

土石流の流動特性に対応した間隙水圧の変化

東京大学大学院 ○堀田 紀文

1. 研究の背景と目的

土石流の流動特性は、初期条件・境界条件に対応して形成される土石流内部の応力構造によって決定される。土石流の応力構造は構成則によって記述され、その検証が水路実験などによって精力的に実施されてきた。しかしながら、内部応力の測定は困難であり、多くの場合、流速分布や抵抗係数などを用いた包括的な検証にとどまっているため、土石流の内部応力の実態に関しては不明な点が残されている。土石流の内部応力としては、構成粒子の衝突、接触摩擦による粒子間応力と、間隙流体における応力が存在すると考えられている¹⁾。このうち、間隙流体の応力は、現地観測で間隙水圧の測定に成功した例²⁾がある一方で、水路実験では十分な成果が得られていない。これは、センサーへの粒子の衝突の影響を除去した上で、水路実験で一般的となる数 cm オーダーの流れにおける水圧を測定することが困難だからである。間隙水圧の測定結果から、全応力に対する粒子間応力分の割合や、微細粒子の間隙流体への取り込みの実態が明らかになる。また、土石流においては層流とみなせる流れから乱流への遷移が生じていると考えられ、多様な条件下で間隙水圧の測定を行うことによって、土石流の流動特性の変化に伴う応力構造の変化に関する情報も得られると期待できる。

本研究では、水路実験における模擬土石流の間隙水圧の測定法を構築した上で、多様な条件下で測定を実施し流動特性との対応を検討した。

2. 実験概要

実験は、(財)建設技術研究所において行った。全長 10m、幅 10cm の可変勾配水路を用い、上流側 4.5m の路床を 10cm 下げて土砂を堆積させ、上流端より給水 (1~3.5l/sec) することによって土石流を発生させた。水路勾配は 13 度、17 度とし、篩い分けでなるべく均一の粒径にした 4 種類の土砂 (平均粒径約 0.2, 0.7, 1.3, 2.9mm) を用いた。水深は超音波センサー (E4PA, OMRON) を用いて下流端より 1m の位置で測定し、下流端で土石流を採取するとともに採取時間を記録して土石流流量を求めた。なお、水路床には粗度として平均粒径約 2.9mm の砂粒子を貼り付けた。

間隙水圧の測定は、水深と同様下流端より 1m の位置で実施した。流動深が小さく、検出精度が必要なため、水圧の測定には気体用の微差圧センサー (AP-47, KEYENCE) を用いた。差圧センサーの測定部に内径 4mm のシリコンチューブを接続し、その先端に自作のダイアフラムによる感圧面を取り付けた。感圧面は外径 9mm、厚さ 1mm のアルミパイプの先端に、厚さ 0.03mm のラテックスシートを貼り付けて製作した。粒子の衝突の影響を最小限にするため、センサーは側壁と感圧面が一致するよう埋設して設置した。測定位置は、底面 (0mm) とした。ダイアフラム内部の圧力は周辺温度の変化に強く影響されるため、実験ごとに内部気圧の解放を行い、実験時には水温と気温のモニタリングを行った。また、各実験前後で、測定部分に貯水した上で水深を変化させることによって検定を行い、前後の検定結果がほぼ一致している実験のデータだけを用いた。Fig. 1 に例を示すように、実験前後の静水圧検定の結果から、この装置による圧力測定は直線性も高く、実用的であることが分かった。

3. 間隙水圧の測定結果

水路実験における間隙水圧の測定結果の例が Fig. 2 である。検定結果を用いてセンサーの出力値を圧力に変換して水高換算し、流動深とともに示している。Fig. 2 において、流動深と間隙水圧が同程度の値を取っていることから、この実験条件において間隙水圧は静水圧に近い値を取っていることが分かる。また、流動深と間隙水圧の波形は良く一致しており、センサーが十分な追随性を有していることが見て取れる。

Fig. 2 の測定区間 (流量測定区間に対応) で流動深と間隙水圧の平均値を求め、全実験での両者の関係を示したのが Fig. 3 である。静水圧に相当する直線も併せて示している。Fig. 3 から、粒径 0.2mm の実験では間隙水圧が静水圧より大きな値を取っていることが分かる。それ以外の粒径では、粒径 2.9mm や粒径 0.7mm で間隙水圧が比較的高いケースが見られるが、基本的には静水圧に近い値を取っている。

