

土石流の衝突による立木の折損の特徴と 評価についての実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BREAKAGE CHARACTERISTICS OF STANDING TREES DUE TO DEBRIS FLOW IMPACT

伊藤 涼¹・永野 博之²・森田 年一³

Ryo ITO, Hiroyuki NAGANO and Toshikazu MORITA

¹群馬工業高等専門学校専攻科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

²群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

E-mail: hr-nagano@gunma-ct.ac.jp

³群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

E-mail: t_morita@gunma-ct.ac.jp

Key Words: woody debris, drift wood, debris flow

1. はじめに

近年、河川上流域で豪雨により発生した土石流が流木と共に下流へと流下し被害をもたらす事例^{1),2)}が報告されている。流下した流木は、衝突によって家屋や構造物を破壊したり、橋梁に詰まることで河道の閉塞を発生させたりするなど様々な被害をもたらす。石川³⁾は、わが国の流木災害事例と特徴から流木災害形態を分類し、流木災害を防止・軽減するためには溪流の上流から河川域まで連続的にかつ総合的に流木対策を進める必要があることを指摘している。また、「流木災害を防止軽減するための第一歩は対象とする溪流において発生・流下する流木の量、長さ、直径等を推定すること」と指摘している。すなわち、流木長は流木災害を防止するために不可欠な流木諸元の一つであり、構造物での捕捉に関係することが指摘されている⁴⁾など重要な物理量である。また、流木長は流下の過程で短くなるのが既往の災害調査で指摘されている。渋谷ら⁵⁾は、2010年広島県庄原市の土石流災害で発生した多数の流木について現地調査を行い、堆積する流木の計測を行っている。計測した流木の特徴として、根の付いている流木の端部や、根の付いていない流木の幹の両端が

折れた状態であることを挙げている。また、崩壊斜面付近の樹高と流木長を比較し、短くなっていることから、流下途中で流木が折れた可能性を指摘している。永野ら⁶⁾も2017年福岡県朝倉市で発生した土石流災害で氾濫した流木について、倒木・流木の長さを計測し、立木が流木化し、流下する過程の中で摩擦・破断した可能性を指摘している。しかし、流木折損メカニズムに基づく流木長の変化を考慮した研究はない。そのため、流下中にどのように折れ、どの程度の長さとなるのかは依然として明らかでない。したがって、現段階では任意の地点での流木長の評価を行うことは難しい状況にある。

任意の地点での流木長の評価を行うには、流木折損プロセスに加え、土石流によってどの程度の長さの流木が生産されるのか、といった立木の折損・流木化のプロセスについても明らかにする必要がある。流木は倒伏した立木を土石流が巻き込み、ともに流下することで流木となる。樹木の倒伏は、幹が根元付近または途中で折れる「幹折れ」と、根系基盤が周囲の土壌から引きはがされるように樹体が完全に転倒する「根返り」に分類される^{7),8)}。根返りの場合では、生産される流木は樹高と同程度の長さになるが、幹折れでは折損の位置によって、流木長が変化

することが考えられる。このような背景を踏まえ、本研究では河道における流木の発生源として、土石流による立木の折損（幹折れ）に着目をし、水路実験を通じて立木の折損・流木化のプロセスについて検討を行ったものである。

2. 実験方法

本研究では、重力と慣性力が卓越し、フルード則に従って条件を設定すべきと考えるものの、折損プロセスを考慮するには模型材料の曲げ弾性率などの物性値の相似性についても評価が必要と考えられ、適切な模型材料の選定あるいは入手が課題となる。本研究では、入手が容易である南洋材を用いて検討を行うものとし、模型材料も含めた相似則についての詳細な検討については今後の検討課題とした。実験に使用した水路は、全長 400cm、幅 40cm、側壁高 40cm、勾配 15 度の長方形断面水路である。側壁は亚克力、底面は平均粒径 1cm の川砂利を張り付けたコンパネを用いている。水路全体は合計 4 フレームの木製フレームで構成されており、1 フレームの長さは 1m である。下流端から 1 フレーム目に立木模型を設置し、模型上流から 3 フレーム目までの区間を移動床とした。河床材料としては粒径 1.5cm のガラス玉を用い、5cm の厚さで敷設した。地下ピット中の水中ポンプを通じて汲み上げられた水が、塩化ビニルパイプを通じて、上流端に設置された 5 つの吐水口から供給される。実験では河床材料の敷設前に各ポンプで流量計測を行い、すべての実験で 9 ~ 10 L/s の流量となるようにした。下流端および上流端から 50cm の位置には、5cm 高さで堰を設置した。上流の堰は整流目的であり、下流端の堰は模型が流出しないよう固定するために設置した（図-1）。

