

南海トラフ地震による漂流船舶が 長大橋に及ぼす影響について

八ツ元仁¹・飛ヶ谷明人¹・加賀山泰一²・田崎賢治³・具志一也³・奈良崎泰弘³

¹正会員 阪神高速道路株式会社 技術部技術開発課（〒160-0004 大阪市中央区久太郎町4）
²正会員 同上 技術部技術企画課（ 同上 ）
³正会員 大日本コンサルタント株式会社 復興・防災推進部地震・津波防災技術室
（〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19）

1. はじめに

近い将来、南海トラフ地震が高い確率で発生することが予想されており、このような大規模地震に対する減災対策の必要性が高まってきている。東北地方太平洋沖地震による被災経験からわかるように、大規模プレート型地震による被害としては、地震の揺れによる被害だけでなく、地震後に発生する津波による被害も考えておかなければならない。

津波による構造物の被害を想定する場合、波力などの津波そのものによる外力だけでなく、東北地方太平洋沖地震における釜石等での事例のように、津波により漂流した物体の衝突外力を考える必要がある。阪神高速橋梁が数多く架橋されている大阪湾には国内有数の大きな港が存在しており、大型の貨物船や旅客船は日々湾内を航行している。このような状況を考えると、南海トラフ地震が発生した後に、これら大型船舶が漂流することやその漂流した船舶が阪神高速橋梁に衝突することも否定することはできない。

津波により漂流する船舶の挙動については、近年、橋本ら¹⁾や小林ら²⁾が研究を行ってきており、その挙動が解明され始めている。しかし、津波を伴うような大規模プレート型地震の発生が稀であることやそのような大地震が発生しても震災後の津波発生後の漂流船舶に関する詳細な記録がほとんど存在していないことから、津波により漂流する船舶の挙動については不明な点が存在している。また、津波の挙動が地形や海底面の形状といった地理的な固有の条件に大きく左右されることから、南海トラフ地震発生後における大阪湾内での船舶漂流挙動については

さらに不明な点が多い。

一方、2012年に馬越ら³⁾や谷口ら⁴⁾が南海トラフ地震発生後の大阪湾内での漂流船舶の挙動に関する研究成果を発表しており、大阪湾での津波被害の可能性について言及している。特に、文献4)では、南海トラフ地震発生後に漂流する大型船舶が、操縦不能状態という限られた条件下での解析結果ではあるものの、阪神高速橋梁に衝突する可能性があることが述べられている。現状ではこのような研究は少なく知見も蓄積されてはいないものの、南海トラフ地震発生後の津波による被災の可能性については言及され始めている。

そこで、従来より減災対策に関する検討を取り組んできている阪神高速においては、最大級の被災シナリオとして漂流した大型船舶の橋梁への衝突を仮定し、大型船舶の衝突が阪神高速橋梁に与える影響について数値解析による検証を実施した。本稿では、この検討結果についての報告を行う。

2. 検討の概要

既往の研究の中でも述べられているように、船舶の漂流挙動は津波のそのものの挙動に大きく左右されることから、本検討ではまず初めに、南海トラフ地震発生後に生じる津波の挙動を津波伝播解析により求めた。次に、津波伝播解析により得られた津波の速度、波高および流向を用いることで船舶一橋梁の衝突解析を実施し、漂流船舶が阪神高速橋梁に与える影響について検証を行った。図-1に本検討フローを示す。

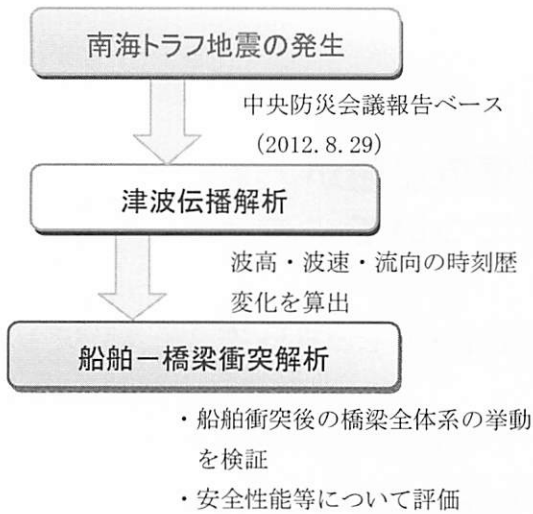


図-1 検討フロー

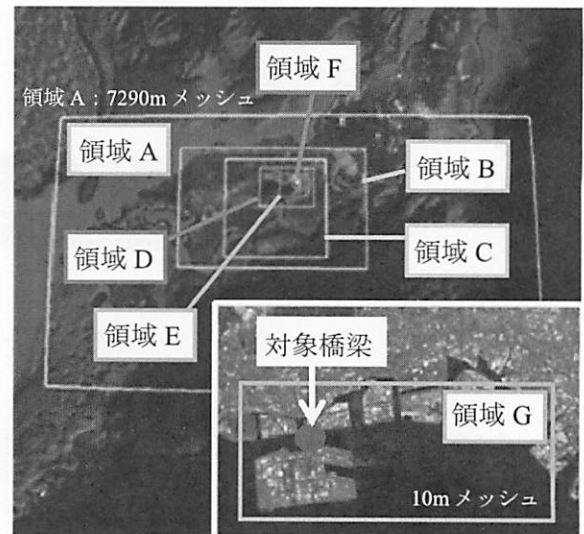


図-2 解析領域 (7段階メッシュ構成)

