

遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験

Large Model Tests of Drifting Container Impact Force due to Surge Front Tsunami

有川太郎¹・大坪大輔²・中野史丈³・下迫健一郎⁴・石川信隆⁵

Taro ARIKAWA, Daisuke OHTSUBO, Fumitake NAKANO
Kenichiro SHIMOSAKO and Nobutaka ISHIKAWA

This report investigates the impact force of drifting container due to surge front tsunamis. Because the impact force depends on the material and rigidity of the objects, the 1/5 scale model experiments are conducted with container made of steel and concrete wall. First, effect of the material and rigidity, impact force tests in the air are conducted. Then, the velocity of drifting container is checked. Finally, the drifting container impact force tests due to surge front tsunami are conducted. The empirical formula based on Hertz theory is applied to the impact force results. It indicates that this formula can evaluate the impact force under this report condition.

1. はじめに

巨大津波の来襲が指摘されるなか、港湾域においては、船舶やコンテナの漂流による衝突被害が懸念されており、コンテナや船舶などの漂流メカニズム、漂流衝突力を明らかにする必要がある。そのため、水谷ら（たとえば、2006）はコンテナの漂流挙動や漂流衝突力に関する一連の研究を行い、衝突力の算定式を提案している。しかし、縮尺 1/75 のアクリル製模型を用いた実験であるため、剛性が異なる物に対する適用性に課題を残している。

衝突力は、衝突速度や重さだけでなく、材質、構造体、衝突面のあたり方にも依存し、コンテナ漂流に関しては不明な点が多い。そこで、被衝突物にコンクリート構造物、衝突体に鋼製構造物を用いた衝突力を検討することを念頭に置き、縮尺約 1/5 の鋼製コンテナ模型を用いて漂流衝突実験を行い、その衝突力特性を検討する。

2. 既往研究と研究手法

(1) 鋼とコンクリートによる衝突力

漂流物とは異なるものの、消波ブロックを用いた衝突力について、有川ら（2003）が検討しており、消波ブロックが鋼製のロードセルに衝突する大規模実験を行い、Hertz の理論を基に算定式を提案している。ここでは、衝突体のヤング率や衝突面の大きさをを用いて定式化される。また、コンクリート壁に対する押し抜きせん断破壊の実験も行い（有川ら、2004）、算定式を用いて、押し

抜きせん断破壊の判定が可能であることを明らかにした。

(2) コンテナ漂流物の衝突力

コンテナの漂流衝突力に関しては、水谷ら（2006）が、一連のコンテナ漂流物の衝突力に関する研究から

$$F_m dt = (\alpha \rho \eta_m B_c V_x dt + W/g) V_x \dots\dots\dots (1)$$

を提案している。ここで、 F_m ：衝突力、 α ：係数（コンテナを越波する場合、 $\alpha \eta_m = H_c$ 、 H_c はコンテナ高さ）、 ρ ：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、 g ：重力加速度、 W ：コンテナ重量、 dt ：衝突作用時間である。第 1 項目が付加質量を表している。衝突作用時間が小さいと、その項の衝突力に対する影響が小さくなることがわかる。衝突作用時間は剛性により変化し、剛性が低いと付加質量の効果が大きくなるが、剛性が高いと付加質量の効果が小さくなっている。よって衝突作用時間の定量的な算定が必要となる。

(3) 漂流物の衝突速度

漂流物の衝突力は、衝突速度に依存するため、その衝突速度の算定が重要である。そのため、水谷ら（2006）、藤井ら（2005）は検討を行い、それぞれ、モリソン式にならった算定式が実験値とよく一致していることを指摘している。ただし、抗力係数が異なっており、水谷らの研究では、実験では抗力係数は 1.0 ～ 2.0、慣性力係数は 0.5 ～ 1.0 の間に大抵のデータが収まっていると指摘する。藤井らも同様に両者とも 1.0 を用いて漂流物の挙動の計算を行い、良好な結果を得ている。

(4) 本研究の研究手法

既往の研究より、コンテナ衝突力を評価するためには、衝突時間の算定手法の確立が重要であり、それは材質・剛性に大きく依存するがわかる。そこで、本研究においては、コンクリートと鋼材を対象とするため、可能な限

