

3.9 津波の影響を受ける橋の挙動と抵抗特性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：星隈順一、中尾尚史

【要旨】

研究 2 年目となる平成 25 年度は、昨年度に得られた知見を基に、津波による上部構造への作用力の軽減対策の開発および津波に対する橋の抵抗耐力の評価手法の提案を目的として、水路実験から得られた知見より、橋に影響を与える津波の作用状態とその評価方法に関する検討を行い、更にフェアリングや側道橋が津波により橋桁に作用する力に与える影響に関する検討を行った。その結果、橋に影響を及ぼす津波の作用状態を示すとともに、津波により橋桁に作用する力の評価方法を提案することができた。また、半円フェアリングや三角フェアリングを設置することで、津波作用直後の衝撃的な力を低減させることがわかった。

キーワード：津波、上部構造、支承反力、圧力、フェアリング、津波速度

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、津波による橋梁の被害が多数発生した¹⁾。被害の中には、支承部が破壊して上部構造が流出し、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させることが難し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、大規模災害発生時においても、避難路・緊急輸送道路として道路ネットワークの機能を早期に確保することが喫緊の課題となっている。

平成 24 年に改定された道路橋示方書 V 耐震設計編²⁾では、津波に対しては、地域の防災計画をも考慮した上で橋の構造を計画することが規定されており、道路橋の設計においては、地域の防災計画等に基づいて設定される当該路線に求められる性能に応じて、適切な構造計画を検討することが重要と示されている。また、構造計画の考え方の例としては、津波に関する地域の防災計画等を参考にしながら津波の高さに対して桁下空間を確保すること、津波の影響を受けにくいような構造的工夫を施すこと、上部構造が流出しても復旧しやすいように構造的な配慮をすること等が挙げられている。津波により橋梁に生じる影響は、津波と橋梁との間の相互作用によって生じるものであるが、津波により橋梁が受ける影響を評価し、さらに橋梁側での構造的な工夫により津波の影響

を受けにくくする対策を講じていくためには、津波に対して橋梁がどのようなメカニズムに基づいて挙動するのか、また津波により橋梁に作用する力はどれくらいなのかを解明していくことが必要である。

このような背景から、本研究では、津波の影響を受ける橋の挙動に着目し、東日本大震災の被災経験を基に、津波による上部構造の流出メカニズムの解明をするとともに、津波に対する橋の抵抗特性の評価手法および主として既設橋を対象とした津波作用の軽減対策の開発を行う。

研究 2 年目である平成 25 年度は、橋桁各部位に生じる圧力を詳細に計測し、各部位に作用する圧力の分布、および津波速度と圧力の関係を検討した。そして、得られた結果と、初年度で得られた知見を基にして、津波の影響を受ける橋の挙動評価手法の提案を行った。また、津波により橋に作用する力の軽減対策方法を水理実験及び数値解析により検討した。

2. 津波速度と圧力の関係

2.1 本章の概要

津波による桁に作用する力の評価方法や、力の低減させる方法を検討するには、橋桁の各部位に生じる圧力を詳細に分析する必要がある。初年度の計測では、各部位の中心部のみ計測を行っていたために、どのような圧力分布になるのか詳細な検討ができなかった。そこで本章では、橋梁の各部位に生じる圧力を詳細に調べることで、

どのような圧力分布になるのか、また、津波速度と橋梁各部位に生じる圧力にはどのような関係があるのか水路実験により検討を行った。

2. 2 水路実験の概要

2.2.1 実験装置

実験装置は図-2.1 におよび写真-2.1 示すような全長30m、幅1mの水路を用いて実験を行った。初年度に行った実験では、初期水位が低くて、比較的大きな津波が作用した場合を想定して実験を行った³⁾。しかし、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に関する幸左らの研究から⁴⁾⁵⁾、少なくとも橋が流出した地点での津波速度は最大でも5.0m/sから8.0m/s程度と推定されている。そこで本研究では、このように推定されている津波速度を水理実験で再現できるように、寸法の縮尺スケールは1/20で設計した。津波には段波状の津波と、徐々に水位が上昇する津波があるが、初年度の実験により、津波作用直後の衝撃的な力が作用するのは、段波状の津波が作用した場合であり、この力による影響が大きいことがわかっている³⁾⁶⁾。したがって、本実験では、段波状の津波のみを対象として実験を行った。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。

2.2.2 橋梁模型

本実験で用いた橋梁模型は、図-2.2(a)~(h)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

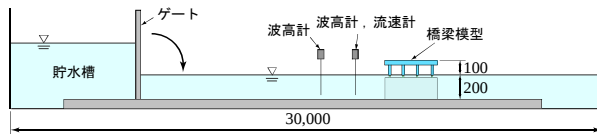


図-2.1 実験装置



写真-2.1 実験装置

985mmとした。また、圧力計は、図-2.3に示す位置に設置した。

上部構造の模型は、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。

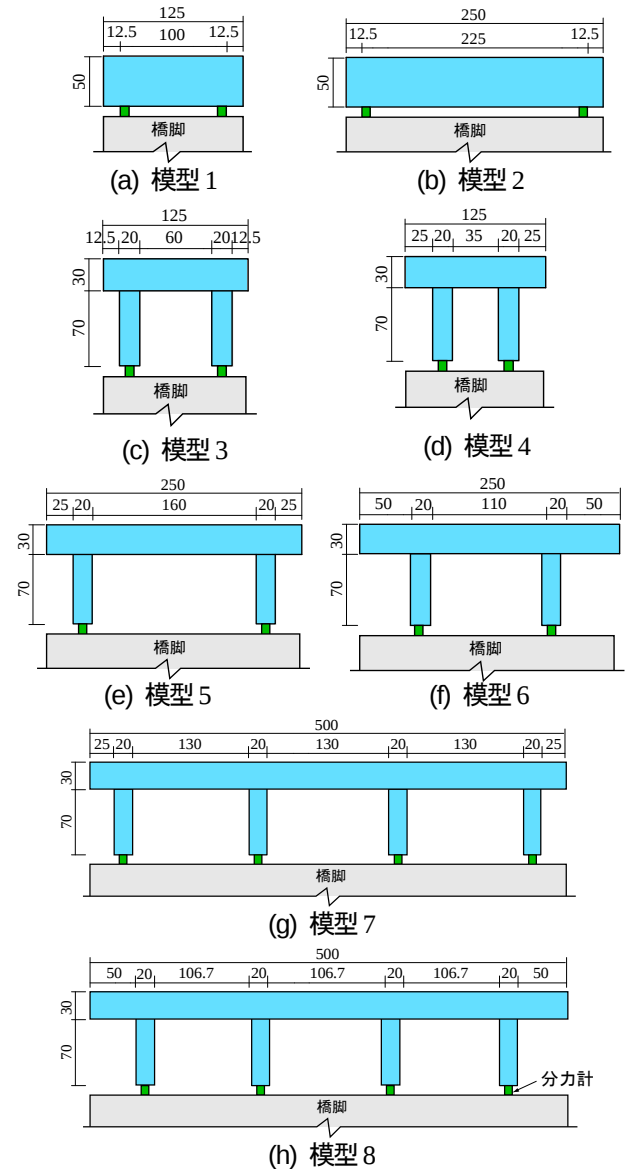


図-2.2 上部構造模型

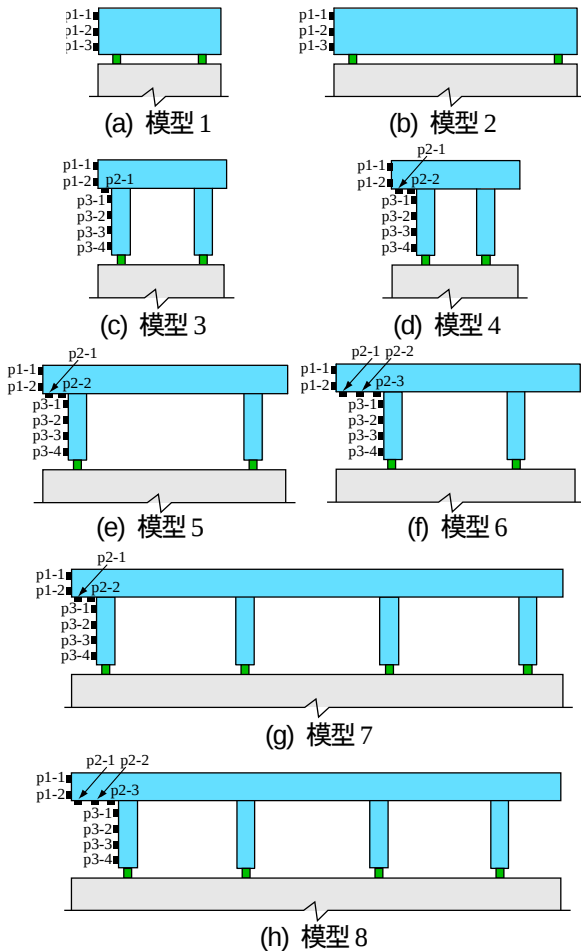


図-2.3 圧力計設置状

2. 3 実験結果

2.3.1 上部構造の各部位に作用する圧力の分布

図-2.4 および図-2.5 は各計測位置に作用する圧力を示したものである。横軸は津波速度、縦軸は橋梁の各部に生じる圧力である。ここでは2主桁断面と4主桁断面における、津波作用側の張出底面および主桁に作用する圧力を示した。

津波速度が小さいケースは、全体的に圧力のばらつきは小さい。そのため、一部を除きほぼ様な圧力分布になっている。津波速度が大きいケースでは、各位置における圧力に差が生じる。主に、主桁に近い位置の圧力(p-2 または p-3) は大きくなっており、外側の圧力(p-1) に対して、約1.5倍~3.0倍の大きさになっている。よって、圧力分布は、主桁側の圧力が大きくなるような台形分布になっている。

主桁に作用する圧力は、主桁上部の圧力(p-1) が大きくなる傾向になっている。その傾向は、津波速度が大きくなるにつれて大きくなっており、主桁上部に作用する圧力は、主桁下部に作用する圧力(p-4) の約2.5~3.0倍

