

斜面崩壊危険斜面での降雨パターンと土壌浸透の現地モニタリング と危険度予測手法の構築

土木学会西部支部調査研究委員会 研究代表者 山本健太郎
大分大学

本研究では、崩壊の可能性のある層（表層土）が、降雨により飽和すれば危険度が高まると考えられることから、雨の降り方と崩壊の可能性のある層の飽和度の関係を明らかにし、危険度をリアルタイムに予測する手法を開発することを目的とした。本稿では、降雨特性と地盤の体積含水率の変化傾向を把握するために実施した計測手法と結果について、門司区と小倉南区の事例を報告する。また、小倉南区への表面波探査の適用についても述べる。

1. はじめに

降雨による斜面災害から住民の生命と財産を守るためには、降雨と斜面崩壊の危険度の関係を明らかにし、住民にとって分かりやすい警戒避難体制を構築することが必要と考える。福岡県北九州市では、雨の降り方と斜面崩壊の関係について研究が進められ、その成果が警戒避難情報に関する意思決定時の参考資料に供されている¹⁾。

土木学会西部支部の調査研究委員会である「斜面崩壊と雨の降り方との関係と警戒避難システムの実用化に関する調査研究委員会」では、斜面災害から住民の生命と財産を守るため、斜面崩壊を予測する手法を開発するために調査を実施してきた²⁾。そこでは、崩壊の可能性のある層（表層土）が、降雨により飽和すれば危険度が高まると考えられることから、雨の降り方と崩壊の可能性のある層の飽和度の関係を明らかにし、危険度をリアルタイムに予測する手法を開発することを目的とした。本研究では、降雨特性と地盤の体積含水率の変化傾向を把握するために実施した計測手法と結果について、門司区と小倉南区の事例を報告する。さらに、小倉南区の事例に対し、不均質な地下構造の面的把握のために表面波探査を適用した結果について述べる。

2. 地形地質概要³⁾

図-1には、北九州市圏域である福岡県北東部での調査対象位置、図-2 調査地周辺の地質を示す。門司区の調査地は企救半島の山地南東向き斜面(標高 50~100m)に位置する。地質は呼野層群に属する凝灰質砂岩の分布域であり、現地観察では赤褐色の玄武岩強風化土と黄灰色の凝灰

質岩強風化土が確認された。次に、小倉南区の調査地は林道沿いの北向き斜面(標高 190m)に位置し、地質は中生代白亜紀後期の花崗岩類(平尾花崗閃緑岩)で中~粗粒の塊状岩盤を呈している。写真-1には、調査地全景を示す。なお、門司区は平成 30 年 7 月豪雨での崩壊跡地の近傍で中・古生層の堆積岩、小倉南区は花崗岩の地質区分であった。

3. 主要な原位置試験

原位置試験として、崩壊の恐れのある層厚を把握する目的で簡易動的コーン貫入試験(通称:簡易貫入)⁴⁾を実施した。簡易動的コーン貫入試験による N_d 値の算定式は以下に示す。

$$N_d = 10N / \Delta h \quad (1)$$

ここに、 N : 打撃回数(回)、 Δh : 貫入量(cm)である。

4. モニタリング概要

事前に実施した原位置試験(簡易動的貫入試験、土層強度検査棒、現場透水試験、密度試験)や採取試料を用いた室内土質試験(物理試験、締固め試験、一軸・三軸圧縮試験)の結果を参考にして、土壌水分センサーは斜面の上部、中部、下部のそれぞれに対して、深度 0.2m、0.5m、0.8m、1.0m に設置した。なお、図-3には簡易測量と簡易動的貫入試験から得られた地質断面を示す。図-3(a)は門司区の地質断面図を示し、斜面の上部、中部、下部の位置はそれぞれ R5-No.1、R5-No.2、R5-No.3 で示される。 $N_d \leq 5$ である崩積土(dt)の下に薄い凝灰岩砂岩(W-Ss、 $5 < N_d \leq 10$)があり、その下層(Ss)に $10 < N_d$ の凝灰質砂岩が分布していることがわかる。一方、図-3(b)は小倉南区の地質断面図を示し、斜面の上部、中部、下部



