

離岸堤の津波防災効果に関する実験的研究

Experimental Study on Detached Breakwaters' Effect on Tsunami Disaster Mitigation

半沢 稔¹・松本 朗²・田中 仁³・山本方人⁴

Minoru HANZAWA, Akira MATSUMOTO, Hitoshi TANAKA and Masato YAMAMOTO

In recent years, the risk of occurrence of tsunamis generated by near shore earthquakes, such as, Tokai, Tonankai, Nankai and off-Miyagi is considered to be higher than before as well as off shore tsunami traveling long distance, e.g., the 2010 Chilean tsunami. Tsunami force onto vertical walls, such as seawalls, has been studied in detail. Detached breakwaters are widely applied in front of seawalls especially in Japan. However, effect of such kind of detached breakwaters to reduce run-up and wave force onto seawalls has not been studied. In our study, hydraulic model tests have been systematically and carefully carried out using solitary tsunami waves with and without detached breakwaters to evaluate the effectiveness of detached breakwaters from the viewpoint of reducing run-up and wave pressure onto seawalls.

1. はじめに

近年、東海、南海、東南海、宮城沖など、日本近海地震による津波の発生リスクが高まってきている。また、2004年末に発生したインド洋大津波を契機に、津波災害軽減に向けた研究がより精力的に進められている。例えば、海岸施設に作用する津波波力については従来から多くの研究がなされている（例えば、加藤ら、2005；池野ら、2003, 2001；水谷・今村、2001, 2000；朝倉ら、2000；松富、1991など）。

しかし、多くの海岸で設置されている離岸堤の効果に関する検討は、1983年の日本海中部地震津波を契機に宇多ら（1986）、その後、中村ら（1998）によって津波遡上抑制効果について検討された以外にはほとんどなく、海岸堤防に作用する津波波力の離岸堤による低減効果は未解明である。前述のインド洋大津波の際には、モデル島のマレ島を対象とした解析の結果、島の前面に設置されている離岸堤が浸水域低減に効果を発揮したことが示唆されている（大谷ら、2005）が、離岸堤の効果を設計に反映できるまでには至っていない。また、既往の研究においては、津波による離岸堤の被災は考慮されていないが、実際には津波によるブロックの散乱が報告されており（富樫ら、1986, 1987）、こうした現象を考慮することは離岸堤の防災効果を評価する上で必須である。

そこで、本研究では津波防災設計に資することを目的として、離岸堤の持つ津波遡上抑制効果並びに、海岸堤防への波力低減効果に関して、従来考慮されていなかっ

た離岸堤の被災をも加味した系統的な水理実験を行うことにより、離岸堤の持つ津波防災効果について詳細な検討を行ったものである。

2. 実験条件

(1) 実験水槽

実験には（株）不動テトラ総合技術研究所所有の長さ30m、幅0.5m、深さ1.0mの二次元造波水槽を用いた。本水槽はピストンタイプの造波装置を有している。

図-1に水槽内の配置を示す。造波板の位置を $x=0\text{m}$ とし、 $x=3.75\sim 4.25\text{m}$ の区間を1/5勾配斜面、 $x=4.25\sim 13.25\text{m}$ の区間を1/30勾配斜面とした。そこから $x=14.75\text{m}$ までの1.5mの区間を水平部とし、更に陸側には1/20の斜面を形成した。水槽内の水位波形を計測するため、図-1に示すように $x=2.25\text{m}\sim 14.25\text{m}$ までの13箇所（St.1～13）に波高計を設置した。なお、離岸堤ありのケースではNo.9、海岸堤防ありのケースではNo.12並びにNo.13では計測を行っていない。後述するが対象測定項目に応じて離岸堤および、海岸堤防それぞれのありなしを適宜組み合わせる実験を行った。

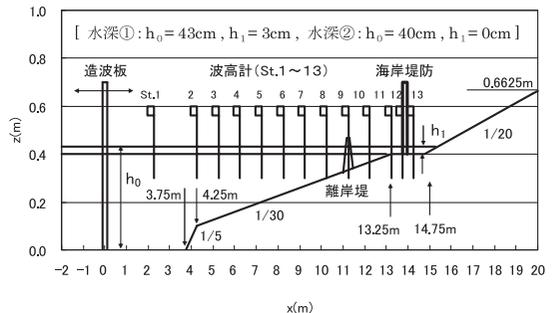


図-1 水槽内配置図

1 正会員	工修	(株)不動テトラブロック環境事業本部
2 正会員	工修	(株)不動テトラ総合技術研究所
3 フェロー	工博	東北大学大学院工学研究科教授
4	工博	(株)不動テトラ総合技術研究所

