

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

ESTIMATION OF THE ABILITY OF TREE ROOT SYSTEMS TO PREVENT
COLLAPSE OF SLOPE COLLAPSED AND UNCOLLAPSED AREAS DUE TO
HEAVY RAINFALL

岡崎 敬祐¹・藤堂 千景²・鏡原 聖史¹・坂東 聡⁴・根本 信行³

柳田 寛⁴・高橋 良輔³・伊東 陽希¹・池田 智博¹

Keisuke OKAZAKI, Chikage TODO, Satoshi KAGAMIHARA, Satoshi BANDO, Nobuyuki NEMOTO, Hiroshi YANAGIDA, Ryosuke TAKAHASHI, Haruki ITO and Tomohiro IKEDA

¹大日本ダイヤコンサルタント株式会社 神戸支店 (〒651-0085 神戸市中央区八幡通 3-2-5)

E-mail: okazaki_keisuke@dcne.co.jp

²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 (〒671-2515 宍粟市山崎町五十波 430)

³大日本ダイヤコンサルタント株式会社 関東支社 (〒331-0811 さいたま市北区吉野町 2-272-3)

⁴大日本ダイヤコンサルタント株式会社 地圏環境事業部 (〒331-0811 さいたま市北区吉野町 2-272-3)

Key Words: Slope failure, stability analysis, infiltration flow analysis, tree root systems

1. まえがき

近年、豪雨による自然斜面の表層崩壊が多発している。特に、平成 26 年(2014)年 8 月に発生した台風 11 号・12 号および前線による豪雨では、西日本の広範囲で大規模な土砂災害が発生した。兵庫県でも被害は甚大で、丹波市や神戸市の六甲山周辺の山腹斜面で表層崩壊が同時多発的に発生した。表層崩壊地の滑落崖を観察すると、多数の樹木根系が崩壊面から露出しているところや亀裂部で根系が引っ張られながら土塊の移動を抑制している状況が確認された。このことから、山腹斜面で表層崩壊が発生する際には、地盤内に存在する樹木根系が崩壊の防止または抑制に寄与していると考えられる。

阿部¹⁾は斜面表層において土のせん断抵抗力に加え、根系による補強効果が期待でき、斜面の強度が根系によって補強されるといった力学的な関係を提案している。また、北原²⁾は樹木根系の侵入が難しい崩壊深さ 1.0~1.5m 以上の崩壊や基盤面が浅い岩盤斜面の場合、鉛直根の崩壊防止力は発揮されないが、3 次的に崩壊周囲の側壁面に広がる水平根のせん断抵抗力が発揮されることを指摘している。

これらの研究成果を基に、林野庁や自治体では、「災害に強い森づくり」の事業³⁾を進め、人命や下

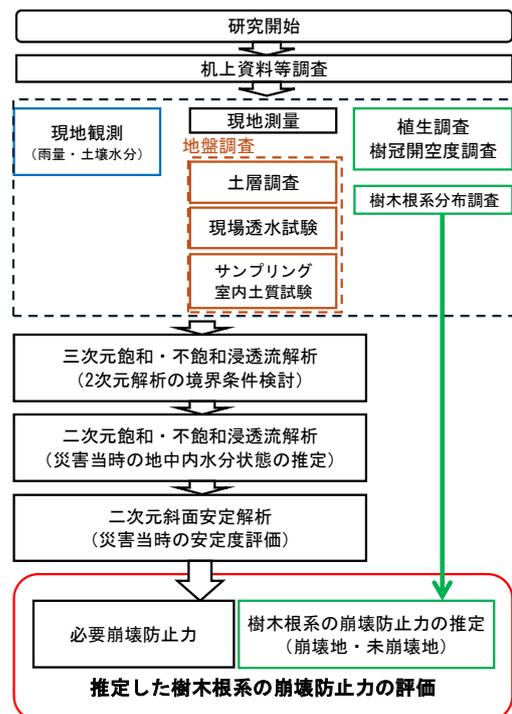


図-1 研究フロー

流の住家等に被害を及ぼす危険性が高い流域の森林を対象に、本数調整伐、土留工の設置、倒木の危険性が高い大径木の伐採等を行い、斜面崩壊防止力と土砂流出防止機能の向上を図る取り組みを行っている。ただし、山地斜面における樹木根系の崩壊防止力がどの程度か定量的に評価されていないのが現状である。定量的に評価するためには、樹木根系の崩壊防止力がどの程度発揮されたかを、崩壊斜面や非崩壊斜面を対象に検討することが重要と考える。

