

## 陸上津波によるコンテナの漂流と漂流衝突力に関する研究

水谷 法美	名古屋大学
廉 慶善	名古屋大学
宇佐美 敦浩	名古屋大学
中村 友昭	名古屋大学
白石 和睦	鈴与株式会社

### Study on behavior of drifted container due to run-up tsunami and its collision force

MIZUTANI, Norimi	Nagoya University
YEOM, Gyeong-Seon	Nagoya University
USAMI, Atsuhiko	Nagoya University
NAKAMURA, Tomoaki	Nagoya University
SHIRAISHI, Kazutomo	Suzuyo & Co. Ltd

#### Abstract

In this study, the behavior of the container drifted by run-up tsunamis and its collision force are discussed. First, characteristics of the run-up tsunami have been investigated through laboratory experiments. Then, numerical computation methods to simulate interactions between wave and fixed container and behaviors of a drifted container have been developed. These methods have been verified by comparisons between numerical and laboratory experimental results. Moreover, the full scale simulation of collisions of a drifted container to a concrete column has been conducted using the LS-DYNA3D. Through the model experiments and simulations, the importance of added mass on the wave force and collision force is confirmed. Moreover, it is revealed that the mass of the container and its colliding velocity are the important parameters to estimate the collision force and collision time.

#### 1 緒言

津波被害は、経済発展にともなってそのダメージが大きくなる。津波被害としては、陸上に遡上した津波による建造物の浸水・破壊のような直接被害と、遡上津波によって漂流した物体が他の建造物などに衝突し、被害を及ぼす間接被害に分けることができる。津波による直接被害の予測は、陸上に遡上した津波の建造物に作用する波力を推定することで概算することは可能であるが、間接的な被害を予測するには、漂流物の選定やその挙動、衝突時の影響など数多くの要因を考慮する必要があり、複雑なメカニズムの解明が必要になる。

2004年に発生したスマトラ島沖地震津波では遡上津波により、海岸近くの陸上に貯蔵されていた大量の原木が50~60mも流されたり、また、漂流した船舶が家屋を破壊したという報告がある[1]。さらに、スリランカのゴール港では多大な施設被害が発生するとともに、大型渡船が棧橋上に乗上げられたという報告もなされており[2]、このように津波による漂流問題やそれにとまなう間接被害は軽視できない。近年、東海地震など海溝型地震の発生が危惧され、同時に巨大津波の襲来が予想されている日本においては、このような被害を軽減するための対策を早急に構築する必要がある。

そのためには、被害の程度を予測する必要があるが、このような津波による漂流・衝突被害に関する研究は幾つか行わ

れてきている(松富ら[3]、池谷ら[4]、水谷ら[5])ものの、まだ十分進んでいるとは言い難いのが現状である。池野ら[6]、[7]は、水理模型実験を通じて砕波段波津波による木材の衝突力を計測し、鉛直壁に及ぼす木材の衝突力は木材の形状によらず初期の運動量が同じならば同程度の衝突力となることを明らかにした。また、陸上に遡上した津波による漂流木材の衝突力は、遡上しない津波による漂流木材の衝突力を上回るという結果を得ている。Haehnelら[8]は、洪水時の氾濫源での木材の衝突力は被衝突物を剛体と仮定することにより算定できるという剛体に基づく一自由度モデルを提案した。そして、模型実験や実スケールの実験を行って、提案したモデルの妥当性を確認するとともに、既往の力積・運動量に基づくモデルや仕事・エネルギーに基づくモデルのいずれも衝突の時間関数を考慮すると剛性に基づく一自由度モデルと同じ結果になることを明らかとした。

水谷ら[9]、[10]は運動量理論に基づいて遡上津波によるコンテナに作用する津波力及び漂流コンテナによる衝突力に関する算定式を提案した。その中で、コンテナの衝突時にはコンテナ重量のみでなく、コンテナ背後の水塊が付加質量として働き、衝突力を増大させていることを指摘した。しかし、算定式には、衝突時間のような物性に依存する量が含まれており、その定量的な評価に課題を残している。

そこで、著者らは、津波による漂流・衝突について、近年急激に増加しているコンテナを対象に検討を行っている。本報では、津波が陸上を遡上し、コンテナに作用する段階から漂流したコンテナが背後施設と衝突するまでの一連のプロセスについて、水理模型実験による津波の陸上遡上特性やコンテナの漂流挙動の把握と、VOFに基づく数値計算による遡上津波の変形や作用波力の再現、さらにその数値計算手法を発展させ、コンテナが衝突に至るまでの漂流挙動の再現を試みる。さらに、水理実験や数値計算から得られた衝突直前のコンテナ移動速度やコンテナに作用する付加質量を考慮しながら、コンテナの衝突現象を非線形衝突応答モデルLS-DYNA3Dを利用して再現を試みる。そして、それらをまとめてコンテナの漂流・衝突について検討することとする。

## 2 遡上津波の特性とコンテナ漂流速度

遡上津波の特性ならびにコンテナの漂流速度を把握するため、水理模型実験を名古屋大学大学院の二次元波浪水槽（長さ30.0m、幅0.7m、高さ0.9m）を用いて行った。水槽内にはFig. 1に示すように1/10と1/100の傾斜海底地形と矩形で単純化したエプロン模型を設置した。コンテナ模型は国際規格に基づく20ftと40ftの貨物ドライコンテナを対象に、アクリル板で製作した。その際、コンテナ重量を半載と満載を想定したケースを含め6種類を変化させ、重量による漂流挙動の違いについて検討した。なお、模型縮尺は1/75とした。

入射波として、長周期波(峰高  $H_0=0.24\sim 0.36\text{m}$ 、周期  $T=7.5\sim 15.5\text{s}$ )や孤立波(峰高  $H_0=0.22\sim 0.35\text{m}$ )をピストン型造波装置（最大ストローク1.5m）により造波させた。ここで、長周期は造波板を後端から前端まで半波数移動させる押波初動とし、周期  $T$  をこの間の造波板の移動時間として定義した。

