

流木の流下条件が流木捕捉工に作用する荷重に 与える影響に関する検討

EXAMINATION OF INFLUENCE OF DRIFTWOOD FLOW CONDITION ON LOADS ACTING ON HANGOVER-TYPE DRIFTWOOD CATCHMENT

渡邊 大貴¹・堀口 俊行²・飯塚 幸司³

Daiki WATANABE, Toshiyuki HORIGUCHI and Koji IIZUKA

¹防衛大学校工学理工学研究科前期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 - 10 - 20)

E-mail: em60020@nda.ac.jp

²防衛大学校システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 - 10 - 20)

E-mail: htoshi@nda.ac.jp

³JFE 建材株式会社 (〒108-0075 東京都港区港南 1 - 2 - 70)

Key Words: *hangover-type, driftwood catchment, closed Sabo dam, debris flow load*

1. 緒 言

近年, 異常気象に起因した台風や集中豪雨により, 土石流災害が頻発している. 最近の傾向として, 平成 29 年 7 月九州北部豪雨¹⁾のような被災事例を受け, 流木対策が求められている. 流木災害では, 例えば, 福岡県朝倉市の須川第一砂防堰堤で大量の流木の影響で天端が損傷した事例²⁾や令和 2 年 7 月豪雨での河川における流木の橋梁閉塞³⁾⁴⁾などがあり, 流木による被災事例が多く報告されている.

国土交通省は, 流木による被害を減少させるため, (1) 新設の砂防堰堤は, 流木等を全て捕捉するために, 透過構造を有する施設の設置を推進すること, (2) 既設不透過型砂防堰堤は, 流木捕捉効果を高めるための改良を行い, 特に多量の流木の流出が想定される流域では流木捕捉工を設置する等, 既設堰堤の有効活用を積極的に進める方針を示した.

そこで, 既設不透過型砂防堰堤に流木捕捉機能を付与する手法の一つに, 写真-1 に示すような既設不透過型砂防堰堤の水通し部に対して設置する張り出しタイプ流木捕捉工 (以下, 流木捕捉工とする.) が提案されている⁵⁾.

次に, 土石流を流下形態で区分すると図-1 のよう



写真-1 張り出しタイプ流木捕捉工

に整理できる⁶⁾. 土石流を構成する成分として, 水, 土砂そして木材があり, 混合状況によって流れ方が変わる. 図-1 の赤枠に着目すると, 堰堤に作用する荷重も大きく変化することが考えられる. さらに, 図-2 に示すように流木混じり土石流は, (1)砂や流木の濃度が低く, 個々の流砂粒子や流木が個別に運搬されている形態 (各個運搬) や(2)流砂や流木が流れの中に高濃度に含まれ, 一つの流体のように流れる形態 (集合運搬), (3)複雑に絡み合った大量の流木が土石流先頭部に集中している形態 (Hypercongested flow⁶⁾もしくは高密度集合運搬) に区分され, 流下形態によって作用荷重が大きく変化することが考えられる. 現行設計の荷重評価を見ると, 図-3 に示すように土石流区間および掃流区間において流木捕捉工を付与した条件での砂防堰堤の設計外力が示されて

