

流木の流下と橋梁への集積に関する実験

Experimental Study on Flow Characteristics of Driftwood and Accumulation Condition of Driftwood at Bridge

長谷川祐治・中谷加奈⁽¹⁾・竹林洋史・里深好文⁽²⁾・藤田正治

Yuji HASEGAWA, Kana NAKATANI⁽¹⁾, Hiroshi TAKEBAYASHI, Yoshifumi SATOFUKA⁽²⁾ and Masaharu FUJITA

(1) 京都大学大学院農学研究科

(2) 立命館大学理工学部

(1) Graduate School of Agriculture, Kyoto University

(2) Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University

Synopsis

In recent years, large-scale sediment disasters occur frequently due to extreme weather. Not only sediment but also driftwoods cause expansion of damage in sediment disasters. In particular, there are some cases that flooding occurs from the point of bridges where driftwood integrated. Therefore, for future disaster prevention planning, it is important to know the conditions of driftwoods integrated on bridges, and the characteristic of the driftwood flowing down. In this study, we have conducted experimental study and organized the basic data of driftwood characteristic in $Fr > 1$, super critical flow condition, especially on accumulation. From this study, we concluded that critical conditions for driftwood integration on bridges have correlation between supplied driftwood volume and combined value from following parameters; length of driftwood, driftwood diameter, flow depth, river width, clearance of the bridge, and the slope.

キーワード: 流木, 水路実験, 橋梁, 集積, 次元解析

Keywords: driftwood, channel experiment, bridge, accumulation, dimensional analysis

1. はじめに

地球温暖化に伴う極端な気象条件の増加によって、土砂災害の規模や発生頻度も変化することが懸念されている。土砂災害は、土石流や泥流により流下した土砂が家屋を直撃して家屋に被害を及ぼすだけでなく、同時に流木が発生して被害を拡大する場合がある(石川ら, 1989; 河川環境管理財団, 2008)。今後、極端な気象条件の変化によって、流木の量や発生頻度も増加することが容易に想像できる。土石

流中に流木が含まれるとそれが土石流の先端部に集中し、家屋などの建物に衝突したり、橋梁などの横断構造物などによって河道に集積すると、河道内の流れを阻害して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(坂野, 2003)。下流への流木流出を抑制するためには、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(水山ら, 1991)。土砂流出の整備が進んでいる流域においては、代表的な施設として不透過型砂防堰堤が整備さ

れているが、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（小山内ら，1998），流木の流出については別途検討する必要がある。

流木に関する既往研究では，水に浮く流木を対象として流木群の流動や流木捕捉工の検討が水路実験や数値シミュレーションで行われている（例えば，足立・大同，1957；中川ら，1992；中川ら，1993，中川ら，1994；清水・長田，2007）。しかし，樹種により流木の比重は異なり，広葉樹は比重が1.0を超えることが知られているが，水に沈む流木の挙動についてはほとんど検討が行われていない。また，既往研究のほとんどが $Fr < 1$ の常流域を対象としており，山地河川のような急勾配ではその挙動が大きく異なることが予想される。さらに，フルード数に関わらず，流木が橋梁に集積する条件については十分な知見が得られておらず，洪水氾濫の原因を予測する上で早急に検討が必要となっている。

本研究は，水路実験により急勾配の山地河川で見られることの多い $Fr > 1$ の条件で流木モデルを流下させて橋梁に集積する条件を検討する。また，橋梁に流木が集積する条件について流木の形状や水理条件に加えて流木の流下量にも着目し，各条件を組み合わせた変数と橋梁へ集積が発生するのに必要な流木の流下量の関係を検討する。

