

底面粗度を考慮した土石流の流出特性に関する実験と数値シミュレーション Effects of Bed Roughness on Debris Flow Runoff Characteristics: Experiments and Numerical Simulations

○矢野 むつみ・木次 貫太・中谷 加奈・山野井 一輝・正岡 直也

○Mutsumi YANO, Kanta KOTSUGI, Kana NAKATANI, Kazuki YAMANOI, Naoya MASAOKA

In recent years, debris flow disasters have increased due to the intensification of localized heavy rainfall, and urban development around torrent outlets has led to the expansion of damage caused by debris flows running along roads. However, few studies have focused on debris flow behavior in artificial sections with low bed roughness, and existing numerical analyses do not sufficiently account for the effects of bed roughness. In this study, hydraulic model experiments were conducted under conditions with different bed roughness to investigate particle behavior and runoff characteristics in low-roughness sections. The results revealed clear differences in flow behavior between high-roughness and low-roughness sections. Furthermore, numerical simulations demonstrated that modifying the constitutive equation for bed shear stress can reproduce the experimental results. (121 words).

1. はじめに

近年、気候変動の影響により集中豪雨や台風に伴う豪雨が激甚化し、土砂災害の発生件数は増加傾向にある。土砂災害の中でも土石流はがけ崩れに次いで被害件数が多く、近年では渓流出口周辺まで市街地開発が進んだことで、道路を流下する土石流による被害拡大が問題である。既往研究では、道路などの山間部と比較して相対的に粗度が小さな区間が土石流の到達範囲や被害状況に大きく影響することが示されるが、底面粗度の小さな区間における土石流挙動に着目した研究は少ない。また、従来の数値シミュレーションでは、道路等でも山地河道と同一の構成則¹⁾が用いられ、流動特性を十分に評価できないことが課題である。

本研究では、底面粗度の異なる条件下で水理模型実験を行い、低粗度区間における粒子挙動および流出特性を把握するとともに、数値シミュレーションによる解析との比較を通じて、河床せん断力に関する構成則について検討した。

2. 実験方法および条件

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 15 m、水路幅 0.1 m の矩形断面）を用いて、水路勾配 18° の条件で水理模型実験を行った。底面粗度には、山間部の溪流・河道を模した朝明砂 ($d_{50}=2.3$ mm) を貼り付けた高粗度、市街地の道路を模した化粧板を低粗度①、および珪砂 4 号 ($d_{50}=0.6\sim1.2$ mm) を貼り付けた低粗度②

を作成して、上流側に高粗度、下流側に低粗度を設置した。実験試料としては、朝明砂 11 kg、珪砂 4 号 11 kg、玉石 ($d_{50}=\text{約 } 10$ mm, max12.5 mm) 3 kg の計 25 kg の混合砂 ($d_m=1.7$ mm, $\sigma=2.64$ g/cm³) を用いて、上流側に約 2 m 長で天然ダム上に堆積させた。実験開始前には堆積させた土砂を十分に散水して飽和状態として、一定流量 800 cm³/s を供給し、給水時間は、全土砂が下流へ流出する 24~27 s とした。実験では、超音波センサ (OMRON E4PALS50-M1-N) やハイスピードカメラ (DITECT HAS-U2) を用いて、流動深、流速を計測し、下流端で土砂採取を行うことで流出流量および土砂濃度を算出した。なお、本誌では流動深の結果のみを示す。

3. 数値解析手法および条件

数値解析には、土石流シミュレータ Kanako Ver.1.44²⁾を用いて矩形断面で次元解析を行った。Kanako は支配方程式に高橋らのモデル¹⁾を適用し、石礫型土石流を対象とした高粗度河床を想定している。解析条件は、表 1 の広島大学での実験と整合するよう、構成材料、流路形状、河床勾配および供給流量を設定した。

本検討では、実験結果を基に低粗度区間での河床せん断力 τ_b に、式(3.1), (3.2)および(3.3)に示す高橋¹⁾, Voellmy³⁾, Manning のモデルを用いて、表 2 に示す代表的なパラメータを採用した解析を行い、実験結果と比較してその適用性を検討した。