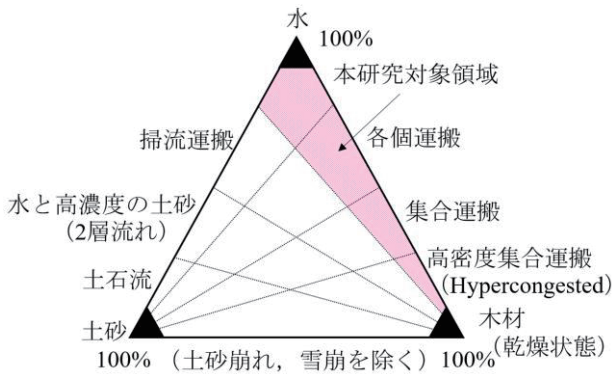


図-1 土石流の流下形態⁶⁾

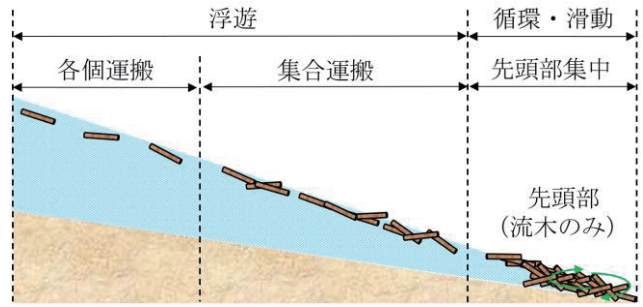


図-2 流木混じり土石流の流下形態⁶⁾

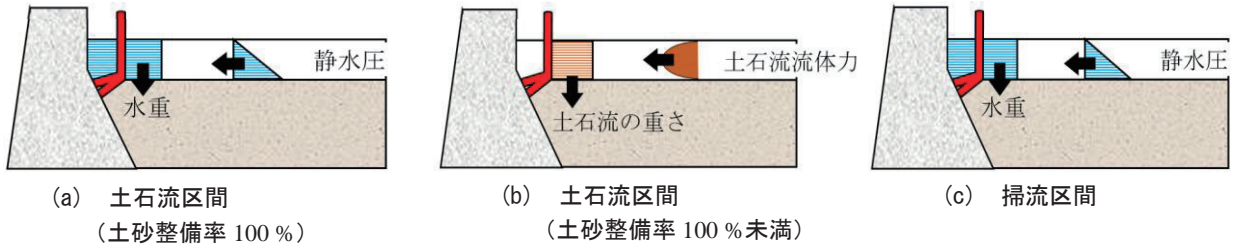


図-3 流木捕捉工を付与した不透過型砂防堰堤の設計外力 (満砂型)

いる⁹⁾。流下形態の言及はなく、文献⁷⁾に基づく設計指針から作用荷重を決めており、不透過部と透過部において同時に作用した時の詳細な荷重評価は検討されていない。そのため、流下形態が荷重に及ぼす影響について検討する必要がある。

そこで本研究は、水路実験によって流木捕捉工に作用する荷重を計測して、各々の流下形態が流木捕捉工に作用する荷重に及ぼす影響について検討するものである。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

図-4 に、実験水路を示す。水路の諸元は、水路長約 4.4 m、水路幅 0.3 m、深さ 0.5 m、水路底面の粗度係数 $n_b = 0.012$ ⁸⁾ であり、水路勾配 ($\theta = 0 \sim 20^\circ$) は任意に設定できる。本実験では、土石流区間のうち堆積区間から流下区間を想定した勾配 ($\theta = 5 \sim 15^\circ$) に設定した。

(2) 初期堆積礫モデル

写真-2 に示す初期堆積礫モデルは、粒径 $d = 5 \sim 15$ mm のものを堰堤の満砂状態を再現するため、初期堆積礫として使用した。写真-3 に、初期堆積礫の設置状況を示す。初期堆積設置区間は自然河道を模すため、粗度係数 $n_b = 0.1$ とした。実際に流木捕捉工を施工する場合、流木捕捉工の設置後に初期堆積礫を水平に敷きならすことを踏まえ、堰堤に作用する水平方向荷重に着目するため、計画堆砂勾配 $\theta_p =$

0° として、初期堆積礫を堰堤の前面部に設置した。これは、満砂時における流木捕捉工の設置要領⁵⁾に従っている。また、流木捕捉工は、直接的な礫の衝突は生じしないものとした。ここで、満砂状態とは、初期堆積礫が不透過部の堰堤高に到達したときを示している。初期堆積礫は、密詰めにして不透過部に作用する堆砂礫圧が各実験ケースに対して一定となることを確認してから実験を開始している。

