

勾配変化点における土石流・土砂流の堆積特性に関する基礎的実験

株式会社建設技術研究所 ○奥山遼佑, 安達郁哉, 西口幸希, 中島奈桜
井上雄登, 矢作和樹, 高橋佑弥, 松原智生
国土技術政策総合研究所 泉山寛明, 山越隆雄

1. はじめに

河川・砂防技術基準基本計画編では土砂・洪水氾濫に対する土砂処理計画立案にあたっては河床変動計算等に基づいて策定することが基本とされている。その場合、河床勾配によって流れの形態（土石流・土砂流から掃流砂・浮遊砂）が遷移する状況が想定され、計算でも適切に反映することが求められる。土石流から土砂流あるいは掃流砂への遷移過程について高濱（2001）が実験、数値計算から詳細に検討している。そのほか、実験結果と江頭らの侵食・堆積速度式（芦田ら, 2008）を用いて土石流の侵食・堆積過程を精度良く再現しているが、土砂流から掃流砂に遷移するような条件など、勾配変化がある河床上での実験データ（例えば池谷・水山, 1982; 高濱ら, 2001; 池田, 2011）は多いとは言えず、実現象自体も土石流が堆積した後に再侵食が発生したりするため、計画検討立案に用意する計算モデルの検証のためにはシンプルな条件での実験データの蓄積が必要と考える。

本検討では土石流・土砂流の堆積過程に着目していくつかの条件における水路実験を行い、砂礫移動層の縦断変化や堆積速度を計測した。その上で、流動・堆積特性に関する分析を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験条件

実験水路は、長さ 10 m, 幅 50 cm, 高さ 50 cm の可変勾配型水路を用いた。本実験では横断方向の偏流が生じないように水路幅を 10 cm に狭めて使用した。水路の勾配は 1 箇所に変化させ水路長は上流側 6 m, 下流側 4 m とした。水路勾配は土石流から土砂流への遷移を想定した 12 度-5 度, 土砂流から掃流への遷移を想定した 5 度-1 度とした。

実験砂は、混合砂と均一砂の 2 条件とした。実験砂の粒径は、砂礫が層流上に挙動するようにするため粒径 4 mm と 3 mm の 2 種類を用いた。混合砂はこれらの混合比率を変化させて 3 種類設定した。均一砂は、代表粒径 4 mm のものを用いた。実験砂は JIS 規格に準拠してふり分けを行った土砂を使用した。

土砂供給は上流側の水路床に実験砂を敷詰めて移動床とし、上流から水を供給して土砂移動を発生させる方法とした。Case 5～7, 12～14 については下流側水路に実験砂と同じ大きさの粒径を貼り付けた粗度板を設置し固定床とし、それ以外は上流側と同じ材料で移動床とした。供給する水の量は定流 3.5 L/s とした。通水時間は水路勾配に応じて 10 秒および 90 秒とした。また、水路床に敷詰めた土砂を水で飽和させるために散水を行った。

散水は水路上流側で行い、散水量は勾配ごとに設定した。

2.2 計測項目および計測手法

計測項目は水位、砂礫移動層の上面、河床位、流速、下流端での土砂輸送濃度とした。計測は水路側面に設置した 3 台のハイスピードカメラと 7 台のビデオカメラにより通水中の流況を記録し、取得した動画をもとに目視により判読した。ハイスピードカメラ (HSC) は、Ximea 社製の MC031CG-SY-UB, レンズはスペース社の JHF25M を用いた。堆積速度は勾配変化点の河床位から整理した。堆積速度は、土石流等が勾配変化点に到達してから一定時間内の河床変動高から求めることとし、勾配変化点の水路床から上流側の水路床と垂直になるように設置した測線上で計測し、堆積面垂直方向に変換して求めた。計測間隔は 12-5 度では 0.5 秒, 5-1 度では 5 秒とした。

3. 実験ケース

実験のケース表を表-1 に示す。実験は、水路勾配 2 条件、実験砂 4 条件、勾配変化点下流の河床条件 2 条件を組み合わせた計 14 ケースを実施した。実験は、各ケース 2 回ずつ実施した。上流側水路で土石流, 土砂流を発生・流下させた場合の流動深 h と粒径 d の比 (h/d) は 8.5～12.5 であった。

