

山地河川の橋梁閉塞に流木の曲がり幹形状が及ぼす影響

中谷 加奈¹・長谷川 祐治²・海堀 正博³・里深 好文⁴

Study on woody debris curved trunk shape influence on bridges blocking in mountainous rivers

Kana NAKATANI¹, Yuji HASEGAWA²,
Masahiro KAIBORI³ and Yoshifumi SATOFUKA⁴

Abstract

When bridges in mountainous rivers are blocked with accumulated woody debris, a high flow depth leads to overflow and causes damage. Recent studies have focused on straight trunk shape. However, woody debris showing shape with curved trunk have been reported, but the trunk shape influence is not clear. In this study, we conducted field survey in Higashi-Hiroshima after 2018 disaster focusing on curved trunks woody debris, and proposed two representative curved trunks; single wavelength and half wavelength with different curving degree. We conducted laboratory experiments using woody debris model with straight trunk and two types of curved trunk. We also changed the mixing ratio of curved and straight trunk. From experiment results, curved trunk caused blocking in smaller woody debris comparing with straight trunk in both shape and in all mixing ratio. We applied the experimental results to examine the blocking possibility with logistic regression analysis. From the results, half wavelength with large curving degree showed higher possibility of blocking comparing with single wavelength.

キーワード：流木, 曲がり幹形状, 橋梁閉塞, 水理実験, ロジスティック解析

Key words: woody debris, curved trunk shape, bridges blocking, laboratory experiments, logistic regression analysis

¹ 京都大学大学院農学研究科
Graduate School of Agriculture, Kyoto University

² 広島大学大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering,
Hiroshima University

³ 広島大学防災・減災研究センター
Resilience Research Center, Hiroshima University

⁴ 立命館大学理工学部
Department of Civil Engineering, Ritsumeikan University

1. はじめに

近年、頻発する局所的な集中豪雨により土砂災害の発生件数が増加傾向にある。これまでの土砂災害の発生事例を見ると、山間部から土砂だけでなく流木が流出して橋梁に閉塞することで被害が拡大する事例が見られる¹⁾。流木に関する検討は多数実施され^{例えは2-5)}、近年では橋脚周辺の流木の三次元的な集積機構⁴⁾や、流木の沈下過程を考慮した橋梁閉塞⁵⁾が、実験から検討されている。一方で、既往検討の多くは常流の緩勾配の河川を対象として、急勾配の射流区間の山地河川を対象とした検討は少ない。山地河川を対象とした検討は、流下時の流木の投影面積に着目した橋梁閉塞の検討⁶⁾や、流木形状を考慮した流木捕捉工の捕捉効果に関する検討⁷⁾などがある。筆者らは、橋脚0本⁸⁾や2本⁹⁾で水理条件や流木条件による橋梁の閉塞限界の差や、流木を含む土石流による河道閉塞について¹⁰⁾、実験により検討している。

山間部からの流木流出に関する検討は、日本で発生する大部分が針葉樹であることから^{11,12)}、流木の幹を直線とすることが殆どである^{例えは2-10)}。丸太形状と根付形状に着目した検討は実施され、根付形状の方が構造物の閉塞が起こりやすいことが示されている^{7,10)}ものの、幹形状は直線のみが対象とされる。

しかし、土砂災害では広葉樹による流木流出も確認され¹³⁾、広葉樹は針葉樹と比べて複雑な形状を持つことが知られる。平成30年7月豪雨により広島県で発生した流木による橋梁閉塞では、直線状だけでなく曲がった形状の幹の流木も確認された。洪水後に堆積した流木は、流下過程で変形したものも含まれる可能性がある。図1に広島県安芸郡坂町総頭川において流木で閉塞した橋梁を示す。曲がり流木は直線状よりも流木同士が連結してジャム状になりやすくなると考えられるため、少ない流木での閉塞が推測されるが、曲がった流木に関する検討はほとんどない。

本研究では、平成30年7月豪雨により山間部から流出した流木形状を調査して、代表的な曲がり形状を検討した。本検討では幹が直線形状ではないものを曲がり流木として扱った。次に水理実験



図1 平成30年7月豪雨により流木で閉塞した総頭川の橋梁 (2018年7月8日撮影)

により、直線形状の幹と曲がった形状の幹による橋梁閉塞の差を検討した。曲がった形状の流木と直線形状との混合割合についても検討を行い、直線のみの場合との差を示すことを目指した。

2. 実災害で山間部から流出した流木

2.1 対象地と調査の概要

図2に流木調査の対象地を示す。図中の左上が八本松曾場ヶ城山、左下の黒瀬町本岳・前平山、右上の下三永本頭、この3箇所の直線で囲んだ範囲が調査対象である。2018年7月豪雨で崩壊や土石流による土砂、並びに流木が山間部から発生した広島県東広島市内で2019年7-9月に調査を行った。調査対象には、発災後から2019年9月まで工事等による人為的影響が少なかった地点、並びに人工林よりも自然状態に近い天然生林や、広葉樹が広く分布する地域を選定した。

八本松曾場ヶ城山には林道(図2左上の破線部)が存在し、林道の一部が崩壊して土砂移動現象が発生した。小倉神社の北西から発生した図2左上のA、その下流から続く林道の北東に位置するB、Aに隣接するCを調査対象とした。広島県か