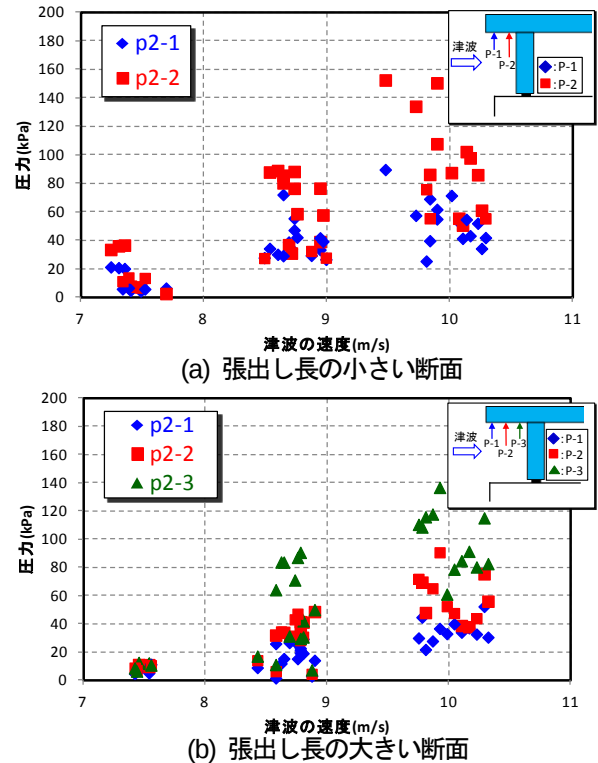


図-2.4 張出し部底面に生じる圧力

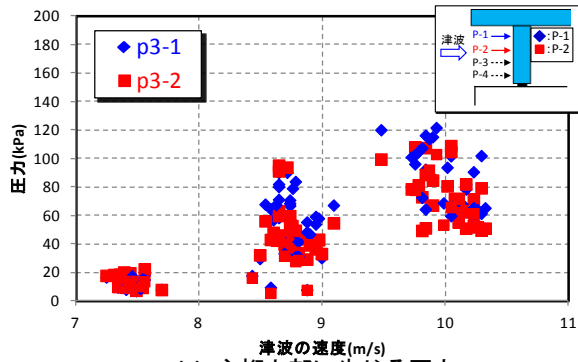
になっている。

また、張出底面に作用する圧力と同様に、津波速度と張出部側面に作用する圧力には、実験の範囲で線形的な傾向がある。

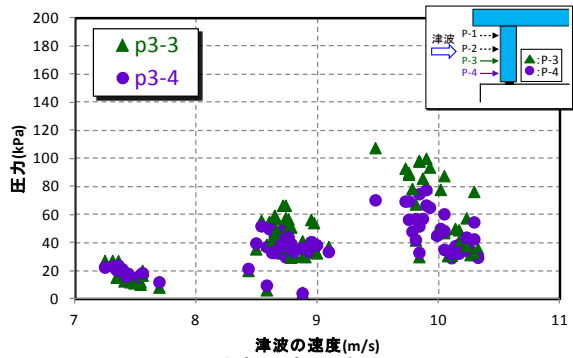
2.3.2 津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力の関係

図-2.5 は津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力の関係を示したものである。横軸は津波速度、縦軸は上部構造の各部位に作用する圧力である。ここでは、著者が既に別途実施した水路実験(初期水深が0.1mで設定津波高が0.15m, 0.20m, 0.35m, 初期水深が0.15mで設定津波高が0.10m, 0.15m, 0.35m)の結果も図中に示した³⁾。なお比較のため、別途実施した水路実験において計測した圧力の計測位置に近い位置の圧力(1~2点)を、代表値としてここでは示している。

津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力との間には、相応のばらつきがあるが、実験範囲内では、ほぼ線形または2次関数の関係がある傾向になっている。また、津波作用側の張出底面に作用する圧力と主桁に作用する圧力の結果は、比較的似た傾向になっている。さらに、津波作用側の張出し側面に作用する圧力は、主桁に作用する圧力や張出し底面に作用する圧力に対して、1割程度小さくなっている。



(a) 主桁上部に生じる圧力



(b) 主桁下部に生じる圧力

図-2.5 主桁に生じる圧力

3. 津波の影響を受ける橋の挙動評価手法の提案

3.1 本章の概要

東日本大震災以降、津波が橋梁に与える影響について実験及び解析的研究が幾つか行われているが、支承部などの部材状態の評価を行うために、津波の作用によって橋に生じる力を定量的に評価した検討例は少ない。

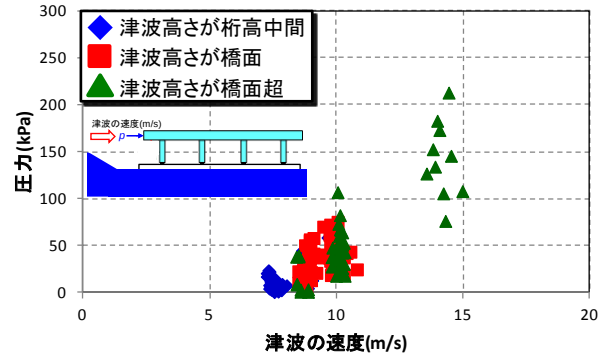
本章は、津波によって橋桁に作用する力を評価する手法を構築することを目的として、橋に影響を与える津波の作用状態と橋桁に生じる力の評価方法について、これまでにを行った実験結果を基に検討した。

3.2 橋に影響を与える津波の作用状態

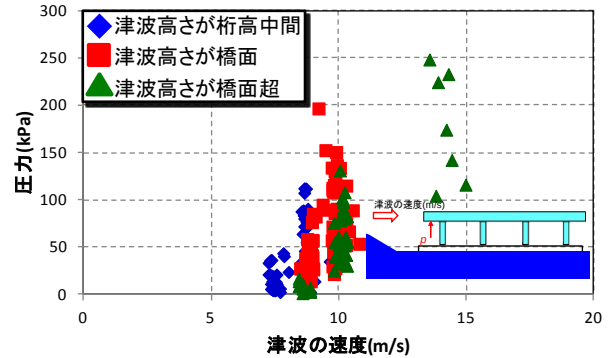
初年度に行った実験や、東北地方太平洋沖地震により発生した津波が橋に作用している時の映像解析による幸左らの研究⁴⁾⁵⁾から、津波により桁下の高さまで水位が上昇し、その後段波状の津波が作用する状況に着目した時、橋梁に最も影響を及ぼす状態として以下の2つの段階があると考えた。

①口波が橋桁に到達した段階（状態Ⅰ）

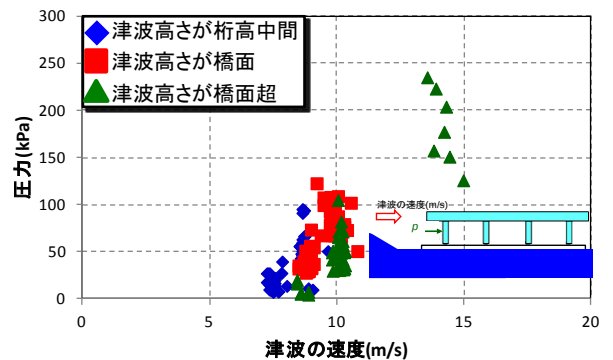
津波が橋桁に到達した直後に桁の状態では、図-3.1に示すように、橋桁には津波により津波作用側の耳桁に作用する力が水平方向に、また、床版張出し部底面に作用



(a) 床版側面に生じる圧力



(b) 床版張出部底面に生じる圧力



(c) 津波作用側の主桁に生じる圧力

図-2.6 津波速度と橋梁部材に生じる圧力の関係

する力 f_{vaI} と、津波により浸水した部分（緑色で示した部分）の浮力（ただし桁間の空気はそのまま保持される） f_{vsI} が上向きに作用する。

②津波が橋桁の上を通過している段階（状態Ⅱ）

津波が橋桁の上を通過しているときには、津波が橋桁に到達した直後に作用する衝撃的な力は作用せず、橋桁を通過する流れによって作用する力が作用する。また図-3.2に示すように、橋桁が完全に水没する状態となるため、桁間の空気溜りを含む橋桁全体が浮力として作用する。

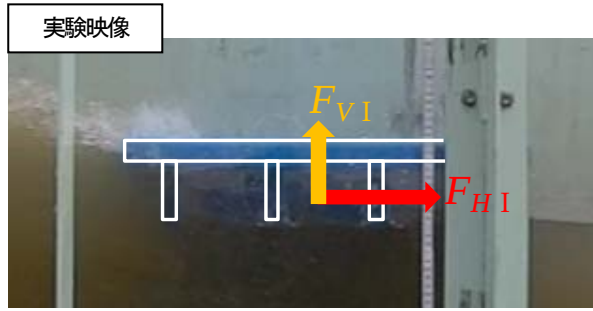


図-3.1 津波が橋桁に到達した段階の流況と桁に生じる力の関係（状態Ⅰ）

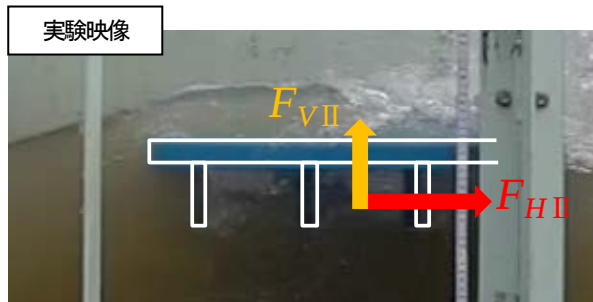
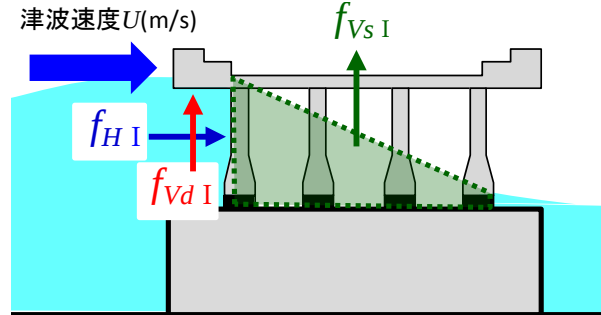


図-3.2 津波が橋桁の上を通過している段階の流況と桁に生じる力の関係（状態Ⅱ）

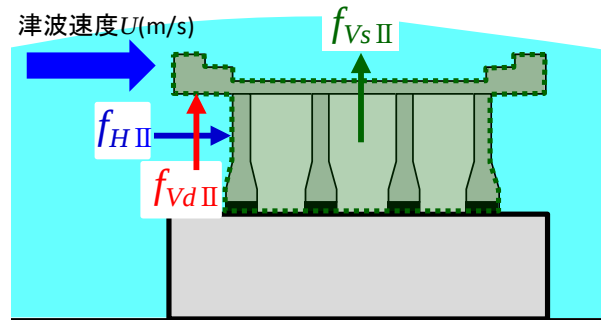
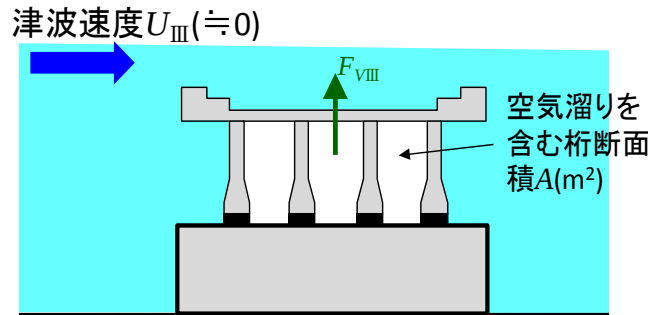


