

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

Study on Behavior of Drifting Containers due to Tsunami and Collision Forces

廉 慶善¹・水谷法美²・白石和陸³・宇佐美敦浩⁴・宮島正悟⁵・富田孝史⁶

Gyeong-Seon YEOM, Norimi MIZUTANI, Kazutomo SHIRAISHI
Atsuhiko USAMI, Shogo MIYAJIMA and Takashi TOMITA

This study is intended mainly to investigate collision force due to a drifted container by run-up tsunami. Laboratory experiments were conducted to investigate behavior of run-up tsunami and drifting container. Moreover, effect of vertical wall to reduce run-up tsunami was observed. Results show that the vertical wall installed at the leading edge of apron can reduce wave forces acting on container, which may lead to reduce drift of containers. This study also conducted numerical simulation of collision of container with concrete column. It is revealed that the present analyzing method is useful in such simulation.

1. はじめに

津波発災時には、港湾や沿岸域におけるコンテナ・船舶・自動車などが倒壊した家屋の建材などの漂流衝突による二次被害が懸念され、被害軽減や災害後の迅速な復旧の観点から、漂流物対策が強く望まれる。

コンテナの漂流衝突力に関して、水谷ら (2006) はその算定式を提案するとともに、漂流物の質量に加え、堰き止める水の質量 (付加質量) の寄与が無視できないことを指摘している。付加質量の影響は被衝突物の剛性に依存し、特に剛性の低い場合に大きくなるが、これは付加質量が剛性に強く依存する衝突時間に影響されることによる。したがって衝突力を定量的に評価するためには、衝突時間を衝突・被衝突物体の剛性と関連づけて明らかにしておくことが不可欠である。しかし、これを模型実験から明らかにすることは困難であり、詳細なモデル化に基づく数値解析による検討も望まれる。そこで、本研究では、構造解析ツールを用いた実スケールの衝突シミュレーションを実施し、衝突物・被衝突物の剛性や変形が衝突作用時間・衝突力に及ぼす影響を考察する。

一方、漂流物対策として、護岸前面に設置した鉛直壁の有効性について、水理模型実験と数値解析の両面から

考究する。本実験では、孤立波よりも周期の長い長周期波を採用し、遡上津波やそれによる漂流現象に対する波の作用時間の影響についても考究するものとする。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および実験条件

図-1 に示す二次元造波水槽 (全長 30 m, 全幅 0.7 m, 高さ 0.9 m) 内に、緩斜面 (勾配 1/10 と 1/100 の複合断面) と矩形で単純化したエプロン模型を設置し、縮尺 1/75 の水理模型実験を行った。一様水深部の静水深 h_0

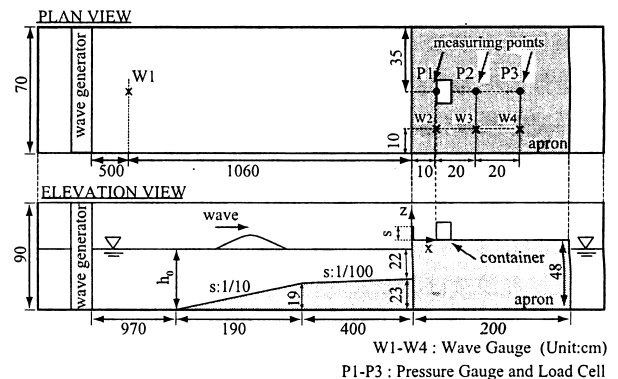


図-1 実験水槽の概要

表-1 入射波条件

Case No.	Wave	T(s)	H(cm)
1	L	15.0	2.8
2	L	12.5	2.9
3	L	10.0	3.6
4	L	10.0	3.2
5	L	10.0	2.6
6	L	7.5	2.6
7	S		2.9
8	S		3.5

L : Long wave, S : Solitary wave

- 1 学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
- 2 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
- 3 正会員 修(工) 鈴与株式会社
- 4 学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
- 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長
- 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 上席研究官

