

## 津波作用時における橋梁周辺の流れと流体力に関する基礎的研究

Flow and hydrodynamic force characteristics associated with a tsunami acting on a bridge

中尾尚史\*, 伊津野和行\*\*, 小林紘士\*\*\*  
Hisashi Nakao, Kazuyuki Izuno, Hiroshi Kobayashi

\*工博, 立命館大学ポストドクトラルフェロー, 総合理工学研究機構  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

\*\* 工博, 立命館大学教授, 理工学部都市システム工学科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

\*\*\*工博, 立命館大学チェアプロフェッサー, 総合理工学研究機構  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

This study investigated the flow and the hydrodynamic force characteristics acting on a bridge during a tsunami event using hydraulic experiments and numerical analysis. Characteristics such as wave height, flow regime, and the hydrodynamic force for rectangular and channel section bridge models were measured, and numerical analysis using the particle method was conducted. The experimental results showed that the impulsive hydrodynamic force acting on a rectangular section model during a tsunami event was larger than that observed using a channel section model. Thus the shape of bridge girder needs to be taken into account in the design load for a tsunami event.

*Key Words: tsunami, bridge, hydraulic experiment, numerical analysis, hydrodynamic force*

キーワード: 津波, 橋梁, 水理実験, 数値解析, 流体力

## 1. はじめに

2004年に発生したスマトラ沖地震<sup>1)</sup>による津波で, 多くの橋梁構造物が流失または使用不可能の状態に陥った。過去には日本も津波によって多くの被害を受けており<sup>2)</sup>, さらに近い将来に発生するとされる東海, 東南海, 南海地震では非常に大きな津波が発生すると予想されている。そのため, 津波を受けたときの橋梁構造物の挙動を検討することは重要課題である。

これまでに津波の波速や波力に関する研究<sup>3)~4)</sup>や, 堤防および防波堤やビル等の建造物に津波が与える影響について研究<sup>例えは5)</sup>が行われており, これらの構造物の設計においては基準<sup>6)</sup>やガイドライン<sup>7)</sup>によって津波外力などが規定されている。

しかし, 橋梁構造物に関しては津波に対して明確な設計基準が規定されていない。道路橋示方書<sup>8)</sup>では津波外力の記述はなく, 鉛直壁に対して海水の単位重量と沖波の波高をかけたものに1.5倍した, 通常時の波圧しか考

慮していない。さらに橋桁に対しても津波外力の設定が行われていない。津波が橋桁に与える影響についての研究は始まったばかりである<sup>9)~11)</sup>。

桁に作用する力は, 津波通過時に作用する水平力のほかに鉛直力や回転力についても検討する必要がある, それらを同時に検討することによって, 津波外力および橋梁の安全性を定量的に評価することが重要である。

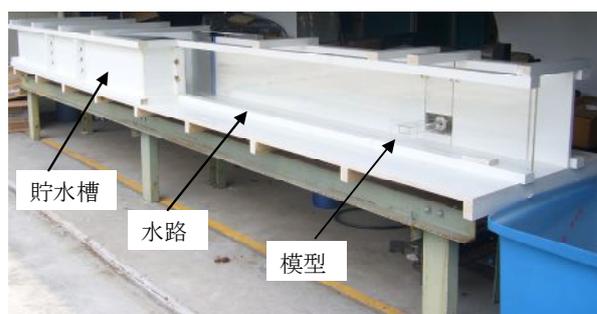


写真-1 実験装置

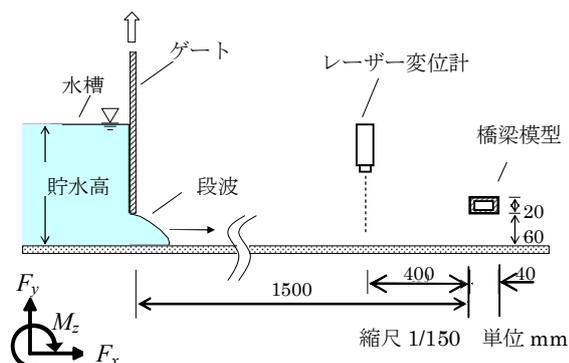


図-1 模型概略図

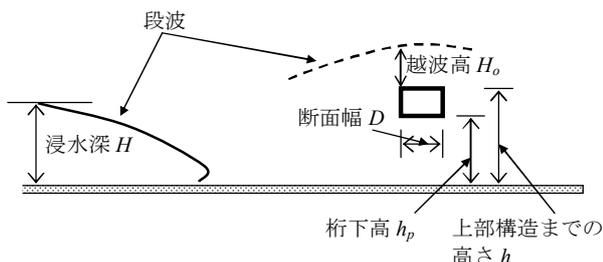


図-2 各名称の定義

よって本研究は、津波が橋桁に与える影響を実験及び解析により検討し、橋梁に作用する津波外力を合理的に評価するための資料を得ることを目的とする。

## 2. 実験的検討

### 2.1 実験概要

本研究では写真-1 および図-1 に示すような実験装置を用いた。貯水部は長さ 2m、幅 0.6m、水路は長さ 2m、幅 0.2m である。また水路の勾配は無しにした。貯水部に一定の貯水高になるまで水を溜め、水が一定量に達してから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。

本研究は基礎的な研究として長方形断面とみぞ形断面の模型を用いた。これらはボックスガダー橋およびプレートガダー橋を想定したものである。断面の幅  $D$  と高さ  $H$  は、 $D/H=2$  に設定し、模型は図-1 に示す位置に設置した。

発生した津波は橋梁模型に衝突する。それによって作用する流体力すなわち抗力、揚力、流力モーメントを 6 分力計ロードセル (AMTI 社製 MC3A-X-100) によって測定した。これらの流体力をそれぞれ水平力  $F_x$ 、鉛直力  $F_y$ 、ねじりモーメント  $M_z$  と呼ぶことにする。ねじりモーメントは模型の幅、高さの中心を通る模型中心軸 ( $z$  軸) 周りのモーメントである。それぞれの力の符号は図-1 に示すとおり設定した。同時に波高もレーザー変位計 (小野測器製 LD-1300L-200) により計測した。貯水高は