図-3.3 津波が橋桁の上を通過している段階の流況と桁に生じる力の関係（状態Ⅲ）



③橋桁が完全に水没した状態（状態Ⅲ）

徐々に水位が上昇した津波が作用したときに、橋桁が完全に水没した場合、津波速度はほぼ 0 と仮定すると、水平方向の津波による力と、床板張出し部底面に作用する力は 0 になり、浮力 (F_{VIII}) のみ作用する。

3. 3 橋桁に作用する力の評価式

次に、上述した 3 つの状態を対象として、橋桁に作用する水平方向および鉛直方向に作用する力を検討する。実際の現象は非常に複雑であると考えられるが、ここでは先述した以外の外力は小さく無視できると仮定し、各状態（状態Ⅰ，状態Ⅱ，状態Ⅲ）において橋桁に作用する単位長さあたりの力を次式のように表すことを考えた。

$$\text{状態Ⅰ} : f_{HI} = 0.5\rho U_I^2 d C_{DI} C_{HI} C_r \quad (1)$$

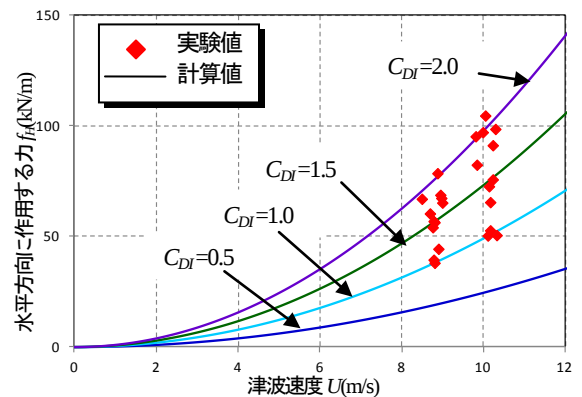


図-3.4 水平方向に作用する力の試算結果

$$\text{状態Ⅱ} : f_{HII} = 0.5\rho U_{II}^2 DC_{DI} C_{HII} \quad (2)$$

$$\text{状態Ⅲ} : f_{HIII} = 0 \quad (3)$$

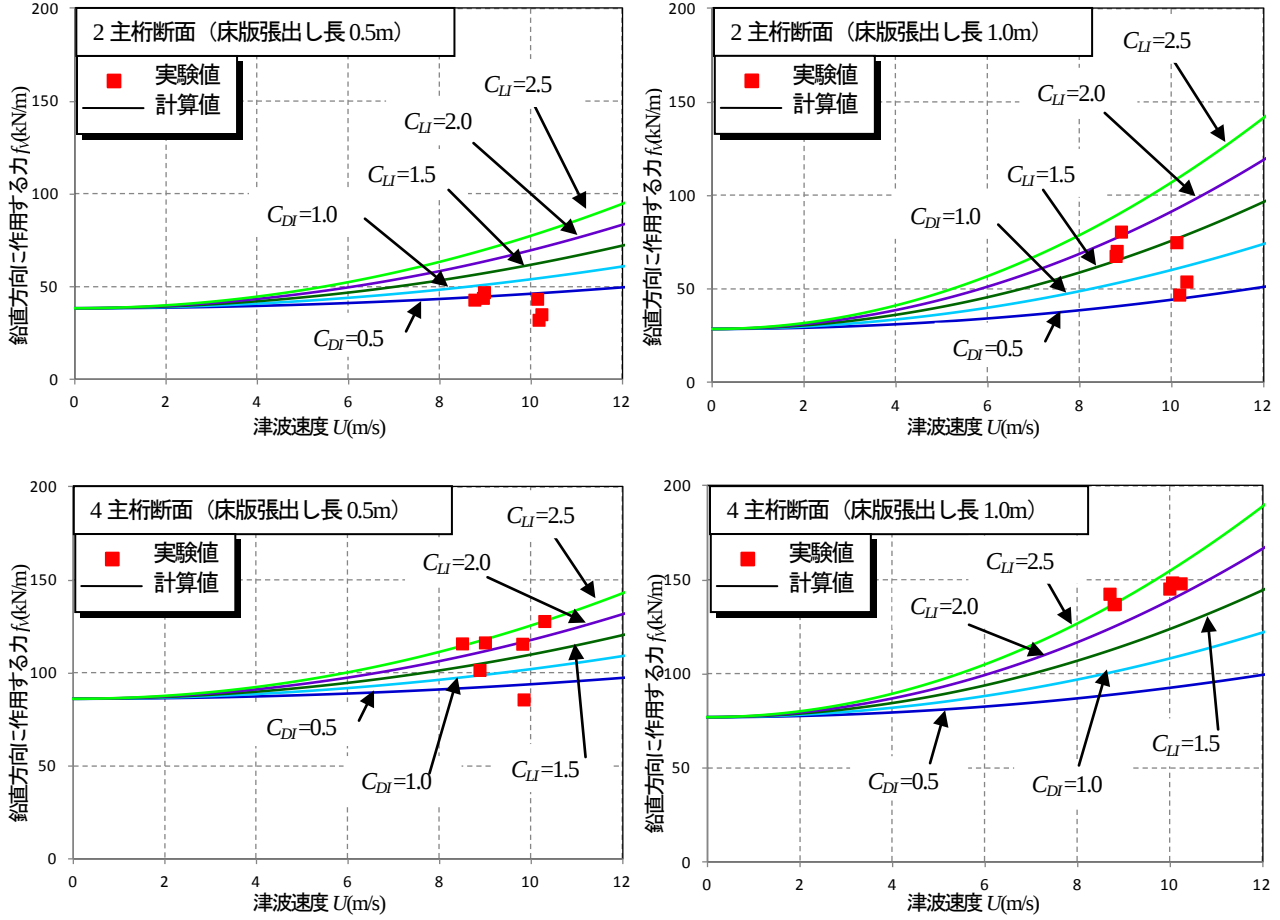


図-3.5 鉛直方向に作用する力の試算結果

状態Ⅰでは作用面積は主桁の高さであり，状態Ⅱでは上部構造の高さになる．状態Ⅲでは津波速度は0に近くなると考えているため，水平方向に作用する力は0と考えている．なお，状態Ⅰでは水位差による静水圧が生じており，抗力係数 C_{D1} はこの動的な力に加えて，静水圧による静的な力も含まれている．

鉛直方向に作用する単位長さあたりの力

状態Ⅰ：

$$\begin{aligned} f_{V1} &= f_{Vs1} + f_{Vd1} \\ &= 0.5\rho U_1^2 C_{L1} b' C_{Vd1} + 0.5\rho g h b C_{Vs1} \end{aligned} \quad (4)$$

状態Ⅱ：

$$\begin{aligned} f_{V2} &= f_{Vs2} + f_{Vd2} \\ &= 0.5\rho U_2^2 C_{L2} b' C_{Vd2} + \rho g A \end{aligned} \quad (5)$$

状態Ⅲ：

$$f_{V3} = \rho g A \quad (6)$$

これらの式は，オレゴン州立大学で提案された式⁹⁾を基本としている．この式は第1項および第2項ともに桁幅

に一樣な力が作用した場合を想定しているが，ここでは水路実験で得られた結果を用いて，第1項は張り出し部底面，第2項は桁幅にそれぞれ台形の圧力分布が作用している場合を想定して式を修正した．状態Ⅰの第1項は床版張り出し部底面に作用する力，第2項は津波により浸水した部分の浮力を表している．状態Ⅱでは，津波により上部構造が水没している状態を想定しているため，第2項は桁間の空気溜まりを含む橋桁の全浮力になっている．また状態Ⅲでは，津波速度を0と想定しているため，第1項は0になっており，空気溜まりを含む橋桁の全浮力のみになっている．

ここで， ρ は水の密度(1000kg/m^3)， g は重力加速度(9.8m/s^2)， d は主桁の高さ(m)， b は耳桁間の距離(m)， b' は床版張り出し部の長さ(m)， D は上部構造の高さ(m)， A は桁間に生じる空気溜まりを含めた桁断面積(m^2)， h は波高($h \geq d$ のときは d)(m)， U_1, U_2 は各状態における津波速度(m/s)， $C_{D1}, C_{D2}, C_{L1}, C_{L2}$ は津波到達時および津波通過時の抗力係数および揚力係数である．また， C_{H1}, C_{H2} と $C_{Vs1}, C_{Vs2}, C_{Vd1}, C_{Vd2}$ は津波特性による補正係数であり，各部位に生じる圧力分布から算出される値である． C_r は浸

水率であり、波高と主桁の高さの比(h/d)から算出でき、波高が主桁の高さよりも大きいときは1となる。橋梁に対する津波の影響を評価する場合、この3つの状態に対して、橋桁に作用する力を評価する。そして、大きい力が発生する方の値を、津波により橋桁に作用する力とし、この値を用いて橋梁各部位に対して評価を行っていく。

3.4 試算結果

上述した評価式を用いて、床版張出し長の異なる2主桁（主桁高 $d=1.4\text{m}$ 、橋桁幅 $b=5\text{m}$ ）および4主桁断面（主桁高 $d=1.4\text{m}$ 、橋桁幅 $b=10\text{m}$ ）に生じる力を試算した。本研究では、津波が橋桁に到達した段階（状態Ⅰ）における、単位長さにおける津波により橋桁に作用する力を求めた。式中の補正係数は、著者らが別途行った実験⁹⁾から、主桁下部に生じる圧力は、主桁上部に生じる圧力の40%となる圧力分布を仮定し、作用高さ（ここでは主桁高 d ）で積分することにより C_{H1} は0.7に設定した。同様に、床版張出し部底面先端の圧力は、床版張出し部底面の主桁側の圧力の25%となる圧力分布を仮定し、床版張出し長 b で積分することにより C_{Vd1} は0.625、津波作用側と反対側の桁底面に生じる圧力は、津波作用側の主桁底面に生じる圧力の40%になる圧力分布を仮定し、耳桁間の距離 b で積分することにより C_{Vs1} は1.4にそれぞれ設定した。

