

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

水谷法美¹・白石和陸²・宇佐美敦浩²
宮島正悟³・富田孝史⁴

エプロン上への打上津波がコンテナに作用した場合の波変形や作用津波力に及ぼすコンテナの設置位置の効果について、水理実験を行って考究した。そして、コンテナ前面への打上高や作用津波力が設置位置に大きく依存すること、またそれは越波の有無にも依存することを明らかにした。また、漂流したコンテナによる衝突力は、被衝突物の剛性によってその特性が変化し、剛性が低いときには衝突作用時間は長くなり、衝突力に及ぼす背後水の付加質量の影響は大きい、剛性が高くなると衝突力はコンテナ質量に依存することを明らかにした。さらに、津波来襲時のコンテナ漂流による被害の軽減策としての岸壁に設けた止水壁の効果についても実験を行い、止水壁の有効性を示した。

1. はじめに

ひとたび津波が襲来すると溺死などの人命被害のほかにも、港湾においてはターミナル施設や倉庫の浸水・損壊といった浸水被害や、車両・原木・コンテナ・船舶の港内や後背地域への漂流などによる流出被害も懸念される。特に近年では、港湾の大小を問わずコンテナ取扱量が増加傾向にあり、津波によるコンテナの漂流が港湾機能の低下を招く恐れのあることが指摘されている。

2004 年 12 月 26 日にスマトラ島沖で発生した M9.0 の巨大地震では、周辺諸国に大規模な津波が発生し、船舶のみならず、バスや自動車が漂流し、民家をはじめとする構造物の被害を増大させた。今後発生が予想される東海地震等の巨大地震による津波に対してもこのような被害の発生が懸念され、その被害を最小限化するための有効な対策を考える必要がある。

津波の作用流体力に関しては、松富 (1989, 1990) や水谷ら (2000) が検討している。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。そして、護岸を越流して構造物に作用する波圧分布は構造物が存在しない場合の遡上水深のみで評価することが可能であり、遡上水深に基づく静水圧分布の相似形で表現できることを報告した。

衝突力に関する研究としては木材を対象とした松富ら (1992) や池野ら (2001, 2003) が検討しているが、コンテナを対象とした研究はまだ十分には行われていない。水谷ら (2004, 2005) は衝突力の算定モデルを提案する

とともに、衝突力に及ぼす背後水による付加質量の重要性を指摘しているが、衝突力に及ぼす被衝突物の物性の影響など、検討の余地が残されている。そこで、本研究では更なる水理実験を行って、エプロン上に遡上した津波がコンテナに作用したときの波変形や漂流衝突力の特性などについて考究する。

2. 水理実験

平面波浪水槽 (全長 28.0 m, 有効幅 8.0 m, 高さ 0.8 m) に矩形で単純化したエプロン模型を設置し、岸壁に波が直角に入射する場合を対象に、縮尺 1/75 の水理模型実験を行った (図-1 参照)。静水深 $h = 22$ cm, 天端高 $R = 3$ cm を基本条件として波を入射させたが、津波被害の軽減策として、エプロン先端の岸壁に止水壁として設置した直立壁の効果を検討するため、高さ s を 2 種類 (0.4 cm, 0.8 cm) 変化させた直立壁を設置した場合、および比較のため静水深を $h = 23$ cm と 24 cm に変化させた場合の実験も行った。

入射波は、孤立波の場合、峰高 H を 8 種類 (2.8~6.8 cm) 規則波の場合、峰高 H を 3 種類 (1.7~3.0 cm) 変化させた。コンテナ模型は 20 ft と 40

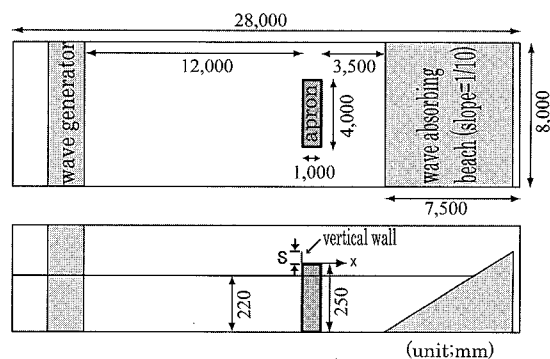


図-1 実験水槽の概要

- 1 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
2 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
3 正 会 員 修(工) 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
4 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所津波防災研究センター

