

土石流に含まれる流木塊の有無が砂防堰堤に 作用する外力に与える影響に着目した実験的検討

Experimental Study Focusing on the Effect of the Presence or Absence of
Woody Debris Masses in a Debris Flow on the External Force Acting on Non-permeable Check Dam

正木 宏幸¹⁾, 畠 俊郎²⁾

1) Hiroyuki MASAKI, 修士課程, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, m240910@hiroshima-u.ac.jp

2) Toshiro HATA, 教授, 広島大学大学院先進理工系科学研究科, thata@hiroshima-u.ac.jp

近年土砂災害が頻発しており, 防災対策として既存の砂防堰堤の有効性を検討する必要がある。既往研究では, 土石流に流木が混じることで最大衝突荷重の減少が期待できることが報告されている。一方本実験では, 流木を含むことで単位時間あたりに衝突する土石流の体積が増加した。そのため砂防堰堤に作用する衝突荷重の減少要因は, 土石流の単位体積あたりの重量低下であると考えられる。今後, 土砂・流木濃度を計測する実験などによりこの単位体積重量の低下の検証を行うことで, 流木塊を含む土石流に対して既存の砂防堰堤が十分な耐力を発揮する可能性を示したい。

キーワード: 土石流, 流木塊, 流量フラックス

(IGC : D-04, G-14)

1. はじめに

近年, 記録的な集中豪雨の頻発などにより土砂災害の発生件数が増加傾向にある。国土交通省¹⁾によると, 2012年～2021年の期間では, 年平均で約1,450件の土砂災害が発生しており, 2002年～2011年の期間の年平均より土砂災害発生件数は約1.3倍であった。このような背景から, 土石流危険溪流に対して防災施設の整備数は増加傾向にある。一方で, 2018年には土砂災害の発生件数は3,459件にも及び, 死者・行方不明者は161名であり過去最多となった²⁾。そのため, 土石流対策としての社会基盤インフラ整備は進められているものの現状の発災数の増加に整備率が追いついていないので, 今後も継続的に防災対策を講じる必要がある。

防災対策にはハード対策とソフト対策があるが, 本研究では危険な箇所直接的に対策を行うハード対策に着目する。ハード対策の一種である砂防堰堤の建設は1950年代頃から始まっているため多くの砂防堰堤は建設後数十年を経過している。さらに気候変動に伴う災害規模の大型化により設計当初とは異なる外力を受ける可能性が危惧されている。砂防堰堤は, 不透過型砂防堰堤と透過型砂防堰堤の二種類あるが, これまで多く建設されてきた不透過型砂防堰堤(写真-1)³⁾に着目する。なお, 不透過型砂防堰堤は, 土砂を堆積させる機能だけでなく満砂後には勾配が緩やかになるため, 土石流の流下速度も低下させる機能も有している⁴⁾。

