

土石流等の堆積速度に関する水路実験

株式会社建設技術研究所　○奥山遼佑, 矢作和樹, 安達郁哉, 松原智生
井上雄登, 高橋佑弥, 西口幸希
国土技術政策総合研究所　山越隆雄, 西脇彩人, 山村康介

1. はじめに

近年、令和元年東日本台風による丸森町での災害に代表されるように土砂・洪水氾濫による被害が顕在化している。土砂・洪水氾濫の被害想定や対策計画立案には一次元河床変動計算による土砂移動・河床変動予測が有効である。土砂・洪水氾濫を引き起こす土石流や土砂流の堆積過程は非平衡性が強いとされており(例えば、水山・下東, 1986), 堆積速度をどのように与えるかが、河床変動計算結果に大きく影響する。

本研究では、土石流の堆積過程に着目していくつかの条件で水路実験を行い、堆積速度を計測した。そのうえで、粒径と堆積速度の関係や高橋・匡(1986)、高橋ら(1991)が提案した堆積速度式(以下、「高橋式」とする)の多様な実験条件下での検証を行った。

2. 実験の概要

2.1 実験条件および実験ケース

実験条件を表-1に示す。実験水路は、上流側6m、下流側4mの可変勾配型水路を用いた。実験条件は、水路勾配、供給流量、実験砂を変化させた。

実験ケースを表-2に示す。表には、奥山ら(2023)の実験ケースを併せて示した(Case10~13)。ケース数は計13ケースである。実験は各ケース2回ずつ実施した。

また、表-2中には、勾配変化点より上流側で計測した土石流の流動深 h と粒径 d の比(h/d)および勾配変化点における堆積速度の計測結果を併せて示した。 h/d 及び堆積速度は、各ケースの2回実施した平均値を示した。

2.2 計測項目および計測手法

計測項目は水位、河床位、断面平均流速、水路下流端での土砂輸送濃度とした。また、勾配変化点へ流入する土砂濃度を把握するために勾配変化点上流側を抽出した予備実験を行い、輸送土砂濃度を計測した。

水位、河床位、流速は水路側面に設置したハイスピードカメラの動画から判読した。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高の変化から求めた。堆積速度は、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、堆積面に垂直な方向に変換して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 実験砂の粒径と堆積速度の関係

3.1.1 実験結果

実験結果の堆積速度と粒径の関係を図-1に示す。ここでは、流量や勾配の影響を除くために、上流側の水路勾配12度、供給流量が3.5L/sのケースを抽出して示した。

粒径4.0mm前後のCase10~13の堆積速度は0.6~0.8cm/sの範囲にある。粒径7.0mm前後のCase7, Case9の堆積速度は0.7~0.8cm/sであり、Case10~13の実験結果と同程度である。粒径1.3mmのCase8の堆積速度は0.5cm/s程度であり、他のケースと比較して小さい。

3.1.2 考察

Case8は、流況観察の結果、流れの表面近くの粒子が浮遊して流下していることが確認された。層流状で土砂が移動している他のケースとは土砂の移動形態が異なっていたため、堆積速度に差が生じたものと考えられる。

3.2 堆積速度式と実験結果の比較検証

3.2.1 検証の背景

高橋・匡(1986)は非平衡性を数値計算上で表現するための堆積速度式を提案し、広く活用されている。

表-1 実験条件

水路長	10 m (勾配変化点上流 6.0 m, 下流 4.0 m)
水路幅	10 cm
水路勾配	勾配変化点上流 : 15 度, 12 度, 10 度, 8 度 勾配変化点下流 : 5 度
供給流量	定流 2.0, 3.5, 5.0 L/s 移動床を湿潤状態にするため散水を実施
実験砂	均一砂 3 条件 (1.3 mm, 4.0 mm, 6.7 mm) 混合砂 4 条件 (平均粒径 3.5 mm, 3.7 mm, 3.8 mm, 7.0 mm)
土砂供給	移動床の侵食 (移動床敷厚 5.0 cm)
水路床	全区間移動床を基本とした (Case10, 11, 13 は、勾配変化点下流側が移動床の場合と固定床の場合を各 2 回, 計 4 回実施)