そこで、本報告では、図-1のフローに従い、平成26(2014)年の豪雨によって六甲山系で発生した表層崩壊地と未崩壊地を対象に、樹木根系の分布状況から既往文献を参考に樹木根系の崩壊防止力を推定した。また、地盤調査(土質調査、現場透水試験、サンプリング・室内土質試験等)や現地観測の結果から得られた知見に基づき、豪雨時の地盤内の水分状況をシミュレーションし、斜面の安定解析を行い、必要崩壊防止力を算定した。以上の結果から、推定した樹木根系の崩壊防止力について考察を加えた。

2. 調査地概要

(1) 地形・地質・植生分布(机上資料等調査)

調査対象地は兵庫県神戸市北区有馬町唐櫃地区で、平成26(2014)年に崩壊が発生した山腹斜面地周辺である。調査地周辺の地形図⁴⁾を図-2に示す。調査地は六甲山北部の標高600~700m付近に位置しており、北側に北東-南西方向のリニアメント構造(射場山断層、湯槽谷断層)が判読されている。周辺の地質⁵⁾は、中生代白亜紀に貫入した六甲花崗岩(Rg:黒雲母花崗岩)が主に分布する。植生については、植生図⁶⁾によると、二次天然林のアカマツ-モチツツジ



図-2 地形図(国土地理院地図⁴⁾より作成)

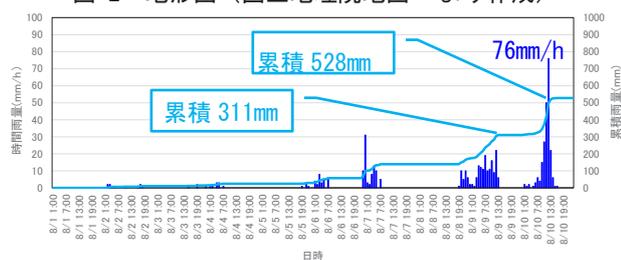


図-3 災害時の降雨データ(解析雨量)

群集が分布しているとされている。

(2) 災害降雨

災害時の降雨状況(平成26(2014)年8月の解析雨量)を図-3に示す。この降雨の特徴としては、一連の降雨の前半で累積雨量311mmに達した後、8月10日13時頃に時間雨量76mm/hという激しい降雨となり、最終的には、累積雨量528mmとなった。

(3) 検討対象斜面

調査対象とした斜面の位置図を図-4に示す。対象斜面は平成26(2014)年8月豪雨で崩壊した「調査地A」と未崩壊地である「調査地B」とした。

調査地Aは崩壊幅10m、崩壊深さ1~2m、斜面傾斜35度程度の0次谷地形を呈している。滑落崖には周辺に群生するアカマツの水平根が多く露出していた。一方で、調査地Bは、調査地Aと斜面傾斜や0次谷地形などの地形的な特徴が同様である箇所として選定した。

3. 地盤調査および植生・樹木根系分布調査

(1) 土層調査

調査地Aの主断面図を図-5に示す。調査地AおよびBの主断面上では、解析の基礎資料とするために、簡易動的コーン貫入試験を実施し、土層の分布状況を調べた。調査の結果、調査地Aの崩壊地上部では1.0~2.0m程度の潜在崩土層($N_d \leq 10$ ⁷⁾の土層が確認された。また、調査地Bでも調査地Aと同程

