

河床から土石流に取り込まれる大小砂礫の上昇速度差の把握

鳥取大学大学院工学研究科 ○和田孝志, 三輪 浩
 国土交通省中国地方整備局太田川河川事務所 渡辺優太
 京都府庁 中井智也

1. 研究背景と目的 土石流は大小様々な砂礫で構成されており, 流下に伴って先頭部に粗い砂礫を集積させるという特徴(先頭部粒度偏析)がある. 土石流の粒度偏析に関する提案理論の多くは, 流動層内部で発生する逆グレーディングにより, 上方に遷移した大粒子が比較的速い上方の流れで輸送されることで発生するとしている. しかし, 逆グレーディング形成機構については, それぞれ見解が異なっている(図-1). 我々の研究グループでは, 逆グレーディング形成機構について 2 粒径混合土石流中の大小粒子の軌跡を高解像度ハイスピードカメラにより把握する実験を通して検討してきた. この結果, 流下距離 65 cm 地点では, 大小粒子の粒径差が大きいものほどすでに逆グレーディング形成が完了していた状態であった. そこで, 本研究では, 土石流発達段階(河床から流れに取り込まれる際の)大小粒子の河床鉛直方向の移動速度をハイスピードカメラおよび動画解析ソフトを用いて解析し, 逆グレーディングの形成過程を検討した.

2. 実験概要 本実験では, 直線水路 A (水路長 250 cm (移動床長 $L = 150$ cm), 水路幅 10 cm) と直線水路 B (水路長 100 cm (移動床長 $L = 90$ cm), 水路幅 7 cm) を用いて実験を行った. 実験の対象は大小 2 粒径の砂礫を混合した 2 粒径混合土石流である. 水路に 2 粒径混合砂礫を水厚さ 5 cm で敷き詰め, 散水して飽和状態にした後, 水路上端より給水して土石流を発生させた. その様子を観測地点に設置したハイスピードカメラ (EXILIM_EX_F1 (CASIO, 960FPS), または, CHU30_C_RS(松電舎, 360FPS)) で撮影した. 実験後, ハイスピードカメラ動画から, 土石流内部の大小砂礫の移動軌跡をソフトウェア「Dipp-Motion V Ver1.2.7 (DITECT 社)」により座標化した. 移動軌跡を追跡する対象砂礫は, 観測位置に土石流先頭部が到達した後 1 秒以内に, 観測軸から -5 cm ~ +5 cm の範囲内で動いている砂礫とし, 小粒子と大粒子合わせて 10~15 個程度選定し, それぞれの砂礫粒子の 1 コマごとの重心位置を座標化した. 合わせて, 観測軸における水位と河床位の時間変化(土石流先頭部到達時から 1 秒間)も測定した. なお, 実験開始時における観測位置と河床表面との交点を原点とした. 混合する砂礫径とその割合, 供給流量, 水路勾配, 観測位置は表-1を示す. なお, 表-1には各 Case の無次元掃流力 τ_* と土石流到達後から約 1 秒間の平均水深 \bar{h} (観測地点の約 1 秒間平均水位と平均河床高の差分) も合わせて示す. τ_* は以下の式より算出した.

