

鈹桁橋に対する津波の作用力 に関する実験的研究

糸永航¹・中尾尚史²・伊津野和行³・小林紘士⁴

¹立命館大学大学院理工学研究科 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:rd000067@ed.ritsumei.ac.jp

²立命館大学総合理工学研究機構ポスドクフェロー (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:h-nakao@fc.ritsumei.ac.jp

³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

⁴立命館大学名誉教授 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:kobayashi@shiga-jst-satellite.jp

近年発生した大津波は、多数の橋梁を流出させ、災害援助や復旧作業に多大な影響を及ぼしている。現在、橋梁構造物に対する津波対策の明確な基準が存在せず、橋梁を対象とした津波対策が重要視されている。本研究では水理実験を行い、鈹桁橋の対津波特性を明らかにすることを目的とした。100分の1スケールの4主桁断面を用いて、橋梁に作用する流体力の測定を行い、ハイスピードカメラを用いて橋梁周辺状況の撮影し、津波が作用した時の流況の分析を行った。その結果、津波作用直後に上向きの力が作用し、その後急激に下向きの力が作用することがわかった。また、鈹桁断面は上流側張り出し部により波が戻され、上流側の水位が高くなることがわかった。

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

1. はじめに

2011年3月東北地方太平洋沖地震により発生した大津波で、多数の橋梁が流出した。ライフラインの寸断により、災害救助や復旧作業が遅れるといった問題が発生し、橋梁の津波対策が重要視されている。津波被害によるライフラインの寸断を防ぐためにも、津波による橋梁構造物の被害を最小限に抑える方法を考える必要がある。

著者らは^{1),2)}、長方形断面やみぞ形断面などの基本的な断面を用いた津波作用力や橋梁模型周辺の流況についての検討を行ってきた。これらの研究を基に長方形断面を基準として、橋桁の断面形状が津波の作用力に与える影響についても検討を行ってきた^{3),4)}。その結果、模型の側面を半円の形状にした断面が、橋桁の津波作用力の軽減に関しては最も適した断面だとわかった。

しかし、これらの実験では主に、長方形断面に対して有効な断面形状に補強する方法を検討してきた。一般的な I 桁を有する鈹桁橋に対する検討が十分とは言えない。橋桁下面における津波の流れが、両者では異なることが予想される。

本研究では鈹桁橋を対象とし、長方形断面との対津波特性の差を明らかにすることを目的として、4主桁橋を模擬した橋桁模型を用いて水路実験を行った。橋梁模型は100分の1スケールで作成し、橋梁に作用する津波の力を測定した。また、ハイスピードカメラを用いて津波作用時の橋梁周辺状況を撮影し、流況の分析を行った。

2. 橋梁模型を用いた津波の水理実験

(1) 実験装置概要

本実験は図-1のような実験装置を用いた。実験装置は水槽(0.6m×2.0m)と水路(0.2m×4.0m)を繋ぎ合わせたもので、水槽と水路の間にはゲートを設けている。開閉装置を用いてゲートを引き上げることで津波を発生させた。なお、水槽のゲート付近では流体が水路に流れる際のエネルギー損失を軽減するために水槽の側壁は弧を描くような形状に加工している。

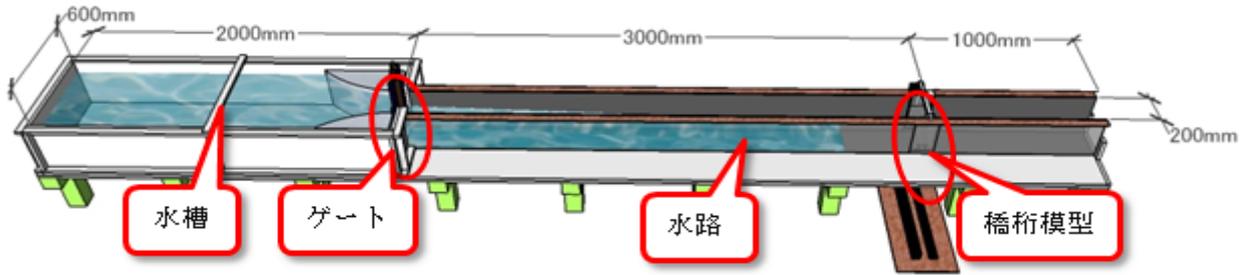


図-1 実験装置

また、水槽と水路の間にあるゲートから3.0m離れ、水路の底から桁下面までの距離が0.04mの位置に橋桁模型を設置し、津波が模型に作用するときの津波作用力（水平・鉛直・回転）をロードセル（AMTI社製MC3A-X-100）により計測した。サンプリング間隔を0.01秒に設定し、得られた波形は模型の固有振動数(15Hz)以上の成分をカットするようなローパスフィルタをかけて処理した。

