

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

A Study on Estimation of Tsunami Force Acting on Structures

ファウジアフマド¹・鳴原良典²・藤間功司³・水谷法美⁴

Fauzie ACHMAD, Yoshinori SHIGIHARA, Koji FUJIMA and Norimi MIZUTANI

The hydraulic experiments have been carried out for estimating tsunami wave force through water level, velocity, force and pressure measurements. Force estimation through integrating wave pressure had been conducted at almost all elements on exposed area. Precise estimation of wave force seems very difficult because the gap of time lag occurred certainly on each line of measurement points. Present study data were compared to the past of available design guidelines for tsunami forces and some available data from past experiments in order to check the validity of some tsunami wave force estimation methods. Some modification equations that refer to function of maximum inundation depth, maximum velocity and run up distance from shoreline are proposed for more considerable agreement of tsunami wave forces estimation.

1. はじめに

陸上構造物に作用する津波波力を評価するために、これまで水理実験に基づいた津波波力推定式が提案されている。しかしながら、津波波力を推定する目的に対してどのような推定方法が望ましいのかについてさえ十分な理解が得られていない。

そこで本研究では、まず構造物に作用する津波波圧の時空間的な変化が津波波力にどのように対応しているかを水理実験により調べた。次に、本研究での実験結果と既往の実験結果を利用して、各種の津波波力推定式の妥当性を検証することで、最適な波力推定手法について議論した。

2. 実験方法

実験には、防衛大学校構内の幅7m、長さ11mの平面水槽を用いた。水槽の一片にはピストン式造波装置があり、他の3辺は鉛直壁で覆われている。図-1に実験装置の概要を示す。1/200スケールを想定し、津波の沿岸における浅水変形から陸上での遡上までを再現する。沖合の水平床の水深は60cmであり、水路床から水位を増幅させるために1/3勾配斜面を設け、水深3cmの浅海域に繋げた。直立護岸の背後は平坦な陸域である。護岸からの距離(D=20,50,80,150cm)の位置に対し直方体の構造物模型(模型幅B=10,20cm)を配置した。

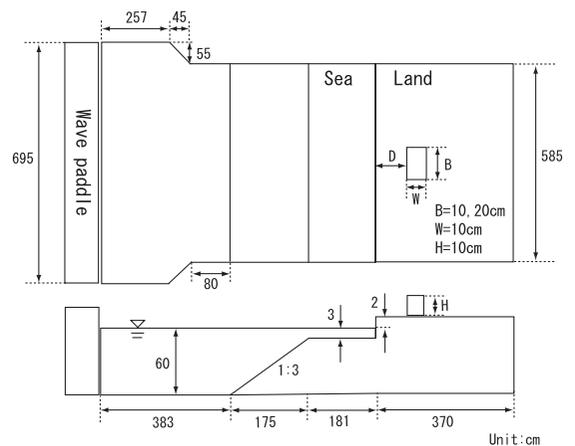


図-1 実験装置概要

津波は造波板を中立位置から静かに後退させ、そして完全に水が静止した後、前方に造波板を押し出すことにより造波させた。造波板は4秒間で正弦波状に3種類の移動距離(20, 30, 40cm)で移動させた。津波は、浅海域で碎波、段波状の波が伝播し、護岸を越流して陸域を遡上することになる。

本実験では構造物模型に作用する津波波力、陸上での遡上水深、流速、構造物模型前面の圧力を測定した。波力はロードセルにより、遡上水深の測定には容量式波高計を用いた。なお、計測方法の詳細はシマモラら(2007)と同様である。また、流速はプロベラ流速計を底面近傍に設置し計測した。圧力については圧力ゲージを構造物模型前面部に設置した。図-2は模型幅20cmの場合の配置状況であり、Line1を中心に4列計測した。また、模型幅10cmの場合では同様に2列計測した。さらに高速度カメラ(250fps)で模型に衝突する瞬間を撮影し、同時刻での波圧と水面形を比較した。

| | |
|------------|-------------------------|
| 1 学生会員 | 防衛大学校理工学研究科前期課程 |
| 2 正会員 博(工) | 防衛大学校助教システム工学群建設環境工学科 |
| 3 正会員 工博 | 防衛大学校教授システム工学群建設環境工学科 |
| 4 正会員 工博 | 名古屋大学大学院教授工学研究科社会基盤工学専攻 |

