

# 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

中尾 尚史<sup>1</sup>・伊津野和行<sup>2</sup>・小林 紘士<sup>3</sup>

<sup>1</sup>立命館大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: h-nakao@fc.ritsumei.ac.jp

<sup>2</sup>立命館大学理工学部都市システム工学科教授  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: izuno@se.ritsumei.ac.jp

<sup>3</sup>立命館大学総合理工学研究機構チェアプロフェッサー  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: kobayashi@shiga-jst-satellite.jp

沿岸部に位置する橋梁等の構造物は津波によって被害を受ける可能性がある。しかし橋梁構造物においては、津波外力が橋梁に作用した場合の具体的な応答や流体力の特性は解明されていない。本研究では、橋梁に対する津波の影響に関する基本的なデータを得るために、単純な断面の橋梁2次元模型を用いて津波作用時の橋梁周辺の流況や流体力を実験により計測した。その結果、橋梁模型を越波するときの流体力は、橋梁模型を越波しないときの流体力に比べかなり大きいものとなることがわかった。また流体力は支点に負の反力を発生させる可能性があることがわかった。

**Key Words :** tsunami, wave overtopping, hydraulic experiment, flow regime, hydrodynamic force

## 1. はじめに

2004年12月に発生したスマトラ島沖地震による津波では、インドネシア・スマトラ島北部の西海岸の道路約250kmの区間に存在する橋梁168橋中81橋が橋桁の流失および甚大な被害を受けた<sup>1)</sup>。日本も近い将来発生するとされる東海、東南海、南海地震では、津波によって太平洋沿岸の地域に被害が及ぶとされ、その対策が急務とされている。特に橋梁を津波から守ることは、津波被害後の復旧作業の観点から考えても重要なことである。

ビル等の建築構造物や、港湾の施設構造物の津波への対策は各種のガイドライン等<sup>2),3)</sup>にまとめられているものもあり、さらに津波による流木の衝突力や護岸を越流する津波の外力に関する研究も行われている<sup>4),5)</sup>。しかし、橋梁構造物に対するガイドラインはないのが現状であり、橋梁を対象とした津波外力やその対策に関する研究は始まったばかりである<sup>6)-10)</sup>。

津波が橋梁に作用した場合、津波による大きな流体力は桁に対しては浮遊物の衝突による損傷、支障に対しては水平力、負反力による損傷を与える可能性がある。そのほか橋脚に対しても安全性を脅かす

ものとなりうる。

本研究では、橋梁への安全性を評価するための基礎データを得ることを目的として、津波が作用したときの橋桁の周辺の流況を調べるとともに津波により橋桁が受ける流体力の測定を行った。実験で用いた模型は橋梁断面を代表するものとして、長方形断面およびみぞ形断面とした。

## 2. 実験による流況および流体力の検討

### (1) 実験方法

実験は写真-1および図-1の実験装置（縮尺約1/150）を用いて行った。実験装置の貯水部は長さ2m、幅0.6m、水路は長さ2m、幅0.2mに設計し、陸上部に橋梁があると想定し、水路に勾配はつけなかった。また写真-2の位置にハイスピードカメラ（1200コマ/秒、CASIO EX-F1）を設置し、橋梁周辺の流況を撮影した。流体力の向きは図-2に示す向きを正とした。モーメントは断面の幾何学的中心まわり(z軸)のモーメントである。

実験では一定の貯水高になるまで水を溜め、貯水部の出口に設けたゲートを一気に引き上げて開放す

ることにより、段波を発生させた。発生した段波は水路部に設置した橋梁模型に衝突し、それにより生じた流体力（抗力 $F_x$ 、揚力 $F_y$ およびz軸回りのモーメント $M_z$ ）を6分力計ロードセル（AMTI社製MC3A-X-100）により計測した。また図に示す位置に波高計を設置し、波高を計測した。なお計測はそれぞれ3回行い、得られた計測波形に対し模型の固有振動数（水平方向11.0Hz、鉛直方向18.0Hz）以上の成分をカットした。なおサンプリング間隔は0.001秒とした。

