粒度分布が土石流の流動機構に与える影響

東京大学大学院農学生命科学研究科　○酒井　佑一　堀田　紀文

1. はじめに

土石流は，固相としての土砂と液相としての水からなる固液混相流として扱われ，土砂粒子を均一粒径としてモデル化し導出された構成則を用いて記述されている [1)]。そこでは，土石流の応力は，固相としての土砂粒子同士の接触摩擦応力と衝突応力，液相としての間隙流体の乱れによる応力の 3 つからなるとされる。一方，現地で発生する土石流は粘土やシルトから巨礫まで幅広い粒度分布をもちうることが知られており，大粒径土砂が流れ表面へ分級し土石流先頭部へ集中することや，微細土砂が土砂本来の固相としての働きをせず液相として振る舞う（液相化）ことが指摘されている [2)]。このような混合粒径の土石流に対して均一粒径に対する構成則を適用する際には，適切な代表粒径を与えた上で微細土砂の液相化による間隙流体密度の変化を考慮して検討してきている [3)]。混合粒径土石流の流動機構の検討は主に二粒径からなる流れをもとに行われているが，連続的な粒度分布をもつ混合粒径の土石流への適用性は十分に検討されているとは言えない。本研究では，二粒径の土石流と幅広い粒度分布からなる土石流の水路実験の結果を整理し，現状の問題点と今後の方針を示した。

2. 二粒径からなる土石流

固定床上の土石流の水路実験を行った。用いた実験砂は，大粒径粒子として粒径が 2.9 mm の粒子を用い，小粒径粒子として粒径が 1.3 mm，0.84 mm，0.23 mm，0.11 mm の粒子をそれぞれ用いて混合比を 4:1，1:1 と変化させた（表 1）。実験により得られたデータから，抵抗係数の実験値（*fex*）と理論値（*fcal*）の比較を行った。抵抗係数の理論値は，小粒径が完全に固相として振る舞う場合（Model 1）と完全に液相として振る舞う場合（Model 2）の二つのモデルを考え，それぞれのモデルの下で均一粒径の構成則 [1)]を適用して求めた抵抗係数を用いた。そのうえで，液相化の指標として以下のような α を導入した。

表 1　二粒径実験の粒径組成

Large	Small	Mixing ratio
2.9 mm	1.3 mm 0.84 mm 0.23 mm 0.11 mm	4:1 and 1:1

$$f_{ex} = (1-\alpha) f_{cal:Model1} + \alpha f_{cal:Model2}$$

小粒径粒子の粒径の増大に伴い α は大きくなる傾向にあったが，同一粒径でも混合比によって α の値は異なった。このことから，微細土砂の液相化は単純な幾何学的条件によって決まるのではなく，流動条件に応じた力学的な条件によって決まると考えられる。小粒径粒子は間隙流体の乱れの影響を受けて液相化すると考えられるので，小粒径粒子の運動学的条件として間隙流体の乱れ速度 v_t と小粒径の沈降速度 w_s の比 v_t/w_s を考え，液相化指標 α との関係を調べたところ，α は v_t/w_s と正の相関を示した（図 1）。このことから，小粒径粒子の運動学的条件によって小粒径粒子は完全に固相もしくは液相として振る舞うとは限らず，一部が固相で残りが液相として振る舞う場合があると考えられる。また，図 1 には α と v_t/w_s の関係を示す回帰式も示しており，これを用いることで，間隙流体密度の上昇と代表粒径の変化を暗に考慮して，二粒径からなる土石流の抵抗係数を求めることができる。

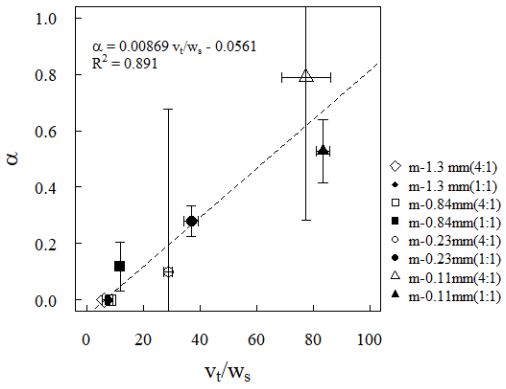

図 1　小粒径粒子の運動学的条件 v_t/w_s と液相化指標 α の関係

3. 幅広い粒度分布からなる土石流

移動床上の土石流の水路実験を行った。用いた実験砂は a～g の 7 種類で，それぞれの粒度分布を図 2 に示す。実験により得られたデータから，抵抗係数の実験値（*fex*）と理論値（*fcal*）の比較を行った。抵抗係数の理論値の算出に

