

樹木根系を考慮した斜面安定度評価の事例その1－神戸市北区有野町を対象にして－

株式会社ダイヤコンサルタント ○岡崎 敬祐
 兵庫県森林林業技術センター 藤堂 千景
 株式会社ダイヤコンサルタント 鏡原 聖史・根本 信行
 高橋 良輔・柳田 寛

1. はじめに

近年、激しい豪雨によって土砂災害が頻繁に発生している。特に、表層崩壊箇所では、滑落崖面に樹木の水平根の露出が多く認められ、破断またはゴボウ状に引っ張られた形跡がある。このことから、山腹斜面では、表層崩壊に対して樹木根系による崩壊防止あるいは変形抑制効果があると推察される。

本稿では、平成26年8月豪雨で発生した表層崩壊箇所を対象に、現地調査を行い、二次元飽和・不飽和浸透流解析により求めた透水パラメータを引用して、崩壊前の地盤内の水分状態（飽和度）を再現したモデル¹⁾で斜面安定解析を実施した。さらに、樹木根系の崩壊防止力を考慮したときの斜面の安定度について検討し、樹木根系の崩壊防止力が斜面の安定性に与える影響について評価した。

2. 調査地の概要

調査地は、兵庫県神戸市有野町の茶園谷上流部に位置する山腹斜面で、平成26年8月豪雨で崩壊した箇所である。調査地の地質は六甲花崗岩で、斜面表層にはまき土が分布している地域である。また、調査地の植生はアカマツ・モチツツジ群集である。

図1に調査地の状況写真を示す。崩壊規模としては、幅5m、高さ7m程度であり、崩壊厚さ1.0m程度の表層崩壊であった。滑落崖周辺にはアカマツが多く分布し、崖面には樹木の水平根が露出している状況が確認された。

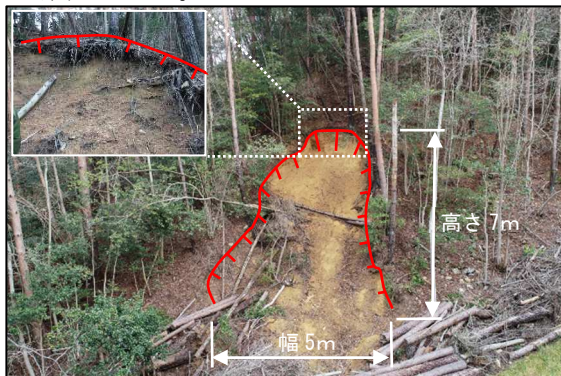


図1 調査地の現地状況

3. 現地調査

現地調査は、崩壊地と周辺の未崩壊地で実施した。まず、調査地周辺の崩壊土層厚を調べるために簡易動的コーン貫入試験を実施した。また、滑落崖では不攪乱試料をサンプリングして室内試験を実施し、崩壊土層の物理的・力学的特性について調べた。

次に、地盤内の樹木根系の分布を調べるために、崩壊地では滑落崖中央部で1断面、未崩壊地では幅

2.0m×深さ1.0m程度のトレンチを掘削して3断面分の根系分布調査を行った。

調査の結果、未崩壊地では1.5m程度まで $N_d \leq 5$ の緩い土層が分布しており、崩壊は $N_d \leq 5$ と非常に緩い土層内で発生していた。地盤材料の特性としては、周辺斜面で実施した複数個所の試験結果も含めて、一般的なまき土と同じ傾向が確認でき、土の単位体積重量 $\gamma_t = 14.0 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c_s = 0 \sim 10 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 34.9^\circ$ であった。

また、根系調査の結果からGL-0.6mの深度までに根系が90%以上分布する傾向にあることが分かった。

4. 斜面安定解析

斜面安定解析は、現地調査ならびに室内試験結果と、既往の二次元飽和・不飽和浸透流解析から求めた透水パラメータ¹⁾を引用して、崩壊前における平成26年月豪雨時の地盤内の水分状態を再現し、下式に示すスライス分割法²⁾を用いて実施した。

$$F_s = \frac{\sum (c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad \dots (1)$$

