

津波により漂流する大型船舶と長大斜張橋主塔の衝突解析 による衝突荷重分布の評価

永原稔之¹・崔準祐²・八ツ元仁³・梶田幸秀⁴

¹学生会員 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³正会員 修(工) 阪神高速道路株式会社 技術部 技術開発課
(〒160-0004 大阪府大阪市中央区久太郎町四丁目1-3)

⁴正会員 博(工) 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 准教授
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の被害状況では、地震の揺れによる被害のみならず、大規模な津波により多数の大型船舶が漂流し、橋梁などの周辺構造物への衝突、大規模な延焼火災といった複合的な被害も発生した。今回の津波による被害は、これまで想定していた被害想定レベルを大きく上回り、将来の構造物の耐津波設計に警鐘を鳴らすものであった。こうした中、近い将来に発生が懸念されている南海トラフの巨大地震では、津波高が10mを大きく超えると想定されており¹⁾、こうした巨大津波による被害に備え、橋梁構造物の設計時においても、地震の揺れや津波の水圧及び波力だけでなく、津波により生じる様々な複合的な被害に対しても耐性を有するように考慮しておかなければならないと考えられる。

津波による複合的な被害に関する既往の研究として、津波により漂流した船舶と橋梁の衝突現象を題材とした研究が行われている。馬越らの研究²⁾では、漂流船舶と長大橋の衝突による橋梁応答について検討がなされており、津波により大型船舶が長大橋に衝突した際、大型船舶が長大橋の応答に及ぼす影響を数値シミュレーション解析により分析している。また、八ツ元らの研究³⁾では、南海トラフ地震発生後に漂流した大型船舶が阪神高速の斜張橋に衝突することを想定し、その衝突が斜張橋に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、数値解析により検討を行っている。これらの研究では、船舶が衝突した際の衝突力を橋梁モデルに与え、船舶の衝突が橋梁構

造物に与える影響について検討が行われているが、漂流した船舶が橋梁に衝突した際の衝突力については、船舶が衝突した後完全に停止するという仮定の下で推定された式に基づいている。しかし、船舶と橋梁構造物の衝突問題、特に衝突荷重評価については、これまで研究事例が少なく、不明な点が多い。

そこで、本研究では、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、大型船舶と長大斜張橋の主塔を対象とした衝突解析を実施した。ここでは、衝突荷重をより精度良く評価するため、船舶と斜張橋主塔を詳細にFEMでモデル化し、船舶の衝突位置、また船舶の衝突方向が変わることで衝突荷重分布がどのように変化するかについて検討を行った。また、既往の研究で用いられた衝突荷重の推定式より求められた衝突荷重分布と、本解析により求められた衝突荷重分布の比較を行い、その比較結果について考察を行った。

2. 解析モデルおよび解析条件

(1) 主塔のモデル化

本研究では、橋長約900mの鋼斜張橋の鋼製主塔を対象とした。図-1は、本数値解析で用いた主塔部と主塔断面の有限要素モデルを示したものである。主塔の高さは144.5mとなっており、主塔のウェブ幅は下から6.5m～4.5mとなっている。

主塔断面は、外フランジ・ウェブ・内フランジ・リブよ

り構成されており、材料は鋼材のSM570である。また、主塔断面の非線形特性については、圧縮側の座屈を精度良く評価するため、圧縮側と引張側で非対称バイリニアでモデル化している。なお、船舶による衝突荷重分布を精度よく評価するため、船舶が衝突する部分に対しては、断面を細かく分割してモデル化を行った。

(2) 船舶のモデル化

本解析で用いた衝突船舶モデルは、船長227m、幅36m、高さ23mの質量15000t級のLNG船を対象とした。図-2に本解析で用いた船舶の有限要素モデルを示す。船舶の材料は、鋼材のSS400である。主塔に衝突する船体の前方に対しては、衝突時の船舶の変形を精度よく評価するため、内部構造に対しても詳細にモデル化した。船舶の後方部分については、衝突時に損傷しないと仮定し、剛体としてモデル化を行った。また、図-2の船舶の前方モデルにおいて、上の部分を船首部分、下の部分をバルブ部分と呼ぶこととする。

