

津波波力に関する基礎的検討 ―数値解析―

三菱重工業(株) 正会員 ○四條 利久磨

(株)高速道路総合技術研究所 正会員 青木 圭一 正会員 林 秀和

三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 正会員 鈴木 俊光

東北大学 正会員 越村 俊一

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、多数の橋梁が流出した。今後、南海トラフ地震など巨大地震による津波の来襲が危惧されるなか、津波発災時の道路ネットワーク網を保持するためにも、津波による橋梁構造物の被害を適切に評価し、起こり得る被害を最小限に抑える方法を検討する必要がある。著者らは、これまでに汎用の流体解析コードとVOF法(Volume of Fluid Method)¹⁾を用いた数値解析によって、津波の遡上現象や建屋群に作用する津波波力の再現を行ってきており^{2),3),4)}、橋桁のように上下に空間のある構造物の津波波力の評価にもこの解析手法が適用できると期待される。そこで、本研究では、高速道路橋で一般的に用いられている箱桁断面を対象とした水路模型実験⁵⁾の再現計算を行い、橋桁断面における津波波力評価への数値解析の適用性を検証した。

2. 数値解析手法と解析条件

2.1 数値解析手法

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。支配方程式は以下で示す連続式と2次元非定常のNavier-Stokes方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla (p) + \mu \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\rho = \phi \rho_1 + (1 - \phi) \rho_2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ ：流速ベクトル、 p ：圧力、 μ ：流体の粘性係数、 $\mathbf{g}$ ：重力加速度ベクトル、 ρ_1 ：水の密度、 ρ_2 ：空気の密度、 ϕ ：水の充填率($0 \leq \phi \leq 1$)、 ρ ：水と空気の混在を考慮した見かけの密度である。

式(1)と式(2)の空間離散化には有限体積法を用い、流速と圧力の連成解法にはPISO法を採用した。また、乱流モデルにはLESを用いた。解析には汎用の流体解析コードとしてANSYS社のFLUENTを用いた。

2.2 解析条件

図1に解析領域の概要を示す。解析領域は、造波板前面位置を $x=0\text{m}$ として波の進行方向を x の正方向とした。造波板前面の解析領域長さは 12.0m とし、実験と同様に造波板前面から 7.55m の位置に橋梁モデルを配置した。解析領域の境界条件については、解析領域端面および底面を壁面境界条件(No-slip条件)、解析領域上面を出口圧力境界条件とした。また、解析における津波の造波は、実験で用いた造波板の動きを移動計算格子で直接模擬することにより行った。解析でははじめに、橋梁モデルの無い状態での通過波再現解析を行い、モデル設置位置において、最大津波高と水位波形、津波流速の実験との合わせこみを行った。次に、橋梁モデルを再現し、通過波再現解析で生成した波を橋梁モデルに作用させて津波波力を算定した。実施した解析ケースを表1に示す。水路実験同様、津波高、流速および横断勾配をパラメータとした。

表1 解析ケース

ケースNO.	津波高 h_a	流速 v_a	横断勾配
1	20 cm	0.91 m/s	0%
2	20 cm	0.83 m/s	0%
3	20 cm	0.80 m/s	0%
4	13 cm	0.88 m/s	0%
5	13 cm	0.78 m/s	0%
6	13 cm	0.60 m/s	0%
7	11 cm	0.79 m/s	0%
8	11 cm	0.59 m/s	0%
9	11 cm	0.53 m/s	0%
10	20 cm	0.91 m/s	2.5%
11	20 cm	0.91 m/s	5.0%

※津波高、流速は橋梁モデル中心における値

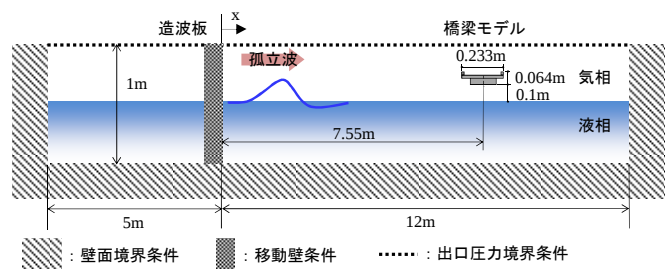


図1 解析領域の概要

キーワード：津波、橋梁、箱桁、波力、数値解析、VOF法

連絡先：〒851-0392 長崎県長崎市深堀町 5-717-1 三菱重工業(株) 長崎研究所 流体研究室 TEL095-834-2820

3. 解析結果

3.1 断面周りの流況

解析結果の一例として、最も大きな波力が得られたケース1の断面周りの流況を図2に示す。ここで、解析結果画像については、 $\phi=0.5$ の等値線を境界とした水面形を示し、画像下に示す時刻は造波板の稼働開始を0秒と定義した場合の時刻を示す。図2より、橋桁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およ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とともに、橋桁下面では波が下フランジから離れる
- 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と言える。

