

流木の橋梁閉塞が河川水位に与える影響とその対策に関する検討 Effects of Woody Debris Blocking at Bridges on River Water Level and Its Countermeasures

20N3100036C 東野 禎久 (河川・水文研究室)
Sadahisa HIGASHINO/River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : *Sediment Disaster, Woody Debris, Blocking at Bridges, DEM, Capturing Structure*

1. はじめに

我が国では、台風や梅雨前線の集中豪雨の増加により土砂災害が頻発している。また、近年は林業の衰退等から森林の整備が行き届かず荒廃し(写真-1)、豪雨時に流木となって流出する。これらが河川を流下し、河川狭窄部や橋脚に詰まることで、氾濫被害の拡大を引き起こしている。2018年の西日本豪雨では、愛媛県西予市を流れる肱川の山地溪流において、写真-2に示すような大量の流木流出が見られた¹⁾ほか、兵庫県粟粟市では写真-3に示すように山地の人工林から流出した流木が橋梁に詰まり、河川の氾濫を引き起こしている。このほか、平成29年の九州北部豪雨(福岡県朝倉市)²⁾や、令和元年東日本台風(岩手県沿岸部)³⁾においても流木が橋梁に詰まり閉塞することによる氾濫被害が拡大したことが報告されている。以上のように、台風や前線性の豪雨による流木の流出、またそれによる橋梁閉塞が多くの被害をもたらしている。流木の橋梁閉塞による被害を防止・軽減するため、橋梁への流木集積メカニズムについて多くの知見が得られている。香月ら⁴⁾は平成22年7月に広島県庄原市で発生した流木による橋梁閉塞災害の実態調査および再現シミュレーションを行い、橋梁上流部に設置した流木捕捉工によって流木をせき止め、橋梁閉塞を防ぐことが可能であることを示している。また、岡本・戸田⁵⁾らは、流木の橋梁閉塞について模型実験を行い、流木が長いこと、フルード数が大きいために、河道閉塞率の上昇に寄与していることを明らかにしている。しかし、流木による橋梁閉塞が、河川水位へ与える影響の評価については著者の知る限り未解明な部分が多く存在する。そこで本研究では、橋梁閉塞による氾濫被害を軽減させることを目的とし、流木により橋梁が閉塞されたときの河川水位に与える影響や、橋梁の上流部に流木捕捉工を設置した場合の橋梁地点における河川水位に与える影響について分析することを目的とする。まず流木が橋梁に詰まり閉塞する過程の再現シミュレーションを行い、その際の河川水位に与える影響について数値計算を行う。さらに、流木閉塞の対策施設として写真-4に示すような河道上の



写真-1 (左) 荒廃した山林の様子
写真-2 (右) 豪雨による流木流出の様子



写真-3 (左) 豪雨時の流木による橋梁閉塞の事例
写真-4 (右) 河道への流木捕捉工の設置例

橋梁上流部に流木捕捉工を設置した場合の橋梁および流木捕捉工への流木集積と、その際の水位状況を流木捕捉工を設置しない場合とで水位への影響を比較し、対策の有効性について検討を行った。

2. 数値計算の概要

(1) 個別要素法の概要

本研究では、個別要素法(Distinct Element Method : DEM)を用いて流木による橋梁閉塞の数値解析を実施した。個別要素法は、接触力をモデル化し、接触力が作用する個々の粒子の運動をそれぞれの運動方程式を基にして、数値解析する手法である。基礎方程式は以下の(1)、(2)式で表される運動方程式である。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \sum \mathbf{f}_k(\mathbf{u}(t)) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{M}\mathbf{g} + \mathbf{f}_w(t) \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{M} : 質量マトリクス、 \mathbf{D} : 減衰マトリクス、

\mathbf{f}_k : ばね力の重心点等価力ベクトル, \mathbf{U} : 変位ベクトル, \mathbf{f} : 外力の総和, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル, \mathbf{f}_w : 流体力ベクトル, $(\dot{\quad}), (\ddot{\quad})$: 時間に関する1次微分, 2次微分である.

