コンテナ沈没挙動測定の現地実験と港湾における漂流数値シミュレーション

The Field Experiment for Containers Floating on Sea Surface and Numerical Simulation of Container Drift

熊谷兼太郎¹•小田勝也²•藤井直樹³

Kentaro KUMAGAI, Katsuya ODA and Naoki FUJII

There are high risks that tsunamis may cause containers stored in ports to drift into sea/land areas. In this study, one of the main objects is to construct a simulation model which enable us make accurate prediction of the drift behavior of containers and its collision force. For the object, the field experiment for containers drifting and floating on sea surface due to tsunami. The field experiment was conducted in the inner harbor of the Shimizu Port, Shizuoka Prefecture. The container sunk completely to the sea bottom bed after floating for 24.15 hours. And the numerical simulation was conducted and the behavior of the container drift and collision force in Shimizu Port Area was estimated.

1. はじめに

港湾には、津波により漂流する可能性があるコンテナ、 小型船舶等が多数蔵置・係留されている.津波によりそ れらが津波漂流物として航路・泊地に漂流・沈没し船舶 航行を阻害する場合,船舶航行の安全性が確保されるま で港湾機能が停止する可能性がある.また、港湾のふ頭 周辺には、背後地域を浸水から防護するための防潮施設、 貨物を保管するための上屋等の構造物がある.津波によ る漂流物が陸域を漂流し構造物へ衝突した場合、構造物 の破壊に伴う被害が生じる可能性がある.そこで、コン テナ等の津波漂流物の漂流・衝突挙動を適切に予測する 手法の検討が必要である.

漂流物の漂流・衝突挙動に係る既往の解析的手法とし ては,船舶及び流木について,流れによる抗力及び慣性 力を考慮した検討が多数ある. コンテナについて, Danielら(2002)の広領域の海洋における風を外力として 漂流するコンテナに関する検討があるが,津波時の流れ を対象にしたものではなく,また,海洋に接触物がない 条件であり漂流物と構造物あるいは漂流物同士の接触は 考慮していない.接触については,山口(2001)が海氷に ついて接触や衝突を考慮し個別要素法(DEM: Distinct Element Method)を用いる手法が参考となる. 川崎・袴 田(2007)は、3次元固気液多相乱流数値モデルを用いて 漂流物の動的解析を行っている.また,東野ら(2007)は 津波の流れ,漂流物及び構造物の相互作用について移動 境界を用いた精緻な解析を行っている.

しかし,港湾程度という比較的大きく,津波が影響す る数時間程度という比較的長い時空間領域を対象に,漂

1 2	正 正	会会	員員	工修 工修	国土交通省国土技術政策総合研究所国土交通省国土技術政策総合研究所
3	Æ	会	員		東電設計株式会社社会基盤推進部

流物の漂流・衝突挙動を解析的手法により比較的精度良 く検討を行った例はほとんどない.

これまで,著者ら(2006,2007)は、コンテナの漂流・ 衝突挙動の数値シミュレーションモデルを提案してきた. そこでは,水深方向に積分した非線形長波理論式により 海域から遡上域までの津波計算を行う.個別要素法を用 いて形状を表現したコンテナが,流れの抗力,慣性力等 の作用で漂流する.漂流したコンテナは,個別要素法を 用いて形状及び剛性を表現した構造物に衝突し,衝突力 が算定される.また,廉ら(2007)によるコンテナ模型の 漂流・衝突実験結果について再現計算を行い,実験結果 と計算結果とを比較して検証している.このモデルを, 港湾程度の大きさで津波が影響する数時間程度という長 さの時空間領域に適用することを考える.

一般に、コンテナは完全な水密性を有していない.コ ンテナが流出し海面に浮遊すると、内部へ浸水し水中部 分の体積が変化する.海面下へ完全に沈没する場合もあ る.浮遊限界時間(浮遊開始から完全に沈没するまでの 時間)は、いくつか報告があるが数日間〜数十分の間で ばらつきが大きい.例えば、田辺海上保安部(2006)によ れば、荒天で船舶から転落したコンテナが少なくとも2 日間程度漂流した.著者らのヒアリング結果では、水島 港において高潮で流出したコンテナの一部は15時間以内 に完全に沈没した.また、CEDRE(2001)は、海難事故 で流出したコンテナは約20~30分で完全に沈没するとし ている.これらの多くは、浮遊から沈没に至る経過、流 出したコンテナの形状、重量諸元等の詳細も不明である.

