

統計的および力学的手法による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表層崩壊が発生し、社会的に大きな問題となる。特に急峻な地形と脆弱な地質から形成される日本列島においては多雨により表層崩壊が頻発している。危険度の高い斜面を抽出する手法は、1) 採点方式、2) 統計的方式、3) 力学的方式、に大別される。特に豪雨に伴う広域の斜面崩壊の危険度予測には、統計的手法を用いる場合が多い。一方、近年、無限長斜面安定解析を利用した広域を対象とする表層崩壊危険度予測手法が提案されている。広域における表層崩壊危険度評価の更なる研究が望まれる中、統計的及び力学的手法の適用性を事例研究により考察することは重要である。本研究では、2004 年新潟豪雨を研究事例として統計的手法と力学的手法を用いた表層崩壊の危険度評価に関して考察を行なう。この考察をもとに表層崩壊危険度予測手法の選択について提言を行うことを目的とする。

2. 解析方法

対象領域として、2004 年新潟豪雨により斜面崩壊が多発した栃尾と出雲崎を選択する（図-1）。崩壊の深さ

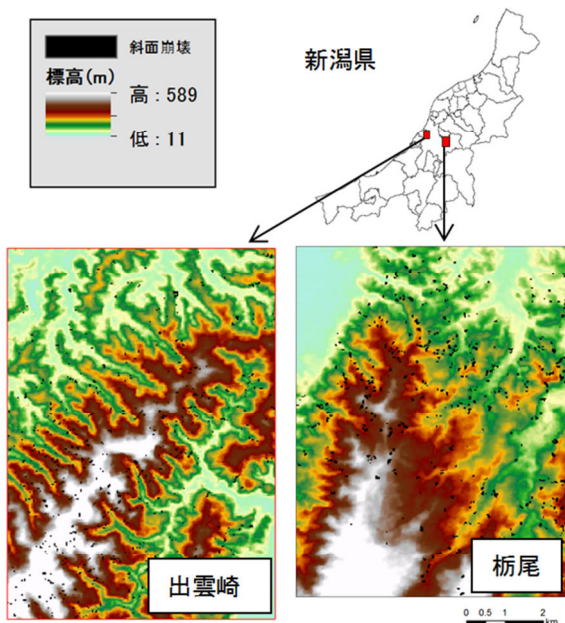


図-1 解析対象領域および標高分布、斜面崩壊位置

が 2 m 以内の表層崩壊を研究対象とする。降雨データとしてアメダスの日雨量、地形データとして解像度 30m × 30m の ASTER GDEM、崩壊実績データとして山岸ら¹⁾が作成した表層崩壊位置データを利用する。力学的手法として SLIP (Shallow Landslides Instability Prediction) モデル²⁾、統計的手法としてロジスティックモデル³⁾を利用する。栃尾において SLIP モデルの土質パラメータを最適化した後、最適化した SLIP モデルを出雲崎に適用する。また、栃尾においてロジスティックモデルを構築した後、構築したモデル式を出雲崎へ適用する。

2.1 SLIP モデル

SLIP モデルの詳細を以下に示す。

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

where:

$$\Gamma = G_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r \quad (2)$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r) \quad (3)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin 2\beta \cdot H \cdot \gamma_w} \quad (4)$$

$$C' = [c' + c_\psi] = [c' + A \cdot S_r \cdot (1 - S_r)^\lambda \cdot (1 - m)^\alpha] \cdot L \quad (5)$$

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_ψ : 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。降雨に伴う m の時間変化は以下の式で表される。

$$m(t) = \sum_i \left[e^{-K_r \frac{\sin \beta}{n \cdot (1 - S_r)} (t - t_{0i})} \cdot \frac{h(t_{0i})}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \right] \quad (6)$$

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。安定解析の時間ステップは 1 日とする。土壌を Deposits, Sand, Clayey silt, Clay に大別し土壌分類に応じて SLIP パラメータを設定する²⁾。空隙率 (n)、飽和度 (S_r)、表土層厚 (H) に関しては栃

尾の崩壊位置データと SLIP モデルから導かれた安全率の相関が最も高くなる値を最適化により決定する。

2.2 ロジスティックモデル

ロジスティック回帰分析の目的変数に崩壊実績データ，説明変数に斜面勾配および7月13日の日降雨量を利用する．回帰分析から得られたモデル式を対象領域に適用し，メッシュ単位の発生確率を明示する．以下に表層崩壊発生確率モデル式を示す．

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_s \text{Slope} + \beta_r \text{Rain})]} \quad (7)$$

