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

八ツ元 仁1・鈴木 威1・田崎 賢治2

¹正会員 阪神高速道路株式会社技術部技術開発課(〒541-0056大阪市中央区久太郎町4-1-3) E-mail:hitoshi-yatsumoto@hanshin-exp.co.jp

E-mail:takeshi-suzuki@hanshin-exp.co.jp

²正会員 大日本コンサルタント株式会社復興防災推進部 (〒541-0058大阪市中央区南久宝町3-1-8) E-mail: tasaki@ne-con.co.jp

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 に対しても想定しておかなければならない.

本検討では、南海トラフ地震発生後に生じる津波による被害の一つである漂流船舶と橋梁の衝突に関す る検討を行うこととし、船舶と橋梁の衝突解析を行った.検討の中では、評価することが難しいとされて きた衝突現象を橋梁分野において広く一般的に用いられる骨組み解析により算定することで、船舶の衝突 が橋梁に与える影響について定量的な評価を行った.本稿では、この検討結果について報告を行う.

Key Words : Nankai Trough quake, drifting ship, long-span bridge, collision

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 が予測されている.大規模プレート型地震に分類される 南海トラフ地震は,2011年の東北地方太平洋沖地震の 被害状況からわかるように津波による被害が大きく なることが予想される.このため,従来の地震の揺 れに対する対策だけでなく,津波による被害に対す る防災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の被災事例が示すように, 津波による被害は津波の波力によるものだけでなく 漂流物の衝突による被害も生じることが予想される. 南海トラフ地震が発生した場合に大きな被害が生じ ると予想される大阪湾内には,大阪港,神戸港など の国内でも有数の大きな港があり,大型の貨物船, 旅客船などが日々往来している.このため,地震発生後 においては,これら大型船舶が大阪湾内を漂流する可能 性もあり得るものと考えられる.

津波による漂流船舶の挙動に関する研究については, 2004 年のスマトラ島沖地震以降増えてきており、その 研究成果¹⁻⁵も公表されてきている.谷口らの研究では, 津波で漂流する船舶の挙動に焦点を当てた検討が行われ ており、南海トラフ地震後に大阪湾内で航行していた大型船舶が、船舶が阪神高速湾岸線の橋梁に衝突する可能性があることが示されている⁴. この結果は、漂流船舶が操縦不能状態を前提とした極めて限定的な条件下での計算結果ではあるものの、防災計画を考える上では非常に重要な知見が示されていると考えられる.

一方で、馬越らの研究では、漂流船舶と長大橋の衝突 現象そのものに焦点を当てた検討がなされており、衝突 後の長大橋の応答が数値解析により求められている⁵. この研究では、数値解析における対象橋梁が実在しない 仮想橋梁ではあるものの、衝突外力をある仮定の基で設 定することで、橋梁の耐震解析で一般的に用いられてい る骨組み解析により船舶の衝突が仮想橋梁に及ぼす影響 を求めている.従来では、高度な解析手法を用いなけれ ば求めることができないと考えられてきた衝突現象を、 橋梁分野で広く一般的に用いられている骨組み解析によ り評価したという点で、非常に有用な成果が示されてい ると考えられる.

このように、近年において南海トラフ地震の津波に関 する研究は様々なアプローチで行われてきており、知見 も少しずつではあるが蓄積されてきている.そこで、筆 者らは南海トラフ地震による津波被害に関する知見をさ らに蓄積することを目的として、大阪湾岸エリアに実在 する阪神高速橋梁を対象とした漂流船舶と橋梁の衝突に 関する解析的検討を行った.本検討では、阪神高速湾岸 線の斜張橋を数値解析の対象として選定するとともに、 船舶の動態観測データを分析することで対象橋梁周辺部 に存在する船舶の最大級の大きさの想定を行った.また、 船舶と橋梁の衝突解析において、解析結果に大きな影響 を及ぼす衝突力の設定については、複雑な解析手法を用 いるのではなく、文献5と同様に、初等物理法則に基づ いた簡便な手法で衝突力を算定することにより、対象橋 梁と漂流船舶の衝突現象のシミュレーションを行った.

