

橋梁に作用する津波外力の簡易な二次元混層流解析

伊津野 和行¹・川崎 佑磨²・中尾 尚史³・里深 好文⁴

¹フェロー会員 工博 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)

²正会員 工博 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)

³正会員 工博 独立行政法人土木研究所専門研究員 構造物メンテナンス研究センター
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 工博 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)

1. 研究目的

2004年インドネシア・スマトラ島沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震における橋梁の津波被害を受け、多くの機関で関連研究が進められている。数値流体力学の進歩にはめざましいものがあり、当該分野においても種々の適用例が報告されている^{1)~8)}。しかしまだ実務レベルで利用できる解析ソフトウェアは少なく、各研究者が独自に開発したソフトウェアを用いている場合が多い。

CADMAS-SURF⁹⁾は数少ない公開ソフトウェアの一つであるが、海域施設の耐波設計を目的として開発されたソフトウェアということもあり、構造物の下に空間がある橋梁の場合、作用する揚力の推定精度が低いという報告がある^{10),11)}。一方、揚力を精度よく求めている研究¹²⁾もあり評価は分かれている。しかし、気体と液体との相互作用が考慮されず、桁に水が直接作用しなければ力が発生しない点は、橋梁を対象とした解析において短所となり得る。

そこで本研究では、オープンソースの数値解析コードであるOpenFOAM¹³⁾を用い、なるべく簡易に解析することを目指して二次元混層流解析を行った。そして、矩形断面桁を用いた水理実験における圧力および作用力の計測結果と比較し、数値解析の精度を検証した。

OpenFOAMを用いた橋梁と津波に関する研究としては、吉野らの研究¹⁰⁾や、Brickerらの研究¹⁴⁾があり、また、大阪府の南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会において橋梁の津波に対する安全性評価¹⁵⁾にも使われている。これらの研究や評価では必要に応じてソースコードの改良を行い、水位や流速、

橋梁に作用する力の計算が行われている。それに対して本研究ではソースコードの改変は行わず、実験で計測された圧力分布をどの程度の精度で再現できるかに着目して検討したものである。

2. 数値解析モデル

(1) 模擬する実験概要

本研究では、著者らによる既報の実験¹⁶⁾で得られた圧力と力の計測結果を再現することを考えた。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200mmである。

ゲートから3000mm下流位置に、桁下空間40mmで図-2に示す幅80mm×高さ20mmの亚克力製矩形断面模型が設置されている。水路幅方向の特性変動は無視し、二次元的な実験として実施されている。

圧力は、図-2に示す位置に埋め込まれたひずみゲージ式圧力計により、計14箇所で測定された。模型はロードセルで支持され、水平力（抗力）、鉛直力（揚力）、回転力（流力モーメント）が測定された。力の正方向は図-3のように定義した。圧力も力も100Hzサンプリングで測定されている。図-3の模型図心において、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。

(2) 解析手法

数値解析にはOpenFOAM (Ver.2.1.1 Windows版)

