

東日本大震災時に道路橋に作用した津波の特性とその影響

片岡正次郎・松本幸司

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つた。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考えられるが、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・現象の分析が基本になると考えられる。

以上のような背景から、本稿では、東北津波の影響を受けた道路橋を対象に、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津波の特性を検討した結果を報告する。

2. 対象道路橋位置の津波特性の算出

2.1 検討対象とする道路橋

東北津波で上部構造が浸水した道路橋のうち、被災後の支承の状況等から流出過程が推定可能なもの、支承部の耐力が算出できるもの、津波の来襲状況が記録された動画があるもの、等の条件を考慮して、国道45号歌津大橋、小泉大橋、沼田跨線橋の3橋を選定した。歌津大橋には流出した区間と流出していない区間があり、上部構造の断面形状も変化するため、区間ごとに検討する。

2.2 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。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³⁾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⁴⁾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、各橋梁位置における津波浸水深⁵⁾や浸水範囲⁶⁾、流速（動画中の漂流物の移動速度から推定⁷⁾）を概ね再現できていることを確認した。

次に、道路橋に作用した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



図-1 3次元モデルの設定領域と津波入射境界(小泉大橋)

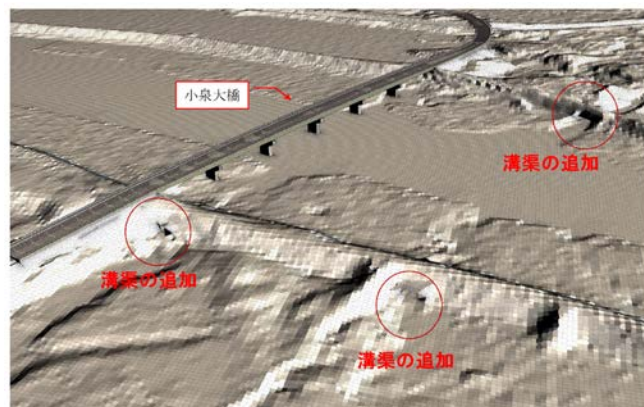


図-2 3次元モデル図 (小泉大橋)

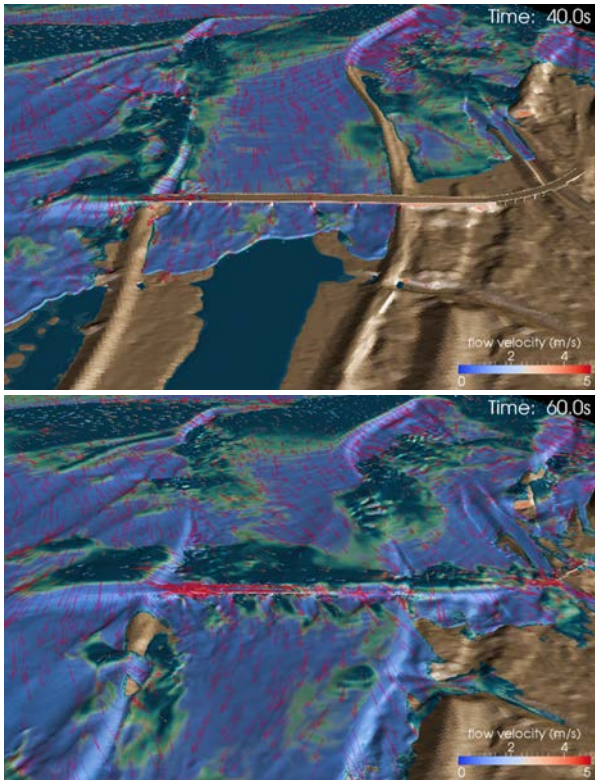


図-3 小泉大橋への津波来襲状況の解析結果

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次元津波解析を実施した。例として小泉大橋を対象とした3次元モデルの領域を図-1に、モデル化した橋と周辺地形を図-2に示す。

