

河口付近の橋梁に作用する津波流体力に関する実験的研究

Experimental Study on Tsunami Fluid Force Acting on Bridge Beam near River Mouth

荒木進歩¹・中嶋 悠²・出口一郎³・伊藤禎和⁴

Susumu ARAKI, Yu NAKAJIMA, Ichiro DEGUCHI and Sadakazu ITOH

Horizontal and vertical tsunami fluid forces acting on a bridge beam near the river mouth were measured with and without river flow in hydraulic experiments. Very large impulsive force was measured. Vertical tsunami fluid force increased with the increase in the tsunami wave height over the bridge beam. Horizontal tsunami fluid force (wave pressure) increased under the condition that the top of wave crest hit the bridge beam. Generally, horizontal tsunami fluid force (wave pressure) in the cases of river flow was smaller than that in the cases of no river flow. Although it is difficult to estimate impulsive fluid force, the wave pressure after the impulsive component was able to be estimated by the equation that has been already proposed for structures on the ground.

1. はじめに

東南海、南海地震の発生確率は日に日に高まっている。紀伊半島沿岸域は、これらの地震により発生する津波の来襲が予想される地域であるが、山地が海岸付近にまで迫る急峻な地形のため、主要国道が海岸沿いを通り、河川の河口付近に橋梁が架けられている場合が多い。これらの橋梁では、津波により橋桁が流出することも考えられるが、急峻な地形のため迂回路の確保が困難な地域も多い。そのため、橋桁が流出した場合の影響が大きく、被災地の復興にも支障が生じる。

津波流体力に関する研究例として、松富(1991)による直立壁に作用する段波波圧の測定、朝倉ら(2000)による護岸を越流した津波による波力測定、水谷ら(2000)による傾斜構造物に作用する段波波圧の測定、池野ら(2005)による直立防波堤に作用するソリトン分裂津波の波圧測定、水谷ら(2005)によるエプロン上のコンテナに作用する津波力の測定などがある。しかし、橋梁は橋桁下に水面までの空間があることから、これらの検討例とは流体力の特性が異なると考えられる。橋桁への作用波力等については、庄司ら(2006)が橋桁の移動を津波流速から検討しているが、鉛直方向の流体力は考慮されていない。片岡ら(2006)やArakiら(2008)は橋桁に作用する津波流体力を水平・鉛直方向ともに測定しているが、河川流は考慮されていない。

橋桁に作用する津波流体力の研究例は多くないが、鉛直方向力は橋桁の摩擦抵抗力の減少をもたらす、橋桁流出に及ぼす影響が大きいと考えられる。そこで、水理実

験により津波による橋桁への作用流体力を水平および鉛直方向成分に分けて測定を行った。その際、河川流を発生させ、作用流体力への影響についても検討した。

2. 水理実験

水理実験は紀伊半島南部に見られる川幅30~40m、水深2m程度の小河川を想定(模型縮尺は1/30程度を想定)し、大阪大学の長さ41.0m、幅0.7mの水路で行った。図-1にその概要を示す。水路内に固定床を設置し、海底部の勾配を1/40、河床部の勾配を1/100とした。海底部と河床部の接続部(河口)付近に橋桁模型を設置し、孤立波状の波(橋桁直前での最大水位上昇量 $a=4.8\sim 12.3\text{cm}$)を発生させることにより、この橋桁模型に作用する流体力を測定した。実験では、橋桁の桁下高さ $h_c(0.4\sim 7.5\text{cm})$ 、架橋地点の水深 $h(7.0\sim 11.0\text{cm})$ 、架橋位置(河口からの距離 $L_B=0\sim 2\text{m}$)を変化させた。河川流は、ポンプを用いて水路内の水を循環させることにより発生させた。また、河口付近には幅0.22mの河道および護岸を設置した。

流体力の測定においては、橋桁模型を取り付けた片持ち梁式の流体力計を製作し、水平方向力 F_x と鉛直方向力 F_z を測定した。流体力計の梁にはアルミ製の角柱(6.0cm×6.0cm)を使用した。固有振動数については、鉛直方向が約170Hz、水平方向が約60Hzであった。橋桁模