ここからは本研究で流木に着目する理由について述べる。日本は国土の約70%が山地に覆われており, 土石

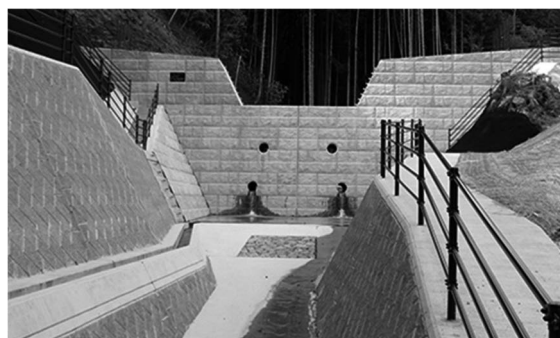


写真-1 不透過型砂防堰堤³⁾

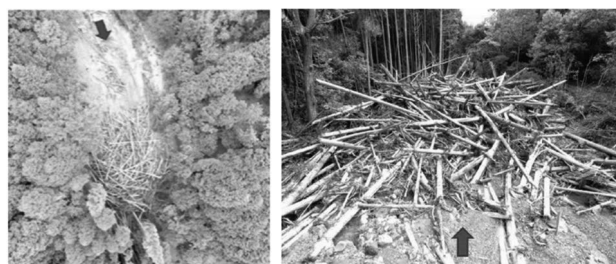


写真-2 流木塊の様子⁶⁾

流が発生する山地では多くは木が生い茂っている。そのため, 土石流災害において流木を含む事例が多く報告されている。2017年7月に九州北部で発生した豪雨災害では, 多量の流木流出に伴って, 橋脚に流木が詰まるなどして氾濫が発生し, 家屋や河川構造物に甚大な被害が報告された。この災害では, 流木や土砂などの流出物が河川に過剰に堆積することにより川がせき止められて氾濫

が起き被害が広がった⁵⁾。こうした経緯から、流木混じりの土石流に関する関心が高まっている。流木混じりの土石流では、土砂よりも密度の軽い流木が土石流先頭部に集積し流木同士が絡まり**写真-2**に示すような流木塊を形成することが知られている⁶⁾。実際に、2020年7月に熊本県で発災した現場で調査を行い、土石流全体の流木のうち約9割が先頭部に集積していることが報告されている。さらに土石流先頭部に形成された流木塊の内部には土砂が一樣に広がっておらず、土砂の堆積区間が流木塊の後続側に限定されていることが示された。

流木塊の発達メカニズムに関して、立石⁷⁾らは、土石流の下層部では、後退する流体の流れがあるが、上層部では先端に向かう循環流が存在しており、土粒子よりも軽い流木は上層の水流と共に先端部に達するが流体の流れにより沈み込む。その後水路底面に達し、摩擦によって後続へと流れだし後続へと進む流木は、上層の先端へ流れる流木とお互いに干渉し、絡まりあうことで流木塊が形成されると考察している。

このようにして形成された流木塊が、砂防堰堤に衝突し堆積する状況を想定すると、土石流と砂防堰堤の間に流木塊が存在するため、砂防堰堤に作用する荷重に対して流木塊が緩衝する効果をもたらす可能性が期待される。

そこで、本研究は土石流に流木塊が含まれるか否かで砂防堰堤に作用する外力に与える影響に関して水路実験で検証を行い、既存の砂防堰堤の耐久性を再評価することを目指す。なお本投稿では、土石流に流木が含まれることで砂防堰堤に作用する土石流の荷重が減少する要因について考察する。

2. 流木が土石流の荷重に与える影響

流木を含む土石流が透過型砂防堰堤に作用する荷重に着目した既往研究⁸⁾では、1/50スケールでの検証実験を行い、実物荷重に対する検討は行わず実験から得られる結果を相対比較している。この研究では土石流に含まれる流木の量を変化させて、流木量による影響について検討している。その結果土石流に含まれる流木量を増加すると土砂に比べて疎に集積した流木により、最大衝突荷重は減少することが明らかとなった。本研究と既往研究⁸⁾との実験条件の比較を表-1に示す。主な違いは流下距離であり、既往研究の流下距離が3.5mであるのに対して本研究では約3倍の11mが流下距離となる。流下距離が長いことで、土石流の流下過程において流木が先頭部に集積し、十分に平衡状態に達して土石流フロントを有することを期待する。

既発表の研究⁹⁾では、本研究と同様の実験条件で行っており、給水流量と砂防堰堤に作用する最大衝突荷重の関係に着目した結果について報告している。なお、最大衝突荷重(図-1)とは土石流先頭部が衝突した時の荷重の最大値である。実験条件は土砂のみの土石流と流木混

表-1 既往研究⁸⁾との実験水路諸元の比較

| | 既往研究 ⁸⁾ | 本研究 |
|----------|--------------------|-----|
| 流下距離 (m) | 3.5 | 11 |
| 流下幅 (m) | 0.3 | 0.1 |
| 勾配 (°) | 15 | 18 |

