阿武層群と関門層群に由来するスレーキング特性を有する道路掘削残土の内部侵食挙動

INTERNAL EROSION BEHAVIOR OF SLAKING-PRONE ROAD EXCAVATION WASTE ORIGINATING FROM THE ABU AND KANMON FORMATIONS

梶原 一輝[1]・鈴木 素之[2]・軸屋 雄太[3]
Kazuki KAJIHARA, Motoyuki SUZUKI and Yuta JIKUYA

[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 2-16-11）
E-mail: f019vew@yamaguchii-u.ac.jp
[2]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 2-16-11）
E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp
[3]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 2-16-11）
E-mail: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words: *slaking, internal erosion, seepage, fine particle migration, turbidity*

1. はじめに

現在，国土交通省中国地方整備局において山陰道の大井・萩道路[1)]および俵山・豊田道路[2)]の建設が進められている（**図-1**）．これらの道路計画地周辺には，スレーキング特性を有する後期白亜紀の阿武層群[3)]や，前期白亜紀の堆積岩・火山岩類からなる関門層群[4)]が分布しており，これらの特徴としてスレーキング特性を有するため，切土後に変状・崩壊の発生が懸念されている．実際に，平成 25 年 7 月山口・島根豪雨災害では，阿武層群分布域において多数の斜面崩壊が報告されている[5)]．関門層群においても，複数の切土のり面において崩壊が発生していることが指摘されている[6)]．また，道路建設に伴い発生する掘削残土については，盛土材料への有効利用が検討されている．しかし，スレーキングしやすい土を盛土材料に使用すると，盛土造成後に水の浸透を受けて強度低下や圧縮沈下を起こすおそれがあり[7),8)]，スレーキングに起因する盛土の不安定化が懸念される．さらに，スレーキングにより盛土材料が細粒化すると，盛土内に不可逆的な構造変化や強度低下が生じるとともに，地下水の流れにより細粒分が移動・流出し，内部侵食が発生するおそれがある[9)]．

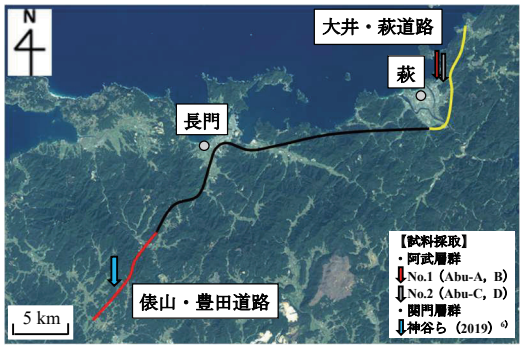


図-1　阿武層群試料の採取場所
（国土地理院より引用した図に加筆した）

既往の研究では，スレーキング特性を有する強風化安山岩を対象として，切土のり面表層の脆弱化や斜面安定性に関する研究[6)]が行われているほか，濁度を利用した細粒分流出実験など，内部侵食に伴う土粒子流出挙動に関する研究[10)]も実施されている．しかし，これらの研究はスレーキング特性と内部侵食挙動を個別で評価した研究が多く，両者の関係に着目した研究は十分に行われていない．

