3次元混相流解析による 一部径間が流出した道路橋の津波被害再現解析

片岡 正次郎¹・田崎 賢治²・具志 一也³・松本 幸司⁴

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 国土防災研究室 主任研究官 (〒305-0804 つくば市旭1)
E-mail: kataoka-s92rc@nilim.go.jp

²正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町3-1-8)
E-mail: tasaki@ne-con.co.jp

³正会員 大日本コンサルタント(株) 大阪構造センター (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町3-1-8)
E-mail: gushi@ne-con.co.jp

⁴正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 国土防災研究室 室長 (〒305-0804 つくば市旭1)
E-mail: matsumoto-k88ce@nilim.go.jp

東北津波により12径間中8径間が流出した国道45号歌津大橋の津波被害再現解析を実施した。沿岸部の津波を非線形長波理論に基づく平面2次元の差分法を用いた津波伝播解析で計算し、さらに橋梁周辺はOpenFOAMによる3次元津波解析(気体・流体の混相流解析)で再現した。3次元津波解析で算出された上部構造の各点に作用する時々刻々の圧力による津波荷重を上部構造断面モデルに載荷する時刻歴解析を実施し、各支承反力の時刻歴を算出した。反力と支承の破断耐力を比較した結果、流出した区間では海側の支承から鉛直上向きの力で破断する一方、流出しなかった区間では支承は破断しないことが示され、実被害と整合していた。大きな鉛直上向きの力には、空気層の影響が大きいことがわかった。

Key Words : tsunami damage analysis, highway bridge, 3-D multi-phase flow analysis, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

1. はじめに

平成23年東北地方太平洋沖地震では、地震動や津波の影響により広い範囲で道路橋に被害が発生し¹⁾、特に津波による上部構造の流出は、交通機能の回復に時間を要したものがあった。これを教訓として、平成24年に改定された道路橋示方書V耐震設計編では、津波の影響を考慮した構造計画を行うことが新たに規定されている。同解説²⁾には、津波の高さに対して桁下空間を確保する、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施す、上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をすることが構造計画の例として挙げられている。

津波の影響を軽減するこれらの構造的工夫や配慮の具体的な方法に関しては、今後も調査研究が必要とされるが、その際、東北地方太平洋沖地震の津波(以下「東北津波」という。)で実際に道路橋に作用した津波の特性並びに発生した被害・現象の分析はきわめて重要である。著者らはこれまでも、上部構造が流出した道路橋と流出しなかった道路橋の津波被害再現解析等を行い、津波特性や床版の張出し長の影響が大きいことを示してきて

いる^{3,4)}。しかし、上部構造の断面形状や作用した津波の特性が異なる橋梁を比較するのは容易ではない。一つの道路橋で流出した径間と流出しなかった径間を有するものを対象とすることにより、上部構造の断面形状や津波特性(特に波高)に大きな違いがない状況での比較・考察が可能になると考えられる。また、最近では、桁間に空気が捉えられる形状の上部構造の場合、空気の流れの影響を精度良く考慮するには3次元混相流解析が必要という知見も得られている⁵⁾。

以上のような背景から、本研究では、全12径間のうち8径間が流出した国道45号歌津大橋(図-1)を対象に、東北津波の再現解析を行い、道路橋に作用した津波の推定結果を検証した上で、上部構造の流出に影響の大きい要因を検討した。その際、空気層の影響も考慮した上で道路橋周辺の津波を精度良く再現するため、精緻な地形・構造物モデルを用いた3次元混相流解析を実施した。

なお、歌津大橋では、被災後の現地調査⁶⁾により、上部構造が流出した径間の橋脚で変位制限構造の損傷、上流側の張出し部の損傷が確認され、P2橋脚には一部かぶりコンクリートの剥落や鉄筋のはらみ出し、流出しなか

図-1 歌津大橋の被災状況 (2011.3.19 東北地方整備局撮影)

