

機械学習を用いた崩壊判定と崩壊体積予測

広島大学 ○木戸理歩・井上卓也

京都大学 山野井一輝

1. はじめに

近年、山地流域から流出した土砂の堆積による流下能力の低下によって甚大な被害が多発している。山地流域では斜面崩壊によって大量の土砂が生産される。そのため、斜面の崩壊判定や崩壊土砂量を、山地流域全体で把握することが重要である。斜面の崩壊判定を行うためには、降雨が土層内へ浸透し、安全率が低下する過程を計算する必要がある。しかし、山地流域内には地質や地形が異なる多様な斜面がある上に、降雨パターンによって崩壊する斜面は異なる。そこで本研究では、地質・地形パラメータから崩壊判定と崩壊体積を推定する機械学習モデルの作成し、降雨による斜面内の土中水分量の増加や生産された土砂の輸送を考慮できるモデルと組み合わせ、斜面崩壊による土砂生産を考慮した山地流域からの土砂流出の再現を行った。

2. 対象流域

対象は北海道十勝川水系ペケレベツ川の上流部とする。流域面積は30万 km^2 である。主に風化しやすい花崗岩で構成され、粘着力は 0.07 tf/m^2 から 0.53 tf/m^2 で平均 0.2 tf/m^2 、内部摩擦角は 35.6° から 38.9° で平均 37.3° である¹⁾。2016年の北海道豪雨時には15万 m^3 の土砂が生産され、 $3.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ の土砂が流出した。

3. 方法

3.1 降雨浸透斜面安定解析モデル

まず、堤らの降雨浸透斜面安定解析モデル IRIS²⁾を用いて、降雨に浸透による斜面内の圧力水頭の分布と崩壊面積を計算した。各層の平均圧力水頭が0 m以上である層を飽和層と定義する。今回の条件では飽和層は斜面下部から連続的に分布しており、その飽和層高さを土層厚で除した無次元量を飽和度とした。土層厚は3mで一定とし、メッシュサイズは水平方向に5m、鉛直方向に0.33mとした。粘着力は根系等により不確実性があると考え複数設定し、内部摩擦角は 37.3° とした。斜面条件は表の範囲内で、粘着力・内部摩擦角・斜面勾配・斜面長さをランダムに組み合わせ、高頻度領域内で1200ケース、低頻度領域で200ケース設定した。入力

降雨は、0から50 mm/hに線形的に12時間かけて増加し、その後50 mm/hが3時間続く雨を与えた。

表-1 斜面パラメータの範囲

	高頻度領域	低頻度領域
粘着力 [tf/m^2]	0.5 - 1.5	1.5 - 3.0
内部摩擦角[degree]	20 - 30	10 - 20, 30 - 45
斜面勾配 [degree]	20 - 44	10 - 20
斜面長さ [m]	10 - 400	400 - 1000

3.2 土砂生産・供給・輸送モデル SiMHiS

土砂生産・供給・輸送を考慮するモデルとして山野井らの SiMHiS³⁾を、山地河道における遮蔽効果や川幅の拡大を考慮できるように修正したもの⁴⁾を用いた。SiMHiSでは、河道網を合流点ごとに分けた単位河道とその兩岸に隣接する単位斜面を設定し、単位斜面で崩壊し生産された土砂は隣接する単位河道に供給され、河道での掃流砂・浮遊砂の輸送を解く。

3.3 崩壊確率・崩壊長さ推定モデル

四つの斜面パラメータと IRIS で計算した崩壊飽和度から崩壊判定を行うランダムサバイバルフォレストモデル RSF を作成した。作成した RSF モデルから、0.1 から 0.9 まで 0.1 刻みの飽和度 i における、地質や地形が異なる斜面要素 j の未崩壊確率 $S_j(\theta_i)$ を設定する。SiMHiSで計算される斜面内水位と土層厚から得られる飽和度 θ が、設定した飽和度 θ_i を初めて超えたとき、以下の条件付き確率 $P_{failure}$ で崩壊が発生するかを判定する。

$$P_{failure} = 1 - S_j(\theta_i)/S_j(\theta_{i-1})$$

崩壊面積は、土層厚に依存すると仮定し、四つの斜面パラメータと崩壊面積を土層厚で除した崩壊長さを学習データとして、崩壊面積を推定するランダムフォレストモデル RF を作成した。

ここで推定した限界飽和度と崩壊体積を SiMHiS に組み込み、2016年北海道豪雨時のアメダス降雨を入力することで、当時の土砂生産・流出量の再現を行った。

4. 結果

1400 ケースで降雨浸透斜面安定解析を行った結果、233 ケースで自立せず、450 ケースで入力降雨により崩壊が発生し、717 ケースで崩壊しなかった。図-1 に、崩壊が発生した斜面の崩壊時の飽和度と崩壊長さを示す。安定性の高いパラメータの斜面ほど、崩壊により高い飽和度が必要であった。また、斜面長が 20 m 以下の斜面は崩壊面積が小さいが、それ以上の斜面の崩壊面積はその他のパラメータによって異なった。また飽和度、崩壊面積ともに 2 つのパラメータでは推定が難しいことがわかる。

