

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。

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た。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ってきた^{3) 4)}が、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、津波特性、特に波高には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。

以上のような背景から、本稿では、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結果を報告する。



図-1 歌津大橋の被災状況（2011.3.19 東北地方整備局撮影）

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→interform	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

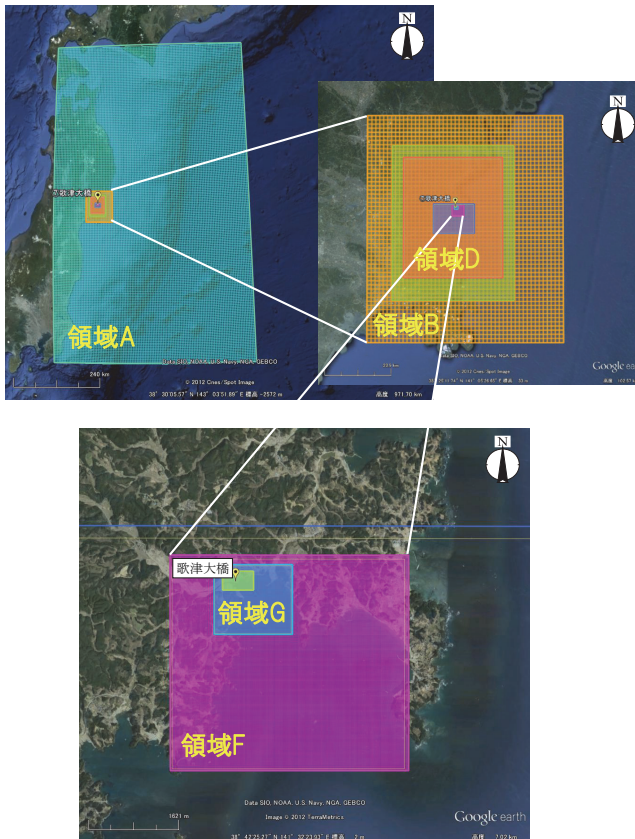


図-2 平面2次元津波伝播解析の解析領域

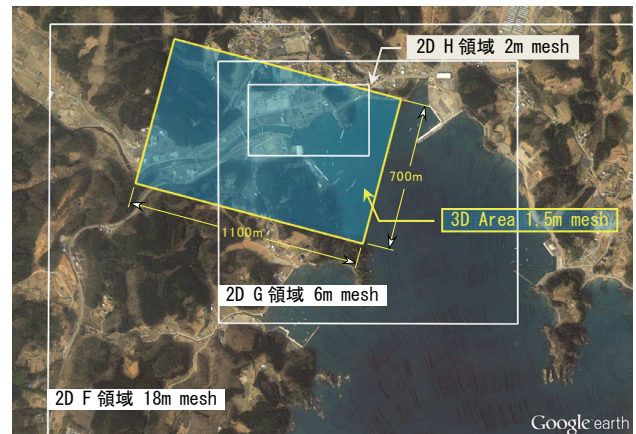


図-3 平面2次元津波伝播解析と3次元モデルの解析領域



図-4 3次元モデル図（橋周辺部）

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⁹⁾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⁹⁾のVer.4.6を基本とし、GPS波浪計による沖合での津波の観測結果⁹⁾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。併せて、架橋位置周辺における津波浸水深⁷⁾や浸水範囲⁸⁾、流速（動画中の漂流物の移動速度から推定⁹⁾）を概ね再現できていることを確認した。

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）¹⁰⁾を実施した。主な解析条件を表-1に示す。3次元モデルの領域を図-3に、モデル化した橋と周辺地形を図-4に示す。