った4径間でも桁の斜めひび割れや桁端の欠けなどが生じたことがわかっているが、本研究では上部構造の流出のみに着目して検討した。

2. 架橋位置の津波特性の算出

(1) 津波特性の算出手順

波源から対象橋梁周辺までの津波特性を算出するため、非線形長波理論に基づく平面2次元の差分法を用いた津波伝播解析を実施した。図-2のとおりA~Hの全8領域を結合³⁾し、領域が最小のHではグリッド間隔を2m、大小領域の結合は3倍間隔としたため、領域が最大のAではグリッド間隔は4,374mとなっている。

津波波源モデルは40枚の小断層からなる藤井・佐竹モデル⁶⁾のVer4.6を基本とし、GPS波浪計 (宮城北部沖) による沖合での津波の観測結果⁷⁾に対する再現精度を向上させるため、各小断層のすべり量を0~2倍の範囲で修正する調整を行った³⁾。潮位は、津波到達時の天文潮位 T. P. +1.4mと同じ結果が得られるよう、Mansinha and Smylie 法によって得られた架橋地点での海底地盤変動量-0.7mを予め補正した値とした。GPS波浪計による観測記録と解析結果の比較を図-3に示す。併せて、架橋位置周辺における津波浸水深⁸⁾や浸水範囲⁹⁾、流速 (動画中の漂流物の移動速度から推定¹⁰⁾) を概ね再現できていることを確認した。なお、浸水深の痕跡高と解析値の平均的な対応関係を示す幾何平均 $K=0.97$ 、対応関係のばらつきを示す幾何標準偏差 $\kappa=1.13$ であり、良好な結果といえる。

次に、架橋位置の津波の特性および津波作用力を高精度で推定するために、道路橋とその周辺の地形の3次元モデルを作成し、平面2次元の津波伝播解析で得られた津波特性をその境界から入射する3次元津波解析 (気体・流体の混相流解析) を流体解析ツールOpenFOAM¹¹⁾ のソルバinterFoamにより実施した。主な解析条件を表-1に示す。既往の研究¹²⁾を参考に、複数多方向流入が可能

図-2 平面2次元津波伝播解析の解析領域

図-3 GPS波浪計による観測結果と解析結果の比較

な造波境界を3次元モデルに設定して津波を入射した。造波境界では水深方向に流速は一定とした。流体解析ソルバinterFoamは、VOF法により界面を捕捉する不混和流体 (非圧縮性・等温) の二相流のソルバであり、Navier-Stokes方程式と連続の式を有限体積法で空間離散化し、PIMPLE法により圧力と流速を計算する。時間の離散化にはEuler 1次精度陰解法を、空間の離散化には二次精度の中心差分を採用している。

3次元モデルの領域を図-4に、モデル化した橋と周辺地形を図-5に示す。浸水域とその近傍は国土地理院が震災後に計測した2mメッシュ標高データを用いて、それ以外は同じく国土地理院が震災前に作成した数値地図50mメッシュ (標高) に地殻変動の補正を加えて震災後の地形モデルを作成しているが、水門、トンネルなど標高データに現れない施設等も津波特性に影響する可能性があるためモデルに追加している (図-5)。

表-1 3次元混相流解析の主な解析条件

項 目	内 容	備 考
解析種類	非定常・非圧縮性・等温	
解析コード	OpenFOAM→interFoam	気体・液体の2相流ソルバ
自由表面モデル	VOF法	(Volume of Fluid)
解析モデル	層流モデル	Laminar
並列計算	プロセス間通信(MPI)Flat MPI(または Pure MPI)	(Message Passing Interface)
解析領域	700m×1100m	
メッシュ数	3,388 万 (最小メッシュ: 地形 2m, 構造物 0.375m)	
計算時間間隔	最小時間 0.0001 秒	クーラン条件による自動調整

図-4 平面2次元津波伝播解析と3次元モデルの解析領域

図-5 3次元モデル図 (橋周辺部)

(a) 解析開始後 20 秒

(b) 解析開始後 300 秒

図-6 3次元津波解析により得られた流速分布の例 (流速は深さ方向の平均値)