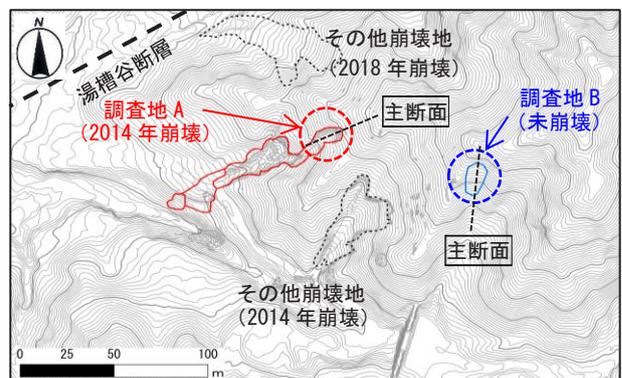


図-4 調査対象斜面の位置図

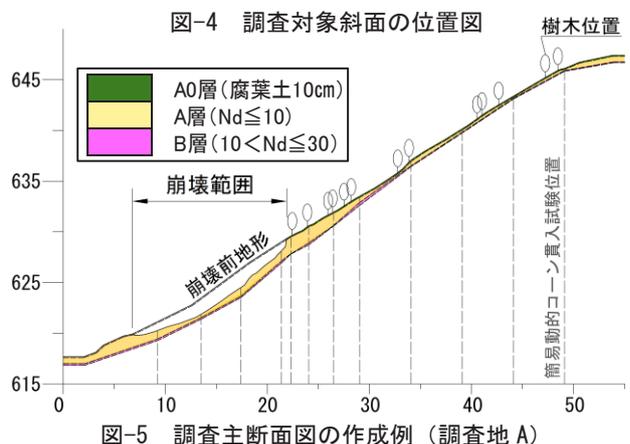


図-5 調査主断面図の作成例(調査地A)

度の潜在崩土層を確認した。また、別途行ったトレンチ調査の結果も踏まえて、表層から GL-0.1m を腐葉土層 (A₀層)、Nd≤10 の土層を A 層、10<Nd≤30 の土層を B 層、それ以深は基盤層と区分した。崩壊前地形は航空レーザ測量データ⁸⁾ から復元した。

(2) 現場透水試験及びサンプリング・室内土質試験

調査地 A および B の潜在崩土層 (崩壊地は崖面、未崩壊地は A 層) を対象に φ0.2m、高さ 0.2m の乱れの少ない試料を採取し、物理試験、強度試験を実施した。試験の結果、地盤材料は粘性土混じり礫質砂、湿潤密度 ρ_r=1.39~1.66g/cm³ であった。また、一面せん断試験および三軸圧縮試験の結果、粘着力 0~10.5kN/m²、内部摩擦角 29~42°程度 of せん断強度が得られた。特に、粘着力は飽和状態で消失することを確認した。さらに、現場透水試験⁹⁾ を行い、土層と基盤層の透水性を確認した (表-1 参照)。

(3) 植生調査および樹冠開空度調査

調査地 A および B 周辺の樹木の位置、樹種、樹高、胸高直径を計測した。調査地では優占種であるアカマツが多く分布していた。調査地 A のアカマツは、平均樹高 16.8m、平均胸高直径 34.5 cm 程度であった。一方で、調査地 B のアカマツは、平均樹高 13.4m、平均胸高直径 26.5cm と、調査地 A より若干小さい傾向であった。ただし、形状比 (胸高直径を樹高で除した値) では、どちらも 50 程度となり、形状的に類似したアカマツが分布する傾向が確認された。アカマツの分布密度は、どちらの調査地も 100m² 当たり 5~6 本程度であった。また、調査地 A および B の樹冠開空度を調査した。調査は 360°カメラ (instaX3) を用いて画像を取得し、全天写真解析プログラムを用いて樹冠開空度を整理した。その結果、調査地 A は開空度 20%、調査地 B は開空度 12% であり、調査地 A のほうが、調査地 B より樹冠開空度が高いことが分かった。

(4) 樹木根系分布調査と崩壊防止力の推定

地盤内の樹木根系の分布を把握するため、調査地 A および調査地 B でアカマツを対象に樹木根系分布調査を行った。調査地 A の崩壊地では、滑落崖面を幅 2.0m×深さ 1.0m 程度に整形し、断面内に分布する根系の位置、本数、直径を計測した。さらに、未崩壊斜面では、アカマツの立木間中央付近に幅 2.0m×深さ 1.0m のトレンチを掘削して同様の調査を行った。調査地 B では、未崩壊斜面でアカマツの立木間中央付近に幅 2.0m×深さ 1.0m のトレンチを掘削して同様に根系の分布状況を調べた。

