

混合粒径土石流の堆積に関する実験とモデルの提案

立命館大学大学院理工学研究科（現 国立研究開発法人土木研究所）○榊原 颯輝
立命館大学工学部 里深 好文
藤本 将光

1. 背景と目的

土石流の運動は、構成則と侵食・堆積速度式によって特徴づけられる。従来のモデルは均一粒径を仮定しているが、実際の土石流は幅広い粒度分布を持ち、粒径間の相互作用が流動・堆積に与える影響は十分に検討されていない。流動過程では、大粒子から小粒子への作用の検討が不足している。堆積過程では、異なる粒径の混合が堆積速度や堆積地形に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、異なる粒径間の影響を考慮した土石流の堆積モデルの構築を目的とし、水路実験を通じて、混合粒径の堆積特性について検討し、モデル化を試みた。

2. 実験方法

実験水路は長さ 8m 幅 0.2m の可変勾配水路である。堆積実験を行うために水路下流部に流動勾配（15度）から堆積勾配（1度）に変化する勾配変化点を設ける。流動、堆積区間ともに固定床とし、発生した土石流の堆積区間の様子をハイスピードカメラで記録し、堆積速度や流動深を映像から読み取った。

実験は2種類あり、一つは2種類粒径の存在比を変化させた堆積実験（実験1）。もう一つは大粒子の移動が小粒子の堆積に与える影響について検討する実験（実験2）。

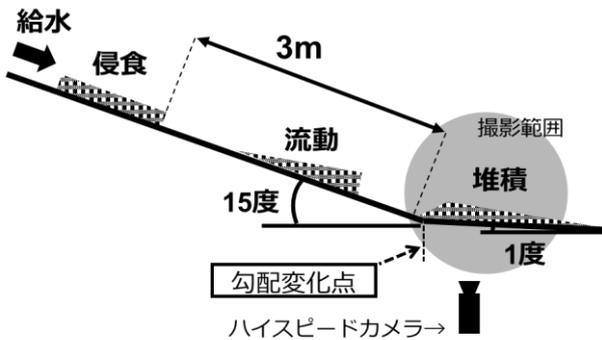


図1. 実験1の概要

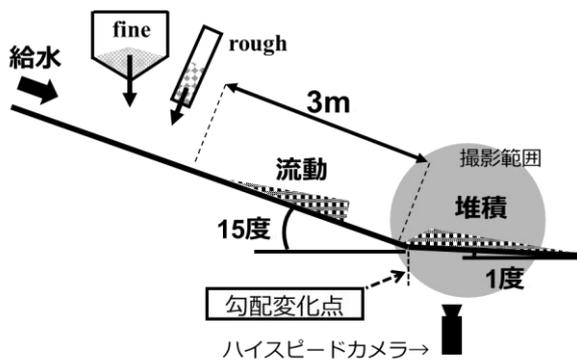


図2. 実験2の概要

実験1では図1のように勾配変化点から3m上流に10kgの土砂を敷き均し、1.2L/sの供給水流量で侵食させ土石流化させた。実験条件を表1に示す。使用した土砂は大粒子として珪砂1号（6mm）、小粒子として珪砂6、7号を使用した。大小2種類の粒子の存在率を25%ずつ変化させ、計9ケースの混合粒径の土石流の堆積実験を行った。なお、各粒子の比重はそれぞれ2.6g/cm³である。

また、実験2は、大粒子として10mm、小粒子として0.33mmの粒子を用いた。実験の概要を図2に示す。小粒子は供給土砂量を一定に保つため、ホッパーを使用した。ホッパーから流出する小粒子の量は100 cm³/sであり、水の供給流量が1.2L/sであるので、流下時の小粒子の土砂濃度は0.08となる。一方、大粒子については、400 cm³の土砂を供給し、供給時間を調整することで、全土砂に対する大粒子の存在率が0.70、0.45、0.33の3通りとなるように投入した。測定は、大粒子の運動による影響を調べるため、大粒子が停止する前の期間で行った。

3. 実験1の結果と考察

図3の黒プロットに、流動時および堆積物の小粒子の存在率の比較を示す（CASE1, 5, 9は除く）。プロットは小粒子 d と大粒子 D の比（ d/D ）別に表示している。流動時の小粒子の存在率 γ_{cf} は、堆積物の小粒子の存在率 γ_{df} より高いことがわかる。これは、流動時と堆積物の各粒径の存在率が変化することを示している。この存在比のずれは、堆積の支配粒子を誤認する要因となり、実際の堆積過程や地形と乖離を引き起こす可能性がある。

表1. 実験1の実験条件と実験結果

CASE	供給時の各粒子の存在率 (%)			C
	6mm	0.33mm	0.14mm	
1	100	0	0	0.34
2	75	25	0	0.35
3	50	50	0	0.26
4	25	75	0	0.38
5	0	100	0	0.22
6	75	0	25	0.18
7	50	0	50	0.15
8	25	0	75	0.13
9	0	0	100	0.10

4. 実験2の結果と考察

図4に、大粒子の存在の有無による小粒子の堆積速度の比較を示す。横軸は大粒子の存在率 γ_{dl} である。なお、大粒子混入のケースでは、堆積速度の測定期間を大粒子が停止するまでとしたため、堆積した粒子は小粒子のみである。図より、明らかに大粒子を混入させたケースでは堆積速度が小さくなり、その値は大粒子の存在率に関わらず、おおよそ元の1/3~5である。これは、大粒子の移動が小粒子の堆積速度を低下させる要因となり、3章での流動時と堆積物の小粒子の存在率のずれの要因の一つであると示唆する。

