

橋梁部での流木沈下過程と全面閉塞の限界条件に関する実験的研究

岡本 隆明¹・染谷 智紘¹・松本 知将¹・山上 路生¹・田中 健太¹

EXPERIMENTAL STUDY ON SINK MOTION OF DRIFTWOOD AND CRITICAL CONDITION FOR DRIFTWOOD BLOCKING

Taka-aki OKAMOTO¹, Tomohiro SOMEYA¹, Kazumasa MATSUMOTO¹,
Michio SANJOU¹ and Kenta TANAKA¹

Abstract

At the time of heavy rain, driftwood accumulates at river infrastructures and blocks a river. Driftwood accumulation results in an increase of backwater. It is well known that driftwood sinks under the water surface and the entire depth region is blocked. However, there is almost no detailed information about the porosity of wood jam and the mechanism that driftwood sinks under the water surface. In this study, two kinds of flume experiments were performed. First, driftwood accumulation experiments at a two-pier bridge were conducted. We examined the effect of the approach flow velocity, approach flow depth and specific density of driftwood on the porosity of wood jam. Then, we conducted PIV measurement to examine the effect of the downward flow on the driftwood accumulation. The experimental results revealed the critical condition for driftwood blocking.

キーワード：流木閉塞時の遮蔽率，流木沈下過程，全面閉塞の限界条件，修正リチャードソン数，表面流況，PIV

Key words: Porosity of driftwood blocking, driftwood sink motion, critical condition for blocking whole depth region, modified Richardson number, surface velocity, PIV

1. はじめに

近年，豪雨時の山地斜面での流木流出に伴う河

川災害がしばしば報告されている。大量の流木が河川に流出すると橋梁部で河道が閉塞し，広

¹ 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
Department of Civil and Earth Resources Engineering,
Kyoto University

本論文に対する討議は2021年8月末日まで受け付ける。

範囲の氾濫(図1, 平成29年九州北部豪雨, 橋本ら(2018))や迂回流による周辺の家屋流失が生じる。さらに, 氾濫原に流入した流木が家屋被害をより拡大させており, その対策が急務となっている(山本ら(2017), 守屋ら(2018), 矢野ら(2018))。流木対策のためには流木の流出, 流動, 集積などのプロセスに分けて研究する必要がある, 多くの既往研究により貴重な知見が得られている。

流木の流動・集積に関する研究としては清水・長田(2007)は流木が棒状である場合と枝付形状とした場合での橋脚部での集積率の違いを数値実験から検証した。枝付き流木では最大値で集積率0.8にも達し, 枝なし流木の4倍程度となることを示した。

Shresthaら(2012)は氾濫流のオイラー的解析法, 流木のラグランジェ追跡法を組み合わせた数値解析を行い, 氾濫流による流木群の流動・拡散過程, スリットダムでの流木捕捉が良好に再現できることを示した。

中谷ら(2017)は流木長と流下時の流木濃度を系統変化させて, 橋梁部で流木集積が発生する限界条件について調べた。山上・岡本(2016)は流木の重心位置の影響について調べ, 流木の重心が偏心しているケースでは橋梁前面で縦向きに捕捉され, 河道閉塞率が上昇することを指摘した。

木村・北園(2017)は流れの三次元性が流木挙動に及ぼす影響について調べた。流木リチャード

ソン数を定義し, 捕捉時の流木沈下率との関係を導出した。木村(2019)は流木径を長さスケールとする修正流木リチャードソン数を支配パラメータとして新たに提案した。赤堀(2018)はフルード数が大きいと橋脚前面で流木が沈下し堰上げ水深効果が大きくなることを示した。流木の浮力と重力の差と抗力が生じさせるモーメントを用いて流木沈下現象が起きる接触角を示した。著者ら(2018)は橋梁部での流木集積によるせき上げ水深を計測し, 既知の遮蔽率のポーラス板による水深と比較することで橋梁部での河道閉塞率を定量的に評価した。また越流した迂回氾濫流を鉛直PIV計測し, 左岸と右岸の高低差の影響を明らかにした。さらに抗力計測により家屋流出被害について調べた。

このように流木に関する研究は多くみられる。しかしながら, 水より比重の小さい流木が浮力によって水面から底面に向かって沈下するメカニズムや全面閉塞する限界条件については未解明点が多い。著者らの既往研究(2018)では流速は変化させているが, 初期水深・流木の比重を一定としており, 底面から水面までの領域が流木により全面閉塞する限界条件は評価できていない。流木沈下には橋梁前面の下降流の影響が大きいと考えられるが, これまで流木沈下する瞬間の流木の挙動と周辺の流れ場を計測し, 流木沈下メカニズムについて考察した例はあまりみられない。

(a)



(b)



図1 (a) 都市域の河川での流木集積(2014年福知山市弘法川), (b) 橋梁での流木による全面閉塞(2017年福岡県大肥川, 橋本ら(2018))

そこで本研究では流木集積実験を行い、橋梁前面での流木塊の形成過程を水路側方・上方の2台のビデオカメラで観察し、せき上げ水深と同時計測することで流木沈下過程と河道閉塞率の時間変化について調べた。また流木の比重、平均流速、初期水深を変化させて流木沈下して全面閉塞する限界条件と支配パラメータを明らかにした。次に流木沈下と与える周辺の流れ場の影響について考察するために、PIV計測した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 流木捕捉実験と流木集積実験による河道閉塞率の評価

本研究では、橋梁での捕捉率を評価する流木捕捉実験と河道閉塞率を評価する流木集積実験を行った。実験には長さ10 m、幅0.4 m、高さ0.5 mの可変勾配水路を用いた。 x, y および z はそれぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向である。 $x = 0$ は河道閉塞部（橋梁の上流端位置に対応）の流下方向位置、鉛直方向原点 $y = 0$ は水路底面、横断方向原点 $z = 0$ は右岸側の水路壁とした。 U, V および W は各方向における時間平均流速を示す。

図2のように水路側方から橋梁前面に形成される流木塊を観察できるようにするために氾濫原模型（塩ビ製）を左岸側に設置した。低水路幅は $B_m = 0.2$ m、氾濫原幅は $B_j = 0.2$ m である。氾濫原高さは $D = 0.1$ m で流下方向に一樣とした。

橋梁模型（1/80スケール）は水路の上流端から4.0 mの位置に設置した。本研究では流れに対して横向きに捕捉された流木がどのように沈下するかについて調べるために、2本橋脚を有している橋梁模型を用いた。橋長0.2 m、幅員0.05 m、床板厚0.01 mで、高さ0.09 m、幅0.01 mの橋脚部を有しており、橋脚間距離は0.06 mである。橋梁模型の上部には欄干部として高さ0.03 m、幅0.2 m、厚さ2 mmのメッシュ（メッシュサイズ 2×2 mm）板を取り付けている。また流木が捕捉されていない状態での河道全体の断面積 $A (= B_m \times D)$ に対する橋梁模型の投影面積の割合は $A_b/A = 0.19$ である。