コンテナを設置していない場合の遡上水位・遡上流速や、固定されたコンテナに遡上波が衝突することにより発生するコンテナ沖側の面での打上高は同図のP1、P2及びP3の各地点で計測を行った。さらに、漂流中のコンテナを上方からビデオ撮影を行うことにより、漂流速度を算出した。

エプロン上のP1、P2及びP3におけるコンテナを設置していない場合の最大遡上水位( $\eta_m$ )とコンテナ沖側における最大打上高( $\eta_{tm}$ )の関係を水深( $h_0$ )で無次元化しFig. 2に示す。孤立波の場合、コンテナ沖側の最大打上高は最大遡上水位の3~4倍、長周期波の場合、エプロンの天端高が低くなるほど遡上水位が高くなる傾向があるが、その割合はほぼ2倍に近いことができることが明らかとなった。

Fig. 3に、40ftコンテナが30cm漂流したときの漂流速度( $V_x$ )とコンテナ通過地点における遡上流速( $u$ )を比較する。なお、コンテナ漂流速度は遡上距離が長くなると一定の値に近づくことがわかっており、Fig.3の値は、ほぼ一定値となった値である。同図から、コンテナの重量が小さくなると漂流速度は大きくなる傾向があるが、全体的に流速に比べて漂流速度は小さく、半載を想定したコンテナの場合、ばらつきがあるものの遡上流速のほぼ半分程度であることがわかる。なお、20ftコンテナの場合も同様な傾向が確認できた。

## 3 遡上津波の流動場とコンテナの漂流挙動の数値計算

まず、固定されたコンテナに衝突する遡上波を数値計算により再現し、コンテナに作用する波力を実験と比較する。さらに、漂流するコンテナの挙動についても数値計算を行ってその再現性を検討する。そして、コンテナの衝突シミュレーションに必要な付加質量（コンテナ背後の水塊量）などについて検討する。

### 3.1 固定されたコンテナ周辺の流動場について

遡上波によるコンテナ周辺の流動場を再現するためダイナ

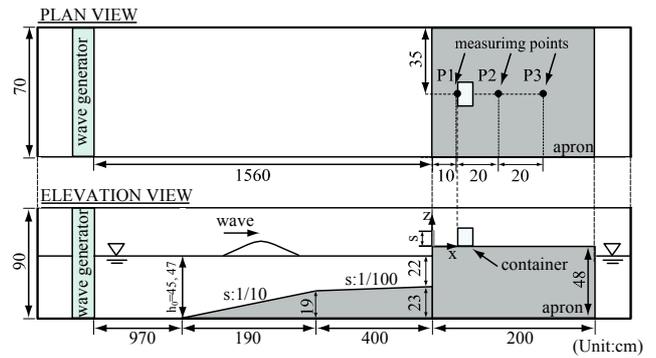


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental wave tank

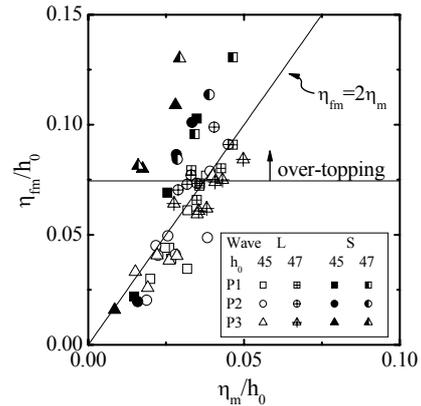


Fig. 2 Crest height of run-up wave in the absence of container and run-up wave level on the front surface of a container

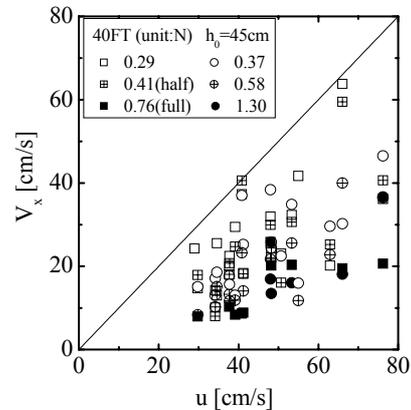


Fig. 3 Velocities of the run-up wave and drifted container

ミック二変数混合モデル[11]に基づくLES(Large Eddy Simulation)と功刀[12]によるMARS(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)を組み込んだ中村ら[13]の手法を採用した。詳細は中村ら[13]を参考されたい。

計算手法の検証を水谷ら[8]が行った水理模型実験結果を使って行った。この実験では、平面波浪水槽内にエプロン模型ならびに上述のコンテナ模型を配置し、入射波として孤立波を使用している。実験では、エプロン前面の入射波高、エプロン上の遡上水位、固定されたコンテナに作用する波力が計測されている。

エプロン先端から505mm岸側に20ftコンテナを設置した場合のエプロン上の遡上波によるコンテナ周辺の流動場の比較をFig. 4に示す。同図の左図は実験結果を、右図は計算結果を示す。左図よりエプロンを遡上した波がエプロン上を進行し(Fig. 4(a))、コンテナの真上に打ち上げられる様子(Fig.