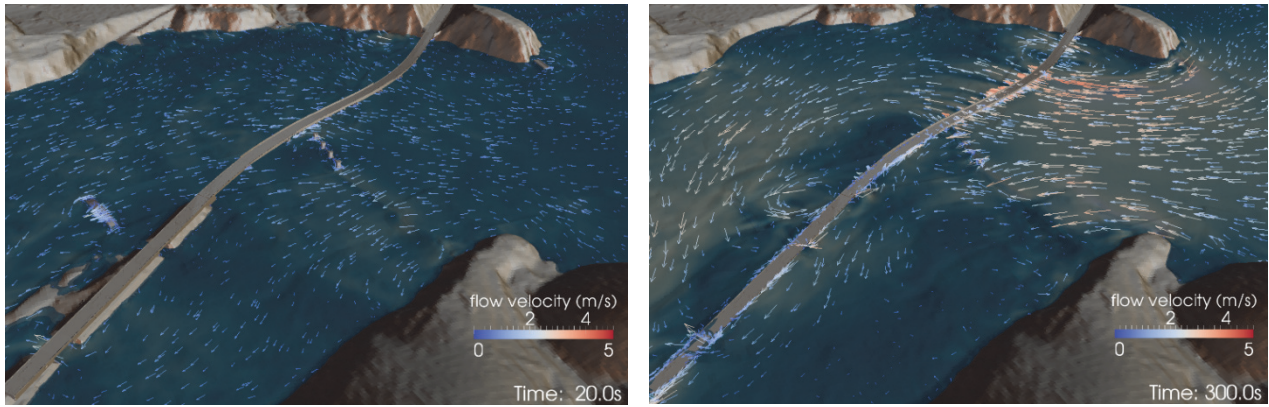


図-5 3次元津波解析により得られた流速分布の例

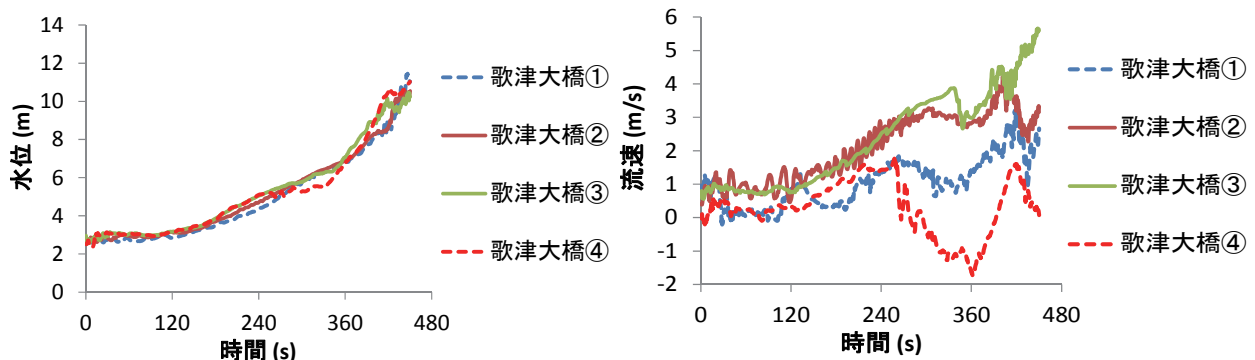


図-6 3次元津波解析による歌津大橋地点の津波再現結果（流速は深さ方向の平均値，橋軸直交方向で陸側が正）

浸水域とその近傍は国土地理院が被災後に計測した2mメッシュ標高データを，それ以外は同じく国土地理院の数値地図50mメッシュ（標高）をもとに地形データを作成しているが，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-4）。

(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秒後のスナップショットを図-5に示す。

図-6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ることがわかる。

3. 被災状況との整合性の確認

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-7，図-8に，構造概要を表-2に示す。図-8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の各分割要素表面に載荷する時刻歴解析を実施し，各支承に作用する力の時刻歴を算出した。

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），上沓ストッパー，下沓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，支承本体で上揚力に抵抗する機能を有していない。そこで，

