

# 津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性

熊谷兼太郎<sup>1</sup>・小田勝也<sup>2</sup>・藤井直樹<sup>3</sup>

津波により、港湾内に蔵置されたコンテナ等が海域・陸域へ漂流し被害を引き起こす危険性が高い。そこで、コンテナの漂流挙動を的確に予測するため、コンテナの漂流挙動シミュレーションのモデル化を行った。既往のコンテナ漂流実験の再現計算を実施し、モデルの適用性の確認を行った。その結果、津波に伴うエプロン上の一方向流れ及び多方向の流れについて、コンテナの蔵置位置、コンテナ重量、コンテナ長さの違い等による漂流挙動が再現できた。また、コンテナ蔵置場所の背後にある壁へコンテナが漂流し衝突した場合の衝突力を求め、衝突力のピーク値は既往の実験と同程度の値となった。

## 1. はじめに

港湾は、津波により漂流する危険性の高いコンテナ等の貨物を多数、蔵置している。津波により、コンテナが陸域へ漂流した場合は、港湾構造物、海岸構造物、危険物貯蔵施設、背後の住居等へ衝突し、大きな被害が発生する。また、海域へ漂流し航路及び泊地に漂流・沈没した場合は、多額の回収費用の発生、港湾機能の長期間にわたる停止等の被害が発生する。その対策として、津波による浸水の影響の小さい場所への貨物蔵置、流出防止柵の設置等が考えられる。そのためには、コンテナの漂流挙動を的確に予測する必要がある。そこで、津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルを開発する。また、既往の実験結果と同モデルによる計算結果との比較により、同モデルの適用性の検討を行う。

コンテナの漂流に係る既往の検討は、解析的手法として、平面 2 次元場の流れによる抗力だけを考えれば既往の船舶及び流木に関する検討と同様である。Daniel ら (2002) によりコンテナを対象に広領域の海洋における風を外力とした検討があるが、津波時の流れを外力とした検討はほとんどない。また、コンテナ単体を対象とし海洋に接触物がない条件であり、接触計算を行ったものはない。この点は、海水について山口 (2001) が接触や衝突を考慮し個別要素法 (DEM: Distinct Element Method) とのハイブリッドモデルを提案している手法が参考となる。実験的手法としては、水谷ら (2005) が模型水槽により港湾のコンテナふ頭に蔵置されたコンテナの漂流挙動・衝突力について詳細に実験している。

## 2. 構築したモデルの概要

構築したモデルの概要を図-1 及び図-2 に示す。まず、対象地域について津波の平面 2 次元数値シミュレーシ

ンを実施し、水深及び流速分布を把握したうえで、津波漂流物に作用する抗力及び慣性力を評価し、津波漂流物に関する運動方程式を解くことにより、津波漂流物の挙動を計算する。また、津波漂流物と港湾・海岸構造物との衝突、津波漂流物の回転等について表現するため、個別要素法 (DEM) を用いて津波漂流物をいくつかの要素で表現し、津波の平面 2 次元数値シミュレーション結果を取り込みながら、津波漂流物が港湾・海岸構造物に接触した場合の衝突力を計算する。なお、津波漂流物をいくつかの要素で表現するにあたり、個別要素法に目黒・伯野 (1988) による連結要素の考え方を付加している。

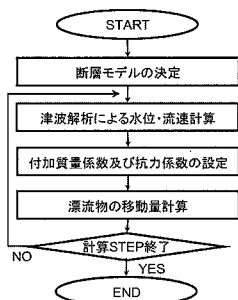


図-1 漂流挙動の検討フロー

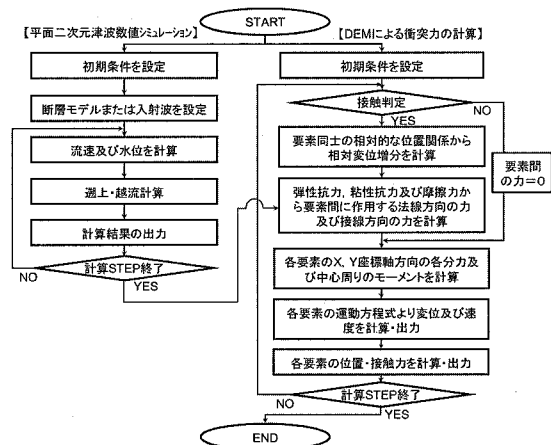


図-2 衝突挙動の検討フロー

1 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所  
2 正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所  
3 正会員 東電設計株式会社 港湾・海岸部