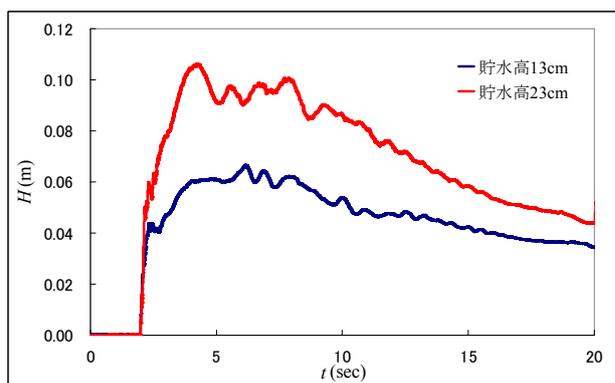


図-3 浸水深の測定波形

表-1 浸水深の測定結果

貯水高(cm)	浸水深(cm)
13	6.1
15	7.3
17	7.9
20	9.7
23	10.4

13cm, 15cm, 17cm, 20cm, 23cm に設定して、それぞれ 10 回ずつ実験を行い、平均をとった。

なお、本論文では、図-2 に示すように、発生した段波の波高を浸水深、橋梁模型を越波した波の高さを越波高と定義した。

### 2.2 津波外力の評価

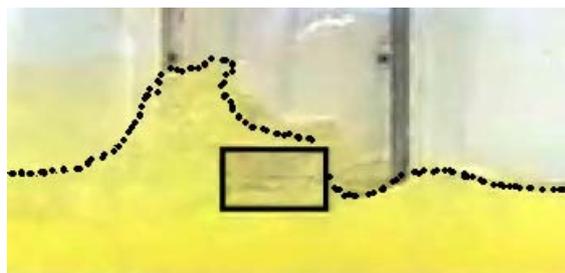
橋梁構造物における津波の作用状況は、堤防構造物やビルなどの建築物と異なり、桁の形状により複雑な流れとなるため、波力を一様に評価するのは困難である。またスマトラ沖津波では桁が何 10m も流されたことから、橋梁構造物においては、水平方向のほかに鉛直方向の流体力も大きく影響することが考えられる。水平力、鉛直力およびねじりモーメントの流体力を同時に考慮する必要があるものと考えられる。

橋梁に作用する水平方向の流体力は、橋梁の位置が陸上および水中によって式が異なる。橋梁の位置が陸上の場合には津波に対する構造物の構造設計法 (素案)<sup>7)</sup>、橋梁の位置が水中の場合には港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>8)</sup>を用い、それぞれに定義されている波圧式を波力の作用範囲で積分し、単位長さあたりの水平方向の流体力  $f_x$  にすると次式が算出される。

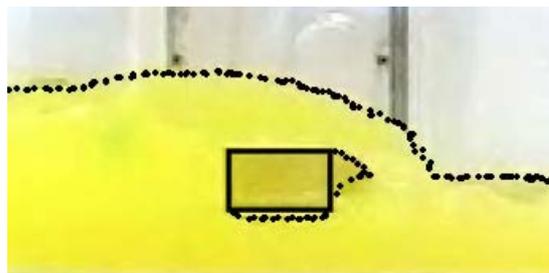
$$f_x = \frac{1}{2} \rho g \left\{ (12Hh - h^2) - (12Hh_p - h_p^2) \right\} \quad (1a)$$

$$f_x = 1.1 \rho g \left\{ \left( 2Hh - \frac{1}{3} h^2 \right) - \left( 2Hh_p - \frac{1}{3} h_p^2 \right) \right\} \quad (1b)$$

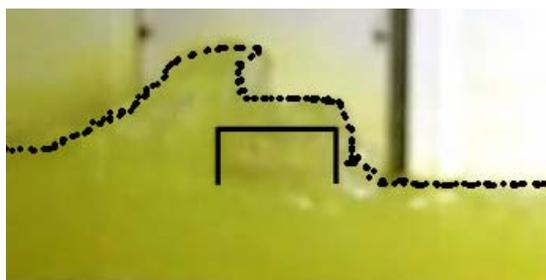
(1a)式は陸上、(1b)は水中における水平方向の単位長さあたりの流体力である。式中の  $\rho$  は海水の密度(1.04t/m<sup>3</sup>)、



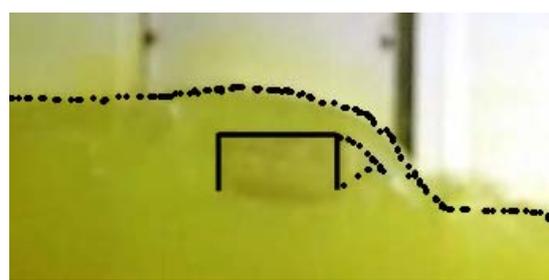
(a) 長方形断面 (津波作用直後)



(b) 長方形断面 (津波通過時)

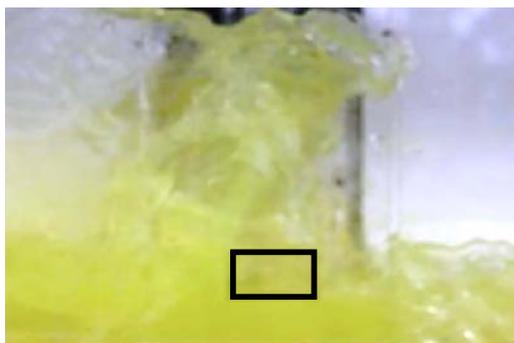


(c) みぞ形断面 (津波作用直後)

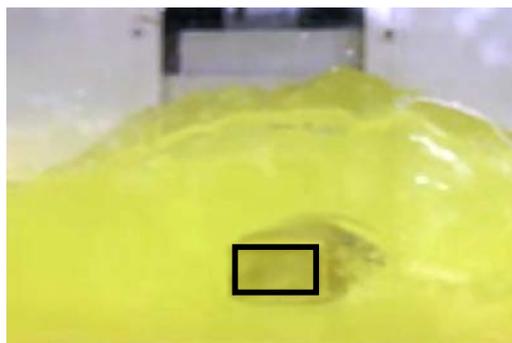


(d) みぞ形断面 (津波通過時)

