

# 土中水分連動型斜面崩壊危険指標の開発と 地理的評価に関する一考察

## A CONSIDERATION ON DEVELOPMENT AND GEOGRAPHICAL EVALUATION OF SLOPE FAILURE INDEX DUE TO CHANGES OF SOIL MOISTURE

浅田 穂乃果<sup>1</sup>・荒木 功平<sup>2</sup>

Honoka ASADA, Kohei Araki

<sup>1</sup>徳山工業高等専門学校環境建設工学専攻 (〒745-8585 周南市学園台)

E-mail: c17asada@tokuyama.kosen-ac.jp

<sup>2</sup>徳山工業高等専門学校土木建築工学科 (〒745-8585 周南市学園台)

E-mail: araki@tokuyama.ac.jp

**Key Words:** *slope failure, slope stability analysis, safety factor, soil moisture, GIS*

### 1. はじめに

地球温暖化等の気候変動に伴う大雨の頻度増加が指摘されるようになり久しい。それに伴い全国各地で大雨を誘因とする斜面崩壊等が生じ、大規模な人的被害を伴う土砂災害に発展している。全国の年平均土砂災害発生件数は 1,450 件 (平成 24 年～令和 3 年)<sup>1)</sup>であり、令和 2 年 7 月豪雨は、37 府県にわたる過去最大クラスの広域災害をもたらし、961 件の土砂災害が発生した<sup>2)</sup>。土砂災害警戒区域等指定箇所数は全国で 672,419 箇所、山口県は 25,711 箇所 (全国 5 位)<sup>3)</sup>と非常に多い。不確定性を有するとしても急傾斜地の健全度を地域に発信・周知していくシステムが求められる。また、崖崩れや土石流等で被災のおそれがある土砂災害警戒区域等に立地し、要配慮者利用施設として位置づけられた公立の幼稚園や小中学校、高校等は 4,192 校で、全体の約 1 割<sup>4)</sup>にあたる。そのため避難確保計画を策定することは急務であり、斜面崩壊等の危険性の高い地点を把握・斜面崩壊の予知精度の向上を図る必要がある。

近年、健全度～時間関係を適切に管理・評価し、比較的小規模な補修を繰り返すことによる効果的・効率的な維持管理 (アセットマネジメント) の考え方が取り入れられてきている<sup>5)</sup>。また、地図利用に

特化したフリーオープンソースの地理情報システム (GIS) ソフトウェアが多く存在するようになり、導入コストが下がりつつある。このような中、行政機関が保有する公共データなどについてオープンデータ化が進んでいる。オープンデータを GIS と連携させ、地理的・土質的特性を導入することで、地域独自の斜面崩壊危険度の分析が可能になる。これによりはじめてアセットマネジメントを地域防災計画等に導入出来るようになる。

本研究では地域発信型土砂災害予知システムの開発を目指し、第一に、徳山工業高等専門学校 (以下、徳山高専と称する) での現地実験環境を整備する。IoT 技術の導入を意識した計測・撮像機器を用いた現地観測により、斜面崩壊等実現象を捉えることを目的とする。松尾 (1984)<sup>6)</sup>の研究を基に、土中水分に伴う粘着力の変化を考慮して、表層すべりを対象とした斜面安定解析を行い、斜面の安全率、崩壊確率を導く。主として、解析結果と現地観測データを比較し、解析手法の妥当性を検討する。

第二に、地形図上で土中水分連動型斜面崩壊危険度を表す手法について検討する。徳山高専周辺の安全率分布、及び斜面崩壊確率分布を GIS によりマッピングし、危険領域の広がり方を分析することにより、地理的評価を行う。

## 2. 斜面崩壊危険指標の開発

### (1) 土のせん断強度パラメータと降水量関係の評価

#### (松尾<sup>6)</sup>の方式)

降雨に伴う斜面崩壊の多くは表層すべり（厚さ1.1m程度<sup>7)</sup>の平面すべり）であることが知られている。降雨時には、すべり土塊の自重の増加とともに、土のせん断強度パラメータ（粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\varphi$ ）が変動する。ただし、表層すべり型斜面崩壊においては拘束圧が小さく、内部摩擦角の斜面安定度への影響は限定的であるため、せん断強度パラメータの土中水分依存性は粘着力に対して検討される。

