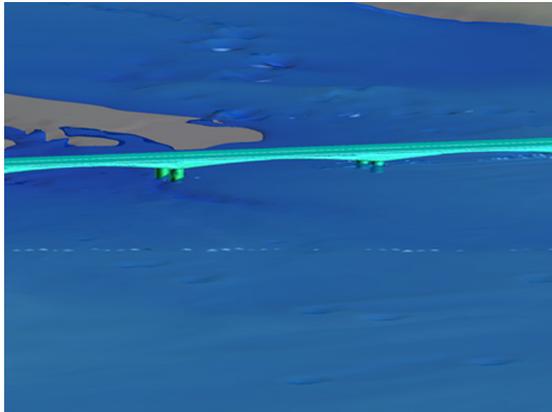


橋梁に対する巨大津波作用時の挙動の解明 -津波水路による実験とシミュレーション技術-

Clarification of Behavior of Huge Tsunami Action on Bridges
- Hydraulic Model Experiment and Simulation Technology -



鈴木 俊光*¹
Toshimitsu Suzuki

四條 利久磨*²
Rikuma Shijo

横山 薫*³
Kaoru Yokoyama

池末 俊一*⁴
Syunichi Ikesue

山崎 仁史*⁵
Hirofumi Yamasaki

本山 潤一郎*⁶
Junichiro Motoyama

2011年の東北地方太平洋沖地震では、多くの社会インフラ設備が津波に遭遇し、甚大な被害を受けた。災害復旧時において橋梁は重要な生命線となるため、津波による災害発生時においても橋梁機能の損失防止を図る必要がある。しかし、従来設計では津波波力による橋桁等の流出が想定されておらず、また津波波力を想定するとしても、荷重算定手法並びに設計手法が確立されていないため、その対応が困難となっている。三菱重工鉄構エンジニアリング(株)(MBE)と三菱重工業(株)(MHI)長崎研究所では、橋梁の上部構造を対象として、津波作用時の挙動や波力による作用力を明らかにするための水路実験並びに2次元及び3次元数値解析に共同で取り組んでいる^{(1)~(3)}。本稿ではそれら実験及び解析の概要について紹介する。

1. はじめに

橋梁に作用する津波波力の研究については、これまでに多くの検討^{(5)~(6)}が行われているものの、複雑な断面形状を有する橋桁に対する津波波力の算定手法は、現行の設計基準等で確立されていない。橋梁設計において津波波力を考慮するためには、正確な津波シミュレーションに加え、津波作用時の挙動や波力特性を把握しておく必要がある。筆者らは津波波力の算定と津波挙動の解明を目的として、様々な実験や解析に取り組んでいる。具体的な検討内容は以下の通りである。

- (1) 橋梁縮小模型を用いた津波水路実験 (MHI長崎研究所内“可視化水路”にて実施)
- (2) 津波水路実験結果の数値解析による再現
- (3) 特定範囲の構造物に対する津波作用時の挙動の把握及び安全性の評価 (2次元広域津波伝播解析と3次元数値解析の連動解析技術を適用)

津波波力の評価については、構造物の形状や架橋地点の地形、考慮する震源により、波力が異なることから、一意的に設計波力を詳細に決定することは難しいが、本稿で紹介する手法により、構造物に津波が作用した場合の波力の評価が可能になると考えられる。次章以降に、一連の検討内容と結果について述べる。

*1 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)橋梁事業本部 グループ長 博士(工学), 技術士(建設, 総合技術監理部門)

*2 技術統括本部長崎研究所 技術士(建設部門)

*3 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)橋梁事業本部 主事 技術士(建設, 総合技術監理部門)

*4 技術統括本部長崎研究所 主席研究員 博士(工学) *5 技術統括本部長崎研究所

*6 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)橋梁事業本部

2. 津波水路実験と数値シミュレーション

2.1 津波水路実験

実験には、図1に示す長さ 20m、断面幅 0.7m、断面高さ 1.0m の片面ガラス張りの可視化水路を使用した。波はスライド式造波板により生成し、造波板の移動距離と速度、静水深を調整することで、津波の高さ、流速、周期を調整することが可能である。模型は、模型支持梁を介して水路上の梁に固定した分力計と接続されており、直接模型に作用する波力を計測することができる。本実験の相似則は、津波を再現するような水理実験では一般的に水の摩擦抵抗や表面張力の影響が小さく、粘性効果は重力効果に比べて十分小さいことから、フルード数(Fr)による以下の相似則を適用した。

$$Fr = \frac{v_p}{\sqrt{gH_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{gH_m}} \quad (1)$$

