

鉛直荷重一定下での乾湿繰り返しを受けた泥岩粒集合体の力学特性の再現 Reproduction of mechanical properties of crushed mudstones aggregates subjected drying-wetting cycles under constant loading by using constitutive model

酒井崇之¹, 中野正樹², 中村洋丈³, 早野智彦⁴

- 1 名古屋大学・大学院工学研究科・t-sakai@civil.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋大学・大学院工学研究科
- 3 高速道路総合技術研究所・道路研究部土工研究室
- 4 中日本高速道路株式会社

概 要

泥岩盛土内のスレーキング進行による盛土の安定性が問題となっている。そこで、スレーキング進行に伴い、盛土がどのように変形していくのか把握する必要がある。本研究では、スレーキングが進行した際の圧縮特性について調べた。実際の盛土を想定した泥岩粒状体を締固めた後に上載荷重を与えながら乾湿繰り返しを行い、その後非排水せん断を実施した。そして、それらの力学挙動を構成則により再現した。鉛直荷重下では、乾燥で圧縮、湿潤で膨張し、乾湿回数の増加に伴い、圧縮が進行する。また、圧縮が進行するために、乾湿を与えた方がむしろ非排水せん断強度は大きくなった。しかし、せん断時の密度が同じであれば乾湿を与えた方が非排水せん断強度は小さい。構成則による再現から、乾湿を与えることによるサクシジョンの増減によって有効応力が増減し、塑性変形が進行するため、圧縮することがわかった。この際、構造が劣化するため、せん断時の密度が同じであれば、乾湿を与えた方が、強度が小さくなる。

キーワード：泥岩，スレーキング，三軸圧縮試験，締固め，不飽和土

1. はじめに

泥岩で建設された道路盛土は、建設時の泥岩粒が新鮮であるため、高い安定性を有する。しかし長期にわたり盛土内に水が浸入すると、種類によっては岩砕が脆くなり、盛土に変状が生じることがある。この泥岩のスレーキング現象については、NEXCO 総研（旧 JH 試験研究所）において古くから精力的に研究が行われ、例えば島ら(1980)は¹⁾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おり、現在の日本の高速道路における泥岩盛土の設計・施工に反映されている。しかし 2009 年 8 月の駿河湾沖を震源とする地震により、牧之原 SA 付近の泥岩で建設された道路盛土が崩壊した。その原因の 1 つは、盛土の下部路体にある泥岩のスレーキングが進行したことである。この災害は我々に、スレーキング現象は圧縮沈下だけでなく、せん断変形にも注目すべきことを示唆している。

著者らは²⁾、以前より長期にわたる泥岩のスレーキング進行を、粒度調整した泥岩粒に対し乾燥・湿潤サイクル（以後、乾湿繰り返し）を繰り返す促進実験で近似し、その後泥岩粒を締固めて、泥岩粒集合体としての圧縮・せん断挙動を調べている。室内試験から、同じ密度に締固めると乾湿

繰り返し回数の増加に伴い、硬化挙動が見られなくなり、最大軸差応力が低下することを明らかにした。

一方、締固めた泥岩粒集合体に、鉛直荷重を与えた状態で乾燥・湿潤サイクルを与えることは、実際の盛土に近い状態であると考えられる。上記島らの研究はまさに一次元載荷での乾燥・湿潤サイクルを与えた試験であり、加登ら³⁾、菊本ら⁴⁾も一次元拘束応力下で乾湿経験によって発生するスレーキング現象に注目している。

そこで本研究では、締固め度 $D_c = 95\%$ で締め固めた泥岩粒集合体に対し、一次元載荷状態での乾湿繰り返しを与え、実際の盛土内の泥岩のスレーキング進行を模擬した。その後圧密非排水三軸試験を実施することで、スレーキングが進行した泥岩の圧密・せん断挙動を把握する。特にせん断挙動に及ぼす影響として、泥岩粒の粒度に注目して考察を加える。さらにサクシジョン効果を考慮した弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁵⁾⁶⁾を用いて、乾湿繰り返し中の圧縮挙動およびせん断挙動を再現し、これらの挙動について考察を行った。

