

関門層群分布域における切土法面地すべり性 崩壊に関わるスレーキングおよび強度特性

SLAKING AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF LANDSLIDE-LIKE FAILURE OF CUT SLOPE IN THE KANMON-GROUP DISTRIBUTION AREA

小坂 駿斗¹・鈴木 素之¹・居石 和昭²・逢坂 勇輝¹
Hayato KOSAKA, Motoyuki SUZUKI, Kazuaki SUEISHI, Yuki OSAKA

¹山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2 丁目 16 番 1 号)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

²ヒロセ補強土 (株) (〒135-0016 東京都江東区東陽 4 丁目 1 番 13 号)

E-mail:k-sueishi@hirose-net.co.jp

Key Words: Kanmon Group, triaxial compression test, slaking, black lustre thin clay

1. はじめに

現在, 山口県長門市俵山小原から下関市豊田町八道を結ぶ俵山豊田道路の建設が進められている. その一帯には白亜紀後期の安山岩, 流紋岩, 堆積岩からなる関門層群^{1), 2)}が分布している. 関門層群は, 深部まで風化しており, 切土による応力解放を受けると, その後スレーキングの進行とともに徐々に強度低下を起こす特性を有している. 関門層群分布域では, 道路供用後, 法面勾配が緩い場合であっても地すべり性崩壊に進展した事例がある. そのため, 調査・設計時に地質および地質構造や土質特性に十分に留意して, 施工中は法面の変状に注視する必要がある.

これまでの研究によると, 崩壊の要因として, スレーキング特性³⁾や光沢質黒色薄層土 (以下, 黒色薄層土と略記)^{4), 5)}の存在が報告されている. ここで, 黒色薄層土は, 厚さ約 1 μm の土粒子が積層構造をなし, 厚さは 0.4 mm~6.0 mm で様々である. さらに黒色薄層土面には間隔約 0.4 mm~5.0 mm でもって細くて新鮮な条線が入っている, とされる. しかし, それらが土のせん断挙動や強度特性にどう影響する

のかはほとんど解明されていない.

そこで, 本報は, 山陰道豊田俵山道路建設予定地で採取した不攪乱試料に対して圧密非排水三軸圧縮試験 (CU) とスレーキング試験を実施し, 関門層群のスレーキング特性, 光沢質黒色薄層土が潜在する不攪乱試料の破壊モードの特徴と強度特性, 両特性の関連性について調べた結果を述べる.

2. 暫定切土における法面の変状

本研究では, 豊田俵山道路建設予定地の下関市豊田町金道地区で試験切土を計画して, 各種試験および探査を進めてきたところ, 2021 年 3 月 5 日に同地区から南西に 300m 程度離れた八道地区で暫定施工された切土法面においてクラックが確認された. なお, 同日の朝方に, 少量の降雨が確認されており, 何らかの影響を与えた可能性がある. クラックの状況を写真-1, 写真-2 に示す. 写真-2 から分かるように, クラック面に広範囲にわたる黒色薄層土が厚さ 1mm 程度で分布していることが確認できた. 以上のことから, 関門層群分布域にしばしばみられる切土からある時間経過後の応力解放による斜面崩壊にお



写真-1 切土法面に発生したクラック（白の破線）の状況



写真-2 クラック面にみられた光沢質黒色薄層土

いて、黒色薄層土が切土に伴う応力解放によって層理面で開口し、その状態で水が浸入して斜面崩壊に至ったものと考えられる。

3. 関門層群の物理的性質

(1) 物理試験

金道地区および法面にクラックが確認された八道地区の2箇所において不攪乱試料とともに攪乱試料を採取し、地盤工学会基準の土粒子の密度試験（JIS-A-1202:2020）、液性限界・塑性限界試験（JIS-A-1205:2020）および土の粒度試験（JIS-A-1204:2020）を実施した。

