

# 津波によるエプロン上のコンテナの漂流特性とその衝突力に関する研究

水谷法美\*・山口 聡\*\*・宮島正悟\*\*\*・富田孝史\*\*\*\*

エプロン上に打ち上がる波の波形と流速を計測するとともに、その打上波に伴うコンテナの漂流と衝突力の計測を行った。エプロン上の打上波による流速は微小振幅長波の波速よりも大きくなる傾向がある。また、コンテナの漂流速度は打上波の水位の増加とともに増加するが、ある水位を超えるとその増加の割合は小さくなる。コンテナの衝突力は、打上波の水位が大きくなるほど大きくなる。また、コンテナの長さが長い方が衝突力は大きくなるが、質量の変化は衝突力に大きく影響を及ぼさない。これは、コンテナの質量よりも背後の水の付加質量が衝突力により大きく影響を及ぼしているためであると考えられる。

## 1. はじめに

近年、東海地震や南海・東南海地震に対する対策が国や自治体で本格的に検討され初めてきた。その中で、海運に占める割合が現在でも伸びつつあるコンテナの津波来襲時の挙動が問題視されている。すなわち、津波によってコンテナが漂流し、家屋や構造物に衝突すると、その破壊力は海水に比べて格段に大きく、津波被害を増大させることが予想される。これまで、津波による漂流物の衝突力は木材を対象に検討されてきているが、コンテナ化の著しい現在では、コンテナの津波来襲時の挙動とその衝突力を検討しておくことが、港湾における防災対策や計画を考える上で重要である。

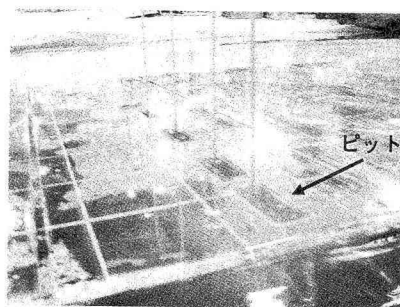
津波波力の研究として、松富 (1991) は水路実験により津波による砕波段波の鉛直壁に作用する波圧分布を詳細に測定し、その波圧特性について検討を加え、これまでに使われてきた砕波後の波のものよりもはるかに大きいことを確認している。また、朝倉ら (2000) は津波の浅水変形を考慮した水理実験で、直立護岸背後の陸上構造物に作用する津波波力の評価方法を提案した。

漂流物の衝突力については、流木の衝突力の評価が松富 (1990) によって行われている。また、池野ら (2001, 2003) は砕波段波の波力と直立護岸前面に配置された木材を漂流物としたときの挙動とそれによる衝突力を測定し、漂流物の形状によらず、衝突直前の漂流物の運動量が同じならば同じ衝突力を示すという結果を得ている。また、陸上を遡上していく津波により漂流した木材の衝突力も検討しており、陸上を遡上する津波の波力が、陸上を遡上しない津波の波力を上回ることがあるという結果を示した。また、水谷・今村 (2000) は傾斜角度を考慮した段波波圧の算定式を提案している。

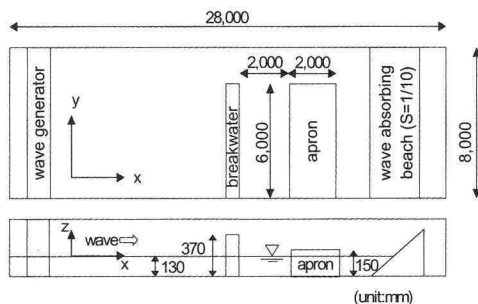
しかし、近年では、木材よりもコンテナが港湾では増加しており、津波による新たな漂流可能物としてコンテナの存在が挙げられるようになってきている。しかしながらコンテナの津波による挙動とコンテナが構造物に衝突したときの衝撃力についてはこれまで議論されておらず、今後の港湾計画を考える上で極めて重要な課題である。本研究では、まず、単純化した港湾モデルを使った水理模型実験を実施し、津波のような長波性の波が港湾に入射したときの、エプロン上への打上げの特性とそれによるコンテナ模型の漂流特性について検討し、漂流したコンテナの衝突力について考究する。

## 2. 水理実験

水理模型実験を平面波浪水槽(幅 8 m, 高さ 0.9 m, 長



(a) エプロン上の水位計測



(b) エプロンと防波堤の概要 (Type-B)

