

津波による橋梁被災解析への VOF 法に基づく三次元流体解析手法の適用性検討

A study on the applicability of a VOF based Three-Dimensional Numerical model for analysing tsunami-induced damage to bridges

○直田 梓, 京大院, 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, naota.azusa.32v@st.kyoto-u.ac.jp
米山 望, 京大防災研, 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, yoneyama.nozomu.4w@kyoto-u.ac.jp
Azusa NAOTA, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011
Nozomu YONEYAMA, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

When the Tohoku Earthquake occurred in March 11, 2011, the associated tsunami washed away a number of bridges. This resulted in difficulties such as transport disorder to rescue and recovery operations. Therefore it is necessary to estimate tsunami force acting on a bridge. In this study, we applied the three-dimensional numerical analysis based on VOF method to two hydraulic experiments, each with a different type of bridge model. The results of the calculation are compared with those of the experiments in regard to the horizontal and vertical forces. As a result, the method well simulated each time series variation of tsunami force acting on the bridge beam.

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では、地震に伴って発生した津波により青森県から千葉県にかけての太平洋側沿岸部で家屋等の被害に加え、湾港、道路、鉄道等の社会基盤構造物が多数被災した。構造物被害の中でも橋梁が被災し使用不能となった場合、代替路を近くに確保できないことが多く迂回ルートが長くなるため、避難・救助等の緊急活動や迅速な復旧活動の大きな妨げとなる。阪神・淡路大震災(1995年)以降、橋の耐震補強が進められてきた一方で、橋梁構造物の橋桁は河川の計画高水位より上に設置するため水による外力を想定しておらず、津波来襲時の橋梁の安全性評価はなされていなかった。陸上輸送において重要な交通基盤の要素である橋梁が地震・津波災害時にその機能を保持するためには津波外力を考慮した設計が必要であり、橋梁構造物に作用する津波波力の評価、またその津波波力によって発生する橋梁被害を予測することは重要な課題である。

東日本大震災では、橋桁の落橋・流出や橋脚の破壊・流出、盛土の崩壊・流出といった様々な橋梁被害が発生し、橋によってその被害状況が異なる。橋桁の被災過程については、橋台部のサイドブロックにほとんど損傷がないケースがあることや、沓座固定用アンカーボルトが上方向に引抜かれ上流側に傾いている等の被災状況の調査報告を受け、橋桁の浮き上がりや回転移動が推測されている。インド洋大津波(2004年)での橋梁被害の発生以降、橋桁に作用する津波波力に関する研究が水理模型実験および数値解析により行われているが、鉛直方向に作用する力のメカニズムについては評価手法が確立しておらず、橋梁被災のメカニズ

ム解明のためには今後さらに詳細な作用波力の分析を行う必要がある。

橋梁の被害状況の差を現地スケールで分析し、詳細な作用波力の分析を行うためには三次元数値解析が有効であると言える。米山らはこれまでにVOF法を用いた三次元数値解析手法によって北海道南西沖地震津波の奥尻島における津波遡上現象の再現をしており(米山ら, 2001)、津波により物体が移動回転する挙動の解析手法を構築し、津波波力によるフラップゲート式可動防波堤の動きを適切に解析できることを示している(米山ら, 2011)。そのため、橋桁に作用する津波波力の分析へもこの解析手法は有効であると期待される。しかし、橋桁のように静水面の上部に構造物があるという条件に適用した例はなく、流体中にある物体と異なり、上部にある場合には津波の衝突力を強く受けることが予想されるため、まずはその波力の再現精度を検証する必要がある。

そこで本研究では、橋桁の縮尺模型に作用する津波波力を計測した既往の水理模型実験の再現計算を行い、波力の再現精度を検証した。再現計算を行ったのは模型形状の異なる2つの実験である。1つは長方形断面の橋桁模型を用いて桁下高を変えた実験を行い、作用波圧と水平・鉛直波力の特性を検討した荒木ら(2010)の実験。もう1つは溝形断面の橋桁模型を用い、橋梁の津波安全性評価を行う際の波力について検討を行った片岡ら(2006)の実験である。

2. 解析手法の概要

数値解析手法は米山らが北海道南西沖地震津波の奥尻島における津波挙動を適切に再現した三次元津波流動解析法

(米山, 2001)を用いた. 詳細は文献に記載されているため, ここではその概要のみを簡単に示す.