(2) 津波特性の算出結果

3次元津波解析には長い計算時間を要するため、津波が上部構造に到達する数分前から架橋位置で波高が最大となるまでの時間帯に限って解析の対象とした。具体的には、地震発生の35分後からの450秒間を対象として解析を実施した。3次元津波解析の開始時から20秒後、300秒後の流速分布のスナップショットを図-6に示す。

図-7は3次元津波解析で代表地点の津波の水位・流速を再現した結果を比較したものである。代表地点は図-4のように上部構造を4区間に分け、区間ごとに1地点ずつ

選定した。区間は被災状況(図-1)をもとに起点側から2径間(区間①, 流出せず), 5径間(区間②, 流出), 3径間(区間③, 流出), 2径間(区間④, 流出せず)とし、代表地点は区間①②③④の順に起点側から第1・5・8・11径間それぞれの中央海側の地点としている。

この図から、水位の時間変化には区間による違いがない一方で、流速には区間による違いが見られ、流出した区間②③の方が流出しなかった区間①④よりも全体的に流速が大きいことがわかる。

図-7 3次元津波解析による歌津大橋地点の津波再現結果（流速は深さ方向の平均値，橋軸直交方向の陸側が正）

図-8 歌津大橋の側面図（左（起点側）から第1，第2，…，第12径間，杭長以外の単位はmm）

図-9 歌津大橋の上部構造断面図（左：第1～2径間，中央：第3～7径間，右：第8～12径間，単位mm）¹³⁾

表-2 歌津大橋の構造概要

橋 長		303.6m	有効幅員	7.5m	支 間 長	2@40.0m+5@13.8m+5@29.2m
上部構造形式		単純 PC ポステン T 桁 2 連 + 単純 PC プレテン T 桁 5 連 + 単純 PC ポステン T 桁 5 連				
下 部 構 造	橋 台	A1：ラーメン式橋台，A2：逆 T 式橋台				
	橋 脚	張出式 RC 橋脚，高さ 6.7～11.4m，RC 巻き立て補強				
	基 礎	A1，P1～P11：PC 杭基礎（φ700mm，長さ 7.0～18.0m），A2：直接基礎				
	支承	A1～P2：支承板支承，P2～P7：パッド型ゴム支承，P7～A2：支承板支承				

3. 被災状況との整合性の確認と考察

2.で再現した津波の特性を用いて，被害再現解析を行う。歌津大橋の側面図と上部構造断面図を図-8，図-9に，構造概要を表-2に示す。図-9の左が区間①，中央が区間②，右が区間③と④の上部構造断面図である。

(1) 支承への作用力と抵抗力の算出

3次元津波解析では，上部構造の各点に作用する時々刻々の圧力も算出されている。その圧力による時々刻々の津波荷重を，上部構造断面モデル（フレームモデル）の各分割要素表面に載荷する時刻歴応答解析を実施し，各支承に作用する力の時刻歴を算出した。

(a) 区間① (上から G1,G2,G3,G4 : G4が海側)

(b) 区間② (上から G1,G4,G8,G11 : G11が海側)

(c) 区間③ (上から G1,G2,G3,G4 : G4が海側)

(d) 区間④ (上から G1,G2,G3,G4 : G4が海側)

図-10 支承への作用力の時刻歴と抵抗力の比較 (水平は橋軸直交方向の陸側, 鉛直は下向きが正)

一方、抵抗力は上部構造を支持する支承の破断耐力とした。A1～P2径間およびP7～A2径間の支承板支承では、アンカーボルト、上揚力止め（サイドブロック）、上巻ストッパー、下巻ストッパーの各支承構成部品の水平方向及び鉛直方向の破断耐力を算定し、その最小値を

支承の抵抗力として評価した。なお、鉛直方向の抵抗力には上部構造の自重も考慮した。P2～P7径間のパット型ゴム支承では、鉛直支持のパット型ゴム支承と水平力に抵抗するアンカーバーが分離して配置されており、支承本体は上揚力に抵抗する機能を有していない。そこで、

図-11 平面2次元の津波伝播解析による歌津大橋地点の津波再現結果 (橋軸直交方向の陸側が正)