ここで、 F_s :安全率、 c :粘着力 (kN/m^2)、 ϕ :内部摩擦角 ($^\circ$)、 l :すべり面長 (m)、 u :間隙水圧 (kN/m^2)、 b :スライス分割片の幅 (m)、 W :分割片の重量 (kN/m) ($W = \gamma_t \cdot H$)、 γ_t :単位体積重量 (kN/m^3)、 H :崩壊土層厚 (m)、 α :斜面傾斜角 ($^\circ$)である。

計算は、図3に示すように、降雨前の状態(CASE1)と最大降雨(76mm/h)時ならびにその後の状態(CASE2~5)の5ケース実施した。

図2に安定解析モデルを示す。解析モデルは、兵庫県のレーザー計測結果³⁾(H23)から崩壊前の地形断面を再現して作成した。また、各計算ケースにおける飽和度分布に従い、地盤区分を行った。

想定すべり面は、崩壊後に実測した結果を用いて、滑落面は現地の崩壊状況からテンションクラックとして設定した。水位線は飽和度100%層の上端に設定した。なお、地盤物性値は室内試験結果を参考に、内部摩擦角は 34.9° 、単位体積重量と粘着力は飽和度によって変化させて設定した。

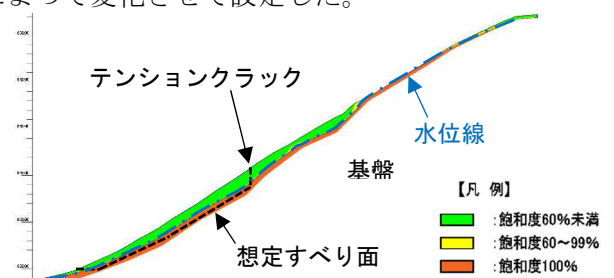


図2 安定解析モデル例 (CASE4)

図3に計算結果を示す。図中の黒線が斜面のみの安全率変化(F_s)であり、桃色線が樹木根系の崩壊防止力を考慮したときの安全率変化(F_s')である。樹木根系の崩壊防止力を考慮した場合については後述する。

計算結果より、斜面のみの場合、降雨が降る前のCASE1では安全率が1.7程度あったが、雨が降り始めて安全率が徐々に減少傾向を示し、最大降雨が降った後に急激に安全率が下がり、CASE4、5で安全率が1.0を下回る結果となった。この結果から、CASE2(最大降雨)以降は降雨により地下水位が上昇し、土の自重増加やサクシオン消失による土の粘着力の低下によって土塊が急激に不安定化したと推察される。

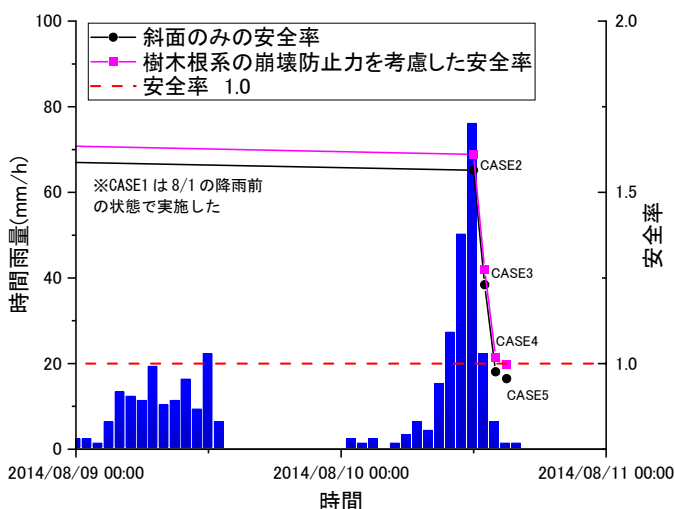


図3 降雨量と安全率の時間変化

5. 樹木根系の崩壊防止力の検証

斜面安定解析では、平成26年8月豪雨の最大降雨後に地下水位増加に伴う土塊自重の増加とサクシオン消失による粘着力の低下により、数時間の間に斜面が急激に不安定化し、安全率が1.0を下回る結果であった。ただし、図3の計算結果は土地盤のみの結果であり、樹木根系の崩壊防止力は見込まれていない。

