

構造物前面における津波漂流コンテナの挙動と その衝突力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF DRIFTED CONTAINER IN FRONT
OF STRUCTURE DUE TO RUN UP TSUNAMI AND ITS COLLISION FORCES

廉慶善¹・宇佐美敦浩²・水谷法美³

Gyeong-Seon YEOM, Atsuhiko USAMI and Norimi MIZUTANI

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(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) ジェイアール東海コンサルタンツ(〒450-0002 名古屋市中村区名駅5-33-10)

³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(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

It is concerned that indirect damages due to tsunami like collisions of drifted objects such as boats, automobiles, containers, etc. are severe as well as direct damages. To predict and reduce these kinds of damages, the characteristics of drifted container are experimentally investigated with installing different types of structures on the apron. As a result, it is found that in case a sea wall is installed, drifted container has less possibility to collide sea wall because water between the container and sea wall is working as a buffer. On the other hand, there is good possibility for the container to be drifted to offshore and fall down. The wave force acting on the fixed container can explain well the mechanism of this phenomenon. Moreover, it is found that in case rectangular finite structure is installed, drifted container would flow away beyond the structure due to long period wave.

Key Words : *Tsunami, drifted container, sea wall, pier, collision fore, wave force*

1. 緒言

津波被害として、陸上遡上津波によって漂流した物体が他の構造物などに衝突し、被害を拡大させるといった二次被害が挙げられる。

2004年にスマトラ島沖で発生した巨大地震では周辺諸国に大規模な津波が来襲し、海岸線近くに貯蔵されていた数多くの原木が陸上を遡上した津波により50~60mも漂流した事例や、小型船舶が漂流し、背後に存在した家屋などに衝突したという事例が報告されている¹⁾。また、この他にも、大型の浚渫船が栈橋上に打ち上がったという事例も報告されており²⁾、津波来襲時にはこのような漂流被害の発生が多いこと、さらに、津波による波力は非常に大きく、ひとたび発生すればその被害は甚大化することが明らかとなっている。したがって、このような現象のメカニズムを解明し、被害軽減に有効な対策を検討することが求められている。

現在、日本では東海地震などの海溝型の地震の発生が危惧され、それに伴い巨大な津波が来襲すると予想されている。そして、港湾などが津波被害に遭った場合、コンテナや木材、船舶、自動車などが漂流物になると指摘されており、これらが陸域を漂

流し衝突する以外にも、航路や停泊地に転落・沈没し、震災後の復興を阻害することが考えられ、したがって津波による漂流物の対策は急務である。

津波による漂流物の挙動や衝突力に関する研究として、池野ら³⁾や池野・田中⁴⁾の研究、漂流物として船舶を用いた藤井ら⁵⁾、池谷ら⁶⁾の研究があるが、陸上に構造物などが存在する場合の漂流挙動についてはあまり検討されていない。また、コンテナを対象とした著者らの研究^{7),8)}では、被衝突物の剛性により衝突作用時間に依存する付加質量が変化するなどといった衝突力のメカニズムなどについて検討されているが、被衝突物として具体的な構造物を取り上げてはならず、被衝突物による衝突現象の差異やそれにとりもなう衝突力の変化については明らかになっていない。

本研究では、陸域にいくつかの種類の構造物が存在した場合に、遡上津波によるコンテナの漂流挙動に及ぼす構造物の影響について水理模型実験を行って検討する。また、構造物に作用する遡上波の波力とコンテナの衝突力、さらには蔵置中のコンテナに作用する波力についても計測を行い、衝突形態による衝突力の差や波力から漂流のメカニズムを考究する。

