# 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

Study on relation of velocity and wave height to hydrodynamic force on bridges by tsunami

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 paper shows the relation of wave velocity and wave height to hydrodynamic force in tsunami act on a bridge. This research conducted hydraulic experiments using bridge models of rectangular and channel form with a width to height ratio of 1, 2 and 4. The experiment measured hydrodynamic force, wave velocity and wave height. As a result, in case of bridge models of rectangular form, hydrodynamic force in vertical direction occured in a downward direction immediately after tsunami acts on a bridge. On the contrary, the channel form model was subjected to weak downward force due to the water flow inside the model. Hydrodynamic force to the bridge in horizontal direction was one to five times larger than the wave force.

*Key Words: tsunami, hydrodynamic force, wave force, drag coefficient キーワード: 津波, 流体力, 流力, 抗力係数* 

1. はじめに

近い将来発生する東海,東南海,南海地震によって発 生する津波によって,沿岸部の地域は甚大な被害を受け ることが予測され,それによる対策が行われている.橋 梁構造物も例外ではなく,津波による被害を受ける可能 性が高い.現在,ビル等の建築構造物については津波に よるガイドライン<sup>1)</sup>,港湾等の構造物については基準・ 同解説<sup>2)</sup>によって津波対策が行われている.しかし,橋 梁構造物における津波の対策については,ガイドライン などにより規定されていない.

これまでに港湾や堤防に作用する流体力や設計におけ る津波外力の評価方法についての研究<sup>3)</sup>は行われてきて いる.橋梁構造物に作用する流体力に関する研究は,始 まったばかりであり,更なる研究が期待されている<sup>4)-10)</sup>.

津波が橋梁に作用する場合,水平方向の力が桁流失に 最も影響があると考えられ,スマトラ沖で発生した津波 による橋梁流失被害をもとに,橋梁構造物の抵抗力が水 平方向の力に対して安全であるか検証されているものも ある<sup>11)</sup>.しかし、これまで行われてきた研究では水平方向の津波外力については検討されているが、鉛直方向の 津波外力やモーメントについてはあまり検討されていな い.鉛直方向の津波外力やモーメントの影響で、支点部 が負反力になり、支承部が破壊することで、桁が流失す る可能性もあり、水平方向の津波外力と併せて、鉛直方 向の津波外力やモーメントを検討する必要がある.

また津波外力は、桁の断面形状や津波の速度および波 高によって異なることが考えられ、津波外力を正確に評 価するためには、以上の点について総合的に検討する必 要があるが、異なる断面形状での津波作用時の流体力を 検討した研究は少ない.

さらに津波作用時の橋梁に作用する津波外力と流速お よび波高との関係を定式化することができれば、津波作 用時の津波外力の設計を行うことが可能になる.

本研究では、津波外力を正確に評価するための基礎的 なデータを得ることを目的として、桁断面の異なる橋梁 模型を作成し、津波が模型に作用するときの津波外力を 水理実験により検討した.同時に津波の波高および流速 を計測し、橋梁模型に作用する津波外力との関係を検討 した.本研究では基礎的な研究として、ボックスガーダ ー橋およびプレートガーダー橋にみなした、長方形断面 およびみぞ形断面を用いて検討を行った.

### 2. 断面形状を変化させた場合の津波外力に与える影響

本章では、津波が橋梁に作用するときの津波外力や水 位、流速について、水理実験によって検討する.

#### 2.1 実験概要

本実験で使用する実験装置は、図-1に示す長さ 4m (貯水部:長さ2m,幅0.6m 水路部:長さ2m,幅



図-2 模型設置状況図

0.2m)の実験装置を用いて実験を行った.図-1に示す 位置に模型を設置し、図-2(a)に示したように片持ち梁 形式としてロードセルで支持した.桁端部は図-2(b)に 示したように、模型端板と側壁との間に数 mm の間隔を 持たせて設置した.座標軸の向きは図-1 に示したとお りである.今回の実験では、橋梁は陸上にあると想定し、 静水深は考えず、水路に勾配をつけなかった.橋梁模型 は模型幅と模型高の比(*B/D*)が 1(20mm/20mm), 2(40mm/20mm)および 4(80mm/20mm)の長方形断面およ びみぞ形断面を用いた.