また,コンテナ初期蔵置位置,形状,重量,流れの作 用力の算定方法等も漂流・衝突挙動に影響すると考えら れるので,数値シミュレーションで把握する必要がある.

そこで,コンテナを海上に浮遊させ沈没挙動を測定す る現地実験を行った.次に,実験結果をふまえ,沈没を 考慮した,コンテナの津波漂流・衝突数値シミュレーショ ンを行った.このように,港湾における津波漂流物の漂流・衝突挙動を適切に予測する手法の検討を目的とした.

2. コンテナ沈没挙動測定の現地実験

(1) 実験に用いたコンテナ

長さ40フィートの標準的な国際海上コンテナ2本を用いた. 表-1に,主な諸元を示す. No.1は空コンテナに模擬貨物として4,000 kgの山留材をコンテナ床上の長軸中心線上に動かないように固縛した(写真-1). No.2は空コンテナである.日本工業規格(1994)にはコンテナの風雨密性を確認するための漏水試験がある.これに準じた漏水試験を行い,漏水のないことを確認した.また,コンテナ外側の10箇所に測量用スタッフ(標尺)を溶接して取付けた.海上浮遊時に海面位置を目盛りで読みとり,沈没深さを測定する.

表−1 実験に用いたコンテナの主な諸元

外法寸法(m)	高さ2.591×幅2.438×長さ12.192			
重量(kg)	No.1 7,740(自重3,740+模擬貨物4,000) No.2 3,740			
材料	鋼(床板のみ木材)			

(2) 実験の概要

2007年5月21日(月)~24日(木)に,清水港内の波及び 流れがほとんどない静穏な泊地(折戸地区波除堤湾口側 水域)で実施した.コンテナの扉を通常の方法で閉じ, クレーンでコンテナを吊り上げ,海面上に水平に静かに 浮遊させ,5~10分間隔で沈没深さを測定した.ただし, 第一回実験は夜間に及んだため,途中が一部欠測してい る.**表**-2に,実験ケースを示す.

表-2 実験ケース

	使用コンテナ	浮遊開始~
第一回	No.1	完全に沈没させる
第二回	No.2	約2時間浮遊させたのち引き揚げ

(3) コンテナの沈没挙動と浮遊限界時間

コンテナは浮遊させると,急激に沈没することなく, コンテナ内部への浸水により水中部分の体積が増加した. 浸水は浮遊開始直後から生じ,扉部のみから生じた.

第一回実験では、浮遊開始直後は水平に浮遊し(写真-2)、次第に長軸回りに回転する(写真-3).最大回転角度 は3時間50分後の約25.6度である(図-1).約5時間後から 水平に戻る傾向が顕著となり、6時間後にはほぼ水平と なり(写真-4)、そのまま水中部分が増加する(写真-5). 22時間7分後に扉部付近に空気が集まる方向の回転が生 じ、扉部上部だけが気中に露出した。そのまま水中部分



写真-1 コンテナNo.1の内部 写真-2 浮遊開始直後



写真-3 2時間35分後

写真-4 6時間後



写真-5 21時間45分後

写真-6 完全に沈没する直前 (24時間9分後に沈没)



図-1 長軸回りの回転角度(第一回実験, 6.5時間まで示す)



(a) 天井が気中に出た状態



図-2 コンテナの浮遊状態

が増加する(写真-6). 浮遊限界時間は, 24時間9分 (24.15時間)であった. コンテナ内部に残る空気を扉部 から短時間に激しく吹き出しながら, 完全に沈没した. 第二回実験は,約2時間浮遊させ沈没前に引き揚げた.

(4) 「平均沈没深さ」について



図-3 実験によるコンテナの平均沈没深さの時間変化

コンテナの浮遊状態は、図-2に示す二種類があった. そこで、コンテナ内部の海水量は変えずに、完全に水平 な状態での浮遊を仮定したときの沈没深さである「平均 沈没深さ」を測定結果より算定した.なお実験では駆体 に若干のねじれが生じたが、完全な直方体型とみなした.