また、大粒子が停止すると、その上流側に逆勾配の地形が形成され、これに伴い小粒子の堆積量が増加する様子が観察された(図5)。

5. モデルの提案

実験1の結果から、流動時と堆積物の各粒径の存在率が変化することが明らかとなった。その原因として、各粒径で堆積能力の違いや、異なる粒径の混合による影響が考えられる。

前者について、粒子の堆積能力は昨年の研究¹⁾より濃度減衰率で表現できると仮定すると、各粒径の堆積能力 f_k は以下の式で表される。

$$f_k = -\frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{(C_* - C)}{uh} i_k = \delta'_d \frac{(C - C_*)(C_\infty - C)}{C_*} \frac{d_k}{h^2}$$

ここで、 C_* は堆積物の容積濃度、 C は土砂濃度、 C_∞ は平衡土砂濃度、 u は断面平均流速、 h は流動深、 d_k は各粒径である。この関係を用いて、流動時の存在率 γ_{tk} から堆積物の存在率 γ_{dk} への変換を以下の式で表す。

$$\gamma_{dk} = \frac{\gamma_{tk} f_k}{\sum \gamma_{tk} f_k}$$

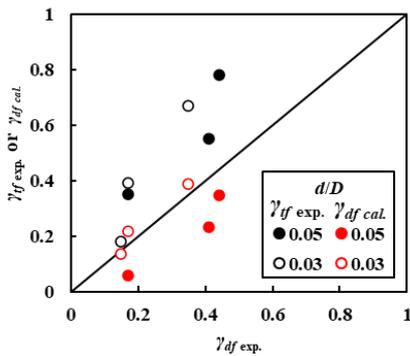


図3. 流動時及び堆積物の小粒子の存在率

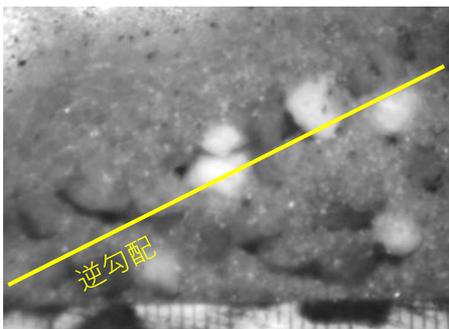


図5. 大粒子停止で逆勾配が形成され小粒子は堆積

図3の赤プロットは、堆積物の小粒子の存在率 γ_{df} について、上式の計算値と実験値を比較したものあり、両者がよく一致していることが確認できる。

次に後者について、次の条件を組み込んだ。①各粒径はそれぞれの限界速度に達するまで停止しない。②大粒子運動中は小粒子の堆積を低下させる。③大粒子の停止による逆勾配地形の発生で、小粒子は限界速度に達していなくても堆積。ここで、限界速度とは、現在の濃度で土石流が流動を継続できる平衡速度と仮定し以下の式で表す。

$$U_{\infty k} = \frac{2}{5} \left[\frac{gh \sin \theta_\infty \left\{ \frac{\rho_t}{\sigma} \right\}^{1/2} h}{a \sin \alpha} \right] \frac{h}{\lambda d_k}$$

ここに、 θ_∞ は平衡勾配、 λ はBagnoldの線濃度である。また、条件②について、大粒子による小粒子の堆積の抑制の程度は、流動中の小粒子の存在率と粒径比に比例すると仮定し、堆積速度を以下の式で表した。

$$i_k = \delta'_d \gamma_{dk} \frac{(C_\infty - C)}{C_*} u \frac{d_k}{h} \gamma_{tk} \frac{d_k}{d_{k-1}}$$

以上のことを踏まえ、全体の堆積速度を以下の式で表す。

$$i = \sum \gamma_{dk} i_k$$

図6はCASE4の堆積縦断面の結果を示している。プロットは実験結果を示し、実線は本モデルの計算結果、破線は代表粒径を用いた従来の計算結果を示している。堆積縦断面の計算結果と実験値とは概ね一致している。特に、勾配変化点から30cm下流以降においても一致が見られ、従来の計算でみられた堆積の遡上を解消することができた。

6. 参考文献

- 1) 榊原 (2024), 令和6年度砂防学会研究発表会概要集, P-208

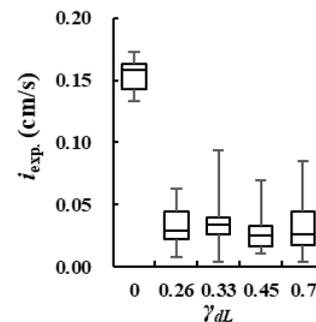


図4. 大粒子の存在有無と堆積速度の比較

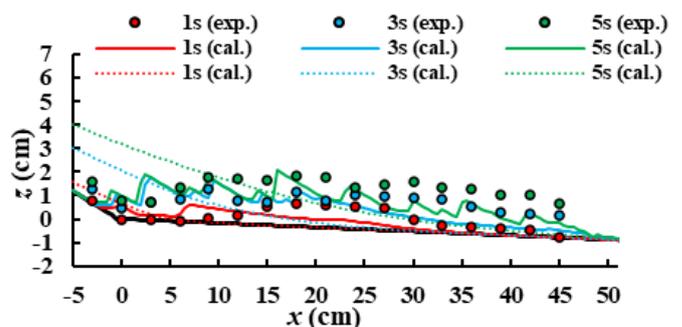


図6. 堆積縦断面の実験結果と計算結果 (CASE4)