2. 水路実験の概要

実験は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーにある長さ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。右岸の側壁を透過性の材料で作成し，側面から流況が観察できるようにした。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。橋脚幅は0.02 mで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。流木モデルは広葉樹を対象に比重1.05のABS樹脂製で，長さ0.15，0.175，0.2，0.3 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。流木は橋梁から5.5 m上流の水路中央から一気に投入し，給木方向が一様にならずにランダムに投入した。供給した流木量は20～250本/s（10本刻み）である。流木は流下中に拡散するが，橋梁から上流1 m範囲内ではほぼ定常状態で流下すると仮定した。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数および平均的な速度を計測し，それを単位時間当たりの流木量として，本実験での供給量とした。その結果，単位時間当たりの流木量は7～130本/sである。実験水路概要図をFig. 1, 2に，実験条件の一覧表をTable 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回を実施した。

3. 実験結果

Table 2, 3に各ケースの橋梁直上流における単位時間あたりの流木数を示す。上段に示した数値は供給した流木数で，各ケースに示した数値は橋梁直上流での流木数である。また，黒で示した数値はそのまま通過したケース，青は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，赤は橋梁に集積して水位が上昇したケースである。これらの結果より，上流から供給した流木数に対して橋梁に流下する流木数は少なくなる。流木供給直後は流木が重なっていたが，流下とともに拡散する傾向が確認された。これは，流下方向に対して横向きに投入された

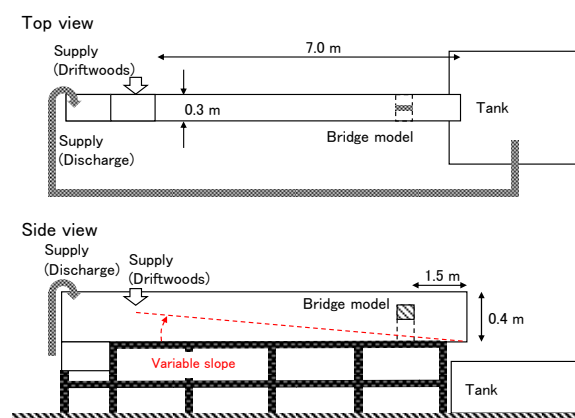


Fig.1 Outline of experimental flume

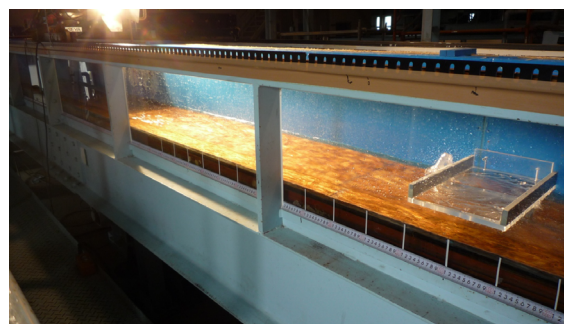


Fig.2 Experimental flume

Table 1 Experimental condition

Case	Bed slope	Discharge Q (m ³ /s)	Length of driftwood l (m)	Supplied driftwood Q_d (logs/s)	Clear head H_b (m)	Froude number Fr	
1-1	1/20	0.0141	0.2	20~250	0.05	3.09	Constant water depth and difference velocity
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	Difference water depth and discharge
2-2		0.0099				2.17	
2-3		0.0141				2.20	
3-1	1/40	0.0141	0.15		0.05	2.20	Difference length of driftwood
3-2			0.175				
3-3			0.2				
3-4			0.3				
4-1	1/40	0.0141	0.2		0.05	2.20	Difference clear head
4-2					0.07		
4-3					0.09		

※ CASE1-3 and CASE2-2, CASE2-3 and CASE3-3 and CASE4-1 are same cases.

Table 2 Supplied driftwood and number of driftwood reached the bridge(Case1-1~2-2)