(2) 橋梁模型

a) 鉸桁断面

本実験で用いた橋梁模型は、4主桁の鉸桁橋を図-2のようにモデル化したものを作成した。模型に接着した端板は、ロードセルに接続されており、模型の橋軸が水路の側壁に直角になるように設置して、水平方向の津波作用力 F_x と鉛直方向の津波作用力 F_z 、流力モーメント M_y を計測した。なお、水平方向の津波作用力 F_x は上流から下流へ向かう向き、鉛直方向の津波作用力 F_z は上向き、流力モーメント M_y は時計回りを正としている。

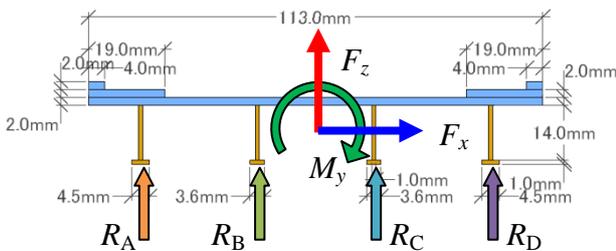


図-2 鉸桁断面

b) 長方形断面

鉸桁断面を用いて得られた流況とこれまで基準としてきた長方形断面^{1),2)}の実験で得られた流況との比較を行った。長方形断面の概略図を図-3に示す。

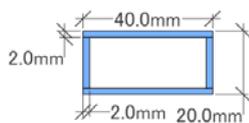


図-3 長方形断面

(3) 支点反力の算出

上流側から支点A、支点B、支点C、支点Dとして鉛直方向の支点反力 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D を算出した。支点反力の算定式を式(1)から式(4)に示す。なお、計測した津波作用力は模型の中心に作用すると考えた(図-2)。

$$R_A = -\frac{3}{10L}(F_x \cdot d + M_y) - \frac{1}{4}F_z \dots\dots (1)$$

$$R_B = -\frac{1}{10L}(F_x \cdot d + M_y) - \frac{1}{4}F_z \dots\dots (2)$$

$$R_C = \frac{1}{10L}(F_x \cdot d + M_y) - \frac{1}{4}F_z \dots\dots (3)$$

$$R_D = \frac{3}{10L}(F_x \cdot d + M_y) - \frac{1}{4}F_z \dots\dots (4)$$

L : 支点間距離=29mm
 d : 支点からロードセル
 固定高さまでの距離 = 10.5mm

(4) 実験水位

本実験では、貯水高を200mmおよび300mmに設定して実験を行った。なおこのときの最大の水位は貯水高が200mmの場合では54.7mm、貯水高が300mmの場合78mmである。100分の1スケールで作成しているため、実際の津波高に換算すると、それぞれ5.5mと7.8mになる。

(5) 流況の撮影

橋梁模型に津波が作用したときの様子をハイスピードカメラ(CASIO:EX-FH25およびEX-F1)を用いて撮影した。その際、カメラは図-3のように橋梁模型から水路と直角方向に3.0m離れたところに設置した。水路の中央部分の流体の動き撮影するため、橋梁模型から水路に直交する方向に箱をかぶせて暗室にした。橋梁模型の上に光源を設置し、シート光発生装置(シート光30mm)を用いて水路の中央部分だけが写るようにした。橋梁周辺の流況を動画(240fps/secおよび420fps/sec)および高速連写撮影(30fps/sec×60枚=2秒)により撮影した。

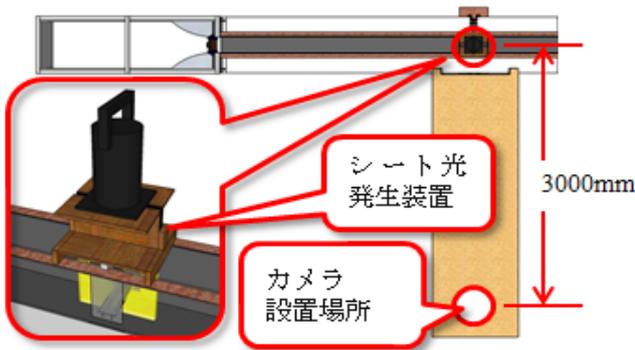


図-3 撮影方法

3. 実験結果

(1) 津波作用力測定結果

得られた水平方向の津波作用力 F_x を図-4、鉛直方向の津波作用力 F_z を図-5、流力モーメント M_y を図-6に示す。

a) 水平方向の津波作用力 F_x に関して

図-4より、貯水高200mmでは計測開始2.0秒後、貯水高300mmにおいては1.3秒後から津波が作用している。津波作用力の最大値を比較すると貯水高200mmでは約5.0N、貯水高300mmでは約11.0Nとなり約2倍になる。また、津波は貯水高200mmでは約10.0秒間、貯水高300mmでは約15.2秒間作用する。