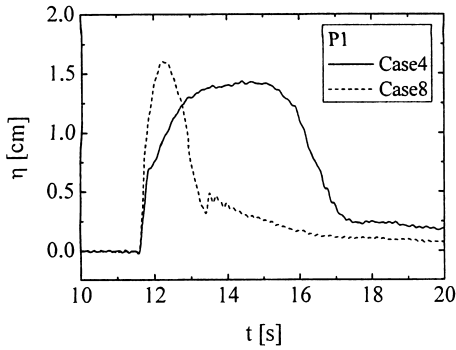


図-2 遡上水位の時間変化の例

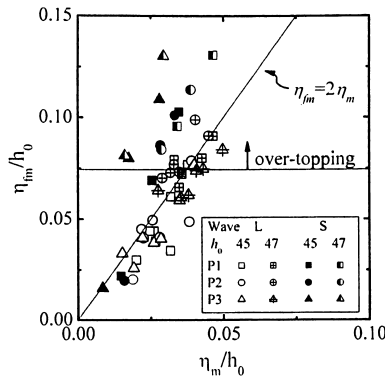


図-3 最大遡上水位とコンテナへの最大打上高の関係

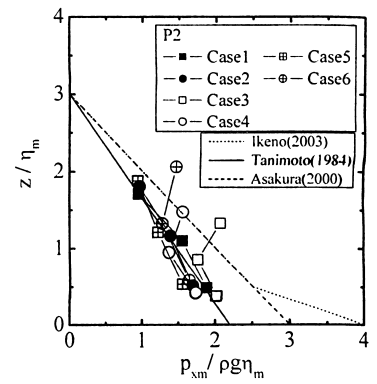


図-4 コンテナの作用最大波圧の鉛直分布

=45, 47 cm, 天端高 $R=3$, 1 cm とし, ピストン型造波板により波を入射させた. なお, 津波を押波初動の長周期波 6 種類と孤立波 2 種類で模擬した (表-1 参照). また, コンテナ模型は 20ft, 40ft の 2 種類を対象とし, 重量を $W=0.15 \sim 1.3$ N で 6 種類ずつ変化させ (G1(最軽量)~G6(最重量)), 漂流挙動や衝突力に及ぼす形状やコンテナ重量 (質量) の影響について検討した.

実験では, エプロン上に遡上した波の水位・流速, および固定されたコンテナ前面の打上高・波圧と作用波力をそれぞれ図-1 中の P1, P2, P3 の 3 地点で計測するとともに, 漂流速度と漂流衝突力を計測した. その際, 被衝突物である受圧板の板厚を 3 種類 ($k=2, 3, 4$ mm) 変化させ, 剛性の影響も検討した. さらに, 津波被害の軽減策として, 3 種類の高さ ($s=0.4$ cm, 0.8 cm, 1.2 cm) の鉛直壁をエプロン前面に設置した場合の遡上波の変化特性や作用波力も計測し, その有用性の検討も行った.

(2) 実験結果

a) 遡上特性

図-2 に長周期波と孤立波を入射させたときのエプロン上における遡上水位 η の時間変化を例示する. 同図より, 長周期波は孤立波に比べ, 遡上水位のピークを長く保持しており, エプロン上へ遡上する水塊の量も多いことがわかる.

これらの 2 種類の入射波を作用させた場合の固定されたコンテナ前面における最大打上高 η_{fm} を図-3 に例示する. 水槽側方からのビデオ映像と目視観測より, 長周期波の場合は遡上波がコンテナ前面で静的に水位上昇するのに対し, 孤立波の場合はコンテナに衝突した直後に上方に水塊が打ち上げられる傾向があることが確認された. そのため, 孤立波の最大打上高は水谷ら (2006) と同様に, コンテナを越波する場合で最大遡上水位 η_m の 3~4 倍程度にもなるが, 長周期波の場合, 最大打上高は最大遡上水位の 2 倍程度 ($\eta_{fm}/\eta_m = \alpha = 2$) で近似できることが判明した.

b) コンテナに作用する波圧と波力

図-4 は, コンテナ前面に作用する最大波圧 p_{xm} の実験結果を例示したもので, z はエプロン上面からの高さである. 一般に, 長周期波の場合, $p_{xm}/\rho g \eta_m$ の分布は既往の波圧算定式 (谷本ら, 1984; 朝倉ら, 2000; 池野ら, 2003) に近く, 最大波圧は最大打上高から静水圧分布により見積もることができる. ただし, 入射波高の大きい場合など, 静水圧分布より大きくなる場合もあり, その原因について今後検討する必要がある.

