

エプロン上のコンテナに作用する津波の流動場 と波圧及び津波力に関する3次元数値解析

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS ON TSUNAMI WAVES
AROUND CONTAINERS ON APRON AND TSUNAMI-INDUCED WAVE
PRESSURE AND TSUNAMI FORCE ACTING ON CONTAINERS

中村友昭¹・白石和睦²・宇佐美敦浩³・水谷法美⁴・宮島正悟⁵・富田孝史⁶

Tomoaki NAKAMURA, Kazutomo SHIRAISHI, Atsuhiko USAMI,
Norimi MIZUTANI, Shogo MIYAJIMA and Takashi TOMITA

¹学生会員 修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²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(同上)

³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(同上)

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(同上)

⁵正会員 修(工) 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(〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町 1-57-3)

⁶正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所津波防災研究センター(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

Tsunami-induced wave pressure and tsunami force acting on containers on an apron are investigated with a three-dimensional numerical simulation based on MARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) as well as hydraulic model experiments for the measurements of runup height on the apron and tsunami force acting on the containers. It is consequently found that the numerical method allows the good estimations of both the runup height on the apron and tsunami force acting on the containers. It is also revealed that the maximum runup height in front of the containers gives the maximum wave pressure on the containers with hydrostatic pressure approximation, however impact pressure on the lower part of the containers may exceed this hydrostatic water pressure.

Key Words : *tsunami, container, apron, runup height, wave pressure, tsunami force, three-dimensional numerical simulation, hydraulic model experiment*

1. 緒言

津波の来襲による木材等の物体の漂流は津波の破壊力の増大とそれに伴う沿岸域の被害の拡大を招くことから、被害軽減のためにもその挙動の把握が急務である。近年では需要の拡大からコンテナの取扱量が増加しており、港湾に野積みしたコンテナが津波により漂流した際の二次災害が危惧されている。水谷ら^{1),2)}は水理模型実験によりエプロン上のコンテナに作用する津波力やコンテナの漂流に伴う衝突力に関して検討しており、モリソン式により津波力が算定できることや衝突力はコンテナが堰き止める水の質量に強く影響を受けることなどを明らかにしている。しかし、漂流特性の解明に不可欠なコンテナ周辺の流動場の詳細な計測は行っておらず、また津波力の特性を議論する上で重

要な波圧分布に対する検討も行っていない。

津波の作用に伴う波圧に関して、谷本ら³⁾は直立壁に作用する段波性津波による津波力に関する水理模型実験により波圧分布の算定法を提案しており、朝倉ら⁴⁾は直立護岸を越流した津波による陸上構造物に作用する波力の評価手法の提案を目的とした水理模型実験を行い、構造物を設置しない状態での遡上水位により構造物上の波圧分布が評価できることや構造物の底面近傍での波圧は非分裂波と比較してソリトン分裂波の方が大きくなることを確認している。また、池野ら^{5),6)}は砕波段波津波と陸上遡上津波を対象にした水理模型実験により鉛直壁に作用する最大波圧の算定式を提案しており、池谷ら⁷⁾は護岸背後の陸上部に設置した直方体構造物に作用する波圧の時空間変動特性を水理模型実験により明らかにしている。しかし、最大遡上水位の3倍

の高さを基点とする静水圧分布^{4),5),6)}を超える波圧が構造物の底面付近で生じる機構や最大波圧の発生時刻などの波圧の特性についての詳細な検討を行っている事例は非常に限られている。

そこで本研究では、まずエプロン上に遡上した津波によるコンテナ周辺の流動場の解析に有用な3次元数値波動水路を著者ら⁸⁾の手法を基に開発し、水谷ら^{1),2)}を参考に行った水理模型実験との比較によりその妥当性を検証する。そして最後に、開発した3次元数値波動水路によりエプロン上のコンテナに作用する波圧の特性に対する詳細な検討を行う。