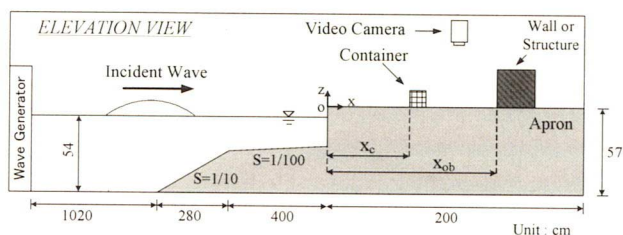


図-1 実験装置の概要

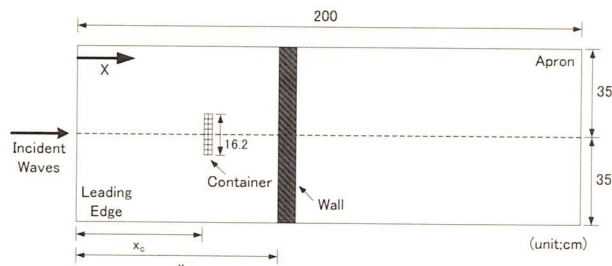


図-2 胸壁の設置位置

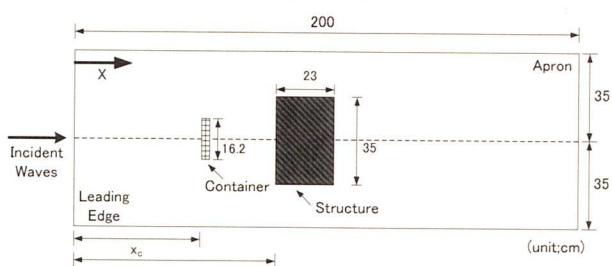


図-3 矩形構造物Aの設置位置

2. 実験の概要

水理模型実験を片面ガラス張り二次元造波水路（幅 70cm）内に海底地形とエプロン模型を設置して行った（図-1 参照）。入射波としては、津波を想定した押波初動の長周期波（11 種類）を採用し、造波水槽の一端にある最大ストローク 1.5m のピストン型造波板により生起させた。造波板の移動時間を周期と定義し、その周期を $t=7.5\sim 15$ (s)、沖波波高を $H=2.1\sim 6.1$ (cm) 変化させた（表-1 参照）。本実験では幾何縮尺を 1/75 としているため、現地換算で波高 1.6~4.6(m)、周期 65~130(s) に相当する。

実験では、エプロン上に半載と満載を想定したコンテナ模型（縮尺 1/75、幅 16.3cm）を護岸から $x_c=30.5, 50.5$ cm (x_c はエプロン先端からコンテナの距離) の位置に、コンテナ長手方向が護岸と平行になるように設置し、また構造物の設置位置 x_{ob} も 2 種類変化させた（図-2, 3, 4 参照）。本実験で使用した構造物の種類、大きさ、設置位置について表-2 に示す。なお、本実験で使用した構造物は十分な高さを有しており、越波は生じていない。

実験では、エプロン上の遡上水位とコンテナの漂流挙動を、それぞれ電気容量式水位計とビデオカメラを使って計測した。また、被衝突物として円柱を用いた場合には 6 分力計を使って遡上波ならびにコ

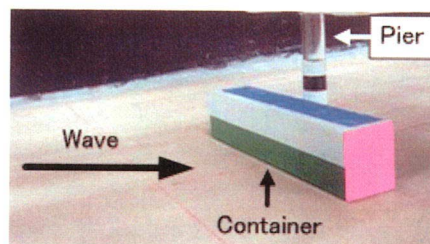


図-4 円柱とコンテナ

表-1 入射波諸元

Case No.	Period T (s)	Height H (cm)
1	7.5	2.31
2	7.5	3.11
3	7.5	3.97
4	7.5	5.20
5	7.5	6.09
6	10.0	2.13
7	10.0	3.16
8	10.0	3.97
9	10.0	4.91
10	15.0	2.81
11	15.0	3.24

表-2 構造物の種類（単位：cm）

		平面寸法	設置位置 (x_{ob})
胸壁		幅 70	80.5, 130.5
矩形構造物	A	幅 35×長さ 23	80.5, 130.5
	B	幅 23×長さ 35	80.5, 130.5
円柱		直径 1.5	80.5