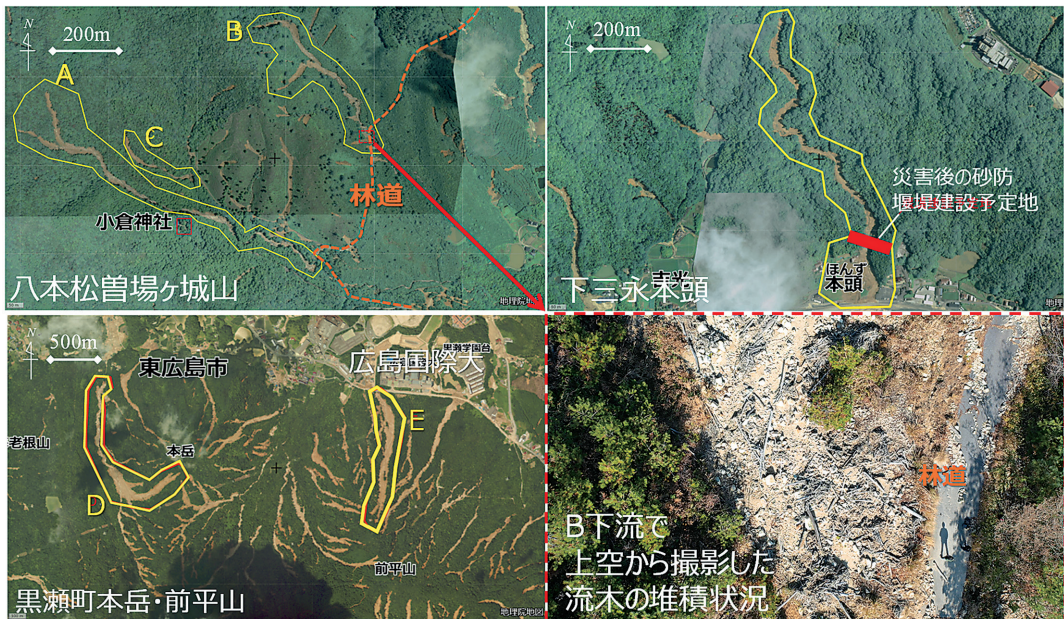


図2 調査対象の東広島市内の3箇所(左上:八本松, 左下:黒瀬町, 右上:下三永, いずれも2018年災害後の地理院地図に加筆)と上空から撮影した流木の堆積状況(右下:曾場ヶ城山のB下流)

ら提供された森林資源情報から、調査地では天然生林のアカツヤクヌギが主な樹種だが、AやCには隣接してクヌギ以外の広葉樹が、Bには隣接して人工林のヒノキヤスギも分布する。

東広島市黒瀬町では、本岳と前平山の山頂近くの稜線付近から放射状に多数の崩壊や土石流などの土砂移動が発生し、本岳では勾配が約15度から発生していた。対象としたのは、本岳西側の最大約100 m幅での土砂移動が見られる斜面(図2左下のD)、ならびに土砂が流入する被害が発生した広島国際大学東広島キャンパスの上流に位置する前平山の北側の斜面(図2左下のE)である。広島県の森林資源情報から、DやEも大部分は天然生林のアカツヤだが、一部でクヌギ以外の広葉樹や、人工林のスギやヒノキが分布する。

下三永本頭では、土砂流出によって家屋の全壊が1戸、半壊が1戸、死者3名の被害が発生している。森林資源情報から、このエリアは天然生林のクヌギ以外の広葉樹が分布する。

調査では、対象地の上空からドローン(Mavic 2 PRO, DJI)で取得した撮影映像により、河道に

堆積した流木形状の分布を調べた。図2右下に、八本松曾場ヶ城山B下流での流木堆積状況を示す。図3のように写真を拡大すると流木形状が確認できる。ここでは曲がり流木を流木の両端を結んだ直線の長さに対して流木長が1.1倍以上になるものとした。対象区間において河道に堆積した流木を全て撮影して、直線形状を青色で示し、曲がった形状を赤色で示し、目視で全ての流木形状を調べた。ただし、重なって堆積した流木は、上空からの写真で判別できるもののみを対象とした。調べた流木本数486本に対して、曲がり流木の混合割合は約0.1の47本だった。

2.2 流木形状の検計

上空からの撮影写真を基に、形状全体が確認できる12サンプルの曲がり形状の流木を選定して、地上での現地調査を行った。デジタルカメラを用いて図4のように複数アングルから選定したサンプルの流木の撮影を行った。撮影した写真はAgisoft Metashapeを用いて、図5のように三次元的な形状のデータを得た。



図3 上空から撮影した写真による流木の直線形状と曲がり形状の判別事例(青:直線形状, 赤:曲がり形状)

