

スレーキング特性の異なる 3 種類の泥岩碎石集合体の 力学特性に及ぼす乾湿経験回数の影響

The Effect of Number of Dry-wet Repetition on Mechanical Properties of Three Typical Crushed Mudstones Aggregates having various slaking properties

酒井崇之¹, 中野正樹², 倭大史³, 福田雄斗², 工藤佳祐²

1 名古屋大学・減災連携研究センター・t-sakai@civil.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻

3 中日本高速道路株式会社・横浜保全・サービスセンター

概 要

本研究では、採取場所の異なる 3 種類の泥岩に対し、細粒化のしやすさを把握するため、乾燥と水浸（湿潤）を繰返し作用させ細粒化率を測定する新しい試験方法、乾湿繰返し細粒化率試験を実施した。また、乾燥湿潤のサイクルを 0, 1, 2 回与えた泥岩を締固めて一軸試験および三軸試験を実施した。そして、三軸試験については、得られた結果を SYS Cam-clay model で再現することにより、乾湿繰返し回数が力学特性に及ぼす影響を調べ、3 種類の泥岩を比較した。以下に結論を示す。1)対象とした 3 種類の泥岩において、スレーキング率が同じでも、乾湿繰返し回数～細粒化率関係の異なる泥岩が存在した。細粒化のしやすい泥岩ほど、同じ乾燥密度であっても、少ない乾湿繰返し回数で泥岩の最大軸差応力は急減した。2)それぞれの泥岩について、同じ密度の場合、細粒化率が高くなればなるほど、構造は低位化し過圧密が解消する傾向が得られた。3)過圧密が解消することにより、せん断中に塑性膨張を伴う硬化の程度が小さくなってしまいうため、泥岩の強度が低下する。

キーワード：泥岩，スレーキング，三軸圧縮試験，細粒化率，土の骨格構造

1. はじめに

2009 年 8 月 11 日、静岡県御前崎の北東 35km の駿河湾の深さ 23km を震源とするマグニチュード 6.5 の地震が発生した。この地震によって、東名高速道路牧之原 SA 付近の盛土（牧之原盛土と呼ぶ）が崩壊した。この崩壊の原因として、盛土の下部路体にある泥岩が長年の浸水作用によって、泥濘化（スレーキング）し、強度低下したことなどが挙げられた¹⁾。このようにスレーキングしやすい泥岩は、建設時は良好な盛土材料であっても、盛土の安定性に大きく影響を与える。

泥岩のスレーキングに関する研究は以前から多くなされておられ、例えば島ら²⁾は道路盛土の圧縮沈下に対し、空気間隙率 15%以下に締固めることを提案している。村上³⁾は岩石の物理的性質や初期状態とスレーキングの関係を示した。仲野⁴⁾は地滑りや膨張性地圧に注目し、スレーキングを限界状態理論より説明した。さらに松尾⁵⁾は、スレーキング現象を超過圧密粘土のせん断に伴う吸水膨張による正規圧密土化であると解釈した。これらの研究では、主に泥岩盛土の長期沈下を抑制することを目的としていた。しかしそれだけでは不十分で、今後は長期的安定性や

耐震性を目的としたせん断特性の把握、特に、スレーキングの進行速度の違う泥岩のせん断特性についての研究を行っていくべきであることを今回の災害は物語っている。

そこで、本稿では、スレーキング特性の異なる 3 種類の泥岩に対し、乾湿繰返し細粒化率試験（詳細は 2 章に示す）を実施し、各泥岩のスレーキング進行速度（進行しやすさ）を把握する。また、それぞれの泥岩に乾湿経験を与えることによりスレーキングを促進させて作製試料を締固めて作製した泥岩碎石集合体に対し、一軸圧縮試験と非排水三軸圧縮試験を行い、乾湿経験回数がせん断特性に及ぼす影響を調べる。また、非排水三軸試験結果を弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁶⁾で再現し、スレーキングが骨格構造に及ぼす影響を、泥岩のスレーキング特性と関連させて考察する。

2. 各種泥岩の物性およびスレーキング特性

3 つの泥岩の物性やスレーキング特性を把握するため、各種室内試験を実施した。3 つの泥岩をそれぞれ泥岩 A, B, C とする。スレーキング率試験(JHS110-2006)中の供試体の様子を図 1～3 に示す。スレーキング率試験を簡単に説明すると、調整した供試体に 24 時間炉乾燥、24 時間水

浸のサイクルを5回与え、どの程度細粒化しているか調べる試験である。図より乾湿回数を増やすことによって細粒化が進んでおり、その進み方も異なることが分かる。また、試験により得られた結果を表1に示す。泥岩Aは最大乾燥密度が最も大きい。また、スレーキング率より泥岩Cが最もスレーキングしやすい材料である。図1~3からも泥岩Cが最も細粒化していることが分かる。



図1 スレーキング率試験中の供試体の様子(泥岩 A)



図2 スレーキング率試験中の供試体の様子(泥岩 B)