本研究では、松尾<sup>6)</sup>の方式を用いて、粘着力と土中水分関係の評価する。図-1に粘着力 $c$ ～飽和度 $S_r$ 関係の例（シルト質砂）<sup>6)</sup>を示す。鬼塚<sup>8)</sup>や松尾・上野<sup>9)</sup>の実験事実によれば、土質によらず粘着力はある飽和度でピーク値（以下、最大粘着力 $c_{max}$ (kN/m<sup>2</sup>)と称する)を示す。松尾は最大粘着力のときの飽和度（以下、変曲飽和度 $S_{ri}$ (%)と称する)と最適飽和度 $S_{ropt}$ の差 $\Delta S_{ropt}$ について平均粒径 $D_{50}$ と強い負の相関があることを明らかにし、式(1)で表した。また、種々の土質について初期間隙比 $e_0$ と変曲飽和度の関係を最小二乗法により直線回帰式(2)および式(3)で表した。飽和度は体積含水率 $\theta$ (%)と式(4)の関係がある。さらに、最大粘着力を近似的に式(5)で表し、粘着力 $\mu_c$ (kN/m<sup>2</sup>)と最大粘着力の比～変曲飽和度と飽和度の差 $\Delta S_r$ 関係を調べ、変曲飽和度より湿潤側について、平均的に見て直線関係が見出されるとし、式(6)および式(7)で表した。これらの式を用いることで体積含水率変化に伴う粘着力変化を算出できる。湿潤単位体積重量 $\gamma_t$ (kN/m<sup>3</sup>)は式(8)で求められる。

$$\Delta S_{ropt} = -79.09D_{50} + 37.86 \quad (1)$$

$$S_{ri} = -100.0e_0 + \beta \quad (2)$$

$$\beta = S_{ropt} - \Delta S_{ropt} + 100e_{min} \quad (3)$$

$$S_r = \{(1 + e_0)/e_0\} \times \theta \quad (4)$$

$$c_{max} = 0.103(0.0086)^{e_0} D_{50} U_c \quad (5)$$

$$\Delta S_r = S_r - S_{ri} \quad (6)$$

$$\mu_c = (1.0 - 0.018\Delta S_r)c_{max} \quad (7)$$

$$\gamma_t = \gamma_d + (\theta/100)\gamma_w \quad (8)$$

ここに、 $U_c$ :均等係数、 $\gamma_d$ :乾燥単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $\gamma_w$ :水の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)

### (2) 斜面安定解析の方法

表層すべり型斜面崩壊のように、表層厚さに対してすべり長さが大きい場合、図-2のような斜面モデルを対象にした無限斜面法による斜面安定解析<sup>10)</sup>が行われる。不飽和状態における安全率 $F_s$ は式(9)を用い、

飽和状態における安全率は式(10)により求め、粘着力 $\mu_c$ と湿潤単位体積重量 $\gamma_t$ の土中水分依存性を評価する。

i)  $S_r < 100$ の場合

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_t Z \cos^2 i \tan \varphi}{\gamma_t Z \cos i \sin i} \quad (9)$$

ii)  $S_r = 100$ の場合

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_{sub} Z \cos^2 i \tan \varphi}{\gamma_{sat} Z \cos i \sin i} \quad (10)$$

ここに、 $\tau_f$ :すべりに抵抗するせん断強さ、  
 $\tau$ :すべりを起こそうとするせん断応力、  
 $z$ :表層の厚さ(m)、 $i$ :傾斜角、 $\varphi$ :内部摩擦角  
 $\gamma_{sat}$ :飽和単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、  
 $\gamma_{sub}$ :水中単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)

### (3) 斜面崩壊確率の算出方法

図-3に粘着力 $c$ のばらつきを考慮し、正規分布 $f(c)$ (平均 $\mu_c$ 、標準偏差 $\sigma_c$ (式(11)))を導入する。安全率 $F_s$ が1となる粘着力 $c_F$ を求め、 $c$ を変数として、 $c$ が $c_F$ 以下となる確率を崩壊確率 $P_f$ とすることにより、斜面の安定性を評価する<sup>11)</sup>。崩壊確率は式(12)により表される。

$$\sigma_c = 0.182c_{max} \quad (11)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{c_F} f(c) dc \quad (12)$$