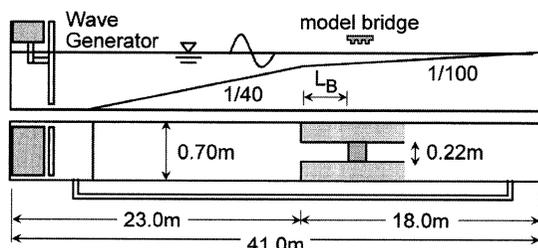


図-1 実験水槽

- | | | | | |
|-------|------|------------|-----|----------|
| 1 正会員 | 博(工) | 大阪大学 | 准教授 | 大学院工学研究科 |
| 2 | 修(工) | (株)ショーワ | | |
| 3 正会員 | 工博 | 大阪大学 | 教授 | 大学院工学研究科 |
| 4 正会員 | 修(工) | (株)建設技術研究所 | | |

型には波圧計も取り付け、橋桁の沖側側面、下面など8箇所に作用する波圧も同時に測定した。データのサンプリング間隔は0.002秒とした。

図-2に模型橋桁周りの模式図、および F_x , F_z の向きを、図-3には橋桁模型の諸元を示す。図中の P1~P8は波圧計を表す。また、表-1に実験ケースの概要を示す。なお、ポンプの流量は一定であり、河川流の流速は河口部の水深が8.0cm の場合、河道内で21.5cm/s、河口から沖側10cm の地点で18.0cm/s、また、河口部の水深が11.0 cm の場合、河道内で16.0cm/s、河口から沖側10cm の地点で13.0cm/s であった。

3. 実験結果

(1) 入射波の浅水変形

図-4に、沖から河口までの、また河道内での最大水位上昇量 a_{max} の変化を示す。横軸は水位変動測定点の地点番号を表し、測定点の水深と河口からの距離（岸向き、上流側を正）はそれぞれ図中に Depth と Distance で示す通りである。また、白丸は河川流がない場合、三角印は河川流がある場合を表し、河口の位置を横軸上に矢印で示す。

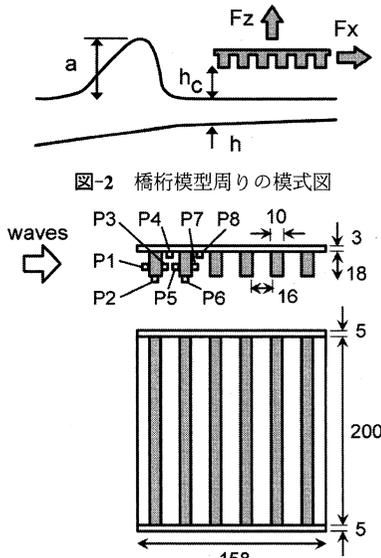


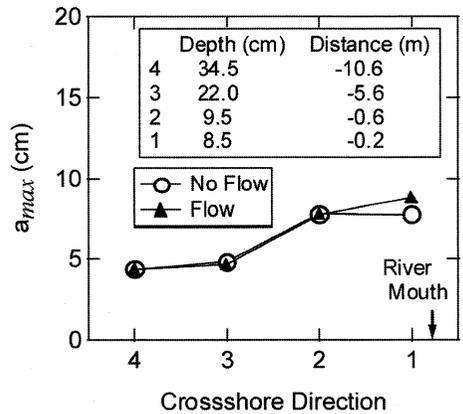
図-3 橋桁模型 (単位: mm)

表-1 実験ケース

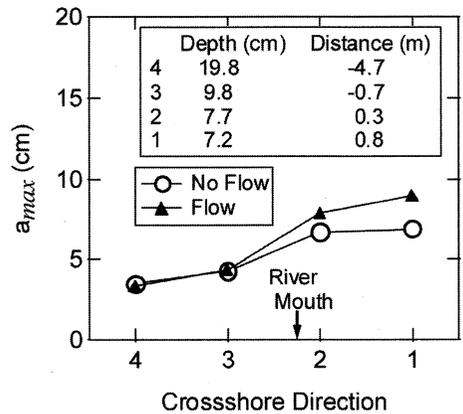
L_B (m)	河川流	その他
0.0	なし	最大水位上昇量 $a = 4.8 \sim 12.3$ cm
	あり	
1.0	なし	桁下高さ $h_c = 0.4 \sim 7.5$ cm
	あり	
2.0	なし	架橋地点の水深 $h = 7.0, 8.0, 9.0, 10.5, 11.0$ cm
	あり	

