

# 北九州市小倉南区の自然斜面における 土壌水分の現場モニタリング

## FIELD MONITORING OF SOIL MOISTURE ON NATURAL SLOPE IN KOKURA-MINAMI AREA, KITAKYUSHU CITY

東風平宏<sup>1</sup>・山本健太郎<sup>2</sup>・横矢直道<sup>3</sup>・佐藤秀文<sup>4</sup>・徳田充樹<sup>5</sup>・山下武志<sup>6</sup>・宮原仁<sup>7</sup>

Hiroshi KOCHIHARA, Kentaro YAMAMOTO, Naomichi YOKOYA, Hidefumi SATOU,

Mitsuki TOKUDA, Takeshi YAMASHITA and Hitoshi MIYAHARA

<sup>1</sup> 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (〒814-0022 福岡県福岡市早良区原 2-16-7)

<sup>2</sup> 大分大学 (〒870-1192 大分県大分市且野原 700 番地)

<sup>3</sup> 元 株式会社福山コンサルタント (〒802-0004 福岡県北九州市小倉北区鍛冶町 2 丁目 1 番 6 号)

<sup>4</sup> 平成地研株式会社 (〒812-0894 福岡県福岡市博多区諸岡 1 丁目 7-25)

<sup>5</sup> 新地研工業株式会社 (〒812-0063 福岡県福岡市東区原田 1-42-41)

<sup>6</sup> 日本地研株式会社 (〒812-0894 福岡県福岡市博多区諸岡 5 丁目 25-25)

<sup>7</sup> さくら設計株式会社 (〒812-0893 福岡県福岡市博多区那珂 3 丁目 21-27-609)

**Key Words:** slope failure, soil Moisture, portable dynamic cone penetration test, surface-wave exploration

### 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<sup>1)</sup>。

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、平成30年7月豪雨にて、甚大な土砂災害が発生した北九州市を対象に、斜面崩壊を予測する手法の開発を目指し、調査・研究を実施してきた<sup>2)</sup>。ここでは、斜面の表層土が降雨によって飽和すれば、崩壊の危険度が高まると考え、雨の降り方と崩壊の可能性のある地層の飽和度と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ている。本稿では、北九州市小倉南区朽網をフィールドと

して実施した簡易動的コーン貫入試験、現場透水試験及び室内土質試験の結果に基づき、現地の地質や工学的特性について整理するとともに、土壌水分センサーによる連続観測から降雨に伴う地盤の体積含水率の変化傾向について報告するものである(図-1)。

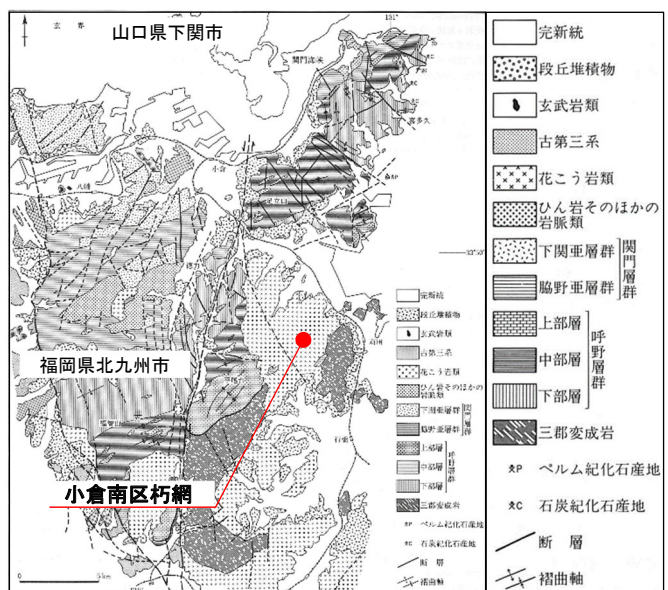


図-1 北九州市周辺の地質概念図<sup>3)</sup>

北九州市地域には上部古生界，下部白亜系，古第三系，第四系および白亜紀深成岩類，鮮新世－更新世の玄武岩類などの幅広い年代の多様な岩石・地層が複雑な地質構造をなして分布している<sup>3)</sup>。平成30年7月豪雨の土砂災害は地質別の被災件数や発生比率に若干偏りはあるものの，基本的に市内全域で発生している<sup>2)</sup>。このことから，地質分布による違いも明らかにすべく，代表的な地質毎に同様の取組みを行っているが，今回は北九州市の南東に位置する小倉南区の中生代花崗岩類の事例を対象とする。

