

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-24-0005_改5
提出年月日	2021年6月16日

女川原子力発電所第2号機 津波漂流物の衝突荷重について

2021年 6月16日
東北電力株式会社

前回会合(4/27)における指摘事項及び回答概要

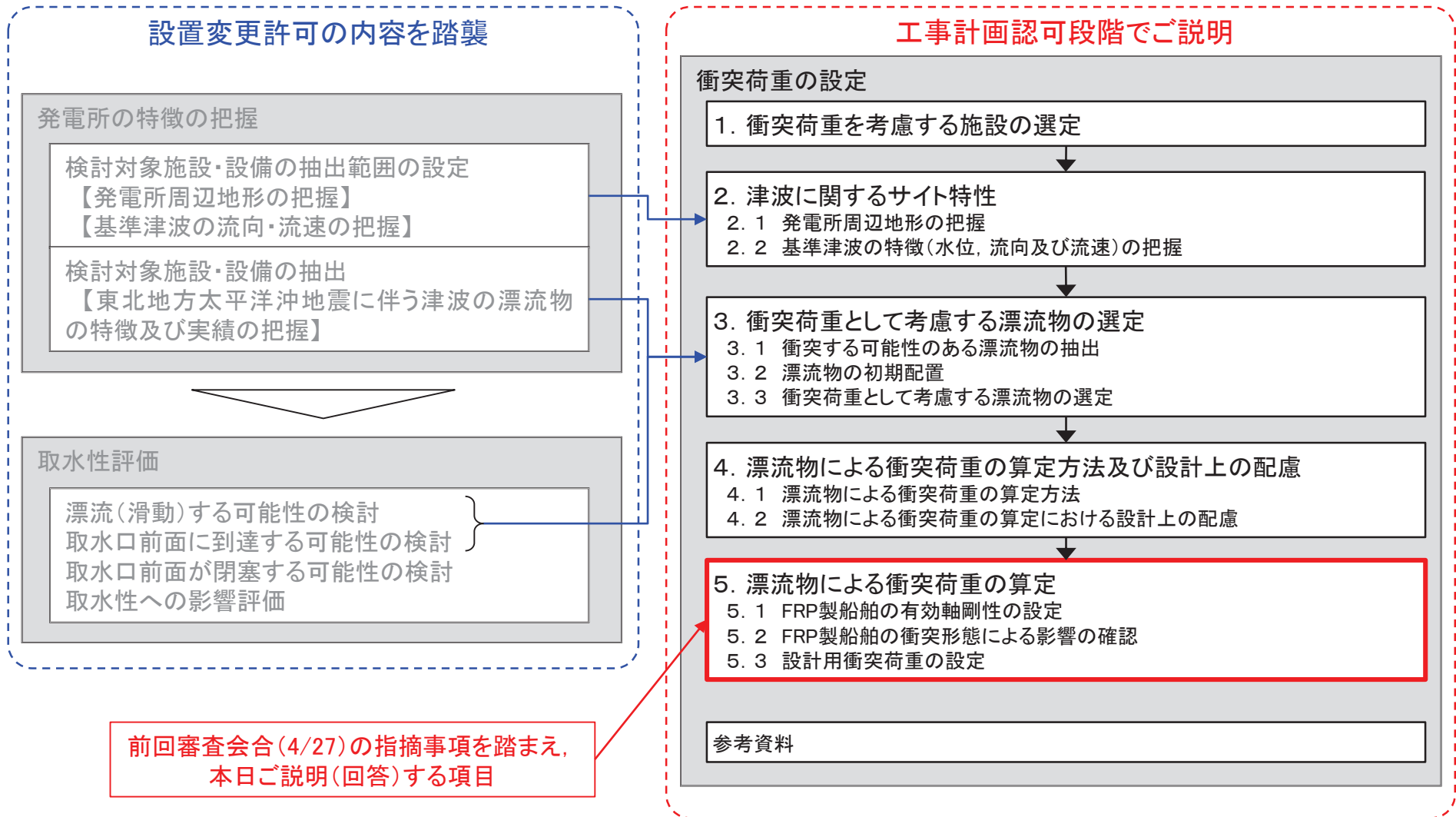
- 第970回審査会合において、主要説明項目(第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)にて説明)における「詳細設計申送り事項 No.2-5 津波漂流物の衝突荷重」について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答内容を説明する。

実施日	指摘事項
令和3年4月27日 第970回審査会合	FRP製船舶の衝突荷重の算定について、以下の点を含めて妥当性と設計への適用性をそれぞれ体系立てて整理して説明すること。 <ul style="list-style-type: none"> ➤ 土木学会の手法では鋼製船舶を対象としていることから、材質及び構造の観点を踏まえFRP製船舶に適用できるとした根拠【①】 ➤ 軸剛性の算定における材質及び構造のばらつきを含めた保守性【②】 ➤ 衝突の解析の位置づけ及び衝突形態の不確かさを考慮した解析結果【③】



回答の概要	記載箇所
<p>【FRP船舶の軸剛性算定方法に関する妥当性】</p> <p>衝突時における船舶の破壊に関する整理を行った上で、鋼製船舶を対象としている土木学会(1994)を用いてFRP製船舶の軸剛性を算出する方法が妥当であることを、文献調査の結果から以下の観点を踏まえ確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 鋼製船舶とFRP船舶の形状、構造、材質の力学特性及び損傷モードにおける類似(同等)性【①】 ✓ 軸剛性算定に係る船舶の構造条件に用いる文献の適用性【①】 ✓ 軸剛性算定に係る材料物性(材質の条件)に用いる文献の適用性【①】 <p>また、鋼製船舶を対象に、「甲斐田・木原(2017)」で示されている軸剛性と土木学会(1994)により算出した軸剛性を比較し、おおむね同等の軸剛性になり、後者の軸剛性の方が大きくなる傾向を確認した【①】</p>	<p>「5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー)」及び「5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」</p> <p>【p5-15, 参考4~5】</p>
<p>【土木学会(1994)の方法を用いた軸剛性より算出する衝突荷重の設計への適用性】</p> <p>以下の内容から土木学会(1994)の方法を用いた軸剛性より算出する衝突荷重は設計への適用性があると判断した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 軸剛性算定に係る船舶の構造条件は、妥当性確認で適用した値とは異なる方法で定め、保守的になる値を採用した【②】 ✓ 軸剛性算定に係る材料物性(材質の条件)は、不確かさやばらつきを有する条件であることを踏まえ、適用性を確認した文献の最大値を採用した【③】 ✓ 保守性を考慮したケースで算出した軸剛性は、妥当性を確認したケースよりも3倍以上の値であることを確認した【③】 ✓ 衝突形態による荷重への影響を確認するために実施した衝突解析の結果から、いずれの荷重も上記の保守性を確認したケースの軸剛性から算出される衝突荷重よりも小さく、包絡されることを確認した【③】 ✓ 鋼製船舶を対象に、衝突解析と土木学会(1994)とFEMA(2012)から算出した衝突荷重の比較を行い、概ね同等の荷重であり、後者の荷重の方が大きくなることも確認した【③】 	<p>「5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー)」, 「5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」及び「5. 2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認」</p> <p>【p16-24, 参考6~10】</p>

- 漂流物に対する要求事項(参考1)に対して、工事計画認可では、設置変更許可における「発電所の特徴の把握」及び「取水性評価」を踏襲し、それらを踏まえた衝突評価を行うための衝突荷重を設定する(第970回審査会合にてご説明)。
- 第970回審査会合での指摘事項を踏まえ、FRP製船舶の軸剛性算定方法に関して、衝突解析の位置付けを踏まえて、その妥当性と設計への適用性を分離して説明する。



5. 漂流物による衝突荷重の算定

- 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
- 5. 2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認
- 5. 3 設計用衝突荷重の設定

5. 漂流物による衝突荷重の算定

- 規格・基準類及び既往の研究論文の衝突荷重算定式の適用性を考慮し、「直近陸域」の巡視点検用車両(2.15t)と「直近海域」の小型漁船(排水トン数15t)は「FEMA(2012)」,「前面海域」の漁船(排水トン数57t)は道路橋示方書式を適用して衝突荷重を算定することとした。
- また、第876回審査会合において、漂流物衝突荷重算定式に道路橋示方書式及びFEMA(2019)に従いASCE(2016)を適用する方針としていたが、先行サイトの適用実績及びFEMA(2012)を適用した方が保守的な評価となること(p25に示す)を踏まえ、浮遊状態で衝突する可能性のある「直近陸域」の巡視点検用車両及び「直近海域」の小型漁船にはFEMA(2012)を適用することとした。

道路橋示方書の衝突荷重算定式

$$P = 0.1 \times W \times U$$

P: 衝突力(kN) W: 輸送物の重量(kN)
U: 表面流速(m/s)

FEMA(2012)の衝突荷重算定式

$$F = 1.3 \times v \times \sqrt{k \times m \times (1 + C)}$$

F: 衝突力(kN) m: 質量(kg)
v: 最大流速(m/s) C: 付加質量係数
k: 有効軸剛性(N/m)

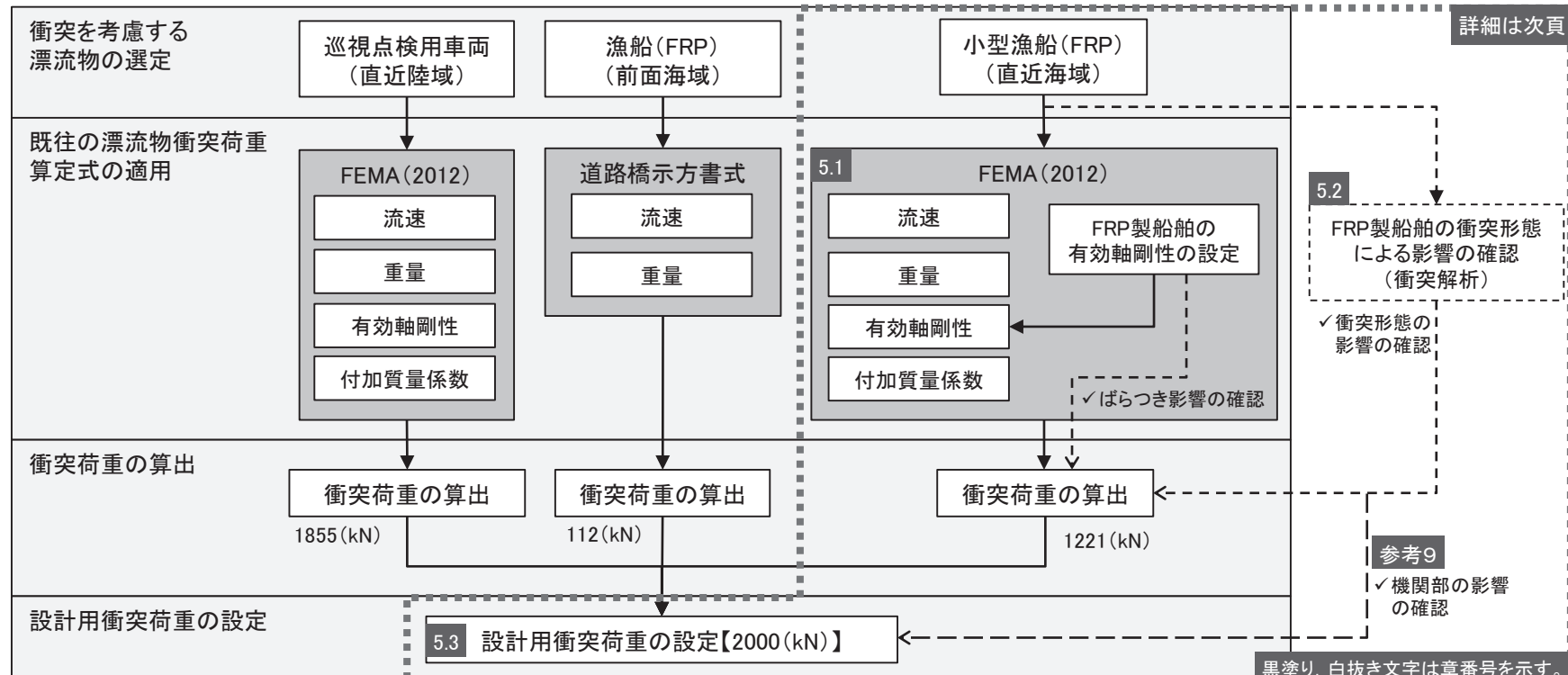
漂流物による衝突荷重算定条件

衝突する可能性のある漂流物	重量	到達形態	流速 (衝突速度)	初期配置 区分	適用式	衝突荷重を考慮する施設			
						防潮堤 (鋼管式 鉛直壁)	防潮堤 (盛土堤防)	屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	貯留堰
車両系重機*1	41.2 t	滑動	13 m/s	直近陸域	ASCE(2016)	—	○	○	○*2
巡視点検用車両	2.15 t	浮遊	13 m/s	直近陸域	FEMA(2012)	○	○	○	○*2
小型漁船(FRP)	排水トン数 15 t	浮遊	13 m/s	直近海域	FEMA(2012)	○	○	○	○*2
漁船(FRP)	排水トン数 57 t	浮遊	2 m/s*3	前面海域	道路橋示方書	—	—	—	○

注記*1: 滑動状態で衝突を考慮する車両系重機(41.2t)は、「ASCE(2016)」を参考に、衝突荷重を算定することとした(詳細は参考2)。
 *2: 貯留堰は第二波以降に海中から露出するため、第二波以降に衝突するが、初期配置が「直近陸域」及び「直近海域」の漂流物は第一波で敷地に到達していることを踏まえ、流速13m/sを適用する。
 *3: 発電所周辺の最大流速13m/sとした場合の影響についても確認する。

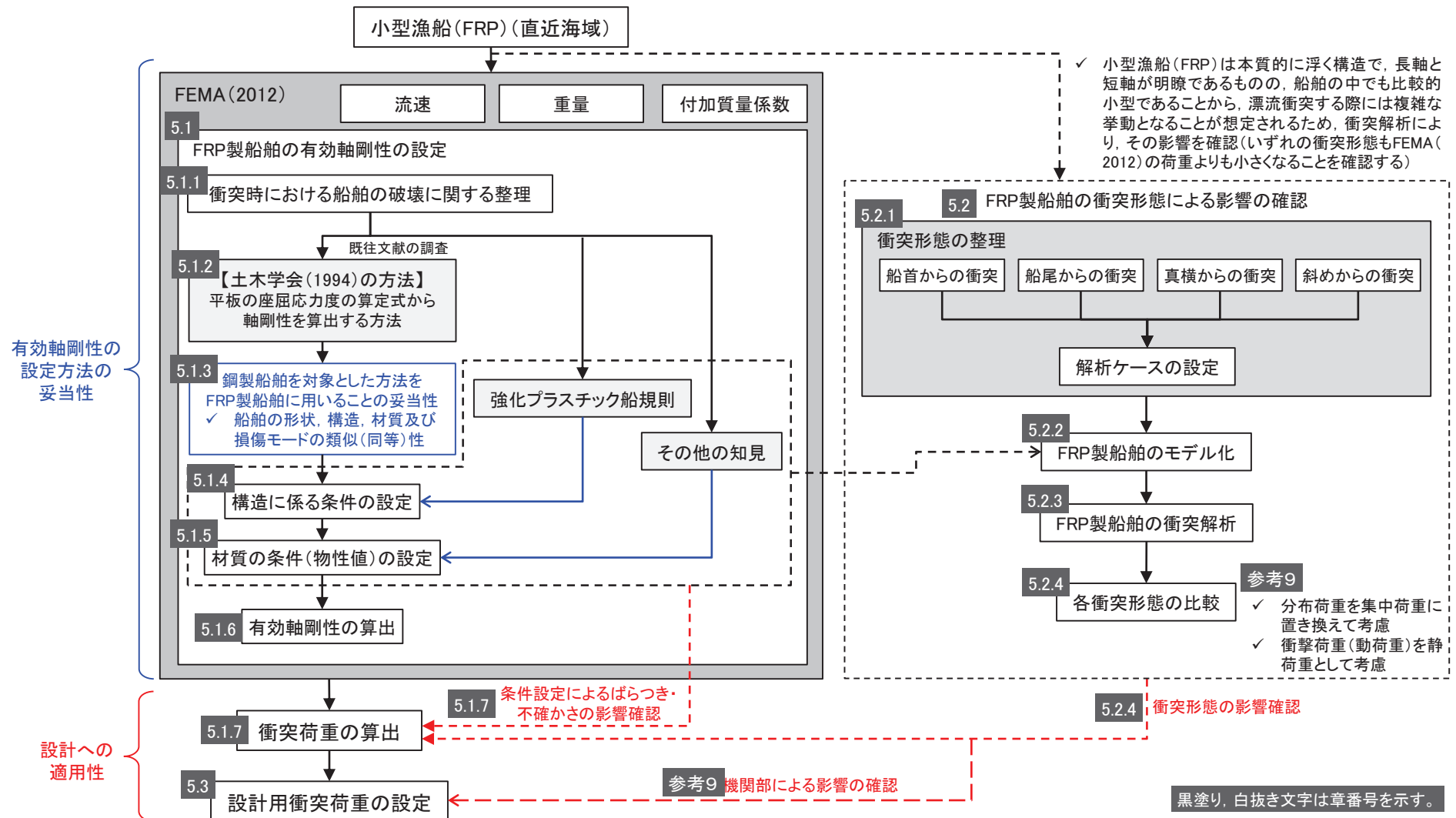
5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー(1/2))

- 「直近陸域」の巡視点検用車両, 「直近海域」の小型漁船(FRP)及び「前面海域」の漁船(FRP)の衝突荷重算出の流れを以下に示す。なお, 滑動状態で衝突を考慮する車両系重機は, 「ASCE(2016)」を参考に, 衝突荷重を算定する(詳細は参考2)。
- 上記の漂流物のうち「直近陸域」の巡視点検用車両及び「直近海域」の小型漁船(FRP)については, 「FEMA(2012)」を適用することから, 付加質量係数及び有効軸剛性を設定する必要がある。
- 付加質量係数は, 巡視点検用車両及び小型漁船(FRP)ともに, 最大値の「1」を適用する。
- 有効軸剛性については, 巡視点検用車両に対して甲斐田・木原(2017)の 2.8×10^6 (N/m)を用いる(車両の軸剛性の妥当性は参考3)。一方, 小型漁船(FRP)については以下の内容から材質がFRPであることを考慮した軸剛性を個別に設定することとする。
 - ✓ 船舶の軸剛性としては, 「甲斐田・木原(2017)」が既往の文献を整理し, 総トン数400~4000tの鋼製の大型船舶の船首方向の有効軸剛性が示されている。
 - ✓ 一方, 評価対象としている船舶は小屋取漁港の漁船で, 最大の総トン数は約5tであることから, 大型船舶から小型船舶へ外挿する方法が考えられるが, 小屋取漁港の小型漁船はいずれもFRP製の船舶であるため, 材質の違いにより外挿する方法は適用が困難であると考ええる。
- また, 小型漁船(FRP)は, 本質的に浮く構造で, 車両に比べて長軸と短軸が明瞭であるものの, 船舶の中でも比較的小型であるため, 回転の影響を受けやすく, 漂流物となって襲来する際には複雑な挙動となることが想定される。そのため, 衝突解析により, 衝突形態が衝突荷重に及ぼす影響を確認することとした。



5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー(2/2))

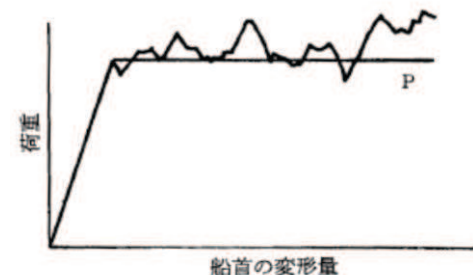
- ▶ 小型漁船(FRP)の衝突荷重はFEMA(2012)から算出することとし、軸剛性は「甲斐田・木原(2017)」で示されている軸剛性と同様に船首方向の軸剛性とする。
- ▶ FEMA(2012)に用いる船舶の有効軸剛性の設定にあたっては、有効軸剛性の設定方法の妥当性(FRP製船舶と鋼製船舶の類似性、用いる知見の適用性)を示した上で、有効軸剛性の算定における各パラメータのばらつきを考慮し、設計への適用性を確認することとする。
- ▶ 衝突形態による影響は、各衝突形態で実施する衝突解析から得られる荷重がいずれも上記のFEMA(2012)から算出される荷重よりも小さくなることを確認する。



5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.1 衝突時における船舶の破壊に関する整理

- 「土木学会(1994)」によれば、右図及び下図に示すように、剛性及び強度が大きい海洋構造物に対する船舶の圧壊荷重と変形量との関係が示されており、以下の①～②のような破壊進展となる。
 - ① 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)はほぼ直線的に増加する。
 - ② 船舶の破壊が進み、船首の傾斜部が全部破壊し、船体の全面が海洋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みることができるとされている。
- 剛性及び強度が大きい浸水防護施設(防潮堤、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰)に対して、小型漁船(FRP)の座屈強度は小さいと考えられることから、「土木学会(1994)」で示されている破壊進展と同様に、FRP製船舶が圧壊していくこととなり、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、被衝突側の強固な浸水防護施設にその圧壊荷重(最大荷重)が作用する。
- 以上を踏まえ、FRP製船舶の圧壊荷重を求めた上で、軸剛性を算出することとする。



荷重と船首の変形量(「土木学会(1994)」)

土木学会(1994)

「船が海洋構造物に船首衝突し、船首から圧壊が起こり食い込んで行くときは、まず船首前端から船首傾斜部が圧壊する。そして、さらに圧壊が進むと深さが一樣となる船首部の圧壊へと食い込みが拡大していく。」

「衝突船が海洋構造物に衝突し、船体が圧壊するときは、その衝突エネルギーは船首の圧壊によって吸収される。この船首の圧壊による吸収エネルギーは、図3.6の点線で囲まれる面積で求められる。」

