

均一粒径土石流における流れの遷移：間隙水圧の測定

京都大学大学院理学研究科 ○酒井 佑一
 東京大学大学院農学生命科学研究科 堀田 紀文

1 はじめに

土石流の流動機構は、主に均一粒径土石流を対象に検討されてきた。水路実験により、粗粒砂からなる土石流は粒子間応力が卓越した層流状の流れ（石礫型）、細粒砂からなる土石流は乱流状の流れ（乱流型）となることが知られている。

このような流れのマクロな状態を判別する指標として流動深と粒径の比（相対水深）が用いられることが多い¹⁾。相対水深が10程度の流れは石礫型に対応し、粒子間応力のモデル化をもとに構成則が提示されてきた。一方、相対水深が20程度を超えると構成則によって表現される流動特性から外れることが指摘されている。このような流れは乱流型への遷移状態であると考えられ、流れ上層に乱流層をもつ二層構造となることが流速分布の検討をもとに指摘されている²⁾が、応力を直接測定した例はない。また、相対水深は単純な幾何学的指標であるため、流れの遷移を表す指標として直感的に使いやすいものの、その物理的意味はあいまいである。

そこで本研究では、流れの遷移領域における土石流の応力を間隙水圧の測定によって検討し、構成則をもとに定義された無次元数を用いて領域区分することを目的とする。

2 間隙水圧の測定実験と結果

実験では長さ8 m、幅0.1 mの矩形水路を使用し、固定床上を流れる均一粒径土石流を対象とした。用いた均一粒径土砂の粒径 d は6種類で、それぞれ0.2, 0.5, 0.8, 1.3, 2.2, 2.9 mmである。水路上流に長さ3 m、厚さ0.1 mで土砂を堆積させて移動床区間とし、上流端から定期的に水を供給することで土石流を発生させた。下流端から長さ4.5 mの区間は、粒径2.9 mmの均一粒径砂を粗度として貼り付けた固定床としており、移動床区間で発達した土石流が流下する。実験条件として、水路勾配 θ は13, 15, 17°の3種類、上流端からの供給水量は1, 2, 3, 3.5 L/sの4種類とした。

土石流の流動深は、下流端から1 mの位置に設置した超音波センサーによって測定した。間隙水圧の測定は、自作のダイアフラムを感圧面として水路側壁に設置し、シリコンチューブにより気密を保ったままガス用の微差圧センサーと接続することで行った³⁾。本実験では底面での間隙水圧を測定した。感圧面設置個所にはビニールメッシュを貼り付け、感圧面に対する粒子の衝突の影響を防いだ。土石流が疑似定常等流状態になったとき、下流端で直接採取により土石流の密度 ρ_m を測定し、対応する区間の平均流動深 h を用いて静水圧 $P_{static} = \rho_w g h \cos \theta$ 、全圧力 $P_{total} = \rho_m g h \cos \theta$ を求

めた。ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。間隙水圧は、同区間の平均値 P_{exp} を検討の対象とした。

本実験で得られた全ケースの抵抗係数 f と相対水深 h/d の関係を図1に表す。比較のために石礫型土石流と清水乱流を想定した抵抗係数の理論線も示した。粒径2.9, 2.2 mmのケースは石礫型土石流の理論線とよく対応し、全層が層流であると考えられる。また粒径1.3, 0.8 mmのケースは、本実験での土砂濃度 c の範囲（0.15–0.3程度）を考慮すると石礫型土石流の理論線よりも値が大きい傾向にあるものの、理論線の近傍に位置している。一方、粒径0.5, 0.2 mmのケースは石礫型土石流の理論線から1オーダー程度大きい値をとっており、全層が層流の流れとは異なる可能性がある。

図2は間隙水圧の測定に成功したケースを対象に、静水圧と比較した結果である。間隙水圧は、粒径0.2 mm以外のケースにおいて静水圧程度であるのに対して、粒径0.2 mmではすべてのケースで大きな過剰間隙水圧が発生した。

