陸上の津波対策防護柵に作用する波力および漂流物の衝突力の基本特性

Fluid Force and Collision Force of a Tsunami-driven Container Acting on Onshore Tsunami Barriers

榎田真也¹・斎藤武久²・古路裕子³・中口彰人⁴・石田 啓⁵

Shinya UMEDA, Takehisa SAITOH, Hiroko FURUMICHI, Akito NAKAGUCHI and Hajime ISHIDA

A laboratory experiment is conducted to make clear fundamental characteristics of fluid force and collision force due to tsunami-driven shipping container acting on a porous onshore tsunami barrier. Fluid force becomes large as the porosity of the barrier decreases, and then the reduction of inundation depth behind the barrier is significant. The correlation between fluid forces on the barriers and reduction of inundation flow can be characterized by the relative incident bore height to barrier height. A tsunami-driven container slows down in front of the barrier due to the interaction between the container and reflection wave from the barrier, so that the reduction of collision force is much significant in the case of the barrier with low porosity. The collision force for high porous barrier is much larger than the fluid force.

1. 序論

津波は海水だけでなく様々なものと一緒に遡上して、沿岸地域に深刻なダメージを与える場合がある。特に港湾や臨海地域では船舶、コンテナや木材等が漂流して、周辺地域の被害を増大させたり、復旧の妨げになったりするため、想定される津波に備えて浸水の防止・低減とともに適切な漂流物対策を進める必要がある。

津波漂流物の挙動や衝突力に関しては、流木を対象に松富（例えば1989, 1999）が漂流挙動・速度、衝突力の大きさや作用時間等について実験・理論的に詳細な検討を行い、流木衝突力の実用的な評価式を考案している。コンテナについては、水谷ら（例えば2004, 2005）が漂流速度、作用波力や細長物体の衝突力等に関して多角的に研究し、波力と衝突力の算定方法を提案している。また、衝突力は衝突側と衝突される側の両者の材質や構造形式等の影響を受けるため、有川ら（2007）はコンクリート板と鋼製コンテナの大型模型を用いた実験を行い、衝突力を評価する上でHertz式の有用性を指摘している。

津波防災・減災技術の重要性が広く認識されるとともに、津波波力や津波防護に関する研究も最近増えている（例えば、Thomas・Cox, 2012；Lintonら, 2013）ものの、陸上津波、構造物と漂流挙動との関係および透過型の構造物に作用する波力や衝突力の特性については未解明な点が多い。津波漂流物対策を検討する上で、種々の構造物と漂流物の組み合わせによる評価が必要である。

本研究で対象とする防護柵は、東北地方太平洋沖地震津波によって漂流した船舶、コンテナ、木材などを幾つ

かの港湾施設で捕捉したもので、通常は高波浪時の越波や飛沫拡散の軽減および防風・防塵のために利用される。数cmの孔が多数開いた遮蔽率60～70%前後の透過性の壁状構造物であり、漂流物の捕捉、背後域の浸水低減や視界の確保等の機能が期待できる。しかし、防護柵の浸水低減効果や波力については榎田ら（2013, 2014）が検討しているが、想定を大幅に上回る津波に曝された場合や漂流物の衝突力の特性および柵の形式がそれらに及ぼす影響に関する定量的な評価がされていない。

そこで本研究では、直立護岸の背後陸上域に設置した津波対策防護柵について、柵衝突後の浸水深が柵高の2倍を超える津波まで想定して、各種形式の防護柵を用いた基礎実験を行う。津波の越流状況や柵形式の違いに対する作用波力と浸水低減率の変化、コンテナの漂流挙動と陸上津波・防護柵との関係、および漂流衝突力の変動特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法及び条件

長さ12m、幅・深さ0.4mの開水路内に設けた護岸・背後陸域上に防護柵とコンテナの模型（縮尺1/50程度）を図-1のように設置し、堰板の急開により段波を発生させて実験した。防護柵には図-2に示すように、柵の遮蔽性が高い順にB1～B5の5種類を採用した。図中の遮蔽率 σ は柵の面材部分の不透過な投影面積の割合を示す。各種柵は金属製で、高さ H_b を6cmに統一した。各種柵の詳細は榎田ら（2014）を参照されたい。コンテナは20ftで満載を想定し、護岸先端と防護柵の間に、コンテナの長手方向が波峰線に平行になるように1つ配置した。

