

1. はじめに

土石流の構成則に関する研究は、流れ内部で層流状に流動する粒子の運動状態に着目してモデル化することによって進められてきた。しかしながら、固定床上の土石流に関しては、層流状態だけでなく乱流状態で流下しているケースもありある。また、掃流状集合流動と呼ばれる流れや泥流の中には、流動層中に層流と乱流のインターフェースを有する事例が報告されている。流下に伴う境界条件等の変化に伴い、土石流において層流状態と乱流状態の遷移が生じていると考えられる。土石流の間隙水圧に着目すると、層流状態の土石流では粒子間の間隙流体の乱れによって生じるレイノルズ応力として現れる¹⁾のに対し、乱流状態では粒子間の応力が解放されるために全圧力と等しい値を取る。

本研究では、土石流における流れの遷移を表現するためにレイノルズ数を提示した上で、土石流の間隙水圧を測定し、流れの遷移との対応を検討する。

2. 土石流の構成則とレイノルズ数

土石流の構成則は以下のように表すことができる²⁾。

$$\tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f \quad p = p_s + p_d + p_f \quad (1)$$

ここに、 p は流れの全圧力、 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応力成分、 d は砂礫粒子の非弾性衝突により生じる応力成分、 f は間隙水の乱れにより生じる応力成分をそれぞれ意味する。レイノルズ数としては、土石流をダイラタント流体とみなした際にバッキングガムの π 定理から求まるものを Re_1 、宮本・伊藤(2003)³⁾と同様に、運動方程式中の慣性項と粘性項の比から求めたものを Re_2 とした。

$$Re_1 = \frac{\rho_m L^2}{\mu} \approx \frac{\rho_m h^2}{\mu} = \frac{\rho_m}{F(c)} \left(\frac{h}{d} \right)^2 \quad \tau = \tau_s + \tau_d + \tau_f = \mu (du/dy)^2 \quad (2)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_m UL}{\mu'} \approx \frac{\rho_m u_*^2}{\mu'} \quad \tau - \tau_s = \tau_d + \tau_f = \mu' (du/dy) \quad (3)$$

ここに、 ρ_m は土石流の密度、 h は流動深、 d は粒径、 u_* は摩擦速度、 du/dz は深さ方向の流速分布を示す。 μ と μ' は粘性係数に相当し、 $F(c)$ は濃度のみの関数となることを意味する。

3. 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、篩い分けして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, 1.3, 2.2, 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 の砂粒子をは貼り付けた。

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差圧計 (AP-47, KEYENCE) を用いた。差圧計の測定部に内径 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。静水圧で検定を行ったところ、この装置による圧力測定は直線性も高く、実用であった。ただし、温度の影響を強く受けるため、実験時には水温と気温のモニターを行った。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った。測定高さは、底面 (0mm)、12.5mm とした。

4. 結果

4.1 レイノルズ数の比較

各実験条件を入力して Re_1 、 Re_2 を算出した上で両者を比較した。 Re_2 の算出にあたっては、 μ' が du/dz を内包するため du/dz の値が必要となる。流れ全体に対して一つの du/dz を適用することの妥当性については別に検

討する必要があるが、今回の実験における土石流の流速分布はほぼ直線的であったため、ここでは平均流速から du/dz を求めた。

図1から、実験条件の不足が見られるものの、両者はよく対応することが分かる。このことは、流れが取り得る条件のレンジの大きさに対して、レイノルズ数間の違いが小さいことを意味しており、流れの遷移がこれらのレイノルズ数で分類できるなら、どちらを用いることも可能である。

4.2 間隙水圧の測定結果

水圧測定の結果を示す。図2は流れの経過に伴う水深と水圧の変化の例を示している。水圧は水高で示している。図から、間隙水圧の変動が大きく、底面での間隙水圧と12.5mmでの間隙水圧の関係も一様ではないことが分かる。どの区間の間隙水圧を参照するかが重要となるが、ここでは、下流での採取時に対応する区間を選定して検討することとした。

図3は、水深と水圧を比較したものである。図3には、静水圧を表す直線(実線)と、土石流の濃度が一定だと仮定した際の全圧力を表す直線(破線)が示されている。各結果のレイノルズ数については、図1に示している。図3から、レイノルズ数の大きい条件では、底面も12.5mm高さの間隙水圧も、全圧力に近い値を示していることが分かる。それに対して、レイノルズ数の小さい条件では、底面の圧力は静水圧と同程度である。ただし、条件cにおける12.5mmの間隙水圧は静水圧より大きく、条件bにおける12.5mm高さの間隙水圧は全圧力の理論値よりも大きい。