図-1 実験装置の概要

\* 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

\*\* 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

\*\*\* 正 会 員 工修 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

\*\*\*\* 正 会 員 (独) 港湾空港技術研究所高潮津波研究室長

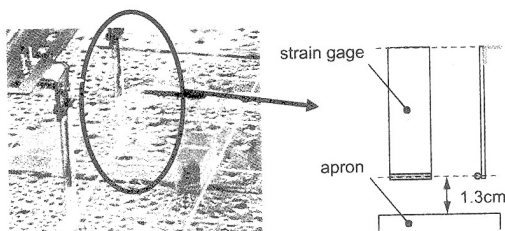
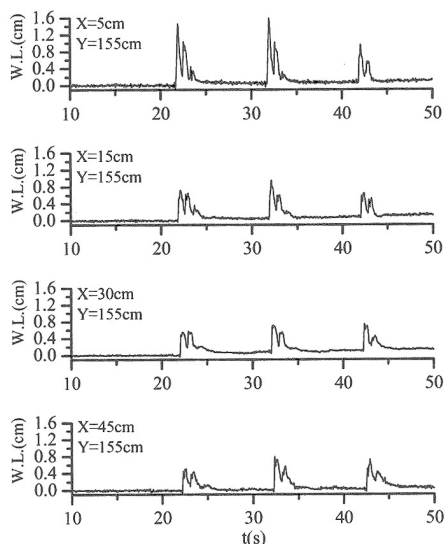


図-2 受圧板の概要

さ 30 m) にエプロンと防波堤からなる港湾模型を設置して実施した。底面は水平床とし、静水深を  $h=13$  cm で一定とした。本研究では、極力単純化した現象を取り扱うこととし、エプロン形状を長方形(幅 6 m, 長さ 2 m, 高さ 0.15 m)とし、防波堤もエプロンに並行な直線形状のものを設置した(図-1 参照)。この際、長さはエプロンと同じ 6 m とし、その高さは越波が生じないよう十分高くした。また、防波堤の影響を考慮するため、その設置位置をエプロン手前 2 m に設置した場合 (Type-B) と 4 m に設置した場合 (Type-C) の 2 種類変化させるとともに、防波堤の無い場合 (Type-A) も対象とした。

入射波は、実験装置の制約上、規則波とし、その周期  $T$  を 10.0, 5.9, 4.4 s の 3 種類、波高をそれぞれの周期で 2 種類変化させた。なお、いずれも極浅海波(長波)の範囲である。

実験では、エプロン回りの水位変動と流速、エプロン上への打上げ波の水位変動と流速、およびエプロン上に設置されたコンテナ模型の漂流特性と衝突力を計測し

図-3 エプロン上への打上波の水位変動 ( $T=10.0$  s,  $H_I=2.8$  cm)

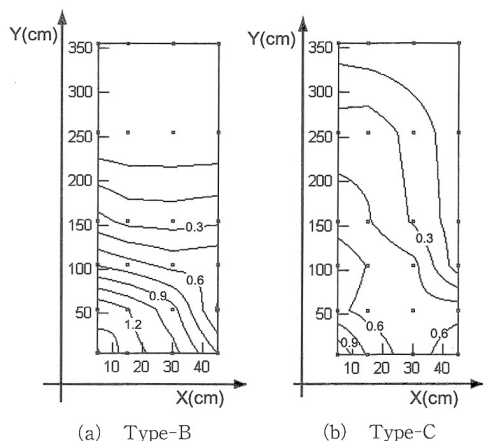
た。エプロンへの打上げ波は、エプロンにピットを 24 箇所設置し、エプロン天端まで水を満たし、そこに水位計を設置して計測した。また、エプロン上にフロートを配置し、打上げ波による流動特性をビデオ撮影し、その画像から流速を求めた。コンテナ模型を、縮尺 1/100 で作製し、エプロン上で場所を変えて設置して波を入射させ、その移動状況をビデオ撮影した。コンテナ模型は長さを 2 種類 (40 ft と 20 ft に対応)、質量をそれぞれ 2 種類 (満載と半載に対応) 変化させた。さらにアクリル板を使った片持梁式の受圧板を作製し、コンテナ衝突時の衝突力も計測した。なお、受圧板は、その先端部に突起を付けることでコンテナが衝突する位置が固定されるようにした(図-2 参照)。さらに受圧板下部にクリアランスを設け、打上波は通過するようにした。この受圧板をコンテナ初期設置位置の後方 5 cm に設置し、衝突力の入射波方向の成分を計測した。

計測した水位変動、衝突力などの時間変化を時間間隔 0.01 秒で AD 変換し、パソコンに保存して解析に使用した。フロートやコンテナの挙動はビデオ画像から求めた。