貯留水深 h_l を段階的に変えて、規模の異なる4つの段波を作用させた。防護柵が無い状態における陸上の浸水深 η_0 と波速 C_0 の分布は図-3に示すとおりで、コンテナの初期地点（ $x/L = 0.55$ ）の浸水深はコンテナ高 H_c の約30～

1 正会員	博(工)	金沢大学准教授環境デザイン学系
2 正会員	博(工)	金沢大学教授環境デザイン学系
3 正会員		(株)日本パーツセンター設計部部長
4 正会員		(株)日本パーツセンター設計部課長代理
5	工博	金沢大学名誉教授

図-6 浸水低減率と波力比の関係

た傾向を示し、防護柵で受け止める波力が相対的に大きいほど、背後域の浸水低減効果が高まる。入射波の相対浸水深が大きくなるにつれて浸水低減率 R は減少するが、B4柵の R の減少率は比較的小さく、浸水低減効果が安定している。

浸水低減効果と波力の関係に着目して、図-6に不透過壁B1の最大波力 F_{B1} に対する各種柵の最大波力 F の比（波力比）に対する浸水低減率の変化を示した。柵天端からの越流が無い場合、浸水低減率は波力比とほぼ一致する。一方、相対浸水深が増加し、柵天端から越流が起ると、透過性柵B2～B4の波力は増加し、不透過柵の波力に近づいて、浸水低減率は減少する。遮蔽性の高い柵ほど越流した場合の浸水低減率の減少が顕著になる。

4. 漂流物を伴う津波による防護柵の作用力

(1) 漂流速度と遡上波、防護柵との関係

漂流速度は遡上波の性質に依るところが大きいと考えられるため、図-7に防護柵が無い状態で計測した漂流中のコンテナの最大瞬間速度 u_{max} 、区間平均速度 u_{mean} および遡上波の波速 C_0 と浸水深 η_0 との関係を示す。なお、同図ではコンテナ高 H_c を代表長さとして基準化し、漂流速度は10回の計測の平均値で与えた。波速は概ね $2(g\eta_0)^{1/2}$ で表され、規則波や孤立波を用いた水谷ら（2005）の実験結果と同様の傾向が見られる。浸水深がコンテナ高と同じくらいになると、漂流物の最大速度は波速とほぼ一致するが、浸水深がコンテナ高の半分程度になると、波速の7～8割程度までの加速に留まる。さらに浸水深が浅くなり、コンテナ高の1/4程度になると、漂流コンテナは防護柵まで到達しない場合が多かった。

漂流したコンテナが防護柵に接近すると、先行していた遡上波の先端部が柵に衝突して形成された反射波の干渉を受けるため、漂流速度は減速する。減速の度合いや範囲は柵の種類や遡上波の規模により変化すると考えられる。一例として、図-8に相対浸水深が柵高の半分程度の遡上波による漂流速度の各種柵付近での空間的な変化

図-7 漂流速度 u と波速・浸水深との関係 図-8 各種柵付近における漂流速度 u の変化($\eta_0/H_c = 0.52$)

を示す。図中の漂流速度は10回の計測値のアンサンブル平均である。透過性の高いワイヤー柵B5は反射波を形成しないため、コンテナはほとんど減速しないで衝突する。一方、透過性の低い柵B1～B3の手前では、漂流物は反射波に干渉され、コンテナ幅の数倍くらい手前から減速し始めて、柵直前の漂流速度は半分以下になる。B2柵の波返しの効果はあるものの、この条件ではB1やB3柵と変わらない。遮蔽率70%のB4柵による漂流物の衝突速度の低減効果は両者の中間くらいである。