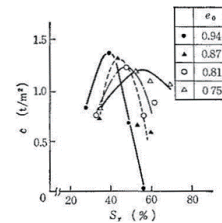


図-1 粘着力～飽和度関係の例（シルト質砂）<sup>6)</sup>

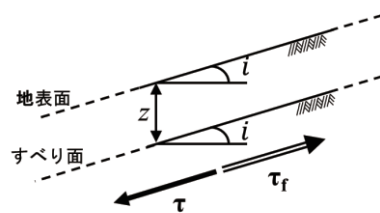


図-2 無限斜面法におけるモデル斜面

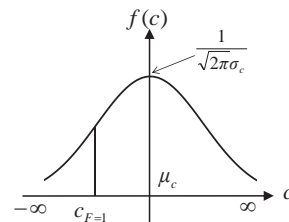


図-3 正規分布

### 3. 実証的研究

#### (1) 実証的研究の場の整備

土砂災害警戒区域に指定されている徳山高専の北側斜面を整備し、現地実験、実証的研究の場とする。

写真-1 に現地実験斜面を示す。地山を成型し、斜面勾配 30 度、斜面高 5m の人工斜面を造成した。成型後の地山上に表土（真砂土、物理特性を表-1 に示す）を、幅 0.9m、厚さ 0.1m で設置した。写真-1 では 7 区画に分けているが、本論文では法面対策が施されていない無対策（裸地）区画（左から 1 番目を裸地-1、4 番目を裸地-2 と称する）のみ議論する。

斜面動態把握に向け、写真-2 の観測カメラ、写真-3 の雨量計、写真-4 の土中水分計を斜面法尻から 1m、埋没深さ 10cm に設置した。

#### (2) 観測・計測結果および考察

##### a) 斜面概観の観測結果および考察

写真-5 に観測カメラによる撮像結果（明るさとコントラストは調整している）を示す。写真-5(a) は 2021 年 6 月 4 日の午前 1 時 35 分、(b) は午前 2 時 59 分である。写真-5 にみられる白い影は雨の筋を表している。写真-5(a)、(b) より、裸地-1 において、2021 年 6 月 4 日午前 2 時頃～午前 3 時頃にかけてガリ侵食（○で囲んだ領域）が発生した。

##### b) 降水量と土中水分計測結果および考察

図-4 に 2021 年 6 月 3 日午前 9 時～4 日午後 9 時の裸地-1 と裸地-2 の経時的な降水量、体積含水率を示す。図-4 から、4 日午前 2 時頃、最大降水量 32mm を観測し、裸地-1 で午前 4 時頃最大体積含水率 45.1% を記録したことが分かる。斜面の侵食により亀裂が入り、間隙比が上昇したため、最大体積含水率が 45% に達したと考える。また、降水に伴い体積含水率が変動し、急激な増加が始まった際にガリ侵食が発生している。体積含水率が大きくなった時刻と斜面崩壊時刻に近いことは興味深い。一方、裸地-2 で午前 2 時頃に体積含水率が約 30% を示したが、それ以降の増加は見られず、斜面の目立った崩壊はなかった。

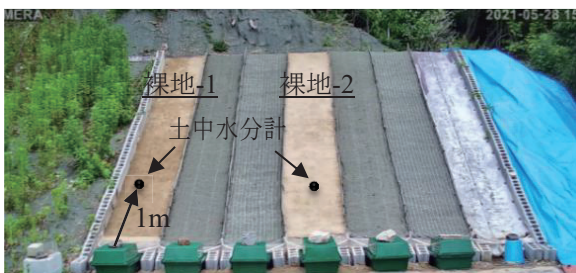


写真-1 現地実験斜面

表-1 真砂土の物理特性

土質パラメータ	記号	値
初期間隙比	$e_0$	0.448
土粒子の密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	$\rho_s$	2.65
最適含水比	$w_{opt}$	10.8
最大乾燥密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	$\rho_{dmax}$	1.92
平均粒径 (mm)	$D_{50}$	1.10
均等係数	$U_c$	21.4

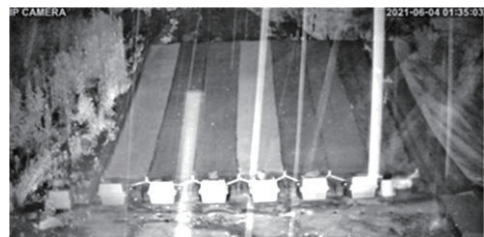


写真-2 観測カメラ

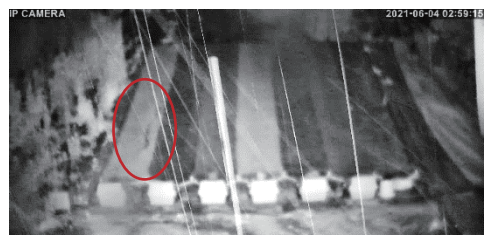
写真-3 雨量計



写真-4 土中水分計



a) 01 時 35 分



(b) 02 時 59 分

写真-5 撮像結果 (2021 年 6 月 4 日)