2. 数値計算手法

著者ら⁸⁾は捨石護岸の背後に設置した埋立土砂の吸い出し機構を解明するために非圧縮性気液二相流を解析できるVOF法に基づく3次元数値波動水路を開発しているが、本研究では同水路にさらに改良を施した以下の手法を適用した。すなわち、透過性構造物による慣性力と抗力の効果⁹⁾、CSF (Continuum Surface Force) モデル¹⁰⁾に基づく表面張力の影響、Smagorinsky モデル¹¹⁾によるLES (Large Eddy Simulation) を導入した次に示す連続式、運動方程式、VOF関数 F の移流方程式を採用した。

$$\frac{\partial(mv_j)}{\partial x_j} = q^* \quad (1)$$

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \frac{f_i^s}{\bar{\rho}} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu_t D_{ij}) - R_i + Q_i - \beta_{ij} v_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(mF)}{\partial t} + \frac{\partial(mv_j F)}{\partial x_j} = Fq^* \quad (3)$$

ここで、 v_i は実流速ベクトル、 p は圧力、 x_i は位置ベクトル、 t は時間、 g_i は重力加速度ベクトル、 $\bar{\rho} = F\rho_w + (1-F)\rho_a$ は流体の密度、 $\nu_t = \hat{\nu} + \nu_e$ 、 $\hat{\nu} = F\nu_w + (1-F)\nu_a$ は流体の動粘性係数、 ν_e は渦動粘性係数、 m は空隙率、 $q^* = q(y, z; t)/\Delta x_s$ 、 $q(y, z; t)$ は3次精度孤立波¹²⁾に基づく造波位置でのわき出し強さ、 Δx_s は造波位置での x 軸方向の格子幅、 C_A は付加質量係数、 $D_{ij} = (\partial v_i/\partial x_j + \partial v_j/\partial x_i)/2$ はひずみ速度テンソル、 R_i は抵抗力ベクトル、 Q_i は造波ソースベクトル、 β_{ij} は減衰係数行列であり、下付きの w と a はそれぞれ液相、気相での値を表している。ただし、 σ を表面張力係数、 κ を曲率、 $\bar{\rho} = (\rho_w + \rho_a)/2$ を気液界面での流体の密度、 C_{D2} 、 C_{D1} をそれぞれ線形、非線形抵抗力係数、 d_m を中央粒径、 C_s をSmagorinsky係数、 Δ をフィルター幅、 $|D|$ をひずみ速度テンソルの大きさ、 g を重力加速度、 β を付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数¹³⁾とすると、 ν_e 、 f_i^s 、 R_i 、 Q_i 、 g_i 、 β_{ij} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 |D| \quad (4)$$

$$f_i^s = \sigma \kappa \frac{\partial F}{\partial x_i} \frac{\hat{\rho}}{\bar{\rho}} \quad (5)$$

$$R_i = \frac{12C_{D2}\hat{\nu}(1-m)}{md_m^2} v_i + \frac{1}{2} \frac{C_{D1}(1-m)}{md_m} v_i \sqrt{v_j v_j} \quad (6)$$

$$Q_i = v_i \frac{q^*}{m} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\hat{\nu} \frac{q^*}{m} \right) \quad (7)$$

$$g_i = [0 \quad 0 \quad g]^T \quad (8)$$

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

本論では、連続式(1)と運動方程式(2)の解法にAmsden・Harlow¹⁴⁾のSMAC法を用い、運動方程式(2)の時間発展項の離散化には3次精度Adams-Bashforth法を、対流項の離散化にはChakravarthy・Osher¹⁵⁾の3次精度TVD (Total Variation Diminishing) スキームを、その他の項の離散化には2次精度中央差分法を、また圧力方程式の解法にはMICCG (Modified Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 法を適用した。一方、VOF関数の移流方程式(3)の解法には功刀¹⁶⁾のMARS (Multi-interface Advection and Reconstruction Solver) を採用し、気相を含む非圧縮性気液二相流に対する解析を行った。

