

土石流に含まれる微細土砂の挙動に関する実験的検討

筑波大学生命環境系 ○堀田 紀文
長野県 金子 宇弘
千葉県 岩田 知之

1. 研究の背景と目的

石礫型土石流内部の応力構造についての研究は、単純化のために均一粒径を仮定することで、砂礫粒子間の衝突・接触、および間隙流体における応力のモデル化に成功してきた。一方、微細な土砂によって構成される泥流についての研究は、粒子間の相互作用に立ち入らず、ビンガム流体や乱流モデルによって泥流を記述することが多い。しかしながら、現地で観測される土石流の粒度分布は幅広く、石礫型土石流とみなせるような土石流といえども、その内部に大量の微細土砂を含む。近年の研究では、特に大規模な土石流の流下シミュレーションを実施する際には、土石流を構成する微細土砂の一部を液相とみなすことで現象の再現性が向上することが報告されている¹⁾。石礫型土石流中の微細土砂は乱流構造に取り込まれることで液相として振る舞うと考えられるが、乱流構造に取り込まれるかどうかは砂礫の粒径そのものではなく、相対水深（流動深／粒径）によって整理される²⁾との指摘³⁾もあり、土石流内の微細土砂の挙動については未だ十分に明らかになっていない。

本研究では、混合粒径の土石流における微細土砂の挙動と、それが土石流の流動性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として水路実験を実施した。

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、上流端より給水することによって土石流を発生させた。全ての実験で水路勾配は 15 度、上流端からの供給流量は 2 リットル/sec とした。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。実験では、水路下流端で土石流を採取して土砂濃度を測定するとともに、採取時間を記録して土石流の流量を求めた。また、水路下流端より 1m の位置で超音波センサー(E4PA, OMRON)を用いて水深を測定し、土石流流量のデータと合わせて平均流速を算出した。

実験材料には、篩い分けでなるべく均一の粒径にした 5 種類の土砂を用いた (Table 1)。5 種類の均一粒径での実験と、2 種類の混合粒径での実験を実施した。混合粒径の実験では、2.9mm の砂礫粒子を大粒径粒子として固定し、小粒径粒子として 0.11~1.3mm の砂礫を用いた。また、初期混合比は 1:1 と 1:4 の 2 通りとし、事前に実験材料を十分に混合して水路上部に堆砂させた。実験で採取した土石流サンプルを乾燥後に篩い分け、それぞれの粒径の土砂濃度も求めた。

3. 解析

実験結果の解析は次の 2 つの抵抗係数を用いて行った。

$$f_{ex} = \frac{2gh\sin\theta}{u_m^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$f_{cal} = \frac{25}{2\rho_m} K(c,\rho) \left(\frac{h}{d}\right)^{-2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 g は重力加速度、 h は流動深、 u_m は平均流速、 ρ_m は土石流の密度、 c は土砂濃度、 ρ は土石流の間隙流体の密度、 $K(c,\rho)$ は土石流の構成則から導出される c と ρ の関数を表し、 d は粒径である。式 (1) の抵抗係数 f_{ex} は実験値であり、式 (2) の f_{cal} は土石流における抵抗係数の理論値を表す²⁾。

本研究では、混合粒径実験の f_{cal} は次のような 2 つのモデル (Fig. 1) で計算を行い、どちらのモデルがより f_{ex} と近いかを比較した。

モデル I：小径粒子が全て固体粒子として振る舞うと仮定し、計算には大小二粒径の平均粒径を用いた。

モデル II：小径粒子が全て水と一体化するとして間隙流体の密度を増加させ、計算には粒径 2.9mm を用いた。

Table 1 実験材料

Monogranular	Two diameter mixed		
size	large	small	ratio
2.9mm	2.9mm	1.3mm	1:1 & 1:4
1.3mm		0.84mm	
0.84mm		0.23mm	
0.23mm		0.11mm	
0.11mm		0.11mm	