(2) 衝突波力と遡上波、防護柵との関係

漂流物を伴う遡上波による各種柵の最大作用力 F_{ii} （以下、衝突波力と便宜的に呼ぶ）と漂流物が無い場合の柵の最大波力 F を入射波・防護柵が同じ条件で比較したものを図-9に示す。衝突波力 F_{ii} は同一条件の設定であっても測定結果のばらつきが波力 F に比べて大きいため、 F_{ii} は条件毎に10回の計測値を、 F は平均値を用いて図示している。なお、衝突波力と波力の全実験条件の変動係数はそれぞれ0.14と0.05であった。本実験条件の範囲では衝突波力の方が波力より大きい。透過性の高いワイヤー柵B5に作用する衝突波力は、漂流物が無い状態で柵B5が受ける最大波力 F に比べてかなり大きく、その変動範囲も F の約8～25倍と大きい。一方、B1～B4の透過性の低い防護柵の衝突波力はそれぞれの防波柵の波力の1～2倍

図-9 各種柵の衝突波力 F_{it} と波力 F の比較 図-10 漂流物衝突による各種柵の作用力 F_{it}

の範囲に概ね収まる。

次に、衝突波力に与える柵の種類や遡上波の大きさの影響を把握するため、衝突波力 F_{it} を10回計測した中の最大値 $F_{it/10}$ を図-4の波力と同様に基準化して、柵の種類や相対浸水深による衝突波力の変化を図-10に示す。B1～B4の柵に比べて透過性の高いワイヤー柵B5の衝突波力は2倍程度大きく、波力の場合（図-4）と対照的である。前述のようにワイヤー柵の付近では漂流物はあまり減速しない（図-8）まま柵に衝突して、その際に短時間であるが大きな衝撃力を受けるため、ワイヤー柵の衝突波力は波力よりかなり大きくなる。一方、遮蔽率70%以上の透過性の低い柵の付近では、前述した反射波を形成する水塊の一部がコンテナと柵の間に介在して、漂流物はある程度減速しながら（図-8）柵に衝突するため、衝突に伴う衝撃的な力は比較的小さくなる。被衝突物体の透過性の違いによる衝撃力の変化や緩衝効果については、松富・白鳥（1994）が流木の最大衝撃力に関する実験結果において指摘しているが、本実験でも同様の特徴が認められた。

相対浸水深が $\eta_0/H_B=0.46$ においては柵B4やB3、 $\eta_0/H_B=0.69$ においては柵B1～B3、 $\eta_0/H_B=1.01$ においては波返しのある柵B2がそれぞれ衝突波力 $F_{it/10}$ を低く抑える傾向が図-10に見られる。この傾向は F_{it} の10回の平均値でも同様

図-11 波力・衝突波力と相対浸水深との関係

図-12 漂流物による作用力の増分と相対浸水深との関係

に確認されており、衝突波力を全体的に低減するのに優れた柵の種類は相対浸水深によって変わることが分かる。ただし、衝突波力は図-9に見られるようにばらつきの範囲が広いいため、漂流物の柵への衝突状況に左右される側面も大きい。

最大波力 F および衝突波力 $F_{it/10}$ を入射波の浸水深に対応する静水圧の全圧力で基準化して、相対浸水深との関係を示したものを図-11に示す。相対浸水深が柵高の半分程度あたりを境にB1やB4柵の基準化波力の相対浸水深による増減が変わる。相対浸水深が実験計測した範囲より浅くなると、コンテナは柵に衝突しなくなり、衝突波力は波力の値に近づくと考えると、基準化した衝突波力も波力と同様の变化傾向にあると見込まれる。遮蔽率100%の不透過壁B1に比べて遮蔽率70%の柵B4の波力は30%前後小さくなるが、両者の衝突波力 $F_{it/10}$ は相対浸水深により大小が多少変わるものの同程度になることが分かる。

最後に、津波漂流物によって防護柵の受ける荷重がどの程度増すかを把握するために、相対浸水深や柵の種類に対する衝突波力と波力の差の変化を図-12に示す。なお、この漂流コンテナによる柵の作用力の増分は図中ではコンテナ重量 m_{cg} と柵幅 b を用いて基準化している。漂流物による作用力の増分は柵の種類や遡上波の規模に

