

津波漂流物の衝突荷重算定式に関する調査 Survey on Impact Load Formula for Tsunami Drifting Objects

○永吉琉莞¹, 北嶋圭二²
*Rui Nagayoshi¹, Keiji Kitajima²

Abstract: This study focuses on estimating collision loads from tsunami debris, which impose significant forces on buildings and structures, often leading to their destruction. A comparison between the collision loads from the tsunami's leading edge and debris, as well as a review of the formulas outlined in the Architectural Institute of Japan's load guidelines, was conducted. The types of debris, underlying principles, and application ranges of each formula were examined. Future research should explore methods that consider both debris and tsunami leading-edge collision loads.

1. はじめに

津波は、地震や火山噴火、海底地すべりなどの地殻変動に伴って発生し、沿岸地域に壊滅的な被害をもたらす自然災害の一つである。現在、南海トラフ地震による巨大津波の襲来が懸念されている。巨大津波による漂流物の衝突は、建築物や構造物に大きな荷重を与え、それらの破壊や崩壊を引き起こす主な要因となる。

これまでに、漂流物の衝突により建築物や構造物に作用する津波漂流物の衝突荷重に関する研究が多く行われてきた。しかし様々な漂流物による衝突荷重の算定式が提案されている中で、その適用範囲が明確でない場合が散見される。

そこで、本研究では津波先端部の衝突荷重と津波漂流物の衝突荷重を既存の算定式を用いて比較したうえで、衝突荷重算定式を整理する。また、荷重指針の漂流物衝突荷重算定式の適用範囲を調査するとともに、今後の検討課題を明確にすることを目的とする。

2. 津波先端部衝突荷重と漂流物衝突荷重の比較

津波が建築物に衝突する際の荷重は、津波先端部の衝突荷重と漂流物の衝突荷重に分けられる。そこで、建築物に作用する衝突荷重を既存の算定式を用いて算定した。Fig.1 に津波先端部の衝突を想定した概念図、Fig.2 に漂流物先端部の衝突を想定した概念図を示す。また、被衝突物の概要を Table 1 に示す。

津波先端部の衝突荷重は、式(1)より算定し、漂流物

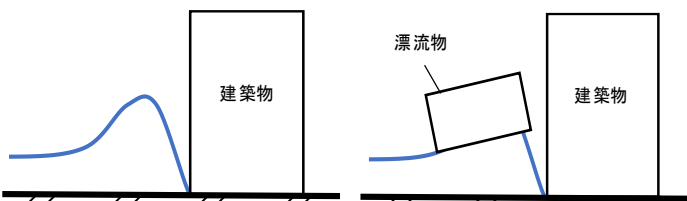


Fig.1 Conceptual diagram of impact load due to Tsunami

Fig.2 Conceptual diagram of impact load due to drifting objects

による衝突荷重を FEMA¹⁾の算定式(式(2))より算定する。また、その際の津波の与条件は津波高さ H を 5 [m]、最大浸水深 η_{max} を 15[m]、最大流速 V_{max} を 7[m/s]とし、算定に用いる漂流物概要を Table 2 に示す。

$$F = \frac{C_{D3}}{2} \rho B \eta_{max} v_{max}^2 \quad (1) \quad \left(C_{D3} = 1.3 + 6.3 \frac{\eta_{max}}{D} \right)$$

$$F = C_m v_{max} \sqrt{km} \quad (2)$$

F: 衝突荷重(kN) ρ : 海水の密度(ton/m³) B: 建築物の見付け幅(m)
 η_{max} : 最大浸水深(m) V_{max} : 最大流速(m/s) D: 海岸線からの距離(m)
 C_m : 付加質量係数(2.0推奨) m: 漂流物の質量(kg) k: 漂流物の有効剛性
 C_{D3} : 津波波力算定のための係数

