津波による桁の移動に与える 津波力低減対策の影響に関する研究

中村 友昭¹・水谷 法美²・Xingyue REN³

¹正会員 名古屋大学特任講師 高等研究院 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tnakamura@nagoya-u.jp

²フェロー 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: mizutani@civil.nagoya-u.ac.jp

³学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: renxingyue@gmail.com

津波による橋桁の流出現象を3次元数値計算モデルにより解析し、津波力の低減対策としてフェアリングを側面に取り付けた桁と防衝工を横に設置した桁を対象に、それらの低減対策が桁の移動に与える影響を検討した。その結果、フェアリングと防衝工には水平波力を低減させる効果があることを示した。また、斜め上を向く面があるフェアリングには、鉛直下向きの力つまり静止摩擦力を増加させる効果があるために桁の流出を遅らせられる効果があることを明らかにした。逆に、斜め下を向く面があるフェアリングには、鉛直下向きの力を抑え静止摩擦力を低下させる負の効果があるために桁の流出を早めてしまうことが判明した。また、防衝工にも静止摩擦力を低下させる負の効果があるが、水平波力を十分に低減できれば桁の流出を抑える効果があることを示した。

Key Words : bridge superstructure, tsunami, countermeasure, wave force, numerical analysis

1. 緒言

2004年スマトラ島沖地震津波や2010年東北地方太平洋沖地震津波により橋梁の桁が流出する被害が発生した。これまでに、このような津波による桁の被災についての研究が水理実験と数値計算の両面から進められてきており、桁に作用する津波力の特性が明らかにされてきている。しかし、桁の移動を抑えるための津波力の低減対策を取り扱った研究は張ら¹⁾に限られており、また桁の移動現象を取り扱った研究も庄司・森²⁾、庄司ら³⁾、五十里・後藤⁴⁾、中村ら⁵⁾に限られており、津波力の低減対策が桁の移動に与える影響については検討の余地を残している。本研究では、津波力の低減対策としてフェアリングを側面に取り付けた桁と防衝工を横に設置した桁を対象に、それらの低減対策が桁の移動に与える影響を津波と桁の相互作用を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデル⁶⁾により考究する。

2. 数値計算モデルの概要

津波と桁の相互作用を解析できる3次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルは、メインソルバーと3つのモジュールから構成されている。メインソルバーは、可動構造物や地形変化を取り扱えるようにした非圧縮性粘性流体からなる全気液相に適用可能な連続式とNavier-Stokes方程式に基づくLESである。そのLESには、気液界面を追跡するMARSに基づくモジュール、可動構造物を取り扱う体積力型IB法に基づくモジュール、漂砂に伴う地形変化と浮遊砂の解析を行うモジュールが組み込まれている。ただし、本研究では漂砂は取り扱わないことから、最後のモジュールは使用しなかった。モデルの詳細は、紙面の都合上、中村・水谷⁶⁾を参照されたい。

3. 計算条件

津波を模擬した水柱崩壊に伴う段波による桁への作用津波力の検討を行っている中尾ら⁷⁾の水理実験に対してモデルの適用性が確認されている⁵⁾ことから、ここでは

図-1 計算領域の概略図

その水理実験を基に決定した図-1の計算領域を用いた。同図に示すように、貯水部（長さ2.0 m、奥行き0.6 m）の下流側に設けられた水路（長さ4.0 m、奥行き0.2 m）内に、移動可能な矩形断面の桁（幅80 mm、高さ20 mm）を設置した。そして、貯水部の初期静水深を0.25 mとした水柱崩壊に伴う段波を作用させた。なお、水理実験で貯水部と水路部の境界に設置されていたゲートのモデル化は行わず、計算開始とともにゲートが瞬間的に取り除かれたものとして解析を行った。また、桁は移動が最も生じやすかった密度 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の剛体とした⁹⁾。さらに、計算開始とともに桁が落下しないように桁の初期設置位置の下面($1490 \leq x \leq 1570 \text{ mm}$, $z = 65 \text{ mm}$)に仮定の透過な橋脚を設定した。ここで、桁と橋脚の静止摩擦係数 μ_s は幸左ら⁹⁾を参考に0.6とし、動摩擦係数は簡単のために静止摩擦係数と等しい0.6とした。水理実験がFroude則で約1/150の縮尺⁹⁾であることを考慮すると、実スケールでは幅12.0 m、高さ3.0 mの桁に高さ37.5 mの水柱を崩壊させた段波を作用させたことに相当する。