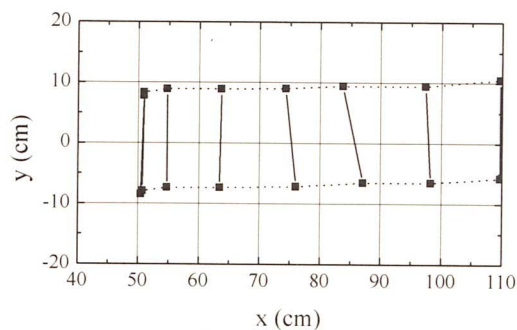


図-5 コンテナの漂流軌跡
(Case5, 満載コンテナ, $x_c=50.5$ cm)

ンテナの衝突によって円柱に作用する力の計測も行った。また、漂流挙動のメカニズムを検討するため、固定状態のコンテナに作用する波力も計測した。

3. 結果と考察

(1) 構造物がない場合のコンテナ漂流挙動

まず、エプロン上に構造物がない場合のコンテナ漂流挙動について述べる。図-5 はコンテナ前面（沖側）の位置を 0.1(s) 毎に表した漂流軌跡の一例である。同図に示すようにコンテナは概ね陸側に直線的に漂流するが、このように直線的に漂流するのは入射波高が比較的大きい場合に多く見られ、入射波高が小さい場合やコンテナ重量が大きい場合で

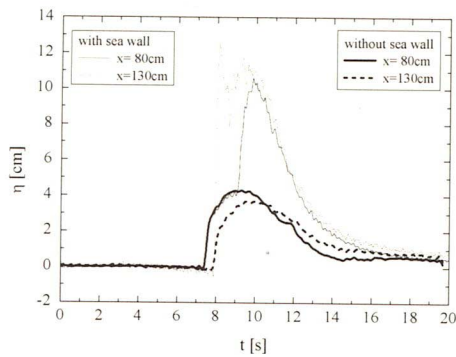


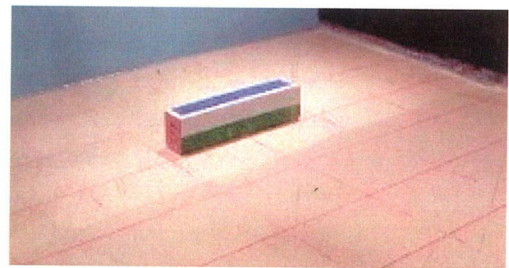
図-6 胸壁設置による遡上水位の変化 (Case5)

は、コンテナが完全に浮上しないため、底面の一部がエプロン上面の接触している場合がある。この場合、左右非対称に摩擦が作用することにより、斜め方向に回転を伴って漂流することが多い。このような現象は左右の非対称性の影響が強く表れた場合であるため、本研究ではこのような場合は、解析対象から外して検討した。

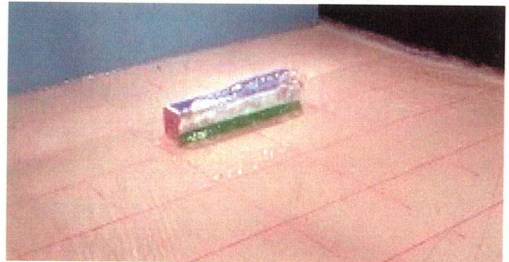
(2) 胸壁設置時のコンテナ漂流挙動

胸壁を設置することによる遡上波の変形について述べる。図-6 は胸壁が設置されていない場合の遡上水位と胸壁を $x_{ob}=130.5(\text{cm})$ に設置した場合の遡上水位の時間変化を例示したものである。同図から明らかなように、胸壁前面では遡上波が胸壁に到達した瞬間 ($t=8.0(\text{s})$) に急激に水位が上昇していることがわかる。そして、胸壁から反射した波はエプロン沖側方向に進行するが、遡上波とぶつかることにより胸壁前方の水位 ($x=80(\text{cm})$) も急激に増加する。同様な傾向は被衝突物として矩形構造物を設置した場合においても確認され、このような複雑に変化する波動場の影響によりコンテナの漂流挙動は構造物を設置していない場合に比べ大きく異なった。

