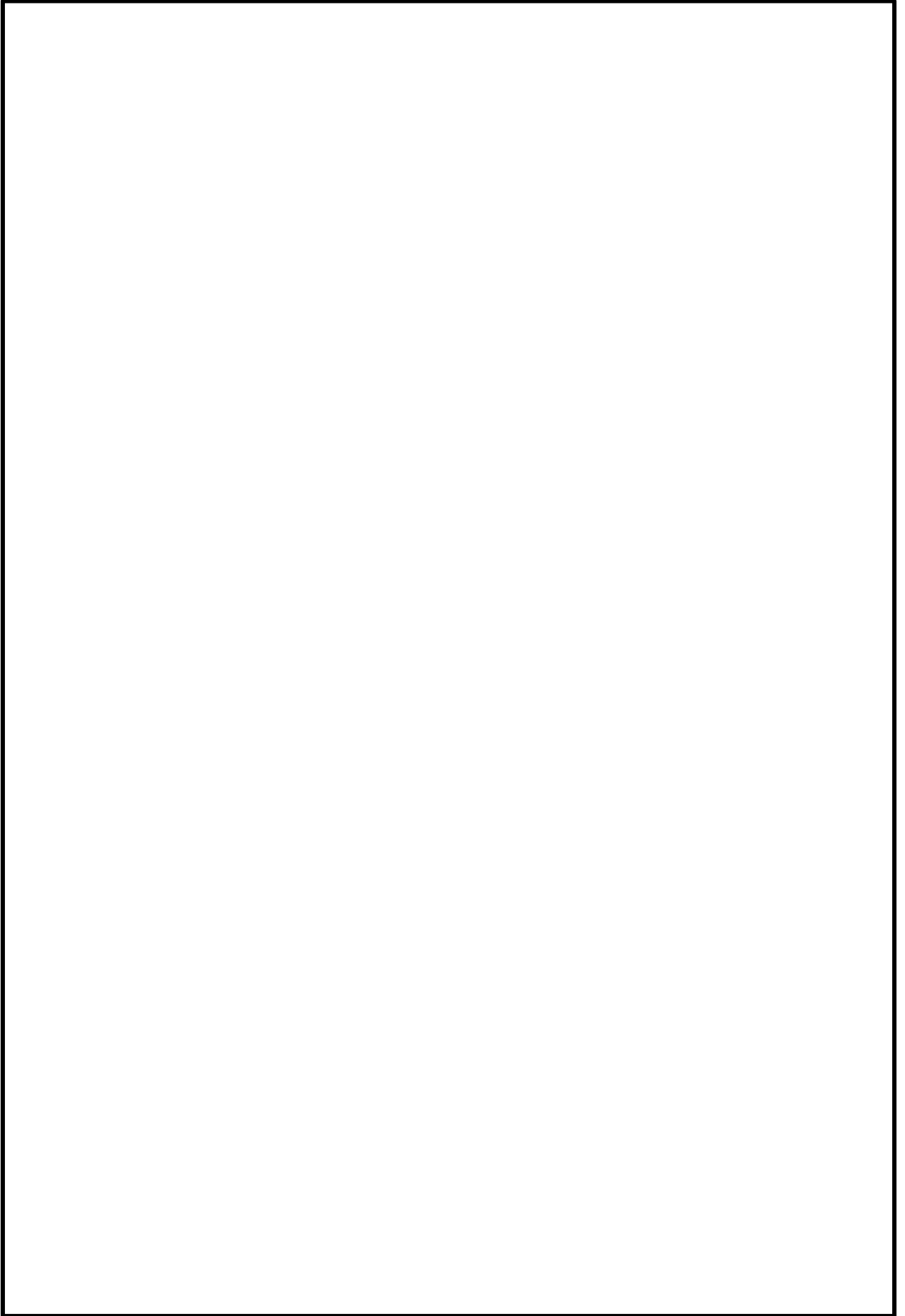




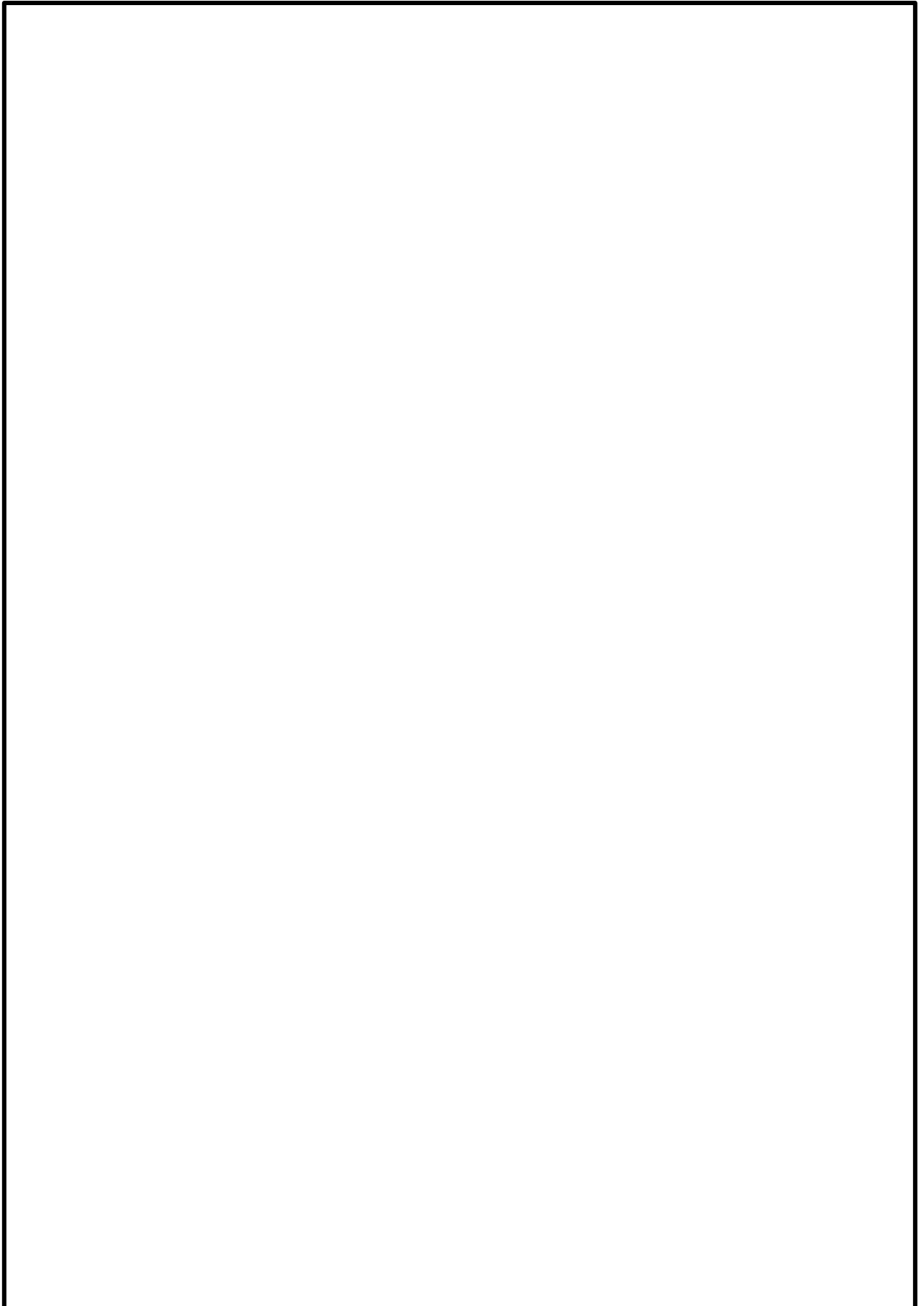








3. 島根原子力発電所における解析条件の妥当性確認



b. 船体板厚

船体板厚については、「豊田ほか（2022）」では部位毎に板厚を変化させているが、実験船を模擬した当社解析モデルにおいては、一般的な船舶の規則である「強化プラスチック船規則（2018，日本海事協会）」を基に船体板厚を設定した。設定値について，表 3-1 及び図 3-1 に示す。

表 3-1 島根原子力発電所における F R P 船舶衝突解析における船体板厚の設定

板厚 t		引用文献等に基づいた設定・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 (デッキ)	「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 ^{*1} d: 計画最大満載喫水=1.20m ^{*2} L: 登録長さ=7.20m ・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 9.00mm を採用	7.51	9.00
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 ^{*1} d: 計画最大満載喫水=1.20m ^{*2} L: 登録長さ=7.20m ・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 10.00mm を採用	8.83	10.00