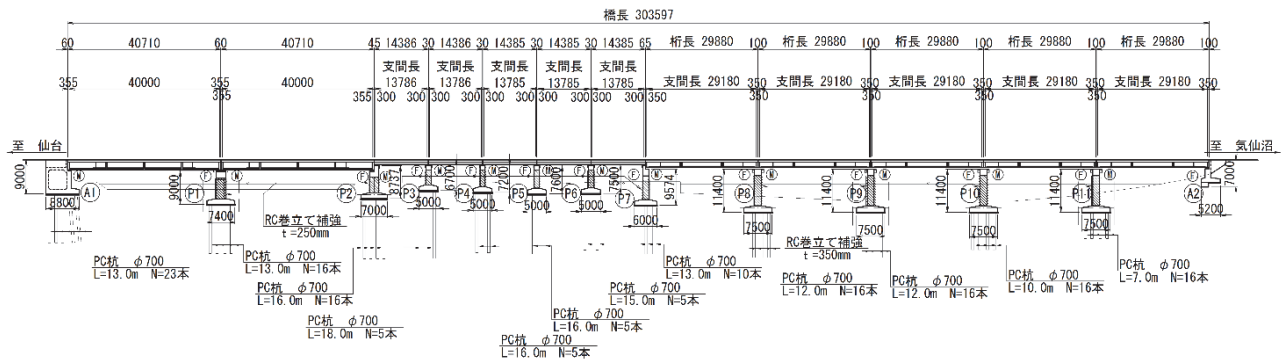


図-7 歌津大橋の側面図（左（起点側）から第1，第2，…，第12径間，桁長以外の単位はmm）

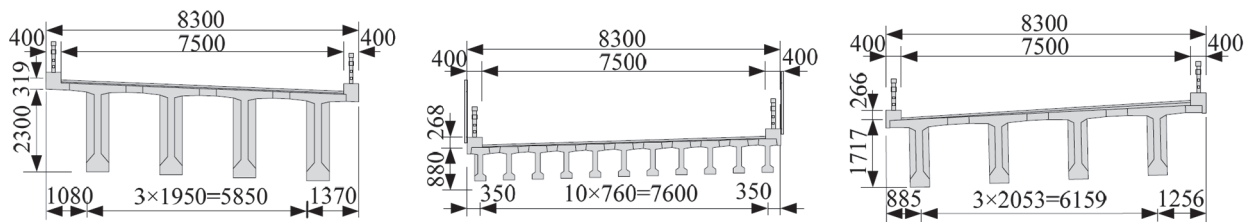


図-8 歌津大橋の上部構造断面図（左：第1～2径間，中央：第3～7径間，右：第8～12径間，単位mm）¹⁾

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（φ 700mm，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				

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) 作用力の時刻歴と抵抗力の比較

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-9である。区間②はパット型ゴム支承で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。

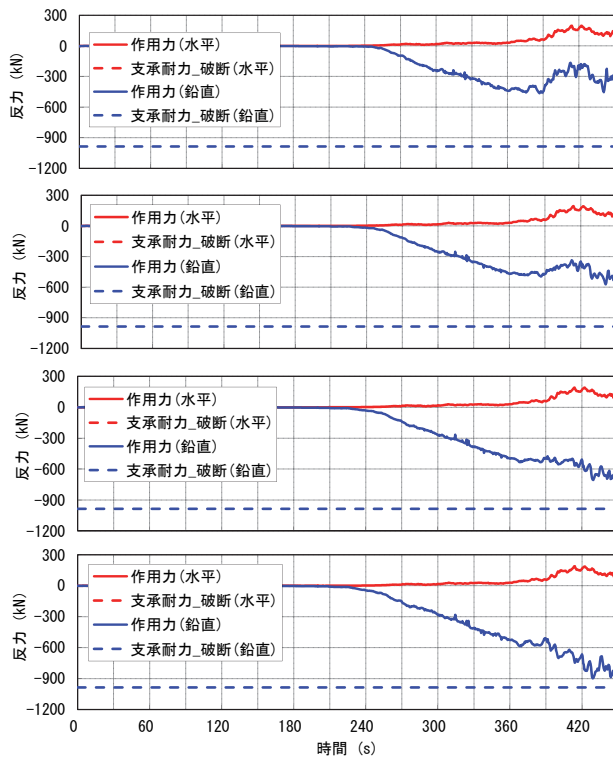
歌津大橋の起点側2径間（区間①）と終点側2径間（区間④）はポステンT桁で，流出していない。解析でもこれらの径間を支持する支承への作用力は抵抗力を上回らず，支承は破断しない結果となった。

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

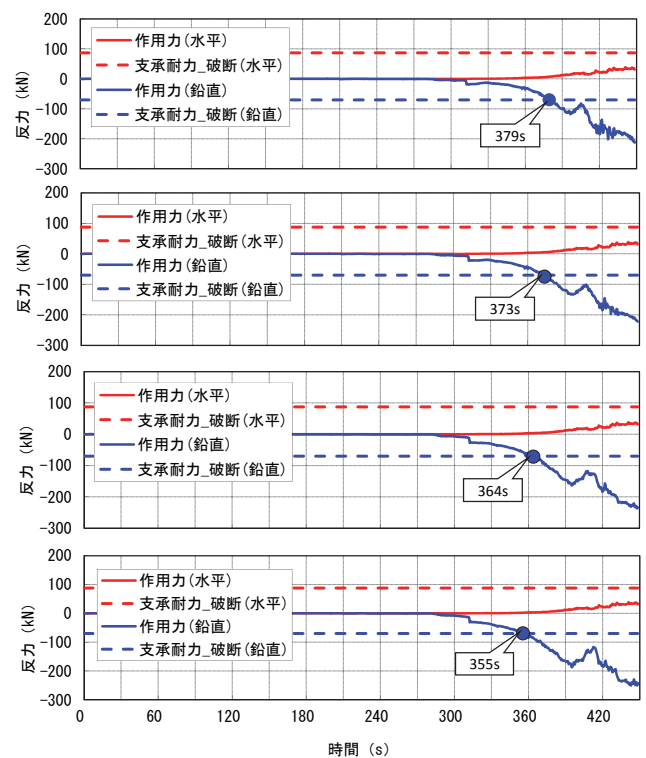
ポステンT桁の3径間（区間③，桁高約1.7m）は反転し全て裏返し状態で流出している¹⁾。図-9ではいずれも海側の支承から順に鉛直上向きの作用力で破断する結果になっている。