2. 鉛直荷重一定下での泥岩粒集合体の乾湿繰り返し時～後の力学挙動

本研究で用いた泥岩は高速道路工事で発生したもので、表 1 はその物性を示す（以後、神戸泥岩と呼ぶ）。スレーキング率 82% でスレーキングを起こしやすい泥岩である。

表 1 対象とした泥岩の物性

自然含水比(%)	22.6	液性限界(%)	52.1
土粒子密度(g/cm ³)	2.62	塑性指数	26.9
スレーキング率(%)	82	最適含水比(%)	25.3
破碎率(%)	44	最大乾燥密度(g/cm ³)	1.47

神戸泥岩の初期粒径を 26.5~37.5mm に調整し、静的に締め固めた供試体を、図 1 に示す乾湿繰返し圧縮試験機にセットした。そして、鉛直荷重を作用させた状態で、供試体に乾湿繰返しを与えた。本試験機において乾燥過程では 110℃の熱風で容器内を充満させ供試体を乾燥させ、湿潤過程ではモールド底部と載荷板の孔から水を供試体を送っている。この際、乾燥過程および湿潤過程の日数を決めるため、予備実験を行った。予備実験においては、高さ 4、10、20cm の 3 種類の供試体を作製した。締め固め度 95% かつ空気間隙率 15% になるように、高さ 4cm については一層、高さ 10cm については二層、高さ 20cm については四層に分けて締め固めた。乾湿中に供試体に作用させる鉛直荷重は 900kPa である。また、試験中に含水比を計測することで、供試体の含水状態を把握した。図 2 は予備試験における飽和度と日数の関係を示す。高さ 4cm、10cm のケースでは乾燥 4 日で飽和度がおよそ 0% に達するのに対し、高さ 20cm のケースでは、乾燥 13 日でも、飽和度が 10% 以上であった。湿潤過程では、3 ケースとも湿潤 2 日で飽和度が 80% 程度に達し、それ以上は上昇せずに収束した。本試験においては、高さ 20cm の供試体を用いるため、乾燥 13 日間、湿潤 3 日間の計 16 日間を乾湿サイクル 1 回とした。

表 2 は本試験の試験ケースを示す。Test-1 では、鉛直荷重一定条件下において、最初に 3 日間湿潤させた後に、乾湿サイクル 3 回与えた。Test-2,3 では、鉛直荷重一定条件下で、3 日間湿潤のみ与えた。鉛直荷重の大きさは 100、300kPa とした。上記、乾湿サイクルを与えた後、供試体を二重負圧法で十分に飽和させた後、等方圧 100,300kPa で 24 時間圧密し、非排水三軸圧縮試験を実施した。Test-1、

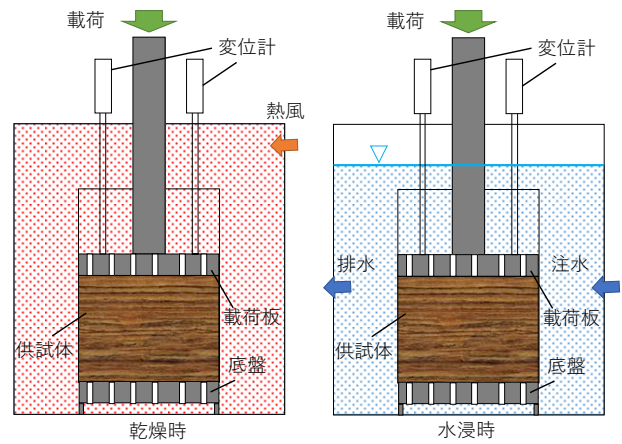


図 1 乾湿繰返し圧縮試験機の概要

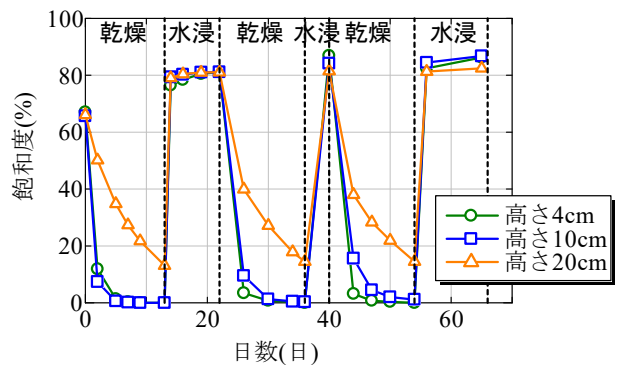


図 2 飽和度－日数の関係

Test-2 の初期密度は等しく、締め固め度 95% になるように供試体を作製し、Test-3 の初期密度は、Test-1 の乾湿繰返し後の密度と同じになるように供試体を作製した。

