

拡張 H-SLIDER 法の表層崩壊・土石流多発事例への適用

国土技術政策総合研究所 ○秦雅之（現中電技術コンサルタント株式会社）、内田太郎、蒲原潤一
 広島大学大学院総合科学研究科 海堀正博

1. はじめに

山地流域の土砂生産現象は、斜面崩壊、土石流、侵食など多様である。そのため、土砂災害の発生危険度や流域からの土砂生産量の予測のためには、これら多様なプロセスによる土砂移動の発生を予測する必要がある。

山地流域は、大きく斜面と溪流の2つの場に分類される。一般に、斜面の土層は原位置での風化により形成・発達し、溪流の土層は上流域からの流出土砂が堆積して形成される。この土層形成プロセスの違いから、両者の土質強度は異なる可能性がある。これまでは、前者は表層崩壊予測モデル（土質強度あり、地表流なしの条件）、後者は土石流予測モデル（土質強度なし、地表流ありの条件）を用いて別々に検討が行われることが多かった。しかしながら、斜面と溪流の区分は必ずしも明瞭でなく、0次谷等の中間的な領域からしばしば土砂生産が生じることから、筆者は上記2つのモデルを結合して、土質強度、地表流のあり・なしの両方の状態を考慮できる手法（拡張 H-SLIDER 法¹⁾）を提案している。また、本手法を用いるにあたっては、流域内の土質強度（粘着力）の設定が土砂生産予測に及ぼす影響が大きいとしているが、流域内の土質強度には空間的なばらつきがある²⁾ことから、綿密な設定は現実的に困難である。

以上の背景を踏まえ、本研究の目的は、拡張 H-SLIDER 法を実際の表層崩壊・土石流多発事例（山口県防府市の2009年7月豪雨）に適用してその再現精度を検証するとともに、土砂生産予測の更なる精度向上のため、土質強度（粘着力）の簡易且つ実用的な設定手法を提案して、その有効性を検証することである。

2. 研究方法

2.1 拡張 H-SLIDER 法の概要

山地流域の土砂生産現象は、地中流発生による土層の不安定化（type1）、地表流発生による土層の不安定化（type2,3）に大別され、type1,2は土層全体が崩壊するタイプ、type3は表層付近の土層から徐々に土砂移動するタイプである。

拡張 H-SLIDER 法は、簡易に降雨や地下水・地表水の移動を定常と仮定し、斜面安定解析の考え方を基本として、これら3タイプの土層の不安定化を判定する手法であり、その判別式を次に示す。

$$\text{地中流による不安定化の判定} \quad F_{S1} = \frac{c + \left(\gamma h \cos^2 \theta - \frac{rA\gamma_w}{K_s \tan \theta} \right) \tan \phi}{\gamma h \cos \theta \sin \theta} \Rightarrow F_{S1} < 1 \text{ のとき, 不安定化 (type1)}$$

$$\text{地表流による不安定化の判定} \quad F_{S2} = \frac{C_s (\gamma_p - \gamma_w) \tan \phi}{[C_s (\gamma_p - \gamma_w) + \gamma_w (1 + h_w / D)] D \cos \theta \cdot \sin \theta + C_s (\gamma_p - \gamma_w) + \gamma_w (1 + h_w / D) \tan \theta}$$

$$\tan \theta > \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \tan \phi = \tan \phi_c \text{ のとき, } D=h \text{ (土層厚)} \Rightarrow F_{S2} < 1 \text{ のとき, 不安定化 (type2)}$$

$$\tan \theta \leq \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \tan \phi = \tan \phi_c \text{ のとき, } D=d \text{ (粒径)} \Rightarrow F_{S2} < 1 \text{ のとき, 不安定化 (type3)}$$

ここで、 F_S は安全率、 c は土層の粘着力 [kN/m²]、 γ は土層の単位体積重量 [kN/m³]、 h は土層厚 [m]、 θ は斜面勾配 [°]、 r は降雨強度 [mm/h]、 A は単位幅あたりの集水面積 [m²/m]、 K_s は透水係数 [m/s]、 ϕ は内部摩擦角 [°]、 ϕ_c は不安定化機構が変化する勾配 [°]、 C_s は堆積土砂の容積濃度、 γ_p は土粒子の単位体積重量 [kN/m³]、 γ_w は水の単位体積重量 [kN/m³]、 h_w は地表水深 [m]、 D は不安定化する土層厚 [m] である。また、type1の判別式で、地下水深0で不安定と判別されるものは、理論上存在しない“type0の不安定化”と定義した。