(2) 流体力の算出

流体力は, 本来であれば水の流れと固体である流木の運動との相互作用や, 流木周辺の流れについて時々刻々計算することが望まれる. その場合, 絡まりあう流木の隙間を通り抜ける複雑な流体運動を解く必要があり, 高度かつ膨大な計算量を要する. 本解析では計算負荷の軽減のため, 流速を流木群との相対位置の関数として与え, 初期に与えた流速と水深の範囲内にある要素に流体力が生じる流速分布モデルを用いた²⁾. 円柱形要素が受ける流体力の基本式は以下の式(3), (4), (5)に示す.

$$\mathbf{f}_{wij} = \frac{1}{2} C_D \rho w_j A_{ij} \begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} & |\dot{u}_{Rxij}| \\ \dot{u}_{Ryij} & |\dot{u}_{Ryij}| \\ \dot{u}_{Rzij} & |\dot{u}_{Rzij}| \end{bmatrix} + \mathbf{f}_{Bij} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{Rxij} \\ \dot{u}_{Ryij} \\ \dot{u}_{Rzij} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{ij} - \left(\dot{\mathbf{u}}_{pi} + \begin{bmatrix} 0 \\ l_{Gij} \dot{u}_{azi} \\ -l_{Gij} \dot{u}_{ayi} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

$$|\mathbf{f}_{Bij}| = \rho g w_j V_i \quad (5)$$

ここに, C_D : 抗力係数, ρ : 水の密度(=1.0g/cm³), w_j : 積分点 j の重み, A_{ij} : 要素 i の積分点 j における流れ方向の投影面積, \dot{u}_{Rxij} , \dot{u}_{Ryij} , \dot{u}_{Rzij} : それぞれ要素 i の局所座標系における積分点 j の速度と相対速度ベクトルの x , y , z 軸方向成分, $\dot{\mathbf{u}}_{pi}$: 要素 i の局所表敬における並進方向成分ベクトル, \dot{u}_{ayi} , \dot{u}_{azi} : それぞれ要素 i の局所座標系における y , z 軸回りの角速度, l_{Gij} : 要素中心を0とする円柱座標系要素の中心軸上における積分点 j の位置 ($-l_i/2 \leq l_{Gij} \leq l_i/2$), l_i : 要素 i の長さ, \mathbf{f}_{Bij} : 要素 i の積分点 j における浮力ベクトル, V_i : 要素 i の体積(cm³), g : 重力加速度(m/s²)である.

(3) 橋梁閉塞に伴う水位の算定

本研究では, 水の流れについて連成解析を行っていない. そのため, 渋谷ら⁹⁾の方法をもとに橋梁地点における水位の算出を行うこととした. 以下にその概要を記す.

渋谷ら⁹⁾は, 流木が捕捉され流水の透過断面積が減少すると, 流量が保存されるように, 捕捉された流木量

に応じて水深を変化させるものと仮定し, 流水の透過断面積は捕捉された流木の投影面積の総和によって表すものとした. また, 流木の投影面積の総和が流水の透過断面積の1.5倍となったときに橋梁の高さまで水位が上がり, それ以上の閉塞状況では水位は一定に保たれるものとした. また, 流木の投影面積が流水の透過断面積の2割以下の場合においては, 水位変化が起らないものと仮定した. 以上から, 橋梁の閉塞に対する水深 h' は以下の(6)式により算出される.

$$\begin{cases} h' = h_0 & \left(\sum A_{di} / A_0 < 0.2 \right) \\ h' = \frac{H - h_0}{1.3} \left(\frac{\sum A_{di}}{A_0} - 0.2 \right) + h_0 & \left(0.2 \leq \sum A_{di} / A_0 < 1.5 \right) \\ h' = h_0 & \left(1.5 < \sum A_{di} / A_0 \right) \end{cases} \quad (6)$$

ここに, H : 捕捉工高さ(cm), $\sum A_{di}$: 捕捉された流木の投影面積の総和(cm²), A_0 : 水路の断面積($A_0 = BH$ (cm²)), B : 水路幅(cm)である.