図-4(a)は河口からの架橋位置 $L_B = 0$ m (河口部に架橋)、架橋地点の水深 $h = 8.0$ cm のケースにおける水位上昇量の変化の一例である。水位変動測定点の3から2の間で、浅水変形により水位上昇量が大きく増加している。また、河口直前の測定点1では河川流がある場合は水位上昇量がさらに増加しているが、河川流がない場合は変化がない。図-4(b)は河口からの架橋位置 $L_B = 1.0$ m、架橋地点の水深 $h = 7.0$ cm のケースにおける水位上昇量の変化の一例である。同様に、浅水変形により水位上昇量が増加しており、また、河川流がある場合は河道内でも水位上昇量が増加しているのに対して、河川流がない場合は河道内ではほぼ一定である。

また、図示しないが、河口からの架橋位置 $L_B = 2.0$ m の場合も水位上昇量の変化の傾向、および河川流がある場合とない場合の傾向はほぼ同様であったが、河道内の架橋地点よりも下流側（河口から1.0m 付近の地点）で砕波が生じるため、架橋地点での水位上昇量は減少している。



(a) 河口からの架橋位置 $L_B = 0$ m, 架橋地点の水深 $h = 8.0$ cm



(b) 河口からの架橋位置 $L_B = 1.0$ m, 架橋地点の水深 $h = 8.0$ cm

図-4 水位上昇量の変化

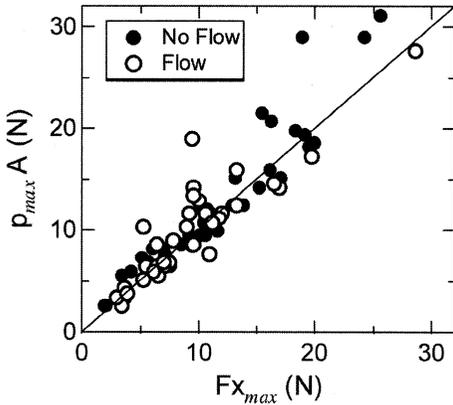
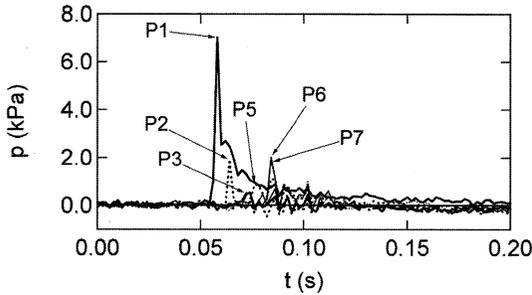
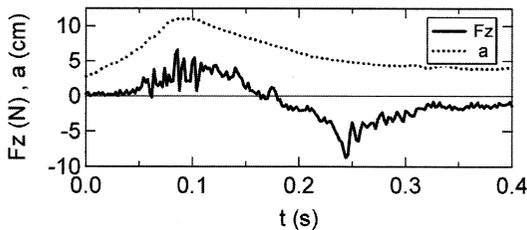


図-5 水平方向流体力 $F_{x,max}$ と波圧積分値



(a) 波圧



(b) 鉛直方向流体力 F_z , 橋桁沖側での水位変動

図-6 波圧, 鉛直方向流体力, 水位変動の時系列
($a_{max}=10.7\text{cm}$, $h_c=5.5\text{cm}$, 河川流なし)

(2) 測定結果の時系列

図-5に、橋桁沖側前面で測定された波圧 P1の最大値に橋桁沖側前面の面積 A を乗じた値と、水平方向流体力 F_x の最大値の関係を示す。図中の黒丸は河川流なしのケース、白丸は河川流ありのケースの結果である。図より、波圧 P1の値と水平方向流体力 F_x との対応は概ね良好であることが分かる。水平方向の流体力に相当する波圧としては P3および P5などもあるが、P1とはピークの位相がずれること、また水平方向力としては P3と P5は逆向きであるものの、ほぼ同時刻に発生するために相殺されるこ

とから、最大値は P1の波圧のみでほぼ表されていると考えられる。ややずれが見られるプロットは、最大水位上昇量 a_{max} が同等である他のケースと比較して、波圧 P1で大きな値が測定されたケースである。このようなケースでは波圧計設置箇所近傍において局所的に大きな波圧が発生し、橋桁沖側前面の面積内での波圧が一様ではなかったのではないかと考えられる。以上より、一部のケースでややずれがあるものの、水平方向の流体力については、波圧 P1を用いて検討が可能であると考えられる。

