

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

岡本 隆明¹・竹林 洋史²・鈴木 隆太¹・山上 路生¹・戸田 圭一¹

EXPERIMENTAL STUDY ON POROSITY OF DRIFTWOOD BLOCKING AT A BRIDGE AND FLOOD DISCHARGE OF DETOUR FLOW

Taka-aki OKAMOTO¹, Hiroshi TAKEBAYASHI², Ryuta SUZUKI¹,
Michio SANJOU¹ and Keiichi TODA¹

Abstract

Driftwood in rivers seriously increases the destructive power of flood flow. Large driftwood accumulates at a bridge and blocks the river, which leads to a decreased discharge capacity and increased water levels. In Uji city in August 2012, the detour flood-flow occurred around the bridge and the house along Shizugawa River was washed away. However, there is almost no detailed information about flood discharge of a detour flow around a bridge and flood damage area in a blocked river. In this study, three kinds of flume experiments were performed. First, we conducted the driftwood accumulation tests at the model bridge to evaluate the porosity of driftwood blocking. Then, we measured the flood flow velocity in the blocked river by PIV to estimate the flood discharge on floodplains. Finally, the drag force exerted on the model house on floodplain was measured using Force gauge to examine the flood damage of the nearby area.

キーワード：流木集積，橋梁閉塞，河道閉塞率，橋梁迂回流，氾濫流量，PIV，氾濫被害区域

Key words: Driftwood accumulation, driftwood blocking, porosity of driftwood blocking, detour flood flow, flood discharge on floodplain, PIV, flood damage area

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

² 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本論文に対する討議は平成 30 年 8 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

地球規模の気候変動の影響により、台風の規模が大きくなり各地で集中豪雨による水害が頻発している。豪雨時には流木をはじめとした漂流物が河川に流出し、橋脚に引っかかることで河道を閉塞させて水位上昇を招き、洪水被害を大きくすることが知られている。さらに橋梁を迂回した氾濫流が河岸を浸食して(2012年三重県五郷町, 図1(a), 竹林ら(2012)), 家屋を流出させるなどの被害が報告されている(2012年宇治市志津川, 図1(b), 2016年北海道清水町)。特に中小河川では非常に短時間で氾濫する機会が多いため、洪水氾濫時に発生する迂回氾濫流の危険箇所を正確に把握する必要がある。

河川の横断構造物による流木捕捉の研究としては中川ら(1992)は流水のオイラー的解析法, 流木のラグランジュ追跡法を組み合わせた数値解析を行い, 実験値と比較することで堤内地を流動する流木群の拡散過程が良好に再現できることを示した。渋谷ら(2010)は流木捕捉工を用いた流木捕捉実験を行い, 捕捉工間隔と流木長の比や最大流木長が同じであっても, 流木長が混在することにより捕捉率が低下することを指摘している。初田ら(2012)は蛇行水路に水面追跡粒子と流木模

型を流下させ, 双方にPTVを適用することで流れ場と流木輸送の関係について調べた。実験・数値解析結果から流木は流路内のせん断の強い領域を避けるように集中することを明らかにした。山上・岡本(2016)は流木のピッチングモーメント・ヨーイングモーメントを計測し, 流木の重心が偏心しているケースでは流下時の迎え角が変化し, 流木の水中投影面積が大きくなるため橋梁部での閉塞率が増加することを明らかにした。

橋梁部での流木集積に関するトピックは海外でも注目されており, Bocchiolaら(2008)は流木長と流速を系統変化させて流木捕捉実験を行い, フルード数が増加すると流木の橋脚での捕捉確率は減少することを明らかにした。Schmocker & Hager(2013)は実験水路を用いて橋梁部での流木集積実験を行い流木捕捉による堰上げ水深効果について調べ, 堰上げ水深を投入した流木塊の体積とフルード数を用いて定式化した。Pfisterら(2013)は流木集積によって上流側の水深が70%増加する可能性があることを指摘している。

このように橋梁部での流木捕捉に関する研究は多くみられる。しかしながら, 流木閉塞時の洪水被害を予測するには流木集積のメカニズムだけでなく, 橋梁周辺の氾濫水の挙動を予測することが

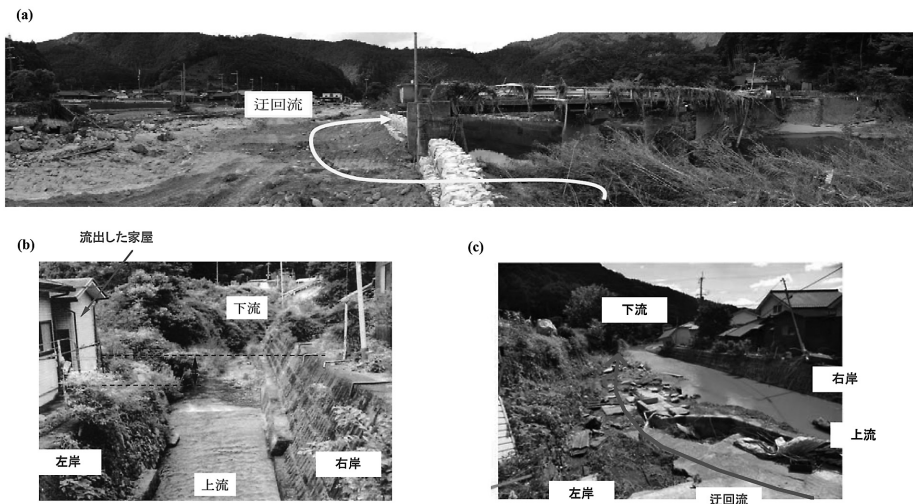


図1 (a) 橋梁迂回流発生による河岸浸食(2012年三重県五郷町, 竹林ら(2012))
 (b) 橋梁迂回流の発生以前の氾濫原地形(2012年宇治市志津川, 竹林ら(2012))
 (c) 橋梁迂回流の発生による家屋の流出(2012年宇治市志津川)

重要であるが、これまで流木による橋梁閉塞時に越流した氾濫流を対象とした研究はあまりみられない。著者ら (2016) は2012年宇治水害のような中小河川水害を想定して水路実験を行い、氾濫原高さが低い左岸に迂回流が集中し、家屋が流出する危険が大きくなることを明らかにした。しかしながら、流木投入実験を行っていないため実際に流木が集積したときの橋梁部での河道閉塞率はどの程度かということを実験を行うことはできていない。また氾濫流の PIV 流速計測を行っているが、計測位置を横断方向に変えていないため、河道閉塞時の橋梁迂回流の氾濫流量を算出することはできなかった。さらに氾濫原高さを2パターンしか変化させていないため、左岸と右岸の氾濫原高さの差が何%以上であれば橋梁迂回流が局所集中し氾濫被害を拡大させるかについては課題が残っている。

そこで本研究ではまず橋梁での流木捕捉実験を行い、堰上げ水深から実際の流木集積時の橋梁部での河道閉塞率を評価する。次に流木投入実験により得られた河道閉塞率をもとに閉塞率を設定し、橋梁を迂回した氾濫流の流速を PIV 計測した。PIV 計測位置は氾濫原全域をカバーするように横断方向にシフトさせて、氾濫原に流れ込む氾濫流

量を正確に評価した。さらに左岸の氾濫原高さを系統変化させて氾濫原の家屋抗力を計測し、洪水氾濫危険区域を洪水被害を軽減するという観点から評価し、再発防止に向けた予測、対策の検討を行う。

2. 実験装置と実験方法

2.1 流木集積による橋梁閉塞実験

本研究ではまず流木捕捉による橋梁閉塞について調べるために、流木投入実験を行った。図2に流木捕捉実験装置図を示す。実験には長さ10 m、幅40 cm、高さ50 cm 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。流下方向原点 $x=0$ は河道閉塞部 (橋模型の上流端)、鉛直方向原点 $y=0$ は橋の上流側氾濫原底面、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に示すように氾濫原模型 (1/80スケール：塩埴製) を水路両側に設置した。低水路幅は $B_m = 20$ cm、左岸側と右岸側の氾濫原の幅は $B_f = 10$ cm である。両岸の氾濫原高さは $D_L = D_R = 10$ cm (左岸と右岸で流下方向に一樣) とした。橋梁模型 (1/80スケール) は水路上流端から4.0 m の位置