本実験で使用した立木模型の模式図を図-2、図-3 に示す。立木模型は長さ 92cm、幅 40cm である。土台はスタイロフォームと合板を用い、立木には長さ 30cm、直径 $D = 2\text{mm}$ 、 3mm の南洋材を用い作製した。立木の本数は $N = 72$ 、 143 本の二種類で、千鳥配置になるように 7 本と 6 本を繰り返し配置した。72 本の場合では、流下方向に一行を 6cm 間隔とし、142 本の場合では 3cm 間隔で配置した。立木は水路に設置した際に地面に対し垂直となるように、15 度の角度でさし立てた。また、根返りを防ぐためパラフィンを路床に流し込み、自然冷却で固めて立木を固定した。

実験ケースを表-1 に示す。実験では、まず立木模型を設置し、水路に河床材料を敷設した。その後、

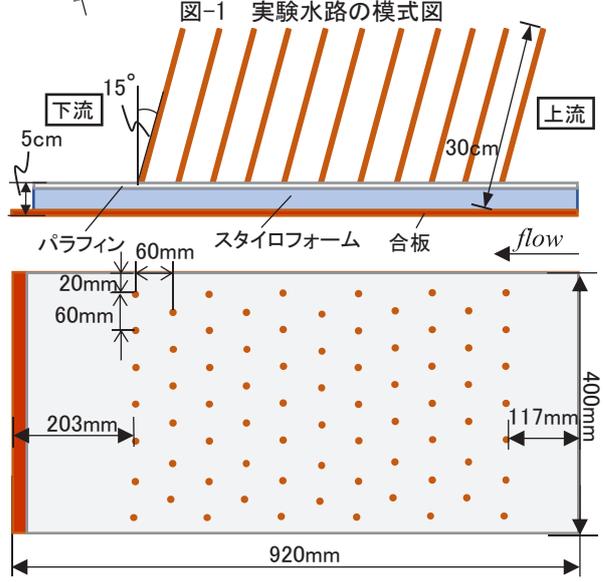
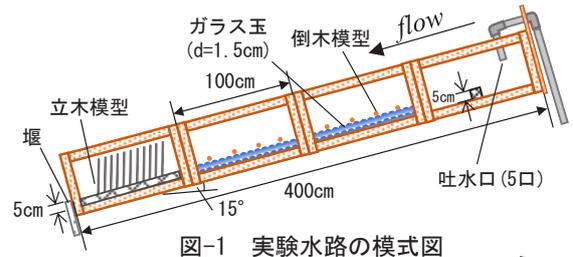