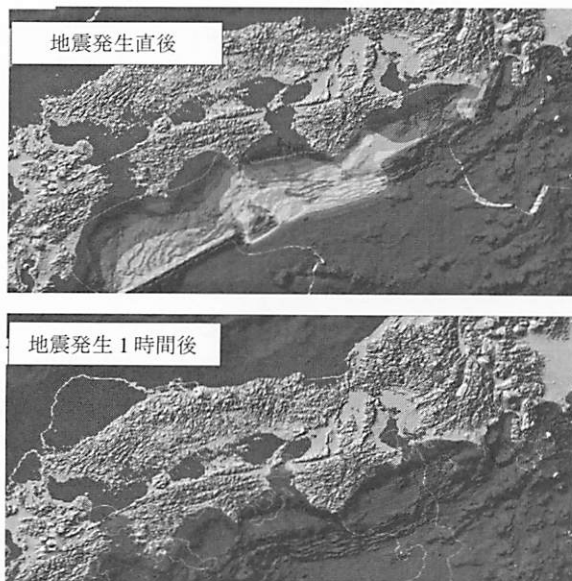


図-3 水位コンター図

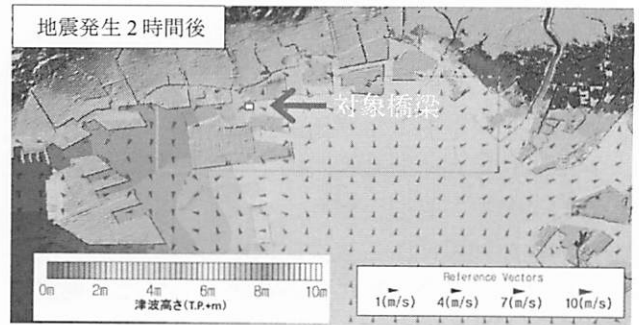


図-4 水位コンター図 (神戸港東エリア)

3. 津波伝播解析

(1) 解析概要

津波伝播解析については、平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き⁵⁾に従い数値解析を行った。本検討では、「第15回南海トラフの巨大地震モデル検討会」⁶⁾にて報告（以下、中央防災会議報告と呼ぶ）された震源断層モデルを用いることとした。解析領域の設定は解析対象領域である大阪湾を中心として、図-2に示すような最小計算格子幅は10mと設定した多層メッシュ構成（7段階）とした。津波伝播解析については、Mansinha and Smylieの方法⁷⁾による海底地盤変動を考慮して、2次元浅水モデル

を用いた非線形長波理論により行った。なお、本検討では安全側の評価を行うため、大阪湾での望望平均満潮位（TP+0.85m）を考慮した計算を行った。

(2) 解析結果

図-3に南海トラフ地震発生直後の水位コンター図を示す。津波の第一波は、地震発生1時間後に紀淡海峡あたりに到達し、地震発生2時間後には神戸港に到達する結果となった。この結果については、中央防災会議報告の結果とほぼ同じものとなった。また、図-4には、後述する船舶—橋梁衝突解析の対象橋梁が位置する神戸港東エリアの水位コンター図を示す。図-5には、対象橋梁地点における波高・流速・流向の時刻歴変化図を示す。図に示すように、対象橋梁地点では地震発生後135分において最大波高がTP+3.0mとなり、また地震発生後128分において最大流速が1.4m/sとなった。最大波高時および最大流速時においてはともに流向が268°とほぼ真西に流れる結果となった。また、本解析では地震発生後における地盤沈下量も求めており、神戸港東エリアでの地盤沈下量は0.6mとなった。このため、対象橋

