

調査・試験結果に基づいた広域の斜面崩壊危険個所と必要崩壊防止力分布図の作成

大日本ダイヤコンサルタント株式会社 ○岡崎 敬祐
 兵庫県農林水産技術総合センター森林林業技術センター 藤堂 千景
 大日本ダイヤコンサルタント株式会社 鏡原 聖史・根本 信行・坂東 聡
 柳田 寛・高橋 良輔・伊東 陽希

1. はじめに

近年、豪雨によって土砂災害が頻繁に発生している。特に、自然斜面における表層崩壊個所では滑落崖面に樹木根系の露出が多数確認され、樹木根系が斜面の移動に対して崩壊防止、あるいは変形を抑制する効果を発揮していると推察される。著者らは、主に花崗岩地域における自然斜面の崩壊地を対象に地盤内の水分状態の把握や樹木根系の崩壊防止力に関する調査を進めてきた。また、長期間に渡る現地調査や現地観測結果¹⁾²⁾から2次元・3次元飽和・不飽和浸透流解析や2次元斜面安定解析を行い、樹木根系の崩壊防止力が斜面安定に与える影響の定量的な評価³⁾⁴⁾を目指して模索している。

本稿では、これまでの調査観測、解析結果から得た知見をもとに、無限長安定解析を行い、広域斜面で表層崩壊の危険性が高い個所を抽出した。さらに、表層崩壊の危険個所に対して、崩壊しないために必要な崩壊防止力分布を推定したマップの作成事例について報告する。

2. 調査地の概要

調査地位置図を図1に示す。調査地は神戸市六甲山北部の標高600～700m付近に位置する山腹斜面である。調査地周辺の地質は古生代白亜紀に堆積した六甲花崗岩が主に分布する。周辺では、2014年または2018年の豪雨で崩壊した個所(調査地A～D)が複数確認される。

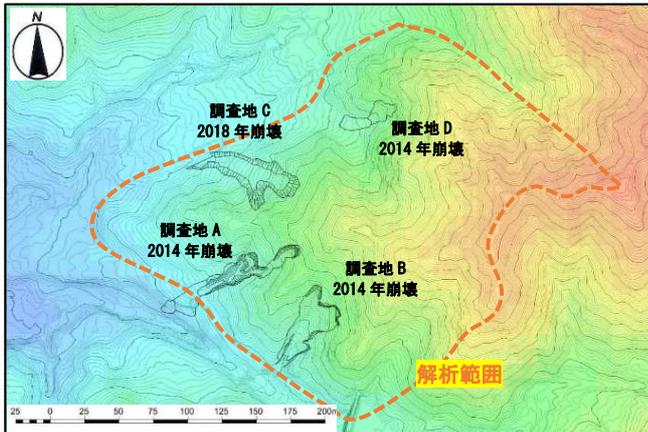


図1 調査地位置図

3. 現地調査ならびに現地観測

現地調査は地盤や植生状況ならびに根系分布状況を把握するために、地形測量、簡易動的コーン貫入試験ならびに土壌検査棒貫入試験(解析範囲内で10m×10m格子毎の土層厚分布の把握)、室内土質試験、現場透水試験、植生調査、根系分布調査、樹冠開空度調査等を実施した。調査の結果、土層厚分布、崩壊土層の地盤物性値、樹木の形状や密度、樹木根系分布状況、樹冠開空度

等の解析に必要な情報を取得した³⁾。特に根系分布調査結果から、既往研究⁵⁾に基づき、調査地における樹木根系の崩壊防止力 Δc_{rH} を計算すると $\Delta c_{rH}=11.8 \sim 14.1 \text{ kN/m}^2$ が得られた。

さらに、雨量計や土壌水分計等の観測機器を設置して、経時毎の降雨データや降雨時の地盤内の土壌水分状態をモニタリング¹⁾²⁾した。これらの観測データは解析を行う際の条件設定の基礎資料とした。

