

浸透流・斜面崩壊・土石流の発生と流動の数値解析と実験結果に基づく検証

九州工業大学大学院 学生会員 ○十河 佑宇・正会員 重枝 未玲

1. はじめに

近年、令和6年9月能登半島豪雨¹⁾など、大規模な土砂災害が頻発し、甚大な被害をもたらしている。このような土砂災害の被害軽減のためには、豪雨による斜面崩壊、土石流、河道への流入土砂、河道での掃流土砂などの土砂動態を予測し、その予測結果に基づき災害リスクを的確に把握するツールが不可欠である。本研究は、以上の背景を踏まえ、浸透流による斜面崩壊から土石流の発生・流下に至る一連の土砂動態を予測可能な解析法の開発を目的とする。ここでは、浸透流・斜面崩壊・土石流一体1次元解析法を新たに構築するとともに、本研究で実施した浸透流の発生による斜面崩壊とそれに起因する土石流の発生・流下実験への適用結果に基づき、同解析法の再現性について検討した。

2. 解析モデルの概要

本研究の浸透流・斜面崩壊・土石流一体1次元解析法は、土石流解析、浸透流解析、斜面崩壊解析で構成される。土石流解析には、重枝ら²⁾のモデルに侵食堆積と浸透流の影響を組み込んだ土石流解析モデルを用いた。同モデルの基礎方程式は式(1)に示す浸透と滲出を考慮した鉛直積分型の無次元化された土石流の質量保存則、 x 方向の運動方程式、土石流に含まれる砂礫の体積保存則および河床材料の質量保存則である。底面せん断応力 τ_{bx} には、式(2)の高橋らの抵抗則をより一般化した鈴木らの抵抗則³⁾、式(3)、(4)の江頭らの抵抗則⁴⁾、式(3)、(5)の宮本らの抵抗則⁵⁾を用い、侵食・堆積速度 i_b には、式(6)の高橋らの侵食・堆積速度式³⁾、式(7)の江頭らの侵食・堆積速度式⁴⁾を用いた。

浸透流解析には、重枝らの浸透流解析モデル⁶⁾を用いた。同モデルの基礎方程式は式(8)の空隙を考慮した連続の式と、式(9)のダルシー則から導かれる運動方程式で表される。

