

流木・土石流対策における透過型砂防堰堤の性能評価に関する研究

Performance Evaluation of Open Type Sabo Dam in Sediment Disasters Prevention

18N3100013L 合田 明弘 (河川・水文研究室)
Akihiro GODA / River Engineering and Hydrology Lab.

Key Words : Sediment Disaster, Open Sabo Dam, Debris flow, Wood Debris Dam, DEM

1. 緒言

我が国では、梅雨前線や台風等による集中豪雨によって土砂災害が頻発している。近年は、緑化運動から森林の整備が行き届かなくなり、山地流域で発生した流木が土砂と混ざること、流木混じり土石流となり、河川を流下し、狭窄部や橋脚に詰まることがある。これにより、氾濫被害の拡大を引き起こしている。今後、災害外力の増大によって、洪水や土石流等の大規模化が想定されるため、流木の更なる大量流出が懸念されている。そのため、流木の発生・流下・堆積・再移動という一連のプロセスの理解が重要となってくる¹⁾。流木の流出メカニズムは、山地における流木堆積が重要であることが示唆されている²⁾。しかし、その実態は不明な点が多く存在する。このことから、調査資料の蓄積や調査要領における検討が必要である。

一方で、近年の流木災害を踏まえ、土石流対策施設として、流木の捕捉効果が高い透過型砂防堰堤（以下、透過型）や流木捕捉工等の透過構造を有する施設の設置が義務となった³⁾。透過型の流木捕捉事例は数多く報告されているが、研究面では、流木混じり土石流における透過型の捕捉性能や耐荷性能に関する研究例は少なく、いずれの性能評価において研究の余地がある。

よって本研究は、近年増加する流木災害を防止・軽減することを目的に、①流木の流出メカニズムを明らかにする基礎的段階として、山地流域における流木の堆積特性を明らかにし、②砂防基本計画策定指針⁴⁾で設置原則となった透過型砂防堰堤の流木混じり土石流の捕捉・耐荷性能を評価するものである。

2. 土砂災害の実態調査

土砂災害の発災メカニズムを明らかにするために、令和元年台風第19号で甚大な土砂災害が発生した岩手県沿岸域（岩泉町、普代村、宮古市、山田町、釜石市）において調査を実施した。

(1) 降雨状況と被害の関係

大規模な外水氾濫が発生した地域（関東甲信越地方、静岡県）においては、72時間降水量が顕著であり、それ

らが脆弱地帯に集水し、堤防決壊を引き起こしたことが推察される。一方で、東北地方は、72時間降水量は他の地点に比べて少ないが、短時間降水量が顕著であった。特に岩手県沿岸域は、その傾向があり、流木を伴う土石流や内水氾濫などの局所災害が多発したことが推察される。

(2) 災害発災メカニズムの考察

共通した災害発災メカニズムを以下に挙げる。

- 1) 上流域において発生した斜面崩壊や土石流によって、流木や土砂が生産され、それらが河道を流下し、暗渠箇所や道路・鉄道などの人工的狭窄箇所でも堰止まり、河道から水と共に土砂が溢れた（写真-1右）。また、山田町田の浜地区では、津波堤防が氾濫水を堰き止めたことで、水深が上昇し、浸水被害が拡大した。
- 2) 暗渠内に流入した土砂が暗渠の流下能力を低下させたことで、雨水を排除できず、住宅街に水が溢れた。さらに排水機場が機能せず、住宅街への浸水が広がった。
- 3) 山地と住宅地が接している場所では、土石流が住宅を直撃したことにより、家屋被害が発生していた。土石流危険区域における発災が多く見られた。

降水規模は、気候変動の影響などにより、暗渠箇所の設計時の降水規模より大きくなることが想定される。今後、どの街でも同じメカニズムの災害が起こりうる可能性が示唆される。また流木や土石流が暗渠を閉塞することが多かったことから、上流域での透過型砂防堰堤や流木捕捉工の対策が必要である。