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、溝渠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た（図-2）。

3次元津波解析には、オープンソースの数値解析コードOpenFOAM[®]を用いた。OpenFOAMは気体と液体の混相流解析が可能であるため、上部構造と水面との間に挟まれる空気層の影響を考慮できるという利点がある。

2.3 津波特性の算出結果の例

3次元津波解析には長い計算時間を要するため、津波が対象道路橋に到達する前から対象道路橋位置で波高が最大となるまでの時間帯に限り解析を実施した。小泉大橋の場合は地震発生後の39分後からの3分40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40秒後、60秒後のスナップショットを図-3に示す。

図-4は3次元津波解析で小泉大橋の上部構造中

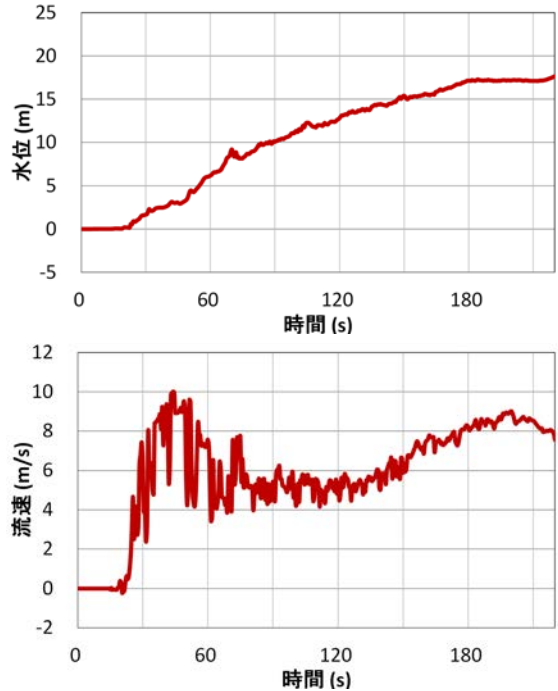


図-4 3次元津波解析による小泉大橋地点の津波再現結果

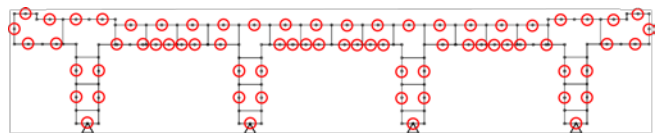


図-5 支承作用力の算出に用いた上部構造断面モデルの例

央付近の津波を再現した結果を比較したものである。流速は深さ方向の平均値を示している。流速には周期の短い変動が見られるほか、30～60秒には水位が低い状態での分散波等による不規則な流れおよび構造物の影響などによる大きなピークがあるのが特徴的である。

3. 被災状況との整合性の確認

3.1 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、図-5のような上部構造断面モデルの各分割要素表面の点（図中の赤丸囲み）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を合計して計算した。個々の支承の破断耐力は、支承の各部位（上揚力止め、アンカーボルト等）の水平せん断力・鉛直引張り力に対する破断耐力をそれぞれ計算し、最も小さい部位の耐力をその支承の破断耐力とした。