Case	Supplied driftwood(logs/s)																			
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250
1-1				10	9	17	20	24	24	29	29	34	29	34						
					9	18	20	18	21	20	29	29	29							
					15	14	13	17	24	22	29	27	29							
						14	12	22	21	24										
						13	15	19	20	20										
1-2			23	21	21	31	42	42	48	73	63	52								
			15	25	27	27	38	73	48	52	52	73								
				21	27	23	42	46	31	63	52	73								
					25	23	33	52	46	54	69									
					25	29	48	46	42	52	52									
1-3		12	19	15	24	24	36	41	48	33	55									
			14	19	21	34	31	29	34	51										
			14	22	21	19	31	26	36	60										
				21	21	24	43	51	55											
				17	24	22	33	48	43											
2-1	7	7	15	14	13	16	17	14	20	30	27	29	23							
				15	13	18	15	18	25	36	22	29	33							
					13	17	20	17	22	21	27	28	34							
						18	15	17	22	25	41	27								
						15	18	16	24	26	29	27								
2-2		12	19	15	24	24	36	41	48	33	55									
			14	19	21	34	31	29	34	51										
			14	22	21	19	31	26	36	60										
				21	21	24	43	51	55											
				17	24	22	33	48	43											

Table 3 Supplied driftwood and number of driftwood reached the bridge(Case2-3~4-3)

Case	Supplied driftwood (logs/s)																			
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250
2-3				28	37	30	40	37	63	75										
				30	28	52	47	35	56	47										
				28	26	35	52	70	54											
					42	33	44													
					35	47	42													
3-1									49					91		65	78		117	130
									60					57		78	78		65	
									47					65		65	65		78	
														65		65	65		78	
														49		73	60		78	
							36	31	40	54	56	60	47	67		60	62		67	
3-2							29	49	56	45	40	45	45	51		67	67		67	
							40	25	40	38	38	45	62	60		62	67		78	
							38	27	42	38	51	45	56			67				
							25	49	49	45	40	49	47			62				
				28	37	30	40	37	63	75										
3-3				30	28	52	47	35	56	47										
				28	26	35	52	70	54											
					42	33	44													
					35	47	42													
	7	9	12	17	26	33														
3-4	7	12	18	16	22	23														
	10	10	16	16	20	22														
	9	17	16	14																
		10	21	13																
				28	37	30	40	37	63	75										
4-1				30	28	52	47	35	56	47										
				28	26	35	52	70	54											
					42	33	44													
					35	47	42													
				15	14	16	24	27	30	61	47									
4-2					15	23	19	34	34	41	31									
						24	22	23	37	41	41									
						24	19	34	31											
						16	26	39	42											
					26	30	28	49	42	56	52	47	73	82						
4-3					26	37	35	49	52	42	54	54	75	70						
					30	37	37	47	59	52	54			82						
						30	40	33	49	56			70							
				28	37	30	40	37	63	75										
				30	28	52	47	35	56	47										

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ためである。また、流木が橋梁に一時的に引っ掛かる条件は、流木が橋梁に集積する場合としない場合の境界となる条件とほぼ一致することがわかる。Fig.3～7に各条件と橋梁直上流における単位時間当たりの流木量の関係を示す。図中の○は流木が橋梁に集積しなかった場合、×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水位が上昇し、その後再流出するケースは結果には載せず、後述の4章の解析で検討した。

Fig.3に河床勾配と橋梁直上流における単位時間当たりの流木量の関係を示す（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。CASE1-1～1-3は同じ水深としたため、勾配と流速は比例関係にある。すなわち、単位時間当たりの流木量が少なくても流速が小さい場合は流木が橋梁に集積しやすいことになる。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、河床勾配と単位時間当たりの流木量は一次の線形関係になっているが、急勾配になると単位時間当たりの最小流木量の値は若干ばらついている。

Fig.4に流量と橋梁直上流における単位時間当たりの流木量の関係を示す（CASE2-1～2-3）。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。これは流木の流下濃度が橋梁の集積に影響することを示している。またCASE2-1～2-3では、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、流木径が3 mmであること、比重が1.0以上で流木が沈んで流下するためクリアランスの影響が小さかったと推測される。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くなっている。Fig.5に流木長と橋梁直上流における単位時間当たりの流木量の関係を示す（CASE3-1～3-4）。流木長が長ければ、橋梁に引っ掛かりやすくなるため、流木が集積しやすい傾向を示す。一方、流木長が0.3 mは水路と同じ幅になるが、流木は流れと平行に流下するため、単位時間当たりの流木量が小さい場合は、橋梁に集積しない結果を得た。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、流木長が短いほど大きくなることがわかる。ただし、最小流木量の値のばらつきは比較的大きい。Fig.6に河床面から橋桁下面までの高さや橋脚直上流における単位時間当たりの流木量の関係を示す（CASE4-1～4-3）。河床面から橋桁下面までの高さが高くなると、

