

土中水分連動型斜面崩壊危険指標の開発とマッピング

徳山工業高等専門学校 学生会員 ○浅田 穂乃果
徳山工業高等専門学校 正会員 荒木 功平

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1,105件（昭和57年～令和2年）¹⁾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²⁾。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）³⁾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、特別支援学校等は4,192校で、全体の約1割⁴⁾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。

本研究では、地域発信型予知システムの開発に向け、現地実験環境を整備している。また、斜面崩壊・侵食等の実現象を対象とした実証的研究を行っている。同時に、土中水分に伴う粘着力変化に着目した危険指標（安全率、斜面崩壊確率）の検討、GIS等を用いたマッピングを行った。

2. 斜面崩壊危険指標の開発

降雨に伴う斜面崩壊の多くは表層すべり（厚さ1.1m程度⁵⁾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 ϕ ）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、内部摩擦角が変動したとしても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考慮される。本研究では、松尾の方式⁶⁾を用いて、土のせん断強度パラメータと降水量関係の評価する。図-1に粘着力 c ～飽和度 S_r 関係の例（シルト質砂）⁶⁾を示す。鬼塚⁷⁾や松尾・上野⁸⁾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} 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 ΔS_{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 と変曲飽和度関係の直線回帰式(2)を導いた。飽和度は体積含水率 $\theta(\%)$ を用い、式(3)で表される。さらに、最大粘着力を近似的に式(4)で表した。粘着力 μ_c と最大粘着力の比～変曲飽和度と飽和度の関係を調べ、平均的に見て直線関係が見出されるとし、式(5)で表した。湿潤単位体積重量 γ_t は式(6)で表される。

$$\Delta S_{ropt} = -79.09D_{50} + 37.86 \quad (1), \quad S_{ri} = -100.0e_0 + (S_{ropt} - \Delta S_{ropt} + 100e_{min}) \quad (2), \quad S_r = \{(1 + e_0)/e_0\}\theta \quad (3),$$

$$c_{max} = 0.103(0.0086)^{e_0 D_{50}} U_c \quad (4), \quad \mu_c = \{1.0 - 0.018(S_r - S_{ri})\}c_{max} \quad (5), \quad \gamma_t = \gamma_d + (\theta/100)\gamma_w \quad (6)$$

ここに、 U_c ：均等係数、 e_{min} ：最小間隙比、 γ_d ：乾燥単位体積重量(kN/m³)、 γ_w ：水の単位体積重量(kN/m³)
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長い崩壊に対しては、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⁹⁾が行われる。不飽和状態における安全率 F_s は式(7)を用い、飽和状態における安全率は式(8)により求め、粘着力 μ_c と湿潤単位体積重量 γ_t の土中水分依存性を評価する。

i) $S_r < 100$ の場合ii) $S_r = 100$ の場合

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_t z \cos^2 i \tan \phi}{\gamma_t z \cos i \sin i} \quad (7)$$

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{\mu_c + \gamma_{sub} z \cos^2 i \tan \phi}{\gamma_{sat} z \cos i \sin i} \quad (8)$$

キーワード 斜面崩壊, 土壌水分, 斜面安定, 崩壊確率, 安全率, GIS

連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山工業高等専門学校環境建設工学専攻 TEL 0834-29-6328

ここに、 τ : すべりに抵抗するせん断強さ、 τ : 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、 φ : 内部摩擦角、 γ_{sat} : 飽和単位体積重量(kN/m³)、 γ_{sub} : 水中単位体積重量(kN/m³)

さらに、図-3 に粘着力 c のばらつきを考慮し、正規分布 $f(c)$ (平均 μ_c , 標準偏差 σ_c (式(9))) 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⁹⁾。崩壊確率は式(10)により表される。

$$\sigma_c = 0.182c_{max} \quad (9), \quad P_f = \int_{-\infty}^{c_F} f(c) dc \quad (10)$$