これらパラメータを用いて、津波速度および抗力係数、揚力係数を変化させたときの計算結果を、図-3.4および図-3.5に示す。図にはこれまでに行った水路実験（初期水位が桁下まであり、橋面および橋面を超える高さの津波が作用する条件⁷⁾による計測値（津波が橋桁に到達した時の最初のピーク値）も示した。水平方向に作用する力については、図-3.4より式(1)において実験値は抗力係数の1.0~2.0範囲に入っている結果となる。鉛直方向に作用する力については、図-3.5より一部の計算結果を除き、式(2)における揚力係数を1.5~2.5にすると実験値は計算値の範囲に入っていることがわかる。

4. 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の検討

4.1 本章の概要

津波の影響に対する橋梁の対策の一つとして、津波によって橋に生じる作用力そのものを軽減させる手法が考えられる。土木研究所では、これまで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

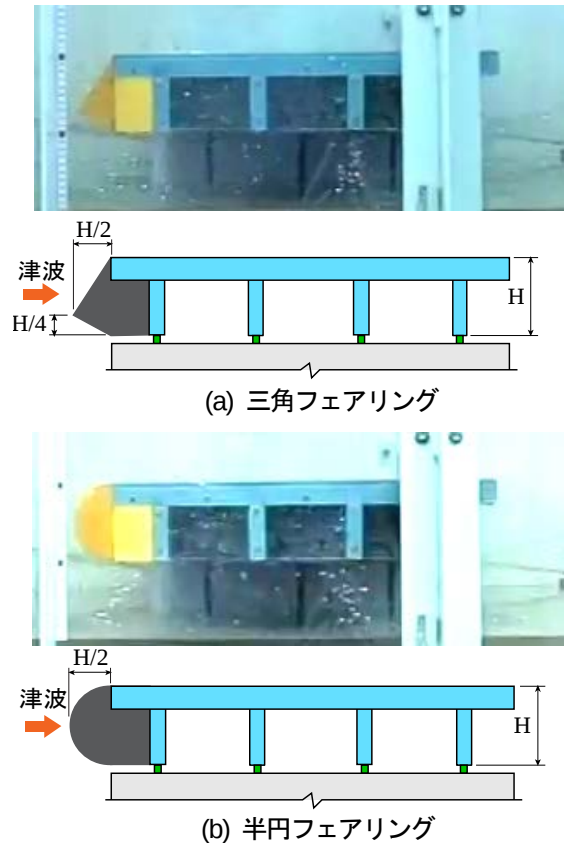


図-4.1 フェアリングを設置した模型

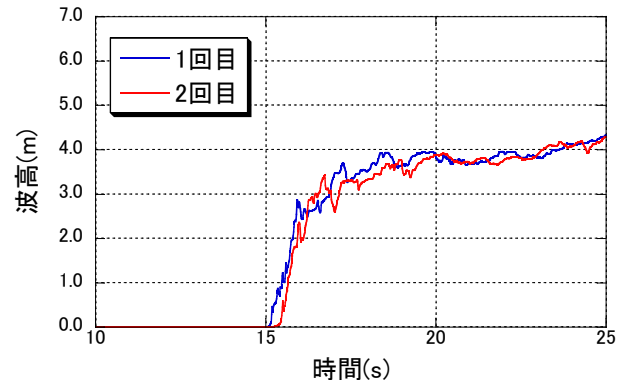


図-4.2 波高の計測結果

波による影響を軽減できるのではないかと考え、その検証実験を行っている⁹⁾。

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、個々の支承反力や上部構造の詳細な挙動についてまでは確認できていなかった。そこで、ここでは、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、大型の水路実験を行い、さらに数値解析による検証を行った。

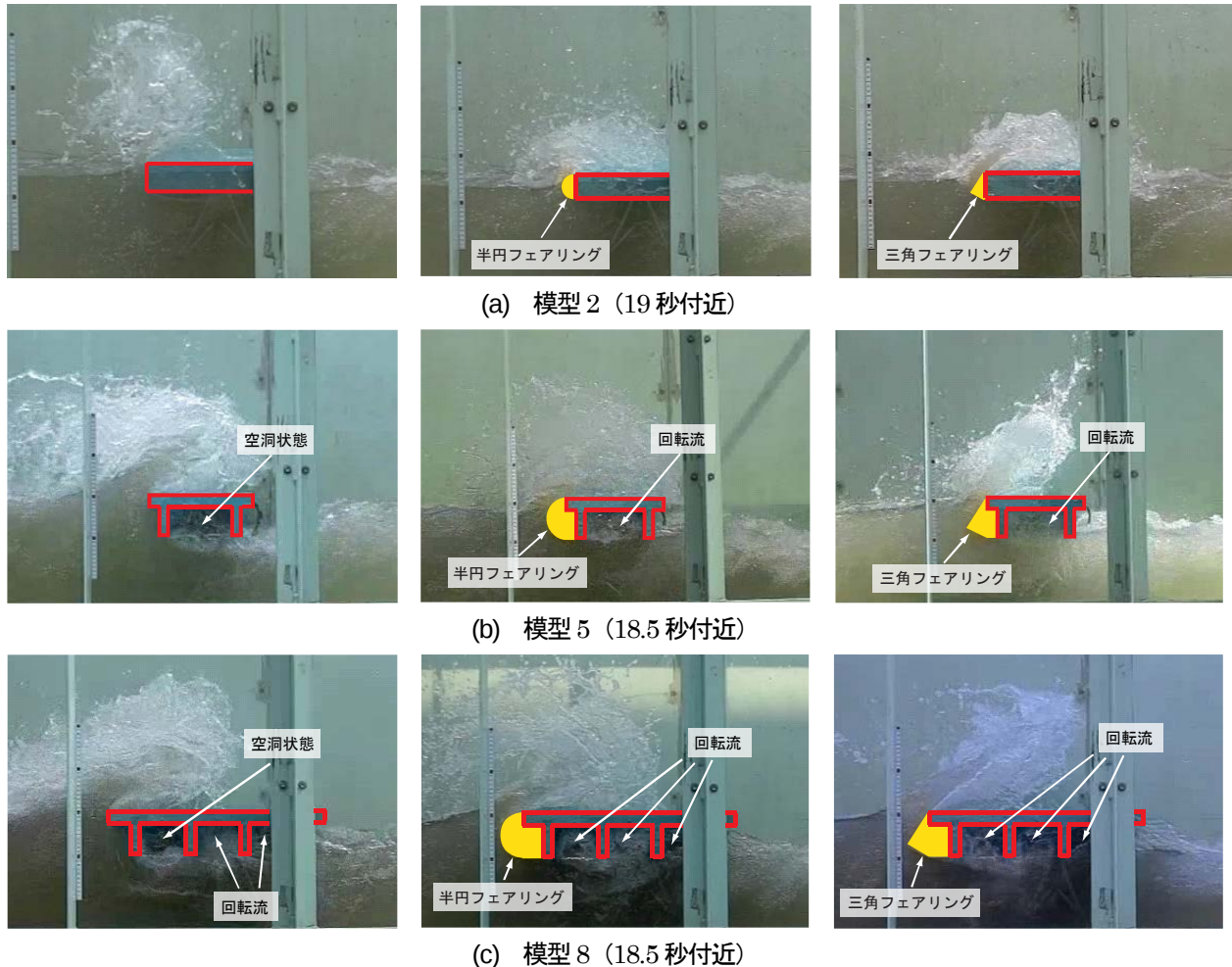


写真-4.1 津波が模型に衝突したときの状況

(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)

4.2 水路実験の概要

4.2.1 実験装置

実験装置および実験模型は、前章で示した実験装置および実験模型を使用して実験を行った。東北地方太平洋沖地震による橋桁の流出被害や、津波が橋に作用している時の映像解析等から⁴⁰⁾、主に段波状の津波が橋桁に作用したケースと、徐々に水面が上昇して橋桁に作用したケース（またはこれらが複合的に発生するケース）に分類される。本論文で対象としているフェアリングは、もともと長大橋の風対策として用いられていることに鑑みれば、その効果は段波状の津波に対して有意であると考えられる。このため、本実験では、段波状の津波のみを対象として実験を行った。

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。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。

また、本実験で発生させた段波状の津波は、同じ形状を保ったまま進行しており、途中で波の形状は変化していない。そのため、設置した 2 本の波高計に段波状の津波の先端が到達した時間差から、津波の伝播波速を求めた。本論文では、この伝播波速を津波速度と呼称する。

4.2.2 フェアリング

本実験で用いたフェアリングは、図-4.1 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

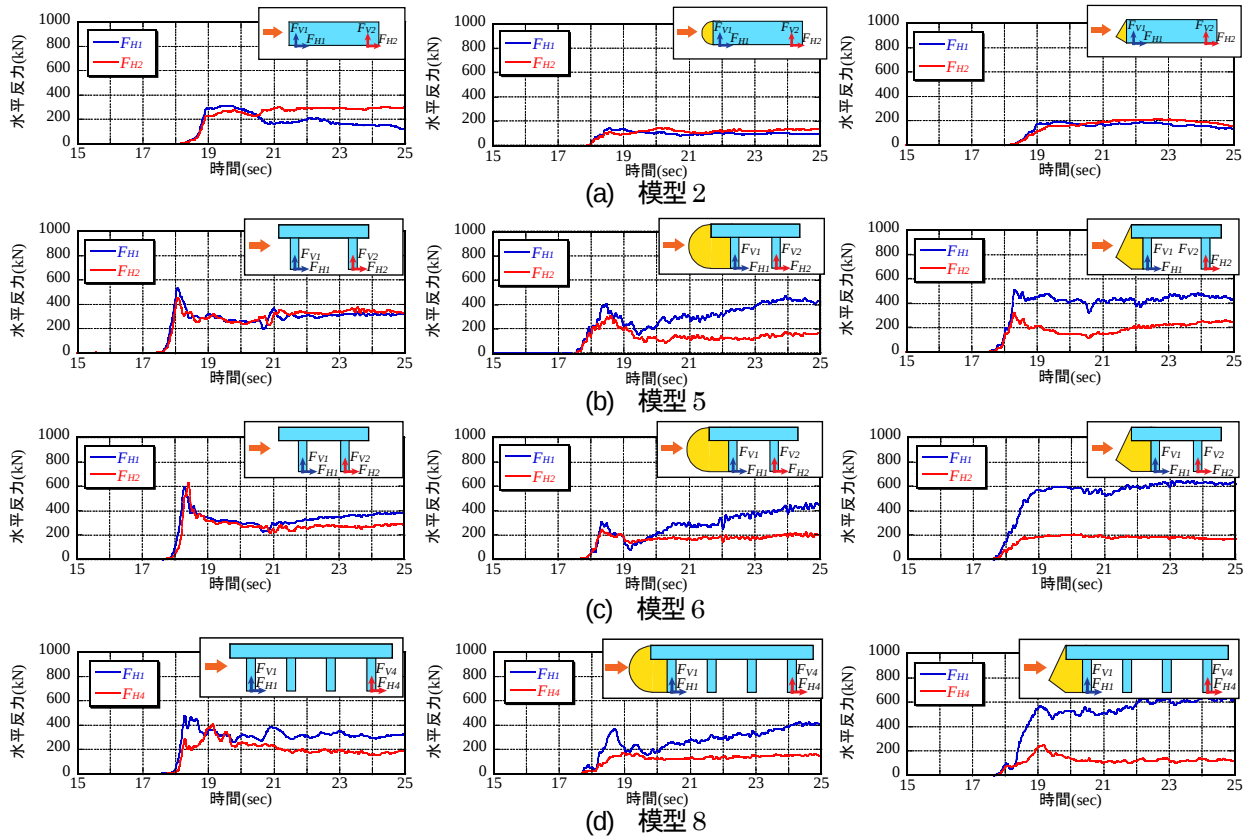


図-4.3 水平反力の実験結果（左：フェアリングなし，中：半円フェアリング，右：三角フェアリング）

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のみ設置した。三角フェアリングの形状は、土木研究所での既往の実験結果を参考にして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。