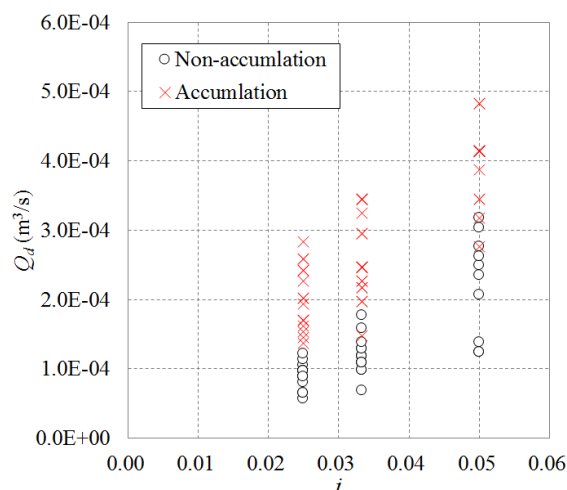


Fig.3 Relationship between bed slope and driftwood discharge (CASE1-1～1-3)

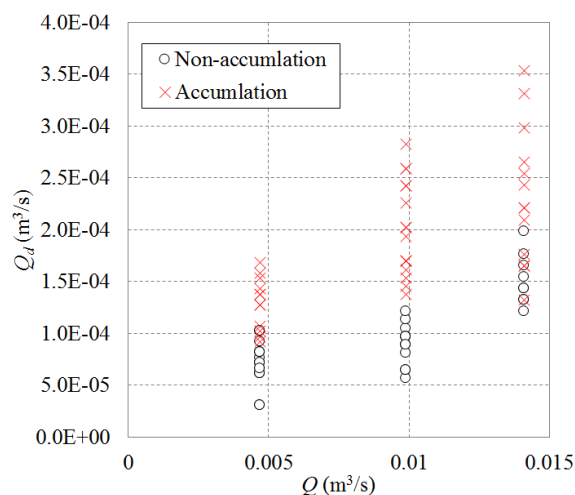


Fig.4 Relationship between discharge and driftwood discharge (CASE2-1～2-3)

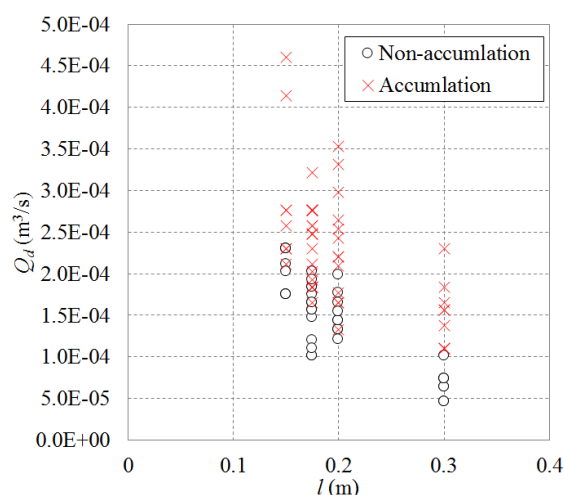


Fig.5 Relationship between driftwood length and driftwood discharge (CASE3-1～3-4)

