破碎泥岩のスレーキング現象と変形挙動

菊本 統¹・福田 拓海²・京川 裕之³

¹正会員 横浜国立大学准教授 都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: kikumoto@ynu.ac.jp

²正会員 東京都庁 下水道局 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)
E-mail: fukuda-takumi-mp@ynu.jp

³正会員 鹿島建設 土木設計本部 解析技術部 地盤解析グループ (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)
E-mail: kyokawa@kajima.com

乾湿繰り返しに伴う風化現象であるスレーキングを、従来型の促進スレーキング試験と一次元圧縮条件下で湿乾履歴を与える圧縮スレーキング試験により検討した。促進スレーキング試験では、試料によるスレーキング特性の違いや、細粒化に伴う土の力学特性の不可逆な変化について考察した。圧縮スレーキング試験では、圧縮過程での粒子破碎が圧縮性の増加に寄与すること、拘束応力下でのスレーキングは土の大圧縮を引き起こすことを示した。最後に、湿乾履歴を考慮した粒度指標 I_G の発展則により記述し、粒度指標 I_G と最大・最小間隙比や限界間隙比を関係付けることでスレーキング現象を構成則の範疇で考慮できるとの考えを示した。

Key Words : mudstone, slaking, 1d compression, particle size distribution, laboratory test

1. 背景と目的

道路盛土や河川堤防等の土構造物は、新たに調達した購入土や採取土を盛土材とするだけでなく、経済性や環境面への配慮から切土やトンネル掘削での建設発生土をそのまま利用して築造されることも多い。発生土の多くは堆積岩で、泥岩や頁岩、凝灰岩、片岩もしばしば含まれるが、これらは乾燥と湿潤の繰り返しに伴って細片化、細粒化するスレーキング現象を発生する脆弱岩としてよく知られている¹⁾。そのため、脆弱岩に由来する岩砕を土構造物の築造に用いる場合には、スレーキングが長期的な圧縮沈下や強度低下を引き起こす可能性も指摘されている^{1),2)}。実際、2008年9月には新潟県村上瀬波温泉ICの大規模切土⁴⁾、同年11月には愛媛県南西部の切土⁵⁾において、掘削による応力解放と泥岩のスレーキングに起因した崩落が報告されている。また、翌年8月の駿河湾沖地震発生時には高速道路盛土の法面崩壊が起こったが、後にスレーキングによる強度低下や土粒子の細粒化に伴う透水性の低下が誘因として指摘されている³⁾。

これまでスレーキングによる地盤材料の変形・強度特性の変化や土構造物の変形・破壊メカニズムの解明を目的として、幾つかの検討が行われてきた。スレーキングによる粒度変化に着目した検討として、望月ら⁶⁾は粒径

を調整した岩塊の促進スレーキング試験と暴露試験を実施し、スレーキングは初期の乾湿サイクルで顕著に発生し、乾湿回数を重ねるにつれてやがて粒度変化は起こらなくなることを示した。また、板橋ら⁷⁻⁹⁾は、泥岩の室内試験と暴露試験により、60回以上の乾湿履歴を経て細粒化が進行しても、最大粒径はほとんど変わらないと述べた。中村・小林¹⁰⁾は、締固めた破碎泥岩の室内試験から、スレーキングによる粒度変化には限界があると指摘した。一方、島・今川¹¹⁾は全国各地で採取した泥岩、頁岩、凝灰岩など22種類の脆弱性岩に対してスレーキング試験と破碎試験を行い、スレーキング率と破碎率で表される圧縮性分布図を脆弱岩の圧縮性の評価方法として提案した。

スレーキング発生前後の力学特性の違いに着目した検討として、金丸ら¹²⁾は乾湿履歴を与えた泥質片岩の圧縮試験を実施し、スレーキング率による圧縮特性の違いを比較した。加登ら¹³⁾も真砂土と泥岩について同様の検討を行った。また、殿垣内ら¹⁴⁾は、実際の盛土から採取した泥岩試料やスレーキング発生前後の試料の三軸圧縮試験を行い、スレーキングの発生によりせん断抵抗角は減少するものの、粘着力はあまり変化しないことを指摘した。これに対して、楠見ら^{15),16)}は、一定せん断応力下で軟岩に乾湿繰り返し履歴を与えて強度特性の変化を調べ、