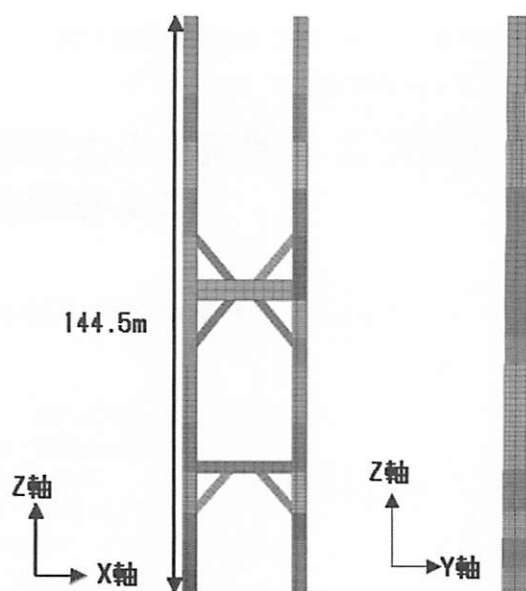
(3) 解析条件

境界条件は、主塔部底面の全節点に対し、全自由度を拘束した。主塔断面が変化する位置では、断面の要素間は完全結合しているものと仮定している。船舶に衝突される主塔部の要素には、船舶の衝突による要素間の相互作用を考慮するため、ペナルティ法⁹⁾に基づいて面と面の接触を考慮した接触面の定義を行っている。但し、本数値解析では、船舶と主塔の衝突面に作用する摩擦は、衝突荷重分布に及ぼす影響が小さいと考え、考慮していない。また、漂流時の船舶は操縦不能状態になり、進行方向に流速0.6m/sの津波に流される状態と仮定している。なお、船舶は水中で浮かんでいる状態にあると仮定し、本解析では全てのモデルに対して重力を考慮していない。解析ソフトはLS-DYNA (Ver.971) を用いた。

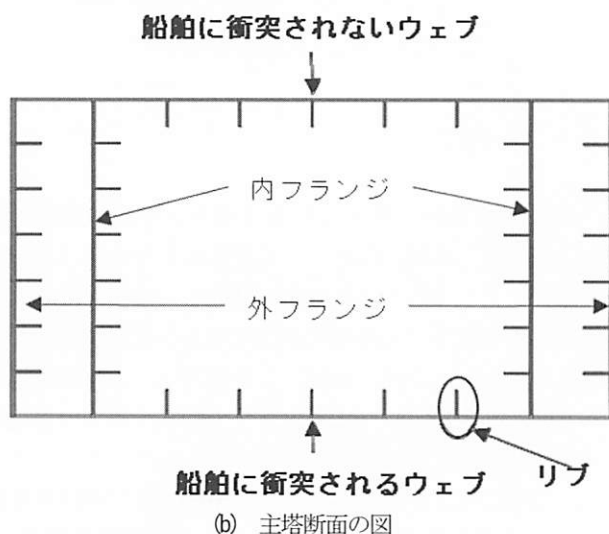
3. 船舶と鋼製主塔の衝突解析

(1) 船舶の衝突する高さの違いによる検討

気象庁によると2011年東北地方太平洋沖地震による津波は、福島県相馬で9.3m以上、宮城県石巻市鮎川で8.6m以上と、非常に高い津波が観測された⁹⁾。このような状況から、船舶が津波によって押し流されることを考えた場合、船舶は津波の高さによる影響を受け、主塔部の様々な高さの位置に衝突する可能性がある。船舶が衝突する高さが変わると、主塔部に生じる応答も変わる可能性があり、衝突時の衝突荷重分布も変化することが考えられる。そこで、本節では船舶が衝突する主塔高さをパラメータとし、衝突高さの違いによって衝突部の主塔の