実験では、貯水部に一定の高さになるまで水を貯め、 水槽部と水路部の境界に設置したゲートを一気に引き 抜くことによってゲート急開流れを発生させ、それが橋 梁模型に作用することで生じる津波外力を計測した.

同時に水深を図-1 に示した箇所で計測した.水深は 抵抗線式の波高計を用いた.本論文では模型を設置して いない状態で計測した水深を水位と呼ぶ.

本研究では簡易的な流速計測法を採用し、ゲートを開 扉からゲート急開流れが波高計に到達した時間を求め、 ゲートから波高計の距離をこの時間で割ることで、流速 を算出した.ここで求めた流速はゲートから放出された 流れの流速である.実験では、貯水高を13cmから25cm まで変化させて、そのときに橋梁模型に作用する津波外 力や水位を計測した.計測におけるサンプリング間隔は 0.01秒に設定した.計測は各ケース3回ずつ行い、模型 の固有振動数(水平方向11.0Hz,鉛直方向18.0Hz)の成分 等のノイズをカットするために、5Hz以上の成分をカッ トして波形を処理した.固有振動数は、載荷した荷重を 一気になくしたときの波形から算出した.

本研究では、橋梁模型から lm 離れた位置にハイスピードカメラ(300 コマ/秒)を設置して橋梁周辺の流況を 撮影した.また、橋梁模型に流れが到達した時刻を、津 波外力が最初に作用した時刻として検討を行った.

#### 2.2 貯水高と水位の関係

図-3 は水位の時刻歴の一例である. 横軸は時刻, 縦 軸は水位である. いずれのケースにおいても, 津波が水 位計に達すると急激に水位は上昇する. その後, 徐々に 水位は低下する. また図中に最高の水位 h<sub>max</sub> を示した.

図-4 に貯水高と最高水位の関係を示した.図より, 貯水高と最高水位には線形の関係があると考えられる. なお本論文ではこれ以降,貯水高ではなく図-3 および 図-4 で示した最高水位という表現をする.

## 2.3 桁断面の違いによる津波外力の影響

### (1) 実験波形の処理

図-5 および図-6 は水平方向および鉛直方向の津波 外力のノイズ除去前とノイズをカットした結果である. 横軸は時刻,縦軸は津波外力である.一例として, *B/D*=2 の長方形断面で最高水位が 11.1cm の結果を示した.





図-5(a)および図-6(a)より,津波が作用している時間 は模型振動や電気信号などのノイズが発生している. 5Hzのローパスフィルタを通すことにより図-5(b) や図 -6(b)のように高振動成分がカットされ,津波外力のみ の波形になる.ノイズカットした方が,種々の断面を有 する桁に作用する津波外力の相互比較結果がわかりや すいと考え,本論文ではフィルタ処理した波形を用いて 考察することとする.

同じ実験ケースの測定を3度行った.水平の方向の力 のピーク値のばらつきは 5%以下であったが,鉛直方向 の津波外力のばらつきは最大で約50%あった.そのため, 波形は鉛直方向の津波外力の最大値の中間のケースを 記載した.以下にその結果を示す.

#### (2) 水平方向の津波外力

図-7 は水平方向の津波外力の応答波形である. 横軸 は時刻,縦軸は水平方向の津波外力である. 時刻はゲー

(a) ノイズカット前



(b) ノイズカット後図-5 ノイズカットの影響(水平方向の津波外力)

ト開扉時を0秒にあわせた.各水位における波形は *B/D* が異なってもほぼ同じである.最高水位が 8.1cm のとき



図-7津波外力(水平方向)の計測波形(青:長方形断面赤:みぞ形断面)

はピークの山は1つである.しかし最高水位が8.4cmになると、5秒付近でピークの山が2つになる.最高水位が10.6cmになると、津波が橋梁模型に達してからピーク値に達するまでの時間が短く衝撃的な力が作用し、2つ目のピークの山がなだらかになる.模型に作用した流れが反射し、遡上した流れが再び流下して模型に作用することから、水位が大きくなると、重複波が発生することでピーク値が2つ発生すると考えられる.

