# 鈑桁橋に作用する津波の圧力特性に及ぼす 桁端部の影響に関する一考察

川崎 佑磨1·伊藤 典昭2·伊津野 和行3

<sup>1</sup>正会員 立命館大学助教 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: yuma-k@fc.ritsumei.ac.jp

2学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: rd0011pf@ed.ritsumei.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: izuno@se.ritsumei.ac.jp

橋梁に作用する力を数値解析によって求める際,簡易な2次元モデルが用いられることがある.本研究 では、鈑桁橋を2次元および3次元でモデル化し、オープンソースの数値解析コードOpenFOAMで計算した. 桁端部の影響による2次元モデルと3次元モデルとの結果の差異に着目し、桁模型に作用する力を水理実験 結果と比較して考察した.その結果、桁模型に作用する揚力と流力モーメントには、主桁間に捉えられた 空気が桁端部から抜けることによる影響が大きく、桁端部をもモデル化した3次元解析が必要であること がわかった.

Key Words : tsunami, bridge, girder-end, multi-phase flow

## 1. はじめに

津波が襲来したときに、鈑桁橋のように桁下空間に空 気が閉じ込められやすい構造物では、水と空気との両者 の動きを解く混層流解析が必要だと考えられる.そのた め、橋梁に作用する津波の力を解析する際、混層流解析 が可能なオープンソースのOpenFOAM<sup>1)</sup>を利用する事例 が増えつつある<sup>例に120</sup>.

橋の一径間の津波に対する安全性を考えた場合,橋 桁断面は橋軸方向にそれほど大きく変化しないため,簡 易な2次元解析が行われることがある.しかし,本研究 で示す事例のように,桁下の空気が橋桁の端部からも抜 けることにより,橋桁に作用する揚力が2次元解析と3次 元解析では大きく異なることがあることがわかった.本 研究では,水理実験結果との比較を行い,数値解析上の 問題点について考察した.

#### 2. 比較に用いた実験の概要

本研究では、著者らによる既報の実験<sup>7</sup>で得られた抗 カ・揚力・流力モーメントの計測結果を、数値解析結果 と比較した.当該の実験では図-1に示す水路が用いられ ている.貯水槽は幅600mm×長さ2000mmで、ゲートを



図-1 実験水路立面図

急に引き上げることによって、幅200mm×長さ4000mm の水路に津波を模擬した水が流れる.貯水槽の初期水位 は250mmとした.また、幅の異なる水槽から水路部へ水 が流れる際の急縮にともなうエネルギー損失を軽減する ために、水槽のゲート付近の側壁は図-2のような曲線形 状になっている.

ゲートから3000mm下流位置に,桁下空間40mmで図-3 に示すアクリル製4主桁断面模型が設置されている.床 版部中央において,紙面直角方向にロードセルの支持軸 が取り付けられている.水路幅方向の特性変動は無視し, 2次元的な実験として実施されている.ロードセルによ って計測された力を100Hzサンプリングで記録し,模型 の固有振動数より高い振動数をカットするため,15Hz のローパスフィルターをかけた.







**図-3** 桁模型

## 3. 数値解析の概要

数値解析にはOpenFOAM (Ver.2.2x) の非圧縮混層流解 析ツール interFoamを用いた. このツールでは, VOF (Volume Of Fluid) 法による気体-液体の二層流解析が 行える.

## (1) 桁模型がない場合の流れ

桁模型中心から2m上流(ゲートから1m下流)におけ る水位と流速を境界条件として与えることとし,まず, その位置における水位と流速の計算を行った.桁模型を 設置しない状況をモデル化した.

図-4に示す3次元モデルを作成し、ゲートを上げて水 を流す実験を一般的な水柱崩壊(dam break)問題として 取り扱うことにした.図-5に示すように約100万のメッ シュに分割した.解析領域下面の境界条件は非すべり条件の壁とし,流速を0,圧力勾配を0とした.右面は流出 境界とし,流速勾配および圧力勾配を0とした.上面は 大気境界とし,空気が自由に出入りできる開境界としている.