津波力の低減対策として、桁の側面にフェアリングを取り付けたケースと桁の横に防衛工を固定したケースを対象とした。図-2(a)にフェアリングの概略図を示す。フェアリングとして、張ら¹⁾を参考に決定した桁高と同じ長さだけ張り出した三角形の3パターン(Case A-1 ~ Case A-3)と、Case A-3の先端を切り落として台形とした1パターン(Case A-4)を対象とし、現地での引き波の作用を考慮して桁の左右両側に取り付けた。また、フェアリングの有無とその形状が桁の移動に与える影響に絞って検討を行うために、フェアリングの密度は仮想的に 0.0 kg/m^3 とし、桁の質量と慣性モーメントはフェアリングがない場合と同じとした。図-2(b)に防衛工の概略図を示す。同図に示すように、桁から10 mm上流側に幅10 mmの防衛工を固定し、その高さは桁高と等しい20 mm (Case B-1)とその約半分の8 mm (Case B-2)の2パターンを対象とした。

計算格子は、桁の設置位置周辺の $0 \leq x \leq 2000 \text{ mm}$, $45 \leq z \leq 105 \text{ mm}$ に $2 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ の等間隔格子を用い、それ以外の範囲には計算負荷の軽減のためにx軸方向に

図-2 津波力の軽減対策の概略図

約1%, z軸方向に約5%ずつ広げた不等間隔格子を用いた。流速と圧力の境界条件として、底面と側面にSlip条件を、下流側の境界にSommerfeld放射条件を、上側の境界に圧力一定の条件を課した。また、VOF関数の境界条件には、全境界に勾配ゼロの条件を用いた。

パラメータは、重力加速度を 9.80 m/s^2 、水の密度を $9.97 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ 、空気密度を 1.18 kg/m^3 、水の動粘性係数を $8.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、空気の動粘性係数を $1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、表面張力係数を $7.20 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ とした。その他のパラメータについては中村・水谷⁹⁾を参照されたい。

4. 計算結果および考察

(1) 桁移動に与える津波力低減対策の影響

図-3と図-4に、桁の重心位置のx軸方向の変位 Δx およびz軸方向の変位 Δz と、桁の重心位置のy軸回りの角度 θ を示す。同図には、比較のために津波力の低減対策がない場合の結果も示した。なお、図-3(a)に示したCase A-2の場合は、 $t = 4.0$ 秒手前で流出した桁が計算領域の外に出たことから、その前までの計算結果を示した。

まず、以降での比較のために、津波力の低減対策がない場合に注目すると、図-3と図-4より、 $t = 2.2$ 秒頃に Δx が増加し始めているものの、 $t = 2.6$ 秒頃になるまで Δz や θ の変化は認められないことが分かる。したがって、 $t = 2.2$ 秒頃に橋脚上を滑動して移動し始め、 $t = 2.6$ 秒頃に桁が橋脚から外れるとともに、桁の上流側が若干持ち上げられた状態で流出が生じたことが分かる。この詳細については中村ら⁹⁾を参照されたい。

次に、フェアリングを取り付けたときに注目すると、図-3(a)に示したCase A-2の場合には、 $t = 2.0$ 秒過ぎに Δx が増加し始めたのに続いて、 $t = 2.2$ 秒過ぎに Δz と θ も増加し始めたことが確認できる。そして、 $t = 2.3$ 秒での桁の様子を示した図-5からも分かるように、桁の上流側が大きく持ち上げられた状態になった。これは、上述したフェアリングがない場合との比較より、上流側のフェアリングの斜め下を向いた面に鉛直上向きの力が作用したため

図-3 桁の移動に与えるフェアリングの影響

に生じたと考えられる。そして、フェアリングがない場合よりも桁の流出が早く生じたことが分かる。なお、斜め下を向く面が同様にあるCase A-1のフェアリングの場合には、図示しないが、Case A-2よりもさらに早く桁の流出が生じたことを確認している。

