

# 山地河川における流木の流下と橋梁集積 に関する検討

FLOW CHARACTERISTICS OF DEBRIS WOOD AND ACCUMULATION

CONDITION AT BRIDGE IN MOUNTAINOUS RIVER

長谷川祐治<sup>1</sup>・中谷加奈<sup>2</sup>・里深好文<sup>3</sup>・藤田正治<sup>4</sup>

Yuji HASEGAWA, Kana NAKATANI, Yoshifumi SATOFUKA and Masaharu FUJITA

<sup>1</sup>京都大学防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: hasegawa.yuji.3e@kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: kana2151@kais.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsume.ac.jp

<sup>4</sup>京都大学防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: fujita.masaharu.5x@kyoto-u.ac.jp

*Key Words: debris wood, channel experiment, bridge, accumulation, dimensional analysis*

## 1. はじめに

土砂災害は、土石流や泥流などで流下した土砂が家屋を直撃して被害を及ぼすだけでなく、流木の発生、流下により被害を拡大する場合がある<sup>1)</sup>。また、土石流中に流木が含まれると流木は土石流の先端部に集中し、家屋などの建物に衝突したり、横断構造物に引っ掛かったり、扇状地のような山地溪流と比べて平面的に広がる地形では流木が河道に集積し、流れの方向を大きく変化させて被害拡大の要因に繋がる恐れがあることが知られている<sup>2)</sup>。流木の流出を抑制する対策は、山腹工などの斜面を保護する施設が一般的で、流出した流木については流木捕捉工が用いられることが多いが<sup>3)</sup>、土砂流出の対策と比べて整備が進んでいない。土砂流出の整備が進んだ流域では、代表的な施設として不透過型砂防堰堤が挙げられるが、満砂した不透過型砂防堰堤ではほとんど流木が捕捉できずに下流に流下することが報告されており<sup>4)</sup>、流木の流出対策は別途検討する必要がある。

流木に関する既往研究は、比較的勾配の緩い区間

での検討は数多くあるものの<sup>例えば5),6)</sup>、山地河川のような急勾配領域での検討は少なく、この領域での流木集積に関する検討は3次元的な扱いが必要と考えられている<sup>7)</sup>。流木集積による洪水氾濫の被害を予測するには数値シミュレーションが適しており、これまで粒子法<sup>7)</sup>、個別要素法<sup>8)</sup>や平面2次元流解析<sup>9)</sup>が提案されている。いずれの研究も流木要素の運動をラグランジュ的に追跡する手法で洪水時の流木の挙動を解析する上で有用な手段であるが、山地河川を広範囲で解析するための汎用的なモデルは提案されていない。筆者らは、透過型砂防堰堤の土砂捕捉モデル<sup>10)</sup>と同様の考え方で流木の橋梁集積に関するモデル構築を目標としているが、そのためには流木が橋梁に集積するために必要な条件を把握することが求められる。

既往研究<sup>11)</sup>では、橋梁に流木が集積する条件は単位時間当たりの流木量が大きく影響することが知られているが、これらを系統的に示した検討は行われていない。本研究は、橋梁において流木が集積する条件を水路実験で把握し、得られた結果を次元解析により検討した。