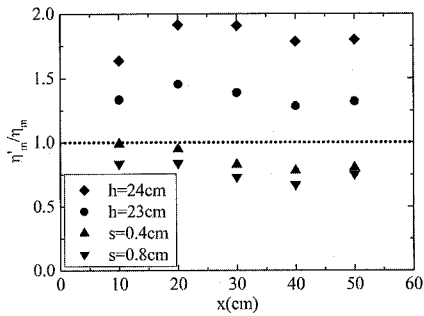


図-2 相対遡上峰高の変化

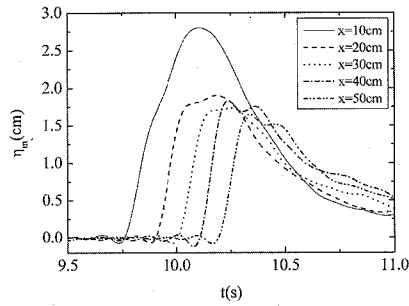


図-3 遡上峰高の時間変化

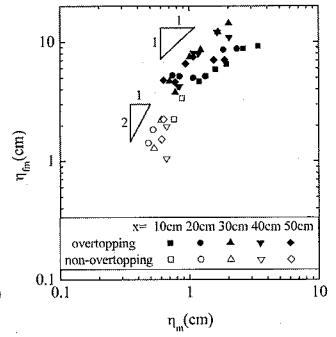


図-4 遡上峰高と打上高の関係

ft の 2 種類を対象とし、質量の違いによる挙動の違いを比べるため、それぞれ質量を 6 種類変化させた。なお、コンテナの前面がエプロン先端より 105, 205, 305, 405, 505 mm になるように設置した。

実験では、エプロン上への遡上波の波峰高の空間変化、異なる地点に設置したコンテナ前面への波の打上高、作用波力（以下津波力と称する）、および流速を計測した。なお、水位を電気容量式水位計で、津波力を三分力計で、流速をプロベラ流速計で計測した（水谷ら，2005 参照）。また、コンテナを漂流させた場合の漂流速度と受圧板に衝突させたときの衝突力の計測も行った。この際、受圧板の剛性を 3 種類変化させた。

3. 実験結果と考察

(1) 遡上波の特性

まず遡上波の特性について考察する。遡上波は、水谷ら（2005）と同様に、波の条件に関わらずエプロン前面（ $x = 10$ cm）で峰高が大きく、遡上距離が大きくなるにともなって峰高は減少することが確認された。図-2 は遡上波の波峰高に及ぼす天端高さや直立壁の影響を検討した例で、静水深 $h = 22$ cm で直立壁がない場合の遡上峰高 η_m との比 η'_m/η_m の空間分布を示している。直立壁を設置した場合、遡上峰高は全般的に小さくなり、 $s = 0.8$ cm（原型で 60 cm）では、 x によって差はあるものの、平均的に約 20 % 減少することが明らかとなった。このことからエプロン前面に直立壁を設けることは、津波の遡上峰高を低減させる上で有効であることが指摘できる。ただし、実際の津波のように周期が長くなった場合についても更に検討を行う必要がある。一方、水深が深くなった場合、遡上峰高は大きくなり、 $h = 24$ cm の場合には最大約 80 % の増加が確認された。したがって、エプロン高さが低い場合には注意が必要である。

図-3 は異なる位置での遡上波の時間波形を例示したものである。上述したように $x = 10$ cm では他の地点

に比べ遡上峰高が大きく、それより後方の 4 点では峰高の減少割合は小さいことが確認できる。また、 $x = 10$ cm では遡上し始めてから遡上峰高が最大になるまでの時間が他に比べ長く、水面勾配は緩やかであるが、後方の 4 点では遡上波の前面の勾配が若干急になっている。この特徴は、遡上峰高とコンテナ前面打上高、津波力との関係にも大きく影響を及ぼすがその詳細は後述する。