4. 3 実験結果

4.3.1 橋梁周辺の流況

写真-4.1 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。ここには、模型 2（長方形断面）、模型 5（2 主桁断面）、模型 8（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 5 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 8 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。

実験では、できる限り東北地方太平洋沖地震による橋桁の流出被害や、津波が橋に作用している時の映像解析等から推定される津波速度（最大で 5.0m/s から 8.0m/s 程度）⁴⁾⁵⁾に合うように、津波条件を設定したが、実験水路のスケール等の制約により、得られた津波速度は 2.0～2.4m/sec（実規模で 9.0～11.0m/sec）と、若干速い速度になった。図-4.2 に模型 1.0m 手前の波高の計測波形を示すように、津波高は各回再現性があるが、波高の立ち上がりについては、若干の違いが見られ、そのために津波速度にばらつきが見られた。

4.3.2 水平方向の支承反力

図-4.3 にフェアリングなし、三角フェアリングおよび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

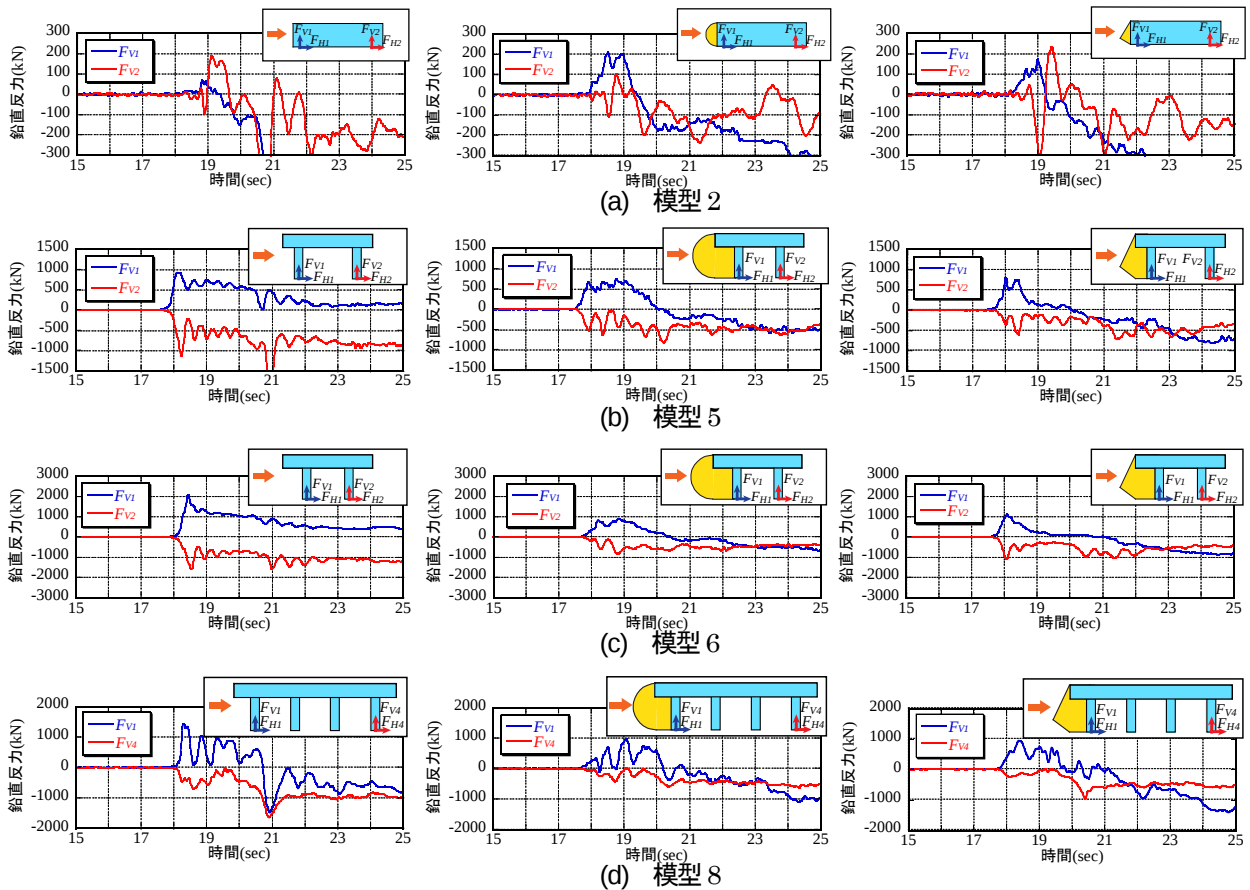


図-4.4 鉛直反力の実験結果（左：フェアリングなし，中：半円フェアリング，右：三角フェアリング）

（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主桁断面モデルでは、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。

4.3.3 鉛直方向の支承反力

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、さらに橋梁モデルを越流した波の自重による影響等が含まれるため、モデル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、同様の橋梁モデル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¹⁰⁾。

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-4.4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（モデル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_{v1} ）に上向きの反力、上流側の支承（ F_{v2} ）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。写真-4.1(a)で示した橋梁周辺の流況から、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、模型に衝突した波が上方に飛び跳ねず、模型後部に着水している。この模型後部に着水した水が下向きに作用することにより、上流側の支承に下向きの反力が作用したと考えられる。また、フェアリングを設置することで、模型下面での剥離が生じずに、波が模型下に流れ込む。この流れ込

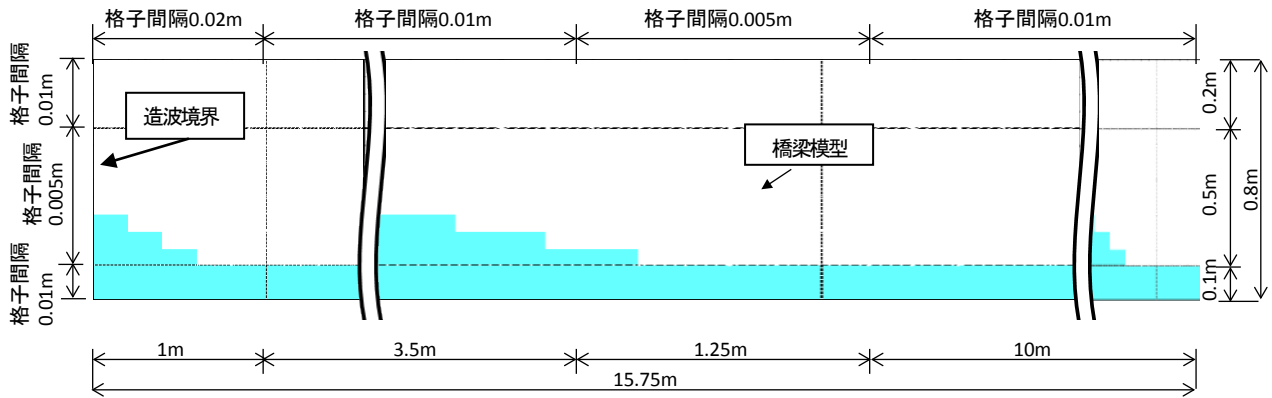
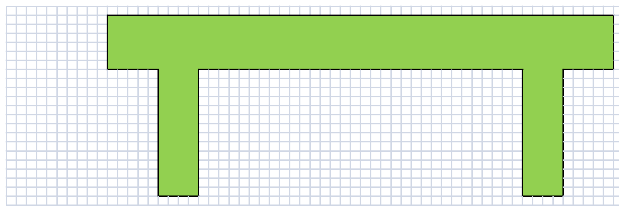
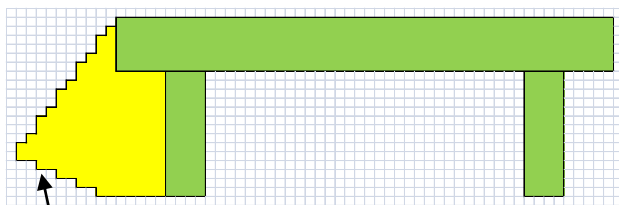


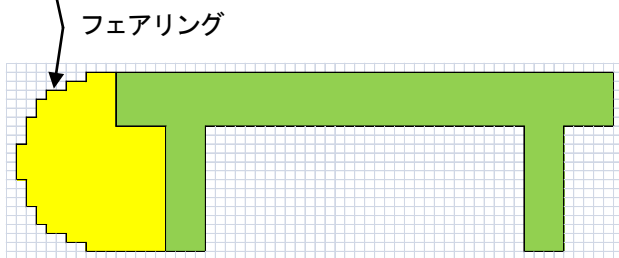
図-4.5 実験条件に対する解析モデル



(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-4.6 橋梁モデル

む波により模型底面に圧力（正圧）が生じたために、下流側の支承反力が大きくなっていると考えられ、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。