注記* 1 : 「強化プラスチック船規則検査要領，日本海事協会，2018」

* 2 : 「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）」

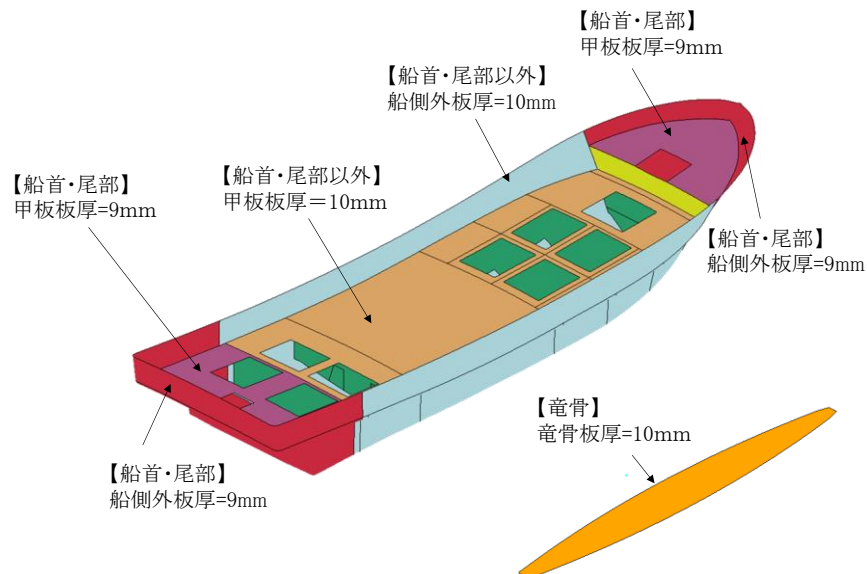


図 3-1 実験船を模擬した当社解析モデルの船体板厚

4. まとめ

F R P 製小型船舶について船首からの落下衝突実験を行った文献を確認し、船体の破壊挙動と衝突荷重を把握した。また、衝突実験の再現解析を実施し、衝突実験の衝突荷重を推定できる手法が構築されていることを確認した。

これら文献の確認の結果を踏まえ、実験船を模擬した当社解析モデルを作成し、当該モデルを用いた衝突解析結果と文献の衝突実験結果を比較することにより、解析手法の妥当性を確認できた。

以上より、F R P 製小型船舶による衝突荷重について 3 次元非線形構造解析により推定することは可能であり、当社解析モデルを用いた解析手法及び解析条件は妥当性であると判断した。

F E M A (2012)による F R P 製船舶の衝突荷重

1. 検討概要

「F E M A (2012)」により漂流物による衝突荷重を算定するには、対象漂流物の「有効軸剛性（以下「軸剛性」という。）」が必要となる。車両や鋼製船舶の軸剛性については、文献等で公知化されているが、F R P 製船舶の軸剛性は、文献等において公知化されたものがない。一方、先行の新規制基準適合性審査では、総トン数 5 トンの F R P 製船舶に対して、「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。）の文献等を用いて、船首方向の軸剛性を設定し、「F E M A (2012)」により衝突荷重を算定している実績がある。そのため、本検討においても同様の手法により、総トン数 19 トンの F R P 製船舶の衝突荷重を算定する。

なお、「土木学会（1994）」は鋼製船舶を対象としており、F R P 製船舶の軸剛性の設定においては、座屈強度を F R P 材料に置き換えて算出するため、F R P 製船舶と鋼製船舶の類似（同等）性及び用いる知見の適用性（軸剛性の設定方法の妥当性）を示した上で、漂流物による衝突荷重を算定する。

2. 衝突時における船舶の破壊に関する整理

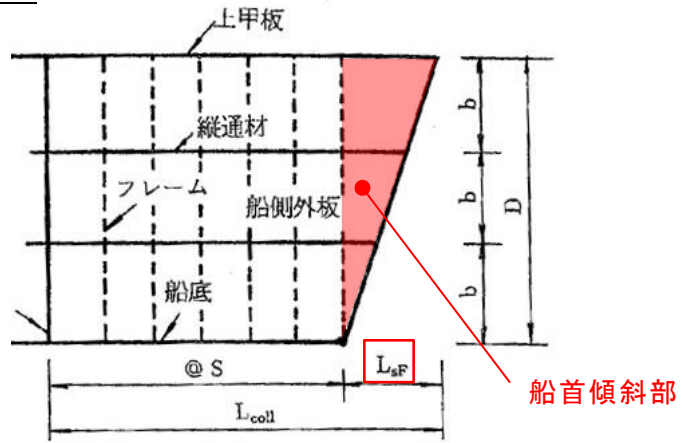
被衝突物は鉄筋コンクリート造又は鋼製であり、F R P 製船舶に対して剛性、強度及び座屈強度が大きいと考えられる。

そのため、F R P 製船舶が被衝突物に衝突した場合、「土木学会（1994）」で記載されている鋼製船舶の破壊進展と同様に、F R P 製船舶の圧壊が進み、圧壊が進むにつれて衝突エネルギーが減少しつつ圧壊荷重が上限となって圧壊は終了する。これと同時に、被衝突側の強固な弾性体である構造物にその圧壊荷重（最大荷重）が作用する。「土木学会（1994）」によると、剛性及び強度が大きいケーソンのような海洋構造物に対する船舶の圧壊荷重と変形量及び圧壊荷重と圧壊量との関係が記載されており、図 2-1 に示すような破壊進展となる。

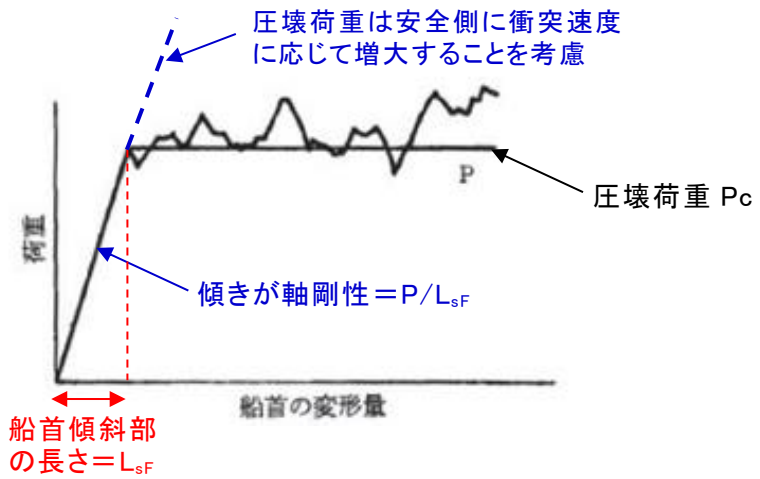
船舶の衝突初期は、船首が傾斜しているため接触面が小さく、圧壊が進むに従って荷重（反力）がほぼ直線的に増加する。船舶の破壊が進み、船首傾斜部破壊後に船体面（隔壁等）が構造物に接触すると、その後の荷重はほぼ一定値に達する。この時の荷重は、船首側からの圧壊による座屈荷重とほぼ同等と判断できるとされている。

以上を踏まえ、F R P 製船舶の圧壊荷重を求めた上で、軸剛性を算出する。

船首部の標準型



圧壊荷重と船首の変形量の関係



圧壊荷重と圧壊量の関係

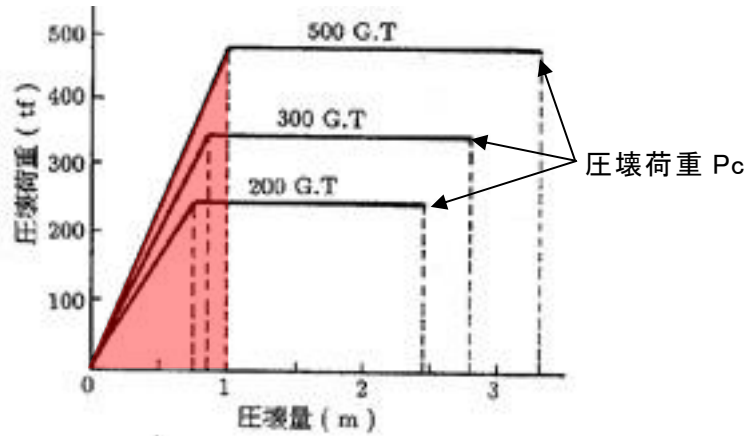


図 2-1 荷重と船首の変形量及び圧壊荷重と圧壊量
 (「土木学会 (1994)」に一部加筆)

3. 土木学会(1994)による軸剛性の設定方法

「土木学会(1994)」では、船舶の圧壊荷重(船首強度) P_c について、図3-1に示す平板の座屈応力度の算定式から座屈強度 σ_c を算出し、船首形状寸法等を乗じることで求められるとしている。「土木学会(1994)」では、大型の鋼製船舶を対象としているが、座屈強度 σ_c の算定式は一般的な平板の座屈応力度の算定式であることから、ヤング率とポアソン比を適切に考慮することで、鋼製以外の船舶にも適用可能である。

また、「土木学会(1994)」によると、前述のとおり船舶の破壊が進み、船首傾斜部がすべて破壊した際に圧壊荷重 P_c に達し、その後圧壊荷重 P_c が一定値として作用することとなる。そのため、圧壊荷重 P_c を船首傾斜部の長さ L_{sf} で除した値が船舶の軸剛性 k_c となる。

ここで算出される軸剛性は、船首傾斜部のみに適用され、圧壊荷重到達後に衝突荷重は一定値となることが想定されるが、本評価では図2-1に示すとおり、一定となる圧壊荷重をそのまま衝突荷重とは考えずに、安全側に衝突速度に応じて荷重が増大すると仮定し、衝突荷重を算出する。なお、「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」によると、「圧縮荷重が作用する場合には、圧縮強度を基準に構造設計するのではなく、座屈強度を基準に構造設計する必要がある。」とされていることから、FRP製船舶の圧壊荷重に座屈強度を用いることは妥当と判断できる。

以上を踏まえ、「土木学会(1994)」に記載されている圧壊荷重の算出方法を用いて、軸剛性を算出する。「土木学会(1994)」で記載されている船首強度(圧縮荷重)の計算例を図3-2に示す。

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

- σ_c : 座屈強度 (tf/m²)
- k : 座屈係数 $(b/a+a/b)^2$
- a : 横肋骨心距 (mm)
- b : 縦肋骨心距 (mm)
- E : ヤング率 (tf/m²)
- ν : ポアソン比
- t : 船側外板厚 (mm)

$$P_c = 2Dt(\cos\theta)\sigma_c$$

- P_c : 圧縮荷重(船首強度) (kN)
- D : 船の深さ (m)
- θ : 船首角度 (°)

$$k_c = \frac{P_c}{L_{sf}}$$

- k_c : 軸剛性 (N/m)
- L_{sf} : 船首傾斜部の長さ (m)

