

橋桁に作用する砕波段波の流体力に関する実験的検討

Experimental Study on Fluid Force Acting on a Bridge Deck Subjected to Plunging Breaker Bores and Surging Breaker Bores

庄司 学¹・平木 雄²・藤間功司³・鳴原良典⁴

Gaku SHOJI, Yu HIRAKI, Koji FUJIMA and Yoshinori SHIGIHARA

In this study, hydraulic experiments were carried out to clarify a tsunami wave load on a bridge deck, focusing on the variation of horizontal wave force effected by the change of deck position from still water level against the tsunami height. The values of averaged drag coefficient were calculated by using the measured maximum lateral force and tsunami velocity as 1.52 subjected to surging breaker bores and as 1.56 subjected to plunging breaker bores. In addition, the variation of horizontal wave force is more sensitive in the case that still water level is lower when a bridge deck is subjected to plunging breaker bores.

1. はじめに

2004年12月26日 (UTC 00:58:53) に発生したインド洋大津波はスマトラ島北西部のみならず、インド洋に面する多くの国々の沿岸部を襲い、甚大な被害を与えた。また、2006年7月17日 (UTC 08:19:28) にジャワ島南西部において $M_w=7.7$ の地震が発生し、それに伴う津波によって、ジャワ島南西部では死者500人を超える大災害となった。最近の例としては、2010年2月27日 (UTC 06:34:14) にチリ中部沖において $M_w=8.8$ の地震が発生し、それに伴って発生した津波により数百人以上の犠牲者が発生した。これらの津波被害の要因としては家屋等の構造物の被災が挙げられるが、さらに、港湾、道路等の社会基盤構造物が多数被災したことにより、社会経済活動に甚大な影響が発生した。それらの中でも橋梁構造物は交通社会インフラの重要な要素であり、被災時の緊急活動や復旧活動を支える交通基盤として、津波災害時においても機能保持が強く求められる。

そのため、橋梁構造物に作用する津波荷重評価は社会的に喫急な課題となっており、それらに関しては学術的に未解明な点が多いため、多数の研究者がこれらの研究に取り組んでいる。実験的検討としては橋桁の縮尺模型を用いた水理実験を通じて、片岡ら (2006) が橋桁に作用する水平抗力に合田式 (合田, 1973) を適用することの妥当性を検討しており、荒木ら (2007) は水平波力に加えて鉛直波力を測定し、波高に対する橋桁の位置との関係を明らかにしている。Iemuraら (2007) 及び杉本・

運上 (2008) は、橋桁模型に対する水理実験を行い、津波浸水深と津波流速の関係や津波流速と津波波力の関係について明らかにしており、特にIemuraら (2007) は緩衝マウンド等の効果について検討している。更に、庄司ら (2009) は橋桁の横移動という被害形態について相似則を考慮した上で、水理実験を実施し、津波流体力と桁移動との関係を定量的に評価している。二井ら (2009) は実験より得られた水平波力と鉛直力から既往の設計式に対する評価を行っており、中尾ら (2009) は実験と粒子法による解析により、津波作用時の橋梁周辺の流況を詳細に評価している。数値解析の観点からは、五十里・後藤 (2007) が粒子法による津波の遡上と氾濫流に伴う桁橋の被災シミュレーションを行っており、鳴原ら (2009) がStaggered leap-frog差分法を適用した3次元数値流体解析に基づいて橋桁の被災に関わる実験結果に対する検証を行っている。しかし、津波の形態として巻き波型及び砕け寄せ波型の砕波段波を想定した場合の砕波段波の種類が橋桁の抗力係数に及ぼす影響や、橋桁に対する津波の作用位置の変化が水平波力の感度に及ぼす影響については明らかになっていない。

以上を踏まえ、本研究では単径間RC桁橋に作用する砕波段波を模擬した水理実験を実施し、巻き波型及び砕け寄せ波型の砕波段波を受けた場合の津波流体力を、上述した観点から評価することとする。

2. 水理実験

(1) 実験条件及び実験水路

橋桁へ作用する砕波段波としては巻き波型と砕け寄せ波型の2種類をモデル化した。前者は河口部において橋桁へ作用する砕波段波をモデル化したものであり、後者は河口を遡上した後に橋桁へ作用する砕波段波をモデル化したものである。実験条件を表-1に、実験水路を図-1

