

エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究

水谷法美* ・ 高木祐介** ・ 白石和陸***
宮島正悟**** ・ 富田孝史*****

陸上を遡上する津波によりコンテナに作用する津波力を水理模型実験を行って計測するとともに、津波によって漂流するコンテナの挙動特性、および漂流コンテナの衝突力の計測を行った。遡上波の波速は微小振幅長波理論のほぼ2倍で近似でき、漂流するコンテナの速度も遡上流速と同程度になることが判明した。また、コンテナの衝突力は付加質量に大きく依存し、そのためコンテナの重量よりもコンテナの長さによって変化する。そして、その大きさは運動量と力積の関係をモデル化した関係式によりほぼ近似可能である。さらに、コンテナに作用する津波力は抗力項が支配的であり、抗力のみで算定可能であることが明らかとなった。

1. はじめに

津波来襲時に津波によって漂流する物体は津波の破壊力を増大させることが指摘され、主に流木を対象にその挙動や衝突力が研究されてきた。近年では、海運に占めるコンテナの割合が増加しており、港湾に野積みされているコンテナ数も非常に多く、このようなコンテナが津波により漂流した場合の二次災害が懸念されている。2004年12月26日に発生したインド洋大津波では、津波による漂流物が被害を増大させていることが示されており、今後発生が予想される東海地震津波や東南海・南海地震津波の対策にも考慮する必要がある。

コンテナの漂流は作用流体力（津波力）に大きく依存する。朝倉ら（2000）は津波の浅水変形を考慮した水理実験で、直立護岸背後の陸上構造物に作用する津波力の評価方法を提案した。また、大森ら（2000）は、朝倉らによる実験結果での直立護岸を越流した津波の水位・流速の再現計算を行い、修正モリソン式を用いることにより非分裂波の進行波による波力の時系列評価をしている。津波による漂流物・浮遊物の研究として、木材を対象に、松富による一連の研究（例えば、松富・池田、1992）や高（1983）、池野ら（2001、2003）の研究が、津波石を対象に野路ら（1993）の研究があり、今村ら（2001）は津波石を用いた歴史津波の再現計算の検証や津波石の移動を再現する数値モデルの研究を行っている。しかし、コンテナに関しては水谷ら（2004）が実験的に検討を行っているが、必ずしも十分な知見が得られているとは言い難い。そこで本研究では、エプロン上に遡上した津波に

よるコンテナへの作用津波力の特性と、コンテナの移動限界や漂流特性、および衝突力について、津波を模擬した極浅海波や孤立波を用いた水理模型実験結果に基づいて考究する。

2. 水理実験

縮尺1/75の模型実験を長さ28.0 m、幅8.0 m、高さ0.8 mの平面波浪水槽を使用して行った。一様水深部の水深 h を0.22 mとし、高さ0.25 m、長さ1.0 m、幅4.0 mの矩形のエプロン模型を設置した(図-1参照)。コンテナ模型は長さを20 ftと40 ftの2種類とし、重量 W をそれぞれ6種類ずつ変化させた。入射波は規則波と孤立波とし、周期を規則波で4種類、孤立波で5種類変化させた(表-1参照)。なお、規則波は極浅海波（長波）となるようにした。

表-1 入射波条件

周期波	T (s)	H_f (m)	孤立波	T (s)	H_f (m)
CASE 1	10.0	0.053	CASE 5	8.0	0.048
CASE 2	8.0	0.048	CASE 6	6.0	0.056
CASE 3	6.0	0.043	CASE 7	6.0	0.069
CASE 4	6.0	0.062	CASE 8	4.0	0.052
-	-	-	CASE 9	4.0	0.073