基礎方程式は以下のようなものである.

- 連続式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- 運動方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (2)$$

- 流体充填率の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

ここで, u : 流速の各方向成分, G_i : 単位体積あたりの外力, p : 圧力, ρ : 流体密度, ν : 動粘性係数, F : 計算セルの流体充填率 (=セル内の流体体積/セル内の空隙体積), $\bar{\cdot}$: レイノルズ平均量, $\overline{\cdot}$: レイノルズ平均量からの変動量である. また, 式(2)中のレイノルズ応力 $-\overline{u_i' u_j'}$ を求めるため, 以下の乱流評価式を用いた.

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

ここで, k : 乱流エネルギー, ε : 乱流エネルギー散逸率, ν_t : 渦動粘性係数であり, 式(4)~式(7)中の定数は $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.45$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $C_\mu=0.09$ とした.

以上の基礎方程式を直角座標系上で離散化して SIMPLE 法(Patankar ら, 1972)に基づいて解析した. 各物理量の定義点は, 流速のみを計算セルの境界面中央, その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし, 離散化は時間について前進差分, 移流項は三次精度風上差分, その他は中央差分とした. 底面や側面境界条件は流速, 乱流量ともフリースリップとした.

また, 式(3)はドナクセプタ法を用いて計算した. これに関して, 流体体積を保存するためのいくつかの工夫を行っている(米山, 1998).

3. 解析手法の適用性検討

3.1 長方形断面の橋桁模型への適用

a) 実験の概要と計算条件

荒木ら(2010)は単純化した橋桁模型として長方形断面の水平板を用いた水理模型実験を行っている. 実験は川幅 20m 程度の小河川を想定し, 長さ 41.0m, 幅 0.7m の断面二次元水路を用い, 津波の河川遡上を模擬した.

Fig.1 にその概要を示す. 水路内には勾配 1/40 の固定床が設置されており, 固定床から 0.24m の位置に橋桁模型を設置している. 水路端の造波機により孤立波状の波を発生させ, 模型上面に取り付けた片持ち梁式の波力計, および模型の周囲に取り付けた波圧計(計測点を Fig.2 に示す)により橋桁模型に作用する波力と波圧を測定した.

Fig.3 に橋桁模型付近の模式図を示す. 実験は桁下高 h および橋桁模型から沖側 0.1m の位置に設置した波高計 2(Fig.1 参照)で計測される津波高 H を変えて複数のケースで行われた.

本研究では $h=7\text{cm}$, $a=3.2\text{cm}$ のケース(Case1)と $h=5\text{cm}$, $a=3.9\text{cm}$ のケース(Case2)の 2 つの実験の再現計算を行った (Table 1). ここで a は橋桁下面からの津波高($H-h$)である.

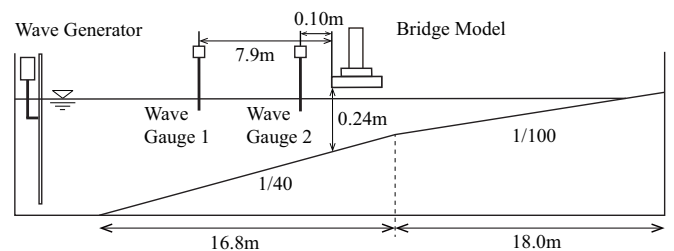


Fig.1. Schematic of the experimental set-up.

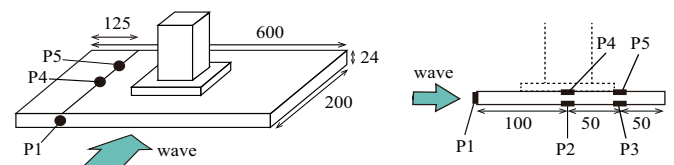


Fig.2. Dimensions of the bridge model (unit ; mm).

