

# 流木捕捉工に作用する流木群の荷重 に関する実験的検討

A EXPERIMENTAL STUDY OF LARGE DRIFTWOOD GROUP LOAD ACTED ON  
DRIFTWOOD CATCHMENT

竜川太志<sup>1</sup>・堀口俊行<sup>2</sup>

Taishi TATSUKAWA and Toshiyuki HORIGUCHI

<sup>1</sup> 防衛大学校理工学研究科 (〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20)

E-mail: em63025@nda.ac.jp

<sup>2</sup> 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20)

E-mail: htoshi@nda.ac.jp

**Key Words:** driftwood catchment, driftwood group, large driftwood group, impact load

## 1. 緒言

近年の流木災害は、下流部まで到達することで橋梁の閉塞や人命被害が発生している。また、流木が海域へ流出することで、漁港や海岸施設への漂着という新たな問題も広がっている<sup>1)2)</sup>。さらに、被災地を見ると、10年前に比べて流木の被害は拡大傾向である。2010年以前の調査は、流木長が3~6m、直径20cm程度のもので多くあった<sup>3)</sup>。一方で、2021年の現地調査では、流木長10m程度、直径60cm程度の流木が多く報告されるようになった<sup>4)</sup>。このように昨今では、大きな流木の流出事例が報告されるようになってきた。また、流木群が流れてくることで、不透過型砂防堰堤の損傷を引き起こし、天端や袖部、前庭工に対しても損傷を与えている<sup>5)</sup>。今後、更なる流木の太木化や流木群が流下することが想定されており、砂防関係施設がこれまでに経験をしたことがない規模の被害になる恐れがある。

写真-1は、令和4年8月新潟県大雨災害での下土沢堰堤の被災状況である。そこでは、流木が堰堤を乗り越え、下流部まで流下することで、流域一帯にわたり被害を与えた。そのため、流木の発生量が増



写真-1 下土沢堰堤の流木の越流  
(2022年8月21日撮影)

加すると砂防関係施設への被害が拡大する懸念があり、流木の作用荷重について検討が必要である。例えば、砂防堰堤の現行設計で用いられる土石流流体力を代用すると、流木のみ作用荷重を評価するには過大評価になると想定される<sup>6)</sup>。さらに、流木群における作用力についての研究や流木群の実験における評価式の検討については見ない。

流木捕捉工の設計荷重は、掃流区間において静水圧のみで評価している。各個運搬による単体の流木による作用荷重を実験的に評価すると、作用荷重は明らかに静水圧よりは小さくなり、いずれは透過部を閉塞して満砂状態になると、静水圧と同じになる

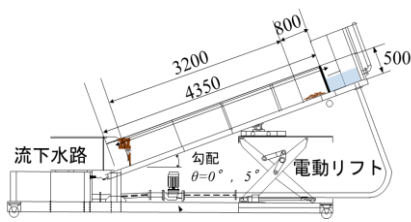


図-1 実験水路

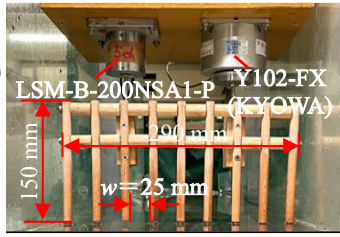


写真-2 流木捕捉工モデル

表-1 実験条件

項目	実物	模型
相似比	1	1/50
水路	勾配 $\theta$	$0^\circ, 5^\circ$
	長さ $L$	160 m
	流量 $Q_0$	883.9 L/s
捕捉工	間隔 $w$	1.25 m
	流木長 $l$	3, 6, 9 m
流木	直径 $\phi$	27.5 cm
	本数 $n$	100, 200, 300

とされている<sup>7)</sup>。しかし、流木群では大量の流木のみが高濃度に混ざりあった状態で堰堤に衝突し、水面よりも高い位置に流木が表れ、絡み合っ流れてくるので、荷重が瞬間的に大きくなるのが分かっている<sup>8)</sup>。そのため、流木が流れの先端部で集まっている状態での作用荷重について詳細な分析が必要である。