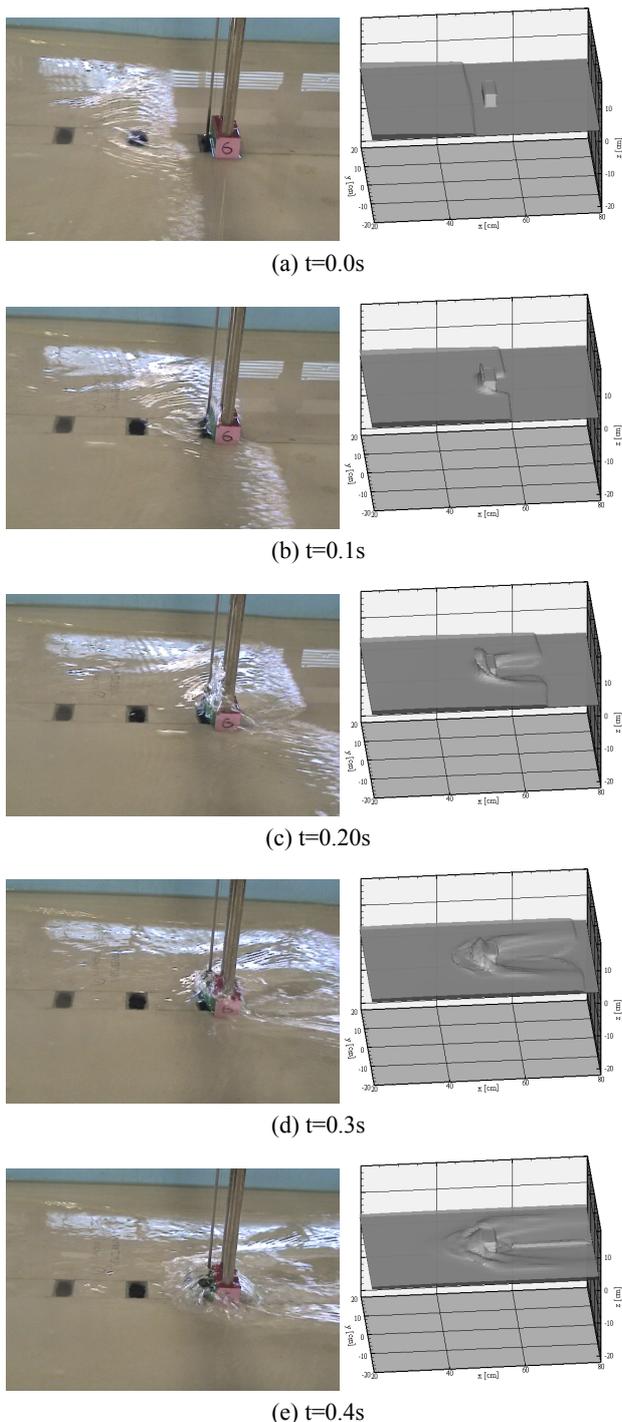


Fig. 4 Flow shapes around the fixed container (left : exp.; right : cal., H : 5.0cm; T : 2.0s)

4(b))が見られる。その後、コンテナによる反射波と遡上波の相互作用による砕波が発生し(Fig. 4(c)-(d)), コンテナ前面の遡上水位が高くなり、波がコンテナを若干乗り越える現象(Fig. 4(e))も確かめられた。このような現象は右図の計算結果からも認められ、本計算手法の妥当性を定性的に検証できた。

つぎに、定量的に妥当性を検証する。Fig. 5 にエプロン先端 5mm 沖側の水位変動( $\xi$ )とエプロン先端から 205mm 岸側に二段積みで設置した 40ft コンテナ沖側での打上水位( $\eta$ )を示す。なお、図中の実線は実験結果を、点線は計算結果を示す。数値計算による水位変動やコンテナ沖側での打上水位は実験結果と良好な一致が確認できる。また、Fig. 6 にはエプロン前面から 105mm 離れた位置において同コンテナに作用する波力を示す。同図から実験結果と計算結果が良く一致しているこ

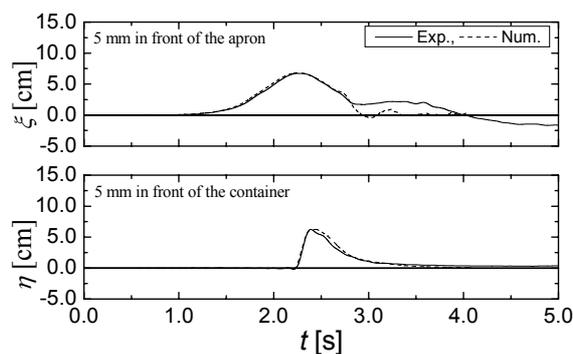


Fig. 5 Wave levels in the front of the apron and fixed container (double laid 40ft containers; H : 3.8cm; T : 3.0s)

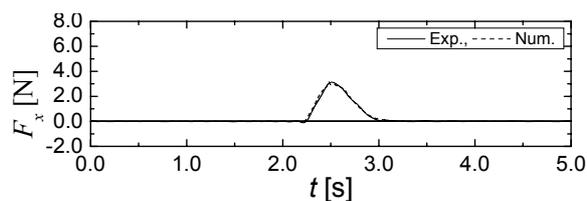


Fig. 6 Tsunami forces acting on the fixed container (double laid 40ft containers; H : 3.8cm; T : 3.0s)

とがわかる。よって、両図から本計算手法は定量的にも妥当な結果を与えることが確認できる。

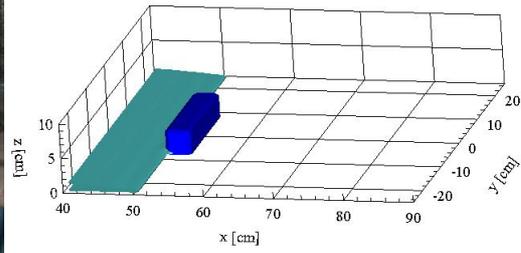
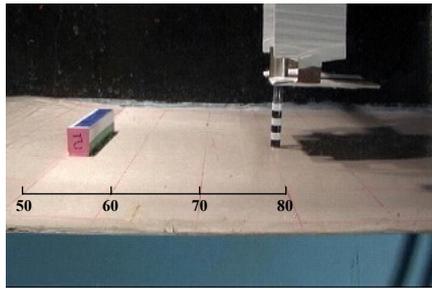
以上のことから、本計算手法により、固定されたコンテナに作用する津波力が算定可能であるといえる。ついで、遡上津波により漂流するコンテナの挙動の計算について検討を行う。