アカマツの根系の引抜抵抗力は、既往研究^{2),10)} に

基づき、式 (1) から推定した。この式は、アカマツ林における根系の引抜試験結果を整理したものである。

$$F = 11.7 \times D^{1.59} \quad (1)$$

ここで、 F : 根系の 1 本当たりの引抜抵抗力 (kN/本)、 D : 根系の断面直径 (mm) を示す。

次に、樹木根系の崩壊防止力は、崩壊面に対して面的に機能することを考慮して、根系の引抜抵抗力の総和を断面積で除して算出した。ここで、根系の侵入層は概ね 0.6m 以浅に分布していたため、断面積は 1.2m² とした。この結果、単位面積当たりの根系の崩壊防止力は、調査地 A で $\Delta C_{thA}=11.3\sim 21.3\text{kN/m}^2$ 、調査地 B で $\Delta C_{thB}=15.6\sim 21.1\text{kN/m}^2$ が推定された。

4. 現地観測

調査地 A および B では、令和元 (2019) 年 4 月以降に雨量計と土壌水分計を設置して地盤内の水分状態を観測している。また、調査地 A では令和元 (2019) 年 9 月に崩壊地で被覆工を敷設し、それ以降、被覆工の雨水浸透効果¹¹⁾の継続的な観測を行っている。

図-6 に調査地 A の土壌水分計設置の状況を示す。土壌水分計は meter 社の EC-5 を使用して、測線上の被覆工内外 2 箇所 で体積含水率を計測 (計測間隔 10 分) した。計測結果から、被覆工内に設置した土壌水分計 (C-1) は、通常の降雨では体積含水率に変化はないが、豪雨時に GL-0.8m の深度のみで反応する傾向¹²⁾が観察され、基盤層の境界に高透水層が存在することが示唆された。また、調査地 B では根系近くの体積含水率が根系侵入の少ない土層よりも早く上昇する様子が観察¹³⁾された。このことから、根系が土壌パイプとして機能することが示唆された。

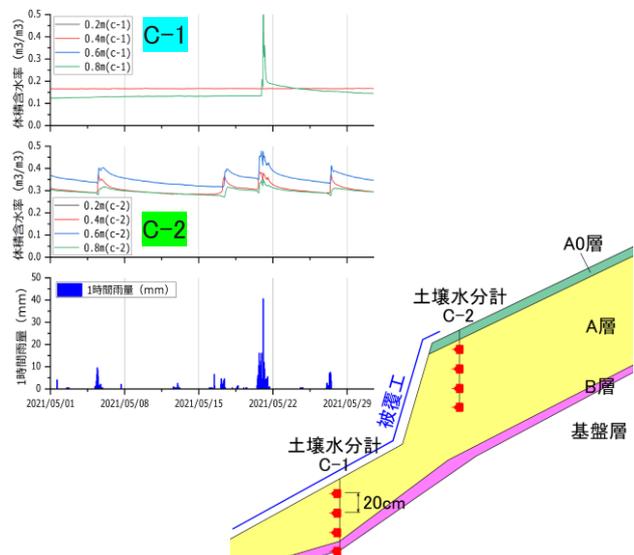


図-6 調査地 A の土壌水分観測結果例 (縮尺 Free)

5. 飽和・不飽和浸透流解析

5.1 概要

平成 26 (2014) 年 8 月豪雨時における飽和・不飽和浸透流解析を実施し、斜面安定解析で用いる飽和度分布を推定した。飽和・不飽和浸透流解析は、広域の三次元飽和・不飽和浸透流解析と狭域の二次元飽和・不飽和浸透流解析の 2 段階で行った。はじめに、三次元飽和・不飽和浸透流解析を調査地を含む広域で実施し、集水域全体の流れ場を把握した。次に、調査地 A および B では、主断面上の土層厚の情報が詳細に得られていたことから、三次元飽和・不飽和浸透流解析で得られた豪雨時の地中内における水分状態の変化に関する知見を活用して、調査地 A および B の主断面で二次元飽和・不飽和浸透流解析を実施した。なお、解析コードは浸透流・移流分散解析コード「Dtrans-2D・3D・EL」¹⁴⁾を使用した。