津波外力を考えると, B/Dが1の場合が大きな津波外力となり, B/Dが2や4ではB/Dが1の場合に比べ,約10%から20%程度低下する. 写真-1に水平方向の津波

外力が最大になる時刻の流況を示した. どの断面でも, 断面上部前縁および下部前縁で剥離し,剥離流が発生する. B/D が4の場合,剥離した流れが模型後部に回りこんでいる様子が見られる. そのために B/D が1の場合に比べ津波外力が低下したと考えられる.

長方形断面の場合, B/D が大きくなると津波外力は低下するが,みぞ形断面の場合は津波外力の低下はなく,各水位で津波外力はほぼ同じ値になる.先ほど同様に水平方向の津波外力が最大になるときの流況を写真-2 に示した.みぞ形断面では写真-2(b)に示したように模型後部への剥離流れの巻き込みが見られない.これにより,



(a) B/D = 1



(a) B/D = 1



(b) *B/D* =4 写真-1 長方形断面の流況(最高水位 11.1cm)

津波外力が低下しなかったと考えられる.

### (3) 鉛直方向の津波外力

図-8 は長方形断面における鉛直方向の津波外力の計 測波形である. 横軸は時刻, 縦軸は鉛直方向の津波外力 である. B/Dが1の場合, 最高水位が9.7cmになると, 1 秒から2秒にかけて下向きの力が一瞬作用する. その後 は上向きの力が作用する. B/D が2の場合も同様に最高 水位が 9.7cm になると急激な下向きの力が一瞬作用する. その後上向きの力が作用するが、再び下向きの力が作用 する. 上向きの力が作用する時間は、最高水位が高くな ると長くなる.後半で下向きの力が作用する時間は、水 が流れ終わりに差し掛かったあたりで見られるので、津 波が一定量流れ続けている間は、上向きの力が常時作用 していると考えられる. B/D が4になると最高水位が 8.1cm の場合でも、下向きの力が作用する. また最高水 位が9.7cmになると、津波作用直後に急激な下向きの力 が短時間作用する. その大きさは, 最高水位が 9.7cm の 場合, B/D が1の津波外力の約9倍, B/D が2の津波外 力の約2倍作用する. B/Dが2の場合は下向きの力が作 用した後に上向きの力が作用するが, B/D が4の場合は ほとんど見られず、上向きの力が発生しても、作用時間 はわずかである.よって、津波が一定量流れ続けている 間は、下向きの力が常時作用していると考えられる.



(b) *B/D* =4 写真-2 みぞ形断面の流況(最高水位 11.1cm)

B/Dが1の場合,写真-1(a)に示したように,津波通過時は断面上部および下部に同じ形の剥離流が形成され, それにより断面上部および下部に生じる負圧がキャンセルされ,浮力のような上向きの力が作用する. B/Dが2の場合でも同様である<sup>12)</sup>.しかしB/Dが4になると,断面下部に生じる剥離流が,断面上部に生じる剥離流よりも大きくなるために,断面下部の負圧により下向きの力が作用したと考えられる.

みぞ形断面では長方形断面の場合と異なり,津波作用 直後の急激な下向きの力は作用しない.津波作用直後の 流況を写真-3 に示す.比較のために長方形断面の結果 も合わせて示す.長方形断面の場合,津波作用直後模型 下部で剥離流れが発生し,断面下部に負圧が発生すると 考えられる.この負圧によって下向きの力が生じる.み ぞ形断面の場合も長方形断面の場合と同様に津波作用 直後模型下部の上流側で剥離流れが発生し,断面下部が 負圧になる.しかし,みぞ形断面では模型内部に水が流 入する.これによって断面下部の負圧が小さくなったた めに下向きの力が生じないと考えられる.津波通過時は 長方形断面とほぼ同じ流れになるため,長方形断面とほ ぼ同じ波形を描く.津波外力も最高水位が9.7cm以上に なると大きな変化はない.

なお, 津波終了時に下向きの力が残っているのは, 模





(a) 長方形断面 (B/D=4)(b) みぞ形断面 (B/D=4)写真-3 津波作用直後の流況 (最高水位 11.1cm)



図-9 津波外力(モーメント)の計測波形(青:長方形断面 赤:みぞ形断面)

型上部に水が残った影響である.

#### (4) モーメント

図-9 は長方形断面およびみぞ形断面における y 軸回 りの津波外力(モーメント)の計測波形である. 横軸は 時刻,縦軸はモーメントである.