(a) 対象解析主塔のモデル図



(b) 主塔断面の図

図-1 解析対象主塔のモデル図

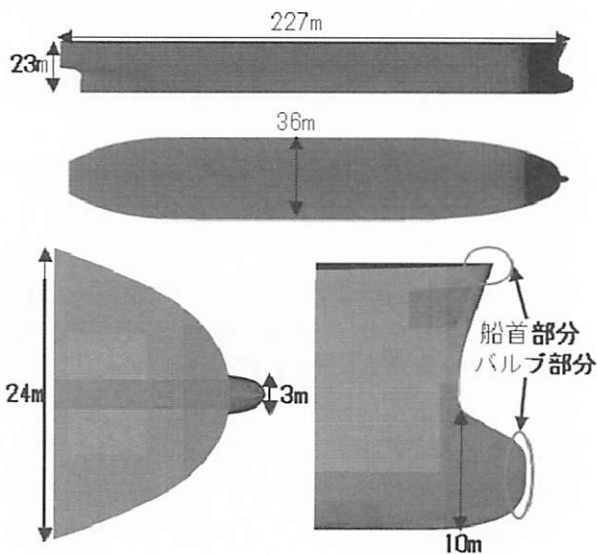


図-2 解析対象船舶のモデル図

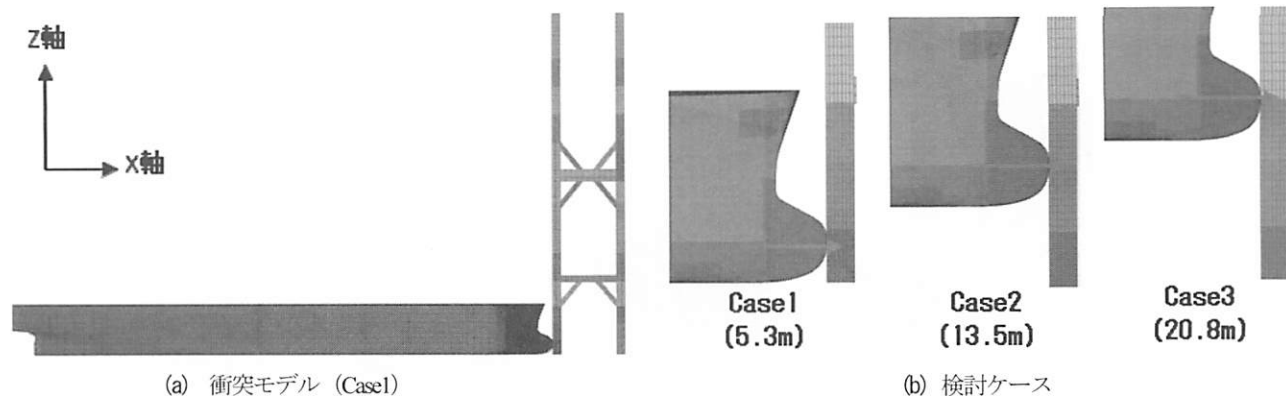


図-3 解析モデル

挙動や衝突荷重分布がどのように変化するかについて検討を行った。

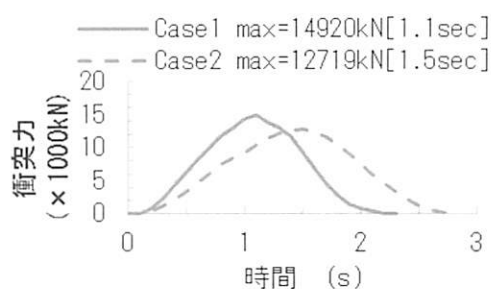
a) 検討ケース

本検討では、3つのケースの衝突解析を行うこととし、Case1では船舶が衝突する高さを5.3m、Case2では13.5m、Case3では20.8mとしている。図-3にCase1の衝突モデルと各検討ケースのモデルを示す。Case1は、船舶の底面が主塔の基部の高さに一致するケースであり、船舶のバルブ部分が主塔の基部からの高さ5.3mに衝突しているものである。Case2では、Case1よりと衝突位置を8.2m上げ、主塔基部付近より離れた位置に船舶が衝突するケース、Case3では衝突する断面の違いによる影響をみるためのケースであり、Case2より7.3m上げたモデルとしている。本検討では、衝突高さや衝突する断面の違いによる衝突荷重分布の変化を明らかにすることを目的としており、実際に発生する津波の高さを想定したものではない。

