

## セラミックディスクおよび微細多孔質膜を用いた 三軸試験による不飽和シルト排気排水せん断挙動の把握

(Comprehension of mechanical behavior of a triaxial silty soil under exhausted and drained condition using ceramic disc and micro-porous membrane for suction control)

中澤一眞<sup>1</sup>, 吉川高広<sup>1</sup>, 野田利弘<sup>2</sup>, 中井健太郎<sup>1</sup>, 高根澤巧也<sup>3</sup>

1 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 nakazawa.kazumasa@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学減災連携研究センター

3 東日本旅客鉄道株式会社

### 概要

不飽和土の三軸試験においては、間隙水と間隙空気の経路を分離し、サクシオンを制御するために、セラミックディスクや微細多孔質膜が用いられる。ディスクは膜に比べて、空気侵入値が大きく、高サクシオンまで制御できる一方で、透水性が低く、吸排水に長時間を要することが指摘されている。本研究では、ディスクおよび膜の両方を用いた不飽和シルト排気排水三軸試験を実施し、ディスクと膜との違いが試験結果に及ぼす影響を改めて考察した。その結果、ディスクの低透水性が不飽和シルト三軸供試体への吸排水を阻害し、軸ひずみ速度によっては、排気排水せん断時の吸排水挙動が、ディスクと膜とで大きく異なることを示す。また、膜を用いた排気排水せん断試験により、サクシオン低下時の吸水圧縮挙動（吸水コラプス）だけでなく、サクシオン一定のせん断時においても吸水圧縮挙動が現れることを示した。

キーワード：不飽和土，三軸試験，セラミックディスク，微細多孔質膜，排気排水せん断

### 1. はじめに

不飽和土の三軸試験においては、間隙水と間隙空気の経路を分離し、サクシオンを制御するために、セラミックディスク（以後「ディスク」と略す）や微細多孔質膜<sup>1)</sup>（以後「膜」と略す）が用いられる。ディスクは膜に比べて、空気侵入値（AEV）が大きく、高サクシオンまで制御できる一方で、透水性が低く、吸排水に長時間を要することが指摘されている<sup>2)</sup>。吉川ら<sup>3)</sup>は、小高ら<sup>4)</sup>のディスクを用いた不飽和シルト排気排水三軸試験の空気～水～土連成シミュレーションを通じて、ディスクの低透水性が不飽和シルト三軸供試体の吸排水を阻害し、試験結果に影響を与えることを示唆している。

本研究では、小高らの不飽和シルト三軸試験を参照して、ディスクおよび膜の両方を用いた実験を実施し、ディスクと膜との違いが試験結果に及ぼす影響を改めて考察する。

### 2. 実験条件

まず不飽和三軸試験機に関して、供試体下端にはセラミックディスク（厚さ 3mm, AEV200kPa）および微細多孔質膜を用いてサクシオンを制御した。供試体上端には撥水性のポリフロンフィルターを用いることで間隙水と間隙空気の経路を分離した。なお、供試体の体積変化は、内セルの水位変化から算出している。

実験で用いた土材料は非塑性シルト（DL クレー）で、その粒径加積曲線を図 1 に示す。また、土粒子密度は 2.70g/cm<sup>3</sup>であった。

実験で用いた土材料は非塑性シルト（DL クレー）で、その粒径加積曲線を図 1 に示す。また、土粒子密度は 2.70g/cm<sup>3</sup>であった。

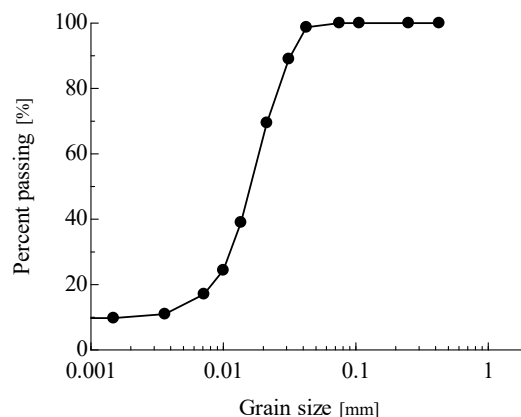


図 1 粒径加積曲線

前述の通り、実験手順は小高らの実験を参照した。本研究で具体的に行った実験の概要は次の通りである。(i)含水比 20%になるように調整した DL クレーを用いて、間隙比