ついで、胸壁前面におけるコンテナ漂流挙動について述べる。コンテナと胸壁の距離が最小で約 $50(\text{cm})$ と設定した本実験では、ほぼ全ての入射波のケースで、コンテナが胸壁に衝突する現象は確認できなかった。この条件での代表的な漂流挙動の様子を写真-1 に例示する。エプロン上を進行した遡上波 (写真-1(a)) がコンテナに衝突し、コンテナは漂流を開始する (写真-1(b))。一方、コンテナ側方を通過した遡上波はコンテナよりも先に胸壁まで到達するとともに、その一部はコンテナの陸側に回り込む (写真-1(c)~(d))。そして、陸側に漂流するコンテナはこの回り込んだ水塊の影響や胸壁からの反射波により減速し (写真-1(f))、胸壁に衝突しない。以上のように、無限幅を有する胸壁を対象とした場合、反射波などがクッションのように衝突を妨げる役割を果たすため、コンテナは胸壁へ衝突しにくいことが明らかとなった。ただし、コンテナ初期設置位置と胸壁の間隔が本実験よりさらに短い場合やコンテナの初期設置方向が護岸に対して直角な場合では、胸壁前面に溜まる水塊は少なくなるこ



(a) 遡上波衝突前 0.1 秒



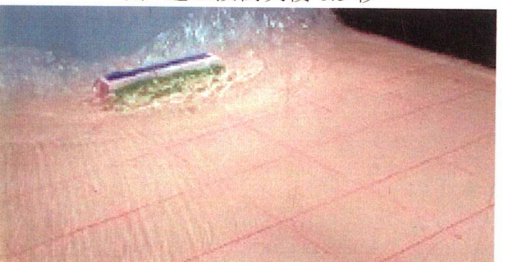
(b) 遡上波衝突後 0.1 秒



(c) 遡上波衝突後 0.3 秒



(d) 遡上波衝突後 0.5 秒



(e) 遡上波衝突後 0.7 秒



(f) 遡上波衝突後 0.9 秒

写真-1 胸壁設置時のコンテナの挙動
(Case4, 満載コンテナ, $x_c=50.5\text{cm}$, $x_{ob}=80.5\text{cm}$)



写真-2 海域へ転落するコンテナ
(Case8, 半載コンテナ, $x_c=50.5\text{cm}$, $x_{ob}=80.5\text{cm}$)

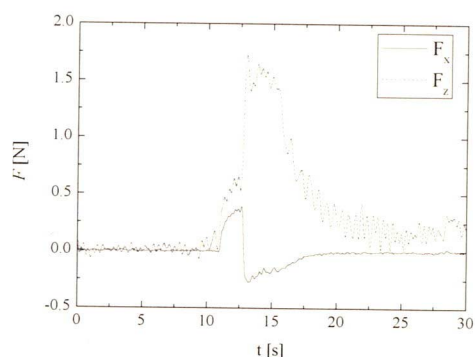


図-7 コンテナに作用する浮力・波力
(Case8, $x_c=50.5\text{cm}$, $x_{ob}=80.5\text{cm}$)

とが予想されるため、衝突する可能性は大きくなると推察される。

ところで、胸壁に衝突しなかったコンテナは、入射波高の大きい場合などに胸壁からの反射波の影響を受け、冲向きに漂流し、海側へ転落する場合が認められた。このような事例は特に半載コンテナにおいて多く確認された(写真-2 参照)。同様な現象は 2003 年に発生した十勝沖地震津波で実際に確認されているが、このような現象は、災害発生時に海上から行う災害復旧作業などの大きな支障となりうると指摘されており、衝突以外にも、転落・沈没被害に対する対策を検討しておく必要があることが指摘できる。

海側への漂流に関しては、以下のような実験結果が得られた。すなわち、胸壁が存在しない場合にはエプロン上の遡上水位が小さく、陸側に漂流しないコンテナでも、胸壁が設置された場合、反射波の影響によりコンテナ設置位置の水位が上昇するため、浮力が増大してコンテナが浮き上がり、漂流し始める。この際、反射の影響が卓越すると海側へ漂流を開始することになる。

