

橋梁における流木の閉塞条件に関する一考察

一般財団法人 砂防・地すべり技術センター 藤田正治、○吉田真也、和田真典

1. 背景

近年、気候変動による降雨量の増加等を背景に、流木が橋梁等の河川構造物に集積し、洪水氾濫を助長する現象が散見される。流木集積により助長される土砂・洪水氾濫の被害予測のためには、流木が橋梁を閉塞する条件等を明らかにする必要がある。既往検討として坂野(2006)は橋梁条件や流木条件を変化させた実験を実施している。

橋梁部における流木の閉塞条件は、径間長、流木長、単位時間当たりの流木の流下本数などにより決められる場合が多いが、既往研究では閉塞のプロセスを直接モデル化して決められていない。本研究では、橋梁部における流木の閉塞実験によってそのプロセスについて考察し、閉塞における本質的な現象を明確にしたうえで閉塞条件の定式化を行う。

2. 実験

和田ら(2024)の実験結果について整理した。

3. 結果①：流木の流下角度と流下位置

流木の流下位置と流下角度の定義を図 1 に示す。また、流下位置の結果(図 2)および流下角度の結果(図 3)を示す。流下位置については水路の中央付近を流下するものが多く、流下角度については流水の流下方向と平行な角度 0rad のものが多かった。

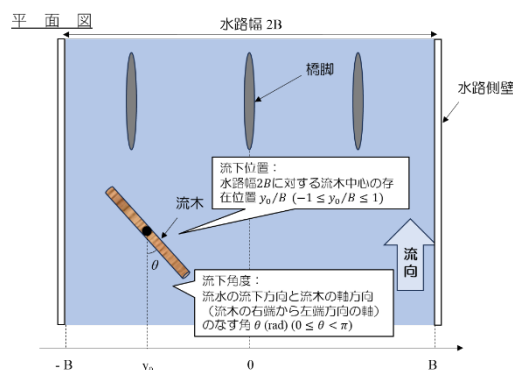


図 1 流下位置と流下角度の定義

4. 結果②：流木による橋梁閉塞のプロセス

以下の①～④のプロセスにより閉塞が進行、あるいは集積した流木塊が崩壊することが確認された。①流木が橋脚に衝突して回転運動、②回転して橋梁を通過するまでに後続の流木が衝突、③流木塊が形成、④場合によっては流木の衝突により集積した流木塊が崩壊する。また、橋脚で概ね 10 本以上の流木の塊が構成されると、塊がほぼ動かずに安定し、閉塞が進行する傾向が見られたことから、これを流木塊と定義する。以上のプロセスから、閉塞または非閉塞の発生パターンを以下のように分類した。

- A: ① (閉塞しない)
 B: ①→② (閉塞しない)
 C: ①→②→③ (閉塞する)
 D: ①→②→③→④ (一度は閉塞するが流木塊が崩壊して非閉塞となる)

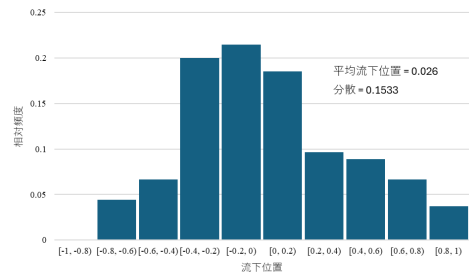


図 2 流下位置の頻度分布

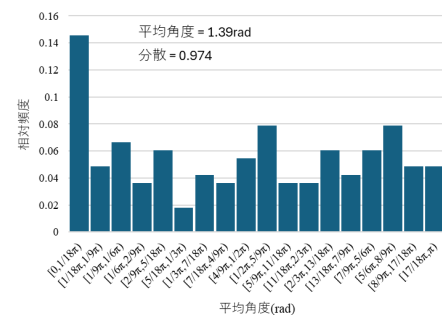


図 3 流下角度の頻度分布

それぞれのパターンの発生頻度を図 4 に整理した。図 4 のうち、流木集積が進行するパターンは C、D であり、これらの中でも 2 割程度は集積した流木塊が崩壊するパターン C が確認された。しかしパターン C は支配的ではなく、8 割程度は集積が進行したため、橋梁部での流木の回転運動中に後続の流木が衝突するプロセスが橋梁閉塞においては重要と考えられる。また、1 本の流木が橋脚に衝突する確率、衝突後の回転運動時間、後続の流木の衝突時間間隔が重要なパラメータである。

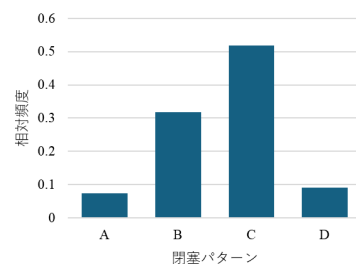


図 4 閉塞・非閉塞パターンの発生頻度

5. 考察①：流木が橋脚に衝突する確率

図 5 は橋梁周辺の平面形状を示したもので、径間長を $2L$ とする。実際には複数の橋脚が並んでいるが、ここでは中央の橋脚を対象とし、そこから横断方向に L だけ離れた領域において、この領域内に存在する流木 ($-L \leq y_0 \leq L$, y_0 : 流木の中心位置) の橋脚への衝突を考える。