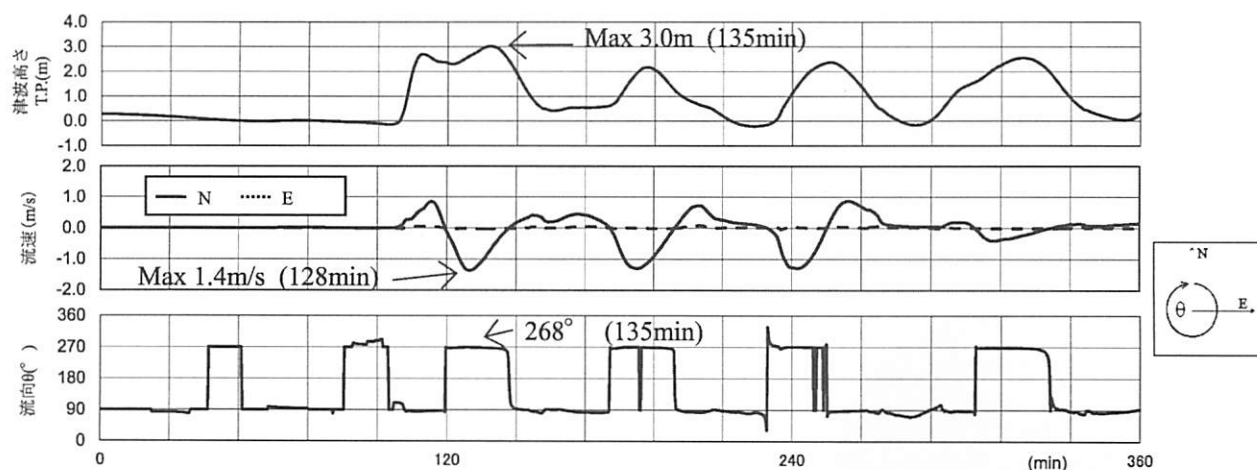


図-5 対象橋梁地点における波高・波速・流向の時刻歴変化

脚地点での最大波高は地盤沈下量を加味することで、 $TP+3.6m$ とした。

この結果、船舶－橋梁衝突解析で用いる船舶の衝突速度は $1.4m/s$ 、船舶の衝突高さは $TP+3.6m$ となった。また、船舶が衝突する向きは外力を安全側に評価することを目的に、橋軸直角方向にあたる真西方向 (270°) とした。



図-6 対象橋梁の位置

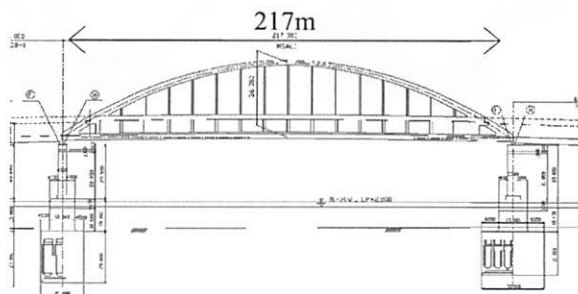
4. 船舶－橋梁衝突解析

(1) 解析概要

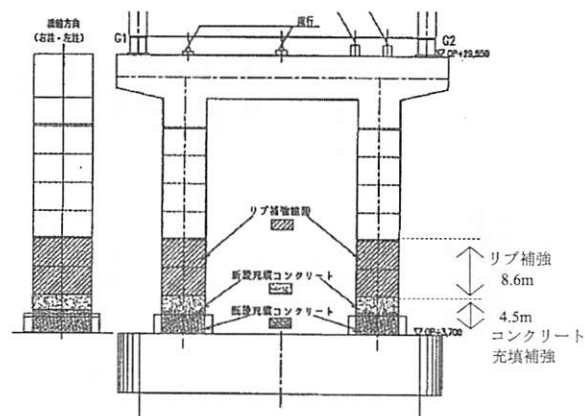
船舶－橋梁衝突解析では、船舶が衝突する可能性の高い橋梁を解析対象として選定し、その対象橋梁の近傍に存在する最大級規模の船舶が衝突することを想定した。なお、本検討では、漂流時の船舶は操縦不能状態に陥っており、津波により完全に流されている状態と仮定した。また、船舶の対象橋梁への衝突については、3. で求めた津波の最大波高と対象橋脚の上部構造の位置関係から、上部構造に対して船舶の衝突は起こらないと判断した。そのため、後述する船舶－橋梁衝突解析では、下部構造である橋脚に船舶が衝突するものとした。

(2) 対象橋梁

大阪湾内で大型船舶が頻繁に出入りする港は、神戸港および大阪港の2港が挙げられる。本検討では、これら2港周辺部を南海トラフ地震発生後において大型船舶の存在確率が高いエリアと考え、このエリアの中から対象橋梁を選定した。選定の結果、図-6 に示す神戸港東エリアに架橋された下路アーチ橋を対象橋梁とした(図-7)。なお、この対象橋梁は橋長約 $220m$ のニールセン形式のアーチ橋であり、下