3. 水理模型実験

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の平面波浪水槽(長さ28.0m、幅8.0m、高さ0.8m)に縮尺1/75でモデル化した長さ1.0m、幅4.0m、高さ0.25mのエプロン²⁾を設置して水理模型実験を行った。本実験では、コンテナとして32×80×35mmの20ftコンテナと32×163×35mmの40ftコンテナを取り扱い、入射波としてピストン型造波板のストロークと造波所要時間(以下、周期 T と呼ぶ)を数種類ずつ変化させた計8種類の孤立波を採用した(表-1)。

コンテナの沖側前面に生じる打上水位に関して、エプロン前面から105、205、305、405または505mm岸側にコンテナを固定し、その5mm沖側での打上水位を電気容量式水位計(KENEK製CHT6-30)により計測した。一方、コンテナに作用する津波力を計測する実験では、エプロン前面から105、305または505mm岸側に設置したコンテナに作用する津波力を3分力計(共和電業製LSM-5KBS)により計測した。いずれの実験でもエプロン前面から5、50または100mm沖側の水位

表-1 入射波条件

ケース	周期 T [s]	波高 H [cm]	静水深 h [cm]
Case 1	4.0	2.8	22.0
Case 2	3.0	3.8	22.0
Case 3	3.0	3.0	22.0
Case 4	3.0	2.8	22.0
Case 5	2.0	6.8	22.0
Case 6	2.0	6.0	22.0
Case 7	2.0	5.0	22.0
Case 8	2.0	4.0	22.0

を電気容量式水位計により計測するとともに、20 ft または 40 ft コンテナを 1 個だけ設置した場合に加えてコンテナを 2 段積みにした場合の実験も行った。

4. 結果及び考察

本研究で使用した数値波動水路を図-1 に示す。すなわち、エプロンの長さは水理模型実験と同様に 1000 mm としたが、エプロンの岸側端には不透過壁を設置して格子数の削減を図った。また、コンテナの両側にはコンテナ幅 B_c の 2 倍、すなわち $2B_c$ の隙間を設けた。エプロンとコンテナの表面にはスリップ条件を課し、側面の境界条件として勾配ゼロの開境界条件を採用した。計算格子の幅はコンテナの内部で $6.40 \times 8.00 \times 5.00$ mm (20 ft コンテナ) または $6.40 \times 8.15 \times 5.00$ mm (40 ft コンテナ) とし、さらなる格子数削減のためにコンテナから遠ざかるに従い格子幅を約 5% ずつ広げた不等間隔格子を用いた。なお、透過性構造物は取り扱わないことから $C_A = 0.0$, $C_{D2} = 0.0$, $C_{D1} = 0.0$ とし、その他は $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_w = 9.97 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a = 1.18 \text{ kg/m}^3$, $\nu_w = 8.93 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu_a = 1.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\sigma = 7.20 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, $C_s = 0.173$ と設定した。

造波ソースを用いた入射波の造波に関して、 $T = 3.0$ s の場合 (Case 2~Case 4) は 3 次精度孤立波¹²⁾による計算結果が実験値とほぼ一致したものの、 T が 2.0 s (Case 5~Case 8) や 4.0 s (Case 1) の場合は計算と実験で孤立波の裾の幅が若干異なる傾向が確認された。そこで、 $T = 2.0$ s の場合は孤立波を時間方向に 0.9 倍して裾の幅を狭め、 $T = 4.0$ s の場合は孤立波を時間方向に 1.1 倍して裾の幅を広げて計算を行った。その結果、後述するように実験結果との一致が認められたことから、以下この孤立波を用いて検討を行った。