図 3 に乾湿圧縮中の比体積－時間関係を示す。Test-1 では、乾燥過程で圧縮、湿潤過程で膨張し、乾湿回数が増えるにつれて圧縮が進行した。乾湿 1 回で 100kPa の場合、比体積が 0.06 減少(体積ひずみ 4.0%)、300kPa の場合、比体積が 0.09 減少(体積ひずみ 5.9%)、乾湿 3 回では、100kPa の場合、比体積が 0.1 減少(体積ひずみ 6.0%)、300kPa の場合、0.13 減少(体積ひずみ 8.1%)した。特に乾燥過程における圧縮挙動が顕著であり、特に 1 回目の乾燥における圧縮が顕著であることがわかる。一方、Test-2 と Test-3 では、ほ

表 2 試験ケース

	Test-1-100	Test-1-300	Test-2-100	Test-2-300	Test-3-100	Test-3-300
供試体密度	Dc95 %		Dc95 %		Test-1 の乾湿後比体積に調	
サイクル数	3 回		0 回		0 回	
載荷荷重(kPa)	100	300	100	300	100	300
空気間隙率 v_a (%)	16.0	16.0	16.0	15.9	9.3	7.1
作製時含水比 w (%)	21.4	21.4	21.4	21.4	22.8	22.8

とんど圧縮が進行しなかった。また、Tes-1 と Test-3 を比較すると、Test-3 の比体積は、Test-1 の乾湿圧縮後の比体積とほぼ同じ値であり、Test-3 において狙い通りの供試体が作製できたことがわかる。