そこで本研究では，スレーキングの進展が道路掘削残土の内部侵食挙動に及ぼす影響を明らかにする

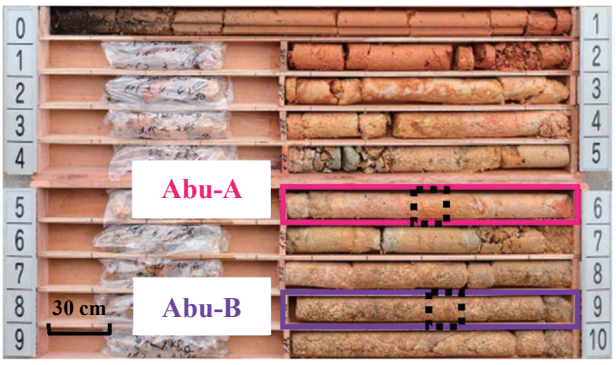


写真-1　阿武層群のボーリングコア試料（地点 No. 1）

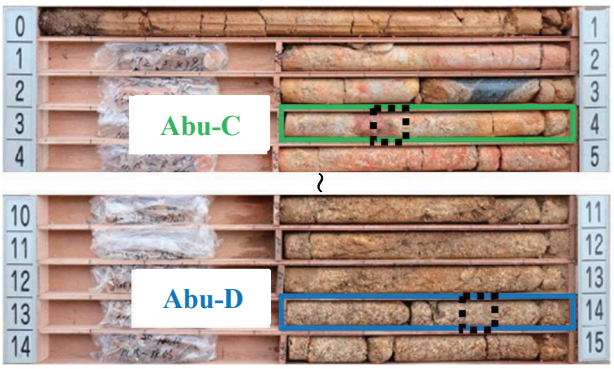


写真-2　阿武層群のボーリングコア試料（地点 No. 2）

ことを目的とした．まず，阿武層群試料を対象に岩石のスレーキング試験を実施し，関門層群試料については既往研究 [6]を参照することで，両者のスレーキング特性を整理した．次に，スレーキング履歴の異なる関門層群試料を対象に下向きカラム通水試験[10]を実施し，スレーキングの進展が内部侵食挙動に及ぼす影響を検討した．

2. 阿武層群および関門層群試料

阿武層群試料の採取場所を**図-1** に示している．試料には，**写真-1**，2 にそれぞれ示す大井・萩道路建設地の 2 地点で採取したボーリングコア試料の一部を使用した．このうち，No.1 の採取地点からは深度 5.5 m と深度 8.5 m 付近の試料を使用し，それぞれ Abu-A，Abu-B とした．また，No.2 の採取地点からは深度 3.5 m と深度 13.5 m 付近の試料を使用し，それぞれ Abu-C，Abu-D とした．

関門層群試料には，俵山・豊田道路建設地で採取した掘削残土を用いた．なお，掘削残土には細粒分が多く含まれているため，スレーキングに伴う細粒化や細粒分の流出を明瞭に評価することを目的として，粒径が 0.425 mm 以下の粒子を除去し，粒度調整を行った（**写真-3**）．粒度調整後の試料は，粒度調整前の最大粒径が 2.0 mm であることから最大粒径を 2.0 mm とし，スレーキングに伴い通水時に排出される細粒分を評価するため最小粒径を 0.425 mm とした．具体的には，2.0 mm～0.85 mm，0.85 mm～0.425 mm に分級した試料を所定割合で混合した．調整前後の粒径加積曲線を**図-2** に，調整後の締固め曲線を**図-3** に，基本的物性値および状態量を**表-1** に示す．

関門層群試料のスレーキング特性については先行研究 [6]を参照し，本研究では，阿武層群試料のみを対象に岩石のスレーキング試験を実施した．一方，下向きカラム通水試験については，採取した土量を考慮して関門層群試料のみを用いて試験を実施した．