図-6に測定結果の一例として、架橋位置 $L_B=0.0\text{m}$ 、橋桁直前での最大水位上昇量 $a_{max}=10.7\text{cm}$ 、桁下高さ $h_c=5.5\text{cm}$ 、河川流なしのケースにおいて測定された波圧、鉛直方向流体力 F_z および橋桁沖側20cmの地点での水位変動の時系列を示す。波圧の時系列は図-6(a)に示しており、橋桁沖側前面での波圧 P1には衝撃的な成分が見られる。波圧計の設置位置に従って P1から順にピークの値が出現しているが、このケースでは波圧 P4および P8のピークは明瞭ではなかったため、図中には明記していない。また、P6と P7のピークは一致している。その他のケースにおいては、P1のピーク値が P2のピーク値と同程度である場合や、複数のピークの値が同位相で現れる場合もあり、これらは波面と橋桁の関係により変化すると考えられる。

鉛直方向流体力 F_z および水位変動の時系列は図-6(b)に示している。橋桁沖側20cmの地点で測定された水位変動は、河口(水深8.0cm)での線形長波の波速を用いて時間的に架橋位置までずらして示している。このケースでは桁下高さが $h_c=5.5\text{cm}$ であるため、水位 a が5.5cmを上回るあたりから鉛直方向流体力 F_z が正の向き(鉛直上向き)に増加している。 F_z の鉛直上向きのピーク後は鉛直下向きの流体力が作用しているが、これは橋桁上まで水位が上昇していることによる上載圧と考えられる。ただし、この時点における架橋地点での実際の水位変動は、橋桁が存在することによる影響を受けるので、橋桁沖側20cmの地点での水位変動とは異なると思われる。他のケースにおいても、鉛直方向流体力 F_z は鉛直上向きのピークの後、鉛直下向きのピークを示すことが多かった。場合によっては、鉛直上向きの F_z よりも鉛直下向きの F_z のほうが絶対値が大きいくこともあった。しかし、橋桁の流出に影響を及ぼすのは鉛直上向きの流体力であるため、以降は鉛直上向きの流体力についてのみ検討を行う。

(3) 水平方向流体力と鉛直方向流体力

図-7に、水平方向流体力の最大値 $F_{x,max}$ と鉛直方向流体力の最大値 $F_{z,max}$ の関係を示す。実験ケースごとのばらつきが大きい、これは橋桁に作用した瞬間の波面の角度に依存しているためであり、非砕波、砕波前、砕波

直後等の違いによるものと考えられる。河川流の有無による違いは見られないが、架橋位置 $L_B=0.0\text{m}$ および 2.0m の場合の鉛直方向流体力は水平方向流体力と同程度、あるいはそれ以上になる場合も見られる。一方、 $L_B=1.0\text{m}$ のケースにおける鉛直方向流体力はほぼ一定の値となった。これは、たいていの入射波の砕波点が河口から上流側へ $0.5\sim 1.0\text{m}$ の地点であり、砕波直後の波が橋

桁に作用していたことと関連があると考えられる。

(4) 鉛直方向流体力と橋桁上の水位

図-8(a)および(b)に、それぞれ河川流がない場合および河川流がある場合の、鉛直方向流体力の最大値 F_{Zmax} と橋桁上の最大水位の関係を示す。鉛直方向流体力の最大値は、橋桁の流体力測定部分に作用する浮力 B で無次元化し、橋桁上の最大水位 $a_{max}-h_c$ は a_{max} で無次元化している。河川流がない場合の図-8(a)には、参考として Araki ら (2008) の実験結果 (架橋位置はすべて $L_B=0.0\text{m}$ に相当) のうち、桁下高さ h_c の条件が比較的近いものを併せて示す。河川流がある場合は若干、ばらつきが大きくなるが、河川流の有無による明瞭な差異は見られず、橋桁上の水位が大きくなるほど鉛直上向きの流体力も大きくなっており、その傾向は Araki ら (2008) と同様である。ただし、前述のように、架橋位置 $L_B=1.0\text{m}$ の場合だけは鉛直方向流体力は小さい。