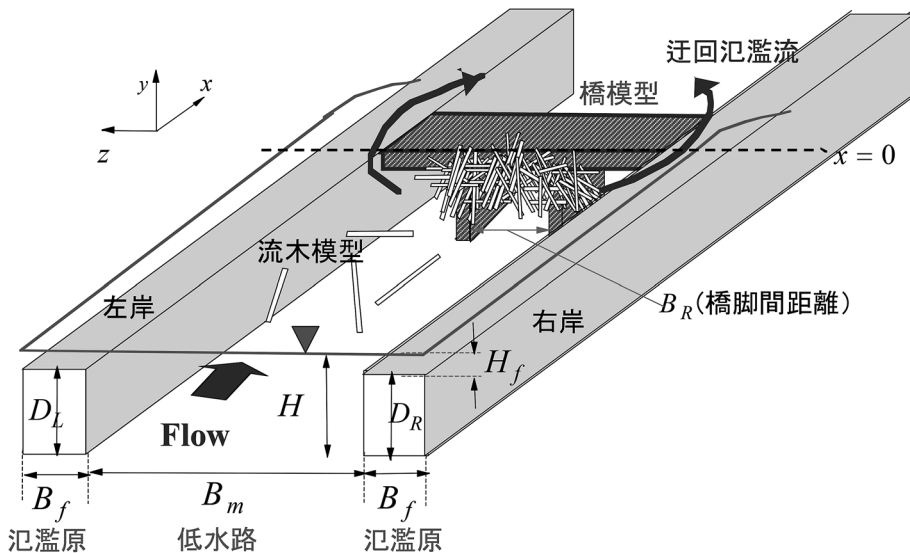


図2 流木投入実験装置図

に設置した。橋梁模型は橋長20 cm, 幅員5 cm, 床板厚1 cmで, 高さ9 cm, 幅1 cmの橋脚部を2本有しており, 橋脚間距離 B_R は6.0 cmである。橋模型の上部には欄干部として高さ3 cm, 幅20 cm, 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 $A(=B_m \times D)$ に対する橋模型の投影面積の割合は $A_{bridge}/A=0.19$ である。

流木模型として木製円柱(直径 $d=6.0$ mm, 長さ $l=6.0, 9.0, 12$ cm(1/80スケール), $l/d=10, 15, 20$, 比重0.5)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。

橋梁模型の4.0 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。これを10秒ごとに繰り返し行った。供給した流木量は各ケース計270本とした。流木閉塞による堰上げ効果について調べるために, 捕捉された流木は除去せず投入を繰り返した。各投入が終了するごとに橋模型の上流側5 cmにおける水深を計測した。10回実験を行い, 水深の集合平均値を堰上げ水深とした。

また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, 流木除去後に橋模型の前面に既知の遮蔽面積のアルミ製ポーラス板(20 cm \times 15 cm, パンチ径3.0 mmで穴の配置は均等)を設置して橋模型の上流側の水深を計測した。流木閉

塞時の水深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。

2.2 迂回氾濫流のPIV計測と家屋抗力計測実験

次に流木による橋梁閉塞時にどの程度の氾濫流量が氾濫原に流れ込むか詳細に調べるために鉛直面(x - y 面)PIV画像計測法を導入した。図3に示すように橋模型の前面にアルミ製ポーラス板を設置し, 大量の流木が一度に橋梁に捕捉され河道閉塞した状態を再現した。ポーラス板の閉塞率 A_b/A は流木捕捉実験をもとに決定している。PIV計測実験ではポーラス板を設置して十分に時間が経過して, 氾濫原の氾濫流水深が増加しなくなった状態(定常状態)に達したときに流速計測を行った。

2012年宇治豪雨時には氾濫原高さの低い左岸側に迂回流が集中して, 家屋が流出している(図1(b))。本研究では氾濫原の地形効果についても考察する。右岸側の氾濫原高さ D_R は流下方向に一様とした。これに対して, 左岸側の氾濫原高さは河道閉塞部($x=0$)より下流側では氾濫原高さ D_{L2} を変化させている。

x - y 鉛直面PIVでは水路上方から3.0Wのアルゴンイオンレーザー(LLS)を照射し, 水路側方に高速度カメラ(1024 \times 1024pixel)を設置し, フレームレート500 Hz, サンプルングレート30 Hz

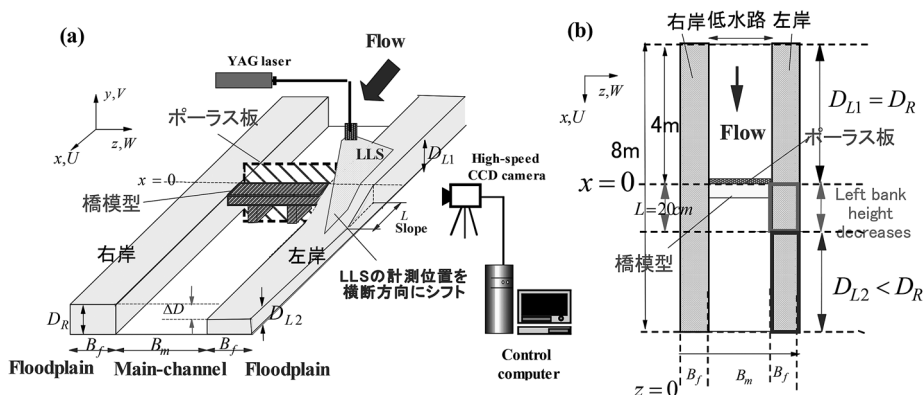


図3 (a) 鉛直 PIV 法による迂回流の流速計測, (b) 氾濫原模型と河道閉塞部

で60秒間撮影した。撮影領域のサイズは河道閉塞部を含むように20 cm × 20 cm 領域である。計測画像から鉛直面の時間平均流速 (U, V) を算出した。PIV トレーサーについては粒径80 μm 、比重1.02のポリスチレンを用いた。氾濫原の氾濫流量を正確に算出するため、氾濫原全域をカバーするように LLS 位置を横断方向にシフトさせている。LLS の照射位置は $z/B_m = 1.55, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9$ (左岸側), $z/B_m = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45$ (右岸側) とした。

次に迂回流発生時の氾濫原家屋に作用する抗力を計測した。PIV 計測実験と同様に橋模型の前面にアルミ製ポーラス板を設置している。図4に示すように左岸と右岸の氾濫原に家屋を模した柱状物体 (1/80スケール: 6.0 cm × 6.0 cm × 6.0 cm : 発泡スチロール製) を設置し、水路上方から支持

棒を介して固定したデジタルプッシュプルゲージ (分解能1/1000N) を用いて、迂回流によって氾濫原家屋に作用する抗力を120秒間計測した。デジタルプッシュプルゲージはパソコンに接続することで、家屋にかかる抗力の時系列データ (サンプリングレート10 Hz) を得ることができる。家屋模型の設置位置は河道閉塞部より下流側 ($x > 0$) とした ($x = 0 \sim 80 \text{ cm} : 10 \text{ cm}$ 間隔)。

図4 (b) に示すように家屋抗力は時間とともに増加するが、氾濫流水深が増加しなくなると一定値に達する。本研究では抗力が一定値に達した時の値をその計測位置における家屋抗力最大値 F_{max} (N) とする。