つぎに波力について検討する. 波力の発生機構として, 水塊の衝突による運動量の変化にともなう力の作用が考えられるため, ここでは, 以下のようなモデル化を考える. すなわち, 固定されたコンテナ前面に, 図-5 のように近似した水塊が衝突し, 時間 dt の間に運動量をすべて

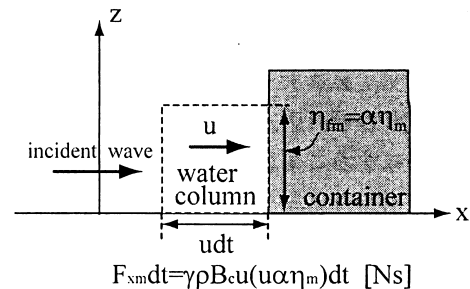


図-5 水塊の運動量の概念図

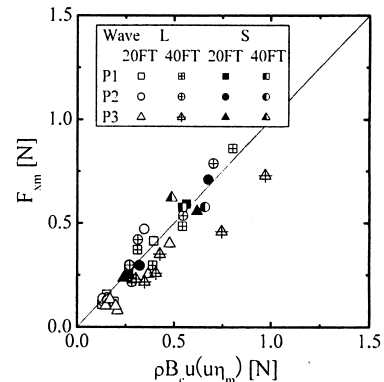


図-6 波力の近似式の比較

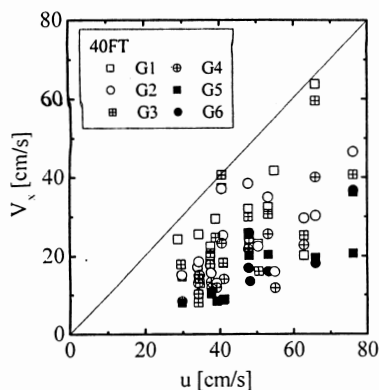


図-7 遡上流速とコンテナ漂流速度

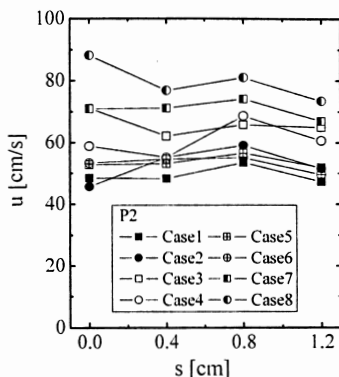


図-8 鉛直壁の遡上流速への影響

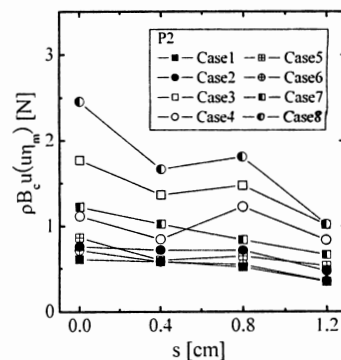


図-9 鉛直壁の波力への影響

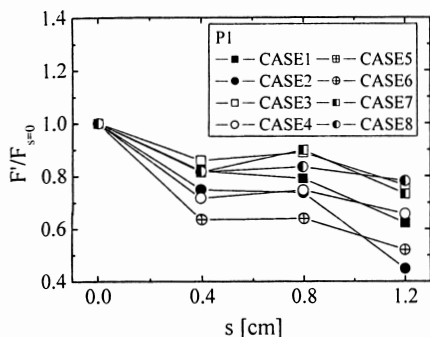


図-10 鉛直壁による波力低減効果

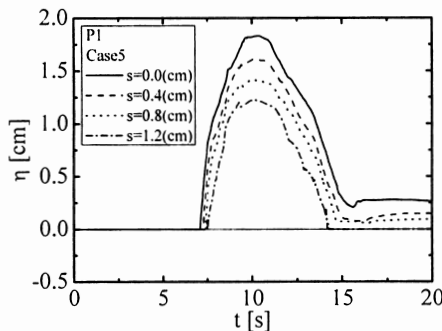


図-11 水位変動に及ぼす鉛直壁の効果 (計算結果)

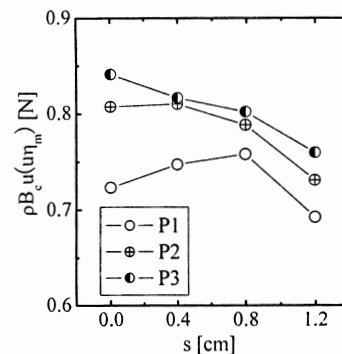


図-12 波力に及ぼす鉛直壁の効果 (計算結果)