実験で使用する橋梁模型は、桁幅 $D$ と桁高 $H$ の比 $D/H$ が40mm/20mm=2となる長方形断面、みぞ形断面の橋梁模型を用いた。

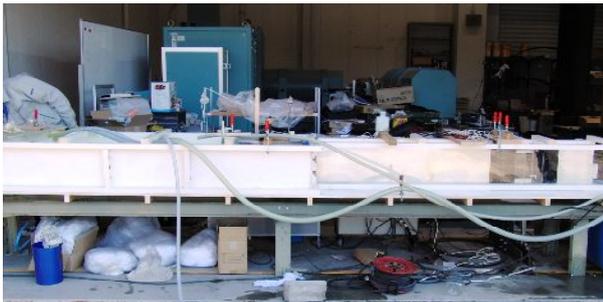


写真-1 実験装置



写真-2 撮影カメラ

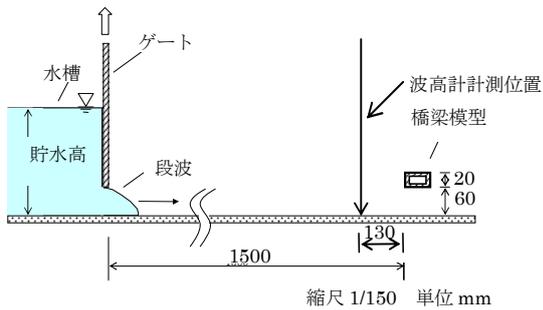


図-1 模型概要

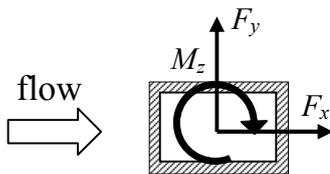


図-2 流体力の正の向き

本研究では、橋梁模型に津波が作用するように、貯水部の水深を12cmから16cmに設定し、橋梁周辺の流況および流体力を計測した。

なお本論文では、貯水部の水深を貯水高、図-1で示した波高計測位置（模型の手前130mm）で計測した水深を波高と呼ぶ。

## (2) 実験結果

### a) 橋梁周辺の流況

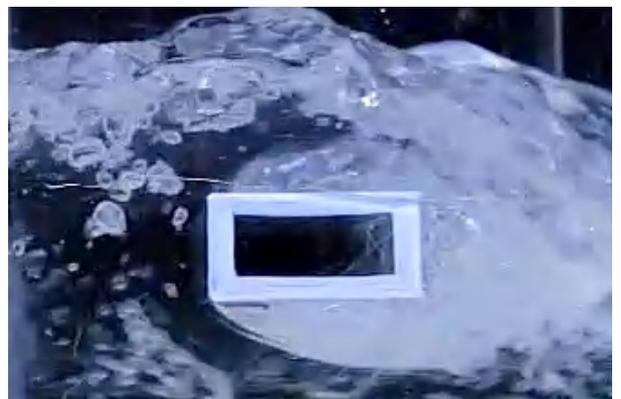
写真-3および写真-4にそれぞれ長方形断面およびみぞ形断面の模型に津波が作用したときの流れの様子を撮影した結果を示す。いずれの断面の模型でも同じ貯水高さではほぼ同じ流況を示している。なお貯水高さ12cmの時は津波は模型の高さまでは達しなかった。



(a) 貯水高13cm



(b) 貯水高14cm



(c) 貯水高16cm

写真-3 橋梁周辺の流況（長方形断面）

貯水高が13cmの場合、模型の前面で水流が遡上する様子が見られるが津波は模型を越波しない。貯水高が14cmになると津波が模型を越波するようになる。越波した流体の流速はさほど大きくないため、模型下面にみられるような流れの剥離は上側面にはみられない。貯水高が16cmでは模型上部を流れる流体の量は多くなり、模型上下面ともに剥離流が形成されている。

**b) 波高**

図-3は実験により得られた波高である。横軸は時刻、縦軸は波高である。時刻はゲートを開けた時刻を0秒とした。

それぞれ2秒から6秒付近で波高がピークになり、それ以降は徐々に低下する。貯水高が13cmの場合、最大波高は6cm程度である。すなわちこれは津波の高さが模型の下部に接する高さである。