図-1 調査対象位置



図-2 調査地周辺の地質

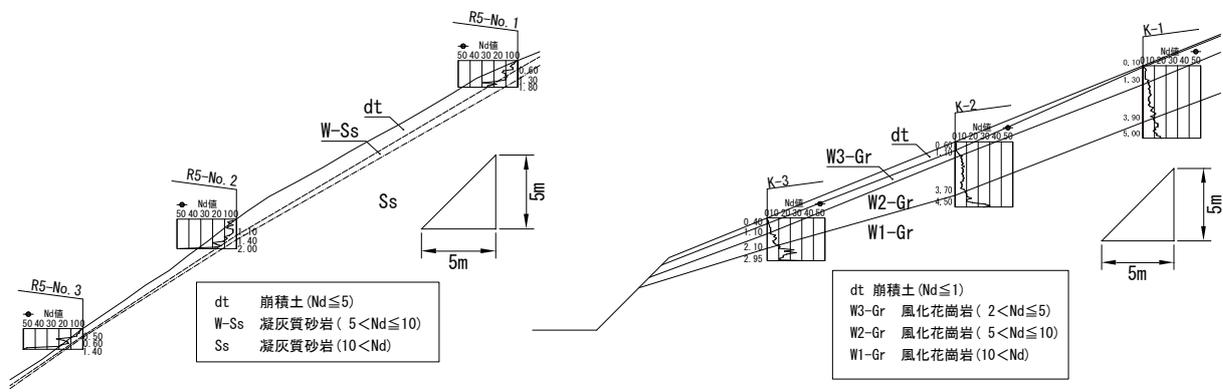


(a) 門司区



(b) 小倉南区

写真-1 調査地全景



(a) 門司区

(b) 小倉南区

図-3 簡易動的貫入試験による地質断面

の位置はそれぞれ K-1, K-2, K-3 で示される。 $N_d \leq 1$ である薄い崩積土(dt)の下に薄い風化花崗岩 W3-Gr ($2 < N_d \leq 5$)あり、その下層 W2-Gr, W1-Grに $5 < N_d \leq 10$ と $N_d < 10$ の風化花崗岩がそれぞれ分布していることがわかる。なお、写真-2(a)~(d)には門司区の斜面上部に設置した計測機器全景、データロガー、深度 0.2m と 1.0m に設置した土壌水分センサーを示す。

門司区は小倉南区と比較すると、斜面勾配が急である。また、観測は土壌水分センサー SM150T (Delta-T 製) と外部プレヒート基盤と接続したデータロガー MCR-4V (TANDD 製) を使用し、縦穴から山側に向けて設置した(写真-2(c), (d)参照)。観測間隔は 10 分間隔で、月 1 回のデータ回収を実施している。なお、降雨量は北九州市が設置している近隣の観測所における 10 分毎のデータを利用した。

5. モニタリング結果

現場での体積含水率のモニタリングは門司区：2023年8月22日、小倉南区：2023年9月12日に開始した。図-4は門司区での体積含水率と降雨の経時変化を示す。これは、図-3(a)で示される斜面上部(R5-No.1), 中部(R5-No.2), 下部(R5-No.3)のそれぞれの位置において、地表面から 0.2m, 0.5m, 0.8m, 1.0m の深さの断面に土壌水分センサーを挿入し、降雨量に伴う体積含水率の変化を観察したものである。まず、これらのグラフを見ると、斜面中部と下部が上部と比較して、降雨量に対して敏感に反応していることがわかる。斜面上部と中部では、浅層である 0.2m の体積含水率が小さい。斜面下部になると、0.5m の次に 0.2m の体積含水率が大きい値を示し、降雨にも良く反応していることが観察できる。よって、表層からの浸透水による影響は斜面下部においてのみ、顕著と言える。これらの現象は斜面勾配や分布地質にも関連すると考えられる。