### 3. コンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性の検討

#### (1) 対象とする実験

水谷ら (2005) による矩形水路及び清水港新興津地区を想定した水路におけるコンテナ漂流実験について、再現計算を行った。波浪条件、遡上水位等の計測位置等をそれぞれ表-1、図-3 及び図-4 に示す。

表-1 実験波浪条件

(1) 矩形水路 (模型縮尺 1/75)

| Case No. | 波形  | T(s) | H(m)  | $gT^2$ |
|----------|-----|------|-------|--------|
| R-7      | 孤立波 | 6.0  | 0.069 | 352.80 |

(2) 清水港新興津地区を想定した水路 (模型縮尺 1/150)

| Case No. | 波形  | T(s) | H(m)  | $gT^2$ |
|----------|-----|------|-------|--------|
| S-12     | 孤立波 | 4.5  | 0.043 | 199.67 |

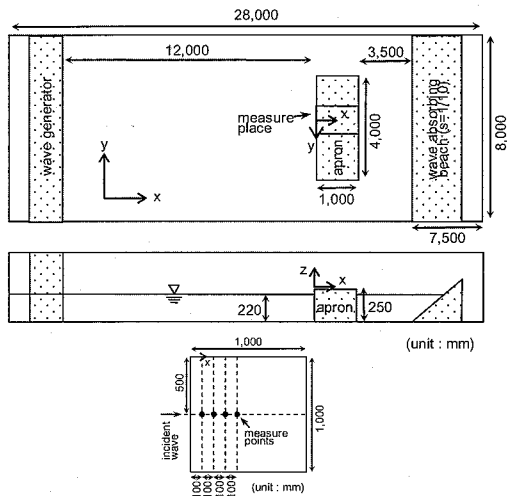


図-3 矩形水路 (水谷ら (2005))

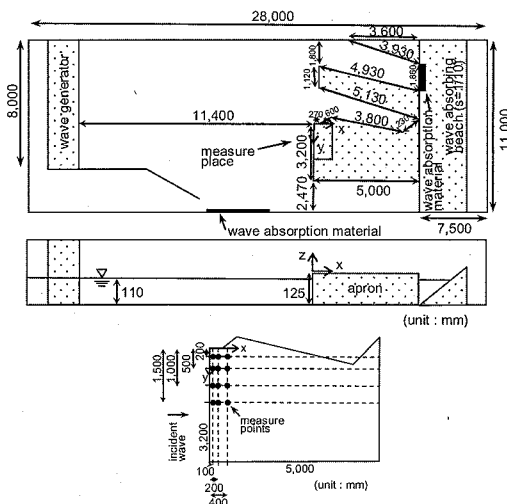


図-4 清水港新興津地区を想定した水路

#### (2) 遡上波の計算結果 (矩形水路)

##### a) 津波計算モデル

津波計算は解析対象領域を遡上域と海域とに分け実施した。津波遡上計算は、後藤・小川 (1982) と同様の非線形長波理論方程式を用いた。基礎方程式を式(1)～(3)に示す。

(連続式)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

また、実験では海域において分裂波が観察されたため、海域を対象とした津波計算は以下に示す Peregrine 形式の分散項を考慮した基礎方程式により行った。非線形分散波理論式を解く手法は、ADI 法を用いた。そして、津波が遡上すると、リーブフロッグ法により行った。

(連続式)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

(運動方程式)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{NM}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = \frac{h^2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 N}{\partial t \partial y} \right) \quad (6)$$

ここに、 $t$ : 時間、 $x, y$ : 平面座標、 $\eta$ : 静水面から鉛直上方にとった水位変動量、 $M$ :  $x$  方向の線流量、 $N$ :  $y$  方向の線流量、 $h$ : 静水深、 $D$ : 全水深 ( $D = h + \eta$ )、 $g$ : 重力加速度、 $n$ : マニングの粗度係数である、