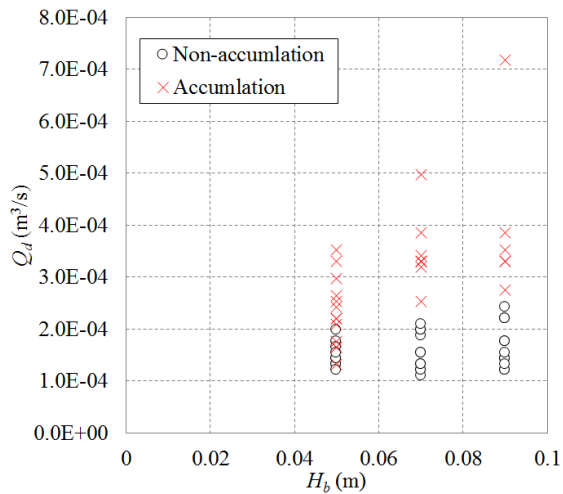


Fig.6 Relationship between clear-head and driftwood discharge (CASE4-1～4-3)

若干ではあるが単位時間当たりの流木量が大きくても、流木が橋梁に集積しない結果を得た。大きく影響が表れなかった理由は、前述の様にクリアランスに対して流木の径が小さいこと、流木が沈んで流下したことが影響していると推測される。

4. 流木の流下と橋梁への集積の限界条件

実験結果の傾向を踏まえ、橋梁への集積のしやすさを現すパラメータとして、単位時間当たりの流木量に着目して次元解析を行った。ここで、橋梁への

集積の発生・非発生の境界となる流木量を限界流木量 Q_{dim} とした。 Q_{dim} は、橋梁に一時的に引っ掛かかる流木量とした。これを支配するパラメータとして、a) 流木形状 (D/l or D^2/l)、b) 橋桁下の断面積 (BH_b)、c) 水の流下断面積 (Bh)、d) 橋桁下の水面からのクリアランスの断面積 (BH_{cl})、e) 流速 (v)、f) 水路勾配 (i) を挙げる。ここに、 D : 流木径、 l : 流木長、 B : 河幅、 H_{cl} : 河床からのクリアランス (H_b-h) である。

Fig.7に限界流下流木量と支配パラメータを組み合わせた変数との関係を示す。支配パラメータを組み合わせた変数は流木量の次元に合わせるように設定した。これらの結果より主に変数が増加すると Q_{dim} も増加することがわかる。流木径 D について着目すると、 D が大きくなると Q_{dim} も増加する。本実験では比重1.0以上の流木を対象としたため、 H_{cl}/D の影響は小さく、集積には流木数が影響したと推測される。これは、本条件下では少量の太い流木より複数の細い流木の方が集積しやすいと推測される。針葉樹の様に水面に浮かんだ状態で流下する流木は H_{cl}/D の影響を受けやすくなるため本実験とは傾向が異なる場合も考えられる。

Fig.7 の各図の実験結果の値はばらつきが見られるが、比較的ばらつきが小さいのは $(D^2/l) \times (vBH_b/D)$ であり、単位時間あたりの流木量と一次の線形関係であると推察される。ただし急勾配の条件では、他のケースと異なる傾向を示す。次に、水路勾配 i の