## 2. 実験概要

実験は長さ 7 m, 幅 0.3 m の直線矩形断面水路を用いて実施した。河床には粗度として粒径がほぼ一様な 0.7 mm の砂を張り付けた。右岸の側壁は透過性の材料で、側面から流況を観察した。橋梁模型は水路下流端から 1.5 m の位置に設置し、橋脚が中央に 1 本の 2 スパンとした。橋梁模型の桁下高（河床から桁下までの高さ）は 0.05 m, 0.07 m, 0.09 m の 3 タイプを用意し、桁幅員は 0.2 m, 桁下厚は 0.02 m, 欄干高は 0.03 m, 橋脚幅は 0.02 m, 橋脚と側壁の間隔は 0.14 m である。水路上流端から水を定常で供給し、流量は橋梁直上流地点での等流水深が桁高を超えないように設定した。なお、橋脚部に流れが衝突して水面が上方に跳ね上がった状態も見られるが、せき上げ背水が生じることによる水面形の大きな変化はなかった。流木模型は比重 1.05 の ABS 樹脂製である。長さ 0.15 m, 0.175 m, 0.2 m, 0.3 m, 直径 3 mm の円柱型の丸棒を使用し、根や枝などは再現していない。流木は橋梁模型から上流 5.5~6.0 m の範囲から流木の方向が一様にならないように約 1 秒間で投入した。供給した流量量:  $Q_{d1}$  は 20~250 本/s で 10 本/s 単位ずつ変化させて投入した。流木は流下中に拡散するが、橋梁から上流 1 m の範囲内ではほぼ定常状態で流下する。実験の観察から流木が橋梁に集積する場合、流下する流木の先端部が橋梁に到達した後、橋梁の上流側約 1 m の範囲内にある流木が集積を引き起こす。そこで、この範囲を撮影した映像から流木の本数および平均的な流木の速度を計測し、流木の移動体積と速度から単位時間当たりの流量量:  $Q_{d2}$  を求めて、本実験での供給量とした。なお、撮影範囲の境界付近にある流木については半分

以上が範囲内に含まれている場合のみ計測した。その結果、 $Q_{d2}$  は 6.5~130.1 本/s である。実験水路概要図を図-1 に、実験条件の一覧表を表-1 に示す。実験は同一の条件で複数回繰り返し実施して、合計 359 回実施した。

## 3. 実験結果

### (1) 流木の流下による拡散

表-2 の上段に示した数値は  $Q_{d1}$  で、各ケースに示した数値は  $Q_{d2}$  である。表中の濃淡は、薄い欄は橋梁に流木が集積せずにそのまま通過して水位が上昇しなかったケース、中間色の欄は橋梁に流木が一時的に引っ掛かり水位が上昇したが、その後流出したケース、濃い欄は橋梁に流木が集積して水位が上昇したケースである。空欄は実施していない条件である。

これらの結果より、 $Q_{d1}$  に対して  $Q_{d2}$  は少ない。また、 $Q_{d1}$  や  $Q_{d2}$  に関係なく流木量が多いと橋梁に集積が生じやすく、流木量が少ないと集積が生じ難い傾向を示す。流木が橋梁に一時的に引っ掛かる条件は、

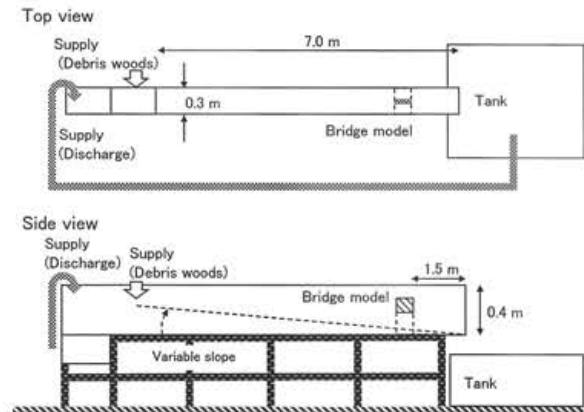


図-1 実験水路概略図。

表-1 実験条件。

Case	水路勾配 $i$	流量 $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	流木長 $l$ (m)	水路上流端から供給した流木量 (本/s)	橋脚高 $H_b$ (m)	フルード数 $Fr$	備考
1-1	1/20	0.0141	0.2	20~250	0.05	3.09	同じ水深, 異なる流速での比較
1-2	1/30	0.0115				2.52	
1-3	1/40	0.0099				2.17	
2-1	1/40	0.0047	0.2		0.05	2.07	異なる水深, 流速での比較
2-2		0.0099				2.17	
2-3		0.0141				2.20	
3-1	1/40	0.0141	0.15		0.05	2.20	異なる流木長での比較
3-2			0.175				
3-3			0.2				
3-4			0.3				
4-1	1/40	0.0141	0.2		0.05	2.20	異なる橋脚高での比較
4-2							
4-3				0.09			

※ Case1-3 と Case2-2, Case2-3 と Case3-3 と Case4-1 は同じ条件

表-2 供給した単位時間当たりの流木量  $Q_{d1}$  と橋梁まで流下した単位時間当たりの流木量  $Q_{d2}$ .