1 正会員 博(工) 筑波大学准教授
2 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻
3 正会員 工博 防衛大学校教授建設環境工学科
4 正会員 博(工) 防衛大学校助教建設環境工学科

表-1 実験条件

CASE 番号	模型 サイズ	橋桁模型設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 (mm)	桁中心位置 h_c (mm)	貯留水深差 (mm)	貯留水位 (mm)	CASE 番号	模型 サイズ	橋桁模型設置位置 (mm)	静水深 h_0 (mm)	桁下高 (mm)	桁中心位置 h_c (mm)	貯留水深差 (mm)	貯留水位 (mm)
1	小	5,500	40	10	18.5	80	422	9	大	5,500	40	10	20.7	80	422
					18.5	90	432						20.7	90	432
					18.5	103	445						20.7	103	445
2	小	5,500	30	20	28.5	80	412	10	大	5,500	30	20	30.7	90	422
					28.5	90	422						30.7	100	432
					28.5	100	432						30.7	114	446
3	小	5,500	20	30	38.5	100	422	11	大	5,500	20	30	40.7	110	432
					38.5	110	432						40.7	120	442
					38.5	120	442						40.7	130	447
4	小	5,500	10	40	48.5	130	442	12	大	5,500	10	40	50.7	140	452
													50.7	150	462
													50.7	160	472
5	小	1,500	40	10	18.5	40	382	13	大	1,500	40	10	20.7	60	402
					18.5	48	390						20.7	70	412
					18.5	60	402						20.7	80	420
6	小	1,500	30	20	28.5	40	372	14	大	1,500	30	20	30.7	70	392
					28.5	50	382						30.7	80	402
					28.5	59	391						30.7	90	414
7	小	1,500	20	30	38.5	70	392	15	大	1,500	20	30	40.7	90	392
					38.5	80	402						40.7	100	407
					38.5	90	412						40.7	110	422
8	小	1,500	10	40	48.5	130	442	16	大	1,500	10	40	50.7	130	442
													50.7	140	452

表-2 橋桁模型の構造諸元

模型 サイズ	小	大	模型 サイズ	小	大
桁長 L (mm)	200	252.6	床版幅 B_1 (mm)	95	120
床版厚さ T_1 (mm)	7	8.8	桁厚 B_2 (mm)	5	6.3
桁高 T_2 (mm)	10	12.6	桁間長さ B_3 (mm)	13	16.4
			縮尺	1/100	1/79.2

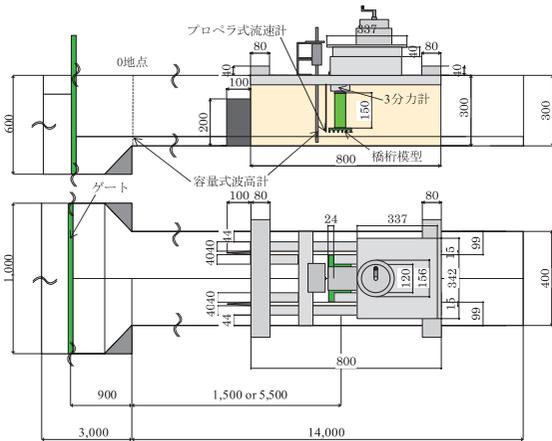


図-1 実験水路 (単位mm)

に示す。本実験では全長が17m、幅0.4m、高さ0.3mの開水路を使用し、ゲート急開流れによって碎波段波を模擬した。表-2、図-2に実験で使用した橋桁模型の構造諸元を示す。橋桁模型は2004年インド洋大津波の際にインドネシアで実際に被災したLueng Ie Bridgeの桁長、幅員、桁高を幾何学的に1/79.2 (0.013), 1/100 (0.01)で縮尺している。実験に際しては、静水深 h_0 を40mm, 30mm, 20mm, 10mmの4通りとした上で、図-1中の0地点から1,500mmの位置における碎波段波を巻き波型碎波段波、5,500mmの位置における碎波段波を砕け寄せ波型碎波段波とそれぞれ定義した。従って表-1においてCASE1-1~4-1, 9-1~12-3が砕け寄せ波型碎波段波, CASE5-1~8-1, 13-1~16-2が巻き波型碎波段波の津波作用を表わしている。その上で、同一の静水深 h_0 で貯留水位を変化させることで各ケースにおいて最大3段階の異なる波高の津波を作用させている。計測したパラメータは橋桁模型前面の津波流速、静水面を基準とした0地点及び橋桁模型