1.18, 飽和度 46%の不飽和供試体を作製する（初期サクシオンは約 20kPa）。(ii)供試体を三軸試験機に設置し、排気非排水条件下でセル圧を 20kPa まで上昇させた後、セル圧と空気圧を同時に 250kPa 上昇させる。(iii)所定のサクシオン（0, 10, 20, 30kPa の 4 ケース）となるように水圧のみを変化させ、その後セル圧を 450kPa まで上昇させて圧密する。この過程では、吸排水量が収束するまで時間をかけ、ディスクの場合は、サクシオン 0kPa のみ実験を行った。なお、膜を用いたサクシオン 20kPa の場合は、サクシオン作用時に供試体は吸排水しないため、圧密のみを行った。(iv)以上の過程を経た供試体を、側圧一定・排気排水条件下、軸ひずみ速度一定でせん断させた。軸ひずみ速度の値は、3 章において示す。

### 3. 実験結果

#### 3.1 サクシオン 0kPa を与えた場合のディスクと膜の実験結果の比較

サクシオン 0kPa の場合に、ディスクと膜の両方を用いて実験を行い、その結果を比較・考察する。

図 2 は、サクシオン作用・圧密過程における排水量と体積ひずみの経時変化を比較した図である。図中の白抜き点は、セル圧を 450kPa まで上昇させる圧密開始直前の点を示す。いずれの実験においても、供試体の初期サクシオンが 20kPa のため、サクシオン 0kPa を与えると供試体は吸水し、体積圧縮した（吸水コラプス挙動）。ディスクと膜の結果を比較すると、ディスクの方が、吸水量が収束し始めるのに非常に長い時間がかかり、その結果、吸水コラプス挙動も長時間にわたり観察された。つまり、ディスクの透水性は供試体の透水性よりも低く、吸水量と体積圧縮量の経時変化において支配的であると言える。一方で、吸排水挙動が落ち着いた時点での両者の吸排水量および体積圧縮量は概ね一致している（ただし、サクシオン作用過程において体積圧縮量に少し差が生じた点は、再度実験を行って確認する必要がある）。このように、収束時の状態量を議論する場合は膜とディスクで大きな違いはないが、経時的な変化までを議論する場合は、同じ材料・状態の土供試体であっても、膜とディスクで力学挙動が大きく異なる。

図 3 は、側圧一定・排気排水条件下、軸ひずみ速度 0.075%/min でせん断させた際の、体積ひずみ・排水量および飽和度と軸ひずみの関係を、ディスクと膜で比較した図である。参考として、ディスクを用いて軸ひずみ速度 0.0125%/min で遅い载荷でせん断した結果も併記した。まず、軸ひずみ速度 0.075%/min の場合のディスクと膜の結果を比較すると、同じ载荷速度にも関わらず、ディスクと膜で結果が異なる。膜の場合はせん断中に飽和度変化がほぼ生じておらず、つまり体積圧縮量の約 85%の排水量が生じている。一方でディスクの場合は、殆ど排水しておらず、膜の場合は変化がなかった飽和度が、約 5%も上昇している。さらに、ディスクを用いた軸ひずみ速度 0.0125%/min