流木の衝突荷重の検討によると、松富<sup>9)</sup>や池野・田中<sup>10)</sup>らの流木の衝突荷重推定式や、流木単体を固体として捉えて接触理論<sup>11)</sup>を用いたものが見られる。また、有川<sup>12)</sup>は、流木の衝突荷重の推定式を用いて、津波の漂流物である流木を衝撃力として評価している。さらに、鋼管部材への衝突<sup>13)</sup>や柵型の堰堤における衝撃力の評価<sup>14)</sup>はあるが、いずれも流木単体であり、流木群での作用荷重については検討されていない。

そこで本研究は、流木群における流木捕捉工に作用する荷重について実験的に検討するものである。その際、流木本数、流下勾配ならびに流木の捕捉高が最大衝突荷重に与える影響について整理する。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験装置

図-1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、流木捕捉工の設置において流木のみが流下してくる区間を想定し、文献<sup>15)</sup>から勾配  $\theta=0^\circ, 5^\circ$ とした。それぞれの勾配は、流木群の作用荷重と、流木群が流れた時の勾配の影響を見るために設定した。

写真-2に、流木捕捉工モデルを示す。流木捕捉工モデルの堰堤高は150 mm、幅290 mmであり木材を用いて作成している。縮尺は1/50で、捕捉工間隔  $w=25$  mmとした。流木捕捉工モデルに作用する全ての荷重を測定するために、3軸方向の力の計測ができる2個の分力計 (LSM-B-200NSA1-P, Y102-FX, KYOWA) により固定し、流木捕捉工モデルの底部が水路底面に接触しないように吊るした。作用荷重を計測するために、流木捕捉工モデルの中心より45

mm離れた箇所にそれぞれの分力計を設置した。分力計と流木捕捉工の固定については適切な剛性を有した鋼材を用いている。また、分力計は、それぞればね計りを用いて、重錘を基に校正値を定めた<sup>16)</sup>。

表-1に、本実験の実験条件を示す。流木捕捉工モデルは捕捉率が安定するように、捕捉工間隔を設計基準である  $w/l \leq 0.5$  より狭く設定した。

### (2) 流木モデル

写真-3に、流木モデルおよびその諸元を示す。本実験では、澁谷<sup>4)</sup>による平成22年に発生した広島県災害の流木実態調査を参考に流木長と流木径を設定した。材質はラミン木材を使用し、流木モデルを直径5.5 mm、流木長  $l=60, 120, 180$  mmとした。流木は水に十分浸した状態のものを使用した。その時の比重は、0.95である。

### (3) 流木群の流下方法

流木群は、水路に設置した流木捕捉工モデルの前面から3.2~4.0 mの位置に敷きならして堆積させた後、後方から水を流下させて形成する。本実験の流量は、文献<sup>14)</sup>を参考に当初貯めている水量  $V=40$  L、流木衝突後も一定時間水を供給し続ける供給流量  $Q_0=2.5$  L/sとした。流速は、流木捕捉工モデルから上流側に1.0 mの位置における平均流速とし、撮影したビデオから計測した。流下方法は、流木捕捉工モデルよりも4.35 m上流の位置に水をせき止める板を設置し、流木の初期位置の堆積高さまでの水深まで水を貯めて、一挙に流すダムブレイク方式で水を与えた。これは、文献<sup>8)</sup>を参考に流木群における高密度集合運搬の状態になるようにするためである。その後、供給流量  $Q_0$  を10秒間流し続けた。この時、水路勾配  $\theta=0^\circ, 5^\circ$ における流速は1.0 m/s、2.0 m/sとなった。

### (4) 作用荷重計測方法

分力計の測定精度を確認するため、静水圧の測定による事前実験を行った。流木捕捉工モデルの前面にフィルムを当て、水深  $h=5, 10, 15$  cmのところまで水を貯め、その際に流木捕捉工モデルに作用す