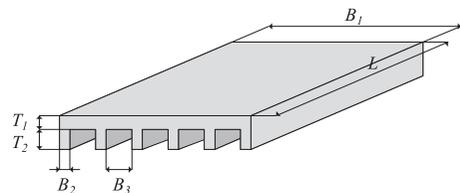


図-2 橋桁模型

前面の水位、橋桁模型に作用する水平波力及び鉛直力である。津波流速についてはプロベラ式流速計 (KENEK製, VOT2-100-10), 0地点水位及び前面水位については容量式波高計 (正豊工学実験装置製作所製, L-300), 水平波力及び鉛直力については3分力計 (日計電測株式会社製, Y102) を用いて計測している。データのサンプリング間隔は1/200秒とし、ゲート開放から20秒間の計測を行っている。全ての時系列データに対して、ある時刻におけるデータについて、そのデータと、その前後10データの合計21データを用いて移動平均を施している。なお、全てのケースについて橋桁模型を設置した状態で実験を行った後、橋桁模型を除いた上で通過波の計測を行い、5回の再現性の高いデータが得られるまで計測を行っている。分析に際しては水平波力は橋桁模型有りの場合のデータを採用し、津波流速及び前面水位について

は橋桁模型を除した場合のデータを採用している。

(2) 実験におけるフルード数

図-3には津波流速の平均である v_{ave} と浸水深の平均である h_{ave} との関係を示す。津波流速の平均 v_{ave} はそのピーク発生時刻から1~3秒間の信頼性の確保された区間の平均である。同じく前面水位のピーク発生時刻から1~3秒間の信頼性の確保された区間の平均である $a_{h_{ave}}$ に静水深 h_0 を加算することで浸水深の平均 h_{ave} を求めた。図-3の直線の傾きを本実験においてはフルード数 F_r と定義するが、それによるとフルード数 F_r は0.40~0.93となった。フルード数の相似により、実橋に作用する津波流速は、大模型において実験値の8.9倍の値になり、小模型においては実験値の10.0倍と解釈できる。

3. 抗力係数の算出

次式を用いて抗力係数 C_D を算出した。

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \dots\dots\dots (1)$$

水平波力の代表値として F_x は橋桁模型に津波が衝突した瞬間の衝撃的な波力とし、津波流速の代表値として v は津波が流速計の感知部に衝突した瞬間の値とした。 ρ は水の単位体積質量、 A は橋桁模型の被水圧面積である。

図-4には式 (1) から算出される抗力係数の時系列を示す。なお、全5回の測定中、水平波力 F_x と津波流速 v との間で、データの立ち上がりにばらつきがみられたため、全5回の中でそれらのばらつきが少ない1~2回分のデータを用いた。更に、データの立ち上がり部において式 (1) の分母の津波流速 v の数値が低くなると抗力係数

C_D の数値が高くなるため、そのようなデータの信頼性が低い時間領域を除外した。その上で、各ケースにおいて津波流速 v のピーク時刻からデータの信頼性が高い時間領域において抗力係数の時間平均 $\overline{C_D}$ を各々の実験回数分求め、それらの平均 $\overline{\overline{C_D}}$ を算出した。なお、図-4中にはその時間領域を点線で囲んで示した。

砕け寄せ波型の場合、 $\overline{C_D}$ の全てのケースの平均は1.83となり、巻き波型においては $\overline{C_D}$ の平均は1.85となる。時系列で評価した場合には波の種類による $\overline{C_D}$ の相違は大きくは見られなかった。

次に、 F_x の平均 $\overline{F_x}$ を先述した実験の繰り返し回数分の平均値として算出した。同様に、実験の繰り返し回数分の v を採用し、次式により $\overline{F_v}$ を算出した。

