

【建設工学研究所論文報告集第 60 号〔報告〕2018 年 11 月】

樹木根系を考慮した自然斜面の安定性評価検討事例

Case Study on Evaluating the Stability of Natural Slope by Considering the Effects of Forest Roots

鏡原 聖史	藤堂 千景	岡崎 敬祐	西脇 博也
Satoshi Kagamihara	Chikage Todo	Keisuke Okazaki	Hiroya Nishiwaki
	片岡 沙都紀	澁谷 啓	
	Satsuki Kataoka	Satoru Shibuya	

1. はじめに

近年、極端な豪雨によって土砂災害や流木災害が頻発^{1), 2)}している。土砂災害の中で最も多い斜面表層崩壊の発生箇所では、滑落崖に多数の樹木根系の水平根が露出している。あるいは、地盤に亀裂が入り、その亀裂に引張力がかかった状態の樹木根系の水平根が確認できる場合がある。このことから豪雨によって山腹崩壊が発生するような場合、樹木根系による崩壊防止・抑制効果があることが推察できる。

これまでに樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能についての研究として、阿部³⁾は表層崩壊発生に関連する表層土中の土質力学的力のバランスとして、崩壊すべり面は樹木根系分布範囲のほぼ下端面の深さに生じるとしている。さらに、このすべり面に関する樹木根系の鉛直根がせん断変形することによってすべり抵抗力が発揮されるとしている。また、北原⁴⁾は、樹木根系の侵入が難しい崩壊深さが 1.5m 以上の崩壊や岩盤斜面の場合、樹木根系の鉛直根の崩壊防止機能は発揮されないものの、3 次元的に広がる樹木根系の水平根によって、せん断抵抗力が発揮されるとしている。ここで、樹木根系のせん断抵抗力は、これまでの研究によって根系の引抜き抵抗力の総和⁵⁾で表されている。また、この引抜き抵抗力を根系の断面直径のべき関数³⁾で表現している。これらの考え方を参考にして、木之下ら⁶⁾は、広域の表層崩壊危険度評価として、沖村ら⁷⁾の表層崩壊発生危険度評価手法をベースに、樹木根系の効果による水平方向と鉛直方向の粘着力の増分を考慮した無限長斜面の安定解析法を提案している。しかしながら、この解析手法を実務で適用するためには、根系の引抜き力や土のせん断抵抗力など、現地調査、試験等する必要があり、ほとんど活用されていないのが現状である。

そこで、本報告は、神戸市北区有馬町唐櫃で平成 26 (2014) 年の豪雨によって自然斜面が崩壊した箇所を対象に、植生にかかわる調査や地盤にかかわる調査および試験を実施し、それら結果に基づき斜面安定解析を行った。その結果から、樹木根系が斜面崩壊防止にどの程度寄与するか等について考察を行った。

2. 樹木根系を考慮した自然斜面安定評価方法

樹木根系を考慮した自然斜面安定評価手法は、検討対象地の崩壊が、根系によって土塊状で移動し、滑落崖には樹木根系の水平根が多く観察できる箇所であったことから、樹木根系の水平根を考慮することができる木之下らの解析手法⁶⁾を用いることとした。モデルは、図 1 に示すとおりで、このモデルから求めた安定解析式は (1) のとおりである。ここで、 H : 基岩面からの表土層深さ(m), H_s : 水平根系の侵入深さ(m), $h(t)$: 時刻ごとの基岩面からの地下水位(m), z : 基岩面からのすべり面までの深さ(m), D : 計算メッシュ幅(m), β : 斜面勾配($^{\circ}$), t : 時間 (hr), γ_{sat} : 土の飽和単位

$$SF(t) = \frac{c_s + c_{rV} + A(t) \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi}{B(t) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} + \frac{c_{rH}}{B(t) \cdot \sin \beta} \cdot \frac{H_s}{D} \quad (1)$$

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

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

体積重量(kN/m³), c_s : 土の粘着力(kN/m²), ϕ : 土の内部摩擦角(°), c_{rH} : 根系による水平方向の粘着力増分(kN/m²), c_{rV} : 根系による鉛直方向の粘着力増分(kN/m²)である。式において, 鉛直根による杭効果を鉛直方向の粘着力増分 c_{rV} として第 1 項で, 水平根による地盤の緊縛効果を水平方向の粘着力増分 c_{rH} として第 2 項で評価している。

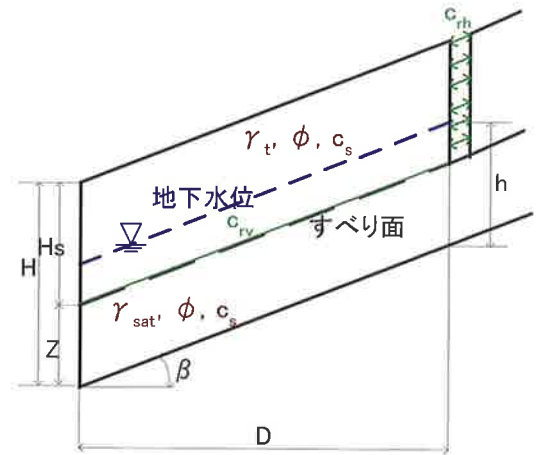


図 1 モデル

3. 事例検討

3.1 事例検討対象地の概要

事例解析対象地は, 平成 26 (2014) 年 8 月豪雨によって花崗岩の分布域で崩壊した神戸市北区有馬町唐櫃にある図 2 の箇所である。対象箇所には, モチツツジーアカマツ群集が分布しており, 崩壊地は図に示すような場所で幅 10m 程度, 深さ 1~2m 程度の崩壊が 2 箇所が発生していた。西側の崩壊地の状況を図 3 に示す。この図に示すように, 滑落崖には樹木根系の水平根が多く認められ, 崩壊土砂は花崗岩が強風化したマサ土であった。