図-1 蛍光 X 線分析により得た泥岩試料の構成元素 (モル百分率)

粘着力は減少し、せん断抵抗角はあまり変化しないことを示している。いずれにしてもスレーキングによる細粒化によりせん断強さは低下すると考えることができよう。

以上のように、既往研究の多くは、スレーキングによる粒度変化やスレーキング前後の変形・強度特性の変化に着目した実験であった。一面せん断条件下での乾湿繰返し試験では、スレーキングに伴う変形の観察が試みられたものの、同試験は供試体内部の変形が不均一で、応力 - ひずみ関係を得られないため、スレーキング現象を考慮した構成モデルの開発・検証に利用できる実験結果はこれまでなかった。これに対して本研究では、スレーキング特性と応力ひずみ特性への影響を考慮した構成モデルの開発を目指して、供試体が一様に変形する一次元圧縮条件下で乾湿履歴を与える圧縮スレーキング試験を実施し、スレーキング現象と応力ひずみ特性への影響を観察した。また、同じ材料に対して従来の促進スレーキング試験も実施し、気中と拘束応力下でのスレーキング現象の違いについても考察を行った。

2. 非拘束条件下での泥岩のスレーキング

ここではまず 3 種類の泥岩試料に対して、促進スレーキング試験を中心とした試験結果を示し、スレーキング特性と粒度特性および力学特性の変化について考察を行う。

(1) 試験の概要

岩の促進スレーキング試験¹⁷⁾を参考にして、拘束応力を与えない気中で乾湿繰返し試験を実施し、スレーキング特性を観察した。

試料は予め 19.0~37.5mm の粒径に粒度調整しており、全ての粒子が完全に水浸する深さの容器に粒子同士が重なり合わないように入れ、24 時間、炉乾燥して室温に冷ました状態を初期状態とした。なお、試験の再現性を確保できるように、全ての試験パターンにおいて約 2.0 kg の乾燥重量の試料を用いた。試験では、まず乾燥状態の重量を量り、鉛直上方からデジタルカメラで試料全

体を撮影した。

湿潤過程では、20° C の恒温条件下で試料が完全に水浸するまで蒸留水を注いで、24 時間放置した。続いて、乾燥過程では土粒子が流失しないよう、また土粒子の配置が変わらないように留意しながら容器内の上澄み液を慎重に取り除いて、24 時間、炉乾燥した後、写真撮影した。なお、乾燥炉内の温度は水が沸騰して土粒子に影響を及ぼさぬよう 90° C とした。また、個々の粒子の変化を確認できるよう写真撮影は極力、初期状態と同一の条件で行った。このような湿潤、乾燥過程を 1 サイクルとして、最大 5 サイクルまで乾湿履歴を与え、試験後に粒度分析を行った。なお、一般的な土の粒度試験法 JIS A 1204¹⁸⁾では、ふるい分け時に団粒化した試料は水洗いして裏ごしするが、本試験に用いた泥岩試料ではさらにスレーキングが進行する懸念から水洗いは行っておらず、極力、外力が加わらないようふるい分けを行った。

(2) 試料と試験パターン

試験には、掛川泥岩、神戸泥岩、高崎泥岩の 3 種類を用い、5 サイクルの乾湿履歴を与えた。また、粒径加積曲線に顕著な変化が見られた掛川泥岩と神戸泥岩については、1 サイクルの乾湿履歴を与えるケースも実施し、乾湿回数による粒度変化の差異も検討した。また、乾湿履歴による力学特性の変化についても検討するため、別途、少量の試料を用いて 5 サイクルの乾湿履歴を与え、最小密度・最大密度試験法 (JGS 0612-2006)¹⁹⁾に基づいて、各サイクル終了時に最大・最小間隙比を調べた。

掛川泥岩は、第一東海自動車道 (東名高速) の菊川 IC~袋井 IC 間の盛土で採取された試料で、新第三紀鮮新世の掛川層群の土方層に由来する。

神戸泥岩は、兵庫県神戸市北区に堆積する神戸層群の吉川累層泥岩層から採取した試料で、新名神高速道路の盛土に用いられた古第三紀後期始新世~前期漸新世の堆積岩である。

高崎泥岩は、上信越自動車道の藤岡~吉井 IC 間の供用 18 年の盛土から採取された試料で、新第三紀中新世の吉井層に由来する。

図-1 に 3 種類の試料の蛍光 X 線分析の結果を示す。

表-1 泥岩試料の物性 (初期状態)