図-2 左に IRIS と RSF それぞれから得られる、崩壊確率を示す。両者はおおむね一致しており、高い精度で崩壊時の飽和度を予測できた。図-2 右に IRIS の計算結果と RF で推定された崩壊長さを示す。R² の平均値は 0.35、RMSE は 2.65 であった。特崩壊面積の大きい領域において RF が過小評価しているため、精度が低い結果となったがその他はおおむね予測できている。

作成した機械学習モデルを SiMHiS に組み込み、2016 年北海道豪雨時のペケレベツ流域の降雨を入力し、再現計算を行った。図-3 に、粘着力を 0.85, 0.90, 0.95, 1.00,

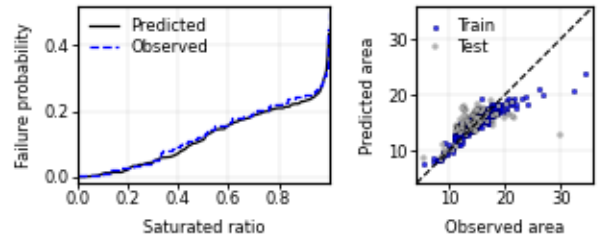


図-2 飽和確率予測結果(左)・崩壊面積予測結果(右)

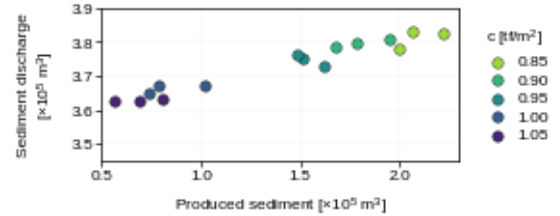


図-3 粘着力ごとの土砂生産量と土砂流出量の関係

1.05 [tf/m²]それぞれで、3 回ずつ、SiMHiS で計算した結果を示す。粘着力が 0.95 tf/m² のとき、北海道豪雨時の斜面崩壊による土砂生産量 1.5 × 10⁵ m³、土砂流出量 3.8 × 10⁵ m³ を再現できた。同じ粘着力であっても、崩壊判定を飽和度による崩壊確率から行ったことで土砂生産量にばらつきがあった。また、土砂生産量の変化の範囲に対し、土砂流出量の変化は小さかった。

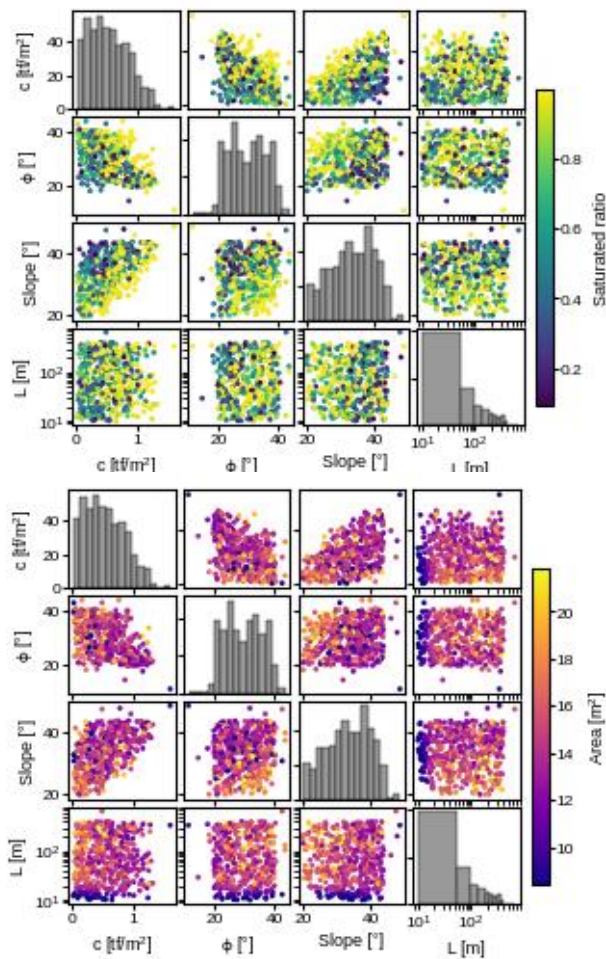


図-1 斜面パラメータと崩壊飽和度(上)・崩壊面積(下)

5. 結論

様々な粘着力・内部摩擦角・斜面勾配・斜面長さをもつ斜面で降雨浸透斜面安定解析を実施し、それぞれの斜面パラメータと崩壊時の飽和度と崩壊体積の結果を機械学習モデルで学習させ、土砂生産・供給・輸送モデル SiMHiS に組み込むことで、2016 年北海道豪雨時の崩壊による土砂生産、土砂流出を再現できた。本手法では、斜面パラメータと降雨データを入力とすることで、山地流域全体の土砂生産および流出を一体的に推定可能であり、下流域における土砂災害リスク評価の高度化に寄与する。

参考文献

- 1) 佐藤ら：北海道まさ土の地盤工学的性質について、地盤工学会北海道支部技術報告集，第 75 号，2016。
- 2) 堤ら：2005 年台風 14 号により 大分県竹田市で発生した斜面崩壊に関する数値シミュレーション，水工学論文集，V51，p.931-936，2007。
- 3) 山野井ら：豪雨時の水・土砂災害に関わる ハザード群の発生リスク評価，土木学会論文集 B1，2016。
- 4) 木戸ら：山地流域における河岸侵食による川幅の拡大と遮蔽効果を考慮した土砂流出モデル，土木学会論文集，2025。