

三軸圧縮応力状態における 粘性土の乾燥とせん断による側方ひずみの挙動

Behavior of Lateral Strain due to Drying and Shearing
in Triaxial Compression Tests on a Fine Soil



清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学大学院工学研究科)

側方拘束1次元圧密試験において飽和供試体にサクシオンを作用させると側方の収縮が生じ、供試体と圧密リングの間に隙間が生じるかもしれない。そのような状況を模擬するために三軸圧縮試験を実施し、乾燥と引き続くせん断によって引き起こされる側方の変形挙動を定量的に評価した。その結果、(1)異方圧密された飽和供試体にサクシオンを作用させると側方の圧縮ひずみが生じる、(2)そのひずみの大きさはサクシオン作用時の有効応力径路によって異なる可能性がある、(3)圧縮ひずみはせん断とともに減少し、せん断応力があるレベルに達すると0になりさらに膨張に転じる、という知見を得た。

キーワード：三軸試験，異方圧密，収縮，サクシオン，1次元圧密試験 (IGC : D05, D06)

1. 序論

著者らは不飽和土の1次元圧縮挙動を調べるために、圧密リング内で圧密された飽和供試体にサクシオンを作用させて不飽和状態にして、その後圧縮荷重を変化させていくような一連の試験を実施した¹⁾。その結果、不飽和化後の圧縮特性、即ち鉛直荷重と間隙比の関係などがサクシオンの影響を強く受けることがわかった。例えば、最も特徴的な挙動として、ある圧密圧力の下でサクシオンを作用させると間隙比が減少し、次に圧密圧力を上げていくとあるレベルに達するまでほとんど圧縮しないがさらに上げていくと圧縮性が大きくなるという結果を挙げることができる。ところが、この方法で不飽和化させると供試体が鉛直方向のみならず側方にも圧縮する可能性があり、側方に圧縮すると供試体とリングの間に隙間が生じ、その後の載荷による圧縮は一軸圧縮になる可能性がある。要するにこの方法で得られた結果は1次元圧縮特性ではないかもしれない。

このような背景の下で、サクシオンと鉛直荷重によって生じる側方ひずみの挙動を三軸圧縮試験によって明らかにすることを試みた^{2),3)}。その後、三軸試験の方法、とくに K_0 圧密を厳密に行うために装置等を改良し、現在に至っている⁴⁾。

本稿では、 K_0 圧密を行う前の研究の内容を紹介する。既発表の内容と重複する部分があることをお断りしておく。

2. 試料

粘性土試料（シルト；DL クレー）を用いた（図-1および表-1参照）。以前の研究^{5),6)}において基準試料として用いている。粘土分を含むものの透水性が高いので実験に要する時間を短縮できるという利点があるためである。

表-1 試料の物理的性質

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.703
コンシステンシー限界*	w_L (%)	32.8
	w_P (%)	17.0
	I_P	15.8
粒度	シルト分 (%)	75
	粘土分 (%)	25

* 文献⁶⁾から引用。

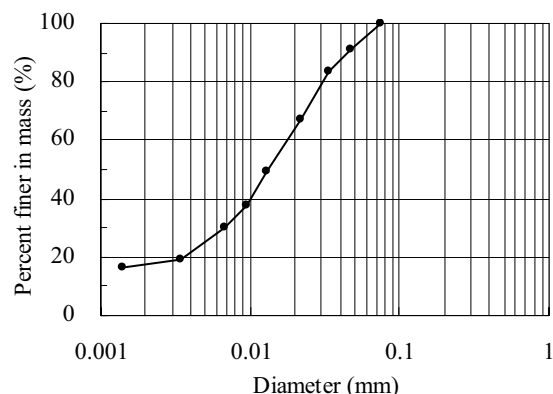


図-1 試料の粒径加積曲線

る。その反面、三軸圧縮試験のように供試体を自立させる必要がある場合、本研究で行ったように、供試体を作成する方法に特別の工夫をしなければならない。

3. 三軸圧縮試験

3.1 装置

図-2 に示す装置を用いて供試体作成と三軸圧縮試験を行った。軸方向荷重は錘（図中 a で記した）で載荷した。ペDESTAL (h) の上部にセラミック板 (g) を装着している。載荷キャップ (e) に繋がる細管を通して間隙空気圧 (u_a) を作用させる。供試体の体積変化を測定するために“内セル”と称している部分 (c) をセル (d) の中に設置している。