2.3 実験条件

表1に流木捕捉実験の実験条件を示す。本研究

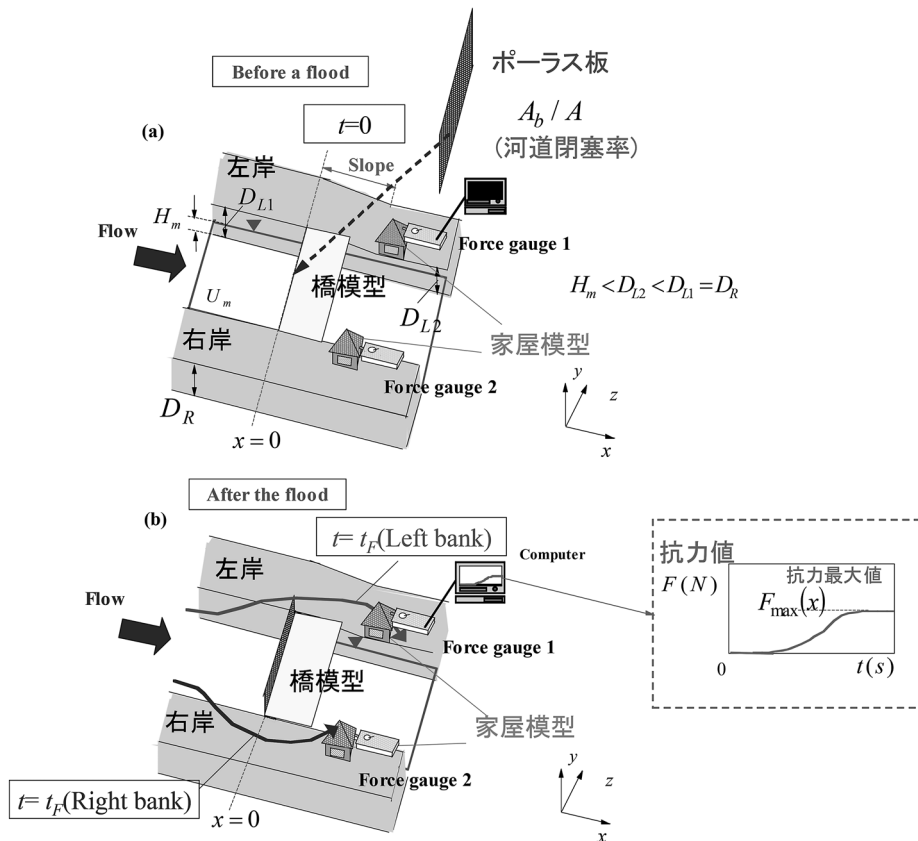


図4 氾濫原家屋抗力計測装置 (a) 洪水前, (b) 洪水後

で用いた流木模型の重心位置は流木の中央である。流木捕捉実験では左岸側と右岸側の氾濫原高さは $D_L = D_R = 10 \text{ cm} (=D)$ と流下方向に一様である。流木投入前の低水路水深 $H_m = 7.0 \text{ cm}$ は全ケースで同じである。橋梁部の捕捉性能への影響を調べるために、上流からの流入流量 $Q(l/s)$ を4通りに変化させた。流木投入前に等流になるように水路勾配を変化させている。 U_m は流木投入前の低水路における断面平均流速で、 $U_m = 21, 36, 50, 64 \text{ cm/s}$ (実河川では1.9, 3.2, 4.5, 5.7 m/s に対応) とした。また流木模型は流木長 $l = 6.0, 9.0, 12 \text{ cm}$ に変化させ、橋脚間距離 B_R に対する流木長の比は $l/B_R = 1.0, 1.5, 2.0$ である。フルード数は $Fr = U_m / \sqrt{gH_m}$ である (g は重力加速度)。

表2にPIVによる流速計測実験と家屋抗力実験の実験条件を示す。流木捕捉実験結果をもとにポーラス板の河道閉塞率を $A_b/A = 0.56, 0.65$ の2通りに変化させている。また氾濫原の地形形状の

迂回流への影響に着目した。図4に示すように右岸側の氾濫原高さは $D_R = 10 \text{ cm}$ で流下方向に一様とした。河道閉塞部 ($x = 0$: 橋模型の上流端位置) から左岸側の氾濫原高さが下がり始めるスロープ (流下方向長さは $L = 20 \text{ cm}$) を設置した。上流の左岸側氾濫原高さは $D_{L1} = 10 \text{ cm}$ であり、下流の左岸側氾濫原高さは $D_{L2} = 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10 \text{ cm}$ (高低差 $\Delta D/D = 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.0$) の5通りに変化させた。

CaseR10L8-X($\Delta D/D = 0.2$) については迂回流の発生条件について調べるためにポーラス板の河道閉塞率を $A_b/A = 0.19, 0.3, 0.39, 0.49, 0.56, 0.65, 0.74, 0.84, 0.91$ に系統変化させている。

3. 実験結果と考察

3.1 流木集積による堰上げ水深と橋梁部での河道閉塞率の評価

本研究ではまず橋梁での流木捕捉実験を行い、

表1 実験条件 (流木投入実験)

	$Q(l/s)$	$U_m \text{ (cm/s)}$	$H_m \text{ (cm)}$	$l \text{ (cm)}$	$d \text{ (cm)}$	$B_R \text{ (cm)}$	l/B_R	$D_R \text{ (cm)}$	$D_L \text{ (cm)}$	$\Delta D \text{ (cm)}$	Fr	水路勾配				
CaseL6-1	3.0	21.4	7.0	6.0	0.6	6.0	1.0	10.0	10.0	0.0	0.26	1/1000	流木投入実験			
CaseL6-2	5.0	35.7									0.43	1/400	流木投入実験			
CaseL6-3	7.0	50.0									0.60	1/200	流木投入実験			
CaseL6-4	9.0	64.3									0.78	1/100	流木投入実験			
CaseL9-1	3.0	21.4		9.0			1.5				10.0	10.0	0.0	0.26	1/1000	流木投入実験
CaseL9-2	5.0	35.7												0.43	1/400	流木投入実験
CaseL9-3	7.0	50.0												0.60	1/200	流木投入実験
CaseL9-4	9.0	64.3												0.78	1/110	流木投入実験
CaseL12-1	3.0	21.4		12.0			2.0				10.0	10.0	0.0	0.26	1/1000	流木投入実験
CaseL12-2	5.0	35.7												0.43	1/400	流木投入実験
CaseL12-3	7.0	50.0												0.60	1/200	流木投入実験
CaseL12-4	9.0	64.3												0.78	1/100	流木投入実験

表2 実験条件 (PIV 流速計測, 家屋抗力計測実験)

	$Q(l/s)$	$U_m \text{ (cm/s)}$	$H_m \text{ (cm)}$	$D_R \text{ (cm)}$	$D_{L1} \text{ (cm)}$	$D_{L2} \text{ (cm)}$	$\Delta D \text{ (cm)}$	$\Delta D/D_R$	A_b/A	Fr	Method
CaseR10L8-1	7.0	50.0	7.0	10.0	10.0	8.0	2.0	0.20	0.65	0.60	PIV/ 家屋抗力
CaseR10L8-2	7.0	50.0							0.56	0.60	家屋抗力
CaseR10L8-X	7.0	50.0							0.19-0.91	0.60	家屋抗力
CaseR10L8.5	7.0	50.0	7.0	10.0	10.0	8.5	1.5	0.15	0.65	0.60	PIV/ 家屋抗力
CaseR10L9	7.0	50.0	7.0	10.0	10.0	9.0	1.0	0.10	0.65	0.60	PIV/ 家屋抗力
CaseR10L9.5	7.0	50.0	7.0	10.0	10.0	9.5	0.5	0.05	0.65	0.60	PIV/ 家屋抗力
CaseR10L10-1	7.0	50.0	7.0	10.0	10.0	10.0	0.0	0.00	0.65	0.60	PIV/ 家屋抗力
CaseR10L10-2	7.0	50.0							0.56	0.60	家屋抗力

堰上げ水深から流木集積時の閉塞率を定量的に評価する。図5にCaseL12-1($l/B_R=2.0, Fr=0.26$)とCaseL12-3($l/B_R=2.0, Fr=0.60$)のケースにおける流木100本投入時の橋梁部での流木集積のスナップショットを示す。