(a) 橋梁一般図



(b) 下部構造図

図-7 対象橋梁の構造概要

部構造は鋼製ラーメン橋脚である。

(3) 衝突船舶

対象橋梁の周辺海域での船舶の航行、停泊等の船舶動態については、AIS（船舶自動識別装置）デー

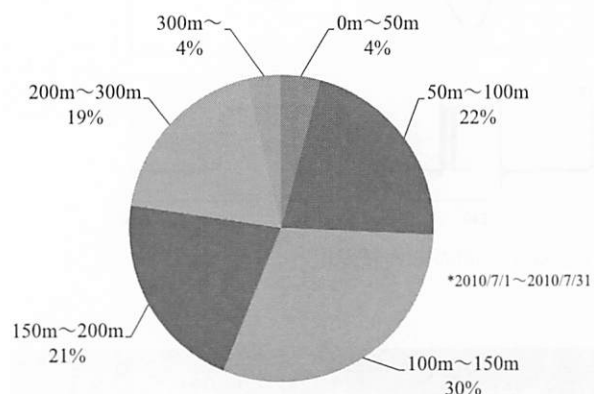


図-8 船舶の大きさの割合（神戸港東エリア）

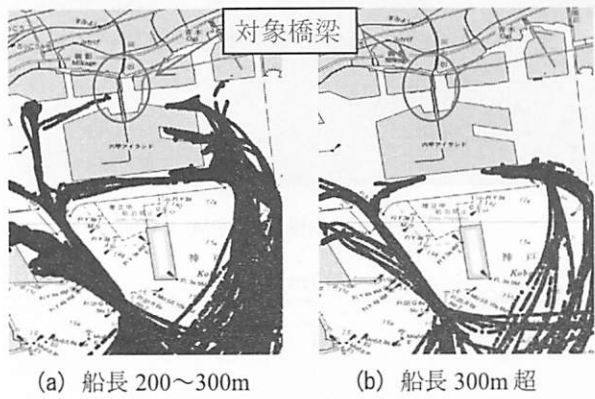


図-9 船舶の航行軌跡（対象橋梁近傍）

タを分析することで整理を行った。図-8に神戸港東エリアにおける船舶の大きさの割合について示す。このエリアでは、船長が100m～200mのものが約半数を占めており、300mを超えるような超大型の船舶は約4%存在している。一方、図-9には船長クラス毎の航行軌跡図を示す。この図より、船長が300mを超える船舶は対象橋梁近傍を航行していないことがわかる。これは、300mを超える船舶が水深などの影響から対象橋梁周辺部の航路を使用していないためだと考えられる。これらの結果を総合的に判断して、対象橋梁近傍に存在する最大級規模の船舶は船長300mクラスであるとした。

次に、本解析で想定する衝突船舶の構造諸元を図-10に示す。これら船舶の構造諸元については、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁸⁾に記載される構

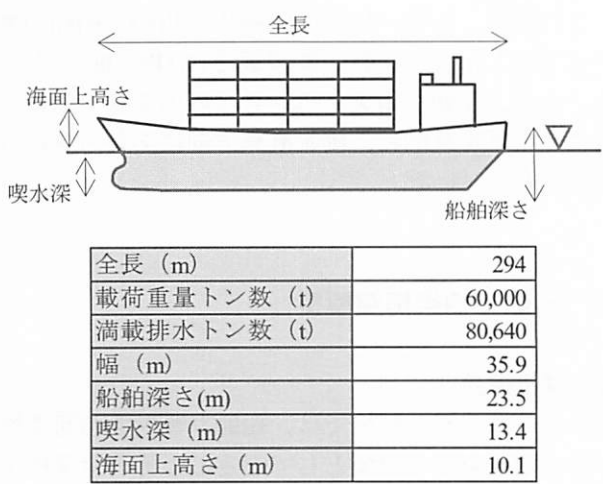


図-10 衝突船舶の構造諸元

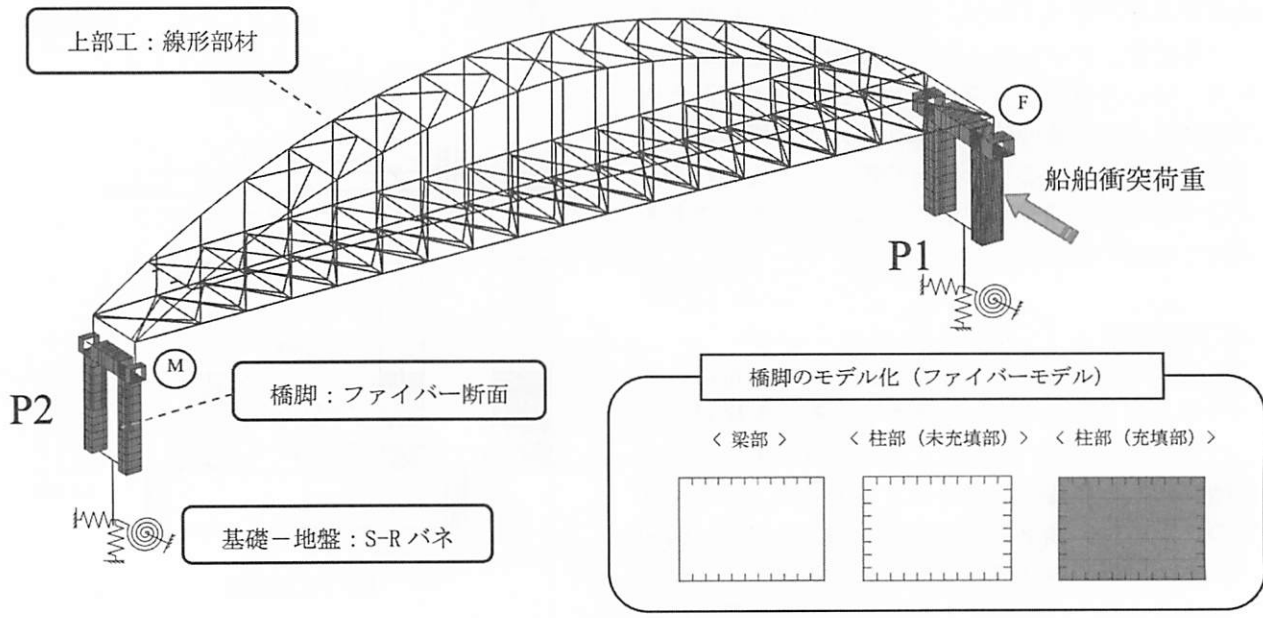


図-11 対象橋梁の解析モデル

造諸元の中で、船長300mに最も近い294mのコンテナ船の値を用いることとした。後述する船舶-橋梁衝突解析で用いる船舶質量は、満載排水トン数(80,640トン)とした。

