

## 中国四川省における斜面崩壊モデルの適用

東北大学工学部	学生会員	○井下雄揮
東北大学大学院環境科学研究科	学生会員	Sartsin Phakdimek
東北大学大学院工学研究科	学生会員	中村雅志
東北大学大学院工学研究科	学生会員	阿部祐太
東北大学大学院工学研究科	正会員	小森大輔

## 1. 背景と目的

斜面崩壊は、人命や経済的損失をもたらす深刻な自然災害の1つである。浅層崩壊は、降雨時の水位上昇により飽和した浅層土壌の間隙水圧が上昇し土壌のせん断強度が低下した結果、せん断強度がせん断応力より低くなり斜面の安定が不安定となり発生する。豪雨が斜面の安定性に及ぼす影響を評価・予測するために、既往研究にて多くの物理モデルが用いられてきた。それらの物理モデルは、降雨による斜面安定性モデルや水理学的モデル(間隙水圧や地下水位)を考慮しているが、降雨強度や降雨パターンに起因する斜面崩壊に至る基本的な制御や土層厚分布の不確実性はまだ十分に定量化されていない。そこで本研究は、定常的な地下水の流れを考慮した斜面安定モデルと土層厚モデルを適用した先行研究にならい、2013年に中国四川省成都市都江堰で発生した斜面崩壊災害に同様のアプローチを適用し、斜面安定性解析を行なった。

## 2. 対象イベントとデータセット

対象イベントは2013年7月9日から10日の2日間にかけて中国四川省成都市都江堰で発生した豪雨が対象である。このイベントは累積降雨量が300mmを超えており、10日の午前2時ごろに土石流が発生した<sup>2)</sup>。

解析に使用したデータは、標高、傾斜角、斜面崩壊痕、降水量、土壌である。解析メッシュサイズは12.5m×12.5mとして解析を行なった。

## 3. 解析手法

## 3.1 斜面崩壊モデルの適用

斜面崩壊モデルの適用は、Sartsinら<sup>1)</sup>にならい、その手順を(A),(B),(C)に示す。

## A) 土層厚

表面の土層厚  $D$  (m) は、Saulinerら<sup>3)</sup>による Z-model を用いて式(1)より推定した。



図1 対象地域

$$D_i = D_{max} - \frac{Z_i - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} (D_{max} - D_{min}) \quad (1)$$

ここで、 $D_i$  :  $i$  地点における土層厚 (m),  $D_{max}$  : 領域内の最大土層厚 (m),  $D_{min}$  : 領域内の最小土層厚 (m),  $Z_i$  :  $i$  地点における標高 (m),  $Z_{max}$  : 領域内の最高標高,  $Z_{min}$  : 領域内の最小標高 (m) であり  $D_{max}$ ,  $D_{min}$  はそれぞれ 5.0 (m), 0.5 (m) と仮定した。

## B) 地下水浸透高

Renzo Rossoら<sup>4)</sup>に基づき、表層土における地下水浸透高を式(2)によって算出した。

$$ap - q = \frac{dS}{dt} = a \cdot \frac{e}{1+e} \cdot (1 - Sr) \cdot \frac{dh}{dt} (h \leq D) \quad (2)$$

$$ap - q - r = 0 \quad (3)$$

ここで、 $a$  : 表面積 ( $m^2$ ),  $p$  : 降水量 ( $m/s$ ),  $q$  : 地下流出量 ( $m^3$ ),  $S$  : 貯留量 ( $m^3$ ),  $h$  : 表層土の地下透水高 (m),  $t$  : 降雨継続時間 (s),  $D$  : 土層厚 (m),  $r$  : 地表面流出量 ( $m^3$ ) である。また、ダルシー則によって地下水流量について式(4)が成り立つ。

$$q = (wh \cos \beta) K \tan \beta \quad (4)$$

ここで、 $w$  : 幅 (m),  $\beta$  : 傾斜度 (rad),  $K$  : 透水係数 ( $m/s$ ) である。式 (2), (4) を用いて地下透水高  $h$  は

式 (5) として表される.

$$h = \frac{apD}{Twsin\beta} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{Twsin\beta}{aD} t\right) \right] + h_i \exp\left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{Twsin\beta}{aD} t\right) \quad (5)$$

ここで、 $T = Kz$ とし、 $h_i$  : 表層土の初期地下水浸透高 (m) である. また、初期状態において表層土に地下水が浸透していないことを仮定して $h_i=0$ とした.

