

# 北九州市圏域における豪雨による斜面防災の実用化に関する研究

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

西日本工業大学

本研究では、北九州市圏域で平成30年7月に発生した斜面崩壊を対象として、地形・地質、降雨・崩壊状況、崩壊土砂や崩壊面付近の土の物性値等を把握し、崩壊メカニズム及び降雨と崩壊層の飽和度（斜面崩壊の危険度）の関係について検討するものである。本稿では研究対象地の一つとして、北九州市小倉南区の山間部で発生した斜面崩壊の現地調査、原位置試験と斜面崩壊解析結果について報告する。

## 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と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>。そこで、本研究は北九州市圏域で平成30年7月に発生した斜面崩壊を対象として、地形・地質、降雨・崩壊状況、崩壊土砂や崩壊面付近の土の物性値等を把握し、崩壊メカニズム及び降雨と崩壊層の飽和度（斜面崩壊の危険度）の関係について検討するものである。

本稿では研究対象地の一つとして、北九州市小倉南区の山間部（図-1）で発生した斜面崩壊を一例として、現地調査による斜面崩壊メカニズムを基に、原位置試験（簡易動的コーン貫入試験、原位置透水試験）および室内土質試験結果から考察できる斜面崩壊の危険度と崩壊層の飽和度との関係について報告する。

## 2. 地形地質概要

対象地は、北九州市南部を通る東九州自動車道長野トンネル西側坑口付近の林道沿い斜面（標高80～90m）である（図-1参照）。

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（図-2参照）。当該地の地質は、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。

## 3. 崩壊状況

崩壊斜面は林道の西向き斜面で、古い滑落崖

を含めると約50mの崩壊履歴を伴っている。今回の豪雨による崩壊規模は、幅約15m、高さ約10m程度である。そして、崩土が道路を塞ぎ、一部下方斜面に落ちているが、幸い人的な被害は発生していない。現在、道路に表層水で浸食したと思われる水みちや窪みが多く、崩壊土砂の撤去も進んでいないため、車両通行止めとなっている。

## 4. 現地調査結果

### 4.1 崩壊斜面の地形地質状況

崩壊地周辺の地形は、尾根地形側面を切土した斜面で、典型的な集水地形ではないが、僅かに馬蹄形を呈している（図-3）。崩壊斜面を構成する地層は、上位から表土、赤褐色の粘土質まさ土、黄灰～淡褐灰色の砂質まさ土、礫質まさ土～軟岩が確認された（図-4, 7参照）。図-3中の写真-1, 2, 3はそれぞれの位置での現地写真を示す。これらを見ると、崩壊地全景色、コアストーンの点在、粘土質まさ土の露出がわかる。

粘土質まさ土は、一部に縦方向の乾燥クラックが卓越していた。乾燥クラックは粘性土の含水変化により形成されるもので、粘土化した強風化帯の表層部が乾燥しやすいためにできる。さらに、まさ土中には最大径1.5mのコアストーン（未風化硬質岩）の点在が認められた。これら乾燥クラックやコアストーンの形成は除荷作用による割れ目の発達から進行する花崗岩の典型的な風化形態であり（図-5(a)）、現地斜面の風化帯の形成を示すものである。

風化したまさ土は深部ほど締まり状態が強くなり、透水性も低くなる。上部の粘土質まさ土直下の緩い砂質まさ土は、比較的透水性が高いと想定される。そのため、粘土質まさ土中に形成された乾燥クラックを伝って侵入した地表水は、緩い砂質まさ土中に帯水され、次第にシート状の節理（図-5(b)）などで横方向に繋がり弱