この装置ではセル圧 (u_c) を変化させるとセルの容積が変化し、従って“内セル”の水面も変動して供試体体積の測定が正確でなくなる。従って、各試験においてセル圧は常に一定 (340kPa) に保った。その代わり間隙空気圧 u_a を変えることによって正味の拘束圧 σ_{met} ($=u_c - u_a$) を制御した。

間隙空気はキャップ (e) を通して常に排気状態である。間隙水の排水はセル底盤の下部にあるバルブ (j) によって制御できる。圧力変換器 (i) によって測定される水压を間隙水压 u_w と見なす。

3.2 供試体作成方法

三軸試験用の供試体は過去の研究⁶⁾で用いたものと同じ方法で作成した。この方法によれば良好な再現性をもって供試体を準備することができる。三軸セル内に、ペDESTAL を内側に密着させるように円筒形モールドを装着し、その中でスラリー状の試料をまず圧密し、ついで不飽和化させる。モールドの内径は 35mm、高さはスラリーが圧密されて高さが 80mm になるように十分高くしている。

スラリーを圧密するために鉛直圧力を段階的に 49kPa まで上げた。圧密が終了したら鉛直圧力を 6kPa に下げ、同時に 50kPa のサクシオンを作用させた。サクシオン作用による排水が完了した後、供試体がペDESTAL の上に残るようにしてモールドを上部へずらして外した。このような手順によって供試体の不飽和になるとともにモールドがなくてもペDESTAL の上で自立するようになる。実際、この段階で飽和度は 77~85 (%) になった。

不飽和化した供試体にラテックスメンブレンを被せて三軸試験の前に再度飽和化した。セル圧を約 2kPa にして、底面から 10kPa の水压を作用させることによって間隙空気を載荷キャップから排出させた。キャップにつなげたチューブ内を流れる排水中に気泡が見られなくなれば、

さらに 3kPa の正味の拘束圧を作用させて供試体に残っている可能性がある気泡を排出させた。

3.3 三軸圧縮試験の方法

4 個の試験を実施した (No.1, 2, 3 および 4 と呼称する)。No.1, 2 および 3 の試験は先に断ったように文献²⁾で結果を示したものである。

図-3 に各試験の応力経路を示す。ただし No.2 試験の経路は No.3 とほぼ同じであるので図には示していない。同図(a)には正味の応力 (σ_{anet} および σ_{rnet}) を、図(b)には有効応力 (σ_{aB} および σ_{rB}) をそれぞれ変数に取っている。ここに

$$\sigma_{anet} = \sigma_a - u_a \quad (1)$$

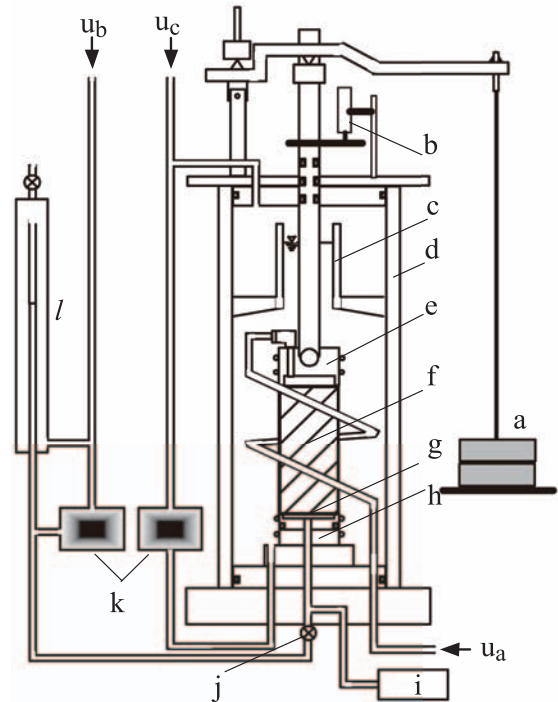
$$\sigma_{rnet} = \sigma_r - u_a \quad (2)$$

$$\sigma_{aB} = \sigma_{anet} - S_r s \quad (3)$$

$$\sigma_{rB} = \sigma_{rnet} - S_r s \quad (4)$$

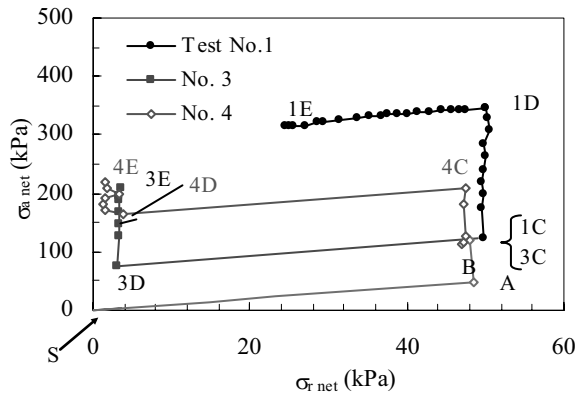
また u_a : 間隙空気圧, S_r : 飽和度, s : サクシオン ($=u_a - u_w$) である。