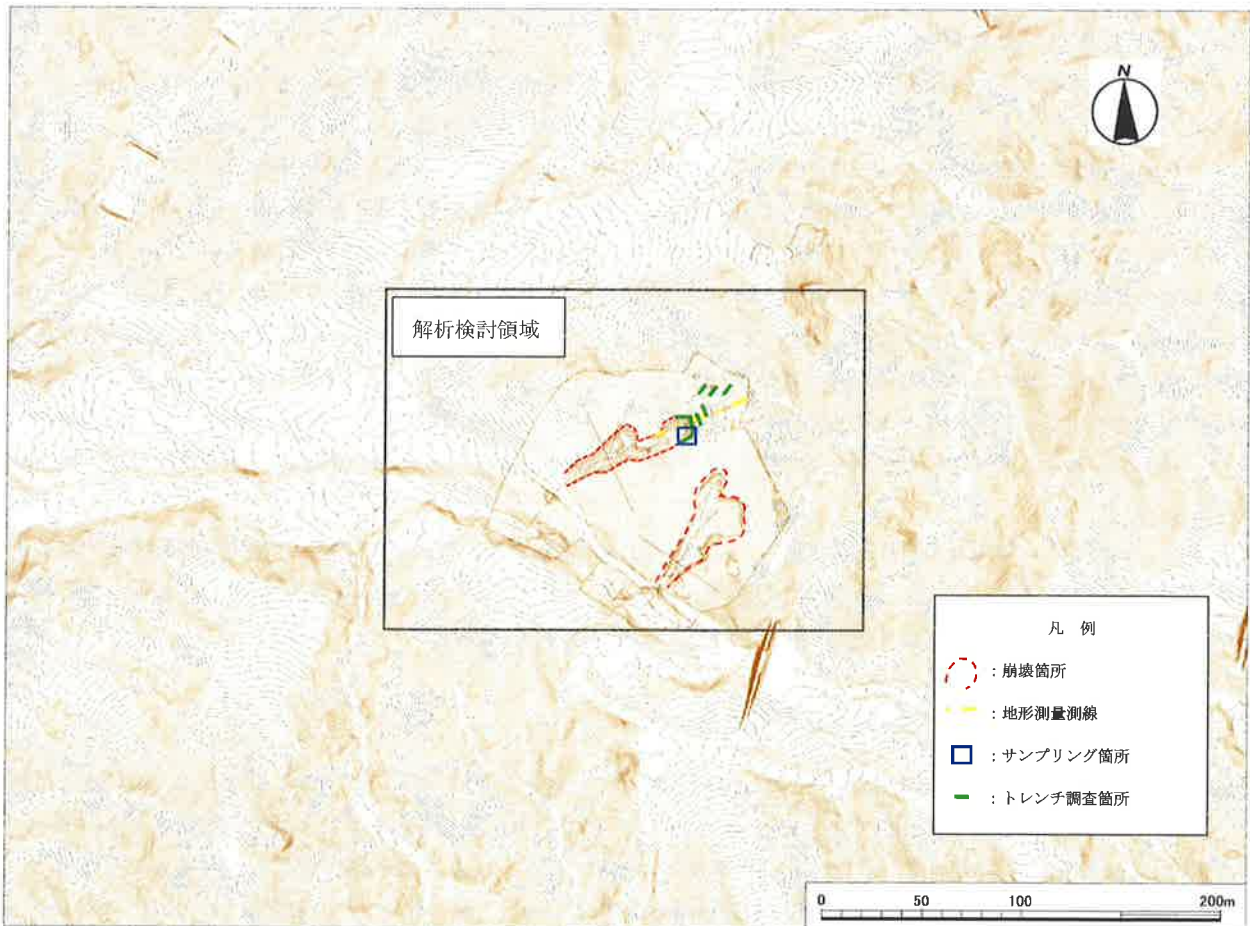


図 2 事例検討箇所と現地状況 (崩壊前の地形と崩壊後実施した平面測量結果を合成)



図 3 滑落崖や崩壊土砂の状況(平成 30(2018)年 1 月 31 日撮影)

3. 2 現地調査, 室内試験

3. 2. 1 現地調査

対象地の地盤状況や植生の状況ならびに樹木根系の分布状況を把握することを目的に、地形測量、簡易動的コーン貫入試験、植生調査、トレンチ調査(根系分布把握のための調査)を行った。また、地盤材料の物理、透水、強度特性を把握するために、崩壊土層から乱れの少ない土試料をサンプリングし、室内試験を実施した。それぞれの調査地点を図 2 に示している。

(1) 地形, 地盤調査

崩壊前に航空レーザー測量が国土交通省六甲砂防事務所により実施されており、崩壊後の測量の結果から崩壊土塊は図 4 に示すようであることが明らかとなった。また、この測線上で実施した簡易動的コーン貫入試験の結果では、1.0m 程度までが $N_d=2$ 程度と非常にゆるい状態で、深さ 1.8m 以深で $N_d \geq 10$ となった。滑落崖上部の未崩壊地における調査結果から表面とおおよそ同じ深度(1.8m)で $N_d < 10$ の土層が分布していたため、図 4 は崩壊前の地形と $N_d < 10$ の出現深度(1.8m)から推定した崩壊土層境界と崩壊前、後の地形を示したものである。この図から推定した崩壊土層境界と崩壊後のすべり面が概ね一致していることから、 $N_d < 10$ の崩壊土層が崩壊したものと考えられた。

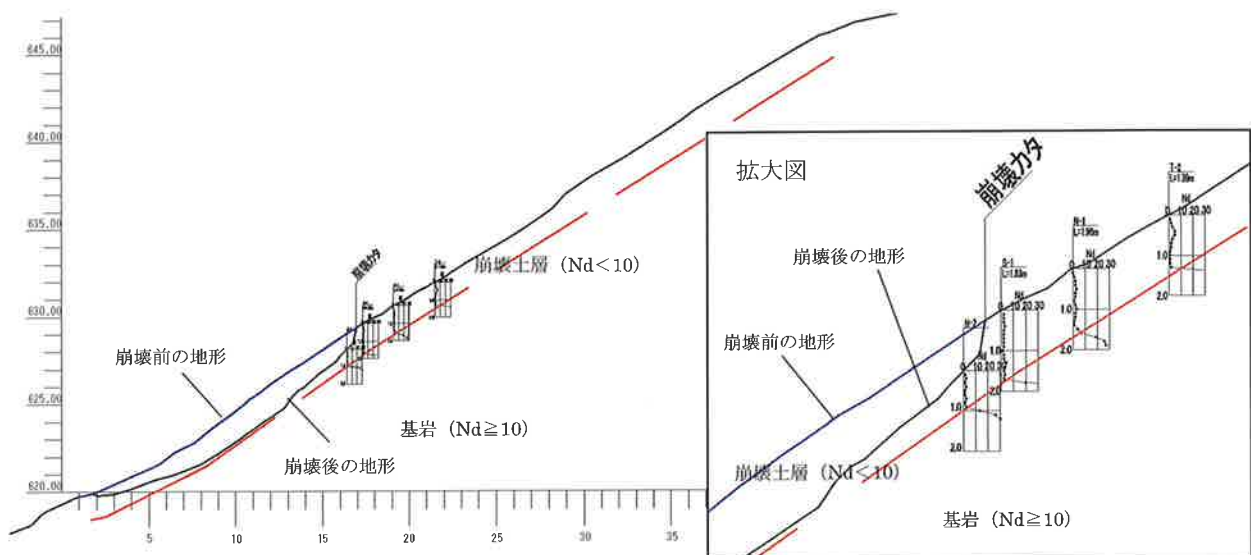


図 4 崩壊前後の断面と簡易動的コーン貫入試験結果

(2) 植生調査

樹種の位置、樹種、樹高、胸高直径、地際直径を計測し、平面図に整理した。本調査地内では、優占種であるアカマツの他に、広葉樹（常緑）、広葉樹（落葉）が確認された。アカマツは、胸高直径 0.3~0.4m、樹高 15~25m 程度と高木であった。