(4) 解析モデル

船舶衝突後の橋梁全体系の時刻歴応答を算出するために、動的弾塑性有限変位解析（解析コード:ScanFEM ver.1.2.2）を実施した。解析モデルを図-11に示す。本検討では、船舶との衝突により大きな変形が生じると予想される橋脚部については、ファイバーモデルを用いることで非線形挙動を評価した。橋脚のモデル化においては、コンクリート充

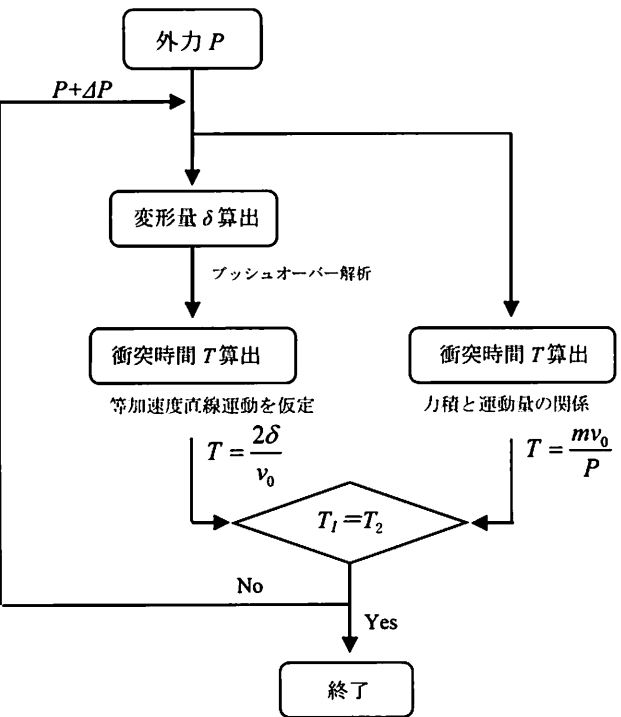


図-12 衝突時間算出フロー

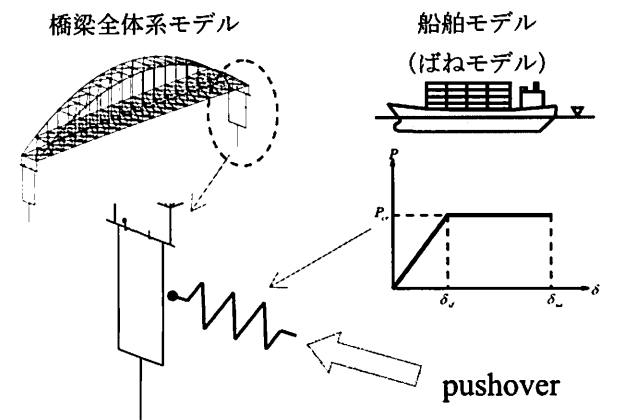


図-13 プッシュオーバー解析の概要

填部と未充填部のモデル化を変えることで、コンクリートによる充填の効果を考慮した。なお、本解析ではファイバーモデルによる解析を行っているため、局部座屈現象の評価は行えない。このため、衝突部位など変形が大きくなる箇所での変形挙動を完全に再現することは難しいものと考えている。その他の部材のモデル化では、上部構造に線形はりモデル、支承部に線形ばねモデル、基礎部にS-Rモデルを用いた。また、減衰については、衝突時における粘性減衰の設定法が確立されていないため、履歴減衰のみの考慮とした。

船舶の衝突外力は後述する(5)で求めた外力波形を、船舶との衝突位置となる橋脚のTP+13.7mの位置に与えた。船舶と橋脚の衝突位置は船舶の船首部分の舳先と想定し、3. で求めた最大波高TP+3.6mに船舶の海面上高さ10.1mを加えることで衝突位置をTP+13.7mとした。なお、TP+13.7mの位置は橋脚基部から11.3mの高さにあたる。

(5) 衝突力の算出

船舶の衝突力については、文献3)で用いられている手法と同様に、船舶は橋梁に衝突した後に完全に停止すると仮定し、その時に失った運動量が正規分布に従った時刻歴の力波形に変換すると考えた。その時の外力波形を時間*t*の関数として表すと式(1)のようになる。

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

ここで、*F(t)*は外力波形、*m*は船舶の質量、*v*は3. 津波伝播解析で求めた衝突時における船舶速度、*σ*は標準偏差、*t*は時刻、*μ*は平均値(*T*:衝突時間の半分)とする。なお、外力波形*F(t)*が正規分布に従うことを仮定しているため、衝突時間*T*は6*σ*に等しいとした。この外力*F(t)*は、衝突時間*T*に大きく依存することから、図-12に示すフローに従い衝突時間*T*を求