写真-1 近年の流木災害

3. 山地溪流における流木の堆積特性

流木流出の一連のプロセス中で、山地における流木堆積は流木流出と密接に関係している。清水³⁾は、北海道沙流川支流の調査から、山地で発生した流木は山林内や沢の狭窄部で塞き止められ、流木天然ダム（以下、ダム）を形成・堆積し、段階的に流出することを示した。ダムは、流木の流出プロセスに密接に関係していると考えられる。しかし、ダムの形成過程と構造特性に関しては、研究例が少なく、検討する必要がある。

よって本研究は、愛媛県肱川流域の山地溪流においてダムの現地調査を実施し、肱川流域におけるダムの形成要因と構造特性を明らかにするものである。

(1) 流木天然ダムの形成要因

本研究では、ダムの形成要因を以下2つに分類した⁴⁾。

①側岸の斜面崩壊から供給された倒木と土砂が直下の流路を閉塞し、その場にダムを形成したタイプ、もしくは②流路を移動した流木が途中で集積して流路を閉塞し、ダムを形成したタイプである。本調査では②のタイプは少なく、①のタイプが相対的に多く見られたが、流路上を閉塞するダム形成は少なかった。一方で、本調査では、流路脇の立木に流木が堆積してダムを形成したタイプ（写真-2タイプ③）が多かった。つまり、流路上のダムは豪雨によって流され、流路脇のダムが残存したと考えられる。この流木の堆積特性は、Seo et al.⁴⁾が指摘しているように、南日本では豪雨の発生頻度が高いため、北日本に比較して流木堆積量が少ないことに関係していることを示唆している。

(2) 流木天然ダムの構造特性

ダムを構成している倒木とダム周辺の立木の樹種、樹齢、胸高直径についてサンプルを取り、ダムの構造特性を調べた。得られた結果は、4つである。①樹種は90%が針葉樹で、②倒木の平均樹齢は立木よりも若く、③倒木の平均胸高直径は立木よりも小さく、④倒木は概ね全て新しいことである。小森ら⁵⁾は、岩手県小本川周辺の山地において同様な調査を行い、広葉樹と針葉樹共に若いものが倒木になりやすいことを示しており、本調査と同様な結果である。つまり、樹齢が若く、胸高直径が小さい樹木は流出しやすく、流木天然ダムの形成に寄与することが示唆される。

4. 透過型砂防堰堤の性能評価

砂防基本計画策定指針において、透過構造を有する施設の設置が原則となった⁶⁾。透過型の巨礫捕捉性能に関しては、水路実験や数値解析が数多くされているが、写真-3(a)に示すような流木混じり土石流捕捉性能については、渋谷ら⁷⁾、香月ら⁸⁾が挙げられる。一方、頑健



写真-2 タイプごとの流木天然ダム



(a) 流木捕捉時 (b) 一部破損した堰堤

写真-3 透過型砂防堰堤

で冗長性のある透過型において、土石流規模の激化に伴い損傷や破壊事例が発生している。例えば、写真-3(b)に示すように、平成26年7月の豪雨によって長野県南木曾町の透過型が土石流衝撃荷重によって破損した。このことから、透過型に作用する土石流荷重を評価する手法が求められているが、流木混じりの土石流荷重に関する研究例は少ない。このように、捕捉性能と耐荷性能の両方を検討する必要があり、いずれの性能評価における研究の余地がある。

