

土石流の流下距離に着目した先頭部粗粒化現象の感度分析

鳥取大学大学院工学研究科 ○前田純平, 和田孝志, 三輪 浩

1. 背景と目的 土石流は大小様々な粒径の砂礫によって構成された流れであり、これらの砂礫は土石流内部で互いに複雑に影響を及ぼし合う。この結果、土石流を構成する砂礫に粒度偏析が生じ、先頭部には比較的粒径の大きい砂礫が集積する。この現象は巨礫を多く含む土石流の特徴的な現象の一つであり、土石流先頭部で集積した巨礫が集落等に到達することで人的・物的被害が拡大する可能性がある。土石流先頭部での粗粒化現象については多くの研究がなされているが、土石流の流下距離による先頭部粗粒化への影響については高橋¹⁾らによる研究はあるものの十分把握されているとは言い難い。そこで、本研究では、昨年度の実験²⁾より流下距離を大きくした水路実験を実施し、土石流の流下距離が先頭部粗粒化現象にどのように影響するかを検討する。

2. 実験の概要 本研究で用いる実験水路は、水路勾配を 0° ～ 8° で設定可能な鉄製循環式直線水路の上に、水路長 350 cm (移動床流下距離 300 cm)、水路幅 10 cm の一様勾配水路を設置することで作製した。本研究で用いる砂礫は、平均粒径 10.7mm, 7.1mm, 3.0mm および 1.4mm の 4 粒径のほぼ一様な砂礫であり、実験では 4 粒径のうち 2 粒径を表 - 1 に示すように混合して用いる。水路勾配は作製した水路 (7° に設定) を鉄製循環型水路 (8° に設定) 上に設置することで 15° の一様勾配を作り出し、上流端給水量は昨年度実験²⁾と同じ単位幅流量となるように 0.67 L/sec とした。

表 - 1 本研究の実験砂の混合方法と実験条件

大粒径:小粒径 (mm)	体積平均径 (mm)	流量 (L/s)	勾配 ($^\circ$)	混合割合
10.7:7.1	8.10	0.67	15	1:4
10.7:3.0	6.44	0.67	15	1:4
10.7:1.4	6.28	0.67	15	1:4
7.1:3.0	4.53	0.67, 1.0, 2.0	15	1:4
7.1:1.4	4.19	0.67	15	1:4
3.0:1.4	1.97	0.67	15	1:4

表 - 2 宮本³⁾・昨年度²⁾・本研究の実験条件比較

	宮本	昨年度研究	本研究
水路長(m)	12	1	3
流量(cm ³ /sec)	1~3	470	670
水路幅(cm)	10	7	10
単位幅流量(cm ² /sec)	100~300	67	67
取得方法	20L分を採集	1~1.5sec間隔で4つ採集	1~2sec間隔で4つ採集

本実験の流れは次のようである。まず混合した実験砂を水路に敷き詰めた後、水路上流端より給水し、敷き詰めた混合砂を侵食させることで土石流を発生させた。実験水路下流部では、連結させた 4 つの採砂箱を用いて、1~2 秒間隔で土石流の先頭部を 4 つの部分に分けて採取し、採取した各採砂箱内の水および各粒径の重量を計測した。これらの各採砂箱の採取時間を計測するため、カメラで土砂の採取状況を撮影した。なお、結果のばらつきを考慮して全ケースにおいて同一の実験を 3 回繰り返した。

