

底面粗度の違いを考慮した土石流に関する実験および数値シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 ○矢野むつみ, 木次貫太
 京都大学防災研究所 中谷加奈, 山野井一輝
 京都大学大学院農学研究科 正岡直也
 広島大学大学院先進理工系科学研究科 畠俊郎

1. 研究背景

土石流に関する研究の殆どは山地斜面や自然溪流を想定した底面粗度(凹凸)の大きな河床を対象としている¹⁾。一方で, 山間部でも道路や流路などの底面粗度の小さい場でも土石流は流動するが, その知見が少ないことが現状である。また, 近年では谷出口まで宅地開発が進み, 山間部に建設された道路が土石流の移動経路となり, 氾濫・堆積被害が拡大したことが確認されている。これらの被害を防止するためには, 道路を流下する際の挙動も踏まえた被害予測を数値シミュレーションによって精度良く実施することが重要である。数値シミュレーションにおいて, 土石流の流れの抵抗は運動方程式中の河床せん断力 τ_b で表され, 日本では, 式(1)の高橋²⁾や式(2)の江頭らのモデル³⁾がよく用いられる。また, 海外では雪崩や土石流などを対象とした数値シミュレーションソフトRAMMSに採用されている式(3)のVoellmyモデル⁴⁾がよく用いられる。

$$\tau_b = a_i \sin \alpha \sigma \left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} u^2 \quad (1)$$

$$\tau_b = (\sigma - \rho) C \left(\frac{C}{C_*} \right)^{1/5} gh \cos \theta \tan \phi$$

$$+ k_g \sigma (1 - e^2) C^{1/3} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} u^2 + k_f \rho \frac{(1-C)^{5/3}}{C^{2/3}} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} u^2 \quad (2)$$

$$\tau_b = \mu \rho_m gh \cos \theta + \frac{\rho_m u^2}{\xi} \quad (3)$$

ここに, a_i : 実験定数, α : 衝突角, σ : 砂密度, ρ : 水の密度, C : 土砂濃度, C_* : 河床堆積物の体積濃度, θ : 水面勾配, ϕ : 内部摩擦角, k_g : 実験定数, e : 反発係数, k_f : 実験定数, μ : 底面摩擦係数, ξ : 乱流抵抗係数である。これらのモデルに含まれるパラメータは流動形態によって実験的または感度分析的に与えられ, 実務では一律に用いられることが多い。その一方で, 底面粗度の違いを直接的に表現したモデルは提案されておらず, 底面粗度の小さい区間でも山地河道と同一のモデルやパラメータ値を使用していることが課題となっている。

そこで本研究では, 異なる底面粗度を用いた水路実験を行い, シミュレーションでは山地河道を模した高粗度には従来の河床せん断力のモデルを, 道路を模した低粗度にはパラメータを変化させたモデルを適用させ, 実験

とシミュレーションでの河床せん断力を比較することで実験結果を再現可能か検証した。

2. 水路実験概要と結果

広島大学東広島キャンパス内の国内最大規模の可変勾配水路(全長15m, 水路幅0.1mの矩形断面)を用いて, 水路勾配18°の条件で水路実験を行った。実験試料については, 玉石(d_{50} ≈約10mm, max12.5mm)3kg 朝明砂(d_{50} =2.3mm)11kg, 珪砂4号(d_{50} =0.6~1.2mm)11kg, の計25kgの混合砂(d_m =1.7mm, σ =2.64g/cm³)を用いて, 上流側に約2m長で天然ダム上に堆積させ, 一定流量800cm³/sで全土砂が下流へ流出することを目安に約27s間供給した。また, 超音波センサ(OMRON E4PALS50-M1-N)を用いて流動深を計測し, 下流端で土砂採取を行うことで土砂濃度を算出した。実験条件については, Case1では朝明砂を用いた山地河道を模した高粗度のみ, Case2では上流に高粗度, 下流に化粧板を用いた低粗度(凹凸無)5.2m, Case3では上流に高粗度, 下流に珪砂4号を用いた低粗度(凹凸有)5.5mを設置し, 土砂の流下距離は12mとした。河床せん断力の算出方法については, 時間的・空間的に変動が小さい区間を平衡状態として, その区間平均を取ることで平衡状態での流動深および土砂濃度を算出し, 運動方程式から平衡状態での河床せん断力式 $\tau_b = \rho_m gh \sin \theta$ にこれらの結果を代入することで算出した。

流動深および土砂濃度の実験結果を図-1および表-1に示す。図-1はCase2での複数回実施した流動深結果の一例であり, 高粗度を流下する流下距離6.0m地点と低粗度(凹凸無)を流下する流下距離11.8m地点の流動深の時間変化を示している。また, 表-1は各実験ケースで複数回実施した平衡状態での流動深・土砂濃度の平均値を示しており, Case1の高粗度の結果およびCase2, 3の低粗度の結果を比較すると, 低粗度に遷移後流動深の低下に伴い河床せん断力の減少がみられた。

表-1 平衡状態での各実験条件における実験結果

	流動深	土砂濃度	河床せん断力
Case1(高粗度)	28.2 mm	0.416	143.1 Pa
Case2(凹凸無)	7.9 mm	0.414	40.4 Pa
Case3(凹凸有)	12.8 mm	0.452	67.5 Pa