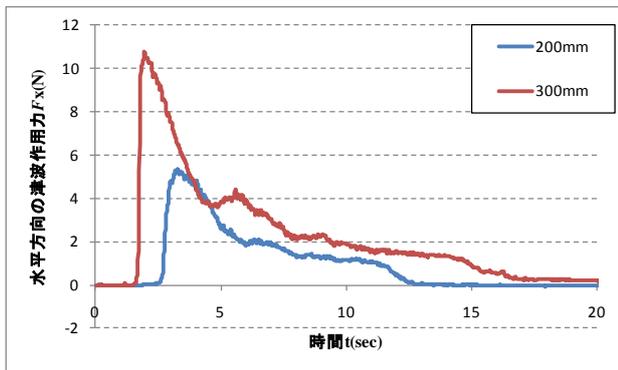


図-4 水平方向の津波作用力 F_x の計測波形

b) 鉛直方向の津波作用力 F_z に関して

図-4、図-5より、鉛直方向の津波作用力は水平方向の津波作用力の半分ぐらいの大きさになった。

貯水高200mmでは津波作用直後（2.5秒付近）から計測開始3.7秒後まで0~2Nの上向き力が作用し、その後急激に下向きの力が作用した（図-5）。貯水高300mmの場合も同様に津波作用直後（1.5秒付近）から計測開始5.0秒後まで上向きの力が作用し、5秒付近で急激に鉛直方向の津波作用力が低下する。図-4と比較すると、水平方向の津波外力が低下または一時増加する時刻に一致する。

また、下向きの津波作用力のピーク値は貯水高200mm、貯水高300mmともにおよそ5.0Nとなる。

なお、計測開始15秒以降も下向きの力が作用しているのは模型上部に水が溜まっているためである。

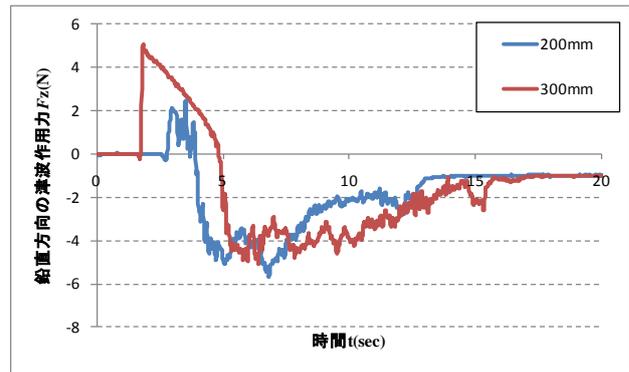


図-5 鉛直方向の津波作用力 F_z の計測波形

c) 流力モーメント M_y に関して

流力モーメントは図-6より、時計回りの力が作用し続け、反時計回りの力はほとんど作用しないことがわかった。また、流力モーメント（図-6）は水平方向の津波作用力（図-4）と相似的だということから、水平方向の津波作用力の影響が強いことがわかる。

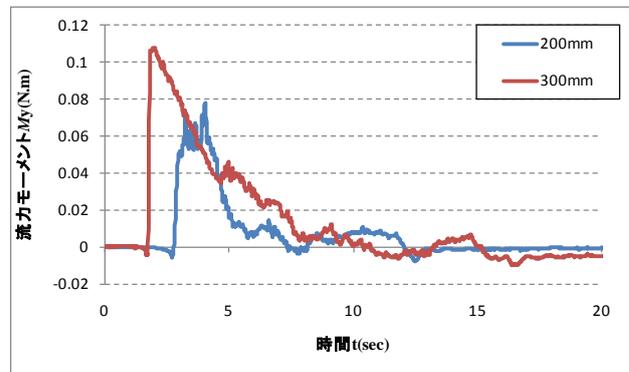


図-6 流力モーメント M_y の計測波形

(2) 支点反力の算出結果

式(1)~式(4)を用いて算出した支点反力を図-7~図-10に示す。

図-7より、上流側の支点反力は常に負の値である。ピーク値は津波作用直後に発生し、水平方向、鉛直方向の津波作用力が最大となる時刻とほぼ等しいという結果になった。

また、相似則よりピーク値を100分の1スケールと考えて実際に作用する力に換算すると、貯水高200mmでは1800kN、貯水高300mmでは3500kNとなる。例えばスパン20mの鈹桁橋を考え、桁重量を2400kNとすると、耐震設計基準⁵⁾で規定される負反力の耐力は、 $2400 \div 2 \times 0.3 \div 4 = 80\text{kN}$ となる。貯水高200mmでは上流側の R_A と R_B が、設計値の20倍以上の揚力を受けることになる。さらに貯水高300mmでは、最も下流の R_D 以外の3支承で、設計値を上回ることになる。