## 2. 地形地質概要

対象地は，林道に面した北東向き斜面となり，道路脇は傾斜40°程度の切土であるが，大局的には傾斜20°程度の比較的緩やかな斜面である(図-2，写真-1)。同林道では表層崩壊も数多く発生しているが，当該地では急傾斜の斜面高が低いため，表層の肌落ち(侵食)を除き，崩壊及びこれに至るような変状は確認できない。

基盤の地質は，長径1cm内外の柱状角閃石の斑状結晶が特徴的であり，径10cm以下の閃緑岩質暗色包有物が点在する中生代白亜紀後期の花崗岩類である(中～粗粒の塊状岩盤を呈す平尾花崗閃緑岩)。現地の産状として，上位から黄灰～淡褐灰色の砂質土状のまさ土，礫質土状のまさ土～軟岩の風化帯を伴い，最大径2.0m程度のコアストーン(未風化硬質岩)が一部点在するものと想定される。なお，岩盤の上位は，一般に砂質土を主体とする表層土により薄く覆われている。

## 3. 現地調査結果と地盤状況

### (1) 簡易動的コーン貫入試験

簡易動的コーン貫入試験は，斜面を上部，中部，下部の3地点に分けて実施し，試験結果であるNdの傾向を基に地層区分を行った(写真-2，表-1)。

Ndの傾向として，斜面の下部K-3では表層からGL-1m程度がNd≤5，GL-2mにてNd≤10となる。一方，斜面の中部K-2及び上部K-1では，Nd≤5の地層はK-3と同じくGL-1m程度までとなるが，Nd≤10の地層はK-3と異なりGL-4m付近までとやや厚く分布する。このように，表層のNd≤5の地層の層厚は概ね場所による違いは認められないが，その下位Nd6～10は斜面上方ほど厚くなっている。また，斜面上方のK-1およびK-2はNd10以深から急激にNdが上昇するが，K-3のNdは急激な上昇はな

く緩やかな傾向が深部まで続いている(図-3)。

本斜面が尾根の側方斜面であることも考慮すると，崖錐堆積物など二次堆積物の層厚は薄く，浅所から基盤地質である花崗岩の風化層となり，それは斜面上部ほど厚く分布していると考えられる。

### (2) 現場透水試験

現場透水試験は，簡易動的コーン貫入試験の3箇所(K-1，K-2，K-3)において，単孔を利用した透水試験法(JGS1314)に準じた方法で実施した(写真-3，図-4)<sup>4)</sup>。

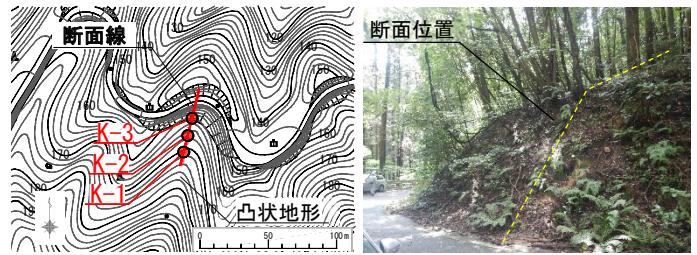


図-2 平面図

写真-1 全景



写真-2 測定状況

表-1 Ndの境界深度

Nd	K-3 (GL-m)	K-2 (GL-m)	K-1 (GL-m)
Nd≤5	1.1	1.1	1.3
Nd≤10	2.1	3.7	3.9

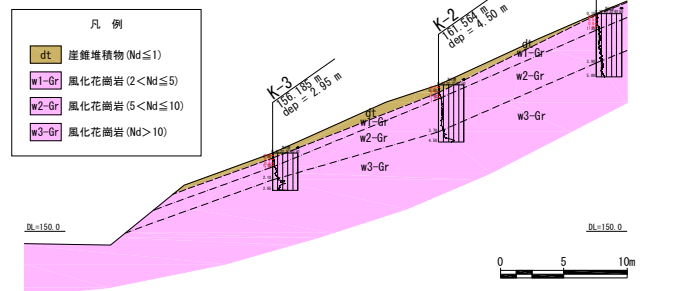
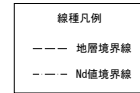