ここに、 v は津波流速、 g は重力加速度、 H は浸水深さを表し、下付きの p 及び m はそれぞれ橋桁の実物と模型に対応するそれらの諸量を表すものとする。

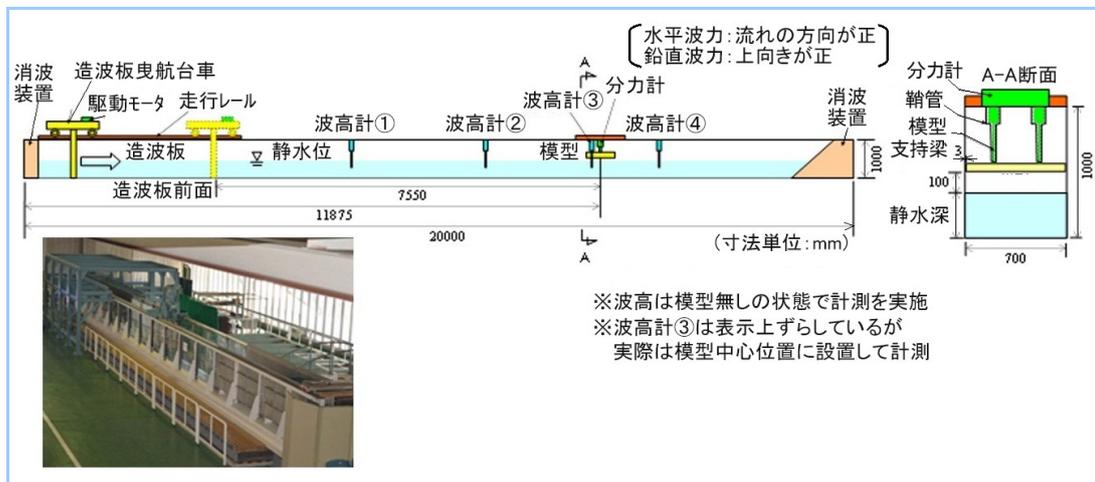


図1 津波水路実験設備概要

水路全体の概要と計測点及び模型のセッティングを示す。

2.2 数値シミュレーション

上記の津波水路実験を数値解析で再現することができれば、様々な津波性状の再現と津波波力の算出を効率的に実施することができる。そこで、津波水路実験を数値シミュレーション(CFD: Computational Fluid Dynamics)で再現することを試みた。解析には汎用の流体解析コードである ANSYS 社の FLUENT を用い、津波の自由表面の決定には、界面捕捉手法の一つである VOF (Volume of Fluid) 法を採用し、水と空気の2相流として流体をモデル化した。なお、VOF 法とは解析セル中に流体の占める割合を表す関数を定義し、この関数の移流方程式を解くことにより水面の変化を追跡する手法である。また、2相流流体モデルとした理由として、橋梁に津波が作用すると波の自由表面と床版張り出し部、桁間空間に閉じ込められた空気層により、浮力を伴う大きな上揚力が発生することが考えられ、この現象を正確に評価するためである。支配方程式は、連続式と運動方程式(Navier-Stokes 方程式)であり、乱流モデルには LES (Large-Eddy Simulation) を用いた。

2.3 実験及び解析結果

実験及び解析結果の一例として、孤立波状の津波で検討したケースを示す。実験ケース及び実験における津波高さの設定を表1並びに図2に示す。本実験で考慮した津波の最高高さは 10m (実験値 20cm)、流速は 6.4m/s (実験値 0.91m/s) である。これは、南海トラフ地震により想定される津波高が対象とする橋梁位置付近で 5~10m と予測されていたこと⁽⁴⁾、東北地方太平洋沖

地震の津波による漂流物の画像解析より、流速が約 6m/s 程度⁽⁵⁾と推測されていたことから設定したものである。実験では、造波板の稼働速度やストローク、静水深を調整することで、所要の波高さ・流速を有する孤立波の造波を行った。なお、本実験装置ではスライド式造波板の制御及び模型縮尺の設定により、長周期波、段波(砕波有、無)の再現も可能である。

表1 実験ケース

ケース	津波高さ h_a (cm)	設定流速 v_a (m/s)	橋梁模型横断勾配 (%)	
1	20	0.91	0	
2		0.83		
3		0.80		
4	13	0.88		
5		0.78		
6		0.60		
7	11	0.79		
8		0.59		
9		0.53		
10	20	0.91		2.5
11				5.0

