

フェアリングを設置した橋梁上部構造の津波の作用による挙動メカニズム

中尾 尚史¹・張 広鋒²・炭村 透³・星隈 順一⁴

¹正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: nakao55@pwri.go.jp

²正会員 博(工) 一般財団法人首都高速道路技術センター 技術開発部 鋼構造物技術開発課
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10-11 虎ノ門PFビル)
E-mail: g.zhang@tecmex.or.jp

³正会員 修(工) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: sumimura44@pwri.go.jp

⁴正会員 博(工) 独立行政法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: hosikuma@pwri.go.jp

本研究は、フェアリングを設置したことによる津波作用時の上部構造の挙動メカニズムについて、水路実験および数値解析より検討を行った。水路実験では1/20スケールで実験を行い、長方形、2主桁、4主桁断面を用いて実験を行った。フェアリングは三角形および半円形を用いた。その結果、上部構造の断面形状に関わらず、フェアリング設置により、段波状の津波が作用した時に支承部に発生する衝撃的な水平反力を低減でき、鉛直反力についても低減効果があることが分かった。また数値解析では差分法を用いて検討を行った。その結果、フェアリングなしでは、主桁上部および張出部底面に作用する圧力が衝撃的な力を受けることが分かった。そして、フェアリング設置により、この部分に作用する圧力が小さくなり、水平および鉛直反力が小さくなることが分かった。

Key Words : tsunami, bridge, reaction force, hydraulic pressure, fairing

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、津波により橋梁の被害が多数発生した¹⁾。被害の中には、上部構造が流出し、さらにその橋の架橋条件によっては応急的な措置による迂回路の仮設も難しく、緊急輸送路としての機能が速やかに回復できなかった事例もあった。今後発生が予想されている、東海、東南海、南海地震においても、大規模な津波が襲来する可能性が指摘されており、津波による橋梁の対策は喫緊の課題である。

津波の影響に対する橋梁の対策の一つとして、津波による作用力そのものを軽減させる手法が考えられる。著者らは、津波による作用力を軽減する手法の一つとして、主に長大橋で風による制振対策として用いられるフェアリングに着目した研究をこれまで実施してきているが²⁾、津波による作用力の軽減に着目した研究事例は少ないの

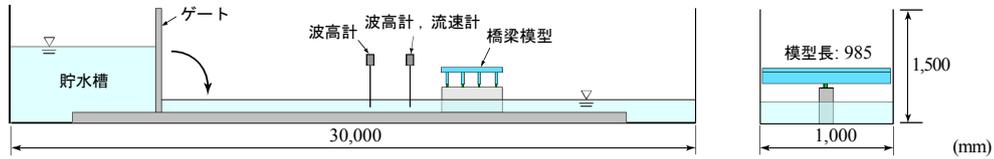
が現状である^{例えは図4)}。

著者らの研究³⁾は、フェアリングを設置することによって、津波が衝突する上部構造の橋軸直角方向側面の形状を流体力が作用しにくくすることにより、津波による影響を軽減できるのではないかと考え方に基づくものである。過去の研究事例として、上部構造の橋軸直角方向側面に取付けた三角フェアリングの効果について、三角形の頂点位置をパラメータとした種々の形状のフェアリングを用いた水路実験を実施している。

その結果として、フェアリングによる鉛直、水平方向の作用力の軽減効果が見られることや、その効果はフェアリングの形状によって異なること、また、鉛直方向よりも水平方向の作用力の軽減効果の方が大きいことを確認している²⁾。しかし、これまでの実験は模型の縮尺率が大きく、小さな模型であったために上部構造の中心の一点のみでしか反力を計測することができず、個々の支



(a)水路の状況写真（左：全体系，右：橋梁模型部拡大）



(b)水路のセットアップ状況（左：側面図，右：断面図）

図-1 実験装置の概要

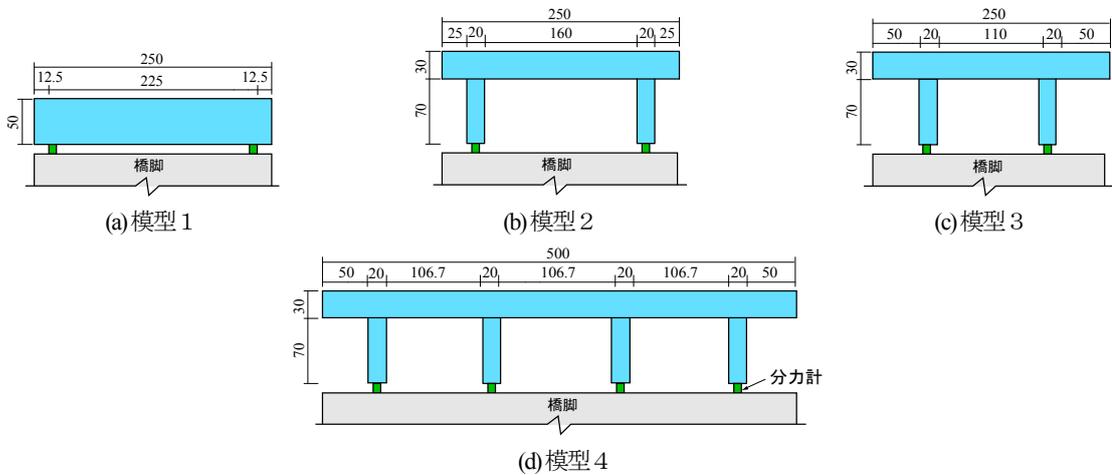


図-2 橋梁模型の橋軸直角方向断面寸法

承反力や上部構造の詳細な挙動については確認できていなかった。

そこで、本研究では、フェアリングが支承反力や上部構造の挙動に与える影響と挙動メカニズムについて、水路実験及び数値解析により検討した。

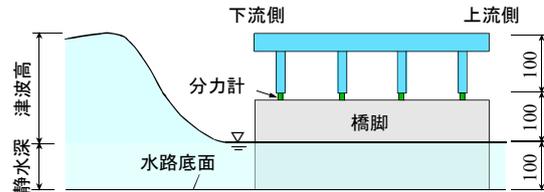


図-3 橋梁模型の設置状況例（模型4の場合）

2. 水路実験

(1) 水路実験の概要

a) 実験装置

実験装置は図-1に示すような全長30m、幅1mの水路を用いて実験を行った。本実験での縮尺スケールは1/20と出来るだけ実現象を再現できるように大きなスケールで設計した。実験装置は貯水槽に目標とする津波高を発生させることができる量の水をため、水槽と水路の間に設けたゲートを倒すことで、段波状の津波を発生させる仕組みになっている。

b) 橋梁模型

本実験で用いた橋梁模型は、図-2(a)～(d)に示すよう

に、長方形断面、2主桁断面、4主桁断面模型を用いて実験を行った。長方形断面は床版橋をイメージしたものであり、2主桁および4主桁断面模型は、幅員、床版張出長、主桁数の異なる桁橋をイメージしたものである。上部構造模型の橋軸方向寸法は、水路の幅を考慮して985mmとした。