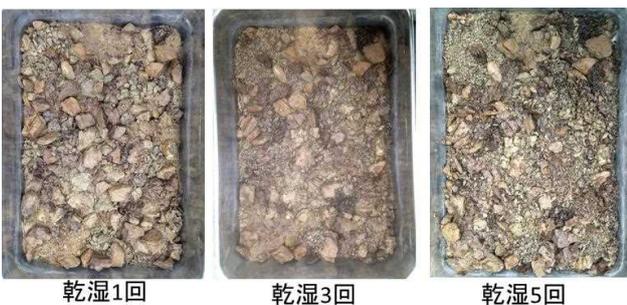


図3 スレーキング率試験中の供試体の様子(泥岩 C)

表1 各種泥岩の物性

	泥岩 A	泥岩 B	泥岩 C
自然含水比(%)	16.8	21.1	22.6
土粒子密度(g/cm ³)	2.70	2.70	2.62
液性限界(%)	30.2	44.2	52.1
塑性指数	11.5	18.1	25.2
スレーキング率(%)	44	47	82
破砕率(%)	49	43	44
最適含水比(%)	17.9	24.0	25.3
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.73	1.55	1.47

図4に脆弱岩区分図を示す⁷⁾。盛土施工の指針では、区分図によってスレーキングしやすい脆弱岩を3つに分類している。(1)材は、スレーキング率が30%以下で、スレーキングの影響が出にくい材料である。(2)材は、スレーキング率、破砕率ともに高い材料である。したがって、盛土施工中に泥岩が破砕され細粒化するため、施工後の細粒化を考慮する必要が無い材料である。(3)材は、スレーキング率は高いが、破砕率は低い材料であるので、施工中に泥岩は破砕されず、盛土施工後に泥岩の細粒化が進行する恐れがある危険な材料である。その泥岩もほぼ(3)材で、特に泥岩Cが盛土施工後に泥岩の細粒化が進行する恐れがある。

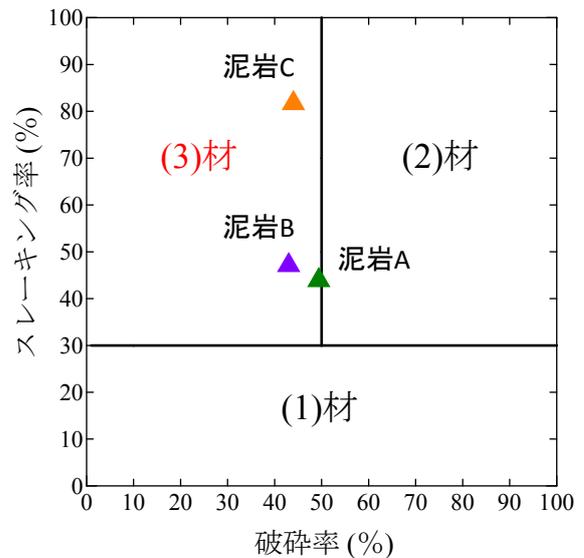


図4 脆弱岩区分図

3. 乾湿繰返し細粒化率試験の提案

図4からもわかるように、泥岩Aと泥岩Bはスレーキング率がほぼ同じである。しかし、図1と図2を比べると、特に乾湿3回で細粒化している様子が異なっており、スレーキング率試験のみでは、泥岩のスレーキング特性を把握できない。また、スレーキング率試験は、粒径19~37.5mmを用いているが、4章で示す力学試験では、9.5mmふるい通過試料を用いるため、粒径の違いも考慮する必要がある。そこで、NEXCO試験方法である岩のスレーキング率試験(JHS110-2006)を参考に、『乾湿繰返し細粒化率試験』を提案する。スレーキング率試験では、粒径19~37.5mmの試料を3kg用意し、24時間炉乾燥、24時間水浸のサイクルを5サイクル行い、その後9.5mmふるいでふるう。9.5mmふるい通過分の乾燥重量が全試料の乾燥重量に占める割合がスレーキング率となる。一方、今回提案する乾湿繰返し細粒化率試験では、粒径が9.5~19mmである試料を約400g用意する。スレーキング率試験と同様の乾湿24時間サイクルを1回行うたび、乾燥後の試料に対し4.75mmふるい通過分の乾燥重量を計測し、全試料の乾燥重量に占める割合を細粒化率 R_s と定義する。この作業を細粒化率が

95～100%になるまで繰り返し行い、乾湿経験回数と細粒化率の関係を調べる。

図5には乾湿繰り返し細粒化率試験の結果を示す。泥岩A、Bはスレーキング率が同程度であったが、スレーキング進行の仕方は全く異なっている。泥岩Aはある程度乾湿を経験すると急に細粒化が進む泥岩、泥岩Bは最初の乾湿で大きく細粒化し、そこからは徐々に細粒化が進む泥岩、泥岩Cはすぐに細粒化する泥岩であることが分かる。