図-3 簡易動的コーン貫入試験結果に基づく地質断面図



写真-3 測定状況

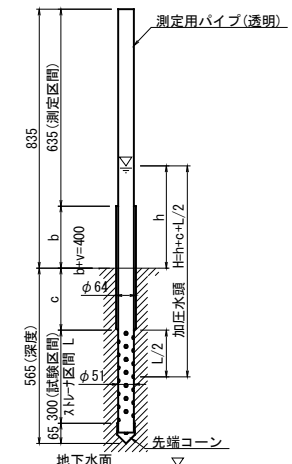


図-4 現場透水試験装置

表-3 室内土質試験結果

地点名	深度	室内土質試験								
		土粒子の密度 $\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	含水比 (%)	粒度				液性 限界 $W_L$ (%)	塑性 限界 $W_P$ (%)	塑性 指数 $I_P$
				礫 (%)	砂 (%)	シルト (%)	粘土 (%)			
K-1	0.2m	2.601	39.2	0.7	41.9	27.7	29.7	62.7	30.4	32.3
K-1	0.5m	2.642	39.8	1.2	43.1	27.4	28.3	70.6	30.3	40.3
K-1	0.8m	2.660	35.9	1.9	57.3	19.4	21.4	70.6	30.2	40.4
K-1	1.0m	2.648	34.1	1.8	56.9	18.9	22.4	66.9	30.8	36.1
K-2	0.2m	2.607	36.5	0.7	38.9	24.3	36.1	65.4	30.1	35.3
K-2	0.5m	2.627	35.1	1.3	44.8	22.9	31.0	59.1	30.0	29.1
K-2	0.8m	2.644	37.7	1.7	47.8	24.7	25.8	64.4	30.6	33.8
K-2	1.0m	2.644	36.2	1.7	54.4	22.5	21.4	66.3	30.8	35.5
K-3	0.2m	2.593	36.8	1.0	37.4	30.7	30.9	48.0	30.1	17.9
K-3	0.5m	2.610	37.6	0.8	36.5	32.4	30.3	49.7	29.9	19.8
K-3	0.8m	2.642	34.2	0.9	34.3	31.5	33.3	58.4	29.9	28.5
K-3	1.0m	2.637	33.3	1.0	35.4	31.5	32.1	61.0	30.4	30.6

これは打込みサンプラーにてサンプリング削孔した後、その孔内に透水試験装置のストレーナ部分 (GL-0.3~0.6m 付近) を挿入し密着させ、注水を行い、単位時間当たりの地盤への浸透量 (測定パイプ内の水頭の低下量) を計測することで透水係数を試算するものである。透水係数  $k$  (m/s) は次式を用いて算出した。

$$k = \frac{2.3 \cdot Q}{2\pi L \cdot H} \log(2L/D)$$

$Q$ : 注水流量 ( $m^3/s$ )

$H$ : 試験区間の中央における加圧水頭 (m)

$L$ : 試験区間の長さ (m)

$D$ : 試験区間の孔径 (m)

概ね中位程度の透水性を呈し、地点毎に極端な差はないが、斜面上部ほど透水性がやや高い傾向が確認できる (表-2)。

### (3) 室内土質試験

室内土質試験は、簡易動的コーン貫入試験の3箇所 (K-1, K-2, K-3) および土壌水分センサーを設置する4深度 (0.2m, 0.5m, 0.8m, 1.0m) から、計12試料を採取し実施した。

粒度分布の傾向は、斜面上部では上部 K-1 より中部 K-2, 下部 K-3 に向かうほど、地点毎では浅い深度ほど、粗粒土から細粒土に変化する傾向が認められ、表層かつ斜面の下方において地山の風化など細粒化が進んでいるものと推察される (表-3, 図-5)。

細粒分含有率は斜面下部 K-3 では深度に関係なく60%を示すが、上部 K-1 は0.5m 以浅が60%, 0.8m 以深は40%となり、深度でやや傾向が異なる (図-6)。土粒子の密度, 自然含水比及び塑性指数についても、地点により若干異なるが、概して深さ0.5m 以浅と0.8m 以深で傾向を大別できるような結果が得られている (図-7, 図-8, 図-9)。このように、当斜面では深度方向の傾向として0.5m と0.8m の間で地層 (特性) が異なる可能性がある。

なお、粒度分布等の傾向では斜面下部ほど細粒化が進んでいるが、これは前述の現場透水試験による透水性と調和的な結果となっている (図-10)

表-2 透水係数

地点名 (場所)	地層 (Nd)	現場透水試験 $k$ (m/sec)
K-1(上部)	Nd ≤ 5	$5.5 \times 10^{-5}$
K-2(中部)	Nd ≤ 5	$2.0 \times 10^{-5}$
K-3(下部)	Nd ≤ 5	$4.9 \times 10^{-6}$