流木模型として木製円柱（直径 $d = 6.0$ mm、長さ $l = 0.12$ m、山上・岡本（2016）、著者ら（2018））を用いた。針葉樹は比重が1よりも小さいとされているため比重は1よりも小さく設定している（比重0.7, 0.81）。

流木捕捉実験では橋梁模型から2 m上流から水路中央に10本ずつまとめて同時に投入した。着水時の給木方向はランダムとなる。毎回捕捉された流木を除去した後、次の流木を投入している。これを40回繰り返す（Shalkoら（2017））、橋梁模型の前面での捕捉率を調べた。毎回投入した流木本数10本に対する捕捉本数を流木が捕捉されていない状態（初期）の橋脚での流木捕捉率 P_{bi} と定義する。

流木集積実験でも10本ずつ流木を投入しているが、捕捉された流木は除去せず投入を繰り返した。供給した流木量は各ケース計300本とした。

流木塊の形成過程について調べるために、水路上方と側方にそれぞれビデオカメラを設置し、水面付近での流木塊の流下方向長さ L_{xi} 、底面側での流木塊の流下方向長さ L_{x2} 、鉛直方向長さ L_y の時間変化を計測した。流木集積時のせき上げ水深 H の時間変化も計測している。水深の計測位置は橋梁部の20 cm上流側の点である。流木集積実験では橋梁での流木捕捉率を毎回投入した流木本数10本に対して捕捉された流木の本数として算出し、流木捕捉率の時間変化 $P_b(n_d)$ を調べた。各ケースについて6回実験を行った。

また図2(c)のように流木捕捉時の橋梁部での河道閉塞率について調べるために、流木除去後に橋梁模型の前面に既知の遮蔽面積のアルミ製ポーラス板（0.2 m \times 0.15 m、パンチ径3.0 mmで穴の配置は均等、著者ら（2018））を設置して橋梁模型の上流側の水深 H_b を計測した。流木閉塞時のせき上げ水深の最終値 H_{max} と比較することで河道閉塞率 A_b/A を評価した。ここで A_b は閉塞面積である。本研究ではアルミ板の空いている穴の大きさや個数を変えることで、河道閉塞率 A_b/A を変化させている。

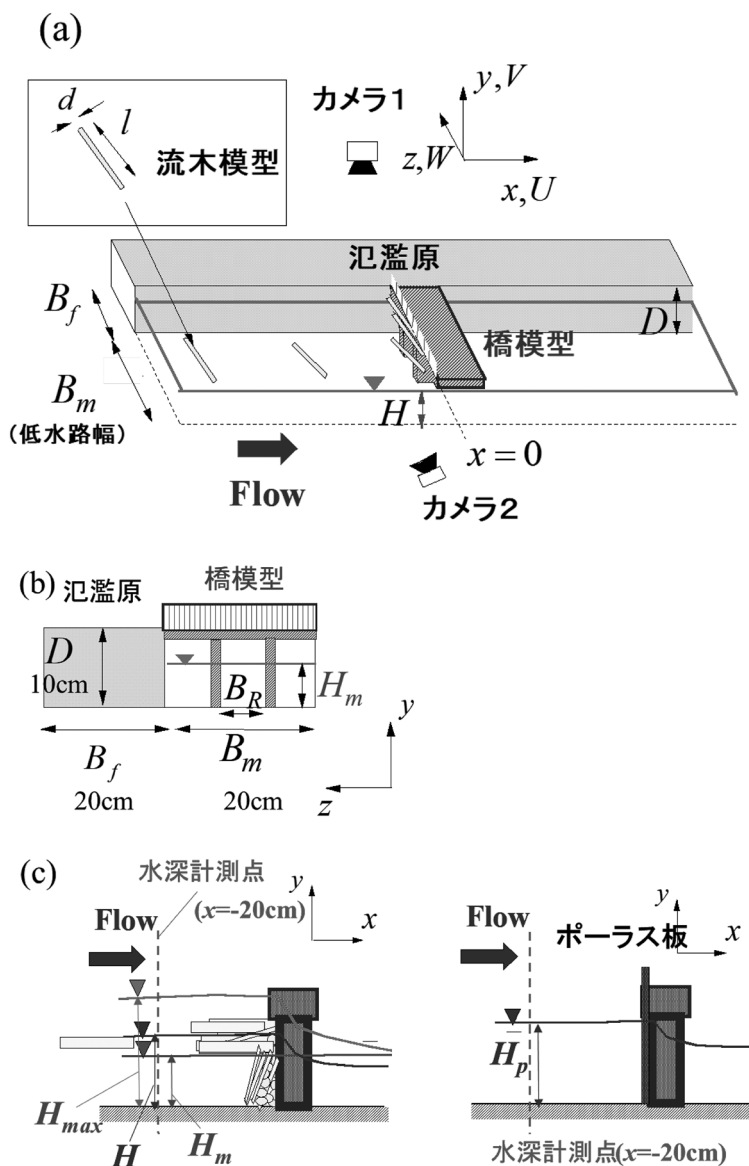


図2 橋梁での流木集積実験 (a) 流木塊の形成過程の計測, (b) 橋梁模型, (c) 流木によるせき上げ水深と河道閉塞率の評価

2.2 流木閉塞時の橋脚前面の流れの流速計測

流木集積過程への下降流の影響について調べるために図3のようにPIV法による流速計測を行った。流木集積時には水面は流木塊で覆われるため水路上方からレーザー光を照射することは不可能なので、水路下方から3.0Wのアルゴンイオンレーザー(LLS)を照射した。水路側方に設置した高

速度カメラ(1024×1024pixel)で撮影した。外部トリガからのダブルパルス信号を用いてフレームレート500Hz、サンプリングレート30Hzで60秒間撮影した。撮影領域のサイズは20cm×20cm領域である。

流木集積の初期過程では橋脚前面で発生する下降流の影響が大きいと考えられるため、まず

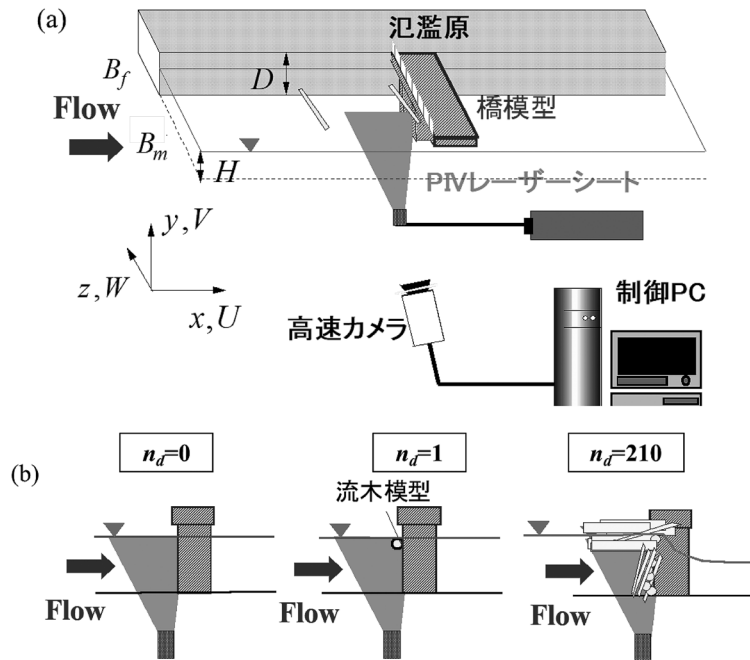


図3 (a) 流木集積時の橋脚前面の鉛直 PIV 計測, (b) 流木捕捉前後の鉛直 PIV 計測

図3 (b) のように流木が捕捉されていない状態 ($n_d = 0$) で橋脚の上流側の流速を鉛直面 PIV 計測した。横断方向の LLS 照射位置は橋脚間の中心ライン $z/B_m = 0.5$, 橋脚前面の中心ライン $z/B_m = 0.67$ とした。