(a) 貯水高13cm



(b) 貯水高14cm



(c) 貯水高16cm

写真-3 橋梁周辺の流況（みぞ形断面）

津波が模型を越波した貯水高14cmや16cmのケースでは、模型に作用した波が水路上流に遡上するため、津波が模型に作用した直後、急激に波高が増加する。図-3にみられる鋭いピークはそれを示している。そのような上流への遡上のため、たとえば貯水高が14cmの場合、模型のない時の津波高さ7cmが9cmのピーク高さにまで増加している。

**c) 流体力**

図-4(a)と(b)は長方形断面における流体力の計測結果である。横軸は時刻、縦軸は水平方向あるいは鉛直方向の流体力である。

水平方向の流体力を示す図-4(a)から、津波が模型を越波する貯水高14cm、16cmの場合、水平方向の流体力の最大値はそれぞれ0.7N、1.9Nとなる。しかし津波が模型を越波しない貯水高13cmの場合の

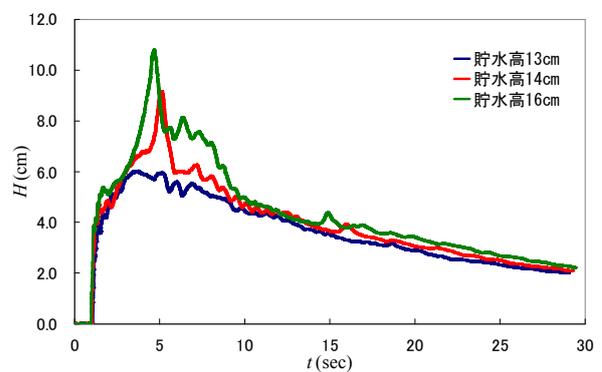
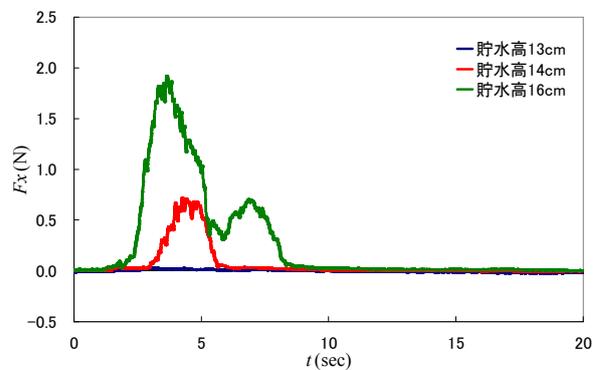
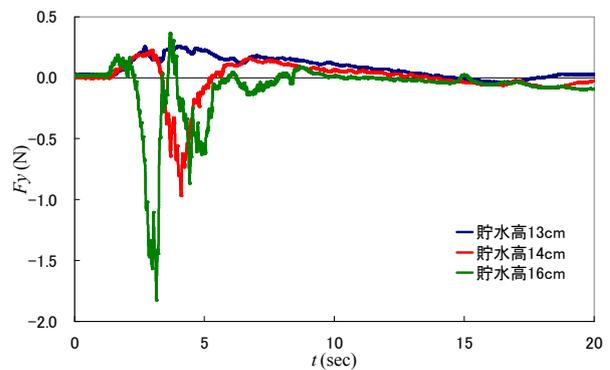


図-3 波高の計測波形



(a) 水平方向の流体力



(b) 鉛直方向の流体力

図-4 計測波形（長方形断面に作用する流体力）

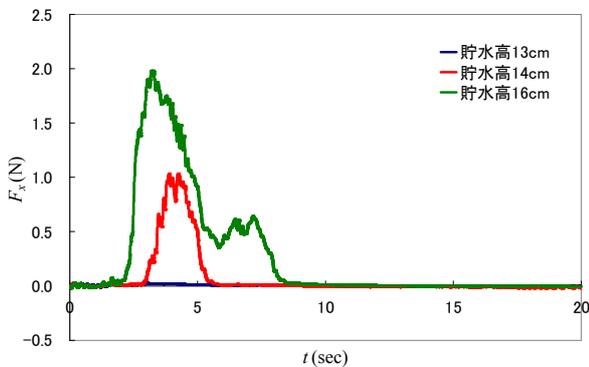
水平方向の流体力は図-4(a)ではほとんど認められないくらい小さく最大水平力は0.03N程度である。