次に、図-5は小倉南区での体積含水率と降雨の経時変化を示す。これは、図-3(b)で示される斜面上部(K-1), 中部(K-2), 下部(K-3)のそれぞれの位置において、地表面から 0.2m, 0.5m, 0.8m, 1.0m の深さの断面に土壌水分センサーを挿入し、降雨量に伴う体積含水率の変化を観察したものである。まず、斜面上部では中層 (0.5m), 斜面中部と下部では下層 (0.8m, 1.0m) の体積含水率が大きいことがわかる。また、上部では降雨量に伴う深層 (1.0, 0.8m) の変化が少なく、中部では浅層 (0.2m) と中層 (0.5m) の反応が

似ており、下部では深層 (1.0m) の変化が少なく、中層 (0.5m) の体積含水率が最も小さかった。なお、特にモニタリングの後半において、門司区の方が小倉南区に比べて、少量の降雨でも体積含水率の変化が顕著であることも観察できた。

6. モニタリングの考察

詳細な検討は今後のモニタリング結果も加味し、実施していく。現状での結果をまとめると以下ようになる。

- ① 時間降雨量数ミリ程度の降雨でも、各々の地点で体積含水率に変化が生じる。
- ② 体積含水率の変化は、斜面の位置や深度により、その開始時間や変化率(変化の度合い)が異なる。

7. 表面波探査の適用

斜面の地層、地下水状況を面的に把握し、斜面崩壊に至る機構の推定に関する情報の精度を向上させること目的として実施した表面波探査の結果と崩壊機構の推定、現状における課題について述べる。

7.1 不均質な地下構造の面的把握

斜面崩壊の予測には、地表面の明瞭な遷急線、段差地形、裸地や植生、地層の強度特性、地下水の浸透状況、誘因となる雨の降り方等の情報が必要となる。地表情報はレーザー測量、赤色立体図のデータから微地形判読の精度向上が認められる。一方で、地中の情報は、簡易動的コーン貫入試験を 7m~13m 間隔で実施した 3 地点 (K-1~K-3) の N_d 値と斜面下方の露頭の情報を線で結び地層区分を想定したものであり(図-6)、不均質な風化部、クラック、小断層といった不連続面は考慮されていない。

斜面の地層・地下水モデル構築の精度向上には、斜面方向、深さ方向の面的連続性の確認が課題と考えられる。そこで、図-6の測線で多チャンネル式表面波探査(図-7)を実施して、地盤の工学的性質(剛性率)を反映する S 波速度 (V_s : m/s) の分布構造を把握し、探査の不均質な地下構造把握の有効性について検討した。

7.2 表面波探査結果

図-8に簡易動的コーン貫入試験結果を $N_d \leq 5$ を表層土、 $N_d \leq 10$ を下層土、 $N_d > 10$ を風化岩層として破線で示した。また、S 波探査結果を速度 10m/s ピッチで色分けして示した。 $N=2/3N_d$, $V_s=100 \cdot N^{1/3}$ (道路橋の粘性土の式)を用いると $N_d=5$ が $V_s \approx 150\text{m/s}$ $N_d=10$ が $V_s \approx 190\text{m/s}$ と



(a) 計測機器



(b) データロガー



(c) 深度 0.2m のセンサー



(d) 深度 1.0m のセンサー

写真-2 現場での設置状況 (門司区)