そこで、この発生機構を明らかにするため、同条件にて固定されたコンテナに作用する波力の計測を行った。その時間変化の一例を図-7 に示す。なお、同図で F_z は鉛直上向きの浮力を正、 F_x は陸向波力を正としている。同図において、遡上波は $t=11(\text{s})$ 前後でコンテナに衝突し、浮力・波力ともに増加するが、この時点での波力は最大静止摩擦力を下回っ

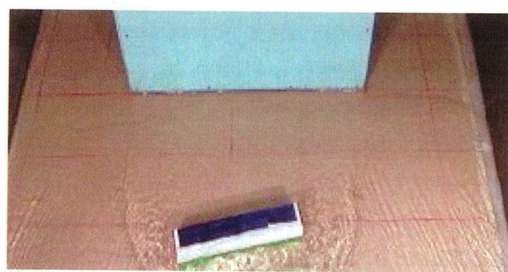
ているためコンテナは動き出さない。しかしその後、 $t=12.5(\text{s})$ あたりで海方向に進行する胸壁からの反射波によりコンテナ周辺の水位が上昇するため、浮力が急激に増加するとともに、水平方向波力が海方向へと向きを変化させコンテナに作用する。これがコンテナを海側へ漂流させる外力となると考えられる。同図の結果は実験の都合上、固定されたコンテナに作用する波力であるが、固定されていない場合、この急激な浮力の増加によってコンテナは浮き、底面に摩擦力が作用しなくなるため、海側へ漂流を開始した。このように胸壁を設置することによって、陸域側への漂流を防止する効果は期待できるが、海側へ漂流物が転落する可能性のあることが明らかとなった。その現象に大きく影響を及ぼす陸上構造物からの反射波については、コンテナの漂流防止の対策を検討するに当たって考慮すべき重要な要因であると言える。

(3) 矩形構造物設置時のコンテナ漂流挙動

二種類の矩形構造物をエプロン上に設置した場合のコンテナの漂流挙動について述べる。なお漂流実験開始前に、構造物前面における水位は反射波の影響により高くなるが、構造物の側方を遡上波が通過するため、胸壁を設置した場合の水位に比べ、低いことを事前に確認した。

この場合のコンテナ漂流挙動としては、写真-3 に示すように、構造物を避けて、構造物の後方まで流されるケースが多く確認された。そこで、ここではこの現象について詳述する。胸壁を設置した場合と同様に、反射波などの影響によりコンテナは構造物に衝突しないが(写真-3(c))、このとき、構造物前面の左右端では構造物の側方を通過する遡上波の影響により圧力が低くなっており、コンテナは横方向に徐々に移動し(写真-3(d))、やがて遡上波にさらわれ後方へ漂流する。このような現象は、コンテナの動き出しが比較的遅い満載コンテナの場合や、コンテナと構造物の距離が長い場合、構造物幅の大きい場合(構造物 A)に多く見られた。これらのことから、構造物前面に溜まる水塊の量が多いほど衝突が起こりにくく、構造物の左右にコンテナが流されやすいと考えられる。このような構造物側方への流れによって漂流すると、漂流被害は海岸線近傍だけでなく、構造物背後の陸地奥まで及ぶ可能性のあることが指摘できる。

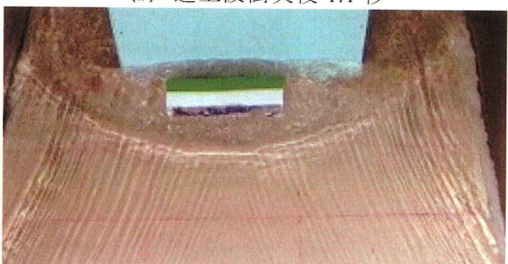
なお、このような有限長の構造物の場合、コンテナが構造物に衝突する場合も確認された。これは入射波高が比較的大きい場合(例えば、Case9 など)に生じ、遡上波の到達後、早い段階でコンテナが動き出したことにより、構造物前面に溜まる水塊が少なかったことが原因であると考えられる。また、構造物に衝突こそしないが、遡上波の通過後に構造物前面にコンテナが留まる場合も見られた。本実験で使用した構造物模型は、前面に間口部を設けていないが、出入口や窓を有する実際の構造物の場合、遡