鉛直方向の流体力は図-4(b)に示すように、津波が模型を越波するケースでは、津波作用直後に一旦上向きの力が作用するがすぐに下向きの力が短時間作用する。その大きさはそれぞれの貯水高さのケースで約1.0Nおよび1.8Nとなり水平力の大きさに匹敵するものとなっている。津波が模型を越波しないと下向きの力は作用しない。

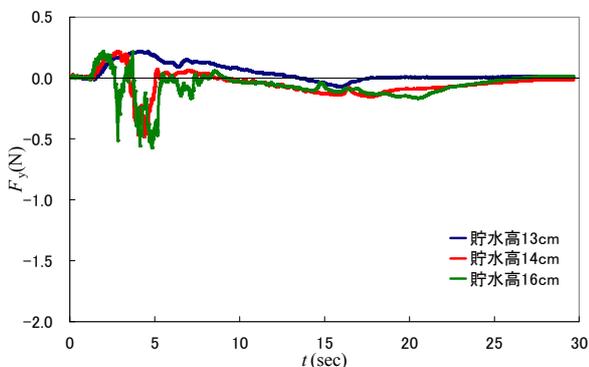
図-5(a)と(b)はみぞ形断面における流体力の計測結果である。横軸は時刻、縦軸は水平方向あるいは鉛直方向の流体力である。

水平方向の流体力は長方形断面ほぼ同様である。鉛直方向の流体力は津波が模型を越波しない場合（貯水高13cm）では、津波作用時から上向きの力のみが作用する。津波が模型を越波すると（貯水高14cm）、はじめに上向きの力が作用した後に下向きの力が作用する。しかし、下向きの力の最大値は長方形断面の場合の1/2から1/3程度である。

みぞ形断面は長方形断面と異なり断面下部が開いているため、長方形断面と同様に津波作用時に模型下部に負圧が生じるが、水が模型内部に入り込むため、下向きの力がさほど大きくならないものと思われる。なお、津波の影響がなくなると思われる10秒を超える時間帯で鉛直方向の流体力がゼロにならず下向きの値となっているのは模型上面に水が残った影響である。



(a) 水平方向の流体力



(b) 鉛直方向の流体力

図-5 計測波形（みぞ形断面に作用する流体力）

### (3) 流体力の支点反力に対する影響

ここでは津波作用時における流体力の特性および支点反力への影響について、模型を越波する場合としない場合について検討する。

#### a) 模型を越波しない場合の流体力の特性

図-6(a)(b)は貯水高13cmにおける模型に作用する流体力である。横軸は時刻、縦軸は流体力（上から水平方向、鉛直方向、モーメント）である。縦軸は図-4、5に比べてスケールを拡大してある。