平面分布から、南西向き斜面はアカマツと広葉樹（常緑）が 45 本/100m²であった。一方、北西向き斜面では、アカマツと広葉樹（落葉）で 85 本/100m²であった。このことから、検討領域において、南西向き斜面と北西向き斜面では、同じアカマツ林であっても異なる植生状況で、北西向き斜面が 100m²辺りの本数が多い特徴があった。

トレンチ調査（根系分布）は、崩壊地の滑落崖をおよそ長さ 10m、およそ高さ 1m で整形し、根系の位置、直径を計測し、根系分布断面図を作成した。また、未崩壊地については、アカマツとアカマツの中間付近に調査箇所を設定し、南西向き斜面で 2 箇所、北西向き斜面で 3 箇所において、それぞれおよそ幅 2m、高さ 1m となるようトレンチ掘削を行い、根系の位置、根系の直径を計測し、根系分布断面図を作成した。

滑落崖で観察した根系の分布状況と未崩壊地で観察した根系分布状況を図 1、図 2 に示している。図 1 に示すように滑落崖（南西向き）では、地表 0.2m 付近に根系が集中しており、根系の本数は、深度 0.8m 程度で全体本数の 90% 程度以上となり、それ以深ではほとんど侵入していないことが確認できた。一方、図 2 は未崩壊斜面（北西向き）の状況を示している。図 1 と比較すると表層付近の根系の集中は少なく、深度 0.6m 付近までまばらに根系が分布している状況が確認できた。他の結果も確認したところ、全体的に、根系の分布状況にばらつきがあるものの、深度 0.8m 以浅までに根系の本数が全体の 90% 以上分布していることが確認できた。このことから、崩壊深さが 1.8m であった今回のケースにおいて、鉛直根がすべり面に作用し、崩壊への抵抗力となった効果は極めて小さいと考えられる。

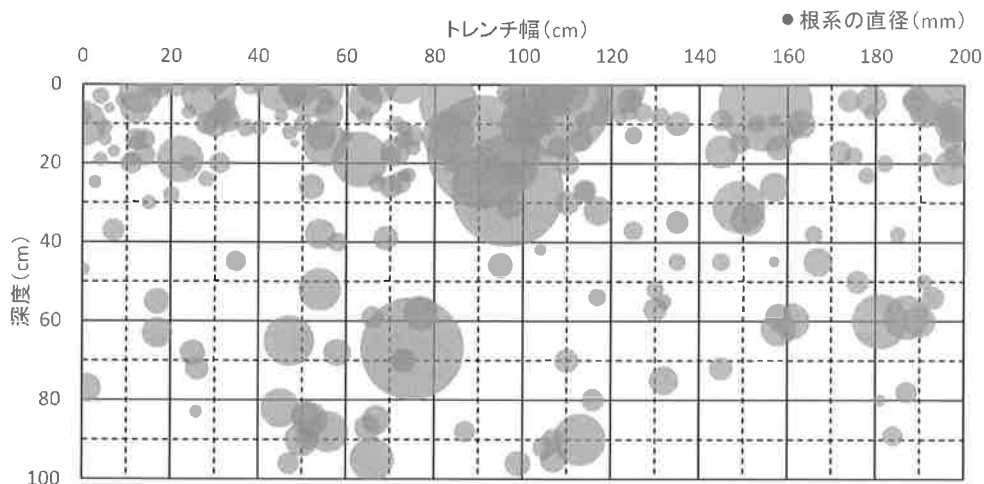


図 1 根系の分布状況(滑落崖:南西向き)

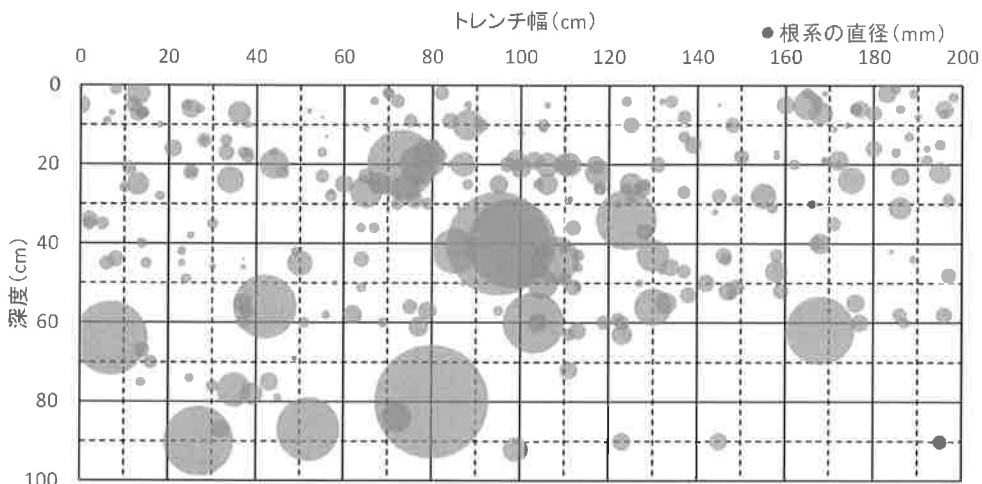


図 2 根系の分布状況(未崩壊地:北西向き)

3. 2. 2 室内試験

現地で採取した試料の物理試験、飽和透水試験、一面せん断試験を実施した。物理試験の結果を表 1 に示す。この表に示すように当該地の試料は、粘性土まじり礫質砂であり、飽和透水係数は、 $1.01 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と透水性が高い材料である。つぎに、一面せん断試験を実施するために、乱れの少ない状態の供試体作製を試みたが、試料が非常にゆるかったために整形できなかった。そのため現場密度に調整したかく乱試料で自然状態（不飽和状態）を想定した試験を行った。なお、現地の崩壊厚さが 1.8m 程度と薄いことから、低拘束圧条件下で試験が可能な一面せん断試験^④を用いて、鉛直応力 20, 30, 45kPa で試験し、内部摩擦角 37.8 度、粘着力 10.9kN/m² が得られた（図 7 参照）。