	Kakegawa mudstone	Kobe mudstone	Takasaki mudstone
Particle density ρ_s [g/cm ³]	2.65	2.69	2.77
Maximum void ratio $e_{\max}$	1.93	1.85	2.40
Minimum void ratio $e_{\min}$	1.48	1.38	1.86

図-2 乾湿履歴に伴う粒度分布および粒子性状の変化

図からわかるように、3つの試料はいずれもケイ素 Si のモル百分率が最も高く、二酸化ケイ素 SiO_2 の結晶である石英やシリカを含有すると考えられる。また、アルミニウム Al は酸化アルミニウム Al_2O_3 、鉄 Fe は酸化鉄(III) Fe_2O_3 の結晶と考える。これらは、泥岩の一般的な化学組成²⁰⁾と言える。試料の初期状態における物性を表-1にまとめる。

(3) 結果と考察

3種類の泥岩の乾湿履歴に伴う粒径加積曲線の変化と

各サイクル後の土粒子の様子を図-2に示す。写真は、同じ粒子群を繰返して撮影したものであり、乾湿履歴に伴う土粒子の細片化、細粒化の進行を確認できる。(a)に示した掛川泥岩の粒径加積曲線では、初回の乾湿サイクルから粒度は明確に変化して、初期状態では存在しなかった9.5 mm以下の粒子が20%以上になった。また、乾湿履歴によって粒度分布はさらに変化して細粒分が増加し、9.5 mm以下の粒子が90%程度に達し、粒径加積曲線が直線的な形状になっている。ただし、最大粒径はほとんど変化していないことから、スレーキングを発生

図-3 乾湿サイクル数と最大・最小間隙比の関係

して細粒化する粒子とそうではない粒子が混在し、均等係数が増加することがわかる。これは乾湿に伴う粒子画像の変遷からも見てとれる。

(b)の神戸泥岩や(c)の高崎泥岩でも、掛川泥岩と同様に乾湿履歴後に明確な粒度変化を見てとれる。神戸泥岩は、1サイクルの乾湿試験も実施して粒度分析を行っているが、初期サイクルから明確に粒度変化を生じ、その後、多サイクルの乾湿によりさらに粒度変化が進行する。なお、神戸泥岩の拡大写真では乾湿履歴後に団粒化する粒子を見てとれるが、いったん細粒化して団粒化した試料の結合は極めて弱く、裏ごし工程のないふるい分け試験でも乾湿サイクルの増加に伴う粒度変化は粒径が小さい方向に単調に変化することを確認している。各試料の結果を比較すると、試料によるスレーキング特性の違いは明確で、神戸泥岩は初期サイクルから粒度変化が顕著で、各サイクルの写真からも初期サイクルでほとんどの粒子が粉々に細粒化している。このような顕著な細粒化により、神戸泥岩の場合には最大粒径も明確に小さくなった。一方、高崎泥岩は、掛川泥岩と同様に、粒子は元の形状は保ちながら徐々に亀裂が入る形で破碎した。土粒子の拡大写真を注意深く観察すると、掛川泥岩の破碎特性に明確な指向性はなく、徐々にひび割れて細粒化するのに対して、高崎泥岩は明確な方向性をもって薄い層状に粒子が破碎した。以上のようなことから、泥岩試料

はいずれも乾湿履歴によって明確に粒度特性が変化するものの、採取場所ごとに堆積年代や構成物質は異なり、それがスレーキング特性にも影響を及ぼすと考えられる。特に、粒度変化の程度や乾湿サイクルの増加に伴う粒度の変遷、すなわちスレーキングの進行速さは試料によって大きく異なり、一回の乾湿で完全に細粒化する試料と多サイクルの乾湿で徐々にスレーキングを起こす試料など、スレーキングの起こりやすさも異なることがわかる。

次に、スレーキングによる粒度変化と力学特性への影響について考察を行う。3種類の泥岩試料に対して、1サイクルの乾湿履歴を経るたびに最大間隙比 $e_{\max}$ と最小間隙比 $e_{\min}$ を調べた結果を図-3に示す。図より、いずれの試料においても、最大・最小間隙比は3サイクル経過まで単調に減少することがわかる。その後、最大・最小間隙比は神戸泥岩ではともに微増しているが、掛川泥岩はほぼ横ばい、高崎泥岩では減少し続けている。