(2) 試験結果

物理試験結果の一覧を表-1に、粒径加積曲線を図-1に示す。採取試料の土質分類としては八道地区が細粒分質砂、金道地区がシルト（高液性限界）となった。

4. スレーキング特性

(1) 試験概要

本試験は地盤工学会が定めた岩石のスレーキング

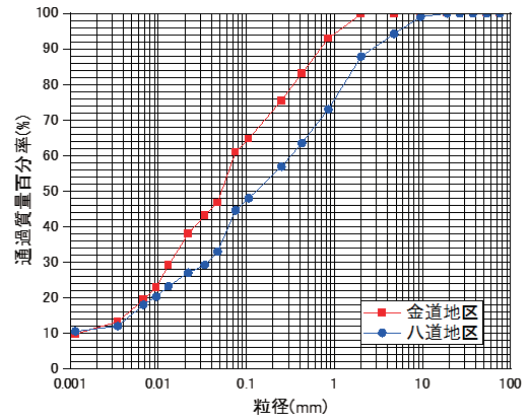


図-1 粒径加積曲線

表-1 物理試験結果

項目	地区	
	八道	金道
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.752	2.670
液性限界 (%)	57.0	63.2
塑性限界 (%)	34.6	38.6
塑性指数	22.4	24.6
液性指数	-0.04	10.8
コンシステンシー指数	1.04	0.58
細粒分 (%)	44.6	60.9
砂分 (%)	43.2	38.9
礫分 (%)	12.2	0.20

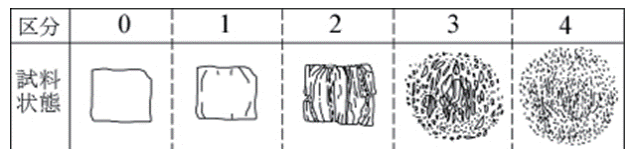


図-2 スレーキング区分（「地盤材料試験の方法と解説」（地盤工学会，2020）より図を引用）（JGS-2124-2020）

試験方法を採用した。スレーキングの判定は図-2の岩種 A 区分基準を用いて判定し、供試体の水浸 24 時間後のスレーキング区分をスレーキング指数とした。また、乾湿繰返しによるスレーキングの進展状況の確認のため、水浸→炉乾燥（100℃）のプロセスを繰返した。

スレーキング試験の試料には、2020 年度に金道地区の暫定切土の法肩および法尻で採取した土塊から成形したもの、2021 年度に八道地区で三軸圧縮試験用に採取したブロックサンプルの端材と三軸圧縮試験後の供試体から成形したものをを用いた。サンプル

数は端材から3つ、三軸圧縮試験後供試体から3つとした。各段階における供試体の含水比は次の式(1)～(3)によって求める。

a) 初期の含水比 w_1

$$w_1 = \frac{m_1 - m_4}{m_4 - m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

b) 水浸前の含水比 w_2

$$w_2 = \frac{m_2 - m_4}{m_4 - m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

c) 水浸 24 時間経過後の含水比 w_3

$$w_3 = \frac{m_3 - m_4}{m_4 - m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

※ m_0 : 試験容器の質量 (g)

m_1 : 乾燥前の全質量 (g)

m_2 : 乾燥後の全質量 (g)

m_3 : 水切り後の全質量 (g)

m_4 : 絶乾後の全質量 (g)