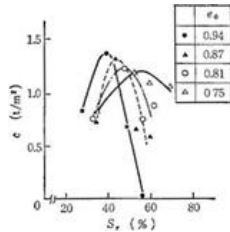


図-1 粘着力～飽和度関係⁶⁾

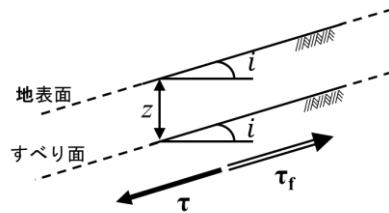


図-2 無限斜面法におけるモデル斜面

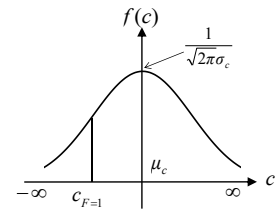


図-3 正規分布

3. 現地実験

土砂災害警戒区域に指定されている徳山工業高等専門学校の北側に現地実験斜面（勾配 30 度、高さ 5m、表-1 の物理特性をもつ真砂土を幅 0.9m、厚さ 0.1m で覆土した）を造成した。斜面動態把握を向け、写真-1 の観測カメラ、写真-2 の雨量計、写真-3 の土中水分計を斜面法尻から 1m、埋没深さ 10cm に設置した。また、写真-3 のデータロガーにより土中水分計から得た計測値の収集を行う。

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 (Mg/m ³)	ρ_s	2.65
最適含水比	w_{opt}	10.8
最大乾燥密度 (Mg/m ³)	ρ_{dmax}	1.92
平均粒径 (mm)	D_{50}	1.10
均等係数	U_c	21.4

写真-5(a),(b)に観測カメラの撮像結果（明るさとコントラストは調整している）を示す。(a)は 2021 年 6 月 4 日午前 1 時 35 分、(b)は午前 2 時 59 分である。写真-5 では 7 区画に分けているが、本論文では裸地区画（左から 1 番目の裸地-1、4 番目の裸地-2）のみ議論する。(a),(b)より裸地-1 にガリ侵食（地隙侵食）が発生していることが分かる。写真-5 にみられる白い影は雨の筋を表している。

図-4 に 2021 年 6 月 3 日午前 9 時～4 日午後 9 時の経時的な降水量～体積含水率の関係を示す。図-4 は裸地-1 と裸地-2 の測定結果を表している。降水に伴い体積含水率が変動しており、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。体積含水率の急激な増加が始まった際にガリ侵食が発生しており、体積含水率と斜面崩壊時刻に興味深い関係がみられる。また、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。

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、それ以降の急激な増加は見られず、斜面の目立った崩壊はなかった。



写真-1 観測カメラ



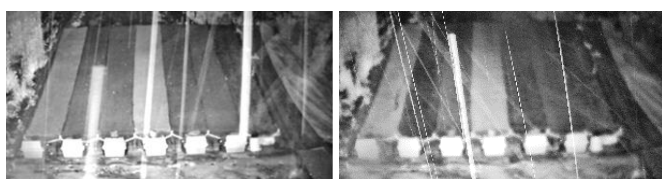
写真-2 雨量計



写真-3 土中水分計



写真-4 データロガー



(a) 午前 1 時 35 分 (b) 午前 2 時 59 分

写真-5 撮像結果 (2021 年 6 月 4 日)

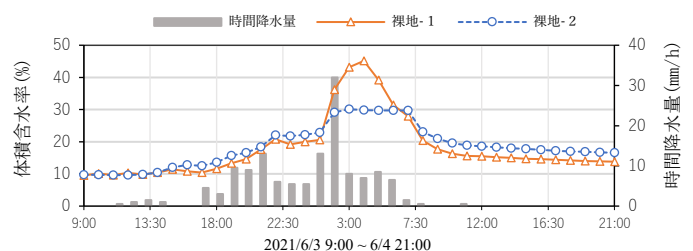


図-4 降水量・体積含水率関係の経時変化

4. 安全率と崩壊確率の比較と考察

現地実験解析では、2021年6月4日午前2時～3時頃に裸地-1で小規模な崩壊が発生していたため、裸地-1について体積含水率を変動させ、松尾の方式⁶⁾により粘着力 μ_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、安全率は式(7)を用いる。また、飽和度が100以上となる場合は、 $S_r=100\%$ とし、間隙比を体積含水率により逆算し、安全率は式(8)を使用する。続けて、斜面崩壊確率 P_f の算出を行う。