水平方向はアンカーバーのせん断耐力を、鉛直方向は上部構造の自重のみを抵抗力として評価した。

支承への作用力が破断耐力を超えると支承が破断し、破断していない残りの支承が作用力を分担するため、反力が増加すると予想されるが、支承の破断を考慮した解析では計算が不安定になったため、ここではこのような応力再配分は考慮せずに解析を実施した。

(2) 被災状況との整合性の確認

上記のように算出した作用力の時刻歴と抵抗力を比較したものが図-10である。区間②はパッド型ゴム支承で1支承線上に支承が11基あるため、支承1基あたりの耐力は小さい値となっている。また、区間①の支承版支承は区間③④とは構造が異なり、耐力が大きい。

歌津大橋の起点側2径間 (区間①) と終点側2径間 (区間④) はポステンT桁で、流出していない。解析でもこれらの径間を支持する支承への作用力は抵抗力を上回らず、支承は破断しない結果となった。ただし、作用力と抵抗力の差は小さく、解析モデルや解析条件の設定によっては作用力が抵抗力を上回る場合もあると考えられる。ここでは高精度のシミュレーションを行うことにより、区間①④が流出しなかったことを再現する結果が得られている。

一方、比較的桁高の小さいプレテンT桁の5径間 (区間②、桁高約0.9m) は水平方向に流出し、桁高の大きいポステンT桁の3径間 (区間③、桁高約1.7m) は反転し全て裏返し状態で流出している。図-9ではいずれも海側の支承から順に鉛直上向きの作用力で350~380sに破断する結果になっており、被災状況と整合している。

(3) 平面2次元の津波伝播解析との比較

平面2次元の津波伝播解析のみで歌津大橋地点の津波を再現した結果を図-11に、その際に用いた周辺の地形モデルを図-12に示すが、3次元地形モデルと同様に河口部の水門をモデル化しても、区間①と区間②の流速は

図-12 平面2次元の津波伝播解析に用いた地形モデル (領域H)

ほぼ同じであり、図-7ほどの違いは生じない。これは、3次元地形モデルほど詳細な水門のモデル化ができない (開口部など) ことに加え、水深方向に流速一定となっている影響があると考えられる。一方、平面2次元の津波伝播解析でも区間③と区間④の流速には大きな違いがあり、山地形による津波の回り込みの影響は平面2次元解析でもある程度再現されていることが確認できる。

(4) 作用力に関する考察

上部構造の流出に影響の大きい鉛直上向きの作用力を分析するため、区間①~④それぞれの径間に作用した鉛直力の時刻歴を図-13に示す。ここで、桁間空気の作用力は桁間に捉えられた空気による力、床版の作用力は路面に越流してきた津波の水流と重量による力、桁端部の作用力は床版張出し部に作用する津波の水流による力である。これら3つの作用力の和と作用力 (合計) の差が、津波の水流による力に相当する。

この図によると、区間②と③で支承が破断する350~380sでは、いずれの径間でも桁間の空気と水流による作用力は同程度である。その後、区間①~③では水位の上昇に伴い桁間空気の作用力が支配的になり、上部構造断面から計算される浮力に漸近する結果になっている。このように、今回の解析では、上部構造に作用する鉛直力には、桁間空気を含め、浮力の影響が大きいことがわかった。

図-13 上部構造に作用した鉛直力の時刻歴 (鉛直上向きが正)

流出しなかった区間④では解析の最後まで作用力の合計が上部構造断面から計算される浮力より小さいが、これは桁間に津波が流入し空気を追い出した結果である。区間④のみにこの現象が見られたのは、近接する山地形の影響による複雑な津波の流れ(図-6(b)参照)によるものと考えられる。

一方、水平力に関しては、区間②では小さく、区間③では鉛直力と同程度の大きさがある。図-6のとおり水位と流速の違いは小さいことから、桁高の違いにより区間②と③に作用する水平力に差が生じていると考えられる。