(5) 橋桁沖側前面の波圧と橋桁上の水位

図-9に、橋桁沖側前面波圧 P1の最大値と橋桁上の最大水位の関係を示す。橋桁沖側前面波圧 P1の最大値は、橋桁上の最大水位に伴って橋桁に発生する静水圧で無次元化し、橋桁上の最大水位 $a_{max}-h_c$ は a_{max} で無次元化している。図-9(a), (b), (c)はそれぞれ架橋位置 $L_B=0.0, 1.0, 2.0\text{m}$ の場合で、黒丸が河川流なし、白丸が河川流ありの結果である。

どの図においても、橋桁上の水位の無次元量が小さくなるほど橋桁沖側前面波圧 P1は大きくなること分かる。これは、入射波の峰の先端付近が橋桁に作用した場合、かつ入射波高が大きい場合に波圧が大きくなることを意味している。また、橋桁に作用する波圧は、河川流がない場合は静水圧の10倍以上にも達することもある。河川流がある場合は、河川流がない場合と比べて波圧がやや小さいが、それでも静水圧の8倍程度になることもある。 $L_B=0.0\text{m}$ の場合は、全体的に河川流がある場合の波圧は河川流がない場合の波圧より小さい傾向がある。しかし、 $L_B=1.0\text{m}$ および 2.0m の場合は、図中の最大値は河川流がない場合の波圧となっているが、全体的には河川流の有無による相違は明瞭ではない。

4. 波圧の算定

陸上構造物を対象として提案された朝倉ら (2000) の津波波圧算定式を用いて、大きな波圧が作用していた橋桁沖側前面の波圧の算定を試みた。橋桁沖側 20cm の地点で測定された水位変動から橋桁上の水位を算出し、その橋桁上の水位に対して朝倉ら (2000) の非分裂波の算定式を適用した。

図-10(a)および(b)に、それぞれ架橋位置 $L_B=0.0\text{m}$ 、橋桁直前での最大水位上昇量 $a_{max}=10.7\text{cm}$ 、桁下高さ $h_c=$

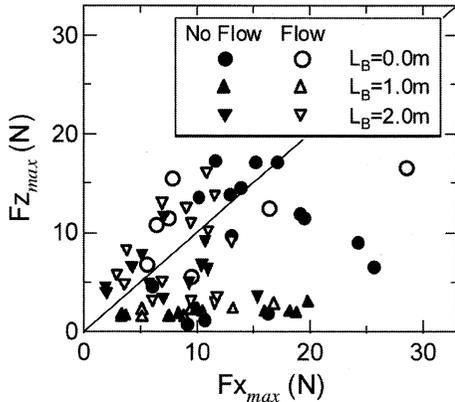
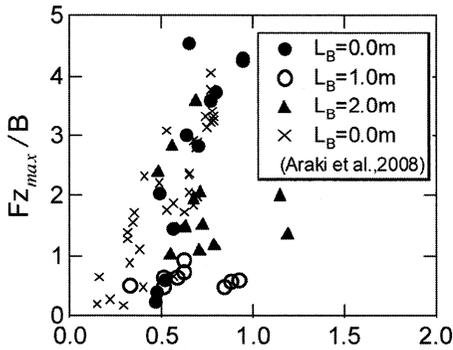
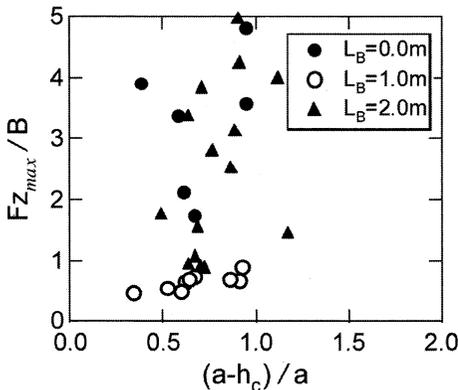


図-7 水平方向流体力 F_x と鉛直方向流体力 F_z



(a) 河川流がない場合



(b) 河川流がある場合

図-8 鉛直方向流体力と橋桁上の水位

5.5cm, 河川流なしのケース(図-6で示したケース), および架橋位置 $L_B=0.0\text{m}$, 橋桁直前での最大水位上昇量 $a_{max}=7.53\text{cm}$, 桁下高さ $h_c=0.4\text{cm}$, 河川流なしのケースでの算定結果を示す. どちらのケースにおいても衝撃的な成分は表現できていないが, その後に続く波圧は安全側の波圧を算定している. 他のケースについては, 河川流なしの場合は安全側に波圧を算定できるケースが多かったが, 河川流ありの場合(特に $L_B=0.0\text{m}$ の場合)は図-9(a)に示したように, 水位上昇量に対して相対的に波圧が小さい傾向があるため, 実験結果との差が大きくなった.