(1) コンテナ周辺の流動場

エプロン前面から 505 mm 岸側に 20 ft コンテナ 1 個を設置した場合のエプロン上への遡上波によるコンテナ周辺の流動場の比較を図-2 に示す。入射波は Case 7 (表-1) の条件であり、同図の左図は実験結果を、右図は計算結果を表す。図-2 より、エプロン上に遡上した孤立波がエプロン上を進行し (図-2(a))、コンテナの沖

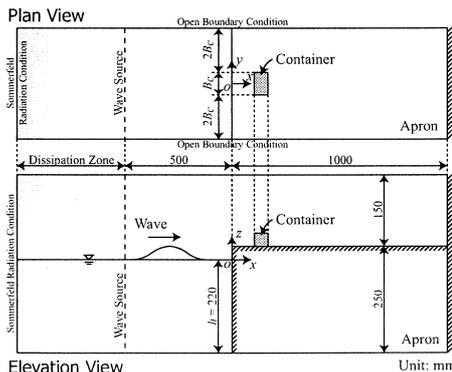


図-1 数値波動水路の概略図

側でほぼ真上に打ち上げられる様子 (図-2(b)) が確認できる。その後、コンテナの沖側前面での反射波に起因する沖向きの砕波が生じており (図-2(c)~(d))、さらに遡上水位が比較的大きいこのケースではその波が後続の遡上波に乗ってコンテナを若干乗り越える現象 (図-2(e)) も認められる。同様の現象は同図右図からも確認できることから、本論で使用した数値計算手法の妥当性が定性的に確かめられた。

(2) コンテナ沖側の打上水位

エプロンの 5 mm または 100 mm 沖側の水位変動 ξ とコンテナの 5 mm 沖側の打上水位 η に関して、実験値と計算値の比較を図-3 に例示する。同図の実線は実験結果を、破線は計算結果を表す。図-3 より、入射波高が比較的大きい条件 (図-3(b)) では打上水位 η を若干過小評価する傾向が認められるものの、実験結果との極めて良好な一致が確認できることから、定量的にも本計算手法の妥当性が検証できた。

(3) コンテナに作用する津波力

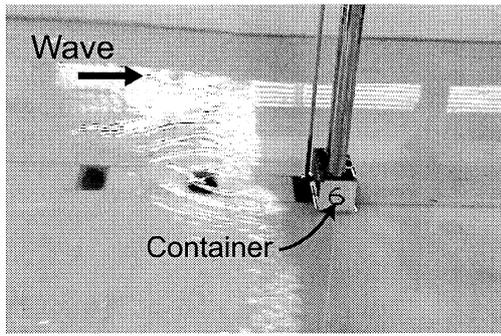
図-4 にコンテナに作用する波進行方向の津波力 F_x の比較を例示する。ここで、同図の上図は位相差を確認するためのエプロン前面での水位変動 ξ であり、実線と破線はそれぞれ実験結果と計算結果を表す。図-4 より、図-3 に示すコンテナ沖側の打上水位 η と同様に実験値を若干過小評価する傾向があるが、実験結果と比較的良好一致していることから、津波力の算定手法としての本手法の有効性が確認できた。

(4) コンテナに作用する波圧

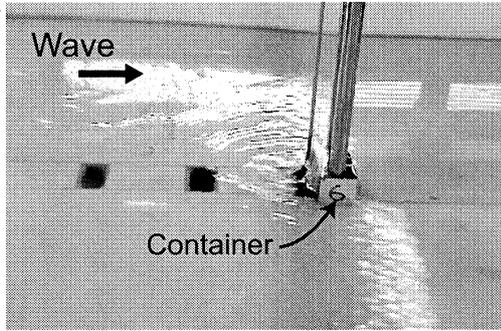
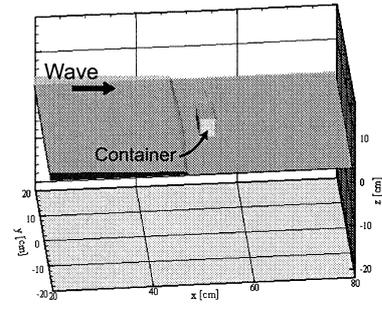
前節までに本手法の妥当性を検証できたことから、最後に数値計算によりコンテナに作用する波圧の特性を検討する。図-5 にコンテナの中央部 ($y = 0.0$) に作用する最大波圧 p_m の計算結果を示す。ここで、 z' はエプロン表面を原点とする鉛直上向き座標、後述するが η_{fm} はコンテナの 5 mm 沖側での最大打上水位、 η_m はコンテナを設置しない状態での η_{fm} と同位置での最大遡上水位であり、実線、一点鎖線、破線、点線はそれぞれ谷本ら³⁾、朝倉ら⁴⁾、池野ら^{5),6)}による波圧算定値を表す。

