

粒度構成が異なる土石流の勾配変化に伴う流動形態遷移

鳥取大学大学院工学研究科 ○大山翔矢, 三島大侃, 和田孝志, 三輪 浩

1. はじめに 土石流による被害をより厳密に予測するためには、溪流出口より供給される土石流の性状をより正確に捉える必要がある。そのためには、大小様々な砂礫を含む土石流が急勾配～緩勾配へと連続的に変化する山地溪流を流下する間にどのように変化するかを把握する必要がある。昨年度の研究では、主に一様粒径土石流を対象に、土石流卓越勾配（15°）から掃流状集合流動勾配（9°）へと変化した変勾配条件において、土石流先頭部の輸送土砂濃度、流動深等の性状が勾配変化点下流の各地点でどのように変化するかを把握した。今年度は、2 粒径砂礫を混合した土石流を対象とし、土石流の粒度構成を様々に変化させることで、流路の勾配変化による土石流先頭部の性状（輸送土砂濃度、大粒子集積、流動深）の変化に粒度構成条件が及ぼす影響を把握する。

2. 実験概要 実験水路は図 1 に示す、水路長 770 cm、水路幅 40 cm、深さ 40 cm、最大傾斜約 8 度の一様勾配水路内に、水路長 350 cm、水路幅 10 cm の変勾配水路を設置して用いた。実験砂礫は平均粒径 10.7 mm, 7.1 mm, 3.0 mm, 1.4 mm の砂礫から 2 粒径を選択し、大粒径：小粒径を 1：4 の割合で混合した砂礫を用いた。表 1 に実験ケースを示す。実験ケースは、配合する粒径別に設定し、それぞれのケースに対して、水路勾配を一様勾配 15°、一様勾配 9°、変勾配 15°→9° の 3 種類、供給流量を 1.0, 2.0 L/s の 2 種類の組み合わせで実験を行った。一様勾配の条件は、勾配変化がない場合の土石流先頭部の性状を確認するための設定条件である。なお、Gy, Gf は竹村²⁾の研究、Yf は小林¹⁾、三島³⁾の研究結果を引用している。上記の全ての実験において、勾配変化点を P0 地点として下流端方向を正と定義し、勾配変化点から +10 cm (P10 地点)、+50 cm (P50 地点)、+70 cm (P70 地点)、+100 cm (P100 地点) の位置に超音波水位センサーを設置することでこれらの地点での流動深を計測した。輸送土砂濃度と大粒子存在割合は、下流端 (+150 cm (P150 地点)) で 4 つの採砂箱を連結した可動式連結土砂受けで土石流先頭部より連続的に採取することで計測した。

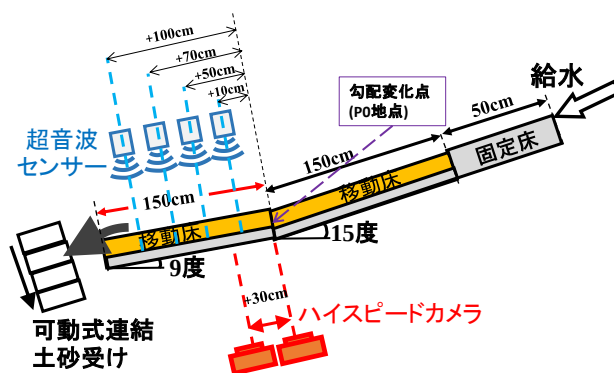


図 1 実験水路

表 1 実験条件

ケース名	砂礫	流量
Gy※1	19.0(mm):7.1(mm)-1:4	1L/s
Gf※1	19.0(mm):3.0(mm)-1:4	2L/s
By	10.7(mm):7.1(mm)-1:4	勾配
Bf	10.7(mm):3.0(mm)-1:4	
Bs	10.7(mm):1.4(mm)-1:4	
Yf※2	7.1(mm):3.0(mm)-1:4	15度一様
Ys	7.1(mm):1.4(mm)-1:4	9度一様
Fs	3.0(mm):1.4(mm)-1:4	15度→9度