写真-3　関門層群試料のふるい分け状況

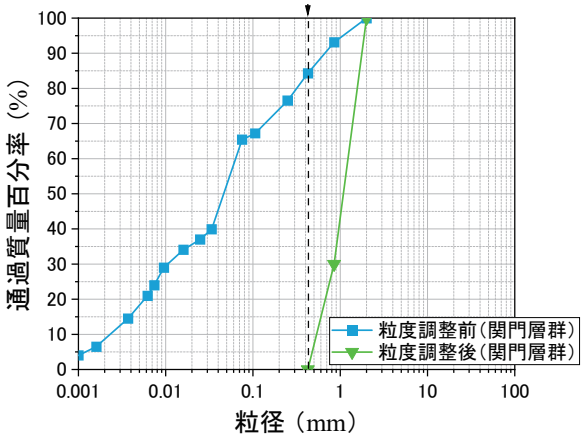


図-2　関門層群試料の粒径加積曲線

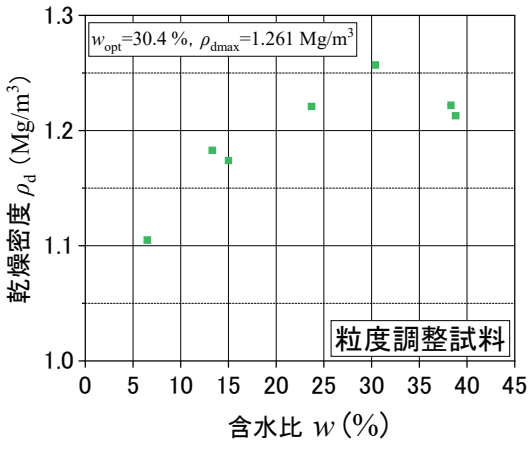
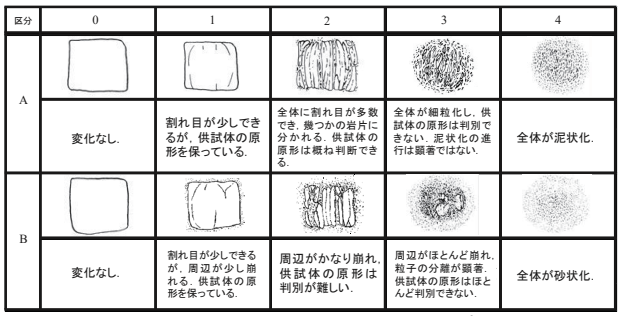


図-3　関門層群試料の締固め曲線

表-1　関門層群試料の基本的物性値および状態量

	土粒子密度 ρ_s (Mg/m^3)	細粒分含有率 F_c (%)	最適含水比 w_{opt} (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (Mg/m^3)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_p (%)	塑性指数 I_p
調整前試料	2.572	65.9	-	-	54.3	30.8	23.5
調整後試料	2.621	0	30.4	1.261	NP	NP	-



A：泥岩・凝灰岩（細粒）によくみられるタイプ
B：シルト岩・砂岩・凝灰岩（粗粒）によくみられるタイプ

図-4　スレーキング区分図

（文献[11]より引用した図に加筆した）

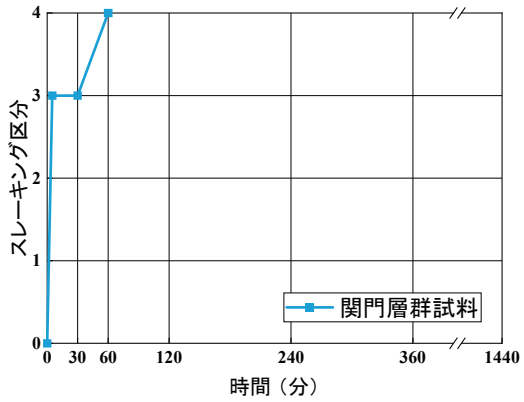


図-6　関門層群試料のスレーキング試験結果[6)]

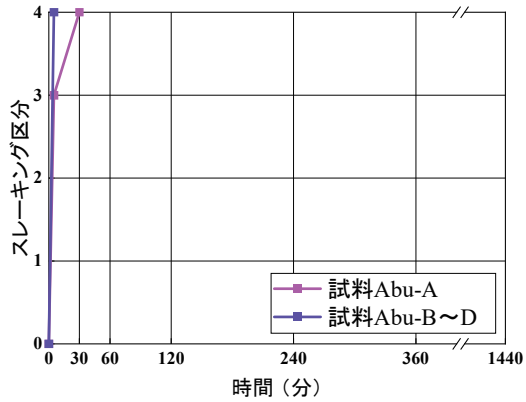
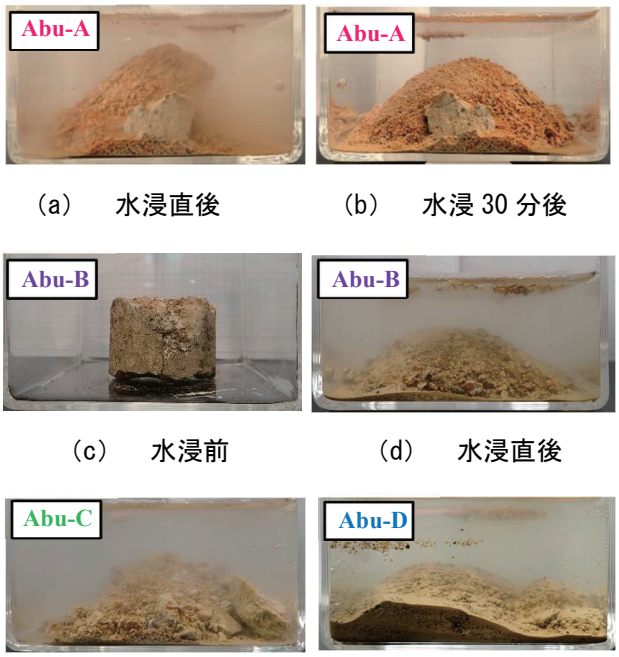