##### b) 遡上水位及び流速の計算結果

津波計算は、造波板から 6 m 離れた地点で計測されている水位データを入射波形とし、海域 6 m とエプロン上 1 m を対象区間とした。図-5 に CASE R-7 の遡上水位の時間波形の計算結果及び水谷ら (2005) による実験結果を示す。エプロン上のコンテナは第一波で移動し、第二波以降では移動しない。第一波の計算結果と実験結果とを比較する。まず振幅および位相 (エプロン上の水位発生

の継続時間)は若干の違いがある。例えば、実験結果の  $x=10$  cm の遡上水位ピーク値は、測定位置が異なるため単純に比較できないが、 $x=5$  cm, 15 cm の計算結果よりも大きくなっている。ただし、実験では打ち上がった波は不安定で砕波して進行しているような様子が観察されており、計算では砕波現象が的確に再現できてない可能性がある。一方、流速については、計算結果は最大値が  $0.5\sim 1.0$  m/s 程度であり、フルード数を求めると 2 程度となった。実験結果は、遡上波の表層付近の流速は  $0.5\sim 0.8$  m/s 程度であり、また、最大遡上水位を用いてフルード数を求めると 2 程度となった。これらをふまえ、計算結果は、振幅及び位相について若干の違いがあるものの、概ね実験における遡上波の流れを表しているものと考え、検討に用いた。ただし、振幅及び位相を含めた遡上波の詳細な再現については今後の課題である。

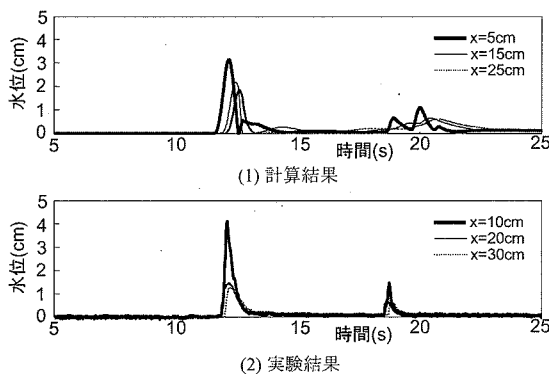


図-5 遡上水位の時間波形 (Case R-7)

### (3) コンテナ漂流の計算結果 (矩形水路)

(2)で得られた津波の遡上計算結果を用いコンテナの漂流計算を実施した。表-2に20フィート (ft), 40フィート (ft) のコンテナ模型の諸元をそれぞれ示す。

コンテナは個別要素法 (DEM) を用い、20 ft コンテナ、40 ft コンテナをそれぞれ  $2\times 2\times 5$ ,  $2\times 2\times 10$  の球形要素、バネ等でモデル化した。図-6に20 ft コンテナの球形要素の配置イメージを示す。各球形要素にそれぞれ作用する力を考慮し底面との接触、回転等を表現する。

表-2 コンテナ模型の諸元

| コンテナ名  | 重量 (N) | 長さ (mm) | 幅 (mm) | 高さ (mm) |
|--------|--------|---------|--------|---------|
| FT20G4 | 0.39   | 80      | 32     | 35      |
| FT40G4 | 0.58   | 163     | 32     | 35      |



図-6 コンテナモデル (20ft コンテナ)

コンテナの初期位置は  $x=11.5$  cm, 31.5 cm, 51.5 cm である。コンテナの漂流計算は、コンテナに作用する津波波力をモリソン式により算定した。式中の抗力係数及び慣性力係数は水谷ら (2005) の実験を参考に設定した。

図-7に、計算による FT20G4, FT40G4 の  $x$  方向移動距離を示す。移動距離は、初期位置  $x=11.5$  cm が大きく、31.5, 51.5 cm の順に小さくなる。また、移動距離は 40 ft の方が 20 ft より大きい。例えば初期位置  $x=51.5$  cm では 20 ft コンテナは 10 cm 程度、40 ft コンテナは 25 cm 程度移動する。 $y$  方向移動距離はいずれも小さい。

図-8に実験による初期位置  $x=51.5$  cm の場合の移動軌跡を示す。図中の線はコンテナの軸方向を示している。図-9は、それをコンテナの中心点の位置変化で書き直したものの  $x$  方向成分である。20 ft コンテナは  $x$  方向に 15 cm 程度、40 ft コンテナは 30 cm 程度移動した。このように、実験は計算と比較してやや移動距離が大きいものの、概ね計算結果と同様の傾向となった。