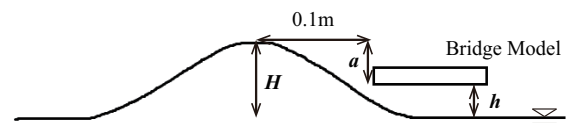


Fig.3. Diagram showing parameters of the experiment.

Fig.4 に解析領域の概要を示す．解析領域は斜面勾配が 1/40 の範囲で Fig.1 に示した波高計 1 より岸側とした．水路と橋桁模型の隙間および模型上面に取り付けられた波力計は無視し，橋桁を平板として扱った． X 軸方向の格子間隔は 0.025~0.05m の間で変化させ，橋桁近傍では 0.025m とした． Z 軸方向のメッシュ間隔は 0.006~0.0125m の間で変化させ，橋桁近傍では 0.006m とした． Y 軸方向は一定で 0.15m とした．沖の入射境界には，波高 1(Fig.1 参照) の水位変動の測定値を用いて水位を設定し，水位変化を満たすような断面平均流速を計算し，その値を境界の流速として設定した．

b) 解析結果と実験結果の比較

桁下高が大きいケース(Case1)の解析で得られた橋桁周辺の流れの様子と圧力分布を Fig.5 に示す．橋桁の沖側の面に波圧が作用し，底面に波圧が作用した後，越流し，上面に波圧が作用する様子が分かる．

Fig.6 に Case1 で得られた波圧および波力の解析結果と実験結果を比較したものを示す．Fig.6(a)は沖側計測点(P1)での波圧の時間変化を比較したものである．Fig.5 から分かるように 6.5 秒以降では沖側の面に津波は作用していないため，6.5 秒までの間で比較すると解析結果が実験結果を十分な精度で再現していることが分かる．

Fig.6(b)より橋桁下面の計測点(P2)に作用する波圧は解析結果が実験結果よりやや大きな値となっているが，時間変化の傾向は良く一致している．

Fig.6(c)より，上面計測点(P5)では，解析結果が実験結果より小さな値となった．これは，上面に乗り上げる水量が正確に予測できていないためと考えられるが，波圧の時間変化の傾向は一致している．

Fig.6(d)は，分力計により計測された鉛直波力を解析結果と比較したグラフである．解析結果に変動はあるものの，時間変化の傾向は十分な精度で予測できた．6.2 秒~6.3 秒で解析値が実験値より大きな値を示しているが，これは下面に作用する波圧が過大評価となったためである．また，先に述べたように上面計測点の P5 での波圧は過小評価となったが，6.3 秒以降で鉛直下向きの力が実験結果とほぼ一致していることから，上面全体での波圧は実験結果をおおむね再現できたと言える．

Fig.7 に桁下高が小さいケース(Case2)で得られた波圧および波力の解析結果と実験結果を比較したものを示す．Fig.7(a), Fig.7(b)より沖側計測点(P1)および橋桁下面計測点(P2)では解析結果が実験結果を精度良く再現していることが分かる．Fig.7(c)より，上面計測点(P5)では Case1 と同様に解析結果は実験結果より小さな値となったが，時間変化の傾向は一致した．

鉛直波力は Fig.7(d)より，解析結果に変動はあるものの，

7.4 秒までは十分な精度で予測できている．また，それ以降では上面の波圧が過小評価となったため解析値が実験値より大きな値を示しているが，時間変化の傾向は一致している．

桁下高が大きいケース(Case1)と桁下高が小さいケース(Case2)の実験結果を比較すると，作用する波圧および鉛直方向波力は桁下高が大きいケースの方が大きくなり，鉛直方向波力の継続時間は桁下高が小さいケースの方が長くなっている．このような桁下高の違いによる作用波力の特徴を数値解析により再現できていることが分かる．

Table 1. Experimental condition.