(4) 堰上げ水位の計算

ここでは, 国土技術政策総合研究所の砂防基本計画策定指針⁷⁾に示されている堰上げ水位の計算式を用いた. 以下の式(7-1), (7-2)に示す.

$$h_s = h' + \Delta h \quad (7-1)$$

$$\Delta h = k_m \sin \theta_m \left(\frac{D}{W} \right) \frac{U_h^2}{2g} \quad (7-2)$$

ここに, h_s : 堰上げ水深(cm), Δh : 堰上げ高, k_m : 断面係数(鋼管で $k_m \approx 2.0$), θ_m : 縦部材の純間隔(cm), U_h : 上流側の流速(m/s)である.

(5) 計算条件

図-1に示すような計算モデルを, 流木・橋梁は円柱形要素, 水路は三角形の平面要素を組み合わせて作成した. 表-1に解析モデルの諸条件を記す. 全てのスケールを現象に合わせる事ができないため, 渋谷ら⁶⁾の例を参考に, 模型実験スケールに合わせて計算を行った. 水路長は450cm, 水路幅30cm, 深さ30cm, とした. 水路勾配は河川の中流部を想定した1000分の1, 値としては0.057°であるが, 本計算では近似して0°として計算を行った. 流木の本数は100本に設定した. 橋梁は半径1.5cmの円柱モデルを用いて構築し, 幅30cm, 奥行8cm, 高さ15cmとし, 中心に半径1.5cmの橋脚を1本設置した. 流水に関しては初期水深を7.5cm, 流速を1m/sとした. また, 流木対策施設として, 図-2に示すように水路上の橋梁の上流部へ流木捕捉工を設置した場合の, 捕捉工での流木の捕捉状況および, 橋梁地点における水位の上昇に

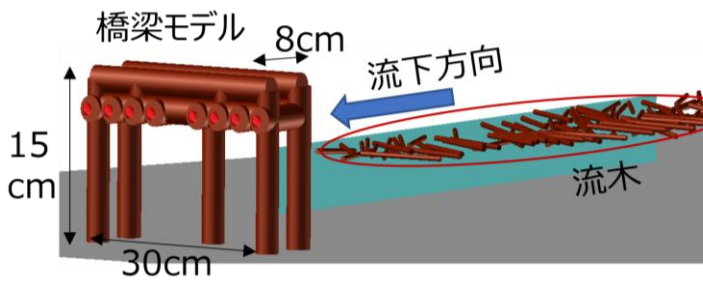


図-1 橋梁閉塞計算模式図（捕捉工なし）

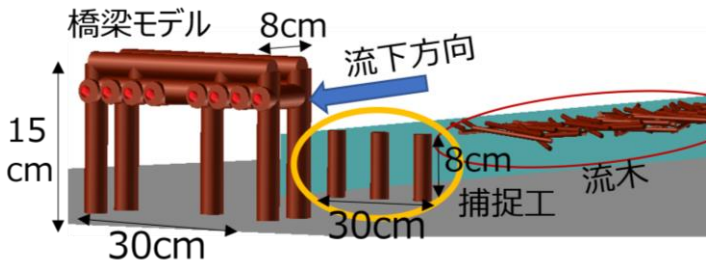


図-2 橋梁閉塞計算模式図（捕捉工あり）

表-1 計算諸条件

項目		値
水路	勾配	0°
	長さ	300cm
	幅	30cm
流水	流速	1 m/s
	初期水深	7.5 cm
流木	長さ	12 cm
	直径	6 mm
	密度	980 kg/m ³
	本数	100本
橋梁モデル	幅	30cm
	奥行き	8cm
	高さ	15cm
	半径	1.5cm
捕捉工モデル	幅	30cm
	高さ	8cm
	半径	1.2cm
計算条件	時間刻み	1.0×10 ⁻⁶ s