上部構造の模型は図-3に示すように、河床から0.2m（実際の高さに換算すると4.0m）の位置に設置した。また上部構造は橋脚と連結材で連結し、その連結材に分力計を設置することで、津波が橋桁に作用したときの水平および鉛直方向の支承反力を計測した。

なお、本実験で用いた上部構造の模型質量は、実橋梁で想定している質量と相似にできていない。しかし、本

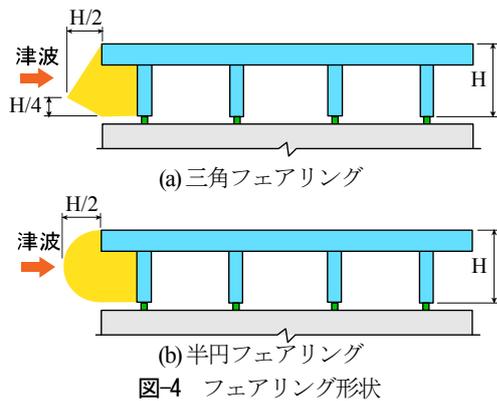


図-4 フェアリング形状



写真-1 半円フェアリングを取り付けた橋梁模型

実験では、津波からの作用に対して、支承に生じる水平反力と鉛直反力を把握することを目的としており、また上部構造の模型の重さによる支承の変形は生じないようにしているため、本実験では、上部構造の模型の質量が相似則に則した値でないことの影響は小さいと考えた。

c) フェアリング

本実験で用いたフェアリングは、図-4に示すような三角形および半円形のフェアリングを用いた。本研究では、津波が来襲したときについて検討しており、その後の引き波の影響については検討の対象としていない。そのため、本実験では、フェアリングは津波が作用する側の上部構造側面にのみ設置した。三角フェアリングの形状は、これまでに著者らが行った実験を参考にして⁹⁾、比較的大きな作用力の軽減効果が確認されている形状、すなわち、鉛直方向には桁下から上部構造高さの1/4の位置に、水平方向には同じく上部構造高さの1/2の位置に頂点を有する形状とした。半円形のフェアリングを取り付けた橋梁模型の状況を写真-1に示す。

d) 設定津波および条件

実験で発生させた津波は、桁下の半分まで水位がある状態で、橋面までの高さの津波が橋桁模型に作用したと想定して、初期水深を100mm（実際の水位に換算すると2.0m）、津波高さは200mm（実際の津波高に換算すると4.0m）に設定した。計測については、橋梁模型の1.0m手前の波高と流速、2.0m手前の波高および支承部の水平反力、鉛直反力を時刻歴で記録した。なお、以降は津波が

作用する側は下流側、その反対を上流側と呼ぶこととする。実験における計測のサンプリング間隔は0.002秒で行い、実験により得られたデータは模型の固有振動数以上の成分をカットするため、5.0Hz以上の成分をカットするローパスフィルタをかけた。同時にハイスピードカメラを用いて、橋桁周辺の流況を撮影した。

(2) 実験結果（橋梁周辺の流況）

写真-2に、フェアリングなし、三角および半円フェアリングを取付けたそれぞれのケースについて、津波が橋梁模型に衝突する瞬間の状況を示す。ここでは、模型1（長方形断面）、模型2（2主桁断面）、模型4（4主桁断面）の3ケースを示している。いずれのケースについても、フェアリングを取り付けたケースの方が衝突時の水の跳ね上がりが小さくなっていることがわかる。本実験における条件では、2主桁形式の模型2では、フェアリングを設けない場合は桁間の空間に波が流れ込んでいないものの、フェアリングを設けた場合は桁間の空間に回転流が生じている。また、4主桁形式の模型4では、フェアリングを設けない場合は最も下流側に位置する桁間の空間のみ波が流れ込んでいないが、フェアリングを設けた場合は回転流が生じており、フェアリングの有無による流況の違いが確認できた。

なお、実験における津波速度は2.0～2.4m/sec（実規模で9.0～11.0m/sec）であり、東日本大震災において津波により被災した構造物の分析⁹⁸⁾から推定される津波速度（最大で6.0m/sから8.0m/s程度）に比べて、若干速い速度での実験となっている。

(2) 実験結果（支承反力）

a) 水平反力

図-5に、フェアリングなし、三角フェアリング、半円フェアリングによる水平反力の計測結果を示す。横軸は時間、縦軸は水平反力であり、反力値は相似則を考慮して実橋梁規模の値に換算した値を示している。なお、模型4は、両端部の支承反力を示した。グラフは、津波が衝突する前後の時間のみを拡大して示している。

長方形断面（模型1）の場合、フェアリングの設置による水平反力の低減効果が明確に見られ、半円フェアリングでは約67%、三角フェアリングでは約33%低減している。2主桁断面（模型2、3）や4主桁断面（模型4）の場合、フェアリングがないケースでは、津波作用直後（18秒から19秒付近）に反力はピーク値に達しており、津波作用側の支承は約500kNになっている。フェアリングを設置すると、津波作用直後の衝撃的な力が小さくなり、半円フェアリングでは約50%、三角フェアリングでは約17%小さくなっている。