(2) 構造物

a) 離岸堤

離岸堤は天端中心位置が $x=11.25\text{m}$ (St.9) となるように、テトラポッド (質量59g) により天端3個並びで形成した。天端高はクリアランス (静水面上高さ) hc を4cmとしたケース (通常タイプ: 図-2 (a)) および, hc を0cmとしたケース (水中部のみ: 図-2 (b)) の2つのケースを対象とした。なお, 図-2 (a) および, 図-2 (b) は沖水深 $h_0=43\text{cm}$ の場合について示しているが, $h_0=40\text{cm}$ の場合も天端幅および, クリアランスは同一である。

通常タイプは離岸堤断面として標準的なものを想定している。すなわち, クリアランスは使用したテトラポッド模型に対して, 通常設計で用いられるKD値8.3より計算される安定限界波高8cmの1/2として設定したものである。また, 水中部をみの断面の意味合いは以下のとおりである。すなわち, 津波第一波により離岸堤に被災が生じ, 離岸堤の津波低減効果が減少した後に後続波が来襲することを想定している。つまり, 機能低下後の離岸堤の効果を把握しておくことも防災上重要であるとの視点に立っている。断面形状は別途実施した実験結果を参考にし, 被災の形態として水上部のブロックが移動・散乱した状況をモデル化して設定したものである。なお, 本研究においては, 両断面共に実験中のブロックの移動が生じないように網状のもので固定して実験を行った。

b) 海岸堤防

海岸堤防は図-1に示したように $x=13.75\text{m}$ (St.12) の位置に設置した。本研究において対象とした入射波高に対しては, 非越流条件である。海岸堤防前面には図-3に示すように7箇所に波圧計を取付けて波圧測定を行った。左縦軸 z は水槽底面からの高さ, 右縦軸 zp は海岸堤防基部からの高さを表している。

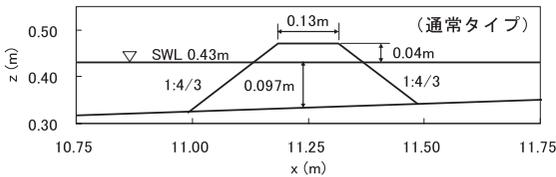


図-2 (a) 離岸堤断面図 (通常タイプ: $h_0=43\text{cm}$ の場合)

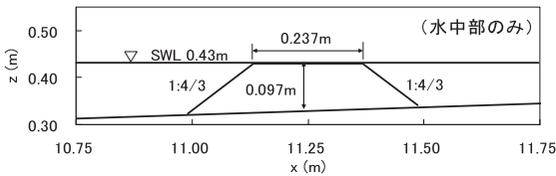


図-2 (b) 離岸堤断面図 (水中部のみ: $h_0=43\text{cm}$ の場合)

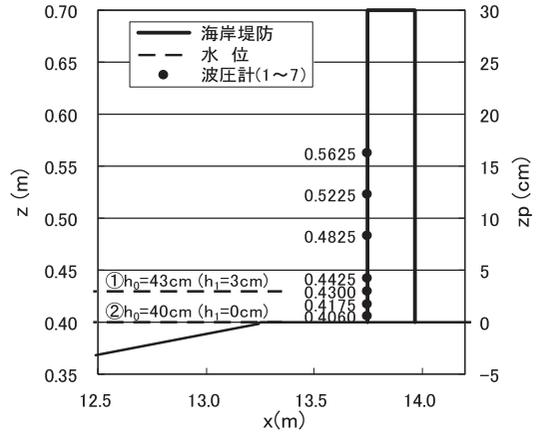


図-3 海岸堤防波圧測定位置図

(3) 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。Case-1およびCase-2は津波遡上高, Case-3およびCase-4は海岸堤防前面波圧に関するものである。ケースのサフィックスは, -1は沖水深 h_0 が43cm (離岸堤位置水深 $h_D=9.7\text{cm}$, 海岸堤防位置水深 $h_I=3\text{cm}$) であり, -2は同様に40cm (6.7cm, 0.0cm) である。また, 離岸堤ありのケースについては (1) は通常タイプ ($hc=4\text{cm}$), (2) は水中部をみのタイプ ($hc=0\text{cm}$) を表している。

