

根系による斜面安定性と崩壊後の土砂流動性の関係

Relationship between slope stability by root systems and mobility of landslide materials

名古屋大学生命農学研究科 ○五味高志・Gumbert Maylda Pratama
 ガジャマダ大学 Rozaqqa noviandi
 ノンフレーム工法研究会 岩佐直人
 日鉄建材株式会社 大高範寛・蓮沼佑晃

1. はじめに

植生根系による斜面安定性は鉛直根と水平根により作用し、鉛直根は土壌深 1.5m 程度で垂直方向の斜面安定性に影響し、水平根は隣接樹木の水平根の重なりによる斜面土壌を面的に補強する (Sakals and Sidle, 2004)。水平根の効果は、森林の立木密度により異なり、植生密度が高いほど、根の空間的な重なりが大きく、根の補強力が高まるとされている。阿部ら (2004) は、数値解析により間伐による樹木密度の変化および根系の重なりと斜面安定性についての評価を示した。

根系強度の増加は崩壊発生時間の遅れをもたらす。Cohen and Schwarz (2017) は数値計算により、根系の引っ張り強度の増加は、根系の変形抑制効果よりも崩壊発生時間を遅らせることを示した。また、樹木間隔が 3, 5, 7m と変化させることで、樹木間の根系の弱線の形成と斜面変形の時間が異なることを示した。立木密度の違いは、根系による選択流などの土壌中の水移動プロセス (宮前ら, 2012) に加えて、崩壊発生時間の違いによる崩壊発生時の土壌中の水貯留量にも影響すると考えられる。

崩壊発生時の土壌中の水の貯留量は崩壊発生の規模や崩壊土砂の流動性にも影響する。Noviandi et al. (2022) は、崩壊土壌中の体積含水率 60% を越えると流動距離が長くなることを示した。また、崩壊土砂に樹木が混在し、流動距離が短くなるとの報告もある (Koyanagi et al. 2020)。すなわち、降雨時の植生根系の役割を評価する場合、崩壊発生時の時間、土壌中の水貯留量、土砂の流動性を一体的に検討する必要がある。そこで、本研究は、水路実験により、植生密度と斜面崩壊の発生時間や規模、根系発達による土壌水分状況、さらには土砂の流動性を把握すること目的とした。

2. 研究方法

本研究は、1/70 縮尺の斜面水路を用いた降雨崩壊実験により実施した。斜面水路は、斜面部 (長さ 120cm, 傾斜 35°) と流動部 (長さ 150cm, 傾斜 35°) で構成されている。水路は、幅 80cm, 高さ 15cm, 厚さ 1cm のアクリル材

で作成した。斜面上部 2m に散水ノズル (直径 0.8mm) を設置した。流動部下端では斜面からの流出量を転換マスで計測した。斜面には密度 1.4 g/cm³, D₅₀0.23mm の川砂を深さ 10cm で、むらなく敷き詰めた。斜面部に植生なしの条件と豆苗 (エンドウ豆) を 1.5, 3, 5, 7, 14cm の間隔で配置した条件で崩壊実験を実施した。実験は、それぞれの 3 くり返した。豆苗は植栽後 2 週間で、高さ 25~30cm に達し、1/70 スケールでは、スギ林人工林 17.5~21m に相当する。すなわち、1.5, 3, 5, 7, 14cm の間隔で植生配置した条件で、立木密度 9070, 2267, 816, 416, 104 本/ha に該当する。散水前に地上部を刈り取り、根の効果のみを検証した。降雨強度 90mm/h で散水し、亀裂形成などの斜面変状、斜面崩壊までの時間を計測した。斜面表面に変位マーカーを配置し、実験中は、斜面上部と側面からビデオ撮影を実施した。

降雨時には、斜面上部・中心部・下部・左岸と右岸のそれぞれに、土壌表面から 3cm と 7cm の深さに TDR (Time Domain Reflectometer) を 10 箇所設置し、1 分間隔の体積含水率を計測した。崩壊後には、斜面の 9 箇所根系サンプルを採取し、根の長さや乾燥重量を測定した。総根量は、平均根量に単位面積当たり植生数を乗じた値に基づき計測した。根の重なりは、根長、植生間隔、側根の傾きから推定した。崩壊面積は、崩壊幅と崩壊斜面長の平均値から算出した。変位速度 (崩壊発生前の変形斜面の速度) の推定は変位マーカーを用い、移動速度はインターバルカメラを用い 20 秒間隔で測定した。崩壊土砂の移動時の摩擦係数 (H/L) は、総移動距離 (L) と土砂の落下高さ (H) から算出した。

3. 結果

植生密度の増加により斜面全体の根量 0.07~4.1 g, 総根長 90~3826×10³ mm, 根数 1.8~110.7×10³ は増加していた。植生なし状態では、平均 8.2 分後に崩壊が発生し、崩壊までの最大変位速度は 8~17 mm/分であった。崩壊面積は 3664~6050cm², 崩壊発生時の飽和域面積は 35~39cm² であった。崩壊土砂の移動距離は 23