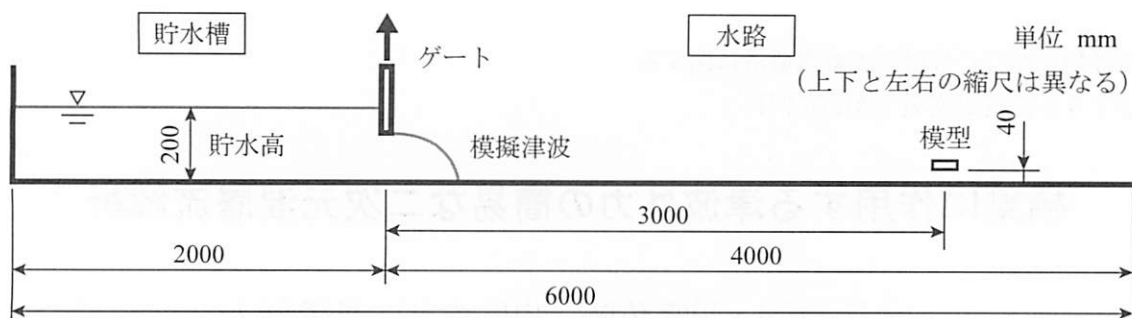


図-1 実験装置

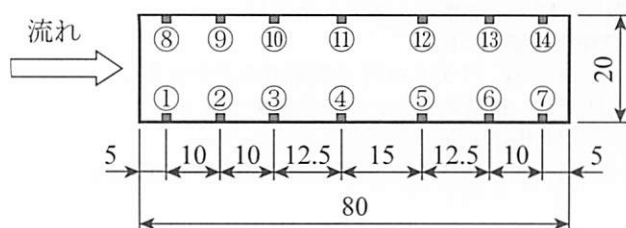


図-2 圧力計配置図

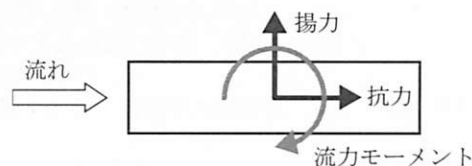


図-3 力の向きの正方向

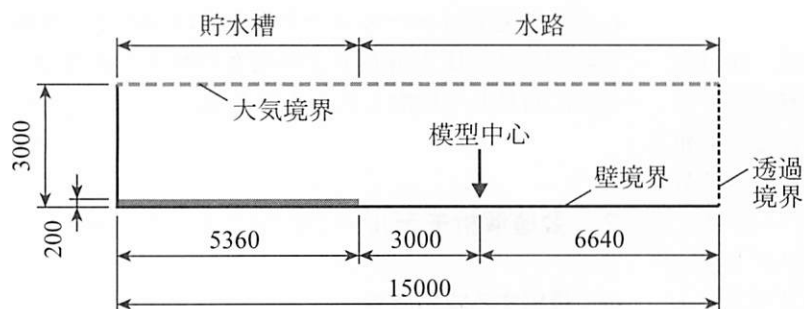


図-4 解析領域

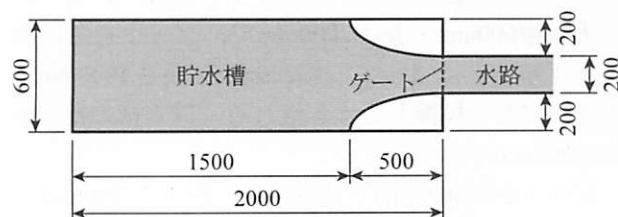


図-5 実験水路ゲート付近の平面図

を用いた。本研究では、その中のinterFoamという非圧縮混層流解析ツールを用いた。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。

水路全体の解析モデルを図-4に示す。OpenFOAMは三次元解析ができるソフトウェアであるが、本研究では二次元問題としてモデル化した。

実験では図-1の左側の貯水槽が幅600mmと、水路幅200mmの3倍である。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-5のように曲線形状になっている。これを二次元問題としてモデル化するにあたり、実験における貯水槽長さ2000mmに対し、図-4の数値解析モデルでは水量を実験と等しくするよう水の初期配置位置の長さを5360mmとした。初期の水位は実験と同じ200mmとしている。

解析領域左面と下面、および橋桁モデルの境界条件は壁とし、流速を0、圧力勾配を0とした。右面は透過境界とし、流速勾配および圧力勾配を0とした。上面は大気境界であり、空気が自由に入出力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3m上方まで大きな空間を設定し、右方向も橋桁モデル位置から6m以上離れたところに透過境界を設置した。

水平方向には、左端から4mと右端から6mを20mm間隔、その間の橋桁モデルを含む5mを2mm間隔のメッシュに分割した。鉛直方向には、橋桁モデルを含む底面から400mmを2mm間隔、それより上方を20mm間隔のメッシュに分割した。合計1,055,600個