### 3.2 コンテナの漂流挙動

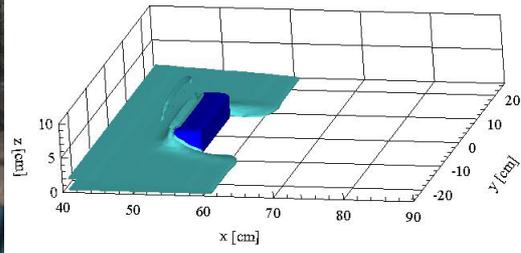
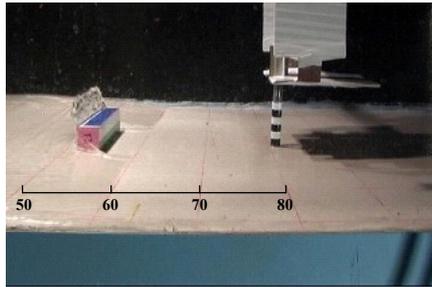
前節で述べた手法に、コンテナに作用する波力と摩擦力を外力として加え、漂流挙動の再現計算を行った。

計算手法の妥当性を検証するための実験は前章で述べた実験概要とほぼ同じであるが、コンテナが漂流しやすくするため、入射波高を大きくし、実験を行った。なお、計算では、静止摩擦係数( $\mu_s$ )と動摩擦係数( $\mu_k$ )が必要であるが、これらは実験結果と数値解析結果の比較しながら決定し、本報の計算では静止摩擦係数を 2.0 に、動摩擦係数を 0.3 に設定した。

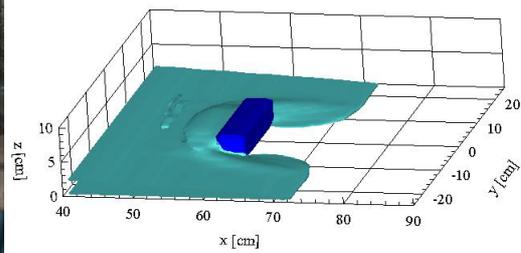
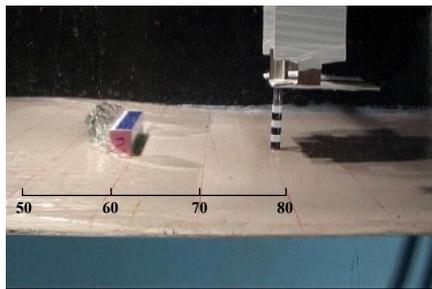
エプロン前面から 505mm 岸側に満載時を想定した 40ft コンテナを設置し、入射峰高(H) 5.2cm, 周期(T) 7.5s の入射波によるコンテナの漂流挙動の比較を Fig. 7 に示す。前節と同様に、左側に実験結果を、右側に計算結果を表している。同図より、エプロン上の遡上波がコンテナに衝突し (Fig. 7(a)), その影響によりコンテナの沖側で水塊がほぼ真上に打ち上がり (Fig. 7(b)), それと前後してコンテナが岸側に移動を開始する様子 (Fig. 7(c)) が確認できる。その後、打ち上げられた水塊がエプロン上に落下し、コンテナ沖側の水位は上昇するとともに、コンテナからの反射波と入射波の相互作用によって広い範囲で砕波が見られ (Fig. 7(d)), その後、コンテナ沖側の水位が周辺部より低くなったままコンテナが進む様子 (Fig. 7(e)) が観察された。この現象は細部に差はみられるものの Fig. 7 の計算結果からも認められ、本計算結果は実験結果を定性的に再現していることがわかる。



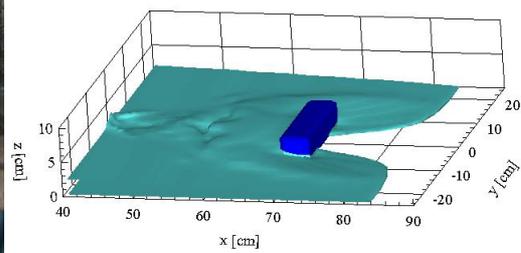
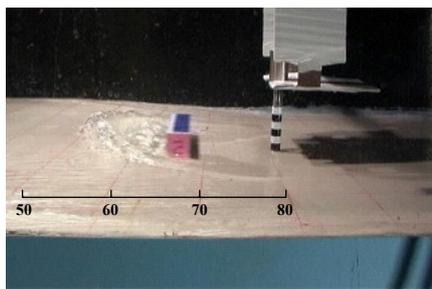
(a)  $t=0.0s$



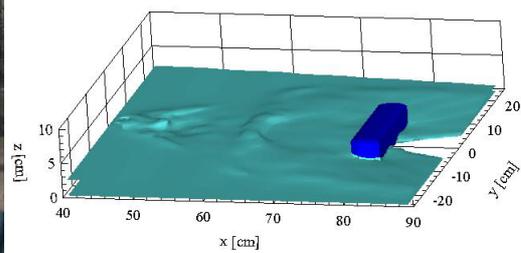
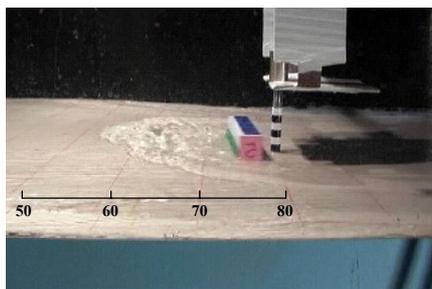
(b)  $t=0.1s$



(c)  $t=0.2s$



(d)  $t=0.03s$



(e)  $t=0.4s$

Fig. 7 Behaviors of a drifted container by run-up tsunami (left : exp.; right : cal., Case 03)