半円フェアリングの方が三角フェアリングを設置した

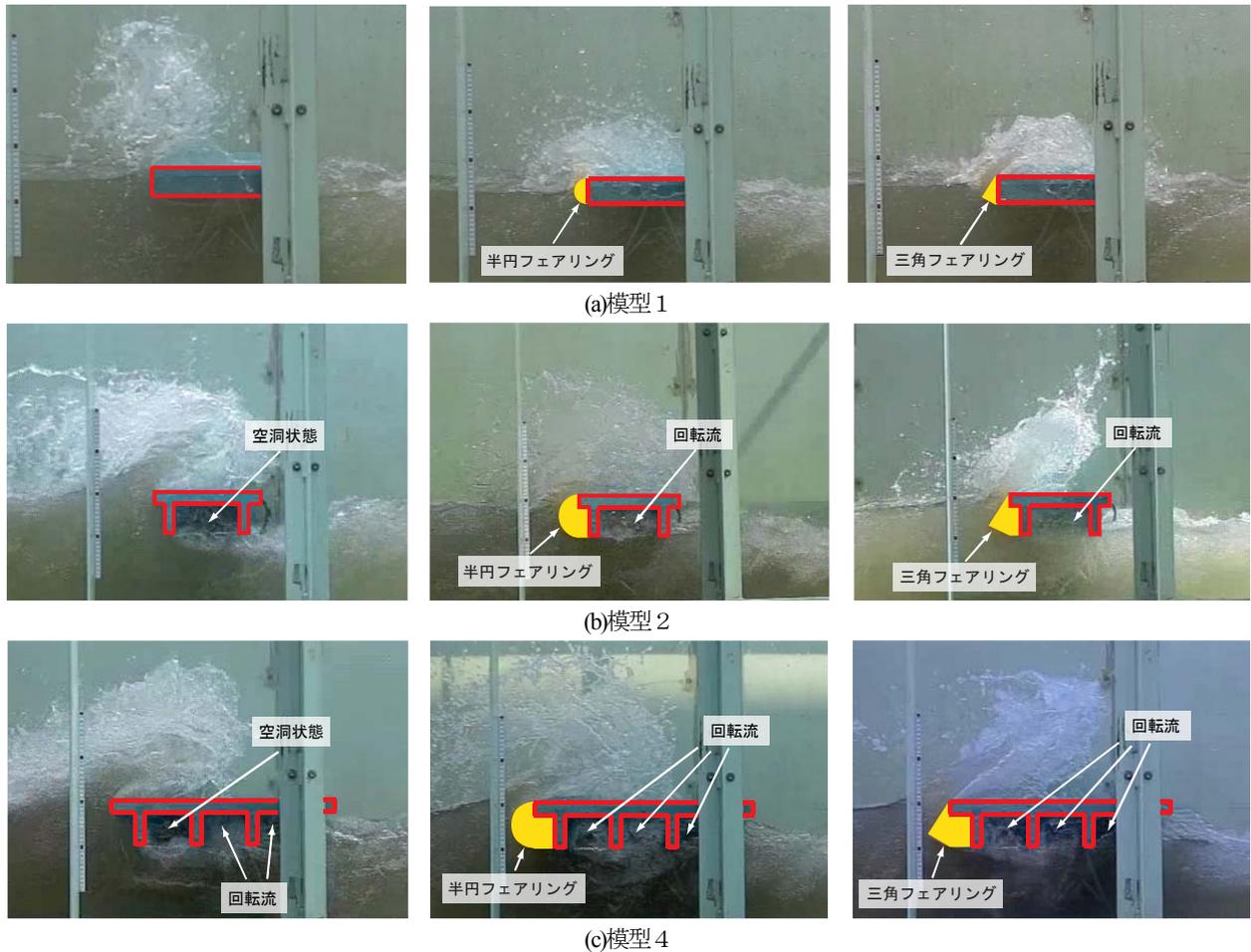


写真-2 津波が模型に衝突した瞬間の状況
(左：フェアリングなし，中：半円フェアリング，右：三角フェアリング)

場合よりも水平反力は小さくなっている。しかし、2主桁断面模型では、津波通過時（19.5秒以降）に水平反力は徐々に増加しており、500kNで一定値になっている。

c) 鉛直反力

鉛直反力の計測値には、津波による浮力や、鉛直、水平反力によって生じる回転モーメント、さらに橋梁模型を越流した波の自重による影響等が含まれるため、模型の構造特性の影響も考慮された計測値となる。既往の研究では、津波の作用によって、上部構造には下流側を持ち上げるような曲げモーメントが発生し、下流側の支承に上向き反力が、上流側の支承に下向き反力が発生する傾向にあることが、同様の橋梁模型を用いた水路実験より明らかにされている。その傾向は、上部構造の断面高さが高く、床版張出し部を有する桁形式の橋梁において顕著に見られる⁵⁾。

また、東北地方太平洋沖地震時の津波による橋梁上部構造の流出被害事例にも、下流側から持ち上げられるように回転しながら流出したと考えられる被害が見られた。したがって、ここでは最も下流側に位置する支承に発生する鉛直反力に着目して、フェアリングの効果について

検証することとした。

図-6に鉛直反力の計測結果を示す。横軸は時間、縦軸は鉛直反力を示しており、上向きの反力を正としている。

長方形断面（模型1）の場合、半円、三角ともにフェアリングを設置したケースにおいて、津波が作用した直後（18.5秒から19.0秒付近）に下流側の支承（ F_{1n} ）に上向きの反力、上流側の支承（ F_{2n} ）に下向きの反力が生じており、上部構造が津波作用側から持ち上げられるような挙動が生じていると考えられる。また、フェアリングを設置すると、フェアリングを設置していない場合に比べて鉛直反力は、半円フェアリングの場合で約4倍、三角フェアリングの場合は約3倍大きくなっている。フェアリングを設けることによって逆に上部構造下面に流れ込む波による圧力の影響を受けやすくなったためであると考えられる。

2主桁（模型2、3）および4主桁断面（模型4）の場合、フェアリングを設置すると、下流側の支承に作用する上向きの力は小さくなっており、張出し長が大きい模型3では、フェアリングを設置していない場合に比べて、半円フェアリング、三角フェアリング共に約50%小