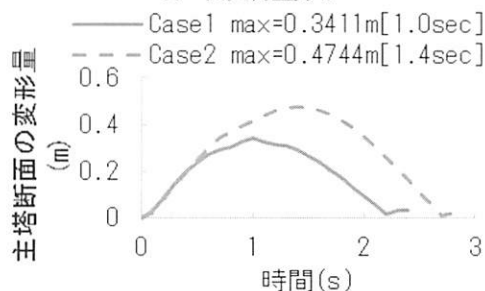
b) 解析結果の比較

図-4は、Case1とCase2の衝突荷重分布と船舶が衝突した位置の主塔のウェブの変形量を比較したものである。図-4(a)よりCase1とCase2の最大衝突力は、それぞれ14920kNと12719kNとなっている。主塔に与えられる最大衝突力は、Case2よりCase1の衝突力が2201kNほど大きい。この原因を調べるため、ここでは主塔断面の変形量に注目したが、図-4(b)よりCase2の主塔断面がCase1の主塔断面よりも大きく変形していることがわかる。ここから、船舶が主塔の基部付近で衝突する場合は基部下の全自由度を固定していることから、基部より離れた箇所での衝突した場合に比べ、主塔断面が変形しにくいことが考えられる。それにより、主塔基部付近の衝突では、船舶からの衝突エネルギーが主塔断面の変形に変換されにくい状態になることから、主塔に与えられる衝突力が大きくなったと考えられる。

一方、図-5にCase2とCase3の衝突荷重分布と船舶が衝突した位置の主塔のウェブの変形量の比較を示す。図-5(a)より、Case2とCase3の最大衝突力は、それぞれ12719kNと