実験初期の10本投入時における捕捉確率は、 $Fr=0.26$ では $P_b=0.3$ 、 $Fr=0.60$ では $P_b=0.23$ である。既往研究でも報告されているように、流木が1本でも捕捉されると後続の流木がこれに接触しやすくなり捕捉確率が飛躍的に増大する。 $Fr=0.26$ のケースでは $Fr=0.60$ のケースよりも水面付近で流木捕捉が進行していることがわかる。 $Fr=0.60$ ケースでは橋梁前面で流木が集積していくと水深

が増加し、越流し氾濫原で橋梁迂回流がみられた。

図6にCaseL6-3($l/B_R=1.0, Fr=0.60$)、CaseL9-3($l/B_R=1.5, Fr=0.60$)、CaseL12-3($l/B_R=2.0, Fr=0.60$)のケースにおける流木集積時の堰上げ水深 H の累計流木投入本数による変化を示す。値は10回の流木投入実験の堰上げ水深平均値で、流木投入前の低水路水深 H_m で無次元化している。横軸は投入した流木本数 n_d である。

$l/B_R=2.0, Fr=0.60$ ケースでは流木集積とともに上流側の水深が堰上げされ、70本投入時に氾濫原への越流がみられた。200本投入以降では堰上げ水深の増加はあまりみられずほぼ一定値 H_{max} に達している。 $l/B_R=1.5, Fr=0.60$ ケースでも氾

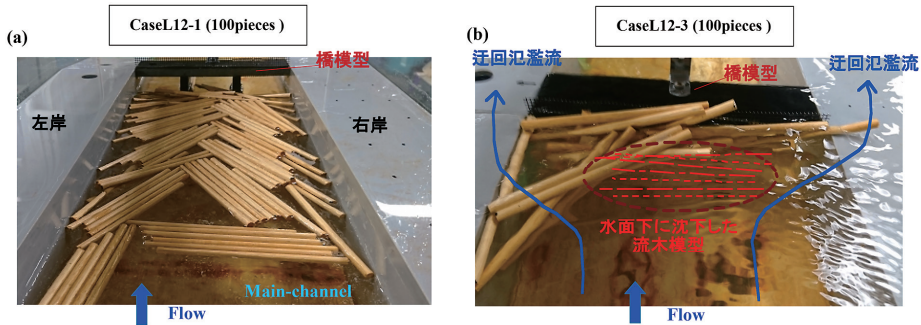


図5 橋梁部での流木集積のスナップショット (100本投入時)
(a) $l/B_R=2.0, Fr=0.26$, (b) $l/B_R=2.0, Fr=0.6$

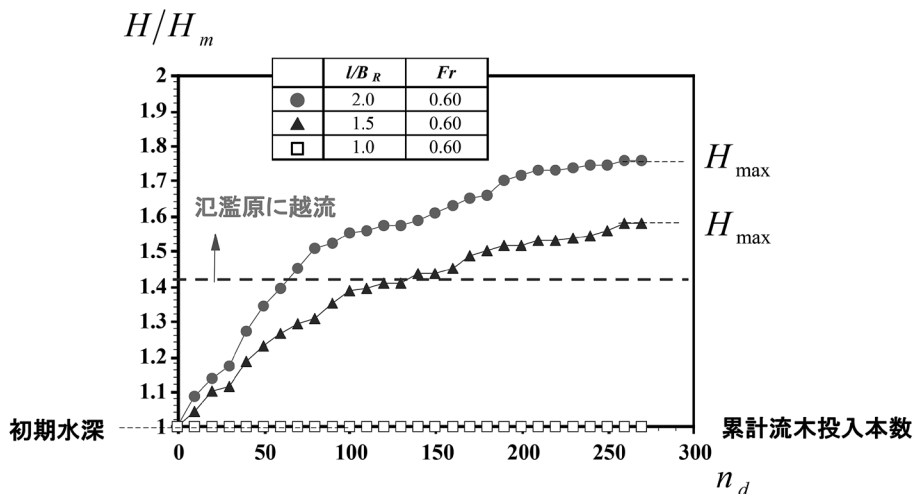


図6 流木集積による堰上げ水深の変化 (流木長の影響)

濫原への越流がみられたが(140本投入時), $l/B_R = 2.0$, $Fr = 0.60$ ケースよりは堰上げ水深効果が小さい。これに対して, $l/B_R = 1.0$, $Fr = 0.60$ のケースでは流木捕捉はみられず, 堰上げ水深 H は変化しない。流木が橋脚に接触しても, 回転して下流側に流出する現象がみられた。

図 7 (a) に各ケースの流木270本投入時の橋梁部での堰上げ水深 H_{\max} を示す。横軸は流木投入前低水路におけるフルード数 Fr である。堰上げ水深 H_{\max} (270本投入時) は10回の流木投入実験のデータを平均して算出した。図中に既知の閉塞率 $\lambda_d = A_b/A$ のポーラス板を設置したときの堰上げ水深を併示した。なお捕捉流木が存在しない状態における橋梁による河道の遮蔽率は $A_{\text{bridge}}/A = 0.19(19\%)$ である。

$l/B_R = 1.5$, $Fr = 0.60$ のケースにおける堰上げ水深 H_{\max} はポーラス板閉塞率 $A_b/A = 0.56$ の水深と同程度である。270本投入時には流木集積によって閉塞率が37%増加したことを示している。 $l/B_R = 2.0$, $Fr = 0.60$ のケースにおける堰上げ水深 H_{\max} はポーラス板閉塞率 $A_b/A = 0.65$ の水深と同

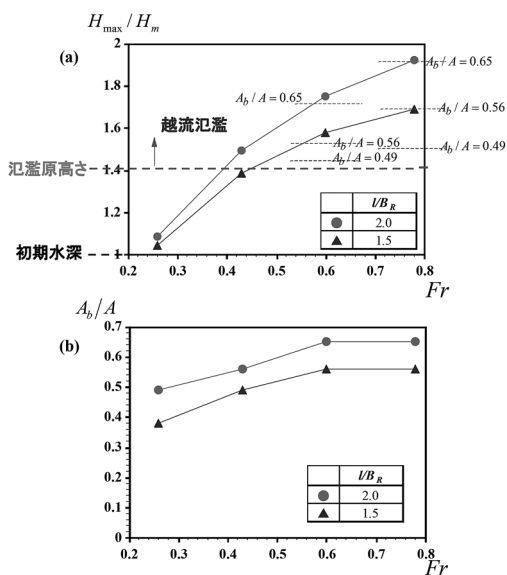


図 7 (a) 流木集積による堰上げ水深最大値の変化(フルード数の影響)
(b) 流木集積による橋梁部での河道閉塞率の変化(フルード数の影響)

程度であった。これは流木が捕捉されることにより閉塞率が約46%増加している。流木捕捉実験によって求められた橋梁部での河道閉塞率の最大値は $\lambda_d = 0.65$ となった。

図 7 (b) に各ケースの流木閉塞による閉塞率 $\lambda_d = A_b/A$ を示す。横軸は流木投入前の Main-channel におけるフルード数 Fr である。流木閉塞による閉塞率 λ_d は流木270本投入時の橋梁部での堰上げ水深 H_{\max} と既知の閉塞率 A_b/A のポーラス板を設置したときの堰上げ水深 H を比較して算出した。

$l/B_R = 2.0$ ではフルード数 Fr が大きくなると流木閉塞による閉塞率 A_b/A が増加する傾向がみられた。これはフルード数 Fr が小さいと流木が橋梁断面で水面付近でのみ集積していくためである。フルード数 Fr が小さいケースでは橋梁前面の流木塊は水面付近で上流側に向けて大きくなっていく現象がみられた(図 5 (a), 図 8 (a))。