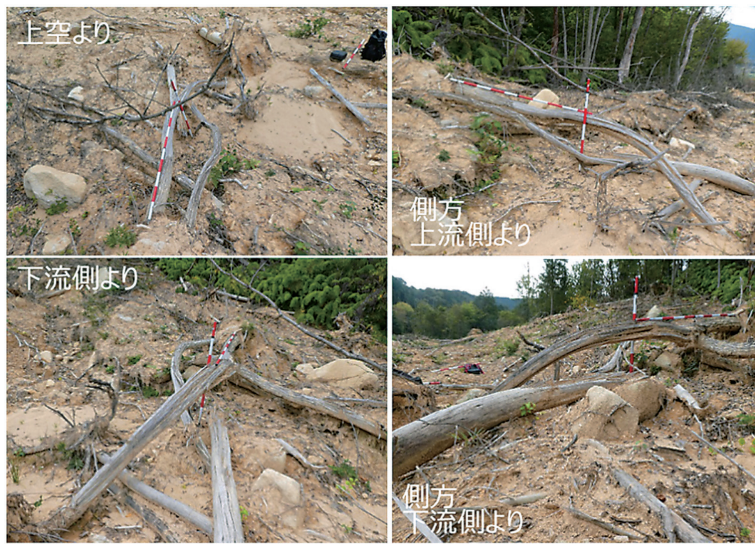


図4 本岳における流木サンプルの複数アングルからの撮影

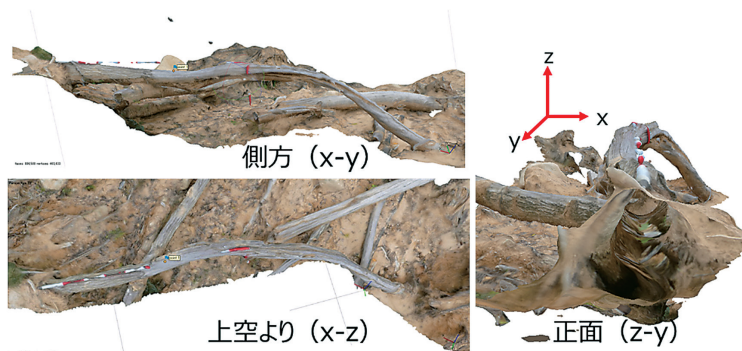


図5 本岳における流木サンプルの三次元データ

曲がった流木形状を検討するために、三次元データを基に側方 (x-y)、上空 (x-z) 方向の画像から、流木の両端を結んだ直線を4等分にした5点の位置を計測した。この際に x, y, z 方向ができる限り最大長を取るような角度とした。両端を結んだ長さを L (m)、両端を結んだ直線の幅の平均値を直径 D (m) として、側方 (x-y)、上方 (x-z) それぞれで計測した。x-y 方向を4等分した一つの事例を図6に示す。計測点1と5の両端を結んだ直線の長さが L、幅の平均値が直径 D である。図6に赤の長方形で示した両端を結んだ直線と、計測点2, 3, 4の流木端の間隔の求め方を矢印で示す。各計測点の間隔と直径 D の比を相対長さ C として無次元量で表し、本稿では相対長さ C を曲がり形状の程度を表す指標とした。x-z 方向でも同様に5点を計測して、各計測点での相対長さ C を得た。

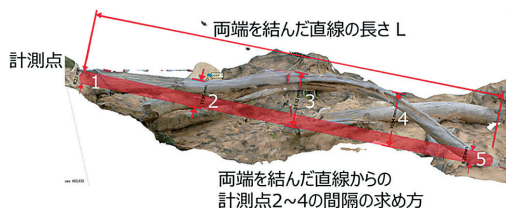


図6 流木の相対長さ C を算出するための計測点の設定

表1にサンプル番号, 両端を結んだ長さ L (m)、両端を結んだ直線幅の平均値の直径 D (m)、計測点2~4の相対長さ C をそれぞれ側方 (x-y)、上空 (x-z) 方向について示す。12サンプル中、半波長 (以降、弓型) は x-y 方向では8サンプル、x-z 方向は10サンプル確認された。No.7は x-y 方向は直線で、x-z 方向のみ弓型を示した。一波長 (以降、S字型) は両端を結んだ直線に対して、曲がりが一方向のみではなかったため、負の値も示すが、曲がりの大きさは相対長さ C の絶対値で表される。S字型は x-y 方向では3サンプル、x-z 方向は2サンプル確認された。両方向とも S字型を示したのは1サンプル (No.9) で、他の3サンプル (No.3, 5, 12) は一方向のみ S字型でもう一方は弓型だった。なお、今回計測した流木には一波長以上の曲がりを持つ形状は確認されなかった。相対長さ C は、弓型タイプの x-y 方向は1.00~6.91、x-z 方向は1.06~5.45の範囲に分布した。S字型タイプの x-y 方向は-3.04~1.41、x-z 方向は-1.57~1.56の範囲に分布した。

流木サンプルを基に代表的な曲がりの幹形状を提案するために、x-y 方向、x-z 方向について弓型とS字型の形状を分けて、計測点毎に平均を求めて得た代表値を図7に示す。各計測点の C は、弓型タイプは計測点2, 3, 4の順に x-y 方向に2.26, 2.64, 2.62で、x-z 方向に2.02, 2.66, 2.74

表1 流木サンプルの側方 (x-y) 方向、上空 (x-z) 方向からの長さ L、直径 D ならびに計測点2, 3, 4の相対長さ C

サンプル No.	(x-y) direction					(x-z) direction				
	L(m)	D(m)	C (point2)	C (point3)	C (point4)	L(m)	D(m)	C (point2)	C (point3)	C (point4)
1	2.06	0.12	1.00	1.36	2.06	1.93	0.10	2.16	2.81	2.58
2	1.77	0.15	4.84	6.34	6.91	1.43	0.12	2.10	2.18	1.66
3	2.27	0.11	-3.04	1.12	1.00	2.29	0.16	1.60	3.11	4.09
4	2.71	0.11	1.11	1.19	1.30	2.73	0.09	1.42	1.83	2.22
5	2.14	0.15	1.69	1.96	1.86	1.32	0.11	-1.17	-1.57	1.32
6	2.33	0.14	4.09	5.38	6.21	2.47	0.14	2.41	4.24	5.45
7	2.57	0.07	1.00	1.00	1.00	2.54	0.07	2.53	2.91	2.54
8	2.04	0.08	2.38	1.39	1.43	2.11	0.10	2.53	3.30	3.41
9	2.66	0.04	-1.15	1.22	1.41	2.58	0.05	1.03	-1.36	1.56
10	2.75	0.08	3.02	3.02	1.71	2.67	0.11	3.06	3.36	1.93
11	2.66	0.08	1.19	2.15	1.11	2.74	0.05	1.06	1.26	1.08
12	2.76	0.04	-1.71	0.95	1.33	2.50	0.10	1.37	1.66	2.41