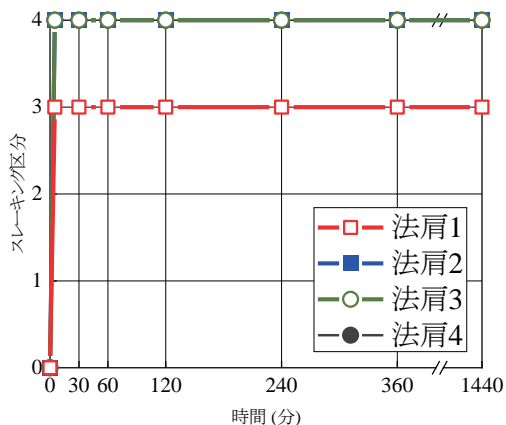


図-3 金道地区法肩でのスレーキング区分の経時間変化

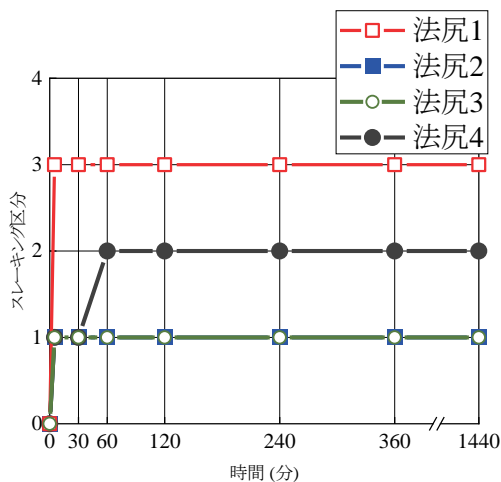


図-4 金道地区法尻でのスレーキング区分の経時間変化

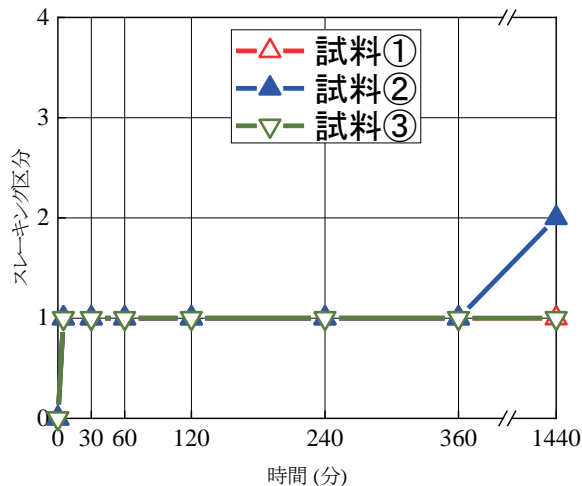


図-5 八道地区の三軸圧縮試験供試体端材のスレーキング区分の経時間変化

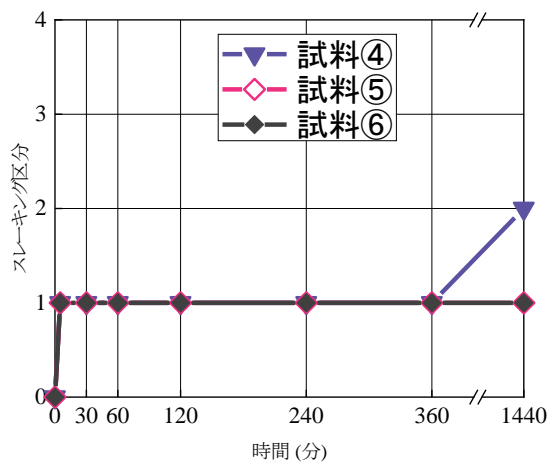


図-6 八道地区の三軸圧縮試験後供試体のスレーキング区分の経時間変化

(2) 試験結果

水浸後 24 時間経過した時の結果として、金道地区法肩および法尻のケースを図-3、図-4 に、八道地区三軸試験供試体のケースを図-5、図-6 に示す。

ここで八道地区の各供試体に対して端材には試料①～③、三軸圧縮試験後供試体には試料④～⑥と付した。八道地区では水浸直後からスレーキング指数 1 を示すことが確認でき、24 時間経過時までにスレーキング指数 1～2 を示した。それに対して、金道地区は法肩がスレーキング指数 3～4、法尻がスレーキング指数 1～3 を示し、金道地区の方がスレーキング性の高い試料といえる。また、八道地区では水浸後に試料①、②、③、⑥はクラックが発達したことに對して、試料④、⑤は供試体の外側から細粒化が進行するような変化がみられた。続いて、八道地区の試料に対して実施した繰返しスレーキング試験結果