次に流木模型を1本投入し、橋脚で横向きに捕捉された状態 ($n_d = 1$) で PIV 計測し、流木捕捉による表面流況の変化を調べた。さらに流木模型を1本投入し、投入された流木と前に捕捉されている流木の中心位置を追跡した。PIV 法によって流木捕捉時の周辺の瞬間流速も計測することで、表面流況が流木の沈下メカニズムに与える影響について調べた。

また流木集積が進んでいくと水面付近で流木塊が上流側に成長し、流木が流木塊の下に潜り込むのも観察された。流れてきた流木が流木塊の下に潜り込み始めたとき ($n_d = 210$), 水路下方から LLS を照射し、流木塊の周辺の流速を PIV 計測した。

2.3 実験条件

表1に流木捕捉実験、流木集積実験の実験条件を示す。流木沈下の支配パラメータを明らかにするために、水路勾配を調整して初期水深を $H_m = 0.07, 0.085$ m, 断面平均流速 U_m を $0.14\text{--}0.43$ m/s (実河川流速 $1.25\text{--}3.84$ m/s に対応) に変化させた。また流木の比重も $0.7, 0.81$ に変化させている。流木集積実験の終了後、流木を除去し各ケースについて既知の遮蔽率のポラス板の水深と比較し、河道閉塞率 A_f/A を評価している。

流木集積時の鉛直面 PIV 計測については流木集積前の初期水深、流速は $H_m = 0.07$ m, $U_m = 0.36$ m/s とした。流木集積の初期過程について考察するために流木が0本、1本捕捉された状態で橋脚前面の流速を PIV 計測した。また多数捕捉された状態での流木集積過程について調べるために、流木210本投入時の流木塊近傍の流速を PIV 計測した。

表1 実験条件

U_m (m/s)	H_m (m)	D (m)	l (m)	d (m)	l/d	ρ_d	B_g (m)	Fr
0.14	0.07	0.10	0.12	0.006	20	0.70	0.06	0.17
0.18								0.22
0.21								0.26
0.25								0.30
0.29								0.34
0.36								0.43
0.43								0.52
0.14	0.07	0.10	0.12	0.006	20	0.81	0.06	0.17
0.18								0.22
0.21								0.26
0.25								0.30
0.29								0.34
0.36								0.43
0.43								0.52
0.14	0.085	0.10	0.12	0.006	20	0.81	0.06	0.16
0.18								0.19
0.21								0.23
0.25								0.27
0.29								0.31
0.36								0.39
0.43								0.47

3. 実験結果と考察

3.1 流木塊の形成過程と河道閉塞率の変化

本節ではまず、橋梁での流木捕捉率に注目する。図4に橋梁での初期の流木捕捉率 $P_{b,i}$ の変化を示す。ここで用いた流木の比重は0.81である。流速が大きくなるほど橋梁での流木捕捉率が小さくなっている。流速が小さいケースでは流木の一部が橋脚に接触したときでも捕捉される。これに対し、流速が大きいケースでは流木が橋脚にぶつかったときに流木が流れによって回転して、下流側に流出してしまうためである。

初期水深 H_m の違う2ケースで比較したが、水深の流木捕捉率への影響はほとんどみられない。Shalko (2017) は橋梁での流木捕捉率は水深の影響が少ないためフルード数で整理することは困難であるとし、断面平均流速で整理している。

次に、流木塊の形成過程と沈下メカニズムについて考察する。図5に流木集積時の橋梁での流木捕捉率 P_b の累計流木投入本数 n_d による変化を示す。流木投入前の初期水深は $H_m/D=0.7$ 、断面平均流速 $U_m=0.36$ m/s である。

流木が捕捉されていない状態（初期）の橋脚での流木捕捉率は図4から $P_b=0.43$ であるが、流木

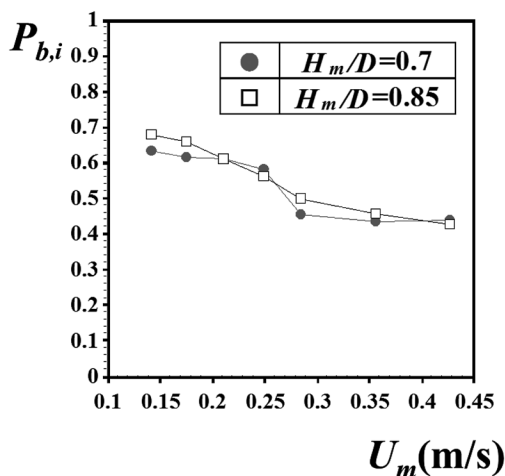


図4 橋梁での初期の流木捕捉率（初期水深、断面平均流速の影響）

が一度捕捉されると、流木捕捉率は急激に上昇し後続のほとんどの流木が捕捉されるようになる。このケースでは60本投入すると ($n_d=60$)、投入した全ての流木が捕捉され、流木塊が形成されるようになった。

