



建築物に作用する津波漂流物衝突時の衝撃外力

浅井竜也¹⁾、松川和人²⁾、崔琥³⁾、中埜良昭⁴⁾

- 1) 学生会員 東京大学大学院工学系研究科、大学院生 修士 (工学)
e-mail : asai-t@iis.u-tokyo.ac.jp
- 2) 正会員 東京大学生産技術研究所、助教 博士 (工学)
e-mail : mtkw@iis.u-tokyo.ac.jp
- 3) 正会員 東京大学生産技術研究所、助教 博士 (工学)
e-mail : choiho@iis.u-tokyo.ac.jp
- 4) 正会員 東京大学生産技術研究所、教授 工博
e-mail : iisnak@iis.u-tokyo.ac.jp

要 約

本稿では、津波漂流物が衝突し得る建築物の応答に着目した構造設計法を確立することを目的に、船舶およびコンテナが建築物に衝突する際の衝撃外力について、津波来襲時の記録映像および関連する既往研究に基づき検討した。その結果、津波漂流物の衝突速度が津波流速と等しいこと、漂流物はその長手方向に衝突すること、その衝突位置が十分剛と仮定した床であること、をそれぞれ仮定した衝突を想定し、その時に生じる衝撃外力を、船首の破壊強度およびコンテナの衝撃外力を評価する既往研究に基づき、矩形パルス波により設定することを提案した。

キーワード： 津波、漂流物、衝撃外力、津波避難ビル

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震による甚大な津波被害を鑑み、津波外力に対する建築物の設計法が国土交通省告示に示されたり。本設計法には、津波波力や浮力に対する定量的な安全性検討手法は示されているものの、津波漂流物衝突時の衝撃外力に対する定量的な安全性検討手法は示されていない。過去の津波被害調査結果によると、津波漂流物の衝突に起因する建築物の被害事例が報告されており²⁾、その衝撃外力に対する構造設計法の確立が急がれる。津波漂流物衝突時の衝撃外力については、衝突実験によりその定量的な評価が試みられているが^{例えば3)~5)}、未だ統一的な設計式を得るには至っていないのが現状である。そこで本稿では、津波来襲時の記録映像資料および関連する既往研究に基づき、津波漂流物衝突時の衝撃外力について検討を行う。

本検討は、衝突に至る以前の漂流過程と、その後の衝突過程に分けて行うこととした。すなわち、まず津波漂流物の漂流挙動を考察することによって漂流物の衝突速度や方向などの衝突条件を定め、次にその条件のもとに生じる衝突挙動を考察することによって衝撃外力を検討する。なお、津波来襲時には瓦礫や自動車、家屋など様々な漂流物が見られたが、ここでは広く一般に漂流が確認され、かつ衝突により建築物の応答に重大な影響を及ぼし得る比較的大規模の漂流物として、船舶およびコンテナを検討対象とする。

2. 津波漂流物の漂流過程の検討

津波漂流物衝突時の衝撃外力は、漂流物が有する運動量（すなわち漂流物の質量と速度の積）や、漂流物および被衝突物の剛性および強度により、その大きさや継続時間が変化する。そのため、漂流物の漂流過程により定まる衝突時の条件において、主に衝突速度、衝突時の方向、および衝突位置、の三要素が衝撃外力を左右する重要な要因であると考えられる。しかし、漂流物の複雑な漂流挙動を正確に予測することは一般に困難なため、ここでは津波来襲時の記録映像資料および関連する既往研究を総合的に勘案し、以下のように衝突時の三条件を定めることとする。

2.1 津波漂流物の衝突速度

まず、津波漂流物の衝突速度について、津波来襲時の記録映像⁶⁾を用いて津波流速と漂流物の漂流速度を比較することにより、例えば気仙沼市では津波流速が5.7m/s程度の場所において、総トン数305トンの船舶が5.6m/s程度で漂流するなど、漂流物が概ね津波流速に等しい速度で漂流することを確認した。また、銚子市における船舶が海岸構造物に衝突する記録映像⁷⁾では、船舶が漂流速度を保ったまま、減速することなく海岸構造物に衝突する様子を確認できる。一方で、漂流距離と漂流速度の関係を検討した解析結果においても、漂流距離の増加とともに漂流速度は流速と同程度に収束することが確認されている⁸⁾。よって、漂流物の衝突速度は流速に等しいとして衝撃外力を設定する。