斜面崩壊解析には、斜面の安全率 F_s が1.0を下回る場合に臨界すべり面で斜面崩壊が発生したと判定し、すべり面より上部の土砂を土石流の流動層厚として取り扱う斜面崩壊モデルを用いた。本モデルではすべり面より下部の土砂は河床位として扱い、次の時間ステップ以降では、残存した河床位を対象として解析を行った。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} &= S_b + S_r + S_e + S_q \quad \dots (1) & r &= \rho_m / \rho_f = 1 + C_m, r_b = \rho_b / \rho_f, g_\psi = g \cos^2 \psi \\
 U &= (rhu, rhu, C_m s h, z_b)^T & C_m s &= C_m (\rho_s - \rho_f) / \rho_f, \alpha_i \cdot \sin \alpha = 0.02 \\
 E &= (rhu, rhu^2 + g_\psi r h^2 / 2, C_m s h u, 0)^T & K(C_s) &= \alpha_i \cdot \sin \alpha \{ (C_b / C_s)^{1/3} - 1 \}^{-2} \cdot \rho_s / \rho_f \\
 S_b &= (0, -g_\psi r h \cdot \partial z_b / \partial x, 0, 0)^T & \psi_{si} &= 2/3 r_s^{-2} \{ (r_s - 2/5 r_m)^{3/2} - (r_s - 2/5)^{5/2} \} \\
 S_r &= (0, -g_\psi r h \cdot \tau_{bx} / \rho_m g_\psi h, 0, 0)^T & \psi_w &= \sqrt{K(C_s)} / g \cdot h^{1/6} / n r_w^{5/3} \cdot (h/d_m)^{-1}, k_s = d_m \\
 S_e &= (r_b i_b, -u r_i b, \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} i_b C_b, -i_b / \cos \psi)^T & r_m &= 1 + C_m (\sigma / \rho_f), r_s = 1 + C_s (\sigma / \rho_f), e = 0.85 \\
 S_q &= (q_s - f_i, u(q_s - f_i), 0, 0)^T & r_w &= 1 - (C_m / C_s), f_d = k_d (\rho_s / \rho_f) (1 - e^2) C_m^{3/3} \\
 \tau_{bx} &= \rho_f K(C_s) r_m (\psi_{si} + \psi_w)^{-2} (h/d_m)^{-2} u^2 \quad \dots (2) & \tau_f &= (C_m / C_b)^{1/5} (\rho_s - \rho_f) C_m g h \cos \psi \tan \phi_s \\
 \tau_{bx} &= \tau_f + \rho_f f_b u^2 \quad \dots (3) & f_f &= k_f (1 - C_m)^{5/3} C_m^{-2/3}, k_d = 0.0828, k_f = 0.25 \\
 f_b &= \begin{cases} a: 25/4 (f_d + f_f) (h/d_m)^{-2} & \text{if: } a \geq b \\ b: \left(A_r - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{\kappa_s} \right)^{-2} & \text{if: } a < b \end{cases} \quad \dots (4) & K_s &= 4/15 r^{-2} (K_{ds} + K_{fs})^{-0.5} \{ (1 - C_m / C_s)^{5/2} \\
 f_b &= \{ 1 - (C_s / C_b)^{1/5} \} \{ (\rho_s / \rho_f - 1) C_m + 1 \} & & \left[\left(1 - \frac{C_m}{C_s} \right) + r \frac{C_m^{3/2}}{C_s} \right] \left\{ \left(1 - \frac{C_m}{C_s} \right) - 1.5 r \frac{C_m}{C_s} \right\} \\
 & \{ K_s + K_i + K_w \}^{-2} (h/d_m)^{-2} \quad \dots (5) & K_i &= -2/3 r^{-1} (K_{ds} + K_{fs})^{-0.5} (1 - C_m / C_s) \\
 i_b &= \begin{cases} \delta_e \frac{C_\infty - C_m}{C_b - C_\infty} \frac{h}{d_m} |u| & \text{if: } (C_\infty - C_m > 0) \\ \delta_d \frac{C_\infty - C_m}{C_b} \frac{h}{d_m} |u| & \text{if: } (C_\infty - C_m \leq 0) \end{cases} \quad \dots (6) & K_w &= 1/\kappa \sqrt{1 - C_m / C_s} \left\{ \frac{\eta_0}{h} + 1 - \frac{C_m}{C_s} \right\} \left(\frac{h}{d_m} \right)^{-1} \\
 i_b &= \beta_T \tan(\theta - \theta_e) |u| \quad \dots (7) & & \ln \left(\frac{\eta_0/h + 1 - C_m/C_s}{\eta_0/h} \right) - \frac{1}{\kappa} \left(1 - \frac{C_m}{C_s} \right)^{3/2} \left(\frac{h}{d_m} \right)^{-1} \\
 (1 - C_b) \frac{\partial (h_g + z_b)}{\partial t} + \frac{\partial q_G}{\partial x} &= f_i - q_s \quad \dots (8) & K_{ds} &= k_d (\rho_s / \rho_f) (1 - e^2) C_s^{2/3}, \eta_0 = a \approx 1, \kappa = 0.41 \\
 q_G &= -\theta (H/\partial x) \quad \dots (9) & K_{fs} &= k_f (1 - C_s)^{5/3} C_s^{-2/3}, C_\infty = 0.9 C_b \\
 & & l_0 &= a \sqrt{k_f} \{ (1 - C_s) / C_s \}^{1/3} d_m, f_p = K_v \\
 & & \theta_e &= \arctan \left\{ \frac{(\rho_s / \rho_f - 1) C_m}{(\rho_s / \rho_f - 1) C_m + 1} \tan \phi_s \right\}
 \end{aligned}$$