よって本研究は、個別要素法を用いた数値解析により、流木混じり土石流における透過型の捕捉性能、耐荷性能を評価をするものである。

(1) 数値解析の概要

本研究は個別要素法を用いて数値解析を実施した。個別要素法は、接触力をモデル化し、接触力が作用する個々の粒子の運動をそれぞれの運動方程式を基にして、数値解析する手法である。基礎方程式は以下の式で表される運動方程式である。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) + D\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) + \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{x}(\mathbf{t})) = \mathbf{f}(\mathbf{t}) \quad (1)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{t}) = M\mathbf{g} + \mathbf{f}_{w_{ij}}(\mathbf{t}) + \mathbf{F}_{B_{ij}} \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{M} ：質量マトリクス、 \mathbf{D} ：減衰マトリックス、 \mathbf{f}_K ：接触力ばね力の重心等価力ベクトル、 \mathbf{x} ：変位ベクトル、 \mathbf{f} ：外力ベクトルの総和、 \mathbf{g} ：重力加速度ベクトル、 \mathbf{f}_w ：流体力ベクトル、 \mathbf{f}_b ：浮力ベクトル、 (\cdot) 、 $(\dot{\cdot})$ ：そ

それぞれ時間に関する1次および2次微分である。

本来、流体解析は、水と礫の相互作用、礫周辺の流体の流れを時々刻々に、計算することが望まれる。しかし、本解析は、計算負担を軽減するため、流速を礫塊との相対位置の関数として与え、初期に与えた流速と水深の範囲内にある要素に流体力が生じる流速分布モデルを使用した。

図-1は、解析モデルであり、水路長450 cm、水路幅30 cm、深さ50 cm、河床勾配11.3°に設定した。また、土石流の先端部に段波を形成させるために底面粗度を20 mm間隔に配置した。表-1は、解析基本値である。解析モデルと同様の実験結果⁹⁾から、初期水深は15 cm、初期流速は2.0 m/sに設定して解析を行った。

(2) 透過型の流木・土石流の捕捉性能評価

a) 計算条件

透過型の開口部は、開口部間隔 l と巨礫の最大粒径 $D95$ の比 $\beta (=l/D95)$ で設計される。本解析では、間隔比 β (鉛直間隔比 β_V 、水平間隔比 β_H)を現行の基準³⁾である $\beta_V = \beta_H = 1.0$ 、旧基準の $\beta_V = \beta_H = 1.5, 2.0$ の3ケースに設定した。また、流木容積率 K_w は、土石流の全体積に対する流木の体積の割合を表しており、0% (流木無)、3%、5%、10%にの4ケースとして、計算を行った。

b) 計算結果

透過型砂防堰堤の流木・土石流捕捉効果の評価は、以下の(3)式で表される捕捉率 P で行う。

$$P = \frac{V_G^{\text{Trap}} + V_W^{\text{Trap}}}{V_G + V_W} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 V_G : 礫の全体積、 V_W : 流木の全体積、 V_G^{Trap} : 捕捉した礫の体積、 V_W^{Trap} : 捕捉した流木の体積、である。

図-2は、流木容積率ごとの捕捉率である。図中の青丸は透過型の間隔比 $\beta_V = \beta_H = 1.0$ 、緑四角は $\beta_V = \beta_H = 1.5$ 、赤三角は間隔比 $\beta_V = \beta_H = 2.0$ である。青丸 ($\beta_V = \beta_H = 1.0$)、緑四角 ($\beta_V = \beta_H = 1.5$)に注目すると、流木の有無に依らず、捕捉率が80%以上であり、高い確率で土石流を捕捉できる構造であることがわかる。一方で、間隔比が1番大きい赤三角 ($\beta_V = \beta_H = 2.0$)に注目すると、流木がなく礫のみのときは、捕捉率が30%以下と小さいが、流木容積率が大きくなるごとに、捕捉率が大きくなっている。流木容積率が5%以上になると、他の堰堤構造と同等の捕捉率になることがわかる。図-3は、間隔比 $\beta_V = \beta_H = 2.0$ の透過型の閉塞状況の一例である。流木が無いとき、開口部から土石流が捕捉されずに開口部から流出している。流木容積率が3%以上になると、流木が開口部を閉塞することで、後続の土石流を捕捉していることがわかる。流木容積率が大きくなるほど、開口部の閉塞率が高くなり、後続の土石流を捕捉できている。