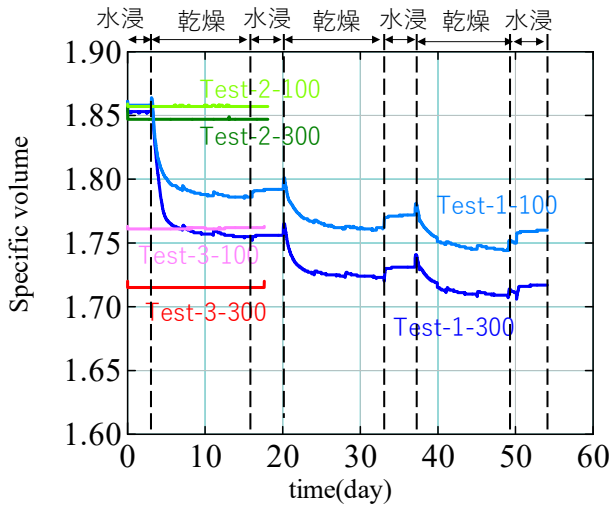


図3 比体積-時間関係

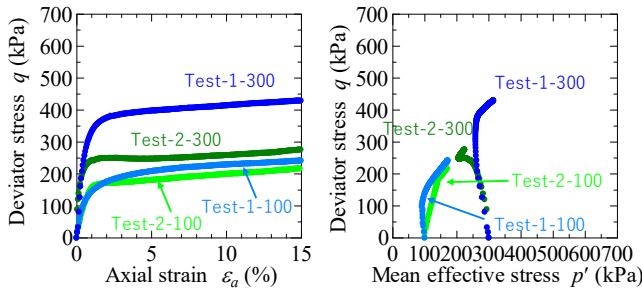


図4 Test-1 と Test-2 の非排水せん断挙動の比較

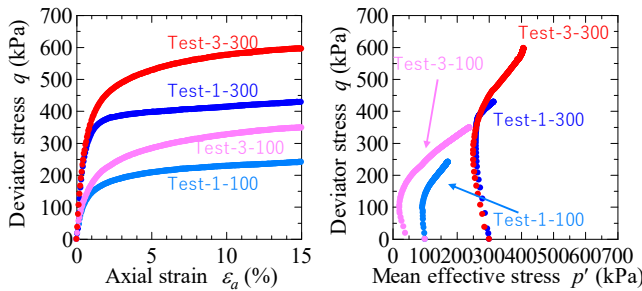


図5 Test-1 と Test-3 の非排水せん断挙動の比較

図4は、乾湿3回のTest-1、および乾湿を作用させない乾湿0回のTest-2のせん断挙動を示している。左の図は軸差応力 q -軸ひずみ ϵ_a 関係を、右の図は軸差応力 q -平均有効応力 p' 関係を示す。乾湿繰返しを作用させたTest-1の方が、乾湿0回のTest-2よりも硬化挙動が顕著であり、最大軸差応力は大きくなった。この理由として、せん断前の鉛直荷重一定下での乾湿繰返し作用によって図3に示した通り供試体が圧縮し、密度が増加したことが挙げられる。

図5は、せん断直前の密度が同じTest-1とTest-3の圧密非排水せん断試験結果を示す。同じ密度の場合、乾湿0回のTest-3の方が、乾湿3回のTest-1よりも軸ひずみ2%以降の p' の増加を伴う q の増加、つまり、塑性膨張を伴う硬化挙動が顕著に見られ、大きな最大軸差応力を示している。同じ密度の場合、乾湿を与えた方が、最大軸差応力が低下することは、著者らの行った既往の研究と同様の傾向を示している²⁾。

図6は三軸圧縮試験後の粒径分布を示す。三軸圧縮試験後の供試体を2つに分割し、片方を粒度試験に用いた。なお、粒度試験はふるい分析のみ実施した。なお、地山から削った泥岩を26.5~37.5mmに粒度調整したため、削った時の原粒度は不明である。Test-1は乾湿繰返し圧縮やせん断により粒径が変化している。Test-2と比較して2~20mmの粒度のみが最大10%細粒化している。本試験で用いた泥岩は、スレーキング率が80%を超えている。つまり、非拘束圧条件下で乾湿5回を与えることで、26.5~37.5mmに調整した試料が細粒化することにより、19mmふるいを80%以上通過する。本試験のように拘束圧条件下で乾湿繰返しを与えた場合、非拘束圧条件下とは異なる結果を示した。以上のことから、拘束圧条件下では、泥岩粒は細粒化しづらくなる。

一方、Test-1とTest-3を比較すると、2mm以下の粒径については、Test-3の方が多い。Test-3では、供試体作製時に締固めにより密度を高めるため、大きな荷重で締固めて供試体を作製した。したがって、締固め時に粒子が破碎したと考えられる。乾湿が粒度に与える影響よりも、供試体作製時の締固めにおける粒子破碎の影響の方が大きい。

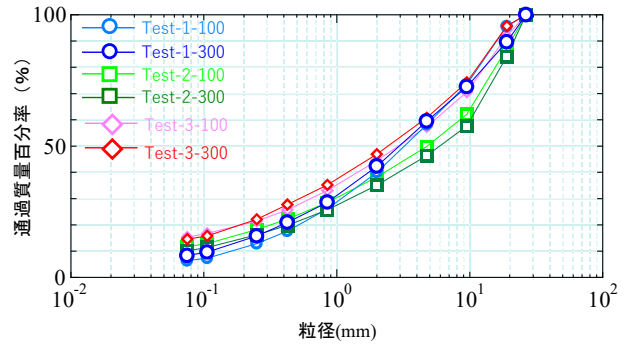


図6 試験後供試体に対して行った粒度試験結果

3. 乾湿繰返し圧縮挙動およびせん断挙動の再現

解析には、サクシオン効果を考慮したSYS Cam-clay modelを用いて行った。材料定数および初期値は表3、表4に示す。供試体作製時のデータから初期比体積と初期飽和度を決定した。初期鉛直有効応力は10kPaと仮定し、初期異方性と初期応力比は今回考慮していない。初期構造の程度や初期過圧密比と表3の材料定数を試行錯誤的に変化させて、試験結果の再現を行った。なお、Van Genuchtenパラメータについては文献7)を参考に決定した。