Case	供給した単位時間当たりの流木量 $Q_{d1}$ と橋梁まで流下した単位時間当たりの流木量 $Q_{d2}$ (本/s)																			
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250
1-1				29.3	26.4	49.8	58.6	73.2	73.2	87.9	87.9	102.5	87.9	102.5						
					26.4	52.7	58.6	52.7	64.4	58.6	87.9	87.9	87.9							
					43.9	41.0	38.1	49.8	73.2	67.4	87.9	82.0	87.9							
						41.0	35.2	67.4	64.4	73.2										
1-2																				
				23.0	20.9	20.9	31.4	41.8	41.8	48.1	73.2	62.7	52.3							
				14.6	25.1	27.2	27.2	37.6	73.2	48.1	52.3	52.3	73.2							
					20.9	27.2	23.0	41.8	46.0	31.4	62.7	52.3	73.2							
1-3																				
2-1																				
2-3																				
3-1																				
3-2																				
3-4																				
4-2																				
4-3																				

流木が橋梁に集積する場合としない場合の境界に近いことがわかる。図-2 に  $Q_{d1}$  と  $Q_{d2}$  の関係を示す。実験での観察より、流木は水面に浮いた状態ではなく少し沈んだ状態で流下し、流れの方向に対して平行の状態を保ったまま流下するものが多い。比重が1を超えるような流木の流れ方としては既往の実験と同様の傾向を示す<sup>12)</sup>。流木投入直後は流木が重なっているが、流下とともに拡散する傾向が見られた。これは、流下方向に対して横向きに投入された流木は回転しながら流下して他の流木と衝突したり、側壁近くを流下する流木は中央付近を流下する流木よりも明らかに速度が遅くなる等の影響の受けためである。そのため、実験では  $Q_{d1}$  に対して  $Q_{d2}$  は最大で0.81、最小で0.16である。いわゆる、斜面崩壊で大量の流木が河道に供給され、流動中に拡散する現象に近いと考えられる。なお、本実験は直線水路で射流領域の条件で実施したため、水面形の変化が現れ難く、流木が集中するような現象は確認されなかった。

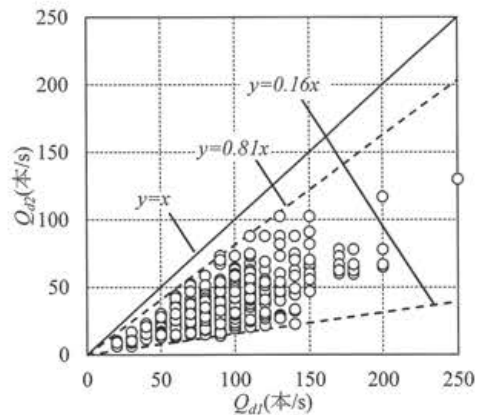


図-2 流木の流下による拡散。

(2) 単位時間当たりの流木量と各種条件が橋梁集積に及ぼす影響

図-3~6 に各条件に対する橋梁集積に関する結果を示す。図中の○は流木が橋梁に集積せずに通じた場合、×は流木が橋梁に集積して水位が上昇した場合である。なお、流木が橋梁に一時的に引っ掛かり再流出するケースは図が煩雑になるため省いた。

図-3 に水路勾配： $i$ と単位時間当たりの流木量： $Q_{d2}$ の関係を示す。図-4 に流速： $v$ と単位時間当たりの流木量： $Q_{d2}$ の関係から橋梁に流木集積の発生、非発生の結果を示す (Case1-1~1-3)。水路勾配が急になると集積するために必要な単位時間当たりの流木量が多くなる。これらの条件は全て同じ水深のため、勾配と流速は同じ傾向を示し、流速が速いと橋梁に集積するために必要な単位時間当たりの流木量が多くなる。この結果は、水深が異なると橋桁下面と水面とのクリアランス： $H_{cl}$ が異なるため比較が難しいが、同じ水深では  $Fr$  が大きい方が集積しやすいことを示す。流木が橋梁に集積するための単位時間当たりの最小流木量は、河床勾配や流速と単位時間当たりの流木量は一次の線形関係になるが、急勾配では単位時間当たりの最小流木量は若干ばらつく。