【解釈】

図3.3の船首傾斜部(赤色部)が壊れる際には、図3.6及び図3.7の赤色部で示すように圧壊荷重及び船側の吸収エネルギーが増加する。一方、船首傾斜部が完全に壊れ、図3.3の船首傾斜部よりも船体側(青色部)が壊れ始めると、構造が長手方向に一樣であることから、図3.6のように圧壊荷重は一定となり、吸収エネルギーは図3.7のように線形に増加することとなる。

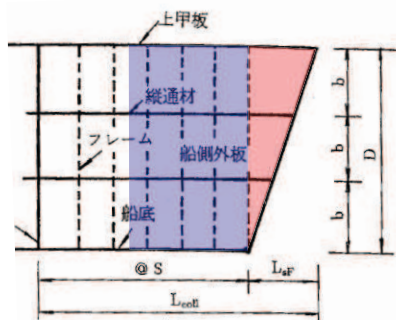


図 3.3 船首部の標準型

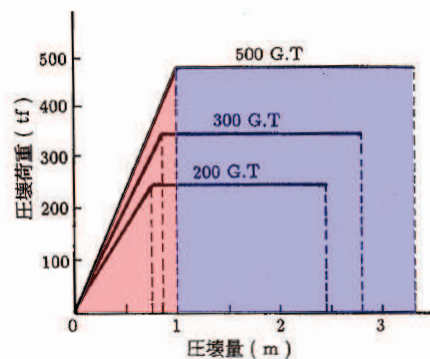


図 3.6 圧壊荷重と圧縮量

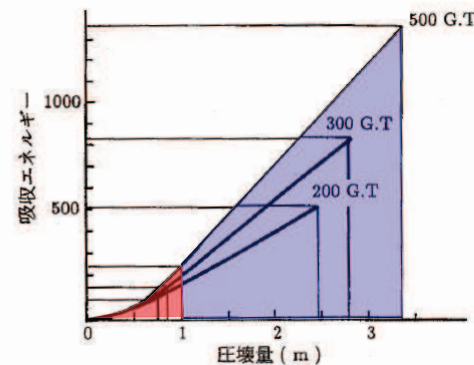


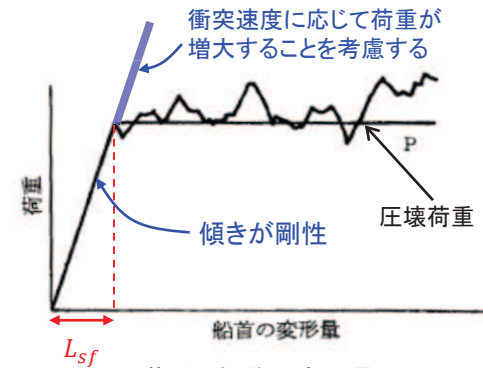
図 3.7 船側強度の算定

荷重と船首の変形量(「土木学会(1994)」)に一部加筆)

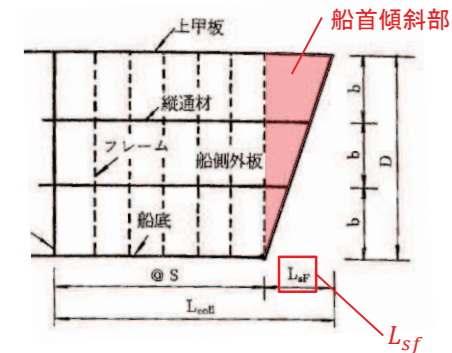
5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.2 土木学会の方法

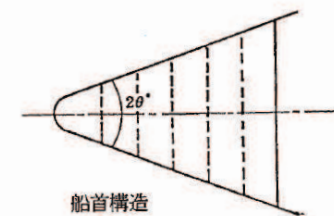
- 「土木学会(1994)」では、船舶の圧壊荷重(船首強度) P_c について、下に示す平板の座屈応力度の算定式から座屈強度 σ_c を算出し、船首形状寸法等を乗じることで求められるとしている。「土木学会(1994)」で検討対象としている船舶は、大型の鋼製船舶ではあるが、座屈強度 σ_c の算定式は一般的な平板の座屈応力度の算定式であることから、ヤング率とポアソン比で適切に考慮することで、鋼製以外の船舶にも適用可能である。
- また、「土木学会(1994)」によれば、船舶の破壊が進み、船首傾斜部がすべて破壊した際に圧壊荷重 P_c に達し、その後圧壊荷重 P_c が一定値として作用することとなる(右図参照)。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(大型の鋼製船舶を対象に、「甲斐田・木原(2017)」で示されている軸剛性と土木学会(1994)により算出した軸剛性の比較を参考4に示す)。
- ここで算出される軸剛性は、船首傾斜部のみに適用され、圧壊荷重に達した後は衝突荷重は一定値となることが想定されるが、本評価では一定となる圧壊荷重をそのまま衝突荷重とは考えずに、保守的に衝突速度に応じて荷重が増大することを仮定し、衝突荷重を算出することとする。
- なお、「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」によれば、「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である。
- 以上を踏まえ、「土木学会(1994)」に示された圧壊荷重の算出方法を用いて、軸剛性を算出する。



荷重と船首の変形量
(「土木学会(1994)」に一部加筆)



船首部の標準型
(「土木学会(1994)」に一部加筆)



船首角度(「土木学会(1994)」)

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

σ_c : 座屈強度 (tf/m²) P_c : 圧壊荷重(船首強度) (tf)

k_c : 軸剛性 (tf/m) E : ヤング率 (tf/m²)

ν : ポアソン比 a : 横肋骨心距 (mm)

k : 座屈係数 ($(b/a + a/b)^2$) b : 縦肋骨心距 (mm)

t : 船側外板厚 (mm) D : 船の深さ (m)

L_{sf} : 船首傾斜部の長さ (m) 2θ : 船首角度 (°) (35° ~ 70°)

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

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

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5. 1. 3 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(1/4)

- 「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度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)性について検討を行った。

【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))」に、ほたての養殖に使用する総トン数14tのアルミ合金漁船とFRP製の船舶の図面が示されている。
- FRP漁船とアルミ合金漁船の寸法、外形及び断面はほぼ同じである。
- なお、評価対象である小屋取漁港の小型漁船もほたての養殖を営んでいることから、右の図で示されているFRP漁船と概ね同様の形状である。
- 以上から、FRP製船舶と鋼製船舶は同じ形状であると判断した。

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

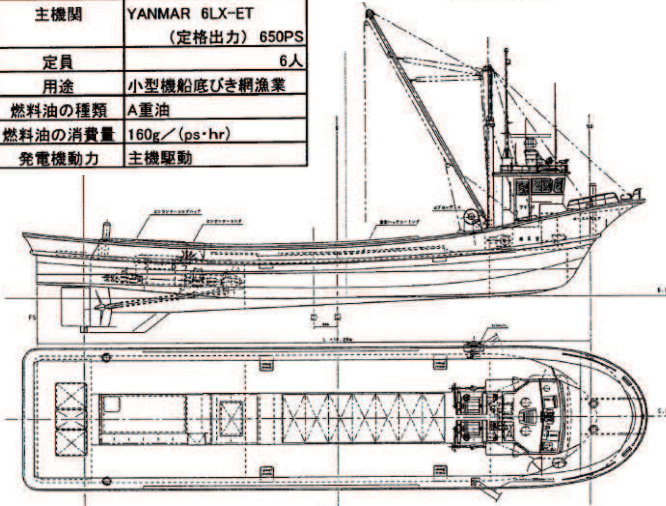


図-2.1 アルミ合金漁船の一般配置図

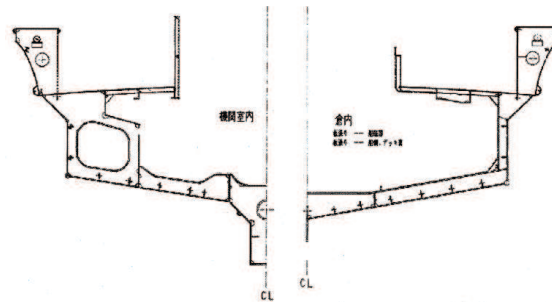


図-2.2 アルミ合金漁船の中央断面図

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

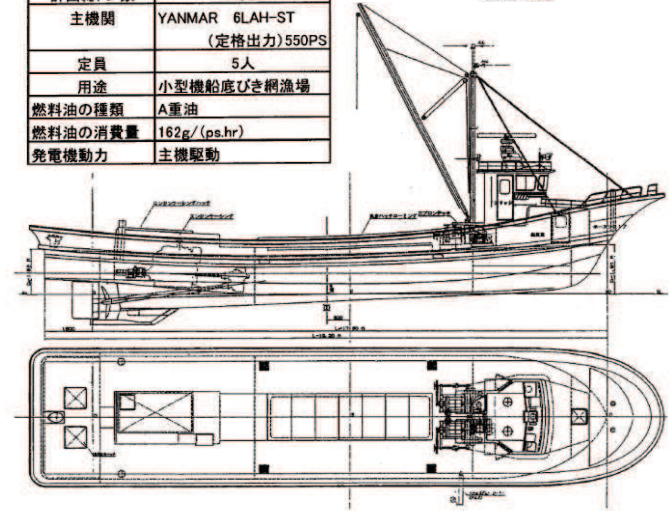


図-2.4 FRP漁船の一般配置図

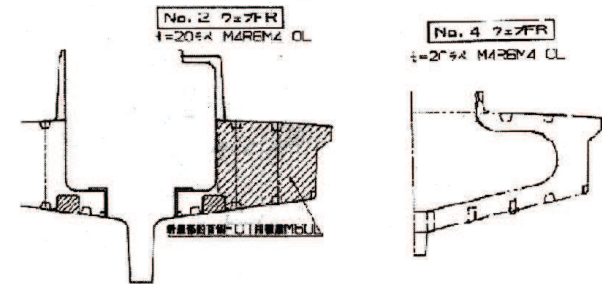


図-2.5 FRP漁船の横断面図

アルミ合金漁船(左)及びFRP漁船(右)の構造
 (「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))」)

5.1.3 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(2/4)

【船舶の構造に関する類似(同等)性】

- 座屈強度 σ_c 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。
 - ✓ 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」によれば、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)とされている。この算定式に関しては、「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。」とされており、外板の厚さ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。」とあることから、FRP製船舶の船側外板厚算定式は、鋼製船舶を基本にしていることから、両者は類似性を有する。
 - ✓ また、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)」、「小型鋼製漁船((社)漁船協会, 昭和46年)」及び「小型鋼船構造規則(詳細不明)」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。

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(同等)性
全体形状	「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))」	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した。	○
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した。	○
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(日本海事協会会誌, 1978)」 「鋼船規則(日本海事協会)」 「小型鋼製漁船((社)漁船協会, 昭和46年)」 「小型鋼船構造規則(詳細不明)」	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にしたり、同様の考えを採用していることを確認した。	○

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

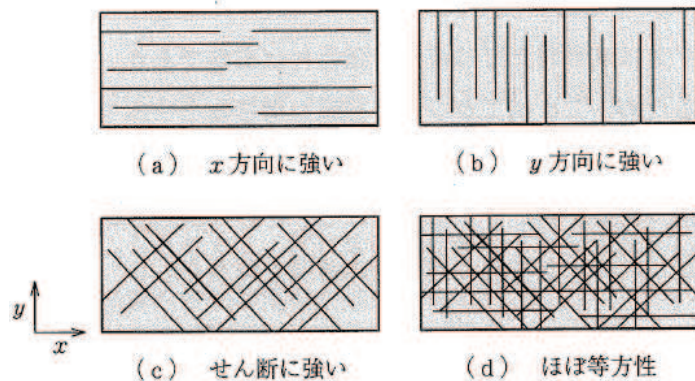
5.1.3 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性(3/4)

【船舶の材質の力学特性及び損傷モードの類似(同等)性(1/2)】

- 「土木学会(1994)」で示されている座屈強度 σ_c は、一般的な平板の座屈応力度の算定式から求められているため、FRPのヤング率とポアソン比を用いることで、FRP製の船舶の座屈強度を算出することが可能であるが、「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、それぞれの材料である鋼材とFRP材の材質及び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。

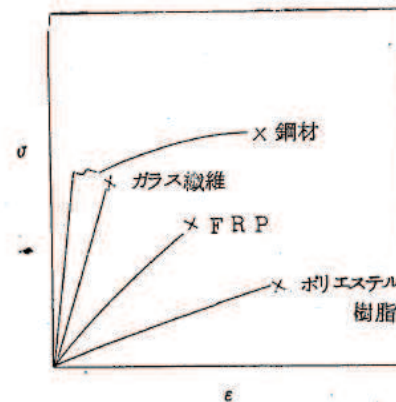
船舶の材質の力学特性

- ✓ 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)」では、FRPの材料力学的特性の記載があり、「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させて成形される(左下図)。
- ✓ 「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」によれば、「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取り扱うことができる。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。」とされている(左下図)。一方、鋼材は等方性の力学特性を持つ均質材料であるため、両者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)」によれば、「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。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(中下図)。応力-ひずみ曲線は「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」でも同様の図(右下図)が掲載されており、「土木構造用FRP部材の設計基礎データ(土木学会, 2014)」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。



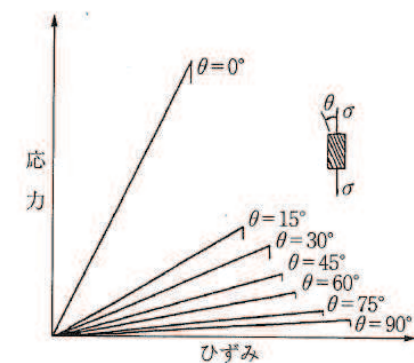
FRPの材料異方性

「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」



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)」 「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」



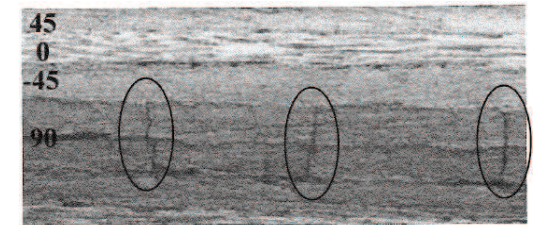
応力-ひずみ曲線

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 3 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(4/4)

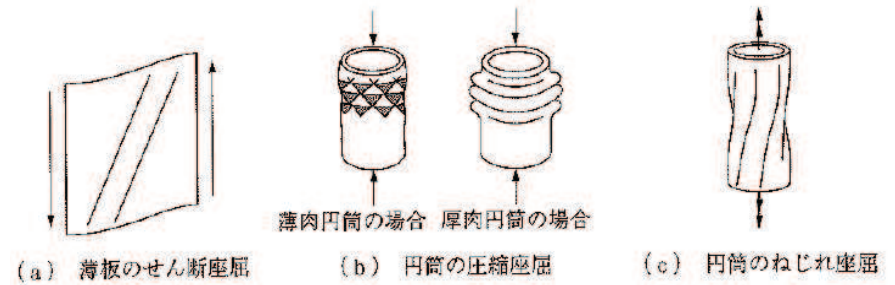
【船舶の材質の力学特性及び損傷モードの類似(同等)性(2/2)】

船舶の損傷モード

- ✓ 「FRP構造設計便覧(強化プラスチック協会, 1994)」によれば, 「FRP構造は薄肉シェルのごとが多いが, 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。
- ✓ 評価対象している小型船舶の構造は半円筒形のような構造をしているが, 甲板は船舶の全体の構造強度には寄与しておらず, 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。
- ✓ また, 船舶は13m/sという高速度で被衝突体に衝突するため, 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13m/sと高速度で, 船舶の重量が15t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, 上で示したように, 船舶に一方から極端に大きな力が作用するため, せん断座屈やねじれ座屈のような事象も生じず, 圧縮座屈が支配的となる。



積層板に発生するトランスバースクラックの例



座屈変形の例

以上の整理により, 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製船舶の圧縮荷重算出にあたり「土木学会(1994)」の方法を用いることは妥当である。

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(同等)性
材質の力学特性	「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」 「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)」	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した。また, FRPは破壊直前まで鋼材と同様に弾性変形することを確認した。	○
損傷モード	「FRP構造設計便覧(強化プラスチック協会, 1994)」 「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」	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した。	○

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.4 FRP製船舶の構造に係る条件の設定(文献の適用性)

➤ FRP製船舶の座屈強度を算出する際に必要となる船舶の構造条件については、用いる文献の適用性を確認した上で、下表のとおりとする。

船舶の構造に関する整理(適用性)

項目	引用文献	適用性	評価	引用文献の値	採用値	
船舶構造	船舶の長さ L	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ)	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、全漁業種類の漁船の平均値が示されていることから、適用可能と判断した。	○	11.0(m)	11.0(m)
	船の深さ*1 D	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの最大喫水	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、全漁業種類の漁船の平均値が示されているが、最大喫水と船の深さは異なることから、適用不可と判断した。	×	1.8(m)	1.22(m)
		「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))」から案分	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから、総トン数5tに案分することで適用可能と判断した。	○	<u>1.22(m)</u> *2	
	船側外板厚 t	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の前後部の外板の厚さ	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	5.89(mm)	5.89(mm)
	横肋骨心距 a	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の肋骨心距	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	500(mm)	500(mm)
	縦肋骨心距 b	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の肋骨心距	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	500(mm)	500(mm)
	船首角度 2θ	「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))」から推定	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから適用可能と判断した。	○	70°*2	70°
船首傾斜部の長さ L _{sf}	「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))」から案分	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから、総トン数5tに案分することで適用可能と判断した。	○	1.52(m)*2	1.52(m)	

注記*1:「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」によれば、「船の深さ(D)とは、船の長さの中央で測った船体外板の下面、又は船体中心線と船体外板下面の延長線との交点から船側における上甲板の上面までの垂直距離をいい、単位はメートル(m)とする。」とされている。

*2:算出方法の詳細は参考5に示す。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5.1.5 FRP製船舶の材質の条件の設定(文献の適用性)

➤ FRP製船舶の座屈強度を算出する際に必要となるヤング率及びポアソン比については、用いる文献の適用性を確認した上で、下表のとおりとする。

ヤング率及びポアソン比に関する整理(適用性)

項目	引用文献	適用性	評価	引用文献の値*1	採用値*2	
材料物性	ヤング率(曲げ弾性率)	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数	本規則は、「長さが35m未満の普通の形状のFRP船(油タンカーを除く。)で、普通の主要寸法比を有するものに適用する。」とされており、平均的な曲げ弾性係数を示しているが、最低値を規定している可能性があるため、適用不可と判断した。	×	$6.86 \times 10^3(\text{N/mm}^2)$ 【 $0.7 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	1.2×10^6 (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年)」の曲げ弾性係数の判定基準	上記規則に対する検査要領であり、船体材料(ガラス繊維基材)の判定基準を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	$11.78 \times 10^3(\text{N/mm}^2)$ 【 $1.2 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」のハンドレイアップ成形法*3の曲げ弾性率	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法による曲げ弾性率を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	9~12(GPa) 【 $1.08 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「船舶海洋工学シリーズ⑥ 船体構造 構造編(藤久保昌彦・吉川孝男・深沢塔一・大沢直樹・鈴木英之, 2012年)」	本文献は、船体構造が詳細に示されているが、FRP船舶については紹介されている程度であり、示されているヤング率も典型的な値として紹介されているのみで、値の根拠が示されていないことから、適用不可と判断した。	×	10.7(kN/mm ²) 【 $1.09 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)の曲げ弾性率	本文献は、非金属材料の物性値を幅広く掲載しており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法による曲げ弾性率を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	1050~1140(kgf/mm ²) 【 $1.10 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
ポアソン比	「3相森・田中平均化手法のハイブリッドFRP梁への応用(土木学会, 2014)」	FRP材料の巨視的材料係数としてポアソン比が示されているが、I型断面の梁構造の値であり、船舶とは使用目的が異なるため、適用不可と判断した。	×	0.1, 0.29, 0.308, 0.32	0.336	
	「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)	本文献は、非金属材料の物性値を幅広く掲載しており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法によるポアソン比を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	<u>0.336</u> (0.320~0.358)		

注記 *1: 文献に記載されている値が範囲を示している場合は平均値とし、【】内に示す。また、各項目で適用性ありと評価されたものの最大値を下線で示す。

*2: 各項目で適用性ありと評価された中から最大値を採用する。

*3: FRPの成形法の1つで、漁船に用いられる成形法である。他の漁船の成形法としてはスプレイアップ成形法があるが、ヤング率は7~9(GPa)であり、ハンドレイアップ成形法の方が高い。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 6 有効軸剛性の算出

【軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケース】

- 軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケースの各条件は下表のとおりであり、これらの設定値を用いて船舶の軸剛性を算出すると、 0.47×10^5 (N/m)となる。
- なお、この軸剛性を用いてFEMA(2012)から衝突荷重を算出すると、635(kN)となる。

項目		軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケース
船舶構造	船舶の長さ L	11.0(m)
	船の深さ D	1.22(m)
	船側外板厚 t	5.89(mm)
	横肋骨心距 a	500(mm)
	縦肋骨心距 b	500(mm)
	船首角度 2θ	70(°)
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	1.52(m)
材料物性	ヤング率 E (曲げ弾性率)	1.2×10^6 (tf/m ²)
	ポアソン比 ν	0.336
圧壊荷重 P_c		72.3(kN)
有効軸剛性 k_c		0.47×10^5 (N/m)
衝突荷重(FEMA(2012))		635(kN)

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

$$(k = (b/a + a/b)^2)$$

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

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

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 7 FRP製船舶の衝突荷重の算出

【軸剛性の設定にあたり保守性を考慮する際の方針】

- 前頁までで示した軸剛性は、軸剛性の設定に当たり各条件(構造及び材料物性)の妥当性は確認しているものの、設計へ適用するためには保守性を考慮する必要がある。そのため、以下の方針で保守性の考慮について整理した。
 - ✓ 材料物性であるヤング率及びポアソン比について、妥当性を確認したケースにおいては適用性を確認した文献に示されている値又は範囲で示されている場合は平均値を用いたが、これらの物性は不確かさ及びばらつきがある条件であるため、それぞれ文献で確認した値の最大値(範囲を示している場合も最大値)を採用することで、保守性を考慮する(下表のとおり)。
 - ✓ 「土木学会(1994)」では、船首角度以外の条件は船舶の長さLの関数として記載されている。そのため、妥当性を確認したケースの船舶の長さ11mとした場合の軸剛性を算出する。さらに、船舶の長さをより長くした場合の検討も行き、軸剛性の保守性を考慮する。