表 1 物理試験結果

項目		数値	備考
一般	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.414	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.266	
	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.616	
	自然含水比 w (%)	11.7	
	間隙比 e (%)	1.066	
	飽和度 S_r (%)	28.7	
分類	地盤材料の分類名	粘性土まじり礫質砂	
	分類記号	SG-Cs	
透水特性	透水係数 k_{15} (m/s)	1.01×10^{-4}	定水位法
強度特性	内部摩擦角 ϕ (度)	37.8	定圧(低圧力)
	粘着力 c (kN/m ²)	10.9	定圧(低圧力)

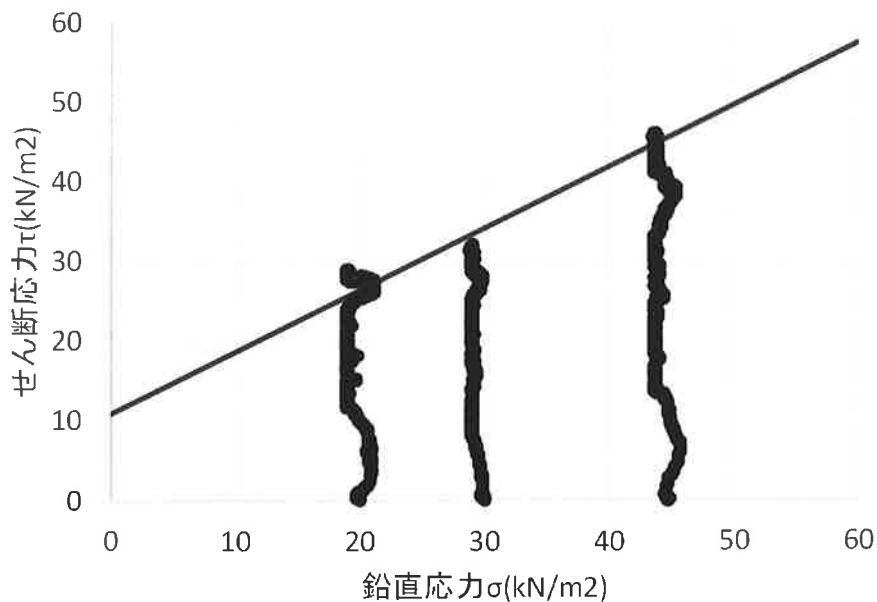


図 7 一面せん断試験結果

3. 3 樹木根系を考慮した斜面安定解析による安定度評価

樹木根系を考慮した安定解析を行うために解析領域の数値モデル化ならびに入力条件の設定を行い、解析を実施した。

3. 3. 1 地形・崩壊土層モデル作成

地形モデルは、崩壊前の測量データを用いて崩壊前の10mメッシュ標高図を作成した。つぎに、崩壊土層のモデルを作成するために、現地で実施した簡易動的コーン貫入試験の結果と10mメッシュ標高図をもとに10mメッシュの中央点における地表面傾斜角から、地表面傾斜角と崩壊土層厚の関係を整理した。あわせて、既往の地表面傾斜角と崩壊土層深さの関係式⁹⁾を参考にして図8の数値モデルを得た(図9参照)。今回の調査地周辺は、傾斜30から35度程度の箇所で調査を行ったため、僅かな傾斜角の違いで崩壊土層深さが急激に変化する条件設定となった。