図-5 に流量： $Q$ と単位時間当たりの流木量： $Q_{d2}$ の関係から橋梁に流木集積の発生、非発生の結果を示す (Case 2-1~2-3)。流量が大きくなると橋梁に集積するために必要な単位時間当たりの流木量が多くなる。また、流量が大きくなると水深が高くなるため、橋桁下面と水面との間のクリアランスが小さくなる。クリアランスは最大流量時で 1.4 cm、最小流量時で 3.2 cm である。しかし、流木径： $D$ が 3 mm であること、比重が 1 以上で流木が沈んで流下するためクリアランスの違いによる影響が小さいと考えられる。流木が橋梁に集積するための単位時間当たりの最小流木量は、最大流量時でばらつきが大きい。

図-6 に流木長： $l$ と単位時間当たりの流木量： $Q_{d2}$ の関係から橋梁に流木集積の発生、非発生の結果を示す (Case 3-1~3-4)。流木長が長ければ、橋脚に引っ掛かりやすくなるため、少ない流木量でも流木が集積しやすい傾向を示す。流木長による集積の違いは透過幅 (橋脚と側壁の間隔： $w$ ) との比  $w/l$  が影響し、既往研究<sup>7)</sup>と同様の傾向を示す。流木が橋梁に集積するための単位時間当たりの最小流木量は、流木長が短いほどばらつきが大きくなる。

図-7 に橋脚高： $H_b$ と単位時間当たりの流木量： $Q_{d2}$ の関係から橋梁に流木集積の発生、非発生の結果を示す (Case 4-1~4-3)。橋脚高が低いと集積に必要な単位時間当たりの流木量は若干少なくなる。写真-1 に示す集積後の状況から、橋桁が支点となり流木が集積する。既往研究<sup>7)</sup>では山地河川のような急勾配領域では流木は 3 次元的な運動で橋梁に集積するため、 $H_b/(h+D)$ または  $H_{cl}/D$  が橋桁の引っ掛かりやすさ、すなわち流木集積に影響すると考えられる。流木が橋梁に集積するための単位時間当たり最小流木量は、 $H_b$ が小さいほどばらつきが大きくなる。