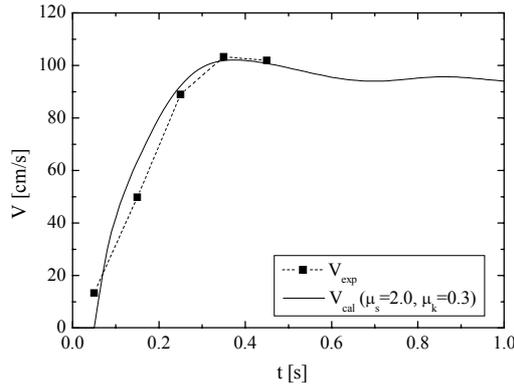


Fig. 8 Time variations of the velocities of the drifted container

つづいて、遡上波がコンテナに衝突した時間を 0 (s)とした漂流速度の時系列の実験値と計算値の比較を Fig. 8 に示す。図中の点線は実験結果、実線は計算結果である。なお、コンテナを円柱に衝突させる実験の結果を同図しているため、実験結果は途中までとなっている。動き出した直後の速度や 0.3 秒辺りから約 100cm/s の速度になることなど、計算結果は実験結果を良好に再現している。

以上より、本数値計算手法を用いて遡上津波によるコンテナの漂流挙動を評価することが可能であり、改善の余地は残されてはいるものの、次章で述べる衝突シミュレーションの入力値を提供する数値解析ツールとしての可能性は十分有していると言える。

#### 4 津波力算定式と衝突力算定式

著者ら[10]は、遡上波の持つ運動量が固定されたコンテナに作用したときに、その運動量を失い、それが力積としてコンテナに作用する波力を生じさせると考え、コンテナに作用する波力の算定モデルを提案している。Fig. 9 は、コンテナに作用する遡上波の水塊の概念図を示したものである。このモデルは、式(1)のように表せる。

$$F_{xm} dt = \gamma \rho B_c u (u \eta_{fm}) dt \quad (1)$$

$$= \gamma \rho B_c u (u \alpha \eta_m) dt$$

ここで、 $dt$  は水塊の衝突時間、 $\rho$  は水の密度、 $B_c$  はコンテナの幅、 $u$  は流速、 $\eta_m$  は最大遡上水位、 $\alpha$  は本研究において Fig. 2 から得た 2 を用いる。なお、 $\gamma$  はコンテナに遡上波が衝突する際の打上水位 ( $\eta_{fm}$ ) を水塊全体に対しては過大評価していることや運動量の損失を過大評価していることを考慮する補正係数で、本報では 0.5 とする。これらを考慮すると式(1)は式(2)のように簡略に表現できる。

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

実験で計測した波力の最大値  $F_{xm}$  と式(2)で推算した波力を Fig.10 に比較する。同図より、式(2)は実験値を良好に再現しており、式(2)の有効性が確認できる。ただし、 $\gamma$  の適当な値については更なる検討が必要である。

式(1)は固定されたコンテナに作用する波力の算定モデルであるが、この概念をコンテナの漂流衝突力 ( $f_{xm}$ ) の算定にも適用する。ここでは、漂流コンテナと被衝突物が衝突し、運動量をすべて失うまでの時間を衝突時間 ( $dt$ ) と仮定する。また、

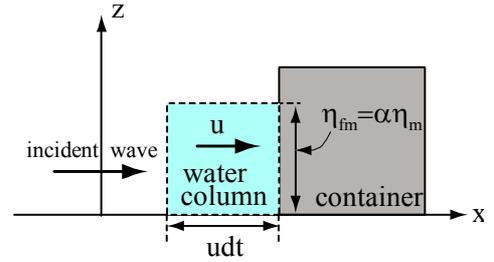


Fig. 9 Concept of estimation for the wave force

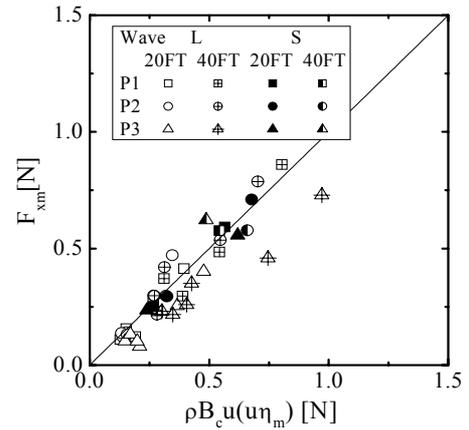


Fig. 10 Comparison of the formula and the experimental results

コンテナ背後の水塊も衝突によって運動量をすべて失うと仮定すると式(3)を得る[9].

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

ここに、 $V_x$  はコンテナの漂流速度、 $W$  はコンテナの重量、 $g$  は重力加速度である。

式(3)より、衝突時間  $dt$  は、右辺第 1 項と第 2 項の卓越状況に影響を及ぼす重要な物理量となる。すなわち、コンテナ重量に加え、付加質量 ( $\alpha \rho \eta_m B_c V_x dt$ ) の影響の大きさを支配する重要なパラメーターである。しかし、 $dt$  は衝突物や被衝突物の剛性に大きく影響を受ける量であり、これを水理模型実験によって算定することは困難である。そこで、実スケールの衝突現象が計算可能な LS-DYNA3D を使って衝突時間について検討する。

#### 5 付加質量の影響

まず、被衝突物の剛性を変えながら付加質量の効果について検討する。本来であれば、3 章で述べたコンテナの漂流挙動の再現計算で得られた衝突直前のコンテナ沖側に存在する水塊を含め、衝突力の算定にコンテナと水塊の連成解析を行うべきであるが、ここでは、付加質量に相当する量の水をコンテナ背後に付着させることで簡易的に衝突力の特性と付加質量の効果について考察する。