4. 実験結果

4.1 砂礫移動層の縦断変化

図-1 に砂礫移動層の縦断的な変化を示す。図-1 には、

表-1 実験ケース表

CA SE	勾配		材料		水供給		
	上流 度	下流 度	実験砂の 粒径構成 (混合比)	平均 粒径 d mm	流量 L/s	継続 時間 秒	
1	12	5	4 mm	4.0	3.5	10	
2	12	5	4 mm, 3 mm (1:1)	3.5	3.5	10	
3	12	5	4 mm, 3 mm (2:1)	3.7	3.5	10	
4	12	5	4 mm, 3 mm (3:1)	3.8	3.5	10	
5	12	5	4 mm	4.0	3.5	10	
6	12	5	4 mm, 3 mm (1:1)	3.5	3.5	10	
7	12	5	4 mm, 3 mm (3:1)	3.7	3.5	10	
8	5	1	4 mm	3.8	3.5	90	
9	5	1	4 mm, 3 mm (1:1)	4.0	3.5	90	
10	5	1	4 mm, 3 mm (2:1)	3.5	3.5	90	
11	5	1	4 mm, 3 mm (3:1)	3.8	3.5	90	
12	5	1	4 mm	4.0	3.5	90	
13	5	1	4 mm, 3 mm (1:1)	3.5	3.5	90	
14	5	1	4 mm, 3 mm (3:1)	3.8	3.5	90	

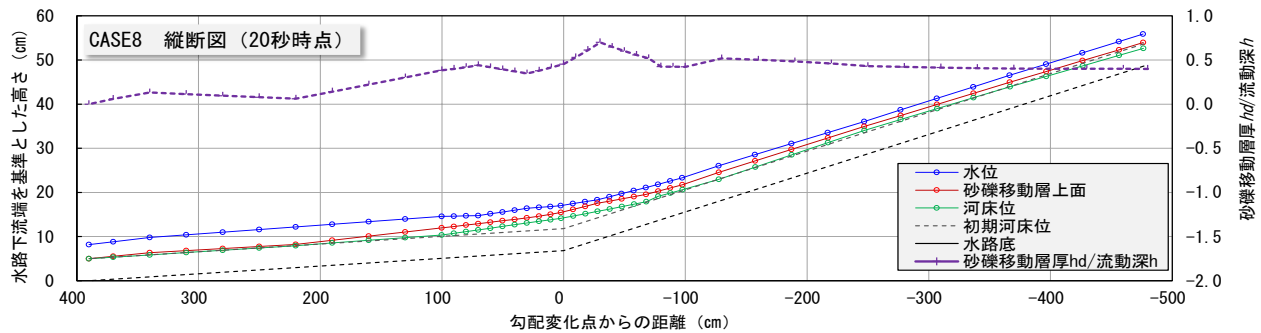


図-1 水位・河床位・砂礫移動層の縦断変化 (CASE8 の例)

