

表層崩壊および溪床堆積土砂再移動による土砂生産量予測モデルの構築

(株)東京建設コンサルタント ○秋山 浩一、伊藤 達平
国土技術政策総合研究所 岡本 敦、内田 太郎、鈴木 拓郎

1. 背景

表層崩壊に関しては、土層内の水移動と斜面安定に関する数値モデルを結合した手法（以下、「物理モデル」と呼ぶ）が提案され（例えば、平松ら、1990）、斜面崩壊の発生場所の予測計算が可能となりつつある。しかしながら、物理モデルは、膨大なパラメータの同定や複雑な計算を必要とするため、現時点までに十分に実用化されてきているとは言い難い。これに対し著者らは、予測項目を表層崩壊の発生場所に特化した物理モデルとして、地下水位を定常状態と仮定し、斜面安定解析により崩壊発生危険度を評価する手法を提案した（田村ら、2010）。これより、予測結果に影響の大きいパラメータの空間分布を実測することで、表層崩壊の発生場所を予測が可能となった。さらに、パラメータの不確実性を考慮することで、広範囲の崩壊発生危険度の概略評価が可能となった（以下、「C-SLIDER 法」と呼ぶ）。しかし、C-SLIDER 法は地下水による表層崩壊のみを対象としており、表面流による土砂移動は表現できていない。一方、緩勾配の斜面や 0 次谷、溪流では、地下水による表層崩壊起因の土砂生産ではなく、表面流による土砂生産が卓越することもある。また、これまで、表面流による土石流発生条件については定式化されてきている（例えば、高橋、1977）。

そこで、本研究は表層崩壊の発生予測モデルに表面流による土石流発生条件を加え、地下水による表層崩壊から表面流による溪床等における不安定土砂の移動まで、統一的に扱える手法の構築を行うことを目的とした。

2. モデル

2.1 基礎式

地下水面が地表面以下の場合、C-SLIDER 法に準じ、式 1 で斜面の安全率を算出した。

$$F_s(t) = \frac{c + (\gamma_h \cos^2 I - \frac{r(t)A\gamma_w}{K_s \tan I}) \tan \phi}{\gamma_h \cos I \cdot \sin I} \quad \text{式 1}$$

ここで、 c は粘着力 [kN/m²]、 ϕ は内部摩擦角 [°]、 K_s は透水係数 [m/s]、 h は土層厚、 γ_w は水の単位堆積

重量 [kN/m³]、 γ は土の単位堆積重量 [kN/m³]、 I は斜面勾配 [°]、 A は単位幅あたりの集水面積 [m²/m]、 $r(t)$ は時刻 t の降雨強度 [mm/h] である。

次に、地下水位が地表面に達し、式 1 で求まる安全率が 1 を下回らない場合、表面流による影響も含めた斜面の安定解析を行った。ここでは、式 2 に示す溪床堆積物の応力分布に基づく手法（高橋、1977）に粘着力の影響を考慮した式 3 を導出し、これにより安全率を算出した。

$$F_s = \frac{C_s(\gamma_s - \gamma_w)}{C_s(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + h_w/d)} \frac{\tan \phi}{\tan I} \quad \text{式 2}$$

$$F_s = \frac{c}{[C_s(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + h_w/d)]h \cos I \cdot \sin I} + \frac{C_s(\gamma_s - \gamma_w)}{C_s(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + h_w/d)} \frac{\tan \phi}{\tan I} \quad \text{式 3}$$

ここで、 C_s は土砂濃度、 h_w は地表水深 [m]、 d は粒径 [m]、 γ_s は飽和時の土の単位堆積重量 [kN/m³] である。なお、式 3 は地表面水位 0 のときの安全率は、式 1 で地下水位が地表面と一致した条件の安全率は等しくなる。

2.2 モデルの結合

上記の表層崩壊に関する危険度評価（式 1）と表面流による危険度評価（式 3）を結合し、土砂生産量予測モデルを構築した。土層内の間隙水圧、流量および水位は、田村ら（2010）と同様にダルシー則と質量保存則に従うとし、式 4～6 とする。

$$u(t) = \frac{r(t)A\gamma_w}{K_s \tan I} \quad \text{式 4}$$

$$Q_u(t) = K_s \frac{u(t)}{\gamma_w} \tan I \quad \text{式 5}$$

$$h_u = \frac{u(t)}{K_s \cos I \sin I} \quad \text{式 6}$$

ここで、式 4～6 で求まる地下水位が土層厚を上回った場合、表面流が発生すると判定した。ある地点の土層内で流せる最大の地下水流量（ Q_u ）は、式 4～6 より、式 7 で表すことができる。

$$Q_u = K_s \cos I \sin I h_u \quad \text{式 7}$$

そこで、上流域からもたされる水のうち、土層内で流しきれない水は表面流となるとし、 $r(t)A > Q_u$ の時、単位幅あたりの時刻 t にある地点を流下する表面流量（ Q_s ）は、式 8 で表すことができるとした。

$$Q_s = r(t)A - Q_u \quad \text{式8}$$

表面水位は、等流計算で算出した（式9）。

$$h_w = \frac{nQ_s}{BR^{2/3}i^{1/2}} \quad \text{式9}$$

次に、表層崩壊に関する斜面の安全率を式1で算出し、安全率が1以上の場合でかつ表面流が生じる場合、安全率を式3で算出した。さらに、表層崩壊による崩壊深は土層厚と等しいと仮定し、表面流による土砂移動の深さ（ h' ）は、以下の式10で算出した。

$$h' = \frac{c}{1 - \frac{[C_s(\gamma_s - \gamma_w) + \gamma_w(1 + h_w/d)] \cos I \cdot \sin I}{C_s(\gamma_s - \gamma_w) \tan \phi}} \quad \text{式10}$$

