

橋脚での流木集積と閉塞発生機構に関する検討

赤堀良介¹

Ryosuke AKAHORI

¹ 愛知工業大学工学部土木工学科 准教授

要 旨

出水時の流木による被害は多数報告されており、橋梁や取水施設等に集積し閉塞による氾濫や施設の破壊などを生じさせる例や、氾濫流により流失した流木が、周辺家屋に衝突するなどの例が知られている。このうち、構造物周辺での閉塞を生じさせる際の流木投入条件などに関しては先行研究が多く存在しているが、流木捕捉工の評価に主眼を置いた例が多く、前提となる勾配やフルード数が大きいものが多い。一方で平野部を流れる河道では、水面近くを流れてきた流木が何らかの機構により構造物周辺で水面下に引き込まれ3次的に集積していることが推測されるが、流れの状況と連動した集積のメカニズムの解明については十分に理解が進展していない。そこで本研究では、河道内での流木の発生から輸送、集積までを対象とした3年計画のうちの初年度として、まずは対象となる勾配の緩やかな河川における集積機構の整理を目的として研究を実施した。ここでは、橋脚模型を設置した開水路に流木模型を投入し、フルード数や、橋脚の径間長と流木長との比率、水制群の有無などを変更しながら、その挙動に対して画像解析を適用し検討を行った。結果より、表面流速の遅い流れでは流木の集積は平面的で閉塞には至らず、表面流速が速い流れでは集積が鉛直方向に生じ全面的な閉塞に至ることが確認された。また水制を設置することで流れの状態に空間的な変化を生じさせた場合には、局所的に最も流れの速い箇所での流木集積の機構に依存し、平均的には流れの遅い条件であっても、一部の流れが集中した箇所から鉛直方向の引き込みが生じ、閉塞に至ることが確認された。

《キーワード：流木；集積；橋脚；水理実験；PIV；PTV》

1. はじめに

出水時の流木による被害は多数報告されており、橋梁や取水施設等に集積し閉塞による氾濫や施設の破壊などを生じさせる例や、氾濫流により流失した流木が、周辺家屋に衝突するなどの例が知られている。このうち、構造物周辺での閉塞を生じさせる際の流木投入条件などに関しては先行研究が多く存在しているが、流木捕捉工の評価に主眼を置いた例が多く、前提となる勾配やフルード数が大きいものが多い。一方で平野部を流れる河道では、水面近くを流れてきた流木が何らかの機構により構造物周辺で水面下に引き込まれ3次元的に集積していることが推測されるが、流れの状況と連動した集積のメカニズムの解明については十分に理解が進展していない。そこで本研究では橋脚模型を設置した開水路に流木模型を投入し、フルード数や、橋脚の径間長と流木長との比率、水制群の有無などを変更しながら、その挙動に対して画像解析を適用し検討を行った。

2. 研究手法

実験水路として、寒地土木研究所第4実験棟の可傾斜水路を用いた。水路の側面からの概要を図-1に示す。水路幅0.6m、水路延長15mの水路のほぼ中央部にアクリル材による橋梁模型を設置した。上部工は水面に対して十分に高い位置にあり、本実験では橋梁周辺の流木の集積は橋脚のみによって生じた。実験では、水制群を置かないケースと、橋梁をはさんで突き出し10cm、幅6cmの非越流水制を左岸側に9基置いたケースを設定した。前者は全体的な水理条件と集積の関係性を検討するために実施し、後者は空間的な流れの特性が集積機構に影響を与え得るかの検討のために実施した。このため後者の実験の水理条件は前者の一部と共通とした。まず水制を置かない条件では、水路の中央部に5点の圧力計(STS Sensors, ATM. 1ST)を縦断的に設置した。図-1にその際の水位計設置位置を示した。橋梁模型の径間は8cm、10cm、12cmの3種類とし、流木長さに対する径間の比は、それぞれ80%、100%、120%となる。流量はすべてのケースにおいて10.4L/sと一定であるが、水路の下流側にはね板式の堰上げの機構を設け、水制群を設置しない実験では水深と流速の調整を行った。堰上げを行った場合は水深が約9.4cm、断面平均流速Uが0.18m/s、フルード数Frが0.19であり、堰上げを行わない場合は水深6cm、断面平均流速Uが0.29m/s、フルード数Frが0.38であった。水制群を設置した実験では、堰上げを行なった条件のみで実験を実施した。すなわち、水深が約9.4cm、断面平均流速Uが0.18m/s、フルード数Frが0.19の実験のみであった。ただし、橋梁模型が水制群の中ほどに設置されており、水制域とそれ以外とは、局所的な水理条件が大きく異なる設定とした。これらの実験に共通する流木模型は、長さ10cm、直径0.6cmの木材であり、全体を黒く着色し中央部のみ後のParticle Tracking Velocimetry (PTV)において解析画像中で明瞭に判別するために白く帯状に着色した。流木は上流側から手作業により5s間隔で散布した。流木の投入本数を2本、5本、10本、20本、40本、80本、120本とすることで、投入数の異なるケースを設定した。投入時間は約2分間であった。実験では橋梁上空から水面を見下ろす形で高速カメラ(Photoron, Fastcam SA3)を設置し流木模型を撮影した。PTVに用いた画像の画素数は768×768pixel、フレームレートを60fpsとした。得られた画像の流木の白帯部分に対しPTVによる解析を行ない、個々の流木の移動速度を算出した。PTV解析の結果の例を図-2に示す。さらに、一部のケースでは同一の水理条件のもと再実験を行い、底面から鉛直縦断面状にレーザーシートを照射し、側面から高速カメラで撮影することで、Particle Image Velocimetry (PIV)計測を実施した。PIVに用いた画像では、画素数は1028×768pixel、フレームレートを250fpsとした。またPIVにお