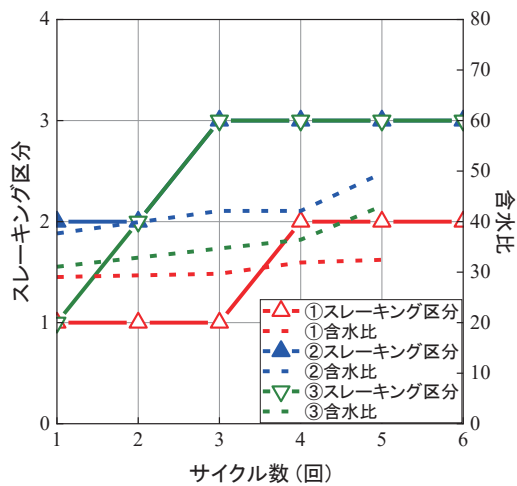


図-7 三軸供試体端材の繰返しスレーキング区分と含水比の関係

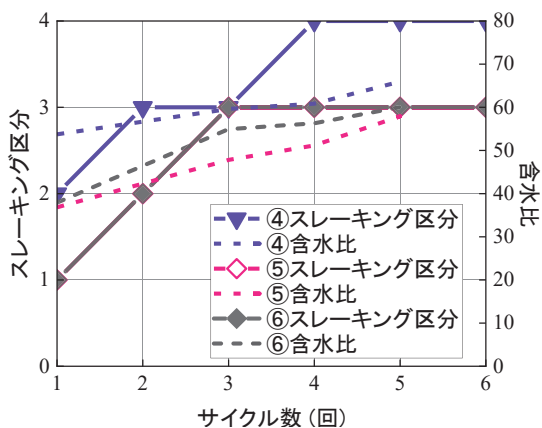


図-8 三軸試験後供試体の繰返しスレーキング区分と含水比の関係

を図-7、図-8 に示す。本試験では水浸→炉乾燥のサイクルを6回繰り返した。両図から、いずれの試料もスレーキング区分が1~2段階高くなったことがわかる。各水浸後の含水比はスレーキング区分と関係するが、スレーキング区分が2となった試料①の含水比はサイクル数に応じた含水比の増加度合いはわずかであったのに対して、スレーキング区分が4となった。試料④は含水比の増加度合いは高かった。また、スレーキング区分が3程度を示しはじめると、含水比の増加度合いが高くなっている。これは、スレーキングの進行によって試料の断片化・細粒化が進んだことにより、水に触れる面積が多くなり、吸水率が上がったためと考えられる。

次に、八道地区の試料に対する繰返しスレーキング写真の画像解析で得られた結果を示す。図-9 に乾湿サイクルとクラック面積の関係を示す。本研究では、スレーキングの度合いを視覚的な定量評価ではなく、数値的な定量評価できるよう画像解析を行っている。繰返しスレーキング時に撮影した画像に対して写真編集ソフトウェア ImageJ を用いて、二値化

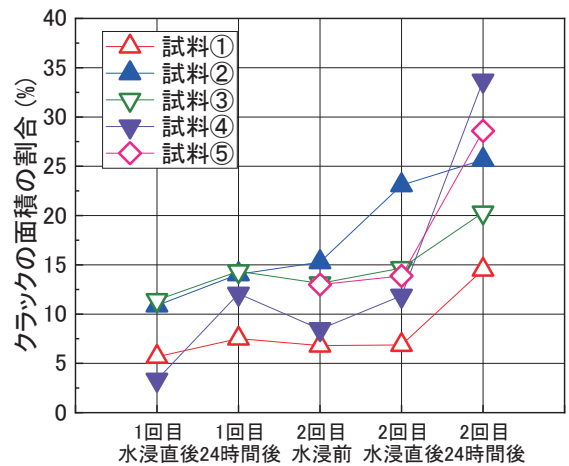


図-9 乾湿サイクルとクラック面積の関係

処理を施し、クラックが黒く表示されるようにし、クラック面積を数値化した。画像解析の手順を以下に示す。なお、この画像解析の精度は 3264 pixel × 2448 pixel である。

- ①画像を読み込み、容器の直径を基準に写真のスケールを決定する。
- ②ビーカーに反射した供試体の部分をトリミングし、供試体部分のみを残す。
- ③RGB で構成されている画像を 8-bit で表示することによりグレーカラーで表示する。
- ④グレーカラーにしたものを二値化する。二値化する際には元の写真と見比べながらクラックが黒く表示される閾値に設定をする。
- ⑤二値化処理を行った画像についてはクラックの面積、色付きの画像については粒径の大きさを測定する。

画像解析から、水浸後にクラックが全体的に発生している状況を確認することができた。このクラックは黒色薄層土に沿って発生しているものではなく、乾燥と湿潤による収縮と膨張が原因である可能性が高い。また、繰返しスレーキングを行う際に試料が徐々に細粒化していく様子も確認できた。また、図より、クラックの面積割合はサイクル数を増やすごとに増加する傾向にあることが分かった。2 回目の水浸前でクラックの面積割合が減少している試料がみられるが、この原因の1つとして乾燥収縮の影響が考えられる。

5. 不攪乱試料の強度特性

(1) 試験概要

関門層群の地山および切土法面の強度定数を決定するため、金道および八道両地区の切土付近で不攪



写真-3 金道地区の試料採取位置



写真-4 八道地区の試料採取位置

乱試料を採取した。採取地点を写真-3, 写真-4 に示す。不攪乱試料の採取方法としては、土質がシルト～細粒分質砂であったため、ネイルサンプリング法⁶⁾を採用した。サンプリング後、冷凍庫で凍結させた。凍結後、融解する前にネイルを抜き取り、再び凍結させた。サンプルの成形は、液化窒素で試料の融解を防ぎつつ、直径 7.5 cm, 直径 5 cm の順にコアビットで削り出した。その後、試料の端部を処理し、直径 5 cm, 高さ 10 cm の供試体に成形した。なお、金道地区では、強度異方性を調べるために、不攪乱試料を地盤に対して鉛直, 水平の両方向から採取した。