衝突力の計測装置の概要は 2 章で述べたとおりであり、衝突力の計測にはコンテナ模型と同じアクリル製の板にひずみゲージを添付した受圧板を用い、遡上波とともに漂流するコンテナを受圧板に衝突させることで衝突力の計測を行った。ただし、本研究では衝突作用時間の長短による付加質量の大小について検討するため、受圧板の剛性を変化させることとした。すなわち、受圧板の板厚を 2mm, 3mm, 4mm の 3 種

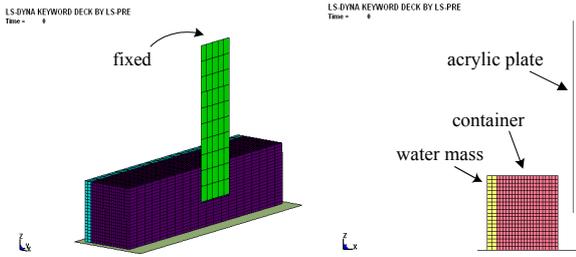


Fig. 11 Element division of the container collision model considering the added mass

類変化させ、衝突力の差異を付加質量と関連づけながら検討した。なお、LS-DYNA3D の妥当性を、コンテナを受圧板へ自由落下させる実験とその再現計算から検討している[11]。

本計算では、実験で使用したアクリル製の 40ft 半載コンテナに、付加質量を加え、上端固定の受圧板へ衝突させた。Fig. 11 に、本計算での要素分割を示す。全てのモデルは弾性体で構成させ、コンテナと受圧板はシェル要素、付加質量(水塊)はソリッド要素で構成した。

解析では、まず実験で用いた半載コンテナ(0.41N)のみを受圧板に衝突させ、その衝突力を求めた。しかし、この場合、付加質量を考慮していないため、実験値を過小評価する。そこで、付加質量に相当する量の水塊をコンテナ背面に付着させ、その量を受圧板の剛性毎に変化させながら計算し、実験値と衝突力が同程度となる場合を求めた。それらの結果を Fig. 12 に示す。実線が付加質量を考慮した場合の解析結果であり、2mm, 3mm, 4mm の受圧板に対して、それぞれコンテナ質量の 100%, 70%, 50%を付加質量として加えると実験結果に近くなる事が判明した。なお、これらの値は式(3)中の第一項と第二項の比に相当しており、実験からも推定が可能である。

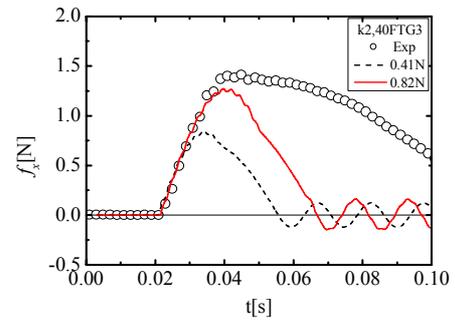
これらの結果より、漂流コンテナの衝突力を算定する際には、付加質量を考慮する必要があることが明らかとなった。また、その付加質量は、被衝突物の剛性により大きさが異なり、剛性が小さいほど、付加質量は大きくなる事が判明した。

## 6 衝突力及び衝突作用時間の算定

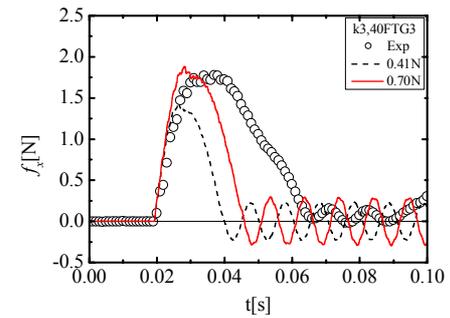
ここでは実スケールのコンテナの衝突現象について数値解析に基づいて検討する。具体的には、国際規格の貨物コンテナを津波避難施設の柱を想定したコンクリート柱に衝突させるシミュレーションを実施して、衝突力算定モデルに含まれる重要なパラメーター $dt$ について検討する。Fig. 13 に 40ft 空載コンテナとコンクリート柱の初期形状と実際の貨物コンテナの骨組みを示す。

数値解析では、コンテナとコンクリート柱にそれぞれ鉄、コンクリートの物性値を適用し、さらに、コンテナはシェルとソリッド要素の組み合わせ、コンクリート柱はソリッド要素で構成した。さらに、コンテナの全面はウェーブ板とし、実際のコンテナに近い状態でモデル化した。基本的にコンテナは弾塑性体、柱は剛体でモデル化した。なお、コンテナの衝突速度は以下のように想定した。まず、遡上水位( $\eta_m$ )を 1m と仮定し、つづいて、本稿では示さなかったが、遡上水位と遡上流速の関係( $u = \sqrt{g\eta_m}$ )と Fig. 3 で示した遡上水位と漂流速度の関係( $V_x = u/2$ )を用い、漂流速度を  $V_x = 1.57(m/s)$  と概算した。

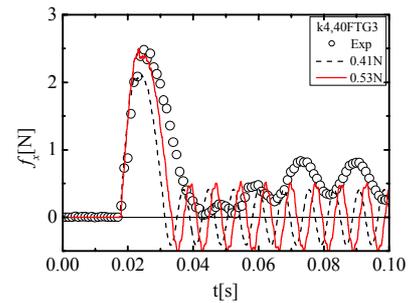
Fig. 14 に衝突中のコンテナに発生する応力の空間分布のスナップショットを示す。コンテナの前面板に応力の振動が発生しているが、この主な原因としては、コンテナ長が長いため、衝突にともなって長軸方向に振動が発生したことが挙げ