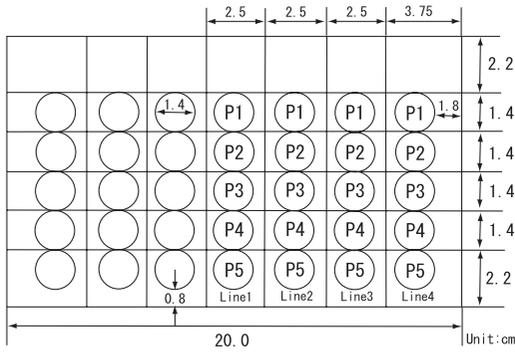


図-2 圧力ゲージの設置位置

データのサンプリング周波数は、ロードセルで100Hz, 波高計および流速計で200Hz, 波圧計で500Hzとした。1ケースごとに平均値から約5%誤差の以内の範囲に収まるまで繰り返し計測を行い、5回のデータにいてその平均値を用いた。

3. 面的な波圧積分による津波波力の推定

図-3は、模型幅20cmの場合のline-1における鉛直方向での各測定位置の波圧と、ロードセルによる津波波力の

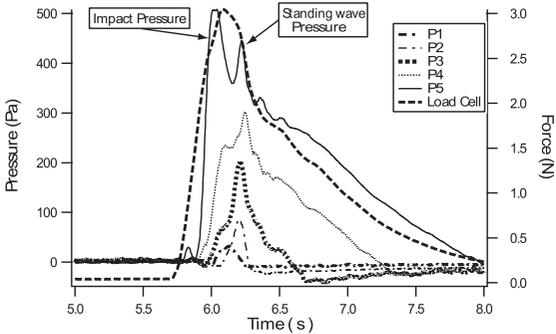


図-3 Line1上での波圧および波力の時系列 (B=20cm)

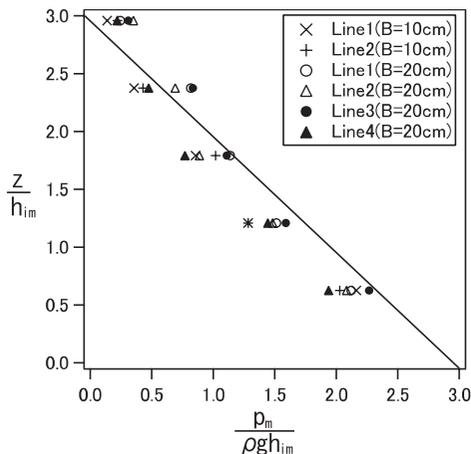


図-4 最大波圧分布

時系列である。図中の曲線は、全計測点において信頼性の高い5回のデータを採用し、そのアンサンブル平均値を用いている。なお、図において津波波力の立ち上がりが波圧よりも早くになっているのは、波圧計を底面付近で設置できなかったことに起因している。

図-3より、P5での波圧は2つのピークが観測されている。ハイスピードカメラから撮影された動画から解析すると、ほぼはじめのピーク値はスプラッシュが模型前面の最高点に達した瞬間に、2度目のピーク値はスプラッシュが波本体に突入して重複した際に生じていることがわかった。したがって最初のピークは衝撃波圧であり、2度目のピークは最大重複波圧であると考えられる。また、模型上部 (P1~P4) での最大波圧が出現する時刻は6.2~6.3 (s)であり、これはP5での2度目のピークが出現する時刻とほぼ等しい。しかしながら各測定点において波圧のピークが出現する時刻には差が見られ、鉛直方向のみならず幅方向でも同じような時間差が生じていることが確認された。これは陸上の遡上波の先端構造は複雑な3次元性を有していることや、実験の試行毎に波形が異なる不確実性が原因であると考えられる。このことは遡上波が模型前面に衝突する瞬間の写真(写真-1)において、波形先端部が幅方向に一様でないことから確認できる。