妥当性確認と保守性考慮での材料物性(ヤング率及びポアソン比)の考え方

項目	引用文献	引用文献の値①	妥当性確認 (①の平均値)	保守性確認 (①の最大値)
材料物性	ヤング率 (曲げ弾性率)	「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数の判定基準	$11.78 \times 10^3(\text{N}/\text{mm}^2)$ 【 $1.2 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$ 】	$1.2 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)^{*1}$
		「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」のハンドレイアップ成形法の曲げ弾性率	9~12(GPa) 【 $0.91 \times 10^6 \sim 1.22 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$ 】	$1.08 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$
		「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)の曲げ弾性率	1050~1140(kgf/mm ²) 【 $1.05 \times 10^6 \sim 1.14 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$ 】	$1.14 \times 10^6(\text{tf}/\text{m}^2)$
	ポアソン比	「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)	0.336 (0.320~0.358)	0.336^{*1}

注記 * 1: 妥当性確認の際に採用した物性値を示す。

* 2: 保守性確認の際に採用した物性値を示す。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 7 FRP製船舶の衝突荷重の算出

- 前頁の方針に従い保守性を考慮した軸剛性算出の各条件を下表に示す。
- その結果、保守性確認ケース1では 1.56×10^5 (N/m)、保守性確認ケース2では 1.74×10^5 (N/m)となり、保守性確認ケース2の方が大きく、p14で示した妥当性を確認したケースの軸剛性(0.47×10^5 (N/m))よりも3倍以上の値であることから、保守性確認ケース2の軸剛性(1.74×10^5 (N/m))を採用する。

項目	設定・算出方法	保守性確認ケース1	保守性確認ケース2	
船舶構造	船舶の長さ L	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ)に加えて、その長さを超える場合も考慮	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ): 11.0(m)	「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会誌, 1978年)」から総トン数5tに最も近い船の長さ: 12.8(m)*
	船の深さ D	「土木学会(1994)」より $0.08 \times L$ にて算出	$0.08 \times 11.0 = 0.88$ (m)	$0.08 \times 12.8 = 1.02$ (m)
	船側外板厚 t	「土木学会(1994)」より $0.82\sqrt{L} + 2.5$ にて算出	$0.82 \times 11.0^{0.5} + 2.5 = 5.22$ (mm)	$0.82 \times 12.8^{0.5} + 2.5 = 5.434$ (mm)
	横肋骨心距 a	「土木学会(1994)」より $450 + 2L$ にて算出	$450 + 2 \times 11.0 = 472$ (mm)	$450 + 2 \times 12.8 = 475.6$ (mm)
	縦肋骨心距 b	「土木学会(1994)」より $550 + 2L$ にて算出	$550 + 2 \times 11.0 = 572$ (mm)	$550 + 2 \times 12.8 = 575.6$ (mm)
	船首角度 2θ	「土木学会(1994)」より $2\theta = 35 \sim 70^\circ$ とされていることを踏まえ、保守的になるよう 35° を採用	35°	
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	「土木学会(1994)」より $0.25 \times D$ にて算出	$0.25 \times (0.08 \times 11) = 0.22$ (m)	$0.25 \times (0.08 \times 12.8) = 0.256$ (m)
材料物性	ヤング率 E (曲げ弾性率)	以下の3つの文献で示されている値の最大 ・「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数の判定基準 ・「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」のハンドレイアップ成形法の曲げ弾性率 ・「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)の曲げ弾性率	1.22×10^6 (tf/m ²)	
	ポアソン比 ν	「非金属材料データブック 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](日本規格協会, 1985年)」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(標準)で示されている値の最大	0.358	
圧壊荷重 P_c		34.3 (kN)	44.5 (kN)	
有効軸剛性 k_c		1.56×10^5 (N/m)	1.74×10^5 (N/m)	
衝突荷重(FEMA(2012))		1156 (kN)	1221 (kN)	

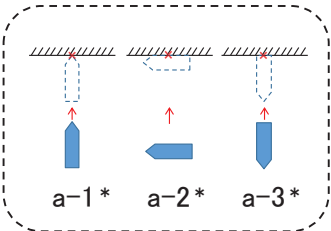
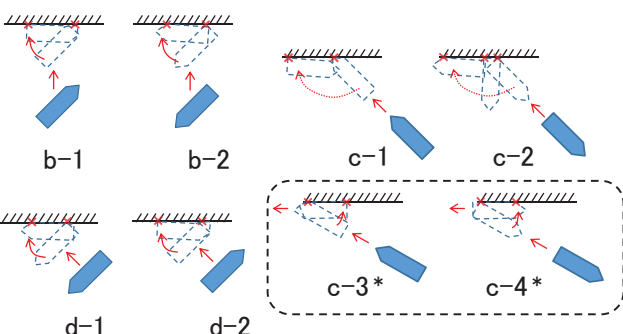
注記* : 総トン数5tの船舶に12.8mの長さを用いることの保守性については参考6に示す。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.1 船舶の衝突形態の整理

- ▶ 小型漁船(FRP)は、本質的に浮く構造で、車両に比べて長軸と短軸が明瞭であるものの、船舶の中でも比較的小型であるため、回転の影響を受けやすく、漂流物となって襲来する際には複雑な挙動となることが想定される。そのため、衝突解析により、衝突形態が衝突荷重に及ぼす影響を確認する。
- ▶ まず、船舶の衝突形態の特徴について、下表のとおりまとめた。
- ▶ これらの衝突パターンのうち、b、c及びdシリーズは荷重が分散する等の影響により、aシリーズに包含される事象と考えられる。また、aシリーズのうち、真横(a-2)は衝突幅から施設に衝突しないか、施設が負担する荷重が小さくなるため、船首(a-1)及び船尾(a-3)で衝突する場合が厳しくなると考えられる(衝突形態に関する文献調査結果を参考7に示す)。
- ▶ ただし、衝突形態の影響を確認するため、船首(a-1)、真横(a-2)、船尾(a-3)の3ケースに加えて、斜め船首(c-3)及び斜め船尾(c-4)を加えた5ケースの衝突解析を実施する。

船舶の衝突形態の特徴

衝突パターン	衝突形態の特徴
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 船首(又は船側、船尾)の1箇所衝突する。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の幅は、衝突を考慮する船舶の長さの半分以下であり、海側に張出した構造ではないため、a-2では衝突することはない。 ✓ 防潮堤(鋼管式鉛直壁)は1本の杭が支持する漂流物防護工の幅が4mであることから、a-1又はa-3で衝突する場合は衝突面積が小さいため、衝突荷重を1本の杭で受け持つこととなるが、a-2で衝突する場合は船舶の長さが4m以上であるため、2本以上の杭で衝突荷重を受け持つこととなり、杭1本あたりで負担する衝突荷重は小さくなる。 ✓ 貯留堰についても、防潮堤(鋼管式鉛直壁)と同様に、a-2で衝突する場合に負担する衝突荷重は小さくなる。
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 船首(又は船尾)付近で衝突した後で、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て荷重が分散されてしまう。 ▶ Ikeno et al(2016)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小さくなること示されており、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。

注記* : 衝突解析を実施する衝突パターン

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

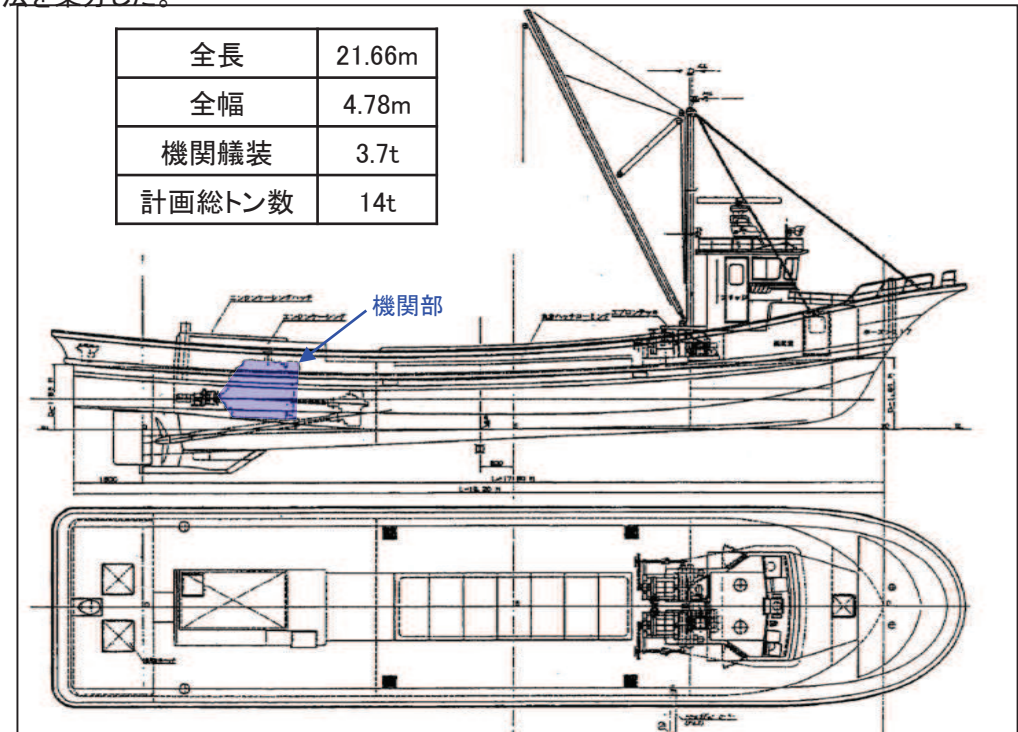
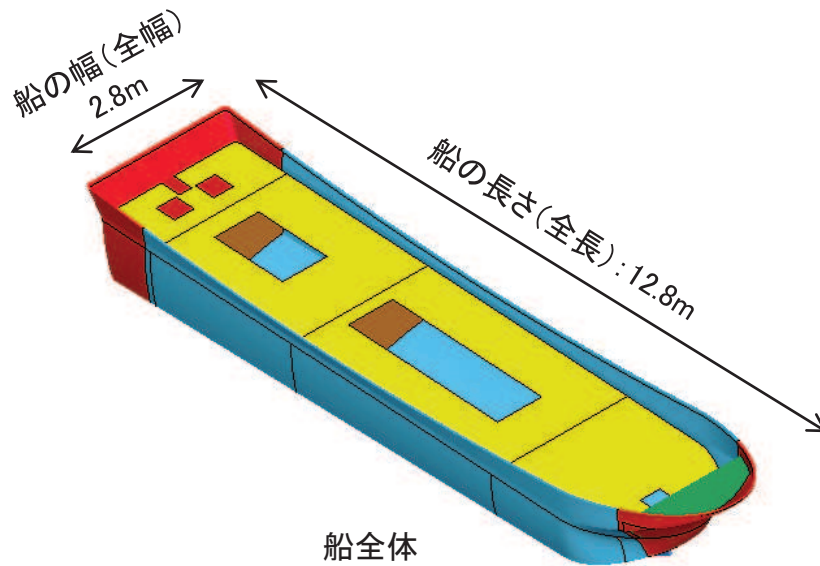
5.2.2 FRP製船舶のモデル化

検討方法

- ✓ FRP製船舶を対象に、船首からの衝突、船尾からの衝突、船舶真横からの衝突、斜め船首からの衝突及び斜め船尾からの衝突について、衝突解析を実施し、衝突形態の影響について確認する。
- ✓ なお、鋼製船舶を対象に、土木学会(1994)の方法で軸剛性を設定しFEMA(2012)から算出した衝突荷重と、衝突解析(LS-DYNA)から得られる最大衝突荷重(「崔ほか(2016)」)について、比較した結果、おおむね同等の荷重となることを確認(参考8)しており、船舶の衝突荷重算出に解析を用いることは妥当である。

モデル化の方針

- ✓ 漂流物であるFRP製の船舶は、「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」という。)で示される総トン数14tのFRP船を基に、総トン数5tのFRP船の大きさに案分し、左下図及び次頁のようにシェル要素でモデル化した。
- ✓ 具体的には、船舶の全長の比率(21.66m:12.8m)からその他の寸法を案分した。



「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))」に一部加筆

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.3 FRP製船舶の衝突解析

解析コード

解析コードは「LS-DYNA Ver.971 R6.0.0」を用いる。

材料定数

FRP製の船舶に使用する材料定数は、下表のとおり設定する。

ヤング率 E(MPa)	強度 $\bar{\sigma}$ (MPa)	ポアソン比
12000*1	200*2	0.4*3

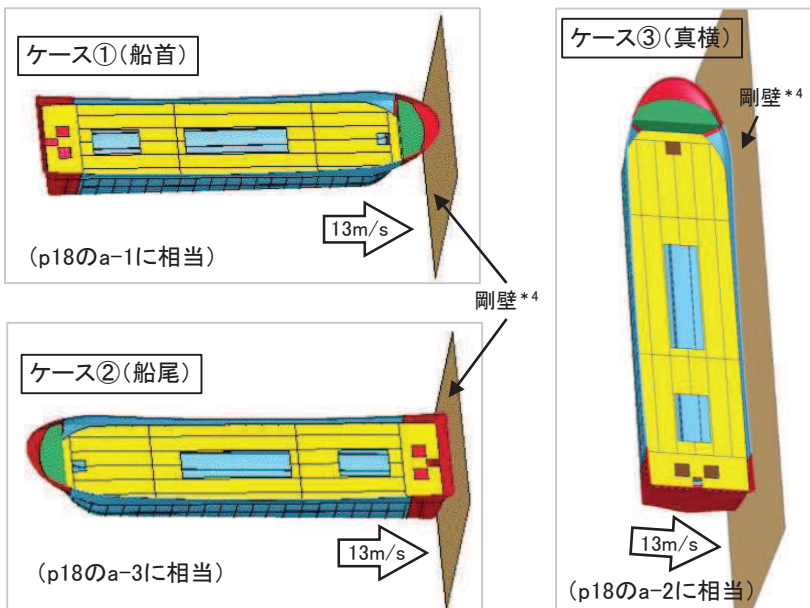
注記 *1:p17から設定

*2:「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より設定

*3:p17から保守的に設定

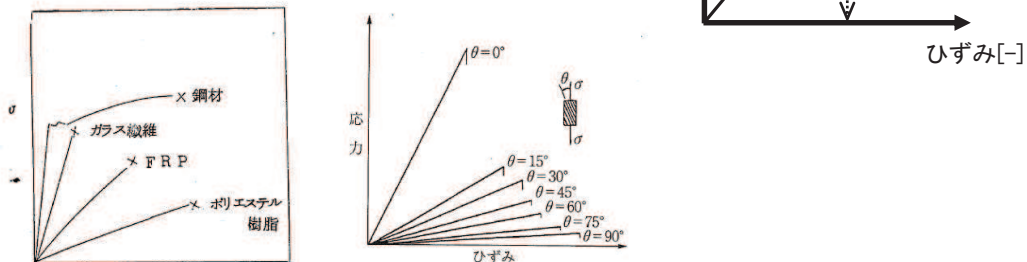
解析ケース

解析ケースは下図のとおりで、いずれのケースも衝突速度(絶対値)は13m/sとする。なお、各ケースとp18で示した衝突パターンとの関係を右表に示す。



材料特性(FRPの応力-ひずみ関係)

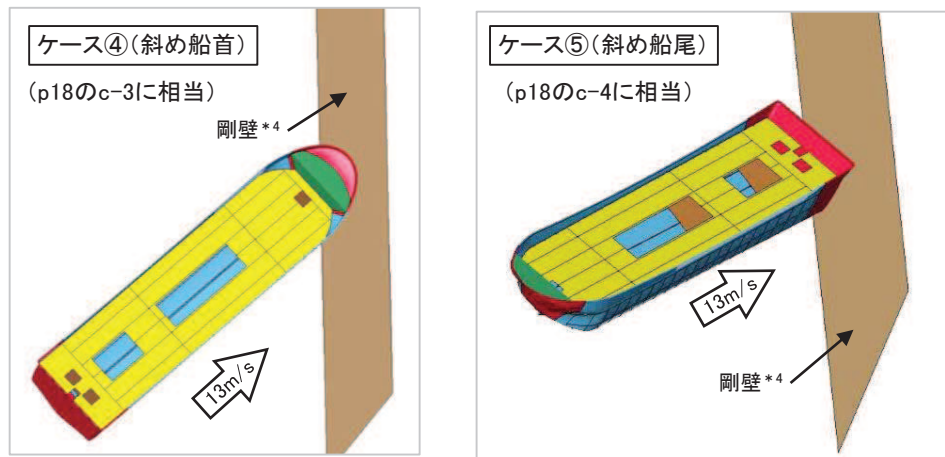
下図で示した「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」及び「FRP成形入門講座(日本プラスチック加工技術協会)」の応力-ひずみ曲線と同様に、FRPの応力-ひずみ関係を右図に設定した。なお、FRPは鋼材と異なりねばり強さががないため、応力が強度 $\bar{\sigma}$ に達した後(降伏以降)ではシェル要素を削除する設定とした。



応力-ひずみ曲線

左:「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」
右:「FRP成形入門講座(日本プラスチック加工技術協会)」

衝突方向	船首	船尾	真横	斜め船首	斜め船尾
解析ケース	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	ケース⑤
p18での衝突パターン	a-1	a-3	a-2	c-3	c-4

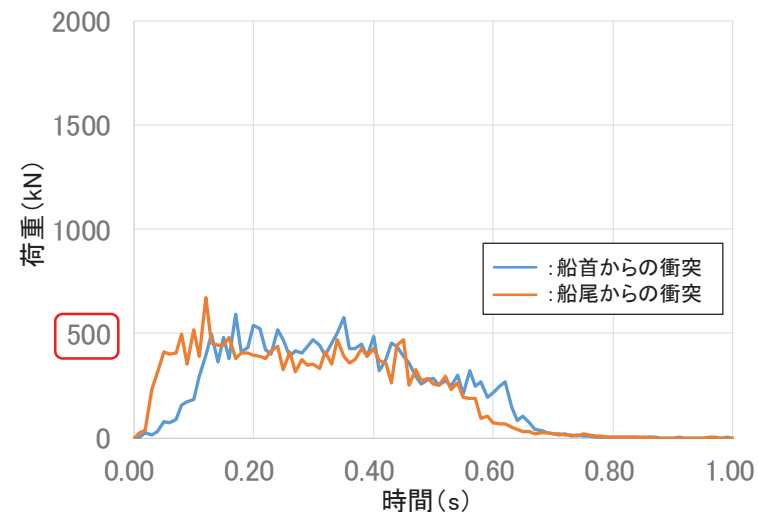


注記 *4:剛壁は変形・移動しない条件とし、ヤング率200GPa、ポアソン比0.3の鋼製の塊としている。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認
 5.2.4 各衝突形態の比較(1/4)

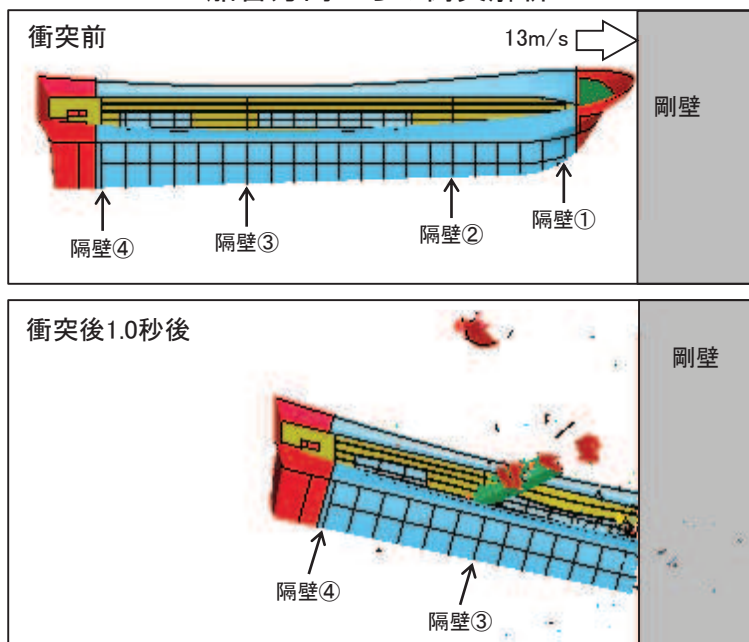
ケース①(船首)及びケース②(船尾)の解析結果

- ✓ ケース①(船首)及びケース②(船尾)の結果, どちらの衝突形態の荷重も500kN程度(瞬間最大で約670kN)であり, 有意な差はなく, 同等の衝突荷重が作用することが分かった(解析結果の詳細は参考9に示す)。
- ✓ また, 力積については, ケース①(船首)が約214(kN・s), ケース②(船尾)が約211(kN・s)であり, 力積からも同等であることが分かった。
- ✓ なお, 船首及び船尾からの衝突荷重が同等となったことについては, 検討対象の漂流物が15tと非常に重いこと, 衝突速度が13m/sと速いことから, 衝突エネルギーが大きく, 船首及び船尾のどちらから衝突したとしても, 船体部分まで破壊が生じていることがその要因である。

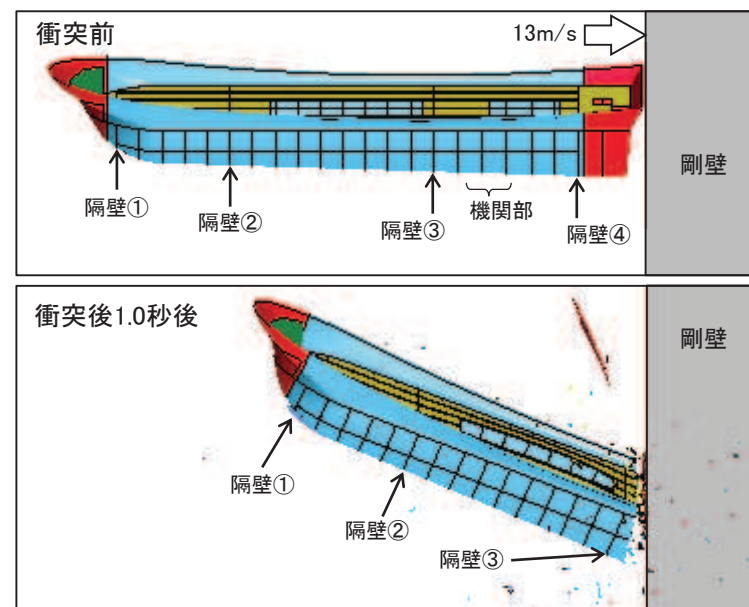


衝突荷重の時刻歴(船首, 船尾)

