

橋梁部における杉の堆積に関する水理模型実験*

秋田大学工学理工学部 西脇 遼
 秋田大学大学院理工学研究科 齋藤 憲寿
 秋田大学大学院理工学研究科 渡辺 一也

1. はじめに

台風や大雨に伴う河川の増水によって流木が発生し、流出した流木が橋梁などの河川構造物に堆積することで水位上昇が生じ、洪水が拡大する被害が国内で多発している。一例として、2016年8月の岩手県豪雨災害では流木の発生と橋梁への堆積によって小本川が氾濫し、甚大な被害を及ぼした¹⁾²⁾。小本川の氾濫に見られたような流木による被害は、杉林が豊富な秋田県内においても発生する可能性があり、その流出過程を知ることは重要である。

そこで本研究では、実際の河川と橋梁をモデルとした水理模型実験を行い、橋梁への流木の堆積過程、堆積した際の水位、堆積本数、橋梁に堆積した流木の間隙などを計測し、流木の堆積状況についての検討を行った。

2. 研究対象

本研究でモデルとした河川と橋梁は、2016年8月に台風10号による豪雨災害が発生した小本川である。現地で測量を行い、橋梁の全長98m、川幅54m、水面からの橋脚の高さ4.6m、橋桁の高さ1.8m、欄干の高さ1.1m、道路の幅員3.7mという値を得た。

3. 実験方法

実験は直線矩形開水路に橋梁の模型を設置し、流木の模型を水路の一方の端から投入して行った。橋梁模型はアクリル板を用いて作製した。縮尺は小本川の川幅54mと実験水路の幅300mmの比より1/180とした。模型は単断面の橋梁として、橋脚が中央に1本の2スパンとなっており、橋脚幅は20mm、橋梁幅員20mm、橋桁厚10mm、欄干高さ10mm、橋脚と橋梁端部の間隔を140mmとした。橋梁模型の設計図を図-1に、水路に設置した模型を写真-1に示す。

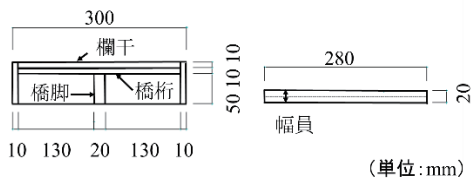


図-1 橋梁模型設計図

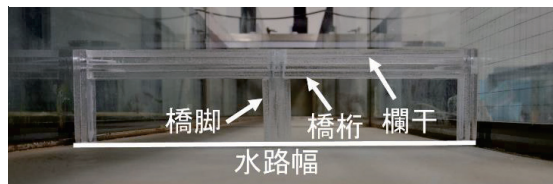


写真-1 橋梁模型

実験で用いる水路は長さ9.0m、幅0.3m、高さ0.5mであり、水路底面は固定床である。橋梁模型は流木投入地点から5.3mの地点に設置した³⁾。実験で使用した流木模型は針葉樹の杉である。

*Experimental Study on Accumulation of Cedar at the Bridge by Ryo NISHIWAKI, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

杉の直径は実スケールにおいて 1 m と想定して、模型流木直径は 0.5 cm とした。

本実験においては、「流木の長さに関する実験」(Case A)と「混合流木に関する実験」(Case B)と「流量変化に関する実験」(Case C)の3種類の実験を行った。Case Aの実験では、3種類の長さの異なる流木模型を用いて堆積状況を観察した。想定する流木の長さは 20 m, 25 m, 30 m である。小本川での災害時の流木発生量 1500 m³より¹⁾流木長ごとの本数を算出した。流木模型の長さとおよび本数を表-1に示す。流木の比重は乾燥状態で 0.38 であり、4日間水につけた湿潤状態で比重は 0.87~0.97 であった。実験では湿潤状態を使用した。水路に水位 5 cm となるように水を流し、橋桁下部と水面の隙間を無くした。ビデオを用いて橋梁模型を設置した箇所の横と上から、流木が堆積する様子を記録した。流木は 1 秒に 10 本ずつ投入した。流木長ごとに 5 回ずつ、合計 15 回実験を行った⁴⁾。流木の堆積状況は、流木堆積率で評価した。流木堆積率は式(1)で表される。