最も下流側の支承 R_D においては、常に正の支点反力が加わっていることが図-10から読み取れる。最大値を取るのは、上流側と同様に津波作用直後となった。

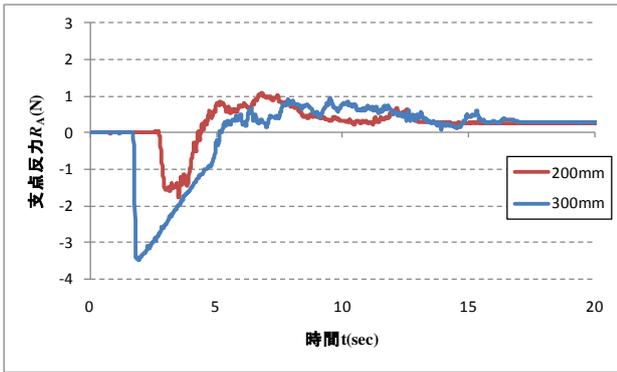


図-7 支点反力 R_A

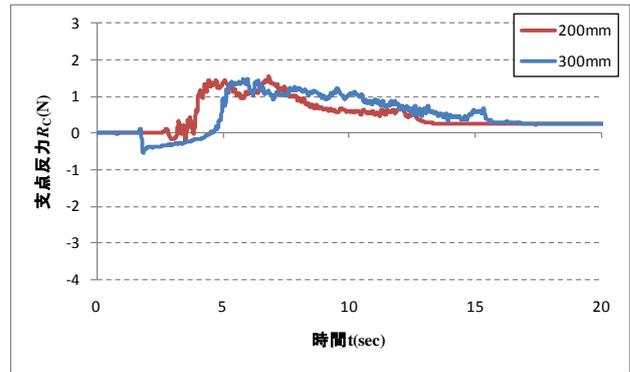


図-9 支点反力 R_C

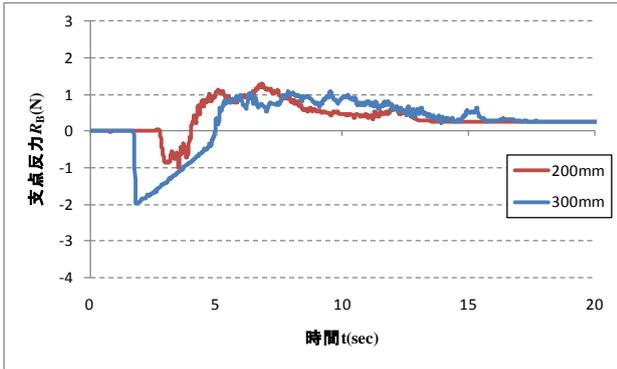


図-8 支点反力 R_B

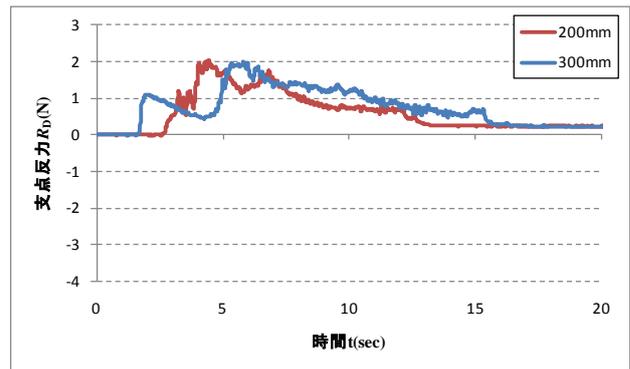


図-10 支点反力 R_D

(3) 鉸桁断面周辺の流況

ハイスピードカメラの撮影により得られた鉸桁断面の貯水高200mmの津波作用時の流況を写真-1～写真-3, 貯水高300mmの流況を写真-7～写真-9に示す。

a) 津波作用直後の流況に関して

貯水高200mmと貯水高300mmの津波作用直後の流況を写真-1, 写真-7に示す。写真を比較すると模型の上流側の模型側面周辺の流況は変わらなかったが、模型の中央部下と下流側の流況に違いが見られた。