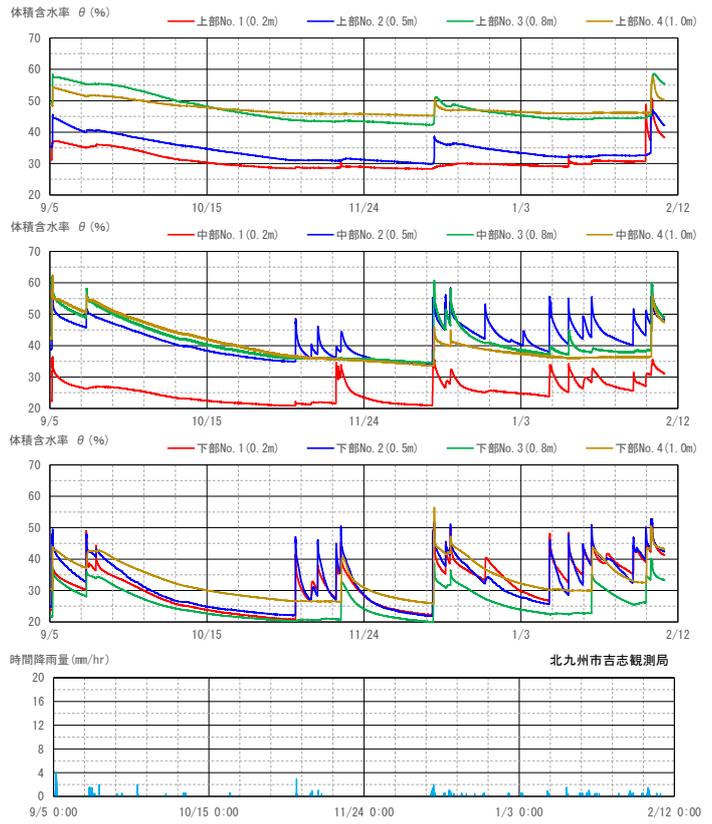


図-4 体積含水率と降雨量の経時変化 (門司区)

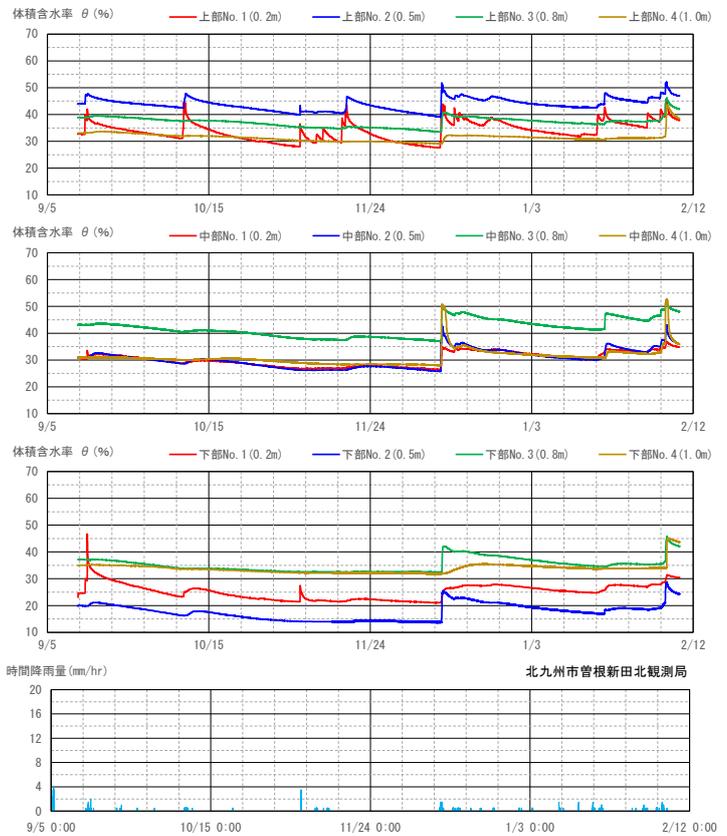


図-5 体積含水率と降雨量の経時変化 (小倉南区)