#### (a)詳細

図-4 実験水路3次元モデル



図-5 実験水路全体のメッシュ分割

VOF 法では明確な水面を定義できないため、各メッシュに存在する水の割合(流体充填率)  $\alpha$ により水位を推測した.  $\alpha = 1$  はそのメッシュがすべて水で満たされていることを表し、 $\alpha = 0$  はすべて空気、 $0 < \alpha < 1$ は一部分が水だということを表している. ここでは、水位を計算する位置において $\alpha = 0.99$ 以上になるメッシュの高さで水位を推定した.

実験では模型中心位置より上流 90mmの位置で、抵抗 線式水位計によって水位が記録されている.その記録と 解析結果とを比較すると図-6のようになる.実験にお ける最大水位 67mmに対して、解析では 80mmと 20%過 大評価している.壁における境界条件の違いや、水路を 自作したことによる精度の問題が考えられる.時間的な 変化の様子はある程度再現できていることから,安全側の評価だと考え,この解析によるゲートから lm 下流における水位と流速(図-7)を入力値として用いることにした.



図-7 流入境界における入力水位と流速

#### (2) 桁模型を設置した場合の解析モデル

実験において桁模型をロードセルで支持する都合上, 図-8のように、桁模型と水路の壁との間にはわずかなが らも隙間が生じる.隙間を設けなければ、桁模型に作用 した力を水路の壁も受け持ってしまい、正確な力をロー ドセルで計測することができないからである.そのため、 波の到達とともに主桁間に取り残された空気が、桁模型 と水路壁面との隙間から抜け出す現象が発生し、桁模型 に作用する力に影響を与えることが考えられる.実橋に おいては、桁端部から空気が抜け出すことに相当する.

2次元モデルを用いた解析では、桁端における隙間を 考慮することができない.よって、空気が抜け出すこと の影響が大きいのであれば、3次元モデルの利用が必要 となる.ここでは、桁端における隙間をモデル化した3 次元モデルと、隙間の影響を考慮しない2次元モデルと を考え、両者の解析結果を比較することにした.

解析領域を図-9に示す.桁模型設置位置中心より上流 2mの位置に流入境界を設け,前節で得られた水位と流 速を入力した.OpenFOAMには時間的に変化する流入条 件が標準では備わっていない.そのためOpenFOAMの非 標準境界条件として公開されているgroovyBC<sup>®</sup>を利用し て,流入境界における水位と流速の時間的変化を再現した.



図-8 水路壁と桁模型との間の隙間



#### (b)模型周辺詳細





図-10 実験水路3次元モデル

乱流モデルとしては、レイノルズ平均モデル(RANS) のSST k-ωモデルを用いた.桁模型および解析領域下面 の境界条件は非すべり条件の壁とし、流速を0,圧力勾 配を0とした.右面は流出境界とし、流速勾配および圧 力勾配を0とした.上面は大気境界とし、空気が自由に 出入りできる開境界としている.境界の影響を少なくす るよう水路底面から1m上方まで広い空間を設定し、右 方向も桁模型中心から1m離れたところに流出境界を設 置した. 2次元モデルのメッシュ分割にあたっては、図-10に示 すとおり、桁模型周辺を2mm四方の正方形メッシュとし、 離れた部分は最大10mm四方のメッシュとした. 壁近傍 では壁関数を用いることとし、模型近傍もそれほど密な メッシュにしていない. 実験に用いた模型の主桁フラン ジと床版上面の高欄等のモデル化は省略した.約10万個 の正方形および長方形メッシュになる.

3次元モデルは橋軸方向の分割は荒く10分割程度とし、 約144万メッシュの分割にした.そのため、橋軸方向に 関する乱れの3次元性については、あまり正確な再現が できていない.実験における隙間は1mm未満だが、ここ では全体のメッシュ分割の最小長さである2mmの隙間を 設けた.その影響については次節で考察する.