その上で、表面流による土砂移動の深さが土層厚よりも小さい場合、再度式4～9を用いて表面流水深を算出し、安全率が1以上になるか、表面流による土砂移動後の土層厚が0になるまで繰り返し計算を行った。以上の計算の流れを図1に示した。

3. 試算

3.1 試算条件

構築した土砂生産量予測モデルについて、斜面勾配 $25^\circ \sim 40^\circ$ 、土層厚 100cm～400cm の組合せに対して安全率を算出した。検討条件は、内部摩擦角 35° 、粘着力 5.8kN/m^2 、透水係数 0.05cm/s 単位堆積重量 18.1kN/m^3 、土砂濃度 0.7 、単位幅あたりの集水面積 $500\text{m}^2/\text{m}$ とした。

3.2 試算結果

試算結果は表1に示すとおりであり、(1)表層崩壊に関する安全率が1未満の領域、(2)表層崩壊に関する安全率は1以上だが、表面流による安全率が1未満の領域、(3)表面流が発生せずに安全率が1以上の領域、(4)表面流が発生するが安全率が1以上の領域に土層厚と勾配の関係から、分類できた。さらに、崩壊深、移動の生じる回数も算出できた。今後、実際の事例にあてはめるなど本モデルの有効性を検証し、斜面、溪

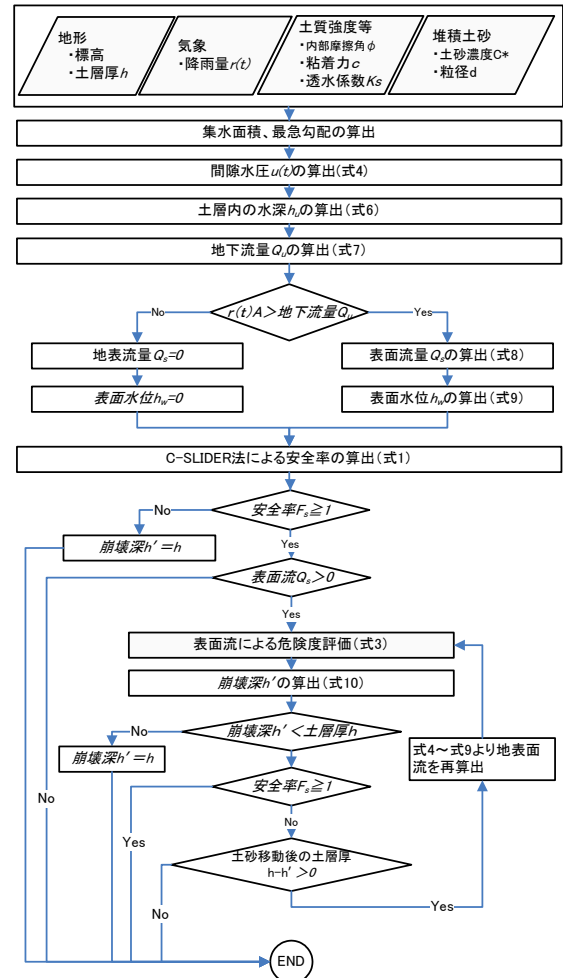


図-1 計算フロー

流における土砂生産量の予測技術の向上につなげたい。

4. 参考資料

- 1) 平松ら；雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 43, No. 1, 5-15, 1990.
- 2) 田村ら；高精度空間情報を用いた表層崩壊発生危険度評価手法に関する研究, 土木研究所報告 (214), 47-61, 2010.
- 3) 高橋 保；土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報 20(B-2), 405-435, 1977.

表-1 安全率算出結果

(a) 堆積土砂の再移動に関する安全率						(b) 崩壊深						(c) 堆積土砂の移動の生じる回数					
勾配 堆積厚 (cm)	25	30	35	40		勾配 堆積厚 (cm)	25	30	35	40		勾配 堆積厚 (cm)	25	30	35	40	
100	1.30	1.13	1.02	0.94		100	0.00	0.00	0.00	0.92		100	0	0	0	0	
125	1.15	1.00	0.89	0.80		125	0.00	1.25	1.03	1.25		125	0	1	0	0	
150	1.05	0.91	0.91	0.82		150	0.00	1.25	1.50	1.50		150	0	1	0	0	
175	0.99	0.98	0.85	0.76		175	1.70	1.75	1.75	1.75		175	1	0	0	0	
200	0.94	0.93	0.80	0.71		200	1.70	2.00	2.00	2.00		200	1	0	0	0	
225	0.91	0.89	0.76	0.67		225	1.70	2.25	2.25	2.25		225	1	0	0	0	
250	0.89	0.85	0.76	0.69		250	1.70	2.50	2.50	2.50		250	1	0	0	0	
275	0.99	0.87	0.78	0.70		275	2.75	2.75	2.75	2.75		275	0	0	0	0	
300	0.99	0.89	0.79	0.71		300	3.00	3.00	3.00	3.00		300	0	0	0	0	
325	1.03	0.91	0.81	0.72		325	0.00	3.25	3.25	3.25		325	0	0	0	0	
350	1.06	0.93	0.82	0.72		350	0.00	3.50	3.50	3.50		350	0	0	0	0	
375	1.08	0.95	0.83	0.73		375	0.00	3.75	3.75	3.75		375	0	0	0	0	
400	1.10	0.96	0.84	0.74		400	0.00	4.00	4.00	4.00		400	0	0	0	0	

(1) 表層崩壊に関する安全率が1未満の領域 (2) 表面流による安全率が1未満の領域 (3) 表面流が発生せずに安全率が1以上の領域 (4) 表面流が発生するが安全率が1以上の領域