

無限長斜面安定解析を用いた降雨に伴う表層崩壊ハザードマップの作成

東北大学大学院 学生会員 ○小野 桂介
東北大学大学院 正会員 風間 聡

1. はじめに

豪雨時には急傾斜面において崖崩れ（表層崩壊）が多く発生し、社会的に大きな問題である。特にモンスーンアジアにおいては雨期の多雨により広域で斜面災害が生じている。GISの普及を背景に、広域に発生する斜面崩壊の危険度評価に対して、統計的な手法を用いることが一般的である。しかし、統計的手法では崩壊のメカニズムまで踏み込んだ議論ができないこと、特に途上国では統計解析で最重要である崩壊実績データの入手が困難であること、等の課題がある。一方、近年、無限長斜面安定解析に基づく力学的手法を用いて、降雨に伴う表層崩壊危険度の推定手法が提案されている¹⁾²⁾。これらの手法は現段階では対象領域を限定した流域スケールの解析であるが、広域への応用が期待できる。そこで、本研究では2001年にタイで生じた斜面崩壊事例に Montrasio *et al.* (2011) の力学的解析手法²⁾を適用することにより表層崩壊ハザードマップを作成し、手法の有用性を評価することを目的とする。

2. 表層崩壊モデル

表層崩壊の危険度予測に向けた無限長斜面安定解析に Montrasio *et al.* (2011) が提案した SLIP (Shallow Landslides Instability Prediction) モデルを用いる。SLIPモデルの詳細を以下に示す。

$$F_s = \frac{\cot \beta \cdot \tan \phi' \cdot [\Gamma + m \cdot (n_w - 1)] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w}$$

where:

$$\Gamma = G_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin 2\beta \cdot H \cdot \gamma_w}$$

$$C' = [c' + c_w] = [c' + A \cdot S_r \cdot (1 - S_r)^\lambda \cdot (1 - m)^\alpha] \cdot L$$

ここで、 F_s : 安全率、 β : 斜面勾配、 ϕ' : 内部摩擦角、 γ_w : 水の単位体積重量、 H : 表土層厚、 L : 斜面の長さ、 m : 表土層厚に対する飽和土層厚の割合 ($m = H_{sat} / H$)、 n : 空隙率、 G_s : 土粒子比重、 S_r : 飽和度、 C' : 粘着力 (Total)、 c' : 有効粘着力、 c_w : サクシオンにより変化する見掛けの粘着力、 $A \cdot \lambda \cdot \alpha$: 土壌パラメータ、で

ある。ここで、降雨に伴う m の時間変化は以下の式で表される。

$$m(t) = \sum \left[e^{-K_r \frac{\sin \beta}{n(1-S_r)} (t-t_{0i})} \cdot \frac{h(t_{0i})}{n \cdot H \cdot (1-S_r)} \right]$$

ここで、 $m(t)$: 時間 t における表土層厚に対する飽和土層厚の割合 ($t=0,1,2,\dots,t_{0i}$ における降雨浸透および流出の結果として算出)、 K_r : 排水係数、 $h(t)$: 時間 t における降雨量、である。本研究においては安定解析の時間ステップは1日とする。

3. 対象地域およびデータセット

対象領域はタイ王国ペチャブン県ロムサック郡ナムコヤイ支流流域である (北緯 16.82 度/東経 101.13 度、流域面積 67km²、流域内最高標高 1600m)。Yumuang (2006) によると、2001年8月10日に発生した豪雨によりこの地域において多くの斜面崩壊が発生し、136名が死亡した³⁾。崩壊の多くは砂岩を母岩とする土壌で発生した表層崩壊であり、土壌は Clayey Silt、表土層厚は 0.5m 未満である。安定解析に用いる入力データとして降雨データと斜面勾配データを作成する。降雨データとしてタイ気象庁雨量計 (7地点) において8月1日から14日にかけて観測された日降雨量を用いる。解析においてはこれらを空間的に内挿することで作成した解像度 30m×30m の日降雨量分布を用いる。斜面勾配データは解像度 30m×30m の DEM である ASTER GDEM から作成される。図1に解析対象領域の諸元を示す。

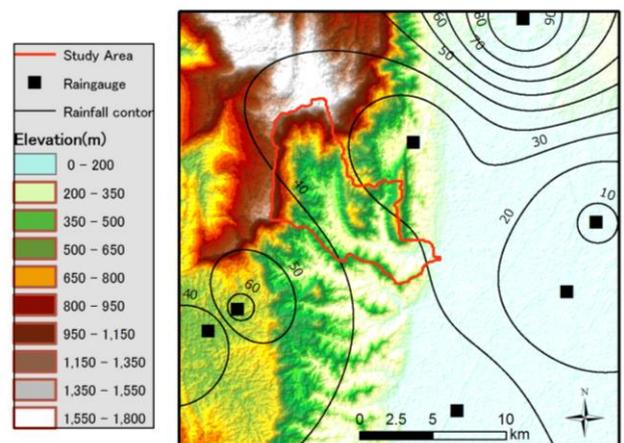


図1 解析対象領域の諸元 (降雨データ: 8月10日観測)

4. 斜面安定解析

前述したように SLIP モデルは複数のモデルパラメータを必要とする。しかし現時点では、対象地域におけるこれらの値は不明である。そこで今回は、Montrasio *et al.* (2011) が土壌タイプ毎に提案したモデルパラメータを利用する。安定解析の初期条件として流域の土壌の飽和度が必要となるが、今回は $S_r = 0.70$ を用いて解析を行う。モデルパラメータを表 1 に示す。