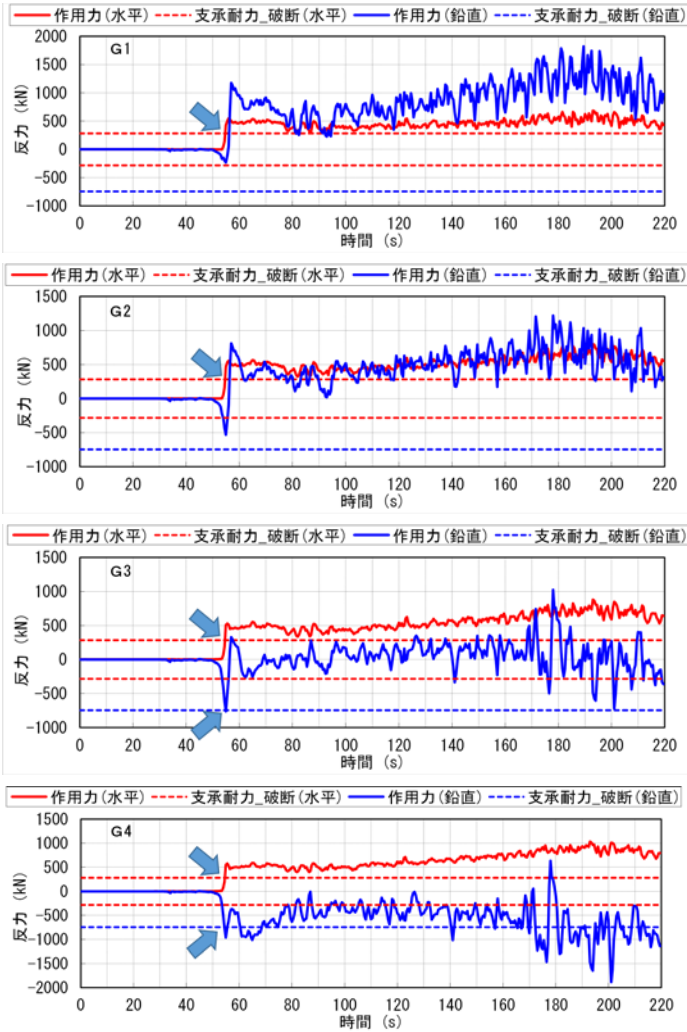


図-6 小泉大橋の支承G1～G4への作用力の時刻歴と抵抗力の比較 (水平は橋軸直交方向の陸側、鉛直は下向きが正)

3.2 作用力の時刻歴と抵抗力の比較

全6径間が流出した小泉大橋を例として、各支承への作用力の時刻歴と抵抗力を比較したものを図-6に示す。矢印は作用力が抵抗力を超えた時点である。この解析結果から、支承の損傷過程は、まず海側の支承G3、G4が鉛直上向きの作用力を受けて破断した後、すぐに水平方向の作用力によって陸側の支承G1、G2も破断したと推定される。

小泉大橋の支承の損傷状況(図-7)も海側と陸側では異なっており、解析結果から推定される支承の損傷過程と整合する。

3.3 被災状況との比較

他の2橋についても同様の検討を行い、実被災状況と解析結果を比較したものが表-1である。

歌津大橋の起点側2径間(区間①)と終点側2径間(区間④)は全てポステンT桁で、流出して

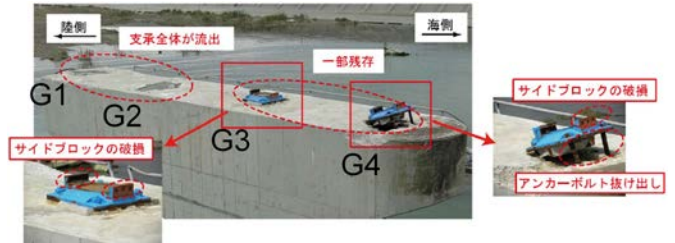


図-7 小泉大橋の支承の損傷状況⁹⁾

表-1 対象道路橋の実被災状況と解析結果の比較

橋梁名	径間数	実被災状況	解析結果
歌津大橋			
区間①	2	流出せず	支承は破断しない
区間②	5	流出(水平)	海側の支承から破断
区間③	3	流出(回転)	海側の支承から破断
区間④	2	流出せず	支承は破断しない
小泉大橋	6	流出(回転)	海側の支承から破断
沼田跨線橋	3	流出(浮上)	海側の支承から破断

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1.8m)は回転し全て裏返しの状態に流出している¹⁾。解析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が、幅員8.3mの割に桁高の大きいポステンT桁は回転しやすいため裏返しになったと考えられる。