図-2 立木模型側面図，平面図， $N = 72$ 本

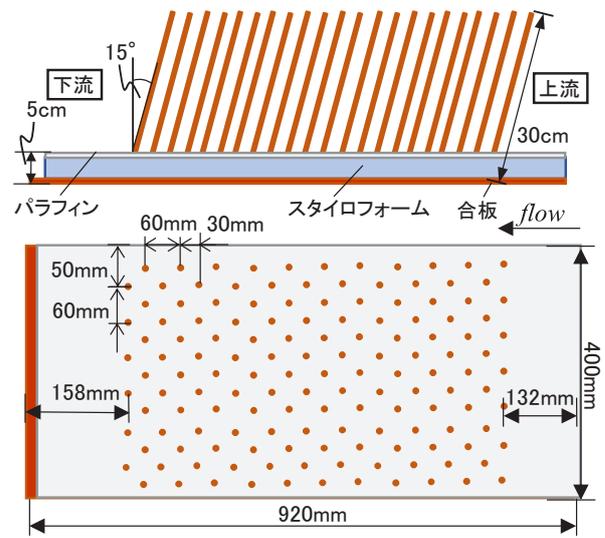


図-3 立木模型側面図，平面図， $N = 143$ 本

表-1 実験ケース

CASE	本数	直径 (mm)	倒木	粗度
1	72	2	-	-
2	143	2	-	-
3	72	3	-	-
4	143	3	-	-
5	72	2	10	-
6	143	2	10	-
7	72	3	10	-
8	143	3	10	-
9	72	2	-	あり
10	143	2	-	あり
11	143	3	10	-

吐水口から 10 秒間清水を供給し土石流を発生させ、立木模型内に流入させた。下流端では、ガラス玉と水とを合わせたキャッチングにより全流量を計測し、計測結果から輸送濃度を算出した。また、側方および上方からはデジタルカメラおよびビデオカメラで立木折損および流れの状況を撮影した。CASE5～CASE8 では倒木模型が土石流と共に流下するケースを想定し、河床材料を敷設後、移動床上に倒木模型を敷設した。倒木模型は立木模型に用いた南洋材と同一のもので、長さは 30cm であり、直径は各ケースの立木模型の直径と対応させた。倒木模型は下流端より 120cm の地点から、上流側に向かって 20cm 間隔で流下方向に直交するように敷設した。また、CASE9, 10 では模型の路床表面に、底面と同じ平均粒径 1cm の川砂利で粗度付けを行った。CASE11 は、2 波目の土石流による折損の観察を目的として、CASE8 の流下後の状態を維持したまま、上流側に再度ガラス玉を敷設した後、再び 10 秒間水を供給したものである。

表-2 実験結果

	本数	直径 (mm)	倒木	粗度	折損数	立木長平均 (mm)
1	72	2	-	-	7	0.9
2	143	2	-	-	7	4.9
3	72	3	-	-	0	-
4	143	3	-	-	0	-
5	72	2	10	-	9	2.4
6	143	2	10	-	34	2.3
7	72	3	10	-	0	-
8	143	3	10	-	0	-
9	72	2	-	あり	10	3.5
10	143	2	-	あり	5	1.2
11	143	3	-	-	11	1.0

3. 実験結果

(1) 立木の折損本数と残存した立木長について

実験の結果を表-2に示す。CASE1, 2, 5, 6, 9～11で立木の折損が見られた。2波目であるCASE11を除き、立木の折損が見られたのはすべて立木の直径が2mmの実験ケースで、直径が3mmの実験ケースでは折損が見られなかった。最も立木の折損が見られたのは、CASE6(2mm, 143本, 倒木敷設)で23本、立木の本数で最も折損が少なかったのは、CASE10(2mm, 143本, 粗度あり)で5本の立木が折損した。流下後、折損した立木の地表面からの長さを計測し、各実験ケースの残存した立木長の平均を算出した。ほとんどの立木は根元から折損しており、幹中間での折損は見られなかった。そのため、残存した立木長はどの実験ケースでも、10mm以下の値となった。

(2) 折損した立木の位置について

CASE1, 2, 5, 6, 9～11における折損位置を図-4～図-10に、CASE8の倒木捕捉位置を図-11に示す。また、流下方向にy軸、横断方向に右岸から左岸にかけてx軸をとる。原点は立木模型の上流右岸側の端とする。

すべての実験ケースで立木の折損は、上流側で確認された。CASE1では1列目で4本、2列目で1本、3列目で2本の立木が折損した。1列目では偏りな

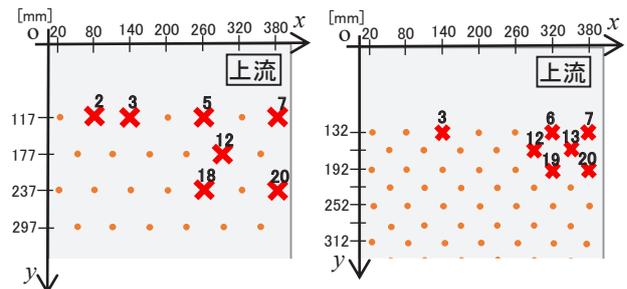


図-4 折損位置 (CASE1)