$$\tau_* = \frac{g\bar{h}\tan\theta}{(\sigma/\rho - 1)gd_{m0}}$$

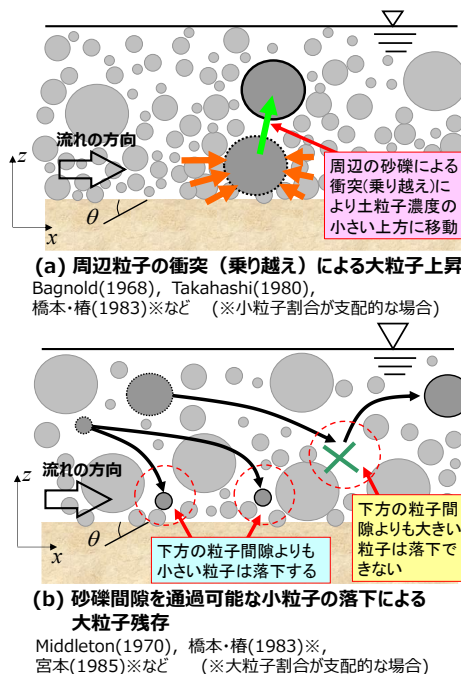


図-1 土石流内部の逆グレーディング形成に関する主な既往提案モデル

表-1 実験条件

Case	土石流構成材料	流量 (cm ³ /s)	勾配 (°)	観測位置 (上流端からの距離 cm)	\bar{h} (cm)	τ_*
1	10.7mm: 7.1mm =1:1	900	10	45 cm	3.515	0.411
2		900	15		2.682	0.477
3		550	20		2.455	0.436
4		400	15		1.639	0.816
5		900	15		3.381	0.291
6		550	15		3.178	0.816
7		400	15		3.939	0.951
8	10.7mm: 7.1mm =1:4	900	15	80 cm	4.400	0.674
9		550			3.641	0.685
10		400			3.152	0.559
11	10.7mm: 7.1mm =1:1	1000	15	80 cm	3.219	0.572
12		2000			3.808	0.677
13		2000			100 cm	4.398
14	19.0mm: 7.1mm =1:1	1000	15	80 cm	3.354	0.357
15		2000			4.921	0.524
16		1000			3.889	0.394
17		2000			80 cm	4.205

ここに、 g :重力加速度、 $\sigma/\rho - 1$:砂粒の水中比重、 d_{m0} :材料の初期体積平均径である。

3. 実験結果および考察 図-

2(a)は流量・水路勾配などが同一条件で大粒子径が異なる場合の大小砂礫の河床鉛直方向移動速度を示している。粒径の大きい礫を有するCase 15 (大粒子径 19.0 mm)のほうが、大粒子上昇速度は顕著に大きくなった。すなわち d_{m0} が大きく、無次元掃流力 τ^* が小さい材料のほうが大粒子の上昇速度が大きくなる傾向が見て取れる。これは、河床表面上でより突出した大粒子のほうがより速い上層の流速分布の影響を受けて河床礫を乗り越える形で取り込まれるためと推察される。

図-2(b)は同一の粒度構成で流量が異なる場合の大小砂礫の河床鉛直方向移動速度を示している。Case 2 (流量 0.90 L/s)では全層的に大粒子のほうが小粒子よりも上昇速度が大きく、Case 3 (流量 0.55 L/s)やCase 4 (流量 0.40 L/s)は両者に大きな違いは見られなかった。Case 2 > Case 3 > Case 4の順に無次元掃流力 τ^* が大きくなり、土石流内部の逆グレーディング形成に繋がる特徴が表れていると考えられる。これは、無次元掃流力 τ^* がより大きいほうが、土石流流速分布が全体的に大きくなり、河床付近の速度勾配も大きくなるため、上昇によって得られる速度増加が顕著なためと考えられる。

図-3は全Caseの無次元掃流力 τ^* と鉛直方向の平均大小粒子速度の差の関係をj示している。大粒子が 10.7 mm 径の場合は、 $0.45 < \tau^* < 0.70$ において平均大粒子上昇速度のほうが顕著に大きくなっており、 $\tau^* = 0.40$ 付近で小粒子上昇速度のほうが卓越する傾向が見られる。なお、大粒子が 19.0 mm 径の場合は $\tau^* = 0.40$ 付近で上昇速度の逆転がより明瞭であった。 $\tau^* < 0.40$ では大粒子の移動限界掃流力を下回る τ^* となり、小粒子の上昇のみが発生したことが推察される。一方、大粒子の移動限界を少し上回った τ^* の領域では、前述したように、河床表面上でより突出した大粒子のほうがより速い上層の流速分布の影響を受けて河床礫を乗り越える形で取り込まれるため上昇速度が大きくなったためと推察される。これらの結果は、土石流先頭部の大粒子集積が低い τ^* ほど顕著となる傾向がある²⁾ことと合致している。