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官
2 シバタ工業(株)
3 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室
4 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所耐波研究室長
5 正会員 博(工) 防衛大学 名誉教授

り大きな模型を用いた実験を行うこととした。

まず、空気中での衝突実験を行い、次に、コンテナを津波により漂流させたものの衝突力を測定する。また、漂流速度についての若干の検討を行う。今回は、コンテナは剛と考え、破壊は考えないものとする。

3. 空中衝突実験

(1) 実験断面および模型

図-1 のように最大高さ 1.0 m の位置からコンテナ模型を自然に放し、ロードセルで衝突力を測定する。

コンテナは、長さ 1.21 m、高さ 0.52 m、幅 0.49 m とした。材質は、厚さ 2.3 mm の鉄板を使用し、コンテナが空のときの測定値は 62 kg となった。大きさは縮尺 1/5 となっている。その模型にタイヤを取り付けた (図-2)。

ロードセルは図-2 右に示すように、定格容量 50 kN の

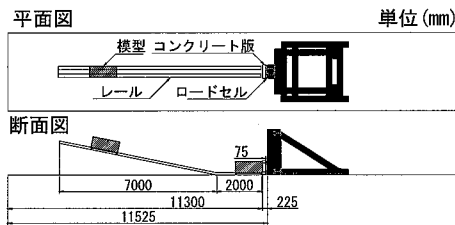


図-1 空中衝突実験の実験断面

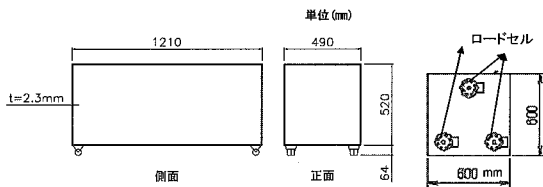


図-2 コンテナ模型 (左) とロードセル (右)

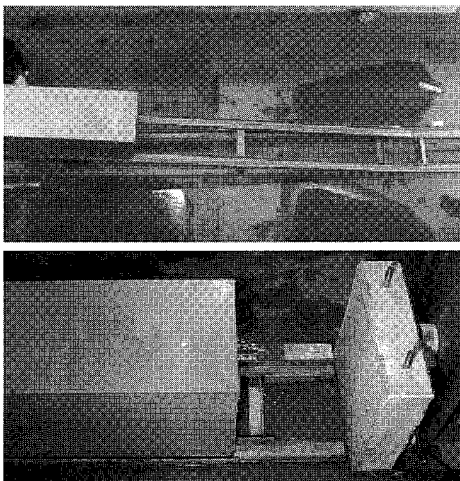


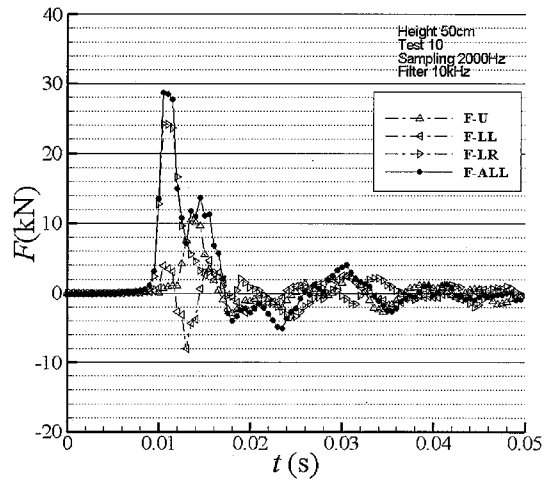
写真-1 空中衝突実験の様子 (上: 設置, 下: 衝突後)

ものを 3 点で被衝突体を固定して測定した。被衝突体は、高さ 60 cm × 幅 60 cm × 厚さ 20 cm のコンクリート版とした。コンテナは 52 cm × 49 cm の面全体が衝突するように調整した。高さは 50 cm, 75 cm, 100 cm から、それぞれ 10 回, 10 回, 3 回ずつ落下させた (写真-1)。