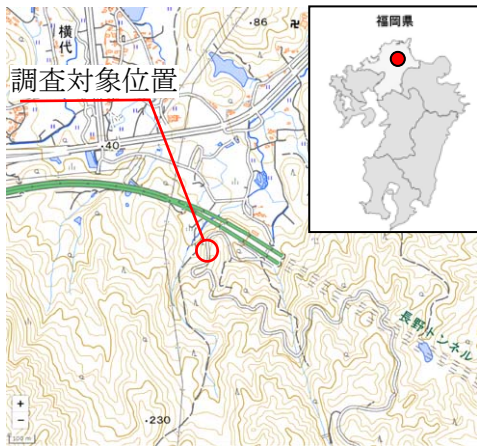


図-1 調査対象位置図

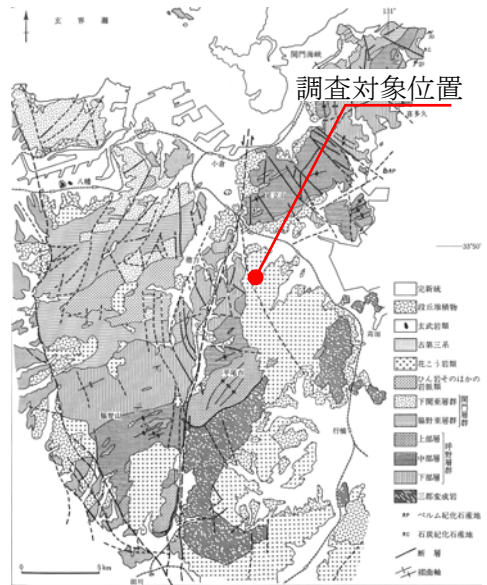


図-2 北九州市周辺の地質概要図<sup>2)</sup>

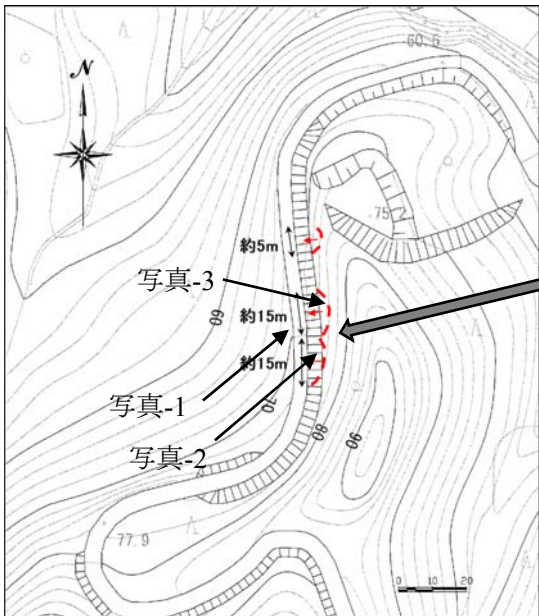


図-3 対象地周辺の地形図  
「北九州市基本図」S=1/2,500 (に加筆)

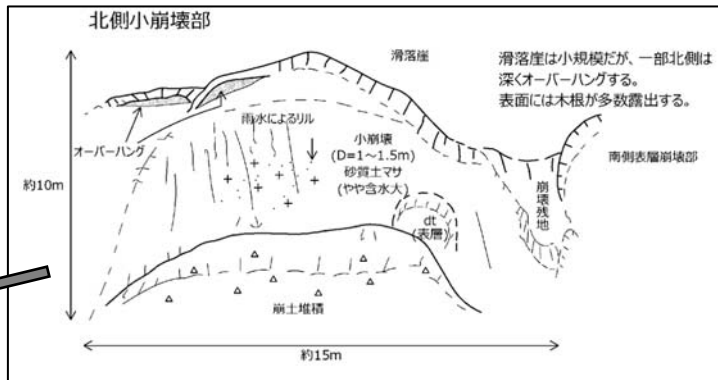
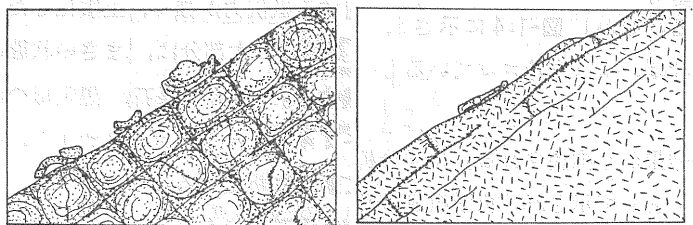