失うと仮定すると、力積の変化は次式のように表せる。

$$F_{xmdt} = \gamma \rho B_c u (u \alpha \eta_m) dt \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 B_c :コンテナ幅、 γ :補正係数である。図-3に例示したように、長周期波の場合、 $\alpha=2$ で近似できるが、水塊全体に対しては過大評価となり、また、上式はその仮定で運動量の損失も過大評価していると考えられるため、本研究では $\gamma=0.5$ とし、式(1)を

$$F_{xm} = \rho B_c u (u \eta_m) \dots \dots \dots (2)$$

と近似する。図-6は上式の両辺の比較を示すが、両辺は良好に一致しており、式(2)はコンテナの作用波力の近似式として有用であることが確認できる。また、この結果より、非越波条件の多い本研究の条件ではコンテナの作用波力は遡上流速の2乗と最大遡上水位に比例すると言える。

c) コンテナの漂流速度

コンテナの漂流速度は、遡上距離がある程度長くなるとほぼ一定値を保つ傾向が確認されたため、そのときの速度に着目して検討する。同地点における遡上流速 u とコンテナの漂流速度 V_x の関係は、図-7に示すように、概ね比例関係にあることが確認された。そして、コンテナ質量が軽い方が速くなり、実験結果にばらつきが見られるものの、漂流速度は半載で遡上流速の半分程度、最

軽量の場合で最大で同程度になることが確認された。

3. 鉛直壁の効果について

エプロン上への遡上波を低減させ、津波被害を減少させるための対策として、エプロン前面に鉛直壁を設けた場合の有用性について、水谷ら(2006)は、孤立波の遡上水位の観点から示しているが、漂流に直接的に影響を及ぼす波力の計測を行っていない。本研究では、鉛直壁を設置した場合の遡上流速や波力の計測も行ったのでその結果にもとづいて鉛直壁の効果について再検討する。

図-8に異なる高さの鉛直壁を設置した場合の遡上流速の計測結果を例示する。なお、遡上水位は鉛直壁を高くすることにより軽減できることを確認している(白石ら, 2007)。鉛直壁を設置すると越流によって加速されることにより流速は若干増加する場合もあることがわかる。コンテナの漂流限界は作用波力に依存し(水谷ら, 2005)、また、その波力が $\rho B_c u (u \eta_m)$ で近似できる(図-6参照)ため、 $\rho B_c u (u \eta_m)$ に及ぼす鉛直壁の効果を図-9に、また実験で直接計測したコンテナの作用波力に及ぼす鉛直壁の効果を図-10にそれぞれ例示する。若干傾向の異なるケースもいくつか見られたが、全般的には鉛直壁を高くしていくと波力は小さくなる傾向がある。これは、鉛直壁の設置による流速の増大よりも水位の減少の方が顕著に生じ、結果として遡上水塊の持つ運

動量が減少したためである。

実験では造波装置の制約上、より周期の長い入射波に対する鉛直壁の効果は検討できないため、中村ら(2006)によるVOF法を用いて数値計算からも検討を行った。数値計算によるエプロン上の遡上水位の時間変化を図-11に例示する。同図より、実験と同様に鉛直壁の嵩上げにより遡上水位が低減すること、また、遡上開始の遅延が確認できる。図-12は、周期60秒の長周期波を入射させた場合のコンテナの作用波力と鉛直壁高さの関係を示したものである。全般的に鉛直壁を高くすることにより波力は低減されることが数値解析結果からも確認でき、また、周期が長い場合でも有効であることが指摘できる。以上のことから、鉛直壁を設置することにより、比較的周期の長い入射波であっても作用波力は低減でき、漂流被害の軽減に有効であることが指摘できる。

4. 衝突力の算定

(1) 衝突力のモデル化

水谷ら(2005)はコンテナ前面で堰き止める水塊がコンテナと一体となって衝突すると仮定し、衝突力 f_{xm} に関して以下のモデル化を行っている。

$$f_{xm}dt = (\alpha\rho\eta_m B_c V_x dt + W/g) V_x \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 W :コンテナの重量、 g :重力加速度、 dt :衝突作用時間である。なお、既述したように、 $\alpha=2$ とする。

長周期波を用いた本実験においても、被衝突物の剛性を3種類変化させ、剛性の違いによる衝突作用時間や衝突力の違いについて検討したところ、被衝突物の剛性が低い場合、衝突作用時間は長くなるが衝突力のピーク値は小さくなること、また、図-13に示すように、付加質量($2\rho\eta_m B_c V_x dt$)とコンテナ質量(W/g)の比を漂流速度別に検討したところ、剛性が低いほど付加質量の影響が大きくなること、など水谷ら(2006)と同様の結果が確認された。このように衝突作用時間 dt は被衝突物の剛性に依存し、さらにそれが衝突力の大きさや付加質量に大きく影響するなど、衝突現象に極めて重要な量で