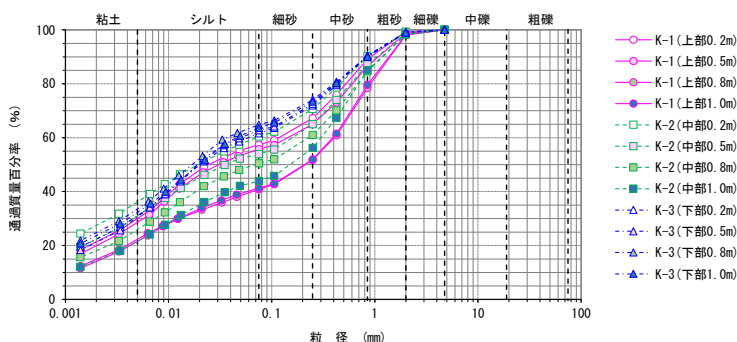


図-5 対象地盤の粒度分布 (粒径加積曲線)

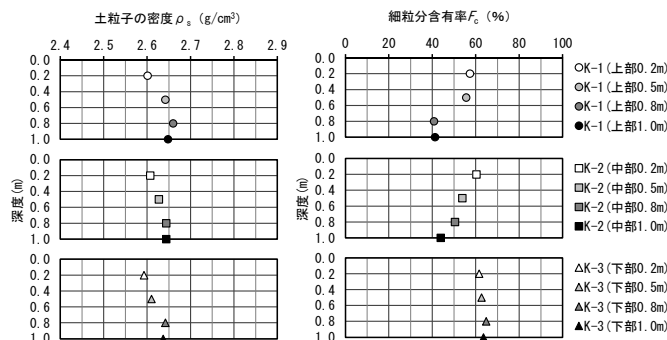


図-6 細粒分含有率

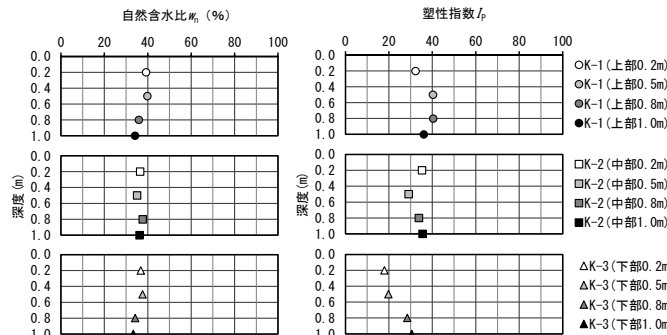


図-7 土粒子の密度

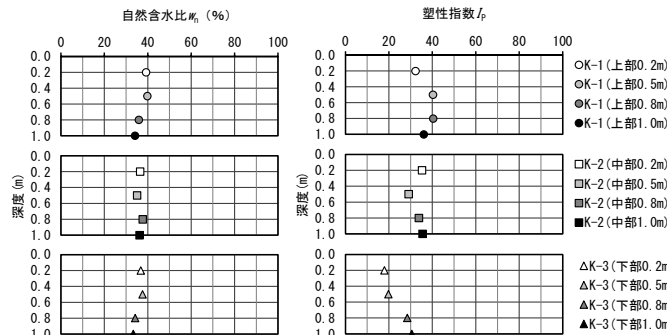


図-8 自然含水比

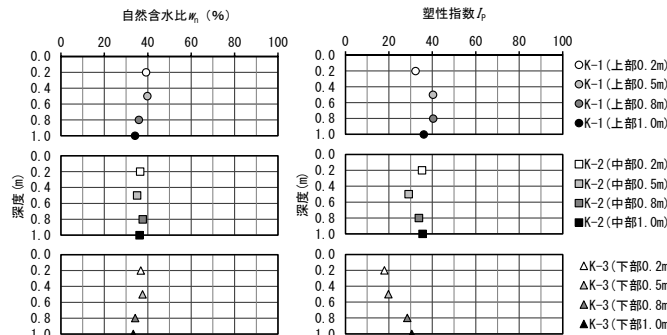


図-9 塑性指数

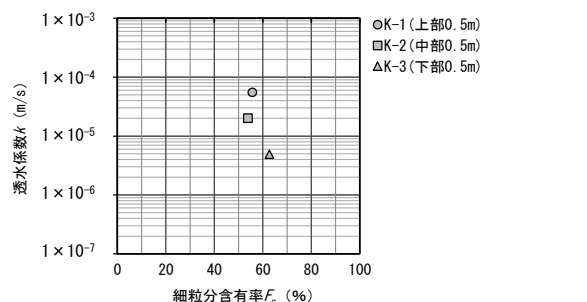


図-10 透水係数と細粒分含有率

#### 4. 土壌水分センサーによる体積含水率

土壌水分センサーによる観測は、2023年9月12日より開始し、3地点4深度の計12箇所において、現在も観測中である(図-12)<sup>5)</sup>。

##### (1) モニタリング概要

地中における体積含水率の観測は、土壌水分センサーSM150T (Delta-T Devices Ltd 製) とデータロガMCR-4V ((株)TANDD 製) を使用し、計器設置深さ毎に設けた縦穴から山側に向けて設置した(写真-4, 写真-5)。縦穴部の埋戻しは、ベントナイトを用いて雨水流入防止対策を講じた。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、体積含水率との関係性検討に用いる降雨量は、北九州市が設置している曽根新田北観測所における10分毎のデータを利用した。