遡上高 (R) は波面先端の到達位置を目視で測定し, 静水面からの鉛直距離として求めた。なお, 波浪は孤立波を対象とし, 各ケースとも造波版前面の波高 H_0 (波高計No.1) を0.8cm~8.9cmの範囲で10ランク程度変化させ波高の影響も検討している。

表-1 実験ケース

Case	水深		構造物			測定項目	
	沖 h_0 (cm)	水平部 h_1 (cm)	離岸堤		海岸堤防	遡上高	堤防波圧
			通常タイプ $hc=4\text{cm}$	水中のみ $hc=0\text{cm}$			
1-1	43	3	—	—	—	○	—
1-2	40	0	—	—	—	○	—
2-1 (1)	43	3	○	—	—	○	—
2-1 (2)	43	3	—	○	—	○	—
2-2 (1)	40	0	○	—	—	○	—
2-2 (2)	40	0	—	○	—	○	—
3-1	43	3	—	—	○	—	○
3-2	40	0	—	—	○	—	○
4-1 (1)	43	3	○	—	○	—	○
4-1 (2)	43	3	—	○	○	—	○
4-2 (1)	40	0	○	—	○	—	○
4-2 (2)	40	0	—	○	○	—	○

3. 実験結果

(1) 遡上高

図-4および図-5は遡上高 R の測定結果を、横軸に H_0/h_0 (h_0 : 沖水深, H_0 : 波高計No.1での波高), 縦軸に R/H_0 をとって示したものである. 図-4は $h_0=43\text{cm}$ の場合 (Case-1-1, 2-1 (1), (2)), 図-5は $h_0=40\text{cm}$ の場合 (Case-1-2, 2-2 (1), (2)) に対応している. 水深によらず離岸堤設置によって遡上高は低減すること, また, 入射波高が小さいほどその効果が大きいことがわかる. 水深が小さい場合の傾向は, 離岸堤なし, ありともに宇多 (1986) らの結果と傾向が合っている. 一方, 水深が大きい場合は離岸堤設置により波高によらず, 遡上高は沖の波高と同程度となることがわかる. また, 離岸堤が被災した場合 (水中部のみ) でも津波遡上低減効果が十分発揮されることが確認される.

図-6は以上の結果を基に, 離岸堤による遡上高の低減効果を具体数値として見たものである. 縦軸は離岸堤なしの場合に対するありの場合の遡上高の比率である.

先に傾向として波高が小さいほど低減効果大きいことには触れたが, 数値としてみると通常タイプの離岸堤に

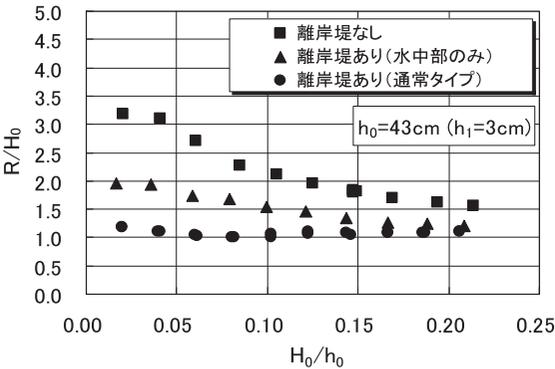


図-4 遡上高測定結果 ($h_0=43\text{cm}$: Case-1-1, 2-1 (1), (2))

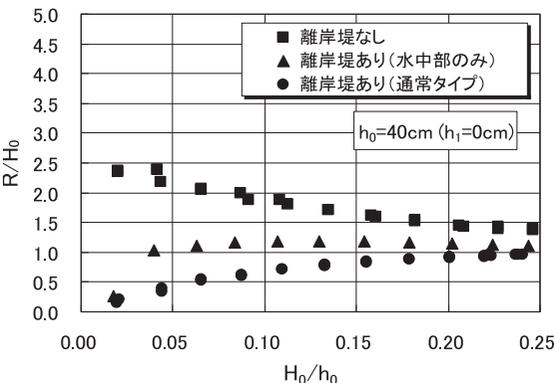


図-5 遡上高測定結果 ($h_0=40\text{cm}$: Case-1-2, 2-2 (1), (2))