表3 材料定数

弾塑性パラメータ		
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.120
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.008
限界状態定数	M	1.600
NCLの切片 ($p'=98.1$ kPa)	N	1.723
CSLの切片 ($p'=98.1$ kPa, $s^w=s^w_{min}$)	Γ_r	2.100
ポアソン比	ν	0.342
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	1.000
構造劣化指数 ($b=c=1$)	a	0.100
塑性指数	c_s	0.100
回転硬化指数	b_r	0.900
回転硬化限界定数	m_b	0.170
水分特性に関するパラメータ		
最大飽和度(%)	s^w_{max}	80.0
最小飽和度(%)	s^w_{min}	0.0
Van Genuchten パラメータ	α	0.275
Van Genuchten パラメータ	n'	1.23
Van Genuchten パラメータ	m'	0.187

表4 初期値(Test-1)

ケース	Test-1-100	Test-1-300
比体積 ν	1.860	1.860
初期鉛直有効応力(kPa)	10	
初期飽和度(%)	65	
構造の程度	6.0	5.0
過圧密比	24.3	29.1
応力比	0.0	
異方性	0.0	

表5 初期値(Test-2)

鉛直荷重	Test-2-100	Test-2-300
比体積 ν	1.843	1.802
初期鉛直有効応力(kPa)	100	300
構造の程度	7.0	7.0
過圧密比	2.4	1.1
応力比	0.0	
異方性	0.0	

表6 初期値(Test-3)

鉛直荷重	Test-2-100	Test-2-300
比体積 ν	1.776	1.694
初期鉛直有効応力(kPa)	100	300
構造の程度	6.2	6.0
過圧密比	3.9	2.4
応力比	0.0	
異方性	0.0	

Test-1 では、初期状態から 100 と 300kPa まで一次元載荷した後に、湿潤過程、乾燥過程を繰り返していく。試験中の飽和度は、予備実験の結果を用い、湿潤時は 80%、乾燥時は 10%とした。再現計算では、飽和度を変化させることで、湿潤過程、乾燥過程を表現しており、最大飽和度になった時、サクシオンが 0 になる。試験では、乾湿繰返し圧縮過程の後、除荷を行いモールドから供試体を取り出し、三軸圧縮試験機にセットし、鉛直荷重と同じ拘束圧で等方圧密した後に、非排水せん断した。計算においては試験と同様の過程を考慮して再現を行った。なお、Test-2、Test-3 については、等方圧密後の状態を初期値として、再現計算を実施した。Test-2 と Test-3 の初期値はそれぞれ表 5、6 に示す。このケースの試験は飽和条件で行っているため、通常の SYS Cam-clay model で計算した。なお、計算で用いた弾塑性パラメータおよび発展則パラメータは表 3 と同じである。

図 7 は Test-1 の乾湿繰返し中の比体積-経過日数の再現結果を示す。点線が実験結果、実線が解析結果を示しており、乾燥過程における圧縮や湿潤過程における膨張を再現できており、その圧縮量や膨張量も概ね再現できた。図 8 は、Test-1 の非排水せん断試験の再現結果を示す。また、図 9 は Test-2、図 10 は Test-3 の非排水せん断試験の再現結果を示す。太い線が実験結果、細い線が解析結果をそれぞれ示している。それぞれ密度や応力履歴の異なる各ケースの試験結果を概ね再現することができた。