	Clearance h (m)	Wave height above bottom face of the bridge model a (m)
Case 1	0.070	0.032
Case 2	0.050	0.039

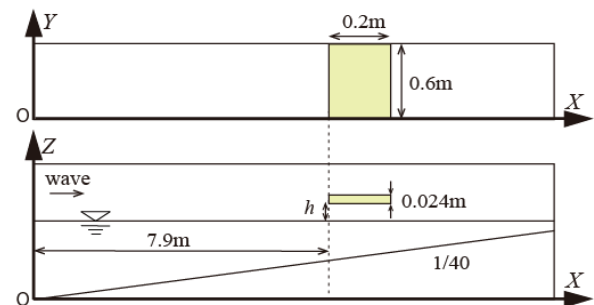


Fig.4. Diagram of the basic numerical domain.

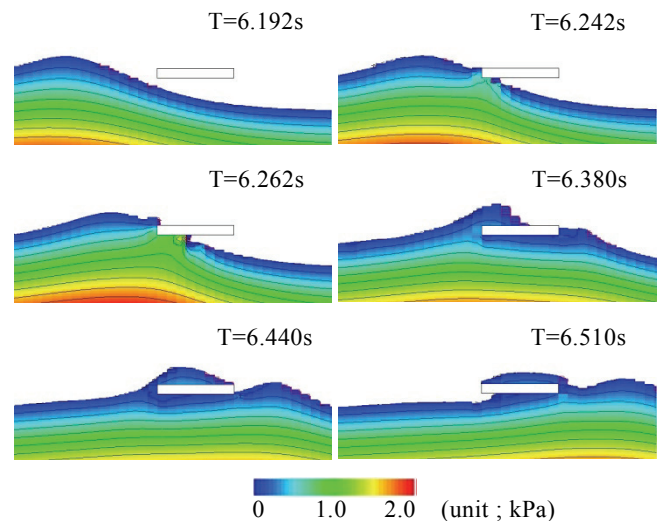
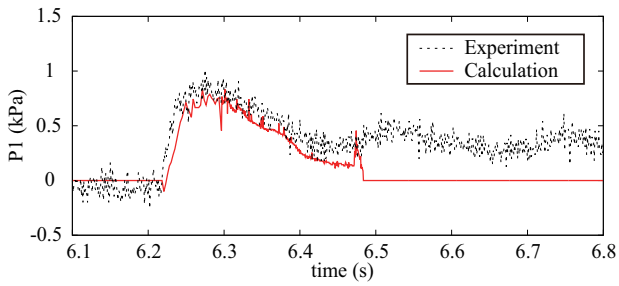
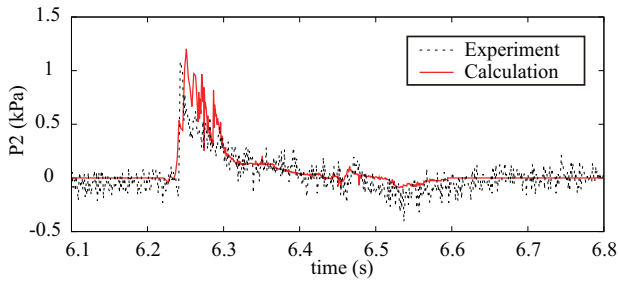


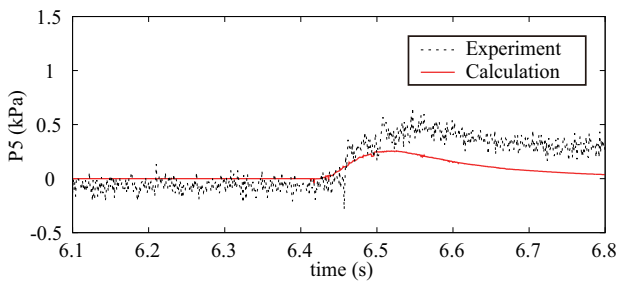
Fig.5. Free surface profile and pressures at different times (Case 1).