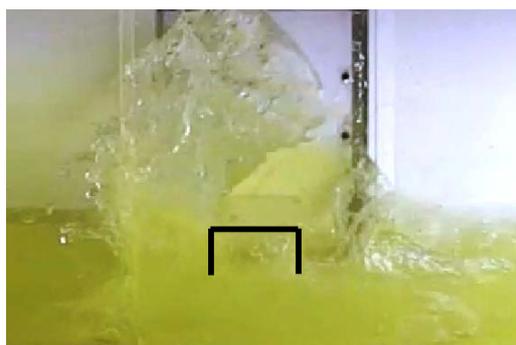
写真-2 津波作用時の橋梁周辺の流況 (浸水深 6.1cm : 貯水高 13cm)



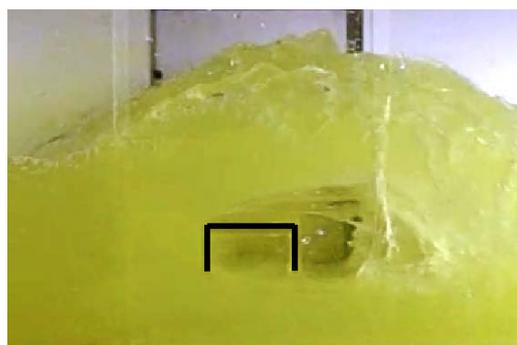
(a) 長方形断面 (津波作用直後)



(b) 長方形断面 (津波通過時)



(c) みぞ形断面 (津波作用直後)



(d) みぞ形断面 (津波通過時)

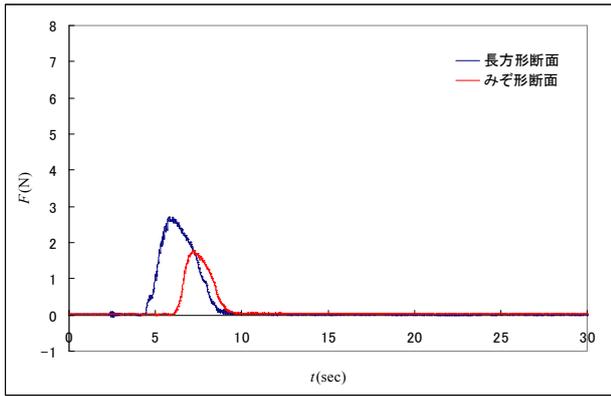
写真-3 津波作用時の橋梁周辺の流況 (浸水深 10.4cm : 貯水高 23cm)

$g$  は重力加速度( $9.8\text{m/s}^2$ ),  $H$  は浸水深,  $h_p$  および  $h$  は, それぞれ桁下高および上部構造までの高さである (図-2).

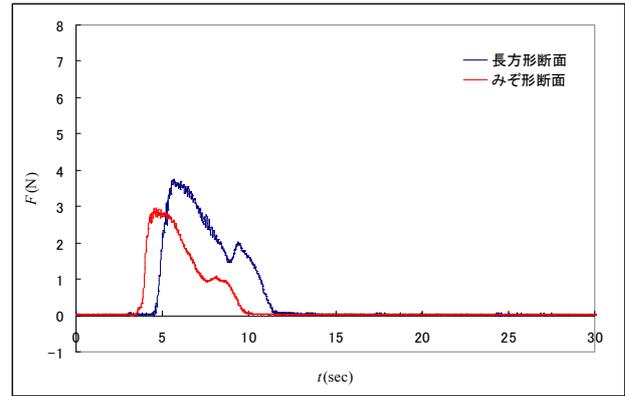
単位長さあたりの鉛直方向の流体力  $f_y$  は浮力と揚圧力の和を考え次式となる.

$$f_y = \rho g D H_i + 2 D \rho g H \quad (1c)$$

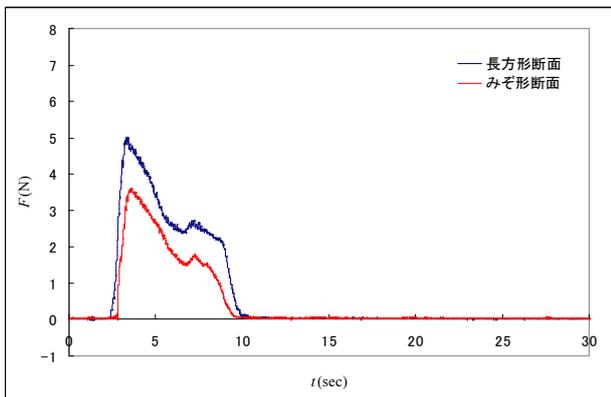
式中の右辺第1項は浮力, 第2項は揚圧力である. ここで,  $H_i$  は桁が浸水した高さ ( $H_i < \text{桁高}$ ),  $H$  は浸水深, また  $D$  は断面幅である (図-2). 本研究では津波による橋梁模型に作用する流体力および浸水深を測定することにより, 貯水高の違いによる流体力の作用状況および浸水深を検討し, 同時に設計式と比較し評価した.



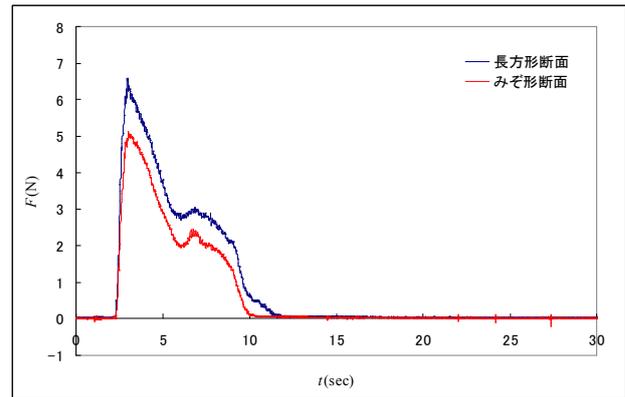
(a) 浸水深 6.1cm (貯水高 13cm)



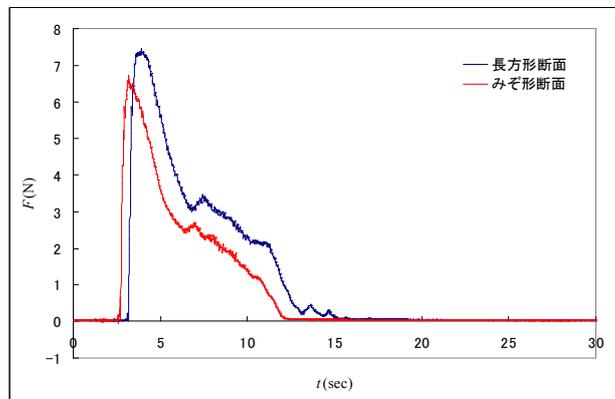
(b) 浸水深 7.3cm (貯水高 15cm)