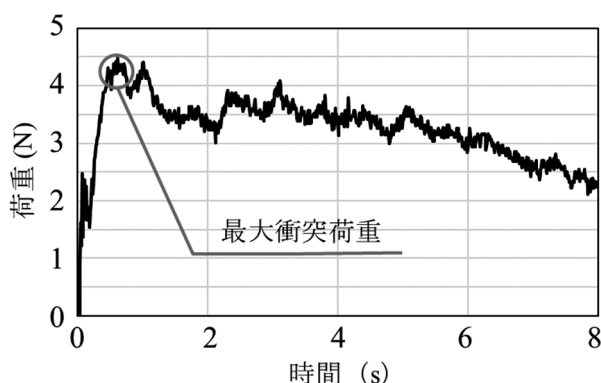


図-1 最大衝突荷重の計測例

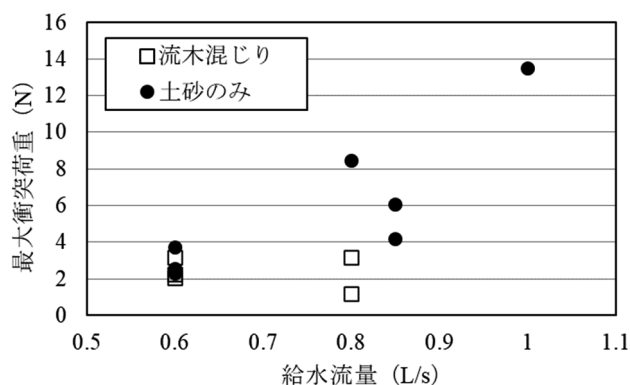


図-2 給水流量-最大衝突荷重の関係⁹⁾

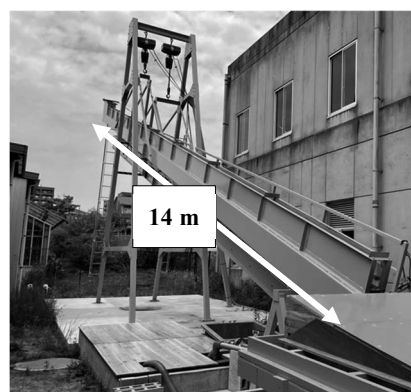


写真-3 水路の全体写真

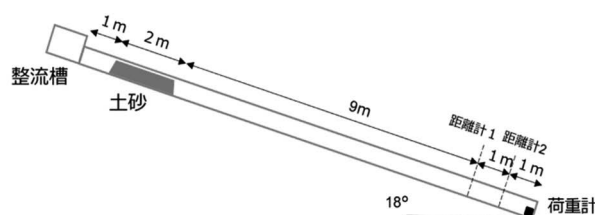


図-3 水路の概略図

じりの土石流（流木塊形成後）の2つとし、結果を図-2に示す。土砂のみの土石流では給水流量の増加に伴い、最大衝突荷重は増加傾向にある一方で、土石流中に流木を含むことで最大衝突荷重の増加幅は小さくなる傾向が見て取れる。このことから給水流量が増加すると流木による緩衝効果が大きいことが示唆された。しかし、その緩衝効果の要因までは検討できていない。

そこで、流木塊による砂防堰堤に作用する土石流荷重の緩衝効果のメカニズムを解明するため、流速や最大衝突荷重の計測時の流動深、最大流量フラックスと給水流量との関係から考察を行い、流木による緩衝効果の要因を明らかにする。

3. 実験概要

実験は1/40縮尺として実施し、堰堤模型の大きさや粒径を定めた。なお、フルード相似則を適用した条件で実験を実施した。

3.1 実験装置の概要

本研究では、水路幅0.1m、高さ0.3mの写真-3、図-3に示す水路長が14mの直線矩形断面の可変勾配水路を用いて実施した。水路側面は、流下過程を観察するために片側ガラス面である。また、水路底面には平均粒径2.3mmの砂礫を張り付けることにより粗度をつけ、土石流が発達する過程を再現した。