5.2 三次元飽和・不飽和浸透流解析

(1) 解析条件

森林斜面の土層内部は、樹木根系やその腐朽、地中の小動物の活動、土層中の礫の存在等の影響で不均一性が大きいことが知られている¹⁵⁾。本検討では、観測結果から示唆された高透水層を斜面に沿った面的な水みち（以下、斜面水みち）、土壌パイプによる不均一性を鉛直方向の線的な水みち（以下、鉛直水みち）として解析モデルに考慮した。さらに、樹冠開空度調査結果や地形 DEM⁸⁾を活用して、樹冠遮断や地形の集水効果による地上部の不均一性も考慮した。これによって、地中および地上部の不均一性を両方表現した三次元飽和・不飽和浸透流解析を実施した。図-7 に三次元解析モデル¹⁶⁾を示す。平面の解析領域は、調査地 A および B を含む集水域を基本として 400m×280m の範囲を設定した。鉛直方向の解析領域は、現場透水試験結果⁹⁾から土層と基盤層の境界を水理学的な不連続面と考え、地表面から基盤層上面までの土層（20m または 10m 格子で実施した簡易動的コーン貫入試験ならびに土層強度検査棒により設定した）のみをモデル化し、モデル底面を不透水境界とした。また、斜面水みちは基盤層上面に 0.2m の厚さで、鉛直水みちは 10m×10m の平面メッシュに 0.2m×0.2m の大きさで 1 箇所モデル化した。鉛直水みちからの流入量は、既往文献¹⁷⁾を参考に、降雨の 15% が樹幹流となり、樹幹流が全て鉛直水みちから流入することを想定した。地表面は降雨浸透境界とし、樹冠遮断および地形の集水効果による地上部の不均一性を簡易的に考慮した。樹冠遮断による影響は、既往文献¹⁵⁾を参考に降雨の 20% 程度（開

空度 0%) と考え、解析領域全体の樹冠遮断率として、現地計測した樹冠開空度から調査地 A で 16%、調査地 B で 18% と推定した。地形の集水効果は、10m 格子単位の水系網図⁸⁾を用いて、地表面に到達した雨水を再配分することで考慮した。

(2) 解析結果

解析の結果、最大降雨時には谷の地表面の飽和度が高くなった。時系列で見ると、降雨が強くなるにつれて、谷の下流から上流に向かって飽和度の高い領域が広がる傾向が確認できた。この結果から、谷付近の飽和度は高まりやすい傾向が示唆されており、標高が低く下流の谷に近い調査地 A の方が、標高が高い調査地 B と比較して不安定な状態であったことが推察される。沖村ら¹⁸⁾は、六甲山系で降雨時に谷の下流から上流に向かって水位が上昇していく様子を報告しており、今回の解析結果と近い傾向を示している。以上のことから、本モデルの飽和度上昇過程は、崩壊当時の水分状態の傾向を再現していると考え、二次元飽和・不飽和浸透流解析モデルでも近い挙動を示すように境界条件を設定することとした。

5.3 二次元飽和・不飽和浸透流解析への適用

(1) 解析条件

二次元飽和・不飽和浸透流解析は、詳細な土層厚分布を把握している調査地 A および B の主断面で実施した。解析に用いる物性値や降雨浸透率は、三次元飽和・不飽和浸透流解析モデルと同様とした。また、鉛直水みちの位置は、現地で実測した樹木位置とし、崩壊地内で樹木位置が不明な箇所は、崩壊地周辺の樹木密度を考慮して設定した。三次元飽和・不飽和浸透流解析結果で確認された谷の下流から上