あることが指摘できる。式(3)の有用性はこれまでの検討からも確認されているものの、実際の使用にあたっては dt の適切な値が求められる。しかし dt は衝突物や被衝突物の物性に依存するため、その値を模型実験から定めることは困難である。そこで、本研究では、衝突物や被衝突物の剛性の影響を比較的容易に考慮できる数値解析手法として、有限要素法を用いた非線形衝撃応答解析汎用ソフトLS-DYNA3Dを使用し、衝突作用時間の算定を行うこととした。

この数値解析を行うに当たり、実験で使用したコンテナ模型を自由落下させ、受圧板に衝突させた場合の計算により、その妥当性を検証することとした。このときのコンテナと受圧板の解析モデルの要素分割図を図-14に、また、衝突力の実験結果と計算結果の比較を図-15に示す。なお、ここではコンテナ・受圧板ともに完全弾塑性体としている。図-15より両者は良好に対応しており、コンテナの衝突現象の再現に本数値解析手法が有効であることが指摘できる。

そこで、コンテナが漂流し、コンクリート構造物に衝突した場合の数値計算を実施し、実際の衝突における衝突時間について検討することとした。この際、コンテナは接点数45280(40ft)のシェル要素でモデル化し、また、全ての要素を弾塑性体とし、ヤング率を $E=206$ GPa、ポアソン比を $\nu=0.3$ 、降伏点応力を235 MPaとし、全質量を3.384 tとした。コンクリート構造物は、実存の避難所の橋脚を想定し、上下を拘束させた。別途胸壁も対象に計算したが紙面の都合上本論では橋脚の結果について示す。また、コンテナの最大衝突力を評価するため剛体を基本とした。このような条件に、遡上水位が1 mの津波が来襲した場合を想定し、コンテナの漂流速度を、エプロン上の遡上流速の半分程度に相当する $V_x=1.57$ m/sの場合と、危険側を想定した $V_x=3.13$ m/sの二種類変化させた。また、付加質量の効果を、水谷ら(2006)の結果を参考にコンテナの0.5倍の質量を付加することで近似し、検討した。計算では、コンテナが横向きと縦向きで衝突する場合、空載と半載など条件を変