Ladeら²¹⁾は、室内試験により粗い粒径の土試料に細粒分を添加すると最大・最小間隙比は減少するが、添加量をさらに増加させると細粒分同士の間隙が形成されて最大・最小間隙比は再び増加することを示している。ここで示した最大・最小間隙比の変化も、図-2に示した粒度変化に連動しており、掛川泥岩や高崎泥岩では最大粒径をほぼ保ちつつ、均等係数が増加する形でスレーキングが進行したため、最大・最小間隙比は単調に減少

図4 細粒分含有率が最大・最小間隙比および限界状態の間隙比に及ぼす影響(Papadopoulou & Tika²³⁾を元に作図)

図5 粒子破碎に伴う粒度変化と粒度指標 I_G ^{23),24)}

している。一方、神戸泥岩では、乾湿履歴に伴ってほとんど粒子が細粒化して最大粒径が明確に減少し、細粒分含有率が 100% に近づくにつれて均等係数が減少して、最大・最小間隙比が再び増加した。

一方、Papadopoulou and Tika²³⁾は、細粒分含有率を変化させて最大・最小間隙比とともに、平均有効応力 $p' = 100 \text{ kPa}$ での圧密排水三軸試験により限界状態間隙比を観察し、図-4 のように細粒分含有率の変化に伴って、最大・最小間隙比と同様に限界状態の間隙比も変化することを示している。つまり、最大・最小間隙比の変化は、土粒子が安定的に存在する間隙比の範囲の変化を意味し、土の力学的性質である限界状態や正規圧密状態の間隙比も変化すると考えるのが自然である。したがって、図-3 に示したスレーキング現象に伴う最大・最小間隙比の変化も、限界状態における間隙比の変化を伴うと考えることができよう。

ところで、Kikumoto ら²³⁾は土の粒度特性を図-5 で定義されるスカラー指標 I_G ^{23),24)} に単純化して、粒子破碎現象に伴う粒度変化を粒度指標 I_G の発展則として表現し、粒度指標 I_G と最大・最小間隙比および限界状態の間隙比を関係付けることで粒子破碎による粒度変化を考慮した構成則を提案している。スレーキング現象に伴う粒度

変化と最大・最小間隙比の変化は、粒子破碎のそれと類似していることから、粒度指標 I_G の発展則をスレーキング現象に拡張することで、スレーキング現象も同じ観点から記述できるものと考えられる。

3. 一次元圧縮条件下での泥岩のスレーキング

前章でスレーキング現象が明瞭に確認された掛川泥岩と神戸泥岩に対して、一次元圧縮条件下で乾湿履歴を与える圧縮スレーキング試験を実施し、拘束応力を与えた条件下でのスレーキング特性と応力ひずみ特性への影響について議論する。

(1) 試験の概要

促進スレーキング試験では、乾湿履歴の前後の泥岩試料が異なる材料に変遷していることを示した。本章では、2 種類の泥岩に対して、一次元圧縮条件下で乾湿履歴を与える圧縮スレーキング試験を実施し、スレーキング特性と変形挙動の関係について検討する。

試験は図-6 に示す試験装置により実施した。装置は同図の左側の載荷・計測機構と右側の乾湿経路からなる。試料容器の側方は変形を許さない剛な直径 60 mm の鋼製リング、上下端は湿潤・乾燥履歴を与えられるようにポーラスストーンを介した載荷板となっている。載荷は空圧シリンダーにより行い、鉛直荷重および鉛直変位を自動計測する。下端のポーラスストーンは、湿潤・乾燥を繰り返す経路に接続されている。湿潤経路は炭酸ガスの通気経路と脱気水の通水経路からなり、脱気水を溜めたタンクは真空ポンプに接続されている。なお、試料容器は試料を完全に水浸できる構造になっている。乾燥経路は排水経路と乾燥気体の通気経路からなり、排水経路は大気に開放されており、乾燥空気はシリカゲルを充填したタンクに圧縮空気を送る機構になっている。