土壌水分センサーは斜面の上部K-1、中部K-2、下部K-3にて、それぞれに事前に実施した原位置試験や採取試料を用いた室内土質試験の結果を参考に、深さ0.2m、0.5m、0.8m、1.0mの4深度に設置した(図-11)。地点により詳細は異なるが、深さ0.2mと0.5mはNd1~2程度、深さ0.8mはNd2~3、深さ1.0mはNd3~6程度となっている(表-3)。



写真-4 センサー設置状況

写真-5 観測状況

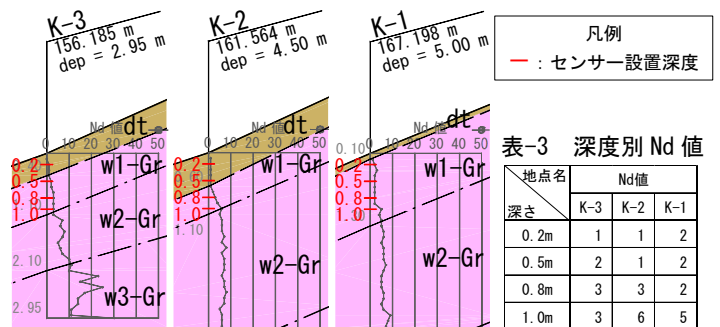


図-11 センサー設置深度

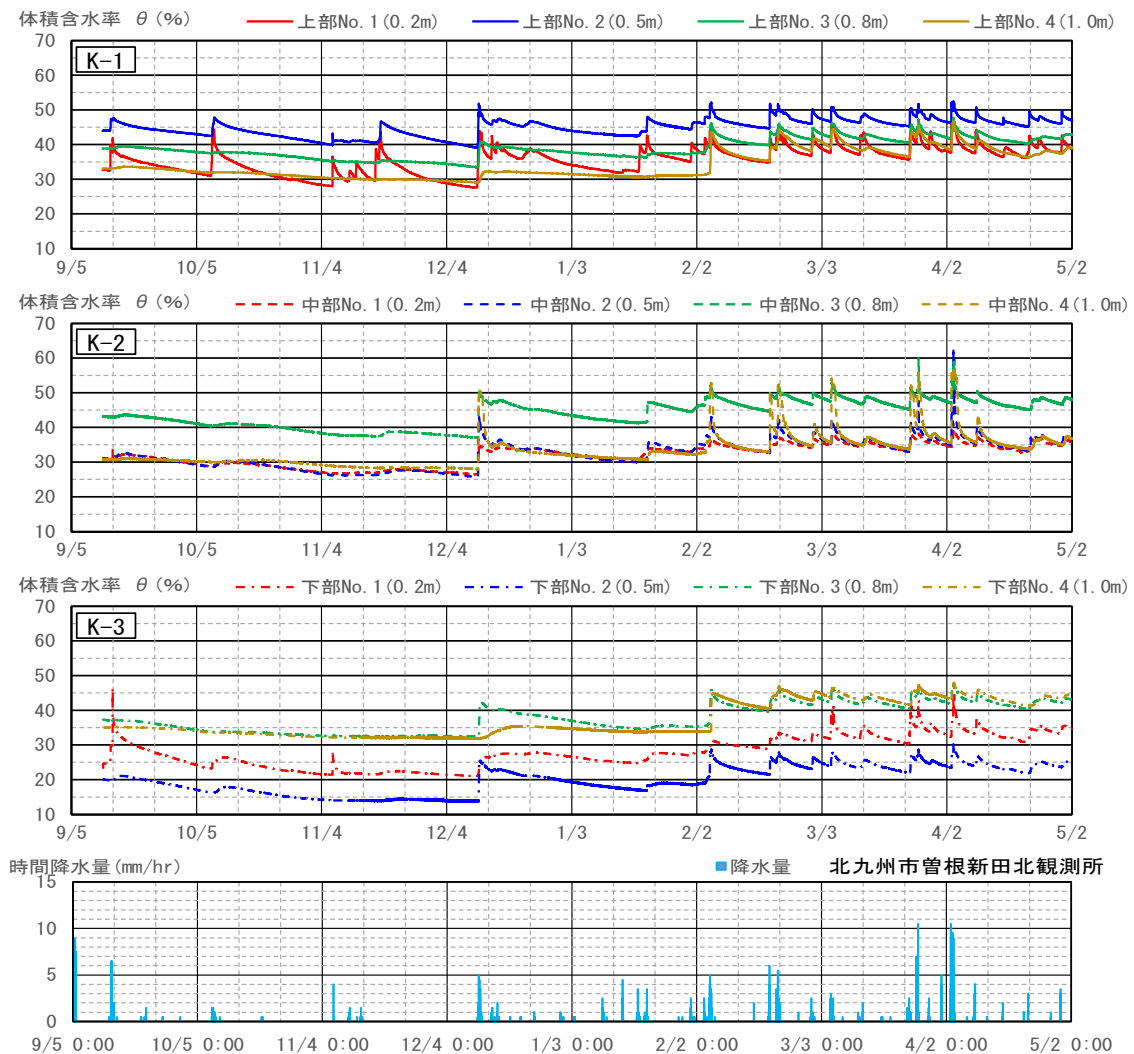


図-12 土壌水分センサーによる観測結果 (全期間)

## (2) モニタリング結果及び考察

計測開始から現在までの観測全期間における体積含水率の傾向として、数 mm の降雨でも体積含水率の上昇によるピークが発生する。さらに、2023 年 12 月までは緩やかな低下傾向にあったが、それ以降から現在にかけて上昇しており、これは降水の傾向と調和的であることから、当地の体積含水率は降雨と連動していることがわかる（表-4）。

全観測における傾向として、上部 K-1 や下部 K-3 では深度毎に体積含水率はばらつくが、中部 K-2 は深さ 0.8m 以外の 3 深度の体積含水率はほぼ同じ値となる。また、深さ 0.2m は降雨に反応し易いが、中部 K-2 ではピークが不明瞭である。原位置試験や室内試験からこの傾向を示唆するような結果は得られていないが、雨水浸透という観点において K-2 は他 2 箇所と異なる地山状況であることが考えられる。