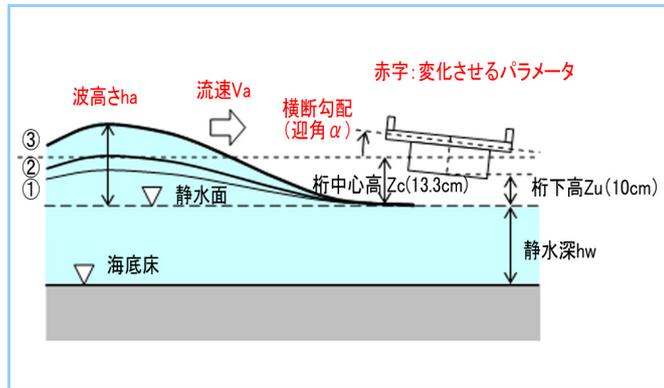


図2 実験における津波高さ、流速、横断勾配の設定
実験において設定した波高さ(3種類)と橋梁位置の関係を示す。

一例として、ケース1の実験と解析の断面周りの流況比較を図3に示す。断面周りの流況として以下の特徴が捉えられている。

- (a) 波がはじめに下フランジ前流側端部に接触する。
- (b) 波が下フランジ下面及び前流側床版張出し下面に浸入すると同時に、ウェブ側面、前流側高欄側面に衝突して打ち上げられ越波する。
- (c) 越波水塊が床版上面に落下する。
- (d) 落下した水塊が後流側の高欄を乗り越えるとともに、橋桁下面では波が下フランジ下面から離れる。

上記挙動は実験で観察された流況と概ね一致しており、実験結果を定性的に再現できている。

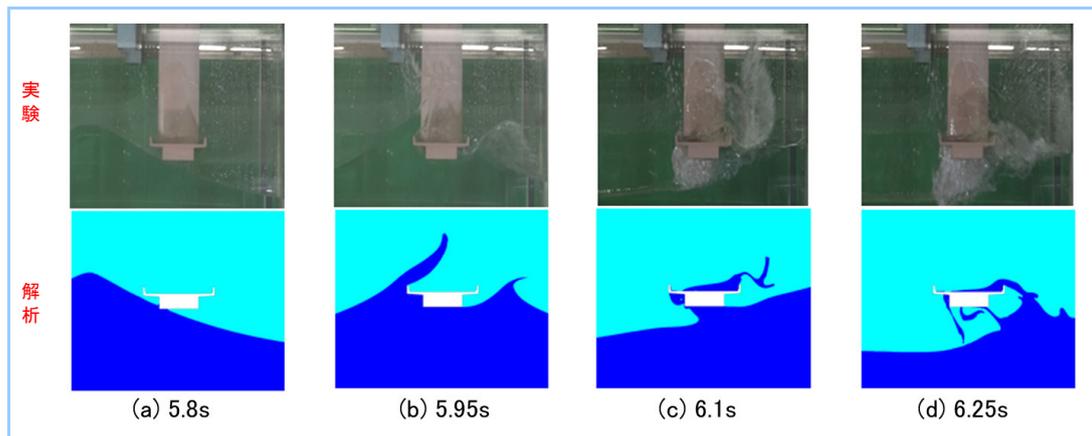


図3 実験と解析の断面周りの流況比較(ケース1)

また、実験及び解析により得られた水平波力、鉛直波力、流力モーメントの比較を図4に示す。実験における波力は、模型上部に取り付けた分力計により直接計測した値で、解析における波力は、橋梁モデルの表面に作用する津波による圧力を積分して求めた。また、実験では模型の振動、解析では数値計算上のノイズが発生するため、10Hz のローパスフィルター処理によって波力を平滑化して比較した。図4の縦軸は波力の計測値及び解析値を示し、横軸は造波板の稼働開始を0秒と定義した時刻を示しており、同図より本解析手法を適用することで、波力波形における複数ピークの存在や作用方向など波力の時間変化の傾向を良く再現できていることが分かる。