いて中立粒子として樹脂製粒子（三菱化学製：ダイヤイオン HP20）を使用した。なお PTV、PIV とともに、解析システムとして市販のシステム（カトウ光研，Flow Expert）を使用した。これらの実験に関してその水理条件を表-1 に示した。

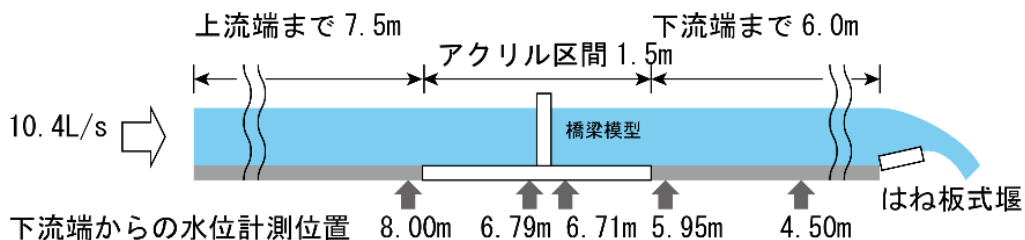


図-1 実験水路を側面から見た概要

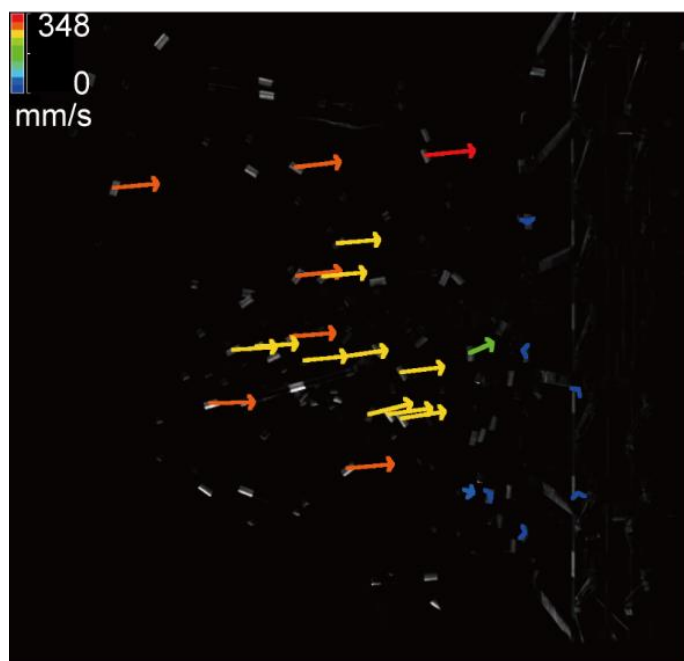


図-2 PTV 解析により流木の移動速度を解析した例

表-1 実験条件

水制群	堰	長さ	幅	流量	勾配	水深	Fr 数
無	有	15m	0.6m	10.4 L/s	1/2000	9.4cm	0.19
	無					6.0cm	0.37
有	有					9.4cm	0.19

3. 実験結果

水制群を設置しない条件において、各ケースにおける流木の集積の状況あるいは危険性について、3項目で評価を行なった。すなわち、流木捕捉率、集積状況の定性的観察、橋梁上流側での水位上昇の3点である。以下に評価の詳細と結果について述べる。