図-5,6に斜面勾配30度、40度、50度の経時的な安全率、斜面崩壊確率の変動を示す。図-5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時頃に斜面勾配30度で0.759となった。図-6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。侵食発生時に解析結果が危険値を示しており、解析方法の妥当性を示唆している。また、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る。

次に、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-7,8に斜面勾配と安全率、斜面崩壊確率関係を示す。図-7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、30度以上で収束傾向を示した。図-8の斜面崩壊確率では、斜面勾配が10度以上で急激に上昇した。30度以上の急傾斜地に対しては、安全率より崩壊確率の方が鋭敏な反応を示すと考える。

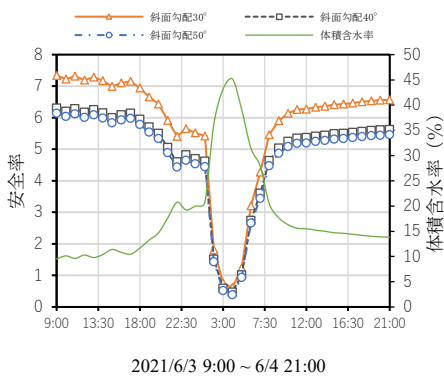


図-5 安全率の変動

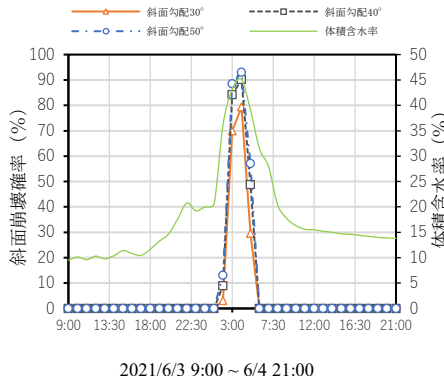


図-6 斜面崩壊確率の変動

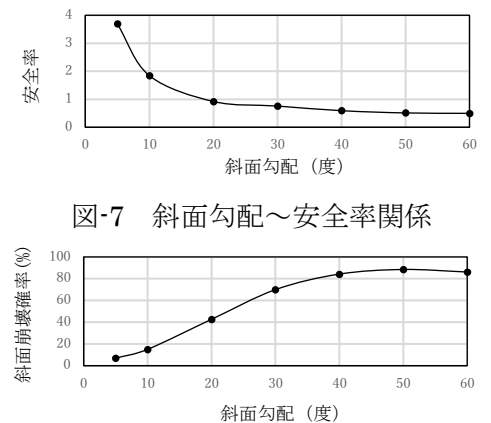


図-7 斜面勾配～安全率関係

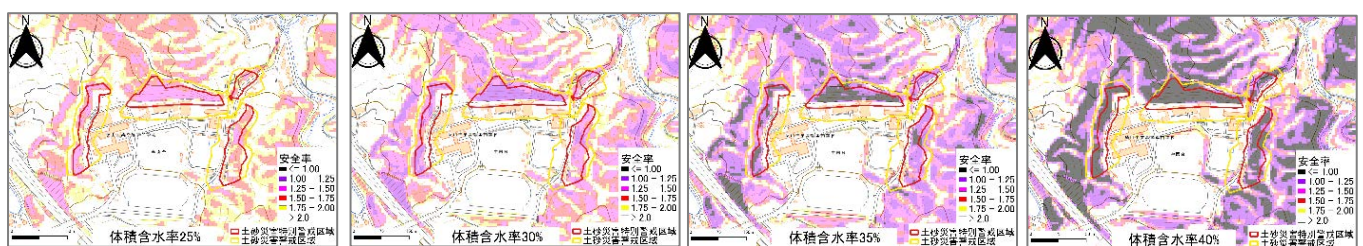
図-8 斜面勾配～斜面崩壊確率関係

5. マッピング（地理的評価）

国土地理院の基板地図情報¹¹⁾の斜面勾配を用い、表層厚さを1.1m⁸⁾、内部摩擦角は25度¹²⁾とし、松尾の代表値⁶⁾（表-2に示す）により解析し、GISでマッピングした。図-9に安全率、図-10に斜面崩壊確率分布を示す。図-9,10の(a)～(d)は体積含水率を25%～40%まで5%毎に解析した結果である。図-9,10(a)より、安全率が1.5未満になると崩壊確率が増加を始める。特に、図-9,10(d)より安全率が1に近づくると崩壊確率が顕著に上昇する。崩壊確率では安全率1付近の危険域で反応が鋭敏になる。よって、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。

表-2 松尾の代表値⁶⁾

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 (Mg/m ³)	ρ_s	2.62
最適含水比	w_{opt}	15.9
最大乾燥密度 (Mg/m ³)	ρ_{dmax}	1.77
平均粒径 (mm)	D_{50}	0.420
均等係数	U_c	65.0



(a)体積含水率25%

(b)体積含水率30%

(c)体積含水率35%

(d)体積含水率40%

図-9 安全率分布

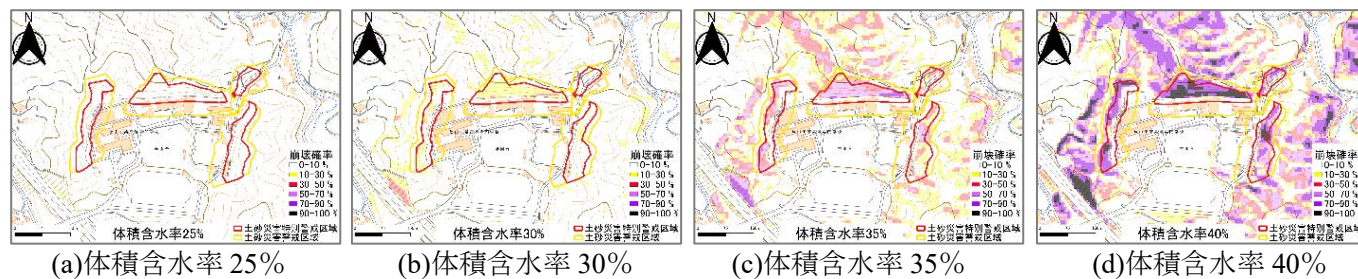


図-10 斜面崩壊確率分布

6. おわりに