### 3. 実験結果と考察

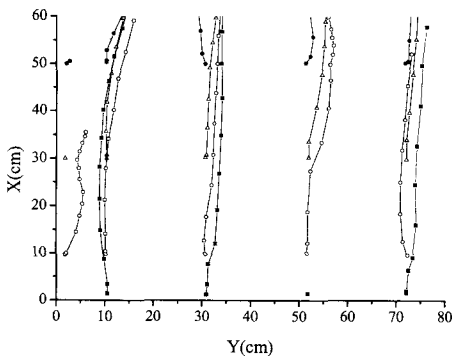
#### (1) エプロン上への打上波

エプロン上に打ち上がった波は、伝播とともにエプロン上で分裂し、峰が 2 つに分かれる現象が生じる。図-3 は防波堤を設置しない Type-A の場合の打上波の時間変化を例示したもので、その様子がよく現れている。これは潜堤上を通過する波のように、水深が急に浅くなった場合に生じる現象とよく似た現象と考えられ、急激な水深の変化にともなう非線形変形によりこのような分裂が生じたと考えられる。防波堤があると、後述するように打上波は放射状に伝播するため、峰高は伝播とともに

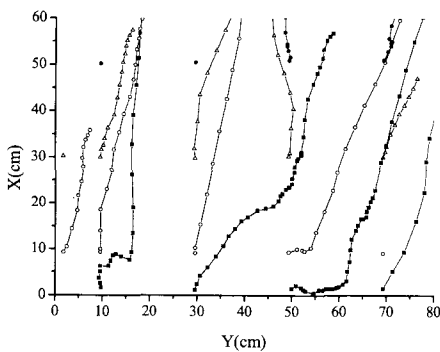
図-4 打上波の最高水位の空間分布 ( $T=10.0$  s,  $H_I=2.8$  cm)

急速に減少するが、防波堤のない場合はエプロン上でも入射波の波進行に伝播する傾向が強く、峰高の減少は防波堤のある場合に比べて小さい。しかし、図-3に示すように伝播とともに峰高は減少する。岩田ら(1997)によると、潜堤上を非碎波の状態で通過した波は高次の成分波にエネルギーが移行することを示しているが、エプロン上でも高次成分にエネルギーが移行し、最初のピークが伝播とともに低下すると考えられる。高次の波は伝播速度が遅くなるため、二つの波峰は徐々に離れるが、それぞれに対して同様の現象が連続して生じると波峰は低くそして広がっていき、徐々に峰高が減少すると考えられる。

エプロン上の遡上波の最高水位の空間分布を図-4に例示する。なお、描画の都合上、防波堤開口部が下側になっている(図-1と上下逆)。図示していないが、防波堤を設置した場合のエプロン周辺の波高分布より、エプロン角部付近で波高が最大となることが確認されている。そして、そこから波が打ち上がり、放射状に進行していく。そのため、最高水位も放射状に低減していくことが確認される。防波堤が無い場合は $y$ 方向の最高水位



(a) Type-A



(b) Type-C

図-5 エプロン上のフロートの軌跡の例

の変化は小さい。

図-5にエプロン上に配置したフロートの1/10秒ごとの軌跡を示す。防波堤のない場合のType-Aではフロートは入射波の進行方向である $x$ 方向に卓越した動きをしているが、防波堤がある場合は打上波がエプロン角部から放射状に広がるため、 $y$ が大きくなるほど、すなわち、開口部から奥に向かって $y$ 方向の運動成分が大きくなる。

## (2) 波の遡上波速とコンテナの移動速度

図-6に無次元遡上水位と遡上波速の関係を示す。なお、ここでは、波速をフロートの移動速度により与えることとした。図では横軸に無次元遡上水位、縦軸に遡上速度をとり、微小振幅波理論による長波の波速( $\sqrt{gh}$ ,  $h$ は水深)を点線で示した。打上波の先端では水深に比べ