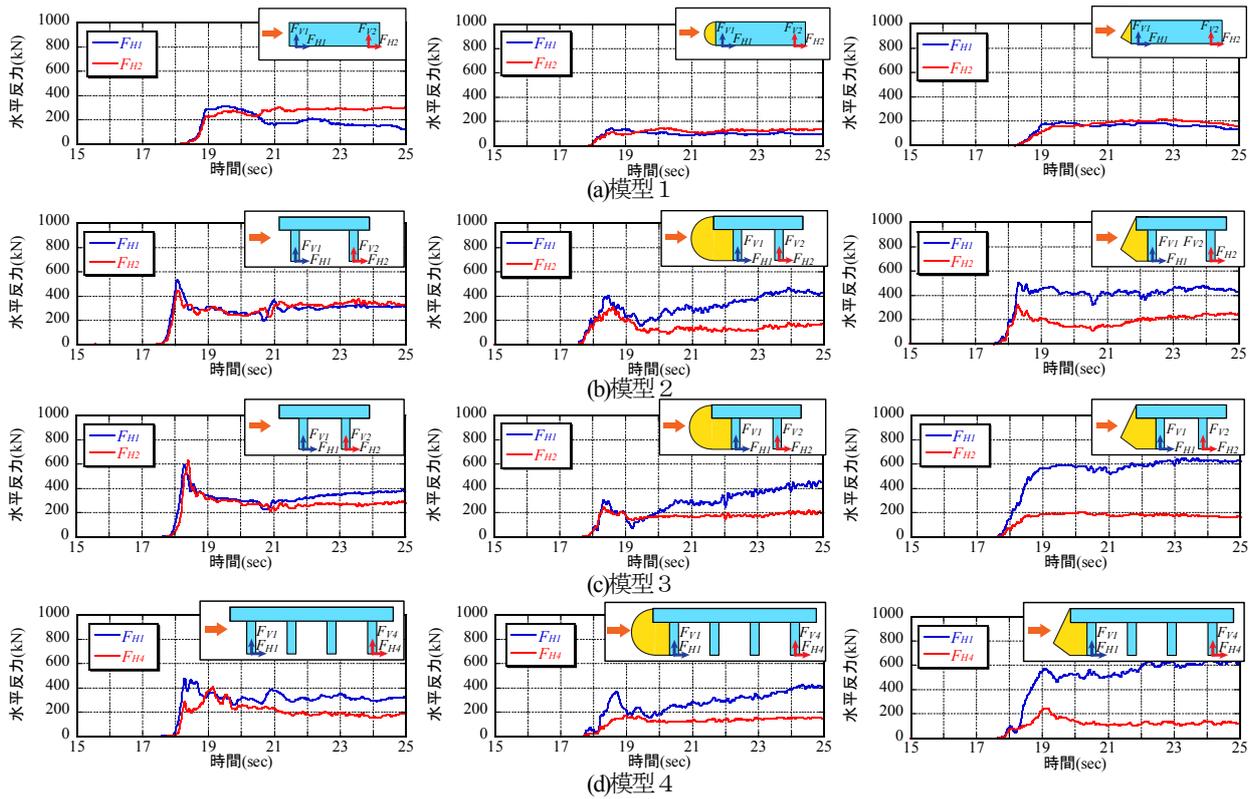


図-5 水平反力の実験結果 (左：フェアリングなし，中：半円フェアリング，右：三角フェアリング)

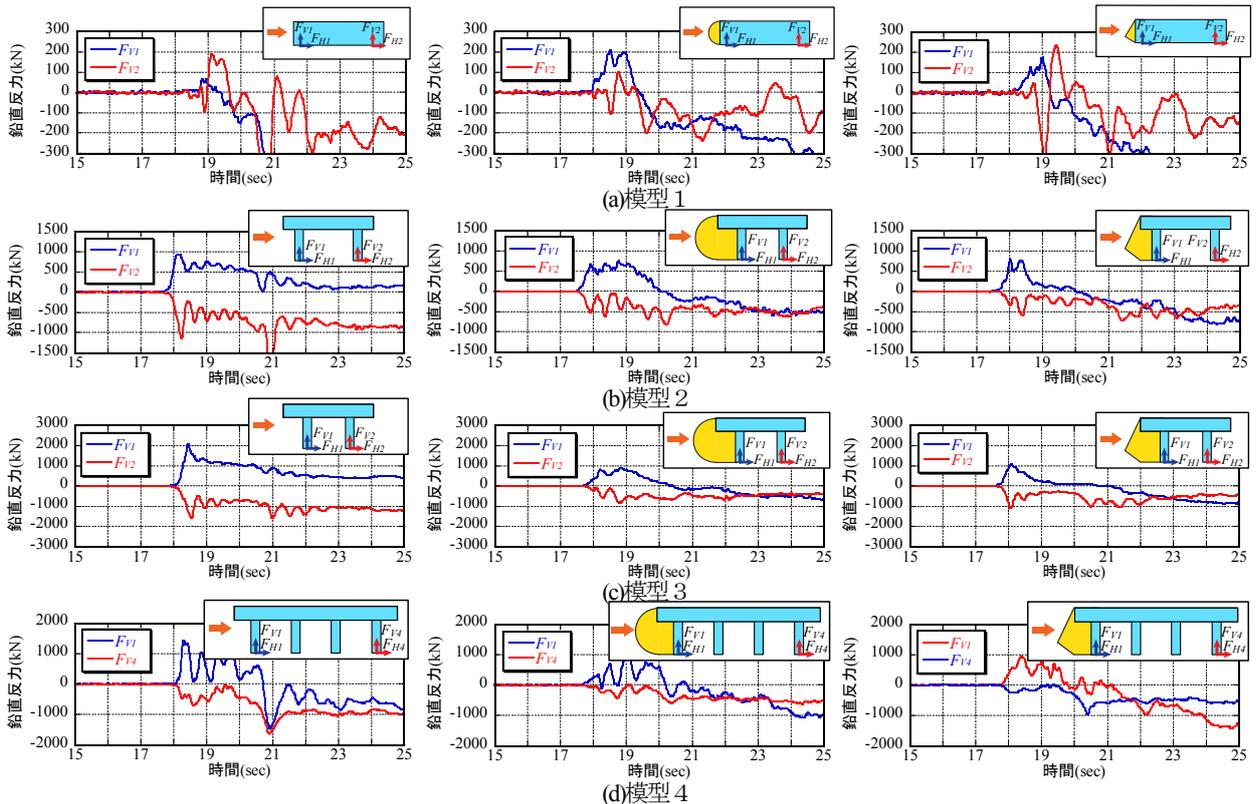


図-6 鉛直反力の実験結果 (左：フェアリングなし，中：半円フェアリング，右：三角フェアリング)

