

三次元斜面安定解析を用いた豪雨時における 崩壊斜面の位置・崩壊規模の予測

PREDICTING POSITION AND VOLUME OF SLOPE FAILURE DURING HEAVY
RAINFALL USING THREE-DIMENSIONAL SLOPE STABILITY ANALYSIS

梶島 匡¹・三谷 泰浩²・谷口 寿俊²・本田 博之²・中西 隆之介²・菅原 巧¹

Masashi KABASHIMA, Yasuhiro MITANI, Hisatoshi TANIGUCHI, Hiroyuki HONDA,

Ryunosuke NAKANISHI, and Takumi SUGAHARA

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: kabashima.masashi.000@s.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

Key Words: three-dimensional slope stability analysis, slope failure, heavy rain disaster

1. はじめに

近年, 集中豪雨や台風によって, 斜面崩壊や土石流といった土砂災害が頻発し, 多くの人的被害が発生している. その対策として, 現在, 土砂災害防止法に基づき, 土砂災害の被害を受ける恐れのある区域として, 土砂災害警戒区域・特別警戒区域が指定されている. しかし, これらの区域は保全対象の有無などに基づいて決定されており, 土砂災害の被害予測としては不十分である. 土砂災害の危険性は発生箇所と規模によって異なるため, これらを予測する手法が必要となる.

自然斜面の中から不安定斜面を予測する手法として, 地理情報システム (Geographic Information System: GIS) とモンテカルロ法を用いた三次元斜面安定評価手法¹⁾が提案されている. この手法では, デジタル標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) から, 図-1 に示すように, 尾根線と谷線に囲まれた傾斜方向が類似する領域である単位斜面を定義している. そして, 単位斜面を三次元斜面安定解析の解析単位として用い, 各単位斜面内に楕円体を発生させ, 地盤との交差面をすべり面とし, すべり破壊に対する安全率を算出している. しかしながら, 1次谷の上部の凹地形である0次谷を単位斜面に分割するのが難しく, 斜面の安定性を適切に評価できてい

ない. 近年では, 微地形を表現できる解像度の高い DEM が整備されつつあり, 0次谷において単位斜面を適切に定義することで, より精度の高い斜面安定評価が可能になると考えられる.

そこで本研究では, 0次谷とその他の斜面を異なる方法で単位斜面に分割する手法を提案し, その単位斜面を用い, 豪雨時における斜面崩壊を対象として, 崩壊斜面の位置と崩壊規模を予測する手法を開発することを目的とする. 平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の福岡県朝倉市乙石川流域における表層崩壊を対象とし, 三次元斜面安定解析により不安定斜面の位置と崩壊規模を評価することを試みる.

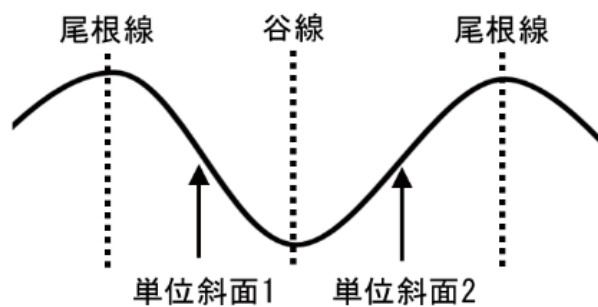


図-1 単位斜面の概念図

2. 単位斜面の生成手法

0次谷は傾斜方向が複雑に変化する地形であり、一様な傾斜方向を有する谷沿い斜面とは異なる方法で単位斜面に分割する必要がある。そのため、0次谷が存在する可能性のある1次谷上部の領域を「想定0次谷」、その他の領域を「谷沿い斜面」と定義し、以下に示す(1)～(3)の手順で単位斜面を生成する。単位斜面の生成、および三次元斜面安定解析には、豪雨災害前（平成29年1月）に取得されたLPデータから作成された、セルサイズ1mのDEMを用いる。