ここで， P ：発生確率， β_0 ：切片， β_r ：雨量係数， β_s ：勾配係数， Rain ：標準化された雨量， Slope ：標準化された勾配である．

3. 結果と考察

両手法による結果を定量的に比較するために，ROC (Receiver-Operating Characteristic) プロットを用いる．ROC カーブに囲まれた面積 (Area- Under-Curve : AUC) を用いてハザードマップの精度は評価され，AUC の値が大きいほど精度の良い推定結果となる．SLIP モデルおよびロジスティックモデルにより求めた確率の ROC プロットを図-2 に示す．SLIP モデルの結果について，安全率1を安全・危険の閾値と見なす場合，栃尾において崩壊地を不安定と見なす確率は34%，非崩壊地を不安定と見なす確率は15%である (図-2，プロット①)．同様に，出雲崎において，崩壊地を危険と見なす確率は44%，非崩壊地を不安定と見なす確率は21%である (図-2，プロット②)．AUC の値は，トレーニング領域である栃尾においては0.729，検証領域である出雲崎においては0.715である．ロジスティックモデルの結果に関して，発生確率60%を安全・危険の閾値とした場合，栃尾において崩壊地を危険と見なす確率は44%，非崩壊地を危険と見なす確率は18%である (図-2，プロット③)．同様に，出雲崎において崩壊地を危険と見なす確率は56%，非崩壊地を危険と見なす確率は31%である (図-2，プロット④)．ハザードマップの精度の指標である AUC の値は，栃尾においては0.744，出雲崎においては0.691である．本研究事例においてはロジスティックモデルが栃尾において最も良好な AUC (0.744) を示した．一方，SLIP モデルが両領域において良好な AUC (栃尾：0.729，出雲崎：0.715) の値を示し，他地域への適用に関して高い再現性をもつ．斜面の不安定

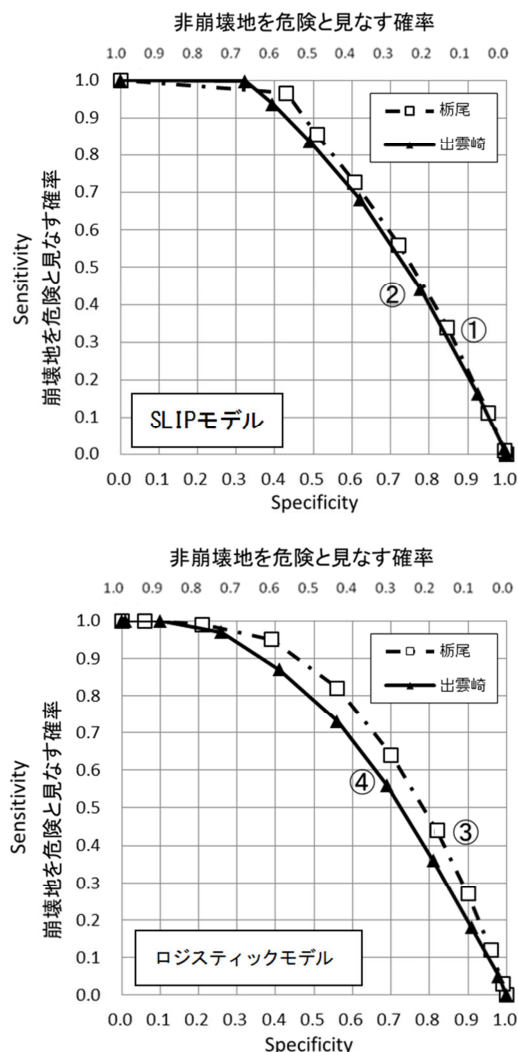


図-2 ROC プロット (上：SLIP，下：ロジスティック)

化を動的に解析することが可能である点を踏まえ，今後，SLIP モデルを用いた更なる研究を継続していく意向である．

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励研究費の助成を受けて行われた．地球規模課題対応国際科学技術協力事業 (SATREPS) の援助による IMPAC-T によって実施された．環境省の環境研究総合推進費 (S-8) の支援により実施された．ここに謝意を表します．

参考文献

- 1) 山岸宏光・アヤレウルルセグド・大谷政敬・加藤晃司：土砂災害の調査法とデータベース化に関する研究，日本建設情報総合センター，2004．
- 2) Montrasio, L. and Valentino, R.: A model for triggering mechanisms of shallow landslides, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1149–1159, 2008．
- 3) Kawagoe, S., Kazama, S. and Sarukkalige, P.R.: Probabilistic modeling of rainfall induced landslide hazard assessment, Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 1047–1061, 2010．