流木群衝突時に作用する荷重特性と見かけの抗力係数の評価

EVALUATION OF LOAD CHARACTERISTICS AND APPARENET DRAG COEFFICIENT DURING COLLISION OF DRIFTWOOD GROUPS

竜川　太志[1]・堀口　俊行[2]

Taishi TATSUKAWA and Toshiyuki HORIGUCHI

[1]防衛大学校　理工学研究科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

E-mail: ed26006@nda.ac.jp

[2]防衛大学校　建設環境工学科（〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

E-mail: htoshi@nda.ac.jp

***Key Words**: driftwood group, impact load, drag coefficient, driftwood catchment*

1. 緒　言

近年，記録的豪雨の頻発に伴い，土砂・流木災害が激甚化している．過去 40 年間の調査では，下流域への流木流出量の増加や，流木を多量に含む土石流の発生が報告されている [1]．流木は，浮力の影響を受けて流下し，住宅地やインフラに被害を及ぼし，さらに海域での堆積に伴う二次災害を引き起こしている．特に，平成 29 年 7 月九州北部豪雨では，多量の土砂および流木が渓流・河川を通じて下流へ流出し，居住域に深刻な被害をもたらした [2]．また，豪雨や地震に伴う複合災害では，多量の流木や根系を伴う流木が土砂と共に流出し，構造物被害を拡大させる事例が見られている [3]．このような状況は，災害後の応急対策や復旧対策において，土砂のみならず流木を含めた外力評価が重要であることを示している．とりわけ，透過型砂防堰堤（以下，透過型）では，流木群の捕捉や閉塞に伴って局所的に大きな荷重が作用する可能性がある．

流木の多くは立木に由来し，その主な発生要因として，山腹斜面崩壊や，それに続く土石流による渓岸・渓床侵食が挙げられる [4]．このため，流木の流下形態は流況に応じて異なり，土石流区域では土砂・巨礫と一体となって流下する．一方で，掃流区域では流木が分離して，水面付近を流下すると考えられる．中には，複数の流木が集積した流木群として挙動する場合があり，このような流木群は単木とは異なる複雑な流体作用および衝突作用を構造物に与え，従来の静的な想定のみでは捉えにくい外力を作用させる可能性がある．

既往の研究において，著者ら [5)-7)] は流木群の衝突荷重について実験的および解析的検討を行い，流木群が構造物に対して顕著な衝突荷重を生じることを明らかにするとともに，その評価に流体力学的な考え方を適用できる可能性を示した．しかし，流木群は個々の流木の形状や姿勢に加え，集積形状，空隙構造，流れとの相互干渉さらには透過部の閉塞状況によって力学特性が大きく変化するため，荷重評価に必要となる抗力特性は明らかにされていない．特に，流木群に作用する荷重を構造設計時に利用可能な指標へ接続した研究は限定的である．

そこで本研究では，流木群が透過型に衝突する際の荷重特性を明らかにするとともに，その作用荷重を流体力の観点から整理し，流木群の見かけの抗力係数の評価を試みるものである．

2. 実験概要 [5)]

(1) 実験装置

図-1 に実験装置の概要を示す．実験には，長さ L

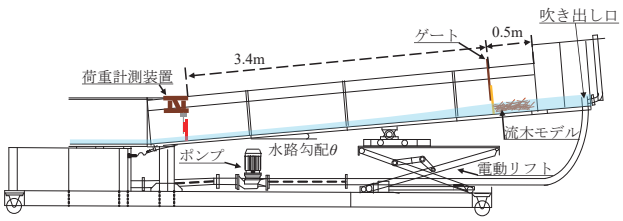


図-1　実験装置

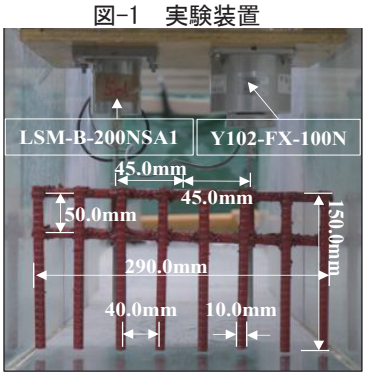


図-2　捕捉工モデル

表-1　実験ケース

勾配 θ (°)	流量 Q (L/s)	水深 h_w (cm)	流木本数 n	回数
1	2.3	1.3	100 200 300	5
	4.7	2.1		
	6.9	2.6		
3	2.3	0.9		
	4.7	1.5		
	6.9	1.9		
5	2.3	0.8		
	4.7	1.3		
	6.9	1.6		