(1) 尾根線・谷線の作成と想定0次谷の抽出

はじめに、標高の高いセルに周囲を囲まれた一連のセルを検出し、平滑化する。次に、隣り合うセルの標高値を比較し、水の流れる方向（流向）を決定する。各セルに対して隣接8方向のセルとの標高差および中心点の距離から傾斜角度を算出し、傾斜が最も急となるセルへの方向を流向とする。さらに、その流向を用いて、各セルに流れ込む方向のセル数（累積流量）を求め、累積流量が大きく、周囲のセルから集水しやすいセルを谷線として抽出する。累積流量ラスタの作成例を図-2に示す。豪雨災害前のDEMから作成されたCS立体図による0次谷の地形判読結果と比較した結果、累積流量4,000以上のセルを谷線と定義することとした。そして、雨水が排出される共通の出口（流出点）までの領域である集水域を谷線に対して作成し、尾根線を集水域の境界線として作成する。最後に、1次谷の最上端から、1次谷の谷線に対して垂直に集水域を切断して、その上部を想定0次谷とし、その他の領域を谷沿い斜面とする（図-3）。

(2) 単位斜面の分割方法

a) 谷沿い斜面

谷沿い斜面は、谷線を利用して単位斜面に分割する。まず、単純化した谷線から変曲点を作成し、各変曲点を流出点とする集水域を作成する。次に、尾根線と谷線、および変曲点を流出点とする集水域で囲まれる領域を作成し、これを谷沿い斜面における単位斜面とする。谷沿い斜面の具体的な分割方法を図-4(a)に示す。

b) 想定0次谷

想定0次谷は、谷線に向かって傾斜する谷沿い斜面と異なり、傾斜方向が複雑に変化するため、傾斜方向に基づいて単位斜面に分割する。まず、想定0

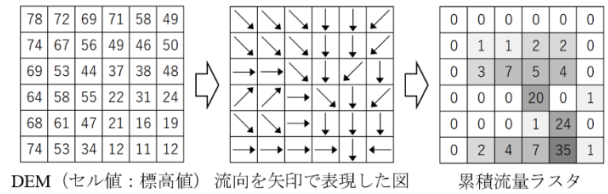


図-2 累積流量ラスタの作成例

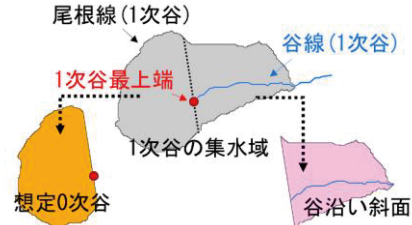


図-3 想定0次谷の抽出

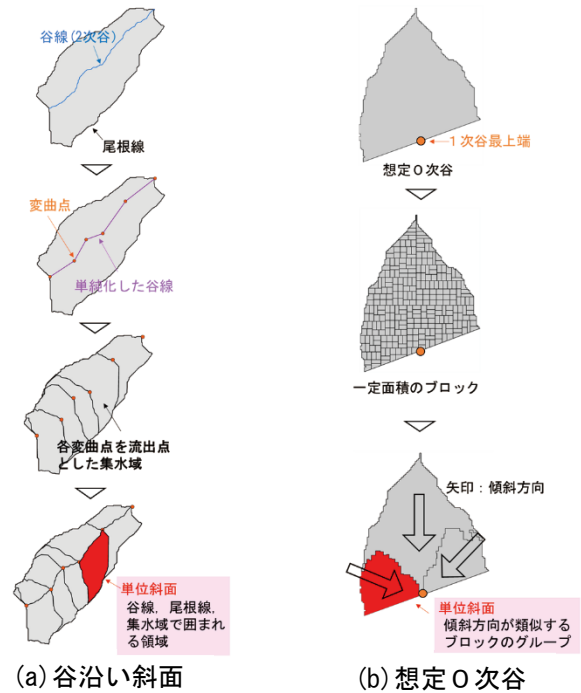


図-4 単位斜面の分割方法

次谷を面積5m²のブロックに細分化する。次に、各ブロックの傾斜方向の中央値に基づいて、ブロックを3つにクラスタリングする。各クラスタ内における値のばらつきを小さくするとともに、クラスタ同士の値のばらつきが大きくなるようにクラスタリングし、ブロックを傾斜方向が異なるグループに分け、各グループを想定0次谷における単位斜面とする。想定0次谷の具体的な分割方法を図-4(b)に示す。