図6に橋梁前面での流木塊の形成過程のスナップショットを示す。図7 (a) に流木集積時のせき

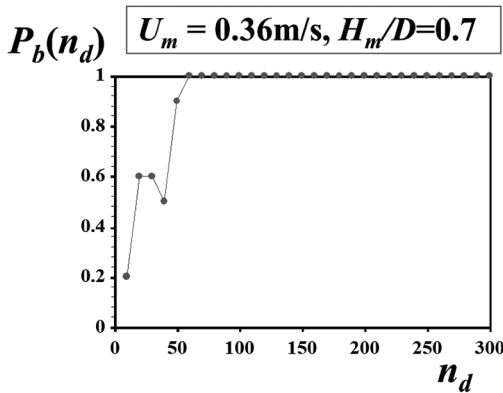


図5 流木捕捉率の流木投入本数による変化

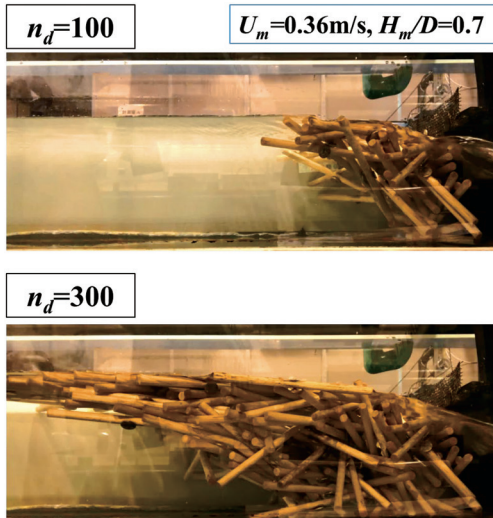


図6 橋梁での流木塊の形成過程

上げ水深 H と流木塊の下端高さ $y_{d,min}$ の変化を示す。流木投入前の初期水深は $H_m/D=0.7$ 、断面平均流速 $U_m=0.36$ m/s である。流木の比重は0.81である。流木塊の上端位置は水面と一致するので、堰上げ水深 H と流木塊の下端高さ $y_{d,min}$ の差は流木塊の鉛直高さ $L_y (=H-y_{d,min})$ となる。横軸は投入した流木本数 n_d である。氾濫原高さ D で無次元化している。図7(b)に水面での流木塊の流下方向長 L_{x1} と底面での流木塊の流下方向長 L_{x2} の変化を示す。

流木集積の初期過程では鉛直高さ L_y が増加し

ており、先に橋脚で捕捉された流木が浮力に逆らって水面から底面に向かって沈下するのが観察された(流木の沈下メカニズム(1))。流木が沈下すると流木塊による遮蔽面積が大きくなって、せき上げ水深が増加している。40本を超えると ($n_d=40$) 流木塊の鉛直方向長さ L_y と水深 H が一致しており ($L_y=H$)、これは水面から底面まで流木で閉塞していることを示している。

流木が底面まで沈下してもせき上げ水深は増加し続けており、注目される。これは先に捕捉された流木が沈下して底面に到達すると、水面付近で流木塊が上流側に成長する。後続の流木の中には水表面の流木塊の下に潜りこみ橋脚前に集積するものがみられ、この流木の沈下メカニズム(2)によって底面側の流木塊の厚みが増して、流木塊の空隙を小さくするためと推測される。60本を超えると ($n_d=60$)、底面側の流木塊の厚さ L_{x2} が急激に増加している。投入本数200本を超えると ($n_d=200$) せき上げ水深の増加は緩やかになり、せき上げ水深は一定値に達したと考えられる。

図8(a)に流木塊の流下方向長さの最終値 L_{x1max} を比較した。流木の比重は0.81である。流速が小さいケースほど、流木塊の流下方向長さが大きい。これは流速が小さいと流木が沈下せず、上流側に流木塊が成長していくためである。

図8(b)に流木によるせき上げ水深の最終値 H_{max} と流木塊の鉛直方向長さの最終値 L_{ymax} を比較した。流速が大きいほど流木塊の鉛直方向長さが大きくなっている。これは流速が大きくなると、流木が沈下するためである。流速が $U_m=0.21$ m/s を超えると流木塊の鉛直方向長さ L_{ymax} と水深 H_{max} が一致し、これは水面から底面まで流木で閉塞したことを示している。

$U_m > 0.21$ m/s で L_{ymax} が増加しているのはせき上げ水深が大きくなっているためである。初期水深 H_m が変化しても流木沈下が起きる限界流速は $U_{mc}=0.21$ m/s であり、水深に依存せず表面流速によって決まることがわかった。

図9に流木集積による河道閉塞率 A_p/A を示す。河道閉塞率はせき上げ水深の最終値 H_{max} と既知の遮蔽率のポーラス板の水深 H_p と比較すること

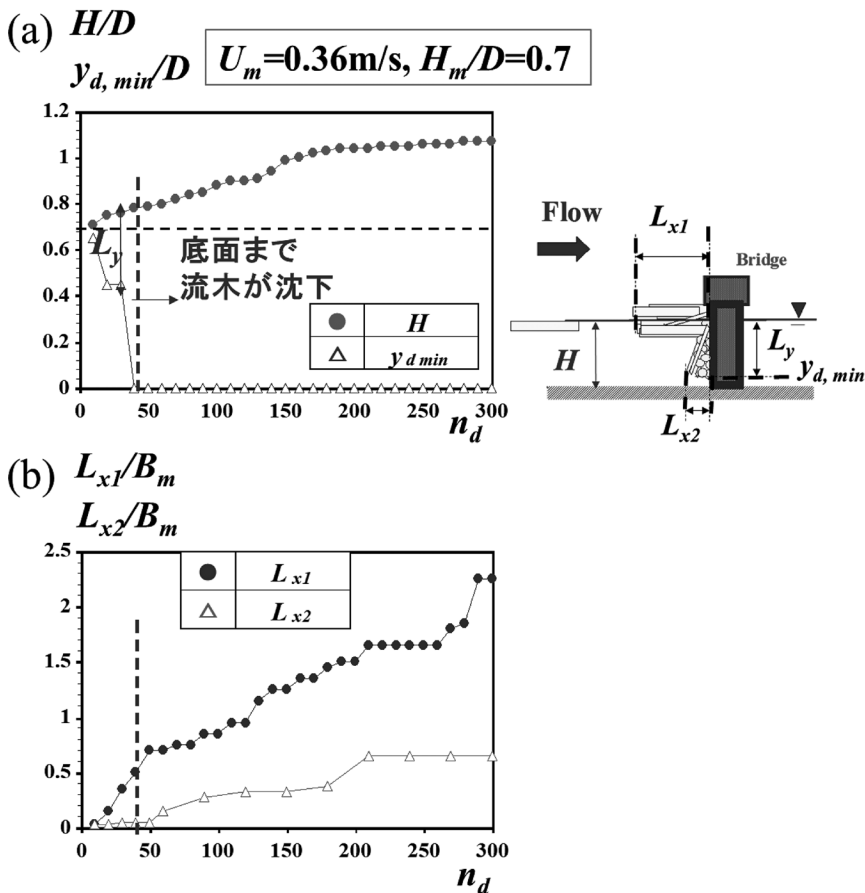


図7 (a) 流木集積によるせき上げ水深と流木塊の鉛直高さの変化, (b) 水面付近と底面側の流木塊の流下方向長の変化

で評価している。流速が小さいケースでは流木が沈下していないので河道閉塞率は小さい。流速が小さいケースでは流木が水面付近にのみ堆積するため、水深が大きいケースほど河道閉塞率が小さくなっている。流木が沈下して底面まで流木閉塞すると、河道閉塞率は60%以上になる。流速をさらに大きくすると橋脚前に流木集積し、底面側での流木塊の厚みが増すため河道閉塞率は70%に達した。流速が大きいケースでは、初期水深 H_m の河道閉塞率への影響はみられない。