(c) 浸水深 7.9cm (貯水高 17cm)



(d) 浸水深 9.7cm (貯水高 20cm)



(e) 浸水深 10.4cm (貯水高 23cm)

図-4 水平方向流体力の測定波形

## 2.3 実験結果

### (1) 津波作用時の橋梁周辺の流況

図-3 は橋梁模型を設置せずに計測した浸水深の測定波形である、ここでは一例として貯水高が 13cm と 23cm の測定結果を示した。横軸は時刻、縦軸は浸水深である。

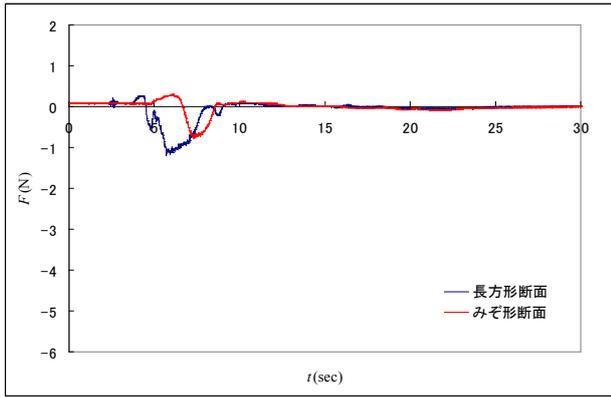
図より、貯水高が 13cm および 15cm では、浸水深がそれぞれ 6cm および 10cm 程度まで増加し、その後徐々に水深が低下していることがわかる。周期 1 秒あるいはそれ以下の変動がみられるが、段波に重なった波である。また、実験では桁下高を 6.0cm と設定したので、図より流体力作用時間はおよそ 5 秒から 10 秒程度であると考

えられる。

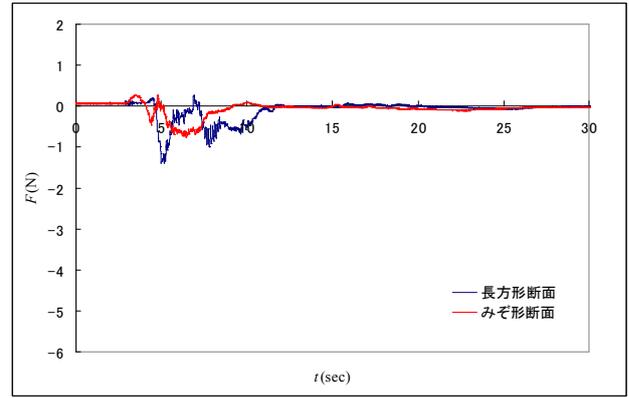
以下の検討で用いる浸水深は、浸水深の測定波形が最大となる値を使用する。その結果、各貯水高から得られる浸水深は表-1 のようになる。

写真-2 および写真-3 は津波作用直後および津波通過時における橋梁周辺の流況を示したものである。ここでは最小の浸水深(6.1cm)と最大の浸水深(10.4cm)の津波が作用したときの写真を示した。水表面がわかりにくい写真に関しては破線で水表面を示した。また、実線は長方形断面およびみぞ形断面を示している。

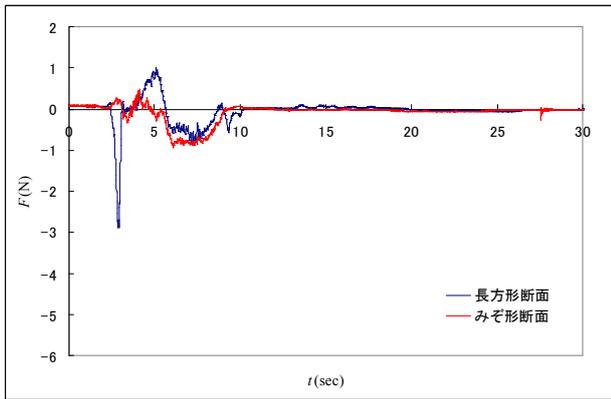
津波作用直後、浸水深が 6.1cm では衝突による水の越



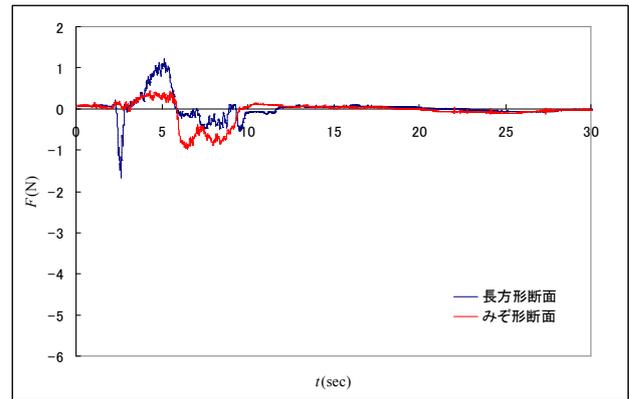
(a) 浸水深 6.1cm (貯水高 13cm)



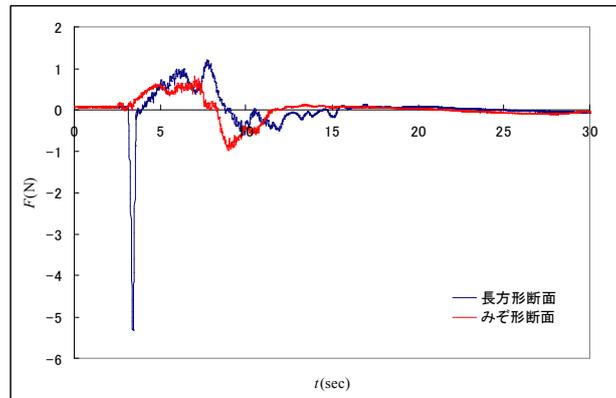
(b) 浸水深 7.3cm (貯水高 15cm)



(c) 浸水深 7.9cm (貯水高 17cm)



(d) 浸水深 9.7cm (貯水高 20cm)



(e) 浸水深 10.4cm (貯水高 23cm)