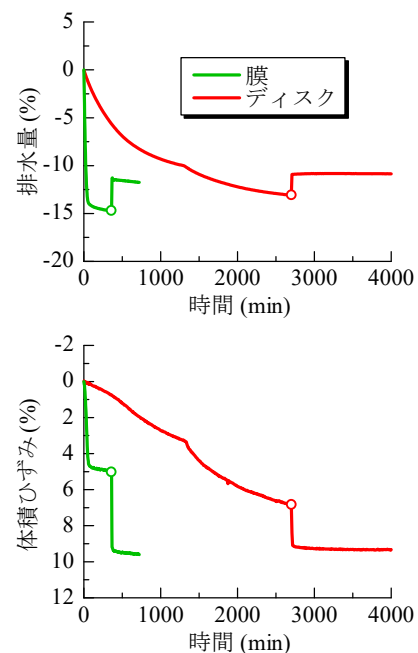


図 2 サクシオン作用・圧密過程における膜とディスクの比較 (サクシオン0kPa)

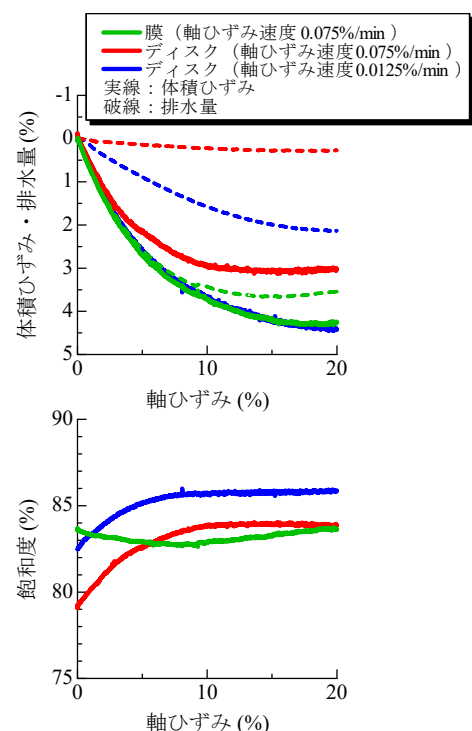


図 3 排気排水せん断過程における膜とディスクの比較 (サクシオン0kPa)

での実験結果は、軸ひずみ速度 0.075%/min の場合よりゆっくり時間をかけてせん断したため、排水量が多くなっている。このように、せん断過程においても、ディスクの透水性が供試体の透水性よりも小さいことが実験結果に影響を与えることがわかる。したがって、ディスクを用いたせん断を行わざるを得ない場合、今回実施した軸ひずみ速度 0.075%/min や軸ひずみ速度 0.0125%/min では、サクシオン 0kPa においてせん断中に土が飽和度上昇する力学的

性質を持つと誤解する恐れがあるため、注意を要したい。

最後に参考として、各段階における飽和度および間隙比の値を表 1 に示した。

表 1 飽和度と間隙比のディスクと膜を用いた場合の比較  
(サクシオン0kPa)

	飽和度(%)		間隙比	
	ディスク	膜	ディスク	膜
初期状態	44.7	45.8	1.19	1.18
セル圧・空気圧上昇後	45.3	46.7	1.17	1.16
サクシオン作用放置後	79.8	81.8	1.02	1.05
圧密終了時	79.3	83.6	0.97	0.95
排気排水せん断後	83.9	83.7	0.91	0.87

### 3.2 サクシオン 0, 10, 20, 30kPa を与えた場合の膜を用いた実験結果

3.1 節では、低サクシオン時にはディスクではなく、膜を用いるべきであることを示した。そこで次に、低サクシオン時の不飽和シルトの排気排水せん断挙動を把握するために、膜を用いてサクシオン 0, 10, 20, 30kPa を与えた場合の実験結果を示す。