ここに、 h : 流動深、 u : 速度の x 方向成分、 C_m : 土石流の体積濃度、 C_b : 静止堆積層の体積濃度、 g : 重力加速度、 ρ_m : 土石流の密度、 ρ_f : 周囲流体の密度、 ρ_s : 砂礫の密度、 z_b : 基準水平面からの河床高、 z_{bd} : 水路床高、 τ_{bx} : 河床せん断力、 i_b : 侵食・堆積速度式、 ϕ_s : 砂粒子の内部摩擦角、 d_m : 砂粒子の代表粒径、 C_∞ : 平衡土砂濃度、 δ_e : 侵食速度係数、 δ_d : 堆積速度係数、 θ_w : エネルギー勾配、 f_p : 浸透係数、 $f_p = K_v$: 鉛直方向の浸透係数、 H : 全水頭、 h_g : 地下水深、 λ_e : 河床材料の空隙率である。

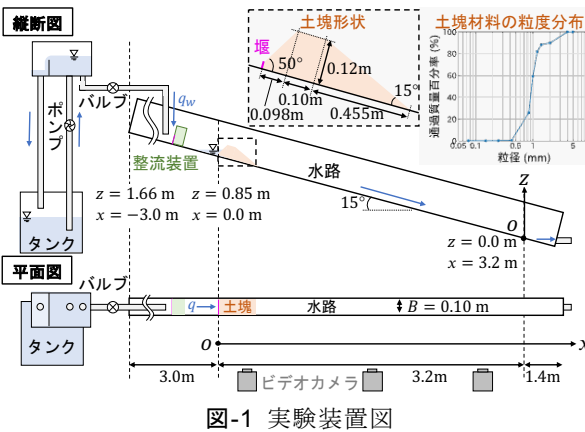


表-1 パラメータ値

パラメータ	値
Δx [m]	0.10
n [$m^{-1/3} \cdot s$]	0.01
γ_m [kN/m^3]	18.0
γ_s [kN/m^3]	21.0
c [kN]	0.010
C_b [-]	0.60
K_c [-]	0.0038
K_v [-]	0.0070
δ_e [-]	0.050
δ_d [-]	0.0007
β_T [-]	1.0
C_r [-]	0.3

図-1 実験装置図

3. 既往の実験結果への適用

本モデルを、浸透流の発生による斜面崩壊とそれに起因する土石流の発生・流下実験結果へ適用し、その妥当性について検討した。実験は、図-1に示す全長7.6 m、幅0.1 m、高さ0.4 mの実験水路で実施した。土塊は、密度 $\rho_s=2620 \text{ kg/m}^3$ 、図-1の粒度分布の砂を用いて、水路上流端から3.0 mの位置に、図-1に示す形状で設置した。水路上流端から単位幅流量 $q_w=5.033 \text{ cm}^2/\text{s}$ を給水した後、水が土塊上流端に到達した時刻を $t=0.0 \text{ s}$ として、測定を開始した。測定項目は、土塊形状、水位、浸潤線であり、水路側方から3台のビデオカメラで撮影を行うことで測定した。解析は、鈴木らの抵抗則と高橋ら侵食・堆積速度式を組み合わせたST、江頭の抵抗則と侵食・堆積速度式を組み合わせたEG、宮本らの抵抗則と江頭らの侵食・堆積速度式を組み合わせたMIで実施した。解析に用いた値は表-1に示す。なお、斜面崩壊の解析間隔は最初の崩壊発生までは1.0 s、崩壊後は0.1 s間隔とし、すべり面探索点の鉛直間隔 $\Delta z=0.005 \text{ m}$ とした。本実験では整流のために土塊上流端に堰を設置しているが、解析ではこれを考慮できないため、堰を乗り越えて浸透が開始する時間を0.5 sとして、時間をずらしている。

図-2に、最初の崩壊時のすべり面と浸潤線の流況図および実験値と解析結果との比較を示す。実験では斜面の崩壊は通水から約78秒後に発生した。図-2より、(1) 崩壊の発生はSTで計算開始74秒後、EGとMIで計算開始78秒後であり、実験結果を概ね再現できること、(2) 浸潤線およびすべり面形状の解析結果は、いずれも実験値を概ね再現できること、(3) すべり面の発生位置については、STを用いた解析結果では実験値のすべり面範囲よりも下流側で、EGおよびMIを用いた結果では上流側で発生したこと、などが確認できた。STに比べEGおよびMIは崩壊までの時間が長く、崩壊時点における浸潤線が土塊下端まで到達しているために、安全率に差が生じ、すべり面の発生位置に差が生じたためと考えられる。

