

混合粒径土石流において微細土砂が流動特性に及ぼす影響

長野県（旧所属：東京大学農学部） ○金子宇弘
 筑波大学大学院生命環境科学研究科 堀田紀文
 東京大学大学院農学生命科学研究科 岩田知之

1. 研究の背景と目的

土石流の流動は、内部粒子の接触・衝突をモデル化して得られる構成則と運動方程式によって記述される。これらによって汜濫シミュレーションが可能になるなど、実用的な段階での理解が進んでいる。しかしながら、実際の土石流が幅広い粒径分布を有する土砂からなるのに対して、構成則は主に均一粒径の土石流をモデル化することで導出されており、例えば、粗粒子の間隙に取り込まれるような微細土砂をどう評価するかの知見は定まっていない。あくまで固相とみなして固体摩擦の影響が大きいと考える立場や、間隙流体と一体化し、液相密度の上昇を通して流れに作用すると考える立場などがある。そこで、本研究では、土石流において微細土砂が流動機構に与える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、微細土砂の挙動を固相と液相のどちらとみなせるかという点に着目して検討を行った。

2. 実験・解析方法

実験には（財）建設技術研究所の可変勾配水路を使用した。水路は全長 10m で、幅は 10cm に加工した。下流側 4.5m の水路床は 10cm 嵩上げし、表面には粗度として粒径 2.9mm の砂を貼り付けた。上流部は堆砂区間とし、下流部の路床と同じ高さまで堆積させた土砂に一定流量の水を供給することで土石流を発生・流下させた。実験には粒径がほぼ様な 5 種類の土砂を用いた。粒径はそれぞれ 0.11mm, 0.23mm, 0.84mm, 1.3mm, 2.9mm である。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。

混合粒径実験には 2 種類の土砂を混合して用いた。堆積時の混合比「小径粒子：大径粒子」を 1:1, 1:4 の 2 通りとし、大径粒子に 2.9mm 土砂を、小径粒子にその他の 4 種類の土砂を用いた。比較のために均一粒径の実験も行い、5 種類の粒子を単一粒径で流した。いずれの実験でも、下流端から 1.5m の位置に変位センサーを設置し、土石流の水深の時間変化を計測・記録した。また、試料を下流端で採取し、濃度を測定した。

各実験条件における流動特性を比較するために、抵抗係数を用いた。実験データは(1)式で求められる抵抗係数 f_{ex} によって整理した。

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

ここで、 g は重力加速度、 h は流動深、 u_m は平均流速である。得られた f_{ex} を、構成則から導出され(2)式のように表される石礫型土石流の抵抗係数の理論値 f_{cal} (Hotta and Miyamoto, 2008) と比較した。

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

ここで、 ρ_m は流れの平均密度、 $K(c)$ は土石流の構成則から導出される濃度 c の関数、 d は粒径である。ここで、混合粒径実験の f_{cal} は以下のような 2 つのモデルについて計算を行い、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水の比重を増加させ、計算には粒径 2.9mm を用いた

3. 結果

図-1 に示すように、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 の実験では均一粒径の実験と同程度だった。0.11mm, 0.23mm の混合実験では、混合比によらず濃度が高くなった（図-1：丸囲い）。なお、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) と近い値を取った。また、流動深に関して、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、2.9mm の均一実験と同程度の値を示した。

抵抗係数の比較結果から、 f_{ex} と f_{cal} の対応関係は、実験条件によって異なることが分かった。すなわち、モデル I による f_{cal} が f_{ex} と対応するケースと、モデル II による f_{cal} が f_{ex} と対応するケースが混在した。モデル I, II と実験結果の関係を明確にするため、式(3)のような指標 α を導入した。

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

ここで、 α は 0~1 の間の値を取るとし、実験値 f_{ex} と式(3)で表される計算値が等しく／最も近くなるときの α を求めた。 α が 1 のとき、小径粒子が全て固体粒子として振る舞うと解釈でき、 α が 0 のとき、小径粒子が全て水と一体化していると解釈できる。

図-2 に実験条件ごとの α を示した。混合比 1:4 の実験では、 α は 1 か 0 かに明確に別れ、混合比 1:1 の実験では、 α が 1 と 0 の間の値を取るケースがあった。どちらの混合比でも、小径粒子の粒径が小さいケースで小径粒子が液相として振る舞っていると見なせた。