表-1 流木模型の長さおよび本数

模型流木の長さ	12 cm	15 cm	18 cm
想定する流木の長さ	20 m	25 m	30 m
投入本数	100 本	80 本	60 本

$$\text{流木堆積率(\%)} = \frac{\text{堆積した流木の本数}}{\text{投入した流木の本数}} \times 100 \quad (1)$$

Case Bの実験では長さの異なる3種類の湿潤状態の流木を混合して流し、堆積状況を観察した⁵⁾。小本川での災害時流木発生量 1500 m³を基に体積を統一した場合(Pattern 1.1, Pattern 1.2)と合計本数を 100 本に統一した場合(Pattern 2.1, Pattern 2.2)の2つの実験を行った。各実験の流木本数を表-2と表-3に示す。Case Aと同様に水位 5 cm となるように水を流し、流木は 1 秒に 10 本ずつ投入した。体積を統一した実験は Pattern 1.1 と Pattern 1.2 とともに 2 回ずつ、本数を統一した実験は Pattern 2.1 と Pattern 2.2 とともに 3 回ずつ実験を行った。流木の堆積状況の評価には流木堆積率を用いた。

Case Cの実験では数パターンの流量を設定して、流量ごとに流木の堆積状況の違いが見られるか検証を行った⁶⁾。設定した流量と流木が無い状態での水位を表-4に示す。長さ 12 cm の湿潤状態の流木を 100 本使用し、1 秒ごとに 10 本ずつ投入した。流木の堆積状況は、流木堆積率で評価した。さらに流量を 6.3 L/s に設定して、流木が橋梁に堆積した状態で水を抜き、橋脚と橋梁両端の間のスパンの断面において、堆積した流木はどのくらいの断面積を占めているかを上流側から観察し、間隙率として評価をする実験を行った。間隙率は式(2)で表される。

表-2 体積を統一した混合流木のパラメータ

		Pattern 1.1	Pattern 1.2
各流木の本数	18 cm	16本	11本
	12 cm	44本	23本
	6 cm	50本	96本
投入本数		110本	130本

表-3 本数を統一した混合流木のパラメータ

		Pattern 2.1	Pattern 2.2
各流木の本数	18 cm	14本	8本
	12 cm	40本	18本
	6 cm	46本	74本
投入本数		100本	100本

表-4 流量と水位

流量	3.6 L/s	4.5 L/s	5.4 L/s	6.3 L/s
水位	3.50 cm	3.98 cm	4.37 cm	4.84 cm

$$\text{間隙率(\%)} = \frac{\text{堆積した流木によって塞がれたスパンの断面積}}{\text{橋梁のスパンの断面積}} \times 100 \quad (2)$$

4. 実験結果

Case A の実験より得られた、流木が橋梁に堆積した様子を写真-2 に示す。流木が橋梁にぶつかり堆積するとともに、上流側の水位が上昇して最終的に越流をする様子が確認できた。水位は約 2~3 cm 上昇した。下流側では水位の低下が確認でき、水位は約 1 cm 低下した。

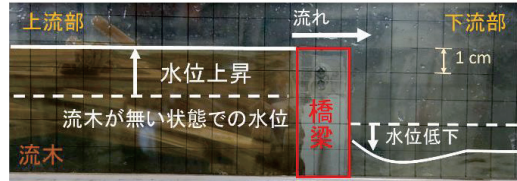


写真-2 横方向からの流木堆積の様子

図-2 に流木長 l と流木堆積率の関係を示す。流木の長さながいほど、流木が橋梁に堆積しやすいたことが確認できた。流木長ごとの流木堆積率は、長さ 12 cm では 25~40 %、15 cm では 30~60 %、18 cm では 60~80 %であった。分布の範囲は 15~30 %であり、長さ 15 cm の流木堆積率のばらつきが 3 種類の流木長の中で最も広範囲であった。これは流木長が橋梁の 1 スパンの間隔 13 cm よりも少し長いいため、橋梁に多く堆積する場合とあまり堆積しない場合の 2 種類に分かれるためと推測される。