これに対して, フルード数 Fr が大きくなると水面付近だけでなく, 底面付近でも流木が捕捉されるのがみられた(図 8 (b))。これは流木が橋脚に捕捉された後に底面に向けて沈下するためである(図 8 (c), (d))。捕捉された流木が沈下した結果, 水面から底面まで流木塊が流れを阻害するようになり, 流木閉塞時の閉塞率 A_b/A が大きくなったと考えられる。

本研究でみられた捕捉された流木の沈下現象は既往流木研究ではあまり明らかにされておらず, 注目される。これは橋脚前面で水流がぶつかって下降流が発生するため, フルード数が大きいケースでは下降流の鉛直下向き ($V < 0$) の流速が大きくなって流木を沈下させると推測される。流木の比重, 重心位置も流木の沈下現象にかかわる重要なパラメータである。

3.2 橋梁閉塞時の迂回流の氾濫原流量の評価

次に流木閉塞時の氾濫流量を PIV 計測結果から評価する。ポーラス板の閉塞率 A_b/A は流木捕捉実験をもとに決定している。本研究では流木閉塞時の橋梁迂回流の氾濫流量を正確に算出するため, 横断方向位置をシフトさせて鉛直 PIV 計測

を行っている ($z/B_m = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45$ (右岸), 1.55, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 (左岸))。

図 9 (a), (b) に CaseR10L8-1 (左岸 8 cm, 右岸 10 cm), A_p/A (ポーラス板の閉塞率) = 0.65, $Fr = 0.60$ のケースについて横断方向位置ごとに時間平均主流速 U の鉛直断面 (x - y 平面) コンターを示している。図 9 (c) に CaseR10L8-1 の氾濫原における氾濫流水深 H_f の水平面 (x - z 平面) コンターを示す。図 9 (d) に横断方向位置ごとに氾濫流水位 H_w の流下方向プロット図を示す。

図 9 (a) からどの位置においても橋梁部より下流側で氾濫流速が増加している。これは氾濫流水深が流下方向に減少しているためだと考えられる (図 9 (c))。氾濫原高さの低い左岸側では流速値は大きく、下流側に進むにつれて右岸との流速差は大きくなる事が確認できる。

横断方向位置ごとに比較すると氾濫原の中央部付近 ($z/B_m = 0.4$ (右岸), 1.6 (左岸)) において氾濫流速が最も大きくなっている。これは氾濫流速が橋梁の欄干部付近で低減するためである。図 9 (d) から橋梁の上流側 ($x/B_m < 0$) では氾濫流水位に横断方向の差はあまりみられない。

図 10 に CaseR10L8-1, A_p/A (ポーラス板の閉塞率) = 0.65, $Fr = 0.60$, 横断方向位置の橋梁の

上流端位置 ($x/B_m = 0$) での単位幅流量 $\Delta Q(z) = H_f(z) \cdot \langle U \rangle (z)$ の横断方向プロットを示す。 $\langle U \rangle (z)$ は各横断方向位置の流速値を式 (1) のように水深平均して算出した。

$$\langle U \rangle (x, z) = \frac{1}{H_f} \int_0^{H_f} U(x, y, z) dy \quad (1)$$

$$\Delta Q(z) = H_f(z) \cdot \langle U \rangle (z) \quad (2)$$

単位幅流量 $\Delta Q(z) = H_f(z) \cdot \langle U \rangle (z)$ は橋梁の欄干部 ($z/B_m = 0.45$ (右岸), 1.55 (左岸)) 付近で小さい。これは氾濫流水深が橋梁部では横断方向に非一様で橋梁部付近では $H_f(z)$ が小さいためである。また、単位幅流量 $\Delta Q(z) = H_f(z) \cdot \langle U \rangle (z)$ は氾濫原の中央部 ($z/B_m = 0.3$ (右岸), 1.7 (左岸)) 付近で大きくなっている。これは前述したように、氾濫原の中央部付近の氾濫流速の方が大きくなるためである。

図 10 にはプロットした単位幅流量 $\Delta Q(z)$ の横断分布をもとに描いた多項式近似曲線を併示している。どのケースも多項式近似を用いて精度良く近似することができた。多項式近似した $\Delta Q(z)$ を積分することで左岸と右岸における氾濫流量を

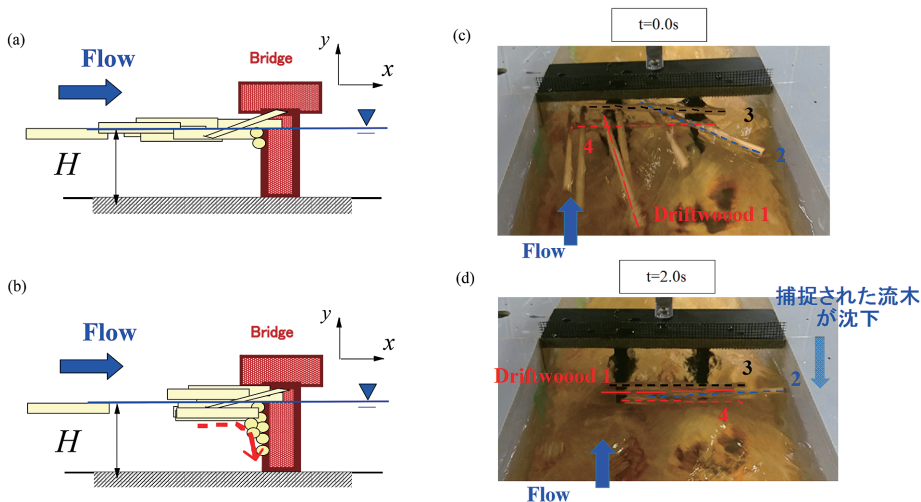
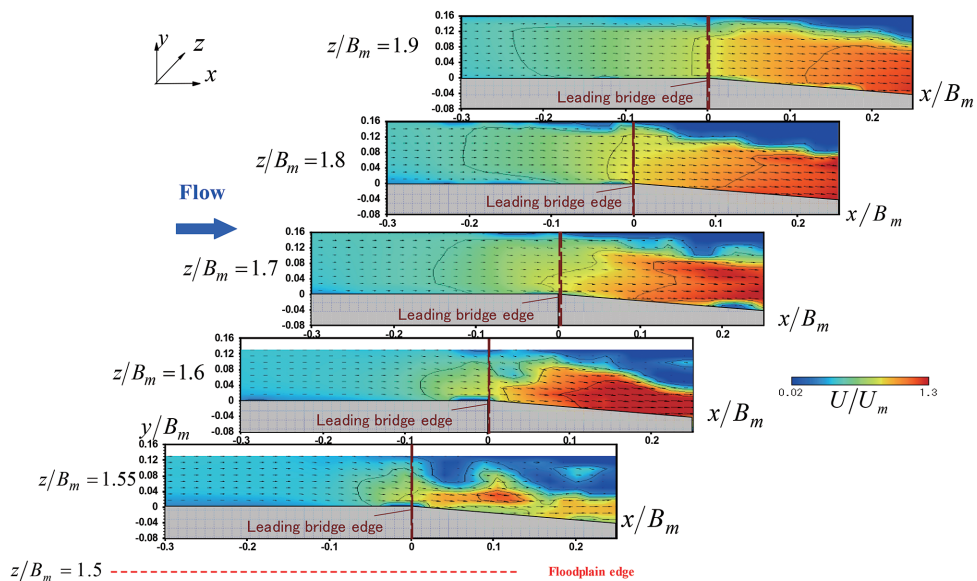


図 8 (a) 橋梁部での流木集積の模式図 (フルード数が小さいケース)
 (b) 橋梁部での流木集積の模式図 (フルード数が大きいケース)
 (c), (d) 橋梁で捕捉された流木の沈下現象のスナップショット ($I/B_R = 2.0, Fr = 0.6$)

(a) 左岸 (CaseR10L8-1, $Fr=0.6, A_b/A=0.65$)



(b) 右岸 (CaseR10L8-1, $Fr=0.6, A_b/A=0.65$)