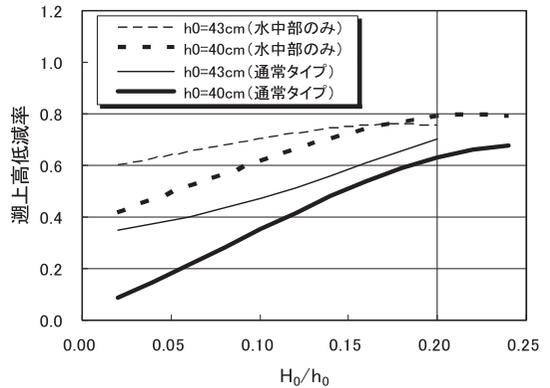


図-6 遡上高低減率

よって水深小では10%~70%, 水深大では35%~70%程度に遡上高が低減されることがわかる. また, 被災想定断面 (水中部のみ) でも40%~80% (水深小), 60%~80% (水深大) と低減されることがわかる.

(2) 海岸堤防波圧

図-7は海岸堤防への最大波圧分布の一例として, 沖水深 $h_0=43\text{cm}$ の場合 (Case-3-1, 4-1 (1), (2)) を示す. 縦軸は波圧計位置 zp を, 横軸は波圧をそれぞれ生の値で示している. 図は左から沖波高 $H_0=1.7\text{cm}$, 5.3cm , 8.9cm の結果である. 図中のプロットは各波高毎に行った2回の測定結果を, また, 実線はその2回の平均値を連ねたものである. これらのケースは海岸堤防堤脚に3cmの水深があることから, 静水面付近に波圧のピークが発生していることがわかる. また, 各波高ランク共に離岸堤設置によりピーク値並びに, 波圧発生高さの低減が認められる. 遡上高同様に離岸堤が水中部のみの場合でも, 波圧低減効果が発揮されることが波圧分布からも明瞭である.

図-8は同様に沖水深 $h_0=40\text{cm}$ の場合 (Case-3-2, 4-2 (1), (2)) の結果を示す. これらのケースでは海岸堤防堤脚の水深がゼロであるため, どの波高ランクにおいても堤防最下段で波圧のピークが発生している. 図-7と同様に離岸堤設置による波圧低減効果は明瞭であり, その効果は断面が水中部のみでも発揮されることが確認される. また, 波高の増大に伴って波圧分布が一般的な三角形分布から海岸堤防基部に近い位置で折れ曲がる傾向が見られるようになる. この現象には波高や入射波形状条件が関連しているものと考えられるが, メカニズム等の詳細については今後の課題としたい.

図-9は $h_0=43\text{cm}$ の場合について横軸, 縦軸ともに津波高 η_{max} によって無次元化して実験全データをプロットしたものである. 本研究においては離岸堤ありなし共に海岸堤防がない状態での堤防位置No.12での入射波高H12を η_{max} として整理している. データのばらつきは

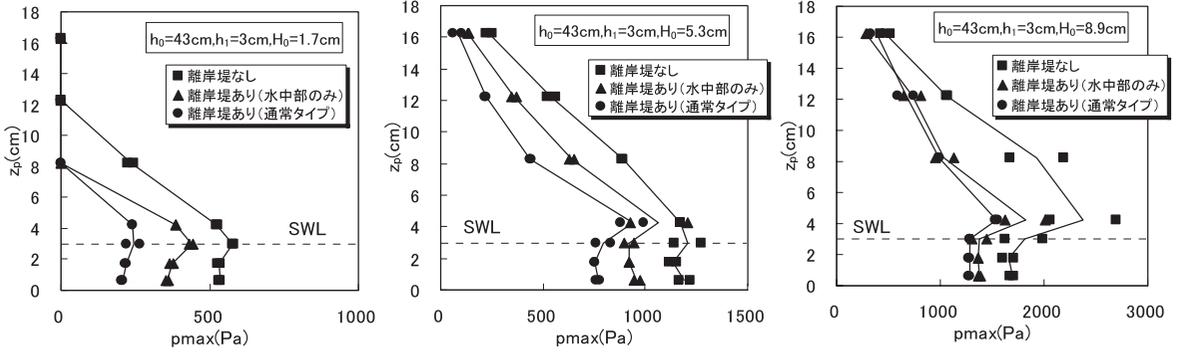


図-7 波圧分布例 ($h_0=43\text{cm}$: Case-3-1, 4-1 (1), (2))