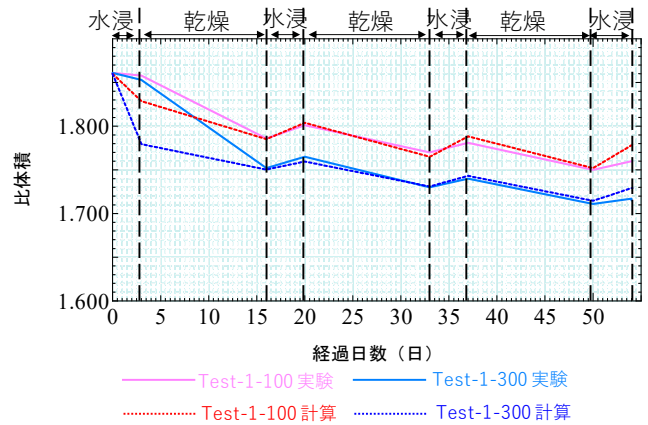


図7 乾湿圧縮過程の再現結果

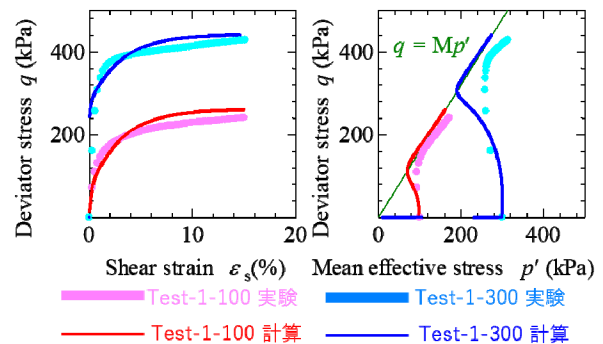


図8 Test-1 の非排水せん断の再現結果

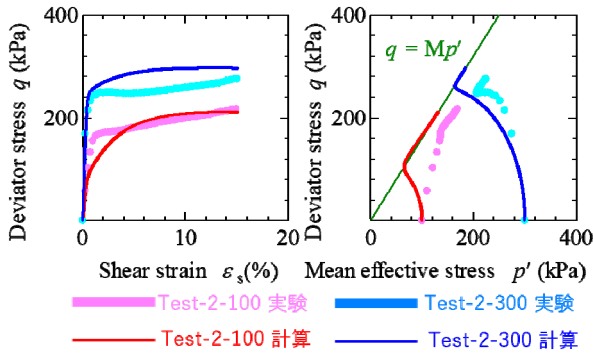


図9 Test-2の非排水せん断の再現結果

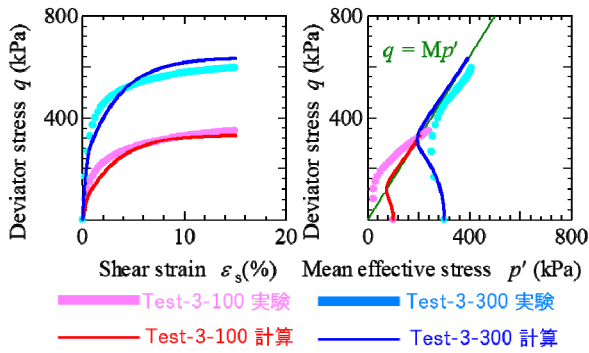


図10 Test-3の非排水せん断の再現結果

表7 非排水せん断直前の状態量

	Test-1		Test-3	
	100kPa	300kPa	100kPa	300kPa
拘束圧	100kPa	300kPa	100kPa	300kPa
比体積 v	1.770	1.720	1.776	1.694
構造の程度	4.55	5.13	6.2	6.0
過圧密比	3.07	1.64	3.9	2.4
応力比	0.0		0.0	
異方性	0.07	0.14	0.0	

Test-1 と Test-3 については、非排水せん断中の比体積はほとんど同じである。しかし、乾湿履歴を受けていない方が(Test-3)塑性膨張を伴う硬化が顕著であり、最大軸差応力が大きくなった。この理由について考察を行う。表7は非排水せん断直前の状態量を示す。乾湿履歴無しの方は表6と同じ値である。構造の程度や過圧密に着目すると、乾湿履歴を受けた方が、値が小さくなっている。この原因として、乾湿履歴を与えると、飽和度変化に伴いサクシオンが増減する。サクシオンが増減することにより、土骨格に作用する応力も増減するため、塑性変形が進展する。それにより、構造の程度が小さくなったと考えられる。図11は構造の程度の変化を示している。乾湿回数の増加に伴い、徐々に構造が低位化していることがわかる。Test-1 と Test-3 は、せん断直前の状態においてほとんど同じ密度であるが、受けている応力履歴が異なる。乾湿により土骨格に作用する応力が増減し、構造が低位化したため、Test-1