試験手順は以下の通りである。鋼製リング内に供試体を作製した後、荷重計他の計測機器類を設置して初期化するとともに、供試体高さを求めて初期間隙比を算出する。続いて、乾燥状態のまま、空圧シリンダーにより鉛直応力を制御して、段階的に載荷を行う。上載圧は 9.8, 19.6, 39.2, 78.5, 157, 314, 628, 1256 kPa の 8 段階で載荷した。また、試料は乾燥状態であり、載荷後の圧縮挙動に時間依存性もほとんど見られなかったことから、各段階の載荷重時間は 30 分とした。その後、鉛直応力を一定に保ったまま乾湿の繰り返しを行う。湿潤過程では、供試体の飽和化を促進するため、炭酸ガス (CO_2) を 30 分通気した後、大気圧に開放した脱気水槽と圧密リングとの水位差で通水し、供試体を所定の時間、放置した。

図-7 は通水開始後の時間経過に伴う泥岩試料の体積変

図-6 一次元圧縮スレーキング試験の概要

 図-7 浸水時間の経過に伴う泥岩試料の間隙比の変化
(掛川泥岩, 鉛直有効応力 $\sigma_v' = 314 \text{ kPa}$)

化の一例であるが、試料の体積は通水開始から 1~2 分経過時まで圧縮し、それ以降はほぼ一定であった。この結果を受けて放置時間は 6 時間とした。乾燥過程では、大気に開放した排水容器と圧密容器の水位差で 30 分間排水し、圧密容器内の脱気水をスポイトで取り除いた後、圧密容器内にシリカゲルパックを数個設置するとともに、シリカゲルを充填した空気タンクに微量の正圧を作用させることで供試体下部から乾燥空気を送り、48 時間かけて試料の乾燥を促した。試験では、以上の乾湿過程を 1 サイクルとし、所定のサイクルまで乾湿を繰り返した。所定の回数の乾湿履歴が終了したら試料を取り出して 24 時間炉乾燥し、粒度分析と最大・最小密度試験を行った。なお、本試験においても裏ごし時の加水によりスレーキングが更に進行することへの懸念から、粒度分析は乾燥状態でふるい分けにより行った。

(2) 試料と試験パターン

試験は掛川泥岩と神戸泥岩の 2 種類に対して実施した。土試料は、供試体の寸法を勘案して、粒径 $0.85 \sim 2.0 \text{ mm}$ に粒度調整した試料を炉乾燥して用いた。供試体は直径 60 mm 、高さ 40 mm の円柱型で、所定の初期間隙比になるよう予め計算した重量の試料を半量ずつ 2 層に分けて詰め、層ごとに 80 mm の高さから試料に気中落下させた後、ガラス棒で 50 回ずつ突き固めた。なお、本試験では乾燥状態から乾湿履歴を与えるが、緩詰め試料は水浸時にコラプスと呼ばれる体積圧縮を生じることが指摘されている。そこで、コラプス現象に起因した圧縮を極力起こさないように中密な試料を作製した。

試験は 2 種類の試料に対して、 $\sigma_v' = 314 \text{ kPa}$ と $\sigma_v' = 1256 \text{ kPa}$ の 2 つの鉛直応力下で乾湿履歴を与えた。乾湿回数による変化を確認するため、 $\sigma_v' = 314 \text{ kPa}$ では乾湿履歴を与えない 0 サイクルと 1 および 3 サイクルの乾湿繰返し試験を実施し、鉛直載荷圧 $\sigma_v' = 1256 \text{ kPa}$ では湿潤を行わない 0 サイクルと 3 サイクルの乾湿繰返し試験を行った。

(3) 結果と考察

まず、圧縮過程および鉛直応力一定条件下での乾湿繰返し過程における粒子特性の変化について考察する。図-8 に掛川泥岩と神戸泥岩の初期状態、一次元圧縮後（水浸前）、1 および 3 サイクルの乾湿サイクル後の粒径加積曲線を示す。図の上段には、初期状態および鉛直応力 $\sigma_v' = 314 \text{ kPa}$ で 3 サイクルの乾湿繰返し後の粒子の拡大写真も示した。図より、粒径加積曲線に着目すると、一次元圧縮直後（乾湿履歴前）の時点で、掛川泥岩と神戸泥岩は明瞭に粒度変化を生じており、両試料ともに一

図8 一次元圧縮スレーキング試験における3種類の泥岩試料の粒度特性の変化

次元圧縮の過程で粒子破碎を生じることが分かる。また、鉛直応力が大きいほうが小さい粒径の通過重量百分率は高くなっており、圧縮応力が高いほどより粒子破碎が進行していることが分かる。

