

矩形断面桁に作用する津波の 圧力特性に関する実験的研究

中尾 尚史¹・糸永 航²・野阪 克義³・伊津野和行⁴・小林 紘士⁵

¹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

²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

³立命館大学理工学部都市システム工学科准教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: k-nozaka@se.ritsumei.ac.jp

⁴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

⁵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

2011年に東北地方で発生した津波により、多くの橋梁が流出する被害を受けた。道路の遮断により被災地への復旧・復興の遅れが生じるなど二次的な被害も生じた。津波が橋梁に作用しても橋梁の機能を損なわないように対策を講じる必要がある。このためには橋梁に作用する津波外力の特性を知ることが重要である。本論文では矩形断面桁を有する橋梁をモデル化し、実験により模型に作用する津波外力および模型表面の圧力を計測して、外力の作用メカニズムについて検討した。その結果、矩形断面の下面上流側に比較的絶対値の大きい負圧、下面上流側に正圧が作用し、これにより下向きの津波外力および下流側支承が浮き上がる向きの流力モーメントが作用することがわかった。

Key Words : *Tsunami, Bridge, Rectangular section, Pressuer, Water channel*

1. はじめに

2004年に発生したスマトラ沖地震や2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震による津波によって多くの橋梁が流出するなどの被害を受けた。橋梁が機能を失うことで、被災地への救援および復旧に支障をきたす二次的な被害も受けている。そのために津波の作用を受けても橋梁の機能を維持できるような対策が必要である。

港湾構造物やビル等の構造物についてはガイドライン等^{1),2)}で津波の外力や対策が規定されている。しかし、橋梁構造物に対しては津波外力の設定や津波に対しての具体的な対策は規定されていない。道路橋示方書³⁾では波力を静的な波圧で置き換えているのみであり、津波を想定して設定されていない。

現在、スマトラ沖地震や東北地方太平洋沖地震による津波の被害調査および分析が行われている⁴⁾⁻⁷⁾。また津波作用時の橋梁構造物に作用する外力について実験や解析により研究され⁸⁾⁻¹⁰⁾、津波外力を低減

させる方法も研究されている^{11),12)}。

著者らは模型実験を行い、橋梁周辺の流況撮影と津波外力の測定から、津波が橋梁に作用するメカニズムを解明しようと試みてきた¹³⁾。その結果、津波の流れが桁端部で剥離し、桁上下面に再付着する状況によって、桁に作用する力が大きく変化することが明らかになった。

したがって、津波外力が桁のどの部分に強く作用しているのかを明らかにすることが、津波の桁への作用を定式化するために必要だと考えるに至った。

そのためには、桁の各部における圧力測定をしなければならぬが、小型模型実験に適用するには市販の圧力計では大きすぎるという問題がある。

そこで本研究では圧力計の試作を行い、桁各部の圧力を詳細に計測することとした。矩形断面模型を用いた水理実験を行い、津波外力の特性を圧力分布から検討した。

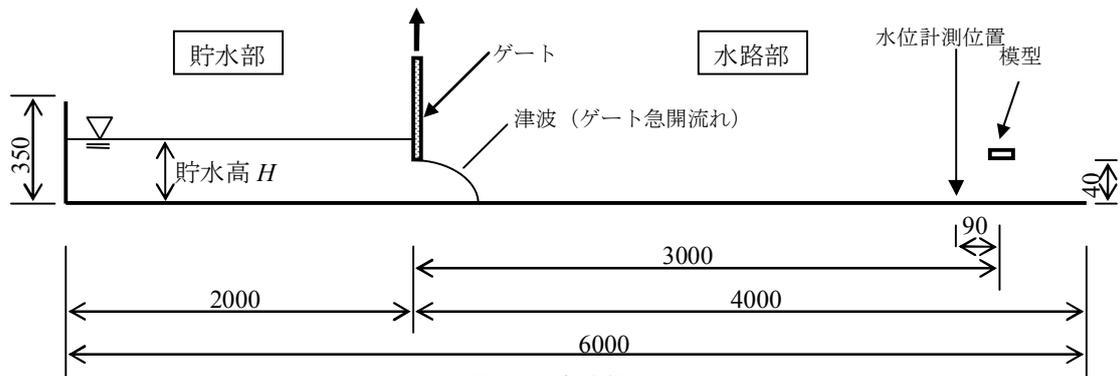


図-1 実験装置

2. 実験概要

(1) 実験装置

実験装置の側面図を図-1に示す。実験装置は貯水槽（長さ2000mm、幅600mm）と水路（長さ4000mm、幅200mm）からなり、貯水槽と水路の間にゲートを設けた。またゲートから3000mm下流に実験模型を設置した。