コンテナの移動速度は、計算では 20 ft と 40 ft とで顕著

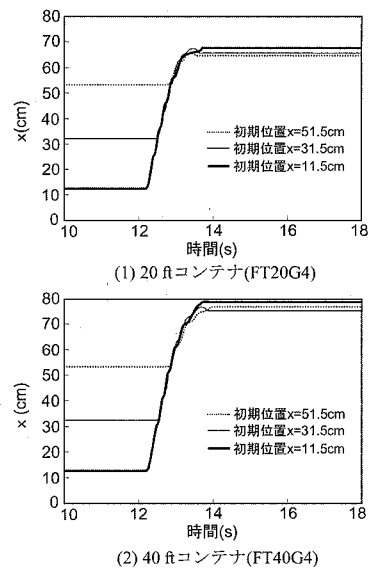


図-7 計算によるコンテナの  $x$  方向移動距離

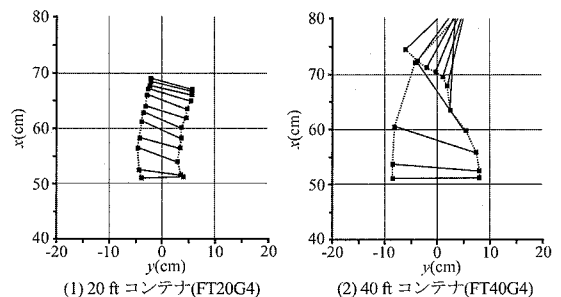
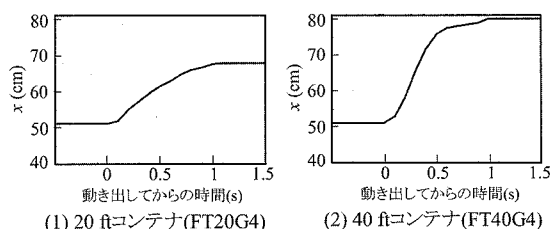
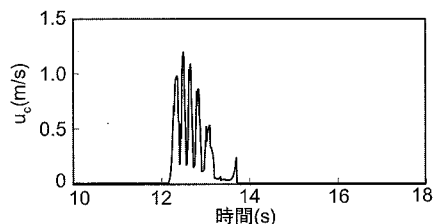


図-8 実験によるコンテナの漂流軌跡 (水谷ら (2005))

図-9 実験によるコンテナの  $x$  方向移動距離図-10 計算によるコンテナの  $x$  方向移動速度の時間変化 (FT20G4, 初期位置  $x=11.5$  cm)

な差がなかった。図-10に、20 ftコンテナ (FT20G4, 初期位置  $x=11.5$  cm) の計算による  $x$  方向移動速度  $u_c$  の時間変化を示す。コンテナが動き出してから  $u_c$  は振動している。これは、水深方向のコンテナの変位もふまえると、エプロン上で浮き上がるとともにコンテナが漂流し、底面と接触するとエプロンとの摩擦力で速度が低減する挙動を示している。ただし、計算上の数値的な振動が含まれている可能性もあり、今後詳細な検討が必要である。

#### (4) コンテナ衝突力の計算結果 (矩形水路)

$x=11.5$  cm, 31.5 cm, 51.5 cm に設置したコンテナについて、それぞれ背後に 5.3 cm 離れた位置に鉛直板を設置し、コンテナがそれぞれ衝突して作用する力を求めた。

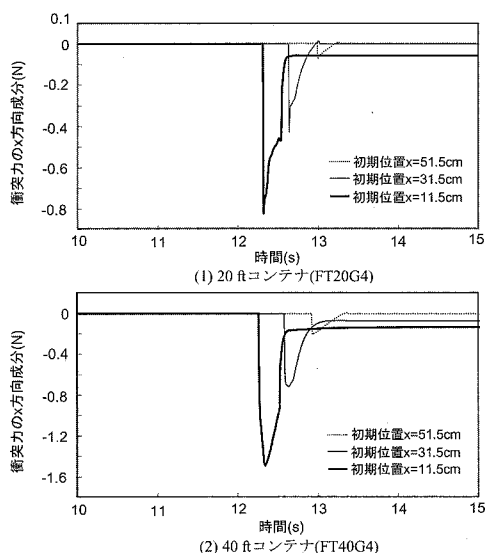
図-11 計算による衝突力の  $x$  方向成分の時間変化

図-11に、FT20G4, FT40G4について計算による衝突力の  $x$  方向成分の時間変化を示す。なお、図中ではコンテナの衝突力を正としているため、その反作用である壁での作用力を負として示す。衝突力は、初期位置が遠くなるほど小さくなった。また、20 ftより40 ftの方が大きくなった。衝突後も壁面に力が作用しているものは、流れによりコンテナが押されることによる反力を示す。