(a) k2

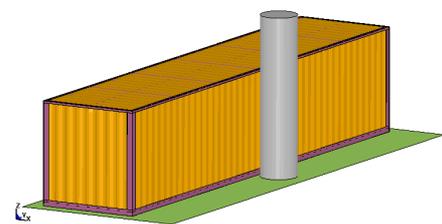


(b) k3

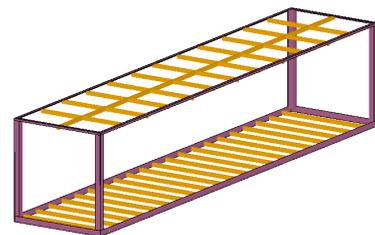


(c) k4

Fig. 12 Comparison of the experimental and numerical results



(a) Configuration of the initial condition



(b) Framework of the container

Fig. 13 Configurations of the container and pier

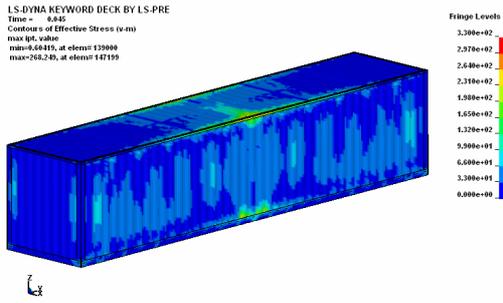


Fig. 14 Stress distribution of 40ft container

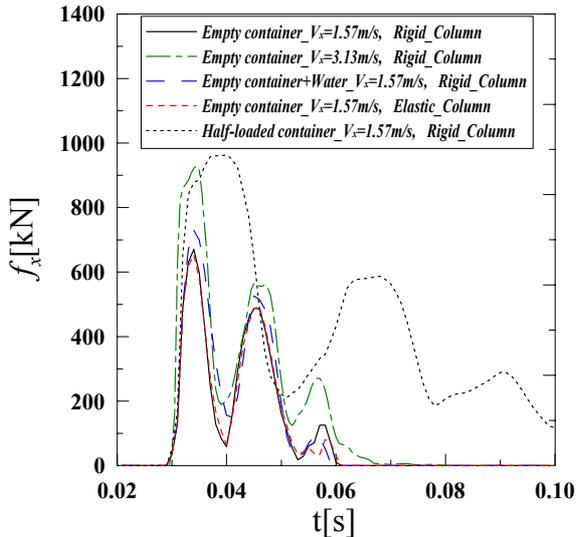


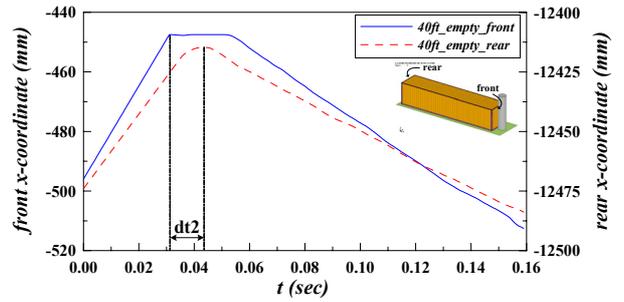
Fig. 15 Collision forces of the 40ft container with the pier in full scal

られる。そして、コンテナ前面板の振動の影響は Fig.15 の衝突力の時間変化にも現れている。

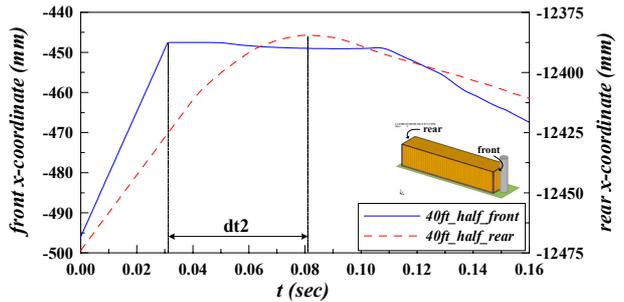
衝突速度、付加質量、被衝突物の剛性やコンテナの重量を変化させた場合の衝突力の時間変化を Fig. 15 に示す。衝突力にはコンテナの重量や衝突速度が、衝突時間にはコンテナの重量が大きい影響を与えることがわかった。剛体のコンクリート柱の代わりに弾性体の柱を対象とした場合、明らかな違いはなかった。これは、本計算で用いたコンクリート柱の高い剛性の影響と判断できる。また、半載コンテナと付加質量を考慮した空載コンテナを比較した場合、前者のほうが衝突力は大きくなったが、これは、半載コンテナが約 17 トンであるのに対し、付加質量を考慮した空載コンテナが約 6 トンと格段に重量が小さいためである。

最後に、コンテナの衝突力算定式で付加質量の大きさを決定する際に必要となる衝突時間の予測について議論する。Figs. 11~12 のような弾性体の被衝突物の場合、衝突力の時間変化は明瞭なピークを示し、衝突物と被衝突物の衝突開始から衝突力のピーク値までの時間を衝突時間  $dt$  として取り扱うことができると考えられる。しかし、Figs. 13~15 のように、被衝突物が剛体の場合、衝突物に変形が発生し、Fig. 15 に見られるように衝突力に多数のピークが発生する。このため、衝突物と被衝突物の衝突開始から衝突力のピーク値までの時間を単純に衝突時間  $dt$  として定義することには再考の余地がある。

そこで、本研究では衝突物の変形を考慮する車両衝突解析 [15] に基づいて衝突時間を定義することとした。Fig. 16 は、40ft 空載や半載の縦向きコンテナのコンクリート柱への衝突