本実験装置は貯水槽に一定量の水をため、ゲートを引き上げるにより津波とみなしたゲート急開流れを発生させた。なお本研究ではこの流れを津波と表現する。

(2) 津波外力計測方法

実験では模型に6分力計ロードセル（AMTI社製MC3A-X-100）を設置し、3分力すなわち水平方向の津波外力 F_x 、鉛直方向の津波外力 F_z 、流力モーメント M_y を計測した。 M_y は断面の図心を通る軸（y軸）回りにとってある。模型は幅が80mm、高さが20mmの長方形断面を用いた。本研究では図-2に示すように、流れの向き、上向き、時計回りを各外力の正とする。

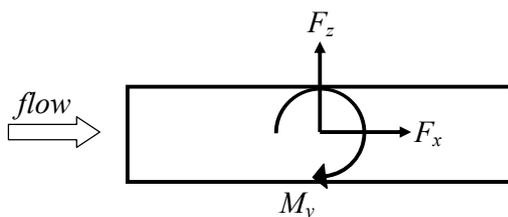


図-2 外力の向き

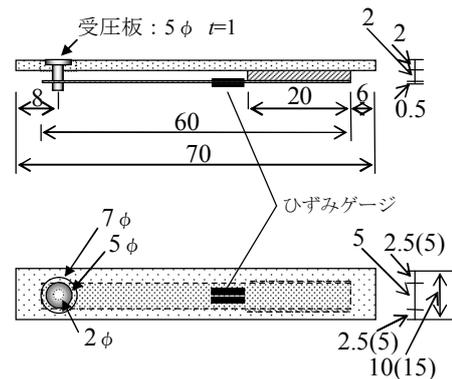
(3) 圧力計測方法

本実験装置は小規模な装置のため、これに適合できる小型で高い感度の圧力計を試作した。

図-3に示すように圧力計は受圧板と片持ち梁からなり、片持ち梁に取り付けたひずみゲージ（東京測器FLA-03-11）により圧力を検出する。

本研究では津波外力のうち鉛直方向成分および流力モーメントに着目して圧力を調べるため、図-4および写真-1に示す模型の上面および下面に圧力計を設置した。図中のナンバーは圧力計の番号である。

実験では津波外力と圧力を同時に計測した。またサンプリング間隔は0.01秒として60秒間計測した。



() は圧力計の幅 15mm の場合

図-3 圧力計

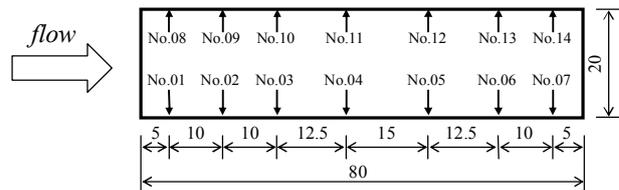


図-4 圧力計配置図



写真-1 圧力計を取り付けた模型

なお、圧力計の固有振動数成分および圧力計の固有振動数成分の影響は波形処理によりカットした。

3. 計測結果

本実験では貯水高 H を200mmに設定した。模型がないとき模型中心から90mm上流側で測定した最大水位は54.7mmで、模型の上流側側面の高さより約5mm低い。津波の進行速度は約1.7m/sである。

(1) ロードセルによる計測結果との比較

試作圧力計による測定結果が妥当なものであるか検証する目的で各測点圧力の測定結果を積分して流体力を算定し、ロードセルによる流体力の測定値と比較した。模型の正面および背面の圧力も流力モーメントに寄与するが、上下面に作用する圧力に対して影響が十分に小さいため、ここでは無視してある。図-5にその結果を示す。図-5には同時に計測された水位も示してある。

