B-47

準三次元流れにおける流木の挙動に関する研究

STUDY ON THE BEHAVIOR OF DRIFTWOOD IN THE FLOW

北海道大学工学部環境社会工学科 〇学生員
 北海道大学大学院工学研究院 准教授 正会員
 北海道大学大学院工学研究院 教授 フェロー株式会社 水工リサーチ 業務部 正会員
 株式会社 水工リサーチ 業務部 正会員
 北海道大学大学院工学研究院 教授 正会員

学生員 吉沢朋樹 (Tomoki Yoshizawa)
正会員 久加朋子 (Tomoko Kyuka)
フェロー 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)
正会員 加藤一夫 (Kazuo Kato)
正会員 サムナー圭希 (Tamaki Sumner)
正会員 今日出人 (Hideto Kon)

1. 研究背景

平成30年の西日本豪雨,平成29年の九州北部豪雨, 平成28年の北海道豪雨災害など,以前には考えられな かった雨量によって近年,豪雨災害が激甚化している¹⁾. 特に,上流で発生した流木が下流に流出することで,家 屋や橋梁に大きな被害が出ている.

平成28年8月に発生した台風10号は、東北地方や北 海道に大きな爪痕を残した 2). 東北地方の太平洋側から 上陸したのは史上初であり、岩手県の岩泉町では小本川 が氾濫し、上流で発生した流木が高齢者施設に到達して 9名が亡くなるなど、甚大な被害が発生した. 図-1 に、 岩手県を流れる小本川の流域図を示す. この災害を契機 に,小本川では山間地における湾曲部外岸に流木捕捉施 設を設置する計画が立案され、水理模型実験により河道 湾曲部における流木挙動の把握が試みられている³⁾. これらの報告によると、水路実験での模擬流木は河道湾 曲部の3次元的な流況により下層に潜り込み外岸から内 岸側へ移動すること、また流木長の違いによって異なっ た挙動を示すことが指摘されている.しかしながら、流 況中の流木がどのような挙動を示すのかは未知な部分も 多く,出水中の流木による被害を今後軽減していく為に も、それらを検討することは急務である.

そこで本研究では、流木の挙動と流れの関係を検討す るため、小本川をモデルとした水路実験³⁾を参考に、 数値計算による蛇行流路内の流木挙動の把握を試みた. 具体的には、準3次元流れの計算モデルに個別要素法を 用いた流木モデルを組み込んだモデルより、流木の長さ と直径等の条件を変え、流木挙動の感度分析を行った.

2. 数值解析

2.1 解析モデル

流水中における流木の挙動を検討するため,準3次元 非定常流の数値計算を行った.手順は以下の通りである まず,iRIC ソフトウェアに搭載されている既存ソルバ の Nays2D を用いて流れの計算を行い,水深平均流速か ら局所的な流線の曲率半径を算出した.次いで,改良プ ログラムにより,求めた曲率半径と局所的な水深から Engelund⁴による平衡 2 次流を仮定した準 3 次元流を計 算した.流木の計算は,上記で得られた準 3 次元流中の 水深平均流速および底面流速のいずれかを用い,個別要 素法より流木の移動を計算した.流木に働く力 m'_i は 以下の式(1) と図-2 の通りである.



図-1 小本川流域図

$$m'_i = \rho \left(\frac{\sigma}{2} + C_m\right) V_i, \quad V_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 l_i$$
 (1)

ここに、 ρ :流体の密度、 σ :流木の密度、 C_m :付加質 量係数(=0.5)、 V_i :円柱の体積、 d_i :個別要素の円柱の 底面の直径、 l_i :個別要素の円柱の長さである.

個別要素に作用する力の総和*Fx_iとFy_iは、*式(2)より求める.

$$m'_{i}\frac{du_{pi}}{dt} = Fx_{i} + \frac{1}{2}\rho C_{D}Ax_{i}\left(u - u_{pi}\right)$$
⁽²⁾

 $m'_{i} \frac{dv_{pi}}{dt} = Fy_{i} + \frac{1}{2}\rho C_{D}Ay_{i} \sqrt{\left(u - u_{pi}\right)^{2} + \left(v - v_{pi}\right)^{2}} \left(v - v_{pi}\right)$ (3)

ここに、 Ax_i , Ay_i : 円柱の投影面積, C_D : 形状抵抗係数 (=1), u, v: 流下方向と横断方向の流速, u_{pi}, v_{pi} : 個別 要素の流下方向と横断方向の移動速度である. 個別要素 の慣性モーメント I_i は以下の式(4)より表わされる.

$$I_i \frac{d\omega_{pi}}{dt} = M_i \tag{4}$$

ここに、 ω_{pi} :個別要素の回転速度、 M_i :個別要素に 作用する回転モーメントである.