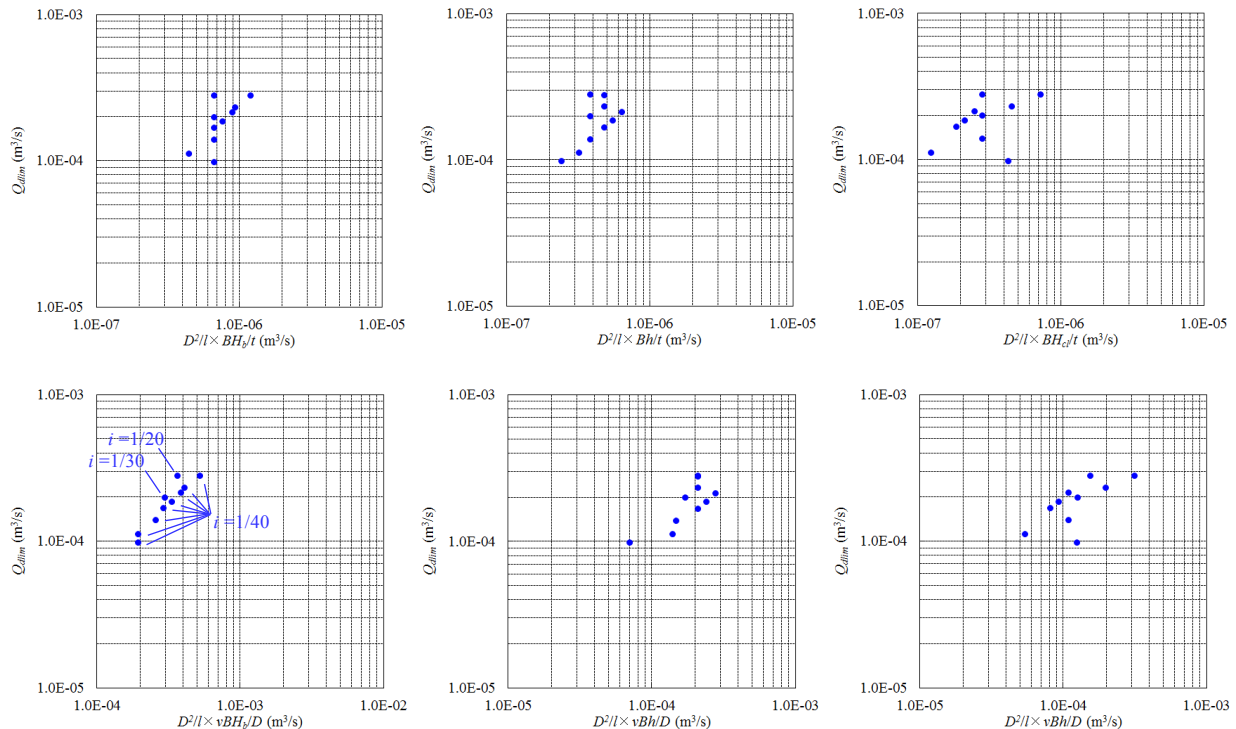


Fig.7 Relationship between accumulation condition of driftwood at bridge and boundary driftwood discharge

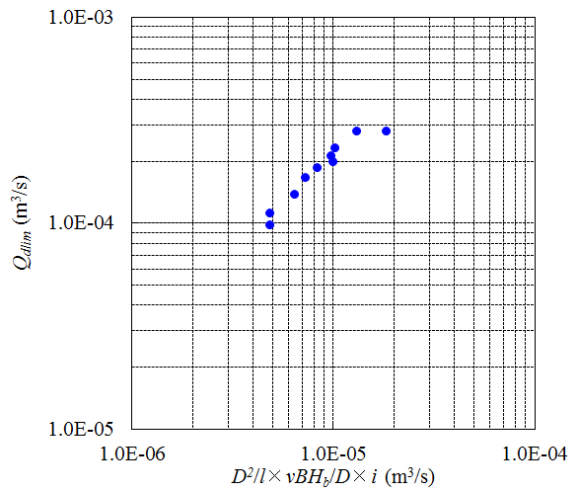


Fig.8 Relationship between parameters (considering slope degree) and boundary driftwood discharge

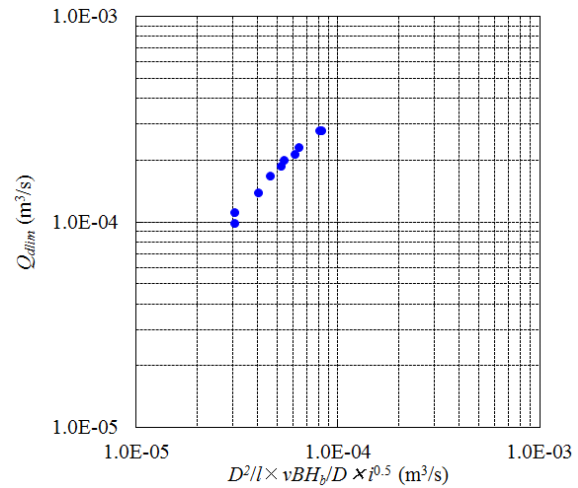


Fig.9 Relationship between parameters (considering the square root of slope degree) and boundary driftwood discharge