鉛直方向外力および流力モーメントともに3秒から13秒の範囲で両者がやや異なる値を示しているが、ロードセルにより計測された結果には水中に没している圧力計の配線に作用する流体力が含まれているためであると思われる。流体力の時間的な変動の特性は両者でほぼ同じである。圧力計による計測は、ほぼ津波外力を捉えているものと判断できる。

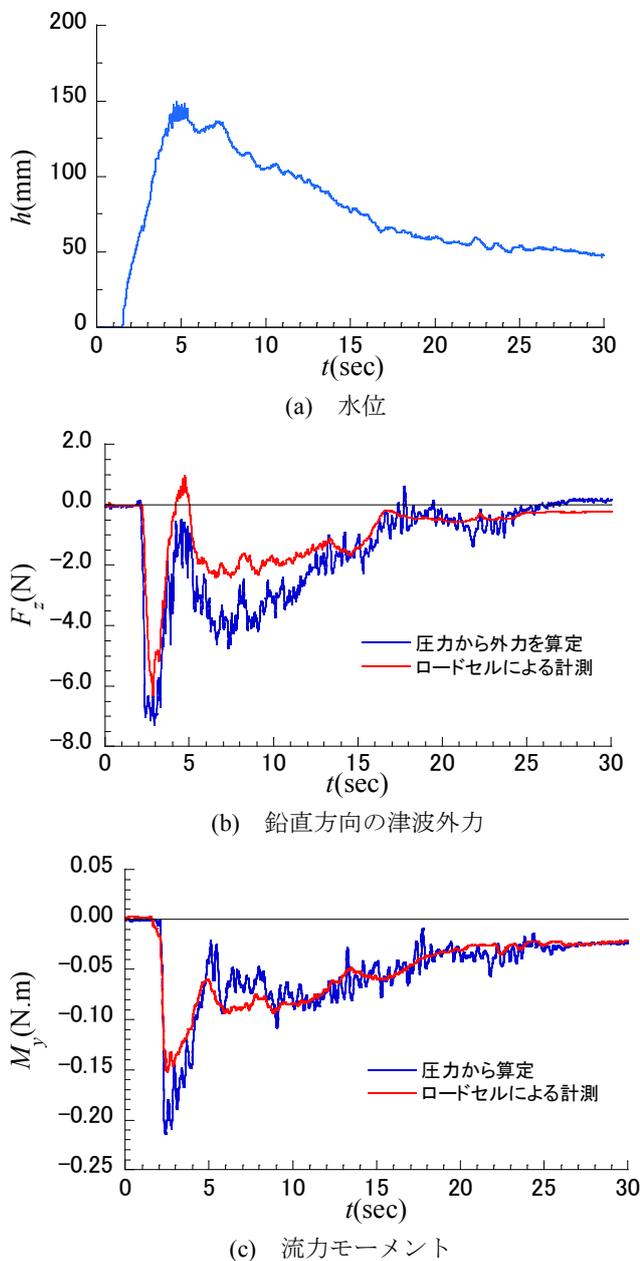


図-5 圧力測定値による流体力

(2) 鉛直方向の津波外力と流力モーメントの関係

津波作用直後（3秒付近）で反時計回りの流力モーメントが最大となる。ロードセルで得られた鉛直方向の津波外力の結果と比較すると、下向きの津波外力が最大になる時刻と一致する。また5秒付近で反時計回りの流力モーメントが減少する時刻と上向きの津波外力が最大になる時刻がほぼ一致する。