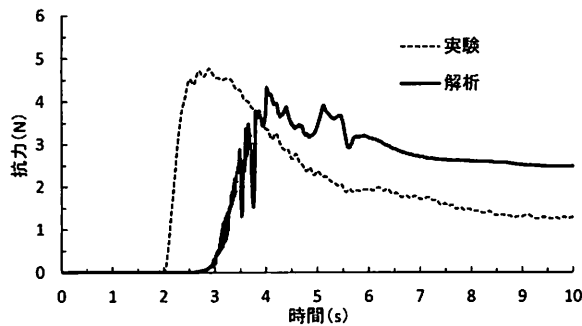


図-6 抵抗力

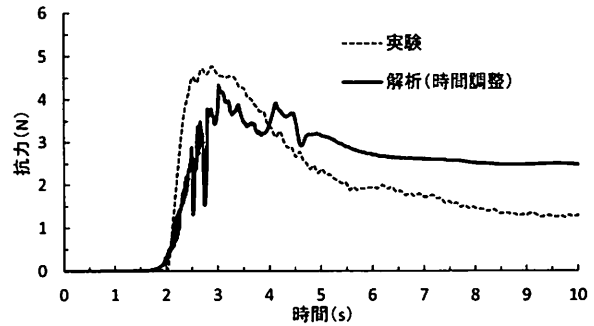


図-7 解析時間調整後の抵抗力

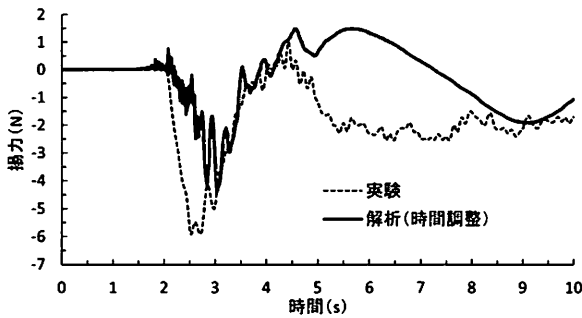


図-8 揚力

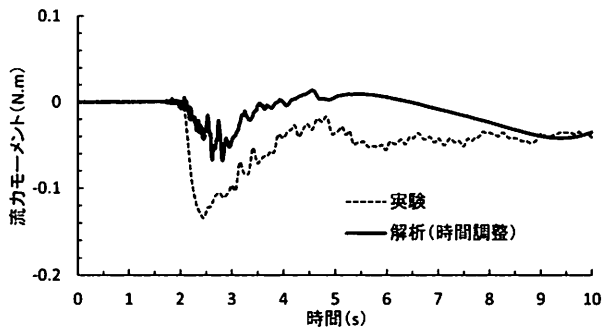


図-9 流力モーメント

の長方形メッシュになる。

一般的な水柱崩壊 (dam break) 問題として場を設定した。時刻0秒で図-4の左側に設定した水柱が崩壊し始める状況を計算し、実験でゲートを急開した状況をシミュレーションした。

橋桁モデル近傍におけるレイノルズ数は約6万になり、実験の観察結果からも乱流解析が必要だと判断した。乱流解析には、レイノルズ平均モデル RANS を用いることとし、その中の標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。このモデルにおいて初期値設定が必要なパラメータは、乱流エネルギー k とエネルギー逸散率 ϵ である。乱流エネルギーの初期値が不明な場合には、流速の2乗値の 10^{-4} 倍程度にすればよいという文献¹⁷⁾を参考に、層流計算結果による橋桁モデル位置付近の流速約2m/sより、 $k = 0.0004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ とした。エネルギー逸散率は、同じ文献¹⁷⁾の ϵ と k との関係式、

$$\epsilon = \frac{k^{1.5}}{L} \quad (1)$$

より計算することとした。ここで、 L は長さスケールであり、本研究では桁高0.02mとした。式(1)より、エネルギー逸散率の初期値は、 $\epsilon = 0.0004 \text{ m}^2/\text{s}^3$ とした。

なお、解析時間刻み Δt は、クーラン数が1未満になるように自動設定し、結果として0.0001~0.0015秒刻みにの計算になった。この計算結果を、 $\Delta t = 0.01$ 秒間隔でファイルに出力した。特殊なPCは使わ

ないこととし、Intel Core i7-4770 3.40GHzのPCで、10秒間のシミュレーションに要したCPUタイムは24時間だった。

3. 解析結果と実験結果との比較

(1) 橋桁モデルに作用する力

図-6に、橋桁モデルに作用する水平力である抵抗力の時刻歴を示す。実験値には、模型の固有振動数より高い振動数をカットするため、100Hzサンプリングした値に15Hzのローパスフィルターがかけられている。一方解析値は、0.01秒間隔で出力した値そのものである。実験と解析では、力が作用し始める時刻が異なっており、解析の方が1秒ほど遅く作用し始めている。OpenFOAMのRANSモデルでは、計算格子の大きさによって床面の流体摩擦効果を過大に評価する傾向がある¹⁸⁾ことが原因だと考えられ、計算格子の大きさに注意が必要である。

橋梁設計においては、最大値と津波が作用し始めてからの時刻歴とが重要になると考えられる。そこで結果を見やすいように、解析結果の時間軸を1秒ずらしてプロットしたものを図-7に示す。最大値を比較すると、解析値4.3Nは実験値4.8Nに比べ9%過小評価している。よって、本研究を元に対津波設計をする場合、本矩形断面においては抵抗力に安全率を設定する必要がある。