有効応力は Bishop⁷⁾の有効応力におけるパラメータ χ を飽和度 S_r に置き換えたものである。

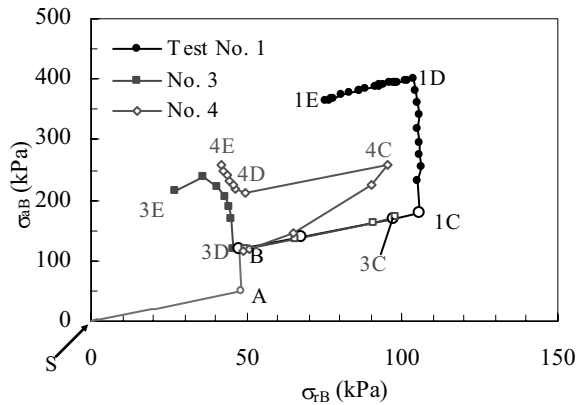


a: 錘, b: 変位変換器, c: 内セル, d: 外セル, e: 載荷キャップ, f: 供試体, g: セラミック板, h: ペDESTAL, i: 圧力変換器, j: サークルシールバルブ, k: 差圧変換器, l: 二重管ビュレット, u_a : 間隙空気圧, u_c : セル圧 ($=\sigma_r$), u_b : 背圧。

図-2 三軸圧縮試験装置



(a) 正味の応力



(b) 有効応力

図-3 各試験の応力経路

どの試験も以下の4段階から構成されている：

- 1) 等方圧密 (図中, 状態の S から A に至る経路) .
- 2) 異方圧密 (A から B に至る経路) .
- 3) 不飽和化または乾燥過程 (B から C に至る経路) .
- 4) 応力制御によるせん断 (C から D を経て E に至る経路) .

最初の2段階では供試体は完全または高い飽和状態にあり, 後の2段階では不飽和である.

a. 飽和状態での等方および異方圧密

どの試験もまず 48kPa の有効応力 (Terzaghi) で等方圧密した. 底面非排水・上面排水で圧密した, 即ち, 図-2 に示したバルブ j を閉じてキャップから間隙水圧を作用させた. 続いて, 有効側圧 σ'_r を変化させないで σ'_a を σ'_r/K_0 まで増加させた. ここに K_0 は Jaky の式から推定した静止土圧係数である. K_0 の値は著者らの研究成果²⁾に基づいて $\phi'=36^\circ$ として決定した.

b. サクシヨンの作用

間隙水圧を調整して 70kPa のサクシヨンを作用させた. このとき試験 No.1, 2 および 3 では軸方向および側方の正味の応力 σ_{net} および σ_{met} を変えていない. 実際, 先の

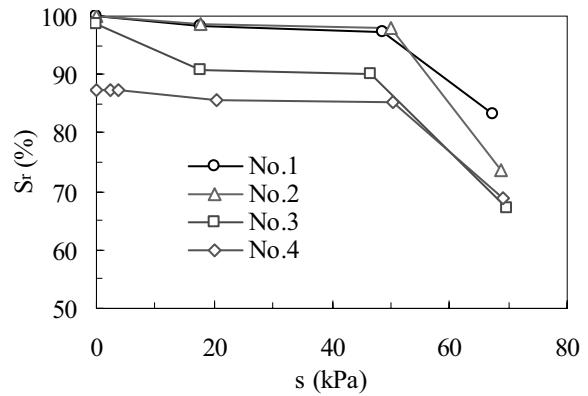


図-4 水分保持特性曲線

図(a)に示したように状態 B と C がほとんど同じである. 一方, サクシヨンを变化させたので有効応力 (σ_{aB} と σ_{rB}) は大きく变化した (図(b)). 特に比 $\sigma_{\text{aB}}/\sigma_{\text{rB}}$ が減少した. 試験 No.4 では, σ_{net} を調整して応力比 $\sigma_{\text{aB}}/\sigma_{\text{rB}}$ を変化させないようにした. 後で示すようにサクシヨン作用時の有効応力経路の違いがこのとき生じる側方のひずみの大きさに影響を与える.

c. 応力制御せん断過程

試験 No.1 では正味の拘束圧 σ_{met} を一定にして, 図-3(a)の点 1D で示す状態まで σ_a を増加させることによりせん断した. 次に点 1D から 1E までの間は, σ_a を変えないで間隙空気圧 u_a を減少させてさらにせん断したが, これは状態が点 1D に達したとき, σ_a を調整するための錘 (図-2 の a) を載せるスペースがなくなったためである. 技術上の問題に起因する.