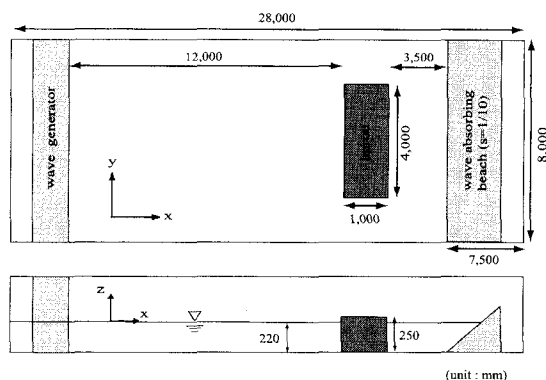


図-1 実験水槽の概要

* 正 会 員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

** 正 会 員 修(工) ビーシー橋梁 エンジニアリング部

*** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

**** 正 会 員 工修 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所長

***** 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所津波防災センター

実験では、エプロン上に遡上した波の特性を得るために、遡上波の水位、流速、および固定されたコンテナ前後での水位を計測した。また、コンテナの移動特性を知るために、コンテナに作用する津波力、コンテナの漂流速度、衝突力の計測を行った。なお、水位を電気容量式水位計で、津波力を三分力計で、衝突力を受圧板で、遡上波の流速とコンテナの漂流速度を0.1 s 間隔でキャプチャーしたビデオ画像により計測した。また、可変勾配斜面を使ってコンテナとエプロン表面の静止摩擦係数 μ_s を求めた。

3. 実験結果と考察

(1) 遡上波の特性

図-2 に、遡上波の最大水位のエプロン前面からの距離 x (波進行方向を正) にもなう変化を示す。いずれの波浪条件でも、 x の増加とともに最大水位が線形的に小さくなることを確認できる。遡上波はエプロン上を伝播

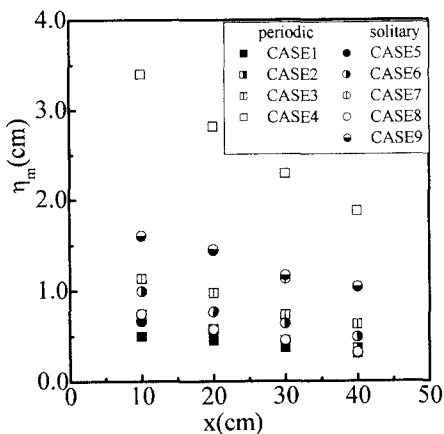


図-2 x 方向の最大遡上水位の変化

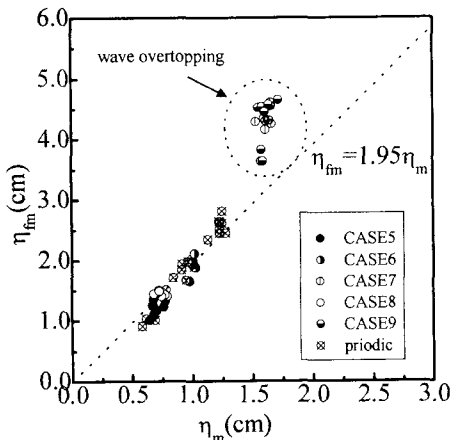


図-3 最大遡上水位とコンテナ前面の最大水位

するにしたいが、波峰が切り立った急峻な波から徐々に波高を減衰させながら緩やかな波へと変化していく。この際、打ち上がった直後の不安定な波が碎波しながら進行する場合も多く認められた。

このような波が $x=11.5$ cm に固定したコンテナに入射した時のコンテナ前面水位 η_{fm} とコンテナのない場合の最大水位 η_m の関係を図-3 に示す。越波が生じる場合を省くと最大遡上水位とコンテナ前面の最大水位の関係はほぼ直線で近似できる。そしてその関係は、20 ft コンテナの場合 $\eta_{fm}=1.95\eta_m$ 、40 ft コンテナの場合 $\eta_{fm}=2.10\eta_m$ となり、固定されたコンテナ前面の最大遡上水位は、コンテナのない場合の約2倍になることが判明した。一方、コンテナ背後の水位は非常に小さく、本実験ではコンテナ背後に作用する波圧はほとんど寄与しないことを確認した。

