

土石流先端部への流木集積過程に関する数値解析的検討

(国研) 森林研究・整備機構森林総合研究所： ○鈴木 拓郎, 経隆 悠, 浅野 志穂

株式会社建設技術研究所： 村上 正人, 飯田 弘和, 高橋 佑弥, 奥山 遼佑

1. 背景及び目的

平成 29 年九州北部豪雨に代表されるように、近年極端豪雨により同時多発的に斜面崩壊が発生し、斜面上に生育していた立木が流木となり、下流域に甚大な被害をもたらす災害が発生している。極端豪雨は増加傾向にあり、このような流木災害の被害を軽減するための対策が必要である。

流木が土石流によって輸送される場合、流木の比重は一般的に土石流の比重よりも小さく、表層部に浮上して先端部に集積すると考えられる。施設によって流木を捕捉する場合、流木が先端部に集積した状態で捕捉することが効率的であると考えられる。

そこで本研究では、流木混じり土石流において流木が先端部に集積しやすい条件を、水路実験および数値計算に基づいて検討した。

2. 実験方法

(1) 実験水路と実験材料

実験水路は、株式会社建設技術研究所の長さ 10 m, 幅 30 cm, 高さ 50 cm の直線水路を用いた。実験砂は直径 3 mm 程度の均一砂とした。流木模型は、直径 5 mm, 長さ 75 mm の丸棒および自然木材の 2 種類を用いた。下流側を固定床区間として 10cm 高くした。上流側には固定床区間の底面と同じ高さになるよう深さ 10cm まで土砂と流木の混合材料を敷き詰めた。供給土砂量は 100 L, 供給流量は供給土砂量の容積の 1.0%程度 (約 680 本) とした。なお、下流側固定床区間の長さを 1, 3, 5 m と変化させて流下距離の長さの違いによる流木の先端部集積の違いを検討した。水路勾配は 10, 15, 20 度の 3 種類で行った。

(2) 計測項目

上流から定流 4.5 L/sec で水を供給して流木混じり土石流を発生させ、水路下流端で土石流のフロント部の流出土砂濃度、流出流木濃度を計測した。濃度の計測は水路下端に設置したレーン上で捕捉箱 (図-1) をスライドさせることで、流出する水、土砂、流木を直接採取する手法とした。また、流下中の土石流および流木の状況はビデオにより確認した。

3. 粒子法

流木が流れの表面に集中しようとする現象を再現するためには、土石流中の土砂のように平均濃度という場の平均量を取り扱うシミュレーション手法を適用することは困難である。したがって、流木要素を個別に表現することが必要であり、粒子法のような計算手法が適している。鈴木・堀田 (2015) は土石流の構成則に基づいた粒子法モデルを開発している。このモデルでは土砂は濃度を用いて表現しているが、流木は粒子を連結することによって個別に再現する

ことができる。流木 (連結要素) の計算方法は次のとおりである。

- ① 土石流粒子と同様に計算する。
- ② 粒子の相対位置がずれる。
- ③ 重心の座標変化量と角運動量が保たれるように、粒子の位置を修正する (Koshizuka et al., 1998)。

一方、応力を土石流粒子として計算すると、固体間の接触摩擦を生じさせることができない。一般的には個別要素法を併用して再現されるが、計算時間が非常に長くなる。そのため、固体粒子同士がある距離より近い場合 (接触判定) には、摩擦力を粒子の相対速度と逆方向に作用させる簡易摩擦項を導入した (摩擦力 = 固体粒子間の接触応力 × 摩擦係数)。

計算では、円柱材料と自然木材の違いは摩擦力が大きいと考え、摩擦係数を変化させることでその違いを表現した。

4. 分析方法

実験では、図-1 のような捕捉箱を用いて土砂と流木の濃度を測定したが、人力でスライドさせたため、捕捉箱で捕捉する容量を統一することはできない。したがって、例えば流木濃度の時間変化だけでは全体的な流木の集積状態を把握することは困難である。そこで、図-1 のように先端部からの累加通過体積と累加通過体積中の流木濃度の関係を分析して、流木の集積状態の程度を分析することにした。仮に先端部のみに流木が集積すれば先端部濃度だけ跳ね上がるような状態になるが、先端部付近全体に流木が集積した状態ではより大きな通過体積まで流木濃度が高い状態が継続することになる。本研究では後者の方が流木の集積が進んだ状態と判断している。このように、本分析方法によって局的ではなく全体的な流木集積の傾向を把握可能である。



先端部からどの領域まで集積が進んでいるかを定量的に比較するため、累加通過体積-累加通過体積中の流木濃度の関係を分析

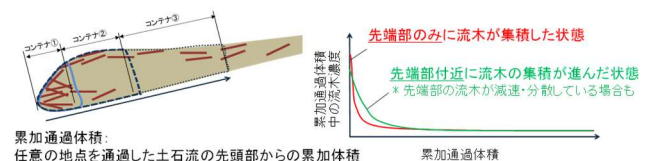


図-1 流木の先端部集積状態の分析方法の考え方

5. 結果

実験結果より、流下距離が長いほど集積が進行する条件（図-2）と、流下途中で集積状態から分散状態に変化する条件（図-3）に分かれることが明らかになった。分散状態が生じたのは、勾配 15 度では自然木材のみ、勾配 10 度では丸棒、自然木材の両方であった。つまり、勾配（土砂濃度）が大きいほど、あるいは流木材料の摩擦力が小さいと流下距離が長くなるに応じて集積が進行している条件と整理できる。このような傾向は粒子法による数値計算結果においても再現された。また、流下距離に応じて集積が進行していく条件の方が、流木濃度の最大値が大きいようであった。