また水路の下流端から1mと2mの位置にレーザー距離計2とレーザー距離計1を設置した。レーザー距離計では水路底面からの距離を計測し、流動深及び流速の算出を行った。その例を図-4に示す。土石流の到達時間は河床からの変位が0.1cm以上上昇した最初の時間とした。また、流速は土石流先頭部が水路出口の上流側を1m流下する時間の逆数を算出することで求めた。土石流の流動深は、二つのレーザー距離計の最大値を平均した値とした。なお、側面からカメラで撮影し流下する様子を撮影しレーザー距離計による計測データの妥当性を画像から検証することとした。

3.2 堰堤モデル

水路出口直後に写真-4のように不透過型砂防堰堤を模した荷重計（図-5）を設置し、11m流下してきた土石流の荷重の測定を行った。荷重計には3つのロードセルの上に幅10cm、高さ5cmの金属板をねじで固定した。実際のスケールでは幅4m、高さ2mの不透過型砂防堰堤であり、現実的に建設可能な規模である。測定を行うロードセルが1点であれば、金属板の回転によって金属板を固定するために使用しているねじが荷重を受け持つため、3点で計測し総和を荷重とし、金属板に作用する土石流の荷重を計測した。なお、ねじの締め具合により荷重の計測結果に大きな誤差が発生していたため、実

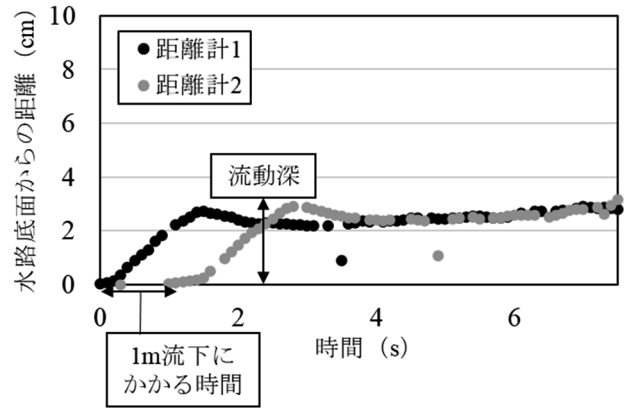


図-4 レーザー距離計の計測例

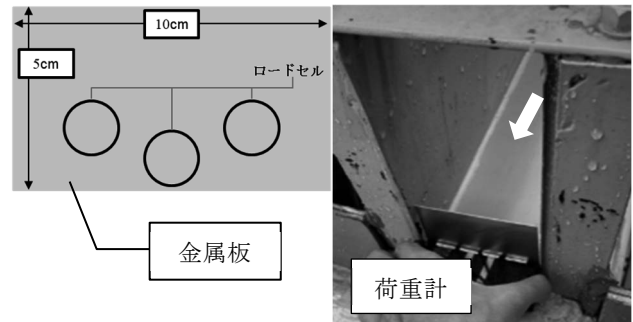
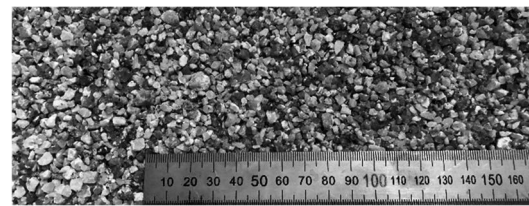
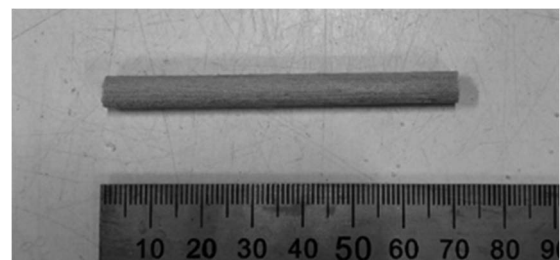


図-5 荷重計の概略図

写真-4 計測の様子



(a) 朝明砂



(b) 流木モデル (φ6×70 mm)