※1 竹村²⁾の成果を引用, ※2 小林・三島¹⁾³⁾の成果を引用

3. 実験結果と考察 図 2 は実験より得られた流量別の先頭部大粒子存在割合を示しており、ここでの先頭部とは土石流先端が観測点に到達してから 1 から 1.5 秒後まで（連結した可動式連結土砂受けの第 1 箱目に取得した土石流部分）を指す。図の上側が流量 1.0 L/s、下側が流量 2.0 L/s の結果を示している。15° と 9° の一様勾配で比較すると、供給流量にかかわらず、9° より 15° のほうが大きいケースは混合する砂礫粒径が大きいケース（図の左側）、15° より 9° のほうが大きいケースは混合する砂礫粒径が小さいケース（図の右側）であった。砂礫粒

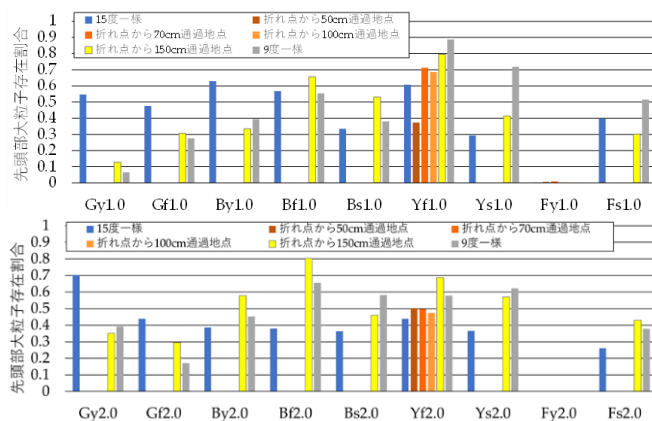


図 2 全ケースの先頭部（第1箱目捕捉部分）の大粒子存在割合

径が小さい場合の傾向は、緩勾配になるほど砂礫にかかる重力の鉛直下向き成分が増加し、流動層中の小粒子が大粒子間隙を通過して下層に落ち込むことで粒度偏析がより発達しやすくなることを表しているが、砂礫粒径が大きい場合は、大粒子の移動限界掃流力に対して十分な掃流力が得られなかったことを示していると考えられる。次に、変勾配条件での P150 地点での結果を見ると、砂礫粒径が大きいケース（図の左側）は供給流量が小さいほうが既に下流側勾配に沿った先頭部存在割合となっていたが、砂礫粒径が小さいケース（図の右側）では供給流量が大きいほうがより大きい先頭部大粒子割合となり下流側勾配に沿った値に遷移する傾向が見られた。

図 3 は実験より得られた流量別の先頭部流動深を示しており、ここでいう先頭部とは土石流先端が観測点に到達してから 3 秒後までを指す。なお、これらの図に示す 15°一様勾配と 9°一様勾配の値は理論値である。各ケースの傾向を見てみると、①勾配変化点直下の P10 ですでに下流側流動深に遷移しているケース、②10～100 cm の間で流動深の遷移が確認できるケース、③10～100 cm の間で流動深の遷移がまだ起こっていないケースの大きく 3 つのパターンに分けることができる。供給流量 1.0 L/s の条件では多くのケースで②となったが、供給流量 2.0 L/s の条件では②のケースだけでなく③のケースも増加していた。流量が大きいほうが勾配変化点通過後に上流側勾配に沿った流動深を保持しやすいという全体的な傾向があることが示されたが、流動深変化の傾向を見ると、砂礫粒径が大きいケース（図の左側）は流量が小さいほうが流動深への移行が早くなり、砂礫粒径が小さいケース（図の右側）は流量が大きいほうが流動深への移行が早くなるといった、先頭部大粒子存在割合と同様の傾向が見られた。