算定した結果、津波先端部の衝突荷重が 24,751[kN]、コンテナ(20ft)の衝突荷重が 25,432[kN]、コンテナ(40ft)の衝突荷重が 22,003[kN]であった(Table 3)。Table 3 より、建築物に作用するコンテナ(20ft)による衝突荷重は、津波先端部とコンテナ(40ft)の衝突荷重を上回っている。このことから、漂流物の衝突荷重は、漂流物自体の質量と剛性により津波先端部の衝突荷重の影響より大きくなるケースが存在し、津波避難ビル等の設計を行う際に考慮する必要がある。よって、3章では衝突荷重推定式をはじめ、FEMA の算定式(式(2))以外の漂流物の衝突荷重算定式について述べる。

3. 漂流物衝突荷重算定式

3.1 荷重指針における漂流物の衝突荷重算定式

日本建築学会の建築物荷重指針²⁾には、FEMA¹⁾、有川ら³⁾、松富⁴⁾、池野ら⁵⁾、水谷ら⁶⁾、の漂流物の衝突荷重算定式が記載されている。各算定式の対象漂流物、基本原理、および適用範囲を Table 4 に示す。松富⁴⁾、池野ら⁵⁾、水谷ら⁶⁾は運動量と力積、そしてFEMA¹⁾、

Table 1 Building outline		Table 2 Drifting objects outline			
建物用途	: 事務所ビル	質量(kg)	剛性(N/m)		
構造形式	: RC造	コンテナ(40ft)	3,800 6.5 × 10 ⁸		
建物規模		コンテナ(20ft)	2,200 1.5 × 10 ⁹		
階数	: 地上5階	Table 3 Calculation results			
階高	: 全フロアとも3.5m				
スパン		津波	コンテナ(20ft)	コンテナ(40ft)	
X方向	: 6m × 5=30m	最大荷重(kN)	24,751	25,432	22,003
Y方向	: 6m × 5=30m				

1: 日大理工・院(前)・海建 2: 日大理工・教員・海建

有川ら³⁾は運動方程式の基本原則に基づいて算定式を提案している。また、各算定式の適用範囲を比較することで、算定に用いている基本原則が同じであるにもかかわらず、適用性の有無、算定の対象とすることができる漂流物の条件に大きく差が生まれることを確認できた。

3.2 衝突荷重推定式

漂流物の衝突荷重の評価方法について、これまでも数多くの衝突荷重推定式が提案されており、その多くは式(3)によって評価されている⁷⁾。

$$F = CV^l K^m M^n \quad (3)$$

F: 衝突荷重(N) K: 有効剛性(N/m) V: 衝突速度(m/s)
C: 比例定数 M: 質量(漂流物)(kg) L,m,n: ベキ乗数

式(3)のうち、Kは衝突体と非衝突体の有効剛性が用いられており、漂流物の構造物への衝突を2物体の振動系に置き換えることにより衝突荷重を導出している。衝突体が被衝突体へ衝突する際、衝突時間が短いことから減衰を無視できるものとする、漂流物の衝突は、衝突体の剛性を k_l 、被衝突体の剛性を k_t と表すことでFig.3のような振動モデルにモデル化を行うことができる。Fig.3のモデルはニュートンの第2法則(運動の法則)とフックの法則より求めた式(4)の1自由度の非減衰振動方程式で表すことができる。また、式(4)の \hat{k} は衝突体の剛性 k_l 、被衝突体の剛性 k_t の衝突時の等価な有効剛性を示しており、式(5)より算定する。

$$m_l \ddot{x} + \hat{k}x = 0 \quad (4) \quad \hat{k}^{-1} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{k_t} \quad (5)$$

m_l : 津波漂流物の質量(kg) x: 衝突方向の変位量(m)
 \ddot{x} : 変位量の2階微分 k_l, k_t : 有効剛性(N/m) \hat{k} : 等価な有効剛性(N/m)

ここで、衝突開始時刻 t を0[s]、変位 x を0[m]、衝突速度を v [m/s]とすることで、式(4)の解は、式(6)で表すことができる。

$$x = v \sqrt{\frac{m_l}{\hat{k}}} \sin\left(\sqrt{\frac{\hat{k}}{m_l}} t\right) \quad (6)$$

m_l : 津波漂流物の質量(kg) \hat{k} : 等価な有効剛性(N/m)
 t : 衝突開始時刻(s) v: 衝突速度(m/s)