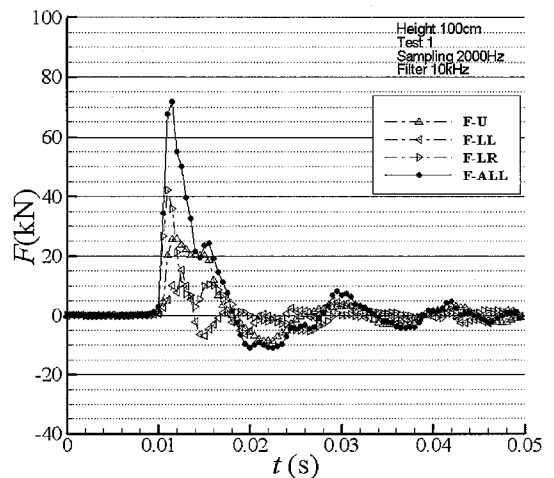
(2) 実験結果

各高さにおける時系列データを図-3 に示す。図中、F-U が上、F-LL が下の左側、F-LR が下の右側のロードセルをそれぞれ表している。F-ALL は、F-U, F-LL, F-LR の合力である。図-3 を見ると、まず右下に衝突し、それから上と左下に衝突しているということがわかり、その合力を足し合わせると、一度目に衝突したところがいっしょに大きくなっている。

図-4 は、横軸に衝突速度、縦軸に衝突力をとったも



(a) 高さ 50 cm (10 回目)



(b) 高さ 100 cm (1 回目)

図-3 各高さにおける衝突力の時系列

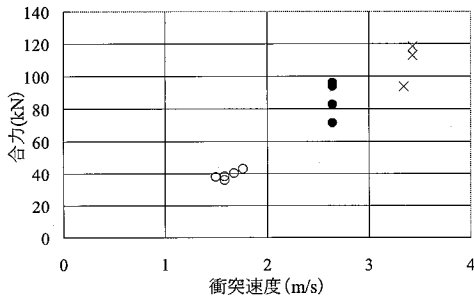


図-4 空中衝突における衝突速度と合力の結果

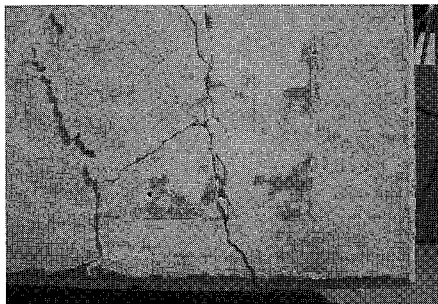


写真-2 破壊したコンクリート版の様子

のである。衝突速度はビデオから読み取った。ほぼ、線形に上昇していることがわかる。高さ 100 cm の際の 3 回目の衝突の際にコンクリート版にヒビが入った(写真-2)。若干小さい点がそれに相当する。他のケースのばらつきの範囲程度に収まっているため掲載した。

4. 漂流速度についての考察

(1) 実験方法

コンテナ 1 個をドライな床の上に設置し、そこに、様々な流速を持つ遡上津波を作用させて、コンテナの漂流速度との関係を調べた。コンテナに作用した津波力を検討するために、コンテナ模型には、図-5 のように波圧計を設置した。今回は、波圧の詳細な議論は行わず、単に漂流速度だけを検討するものとする。

実験断面は図-6 のようにした。漂流距離を可能な限り長くするために、陸上部の先端から 1.8 m の場所に模型を置いた。計測器は、流速計、波高計を設置し、コンテナには上述した通り波圧計を取り付けた。流速計は、

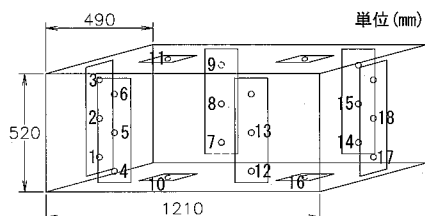


図-5 波圧計の設置されたコンテナ模型図面

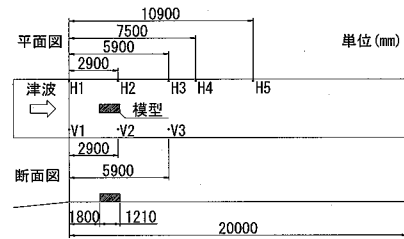


図-6 漂流試験実験断面

図-10 に示すように 3 つ設置 (V1 ~ V3) し、波高計は、陸上部に 5 つ設置 (H1 ~ H5) した。またコンテナ速度をビデオ解析するために、ビデオを水路上部に取り付けた。