次に、乾湿履歴による粒度変化に着目すると、どちらの試料も、初回の乾湿サイクルから粒度分布が顕著に変化しており、乾湿回数が増えるとともに粒度が変化する様子もみてとれる。ただし、両試料ともに最大粒径は一定であった。粒子の拡大画像で2つの試料の結果を比較すると、どちらの試料もスレーキングの細粒化を確認できるが、特に神戸泥岩の細粒化が顕著であった。これは、土粒子の構成物質や堆積年代に起因した固結度の違いが大きく影響しているものと予想されるが、詳細な議論のためには今後、泥岩だけでなく頁岩や凝灰岩も含めて試験を行って比較検証する必要がある。

試験条件による違いに着目すると、拘束応力を与えない促進スレーキング試験では神戸泥岩をはじめとして最大粒径が明確に減少したのに対して、拘束応力下の圧縮スレーキング試験では最大粒径がほとんど変化しないことが特徴的であった。粒径が大きい粒子は、粒子内に割れ目や弱部を含む可能性が高く、周囲を拘束しない促進スレーキング試験では軒並みスレーキングを生じて破碎して最大粒径が減少するのに対して、拘束応力を受けた土粒子の集合体の中では、周囲の粒子から接触力を受けて粒子内部の応力状態が等方的になって安定化しやすく、大きな粒子も幾つかは破碎せずに残って最大粒径が変化

しなかったものと解釈できる。

Kikumoto ら²³⁾は、圧縮やせん断に伴う粒子破碎では粒径加積曲線の最大粒径がほとんど変化せず、細粒分が増加することを指摘し、それを0から1に単調増加する粒度インデックス I_G の発展則として記述したが、本試験の結果からは乾湿履歴によるスレーキングに伴う粒度特性の変化も同じ粒度インデックス I_G の発展則として同一観点から記述しうる可能性が示唆された。

次に、スレーキングによる粒度特性の変化と圧縮挙動の関係について考察する。図-9、10に掛川泥岩と神戸泥岩の一次元圧縮過程（鉛直有効応力 σ'_v の変化）および乾湿繰返し過程（サイクル数 n の変化）での間隙比 e と破碎粒子含有率 F の変化を示す。これらの図では、上段に間隙比 e 、下段に破碎粒子含有率 F を示しており、左図では鉛直有効応力、右図では乾湿サイクル数を横軸にとっている。破碎粒子含有率は、0.85~2.00 mm の粒径に初期粒度を調整した試料に対して、試験後の試料の0.85 mm 未満の粒子の重量百分率であり、応力変化や乾湿履歴により細粒化した粒子の含有率と考えることができる。図-9に示した掛川泥岩の応答に着目すると、一次元圧縮過程では、(c)図のように破碎粒子含有率 F は圧縮応力 $\sigma'_v = 314$ kPa で14.6%、 $\sigma'_v = 1256$ kPa で23.6%に達しており、応力増加に伴う明確な粒子破碎現象を確認できる。このとき、(a)図のように初期状態から圧縮応力の増加に伴って体積圧縮し、片対数の e - $\log \sigma'_v$ 平面での圧縮線の傾きは徐々に右下がりになる。このような粒子

図-9 掛川泥岩の一次元圧縮スレーキング試験における圧縮特性と粒度変化

図-10 神戸泥岩の一次元圧縮スレーキング試験における圧縮特性と粒度変化

破碎の進行に伴う圧縮線の傾きの変化は、既往の実験的検討^{25), 26)}でもしばしば指摘されており、破碎により細粒化した粒子が破碎前に存在した土粒子間隙を充填する形で圧縮性が増すとの考察も示されている²³⁾。乾湿繰返し過程では、(d)図のように3サイクル後に破碎粒子含有率 F が 40 %前後に達し、(b)図から間隙比が 0.6 以上減少して大圧縮する様子を見てとれる。図-10 に示した神戸泥岩でも同様で、乾湿過程における破碎粒子含有率 F の

増加や間隙比 e の減少量は掛川泥岩よりも大きくなった。以上のように、粒子破碎現象は圧縮線の傾きを増加させること、拘束応力下での乾湿履歴により発生するスレーキング現象は大圧縮を引き起こすことがわかった。