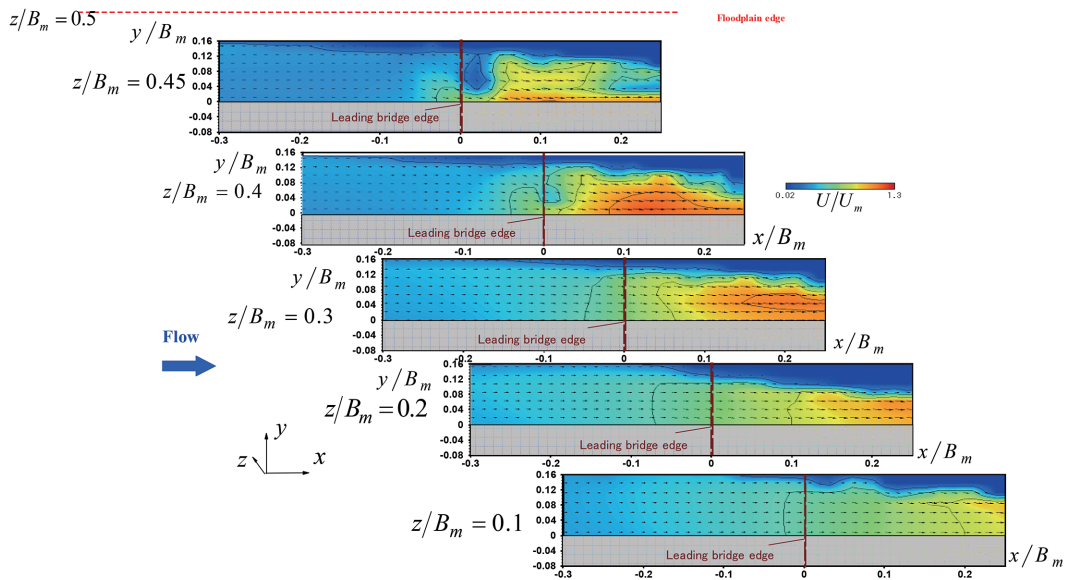
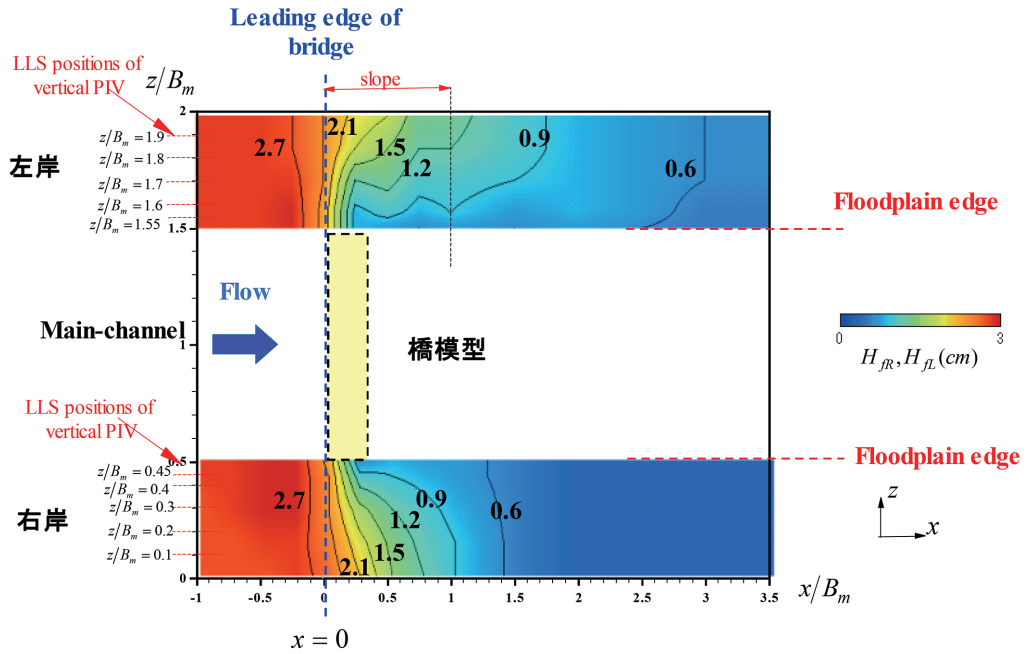


図9 (a) 橋梁迂回流発生時の左岸側主流速の鉛直面コンター
 (b) 橋梁迂回流発生時の右岸側主流速の鉛直面コンター

(c) (CaseR10L8-1, $Fr=0.6$, $A_b/A=0.65$)



(d) (CaseR10L8-1, $Fr=0.6$, $A_b/A=0.65$)

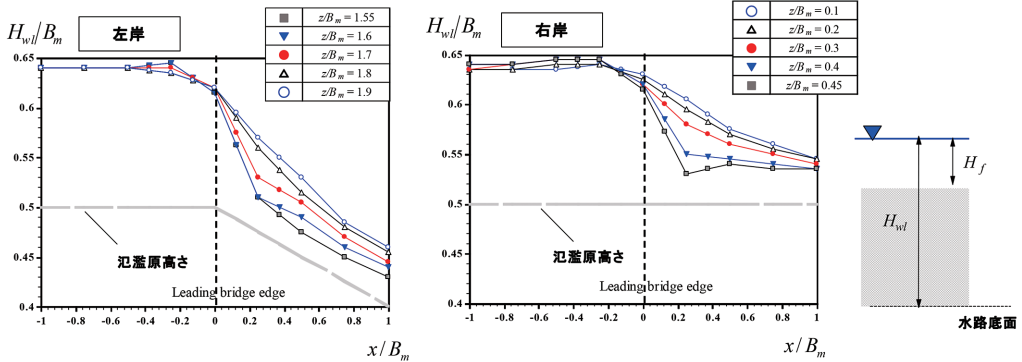


図9 (c) 橋梁迂回流発生時の氾濫流水深の水平面コンター、
(d) 橋梁迂回流発生時の氾濫流水位の流下方向プロット図

次式から算出することができる。

$$Q_L = \int_{B_m - B_f}^{B_m} \Delta Q(z) dz \quad (3)$$

$$Q_R = \int_0^{B_f} \Delta Q(z) dz \quad (4)$$

主流域での流量 Q_M 、両岸の氾濫流量 Q_F は次式で表される。

$$Q_T = Q_M + Q_L + Q_R = Q_M + Q_F \quad (5)$$

図 11 に CaseR10L8-1, CaseR10L8.5, CaseR10L9, CaseR10L9.5 and CaseR10L10-1, A_b/A (河道閉塞率) = 0.65, $Fr = 0.60$ のケースにおける橋梁の上流端位置 ($x/B_m = 0$) での右岸と左岸における氾濫流量 Q_R , Q_L を示す。横軸は左岸と右岸の高低差 $\Delta D/D_R$ である。

左岸と右岸の高低差がもっとも大きい CaseR10L8-1 ($\Delta D/D_R = 0.2$) では氾濫原高さの低

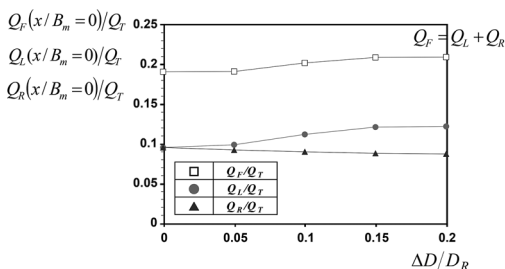
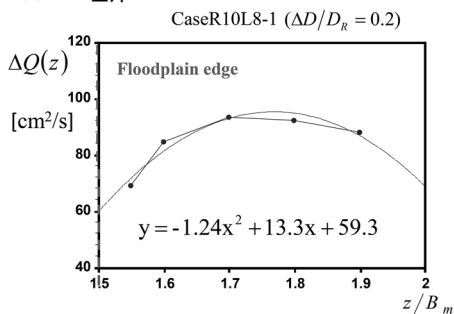