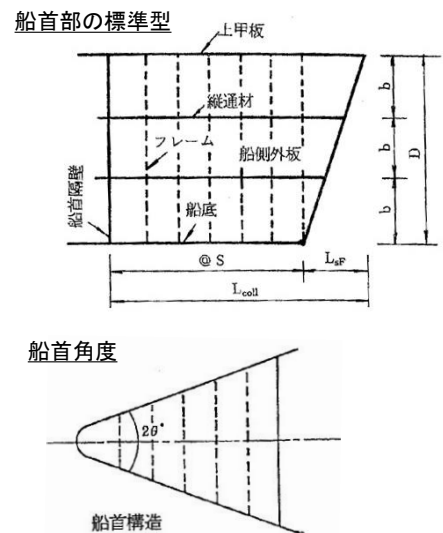


図3-1 「土木学会(1994)」を用いた軸剛性 k_c の算定方法

(2) 船首強度の計算

船首強度は船首の座屈強度から求める。船首部側板の座屈強度は、板厚や側板各辺長さなどの関係式として次式のように表わせる。

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \sigma_y \quad (3.2)$$

船首の形状寸法など諸値を乗じると、船首強度すなわち圧壊荷重は次式で表わせる。

$$P_c = 2 D t \cos\theta \sigma_c \quad (3.3)$$

ここで式の記号は以下のとおりである。

- k : 座屈係数 $= \left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b}\right)^2$
- E : ヤング率 $= 2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$
- ν : ポアソン比 $= 0.3$
- σ_y : 鋼材の降伏点応力 $2,400 \text{ kgf/cm}^2$

上2式をもとに、船首部側板の座屈強度を算出する。200 G.T, 300 G.T および 500 G.T の船舶の船首部諸元を表3.2のように設定する。

ここで横肋骨心距 a は、

$$a = 450 + 2 L \quad (3.4a)$$

縦肋骨心距 b は、

$$b = 550 + 2 L \quad (3.4b)$$

また、図3.5に示す船首角度を $2\theta = 35^\circ$ 、船首傾斜部の長さを $L_{sf} = 0.25 D$ とする。船首強度の計算結果を表3.3に示す。

表 3.2 船首部諸元

ゲート	G.T	L (m)	L_{coll} (m)	D (m)	a (mm)	b (mm)	L_{sf} (m)
A	200	36.84	3.68	2.95	520	620	0.74
B	300	42.17	4.22	3.37	530	630	0.84
C	500	50.00	5.00	4.40	550	650	1.00

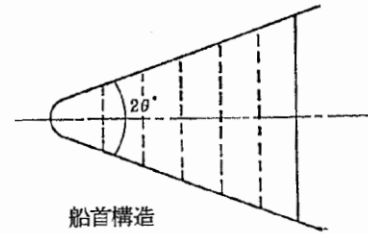


図 3.5 船首角度

表 3.3 船首圧壊強度

L(m)	a(mm)	b(mm)	t(mm)	k	σ_{cr} (kgf/cm ²)	D(m)	P_c (tf)
36.84	520	620	6	4.08	725	2.95	245
42.17	530	630	6.5	4.12	832	3.37	348
50.00	550	650	7	4.12	907	4.00	484

表 3.1 船首部の標準寸法値

構造寸法	記号	標準寸法	単位
船の深さ	D	0.08 L	m
船側外板厚	t	$0.82\sqrt{L} + 2.5$	mm
フレーム間隔	S	610	mm
船首隔壁位置	L_{coll}	0.1 L	m
縦通材間隔	b	3S	mm
船首部傾斜幅	L_{sf}	0.25 D	m
船首部先端角度	2θ	35 ~ 70	度
船体幅	B	$L/10 + 3.81$	m

図 3-2 「土木学会 (1994)」で示されている計算例
(「土木学会 (1994)」より引用)

また、「甲斐田・木原（2017）」*¹では、既往の文献である「有田（1988）」*²を整理し、大型の鋼製船舶（総トン数 400～4000 トン）の船首方向に対する軸剛性が記載されている。そこで、これらの大型の鋼製船舶に対して、「土木学会（1994）」による設定方法を基に軸剛性を算出し、「甲斐田・木原（2017）」に記載されている軸剛性との比較結果を表 3-1 に示す。

注記*1：甲斐田秀樹・木原直人（2017）：原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術—現状調査とその適用に関する考察—，電力中央研究所報告 016010，2017.

*2：有田喜久雄（1988）：船舶等の衝突強度に関する研究，船舶技術研究所報告，第 25 巻，第 1 号，1988，pp. 35-125.

比較結果として、「土木学会（1994）」の方法により算出した軸剛性と「甲斐田・木原（2017）」に記載されている軸剛性は、おおむね同程度となることを確認した。また、「土木学会（1994）」の方法により算出した軸剛性の方が、「甲斐田・木原（2017）」の記載値より大きい傾向となることを確認した。

表 3-1 軸剛性の比較結果（「甲斐田・木原（2017）」記載値及び「土木学会（1994）」算出値）

項目	記号	算定式	単位	500G. T.	1000G. T.	2000G. T.	4000G. T.				
総トン数	G. T.	—	トン	500	1000	2000	4000				
船舶長さ	L	—	m	50.0	63.0	80.0	100.0				
船舶深さ	D	=0.08 × L	m	4.00	5.04	6.40	8.00				
船側外板厚	t	=0.82√L + 2.5	mm	8.300	9.009	9.834	10.700				
縦肋骨心距	a	=450 + 2L	mm	550	576	610	650				
横肋骨心距	b	=550 + 2L	mm	650	676	710	750				
船首角度	2θ	文献記載の最大値と最小値の2ケース実施	°	70	70	70	35				
船首傾斜長さ	L _{sf}	=0.25 × D	m	1.00	1.26	1.60	2.00				
ヤング率 (曲げ弾性率)	E	—	tf/m ²	2.10 × 10 ⁷	2.10 × 10 ⁷	2.10 × 10 ⁷	2.10 × 10 ⁷				
ポアソン比	ν	—	—	0.30	0.30	0.30	0.30				
座屈強度	σ _c	*1	tf/m ²	12,728	13,832	14,903	15,771				
圧縮荷重	P _c	*2	kN	6,789	7,904	10,091	11,748				
軸剛性(船首部)	k _c	*3 甲斐田・木原(2017) 文献記載値	N/m	6.79 × 10 ⁶	7.90 × 10 ⁶	8.01 × 10 ⁶	9.33 × 10 ⁶	9.42 × 10 ⁶	1.10 × 10 ⁷	1.09 × 10 ⁷	1.26 × 10 ⁷
				5.10 × 10 ⁶			6.40 × 10 ⁶			8.20 × 10 ⁶	

*1
$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

*2
$$P_c = 2Dt(\cos\theta)\sigma_c$$

*3
$$k_c = \frac{P_c}{L_{sf}}$$

- σ_c : 座屈強度 (tf/m²) b : 縦肋骨心距 (mm) t : 船側外板厚 (mm) θ : 船首角度 (°)
- k : 座屈係数 (b/a+a/b)² E : ヤング率 (tf/m²) P_c : 圧縮荷重 (船首強度) (kN) k_c : 軸剛性 (N/m)
- a : 横肋骨心距 (mm) ν : ポアソン比 D : 船の深さ (m) L_{sf} : 船首傾斜部の長さ (m)

4. 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性

「土木学会（1994）」で示されている座屈強度 σ_c の算定式は、一般的な平板の座屈応力の算定式であるため、ヤング率とポアソン比で適切に考慮することで、FRP製船舶に適用することが可能であると考えられるが、「土木学会（1994）」で検討対象としている船舶が鋼製船舶であることを踏まえ、FRP製船舶と鋼製船舶の形状、構造、材質及び損傷モードに関する類似（同等）性について確認を行った。

4.1 船舶の形状に関する類似（同等）性

「小型漁船のインベントリ分析に関する研究－A:モデル船の建造・運航状況調査－（海上技術安全研究所報告第3巻第5号（平成15年）」（以下「海技研報告（平成15年）」という。）に、総トン数14トンのアルミ合金漁船とFRP製の船舶の図面が記載されている（図4-1及び図4-2）。

これらの図面から、FRP製漁船とアルミ合金漁船の寸法、外形及び断面はおおむね同形状であることを確認した。加えて、評価対象である総トン数19トンは、「海技研報告（平成15年）」に記載の総トン数14トンに対して、総トン数もおおむね同等であることから、FRP製船舶と鋼製船舶の形状は類似性を有すると判断できる。

表-2.1 アルミ合金漁船の主要目表

全長	21.66m
全幅	4.78m
型深さ	1.21m
登録長	17.60m
登録幅	4.38m
登録深さ	1.20m
測定長	19.20m
測定幅	3.90m
測定深さ	1.20m
計画総トン数	14トン
主機関	YANMAR 6LX-ET (定格出力) 650PS
定員	6人
用途	小型機船底びき網漁業
燃料油の種類	A重油
燃料油の消費量	160g/(ps・hr)
発電機動力	主機駆動



