

土石流・土砂流における堆積侵食プロセス：(2) 数値シミュレーションによる細粒粒子流体化の影響評価

砂防・地すべり技術センター ○石丸桃子 志水宏行 藤田正治 和田眞典 吉田真也
 国土技術政策総合研究所 山越隆雄(現：国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 砂防計画課) 田中健貴

1. はじめに

豪雨時、急傾斜の山地河川上流域での斜面崩壊により発生した土石流が、河床から侵食した大量の土砂を緩傾斜の下流域へ運搬・堆積し、その堆積物と後続の洪水流が大規模な土砂と泥水の氾濫(土砂・洪水氾濫)を引き起こすことがある。この土砂・洪水氾濫に対する数値シミュレーション予測を実施するためには、後続の洪水流の河床変動解析における境界条件として、土石流堆積物の総量や厚さ分布を予測する必要がある。急傾斜地点で発生・流動する土石流は粗粒・細粒土砂が清水内に高濃度で遍在する流れであるが、緩傾斜地点での堆積に伴う土砂濃度低下により、粗粒土砂を主成分とする下層、および、細粒土砂と清水を主成分とする上層から成る流れ(土砂流)に遷移する。これらのような土石流・土砂流による土砂の侵食・運搬・堆積の再現に対し、流れ内部の細粒土砂が清水流体のように振る舞う効果を考慮することの重要性が指摘されている¹⁾。本研究では、細粒土砂の流体化が土石流・土砂流堆積物の総量や厚さ分布に及ぼす影響を系統的に評価するために、川幅一定の1次元単純河道(図1)における土石流・土砂流の数値シミュレーションを実施した。

2. 手法

2.1. 地形・供給条件

河道(図1)の全域には、清水で飽和した移動河床が初期に一定厚さで設定される。勾配 θ は上流から15°、10°、5°、2°、0°と徐々に緩慢となる。15°区間の最上流端から粗粒土砂濃度 $c = c_0 (\equiv 0.9c_*)$ ； c_* は堆積物中の粗粒土砂濃度)の土石流が継続時間 $t_0 = 20$ sで供給される状況を想定する。地形・供給条件が堆積物に対する細粒土砂流体化効果に与える影響を評価するために、初期移動河床厚さ($h_{d0} = 0.2$ m)、上流端での供給流量($Q_0 = 80,500$ m³/s)、供給地点含む勾配15°区間の長さ($L = 250,500$ m)の値を変えて土石流・土砂流計算を行った。

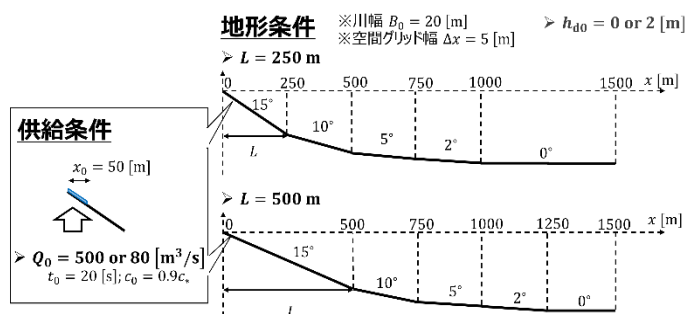


図1 地形・供給条件

2.2. 土石流・土砂流モデル

既存の土石流・土砂流モデルの方程式系²⁾では、土砂と清水からなる流れが想定されているが、本研究では、粗粒土砂と間隙流体(細粒土砂と清水)からなる流れと拡大解釈してシンプルな細粒土砂流体化モデル³⁾を導入し、その方程式系を近似リーマン解法(HLL法)に基づく有限体積法により離散化し数値計算コードに実装した。本方程式系には、江頭⁴⁾の堆積侵食速度式が導入されており、これは粗粒土砂濃度 c に依存する平衡勾配

$$\theta_e(c) = \tan^{-1} \left[\frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi_s \right] \quad (1)$$

に斜面勾配 θ が時々刻々近づくように堆積侵食速度を決定する(土砂の質量密度 $\sigma = 2650$ kg/m³、土砂の内部摩擦角 $\phi_s = 34^\circ$)。間隙流体(細粒土砂と清水)の質量密度 ρ は、流れと堆積物の両者の内部において時空間的に一定(つまり、細粒土砂と清水は相対速度を常にもたず、それらの濃度比は常に一定)となる理想的な状況を想定する³⁾。 ρ の値は、堆積物土砂中の細粒土砂の割合(つまり、細粒土砂流体化率) p の増加に伴い増加する(志水・藤田³⁾の式(1)と表1を参照)。