5. まとめ

水理実験により, 河川流を発生させて橋桁に作用する波力および波圧を測定した. 河口部に架橋したときは,

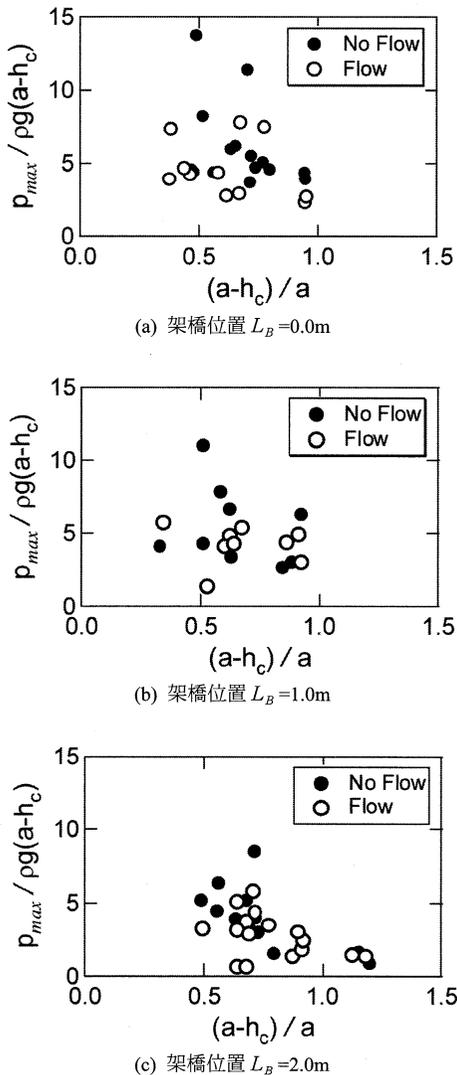
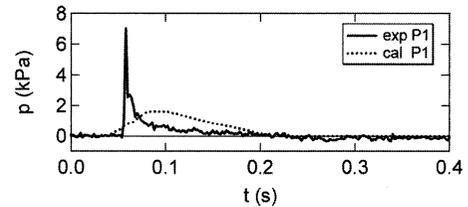


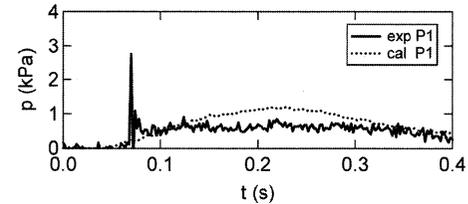
図-9 橋桁沖側前面の波圧と橋桁上の水位

河川流がある場合のほうが波圧が小さくなる傾向があったが, 河口から上流側に離れて架橋したときは, 河川流の有無による明瞭な差異は見られなかった. また, 衝撃的な波力は, その値は大きい, が, 作用時間は短いため, 橋桁流出に及ぼす影響は更に検討を行う必要がある.

謝辞: 流体力の測定には愛媛大学の中村孝幸准教授から助言を頂いた. ここに記して謝意を表します.



(a) $L_B=0.0\text{m}$, $a_{max}=10.7\text{cm}$, $h_c=5.5\text{cm}$, 河川流なし



(b) $L_B=0.0\text{m}$, $a_{max}=7.53\text{cm}$, $h_c=0.4\text{cm}$, 河川流なし

図-10 朝倉ら(2000)の式による波圧の算定

参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森正則 (2000): 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 911-915.
- 池野正明・松山昌史・榊山 勉・柳沢 賢 (2005): ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 751-755.
- 片岡正次郎・日下部毅明・長尾和宏 (2006): 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論文集, pp. 154-157.
- 庄司 学・森 洋一郎 (2006): 桁橋の津波被害再現実験, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 801-805.
- 松富英夫 (1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.
- 水谷 将・今村文彦 (2000): 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 946-950.
- 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005): エブロン上のコンテナに作用する津波力と津波漂流力に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 741-745.
- Araki, S., I. Deguchi and S. Itoh (2008): Experimental study on fluid force on bridge beam due to tsunami, Proc. of the 18th Int'l Offshore and Polar Eng. Conference, Vol. III, pp. 586-591.