写真-5 土砂・流木モデル

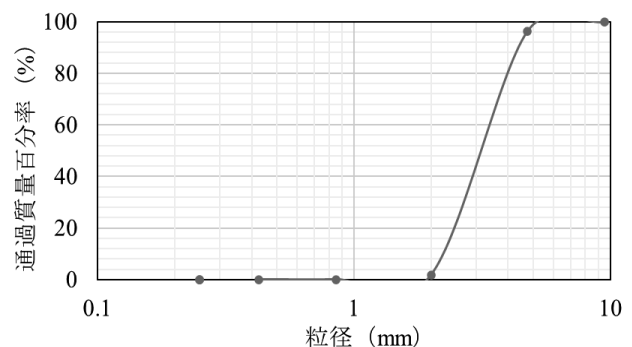


図-6 朝明砂の粒径加積曲線

験ケース毎に静的荷重試験を行い正しく計測できていることを確認した後に実験を行った。また、側面からカメラで撮影し土石流が荷重計に衝突する様子と計測した荷重の値から衝突状況の確認を行った。

3.3 土砂・流木モデル

実験で用いる土砂・流木を写真-5に示す。また、土砂の粒径加積曲線は図-6の通りであり、最大礫径 $d_{95} = 4.8$ mm、平均粒径 $d_{50} = 3.2$ mm である朝明砂を使用した。均等係数 $U_c = 1.5$ であるため粒径幅の狭い土砂といえる。土砂量は、約 14,000 cm^3 、約 25 kg とした。なお流木は直径 6 mm、流木長 70 mm、湿潤時の比重 1.15 の円柱型の丸棒を使用し、根や枝は再現をしていない。実スケールでは直径 24 cm、流木長 280 cm である。

石川ら¹⁰⁾は、発生流木の幹材積の上限値と生産土砂量には 2 % の関係、式 (1) があることを示した。

$$v_g = 0.02 \times V_y \quad (1)$$

ここで、 v_g : 発生流木の幹材積 (m^3)、 V_y : 生産土砂量 (m^3) である。本研究で用いる流木の一本当たりの体積は 1.98 cm^3 である。また、土砂量は 約 14,000 cm^3 である。

そこで本研究は土砂の体積の約 2 % に当たる流木本数、140 本を用いることとする (表-2)。

3.4 実験条件

実験は水路勾配を 18° で固定し、下流から上流 11~13 m の位置に土砂を堆積させ、その上に流木の方向が一樣にならないように設置した。水路最上段部に設定されている整流槽から設定した流量で給水を行い、土砂を越流させて流下させる天然ダム決壊方式による流下方法を採用した。

実験は、土砂のみの土石流 (以下、土砂のみと表記する) と、土砂と流木を混合し流下する過程で流木塊を形成する土石流 (以下、流木混じりと表記する) の二つの条件でそれぞれ表-3、表-4 に示す供給流量を設定し 7 ケースずつ行った。異なる給水流量を設定し供給することで、土石流の流速や流動深が変化することを期待した。

なお、流木を含む土石流では写真-6 に示すように、土石流先頭部に様々な方向を向いた流木が複雑に絡まりあった流木塊が形成されていることを確認した。

4. 実験結果及び考察

まず始めに、荷重計で計測した土石流の荷重を測定した一例を前掲した図-1 を参考に述べる。約 0.5 秒時点で先行した水が衝突し約 2.5 N を計測しその直後流木を含む土石流が衝突するときに約 4.5 N の最大衝突荷重を計測した。また、土砂のみの土石流が流下する様子を写真-7 に示す。写真-6 と比較して流木を含んでいないので、

表-2 実験条件

| | 土砂のみ | 流木混じり |
|----------------------|----------|----------|
| 土砂 (cm^3) | 約 14,000 | 約 14,000 |
| 流木 (cm^3) | — | 約 280 |

表-3 実験ケース (土砂のみ)

| 給水流量 (L/s) | ケース数 |
|------------|------|
| 0.60 | 3 |
| 0.80 | 1 |
| 0.85 | 2 |
| 1.00 | 1 |

表-4 実験ケース (流木混じり)

| 給水流量 (L/s) | ケース数 |
|------------|------|
| 0.50 | 2 |
| 0.60 | 3 |
| 0.80 | 2 |