図-5　阿武層群試料のスレーキング試験結果



（a）　水浸直後　　（b）　水浸 30 分後

（c）　水浸前　　（d）　水浸直後

（e）　水浸直後　　（f）　水浸直後

写真-4　スレーキング試験時の阿武層群試料の状態

3. 岩石のスレーキング試験

(1) 試験方法

阿武層群試料 Abu-A～Abu-D に対して，岩石のスレーキング試験[11)]を実施した．以下に試験手順を記載する．①直径 2～3 cm，高さ 2 cm 程度の供試体を透明のガラス容器に入れ，全質量を測定した．②24 時間以上風乾させた後，40±5 ℃で 48 時間炉乾燥させた．③容器の水面が供試体の最上部より 1 cm 程度上になるまで供試体を水浸させた．④水浸に伴う供試体の形状変化を，水浸直後，30 分後，1，2，4，6 および 24 時間後に目視観察および写真撮影を行った．また，その形状から**図-4** に示すスレーキング区分図に従ってスレーキング区分を判定した．⑤水浸 24 時間経過後，ピペットまたはスポイトを用いて排水し，ガラス容器を傾斜させ，自然に分離した水をろ紙などで吸い取って水切りした．その際，ガラス容器に振動を与えないように留意した．⑥水切りした供試体を 110 ± 5 ℃で，質量が一定になるまで炉乾燥し，全質量を測定した．

(2) 試験結果

スレーキング試験で得られた結果を**図-5** に，試験時の状態を**写真-4** に示す．Abu-A では水浸直後にス

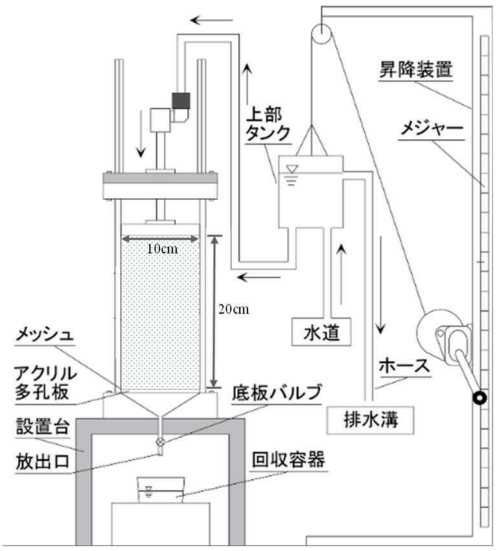


図-7　下向きカラム通水試験装置



写真-5　下向きカラム通水試験時の様子

レーキング区分 3 を示し（**写真-4**（a）），水浸 30 分後にはスレーキング区分 4 に至った（**写真-4**（b））．Abu-B～Abu-D ではいずれも水浸直後にスレーキング区分 4 に至った（**写真-4**（d）～（f））．以上より，阿武層群試料はスレーキングが生じやすいことが確認された．

図-6 に，神谷ら[6]が実施した関門層群試料のスレーキング試験結果の一部を示す．神谷らは，水浸数分から 1 時間程度でスレーキング区分 4 を示すコア試料が多いと報告している．したがって，阿武層群および関門層群の試料は，いずれもスレーキングが生じやすく，その進展は阿武層群試料の方がわずかに速いことが示唆された．

