

樹冠・根鉢つき流木が家屋に衝突する際の流体力に関する付加質量力について

埼玉大学大学院 学生会員 宮原 海
 埼玉大学 学生会員 ○伏見 健吾
 埼玉大学 非会員 山崎 直樹
 埼玉大学大学院（兼）埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター 正会員 田中 規夫

1. 研究背景と目的

2013 年台風 26 号の記録的大雨に見舞われた伊豆大島では、流木を大量に含む泥流が発生し、神達地区の家屋群を破壊した後、運動を停止することなく流路工へと流入した。生産された流木の約 47%が元町橋およびその上流域に堆積し、大量の流木氾濫が発生させた¹⁾。流木の発生は家屋や構造物への流体力を増大させ、河川橋梁などに堆積し抗力の増大や水深の急激なせき上げを発生させ、大規模な氾濫へと繋がる危険性がある。

浮遊物が物体に衝突した場合、流木の衝突力以外に周辺流体にも加速度を与える（主に減速させる）ため、付加質量力²⁾が物体に働く。流木が幹のみの場合は大きくないと想定されるが、根鉢や樹冠が存在する場合には、周辺流体を巻き込むことによる見かけの流体力増大が予想される。一方で、根鉢や樹冠内部の摩擦ですべての流木質量が構造物に瞬時に働くわけではないことも想定される。衝撃力を評価するためには衝突時間が重要なパラメータとなるが、有益な情報は FEMA の基準³⁾、単体流木の衝突時間⁴⁾程度しか存在しない。宮原・田中⁵⁾は、定常流と非定常流では流木の衝突時間に大きな差異が生じることを簡易的な水理実験により明らかにしている。しかしながら、流木モデルは円柱形を使用しており、流木が衝突する際に背面において運動を拘束され水の質量による慣性力（付加質量力）については検討していない。衝突力に関する研究を行う際は、漂流物の形状による影響が大きい。災害時に流木化する根鉢・樹冠つき流木、もしくは流木群の衝突に伴う付加質量力の情報は不足している。

そこで本研究では定常流における流木群の衝突力、非定常における根鉢つき流木の衝突力について実験を行い、根鉢や樹冠があることによって生じる衝突力の相違を解明することを目的として実験を行った。

2. 流木衝突実験の概要

(1) 実験水路の概要

実験装置並びに実験方法の模式図を図-1 に示す。本実験では、全長 6.5m、幅 0.5m、高さ 1.5m の矩形断面を有する循環式開水路を用いた。また非定常実験については、空圧式造波ゲートの急開により段波を発生させて実験を行った。空圧式造波ゲートから下流 1m の位置に木製の家屋モデルを配置した。なお、家屋モデル設置時に水路側壁との影響が水面形に現れないよう考慮し、サイズを縦×横×高さ=5cm×5cm×10cm とした。家屋モデルには分力計（1N 分力計 SSK LB60-1N、10N 分力計 SSK LB60-10N）を取り付け、水路中央（上流端から 1.0m）に設置し、流体力・衝突力・流木衝突後の波形の立ち上がり時間を計測した。定常流実験におけるフルード数は約 0.8。非定常実験では、家屋モデル設置位置における入射波の最大水深 4cm、入射波先端の流速は 0.9m/s、最大フルード数は約 1.2-1.4 と設定した。この時の急開ゲート上流側のタンク水深は 10cm とした。最大水深および入射波先端の流速については、家屋モデルを設置しない予備実験において家屋モデル上流端位置に相当する値を使用した。

(2) 流木モデルおよび実験ケースの概要

a) 単体モデル

流木モデルとして使用する木材はラワン材の丸棒であり、指定の長さに切断して、流木モデルとした。流木サイズは、直径 0.4cm、長さ 12.5cm とした。

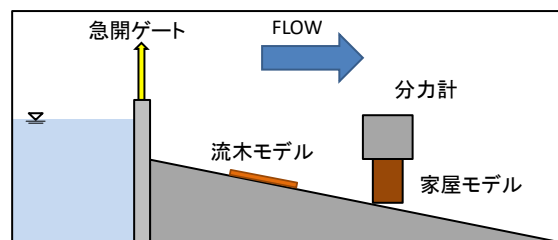


図-1 流木衝突実験の模式図

既往文献⁶⁾を参考に、生木のアカマツの比重0.85~1.05 程度になるよう、実験開始前に流木モデルを規定時間(1時間)水に浸し、条件比重を満たすような値に管理した。

b) 群モデル

流木は互いに絡み合うことで、一つの塊(流木群)となって、構造物に衝突する。それらの現象を再現するため、既往研究⁷⁾と同様に個々の流木モデルの中央を紐で連結し流木群モデルを作成した。連結した流木は単体モデルと同様のものを使用した。