写真-6 流木混じりの土石流の流木塊形成時の状況

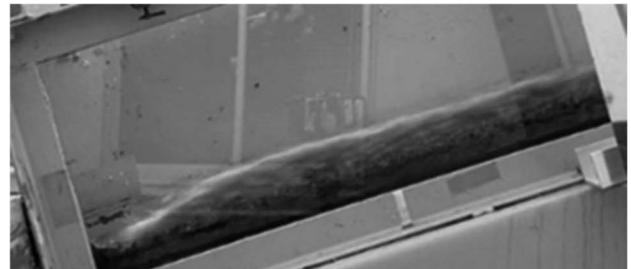


写真-7 土砂のみの土石流の流下過程

表-5 流速・流動深の計測結果 (土砂のみ)

| | 給水流量 (L/s) | 流速 (m/s) | 流動深 (cm) |
|---------|------------|----------|----------|
| Case1-1 | 0.60 | 0.75 | 3.26 |
| Case1-2 | 0.60 | 0.86 | 3.23 |
| Case1-3 | 0.60 | 0.83 | 2.78 |
| Case1-4 | 0.80 | 0.98 | 4.28 |
| Case1-5 | 0.85 | 0.91 | 3.62 |
| Case1-6 | 0.85 | 0.90 | 3.46 |
| Case1-7 | 1.00 | 1.15 | 3.76 |

表-6 流速・流動深の計測結果 (流木混じり)

| | 給水流量 (L/s) | 流速 (m/s) | 流動深 (cm) |
|---------|------------|----------|----------|
| Case2-1 | 0.50 | 0.90 | 2.82 |
| Case2-2 | 0.50 | 0.75 | 4.44 |
| Case2-3 | 0.60 | 0.77 | 3.82 |
| Case2-4 | 0.60 | 0.74 | 4.43 |
| Case2-5 | 0.60 | 0.83 | 3.61 |
| Case2-6 | 0.80 | 0.98 | 4.02 |
| Case2-7 | 0.80 | 1.30 | 4.28 |

土石流先頭部が滑らかな曲線である。

流速は一次元であるため、給水流量と流速の関係だけでなく、衝突時の断面も考慮した三次元である最大流量フラックスと給水流量の比較を行う。ここで、最大流量フラックスとは最大衝突荷重を計測したときの単位時間あたりに通過する体積のことである。つまり、最大流量フラックスが大きければ、より多くの流量が荷重計に衝突していることを示しており、土石流の最大流量フラックス Qf は次式で表される。

$$Qf = 1,000 \times B \times h \times v \quad (2)$$

ここで、 Qf : 最大流量フラックス (L/s)、 B : 土石流の幅 (m)、 h : 土石流の流動深 (m)、 v : 土石流の流速 (m/s) である。土石流の幅は水路の幅 (0.1 m) と同様とし、流動深と流速はレーザー距離計で測定を行った。

実験ケースごとの流動深及び流速から、表-5、表-6を得た。表-6の Case2-1の流速は 0.90 m/s であり、Case2-3～5の給水流量が大きいケースに比べて流速が大きい結果となった。これは、他のケースに比べて流木の集積が緩やかであったため、流速が低下せず土石流が流下したと考えられる。

これらの計算結果を図-7に示す。給水流量が 0.6 L/s の時、最大流量フラックスを比較すると土砂のみでは 2.31～2.78 L/s であるのに対し流木混じりでは 2.94～3.28 L/s であり、土石流中に流木が含まれることで最大流量フラックスは増加した。つまり、単位時間あたりに通過する流量が大きいということである。また、給水流量が 0.8 L/s の時では土砂のみは 4.19 L/s であるのに対して流木混じりでは 3.94～5.56 L/s であった。流量が増加しても流木を含むことで最大流量フラックスは大きくなるのが分かった。以上より、流木混じりでは土砂のみと比べて最大流量フラックスが増加する傾向にあることが分かった。つまり、流木を含むことで単位時間あたりに通過する体積は増加するということである。