4. 結論

乾湿繰り返しに伴う風化現象であるスレーキングについて、その発生過程や土の種類による進行度合いの違いを観察するため、破碎した泥岩試料を用いて拘束応力を与えない条件下で乾湿を繰返す従来型の促進スレーキング試験と、拘束応力下で乾湿履歴を与えて粒度変化と変形挙動を観察する圧縮スレーキング試験を実施した。

促進スレーキング試験では、採取地や堆積年代が異なる3種類の泥岩試料の乾湿回数に対するスレーキング特性の違いや粒子特性の変化を観察した。その結果、1サイクルの湿潤、乾燥履歴でかなり細粒化が進む試料や、乾湿履歴を経るごとに徐々に細片化する試料など、試料によってスレーキング特性が大きく異なることを示した。また、粒子レベルでも、スレーキングを発生して粉々に破碎する試料や、粒子が指向性を持って層状に薄く割れる試料など粒子特性の変化も様々であることがわかった。さらに、スレーキングに伴う細粒化は、土の力学特性に不可逆な変化をもたらす、最大・最小間隙比を変化させることを示した。

次に、促進スレーキング試験で異なるスレーキング特性を呈した2種類の試料に対して、一次元圧縮条件下で鉛直有効応力を一定に保って乾湿履歴の影響を観察する圧縮スレーキング試験を実施した。同試験からは、圧縮過程における粒子破碎現象が土の圧縮性の増加に寄与すること、拘束応力下で乾湿履歴によって発生するスレーキングは土の大圧縮を引き起こすことがわかった。また、拘束圧下での乾湿履歴によるスレーキングでは、最大粒径を一定に保ったまま細粒分が単調に増加することが示された。

一連の実験結果を踏まえて、スレーキング現象を構成則の範疇で記述する方法について考察を行い、スレーキングに伴う粒度特性の変化は、乾湿履歴を考慮して粒度特性を表すスカラーの指標 I_g^{2D} の発展則を規定することにより記述できることを示唆するとともに、スレーキング時の粒度変化が力学特性に及ぼす影響は、粒度インデックス I_g と最大・最小間隙比や限界間隙比を関係付けることで記述できるとの考えを示した。

最後に、スレーキング現象は泥岩や頁岩、凝灰岩等の堆積軟岩や片岩等の変成岩で特徴的な現象であり、スレーキングの進行速さや程度は地質年代や生成過程、含有鉱物等により異なってくるものと予想される。本論文では、3種類の泥岩に対する室内試験の結果から試料によるスレーキング特性の違いを考察したが、影響要因の特定にはさらに多くの試料に対して、分析と試験が必要になると考えている。この点については、第一著者が引き続き検討を行う予定である。

謝辞：試験に用いた3種類の泥岩試料は(株)高速道路総合技術研究所(NEXCO 総研)土工研究室から提供を受けた。実験の実施には元横浜国立大学 学部生の福田圭吾氏、松本亜里沙氏の支援を得た。また、本論文に対する匿名の査読者からの意見はいずれも建設的かつ有益で、論文内容の向上に大きく寄与した。ここに記して関係各位のご厚意に心からの謝意を表す。