水平力を比較すると，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。

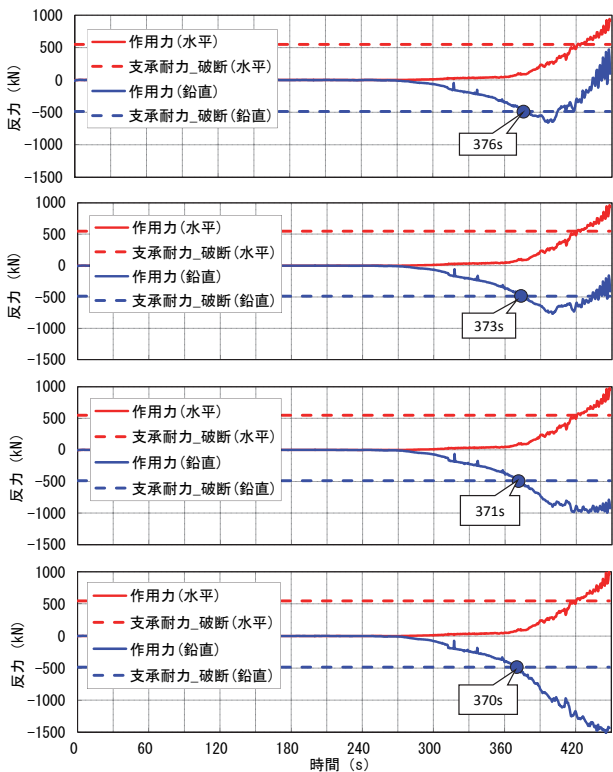
また，海側の支承が破断してから全ての支承が破断するまでに要する時間は，区間②が24秒に対し，区間③は6秒である。上述のように，解析では支承の破断による応力再配分は考慮していないため，この値そのものは信頼できないものの，区間②よりも区間③の方が回転運動に勢いがあり，また一旦回転しはじめると大きな水平力でその動きが助長され，桁高が大きく回転しやすい形状も相まって，反転し裏返しになった可能性が指摘できる。



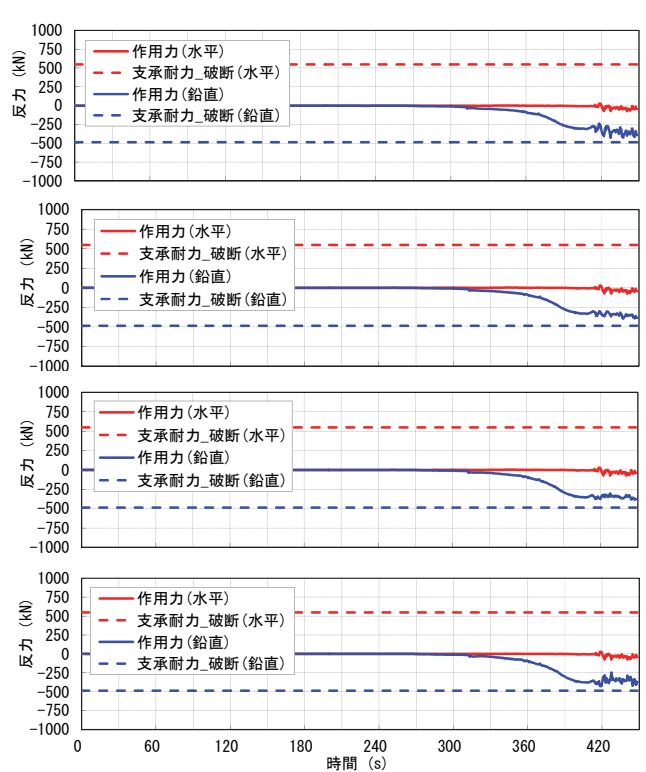
(a) 区間① (上から G1, G2, G3, G4 : G4が海側)



(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-9 歌津大橋の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)

上部構造断面が同じ形状であるにもかかわらず、区間③は流出し、区間④は流出していない。このように被害が大きく異なる要因としては、図-6 に示したとおり、橋軸直交方向の流速の違いが大きいと考えられる。図-5の流速分布からも、区間④は北側にある山の背後にある

ため、津波の流速が区間③よりも小さくなっている状況がわかる。また、区間①についても、前面にある水門により流速が小さく抑えられたことが、流出しなかった理由の一つと考えられる。

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。

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、橋軸直交方向の流速を精度良く把握する必要がある。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。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），I_932-I_941, 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.I_1043-I_1051, 2014.
- 5) 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）
- 6) 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）
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Open CFD Ltd.: OpenFOAM, <http://www.openfoam.com>（2015年9月1日閲覧）
- 11) （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.

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 the flow velocity of the tsunami acting on the superstructures washed out was larger than that acting on the superstructures survived. The difference of the flow velocity was caused by the terrain and the sluice near the survived superstructures.