図-4 崩壊斜面のスケッチ



(a)初生的なクロス状の節理系に沿った進行  
(b)地表に平行に発達するシート状節理に沿った進行

図-5 花崗岩中の割れ目に沿う風化進行の説明<sup>3)</sup>



写真-1 崩壊地全景



写真-2 コアストーンの点在

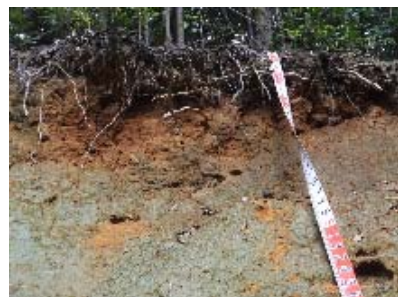


写真-3 粘土質まさ土の露出状況

面を形成したと考えられる。

#### 4.2 原位置試験結果

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）<sup>4)</sup>を、その層の透水係数を把握する目的で現場透水試験<sup>5)</sup>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）、 $\Delta h$ ：貫入量（cm）である。図-6には簡易動的コーン貫入試験結果を示す。この図を見ると、崩壊のり面（測線No.2）の崩壊層の厚さは1.8m程度であり、 $N_d \leq 5$ であった。また、非崩壊のり面（測線No.1）の  $N_d \leq 5$  の層厚は1m程度であった。

次に、現場透水試験は打込みサンプラーにてサンプリング削孔した後、その孔内に地中への注水を行う透水試験装置ストレーナ部分（ $\phi 51\text{mm}$ , 30cm）を挿入密着させ、その上部に水頭観察が可能なアクリル製測定用パイプと注水タンクを接合して試験準備が完了となる。そして、注水タンクに水を満たし、タンク直下のバルブを開放して試験区間を十分に湿潤させる。引き続いて測定を行うが、アクリルパイプ内の水位が一定に保たれるようにバルブ操作によって注水量を調節する。その時の注水タンクの減少水量と経過時間を測定すれば注水流量が求められ、加圧水頭や注水条件が既知であるので透水係数を算出することができる。写真-4には現場透水試験の実施状況を示す。なお、透水係数  $k$  (m/s) の算出には、地下水面が試験区間よりも下位にあると考え、次式を用いた<sup>5)</sup>。

$$k = 2.3 \cdot Q / (2\pi L \cdot H) \times \log(2L / D) \quad (2)$$

ここに、 $Q$ ：注水流量（ $\text{m}^3/\text{s}$ ）、 $H$ ：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）である。本試験では、 $L=0.3\text{m}$ 、 $D=0.051\text{m}$  である。今回、試験対象深さが0.5m程度までの範囲で、非崩壊箇所を実施した。その結果は  $9.3 \times 10^{-7} \sim 5.4 \times 10^{-5} (\text{m/s})$  で比較的低い透水性を示した。

