

豪雨による自然斜面の崩壊に対する樹木根系の崩壊防止力の推定—未崩壊斜面からの推定—

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・坂東 聡・柳田 寛
 根本 信行・高橋 良輔・伊東 陽希

1. はじめに

近年では、激しい豪雨が各地で発生しており、土砂災害が頻発している。表層崩壊が発生した箇所では、滑落崖に多数の樹木根系が露出している。また、滑落崖周辺の地盤に亀裂が発生しており、根系が引っ張られ、土塊の移動を食い止めている事例も認められる。このことから、豪雨によって山腹斜面が崩壊する際には、地盤内の樹木根系による崩壊防止・抑制効果が働いているものと推察される。

著者らは崩壊斜面を対象に樹木根系の崩壊防止力について調査検討を進めてきた。本稿では、花崗岩地域における自然斜面で2014年8月に発生した表層崩壊地と未崩壊地に着目して、現地調査や現地観測から得られた知見をもとに、2次元ならびに3次元飽和・不飽和浸透流解析¹⁾や2次元斜面安定解析を行い、これらの検討結果から解析上で崩壊・非崩壊の要因について考察し、樹木根系の崩壊防止力が斜面安定に与える影響について評価した事例を報告する。

2. 調査地の概要

調査地周辺の地形図を図1に示す。調査地は神戸市の六甲山北部の標高600~700m付近に位置する山腹斜面地である。調査地の北側には北東-南西方向のリニアメント(射場山断層、湯槽谷断層)が周辺の地形を切断するように分布している。また、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。

今回の対象斜面を図2に示す。2014年~2018年に崩壊した斜面が複数箇所確認されるが、本検討では同じ谷地形で斜面規模(幅10m、土層深1~2m程度)や傾斜(35°程度)が類似していた調査地A(崩壊地)と調査地B(未崩壊地)を対象とした。

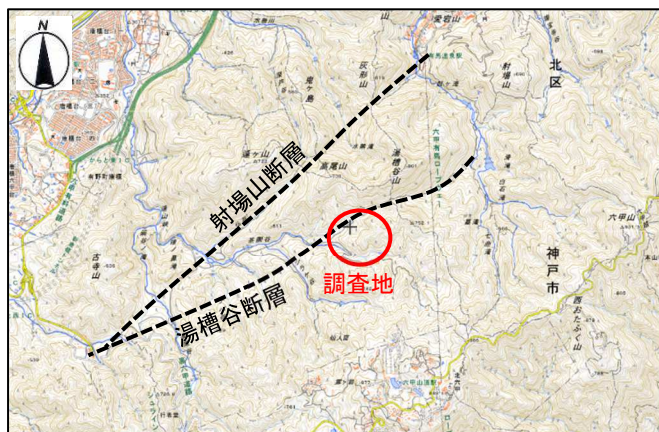


図1 調査地位置図²⁾

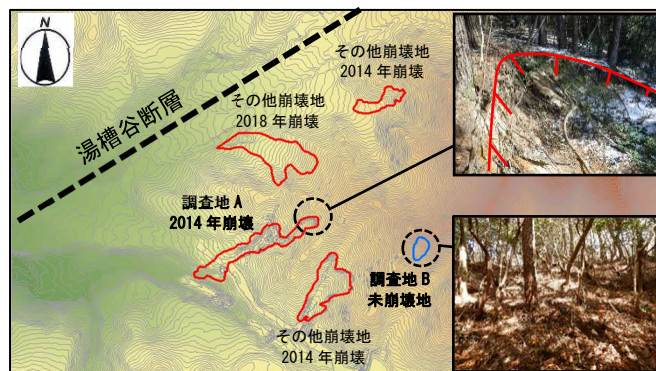


図2 検討対象斜面

3. 現地調査

現地調査は調査地A、Bの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、室内試験、植生調査、根系トレンチ調査等を実施した。