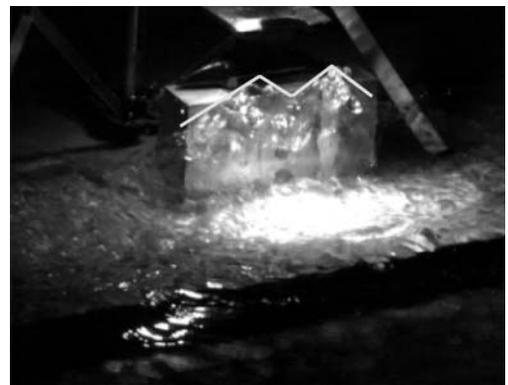
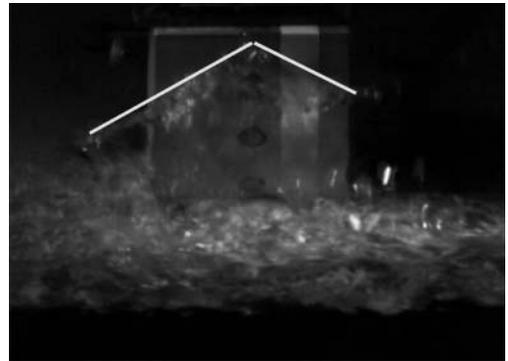


写真-1 遡上波が構造物に作用する瞬間 (上: B=10cm, 下: B=20cm)

朝倉ら(2000)は、遡上水深に基づく最大重複波圧の包絡線の積分により、護岸背後の陸上構造物に作用する津波波力の設計式を提案している。図-4は衝撃波圧も含めた本実験における最大波圧の鉛直分布である。ここでは比較のため、同図中には朝倉らの最大波圧の包絡線を直線で示している。また図中の変数として、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 z は地面を基準面とした鉛直方向距離、 p は圧力、 h_i は構造物模型を除いた場合の通過波の遡上水深である。また、変数 p と h_i に記した添字 m は各時系列データの最大値を意味し、これ以降の文中で示す変数の添字についてもこれに従う。この図より、本実験の最大波圧分布はほぼ朝倉らの分布と類似していることがわかる。しかしながら、先に述べたように各点の最大波圧のピークになる時刻には差が生じている。したがって津波波力推定において最大波圧分布を積分するような手法は必ずしも合理的とはいえず、実際の津波波力よりも過大評価している可能性があるといえる。一方で津波波力の最大値は衝撃波圧と最大重複波圧が生じる時刻の間に発生している。したがって最大重複波圧の積分が絶対に安全側になるとも言い切れない。

4. 各津波波力推定式の比較

(1) 静水圧分布型の津波波力推定式の場合

これまで津波波力評価のための実験式として、以下に示すような静水圧分布型の式が提案されており、種々の研究例がある。

$$F_s = \alpha \rho g h_m^2 B \dots\dots\dots (1)$$

F_s は構造物に作用する最大波圧分布を積分した最大水平波力であり、 B は構造物の幅である。また、式中の係数 α に関して、朝倉らは陸上構造物に対する最大重複波圧の包絡線を積分することにより、 $\alpha=4.5$ を提案している(以下、朝倉式と称する)。また、谷本ら(1984)は防波堤に対する最大重複波圧分布を提案しており、同分布を海面から鉛直上方向を積分することによって $\alpha=3.3$ が得られる(以下、谷本式と称する)。

ロードセルによる測定津波波力と朝倉式($\alpha=4.5$)による推定津波波力を比較したのが図-5である。ここでは本実験のデータのみならず、護岸を越え陸上遡上する既往の津波波力実験から廉ら(2007, 2008)およびシマモラら(2007)のデータをプロットしている。この図から、静水圧分布に基づく津波波力推定式は全体的にばらつきが大きいことがわかる。多くの場合において、朝倉式による推定津波波力は測定津波波力の倍以上になっているものの、一方で過小評価となっている場合もいくつか存在していることがわかる。