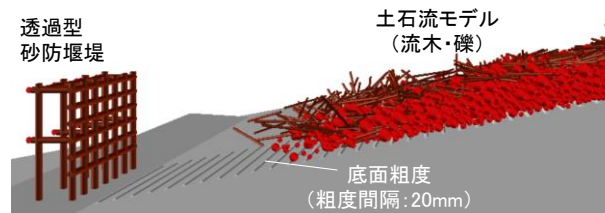


図-1 解析モデル

表-1 解析基本値

項目		値
水路	勾配	11.3°
	長さ	450 cm
	幅	30 cm
流水	流速	2 m/s
	水深	15 cm
礫	密度	2600 kg/m ³
	粒径	10~35 mm
流木	長さ	120 mm
	直径	6 mm
	密度	980 kg/m ³
要素間ばね	ばね定数(法線)	1.0×10 ⁶ N/m
	ばね定数(接線)	3.5×10 ⁵ N/m
	減衰定数	0.2
	粘着力	0 N
	摩擦角	0.404
計算条件	時間刻み	1.0×10 ⁻⁶ s

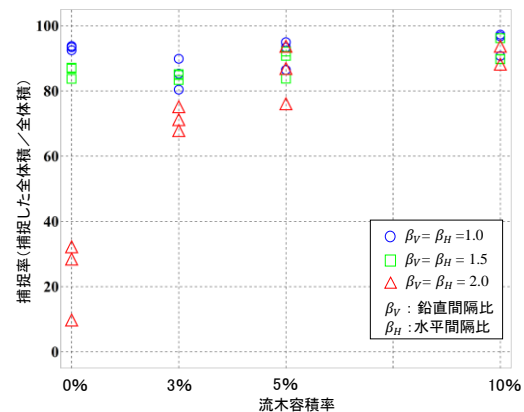


図-2 流木容積率ごとの捕捉率

間隔比が大きい構造(△)においても、流木が混入することで、捕捉率が上がる。

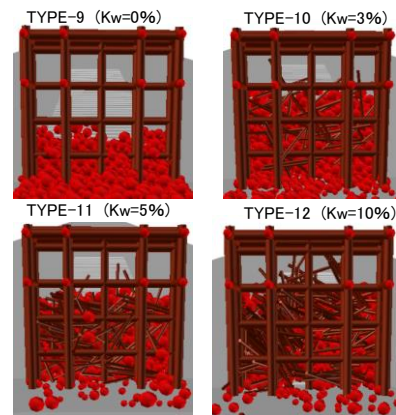


図-3 透過型の閉塞状況

〔流木が開口部を閉塞して、後続部を捕捉している。〕

以上より、本数値解析では、土石流中に流木が少量(約3%)でも混入している場合、開口部を流木が閉塞して開口部が小さくなり、土石流の後続部を捕捉することで捕捉率が大きくなることが分かった。

(3) 透過型に作用する流木混じり土石流の荷重評価

小松ら⁸⁾の実験室規模の土石流実験から得られた荷重～時間関係を数値解析で再現し、透過型に作用する流木混じり土石流の衝撃荷重評価の適用性を検討する。

堰堤構造は、開口部間隔比が1番小さい $\beta_v = \beta_H = 1.0$ を使用し、流木容積率は、10%として計算を行った。

図-4に、荷重～時間関係を示す。青線が実験の荷重～時間関係を表しており、青濃線が平均値、青薄線が各実験の結果である。赤線が解析の荷重～時間関係を表しており、赤濃線が平均値、赤薄線が各実験の結果である。実験と解析、それぞれの衝撃荷重は土石流先頭部が到達してから約0.25 s後に最大荷重付近まで上昇し、約0.15 s間最大荷重付近の値を計測し続けている。実験では、約1.0 s間かけて徐々に荷重が減衰するが、解析では、急激に荷重が減少しており、実験とやや異なる。しかし、最大荷重と継続時間を概ね再現できており、実験規模における最大荷重評価の予測が可能である。

5. 結言

本研究は、近年増加する流木災害の防止・軽減をするために、土砂災害現場での調査、山地溪流における流木調査について行った。その上で、対策構造物として、個別要素法を用いた流木混じり土石流における透過型砂防堰堤の性能評価を行ったものである。