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

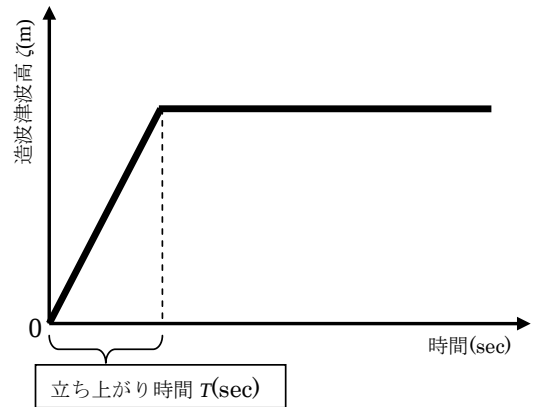


図-4.7 橋梁モデル

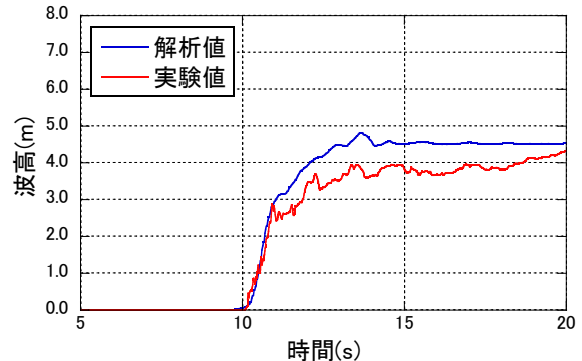


図-4.8 波高の時刻歴波形

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、上向きの鉛直反力が小さくなったと考えられる。また、三角フェアリングでは、上面の傾斜部に津波が作用したことで発生した下向きの力が、下面の傾斜部に津波が作用したことで発生した上向きの力よりも大きくなったことも、下流側の上向きの支承反力が低下した要因の1つであると考えられる。さらにフェアリングを設置することで、模型内に回転流が発生しており（写真-4.1(b), (c)）、この回転流による上向きの力が模型後部底面に作用したことで、フェアリングを設置していない場合に比べて、上流側下向きの支承反力が小さな

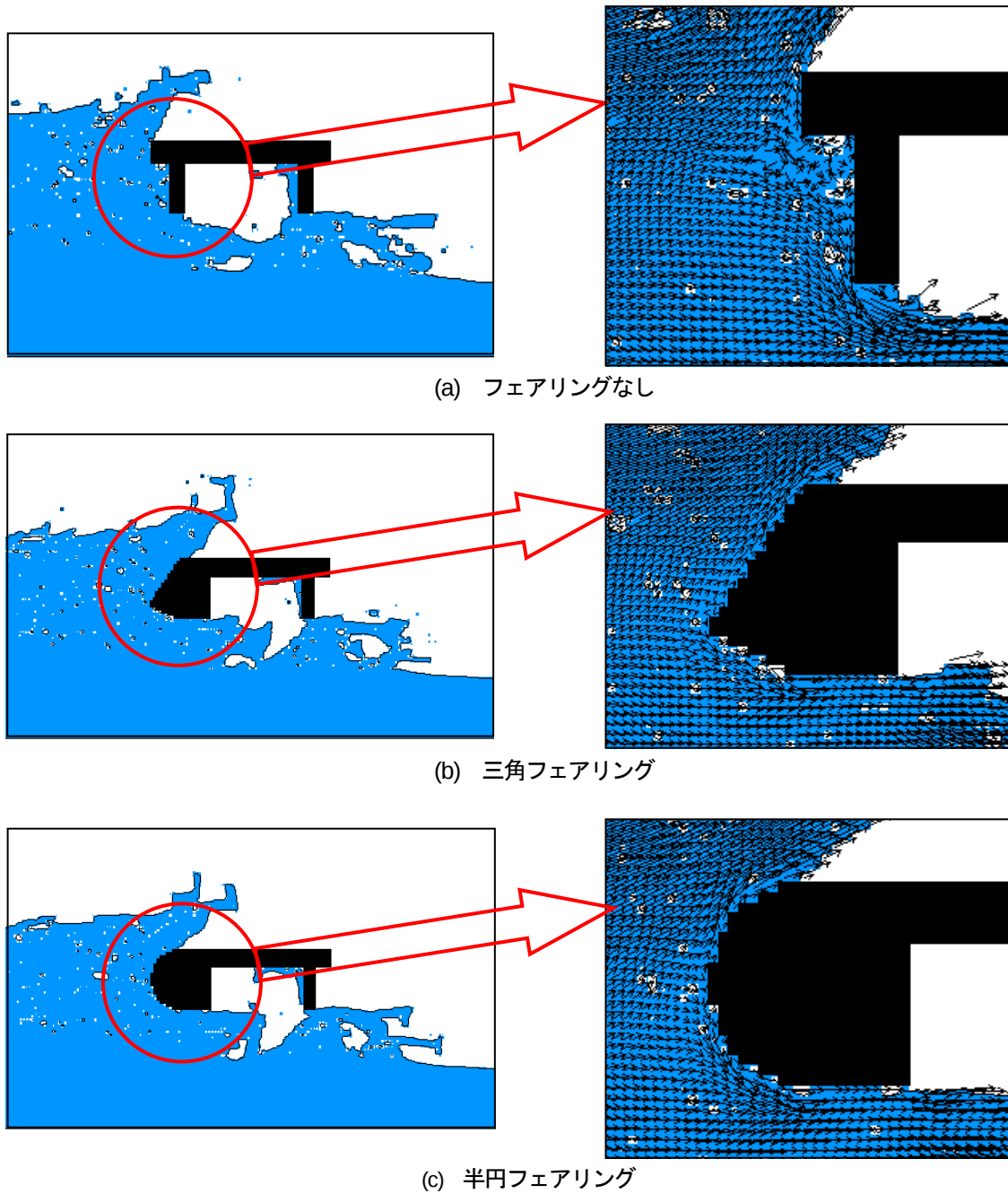


図-4.10 橋梁周辺の流況

くなったと考えられる。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。

4. 4 数値解析の概要

4.4.1 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)¹¹⁾を用いて

検討を行った。解析モデルを図-4.5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、フェアリング部は積み木型の形状でモデル化した。そのため、フェアリング部を出来るだけ忠実に表現できるように、橋梁模型周辺の格子(造波境界から4.5mから5.75m)は0.005mと出来るだけ細かい格子に設定した。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ばないように、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)では0.005m、

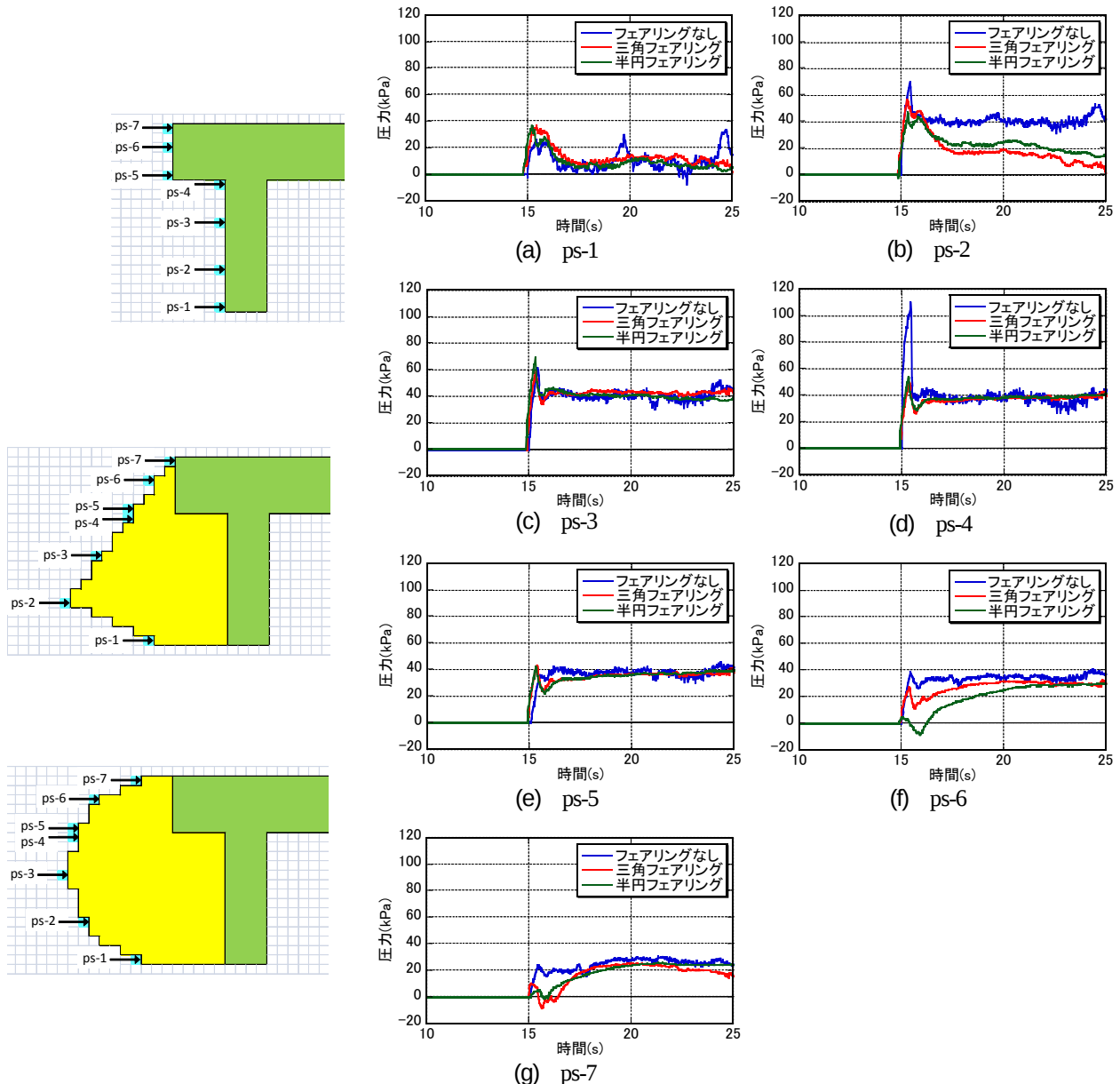


図-4.9 橋梁部材に作用する圧力の時刻歴応答波形（水平方向）

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-4.6のようにモデル化した。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、河床から模型下面までの高さは実験条件と同じく200mmに設定した。また、解析では空気圧を考慮した。これは、空気圧を考慮することにより、桁間に発生する空気溜りを再現でき、かつ、空気溜りを介して橋梁の各部位に発生する圧力を計算することができるためである。ここで、空気圧の考え方としては、 $p/V \gamma = \text{const}$ （ γ ：比熱比（空気の場合1.403））の関係あることを利用し（波により取り込まれた気体が断熱状態で変化すると仮定すると、上式の関係がある）、初期における気体の圧