また、上部 K-1 では 0.5m、0.8m、0.2m 及び 1.0m、下部 K-3 では 0.8m、1.0m、0.2m、0.5m の順に体積含水率が小さくなるなど、体積含水率の数値と深さに明瞭な関連性は見いだせない。

観測期間において、最大の連続雨量が観測された 2024 年 4 月の状況について傾向を整理した（図-13）。

体積含水率は 30~40%前後であり、一部深度を除けば、ばらつきは少なく深さ毎にある程度まとまった値を示す（図-14）。

降雨の降り始めに体積含水率が変化するタイミングを深度別に整理すると、斜面の上部 K-1 と下部 K-

3 の地点については深さ 0.2m など表層に近いほど、反応するタイミングが早く、かつ急激に上昇し、深くなると反応は遅く、緩やかな変化となる（図-15、図-16）。一方、ピーク後に降雨前の状態に回帰する傾向は、深い深度が速く、表層に近いほうが遅くなる傾向を示す（図-17）。

表-4 観測期間における月間降水量

年	2023年				2024年			
	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
降水量 (mm)	70.5	13.5	12.5	54.5	48.0	93.5	99.0	125.0
対前月 (mm)	-	-57.0	-1.0	+42.0	-6.5	+45.5	+5.5	+26.0

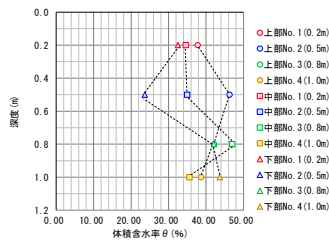


図-14 深度別の体積含水率 (2024 年 4 月降雨前)