(4) 平均沈没深さの時間変化

図-3に,第一回実験の平均沈没深さの時間変化を示す. コンテナ高さは2.59 mなので,完全に沈没するときの平 均沈没深さは2.59 mとなる.浮遊開始直後と完全に沈没 する直前は比較的勾配が大きく,また,(2)で述べたと おり途中に欠測部分があるものの,コンテナの平均沈没 速度は概ね一定と考えてよいことが分かった.xを浮遊 開始からの時間(時間),yを平均沈没深さ(m)とし,線型 近似により以下の関係を得た:

$$y = 0.0806x + 0.59 \tag{1}$$

図-4に,第一回実験(浮遊開始から2時間まで)と,第 二回実験(2時間後に引き揚げ)とを比較する.第一回実 験と第二回実験とは,浮遊開始2時間までは概ね近い勾 配となった.これは,事例数は少ないが,今回の実験結 果をこのタイプのコンテナの特性として一般的に適用で きる可能性があることを示唆する.ただし,コンテナ劣 化度,波,流れ等の影響は,更に知見が必要である.



図-4 第二回実験と第三実験の比較

また、同経過時間の平均沈没深さは、第二回実験に比

ベ第一回実験が約0.19~0.26 mの範囲で大きい.第一回 実験のコンテナは模擬貨物4,000 kgを積載している.模 擬貨物重さを底面積と海水密度で割り,沈没深さ増加分 を算出すると約0.13 mとなった.実験で測定された差は, これよりもやや大きくなっている.この原因は,使用コ ンテナの床板の材質が完全に同一でないことから生じる 影響等が考えられるが,詳細は不明である.

3. 港湾における漂流・衝突数値シミュレーション

現地実験結果をふまえ,清水港を対象に沈没を考慮し たコンテナの漂流・衝突数値シミュレーションを行った.

(1) シミュレーションモデルの概要

著者ら (2007) は、シミュレーションモデルについて 既に報告しており、ここでは概要を述べる.まず、対象 領域の津波数値計算を行う.つぎに、コンテナを伯野 (1997)の拡張個別要素法で表現する.コンテナは形状、 重量または初期蔵置位置を変化させる.コンテナに、水 平方向は底面摩擦力、隣接要素からの反力及びモリソン 式(式(2))により算定される流れによる作用力Fを作用さ せる.

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho A u |u| + C_M \rho V \frac{du}{dt}$$
(2)

ここで、 ρ は密度、uは球形要素中心位置の流速、 C_b は抗力係数、 C_u は慣性力係数、A、Vはそれぞれ水中で 占める投影面積及び体積である。鉛直方向は浮力、重力、 隣接要素からの反力を作用させ、各球形要素の運動方程 式を解き Δt 秒後の位置・移動速度を算定する。構造物 と接触すると、接触した球形要素に働く力を衝突力とし て求めた。



図-5 最大遡上域及び最大流速の分布

今回の検討で新たに,沈没を考慮した漂流計算のため のモデル改良を行った((4)節参照).

(2) 津波数値計算

清水港を対象として,非線型長波方程式により沖側か ら遡上域まで計算を行った.外側領域から港湾領域に向 かうにつれて計算格子間隔を小さくし,最小計算格子間 隔は12.5 mである.時間ステップは0.10 s で地震発生か ら6時間後まで行った.計算時間中の潮位は一定である. 1 s ごとの水位・流速を出力し漂流・衝突計算に用いた. 図-5に,最大遡上域及び最大流速の分布,主なコンテナ 取扱いふ頭を示す.これより,新興津ふ頭全域と,興津 第二ふ頭及び袖師第一ふ頭の間の領域のうち北側部分と がコンテナ流出の危険性が高いことが推察された.

(3) コンテナのモデル化

コンテナの漂流挙動及び衝突時の衝撃力をシミュレー ションするため、コンテナを球形要素及びそれらを接続 する要素(ばね、ダッシュポッド等)でモデル化した.球 形要素の初期密度は、貨物の空載、半載にあわせ与える (図-6).接続する要素のばね定数及び減衰定数は、筆者 ら(2007)で用いたものと同様とした(表-3).