図-5 鉛直方向流体力の測定波形

波高は4cm程度と小さいために、模型に当たった波が反射し、それが入射波と重なり合って、重複波が模型周辺で形成される。しかし、浸水深が10.4cmになると、10cm以上の越波高になり、衝撃的な波が作用すると考えられる。

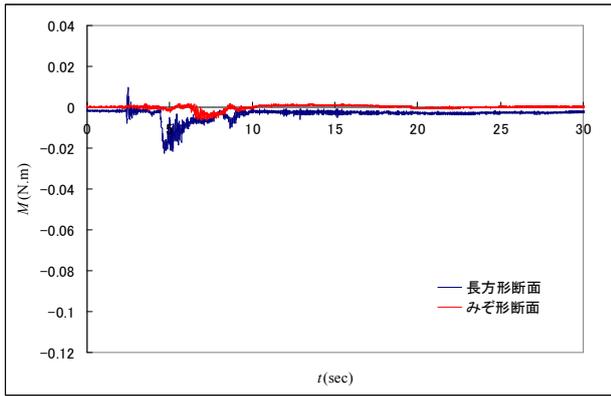
また長方形断面に津波が作用した場合、津波通過時に浸水深が6.1cmでは下部、浸水深が10.4cmでは下部および上部に剥離による空気層が見られる。この部分には負圧が作用していると考えられる。

みぞ形断面に津波が作用する場合、断面内部に空気が残ったままである。

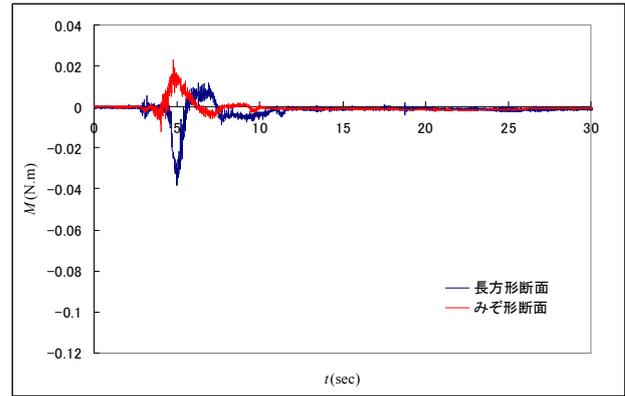
## (2) 流体力および回転力

図-4に水平方向の流体力の測定波形を示す。横軸は時間、縦軸は水平方向の流体力（下流の向きが正）である。それぞれの曲線で力の立ち上がりの時刻は津波が模型に作用し始めたときである。それぞれのケースでこの立ち上がりの時刻が異なるのは、測定開始時刻の違いによるものである。

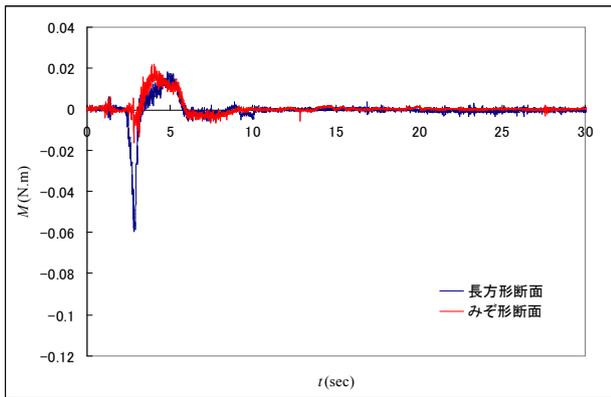
浸水深が6.1cmの場合、流体力の作用時間は短く波形は比較的単純である。しかし、浸水深が7.3cm以上になると流況の変化に伴い2つのピークを有する波形となる。さらに、浸水深が9.7cmを超えると始めのピークに達す



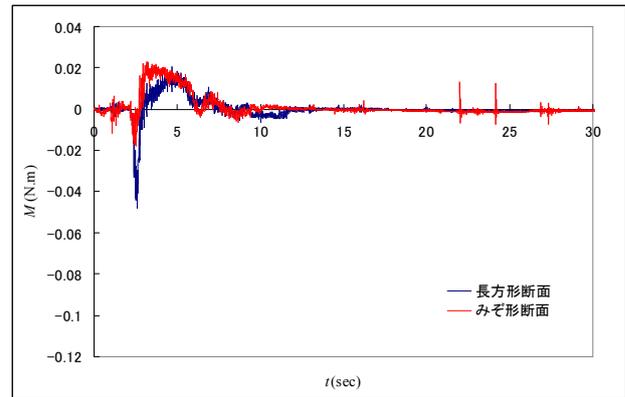
(a) 浸水深 6.1cm (貯水高 13cm)



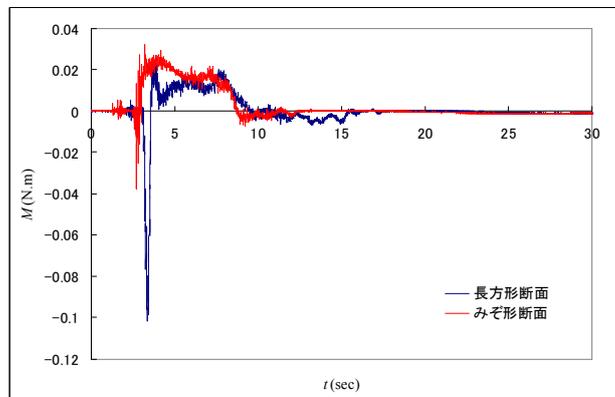
(b) 浸水深 7.3cm (貯水高 15cm)



(c) 浸水深 7.9cm (貯水高 17cm)



(d) 浸水深 9.7cm (貯水高 20cm)



(e) 浸水深 10.4cm (貯水高 23cm)

図-6 ねじりモーメントの測定波形

る時間が短くなり、流体力も大きくなる。写真-2 および写真-3 の(a)(b)に示したように、津波作用直後に衝撃的な流体力が作用していると考えられる。ピークを過ぎると水平力は次第に減少するが、再び大きくなる時がある。これは流体が模型の後部に回りこんだときに生ずる模型後部の負圧によるものと考えられる。

長方形断面とみぞ形断面とを比較すると、長方形断面のほうが全ケースで流体力が大きくなっている。これは一様流中の抗力係数が長方形の場合1.5であるのに対し、みぞ形断面では1.4と少し小さいことによるものと考えられる。