貯水高200mmでは模型の中央部下の主桁間(BC間)に水は入っていないが(写真-1), 300mmでは水の流入を確認することができた(写真-7)。また, 上流側の床版部に水が作用している。これにより上向きの力(図-5)や時計回りの流力モーメント(図-6)が作用したと考えられる。

b) 津波作用後0.5秒後の流況に関して

津波作用後0.5秒後の流況では流況に大きな違いが見られた。貯水高200mmの流況を写真-2に, 貯水高300mmの流況を写真-8に示す。

模型上部の流況において, 貯水高200mm(写真-2)よりも貯水高300mm(写真-8)の方が波は下流斜め上方向に大きく成長している。また, 貯水高300mmでは模型上面に上方向の剥離を写真-8より確認することができた。上流側の水位に差は見られないため, 流速の違いによるものだと考えられる。

模型下部の流況では, 写真-2, 写真-8より, 両ケースで上流側の主桁に剥離を確認できた。貯水高300mmの剥離が大きいのは模型上面と同様に流速の違いによるものである。また貯水高200mmの下流側

の主桁にも津波が作用するようになり(写真-2), 貯水高300mmではこの主桁の下部から見られた剥離がよりはっきりと確認することができた(写真-8)。

c) 津波作用後1.5秒後の流況に関して

貯水高200mmの津波作用1.5秒後の流況を写真-3に, 貯水高300mmを写真-9に示す。貯水高200mmにおいて, 模型上流側の水位に変化はないが, 模型上面に見られた剥離がなくなったため, 津波作用0.5秒後の流況(写真-2)と比べると流速が落ちていると考えられる。そのため, 波の越流量が津波作用0.5秒後の流況と比べると少ない。

また模型下部上流側の剥離は, 津波作用後1.5秒後でも写真-3, 写真-9より確認することができた。津波作用0.5秒後よりも剥離は小さく, 下流側の主桁下部から剥離が形成されていないため, 津波作用0.5秒後の流況(写真-2, 写真-8)と比較すると流速が低下していると考えられる。

貯水高300mmの流況では模型上下部の剥離を確認することができ, 流速の低下は貯水高200mmほどではないことが写真-8, 写真-9よりわかる。水槽に貯めた流量が多いため, 流速の低下に時間がかかっている。

(4) 模型の違いによる流況比較

長方形断面の貯水高200mmの津波作用時の流況を写真-4～写真-6, 貯水高300mmの流況を写真-10～写真-12に示す。

a) 貯水高200mm

写真-4より, 長方形断面の津波作用直後は模型の

側面の影響により波が真上に成長しているが、鉸桁断面では上流側張り出し部に津波が作用し、上流側に波が戻される(写真-1).

また、津波作用0.5秒後の流況を比較すると、鉸桁断面の越波する波の量が少ないことが写真-2、写真-5より明らかになった。津波作用直後の流況と同様に鉸桁断面の上流側張り出し部により波が戻され、

越波する波の量が少なくなったと考えられる。

津波作用1.5秒後の流況において、長方形断面では模型上面に剥離が形成されたが(写真-6)、鉸桁断面の模型上面では波が乱れることがわかった(写真-3)。模型上部の流速が低下したことが原因だと考えられるため、今後は模型周辺の流速を計測する必要がある。

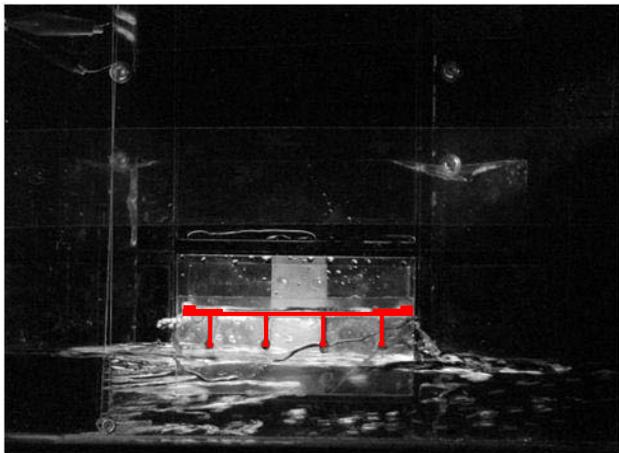


写真-1 津波作用直後の流況
(鉸桁断面 貯水高200mm)