#### 4.3 崩壊メカニズム

崩壊斜面の地形地質、崩壊状況と原位置試験結果から、図-7で示されるように崩壊のメカニズムが以下のように想定される。

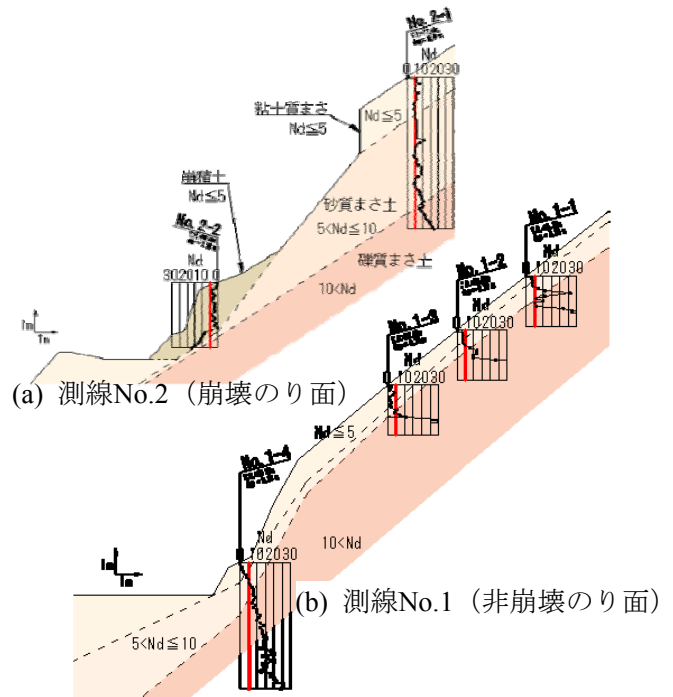


図-6 簡易動的コーン貫入試験結果



写真-4 現場透水試験の状況

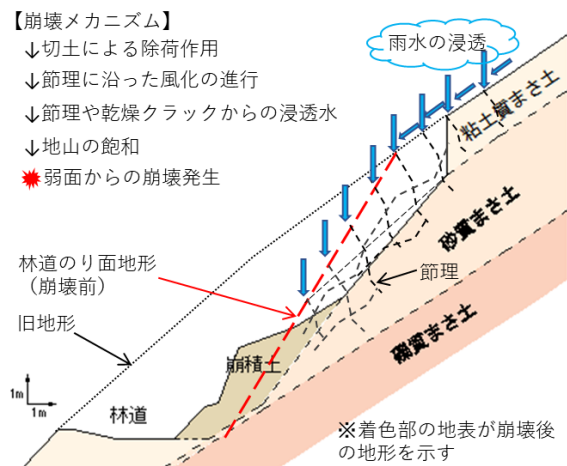


図-7 崩壊箇所の断面図

表-1 有効先行降雨量の算出に関する経験式

$Q_C = V_A \cdot D_s$ $V_A$ : 空気間隙体積, $D_s$ : 鉛直対象深度
$Q_A = h_w \cdot (V_A / 1000)$ , $h_w = A_w \cdot K^m \cdot t^{0.5}$ $A_w$ : 係数(200 ; 北九州市), $K$ : 透水係数(cm/s), $m$ : 指数(0.51 ; 北九州市), $t$ : 浸透時間 (3600sec)
$f(Q_E)_T = Q_E \cdot e^{(-Z \cdot T)}$ $Z$ : 指数 (0.021 ; 北九州市), $T$ : 経過時間(hour)

- ① 強風化した粘土質まさ土と緩い砂質まさ土が分布し、1 : 1.0 よりも急勾配かつ僅かに集水地形を呈する斜面であった。
- ② そこに、豪雨による地表水が強風化した粘土質まさ土に形成された乾燥クラックを伝って急激に供給されたため、これらの層が飽和し弱面が形成され崩壊が発生した。
- ③ 未崩壊斜面は、強風化部の層厚が薄く、切土高さも低かったために崩壊に至らなかった。

## 5. 斜面崩壊解析

### 5.1 玉田らによるアプローチ

斜面崩壊は、崩壊対象層が飽和することによって、「重量増加」と「粘着力の低下」が起こることにより発生する。玉田らによる北九州市における雨の降り方と斜面崩壊の関係についての研究<sup>1)</sup>によると、有効先行降雨量によって斜面崩壊の発生確率を予測できるとしている。この研究における、有効先行降雨量、降雨浸透能力、降雨浸透容量の定義は、以下の通りである。なお、表-1には有効先行降雨量の算出に関する経験式を示す。

降雨浸透容量 (mm) :  $Q_C$

崩壊対象層に貯留可能な降雨量。土質試験から求まる単位体積当たりの間隙量に対象層厚を掛けて求めた体積量。

降雨浸透能力 (mm) :  $Q_A$

崩壊対象層において、降雨強度に対応して浸透することが可能な降雨量（地表流下を考慮した浸透量）。降雨が降雨浸透能力よりも多い場合は、過剰分が表層を流下することになる。