実現象における流木同士の連結の固さを表現するために、本実験におけるモデルの連結は太さ1mmのタコ糸(赤)流木モデル中央で結んだ。連結の間隔は定規で測定しつつ5mmとなるように確認した。

c) 樹冠・根鉢つき流木モデル

図-2に樹冠・根鉢つき単体流木モデルを示す。流木モデルの幹部は直径0.4cm、長さ12.5cmとした。根鉢部分については材質による違いを検討するため、ヘチマロン(空隙があり堅い)とココヤシ繊維(空隙があり柔らかい)の2種類を使用し、流木モデルの幹部と接着した。また大きさによる影響を比較するため、単体モデルについては、直径1cm、2cm、4cmの3種類、群モデルでは直径1cm、2cmをそれぞれ用いた。実験ケースを表-1に示す。ケース名については、流木モデルが家屋モデルと衝突する面を前面、それに対して反対側を後面とした(N:根鉢なし, Y:ココヤシ繊維, H:ヘチマロンとする)。

流木モデルの設置方法としては、流木モデルの長辺を流下方向と平行にし、家屋モデルから15cm上流の位置に静止させて設置および投下した。



図-2 単体流木モデル(根鉢モデル)

(3) 家屋モデルに働く力(衝突力と衝突時間)

流木(質量 m) と家屋の衝突は完全非弾性衝突と仮定し、衝突力 F は下記の力積式により求めた。

$$C_i C_m m V = F \Delta t \quad (1)$$

ここに、 C_i は内部摩擦に関する慣性力係数、 V は衝突直前の流木の速度(流速と同じとした)、 Δt は衝突力が加わる時間で、FEMAの基準(木材と木材の衝突の場合)³⁾では1秒である。 C_m は物体の衝突によって影響を受けた周囲流体に関連する付加質量係数で、コンテナなどは無視できない値²⁾をとるが、流木の場合は1としている場合も多い。

衝突力と衝突時間は以下のように定義した。

- a) 衝突開始点: 分力計の示す値の微振動を考慮した上で、急激に値が上昇し始める点
- b) 衝突終点: 分力計の値が上がり続ける点
- c) 衝突時間: 衝突終点から衝突開始点の時間を引いた値、つまり、衝突立ち上がり時間を衝突時間と定義
- d) 衝突力は衝突終点の値から衝突開始点の示す値を引いたものとした。

この衝突時間の定義の正当性は宮原・田中⁵⁾(以下、前報)で検証されている。

3. 実験の結果と考察

(1) 計測値と力積式から求めた計算値の比較

図-3に前報における分力計の計測値(y 軸)と流木の質量、衝突速度、衝突時間から計算した算出衝突力(x 軸)に関する比較を示す。図においてプロットされた点は概ね $X = Y$ の直線に沿っていることから、計測された衝突時間は精度の高いものであると考える。また、本実験は前報と同様の手法を用いて行ったものであることから、本実験における出力結果についても精度の高いものであると考える。

表-1 実験ケース(樹冠・根鉢つき流木モデル)

	流木前面	流木後面
case NN	なし	なし
case YN	ココヤシ繊維	なし
case NY	なし	ココヤシ繊維
case YY	ココヤシ繊維	ココヤシ繊維
case HN	ヘチマロン	なし
case NH	なし	ヘチマロン
case HH	ヘチマロン	ヘチマロン
case YH	ココヤシ繊維	ヘチマロン
case HY	ヘチマロン	ココヤシ繊維

(2) 根鉢の大きさが流木の衝突時間に及ぼす影響

図-4 に単体モデルの根鉢直径と流木モデルの衝突時間の関係について示す。ここから根鉢モデルの直径が大きくなるにつれて、衝突時間も長くなる傾向がみられる。case NY や case YH, case HY のようにココヤシ繊維を用いているケースでは全体的に衝突時間は長くなっており、特に case YY (流木モデルの前面および後面にココヤシ繊維を接着したもの) では根鉢直径 1,2,4cm の全てにおいて衝突時間が非常に大きい値を示している。これは流木モデルが家屋モデルと衝突する際にココヤシ繊維がクッションのような働きをしたことによるものであると考える。