(3) 圧力の計測結果

図-6、図-7は圧力計で得られた上下面における圧力の計測結果である。横軸は時間、縦軸は圧力である。津波作用時の写真撮影から模型を越える水の最大高さを求めた。その水位を基に静水圧を算定し（5秒付近の水位）、図中に静水圧を示した。

a) 上面の圧力

上面には図-6で示すように常時正圧が作用する。図-5(b)で示した下向きの津波外力が最大になる時刻（津波作用直後：3秒付近）から圧力が作用し始める。再び下向きの津波外力が大きくなる時間（7秒付近）で圧力が最大になる。圧力の最大値は静水圧に近い値になる。

b) 下面の圧力

下面の場合、図-7に示すように津波作用直後（3秒付近）で上流側の圧力計（No.01～No.03）は負圧になり、No.4の圧力計から下流側の圧力（No.04～No.07）は正圧になる。このことから、模型角部から剥離した流れの影響で圧力が負圧になったと考えられる。

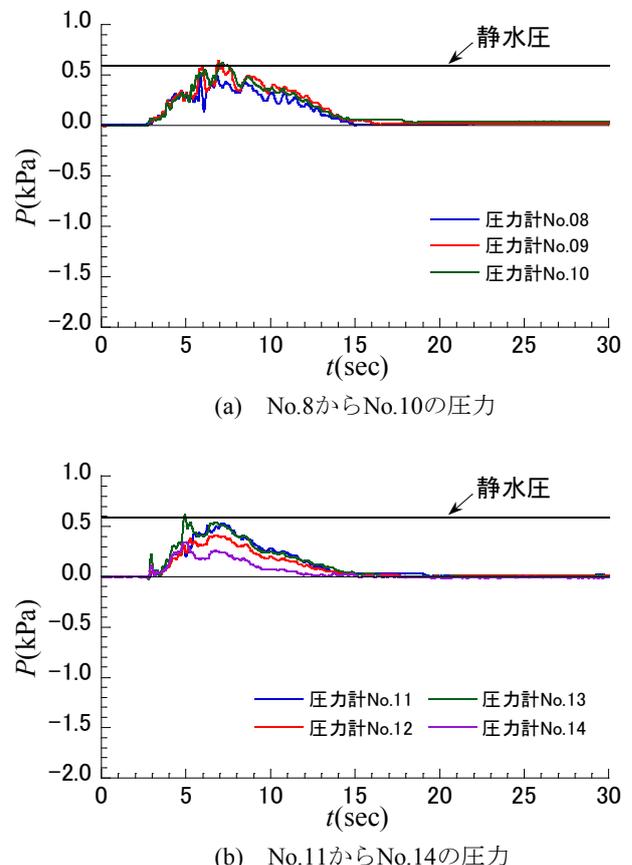
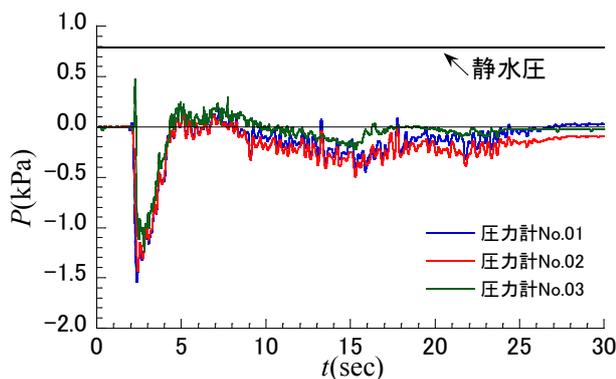
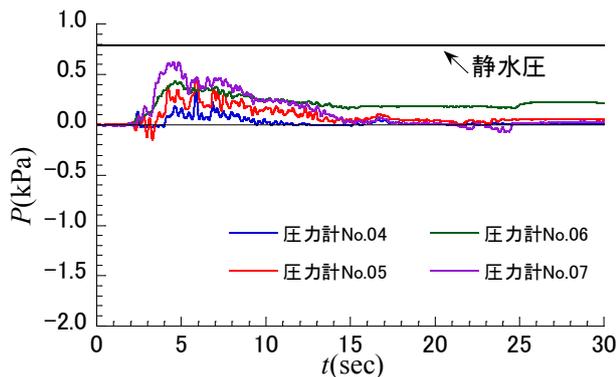


図-6 圧力の計測波形（上面）



(a) No.1からNo.3の圧力



(b) No.4からNo.7の圧力

図-7 圧力の計測波形 (下面)