解析時間刻みは、クーラン数が0.5未満になるように 自動設定し、結果として10<sup>5</sup>~10<sup>3</sup>秒刻みの計算になった. 結果は0.01秒間隔で出力した.

## (3) 桁模型に作用する力の比較

桁模型に作用する力を,実験結果と比較した.

図-11に、桁模型に作用する水平力である抗力の時刻 歴を示す.入力した水位が実験より高いこと(図-6)から、実験値と比べると大きな値を示している.波が到達 した瞬間のスパイク的な波形により、最大値で比較する と28~50%実験値より大きくなった.いずれの解析モデ ルも、ほぼ同じグラフになり、抗力に及ぼす流れの3次 元性の影響は少ないと考えられる.

図-12に示す揚力は桁模型に作用する鉛直力で、上向きの力を正としている.実験では波が到達した時間軸の2秒から上向きの力が作用しはじめ、しばらく上向きの力が作用し続ける.耳桁部に斜め上方向へ当たる波の影響が大きく、桁を持ち上げる力が発生したと考えられる.そして5秒以降は全体的に上から水が桁を抑える状況になり、下向きの力が作用する.3次元モデルでは、波が到達した瞬間に下向きのスパイク的な力が生じるが、その後はほぼ実験値を再現することができている.揚力の最大値は、実験値の3.8Nに対して4.1Nと、6%の推定誤差にとどまっている.実験より20%高い水位の入力条件にもかかわらず、実験値よりあまり大きくなっていないのは、設けた隙間が2mmと実験より大きかった影響が出ているものと考えられる.

それに対して2次元モデルでは,波が到達してからす ぐに下向きの力が作用しはじめ,5秒付近でいったん上 向きの力が作用する.揚力の再現性は低い結果となった.

この理由を考察するため、桁模型周辺の圧力分布を比較した.2次元モデルと3次元モデルで結果が大きく異なる図-12の時間軸2.2秒における圧力分布を図-13に示す.この時点における揚力は、実験値が2.9kN、3次元モデルが2.4kN、2次元モデルは-8.2kNと、実験と3次元モデルで

は上向きの力が作用するのに対し、2次元モデルでは下 向きの力が作用する結果が得られている.図-12の(a)が3 次元モデル、(b)が2次元モデルの結果である.(b)の2次元 モデルでは主桁間に捉えられた空気により大きな負圧が 生じている.それに対して(a)の3次元モデルでは、負圧 が2次元モデルほど大きくないことがわかる.





(a)3次元モデル



**図-13** 圧力分布



(a)3次元モデル



(b)2次元モデル





図-15 水平面上における水の分布



図-14は、図-13と同時刻における桁模型周辺の流況で ある.青い部分が水の存在場所を表しており、色の濃淡 で解析格子中の流体充填率αを表現している.図-13(b) の2次元モデルでは、桁下に空気が捉えられているのに 対し、図-13(a)の3次元モデルでは水面が下がって空気は 下流へ抜けている.

図-15は、3次元モデルの解析において、図-13(a)と同時刻、水路の底面から4cm上における水平面上の水が存在する場所の分布である。ちょうど桁の下端にあたる高さであり、桁を下から仰ぎ見た図になっており、桁下が白い長方形で描かれている。図-14と同様、色の濃淡で解析格子中の流体充填率αを表現している。図の下部が桁間の隙間を表しており、ここに色の薄い部分(空気)の存在が確認できる。これは主桁間に捉えられた空気が桁端から抜けていく状況を示しており、このことによって負圧が緩和されたことが考えられる。

図-16に示す流力モーメントも、3次元モデルと2次元 モデルの差は大きい.図-3の模型を、図で時計回りに回 転させる方向を正と定義した.2次元モデルでは、主桁 間に生じる負圧が大きいため、耳桁に斜め上方向に作用 する桁を回転させる力の影響が相殺され、実験値の半分 程度のモーメントとなった.3次元モデルでは、ほぼ実 験値を再現することができている.波が到達した瞬間に 発生したスパイク的な作用により、負の最大値は誤差が 大きくなったが、正の最大値は誤差1%である.