周期は 20 s と 30 s、コンテナが無いときの浸水深は 15 cm ~ 40 cm 程度の津波を作用させた。

(2) 実験結果

a) コンテナに作用する波圧

写真-3 は実験の様子であり、上段は、津波の来襲した方向から撮影したビデオの映像、下段は、真横から撮影したビデオの映像である。

図-7 は、コンテナに取り付けた波圧計のうち津波が始めに作用する面の最下端の時系列波形の一例である。このときは、津波が来襲した瞬間に 10 kN/m^2 程度が作

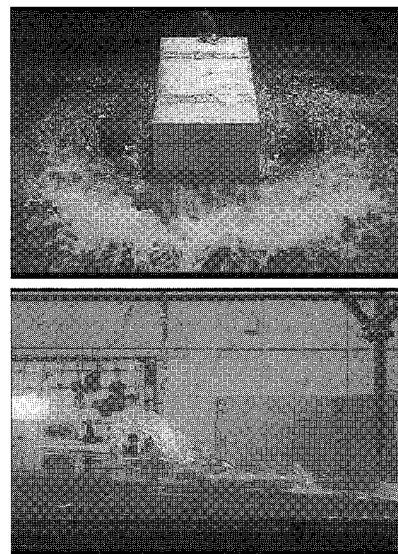


写真-3 コンテナ漂流実験の様子(上:正面,下:横から)

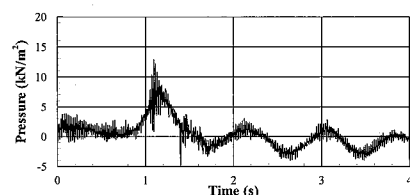


図-7 波圧の時系列値

用していることがわかる。また、これを見ると1秒程度の振動した波圧が得られているが、コンテナが漂流に合わせて振動しているからではないかと考えているが、まだ、明確には解明していない。

b) 浸水流速と漂流速度の関係

コンテナの漂流速度をビデオで解析した一例を図-8に示す。例は周期30s、津波浸水高さ12cmのものである。縦軸にコンテナの漂流速度、 v_{cd} 、を示している。横軸は動き始めを0とした。津波が通りすぎると速度が落ちるため、図のように山なりとなっている。

図-9に、津波の浸水流速とコンテナ漂流速度の関係を示す。横軸は、コンテナが存在しないときの浸水流速、 v_{ts} 、(5.9m地点)を、縦軸は、コンテナの最大漂流速度、 v_{cdm} 、である。浸水流速が速くなるに従い v_{cdm} と v_{ts} の差が小さくなることがわかる。これより浸水流速が大きいと十分に加速するが、小さいと十分に加速するまでに、実験では浸水流速が小さくなっていることがわかる。