5～10秒付近は、上流側 (No.01～No.03) の圧力も、わずかであるが正圧になる。その後津波が通過している間 (10秒以降) は再び上流部および下流部での流れの剥離、再附着によりNo.01～No.03の圧力は再び負圧になる。

静水圧と比較すると、下面の圧力は静水圧よりも小さくなる。上流側では比較的大きな値の負圧が作用することに留意が必要である。

4. 津波外力と圧力分布の関係

図-8は反時計回りの流力モーメントが最大になる時刻の圧力分布を示したものである。図中の三角のプロットが模型上面に作用する圧力、ひし形のプロットが模型下面に作用する圧力である。

図-5で述べたように、この時刻では模型上面はほとんど圧力が作用しない。逆に模型下面の圧力は上流側で負圧、下流側で正圧になる。このことから模型上流側で下向きの力、模型下流側で上向きの力が作用するために、反時計回りの流力モーメントが作用する。また負圧による下向きの力が、正圧による上向きの力よりも上回ったために下向きの津波外力が最大になったと考えられる。

反時計回りの流力モーメントが減少する時刻 (5秒付近) の圧力分布を図-9に示す。この時刻では模型下面の上流側の圧力も正圧になる。そのために、反時計回りの流力モーメントが減少したと考えられる。

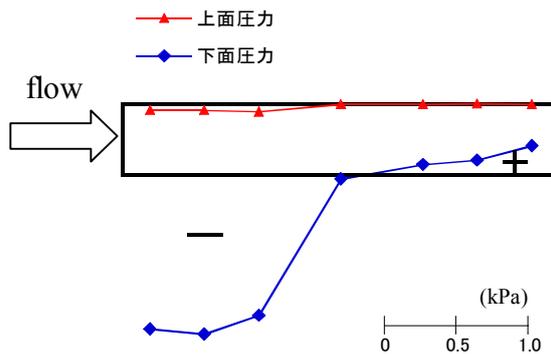


図-8 圧力分布 (3秒付近)

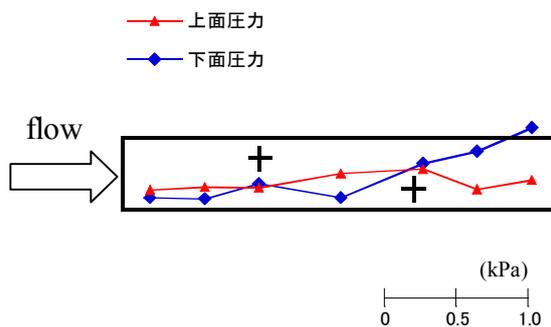


図-9 圧力分布 (5秒付近)

また模型上面は全体的に正圧がほぼ同じ大きさで作用して下向きの力が作用する。他の測点の圧力に比べ模型下面下流側の正圧が特に大きくなっている。そのため下向きの力が大幅に減少したと考えられる。

図-10は10秒付近の模型に作用する圧力の分布を示したものである。この時刻になると、再び模型下面上流側が負圧になる。そのために反時計回りの流力モーメントや下向きの津波外力が生じる。模型上面の圧力は正圧が作用したままであり、圧力の変動はほとんどない。

15秒付近になると (図-11)、津波が橋梁を越波しなくなるため、模型上面の圧力はほぼ0になる。模型下面の圧力は先ほどと同様に、模型の上流側が負圧、下流側が正圧になる。

長方形断面では津波が作用すると、模型上面は常時正圧、模型下面は一部の時刻を除き、上流側が負圧、下流側が正圧になる。

圧力の測定結果から、長方形断面の津波外力低減の対策を考える場合、模型下面に付加物を取り付けるなど模型下面上流側に負圧が作用しないようにすると、下向きの津波外力や反時計回りの流力モーメントを低減させることができると考えられる。

橋梁周辺の流況¹³⁾からでは上面に作用する圧力が鉛直方向の津波外力や流力モーメントにどのような影響を与えているかはわからなかった。本研究で圧力を調べることで、長方形断面では模型下面に作用する圧力が大きな影響を与えていることが分かった。

