

流木の自由落下実験と水路模型実験の衝突荷重に関する検討

防衛大学校 ○竜川太志, 堀口俊行

1. 緒言

近年, 記録的な豪雨の増加に伴い, 流木災害の深刻化が指摘されている. 過去 40 年間の流木災害に関する調査では, 下流域へ流出する流木量が増加傾向にあることが報告されている. さらに, 令和 6 年度奥能登豪雨においても大量の流木が発生し, 砂防構造物や橋梁等に衝突することで被害が拡大した. このような災害において, 流木は堆積後の静的荷重として作用するだけでなく, 流下・衝突時には動的荷重として構造物に作用する点に特徴があり, その影響を適切に評価することが求められている.

流木衝突時に作用する荷重は, 質量や衝突速度に加え, 形状, 衝突姿勢, 材質, 含水状態など多くの要因に左右されるため, その定量的評価は容易ではない. これまでに, 気中での振り子式衝突実験や, 津波漂流物を対象とした実物スケール実験に基づき, 回帰式やヘルツ接触理論による評価が試みられてきた. しかし, 山地河川を流下する流木は重力の影響を受けながら運動するため, 自重の影響を考慮した評価が不可欠であり, 振り子式実験ではこの影響を十分に反映できないという課題がある. また, 津波漂流物を対象とした水路実験は海域での漂流・衝突現象を主眼としており, 山地河川における流木衝突現象にそのまま適用できるとは限らない.

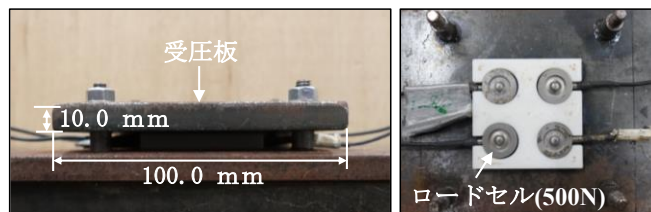
そこで本研究は, 流木衝突荷重の評価に向けた基礎的検討として, 模型規模における自由落下実験および水路模型実験を実施し, 気中衝突と流水中衝突における荷重特性の違いを比較する. さらに, これらの結果を既往の評価手法と対比することで, 現行評価手法の適用性と課題を明らかにすることを目的とする.

2. 実験の概要

2.1 実験装置

写真-1 に, 気中実験における衝突荷重計測装置を示す. 受圧板は十分な剛性を確保するため, 厚さ 10.0 mm の鉄板を用いた. 荷重計測には, 500 N ロードセル (LMB-A-500N-P) を 4 基使用し, 合計で 2,000 N まで計測可能とした.

水中実験に用いた実験水路を図-1 に示す. 実験には,



(a) 受圧板 (b) 500N ロードセル
写真-1 衝突荷重計測装置

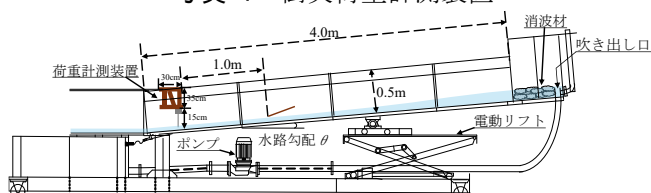


図-1 可変勾配型直線水路

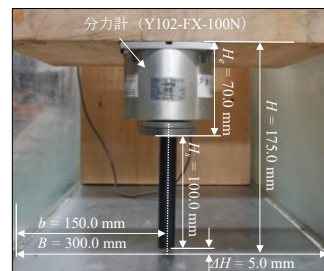


写真-2 荷重計測装置

表-1 流木モデル

材質		ラミン
長さ	l mm	180.0
直径	d mm	10.0
重量	w kg	0.011
比重	s	0.78

表-2 水中実験ケース

勾配 θ ($^{\circ}$)	流量 Q (L/s)
0	6.7
2	

可変勾配型直線水路 (水路長 4.5 m, 水路幅 0.3 m, 水路深さ 0.5 m) を使用した. 水路内には衝突対象として鋼管モデルを設置し, 写真-2 に示すように分力計 (Y102-FX-100N) に固定することで, 流木衝突時に作用する荷重を計測した. また, 流木は十分な速度を有した状態で鋼管モデルを衝突させるため, 上流側 1.0 m の位置から投入した.

2.2 流木モデルおよび実験ケース

表-1 に, 流木モデルの諸元を示す. 気中実験および水中実験では, 同一の材質および形状の流木モデルを使用した. 材質には, 比重が安定しており, 加工性に優れ, 寸法変化の小さいラミン材を用いた. また, 供試体は含水状態を再現するため, 実験前に 24 時間水中に浸漬した.