図-5 に鉛直方向の流体力の応答履歴を示す。横軸は時刻、縦軸は鉛直方向の流体力（上向きが正）である。

長方形断面の場合、浸水深が7.9cm以上になると、津波作用直後に大きな下向きの力がごく短時間作用する。長方形断面下側のの上流側角部から剥離流により生じた剥離バブルに伴う強い負圧によるものと思われる。それ以降の鉛直力は上向きの力となっている。浸水深が6.1cm, 7.3cmのときの鉛直力はほぼ下向きのみである。写真-2(a)に見られるように越波の量が少ないため鋭いピークを示す下向きの鉛直力は現れない。鉛直力が下向きとなるのは、浮力よりも下面の剥離流れによる負圧の

影響が大きいと考えられる。

みぞ形断面の鉛直力も長方形断面のそれとほぼ類似の特性を示すが、津波の作用直後の鋭いピークの大きさは小さくなる。長方形断面では、流況の写真-2(b), 3(b)に示すように、津波が作用した直後に模型下面に剥離が形成され、負圧が発生する。それにより大きな下向きの力が発生する。それに対して、みぞ形断面では、長方形断面同様に津波作用直後模型下面に剥離流が形成され負圧が発生するが、開断面であるため、写真-2(d), 3(d)のように断面内部に水が一定量入り込み、これが下向きの力を低減させたと考えられる。

図-6 は、ねじりモーメントの測定波形である。横軸は時刻、縦軸はモーメント（時計回りが正）である。長方形断面では津波作用直後に大きな負の鉛直力が作用するため、その影響でモーメントにも津波作用直後に大きな負のピークが現れている。正のモーメントの大きさは、みぞ形断面の方がやや大きい。

### (3) 津波の評価

ここでは実験で得られた流体力が、実際にはどれくらいになるかを求め、津波の設計式と比較する。

本研究では、フルード相似則により、次式によって実物の浸水深および流体力を計算した。

$$H_p = \frac{H_m}{\lambda} \quad (2a)$$

$$F_p = \frac{F_m}{\lambda^3} \quad (2b)$$

$H_p$  および  $F_p$  は実物の浸水深および流体力、 $H_m$  および  $F_m$  は実験の浸水深および流体力である。本論文では、実験における浸水深と区別するため、実物の浸水深を津波高と定義して以降述べてゆく。また  $\lambda$  は縮尺である。流体力は単位長さ当りの流体力として表した。

模型の縮尺を 1/150 と想定し、これらの式を用いて津波高および単位長さ当りの流体力に換算すると表-2 および図-7, 図-8 となる。ここで示す実物の流体力は、図-4 および図-5 で示した測定波形が最大になるときの値を実物の単位長さあたりの流体力に換算した値であり、鉛直方向の単位長さ当りの流体力については、上向き方向の最大流体力を示した。またデータ数は少ないが標準偏差を図中にプロットした。

表-2 より浸水深が 6.1cm の場合、津波高は 9.2m となる。その時の実物の水平方向の単位長さ当りの流体力は最大で、長方形断面の場合は約 0.3MN/m、みぞ形断面では約 0.2MN/m になる。浸水深が 10.4cm における津波高は 15.7m と浸水深 9.2cm の時と比べ、津波高は 6m 程度増加する。水平方向の単位長さ当りの流体力は長方形断面の場合約 0.8MN/m、みぞ形断面では約 0.7MN/m となり、浸水深が 6.1cm の時と比べて 2.5 倍から 3.5 倍になる。

表-2 実物の津波高

浸水深(cm)	津波高(m)
6.1	9.2
7.3	11.0
7.9	11.9
9.7	14.5
10.4	15.7

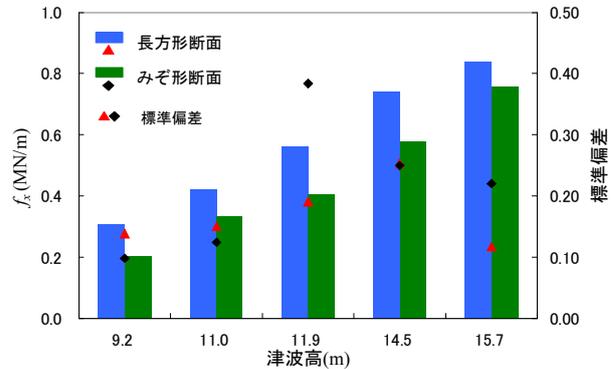


図-7 実物の水平方向の最大流体力

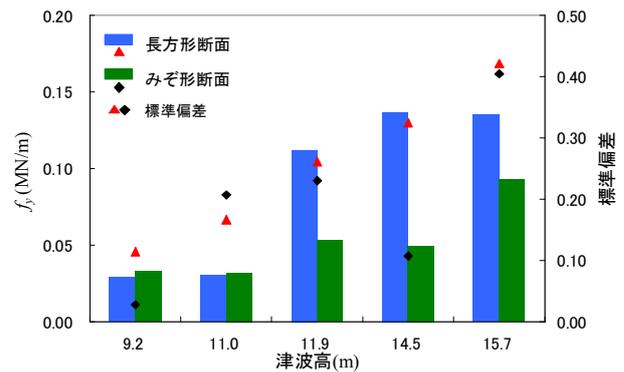


図-8 実物の鉛直方向の最大流体力

また図-8 より、浸水深が 7.3cm (津波高 11.0m) までは、鉛直上向きの単位長さ当りの流体力の最大値は両者とも 0.4MN/m 以下であるが、浸水深が 7.9cm (津波高 11.9m) 以上になると、鉛直上向きの単位長さ当りの流体力の最大値は約 1.5 倍から 3.5 倍と増加する。浸水深が 7.3cm から 7.9cm にかけて、津波高は 8%程度増加するのみであるが、単位長さ当りの流体力は 1.5 倍以上の急激な増加を示す。