6. 考察

流木は一般的に土石流よりも比重が小さいため、流れの表面付近に浮上して流れることは実験動画や数値計算上でも間違いないようであった。したがって、流速の速い表層の流れによって流木は先端部に集中していく。一方で、流木は底面等の境界条件から摩擦抵抗力を受ける。流木の集積が進行すると、流木移動層の厚さが大きくなったり、流木の回転運動の自由度が制限されたりするなどの影響で、流木が受ける摩擦抵抗力が大きくなると考えられる。そのため、一旦集積した流木が減速・分散したと考えられる。また、流木

が摩擦抵抗力によって減速・分散する際に、土砂からは摩擦駆動力が同時に働くと考えられ、摩擦駆動力は分散を抑制する方向に作用する。そのため、土砂濃度が大きい方が分散状態に遷移しにくいと考えられる。

以上から、土石流の先端部における流木濃度は流木が境界条件から受ける摩擦抵抗力と土砂から受ける摩擦駆動力のバランスによって最大値（平衡濃度）が決定され、その値を超えるようになると分散が生じる状態に遷移すると考えている。分散と集積を繰り返し、その平均的な状態が平衡状態ではないかと想定しているが、今後詳細に検討していく予定である。

7. 謝辞

本研究は令和 2 年度農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究(個別課題番号 19191196)の助成を受けたものである。ここに記して感謝申し上げます。

8. 引用文献

Koshizuka et. al. (1998) : Int. J. Numer. Meth. Fluids, 26, p.751-769
 鈴木・堀田 (2015) : 砂防学会誌, Vol.68, No.1, p.13-23

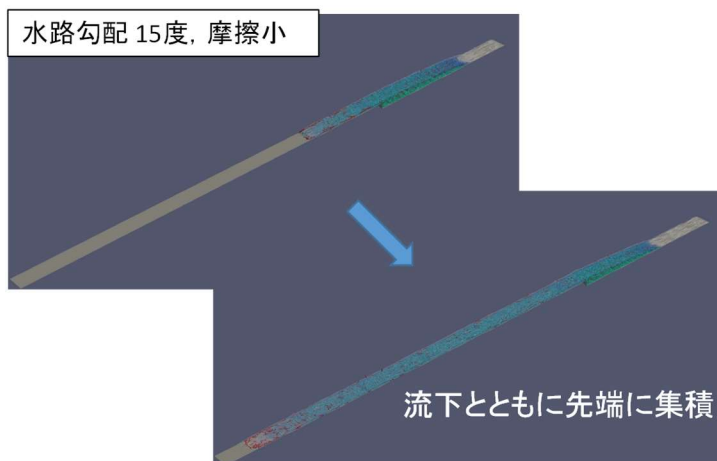


図-2 流下距離が長いほど集積が進行した代表例：15 度，丸棒（摩擦力小）

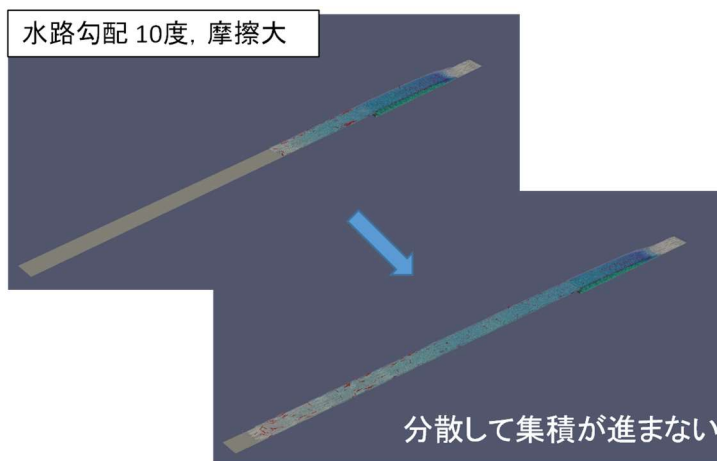
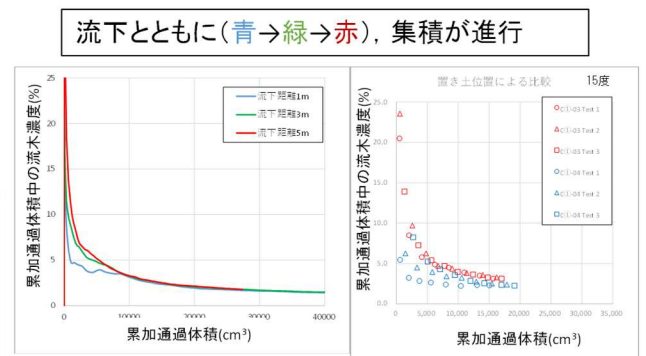


図-3 流下途中で集積状態から分散状態に変化した代表例：10 度，自然木材（摩擦力大）