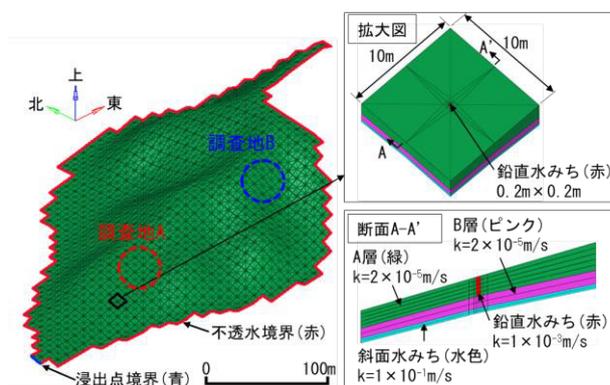


図-7 三次元解析モデル¹⁶⁾

表-1 透水係数一覧^{9), 16)}

区分	透水係数 (m/s)	設定方法
A層	2×10^{-5}	携帯型ミニディスクインフィルトローメータによる試験結果
B層	2×10^{-5}	
基盤層 (モデル化なし)	1×10^{-6} 以下	降雨と土壌水分センサの反応のタイミングから推定
鉛直水みち	1×10^{-3}	
斜面水みち	1×10^{-1}	

流に向かって飽和度が高い領域が広がる挙動は、谷の下流端部となるモデル外周が不透水境界であることに加えて、谷に向かって周囲から地下水が集まる効果によるものと想定される。このことから、三次元飽和・不飽和浸透流解析で得られた水の流れに近い傾向を再現するために、二次元飽和・不飽和浸透流解析モデルでも下流側の境界条件を不透水境界とした。

(2) 解析結果

解析結果を図-8 に示す。解析モデルの下流側を不透水境界にしたことで、三次元飽和・不飽和浸透流解析結果と同様に下流から上流に飽和度が高くなる結果となった。また、不透水境界の位置を、三次元浸透流解析結果と近くなるように調整したところ、調査地 A および B はどちらも同程度の標高を不透水境界にすることとなったが、土層の厚い箇所の標高の違いにより、三次元解析結果と同様に調査地 A の方が飽和度が高く不安定な状態が推察される結果となった。以上より、豪雨時における調査地 A および B の飽和度分布が再現できたと考えた。

6. 斜面安定解析

(1) 解析条件

二次元飽和・不飽和浸透流解析から得られた平成 26 (2014) 年 8 月豪雨時の時間毎の飽和度分布を基に、調査地 A および B の斜面安定解析を実施した。

斜面安定解析モデルは図-8 の飽和度分布から飽和度に応じて土層区分を行い作成した。地盤物性値は室内試験結果を基に、内部摩擦角は一定 (34.9 度)、単位体積重量 (15.8~18.3kN/m³) や粘着力 (0~5kN/m²) は、飽和度に依存させて設定した。地下水位は、斜面下流から飽和度 90~100% の範囲の上面とした。解析は豪雨前 (Timestep100) と最大時間雨量観測前後 (T=226~229) の 5 ケースで行った。斜面安定解析は、一般的なスライス分割法を用いた。

(2) 解析結果

解析結果を図-9 と図-10 に示す。最大時間雨量観測前の T=226 では調査地 A および B とともに安全率が 1.0 以上であるが、降雨が強まるタイミングで安全率が低下し、T=227 時に調査地 A では安全率が 1.0 を下回った。一方で、調査地 B では安全率が低下するものの、1.0 を下回らず、崩壊しない結果であった。以上から、調査地 A および B の災害発生時の安定度を評価した。ここで、調査地 A の危険すべり円弧は、図-10 に示すように崩壊箇所と概ね一致している。

7. 樹木根系の崩壊防止力に関する考察

これまでの検討結果から、調査地 A および B で最大時間雨量時 (T=228) に樹木根系の崩壊防止力が斜面の安定にどの程度寄与していたのか考察を行う。

図-10 の解析結果から、調査地 A が崩壊しない (Fs=1.0) ために必要な崩壊抑止力 (kN/m) を逆算し、その抑止力を根系侵入層である深さ 0.6m で除して、疑似的に円弧すべり上部における樹木根系の水平方向の必要崩壊防止力 ΔC_{th-LL} (kN/m²) を求め