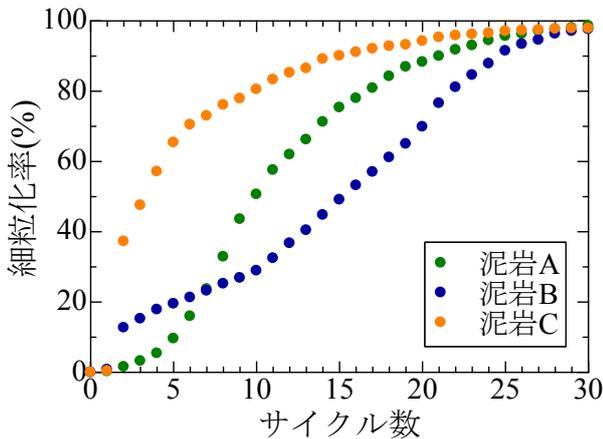


図5 乾湿繰り返し細粒化率試験結果

4. 各種泥岩碎石集合体の力学挙動に及ぼすスレーキング進行度の影響

スレーキングの進行程度が異なる材料として、採取時の状態の泥岩を粒径 9.5～19mm に調整した試料（乾湿未経験試料、乾湿 0 回試料と呼ぶ）と、乾湿 0 回試料に対し、乾燥と水浸を 1 回経験させた試料(乾湿 1 回試料)、2 回経験させた試料(乾湿 2 回試料)を準備した。これらの試料を自然含水比に調整し、 D_c 値 95%になるように締固めて供試体を作製した。 D_c 値とは、締固め度のことであり、供試体の乾燥密度を最大乾燥密度で除して、百分率で表したものである。また、この時の空気間隙率は試料によらず約 10%になった。供試体の寸法は内径 75mm、高さ 150mm とした。

4.1 一軸圧縮試験結果

一軸圧縮試験においては、締固めて作製した供試体を試験機にセットし、1%/min のせん断速度で供試体を載荷した。図 6～8 に一軸圧縮試験の結果を示す。乾湿繰り返し細粒化率試験において、サイクル数 1, 2 回でスレーキングがほぼ進行しない泥岩 A では、乾湿 1, 2 回与えただけでは一軸圧縮強さはあまり減少しない。それに対し、乾湿繰り返し細粒化率試験において、サイクル数 1, 2 回でスレーキングが急激に進行する泥岩 C では、乾湿 1, 2 回で一軸圧縮強さは大幅に低下している。また、乾湿繰り返し細粒化率試験において、サイクル数 1, 2 回での細粒化率が泥岩 A と C の中間にある泥岩 B は、一軸圧縮強さの減少程度も泥岩 A と泥岩 C の間にあると言える。以上より、乾湿

繰り返し細粒化率試験で少ない乾湿サイクル数でスレーキングが進行する泥岩ほど、乾湿経験による一軸圧縮強さの低下が顕著であることが分かる。

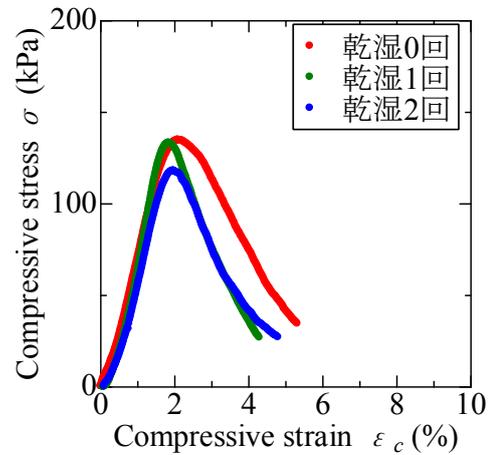


図6 一軸圧縮試験結果(泥岩 A)

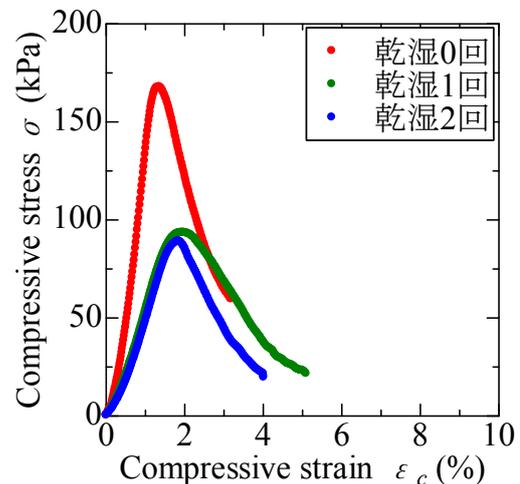


図7 一軸圧縮試験結果(泥岩 B)

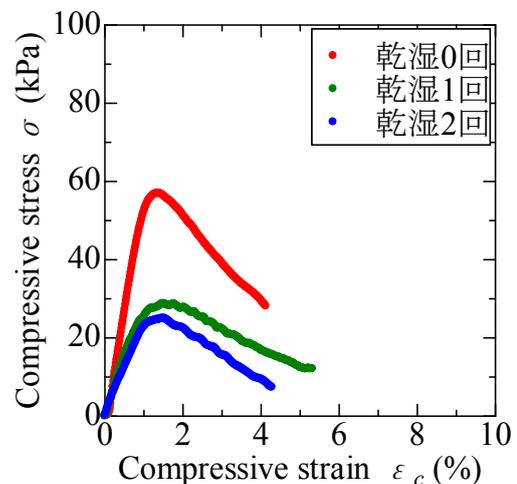


図8 一軸圧縮試験結果(泥岩 C)