写真-2.1 アルミ合金漁船

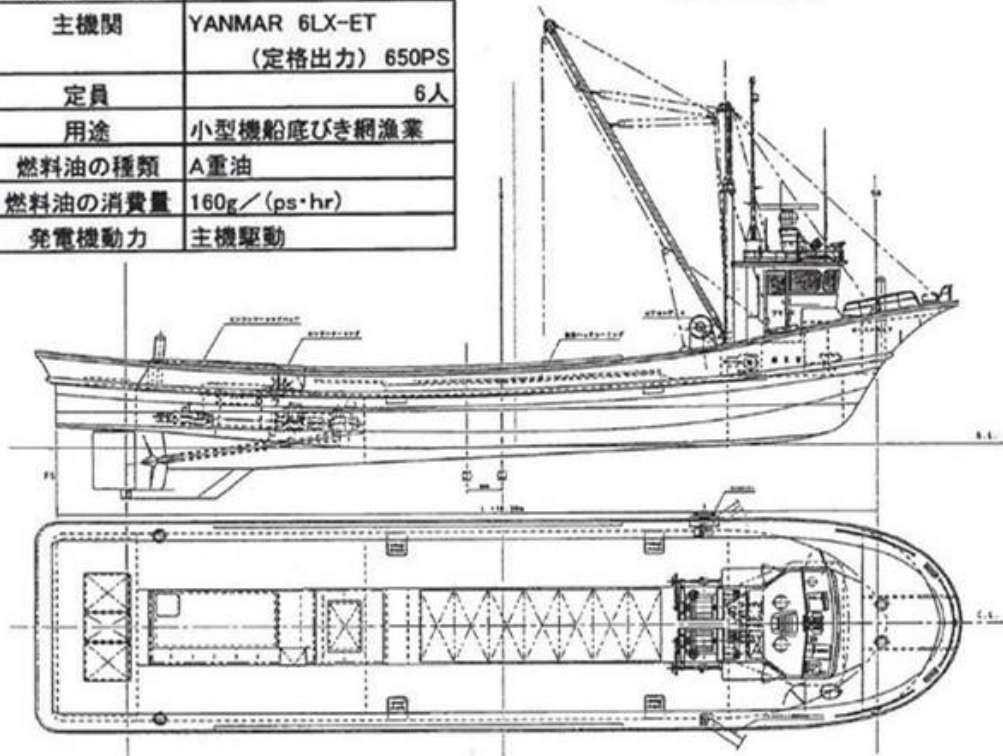


図-2.1 アルミ合金漁船の一般配置図



図-2.2 アルミ合金漁船の中央断面図

図 4-1 総トン数 14 トンのアルミ合金漁船（「海技研報告（平成 15 年）」より引用）

表-2.6 FRP漁船の主要目表

全長	21.66m
全幅	4.78m
型深さ(D)	1.21m
登録長	17.60m
登録幅	4.18m
登録深さ	1.38m
測定長	19.20m
測定幅	3.90m
型深さ(Dm)	1.20m
計画総トン数	14トン
主機関	YANMAR 6LAH-ST (定格出力)550PS
定員	5人
用途	小型機船底びき網漁場
燃料油の種類	A重油
燃料油の消費量	162g/(ps.hr)
発電機動力	主機駆動



写真-2.2 FRP漁船

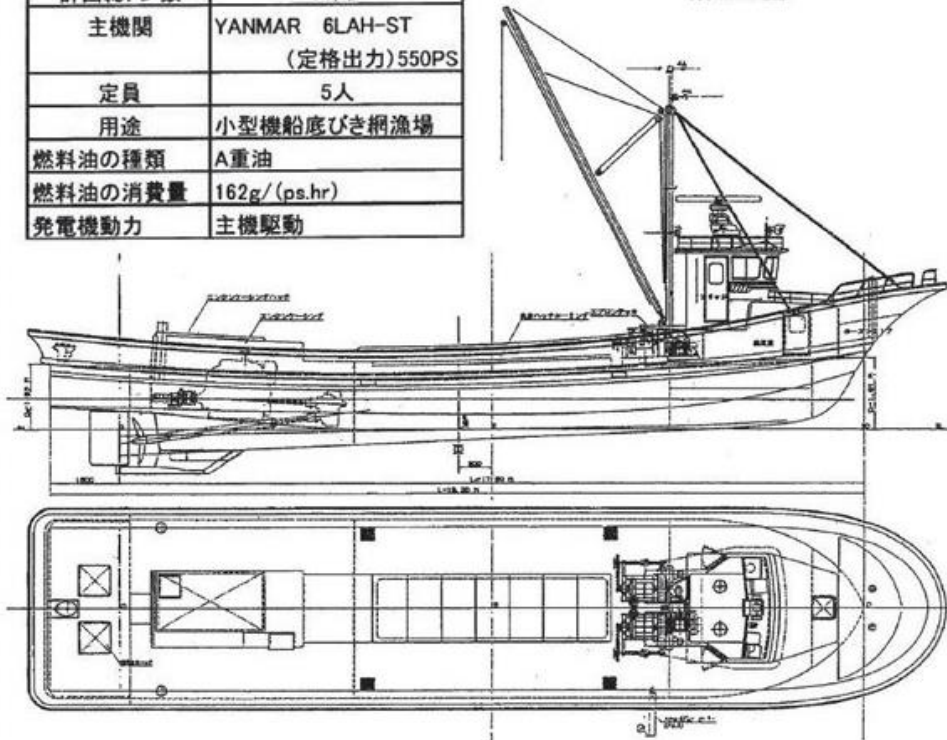


図-2.4 FRP漁船の一般配置図

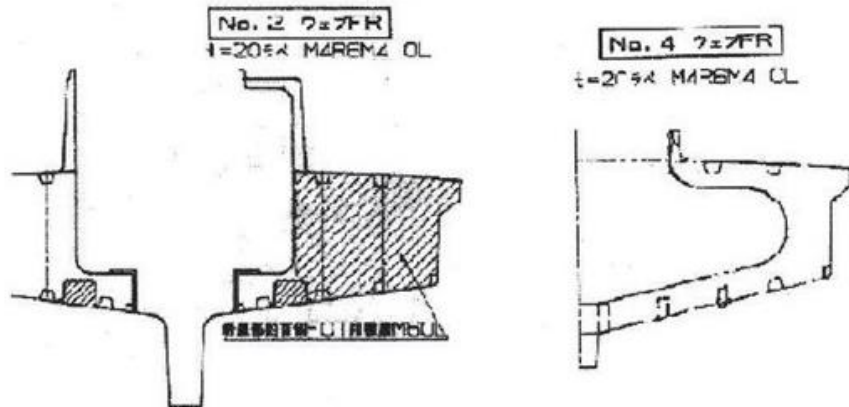


図-2.5 FRP漁船の横断面図

図 4-2 総トン数 14 トンの F R P 漁船 (「海技研報告 (平成 15 年)」より引用)

4.2 船舶の構造に関する類似（同等）性

座屈強度を算出する際に必要となる船側外板厚等について、FRP製船舶と鋼製船舶の算出方法を比較し、両者に類似性があることを確認した（表4-1）。

- ・「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018）」によると，中央部の船側外板厚は $15S\sqrt{(d+0.026L)}$ （S:肋骨の心距，d:計画最大満載喫水，L:船の長さ）と記載されている。この算定式に関して「強化プラスチック船規則解説（日本海事協会会誌，1978）」では，「波浪中を航行する船が受ける外力は，船の大きさ，形状等によって異なるが，特別な場合を除き，船体の材質によって変わらないと考えられる。したがって船底や船側の波浪外力，水密隔壁や深水タンク隔壁に作用する外力は，すべて鋼船規則に定められている外力を用いた。」と記載があり，外板厚を算出するために用いる外圧（水頭）について「荷重を鋼船規則に合わせ，波浪変動圧を考慮に入れた（ $d+0.026L$ ）とした。」と記載されている。よって，FRP製船舶の船側外板厚の算定式は，鋼製船舶を基本としているため，両者は類似性を有する。
- ・縦強度，甲板，肋骨，船底等の主要構造について，「鋼船規則（日本海事協会）」及び「小型鋼製漁船構造基準（（社）漁船協会，昭和46年）」の鋼製船舶を基に「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018）」で規定されていることから，FRP製船舶と鋼製船舶の構造は類似性を有する。

4.3 船舶の材質における力学特性の類似（同等）性

「土木学会（1994）」で検討対象としている船舶が鋼製船舶であることを踏まえ，各船舶の主要な構成材料である鋼材とFRP材の材質の力学特性について整理を行い，両者に類似性があることを確認した（表4-1）。

- ・船舶に用いられるFRP（Fiber Reinforced Plastics：繊維強化プラスチック）の主材料は，ガラス繊維基材と樹脂液（液状不飽和ポリエステル樹脂）である（「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018）」を参考）。
- ・「FRP成形入門講座（日本プラスチック加工技術協会）」によると，FRPの材料力学的特性について，「FRP材料はガラス繊維，マトリックスの種類，組成，形体によってその特性が広範囲に変化する。例えば，無方向性のランダムガラスマットを用いると，ほぼ等方性材料として扱うことができる。」と記載されている。また，船舶にはあらゆる方向からの波が外力として作用することから，異方性材料とならないようガラス繊維基材を組み合わせで成形される。
- ・「基礎からわかるFRP（強化プラスチック協会編，2016）」によると，「FRPは微視的には不均質材料であるが，巨視的には等方性または直交異方性の力学特性を持つ均質材料として扱うことができる。このような場合には，等方性または直交異方性

の座屈理論をそのまま利用できる。」としている（図4-3）。前述と同様に、船舶にはあらゆる方向からの波が外力として作用することから、異方性材料とならないようガラス繊維基材を組み合わせ成形されるため、等方性の力学特性を持つ鋼材とFRPは類似した力学特性を有する。

