

透明粒子を用いた土砂流動構造の可視化

豊橋技術科学大学 ○松田達也・内藤直人・安部萌・濱野真伍

1. 緒言

気候変動に伴う極端で局所的な気象現象の増加により、土砂災害の頻発化と激甚化の傾向が見られる。例えば、短時間に集中して大雨が発生すると、土砂が流動し、土石流化する。土石流は土砂と水が混合して約 10 m/s 程度の速度で溪流を流下する現象であり、溪流の近隣地域に甚大な被害を引き起こす可能性が高い。このため、流動特性を十分に把握することで災害リスクを低減させることができる。しかし、これまでのところ、映像や非接触型計測による表層部の挙動把握はされているものの、土石流の内部構造に関しては十分な現象解明に至っていない¹⁾。また、実験的に土砂流動を観測する方法もあるが、粒子群と間隙水の挙動を同時計測するのが困難であった。土石流の内部構造を解明することは、土石流の平面的な流動挙動を詳細に説明できるだけでなく、3 次元的な流動挙動を把握できる。これにより、土石流が構造物等に作用した際の外力を定量的に評価でき、抜本的な対策を提案することが可能になる。

本研究は、従来は粒子群と間隙水の挙動を同時計測するのが困難であった土砂流動実験に対し、水と屈折率が等価な新しい粒状材料を用いることで、粒子群と間隙水の同時計測を可能にした。そのうえで、実験により得られた画像をもとに PIV (Particle Image Velocimetry) 解析により流動中の挙動を可視化し、定量的な評価を試みた。

2. 検討方法

連続性を有する土砂流動を模擬するため、ボールミル回転装置を用い、円筒容器 (外径 100 mm (内径 88 mm)、長さ 50 mm のアクリル製) を装置回転部に搭載して実験を実施した。地盤材料として用いた材料は、NOK 株式会社が開発した新素材「MEXFLON®」のフッ素樹脂製の粒子で、水の屈折率 (1.333) と等価で、比重が 2.06 である (以下、透明粒子と称する)。粒子形状は円柱形と楕円形の 2 種類あり、円柱形は直径 2.89 mm、高さ 3.17 mm である。楕円形は直行する 3 軸の長軸: $a = 4.30$ mm, 中間軸: $b = 3.32$ mm, 短軸: $c = 2.79$ mm であり、丸みの強い塊状の特性を有する。透明粒子の地盤材料としての適用性を確認するため、最小・最大密度試験、安息角試験、透水試験を実施したところ²⁾、表-1 の結果を得た。これより、いずれも地盤を模擬した土砂流動構造を可視化するための実験に適用可能な材料であることを確認した。

ボールミル回転装置による流動実験は、透明粒子のみの流動挙動を把握するため、円筒容器内に乾燥状態での透明粒子を堆積させた条件 (以下、Dry Condition) と、水-土粒子の混合に伴う土砂流動構造を把握するため、容器内を水で満たして飽和状態で透明粒子を堆積させた条件 (以下、Sat. Condition) の 2 条件で実施した。流動挙動が比較的安定して観察できるように回転速度を 100 rpm (回転速度 10.47 rad/s) で実施した。流体の挙動を把握するために、Sat. Condition では粒径約 50 μm のトレーサーを混入した。実験時の現象を観察するため、高速度カメラによる撮影を行い、得られた画像を粒子画像流速測定法 (PIV) により流動挙動を定量的に評価した。

表-1 透明粒子の物性値

	円柱形	楕円形
最小密度 (g/cm ³)	1.281	1.299
最大密度 (g/cm ³)	1.356	1.383
安息角 (deg.)	35.2	32.1
透水係数 (m/s)	4.01×10^{-3}	4.07×10^{-3}

3. 結果と考察

3.1 Dry Condition

図-1 に PIV 解析によって得られた速度ベクトルを示す。速度値のカラーコンターは最小 0.0~最大 500 mm/s の範囲で示した。同図に各粒子形の安息角と同等の角度に相当する線 (円柱形は 36°, 楕円形は 32°) を赤線で示した。まず、流動中の土砂は、静的な状態で計測した安息角と概ね同等の傾斜で粒子が流動していることがわかった。そのうえで、流動が安定する中央付近をみると、粒子形状によらず 200 mm/s 以上の速度で流下していることがわかった。流動状況を詳細に分析すると、表層より粒子 2~3 個分の層厚で流動しており、一様な層状で流動する現象と減速を繰り返しながら流動した。層状で流動する際は滑動するような現象が発生し、減速が生じる場合は流動粒子が下層の低速粒子と接触し、粒子鎖のような粒子の繋がりが生じた。その後、上部の粒子が回転するように粒子鎖から剥離して流動するような現象が見られた。この現象は前田ら³⁾が示した傾向に類似すると考える。楕円形の方が円柱形よりも円滑に流動しているような傾向が見受けられた。