C) 安定性解析

(A), (B) によって得られたパラメータとデータセットを用いて安全率 FS を算出した.

$$FS = \frac{c' + [hy_{sat} + (D - h)\gamma_t - \gamma_w h] \cos^2 \beta \tan \phi'}{[h\gamma' + (D - h)\gamma_t + \gamma_w h] \sin \beta \cos \beta} \quad (6)$$

ここで、 $c'$  : 粘着力 (kpa),  $\gamma_{sat}$  : 飽和単位体積重量, (kN/m<sup>3</sup>)  $\gamma_t$  : 湿潤単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>),  $\gamma_w$  : 水の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>),  $\gamma'$  : 水中単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>) 地下水浸透高  $h$  および安全率 FS は解像度 12.5m で計算を行い、モデル上の斜面崩壊箇所を閾値よりも小さい値となった箇所を斜面崩壊箇所とした.

3.2 斜面崩壊モデルの検証

斜面崩壊モデルの安全率予測値と対象地域の実際の斜面崩壊痕の相関を受信者動作特性(ROC)曲線によって検証した. ROC 曲線は縦軸に真陽性率 (TPR), 横軸に偽陽性率 (FPR) を用いて作成され、曲線下面積 (AUC)によってモデルの精度を定量的に評価した. 閾値はそれぞれ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.5, 1.75 として検証を行なった.

4. 結果と考察

4.1 斜面崩壊モデルの精度

斜面崩壊モデルの検証の結果、それぞれの閾値に対する TPR, FPR を表 1 に示し、図 2 に対象地域の FS 値の分布図を示した. AUC は 0.698 であり、対象地域の斜面崩壊に対して十分な再現性が得られた.

4.2 傾斜度ごとによる分析

傾斜度は FS 値に影響を及ぼすため、傾斜度ごとによる分析を行なった. 図 3 に閾値が 1.00 以上における傾斜度ごとの TPR について示す.

斜面安定性解析に基づく物理モデルでは、FS 値が 1.00 を下回るときに崩壊箇所として扱うことが一般的である. 傾斜度が 20° から 30° の場合において閾値が 1.00 の TPR と閾値が 1.25 の TPR を比較すると、閾値が 1.00 の TPR が 0.627, 閾値が 1.25 の TPR が 0.922 であることが分かった. この TPR の差は、実際においては崩壊している箇所を崩壊していない箇所と判定していることを表しており、斜面安定性解析において正

表 1 それぞれの閾値に対する TPR と FPR

閾値	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75
TPR	0.003	0.282	0.679	0.844	0.911	0.944
FPR	0.001	0.100	0.384	0.605	0.736	0.814

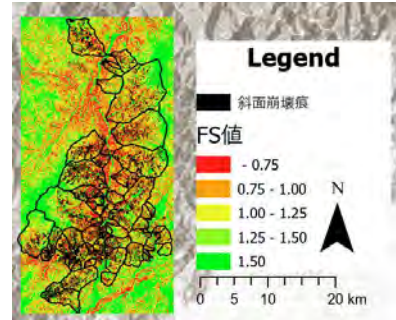


図 2 FS マップ (12.5m メッシュ)

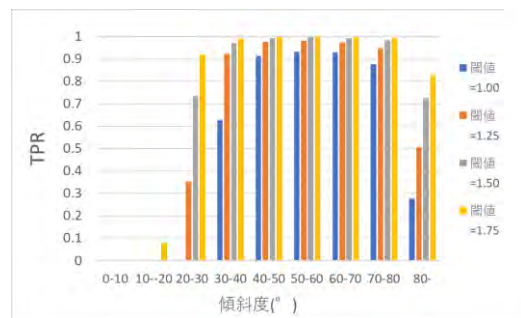


図 3 傾斜度ごとの TPR (閾値 1.00 以上)

しくない箇所である. これらの箇所がどのように分布し、なぜ誤判定されたのかを把握することが課題である.

今後は誤判定値が生じる原因を解明することを目的に、誤判定値の分布の把握、感度分析などに取り組む.

謝辞 : 本研究は国際共同研究加速基金(代表:小森大輔:19KK0362)の助成を受けたものである. ここに深甚な謝意を表す.

参考文献 :

- 1) Sartsin PHAKDIMEK, /Masashi NAKAMURA, Yuta ABE, Daisuke KOMORI : The Sensitivity of Spatial Variation Soil Thickness and Rainfall on Shallow Landslide Triggering Patterns . 土木学会論文集 G (環境) . 78(5), I\_117-I\_124, 2022.
- 2) Guo, X., Cui, P., Li, Y, Zou, Q., and Kong, Y.: The formation and development of debris flows in large watersheds after the 2008 Wenchuan Earthquake, J. Landslides, 13, 25-37, doi10.1007/s10346-014-0541-6, 2014
- 3) Sauliner, GM., Beven K., and Obled, C. : Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL, J Hydrol 202 pp.158-172, 1997.
- 4) Rosso, R., Rulli, M. C., and Vannucchi, G. : A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding, Water Resour. Res., 2006.