- ・「FRP成形入門講座（日本プラスチック加工技術協会）」によると、「FRP材料は金属材料と異なり、はっきりとした降伏点を示さず、破壊寸前まではほぼ弾性変形を示し、その応力-ひずみ曲線は図のようになり、弾性吸収エネルギーが非常に大きいことが特徴で、外力の吸収が金属材料に比較して大きいため、FRP材料で作られた構造物は与えられるショックが小さい。」ことが示されている（図4-4）。「強化プラスチック船規則解説（日本海事協会誌、1978）」及び「基礎からわかるFRP（強化プラスチック協会編、2016）」でも同様の特徴を有することが記載されている。これらのことから、FRPは破壊寸前までは鋼材の降伏強度以内と同様に弾性変形するという点で類似している。

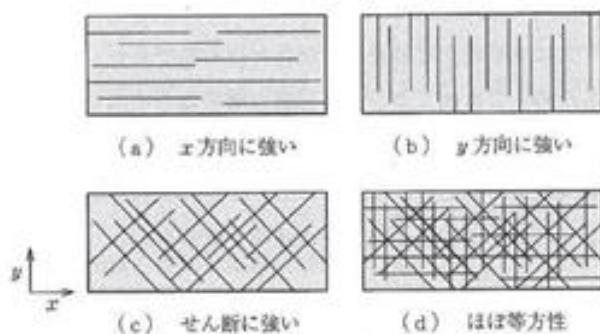


図4-3 FRPの材料異方性

（「基礎からわかるFRP（強化プラスチック協会編、2016）より引用」）

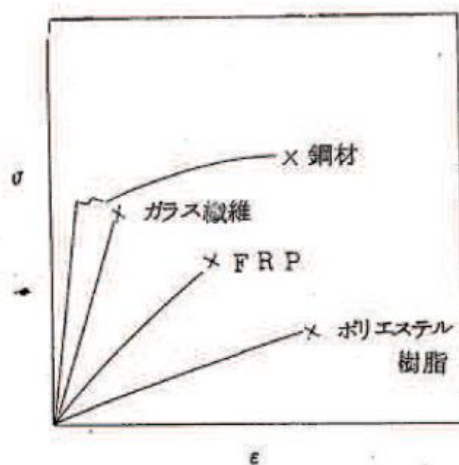


図4-4 FRPの応力-ひずみ関係

（「FRP成形入門講座（日本プラスチック加工技術協会）」より引用）

4.4 船舶の損傷モードの類似（同等）性

「土木学会（1994）」で検討対象としている船舶が鋼製船舶であることを踏まえ、それぞれの材料である鋼材とFRP材の損傷モードについて整理を行い、両者に類似性があることを確認した（表4-1）。

- ・「FRP構造設計便覧（強化プラスチック協会，1994）」によると、「FRP構造は薄肉シェルのことが多いが、もし外圧が作用して面内に発生する圧縮応力が大きくなると、構造は不安定となり、いわゆる座屈現象をおこして大変形を生じ、破損する恐れがあり、座屈限界応力が問題となる。また構造物の固有振動数が、外力からの加振振動数に近い場合には、いわゆる共振現象をおこし、機能を阻害したり、過大振幅になって材料が疲労破壊する恐れがあり、固有振動数が問題となる。」と記載されており、主に座屈と共振による損傷モードが考えられるが、評価対象事象は衝突であるため、座屈による損傷モードが想定される。これは、鋼製の圧縮材と同様の損傷モードである。
- ・評価対象としている小型船舶の構造は半円筒形のような構造で、船底と船側が主に竜骨と隔壁で構造が区切られており、さらに縦断及び横断方向に肋骨が配置されている。そのため、FRP製船舶と鋼製船舶は、それぞれ構成している部位の材質は異なるものの、どちらも主として薄板を組み合わせた構造である。
- ・船舶は10.0m/sと速い速度で被衝突物に衝突するため、非常に大きな力が一方向（圧縮方向）に作用するため、FRP製船舶も鋼製船舶も薄板構造であり、圧縮系の座屈を引き起こしやすいという点で類似性を有する。
- ・なお、FRP材は、局所的にトランスバースクラックや層間はく離等の損傷モードが考えられるが、衝突速度が10.0m/sと速い速度であり、船舶の重量が57tであるため、このような局所的かつ初期的な損傷モードは支配的とはならない。また、上述のとおり、船舶に一方向から極端に大きな力が極めて短い時間で作用するため、圧縮座屈が支配的となると考えられる。

4.5 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性

前述の整理結果を表4-1に示す。FRP製船舶と鋼製船舶は形状、構造、材質に関して類似（同等）性を有することから、FRP製船舶の圧壊荷重算出にあたり「土木学会（1994）」の方法を用いることは妥当であると判断した。

表4-1 FRP製船舶と鋼製船舶の類似（同等）性に関する整理

項目	引用文献	確認内容	類似性 (同等)
全体形状	・海技研報告 (平成15年)	文献に示されているFRP漁船とアルミ合金漁船の寸法、外形及び断面がほぼ同じであることを確認。	○
船側外板厚	・強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018) ・強化プラスチック船規則解説 (日本海事協会会誌, 1978)	FRP製船舶と鋼製船舶に作用する外力が同じであり、FRP製船舶の船側外板厚算定式が鋼製船舶を基にしていることを確認。	○
その他の主要構造	・強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018) ・強化プラスチック船規則解説 (日本海事協会, 1978) ・鋼船規則(日本海事協会) ・小型鋼製漁船構造基準 (社)漁船協会, 昭和46年)	FRP製船舶の縦強度、甲板、肋骨、船底等の主要構造が鋼製船舶の構造を参考としていることや、同様の考えを採用していることを確認。	○
材質の力学特性	・強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018) ・FRP成形入門講座 (日本プラスチック加工技術協会) ・強化プラスチック船規則解説 (日本海事協会, 1978) ・基礎からわかるFRP (強化プラスチック協会編, 2016)	FRP製船舶の材料であるFRPは、等方性又は直交異方性の力学的特性を持ち、鋼製船舶の材料である鋼材と同様に均質材料であることを確認。また、FRPは破壊直前まで鋼材(降伏強度以内)と同様に弾性変形することを確認。	○
損傷モード	・FRP構造設計便覧 (強化プラスチック協会, 1994)	FRP製船舶と鋼製船舶は、どちらも薄板を組み合わせた構造であるため、圧縮方向の力が作用した場合に座屈しやすいことを確認。	○

5. FRP製船舶の構造及び材質に係る条件の設定

FRP製船舶の座屈強度の算出に用いる，船舶の船体構造条件の設定結果を表5-1，材料特性の設定結果を表5-2に示す。

表5-1 船舶の船体構造条件の設定

項目	記号	単位	値	引用文献等
船舶長さ	L	m	19.40	対象船舶の船舶検査資料記載の登録長さ
船舶深さ	D	m	1.85	対象船舶の船舶検査資料記載の登録深さ
計画最大満載喫水	d	m	2.20	津波漂流物対策施設設計ガイドライン(平成26年3月)の総トン数(G.T.)20トン漁船の喫水の最大値
船側外板厚* (船首部)	t	mm	10.48	強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)の船首部の外板厚 $t = 15 \times s \times (d + 0.026 \times L)^{0.5} \times 0.85$ s: 肋骨の心距=0.5m d: 計画最大満載喫水=2.20m L: 船舶長さ=19.40m
肋骨心距	s	mm	500	強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)の肋骨の心距(=縦肋骨心距(a)=横肋骨心距(b))
船首角度	θ	°	45	対象船舶の計測結果
船首傾斜部の長さ	L_{sf}	m	3.20	対象船舶の計測結果

注記* : 船側外板厚は「土木学会(1994)」においても算定方法が記載されているが，FRP製船舶であるため「強化プラスチック船規則(2018)」を採用する。

表5-2 船舶の材料特性の設定

項目	単位	引用文献	引用文献値	採用値*
ヤング弾率性 ($\frac{tf}{m^2}$)	tf/m^2	「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018)」の曲げ弾性係数の判定基準値 引用文献記載: 11,780 (N/mm ²)	1.20×10^6	1.22×10^6
		「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015)」の曲げ弾性率 引用文献記載: 9~12 (GPa)	$0.92 \times 10^6 \sim 1.22 \times 10^6$	
ポアソン比	—	「非金属データブック プラスチック・FRP・ゴム・接着剤・塗料・木材及び木質材料・セラミックス[改訂2版](1985)」のハンドレイアップ用ガラス繊維基材のGRPとしての力学的特性値(標準) 引用文献記載: 0.336 (0.320~0.358)	0.320~0.358	0.358

注記* : 安全側の評価となる値を採用。

表 5-1 及び表 5-2 にて設定した船舶条件を基に、「土木学会（1994）」に準じて圧縮荷重 P_C を算定するとともに、FRP製の船舶の軸剛性（船首方向）を設定した結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 船舶の軸剛性の設定結果

項目	記号	単位	値	
船体構造	船舶長さ	L	m	19.40
	船舶深さ	D	m	1.85
	船側外板厚 (船首部)	t	mm	10.48
	肋骨心距	$\begin{matrix} s \\ (=a,b) \end{matrix}$	mm	500
	船首角度	2θ	°	90
	船首傾斜部の長さ	L_{sf}	m	3.20
材料物性	ヤング率 (曲げ弾性率)	E	tf/m ²	1.22×10^6
	ポアソン比	ν	—	0.358
座屈強度	σ_c	tf/m ²	2,024	
圧縮荷重	P_C	kN	544.4	
軸剛性(船首部)	k_C	N/m	1.71×10^5	