船首方向からの衝突解析



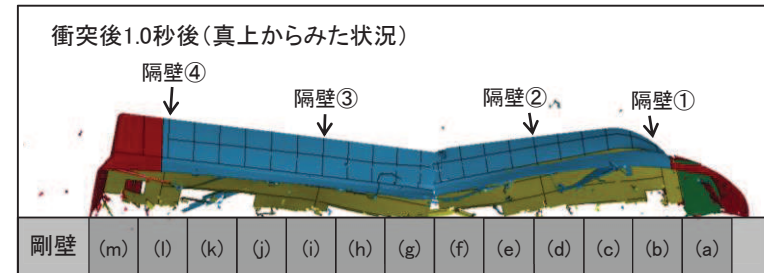
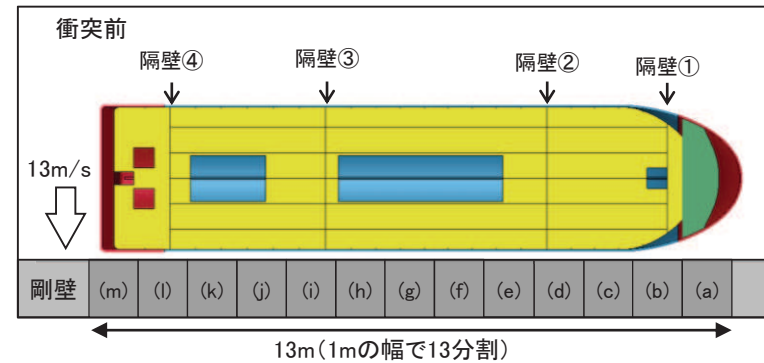
船尾方向からの衝突解析



5.2.4 各衝突形態の比較(2/4)

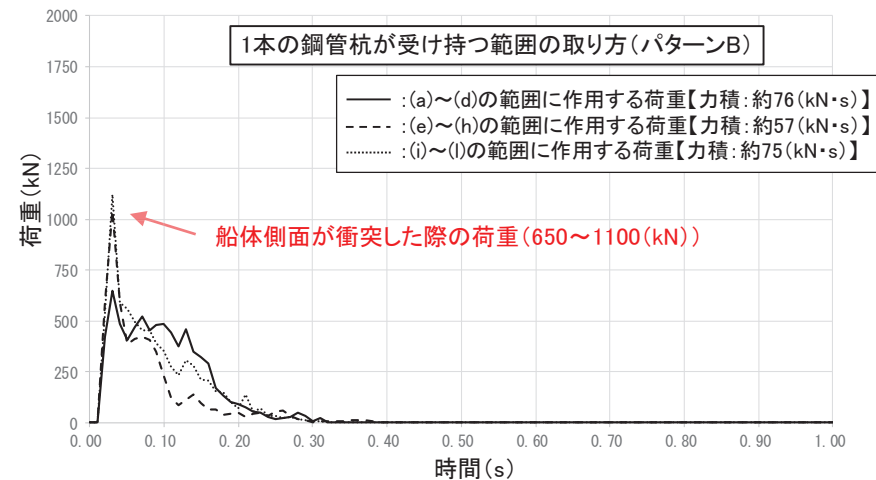
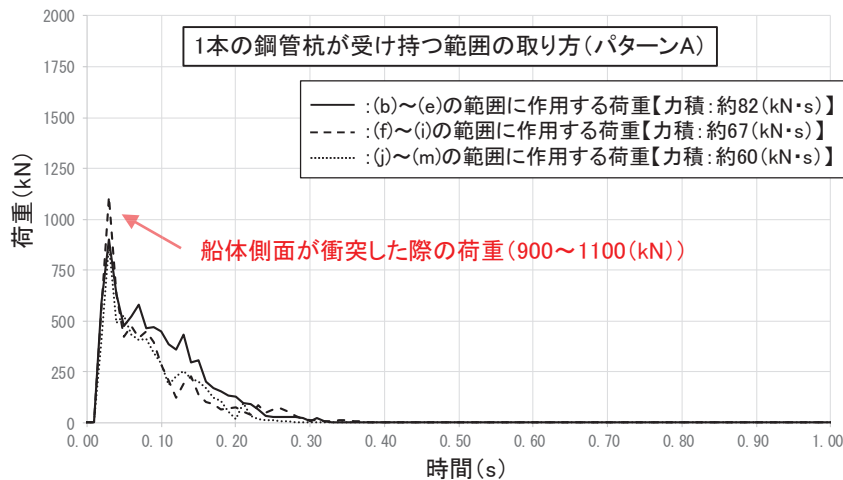
ケース③(真横)の解析結果

- ✓ ケース③(真横)の結果から、船舶の長さ(12.8m)全体で剛壁に荷重が作用しており、およそ船舶の長さの分布荷重となっていることが分かった(解析結果の詳細は参考9に示す)。防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼管杭1本が受け持つ幅は4mであることから、真横から衝突する場合には鋼管杭3本以上で衝突荷重を分担することになる。
- ✓ そのため、鋼管杭1本が受け持つ荷重を確認する必要があることから、右図のように剛壁を1mの幅で分割し、鋼管杭1本が受け持つ荷重について整理した。なお、鋼管杭が受け持つ荷重については、右図のように2パターンの取り方を考え、それぞれ確認した。
- ✓ 衝突荷重は、パターンAとパターンBともに、船体側面が衝突する0.03秒前後で瞬間的に650~1100(kN)の衝突荷重が作用しているが、この荷重は他の衝突形態で生じる荷重に比べて極めて作用時間が短い現象である。また、荷重作用時間も0.2秒程度であり、他の衝突形態に比べて半分以下である。
- ✓ また、力積については、パターンAでは約82(kN・s)が最大で、パターンBでは約76(kN・s)が最大であるが、ケース①(船首)又はケース②の力積に比べて小さく、半分以下となっていることが分かった。なお、パターンAとパターンBともに、最大荷重となる範囲と力積が最大となる範囲は異なり、力積が最大となる約82kN・sの最大荷重は約900kNである。



1本の鋼管杭が受け持つ範囲の取り方(パターンA)

1本の鋼管杭が受け持つ範囲の取り方(パターンB)

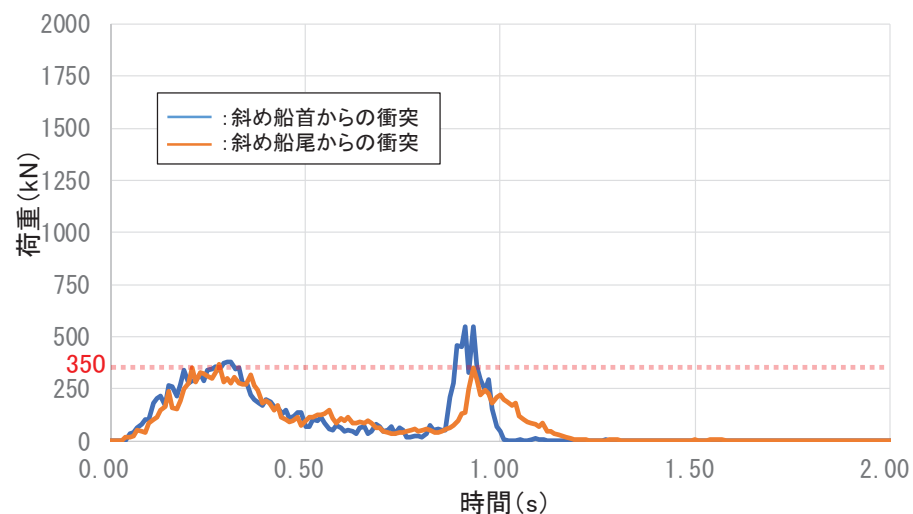


5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.4 各衝突形態の比較(3/4)

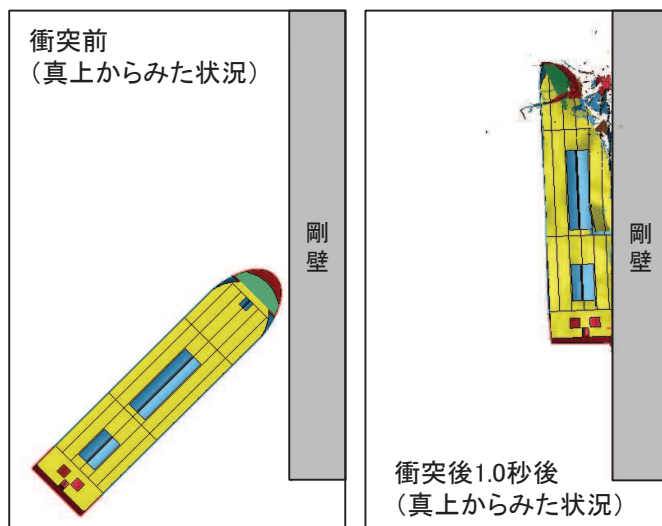
ケース④(斜め船首)及びケース⑤(斜め船尾)の解析結果

- ✓ ケース④(斜め船首)及びケース⑤(斜め船尾)の結果, どちらの衝突形態も初期段階では350kN程度(瞬間最大で約380kN)であり, 有意な差はなく, 同等の衝突荷重が作用することが分かった(解析結果の詳細は参考9に示す)。
- ✓ 斜め船首及び斜め船尾のどちらも衝突後0.9秒付近で衝突荷重が大きくなる特徴があり, 最大で約550kN(斜め船首衝突)となっている。これは, どちらの衝突形態においても斜めから衝突した後に船体が剛壁に平行となる方向に回転し, 船体側面が衝突することにより瞬間的に生じるためである。
- ✓ また, 力積については, ケース④(斜め船首)が約166(kN・s), ケース⑤(斜め船尾)が約164(kN・s)であり, 力積からも同等であることが分かった。これらの力積は, ケース③(真横)のほぼ倍の値であるが, ケース①(船首)又はケース②(船尾)よりも小さい値となっている(船舶が剛壁に衝突した後, 剛壁から離れる方向に速度をもって移動していくため, 船舶の持つエネルギーがすべて荷重に変換されなかったことによるものである)。

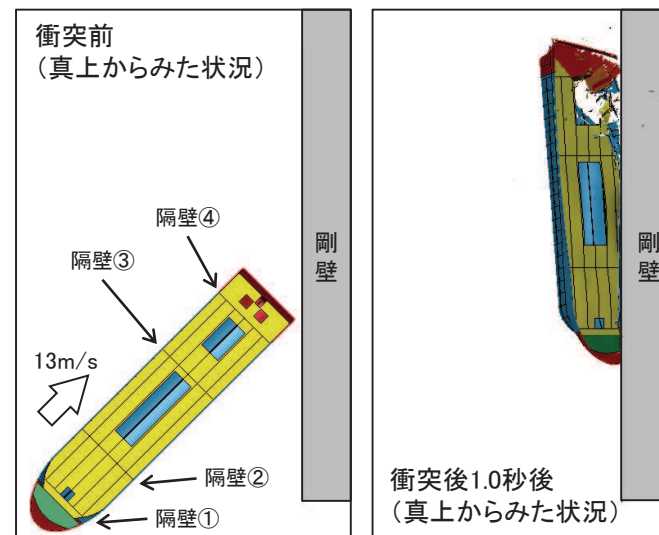


衝突荷重の時刻歴(斜め船首, 斜め船尾)

斜め船首方向からの衝突解析



斜め船尾方向からの衝突解析



5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.4 各衝突形態の比較(4/4)

FRP製小型船舶の衝突形態による影響確認(まとめ)

- 衝突解析の結果から、各ケースの力積、瞬間最大荷重及び衝突荷重の作用時間を左下の表に、衝突荷重の時刻歴を右下に示す(力積による検討及び建築物荷重指針・同解説(2015)による三角波での検討は参考9に示す)。
- 右下の荷重の時刻歴から、作用時間は非常に短いですが、瞬間最大荷重は真横からの衝突形態(ケース③シリーズ)で大きくなる傾向があり、約1100(kN)が最大である。
- なお、衝突解析は気中衝突を模擬しているため、付加質量の影響を考慮する必要があるが、衝突荷重と津波による荷重(最大波高時における波力)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。

注記*: 衝突解析から、船舶の衝突は分布荷重として作用する状況を確認しているが、衝突荷重は設計において集中荷重として考慮することからも、1100(kN)は十分な保守性を有する荷重である。

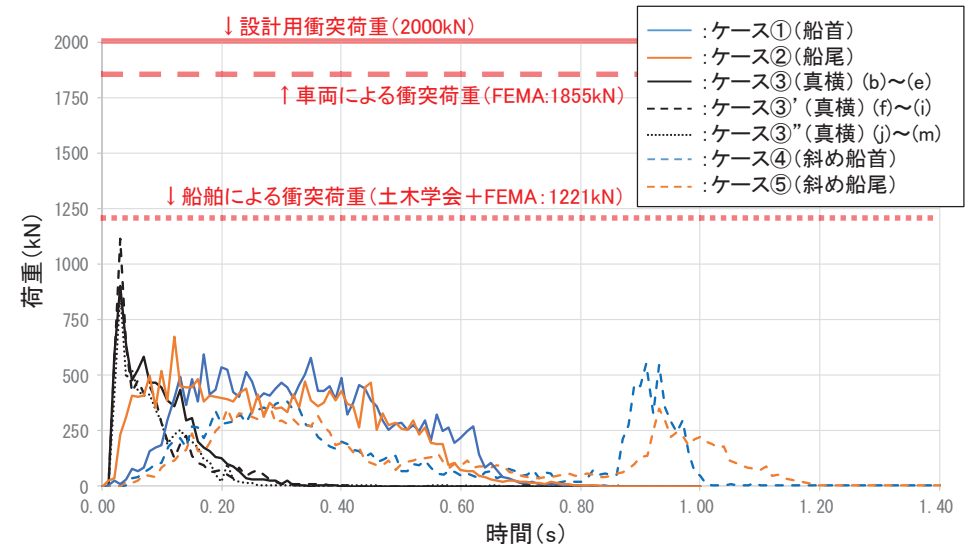
以上のことから、衝突形態の影響を踏まえた最大荷重は約1100(kN)である*。
一方、「5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」で示した保守性を考慮したケースの衝突荷重は1221(kN)である。

保守性を考慮したケースは衝突形態の影響を包含していることを確認。

小型船舶(FRP)の衝突荷重は、「5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」の1221(kN) (FEMA(2012)から算出)を採用する。

ケース	衝突形態	力積 (kN・s)	瞬間最大荷重 (kN)	瞬間最大荷重の発生時刻 (s)	衝突荷重の作用時間 (s)
①	船首	約214	約600	約0.17	約0.7
②	船尾	約211	約670	約0.12	約0.6
③	真横*	約82	約900	約0.03	約0.2
③'	真横*	約67	約1100	約0.03	約0.2
③''	真横*	約60	約870	約0.03	約0.2
④	斜め船首	約166	約550	約0.31	約1.0
⑤	斜め船尾	約164	約370	約0.28	約1.2

注記*: 真横からの衝突については、パターンAとパターンBがあるが、瞬間最大荷重は同程度であるため、力積が大きいパターンAを代表として記載した。



5.3 設計用衝突荷重の設定

- 漂流物による衝突荷重を算出した結果、漂流物による最大衝突荷重は、いずれの施設においても巡視点検用車両(2.15t)の1855kNとなった。
- これに対して、より重量も重い船舶(排水トン数15t)の衝突荷重が小さくなっているのは、船舶がFRP製であり、軸剛性が低いことが要因である。また、排水トン数57tの船舶は「前面海域」からの漂流物であり、津波第二波以降に時間をかけてゆっくりと発電所に到達すると考えられ、衝突速度が2m/sと遅いことが要因である。
- 以上のことから、設計用衝突荷重としては保守的に2000kNとする。
- なお、設置変更許可時において漂流物の最大重量として選定した船舶(排水トン数57t)を考慮しても、設計用衝突荷重2000kNに包絡されることを確認した。

衝突する可能性のある漂流物	重量	到達形態	流速(m/s) (衝突速度)	初期配置区分	適用式	有効軸剛性(N/m)	衝突荷重(kN) *1			
							防潮堤 (鋼管式鉛直壁)	防潮堤 (盛土堤防)	屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	貯留堰
車両系重機	41.2 t	滑動	13	直近陸域	ASCE(2016)	—	—	624*2 【3.20】	624*2 【3.20】	624*2 【3.20】
巡視点検用車両	2.15 t	浮遊	13	直近陸域	FEMA(2012)	2.80 × 10 ⁶	1855 【1.07】	1855 【1.07】	1855 【1.07】	1855 【1.07】
					【参考】 ASCE(2016) (FEMA(2019))	2.80 × 10 ⁶	1261 【1.58】	1261 【1.58】	1261 【1.58】	1261 【1.58】
小型漁船(FRP)	排水トン数 15 t	浮遊	13	直近海域	FEMA(2012)	1.74 × 10 ⁵	1221 【1.63】	1221 【1.63】	1221 【1.63】	1221 【1.63】
漁船(FRP)	排水トン数 57 t	浮遊	2	前面海域	道路橋示方書	—	—	—	—	112*3 【17.8】
設計用衝突荷重							2000	2000	2000	2000

注記*1:【】内は衝突荷重に対する設計用衝突荷重の割合。

*2:「ASCE(2016)」の例示を参考に衝突荷重を算出(詳細は参考2)。

*3:仮に発電所周辺の最大流速13m/sとしたとしても727kNであり、他の衝突荷重よりも小さく、設計用衝突荷重に包絡されることを確認。

【参考資料】

- 参考1 漂流物に対する要求事項
- 参考2 滑動により衝突する漂流物の衝突荷重算定方法
- 参考3 FEMA(2012)に用いる車両の有効軸剛性の妥当性について
- 参考4 既往文献の鋼製船舶の軸剛性と土木学会(1994)の方法を用いた場合の比較
- 参考5 船の深さ, 船首傾斜部の長さ及び船首角度について
- 参考6 総トン数5tの漁船の長さに関する保守性について
- 参考7 船舶の衝突形態に関する文献調査
- 参考8 鋼製船舶の衝突解析とFEMA(2012)の衝突荷重の関係性
- 参考9 衝突解析を用いた衝突形態の検討
- 参考10 衝突解析の時刻歴と三角波の例(建築物荷重指針・同解説(2015))

工認審査ガイドより、基準津波に伴う漂流物に対し、以下の設計を行う必要がある。

- 基準津波に伴う漂流物により、非常用海水冷却系の通水性が損なわれないこと(取水性評価)。
- 基準津波に伴う漂流物の波及的影響により、津波防護施設、浸水防止設備が機能喪失しないこと(衝突評価)。

【工認審査ガイド(抜粋)】

3.6.2 津波の二次的な影響による非常用海水冷却系の機能保持確認

【確認内容】

- (3) 基準津波に伴う取水口付近の漂流物については、(3.1.2)の遡上解析結果における取水口付近を含む敷地前面及び遡上域の寄せ波及び引き波の方向、速度の変化を分析した上で、漂流物の可能性を検討し、漂流物により取水口が閉塞しないこと、又は閉塞防止措置を施していることを確認する。

3.7 津波防護施設、浸水防止設備の設計・評価に係る検討事項

3.7.1 漂流物による波及的影響の検討

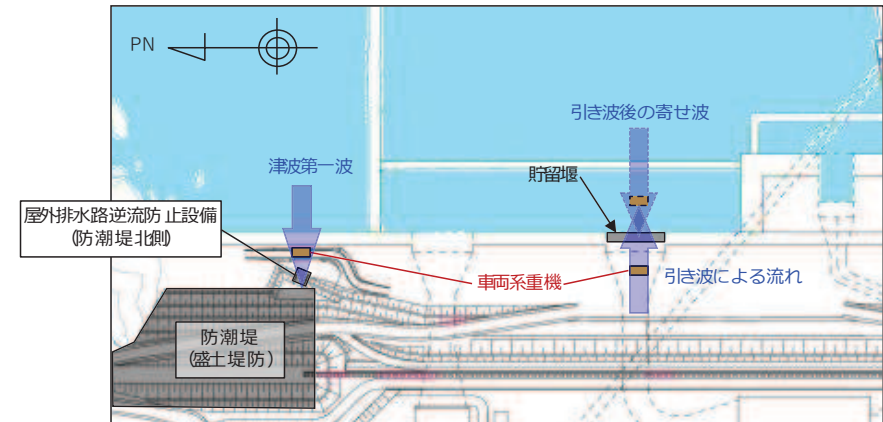
【規制基準における要求事項等】

津波防護施設の外側の発電所敷地内及び近傍において建物・構築物、設置物等が破損、倒壊、漂流する可能性について検討すること。

上記の検討の結果、漂流物の可能性がある場合には、防潮堤等の津波防護施設、浸水防止設備に波及的影響を及ぼさないよう、漂流防止装置または津波防護施設、浸水防止設備への影響防止措置を施すこと。

【参考2】滑動により衝突する漂流物の衝突荷重算定方法

- 「直近陸域」からの漂流物のうち滑動して衝突する可能性のある車両系重機等について、右図のように屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び防潮堤(盛土堤防)に津波第一波により衝突するか、その後の引き波と寄せ波により貯留堰に衝突することが想定される。
- 滑動により衝突する漂流物の衝突荷重については、以下の内容から算定した。



- ✓ 地上及び海底を滑動するものの衝突荷重算定式は、比較的少ない。
- ✓ FEMA(2019)によれば、漂流物の衝突に関しては、最新のASCE(2016)に従うように記載されている。
- ✓ ASCE(2016)によれば、流速4m/sの条件下で石材・コンクリート殻(2270kg)が海底を滑動する際の衝突荷重が以下のとおり示されている。重要度係数 I_{tsu} は、津波のリスク分類に応じて1.0~1.25が適用されるため、ここでは $I_{tsu} = 1.25$ とする。

$$F_i = 36 \times I_{tsu} = 36 \times 1.25 = 45 \text{ (kN)} \quad \text{ここで、} F_i: \text{設計衝突力, } I_{tsu}: \text{重要度係数}$$