図-5 より、数値計算による $p_m/\rho_w g \eta_m$ の分布は既往の波圧算定値とほぼ同じ傾きを有しているものの、コンテナをエプロン前面から 305 mm または 505 mm 岸側に設置した条件ではコンテナの沖側前面で η_m の 3 倍以上の高さまで打ち上がっていることから、 $p_m/\rho_w g \eta_m$ が既往の波圧算定値を大幅に上回っていることが分かる。そこで、 η_m に代えて η_{fm} で規格化した図を図-6 に示す。ここで、同図の実線は無次元最大打上水位 $z'/\eta_{fm} = 1.0$ を基準とする静水圧分布である。図-6 より、 η_{fm} が見積もれば静水圧分布^{4),5),6)}により p_m の分布が算定できるが、 $z' = 0.0$ 近傍では朝倉ら⁴⁾や池野ら⁶⁾と同様に静水圧以上の p_m が生じることも確認できる。

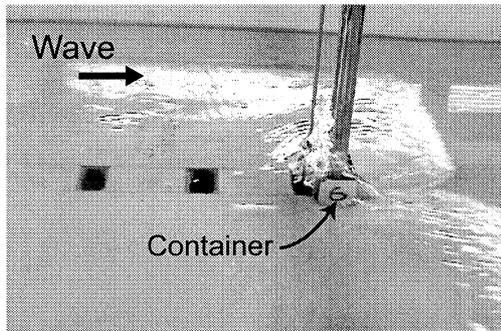
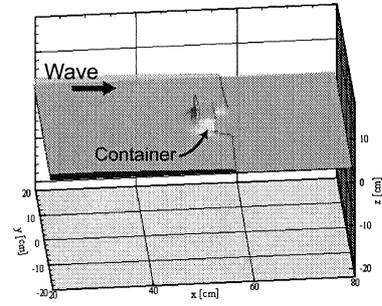
さらに、図-5 や図-6 より p_m の傾きは z' に依存してお



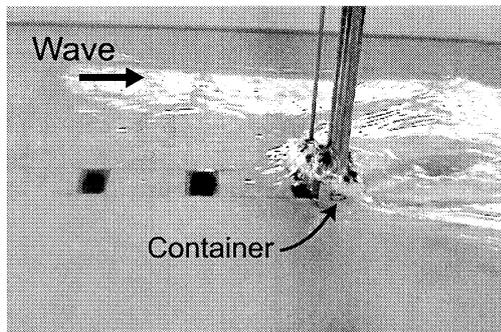
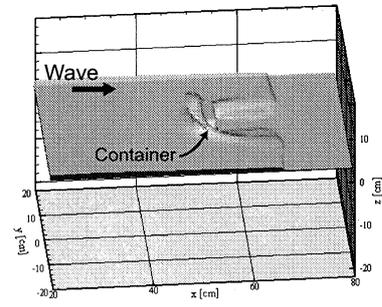
(a) 0.0 秒後