5. 結果と考察

実際に斜面崩壊が発生した地点（黒グリッド）と、SLIP によって導かれた 8 月 10 日の安全率の分布を図 2 に示す。一般的に、安全率 $F_s < 1$ が不安定斜面を意味する（図 2 赤グリッド）。安定解析の結果、全体として流域の西部に不安定斜面が集中する。また、巨視的にみて実際の崩壊の大部分が不安定斜面と推定されたグリッドの中で生じている。推定された安全率の精度を統計的に見るために、ROC（Receiver-Operating Characteristic）プロット⁴⁾を図 3 に示す。ROC プロットとは、ハザードが判定されたグリッド（positive：不安定斜面，negative：安定斜面）が崩壊地と一致するか空振りするか（true か false）の精度を、閾値として判定に用いる安全率の変化に応じて求めるものである。図の左の縦軸は崩壊地が不安定斜面として判定される確率（Sensitivity），下の横軸は非崩壊地が安定斜面として判定される確率（Specificity）を示す。一般的に、崩壊地を安定斜面として誤判定しないように閾値を大きくした場合、非崩壊地が不安定斜面として判定される確率が増加する。例えば、図 3 において $F_s = 1.00$ を閾値とした場合、70%の確率で崩壊地が不安定グリッドと一致するが、20%の確率で非崩壊地を不安定グリッドと誤判定する。 $F_s = 1.50$ を閾値とする場合、90%以上の確率で崩壊地を不安定グリッドと判定できるが、70%の確率で非崩壊地を不安定グリッドと誤判定する。

Montrasio *et al.* (2011) の手法をタイのペチャブン県に適用し、表層崩壊ハザードマップを作成した。モデルパラメータとして文献値を用いたにもかかわらず、推定された安全率は実際の崩壊地と高い相関を示した。今後、本手法をタイ南部 2011 年斜面災害事例に適用し、手法の有用性を確認する予定である。

謝辞

本研究は Chaiwat Ekkawatpanit 博士(モンクット王工科大学, タイ)に現地調査およびデータ提供の援助を受け

表 1 SLIP モデルのモデルパラメータ

Soil unit	Type of soil	H (m)	ϕ' (°)	c' (kPa)	λ	A	n	α	G_s	K_T (d^{-1})
1	Clayey silt	0.5	25	0	0.4	80	0.46	3.4	2.7	0.432
2	Clayey	0.5	20	10	0.4	100	0.50	3.4	2.7	0.086
3	Sand	0.5	35	0	0.4	40	0.40	3.4	2.7	0.864

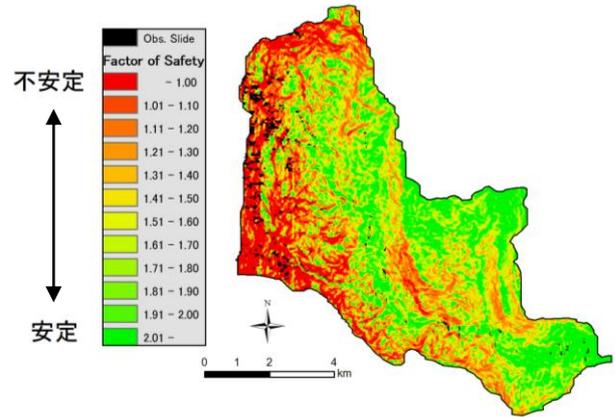


図 2 斜面安定解析結果および実際の崩壊地点

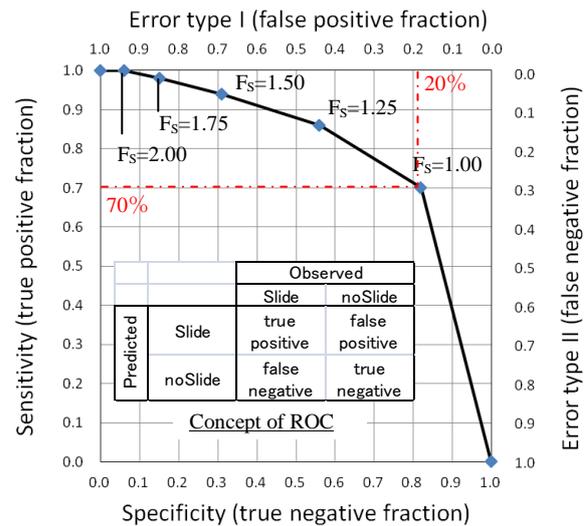


図 3 ROC プロット（閾値 $F_s = 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ ）

ました。独立行政法人日本学術振興会特別研究員奨励費の助成を受けて行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Apip, Takara, K., Yamashiki, Y., Sassa, K., Ibrahim, A. B., and Fukuoka, H.: A distributed hydrological-geotechnical model using satellite-derived rainfall estimates for shallow landslides pre-diction system at a catchment scale, *Landslides*, 7(3), 237–258, 2011.
- 2) L. Montrasio, R. Valentino, and G. L. Losi: Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1127–1947, 2011.
- 3) S. Yumuang: 2001 debris flow and debris flood in Nam Ko area, Petchabun province, central Thailand, *Environ. Geol.*, 51, 545–564, 2006.
- 4) Bagueria, S.: Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management, *Nat. Hazards*, 37, 315–329, 2006.