

# 締固め後に乾湿繰返しを与えた泥岩砕石集合体のせん断挙動の骨格構造概念に基づく解釈

泥岩 締固め スレーキング

名古屋大学 国際会員 ○酒井 崇之 中野 正樹  
 名古屋大学 学生会員 犬飼 翔吾 山本 道信

## 1. はじめに

著者らは、以前より、予め乾燥・湿潤サイクル（以後、乾湿繰返し）を与えた泥岩粒を締固め、圧縮・せん断挙動を把握することを試み、乾湿繰返しにより最大軸差応力が低下することを示した。一方、実際の盛土は、造成後にスレーキングが進行し、盛土内はのり尻などを除けばある程度側方変位も拘束されている状態になっていると考えられる。

そこで本研究は、締め固めた泥岩砕石集合体に対し、モールドに供試体を入れた状態で乾湿繰返しを与えることにより盛土内におけるスレーキング進行を模擬した。そして、作製した供試体に対し三軸圧縮試験を実施し、スレーキング進行が泥岩砕石集合体のせん断挙動に及ぼす影響について調べた。また、弾塑性構成式 SYS Cam-clay model により三軸圧縮試験を再現し、乾湿を与えることに生じる力学特性の変化を骨格構造概念に基づき考察した。

## 2. 実験に使用した泥岩と供試体作製方法について

本研究で用いた泥岩は神戸で採取され、それぞれの泥岩を泥岩 A, B と呼ぶ。泥岩の基本的な性質を表 1 に示す。泥岩 A, B とともにスレーキング率が高い。

供試体は、3層に分けて静的に締め固めて作製し、乾燥密度は最大乾燥密度の90%、空気間隙率は15%とした。そして、三軸試験を実施する前に、供試体に乾燥湿潤過程を与えるケースと与えないケースを設定し、供試体を準備した。乾湿を与えないケースは、作製した供試体をモールドごと蒸留水に1日間水没させている。なおモールドの底盤と蓋には孔が空いており、そこから水や空気が入り出すことが可能となっている。その後、モールドから取り出した供試体を三軸圧縮試験機にセットした。一方、乾湿を与えた供試体については、1日間水没させた後に、乾燥過程と水浸過程を繰り返した。乾燥過程は2日間モールドごと供試体を100℃の定温乾燥器に入れて、水浸過程は2日間脱気しながら蒸留水にモールドごと供試体に水没させた。なお、乾燥・水浸の回数が3回、6回のケースについて実験を行った。乾湿を受けていないケースを乾湿0回、受けたケースをそれぞれ乾湿3回、乾湿6回と呼ぶ。

三軸圧縮試験については、JGS0523-2009 に準拠して実施した。既定のサイクル数の乾湿過程を与えた供試体を乾湿モールドから抜き出し、供試体を三軸セルの中に設置後、飽和化を図るために二重負圧法を実施した。そして、有効拘束圧  $p' = 20\text{kPa}$  を維持しつつ背圧を  $400\text{kPa}$  まで上昇させて、B 値が95%以上であることを確認した後、有効拘束圧  $p' = 100\text{kPa}$  で体積ひずみが収束するまで等方圧密を実施した。そして体積ひずみが収束したことを確認した後、 $0.014\text{mm/min}$  のせん断速度で非排水せん断を実施した。

## 3. 締固め後の乾湿がせん断挙動に及ぼす影響

図 1, 2 に、泥岩 A と泥岩 B に対して実施した乾湿 0 回, 3 回, 6 回結果を示す。最大軸差応力は、密度の高い乾湿 3 回の方が乾湿 0 回よりも小さくなった。これは供試体が乾湿繰返しを受けたことで、スレーキングが進行したからだと考えられる。また、より多くの乾湿サイクルを受けた乾湿 6 回を見ると、比体積が乾湿 3 回よりも小さくなったにもかかわらず、最大軸差応力は乾湿 3 回とほとんど同じ値を示した。有効応力パスに着目すると、いずれもせん断初期に塑性圧縮を伴う硬化挙動を示し、その後、塑性膨脹を伴う硬化挙動を示した。ただし、せん断初期における塑性圧縮の程度、つまり正の過剰間隙水圧の大きさは乾湿 0 回の方が小さい。一方、泥岩 B については、乾湿を受けた供試体と受けて

表 1 対象とした泥岩の物性

項目	泥岩 A	泥岩 B
自然含水比(%)	17.4	27.0
土粒子密度( $\text{Mg/m}^3$ )	2.70	2.62
スレーキング率(%)	100	85.6
破砕率(%)	44.0	44.0
液性限界(%)	56.5	62.6
塑性指数	34.4	34.3
最適含水比(%)	22.5	25.3
最大乾燥密度( $\text{Mg/m}^3$ )	1.57	1.47