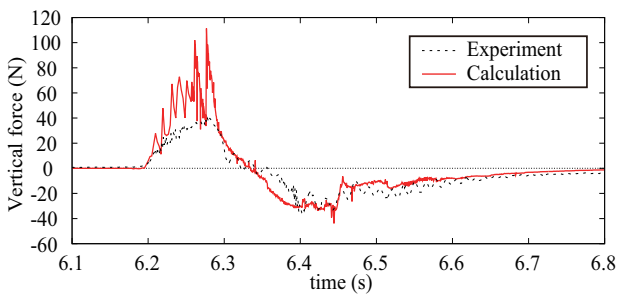
(a) Pressure at P1 of the bridge model (front face).



(b) Pressure at P2 of the bridge model (bottom face).

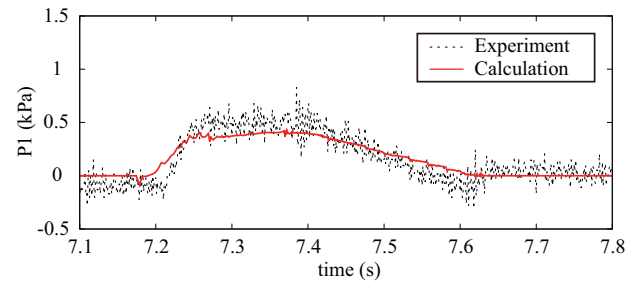


(c) Pressure at P5 of the bridge model (top face).

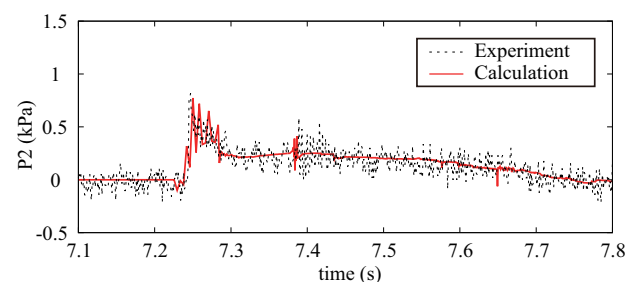


(d) Vertical force

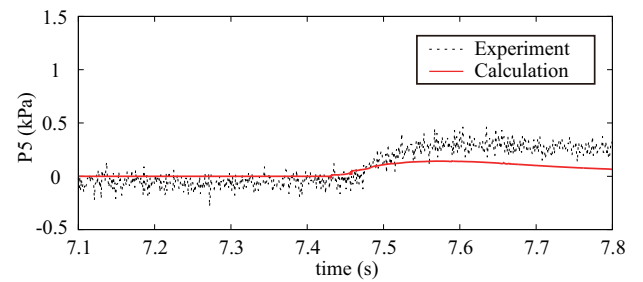
Fig.6. Comparison of time series of wave pressure and vertical wave force obtained in Case1 ($h=0.070\text{m}$, $a=0.032\text{m}$).



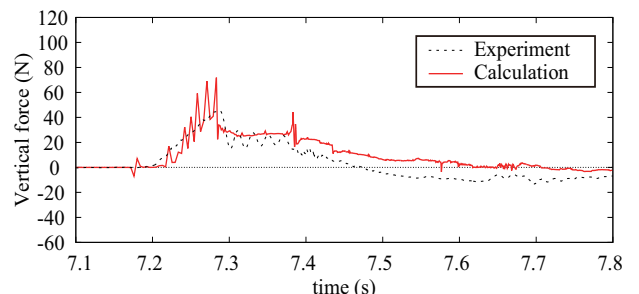
(a) Pressure at P1 of the bridge model (front face).



(b) Pressure at P2 of the bridge model (bottom face).



(c) Pressure at P5 of the bridge model (top face).



(d) Vertical force

Fig.7. Comparison of time series of wave pressure and vertical wave force obtained in Case2 ($h=0.050\text{m}$, $a=0.039\text{m}$).