= 4.4 m，幅 B = 0.30 m，高さ H = 0.5 m の可変勾配型直線水路を用いた．水路勾配は，θ = 0～20°の範囲で設定可能である．水路底面にはアルミ板を用いており，比較的滑面な条件である．ただし，水路底面には若干の傷や板の継ぎ目が存在するため，滑面金属面の一般的な粗度係数を参考に，マニングの粗度係数を n = 0.012 とした．流量は，所定の水深および勾配条件に基づき，等流水深から逆算した代表値として算出した．

流木群は，捕捉工モデルの上流 3.4 m に設けたゲート部から投入した．具体的には，一定流量を通水した状態でゲートを閉じ，ゲート上流側に所定本数の流木モデルを配置した．その後，流木モデルの配置に伴う水面の擾乱が十分に収束し，**表-1** に示す所定の水深条件 h_w を満たしていることを確認した後，ゲートを開放することで流木群の流下を開始した．流木群が捕捉工モデルに衝突した際に発生する作用荷重は，荷重測定装置により計測した．

図-2 に捕捉工モデルおよび荷重計測装置の概略を示す．捕捉工モデルの寸法は，高さ h_c = 150.0 mm，幅 b_c = 290.0 mm，部材間隔 w_c = 40.0 mm とした．本実験では，流木群が捕捉工モデルに作用する条件を安定して再現するため，部材間隔を流木長に対して小さく設定した．具体的には，流木長に対して部材間隔を w_c/l = 1/3 とした．

荷重計測には，捕捉工モデルを支持するために 2 台の分力計（LSM-B-200NSA1，Y102-FX-100N）を用いた．各分力計は，捕捉工モデル中心から 45.0 mm の位置に配置し，ねじ棒を介して模型と接続した．接続部は，直径 6.0 mm の中空円筒管にねじ棒を通し，上下からナットで固定する構造とした．これにより，捕捉工モデルを水路底面から独立した状態で支持し，衝突時の作用荷重を計測した．なお，作用荷重は 2 台の分力計の計測値の合計として評価した．

計測には，ユニバーサルデータロガー（EDX-100A）を用い，サンプリング周波数は 200 Hz とした．また，高周波ノイズを除去するため，ローパスフィルターを適用した．この計測系により，流木群衝突時に生じる動的荷重の時系列変動を記録した．さらに，計測系の精度を確認するため，静水圧を用いた校正試験を実施し，測定値と理論値が良好に一致することを確認した．

(2) 流木モデル

本実験では，水路幅と流木長の関係から，流木長の大きいモデルを用いると流木の移動が水路幅に制約されることから，直径 d = 6.0 mm，長さ l = 120.0 mm の円柱形を採用した．モデル材料には，密度が概ね均質であり，吸水・乾燥に伴う膨張収縮が小さく，加工性に優れるラミンを用いた．すべての流木モデルは，使用前に 12 時間以上浸水させた．その比重は，乾燥時 0.76，湿潤時 0.99 であった．湿潤時比重が 1.0 に近いことから，本実験の流木モデルは水面近傍を流下する流木挙動を概ね模擬できる条件にあると考えられる [8]．

(3) 実験ケース

実験では，相似比 1/20 のフルード相似則に基づく模型実験を実施した．本実験は，流木群の流動挙動および構造物への作用荷重の傾向を把握することとした．そのため，材料剛性，接触変形，および局所的な衝突応答については厳密な相似を満たしていない．このため，衝突荷重の絶対値そのものを完全に再現するものではない．

表-1 に実験ケースを示す．実験では，水路勾配 3 ケース，流量 3 ケース，流木本数 3 ケースを組み合わせ，計 27 ケースを設定した．各ケースに対し 5 回ずつ実施し，実験総数 135 回とした．