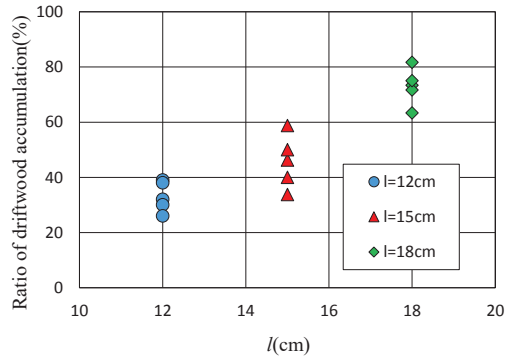


図-2 流木長と流木堆積率の関係

図-3 に経過時間 t と上流側の水位変化の関係を示す。水位は超音波式波高計を、橋梁模型中央から 5 cm 上流側の位置に設置して、100 秒間計測した。流木は水位の計測開始 10 秒後から、1 秒ごとに 10 本投入した。流木投入してから橋梁に流木が堆積始めると、上流側の水位が上昇しているのがデータより読み取れた。流木長が 18 cm と 15 cm の場合は水位が 8 cm 以上であったが、12 cm の場合は水位が 8 cm 以下となることがデータより読み取れた。

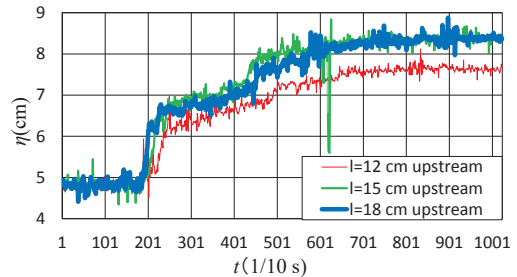


図-3 時間経過と水位の関係

図-4 に水位 η と流木堆積率の関係を示す。水位は流木が堆積した際、橋梁模型の中央から上流側 5 cm の水位と下流側 5 cm の水位をポイントゲージで測定した。上流側の水位は流木長と流木堆積率に関わらず、約 7~9 cm の水位となることがわかった。また下流側の水位も同様に流木長と流木堆積率に関わらず、約 2~3 cm の水位となることがわかった。上流側の水位にあまり違いが見ら

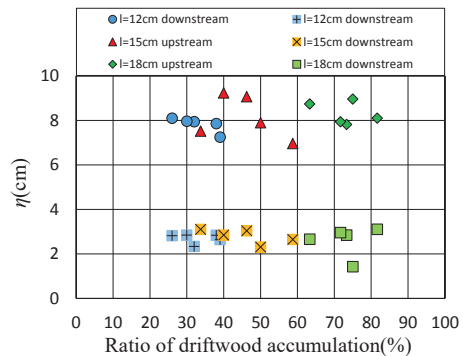


図-4 水位と流木堆積率の関係

れないのは、流木が橋梁に堆積したのち、越流に至るまでの十分な時間経過後に水位の計測を行ったためと推測される。

図-5に流速 u と水位 η の関係を示す。流速は流量計によって計測される流量 Q とポイントゲージで測定する水位 η と水路幅 B を用いて連続式で求めた。連続式は式(3)で表される。

$$Q = \eta \times B \times u \quad (3)$$

水位が高いほど流速が小さくなることが確認できた。また、上流側の水位と下流側の水位が流木長に関わらずあまり違いが見られないことに従って、流速も流木長ごとにあまり違いが見られないことが判明した。

Case B の体積を統一した混合流木の実験により得られた、平均流木長と流木堆積率の関係を図-6に示す。混合した流木の長さの平均値を平均流木長 l_{mean} と定義した⁷⁾。平均流木長が長いほど流木が堆積しやすいことが確認できた。また、図-2の流木長12cmと比較すると、平均流木長10cmのPattern 1.1の場合、流木堆積率は40%前後と堆積率はあまり違いが見られなかった。したがって長い流木が混合していると、平均流木長が小さい場合でも、橋梁に堆積しやすいと考えられる。

図-7に平均流木長と水位の関係を示す。平均流木長の違いによる、下流側の水位の違いは見られなかった。しかし上流側の水位の違いはPattern 1.1がPattern 1.2よりも水位が高くなった。

Case Bの本数を統一した混合流木の実験より得られた、平均流木長と流木堆積率の関係を図-8に示す。平均流木長が長いほど流木が橋梁に堆積しやすいと考えられ、図-2の流木長と流木堆積率の関係と同じ傾向を示していた。Pattern 2.1の流木堆積率は20%~60%と分布の範囲が40%と広がっていた。これは長い流木が橋梁に引っかかり、それに従って短い流木も堆積していくため、長い流木の橋梁への引っかかりに流木堆積率が依存して、