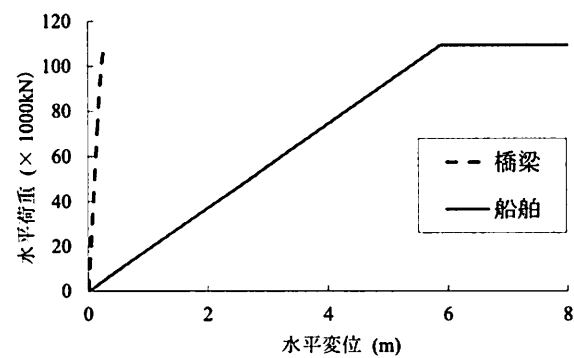


図-14 プッシュオーバー解析の結果

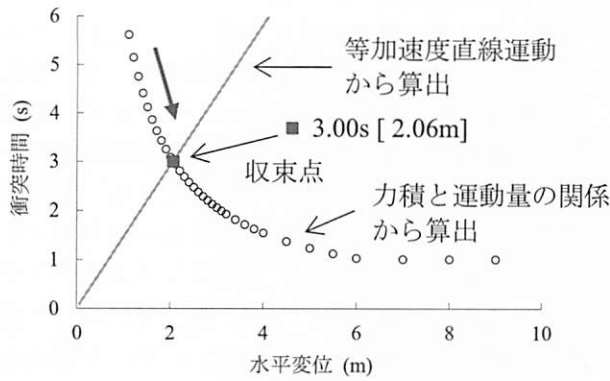


図-15 水平変位と衝突時間の関係

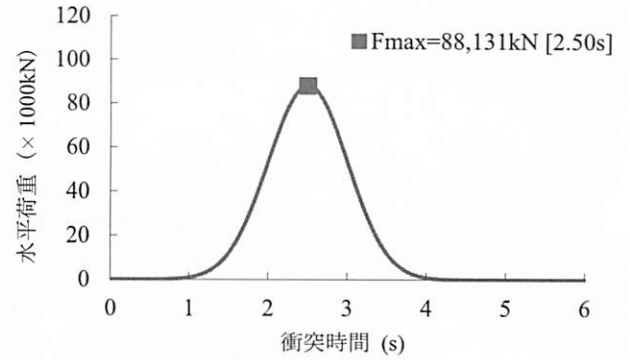


図-16 外力波形

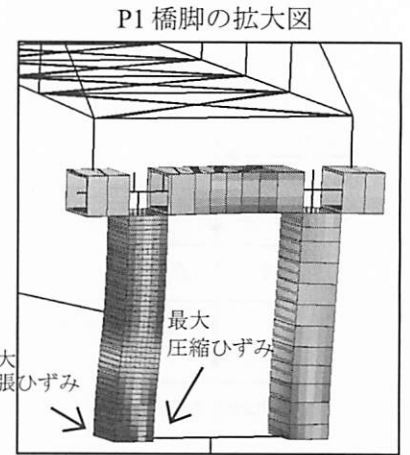
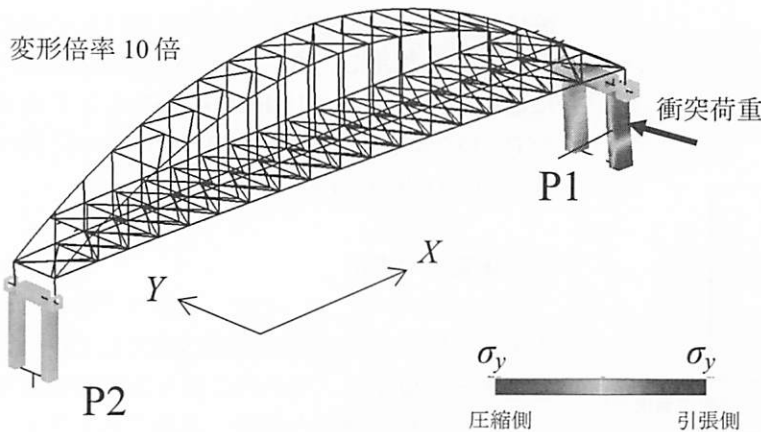


図-17 最大ひずみ発生時の変形図とひずみコンター図

めることとした。

まず初めに、外力 P を与えた場合の水平変位 δ を求める。 δ の算出では、船舶の衝突後では橋梁と船舶がともに変形すると仮定し、図-13に示すプッシュオーバー解析を行った。プッシュオーバー解析では、橋梁は(4)で述べた橋梁全体系のモデルを、船舶は船首部の変形を考慮したばねモデルを用いることで、船舶と橋梁が連鎖的に変形する挙動を求めた。船舶の剛性にあたるバネ値は、清宮らの研究⁹⁾で提案されているバイリニア型の式(2)を用いて算出した。

$$K_s = \frac{P_{cr}}{\delta_{sf}} = \frac{P_{cr}}{0.25D} \quad (0 \leq \delta_s \leq \delta_{sf}) \quad (2a)$$

$$K_s = 0 \quad (\delta_{sf} \leq \delta_s \leq \delta_{sa}) \quad (2b)$$

ここで、 P_{cr} は船首強度、 D は船の深さ、 δ_{sf} 船首部傾斜部の長さ、 δ_{sa} は船首部の許容変位量とする。図-14にプッシュオーバー解析の結果を示す。橋脚の剛性が船舶の剛性に比べて非常に大きいため、船舶の変形量に比べて橋梁の変形量が小さい結果とな