4.2 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験方法は、JGS0523:2009に準拠した。なお、供試体の飽和化については、二重負圧法や背圧法を用いた。本報告においては、拘束圧は 100kPa、せん断速度は 0.014%/min とした。

図 9～11には非排水三軸圧縮試験の結果を示す。まず図 9の泥岩 A の結果に注目する。泥岩 A に関しては、乾湿経回数 8 回試料、乾湿経回数 13 回試料に対しても試験を行った。有効応力パスを見ると、全ての結果でせん断初期に塑性圧縮を伴う硬化挙動を示し、その後、塑性膨張を伴う硬化挙動を示す。この挙動は密詰め砂の挙動に類似している。乾湿繰返し回数が増えるに伴い、塑性圧縮を伴う硬化挙動が顕著になり、その後の塑性膨張を伴う硬化の程度が小さくなる。また、0 回を除けば、乾湿繰返し回数増大に伴い、応力パスが繰返し試料から得られた限界状態線に近づいている。軸差応力は乾湿 0, 1, 2 回ではあまり変わらず、乾湿 8 回, 13 回になると下がっている。乾湿繰返し細粒化率試験では、乾湿 1, 2 回ではほぼスレーキングが進行していないという結果であったが、この傾向に対応している。

図 10に示す泥岩 B のせん断挙動は、図 7の一軸圧縮試験と類似したせん断特性を有している。乾湿 0 回試料は高い軸差応力を示し、乾湿 1 回で急激に減少、乾湿 2 回と繰返すにつれて軸差応力が小さくなる。また、有効応力パスにおいて、塑性膨張を伴う硬化の程度も乾湿繰返しに伴い小さくなる。しかし泥岩 A と違い、乾湿 1, 2 回試料の繰返し試料から得られた限界状態線上を硬化する。せん断挙動の変化は、乾湿繰返し細粒化率試験の傾向ともよく対応している。

図 11に示す泥岩 C は、乾湿 0 回において最適含水比に調整する段階でスレーキングが進行した。そこで、自然含水比（含水比で 2%の差）のまま供試体を作製、試験を実施した（乾湿 0 回（自然含水比））。有効応力パスにおいて、乾湿 0 回（自然含水比）と乾湿 0 回（最適含水比）との挙動が異なっているのは、含水比調整による水添加によりスレーキングが進行したと思われる。一方、乾湿 1 回, 2 回での挙動はほぼ同じとなった。この原因として、乾湿繰返し過程や飽和過程において、スレーキング進行が速く、同程度のスレーキング進行、細粒化率になったためと考えられる。これは、乾湿繰返し細粒化率試験からも裏付けられる。

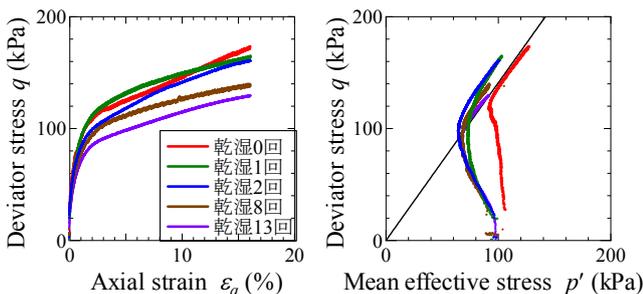


図 9 三軸圧縮試験結果(泥岩 A)

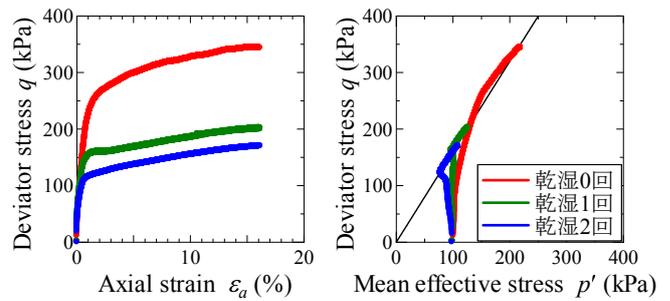


図 10 三軸圧縮試験結果(泥岩 B)

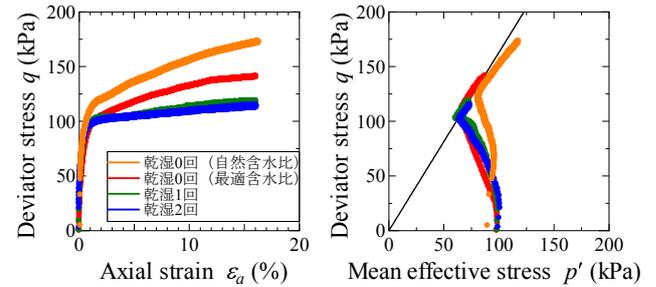


図 11 三軸圧縮試験結果(泥岩 C)

5. スレーキングが泥岩碎石集合体の力学特性へ及ぼす影響の骨格構造概念に基づく解釈

5.1 繰返し状態の力学挙動の再現

本研究では、泥岩も一般的な土と同様に構造・過圧密を有しており、塑性変形の進展に伴い、これらを失い、最終的に繰返し状態になると考えている。したがって、まず繰返した泥岩に対する標準圧密試験、再構成試料に対する圧密非排水三軸試験を再現し、弾塑性パラメータを得る。再構成試料は、予備圧密過程で構造や過圧密を有することがあるため、再現時には発展則パラメータも設定した。