試験 No.2, 3 および 4 では, σ_{met} を瞬間的に 3kPa に低下させ, 次に, σ_{met} を 3kPa に保ったまま, σ_{net} を段階的に増加させた. ここでも錘を調整することにより段階的に載荷した. σ_{met} を 3kPa に設定した理由を述べる. 試験実施前は, 側方拘束 1 次元圧縮試験において乾燥に伴って供試体が側方に収縮するとき起こると考えられる一軸圧縮状態, 即ち $\sigma_{\text{met}} = 0$ にする予定であった. しかし, 本研究では u_a と σ_r を独立に制御する方法を採っていて, それらの制御精度の限界から厳密に $\sigma_{\text{met}} = \sigma_r - u_a$ を 0 にすることができなかった. とくに $u_a > \sigma_r$ となってメンブレンが膨らむことを恐れた. このような理由から σ_{met} を 3kPa に設定せざるを得なかった.

4. 結果と考察

試験の結果に基づいてひずみの挙動を考察する。異方圧密の終了時点、即ち図-3の状態Bを基準にして体積ひずみ、軸ひずみおよび側方ひずみの各ひずみを定義する。圧縮または収縮するときを正にする。よってひずみが負の値をとるときは伸びまたは膨張を意味する。

4.1 水分保持特性

図-4は不飽和化の過程で得られた水分保持特性曲線である。サクシオンを作用させる前の飽和度は試験No.1, 2および3ではほぼ100%で、異方圧密は予定通り飽和状態で行うことができた。No.4の飽和度が低い、これは三軸圧縮試験開始時の再飽和化が不十分であったためであると思われる。また、この図から試料の空気侵入値が60から70(kPa)の間にあると推定できる。

4.2 乾燥によるひずみの挙動

代表例として試験No.3の結果を示す。図-5(a), (b)および(c)に、サクシオンを20から50, さらに70(kPa)に上げたときの軸方向、体積および側方ひずみの時間的変化をそれぞれ示した。

図より、サクシオンを作用させることにより正の軸方向および体積ひずみが生じるとともに正の側方ひずみも生じていること、即ち半径方向に収縮したことがわかる。

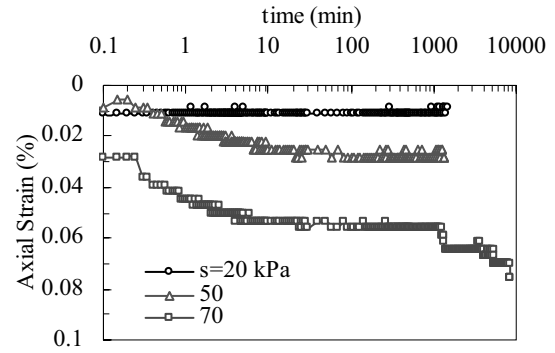
まず、各ひずみの大きさに着目する。軸ひずみが他のひずみに比べて小さい。先に指摘したように、この試験では、No.1やNo.2同様、軸方向および側方の正味の応力(σ_{anet} および σ_{met})を変えていないが、サクシオンを変化させたので有効応力(σ_{aB} および σ_{rB})が変化し、その比(σ_{aB}/σ_{rB})は減少した(図-3(b)参照)。乾燥によって軸方向に圧縮ひずみが生じるが、一方で応力比の減少によって軸方向の弾性的な伸びも生じ、両者の和として軸ひずみが大きくならなかったと推察する。

次に、正の側方ひずみが生じたことから、この試験の条件、即ち $s=70kPa$; $\sigma_{anet}=250kPa$ という条件で側方拘束1次元圧縮試験を行っていたら、供試体と圧密リングの間に隙間が生じたものと思われる。

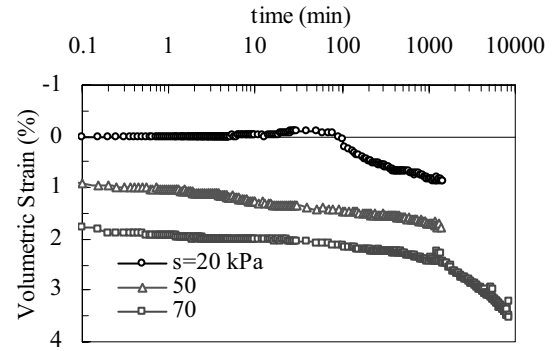
図-6に、他の試験の結果も含めて、サクシオン作用時に生じた側方ひずみとサクシオンの関係を示した。