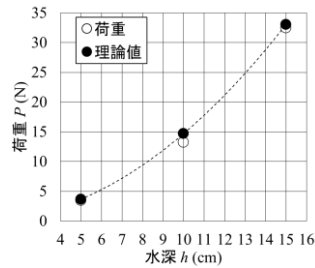
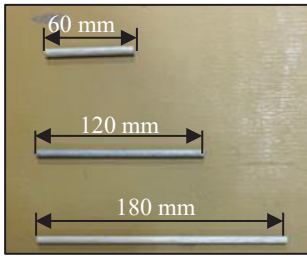


写真-3 流木モデル 図-2 静水圧測定結果

る荷重を測定し、静水圧荷重と計算値を比較した。図-2に実験結果を示す。これより、計測装置が静的な荷重を計測できることを確認した。また、ノイズを低減するためにフィルタリングを行い、サンプリング周波数を 1.0 kHz に設定した。

### (5) 実験ケース

表-2に、実験ケースを示す。本実験では3種類の流木モデルである流木長  $l = 60, 120, 180$  mm をそれぞれ流木本数  $n = 100, 200, 300$  と変化させ、さらに勾配  $\theta = 0^\circ, 5^\circ$  として、パターン数を 18、全てのパターンにおいて繰返し回数は 5 回とした。捕捉工間隔  $w$  と流木長  $l$  の比はそれぞれ流木長が短い順に  $w/l = 0.4, 0.2, 0.13$  となった。

## 3. 実験結果

### (1) 流下状況

本実験では流木長  $l$  や流木本数  $n$  を変えることで流下形態を変化させ、衝突荷重への影響を考察した。また、代表として勾配  $\theta = 5^\circ$  を基に本実験の考察や分析に必要な流下形態を抽出して示すこととした。写真-4~7に勾配  $\theta = 5^\circ$  における実験結果の写真を示す。なお、勾配  $\theta = 0^\circ$  のケースも定性的にはほぼ同じ状況である。写真-4~7は、流木捕捉工モデルに衝突する直前の状況を  $t = t_0$  s として初期時刻を定めた。また、水深  $h$ 、流動深  $h_f$  (水路底面から  $t_0$  時点の流木群上面までの高さ)、最大捕捉高  $H_{max}$  (水路底面から流木群が最も高くなった時の高さ)、流木の堆積高  $H_S$  および堆積長  $H_L$  として定義する。写真-4に、流木長  $l = 60$  mm、流下本数  $n = 100$  を示す。写真-4(a)は、 $t = t_0$  s を示している。写真-4(b)は、流木群が流木捕捉工モデルに衝突し、流木がせり上がっている様子が分かる。さらに、流木群全体が平たくなっており、前面に流木が衝突している。このことから流木長が短く、流木本数が少ないときは流木が捕捉工モデルの上端までせり上がっていることを示している。その後、写真-4(c)は流木が堆積している

表-2 実験ケース

シリーズ	勾配 ( $^\circ$ )	$w/l$	流木長 $l$ (mm)	流木長に対する流木本数 $n$
I	0	0.4	60	100
		0.2	120	200
		0.13	180	300
II	5	0.4	60	100
		0.2	120	200
		0.13	180	300

景況を示しており、流木が衝突後に後方に広がって堆積している。写真-5に、流木長  $l = 60$  mm、流下本数  $n = 300$  の結果を示す。写真-5(a)は、 $t = t_0$  s を示している。写真-5(b)は、流木群が流木捕捉工モデルに衝突し、流木がせり上がっている様子が分かる。しかし、流木本数が多くなることで後続の流木は前方の流木と絡みながら衝突している。よって、流木長が短く、流木本数が多くなると流木群となり、そのままの形状で衝突している。その後、写真-5(c)は流木が堆積している景況を示しており、流木が衝突後に後方に広がって堆積している。写真-6に、流木長  $l = 180$  mm、流下本数  $n = 100$  を示す。写真-6(a)は、 $t = t_0$  s を示している。写真-6(b)は、流木同士の影響後における配置変換が無く、流下してきたものがそのまま流木捕捉工モデルに衝突し、流木が斜めに流木捕捉工モデルに衝突していることが分かる。写真-6(c)は、そのまま流木が広がり堆積している。写真-7に、流木長  $l = 180$  mm、流下本数  $n = 300$  を示す。写真-7(a)は、 $t = t_0$  s を示している。写真-7(b)は、流下してきた状況のまま衝突し、その後の写真-7(c)からわかるように、堆積形状についても衝突時と大きく変化しないことが分かった。