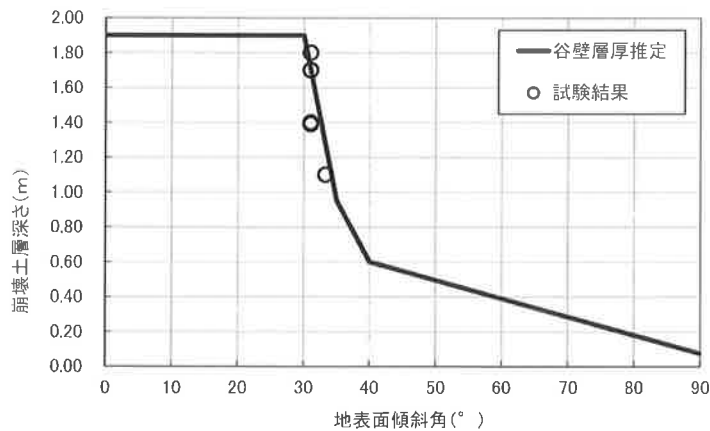


図8 地表面傾斜角と崩壊土層深さの関係

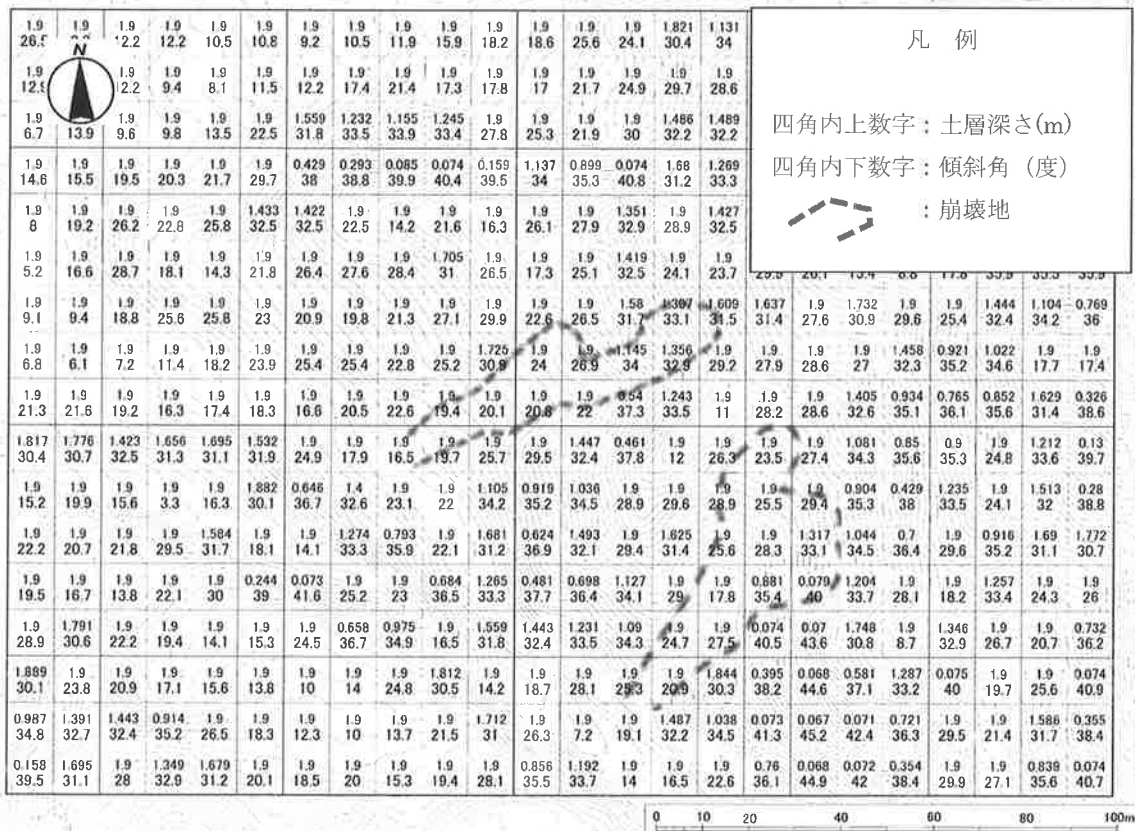


図9 数値モデル(崩壊前の地形)

3. 3. 2 樹木根系の引抜き力の算定

根系分布調査結果から、樹木根系の直径から樹木根系の引抜き力 (kN) を求め、本調査対象樹木根系の引抜き力を算出した。算定式は、アカマツの根系の断面直径と引抜き力を計測した結果から得られた (2) を用いた¹⁰⁾。ここで、F は引抜き力(N)、D は根の断面直径(mm)、数字は試験結果から得られた係数を示す。

$$F = 11.7 \times D^{1.59} \quad (2)$$

この式から算出した各断面の引抜き力 (kN) を表 2 に示す。非崩壊地と崩壊地における根系直径 20mm 以下の単位当りの引抜き力は、概ね 4.89~13.63kN/m² である。また、単純に試験結果を平均した場合、根系の単位当りの引抜き力は、9.28kN/m² となった。南西向き斜面で 8.96 kN/m²、北西向き斜面で 10.01 kN/m² となっており、北西向き斜面のほうが、単位当りの引抜き力が僅かに大きいことがわかる。

表 2 各断面の引抜き力一覧

	断面	断面積(m ²)	引抜き力(kN)	単位当りの引抜き力(kN/m ²)
非崩壊地	T-1	2.0	15.31	7.66
	T-2	1.8	22.84	12.69
	T-3	2.0	14.65	7.33
	T-4	0.8	10.9	13.63
	T-5	1.8	16.37	9.09
崩壊地	H-1	2.0	20.48	10.24
	H-2	2.0	17.29	8.65
	H-3	2.0	14.99	7.50
	H-4	2.0	22.23	11.12
	H-5	2.0	9.77	4.89
平均値	南西向き		T-1,T-2, H-1~H-5	8.96
	北西向き		T-3~T-5	10.01
	全体			9.28

3. 3. 3 入力降雨

入力降雨は、H26 (2014) 年 8 月の台風時の降雨データとして、当該箇所解析雨量のデータを入手し用いた。計算に用いた入力雨量データを図 10 に示した。この図に示すように期間降水量 528mm (8/10:00 から 8/10 24:00)、8 月 10 日 12:00 に最大時間雨量 76mm/h と非常に激しい降雨があったことがわかる。

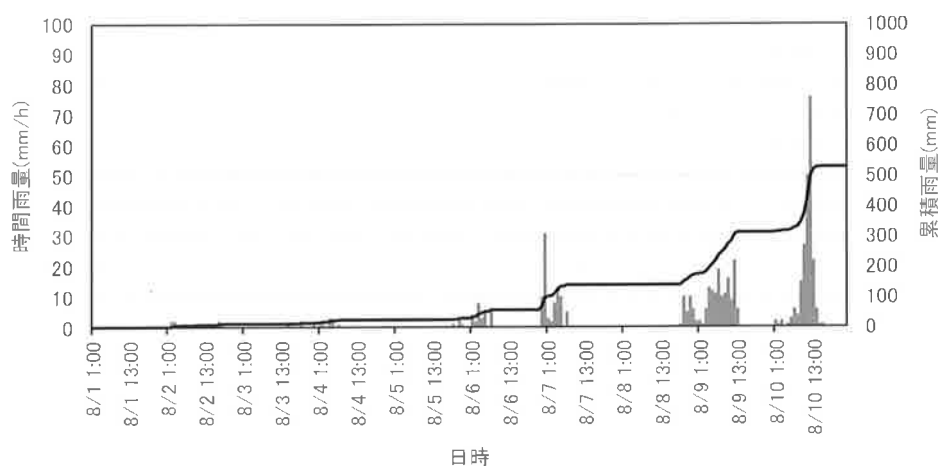


図 10 入力雨量データ(解析雨量)

3. 3. 4 解析ケースと入力データ

解析ケースと入力データを表 1 に整理した。Case1 は、降雨なし、樹木根系の効果を考慮したケース、Case2 は、降雨あり、樹木根系の効果を考慮したケース、Case3 は降雨あり、樹木根系の効果を考慮しないケースである。

ここで、入力物性値は試験結果に基づいて設定した。ただし、せん断強度は、土中内の水分状態でせん断強度が変化することが知られている。土の内部摩擦角は飽和、不飽和ともに変化せず、飽和時には見かけの粘着力が消失する¹⁾と報告があることから、豪雨状態を想定した Case2,3 では、土の見かけの粘着力が消失すると考え、粘着力を 0.0kN/m^2 と仮定した。一方、根系の粘着力増分は、鉛直方向については崩壊土層深さまで根系の侵入が認められなかったため考慮してない。一方、水平方向については根系分布調査から求めた粘着力増分を解析領域で一律に考慮した。また、樹木根系の引抜き力は、降雨による土中水分量の増加に伴って根系の粘着力増分が 70%程度に低下するとの報告⁴⁾を参照し、降雨時の計算では根系の粘着力増分を 70%低減させた。さらに、根系の侵入深さは、根系の分布調査の結果、深度 0.8m 以下で根系の本数が 90%であったことから、深度 0.8m とした。