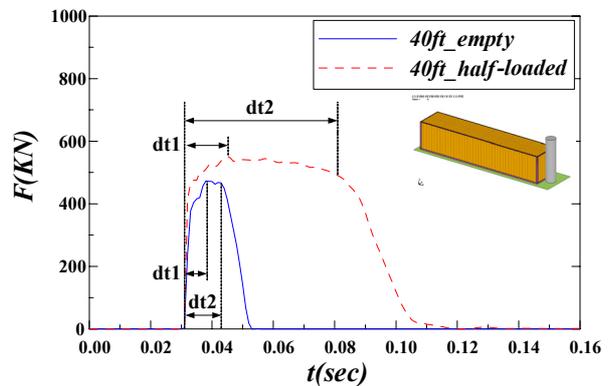


(a) 40ft empty container

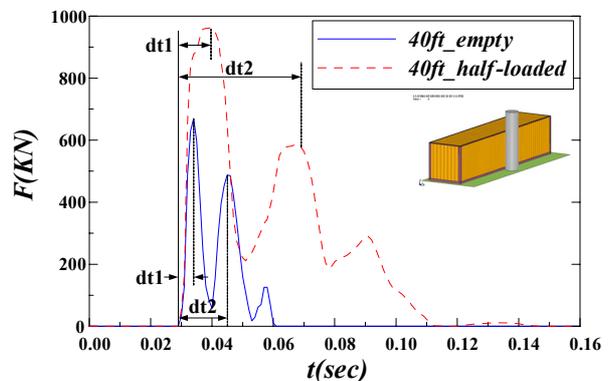


(b) 40ft half-loaded container

Fig. 16 Collision time in x-coordinate of the front and rear plates



(a) 40ft container (longitudinal collision)



(b) 40ft container (lateral collision)

Fig. 17 Collision time in time variation of the collision force

時におけるコンテナの前面板と背面板の位置座標を示している。コンテナが変形しない場合、前面板と背面板の位置関係は不変であるが、同図から本条件のように被衝突物が剛体の場合、前面板が静止した場合でも背面板は衝突方向へ進むことが明らかとなった。そして、本研究では、前面板が柱に当たった瞬間（変位量がなくなった瞬間）から背面板の衝突方向への進行が終了した瞬間までを衝突時間( $dt_2$ )とした。この概念を考慮した衝突時間( $dt_2$ )は衝突物と被衝突物の最初の接触から衝突力のピーク値までの時間( $dt_1$ )より長くなることが Fig. 17 に明瞭に示される。その結果、40ft 縦向き(Fig. 17(a))の空載と半載の衝突時間( $dt=dt_2$ )はそれぞれ 12ms, 50ms であり、40ft 横向き(Fig. 17(b))では 14ms, 37ms となった。

## 7 結論

本報では、遡上津波によるコンテナの漂流挙動と衝突現象について、水理模型実験と数値解析を行って検討している結果についてまとめた。まだ幾つかの課題を残してはいるもののこれまでに得られた結果について以下に要約する。

- (1)水理模型実験を行い長周期波の場合、遡上波による固定されたコンテナ沖側の面の最大打上高は最大遡上水位の約 2 倍になり、コンテナの漂流速度は遡上流速の約 1/2 になる。
- (2)本研究で使用した 3 次元数値波動水槽の妥当性を水理模型実験との比較により検証した。
- (3)LS-DYNA3D による数値解析より、衝突力に及ぼす付加質量の重要性が確認された。さらに、実スケールのコンテナと柱の衝突解析を行い、衝突力にはコンテナの重量や衝突速度などが重要なパラメーターとなることを明らかにした。
- (4)漂流コンテナの衝突現象では、コンテナの変形を考慮した衝突時間の定義が必要であり、本計算の範囲では、衝突時間は 12~50ms 程度であることが判明した。

今後は、さらに信頼性の高い衝突現象のシミュレーションを実施し、その結果を簡易算定モデルにフィードバックできるよう継続して検討を加えていく予定である。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）および（財）漁港漁場漁村技術研究所の研究助成により行われたことを付記し、感謝の意を表す。

## 参考文献

[1] Choi, B.H., Hong, S.J., Hwang, D., Hidayat, R., Kaistrenko, V., Korolev, Yu., Kukin, A., Pelinovsky, E., Polukhin, N., Prasetya, G., Razzhigaeva, N., Subandono, D., Yalciner, A., Yoon, S.B. and Zaitsev, A. : Catastrophic Tsunami in the Indian Ocean (December 26, 2004): Data of Two Field

Surveys and Numerical Simulation, Sumatra Tsunami on 26 December 2004, Asian and Pacific Coasts, pp. 159 - 187, 2005

[2] Imamura, F., Arikawa, T., Tomita, T., Yasuda, T. and Kawata, Y. : Field Investigation on the 2004 Indian Ocean Tsunami in the Southwestern Coast of Sri Lanka, Sumatra Tsunami on 26 December 2004, Asian and Pacific Coasts, pp. 93 - 105, 2005

[3] 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/II-47, 111-127, 1999.5

[4] 池谷毅，稲垣聡，朝倉良介，福山貴子，藤井直樹，大森政則，武田智吉，柳沢賢：津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第 53 巻，pp. 276-280, 2006

[5] 水谷将，今村文彦：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, 2000

[6] 池野正明，森信人，田中寛好：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, 2001

[7] 池野正明，田中寛好：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, 2003

[8] Haehnel, R.B. and Daly, S.F. : Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 112 - 120, 2004

[9] 水谷法美，高木祐介，白石和睦，宮島正悟，富田孝史：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

[10] 水谷法美，白石和睦，宇佐美敦浩，宮島正悟，富田孝史：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, 2006

[11] Salvetti, M.V. and Banerjee, S. : A Priori Tests of a New Dynamic Subgrid-Scale Model for Finite-Difference Large-Eddy Simulation, Phys. Fluids, Vol. 7, No. 11, pp. 2831 - 2847, 1995

[12] 功刀資彰：自由界面を含む多相流の直接数値計算法，日本機械学会論文集 B 編，63, 609, pp. 1576 - 1584, 1997

[13] 中村友昭，白石和睦，宇佐美敦浩，水谷法美，宮島正悟，富田孝史：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, 2006

[14] 廉慶善，水谷法美，白石和睦，宇佐美敦浩，宮島正悟，富田孝史：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, 2007

[15] 伊藤義人，大野隆，森正樹：車両衝突を受ける鋼製橋脚の挙動に関する数値解析的研究，構造工学論文集，Vol. 44A, pp. 1725 - 1736, 1998