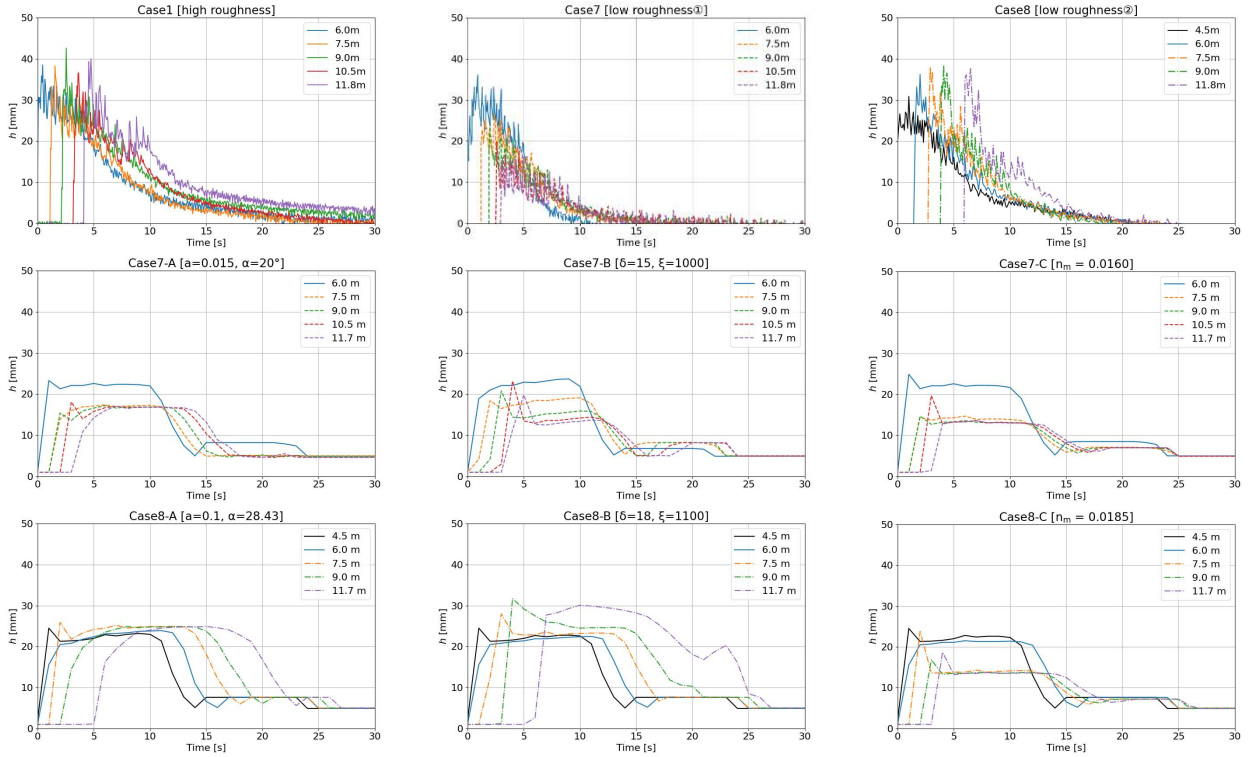


図 1 実験（上段）および解析（○-A:高橋,○-B: Voellmy, ○-C:Manning, [] 内はパラメータ値）による流動深結果

表 1 解析条件・パラメータ

| 項目 | 値 |
|------------|------------------------|
| 計算時間 | 60 s |
| 計算時間間隔 | 0.005 s |
| 代表粒径 | 0.0017 m |
| 砂礫の密度 | 2640 kg/m ³ |
| 流体相密度 | 1000 kg/m ³ |
| 河床の容積濃度 | 0.65 |
| 砂の内部摩擦角 | 35° |
| マンニングの粗度係数 | 0.0206 |
| 水深の最小値 | 0.001 m |

低粗度区間における構成則

$$\tau_b = \frac{25}{4} a \sin \alpha \left\{ C + (1 - C) \frac{\rho}{\sigma} \right\}^{-1} \quad (3.1)$$

$$\left\{ \left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\}^{-2} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2}$$

$$\tau_b = \mu \rho_m g h \cos \theta + \frac{\rho_m u^2}{\xi} \quad (3.2)$$

$$\tau_b = \rho g n_m^2 h^{-1/3} u^2 \quad (3.3)$$

ここに、 ρ ：流体相密度、 σ ：砂粒子密度、 ρ_m ：混合密度、 d ：粒子の代表粒径、 C ：土砂濃度、 C_* ：河床堆積物の体積濃度、 θ ：河床勾配である。式(3.1)の実験定数 a は粒子衝突による運動量散逸係数を表し、衝突角 α は石礫型では約 28.4° とされる。式(3.2)の底面摩擦係数 μ は河床との底面摩擦角に依存し、乱流抵抗係数 ξ は粒子衝突・乱流による運動量損失を表した係数で感度分析的に算出される³⁾。図タイトルには、高橋¹⁾、Voellmy³⁾、Manning の解析結果をそれぞれ A, B, C と表記する。

表 2 各構成則のパラメータ

| 高橋 ¹⁾ | Voellmy ³⁾ | Manning |
|------------------|-----------------------|------------|
| 実験定数 a | 底面摩擦係数 μ | Manning の |
| 衝突角 α | 乱流抵抗係数 ξ | 粗度係数 n_m |

4. 実験・解析結果および考察

図 1 に示す Case1 は高粗度のみ、Case7 および Case8 は上流に高粗度、下流にそれぞれ低粗度①、②を設置した条件で、凡例は設置土砂下端からの流下距離を示す。実験は、Case7 で低粗度①区間において流動深が低下したのに対し、Case8 では低粗度②区間で流動深が増加した。解析では、Case7 において底面摩擦および粒子衝突によるせん断力の低下から、乱流抵抗係数 ξ 以外の各パラメータを小さく設定することで、いずれの構成則でも流動深の低下が再現できた。一方 Case8 では、複数のパラメータで粒子挙動を考慮できる高橋¹⁾および Voellmy³⁾の構成則では、パラメータ調整により実験結果を再現できたが、Manning 式では粗度係数のみで底面抵抗を表すため、粗度係数の減少から流動深の増加を表現できなかった。

参考文献

1)高橋保，土石流の機構と対策，近未来社，2004，2)中谷ら，砂防学会誌，Vol.61，No.2，pp.41-46，2008，3)WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. "RAMMS: Debris Flow." <https://ramms.slf.ch/ramms/modules/debris-flow/> (Retrieved Jan. 19, 2026).