流下角度 θ で流入してきた流木が橋脚に衝突する条件は下記のようなものである。

$$-l \sin \theta \leq y_0 \leq l \sin \theta \quad (1)$$

$-L \leq y \leq L$ の間の流木の流下位置 y_0 の確率密度関

数を $f_{y_0}(y)$ とすると、流木が橋脚に衝突する確率は下記のようである。

$$p_c = \int_{-l \sin \theta}^{l \sin \theta} f_{y_0}(y) dy \quad (2)$$

流木の横断方向の流入を、ここでは簡単に一様であると仮定すると、 $f_{y_0}(y) = 1/(2L)$ のため、そのときの衝突確率は次式のようにになる。

$$p_c = \frac{l \sin \theta}{L} \quad (3)$$

さらに流下角度も確率分布 $f_{\theta}(\theta)$ をもち、実験では図 3 のようである。流下角度の平均値 θ_m とし、流下角度平均値に対する衝突角度を平均衝突確率 p_{cm} とすると、

$$p_{\text{cm}} = \frac{l \sin \theta_{\text{m}}}{L} \quad (4)$$

である。

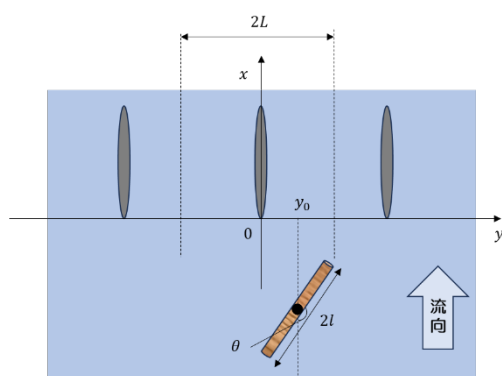


図 5 橋脚への流木の衝突条件

6. 考察②：流木の集積のモデルと閉塞条件

橋脚に衝突した流木は衝突点の周りに回転運動することが考えられる。この回転運動が進行し、水流の方向に向くと橋脚から離れ、流下すると考えられる。ここで、橋脚に流木が衝突したときに流木に作用する力は図 6 のようである。

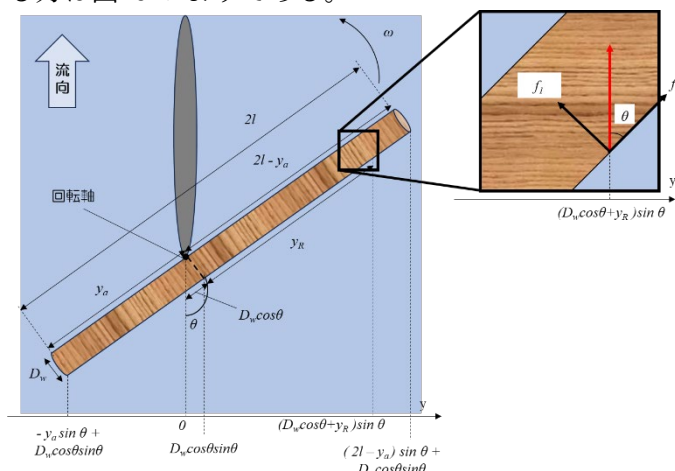


図 6 流木に作用する力

ここで、 D_w は流木直径である。また ω は角速度

($d\theta/dt$)である。回転軸を中心とし、軸方向に垂直な力 f_1 によるモーメントを M_1 、および軸方向に平行な力 f_2 によるモーメントを M_2 とすると、 $2l \gg D_w$ のとき、 $M_1 \gg M_2$ と考えられる。簡単のため、水路横断方向の流速分布を考慮せず、流木を図 7 のような形状と仮定すると、流木の回転運動の運動方程式は次式のようになる。

$$I \left(\frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) = \rho C_D D_w (l - y_a) \sin^2 \theta_m \left(u - l \sin \theta_m \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (5)$$

ここで、 ρ : 流体密度、 C_D : 抗力係数、 y_a : 流木左端から衝突点までの距離、 u : 流速である。また、 I は慣性モーメントであり、

$$I = \frac{m_w}{3}(4l^2 - 6ly_a + 3y_a^2) \quad (6)$$

となる。ここで、 m_w は流木1本の質量である。以上より流木の衝突から流下までの時間を t_b とすると、

$$t_R = f(\rho, \rho_w, D_w, l, \theta_m, u) \quad (7)$$

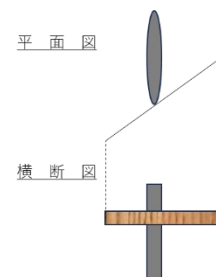


図 7 方程式における流木の形状

今、河道に毎秒 N_0 の流木が横断方向に一樣に供給されるとすると、この領域に流入する単位時間当たりの流木の本数は、

$$N = N_0 \frac{2L}{2B} = N_0 \frac{L}{B} \quad (8)$$

である。流木の橋脚への平均衝突時間間隔 T_{cm} は、平均衝突確率が式(4)で表されるとすると、

$$T_{\text{cm}} = \frac{1}{p_{\text{cm}} N_0 \frac{L}{R}} \quad (9)$$

となる。橋脚に流木が衝突し、回転して通過するまでに後続の流木が衝突することが閉塞の条件とすると、閉塞条件は下記の式で与えられる。

$$t_{\text{R}} < T_{\text{cm}} \quad (10)$$

以上より、閉塞条件に関係する主要なパラメータは $\rho, \rho_w, D_w, l, \theta_m, u, N_0 \frac{l}{R}$ である。

7. 結論

本研究では、流木による橋梁閉塞のプロセスについて考察を行い、閉塞条件について定式化を行った。今後は、実験及び解析で得られた流木の回転時間の比較や閉塞確率の実験値との比較を実施する必要がある。

引用文献

坂野(2003)国土技術政策総合研究所資料, No.78

和田・吉田・藤田・竹林(2024)砂防学会研究発表会概要集, R4-2