

## 令和6年奥能登地方における地震と豪雨が斜面崩壊の発生場所に及ぼした影響の評価

信州大学大学院 ○河合建祐, 堤大三, 福山泰治郎

## 1, はじめに

令和6年に発生した能登半島地震, および同年9月に発生した奥能登豪雨では, 広範囲で多数の斜面崩壊が発生し甚大な被害をもたらした。2つの連続した災害は「複合災害」と呼ばれ, 南海トラフ地震等の巨大地震が切迫している状況に加え, 気候変動に伴う大雨頻度の増加から, 今後も発生が懸念されている。今回のように, 豪雨による斜面崩壊が, 先行して発生した地震による影響に起因するものであるかという点について, 定量的に明らかにすることは防災計画上の課題の一つである。本研究ではまず, 豪雨時の降雨流出解析と極限平衡法を用いて斜面の安全率を求めた。そして実際の降雨での崩壊位置と, 豪雨時, 地震時通常時の解析結果の比較を行い, 先行する地震が斜面崩壊の発生に与える影響を検討した。

## 2, 解析手法

解析対象流域は地震と豪雨によって, 多数の斜面崩壊が発生した石川県輪島市の鈴屋川流域とした。降雨流出解析および斜面安定解析は10mメッシュDEMデータを用いて実施した。また降雨は気象庁編集, 気象業務センター発行の解析雨量(2024/9/19 1:00~2024/9/23 24:00)を使用した。降雨流出解析は計算の簡便化のために, 不飽和浸透流や鉛直浸透過程を考慮しないDiffusion wave法(堤ら, 2019)を用いて求めた。Diffusion wave法は, 水深と土層深の大小関係に応じて以下の式(1)と式(2)を選択して, 位置水頭の差によって, 隣接するメッシュへの流出量およびメッシュ内の水位を決定する手法である。

$$Q = BhK_S I \quad (0 \leq h < D \cos \theta) \quad \dots (1)$$

$$Q = B \left( K_S I D \cos \theta + \frac{1}{n} (h - D \cos \theta)^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \right) \quad (h \geq D \cos \theta) \quad \dots (2)$$

ここに,  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]: 流量,  $B$  [m]: メッシュ幅,  $K_S$  [m/s]: 土層の飽和透水係数,  $I$ : 動水勾配,  $h$  [m]: 土層内飽和帯水深と表面流水位の合計,  $D$  [m]: 土層深,  $n$  [m<sup>-1/3</sup>/s]: マニングの粗度係数である。

なお Diffusion wave 法はマニング則を用いており, 土層表面における速い流出をある程度再現可能なモデルである。しかし広域での解析では集水範囲が過大となり, 河道に当たるメッシュでの流出の再現が困難であった。本研究では河道メッシュの水位が極力適切な値となるよう河道メッシュに独立したパラメータを与えると同時に, 斜面安定解析の対象外とした。計算に用いたパラメータは, 土層の飽和透水係数  $K_S$  は全域で0.0001 m/s, マニングの粗度係数  $n$  は斜面メッシュで0.07, 河道メッシュで0.03を用いた。斜面の土層深  $D$  は現地での簡易貫入試験の結果に基づいて, 緩斜面で最大1.5m, 急斜面で最小0.5mとなるよう, 傾斜角に応じて線形補間して設定した。

降雨流出解析によって求められた各メッシュの水位変動を用いて斜面安定解析を行った。このとき各メッシュに無限長斜面を仮定して, 修正 Fellenius 法を用いた式(3)によって安全率を算出し, 計算時間内の最小安全率の分布を得た。

$$F_S = \frac{c + (W - u) \cos \alpha \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad \dots (3)$$

ここに,  $F_S$ : 安全率,  $c$  [N/m<sup>2</sup>]: 粘着力,  $W$  [N/m<sup>2</sup>]: 単位面積あたりの土塊の重量,  $u$  [Pa]: 間隙水圧,  $\alpha$  [°]: 斜面傾斜角,  $\phi$  [°]: 内部摩擦角である。

なお, 土質強度に関するパラメータである粘着力  $c$  と, 内部摩擦角  $\phi$  は豪雨災害後の現地試料を用いた一面せん断試験結果に基づいて, それに近い値 ( $c = 5,000$  N/m<sup>2</sup>,  $\phi = 35^\circ$ ) を用いた。

豪雨による崩壊の要因を分離して評価するために、本研究では①豪雨時の最小安全率の分布の他に、式(3)に地震加速度を慣性力として考慮した斜面安定解析(堤ら, 2026)を用いて算出した②地震時の最小安全率の分布と、地下水位を低い位置で一定とした③平常時の安全率の分布を作成して解析に用いた。