(3) 根鉢の大きさが流木の衝突力に及ぼす影響

図-5 に単体モデルの根鉢直径と流木モデルの衝突力の関係を示す。ここから case NY や case YY, case HY, case YH のようにココヤシ繊維が関係しているケースにおいて高い衝突力を示している。特に、case NN (根鉢なしのケース) と比較して衝突力が最大で約3倍程度まで大きくなっている。

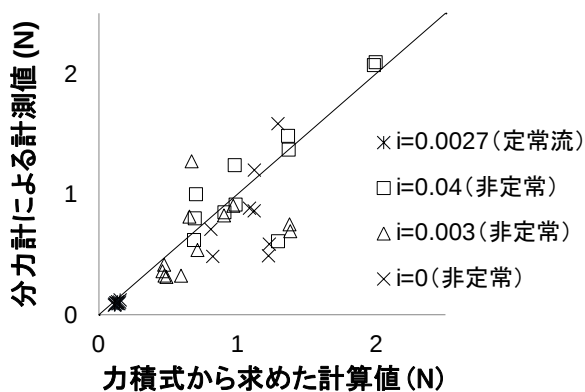


図-3 分力計の計測値と計算値の比較

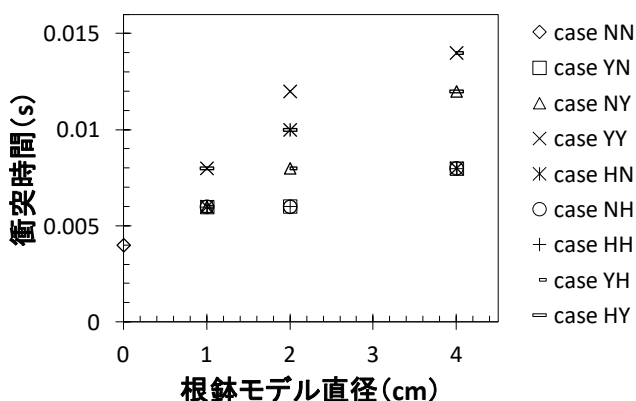


図-4 単体モデルの根鉢直径と衝突時間の関係

前述したように、ココヤシ繊維を用いているケースにおいては衝突時間も大きな値を示し衝突力を減少させる効果があるため、別の効果によるものと考えられる。すなわち、根鉢モデル内部および周囲において水を拘束したことによる影響、すなわち、ココヤシ繊維を用いたケースでは付加質量力の影響が大きいと考える。ココヤシ繊維はヘチマロンと比較してある程度密な素材であることから、衝突時に根鉢モデル前後および内部においてより多くの水を拘束したと考えられる。

(4) 根鉢の大きさと付加質量係数の関係

図-6 に単体モデルおよび群モデルにおける力積 $F\Delta t$ (流木の衝突力×流木の衝突時間) と運動量 mV (流木の質量×流木の速度) の関係を示す。図-6(a) と式(1)より、単体モデルにおいてそれぞれの根鉢モデル直径に対して付加質量係数と慣性力係数を求めると、根鉢モデル直径 1, 2, 4cm においてそれぞれ $C_i C_m = 1.38, 1.44, 1.83$ 程度となった。コンテナにおける付加質量係数は 1.5 程度⁸⁾であることから、流木の衝突の際にも根鉢や樹冠が付いている場合にはコンテナと同等かそれ以上の付加質量力が作用する可能性があると言える。同様に、図-6(b) より群モデルについて求めると、根鉢なし、根鉢直径 1cm, 2cm について定常流で $C_i C_m = 0.86, 1.47, 1.75$ 程度となった。また非定常では $C_i C_m = 0.82, 1.67, 1.78$ 程度となった。根鉢なしの場合に 1 を下回っていることから、流木群の場合は内部摩擦などによって消費されるエネルギーもあることが推定される。群モデルの根鉢なしでの $C_i C_m$ は、内部摩擦影響も含む係数で