しかし、実際の津波周期は十分に長いので、壁面までの距離が十分にあれば、津波浸水流速とコンテナの最大漂流速度が同程度になることが予想される。

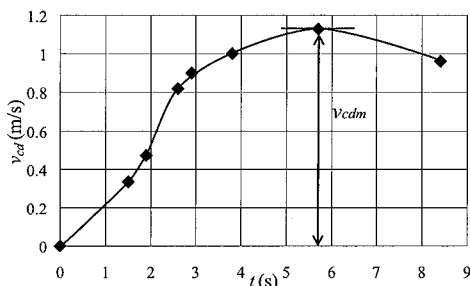


図-8 漂流速度のビデオ解析結果

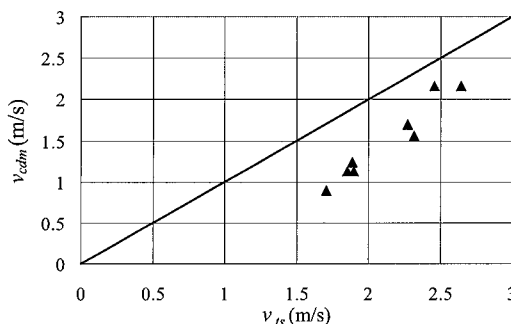


図-9 浸水流速 v_{ts} と最大漂流速度 v_{cdm} の関係

5. 漂流衝突実験

(1) 実験方法

図-2と同じロードセルならびにコンクリート版を用

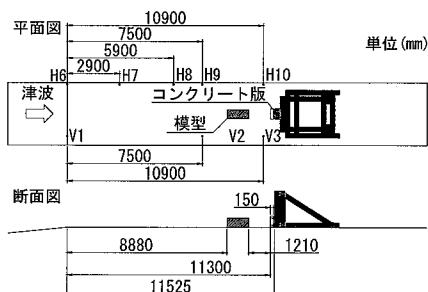


図-10 漂流衝突実験断面

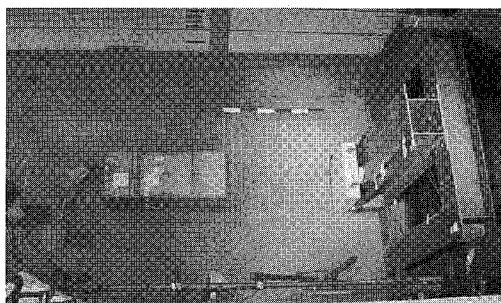


写真-4 漂流衝突実験設置の様子

いて、遡上津波をコンテナに作用させ、その衝突力を測定した。コンテナをコンクリート版近くに設置(1.2m)することによって、面衝突となるようにした(図-10)。設置した様子を写真-4に示す。

(2) 実験結果

a) 実験の様子

写真-5は、実験時の様子を示している。先にコンテナとコンクリート版の間に水が回り込み、その後、コンテナがコンクリート版に衝突する様子がよくわかる。

b) 衝突力時系列結果

ロードセルで計測された衝突力の例を図-11に示す。各場所の値を足し合わせた力は、数トン程度のオーダーであり、コンテナ重量の50～100倍程度の値である。

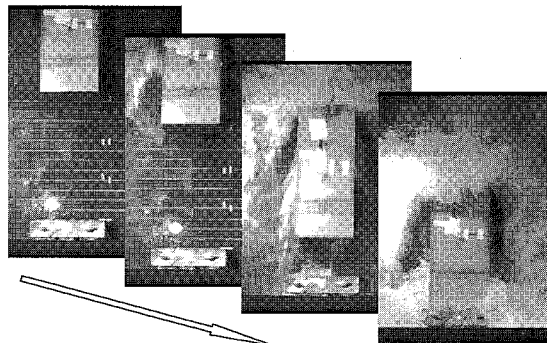


写真-5 コンテナが衝突する様子

これは、コンテナが鋼材でできており、コンクリート版という非常に剛なものに衝突しているため、水谷ら(2006)と比較し、衝突力の作用時間は短くなり、非常に大きな力となっているためであり、コンテナの衝突力を評価するには、前述した通り、材質・構造の影響を加味したものにすることが重要であることがわかる。

c) 漂流衝突速度と衝突力の関係

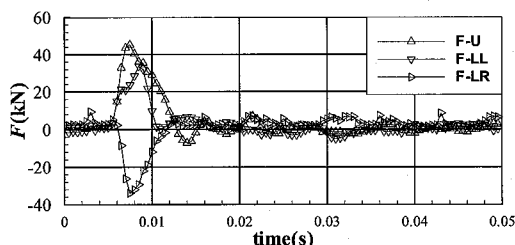


図-11 衝突力の時系列

図-12 に漂流衝突速度と衝突力の関係を示す。衝突速度は 20 cm 手前の位置の時間と衝突した時間をビデオから読み取り、平均速度として計算した。黒塗りの点は空中衝突の結果であり、図-4 に示したものである。