の方が、最大軸差応力が低下したと考えられる。

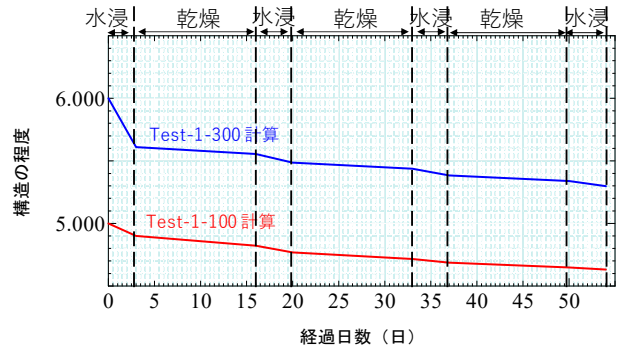


図11 乾湿圧縮中の構造の程度の変化

4. おわりに

本研究では、締固め度Dcを95%として締め固めた泥岩粒集合体に対し、実際の道路盛土を想定し一次元圧縮状態での乾湿繰返しを与え、スレーキング進行を模擬した。その際に生じる圧縮挙動や、乾湿後に実施した非排水三軸試験を行い、乾湿繰返しが泥岩粒集合体の力学挙動に与える影響を調べた。さらにサクシオン効果を考慮した弾塑性構成式SYS Cam-clay modelを用いて、乾湿繰返し中の圧縮挙動およびせん断挙動を再現し、これらの挙動について骨格構造概念を基に考察を行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

- 鉛直荷重一定下での乾湿繰返し一次元圧縮挙動においては、Dc95%に締め固めた泥岩集合体は、乾湿過程で圧縮し湿潤過程で膨張し、乾湿回数が増えるにつれて圧縮が進行した。乾湿サイクル3回与えた後の体積ひずみは、鉛直荷重100kPaでは約6%、鉛直荷重300kPaでは、約8%となった。
- 鉛直荷重一定下での乾湿繰返し後のせん断挙動において、乾湿3回与えた泥岩粒集合体(Test-1)は沈下に伴い乾燥密度が大きくなることから、乾湿0回での泥岩粒集合体(Test-2)よりも硬化挙動が顕著で在り、最大軸差応力は大きくなった。ただし、同じ密度に締め固め場合(Test-3)、乾湿0回の方が乾湿3回(Test-2)よりも、最大軸差応力が大きい。
- SYS Cam-clay modelにより泥岩岩砕の力学挙動を再現できた。乾湿を受けることで、供試体内のサクシオンが増減することにより、土骨格に作用する応力も増減する。これにより、塑性変形が進展し、骨格構造が壊される。せん断前の密度が同じ場合、乾湿履歴を受けた方が(Test-1)、乾湿履歴を受けていない場合(Test-3)よりも、構造が低位化しているため、最大軸差応力が低下する。

今後としては、スレーキング特性と鉛直荷重一定下での力学挙動の関連性について、泥岩に含まれる膨潤性鉱物の力学挙動への影響も考慮するなどしてさらに検討してい

く.

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤(B):課題番号16H04408)の補助を受けて実施した。また、本研究を実施するにあたり、名古屋大学の野田先生と吉川先生にご助言頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.4-12, 1980.
- 2) 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.
- 3) 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(地圏工学), Vol.65, No.1, pp.266-274, 2009.
- 4) 菊本統, 福田拓海, 京川裕之: 破碎泥岩のスレーキング現象と変形挙動, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.72, No.2, pp.126-135, 2016.
- 5) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, No.40, Vol.2, pp.99-110, 2000.
- 6) 吉川高広, 野田利弘: 不飽和土の排気・排水三軸圧縮シミュレーションを通じた水分特性モデルにおける間隙比依存性考慮の必要性, 計算工学会論文集, Vol.22, 2017.
- 7) Carsel, R.F. and Parrish, R.S.: Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, Water Resources Research, 24(5), 755-769, 1988.