3.2 溝型断面の橋桁模型への適用

a) 実験の概要と計算条件

片岡ら(2006)は溝形断面の橋桁模型を用いて水理模型実験を行い、橋桁に作用する津波波力の測定を行っている。

実験は長さ 140m, 幅 2m の水路を用いて行われた。Fig.8 にその概要を示す。水路内には海域と陸域を想定した勾配 1/20 と勾配 1/100 の固定床が設置されており、固定床から 0.35m の位置に橋桁模型を設置した。橋桁模型の奥行きは水路幅と同じであり、波力を計測する対象は水路中央の

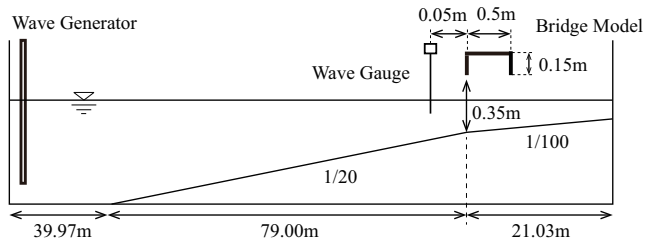


Fig.8. Schematic of the experimental set-up.

0.5m の部分とした。水路端の造波機によって発生させる孤立波の周期(水位が静水深から上昇し再び静水深付近に戻るまで)は 10 秒で、孤立波の初期波高および桁下高を変えた複数の条件で実験を行っている。そして、それぞれのケースにおいて分力計で橋桁模型に作用する水平波力と鉛直波力を測定したほか、橋桁模型から 0.05m 沖側の位置に設置した容量式波高計により水位変動を測定した。本研究では、詳細な実験結果が得られている孤立波の初期波高 0.4m のケースについて再現計算を行った。

Fig.9 に解析領域の概要を示す。X 軸方向の格子間隔は 0.05~0.5m の間で変化させ橋桁近傍では 0.05m とした。Z 軸方向のメッシュ間隔は 0.025~0.05m の間で変化させ橋桁近傍では 0.025m とした。Y 軸方向の格子間隔は 0.25m で一定とした。鋼製の橋桁模型の厚さは無視した。

初期水位は桁下高($=h$) が 0.075, 0.125, 0.175, 0.225m となる水位を設定し、沖側境界から波高 0.40m, 周期 10 秒の孤立波の波形を与えた。

b) 解析結果と実験結果の比較

桁下高 $h=0.175m$ の解析で得られた橋桁周辺の流れの様子と圧力分布を Fig.10 に示す。計算開始後 28.46 秒ほどで津波が橋桁の沖側垂直面外側に衝突し、28.63 秒では、溝形断面内部に入り込んだ流れによって岸側垂直面内側および水平面内側に高い波圧が作用する様子が分かる。

Fig.11 に桁下高 $h=0.175m$ のケースでの波力の実験結果と解析結果の比較を示す。Fig.11(a)から橋桁沖側垂直面および岸側垂直面に津波が衝突した時刻に大きな波力が作用する様子など水平波力の時間変化の傾向を良く再現できていると言える。また、Fig.11(b)から実験では解析より 0.1 秒ほど早く鉛直力が発生している。これは、解析では津波が溝型内側の岸側隅に到達するまで鉛直力が発生しないが、実験ではそれ以前に溝型内側の水平面に到達しているためと考えられる。一方、前節の長方形断面では橋を乗上げる水量が十分一致しなかったが、Fig.11(b)の 29 秒以降の値が一致していることから、溝型模型では乗上げた水量を適切に評価できていることがわかる。また、最大値については、水平力については過大評価、鉛直力については過小

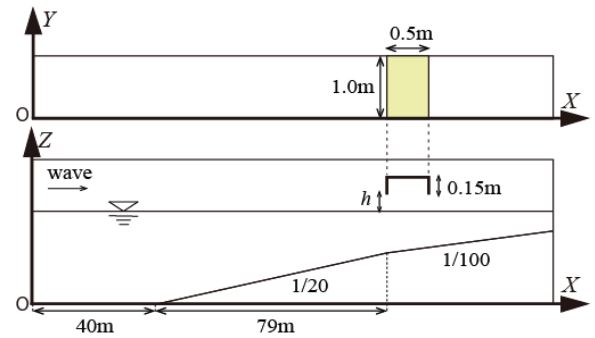


Fig.9. Diagram of the basic numerical domain.