さくなっている。鉛直反力は、津波作用直後に床版張出部底面に生じる圧力の影響が大きいと考えられ、フェアリングを設置することにより床版張出し部に生じる圧力が低下したために、上向き鉛直反力が小さくなったと考えられる。一方、床版張出し長が短い模型2や、幅員

が広く、主桁数の多い模型4では、フェアリング設置による鉛直上向きの反力の低減量は25%から33%であり、模型2に比べて小さくなっている。したがって、床版張出し部が大きい橋梁では、フェアリングの設置による反力の低減効果は大きいと考えられる。

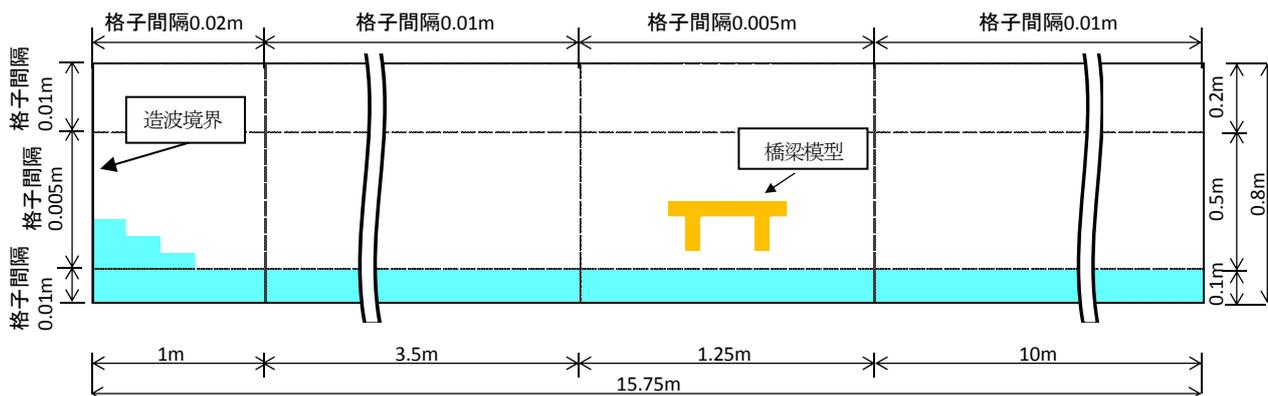
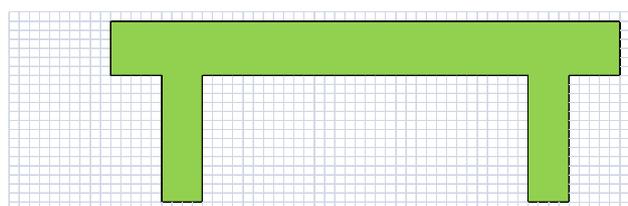


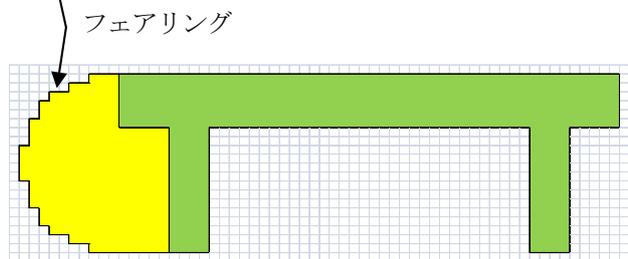
図-7 実験条件に対する解析モデル



(a) フェアリングなし



(b) 三角フェアリング



(c) 半円フェアリング

図-8 橋梁モデル

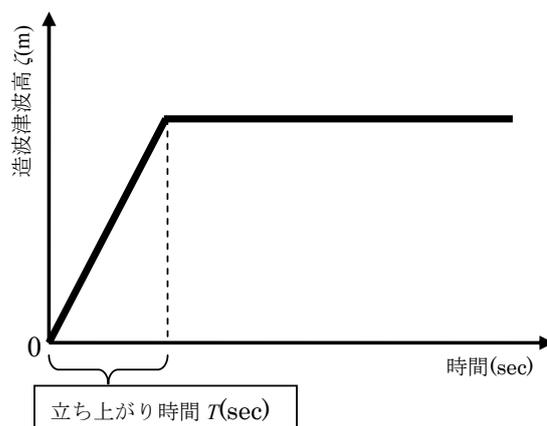


図-9 造波モデル

3. 数値波動水槽を用いた数値解析

(1) 解析モデル

水理実験で得られた上部構造の挙動メカニズムを把握するために、本章では数値解析により検討を行った。本研究では、解析ソフト(CADMAS- SURF/3D)⁹⁾を用いて検討を行った。

解析モデルを図-7に示す。奥行きを単位長さとする2次元モデルで解析を実施した。本解析での鉛直格子間隔は、造波境界から1mまでを0.02m、1mから4.5mまでを0.01mに設定した。また、フェアリング部を表現するために、橋梁模型周辺の格子(造波境界から4.5mから5.75m)は0.005mに設定した。模型より後ろ(造波境界

から5.75m以降)は、波の反射の影響が及ぼさないように、10m(格子間隔0.01)に設定した。水平格子間隔は模型周辺(河床から0.1mから0.6m)は0.005m、それ以外の箇所は0.01mに設定した。

本解析では、2主桁断面模型(模型2)について検討した。解析で用いる橋桁は図-8のようにモデル化した。またフェアリング部は前述したように格子間隔を細かくしてモデル化した。また河床から模型下面までの高さを実験条件と同じく200mmに設定した。また、空気圧を考慮して($\rho V^2 = \text{const}$, γ : 比熱比(空気の場合1.403⁹⁾)解析を行った。