実験結果より推察された土石流特性別の勾配変化に伴う大粒子存在割合、流動深の遷移パターンを図 4 に示す。粗い粒度構成の土石流の遷移傾向は、供給流量が小さい場合（ d_m 大- Q 小、図 4 上段）、上流側の急勾配区間を流下する際に十分な運動エネルギーが得られず、勾配変化点以降での流動形態維持が困難となり遷移が早くなると考えられる。一方、細かい粒度構成の土石流の遷移傾向は、供給流量が大きい場合（ d_m 小- Q 大、図 4 上段）、先頭部粒度偏析が発達して先頭部の流動抵抗（消費運動エネルギー）が大きくなることで勾配変化点以降での流動形態維持が困難となり遷移が早くなると考えられる。どちらも、勾配変化に伴う遷移の途中段階で先頭部で過剰な大粒子集積が発生すると考えられる。粗い粒度構成で供給流量が大きい場合（ d_m 大- Q 大）と細かい粒度構成で供給流量が小さい場合（ d_m 小- Q 小）の遷移傾向は、前者（ d_m 大- Q 大）は先頭部流動抵抗によるエネルギー消費よりも運動エネルギー総量の方が大きいため、後者（ d_m 小- Q 小）は先頭部に十分な集積が発生せず、勾配変化点通過後の先頭部流動抵抗によるエネルギー消費がそもそも小さいためにしばらく流動形態を維持されるものと考えられる。このように、土石流粒度構成によって勾配変化に伴う流動形態遷移傾向が異なるパターンに分けられることが明らかとなった。

4. あとがき 本研究の実験結果から勾配変化に伴う混合砂礫土石流の流動形態遷移パターンが分類できることが示唆された。本推察の妥当性については、より多くの粒度構成条件、勾配変化パターンによる実験を行い、下流側の勾配変化点からの流下距離別の段階的な遷移過程の把握とともに検証していく必要がある。

参考文献 1) 和田・小林・三輪, 第 10 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.139-144, 2020. 2) 和田・竹村・三輪, 第 73 回土木学会中国支部大会発表概要集, pp.125-127, 2021. 3) 三島・和田・三輪, 令和 4 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.679-680, 2022.

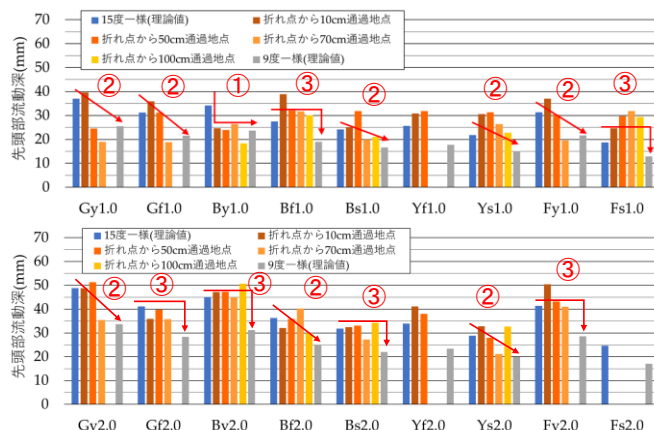


図 3 全ケースの先頭部（先端から 3 秒間）平均流動深

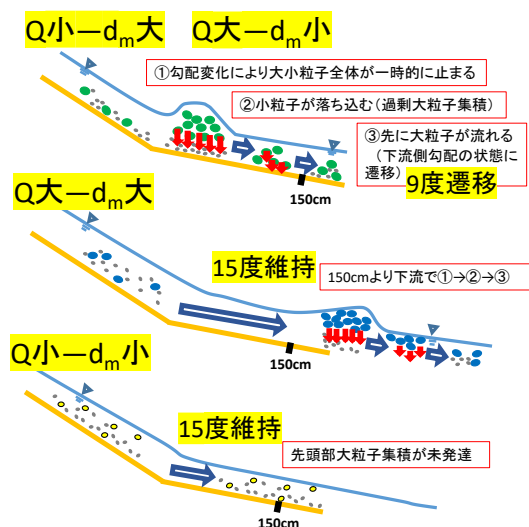


図 4 勾配変化に伴う土石流流動形態の遷移パターン