表−3 ばね定数及び減衰	モ定数	
--------------	------------	--

		設定1	設定2	設定3	設定 4	設定 5
ばね定数	法線方向	1.0×10^{3}	1.0×10^{4}	1.0×10 ⁵	1.0×10^{6}	1.0×10^{7}
(N/m)	接線方向	2.5×10^{2}	2.5×10^{3}	2.5×10^{4}	2.5 × 10 ⁵	2.5×10 ⁶
减衰定数	法線方向	3.58×10	1.13×10^{2}	3.58 × 10 ²	1.13 × 10 ³	3.58×10 ³
$(N \cdot s/m)$	接線方向	1.79×10	5.66 × 10	1.79×10^{2}	5.66×10^{2}	1.79×10 ³

(4) 沈没のモデル化

沈没は、コンテナ重量を時間的に増加させ水中部分の 増加が抗力、慣性力及び浮力に影響することで表現した. 鉛直方向の各球形要素の釣り合いは、浮力、隣接要素ま たは境界からの反力及び重力により成り立っている.今 回、「浮遊している場合はコンテナ重量が一定速度で増加 する」こととしたので、重力が浮力その他の上向きの合 力よりも大きくなる場合がある.その場合は、海面下に 完全に沈没し比較的短時間で着底する.単位時間あたり のコンテナ全体重量の増加 w_t は,以下の式で算定した:

$$w_t = \{V_0 \cdot \rho_w - (W_0 + W_c)\}/t_s$$
(3)

ここで、 V_0 :コンテナ体積, ρ_w :海水密度(1,030 kg/ m³)、 W_0 :コンテナ自重、 W_c :積載貨物重量、 t_s :コ ンテナの浮遊限界時間である. 2. (1)節のコンテナ諸元 及び2. (3)節の浮遊限界時間($t_s = 24.15$ h)より、 $w_t =$ 2,964 kg/hと算定した. さらに、参考ケースとして $t_s =$ 0.33, 1, 2, 4, 8, 16 h の各ケースについても w_t を算 定し(そのとき $W_0 = 3,740$ kg, $W_c = 0$)、比較のための 試算に用いた.なお、 $t_s = 0.33$ hはCEDRE(2001)に記載 の浮遊限界時間より定めた値である.また、 $w_t = 0$ とす れば沈没を考慮しない条件である.

実験から得られた知見により,浸水は扉のゴムパッキ ング部分のみより生じることから扉部形状が同じであれ ばコンテナ長さは海水侵入速度に影響しない,また,沈 没深さの増加速度が概ね一定であることからコンテナ重 量は海水侵入速度に影響しないと考えられる.そこで, コンテナ長さ及び初期重量によらず同じ w,を用いた.

(5) 漂流・衝突数値シミュレーション

新興津ふ頭南側及び袖師第一ふ頭北側に蔵置したコン テナの漂流・衝突数値シミュレーションを行った. 図-7 及び図-8に,漂流軌跡を示す.設定した条件ではそれぞ れふ頭の南側~東側の海面及び北側の海面を漂流するこ とが分かった.このように,ふ頭に蔵置したコンテナが 津波で海面に落下し港湾内を漂流する挙動を表現できた.







図-8 袖師第一ふ頭北側に蔵置したコンテナ

図-9に、コンテナ重量または慣性力係数を変化させた 場合の漂流軌跡の例を示す.コンテナ重量が変化すると、 漂流軌跡及び到達位置が大きく変化する.今回用いた程 度の慣性力係数の変化では、それに比べると影響が小さ かった.今後、慣性力係数を変化させた場合の影響につ いて詳細に検討する必要がある.

なお,図示していないケースも含め,今回実施した条件では,海面に落下したコンテナが再び陸域にあがる現 象は観察されなかった.



図-9 新興津ふ頭南側に蔵置したコンテナ

構造物にコンテナが衝突する場合の衝突力についても 本モデルで試算した.衝突力は、コンテナまたは被衝突 物の剛性により変化する.コンテナが陸域を漂流し上屋 に衝突する場合について、コンテナのばね値を変化させ た計算を行った.図-10にコンテナと上屋の平面位置関 係を示す.表-4に衝突力ピーク値、衝突継続時間(衝突 開始から衝突力ピークになるまでの時間)及び力積(衝突 力ピーク値と衝突継続時間の積)を示す.剛性(ばね定数 の代表値)が大きいと衝突力ピーク値は大きく,継続時 間は小さくなった.力積はばらつきが大きかった.