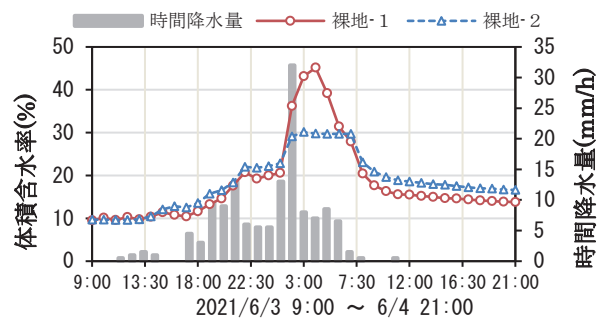


図-4 降水量・体積含水率関係の経時変化



#### 4. 現地実験解析

##### (1) 解析方法

解析手法の妥当性を検討するため、現地実験斜面のデータを基に斜面崩壊危険度の解析・評価を行う。2021年6月4日午前2時～3時頃に小規模な崩壊が発生した裸地-1について解析する。

##### a) 入力パラメータ

入力パラメータは表-1を参照されたい。体積含水率は1時間ごとの測定値を用いる。

##### a) 現地実験解析の流れ

図-5に解析の流れを示す。松尾<sup>6)</sup>の方式により体積含水率変動に伴う粘着力 $\mu_c$ を算出する。飽和度 $S_r$ が100未満の場合、間隙比変化は無視し、安全率 $F_S$ は式(9)を用いる。また、 $S_r$ が100以上となる場合は、 $S_r = 100\%$ とし、間隙比を逆算し、安全率は式(10)を使用する。続けて、斜面崩壊確率 $P_f$ の算出を行う。

##### (2) 崩壊時の解析結果および考察

##### a) 経時的な安全率・斜面崩壊確率の算出

図-6, 7に斜面勾配30度, 40度, 50度の経時的な安全率, 斜面崩壊確率を示す。図-6では、体積含水率の増加に伴い安全率が減少し、侵食が発生した午前3時頃に小さい値を示した。図-7では、4日午前2時頃～午前5時頃に崩壊確率の増加がみられた。侵食発生時に値が急な上昇を示しており、解析方法の妥当性を示唆している。

安全率, 崩壊確率ともに変化量は斜面勾配が30度～40度の方が、勾配40度～50度に比べて大きい。よって、降水量や土中水分は勾配30～40度の斜面に大きく影響を与えると考えられる。

##### b) 斜面勾配と安全率・崩壊確率の関係

6月3日午前3時頃の裸地-1における体積含水率43.19%を用い、斜面勾配5度～60度まで解析を行った。図-8, 9に斜面勾配と安全率, 崩壊確率関係を示す。図-8の安全率では斜面勾配0～20度で大きく低下し、20度で安全率1未満を示し、それ以降傾向を示した。図-9の崩壊確率では、斜面勾配が10度以上で顕著に上昇した。

30度以上の急傾斜地に対して斜面崩壊の危険度評価では、安全率より崩壊確率の方が変動状況を表しやすいと考える。

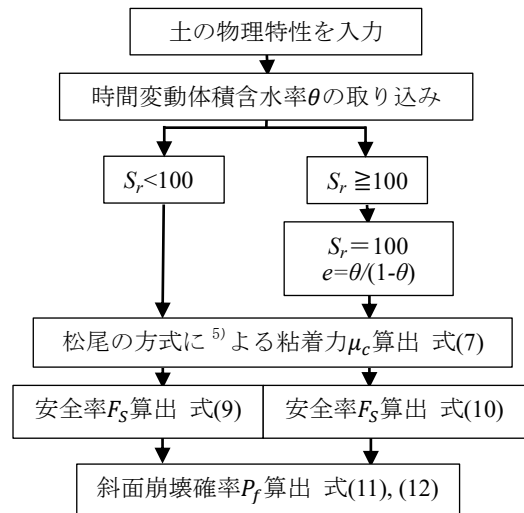


図-5 現地実験解析の流れ (体積含水率変動)