Case A-3の場合には、図-3(b)や図-6に示すように桁の沖側下部を中心とした回転運動を繰り返しつつ、 Δx が徐々に大きくなり、桁がゆっくりと下流側に移動したことが確認できる。そして、 $t = 3.6$ 秒過ぎに Δx が急激に大きくなり、最終的に桁の流出が生じた。ただし、 Δx が大きく増加した時刻はフェアリングがない場合よりも1.2秒ほど遅れていることから、Case A-3のフェアリングには流出を遅延させる効果があると示唆される。

図-4 桁の移動に与える防衛工の影響

Case A-4の場合には、Case A-3のフェアリングの先端を切り取った形状のために、図-3(b)のCase A-3と似た傾向が図-3(c)より確認できる。そのため、Case A-4のフェアリングにも桁の流出を遅延させる効果があると示唆されるものの、 Δx が大きく増加した時刻はフェアリングがない場合と比較して0.4秒ほど遅れるに留まっていることから、Case A-3と比較してその効果は限られている。

一方、防衛工を設置したときに着目すると、図-4(a)に示したCase B-1の場合には、 $t = 2.2$ 秒過ぎに防衛工がない場合とは逆に Δx が減少し始め、桁が上流側に移動したことが分かる。そして、 $t = 2.3$ 秒過ぎに防衛工に近づいた状態で止まったことが確認できる。図-7に Δx が減少し始める直前の $t = 2.2$ 秒における $y = 0$ m断面での圧力変動 p の分布を示す。ここで、細い実線は水面を、太い実線は桁を表している。図-7より、防衛工と桁の間に水塊はほとんど入っていないものの、桁の下流側の面には水塊が作用しており、そのために桁に上流方向の水平力が作用し、上述したように桁が上流側に移動したと考えられる。なお、桁への作用津波力の詳細は次章で説明する。そして、一時的に Δx が増加、 q が減少し、桁の下流側が持ち上げられる現象が生じているものの、その後は桁の移動は生じていないことから、Case B-1の防衛工には桁の流出を抑える効果があると示唆される。

最後に、図-4(b)に示したCase B-2の場合にも、桁の流

図-5 桁が流出する様子 (Case A-2, 上図: 全断面, 下図: $y=0$ 断面)

図-6 桁が回転する様子 (Case A-3, 上図: 全断面, 下図: $y=0$ 断面)

図-7 桁周辺の圧力変動 p (Case B-1, $y=0$ 断面)

出を遅延させる効果が若干ながら確認できる。しかし、 Δx , Δz , Q_z が変化し始めた時刻は防衛工がない場合と比較して0.1秒ほどしか遅らせられていないことから、その効果は非常に小さいと言える。

(2) 津波力の低減効果

図-8と図-9に、桁に作用する x 軸方向の波力 F_x と z 軸方向の波力 F_z を示す。同図の F_x のグラフには、 $\mu_k (W - F_z)$ から求めた静止摩擦力も示した。ここで、 μ_k は桁と橋脚の静止摩擦係数(= 0.6), W は桁の重量である。なお、図-8と図-9では全計算ステップの出力値を200点移動平均したデータを示したものの、桁が移動し始め橋脚と衝突することで生じたスパイク状の振動が若干残っている。

フェアリングを取り付けたCase A-2とCase A-3の水平波

(a) Case A-2

(b) Case A-3

(c) Case A-4

図-8 桁への作用津波力に与えるフェアリングの影響

力 F_x より、Case A-2の桁が移動し始める $t = 2.0$ 秒過ぎまでは、いずれの形状でもフェアリングがない場合の半分程度となっており、 F_x を低減させる効果を有することが確認できる。また、Case A-2とCase A-3を比較すると、Case A-2の方がCase A-3よりも若干小さいことから、 F_x の低減効果はCase A-2の方が若干高いことが分かる。以上の効果は張り¹⁾によっても確認されている。

続いて、Case A-2とCase A-3の鉛直波力 F_z に着目すると、Case A-2の場合には、 $t = 1.8$ 秒過ぎに一時的な減少がみられるものの、 $t = 2.0$ 秒過ぎまではほとんど生じていないことが確認できる。そのため、フェアリングがない場合と比較して、鉛直下向きの力が抑えられており、それに伴って静止摩擦力の増加も抑えられていることが分かる。そして、 $t = 2.0$ 秒過ぎに F_z が急増したことに伴って、静止摩擦力がゼロにまで低下したことが確認できる。そのため、 F_z の観点からは、Case A-2のフェアリングには、静止摩擦力の増加を抑え、さらには低下させ、桁の移動を生じやすくさせる負の効果があると言える。そして、上述したようにフェアリングがない場合よりも F_x は低減されていて小さいものの、静止摩擦力が低下して F_x を下回ったことから、前章で述べたように $t = 2.0$ 秒過ぎに Δx が増加し始め、最終的に桁の流出に到ったと考えられる。

