

二種混合体を用いた土石流の流速および水深に与える大粒子含有率の影響

山口大学大学院	学生会員	○田上 聖人
山口大学大学院	学生会員	吉村 翔
山口大学大学院	正会員	中田 幸男
高速道路総合技術研究所	正会員	村上 豊和
高速道路総合技術研究所	正会員	久田 裕史
高速道路総合技術研究所	正会員	竹本 将

1. はじめに

土石流には、逆グレーディング現象や先頭部への巨礫の集積機能があることが知られている¹⁾。既往の研究としては、山本ら²⁾や松村ら³⁾が石礫を含む土石流の模型実験を実施し、流速や水深、逆グレーディング現象について評価している。しかし、同一の試料における大粒子の含有率を変えて行われてはならない。土石流の中で大粒子と小粒子とで異なる動きをすることから、大粒子の含有率が、土石流の流動に大きく影響を与えると考えられる。そこで、本研究では、二種混合体試料を用いた土石流模型実験を実施することで、土石流の流速および水深に与える大粒子含有率の影響について考察する。

2. 二種混合モデル

二種混合体は、大粒子と小粒子の粒径の異なる二種類の試料によって構成され、それぞれの影響を顕著にとらえることができる試料であり、大粒子は礫分、小粒子は細粒分を代表している。また、図-1に示すように、二種混合体は大粒子含有率の増加に伴い、小粒子骨格構造、中間構造、大粒子骨格構造と、性質の主体となる構造が変化することが知られている。それぞれの骨格構造の限界大粒子含有率(V_L^a , V_L^b)を、理論式を用いて推定するのが、二種混合モデルである。それぞれの理論式を以下に示す。

小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^b %を算出する理論式が、式(1)であり、式(1)中の d' の推定式が式(2)である。

$$V_L^b = \frac{100D_L^3(1+e_s)}{(D_L+d')^2(D_L+mD_S)(1+e_L)+D_L^3e_s} \quad (1)$$

$$d' = (-2.52e_s + 3.38)D_L \quad (2)$$

ここで、 D_L は大粒子の粒径、 D_S は小粒子の粒径、 e_L は大粒子単体試料の間隙比、 e_s は小粒子単体試料の間隙比、 m は主応力方向の大粒子間の距離を小粒子の個数で表したパラメータ、 d' は主応力に直交する方向の大粒子間の距離を意味する。

大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a %を算出する理論式が、式(3)である。

$$V_L^a = \frac{100(1+e_s)}{e_L+e_s+1} \quad (3)$$

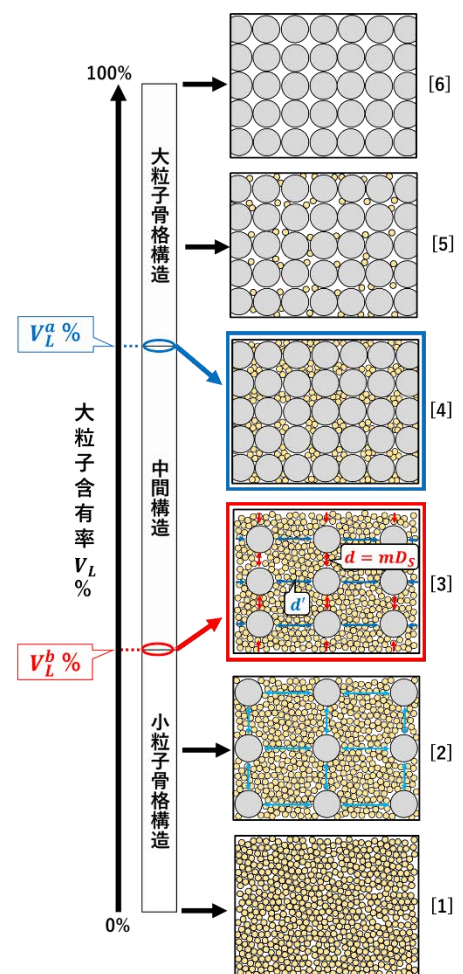


図-1 大粒子含有率による骨格構造の変化と大粒子の配置

キーワード 土石流, 粒度, 流速

連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学 地盤工学研究室

TEL : 0836-85-7326

ここで、 e_L は大粒子単体試料の間隙比、 e_S は小粒子単体試料の間隙比である。また、図-2に示すように、二種混合体は、混ぜ合わさることで、大粒子・小粒子の単体試料よりも間隙比が低くなり、大粒子骨格構造の限界大粒子含有率 V_L^a %において、間隙比が最小(密度が最大)になる。