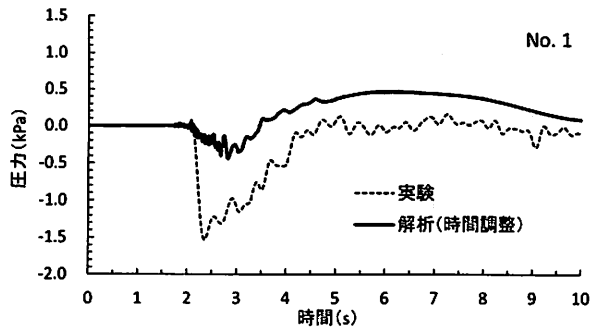


図-10 圧力計 No. 1

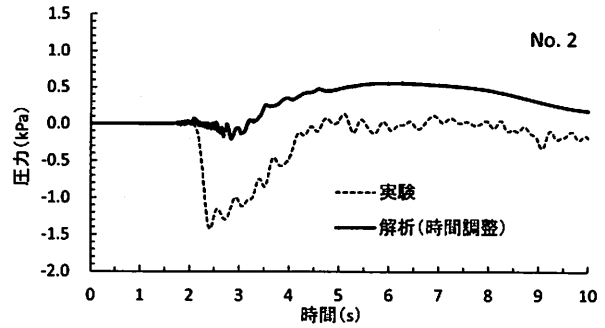


図-11 圧力計 No. 2

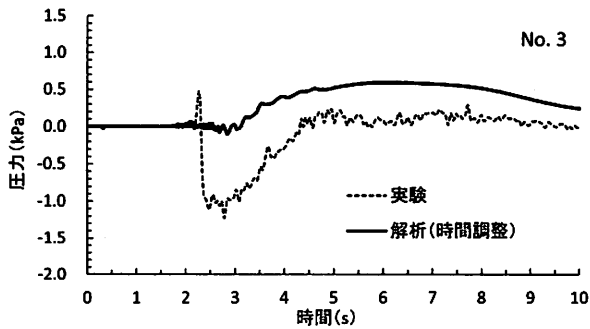


図-12 圧力計 No. 3

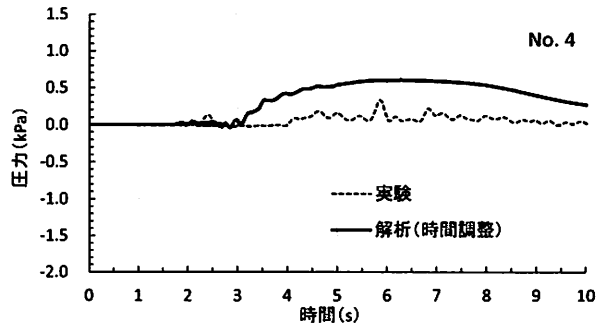


図-13 圧力計 No. 4

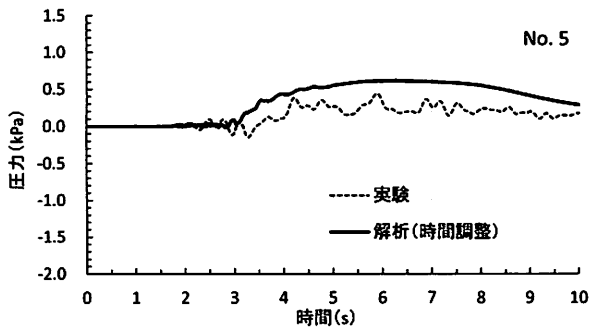


図-14 圧力計 No. 5

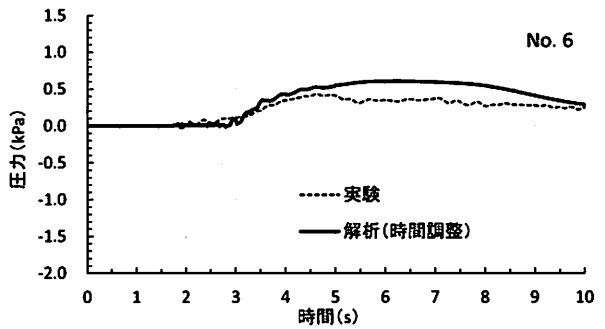


図-15 圧力計 No. 6

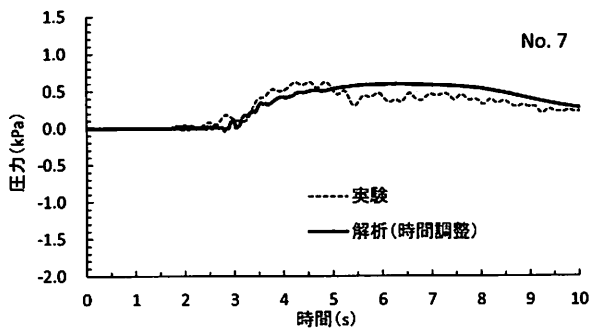


図-16 圧力計 No. 7

解析の方が力の立ち上がりは緩勾配になっており、最大値以降の減少勾配も緩い。このことから、実験の方が初期に多量の水が到達していることが推察され、精度を上げるためには乱流パラメータの初期値調整が必要だと考えられる。しかし、実務設計にお