流木に働く回転速度を得るため,個別要素の円柱に働 く力を図-2の通り考える.円柱両端における流速の円柱 上軸方向成分(図-2) *u*_{N0}と*u*_{N1}は次式より求める.

$$u_{N0} = -u_{x0}\sin\varphi_i + u_{y0}\cos\varphi_i \tag{5}$$

$$u_{N1} = -u_{r1}\sin\varphi_i + u_{r1}\cos\varphi_i \tag{6}$$

$$v_{pi} = \omega_i \frac{l_i}{2} \tag{7}$$

ここに、vpi:円柱両端における円柱回転起因の移動速



図-2 個別要素の円柱に働く力

度, ω_i :円柱の回転速度, φ_i :円柱の角度, $u_{x0}u_{y0}$:右端の x 軸 y 軸の流下方向の流速, $u_{x1}u_{y1}$:左端の x 軸 y 軸の流下方向の流速とし,円柱に働く力 f_0 , f_1 (図-2) は,次式より求める.

$$f_0 = \frac{1}{2}\rho C_r d_i (u_{N0} - u_{pi}) |u_{N0} + v_{pi}|$$
(8)

$$f_1 = \frac{1}{2}\rho C_r d_i (u_{N1} - u_{pi}) |u_{N1} + v_{pi}|$$
(9)

ここに, C_r:回転運動への抵抗係数(=1)である.

円柱に直交にする方向の力Fwは式(10)より求める.

$$F_w = \frac{1}{2}(f_1 + f_0)l_i \tag{10}$$

$$x_g = \frac{(f_0 + 2f_1)l_i}{3(f_0 + f_1)} - \frac{1}{2}l_i \tag{11}$$

ここに、 x_g : 円柱の重心位置から円柱中心までの距離 である. 個別要素に作用する回転モーメント M_i と円柱 の個別要素の慣性モーメント I_i は以下の式より求める.

$$M_i = F_w x_g \tag{12}$$

$$I_i = \left(\frac{d_i^2}{4} + \frac{l_i^2}{12}\right) m_i \tag{13}$$

$$m_i = \frac{\pi}{4} d_i^2 l_i \sigma \tag{14}$$

ここに, m_i :円柱の質量である.以上より、流木の回転速度は以下の式(15)より得られる。

$$\frac{d\omega_{pi}}{dt} = \frac{M_i}{I_i} = \frac{\frac{1}{2}(f_1 + f_0)l_i \left(\frac{(J_0 + 2f_1)l_i}{3(f_0 + f_1)} - \frac{1}{2}l_i\right)}{\left(\frac{d_i^2}{4} + \frac{l_i^2}{12}\right)_i^{T} d_i^2 l_i \sigma}$$

(15)

2.2 計算条件

数値計算に用いた水路は、小本川の KP34 付近に位置 する山間部の地形特性を参考に作成した正弦曲線水路と する.計算水路長は 600m,水路幅は 30m,河床勾配は 1/100 とした.格子の大きさは、縦断方向に 4m,横断方 向に 3m と設定した.河床材料は現地を参考に 50mm の 均一砂,河床の粗度係数は 0.031 とした.

ハイドログラフを図-3に示す.最初に蛇行河川におけ る河床地形を形成するため,小本川上流域における1/10 年超過確率規模の流量である470 m³/sの水を流し,河床 形状が動的平衡状態に達した段階で流量を減少させつつ, 流木を供給した.流木は1500 秒から1950 秒の450 秒間



にわたって、上流端から5秒おきに9本、計810本供給 した.流木の密度は既往研究⁵⁾を参考に1100 kg/m³とし、 付加質量係数は0.5、形状抵抗係数は1とした.計算上、 水深が流木の直径以下になった時、または谷軸方向の流 速が0m/sになった時に流木は停止するものとした.ま た、今回は参考資料⁵⁾より流木の密度が水よりも大きか ったため、水表面での流速ではなく、水深平均流速と底 面流速のいずれかを用いることとした.

表-1に,流木に関する計算条件を示す.流木の長さと 直径の違いが流木の挙動に与える影響を考察するため, 今回は長さと直径の異なる全8ケースの計算を行った. Case1 と Case2 は水深平均流速と底面流速による流木挙 動の比較, Case1 と Case3, Case4, Case5 は流木長さに よる流木挙動の比較, Case1 と Cse6, Case7, Case8 は流 木の直径の違いによる流木挙動の比較を行うものである.

