

土石流等の流下・堆積に関する水路実験 —縮尺の差異が堆積速度に及ぼす影響—

株式会社建設技術研究所 ○奥山遼佑, 石川深緒, 西原加織, 浦長瀬大世, 西口幸希
松原智生, 井上雄登, 中島奈桜, 矢作和樹
国土技術政策総合研究所 赤澤史頭, 鈴木啓介

1. はじめに

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。

土砂・洪水氾濫対策計画検討の実務では, 堆積速度を表現する方法として高橋・匡(1986)や高橋ら(1991)が提案した土石流の堆積速度式(以降, 「高橋式」とする)が多く用いられているが, これらの式の適用性を実験結果との比較により検証した事例は少ない。これまでに著者らは高橋式の適用性の確認を目的として, 供給土砂濃度や粒径に着目して実験を実施してきた。これらの実験結果を現地に適用するためには, 堆積速度が縮尺による影響を受けているかを確認する必要がある。

本検討は, 土石流の堆積過程に着目して, 過去の研究より大縮尺の条件で水路実験を行い, 河床変動高や堆積速度を計測した。そのうえで, 縮尺による堆積速度の違いや, 実験結果の堆積速度と高橋らの式で算出した堆積速度の計算値の関係を整理した。

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。実験条件は, 著者らが過去に実施した実験(奥山ら; 2024)に対してモデルの縮尺を変化させた1条件を設定した。相似則はフルードの相似則を適用した。モデルの縮尺は, 1/15とした。なお, 過去の実験の縮尺は, 縮尺1/30を想定したものである。

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。水路幅は過去の実験と同様に0.1mとした。

供給流量は, 過去に実施した実験の単位幅流量(350 cm²/s)を原型値換算した値(5.75 m²/s)と一致するように, 縮尺をかけて設定した。供給流量は, 定常流9.9 L/s(単位幅流量990 cm²/s)である。

実験砂は, 平均粒径6.7 mmの均一砂を使用した。

なお, 縮尺1/30の実験砂の粒径は4.0 mmであるのに対して縮尺1/15の実験砂の粒径は6.7 mmである。縮尺1/15において縮尺1/30の場合の4.0 mmに対応する粒径は8.0 mmである。一方で, 実験砂はJISA1204に準じてふるい分けを行った土砂を用いている。このため, 縮尺1/30と縮尺1/15の粒径を厳密に一致させることは困難である。したがって, 実験砂は, 縮尺1/30から換算した縮尺1/15の時の粒径である8.0 mmに最も近い6.7 mmのものを用いた。

実験ケースを表-2に示す。ケース数は1ケースである。実験は各ケース2回ずつ実施した。なお, 表中には過去に

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 勾配変化点下流: 5 度
供給流量	定常流 9.9 L/s 移動床を湿润状態にするため散水を実施
実験砂	均一砂 5 条件 (6.7 mm)
土砂供給	移動床の侵食 (移動床敷厚 15 cm)
水路床	全区間移動床とした

表-2 実験ケース

CA SE	勾配		縮尺	材料		水供給	
	上流 度	下流 度		実験砂 の構成	平均 粒径 <i>d</i> mm	流量 L/s	通水 時間 秒
1	15	5	1/15	均一砂	6.7	9.9	20
R5	15	5	1/30	均一砂	4.0	3.5	8

R5は奥山ら(2024)の実験条件

著者らが実施した実験のうち, 今回の実験条件と対応するケースの条件を併せて示した。

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, 別途, 勾配変化点上流側を抽出した実験を行い, 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に設置したハイスピードカメラで判読した河床位のデータから整理した。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 縮尺による堆積速度の変化

図-1には縮尺が異なる2ケースの河床高の時間変化を示した。ここでは, 縮尺が異なる2ケースを比較するために, 実験で計測した河床変動高のデータを原型値に換算して比較図として示した。

縮尺1/15の場合の河床高の時間変化は, 原型値で約30秒付近までは概ね一定の速度で変化している。30秒以降は, 30秒以前よりも河床上昇の速度が遅くなっていることが確認できる。30秒時点までの堆積速度は, 1回目で0.052 cm/s, 2回目で0.051 cm/sである。30秒以降の堆積速度は,

1 回目に 0.020 cm/s, 2 回目に 0.023 cm/s である。このことから、30 秒時点を超えて堆積速度が変化していることが確認できる。これは、勾配変化点の上流側の移動床が侵食されて勾配が緩くなったことで、勾配変化点上流側から勾配変化点に入流する土砂の濃度が低下したためであると考えられる。30 秒までの縮尺 1/30 の河床高の変化は、縮尺 1/15 の場合とほぼ同様である。このことから、縮尺の違いが河床高の変化に与える影響は小さい可能性がある。

表-3 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 、流速 U 、勾配変化点における堆積速度 i の計測結果および流動深 h と粒径 d の比（相対水深 h/d ）を示した。流動深、流速、堆積速度および h/d は、各ケースの 2 回実施した平均値を示した。また、表中には、計測した実験結果に縮率をかけて原型値に換算した流動深 h 、流速 U 、勾配変化点における堆積速度 i の値を併せて示した。なお、縮尺 1/15 の堆積速度は、原型値換算で 30 秒時点までの河床高から算出した堆積速度を示した。