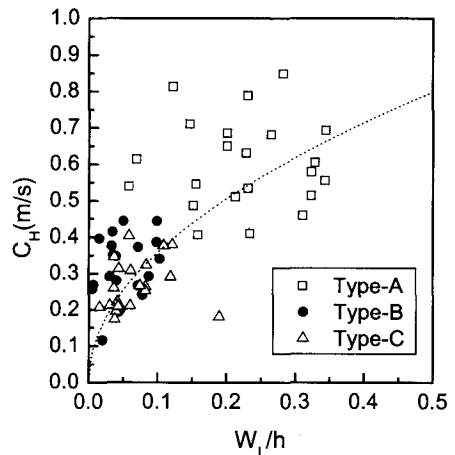


図-6 打上波の速度と水位の関係

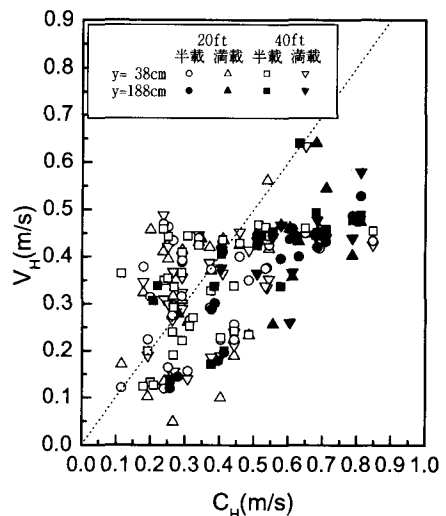


図-7 打上波の伝播速度とコンテナの漂流速度

水位が高く不安定な波で、打上がった直後に碎波し、波峰付近の水粒子が前方に飛び出すため、フロートの移動速度が速くなり、これから読みとった伝播速度は長波近似の波速よりも大きくなる傾向がある。

図-7 にエプロン上を遡上する波の波速  $C_H$  とコンテナの移動速度  $V_H$  の関係を示す。横軸に打上波の波速  $C_H$  (m/s)、縦軸にコンテナ移動速度  $V_H$  (m/s) をとり、図中には比較のため、傾き 1 の直線も示してある。遡上波の波速が 0.4 m/s 以下では、ばらつきはあるものの傾き 1 の直線に近く、したがって、コンテナは波峰の移動速度でほぼ流されることが指摘できる。これは、遡上波の波形は記述したように前面部が急峻であり、切り立った遡上波の前面がコンテナを押すことによりコンテナが流されるためであると考えられる。しかし、0.4 m/s 以上になると、波速が増大してもコンテナの移動速度は 0.4~0.5 m/s の間で大きく変化せず、波速の増加にともなわずかに増加する傾向を示す。

図-8 は無次元遡上水位とコンテナの移動速度の関係を示したものである。水位が上昇するとコンテナの移動速度は増加する傾向があるが、無次元水深が 0.2 を超えると移動速度の水位にともなう増加は急激に鈍る。これは図-7 で波速が 0.4 m/s になる水位にほぼ一致する(図-6 参照)。コンテナが波と衝突する際の様子を実験中の目視、およびビデオ解析により観察したところ、打ち上げが大きくなると波がコンテナに衝突するときにコンテナが傾き、回転する 3 次元的な挙動を示すことが確認された。このうち、コンテナの長軸周りの回転は、コ

ンテナが後傾する向きに生じる(波のあたる面をコンテナの後面とする)ことが判明した。すなわち、コンテナの移動時には移動方向側の底部が持ち上がり、傾いたコンテナの下に水が入り込んだ状態で並進移動するため、流体抵抗が大きくなってコンテナの移動速度の増加が鈍化すると考えられる。この波の衝突時のコンテナの傾きはコンテナの質量に依存することが予想される。図-7 と図-8 にはコンテナの質量とコンテナの長さもパラメーターにプロットしてあるが、質量が軽く、流体力の影響を受けやすいコンテナの方が移動速度の増加に対する移動速度の増加が鈍化する傾向が若干早く現れていることが確認できる。なお、これらの移動速度は、背後の流体抵抗と前面からの流体力のバランスに依存するため、コンテナの前面と背後の水位差に支配されると考えられるが、今回の実験ではそれらのデータを得ることができなかったため、これについては今後の課題である。

### (3) コンテナの衝突力

無次元遡上水位とコンテナの衝突力の関係を図-9 に示す。なお、受圧板位置での水位の計測は実験装置の制約上行うことができなかったため、 $x=2.2$  cm に対しては  $y=55$  cm と 155 cm の位置でのエプロン前面  $x=-10$  cm の最大水位からエプロンの天端高を引いた値を使用し、 $x=6.2$  cm では同じ  $y$  座標における  $x=5$  cm の水位計のデータを使用した。

一般的には、打上波の水位が高くなるほど衝突力も大きくなっていることがわかる。水位が高くなると波圧も大きくなることから、コンテナに加わる流体力も大きく、衝突力が大きくなると推察される。しかし、先述したようにコンテナの移動速度は無次元遡上水位が一定の値を