表-2 実験ケース

CA SE	勾配		材料 実験砂 の構成	平均 粒径 d mm	水供給		実験結果	
	上流 度	下流 度			流量 L/s	通水 時間 秒	h/d	堆積 速度 cm/s
1	15	5	均一砂	4.0	5.0	6	13.2	1.09
2	15	5	均一砂	4.0	3.5	8	11.8	1.18
3	12	5	均一砂	4.0	5.0	10	11.1	0.54
4	12	5	均一砂	4.0	2.0	20	7.1	0.37
5	10	5	均一砂	4.0	3.5	20	9.3	0.31
6	8	5	均一砂	4.0	3.5	25	8.8	0.16
7	12	5	均一砂	6.7	3.5	10	7.3	0.71
8	12	5	均一砂	1.3	3.5	10	34.6	0.54
9	12	5	混合砂	7.0	3.5	10	7.3	0.77
10	12	5	均一砂	4.0	3.5	10	10.2	0.73
11	12	5	混合砂	3.8	3.5	10	10.2	0.67
12	12	5	混合砂	3.7	3.5	10	10.9	0.63
13	12	5	混合砂	3.5	3.5	10	10.9	0.68

$$i = \delta_d \frac{C_L - C_{eq}}{C_{*dL}} \frac{q}{d_L} = \delta_d \frac{C_L - C_{eq}}{C_{*dL}} \frac{h}{d_L} U \quad \cdots \text{式1}$$

$$i = \delta'_d \frac{C_L - C_{eq}}{C_{*dL}} \frac{q}{h} = \delta'_d \frac{C_L - C_{eq}}{C_{*dL}} U \quad \cdots \text{式2}$$

ここに、 δ_d 、 δ'_d は堆積速度係数、 C_L は粗粒子濃度、 C_{eq} は平衡土砂濃度、 C_{*dL} は堆積層中の粗粒子濃度、 q は単位幅流量 (cm^2/s)、 d_L は粗礫の粒径 (cm)、 h は流動深 (cm)、 U は平均流速 (cm/s) である。

高橋式の適用可能性は高橋ら (1991)、高濱ら (2000) などにおいて詳細に分析が行われているが、これらの研究で検証された条件は限定的であり、実験結果から堆積速度式の適用可能性を確認した事例も少ないため、多様な条件で検証することが望まれる。そこで、高橋式による堆積速度計算値と表-2 に示した実験結果を比較した。

3.2.2 検証方法

堆積速度の計算には、実験で計測された土砂濃度、流速、流動深の値を用いた。単位幅流量 q は勾配変化点から 1 m 上流で計測した流動深 h と断面平均流速 U より求めた。土砂濃度は本来、体積土砂濃度が使用されるべきであるが、実験で体積土砂濃度を計測することは困難であるため、輸送土砂濃度の計測結果を用いた。平衡土砂濃度 C_{eq} は水路下流端から流出する土砂濃度の計測結果を用いた。 C_L は上流から勾配変化点へ供給される土砂濃度を用いた。Case8 の土砂移動形態は石礫型土石流と異なると考えられるため除外した。

3.2.3 検証結果

図-2 a) には $(C_L - C_{eq})q/C_{*dL}$ 、図-2 b) には $(C_L - C_{eq})q/C_{*dL}h$ の計算値と実験の結果得られた勾配変化点における堆積速度の実験値の比較図を示した。いずれの式も、計算値と実験結果は比較的良好な正の相関関係にあり、式1では傾きが 0.01 から 0.001 程度の範囲、式2では傾きが 0.1 から 0.01 の範囲に収まっている。式1と式2の傾きには 10 倍程度の差がある。

3.2.4 考察

今回示した実験は相対水深が 6 から 15 の間で実施しており、水深で除す式2、粒径で除す式1の間でおおよそ 10 倍程度の差が生じているものと考えられる。

また、上記の堆積速度係数は、高橋 (2006) に示された値より 1 オーダー程度小さい。本検討の計算値の算出では、 C_{eq} として水路下流端、 C_L として勾配変化点上流側の土砂濃度を用いており、堆積を生じている勾配変化点での実際の $(C_L - C_{eq})$ よりも大きいことが考えられる。この点は、今後、数値計算等によってより詳細に検証することが望ましい。

