津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験

Large Scale Tests on Concrete Wall Destruction by Tsunami with Driftwood

有川太郎¹・鷺崎 誠²

Taro ARIKAWA and Makoto WASHIZAKI

The present study aimed to clarify the influence of the driftwood collision to the destruction of the concrete slab due to tsunamis. The applicability of the empirical formula based on Hertz theory was examined by the large scale collision experiments on the concrete slab with timber in the air and driftwood due to tsunami. The duration time calculated by the formula was good agreement with that obtained from the experimental record of the strain gauge when colliding. It indicated that the impulsive force due to drift wood collision could be estimated by using this formula. Moreover, it was clarified that the destructive force on the concrete slab increased by the collision of driftwood compared with only tsunamis.

1. はじめに

津波の破壊力は、流体力だけでなく、漂流物の衝突力にも大きく影響される。そのため、漂流物の衝突力実験が行われ、いくつかの算定式が提案されている。たとえば、漂流したコンテナに対しては水谷ら（2006）が、流木に対しては松富（1999）がそれぞれ提案している。

その一方で、衝突力は、材質・構造形式の影響を受けることから、たとえば避難ビルなどによく使用されるコンクリート版などに衝突した際に、どのような挙動を示すかということを知っておく必要がある。そのため、著者ら（2007）は、縮尺1/5程度の鉄製のコンテナ模型を用いて、コンクリート版に対する衝突実験を実施し、Hertzの式による算定手法を提案した。

本研究では、流木のコンクリート版に対する破壊力に焦点をあて、流木の衝突によるコンクリート版の破壊・変形に関する大規模な実験を行い、コンクリート版に対する衝突力の評価式の提案およびコンクリート版の挙動を明らかにすることを目的とした。

2. 既往研究

(1) 松富（1999）

松富（1999）は、水路実験、気中での衝突力実験および理論的な考察から衝突力 F について、流木の特性として、 γ :単位体積重量、 D :直径、 L :長さ、 σ_f :降伏応力、 v :衝突速度とし、

$$\frac{F}{\gamma D^2 L} = 1.6 C_{MA} \left(\frac{v}{\sqrt{gD}} \right)^{6/5} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{2/5} \dots\dots\dots (1)$$

を提案している。ここで、 C_{MA} は水の全影響を含めた見かけの質量係数、 g は重力加速度である。 C_{MA} は、段波やサージの状態では1.7、定常流では1.9としている。

(2) Hertzの式

著者ら（2007）では、コンテナがコンクリート壁面に作用したときの衝突力に対してHertzの式を適用している。Hertzの式は式（2）で表される。

$$F = \gamma_p \chi^{2/5} \left(\frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{3/5} v^{6/5}$$

$$\chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, k_n = \frac{(1 - \nu_n^2)}{\pi E_n}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a :衝突面半径の1/2、 E :ヤング率、 ν :ポアソン比、 m :質量、 v :衝突速度であり、 n :1, 2を示し、添え字1, 2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、著者ら（2007）では、0.25を採用している。被衝突体の質量は衝突体の質量より大きいため $\tilde{m} \equiv m_1$ とした。

式（1）と比較するため、式（1）に丸太の質量 m を、

$$m = \gamma D^2 L \dots\dots\dots (3)$$

として代入すると、最終的には、

$$F = 1.6 C_{MA} \left(\frac{4}{\pi g} \right)^{3/5} \sigma_f^{2/5} m^{3/5} D^{1/5} v^{6/5} \dots\dots\dots (4)$$

を得ることができる。これは式（2）と比較すると、 $\sigma_f^{2/5} m^{3/5} D^{1/5} v^{6/5}$ は同じであり、係数部が異なる。

1 正会員 博(工) 独立行政法人港湾空港技術研究所
海洋・水工部
2 正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所
海洋・水工部

定式が過大評価側にあることを認めたくえで提案しているため、ほぼ妥当な結果であると考えられる。ただし、差としては3倍程度のオーダーであることから、衝突力としては誤差の範囲ともとらえることはできる。

以上より、式(2)を用いた木材の衝突力評価が妥当であることが確認できた。

4. 津波による漂流木の衝突試験

(1) 実験方法

図-4のように段積にした丸太を津波に作用させ壁面に衝突させる。写真-2は丸太を4段積にしたところを正面から見たときの様子である。木材は全部で10本用いた。木材の平均の大きさは、直径0.42m、長さ1.31m、重さ102.25kgであった。コンクリート版は、図-1に示すものを用い、上部の版厚は12cmとした。津波は、津波高が沖側で1.0mであり、押波初動で片振幅20sとした。測定は2000Hzである。本実験においてもヒビはなかった。

(2) 実験結果

写真-3は、津波を背後から受けた丸太群が壁面に衝突するところを真上からハイスピードカメラで撮影したときの様子である。丸太群全体が一気に押されて壁面に衝突していることがわかる。図-5および図-6は、コンクリート壁体の底面から0.5mと、1.1mの場所に設置した波圧計の時系列と衝突時の拡大図である。

図-5および図-6より、波圧計P2には54.6～54.7sの間

図-4 津波による丸太衝突実験のポンチ絵

写真-2 丸太をセットした様子（正面）

に、波圧計P5には55s～55.1sの間に、圧力が正しくでているかどうかは定かではないものの、それぞれ丸太が直接波圧計に衝突した痕跡がある（図中矢印）。写真-3と