- ✓ 参考としてASCE(2016)の例示に基づき、車両系重機(41.2t)が地上及び海底を滑動した場合の衝突荷重を算定すると、下記のとおりとなり、FEMA(2012)より算定した巡視点検用車両(2.15t)の衝突荷重(1855kN)よりも小さい。

$$F_i = 36 \times 1.25 \times (13/4) \times (41200/2270)^{0.5} = 624 \text{ (kN)} \quad (\text{流速: } 13\text{m/s, 衝突物重量: } 41.2\text{t})$$

- ✓ 車両の有効軸剛性は石材・コンクリート殻が塊として有する剛性に比べて小さいと想定される。したがって、車両の有効軸剛性を精緻に考慮して衝突荷重を算定すると、上記で算定したものより小さくなるものと考えられる。
- ✓ なお、その他滑動状態で衝突する可能性があるものとして、角落し(約7t)やキュービクル類(約8t)が挙げられるが、それらの重量は車両系重機よりも十分に小さいことを確認している。

【参考3】FEMA(2012)に用いる車両の有効軸剛性の妥当性について

- 車両の軸剛性は、軽自動車(2.04×10^6 N/m)、セダン型乗用車(2.4×10^6 N/m)及び大型乗用車(2.8×10^6 N/m)から最大となる大型乗用車の軸剛性(2.8×10^6 N/m)を用いるものとする。
- なお、軽自動車の 2.04×10^6 N/mは「高畠ら(2015)」の実験により求められた3段階の軸剛性のうち、最も軸剛性が大きい3次剛性であり、セダン型乗用車の 2.4×10^6 N/m及び大型乗用車の 2.8×10^6 N/mは、「高畠ら(2015)」の衝突実験を「甲斐田・木原(2017)」が再整理した $9.0 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^6$ N/m及び $1.3 \times 10^6 \sim 2.8 \times 10^6$ N/mのそれぞれ最大値で、軽自動車の3次剛性 2.04×10^6 N/mよりも大きい値である。
- また、採用する軸剛性 2.8×10^6 N/mは適用可能な衝突速度の上限が $5.1 \sim 8.4$ m/sとされており、評価に用いる衝突速度 13 m/sはこの適用可能な範囲を超えているが、右下の図に示すように、適用範囲を超えた衝突速度では同じ軸剛性を用いた方が実際よりも被衝突物に与えるエネルギーが大きくなるため、エネルギーとしては保守的な評価となる。
- そのため、本衝突評価においては、保守性の観点から適用範囲を超えた速度にも適用し、軸剛性 2.8×10^6 N/mを採用することとする。

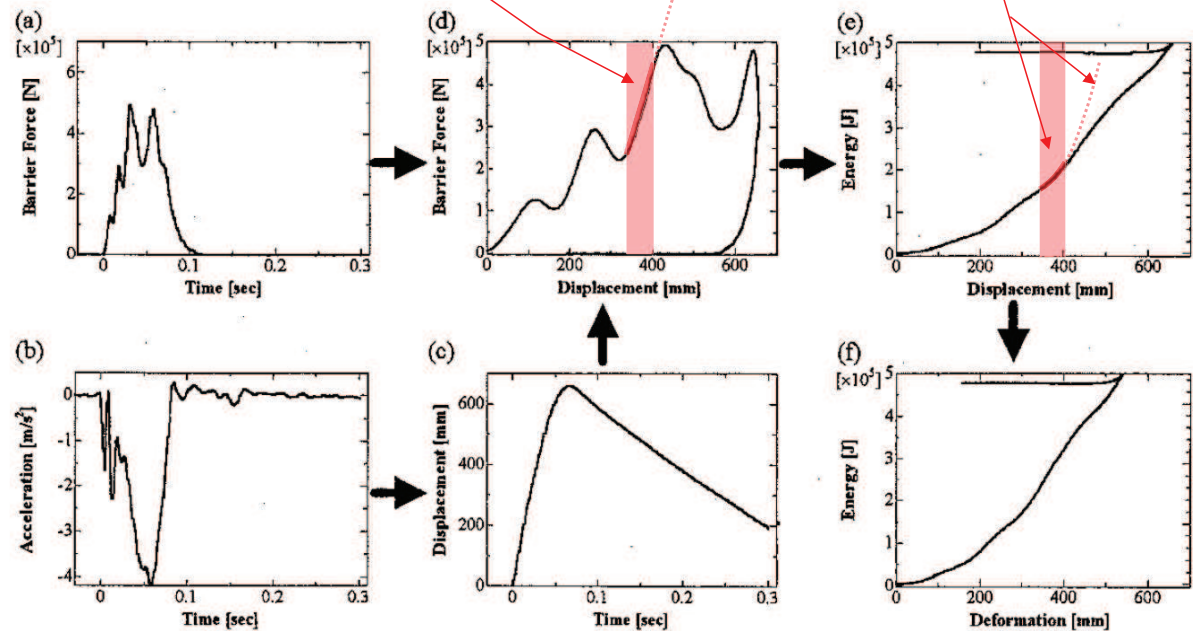


Fig.2 Calculation Process for Energy Absorption Characteristic

衝突速度の適用範囲を超えた場合のエネルギーへの影響
 (「自動車アセスメントの試験データを用いた変形エネルギー吸収分布図の作製(大賀ほか, 2007)」に一部加筆)

- 「甲斐田・木原(2017)」では既往の文献(有田(1988))を整理し、総トン数400~4000tの鋼製の大型船舶の船首方向の軸剛性を示している。ここでは、これらの鋼製の大型船舶の軸剛性を土木学会(1994)の方法を用いて算出し、「甲斐田・木原(2017)」の軸剛性と比較する。
- その結果を下表に示す。土木学会(1994)の方法から算出した軸剛性と「甲斐田・木原(2017)」の軸剛性とは、おおむね同じような値であることを確認した。また、土木学会(1994)の方法から算出した軸剛性の方が大きくなる傾向があることを確認した。

項目		500G.T.船		1000G.T.船		2000G.T.船		4000G.T.船	
総トン数		500(t)		1000(t)		2000(t)		4000(t)	
船舶構造	船舶の長さ L	50(m)		63(m)		80(m)		100(m)	
	船の深さ D	$0.08 \times 50 = 4.0$ (m)		$0.08 \times 63 = 5.04$ (m)		$0.08 \times 80 = 6.4$ (m)		$0.08 \times 100 = 8$ (m)	
	船側外板厚 t	$0.82 \times 50^{0.5} + 2.5 = 8.3$ (mm)		$0.82 \times 63^{0.5} + 2.5 = 9.009$ (mm)		$0.82 \times 80^{0.5} + 2.5 = 9.834$ (mm)		$0.82 \times 100^{0.5} + 2.5 = 10.7$ (mm)	
	横肋骨心距 a	$450 + 2 \times 50 = 550$ (mm)		$450 + 2 \times 63 = 576$ (mm)		$450 + 2 \times 80 = 610$ (mm)		$450 + 2 \times 100 = 650$ (mm)	
	縦肋骨心距 b	$550 + 2 \times 50 = 650$ (mm)		$550 + 2 \times 63 = 676$ (mm)		$550 + 2 \times 80 = 710$ (mm)		$550 + 2 \times 100 = 750$ (mm)	
	船首角度* 2θ	70°	35°	70°	35°	70°	35°	70°	35°
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	$0.25 \times (0.08 \times 50) = 1.0$ (m)		$0.25 \times (0.08 \times 63) = 1.26$ (m)		$0.25 \times (0.08 \times 80) = 1.6$ (m)		$0.25 \times (0.08 \times 100) = 2.0$ (m)	
材料物性	ヤング率 E (曲げ弾性率)	2.1×10^7 (tf/m ²)		2.1×10^7 (tf/m ²)		2.1×10^7 (tf/m ²)		2.1×10^7 (tf/m ²)	
	ポアソン比 ν	0.3		0.3		0.3		0.3	
圧壊荷重 P_c		6785(kN)	7900(kN)	10090(kN)	11747(kN)	15071(kN)	17547(kN)	21690(kN)	25253(kN)
有効軸剛性 k_c		6.79×10^6 (N/m)	7.9×10^6 (N/m)	8.01×10^6 (N/m)	9.33×10^6 (N/m)	9.42×10^6 (N/m)	1.1×10^7 (N/m)	1.09×10^7 (N/m)	1.27×10^7 (N/m)
「甲斐田・木原(2017)」 で示されている 有効軸剛性		5.1×10^6 (N/m)		6.4×10^6 (N/m)		8.2×10^6 (N/m)		1.1×10^7 (N/m)	

注記* : 船首角度は不明であったため、土木学会(1994)で示されている最大と最小の値を用いてそれぞれの軸剛性を算出した。

【参考5】船の深さ, 船首傾斜部の長さ及び船首角度について

- 船の深さ及び船首傾斜部の長さについて, 「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))」に示されている総トン数14tのFRP漁船(全長:21.66m)から, 下図のとおり総トン数5tの漁船の長さ(11m)で案分して算出することとする。
- また, 船首角度については下図のとおり70° とする。

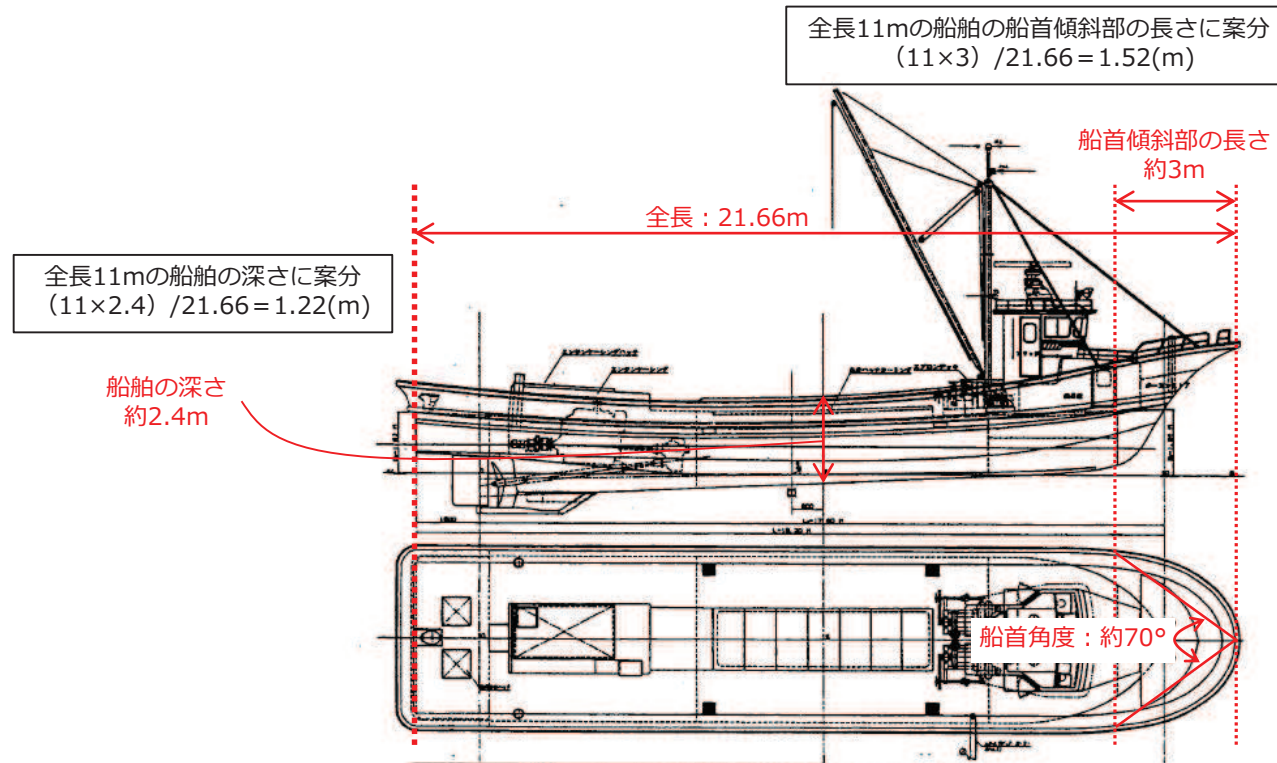


図-1 一般配置図(FRP漁船)

FRP漁船の構造

(「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))」)

【参考6】総トン数5tの漁船の長さに関する保守性について

- 「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」では, 総トン数5tの漁船の長さは11.0mとの記載がある(右図の赤実線)。
- 総トン数5tの漁船の長さを示す他の文献が確認できなかったため, 「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」の供試船一覧表で記載されている船舶の中から11.0mに最も近い12.8mの長さを, 保守性を考慮する際に用いることとする。
- 船舶の長さ12.8mは「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」では, 総トン数10tの漁船の長さ(13.0m)にほぼ等しい長さであり, 総トン数5tの船舶に対して12.8mの長さをを用いることは保守的になっている。

表 2-14-1 漁船の諸元

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

「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」に一部加筆

表 1 供試船一覧表

船名	L (m)	B (m)	D (m)	d (m)	C _b	V (kt)
A	23.8	4.35	2.20	1.87	0.70	10.5
B	26.0	5.60	2.30	1.96	0.71	10.5
C	16.3	3.60	1.40	1.30	0.61	10.0
D	21.5	5.10	2.10	2.05	0.66	11.0
E	26.4	5.46	2.48	2.40	0.67	11.0
F	24.4	5.43	2.34	2.02	0.69	11.0
G	26.5	5.53	2.50	2.17	0.77	11.0
H	22.2	5.23	2.14	1.87	0.64	11.0
I	17.0	3.70	1.40	1.01	0.65	11.5
J	12.8	3.30	1.01	0.52	0.55	17.5
K	24.0	5.35	2.30	2.00	0.66	10.0
L	15.4	3.90	1.55	0.74	0.63	27.0
M	20.1	5.30	2.30	1.08	0.40	24.0
N	14.5	4.03	1.45	1.08	0.53	13.5
O	13.5	3.00	1.08	0.81	0.69	11.0
P	16.0	3.95	1.57	1.30	0.70	11.0

「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」に一部加筆

【参考7】船舶の衝突形態に関する文献調査

- 「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)によれば, 実験の結果から, 漂流船の衝突は右図の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。
- これらの衝突形態は被衝突物としてケーソンを想定しているが, 評価対象施設は, 防潮堤, 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰であり, 津波襲来方向に対して直角方向に堰き止める構造であることから, 襲来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低減する。この漂流速度の低減影響が大きい衝突形態は, 反射波を受ける面積が大きくなる船側衝突(船体の真横からの衝突)である。
- また, 「津波漂流物対策施設設計ガイドライン(平成26年3月)」及び「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」では, 「土木学会(1994)」と同じ衝突形態の図(右図と同じ)を示しており, ③は船の回転によりエネルギーが消費されるため, ①の半分の衝突エネルギーであるとし, ②は①又は③と同じ衝突エネルギーであるとしている。Ikeno et al(2016)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小さくな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。

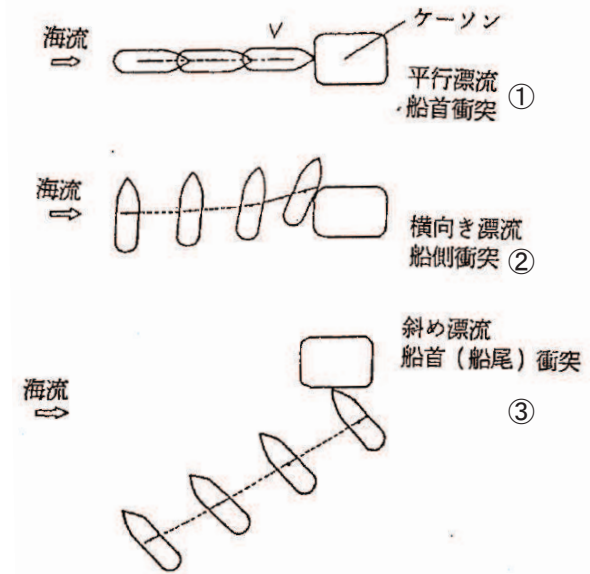


図 漂流による衝突形態(「土木学会(1994)」に一部加筆)

【参考8】鋼製船舶の衝突解析とFEMA(2012)の衝突荷重の関係性

【衝突解析(LS-DYNA)を用いた鋼製船舶の衝突荷重】

- ▶ 「崔ほか(2016)」では、津波により漂流する船舶が橋梁構造物に衝突した際の衝突荷重分布を明らかにすることを目的とし、仮想の大型船舶と仮想の長大斜張橋の主塔を対象とした衝突解析(LS-DYNA:Ver.971)を実施している。
- ✓ 衝突船舶モデルは、船長227m、幅36m、高さ23mの質量15000t級のLNG船を対象としており、船舶はシェル要素でモデル化され、モデルは図1のとおりである。船舶の材料はSS400で力学的特性は表1、応力-ひずみ曲線は図2のとおりである。
- ✓ 衝突速度は0.6m/sであり、図3に示すようなトリム(船首と船尾の喫水差)の影響を確認するためのケースを実施している。
- ✓ 解析結果から、最大衝突力は14920(kN)(図4)であったとされている。

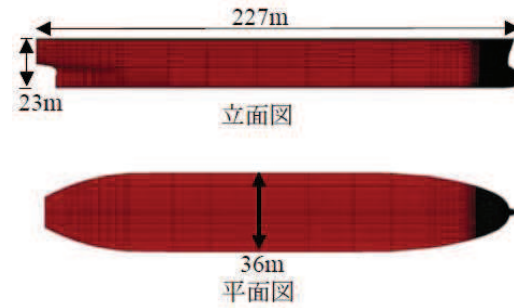


図1 船舶のモデル

表1 船舶の鋼材の力学特性

	SS400
密度 (kg/m ³)	7850
ヤング率 (GPa)	200
ポアソン比	0.3
降伏応力 (N/mm ²)	450

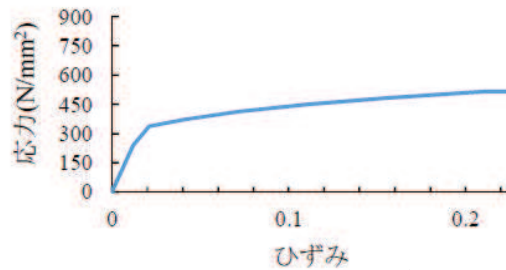


図2 船舶の鋼材の応力-ひずみ関係

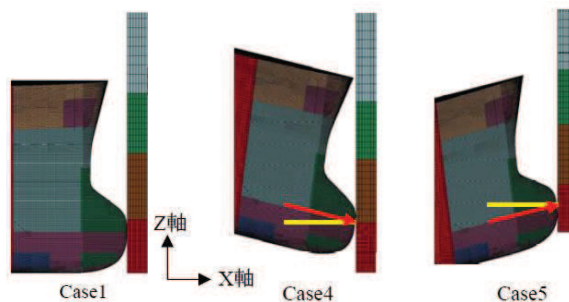


図3 解析ケース(被衝突体は鋼製主塔)

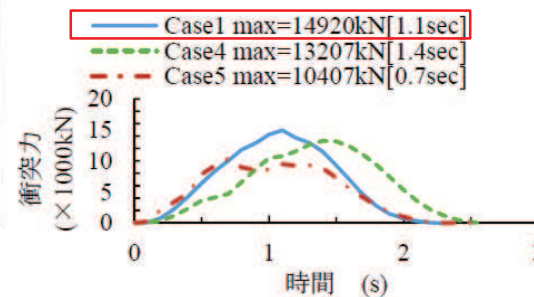


図4 衝突力の時刻歴

【衝突解析(LS-DYNA)と土木学会(1994)から有効軸剛性を設定してFEMA(2012)により算出した衝突解析の比較】

- ▶ 「崔ほか(2016)」で示されている条件を用いて、土木学会(1994)の方法で軸剛性を算出し、FEMA(2012)から衝突荷重を求めた場合、下表のとおり16148(kN)となる。
- ▶ 衝突解析を用いた「崔ほか(2016)」の衝突荷重は14920(kN)である。
- ▶ 土木学会(1994)の方法から軸剛性を設定し、FEMA(2012)から算出した衝突荷重と「崔ほか(2016)」の衝突解析結果はおおむね同じ荷重であることを確認した。また、土木学会(1994)の方法で軸剛性を設定しFEMA(2012)から算出した衝突荷重の方が大きくなっていることを確認した。
- ▶ なお、衝突形態の影響で行った衝突解析も「崔ほか(2016)」と同様にLS-DYNA(Ver.971)であり、衝突作用時間も同程度であることを確認した。

項目		LNG船
船舶構造	船舶の長さ L	227(m)
	船の深さ D	$0.08 \times 227 = 18.16$ (m)
	船側外板厚 t	$0.82 \times 227^{0.5} + 2.5 = 14.855$ (mm)
	横肋骨心距 a	$450 + 2 \times 227 = 904$ (mm)
	縦肋骨心距 b	$550 + 2 \times 227 = 1004$ (mm)
	船首角度 2θ	70°
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	$0.25 \times (0.08 \times 227) = 4.54$ (m)
材料物性	ヤング率 E	2.0×10^7 (tf/m ²)
	ポアソン比 ν	0.3
圧壊荷重 P_c		64859 (kN)
有効軸剛性 k_c		1.42×10^7 (N/m)
FEMA(2012)による衝突荷重		16148 (kN)
崔(2016)の最大衝突荷重		14920 (kN)