本稿では、これら解析結果から得られた漂流船舶の衝 突が斜張橋に及ぼす影響について報告するものである.

2. 検討の流れ

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,津波伝播解析により南海 トラフ地震発生後に生じる津波の挙動を求めた.次に, 津波伝播解析により得られた対象橋梁架設地点での津波 の速度・波高・流向を用いることで漂流する大型船舶と 橋梁の衝突解析(以下,船舶ー橋梁衝突解析と呼ぶ)を 実施し,その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.

3. 津波伝播解析

(1) 津波伝搬解析の概要

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⁶⁾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」⁷⁾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-1 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、 Manshinha and Smylieの方法⁸⁾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、 大阪湾での塑望平均満潮位(TP+0.85m)を考慮した計 算を行った.

(2) 津波伝搬解析結果

図-2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.



図-1 解析対象(7段階メッシュ構成)



(a) 地震発生直後



(b) 地震発生1時間後図-2 南海トラフ地震発生後の水位コンター図



図-3 対象橋梁位置図



図-4 対象橋梁地点における波高・波速・流向の時刻歴変化

図-3には、後述する船舶ー橋梁衝突解析の対象橋梁の 位置図を、図-4には対象橋梁架設地点での波高・流速・ 流向の時刻歴変化図を示す.図-4に示すように、対象橋 梁の架設地点では、地震発生後133分において波高が TP+3.0mと最大値を示した.また、流速については地震 発生後111分において0.6m/sと最大流速を示した.最大波 高時、最大流速時における流向きはともに352°と、ほぼ 真北に向かって流れた.なお、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、対象橋梁の架設地点で の地盤沈下量は0.6mとなった.この地盤沈下量も考慮し て津波高さを算出した結果、東神戸大橋での最大波高は TP+3.6mとなった.

これら津波伝播解析より得られた結果を用いて,後述 する船舶-橋梁衝突解析を行った.

4. 船舶-橋梁衝突解析

(1) 船舶ー橋梁衝突解析の概要

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り, 津波に完全に流されている状態であることを仮定してい る.また,本解析における船舶の衝突は,対象橋梁の下 部構造で生じるものと想定して検討を行った.

(2) 解析対象橋梁

神戸港は日本でも有数の大きな国際港であるため、その周辺海域には大型船舶が常に存在している.このため、 神戸港周辺部は南海トラフ地震発生後に大型船舶が漂流 する可能性が高いエリアであると考えられる.そこで、 本検討では神戸港周辺部に着目し、そのエリアから船舶 ー橋梁衝突解析対象となる橋梁の選定を行った.選定に



際しては、神戸港に繋がる航路からの距離だけでなく水 深や地上部の地形といった地理的条件なども考慮して橋 梁の選定を行った.選定の結果、対象橋梁として神戸港 の東側に位置する海域(以下、神戸港東エリアと呼ぶ) に架橋されている東神戸大橋を解析対象橋梁とした.図 -5 に東神戸大橋の構造概要を示す.図に示すように、 東神戸大橋は橋長約 890m の鋼斜張橋であり、下部構造 は鋼製主塔である.

(3) 衝突船舶の想定

東神戸大橋の周辺海域における船舶の航行、停泊など の船舶動態は、2010年7月のの1ヶ月間における神戸港東 エリアのAIS(船舶自動識別装置)データを分析するこ とで詳細な動態の把握を行った. 図-6に東神戸大橋周辺 部に存在する船舶の大きさに関する分析結果を示す. こ のエリアでは、船長が100m~200mのものが約半数を占 め、300mを超えるような超大型の船舶は約4%存在して いる.また、最も大きい船舶については船長が350mで ある.一方、図-7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を超える船舶は東神戸大橋の 周辺海域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東神戸大橋周 辺部の航路を使用していないためだと考えられる.これ ら分析の結果から、本検討では東神戸大橋に衝突する可 能性がある船舶の最大級の大きさは船長が300mのもの と考えた.

次に、本解析で想定する衝突船舶の構造諸元を、図-8 に示す.これら船舶の構造諸元については、港湾の施設



図-6 神戸港東エリアにおける船長毎の割合

の技術上の基準・同解説⁹に記載される構造諸元の中で, 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.後述する船舶ー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)となった.