層流状態の土石流の間隙水圧は、構成則によって評価することが

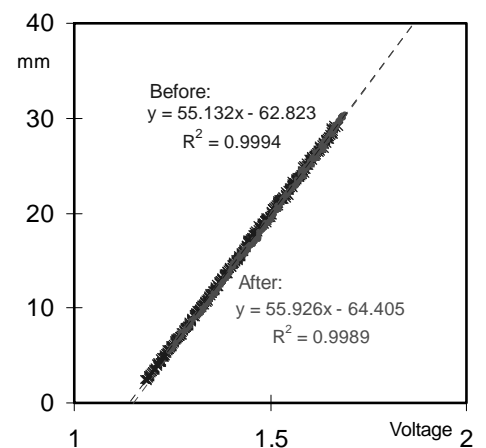


Fig. 1 圧力センサーの検定結果

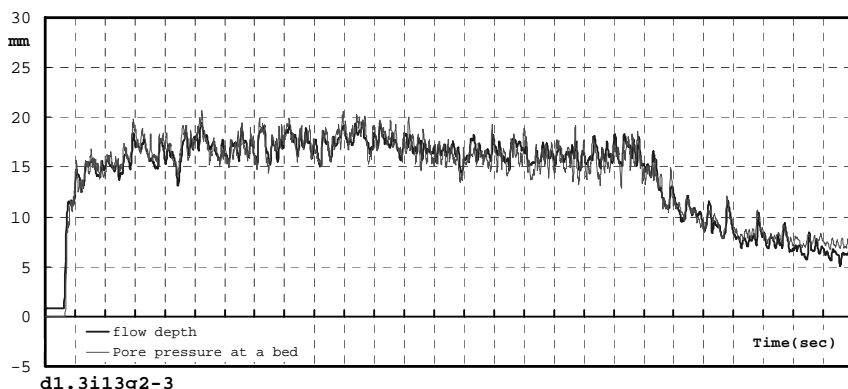


Fig. 2 間隙水圧の測定結果

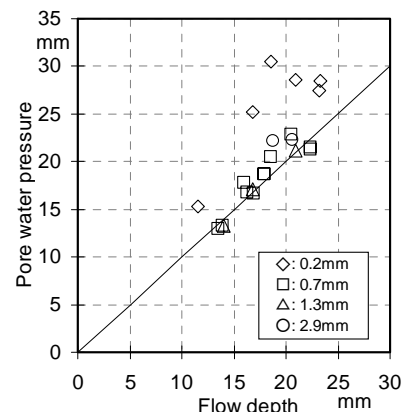


Fig. 3 流動深と間隙水圧の関係

出来る³⁾。土石流の間隙では、粒子の剪断に伴う乱流によってレイノルズ応力が発生しており、間隙水圧は静水圧より大きな値を取る。レイノルズ応力は、粒子間隙の大きさに規定されるため、同様の実験条件では粒径の大きな土石流で大きな値を取る³⁾。Fig. 3 の測定結果を、構成則から求まる土石流間隙水圧の理論値と比較したところ、粒径 1.3~2.9mm では実験値と理論値は良好に対応していた。一方、粒径 0.2~0.7mm では理論値との対応は見られなかった。粒径 0.2mm での実験値は理論値より大きい、0.7mm では理論値より大きな値を取るケースと小さな値を取るケースが存在した。

4. 流動特性と間隙水圧の関係についての考察

間隙水圧の測定値が理論値と対応する実験としない実験ではどこに違いがあるのだろうか？可能性として考えられるのは、層流と乱流での流動特性の違いである。土石流の層流・乱流は構成粒子の運動状態に着目して区分される。層流状態での間隙水圧が前述のように粒子間隙におけるレイノルズ応力として生じるのに対して、乱流状態では粒子の混合に伴う粒子間の衝突・骨格応力の解放により、間隙水圧は流れの全圧力に相当する値を取ると考えられる。

土石流における層流から乱流への遷移と間隙水圧の変化の対応について検討するため、土石流のレイノルズ数 Re を以下のように定義した。

$$Re = \frac{\rho_m L^2}{\mu} \approx \frac{\rho_m h^2}{\mu} = \frac{\rho_m}{F(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_m は土石流の密度、 L は代表長さスケール、 μ は粘性係数、 h は流動深、 d は粒径である。 $F(c)$ は濃度のみの関数となることを意味し、(2)式のように土石流の構成則を変形することで求めた見かけの粘性係数である μ を(1)式に代入して得られる。

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f = \mu (du/dz)^2 \quad (2)$$

τ は流れの全剪断応力であり、添字の s は砂礫粒子のクーロン摩擦により生じる成分、 d は砂礫粒子の非弾性衝突により生じる成分、 f は間隙水の乱れにより生じる成分をそれぞれ意味する。 du/dz は深さ方向の流速分布を表す。各実験条件を代入して計算した Re と間隙水圧の関係を Fig. 4 に示した。実験条件の違いをキャンセルするため、静水圧と全圧力でデータの基準化を行っている。Fig. 4 から、 Re によって間隙水圧の値が異なることが分かる。 Re の小さな領域では間隙水圧は静水圧近傍の値を取り、 Re の大きな領域では全圧力近傍の値を取っている。層流・乱流という流れの違いによって間隙水圧は大きく異なり、 $Re=3000 \sim 10000$ 程度で層流から乱流への遷移が生じていると考えられる。

参考文献

1) Egashira S, Miyamoto K, Itoh T: Constitutive equations of debris flow and their applicability. Proc. 1st Int. Conf., Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997. 2) McArdell BW, Bartelt P, Kowarski J: Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow, Geophysical research letters 34, L07406, 2007. 3) Hotta N, Ohta T: Pore-water Pressure of Debris Flows. Physics and Chemistry of the Earth (B), 25(4), 381-386, 2000.

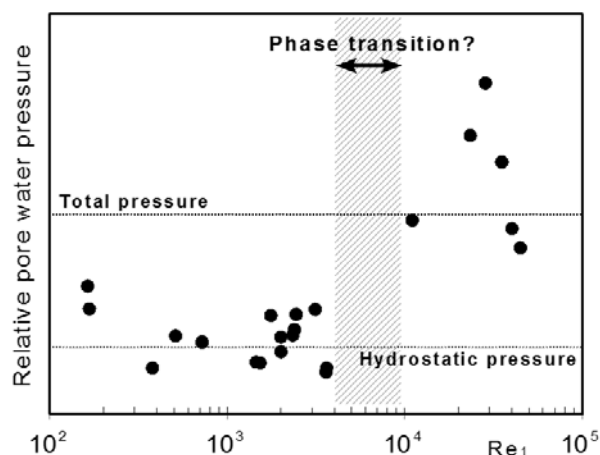


Fig. 4 レイノルズ数と間隙水圧の関係