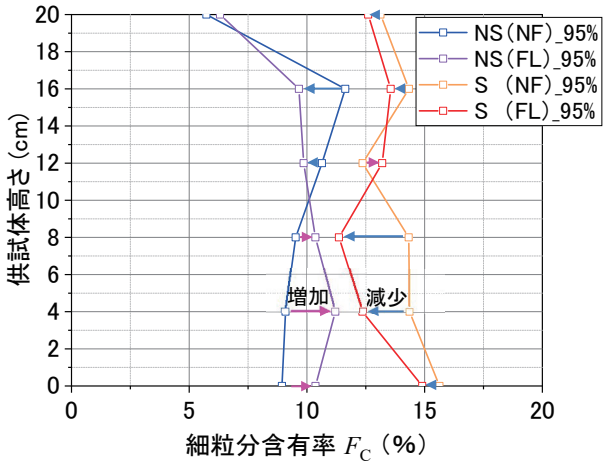
4. 下向きカラム通水試験

(1) 試験方法

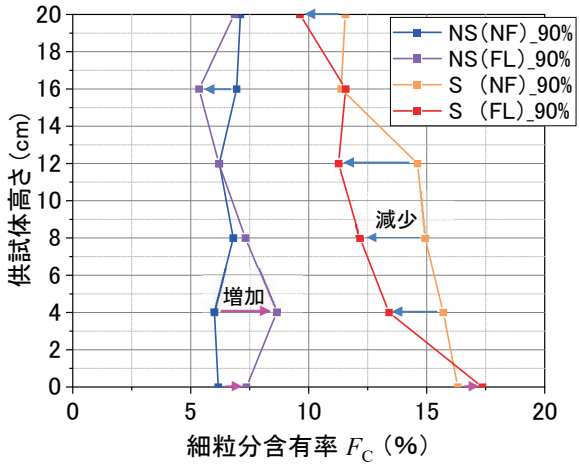
関門層群試料を対象に，スレーキングの進展が内部侵食挙動に及ぼす影響を検討するため，下向きカラム通水試験[10]を実施した．試料には，スレーキングを促進させるため，事前に水浸および乾燥をそれぞれ 24 時間行った．このようなスレーキング処理を施した試料（以下，試料 S と称す）とスレーキング処理を施していない試料（以下，試料 NS と称す）を用いて試験を実施した．**図-7** に下向きカラム通水試験装置を示す．以下に試験手順を記載する．①供試体を，直径 10 cm，高さ 20 cm の容器内に，締固め度 90 %および 95 %を目標として作製した．試料は 1 層当たり 4 cm となるように 5 層に分け，各層で同一の締固めエネルギーとなるよう突き固めた．②供試体作製後，供試体内部に残留する空気を除去するため，二酸化炭素を供試体内に注入した．その後，脱気水を供試体下面から上面まで約 1 時間かけて上昇させ，間隙内に水を浸透させた．さらに，供試体全体が十分に飽和するよう約 24 時間静置した．③上部タンクの水位高さを調節することで，供試体に動水勾配 0.5（限界動水勾配 $i_c = 0.56$）を与え，供試体上面から通水を行った．動水勾配は，供試体の安定性を保持しつつ浸透流の影響で，細粒分の移動がしやすい条件とするため，限界動水勾配に近い値に設定した．④通水開始と同時に底板バルブを開放し，供試体下部の放出口から流出する濁水を採水した（**写真-5**）．濁水は約 100 mL ごとに分取し，容器 No.1～20 の計 20 回分（総量 2000 mL）として回収した（**写真-6**）．その後，透過散乱光方式の濁度計（笠原理化工業株式会社製濁度計 TR-55）を用いて，容器 No.1～20 の濁度 T_b を測定した．本濁度計は極めて低い濁度領域においても測定可能であり，通水初期から後期までの濁度変化を高精度に評価することができる．また，各濁水試料を炉乾燥し，濁水中に