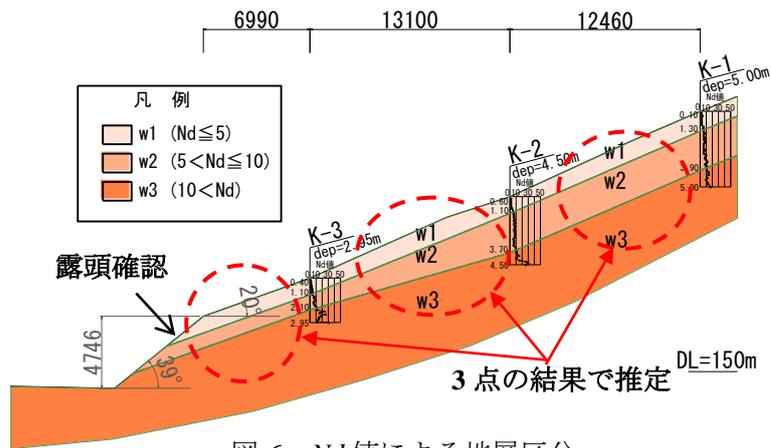


図-6 Nd 値による地層区分

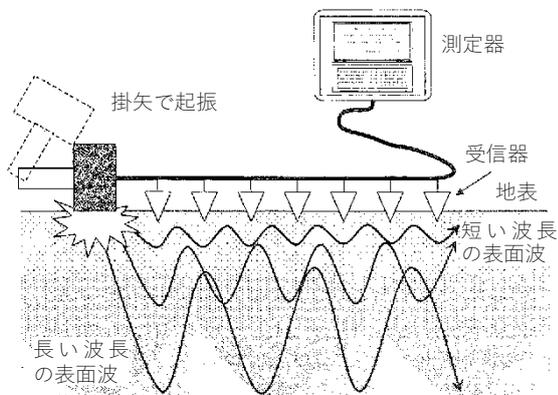


図-7 多チャンネル式表面波探査模式図⁵⁾

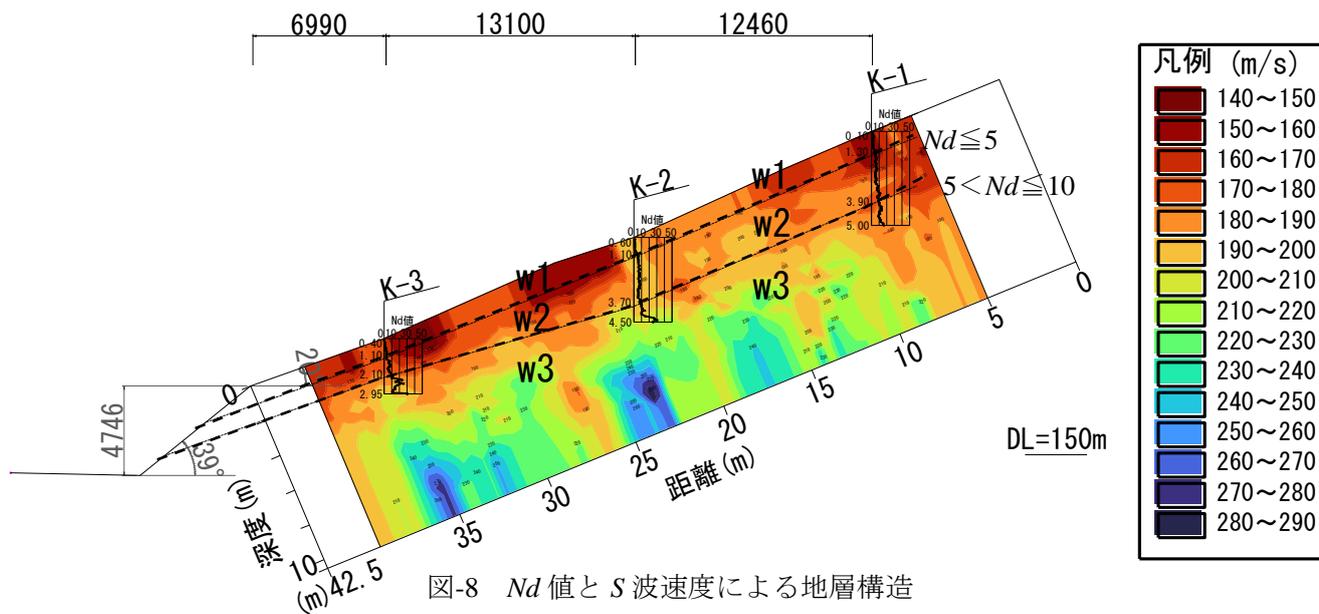


図-8 Nd 値と S 波速度による地層構造

なる。この図から、 Nd 値による地層区分に比べ、 S 波速度の分布構造の方がより詳細な状況を把握することができる。この図から、 Nd 値による地層区分に比べ、 S 波速度の分布構造の方がより詳細な状況を把握することができる。