図-9 桁への作用津波力に与える防衛工の影響

一方, Case A-3の F_z には $t = 1.8$ 秒過ぎまでフェアリングがない場合よりも若干小さい傾向が認められることから, 鉛直下向きの力が増加していることが分かる. その後, 上述した桁の沖側下部を中心とした回転運動にあわせて増減しているものの, F_z はフェアリングがない場合を概ね下回っていることが確認できる. したがって, Case A-3のフェアリングには, 鉛直下向きの力を増加させ, さらにそれに伴って静止摩擦力も増加させる好ましい効果を有すると示唆される. 中村ら⁹⁾は渦が桁のすぐ下側に生じたことによる圧力の低下のために鉛直下向きの力が発生したことを示しているが, これに加えて上流側のフェアリングの斜め上を向く面に向きの力が作用したために, 鉛直下向きの力が増加したと考えられる. そして, 以上の静止摩擦力を増加させる効果と, 上述した F_x を低減させる効果により, $t = 3.6$ 秒過ぎまで桁の流出を遅らせることができたと言える.

Case A-4のフェアリングの場合には, フェアリングがないときよりも F_x の増加が抑えられているものの, Case A-2やCase A-3よりは大きいことから, F_x の低減効果は小さいことが分かる. 一方, F_z は, フェアリングがない場合と比較して, $t = 1.9$ 秒から $t = 2.2$ 秒にかけては若干大きいものの, $t = 3.0$ 秒過ぎまで概ね下回っていることから, 鉛直下向きの力すなわち静止摩擦力を増加させる効果が確認できる. そのため, F_z が正になる $t = 2.8$ 秒頃まで桁の流出を若干遅らせることができたと考えられる.

次に, 防衛工を固定した場合に着目すると, Case B-1の防衛工には, F_x の変化を小さく抑える効果があることが分かる. これは, 防衛工の高さが桁高と等しいことから, 桁の上流側の面全体が防衛工によって遮蔽されていたためと考えられる. ただし, 鉛直下向きの力の増加も

図-10 桁周辺の圧力変動 p (防衛工なし, $y=0$ m断面)

抑えられており, 静止摩擦力を低下させる負の効果もあることが確認できる. 図-10に防衛工がない場合の $y = 0$ m断面での圧力変動 p の分布を示す. 図-7と図-10の比較より, 上流側に防衛工が設置されたことで, 桁の下面に空気が閉じ込められていることが確認できる. そのため, 桁のすぐ下側に生じた渦に伴う圧力低下の影響を受けにくくなったことから, 上述したように鉛直下向きの力の増加が抑えられたと考えられる. そして, $t = 2.2$ 秒過ぎに F_z の増加に伴い静止摩擦力がゼロになり, そのときに F_x が負値をとっていたことから, 上述したように桁が上流側に移動したことが分かる. ただし, その後は F_x が静止摩擦力を上回る現象は, スパイク状の振動を除いてみられないことから, 桁の流出を抑える効果があったと考えられる.

最後に, Case B-2の場合には, 防衛工の高さが桁高の半分程度あることから, 防衛工がない場合と比較して F_x の増加が半分ほどに抑えられていることが分かる. しかし, 鉛直下向きの力すなわち静止摩擦力を低下させる負の効果はCase B-1の場合と同様にみられることから, $t = 2.3$ 秒頃に F_z が静止摩擦力を上回ってしまい, そのために桁の流出を遅らせる効果は小さかったと考えられる.

5. 結論

本研究では, 津波力の低減対策としてフェアリングを側面に取り付けた桁と防衛工を横に設置した桁を対象に, それらの低減対策が桁の移動に与える影響を考究した. その結果, 得られた主要な結論を以下にまとめる.