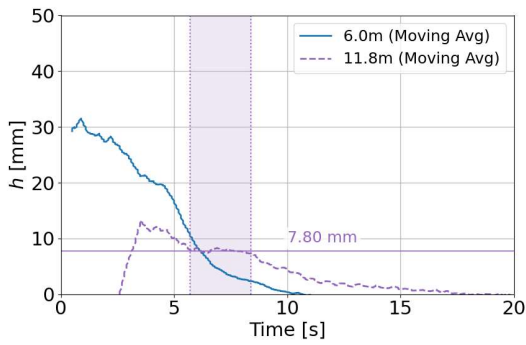


図-1 Case2の平衡状態での流動深結果

3. 数値シミュレーションの概要

土石流シミュレータ Kanako Ver.1.44 を用いて実験に基づく次元河床変動計算を行った。高粗度では式(4)の従来の高橋モデル²⁾、低粗度では式(1)~(3)の高橋・江頭ら・Voellmy のパラメータを変化させたモデルを採用し、実験条件と同じ条件で再現計算を行った。

$$\tau_b = \frac{\sigma}{8} \left\{ \left(\frac{c_s}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} u^2 \quad (4)$$

また、各モデルのパラメータについては、粒子衝突に関するパラメータである実験定数 $a_i \sin \alpha$ および k_g 、底面摩擦に関するパラメータである底面摩擦係数 μ の3つのパラメータを変化させ、内部摩擦角は実測値、その他のパラメータは既往研究に基づいた代表値とした。変化させたパラメータでは、実験で得た各低粗度における河床せん断力の値と式(1)~(3)の河床せん断力が一致するように設定し、各パラメータの設定値を表-2に示す。

表-2 低粗度に用いたモデルのパラメータ設定値

モデル	パラメータ	設定値	
		低粗度 (凹凸無)	低粗度 (凹凸有)
高橋	定数 $a_i \sin \alpha$	0.00076	0.0115
江頭ら	内部摩擦角	35.08	
	実験定数 k_g	0.00001	0.00001
	反発係数 e	0.85	
	実験定数 ϕ	0.16	
Voellmy	底面摩擦係数 μ	0.292	0.187
	乱流抵抗係数 ξ	1000	

4. 解析結果と実験結果との比較

Case1 における平衡状態での流動深および河床せん断力の結果を表-3に示す。従来の高橋モデルを用いた高粗度のみの解析結果では、流動深および河床せん断力の値が実験での値とおおむね一致し、高粗度での実験結果を再現することができた。

表-3 Case1 における平衡状態での流動深および河床せん断力の解析および実験結果

	解析結果	実験結果
流動深	26.8 mm	28.2 mm
河床せん断力	144.7 Pa	143.1 Pa

Case2 および Case3 の各モデルにおける平衡状態での流動深と河床せん断力の解析結果を表-4 および表-5、Case2 の高橋のモデルにおける流下距離 6.0 m と 11.7 m の流動深の解析結果を図-2 に示す。Case2 の低粗度における流動深および河床せん断力の解析結果では表-1 の実験から得た値と比べると高橋および Voellmy のモデルでおおむね一致し、図-1 および図-2 を比較すると流下距離 6.0 m 地点での流動深で差がみられるもの実験での流動深の時間変化を再現できたといえる。また、Case3 においても Case2 同様高橋および Voellmy のモデルで実験結果とおおむね一致する結果を得た。江頭らのモデルでは、変化させた実験定数 k_g を含む式(2)の第2項のオーダーが $10^{-1} \sim 10^1$ に対し第1項のオーダーが 10^2 であるために、 k_g を大きく変化させても河床せん断力の値が殆ど変化しない結果となった。

表-4 Case2 の低粗度での各モデルにおける解析結果

	高橋	江頭ら	Voellmy
流動深	8.0 mm	20.9 mm	7.9 mm
河床せん断力	40.4 Pa	112.4 Pa	40.4 Pa

表-5 Case3 の低粗度での各モデルにおける解析結果

	高橋	江頭ら	Voellmy
流動深	13.1 mm	20.9 mm	13.6 mm
河床せん断力	67.5 Pa	112.4 Pa	67.5 Pa

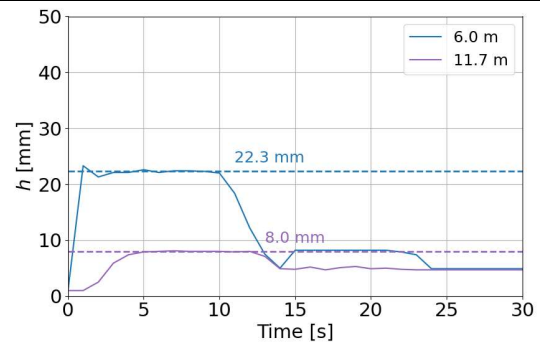


図-2 Case2 の高橋モデルにおける流動深の解析結果 (6.0 m : 高粗度, 11.7 m : 低粗度)

5. 結論

高橋および Voellmy のモデルでは実験で得た河床せん断力の値に一致するようにパラメータを変化させることで、数値シミュレーションでも実験で得た高粗度から低粗度へ遷移する際の流動深や河床せん断力の減少を表現できたが、江頭らのモデルでは実験ほどの再現はできなかった。今後は、実際の土石流災害を対象としてパラメータを変化させたモデルを適用し再現性の検証を行うとともに、実務において汎用性の高いモデルを目指す。

参考文献

- 1) 高橋・中川：砂防学会誌, 44(3), 1991
- 2) 高橋保：土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, 2006
- 3) 江頭ら：京都大学防災研究所年報, No.32, B-2, 1989
- 4) RAMMS : Debrisflow Friction Parameters, 2026年1月29日閲覧