水谷ら (2005) の実験による衝突力の測定結果では、衝突力のピーク値は、FT20G4, FT40G4 がそれぞれ 0.2~1.0 N, 0.4~2.0 N 程度であった。計算結果はこれとほぼ同程度の値となっている。

#### (5) 遡上波の計算 (清水港新興津地区)

(2)a)と同様に、解析対象領域を海域と遡上域に分け、海域は非線形分散波方程式で、陸域は非線形長波方程式を用い、沖側境界条件として実験で測定された水位波形を与えることにより表-1(2)の遡上波の計算を実施した。

#### (6) コンテナ漂流の計算結果 (清水港新興津地区)

(3)と同様に、コンテナ漂流の計算を行った。表-3に対象としたコンテナを示す。コンテナの初期位置は  $x=5$  cm である。

図-12は、計算によるコンテナ移動距離を 20 ft (重量半載または満載) の場合について示す。矩形水路と異なり、エプロン上では  $y$  方向の流れも生じるため、コンテ

表-3 対象としたコンテナ

|      | 長さ 20 ft | 長さ 40 ft |
|------|----------|----------|
| 重量半載 | ○        | ○        |
| 重量満載 | ○        | ○        |

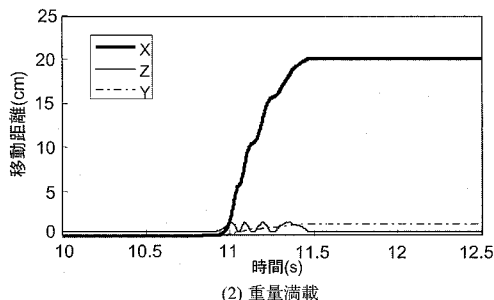
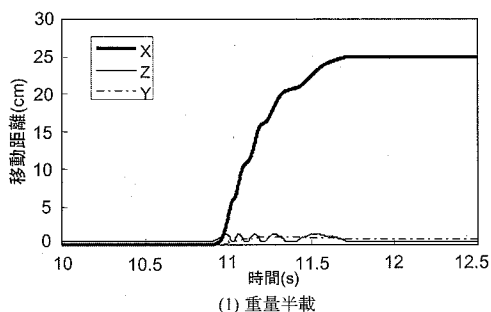


図-12 計算によるコンテナ移動距離 (20ft コンテナ)

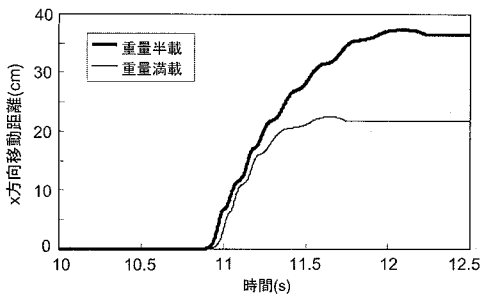
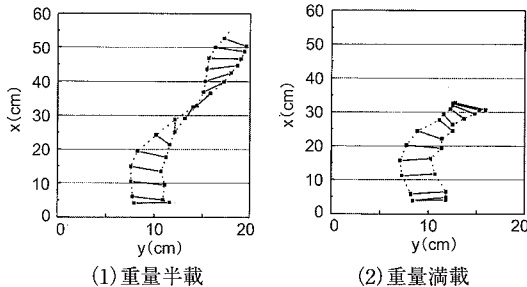
図-13 計算による 40ft コンテナの  $x$  方向移動距離

図-14 実験による漂流軌跡 (20ft コンテナ)