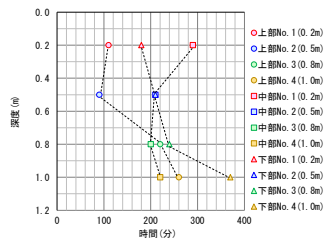


図-15 降り始めから上昇し始めるまでの時間

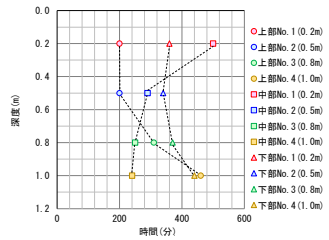


図-16 降り始めからピークに達するまでの時間

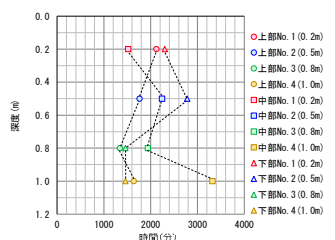


図-17 降り始めから降雨前に回帰するまでの時間

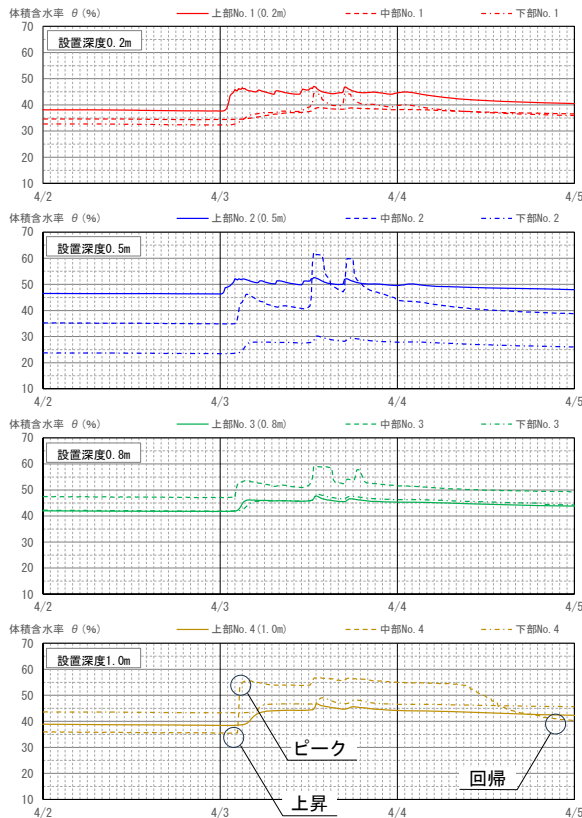
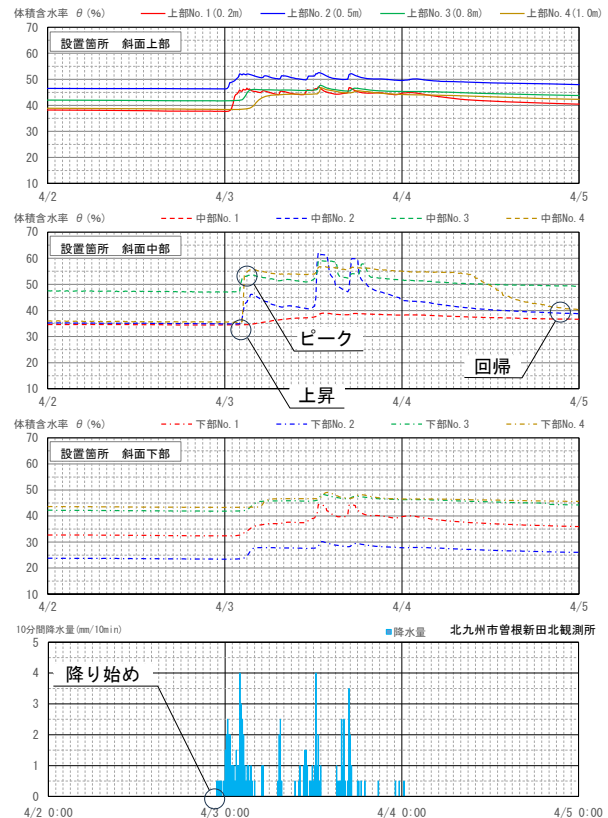


図-13 2024 年 4 月における体積含水率の変動傾向



なお、斜面の中部 K-2 については当該期間においても、前述の全期間の傾向と同じく、他 2 地点 (K-1, K-3) と異なる傾向を示す。

降雨の降り始めにおいて、体積含水率が変化するタイミング、その時点における累積降水量について関連性を整理すると、降雨の降り始めからピーク(平衡状態に達する時点)に至るまでの体積含水率とそれに要する時間、降水量は斜面下部や深部に比べて、斜面上部及び表層ほど少ない降水量で含水率の上昇及びピークが発生するといった相関関係が認められた(図-18, 図-19)。また、体積含水率のピークから降水前など平常時への回帰(下降)についても、前述の上昇時ほど明瞭ではないが、深部(0.8m 以深)ほど回帰が速いなど相関関係が認められる(図-20)。

このように、体積含水率の変化傾向は観測地点によるばらつきはあるが、大局的には、降水量と時間(降雨強度)に相関関係が見出せる可能性がある。

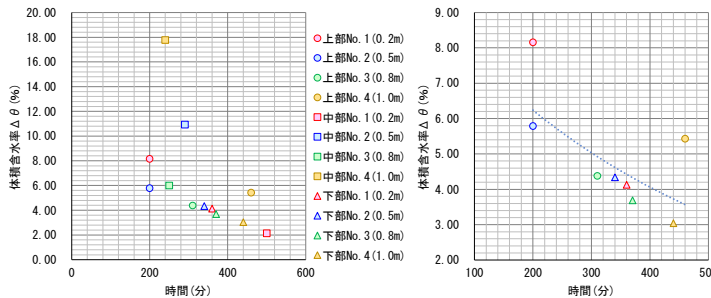


図-18 降り始めからピークまでの体積含水率と所用時間  
(右図：中部を除き，上・下部のデータによる傾向)