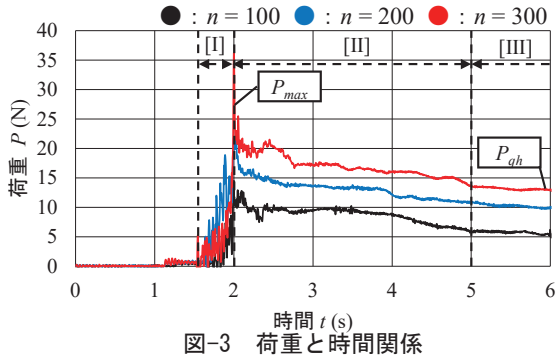


図-3　荷重と時間関係

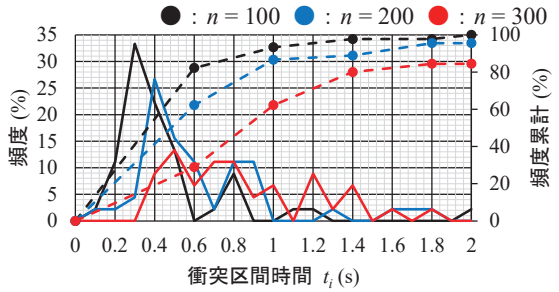


図-4　衝突区間時間の頻度分布および頻度累計曲線

3. 実験結果

(1) 荷重と時間関係

図-3 に荷重と時間の関係を示す．他のケースにおいても概ね同様の挙動が確認された．ここでは代表例として，勾配 $\theta = 3°$，流量 $Q = 4.7$ L/s，流木本数 $n = 100$，200，300 の結果を示す．**図-3** の波形における最大値を最大衝突荷重 P_{max}，衝突後 10 s 以降の安定区間における平均荷重を準静水圧荷重 P_{qh} と定義した．荷重応答の全体傾向は，流木本数が異なる場合でも概ね共通していたことから，本研究では荷重応答を以下の 3 区分に分類して考察した [7]．

Ⅰ.衝突区間：流木が捕捉工モデルに衝突し，最大衝突荷重 P_{max} に到達するまでの急激な変動区間

Ⅱ.遷移区間：最大衝突荷重 P_{max} から準静水圧荷重 P_{qh} へ漸減する区間

Ⅲ.堆積区間：荷重が安定し，流木が堆積した状態を示す区間

なお，衝突区間時間 t_i は，流木群前縁が捕捉工モデルに初接触した時刻から，最大衝突荷重 P_{max} に到達するまでの時間として定義した．

遷移区間および堆積区間では比較的類似した傾向が認められた．一方で，衝突区間時間はケースごとに異なった．このため，本研究では特に衝突区間時間に着目して考察を行った．

図-4 に衝突区間の時間 t_i の頻度分布を示す．各流木本数について，勾配と流量の組合せ全 9 条件に対する 5 回の試行結果，計 45 回を対象とした．本図は，水理条件の違いを含めたうえで，流木本数による衝突区間時間の傾向を把握するために整理したものである．



写真-2　堰上げ高 h_t（最大衝突荷重時）

流木本数 $n = 100$ では，最も多く観測された衝突区間時間は $t_i = 0.3$ [s]であり，その頻度は 33.3 %であった．流木本数 $n = 200$ では，$t_i = 0.4$ [s]で 26.7 %，さらに流木本数 $n = 300$ では $t_i = 0.5$ [s]で 13.3 %であった．このように，流木本数の増加に伴い，衝突区間時間の最頻値は概ね 0.1 [s]ごとに増加する傾向を示した．また，最頻値の頻度は，流木本数 $n = 100$ から 200 では約 0.8 倍，流木本数 $n = 200$ から 300 では約 0.5 倍に低下した．さらに，頻度分布の広がりに着目すると，流木本数別の頻度累計を点線で示す．流木本数 $n = 100$ では，$t_i = 0.1$〜0.6 [s]に 82.2 %集中しているのに対し，流木本数の増加に伴い分布の分散が大きくなる傾向が確認できる．

これらの結果から，流木本数が増加するほど，衝突時における流木群の配列形態が多様化し，捕捉工透過部の閉塞状況や衝突形状のランダム性が増大する可能性を示唆している．すなわち，流木本数が多い条件では，最大衝突荷重に至るまでの荷重立ち上がり過程が一様ではなく，その発生時間にも不確実性が伴うと考えられる．