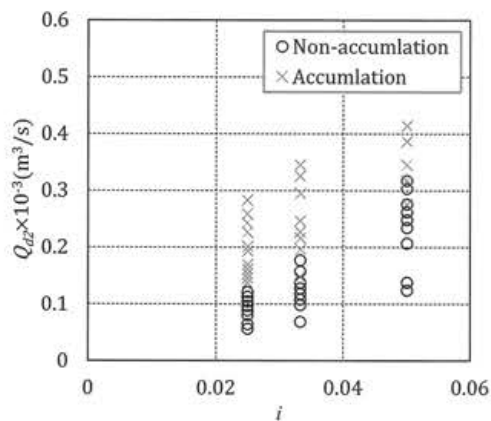


図-3 勾配と単位時間当たりの流木量の関係。

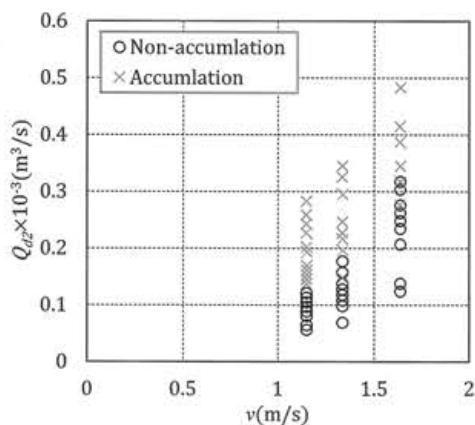


図-4 流速と単位時間当たりの流木量の関係。

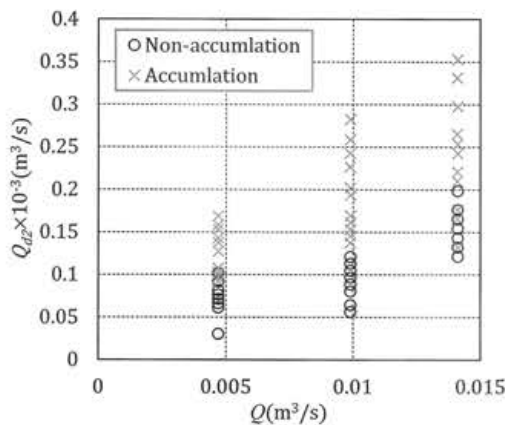


図-5 流量と単位時間当たりの流木量の関係。

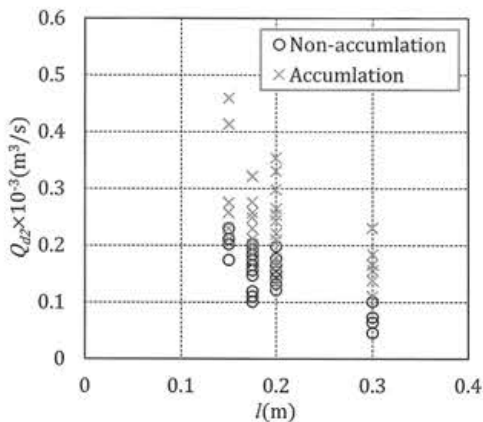


図-6 流木長と単位時間当たりの流木量の関係。

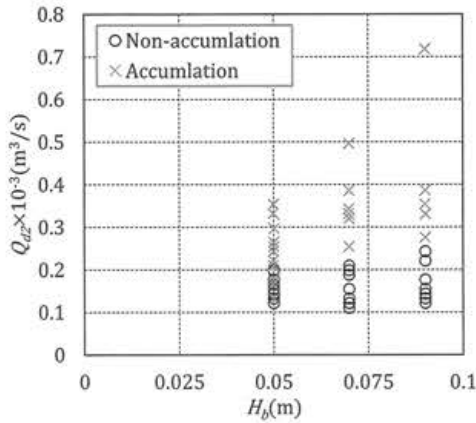


図-7 橋脚高と単位時間当たりの流木量の関係。

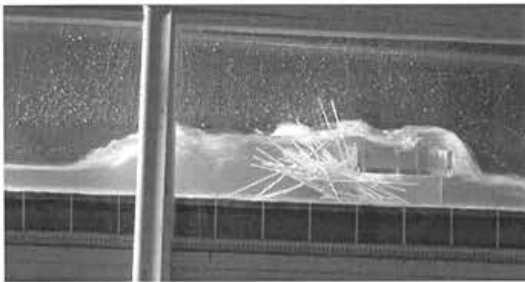


写真-1 橋梁に流木が集積した状況 (Case2-3,  $Q_{d2}$ : 53.9 本/sec).

#### 4. 流木が橋梁に集積するために必要な条件

実験結果の傾向を踏まえ、橋梁に流木集積の発生・非発生には、a) 水理条件、b) 橋脚に引っ掛かりを表す条件 ( $w/l$ )、c) 橋桁に引っ掛かりを表す条件 ( $H_b/(h+D)$ ,  $H_{cl}/D$ )、が影響すると考えて、その3つのパラメータを組み合わせた変数と流木が橋梁に集積するのに必要な単位時間当たりの流木量:  $Q_{dim}$  との関係を確認した。ここで、 $Q_{dim}$  は流木が一時的に橋梁に集積した後に再流出した条件が橋梁集積の発生、非発生の境界付近となるため、同じ条件で複数の結果がある場合は、その平均値とした。例えば、表-2の結果から Case1-1 では73.2本/sとなる。

この結果、(1)  $w/l \cdot Q \cdot H_b/(h+D)$ , (2)  $w/l \cdot Q \cdot H_{cl}/D$ の変数が考えられる。本実験では流木の捕捉に影響する  $w/l < 0.5$  や  $H_b/(h+D) < 1$ ,  $H_{cl}/D < 1$  の条件<sup>1)2)</sup>は実施していないため、今後の更なる検討を要する。図-8の(a), (b)に変数(1), (2)と単位時間当たりの流木量の関係を、(c), (d)は変数(1)に勾配を乗じた変数と単位時間当たりの流木量の関係を示す。図中の直線は橋梁に集積する境界である。変数(1), (2)の比較で良い相関が得られたのは(1)である。(2)は  $H_{cl}$  に対して  $D$  が小さく、 $H_{cl}/D$  に対して  $w/l$  や  $Q$  の影響が小さくなり、 $H_{cl}$  の大きい条件は異なる傾向を示す。(1)の関係性は急勾配でばらつくため、変数に勾配を乗じたが、 $i=1/20$  のみが外れ値となる。そこで、勾