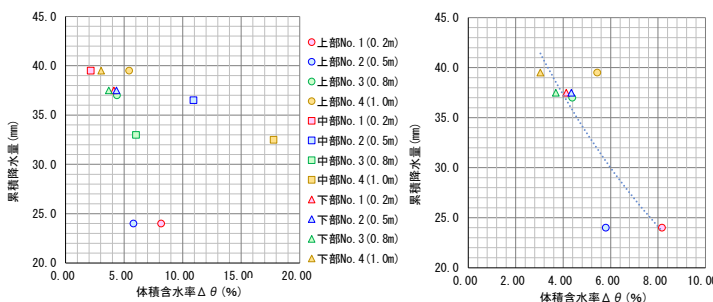


図-19 降り始めからピークまでの降水量と体積含水率  
(右図：中部を除き，上・下部のデータによる傾向)

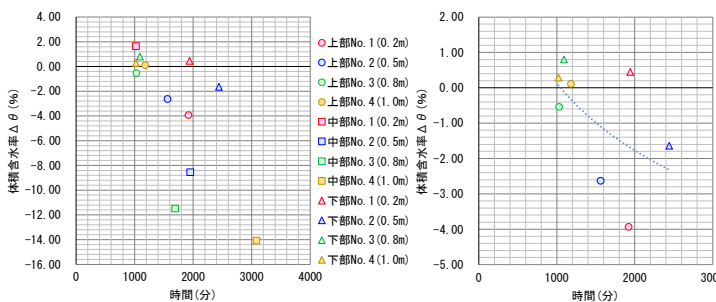


図-20 ピークから回帰までの体積含水率と所用時間  
(右図：中部を除き，上・下部のデータによる傾向)

## 5. まとめ

これまでのモニタリングから、降雨に伴い体積含水率が増加し、上昇するタイミング、変化量、速さ及び低下傾向は地点や深度によって異なっている。浅い深度ほど少雨でも鋭敏(反応が速く、変化量が大)である一方、深い深度では多雨でも反応が緩慢(反応が遅く、ピークが不明瞭、変化量が小)な場合がある。また、図-15,16のように、表層の0.5m以浅では斜面上部と下部の時間差が大きいが、0.8m以深は差が小さくなるなど、両深度で異なる傾向があり、地盤の工学的特性の傾向と調和的である。

ただし、これまでの観測は比較的少雨に対するものであることから、地盤の体積含水率と降雨強度、工学的性質との関連は定性的な評価に留まる。今後、斜面崩壊をもたらすような多雨時におけるデータを蓄積し分析を行うことで、定量的に評価できる可能性がある。その結果、これら関連性や雨水の地盤への浸透モデル等を明らかにし、「どのような雨の降り方(降雨特性)によって、斜面の崩壊対象層が飽和するのか(危険な状況になるのか)」を推定する手法の提案に繋げていきたい。また、北九州市内のほか地点でも同様の手法で調査・観測を行っており、今後、地形や分布地質、地盤の工学的特性の違いによる体積含水率の変化傾向等を把握し、予測手法の精度や適用性等についても併せて検討していきたい。

### 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・長崎県などにおける考察—, 北九州市, 2018年3月。
- 2) 公益社団法人土木学会西部支部, 斜面災害リスクに関する評価手法の開発と斜面防災の実用化に関する調査研究委員会:斜面崩壊と雨の降り方に関するシンポジウム, 北九州 2022 論文集, 斜面災害リスクに関する評価手法の開発を斜面防災の実用化に関する調査研究報告書, pp. 3-6, 2022年11月。
- 3) 日本の地質「九州地方」編集委員会:日本の地質9九州地方, 共立出版, 1992。
- 4) 地盤工学会:地盤調査の方法と解説改訂版, pp. 515-531, 2013年4月。
- 5) 山下武志, 甲木義徳, 波多優佑, 東風平宏, 宮原仁, 黒田隆志, 林泰弘:土壌水分センサーを用いた体積含水率の変化について—その 2—北九州市小倉南区と門司区における事例, 土木学会西部支部講演概要集, III-036, pp. 325-326, 2024年3月。

(2024. 5. 31 受付)