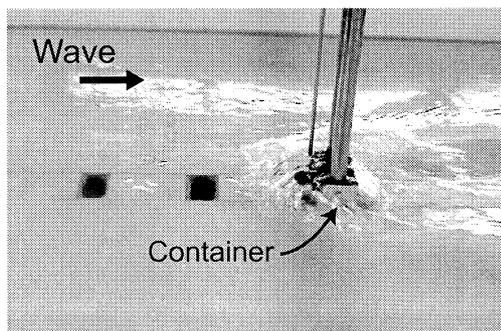
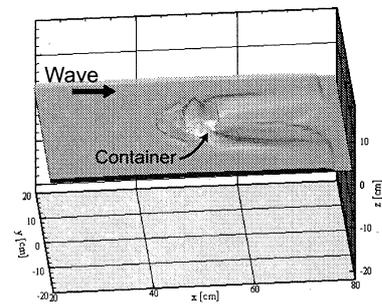
(b) 0.1 秒後



(c) 0.2 秒後



(d) 0.3 秒後



(e) 0.4 秒後

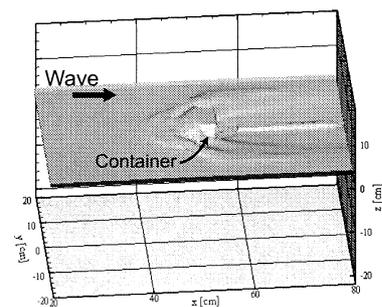
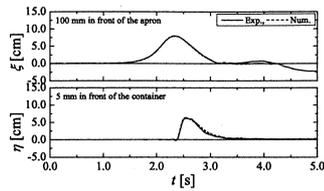
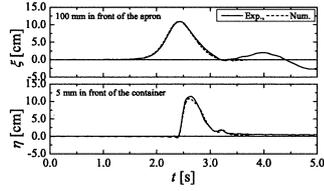


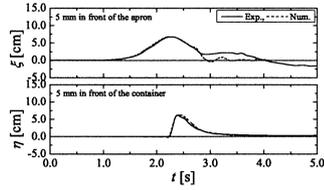
図-2 エプロン前面から 505 mm 岸側に設置した 20 ft コンテナ 1 段積み の周囲 に生じた流動場の比較 (左: 実験結果; 右: 計算結果, Case 7)



(a) 20 ft コンテナ 1 段積みの場合 (Case 7)

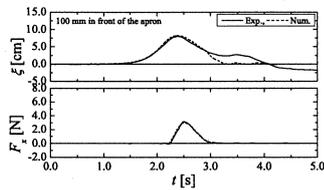


(b) 20 ft コンテナ 2 段積みの場合 (Case 5)

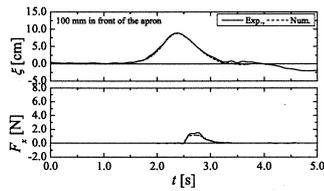


(c) 40 ft コンテナ 2 段積みの場合 (Case 2)

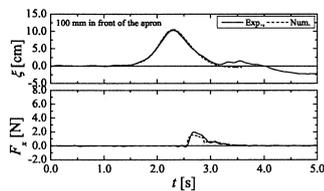
図-3 エプロン前面の水位 ξ およびエプロン前面から 205 mm 岸側に設置したコンテナの 5 mm 沖側の打上水位 η



(a) 40 ft コンテナ 2 段積みを実プロン前面から 105 mm に設置した場合 (Case 2)



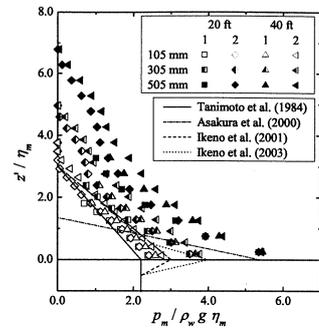
(b) 20 ft コンテナ 2 段積みを実プロン前面から 305 mm に設置した場合 (Case 7)