力と体積から一定値を計算しておき、各ステップにおいて、気体の体積を計算することにより、気体の圧力を算出する方法である¹⁾。

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。なお、本解析モデルは、過去に行ったフェアリングを設置していない2主桁断面模型の水路実験の再現解析において、実験で得られた張出し部側面や底面そして津波作用側の主桁に作用する圧力が、本解析モデルで得られた解析結果とほぼ整合性が得られていることを確認している³⁾。

4.4.2 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-4.7に示すような

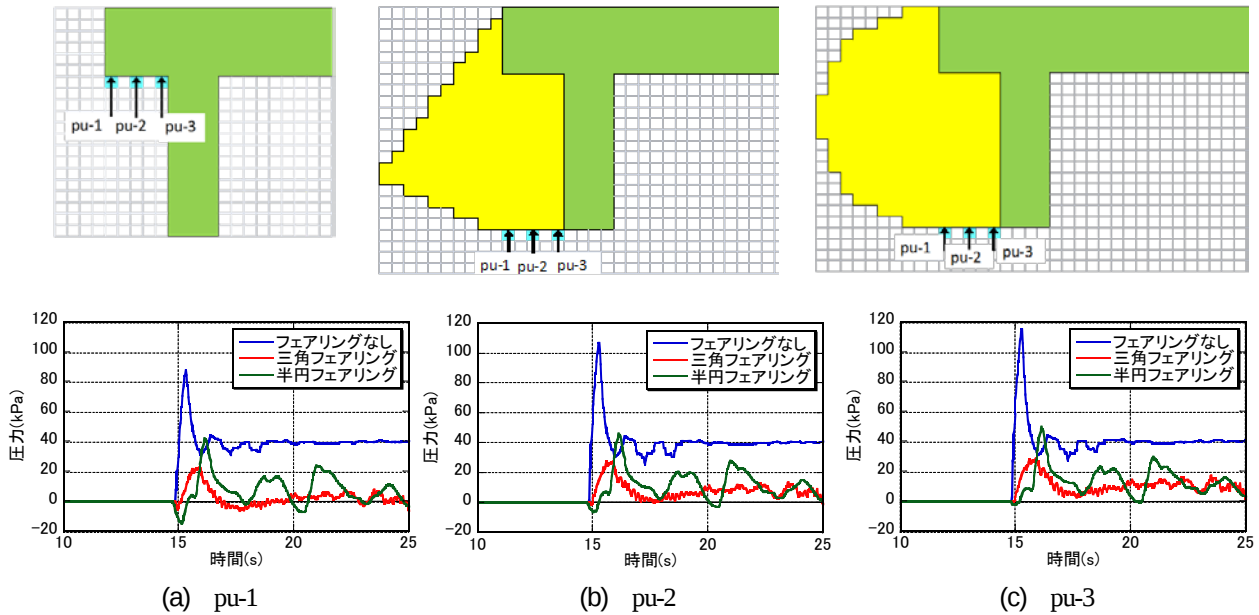


図-4.11 橋梁部材に作用する圧力の時刻歴応答波形（鉛直方向）

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 は造波津波高から、次式のより算定した。

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

式中の h は初期水位(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¹²⁾, 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して³⁾, 造波津波高を 0.17m, 立ち上がり時間を 2 秒に設定した。

4. 5 解析結果

4.5.1 波高

図-4.8 は、模型から 1m 手前の波高の時刻歴波形である。ここでは実験で得られた波高も示している。図より、ピーク値が解析値の方が大きくなっているが、波の立ち上がりなどは実験値を再現できている。

4.5.2 橋梁部材に作用する圧力（水平方向）

図-4.9 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³⁾。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-4.9(a), (d)）。

図-4.10 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-4.10(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-4.10(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、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。

4.5.3 橋梁部材に作用する圧力（鉛直方向）

図-4.11 で示した鉛直方向の圧力について考えると、フ



写真-5.1 側道橋は流出したが、本橋は流出しなかった例（浪板橋）

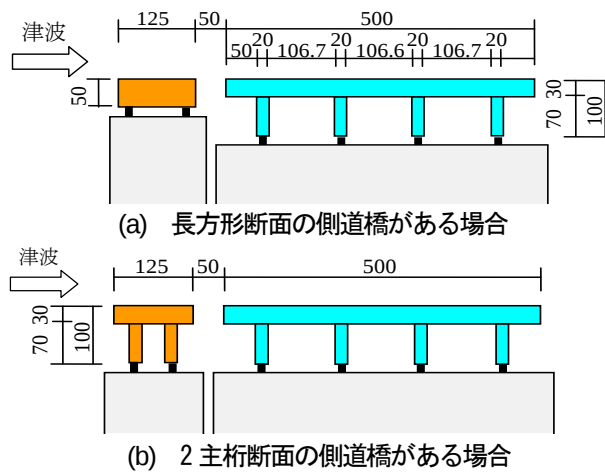


図-5.1 側道橋設置状況

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-4.10(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。

5. 津波による本橋部の挙動に及ぼす側道橋の影響検討

5.1 本章の概要

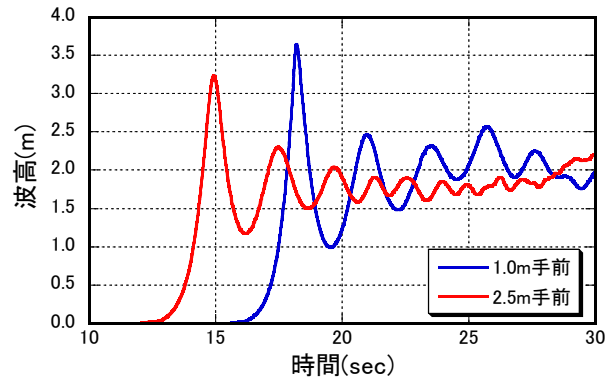


図-5.2 計測された波高の時刻歴

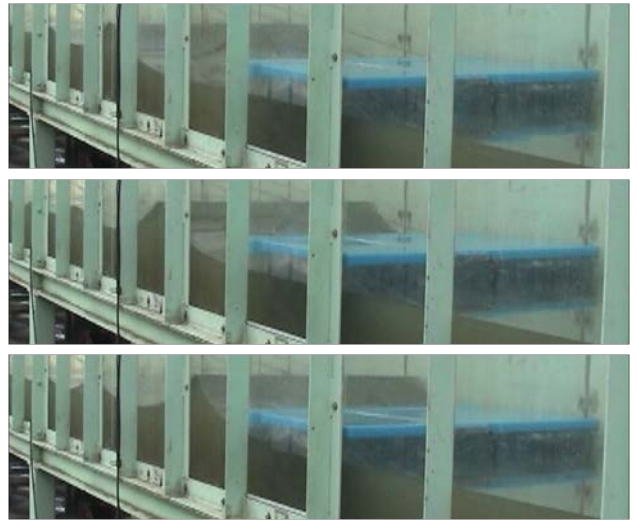


写真-5.2 発生した段波

今回の東北地方太平洋沖地震による津波では、多くの橋梁が流出する被害を受けが、その中には写真-5.1に示すように、側道橋が並列している橋梁で、津波の影響により側道橋は流出したが、本橋は流出しなかったケースが数橋で確認されている。側道橋が近接して並列しているような構造の場合、側道橋がない場合よりも津波作用時の橋桁間の流れがさらに複雑になると考えられるが、側道橋があることにより、本橋部に作用する津波による影響度合いに有意な違いがあったのだとすれば、挙動解明のためのヒントにもなる。そこで、ここでは、側道橋を設置した場合に、津波による本橋部の挙動がどのように影響を受けるのかについて検証するために、水路実験により検討を行った。

5.2 水路実験の概要

5.2.1 実験装置

実験装置および実験模型は、図-2.1で示した実験装置および実験模型を使用して実験を行った。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、



(a) 津波が本橋主桁の中間まで達したときの流況



(b) 津波が本橋橋面に達したときの流況



(c) 津波が本橋を越波したときの流況

写真-5.3 橋梁周辺の流況

(左：本橋単体（側道橋なし）、中央：長方形断面の側道橋あり、右：2主桁断面の側道橋あり）

段波状の津波を発生させる仕組みになっている。計測方法は2章で示した内容と同様の方法で実験を行った。

5.2.2 側道橋模型

上部構造模型は図-5.1に示すように、4主桁断面模型（本橋模型）と側道橋模型を並列させるように設置した。上部構造模型は橋脚と連結材で連結し、連結材に分力計を設置することで、津波が上部構造に作用したときの支点反力（水平 F_H および鉛直 F_V ）を計測した。本論文では津波が作用する側の支点から、支点1、支点2、支点3、支点4とする。

側道橋は、長方形断面模型（桁幅0.125m、桁高0.05m）および2主桁断面模型（桁幅0.125m、桁高0.10m）を用いた。4主桁断面模型と側道橋模型の橋面は同じ高さにし、両模型の間隔は実際の本橋と側道橋の間隔を参考にして、0.05mに設定した。