70kPaのサクシオンを作用させると試験No.1, 2および3では約2%, No.4で約0.5%の側方ひずみが生じた。

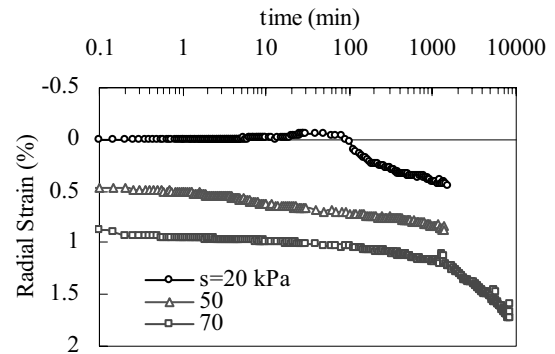
挙動はNo.4とそれ以外で異なっている。No.4はサクシオン作用時に有効応力比を減少させなかった試験であり、図-5に関して説明したように、サクシオン作用時のせん断作用によって側方に伸びる傾向が生じたため、和としての側方ひずみが他の試験より小さくなったと想像できる。



(a) 軸方向ひずみ



(b) 体積ひずみ



(c) 側方ひずみ

図-5 サクシオン作用過程におけるひずみの挙動

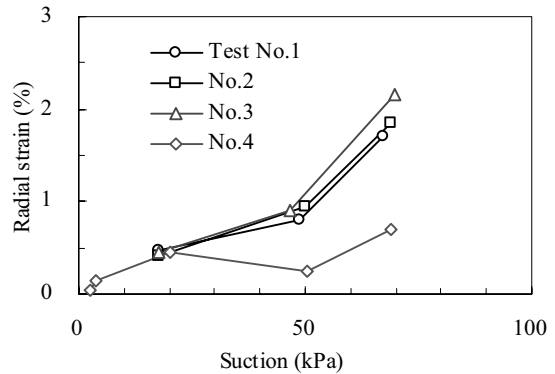


図-6 サクシオンと側方ひずみの関係

側方ひずみ 1%は、側方拘束 1 次元圧密試験では供試体直径を 60mm とすると 0.3mm の隙間が生じることになる。しかし、実際の圧密試験供試体が半径方向に収縮すると正味の拘束圧 σ_{rnet} が即座に 0 になる。一方、本研究の三軸圧縮試験ではサクシオン作用時に σ_{rnet} を 0 にしていない。このことを考慮すると図-6 の結果から隙間の大きさを推定すると過大な推定になると想像できる。

4.3 せん断時の側方ひずみ

この節では、試験 No.1 と No.3 の結果を用いてせん断時の側方ひずみの挙動を考察する。No.1 は他の試験に比べて比較的高い正味の拘束圧 (=48kPa) でせん断した試験であり、No.3 は、No.1 より低い拘束圧で試験した例である。

a. 試験 No.1 の結果

図-7(a), (b)および(c)に試験 No.1 のせん断時の軸方向、体積および半径方向ひずみの時間的変化挙動をそれぞれ示す。ただし、混乱を避ける意味で図-3 に示した径路 1C から 1D までの部分の結果を示した。なお、図ではせん断応力レベルを次式の応力比 R_{net} で表している：

$$R_{net} = \frac{\sigma_{anet}}{\sigma_{rnet}} \quad (5)$$

図から以下のことがわかる：

- (1) 軸方向ひずみはせん断レベルとともに増加し続ける。
- (2) 体積ひずみはせん断応力レベルが低い場合時間が経つと増えるがせん断応力レベルが高くなると一旦膨張する傾向を示した後圧縮に転じる傾向がある。
- (3) 半径方向ひずみはせん断レベルとともに減少する傾向が明らかである。