まず1点目として、橋梁で捕捉された流木数を投入流木本数で除し、捕捉率を算出した。次に2点目として、橋脚への集積状況に関し、上空から見て平面的に流木が集積したか（A：平面的に見た閉塞、B：部分的もしくは一時的滞留、C：集積なし）、側面からの画像で水面から河床まで流木がどう集積したか（a：鉛直的に見た閉塞、b：部分的もしくは一時的滞留、c：集積なし）で定性的に場合分けした。さらに3点目として、橋梁模型直上流の6.79m地点での水位変化について、開始直後と実験終了時の1s間平均をとり、その間の上昇値を算出した。これらを、径間/流木長、時間あたり投入量、およびフルード数の違いにより整理したものを表-2および表-3に示す。ここでは治水上の安全性で評価することを踏まえて、上記の橋梁上流側の水位上昇に応じてセル内を色分けした（水位上昇1cm以上：赤、1cm未満：黄、なし：緑）。Fr=0.38の結果では、表の下から上に掛けてA（平面的に見た閉塞）からC（集積無し）に、左から右に掛けてa（鉛直的に見た閉塞）からc（集積無し）に変化している。この結果では鉛直方向への流木の潜り込みが著しく、平面的な閉塞に至らない状況でも、鉛直方向では3次元的な滞留が観察された。一方でFr=0.19の結果では、下から上にAからCへの変化は生じ、上空から見た場合の集積状況は大きく変化したが、aからcへの変化は見られず、鉛直方向への流木の輸送による閉塞は見られなかった。すなわち、上空からは閉塞したように見られたケースでも実際には水位上昇を生じるような河道の全面的な閉塞には至らない結果となった。また捕捉率の高さが必ずしも橋梁上流での水位上昇と一致しないことが示された。先行研究で示されることが多い径間/流木長比80%前後で捕捉率が飛躍的に上昇するという結果も、表-2と表-3の比較においてはFr=0.38の結果においてのみ示されており、平面的な集積のみを示すFr=0.19のケースにおいては、径間/流木長比で120%でも、投入量に応じて捕捉率が上昇した。これらより、流木の橋梁への集積に関しては、単に捕捉率を検討するのみではなく、鉛直方向への引き込みが発生し得る条件の検討が重要であることが分かる。PIVの結果（例：図-3）からは、Fr=0.38の実験では集積流木周辺で下降流が確認されるが、水面付近の流速が約0.35m/sと高い値を示すことから流下方向の抗力も強く生じていると考えられる。これらと、自身の浮力あるいは他の流木との摩擦力との関係が、河道の閉塞に至る集積の傾向に影響を与えることが推測された。

また水制群を設置したケースでは、全体的な水理条件としては全面的な閉塞を生じない水制群なしのFr=0.19の実験と等しいが、水はねによって右岸に集中化した流れの部分の切欠として橋脚において鉛直方向の閉塞が生じた（例：図-4）。この部分の流速を表面流速から算出するとFr=0.27程度となり、部分的に高い表面流速が生じていたことが分かる。このことから、橋脚への流木集積に関しては、横断方向に一樣な状況を想定した検討のみでなく、流れの状況の局所的、空間的な分布に基く検討が必須であると考えられた。

4. まとめ

本研究では橋脚模型を設置した水路に流木模型を投入し、フルード数や、橋脚の径間長と流木長との比率、水制の有無などを変更しながら、その挙動に対して画像解析を適用し検討した。結果より、表面流速の遅い流れで

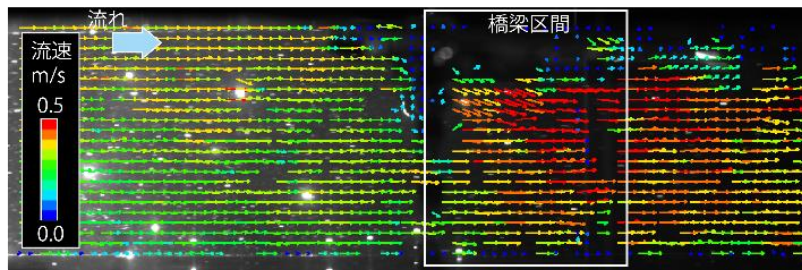
は流木の集積は平面的で閉塞には至らず、表面流速が速い流れでは集積が鉛直方向に生じ全面的な閉塞に至ることが確認された。また水制を設置することで流れの状態に空間的な変化を生じさせた場合には、局所的に最も流れの速い箇所での流木集積の機構に依存し、平均的には流れの遅い条件であっても、一部の流れが集中した箇所から鉛直方向の引き込みが生じ、閉塞に至ることが確認された。