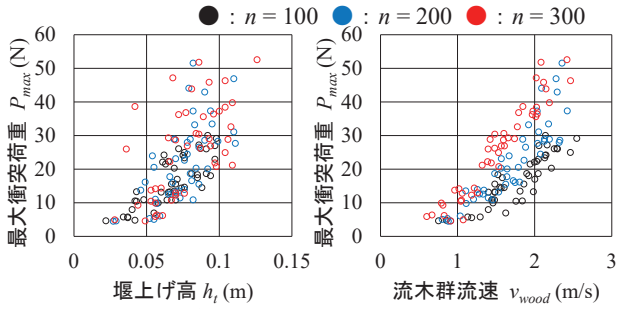
以上より，衝突区間は流木本数の増加に伴って長時間化するとともに，そのばらつきが顕著となることが明らかとなった．したがって，流木捕捉工の設計においては，最大衝突荷重のみならず，荷重の立ち上がり時間およびその変動幅も考慮した安全側の評価が重要であると考えられる．

(2) 最大衝突荷重の特性

次に，最大衝突荷重がどのような要因に依存するかについて検討した．ここで，**写真-2** に示すように，捕捉工モデルに流木群が衝突した際の水深を堰上げ高 h_t(m)と定義した．また，流木群の流下速度(以下，流木群流速）v_{wood} (m/s)は，高速度カメラ（120 fps）を用いて，捕捉工モデル上流 30 cm 区間における流木群前縁の移動を追跡することにより算出した．

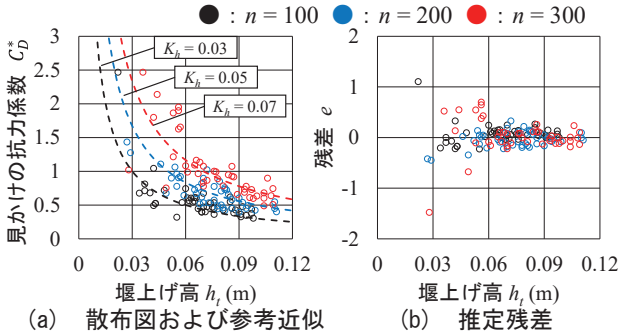
a) 堰上げ高 h_t

図-5(a) に最大衝突荷重と堰上げ高の関係を示す．ばらつきは見られるものの，流木本数によらず，堰上げ高の増加に伴って最大衝突荷重が増加する傾向



(a) 堰上げ高　(b) 流木群流速

図-5 最大衝突荷重の特性



(a) 散布図および参考近似　(b) 推定残差

図-6 見かけの抗力係数と堰上げ高の関係

が確認された．流木本数 n = 100 では最大の堰上げ高は概ね $h_t \approx 0.10$ m であったのに対し，流木本数 n = 200，300 では，$h_t \approx 0.12$ m 程度であり，両者は同程度の値を示した．

以上より，本実験条件の範囲では，最大衝突荷重は堰上げ高と一定の対応関係を有することが分かる．また，流木本数を増加させても堰上げ高の増加には頭打ちの傾向が見られることから，捕捉工近傍の局所的な堰上げ高には，本実験条件に依存した上限値が存在する可能性が示唆される．

b) 流木群流速 v_{wood}

図-5 (b) に最大衝突荷重と流木群流速の関係を示す．流木本数ごとに見ると，流木群流速の増加に伴い，最大衝突荷重も増加する傾向が確認できる．また，流木本数 n = 100 を基準とした場合，最大衝突荷重の増加倍率は n = 200 で約 1.5 倍，n = 300 で約 2.0 倍となった．一方で，流木本数はそれぞれ 2.0 倍，3.0 倍に増加している．このことから，最大衝突荷重の増加率は流木本数の増加率に比べて小さいことが分かる．

