

微細土砂を用いた循環実験における土石流の堆積発生メカニズムに関する検討

東京大学農学部 ○小林 拓琉
 東京大学大学院農学生命科学研究科 堀田 紀文
 宇都宮大学農学部 酒井 佑一

1. はじめに

土石流の流動・堆積機構を明らかにすることは、砂防計画において重要な課題である。微細土砂からなる相対水深の比較的大きい土石流（泥流）においては、高濃度の流れが低勾配でも維持されることが知られている。流れの上層に乱流が形成され、下層では粒子が層流的な挙動をしているとする二層モデルによる説明が提案されている¹⁾²⁾ものの、その流動機構は十分に解明されていない³⁾。

そこで本研究では、微細土砂を用いた後述の循環実験を主な対象として、二層モデルの想定を踏まえた上で、泥流の流動・堆積機構について検討することを目的とした。

2. 二層モデルに基づく泥流の応力構造

ここでは、江頭ら¹⁾の二層モデルについての概要を述べる。江頭ら¹⁾は、移動床土上の平衡状態を対象に行った水路実験の結果から、図1のように流れ上層で乱流により粒子が浮遊し、下層では粒子が層流状態で粒子間応力が卓越する二層モデルを提案した。定常等流の流れにおいて、河床底面での力の釣り合いから以下の平衡勾配 θ_e が得られる。

$$\tan \theta_e = \frac{\int_0^{\delta} (\sigma/\rho - 1) c dz}{\int_0^{\delta} (\sigma/\rho - 1) c + 1 dz} \tan \Phi \quad (1)$$

さらに、下層に既存の石礫型土石流の構成則⁴⁾を適用すれば、その流速分布は式(2)で表される。

$$\frac{du}{dz} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\int_z^h \{(\sigma/\rho - 1) c + 1\} dz \sin \theta - \left(\frac{c}{c_*}\right)^{0.2} \int_z^{\delta} (\sigma/\rho - 1) c dz \cos \theta \tan \Phi}{f_d + f_f}} \quad (2)$$

また上層についても、仮想原点からの対数則を用いることにより、その流速分布は式(3)で表される。

$$\frac{u(z)}{u_{*1}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z - \delta + \zeta_0}{\zeta_0} + \frac{u(\delta)}{u_{*1}} \quad (3)$$

ここで、 σ は土砂粒子密度、 ρ は水の密度、 c は土砂濃度、 c_* は充填濃度、 d は粒子径、 Φ は内部摩擦角、 f_d 、 f_f は濃度からなる関数、 κ はカルマン定数、 u_{*1} は境界での摩擦速度、 ζ_0 は下層内に取られた仮想原点である。

江頭ら¹⁾は、濃度分布を一様と仮定し式(1)、(2)、(3)を用いて流速分布計算を行った。その結果、粒子径が小さい場合に、下層では実験値よりも計算値が過大な流速となった。また、同様の実験をさらに幅広い条件で行った場合には、堆積時に河床波が発生して平坦河床が形成されず、平衡勾配が測定不能な場合があることが指摘された⁵⁾。

3. 方法

本研究では、主に酒井ら⁶⁾が行った以下の実験で得られたデータを用いて解析を行った。

長さ 8 m、幅 0.1 m の矩形直線水路において、水路底面に粗度として粒径 2.9 mm の均一粒径の土砂粒子を貼り付け、下流に設置したタンクにおいて水と土砂を攪拌しながら混合し、サンドポンプで吸い上げることで一定流量・濃度の流れを上流から供給した（図2）。実験の各ケースで上流端から供給する流量と土砂濃度を実験条件として設定し、土砂の堆積が生じるまで 0.1° 刻みで勾配を下げていき、堆積発生時の流動深と勾配を計測した。流れの構成材料としては中央粒径 0.11 mm、内部摩擦角 34°、反発係数 0.85 の珪砂を用いた。

本研究で行った解析の概要を以下に示す。最初に、江頭ら¹⁾と酒井ら⁶⁾を踏襲し、濃度分布を一様、かつ堆積開始時に平衡状態であるとして、二層モデルに基づいて式(1)、(2)、(3)を用いて流速分布計算を行った。ただし、一様濃度には実験で得られた輸送濃度 C_b を用いた。