2.2 流域内の粘着力の設定方法

流域内の粘着力設定について、以下の2種類の方法を検討した。

①流域内で一律の粘着力を設定する方法

②流域内の粘着力を“斜面部”と“溪床部”で2区分する方法

ここで、①については、従来の表層崩壊予測モデルの多くと同様に、土層厚と地形の関係から、少なくとも地下水深が0の状態では土層厚計測地点の土層が不安定化しないように粘着力を逆推定するケース ($c = 6.5 \text{ kN/m}^2$)、従来の土石流発生予測モデルと同様に粘着力を無視するケース ($c = 0.0 \text{ kN/m}^2$) の2ケースを設定した。

また、②では簡易な方法とすることに主眼を置き、上記2つのモデルの考え方をそれぞれ使い、斜面部では 6.5 kN/m^2 、溪床部では 0.0 kN/m^2 の粘着力を設定した。ここで、斜面部と溪床部の境界は、一般に地形形成プロセスが異なると集水面積と斜面勾配の関係に差が出る事が示されている³⁾ことから、図-1を基に、 100 m^2 、 900 m^2 、 $30,000 \text{ m}^2$ を境界とする3ケースを設定することとした。

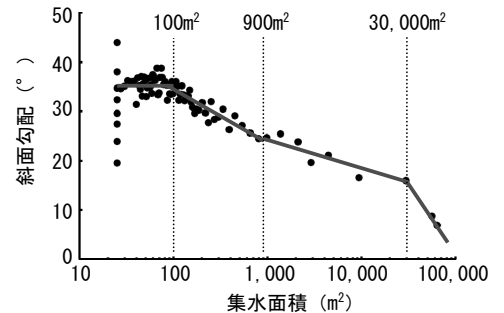


図-1 集水面積と斜面勾配の関係、粘着力を区分する集水面積の設定

※対象流域内のデータを、集水面積（第1優先）、斜面勾配（第2優先）で昇順で並べて、20データずつの平均値をプロットした。

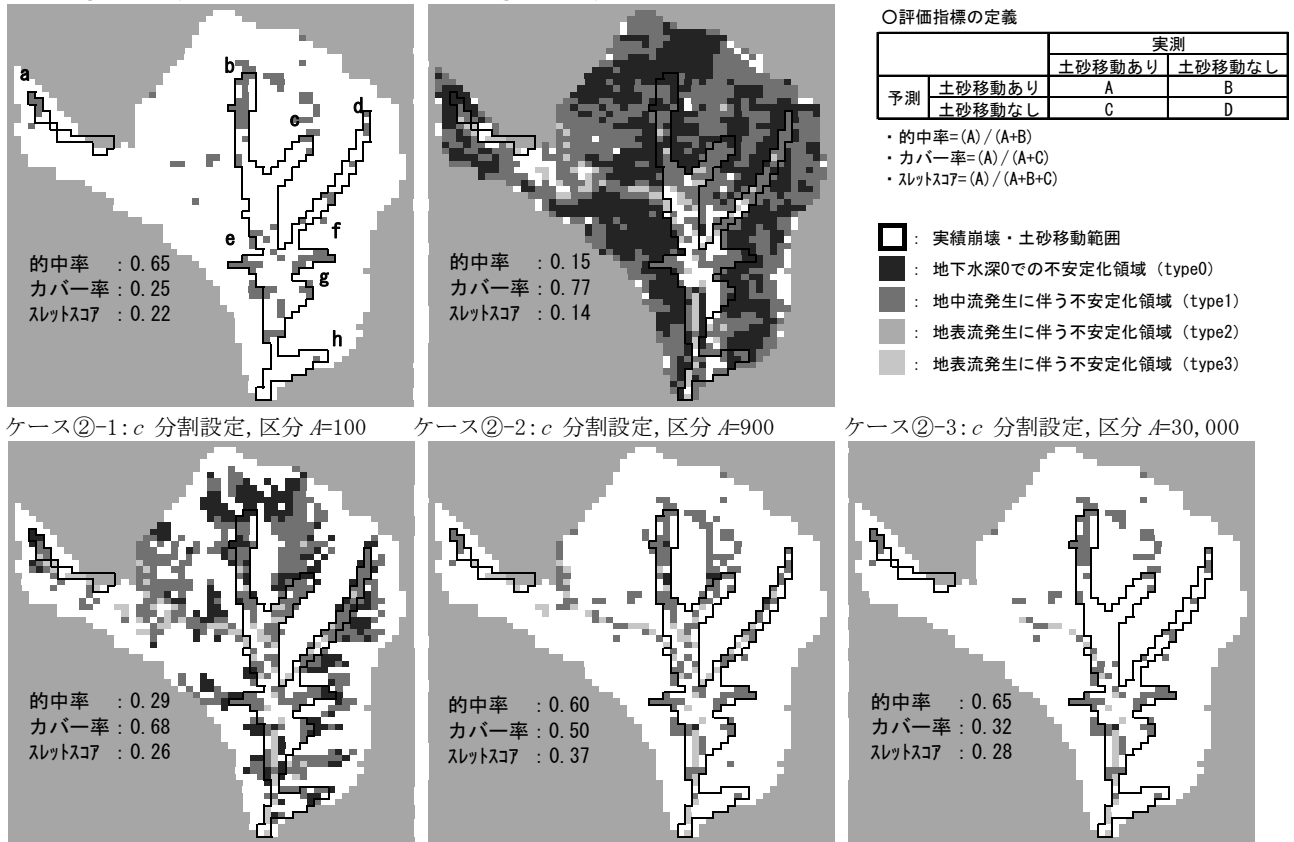
3. 研究結果

前述の5ケースについて、拡張H-SLIDER法を適用した結果を図-2に示す。

これより、スレットスコアが最も高いのはケース②-2（粘着力を区分する集水面積 A は 900m^2 ）であり、実際の崩壊・土砂移動範囲を比較的精度よく再現できていると言える。また、従来の方法で粘着力を設定したケース①-1と比べると、集水面積で粘着力設定を区分したケース②はいずれも有意に予測精度が向上していると判断できる。

ケース①-1：全域 $c=6.5$

ケース①-2：全域 $c=0.0$



ケース②-1: c 分割設定, 区分 $A=100$

ケース②-2: c 分割設定, 区分 $A=900$

ケース②-3: c 分割設定, 区分 $A=30,000$