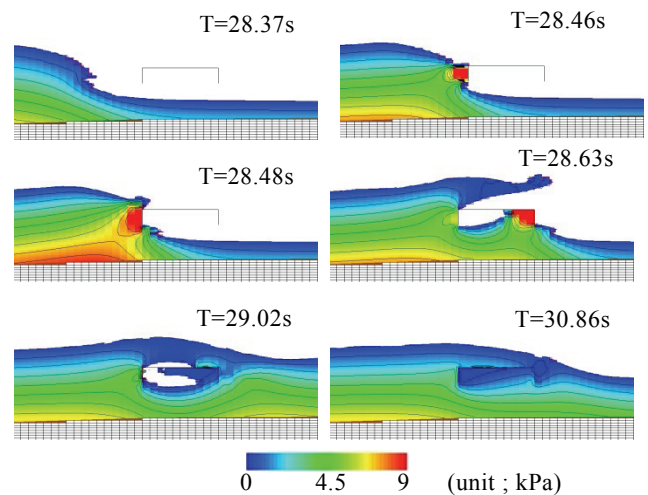
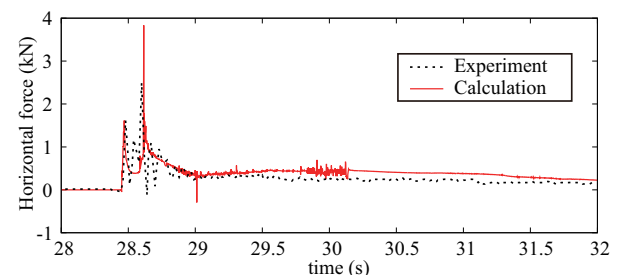


Fig.10. Free surface profile and pressures at different times (C-channel girder).



(a) Horizontal force

(b) Vertical force

Fig.11. Comparison of time series of wave force on the bridge model ($h=0.175m$).

評価となっている。これについて検討するため、桁下高を変化させて他のケースについても最大値を比較した。その結果を Fig.12 に示す。

Fig.12(a)および(b)から桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケース以外は最大波力がよく一致すること、桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケースが他のケースに比べ大きな値を示すことなど桁下高 h の変化に対する最大波力の定性的な変化は解析できていることがわかる。また Fig.12(c)は最大水平波力および最大鉛直波力をそれぞれの発生時間を無視して合力を計算したものである。この合力が桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケースを含め実験結果とよく一致することから、衝突する水塊の運動量を適切に解析できている可能性を指摘できる。