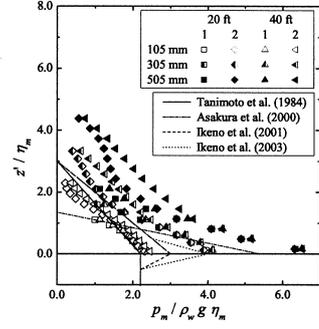
(c) 20 ft コンテナ 1 段積みを実プロン前面から 505 mm に設置した場合 (Case 6)

図-4 コンテナに作用する波進行方向の津波力 F_x

り、 z' の増加とともに傾きが急になる傾向が確認できる。ここでは、40 ft コンテナ 2 段積みを実プロン前面から 505 mm 岸側に設置した場合を取り上げて、以下この機構の説明を行う。図-7(a) に上述の条件での $p_m/\rho_w g \eta_{fm}$ の分布を示す。ここで、同図中の時刻 t は最下点で最大波圧が生じた時刻を基準とする p_m の発生時刻であり、 $t = 0.00, 0.11, 0.21$ s でのコンテナ周辺の流速場とコンテナに作用する波圧 p_w の分布を図-7(b) に示す。

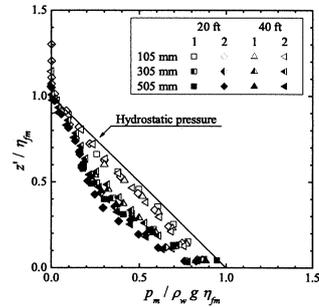


(a) Case 2

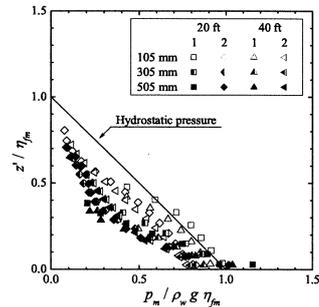


(b) Case 6

図-5 コンテナに作用する最大波圧 p_m の鉛直分布 (最大遡上水位 η_m で無次元化した場合)



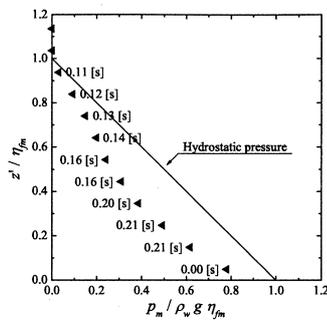
(a) Case 2



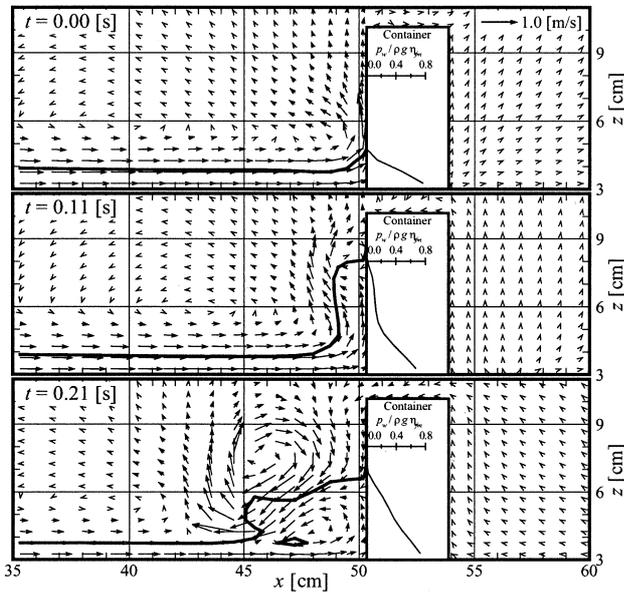
(b) Case 6

図-6 コンテナに作用する最大波圧 p_m の鉛直分布 (最大打上水位 η_{fm} で無次元化した場合)