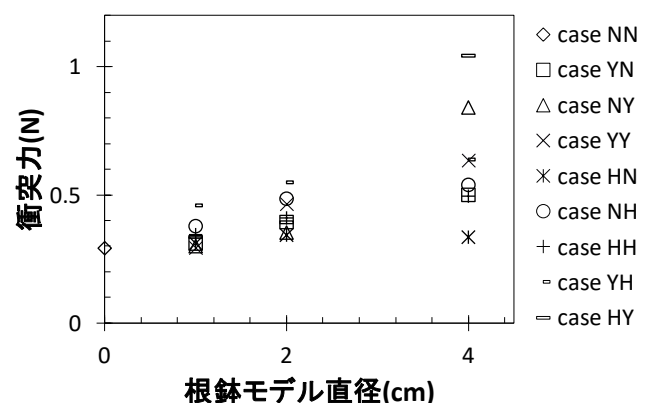


図-5 単体モデルの根鉢直径と衝突力の関係

あるので、根鉢がついた際の付加質量係数 C_m による影響は実際には2倍程度となると推定される。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 根鉢のサイズが大きくなると衝突時間も大きな値を示す傾向が見られた。また単体モデルにおける根鉢ありの場合の衝突時間は根鉢なしの場合の衝突時間と比較して最大で3倍であった。
- 2) 根鉢が大きくなるにつれて付加質量係数が大きくなった。これは、根鉢が内部および背後の水を拘束する働きが作用したためであり、その効率は根鉢の大きさおよび根鉢の密度に依存することを示唆している。

本実験において、群モデルにおいて内部摩擦による影響と付加質量力による影響の双方を含んだ係数として示しているが、付加質量係数は実際にはより大きな値を示すと考えられることから、今後、更な

る実験を行うことが重要であると考ええる。

謝辞 本研究には、河川砂防技術研究開発制度 砂防技術分野「火山地域における水文・土砂流出メカニズムの解明と土砂災害防止事業支援のための数値シミュレーション法の開発（土木研究所 G 代表：江頭進治）」の予算を使用した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中規夫, 流木の生産・流出特性, 土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会 平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団 最終報告書, 2014.5.
- 2) 廉慶善, 水谷法美, 白石和睦, 宇佐美敦浩, 宮島正悟, 富田孝史: 陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, 土木学会, pp.851-855, 2007.
- 3) FEMA: Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, (<http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3463>), 2008
- 4) 松富英夫: 津波氾濫流による流体力への動圧の寄与と漂流物の衝突力の確率分布, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol. B2-65, No.1, pp.836-840, 2009.
- 5) 宮原海, 田中規夫: 定常・非定常流における流木群の衝突力に関する基礎実験, 土木学会平成27年度全国大会, II-233, 2015.
- 6) 小松利光: 流木と災害-発生から処理まで-, 技報堂出版, 2009.
- 7) Tanaka, N., Ogino, T., Comparison of reduction of tsunami fluid force and additional force due to impact and accumulating after collision of tsunami-produced driftwood from a coastal forest with houses during the Great East Japan tsunami, Landscape and Ecological Engineering (in press), 2017.
- 8) 水谷法美, 高木祐介, 白石和睦, 宮島正悟, 富田孝史: エプ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, 2005.

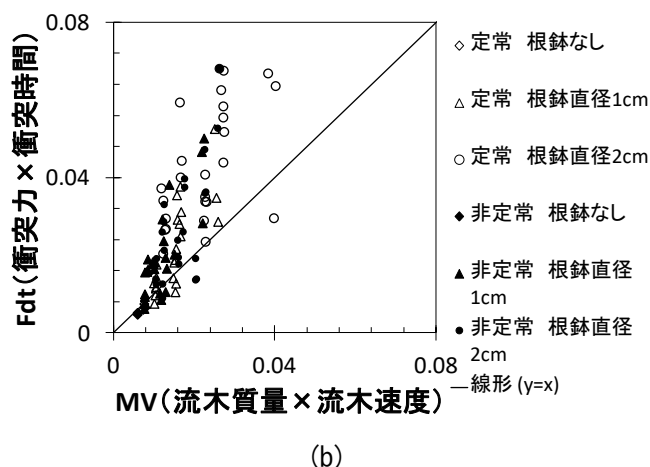
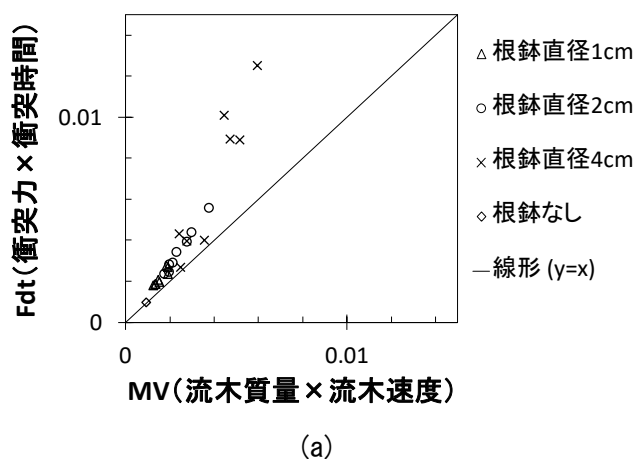


図-6 付加質量を考慮した分力計の計測値と計算値の比較 (a) 単体モデル, (b) 群モデル