気中実験では, 落下高 $H=1\sim 10$ cm とし, 1 cm ごとに各ケース 5 回ずつ実施した. 一方, 水中実験では, 表

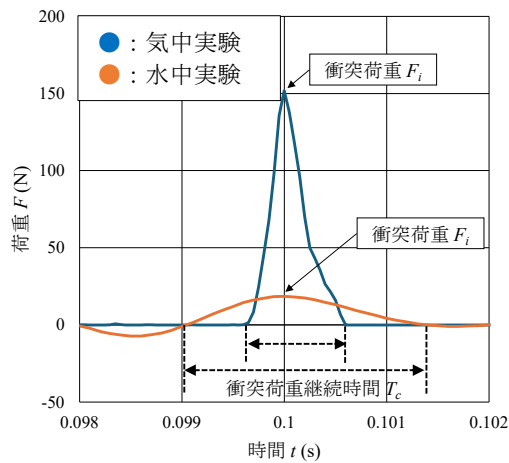


図-2 荷重-時間関係

図-2 に示すように一定流量のもとで、勾配を掃流区間に相当する 3 条件に変化させた。各ケースについて、100 回以上の衝突が得られるまで実験を行った。

3. 実験結果

3.1 作用荷重

気中実験および水中実験結果を比較するため、衝突速度 v_i が概ね同程度 ($v_i = 1.2 \text{ m/s}$) となるケースを代表例として取り上げる。図-2 に荷重と時間の関係を示す。気中実験結果では、荷重は急激に増加してピーク値に達した後、速やかに減少する波形を示した。一方、水中実験結果では、ピーク値に達するまでに時間を要し、その後も緩やかに減衰する傾向が確認された。

ここで、荷重の最大値を衝突荷重 F_i と定義する。気中実験では $F_i = 151.8 \text{ N}$ 、水中実験では $F_i = 18.5 \text{ N}$ となり、水中における衝突荷重は気中実験結果の約 0.12 倍に低減した。さらに、衝突荷重継続時間 T_c は、気中実験で 1.0 ms、水中実験で 2.4 ms となり、水中では約 2.4 倍に増加した。これらのことから、水中では衝突荷重のピーク値が大きく低減する一方、荷重作用時間が増加する傾向にあることが分かる。

3.2 衝突荷重-衝突速度の関係

図-3 に衝突荷重と衝突速度の関係を示す。水中実験結果については、ばらつきの大きいデータ群の傾向を把握するため、全実験結果の中から中央値付近の 50 データずつを抽出し、合計 100 データを整理対象とした。気中実験結果では、衝突速度の増加に伴い、衝突荷重が概ね線形的に増加する傾向が確認された。水中実験結果においても同様の傾向を示したが、衝突荷重の値は気中実験結果と比較して大きく低減した。これらの結果から、水中では流水抵抗や水の緩衝作用が衝突挙動

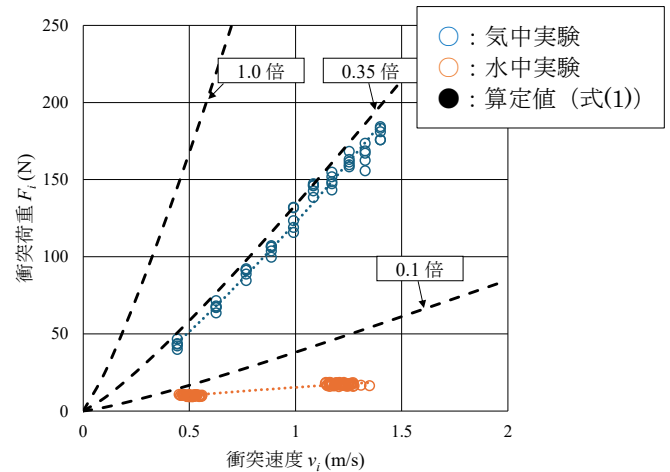


図-3 衝突荷重-衝突速度関係

に影響を及ぼし、その結果としてピーク荷重が低減している可能性が示唆される。

これらの結果に対して、次式に示す現行設計式²⁾を用いて評価を行った。

$$P = \beta n \alpha^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 P ：流木の衝突荷重(N)、 α ：へこみ量(m)、 β ：実験定数、 n ：係数である。

図-3 より、気中実験結果は式(1)の 0.35 倍程度で概ね包括された。一方、水中実験結果は式(1)の約 0.1 倍で概ね包括される結果となった。これより、現行設計式は衝突荷重を安全側に評価しているものの、水中条件に対しては実験結果と比較して大きな値を与える傾向があると考えられる。このため、水中における流木衝突荷重の評価にあたっては、現行設計式をそのまま適用するのではなく、作用条件に応じた低減の考慮が必要である可能性が示された。

4. 結言

本研究によって、流木の衝突荷重は、気中における衝突荷重と比較して十分に小さくなることが示された。さらに、現行設計式の 1/10 程度の荷重を考慮すれば十分である可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、科学研究費助成事業：基盤研科 C (課題番号 23K05326) の助成を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋田寛己, 今泉文寿, 中谷洋明, 堤大三: 過去 40 年程度の主要流木災害における発生流木量の傾向について, 令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集, p.613-614, 2023.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国総研資料第 904 号, 2016.