写真-6　濁水を回収容器に順次採取した様子



(b)　締固め度 95 %



(a)　締固め度 90 %

図-8　供試体高さと細粒分含有率の関係

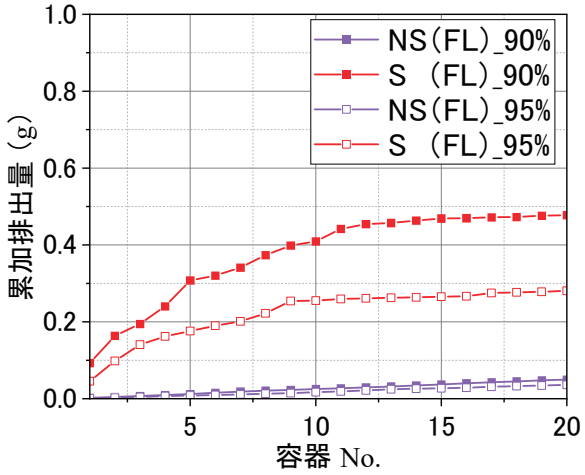


図-9　土粒子の累加排出量と容器番号の関係

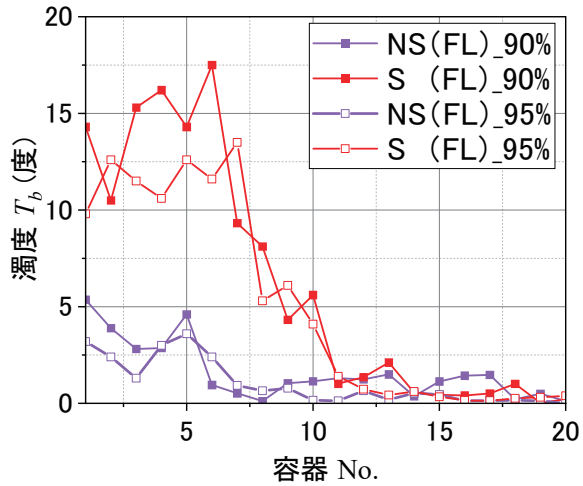


図-10　濁水の濁度と容器番号の関係

含まれる土粒子量を測定することで，土粒子の排出量を算出した．なお，手順①および②まで実施した後，さらに手順③～④の通水過程を実施した供試体を通水条件（FL）とし，手順①のみの供試体作製を実施した供試体を非通水条件（NF）とした．⑤試験終了後，供試体を容器から取り出し，供試体上部から 6 層に分けて試料を採取した．採取した各層の試料については，75 μm を用いたふるい分けを行い，細粒分含有率 F_c を測定した．これにより，通水前後における供試体内部の細粒分含有率の変化を確認し，内部侵食による細粒分移動の程度を評価した．

(2) 試験結果

図-8 に締固め度 90 %および 95 %のケースにおける供試体高さごとの細粒分含有率 F_C の測定結果を示す．通水履歴のない供試体 NF に着目すると，スレーキング処理を施した試料 S（NF）は，スレーキング処理を施していない試料 NS（NF）と比較して，いずれの締固め度においても F_C の値が高かった．このことから，スレーキング処理による細粒化が生じていたと考えられる．また，通水履歴のある供試体 FL に着目すると，スレーキング処理を施した試料 S（FL）は，締固め度によらず，供試体下部で最も F_c の値が高い傾向を示した．これは，スレーキングの進展に伴う細粒化により生成された細粒分が，通水過程において供試体内部を移動したものの，その一部が供試体外へ流出せず，供試体下部に堆積したためと考えられる．また，スレーキング処理の有無に着目すると，通水過程を行っていない試料 NF と通水過程を行った試料 FL では，F_C の変化量に差異が生じ，特にスレーキング処理を施した試料の方が供試体全体の F_C の減少量が大きい傾向を示した．さらに，その減少量は締固め度 90 %の方が大きかった．これは，締固め度 90 %の供試体では間隙が相対的に大きく，通水時に細粒分が移動・流出しやすかったためと考えられる．このことから，スレーキングにより細粒分の流出が促進された可能性があるとともに，間隙構造の違いが細粒分の流出に影響を及ぼす可能性が示唆された．