津波が模型を越波しない場合、津波作用中の2秒から10秒の間、模型には上向きの力と反時計回りのモーメントが作用する。

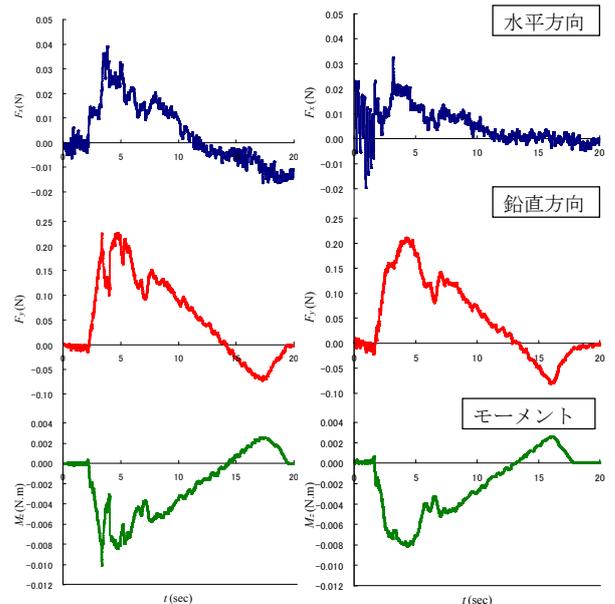
これらの力の支承に対する影響を調べてみる。長方形断面の場合について図-7に示すように支承が断面の両端の下部にあると仮定する。長方形断面の場合について負のモーメントの絶対値が最大となる時刻の鉛直方向の支点反力を求めると、上流側下流側それぞれ0.12N、-0.37N程度になり、下流側の支点は負の反力となる。みぞ形断面の場合も長方形断面の場合と同様に下流側の支点で負の反力が生ずる。

#### b) 模型を越波する場合の流体力の特性

図-8(a)(b)は貯水高16cmにおける模型に作用する流体力および回転力である。横軸は時刻、縦軸は流体力（上から水平方向、鉛直方向、モーメント）である。

津波が模型を越波すると、長方形断面では前述のように津波作用直後に下向きの力が作用する。同時に時計回りのモーメントが作用する。その後数秒間は上向きの力で反時計回りのモーメントが作用し、再び下向きの力で時計回りのモーメントが作用する。モーメントの大きさは最大で0.06N.mである。

先ほどと同様の仮定で時計回りのモーメントが最大となる時刻の長方形断面の場合の鉛直方向の支



(a) 長方形断面

(b) みぞ形断面

図-6 計測波形（貯水高13cm）

（上から水平方向、鉛直方向、モーメント）

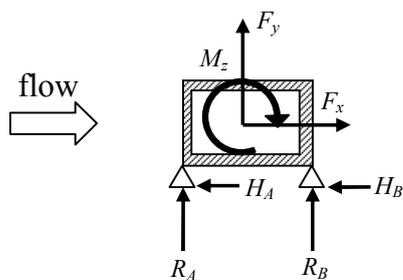


図-7 支点反力作用位置

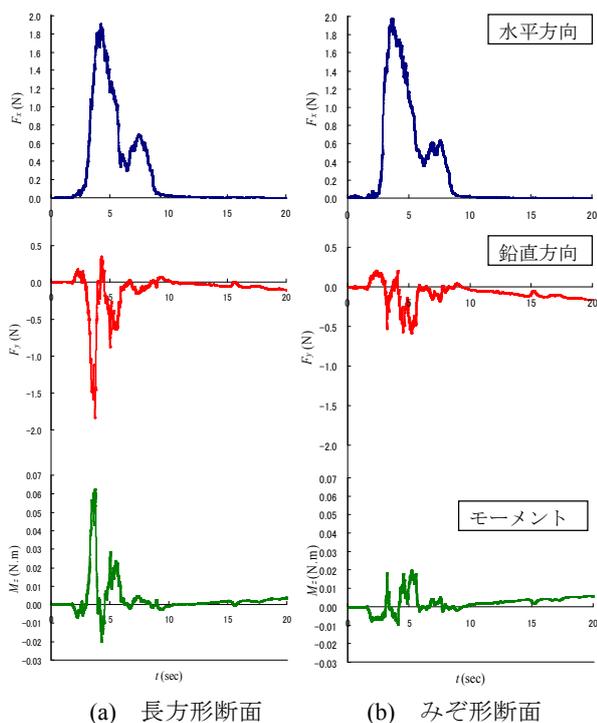


図-8 計測波形 (貯水高16cm)  
(上から水平方向, 鉛直方向, モーメント)

点反力を求めると、上流側、下流側それぞれ-1.08N、2.88N程度になる。津波が模型を越波する場合は上流側の支点に負の鉛直方向の支点反力が生じる。この負の反力は水平力よりも正のモーメントによる寄与が大きい。流体力による負の反力は、津波の速度や橋桁の自重にもよるが、実橋に負の鉛直反力を生じさせる可能性があり注意が必要である。