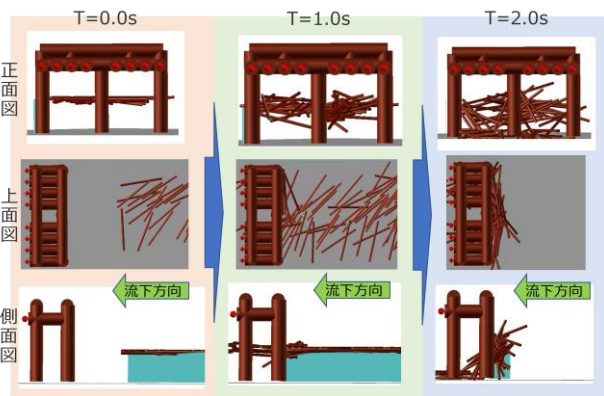


図-3 (左) 橋梁閉塞計算結果（捕捉工なし）

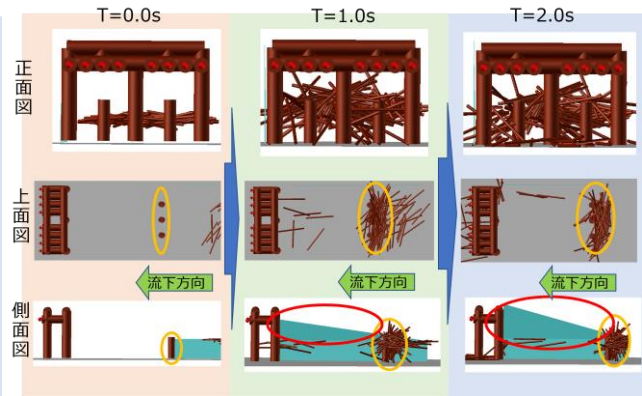


図-4 (右) 橋梁閉塞計算結果（捕捉工あり）

捕捉工がない場合、橋梁の中心に設置された橋脚により流木が捕捉され、閉塞現象が起きている
 流木捕捉工の設置により、橋梁に到達する前に捕捉工によって流木が捕捉できている

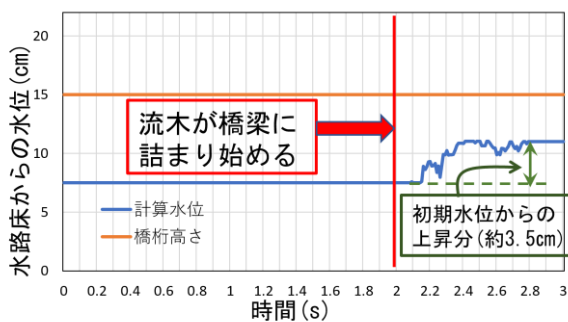


図-5 (左) 捕捉工がない場合の水位の上昇

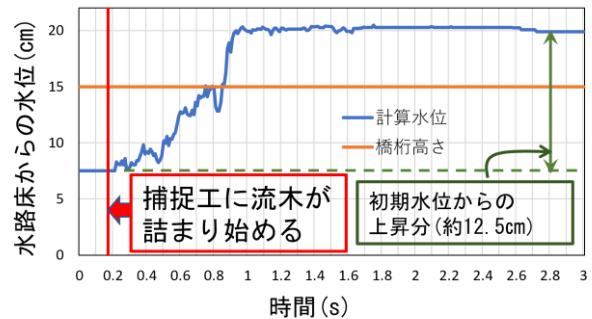


図-6 (右) 捕捉工がある場合の水位の上昇

流木捕捉工を設置した場合が、設置しない場合に比べ橋梁地点における水位の上がり方が大きく計算されている

についても計算・検討を行った。捕捉工は半径1.2cmの円柱モデルを用いて作成し、幅は30cm、高さは8cm、捕捉工間隔は6cmとした。

3. 計算結果と考察

(1) 橋梁の流木閉塞過程の計算結果

図-3に橋梁への流木の流下過程の時系列を示す。正面図および側面図より、流木が水面に浮いて流下してくる様子がわかる。図-3のT=1.0s時点での上面図および側面図をみると、流木が橋梁の真ん中の支柱と衝突し、T=2.0sのときに橋梁中心の橋脚に流木がせき止められている。橋梁閉塞が起きた原因としては、まず流木が橋梁を通過する際に、橋梁の中心を通過する流木は橋梁中心にある橋脚に接触・回転しながら流下していくが、回転した際に後続の流木と接触し絡み合う、ということが考えられる。図-5に着目すると、流木が橋梁に通過している段階であるT=1.0s時点では水位の上昇は認められないものの、流木が橋梁に詰まり始めたT=2.0s頃に水位が上がり始め、水位が上昇していることがわかる。