3. 結果および考察

3.1. 細粒土砂流体化率 p の影響

堆積物の厚さ分布や総量を支配する土石流・土砂流の侵食・堆積プロセスのうち、上流端での供給領域($\theta = 15^\circ$)にて侵食が生じるか否か、および、その細粒土砂流体化率 p 依存性については、数値計算を実施するまでもなく θ — c 空間図(図2)を用いて評価できる。図2には、 $\theta = \theta_e(c)$ と $c = c_*$ が示されており、それらの交点で決まる $\theta = \theta_{e*}$ によって流れの流動様式が分類される⁵⁾。 $\theta \leq \theta_{e*}$ かつ $c \leq c_*$ (領域①)では、 $\theta = \theta_e(c)$ が含まれるため、その条件下での流れの時間発展を考える場合、堆積($\theta > \theta_e$ (領域①a))または侵食($\theta < \theta_e$ (領域①b))が生じた後、流れの侵食・堆積プロセスは平衡状態に収束する($\theta \rightarrow \theta_e(c)$)。一方、 $\theta > \theta_{e*}$ かつ $c \leq c_*$ (領域②)では、 $\theta = \theta_e(c)$ が含まれないため、平衡状態は存在せず、流れがその条件下にある限り、 $c \rightarrow c_*$ となりつつ移動河床を侵食し続け、流れの質量・体積は増え続ける。 θ_{e*} と c_* の値は細粒土砂流体化率 p の増加に伴って減少するため^{1,3)}、領域①に対し領域②の範囲が相対的に拡大する。これらの解析結果に基づき、上流端での供給条件($\theta = 15^\circ, c = 0.9c_*$)を θ — c 空間図上に示すと(図2の星印)、供給条件が、 $p = 0\%$ では領域①a、 $p = 40\%$ では領域②に相当することがわかる。これより、上流端での供給領域($\theta = 15^\circ$)にて侵食が生じるためには細粒土

砂の間隙流体化の考慮が必要といえる。

細粒土砂流体化率 $p = 0\%$ と 40% を与えた土石流・土砂流の数値シミュレーションを行い、各 p に対して、最終堆積物厚さと初期堆積物(移動河床)厚さの差分(Δh_d)を得た(図 3(赤: $p = 0\%$; 青: $p = 40\%$)). 図 3 の実線(a-c で共通)より、 $p = 0\%$ では、給源地点にて堆積が生じそこに堆積物厚さのピークが形成されるが、 $p = 40\%$ では、 $\theta = 15^\circ$ から 10° の区間までの給源近傍で移動河床を侵食し、 $\theta = 10^\circ$ 区間より遠方まで土砂を運搬し堆積物を形成する。堆積物の総量は、 $p = 0\%$ では斜面上流端からの供給量のみによって決定されるが、 $p = 40\%$ では侵食により取り込んだ移動河床量分が追加される。

3.2. 地形・供給条件(h_{d0} , Q_0 , L)の影響

3.1 章で得られた堆積物の厚さ分布と総量の p 依存性が、地形・供給条件(h_{d0} , Q_0 , L)によってどのように変化するか調べた。

初期移動河床厚さ $h_{d0} = 2$ m (図 3(a)の実線)と $h_{d0} = 0$ m (図 3(a)の破線)の結果の比較によると、供給地点において堆積傾向(図 2(a)の領域①a)となる $p = 0\%$ の場合には h_{d0} に依らず堆積物厚さ分布は一致する。一方、 $p = 40\%$ の場合では、供給地点において侵食傾向(図 2(b)の領域②)となるため、 h_{d0} によって結果が変わり、 h_{d0} が減少すると堆積物厚さや総量も減少する。

上流端での供給流量 $Q_0 = 500$ m³/s (図 3(b)の実線)と $Q_0 = 80$ m³/s (図 3(b)の破線)の結果の比較によると、 Q_0 を変えた際の堆積物厚さや総量の変化傾向は、以下のように、 p に複雑に依存する。 Q_0 が減少すると、 $p = 0\%$ では堆積物の厚さと総量は共に減少するが、 $p = 40\%$ では総量は減少するが厚さのピーク値はあまり変化しない。この Q_0 に対する堆積物ピーク厚さの鈍感性については、さらなる解析による原因究明が求められる。