3. 三次元斜面安定解析と崩壊土砂量推定手法

生成した単位斜面に対して、三次元斜面安定解析による斜面の安定評価と、崩壊規模の評価として崩壊土砂量の推定を行う。

(1) 三次元斜面安定解析の流れ

単位斜面内に複数の楕円体を発生させ、地盤との交差面をすべり面とする。さらに、その楕円体の空間姿勢を変化させることで、様々なすべり面を生成する。これらのすべり面と地表面で囲まれたすべり体に対して三次元斜面安定解析を行い、安全率を算出し、領域内のすべり体の安全率の最小値を単位斜面の安全率とする。楕円体の空間姿勢の決定と安全率の計算について、以下に示す。

a) 楕円体の空間姿勢の決定

生成した単位斜面の平面範囲内において、楕円体の中心点を複数発生させる。単位斜面内で網羅的に解析を行うため、今回は、1,000m²あたり 30 個の中心点を発生させた。次に、楕円体の範囲に囲まれた領域の標高値の平均値を計算し、これを楕円体中心の標高値とする。また、楕円体長軸の傾斜方向は楕円体の範囲に囲まれた領域の主傾斜方向とし、傾斜角は主傾斜角～主傾斜角の 50%の間で変化させる。そして、楕円体の半径 a, b, d を一定の範囲内でランダムに変化させる (図-5)。楕円体の長軸の方向・傾斜角の決め方の概念図を図-6 に示す。

b) すべり体の三次元すべり安全率の計算

楕円体の空間姿勢を決定したあと、楕円体と地盤の交差面で囲まれたすべり体の三次元斜面安定解析を行う。三次元斜面安定解析は、有限要素法などの数値解析による手法と極限平衡法による手法の 2 つに大別される。数値解析手法は複雑な形状の地形にも適用できるが、すべりなどの大変形問題を解く場合には特殊な手法を用いることとなり、複雑な計算となる。今回は、広域から不安定斜面を抽出することを目的としているため、極限平衡法を用いる。

楕円体と地盤を交差させることにより特定したすべり体を規則的に分布する柱状体群とする、HOVLAND³⁾が提案した土柱の集合体を対象とした極限平衡法を用いる。図-7 に示すように、すべり体を柱状体に分割し、すべり範囲内でのすべり力と抵抗力をそれぞれ合計し、その比から三次元すべり安全率を求めるものである。三次元すべり安全率の計算式は以下の通りである。

$$F_{3D} = \frac{\sum_j \sum_i (cA + W \cos \theta \tan \varphi) \cos \theta_{avr}}{\sum_j \sum_i W \sin \theta_{avr} \cos \theta_{avr}} \quad (1)$$

ここに、

- c : 粘着力(kN/m²), φ : 内部摩擦角(°)
- A : すべり面の面積(m²), W : 土柱の重量(kN)
- θ : 傾斜角(°), θ_{avr} : すべり面の主傾斜角(°)
- i, j : すべり面の領域内における土柱の列数, 行数