沼田跨線橋は全3径間が流出しているが、変位制限構造の損傷は限定的で支承のアンカーバーもほぼ変形していないことから、津波の上揚力によって持ち上げられた後に流出したと推定されている¹⁾。解析は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であるが、解析で得られた水平方向の作用力は鉛直上向きの2～5割程度と小さい値であった。桁高も約1.2mと幅員13.5mと比較して小さいこともあり、回転せず浮き上がって流出したものと考えられる。

以上より、ここで対象とした3橋については、3次元津波解析で算出した津波特性から推定される支承の損傷過程と実被災状況との間に矛盾はなく、上部構造が流出するか否かを正しく評価できていることから、算出した津波特性は実際の津波を一定の精度で再現できているものと考えられる。

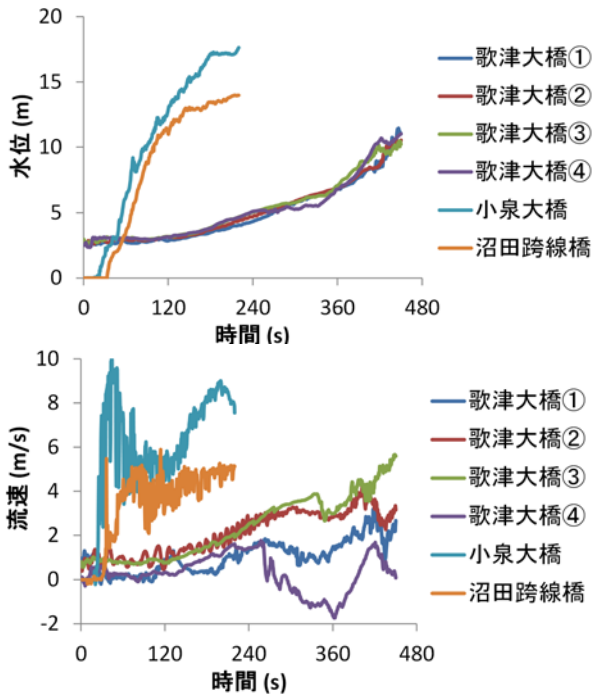


図-8 対象道路橋に作用した津波の水位と流速（橋軸直交方向、陸側が正）の再現結果

4. 道路橋に作用した津波の特性

3次元津波解析で得られた津波の水位と流速の時刻歴を図-8に示す。歌津大橋は表-1の区間ごとに示してある。

水位の変化をみると、小泉大橋と沼田跨線橋では水位の上昇速度が最大6m/分程度と大きく、歌津大橋では最大3m/分程度と小さいのが特徴である。歌津大橋の区間による違いは小さい。

流速に着目すると、最大値は小泉大橋、沼田跨線橋、歌津大橋の流出した区間②③の順に大きく、流出しなかった区間①④では比較的小さい。

このように、対象道路橋によって水位、流速という基本的な特性が大きく異なる津波が作用している。流速に関しては同じ橋でも区間ごとに違いがあり、その違いが流出するか否かにも影響した可能性がある。

5. まとめ

本稿では、東北津波の影響を受けた3つの道路橋を対象に、これらの道路橋に作用した津波の再現を目指した詳細な数値解析を実施した。

今回の検討では、算出した津波の特性等から上部構造が流出するか否かを評価することは可能であり、それには流速を精度良く把握する必要があ

るという結果が得られた。ただし、詳細な数値解析を直ちに実務に適用することは困難な面もあるため、津波の特性を簡易に評価するための手法も必要と考えられる。

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、2014.12
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0814.htm>
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012.3
- 3) 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
- 4) 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.htm>
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Open CFD Ltd.: OpenFOAM,
<http://www.openfoam.com>
- 9) (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

片岡正次郎



国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センター
国土防災研究室 主任研究官、博（工）
Dr. Shojiro KATAOKA

松本幸司



国土交通省国土技術政策総合研究所防災・メンテナンス基盤研究センター
国土防災研究室長
Koji MATSUMOTO