図-5 折損位置 (CASE2)

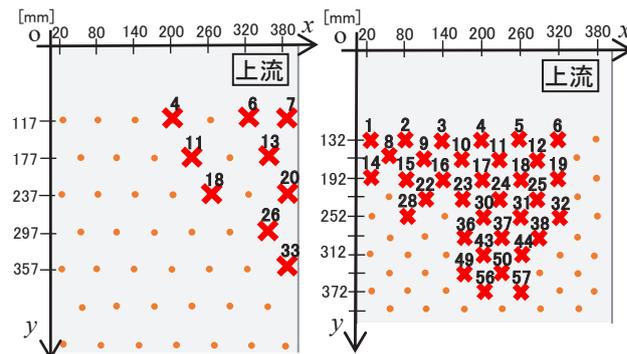


図-6 折損位置 (CASE5)

図-7 折損位置 (CASE6)

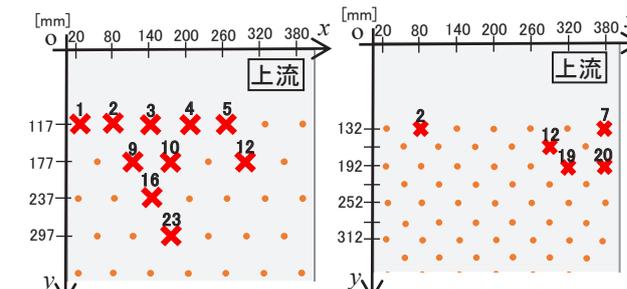


図-8 折損位置 (CASE9)

図-9 折損位置 (CASE10)

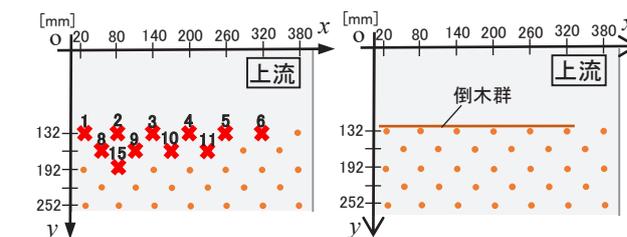


図-10 折損位置 (CASE11)

図-11 倒木の捕捉位置 (CASE8)

く右岸，左岸ともに折損が見られたが，2列目以降では右岸側の折損はなく，左岸側に3本の折損が見られた．立木を143本に増やしたCASE2では，1列目～3列目での折損が生じ，CASE1と同様に1列目では左岸，右岸で折損が見られたが2列目以降は折損が左岸に集中する結果となった．

倒木を敷設したCASE5では，1列目から5列目にかけて折損が見られた．1列目の立木の折損数が最も多く3本で横断方向に $x=200\text{mm}\sim 380\text{mm}$ の区間で折損が見られたが，後列に進むに従い折損が見られる区間が狭まり，折損数は減少した．CASE6では折損の範囲が最も広く，縦断方向に対し $y=132\sim 372\text{mm}$ の広い区間で折損が見られ，1列目から9列目の立木が折損した．横断方向に対しては $x=20\text{mm}\sim 320\text{mm}$ の区間で折損しており，折損は右岸左岸によらず全体的に見られた．CASE9は1列目で5本の立木が折損し，2列目では3本，3・4列目では1本の立木が折損した．横断方向に対し $x=20\sim 290\text{mm}$ の区間で折損が見られ，後列に進むに従い折損した区間が右岸側から中央に向かっていった．CASE10では1列目で2本，2列目で1本，3列目で2本の立木が折損し左岸側で4本，右岸側で1本の立木が折損した．