(4) 船舶-橋梁衝突解析のモデル化

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:SeanFEM)を 実施した.東神戸大橋の解析モデルを図-9に示す.本 解析では、船舶との衝突により大きな変形が生じると予 想される主塔については、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.また、衝突により上部構造 が大きな応答を示すことも考えられるため、主桁等の上 部構造についてもファイバーモデルを用いた.また、両 橋梁において支承部に線形ばねモデル、基礎部に S-R ば ねモデルを用いた.次に、動的解析の結果に大きな影響 を与える減衰については、衝突現象が生じる時の粘性減 衰の設定方法として適切な手法が確立されていないと考 えられるため、本解析での減衰は履歴減衰のみしか考慮 していない.

(5) 衝突外力の設定

船舶の衝突外力は、後述する外力波形をT1主塔の TP+13.7mの位置に与えた.これら外力波形の与える高さ は、船舶と橋脚の衝突が船舶の舳先で生じると想定し、 3.の津波伝播解析で求めた最大波高TP+3.6mに図-9に示 す船舶の海面上高さ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の位置は主塔基部から 10.3mの高さにあたる.

船舶の衝突力は、文献5)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 形に変わると考えた.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.

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

ここで、F(t)は外力波形、mは船舶の質量、vは前章の 津波伝播解析で求めた衝突時における船舶速度、o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Ttは6o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-10に示すフロ ーに従い衝突時間Tを求めることとした.

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-11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と船舶の船首部の変形を考慮 したバネモデルを接合することで、船舶が衝突した時の 船舶と橋梁の連続的な変形挙動を求めた. 船舶の剛性に 相当するバネ剛性値は、清宮らの研究¹⁰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.

$$K_{s} = \frac{P_{cr}}{\delta_{sf}} = \frac{P_{cr}}{0.25D} \qquad \left(0 \le \delta_{s} \le 0.25D\right) \quad (2a)$$

$$K_s = 0 \qquad \left(0.25D \le \delta_s \le \delta_{sa}\right) \tag{2b}$$

ここで、 P_{σ} は船首強度(P_{σ} =109,200kN)、Dは船の深 さ、 δ_{s} は船首部の変位量とする.なお、 P_{σ} の値は文献 10)の中に示す算定式に本解析における対象船舶の長さ である294mを代入することで求めた値である.

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.











図-14 東神戸大橋の主要部における変位の時刻歴応答図

$$T = \frac{2\delta}{v_0} \tag{3}$$

ここで、*δ*は上述のプッシュオーバー解析で求めた橋 梁および船舶の水平変位の合計値、*v*₀は前章で求めた対 象橋梁地点における最大速度とする.

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.

$$T = \frac{mv_0}{P} \tag{4}$$

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,図-10に示すフローに従い繰返し計算(収束計算)を行った.橋梁毎の繰返し計算を行った結果,図-12に示すとおり衝突時間は2.9秒(&=0.9m)となった.

最後に、上述した検討により求めた衝突時間Tを式(1) に代入することで、図-13に示す外力波形F(t)を求めた. この外力波形については、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全体波形としている. 図中には、比較のために道路橋示方書 I 編に示す流木等 の衝突に対する衝突力の算出式(5)から求めた外力を示 す¹¹⁾.

$P = 0.1 \cdot W \cdot v \tag{5}$

ここで, P は外力, W は流送物の重量, v は表面流速 とする.

式(5)は文献 11)の中の記述にもあるように,船舶と橋 脚の衝突力の算出に用いるべきものではないが,漂流物 と橋脚との衝突外力を評価する数少ない算出式であるこ とから,参考値として示した.図に示すように,外力波 形 *F(t)*と式(5)から求めた外力は大きくかけ離れたもので ないことが確認された.

(6) 船舶ー橋梁衝突解析の結果

図-14に東神戸大橋の主要部における変位の時刻歴応 答を,図-15に船舶の衝突を仮定したTl主塔における高 さ方向の最大ひずみ分布を示す.