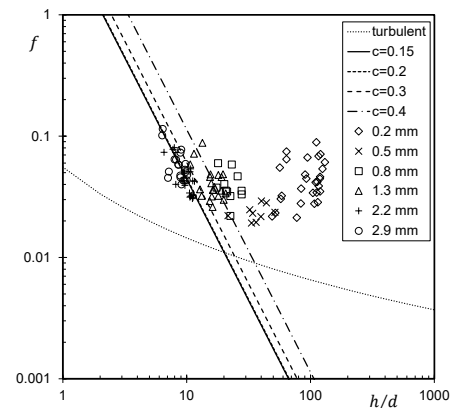


図1 抵抗係数 f と相対水深 h/d の関係。点線：清水乱流の理論線、それ以外の線：石礫型土石流の理論線。

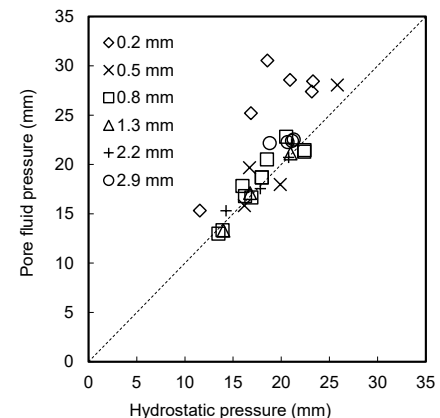


図2 間隙水圧の測定結果と静水圧の比較（水頭表示）。

3 流れの遷移における土石流の応力構造の変化

本研究における土石流の過剰間隙水圧の要因として以下のものが考えられる。

- ・ 間隙水の浸透流による圧力勾配
- ・ 乱流による粒子骨格の解放（粒子の浮遊）
- ・ 粒子が層流状態の流れにおける間隙水の乱れ

本研究では疑似定常等流状態で検討しており、浸透流による過剰間隙水圧の影響は小さいと考えられる。よって、図2で見られた過剰間隙水圧は、残りの二つの要因（流れが層流か乱流か）を反映しているといえる。以下では土石流の流れの遷移を記述する無次元数として、構成則をもとに定義されたレイノルズ数を用いて検討する。

土石流に対するレイノルズ数は慣性力と流動応力の比によって定義される²⁾：

$$Re_D = \frac{\rho_m/\rho_w}{K(c)} \left(\frac{h}{d}\right)^2. \quad (1)$$

ここで、 $K(c)$ は構成則に現れる土砂濃度 c の関数である。図3は測定された間隙水圧 P_{exp} を Re_D によって整理した結果である。ここで、 P_{exp} は静水圧 P_{static} と全圧力 P_{total} によって正規化している。図3により、粒径0.2 mmのケースが存在する $Re_D > 20000$ の領域では全圧力に相当する値をとっていることがわかる。図1の結果も合わせて考えると、 $Re_D > 20000$ の領域では全層で乱流によって粒子が浮遊することで過剰間隙水圧が発生していると考えられる。

一方で、 $Re_D < 20000$ の領域に存在するケースでは、間隙水圧が全圧力より低く、静水圧に比較的近い値をとった。これらの流れは層流状態なのであろうか？ 粒子が層流状態の流れにおいては、間隙水の乱れによるレイノルズ応力で過剰間隙水圧が発生すると考えられる。これは粒径に比例する粒子間隙スケールの乱れであり、間隙水の乱れによるレイノルズ応力 P_f は構成則をもとに以下のように表される³⁾：