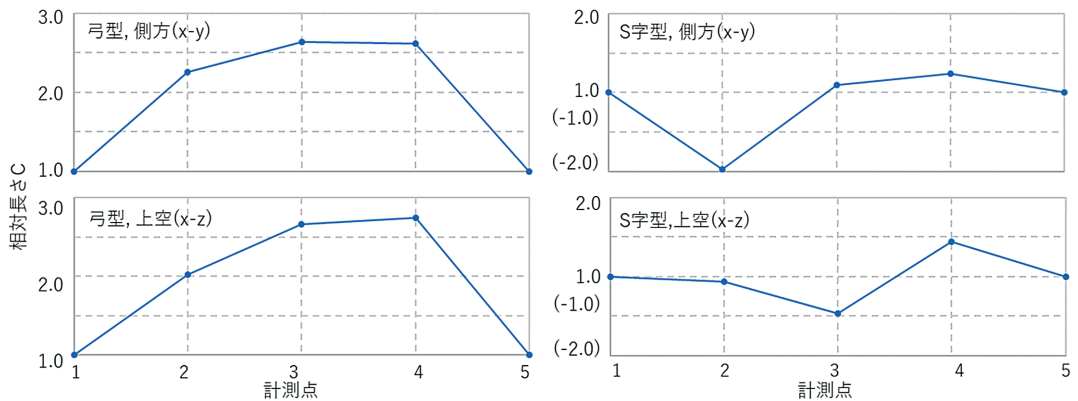


図7 平均的な弓型(左)とS字型(右)の相対長さC

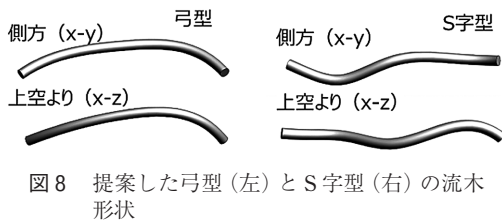


図8 提案した弓型(左)とS字型(右)の流木形状

だった。S字型タイプは計測点2, 3, 4の順にx-y方向に-1.97, 1.10, 1.24で、x-z方向に-1.07, -1.47, 1.44だった。各計測点のCの絶対値、すなわち曲がりの程度は、S字型の方が弓型より小さい。

水理実験で用いる流木模型を作成するために、直線形状の流木を対象とした既往研究の実験条件を参考に⁹⁾、長さ10 cm(ここでは、両端を結んだ長さ)、直径0.5 cmとして、3Dプリンターで流木模型を製作した。図8に弓型タイプとS字型タイプの流木形状を示す。模型では各計測点の間を滑らかな形状とした。

3. 水理実験

直線形状の幹と曲がり形状の幹の流木モデルを用いて、山地河川を対象とした射流域における橋梁閉塞について水理実験により検討した。

3.1 実験概要

実験には、長さ400 cm、流路幅20 cmの直線矩形断面水路を使用した。直線形状の流木を対象と

した既往検討と同様に橋脚2本の橋模型を採用した⁹⁾。橋脚間、並びに橋脚と水路側壁間は6.2 cmとした。橋桁の水路横断方向幅20 cm、縦断方向幅8 cm、厚さ2 cmで製作し、水路下流端から50 cm上流に橋桁上流が位置するように設置した。図9に実験概要を示す。

3.2 水理条件と流木模型

水路は勾配2度として、水路上流端から流量1.85 l/sを定常的に供給した。水深1.0 cm、平均流速92.5 cm/s、フルード数2.95である。水面と橋桁下端の距離(余裕高)は2.5 cmとした。なお、勾配については、既往研究の実験⁹⁾を参考に同じ条件とした。

流木模型は直径0.5 cm、長さは10 cm(曲がり形状では、両端を結んだ長さが10 cm)である。流木模型の体積は、丸太形状を1とすると、弓型で1.12倍、S字型は1.10倍である。山地溪流から発生する流木の多くは、立木由来でも流下中に大部分で枝葉が剥がれ、幹と根の一部のみの形状となることが報告されていることから^{12,14)}、幹のみの形状を採用した。直線の流木は木製で、実験前に十分水に浸けた状態として、このとき比重は約0.8である。曲がり形状の流木はいずれもABS樹脂製で、比重は約0.9である。比重が1を超える場合は、流木が水面から沈んで流下するため、比重が異なると流木の沈む深さが変化して、水面下で流木が移動する層が異なり、橋梁への閉塞に影響

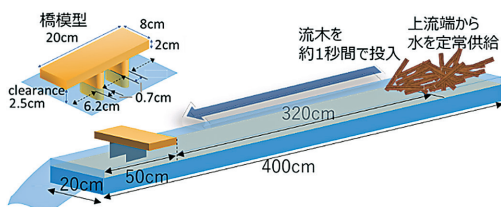


図9 実験概要と橋梁模型

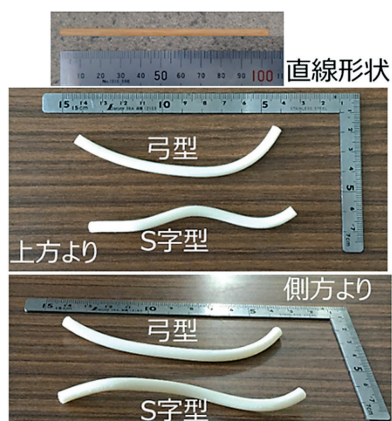


図10 流木模型 (上段：直線形状，中央・下段：曲がり形状を上方・側方より撮影)

響することが推測される。一方で、比重が1より小さい場合は、水面を浮いて移動するために流木が移動する層が変わらないことから、本実験で比重の違いの影響は小さいと考えられる。図10に流木模型を示す。上流端から定常的に水を供給した状態で、流木模型を水路の上流端30 cm 下流の位置から約1秒間で分散するように投入した。投入方法は橋への閉塞に影響を及ぼすが、本実験のように橋に到達した際の単位時間当たりの流木量（以下、流木流量）で評価すれば投入方法の影響が小さくなる。また、同一条件を繰り返し試行することで、偶発的な影響をできるだけ取り除いた。

3.3 実験条件と閉塞の定義

現地調査では曲がり流木が全体の約0.1だったが、本実験では幅広い条件で比較するため、曲がり流木の混合割合を0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0の条件で実施した。0.0は直線流木のみ、1.0は曲がり流木のみを示す。曲がり流木の形状は、弓

表2 実験ケース

幹の形状	曲がり流木の混合割合	曲がり流木の形状	投入本数 (10本毎)
直線のみ	0.0	—	10~80
直線と曲がりの混合	0.1	弓型, S字型	20~60
	0.3, 0.5		10~60
曲がりのみ	1.0	弓型, S字型	10~60

型とS字型の二種類を用いた。1回の試行では一種類の曲がり流木のみを用いた。

上流端から供給する流木は、条件により閉塞が生じやすい本数が異なったため、直線のみは10~80本、直線と曲がり流木を混合したケースでは混合割合0.1では20~60本、混合割合0.3, 0.5ならびに曲がり流木のみは10~60本の範囲で10本ずつ本数を変えて投入した。同じ流木条件について同じ投入本数では、概ね10回実施した。実験条件を表2に示す。1回の試行では流木投入から30秒間通水して流木挙動を確認した。