変位の時刻歴応答については、船舶が衝突する方向で



図-15 高さ方向の最大ひずみ分布図(T1主塔)

あるY方向(橋軸直角方向)の応答が大きくなり,X方向(橋軸方向)の応答はほとんど生じなかった.船舶が 衝突するT1主塔では大きな応答が生じず,主塔で最も 大きな応答変位を示す主塔頂部においてでも約0.09m (2.8秒)という小さな値となった.また,上部構造で ある主桁中央支間部の応答変位についても最大で約 0.04m (3.66秒)と非常に小さな値となった.

次に、T1主塔の高さ方向における最大ひずみ分布に ついては、基部から2.0mの高さで発生するひずみが最大 となり、その値は圧縮側で約1100µ(=0.51ε,)、引張側 で約600µ(=0.26ε,)となった。発生ひずみの最大値を示 す基部から2.0mの位置は、主塔基礎構造と主塔部を接合 するアンカーフレームの直上断面の位置にあたり、断面 剛性が大きく変化する箇所にあたる。アンカーフレーム を含む断面に比べるとこの断面では剛性が低下するため、 この箇所での発生ひずみが大きくなったものと考えられ る.

このように、東神戸大橋では船舶との衝突が生じる T1主塔でさえ塑性化が生じるような大きな損傷が生じ ないことがわかった.東神戸大橋における主塔の高さは 約150mと非常に高く、船舶が衝突する位置は相対的に 考えると非常に低い位置となるため、地震慣性力による 影響に比べて衝突外力による影響が小さくなったためだ と考えられる.

5. まとめ

本検討では、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 突により斜張橋が受ける影響について数値解析を行うこ とで評価を行った.この検討より得られた結果について、 以下にまとめる.

- ・東神戸大橋が位置する神戸港東エリアでは、南海トラフ地震発生後約2時間で津波第一波が到達する. 位置によりその値は異なるが、東神戸大橋架橋地点での来襲する津波の最大波高は3.6m程度、最大速度は0.6m/s程度となる.
- ・AIS データを用いた東神戸大橋周辺部における船舶動 態分析を行うことで、対象橋梁に衝突する可能性があ る船舶の中の最大級の大きさを把握することができた.
- ・衝突解析における衝突力の設定では、その衝突力の大きさに大きな影響を及ぼす衝突時間の設定が重要となる。本検討では衝突部の局部変形による影響は考慮していないものの、橋梁と衝突船舶による相互の変形挙動を考慮したモデルと初等物理法則に基づく繰返し計算を行うことで衝突時間を算出し衝突力を設定した。
- ・東神戸大橋は、主塔の高さが約 150m であるのに対し

て船舶の衝突する高さは基部から約 10m と相対的に 低いこと、東神戸大橋架設地点における津波の波速が 小さいこと、などから船舶の衝突が主塔に与える影響 は非常に小さくなり損傷もほとんど生じないことがわ かった.

本検討における船舶-橋梁衝突解析では、ある仮定条 件の基で衝突力の算出を行っているが、この算出方法は 確立されたものではない.この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、この衝突力の設 定についてはさらなる検討が必要であると考える.この ため、衝突力の算出方法の確立やその妥当性の検証につ いては、今後の課題としたい.

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

- 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 武田智吉, 柳沢賢: 港湾における津波漂流物の解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 2005, pp.296-300
- 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.
- 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.

- 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) 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.
- 6) 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
- 7) 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
- 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.
- (社)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解 説, 2007.
- 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.
- 11) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I 共通編, p.71, 2012.

BASIC STUDY ON THE EFFECT ON THE STAY CABLE BRIDGE RAMED BY LARGE DRIFTING SHIP CAUSED BY NANKAI TROUGH QUAKE

Hitoshi YATSUMOTO, Takeshi SUZUKI and Kenji TASAKI

The impact analysis between the large drifting ship and the Hanshin Expressway Bridges located along the coast of Osaka bay was conducted for the extent of knowledge about Tsunami damage by Nankai Trough quake that is predicted to occur in the near future. In this study, the effect on Hanshin expressway stay cable bridge ramed by large drifting ship caused by Nankai Trough quake was evaluated by using the method based on the fundamental physical low that is able to estimate the impact forth. From the result of this analysis, it was shown that the effect of impact force on Hanshin expressway stay cable bridge is not critical.