長方形断面の場合, B/D が1のケースでは,最高水位 が高くなっても波形に大きな変化はなく,モーメントも 時計,反時計回りのモーメントともに0.03N.m以下であ る. B/D が2以上になると,最高水位の増加にしたがっ て反時計回りのモーメントが増加する.波形は鉛直方向 の津波外力の波形によく似ている.水平方向の津波外力 が作用する面積に対して,鉛直方向の津波外力が作用す る面積の方が大きいために,モーメントも鉛直方向の津 波外力の影響を受けたと考えられる.みぞ形断面においても, B/Dが1の場合は両モーメント方向ともに0.03N.m 以下である. B/Dが2以上では最高水位が9.7cmを超えるとモーメントの大きさはほとんど変わらない.長方形断面と同様に鉛直方向の津波外力の影響を受けている. 長方形断面と異なり,時計回りのモーメントが作用する時間が存在する.

モーメントが大きくなると上流側または下流側の支 点が負反力になる可能性がある.そのために鉛直方向や モーメントの津波外力も考慮する必要がある.

### 3. 波力および浮力の検討

本章では実験で得られた津波外力を,津波の最高水位 にもとづく静水圧から桁に作用する力に換算した場合, 津波外力の何倍になるかを数値計算により検討する.

### 3.1 静水圧および浮力の算定

波圧は津波が模型に作用した場合,本研究では図-10 のような圧力分布を考える.模型高Dの範囲に作用する 力を静的な力に換算したものを,本論文では波力Pと定 義する.波力は模型が完全に浸水するかしないかで次式 のように分けられる.

$$P = \rho g H l \left( H - H_p \right) - \frac{1}{2} \rho g l \left( H^2 - H_p^2 \right)$$
$$\left( H_p \le H \le H_D \right)$$
(1a)

$$= \rho g H D l - \frac{1}{2} \rho g l \left( H_D^2 - H_P^2 \right) \quad \left( H_D \le H \right)$$
 (1b)

ここで, $\rho$ は水の密度(1000kg/m<sup>3</sup>),gは重力加速度(9.8m/s<sup>2</sup>), *l* は模型の長さ(0.2m), *D* は模型高,  $H_D$ ,  $H_P$ はそれぞれ 河床から模型上までの距離(0.085m)および河床から模型 下までの距離(0.065m)である. *H* は模型を設置したとき の水位である.

浮力も同様の考えで、次式のように分けられる.

$$Q = \rho g B l \left( H - H_P \right) \qquad \left( H_P \le H < H_D \right) \tag{2a}$$

$$= \rho g B D l \quad \left( H_D \le H \right) \tag{2b}$$

ここでBは模型断面幅である.

### 3.2 模型に作用するカ

(1) 波力

図-11 は長方形断面に作用する波力と模型を設置したときの水位の時刻歴波形である. 横軸は時刻,縦軸は 模型を設置したときの水位および波力である.

模型を設置したときの水位が小さい場合では, 波力は 最大で0.5N 程度である.これを前章で示した水平方向の 津波外力の計測波形(図-7)と比較すると.津波外力 の計測位置と模型を設置したときの水位の計測位置に 若干の距離があるため, 波形に多少のズレがあるが, 水 平方向の津波外力は波力の約2倍から4倍になる.ただ し *B/D*=4の長方形断面はほぼ同じ大きさになる.

模型を設置したときの水位が大きい場合では,波力は 最大で1.0N程度である.先ほどと同様にこれを前章で示 した水平方向の津波外力の計測波形と比較すると.水平 方向の津波外力は波力の約3.0倍から5.0倍になる.

また,津波に対する構造物の構造設計法(素案)<sup>1)</sup>の 設計法を橋梁に対して波力を算定すると,最高水位が 8.1cmの場合3.2N,最高水位が11.1cmでは5.0N程度に



なり,実験で得られた津波外力の約1.0から2.0倍になる. 津波外力と波力の関係を示したのが図-12である.横

軸は水位,縦軸は津波外力の最大値と波力の最大値の比 である.合田式<sup>2)</sup>や朝倉式<sup>1)</sup>では図-10で示した底面の *pgH*を1.1倍や3.0倍しているが,本研究の結果では,*pgH* を1.0倍から5.0倍すると実測値となっている.よって, 水平方向の津波外力は波力の1.0倍から5.0倍の力が橋梁 模型に作用する.