4. まとめと今後の課題

本研究では、様々な条件で石礫型土石流を対象とした水路実験を行い勾配変化での堆積速度と高橋式による計算値の比較検証を行った。この結果、式1では係数を 10^3 オーダー、式2では 10^2 オーダーとすることで計算値と実験結果が概ね一致することが確認できた。

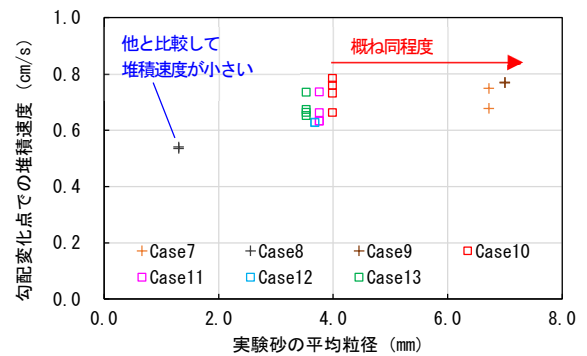


図-1 粒径と堆積速度の関係

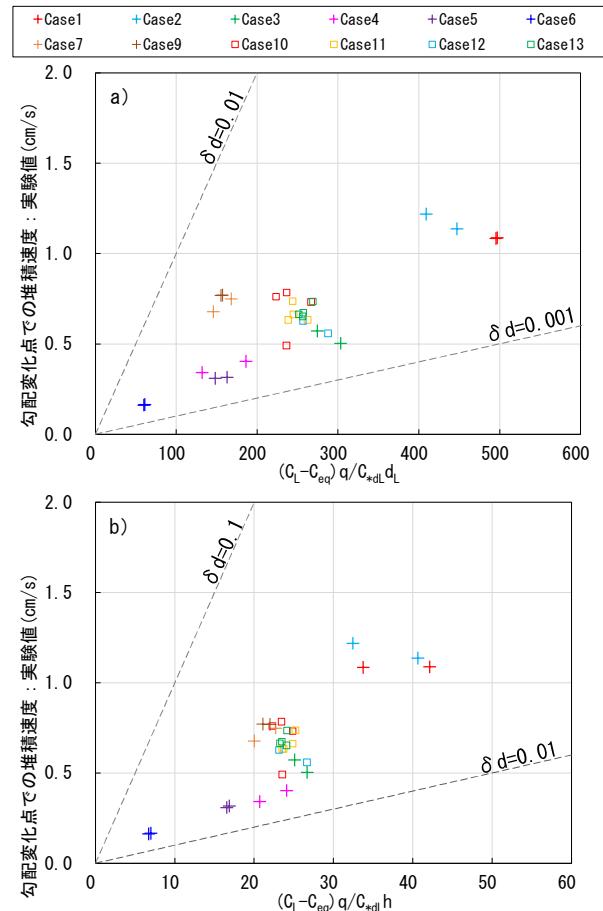


図-2 高橋の堆積速度式の計算値と実験結果の比較

謝辞

本研究の実施にあたり、泉山寛明氏には、実験条件や実験方法、解析手法など総合的なご指導をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- 水山・下東 (1986) : 土石流堆積過程における非平衡流砂量, 昭和 61 年度砂防学会研究発表会概要集, p.130-131
- 奥山ら (2023) : 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, 令和 5 年度砂防学会研究発表会概要集, p.625-626
- 高濱ら (2000) : 土石流シミュレーションモデルの比較研究, 水工学論文集, 第 44 巻, p.687-692
- 高橋・匡 (1986) : 変勾配流路における土石流の形成, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号 B-2, p.343-359
- 高橋ら (1991) : 混合粒径材料からなる土石流扇状地の形成とその侵食, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-2, p.355-372
- 高橋保 (2006) : 土砂流出現象と土砂災害対策, 420pp.