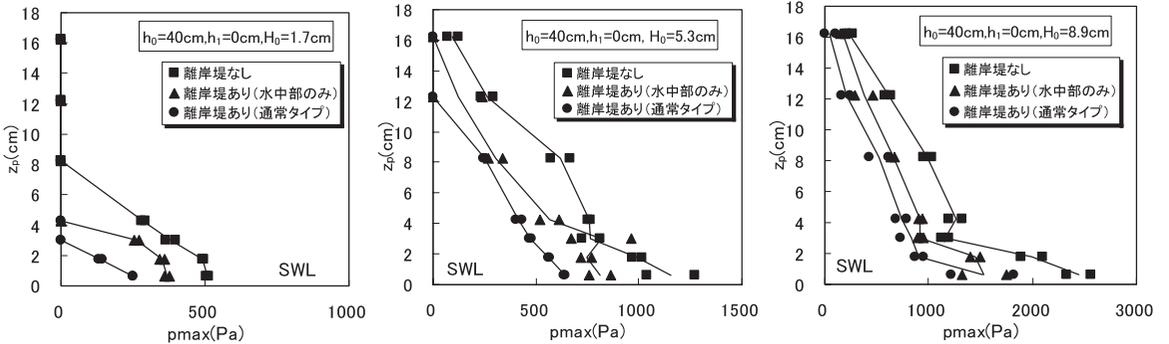


図-8 波圧分布例 ($h_0=40\text{cm}$: Case-3-2, 4-2 (1), (2))

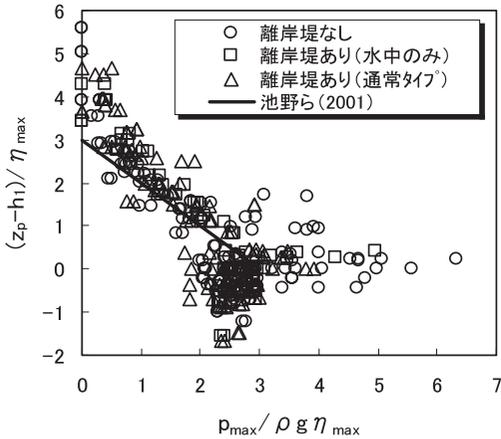


図-9 波圧分布形 ($h_0=43\text{cm}$: Case-3-1, 4-1 (1), (2))

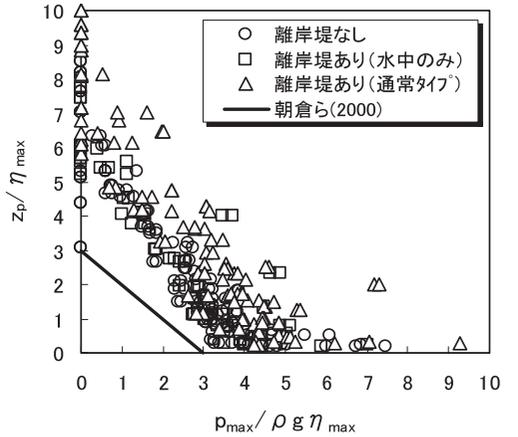


図-10 波圧分布形 ($h_0=40\text{cm}$: Case-3-2, 4-2 (1), (2))

かなり見られるものの、大まかにみれば今回の結果は離岸堤ありなし、また、離岸堤が通常タイプあるいは水中部のみによらず、同様の傾向での整理の可能性が認められる。すなわち、離岸堤の効果を含めた海岸堤防位置での入射波高で統一的に整理できる可能性が示唆される。

同図には本研究対象ケースと類似条件に対する池野ら(2001)の提案式も示している。池野らの提案式は今回

の実験結果の平均的な傾向を表している。しかしながら、静水面付近の波圧ピーク値やその上の領域で池野らの提案式を超えるデータも多く、設計上は更に検討が必要と考えられる。

図-10は $h_0=40\text{cm}$ の場合について図-9と同様な整理を試みたものである。 $h_0=43\text{cm}$ の場合と同様にデータのばらつきは大きい、離岸堤のありなし、離岸堤の形状によ