図-4 は、最大遡上水位 η_m と遡上流速 C_x の関係を示したものである。図中に示した点線は、松富 (1998) による危険側を想定した時の浸水深と流速の関係式や Ramsden (1996) による陸地を伝播する流速と波高の関係式で示されている $C_x=2\sqrt{g\eta_m}$ を示す。最大遡上水位が大きくなるにともない遡上流速は大きくなり、点線で示す $C_x=2\sqrt{g\eta_m}$ で近似できる。ただし、最大遡上水位が同程度であっても、 $x=20$ cm での流速に比べ $x=40, 60$ cm の流速のほうが大きくなっているが、これは、波がエプロン上に打ちあがった直後の波は不安定で、その後波が碎波しながら進行するため、 $x=40, 60$ cm 付近の水粒子速度が増大したためと考えられる。

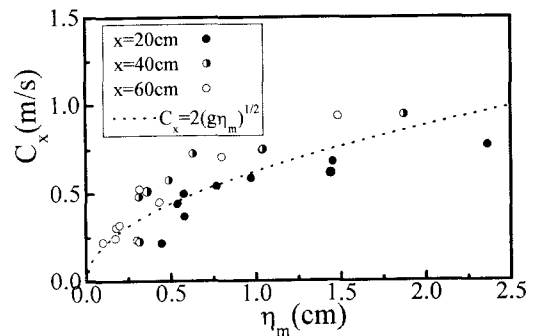
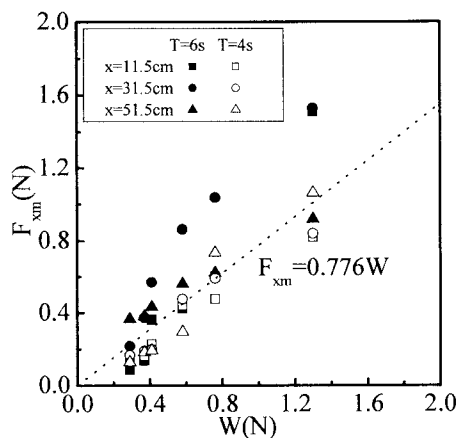
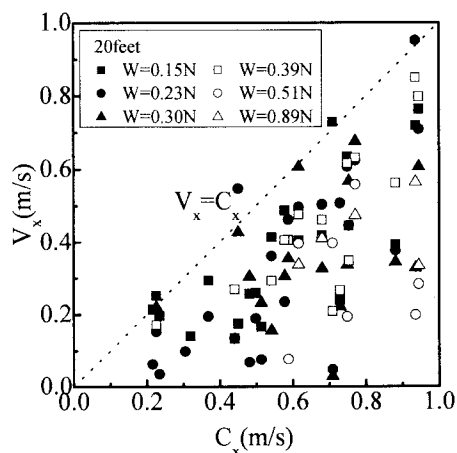


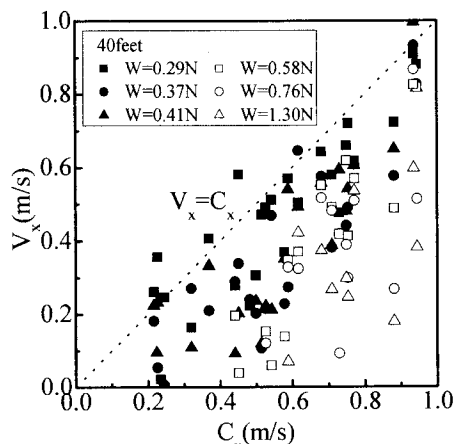
図-4 最大遡上水位と遡上流速

(2) コンテナの漂流特性

図-5 は、コンテナの重量 W と移動限界時の作用津波力 F_{xm} の関係を示したものである。図中の点線は、津波力と摩擦力の釣り合い $F_{xm}=\mu_s W$ (静止摩擦係数 $\mu_s=0.776$) の値を示したものである。ややばらつきがあるものの、津波力が最大静止摩擦力を越えるとコンテナは移動し始めるといえる。