有効先行降雨量 (mm) :  $Q_E$

崩壊対象内に有効に貯留される降雨量（地表流下、地中排水を考慮した貯留量）。

各値を算出するために、以下に示す調査と試験を実施したので、その結果を5.2に記す。

- ・簡易動的コーン貫入試験 :  $N_d$ 値および崩壊対象層厚の把握 [ $D_s$ ]
  - ・現場透水試験 : 崩壊対象層の透水係数 [ $k$ ]
  - ・室内土質試験 : 土粒子の密度  $\rho_s$ , 含水比  $w$ , 湿潤密度  $\rho_t$ , 空気間隙体積 [ $V_A$ ]
- なお、表-1における各項目の経験式にある  $A_w$ ,  $m$ ,  $Z$  は地形や地質構造、風化に起因した浸透特性を表すものである。既往研究では北九州市内の崩壊実績から経験的に一様に求められているが、今後、現地条件で個別に設定することも課題の一つと考えられる。

### 5.2 崩土と地山の物性値

空気間隙体積 ( $V_A$ ) の算出に必要な間隙比と飽和度は現地試料を試験し、以下のよう求めた。

土粒子の密度 ( $\rho_s=2.654 \text{ g/cm}^3$ ),

含水比 ( $w=23.9 \%$ ),

湿潤密度 ( $\rho_t=1.490 \text{ g/cm}^3$ ),

間隙比  $e=(1+w/100) \times \rho_s / \rho_t - 1 = 1.207$ ,

飽和度  $S_r = w \rho_s / e \rho_w = 52.6 \%$ ,

空気間隙体積  $V_A = e / (1+e) \times (1 - S_r / 100) = 0.259$

透水係数は、4.2でも述べたが、非崩壊箇所における深さ 0.5 m 程度の範囲で現場透水試験を実施し、 $k=9.3 \times 10^{-7} \sim 5.4 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}$ を得た。

表-2と図-8には、土質試験結果と粒径加積曲線を示す。これらを見ると、No.2-2崩土、No.2-2地山はNo.1-4地山に比べ、砂分が多い。一方、No.1-4地山はNo.2-2崩土、No.2-2地山に比べて、粘土分、シルト分が多いことがわかる。ここで、No.1,2は側線、次の数字は該当斜面での上方からの位置を表す（図-6参照）。また、崩壊した土砂は非崩壊箇所の土砂と比較して、低い細粒分含有率を示した。

### 5.3 降水量データと対象斜面崩壊時の再現性

降雨浸透容量  $Q_C$  と降雨浸透能力  $Q_A$  の算出を試みた。

表-2 土質試験結果

地点			No. 2-2崩土	No. 2-2地山	No. 1-4地山
土粒子の密度	$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2.669	2.654	2.640
自然含水比	$W_n$	%	17.9	22.8	25.9
石分		%	0.0	0.0	0.0
礫分		%	4.8	7.1	3.6
砂分		%	74.6	70.6	48.4
シルト分		%	16.0	15.7	21.0
粘土分		%	4.6	6.6	27.0
細粒分含有率	$F_C$	%	20.6	22.3	48.0
液性限界	$W_L$	%		53.2	63.1
塑性限界	$W_P$	%		30.3	32.6
塑性指数	$I_P$	%		22.9	30.5

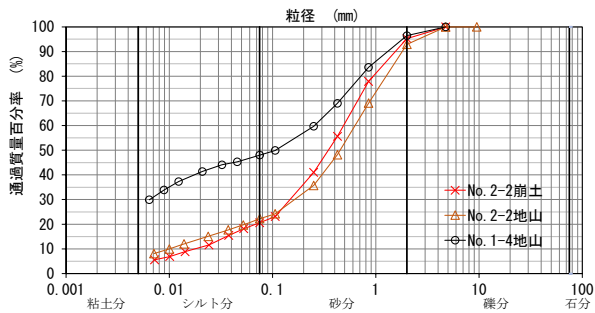


図-8 粒径加積曲線

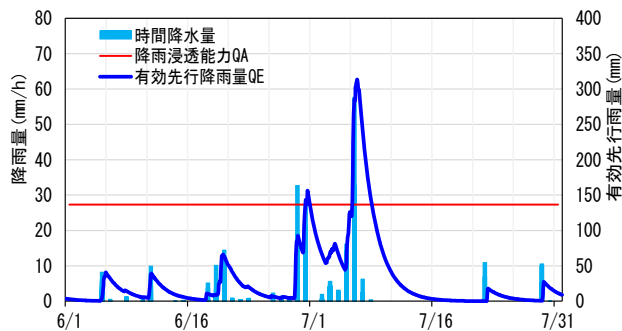


図-9 降水量と有効先行降雨量の関係  
(竹馬川観測点)