図 4 はサクシオン作用・圧密過程における排水量、体積ひずみおよび飽和度の経時変化を示す。図中の白抜き点は、セル圧を 450kPa まで上昇させる圧密開始直前の点を示す。サクシオン作用時と圧密時の放置時間をそれぞれ 6 時間に設定した。なお、サクシオン 20kPa の場合は、サクシオン作用過程で供試体が吸排水しないため、圧密過程のみを行ったが、他のサクシオン値の場合との比較のために、図中では圧密開始点を 6 時間の位置と一致させた。サクシオン作用過程を見ると、供試体の初期サクシオンが 20kPa のため、サクシオン 0kPa および 10kPa を与えると吸水、サクシオン 30kPa を与えると排水挙動を示す。また、サクシオン 0kPa を与えた場合は、吸水コラプス挙動を確認できる。次に、セル圧を 450kPa まで上昇させる圧密過程に着目すると、サクシオン 10kPa を与える場合では、吸水しながら体積圧縮している点は興味深い。従って、この場合は飽和度が大きく上昇していることがわかる。また、サクシオン 20, 30kPa を与える試験でも、吸水こそしていないが、飽和度が上昇している。

図 5 は、側圧一定・排気排水条件の下、軸ひずみ速度 0.05%/min でせん断させた際の、体積ひずみ・排水量および飽和度と軸ひずみの関係を示す。サクシオン 0kPa を与える場合は、3.1 節において述べた通り、せん断中に飽和度変化がほぼ生じておらず、つまり体積圧縮量の約 85%の排水量が生じている。一方で、サクシオン 10, 20, 30kPa の場合では、せん断中に吸水しながら体積圧縮していて、飽和度が大きく上昇している。

このように、圧密過程のサクシオン 10kPa の場合や排気排水せん断過程のサクシオン 10, 20, 30kPa の場合において、サクシオンが一定であるにもかかわらず、吸水しながら体積圧縮する挙動が観察された。なお、吸水コラプス挙動は、サクシオン低下を伴う吸水圧縮現象である点が、ここで示した結果と異なることに注意されたい。

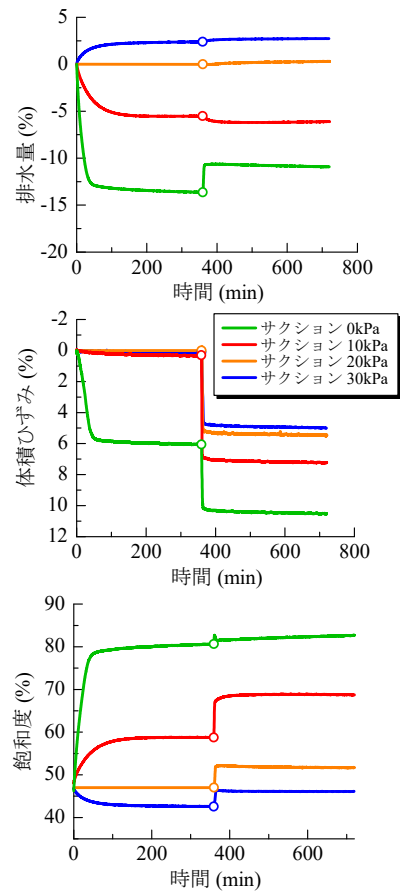


図 4 膜を用いてサクシオン0, 10, 20, 30kPa を与える場合のサクシオン作用・圧密過程における実験結果

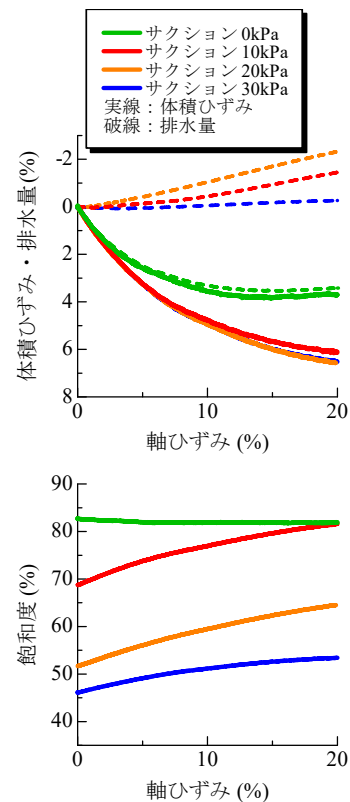


図 5 膜を用いてサクシオン0, 10, 20, 30kPa を与える場合の排気排水せん断過程における実験結果

最後に参考として、各段階における飽和度の値を表 2 に、間隙比の値を表 3 に示した。

表 2 膜を用いた場合の各段階の飽和度の値

与えたサクシオン	0kPa	10kPa	20kPa	30kPa
初期状態	45.4	47.3	46.3	46.1
セル圧・空気圧上昇後	46.2	48.1	47.0	46.9
サクシオン作用放置後	80.7	58.7	-	42.5
圧密終了時	82.7	68.7	51.7	46.1
排気排水せん断後	81.9	81.7	64.5	53.5