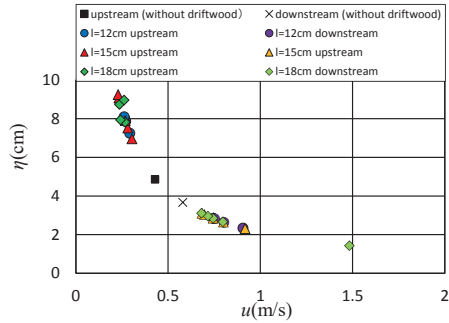


図-5 流速と水位の関係

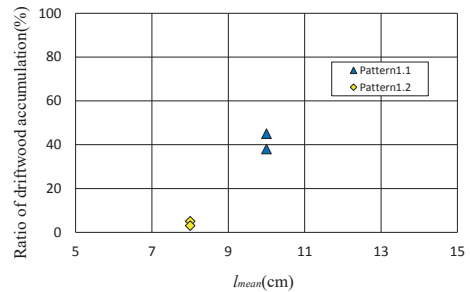


図-6 平均流木長と堆積率の関係(体積統一)

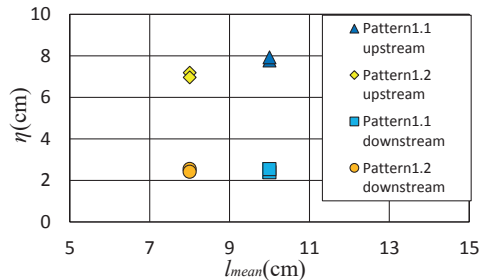


図-7 平均流木長と水位の関係(体積統一)

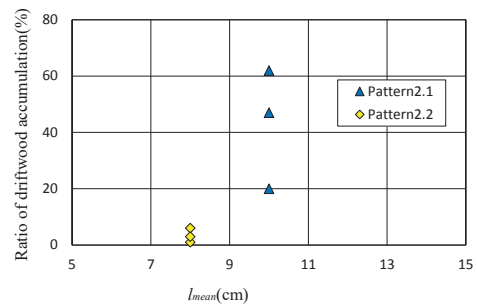


図-8 平均流木長と堆積率の関係(本数統一)

ばらつきが見られたと推測できる。Pattern 2.2の混合流木は橋梁にほとんど堆積しなかった。

図-9に平均流木長と水位の関係を示す。平均流木長の違いによる、下流側の水位の違いは見られなかった。Pattern 2.1の上流側の水位は図-4の水位と同じく約7~9 cmとなった。Pattern 2.2の上流側の水位は約6~7 cmと水位の違いが見られた。これはPattern 2.2の際、橋梁にほとんど流木が堆積しなかったため、水位上昇が小さくなったと推測できる。図-6の体積を統一した場合の平均流木長と水位の関係と似た傾向が見られた。

Case Cの流量に関する実験より得られた、流量と流木堆積率の関係を図-10に示す。流量が4.5 L/sと6.3 L/sの場合20~40%の流木堆積率が確認できた。また流量が3.6 L/sと5.4 L/sの場合0~10%の流木堆積率が確認できた。流量が6.3 L/sの場合の流木堆積率は、Case Aの実験の場合と近い値となった。また流量が4.5 L/sの場合と5.4 L/sの場合で流木堆積率に違いが出たのは、橋桁下部と水面の間隔と流速が関係していたと推測され今後検討が必要である。

図-11に流速と流木堆積率の関係を示す。上流側では流木が堆積するほど流速が小さくなることが読み取れた。しかし下流側には、流量4.5 L/sの場合よりも流木の堆積本数が少なかった流量5.4 L/sの場合に流速が大きくなっており、流木の堆積率と流速の関係についてはあまり見ることができなかった。これは下流側の水位低下の違いが見られなかったためと推測される。

橋梁に流木が堆積した様子を上流側から撮影したものを写真-3に示す。流木の堆積が橋梁の左側に集中していることが確認できた。この実験では12 cm流木を100本流したところ、21本が橋梁に堆積した。橋梁のスパンの断面積が