そこで、上記の推定津波波力のばらつきに対し、空間

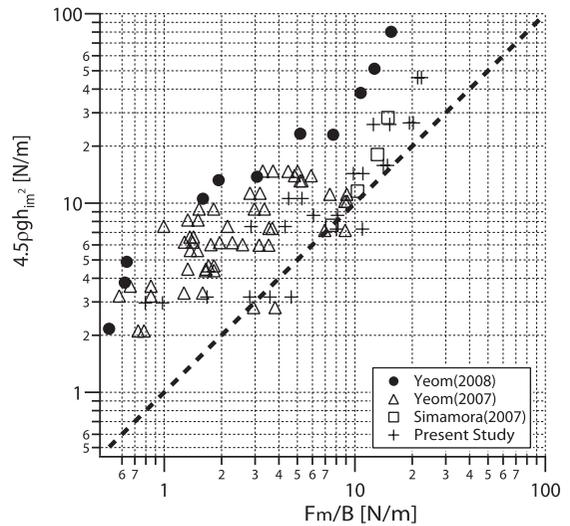


図-5 朝倉式による津波波力の推定値と実験値との比較

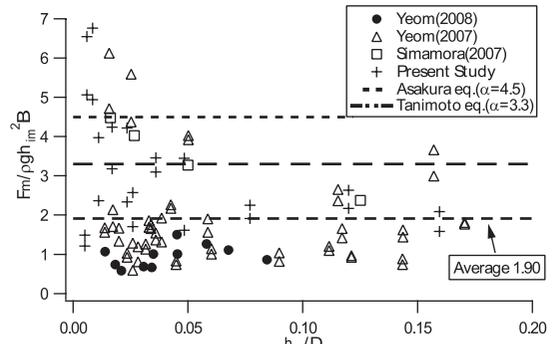


図-6 h_{im}/D に対する α の関係

的な位置関係を調べたのが図-6である。この図より、全体的にみると α は1から3の範囲に存在するケースが多いことがわかるが、一方で $h_{im}/D < 0.05$ (護岸から陸側に遠い、もしくは最大遡上水深が小さい)の範囲では、 α は0.7~7の範囲で大きくばらついている。このことは、護岸から離れるにつれ遡上水深は減少しているものの流速は大きさを保持したまま伝播するなど、実験ケースによって遡上する津波の形態が様々に異なることが原因と考えられる。以上の議論から、 $h_{im}/D < 0.05$ の範囲においては静水圧分布に基づく津波波力推定式は非合理的である。また $h_{im}/D > 0.05$ の範囲では谷本式($\alpha=3.3$)と朝倉式はともに安全側に推定可能であるが、設計公式としては谷本式の方がより経済的である。

(2) 抗力型の津波波力推定式の場合

一般に定常流における構造物に作用する流体力は抗力として評価される。陸上構造物に作用する津波波力の推定においても抗力型の以下のような式が提案されている。すなわち通過波の遡上水深 h_i と流速 u_i 、そして物体

の形状に依存する抗力係数 C_D の関数として,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D B (h_i u_i^2)_m \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる (Yeh, 2007). ここで u_i は構造物模型を除いた場合での通過波の流速であり, 抗力係数は角柱の場合 $C_D=2.0$ が採用されている (FEMA-CCM, 2005). また, $h_i u_i^2$ は運動量フラックスを意味する. さて, 抗力を計算する際の運動量フラックスの最大値の定義としては, (i) 運動量フラックスの時系列を求め, その最大値を採用した場合 ($(h_i u_i^2)_m$) と, (ii) 遡上水深と流速の各時系列の最大値を積とした場合 ($h_{im} u_{im}^2$) が考えられる. 本来の運動量フラックスの定義は前者であり, 後者については最大遡上水深 h_{im} と最大流速 u_{im} は同時刻に生じないため, これらの積を運動量フラックスとして採用するのは疑問がある. しかしながら, 津波が構造物に衝突する際は流れが非定常流であるため, 最大の津波波力を推定する場合にどちらの方法が有効かは議論の余地があるといえる.

使用する側から考えると, 現地調査結果から構造物に作用する力を推定する場合や, ハザードマップなどのデータから簡易的に波力を推定する場合は (ii) の方が便利で, 数値計算を行ったときに同時に波力を評価したいときは (i) の方が便利である. したがって, どちらの式でも使えるようにしておくのが良いであろう. そこで以下では, (i) と (ii) から導かれる波力推定式の適用性について比較・検討を行った.

(a) $(h_i u_i^2)_m$ を採用した場合

図-7は $(h_i u_i^2)_m$ を採用した場合の抗力係数の変化を示している. $C_D=2.0$ から h_{im}/D が大きくなるにつれて, C_D が大きくなる傾向にある. ここでいくつかのデータで全体の傾向から外れているものがあるが, この原因としては, 流速と遡上水深の時間変化にはずれがあるため, 見積った運動量フラックスが小さくなっていることが原因であると考えられる. 抗力係数を h_{im}/D の関数として決定する近似式 (図-7の直線) を決定することで, 運動量フラックス $(h_i u_i^2)_m$ を採用した抗力による波力推定式を以下のように得ることができる.

$$F_{D1} = \frac{1}{2} \rho C_{D1} B (h_i u_i^2)_m, C_{D1} = 2.0 + 5.4 \left(\frac{h_{im}}{D} \right) \dots (3)$$

式 (3) を適用することで, 図-8に示すように推定値は実験値を良好に再現できているといえる.