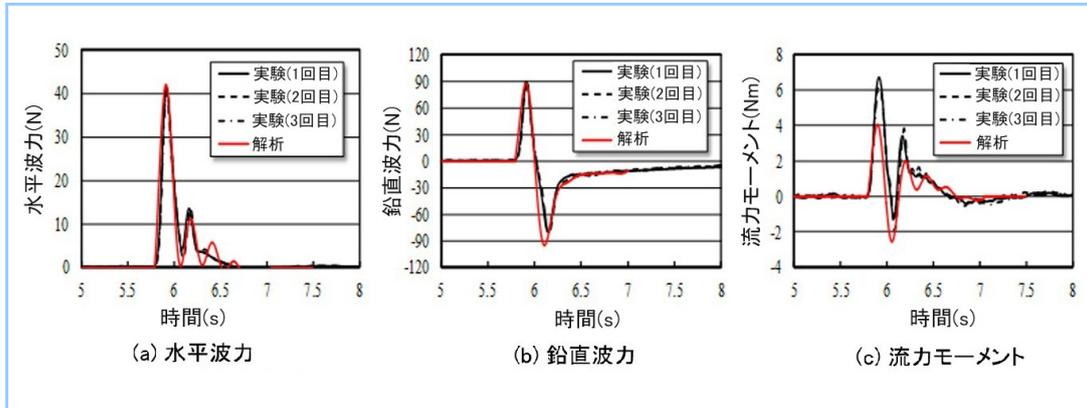


図4 実験と解析の波力波形の比較(ケース1)
 本実験並びに解析で得られた水平波力, 鉛直波力, 流力モーメントの比較を示す。

3. 架橋地点における3次元数値シミュレーション

津波の襲来形態は多様であり, 実際の津波の想定には震源断層及び架橋地点の特定が必要である。一般的な津波解析は, 想定する震源断層モデルの地殻変動量より初期水位を求め, 2次元の非線形長波理論(浅水理論)に基づき, 震源からの対象沿岸領域までの津波の伝播及び遡上を解析するものである。しかしながら, 陸上に遡上する津波は, 地形や構造物の影響を受けて複雑な流れとなる。橋梁構造物に作用する津波波力を精度良く求めるには, 橋梁前面における作用津波の打ち上がりや背後への回り込み等の3次元的な流体现象を再現する必要があるが, 2次元解析では複雑な地形や立体的な形状を有する構造物に作用する波力を精度よく再現することができない。

そこで, 特定範囲の架橋地点における津波挙動や対象橋梁に作用する津波波力を精度よく再現するため, 3次元数値シミュレーションの適用を行った。シミュレーション実施においては, 2次元の広域津波伝播解析にて架橋地点近傍の津波波高, 速度, 流向を算出し, その結果を架橋地点周辺の3次元解析モデルの境界に連携させるという手法を適用した。具体的には, 3次元解析モデル境界の各メッシュに広域伝播津波解析で求められた津波の波高さ, 流速を線形補完して入力し, 各タイムステップで3次元領域内の水量及び運動量の収束計算を行い津波の挙動を算定した。3次元解析により, 対象とする橋梁面に作用する圧力を求め, これらを積分することで橋梁に作用する津波波力の評価を行う。なお, 3次元解析で使用するソフト, 乱流モデル等は2章で記載した内容と同様である。

この手法を用いることにより, 特定範囲の構造物に作用する津波波力シミュレーションが可能となる。図5に広域津波伝播解析結果を, 図6に3次元数値シミュレーションの解析結果例を示す。なお, 津波が河川を遡上するような場合の解析については, 細かい地形データ(解析メッシュ)の作成方法, 河川の通常の水の流れの考慮等, 検討すべき課題が残されている。