(3) 流木混じり土石流モデル

本実験では、水と木材によって構成される流木混じり土石流を扱う。使用する流木モデルは、既往の研究^{9),10)}に基づき、直径 $\phi = 6$ mm、流木長 $l = 120$ mm、比重 0.90 (湿潤時) の円柱形木材を使用した。実験は、フルード相似則において $1/40$ とした。これは、長さ 4~6 m、直径 0.2~0.3 m の流木を想定している¹¹⁾。流下要領は、各個運搬を模すために流水に対して投入速度 2 本/s、集合運搬を模すために流水に対して投入速度 10 本/s および一挙投入として、給水条件は、堰堤モデルに流木が衝突した際に荷重計測が可能であった流量 $Q = 16.0$ L/s とした。初期堆積礫モデル上における流速は、勾配 $\theta = 5 \sim 15^\circ$ でそれぞれ 0.4 m/s、0.6 m/s および 0.7 m/s である。高密度集合運搬を模すために無作為に設置した流木の後方で溜めた水 20 L を一挙に流下させるダムブレイク方式とした。各勾配における流速はそれぞれ 1.2 m/s、2.3 m/s および 2.6 m/s である。なお、これらの流下方法では、流木や礫が越流しないこと、流下後の流木には塑性変形が生じていないことを確認している。

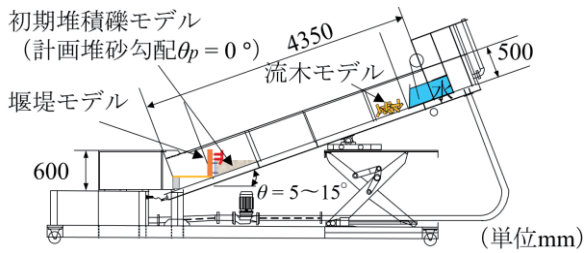


図-4 実験水路

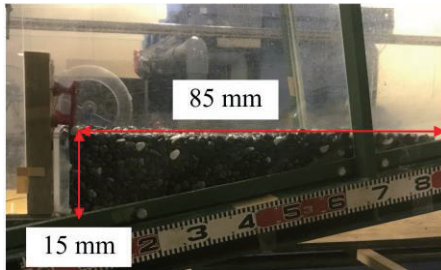


写真-3 初期堆積礫設置条件 (満砂時)

表-1 実験ケース

勾配 θ (°)	流下条件	水の条件	流木本数 n (本)
5 10 15	2本/s	$Q = 16.0 \text{ L/s}$	100
	10本/s		300
	一挙投入		500
	ダムブレイク	20 L	

(4) 堰堤モデル

図-5 に、堰堤モデルと荷重計測要領を示す。図-5(a)に示す堰堤モデルは、流木捕捉工と不透過部から構成され、流木捕捉工高は110 mm、不透過部高は150 mmである。このモデルでは、流木捕捉工の側方からの流木の回り込みを考慮せず、水平方向の荷重のみを計測するため、実際の水通し部のみを再現している。流木捕捉工の純間隔 w および不透過部からの設置距離は、流木長の $1/2$ 以下かつ最大礫径の2倍以上としている⁹⁾。また、不透過部周りは初期堆積礫で覆われており、不透過部に対する大きな衝撃荷重は生起しないため、不透過部には厚さ10 mmの亚克力板を使用している。流木捕捉工は、複雑な形状の加工を容易にするため、PLAを材料として3Dプリンタで作成した。なお、PLAの曲げ強さは 104 N/mm^2 であり、シャルピー衝撃強度は 23 kJ/m^2 、比重は1.24である。

(5) 実験ケース

表-1に、実験ケースを示す。勾配 $\theta = 5, 10, 15^\circ$ の3通りとして、各流下形態における流木本数は、 $n = 100, 300, 500$ の3種類に変化させ、合計36ケースについて、5回ずつ計測した。なお、流木本数 n は、水20 Lに対する流木容積率 $K_w = 10\%$ ^{12),13)}に相当する流木本数 $n = 500$ を最大値としている。また、

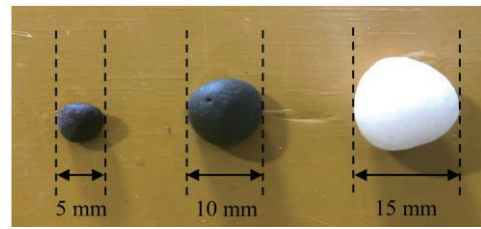
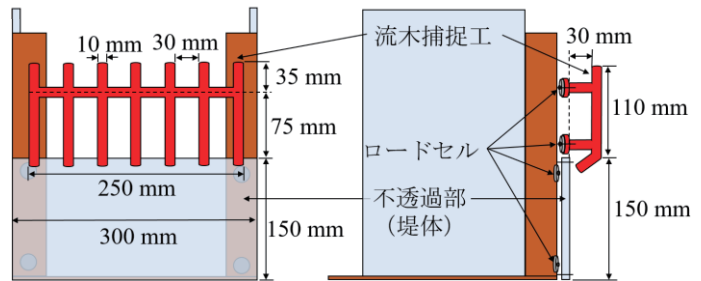