### (2) 平均捕捉率~捕捉工間隔比

図-3に、全実験ケースにおける平均捕捉率と捕捉工間隔比の関係を示している。捕捉工間隔比が大きくなるほど平均捕捉率が小さくなっている。ここで、流木長が長くなると捕捉率が大きくなり、勾配が大きくなると捕捉率が小さくなることが分かった。この傾向は、渋谷ら<sup>15)</sup>の結果と同じ傾向である。

### (3) 衝突荷重~時間関係

図-4に、勾配  $\theta = 0^\circ$ 、流木長  $l = 120$  mm の衝突荷重と時間関係を示す。流木が衝突した時を衝撃時、流木群が衝突して最大衝突荷重を記録した時刻から流木群の動きが静止するまでを遷移時とした。さらに、流木が静止し、それ以降、変化が見られず荷重が低減していく区間を堆積時とした。流木群の衝突時は  $t = t_0 + 0.2 \sim 0.3$  s となる。遷移時は、 $t = t_0 + 0.3 \sim 0.5$  s となり、 $t = t_0 + 0.5 \sim 3.0$  s の間で流木は堆積

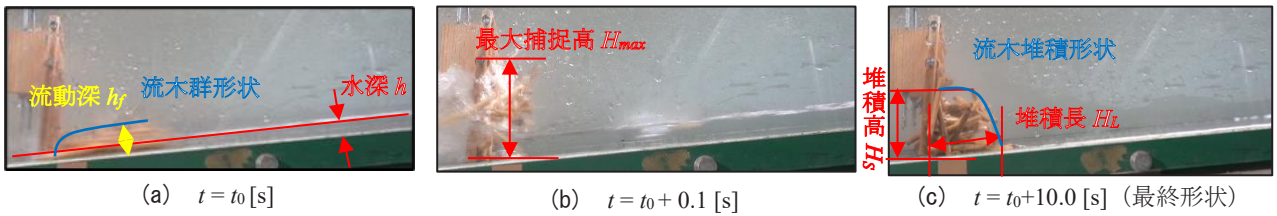


写真-4 流木長  $l = 60$  mm, 流下本数  $n = 100$

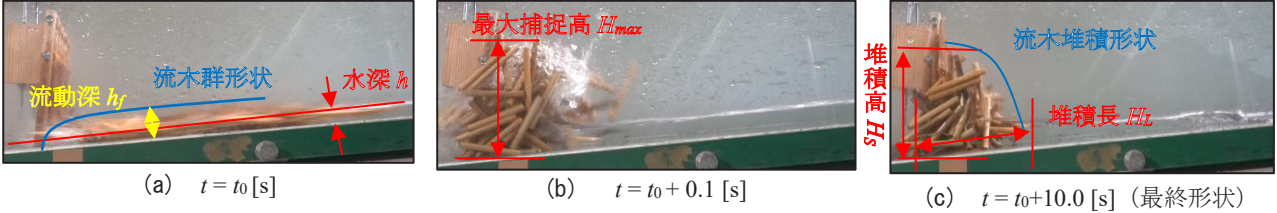


写真-5 流木長  $l = 60$  mm, 流下本数  $n = 300$

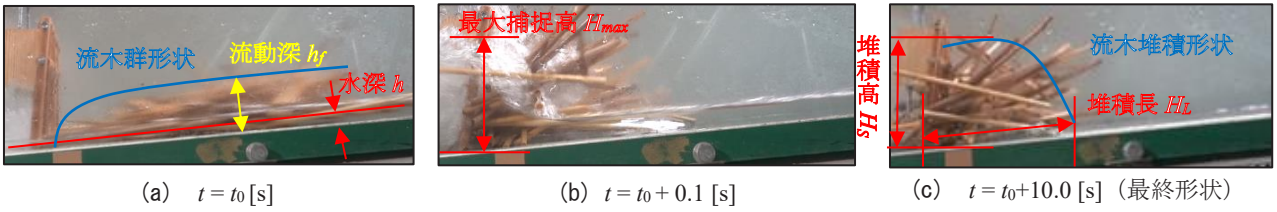


写真-6 流木長  $l = 180$  mm, 流下本数  $n = 100$