図 12～14 は繰返し試料の標準圧密試験の再現結果、図 15～17 は再構成試料の圧密非排水三軸試験結果の再現結果を示す。図 12～17 より実験結果を概ね再現していると言える。表 2 に再現で用いた弾塑性・発展則パラメータを、表 3 に初期値を示す。なお、初期の鉛直有効応力は、標準圧密試験については、20kPa、三軸圧縮試験については、98.1kPa を与え、初期応力比と初期異方性は 0 としている。初期比体積は、実験で得られた値を用いた。

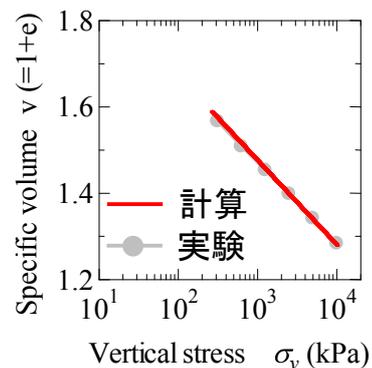


図 12 繰返し試料に対する標準圧密試験の再現(泥岩 A)

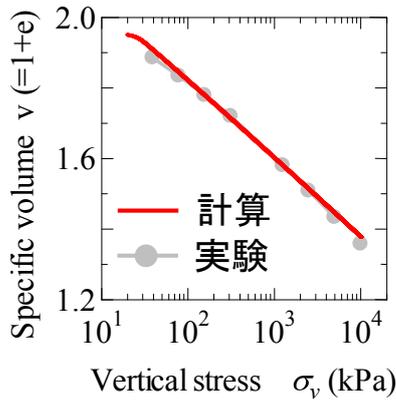


図 13 練返し試料に対する標準圧密試験の再現(泥岩 B)

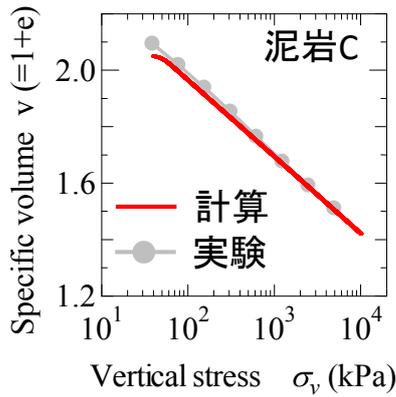


図 14 練返し試料に対する標準圧密試験の再現(泥岩 C)

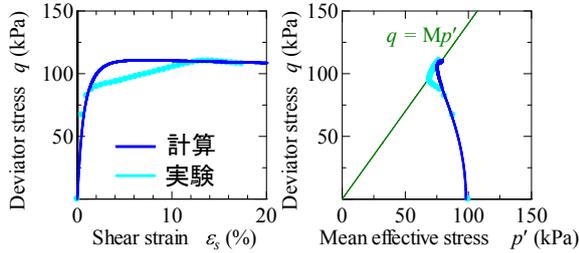


図 15 再構成試料の非排水三軸試験の再現(泥岩 A)

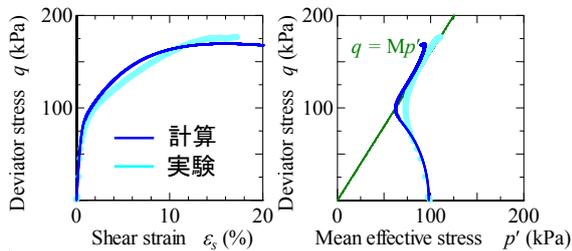


図 16 再構成試料の非排水三軸試験の再現(泥岩 B)

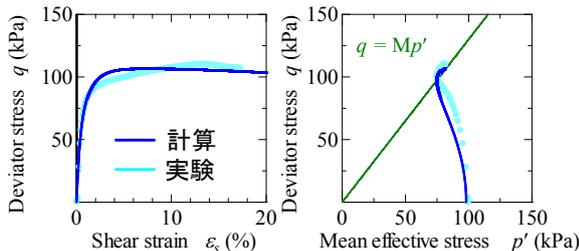


図 17 再構成試料の非排水三軸試験の再現(泥岩 C)

表 2 練返し・再構成試料の再現に用いたパラメータ

材料名				
	泥岩 A	泥岩 B	泥岩 C	
弾塑性パラメータ				
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.085	0.100	0.120
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.040	0.015	0.004
限界状態定数	M	1.400	1.600	1.300
NCL の切片	N	1.650	1.790	1.940
ポアソン比	ν	0.100	0.300	0.100
発展則パラメータ				
正規圧密土化指数	m	0.700	0.500	1.700
構造劣化指数	a	0.100	0.200	0.300
	b	1.000	1.000	1.000
	c	1.000	1.000	1.000
塑性指数	C_s	0.100	0.300	0.200
回転硬化指数	b_t	0.001	0.300	0.100
回転硬化限界定数	m_b	0.400	1.000	0.700