写真-2 礫モデル



(a) 堰堤モデル

(b) 荷重計測要領

図-5 堰堤モデルと荷重計測要領

流木本数 $n = 1000$ 以上とすると流量が足りず流木が流下しないので本研究では対象としなかった。

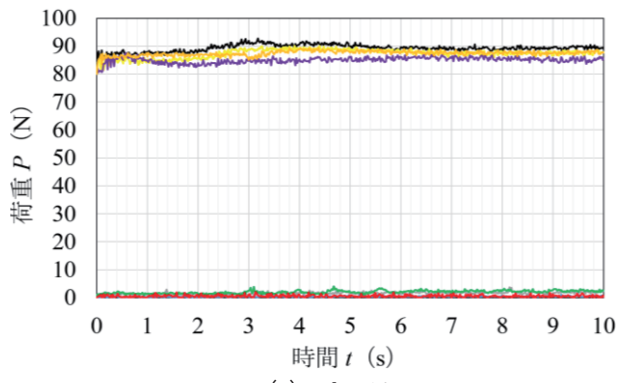
3. 実験結果

(1) 流下形態が荷重に及ぼす影響

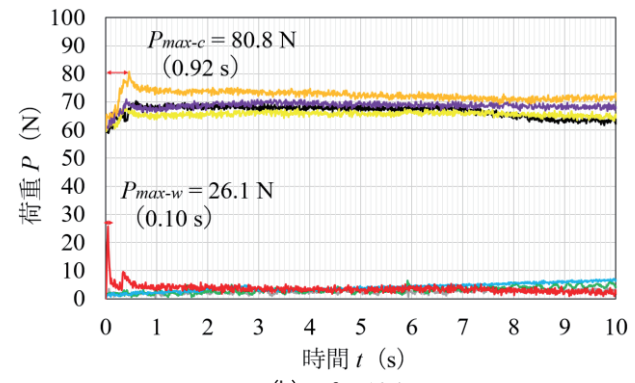
図-6(a)~(c)に、流木本数 $n = 500$ 、各流下形態の荷重~時間関係を勾配ごとに示す。なお、ここでは、各ケースの代表値を示しており、各ケースにおいて流木捕捉工に流木が衝突する直前の時刻を $t = t_0 \text{ s}$ としている。また、図-6(d)は、凡例と各勾配で流木捕捉工および不透過部に生じた最大荷重 P_{max-w} 、 P_{max-c} と最大荷重に至るまでに要した時間である。写真-4に、勾配 $\theta = 10^\circ$ 、流木本数 $n = 500$ のときの各流下形態における捕捉過程を示す。図-6と同様に、流木が衝突する直前を $t = t_0 \text{ s}$ とした。最大荷重から、高密度集合運搬以外は静水圧荷重が流木捕捉工に作用すると評価しても十分に安全である。

a) 各個運搬

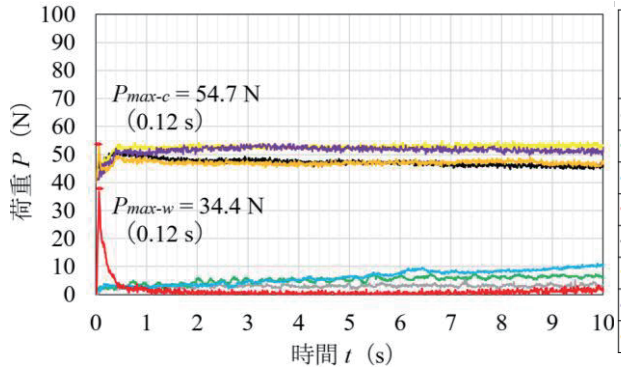
図-6に、各個運搬における流木捕捉工および不透過部に作用する荷重~時間関係を灰色(図-6(a), (b)では緑色と重なっている。)および黒色で示す。流木捕捉工には、衝撃的な荷重は生起していないことがわかる。しかし、時間とともに流木が捕捉されると静水圧分の荷重が大きくなり、次第に静的な荷重に収束する。また、勾配 θ が大きくなると流木の流下速度が増加して流木捕捉工に捕捉される流木本数が増加するため、 $t = t_0 + 10.0 \text{ s}$ のとき流木捕捉工に作用する荷重は勾配 $\theta = 15^\circ$ で最大になる。不透過部周りは、初期堆積礫によって覆われているため、全ての勾配において衝撃的な荷重は作用していない。しか