パラメータを考慮した結果を整理する. Fig.8に限界流下流木量と $(D^2/l) \times (vBH_b/D) \times i$ に i を乗じた変数と Q_{dlim} の関係を, Fig.9に $i^{0.5}$ を乗じた変数と Q_{dlim} の関係を示す. これらの結果から, i よりも $i^{0.5}$ を乗じた方がほぼ一樣な関係が得られる. これは, 流木量の保存則から, 流木の移動速度と流れの流速の速度差の2乗が流木群を含めた質量と勾配の0.5乗の差に比例することから $i^{0.5}$ との関係が強いと推測される. この結果より, 2スパンの橋梁に集積するために必要な支配パラメータとして, 式(1)の関係を得た.

$$Q_{dlim} = \alpha (D^2/l) \times (vBH_b/D) \times i^{0.5} \quad (1)$$

α は定数で実験より3.4を得た. Fig.10に式(1)で得られた Q_{dlim} と Q_d の関係を示す. これらの結果より, Q_d が Q_{dlim} より少ないと集積が発生せず, Q_d が Q_{dlim} より多いと集積が発生することがわかる.

5. おわりに

本研究では, 流木の流下する量に着目し, 橋梁に集積する条件を水路実験で検討した. 得られた結果を整理すると, 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. 回転や流速分布の違いが主な理由に挙げられる. この結果を適用し, 流木の長さ, 径, 桁下高さ, 水深, 幅, 勾配など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限界流下流木量の相関関係を得た. なお, 本実験は広葉樹で橋梁クリアランスに対して流木の径が小さく, これらの条件に対して橋梁集積の違いを明確に示すことができなかった. しかし, 実験の観察から, 針葉樹のように異なる比重では橋梁集積の結果

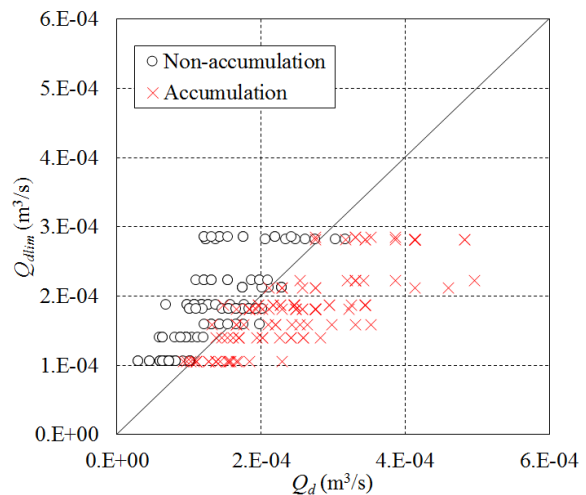


Fig.10 Relationship between boundary driftwood discharge and driftwood discharge

が異なると推測される. さらに, 本実験は2スパンの橋梁模型で検討したが, 流木が引っ掛かる支点数が異なると集積条件が異なるため, 橋脚数が異なる橋梁での検討が, 今後必要である.

参考文献

- 足立昭平・大同淳之 (1957) : 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.
- 石川芳治・水山高久・福澤誠 (1989) : 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.
- 小山内信智・平松晋也・石川芳治 (1998) : 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.
- 河川環境管理財団 (2008) : 流木災害軽減対策と河

- 川樹木管理に関する総合的研究.
- 坂野章（2003）：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.
- 清水義彦・長田健吾（2007）：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.
- 中川一・井上和也・池口正晃（1992）：流木群の流動に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 35, B-2, pp.249-266.
- 中川一・井上和也・池口正晃（1993）：流木群の流動に関する研究（2）, 京都大学防災研究所年報, 36, B-2, pp.487-498.
- 中川一・井上和也・池口正晃（1994）：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.
- 水山高久・石川芳治・福沢誠（1991）：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.

（論文受理日：2015年6月11日）