3.2 流木沈下の支配パラメータについて

本研究では流木沈下の支配パラメータを明らかにするために初期水深、流速に加えて流木の比重

を0.7, 0.81に変化させている。図10(a) に水面付近の流木塊の流下方向長さの最終値 L_{x1max} を比較した。図10(b) に流木によるせき上げ水深の最終値 H_{max} と流木塊の鉛直方向長さの最終値 L_{ymax} を比較した。

流速が大きいケースほど流木塊の流下方向長さが小さくなっているが、流木の比重の影響はあまりみられない。

流木比重が大きいケースの方がせき上げ水深が大きくなっている。これは流木比重が大きいほど沈下し流木による遮蔽面積が大きくなるためである。流木が沈下して水面から底面まで流木で閉塞する限界条件は流木比重によって異なっており、比重0.81の流木では流速が $U_m = 0.21 \text{ m/s}$ 、比重0.7

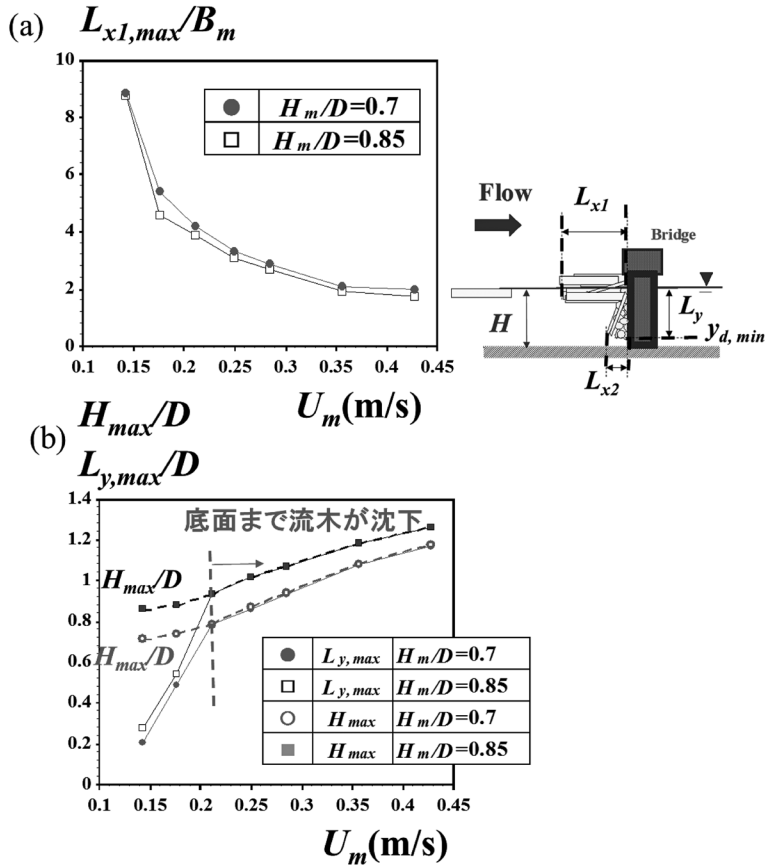


図8 (a) 水面付近の流木塊の流下方向長の最終値 (初期水深の影響), (b) せき上げ水深と流木塊の鉛直高さの最終値 (初期水深の影響)

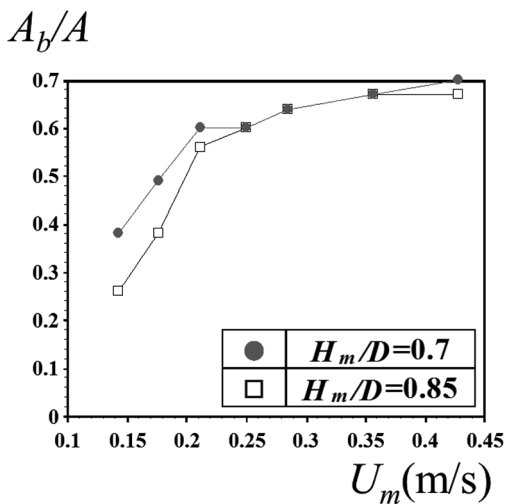


図9 流木による河道閉塞率の変化 (初期水深の影響)

の流木では流速が $U_m = 0.25$ m/s を超えると流木塊の鉛直方向長さ $L_{y,max}$ と水深 H_{max} が一致している。

図11に流木集積による河道閉塞率 A_b/A を示す。横軸は断面平均流速である。流木比重が小さいケースでは流木が沈下して底面まで流木閉塞すると、河道閉塞率は56%以上になる。

流木沈下して底面まで閉塞されるケースよりさらに流速を大きくしても、流木比重による差がみられる。これは図7 (a) で考察したように流木の沈下メカニズム②によって底面側の流木塊の厚みが増すためだと考えられる。