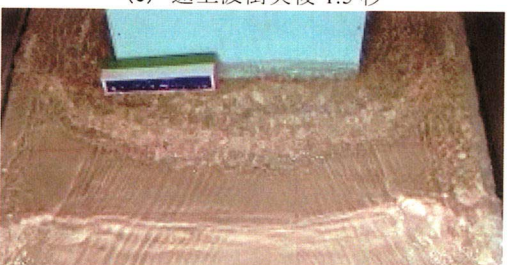
(a) 遡上波衝突後 0.3 秒



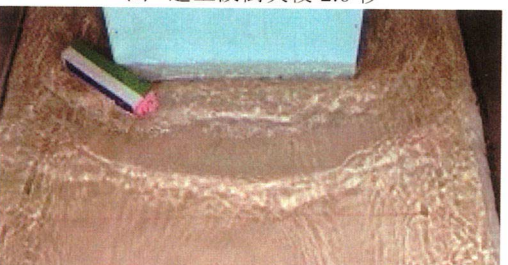
(b) 遡上波衝突後 1.1 秒



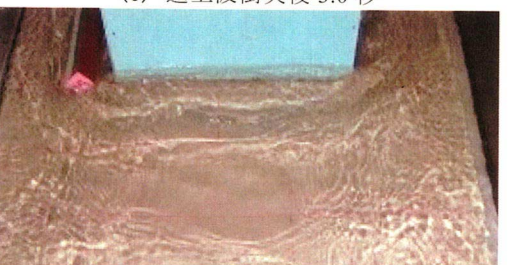
(c) 遡上波衝突後 1.5 秒



(d) 遡上波衝突後 2.6 秒



(e) 遡上波衝突後 3.0 秒



(f) 遡上波衝突後 3.4 秒

写真-3 矩形構造物 A 設置時のコンテナの挙動
(Case4, 満載コンテナ, $x_c=50.5\text{cm}$, $x_{ob}=80.5\text{cm}$)

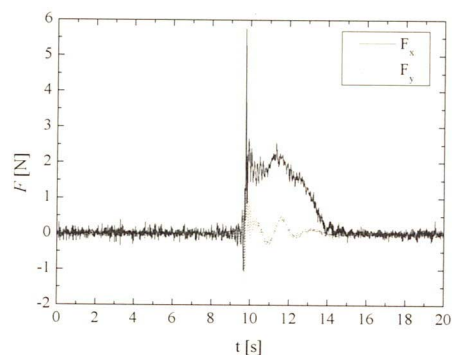


図-8 円柱に作用する波力・衝突力の時系列
(Case5, $x_c=50.5\text{cm}$, $x_{ob}=80.5\text{cm}$, 漂流挙動①)

表-2 円柱に作用する波力・衝突力 (単位: N)

Case No.	コンテナなし(④)	斜めに衝突後, 流される(②)	衝突後, 静止(①)
3	0.1	1.3	2.4
5	0.2	2.4	5.7

上波がそれらを破壊して構造物内へ進入することが考えられるため, 前面に溜まる水塊の量は減少し, 漂流物の衝突が起こりやすくなると推察される。

(4) 円柱設置時に作用する波力・衝突力

被衝突物として円柱を設置した場合のコンテナの漂流挙動としては, 以下の3パターンに大別されることが判明した。すなわち, ①コンテナ中央で円柱に衝突し, 円柱前面に留まる場合, ②斜めに衝突するため, コンテナが後続の遡上波によりすぐに後方へ流される場合, ③円柱が上述の構造物に比べ小さいために, 衝突しない場合である。円柱の設置位置やコンテナ模型種類, 入射波などにより結果は異なるが, 実験結果としては②が最多であった。ただし, ここでは危険側を想定した①の場合について述べる。

