

根系によるせん断抵抗力補強効果(ΔC)に対する植生密度と土壌水分の影響:室内実験による検証The effects of vegetation density and soil moisture on the root reinforcement (ΔC)

名古屋大学生命農学研究科

○五味高志・Gumbert Maylda Pratama

名古屋大学農学部

白井朋香

ガジャマダ大学

Rozaqqa noviandi

ハンプレーン工法研究会

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

植生は根系の強度とその広がり森林斜面における斜面安定性に影響する(Noviandi et al. 2025)。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)。一般に、斜面安定性評価における根系の効果は、せん断抵抗力補強効果(ΔC)として表される。 ΔC は根系構造や引張強度の計測結果とWWM(Wu et al., 1979)やRBMw(Schwarz et al. 2013)のモデルにより評価されている。

根系構造は植生密度により異なること(Suga et al., 1988)が報告されている。とくに、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が示されている。しかし、植生密度により異なる根系構造と補強効果(ΔC)の関係は評価されていない。また、根系がもたらす斜面安定性は土壌含水率の変化による土壌と根系の関係(Hales and Miniati, 2017)と関連しているとも指摘されている。そこで本研究では、 ΔC に対する植生と水分状態の影響を評価することを目的とし、(1)根系構造と植生密度の関係、(3)根系の強度と含水率の関係を把握し、植生根系による斜面安定効果を検討した。本研究は、根系構造の解明と斜面崩壊実験から ΔC を算出し、比較検討する。

2. 研究方法

本研究での根系構造の解明と斜面崩壊実験は、エンドウ(*Pisum sativum*)を用いた。800~2500cm²の容器に川砂を10cmの厚さで充填し、3、5、7cm間隔で植栽した。高さ200mmに成長後、10個体を採取し引張試験により断面直径(D)と最大耐荷重(F)の関係を把握した。また3個体を採取し側根の深度別根長と根元直径を計測し

た。得られた数値から Root Bundle Model- Weibull (RBMw; Schwarz et al., 2013)用いて ΔC を算出した。RBMw ではワイブル生存関数 $S(\Delta x^*)$ を用いることにより根系の弾性変異性を考慮しており、同直径における漸進的破断が再現されている。

$$F_{tot}(\Delta x) = \sum F(D_i, \Delta x) S(\Delta x^*) \quad (1)$$

ここで、 Δx :引張荷重による変位量、 $F_{tot}(\Delta x)$: Δx における根系の総耐荷重(N)、 $F(D_i, \Delta x)$: Δx における直径階級 i の耐荷重(N)であり、(1)式により算出された $F_{tot}(\Delta x)$ を崩壊地面積 A で除した値が ΔC となる。

$$\Delta C = \frac{F_{tot}(\Delta x)}{A} \quad (2)$$

斜面崩壊実験は名古屋大学東山キャンパス内に位置するガラス室内に構築されたアクリル製の模型斜面を用いて行った。模型斜面は幅 1m、斜面長 1.3m、傾斜 35度の崩壊斜面部と、幅 1m、斜面長 2m、傾斜 10度の土砂流動部から構成されている。根系の斜面安定化効果を評価するために、粘着力の小さい川砂を斜面土壌とした。川砂は平均乾燥密度 1.36 g/cm³、平均空隙率 45.1%、D50 1.0mm、最大粒径 2.0mm であった。崩壊実験は植生の有無の検証とし、植生ありではエンドウを 7cm 間隔で三角植えた。植生平均高 20cm となるように 2 週間程度斜面に生育させ、実験前に地上部を刈り取り根系のみとした。

崩壊斜面部下端から上方 1.6m の位置には口径 0.8mm の散水ノズルを 20 個設置し、降雨強度目標値 90mm/h とした。散水量を、流動部下端に設置した 50ml 転倒ます型量水計により 1 分間隔で計測・記録した。また斜面における体積含水率の空間的差異を把握するため、斜面上部、斜面中部、斜面下部と設定し、各位置の斜面底部に 3cm、7cm に静電容量式土壌水分計を設置した。安全率から ΔC を推定した。