木村 (2019) は流木沈下のパラメータとして浮力と慣性力の比を表す修正リチャードソン数を提案した。木村の研究では流量一定として水深の影響

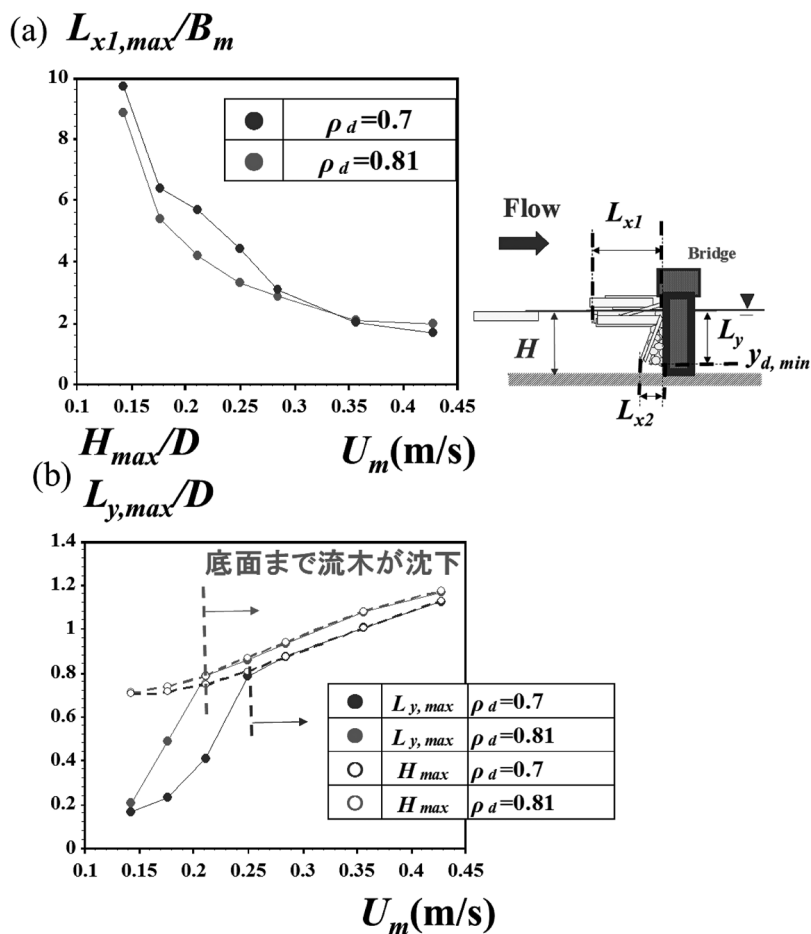


図10 (a) 水面付近の流木塊の流下方向長の最終値（流木比重の影響）、(b) せき上げ水深と流木塊の鉛直高さの最終値（流木比重の影響）

響については考察しているが、流木比重、同一水深下での断面平均流速は変化させていない。

$$Ri = -\frac{g\Delta\rho d}{\rho u^2} \quad (1)$$

d は流木の直径、 $\Delta\rho$ は水と流木の密度差、 u は流速。図12に流木集積による河道閉塞率 A_c/A を示す。横軸は修正リチャードソン数である。図8(b)、図10(b)で流木塊の鉛直方向長さ $L_{y,max}$ と水深 H_{max} が一致するとき、修正リチャードソン数が $Ri=0.24-0.28$ となった。修正リチャードソン数が $Ri=0.24-0.28$ より小さくなると流木が底面まで沈下し、河道閉塞率が急激に上昇している。

本研究の初期水深、流速、流木比重を系統変化させた結果から全面閉塞する限界条件を評価することができた。

3.3 橋梁前面、流木塊下の下降流が流木の沈下メカニズムに与える影響について

流木集積の初期過程での橋梁前面の下降流の影響について考察するために図13(a)に流木が捕捉されていない状態の橋脚上流側の時間平均鉛直流速 V の鉛直面コンターを示す。流木投入前の初期水深は $H_m/D=0.7$ 、断面平均流速 $U_m=0.36$ m/s である。

橋脚前の中心ライン ($z/B_m=0.67$) では底面側

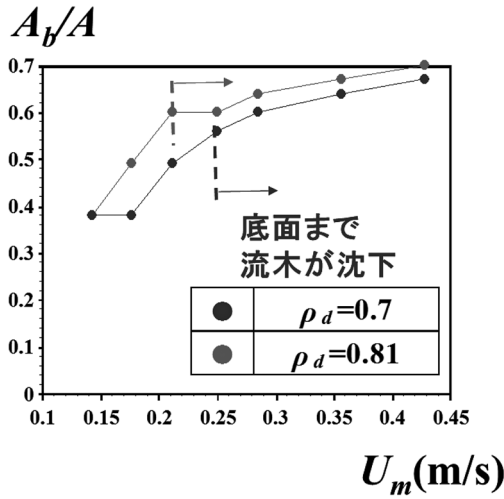


図11 流木による河道閉塞率の変化（流木比重の影響）

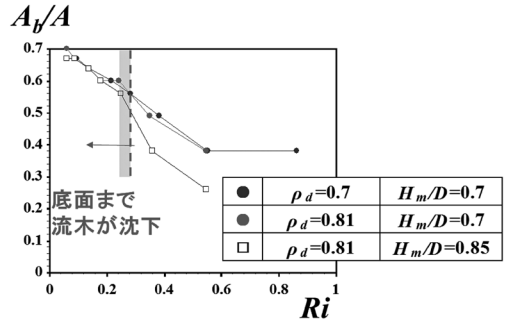


図12 流木閉塞率のリチャードソン数による変化

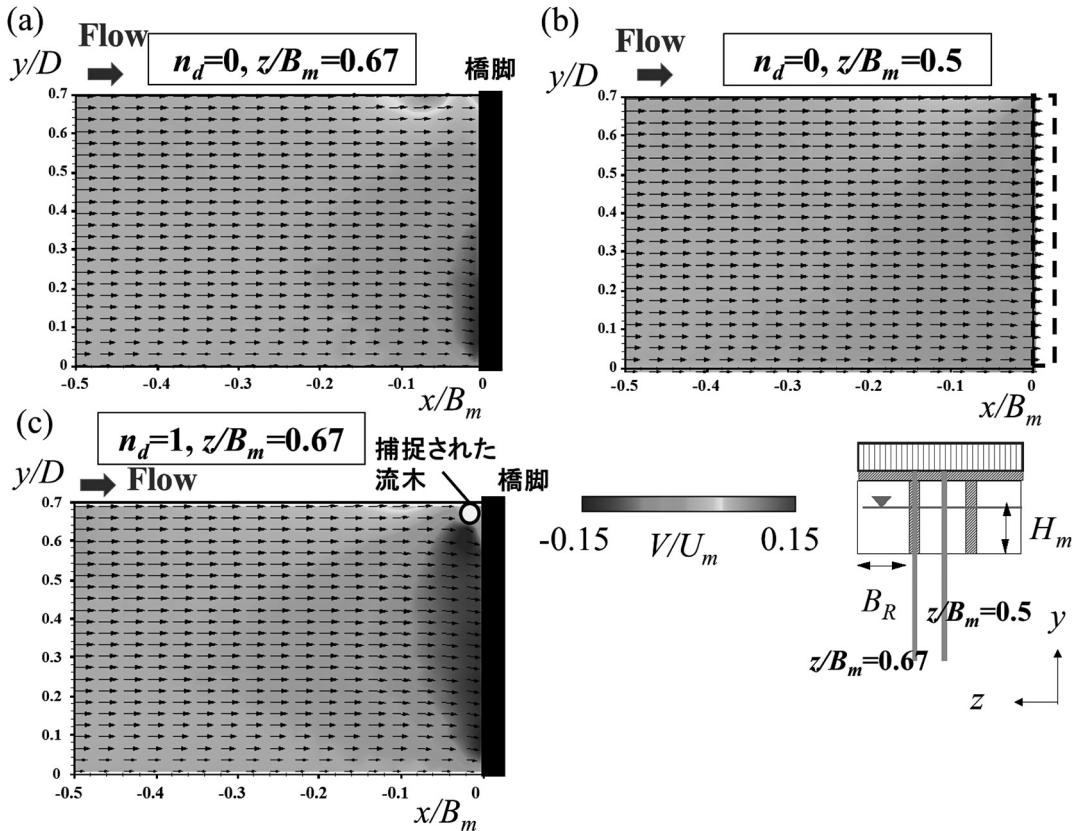


図13 時間平均鉛直流速の鉛直面コンター ($H_m/D=0.7$, $U_m=0.36$ m/s), (a) 流木捕捉無し ($n_d=0$), 橋脚前面 ($z/B_m=0.67$) (b) 流木捕捉無し ($n_d=0$), 橋脚間中央 ($z/B_m=0.5$) (c) 流木1本捕捉時 ($n_d=1$), 橋脚前面 ($z/B_m=0.67$)

で橋脚上流側で鉛直流速は負値をとっており、負値のピーク値は底面付近で見られる。水面付近は表面渦の影響で正値をとる。流木1本を投入して捕捉されても流木は沈下せずに水面付近でとどまるのが観察された。これは水面付近の表面渦の影響だと考えられる。