図-8に給水流量と流動深の関係を示す。土砂のみの場合では給水流量が 0.6 L/s の時ではすべてのケースで流木混じりの場合の流動深を下回っている。一方、給水流量が 0.8 L/s では、土砂のみの場合は 4.28 cm であるのに対し流木混じりの土石流の場合では 4.15 cm と僅かに小さい値を示した。しかし、この差が小さいことやデータ数も限られていることから、今後 0.8 L/s 以上の条件での流木混じり土石流の流動深の計測が必要であると考えられる。

図-9に流速と流動深の関係を示す。流速が 0.7 m/s～0.86 m/s の範囲においては土砂のみの場合と比較すると流木混じりの場合ではより大きな流動深を計測した。一方で流速が 0.86 m/s より大きい条件では流木の回転が抑制されたことに起因して流動深の増加が見られない結果となったことが考えられるが詳細についてはハイスピードカメラ撮影画像等を通じて今後検討を進め、流木混じ

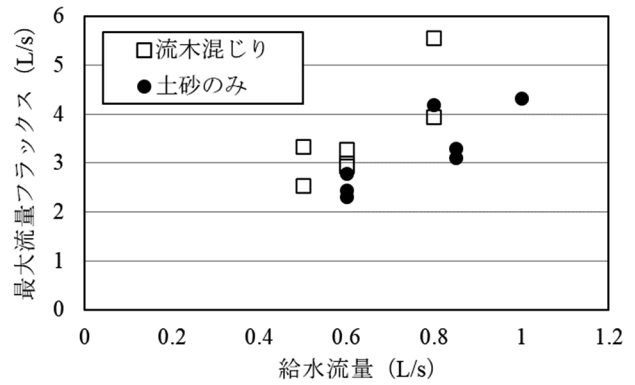


図-7 給水流量-最大流量フラックスの関係

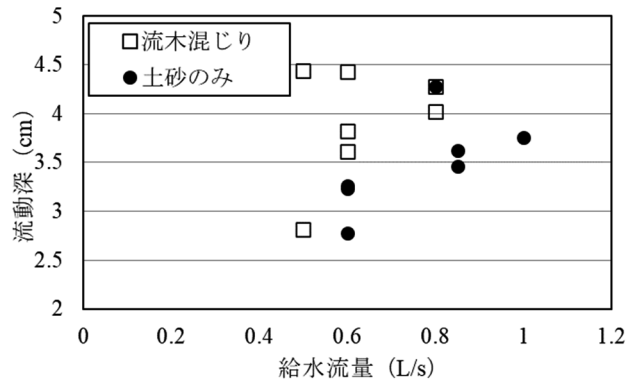


図-8 給水流量-流動深の関係

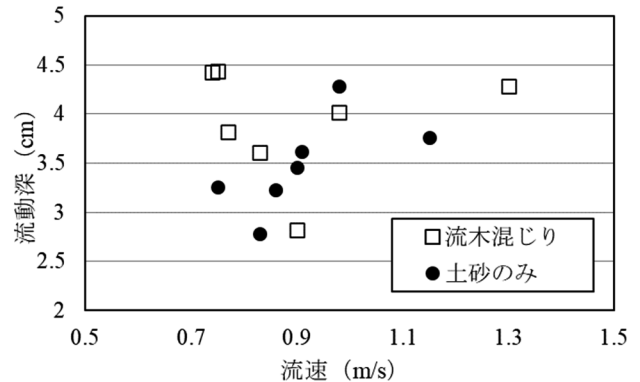


図-9 流速-流動深の関係

りの土石流の流下特性を明らかにしていくことを考えている。

以上のことから、土砂のみよりも流木混じりの土石流の方が通過する流量は多い一方で、既往研究⁹⁾の図-2に示されるように、流木を含むことで、最大衝突荷重は減少している。つまり、流木混じりの土石流では給水流量が増加しても荷重が低下しているため土石流の密度、土石流の単位体積重量が低下していることが考えられる。以上のことから、流木塊を含む土石流に対して砂防堰堤に作用する荷重の低減効果は、先行してぶつかる流体の重量が低下していることが起因していることが示唆された。