$$P_f = \rho_w k_f ((1-c)/c)^{2/3} d^2 (\partial u / \partial z)^2. \quad (2)$$

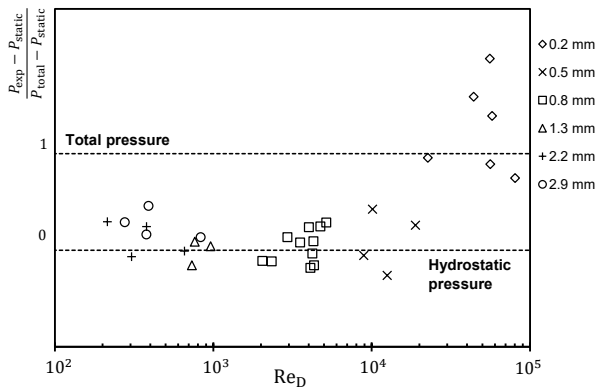


図3 レイノルズ数 Re_D による間隙水圧の測定値 P_{exp} の整理。 P_{exp} は静水圧 P_{static} と全圧力 Re_D により正規化。

ここで、 k_f は実験定数、 $\partial u / \partial z$ は速度勾配である。図4は $Re_D < 20000$ の領域に存在するケースに対して、測定された過剰間隙水圧 $P_{exp} - P_{static}$ と間隙水のレイノルズ応力 P_f を比較した結果である。理論値の算出の際には、流速分布として3/2乗則³⁾を仮定し、底面での速度勾配の値を用いた。また、土砂濃度分布は一様を仮定している。

図4より、粒径2.9, 2.2, 1.3 mmのすべてのケースで P_f は過大評価の傾向にあるものの、過剰間隙水圧の実験値と正の相関関係にあることがわかる。また、式(2)で表される関係と対応して、粒径が大きくなるにつれ過剰間隙水圧の実験値も大きくなる傾向にある。つまり図1の結果も合わせて考えると、粒径2.9, 2.2, 1.3 mmのケースでは全層が層流であり、間隙水の乱れにより過剰間隙水圧が発生していると考えられる。過剰間隙水圧を過大評価した要因としては、土砂濃度一様を仮定したものの実際には底面付近がより高濃度であった可能性や、流速分布に対する3/2乗則の仮定が実際の底面付近の速度勾配を過大評価した可能性が考えられる。

一方、粒径0.8, 0.5 mmケースでは、過剰間隙水圧の実験値が P_f とよく対応するケースがあるものの、一部のケースで1オーダー大きい値を示した。このようなケースでは間隙水の乱れによって過剰間隙水圧を説明することはできず、図3において Re_D の増大とともに過剰間隙水圧が増大する傾向にあることから、乱流による粒子の浮遊が部分的に生じていることを示唆する。つまり、図3において $Re_D = 3000$ 程度を境として、層流から乱流への遷移が始まるといえる。

以上のことから、 $Re_D < 3000$ は全層が層流状態であるのに対して、 $Re_D > 20000$ では全層で乱流によって粒子が浮遊していると言える。その間の $3000 < Re_D < 20000$ は層流から乱流への遷移領域であり、既往研究での指摘^{1),2)}も踏まえると、遷移領域では二層構造の流れにおいて Re_D の増大とともに上層に乱流層が徐々に発達すると考えられる。

参考文献

- [1] Hotta, N. & Miyamoto, K. (2008). *IJECE*, **1**(2), 54–61.
- [2] Itoh, T. & Egashira, S. (2007). *Proc. of DFHM4*, 151–163.
- [3] Hotta, N. (2012). *NHESS*, **12**, 2499–2505.

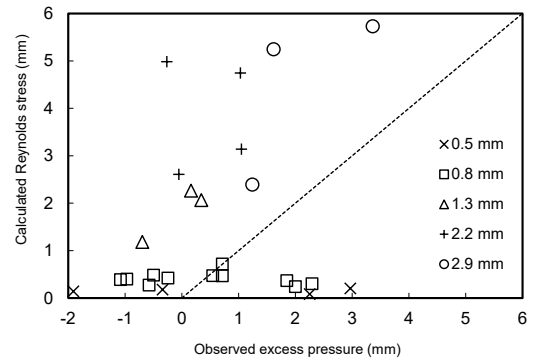


図4 過剰間隙水圧の実験値と、間隙水の乱れによるレイノルズ応力の理論値の比較（水頭表示）。