(2) コンテナ前面での打上高

遡上波がコンテナ前面（海側）に当たったときの遡上波の打上高 η_{fm} について考察する。コンテナ前面での打上高は、遡上波がコンテナを越波する場合としない場合では大きく異なることが明らかとなった。図-4 は遡上峰高 η_m とコンテナ前面打上高 η_{fm} の関係を例示したものであるが、同図に示されるように、遡上波がコンテナを越波する場合、打上水位 η_{fm} は遡上峰高 η_m に比例するが、越波しない場合は η_m の 2 乗に比例する傾向のあることが全般的に認められた。これは、越波しない場合、遡上した波の運動エネルギーの大部分が位置エネルギーに変換されると考えられるが、越波する場合、運動エネルギーの多くは位置エネルギーに変化せず、部分的に保持されることによると考えられる。そこで、まず越波する場合の打上高と遡上峰高の関係について考察する。

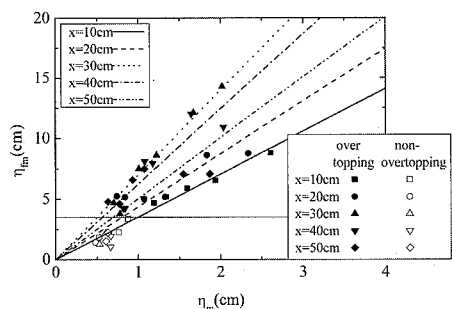


図-5 遡上峰高と打上高の関係（線形軸）

遡上峰高と打上高の関係を図-5に線形軸で示す。エブロン前面 ($x = 10$ cm) では、打上高は遡上峰高の約3.5倍であるが、遡上波が進行して $x = 30, 40$ cm 付近では、最大で7倍程度まで打上ることが明らかとなった。この現象はコンテナ長を変えた場合でも同様であり、上述したように遡上波が進行にともなって波面が急になることが起因していると考えられる。なお、越波がない場合、図-5からもわかるように上述の関係より若干小さくなる傾向がある。

(3) コンテナに作用する津波力

コンテナに作用する津波力 F_{xm} と遡上峰高の関係についても越波の有無は大きく影響を及ぼす。図-6に例示するように、波力は越波しない場合、遡上峰高の4乗に比例するが、越波する場合、遡上峰高に比例することが確認された。既述したように、コンテナ前面打上高 η_{rm} は越波しない場合に遡上峰高 η_m の2乗に、越波する場合1乗に比例するため、津波力は、越波しない場合は打上高の2乗に、越波する場合は打上高に比例することになる。圧力は越波の有無によらず打上高に比例する傾向がある(中村ら, 2006)が、その作用面積が、越波しない場合には打上高に比例するのに対して、越波する場合には一定となる。これらの差によって越波の有無による津波力の傾向に差が生じたと考えられる。

ところで、 $s = 0.8$ cm の直立壁を設置した場合、遡上峰高を約20%減少できることを示したが、この結果から津波力を推算すると、直立壁の設置により、津波力を最大で約60%低減できることになり、津波力に対しては特に効果が大きいことが指摘できる。

つぎに、津波力に及ぼすコンテナ長さの影響について検討する。図-7に例示するように、津波力は40 ftの場合の方が20 ftの場合よりも約2.5倍大きくなる傾向がある。コンテナ前面面積の比である2倍よりも大きくなるのは、端部の影響が40 ftの方が20 ftの場合よりも相対的に小さいことによると考えられる。また、コンテナの段数に着目すると、2段積みの場合、受圧面積が1段に比べて2倍となるが、越波状況の差異や圧力の鉛直分布(中村ら, 2006)の影響により、本実験の範囲では約1.3倍の大きさとなることが確認された。