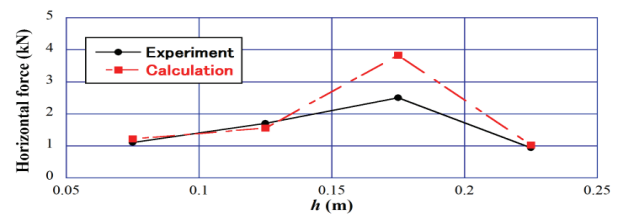
4. おわりに

VOF 法に基づく三次元数値解析法を橋梁に作用する津波波力の予測に適用した結果、以下のことがわかった。

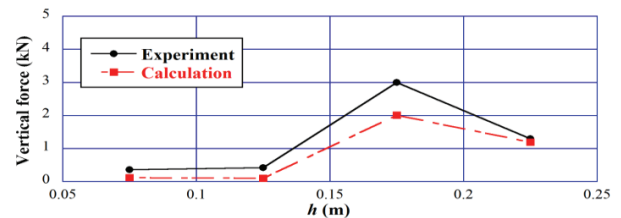
- 長方形断面の橋桁模型に適用した結果、桁下高の異なる2つのケースに関して、沖側面、下面における波圧は、実験結果を適切に再現した。上面の波圧は、解析結果は実験結果より小さな値を示したが、変化の傾向は一致した。また、桁下高の違いによる作用波力の特性を再現できた。
- 溝型断面の橋桁模型に適用した結果。桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケースについて水平波力の変化傾向が一致した。鉛直波力については、溝型下面への津波の回り込みに差異があることが推察された。波力の最大値は、桁下高 $h=0.175\text{m}$ のケース以外は水平、鉛直ともよく一致し、桁下高 h の変化に対する最大波力の変化は定性的に再現できた。
- 今回の解析で十分一致しなかった点は、長方形模型の場合は上面に乗り上げる水量、溝型断面模型では、内側への回り込みが十分再現できていないことが要因と考えられる。より高精度に再現するためには、実験模型の形状を解析形状に厳密に反映させることやより細かい格子間隔の採用などにより流況を高精度に再現する必要がある。

以上のように、本研究の解析法が橋梁に作用する津波波力をおおむね再現できることがわかった。今後は解析精度の向上を図るとともに、橋桁の形状および桁下高、津波形状の違い等による作用波力の特性を検討する。

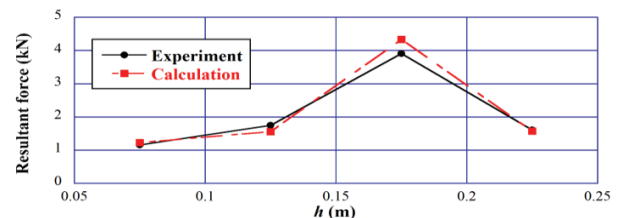
謝辞：本研究を行うに際し、大阪大学大学院工学研究科准教授 荒木進歩先生に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。



(a) Maximum horizontal wave force



(b) Maximum vertical wave force



(c) Total wave force

Fig.12. Comparison of the maximum wave force on the bridge model varying h .

参考文献

- 荒木進歩・坂下友里・出口一郎 (2010) : 橋桁に作用する水平および鉛直方向津波波力の特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 796-800.
- 五十里洋行・後藤仁志 (2007) : 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, 第 54 巻, pp. 211-215.
- 片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏 (2006) : 津波衝突時に橋桁に作用する波力, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 154-157.
- 鳴原良典・藤間功司・幸左賢二 (2010) : 2004 年インド洋津波における Banda Aceh 周辺の橋梁に作用した津波波力の再評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 231-235.
- 鳴原良典・藤間功司・幸左賢二・廣岡明彦・二井伸一・庄司学・宮島昌克・小野祐輔 (2009) : 2004 年インド洋津波におけるスマトラ島北西部沿岸の被災橋梁に関する数値計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 311-315.
- 庄司学・森山哲雄・平木雄・藤間功司・鳴原良典・笠原健治(2009): 巻き波砕波段波及び砕け寄せ波砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 826-830.
- 庄司学・森山哲雄・藤間功司・鳴原良典・笠原健治 (2009) : 単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的

- 検討, 構造工学論文集, 第 55 卷, pp. 460-470.
- 中尾尚史・伊津野和行・小林紘士 (2009): 断面形状の異なる橋桁に作用する津波の流体力に関する実験的研究, 地震工学論文集, 第 30 卷, 6-0004.
- 米山 望 (1998): 自由液面解析コード(FRESH)の開発, 日本流体力学会誌「ながれ」第 17 卷 第 3 号.
- 米山 望・中島健輔・永島弘士 (2011): 巨大津波発生時におけるフラップゲート式可動防波堤の挙動予測手法の開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, I_281-I_285.
- 米山 望・松山昌史・田中寛好 (2002): 1993 年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp. 139-150.
- Hirt, C.W. and B.D.Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp. 201-225.
- Patankar, S.V. and D.B.Spalding (1972): A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, pp. 1787.