さらには、二層モデルの妥当性を詳細に検討するために、上下層での一様な濃度分布を一様と仮定するのではなく、上層と下層にそれぞれ平均濃度を設定し、実験条件を満たすように式(2)、(3)を用いて流速分布計算を行った。ここでは、 δ が式(1)から定まるわけではないことに注意が必要である。

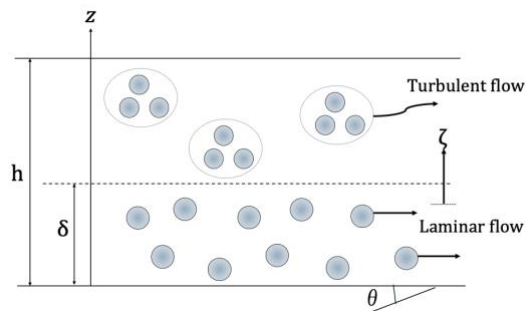


図1 江頭ら¹⁾の二層モデル

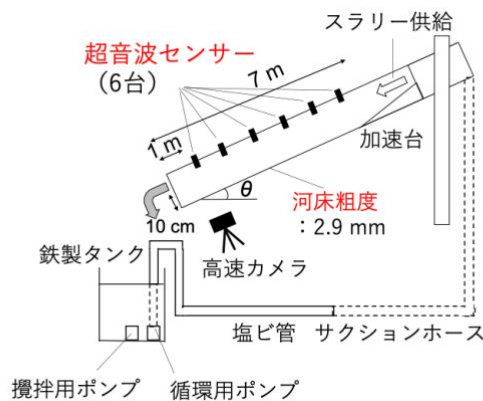


図2 循環実験の模式図

4. 結果

4.1 酒井ら⁹⁾の循環実験の結果

酒井ら⁹⁾の循環実験の結果の概要を以下に示す。堆積が生じる勾配までは、泥流は固定床上の流れを形成したが、ある勾配になると下流付近で堆積層が形成され始め、それが上流側へと徐々に発達し、上流進行する河床波を形成した。また例えば、濃度が12%程度の流れでは、堆積発生時の勾配が0.8°になったように、低勾配まで高濃度の流れが維持されることが確認できた。

循環実験では、堆積発生の直前まで固定床上に流れを形成できるため、酒井ら⁹⁾は、堆積開始時の勾配を平衡勾配とみなすことで幅広い条件に対して江頭ら¹⁾と同様の検討が可能になるとしている。

4.2 江頭ら¹⁾の二層モデルの適用結果

江頭ら¹⁾と酒井ら⁹⁾を踏襲して行った解析の結果を以下に示す。循環実験においても、江頭ら¹⁾で示唆されていたように、下層で大きな流速が生まれるために実験結果を再現できない。さらに、流動深の計算値と実験値の差異を相対水深(h/d)で整理すると(図3)、循環実験の範囲では計算値が常に実験値を過小評価し、また差異と相対水深の間に明確な相関はない。また参考として、移動床上に平坦河床が形成される平衡状態を対象とした既往研究¹⁵⁾についても同様に見ると、層流から乱流への遷移が始まるとされる相対水深が30の部分²⁾を境に、それ未満の部分では、差異は正負の範囲に共に存在するのに対し、30以上の部分では差異は常に正、すなわち常に計算値が実験値を過小評価していることがわかる。

4.3 上下層で濃度の異なる二層モデルの適用結果

続いて、二層モデルにおいて上下層で異なる平均濃度を想定して行った解析の結果を説明する。各ケースにおいて流量が実験値に合うような下層平均濃度 C_s 、上層平均濃度 C_e 、下層厚比 δ/h をまとめたもの(図4)から、殆どのケースで実験値に最も近い条件となるのは二層モデルではなく、全層乱流とした場合であることが明らかになった。ただし、全層乱流として、流量と輸送濃度が実験値に一致するように流速分布の計算を行った場合でも流動深は実験値に一致せず、その差異は土砂濃度の影響を受けない一方、抵抗係数 f に対応して増大することがわかった(図5)。