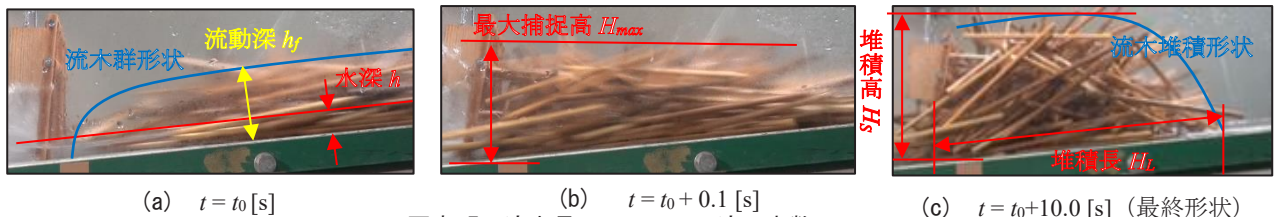


写真-7 流木長  $l = 180$  mm, 流下本数  $n = 300$

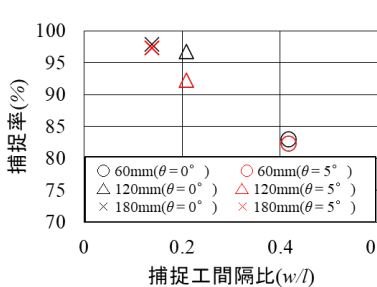


図-3 平均捕捉率と捕捉工間隔比の関係

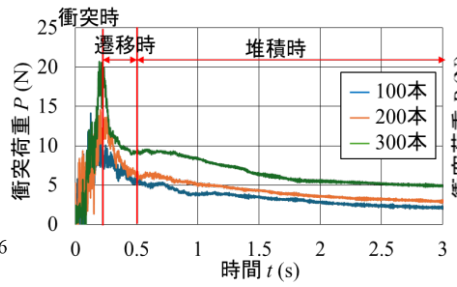


図-4 荷重～時間の関係(勾配  $\theta = 0^\circ$ )

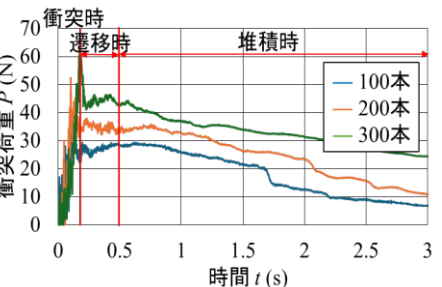


図-5 荷重～時間の関係(勾配  $\theta = 5^\circ$ )

時へ移行する。この時の応答を見ると最大衝突荷重が生じてから遷移時に急激に荷重が落ち、最終的に堆積時は流木のみで堆積荷重となる。図-5に、勾配  $\theta = 5^\circ$ 、流木長  $l = 120$  mmの衝突荷重～時間関係を示す。衝突時は全てのケースにおいて流木群が衝突して  $t = t_0 + 0.1$  sで発生している。遷移時は、流木が衝突してから  $t = t_0 + 0.2 \sim 0.5$  sとなり、 $t = t_0 + 0.5 \sim 3.0$  sで堆積時へ移行する。よって、勾配が大きくなるほど最大衝突荷重が発生する時刻は早くなる。加えて、 $n = 300$ において  $\theta = 0^\circ$ と  $\theta = 5^\circ$ を比較すると、 $P_{\max} = 20$  Nから  $60$  Nと大きくなり、勾配が大きくなると最大衝突荷重が大きくなる。また、遷移時と堆積時を見ると、後続の水が下流に一気に流れる