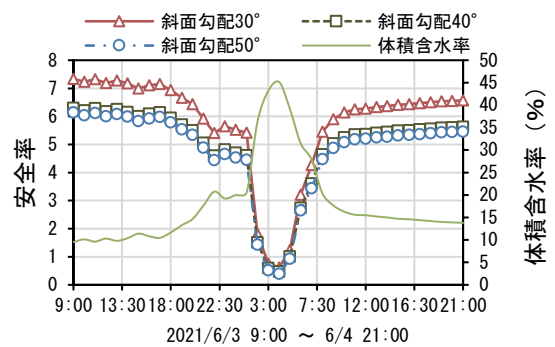


図-6 安全率の変動

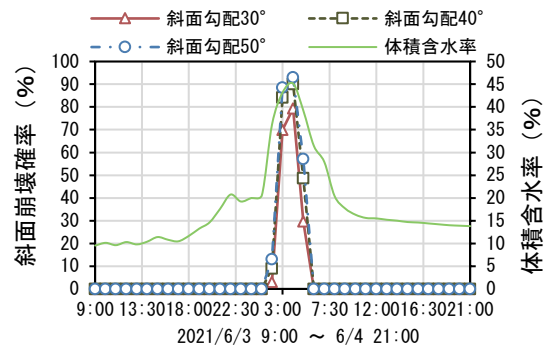


図-7 斜面崩壊確率の変動

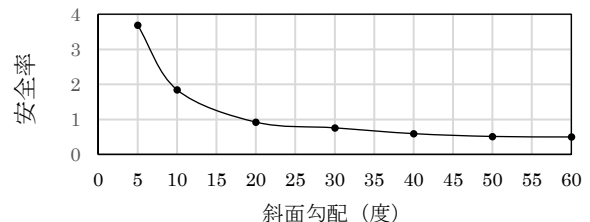


図-8 斜面勾配～安全率関係

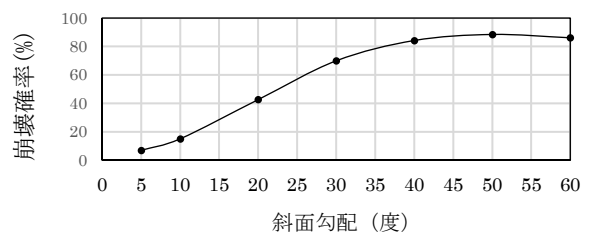


図-9 斜面勾配～崩壊確率関係

## 5. 地理的評価研究

### (1) 徳山高専周辺斜面広域解析方法

#### a) 地理情報システムによる評価方法

##### (斜面勾配分布の把握方法)

行政機関が保有する公共データなど、広く開かれた利用が許可されているデータはオープンデータと呼ばれる。特に、オープンデータを用いた解析モデルを構築し、自然災害等の予知・予測、防災・減災分野へ適用していくことはオープンイノベーションと呼ばれ、国土交通省は技術基本計画の中で「オープンイノベーションの推進」を挙げている。また、地図利用に特化したフリーオープンソースの地理情報ソフトウェア群(FOSS4G)に注目が集まっている。

GISソフト(Q-GIS<sup>12)</sup>)を用いて、オンライン上でオープンデータ化されている国土地理院の基盤地図情報(DEM5A)<sup>13)</sup>から斜面勾配分布図を作成する。

図-10に徳山高専周辺の斜面勾配分布図を示す。基図に国土地理院の標準地図を用い、合わせて土砂災害警戒区域(黄枠)、土砂災害特別警戒区域(赤枠)(山口県土木建築部砂防課データ提供<sup>14)</sup>)を示している。図-10から徳山高専周辺は急傾斜地(勾配30度以上)が点在しており、特に体育館北側の斜面勾配が大きいことがわかる。

#### b) 土質パラメータ

表-2に解析に必要な土質パラメータ(松尾<sup>6)</sup>の代表値)を示す。小山内ら<sup>7)</sup>の研究により、降雨で崩壊するすべり厚さの平均が1.1mであることが分かっている。本研究では、表層厚さを1.1mとし、山口県土木建築部砂防課の土砂災害警戒区域等に関する調査報告書<sup>14)</sup>より内部摩擦角は25度(警戒区域の代表値)とする。

#### c) 広域解析の流れ

図-11に解析の流れを示す。表-2の値と斜面勾配から、各地点の粘着力 $\mu_c$ 、安全率 $F_s$ 、崩壊確率 $P_f$ を算出し、Q-GIS<sup>12)</sup>によりマッピングを行う。