(a) $\theta = 5^\circ$



(b) $\theta = 10^\circ$



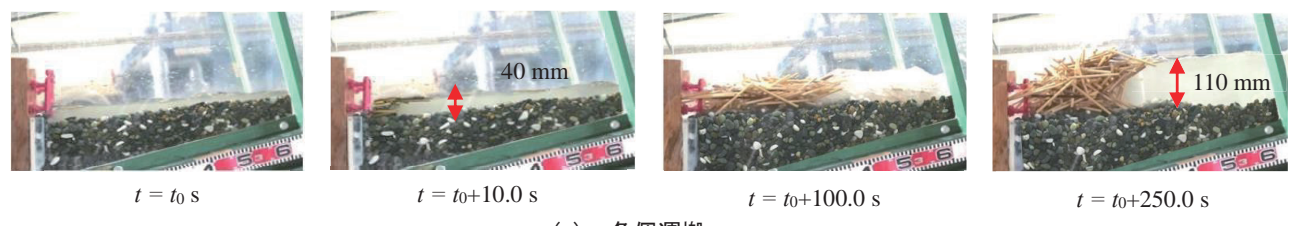
(c) $\theta = 15^\circ$

凡例	堰堤	流下要領	最大荷重			時間 (s)		
			P_{max-w}	P_{max-c}	(N)	5°	10°	15°
—	捕捉工	2本/s	9.7	9.4	10.2	119.50	94.10	81.02
—	捕捉工	10本/s	10.4	10.6	11.2	51.00	22.32	17.12
—	捕捉工	一挙投入	10.6	11.5	11.1	33.32	12.36	9.90
—	捕捉工	ダムブレイク	×	26.1	34.4	×	0.10	0.12
—	不透過	2本/s	92.8	70.3	51.5	3.180	2.09	1.36
—	不透過	10本/s	90.2	69.8	55.6	3.22	1.84	1.53
—	不透過	一挙投入	91.5	70.9	53.9	3.58	1.98	1.83
—	不透過	ダムブレイク	×	80.8	54.7	×	0.92	0.12