以上より、鈑桁橋において津波によって発生する揚力 および流力モーメントの検討をする場合、桁端部の影響 が大きいことがわかった.これらの力をもとにして支承 反力等を計算することになるため、2次元モデルによる 解析では精度に問題があることになる.

## 4. おわりに

本研究では、鈑桁橋を2次元および3次元でモデル化し、 オープンソースの数値解析コードOpenFOAMで計算した. 桁端部の影響による2次元モデルと3次元モデルとの結果 の差異に着目し、桁模型に作用する力を水理実験結果と 比較して考察した.

本研究で得られた主な結論は以下の通りである.

- 抗力の計算結果は、2次元モデルも3次元モデルもほ ぼ同じで、どちらも実験結果との整合性が高かった。 抗力を求める際には簡易な2次元モデルでもよいこと がわかった。
- 2) 揚力および流力モーメントの計算結果は、2次元モデルと3次元モデルとで大きく異なり、2次元モデルでは実験結果を再現することができなかった.主桁間に捉えられた空気によって2次元モデルでは大きな負

圧が作用し、桁には下向きの力が作用した. それに 対して3次元モデルでは、捉えられた空気が桁端部か ら抜けることによって負圧が緩和され、耳桁に斜め 上方向へ作用する力の作用と相まって、桁に上向き の力が作用した.

謝辞:本研究はJSPS科研費26289148「津波や洪水など橋 梁の水害に対する安全性向上対策に関する研究」(代表:伊津野和行)の助成を受けた.

## 参考文献

- OpenCFD Ltd.: OpenFOAM, http://www.openfoam.com, 2014年9月閲覧.
- Bricker, J.D., Kawashima, K. and Nakayama, A.: CFD analysis of bridge deck failure due to tsunami, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, Tokyo, Japan, pp. 1398-1409, 2012.
- 3) 吉野広一,野中哲也,原田隆典,坂本佳子,菅付紘

ー: I 桁橋に対する津波作用力特性の解析的検討,第 15回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジ ウム講演論文集,土木学会, pp. 73-80, 2012.

- 4) 坂本佳子,原田隆典,野中哲也,吉野廣一,鳥越卓志:I桁橋に対する津波波力特性の数値解析的検討,構造工学論文集,Vol.59A,pp.450-458,2013.
- Bricker, J. and Nakayama, A.: Contribution of trapped air, deck superelevation, and nearby structures to bridge deck failure during a tsunami, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000855, 2014.
- 6) 南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会:第 7回部会資料4 各構造物の詳細点検結果(津波), 大阪府, http://www.pref.osaka.lg.jp/jigyokanri/dobokubukai/index.html, 2014年9月閲覧.
- 7) 糸永航,中尾尚史,伊津野和行,小林紘士:飯桁橋に 対する津波の作用力に関する実験的研究,土木学会論 文集A1(構造・地震工学), Vol. 68, No. 4, p.I\_1126-I\_1133, 2012.
- Unofficial OpenFOAM wiki: Contrib/groovyBC, http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/groovyBC, 2014 年9月閲覧.

# GIRDER END EFFECT ON PRESSURE DISTRIBUTION ACTING ON BRIDGES DUE TO TSUNAMI FLOW

# Yuma KAWASAKI, Noriaki ITO and Kazuyuki IZUNO

This study conducted two-dimensional and also three-dimensional analyses on tsunami forces acting on a girder bridge using OpenFOAM, which is open-source software. The trapped air between the girders affects on the pressure distribution acting on the bridge due to tsunami flow. As the trapped air escaped from girder ends, obtained tsunami loads from the two dimensional analysis was different from the experimental results. The difference was particularly in lift and moment. A three dimensional analysis was necessary to estimate the tsunami loads for girder bridges, which showed good agreement with experimental results.