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

σ_c : 座屈強度 (tf/m²)
 k : 座屈係数 $(b/a+a/b)^2$
 a : 横肋骨心距 (mm)
 b : 縦肋骨心距 (mm)
 E : ヤング率 (tf/m²)
 ν : ポアソン比
 t : 船側外板厚 (mm)

$$P_C = 2Dt(\cos\theta)\sigma_c$$

P_C : 圧縮荷重 (船首強度) (kN)
 D : 船の深さ (m)
 θ : 船首角度 (°)

$$k_C = \frac{P_C}{L_{sf}}$$

k_C : 軸剛性 (N/m)
 L_{sf} : 船首傾斜部の長さ (m)

6. F E M A (2012) による荷重の算定

前章で設定した F R P 製の船舶の軸剛性 (船首部) を用いて, 漂流物による衝突荷重を「F E M A (2012)」に準じて算定した結果を表 6-1 に示す。なお, 衝突荷重は, 日本海東縁部に想定される地震による津波における衝突速度 10.0 m/s について算定する。

【F E M A (2012) の式】

$$F_i = 1.3 u_{max} \sqrt{k_C m (1 + c)}$$

ここに,

- F_i : 衝突力 (kN)
- u_{max} : 最大流速 (m/s)
- k_C : 漂流物の有効軸剛性 (N/m)
- m : 漂流物の質量 (kgf)
- c : 付加質量係数

表 6-1 F E M A (2012) による衝突荷重の算定結果

項目	記号	単位	値
衝突速度	u_{max}	m/s	10.0
軸剛性 (船首部)	k_C	N/m	1.71×10^5
漂流物の質量	m	kgf	57,000
付加質量係数	c	—	1
衝突荷重	F_i	kN	1,815

上記の算定結果より, F R P 製の総トン数 19 トン船舶において, 「F E M A (2012)」による衝突荷重は, 衝突速度 10.0 m/s で 1,815 kN となる。なお, この「F E M A (2012)」による衝突荷重は, 船舶の船首方向の衝突を対象としている。

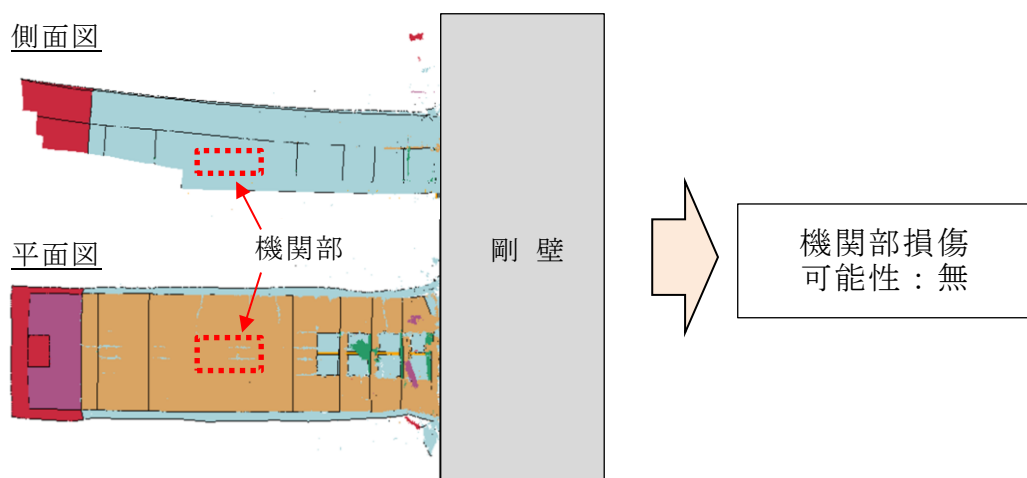
FRP製船舶の機関部における衝突影響の確認

FRP製船舶（総トン数19t）の衝突解析結果より、船体破壊が進展することで機関部（エンジン）まで衝突している可能性がある。機関部の重量は衝突解析の船体モデルに考慮しているが、形状及び剛性についてはモデルに考慮していないため、機関部の衝突影響について検討した。また、対象となる船舶に対する調査結果より、総トン数19t船舶に搭載されているエンジンの最大重量は4.0t（型式：S6R2-MTK3L）であることを確認した。

1. 機関部の衝突荷重の算定方法

FRP製船舶の衝突解析結果より、機関部まで損傷する可能性のある衝突形態において、機関部衝突時の衝突速度に対する衝突荷重を算定する。衝突速度 10m/s（ケース①～⑤）及び 4m/s（ケース⑥～⑩）の衝突解析における衝突状況を図 1-1、機関部の損傷が想定される際の衝突速度を図 1-2、機関部の損傷有無と機関部の衝突速度のまとめを表 1-1 に示す。