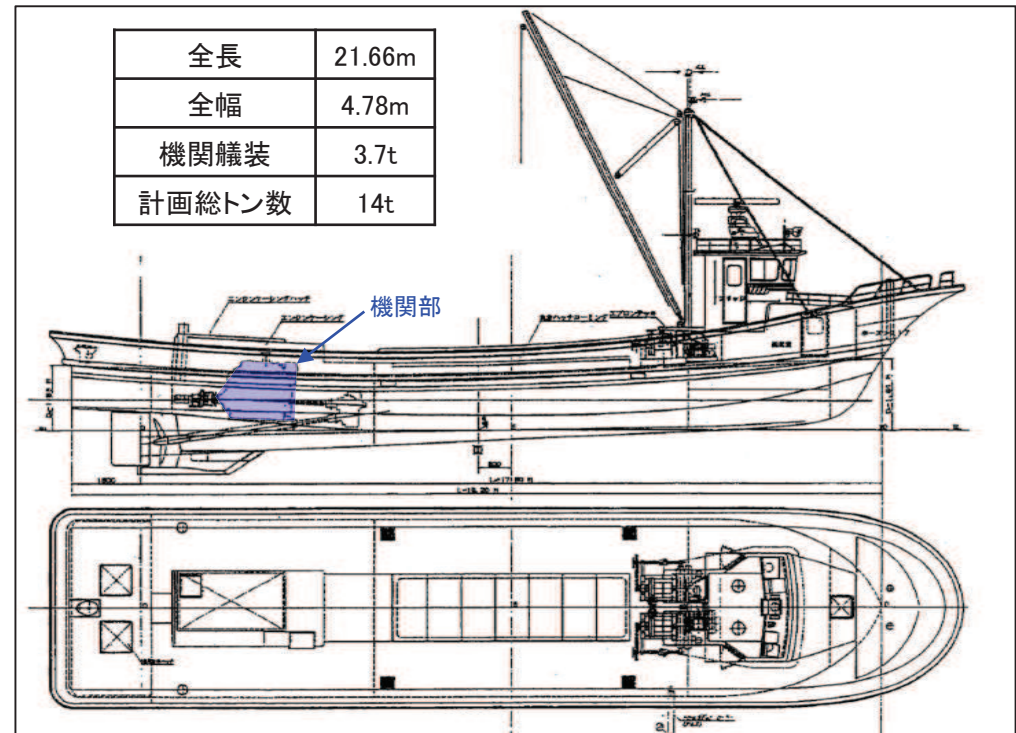
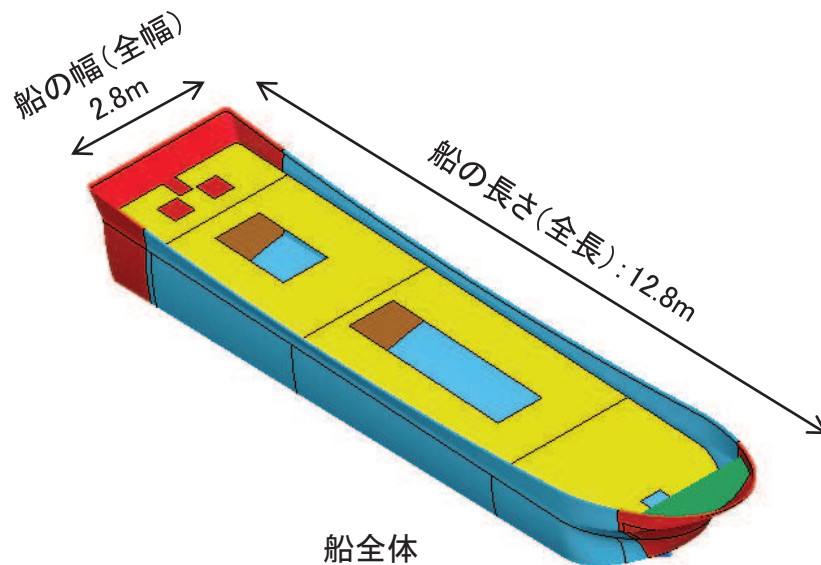
【参考9】衝突解析を用いた衝突形態の検討(1/12)

検討方法

FRP製船舶を対象に、船首からの衝突、船尾からの衝突、船舶真横からの衝突、斜め船首からの衝突及び斜め船尾からの衝突について、衝突解析を実施し、衝突形態の影響について確認する。

モデル化の方針

- ✓ 漂流物であるFRP製の船舶は、「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」という。)で示される総トン数14tのFRP船を基に、総トン数5tのFRP船の大きさに案分し、左下図及び次頁のようにシェル要素でモデル化した。
- ✓ 具体的には、船舶の全長の比率(21.66m:12.8m)からその他の寸法を案分した。

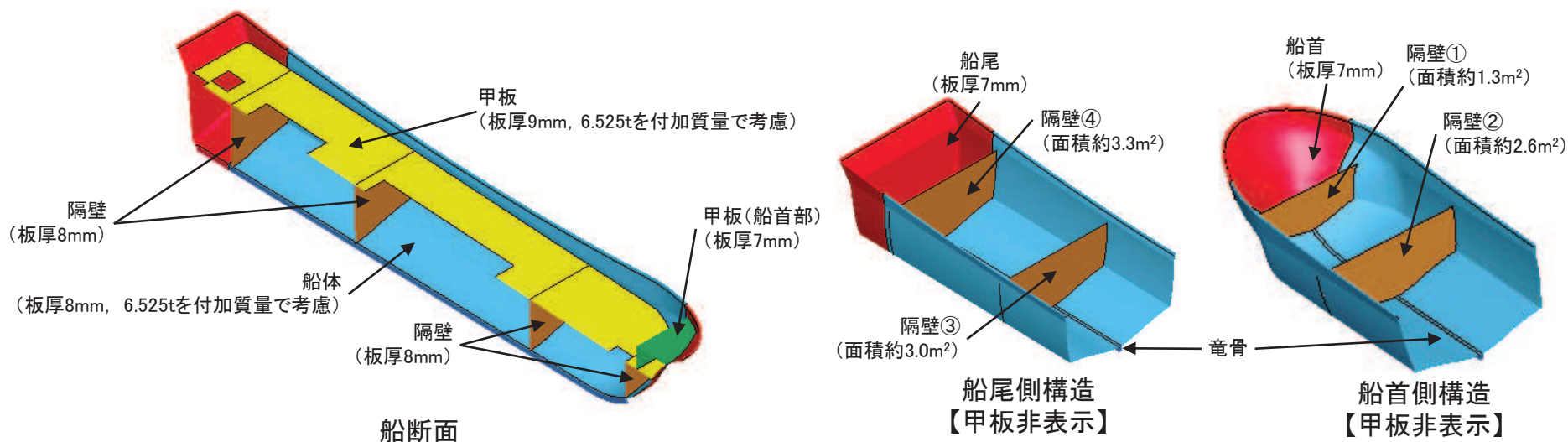


「小型漁船のインベントリ分析に関する研究－A：モデル船の建造・運航状況調査－（海上技術安全研究所報告 第3巻 第5号(平成15年)）」に一部加筆

モデルの詳細

✓ 船舶のモデルの詳細は以下のとおり

船舶の板厚	船首の板厚はp12,16の条件(5.89mm, 5.22mm, 5.434mm)を基に, 縦・横肋骨のモデル簡略化の観点から船首部の板厚を厚くすることで考慮し, 7mmとする。船尾も同様に7mmとする。 また, 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」では船首及び船尾について中央部の板厚の0.85倍とする記載があることを踏まえ, 船首及び船尾以外の船体(隔壁を含む)の板厚は8mmに設定する。なお, 甲板は各種艙装及び貨物が載ることを踏まえ9mmとする。
質量	15t【総トン数5t×3=15】 ('漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より, 総トン数の3倍の重量として考慮) 船殻(船首, 船尾, 船体及び甲板)の質量は約1.95tであるため, 残りの13.05tを船体及び甲板に付加質量として考慮する。



【参考9】衝突解析を用いた衝突形態の検討(3/12)

解析コード

解析コードは「LS-DYNA Ver.971 R6.0.0」を用いる。

材料定数

FRP製の船舶に使用する材料定数は、下表のとおり設定する。

ヤング率 E(MPa)	強度 $\bar{\sigma}$ (MPa)	ポアソン比
12000*1	200*2	0.4*3

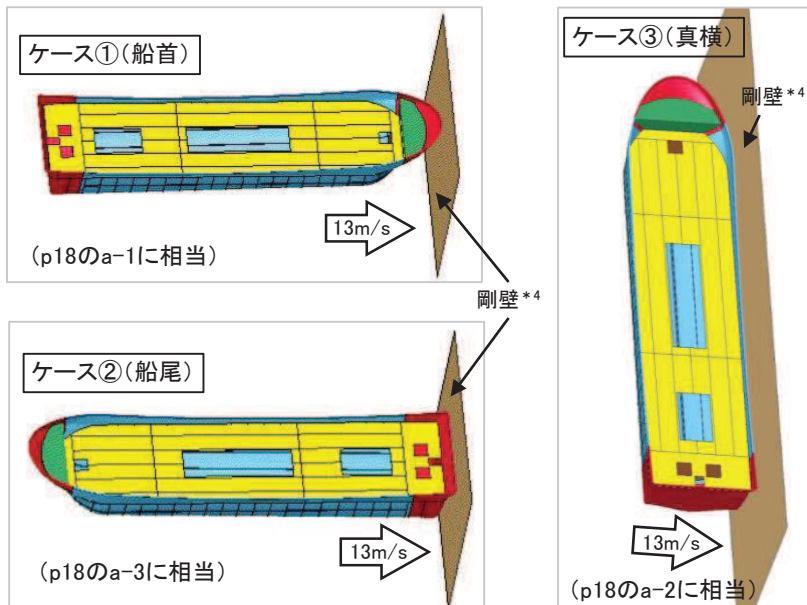
注記 *1:p17から設定

*2:「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より設定

*3:p17から保守的に設定

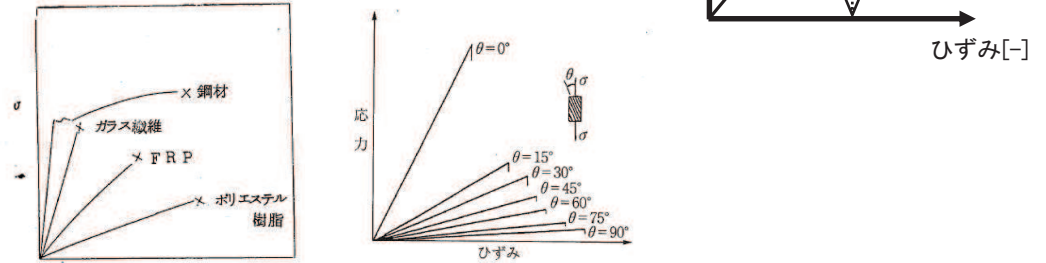
解析ケース

解析ケースは下図のとおりで、いずれのケースも衝突速度(絶対値)は13m/sとする。なお、各ケースとp18で示した衝突パターンとの関係を右表に示す。



材料特性(FRPの応力-ひずみ関係)

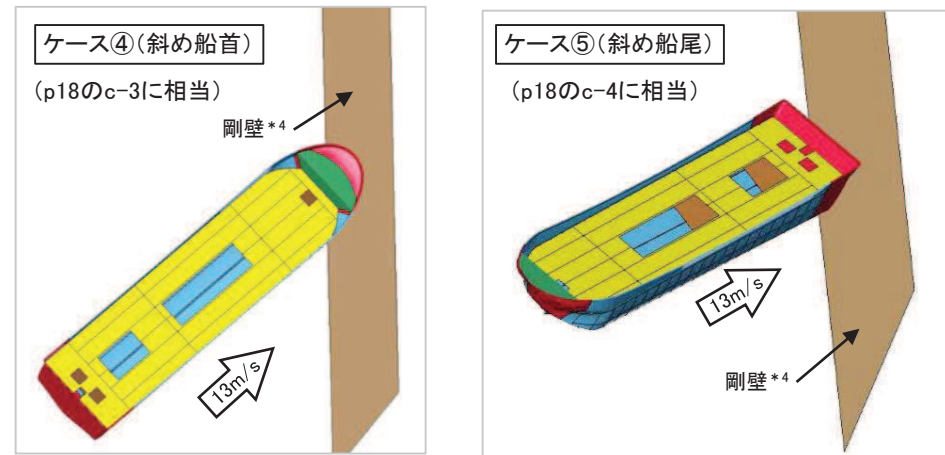
下図で示した「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」及び「FRP成形入門講座(日本プラスチック加工技術協会)」の応力-ひずみ曲線と同様に、FRPの応力-ひずみ関係を右図に設定した。なお、FRPは鋼材と異なりねばり強さがないため、応力が強度 $\bar{\sigma}$ に達した後(降伏以降)ではシェル要素を削除する設定とした。



応力-ひずみ曲線

左:「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」
右:「FRP成形入門講座(日本プラスチック加工技術協会)」

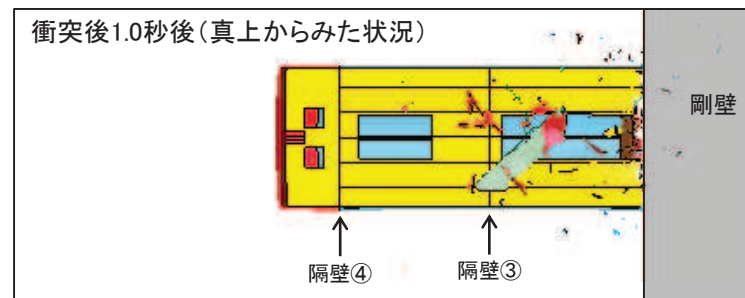
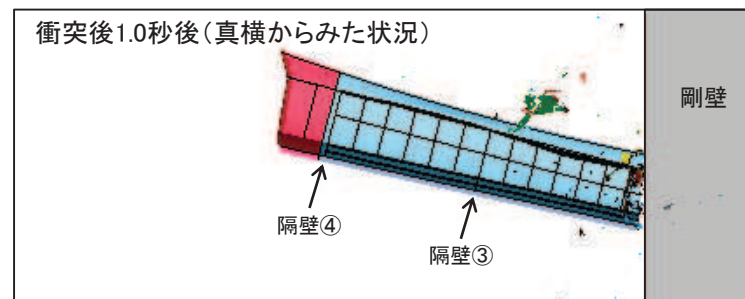
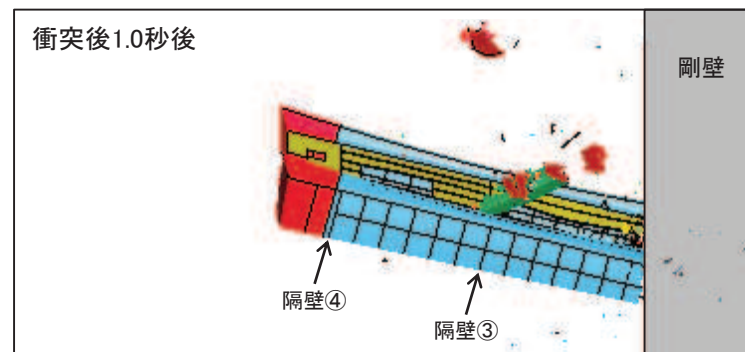
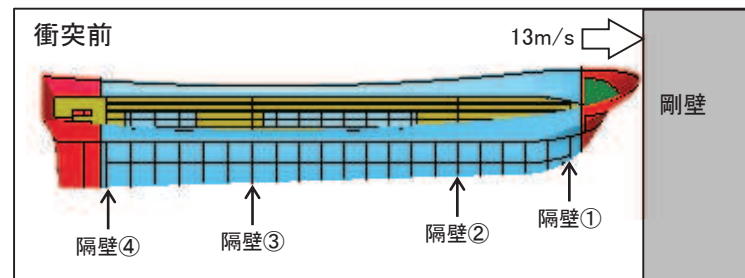
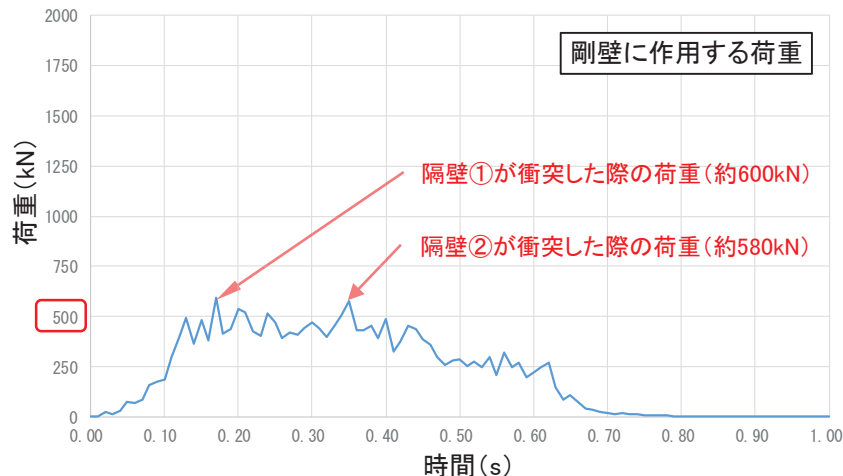
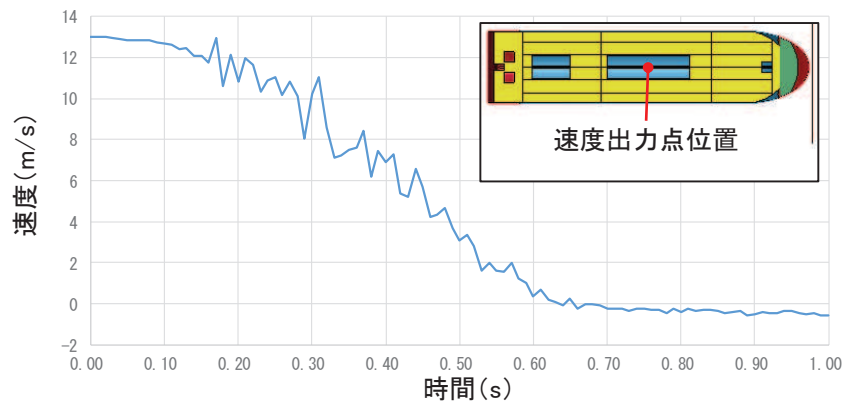
衝突方向	船首	船尾	真横	斜め船首	斜め船尾
解析ケース	ケース①	ケース②	ケース③	ケース④	ケース⑤
p18での衝突パターン	a-1	a-3	a-2	c-3	c-4



注記 *4:剛壁は変形・移動しない条件とし、ヤング率200GPa、ポアソン比0.3の鋼製の塊としている。

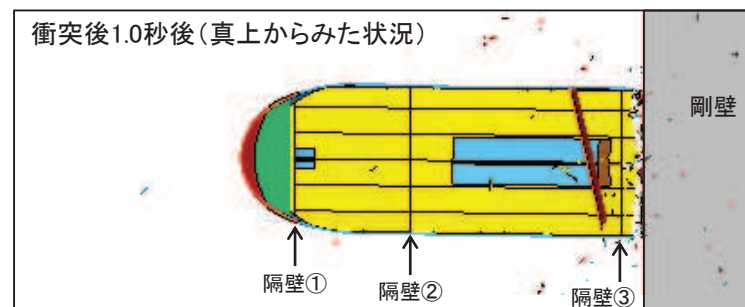
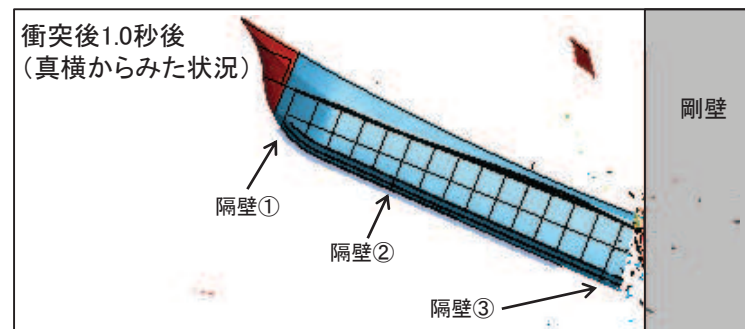
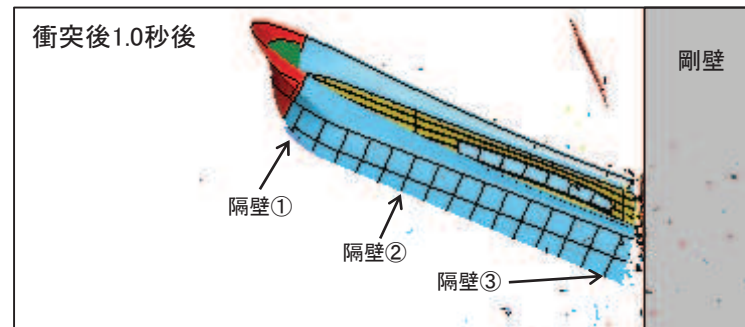
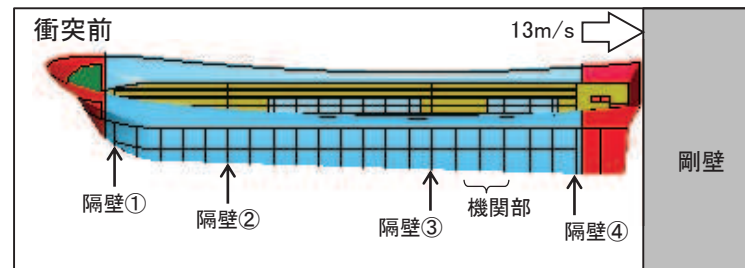
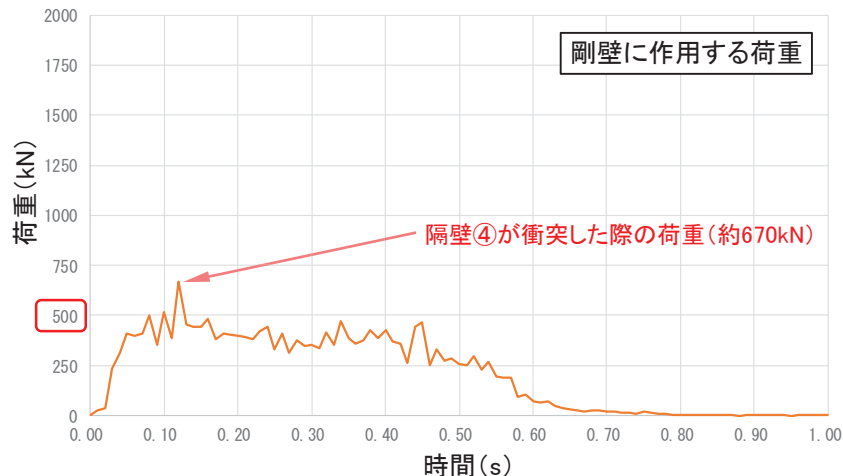
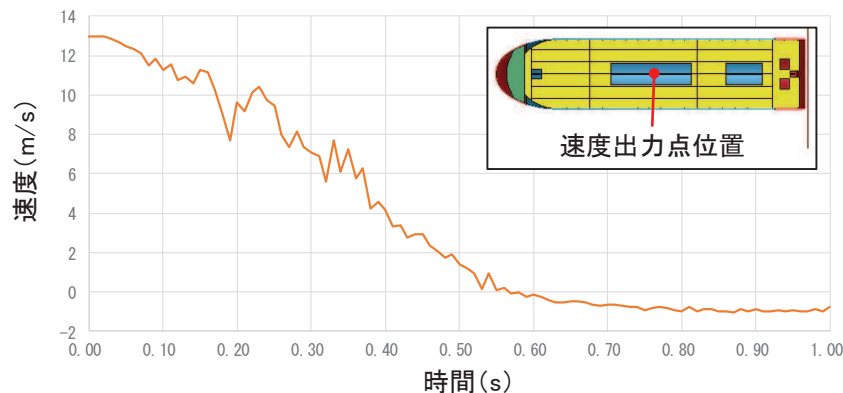
ケース①(船首)の解析結果