表 3 練返し・再構成試料の初期値

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(練返し)	1.785	1.00	1.00
泥岩 A(再構成)	1.700	4.25	1.40
泥岩 B(練返し)	1.951	1.00	1.00
泥岩 B(再構成)	1.634	9.00	1.63
泥岩 C(練返し)	2.051	1.00	1.00
泥岩 C(再構成)	2.087	9.74	1.55

5.2 泥岩砕石集合体の力学挙動の再現

図 18 に示すように泥岩砕石集合体は、泥岩岩塊とその間隙からなるが、岩塊自身も土粒子と間隙からなるため、複雑な構造を形成している。このような構造を「二重構造」と呼ぶ⁸⁾。泥岩砕石集合体のスレーキングに伴う挙動では、この 2 つの「構造」が喪失していく。本研究では、「二重構造」と単純な「構造」では骨格構造の進展の仕方が異なると考えた。つまり、集合体の発展則パラメータは、表 2 と異なる値を用いることになる。弾塑性パラメータについては、構造・過圧密を有した土は、塑性変形を受けると最終的に練返し正規圧密土になるという考えに基、状態に依らず同じものを用いる。

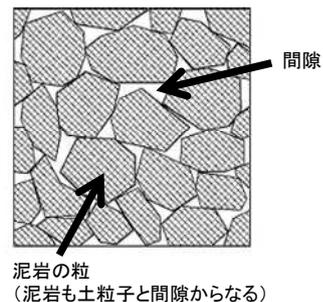


図 18 泥岩砕石集合体の状態

図 19~22 に再現結果を示す。泥岩 A については、図が煩雑になることから、乾湿 0~2 回と乾湿 8,13 回を別の図に分けた。図 19,20 の泥岩 A の再現結果に注目すると、乾湿 0 回におけるせん断初期の有効応力パス立ち上がり部分の表現は困難であった。しかし、他の部分については、再現できた。

図 21 の泥岩 B の再現結果においても、乾湿 0 回における初期の有効応力パス立ち上がり部分が表現できていないが、乾湿 1,2 回の計算結果は実験結果を概ね再現できた。

図 22 の泥岩 C では、塑性圧縮と塑性膨張の境界線である限界状態線の傾きが明らかに異なっていたので、再現性を高めるために弾塑性パラメータの中で限界状態線の傾きのみ値を 1.3 から 1.6 に変更した。限界状態線の傾きを変更することにより、計算結果は実験結果を再現することができた。

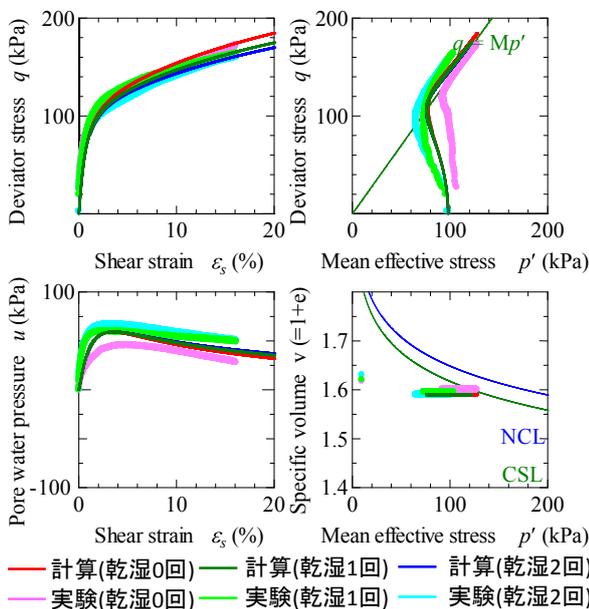


図 19 泥岩 A の再現結果 (乾湿 0,1,2 回)

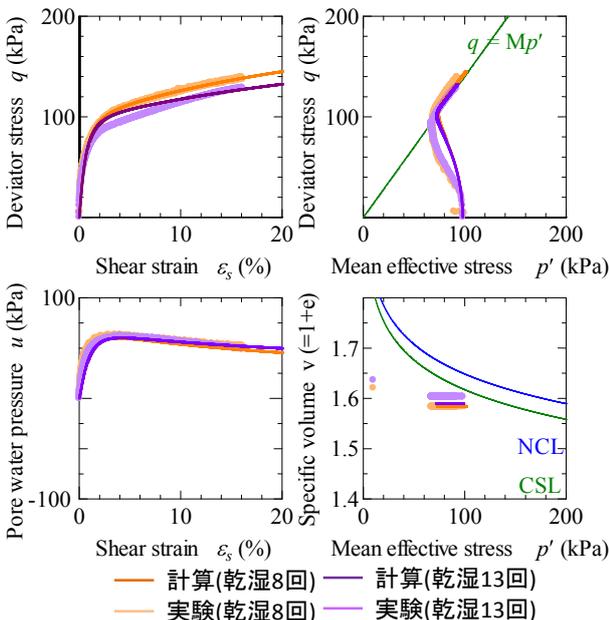


図 20 泥岩 A の再現結果 (乾湿 8,13 回)