$\stackrel{N}{\downarrow}$ 84.2 m	表-4 衝突計算の結果				
初期蔵置位置↓○・↓上屋	ばね定 数の代 表値	衝突力 ピーク値 Fmax (N)	衝突継 続時間 dt(s)	Fmax×dt (N•s)	
海城 \ し	1.0×10^{3}	1,051	3.6000	3,784.6	
「「「「」」 「「」」 「「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」 「」	1.0×10 ⁶	11,975	0.0375	449.1	
^{か現} 図-10 亚面位置関係	$1.0 imes 10^{7}$	42,050	0.0150	630.8	

コンテナ同士が衝突する現象等の漂流物同士の相互作 用は、コンテナ挙動を複雑に変化させる要因のひとつで ある.今後,詳細な検討が必要である.また,波浪,風 等の影響についても詳細な検討が必要である.

5. 結 論

港湾における津波漂流物の漂流・衝突挙動を適切に予 測する手法の検討を目的として、コンテナを海上に浮遊 させ沈没挙動を測定する現地実験を行った.また、実験 結果をふまえ、沈没を考慮した、コンテナの津波漂流・ 衝突数値シミュレーションを行った.以下の知見を得た:

- 海上浮遊実験では、重量7,740 kgの40フィート国際海上コンテナは急激に沈没することなく浮遊し、沈没深さは概ね一定に増加し、浮遊開始から24.15 時間で海面下に完全に沈没した.この結果はこのタイプのコンテナの特性として一般的に適用できる可能性がある.
- ・海上浮遊コンテナが沈没する現象を漂流・衝突数値シ
 ミュレーションモデル上で表現した.またそれに必要
 な単位時間あたりコンテナ重量増加を表す式を示した.
- ・数値シミュレーションにより、設定した条件の場合の コンテナが漂流する範囲が概ね把握でき、ふ頭に蔵置 したコンテナが海面に落下し港湾内を漂流する挙動を 表現できた.また、コンテナ重量が変化すると漂流軌 跡及び沈没地点が大きく変化することが分かった.
- ・今後, 漂流物同士の相互作用, 波浪, 風等がコンテナ 挙動に及ぼす影響について詳細な検討が必要である.

謝辞: コンテナ沈没挙動測定の現地実験は、国土交通 省中部地方整備局港湾空港部港湾空港防災・危機管理課 の実験に中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 とともに参画した.清水湾のコンテナ漂流数値シミュレー ションは、中部地方整備局清水港湾事務所にご協力を頂 いた.水島港のコンテナ漂流事例は、中国地方整備局宇 野港湾事務所にご協力を頂いた.各位に謝意を表す.

参考文献

- 川崎浩司・袴田充哉(2007):3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3Dの開発と波作用下での漂流物の動的解析,海 岸工学論文集,第54巻, pp.31-35.
- 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹(2006):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,海岸工学論 文集,第53巻, pp.241-245.
- 熊谷兼太郎・小田勝也・藤井直樹(2007):津波によるコンテナ の漂流・衝突シミュレーションと衝突力の評価,海岸工学 論文集,第54巻, pp.236-240.
- 田辺海上保安部(2006):コンテナ流出情報(2006年4月13日), 第五管区海上保安本部, 1p.
- 日本工業規格(1994):国際一般貨物コンテナ, JIS Z 1618,日 本規格協会, p.7.
- 伯野元彦(1997):破壊のシミュレーション-拡張個別要素法で 破壊を追う-,森北出版株式会社, p.50.
- 東野洋司・冨田孝史・有川太郎・本多和彦(2007):漂流物解析 のための移動境界を用いた流体と剛体の連成計算手法,第 62回年次学術講演会講演概要集,土木学会, No.2-290.
- 廉慶善・水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史 (2007):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.
- 山口一(2001):海氷変動の数値予測, ながれ, No.20, pp.295-303.
- CEDRE (Centre of Documentation, Research and Experimentation on Accidental Water Pollutions) (2001): Containers and packages lost at sea: OPERATIONAL GUIDE, 82p.
- Daniel P., J. Gwenaele, C. Fanch, Y. Landau and E. Loiseau (2002): Drift Modeling of Cargo Containers, Spill Science & Technology Bulletin, Vol.7, No.5-6, pp.279-288.