(2) 圧密非排水圧縮試験の方法

本試験は JGS-0523 土の圧密非排水 (CU) 三軸圧縮試験方法に従って実施した。成形した凍結供試体を三軸圧縮試験装置のペDESTAL にセットし、有効拘束圧 $\sigma'_v = 20 \text{ kN/m}^2$ の状態で 24 時間かけて解凍した。本試料は細粒分を多く含むことから、その後の飽和過程での通水が困難と判断したため、二重負圧法を用いて飽和した。供試体に背圧 $u_b = -80 \text{ kN/m}^2$, 三軸圧力室内に $\sigma_c = -60 \text{ kN/m}^2$ を加えて 1 時間放置後、脱気水を通水させた。それに引き続き背圧 $u_b = 200 \text{ kN/m}^2$ の载荷を行い、 B 値が 0.95 以上になることを確認した。その後、有効拘束圧 50, 100, 120, 150 kN/m^2 の下で等方圧密を行った。圧密の打ち切り時間 t_c は 3 t 法の値を参考に、一律それを超えた 120 分間

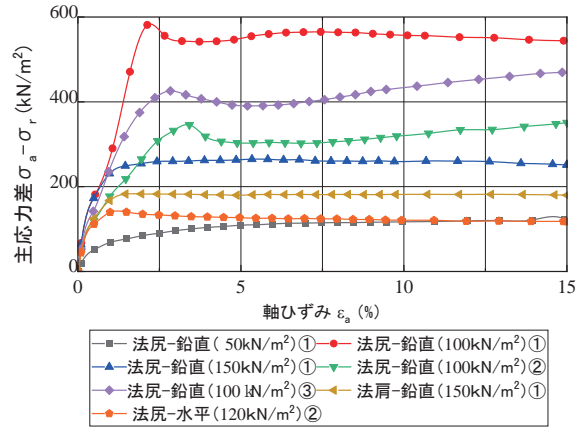


図-10 金道地区試料の主応力差と軸ひずみの関係

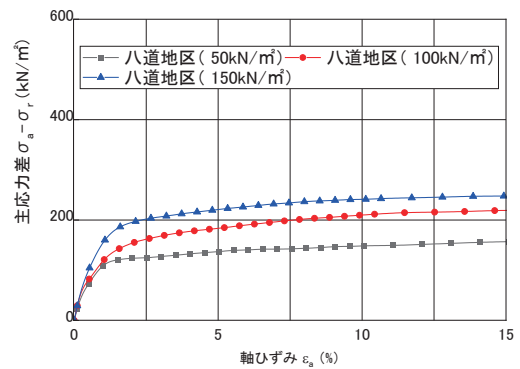


図-11 八道地区試料の主応力差と軸ひずみの関係

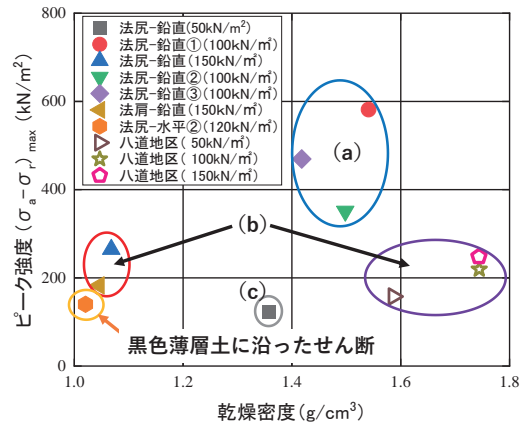


図-12 金道地区試料のピーク強度と乾燥密度の関係

とした。圧密後、直ちにひずみ速度 0.2 %/min で非排水せん断を行った。

(3) 試験結果

図-10, 図-11 に金道および八道地区の三軸圧縮試験から得られた主応力差 ($\sigma_a - \sigma_r$), 軸ひずみ ϵ_a 関係を示す。また、図-12 に金道地区および八道地区で採取した試料各供試体のピーク強度と乾燥密度 ρ_d の関係を示す。