図-2 拡張H-SLIDER法による予測不安定領域

4. 考察・結論

斜面の粘着力とそれを区分する集水面積の感度分析を行い、土砂移動の予測精度をスレットスコアで評価した(図-3)。これより、斜面部の粘着力は、従来の方法で設定した 6.5kN/m^2 程度の値の場合、粘着力を区分する集水面積に関わらず概ねスレットスコアが高い。また、斜面部の粘着力の値に依らず、集水面積 $200 \sim 2,000\text{m}^2$ 程度で粘着力を区分した場合は、概ねスレットスコアが高い。これは、前節の検討において、集水面積 900m^2 で粘着力を区分した場合に予測精度が最も高かったことと一致する。ここで、図-1と合わせて見ると、地形条件の明瞭な変化点(ここでは集水面積 100m^2 , $30,000\text{m}^2$ で、それぞれ現頭部と斜面部、溪床部と氾濫原の境界と考えられる)間の変化点(900m^2)で粘着力設定を区分することが、予測精度の向上に有効であったと判断できる。

以上の結果から、今回提案した地形条件(斜面勾配と集水面積の関係)から簡易に土層の形成プロセスを推定し、斜面部と溪床部の粘着力を2区分して設定する方法が、流域の土砂生産予測の精度向上に有効である可能性がある。

なお、今回 0.0kN/m^2 とした溪床部の粘着力の設定手法については、別途地域特性に応じた検討が必要である。

<参考文献>

- 1) 秦ら：斜面と溪流の中間的な特徴を有する領域の土砂生産予測手法に関する検討，砂防学会誌（投稿中）
- 2) 内田ら：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所への予測に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol. 62, No. 1, p. 23-31, 2009
- 3) Montgomery D.R. : Slope Distributions, Threshold Hillslopes, and Steady-state Topography, American Journal of Science, Vol. 301, p. 432-454, 2001

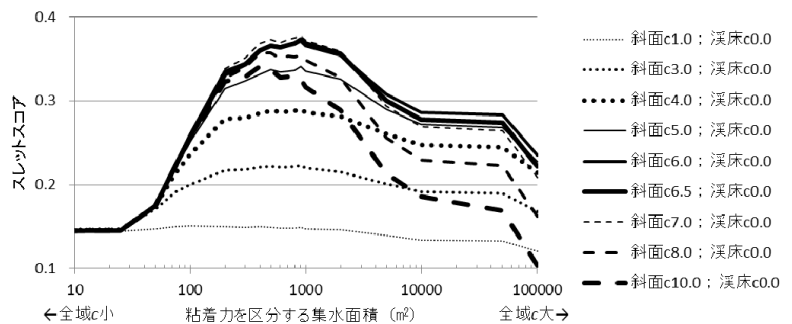


図-3 斜面部の粘着力及びそれを区分する集水面積の感度分析結果