いて参照すべき実験値が得られていることは少ないため、ここでは2章で述べた値を用いた場合について精度を示すに留める。

以降の解析結果図はすべて、時間軸を1秒ずらして調整したものを示すこととし、凡例を「解析(時間調整)」とした。

図-8には揚力、図-9には流力モーメントの時刻歴を示す。図-8の揚力は橋桁に作用する鉛直力で、図-3のとおり上向きの力を正としている。2秒付近でまず下向きの力が作用し、その後4秒付近で上向きの力が作用する。実験値では下向きの最大値5.9N、上向き1.0Nだったが、解析では下向き4.4Nと26%過小評価、上向き1.5Nと51%過大評価している。図-9の流力モーメントの絶対最大値は、実験値の約半分となっている。波が橋桁モデル上方から作用することにより反時計回りの回転力が作用するが、図-8の

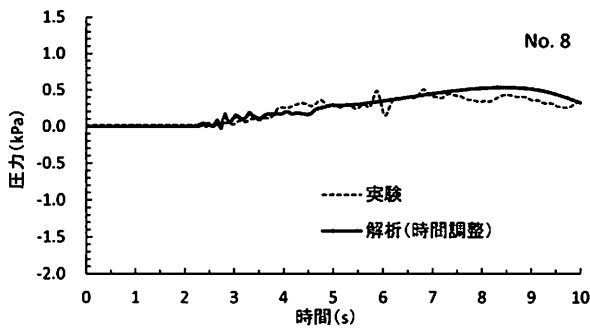


図-17 圧力計 No. 8

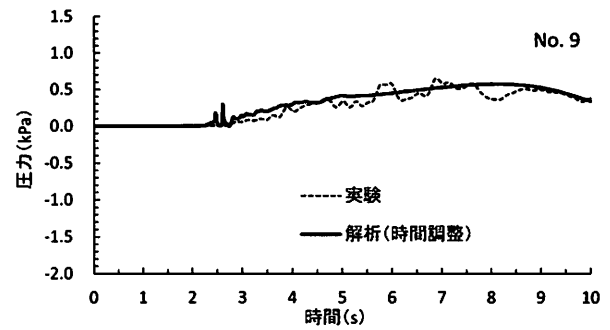


図-18 圧力計 No. 9

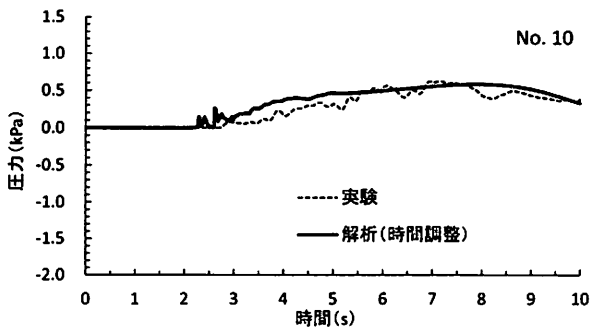


図-19 圧力計 No. 10

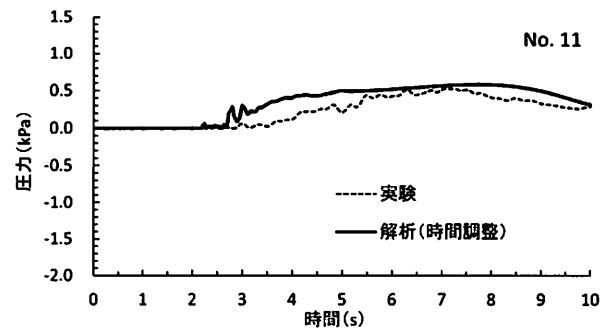


図-20 圧力計 No. 11

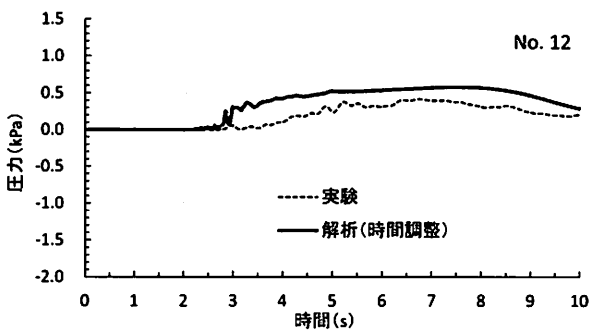


図-21 圧力計 No. 12

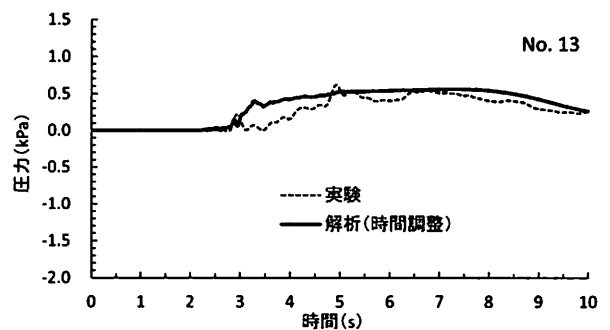


図-22 圧力計 No. 13

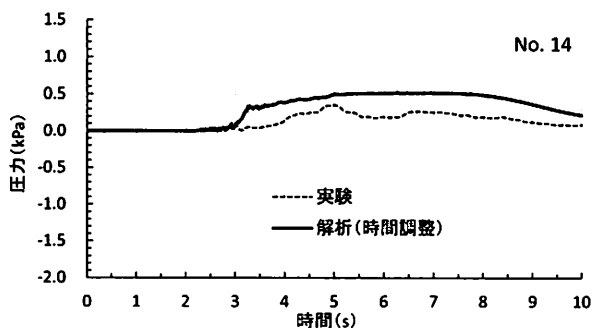


図-23 圧力計 No. 14

鉛直力グラフでも明らかなように、上からの力が解析では小さく、その結果回転力も小さくなった。