解析により、橋梁模型周辺の圧力を求め、フェアリングがある場合とない場合について検討した。

(2) 造波方法

解析により発生させる津波は、水路実験で発生させた段波状の津波を再現できるように、図-9に示すような徐々に津波高を増加させて、一定の時間(本論文では立ち上がり時間と呼称)の後に目標とする津波高(増波津波高と呼称)および津波速度(流速)に達し、それ以降は一定になるような造波を行った。津波速度(流速) U は増波津波高から、次式のより算定した。式中の h は初

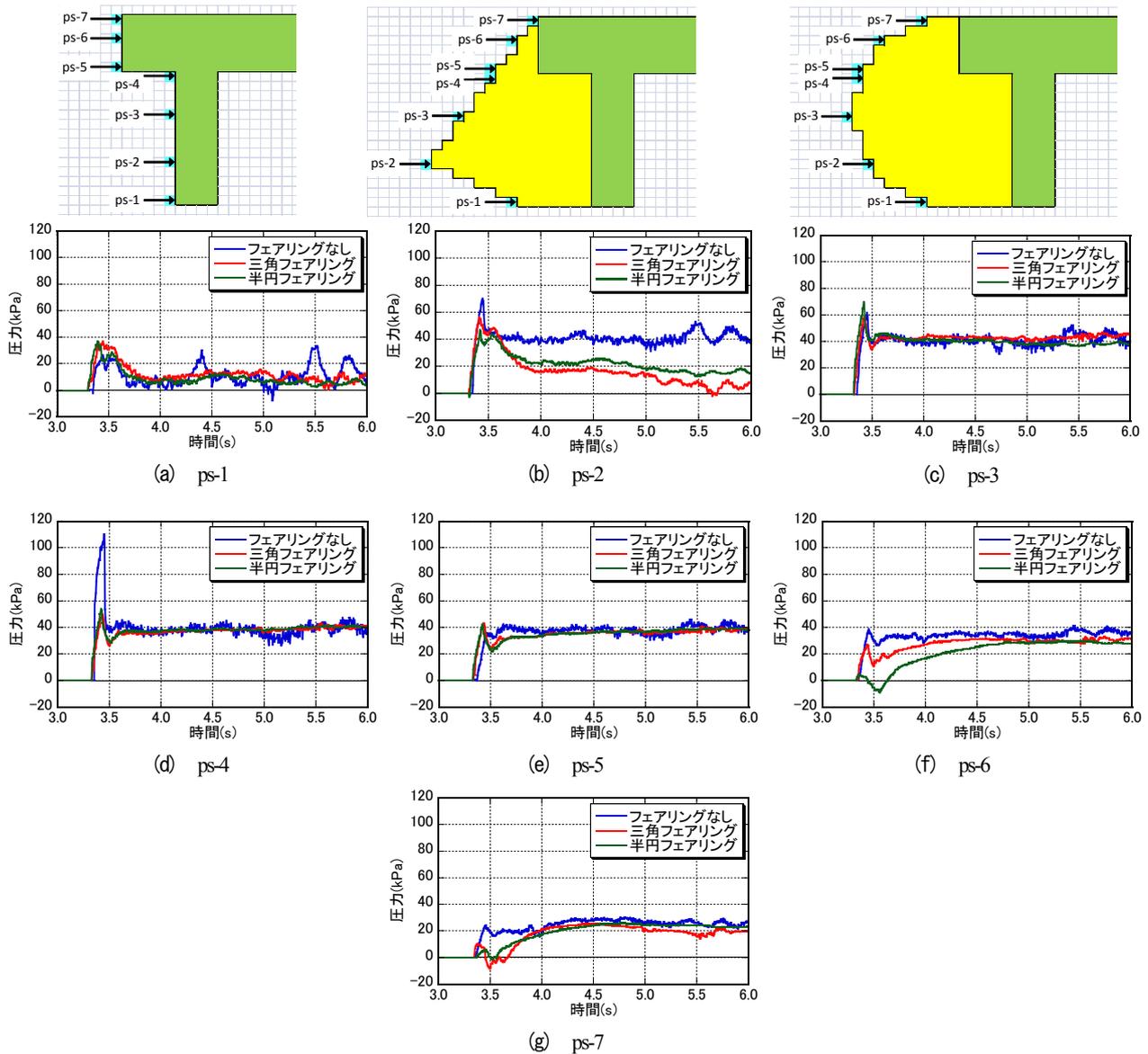


図-10 橋梁部材に作用する圧力の時刻歴応答波形（水平方向）

期水位(m), ζ は造波津波高(m), η は抵抗係数であり, ここでは1.03に設定した¹⁰⁾, g は重力加速度(9.8m/s^2)である. 解析では, これまでに著者らが事前に行った解析を参考に¹⁰⁾, 造波津波高を0.17m, 立ち上がり時間を2秒に設定した.

$$U = \frac{\zeta}{h + \zeta} \sqrt{\frac{g(h + \zeta)(2h + \zeta)}{2(h + \zeta - \eta\zeta)}} \quad (1)$$

(3) 解析結果

a) 橋梁部材に作用する圧力（水平方向）

図-10は, 橋梁部材に作用する圧力の時刻歴応答波形である. 横軸は時間, 縦軸は橋梁部材に作用する圧力である. 圧力の数値は, 水路実験と同様に実物換算した値である. 既往の研究で, 津波作用側の主桁および張出し床版の底面が支承反力に大きな影響を与えることを示し

ている¹¹⁾. そこで, ここでは津波作用側の主桁および張出し床版の底面に加えて, 床版張出部側面に作用する圧力について検討する. なお, 図で示した青色のセルは圧力を算定した箇所を示している.

フェアリングがない場合, 津波作用側の主桁に作用する圧力は, 模型上方にゆくにつれて大きくなっており, 主桁の最上部に作用する圧力 (ps-4) は, 主桁の一番下に作用する圧力の約3倍になっている (図-10(a), (d)). 図-11に解析により得られた橋梁周辺の流況 (圧力が最大になる時刻) を示す. 図の矢印は, 流れのベクトルである. 図-11(a)より, 主桁上部では流れが乱れている. この乱れが, 圧力増加に影響していると考えられる.