ことにより荷重が減少していくことが分かった。

#### (4) 流木群の最大衝突荷重

図-6に、勾配  $\theta = 0^\circ, 5^\circ$ の流木本数ごとに示した流木群の最大衝突荷重を示す。流木長  $l = 60$  mmの時、勾配  $\theta = 0^\circ$ では流木本数  $n = 100, 200, 300$ 本では最大衝突荷重が  $P_{\max} = 10, 12, 15$  Nである。勾配  $\theta = 5^\circ$ では、 $P_{\max} = 30, 32, 40$  Nである。このことから3倍程度荷重が大きい。また、勾配  $\theta = 0^\circ$ 、流木長  $l = 120$  mmでは、流木本数  $n = 100, 200, 300$ では最大衝突荷重が  $P_{\max} = 11, 15, 18$  Nであるが、勾配  $\theta = 5^\circ$ では、 $P_{\max} = 40, 46, 62$  Nである。この結果でも3倍程度荷重に違いがあることがわかつ

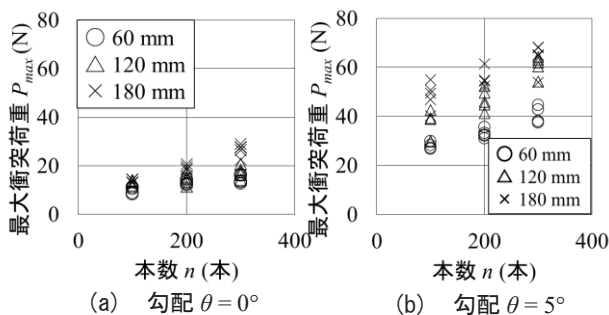


図-6 最大作用荷重

た. 勾配  $\theta = 0^\circ$ , 流木長  $l = 180$  mm では, 流木本数  $n = 100, 200, 300$  本の時, 最大衝突荷重が  $P_{\max} = 15, 20, 28$  N であるが, 勾配  $\theta = 5^\circ$  では,  $P_{\max} = 50, 55, 65$  N であることから 3 倍程度荷重が大きい. これらのことから流木群の最大衝突荷重は流木長が長く, 本数が多くなるほど荷重が大きくなる傾向が見られた. また, 勾配  $\theta = 0^\circ$  と  $\theta = 5^\circ$  では最大衝突荷重  $P_{\max}$  も 3 倍程度大きくなる.

#### (5) 流木の堆積高および堆積長と最大衝突荷重

図-7 に, 流木の堆積高  $H_S$  と最大衝突荷重の関係を示す. 流木の堆積高は勾配  $\theta = 0^\circ, 5^\circ$  の場合も  $H_S = 2 \sim 16$  cm となった. 流木の堆積高が増加すると最大衝突荷重も増加する傾向にある.

図-8 に, 流木の堆積長と最大衝突荷重の関係を示す. 勾配  $\theta = 0^\circ$  では, 堆積長は  $H_L = 4 \sim 44$  cm に対し, 勾配  $\theta = 5^\circ$  では,  $H_L = 4 \sim 31$  cm が堆積長となった. よって, 流木塊の最大衝突荷重は堆積高と堆積長に影響を与えることが分かった. この時, 勾配  $\theta = 0^\circ$  では, 最も長い堆積長は  $H_L = 44$  cm に対し, 勾配  $\theta = 5^\circ$  では,  $H_L = 31$  cm が最も長い堆積長となった. これは, 勾配が大きくなると流木塊の流速が速くなり, 捕捉工に衝突する際, 先行した流木が後続流の流木により押し込まれるからである. さらに, 堆積高と堆積長において, 勾配  $\theta = 0^\circ$  の最大衝突荷重の増加傾向より, 勾配  $\theta = 5^\circ$  の最大衝突荷重の方が急激な増加傾向が見られた. これは流速が大きくなったためであると考えられる. これらのことから, 最大衝突荷重は捕捉された流木の質量が増大すると増加する傾向にある.