$$\overline{F_v} = \frac{1}{2}\rho v^2 A \dots\dots\dots (2)$$

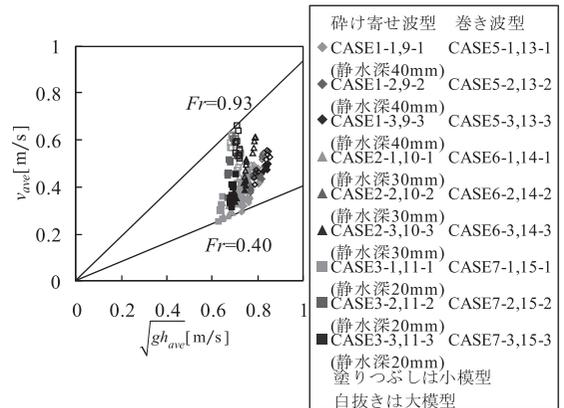


図-3 津波流速の平均 v_{ave} と浸水深の平均 h_{ave} の関係

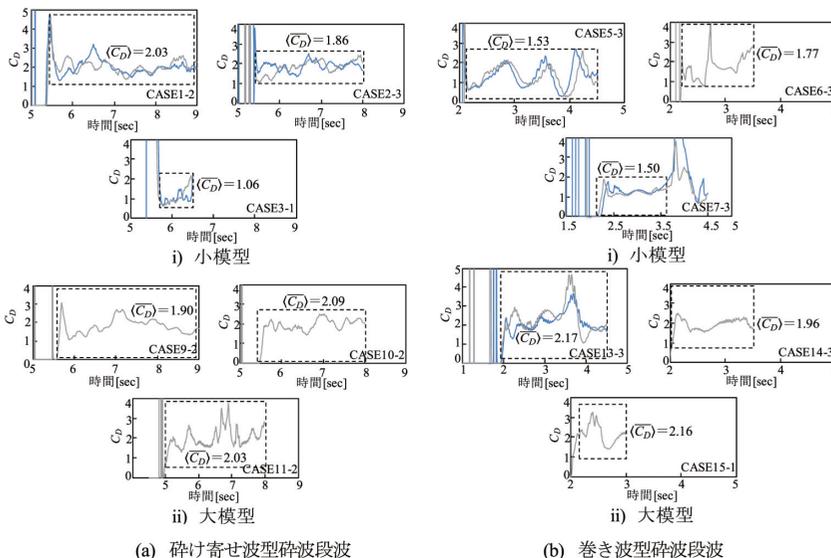
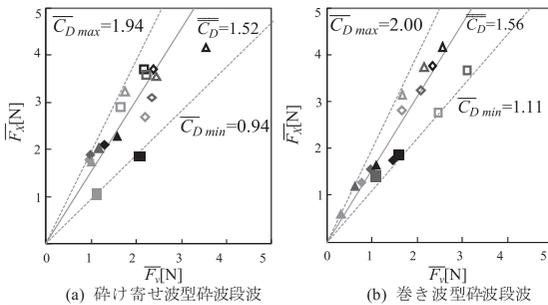


図-4 抗力係数 C_D の時系列



砕け寄せ波型		巻き波型	
◆ CASE1-2,9-2 (静水深40mm)	CASE5-2,13-2 (静水深40mm)	◆ CASE1-1,9-1 (静水深40mm)	CASE5-1,13-1 (静水深40mm)
▲ CASE2-1,10-1 (静水深30mm)	CASE6-1,14-1 (静水深30mm)	◆ CASE1-3,9-3 (静水深40mm)	CASE5-3,13-3 (静水深40mm)
▲ CASE2-3,10-3 (静水深30mm)	CASE6-3,14-3 (静水深30mm)	▲ CASE2-2,10-2 (静水深30mm)	CASE6-2,14-2 (静水深30mm)
■ CASE3-2,11-2 (静水深20mm)	CASE7-2,15-2 (静水深20mm)	■ CASE3-1,11-1 (静水深20mm)	CASE7-1,15-1 (静水深20mm)
		■ CASE3-3,11-3 (静水深20mm)	CASE7-3,15-3 (静水深20mm)
塗りつぶしは小模型 白抜きは大模型			

図-5 \bar{F}_x と \bar{F}_v との関係

図-5には、 \bar{F}_x と \bar{F}_v との関係を示す。その上で、図-5に基づき、抗力係数 \bar{C}_D を次式により算出した。なお、図-5中には、抗力係数 \bar{C}_D の最大値 \bar{C}_{Dmax} 、最小値 \bar{C}_{Dmin} 及び平均 \bar{C}_D を直線で表した。

$$\bar{C}_D = \frac{\bar{F}_x}{\bar{F}_v} \dots\dots\dots (3)$$

図-5によると砕け寄せ波型において \bar{C}_D は 0.94~1.94 の間で変動しており、 \bar{C}_D は 1.52 となっている。また、巻き波型において \bar{C}_D は 1.11~2.00 の間で変動しており、 \bar{C}_D は 1.56 となり、巻き波型の方が砕け寄せ波型より \bar{C}_D はわずかに大きな値となった。このことは巻き波型が橋桁模型に作用することで発生する水平抗力は、砕け寄せ波型が橋桁模型に作用することで発生する水平抗力に比べ、より大きな水平抗力となることを示している。