三角フェアリングや半円フェアリングを付けると, 全体的に水平方向の圧力はフェアリングなしに比べて小さくなっており, 特に津波作用直後 (3.4秒付近) の主桁の最上部に作用する圧力 (ps-4) は, フェアリングなし

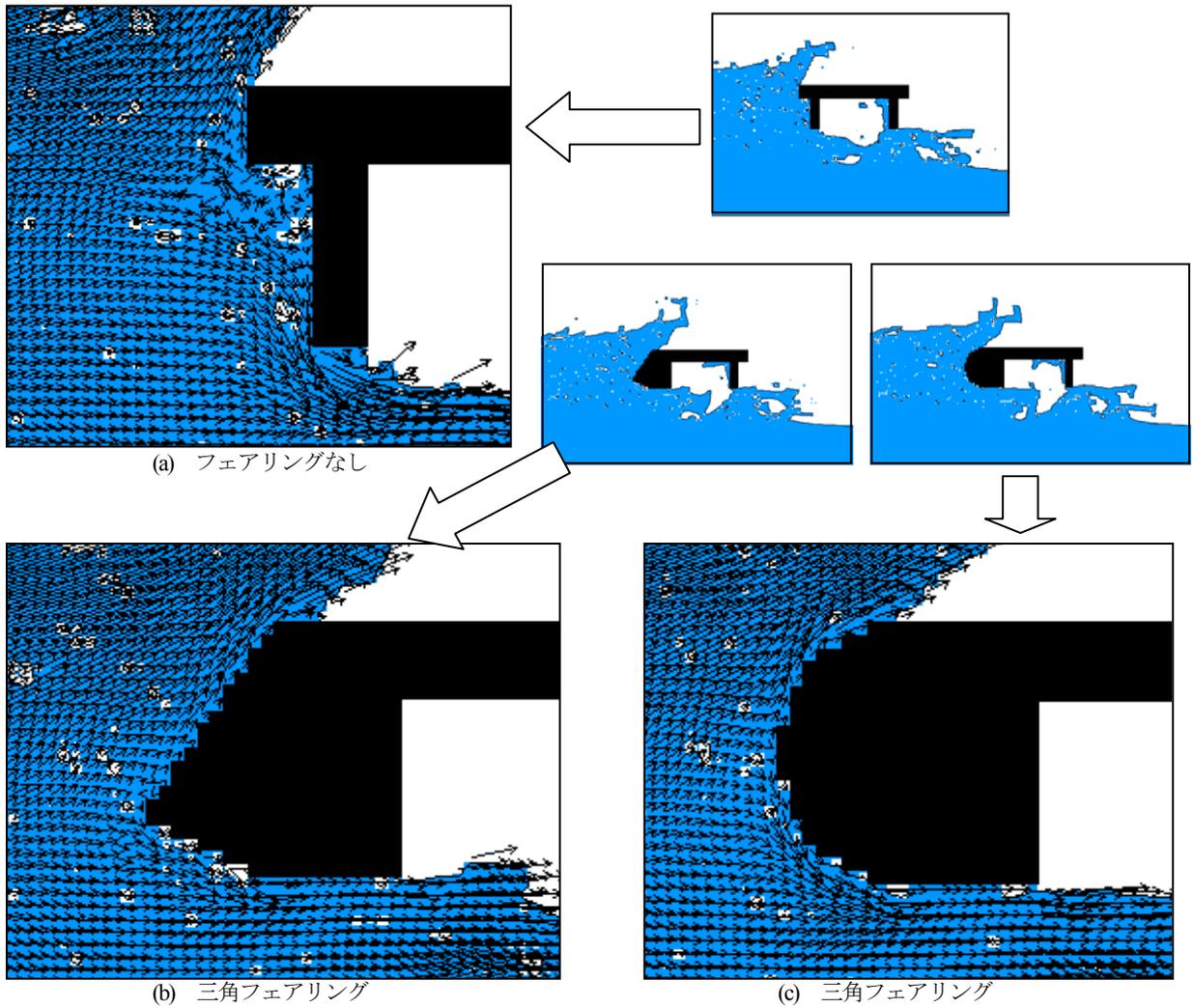


図-11 橋梁周辺の流況

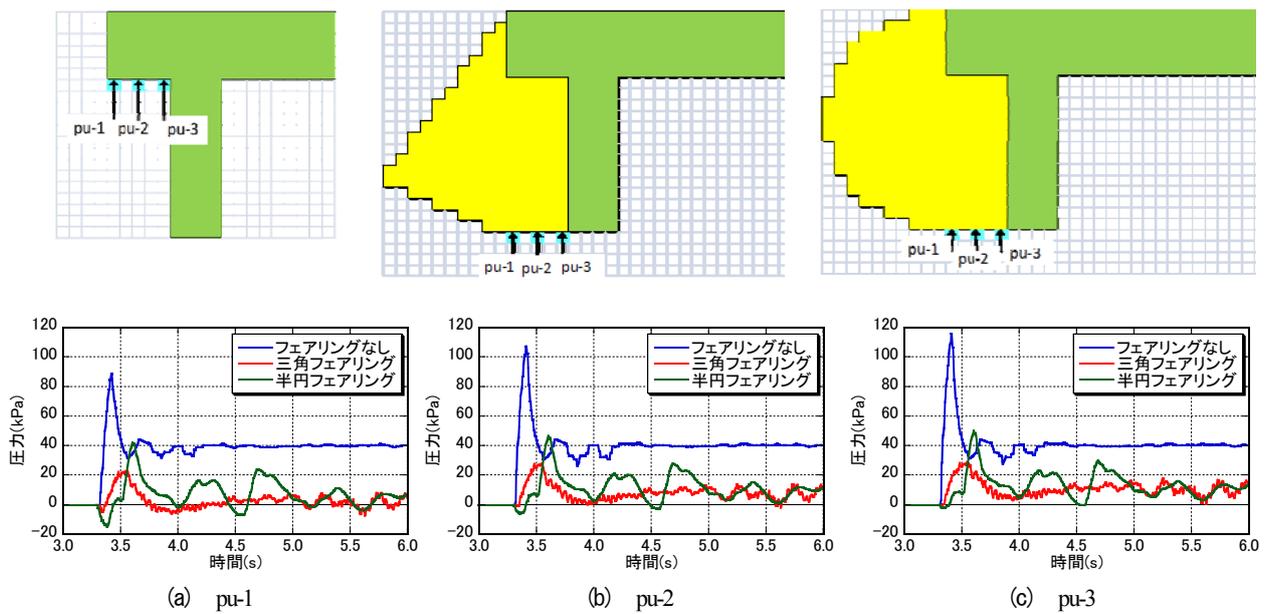


図-12 橋梁部材に作用する圧力の時刻歴応答波形 (鉛直方向)