 図-5 F_{xm} とコンテナの移動限界


(a) 20ft コンテナ



(b) 40ft コンテナ

図-6 遡上流速とコンテナの漂流速度

図-6 は、遡上流速 C_x とコンテナの漂流速度 V_x の関係を示したものである。比較のため $V_x = C_x$ を点線で示し

た。遡上流速が大きくなると、コンテナの漂流速度も大きくなる。コンテナ重量が小さい場合には、ほぼ遡上流速と同程度の速度を示す場合もあるが、本研究の範囲ではほとんど遡上流速に比べ漂流速度は小さくなった。本実験では孤立波と周期波のいずれの場合も波の周期が津波に比べて短く、流体力の作用時間が短いためコンテナが十分加速する前に波が通過したためこのような結果になったが、実際の津波では流体力の作用時間が長く、最終的にはコンテナ重量が大きい場合でもほぼ遡上流速に近い速度で漂流することが考えられる。

(3) コンテナの漂流衝突力

図-7 は、最大遡上水位 η_m と漂流衝突力 F_m の関係を示したものである。衝突力と最大遡上水位の間にはほぼ線形の関係が認められる。その傾きは、コンテナの重量によっても若干差があるが、コンテナ長さの差が大きく、40 ft コンテナの方が 20 ft コンテナの約 2 倍の傾きを示している。これらから漂流衝突力はコンテナ重量よりもコンテナ長さに大きく依存することが指摘でき、水谷ら (2004) と同様の結果が確認できた。したがって、漂流衝突力には、コンテナ前面が堰き止める水塊の質量（付加質量）が大きく影響していることが考えられる。

ここで衝突力を以下のようにモデル化する。コンテナの漂流速度でコンテナと水塊が一体となって衝突し、衝突前の運動量が全て力積として作用したと考えると式 (1) の近似が可能である。なお、コンテナが衝突する際にコンテナが堰きとめている水塊を直方体で近似し、その高さを前述の関係より $\eta_{fm} = 2\eta_m$ とし、衝突時間 dt を漂流衝突力の時間波形の立ち上がりから最大値までの時間と仮定する (図-8 参照)。

$$F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{W V_x}{g dt} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 dt : 衝突時間、 η_m : 最大遡上水位、 ρ_w : 水の