4. 考察と今後の課題

0.11mm, 0.23mm の混合粒径実験のみで土石流濃度が高くなった(図-1)のは、幾何学的な粒径比から、大径粒子の空隙に小径粒子が入り込んだためだと考えられる。さらに、混合比 1:4 で、2.9mm 粒子の濃度が均一粒径実験と同程度のケースでのみ流動深が均一粒径実験と等しくなったことは、それらの流れの抵抗が主に大径粒子に受け持たれていることを示唆している。

抵抗係数の比較結果(図-2)から、1:4 の混合比において小径粒子の流れへの取り込みが生じていると考えられるのは 0.11mm だけであり、0.23mm の混合粒径実験では、小径粒子(0.23mm 土砂)は固相として振る舞っていると見なされた。また、混合比 1:1 の抵抗係数の比較結果から、小径粒子の流れへの取り込みは連続的であり、全体のうちの一部の粒子だけが液相に取り込まれるような遷移領域が存在すると考えられる。混合比 1:4 の結果との比較から、流れに取り込まれる小径粒子の粒径は、実際の粒径や、大径粒子と小径粒子の幾何学的な比だけでは決まらないことも示唆される。同じ粒径比の実験でも、小径粒子は実験条件によって液相としても固相としても振る舞ったからである。土石流の流動条件によって微細土砂の液相への取り込みが決定されると考えられるだろう。

ただし、本研究では微細土砂の取り込みが生じたケースにおいて流れの抵抗が大きくなっており、従来の報告とは逆の結果が得られている。検討した条件範囲が限定的だったことが要因の一つと考えられるため、今後はモデル I, II を幅広い条件下で比較し、土石流の流動機構に微細土砂が与える影響を検討する。

参考文献

Hotta N. & Miyamoto K. (2008): Phase classification of laboratory debris flows over a rigid bed based on the relative flow depth and friction coefficients. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 1 (2): 54-61.

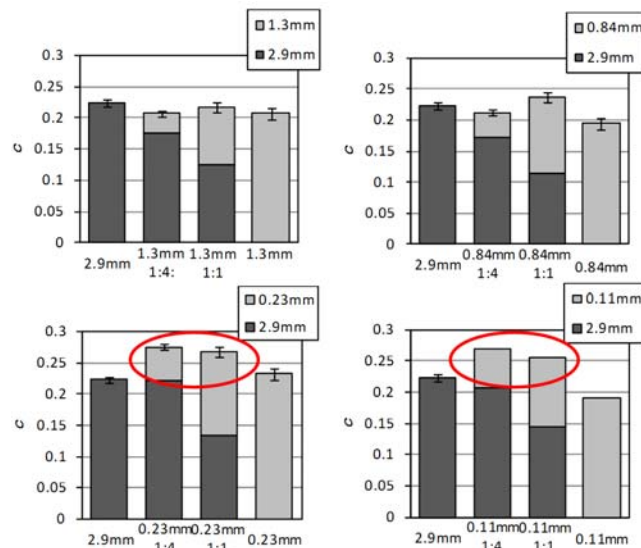


図-1 各実験条件における濃度の比較

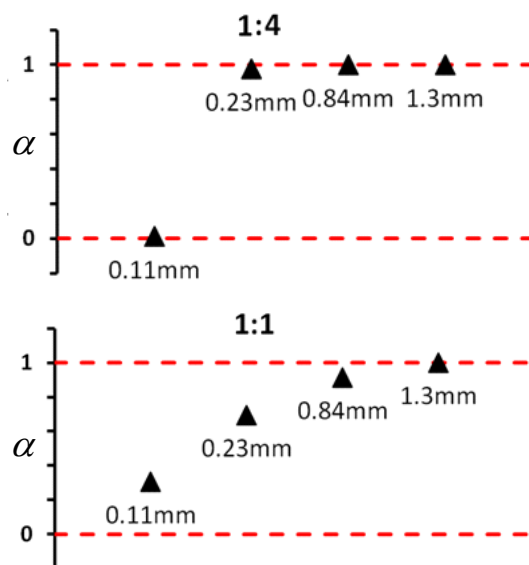


図-2 実験条件によるモデル I, II の適用性
 α が 1 のときモデル I が、0 のとき II が対応