今回実施した実験の相対水深 h/d は、14 である。過年度の実験の相対水深 h/d は 12 で概ね同程度である。原型値換算した堆積速度は、縮尺 1/15 では 0.05 m/s, 縮尺 1/30 では 0.06 m/s である。堆積速度は、縮尺によらずほぼ同じ値である。このことから、縮尺の違いが実験結果の堆積速度に与える影響は大きくないと推察される。

3.2 堆積速度式と実験結果の比較

図-2 に奥山ら (2024) に準じて実験結果の堆積速度と高橋・匡 (1986) の堆積速度式による計算値の関係を示した。図-2 の横軸は、式 1 に対応する $(C_L - C_{eq})q / (C_{*dL} d_L)$ の計算値である。なお、ここでは模型スケールでデータの整理を行った。高橋式を以下に示す。

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

ここに、 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。なお、 C_L は別途実施した勾配変化点上流側を抽出した実験で得た勾配変化点へ供給される土砂濃度を用いた。 C_{eq} は直接計測することが困難であるため、高橋ら (1988) の土砂流の濃度式により求めた。

今回実施した縮尺 1/15 の実験結果は、これまでに実施した過去の実験結果から整理した堆積速度係数のレンジと整合している。このことから、縮尺の違いが実験結果の堆積速度に与える影響は大きくないものと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、土石流の勾配変化での堆積速度が縮尺による影響を受けているかを分析した。現時点で得られている実験データの範囲内では、堆積速度は縮尺による影響を受けていないか、縮尺による影響が小さいことが確認できた。

しかしながら、縮尺の違いを検討できた実験ケースは 1 ケースのみである。今後は、縮尺 1/15 の異なる条件で実験を行い、縮尺が堆積速度に与える影響を複数の条件で確認する必要がある。

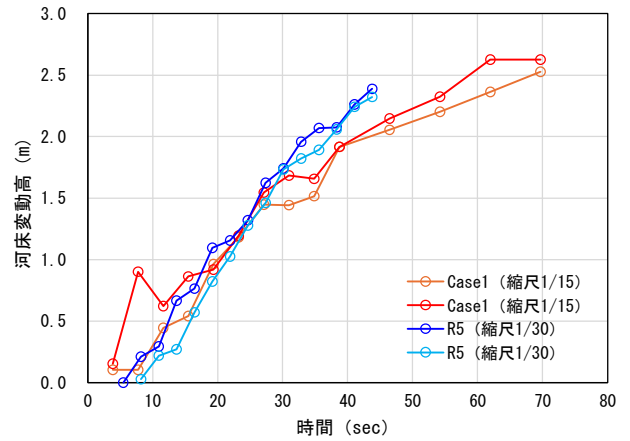


図-1 縮尺が異なる 2 ケースの河床位の時間変化

表-3 実験結果

CASE	縮尺	模型値					原型値		
		流動深 h cm	流速 U cm/s	堆積速度 i cm/s	相対水深 h/d	供給濃度 C_L	流動深 h m	流速 U m/s	堆積速度 i m/s
1	1/15	9.4	122	1.32	14	0.32	1.4	4.7	0.05
R5	1/30	4.7	105	1.18	12	0.27	1.2	5.8	0.06

R5 は奥山ら (2024) の実験結果

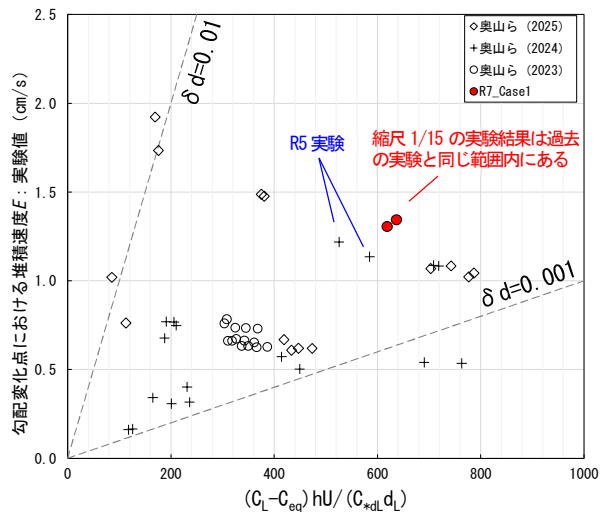


図-2 高橋の堆積速度式の計算値と実験結果の比較

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 (2025) : 粒径の異なる土石流の堆積速度に関する水路実験, 令和 7 年度砂防学会研究発表会概要集, p.777-778
 奥山ら (2024) : 土石流等の堆積速度に関する水路実験, 令和 6 年度砂防学会研究発表会概要集, p.687-688
 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 (1988) : 土石流および土石流扇状地の形成に関する研究, 第 32 回水理講演会論文集, p.497-502
 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