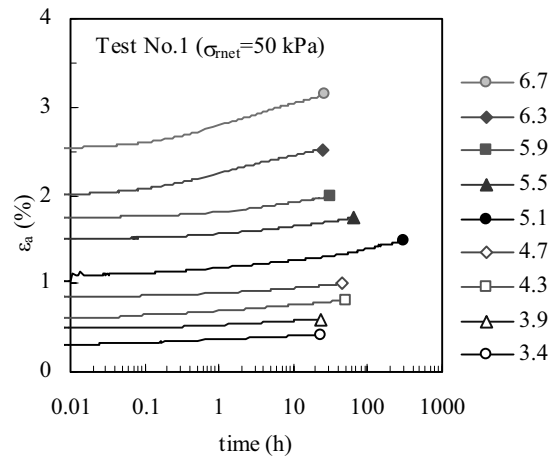
最後の観察は、もし拘束圧が（この試験の拘束圧である）48kPa より低ければ半径方向ひずみは 0 まで減少したかも知れないことを示唆している。実際、この予想を試験 No.3 の結果に基づいて検証する。

b. 試験 No.3 の結果

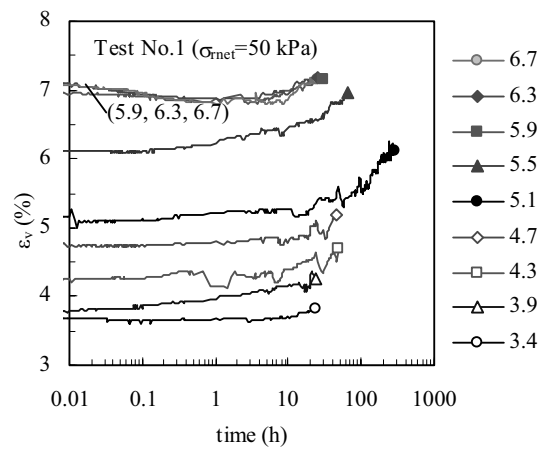
試験 No.3 では供試体が破壊するまでせん断応力のレベルを上げることができた。結果を図-8(a), (b), (c)に示した。これらの図より以下のことがわかる：

- (1) 軸方向ひずみが約 3%に達したら供試体は破壊した。
- (2) 体積ひずみが減少する傾向が比較的低いせん断応力レベルでも見られる。
- (3) 半径方向ひずみはせん断応力比が 59.08 に達したときに正から負に転じた。

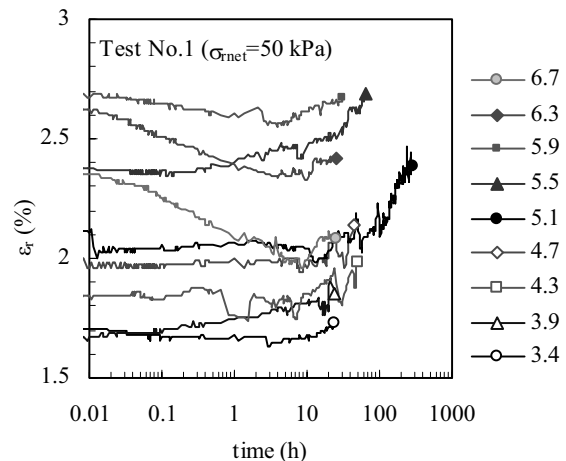
最後の観察は、側方拘束 1 次元圧縮試験において生じるかもしれない隙間は鉛直圧密圧力があるレベルになると消滅することを示唆している。残念ながら、この示唆を証明するデータがない。