### 3, 解析結果と考察

斜面安定解析の結果、最小安全率が 1.0 を下回ったあるメッシュ (37°25'06"N 137°08'57"E) を代表事例として、安全率の変化を図-1 に示す。降雨がピークになるにつれて安全率が低下していることが分かる。

作成した最小安全率の分布(①, ②, ③)と豪雨による実際の崩壊場所のデータを用いて、予測基準の精度に頼らず、二分変数の予測能の評価ができる手法のひとつである ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を図-2 に示す。このとき ROC 曲線を定量的に評価できる AUC (Area Under the Curve) は①豪雨時: 0.730, ②地震時: 0.701, ③平常時: 0.704 であった。

まず、①豪雨時の AUC は③平常時の AUC と比較して大きいことから、Diffusion Wave 法を用いて地下水位の変動を考慮することによって、崩壊予測能が上昇することが示された。これによって、本研究における降雨流出解析と簡易な斜面安定解析を用いることで、降雨における崩壊リスクの上昇を表現可能であるといえる。

次に、①豪雨時の AUC は②地震時の AUC と比較して大きいことから、地震に耐えた斜面がその後の豪雨で崩壊に至った主な要因は、先行した地震動による影響以上に、豪雨に伴う地下水位の上昇が大きい影響を与えたであろうことが示された。

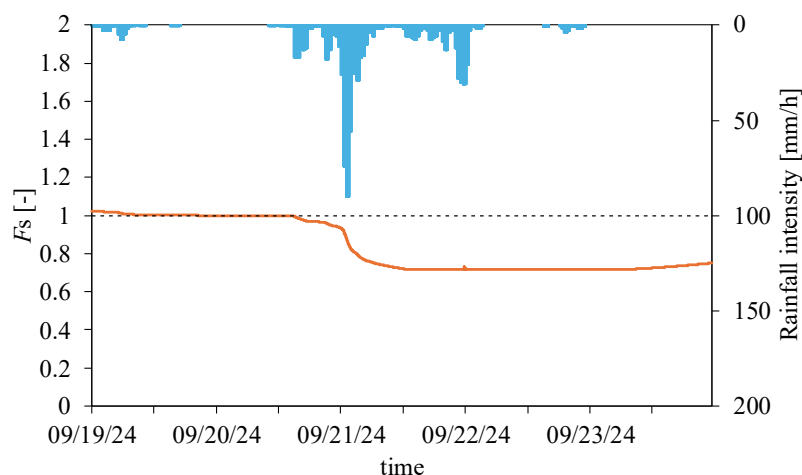


図-1 斜面安定解析によって得た代表メッシュの安全率の変化とハイトグラフ

### 4, おわりに

本研究では、Diffusion Wave 法を用いた降雨流出解析によって得た地下水位の経時変化を用いて、斜面安定解析を行い安全率分布を求めた。これと地震時の安全率分布を比較することで、地震後の豪雨によって発生した斜面崩壊の支配的な要因は豪雨そのものであることを示した。一方で、実際は地震による土壌のかく乱と豪雨の両方の影響があったと推測される。これを究明するためには、さらなる詳細な検討が必要であり、今後の課題としたい。

#### 引用文献

堤大三・古谷元・権田豊ほか: 令和 6 年能登半島地震と奥能登豪雨によって発生した複合災害の調査および検討, 砂防学会誌, vol.78, No.6, p.52-63, 2026

堤大三・孝子綸図・山野井一輝・藤田正治: ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法, 砂防学会誌, Vol.72, No.2, p.3-13, 2019

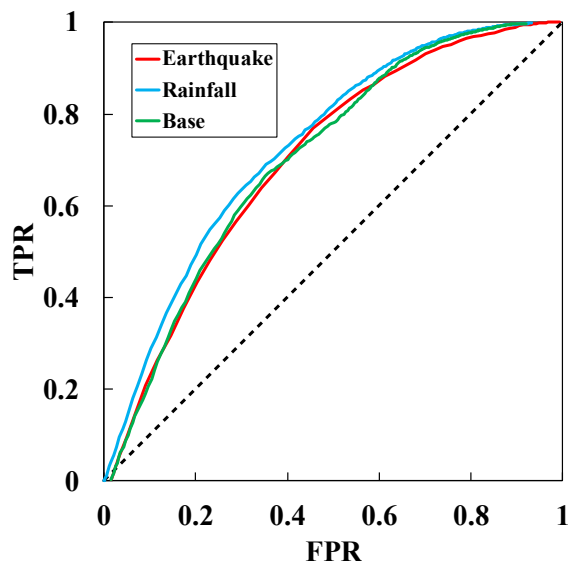


図-2 豪雨による崩壊箇所の安全率に関する ROC 曲線 (①豪雨水位, ②一定水位+地震, ③一定水位)