3. 結果

根系構造では、主根の長さはほとんどの個体が 100m を超えていた。側根長さは、植生間隔が 3 から 7cm と長くなることで、長くなる傾向がみられた。いずれについても個体間のオーバーラップが確認され、主根からの距離が離れるにつれ根系断面積合計が逓減していた。しかし、逓減率は斜面位置、根系の伸長方向によって異なった。植栽間隔中央部の根系密度は $5.1 \times 10^2 \sim 5.9 \times 10^3$ 本/m²であった。全ての植栽間隔で最大耐荷重(F)は直径(D)に伴い上昇していた(図-1)。根系含水率が 10% 高い場合、根系強度が低下する傾向も確認できた。 ΔC は 30.5~304.6Pa であった。斜面崩壊実験の植栽間隔 7cm では 21~60mm の深度でオーバーラップ(22%)し、そのときの ΔC は 30.5 Pa であったと推定された。

植生なし条件では、実験開始から 6 分後に亀裂、9 分 30 秒で崩壊した。斜面崩壊の形状は一般的にみられる表層崩壊の形状である舌端状であり、滑り面は土層と模型斜面との境界面であった。崩壊地底面積が 0.64m²、側面積が 0.27m²であった。植生ありでは、実験開始から 8 分後に亀裂の発生が確認され、24 分で斜面崩壊した。崩壊規模は崩壊地底面積が 0.86m²、側面積が 0.30m²であった。植生有の崩壊時間が 2.5 倍に遅延し、崩壊面積は 1.3 倍になった。この際の ΔC は 24.7 Pa であった。

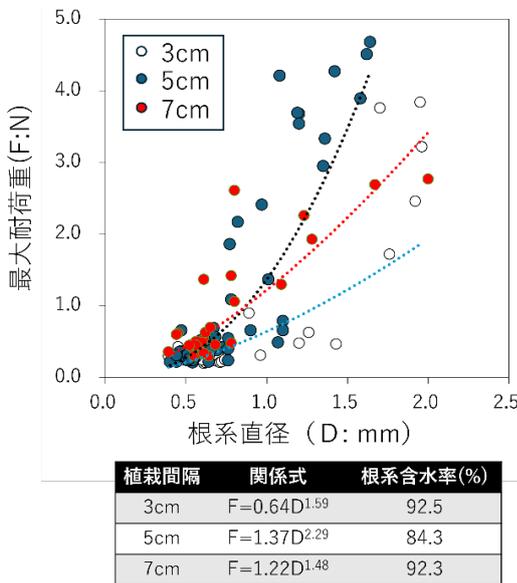


図-1 直径と耐荷重の関係

4. 考察

斜面崩壊実験の結果に基づく方法似対して、根系情報に基づく方法では 23%の過大評価があった。このような傾向は土田ら(2021)でも報告されている。根系構造からの ΔC に対して斜面崩壊実験による ΔC の値が小さ

くなる要因としては、土壌中の間隙水圧の上昇し、土壌全体のせん断強度が低下することが示されている(Wang et al. 2018)。これに加えて、本研究では、根系水分の上昇により根自体が水を吸収して膨張し、繊維構造が柔らかくなるため根系強度が減少することも考えられた。根系構造の解析から、根系の重なりは植生密度により異なるとともに、土壌中の水分による根系発達の違いが重要であることが示唆された。これらの結果は、根系の斜面安定性評価において、植生密度のみならず、植生立地や地形による土壌水分特性とそれに伴う根系発達を考慮する必要がある。これに加えて、降雨によって土壌水分量が増加し、根系強度および土壌-根系摩擦力の双方が低下し、 ΔC も低下すると考えられた。

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.

Hales TC, Miniati CF. 2017. Soil moisture causes dynamics adjustments to root reinforcement that reduce slope stability. *Earth Surface Processes and Landforms* 42: 803-813.

Noviandi R, Gomi T, Pratama GM, Ritonga RP, Fathani TF. 2025. Understanding the role of vegetation root systems in the initiation of rainfall-induced shallow landslides: scaling perspectives. *Journal of Forest Research*.

Sakals ME, Sidle RC. 2004. A spatial and temporal model of root cohesion in forest soils. *Can. J. For. Res.* 34, 950-958.

Suga T, Nemoto K, Abe J, Morita S. 1988. Analysis on Root System Morphology Using a Root Length Density Model. *Japanese Journal of Crop Science* 57: 749-754.

Schwarz M, Giadrossich F, Cohen D. 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Science* 17: 4367-4377.

土田海斗・平松晋也・林直希. 2021. 時間変化を考慮した樹木根系の崩壊抑制機能の適正評価に関する一考察. *砂防学会誌* 73:12-18.

Wu TH, McKinnell III WP, Swanston DN. 1979. Strength of tree roots and landslide on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* 19(1) 19-33.

Keywords: Root structure stability, Soil-water content, Flume experiment, Root cohesion