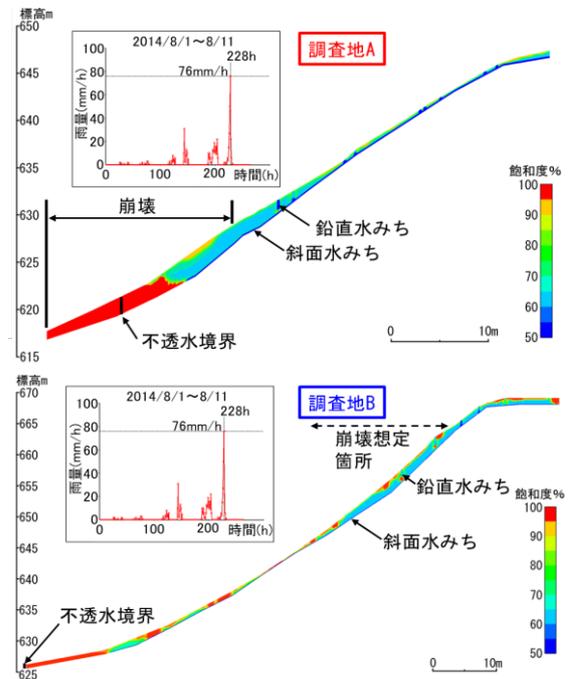


図-8 二次元解析結果 (最大時間雨量時 T=228)

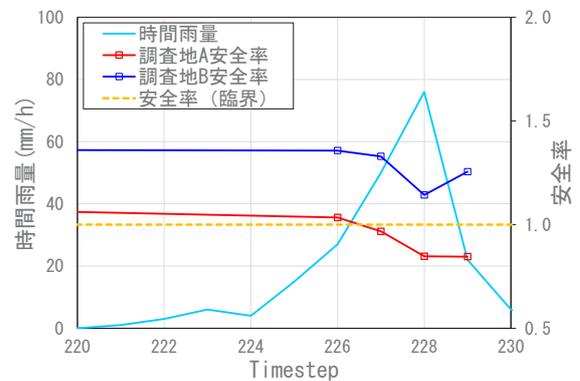


図-9 時間毎の安全率の遷移

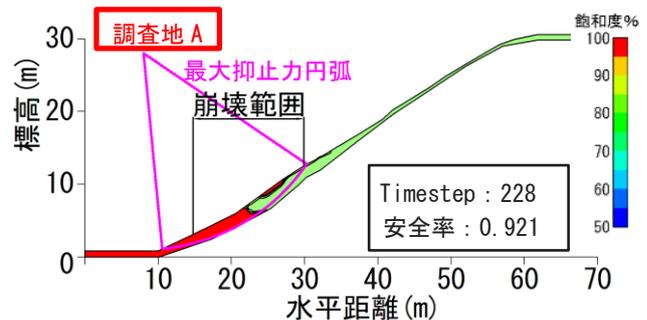


図-10 斜面安定解析結果 (調査地 A)

た。この必要崩壊防止力 ΔC_{th-LL} は、 $\Delta C_{th-LL}=3.7\sim 42.7$ (kN/m²) であった。一方で、調査地 A 周辺の根系分布調査から樹木根系の水平方向の崩壊防止力は $\Delta C_{thA}=11.3\sim 21.3$ (kN/m²) と推定された。さらに、樹木根系の崩壊防止力は、飽和状態で 70%程度となる²⁾ことが知られており、豪雨時には飽和して樹木根系の崩壊防止力が低下していたとして、 $\Delta C'_{thA}=7.9\sim 14.9$ (kN/m²) であると推定した。両者を比較すると必要崩壊防止力 ΔC_{th-LL} の最大値に対して樹木根系の崩壊防止力 C'_{thA} が下回っていたため、崩壊を防止するには至らなかったと考えられる。一方、調査地 B の斜面安定解析結果では、地盤の強度のみで安全率が 1.0 以上であり、樹木根系の崩壊防止力は寄与せずとも安定していたと考えられる。

調査地 A は、最大時間雨量前 (Timestep227) までは、必要崩壊防止力 $\Delta C_{th-LL}=13.3$ (kN/m²) で飽和状態の樹木根系の崩壊防止力 $\Delta C'_{thA}=7.9\sim 14.9$ (kN/m²) と概ね等しいため、最大時間雨量降雨を受けなければ崩壊しなかった可能性がある。