本実験では、津波作用時の本橋に作用する支承反力を計測した。そして、得られた結果から、側道橋がある場合における、本橋に与える影響について検討した。

5.3 実験結果

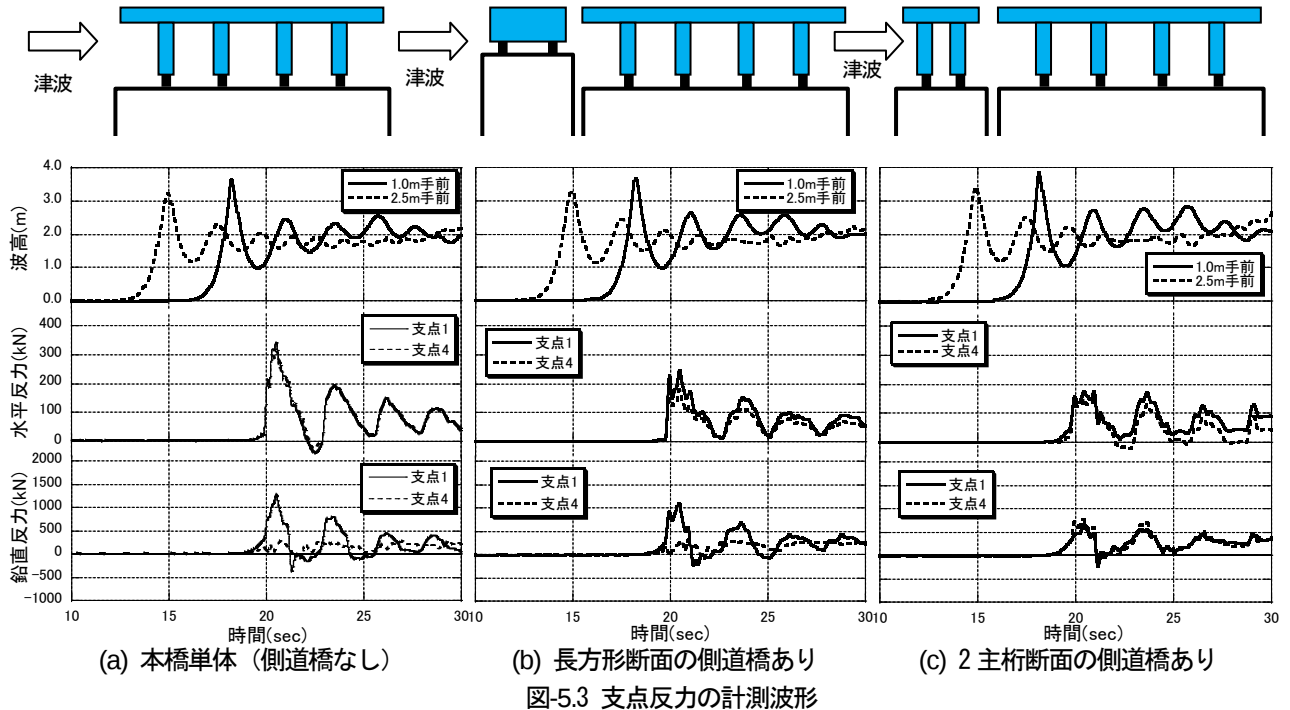
5.3.1 波高

図-5.2は実験により得られた計測波形である。横軸は時間、縦軸は波高である。なお、本論文では、計測された数値は全て実物換算した値で示している。同時に発生した段波の写真を写真-5.2に示す。

図より、発生した段波は、設定した波高（実物換算2.0m）に対して、最大値が約1.5倍大きな値になっている。その後、波高は増加減少を繰り返す挙動を示している。同様に、実験映像も波高が上下に振動している波が発生している。このことから、本実験で発生した津波は、最大3.5mの波高の波状段波であるといえる。

5.3.2 橋梁周辺の流況

写真-5.3は、各時刻（津波が本橋主桁中間まで達したとき、津波が本橋橋面に達したとき、津波が本橋を越波したとき）における橋梁周辺の流況を比較したものである。なお、ここでの時刻は、本橋単体を基準としている。本橋主桁の中間まで津波が達したとき（写真-5.3(a)）、いずれのケースでも、流況に大きな変化はない。波の先端



が崩れて作用する砕波段波では、波が砕けるために、波が前進して橋桁に作用するが、本実験で得られた波状段波は、砕波段波と異なり、側道橋があっても、桁下から水面が盛り上がり本橋や側道橋に作用するため、ほぼ同じような流況になったと考えられる。

津波が本橋橋面まで達したとき（写真-5.3(b)）、側道橋がある場合、長方形断面、2主桁断面共に側道橋の橋面を越波して水が上昇している。同時に本橋と側道橋の間にも水が浸入して、水が上昇している。また、本実験の津波では、全てのケースで模型下面からの剥離が見られなかった。この模型下面からの剥離がなかったのも、本橋と側道橋の間に水が浸入した原因の1つと考えられる。

津波が本橋を越波した場合（写真-5.3(c)）、側道橋から越波した水と、本橋と側道橋の間から上昇した水が、本橋に着水している。また、全ケースで空気溜りが生じている。前述したように、模型下面からの剥離が生じなかったために、桁間内に水が侵入しなかったのが原因と考えられる。そのため、空気溜りによる浮力の影響を考慮する必要があると考えられる。

5.3.3 支承反力

図-5.3は津波作用時に支承部に作用する反力の計測結果を示したものである。横軸は時間、縦軸は上から波高、水平反力、鉛直反力である。なお、ここでは両端の支承部（支点1および支点2）の結果を示した。なお、波高計から津波の速度（波速）を計算すると、平均で8.8m/sであった。

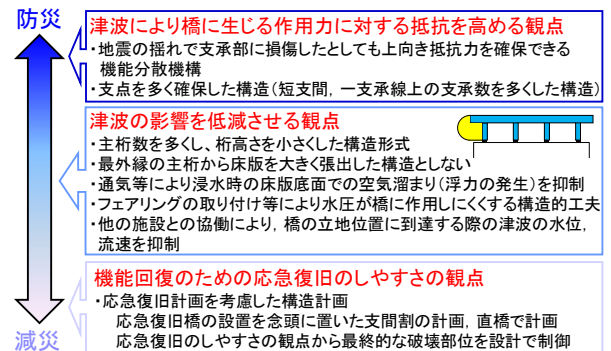


図-6.1 津波の影響を受ける一般的な桁橋における構造計画の考え方の提案

側道橋がない場合、水平反力は両支点とも350kN程度作用するが、長方形断面の側道橋があると約250kN、2主桁断面の側道橋があると約150kNになる。同様に鉛直反力も、津波作用側の支点1では、側道橋がない場合では約1300kNになっているのに対し、長方形断面の側道橋があると約1100kN、2主桁断面の側道橋があると約750kNになっており、側道橋があることで、本橋に作用する支承反力は、水平および鉛直ともに小さくなる挙動を示している。写真-5.3で示したように、側道橋が津波の力のある程度受けたことで、本橋に作用する力が低減したと考えられる。

長方形断面の側道橋と2主桁断面の側道橋では、2主桁断面の側道橋がある場合の方が、本橋に作用する支承反力が小さくなっている。写真-5.3より、長方形断面の

側道橋は桁下空間が2主桁断面の側道橋よりも大きいため、側道橋が受ける面積も小さくなったためと考えられる。

以上のことから、橋面が同じ高さで、本橋との間隔が0.05m（模型での値）の側道橋を設置し、桁下まで水位がある条件で橋面までの高さの津波を発生させた場合、側道橋の存在により、本橋に作用する支承反力が小さくなるような挙動を示すことが確認できた。このように、側道橋の存在により、本橋が受ける津波からの作用に有意な影響が生じると考えられる。

6. 津波の影響を受ける一般的な桁橋における構造計画の考え方

本研究において2カ年にわたって実施してきた実験的な検討結果の傾向、ならびに津波の作用によって支点部に力が生まれるメカニズムをも踏まえ、津波の影響を受ける桁橋の構造計画に関する知見として、防災目的としての対策から減災目的としての配慮事項までを中間的に整理すると図-6.1のようにまとめられる。

7. まとめ

津波により橋に作用する力の低減対策方法と、津波の影響を受ける橋の挙動評価手法の構築することを目的として、水路実験及び数値解析により検討を行い、評価式を提案した。本研究の範囲で得られた知見は以下のとおりである。

- ① 張出底面に作用する圧力は、主桁側の位置の圧力が最も大きく、外部にゆくにつれて小さくなっている。主桁に作用する圧力は、桁の上部が最も大きく、下部にゆくにつれて小さくなっている。
- ② 津波速度と上部構造の各部位に作用する圧力との間には、相応のばらつきがあるが、ほぼ線形または2次関数の関係がある傾向がみられる。
- ③ 橋に影響を及ぼす津波の作用状態を示すとともに、津波により橋桁に作用する力の評価方法を式(1)～式(4)のように提案した。また、これまでに行っている水路実験の結果に基づき、抗力係数および揚力係数の設定方法について提示した。
- ④ 上部構造の断面形状に関わらず、フェアリングの設置によって、段波状の津波が作用した時に発生する衝撃的な水平反力を低減できる可能性がある。
- ⑤ 桁形式の橋梁模型においては、フェアリングの設置によって上向き力の低減効果がみられた。特に、幅員の小さい橋梁や、床版張出し長が大きい橋梁にお

いては、その低減効果が顕著にみられた。

- ⑥ 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床版張出し部底面に作用する圧力が小さくなることを確認した。フェアリングがない場合には、流れの乱れが発生している箇所では、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。
- ⑦ 側道橋があると、津波の力を側道橋が受けることにより、本橋が受ける津波の影響が小さくなる。そのため、側道橋がない場合に比べて、本橋に作用する水平反力および鉛直反力は、ともに小さくなる挙動を示す。
- ⑧ 側道橋の上部構造の断面高さが、本橋の上部構造の断面高さよりも小さくなると、それが同じ高さの場合と比較して、本橋に作用する水平反力および鉛直反力ともに大きくなる傾向にある。
- ⑨ これまでに実施した検討結果より、津波の影響を受ける桁橋の構造計画に関する知見として、防災目的としての対策から減災目的としての配慮事項までを、図-6.1のようにまとめた。

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) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2012.3.
- 3) 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，土木学会地震工学論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69, No.4, I_42-I_54, 2013.
- 4) 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.
- 5) 神宮司博志，幸左賢二，佐々木達生，佐藤崇：画像及び数値解析手法を用いた気仙大橋の津波被害分析，構造工学論文集，Vol.60A, pp.271-281, 2014.
- 6) 中尾尚史，張広鋒，星隈順一：津波により上部構造の高さまで水位が上昇した時に橋に作用する浮力に関する研究，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.151-154, 2012.

3.9 津波の影響を受ける橋の挙動と抵抗特性に関する研究

- 7) 中尾尚史, 張広鋒, 炭村透, 星隈順一: 津波速度の違いが上部構造の挙動に与える影響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.421-428, 2013.
- 8) Harry Yeh: Design Tsunami Forces for Onshore Structures, Journal of Disaster Research, Vol.2, No.6, pp531-536, 2007.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

STUDY ON BEHAVIOR AND RESISTANCE CAPACITY OF BRIDGE UNDER TSUNAMI-INDUCED FORCE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : HOSHIKUMA Jun-ichi, NAKAO Hisashi

Abstract : In the fiscal year of 2013, the evaluation method of simple static force represented the tsunami-induced force to bridges was proposed based on both filed data observed in the 2011 Great East Japan Earthquake and experimental data conducted by PWRI since the fiscal year of 2012. Furthermore, structural ideas for mitigating tsunami-induced force were discussed through studies including flume tests and analytical studies on mechanism of behavior of bridge due to tsunami effect.

States of bridges when the tsunami effect was significant were clarified based on flume tests and analytical studies, and the evaluation method for the tsunami effect on bridges was proposed. Experimental results indicated that the semicircular and triangular fairing effectively reduced the tsunami-induced horizontal and vertical forces applied to bearing supports. Analytical results also 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 effectively reduced by equipping both type of the fairing with the superstructure.

Key words : tsunami effect, bridges, reaction force, hydrodynamic pressure, fairing, evaluation