降雨は、先に述べた H26 (2014) 年 8 月の台風時の降雨データ (8/1 0:00 から 8/10 24:00) を入力した。

表 1 入力データと解析ケース

項目		単位	Case1	Case2	Case3
土の単位体積重量	γt	kN/m^3	13.9	13.9	13.9
土の飽和単位体積重量	$\gamma \text{ sat}$	kN/m^3	17.5	17.5	17.5
土の粘着力	cs	kN/m^2	10.9	0.0	0.0
土の内部摩擦角	ϕ	度	37.8	37.8	37.8
土の透水係数	k	m/s	0.0001	0.0001	0.0001
根系の水平方向の粘着力増分	c_{rH}	kN/m^2	9.3	6.5	0
根系の鉛直方向の粘着力増分	c_{rv}	kN/m^2	0	0	0
土層深さ	H	m	傾斜から設定		
植生の侵入している深さ ($H_s < H$ の場合は $H_s = 0.8\text{m}$ 一定、 そうでない場合は $H_s = H$)	H_s	m	0.8	0.8	0.8
降雨期間			H26/8/1-10	H26/8/1-10	H26/8/1-10

3. 3. 5 解析結果と考察

計算結果をエラー! 参照元が見つかりません。~エラー! 参照元が見つかりません。に示す。降雨なし、樹木根系の効果を考慮した Case1 の結果から、当該箇所は、両方崩壊地ともに安全率 1.0 以上あることが確認できる。つぎに、降雨あり、樹木根系の効果を考慮した Case2 の結果では、最大時間雨量観測時刻における崩壊地の周辺の安全率は 1.0 を下回る箇所があり、極限状態となっていることが確認できる。これは、崩壊した事実と整合する。一方、降雨あり、樹木根系の効果を考慮しない Case3 の結果においては、最大時間雨量観測時刻における崩壊地の周辺の安全率は、Case2 よりさらに低く、崩壊判定範囲 (安全率 1.0 以下) が広がっており、根系の崩壊防止効果が発揮されている。ただ、根系の粘着力増分を考慮しても実際崩壊していない箇所が崩壊判定 (安全率 1.0 以下) されている。これは、今回調査したアカマツ林における根系の分布状況から根系の引抜き力を推定し、考慮したことや当該地域全体の調査を行っていないため、土層深さが実際より深かったり、植生状況が異なること等が原因と考えられる。今後、計算領域の樹木根系の引抜き試験、植生分布状況や崩壊土層深さ等の調査を行うことで、さらに解析の精度が高まるものと考えられる。

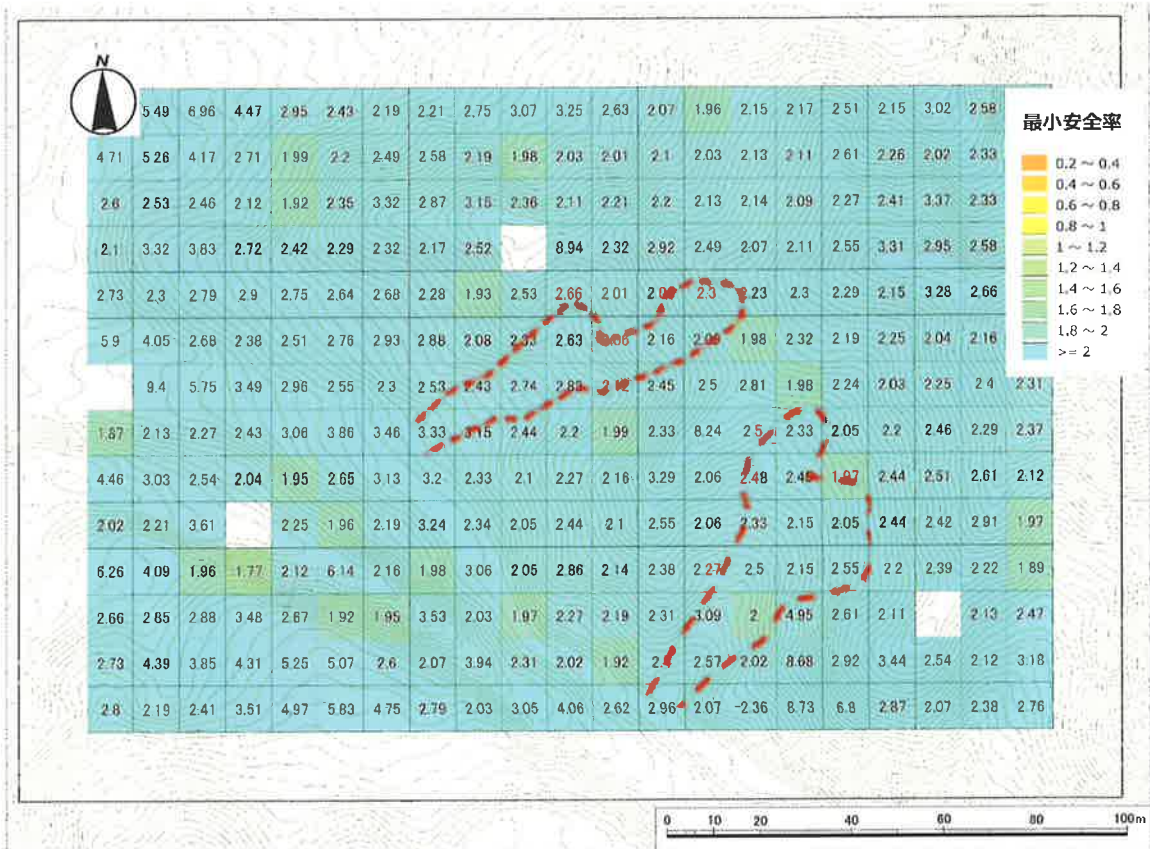


図 11 Case1 安全率の分布(自然状態, 樹木根系の効果あり)