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、徳山工業高等専門学校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。また、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。

第二に、松尾の方式⁶⁾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、松尾の代表値を用いて周辺斜面の健全度をGISによりマッピング・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、斜面崩壊確率の指標の方が急傾斜地で鋭敏な反応を示すと考えた。

今後も継続して現地観測・現地実験を行い、データ収集を行っていく。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・ブレーン様、観測カメラを中村建設株式会社様、現地斜面の造成を多機能フィルター株式会社様・日本工営株式会社様、航空写真等電子データを山口県土木建築部砂防課様にご提供等いただきました。また、徳山工業高等専門学校の上俊二特命教授、桑嶋啓治准教授、福田靖技術長をはじめとする多くの皆様に熱心な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：令和二年の土砂災害，p2，<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasaigai.pdf>，（2022年3月29日閲覧）
- 2) 国土交通省：令和二年の土砂災害，p4，<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasaigai.pdf>，（2022年3月29日閲覧）
- 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>，（2022年3月29日閲覧）
- 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，（2022年4月6日閲覧）
- 5) 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.
- 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) 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.
- 8) 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..
- 9) 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.
- 10) 地盤工学会：地盤工学用語辞典，丸善出版株式会社，p26，2020.
- 11) 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>，（2022年3月29日閲覧）
- 12) 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.