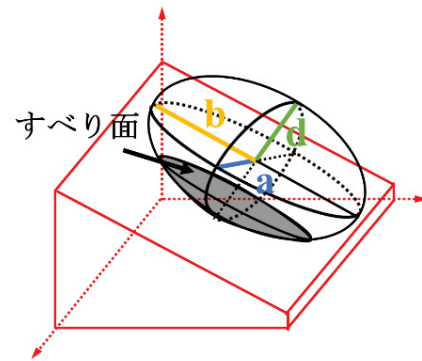


図-5 すべり面の形状の模式図

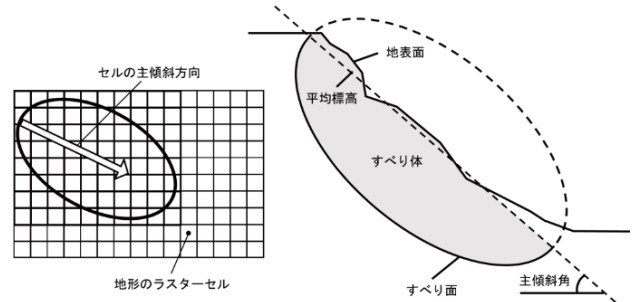


図-6 楕円体の長軸の方向・傾斜角の決め方

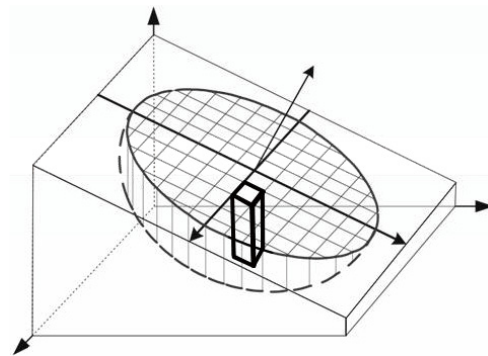


図-7 すべり体の土柱への分割

(2) 崩壊土砂量の推定手法

崩壊の規模を評価するため、各単位斜面における崩壊土砂量を推定する。単位斜面の中で最も安全率が低いすべり体 (以下、危険なすべり体という) の体積を崩壊土砂量とする。

4. 平成 29 年九州北部豪雨時における乙石川流域への適用

提案した崩壊斜面の位置・崩壊規模の予測手法を、平成 29 年 7 月九州北部豪雨時の福岡県朝倉市乙石川流域に適用する。豪雨災害時の表層崩壊を対象とし、不安定斜面を抽出した上で、崩壊規模を評価するために崩壊土砂量の推定を行い、本手法の妥当性を検証する。

(1) 乙石川流域

乙石川は赤谷川の右岸支流で北西-南東方向の河道をもち、三郡山地南部の広蔵山、小岳山、米山を分水嶺とする。流域面積は5.9km²で、20以上の支流から構成されており、これらの支流は、北西-南東の本流に対し、左岸では南北、右岸で東西方向を示している。乙石川流域の表層地質は、上流側には泥質片岩、下流側には花崗閃緑岩が主に分布する(図-8)。平成29年7月に発生した記録的な豪雨により、乙石川流域では多数の斜面崩壊が発生した。

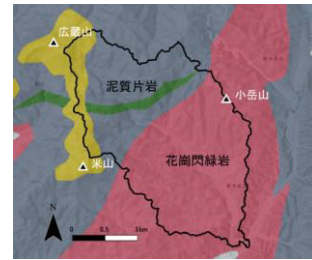


図-8 乙石川流域の表層地質⁴⁾

(2) 単位斜面の生成結果

図-9に示すように、乙石川流域に本手法を適用し、計2,696箇所単位斜面を生成した。また、災害前(平成29年1月)と災害後(平成29年7月)に撮影した航空写真から、斜面崩壊が発生したと考えられる単位斜面1,040箇所の判読を行った。この単位斜面1,040箇所を対象とし、三次元斜面安定解析による不安定斜面の抽出と崩壊土砂量の推定を行う。

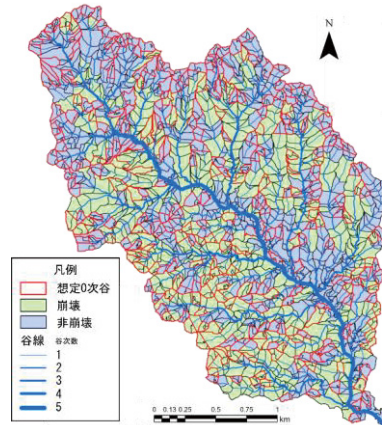


図-9 生成した単位斜面と崩壊の判定

(3) 三次元斜面安定解析の条件

三次元斜面安定解析により、乙石川流域において斜面崩壊が発生したときのすべり体の形状と地盤物性値を求める。

a) 楕円体の形状

平成29年7月九州北部豪雨時における崩壊斜面の形状分析⁵⁾を参考に、発生頻度の高かった崩壊形状を包括するよう、楕円体の半径a, b, dを表-1に示す範囲内でランダムに変化させる。

b) 地盤物性値

三次元斜面安定解析では、すべての単位斜面に対して同じ地盤物性値を設定する。対象流域全体の崩壊時における地盤物性値を、自然状態の地盤物性値から推定する必要がある。花崗閃緑岩地帯の一崩壊斜面の現地調査⁵⁾から、対象流域の自然状態における粘着力c, 内部摩擦角φ, 単位体積重量γはそれぞれ12.0kN/m², 25°, 26.0kN/m³であると仮定した。