写真-3 丸太群が衝突する瞬間（上54.658秒、下54.769秒）

図-5 波圧の時系列（上：高さ0.5m、下：高さ1.1m）

図-6 波圧の時系列の拡大（上：高さ0.5m、下：高さ1.1m）

合わせて考察すると、54.6s～54.7sの間で一度丸太群が壁面に衝突し、その少し後に、木材がP5にもう一度衝突したと考えられる。

図-7は、衝突が生じた54sから55sのC1～C6の位置における縦方向のひずみゲージの時系列データである。横方向のひずみゲージは反応がなかった。よって水平に折れ曲がる方向の曲げ変形が卓越したことになる。これを見ると54.7s頃に衝突に対するゲージの反応が確認できる。図-8は、C3のゲージについた拡大したものである。これを見ると、最初の谷部の作用時間は0.009s (54.706s-54.715s)であり、峰部の作用時間は0.006s (54.715s-54.721s)であることがわかる。

今回、ハイスピードカメラから得られた衝突速度は、およそ1.1m/sであった。これを元にして式(2)から算出される作用時間を求める。コンクリートおよび木材のヤング率を 20×10^9 (N/m²)、および 10×10^9 (N/m²)とし、ポアソン比を0.2および0.3とした。重さとしては10本全体の重さを用いる。衝突面の半径 a は、平均半径を a_{ave} 、本数を N として、

$$a = a_{ave} \sqrt{N} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-7 ひずみゲージの時系列 (C1～C6)

図-8 ひずみゲージの時系列拡大 (C3)

とした。また、松富 (1999) にならい、

$$\tilde{m} = C_{MA} m \quad \dots\dots\dots (7)$$

と見かけの質量係数をかけた質量を用いる。式(7)を式(2)右辺に代入して F を求め、式(5)左辺に代入して作用時間を求めた結果0.00749sとなり、ほぼ実験値に等しい値が得られた。 C_{MA} はサージタイプの1.7とした。よって、式(2)を用いて衝突力が算定できることがわかる。ちなみに、丸太群の漂流衝突力は、計算上では255.3kNとなり、丸太群全体の質量(1022.5kg)の25.5倍に相当する力であった。 C_{MA} を1.0とした場合は、衝突力は185.7kN、作用時間は0.00606sとなる。

5. 漂流木によるコンクリート壁面破壊試験

(1) 実験方法

単純平板を用いて、津波力だけの場合と漂流物がある場合でのコンクリート壁面破壊挙動の違いを調べる。コンクリート版は、壁厚6.0cmと7.5cmの2種類とした。設計圧縮強度は21N/mm²であった。版は、幅220cm、高さ200cmとし、図-9のように水路内に設置した。図-9のなかでハッチングしている両端の長方形は重さ11トンでコンクリート版を支える(写真-4)。鉄筋は6mmの単鉄筋を300mmピッチで縦・横に入れ、ひずみゲージ、波圧計を取りつけ、2000Hzで測定した。津波の大きさは4.節と同じものを用いた。

図-9 コンクリート版の設置図 (背面より、単位:mm)

写真-4 模型設置の様子 (背面より)

写真-5 折れ曲がったコンクリート版 (6cm, 上から)

(2) 実験結果

6.0cmの版厚の場合には、丸太無しで津波だけを作動させた状態で、1回目より版の中央部に曲げ破壊によるヒビ割れが入り、3回目には、背面のヒビが大きくなり、4回目で写真-5のように完全に折れた。この結果より、版厚6cmの平板の曲げ耐力と1.0mの津波による波力がほぼ等しいと考えられる。

次に版厚7.5cmに対して、丸太無しで津波を4回作用させ、その後、丸太を4本、版の前面に設置して実験を行った。図-10は、ヒビの入った場所を示し、太線は丸太無しのときにできたヒビ、細線は丸太有りのときにできたヒビを示す。図-11は、図-10に示す番号の場所におけるヒビの幅の進展具合を示すものである。これを見ると7.5cmの版厚でも曲げ破壊が生じているが、流木が作用することによりヒビ幅の進展率が上昇していることがわかる。特にNo.3, No.4, No.5の場所では、ヒビの進展度合いが2倍以上になっており、この部分に流木が作用している影響と考えられる。

定量的には、流木4本の衝突力は、本実験では式(2)から134kNが得られる。一方で流体力は、丸太の設置が無い場合の版に作用する波圧分布から(図-12)、版の幅が2.2mであるので、版の下部50cmには衝撃段波波力として30kNから50kN程度作用していると推定される。流木の衝突力は、その3~4倍程度が作用すると推定されるため、版全体を考えると進展度合いが2倍程度になることは妥当な結果と思われる。よって、流木の衝突による破壊を検討する際に式(2)による評価が妥当であることを示している。

6. 結論

流木の衝突によるコンクリート版の破壊判定の際に使用することが可能な算定式を提案し、大規模な破壊・変形実験によりその妥当性を確認した。今後は、破壊過程の定量化が課題となる。

図-10 コンクリート版のヒビ割れ場所 (背面より)

図-11 ヒビ割れの進展の様子 (背面)

図-12 丸太無しの場合の波圧分布

参考文献

- 有川太郎・大坪大輔・中野史文・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.
- 松富英夫 (1999)：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No.621/II-47，pp.111-127.
- 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.791-795.