参考文献

- 1) 盛土の挙動予測と実際編集委員会：盛土の挙動予測と実際(地盤工学・実務シリーズ2)，地盤工学会，1996。
- 2) 日本道路公団：ぜい弱岩(風化岩)盛土の圧縮沈下と路床への適用，試験所技術資料第212号，1983。
- 3) 山田一夫，水道龍次，田嶋史人：村上IC大規模切土法面の崩壊対策について，北陸地方整備局管内事業研究会発表論文集，2010。
- 4) 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，技術フォーラム2012，全国地質調査業協会連合会，ID: 55，2012。
- 5) 中日本高速道路 東京支社：東名高速道路牧之原地区地震災害の対応について，道路行政セミナー，No. 14，11月号，2009。
- 6) 望月秋利，片岡昌裕，阪口理，寺下雅裕：暴露試験と乾湿繰返し試験による頁岩の風化速度の検討，土質工学会論文報告集，Vol. 34，No. 4，pp. 109-119，1994。
- 7) 板橋一雄，佐藤健，森富雄，和田英孝：軟岩の室内スレーキング試験に伴う細粒化の表現法，土木学会論文集，No.505/III-29，pp. 181-190，1994。
- 8) 板橋一雄，佐藤健，森富雄，岩田賢：軟岩の暴露試験と細粒化の表現法，土木学会論文集，No.523/III-32，pp. 19-29，1995。
- 9) 板橋一雄，佐藤健，和田英孝，岩田賢：暴露試験と室内スレーキング試験による軟岩供試体の沈下挙動と細粒化，土木学会論文集，No.561/III-38，pp. 99-108，1997。
- 10) 中村洋丈，小林一：泥岩を用いた高速道路盛土の物理特性と強度特性，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，No. 14，2012。
- 11) 島博保，今川史郎：スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沈下と対応策，土と基礎，Vol. 28，No. 7，pp. 45-52，1980。
- 12) 金丸信一，宮崎啓一，廣川文明，平岡博明：乾燥と水浸を繰返し受けた泥質片岩の圧縮試験，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1241-1242，1997。
- 13) 加登文学，森尾敏，堤哲平：泥岩性材料の細粒化と一次元圧縮特性，土木学会論文集C，Vol.65，No.1，pp. 266-274，2009。
- 14) 殿垣内正人，横田聖哉，木内浩二，三嶋信裕：泥岩のスレーキングに伴う性状の変化と強度特性，第31回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 1441-1442，1996。
- 15) 楠見晴重，峰之久，松下千加世，西田一彦：一定せん断応力を受ける軟岩の乾湿繰返し下におけるせん断挙動，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 37-42，1998。

- 16) 楠見晴重, 松下千加世, 片江敏雄, 西田一彦: 一定応力下における乾湿繰返しを受けた軟岩の強度変化特性, 第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 36-42, 2000.
- 17) 東日本高速道路・中日本高速道路・西日本高速道路: 岩のスレーキング率試験方法, NEXCO 試験方法第 1 編 土質関係試験方法, pp. 20-22, 2012.
- 18) 地盤工学会: 第 4 章 粒度試験, 地盤材料試験の方法と解説, pp. 115-136, 2009.
- 19) 地盤工学会: 礫の最小密度・最大密度試験方法 (JGS 0612-2006), 新規定地盤工学会基準・同解説書 (2006 年度版), pp. 3-34, 2006.
- 20) 林謙二, 山真典, 米田哲朗: 幌内層泥岩の風化変質と劣化, 応用地質, 第 46 巻, 第 4 号, pp. 198-206, 2005.
- 21) Lade, P. V., Liggio, Jr., C. D. and Yamamuro, J. A.: Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand, *Geotech. Testing Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 336-347, 1988.
- 22) Papadopoulos, A. and Tika, T.: The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 5, pp. 713-725, 2008.
- 23) Kikumoto, M., Russell, A. and Muir Wood, D.: Particle crushing and deformation behaviour, *Soils and Foundations*, Vol. 50, No. 4, pp. 547-563, 2010.
- 24) Muir Wood, D.: The magic of sands - The 20th Bjerrum Lecture presented in Oslo, 25 November 2005, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44, No. 11, pp. 1329-1350, 2007.
- 25) Roberts, J. E. and de Souza, J. M.: The compressibility of sands, *Proc. of the American Society for Testing and Materials*, Vol. 58, pp. 1269-1277, 1958.
- 26) Coop, M. R. and Lee, I. K.: The behaviour of granular soils at elevated stresses, *Predictive Soil Mechanics, Proc. C. P. Wroth Memorial Symposium*, Thomas Telford, London, pp. 186-198, 1993.

(2015. 11. 19 受付)

SLAKING PHENOMENA AND DEFORMATION BEHAVIOR OF CRUSHED MUDSTONE

Mamoru KIKUMOTO, Takumi FUKUDA and Hiroyuki KYOKAWA

Two kinds of slaking tests, ordinary accelerated slaking tests and newly-developed 1d compression-slaking tests, are conducted on three kinds of mudstone in order to investigate slaking phenomena, namely, weathering due to cyclic process of wetting and drying. Variation in grading occurred by slaking and resulting, irreversible changes in mechanical characteristics are discussed based on the results of accelerated slaking tests. The experimental results of one-dimensional compression slaking test show that: particle crushing during compression process causes increase in compressibility; the wetting and drying cycles causes slaking-induced change of grading and this change causes significant volumetric compression. Finally, it is mentioned that constitutive modeling considering slaking is possible by describing evolution of grading due to slaking through the grading index I_G and linking maximum and minimum void ratio or critical state void ratio with I_G .