次に, 慣性力の効果を調べるため, 以下に示すモリソン式を適用した.

$$F_{D2} = \left[\frac{1}{2} \rho C_{D2} B h_i u_i^2 + C_m \rho B W h_i \frac{du_i}{dt} \right]_m, \dots\dots\dots (4)$$

$$C_{D2} = 2.0, C_m = 1.0$$

ここで C_m は慣性力係数であり, W は構造物模型の奥行き方向の幅である. 図-9に示すように $C_{D2}=2.0$ と $C_m=1.0$

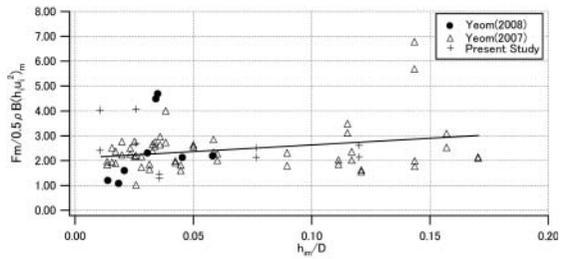


図-7 h_{im}/D に対する抗力係数の関係 ($(h_i u_i^2)_m$ を採用)

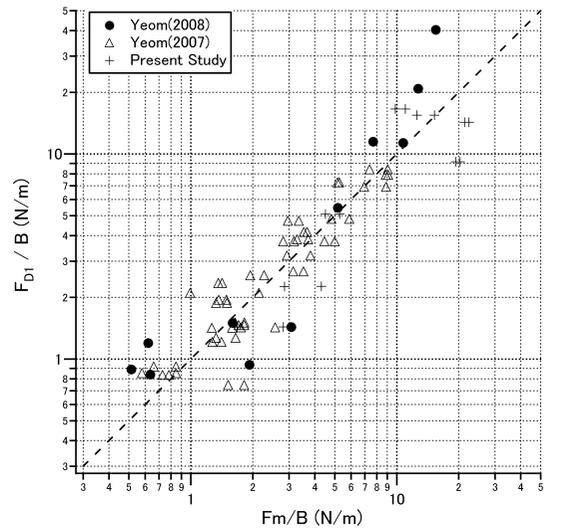


図-8 式 (3) による津波波力の推定値と実験値との比較

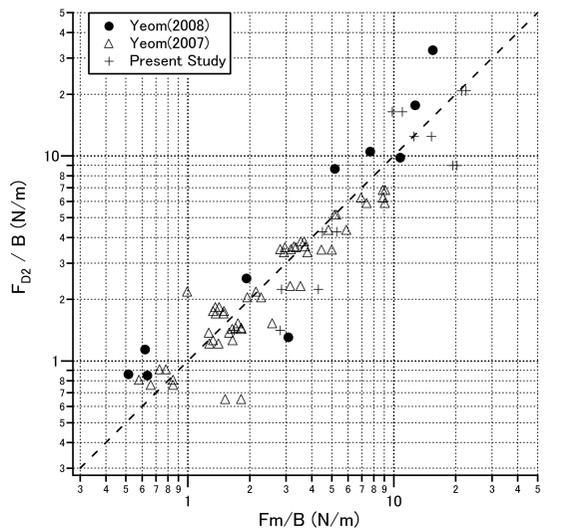


図-9 式 (4) による津波波力の推定値と実験値との比較

とすると, 全体的に推定値は図-8と同じような分布を示していることから, 式 (3) において C_{D1} が h_{im}/D の関数として増加するのは慣性力が一因であると思われる.

(b) $h_{im}u_{im}^2$ を採用した場合

$h_{im}u_{im}^2$ を採用した場合、図-10に示すように図-7よりも抗力係数のばらつきはむしろ小さくなっている。図-10から抗力係数の近似関数を再度決定し、式(5)を以下のように導出した。

$$F_{D3} = \frac{1}{2} \rho C_{D3} B h_{im} u_{im}^2, \quad C_{D3} = 1.3 + 6.3 \left(\frac{h_{im}}{D} \right) \quad \dots (5)$$

式(5)によって得られた推定値と実験値との比較が図-11である。これにより、遡上水深と流速それぞれ時系列の最大値を積としても最大津波波力を推定可能であることが示された。