各種調査の結果から、図3に示す調査断面図を作成した。調査地の地盤は簡易動的コーン貫入試験や地形測量からA0層(腐葉土層)、A層($N_d \leq 10$)、B層($10 < N_d \leq 30$)それ以深は基盤層と定義した。また、室内土質試験結果から地盤材料の単位体積重量 $\gamma_t = 14.0 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $c_s = 0 \sim 10 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi_s = 34.9^\circ$ が得られた。

根系分布調査は幅2m×深さ1m程度のトレンチ掘削を行い、掘削面に分布する根系の位置や直径等を調べた。調査の結果、樹木根系の主な侵入土層はA層で、特にGL-60cmまでに調査断面の内の80~90%程度の根が分布しており、密度が高かった。

また、調査地周辺に雨量計や土壌水分計等を設置することで降雨データや降雨時の地盤内の土壌水分状態を現地観測³⁾した。これらの観測データは浸透流解析を行う上で、条件設定の基礎資料として整理した。

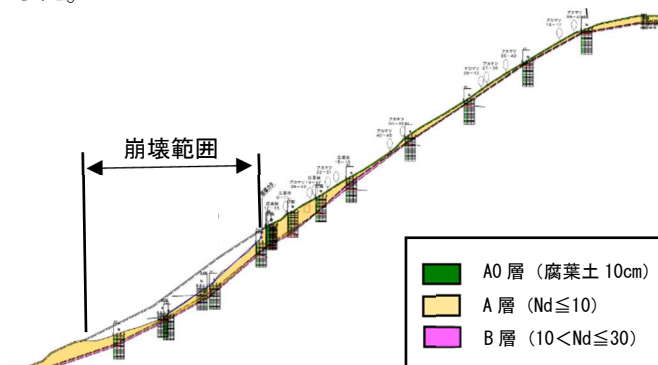


図3 調査断面図例(調査地A)

4. 斜面安定解析（崩壊イベントの予測）

現地調査ならびに現地観測結果のデータをもとに、3次元飽和・不飽和浸透流解析や2次元飽和・不飽和浸透流解析を実施し、調査地Aが実際に崩壊した際の降雨（2014年8月1日～8月11日）を入力して、その時の調査地AならびにBの主断面における地盤内の水分状態を予測した。

浸透流解析結果から得られた断面上の飽和度分布に基づき、斜面安定解析のモデル化を行った。解析モデルは最大降雨量を観測した付近で1時間毎に推移する飽和度分布を参考に地層区分を行い、地盤物性値は飽和度に基づき設定した。具体的には、室内試験から求めた地盤物性値に対して、飽和度が高い場合は単位体積重量が増加し、粘着力が低下するように補正を行い、計算した。なお、安定計算式は一般的に知られる簡便法を用いて計算した。

各調査地の最大雨量観測時（T=228）における解析結果を図4に示す。また、図5に各時間毎の斜面の安全率の推移を示す。調査地Aは最大降雨量観測時には安全率が1.0を下回っており、崩壊した事実と整合して、崩壊範囲と最大抑止力円弧も概ね一致した。一方で、調査地Bは最大降雨量観測時でも安全率が1.0以上であり崩壊しない事実と整合した。