2.2 津波漂流物の衝突時の方向

次に、漂流物の衝突時の方向については、船舶およびコンテナの長手方向に衝突する場合、短手方向に衝突する場合、両者の中間的な状態として斜め方向に衝突する場合、のいずれも想定されるが、ここでは衝撃外力が最大となる漂流物の方向として、以下の検討事例を参考にその衝突方向を設定した。すなわち、まず、棒状の物体が衝突するときの応力波に着目して得られる衝撃外力は、材軸方向での衝突時の方が、材軸と直交する方向での衝突時よりも大きいことが理論的に考察されている⁹⁾。また、津波来襲時の記録映像資料においても、船舶が船体の長手方向に衝突して建築物に損傷を与えた事例が複数確認された^{例えば2), 10)}（図1にその事例を示す）。一方、漂流物が斜め方向に衝突する時には、衝突により漂流物が回転し、その回転エネルギーに衝突エネルギーが消費され、長手方向での衝突時に比べ衝撃外力が低減されることが指摘されている⁸⁾。以上を勘案し、津波漂流物の衝突は、衝撃外力が最も大きいと想定される長手方向での衝突を考慮することとする。



図1 船首衝突により崩壊した建築物（釜石市）²⁾

2.3 津波漂流物の建築物における衝突位置

漂流物の建築物における衝突位置については、漂流物の衝突により外壁が損傷した事例が複数確認されたものの（図2、図3にその事例を示す）、漂流物が床スラブ位置に衝突する場合には、外壁に衝突する場合に比べて被衝突部材の局所的な損傷が少ないため、建築物全体の応答に影響を与えられ、衝撃外力の力積および荷重が、外壁に衝突する場合よりも大きくなることが想定される。よって、ここでは、十分剛と仮定した床位置に漂流物が衝突することを想定し、漂流物の衝突エネルギーが被衝突部材の損傷により吸収される効果は考慮しないこととする。

以上に示した漂流物の衝突条件のもと、船舶およびコンテナの衝突による衝撃外力を検討する。



図2 漂流物の衝突による外壁の損傷（名取市）



図3 漂流物の衝突による外壁の損傷（名取市）¹¹⁾

3. 津波漂流物の衝突過程の検討

3.1 船舶の衝突による衝撃外力

一般に、一様金属棒が、その質量に比べ十分大きな質量を有する金属体に対し、材軸方向に弾性衝突するとき、衝突に要する時間 τ [s]は応力波が部材内を往復するのに要する時間として求まる¹²⁾ (式(1))。

$$\tau = 2L / C_0 \quad (1)$$

ここで、 C_0 は一次元縦波速度[m/s]を、 L は材長[m]を、それぞれ表す。式(1)により得られる衝突時間 τ に着目して計画された縮小模型実験により、船舶とコンクリートとの衝突による衝撃外力波形が得られている^{13), 14)}。しかし、本実験では船舶は弾性体として見なされており、得られた衝撃外力の最大荷重が、船舶の船側外板（船舶の外側面を構成する鋼製部材）の座屈強度により定まる船首の破壊強度 P_{cr} [tf]¹⁵⁾より大きいため、実際の船舶の衝突では船首が破壊し、その強度により力積波形が定まると考えられる。船首の破壊強度は船側外板の厚さの関数として表されており、ここに総トン数 T_G [ton]と船側外板の厚さとの統計的な関係を適用すると、破壊強度 P_{cr} は総トン数 T_G の関数として表される¹⁶⁾ (式(2))。さらに、文献15)では、船首の変形が進行する間の荷重は P_{cr} でほぼ一定となることが実験により確認されている。よって、最大荷重 F [kN]を船首の破壊強度 P_{cr} によって定め (式(3))、さらに衝突が継続する間はその荷重が一定に保たれること、および完全非弾性衝突（反発係数 $e = 0$ 、よって力積は mv ）すること、の二つを仮定すると、荷重作用継続時間 τ は運動量 mv を用いて式(4)により求まるため、船舶の衝突による衝撃外力波形を式(3)および式(4)より得られる矩形パルス波とした。

$$P_{cr} = 1.17 T_G^{1/3} (0.82 T_G^{1/6} + 1)^3 \quad (2)$$

$$F = P_{cr} g \quad (3)$$

$$\tau = mv / F \quad (4)$$

ここで、 m は漂流物の質量[t]を、 v は漂流物の衝突速度[m/s]を、 g は重力加速度[m/s²]を、それぞれ表す。式(3)および式(4)を用いて荷重 F および荷重作用継続時間 τ を求めると、例えば総トン数200トンの船舶（排水量を300tと仮定¹³⁾）が3m/sで衝突するとき、それぞれ1800kNおよび0.5sとなる。