に比べて約1/2になっている。そのため、この部分の圧力が小さくなったために、水平方向の支承反力が低減さ

れたと考えられる。図-11 (b), (c)より、フェアリングを取り付けると、流れが乱れずに後部へ流れている。その

ために、側面に生じる圧力が小さくなったと考えられる。床版張出部側面に作用する圧力は、フェアリングを取り付けると、津波作用直後の僅かの間、負圧になっている。また、三角フェアリングと半円フェアリングを比較すると、上方の圧力 (ps-6) 以外はほぼ同じ大きさになっている。なお、ps-2以外は、津波通過時 (3.5秒以降) はほぼ同じ圧力になっている。

b) 橋梁部材に作用する圧力 (鉛直方向)

図-12で示した鉛直方向の圧力について考えると、フェアリングがない場合は、津波作用直後 (3.4秒付近) に衝撃的な圧力が作用している。その大きさは主桁に近づくにつれて (pu-3), 若干大きくなっている。前述したように、主桁上部で発生している乱れた流れが影響していると考えられる。

フェアリングを取り付けると、全体的に圧力が1/2から1/3程度小さくなっている。図-11 (b), (c) より、フェアリングを設置すると、床版張出部底面の流れはほぼスムーズに流れており、そのためにこの個所に大きな圧力が作用しなかったと考えられる。このように、床版張出部底面に作用する圧力が小さくなったために、鉛直方向の支承反力が小さくなったと考えられる。なお、フェアリングがある場合、鉛直方向の圧力のピーク時間は、水平方向の圧力のピーク時間に比べて、若干遅くなっている。

4. まとめ

本研究は、三角形および半円形のフェアリングを上部構造に設置することによる、津波作用時の上部構造の挙動メカニズムおよび津波により生じる支承部に作用する反力特性への影響について検討するために、種々の形状を有する上部構造模型を用いて水路実験および数値解析により検討した。本研究行った実験及び解析の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 水路実験により、2主桁断面や4主桁断面の場合、フェアリングを設置することにより、支承部に作用する水平および鉛直上向きの力は小さくなる傾向を確認した。
- 2) 一方、長方形断面の場合、フェアリングを取り付けることにより、水平反力は小さくなるが、逆に鉛直上向きの力は大きくなる傾向になった。これは、フェアリングを設けることによって逆に上部構造下面に流れ込む波による圧力の影響を受けやすくなったためであると考えられる。
- 3) 数値解析から、フェアリングを設置することにより、フェアリングを設置していない場合に発生する主桁上方や張出し部底面に作用する圧力が小さくなる。フェアリングがない場合では、流れの乱

れが発生している箇所で、圧力が増加していることから、フェアリングを取り付けることにより、このような流れの乱れが発生しにくくなったため、この部分の圧力が小さくなったと考えられる。

- 4) 2主桁断面や4主桁断面において、主桁上方や張出し部底面の圧力が大きくなると、水平および鉛直上向きの支承反力が大きくなる挙動を示す。そのため、フェアリングを設置することにより、この箇所の圧力が小さくなり、支承部に作用する水平および鉛直上向きの力が小さくなるような挙動になったと考えられる。

参考文献

- 1) 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震 土木施設災害調査速報, 国総研資料第646号, 土研資料第4202号, 2011.
- 2) 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, 土木学会地震工学論文集A1 (構造・地震工学), Vol.66, No.1, pp.425-433, 2010.
- 3) 糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士: 津波作用力の軽減を目的とした橋桁断面形状の実験的検討, 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, pp.125-130, 2011.
- 4) 伊津野和行, 川崎祐磨, 生島直輝, 山中拓也, 四井早紀: 4主桁プレートガーダー橋の津波対策に関する実験的研究, 第16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, pp.259-264, 2013.
- 5) 張広鋒, 中尾尚史, 星隈順一: 津波の影響を受ける橋の挙動に及ぼす上部構造の構造特性の影響に関する水路実験, 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, pp.97-102, 2012.
- 6) 佐々木達生, 幸左賢二, 付李, 田崎賢治: 津波による津谷川周辺のPC桁橋梁を含む構造物の損傷分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.1117-1122, 2012.
- 7) 神宮司博志, 幸左賢二, 佐々木達生, 佐藤崇: 画像及び数値解析を用いた気仙大橋の津波被害分析, 第16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, pp.349-356, 2013.
- 8) 片岡正次郎, 金子正洋, 長屋和宏: 津波が越流した被害が軽微な道路橋の地震・津波応答再現解析, 第16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, pp.7-12, 2013.
- 9) 沿岸技術ライブラリーNo.39: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 財団法人 沿岸技術研究センター, 2010.
- 10) 福井芳郎ほか: 津波の研究 (I) - 一段波津波の堤防に及

ぼす影響一，第9回海岸工学講演会論文集，pp.44-49，
1962.

木学会地震工学論文集A1（構造・地震工学），Vol.69，
No.4，I_42-I_54，2013.

- 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

STUDY ON BEHAVIOR MECHNISM OF BRIDGE WITH FAIRING UNDER TSUNAMI-INDUCED FORCE

Hisashi NAKAO, Guangfeng ZHANG, Toru SUMIMURA and Jun-ichi HOSHIKUMA

This paper discusses the mechanism of tsunami-induced behavior of the superstructure with a fairing through a series of flume test and analysis. In the flume tests, 1/20-scaled models of the superstructure with rectangular, two-girders and four-girders section were employed with/without the semicircular or triangular fairing. Test results showed that the fairing effectively reduced the tsunami-induced horizontal and vertical forces applied to bearing supports in all test cases of superstructure. Furthermore, analytical results showed that the significant hydrodynamic pressure was observed at the top of web and the bottom of overhang slab in the conventional superstructure, while such hydrodynamic pressure was reduced by installing the fairing to the superstructure. The reduction of hydrodynamic pressure results in the mitigation of the tsunami-induced reaction force to the bearing supports of bridges.