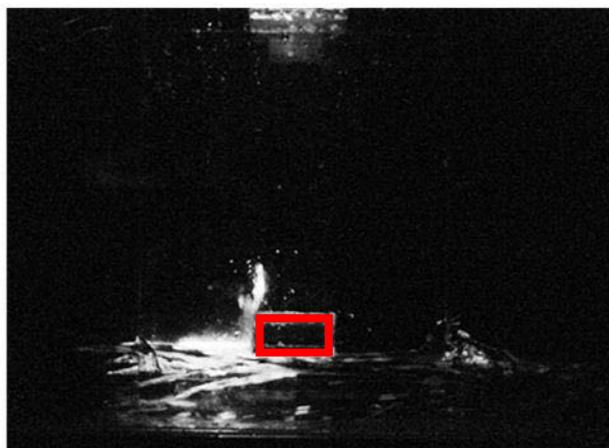


写真-4 津波作用直後の流況
(長方形断面 貯水高 200mm)

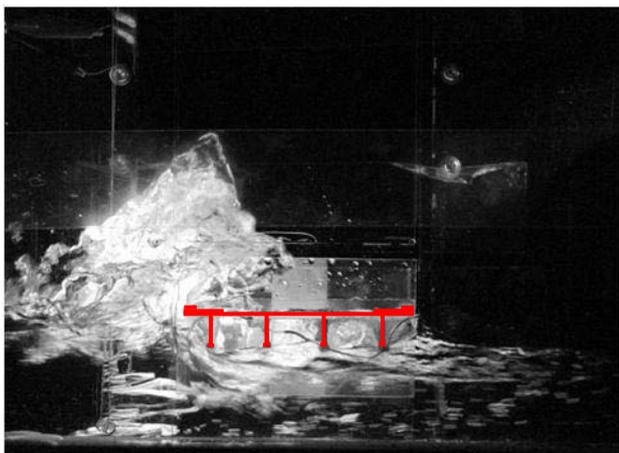


写真-2 津波作用0.5秒後の流況
(鉸桁断面 貯水高200mm)

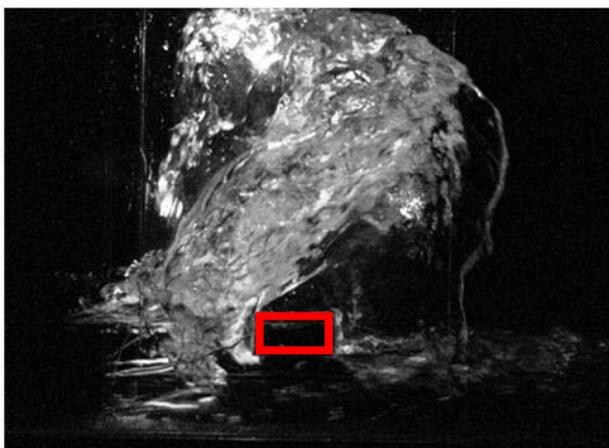


写真-5 津波作用0.5秒後の流況
(長方形断面 貯水高200mm)

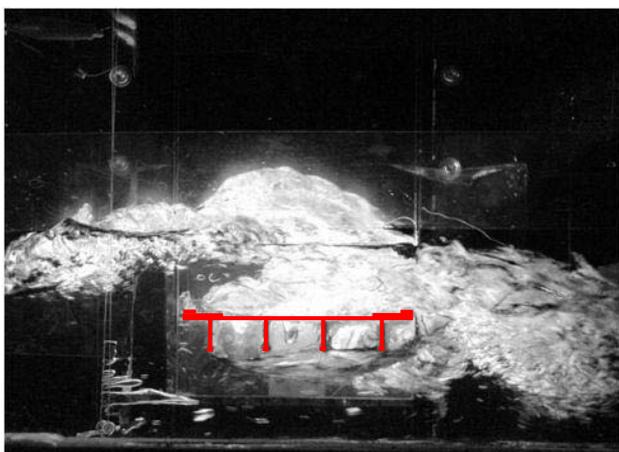


写真-3 津波作用1.5秒後の流況
(鉸桁断面 貯水高200mm)