4. 津波の橋桁に作用する位置とそれに伴って生じる水平波力との関係

静水深 h_0 を基準とした橋桁中心位置 h_c を前面水位 a_h の平均値である \bar{a}_h で除し、パラメータ $\gamma = h_c / \bar{a}_h$ を定義する。なお、 \bar{a}_h はデータの信頼性が保証された回数分の平均値とする。この γ は、津波作用を受ける橋桁の水位に対する相対的な位置を表す。次に、水平波力 F_x の平均値である \bar{F}_x を被水圧面積 A で除し、それを静水圧相当の圧力 $\rho g \bar{a}_h$ で除したパラメータ κ を次式のように定義した。

$$\kappa = \frac{\bar{F}_x / A}{\rho g \bar{a}_h} \dots\dots\dots (4)$$

この κ は津波作用による水平波圧が前面水位の高さ相当の静水圧に対してどの程度の倍率となるかを示している。

図-6には γ と κ の関係を示す。図-6によれば、静水深 40mm (図中、◇印) では津波の下部が橋桁に作用するため、前面水位 \bar{a}_h の高まり + \bar{a}_h により生じる γ の低下 $-\Delta\gamma$ に対して水平波力の変化 $+\Delta\kappa$ がほとんど生じていない。静水深 30mm (図中、△印) では津波の中間部が橋桁に衝突するため、 γ の低下 $-\Delta\gamma$ に対して $+\Delta\kappa$ が生じ始め、静水深 20mm (図中、□印) では津波の上部が橋桁に衝突するため、 γ の低下 $-\Delta\gamma$ に対して水平波力の高まり $+\Delta\kappa$ が顕著となる。以上の津波の橋桁に作用する位置とそれに伴って生じる水平波力に関するメカニズムを図-7に示す。静水深が浅い 20mm のケースでは津波の上部の碎波部が橋桁に作用するため、 $+\bar{a}_h$ に対して水平波力 \bar{F}_x の高まりがより大きくなると推察される。この傾向は巻き波型において顕著になるが、これは碎波する直前のエネルギーの高い部分が橋桁に衝突し、 γ の低下 $-\Delta\gamma$ に対する $+\Delta\kappa$ の感度が砕け寄せ型と比較して高くなるためである。

更に、図-6において合田式並びに朝倉式 (朝倉ら、2000) を併記することで、これらの波圧算定式との比較を行っている。合田式においては静水面から高さ h_c で想定される水平波圧 p は次式で表すことができる。

$$p = 2.2\rho g H \frac{3H - h_c}{3H} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 H は静水面からの津波高さであり、本実験においては \bar{a}_h に相当する。同様に、朝倉式においては、非分裂波を想定した上で静水面からの高さ h_c で想定される水平波圧 p は次式により表すことができる。

$$p = 3\rho g \eta \frac{3\eta - h_c}{3\eta} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 η は遡上水深であり、本実験においては \bar{a}_h に相当する。式 (5)、(6) を変形し H 、 η をそれぞれ \bar{a}_h に対応させ、水平波圧 p が水平波力 \bar{F}_x を被水圧部の面積 A で除したものに相当することを考えると、図-6中に併記する式を導くことができる。なお、朝倉式についてはソリトン分裂を考慮した式も併記した。

図-6によると、砕け寄せ波型及び巻き波型における静水深 40mm 及び 20mm (小模型) の場合と巻き波型における静水深 30mm (小模型) の場合には実験値が合田式の下領域にあり、合田式による評価が可能となっているが、それ以外では評価が難しくなっている。合田式で想定される波圧は防波堤に作用するものであり、桁下に空間を有する橋桁の場合と境界条件が異なるためである。次に、朝倉式では非分裂波並びにソリトン分裂波の式のいずれの場合も静水深 10mm (図中、○印) においてそれらの上領域となり、評価が難しくなっている。朝倉ら