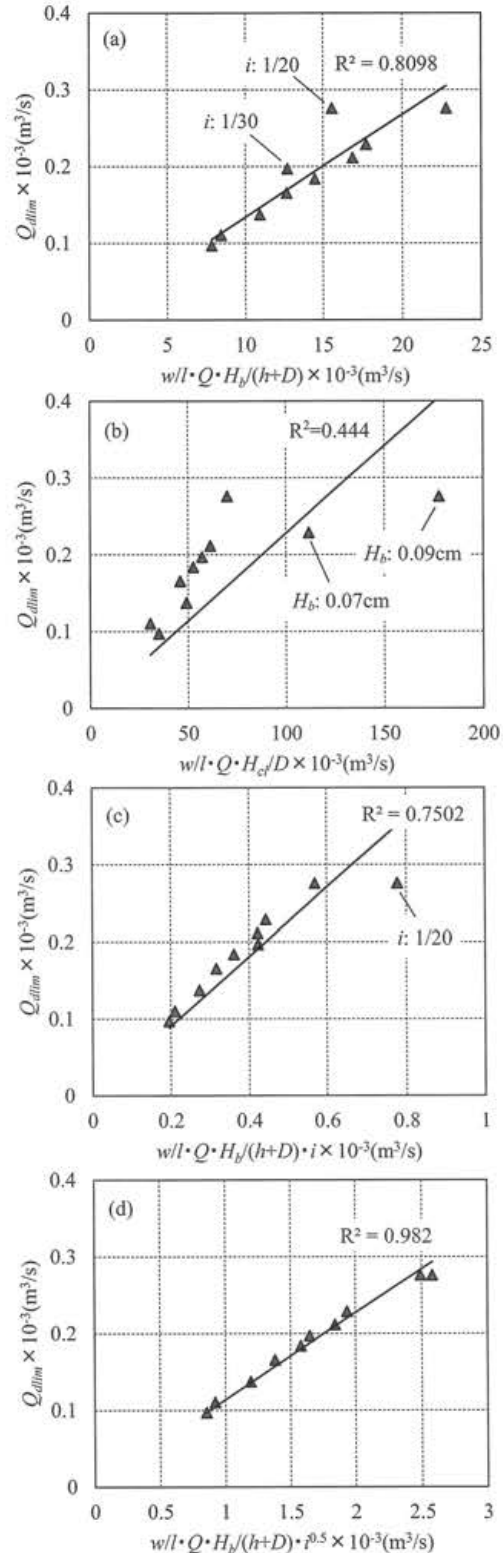


図-8 各変数と流木が橋梁に集積するための流木量の関係。

配の影響を小さくするため  $i^{0.5}$  を乗じると良い相関が得られるが、この関係を示す理由は検討数を増やした後に議論する必要がある。この結果より、2スパンの橋梁に集積するために必要な単位時間当たりの流木量として  $Q_{dim} = \alpha \cdot w/l \cdot Q \cdot H_b/(h+D) \cdot i^{0.5}$  を得た。 $\alpha$  は実験定数で、本実験では0.11である。

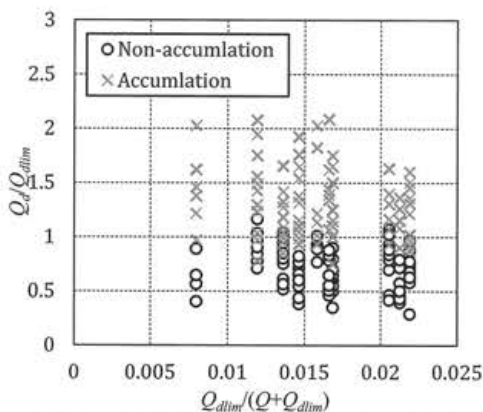


図-9 流木が橋梁に集積するために必要な条件.