図-3に、斜面崩壊発生後 $t=0.3 \text{ s}$ および $t=1.0 \text{ s}$ における流下形状の実験値と解析結果との比較を示す。これらより、(1) EGおよびMIの解析結果には大きな差はなく、流下時のフロント形状の実験値を概ね再現できていること、(2) STの解析結果では、崩壊土砂の流動化が最も早く進行し、崩壊直後の挙動を比較的良好に再現できていること、一方で、(3) いずれの結果も実験値よりも流下速度を過大に評価すること、などが確認できた。解析結果の流下速度が実験値よりも過大に評価された要因として、本実験で用いた水路の幅が0.1 mと比較的狭く、側壁の摩擦の影響により実験値の流下速度が抑制されたことが考えられる。

4. おわりに

本研究で浸透流・斜面崩壊・土石流一体1次元解析法を構築し、浸透流の発生による斜面崩壊とそれに起因する土石流の発生・流下実験結果へ適用した結果、浸潤線およびすべり面形状については、いずれの解析結果も実験値を概ね再現できていること、斜面崩壊および土石流の流下過程では、STの結果で崩壊直後の挙動を比較的良好に再現できていること、EGとMIの結果で流下時のフロント形状の実験値を概ね再現できていることが確認された。今後は、非構造格子を用いた平面2次元解析法へ拡張したいと考えている。

参考文献: 1) 国土交通省: 令和6年9月20日からの大雨による被害状況等について(第25報), 2024. 2) 重枝ら: 土木学会論文集, Vol.82, No.15, 25-15045, 2026. 3) 鈴木ら: 砂防学会誌, Vol.66, No.2, pp.21-30, 2013. 4) 江頭ら: 日本流体力学学会数値流体力学部門Web会誌, Vol.12, No.2, 2004. 5) 宮本ら: 砂防学会誌, Vol.55, No.2, pp.24-35, 2002. 6) 重枝ら: 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16162, 2024.

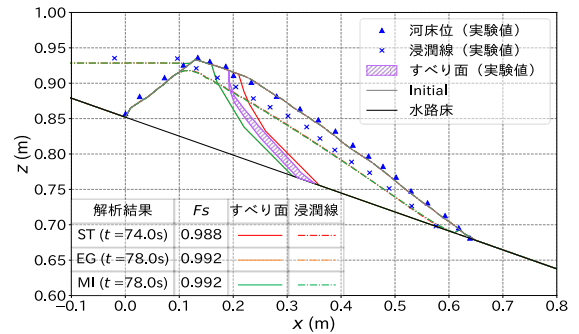


図-2 すべり面の実験値と解析結果との比較

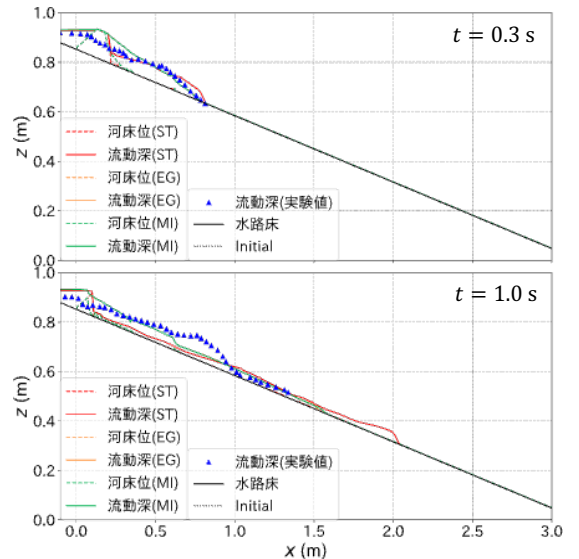


図-3 流下形状の実験値と解析値の比較