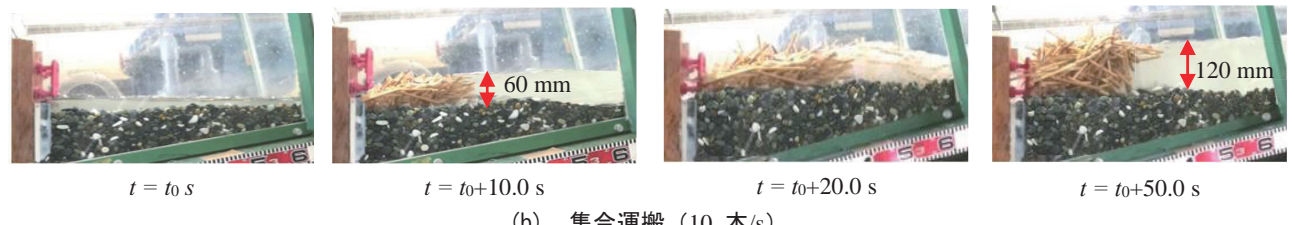
※ ×は流木捕捉工に流木が衝突していないケース

(d) 凡例と各勾配の最大荷重 P_{max-w} , P_{max-c}

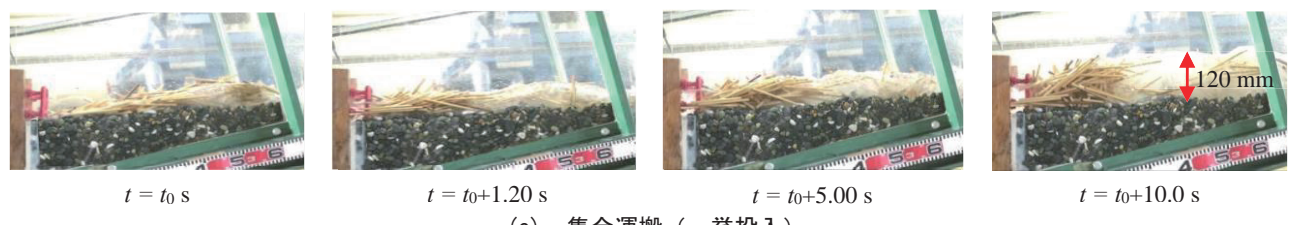
図-6 各流下形態における荷重～時間関係



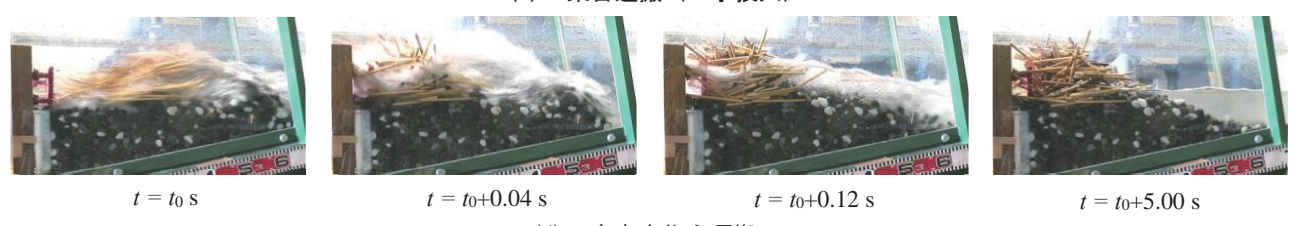
(a) 各個運搬



(b) 集合運搬 (10 本/s)



(c) 集合運搬 (一挙投入)



(d) 高密度集合運搬

写真-4 各流下形態における捕捉過程

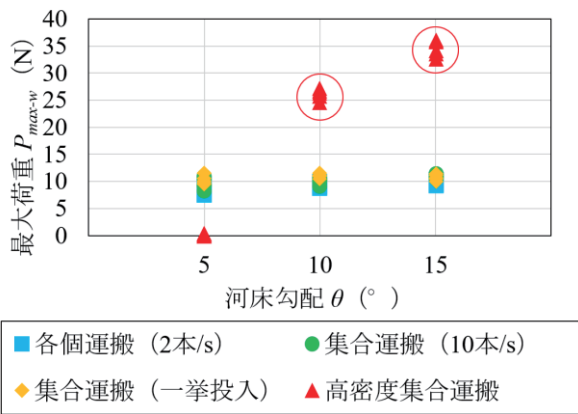


図-7 最大荷重～勾配関係 ($n = 500$)

し、初期堆積礫への水の浸透により、荷重が平均 12.0 N 上昇している。写真-4(a)は、勾配 $\theta = 10^\circ$ 、各個運搬における流木の捕捉過程である。当初、流下方向に対して水平に流下している流木は、流木捕捉工をわずかに通過するが、多くの流木は流下方向に対して傾きを有するため捕捉される。さらに、流木捕捉工が閉塞され、後続の流木が捕捉され易くなる。 $n = 200$ を超えると、ほぼ流木が捕捉され、上流側に水が溜まることで静水圧が作用しており、図-3(a)の設計荷重の考え方を満たす。

b) 集合運搬

図-6 に、集合運搬（投入速度 10 本/s および一挙投入）において流木捕捉工に作用する荷重～時間関係を緑色および青色、不透過部に作用する荷重～時間関係を黄色および紫色で示す。不透過部で初期堆積礫への水の浸透後に上昇する荷重は平均 11.2 N であり、衝撃的な荷重は生起していない。各個運搬（投入速度 2 本/s）のケースと同じく設計荷重に近い。投入速度 10 本/s と一挙投入の荷重を比較すると、一挙投入の方が透過部である流木捕捉工が閉塞され易いため、 $t = t_0 + 10.0$ s より大きな静水圧が作用している。しかし、図-6(d)を見ると、 P_{max-w} に至るまでに要する時間は一挙投入の方が速いが、 P_{max-w} は概ね同等の静水圧が作用している。写真-4(b), (c)は、勾配 $\theta = 10^\circ$ 、投入速度 10 本/s および一挙投入における流木の捕捉過程であるが、流木が捕捉され易く、流木捕捉工が閉塞するまでに要する時間が短いことがわかる。