#### (6) 流木群のせり上がり高と最大捕捉高の影響

流木群のせり上がり高  $H_r$  と最大捕捉高  $H_{\max}$  の影響を検討するために, 最大捕捉高から流動深を引いたものを流木のせり上がり高と定義した.

図-9 に, 勾配  $\theta = 0^\circ, 5^\circ$ , 流木本数  $n = 300$  における最大衝突荷重と流木のせり上がり高の関係を示した. 勾配  $\theta = 0^\circ$  の場合, 流木長が長く, 流木本数

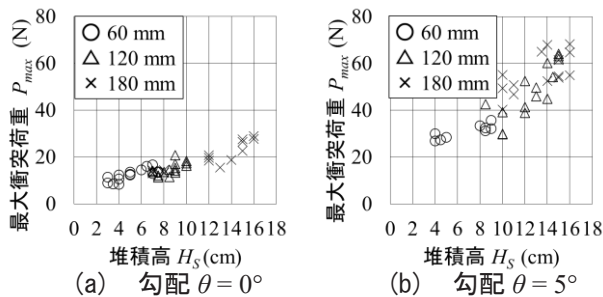


図-7 流木の堆積高と最大衝突荷重

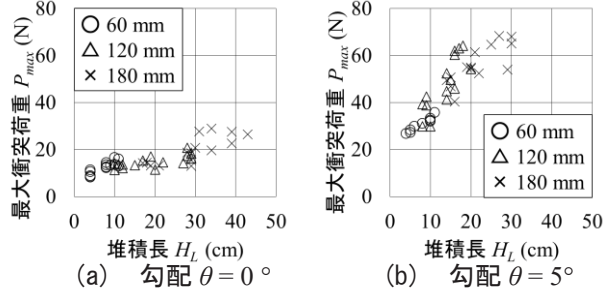


図-8 流木の堆積長と最大衝突荷重

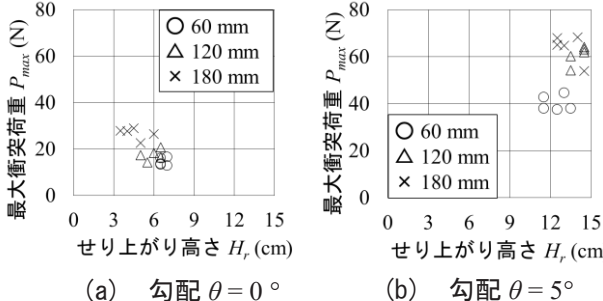


図-9 最大衝突荷重とせり上がり高 ( $n = 300$ )

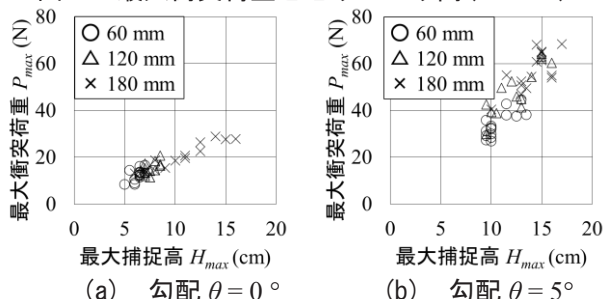


図-10 最大衝突荷重と最大捕捉高

が多くなると最大衝突荷重は増加したが, せり上がり高は小さくなった. 勾配  $\theta = 5^\circ$  の場合, 流木本数が多くなるほど最大衝突荷重は増加し, せり上がり高も増加傾向が見られた. これは, 勾配  $\theta = 0^\circ$  では, 流木本数が多くなると流動深が上がり, 流木が絡み合うことにより流木が固定されるため, せり上がらなくなる. 一方で, 勾配  $\theta = 5^\circ$  では流動深が深くならないためせり上がり高が大きくなる. 図-10 に, 勾配  $\theta = 0^\circ, 5^\circ$  の最大衝突荷重と最大捕捉高の関係を示す. 勾配が急になると, 最大捕捉高の上昇に伴い最大衝突荷重が大きくなる傾向が顕著であった. これは, 勾配が急になると流速が速くなり, 衝突速度が上がり衝突荷重が大きくなる. また, 流