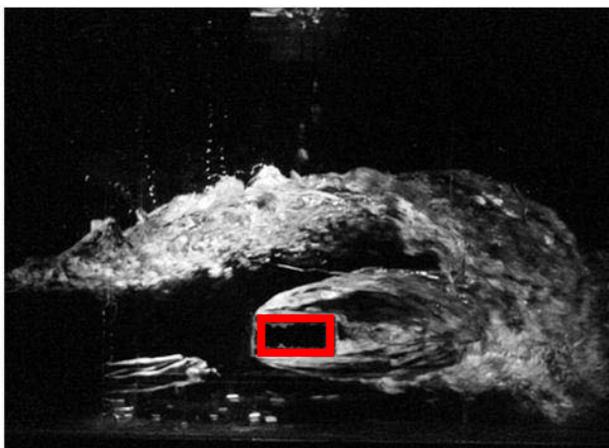


写真-6 津波作用1.5秒後の流況
(長方形断面 貯水高 200mm)

b) 貯水高300mm

津波作用直後は貯水高 200mm と同様に、長方形断面では波が真上に成長し(写真-10)、鉸桁断面では上流側に波が戻された(写真-7)。

また、津波作用 0.5 秒後では、貯水高 200mm よりも流速が上がっているため、越波する波の量が 2 ケ

ースとも多いことが写真-2, 写真-5, 写真-8, 写真-11 よりわかった。

津波作用 1.5 秒後の上流側の水位は長方形断面よりも鉸桁断面の方が 5mm 高くなった(写真-3, 写真-6)。鉸桁断面の上流側張り出し部により波が戻されたことが原因だと考えられる。

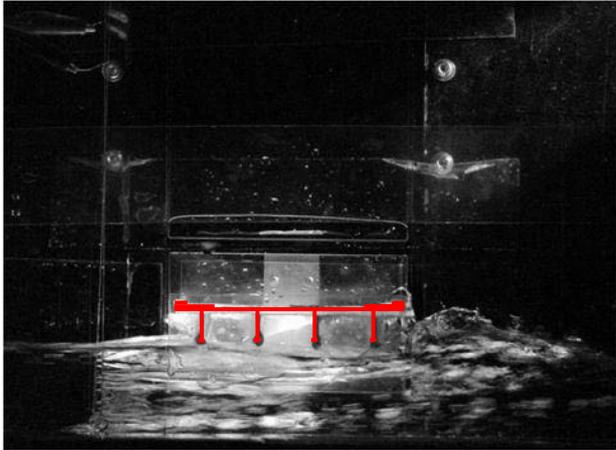


写真-7 津波作用直後の流況
(鉸桁断面 貯水高 300mm)

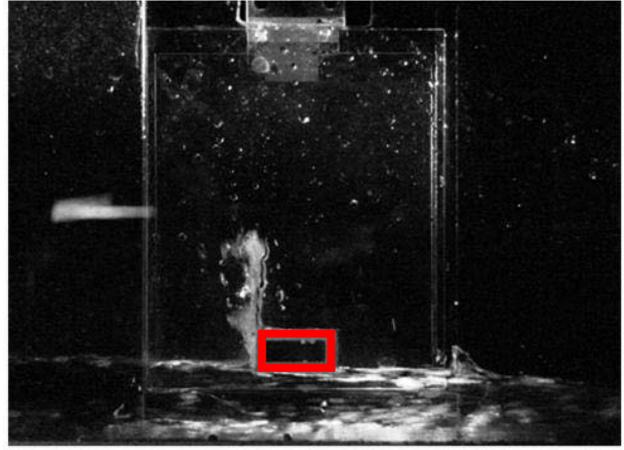


写真-10 津波作用直後の流況
(長方形断面 貯水高 300mm)

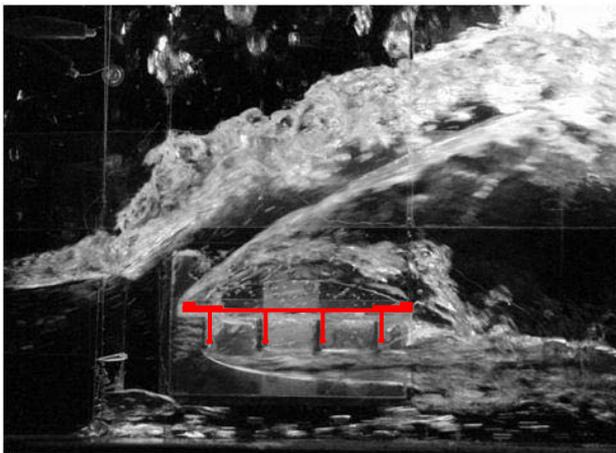


写真-8 津波作用 0.5 秒後の流況
(鉸桁断面 貯水高 300mm)



写真-11 津波作用 0.5 秒後の流況
(長方形断面 貯水高 300mm)