対象とする崩壊斜面は、すべり土層への雨水浸入に伴う粘着力cと内部摩擦角φの低下が崩壊の主たる原因と考えられるため、仮定した地盤物性値からcとφの値を共に低下させる必要がある。また、不飽和土を対象とした室内土質試験結果より、水分量の増加に伴いφに比べてcの方が大きく低下することが報告されているため^{6), 7), 8)}, cの値のみを低下させた事前解析を行う。崩壊履歴のある単位斜面のうち、花崗閃緑岩地帯(合計692箇所)から20箇所、泥質片岩地帯(合計348箇所)から10箇所のサンプルを

表-1 事前解析の条件

	地盤物性値			楕円体の形状			
	粘着力	内部摩擦角	単位体積重量	楕円体の半径(m)			a/b
	c (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	a	b	d	
花崗閃緑岩地帯	6.3	25.0	26.0	2.6~	8.2~	1.0~	0.2~
泥質片岩地帯	5.0			10.1	31.5	5.0	0.5

表-2 解析条件

	地盤物性値			楕円体の形状			
	粘着力	内部摩擦角	単位体積重量	楕円体の半径(m)			a/b
	c (kN/m ²)	φ (°)	γ (kN/m ³)	a	b	d	
花崗閃緑岩地帯	6.3	12.5	26.0	2.6~	8.2~	1.0~	0.2~
泥質片岩地帯	5.0			10.1	31.5	5.0	0.5

選び、cの値を12.0kN/m²から低下させ、サンプルのすべてで安全率が1以下となるcの値を求めた。その結果、表-1に示すように、花崗閃緑岩地帯ではc=6.3kN/m²、泥質片岩地帯ではc=5.0kN/m²で安全率が1以下となった。これらの値を用いて、崩壊履歴のある単位斜面1,040箇所に対して解析を行う。

(4) 三次元斜面安定解析の結果

解析の結果、図-10に示すように、花崗閃緑岩地帯では406箇所(約59%)、泥質片岩地帯では241箇所(約69%)、全体では647箇所(約62%)で安全率が1以下となった。不安定斜面の抽出率を高めるため、φの値も低下させた結果、表-2に示す解析条件において、図-11に示すように、計989箇所(95%)で安全率が1以下となり、崩壊履歴のある単位斜面の約95%を不安定斜面として抽出することができた。

(5) 崩壊土砂量の推定結果

解析対象の単位斜面（計 1,040 箇所）に対し、提案した手法により、崩壊土砂量の推定値を算出する。そして、災害前から災害後にかけて、標高が 1m 以上低下している部分における標高値の差分の合計を崩壊土砂量の実績値とする。崩壊実績と危険なすべり体を図-12 に示す。崩壊実績を含む単位斜面（計 525 箇所）に対して、崩壊土砂量の推定値と実績値の比較を行った。その結果、崩壊土砂量の実績値に対する推定値の割合が、0 以上 0.7 未満の単位斜面は 114 箇所（約 22%）、0.7 以上 1.3 未満の単位斜面は 80 箇所（約 15%）、1.3 以上の単位斜面は 331 箇所（約 63%）となった。以下、表-3 に示す 9 箇所の単位斜面 A~I に対して、発生した崩壊現象について考察を行う。

単位斜面 A~C では、崩壊土砂量の実績値と推定値がほぼ等しくなり、崩壊土砂量を正確に再現することができた。このような斜面では、すべり面が形成され不安定化した部分で崩壊が生じ、土砂が流出したと考えられる。