は，微細土砂の液相化による間隙流体密度と代表粒径の増大を考慮して均一粒径の構成則[1)]を用いた。このとき，微細土砂の液相化の評価には平衡濃度を用いた。つまり，平衡濃度の実験値と構成則から算出される平衡濃度が一致するように，液相化した微細土砂の濃度を求め，間隙流体密度を算出した。ここで，土石流中の土砂は，ある粒径を境界としてその値より小さい粒径の土砂はすべて液相化すると仮定し，間隙流体は水と液相化した土砂を合わせたものとして間隙流体密度を設定した。また，代表粒径には，液相化した土砂を除く固相の土砂の体積平均粒径(*dm*)を用いた。上記の間隙流体密度と代表粒径を用いて構成則から流速分布の理論値を求め，抵抗係数の理論値(*fcal*)を算出した。

抵抗係数の実験値と理論値を比較したところ，抵抗係数の理論値は実験値と一致せず，過小評価の傾向にあった。つまり，平衡濃度による微細土砂の評価を用いて算出した抵抗係数の理論値では，抵抗係数の実験値を十分に説明できないことが分かる。そこで，平衡濃度による評価によって算出した代表粒径と，抵抗係数による評価によって算出した代表粒径の関係を検討するため，体積平均粒径を用いた代表粒径(*dm*)と，抵抗係数の実験値に合うように構成則を用いて逆算した代表粒径(*dr*)を比較した結果を図 3 に示す。図 3 より，*dm* は *dr* と一致せず，全体的に小さい傾向にあった。また，同一の実験砂における実験条件の変化に対して，*dm* の変化は小さいのに対し，*dr* の変化は大きい結果となった。このことから，代表粒径は単純に固相の平均粒径と一致するわけではなく，流動条件に応じて変化する可能性がある。

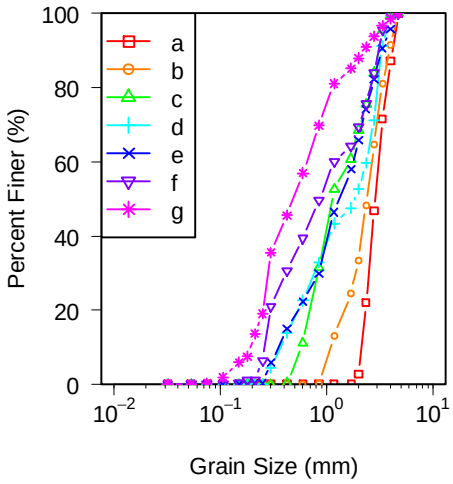

図 2　混合粒径実験の粒度分布

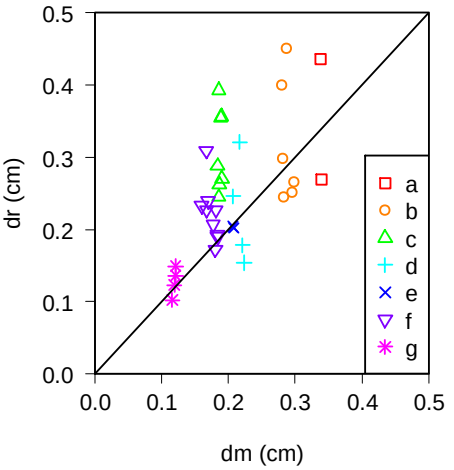

図 3　平衡濃度から求めた代表粒径と抵抗係数から求めた代表粒径の比較

4. 現状の問題点と今後の方針

連続的な粒度分布をもつ土石流の流動機構の検討には，2. で示した二粒径での回帰式を適用する方法が考えられる。このためには，連続的な粒度分布をあらかじめ「大粒径粒子」と「小粒径粒子」に分けて，それぞれの平均粒径からなる二粒径の流れとして考える必要がある。ここで，「大粒径粒子」は常に固相として振る舞うが，「小粒径粒子」は流動条件によって完全に固相，完全に液相，もしくはその中間的な挙動をすると考えられる。このとき，「大粒径粒子」と「小粒径粒子」への分け方が問題となるが，このためには常に固相として振る舞う「大粒径粒子」の下限の粒径を検討する必要があると考えられる。

固相と液相の境界となる粒径をあらかじめ与えられる場合には，固相に対しては代表粒径を考え，液相の土砂は間隙流体密度に寄与するとして二粒径での考え方の発展で検討できると考えられる。ここで問題点としては，3. で述べたように代表粒径は単純に固相の平均粒径と一致するわけではなく，流動条件に応じて変化することである。今後は，幅広い粒度分布からなる土砂の適切な代表粒径についても検討する必要があるといえる。

最後に，本研究は平成 29 年度砂防学会公募研究会（代表：堀田紀文）の助成を受けて実施された。また，実験では国立研究開発法人土木研究所の水路を使用させて頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献：1) Egashira et al. (1979), Proc. of 1st International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation, pp.340－349 2) Iverson (1997), Reviews of Geophysics, Vol.35, No.3, pp.245－296 3) Nishiguchi et al. (2011), in Italian Journal of Engineering Geology and Environment, R. Genevois, D. L. Hamilton, and A. Prestininzi, eds., Sapienza Universita Editrice Univ. Press, pp.477–485.