4. まとめ 本研究の結果、土石流内部の逆グレーディングへと繋がる大小砂礫の上昇速度差は、より速い流速分布の影響を受ける大礫が動いていない礫を乗り越えることで発達する可能性があることが分かった。加えて、逆グレーディングの発端が土石流発達段階に発生している可能性も示唆された。本推察の妥当性について今後さらなる実験を通して検証する必要がある。

謝辞 本研究は国交省河川砂防技術研究開発 (代表: 宮田秀介) の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献 1)和田・熊谷・虫明・三輪: 令和4年度京大防災研一般研究集会 (穂高砂防観測所), 2022., 2)和田・虫明・三輪: 土木学会論文集, Vol.80(16), 23-16090, 2024.

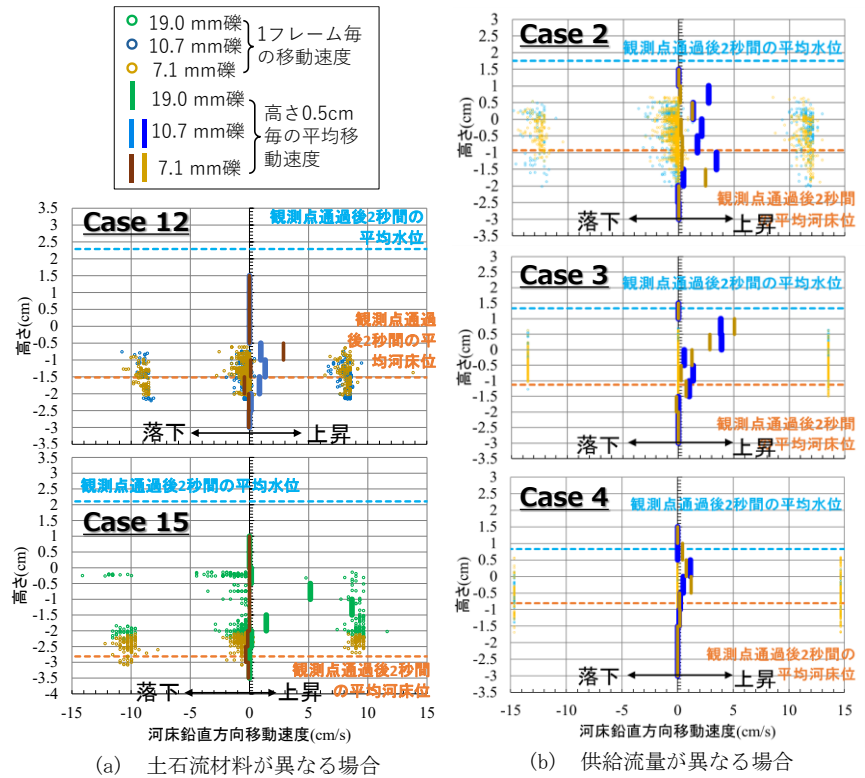


図-2 土石流内部の高さ 0.5 cm 毎の大小砂礫の河床鉛直方向平均移動速度

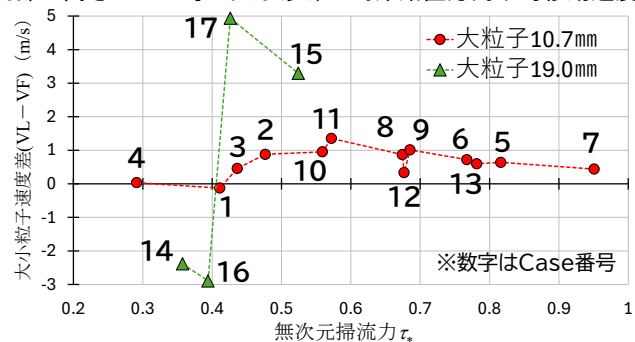


図-3 無次元掃流力と大小砂礫速度差の関係