図-10、図-11より、(1) 軸ひずみ ε_a が3%までに主応力差の最大値 $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ (ピーク強度と呼ぶ)を迎える、(2) ε_a の増加とともに $(\sigma_a - \sigma_r)$ が単調に増加する2つのパターンがみられた。また、図-12より、乾燥密度が高い方がピーク強度が高くなる傾向にあることがわかった。さらに、法尻および法肩の鉛直供試体のピーク強度を比較すると、法尻の方が法肩よりも高くなる傾向にあることが分かった。

金道地区試料の試験では、(a) たすき状の鋭角なせん断破壊、(b) 供試体がたる型に膨らむようなせん断破壊、(c) たすき状の鈍角なせん断破壊の3種類の破壊モードが識別された。前述のパターン(1)の応力-ひずみ曲線はいずれも(a)の破壊モードとなった。これに対して、パターン(2)の応力-ひずみ曲線は(b)、(c)のどちらかの破壊モードになった。これより、破壊モードと応力-ひずみ曲線には相関があるとみられる。

また、(a) たすき状の鋭角なせん断破壊、(b) 供試体がたる型に膨らむようなせん断破壊、(c) たすき状の鈍角なせん断破壊の順でピーク強度が高いことがわかった。さらに、乾燥密度 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ を上回る破壊モードは(a)の破壊モードのみであるのに対して、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ を下回るときの破壊モードは(b)、(c)のどちらかの破壊モードになった。これより、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ を境として破壊モードが変化する傾向がみられた。ただし、法尻-水平(120 kN/m²)②のみが(a)の破壊モードでありながら、ピーク強度は140.1 kN/m²低く、乾燥密度は1.40 g/cm³よりも小さかった。(a) たすき状の鋭角なせん断破壊は、本来高い強度を示す破壊モードであるが、黒色薄層土が弱面となってせん断されると強度が低く発現することを示唆している。

八道地区試料では、金道地区と比較して、乾燥密度は高い値を示したが、ピーク強度は200 kN/m²前後と低い値を示した。また、その破壊モードは、全てのケースで(b) 供試体がたる型に膨らむせん断破壊を示した。さらに、八道と金道両地区で、同じ破壊モードであれば近いピーク強度を示した。以上をまとめると、同じ関門層群でも、地点によって破壊モードの種類に違いがみられた。八道地区よりも、金道地区の方が破壊モードが多岐に渡った。

6. 結論

本研究から得られた知見を以下に要約する。

(1) 八道地区より金道地区の方がスレーキング性の

高い土質であった。

- (2) 関門層群では乾湿繰返しによってスレーキングが進展し、繰返すほどスレーキング区分は高くなった。
- (3) スレーキングの回数を増やすごとにクラックの面積割合は増加する傾向にある。
- (4) 軸ひずみが3%までに主応力差がピークを迎える供試体のピーク強度は総じて高く、破壊モードはたすき状の鋭角なせん断破壊であった。
- (5) 軸ひずみの増加とともに徐々に主応力差が増加する供試体は上記(4)の供試体に比べてピーク強度は低く、破壊モードは多様であった。
- (6) 黒色薄層土がすべり面となって出現したケースでは、破壊モードがたすき状の鋭角なせん断破壊であってもピーク強度は低くなった。

謝辞：本研究は国土交通省中国地方整備局山陰西部国道事務所の受託研究の一環として実施したものである。試料の採取・供試体成形では山口大学工学部技術職員の山本修三氏にご支援いただいた。関係各位に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 植田芳郎：下関市の地質-特に関門層群の層序と構造について、地質学雑誌, 第63巻, 第736号, pp.26-34, 1957.
- 2) 今岡照輝, 飯泉滋：白亜紀-古第三紀の火山-深成岩活動, 日本地質学会編, 日本地方地質誌6 中国地方, 朝倉書店, pp.15-21, 2009.
- 3) 神谷知佳, 鈴木素之, 太田岳洋, 河内義文：関門層群における強風化安山岩のスレーキング特性と切土斜面表層の脆弱化に関する検討, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.99-106, 2019.
- 4) 山本哲朗, 鈴木素之, 吉原和彦, 宮内俊彦：不連続面上の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊と設計強度定数, 地すべり, Vol.37, No.4, pp.49-57, 2001.
- 5) Kochi, Y., Yamamoto, T., Suzuki, M., Nishikawa, T.: Characteristics of landslide and failure with their countermeasures in Kanmon-group slopes, Yamaguchi prefecture, Western Japan, Journal of the Japanese Landslide Society, Vol.41, No.2, pp.83-93, 2004.
- 6) (公社)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説, 2020.

(2022.5.30 受付)