3. 実験結果と考察 粒度構成および平均流速等に着目して実験結果を整理し、表 - 2 に示す条件で実施された昨年度²⁾ および宮本³⁾ の水路勾配 15° 度での既往研究成果と比較することで、流下距離が土石流先頭部の粗粒化に及ぼす影響を検討した。先頭部粗粒化への影響分析を行いやすくするため、実験結果のうち先頭部の採砂箱、すなわち 1 つ目の箱で採取した大粒子存在割合 P_L に対して、混合砂礫の体積平均径 d_m 、平均流速 U_m および粒径比 d_L/d_S の、3 つの指標との関係を整理した。なお、平均流速 U_m は石礫型土石流の平均流速公式⁴⁾を用いて計算した。

$$U_m = \frac{2}{5d_m} \left[\frac{g \sin \theta}{\alpha_i \sin \alpha} \left\{ C_d + (1 - C_d) \left(\frac{\rho_m}{\sigma} \right) \right\} \right]^{1/2} \left\{ \left(\frac{C_*}{C_d} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (1)$$

ここに、 U_m : 平均流速, d_m : 平均粒径, g : 重力加速度, θ : 水路勾配, α および α_i : 係数, C_d : 土砂濃度の実験値, ρ_m : 間隙流体の質量密度, σ : 砂礫の質量密度, C_* : 河床堆積物の容積濃度, h : 流動深である。

混合砂礫の体積平均径 d_m 、平均流速 U_m および粒径比 d_L/d_S と先頭部大粒子存在割合 P_L との関係をプロットしたものを図 - 1 ~ 図 - 3 に示す。図 - 1 から、本研究と昨年度の結果では、混合する粒径が小さなものどうしの場合、先頭部粗粒化の程度 (P_L) において流下距離による顕著な違いが見られなかった。これ以外での粒度構成では流下距離が大きいほど P_L が大きくなった。一方、本研究と宮本の結果を比較すると、流下距離が小さい本研究の方が流下距離が長い宮本の結果よりも P_L が大きくなった。これは、本研究と宮本の結果での先頭部の土砂の採集方法に違

い（表 - 2 参照）があることに起因すると考えられる．宮本の実験では先頭部 20 L 分を採集するため後続の小粒子も捕捉していた可能性があり，これにより大粒子存在割合 P_L が小さくなったと考えられる．ただし，単位幅流量が宮本の実験条件に近い場合（供給単位流量 $100\text{cm}^2/\text{s}$ ， $200\text{cm}^2/\text{s}$ の場合），概ね同じ P_L となった．このことから，流下距離よりも供給流量の方が先頭部粗粒化に及ぼす影響が大きいことが推察された．以上のように流下距離や供給流量により d_m に対する P_L の変化傾向は異なるものの，これら 3 つの実験に共通して d_m が大きくなるほど P_L が大きくなったことから， d_m と P_L には正の相関関係があると考えられる．

図 - 2 に示す平均流速 U_m と大粒子存在割合 P_L との関係より，本研究と前年度⁴⁾の単位幅流量 $67\text{cm}^2/\text{sec}$ における結果では，平均流速 U_m が小さいほど大粒子存在割合 P_L が大きくなった．単位幅流量 $100\text{cm}^2/\text{sec}$ 以上の本研究および宮本の結果では，上記の結果とプロットされる範囲が一致しないものの， U_m が小さいほど大粒子存在割合 P_L が大きくなる傾向は上記の結果と同様であった．このことから，流下距離が長いほど先頭部の粗粒化がより発達すると考えられる．なお，単位幅流量 $67\text{cm}^2/\text{sec}$ と $100\text{cm}^2/\text{sec}$ 以上の条件で U_m と P_L の関係が異なるのは，供給流量が大きいほど大粒子存在割合が比較的少ない後続流が先頭部により多く到達するため，先頭部粗粒化 (P_L) が発達し難くなることを反映していると考えられる．

図 - 3 に示す大粒子存在割合 P_L と粒径比 d_L/d_S の関係より，3 つの実験に共通して， $2 \leq d_L/d_S \leq 4$ の範囲で P_L が最大となり， $d_L/d_S \geq 4$ の範囲では d_L/d_S の増大とともに P_L が減少するという傾向が見られた．これは，大粒子間隙への落ち込み「動的ふるい効果」がより発生しやすい条件（粒径比が大きい条件）では先頭部粗粒化の程度が弱まることを示しており，先頭部粗粒化機構が「動的ふるい効果」以外に，粒子同士の衝突や接触による大粒子の流動層上層への浮き上がり等にも起因する可能性があることを示唆している．