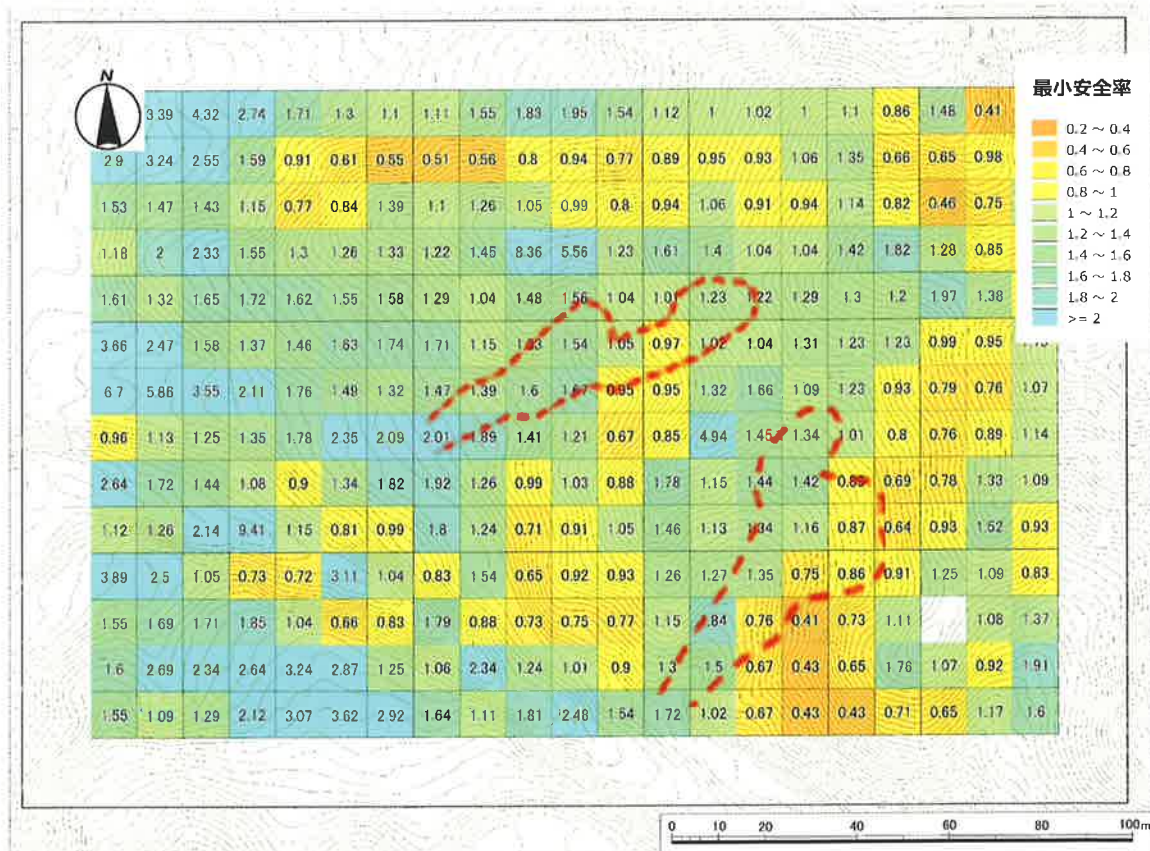


図 12 Case2 安全率の分布(豪雨状態, 樹木根系の効果あり), 最大時間雨量観測後

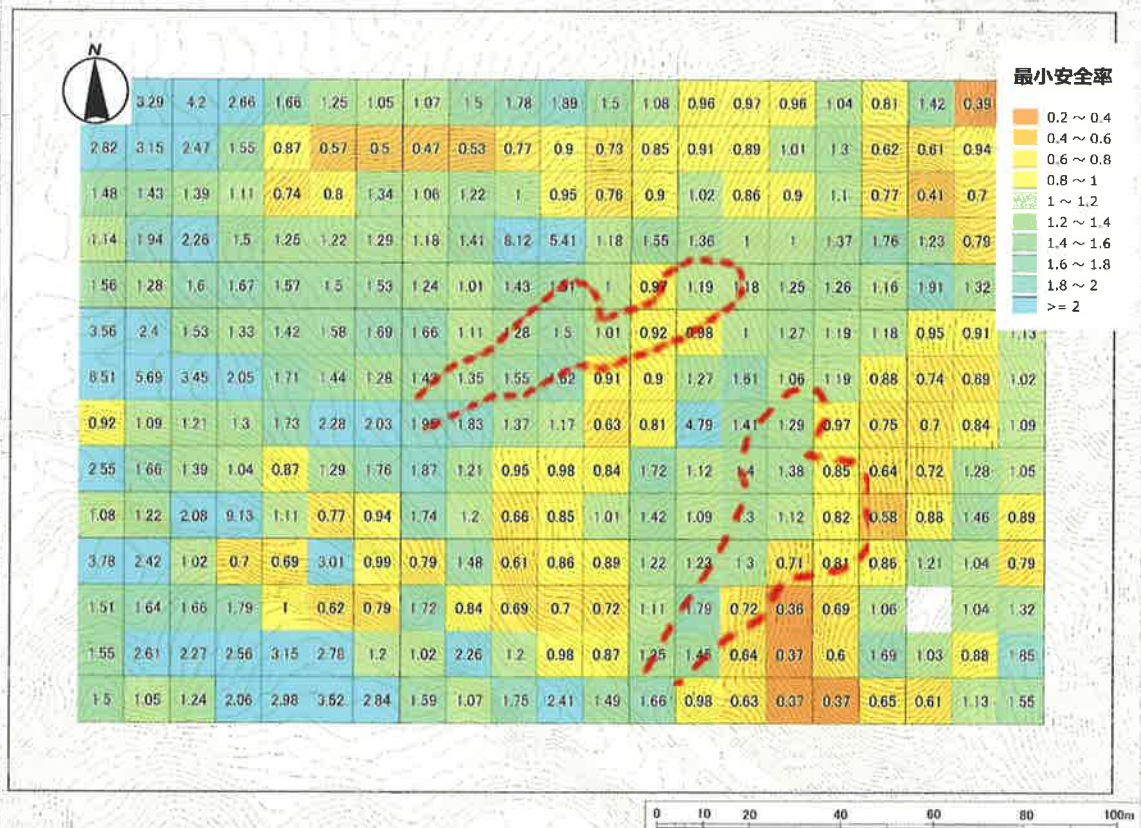


図 13 Case3 安全率の分布(豪雨状態, 樹木根系の効果なし), 最大時間雨量観測後

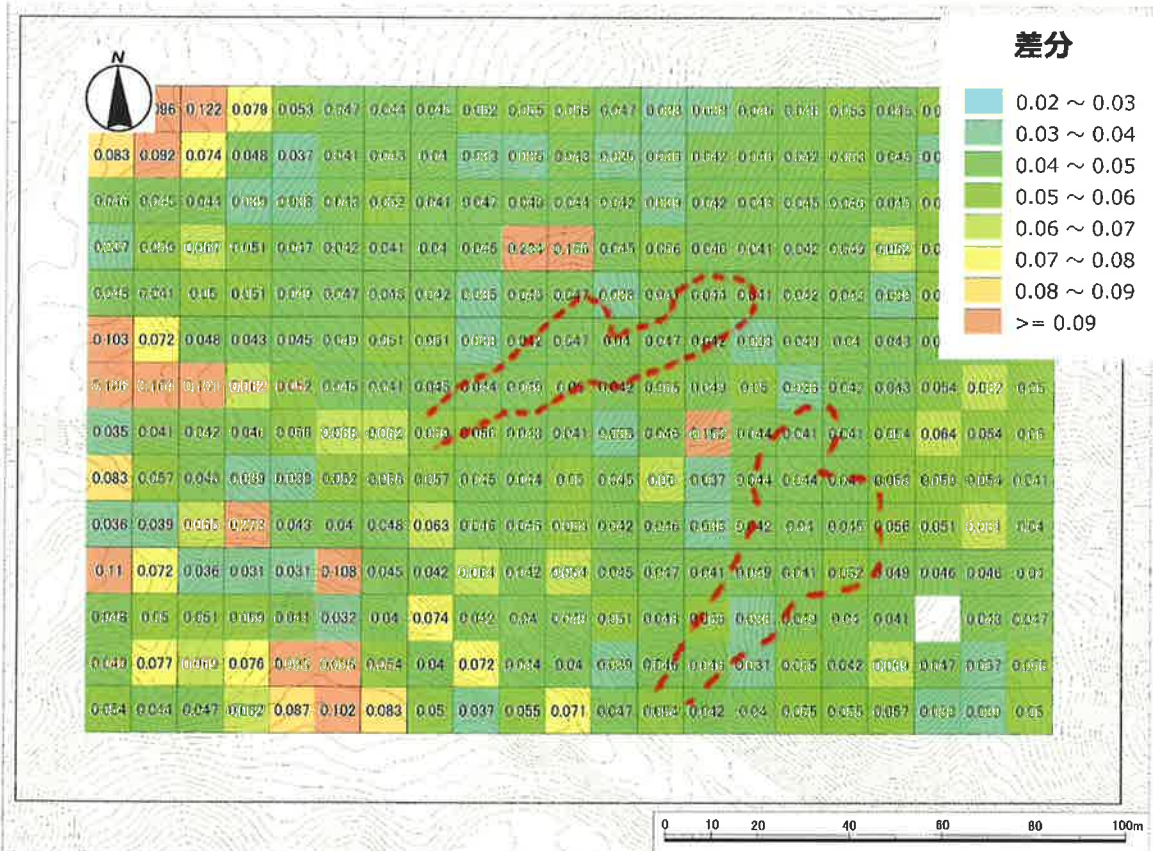


図 14 Case2 と Case3 の安全率差分

つぎに、図 14 に Case2, Case3 における同時刻の安全率の差分を示した。この図から傾斜によって異なっているが、概ね安全率 0.04~0.05 程度の安全率上昇が確認できる。この安全率の差分が樹木根系の崩壊防止効果であると言える。また、今回、樹木根系の水平方向の粘着力増分を一律で取り扱ったが、南西向きと北西向き斜面で植生の分布状況が異なり、単位引抜き力が僅かであるが異なっていた。この結果を考慮すると、南西向き斜面の方が北西向き斜面より、樹木根系の水平方向の粘着力増分が小さかったことから、南西向き斜面の方が北西向き斜面より安全率が小さくなりやすかったと推察される。この予測は、北西向き斜面の崩壊はなかった事実とも整合する。

以上、樹木根系による水平方向の引抜き抵抗の僅かな違いで崩壊の発生が左右されることが分かった。今後、さらに調査事例を増やしていく必要がある。

4. おわりに

本報告では、神戸市北区で平成 26 (2014) 年の豪雨によって自然斜面が崩壊した箇所を対象に、植生にかかわる調査や地盤にかかわる調査、試験を実施し、それら結果に基づき斜面安定度評価を行った。結果、樹木根系の効果を考慮することで、崩壊箇所が局所化し、より実現象に近い結果となった。一方、樹木根系の効果を考慮しても崩壊判定(安全率 1.0 を下回る)箇所が斜面内に多く出現した。これは、今回調査したアカマツ林における根系の分布状況から根系の引抜き抵抗を推定し、考慮したこと等が理由と考えられる。一連の検討から、概略的ではあるが、樹木根系の崩壊防止効果は、概ね安全率 0.05 程度の安全率の上昇に寄与することが推定された。

今後は、調査地で根系の分布調査と合わせて、根系の引抜き試験を実施することや周辺の崩壊土層の調査を進めるとともに、六甲山系で分布するブナ・ミズナラ林、ニセアカシア群落などについても調査を進め、樹林状況(根系)を踏まえた六甲山系の広域的な斜面危険度評価を行いたいと考えている。

【謝辞】

本報告は、一般財団法人建設工学研究所との共同研究の成果である。本報告を整理するにあたり、神戸市立工業高等専門学校 鳥居宣之教授から、根系による崩壊防止効果に係る安定解析について、貴重なご意見を頂いた。また、神戸市有野更生農業協同組合さまには、調査地を提供頂いた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：梅雨前線及び台風第 3 号による大雨と防風，2017。