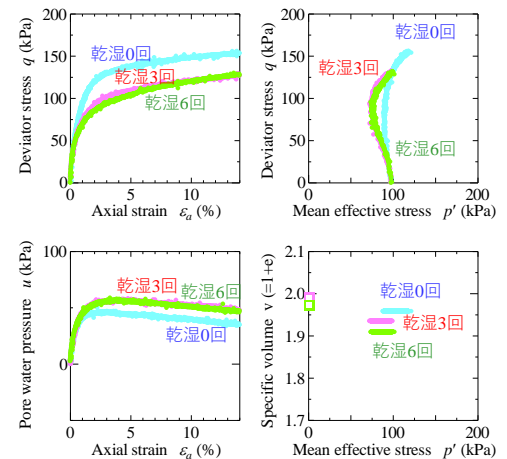


図 1 泥岩 A に対する三軸圧縮試験結果

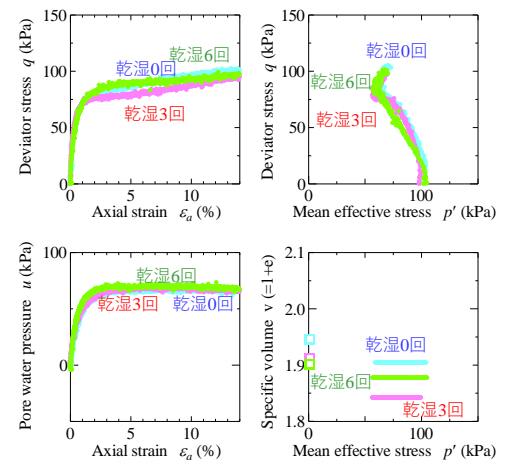


図 2 泥岩 B に対する三軸圧縮試験結果

いない供試体の最大軸差応力、有効応力パスはほとんど同じであった。

#### 4. SYS Cam-clay model による三軸圧縮試験結果の再現

計算に用いた材料定数を表 2、初期値を表 3 に示す。等方圧密試験の再現は、 $p'=100\text{kPa}$  を初期値とし、 $p'=3200\text{kPa}$  までの過程を対象とし、三軸圧縮試験については、等方圧密過程の前の状態を初期値とし、等方圧密過程および非排水せん断過程を対象とした。図 3、4 に SYS Cam-clay model による泥岩 A の等方圧密試験の再現結果と三軸圧縮試験の再現結果をそれぞれ示す。また、図 5、6 に泥岩 B の等方圧密試験の再現結果と三軸圧縮試験の再現結果をそれぞれ示す。図 4、6 については過圧密  $R$  および構造  $R^*$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係も併せて示す。試験結果を概ね再現することができている。過圧密  $R$ —軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係と構造  $R^*$ —軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係に着目すると、構造  $R^*$  はほとんど変化がないが、過圧密  $R$  は最終的に 1.0 になり、構造が劣化しづらく過圧密が解消しやすいと言える。なお、泥岩 A と泥岩 B を比較すると、泥岩 A の方が、過圧密が解消しやすいことがわかった。

表 3 の泥岩 A の値を見ると乾湿繰返しに伴い構造の程度や過圧密比が低下している。つまり、スレーキングの進行により、骨格構造が劣化してゆく。過圧密比が小さくなったことにより、せん断初期の塑性圧縮挙動がより顕著になり、最終的な塑性膨張の程度も小さくなるため、最大軸差応力が小さくなった。構造の程度も小さくなるが、泥岩 A は構造が劣化しづらい材料であることから、その影響は小さい。乾湿 3 回と 6 回はほとんど同じ挙動であったが、初期比体積が大きいため乾湿 3 回の方が構造の程度が大きい。一方、過圧密比はほとんど同じであった。泥岩 B については、乾湿を与えてもほとんど同じ挙動であったが、初期比体積に応じて、構造の程度が小さくなった。これらの結果は供試体を作製する前に乾湿を与えた場合と同じ傾向であった<sup>3)</sup>。