図-13 は、高速カメラの映像から読み取り、速度を解析したものである。これを見ると衝突した瞬間は 2.0 m/s 程度であり、その前後で急激に衝突速度が落ちている。これは、先に到着した水が緩衝材の役割になっていると考えられる。よって、20 cm の平均速度では、実際に衝突した速度よりも、大きな衝突速度である可能性があるが、今回は、20 cm の平均速度を衝突速度とした。

図-12 から、同じ衝突速度で比較すると、空中での衝突力のほうが漂流衝突力よりも若干大きくなる傾向にある。この要因としては、浮力によりコンテナの衝突力に影響する重量が小さくなっていることや、衝突面が空中に比べて小さくなっていることなどが考えられるものの、詳細な検討が必要である。しかし、剛性が高いため、付加質量の影響は、相対的に見られない。

図-12 中に有川ら (2003) による、消波ブロックがコ

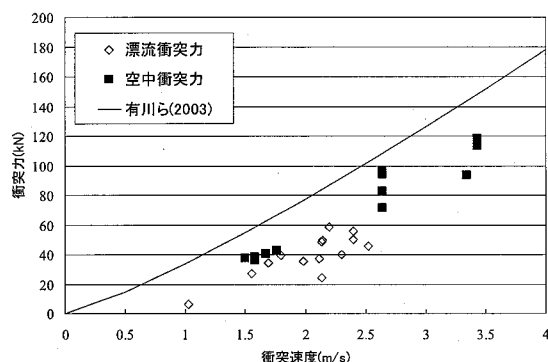


図-12 衝突速度と衝突力の関係

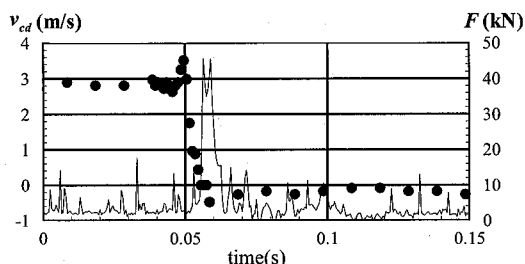


図-13 衝突速度 (●) と衝突力 (実線) の時系列

ンクリート版に衝突を行うときの算定式を適用したものを同時に比較する。ただし、様々な被衝突体や衝突物が存在することから、Hertz の元の式に戻り、

$$F = \gamma_p \chi^{2/5} \left(\frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{3/5} v^{6/5}, \quad \chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2} \dots (2)$$

$$k = (1 - \nu^2) / \pi E, \quad \tilde{m} = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$$

として計算した。ここで、 a : 衝突面半径の 1/2 (ここでは、コンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4 とした)、 E : ヤング率 (コンクリート版)、 ν : ポアソン比、 m は質量、 v : 衝突速度であり、 m や k の添え字は、衝突体と被衝突体を表す。 γ_p は、塑性によるエネルギー減衰効果として、有川ら (2003) では、0.25 を採用している。全体的には大きめの評価をしている。空中より水中のほうが片当たりしていることから、衝突面の与え方や、係数の評価を今後詳細に検討するべきである。ただし、この実験の範囲内では、オーダーは整合しており、式 (2) で衝突力を評価できると考えられる。

6. ま と め

大規模な実験を用いてコンテナ漂流衝突力特性ならびに漂流速度を、コンクリート版ならびに鋼製のコンテナ模型を用いて検討した。その結果、本実験の範囲内において、Hertz の算定式により漂流衝突力を評価することが可能であることがわかった。

参 考 文 献

- 有川太郎・織田朋哉・黒田豊和・下迫健一郎(2003): 消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験, 海岸工学論文集第50巻, pp. 716-720.
- 有川太郎・池辺将光・大嵯葉々子・下迫健一郎(2004): 消波工衝突によるケーソン壁面破壊に関する実験的研究, 海岸工学論文集第51巻, pp. 741-745.
- 藤井直樹・大森政則・池谷毅・朝倉良介・入谷剛・柳沢賢(2005): 津波による漂流物の移動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, vol. 21, pp. 127-132.
- 水谷法美・白石和睦・宇佐美敦浩・宮島正悟・富田孝史(2006): 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, 海岸工学論文集第53巻, pp. 786-790.