った。衝突時の変形量は、船舶と橋梁の変形量の合計値を用いた。

次に、衝突時の変形は等加速度直線運動を行うと仮定し、式(3)により衝突時間 T を求めた。

$$T = \frac{2\delta}{v_0} \quad (3)$$

ここで、 δ は上述のプッシュオーバー解析で求めた水平変位、 v_0 は衝突時の初速度とする。なお、初速度 v_0 は3. で求めた対象橋梁地点における最大速度1.4m/sとした。

一方、衝突時間 T は力積と運動量の関係からも求めることができるため、式(4)により衝突時間 T を算出した。

$$P \cdot T = mv_0 \quad (4)$$

ここで、 P は外力、 m は船舶の質量とする。

式(3)、式(4)それぞれで求めた衝突時間 T が一致した場合、衝突現象を適切に評価できているものと考え、繰返し計算(収束計算)を行った。図-15に示すような収束計算の結果、衝突時間は3秒

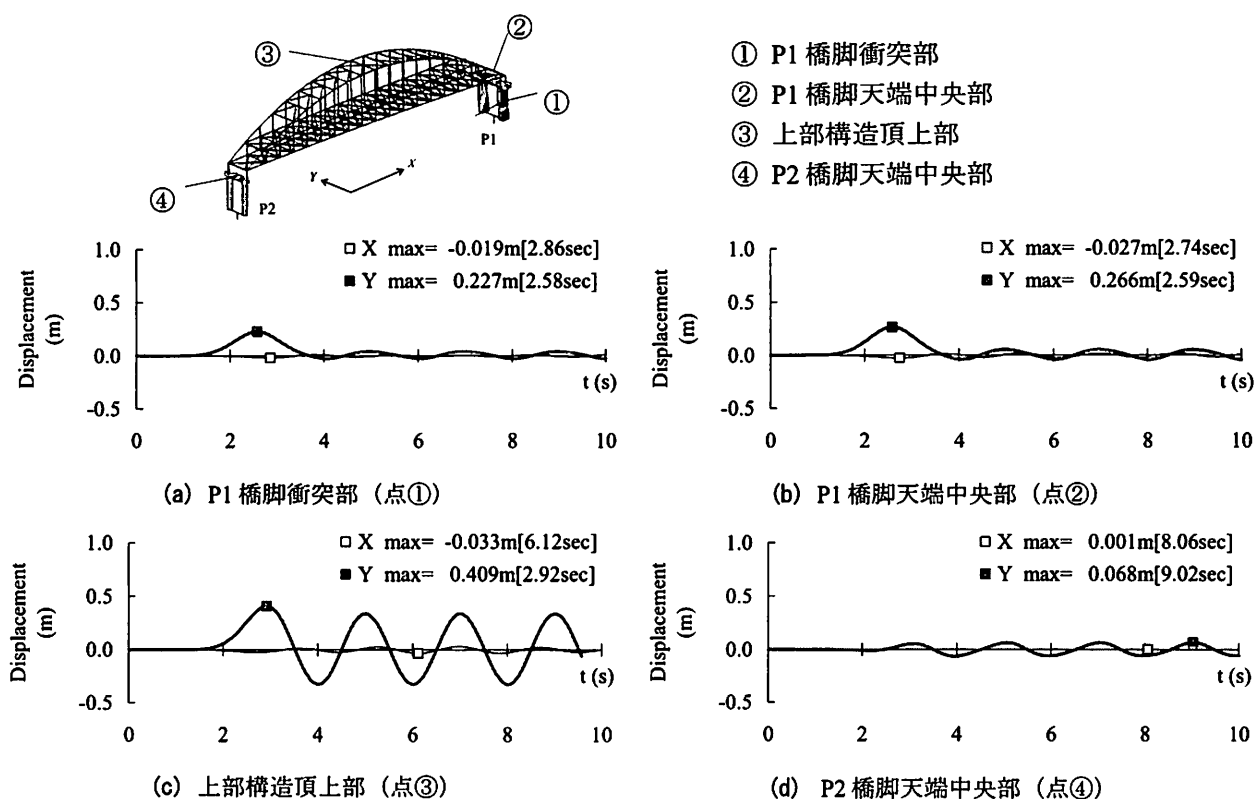


図-18 主要部における変位の時刻歴応答図

($\delta=2.1\text{m}$) となった。

最後に、上記検討で求めた衝突時間 T を式(1)に代入することで、図-16に示す外力波形 $F(t)$ を求めた。なお、この外力波形は、衝突開始時および衝突終了時に1秒間ずつゼロ値を付けることで波形の全体時間を5秒間としている。