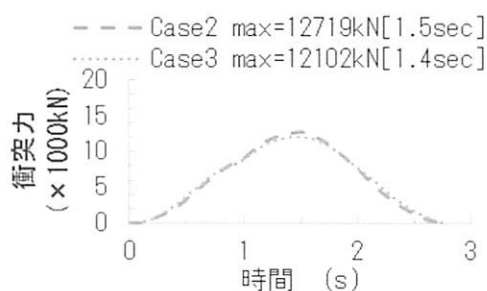


(a) 衝突荷重分布

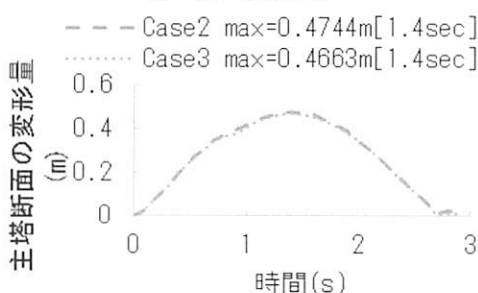


(b) 船舶が衝突した位置のウェブの変形量

図-4 Case1とCase2の比較



(a) 衝突荷重分布



(b) 船舶が衝突した位置のウェブの変形量

図-5 Case2とCase3の比較

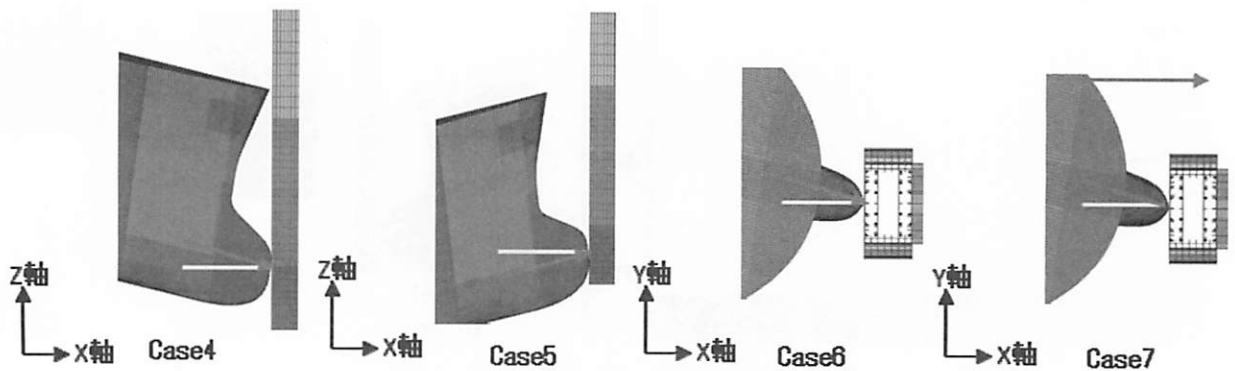


図-6 船舶の衝突方向を変化させたモデル

12102kNであり、両ケースとも近い値であることがわかる。また、Case2とCase3の主塔断面の変形量の比較においてもほぼ同じ変形量を示している。このことから、主塔断面の剛性が衝突荷重分布に与える影響は小さいと考えられる。

以上の検討から、衝突する位置の主塔の断面変化よりも衝突時の主塔の変形状態が衝突荷重分布に与える影響が大きいことがわかる。主塔に与えられる衝突力を考える際は、主塔部の変形を適切に考慮する必要がある。

(2) 船舶の衝突する方向の違いによる検討

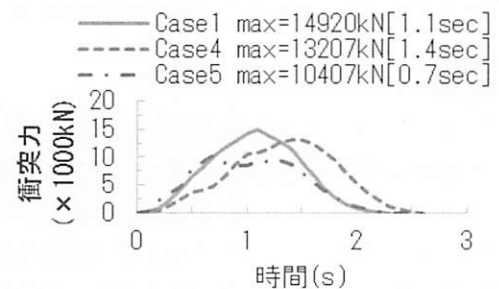
津波によって漂流する船舶は、橋梁構造物に対して様々な方向から衝突する可能性がある。このため、橋梁構造物の耐津波設計に際しては、船舶の様々な衝突方向を想定し、橋梁構造物に対して最も不利となる衝突力を求める必要があると考えられる。本節では、船舶の衝突する方向が異なるケースに対して解析を実施し、津波により流される船舶が主塔に衝突する際、主塔に対して衝突する方向の違いが衝突荷重分布に与える影響について検討を行った。

a) 検討ケース

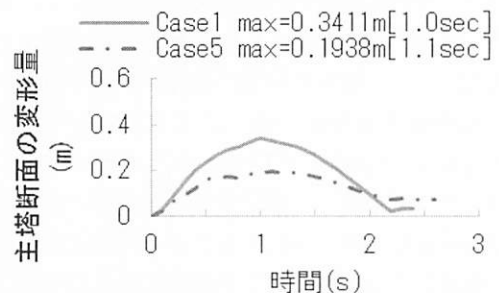
本検討では、Case1を含め、5つのケースの衝突解析を行った。図-6に各検討ケースのモデルを示す。

まず、Case4とCase5については、Y軸方向から解析モデルを示しており、Case4は、主塔に対して船舶をZ軸方向に船尾を10度上に傾けた状態にしてその方向から衝突するモデル、Case5は、主塔に対して船舶をZ軸方向に船尾を10度下に傾けた状態にしてその方向から衝突するモデルである。Case1とこの2つのケースを比較することにより、船舶が上下に傾いた時の主塔に与える衝突力について検討する。