5. 考察とまとめ

本研究から、微細土砂からなる流れにおいては、従来提案されている二層モデルに既存の構成則や対数則を単純に適用するだけでは現象を十分に説明できないことが明らかとなった。

微細土砂を用いた循環実験における流れでは、それが土石流と同程度の高濃度な流れであっても、堆積に先立って全層が乱流状態とみなせることから、土石流層内で生じる粒子間応力を介さない形で堆積が生じる可能性も考えられる。しかし、その場合においても依然として実験値との乖離は大きいこと、その程度が抵抗係数 f と対応するという系統的な傾向があることから、泥流の応力構造について、より詳

細な検討が必要だと考えられる。今後、濃度分布を考慮したモデル検証や、水路実験における流れの内部構造の測定などを通して研究を継続していく予定である。

参考文献

- 1) 江頭ら. 京大防災研年報, 32, B-2, pp.359-369, 1994.
- 2) Hotta N. & Miyamoto K. International Journal of Erosion Control Engineering, Vol.1, No.2, pp.54-61, 2008.
- 3) Winterwerp J.C. et al. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.116, No.1, pp.36-51, 1990.
- 4) Egashira S. et al. Proc. of 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, pp.340-349, 1997.
- 5) Itoh T. & Egashira S. Proc. of 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, pp.151-163, 2007.
- 6) 酒井ら. 令和4年度砂防学会研究発表会概要集, pp.649-650, 2022.

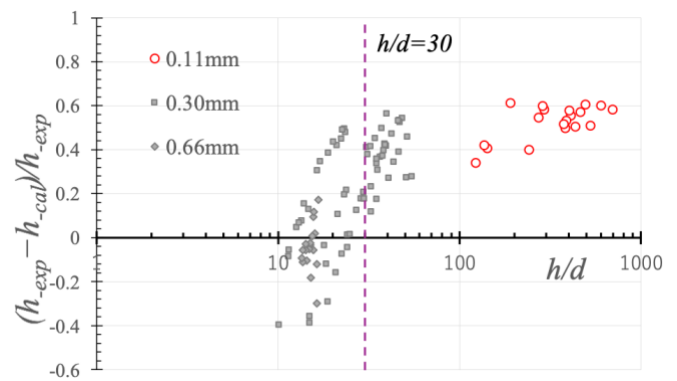


図3 循環実験(赤)と既往研究¹⁵⁾(灰)における流動深の実験結果と計算結果の差異

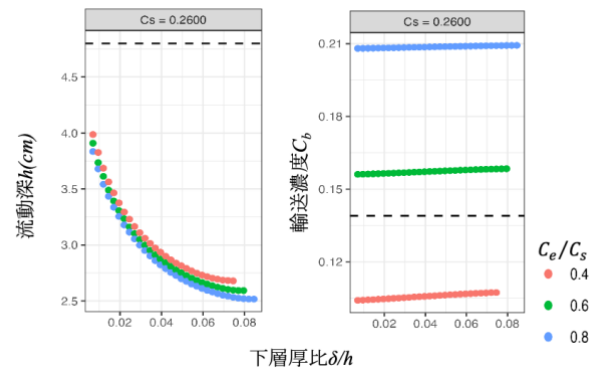


図4 固定床条件での感度分析の例(点線は実験値)

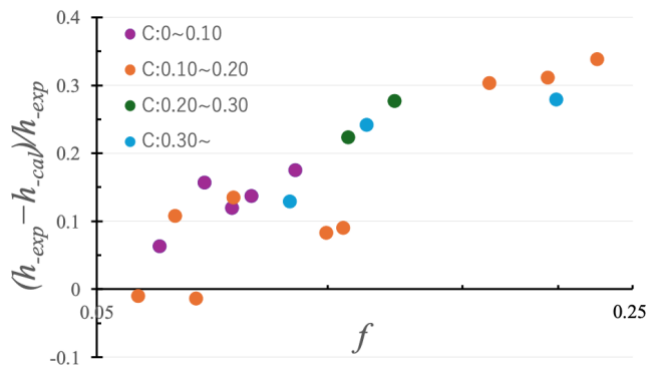


図5 抵抗係数 f と流動深の実験結果と計算結果の差異