図11 迂回流発生時の左岸と右岸の氾濫流量の変化 ($Fr = 0.6$: 左岸と右岸の高低差の影響)

い左岸に氾濫流が集中するため、左岸側氾濫流 Q_L は Q_R の1.4倍となった。左岸と右岸の高低差が小さい CaseR10L9.5 ($\Delta D/D_R = 0.05$) では Q_L は Q_R の1.07倍となった。また、左岸と右岸の高低差がない $\Delta D/D_R = 0$ のケースでは Q_L と Q_R は同じ値をもつ。

同図中には両岸の氾濫流量 Q_F を併示した。左岸と右岸の高低差がない CaseR10L10 ($\Delta D/D_R = 0.0$) のケースではトータルの河川流量の18%の氾濫流が左岸と右岸の氾濫流に流れ込んでいる。これにより大量の流木が捕捉された橋梁閉塞時には河川流量の2割程度の氾濫流が両岸の氾濫原に流れ込む可能性があることが示唆された。左岸と右岸の高低差がもっとも大きい CaseR10L8-1 ($\Delta D/D_R = 0.2$) のケースでは氾濫流量が大きくなり、トータルの河川流量の21%の氾濫流が氾濫原に流れ込んでいる。CaseR10L10-1と比較して全体の氾濫流量が増加しているが、これにより左岸側の水位が低いため上流側の氾濫流が引き込まれている可能性が示唆される。

(a) 左岸



(b) 右岸

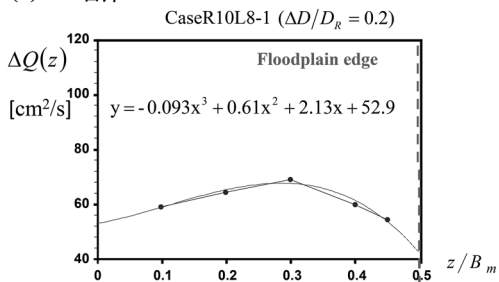


図10 橋梁迂回流発生時の単位幅あたりの氾濫流量の横断方向プロット図 (CaseR10L8-1, $Fr = 0.6$, $A_b/A = 0.65$) (a) 左岸, (b) 右岸

3.3 橋梁迂回流による氾濫被害区域について

流木閉塞時の迂回氾濫流による家屋流出被害について考察するために、氾濫原家屋 (本研究の家屋モデルは1/80スケール) にかかる抗力を測定した。家屋が氾濫流から受ける抗力は次式で表される。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D U_s(x)^2 A_x \quad (6)$$

C_D は抗力係数, A_x は家屋の水中投影面積, U_s は家屋前面での氾濫流速である。式(6)とフルード相似則を用いて実スケールの家屋にかかる抗力を算出し、木造家屋の破壊基準値 F_{wd} と比較する。木造家屋は1mあたりの抗力が1.06 tf/m を超えると破壊されるとされている (Koshimura & Kayaba (2011))。

図12に $Fr=0.60$, $A_b/A=0.65$ のケースにおける左岸と右岸の高低差 $\Delta D/D_R$ に対する迂回流発生時に左岸と右岸の氾濫原の家屋にかかる抗力の最大値 F_{max} の変化を示す。抗力値は木造家屋の破壊基準値 F_{wd} で無次元化している。家屋の流下方向位置は $x/B_m=1.0$ である。

$\Delta D/D_R$ が大きくなるにつれて左岸氾濫原家屋にかかる抗力が増加して破壊基準値 F_{wd} を大き

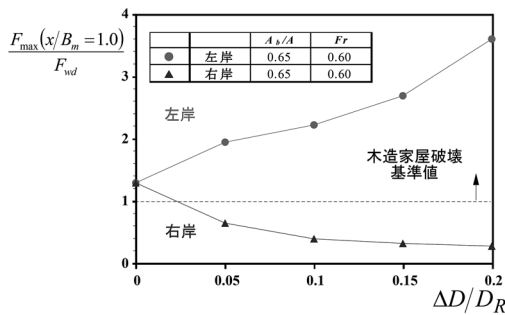


図12 迂回流発生時の左岸と右岸氾濫原の家屋抗力最大値の変化(左岸と右岸の高低差の影響)

く上回るため、家屋流出の危険性が増している。CaseR10L8-1($\Delta D/D_R=0.2$) では左岸側の家屋抗力は $F/F_{wd}=3.6$ 程度、右岸側の家屋抗力は $F/F_{wd}=0.3$ 程度となった。左岸と右岸の高低差が小さい CaseR10L9.5($\Delta D/D_R=0.05$) でも左岸側の家屋抗力の値は右岸側と2倍程度となった。このことから左岸と右岸の高低差が5%程度であっても氾濫流を集中させ、洪水被害をより大きくすることが示唆された。

図13(a)に CaseR10L8-1,2($\Delta D/D_R=0.2$), CaseR10L10-1,2($\Delta D/D_R=0.0$) の左岸と右岸における家屋抗力の最大値の流下方向変化 $F_{max}(x)$ を示す。フルード数は $Fr=0.60$, A_b/A (ポーラス板の閉塞率) = 0.56, 0.65 である。

CaseR10L8($\Delta D/D_R=0.2$) では河道閉塞率 $A_b/A=0.49$ を超えると氾濫原に越流して迂回氾濫流が

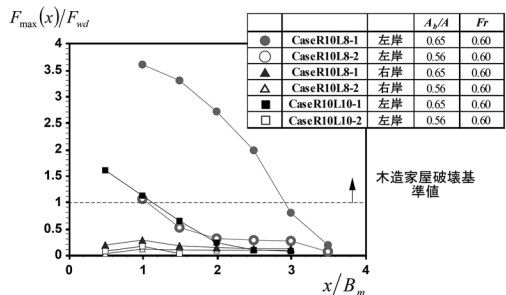


図13 (a) 左岸と右岸氾濫原の家屋抗力最大値の流下方向変化

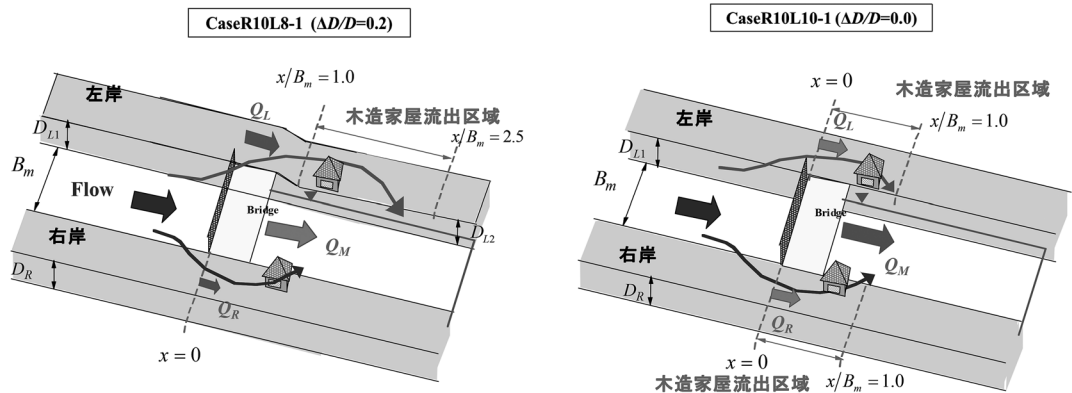


図13 (b) 迂回氾濫流発生時の氾濫被害区域

発生するのがみられた。 $A_b/A=0.49$ の抗力値は小さいため図中には示していない。河道閉塞率 $A_b/A=0.56$ のときに左岸側 $x/B_m=1.0$ の家屋抗力の最大値 F_{max} が木造家屋の破壊基準値 F_{wd} を超え、家屋が流出する危険が大きい。 $A_b/A=0.65$ のケースでは $1.0 < x/B_m < 2.5$ の範囲で左岸氾濫原家屋に破壊基準値 F_{wd} を超える抗力が作用する。これより、氾濫原高さの低い左岸側の氾濫危険区域 (図13(b)) が流下方向まで続いていることが確認された。本研究では浸水深が小さいため家屋にかかる浮力の影響を考えていないが、浮力を考慮すると家屋流出の被害域が広がる可能性がある。