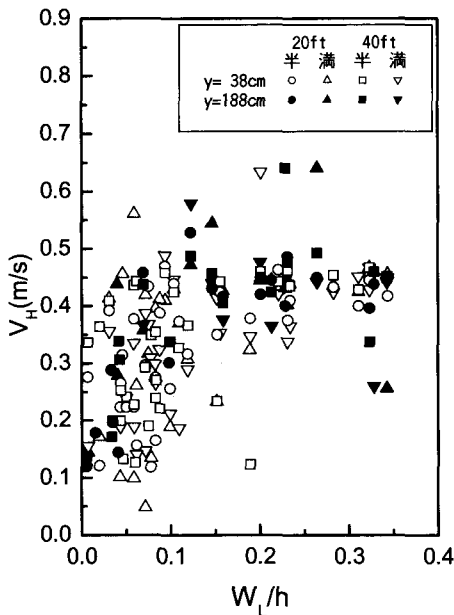


図-8 打上波の水位とコンテナの漂流速度

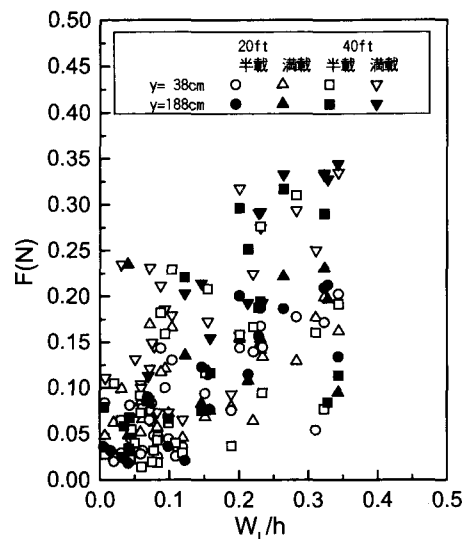


図-9 コンテナの衝突力と水位の関係

超えるとx座標が同じであればほとんど変わらなくなるが、質量が2倍違うコンテナでも衝突力がほとんど同じ値であることが示される。また、長いコンテナがより大きい衝突力を生じていることから、コンテナが波により漂流すると、その衝突力はコンテナの質量よりも長さに依存するところが大きいことが確認される。すなわち、コンテナの長さが大きい方が、その前面に堰き止める水量が多くなる(池野ら, 2003)とともに、波はコンテナの横から逃げにくくなるためコンテナ前面の水位は高くなる。このため、付加質量が大きくなってコンテナ長の影響が明瞭に現れると考えられる。コンテナの質量が大きく影響しないのは、コンテナの質量が背後水による付加質量に比べて非常に小さいためであると考えられる。さらに、コンテナと水塊が一体となって衝突しているためと考えられる。なお、40 ftの長いコンテナであっても、波向きに対して斜めに傾いて移動する場合の衝突力はそれほど小さくなく、20 ftの短いコンテナと同程度の衝突力しか生じていない。

#### 4. 結 論

本研究では、単純化した港湾モデルを用いて、エプロン上に設置したコンテナ模型に津波が入射したときの漂流特性と、それによる衝突力の特性を明らかにすることを目的とし、水理模型実験を行って検討を加えた。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 防波堤がない場合、エプロン上に打ち上がった波は、急激な水深の変化に伴い波峰が2つに分裂する現象が確認された。分裂の現象は防波堤のない場合でより顕著に認められた。
- 2) 打上った波は段波状に砕波しながらエプロン上を進行する。そして、フロートの追跡により求められる流速は微小振幅波理論に基づく長波の波速より大きな値になる。

- 3) コンテナの移動速度は水位の増加とともに増大するが、その値を超えると水位の増加に伴う移動速度の増加の割合は急激に減少する。特に、防波堤を設置しない場合では無次元水位が大きく、コンテナの移動速度は打上波の遡上速度が変化してもあまり変化しない。
- 4) 漂流したコンテナの衝突力は、コンテナ前面の水位に大きく依存し、コンテナの質量にあまり依存しない。これはコンテナの質量よりもその背後の水の質量(付加質量)が卓越していることによる。したがって、コンテナが波向きに垂直な状態で移動する場合に衝突力は大きくなり、また、コンテナ長さが大きいほど衝突力は大きくなる。

#### 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・大森正則 (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.
- 岩田好一朗・川崎浩司・安藤敏宏 (1997): 潜水構造物による碎波再生過程と碎波持続距離に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 71-75.
- 池野正明・森 信人・田中寛好 (2001): 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.
- 池野正明・田中寛好 (2003): 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.
- 平石哲也・永瀬恭一 (2003): 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 801-805.
- 松富英夫 (1990): 流木を伴う砕波段波衝突による波力について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 654-658.
- 松富英夫 (1991): 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.
- 水谷 将・今村文彦 (2000): 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.