以上の結果より,桁に対する相対的な水深をもとに,式(1a)(1b)で求めた波力に断面形状に関する係数を乗じることで,水平方向の津波外力を概略的に見積もることができる.この論文で調べた長方形断面およびみぞ形断



面の範囲では式(1a)(1b)で求めた計算値のおよそ 3~5 倍の力となっている.

(2) 浮力

図-13 は長方形断面模型を設置したときの水位と浮 力の関係を示したものである. 横軸は時刻,縦軸は浮力 および模型を設置したときの水位である.

津波が模型に接すると、浮力は急激に増加し、最大の 浮力に達する.模型を設置したときの水位が小さい場合 は、模型上を越波する時間が短いため、最大の浮力にな る時刻は5秒程度である.水位が大きい場合は、津波が 模型上を越波している時間が長いため、最大の浮力になる時間も約2倍になる.

図-8 で示した鉛直方向の津波外力の結果と比較する と、B/Dが1の場合、水位が小さい場合、浮力の最大値 は0.8N程度である.また鉛直方向の津波外力は主に上向 きの力がほぼ常時作用している.水位が大きい場合にお いても、長方形断面では津波作用直後に下向きの力が作 用するが、それ以外では常に上向きの力が作用している. B/Dが2においても津波作用直後(長方形断面)や鉛直 方向の津波外力の終了付近では下向きの力が作用する が、津波通過時は常に上向きの力が作用していることか ら、前章で述べたように、模型上下の負圧が相殺された ことで、浮力のような上向きの力が波形に表れたと考え られる.

*B/D*が4になると、一部上向きの力が作用しているが、 常に下向きの力が作用している. *B/D*が4のようなケー スでは、下面に生じる負圧が上面に生じる負圧よりも大 きくなるために、相対的に大きな下向きの力が働き、浮 力のような上向きの力が明確には波形に現れない.

### 4. 流速・水位と津波外力の関係

津波が橋梁に作用した場合の橋梁模型に作用する津 波外力は、到達する津波の波高や流速と関係がある.本 章は橋梁模型に作用する津波外力と流速、最高水位との 間にどのような関係があるか検討する.

#### 4.1 最高水位と流速の関係

最高水位と流速の関係を示したものを図-14 に示す. 横軸は水位,縦軸は流速である.先ほど述べたように, ここでの流速はゲートから放出された流れの流速であ る.

全体的に,最高水位が増加すると流速は線形的に増加 する傾向があり,最高水位が11.1cmにおける流速は,最 高水位が7.0cmの場合の流速の約1.5倍になる.

### 4.2 津波外力と最高水位の関係

#### (1) 津波外力の無次元化

橋梁模型に作用する津波外力は流速の影響を受ける と考えられる.よって得られた津波外力を速度圧に代表 面積をかけたもので割り無次元化して表すと次式とな る.

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho A U^2}$$
(3a)

$$C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho A U^2}$$
(3b)





$$C_{M} = \frac{M_{y}}{\frac{1}{2}\rho ABU^{2}}$$
(3c)

 $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$  はそれぞれ抗力係数, 揚力係数, モーメン ト係数である. また式中の $\rho$  は水の密度(1000kg/m<sup>3</sup>), *B* は模型幅, *A* は流体力の作用面積であり, 本研究では水 平 方 向 の 津 波 外 力 が 作 用 す る 面 積 (0.02m × 0.2m=0.004m<sup>2</sup>)である. また津波外力は, 各方向の最大値 を用いた.

(2) 最高水位の増加が津波外力に与える影響

図-15 は最高水位と津波外力の関係を示した図である. 縦軸は抗力係数である.横軸は最高水位を河床から 模型下部までの高さで割ったものであり、本研究では浸 水比と呼ぶ.

$$H_r = \frac{h_{\max}}{H_P} \tag{4}$$

ここで $H_r$ は浸水比, $h_{max}$ は最大水位, $H_p$ は河床から模型 下部までの高さ(65mm)である.