(a) 軸方向ひずみ ϵ_a

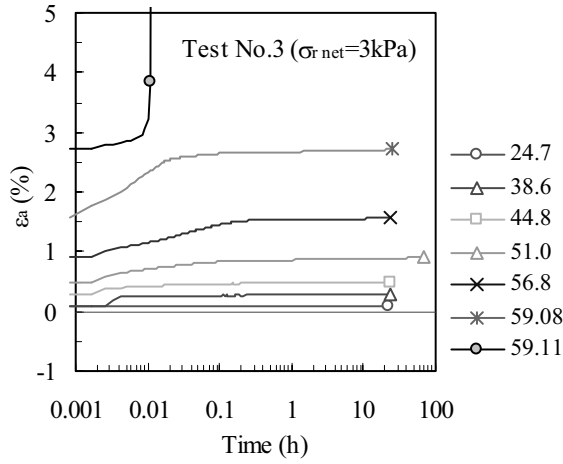


(b) 体積ひずみ ϵ_v

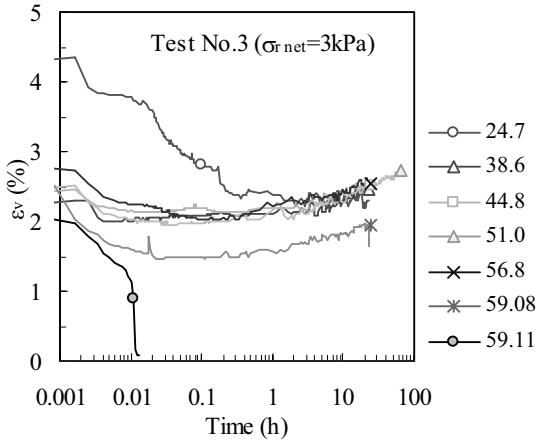


(c) 半径方向 ϵ_r

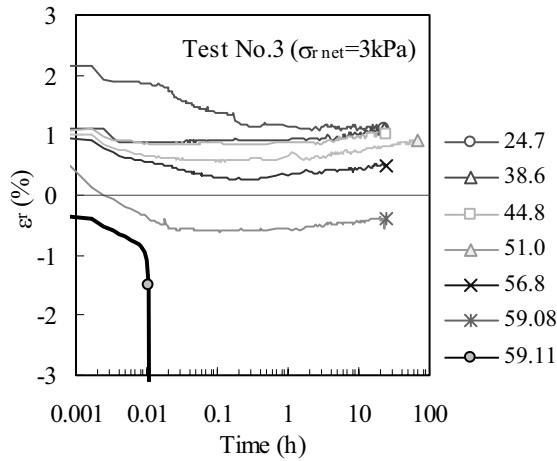
図-7 せん断時のひずみの挙動
(試験 No.1)



(a) 軸方向ひずみ ε_a



(b) 体積ひずみ ε_v

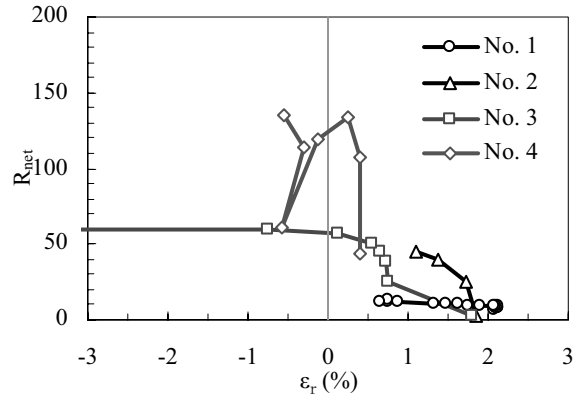


(c) 半径方向ひずみ ε_r

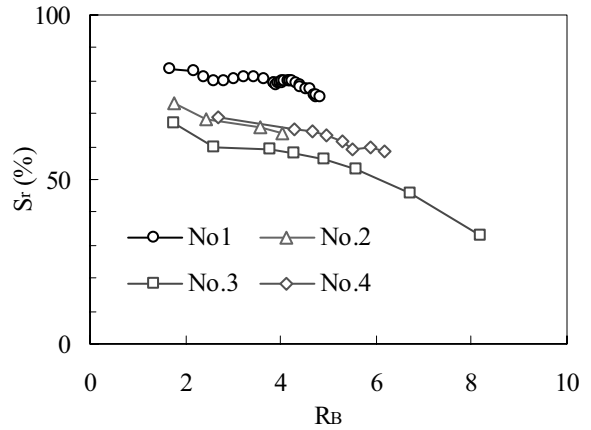
図-8 せん断時のひずみの時間的変化挙動 (試験 No.3)

c. 側方ひずみに対するせん断応力レベルの影響

半径方向ひずみに対するせん断応力レベルの影響を見る。せん断応力レベルを表す指標として図-7 や図-8 で用



(a) 正味の応力で定義した応力比 R_{net}



(b) 有効応力で定義した応力比 R_B

図-9 半径方向ひずみとせん断応力比の関係

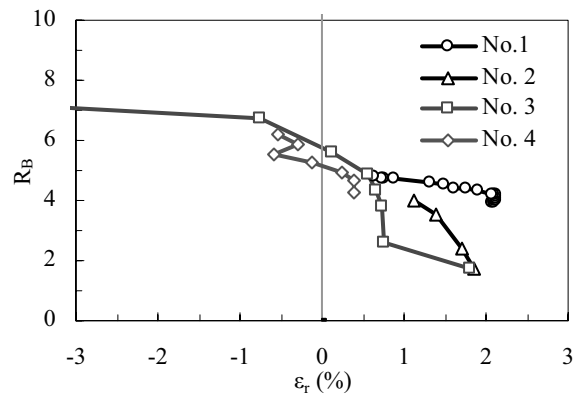


図-10 せん断中の飽和度の変化

いた応力比 R_{net} に加えて、あらたに有効応力に基づく応力比 R_B を用いる。ここに

$$R_B = \frac{\sigma_{aB}}{\sigma_{rB}} \quad (6)$$

試験 No.1 と No.2 ではせん断応力レベルが高くなかったので半径方向ひずみが正から負に転じていないが、せん断のレベルが高い試験 No.3 と No.4 では半径方向ひず