4. 崩壊イベントの予測解析

解析範囲での崩壊イベントの予測を行うため、10m×10mセル単位で無限長安定解析を実施した。安定解析式⁶⁾を以下に示す。なお、樹木根系の崩壊防止力は水平方向の粘着力増分 c_{rH} として計算している。根系の鉛直方向の粘着力増分 c_{rV} は、本調査地において c_{rH} に比べて斜面安定への影響が小さいと判断して、今回の計算には考慮していない。

$$F = \frac{c_s(t) + c_{rV} + A(t) \cos^2 \beta \tan \phi'}{B(t) \sin \beta \cos \beta} + \frac{c_{rH}}{B(t) \sin \beta} \cdot \frac{H_s}{D} \quad (1)$$

$$A(t) = q_0 + \gamma_t(t)(H - h(t)) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)(h(t) - z) \quad (2)$$

$$B(t) = q_0 + \gamma_t(t)(H - h(t)) + \gamma_{sat}(h(t) - z) \quad (3)$$

ここで、 F :安全率、 c_s :土の粘着力、 ϕ :土の内部摩擦角、 c_{rV} :根系鉛直方向の粘着力増分($c_{rV}=0$)、 c_{rH} :根系水平方向の粘着力増分、 q_0 :植生上載荷重($q_0=0$)、 γ_{sat} :土の飽和単位体積重量、 γ_t :土の湿潤単位体積重量、 γ_w :水の単位体積重量、 H :崩壊土層厚、 h :基岩からの浸透水位(解析値)、 z :基岩からすべり面までの高さ、 H_s :地表面からの植生侵入深さ、 β :斜面勾配、 D :セル幅である。

降雨条件は災害が発生した2014年8月の降雨³⁾とした。また、透水係数は当初、現場透水試験の結果⁷⁾から $k=2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ と設定した。ただし、この条件では、解析範囲全体の地下水位が高まり、広範囲で安全率 $F_s < 1.0$ となり、現地状況と乖離する結果であった。調査地Aの現地観測における地下水位形成過程は、降雨時に上昇した後、すぐに低下することから、地下水は地盤内を素早く流れると考えられる。本解析モデルでは地下水位の形成過程が現地と整合しない状況であったため、現地観測で確認した地下水位の反応と整合するように、解析モデルの透水係数($k=5.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)と有効降雨量(時間雨量の51.5%)を調整した。さらに、現地調査から樹冠開空度と材積量との関係を整理し、樹木による降雨遮断率⁸⁾を設定して、セル毎の材積量により入力降雨量の調整(有効降雨量の80～100%)を行った。なお、10mセル毎の材積量は既存調査結果⁹⁾を使用した。

地盤条件は現地で調べた土層厚分布や地盤材料特性

とした。ただし、3次元飽和・不飽和浸透流解析で谷部で集中的に飽和度が上昇する傾向が確認されており、土中の水分状態が飽和に近づくと、サクシオンが消失して土の見かけの粘着力は低下する。そこで、1mセル単位の水系網を使い、水が集中して流れる個所(崩壊地と集水面積の関係から集水面積600m²以上とした)では粘着力をc_s=0kN/m²とした。

また、解析における樹木根系の崩壊防止力c_{rH}は10mセル毎の材積量(m³/ha)から推定した。材積量とc_{rH}の関係式は現地調査結果をもとに相関を取り、近似した。なお、c_{rH}は降雨時に土中が飽和状態となると、70%まで低下する⁴⁾ことが知られており、降雨時の解析では70%低減した値とした。

安定解析結果を図3に示す。図3は樹木根系の崩壊防止力を考慮して斜面の安全率を計算した結果であり、2014年に崩壊した調査地A,B,D周辺では安全率1.0を下回っており、崩壊現象と整合的な結果であることを確認できた。また、調査地Cは2018年7月に崩壊しており、2014年8月の降雨では安全率1.0以上となり、崩壊しないことを確認した。

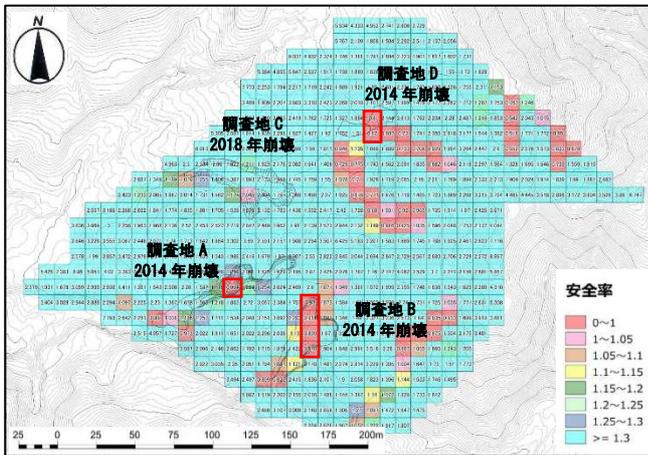


図2 災害降雨時(2014年)の斜面安定度評価結果

5. 必要崩壊防止力の推定と考察

既往研究³⁾では、崩壊地・未崩壊地に対して2次元断面における不飽和・飽和浸透流解析や斜面安定解析を行い、崩壊しないために必要な崩壊防止力c_{rH}を解析的に評価した事例が報告されている。