表 3 膜を用いた場合の各段階の間隙比の値

与えたサクシオン	0kPa	10kPa	20kPa	30kPa
初期状態	1.19	1.17	1.18	1.18
セル圧・空気圧上昇後	1.17	1.16	1.16	1.16
サクシオン作用放置後	1.03	1.15	-	1.15
圧密終了時	0.94	1.00	1.04	1.05
排気排水せん断後	0.87	0.88	0.91	0.91

#### 4. おわりに

本研究ではまず、セラミックディスクと微細多孔質膜を用いて不飽和シルト三軸試験を実施し、ディスクと膜の違いが実験結果に及ぼす影響を比較・考察した。その結果、ディスクは透水性が不飽和土供試体よりも低い場合があり、載荷速度効果などの土の時間依存挙動を調べる場合にも十分注意が必要であることを示した。つまり、低サクシオン下で物性解明のための実験を行う場合は、膜を使う方が余計な気遣いが少なくなる。

次に、低サクシオン時の不飽和シルトの排気排水せん断挙動を把握するために、膜を用いて、サクシオン 0, 10, 20, 30kPa の場合の不飽和シルト三軸試験を実施した結果、サクシオン低下時の吸水圧縮挙動（吸水コラプス）だけでなく、サクシオン一定時の吸水圧縮挙動が現れることを示した（サクシオン 10kPa の圧密時とサクシオン 10, 20, 30kPa のせん断時）。吸水圧縮は、間隙比減少を伴う飽和度上昇とも捉えられるため、これは水分特性の間隙比依存性（同一サクシオンの場合、間隙比が小さい方が飽和度が高い性質）を表しているとも言える。この点に注目して、本実験の数値シミュレーションを実施した研究もある<sup>6)7)</sup>。

今後は、様々な排水・排気条件下での実験を行い、精緻に土の力学挙動を表現可能な土骨格の構成モデルと水分特性モデルの開発を行っていく予定である。

#### 謝辞

JSPS 科研費 25249064 の助成を受けた。名城大学の小高猛司教授には、実験結果に関するご助言をいただいた。足利工業大学の西村友良教授には、実験装置に関するご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Microporous membrane technology for measurement of soil-water

characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal*, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208, 2012.

- 2) 西村友良, 古関潤一: 加圧膜法による低サクシオン領域の非塑性シルトの水分特性曲線, 第47回地盤工学研究発表会, 681-682, 2012.
- 3) 吉川高広, 野田利弘, 小高猛司: セラミックディスクの透水性が不飽和土三軸試験結果に及ぼす影響の数値解析的考察, 第51回地盤工学研究発表会, 705-706, 2016.
- 4) 小高猛司, 鈴木宏尚, 岡二三生: 排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験, 第18回中部地盤工学シンポジウム, 地盤工学会中部支部, 6, 2006.
- 5) Oka, F., Kodaka, T., Suzuki, H., Kim, Y.-S., Nishimatsu, N. and Kimoto, S.: Experimental study on the behavior of unsaturated compacted silt under triaxial compression. *Soils and Foundations*, 50(1), 27-44, 2010.
- 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, 第22回計算工学講演会, F-04-5 (CD-ROM), 2017.
- 7) 野田利弘, 吉川高広: 排気・排水三軸圧縮試験の間隙比依存性水分特性を考慮した空気～水～土連成シミュレーション, 第52回地盤工学研究発表会, 595-596, 2017.