図-8 は①の場合の円柱に作用する波力・衝突力の時間変化を示したものである。実験ではコンテナが円柱に衝突後, 遡上波の非対称性などにより, 円柱のまわりを若干回転する現象が確認された。そこで, 同図には波進行方向に作用する波力(F_x)と, それに対して直角方向の力(F_y)を示す。同図から, コンテナの衝突後に短時間であるが, 非常に大きい力が作用していることがわかる。このときの力は円柱前面においてコンテナが留まっている間($t=10\sim 13(\text{s})$)に作用する波力に比べ, この実験では2倍程度大きい。ただし, この値は水谷ら⁷⁾の研究により被衝突物の剛性により変化し, 剛性が小さいほど付加質量の影響が大きくなることが明らかとなっている。

つづいて, 表-2 に示したように, ④漂流物としてコンテナを設置せず, 遡上波のみによる力が作用した場合の力と比較する。Case5 において, コンテナを設置していない場合, 円柱 (直径 $D=1.5(\text{cm})$)

に作用する波力は非常に小さく(0.2(N)),これはコンテナ(幅 $B=16.3(\text{cm})$)が円柱前面に留まっている間($t=10\sim 13(\text{s})$)に受ける波力(約 2.0(N))の1/10 程度となっている。この力の差は波力が作用する面積の差であると考えられるため、もし漂流物の速度が小さい場合や、被衝突物の剛性が大きく付加質量が比較的小さい場合であっても、幅広の漂流物が円柱のような投影面積の小さい構造物に付着すると、その背後の水塊が付加質量となって作用するため、構造物へ作用する波力が漂流物がない場合に比べ大幅に増大することが指摘できる。

また、図-8 で示した①漂流物が円柱に衝突後留まる場合以外に、②斜めに衝突するため、コンテナが衝突後に後方へ流される場合もあるが、この場合においても表-2 に示したように、非常に大きい衝突力(例えば Case5 の場合 2.4(N))が発生することが明らかとなった。このときの力に関しても、円柱に衝突する際の漂流物の角度、すなわち波進行方向のコンテナの投影面積や衝突直前の速度などにより大きく異なるが、上述の実験結果から、柱状構造物が被衝突物の場合、遡上波が漂流物を含むと、漂流物が存在しない場合に比べ、作用外力が増大し、被害が甚大になることが予想される。したがって、漂流物となりうる物体に関しては漂流を防止するための対策を検討し、被害拡大を未然に防ぐ必要があると指摘できる。

4. 結論

本研究では陸上部に胸壁、矩形構造物、円柱を設置し、陸上遡上津波により漂流するコンテナ挙動への影響や衝突現象への影響について水理模型実験を行って検討した。また、円柱を対象として、漂流コンテナの衝突形態の違いによる作用力の差について検討した。以下に主要な結論を示す。

- 1) 胸壁を設置した場合、コンテナより先に胸壁に到達する遡上波やその反射波がクッションの役割を果たすため、衝突が発生しにくい。
- 2) 反射波の影響により、コンテナが海域へ転落する現象を把握するとともに、その際のコンテナに作用する波力・浮力の計測を行い、漂流メカニズムを明らかにした。
- 3) 矩形構造物を配置した場合、衝突する場合もあるが、構造物を避けるようにしてコンテナが構

造物の後方に漂流する現象が確認され、漂流被害が陸地奥まで及ぶことが予想される。

- 4) 被衝突物として円柱を用いた場合の衝突力の大きさは漂流物の衝突の向き、すなわち波進行方向の投影面積により大きく変化する。さらに、漂流物がない場合の遡上波の波力に比べ、漂流物の影響による衝突力は格段に大きくなることが明らかとなった。

最後になるが本研究は科学研究費補助金(基盤研究B 代表者 水谷法美)によって行われたことを付記し、感謝の意を表する。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 武田智吉, 柳沢賢: 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, 2005.
- 6) 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.
- 7) 水谷法美, 白石和睦, 宇佐美敦浩, 宮島正悟, 富田孝史: エブ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研究, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 791-795, 2006.
- 8) 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.