ケース① 船首衝突（衝突後：1.00秒後）



ケース② 船尾衝突（衝突後：0.85秒後）

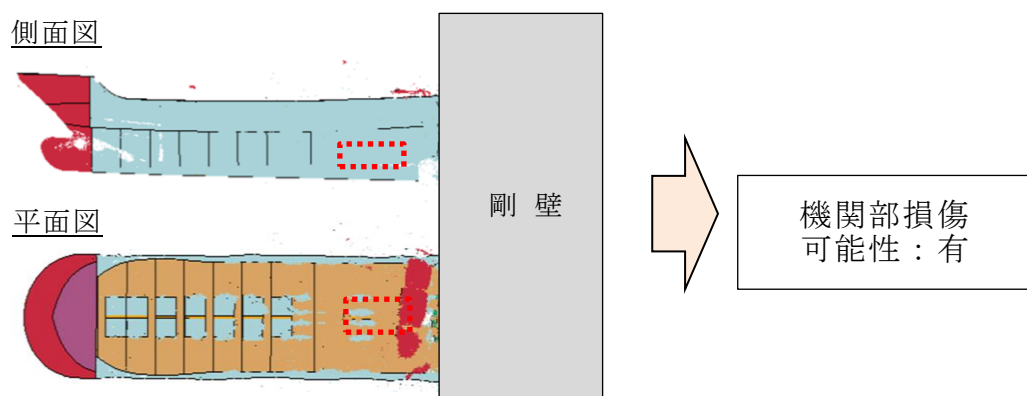


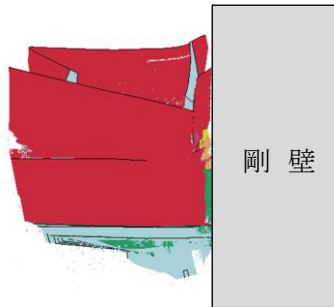
図 1-1 (1) 衝突解析による機関部の損傷状況

ケース③ 真横衝突（衝突後：0.24秒後）

平面図（下面側）



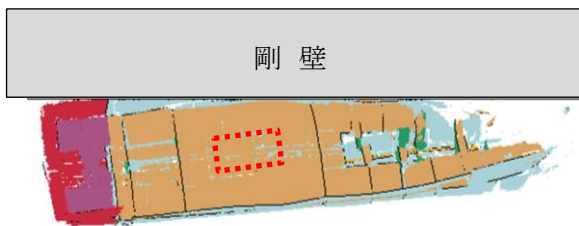
後面図



機関部損傷
可能性：有

ケース④ 斜め船首衝突（衝突後：2.20秒後）

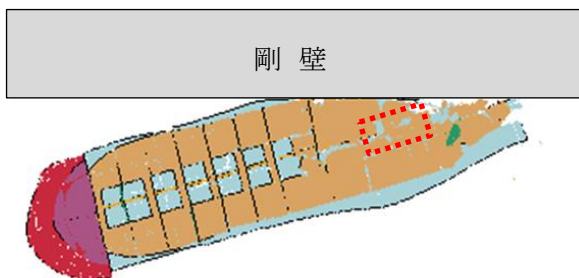
平面図



機関部損傷
可能性：無

ケース⑤ 斜め船尾衝突（衝突後：2.10秒後）

平面図

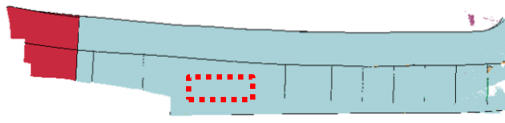


機関部損傷
可能性：有

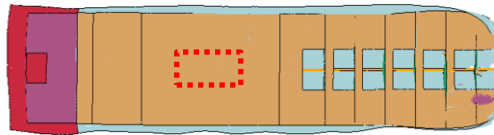
図 1-1 (2) 衝突解析による機関部の損傷状況

ケース⑥ 船首衝突（衝突後：2.00秒後）

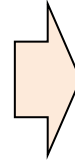
側面図



平面図



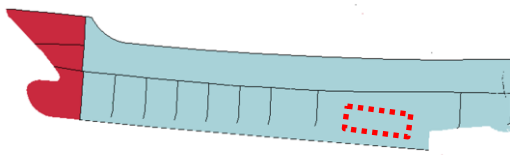
剛壁



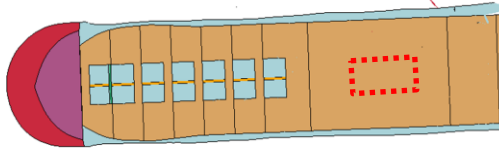
機関部損傷
可能性：無

ケース⑦ 船尾衝突（衝突後：2.00秒後）

側面図



平面図



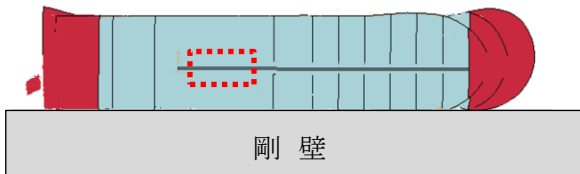
剛壁



機関部損傷
可能性：無

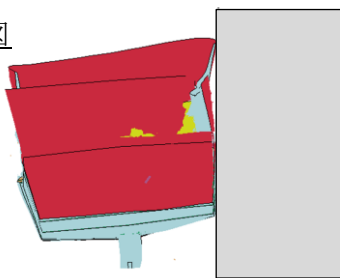
ケース⑧ 真横衝突（衝突後：0.50秒後）

平面図（下面側）



剛壁

後面図

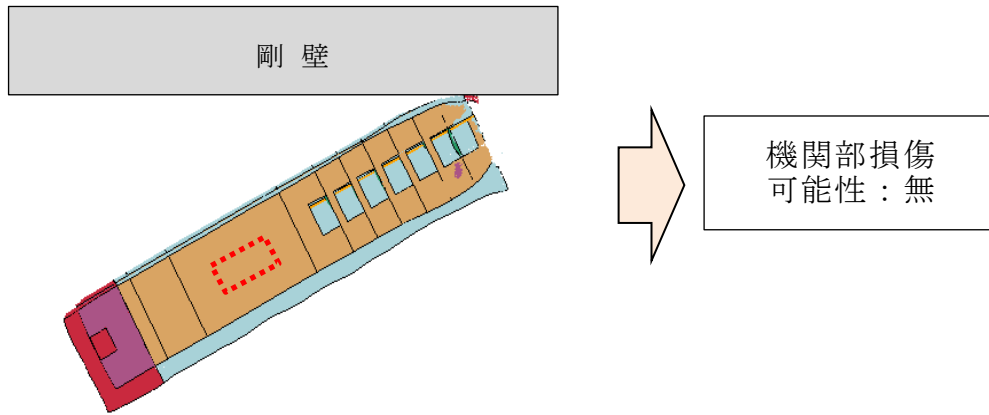


機関部損傷
可能性：無

図 1-1 (3) 衝突解析による機関部の損傷状況

ケース⑨ 斜め船首衝突（衝突後：2.50秒後）

平面図



ケース⑩ 斜め船首衝突（衝突後：2.90秒後）

平面図

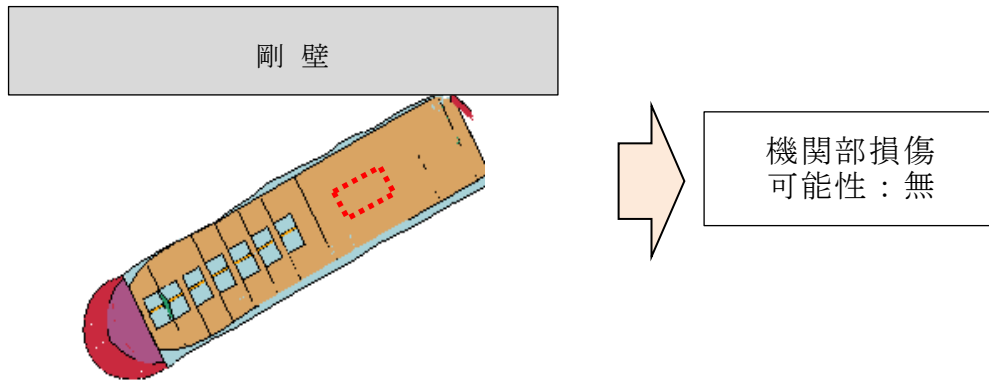
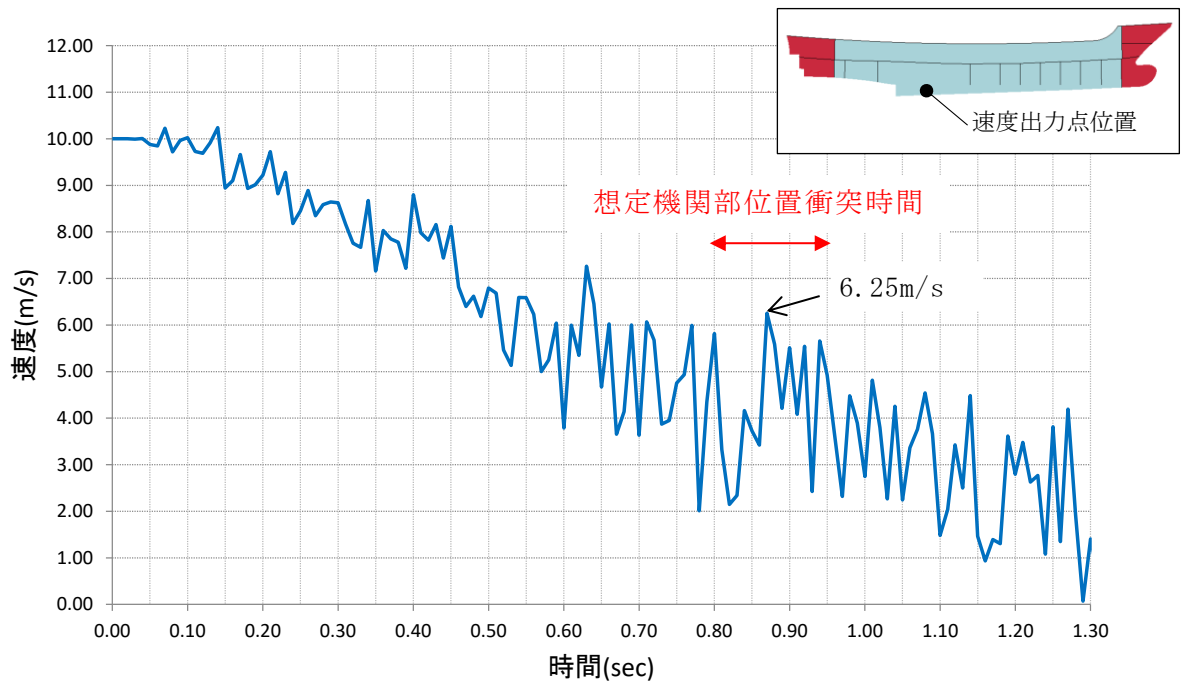


図1-1 (4) 衝突解析による機関部の損傷状況

ケース②：船尾衝突



ケース③：真横衝突

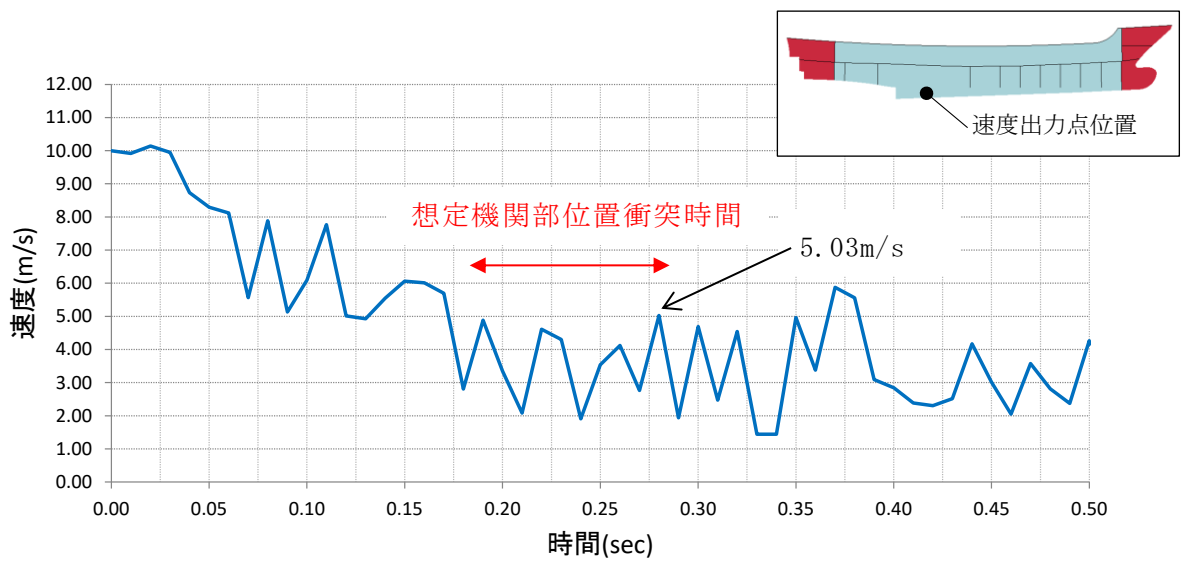
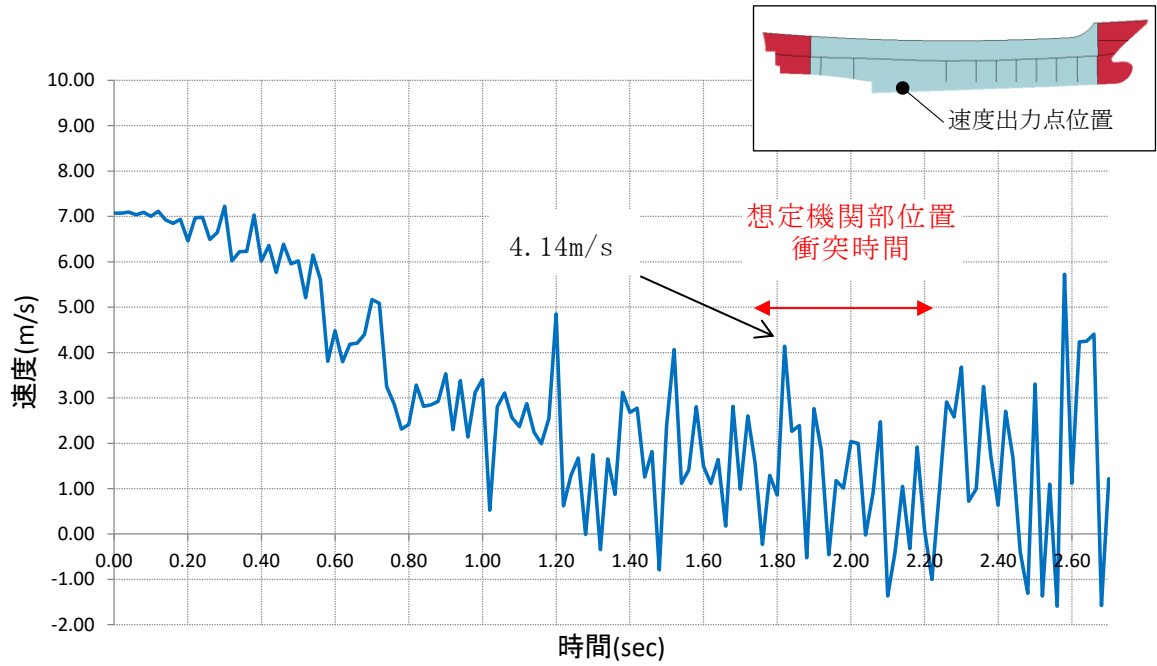