以上により、本研究で提案した抗力型の津波波力推定式はそれぞれ有効であることが示された。その中でも式(4)は h_{im}/D に依存しないことから、他の式よりも優れているといえる。ただし、式(4)は加速度項を求めるために流速の時系列を正確に予測する必要があるため、既往の津波数値計算から求めた流速を使用するような場合に精度に疑問がある。したがって、津波波力推定式の適用性は、数値計算による遡上水深と流速の予測精度を含めた評価が必要である。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 各測定点において重複波圧のピークが出現する時刻には差が見られることが確認された。これは陸上の遡上波の先端構造の複雑さや波形の不確定性が原因であると考えられる。さらに、津波波力の最大ピークが出現する時間も異なっているため、津波波力推定において最大波圧分布を積分するような手法は合理的とはいえ、実際の津波波力よりも過大評価している可能性があるといえる。
- (2) 静水圧分布に基づく津波波力推定式について、 $h_{im}/D > 0.05$ の範囲では谷本式 ($\alpha=3.3$) と朝倉式はともに安全側に推定可能であるが、谷本式の方が経済的である。また、 $h_{im}/D < 0.05$ の範囲においては非合理的である。
- (3) 抗力による最大津波波力の推定を試みた。運動量フラックスの最大値($h_{im}u_{im}^2$)を採用した場合でも遡上水深と流速の各最大値を積とした $h_{im}u_{im}^2$ を採用した場合でも、静水圧分布に基づく津波波力推定式よりは実験値を高い精度で推定することができた。
- (4) 以上の議論から、津波波力推定式を適用する場合、 $h_{im}/D > 0.05$ の範囲(護岸に近い距離)では静水圧分布型、 $h_{im}/D < 0.05$ の範囲(護岸から遠い距離)では抗力型の式を使用するのが望ましい。ただし、いずれの場合においても実務における式の適用性は、数値計算に

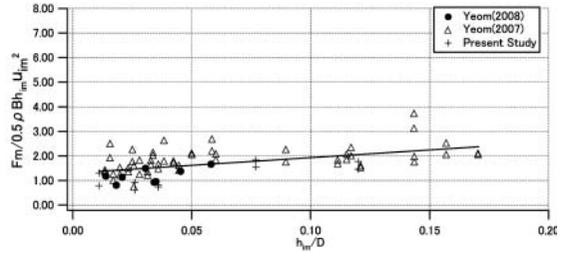


図-10 h_{im}/D に対する抗力係数の関係 ($h_{im}u_{im}^2$ を採用)

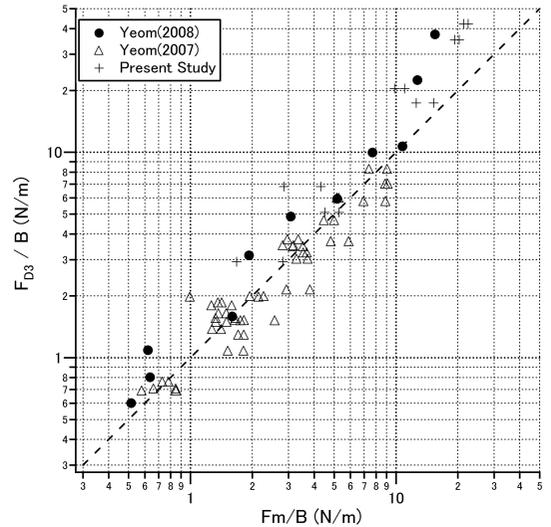


図-11 式(5)による津波波力の推定値と実験値との比較

よる遡上水深と流速の予測精度を含めた評価が必要である。

参考文献

チャルレス・シマモラ, 嶋原良典, 藤間功司 (2007) : 建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 831-835.

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津波波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 911-915.

谷本勝利・鶴谷広一・中野晋 (1984) : 1983年日本海中部地震津波における津波波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.

廉慶善, 水谷法美, 白石和陸, 宇佐美敦浩, 宮島正悟, 富田孝史 (2007) : 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 851-855.

廉慶善, 中村友昭, 宇佐美敦浩, 水谷法美 (2008) : 流体・構造連成解析による漂流コンテナの衝突力の推定に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 281-285.

Yeh, H. (2007) : Design Tsunami Forces for Onshore Structures, Journal of Disaster Research, Vol.2. No.6, pp.531-536.

FEMA-CCM (2005) : Coastal Construction Manual, FEMA 55 Report, Edition 3, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C..