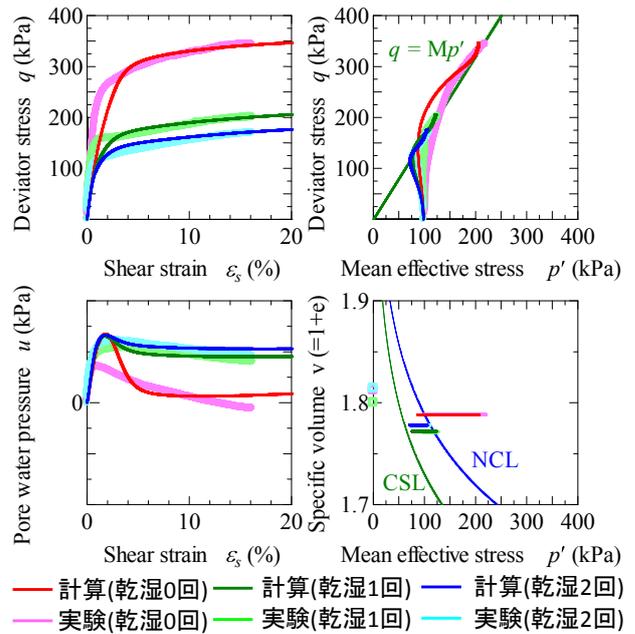


図 21 泥岩 B の再現結果

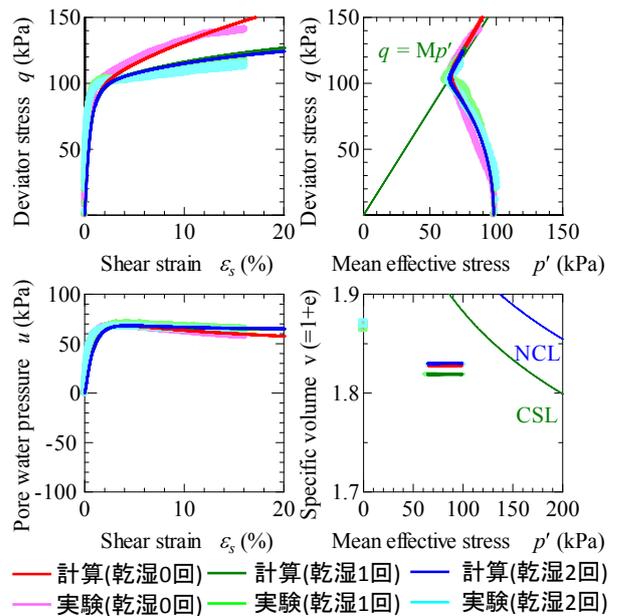


図 22 泥岩 C の再現結果

表 4 に再現に用いた発展則パラメータを、表 5 に初期値を示す。こちらについても 2 章と同様に、初期応力比と初期異方性は 0 としている。泥岩 A, B, C はそれぞれ固有の弾塑性、発展則パラメータを持っている。つまり、初期値のみを変えることで、スレーキングの程度の異なる泥岩砕石集合体の力学挙動を再現できた。特に、今回は供試体の D_c 値が同じ、つまり比体積が泥岩の種類が同じであれば、ほとんど同じであるため、構造と過圧密の値のみ変化させている。

構造と過圧密の値に着目して、スレーキングにより泥岩砕石集合体の骨格構造がどのように変化していくのか考

察する。泥岩 A, B, C に共通しているのは、乾湿経験回数が増加していく、つまり、スレーキングが進行していくにつれて、構造の程度、過圧密比が減少していることである。しかし、その減少の仕方は泥岩ごとに大きく異なる。泥岩 A の場合、別報で示した乾湿繰返し細粒化率試験において、少ない乾湿回数ではほとんど細粒化が進行していない。そのため構造、過圧密の値も減少程度が小さい。一方、泥岩 B は、最初の乾湿繰返しによって泥岩の細粒化が大きく進行し、その後は、緩やかに細粒化が進行しているが、骨格構造も同様に 0 回から 1 回にかけて急激に変化し、1 回から 2 回ではほとんど同じ値となった。泥岩 C については、泥岩 B よりもさらに細粒化の進行が速いが、乾湿 0 回の供試体作製時に細粒化が進行してしまったために、骨格構造の変化の仕方は、泥岩 B とそれほど大きな変化が無いと考えられる。

表 4 材料定数

材料名			
	泥岩 A	泥岩 B	泥岩 C
弾塑性パラメータは表 2 と同じ			
発展則パラメータ			
正規圧密土化指数 m	0.200	2.500	0.001
構造劣化指数 a	0.300	0.200	0.100
b	1.000	1.000	1.000
c	1.000	1.000	1.000
塑性指数 c_s	0.100	1.000	1.000
回転硬化指数 b_r	0.010	0.001	1.000
回転硬化限界定数 m_b	0.500	0.500	0.001