力の増加は、津波高の増加のほかに、動圧力は流速の 2 乗に比例することからもわかるように、水平方向の流速の増加によるものといえる。その時の単位長さあたりの水平方向の流体力  $f_D$  は次式によって求められる。

$$f_D = \frac{1}{2} C_d \rho h_m v^2 \quad (2c)$$

$C_d$  は抗力係数 (長方形断面の場合 1.5)、 $h_m$  は橋梁の桁高である。

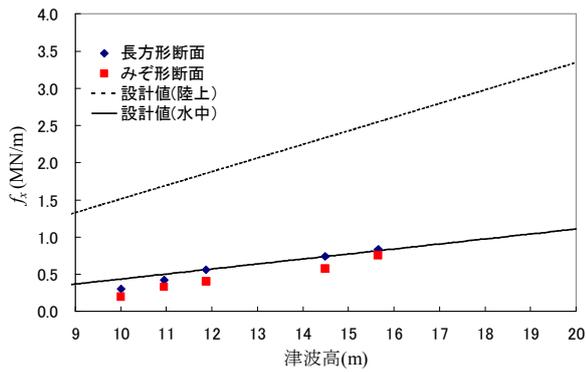


図-9 設計値との比較（水平方向の流体力）

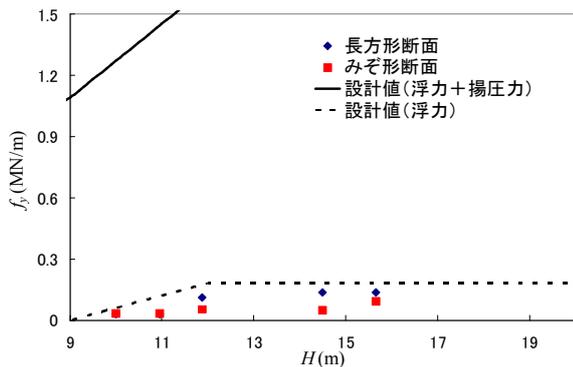


図-10 設計値との比較（鉛直方向の流体力）

浸水深が 10.4cm のときを例にすると、実験により得られた流速は 2m/s 程度であり、実物の津波流速に換算すると、およそ 24.5m/s になる。その時の長方形断面の水平方向の流体力は 1.4MN/m になり、実験により得られた水平方向の流体力よりも大きくなる。そのため、今後は実験時の流速を正確に測り再度評価する予定である。

図-9および図-10は(1a)式から(1c)式を用いた場合の単位長さあたりの流体力および、実験結果から算出した単位長さ当りの流体力を示したものである。図-9 は水平方向流体力の最大値、図-10 は鉛直方向流体力の最大値（ここでは上向き成分のみに着目する）であり、横軸は津波高、縦軸は単位長さ当りの流体力である。また図-9 の設計値（陸上）は(1a)式、設計値（水中）は(1b)式による単位長さ当りの流体力を示している。

図-9 より、長方形断面およびみぞ形断面ともに水平方向の流体力の実験値は(1b)式で示した水中の設計式に近い値となっている。

図-10 で示す鉛直方向の流体力は、両者ともに鉛直方向の流体力は設計式で示した鉛直方向の流体力を下回るため、(1c)式を用いれば、鉛直方向の流体力は安全側の設計となる。しかし、設計値との間に 10 倍以上の差異が見られる。例えば津波高が 15.7m では実験による流体力は 0.09MN/m から 0.14MN/m に対し、設計値では 2.3MN/m である。また図中に浮力のみ考慮した設計値

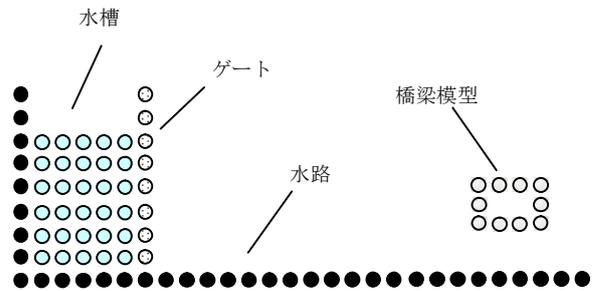


図-11 粒子法による解析モデル

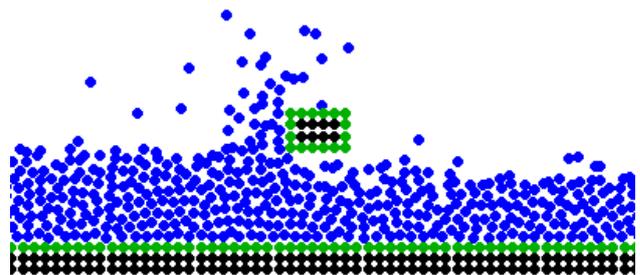


図-12 津波作用直後の橋梁周辺の流況

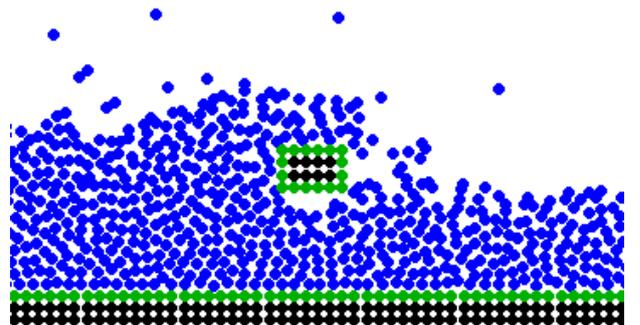


図-13 津波通過時の橋梁周辺の流況

((1c) 式第 1 項) を示したが、それに近い値を示している。よって、揚圧力がほとんど作用していない。

揚圧力の設計式は孤立波が作用した場合のように下面に水が充満している条件から導かれたものであるのに対し、実験では段波が作用しており、写真-3 に示したように桁下に空間が形成されることが、値の違いにつながったものと考えられる。

### 3. 解析による検討

#### 3.1 解析概要

ここでは粒子法の 1 つである MPS 法<sup>12)</sup> (Moving Particle Semi-implicit 法) を用いて解析を行った。実験装置を図-11 のようにモデル化した。この解析は 2 次元解析であるので、解析では貯水部の長さを実験装置の 3 倍にして貯水量を実験条件と合わせた。他の条件は実験と同じに設定した。