### (2) 安全率・斜面崩壊確率の解析結果および考察

図-12, 13(a)~(d)に体積含水率25~40%まで5%毎に解析した結果を示す。図-12, 13(b)より、安全率が1.25未満になると崩壊確率が増加を始める。特に、図-12, 13(d)より安全率が1に近づくと崩壊確率が顕著に上昇する。言い換えると、崩壊確率は安全率1付近の危険域での評価に適していると考えられる。

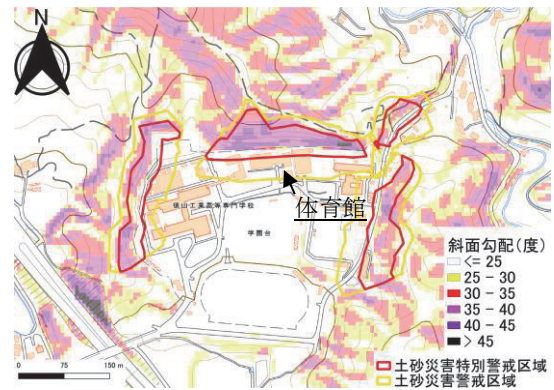


図-10 徳山高専周辺斜面勾配分布

表-2 土質パラメータ(松尾<sup>6)</sup>の代表値)

土質パラメータ	記号	値
初期間隙比	$e_0$	0.940
土粒子の密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	$\rho_s$	2.62
最適含水比	$w_{opt}$	15.9
最大乾燥密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )	$\rho_{dmax}$	1.77
平均粒径 (mm)	$D_{50}$	0.420
均等係数	$U_c$	65.0

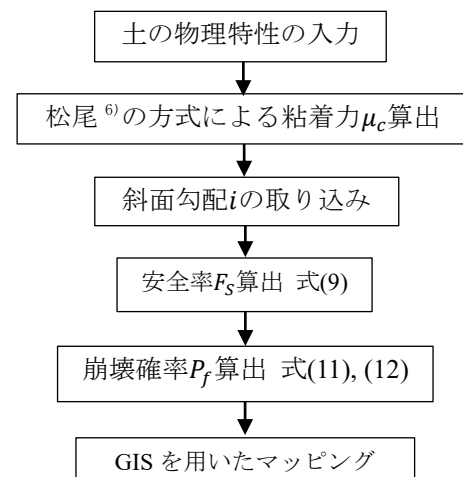


図-11 解析の流れ(斜面勾配変動)

## 6. おわりに

### (1) まとめ

本研究では、地域発信型土砂災害予知システムの開発に向け、IoT技術の導入を意識し、オンライン計測機器を用いた実現象の把握、急傾斜地等の健全度~時間関係のGISによる地理的評価を試みた。

第一に、徳山高専で現地観測用斜面を造成し、観測カメラにより2021年6月4日午前2時頃~午前3時頃の小規模な斜面崩壊を撮像した。降水量および土中水分(体積含水率)を計測し、体積含水率30%以上での急激な増加が斜面崩壊の一因として考えられることを述べた。