一方、推定値と実績値が大きく乖離している単位斜面も確認された。例えば、単位斜面 D~F では、崩壊土砂量の推定値が実績値の 10 倍以上となり、過大評価となった。危険なすべり体の位置と崩壊実績の位置が重なった単位斜面 D では、すべり面が形成し不安定化したものの、その上部のみで崩壊が起こったと考えられる。また、危険なすべり体の位置と崩壊実績の位置が異なる単位斜面 E, F では、斜面基部における洗堀消失による構造的な不安定化による崩壊など、すべり破壊とは異なる現象が発生した可能性が考えられる。

さらに、単位斜面 G~I のように、崩壊土砂量の推定値が実績値を大きく下回った単位斜面も複数確認された。これら 3 つの単位斜面はいずれも想定 0 次谷であることから、すべり破壊が発生したあと、雨水が谷の源頭部に集中し、浸食によってさらに崩壊が拡大した可能性がある。崩壊土砂量を正確に推定するために、0 次谷のような集水能力の高い地形では、このような崩壊の拡大も考慮する必要があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、0 次谷の地形を考慮した単位斜面を生成し、単位斜面に対して三次元斜面安定解析により安全率を算出し、斜面の安定評価を行った。また、三次元斜面安定解析の結果を用いて、崩壊規模とし

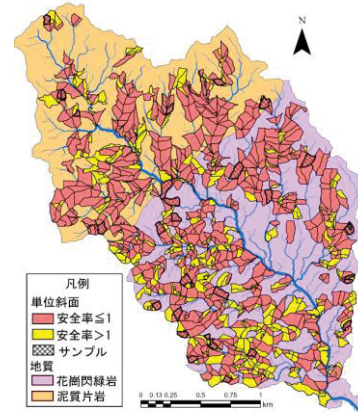


図-10 解析結果（ c のみ低下させた場合）

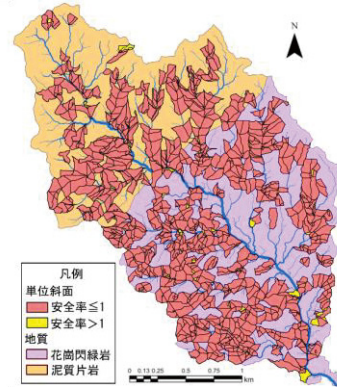


図-11 解析結果（ c と ϕ を低下させた場合）

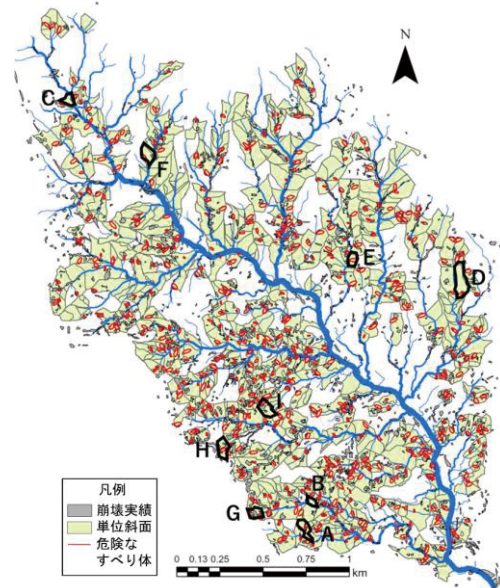
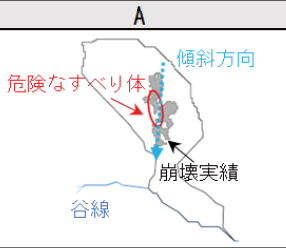
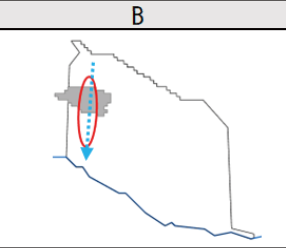
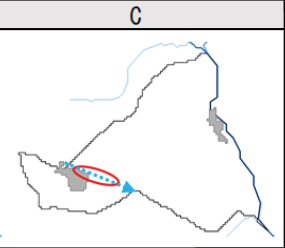
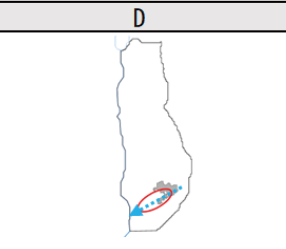
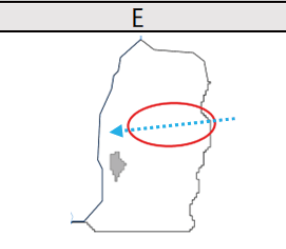
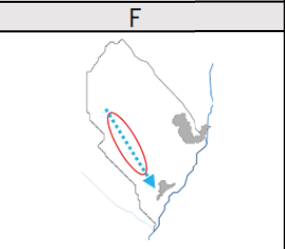
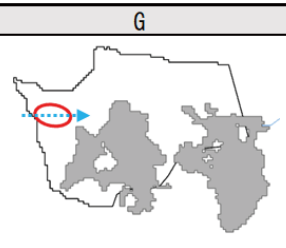
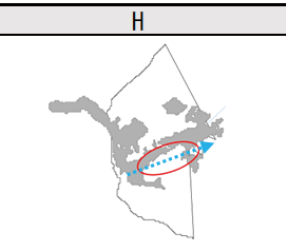
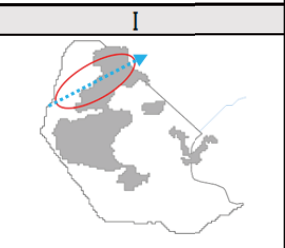