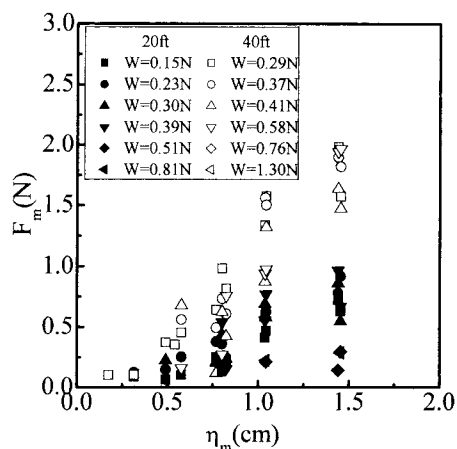


図-7 最大遡上水位と漂流衝突力

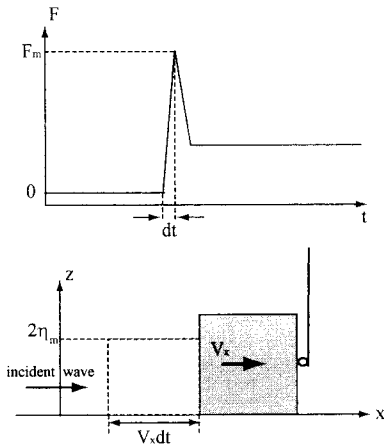


図-8 衝突時間と漂流衝突力のモデル化

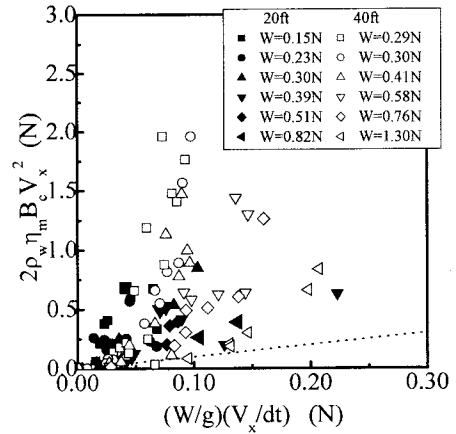


図-10 衝突力における付加質量とコンテナの質量の比

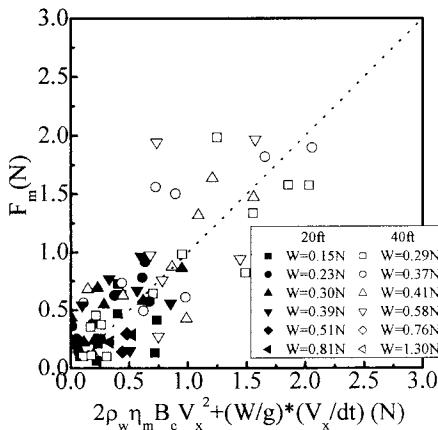


図-9 衝突力の実測値と計算値

密度, B_c : コンテナ幅, V_x : コンテナの漂流速度, W : コンテナ重量, g : 重力加速度で, 右辺第1項は水塊の質量, 第2項はコンテナの質量である。

図-9に漂流衝突力の実測値と式(1)による計算値の比較を示す。コンテナ前面の水塊を直方体とみなしていることや実際は移動しているコンテナの前面水位を固定しているコンテナ前面の水位で近似していることなどによって考えられる誤差があり, ばらつきはあるものの式(1)のモデル化は良好な近似であるとみなせる。図-10は式(1)の右辺第1項と第2項の比を示したものである。コンテナの質量による力に比べ, 水の付加質量による力が非常に大きくなっていることが確認できる。したがって, 前述したような漂流衝突力はコンテナの質量よりも付加質量による力に依存していることがここからも確認できる。

(4) コンテナに作用する津波力

コンテナに作用する津波力を式(2)に示すモリソン式

を適用し, 算定する。本研究では, 最小自乗法を使って抗力と慣性力に分離するとともに, その係数を使った津波力の計算値と実験値を比較し, モリソン式の適用性を検討した。なお, モリソン式に必要な遡上波の流速については, コンテナ位置でオイラー的に計測することができなかったため, 水位変動と水平方向流速の間に線形の伝達関数が適用できるものとして遡上波の水位の時間変化とラグランジュ流速から流速の時間波形を求め, さらにそれを時間微分して加速度の時間波形を求めて使用した。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_w A u |u| + C_M \rho_w V \dot{u} \quad (2)$$

ここに, C_D : 抗力係数, C_M : 慣性力係数, A : 構造物の流速方向の投影面積, u : 流速, V : 構造物の没水体積, $\dot{u}$: 加速度である。

図-11は, CASE7において実測した津波力 F_x とモリソン式により計算した F_x の時間変動を示したものである。計算値と実験値の時間波形はほぼ一致しており, コンテナに作用する津波力はモリソン式により算定可能といえる。なお, 抗力項と慣性力項を比較した結果, コンテナに作用する津波力には抗力項が卓越していることが確認された。図-12と図-13に抗力係数 C_D , 慣性力係数 C_M と