供給地点含む勾配 15° 区間の長さ $L = 250$ m (図 3(c)の実線)と $L = 500$ m (図 3(c)の破線)の結果の主な違いについては、 $p = 0\%$ の場合には $\theta = 15^\circ$ と 10° の勾配変化点での堆積物厚さの極大値が L の増加に伴って遠方にずれるのみである。一方、 $p = 40\%$ の場合ではそれに加え、 L の増加によって侵食領域が拡大するため堆積物厚さと総量が増加する。

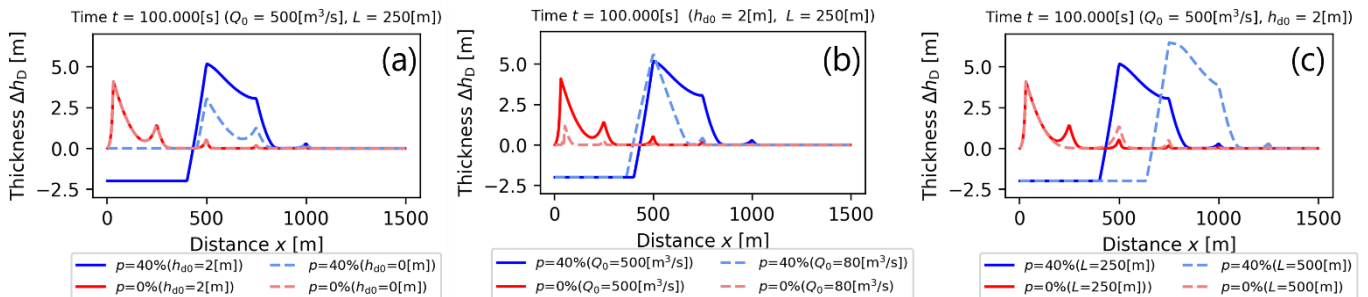


図 3 計算開始から 100 s 後の最終堆積物厚さと初期堆積物(移動河床)厚さの差分 Δh_d (赤: $p = 0\%$, 青: $p = 40\%$). (a) 実線: $h_{d0} = 2$ m, 破線: $h_{d0} = 0$ m. (b) 実線: $Q_0 = 500$ m³/s, 破線: $Q_0 = 80$ m³/s. (c) 実線: $L = 250$ m, 破線: $L = 500$ m

4. おわりに

本研究では、土石流・土砂流に対する細粒土砂流体化効果を系統的に評価するために、間隙流体を構成する細粒土砂と清水の相対速度が完全にゼロであり、それらの濃度比は常に一定である(つまり、間隙流体の密度 ρ は時空間的に常に一定)という理想的な状況を想定した。今後、この理想的状況の想定が、合理性や観測・実験事実の説明能力の観点でどの程度の妥当性をもつか確認する必要がある。

引用文献

- 1) 江頭ら (2016) 砂防学会誌, 68, 5; 2) 宮本・伊藤 (2002) 砂防学会誌, 55, 2; 3) 志水・藤田 (2024) 砂防学会研究発表会概要集[掲載予定]; 4) 江頭 (1993) 砂防学会誌, 46, 1; 5) 経隆ら (2015) 砂防学会誌, 68, 1

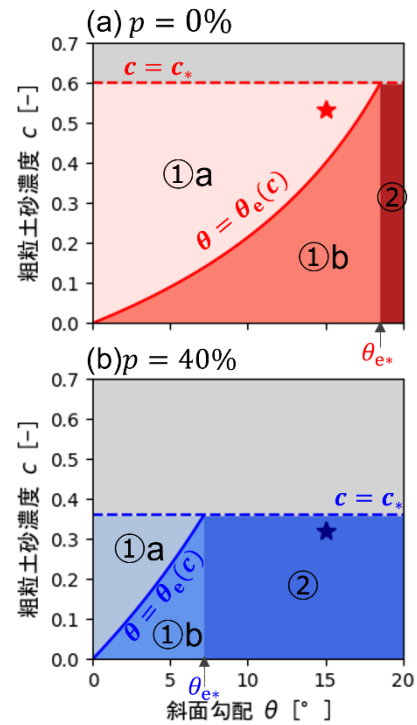


図 2 θ — c 空間における $\theta = \theta_e$ (実線)と $c = c_*$ (破線): 細粒土砂流体化率 p =(a)0%, (b)40%