本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 令和元年台風第19号で甚大な被害を受けた岩手県沿岸域において、土砂災害調査を実施し、災害発災のメカニズムを考察した。その結果、流木や土石流が暗渠や狭窄部を閉塞し、洪水氾濫を助長していることが多かったことから、上流域での透過型砂防堰堤や流木捕捉工の対策が必要であることが示唆された。
- 2) 山地流域における流木の堆積特性を明らかにするために、肱川流域の山地溪流において、流木流出と密接に関係のある流木天然ダムの調査を行った。流木天然ダムの形成要因として、流路脇の立木に流木が堆積して形成するタイプが多いことが分かった。ダムの構造特性として、樹齢が若く、胸高直径が小さい個体が流出して流木天然ダムを形成していることが分かった。
- 3) 個別要素法を用いた透過型の流木混じり土石流の捕捉性能評価を行った結果、開口部間隔が大きい場合でも、土石流中に流木が少量(約3%)混入していれば、開口部を流木が閉塞して、開口部が小さくなり、土石流後続部

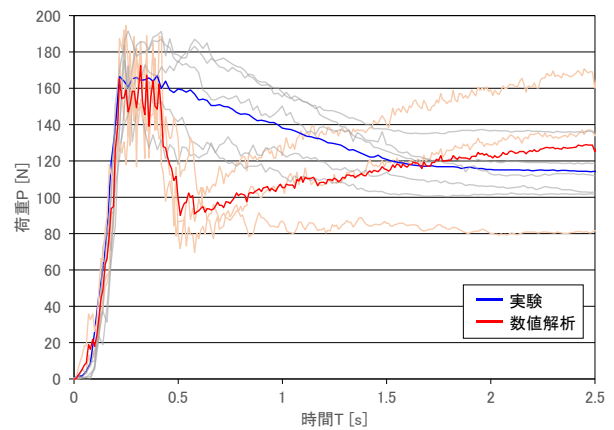


図-4 荷重～時間関係

〔実験で得られた荷重時間関係を概ね再現できている〕
最大衝撃荷重の再現性が高い

を捕捉することで捕捉率が大きくなることが分かった。
4) 流木混じり土石流衝撃荷重における透過型の耐荷性能評価を行うために、個別要素法を用いて、実験で得られた荷重～時間関係の再現を行った。その結果、最大衝撃荷重については予測可能であることが分かった。

今後の課題として、個別要素法を用いた透過型砂防堰堤の捕捉・耐荷性能評価において、災害調査におけるデータを蓄積させて、土石流の再現性について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 清水収：山地流域における天然流木ダムの形成・破壊と流木の流出過程，砂防学会誌，Vol.62，No.3，pp.3-13，2009。
- 2) 小森大輔，助川友斗，Thapthai CHAITHONG，風間聡：流域スケールでの流出流木量の推計モデルの構築，河川技術論文集，Vol.25，pp.639-644，2019。
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，国土技術政策総合研究所資料 No.904，2016。
- 4) Jung II Seo, Futoshi Nakamura, Kun Woo Chun, Suk Woo Kim, Gordon E. Grant: Precipitation patterns control the distribution and export of large wood at the catchment scale, Hydrological Processes, DOI:10.1002/hyp.10473, 2015。
- 5) 土木学会，地盤工学会：平成 28 年台風第 10 号による岩手県災害調査報告書，pp.44-47，2017。
- 6) 渋谷一，原木大輔，香月智：透過型砂防えん堤の流木混じり土石流の捕捉性能に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.62，No.1，pp.66-73,2009。
- 7) 香月智，渋谷一，大隅久，國領ひろし，石川信隆：個別要素法による透過型砂防堰堤の流木混じり土石流捕捉解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.69，No.1，pp.16-29，2013。
- 8) 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衝突荷重に及ぼす構造工学論文集，Vol.62A，pp.779-778，2018。