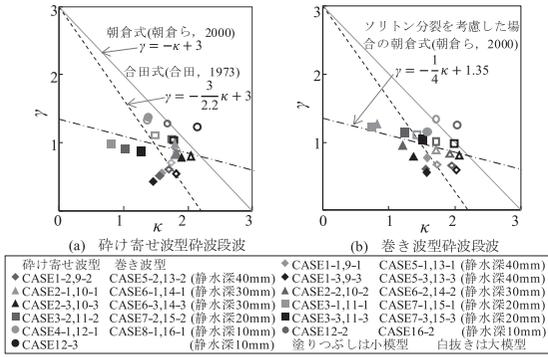


図-6 水平波力 F_x の評価

(2000) においては陸上に設置された構造物に対する津波作用を模擬しており、この場合も本実験における境界条件と異なるためである。このように、どちらの波圧算定式においても危険となる場合があるため、橋桁に対する波圧算定式の考案が急務である。

5. 結論

2004年インド洋大津波で被災した橋桁の縮尺模型を用いて、巻き波型砕波段波及び砕け寄せ波型砕波段波の橋桁への作用を模擬した実験を実施し、津波流体力の評価を行った。以下に得られた主要な知見を示す。

- (1) 水平波力の平均 $\overline{F_x}$ と津波流速 v の2乗の平均 $\overline{v^2}$ より求められる $\overline{F_v}$ により算出した抗力係数 $\overline{C_D}$ の平均 $\overline{C_D}$ は砕け寄せ波型では1.52, 巻き波型では1.56となった, これより巻き波型が橋桁模型に作用することで発生する水平抗力は、砕け寄せ波型が橋桁模型に作用することで発生する水平抗力に比べ、より大きな水平抗力となる。
- (2) 津波の橋桁に作用する位置とそれに伴って生じる水平波力との関係を考察した結果、前面水位 a_h の高まりに比して水平波力 $\overline{F_x}$ の大きくなる割合は、静水深 h_0 が低くなるに従って大きくなり、その傾向は巻き波型において顕著なものとなる。これは、巻き波型の方が砕波する直前のエネルギーの高い部分が橋桁に衝突し、砕け寄せ波型と比較して水平波力 $\overline{F_x}$ の感度が高くなるためである。
- (3) 合田 (1973) 並びに朝倉ら (2000) を橋桁に対する波圧算定式として適用することは、境界条件の違いから危険となる場合がある。そのため、桁下に空間を有する橋梁構造物の境界条件に適した波圧算定式を考案することが急務である。

謝辞：本研究は、国土交通省・平成21年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(研究代表者、九州工

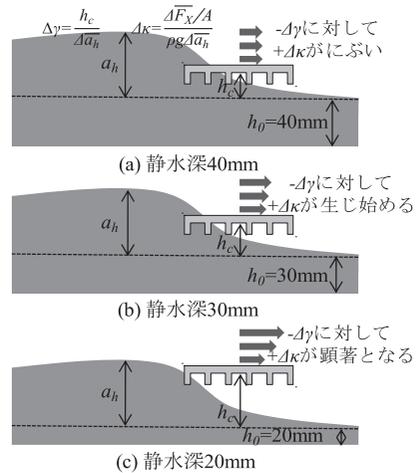


図-7 水平波力の感度に関するメカニズム

業大学・幸左賢二教授)の助成を得て、その研究グループのご指導を得て実施されました。実験の準備及び実施に際しては筑波大学大学院システム情報工学研究科の飯高稔氏に多大なるご指導を頂きました。

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・大森政則 (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.

荒木進歩・中島 悠・出口一郎・伊藤禎和 (2008)：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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.866-870.

五十里洋行・後藤仁志 (2007)：津波氾濫による桁橋被災過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.211-215.

片岡正次郎・日下部毅明・長屋和宏 (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, pp.154-157.

合田良実 (1973)：防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.2, No.3, pp.31-69.

鳴原良典・藤岡功司・庄司 学 (2009)：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, Vol.30, pp.899-904.

庄司 学・森山哲雄・平木 雄・藤岡功司・鳴原良典・笠原健治 (2009)：巻き波砕波段波及び砕け寄せ波砕波段波の作用を受ける橋桁の津波荷重評価, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.826-830.

杉本 健・運上茂樹 (2008)：津波による橋梁の被災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.

中尾尚史・伊津野和行・小林敏士 (2009)：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, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.55, pp.789-798.

二井伸一・幸左賢二・庄司 学・木村吉郎 (2009)：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.55, pp.471-482.

Iemura, H., M. H. Pradono, T. Yasuda and T. Tada (2007)：Experiments of tsunami force acting on bridge models, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.902-911.