5. 結論

流木塊を形成後の土石流では、既存の不透過型砂防堰堤に作用する土石流荷重を低減する効果が期待されているが、その要因は分かっていない。そこで 給水流量と流動深、流速、最大流量フラックスとの関係を考察し流木塊の影響を検討した。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本実験水路は土石流の流下距離が 11 m と比較的長い
ため、土石流が平衡状態に達した状態で実施することができた。
- (2) 土石流の流動深と幅、流速の積で算出する最大流量
フラックスと給水流量との関係から、流木混じりの
土石流では最大流量フラックスは増加することが分
かった。
- (3) 給水流量と流動深の関係から、給水流量が 0.8 L/s の
時、流木を含むことで土石流の流動深は大きくなる
ことが示唆された。
- (4) 流速と流動深の関係から、流木混じりでは流速が
0.76 m/s より小さい範囲において流動深が高くなる
傾向を確認できた。これは、土石流の先頭部に形成
された流木塊が要因であると考えられる。また、流
速が一定の閾値を超えると流木の回転が抑制される
ことで流動深が増加しない可能性が示唆された。
- (5) 流木混じりでは土砂のみの土石流に比べて、砂防堰
堤に作用する荷重は低下することが知られている。
その一方で、単位時間に流下する体積は増加するこ
とから、流木混じりでは土砂のみと比べて、土石流
の単位体積重量が低下していることが示唆された。

以上より、土石流中に流木を含むことで砂防堰堤に作用する土石流の荷重は減少する要因として、流量フラックスの増加であることから、土石流の単位体積当たりの重量が減少していることが考えられる。

その一方で、本研究では流木を含むことによる土石流の単位体積重量の減少を実験で確認できていないため、今後水路出口で数秒毎に土石流を採取する実験を行い、土砂濃度や流木濃度の時間推移を確かめる必要がある。

これらの実験を実施し、既存の砂防堰堤の有効利用を進めて土砂災害による被害を最小限に抑えることのできる社会に向けて、流木による砂防堰堤に作用する土石流の荷重の緩衝効果について研究を進めていく所存である。

謝辞

本研究の実施にあたり、広島大学大学院先進理工系科学研究科先進理工系科学専攻社会基盤環境工学プログラムの地盤工学研究室の学生に水路実験のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部：令和 3 年の土砂災害、
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshas_aigai.pdf. (2024/06/24 閲覧)。
- 2) 全国治水砂防協会：ホームページ、
<http://www.sabo.or.jp/index.htm> (2024/06/24 閲覧)。
- 3) ランデス株式会社：ホームページ「災害復旧・減災
防災特集」砂防堰堤、
<https://www.landes.co.jp/page/107>, (2024/06/24 閲覧)。
- 4) 国土交通省：砂防堰堤の働き、
https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/entei_hataraki.pdf. (2024/06/24 閲覧)
- 5) Nakanishi, R., Baba, A., Tsuyama, T., Ikemi, H. and Mitani, Y.: Examination of sediment dynamics based on the distribution of silica fluxes and flood sediments in the Otoishi River related to the Northern Kyushu heavy rain disaster, July 2017, *Geosciences*, 9(2), p.12, 2019.
- 6) 片山和紘, 金城伶奈, 山田孝: 土石流先頭部に集積する流木群の実態, *自然災害科学*, Vol.42.1, pp.43-51, 2023.
- 7) 立石龍平, 堀口俊行, 香月智: 回転円筒実験における流木混じり土石流の段波形成に関する実験的検討, *構造工学論文集*, Vol.A 61, pp.926-934, 2015.
- 8) 渋谷一, 香月智, 國領ひろし, 大隅久, 石川信隆: 透過型砂防えん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(1), pp.54-61, 2012.
- 9) 正木宏幸, 畠俊郎: 流木を含む土石流が砂防堰堤に作用する最大衝突荷重に与える影響, 第 76 回土木学会中国支部研究発表会, III-2, 2024.
- 10) 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, *砂防学会誌*, Vol.42.3, pp.4-10, 1989.

(2024 年 6 月 24 日 受付)