(3) CASE8 および CASE11 について

CASE8 (3mm, 143本, 倒木10本)では土石流が流下すると敷設した倒木が土石流の先端に集まり流下した．倒木は流下方向に対し横断方向の状態で行下し，立木模型の1列目に捕捉され後続から土石流が流下した．土石流は倒木が捕捉された位置で堆積し，その上を高速で越流した．流下後の状態を確認すると図-12の状態では倒木がガラス玉を堆積させる形で停止した．倒木は立木No.1～No.6にかけて9本の倒木が捕捉され，約6cmの高さでガラス玉は堆積した．2波目の土石流を流下させるため，5cmの敷厚でガラス玉を再度敷設した．ガラス玉が既に堆積している箇所では5cm以下の箇所には5cmとなるように敷設を行った．その後清水を供給し，土石流を再度流下させた．

CASE11の立木の折損位置を図-10に示す．1列目のNo.1～No.6と2列目のNo.8～No.11，3列目のNo.15の立木が折損した．折損が確認された1列目の立木は倒木が捕捉された立木と一致しており，2列目で折損した立木は捕捉された1列目の立木の後列にあたる．2波目の土石流による力が倒木と立木に働いたことで横断方向に対して一様に折損した．



図-12 倒木による堆積 (CASE8)



図-13 CASE6の堆積状況



図-14 水路側面の状況 (CASE2)

(4) CASE6の堆積状況

土石流の流下後，CASE2，4，6，8～11の立木模型内ではガラス玉の堆積が見られた．堆積は倒木と折損した立木によってガラス玉がせき止められたことによって発生していた (図-13)．CASE6では土石流の流下後，倒木と折損した立木によってガラス玉がせき止められた．倒木は右岸側から中央にかけて斜めに停止しており，倒れた立木の上に重なる形でガラス玉と共に堆積していた．また，ガラス玉から受ける力によって，一部の倒木にはたわみが生じていた．

(5) 土石流，倒木の流下について

CASE2の1.5秒後の水路側面の状況を図-14に示す．y軸は流下方向の長さを表しており，z軸は高さ

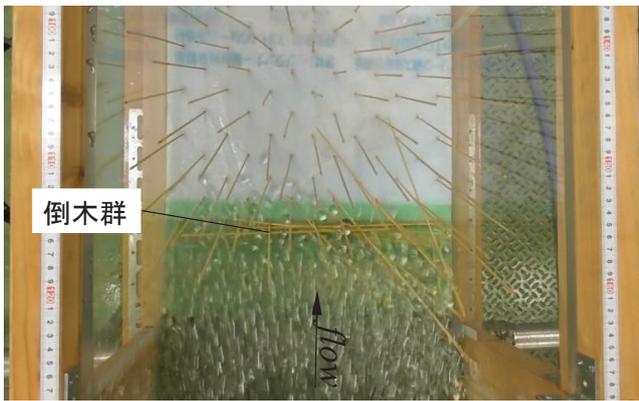


図-15 倒木流下状況 (CASE6)

を表している。また、原点は立木模型の上流端としている。

上流から清水を供給すると波を形成し、下流に流下するにつれ、河床材料を巻き込みながら波高を高くし立木模型内に流入した。模型内に流入すると立木の根元付近では立木による抵抗によって流速が低下し、流入したフロントの一部が堆積した。そこに後続の土石流が流れ込むことで、河床に近い地点では流速が遅く、水面付近では流速が速い流れとなった。底面に近い部分は低速で流下し、その上を後続から流れてきた土石流が越流する形で流れたため、上流と下流では流動深に差が生じた。また、立木の本数が大きいケースや粗度のついた実験ケースでは、本数が72本の実験ケースに比べ、流速が底面で非常に遅く堆積が見られた。

倒木を敷設した実験ケースでは土石流は倒木と共に流下した。CASE6, 8では流下方向に対しほとんどの倒木が横断方向に並んだ状態で流下した(図-15)。一方、CASE7, 5のケースでは倒木は水面を回転しながら流下する向きを変え、立木模型内を通過した。