3. 結果と考察

(1) 水深平均流速と底面流速の違い

図-4 に、Casel および Case2 の 2,200 秒経過時におけ る流木の停止位置と水深コンター図を示す.計算上では 流木を円柱として扱っているが、今回は円柱モデルの重 心位置を点として描画している.図-4より流木停止位置 を比較すると、平均水深流速を用いた Casel では、流木 は主に蛇行内岸側の砂州の上に堆積していることが分か る(図-4-a の赤枠).一方、底面流速を用いて流木を計 算した Case2 では、蛇行内岸部から蛇行外岸部まで幅広 く流木が堆積していることが見て取れる(図-4-b の赤 枠).この停止位置の違いを比較するため、図-5に、そ れぞれ 2,200 秒経過時における Casel と Case2 の流速ベ クトル・水深コンター図を示す.ここで、図-5 を比較す

表-1	数値計	+篁にま	うける	流木	条件
4X-1	欧胆	弁(〜小	ງເງເລ	1/1/1	TIT

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
流木長[m]	6	6	3	9	12	6	6	6
直径[m]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.5	0.7
流速[m/s]	水深平均流速	底面流速	水深平均流速	水深平均流速	水深平均流速	水深平均流速	水深平均流速	水深平均流速



ると、底面流速と水深平均流速に平面的な分布の違いが 生じており、平均水深流速を用いて計算した Casel の方 が流速の谷軸方向成分が比較的大きくなっていることが わかる(図-5-a の赤枠). このため、Casel では外岸側 への流木の堆積が進まなかったと考えられる.一方、底 面流速を用いて計算した Case2 では、2 次流の影響で内 岸へと向かう横断方向成分の流速が大きいことがわかる (図-5-b の赤枠). このため、水深が浅い蛇行内岸側に

も流木が流れ込み,全体的に Casel よりも多くの流木が 堆積したと考えられる.

(2) 流木の長さの違い

ここでは、Case1、Case3~Case5 より、流木長さによ る影響を比較する. 図-6-a, b, c, d はそれぞれ、流木 長を 3m とした Case3, 6m とした Case1, 9m とした Case4, 12m とした Case5 の計算結果である. いずれも 2,200 秒経過時において、水深平均流速による流木の堆 積結果を水深コンター図と併せて示している. 図-6から、 流木の長さが短い Case3 (図-6-a) ほど流木は途中で堆 積せずに下流へと流れていることが分かる.また,あま り分散することなく蛇行内岸側の砂州上流側にまとまっ て堆積している.逆に,流木が長いほど蛇行内岸側の砂 州下流の方までばらついて堆積している.これは,短い 流木は速い流れに乗りやすく,浅い部分にあまり流れ込 まない為であると考えられる.また,長い流木は流れて いく際に,片方の端は比較的流れが速くなり,もう片方 では流れが比較的遅くなるために回転運動が起きやすく なり,水深が浅い蛇行内岸側にも流木が流れ込むためだ と考えられる.

(3) 流木の直径の違い

ここでは、Case1、Case6~Case8 より、流木の直系の 違いによる影響を比較する. 図-7-a, b, c, d はそれぞ れ、流木の直径を0.1mとした Case6、0.3mとした Case1, 0.5m とした Case7, 0.7m とした Case8 の計算結果であ る. 図-7 から、直径が小さい Case6 (図-7-a) ほど流速 が大きい蛇行外岸側に集中して流木が流れ込み、蛇行内 岸側の非常に浅い限られた部分でしか堆積せずに下流へ



図-7 流木の直径の違いによる流木の停止位置(黒点),コンター図は水深を示す

流れていくことが分かる.また,直径が大きくなるほど, 流路中央のやや浅いところから蛇行内岸側にかけて多く の流木が堆積していることが見て取れる(図-7-d).こ れは,直径が大きいために堆積が起こりやすく,後続の 流木が堆積した流木と衝突して前方に押し出されたため に広がって堆積したと考えられる.

4. まとめ

以下,本研究で得られた知見を示す.

 水深平均流速を用いた場合と底面流速を用いた場合では流木の挙動が異なり、二次流の影響によって底面流速を用いた場合の方がより蛇行内岸側の水深が浅い部分で 堆積する。

・流木が長いほど、流木の両端における流速差に起因する回転運動の影響を受け、より多くの流木が蛇行内岸側に堆積する.

・流木の直径が大きいほど、水深の浅い部分に広がって 堆積しやすい傾向がある.

今後は流木の比重を変えるといった更なる感度分析を 行うとともに,実験結果等とも照合しながら実河川での 適用を目指したい.

5. 謝辞

本研究において,寒地土木研究所の井上卓也氏,北海 道大学大学院工学研究院の渡邉健人氏、森川剛氏、奥田 醇氏から貴重なご助言を頂いた.ここに感謝の意を記す.

6. 参考文献

- 土木学会水工学委員会:2017 年九州北部豪雨災害 調査団合同調査報告2017
- 岩手県県土整備部河川課沿岸広域振興局岩泉土木 センター:第1回小本川河川整備連絡協議会「小 本川河川整備計画(素案)資料4」,2017.
- 加藤一夫,小笠原敏紀ら:小本川の流木捕捉施設 設計に関する水理模型実験による検討,河川技術 論文集,第24巻,pp.137-142,2018.
- 4) Frank Engelund, "FLOW AND BED TOPOGRAPHY IN CHANNEL BENDS", *JOURNAL OF THE HYDRAULICS DIVISION*, p1631-1648, 1974.
- 5) 堂薗俊多:河川流域の流木発生ポテンシャルに基 づく橋梁の流木災害リスク評価法の開発,九州大 学学術情報リポジトリ,2017