これに対して、右岸側では氾濫原全域で $A_b/A=0.56, 0.65$ で F_{max} が木造家屋の破壊基準値 F_{wd} より小さいため、家屋流出の危険は少ないと考えられる。

CaseR10L10 ($\Delta D/D_R=0.0$) では $A_b/A=0.56$ では迂回流は発生しているが、兩岸の氾濫原全域で家屋抗力値は小さく家屋流出の危険は少ない。 $A_b/A=0.65$ のケースで $0.0 < x/B_m < 1.0$ の範囲で破壊基準値 F_{wd} を超える抗力が作用する。

4. 結論

本研究ではまず流木の集団投入実験を行い、橋梁前面が流木で閉塞したときの橋の上流側の堰上げ水深を計測した。また流木除去後に橋模型の前面に既知の遮蔽面積のアルミ製ポーラス板を設置して水深を計測し、流木閉塞時の水深と比較することで流木閉塞時の河道閉塞率 A_b/A を評価した。次に流木閉塞時の迂回氾濫流の流量を評価するためにPIV画像計測法を用い、迂回流の流速計測を行った。左岸と右岸の氾濫原高さを変化させて、氾濫原の地形形状の迂回流への影響について調べた。さらに氾濫原家屋にかかる抗力計測を行い、迂回流の家屋流出被害の危険域を評価し、迂回流の発生条件についても考察した。

以下に総合的な考察も加え、結論とする。

1) 流木長を変化させて橋梁部での流木集積による河道閉塞率の変化について調べた。流木長 $l/B_R=2.0$, $Fr=0.6$ (CaseL12-3)のケースでは

ポーラス板閉塞率 $A_b/A=0.65$ の水深と同程度で、流木集積によって河道閉塞率が約46%増加した。流木長 $l/B_R=1.5$, $Fr=0.6$ (CaseL9-3)のケースではポーラス板閉塞率 $A_b/A=0.56$ の水深と同程度で流木集積によって閉塞率が37%増加した。これらの結果から流木長が長くなると橋梁部での河道閉塞率が増加することがわかった。

- 2) フルード数が大きくなると流木閉塞による閉塞率 $\lambda_d=A_b/A$ が増加する傾向がみられた。これはフルード数が小さいケースでは流木が橋梁前面で水面付近でのみ集積していくためである。これに対し、フルード数が大きいケースでは、流木が橋脚に捕捉された後に流木が底面に向けて沈下する現象がみられた。流木が沈下することで水面から底面まで流木塊が流れを阻害し、閉塞率 $\lambda_d=A_b/A$ が増加したと考えられる。
- 3) 氾濫原全域をカバーするようにLLS位置を横断方向にシフトさせてPIV計測を行った。単位幅流量の横断分布を近似曲線を用いて積分することで、河道閉塞時の氾濫原の氾濫流量を正確に算出した。左岸と右岸の高低差がもっとも大きいCaseR10L8 ($\Delta D/D_R=0.2$)では氾濫原高さの低い左岸に氾濫流が集中するため、左岸側氾濫流 Q_L は右岸側氾濫流 Q_R の1.4倍となった。
- 4) 左岸と右岸の高低差のあるCaseR10L8-1 ($\Delta D/D_R=0.2$)のケースでは左岸と右岸を合計した迂回流の氾濫流量 Q_F はトータルの河川流量の21%の氾濫流が氾濫原に流れ込んでいる。高低差のないCaseR10L10と比較すると、CaseR10L8の方が左岸と右岸を合計した氾濫流量 Q_F が増加している。これによりCaseR10L8では左岸側の水位が低いため上流側の氾濫流が引き込まれ、全体の氾濫流量を増加させている可能性が示唆された。
- 5) 左岸と右岸の高低差の小さいCaseR10L9.5 ($\Delta D/D_R=0.05$)でも左岸側の家屋抗力の値は右岸側の2倍程度となった。このことから左岸と右岸の高低差が5%程度であっても氾濫流を集中させ、洪水被害をより大きくすることが示唆された。

6) 左岸と右岸の高低差のある CaseR10L8($\Delta D/D_R=0.2$) では河道閉塞率 $A_b/A=0.49$ を超えると氾濫原に越流して迂回氾濫流が発生した。閉塞率 $A_b/A=0.56$ を超えると左岸側 $x/B_m=1.0$ の位置の家屋抗力の最大値 F_{max} が木造家屋の破壊基準値 F_{wd} を超え、家屋が流出する危険が大きくなった。河道閉塞率 $A_b/A=0.65$ を超えると左岸側 $1.0 < x/B_m < 2.5$ の範囲で氾濫原家屋に破壊基準値 F_{wd} を超える抗力が作用した。右岸では抗力値は小さく、家屋被害はみられなかった。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(若手(B), 集中豪雨による中小河川の橋梁閉塞と迂回氾濫流の河岸浸食防止のための実践的特進研究, 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) Bocchila, D., Rulli, M.C. and Rosso, R.: A flume experiment on the formation of wood jams in rivers, *Water Resour. Res.*, Vol.44: W02408, 2008
- 2) Koshimura, S. and Kayaba, S.: Tsunami fragility inferred from the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami disaster, *J. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.10(3), pp.87-101, 2011
- 3) Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., and Schess, A.: Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.139, pp.1134-1141, 2013
- 4) Schmocker, L. and Hager, W.H.: Scale Modeling of Wooden Debris Accumulation at a Debris Rack, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.139, pp.827-836, 2013
- 5) 岡本隆明, 竹林洋史, 山上路生, 柴山優人, 戸田圭一: 橋梁閉塞時の迂回氾濫流の流況特性と家屋流出被害に関する実験的研究, *自然災害科学*, Vol.35 (3), pp.191-201, 2016
- 6) 渋谷 一, 香月 智, 大隅 久, 石川信隆, 水山高久: 流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究, *砂防学会誌*, Vol.63 (3), pp.34-41, 2010
- 7) 竹林洋史, 平石哲也, 戸田圭一, 中川 一, 張 浩, 東良 慶: 2012年8月宇治水害調査速報, *自然災害科学 J.JSNDS*, Vol.31 (3), pp.233-244, 2012
- 8) 中川 一, 高橋 保, 池口正晃: 流木群の流動に関する研究, *京大防災年報*, Vol.35 (B-2), pp.249-266, 1992
- 9) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行: 蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.68 (2), pp. I_415-I_422, 2012
- 10) 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)*, 第72巻, Vol.3, pp.88-110, 2016

(投稿受理: 平成29年5月8日
訂正稿受理: 平成29年11月16日)

要 旨

集中豪雨時には大量の流木が河川に流出し、橋脚に引っかかることで河道を閉塞させて水位上昇を招き、洪水被害を大きくすることが知られている。さらに橋梁を迂回した氾濫流河岸を侵食して、家屋を流出させるなどの被害が報告させている。流木被害を予測するには川道閉塞時の橋梁周辺の氾濫水の挙動を予測することが重要であるが、これまで流木による橋梁閉塞時に越流した氾濫流を対象とした研究はあまりみられない。

そこで本研究ではまず橋梁での流木捕捉実験を行い、堰上げ水深から実験の流木集積時の橋梁部での河道閉塞率を評価する。次に流木投入時実験により得られた河道閉塞率をもとに閉塞率を設定し、橋梁を迂回した氾濫水流の流速を PIV 計測した。PIV 計測位置は氾濫原全域をカバーするように横断方向にシフトさせて、氾濫原に流れ込む氾濫流量を正確に評価した。さらに左岸の氾濫原高さを系統変化させて氾濫原の家屋抗力を計測し、洪水氾濫危険区域を評価し、迂回流被害の予測、対策の検討を行った。