- ✓ 船首から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.7秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、船首から破壊が生じて荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約600kN(約0.17s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約460kN/m²(隔壁の面積約1.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



ケース②(船尾)の解析結果(1/2)

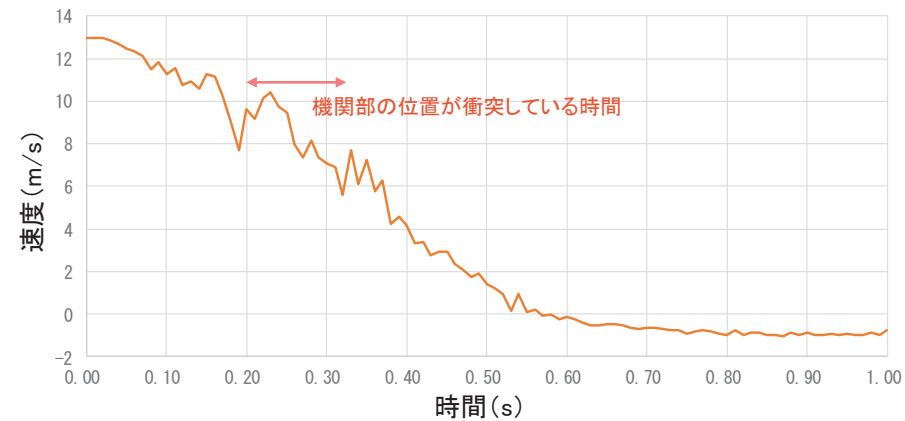
- ✓ 船尾から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.6秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、衝突直後から荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約670kN(約0.12s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約210kN/m²(隔壁の面積約3.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



【参考9】衝突解析を用いた衝突形態の検討(6/12)

ケース②(船尾)の解析結果(2/2) 船尾から衝突した場合の機関部の影響について

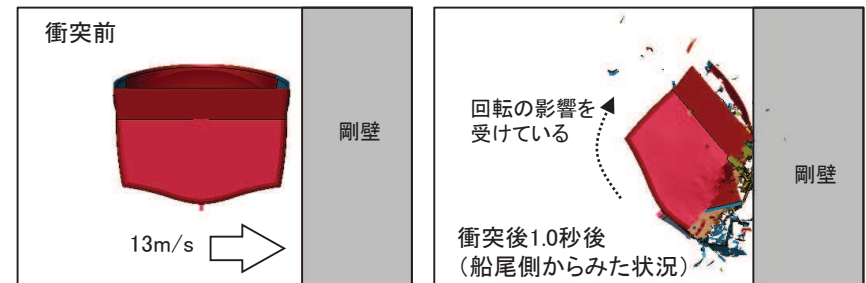
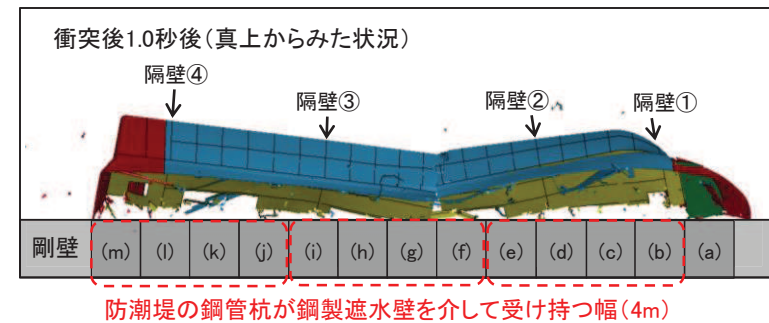
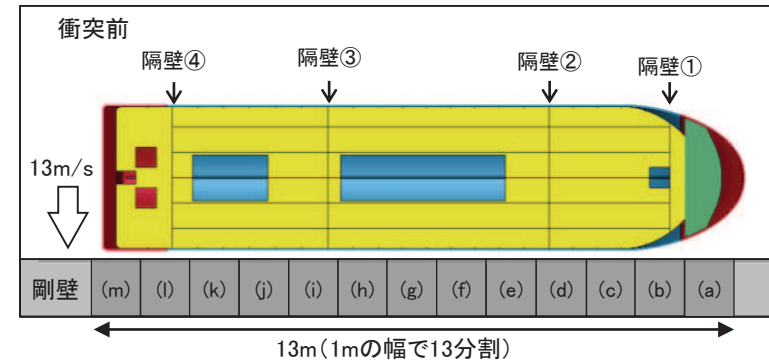
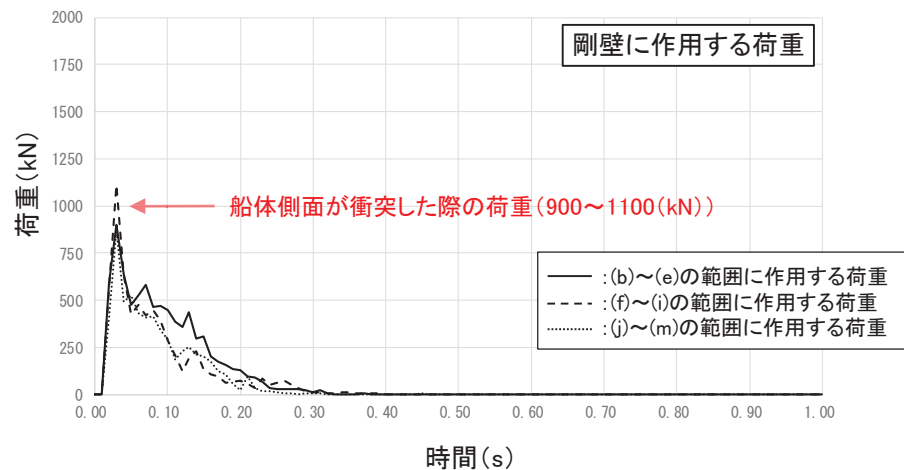
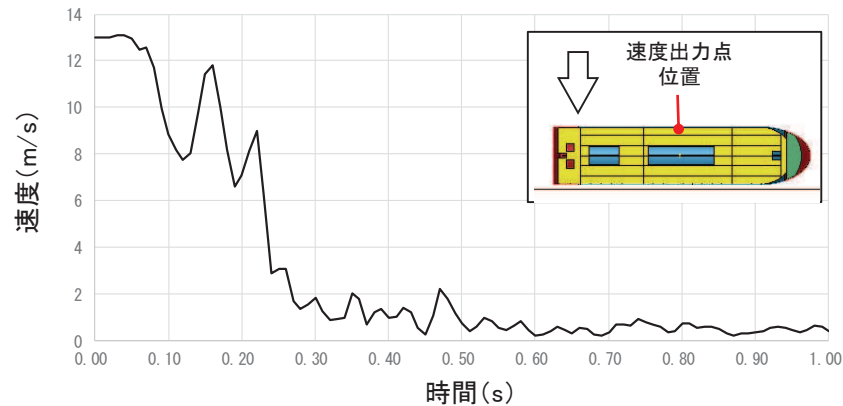
- ✓ 船尾から衝突した場合に、船体の破壊が進展して機関部(エンジン等)まで衝突する可能性がある。そのため、機関部の衝突影響について検討した。
- ✓ 「海技研報告」の総トン数14tの船舶の機関艙装は3.7tであることから、評価対象である総トン数5tに案分して1.33tと考え、機関部がすべて剛性の高い鋼材で構成されていると仮定すると、機関部の衝突は車両の衝突に置き換えることが可能である。
- ✓ 車両の衝突荷重に関しては、2.15tの車両をFEMAにより評価(1855kN)しており、機関部の質量はこの質量以下であること、機関部の衝突速度は13m/sよりも低いことから、車両の衝突荷重に包絡される。



【参考9】衝突解析を用いた衝突形態の検討(7/12)

ケース③(真横)の解析結果(1/2)

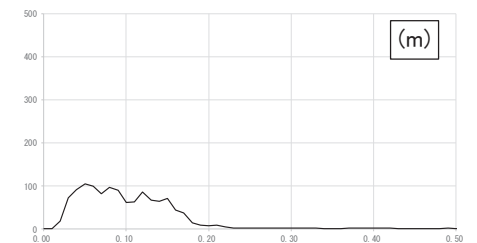
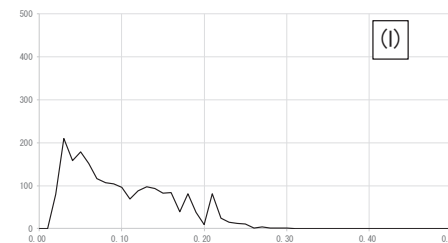
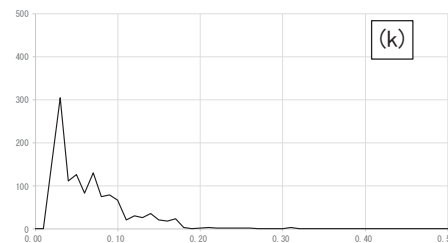
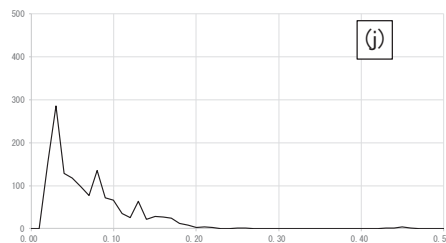
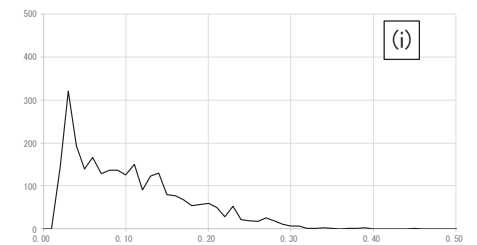
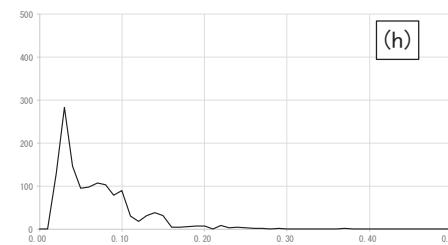
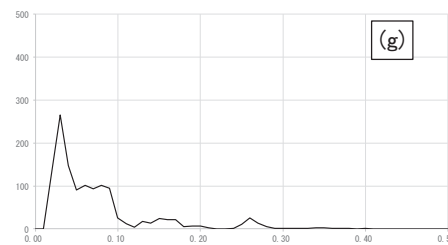
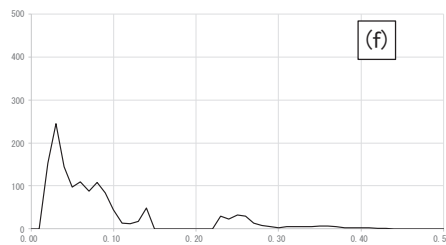
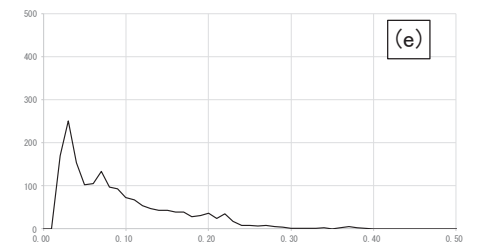
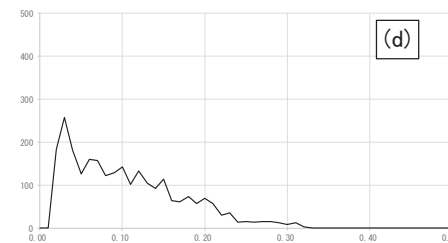
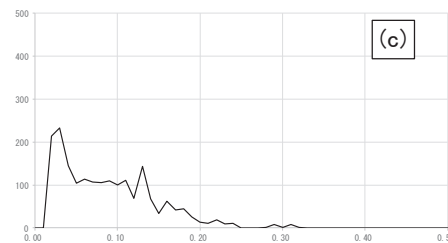
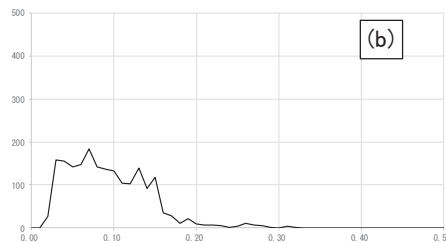
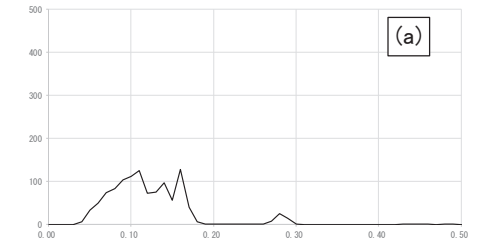
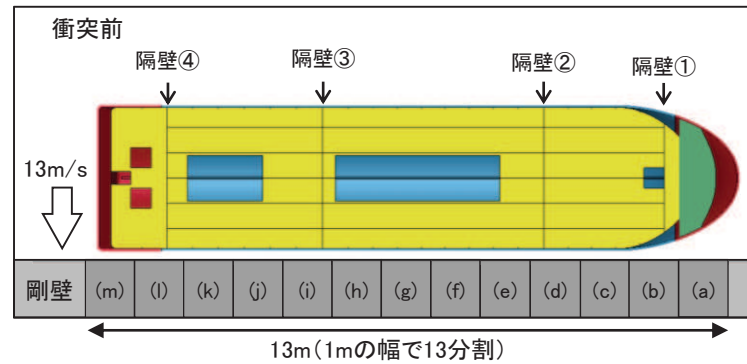
- ✓ 真横から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.3秒後以降では衝突速度はゼロに近づくが、回転(剛壁の水平方向を軸とする回転)の影響により衝突速度はゼロにならない。
- ✓ また、真横からの衝突では、船舶の長さ(12.8m)全体で剛壁へ作用する状況(参考)であり、防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼管杭1本が受け持つ幅は4mであることから、右下の図のように剛壁を分割して、4mの幅に作用する荷重として整理した。
- ✓ 衝突荷重は、船体側面が衝突する0.03秒前後で900~1100(kN)の衝突荷重が作用しているが、この荷重は他の衝突形態で生じる荷重に比べて極めて作用時間が短い現象である。また、荷重作用時間も0.2秒程度であり、他の衝突形態に比べて半分以下である。
- ✓ 瞬間最大荷重900~1100(kN)は船体側面が衝突した瞬間の荷重であり、4mの幅に均等に作用している状況であるため、約225~275kN/m²の分布荷重が作用している状況である。



【参考9】衝突解析を用いた衝突形態の検討(8/12)

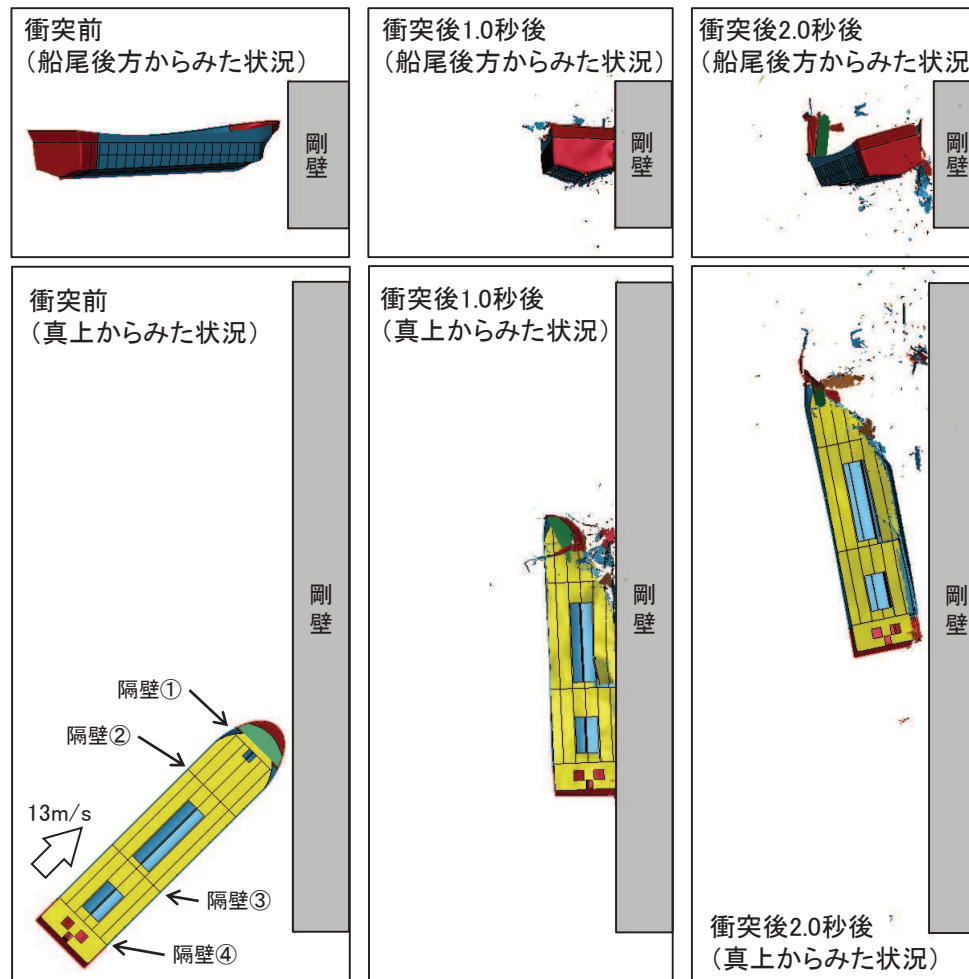
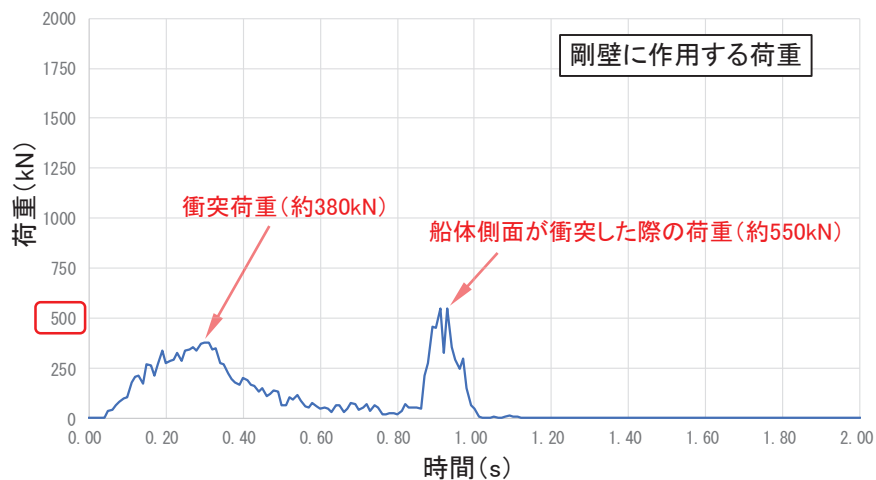
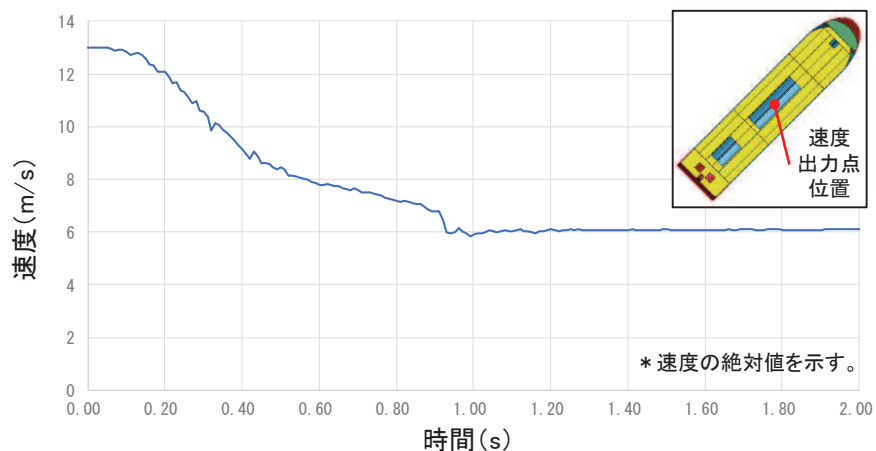
ケース③(真横)の解析結果(2/2)

- ✓ 船舶が衝突する範囲(剛壁の13m)を1mの幅で分割し、それぞれの範囲(幅1m)に作用する荷重を示す(横軸は時間(s), 縦軸は荷重(kN))。
- ✓ (c)~(l)の範囲で約250(kN)程度の荷重が作用しており、船舶の側面が衝突した際に、10mの幅の剛壁に均等に荷重が作用していることを確認した。