(2) 捕捉工を設置した場合の計算結果

図-4に、橋梁の上流側に流木捕捉工を設置した場合の流木の流下過程および橋梁・流木捕捉工への流木の集積状況の時系列を示す。流木捕捉工によって流木が捕捉され、橋梁での閉塞が発生していないことがわかる。しかし、図-6に示すように流木捕捉工の設置による水位上昇に関しては流木捕捉工を設置しない場合よりも高くなってしまっている。これは、本研究で用いたの水位の算出方法が、捕捉された流木量に応じて水深を変化させるものと仮定し、流水の透過断面積は捕捉された流木の投影面積の総和によって表すものとしているために、流木捕捉工時点での捕捉率が高くなることによって、水位が水路上の流木の捕捉率の高さに引っ張られ、水位が上昇してしまったことが原因であると考えられる。

4. おわりに

本研究は流木による橋梁閉塞が河川水位に与える影響の分析を目的とし、流木が橋梁に詰まり閉塞する過程のシミュレーションを行い、その際の河川水位に与える影響を分析した。その後、対策として水路上の橋梁上流部に流木捕捉工を設置した場合の橋梁への流木集積と、その際の水位状況を流木捕捉工を設置しない場合とで水位への影響を比較し、対策の有効性について検討を行った。知見としては以下のとおりである。

・円柱形要素と三角形要素を用いた個別要素法の解析によって、橋梁への流木による閉塞状況および、流木による閉塞で水位が上昇する様子を概ね表現できるこ

とを示した。

・橋梁の上流側に流木捕捉工を設置した場合、橋梁への流木集積を防ぐことに有効であることを示せた。しかし、流木捕捉工を設置しない場合よりも水位が高くなってしまおうという計算結果となっている。

今後の展望としては以下のとおりである。

・同様の条件で実際の模型実験を行い、流木による閉塞の仕方や水位変化について解析の妥当性を検討する。

・解析の精度向上を目的として、橋梁閉塞による災害事例、実験事例を蓄積する。

・水位上昇の表現方法について、現在、流木捕捉工に流木が捕捉され流水の透過断面積が減少すると、捕捉された流木量に応じて水深を変化させるものと仮定しているが、流木捕捉工地点での流水の透過断面積に引っ張られて水位が上昇してしまっているため、橋梁地点での捕捉率を用いて算出できるようにする。

参考文献

- 1) 合田 明弘, 小森 大輔, 横山 光, 山本 道, 森田 陽, 板倉 健太, 山田 正: 肱川流域の山地溪流における流木の堆積特性に関する研究, 河川技術論文集第 26 巻, pp.557-562, 2020.
- 2) 土木学会水工学委員会 2017 年九州北部豪雨災害調査団: 平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害調査団報告書, p55,2020.
- 3) 小森 大輔, Vempi Satriya Adi HENDRAWAN, 市場 昭裕, 山田 慶太郎, 合田 明弘: 令和元年台風第 19 号による岩手県沿岸域における水害発生メカニズムの考察, 土木学会論文集 B1 (水工学) 第 76 巻, pp.430-463, 2020.
- 4) 香月 智・渋谷 一・大隅 久・石川 信隆: 三次元個別要素法による実橋梁の流木閉塞災害事例の解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.1, 1-15, 2013.
- 5) 岡本 隆明・竹林 洋史・鈴木 隆太・山上 路生・戸田 圭一: 流木集積による橋梁閉塞と迂回流の氾濫流量に関する実験的研究, 自然災害科学 J. JSNDS 36 -4 447 -461, 2018.
- 6) 渋谷 一・香月 智・大隅 久・石川 信隆・水山 高久: 円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.1, 113-132, 2011.
- 7) 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, 国土技術政策総合研究所資料 No.904, 2016.