3. 二種混合体試料および物理特性

本研究では、大粒子試料に、宇部珪砂1号A(写真-1 平均粒径 3.35mm)、小粒子試料に、宇部珪砂新特5号A(写真-2 平均粒径 0.81mm)を使用した。図-3に粒度分布を示す。これらの試料は、同じ原石を砕いて粒度調整がなされているため、土粒子密度が $2.626\text{g}/\text{cm}^3$ で同じである。そのため、純粋に粒径のみの影響を評価できると考えられる。また、粒度試験および最小密度試験で得られた間隙比の結果をもとに、式(1)～式(3)で算出した各骨格構造の限界大粒子含有率は、 $V_L^a = 64.9\%$ 、 $V_L^b = 15.9\%$ となった。

3. 土石流模型装置

図-4に土石流模型装置の概略図を示す。装置は、幅 300mm で、水平部分が 800mm、20 度の勾配を持つ斜面部分が 6000mm からなり、斜面部分の上端に開閉式のゲート、その上部に給水用のタンクが配置されている。溪床には、大粒子試料と同じ宇部珪砂1号Aを貼り付け、粗度を与えている。また、装置の屈折部分を基準にして、水平方向に 500mm、斜面方向に 900mm の地点に、計 3 台のレーザー変位計を設置し、各地点における 0.01 秒ごとの水深を計測した。

4. 実験条件および手順

試料は、乾燥状態の重量を 30kg に設定し、大粒子含有率 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100% の 11 種類の二種混合体を作成した。ここでの含有率は、土粒子の体積を基準とした体積含有率である。また、試料を含まない水のみケース用意し、計 12 ケースで実験を行った。

実験手順は、以下のとおりである。

- 二種混合体試料をゲートに充填する。
- 試料が飽和するまで、水を加える。
- ゲートを開放し、試料の流動が停止するまで放置する。
- 水の供給量が 20L になるように、給水タンクから、2L/s の流量で 10 秒間水を流す。
- レーザー変位計で、0.01 秒ごとの波形データを記録する。