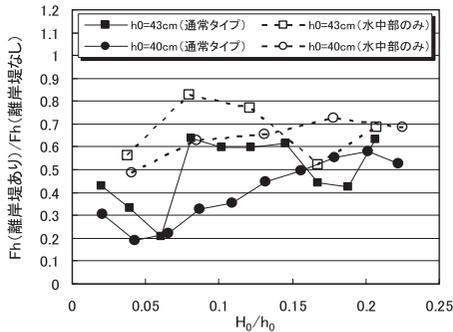


図-11 波力低減率

らず海岸堤防位置での入射波高での整理の可能性が確認される。図中には同様条件と考えられる朝倉ら (2000) の提案式も併せて示している。本研究の結果は朝倉らの提案式よりは大きく、およそ2倍程度とみなせる。これは、浅倉らが対象としているのが直立護岸を越流した津波を対象としているのに対して、本研究の場合は水深ゼロとは言っても、入射波が直接作用する状況を対象としているため、同じ波高 (津波高) でも入射運動量に差があることが考えられる。アフマドラ (2009)、富永ら (2007) も条件によっては朝倉らの提案式が過小評価になることを指摘しており更に検討を要すると考えられる。

図-11は波圧分布を積分して求められる海岸堤防全波力 F_h について、離岸堤による低減効果を波力低減率として示したものである。標準タイプの離岸堤では低減率は60%以下とみなせる。また、遡上高と同様に沖波高が小さいほど波力低減効果が大きいことがわかる。水中部のみの離岸堤の場合でも波力低減効果は明確であり、低減率は80%以下にはなることがわかる。

4. まとめ

本研究では、孤立波を対象として離岸堤設置による遡上高並びに、海岸堤防への波力低減効果について実験的な検討を行った。以下に結果をまとめる。

- 1) 通常タイプの離岸堤によって陸上斜面への遡上高は低減される。離岸堤なしの場合に対する低減率は斜面基部水深にもよるが、10%~70%である。
- 2) 被災想定断面の離岸堤 (水中部のみ) によっても遡上高低減効果は十分発揮されることがわかった。その低減率は40%~80%である。
- 3) 通常タイプの離岸堤により海岸堤防への波力は低減され、その低減率は60%以下となる。
- 4) 水中部のみの離岸堤の場合でも波力低減効果は発揮

され、その低減率は80%以下となる。

以上のように、離岸堤設置による津波遡上高低減効果が、離岸堤被災後の状況まで踏み込んだ検討を行うことによって、より実現象に即した形で明確になった。また、これまで未解明であった離岸堤設置による海岸堤防に作用する波圧低減効果が明らかとなり、津波防災設計に資する有用な知見が得られた。今後はより広範囲な実験の実施も含め、離岸堤設置による津波遡上高や、海岸堤防への津波波力のそれぞれ低減効果の定式化を目指して検討を行っていく所存である。

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.
- 池野正明・森 信人・田中寛好 (2001) : 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 846-850.
- 池野正明・田中寛好 (2003) : 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 721-725.
- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1986) : 離岸堤の津波遡上抑制効果, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 461-465.
- 大谷英夫・藤間功司・嶋原良典・富田孝史・本多和彦・信岡直道・越村俊一・折下定夫・辰巳正弘・半沢 稔・藤井裕之 (2005) : インド洋大津波によるモルディブ共和国マレ島・空港島の浸水特性とそれに及ぼす護岸・離岸堤の影響, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1376-1380.
- 加藤史訓・稲垣茂樹・福濱方哉 (2005) : 津波により海岸堤防に作用する波力に関する大型模型実験, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 756-750.
- 富樫宏由・平山康志・川野 徹・早田佳朗 (1986) : ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック散乱のメカニズムについて, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 466-470.
- 富樫宏由・平山康志・杉山正弘 (1987) : ソリトン分裂遡上津波による消波ブロック堤の破壊機構, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 517-521.
- 富永数男・中野 晋・天羽誠二 (2007) : 海岸堤防に作用する段波津波の実験, 海岸工学論文集, 第54巻 pp. 826-830.
- 中村克彦・佐々木崇之・中山哲嚴 (1998) : 海岸構造物の津波遡上抑制効果に関する実験的研究, 海洋開発論文集, vol.14, pp. 293-298.
- 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 将・今村文彦 (2002) : 津波段波の衝撃性および越流を考慮した設計外力算定フローの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 731-735.
- フェウジアフマド・嶋原良典・藤間功司・水谷法美 (2009) : 陸上構造物に作用する津波波力の推定手法に関する考察, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp. 321-325.