表-5 初期値

	乾湿回数	比体積 v_0	構造の程度 $1/R^*_0$	過圧密比 $1/R_0$
泥岩 A	0	1.590	3.5	13.2
	1	1.590	3.1	11.8
	2	1.590	2.9	11.0
	8	1.584	1.7	7.4
	13	1.590	1.5	5.7
泥岩 B	0	1.788	10.0	3.6
	1	1.772	4.5	1.9
	2	1.778	4.0	1.6
泥岩 C	0	1.828	6.0	24.3
	1	1.819	1.6	7.2
	2	1.830	1.2	4.7

6. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 本研究で提案した乾湿繰返し細粒化率試験より、各泥岩に対する乾湿サイクル数と細粒化率の関係を示

した。泥岩 A はある程度乾湿を経験すると急に細粒化が進む泥岩、泥岩 B は最初の乾湿で大きく細粒化し、そこからは徐々に細粒化が進む泥岩、泥岩 C はすぐに細粒化する泥岩であることが分かる。

- 2) 同じ密度で締固めても乾湿経験を受けてスレーキングが進行すると、一軸圧縮強さや最大軸差応力が低下する。この変化の程度は、乾湿繰返し細粒化率試験で大きく細粒化する際に顕著にみられる。
- 3) 三軸圧縮試験結果の有効応力パスに注目すると、どの泥岩も、乾湿 0 回とそれ以降の乾湿回数とでは挙動が異なる。せん断中期以降の塑性膨張を伴う硬化挙動は、乾湿回数が増加するにつれ、硬化の程度が小さくなっていく。
- 4) SYS Cam-clay model を用いて、泥岩碎石集合体の力学挙動をある程度再現することに成功した。しかし、乾湿 0 回のせん断初期の応力パスや、泥岩 A の乾湿 1, 2 回の限界状態線の上側における挙動など再現できていない部分もある。今回の再現計算から、骨格構造概念により解釈すると、スレーキングが進行により、構造の程度や過圧密比が減少する。また、スレーキングの進行の程度が大きいくほど、これらの値の変化量も大きいと言える。

7. 今後の課題

今後は、この結果を参考に、地震応答解析を実施し、泥岩盛土の地震時の挙動を把握していく。また、今回 D_c 値 95% で供試体を作製したが、スレーキングによる影響が見られた。 D_c 値の上昇により、構造が小さくなることから⁹⁾、 D_c 値を大きくすることで、スレーキングの影響を軽減できることが考えられる。また、 D_c 値の上昇は過圧密の蓄積をもたらすため⁹⁾、仮にスレーキングを受けて過圧密が小さくなったとしても、せん断による硬化挙動を顕著に示すことが考えられる。そこで、より高い密度で試験を実施し、スレーキングにより盛土の耐震性を損なわないための研究を進めていく。

また、今回は「二重構造」は通常の「構造」とは異なることを考慮し発展則パラメータを変えることで、泥岩碎石集合体の力学挙動の再現を行い、ある程度挙動を再現することができた。しかし、表 4 を見ると、泥岩 B の過圧密を除けば、塑性変形の進展に伴う構造や過圧密の変化はあまり起こらない材料定数であることが分かる。泥岩のスレーキングが構造の劣化や過圧密の解消として表現されるのであれば、泥岩 C のようなスレーキングしやすい材料は構造・過圧密の進展が速いことが考えられる。また、泥岩 C のように、弾塑性パラメータを変えることで、再現性を高めることもできたことから、「二重構造」は弾塑性パラメータにも影響を及ぼすことも視野に入れる必要がある。以上のことから、今後は「二重構造」の違いが力学挙動に与える影響も実験によって調べていく。そして、その結果を反映させた上で再度 SYS Cam-clay model による再現を行

い、スレーキング現象を、骨格構造概念を用いて説明し、スレーキングしやすい泥岩とは何か、結局のところ、スレーキングさせないためには、どうすれば良いかを解明していく。

参 考 文 献

- 1) 齊藤康博, 鳥本康弘(2011):NEXCO 中日本における防災への取組み, 地盤工学会中部支部, 第 20 回調査・設計・施工技術報告会, pp.1-2.
- 2) 島博保, 今川史郎(1980):スレーキング材料(ぜい弱岩)の圧縮沈下と対策案, 土と基礎,Vol.28, No.7, pp.45-52.
- 3) 村上幸利(2000):岩石材料の物理的性質とスレーキング性の関係および既存のスレーキング試験の有用性, 土と基礎,Vol.48, No.2, pp.5-8.
- 4) 仲野良紀(1980):軟岩をめぐる諸問題－泥岩の力学特性－, 土と基礎,Vol.28, No.7, pp.1-10.
- 5) 松尾稔(1995):飽和した常滑泥岩の吸水軟化現象に関する基礎的考察と地盤力学の課題, 第 40 回土質工学シンポジウム発表論文集, キーノートレクチャー, pp.1-26.
- 6) Asaoka, A. et al, Anelasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 7) NEXCO 設計要領第一集土工編.
- 8) 中野正樹他(2012), 泥岩岩塊集合体の粘土化を伴う力学挙動の骨格構造概念に基づく解釈, 地盤工学会誌, 60(7),pp6-9.
- 9) Sakai, T., and Nakano, M. (2013): Interpretation of the effect of compaction on the mechanical behavior of embankment materials based on the soil skeleton structure concept, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.1179-1182.