2台のカメラを用いて、橋上から橋梁直上流に到達する流木の挙動や時間的変化を、橋の側方から橋桁下面まで達する水位上昇と閉塞過程を記録して実験後に映像を解析し、データ整理を行った。条件によっては、数本の流木は橋上流に引っ掛かるが、水位上昇が発生しないケースが確認された。本検討では、橋の上流で水位上昇が発生した条件を閉塞とみなした。周辺への氾濫や河床上昇が起こり、被害拡大に繋がると考えたためである。また、閉塞が発生した後に、通水した30秒間の途中で流木流出により閉塞状態でなくなる一時的な閉塞も見られたが、これらは非閉塞として扱った。

3.4 流木流量

実験では水路の上流から本数を変えて流木を供給したが、同じ投入本数でも橋梁に到達する時点で流木の広がり方は異なることから、投入本数ではなく、橋梁に到達した際の流木流量で評価した^{8,9)}。橋梁の上流端から20 cm 上流に基準線を設け、先頭の流木が到達した時から最後尾の流木が通過し終わる時間を求め、投入量を時間で除すこ

とで流木流量 Q_{wd} を式 (1) で定義した。

$$Q_{wd} = N \cdot V / (t_i - t_j) \quad (1)$$

ここに、 Q_{wd} ：流木流量 (cm^3/s)、 N ：投入本数、 V ：流木1本の体積 ($\text{cm}^3/\text{本}$)、 t_i ：最後尾の流木の到達時刻 (s)、 t_j ：先頭の流木の到達時刻 (s) である。

4. 結果と考察

4.1 流木流量に対する橋梁の閉塞と非閉塞

図11に、流木流量 Q_{wd} を指標として閉塞 (図中の×) と閉塞が発生しない非閉塞 (図中の○) の結果を示す。左から順に、直線のみ (0.0)、直線と曲がりの混合 (左から0.1, 0.3, 0.5)、曲がりのみ (1.0) である。同じ混合割合では、左S字型、右に弓型を載せている。図12に、流木流量 Q_{wd} が $120 \text{ cm}^3/\text{s}$ の条件での直線のみ、S字型のみ、弓型のみで橋梁が閉塞した状況の写真を示す。堰上げ水深はどれも橋桁下面までで、形状による大きな違いは見られない。どの形状においても、流

木が橋脚に衝突して、速度が遅くなった流木に後続の流木が衝突して、流木や橋桁、橋脚が支点となり閉塞が生じる。直線は形状的に流木同士が連結し難く、S字型や弓型は連結しやすい状況が確

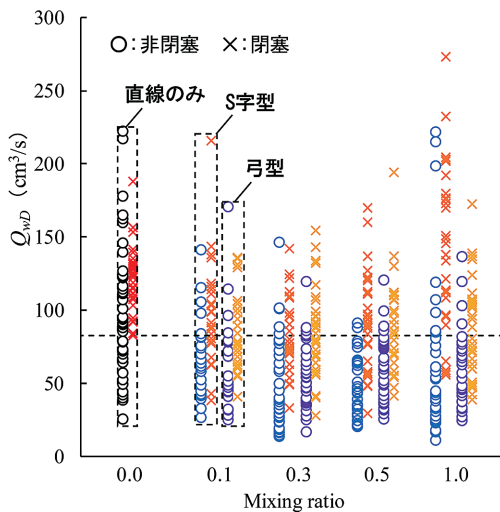


図11 実験結果

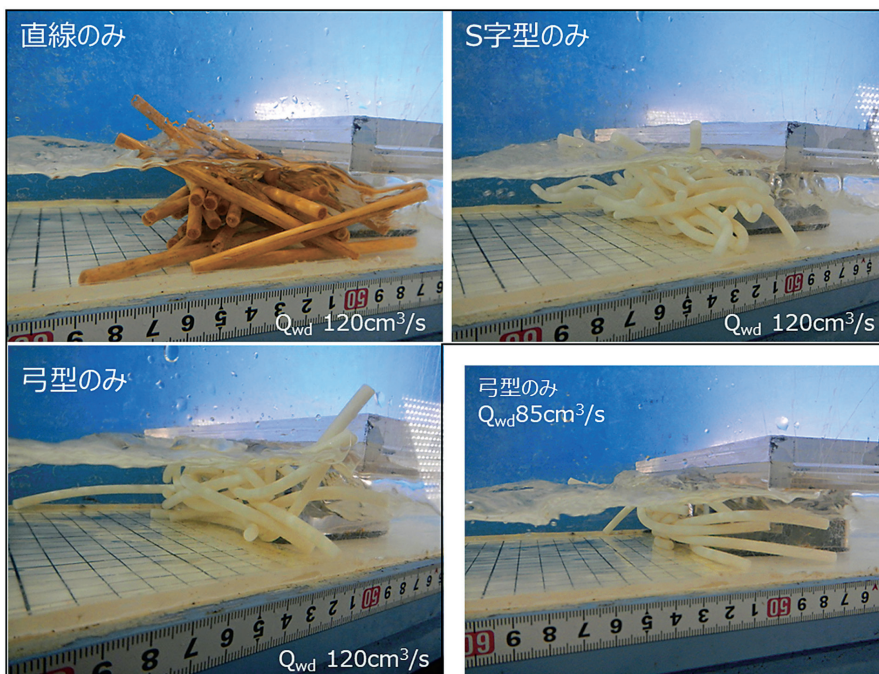


図12 $Q_{wd} = 120 \text{ cm}^3/\text{s}$ の閉塞状況 (左上：直線のみ、右上：S字型のみ、左下：弓型のみ) と弓型のみ $Q_{wd} = 85 \text{ cm}^3/\text{s}$ の閉塞状況 (右下)

認できる。弓型は曲がり大きいため、少ない本数が連結した際、その流木塊が疎な状態でも占める空間は大きくなる。特に、曲がり大きな弓型は橋脚をまたぎやすい形状で、少ない流木流量でも閉塞が発生しやすい(図12右下)。