4. 考察

(1) 流動深の時系列変化

折損が確認されたCASE1, CASE2, CASE6の流動深の時系列変化を図-16~図-19に示す。図は水路の下流端から1フレーム目(下流端から1m地点)に流入した瞬間を0秒とし、立木折損が発生した列での流動深の変化を側面の左岸映像から読み取り0.125秒間隔でプロットしたものである。立木が折損した時間を上方の映像から確認し、側面の映像から読み取った流動深とともに、各ケースで折損した立木の番号と併せて黒の塗りつぶしでプロットした。

流動深は0~2秒の間で急激に上昇し、流動深が最大に達すると緩やかに減少した。

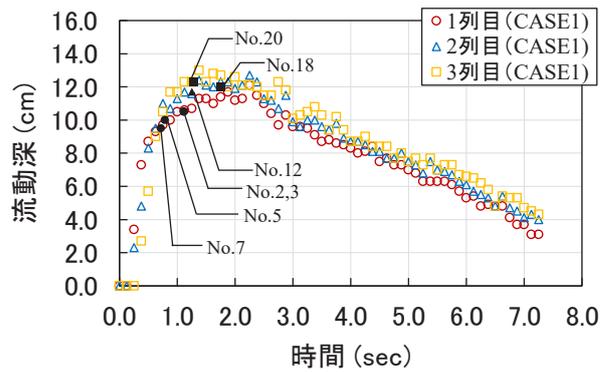


図-16 流動深の時系列変化 (CASE1)

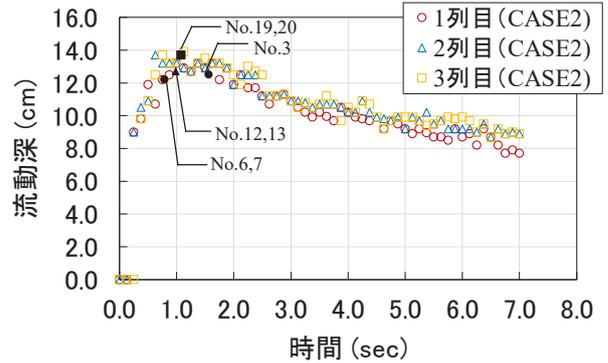


図-17 流動深の時系列変化 (CASE2)

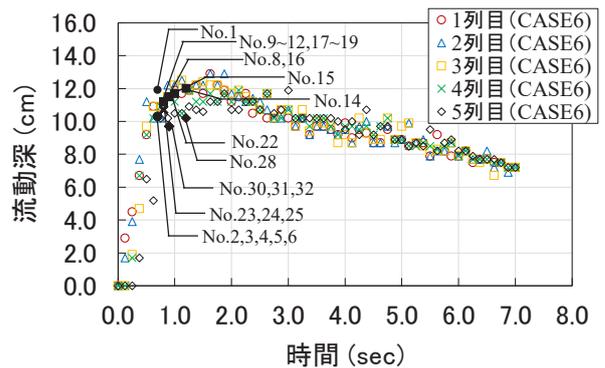


図-18 流動深の時系列変化 (CASE6 1~5 列目)

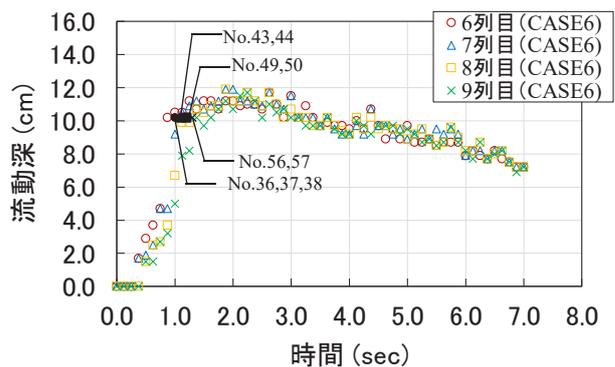


図-19 流動深の時系列変化 (CASE6 6~9 列目)