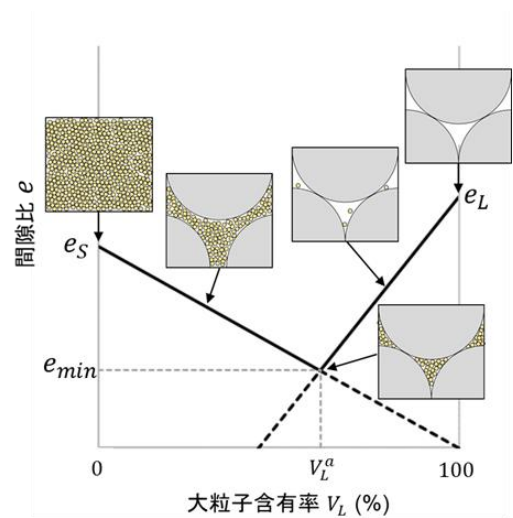


図-2 二種混合体の大粒子含有率による間隙比および骨格構造の概念図



写真-1 宇部珪砂1号A



写真-2 宇部珪砂新特5号A

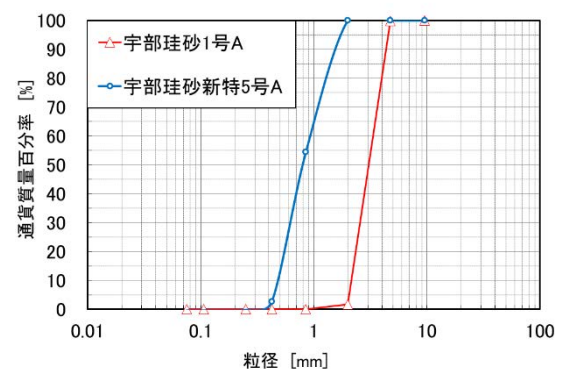


図-3 宇部珪砂1号Aおよび宇部珪砂新特5号Aの粒度分布

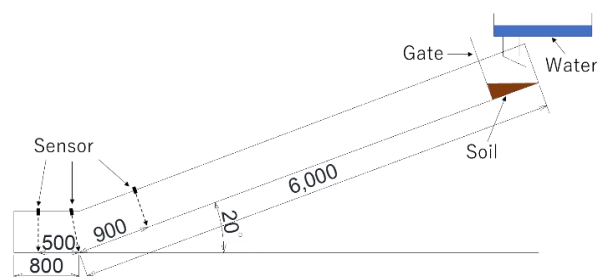


図-4 土石流模型装置の概略図

5. 土石流の流速および水深と大粒子含有率の関係

図-5 に各レーザー変位計で計測した土石流の波形データ, 図-6 に大粒子含有率と流速の関係, 図-7 に大粒子含有率と水深の関係, 図-8 に大粒子含有率と水深増加率の最大値の関係, 図-9 に経過時間と水深増加率の最大値の関係を示す. 図-6～図-9 中の実線は, 流速, 最大水深, 水深増加率の最大値の傾向を示す推定線であり, 破線は, 式(1)～式(3)で算出した各骨格構造の限界大粒子含有率($V_L^a = 64.9\%$, $V_L^b = 15.9\%$)を図示したものである.

図-6 の流速は, レーザー変位計で測定された水深が 1mm を超える時刻を土石流先端の到達時刻とし, 各レーザー変位計の到達時刻の時間差から算出している.

まず, 場所別の土石流の流速は, 斜面部分に比べて, 水平部分の方が遅く, ばらつきが大きくなっているのが分かる. これは, 土石流が水平移動に移行したことで, 重力加速度の影響がなくなったことと, 屈折部分で溪床に衝突して, エネルギーの消散および分散が起こったことが原因である. 大粒子含有率 0%に着目すると, 水のみ流速よりも, 土(小粒子: 宇部珪砂新特5号A)が混じった土石流の流速の方が大きい. これは, 土石流は土の粒子を含んでいることから, 水よりも重いいため, 自重による力が多いことが原因と考えられる.

大粒子含有率と土石流の流速の関係については, 小粒子骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^b\%$ までは, 大粒子含有率の増加に伴い, 流速が急激に低下し, $V_L^b\%$ を超えると流速低下が緩やかになり, $V_L^a\%$ を超えると一定または上昇する傾向が見て取れる. $V_L^a\%$ までの間に, 流速が低下し続ける現象は, 間隙比(密度)の推移に類似していることから, 二種混合体の大粒子含有率の変化に伴う間隙比ならびに密度の変化に関係しており, 土石流中の粒子の密度が増加すると, 流速が低下することを意味している. 粒子の密度の増加により, 流速が低下するメカニズムとしては, 「溪床の粒子と土石流中の粒子の接触の発生と伝達」が考えられる. 土石流が流れる際には, 溪床に貼り付けた粒子と溪床近傍を流れる土石流中の粒子が接触する. 粒子の密度が低い場合, 溪床の粒子と土石流の粒子が接触する確率が少ないため, 抵抗の発生確率が低くなる. また, 発生した抵抗も, 土石流中の粒子の間隔が広いいため, 粒子同士の接触確率が低くなることで, 抵抗の伝達が起こりにくく, 影響が溪床のごく近傍に限られる. そのため, 流速の低下が起こりにくい. 一方で, 粒子の密度が高い場合, 溪床の粒子と土石流の粒子が接触する確率が高いため, 抵抗の発生確率が高くなる. また, 発生した抵抗も, 土石流中の粒子の間隔が狭いため, 粒子同士の接触確率が高くなることで, 抵抗の伝達が起こりやすく, 影響が土石流全体に広がる. これにより, 流速の低下が発生すると推測される.