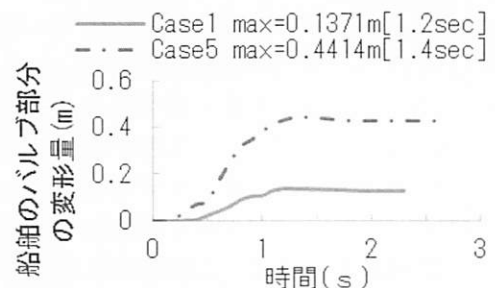
Case6とCase7については、Z軸方向から解析モデルを示しており、Case6は、主塔に対して船舶をY軸方向に10度傾けた状態にしてその方向に衝突させるモデル、また、Case7は、Case6と同様に主塔に対して船舶をY軸方



(a) 衝突荷重分布



(b) 船舶が衝突した位置のウェブの変形量



(c) 船舶のバルブ部分の変形量

図-7 Case1, Case4, Case5の比較

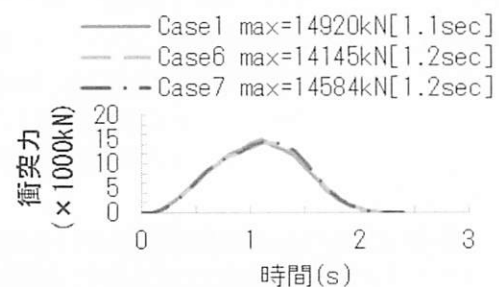


図-8 Case1, Case6, Case7の比較

向に10度傾けた状態にするが、X軸方向に衝突させるモデルである。Case1とこの2つのケースを比較することにより、船舶が水平に傾いたときの主塔に与える衝突力について検討する。

b) 解析結果の比較

図-7は、Case1, Case4, Case5の衝突荷重分布、またCase1とCase5において船舶が衝突した位置のウェブの変形量と衝突による船舶のバルブ部分の変形量を比較したものである。図-7(a)よりCase1, Case4, Case5の最大衝突力は、それぞれ14920kN, 13207kN, 10407kNとなっており、主塔にかかる最大衝突力はCase1が最も大きいことがわかる。また、図-7(b)より、主塔断面の最大変形量もCase1が最も大きくなっていることがわかる。前節で行った船舶の衝突位置の違いによる検討と異なり、主塔断面の変形量が大きいのにに対して衝突力が大きくなっている。この原因を調べるため、船舶のバルブ部分の変形量を調査したが、図-7(c)に示すように船舶のバルブ部分の変形量がCase1で最も小さいことがわかる。このことから、船舶が主塔柱部に対して上下方向に傾いた状態で衝突した場合は、主塔柱部は変形しにくく、船舶のバルブ部分にかかる力が大きくなることが伺える。したがって、船舶が主塔に衝突した際の衝突エネルギーは、主塔断面の変形だけでなく、船舶のバルブ部分の変形にも変換されることになり、X軸方向に衝突したときに比べ、主塔に作用する衝突力が小さくなったと考えられる。

図-8は、Case1, Case6, Case7の衝突荷重分布を示したものである。図-8より、衝突力は3つのケースとも近い値になっており、船舶を主塔に対して水平方向に傾けて衝突させた場合は、船舶の傾きが衝突力に与える影響は小さいと考えられる。

以上の検討から、衝突方向を主塔に対して上下に傾いた状態で船舶が衝突した場合の衝突力は、船舶が主塔に対して傾かない状態で衝突した場合に比べて小さくなる可能性があることがわかった。また、主塔に与えられる衝突力を考える際は、主塔の変形だけでなく、衝突する船舶の変形も考慮していく必要があると考えられる。