ここで、コンテナに作用する津波力を式(1)に示すモリソン式を適用して算定することを考える。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_w A u |u| + C_M \rho_w V \ddot{u} \quad (1)$$

ここに、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数、 A : 構造物の流速方向の投影面積、 u : 流速、 V : 構造物の体積、 $\ddot{u}$: 加速度、 ρ_w : 水の密度である。

モリソン式を使用するには、適当な抗力係数と慣性力係数を与える必要がある。コンテナの抗力係数と慣性力

係数については、水谷ら(2005)の実験結果があるものの、それ以外にはほとんど検討されていない。しかし、水谷らはこれらの係数を算定するための流速を直接計測せずに、水位変化から伝達関数を使って求めており、その妥当性について検討の余地がある。そこで、本研究では、プロベラ流速計を用いてコンテナ位置で計測した流速とそれから求めた加速度を使用して抗力係数と慣性力係数を求めることとした。なお、面積 A および構造物

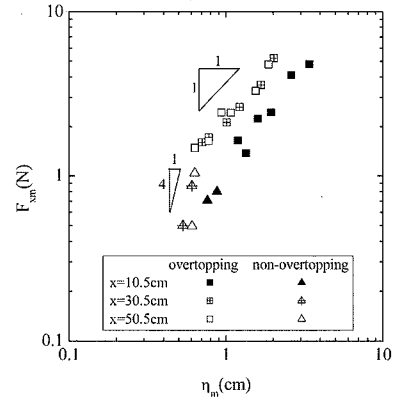


図-6 波力と最大遡上峰高の関係

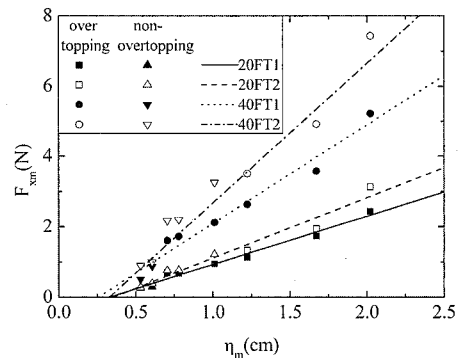


図-7 コンテナの種類による波力の違い

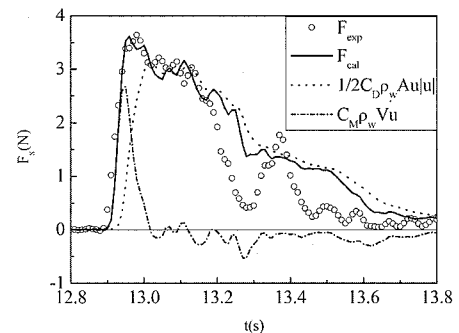


図-8 波力の計算値と実験値の時系列

の体積 V は時間によらず一定とした。

図-8 は波力の実験値と最小自乗法によりフィッティングしたモリソン式による計算波力、および同式中の抗力と慣性力を例示したものである。計算値と実験値の対応は良く、モリソン式により、津波力の算定は可能であるといえる。また、波がコンテナに当たる瞬間は慣性力が卓越しているが、その後は抗力が卓越している。一般に抗力は物体背後に形成される渦により生じる圧力の低下によって物体前後に生じる圧力の非対称性に起因するとされているが、本研究で対象とするような遡上津波のコンテナへの作用の場合、コンテナの前面と後面では水位に大きな差が生じ、圧力の作用面が大きく異なる。このためコンテナ前後で圧力の非対称性が発生する。コンテナ前面の打上高さは流速の2乗に比例することが確認されており、これらの結果より、前後の水位差が抗力の主たる発生機構になっていると考えられる。

図-9 は波力係数と K.C. 数 ($u_m T/B_c$, T は周期で孤立波に対しては造波板の作用時間とした) の関係を示したものである。同図より、若干ばらついているが、大略 C_D は 1~2, C_M は 0.5~1 の間に収まっていることが分かる。一般に角柱の場合、抗力係数 C_D は 1.05 とされているが、今回の実験ではそれを若干上回る結果となった。逆に、慣性力係数は $C_M = 1.67$ とされているが実験値はこれを大きく下回っている。これらの差は抗力・慣性力の発生機構が通常の波力と異なることに起因する