図13(b)に橋脚間の中心ライン($z/B_m=0.5$)でも橋脚前面に比較して値は小さくなっているが、鉛直流速は負値をとっている。流木が橋脚に捕捉されたときには、橋脚間の領域でも水面より下では下向きに押し込む力が作用すると考えられる。

図13(c)に流木が1本捕捉された状態の橋脚上流側の時間平均鉛直流速 V のコンターを示す。最初に捕捉された流木は沈下せずに水面付近でとどまるが、流木近傍では下降流が発生し、底面側でも橋脚上流側で下降流が発生している。負値のピーク値は捕捉された流木近傍で見られる。鉛直

流速が正値をとる領域はみられない。すなわち、流木が捕捉されることで水表面の流れ場が変化している。

図14に1本流木が捕捉された状態で2本目の流木を投入し、流木同士が衝突して沈下する瞬間の流速ベクトルの時間変化を示す。図15に初期過程での流木沈下の模式図を示す。 $t=0.0s$ で後続の流木②が流木①に乗り上げ、流木②の下部で発生する下降流によって先に捕捉された流木①が沈下している。最終的に流木①と流木②は離れているため、後続の流木②が下に押し込むだけでなく橋脚前面の下降流によって先に捕捉された流木①が底面側に輸送されていると考えられる(流木の沈下メカニズム(1))。流木投入本数を増やすと、先に捕捉された流木から沈下していき、橋脚前面で水面から底面まで閉塞される。

図16に流木が捕捉されていない状態の橋脚の

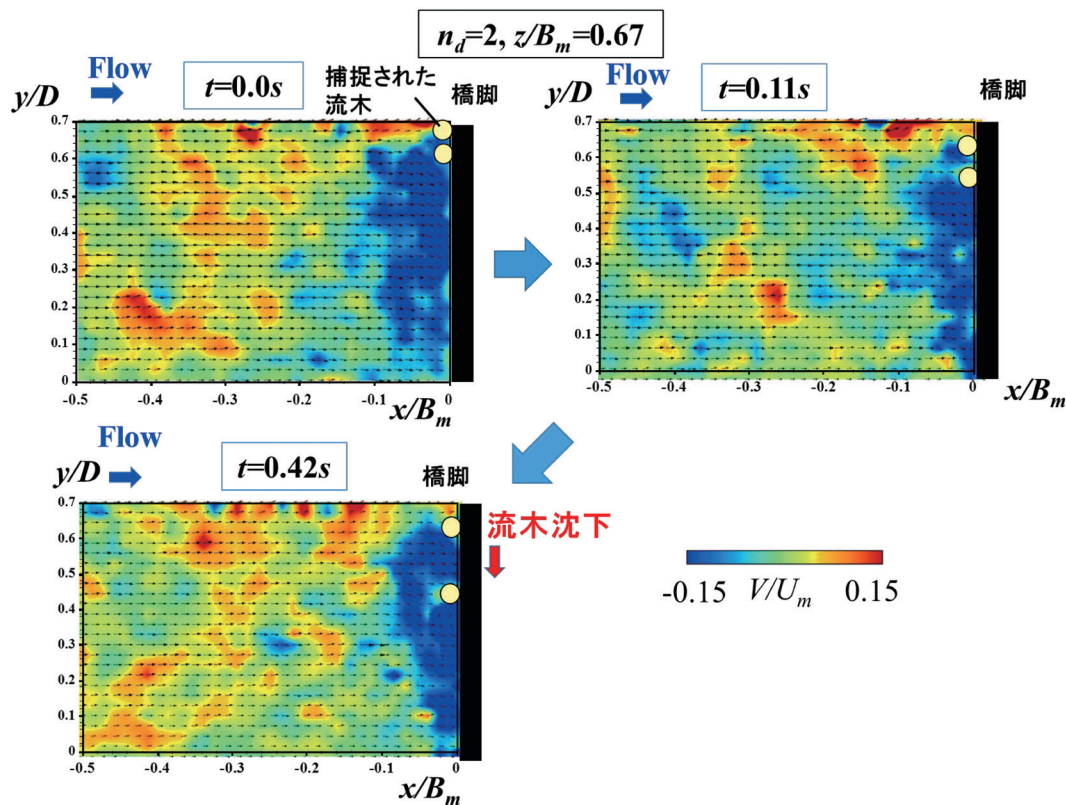


図14 流木2本投入時の瞬間鉛直流速の鉛直面コンターの時間変化

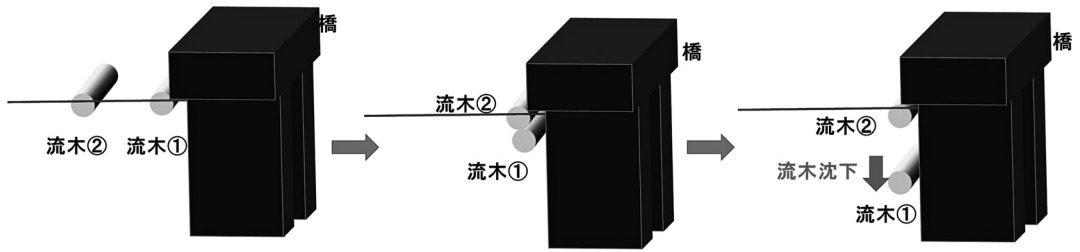


図15 流木集積初期過程における流木沈下の模式図

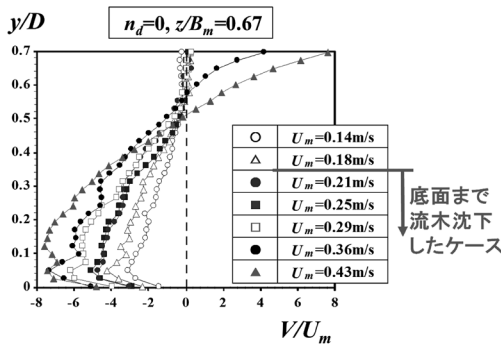


図16 橋脚前面における時間平均鉛直流速の鉛直プロット (流木捕捉無し ($n_d = 0$), 断面平均流速の影響)

上流側の鉛直流速の鉛直プロット $V(y)$ を比較した。流木投入前の初期水深は $H_m/D = 0.7$ である。水面付近 ($y/D > 0.6$) では鉛直流速は正值をとり、 $y/D < 0.5$ では鉛直流速は負で下降流が発生している。鉛直流速の負値ピークは底面付近 $y/D = 0.1$ でみられる。断面平均流速が大きくなると、底面側で鉛直流速の負値は増加しているが、水面付近の正值も大きくなり流木 1 本だけ捕捉されたときには流木は沈下しない。

次に流木集積が進んだ過程での表面流況について考察する。図17に流木210本投入時の流木塊近傍の時間平均鉛直流速 V のコンターを示す。流木投入前の初期水深は $H_m/D = 0.7$ 、断面平均流速 $U_m = 0.36 \text{ m/s}$ である。流木集積が進んでいくと水面付近で流木塊が上流側に成長し、流木塊近傍では下降流が発生している。流木集積の初期過程とは異なり、投入した流木が先に捕捉されている流木塊の下に下降流によって潜り込み、集積する