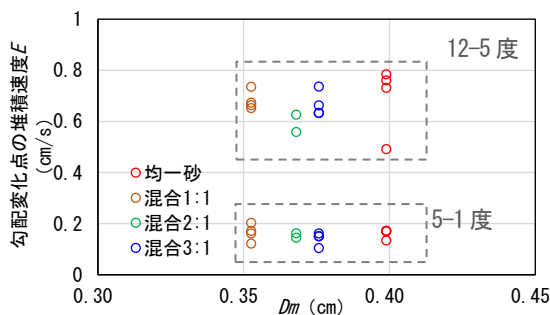


図-2 粒径と堆積速度の関係

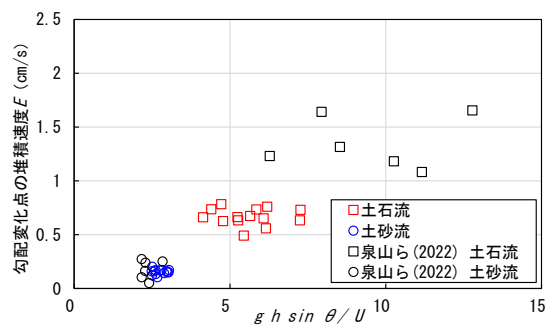


図-3 堆積速度と $gh \sin \theta / U$ の関係

代表例として CASE8 の実験開始から 20 秒時点の水位、河床位、砂礫移動上面および砂礫移動層厚 h_d と流動深 h の比 h_d/h を示した。 h_d/h は、勾配変化点の上流では 0.4~0.6 程度であり土砂流形態である。勾配変化点からの距離 60 cm より下流では h_d/h は次第に低下している。20 秒時点の堆砂の末端である 200 cm 地点から下流側では h_d/h が 0.2 程度で流れの形態としては掃流砂であると考えられる。実験砂の平均粒径は 0.38 cm であり、勾配変化点から粒径の約 500 倍程度の距離を流下すると土砂流から掃流砂へ移行すると言える。砂礫移動層の縦断的な変化は、ケースごとにばらつきはあるものの、5-1 度の他のケースでもおおむね同様の傾向であった。

4.2 堆積速度に影響を及ぼす要素の確認

実験結果の堆積速度と粒径の関係を図-2 に示す。12-5 度で均一砂の場合に堆積速度の差が 0.3 cm/s ほどあり、ややばらつきが大きい。それ以外は概ね安定して実験値が得られていると考えられる。実験砂の違いによる堆

積速度の変化は 12-5 度、5-1 度ともに明瞭でない。今回設定した実験砂の条件内では粒度分布が堆積速度に与える影響は小さく、高橋の侵食・堆積速度式を用いる場合でも平均粒径を使用すれば十分であると考えられる。

体積土砂濃度の実験値を取得できておらず日本で使われる侵食・堆積速度式との比較ができないので、図-3 には堆積速度の実験値と Iverson & Ouyang (2015) に示される式を簡略化して得た $gh \sin \theta / U$ との関係を示している。これは、流れと河床堆積物の間の運動量の交換は流速が大きいほど十分になされず、流速に逆比例するとの考えから導かれたもので式の検証が必要だが両者には正の相関があることが分かる。堆積速度の実験値として 2 粒径を用いた既往の実験 (泉山ら, 2022) も示すが、粒径比 (大粒径/小粒径の比: 1~13)、小粒径についての相対水深 (5.1~25.3) が大きいことなどから砂礫が層流状態で流動していなかったことに留意が必要である。

5. まとめと今後の課題

本検討では、水路実験により勾配変化がある場での流れの遷移過程、勾配変化点での堆積速度に関する実験を行い、流れの遷移の特徴、混合粒径であることの影響の確認を行った。1 ケースしか示していないが土砂流から掃流砂に移行するには、勾配変化点から粒径の約 500 倍程度の距離が必要であることが示された。粒度分布の違いによる堆積速度の変化は確認できなかった。今後は、より相対水深の大きい場合 ($h/d > 20$) を想定した条件の異なる実験を行い、土石流・土砂流の流動・堆積特性に関する分析を行っていきたいと考える。

引用文献

- 芦田ら (2005) : 21 世紀の河川学, 京都大学学術出版会, 265p.
- 池田 (2011) : 土石流の発生・流出過程に関する研究, 京都大学学位論文, 186pp.
- 池谷・水山 (1982) : 土石流の流動と堆積に関する研究, 土木研究所報告, 第 157 号
- Iverson, R. M. and Ouyang C. (2015): Entrainment of bed material by Earth-surface mass flows: Review and reformulation of depth-integrated theory, Reviews of Geophysics, pp.27-58
- 泉山ら (2022) : 勾配変化点上下流の土砂移動形態に関する水路実験, 令和 4 年度砂防学会研究発表会要集, p.627-628
- 高濱 (2001) : 土石流による土砂流出過程の予測法とその適用性に関する研究, 岐阜大学学位論文, 186pp.
- 高橋保 (2006) : 土砂流出現象と土砂災害対策, 近未来社, 420pp.