8. まとめ

樹木根系の崩壊防止力の妥当性を確認するために、さまざまな調査、試験、観測結果に基づいて飽和・不飽和浸透流解析や斜面安定解析を行い、崩壊を防止するために必要な崩壊防止力を求めた。その必要崩壊防止力と現地の樹木根系の分布状況に基づき推定した樹木根系による崩壊防止力とを比較した結果、推定した樹木根系の崩壊防止力では斜面の崩壊を防ぐことはできないという、現象を説明する結果が得られた。一方、調査地 B では調査地 A ほど危険な状態ではなかったため、樹木根系の崩壊防止力に関する明確な比較ができなかった。今後は、調査地 A と同等の危険度を持つ箇所を対象に同様の検討を行い、樹木根系の崩壊防止力の推定方法の妥当性をさらに確認することが重要であると考えられる。

謝辞：本研究は神戸市有野厚生農業協同組合、兵庫県神戸県民センター六甲治山事務所の多大なるご協力を賜った。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 阿部和時: 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究, 森林総研研報, No.373, pp.105-181, 1997.
- 2) 北原曜: 樹木根系の崩壊防止機能, 水利科学, No.311,

pp.11-37, 2010.

- 3) 兵庫県: 災害に強い森づくり, <https://web.pref.hyogo.lg.jp/nk21/saigainituyoi.html>, 2024.5.20 閲覧.
- 4) 国土地理院: 地理院地図, <https://maps.gsi.go.jp/>, 2024.5.20 閲覧.
- 5) 兵庫県土木地質図編集委員会: 兵庫の地質, 1996.
- 6) 環境省: 第 6~7 回自然環境保全基礎調査, 2013.
- 7) 沖村孝, 田中茂: 一試験地における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 新砂防, 33-1, pp.7-16, 1980.
- 8) 兵庫県: G 空間情報センター, <https://www.geospatial.jp/Ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-ootal>, 2024.5.20 閲覧.
- 9) 高橋良輔, 藤堂千景, 鏡原聖史, 岡崎敬祐, 伊藤陽希: 携帯型ミニディスクインフィルトローメーターを用いた崩壊地周辺の現場透水係数の把握事例, 令和 4 年度砂防学会研究発表会, p.2-10, 2022.
- 10) Wu: Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Canadian, Geotechnical Journal, pp.19-33, 1979.
- 11) 鏡原聖史, 鳥居宣之, 岩佐直人, 坂東聡, 芥川真一: 崩壊地に設置した被覆工の雨水浸透防止効果, Kansai Geo-Symposium2020, pp.221-226, 2020.
- 12) 高橋良輔, 鏡原聖史, 岩佐直人, 金村和生, 片山政和, 歳藤修一, 西浦清貴, 石川昌幹, 石田優子, 芥川真一: 2019~2022 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 回地盤工学会研究発表会, 11-7-4-02, 2023.
- 13) 高橋良輔, 藤堂千景, 鏡原聖史, 坂東聡, 柳田寛, 根本信行, 岡崎敬祐: 樹木根系が地盤内の体積含水率変化に及ぼす影響, 令和 6 年度砂防学会研究発表会 概要集, P.561, 2024.
- 14) 西垣誠, 株式会社ダイヤコンサルタント: 解析コード Dtransu-2D・3D・EL, 著作権登録番号 P 第 7169-1 号.
- 15) 森林水文学編集委員会: 森林水文学, pp.83-159, 2007.
- 16) 柳田寛, 藤堂千景, 鏡原聖史, 坂東聡, 根本信行, 岡崎敬祐, 高橋良輔: 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 回地盤工学会研究発表会, 2024.
- 17) 今井久, 中島聡, 池田穰: 樹木による緑化が降雨に対する盛土のり面の安定性に与える影響に関する一考察 (2), 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.192-193, 2010.
- 18) 沖村孝, 吉岡龍馬, 李津: 流出水の水質から見た押し出し流の存在の確定—六甲山系内の一試験値の場合—, 水文・水資源学会誌 Vol.4, No.1, 1991.

(2024.5.31 受付)