4. 結 論

東北津波により流出した径間と流出しなかった径間があった国道45号歌津大橋の津波被害再現解析を実施した。沿岸部の津波を非線形長波理論に基づく平面2次元の差分法を用いた津波伝播解析で計算し、さらに橋梁周辺は空気層の影響を考慮したOpenFOAMによる3次元津波解析で再現した。

3次元津波解析で算出された上部構造の各点に作用する時々刻々の圧力による津波荷重を上部構造断面モデルに載荷する時刻歴解析を実施し、各支承反力の時刻歴を算出した。反力と支承の破断耐力を比較したところ、流出した区間では海側の支承から破断する一方、流出しなかった区間では支承は破断しないことが示唆され、実被害と整合する結果が得られた。破断した支承は全て鉛直上向きの作用力で破断したと推定され、その作用力には

桁間の空気層の影響が大きいことがわかった。

上部構造の流出可能性を評価する際には、津波の水位が上部構造に達するかどうかに加え、空気層の影響を考慮する必要がある。流速には地形や構造物も影響するため、これらの影響を適切に考慮する必要がある。今回は精緻な3次元モデルを作成しているが、どこまで詳細なモデル化が必要かも今後検討していく必要がある。

謝辞：本研究では国土地理院の「東日本大震災からの復旧・復興及び防災対策のための高精度標高データ」を使用した。また、査読者各位の御意見は内容の改善に大きく役立った。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国総研資料第814号／土研資料第4295号，2014.
- 2) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.
- 3) 片岡正次郎，金子正洋，松岡一成，長屋和宏，運上茂樹：上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol. 69, No. 4(地震工学論文集第32巻)，1932-1941, 2013.
- 4) 片岡正次郎，金子正洋，長屋和宏：津波越流後に交通機能が保持された道路橋の地震・津波応答再現解析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol. 70, No. 4(地震工学論文集第33巻)，pp. 1043-1051, 2014.
- 5) 川崎佑磨，伊藤典昭，伊津野和行：鉾桁橋に作用する津波

- の圧力特性に及ぼす桁端部の影響に関する一考察, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 71, No. 4(地震工学論文集第34巻), 162-168, 2015.
- 6) 藤井雄士郎, 佐竹健治: 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源,
http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html
(2015年9月1日閲覧)
- 7) 国土交通省港湾局: 全国港湾海洋波浪情報網,
<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html> (2015年9月1日閲覧)
- 8) Mori, N., Takahashi, T. and the 2011 Tohoku earthquake tsunami joint survey group: Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, Coastal Engineering Journal, 54, Issue 1, pp.1-27, 2012.
- 9) 国土交通省国土地理院: 平成23年(2011年)東日本大震災2.5万分1浸水範囲概況図, 国土地理院技術資料, D1-No. 588
~593, 2011.
- 10) 佐々木達生, 幸左賢二, 鄭玉龍: 桁抵抗力津波作用力比に基づく橋梁の被害分析, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp.417~427, 2013.
- 11) Open CFD Ltd.: OpenFOAM, <http://www.openfoam.com> (2015年9月1日閲覧)
- 12) 本橋英樹, 野中哲也, 中村真貴, 原田隆典, 坂本佳子: 広域3次元津波シミュレーションにおける造波境界の設定方法, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2, 181-185, 2014.
- 13) (公社)土木学会地震工学委員会東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会: 中間報告書, 2014.
(2015. 11. 06受付, 2016. 2. 12修正, 2016. 2. 20受理)

TSUNAMI DAMAGE SIMULATION OF A HIGHWAY BRIDGE OF WHICH SUPERSTRUCTURES WERE WASHED OUT IN PART BY A 3-D MULTI-PHASE FLOW ANALYSIS

Shojiro KATAOKA, Kenji TASAKI, Kazuya GUSHI and Koji MATSUMOTO

A tsunami damage analysis was conducted in order to simulate process of damage to a highway bridge of which superstructures were washed out in part by the tsunami of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. A precise model of the bridge and surrounding terrain and a sluice was constructed and a 3-D multi-phase flow analysis was carried out. The analysis shows that uplift force acting on the superstructures washed out was larger than the strength of bearings. Air trapped between girders was found to play an important role on the large uplift force.