と考えられる。また、本実験の値は水谷ら (2005) の値とほぼ同様の値となっているが、ばらつきは小さくされており、水谷らの結果に比べ信頼性の高いものになっていると考えられる。

(4) コンテナの衝突力

水谷ら (2005) は運動量の保存則から衝突力のモデル化を行うとともに、コンテナに堰き止められる水による付加質量が衝突力に大きく寄与していることを指摘している。しかし、付加質量は被衝突物体の剛性に依存する衝突作用時間に比例しており、したがって、被衝突物体の剛性により付加質量の寄与が変化することが予想される。そこで本実験では、受圧板の剛性を変化させて衝突力の計測を行うこととした。具体的には、アクリル製の受圧板の厚さを 2 mm, 3 mm, 4 mm の3種類変化させて実験を行った。本研究ではそれぞれの受圧板を K2, K3, K4 と称することとする。

図-10 に K2, K3, K4 の受圧板を用いた衝突作用時間と衝突力の結果を示す。剛性の低い受圧板 K2 を用いた場合、他の場合に比べ衝突作用時間は長い、逆に、衝突力のピーク値は小さい。また、受圧板 K3 と K4 の比較でも、差は小さいものの同様の傾向が認められた。したがって、剛性が低くなると衝突作用時間は長く、衝突力は小さくなると言える。

これらの衝突力に対し、水谷ら (2005) によるモデル (式 (2)) を適用した結果、紙面の都合上図示していないが、式 (2) は本実験結果に対しても有効であることが確認された。

$$F_m dt = (\alpha \rho_w \eta_m B_c V_x dt + W/g) V_x \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度、 η_m : 最大遡上峰高、 B_c : コンテナ幅、 V_x : コンテナの移動速度、 W : コンテナ重量、 g : 重力加速度、 dt : 衝突作用時間である。なお、本研究では越波する場合を取り上げたため、 $\alpha \eta_m = H_c$ (H_c : コンテナ高さ) として計算を行っている。

受圧板の剛性が力積に及ぼす影響を検討するため、同一のコンテナと波条件に対して K2 と K4 の場合の力積を図-11 に比較した。図より、受圧板 K2 を用いた場合