図-9に流木の流下濃度 ( $Q_{dlim}/(Q+Q_{dlim})$ ) と橋梁集積の安全率 ( $Q_d/Q_{dlim}$ ) の関係を示す. 安全率1を境に橋梁集積の発生・非発生をある程度表現できる. しかし, 流木の橋梁集積の条件を現地で適用する際は, 安全率が1以下でも集積する条件を把握する必要がある. 実験の観察では, 流木の偏走角度が流れ方向に対して急勾配 (例えば, 横向きでの流下) の流木数が多い場合, 橋脚に衝突する流木数が多い (横断的な偏りが大きい) 場合, 単位時間で評価するとその間の前半もしくは後半で流木が集中する場合など, 様々な要因が挙げられるが, これらの現象が結果のばらつきにどの程度の影響を与えるかの検討は, 今後の課題である.

## 5. おわりに

本研究では, 単位時間当たりの流木の流下する量に着目して, 橋梁に集積するために必要な条件を水路実験で検討した. 結果から, 水路上流端から供給した流木は流れの途中で拡散する傾向が示された. これは, 回転や平面的な流速分布の違いが理由に挙げられる. 橋梁に達する流木量は給木量と異なり, 本実験では0.16~0.81まで減少する. 結果を適用し, 流木の長さ, 径, 橋脚高, 橋脚と側壁の間隔, 水深, 流速, 勾配の支配パラメータを組み合わせた変数と橋梁に集積するために必要な単位時間当たりの流木量と関係から流木が集積するために必要な条件を得ることができる. 本実験では橋梁のクリアランスと流木の径により異なる結果を明確に示さなかったが, 針葉樹を対象にした比重ではその違いによって, 橋梁への集積も異なることが考えられる. さらに, 本実験は2スパンの橋梁模型で検討したが, 橋脚数や形状が異なる橋梁での検討が今後必要である. また, 本実験の手法により流木が橋梁に集積するために必要な条件を得ることができるが, 境界付近では結果のばらつきが生じるため, その原因については今後

検討が必要である. 最後に, 流木の議論を行う際に極めて重要となる単位時間当たりの流木量の推定手法について, 現時点では困難である. しかし, 土石流発生プロセスと共に現地観測やDEMの利用でデータを蓄積し, 土石流中に流木の取りこまれる現象ならびに流木流下中の拡散や集中機構について既往検討と組み合わせることで, 将来的にはある程度の流木流出ハイドログラフが推定可能となり, 本検討のような手法を適用できるようになると考える.

## 引用文献

- 1) 石川芳治, 水山高久, 福澤誠: 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 新砂防 Vol.42, No.3, pp.4-10, 1989.
- 2) 坂野章: 橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察, 国土技術政策総合研究所資料第78号, 2003.
- 3) 水山高久, 石川芳治, 福沢誠: 流木の運動・堆積機構と対策工に関する研究, 土木研究所報告第183号, pp.71-156, 1991.
- 4) 小山内信智, 平松晋也, 石川芳治: 流木対策施設の効果と維持管理体制の現状, 砂防学会誌, Vol.50, No.6, pp.48-51, 1998.
- 5) 足立昭平・大同淳之: 流木に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報第1号, pp.41-49, 1957.
- 6) 水原邦夫: 流木に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1978.
- 7) 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥謙介: 山地橋梁の流木閉塞過程の3次元シミュレーション, 水工学論文集, 第51巻, pp.835-840, 2007.
- 8) 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, 第51巻, pp.829-834, 2007.
- 9) 中川一, 井上和也, 池口正晃: 流木群の流動に関する研究(3) - 流木の回転運動を考慮した解析 -, 京都大学防災研究所年報, 第37号, B-2, pp.1-15, 1994
- 10) 里深好文・水山高久: 格子型ダムによる土石流の調節に関する数値計算. 砂防学会誌, Vol.57, No.6, pp.21-27, 2005.
- 11) C. A. Braudrick, G. E. Grant, Y. Ishikawa and H. Ikeda: Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment, Earth surface processes and landforms, Vol.22, pp.669-683, 1997.
- 12) T. Itoh, K. Ogawa, S. Nishimura and S. Kuraoka: Preliminary Experimental Studies on Debris Flow with Woods focusing on Difference of Specific Weight of Tree Species International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.3, No.1, pp.9-19, 2010.

(2016. 5. 31 受付)