衝突荷重 F [N]は式(4)および式(6)より式(7)で求められ、その最大値として式(8)が与えられる。

$$F = m_l \ddot{x} = -m_l v \sqrt{\frac{\hat{k}}{m_l}} \sin\left(\sqrt{\frac{\hat{k}}{m_l}} t\right) \quad (7)$$

$$F = v \sqrt{m_l \hat{k}} \quad (8)$$

m_l : 津波漂流物の質量(kg) \hat{k} : 等価な有効剛性(N/m)
 t : 衝突開始時刻(s) v: 衝突速度(m/s)

式(8)より、漂流物の衝突荷重を評価するためには、その質量、衝突速度に加え、漂流物の有効剛性を把握することが重要である。また、式(8)では自動車や船舶等の今までの算定式では対象とされていなかった漂流物の衝突荷重の算定が可能となっている。

以上より、現在までに提案されている漂流物の衝突荷重算定式は漂流物の衝突荷重のみに着目したものであり、漂流物が衝突すると同時に建築物や構造物に作用すると考えられる津波先端部の衝突荷重については考慮されていない。

4. まとめ

本研究では、建築物や構造物に大きな荷重を与え、それらの破壊や崩壊を引き起こす主な要因となる漂流物による衝突荷重の算定式について、津波先端部の衝突荷重と漂流物の衝突荷重の比較、および日本建築学会の建築物荷重指針²⁾に示されている算定式^{1),3)-6)}について整理した。また、各算定式が対象としている漂流物の種類、基本原理、および適用範囲を整理し、衝突推定式を調査した。

5. 参考文献

- 1) FEMA: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuations, FEMAP646, 2012
- 2) 日本建築学会: 建築物荷重指針・解説(2015), 第10章 津波荷重, 日本建築学会, pp.584-586, 2015.2
- 3) 松富: 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/I-47, pp.111-127, 1999
- 4) 池野ら: 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, 土木学会, pp.721-725, 2003
- 5) 水谷ら: 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, 土木学会, pp.741-745, 2005
- 6) 有川ら: 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, 土木学会, pp.846-850, 2007
- 7) 真田ら: FRP船舶の衝突解析手法に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.78, No.2, pp.301-315, 2022

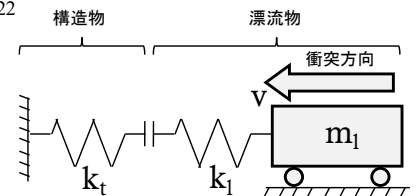


Fig.3 Impact of tsunami drifting objects on structures (vibration system model)

Table 4 Previous studies of proposed calculation methods

出典 (発行年)	漂流物	基本原理	適用範囲
FEMA ¹⁾ (2012)	流木 コンテナ	運動方程式	・衝突時のエネルギー減衰を考慮しない前提 ・衝突時に塑性変形を行う漂流物の荷重算定では、実現象を再現するような軸剛性を適切に定めれば 適用性 ○
有川ら ³⁾ (2007)	流木 コンテナ	運動方程式	・コンテナ:長さ1.21m,高さ0.52m,幅0.49m ・衝突速度:1.0~2.5m/s ・衝突体の剛性,被衝突体の剛性を含む ・対象としている漂流物であれば 適用性 ○
松富 ⁴⁾ (1999)	流木	運動量と力積	・水路:高さ0.5m,幅0.3m,長さ11.0m ・流木(丸太)の直径:4.8~12cm ・流木重量:305~8615gf ・衝突荷重に関する気中の実験 ・被衝突体の直近に衝突体がある(2.5m以内) ・上記仮定をした場合に 適用性 ○
池野ら ⁵⁾ (2003)	流木	運動量と力積	・縮尺1/100の模型実験 ・漂流物の形状:円柱,角柱,球 ・漂流物重量:0.588~29.792N ・縮尺より、 適用性 ×
水谷ら ⁶⁾ (2005)	コンテナ	運動量と力積	・縮尺1/75の模型実験 ・コンテナ長さ:20ftと40ft ・コンテナ重量:0.2~1.3N程度 ・遡上流速:1.0m/s以下 ・エブロン上で衝突力を算出 ・直近陸域からのコンテナに対する 適用性 ○