c) 高密度集合運搬

図-6 に、高密度集合運搬における流木捕捉工および不透過部に作用する荷重～時間関係を赤色、橙色で示す。勾配 $\theta = 10^\circ$ 、 15° では、流木捕捉工には衝撃的な荷重が生起しており、 P_{max-w} はそれぞれ 26.1 N、34.4 N であった。一方、勾配 $\theta = 5^\circ$ では、流木は流木捕捉工に衝突することなく初期堆積礫の上で停

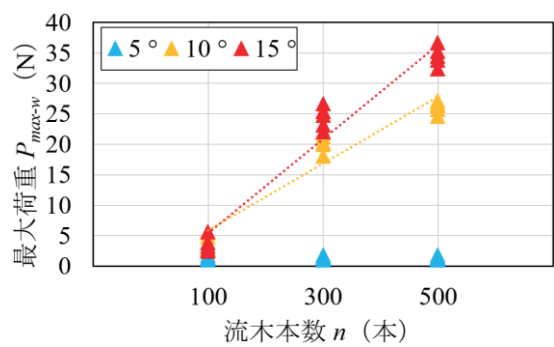


図-8 最大荷重～流木本数関係（高密度集合運搬）

止した。これは、初期堆積礫による摩擦が原因の一つであり、先行停止礫による低減作用¹⁴⁾と同じメカニズムと考えられる。不透過部は、勾配 $\theta = 10^\circ$ のとき、土石流が初期堆積礫到達後に荷重が 20.8 N 上昇しており、他のケースよりも大きくなった。勾配 $\theta = 10^\circ$ 、 15° のとき、 P_{max-c} に至るまでに要する時間は、それぞれ 0.92 s、0.12 s であり、衝撃的な荷重が作用している。実験映像では、初期堆積礫によって覆われている不透過部に対して流木混じり土石流が衝突している様子は確認できないため、流木混じり土石流が通過して上載荷重となったことが原因の一つと考えられる。しかし、急速に流下する時の上載荷重に関する研究は行われていないため、礫と水の相互作用を検討する必要である。

また、土石流流下区間に相当する勾配 $\theta = 10^\circ$ 、 15° では、流木捕捉工には動的な荷重が生起している。写真-4(d)に、勾配 $\theta = 10^\circ$ 、高密度集合運搬における流木の捕捉過程を示す。初期堆積礫の上を通過して流木捕捉工に衝突している。上流側が初期堆積礫によって満たされ、勾配がない状態もしくは満砂状態においても土石流先頭部に流木が密集して流下してくる場合は、流木捕捉工に対して大きな荷重を生起させる。このことから、流下形態によっては衝撃荷重の条件を加味して設計をする必要がある。

(2) 勾配が荷重に及ぼす影響

図-7 に、流木本数 $n = 500$ において流木捕捉工に作用する最大荷重～勾配関係を示す。各勾配において、高密度集合運搬以外の流下形態では衝撃的な荷重は生起しておらず、流下形態による荷重の違いについても微小である。しかし、勾配に応じて流木の流下速度も増加するため、全ての流下形態で勾配 θ が増大すると P_{max-w} も大きくなっている。特に、土石流流下区間に相当する勾配 $\theta = 10^\circ$ 、 15° では、図中に赤枠で示すように流下形態が高密度集合運搬である場合、流木捕捉工に対して衝撃的な荷重が作用している。よって、最大衝撃荷重は勾配（流木の流

下速度)に応じて増加している。このことは、流木捕捉工を設置する河川が急勾配である場合、流木捕捉工に動的な衝撃荷重が生起する可能性を示唆するものである。

(3) 流木本数が荷重に及ぼす影響

図-8に、高密度集合運搬における最大荷重～流木本数関係を示す。流木本数が多くなると、 P_{max-w} も大きくなっている。礫混じりの土石流では、含まれる流木が多くなると構造物に作用する荷重は緩衝効果により低減する¹⁵⁾が、本研究で扱った流木と水によって構成される土石流では、流木本数に比例して荷重も大きくなる。このことより、流木のみ流下形態が高密度集合運搬の条件では、流木捕捉工に対して極めて大きな荷重が生起することが想定される。