以上より，最大衝突荷重が単純に流木本数の増加だけで決まるのではなく，流木群流速の影響を受けることを示している．

4. 流体力式に基づく荷重評価の検討

これまでの結果より，最大衝突荷重は，堰上げ高を用いて評価した投影面積および流木群流速の影響を受けることが示された．このことから，流木群衝突時に生じる荷重は，流体中の物体に作用する抗力と類似した形式で整理できる可能性がある．ただし，流木群衝突時に計測される荷重には，流木の直接衝突，流木同士および構造物との接触・堆積による力，堰上げに伴う水圧の増加，さらに流体力が複合的に含まれている．したがって，計測された最大衝突荷重を純粋な流体力として解釈することはできない．そこで，最大衝突荷重を流体力式に対応づけるため，見かけの抗力係数を導入し，さらに，堰上げ高と流木群流速の影響を統合的に扱うため，フルード数を用いて整理を行った．

(1) 見かけの抗力係数

流木群衝突時に計測された最大衝突荷重P_{max}を，流体力式に対応づけるため，見かけの抗力係数C_D^*を導入し，次式で定義した．

$$C_D^* = \frac{2P_{max}}{\rho A {v_{wood}}^2} \quad (1)$$

ここで，ρ：水の密度（= 1000.0 kg/m^3），A：流木群衝突時の投影面積である．

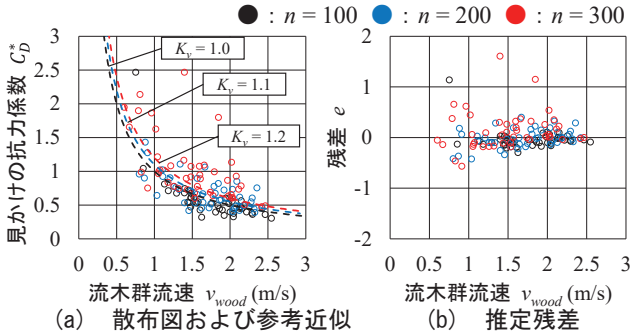
本実験では水路幅 B が一定であるため，投影面積 A は堰上げ高 h_t を用いて次式で表した．

$$A = Bh_t \quad (2)$$

この見かけの抗力係数C_D^*は，流木群衝突時に発生する複合的な荷重を，流体力式の形式に基づいて相対的に評価するための指標である．したがって，見かけの抗力係数C_D^*は，単一物体に対する純粋な抗力係数ではなく，流木群の衝突，堆積，堰上げおよび閉塞状態を含んだ係数として位置付ける．

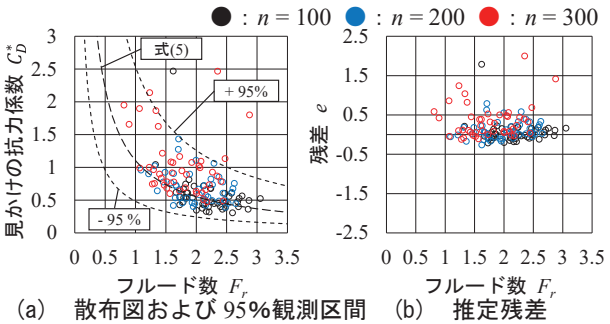
(2) 見かけの抗力係数と各要因の関係

図-6 に，見かけの抗力係数C_D^*と堰上げ高 h_t の関係を示す．図-6 (a) より，ばらつきは見られるものの，堰上げ高の増加に伴ってC_D^*は低下する傾向を示した．これは，堰上げ高の増加により投影面積が大きくなる．一方で，最大衝突荷重の増加率が投影面積の増加に比例しないため，見かけ上，単位投影面積当たりの荷重が小さく評価されることを示している．ただし，C_D^*は定義上，投影面積を分母に含むため見かけの抗力係数C_D^*と堰上げ高h_tの関係には正規化の影響が含まれる．したがって，この関係は直接的な物理法則としてではなく，堰上げ高の変化に対する見かけの抗力係数の感度を示す補助的な整理として扱う．また，図中の点線は，流木本数ごとの累乗近似を示す．補正係数 K_h は堰上げ高の二乗に対する比例係数であり，流木本数が増加すると，同一の堰上



(a) 散布図および参考近似　(b) 推定残差

図-7 見かけの抗力係数と流木群流速の関係



(a) 散布図および 95%観測区間　(b) 推定残差

図-8 見かけの抗力係数とフルード数の関係

げ高でも見かけの抗力係数C_D^*が大きく評価される傾向が確認された．これは，流木本数の増加に伴い，流木群による遮蔽効果や局所的な力の集中が生じやすくなるためと考えられる．