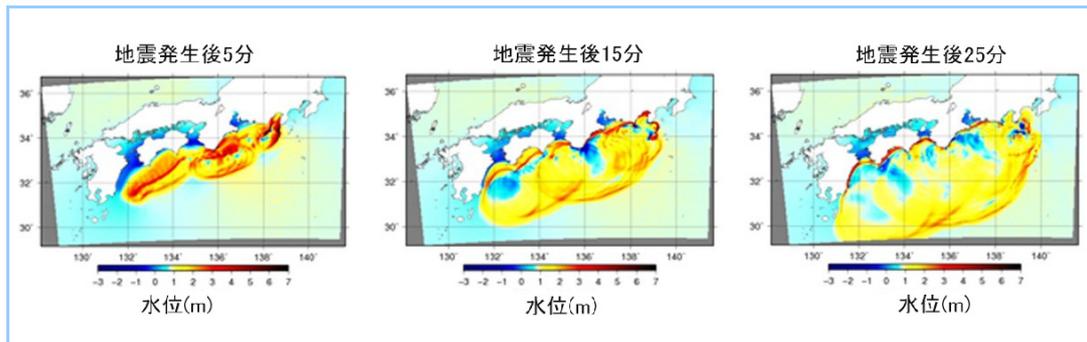


図5 広域津波伝播解析結果
 広域伝播解析により得られた地震発生後, 5分, 15分, 25分における津波伝播状況を示す。

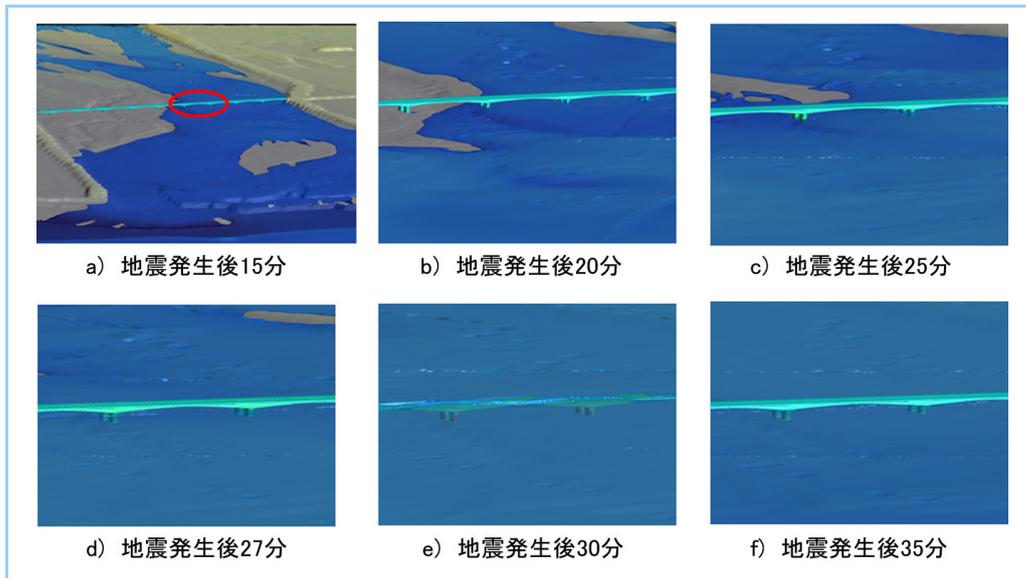


図6 3次元数値シミュレーション結果

3次元数値シミュレーションで得られた地震発生後 15 分、20 分、25 分、27 分、30 分、35 分における橋梁周辺の津波遡上状況を示す。

4. まとめ

橋梁に津波が作用した際の挙動の把握、解明及び設計に適用する波力を算出することを目的とした津波水路実験とそのシミュレーション、及び2次元広域津波伝播解析と3次元数値解析を組み合わせた数値シミュレーションを紹介した。一連の手法により、橋梁に作用する津波波力を評価、想定される被害状況の把握と対策の検討に適用することが可能となる。数値シミュレーション自体はある程度確立された解析手法であるが、解析において正確な挙動を再現するためには水路実験等により実際の挙動と波力発生メカニズムを把握し、適切なモデルを設定した上で解析を実行することが必要不可欠である。一連の津波関連技術については今後も技術開発を継続し、更なる精度向上を図っていく。

謝辞: 本稿に掲載した技術は、(株)高速道路総合技術研究所からの受託業務成果の一部をまとめたものである。また、東北大学災害科学国際研究所の越村教授には本技術開発のご指導を賜った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 四條, 青木, 林, 鈴木, 横山, 越村: 橋梁上部構造に作用する津波波力の VOF 法による数値解析的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp801-805, 2013.11.
- (2) 林, 青木, 四條, 鈴木, 越村, “橋梁上部構造に作用する津波波力特性に関する基礎的検討”, 構造工学論文集 Vol. 60(2014年3月), pp.45-58.
- (3) 四條, 佃, 佐藤, 池末, 樋口, 工藤, 石崎, 清水: 発電所における東北地方太平洋沖地震津波の3次元数値シミュレーション, 日本機械学会論文集B編 79 巻 801 号, pp253-264, 2013.5.
- (4) 内閣府資料: 南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等(第二次報告)及び被害想定(第一次報告)について, 2012.8.
- (5) 清水, 幸左, 佐々木, 竹平: 道路橋の津波による被害分析, 構造工学論文集 Vol.58A, pp.366-376, 2012.3.
- (6) Kenji KOSA, “Damage of Structure due to Great East Japan Earthquake”, The International Workshop on Advances in Seismic Experiments and Computation (ASEC2012), Advanced Research Center for Seismic Experiments and Computations (ARCSEC), 2012.3.
- (7) 中尾, 伊津野, 小林: 橋梁基本断面に作用する流体力と流速・波高の関係に関する基礎的検討, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.564-575, 2010.3.
- (8) 五十里, 後藤: 津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.211-215, 2007.10.