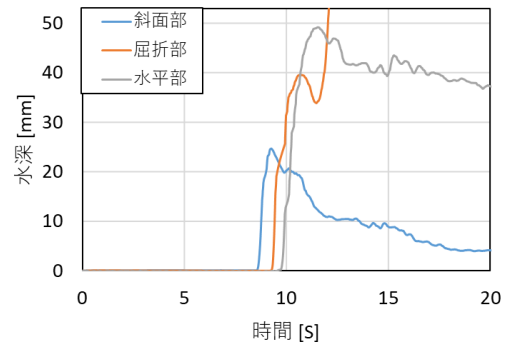


図-5 レーザー変位計による土石流の波形データ(大粒子含有率 50%)

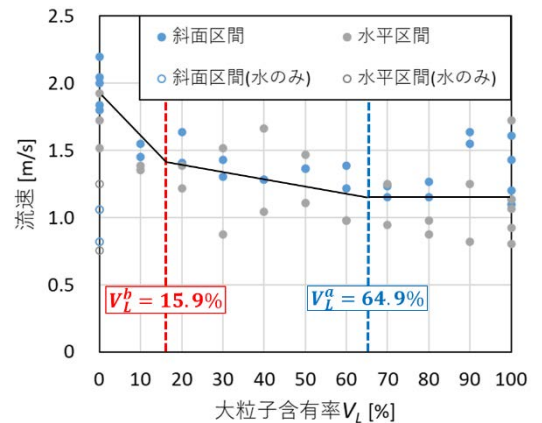


図-6 大粒子含有率と流速の関係

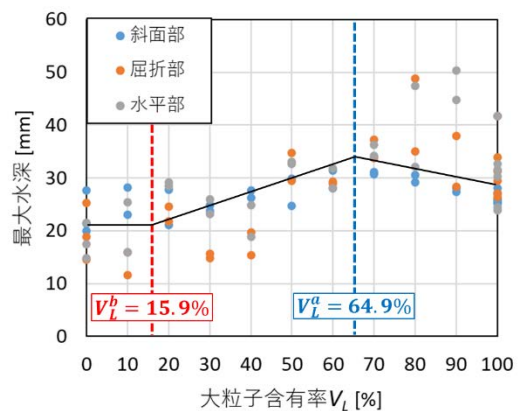


図-7 大粒子含有率と最大水深の関係

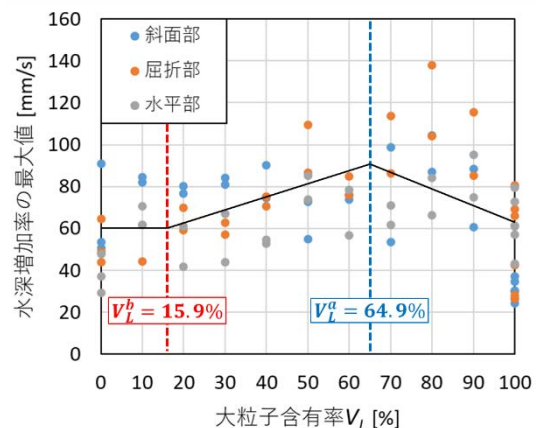


図-8 大粒子含有率と水深増加率の最大値の関係

骨格構造の限界大粒子含有率 $V_L^a\%$ 、 $V_L^b\%$ を境界として、流速の傾向が変化する現象は、大粒子同士の距離に関係していると考えられる。二種混合モデルでは、大粒子含有率の増加に伴う空間に占める大粒子の割合の増加によって、大粒子同士が接近・接触し、 $V_L^b\%$ からその影響が二種混合体に現れるとしている(図-1[3])。土石流実験においても、 $V_L^b\%$ から、大粒子同士の接触によるエネルギーの伝達・消散が流速に現れ始めたため、流速の減少が穏やかになったと考えられる。 $V_L^a\%$ 以降は、大粒子の間をすべて小粒子が満たしていた状態(図-1[4])から、小粒子が減少し、大粒子による間隙が水で満たされること(図-1[5])で、大粒子の自由度(動きやすさ)が増し、速度が増加したと推察される。