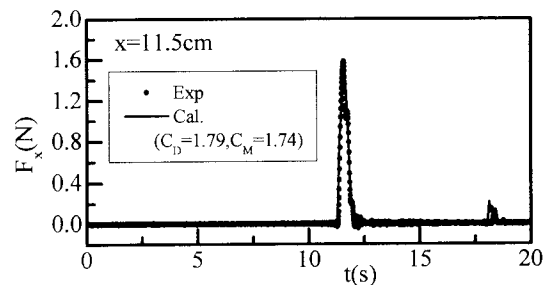


図-11 津波力の計算値と実験値の時間波形

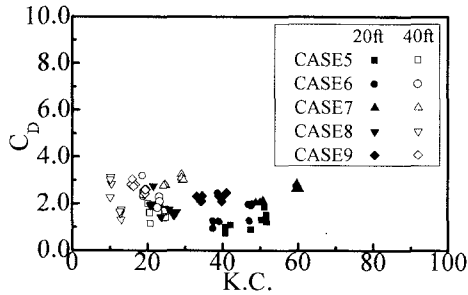


図-12 抗力係数と K.C. 数の関係

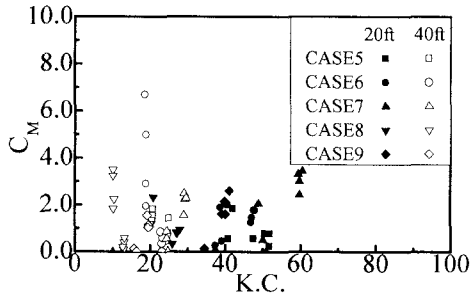


図-13 慣性力係数と K.C. 数の関係

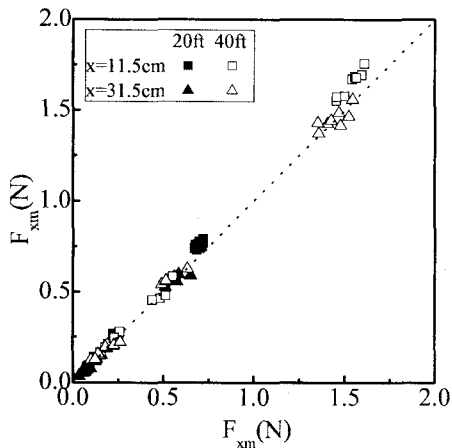


図-14 津波力の計算値と実測値の比較

K.C. 数の関係を示す。抗力が卓越しているため C_M にバラツキが認められるが、 C_D はほぼ一定で 2 前後の値となる。また、抗力が卓越していることから、津波力の実測値とモリソン式の抗力項のみの計算値と比較した結果を図-14 に示す。計算値と実測値はほぼ一致しており、モリソン式の抗力項のみを用いることでコンテナに加わる津波力を算定することができることを確認した。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

1) エプロンに遡上した波は砕波しながら進行し、最大

水位 η_m は、遡上波の進行とともに減少する。

- 2) 固定されたコンテナに衝突した遡上波は、コンテナ前面（海側面）ではほぼ $2\eta_m$ まで打ち上がる。一方、コンテナ背後の水位は非常に小さく、本実験ではコンテナ背後に作用する波圧は流体力にほとんど寄与しない。
- 3) 遡上波の流速は、 $2\sqrt{g\eta_m}$ で近似できる。
- 4) 異なる重量のコンテナの移動限界と作用津波力の関係より、コンテナは作用津波力 F_m が最大静止摩擦力 $\mu_s W$ を超えた時に移動し始める。すなわち、静的釣合で移動限界を近似できることが明らかとなった。
- 5) コンテナの漂流速度は、コンテナ重量が小さい場合にはほぼ遡上流速と同程度の値になる。しかし、コンテナ重量が増すとコンテナの漂流速度は遡上流速に比べ小さくなる。ただし、これは遡上波の周期が短いためであり、流体力の作用時間の長い実際の津波では重量の大きいコンテナであっても遡上流速と同程度まで増加するものと推察される。
- 6) コンテナの衝突力は付加質量の影響が大きいコンテナの重量よりも長さに依存する。さらに衝突力は運動量と力積の関係を使ったモデルにより近似できる。
- 7) 津波力をモリソン式で算定可能である。さらに、津波力には抗力項が支配的であり、抗力のみで近似可能である。

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・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.
- 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.
- 今村文彦・吉田功・Moore, Andrew(2001): 沖縄県石垣島における1771年明和津波と津波石移動の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 346-350.
- 大森政則・藤井直樹・京谷修・高尾誠・金戸俊道・池谷毅(2000): 直立護岸を越流した津波の水位・流速および波力の数値計算, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 376-380.
- 高隆二(1983): 構造物に作用する木材衝撃力の理論的解析, 海岸工学論文集, 第30巻, pp. 322-326.
- 野路正浩・今村文彦・首藤伸夫(1993): 津波石移動計算法の開発, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 176-180.
- 松富英夫(1998): 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 361-365.
- 松富英夫・池田弘樹(1992): 水の緩衝機能を考慮した弾性波理論に基づく流木衝撃力の評価, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 691-695.
- 水谷法美・山口聡・宮島正悟・富田孝史(2004): 津波によるエプロン上のコンテナの漂流特性とその衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 736-740.
- 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.
- Ramsden J.D.(1996): Forces on a vertical wall due to long waves, bores, and dry-bed surges, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol. 122, pp. 134-141.