3.2 コンテナの衝突による衝撃外力

コンテナが長手方向に衝突するときの衝撃外力については、実大衝突実験によりその時刻歴波形が得られており、最大荷重 F を、上述の応力波が伝搬する有効な断面を考慮したコンテナの有効剛性 k [kN/m]を用いた式(5)により、荷重作用継続時間 τ を、完全弾性衝突（反発係数 $e = 1$ 、よって力積は $2mv$ ）を仮定した式(6)により、それぞれ求めた矩形パルス波と概ね一致することが確認されている⁵⁾。

$$F = \sqrt{km} v \quad (5)$$

$$\tau = 2mv/F \quad (6)$$

よって、ここでもコンテナの衝突による衝撃外力波形を式(5)および式(6)により定まる矩形パルス波とし、同二式を用いて荷重 F および荷重作用継続時間 τ を求めると、例えば20ftコンテナが3m/sで衝突するときには、それぞれ1300kNおよび0.01sとなる。

4. まとめ

津波漂流物となり得る船舶およびコンテナが建築物に衝突する際の衝撃外力について、津波来襲時の記録映像および関連する既往研究に基づき検討した。その結果、漂流物の衝突速度は流速に等しいとし、船舶は式(3)および式(4)、コンテナは式(5)および式(6)によりそれぞれ求まる最大荷重と荷重作用継続時間を有する矩形パルス波により衝撃外力を設定することを提案した。

謝 辞

本研究は日本学術振興会 科学研究費補助金（研究課題番号15H04072、研究課題名：津波漂流物の衝突が建築物の応答に及ぼす影響とその作用荷重評価に関する研究、研究代表者：中埜良昭）の助成を受けたものです。関係各位に謝意を記します。

参考文献

- 1) 国土交通省告示：告示第1318号、2011年
- 2) 港湾空港技術研究所：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No.1231、2011年
- 3) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性、土木学会論文集、No.621(II-47)、1999年、pp.111-127.
- 4) 水谷法美、宇佐美敦浩、小池竜：津波による小型船舶の漂流特性とその衝突力に関する実験的研究、海洋開発論文集、第23巻、2007年、pp.63-68.
- 5) Aghl, P.P., Naito, C.J., Riggs, H.R. :Full-Scale Experimental Study of Impact Demands Resulting from High Mass, Low Velocity Debris, Journal of Structural Engineering, ASCE, 140 (5), 2014, 04014006.
- 6) Sankei News：気仙沼湾に押し寄せる大津波が湾内を回流する様子
<https://www.youtube.com/watch?v=v1V3wCpdAvY>
- 7) NHK：災害報道、2011年3月11日
- 8) 沿岸技術研究センター、寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン、2014年
- 9) Riggs, H.R., Cox, D.T., Naito, C.J., Kobayashi, M.H., Aghl, P.P., Ko, H.T., Khowitar, E. :Water-Driven Debris Impact Forces on Structures: Experimental and Theoretical Program, Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2013, 11128.
- 10) Sankei News：八戸海上保安部撮影 津波映像 <https://www.youtube.com/watch?v=QRlyFavmLY4>
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所、建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）東日本大震災、建築研究資料、No.132、2011年
- 12) 横山隆：衝撃工学の基礎と応用、共立出版、2014年
- 13) 松川和人、崔琰、板倉正英、浅井竜也、中埜良昭：津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づくRC造建築物の応答特性 その1 縮小試験体を用いた振り子衝突実験、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、2015年、pp.311-312.
- 14) 板倉正英、崔琰、松川和人、浅井竜也、中埜良昭：津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づくRC造建築物の応答特性 その2 実験結果に基づく衝撃外力評価と非線形時刻歴応答解析による建物応答評価、日本建築学会学術講演梗概集、構造II、2015年、pp.313-314.
- 15) 長沢準、有田喜久雄、谷政明、岡修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について、日本造船学会論文集、第142号、1977年、pp.323-332.
- 16) 庄司邦昭、高林時子：橋脚衝突時の船首強度計算式に対する船体所寸法の影響、日本航海学会論文集、第101号、1999年、pp.201-209.