図-6 (b) に，堰上げ高に対する推定残差を示す．堰上げ高が小さい領域では残差が大きくなる傾向が認められた．これは，投影面積が小さい条件では，流木配置や衝突姿勢の違いが荷重評価に与える影響が相対的に大きくなるためと考えられる．

図-7 に，見かけの抗力係数C_D^*と流木群流速 v_{wood} の関係を示す．**図-7 (a)** より，見かけの抗力係数C_D^*は，流木群流速の増加に伴って低下する傾向を示した．図中の点線は，流木本数ごとの累乗近似を示す．補正係数 K_v は速度の二乗に対する比例係数であり，最大衝突荷重自体は，流速の増加とともに大きくなるものの，式(1)の分母に含まれる流木群流速の増加ほどには増加していない．すなわち，本実験条件の範囲では，流木群衝突荷重は単純な定常抗力のような二乗則のみでは表現しにくく，流木群の配列，閉塞状態，接触・堆積過程の影響を受けると考えられる．

ただし，見かけの抗力係数C_D^*は定義上，流木群流速 v_{wood}を分母に含むため，見かけの抗力係数C_D^*とv_{wood}の関係にも正規化の影響が含まれる．したがって，堰上げ高および流木群流速に対する個別の関係は，見かけの抗力係数C_D^*の傾向を把握するための補助的整理とし，荷重評価に用いる主たる指標としては，両者を統合した無次元量による整理が必要である．

(3) フルード数による評価

前項より，見かけの抗力係数は，堰上げ高および流木群流速の双方に影響を受けることが確認された．堰上げ高は流木群衝突時の水深スケールに対応し，流木群流速は慣性力の指標となる．そこで，これらを統合的に評価するため，フルード数F_rを導入した．フルード数は次式で定義される．

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{3}$$

ここで，F_r：フルード数，v：代表速度(m/s)，h：代表高さ(m)，g：重力加速度 (m/s²) である．本研究では，代表速度として流木群流速v_{wood}，代表高さ hとして堰上げ高 h_tを用いた．

$$F_r = \frac{v_{\mathrm{wood}}}{\sqrt{gh_t}} \tag{4}$$

図-8 に，見かけの抗力係数C_D^*とフルード数の関係F_rを示す．**図-8 (a)** より，流木本数の違いによるばらつきはあるものの，見かけの抗力係数はフルード数により概ね共通した傾向で整理できることが確認された．このことは，堰上げ高と流木群流速を個別に扱うよりも，両者を含むフルード数を用いることで，流木群衝突時の荷重特性をより統一的に評価できる可能性を示している．そこで，見かけの抗力係数とフルード数の関係を経験式として整理するため，次式の回帰式を導入した．

$$C_D^* = K_f \cdot {F_r}^{-1} \tag{5}$$

ここで，K_f：補正係数であり，本実験条件では K_f = 0.1 とした．本式は，流木群衝突荷重を理論的に導出したものではなく，本実験条件におけるC_D^*をフルード数により整理するための経験式である．

図-8 (a) には，式(5)と 95 %観測区間を示す．観測区間の算出にあたっては，見かけの抗力係数およびフルード数を回帰残差の標準偏差に基づいて評価した．その結果，回帰モデルは実験データの大部分を 95 %観測区間内に含まれており，C_D^*をフルード数によって概ね整理できることが確認された．

図-8 (b) に推定残差eとフルード数の関係を示す．推定残差は，全体として特定のフルード数領域に集中する明瞭な偏りは示さなかった．一方，流木本数 n = 300 では一部のデータに比較的大きなばらつきが確認された．これは，流木本数が多い条件では，流木群の配置，衝突姿勢，閉塞状態および流木同士の相互作用の違いが大きくなるためと考えられる．そのため，本研究ではこれらのデータを特異値として除外せず，流木群衝突に伴う実験的ばらつきとして扱った．