実際に流木による橋梁閉塞を評価する時には最小の流木流量、すなわち危険側の条件を知ること対策が検討される。そのため、流木流量が大きい条件で橋梁の閉塞発生、非発生が混在する領域や閉塞のみが発生する領域は、後述する回帰分析の評価で用いるが、ここでは閉塞する最小流木流量を考察した。

直線のみ結果では、閉塞する最小流木流量は83 cm³/sで、それ以下のQ_{WD}は全て非閉塞である。一方で曲がり流木の最小流木流量は混合割合が0.1ではS字型で38 cm³/s, 弓型で41 cm³/s, 0.3ではS字型で33 cm³/s, 弓型で28 cm³/s, 0.5ではS字型で30 cm³/s, 弓型で41 cm³/s, 1.0ではS字型で56 cm³/s, 弓型で39 cm³/sで、それ以下のQ_{WD}では非閉塞である。閉塞が生じる最小のQ_{WD}は、曲がり流木が混在する、あるいは曲がり流木のみ全条件で、直線のみ最小値(83 cm³/s, 図中に点線で示す)よりも明らかに小さい。S字型は混合割合が0.5の条件で、弓形は混合割合が0.3の条件で最も小さいQ_{WD}により閉塞が生じる。一方、同じ形状の中で閉塞する最小のQ_{WD}が最大になるのは、S字型では混合割合1.0, 弓形は混合割合0.5で、S字型は曲がり流木のみ1.0の条件で、閉塞するのに必要な流木流量が最大だった。しかし、曲がり流木を含む条件の中で形状や混合割合の違いによる最小のQ_{WD}に大きな差はなく、明らかな傾向を示すものではなかった。

4.2 ロジスティック回帰分析による統計評価

各条件での流木流量Q_{WD}の増加による閉塞しやすさの違いの傾向は確認できたが、両者が混在する領域は、閉塞の発生しやすさや推移が分かり難く、試行回数にも左右される可能性がある。また、あるQ_{WD}での閉塞発生、非発生の検討では、事象が二つに限られるため、確率分布は離散型の二項分布での検討が適切である¹⁵⁾。分析には

Logistic regression analysisを採用し、本研究では、Q_{WD}を説明変数、閉塞発生の有無を目的変数として、ある説明変数のQ_{WD}で目的変数が1となる確率、すなわち閉塞が発生する確率を予測する。実験結果にロジスティック回帰分析を用いると、目的変数の確率Pは、説明変数の流木流量Q_{WD}をxとして次式(2)で表される。

$$P = \frac{e^{(ax+b)}}{e^{(ax+b)} + 1} \quad (2)$$

ここにeは自然対数の底、aとbは係数である。図13に直線とS字型曲がり流木の混合0.5(S_{0.5})の実験結果について回帰分析した結果と、非閉塞、非閉塞と閉塞が混在、閉塞の3領域に区分した対応イメージを示す。混在する領域(黄色)の位置と広がり方は、回帰曲線の位置と傾きで表現される。閉塞確率50%のQ_{WD}が大きくなると、混在領域はQ_{WD}の大きい側になる。混在領域の広さは、閉塞確率10~90%のQ_{WD}の差が大きいほど広がる傾向にある。

図14には、上段にS字型、下段に弓型のロジスティック解析の結果(回帰曲線のみ)を示す。併せて実験データの信頼性を確認して、全ての条件でP値は0.05以下だった。P値は弓が1割(Bow_{0.1})の条件で最大で、0.025を示した。また、図15には、直線形状とS字型の全ケース、弓型の全ケースのロジスティック解析の結果(回帰曲線のみ)を示す。いずれもQ_{WD}の上昇に従い閉塞確率が上昇することが示され、あるQ_{WD}での閉塞確率が推定できる。

続いて、図14に示した両曲がり形状について混

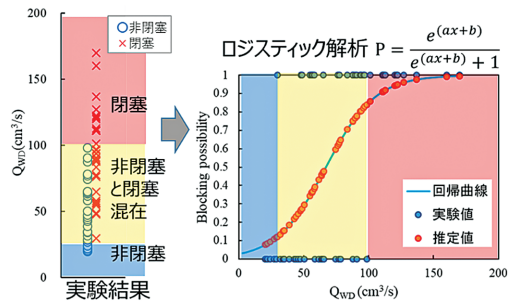


図13 S_{0.5}の実験結果(左)とロジスティック解析結果(右)

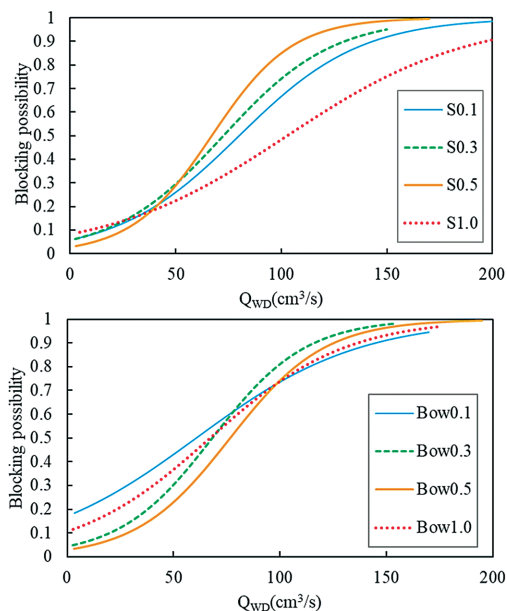


図14 ロジスティック解析結果 (上段：S字型, 下段：弓型)

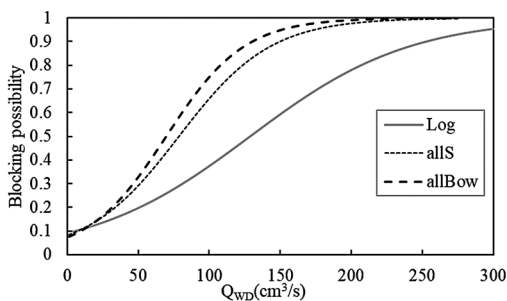


図15 ロジスティック解析結果 (直線形状 Log, S字型全ケース, 弓型全ケース)