#### 5. おわりに

本研究では、実際の盛土を想定して、締め固めた泥岩砕石集合体に対し乾湿繰返しを与えることでスレーキング進行程度を変えた供試体を作製し、三軸圧縮試験を実施し、その挙動を再現した。今後は乾湿回数を増やしたり、供試体作製時の密度を変えたり、様々な条件で実験を進めてスレーキング進行しづらい条件を把握していきたい。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 20K14822 の助成を受けた。本稿は(株)高速道路総合技術研究所道路研究部土工研究室様との共同研究の一部を発表したものである。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献：1) Sakai, T. and Nakano, M.: Effects of slaking and degree of compaction on the mechanical properties of mudstones with varying slaking properties, *Soils and Foundations*, Vol.59, No.1, pp.56-66, 2019. 2) Asaoka, A. et al, Anelasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002. 3) Nakano, M. and Sakai, T.: Interpretation of Slaking of a Mudstone Embankment Using Soil Skeleton Structure Model Concept and Reproduction of Embankment Failure by Seismic Analysis, *Proceedings of The 15th Asian Regional Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE-15ARC)*, Fukuoka(Japan), JPN-137, 2016.

表 2 材料定数

	泥岩 A	泥岩 B
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.130	0.090
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.030	0.010
限界状態定数 $M$	1.350	1.400
NCL の切片 $N$	1.750	1.740
ポアソン比 $\nu$	0.300	0.300
正規圧密土化指数 $m$	1.500	1.000
構造劣化指数 $a$	0.100	0.100
$b$	1.000	1.000
$c$	1.000	1.000
$\ D_s^p\ $ と $-D_v^p$ の比 $c_s$	0.100	0.100
回転硬化指数 $b_r$	0.100	0.500
回転硬化限界定数 $m_b$	0.500	0.100

表 3 初期値

材料名	比体積 $v_0$	構造の程度 $1/R^*_0$	過圧密比 $1/R_0$
泥岩 A(乾湿 0 回)	1.981	8.0	15.1
泥岩 A(乾湿 3 回)	1.991	6.8	11.9
泥岩 A(乾湿 6 回)	1.973	5.5	11.5
泥岩 B(乾湿 0 回)	1.946	4.0	4.0
泥岩 B(乾湿 3 回)	1.912	2.5	3.8
泥岩 B(乾湿 6 回)	1.902	2.0	3.4

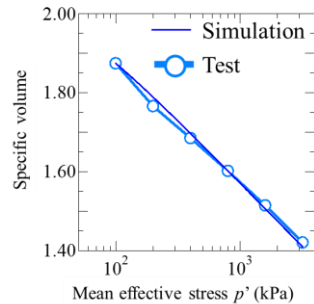


図-3 泥岩 A の等方圧密試験結果の再現

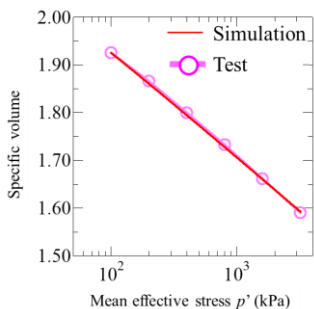


図-5 泥岩 B の等方圧密試験結果の再現

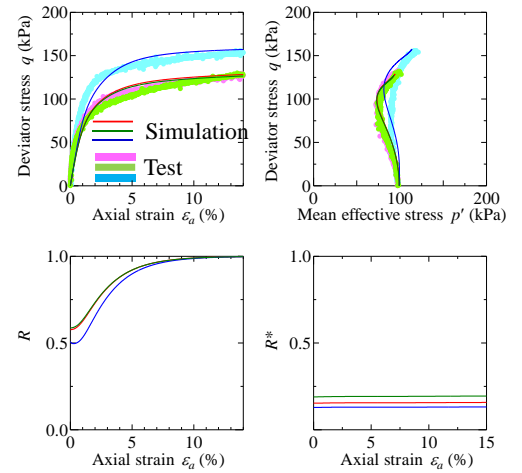


図 4 泥岩 A の三軸圧縮試験結果の再現

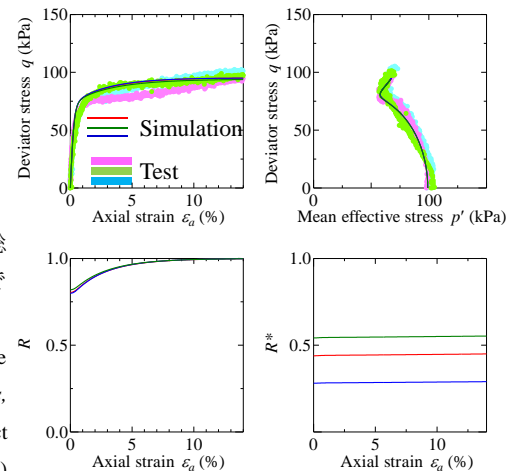


図 6 泥岩 B の三軸圧縮試験結果の再現