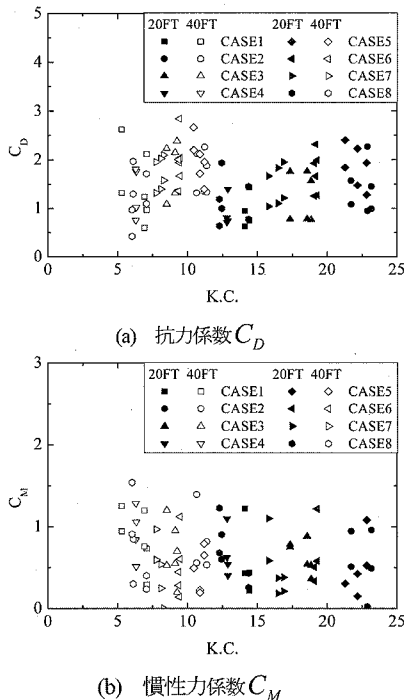


図-9 波力係数と K.C. 数の関係

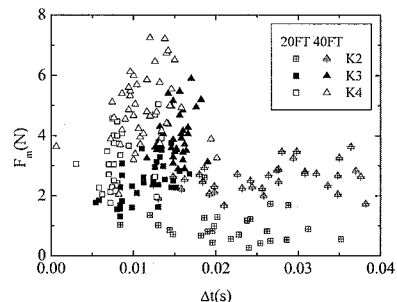


図-10 衝突作用時間と衝突力の関係

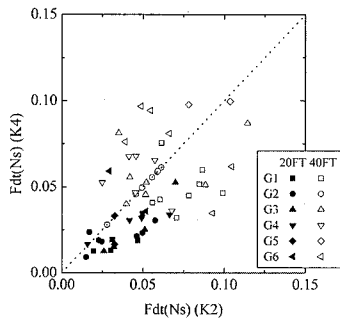
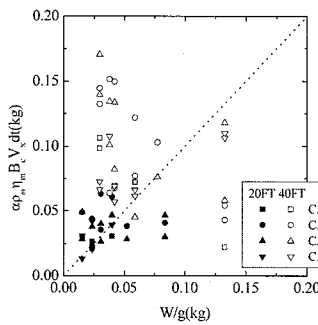
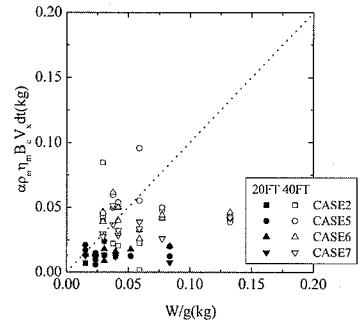


図-11 剛性による力積の違い



(a) 受圧板 K2



(b) 受圧板 K4

図-12 付加質量とコンテナ質量の関係

の力積の方が受圧板 K4 を用いた場合に比べ大きくなる傾向がある。図-12 は、K2 と K4 の場合の衝突力に及ぼすコンテナ質量とコンテナが堰き止めた背後水による付加質量の比較を示したものであるが、剛性の低い K2 の場合には、衝突作用時間が長いために、コンテナが受圧板に衝突している間にコンテナに押し寄せる水塊の量が大きくなり、それにともなって付加質量の影響が大きくなり、それが全体的な力積を大きくすることに寄与しているためであると考えられる。これらの結果から、剛性の低い構造物に漂流コンテナが衝突するような場合、衝突の影響は剛性の高い構造物に比べて大きく、より被害が出やすいことが考えられ、その対策が望まれる。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 直立壁の設置により遡上波の峰高は低減可能であり、津波被害の軽減に有効な対策となり得る。
- 2) コンテナ前面への遡上波の打上高は、非越波の場合、遡上峰高の 2 乗に比例するが、越波の場合は 1 乗に比例する。また、打上高はコンテナ設置位置により大きく変化し、エプロン先端より少し後方で大きくなる。
- 3) コンテナに作用する波力は、非越波の場合、遡上峰高の 4 乗に比例するが、越波の場合は 1 乗に比例する。
- 4) コンテナに作用する津波力は、コンテナ長さや高さに依存する。ただし、2 段積みの場合、上段のコンテナへの作用波力は下段のそれよりも小さくなる。また、一般的に抗力が支配波力成分である。
- 5) コンテナの衝突力は被衝突物の剛性により変化する。

剛性が低いと衝突作用時間が長くなり、衝突力に対する付加質量の寄与は大きくなるが、剛性が高くなると付加質量の寄与は小さく、衝突力はコンテナの質量に依存するようになる。

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・大森政則(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。
- 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。
- 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。
- 中村友昭・白石和陸・宇佐美敦浩・水谷法美・宮島正悟・富田孝史(2006)：エプロン上のコンテナに作用する津波の波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，Vol. 22，pp. 517-522。
- 松富英夫(1989)：流木を伴う破波段波衝突による波力について一段波波高に比べ流木径が小さい場合，海岸工学論文集，第 36 巻，pp. 574-578。
- 松富英夫(1990)：流木を伴う破波段波衝突による波力について一段波波高と流木径が同程度の場合，海岸工学論文集，第 37 巻，pp. 654-658。
- 松富英夫(1992)：水の緩衝機能を考慮した弾性波理論に基づく流木衝突力の評価，海岸工学論文集，第 39 巻，pp. 691-695。
- 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. 947-950。
- 水谷法美・山口聡・宮島正悟・富田孝史(2004)：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，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 736-740。
- 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。