合割合毎に考察する。S字型の結果(図14上段)からは、実験で閉塞が発生して回帰曲線の閉塞確率が上昇し始める最小の Q_{WD} は、混合割合の違いによる大きな差はないが、最大は 1.0 ($S_{1.0}$) で、最小は 0.5 ($S_{0.5}$) だった。また、閉塞確率が 0.5 になる Q_{WD} は $S_{0.5}$ が最も小さく、続いて 0.3 ($S_{0.3}$)、0.1 ($S_{0.1}$) で、1.0 ($S_{1.0}$) の曲がり形状のみが最大となる。 $S_{1.0}$ では、回帰曲線の傾きが他の割合と比べて緩く、非閉塞から閉塞の遷移幅が広い。一般に緩い傾きは橋への引っ掛かり難さ(非閉塞)と引っ掛かり易さ(閉塞)を併せもつ領域が広い事を示

す。 $S_{0.1}$ と $S_{0.3}$ は閉塞確率が 0.2 より小さい領域では、ほぼ同様の傾きや回帰曲線の立ち上がりを示すが、閉塞確率が 0.2 より大きい領域では $S_{0.3}$ の方が $S_{0.1}$ より傾きが急になる。 $S_{0.5}$ は閉塞確率が上昇し始める Q_{WD} が小さいが、回帰曲線の傾きは最も急で、非閉塞から閉塞の遷移幅が狭く、閉塞が急激に進むことが示される。曲がり流木はその形状から流木同士が絡みやすく、小さい Q_{WD} でも閉塞確率が高くなる。S字型では小さな Q_{WD} での閉塞確率は混合割合による差が小さい。大きい Q_{WD} では流木同士が接触する作用点が相対的に多くなることから、S字型はより絡みやすくなると推測される。直線形状と混合した $S_{0.1}$ 、 $S_{0.3}$ 、 $S_{0.5}$ では、混合割合が大きくなるほど回帰曲線の傾きが急になり、閉塞が進む。一方、曲がり形状のみの $S_{1.0}$ では、 $S_{0.1}$ 、 $S_{0.3}$ 、 $S_{0.5}$ と比較して明らかに傾きが緩く、非閉塞と閉塞を併せ持つ領域が広いことから、本検討で用いた S 字型の形状では、特に Q_{WD} が大きい条件で流木同士が連結しにくく、閉塞が進みにくいことが示された。これは曲がり部分を複数有する S 字型の形状そのものや、曲がりの程度が小さいために Q_{WD} が大きくなると連結し難くなったことや、実験観察より連結を保持し難い(一時的な閉塞の後に流出する)ことが影響したと推測される。S字型は、直線と混合する方が連結しやすく、安定した連結により閉塞が維持されたことも示される。

図14下段の弓型では、閉塞確率が上昇し始める Q_{WD} は S 字型よりも混合割合による違いが大きく、最も大きいのは混合割合 0.1 ($Bow_{0.1}$)、次に 1.0 ($Bow_{1.0}$) である。 $Bow_{0.3}$ と $Bow_{0.5}$ には大きな差はなく、閉塞確率が上昇し始める Q_{WD} は最も小さい。閉塞確率が 0.5 になる Q_{WD} は、 $Bow_{0.1}$ が最も小さく、続いて $Bow_{1.0}$ と $Bow_{0.3}$ がほぼ同じで、 $Bow_{0.5}$ が最大となる。回帰曲線の傾きは、 $Bow_{0.1}$ が最も緩く、非閉塞から閉塞の遷移の幅が広い。次に緩いのが $Bow_{1.0}$ で、閉塞確率が 0.6 より大きい領域では、曲線が $Bow_{0.1}$ とほぼ同じになる。 $Bow_{0.3}$ と $Bow_{0.5}$ は、立ち上がりは $Bow_{0.3}$ の方が小さな Q_{WD} だが、曲線の傾きは $Bow_{0.3}$ と $Bow_{0.5}$ で似た傾向を示し、非閉塞から閉塞への遷移幅が同様となる。弓型で

は、S字型と比較すると混合割合による回帰曲線の形状や傾きの差は小さく、特に $Bow_{0.3}$ と $Bow_{0.5}$ は似た形状を示す。 $Bow_{0.1}$ は他の混合割合と比較して非閉塞から閉塞への遷移幅が大きく、閉塞が進行し難いが、閉塞確率が大きい領域では $Bow_{0.1}$ と $Bow_{1.0}$ は似た形状を示す。

弓型では、S字型と比較して小さな Q_{wd} での閉塞確率は混合割合による差が大きい。図7、8で示したように弓型は曲がりの程度CがS字型より大きいことが影響したと推測される。しかし、弓型では大きい Q_{wd} では混合割合による閉塞確率の差が小さくなる。 Q_{wd} が $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ より大きな領域では流木同士が接触する作用点が相対的に多くなることから、流木同士の連結がどの割合でも同様に生じやすくなり、一度連結して閉塞すると再流出は起こりにくいことも推測される。大きい Q_{wd} では、混合割合0.3と0.5で、並びに0.1と1.0で閉塞確率や回帰曲線が近い傾向を示し、0.3と0.5の方が非閉塞から閉塞への遷移が急だった。

以上より、両曲がり形状で混合割合が大きい方が必ずしも閉塞が起きやすい結果は得られなかった。S字型や弓型の混合割合が0.3と0.5では閉塞確率0.5を示す Q_{wd} や回帰曲線の傾きが類似しており、一定以上の混合割合では差が小さくなることが推測される。

図15の直線形状とS字型の全ケース、弓型の全ケースのロジスティック解析の結果からは、両曲がり形状とも直線形状よりも傾きが急で、直線よりも曲がりの方が小さい Q_{wd} から閉塞確率が上昇し、非閉塞から閉塞の遷移が進みやすいことが示される。直線は形状的に最も流木同士が連結し難いため、閉塞が発生するには曲がりと比較して大きな流木塊となることが必要であり、閉塞確率が上昇する Q_{wd} が曲がり形状よりも大きい。さらに、直線で傾きが最も緩いのは、一時的に閉塞しても再流出が最も起きやすい形状であることが影響する。また、曲がりの形状で比較すると、弓型の方がS字型よりもわずかに急で、閉塞が起こりやすいことが示される。一般にはS字型の方が、流木同士が絡みやすくなると考えられるが、本検討では弓型の方が曲がりの程度が大きかった