以上より，式(5)は本実験条件の範囲において，見

かけの抗力係数をフルード数により整理する経験式として有効であると考えられる．

(4) 荷重評価の適用性

以上の検討より，流木群衝突時の最大衝突荷重は，見かけの抗力係数を用いることで，流体力式の形式に基づいて整理できることが示された．ただし，流木群衝突時の荷重は，純粋な流体力ではなく，流木の直接衝突，閉塞，堆積，堰上げを含む複合的な荷重である．そのため，C_D^*は，物理的な抗力係数そのものではなく，設計上の荷重評価に用いるための見かけ上の指標として解釈する必要がある．

特に，フルード数を用いた整理により，堰上げ高と流木群流速の影響を一つの無次元指標として扱うことができる．この点は，流木群衝突荷重を水理条件と関連付けて評価するうえで有用である．また，95 %観測区間を併用することで，流木群の配列や閉塞状態に起因する荷重のばらつきを考慮した安全側の評価が可能となる．

一方で，堰上げ高 h_t は，流木群衝突時に生じる応答量であり，設計時に事前に直接与えられる量ではない．したがって，実務的な荷重評価へ適用するためには，流木群条件，流量，流速，捕捉工形状などから堰上げ高を推定する方法を併せて整備する必要がある．

以上より，本研究で示した見かけの抗力係数およびフルード数による整理は，流木群衝突荷重を合理的に評価するための基礎的枠組みとして位置付けられる．

5. 結　言

本研究は，流木群が透過型に作用する荷重特性を明らかにするとともに，見かけの抗力係数による評価を検討したものである．得られた知見を以下に示す．

1)流木群の荷重応答は，衝突区間，遷移区間，堆積区間の 3 区分に整理できた．特に，衝突区間は流木本数の増加に伴って長時間化し，ばらつきも大きくなった．

2)最大衝突荷重は，堰上げ高および流木群流速の増加に伴って増大した．このことから，最大衝突荷重は流体力学的要因を強く反映していることが示された．

3) 最大衝突荷重を一般的な抗力式に対応づけるため，見かけの抗力係数を導入した．この係数は，流木の直接衝突，捕捉・堆積，堰上げおよび閉塞状態を含む複合的な荷重を，相対的に評価するための指標として位置付けられる．

4)見かけの抗力係数は，フルード数を用いることで流木本数によらず，概ね統一的に整理できた．また，95 %観測区間を併用することで，流木群の配列形態や閉塞状況に起因するばらつきを一定程度評価できることが示された．

今後は，流木群の配列形態や閉塞状況が荷重に及ぼす影響をさらに整理するとともに，流木群条件や水理条件から堰上げ高を推定する方法を検討し，見かけの抗力係数を用いた衝突荷重評価法の高度化を図る予定である．

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 年程度の発生・流出流木量の経年的な変化傾向とその関連要因の分析，砂防学会誌，Vol.77，No.5，pp.3-10，2024.
2) 国土交通省：平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う流木発生量（速報値）について，2017.
3) 堤大三，古谷元，権田豊，堀口俊行，今泉文寿，小杉賢一郎，杉本宏之，Christpher, G，堀大一郎，堀田紀文，伊藤誠記，金俊之，西陽太郎，小川内良人，酒井祐一，笹山隆，鈴木崇，瀧口茂隆：令和 6 年能登半島地震と奥能登豪雨によって発生した複合災害の調査および検討，砂防学会誌，Vol.78，No.6，pp.52-63，2026.
4) 石川芳治：流木災害対策は多層防御で，砂防学会誌，Vol.73，No.6，p.1-2，2021.
5) 竜川太志，堀口俊行：流木捕捉工による流木群の作用荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.71A，pp.817-827，2025.
6) 竜川太志，堀口俊行：流木群に含まれる根付き流木が流木捕捉工に与える荷重の影響，構造工学論文集，Vol.72A，pp.770-779，2026.
7) 竜川太志，堀口俊行，内田太郎，別府万寿博：円柱形要素個別要素法による流木群の衝突荷重に関する解析的検討，土木学会論文集特集号（応用力学論文集），Vol.82，No.15，pp.1-13，2026.
8) Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gaertnerm V., Perret, F., Stoffel, M.: Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers, Catena, 140, pp.182-194, 2016.

（2026.5.29　受付）