図 1-2 (1) 機関部衝突時の速度

ケース⑤：斜め船尾衝突（剛壁直交方向速度）



ケース⑤：斜め船尾衝突（進行方向速度）

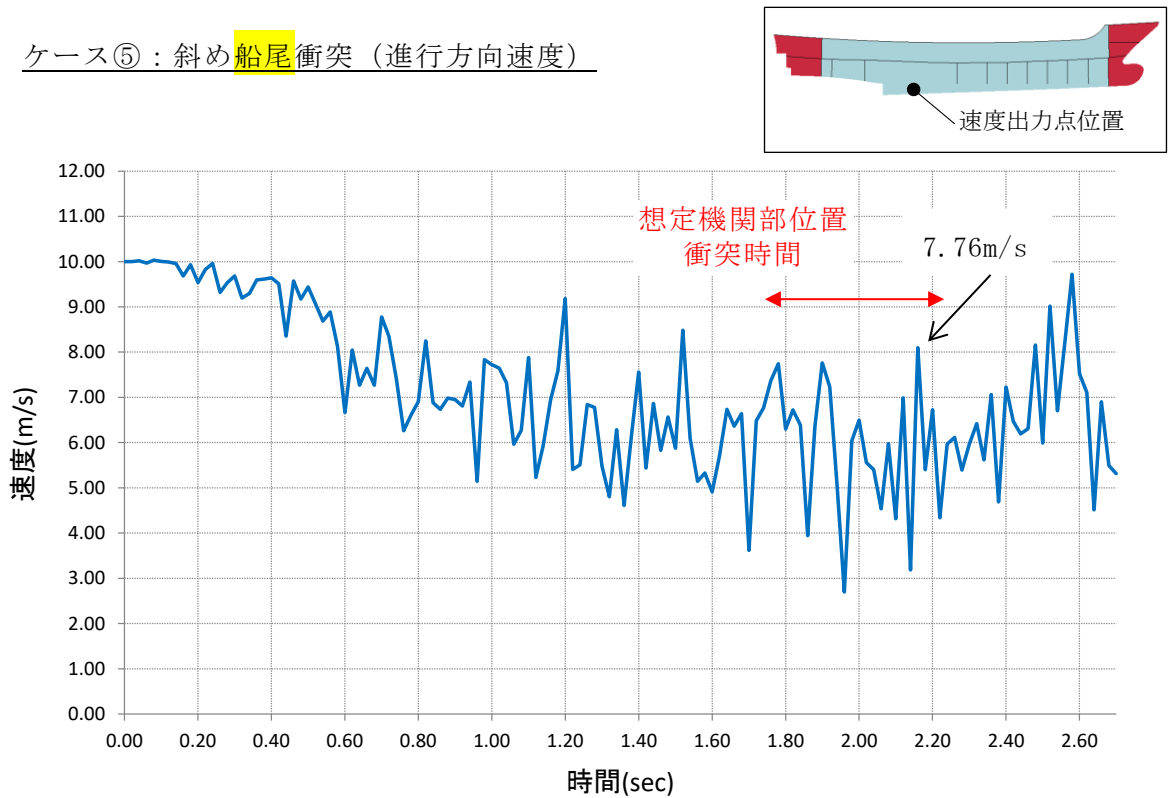


図1-2 (2) 機関部衝突時の速度

表1-1 機関部の損傷有無と機関部の衝突速度

衝突速度	10m/s			4m/s		
	ケース	損傷有無	機関部衝突速度(m/s)	ケース	損傷有無	機関部衝突速度(m/s)
船首	①	無	—	⑥	無	—
船尾	②	有	6.25	⑦	無	—
真横	③	有	5.03	⑧	無	—
斜め船首	④	無	—	⑨	無	—
斜め船尾	⑤	有	4.14^{*1} 【7.76】 ^{*2}	⑩	無	—

注記 *1：剛壁直交方向の速度

*2：進行方向の速度

表1-1より、船体の衝突速度 10.0m/s において想定される機関部の最大衝突速度は約 6.3m/s となり、船体の衝突速度 4.0m/s においては、機関部の損傷は発生しないことを確認した。この機関部の衝突速度に対して、既往の衝突荷重の算定式である、「道路橋示方書（2002）」及び「FEMA（2012）」により衝突荷重を算定する。

2. 機関部の軸剛性の設定方法

「FEMA (2012)」による機関部の衝突荷重算定にあたり、機関部の軸剛性が衝突荷重の算定において重要なパラメータとなる。船舶の機関部が全て剛性の大きい鋼材で構成されていると仮定すると、下記の整理結果より機関部の衝突は、保守的に車両の衝突に置き換えることが可能であると判断し、「甲斐田・木原 (2017)」*1に記載のある軽自動車 ($2.04 \times 10^6 \text{N/m}$)、セダン型乗用車 ($2.4 \times 10^6 \text{N/m}$)、大型乗用車 ($2.8 \times 10^6 \text{N/m}$) の軸剛性のうち、最大となる大型乗用車の「 $2.8 \times 10^6 \text{N/m}$ 」を用いるものとする。

- ・FRP製船舶(総トン数19t)の主機関は4ストロークディーゼルであり、普通車のエンジンも同様に4ストローク機関が一般的であるため、自動車エンジンとFRP製船舶の機関部は同等である。
- ・車両のエンジンは、一般的に車体前方に固定されており、バンパービーム、クラッシュボックス、フロントサイドメンバー等(図2-1)に囲まれ、外部からの衝撃を受け難い構造となっている。一方、FRP製船舶(総トン数19t)の機関部は、一般的に船殻に直接取り付けられており、車両のようにフロントサイドメンバーのような機関部を保護するような構造はないため、車両のエンジンは、FRP製船舶の機関部よりも剛性の高いもので囲まれている。
- ・衝突荷重の算定に用いる軸剛性「 $2.8 \times 10^6 \text{N/m}$ 」は、エンジンを含んだ衝突実験から設定されたものである。



図2-1 車体構造 (高島ほか (2015) *2)

注記*1: 甲斐田秀樹・木原直人 (2017) : 原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術—現状調査とその適用に関する考察—, 電力中央研究所報告 016010, 2017.

*2: 高島大輔・木原直人・宮川義範・甲斐田秀樹・柴山淳・池野正明 (2015) : 津波漂流物の衝突力推定における軸剛性モデル, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, I_1015-I_1020, 2015.

3. 機関部の衝突荷重の算定結果

機関部の衝突荷重を「道路橋示方書（2002）」及び「FEMA（2012）」により算定する。なお、衝突荷重の算定に用いる衝突速度は、表 1-1 の結果から機関部における最大速度の 6.3m/s とする。以下に「道路橋示方書（2002）」及び「FEMA（2012）」の算定式を、表 3-1 に機関部の衝突荷重の算定結果を示す。

【衝突荷重算定式：道路橋示方書（2002）】

$$P = 0.1Wv$$

ここに、

- P : 衝突力 (kN)
- W : 流送物の重量 (kN) = 39.3
- v : 表面流速 (m/s) = 衝突速度 = 6.3

【衝突荷重算定式：FEMA（2012）】

$$F_i = 1.3u_{max}\sqrt{k_c m(1+c)}$$

ここに、

- F_i : 衝突力 (kN)
- u_{max} : 最大流速 (m/s) = 衝突速度 = 6.3
- k_c : 漂流物の有効軸剛性 (N/m) = 2.8×10^6
- m : 漂流物の質量 (kgf) = 4,000
- c : 付加質量係数 = 1

表 3-1 既往の算定式による機関部の衝突荷重

算定手法	道路橋示方書(2002)	FEMA (2012)	【参考】衝突解析
衝突物	機関部 (エンジン)	機関部 (エンジン)	船体 (船首方向衝突)
衝突速度 (m/s)	6.3	6.3	10.0
質量 (tf)	4.0	4.0	57.0
衝突荷重 (kN)	25	1,226	1,676

以上の結果より、船体の衝突速度 10.0m/s における機関部の衝突速度は最大で約 6.3m/s とした場合、既往の算定式による衝突荷重の最大値は 1,226kN となる。この衝突荷重は表 3-1 の参考に示したとおり、衝突解析により算定した船体（船首方向衝突）の衝突荷重 1,676kN に対して、包絡されることを確認した。