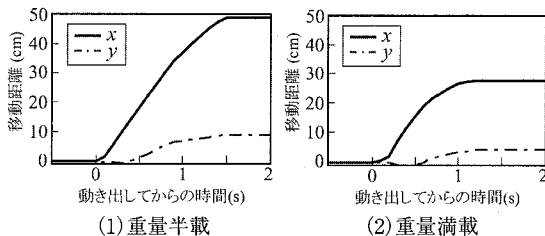


図-15 実験によるコンテナ移動距離 (20ft コンテナ)

ナが  $y$  の正方向への移動が生じている。重量半載の場合、 $x$  方向に約 25 cm、 $y$  方向に約 1 cm 移動した。重量が満載の場合は  $x$  方向に約 20 cm であり、半載の場合より小さくなった。 $y$  方向には約 1 cm 移動した。

計算ではコンテナが浮き上がる ( $z$  の値が正となる) と移動し、底面と接触すると止まる結果となり、エプロン上の水位の上昇とともにコンテナが漂流し、水位が減少するとエプロンとの摩擦力的ために止まるという挙動を表現している。また、40 ft コンテナも、 $x$  方向移動量は重量半載の場合が満載の場合より大きく移動した (図-13)。

図-14 は、実験による漂流軌跡を 20 ft (重量半載または満載) の場合について示した。図-15 は、それをコンテナ中心点の位置変化で書き直したものである。実験では、重量が半載の場合、 $x$  方向に約 45 cm、 $y$  方向に約 10 cm 移動した。重量が満載の場合、 $x$  方向に約 30 cm であり、半載の場合より小さくなった。 $y$  方向には約 5 cm 移動した。

このように、計算結果は実験結果と比較すると移動量

はやや小さいが、エプロン上を  $x$  方向に大きく移動しながら、 $y$  方向の流れの影響を受けつつ移動する傾向が再現できた。

#### (7) コンテナ衝突力の計算 (清水港新興津地区)

(4) と同様に、コンテナ衝突力を検討した。半載時と満載時の衝突力を比較すると、半載時に比べ満載時の方が大きくなった。つぎに、20 ft と 40 ft の衝突力を比較すると、半載時は 40 ft の方が大きく、満載時は 20 ft の衝突力が大きくなった。これは、漂流の姿勢や衝突する形態が関係していると考えられ、今後検討が必要である。

### 4. 本研究のまとめ

本研究の結論は以下のとおり。

- 1) 津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションのモデル化を行った。本モデルは、津波漂流物に作用する抗力及び慣性力を評価し、津波漂流物に関する運動方程式を解くことにより、漂流挙動を計算する。また、個別要素法 (DEM) を用いて津波漂流物を表現し、海岸構造物に衝突した場合等を想定し衝突力を計算する。
- 2) エプロン上に蔵置されたコンテナについて、矩形水路における既往の漂流実験の再現計算を行った。その結果、実験に比較しやや移動距離が小さいが、エプロン上の一方向流れに対し、前面に蔵置されたコンテナが陸側に大きく漂流する現象、40 ft コンテナが 20 ft コンテナよりも移動距離が大きくなる現象等が再現できた。
- 3) エプロン上に蔵置されたコンテナについて、清水港新興津地区を想定した既往の漂流実験の再現計算を行った。その結果、実験に比較しやや移動距離が小さいが、エプロン上の多方向の流れに対し、コンテナ重量・長さの違いによる漂流挙動の傾向を再現できた。
- 4) コンテナ蔵置場所の背後にある壁へコンテナが漂流した場合の衝突力を求め、衝突力のピーク値は既往の実験と同程度の値となった。

謝辞 名古屋大学大学院水谷法美教授には貴重な実験データのご提供・ご示唆を頂いた。また、国土交通省中部地方整備局はじめ各位に謝意を表します。

### 参考文献

- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・武田智吉・柳沢賢 (2005) : 港湾における津波漂流物の数値解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 296-300.
- 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.
- 目黒公郎・伯野元彦 (1988) : 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所集報, Vol.63, 東京大学地震研究所, pp. 409-468.
- 山口一 (2001) : 海水変動の数値予測, ながれ, No.20, pp. 295-303.
- Daniel P., J. Gwenaële, C. Fanch, Y. Landau, E. Loiseau (2002) : Drift Modeling of Cargo Containers, Spill Science & Technology Bulletin, Vol.7, No.5-6, pp. 279-288.