そこで、安全率が1.0以下となったCASE4、5において、樹木根系の崩壊防止力を考慮した斜面の安定度について検討した。図4に樹木根系の崩壊防止力を考慮した安定解析の概念図を示す。

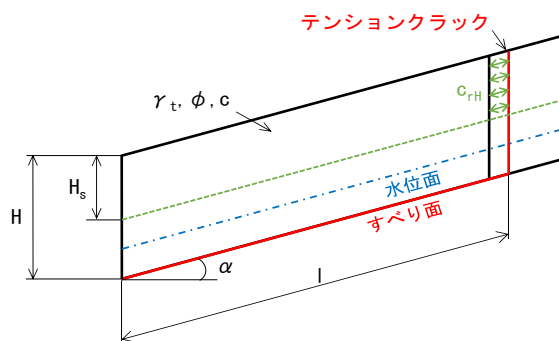


図4 樹木根系の崩壊防止力を考慮した解析概念図

次に樹木根系の崩壊防止力を考慮した安定解析の計算式を下記に示す。

$$F_s' = \frac{\sum (c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi) + c_{rH} \cdot H_s}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad \dots (2)$$

ここに、 c_{rH} : 樹木根系の崩壊防止力 (kN/m^2)、 H_s : 樹木根系の崩壊防止力を考慮する深度 (m) である。 H_s については、根系分布調査から根系が90%以上分布していたGL-0.6mに設定した。

また、樹木根系の崩壊防止力は、アカマツの引抜抵抗力算定式⁴⁾によって算出した値を調査断面積で除して、全調査断面で平均した粘着力として評価した。

$$F = 11.7 \times D^{1.59} \quad \dots (3)$$

ここで、 F : 根系の引抜抵抗力 (N)、 D : 根系の断面直径 (mm) である。

上式より、現地調査から推定した樹木根系の崩壊防止力は $c_{rH}=13.89\text{kN/m}^2$ であった。一方で、斜面安定解析でCASE4、5において算出した安全率から $F_s=1.0$ となるために必要な粘着力を逆算すると、CASE4は $c'_{rH}=7.83\text{kN/m}^2$ で、CASE5では $c'_{rH}=14.00\text{kN/m}^2$ であり、現地調査の結果から推定した値と概ね一致した。

さらに、樹木根系を考慮した斜面の安全率を計算すると、CASE4は $F_s=1.019$ 、CASE5は $F_s=0.999$ となった(図3参照)。樹木根系を考慮すると、斜面のみの安全率よりも全体的に3~5%程度大きくなる傾向にあるが、最大降雨後は同様に安全率が急減し、CASE5で1.0を下回る結果となった。

6. おわりに

表層崩壊地を対象に現地調査を行い、周辺の地盤状況や根系分布状況を調べた。次に、二次元飽和・不飽和浸透流解析の結果を用いて、豪雨災害時の地盤内の水分状態を推定したモデルで斜面安定解析を行った。計算の結果、最大降雨後に斜面が急激に不安定となり安全率が1.0を下回る結果であった。さらに、樹木根系の崩壊防止力を考慮した計算を行った。樹木根系がある場合、斜面のみの計算結果よりも安全率が高くなったが、結果としてCASE5で安全率1.0以下となった。今後も別の表層崩壊地を対象に樹木根系の崩壊防止力を考慮した計算事例を増やして樹木根系の崩壊防止力について評価する必要がある。

参考文献

- 1) 高橋ら：神戸市北区有野町を対象にした土壌水分計測と飽和・不飽和浸透流解析による評価の事例，砂防学会，2021.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路土工 切土工・斜面安定工指針(平成21年度版),p.399,2009.
- 3) G空間情報センター：兵庫県_全域数値地形図_ポータル、
<https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-potal>
- 4) 久保田遼・北原曜・小野裕：樹種による根系分布と引き抜き抵抗力に関する力学的評価，中部森林研究，55，pp.123-126，2007.