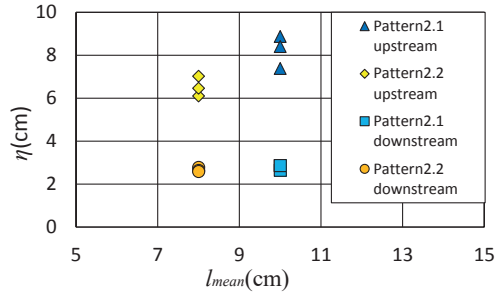


図-9 平均流木長と水位の関係（本数統一）

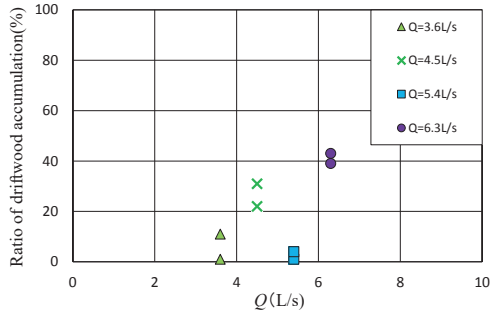


図-10 流量と流木堆積率の関係

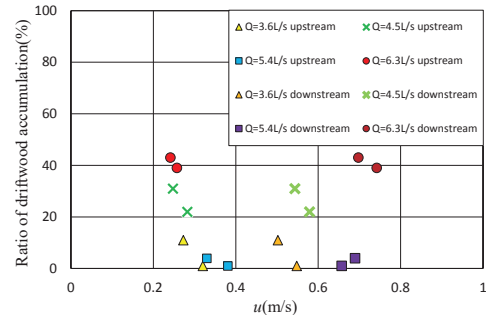


図-11 流速と流木堆積率の関係

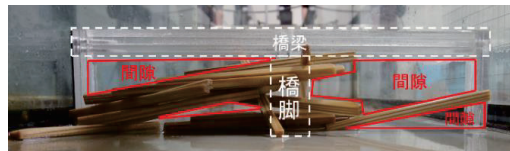


写真-3 流木が21本堆積した状態



写真-4 流木が49本堆積した状態

130 cm²であり、写真-3において間隙の面積を求めると、72 cm²となった。間隙率を式(2)より求めると、55%となった。

写真-4は写真-3と同様に橋梁に流木が堆積した様子を上流側から撮影したものである。流木の堆積は橋脚に集中していることが確認できた。この実験で12 cm 流木を100本流したところ、49本が橋梁に堆積した。写真-4において間隙の面積を求めると27.5 cm²となった。間隙率は21%であった。このことから流木の堆積本数が多いほど、間隙率が小さくなることが確認できた。流木の橋梁への堆積は、橋梁の一端に集中する場合と橋脚に集中する場合の2種類が実験により確認できた。

5. 終わりに

本研究では杉の流木が橋梁に堆積した際に、流木がもたらす水位変化や間隙などへの影響を評価した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 投入する流木の長さや混合率を変化させた場合、単一の流木および混合流木の長さが長いほど、流木堆積率が大きいことが確認された。
- 2) 単一の流木長を流下させた場合、上流側と下流側の水位にあまり変化は見られなかった。流木長が橋梁の1スパンより少し長い場合、上流側の水位に差が見られた。
- 3) 同じ本数の流木を流下させた場合であっても堆積本数に差があり、その間隙率は21%と55%であった。
- 4) 流量の増加によって流木堆積率が増加することが判明した。しかし、5.4 L/sの時に明確な傾向が見られなかった。今後は、5.4 L/sの時に流木堆積率が小さい原因の究明を行う予定である。

参考文献

- 1) 加藤一夫, 小笠原敏記, 松林由里子, 渡辺一也, 三浦忠昭, 菅野貴詳, 山口里美, 渡邊康玄, 赤堀良介, 千葉喜一: 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, 2018.
- 2) 土屋十圀, 小山直紀, 大石裕泰, 佐伯博人: 2016年8月の台風10号による岩手県北部水害調査報告, 自然災害JJSNDS, Vol.36, No.4, pp.409-427, 2018.
- 3) 長谷川祐治, 中谷加奈, 里深好文, 藤田正治: 山地河川における流木の流下と橋梁集積に関する検討, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.133-138, 2016.
- 4) 長谷川祐治, 中谷加奈, 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, No.58B, pp.350-357, 2015.
- 5) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.57, pp.1087-1094, 2011.
- 6) 矢部浩規, 渡邊康玄: 流木の堆積, 捕捉調査と河道流況特性について, 水工学論文集, 第52巻, pp.661-666, 2008.
- 7) 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, No.3, pp.34-41, 2010.