4.あとがき 本研究，昨年度および宮本の実験結果を比較し，土石流の流下距離が先頭部粗粒化現象にどのように影響するかを検討した．その結果，3 つの実験の中で流下距離が中程度の本研究の実験での先頭部粗粒化が最も顕著となった．これは宮本と本研究での実験条件の違いに起因するところが多いと考えられるが，単位幅流量が宮本の実験条件に近い場合は先頭部粗粒化が同程度となったことから，流下距離よりも供給流量の方が先頭部粗粒化に及ぼす影響が大きいことが推察された．一方で，3 つの実験に共通した傾向も見出すことができた．以上は，限られた実験条件による実験から得られた結果をもとにした定性的なものであり，追加実験を行うことで本実験では実施していない体積平均径 $d_m=9\sim 12\text{mm}$ または $1 \leq d_L/d_S \leq 2$ となる粒度構成の土石流を対象とした実験，供給単位流量を変化させた実験等が考えられる．今後は，本研究および昨年度実験により得られた知見を踏まえ，土石流先頭部の粗粒化現象を再現可能な土石流数値計算モデルを構築する予定である．

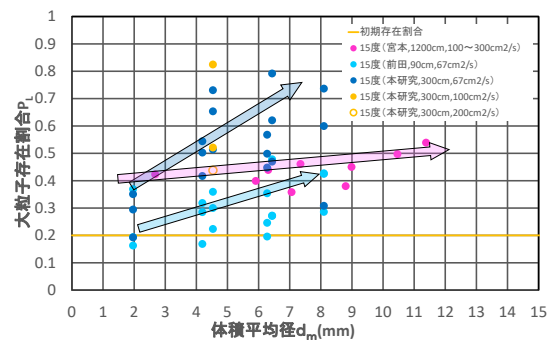


図 - 1 体積平均径に対する先頭部の大粒子存在割合

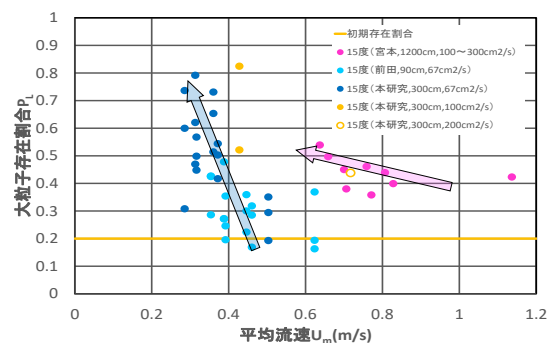


図 - 2 平均流速に対する先頭部の大粒子存在割合

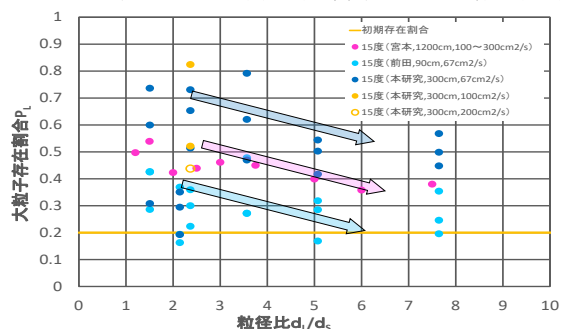


図 - 3 粒径比に対する先頭部の大粒子存在割合

参考文献 1) 高橋ら：京都大学防災研究所年報，Vol.33，B-2，pp.443-456，1990，2) 前田ら：2019 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.493-494，2019，3) 宮本：立命館大学博士学位論文，pp.73-94，1986，4) 高橋：ながれ，Vol.3，No.4，pp.307-317，1984