4. 正規分布より求められる衝突荷重分布の推定式と解析値との比較

既往の研究^{2), 3)}では、大型船舶の衝突によって生じる力を力波形として橋梁に与える際、初等物理法則に基づいた正規分布に近似させた衝突荷重分布の式に基づいて設定している。本検討では、既往の研究で用いられた推定式に前節で得られた解析結果を代入することによって推定値を求め、この推定値と本FEM解析で得られた解析

値を比較した。

(1) 衝突荷重分布の推定式

本検討で用いた衝突荷重分布の推定式は、船舶は主塔に衝突した後に停止すると仮定し、その時に失う運動量が正規分布に従った衝突荷重分布に変わると考えたものである。衝突荷重分布を時間 t の関数として式(1)に表す。

$$F(t) = \frac{mv}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$F(t)$ は衝突荷重分布、 m は船舶質量、 v は衝突速度、 σ は標準偏差、 t は時刻、 μ は平均値(衝突時間の半分)である。衝突時間は衝突荷重分布が正規分布に従うことを仮定するため、 6σ に等しいものとした。

ここでは、前章の解析検討において、最大衝突力が最大となるCase1の解析値と推定値を比較することとし、Case1の衝突時間2.3秒を推定式の中に代入している。

(2) 解析値と推定値の比較

図-9にCase1での船舶と主塔の衝突時の様子を、図-10に衝突荷重分布の解析値と正規分布より求められた推定値の比較を、図-11にCase1の船舶速度の波形を示す。図-10より、解析値の最大衝突力は14920kN、推定値の最大衝突力は9477kNとなっており、解析値が5443kNほど大きい。これは、衝突後の船舶が跳ね返ることが一原因として考えられるが、図-9をみると衝突した船舶が衝突後に主塔によって跳ね返されていることがわかる。この原因を確かめるため、船舶が主塔によって与えられた運動量とグラフから読み取った力積を比較してみた。まず、船舶が主塔に跳ね返されることによって与えられた運動量 mv は、船舶質量15000tと図-11から船舶の主塔によって跳ね返された速度である0.38m/sを代入することで5700kN・sを求めることができる。また、図-10のグラフの面積は力積を示しており、解析値のグラフの面積から推定値のグラフの面積を引くと、解析値と推定値の力積の差は5842kN・sである。これより、与えられた運動量と力積を比較すると近い値を示していることがわかる。このことから、解析値が推定値より大きな値を示す理由は、船舶が主塔に跳ね返されることで運動量が増加し、その分が解析値の衝突荷重分布に加わっていることと考えられる。