ことや、S字型では曲がり流木のみケースで閉塞し難かったことが影響したと推測される。一方、実験条件や試行回数によっては非閉塞のみや閉塞のみの領域が少なかった影響も考えられることから、試行回数を増やして更なる検討を進める。

5. おわりに

本研究では、流木の幹形状が山地河川での橋梁閉塞に及ぼす影響を把握することを目的として実施した。まず、2018年7月豪雨で流出した流木を対象に、東広島市内で現地調査を実施した。ドローンで撮影したオルソ画像から、対象地では曲がった形状の流木は約1割確認された。流木サンプルの平均値から、S字型と弓型の代表的な形状を求めて、3Dプリンターで曲がった形状の流木模型を製作した。次に、曲がった形状の流木が直線形状と比べて橋梁閉塞に及ぼす影響を把握するために、水理実験を実施した。

実験結果から、曲がった流木が含まれると直線形状と比べて少ない流木流量で橋梁が閉塞することや、閉塞が進みやすいこと、曲がった流木では弓型の方がS字型よりも閉塞しやすい傾向を示した。これは、曲がった形状の場合、直線形状と比べて流木が互いに絡みやすくジャム状になることや、S字型と弓型では曲がりの程度が大きな弓型の方がより絡まりやすかった影響と推測される。混合割合は、S字は0.5までは割合が大きい方が閉塞しやすくなるが、1.0では他の割合より閉塞し難い。S字型の形状そのものや、曲がりの程度が影響したことが推測される。弓型では、混合割合0.3と0.5で閉塞の遷移が近く、0.1や1.0よりも閉塞しやすいことを示し、曲がった流木が多い方が閉塞しやすいとは限らなかった。

今後は、実験の試行数を増やして、曲がり同程度の場合や、S字型の方が大きい場合についても検討を行う。さらに、異なる水理条件や橋梁の条件についても検討を進める。また、2019年以降に土砂災害が発生した地域についても、山間部から流出した流木の形状について調査を行い、各地域における代表的な流木の形状や、存在割合、地域毎の特徴などを合わせて検討していく。

謝辞

本研究の一部は、河川財団による河川基金、ならびに国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所の「流木災害防止・被害軽減技術の開発」の研究助成を受けたものです。また、広島県農林水産局林業課に樹種分布のデータ提供を頂いた。広島大学総合科学部の久世祐里奈氏には、現地調査やデータ整理、実験に協力頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明ら他12名：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害、砂防学会誌, Vol.66, No.5, pp.61-72, 2014.
- 2) 中川 一・井上和也・池口正晃・坪野考樹：流木群の流動に関する研究(2), 京都大学防災研究所年報, 第36号 B-2, pp.487-498, 1993.
- 3) 松本健作・小葉竹重機・清水義彦・石田和之・近内壽光・Ioakim Ioakim：流木塊の橋脚への堆積に関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.925-930, 2001.
- 4) 赤堀良介：橋脚周辺における流木の3次元集積に関して, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74 (4), pp. I_679-I_684, 2018.
- 5) 岡本隆明・染谷智紘・松本知将・山上路生・田中健太：橋梁部での流木沈下過程と全面閉塞の限界条件に関する実験的研究, 自然災害科学, Vol.39 (4), pp.423-437, 2021.
- 6) 橋本晴行・楠窪正和・喜多貢業・ムハマドファリドマリカル：洪水時における河道内障害物による流木群の集積過程における実験的研究, 第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.145-149, 2016.
- 7) 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.57A, pp.1087-1094, 2011.
- 8) 中谷加奈・長谷川祐治・里深好文：山地河川を対象としたワンスパン橋梁への流木閉塞に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.74, No.5, pp.I_1081-I_1086, 2018.
- 9) Nakatani, K., Hiura, M., Hasegawa, Y., Kosugi, K., Satofuka, Y.: Experimental study on bridges over mountainous streams with blocked piers due to debris wood, 自然災害科学, Vol.36, 特別号, pp.15-24, 2017.
- 10) 長谷川祐治・中谷加奈・里深好文・水山高久：流木を含む土石流による河道閉塞の形成および決壊に関する実験, 砂防学会誌, Vol.69, No.2, pp.19-23, 2016.
- 11) 小松利光監修・山本晃一編集・財団法人河川環境管理財団企画：流木と災害－発生から処理まで－, 技術堂出版, 273p., 2009.
- 12) 末次忠司：水害被害を助長する土砂・流木の影響, 水利科学, No.365 (第62巻, 第6号), pp.56-69, 2019.
- 13) 久保田哲也：平成29年7月九州北部豪雨災害と流木の特徴, 水利科学, No.365 (第62巻, 第6号), pp.10-22, 2019.
- 14) Nakamura, F., Swanson, F. J.: Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream in Western Oregon, *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, pp.43-61, 1993.
- 15) 光崎研一：分布型のはなし－二項分布－, 獣医科学と統計利用, No.12, pp.34-37, 1984.

(投稿受理：令和3年4月1日
訂正稿受理：令和3年7月2日)

要 旨

山地河川で集積した流木により橋が閉塞すると、水位上昇により氾濫被害が拡大する。既往検討の多くは針葉樹を対象として直線形状の流木に着目している。2018年7月豪雨では広島で曲がった幹形状の流木が確認された。しかし、幹形状の違いによる橋への閉塞の影響は明らかにされていない。本研究では、現地調査により東広島市内の山間部から流出した流木について、曲がり形状に着目して検討して、異なる曲がり度のS字型と弓型の代表的な曲がり幹形状の流木を提案した。次に、水理実験を行い、直線形状の幹と二種類の曲がり幹形状について検討した。曲がった幹形状の方が直線よりも小さな流木流量で閉塞が起り、ロジスティック解析からも、曲がりの程度が大きな弓型の方が、S字型よりも顕著に閉塞することを確認した。