橋軸直角方向の水平方向せん断力は測定された最大水平力すなわち長方形断面で貯水高 16cm の場合 1.9N となる。模型の縮尺が約 1/150 だとして、実橋では 7MN 程度になる。支承あるいはせん断キーの津波に対する設計では、このような水平力に対応する必要がある。

### 3. おわりに

本研究では津波が模型を越波する場合、および越波しない場合における、模型周辺の流況および模型

に作用する流体力の特性を実験により検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 貯水高が14cm以上になると津波は模型を越波し、越波により生じた波が遡上するため、津波が模型に作用した直後、急激に波高が増加する。
- ② 津波が模型を越波しない(貯水高13cm)で模型の下端に接する程度のときは流体力はほとんど作用しない。しかし、貯水高が14cmになると模型を超える流れが生じ、大きな流体力が生じる。鉛直方向の流体力はごく短時間であるが下向きの力が生じる。
- ③ みぞ形断面では、水平方向の流体力は長方形断面とほぼ同じ傾向を示している。しかし、鉛直方向の流体力は長方形断面と異なり断面下部が開いているため、津波作用時に水が断面内部に入り込み流体力は1/2から1/3程度になる。
- ④ 津波が模型を越波しない場合、津波作用中は上向きの力で反時計回りのモーメントが作用する。この場合は下流側の支点の流体力による支点反力が負の力になる。
- ⑤ 津波が模型を越波すると、津波作用直後に下向きの力が作用する。同時に時計回りのモーメントが作用する。その後数秒間は逆に上向きの力で反時計回りのモーメントとなり、再び下向きの力で時計回りのモーメントが作用する。この時計回りのモーメントが作用する場合は上流側の支点が負の力になる。

**謝辞：**本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金(若手研究(スタートアップ)20860078)「津波を想定した落橋防止ケーブルの設計に関する研究(研究代表者：中尾尚史)」による補助を得たことを付記する。また本実験を行うにあたって当時立命館大学生であった小松慎也君の協力を得た。ここに深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 運上茂樹：津波による橋梁被害，日本地震工学会誌，No. 6, pp. 26-28, 2007.
- 2) 中央防災会議：津波避難ビル等に係るガイドライン検討会(第3回)／津波に対する構造物の構造設計法(素案)，2004.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 4) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No. 621/ II-47, pp. 111-127, 1999.
- 5) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則，護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，土木学会海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915, 2000.
- 6) 片岡正次郎，日下部毅明，長屋和宏：津波衝突時に橋桁に作用する波力，第12回日本地震工学シンポジウム，pp. 154-157, 2007.
- 7) 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, pp. 81-88. 2008.

- 8) 二井伸一, 幸左賢二, 宮原健太, 庄司学: 波高と桁高をパラメータとした津波橋梁被害の個別要素法解析, 第12回地震時保有体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, pp. 69-74. 2009.
- 9) 杉本健, 薄井稔弘, 運上茂樹: 橋梁による被害橋梁に対する水路実験の再現解析, 第12回地震時保有体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, pp. 81-84. 2009.

- 10) 竹田周平, 幸左賢二, 二井伸一, 原田紹臣, 藤田亮一, 黒岩俊之: 橋梁に対する津波荷重の設定に関する基礎的研究, 第12回地震時保有体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, pp. 85-90. 2009.

## HYDRODYNAMIC FORCES ON BRIDGE DECK MODELS SUBJECTED TO TSUNAMI

Hisashi NAKAO, Kazuyuki IZUNO and Hiroshi KOBAYASHI

This paper discusses hydrodynamic forces on bridge decks during a tsunami event. Two dimensional tsunami flow was reproduced by a water channel. Hydrodynamic forces (drag, lift and hydrodynamic moment) acting on bridge models with rectangular and channel section were measured. Flow patterns around the model when tsunami got over the model were investigated. The results showed that large hydrodynamic forces appeared when the tsunami got over the bridge deck model compared to the moderate wave. Strong instantaneous downward force acted shortly after a tsunami hit the model. Negative reaction force at the bridge shoe was also observed.