このように揚力と流力モーメントの解析精度が低いのは、次節で述べる圧力の推定精度が低いことに起因すると思われる。

(2) 橋桁モデルに作用する圧力

図-2の圧力計位置における圧力の値を、図-10～図-23に示す。解析値は、前節と同様時間軸を1秒ずらしている。

図-10～図-16が橋桁モデル下側の圧力である。実験値を表す点線を見ると、No.1 (図-10)～No.3 (図-12) の波が到達する側に近い点において、波が到達してすぐに負圧が作用している。これは、桁端部において波が剥離し、負圧が発生したことを示している。No.4 (図-13)～No.7 (図-16) は、あまり負圧が生じず、正圧が徐々に発生している。このあたりでは剥離が生じず、水が桁下面にすぐに当たって正圧がかかっている。

これに対して解析値を表す実線では、No.1 (図-10) における負圧が実験値より小さく、負圧の生じる範囲がNo.1とNo.2 (図-10と図-11) と狭い。例として図-24に津波到達1秒後の圧力分布を示す。黒い

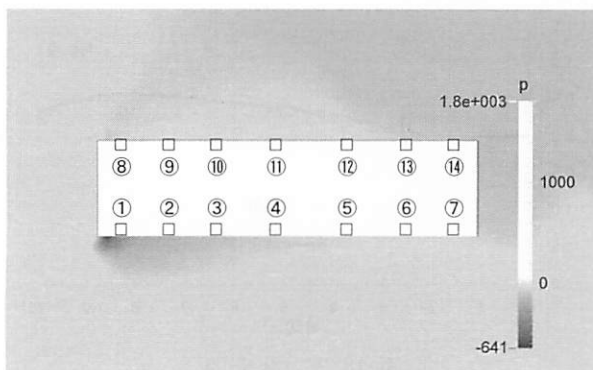


図-24 津波到達1秒後の圧力分布（黒が負圧）

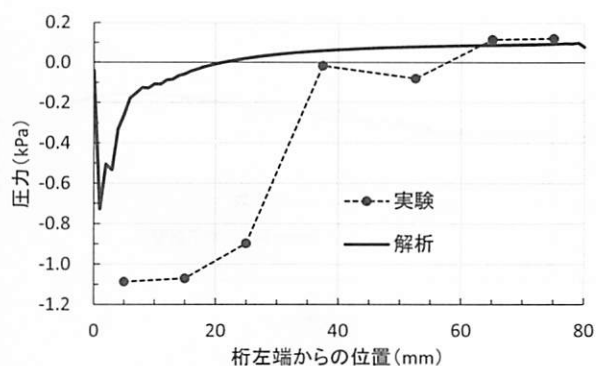


図-25 津波到達1秒後の橋桁モデル下側における圧力分布

部分が負圧が生じている部分を示しており、左下の一部分のみに負圧が集中していることがわかる。この時の橋桁モデル下側における圧力値を実験と解析とで比較した図を、図-25に示す。横軸は桁の左端0mmから右端80mmまでの位置を表している。解析では1mm単位で圧力を求めたものをプロットしている。左から20mmまでが負圧、それより右では正圧になっており、負圧が大きいのは左10mm程度と実験より急なピークを示している。波が剥離する状況に差があるものと考えられ、実験より解析の方が、弱い剥離が狭く生じる結果となった。