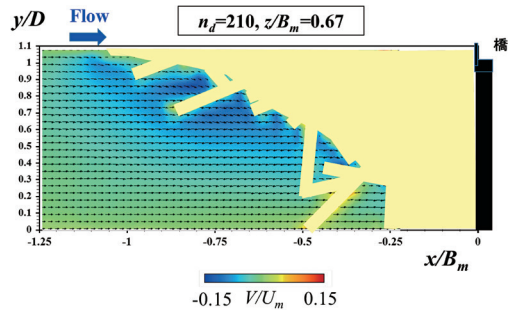


図17 橋脚前面における時間平均鉛直流速の鉛直面コンター (流木210本投入時, $H_m/D = 0.7$, $U_m = 0.36 \text{ m/s}$)

ことで底面側の流木塊の厚さが増加する (流木の沈下メカニズム (2)) のがみられた。

4. 結論

本研究では流木による河道閉塞を再現して水路実験を行った。流木塊の形成過程をビデオカメラで観察し、流木沈下過程と河道閉塞率の時間変化について調べた。また流木の比重、平均流速、初期水深を変化させて全面閉塞する限界条件と支配パラメータを明らかにした。次に流木沈下に与える周辺の流れ場の影響について考察するために、流木が捕捉された状態で橋脚前面の流れを PIV 計測した。以下に総合的な考察も加え、結論とする。

- 1) 流速の大きなケースほど橋梁での流木捕捉率が小さくなるのがわかった。また初期水深の流木捕捉率への影響はほとんどみられなかった。

- 2) 流木集積の観察結果から2つのメカニズムによって流木が水面から底面に向かって沈下することがわかった。すなわち、流木集積の初期過程では流木塊の鉛直高さ L_y が増加し、先に橋脚で捕捉された流木が浮力に逆らって沈下するのが観察された(流木の沈下メカニズム(1))。流木が沈下すると流木塊による遮蔽面積が大きくなって、せき上げ水深が増加する。
- 3) 水面から底面まで流木で閉塞してもせき上げ水深は増加し続けるのがみられた。水表面の流木塊の下に潜りこみ橋脚前に流木が集積し(流木の沈下メカニズム(2))、底面側の流木塊の厚みが増して、流木塊の空隙を小さくするためだとわかった。
- 4) 流速の大きなケースほど流木が沈下し、全面閉塞するのがみられた。底面まで流木閉塞すると、河道閉塞率は60%程度になった。流速をさらに大きくすると橋脚前に流木集積し、底面側の流木塊の厚みが増すため河道閉塞率は70%に達した。
- 5) 流木が沈下して水面から底面まで流木で閉塞する限界条件は初期水深によって変化しないが、流木比重によって変化することがわかった。
- 6) 初期水深、流速、流木比重を変化させた結果から全面閉塞の限界条件を評価した。修正リチャードソン数が $Ri=0.24-0.28$ より小さくなると流木が底面まで沈下し、河道閉塞率が急激に上昇することがわかった。
- 7) 流木集積の初期過程では、PIV計測結果から橋梁の上流側で水面付近は表面渦が発生し、1本目の流木が捕捉されても沈下せずに水面付近でとどまるのが観察された。後続の流木②が流れてくると、先に捕捉された流木①の上に乗せられ、その後先に捕捉された流木①が下降流によって沈下するのがみられた。
- 8) PIV計測結果から流木集積が進んでいくと水面付近で流木塊が上流側に成長し、流木塊近傍では下降流が発生するのがみられた。流木集積の初期過程とは異なり、投入した流木が流木塊の下に下降流によって潜り込んで集積し、底面側の流木塊の厚さが増加することで、河道閉塞

率が上昇することがわかった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(若手、ゲリラ豪雨時の流木閉塞による氾濫被害予測と科学的知見に基づく流木対策工法の提案、代表：岡本隆明)の研究助成の下で行われた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Nakatani, K., Hiura, M., Hasegawa, Y., Kosugi, K. and Satofuka, Y.: Experimental study on bridges over mountainous streams with blocked piers due to woody debris, 自然災害科学, Vol.36 (特別号), pp.15-24, 2017
- 2) Schalko I. Large wood accumulation probability at a single bridge pier. *Proc. of the 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia: 1704-1713.*, 2017
- 3) Shrestha, B., Nakagawa, H., Kawaike, K. Baba, Y. & Zhang, H., Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans. *Nat. Hazards*, Vol.61(2), pp.577-602, 2012
- 4) 赤堀良介：橋脚周辺における流木の3次元集積に関して、土木学会論文集B1(水工学), Vol.74(4), pp. I_679-I_684, 2018
- 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, Vol.36(4), pp.447-461, 2018
- 6) 木村一郎・北園和也：流木捕捉形態の流木リチャードソン数依存性と3D-2D型モデルの適用性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73(2), pp. I_553-I_562, 2017
- 7) 木村一郎：3D-3Dカップリングモデルを用いた橋脚による流木捕捉過程の再現性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75(2), pp. I_601-I_606, 2019
- 8) 山上路生・岡本隆明：流木の挙動安定性と橋梁閉塞に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.72(3), pp.88-100, 2016
- 9) 清水義彦・長田健吾：流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, Vol.51, pp.829-834, 2007
- 10) 橋本彰博・押川英夫・小松利光：平成29年九

- 州北部豪雨災害の特徴と得られた教訓, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.74 (5), pp. I_1087-I_1092, 2018
- 11) 守屋博貴・二瓶泰雄・長谷部由莉・峯 浩二・鮭本健治・矢野真一郎・渡辺 豊・福田信行: 平成29年九州北部豪雨による福岡県北川の流木災害の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.74 (4), pp. I_1195-I_1200, 2018
- 12) 矢野真一郎・大久保遼太・津末明義・竹村 大・富田浩平・笠間清伸・二瓶泰雄: 平成29年7月九州北部豪雨による流木災害の発生要因に関する分析, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.74 (5), pp. I_1063-I_1068, 2018
- 13) 山本晴彦・山崎俊成・坂本京子・山下奈央: 2017年7月5日に発生した九州北部における豪雨と災害の特徴自然災害科学 *J.JSNDS*, Vol.36 (3), pp. 257-279, 2017
- (投稿受理: 令和2年3月30日
訂正稿受理: 令和2年7月2日)

要 旨

本研究では橋梁での流木集積実験を行い, 流木が浮力に逆らって沈下する過程と流木集積による河道閉塞率の時間変化について調べた。また流木の比重, 平均流速, 初期水深を変化させて, 水面から底面まで流木で全面閉塞する限界条件と支配パラメータを明らかにした。次に流木沈下する瞬間の流木の挙動と周辺の流れ場を PIV 計測し, 沈下メカニズムを調べた。