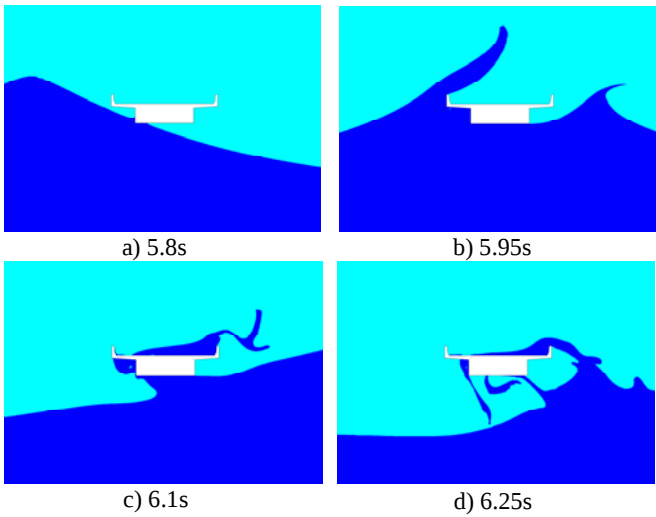


図2 橋桁に作用する津波の流況（ケース1）

3.2 波力波形

ケース1の水平波力、鉛直波力波形を実験と解析で比較したものを図3に示す。ここで、波力の向きは、水平波力は流れ方向を正、鉛直波力は上向きを正と定義している。また、横軸の時刻は図2と同様、造波板の稼働開始を0秒と定義した場合の時刻を示している。図3より、図2 b)に示した、ウェブ側面、前流側高欄側面に津波が衝突し、下フランジ下面および前流側床版張出し下面に波が浸入した時刻に、最大の水平波力、上向き鉛直波力が作用する特性を再現できていることが分かる。また、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。なお、解

析では水路壁面と模型の隙間を考慮していないため、橋面上に溜まった水が動揺し高欄に衝突することによる水平波力のピークが3つ目以降に現れている。

3.3 ピーク波力

ケース1のピーク波力を実験と解析で比較したものを表2に示す。これより、1つ目のピークについては、水平波力が+4%、鉛直波力が-2%の誤差で評価できている。一方、2つ目のピークについては、誤差が水平波力で-14%、鉛直波力で19%と比較的大きい。2つ目のピークは、橋桁に作用して砕けた波が再び橋桁に作用した際に発生する波力に関係しており、砕けた波による作用力の評価精度の向上が今後の課題である。津波高、流速を変化させた他のケースについても、20%程度誤差が生じるケースがあるが、津波高、流速の変化による津波波力の変化およびその概略値を評価できることが確認された。

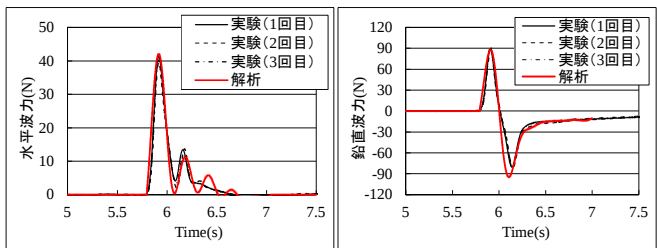


図3 実験と解析の波力波形の比較（ケース1）

表2 実験と解析のピーク波力の比較（ケース1）

区分		実験※	解析	解析誤差
水平波力 (N)	1つ目のピーク	40.5	42.1	+4%
	2つ目のピーク	13.1	11.3	-14%
鉛直波力 (N)	1つ目のピーク	89.5	87.8	-2%
	2つ目のピーク	-79.7	-94.7	+19%

※実験結果は3回計測の平均値を示す。

4. おわりに

本研究で用いた解析手法により、橋桁に作用する津波の挙動や津波波力の特性およびその概略値を把握できることが確認された。今後は、更なる精度向上と様々な津波条件への適用を図る予定である。

参考文献

1) Hirt, C.W., Nichols, B.D., "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol.39 (1981), pp.201-225.
2) 池末俊一, 四條利久磨, 佐藤敏浩, "複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション", 土木学会第67回年次学術講演会(2012), II-216, pp.431-432.
3) 四條利久磨, 佐藤敏浩, 池末俊一, "複数構造物に作用する津波波力に関する3次元数値シミュレーション", 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2(2012), 1-761-765.
4) 四條利久磨, 佃嘉章, 佐藤敏浩, 池末俊一, 樋口康二郎, 工藤悟志, 石崎潤一, 清水信一, "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", 機械学会第90期流体工学部門講演会(2012), pp.547-548.
5) 林秀和, 青木圭一, 横山薫, 四條利久磨, 越村俊一, "津波波力に関する基礎的検討—水路模型実験—", 土木学会第68回年次学術講演会(2013), (掲載予定)