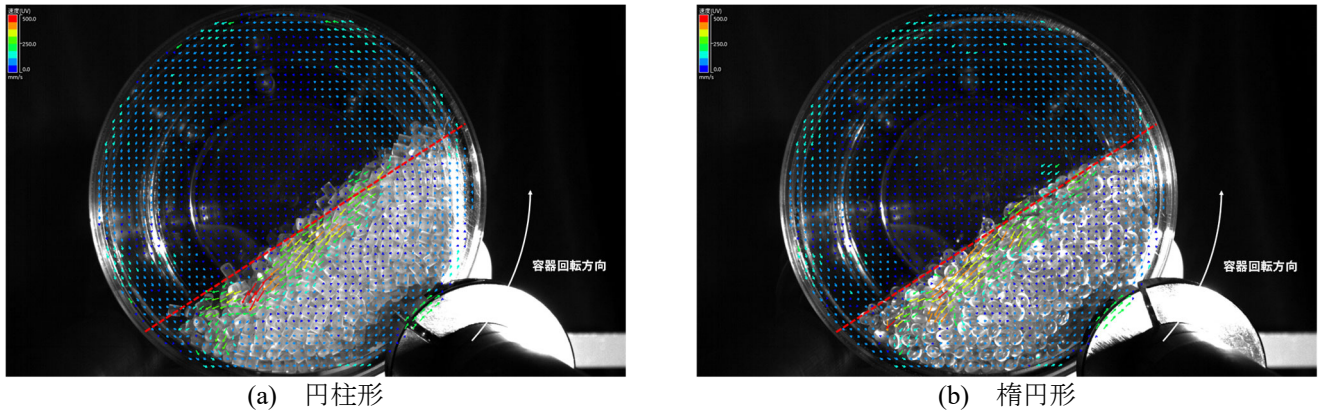


図-1 Dry Condition における粒子流動中の速度ベクトル

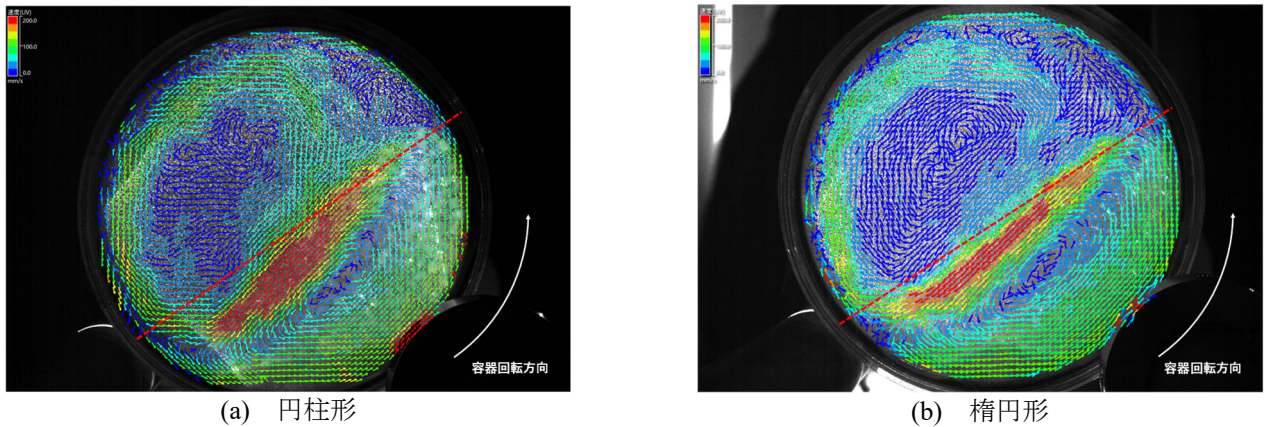


図-2 Sat. Condition における水-粒子流動中の速度ベクトル

3. 2 Sat. Condition

図-2 に PIV 解析によって得られた速度ベクトルを示す。速度値のカラーコンターは最小 0.0～最大 200 mm/s の範囲で示し、安息角と同等の角度を赤線で示した。飽和状態での傾斜角度は各粒子の安息角と同程度の角度であることがわかった。円柱形および楕円形粒子ともに流動土砂の表層より粒子 3～4 個分まで 200 mm/s 程度の速度で一様かつ連続的に流動していることが明らかとなった。トレーサーを混入した水の挙動を観察すると粒子が一様に流動している際は、粒子と同様に間隙水も流下していることがわかった。

4. 結言

本研究では、土砂流動構造を可視化するために透明粒子を用いた実験を実施し、以下の結論を得た：

- ・ 透明粒子と PIV 解析の組合せにより、土砂流動中の内部速度構造を可視化した。
- ・ 粒子形状や乾燥・飽和状態に関わらず、概ね安息角と同等の傾斜で流動していることが明らかとなった。
- ・ 乾燥状態では層状流動と減速が繰り返されるのに対し、飽和状態では一様かつ連続的な流動が生じた。しかし、乾燥・飽和状態によらず表層より粒子数個分の深度まで一様に流動することがわかった。
- ・ 飽和条件では粒子と間隙水の連成的な流動が示唆された。

謝辞

JSPS 科研費 挑戦的研究(萌芽) 25K22113, (一財)砂防・地すべり技術センター研究開発助成, 公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 宮田秀介, 野中理伸, 鶴本孝也, 上小牧和貴, 岩男忠明, 藤田正治: TDR センサーを用いた土石流の間隙流体土砂濃度の現地観測, 砂防学会誌, Vol.74, No.4, pp.42-47, 2021.
- 2) N. Naito, S. Hamano and T. Matsuda. "Dam-break dynamics of transparent granular media in water using multi-sectional visualization." Soils and Foundations, Vol. 66, Issue 3, 2026.
- 3) 前田健一, 舘井恵, 福岡雅俊: 個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりのマイクロメカニクス, 砂防学会誌, Vol.64, No.4, pp.3-14, 2011.