図-12 崩壊実績と危険なすべり体

て崩壊土砂量を推定した。その結果、崩壊が発生した斜面の約 95% を不安定斜面として抽出することができ、崩壊土砂量の推定値と実績値のオーダーが一致するような箇所も確認された。今後、崩壊土砂量の推定手法を改良するとともに、積算雨量や土壌雨量指数といった降雨情報から地盤物性値を設定する手法を開発することで、雨量の変化に応じてリアルタイムに崩壊斜面の位置・崩壊規模を予測することが可能になると考えられる。

表-3 崩壊土砂量の推定値と実績値の比較

		A	B	C
単位斜面				
崩壊土砂量 (m ³)	推定値	492.94	155.07	245.92
	実績値	500.58	173.25	231
崩壊土砂量の実績値に対する推定値の割合		0.98	0.90	1.07
		D	E	F
単位斜面				
崩壊土砂量 (m ³)	推定値	1,452.20	2,555.98	1,480.39
	実績値	58.03	77.12	111.33
崩壊土砂量の実績値に対する推定値の割合		25.03	33.14	13.30
		G	H	I
単位斜面				
崩壊土砂量 (m ³)	推定値	270.51	982.52	893.05
	実績値	1,619.45	3,389.21	4,186.25
崩壊土砂量の実績値に対する推定値の割合		0.17	0.29	0.21

謝辞：本研究（の一部）は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 第3期「スマート防災ネットワークの構築」(研究推進法人：国立研究開発法人防災科学技術研究所)によって実施されました。

参考文献

1) 周国云, 江崎哲郎, 謝謨文, 佐々木靖人: GISを用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出する方法の開発と適用, 応用地質, Vol.46, No.1, pp.28-37, 2005.
 2) 塚本良則, 平松伸二, 篠原斉四郎: 浸食谷の発達様式に関する研究(Ⅲ), 砂防学会誌, Vol. 26, No.2, pp.14-20, 1973.
 3) Hovland, H. J.: Three-dimensional slope stability analysis method, Journal of the Geotechnical Engineering, Vol. 103, No. GT9, pp.971-986, 1977.

4) 産総研地質調査総合センター (2023): 20万分の1日本シームレス地質図 V2, オリジナル版, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (参照 2024年5月20日)
 5) H29年九州北部豪雨災害報告書, 地盤工学会, 2018.
 6) 杉山友康, 村石尚, 岩崎公俊, 成瀬文宏: 鉄道盛土における水圧変動と降雨時の安定性, 土と基礎, Vol.41, No.4, pp.28-32, 1993.
 7) 川崎元, 西垣誠: 実用的な不飽和土用三軸圧縮試験装置の開発とそれを用いて測定した不飽和土のせん断強度について, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.1, pp.39-56, 2011.
 8) H. Ling and H. I. Ling: Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.138, No.9, pp.1151-1157, 2012.

(2024. 5. 31 受付)