$$Q_C = V_A \cdot D_s = 0.259 \times 1800 = 466 \text{ (mm)}$$

$$Q_A = A_w \cdot K^m \cdot t^{0.5} \cdot (V_A/1000)$$

$$= 200 \times (9.3 \times 10^{-5})^{0.51} \times 3600^{0.5} \times (259/1000)$$

$$= 27.3 \text{ (mm)}$$

図-9には降水量と有効先行降雨量の関係を示す。ここで、降水量と有効先行降雨量 $Q_E$ は、現地から4 km離れた北九州市の「竹馬川」観測点の値を用いた。期間中の降水量が $Q_A$ を超えたのは3回であり、過剰分の降雨は表層を流下し浸食に影響したと考える。また、現地調査で得られた透水係数を用いて算出した降雨浸透容量 $Q_C=466 \text{ mm}$ に対して、有効先行降雨量 $Q_E$ は300

mm強と小さく、現地斜面は飽和する前に崩壊に至ったことが考えられる。

これは、地表水が粘土質まのクラックから侵入したため、崩壊層全体の透水係数が現地調査で得られた値より大きかったこと、表流水による浸食が崩壊の発生を速めたこと等の理由によると推定される。

## 6. おわりに

これまでに、平成30年7月豪雨で崩壊した斜面5箇所において現地調査や各種試験を行い、北九州市が参考とする有効先行降雨量との検証を行ってきた。宮原ら<sup>6)</sup>は、北九州市八幡東区における堆積岩の崩壊箇所を検証し、現地崩壊のタイミングと有効先行降雨量との整合が取れたと報告している。今回のまさ土斜面では、玉田らの手法を用い崩壊機構を検討した結果、降雨による地山の飽和に至る前の崩壊が再現された。この2つの事例から、玉田らの手法は現地の降雨と崩壊機構の関係を見出すことが可能と考える。

今後、玉田らの手法を改良し、汎用性を高めたいと考えている。しかし、地形や地質別の特徴を把握するためにはサンプル数が少ないため、今後も同様のフィールドで調査を行う必要がある。また、今回の事例のような亀裂面からの浸透をどのように評価し、有効先行降雨量の算出に反映させるのが課題となる。現在、室内で地下浸透のモデル実験(カラム試験)を進めており、表-1での有効先行降雨量の経験式検証や降雨浸透能力の算出精度向上を図る予定である。

なお、本報告書の内容は、令和元年度 土木学会西部支部研究発表会(土木学会、2020年3月)と第55回地盤工学研究発表会(地盤工学会、2020年7月)において、発表したことを記す。

## 7. 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。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・長崎県などにおける考察-, 2018.3.
- 2) 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.
- 3) 土質基礎工学ライブラリー: 風化花崗岩と

- まさ土の工学的性質とその応用，地盤工学会，1979.2.
- 4) 地盤工学会：地盤調査—基本と手引き—，pp.113-118, 2005.
- 5) 玉田文吾，谷延正夫，川崎優介：表層地すべりの発生機構と対策（その2），斜面防災技術，Vol.36, No1, pp.33-34, 2009.7.
- 6) 宮原仁，東風平宏，林泰弘，岡本憲治，甲木善徳，山下武志，平瑞樹，富永義嵩：平成30年7月豪雨による北九州市八幡東区の斜面崩壊について-その2- 崩壊斜面における原位置試験及び室内土質試験結果について，第55回地盤工学研究発表会論文，pp.1819-1820, 2019.7.