- 2) 気象庁：平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等），2018。
- 3) 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。
- 4) 北原曜：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，No.311，pp.11-37，2010。
- 5) Tien H. Wu, William P. McKinnell III, and Douglas N. Swanston : Strength of tree roots and landslide on Prince of Wales Island, Alaska, Can. Geotech. J., 16, pp.19-33,1979.
- 6) 木之下弦・松尾遼・辻勲平・上月崇史・鳥居宣之：豪雨を起因とする表層崩壊危険度評価手法の予測精度向上化の検討～樹木根系の効果を考慮して～，第 23 回高専シンポジウム in Kobe 講演要旨集，D-026，2017。
- 7) 沖村孝・市川龍平：数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法，土木学会論文集，No.358,III-3，pp.69-75，1985。
- 8) Shibuya, S., Mitachi, T. and Tamate, S. : Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear, Geotechnique 47(4), pp.769-790,1997.
- 9) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・笠原拓造・山内政也・嵯峨根朋子・伊藤正美：表層崩壊リアルハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策(5)，建設工学研究所論文報告集，第 56 号，pp.45-66，2014。
- 10) 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。

- 11) 鏡原聖史・澁谷啓・坂東聡・沖村孝：台風の高雨によって発生した表層崩壊現場における崩壊土層の工学的特性と崩壊メカニズムの推定，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.70, No.2, pp. I_397- I_408, 2014.

著 者

鏡原 聖史	客員研究員，株式会社ダイヤコンサルタント，博士（工学），地盤工学
藤堂 千景	兵庫県立農林水産技術総合センター 森林林業技術センター，森林科学
岡崎 敬祐	株式会社ダイヤコンサルタント，地盤工学
西脇 博也	神戸大学大学院，学士（工学），地盤工学
片岡 沙都紀	研究員，神戸大学大学院，博士（工学），地盤工学
澁谷 啓	所員，神戸大学大学院，博士（工学），Ph. D.，地盤工学