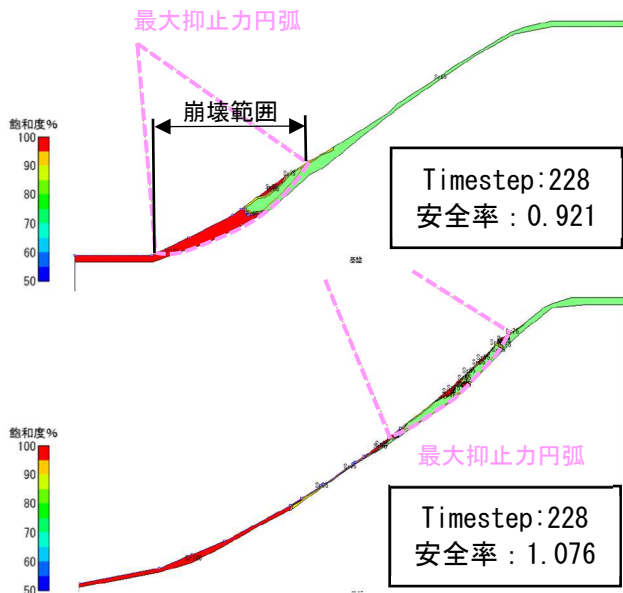


図4 解析結果（上：調査地A、下：調査地B）

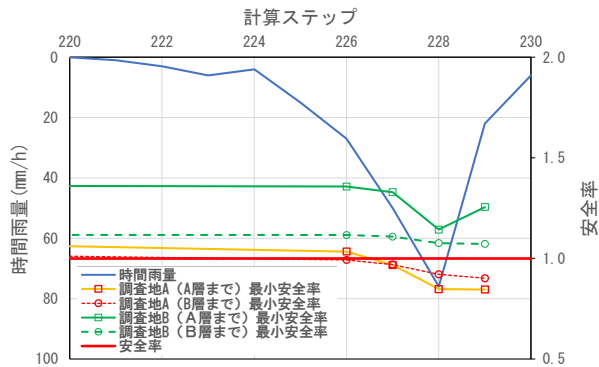


図5 時間毎の安全率の推移

5. 樹木根系の崩壊防止力に関する考察

地盤内の水分状態の違いを考慮した斜面安定解析から調査地A、Bの崩壊・非崩壊について再現できた。次に、樹木根系の崩壊防止力が今回の崩壊に対してどの程度寄与したかについて考察した。

解析結果から調査地Aが崩壊しない（ $F_s=1.0$ ）ための必要抑止力を求め、必要抑止力を根系侵入層0.6mで除して、崩壊地における必要粘着力 ΔC_{rh-LL} を求めた。解析で求めたこの必要粘着力に対して、現地調査から調べた本調査地の樹木根系の崩壊防止力（ $\Delta c_{rh}=9.9\sim 14.1\text{kN/m}^2$ ）を比較した。なお、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⁾によって算出された引抜抵抗力（kN）を根系調査断面積（ m^2 ）で除して粘着力（ kN/m^2 ）として評価している。解析結果の必要抑止力から求められる必要粘着力は $\Delta C_{rh-LL}=3.7\sim 42.7\text{kN/m}^2$ であり、現地調べた樹木根系の崩壊防止力よりも大きく上回っていることがわかる。ここで算出された樹木根系の崩壊防止力は飽和度が高まるほど低下することを考慮している。

以上のことから、調査地Aでは2014年8月の最大降雨量観測時付近で地盤内の飽和度上昇に伴う土塊自重の増加やサクシオン喪失による粘着力の低下により斜面が急激に不安定化して、樹木根系の崩壊防止力の効果を上回るほどのすべり力が発生したため、崩壊が発生したと考察される。一方で、未崩壊地であった調査地Bは、斜面の安全率が調査地Aよりも高く樹木根系の崩壊防止力の効果も合わさって崩壊しなかったと推察される。

6. おわりに

地盤内の飽和度分布から斜面安定解析を行った結果、地盤内の水分状況の違いから崩壊地と未崩壊地の災害時の状況を解析的に表現できた。

今後も他の箇所において、同様のアプローチで整理し実現象と整合するか、また、樹木根系の崩壊防止力が効果的に発揮されているかについて検証する必要がある。

参考文献

- 1) 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回地盤工学研究発表会，2024。
- 2) 国土地理院：地理院地図（電子国土WEB），https://maps.gsi.go.jp/#15/34.778037/135.238729/&base=std&ls=std%7Cchillshademap%7Ccanaglyphmap_color%7Cgazo1&blend=000&disp=1000&vs=c1g1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=m（令和6年4月確認）。
- 3) 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。
- 4) 北原曜：森林根系の崩壊防止機能，中部森林研究，311，pp.13-25，2009。