図から, B/Dが4の長方形断面の抗力係数が小さく,そのケースの最大値との差が最大で0.3 程度小さくなる. 前述で示したように, B/Dが4の長方形断面は他のケースに比べて,水平方向の津波外力が小さい.そのために,抗力係数も小さくなる.また浸水比が増加すると,抗力係数は増加し,一定の関係がある.よって,津波外力を見積もる場合,各断面ケースにおける係数を与えることで,浸水比と抗力係数の関係式を立てることは可能である.本研究の場合,最大値を考慮すると,抗力係数を0.8 程度の値となる.

図-16 は揚力係数と浸水比の関係を示したものである. 横軸は浸水比,縦軸は揚力係数である.ここでは下 向きの力が最大となるときの揚力係数と,上向きの力が 最大となるときの揚力係数を示した.

図-16(a)に示す下向きの力が最大となるときの揚力



(b) 上向きの力の揚力係数 図-16 最高水位と揚力係数の関係

係数は、長方形断面の場合は浸水比が大きくなると揚力 係数は線形的に小さくなる.みぞ形断面では浸水比が大 きくなっても揚力係数は大きくならず、一定値で収束す る.よって津波外力を規定する場合、抗力係数の場合と 同様に、浸水比を考慮することにより揚力係数を見積も ることは可能である.ここでも抗力係数と同様に最大値 を考慮すると、断面形状によって異なるが、揚力係数は -0.1から-1.3程度の値となる.図-16(b)に示す上向きの 力が最大となるときの揚力係数では、浸水比が 0.2程度 まではほぼ一定の値であるが、それ以外のケースではそ





れぞれの浸水比でばらつきがある.

図-17(a)で示した反時計回りのモーメント係数では, 浸水比が大きくなるにしたがって,モーメント係数は線 形的に低下する.図-17(b)で示した時計回りのモーメン ト係数は,一部ばらつきが見られるが,浸水比に関係な く,モーメント係数はほぼ一定値を示している.抗力係 数や揚力係数との場合と同様に,津波外力を見積もる場 合,反時計回りのモーメント係数は浸水比を考慮して線 形的に,時計回りのモーメント係数は最大値を考慮して, 0.01 から 0.1 程度の値となる.

### 5. おわりに

本研究は津波が作用した場合の橋梁基礎断面模型に作 用する津波外力が,最高水位や津波外力とどのような関 係であるかを計測結果や流況から検討した.得られた結 果は以下のとおりである.

 鉛直方向の流体力は、長方形断面では津波作用直後に模型下部に生じた剥離による負圧のために急激な下向きの力が作用する。みぞ形断面の場合、 模型底部が開いているため上流側の模型底部から 剥離した流れが模型内部に流入するために負圧が キャンセルされ、急激な下向きの力は生じない。 その後の鉛直方向の津波外力は両断面ほぼ同じ波 形になる.

- ② 波力に形状係数を用いることで、最高水位から津 波外力を概略的に見積もることができる.水平方 向の津波外力と波力を比較すると、水平方向の津 波外力は波力の1.0 倍から 5.0 倍になる.
- ③ 津波外力と浸水比の関係を調べた結果,次のこと が分かった.浸水比が増加すると,抗力係数は増 加,下向きの揚力係数および反時計回りのモーメ ント係数が減少する.またそれぞれの断面形状か らも浸水比と抗力係数などとの関係が線形関係に ある.

### 謝辞

本研究の実施にあたっては、科学研究費補助金の若手 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)」および基盤研究(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

- 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.
- 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 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.
- 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.
- 5) 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.
- 6) 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. 69-74,2009.
- 7) 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.81-84,2009.
- 8) 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. 85-90, 2009.

- (1) 庄司学,森洋一郎:桁橋の津波被害再現実験,第53
   回海岸工学論文集, pp.801-805, 2006.
- 10) 鴫原良典,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,第30回地震工学研究発表論 文集,Vol 30(CD-ROM), Paper No.6-0001, 4 pages, 2009.
- 宮原健太,幸左賢二,二井伸一,庄司学:スマトラ 沖地震で発生した津波被害の詳細分析,第30回地震 工学研究発表論文集, Vol 30(CD-ROM), Paper No.6-0002, 6 pages, 2009.
- 12) 中尾尚史,伊津野和行,小林紘士: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,地震工学論文集,土木学会,Vol.30.(掲載決定)
   (2009年9月24日受付)