図-9 に土粒子の累加排出量と容器番号を示す．通水履歴のある供試体 FL に着目すると，スレーキング処理を施した試料 S（FL）は，スレーキング処理を施していない試料 NS（FL）と比較して排出量が多く，スレーキングにより土粒子の排出量が促進されたと考えられる．また，スレーキング処理を施した試料 S は通水開始直後の No.1～9 の容器で排出量が多く，その後の排出量は徐々に減少する傾向を示した．特に，その排出量は締固め度 90％の方が大きい傾向を示した．

図-10 に濁水の濁度と容器番号を示す．通水履歴のある供試体 FL に着目すると，スレーキング処理を施した試料 S（FL）は，スレーキング処理を施していない試料 NS（FL）と比較して，No.1～9 の容器で T_b が高く，その後の容器では同程度の値を示した．また，T_b の値は締固め度 90％の方が高い傾向を示した．このことから，スレーキングの影響は通水初期に顕著に現れることが示唆された．

6. まとめ

本研究の結果を以下にまとめる．

1) 岩石のスレーキング試験により，阿武層群および関門層群の試料はいずれもスレーキングを生じやすく，その進展は阿武層群試料の方がわずかに速いと示唆された．
2) 下向きカラム通水試験により，スレーキングの進展に伴い試料の細粒化が生じ，それに伴って，細粒分流出も促進されることが示唆された．
3) スレーキング処理を施した試料では，スレーキング処理を施さない試料と比較して，通水開始直後に土粒子の排出量および濁水の濁度が高い値を示した．このことから，スレーキングの影響は通水初期に顕著に現れることが示唆された．特に，締固め度 90 %の供試体では，締固め度 95 %の供試体と比較して土粒子の排出量および濁水の濁度が高い値を示した．これは，締固め度 90 %の供試体の方が内部の間隙が大きく，細粒分が移動しやすかったためと考えられる．

以上より，スレーキングの進展は内部侵食挙動を促進する一因となる可能性が示唆された．

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からの受託研究の一環として実施したものである．ここに記して，関係各位に謝意を表すしだいである．

参考文献

1) 国土交通省：一般国道 191 号(山陰自動車道)大井・萩道路に係る新規事業採択時評価, https://www.cgr.mlit.go.jp/sanindo/progress/yamaguchi/02/index.html, 2026.5.26.
2) 国土交通省：一般国道 191 号(山陰自動車道)俵山・豊田道路に係る新規事業採択時評価, https://www.cgr.mlit.go.jp/sanindo/progress/yamaguchi/05/index.html, 2026.5.26.
3) 今岡照喜，村上允英：白亜紀阿武層群火山岩類の岩石学的研究，岩鉱，Vol.84，No.8，pp.295-310，1989.
4) 歌田実，澤田臣啓：西日本，関門層群（白亜紀前期）の変質作用，地質学雑誌，Vol.111，No.4，pp.206-216，2005.
5) 土木学会地盤工学委員会・地盤工学中国支部：平成 25 年 7 月山口・島根豪雨災害現地調査結果報告書，pp.8-10，2013.
6) 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および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.
7) 田窪裕一，大岸敏正，奥村隆文，門田圭司：スレーキングによる泥岩法面の崩壊事例，四国地方整備局技術研究報告，Vol.55，No.3，pp.1-6，2012.
8) 菊本統：岩石のスレーキング，地盤工学会誌，Vol.74，No.5，pp.40-45，2026.
9) 加村晃良：スレーキングが生じた盛土の内部侵食メカニズムと劣化シナリオ解明，科研費，20K14820，2020-2022，https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-20K14820/20K14820seika.pdf（2026.5.26 参照）．
10) 石丸太一，鈴木素之，高野翔太：濁度を利用した細粒分流出実験における移動土粒子の粒度組成とその時間変化，地盤工学ジャーナル，Vol.17，No.1，pp.47-60，2022.
11) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説(第 1 回改訂版)，pp.296-319，2020.

（2026.5.29　受付）