図-17と図-18の比較により、立木の本数が143本のCASE2が、72本のCASE1よりも最大流動深が高くなっていることがわかる。CASE2はCASE1に比べ立木の本数が多く密であるため、ガラス玉が捕捉されやすく、流動深が大きくなったと考えられる。

一方で図-18, 図-19 に示す CASE6 は立木の本数が 143 本であるが CASE2 に比べ流動深が低い。これは上流の立木が折損したことで流れの抵抗が少なくなったことが要因であると考えられる。

(2) 立木の折損メカニズムについて

立木折損はすべて 2 秒以内に発生しており、また流動深が上昇し、最大となった時間付近で折損していることがわかる。さらに、流動深が緩やかに減少しているあいだでの折損は見られなかった。このことから立木の折損には流動深が関係していると考えられる。立木が折損した要因として土石流による立木根元でのモーメントの影響が考えられる。流動深が上昇すると立木に働く流体力は大きくなり、それに伴い根元に働く曲げモーメントも大きくなる。これが折損の主要因であると考えられる。また立木模型上流において流動深が高くなる場合では、流動深の高い地点と低い地点では圧力に差が生じることも立木の折損に影響を及ぼしたと考えられるが、これらの詳細については、折損の発生した高さとあわせて今後の検討課題である。

(3) CASE6 の折損について

図-7 に示す CASE6 は実験ケースの中で立木の折損数が最も多い。これは、倒木によるものである。

CASE6 では倒木が土石流のフロント部分に集まり流下した。流下した倒木は 1 列目の立木 No.1~6 に捕捉され、そこに土石流が流下した。土石流の力が倒木に接触している立木に横断的に働いたことによって折損が生じ、後続の列にも力が伝わったことによって、広い範囲で折損したと考えられる。

(4) 流出する流木長について

実験の結果、折損した立木のすべてが根元付近からの折損であった。そのため、流出する流木の長さは立木の地表面に露出した長さと同程度の長さとなった。このことから、立木の根回りも含めた土石流による流木の生産を考えた際は立木の樹高が初期の流木長になると考えることができる。しかし、下流で折損した流木が確認されていることから、土石流による折損では、流木は樹高と同程度の長さで流出し、流下の過程で折損することによって短くなることが考えられる。

5. おわりに

本研究では、土石流による立木の折損に着目し、水路実験を通じて立木の折損・流木化のプロセスについて検討を行ったものである。その結果、土石流による立木の折損は立木の根元から発生する確率が非常に高いことが明らかになった。そのため、土石流によって生産される流木は根回り、幹折れに関わらず樹高と同程度の長さであることが示唆された。しかし、下流で折損した流木が確認されていることから、下流に流下する過程で折損していることが考えられる。流下中の折損としては、狭窄部や落差による折損が考えられるため、それらの条件を考慮した実験を実施する必要がある。また、立木折損については、相似側についての詳細な検討と使用素材についても検討を行う必要があると考える。

謝辞: 本研究は、科学研究費(課題番号: 21K04618, 代表: 永野博之)のもとに実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kenta Koyanagi, Taku Yamada and Koji Ishida : Rediscovering wood-laden debris flow studies: A perspective from Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 48, issue 1, pp.104-118, 2022.
- 2) 土木学会水工学委員会 2017 年九州北部豪雨災害調査団:平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害調査報告書, pp.166-167, 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) 石川芳治: V 章 流木災害と森林, *森林科学*, No.4, pp.28, 1994.
- 5) 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.
- 6) 永野博之, 福岡尚樹, 橋本晴行: 2017 年九州北部豪雨により発生した朝倉市白木谷川流域の流木・土砂・水混相流の流出規模に関する研究, *河川技術論文集*, 第 24 巻, pp.487-492, 2018.
- 7) 国土交通省: 国土技術政策総合研究所資料 第 1059 号 街路樹の倒伏対策の手引 第 2 版, 2019.
- 8) 独立行政法人 森林総合研究所: 風害・森林火災軽減対策, p.1, 平成 18 年 3 月.

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/1st-chukiseika-12.pdf> (2024 年 7 月 12 日最終閲覧)

(2024. 5. 31 受付)