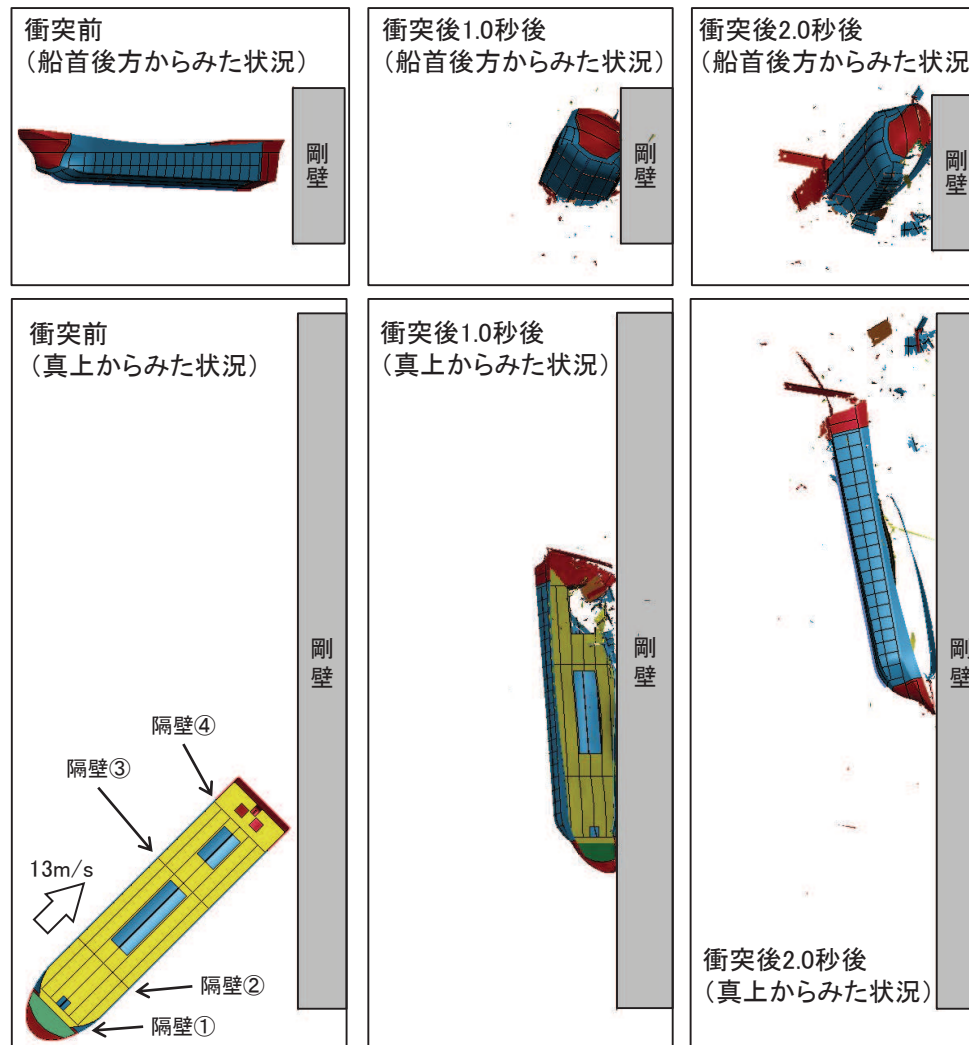
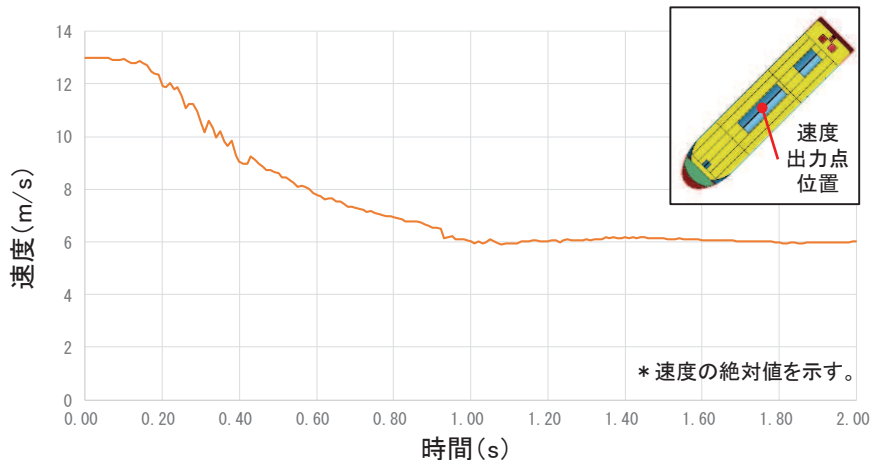
ケース④(斜め船首)の解析結果

- ✓ 斜め船首から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.9秒後には衝突速度が約6m/sで一定となる。これは、船舶が剛壁に衝突した後の約0.9秒後以降では剛壁から離れる方向に移動していることを示している。
- ✓ また、衝突荷重としては、衝突直後から荷重が大きくなり、約350kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約380kN(約0.31秒)が作用しており、約0.91秒後にも瞬間的に約550kNの荷重が作用しているが、これは瞬間的に船体側面が衝突したことによるものである。



ケース⑤(斜め船尾)の解析結果

- ✓ 斜め船尾から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約1.0秒後には衝突速度が約6m/sで一定となる。これは、船舶が剛壁に衝突した後の約1.0秒後以降では剛壁から離れる方向に移動していることを示している。
- ✓ また、衝突荷重としては、衝突直後から荷重が大きくなり、約350kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約370kN(約0.28秒後)が作用しており、約0.93秒後にも瞬間的に約350kNの荷重が作用しているが、これは瞬間的に船体側面が衝突したことによるものである。



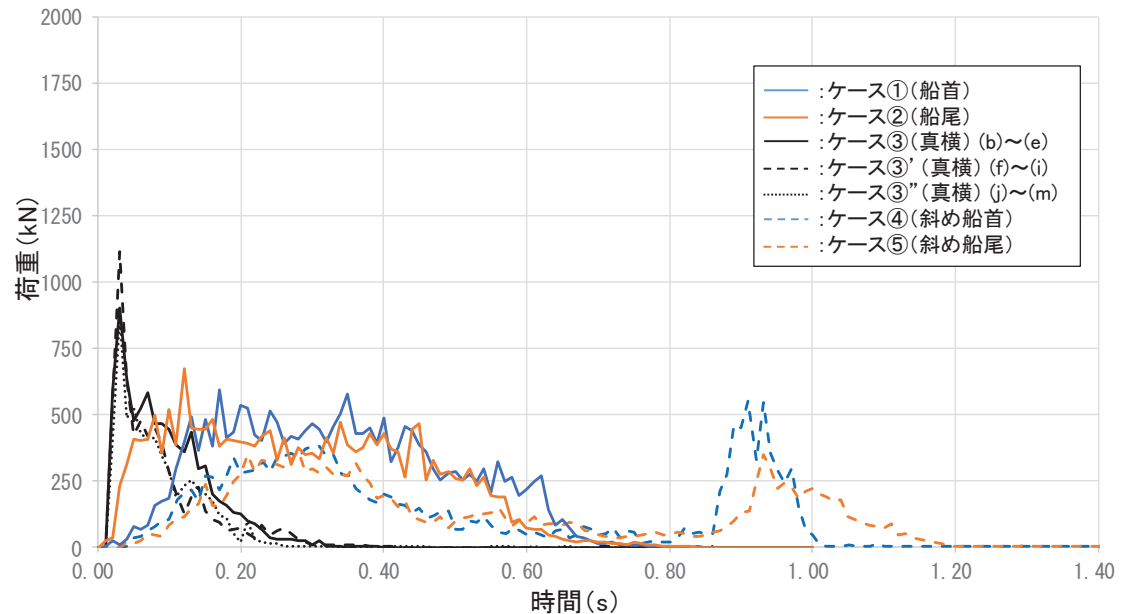
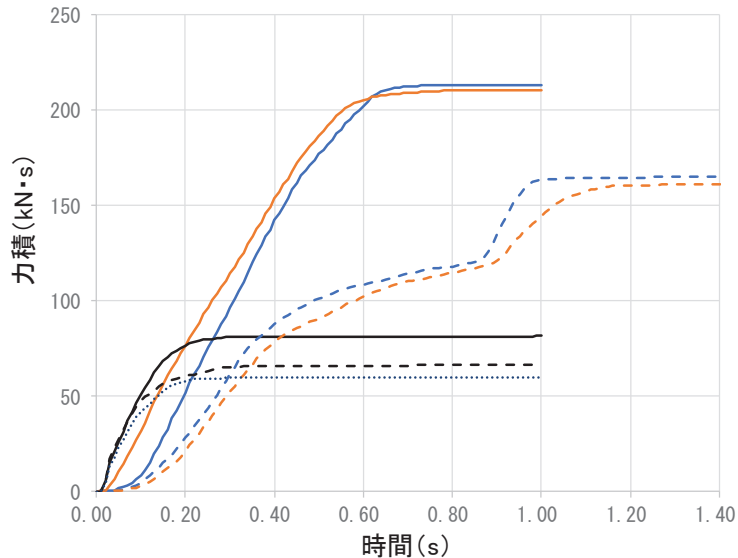
FRP製小型船舶の衝突形態による影響確認(まとめ)(1/2)

- 衝突解析の結果から、各ケースの力積、瞬間最大荷重及び衝突荷重の作用時間については表のとおりである。また、力積と衝突荷重の時刻歴を下に示す。
- 左下の力積の時刻歴からケース①(船首)とケース②(船尾)が大きく、わずかにケース①(船首)が最大であることを確認した。一方、真横からの衝突形態であるケース③、③'及び③''はいずれも、他のケースに比べて小さく、ケース①の半分以下である。
- 右下の荷重の時刻歴から、瞬間最大荷重は真横からの衝突形態(ケース③シリーズ)で大きくなる傾向があり、ケース③'(真横)の約1100(kN)が最大である。ただし、ケース③シリーズは他のケースに比べて、衝突時間が非常に短い特徴がある。
- 衝突事象を検討する際には、衝突応答が力積で決まる領域(「力積破壊の世界」(武藤(1941)))であるか否かが重要であり、衝突荷重の作用時間 τ と被衝突体の固有周期 T の比(τ/T)が0.1よりも小さい場合に「力積破壊の世界」となる。*1
- 防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼管杭の固有周期は0.1(s)程度であり、衝突荷重の作用時間に対して短い(τ/T が1以上となる)ため、本衝突事象は力積での評価が困難であることを確認した。なお、漂流物が衝突する際には、その高さまで津波水位があり、衝突荷重と同時に遡上津波荷重も作用していることから、衝突荷重による振動の影響はない。

ケース	衝突形態	力積 (kN・s)	瞬間最大荷重 (kN)	瞬間最大荷重の発生時刻 (s)	衝突荷重の作用時間 (s)
①	船首	約214	約600	約0.17	約0.7
②	船尾	約211	約670	約0.12	約0.6
③	真横*2	約82	約900	約0.03	約0.2
③'	真横*2	約67	約1100	約0.03	約0.2
③''	真横*2	約60	約870	約0.03	約0.2
④	斜め船首	約166	約550	約0.31	約1.0
⑤	斜め船尾	約164	約370	約0.28	約1.2

注記*2:真横からの衝突については、パターンAとパターンBがあるが、瞬間最大荷重は同程度であるため、力積が大きいパターンAを代表として記載した。

注記*1:「武田・河西(2011):同一力積衝撃応答スペクトルによる衝撃応答算定法の提案, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.57A」, 「上田・小島(1982):衝撃的荷重を受けるRCおよびPCIばりの変形と強度, 港湾技研資料, No.430, 運輸省港湾技術研究所」

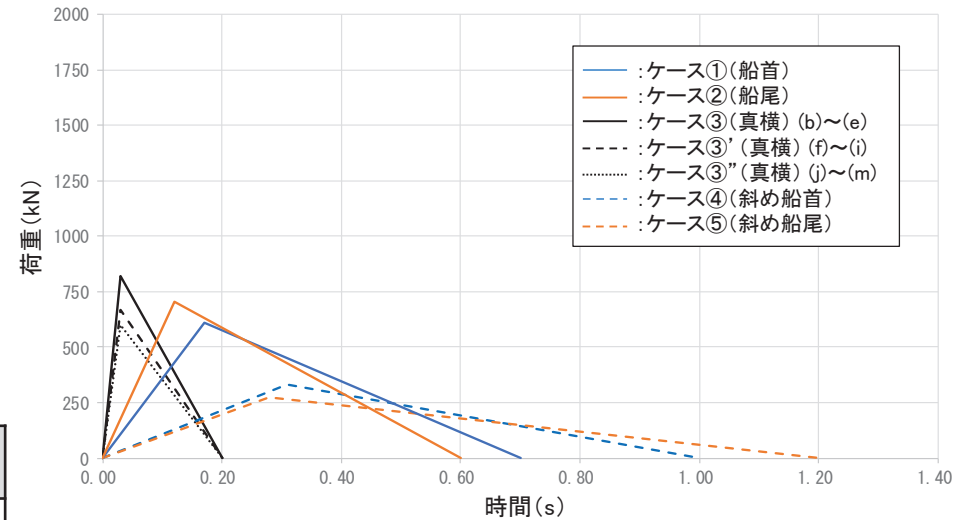


FRP製小型船舶の衝突形態による影響確認(まとめ)(2/2)

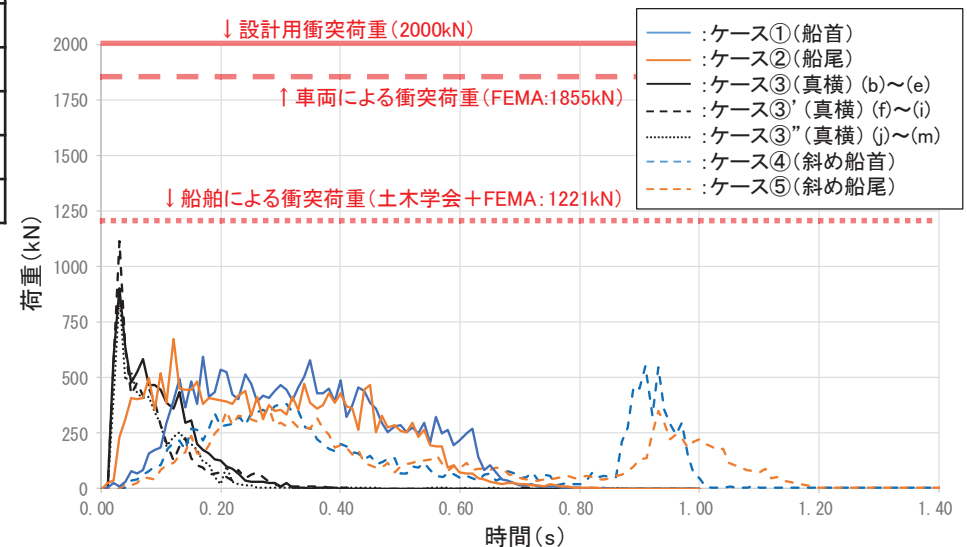
- 建築物荷重指針・同解説(2015)によれば、衝突荷重の算定方針として、「衝突実験データが得られている場合は、その衝突荷重の時刻歴の最大値を静的設計荷重として与える。衝突実験データが得られていない場合は、衝突シミュレーション解析またはエネルギー論的手法により衝突荷重の時刻歴を求め、力積を等しくした三角波として近似し、その三角波の最大値を静的設計荷重として与える。」とされている(建築物荷重指針・同解説(2015)で示されている三角波の例を参考10に示す)。
- 本検討では、衝突解析を実施しているため、解析で得られた力積から三角波に近似し、その三角波の最大荷重を算出した(下表及び右上図)。具体的には三角波のピーク荷重時刻は解析で得られた瞬間最大荷重発生時刻と同時刻とし、三角波の底辺となる作用時間も解析で得られた時間とし、三角波の最大荷重を算出した。

ケース	衝突形態	力積 (kN・s)	瞬間最大荷重 (kN)	瞬間最大荷重の発生時刻 (s)	衝突荷重の作用時間 (s)	三角波の最大荷重 (kN)
①	船首	約214	約600	約0.17	約0.7	約610
②	船尾	約211	約670	約0.12	約0.6	約700
③	真横	約82	約900	約0.03	約0.2	約670
③'	真横	約67	約1100	約0.03	約0.2	約820
③''	真横	約60	約870	約0.03	約0.2	約600
④	斜め船首	約166	約550	約0.31	約1.0	約330
⑤	斜め船尾	約164	約370	約0.28	約1.2	約270

- 三角波の最大荷重はケース③' (真横)の約820 (kN)であったが、ほとんどのケースで衝突解析の瞬間最大荷重よりも小さくなる傾向を確認した。また、衝突荷重の作用時間の取り方によって、三角波の最大荷重は大きく影響することから、瞬間最大荷重を用いることとする。
- なお、衝突解析は気中衝突を模擬しているため、付加質量の影響を含める必要があるが、設計上の配慮として、津波による荷重(最大波高時における波力)と重畳させる方針であることから、この津波による荷重に付加質量の影響は含まれる。



建築物荷重指針・同解説(2015)に従い衝突荷重を三角波に設定した結果



- ✓ 建築物荷重指針・同解説(2015)によれば、衝突荷重の算定方針として、「衝突実験データが得られている場合は、その衝突荷重の時刻歴の最大値を静的設計荷重として与える。衝突実験データが得られていない場合は、衝突シミュレーション解析またはエネルギー論的手法により衝突荷重の時刻歴を求め、力積を等しくした三角波として近似し、その三角波の最大値を静的設計荷重として与える。」とされており、衝突シミュレーション解析の時刻歴から三角波を設定している例を右図に示す。
- ✓ また、建築物荷重指針・同解説(2015)によれば、「衝突時の運動エネルギーがすべて衝突体の変形による内部エネルギーとして吸収されるハードインパクトを仮定した。ハードインパクトは、一般に安全側の結果を与える。」とされており、本検討で実施した衝突解析も被衝突体を剛壁に設定しており、同様の仮定となっている。

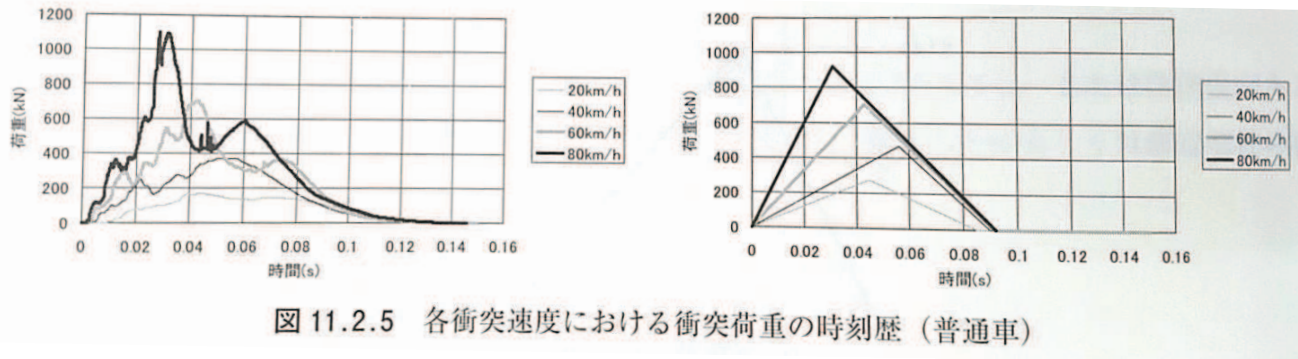
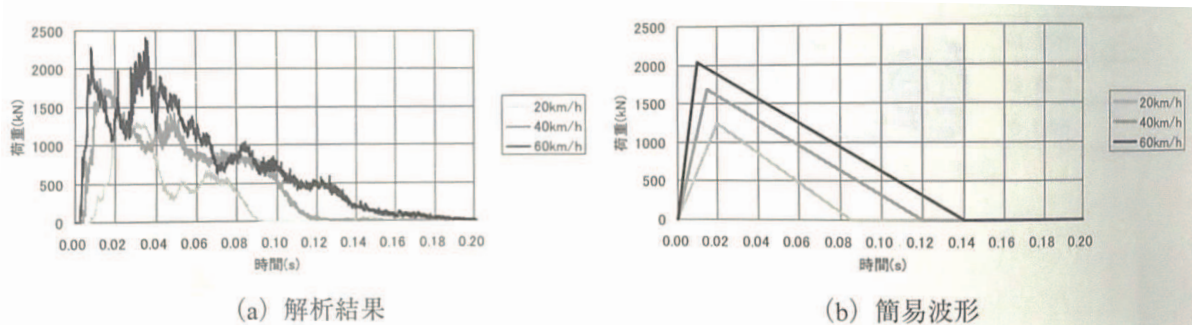
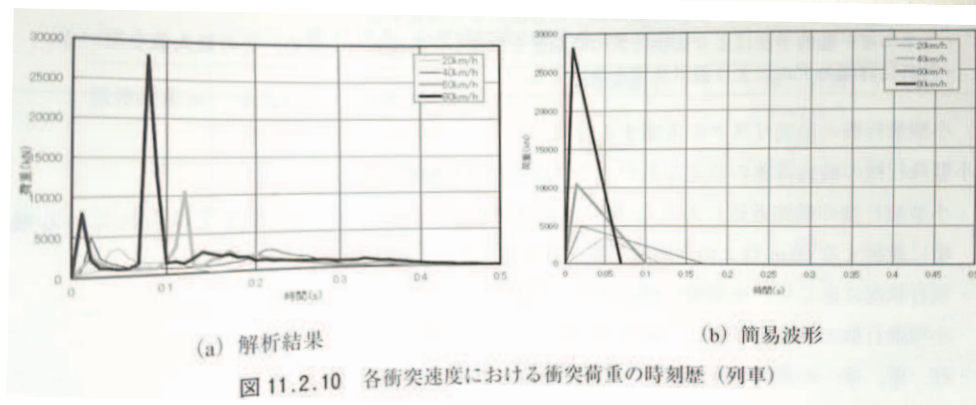


図 11.2.5 各衝突速度における衝突荷重の時刻歴 (普通車)



(a) 解析結果 (b) 簡易波形

図 11.2.7 各衝突速度における衝突荷重の時刻歴 (トラック)



(a) 解析結果 (b) 簡易波形

図 11.2.10 各衝突速度における衝突荷重の時刻歴 (列車)