壁面に水が衝突するところでは乱流エネルギー k が非現実的に大きくなる¹⁹⁾という、用いた標準 $k-\epsilon$ モデルの特性ではないかと考えられる。Brickerら¹⁴⁾は解析コードを修正し、気相における渦粘性係数を0にして剥離状況の再現精度を上げている。しかし本研究では、なるべく簡易に誰もが解析できることを念頭におき、解析コードには手を加えずに解析したものである。

橋桁モデル上側の圧力No.8（図-17）～No.14（図-23）に関しては、実験値と解析値の差は少ない。よって、前節に示した作用力に関する実験値と解析値の違いは、主に下面における圧力の違いだといえる。

図-10～図-23より、図-10～図-13に示すNo.1～3位置における圧力の推定精度がもっとも悪いことがわかる。しかし、橋桁の流出に大きな影響を与えると考えられる下面における正の圧力は安全側に評価している。また、その他の点においても、下面における正圧、上面における負圧は安全側の評価で誤差も小さい。

(3) 橋桁モデル周辺の流況

図-26に、水が橋桁モデル左面に到達した0.2秒後の画像を示す。(a)が実験結果、(b)が解析結果である。実験写真では、桁の右側に圧力計のケーブルが

黒い線として写っている。上から光を当てて撮影しており、砕波した箇所が白く写っている。解析の画像は中央の白い長方形部分が橋桁モデル部分である。計算格子を水が満たしている部分を黒に、空気が満たしている部分を薄い灰色に、水と空気が混ざっている部分を灰色の濃淡で表現している。

図-26の(a)も(b)も桁端に波が当たって真上に波が発達しているが、実験結果の方が高く発達している。橋桁モデル左側の水位が異なっており、水位の解析精度が低いことが原因だと考えられる。

図-27に、水が橋桁モデルに到達した1秒後の画像を示す。実験では、桁の左上角において波が剥離し、写真右斜め上に向かって波が発達している。一方、解析結果では実験結果ほど剥離が見られない。

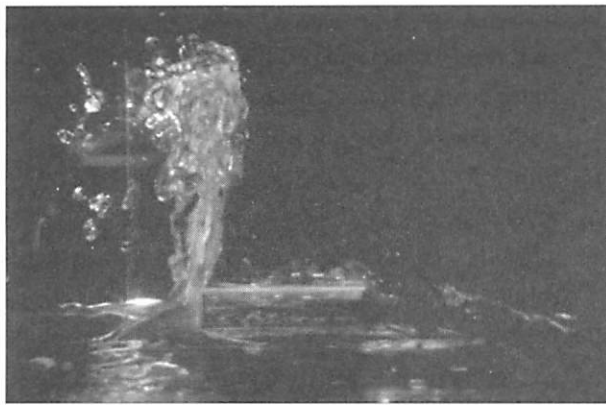
図-26と図-27より、水位の解析精度を向上させることと、剥離をより正確に再現できる乱流モデルの検討とが必要だと考えられる。

4. おわりに

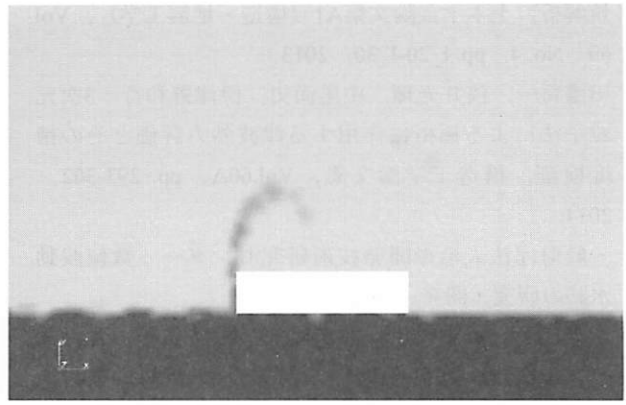
本研究では、矩形断面の橋桁モデルに作用する力と圧力を、オープンソースの数値解析コードOpenFOAMで計算し、水理実験結果と比較して考察した。本研究で扱ったモデルは桁下に空気が取り込まれる形状ではなく、混層流解析の利点が出る解析とはなっていない。OpenFOAMは、CAD等からモデル形状を取り込むことができることや、曲線でメッシュを作ることができることも利点と考えられ、今後、一般的な桁形状のモデルに対する検討が必要である。