よってかなり大きく変化することが分かる。本実験条件の範囲では、相対浸水深とともに作用力の増分も大きくなる。透過性の低い柵の方が漂流物による作用力の増分を抑制できる傾向にあるものの、相対浸水深によって優位な柵の種類が変わる。波返しをついた柵B2は遡上波の入射波高が柵高の7割から同程度の範囲において作用力の増分を抑制するのに効果的で、コンテナ重量の約2.5～4.5倍の増分に留めている。柵高の半分程度の遡上波の場合、透過性の低い柵B1～B4の漂流物による作用力の増分はコンテナ重量の2倍程度以下に収まる。一方、ワイヤー柵B5に加わる漂流コンテナによる作用力はコンテナ重量の10～35倍とかなり大きい。以上より、入射波高が柵高と同程度までの遡上波に対しては、防護柵のような壁状の構造物の衝突力や津波力には構造物の透過性の影響が重要であることが分かった。

5. 結論

本研究は、直立護岸の背後陸上域に設置された津波対策防護柵に作用する波力と漂流物の衝突力の基本特性を明らかにするために、入射波高が柵高と同じ高さまでの遡上波を対象に、各種形式の防護柵とコンテナ漂流物に関する模型実験を行った。ここで主な結果をまとめて結論とする。

遡上波による波力は遮蔽性の高い柵ほど増加するが、同時に柵背後域の浸水低減効果は高まる。柵高の概ね半分以下の遡上波に対して遮蔽率70%以上の防護柵は背後域の浸水流の運動量を約6割以上低減し、柵高と同程度の遡上波でも4割近く運動量を減少させる。

柵高の半分以下の遡上波の場合、防護柵による浸水流低減率は不透過壁の波力に対する各種柵の波力の比とほぼ一致する。柵の天端を越流するような遡上波になると、各種柵の波力は不透過壁の波力に近づき、遮蔽性の高い柵ほど浸水低減率の低下が著しくなる。

20ft満載コンテナの側面から津波が作用した場合、浸水深がコンテナ高の半分程度になると波速の約8割、コンテナ高と同程度になると波速と同じくらいまでコンテナは加速する。遮蔽性の高い防護柵の手前では、漂流物は反射波に干渉され、減速し、衝突力が緩和される。

漂流物を伴う遡上波による作用力（衝突波力）は遮蔽性の高い柵の方が小さくなる傾向にあり、波力と対照的である。遮蔽率70%以上の防護柵の衝突波力は波力の1～2倍の範囲にある。柵の種類によって衝突波力を平均的には下げられるが、衝突波力のばらつきの範囲が広いので、漂流物の柵への衝突状況に左右される側面もある。

謝辞：水理模型実験の実施に当たっては、(株)日本パーツセンターの松本光徳さん、当時金沢大学水工学研究室の大学院生の五十嵐美咲さん、学部生の千葉泰志さん、和田卓磨さんの協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 有川 太郎・大坪 大輔・中野 史丈・下迫 健一郎・石川 信隆 (2007)：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第54巻，pp.846-850。
- 株田 真也・齋藤 武久・古路 裕子・中口 彰人・石田 啓 (2013)：防波柵による津波浸水流の低減効果及び波力に関する実験的研究，土木学会論文誌B3（海洋開発），Vol. 69（2），pp.I_323-I_328。
- 株田 真也・齋藤 武久・古路 裕子・中口 彰人・石田 啓 (2014)：透過型の津波対策防護柵による浸水低減効果と波力に関する実験的研究，土木学会論文誌B3（海洋開発），Vol. 70（2），（印刷中）。
- 松富 英夫 (1989)：流木を伴う碎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・白鳥 雅之 (1994)：サージ・フロントに伴う流木の最大衝撃力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第41巻，pp.811-815。
- 松富 英夫 (1999)：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文誌，No.621/II-47，pp.111-127。
- 水谷 法美・山口 聡・宮島 正悟・富田 孝史 (2004)：津波によるエブ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)：エブ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。
- Thomas, S. and Cox, D. (2012)：Influence of finite-length seawalls for tsunami loading on coastal structures, J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng., Vol.138, No.3, pp. 203-214。
- Linton, D., Gupta, R., Cox, D., van de Lindt, J., Oshnack, M., and Clauson, M. (2013)：Evaluation of tsunami loads on wood-frame walls at full scale, J. Struct. Eng. Vol.139, No.8, pp.1318-1325。