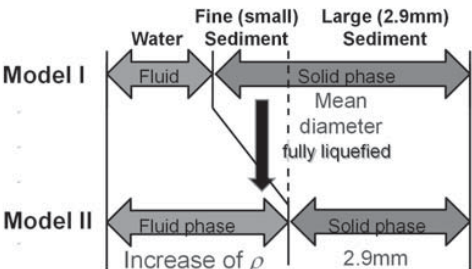


Fig. 1 モデル I と II の概念図

4. 水路実験の結果と考察

各実験における土砂濃度を比較すると、均一粒径の実験では、全てのケースにおいて同程度の濃度が測定された。混合粒径の実験においても、0.84mm、1.3mmの実験は均一粒径の実験と同程度だった。0.11mm、0.23mmの混合粒径の実験では、混合比によらず濃度が高かった。粒径別の濃度に着目すると、0.11mm、0.23mmの実験では、混合比 1:4 の実験で大粒径粒子（粒径 2.9mm）の濃度が均一粒径の濃度とほぼ一致しており、これらのケースでは小粒径の砂礫粒子が大粒径粒子の隙間に取り込まれたとも考えられる。なお、全ての混合粒径実験における混合比は、堆積時の混合比（1:1、1:4）に近い値を取った。

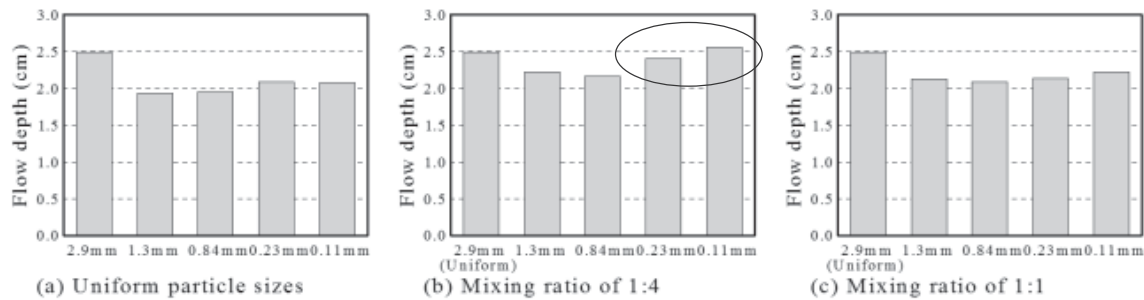


Fig. 2 流動深の比較 (a) 均一粒径, (b) 混合比 1:4, (c) 混合比 1:1

流動深の結果を Fig. 2 に示す。0.11mm、0.23mm の混合比 1:4 のケースでのみ、他の混合粒径の実験よりも流動深が大きく（：Fig. 2b の丸で囲まれた部分）、2.9mm の均一粒径の実験と同程度の値を取った。均一粒径の土石流においては、粒径と土砂濃度以外の条件が同じであれば、土石流を構成する砂礫粒子の粒径が大きく、土砂濃度が高いほど流れにかかる抵抗が大きいために導かれる。Fig. 2b で高い濃度が検出されたのは、均一粒径の土石流より濃度が高く、大粒径の隙間に小粒径が取り込まれているとみなせるケースであった。土砂濃度と流動深の結果を合わせて考察すれば、これらのケースにおいては小粒径土石流が流れの応力にあまり寄与していない可能性が指摘できる。

5. 抵抗係数の比較

上記の実験結果をより詳細に検討するために、抵抗係数の比較を行った。Fig. 3 は f_{ex} と f_{cal} はを比較した結果である。 f_{cal} は前述のように 2 つのモデルで求めており、矢印で両者の値の違いを示した。結果は混合比 1:1 と 1:4 を分けて示している。

Fig. 3 から、実験値と理論値の抵抗係数が同程度の値を取るのは、実験条件によってモデル I を用いた場合とモデル II を用いた場合とに分かれた。また、どちらも一致しない実験条件もあった。

モデル I と II のうち、どちらが実現象を反映しているかを確認するために、以下のような指標 α を導入した。

$$f_{ex} = \alpha f_{cal:I} + (1 - \alpha) f_{cal:II} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$f_{cal:I}$ と $f_{cal:II}$ はそれぞれモデル I と II から求められた抵抗係数の理論値である。式(3)のように抵抗係数の実験値と理論値が等しくなる（条件によっては最も近い値を取る） α を求めたところ、小粒径粒子の粒径の増大に伴い α は大きくなったが、同一粒径でも混合比によって α の値は異なった。0.23mm の砂礫粒子において、固相とみなせる場合と、一部が液相とみなせる遷移域が存在するとの結果が得られたことに着目すると、土石流中で液相とみなせる「微細粒子」の粒径は、幾何学的な条件ではなく力学的な条件によって決定されると考えられた。

参考文献： 1) 西口ら (2011) 砂防学会誌, 64 (3), 11-20 2) Hotta N. & Miyamoto K. (2008) International Journal of Erosion Control Engineering, 1 (2): 54-61.