図-7(a) に示すように、まず水塊の衝突に伴いコンテナの最下点で最大波圧が生じ、その $t = 0.11$ s 後に最大打上高 ($z'/\eta_{fm} = 1.0$) 付近の波圧が最大になることが確認できる。この瞬間を示した図-7(b) 中図より、コンテナ前面の中段付近に比較的大きな流速が生じたために波圧 p_w が静水圧分布にはならず、そのために底面付近の波圧は最大に到るほど大きくならなかったと推測される。その後、打上水位の減少とともにコンテナ前面



(a) 最大波圧 p_m とその発生時刻 t



(b) コンテナ周辺の流速場とコンテナに作用する波圧 p_w

図-7 40 ft コンテナ 2 段積みエプロン前面から 505 mm 岸側に設置した場合の最大波圧と流速場の分布 (Case 8)

の流速が減少し、さらにそれに伴い波圧分布の非線形性も弱まったことから $t = 0.21$ s では波圧 p_w がほぼ静水圧分布となり、この瞬間に底面より少し上で最大波圧が生じたことが確認できた。以上より、コンテナに作用する最大波圧は、底面近傍では水塊の衝突により、最大打上高近傍では打ち上がった水塊に起因する非線形な波圧分布により、その中間部では冲向き砕波時に生じる静水圧に近い圧力分布により説明できることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、エプロン上に遡上した津波によるコンテナ周辺の流動場を取り扱い、開発した 3 次元数値波動水路の妥当性を水理模型実験との比較により検証するとともに、コンテナに作用する波圧と津波力に対する検討を行った。その結果、コンテナに作用する津波力の算定手法としての本水路の有効性が確認でき、さらにコンテナに作用する最大波圧は最大打上高を基点とする静水圧分布により近似できるが、エプロン表面近傍では水塊の衝突に伴う先の静水圧を上回る最大波圧が生じる可能性があることを明らかにした。今後は、

この数値計算により津波堤防などの陸上構造物周辺の陸上遡上津波による流動場や作用津波力の解析を行うなどして、津波防災対策の策定の一助となる有用な手法として本水路が役立つよう更に検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 水谷法美・高木祐介・白石和陸・宮島正悟・富田孝史 (2005) : 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, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.741-745.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 池谷毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・入谷剛・柳沢賢 (2005) : 陸上構造物に作用する津波波圧の時空間変動特性, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.121-126.
- 8) 中村友昭・許 東秀・水谷法美 (2006) : 捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し機構, 土木学会論文集 B, Vol. 62, No. 1, pp.150-162.
- 9) Golshani, A. (2002): *Three Dimensional Study of Porous Flow induced by Nonlinear Interaction between Waves and Permeable Structures*, Doctoral Thesis, Nagoya Univ., 144p.
- 10) Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992): A Continuum Method for Modeling Surface Tension, *J. Comp. Phys.*, Vol.100, pp.335-354.
- 11) Smagorinsky, J. (1963): General Circulation Experiments with the Primitive Equations, *Mon. Weath. Rev.*, Vol.91, No.3, pp.99-164.
- 12) Fenton, J. (1972): A Ninth-order Solution for the Solitary Wave, *J. Comp. Phys.*, Vol.53, pp.257-271.
- 13) Hinatsu, M. (1992): Numerical Simulation of Unsteady Viscous Nonlinear Waves using Moving Grid System fitted on a Free Surface, *J. Kansai Soc. Naval Arch. Japan*, No.217, pp.1-11.
- 14) Amsden, A. A. and Harlow, F. H. (1970): A Simplified MAC Technique for Incompressible Fluid Flow Calculation, *J. Comp. Phys.*, Vol.6, pp.322-325.
- 15) Chakravarthy, S. R. and Osher, S. (1985): A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Law, *AIAA Paper*, 85-0363.
- 16) 功刀資彰 (1997) : 自由界面を含む多相流の直接数値解析法, 機械学会論文集 B 編, Vol.63, No.609, pp.1576-1584.