簡易動的コーン貫入試験箇所の S 波速度を見ると、K-1 と K-3 は $Nd \leq 5$ の境界で $V_s=140 \sim 170\text{m/s}$ 、 $5 < Nd \leq 10$ の境界は $V_s=180 \sim 190\text{m/s}$ を示し、深度方向へ V_s が大きくなることが認められた。K-2 の S 波速度は $V_s=140 \sim 170\text{m/s}$ 層が欠如している結果となっている。

斜面方向の S 波速度の分布構造は、表層の $V_s=140 \sim 170\text{m/s}$ の分布を見ると、K-1 から下方へ 10m、K-2 の下方へ 5m、K-3 の上方へ 3m の範囲に分かれ連続性に乏しく、 Nd 値による地層区分のように風化状況が単純ではないことがわかる。表層には写真-1(b)で見られるように植生が多く、起振箇所や受信器が樹木に近い箇所もあり、これらの影響で解析精度に影響が出ている点も懸念される。

7.3 精度向上への課題等

Nd 値と S 波速度による地層構造を対比したが、 S 波速度の分布構造がより詳細に地下の風化状況を示しており、深度方向と斜面方向の不連続面を読み取ることができた。したがって、表面波探査を先行して実施し 2 次元的に地下構造を把握したうえで、適切なテストピットやモニタリング箇所を選定することで、崩壊対象層の分布状況、発生位置の特定に有効なデータ取得に繋がると考える。ただ、今回調査した斜面は写真-1(b)にあるように大木の根の影響で探査データの品質に問題があることも考えている。植生状態の再確認と、簡易動的コーン貫入試験を追加し、 Nd 値と S 波速度の関係から花崗岩の風化特性を踏まえる。そして、斜面の地層構造を詳細に見極めることが課題となる。

8. おわりに

体積含水率の観測は、2023年の梅雨後に開始したため多くの降雨を経験していないが、深さ方向の傾向や降雨時の変化に特徴が見られた。現在、北九州市内の分布地質が異なる全3地点において観測を実施中である。今後はモニタリングを継続し、降雨特性に着目した考察、分布地質の違い、斜面での計測位置や深度方向における体積含水率の変化傾向の把握を目指す。

表面波探査は現地作業の省力化と詳細な地層構造を捉えるのに有効と考える。本調査研究委員会では北九州市の協力を得て、複数の地質条件下で発生した斜面崩壊箇所で現地調査を進め

ている。今後、基礎データの収集に努め、地層・地下水モデル及び斜面崩壊に至る機構の推定に関する精度向上を目指す。

なお、本報告書の内容は、令和5年度土木学会西部支部研究発表会(土木学会、2024年3月)、第59回地盤工学研究発表会(地盤工学会、2024年7月)と令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会(土木学会、2024年9月)において、発表あるいは発表予定であることを記す。

9. 謝辞

本研究委員会の活動は、九州建設技術管理協会「建設技術研究開発助成」により多大なサポートを受けた。また、表面波探査に使用した地震計は応用地質株式会社から借用した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 玉田文吾, 横矢直道, 森与志信, 北九州市: 斜面崩壊と雨の降り方との関係 -福岡県北九州市・長崎市などにおける考察-, 2018.3.
- 2) 土木学会西部支部 斜面災害リスクに関する評価手法の開発と斜面災害の実用化に関する調査研究委員会: 斜面災害リスクに関する評価手法の開発と斜面災害の実用化に関する調査研究報告書, 2022.11.
- 3) 久保和也ら: 「20万分の1地質図幅 福岡/FUKUOKA」地質調査所(現産総研地質調査総合センター), 1993.
- 4) 地盤工学会: 地盤調査—基本と手引き—, pp.113-118, 2005.
- 5) (公社)地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説, pp.147, 2013.

2024.05.07受理