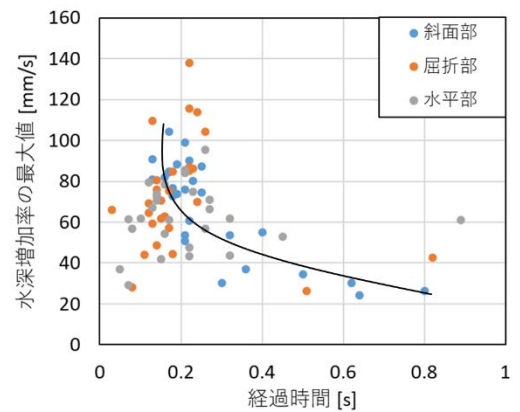


図-9 経過時間と水深増加率の最大値の関係

図-7 の最大水深は、波形データから直接算出し、図-8 の水深増加率の最大値は、土石流到達時刻から最大水深を示す時刻の間に、0.01 秒間で最も大きい水深の増加速度をプロットしている。大粒子含有率と最大水深の関係および水深増加率の最大値の関係においては、 $V_L^b\%$ までは、計測地点によって差があるものの一定で推移しており、 $V_L^b\%$ を超えると、線形に上昇し始め、 $V_L^a\%$ を超えると一転し、大粒子含有率 100%の値に向かって減少する傾向が見て取れる。この現象は、試料の量とタンクからの水の供給流量が一定であることに加え、上記のメカニズムで二種混合体の間隙比(密度)によって流速が定まることで、最大水深や水深増加率の最大値が定まると考えられる。つまり、最大水深や水深増加率の最大値も、大粒子含有率に伴う間隙比(密度)の影響を受けているといえる。

図-9 の水深増加率の最大値は図-8 と同じであり、経過時間とは、土石流到達から水深増加率が最大値を示すまでの時間のことであり、経過時間と水深増加率の最大値の関係においては、土石流到達から水深増加率が最大値を示すまでの時間が短いほど、水深増加率の最大値が大きくなり、逆に長いほど、水深増加率の最大値が小さくなる負の相関関係にあることが見て取れる。これは、水深増加率の最大値が大きいほど、土石流の先端形状が急な形状になり、先頭に多量の土砂を含んでいる土石流であるといえる。最終的に、これまでの流速や最大水深の傾向を総合して考えると、二種混合体の密度が大きいほど、流速が低く、最大水深および水深増加率の最大値が高く、先頭に多量の土砂を含んだ土石流になることを示していると考えられる。

6. まとめ

本研究では、大粒子含有率を変化させた二種混合体試料を用いて土石流模型実験を実施し、土石流の流速に与える大粒子含有率の影響について考察した。その結果、流速、最大水深、水深増加率の最大値は、大粒子含有率に由来する密度の変化の影響を受け、流速は負の相関関係、最大水深と水深増加率の最大値は正の相関関係にあることが分かった。また、経過時間と水深増加率の最大値の関係から、二種混合体の密度が大きいほど、流速が低く、最大水深および水深増加率の最大値が高く、先頭に多量の土砂を含んだ土石流になることが示された。

参考文献

- 1) 高橋保:土石流の機構と対策, p.182-188, 近未来社, 2004.
- 2) 山本彰, 山本修一, 鳥井原誠, 平間邦興:砂防ダムに作用する土石流の衝撃力に関する研究, 砂防学会誌, Vol.51, No.2, pp.22-30, 1998.
- 3) 松村健太郎, 堀口俊行, 香月智:直線水路実験と回転円筒実験における礫分分級現象の比較, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp.928-940, 2020.