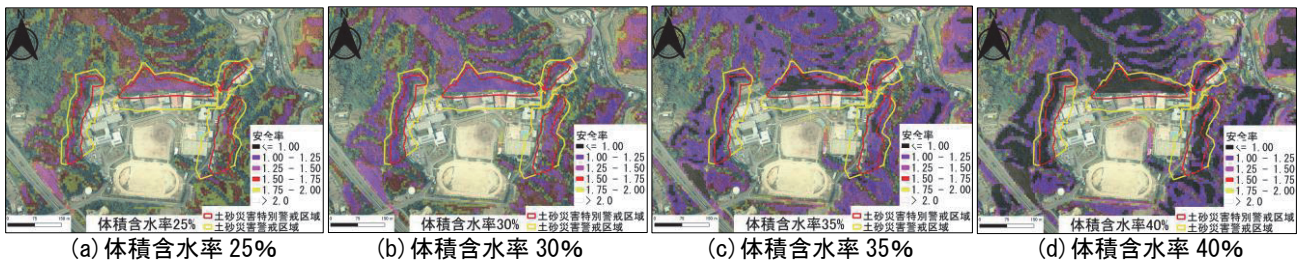


図-12 安全率分布

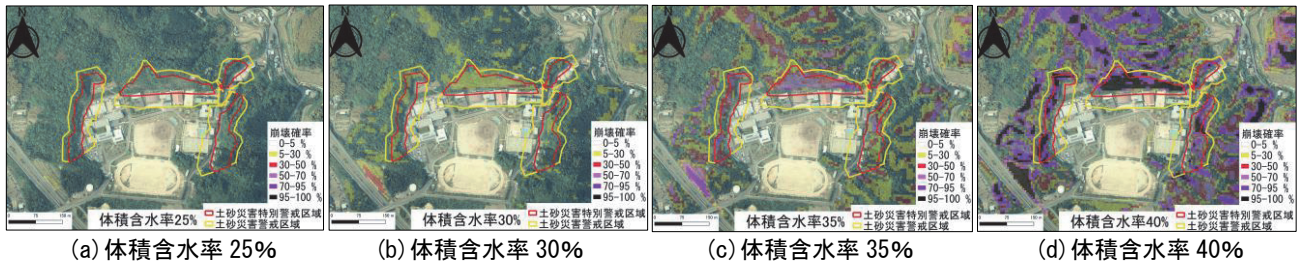


図-13 斜面崩壊確率分布

第二に、松尾<sup>6)</sup>の方式により粘着力変化を想定した斜面崩壊危険指標（安全率，斜面崩壊確率）を開発し、松尾<sup>6)</sup>の代表値を用いて周辺斜面の健全度をGISにより評価した。現地実験データを解析に用いることで、解析手法の妥当性を検討し、安全率に比べ斜面崩壊確率の方が急傾斜地で顕著な反応を示す指標であると考えた。

## (2) 今後の課題

継続して現地観測・現地実験を行い、データ収集を行う必要がある。また、降水量と土中水分から斜面崩壊確率を求め、崩壊発生時刻を予知する手法、発生規模を評価する手法を精査し、確立していく必要がある。

**謝辞：**本研究は、JSPS 科研費 21K04263 の助成を受けました。雨量計を株式会社ソイル・ブレーン、観測カメラを中村建設株式会社、現地斜面の造成を多機能フィルター株式会社・日本工営株式会社、航空写真等電子データを山口県（土木建築部砂防課）にご提供等いただきました。また、徳山高専の上俊二特命教授、桑嶋啓治准教授、福田靖技術長等関係各位にご指導いただきました。ここに深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：令和3年の土砂災害，p2  
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r3dosha/r3doshasai gai.pdf>, 2022
- 2) 国土交通省砂防部：令和二年の土砂災害，p4，

- <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasai gai.pdf>, 2021
  - 3) 国土交通省：全国における土砂災害警戒区域等の指定状況，  
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/content/001465798.pdf>, 2021
  - 4) 文部科学省：浸水想定区域・土砂災害警戒区域に立地する学校に関する調査の結果について，pp.1-2，  
[https://www.mext.go.jp/content/20210608-mxt\\_bousai-000015375.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20210608-mxt_bousai-000015375.pdf), 2021
  - 5) 国土交通省：平成23年度国土交通白書，pp.98-109，  
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/hakusho/h24/html/n1216000.html>, 2013
  - 6) 松尾稔：地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版株式会社，pp.232-235，1984.
  - 7) 小山内信智，富田陽子，秋山一弥，松下智祥：がけ崩れ災害の実態，国土技術政策総合研究所資料第530号，p75，2009.
  - 8) 鬼塚克忠：締固めた不飽和土の間ゲキ圧と力学的性状に関する実験的研究，九州大学学位申請論文，1973.
  - 9) 松尾稔，上野誠：斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究，土木学会報告集，No.276，pp.77-87，1978..
  - 10) 荒木功平：土中水分と連動させた徳山高専周辺斜面における安全率分布に関する一考察，第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.463-468，2021.
  - 11) 荒木功平：池の沢における危険渓岸斜面の抽出と土砂動態の把握に関する一考察，第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.115-120，2016.
  - 12) QGIS Development Team：QGISプロジェクトへようこそ！，<https://qgis.org/ja/site/>
  - 13) 国土地理院：基盤地図情報ダウンロードサービス，  
<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>,
  - 14) 山口県周南土木建築事務所：平成22年度土砂災害警戒区域等に係る基礎調査業務委託第5工区（周南市久米）報告書，pp.1\_1-4\_4，2011.
- (2022.5.30 受付)