4. 結論

本研究は、流木混じり土石流の流下形態が既設不透過型砂防堰堤に付与した流木捕捉工に作用する荷重に及ぼす影響について実験的に検討したものである。その成果を以下のように示す。

- 1) 流木の流下形態に区分して、流木捕捉工に対する作用荷重の計測実験を提案した。
- 2) 設計荷重として流木混じり土石流の流下形態が各個運搬や集合運搬において現行設計の考え方で十分であることを示した。一方で、土石流先頭部に流木が集中する高密度集合運搬では、既存の構造物に付設された流木捕捉工に対して衝撃的な荷重を生起させることを示した。
- 3) 高密度集合運搬で流下してくる流木混じり土石流では、流木捕捉工に作用する荷重は流下してくる流木量と勾配に比例する。
- 4) 土石流流下区間に設置された場合、満砂状態である不透過部にも静的な礫圧荷重に加えて衝撃的な荷重がわずかに作用することが分かった。

最後に、設計に反映するため、今後は流木混じり土石流を構成する成分に礫や土砂を加えて検討する。また、流木モデルが複雑な形状や根付き等である場合、流木モデル同士が複雑に絡み合うことで透水性が低下し、より大きな荷重が作用すると考えられるため、作用側の条件を変化させた荷重評価を検討していく。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成29年7月九州北部豪雨による土砂災害の概要，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/h29_

- 2) kyushu_gouu/gaiyou.pdf (閲覧日：2021年7月30日)
- 2) 赤澤史顕，武澤永純，石井靖雄：2017年7月九州北部豪雨における須川第一砂防堰堤の袖部を破壊させた原因の一考察，砂防学会誌，Vol.72，No.5，pp.15-26，2020。
- 3) 石川芳治：最近の流木災害の特徴と対策，第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.61-66，2018
- 4) 内山庄一郎，檀上徹：令和2年7月豪雨による熊本県人吉市および球磨村渡地区の洪水災害の特徴－2020年7月9日調査速報 第1版－，防災科学技術研究所調査速報，https://www.bosai.go.jp/info/saigai/2020/pdf/20200715_00.pdf(閲覧日：2022年5月25日)
- 5) 一般財団法人砂防・地すべりセンター：張り出しタイプ流木捕捉工設計の手引き，2020。
- 6) Ruiz-Villanueva V., Bürkli, L., Mazzorana B., Mao L., Ravazzolo FD., Iribarren P., Wohl E., Nakamura F, Stoffel M. : Defining and characterizing wood-laden flows in rivers using home videos, E3S Web of Conferences 40, pp.1-5, 2018.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策技術指針解説，国土技術政策総合研究所資料，第905号，2016。
- 8) 国土交通省中部地方整備局：砂防設計要領，2020。
- 9) 浅田寛喜，皆川朋子，小山彰彦，一柳英隆：平成29年7月九州北部豪雨による斜面における表層崩壊の要因分析，応用生態工学，23(1)，pp.185-196，2020
- 10) 山崎亨史：木材と水の関係，<http://www.fpri.hro.or.jp/dayori/index.htm> (閲覧日：2022年7月5日)
- 11) 渋谷一，香月智，大隅久，國領ひろし：平成22年7月16日に広島県庄原市で発生した豪雨災害における流木実態調査，砂防学会誌，Vol.64，No.1，pp.34-39，2011。
- 12) 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。
- 13) 山田孝，土井康弘，南哲行，天田高白：不透過型砂防ダムの持つ流木捕捉能力，Vol.52，No.3，pp.18-23，1999。
- 14) 小松喜治，堀口俊行，香月智，石川信隆，水山高久：鋼製透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流荷重に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.64A，pp.779-788，2018。
- 15) 渋谷一，香月智，國領ひろし，大隅久，石川信隆：透過型砂防堰堤に作用する流木混じり土石流荷重に関する実験，砂防学会誌，Vol.65，No.1，pp.54-61，2012。(2022.5.30 受付)