みがあるせん断応力レベルで正から負に転じている。

興味深いことは、ひずみの符号が変わるときのせん断応力比は、 R_{net} では両試験で大きく異なる (図-9(a)) のに対して、 R_B では大きな差がない (図-9(b))。さらに図(b)において、ひずみの符号が変わらなかった二つの試験 (No.1 と No.2) においても、せん断応力レベルをさらに上げることができておれば $e_r=0$ になり、そのときの応力比が No.3 や No.4 のそれと近くなることが予想される。

これらの観察から応力変数 σ_{anet} や σ_{rnet} はひずみの挙動を説明するのに十分でないが応力変数 σ_{aB} や σ_{rB} は有用であるということができる。

4.4 せん断時の飽和度

図-10 にせん断中の飽和度の変化を示した。せん断応力レベルとして有効応力比 R_B を用いた。図より、すべての試験においてせん断中に飽和度が低下したことがわかる。これはダイレタンスーによる体積膨張と上述の側方の膨張によるものであると想像できる。

5. 結論

側方拘束 1 次元圧縮試験 (oedometer 試験) において飽和供試体にサクシオンを作用させる (乾燥させる) と側方の収縮を引き起こし、圧密リングと供試体の間に隙間が生じるかもしれない。しかし隙間が生じると正味の拘束圧が 0 になり、せん断応力が増加して軸方向の圧縮と側方の膨張が起こり、隙間がなくなるかもしれない。この現象を三軸試験で再現し、乾燥とせん断によって引き起こされる側方変形の程度を定量的に把握することを試みた。

得られた知見を要約する：

- (1) 飽和状態で異方圧密された供試体にサクシオンを作用させると確かに側方に収縮した。その収縮ひずみの大きさはサクシオンを作用させたときの有効応力状態に依存する可能性を指摘した。
- (2) サクシオン作用によって生じた側方の圧縮ひずみはせん断応力を上げると減少し、せん断応力があるレベルに達すると 0 になり、さらに膨張に転じた。
- (3) Bishop タイプの有効応力はせん断中の側方のひずみの挙動を説明するのに有効であった。

以上の知見に基づけば、側方拘束 1 次元圧密試験においてサクシオン増加によって生じるかもしれない供試体と圧密リングの間の隙間は圧密圧力の大きさによっては生じないか、生じてもすぐ消滅する可能性があるかと推測できる。

謝辞

拙稿のために貴重なスペースを割り当てていただきました。地盤工学会中国支部論文報告集編集委員会関係各位に御礼申し上げます。また、ここで示した研究は下垣克夫氏および来海康宏氏がそれぞれ平成 21 年度および平成 22 年度鳥取大学工学部土木工学科卒業研究として行ったもの一部である。記して両氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば Shimizu, M., Sugiura, Y. and Tahara, Y.: Effects of suction and its history on the volume change and soil-water characteristics in oedometer compression, Proc. of 60th Canadian Geotechnical Conf. & 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conf., pp. 1115-1120, 2007.
- 2) Shimizu, M., Shimogaki, K. and Kimachi, Y.: Lateral strain due to drying and triaxial compression of unsaturated soil, Proc 5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, Pathaya, Thailand, pp. 179-184, 2011.
- 3) Shimizu, M., Shimogaki, K., Kimachi, Y. and Nakamura, K.: Lateral strain behavior of soil unsaturated and sheared in triaxial test, Proc. 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils and Ground, pp. 179-188, 2011.
- 4) 清水正喜, 下垣克夫, 中村公一: 不飽和粘性土の K_0 圧密試験における有効応力の特性, 平成 24 年度不飽和土研究会研究発表論文集, 東京農工大, pp.48-51, 2012.
- 5) Shimizu, M., Sakamoto, S. and Nishioka, T.: Effects of drainage conditions on the shear strength of unsaturated soil, Proc. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, ASCE, pp. 1223-1234, 2006.
- 6) Shimizu, M. and Terakata, J.: Constant volume triaxial compression tests on unsaturated soil prepared from slurry, Proc 5th International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 1: pp. 365-370, 2010.
- 7) Bishop, A. W.: The principle of the effective stress, Teknisk Ukeblad, No. 106, pp. 859-863, 1959.

(2012 年 12 月 11 日 受付)