表－2 水制なし $Fr=0.38$ での捕捉率，定性的集積状況，
橋梁上流の水位上昇値（水位上昇大：赤，中：黄，無：緑）

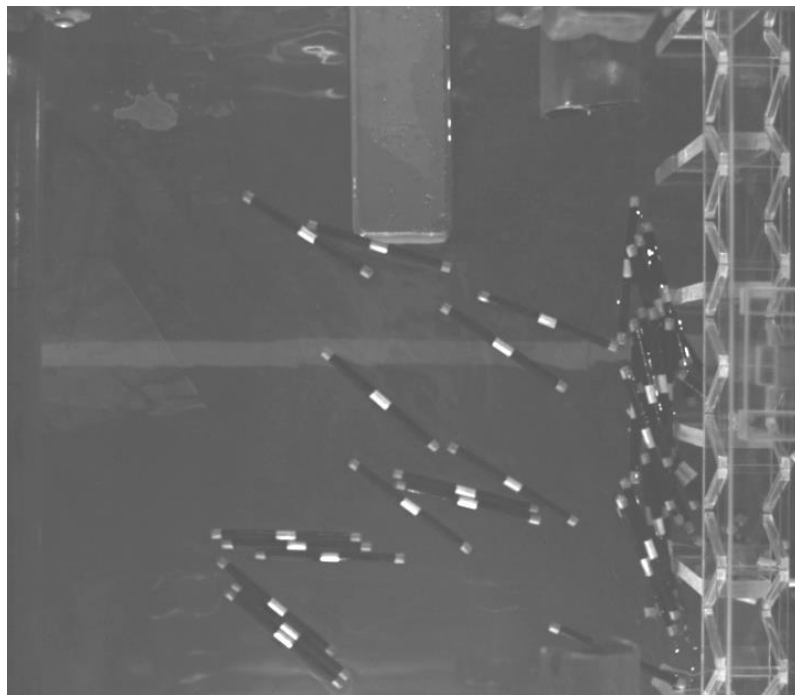
供給量 (本/5s)	径間/流木 80%	径間/流木 100%	径間/流木 120%
5	0.10, Cb, 0.19cm	0.00, Cc, 0.11 cm	0.02, Cc, 0.04 cm
10	0.05, Cb, 0.16 cm	0.01, Cb, 0.05 cm	0.02, Cb, 0.04 cm
20	0.13, Aa, 1.63 cm	0.01, Cb, 0.23 cm	0.01, Cb, 0.04 cm
40	0.33, Aa, 2.04 cm	0.02, Cb, 0.10 cm	0.01, Cb, 0.11 cm
80	0.58, Aa, 2.84 cm	0.01, Bb, 0.13 cm	0.00, Cb, 0.17 cm
120		0.01, Cb, 0.25 cm	0.01, Cb, 0.02 cm

表－3 水制なし $Fr=0.19$ での捕捉率，定性的集積状況，
橋梁上流の水位上昇値（水位上昇大：赤，中：黄，無：緑）

供給量 (本/5s)	径間/流木 80%	径間/流木 100%	径間/流木 120%
2	0.17, Cc, -0.01 cm	0.10, Cc, 0.00 cm	0.00, Cc, 0.00 cm
5	0.42, Ac, -0.02 cm	0.00, Bc, -0.03 cm	0.02, Cc, 0.02 cm
10	0.81, Ac, -0.04 cm	0.72, Ab, -0.02 cm	0.40, Ac, 0.03 cm
20	0.91, Ac, 0.01 cm	0.86, Ab, 0.05 cm	0.75, Ab, -0.01 cm
40	0.93, Ab, -0.02 cm	0.90, Ab, 0.00 cm	0.88, Ab, -0.02 cm



図一3 鉛直断面 PIV (水制なし $Fr=0.38$, 径間/流木 80%, 40 本/5s)



図一4 水制を避け局所的に集積した流木，集積箇所 $Fr=0.27$
(水制あり，平均 $Fr=0.19$ ，径間/流木 80%，投入量 40 本/5s)

参考文献

- 1)長谷川祐治・中谷加奈・竹林洋史・里深好文・藤田正治：流木の流下と橋梁への集積に関する実験，京都大学防災研究所年報 (58), pp.350-357, 2014.