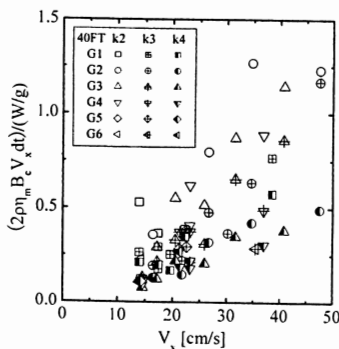


図-13 衝突力における付加質量のコンテナ質量に対する場合

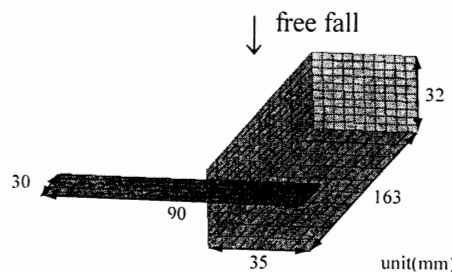


図-14 コンテナと受圧板のモデル化の概要

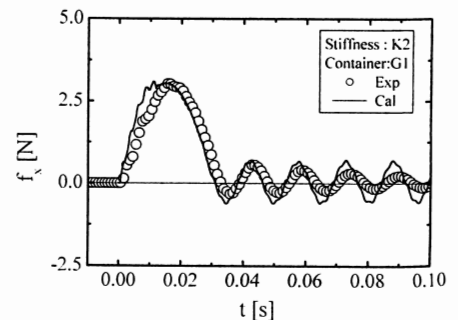


図-15 衝突力の時間変化の比較例

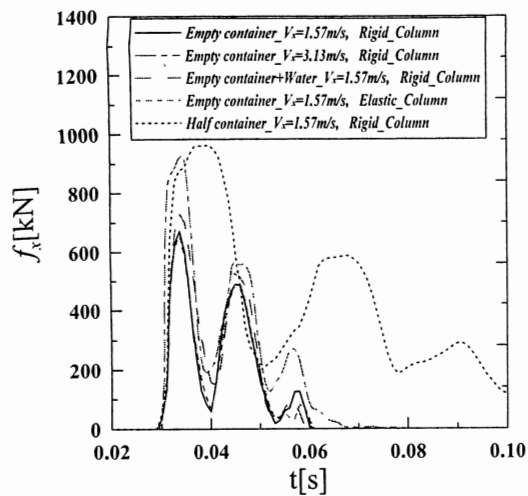


図-16 コンテナの衝突力の解析例

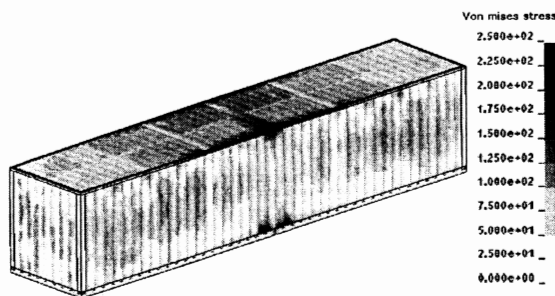


図-17 衝突時のコンテナの応力分布の解析例

えて計算を行った。

解析結果を図-16に例示する。同図より、漂流速度が2倍の場合、最大値は約40%大きくなり、また、水塊を付加した場合、付加しないケースに比べ約10%程度大きくなることが判明した。一方、被衝突物を完全弾性体とした場合は剛体の場合と比べて大差は見られなかった。これはコンクリート柱の剛性がコンテナに比べて高いことに起因すると考えられる。

図-16の衝突力の時間変化で、衝突力の立ち上がりから最初のピークまでを衝突時間 dt とすると、本研究の計算結果から多少のばらつきはあるが、半載の場合で $dt=0.01 \sim 0.015$ s程度であることが確認された。また、図-16の時間変化には振動がみられるが、これは応力分布の瞬間的な空間分布(図-17参照)の時間変化の解析より、コンテナの長軸(横断)方向で衝突にともなう振動が生じることによると考えられる。そこで、コンテナを縦向きに衝突した場合の計算も実施したところ、衝突力の時間変化における立ち上がり部には大きな差はないものの、図-16にみられるような振動は生じないこと、さらに衝突力のピーク値の持続時間が長くなることが確認された。これは縦向きの衝突では、横断方向の振動が生じにくくなる一方で、衝突にともなうコンテナの変形が前端から後端まで伝播する時間が長くなることによる。

このピークの継続時間は横向きの衝突時の振動を包絡する程度であり、コンテナの重量の大きい方が大きくなる傾向のあることも確認された。本計算では、これらの継続時間を含めて衝突時間を考えた場合、 dt は0.05 s程度にまでなることが明らかとなった。 dt は付加質量に重要な量であり、今後更に様々な条件の計算を行って、より信頼性の高い値を得る必要がある。

5. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) 長周期波の場合、コンテナ前面での最大打上高は最大遡上水位のほぼ2倍となる。
- (2) コンテナに作用する津波力は、堰き止める水塊の持つ運動量変化に基づく近似式で表すことが可能である。
- (3) 鉛直壁を設置することによりコンテナに作用する波力が低減できることが確認され、漂流軽減対策として有用であることが指摘できた。
- (4) LS-DYNAによるコンテナの衝突解析により、衝突力の立ち上がりに着目した場合の dt が半載のコンテナで0.015 s程度であることが判明した。ただし、コンテナ重量が増加したり、縦向きに衝突すると、衝突力のピーク継続時間は長くなり、さらなる検討が望まれる。

最後になるが、本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号19360222 代表者 水谷法美)によって行われたことを付記し、謝意を表する。

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・田中寛好(2003): 陸上遡上津波と漂流物の衝突に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 721-725.
- 白石和陸・宇佐美敦浩・水谷法美・宮島正悟・富田孝史(2007): 津波漂流物対策としての鉛直壁の有用性に関する研究—コンテナを対象として—, 土木学会年次学術講演会講演概要集(印刷中)
- 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, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 257-261.
- 中村友昭・白石和陸・宇佐美敦浩・水谷法美・宮島正悟・富田孝史(2006a): 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, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 517-522.
- 中村友昭・倉光泰樹・水谷法美(2006b): 陸上遡上津波による矩形構造物周辺の流動場と洗屈に関する数値シミュレーション, 数値流体力学シンポジウム, 第20回, F5-3
- 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.
- 水谷法美・白石和陸・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史(2006): エプロン上のコンテナへの津波の作用と漂流衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 791-795.