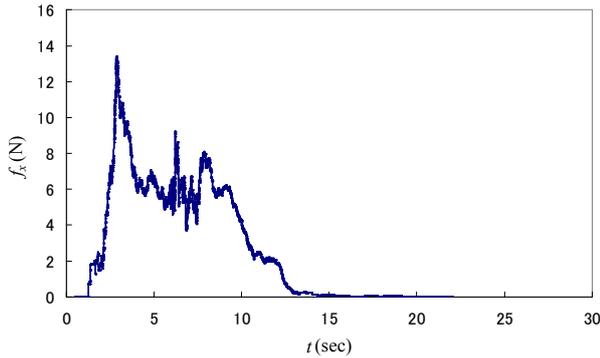


図-14 水平方向の流体力

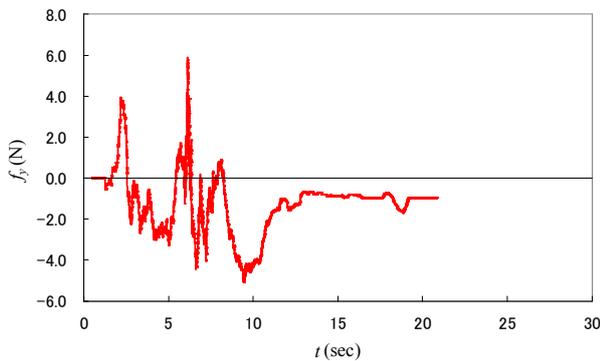


図-15 鉛直方向の流体力

解析では、流体粒子は非圧縮性とし、粒子の直径を 8mm、密度を  $1000\text{kg/m}^3$ 、接近した粒子の反発率を 0.15 に設定した。また計算の安定性を保つため、次式によりステップごとに時刻刻みを設定した<sup>12)</sup>。

$$\Delta t = \frac{l_0 C}{u_{\max}} \quad (3)$$

ここで、 $l_0$  は粒子間距離、 $C$  はクーラン数（本研究では 0.2 に設定）、 $u_{\max}$  は各ステップにおける絶対値が最大となる粒子速度である。

今回の研究では、数値解析によって、長方形断面周辺の流況および流体力が、うまくとらえられるかどうか検証した。

### 3. 2 津波作用時の橋梁周辺の流況

橋梁モデルを実験で用いた長方形断面とする。初期水位を 23cm に設定した場合の解析結果を示す。

図-12 は津波作用直後、図-13 は津波通過時における橋梁周辺の流況を示したものである。図中の青色の粒は流体粒子、中央にある四角は橋梁断面を表している。

津波作用直後の図-12 を見ると、粒子が橋梁に作用した時における越波を見ることができる。これは写真-

3(a)に示した実験による越波と類似している。また図-13 の津波通過時の橋梁周辺の様子から、橋梁下部および右部に空気の層が見られる。また、写真-3(b)とも同じである。

図-14 および図-15 は粒子法により計算された流体力である。横軸は時刻、縦軸は単位長さあたりの流体力である。平均時間 0.5 秒で移動平均した。

図-14 の水平方向の流体力の波形と図-4(e)の測定波形を比較すると、津波作用後の波形の立ち上がりや津波作用時間など波形は図-4(e)と似た波形となる。図-15 の鉛直方向の流体力の波形と図-5(e)の測定波形を比較すると、異なった波形を示している。また測定波形で見られる津波作用直後の急激な下向きの力も見られない。

水平方向の流体力は、解析では  $14\text{N/m}$  程度である。しかし実験では図-4(e)より  $7\text{N}$  程度になり、これを単位長さあたりの流体力に換算（実験の模型の長さが  $20\text{cm}$  であるので 5 倍する）すると  $35\text{N/m}$  となり、実験結果に比べ 0.4 倍となっている。

同様に鉛直方向の流体力においても、下向きの力は実験では図-4(e)より単位長さあたりの流体力に換算すると  $25\text{N/m}$ 、解析では  $5\text{N/m}$  と 1/5 程度になる。なお、鉛直方向の流体力が 0 に収束しないのは、水粒子が模型に残ったためである。

両者とも実験結果と比べ浸水深が少し小さく、また解析粒子が 8mm と大きいために、水表面などの粗さがあり、滑らかな水表面を表現できず、流体力も一致しなかった。しかし流況および水平方向の流体力の波形はおおむね実験値と同様の傾向を示した。今後は、粒子の大きさをより小さくすることで詳細な解析を進める予定である。

## 4. おわりに

本研究は、津波が橋梁に作用したときの流況と流体力を実験および解析により検討した。これらによって得られた結果は以下の通りである。

- ① 浸水深が小さい場合、橋梁から跳ね返った波（反射波）と前進する波（入射波）とが重なり合い、重複波が形成される。しかし、浸水深が一定以上になると、重複波は形成されずに、衝撃的な波が橋梁に作用する。
- ② 水平方向の流体力の測定結果より、長方形断面およびみぞ形断面ともに、浸水深が 7.3cm 以上で流況の変化に伴い 2 つのピークを有する波形となる。さらに浸水深が 7.9cm 以上になると、始めのピーク値が短時間になり、流体力は急激に増加する。
- ③ 長方形断面における鉛直方向の流体力は、津波作用直後下向きに大きな力のごく短時間発生する。下面に発生する剥離バブルによる負圧に起因するものと考えられる。その後は上向きの力が生じるが、浮

力よりも下面の剥離流れによる負圧の影響が大きくなると、再び下向きの力が生じる。また、みぞ形断面では、津波作用直後の大きな下向きの力は生じない。

- ④ 実験結果から実際に作用する単位長さ当りの流体力を算定すると、わずか 8%程度の津波高の増加で水平方向の単位長さ当りの流体力が 2.5 倍以上、鉛直方向の単位長さ当りの流体力が 1.5 倍以上になるケースが存在する。
- ⑤ 長方形およびみぞ形断面の流体力の実験値を津波外力の設計式と比較すると、水平方向の力は水中に構造物が存在する場合の式とほぼ一致する。また鉛直上向きの力は浮力と同程度かそれ以下の値であった。
- ⑥ MPS 法を用いて数値解析を行った。その結果、粒子の粗さはあるが、津波作用時における橋梁周辺の流況の様子を定性的には表現できた。

#### 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) 首藤伸夫，今村文彦，越村俊一，佐竹健治，松富英夫：津波の事典／朝倉書店，2007.
- 3) 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.
- 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) 有川太郎：津波力について，日本地震工学会誌，No.6, pp.13-18, 2007.
- 6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999.
- 7) 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.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I. 共通編，II. 鋼橋編，2002.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 杉本健，運上茂樹：津波の橋梁の被害メカニズムに関する実験的研究，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. 97-100. 2008.
- 12) 越塚誠一：粒子法，丸善，2005.

(2008 年 9 月 18 日受付)