(6) 衝突解析結果

動的弾塑性有限変位解析による衝突解析結果を次に示す。図-17に最大ひずみ発生時における変形図と橋脚部でのひずみコンター図を、図-18に主要部における変位の時刻歴応答を、図-19に衝突橋脚にあたるP1橋脚における高さ方向の最大ひずみ分布を示す。

時刻歴の応答変位が示すように、いずれの箇所においても船舶の衝突方向である橋軸直角方向の応答が大きく、船舶が衝突するP1橋脚の天端部での最大変位は0.27m (2.6秒)となった。衝突が起らないP2橋脚の天端部での応答変位は最大で0.07m (9.0秒)とP1橋脚に比べて小さな値となった。上部構造の最上部にあたるアーチ頂部における応答変位は橋梁全体の中で最も値が大きく、最大で0.41m (2.9秒)となった。

橋脚の高さ方向における最大ひずみ分布に示すように、橋脚基部において最大となり約8300 μ

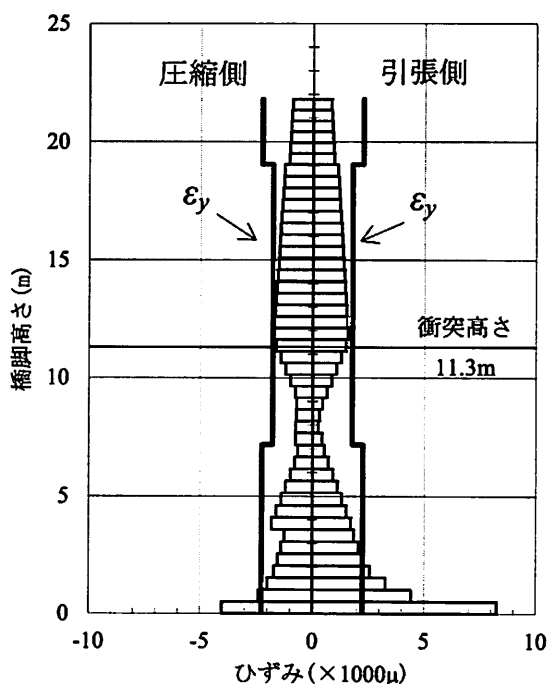


図-19 高さ方向の最大ひずみ分布図 (P1 橋脚)

($=3.7\epsilon_y$) の引張ひずみ、約4000 μ ($=1.8\epsilon_y$) の圧縮ひずみが発生し塑性化が生じた。船舶の衝突位置にあたる基部から高さ11.3mの位置での発生ひずみは、弾性範囲内となり塑性化が生じなかった。塑性化が生じる橋脚基部については、ひずみレベルが圧縮側

で $1.8\epsilon_p$ という大きさであることを考えると、損傷の程度はそれ程大きくなく破壊状態に至るような損傷が生じないことがわかった。

6. おわりに

本検討では、南海トラフ地震発生後に生じる津波により最大級規模の大型船舶が漂流すると仮定するとともに、その漂流船舶が神戸港東エリアに位置する阪神高速橋梁に衝突した場合のその影響について数値解析による検証を行った。津波伝播解析により漂流船舶の衝突速度と衝突位置を明らかにするとともに、船舶－橋梁衝突解析により船舶衝突後における橋梁の応答を検証した。これら検討の結果、船舶が衝突する橋脚の基部において大きな損傷が生じるが、破壊状態に至るような甚大な損傷ではないことを確認することができた。

本検討における衝突解析では、衝突力の設定をある仮定の基で行ったが、衝突力の評価が解析結果に与える影響が大きいことを考えると、衝突力の評価方法の確立や妥当性の検証は重要である。これらの点については、今後の課題としたい。

7. 謝辞：本検討では、神戸大学大学院海事科学研究科小林英一教授ならびに谷口裕樹研究員には、AISデータの分析やその結果の取りまとめに関して貴重なご意見と多大な協力を賜った。ここに、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本貴之，越村俊一，小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析-インドネシア・バンダアチェにおける事例-，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，2005，pp.316-320.
- 2) 小林英一，越村俊一，久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究，関西造船協会論文集，Vol.243，2005，pp.49-56.
- 3) 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.
- 4) 谷口祐樹，小林英一，小林寛，越村俊一：津波による漂流船舶の挙動解析～大 阪湾沿岸部橋梁への適用事例～，日本船舶海洋工学会講演会論文集第15号，pp.103-104，2012.
- 5) 平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の対策のための津波浸水シミュレーションの手引き，国土交通省水管理・国土保全局海岸室，国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室
- 6) 中央防災会議，内閣府防災情報，南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），2012年8月29日
- 7) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
- 8) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 9) 清宮理，宮城敏明，石川雅美，門倉博之：船舶と橋梁の杭式緩衝工との衝突解析，土木学会論文集，No.540/VI-31，49-57，1996.6.