本検討においては、安全率1.0以下のセルに対して、崩壊しないために必要と推定される樹木根系の崩壊防止力c_{rH}について評価した。崩壊しないために必要と推定される樹木根系の崩壊防止力c_{rH}は、下式の通り、式(1)を変形し、Fs=1.0として算出した。

$$c_{rH} = \left(1 - \frac{c_s + c_{rv} + A \cos^2 \beta \tan \phi'}{B \sin \beta \cos \beta} \right) \cdot \frac{D}{H_s} \cdot B \sin \beta \quad (4)$$

図4に樹木根系の必要崩壊防止力推定マップを示す。図4では、崩壊地周辺や一部の斜面で安全率が1.0となるために必要なc_{rH}が示されている。ここで、先述した根系分布調査から、調査地の樹木根系の崩壊防止力Δc_{rH}'=8.3~9.9kN/m²(飽和状態として70%に低減したΔc_{rH})が得られている。これらと比較すると、式(4)で算

出したc_{rH}が現地で調べたΔc_{rH}'未満のセルは樹木が健全であれば、樹木根系の崩壊防止力のみで斜面の安定を担保できる斜面であると判断でき、森林整備等の事業推進が望まれる。一方で、c_{rH}が現地のΔc_{rH}'以上のセルについては、現在の樹木根系の崩壊防止力のみでは斜面が崩壊する危険性があるため、追加で抑止対策工の検討が望まれる範囲と判断できる。

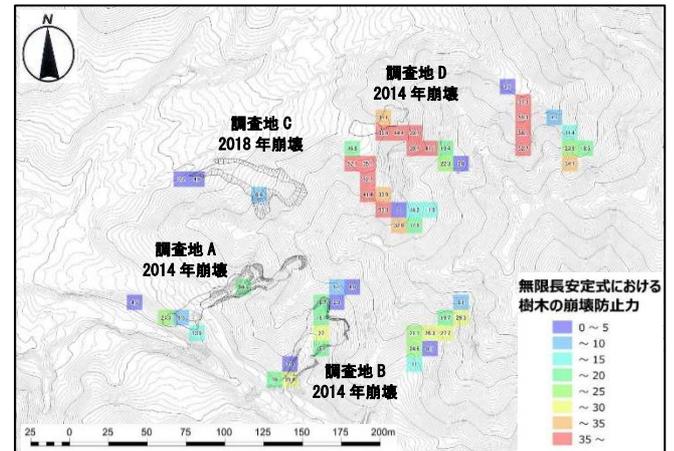


図3 必要崩壊防止力推定マップ

6. おわりに

これまでの調査・観測結果に基づいて、レーザー計測データも活用しながら、広域斜面の中で危険個所を抽出を行った。また、危険個所に対して、樹木根系の崩壊防止力c_{rH}を逆算し、現地で調べたΔc_{rH}'と比較することで、必要な対応策を評価できるマップを作成した。引き続き、本手法を検証して、現地と比較しながら妥当性について吟味したい。

参考文献

- 1) 高橋ら：2019年～2022年の被覆工設置斜面におけるモニタリング計測結果，第58回地盤工学研究発表会，11-7-4-02，2023。
- 2) 高橋ら：樹木根系が地盤内の体積含水率変化に及ぼす影響，R6年度砂防学会研究発表会概要集，p561，2024。
- 3) 岡崎ら：豪雨による斜面崩壊地と未崩壊地を対象とした樹木根系の崩壊防止力の推定，第12回土砂災害に関するシンポジウム論文集，p31-36，2024。
- 4) 柳田ら：水みちのモデル化が斜面崩壊時の水分状態推定に与える影響，第59回地盤工学学会研究発表会，2024。
- 5) 北原曜：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，No. 311，p11-37，2010。
- 6) 鳥居ら：樹木根系による粘着力増分を考慮した無限長斜面安定解析式の提案，建設工学研究所論文報告集第63号，p75-85，2021。
- 7) 高橋ら：携帯型ミニディスクインフィルトレーターを用いた崩壊地周辺の現場透水係数の把握事例，R4年度砂防学会研究発表会，p2-10，2022。
- 8) 森林水文学，森林水文学編集委員会，p159，2007。
- 9) 令和元年度六甲山系流木量調査業務成果，六甲砂防事務所，2019。