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 水が橋桁モデルに到達する時間は、解析の方が実験より約1秒遅くなった。床面の流体摩擦効果が過大に評価された影響だと考えられる。
- 2) 橋桁モデルに作用する抗力は、解析の方が実験



(a) 実験結果

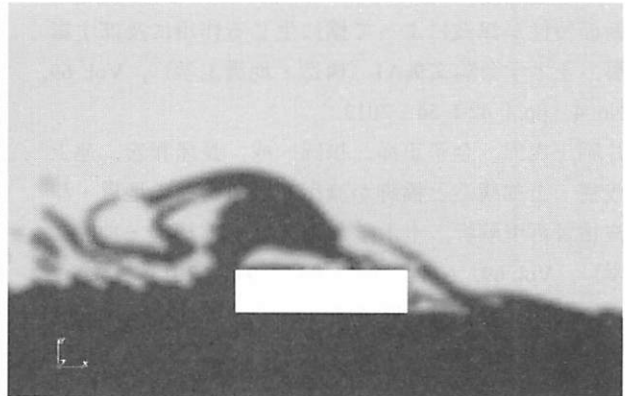


(b) 解析結果

図-26 津波到達 0.2 秒後の流況



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図-27 津波到達 1 秒後の流況

より9%小さくなった。乱流パラメータ初期値の影響で、橋桁モデル周辺の流況に差が出たものと考えられる。橋桁モデルへ下向きに作用する力は過小評価したが、桁流出に影響する正の揚力は安全側に評価することができた。流力モーメントの絶対最大値は、約半分であった。精度が低かった理由は、波の剥離状況の再現性が低かったためだと考えられる。

- 3) 橋桁モデル上面の圧力は、解析により精度よく再現することができた。一方、下面の圧力は、波が到達して直後における負圧の分布状況に、解析と実験とで差が生じた。解析に用いた乱流モデルの特性により、実験よりも桁端部における波の剥離による負圧の発生域が狭くて値が小さくなった。

参考文献

- 1) 二井伸一，幸左賢二，運上茂樹，庄司学：津波による橋梁被害の解析的検討，第11回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造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. 81-88，2008。
- 2) 杉本健，薄井稔弘，運上茂樹：津波による橋梁被害に対する水路実験の再現解析，第12回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造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. 81-84，2009。
- 3) 幸左賢二，二井伸一，庄司学，宮原健太：津波波力による桁移動現象の解析的検討，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 483-494，2009。
- 4) 嶋原良典，藤間功司，庄司学：橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算，土木学会地震工学論文集，第30巻，pp. 899-904，2009。
- 5) 嶋原良典，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：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. 311-315，2010。
- 6) 原田隆典，村上啓介，Indradi Wijatmiko，坂本佳子，野中哲也：津波により桁が流失した床版橋の再現解析，第14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. 103-110，2011。
- 7) 中村友昭，水谷法美，Xingyue Ren：橋桁へ作用する津波力と桁の移動に与える津波力の影響に関する数

- 値解析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_20-I_30, 2013.
- 8) 田邊将一, 浅井光輝, 中尾尚史, 伊津野和行: 3次元粒子法による橋桁に作用する津波外力評価とその精度検証, 構造工学論文集, Vol.60A, pp. 293-302, 2014.
 - 9) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発, 2001.
 - 10) 吉野広一, 野中哲也, 原田隆典, 坂本佳子, 菅付絃一: 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.
 - 11) 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一: 上部構造の断面特性が津波によって橋に生じる作用に及ぼす影響, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_42-I_54, 2013.
 - 12) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏, 運上茂樹: 上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_932-I_941, 2013.
 - 13) OpenCFD Ltd.: OpenFOAM, <http://www.openfoam.com>, 2014年6月閲覧.
 - 14) 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.
 - 15) 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6月閲覧.
 - 16) 中尾尚史, 糸永航, 野阪克義, 伊津野和行, 小林絃士: 矩形断面桁に作用する津波の圧力特性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, pp. I_1145-I_1150, 2012.
 - 17) ファーツィガー, J.H., ペリッチ, M.: コンピュータによる流体力学, 小林敏雄, 坪倉誠, 谷口伸行訳, シュプリンガーフェアラーク東京, 2003.
 - 18) ファム・バン・フック, 長谷部雅伸, 高橋郁夫: VOF法を用いた3次元津波解析に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_71-I_75, 2012.
 - 19) 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 養賢堂, 1999.