速が速いと後続の流木が押し込まれ、最大捕捉高が高くなる。さらに、最大捕捉高は流木長が長く流木本数が多くなると高くなる。これは、流木群の体積が大きくなるためである。よって、最大捕捉高と最大衝突荷重は共に流速の影響を受けることが分かった。

#### 4. 結 言

本研究は、流木捕捉工に作用する流木群の荷重について実験的に検討したものである。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 流木群が捕捉工に衝突した際の応答は3種類（衝突時、遷移時、堆積時）に分けて考察できることを示した。
- 2) 流木群の最大衝突荷重は、勾配が大きく、流木長が長く、流木本数が多くなることで影響を与えることがわかった。特に、流木の流れてくる質量が増大すると線形的に増大する。
- 3) 堆積した流木群の形状は、流木長が長く、流木本数が多くなるほど、堆積高および堆積長が大きくなる。
- 4) 流速が速くなると衝突速度が上がり衝突荷重が大きくなる。また、流速が速いと後続の流木が押し込まれるため最大捕捉高が高くなる。

今後の課題として、本実験では流木径を一定としたが、流木径の違いや流下条件の影響について流木捕捉工に作用する荷重実験を進め、流木群における設計荷重モデルを提案する予定である。

**謝辞**：本研究は、科学研究費助成事業：基盤研科C（課題番号23K05326）の助成を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：令和2年7月豪雨について、国土交通省水管理・国土保全局会議資料，2021。
- 2) 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，2020。
- 3) 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。

- 4) Kon,T., Tsou,C., Koi,T., Tmamoto,Y., Koiwa,H., Noda,R., Irasawa,M., Kato,K., Tsushima,H., Mori,H., Iwata,H., Sato,T., Ikeda,H., Kuda,Y., Kobayashi,M., Arai,K., Kuroiwa,C., Koga,Y., Ishikawa,T., Tsushima,M., Ngano,E., Miura,J., Siato,H., Kawakami,R. (2022) :Landslide Hazards Induced by Heavy Rainfall in August 2021 in the Northern Part of the Aomori Prefecture, Japan, International Journal of Erosion Control Engineering Vol. 15, No. 2, pp.41-51, 2022.
- 5) 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。
- 6) 堀口俊行，合田明弘，嶋川理，山田正：透過型砂防堰堤に作用する流木混じり土石流荷重の検討，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.76，No.2（応用力学論文集 Vol.23），I\_325-I\_336，2020。
- 7) 國領ひろし，澁谷一，香月智，石川信隆，水山高久：流木捕捉工に作用する荷重に関する実験的研究，平成23年度砂防学会研究発表会概要集，pp.308-309，2011。
- 8) 渡邊大貴，堀口俊行：既設砂防堰堤に付与した張り出しタイプ流木捕捉工の荷重計測実験，構造工学論文集，Vol.68A，pp.887-895，2022。
- 9) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，Vol.621，2-47，pp.111-127，1999。
- 10) 池野正明，田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.721-725，2003。
- 11) 新編・鋼製砂防構造物設計便覧（令和3年度版），構成砂防構造物委員会，2021。
- 12) 有川太郎，大坪大輔，中野史丈，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第54巻，pp.846-850，2007。
- 13) 石川芳治，水山高久，浅井信秀：流木の衝突による鋼材の変形に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.42，No.5（166），pp.12-20，1990。
- 14) 水原邦夫，武居有恒，南哲行：流木の流下阻止に関する基礎的研究（II）—柵状構造物における流木の衝撃力と止め率—，新砂防，114号，1980。
- 15) 澁谷一，香月智，大隅久，石川信隆，水山高久：流木捕捉工の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.63，No.3，pp.34-41，2010。
- 16) 堀口俊行：砂防構造物に作用する土石流衝突荷重の計測要領について，シリーズ「はかる」実験・室内試験（16）水理模型実験＜その2＞，砂防学会誌，Vol.75，No.2，pp.23-28，2022。

(2024. 5. 31 受付)