以上の検討より、船舶が衝突後に跳ね返ることまで考慮すると、衝突荷重はこれまで推定されていた衝突荷重より高く評価されることがわかった。

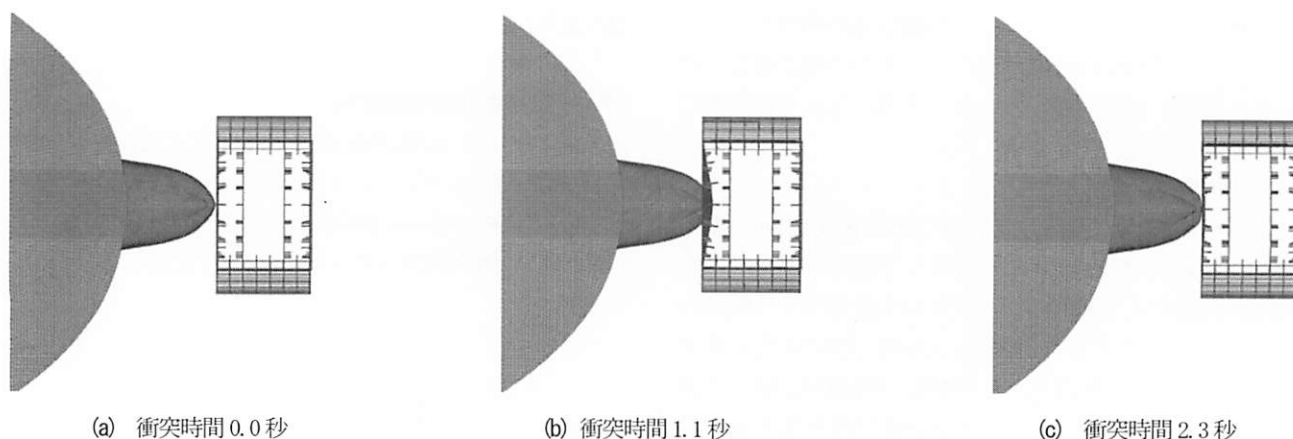


図-9 船舶と主塔の衝突時の様子(Case1)

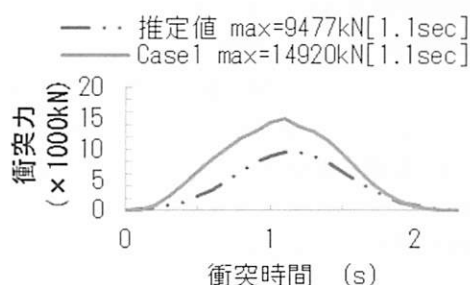


図-10 推定値と解析値の比較

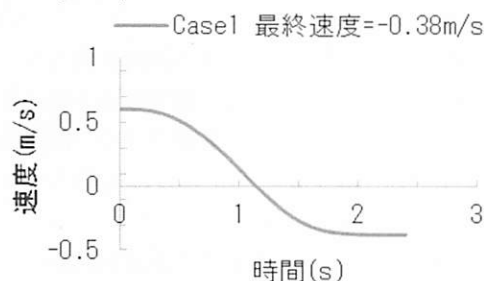


図-11 船舶速度 (Case1)

5. まとめ

本研究では、津波により漂流する大型船舶が長大斜張橋の主塔に衝突することを想定し、FEM解析により、衝突位置や衝突方向の違いによる衝突荷重分布の変化、またこれまでの研究で推定されていた衝突荷重との比較について検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

主塔に与える衝突力は、衝突位置に関しては主塔基部付近で衝突した場合、船舶の衝突エネルギーが主塔断面の変形に変換しにくくなるため、大きくなる傾向にある。また、衝突方向に関しては上下方向に傾いている場合は、船舶の衝突エネルギーが主塔だけではなく、船舶にも多くエネルギーが伝わるため、衝突力は小さくなる可能性があることがわかった。

また、本解析では、船舶が衝突後に跳ね返ることまで考慮しているため、船舶に増加した運動量だけ衝突荷重分布が増加することが確認された。これより、解析により得られた衝突力は、船舶は衝突後完全に停止するという条件の下で求められた推定値より高く評価された。本研究では、船舶と橋梁モデルの一部を用いて行った基礎的な検討であり、今後、様々な衝突条件に対して解析を行い、衝突荷重分布の評価手法についてさらに検討を進めていく予定である。

謝辞：船舶のモデル化に際しては、九州大学大学院の吉川孝男教授ならびに川崎重工業（株）の孝岡祐吉様にご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：南海トラフ巨大地震対策協議会ホームページ、
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1_1.pdf
- 2) 馬越一也、葛漢彬、野中哲也、原田隆典、村上啓介：津波襲来時における大型漂流物の長大橋衝突シミュレーション 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.68, No.2, I_222-I_227, 2012.
- 3) 八ツ元仁、鈴木威、田崎賢治：南海トラフ地震により漂流した大型船舶と斜張橋の衝突に関する基礎的検討 土木学会 第34回地震工学研究発表会講演論文集, 2014.
- 4) 富士通株式会社：LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I Version971, 2007.
- 5) 気象庁：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査報告 第2章津波
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/CHAPTER2.pdf>
- 6) 松富英夫：氾濫に伴う漂流物の衝突力確率に関する試験 土木学会東北支部技術研究発表会, 2008.