～40cm であり、L/H 比は 1.4～1.6 の範囲内であった。

植生ありの条件では、土壌変位の開始は植生なしの条件より遅く、60～140 秒の間に発生した。最大変位速度は 32～90mm/分であり、密度が高い条件で高くなった。

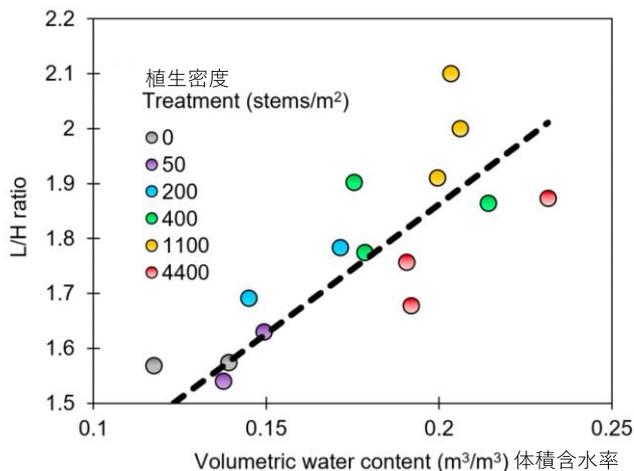


図 1 植生密度ごとの含水率と摩擦係数の関係

崩壊発生時間は平均 9～15 分と密度の増加により遅くなった。崩壊発生時の飽和帯面積は 36～485cm² であり、崩壊発生時の平均体積含水比は密度が高いほど高くなった(図 1)。崩壊土砂の移動距離は密度が高い条件(1.5cm 間隔)で 111～125cm と長く、密度が低い条件(14cm 間隔)で 43～58cm と短くなった。L/H 比は 1.4～2.1 であった。

4. 考察

斜面実験により植生根系は、含水量と飽和帯の形成に関連し、斜面の水文学的プロセスおよび崩壊発生の時間や規模に影響していた。発生時の平均含水比は、植生密度が高いほど高く、根による補強効果が大いことから土壌の不安定化には、より高い含水量と間隙水圧を必要となった(Cohen and Schwarz, 2017)。また、土壌中では根の周囲に沿った選択流が発生し(Ghestem et al. 2011)、土壌表面から下部への移動しやすいことから、根系密度が高いほど、飽和帯の形成時間が 1.1～1.4 倍速くなり、結果として崩壊時の飽和帯の形成面積も大きくなった。

植生密度は、崩壊時の土砂の流動性に影響を及ぼしていた。とくに、崩壊が遅延することで含水率が高くなり、最大変位速度と崩壊土砂の移動速度も高くなった。崩壊土砂の移動性は、崩壊発生時の土壌の水分状態に関係(図 1)し、土壌含水率が高いほど崩壊土砂の移動量が大きくなる(Bessette-Kirton et al. 2020)。すなわち、本研究でも含水率の増加により崩壊土砂の流動距離が長

く、L/H 比も増加したと考えられた。また、含水率の増加により根の結合効果を弱め(Hales and Miniati, 2017)、崩壊の流動性を高めることも考えられた。

5. まとめ

植生密度は根系により崩壊発生の遅延効果をもたらす効果がある一方、一旦崩壊が発生した場合、土壌水分が高く、土砂の流動性が高くなることが示された。このことから、森林の密度管理では、根系強度のみならず、土壌水分と崩壊時の流動性などを考慮していくことが必要であると考えられた。

引用文献

- 阿部和時・黒川潮・竹内美次. 2004. 間伐が森林の持つ表層崩壊防止機能に及ぼす評価手法の開発. 日本地すべり学会誌 41(3): 225-235.
- Bessette-Kirton EK, Coe JA, Schulz WH, Cerovski-Darriau C, Einbund MM. 2020. Mobility characteristics of debris slides and flows triggered by Hurricane Maria in Puerto Rico. *Landslides* 17(12): 2795-2809.
- Cohen D, Schwarz M. 2017. Tree-root control of shallow landslides. *Earth Surf. Dynam.* 5, 451-477.
- Ghestem M, Sidle RC, Stokes A. 2011. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability. *BioScience* 61(11): 869-879.
- Hales TC, Miniati CF. 2017. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability. *Earth Surf. Process. Landforms* 42: 803-813.
- Koyanagi K, Gomi T, Sidle RC. 2020. Characteristics of landslides in forests and grasslands triggered by the 2016 Kumamoto earthquake. *Earth Surf. Process. Landforms* 45(4): 893-904.
- 宮前崇・海勇輝・平松晋也. 2012. 樹木根系が雨水の鉛直浸透過程に及ぼす影響に関する実験的研究. 砂防学会誌 65(4): 39-44.
- Noviandi R, Gomi T, Kharismalatri HS, Sidle RC, Ritonga RP, Shiraki K. 2022. The mobility of landslides in pumice: Insights from a flume experiment. *Water* 14(19): 3083.
- Sakals ME, Sidle RC. 2004. A spatial and temporal model of root cohesion in forest soils. *Can. J. For. Res.* 34, 950-958.

Keywords: Forest density, Slope stability, Soil-water content, Flume experiment, Landslide mobility