5. 考察

図3bcにおいて、底面の間隙水圧に対して上層の間隙水圧が過大であったことの原因としては、実験誤差の他に、土石流の濃度勾配や、層流から乱流への遷移状態にあり、流れ内部にインターフェースが存在していることなどが考えられ、さらなる検討が必要である。

図3aのケースで全層にわたって乱流になっているとみなすと、境界レイノルズ数は Re_1 が2000、 Re_2 が20程度だと考えられる。ここで、 Re_1 に2000を代入して式(2)を変形することによって、流れが遷移する際の相対水深を濃度の関数で表現することが可能である。図4に結果を示す。図から、相対水深は、濃度によって変動するものの、その変化は小さく、全域にわたって20~30に収まっていることが分かる。このことは、土石流において層流から乱流への流れの遷移がレイノルズ数で表現できるとするならば、その遷移は h/d のみで単純に説明できることを意味する。

参考文献

- 1)Hotta, N. and T. Ohta: Pore-water Pressure of Debris Flows. Physics and Chemistry of the Earth (B), 25(4), 381-386, 2000.
- 2)Egashira, S., Miyamoto, K., and Itoh T.: Constitutive equations of debris flow and their applicability. Proc. 1st Int. Conf., Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, 340-349, 1997.
- 3)宮本邦明・伊藤隆郭: 土石流の数値シミュレーションと相似則. 砂防学会誌, 55(6), 40-51, 2003.

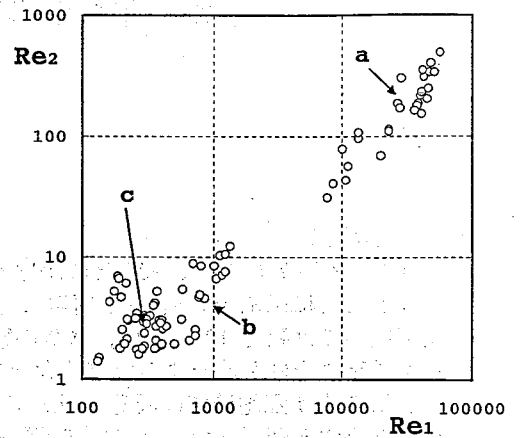


図1 レイノルズ数の比較

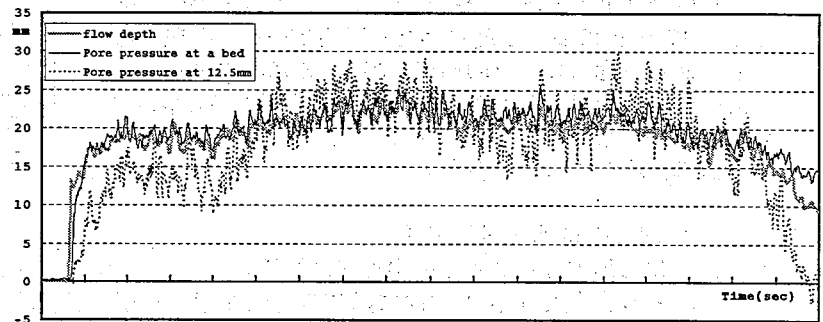


図2 間隙水圧測定例 (d1,i17,q3)

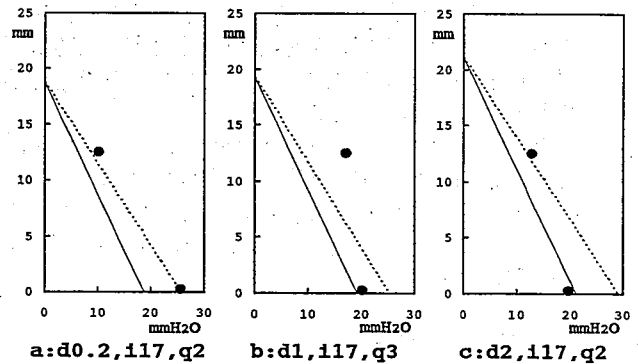


図3 間隙水圧分布

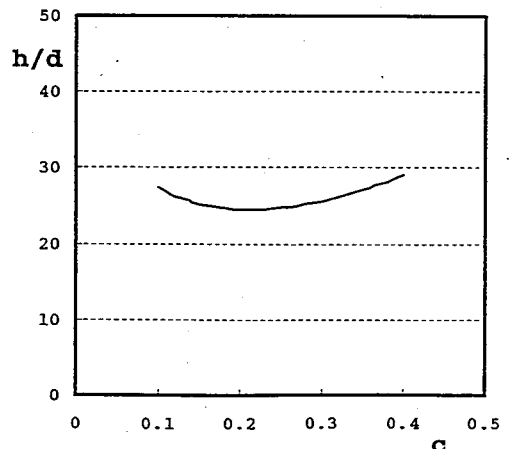


図3 流れの遷移時の相対水深