1. フェアリングとして, Case A-3には桁の流出を遅らせる効果が確認でき, その先端を切り取った形状のCase A-4にもその効果が若干認められた. 逆に, 斜め下を向く面があるCase A-1やCase A-2を取り付けた場合には, 桁の流出がフェアリングがない場合よりも早く生じることを確認した. 一方, 防衛工としては, 桁高と同じ高さのCase B-1には桁の流出を抑える効果があることが明らかになった. ただし, Case B-2のように桁高の半分程度の防衛工ではその効果は限られており, 桁の流出をわずかに遅らせるに留まることが判明した
2. フェアリングには, Case A-1からCase A-4の形状に

関わらず、水平波力を低減させる効果があることが判明した。また、斜め上を向く面があるCase A-3やCase A-4には、鉛直下向きの力を増加させ、さらにそれに伴って静止摩擦力を増加させる効果があることを確認し、そのために桁の流出を遅らせる効果があることが明らかになった。しかし、斜め下を向く面があるCase A-1やCase A-2には、静止摩擦力の増加を抑え、さらには低下させる負の効果があることが判明した。そのために、上述したように水平波力の低減効果はあるものの、桁の流出が逆に早まることが分かった。一方、防衛工には、その高さが高いほど水平波力をより大きく低減させる効果が確認できたものの、摩擦力を低下させる負の効果もあることが判明した。そのため、水平波力を十分に低減できたCase B-1には桁の流出を抑える効果があったものの、高さが桁高の半分程度しかないCase B-2には桁の流出をわずかに遅らせる効果しかないことが判明した。

謝辞：本研究は、財団法人海洋架橋・橋梁調査会橋梁技術に関する研究開発助成（研究代表者：中村友昭）と、科学研究費補助金基盤研究(A)（研究代表者：長岡技術科学大学・丸山久一；課題番号：24246079）の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 張 広鋒, 薄井稔弘, 星隈順一：津波による橋梁上部構造への作用力の軽減対策に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 66, No. 1 (地震工学論文集第 31 巻), pp. 425-433, 2010.
- 2) 庄司 学, 森 洋一郎：橋桁の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 801-805, 2006.
- 3) 庄司 学, 森山哲雄, 平木 雄, 藤間功司, 鳴原良典, 笠原健治：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, 2009.
- 4) 五十里洋行, 後藤仁志：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, 2007.
- 5) 中村友昭, 水谷法美, Xingyue Ren：橋桁への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, 第 32 回地震工学研究発表会, 9 p., 2012.
- 6) 中村友昭, 水谷法美：3 次元流体・構造・地形変化連成数値計算モデルを用いた海上を浮遊するコンテナの風による漂流挙動に関する数値シミュレーション, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, E07-1, 10 p., 2012.
- 7) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士：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.
- 8) 幸左賢二, 二井伸一, 庄司 学, 宮原健太：スマトラ沖地震に伴う津波による橋梁の被害分析, 構造工学論文集 A, Vol. 56A, pp. 454-463, 2010.
- 9) 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士：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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 65, No. 1, pp. 892-898, 2009.

STUDY ON COUNTERMEASURES FOR REDUCING TSUNAMI FORCE ACTING ON A BRIDGE SUPERSTRUCTURE AND ITS EFFECT ON THE MOTION OF THE SUPERSTRUCTURE

Tomoaki NAKAMURA, Norimi MIZUTANI and Xingyue REN

The effectiveness of countermeasures to prevent the tsunami-induced motion of a bridge superstructure are investigated in terms of tsunami force acting on the superstructure using a three-dimensional coupled fluid-structure-sediment interaction model. Numerical results show that fairings attached to the side of the superstructure and fenders fixed beside the superstructure reduce the horizontal tsunami force acting on the superstructure regardless of the configuration of the fairings and the height of the fenders. In addition, the fairings with the surface facing upward result in an increase in the downward vertical tsunami force and accordingly an increase in the static friction force. From these results, it is suggested that the fairings with the surface facing upward would be an effective countermeasure to delay the initiation of the motion of the superstructure. In contrast, the fairings with the surface facing downward reduce the static friction force, and accordingly the motion of the superstructure begins earlier than that for no fairing. The fenders also reduce the static friction force regardless of the height of the fenders. However, the fender with the same height as the superstructure would be effective to prevent the motion of the superstructure because of a significant reduction in the horizontal tsunami force.