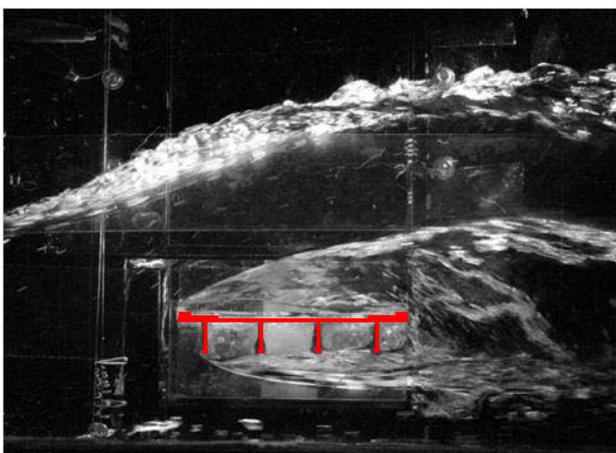


写真-9 津波作用 1.5 秒後の流況
(鉸桁断面 貯水高 300mm)

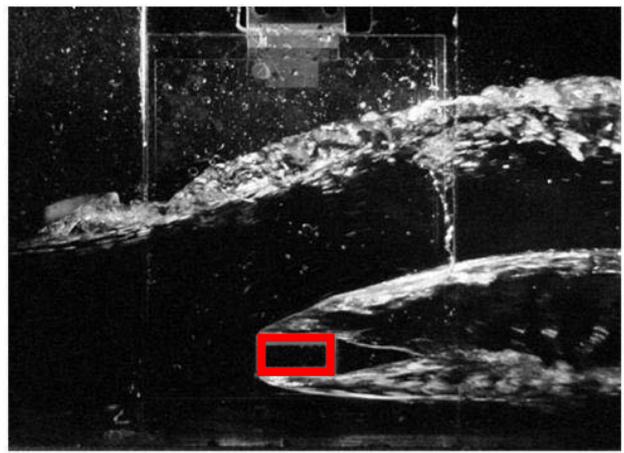


写真-12 津波作用 1.5 秒後の流況
(長方形断面 貯水高 300mm)

4. おわりに

本研究では鉸桁橋の断面を模擬した模型を用いて水理実験を行い、長方形断面との対津波特性の違いについて検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 鉛直方向の津波作用力は、津波作用直後から上向きの力が作用し、その後急激に下向きの力が作用した。
- ② 流力モーメントに関しては、水平方向の津波作用力の影響が強い。時計回りの力が作用し続け、反時計回りの力はほとんど作用しない。
- ③ 橋梁模型の支点反力に関して、ピーク値は津波作用直後であり、水平方向、鉛直方向の津波作用力が最大となる時刻とほぼ等しい。
- ④ 津波作用後直後の流況に関して、貯水高200mmでは模型の中央部下の主桁間に水は入っていないが、300mmでは水の流入を確認することができた。津波高によって、桁に作用する力の場所が変化することになる。
- ⑤ 津波作用後0.5秒後の流況に関して、流速の違いにより、貯水高300mmの方が波は下流斜め上方向に大きく成長した。また、模型上下部に剥離を確認することができた。
- ⑥ 津波作用後1.5秒後の流況に関して、貯水高200mmでは流速の低下が著しく、模型上下部の剥

離が形成されなくなった。

- ⑦ 鉸桁断面は上流側張り出し部により波が戻され、長方形断面の場合よりも上流側の水位が高くなる。

謝辞：本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金(基盤研究(C)(21560510))「津波外力に対する落橋防止システムの必要性能の明確化(研究代表者：小林紘士)」による補助を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 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.55A, pp.564-575, 2010.
- 2) 中尾尚史, 野阪克義, 伊津野和行, 小林紘士：津波到達水位と橋梁の生じる津波外力との関係に関する研究, 応用力学論文集, Vol.13, 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, 2010.
- 4) 糸永航, 中尾尚史, 伊津野和行, 小林紘士：橋桁の断面形状の違いによる橋梁に対する津波作用力の影響, 第66回土木学会年次学術講演会, pp.2-219-220, 2010.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 2002.

TSUNAMI FORCES AGAINST PLATE GIRDER BRIDGE

Wataru ITONAGA, Hisashi NAKAO, Kazuyuki IZUNO and Hiroshi KOBAYASHI

This study revealed tsunami forces against bridge model by hydraulic experiment. Hydraulic experiments were conducted using 1/100 scale plate girder bridge model with four main girders. The hydrodynamic forces acting on the bridge model were measured with a load cell, and the flow regime around the bridge model was observed using a high-speed camera. The results showed that the model suffered uplift force immediately after the tsunami action, which was followed by downward force. And the water level of upper stream side was high, because overhanging part of the girder reflected the wave.