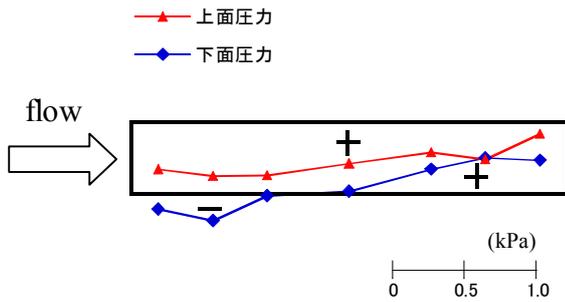


図-10 圧力分布 (10秒付近)

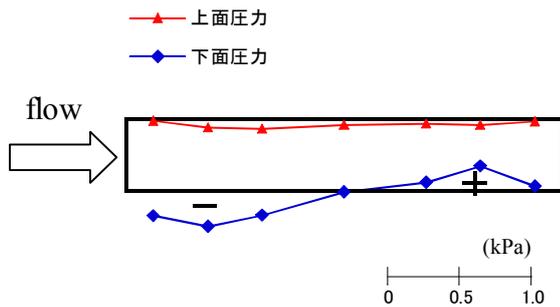


図-11 圧力分布 (15秒付近)

5. 結論

本研究は長方形断面に作用する津波外力や圧力を計測して、津波外力の発生メカニズムを圧力分布から検討した。得られた結果は以下の通りである。

- ① 津波が作用した直後（3秒付近）は模型上面には圧力はほとんど作用しない。模型下面は上流側に流れの剥離、下流側に流れの再付着が生じることにより、上流側に負圧、下流側に正圧が作用する。
- ② 津波が作用した直後では、前述のように模型下面上流側に負圧、下流側に正圧が作用するために、反時計回りの流力モーメントが最大になる。
- ③ 下向きの津波外力が最大になった後（5秒付近）は、模型下面上流側が正圧になるため、反時計回りの流力モーメントが減少する。
- ④ 津波通過時（5秒以降）は再び模型下面上流側が負圧になるため、下向きの力が大きくなる。
- ⑤ 長方形断面では模型下面に作用する圧力が鉛直方向の津波外力や流力モーメントに大きな影響を与えている。

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) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V. 耐震設計編，2002.
- 4) 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物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.81-88，2008.
- 5) 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，Vol.56A，pp.454-463，2010.
- 6) 清水英樹，幸左賢二，竹田周平，佐々木達生：鋼道路橋の津波による被害調査，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，pp.87-94，2011.
- 7) 佐々木達生，田崎賢治，坂本佳子，幸左賢二：東北地方太平洋沖地震によるPC桁橋の津波被害分析，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，pp.95-102，2011.
- 8) 平木雄，庄司学：橋桁へ作用する砕波段波の津波流体力評価，第13回日本地震工学シンポジウム，pp.821-828，2010.
- 9) 二井伸一，幸左賢二，庄司学，木村吉郎：津波形状の違いによる橋梁への津波作用力に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.56A，pp.474-485，2010.
- 10) 嶋原良典，藤間功司，庄司学：橋梁構造物に作用する津波波力の数値計算，地震工学論文集，土木学会，Vol.30，pp.899-904，2010.
- 11) 薄井稔弘，運上茂樹，杉本健：津波に対する道路橋の被害軽減に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.56A，pp.464-473，2010.
- 12) 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）[特]地震工学論文集，Vol.66，No.1，pp.425-433，2010.
- 13) 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.

PRESSURE CHARACTERISTICS ON RECTANGULAR SECTION GIRDER DUE TO TSUNAMI

Hisashi NAKAO, Wataru ITONAGA, Katsuyoshi NOZAKA, Kazuyuki IZUNO and
Hiroshi KOBAYASHI

It is necessary to study the precise pressure on a girder surface to clarify the tsunami action on bridges. This paper shows the pressure distribution and the mechanism of tsunami external force for the basic bridge section model from experiments. The mechanism of tsunami external force was estimated from the pressure distribution. The counterclockwise moment was generated on the bridge immediately after a tsunami action, because the negative pressure were induced on undersurface lower stream side of the model and the positive pressure were induced on the undersurface upper stream side.