

不飽和土の三軸圧縮試験における乾燥とせん断に伴う側方変形挙動

清水 正喜^{*1}・下垣 克夫^{*1}・来海 康宏^{*2}

^{*1}鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

^{*2}鳥取大学工学部土木工学科

Lateral Deformation due to Drying and Shearing in Triaxial Compression Test of Unsaturated Soil

Masayoshi SHIMIZU^{*1}, Katsuo SHIMOGAKI^{*1} and Yasuhiro KIMACHI^{*2}

^{*1}Department of Management of Social Systems and Civil Engineering

Graduate School of Engineering, Tottori University

^{*2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University

Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: The application of suction on a saturated soil specimen consolidated in an oedometer may cause the lateral shrinkage and therefore the condition of the one dimensional compression will not be implemented. This study tries to simulate such situation using triaxial testing apparatus and to quantify the lateral deformation due to drying and shearing. Main conclusions are as follows: (1) lateral shrinkage occurs when suction is applied under the anisotropic stress condition, and (2) with increasing the shear stress, the lateral compressive strain, which occurred due to the drying, will reduce and, at some raised level of the shear stress, it will turn to be expansive.

Key Words:, Triaxial tests, Unsaturated soil, Suction, Anisotropic consolidation, Lateral strain

1. はじめに

土の一次元圧縮試験において、ある荷重の下で飽和状態にある供試体にサクションを作用させて不飽和状態にすると、供試体が側方に収縮し、供試体と圧密容器の間に隙間が生じる可能性がある。隙間が生じると1次元圧縮という条件が満たされなくなる。本研究の目的は一次元圧密容器内で、飽和供試体にサクションを作用させて不飽和化したときの側方の変形量を定量的に評価することである。

過去の研究[1]において、ある荷重の下でサクションを作用させたときの側方収縮量をノギスと写真によって測定することを試みた。その結果、サクションの作用によって確かに収縮して供試体周面と容器との間に隙間が生じること、荷重を増加していくとその隙間が小さくなっていくことを明らかにすることができた。しかし、用いた方法（ノギス法と写真法）では測定精度に限界があり、収縮量を定量的に評価するには至らなかった。

本研究では、三軸圧縮試験によって、飽和状

態で擬似的な K_0 圧密状態をつくり、サクションを作用させたときに生じる側方のひずみを測定するという方法を採用した。三軸圧縮試験では、軸方向変位と体積変化量を測定できるので、それらの測定量から側方変位（ひずみ）を算定することができる。なお、擬似的な K_0 圧密状態は、経験式に基づいて算定した K_0 値に相当する応力比の下で行う異方圧密状態である。側方の変形を許さないという本来の K_0 状態である保証がないので擬似的と形容した。

2. 試料及び試験装置

2.1 試料

用いた試料は市販の粉末シルト（DL クレー）である。この試料は透水性がよいため、間隙水の排水・吸水に要する時間を短縮できる。図1に粒径加積曲線、表1に試料の物理的性質を示す。

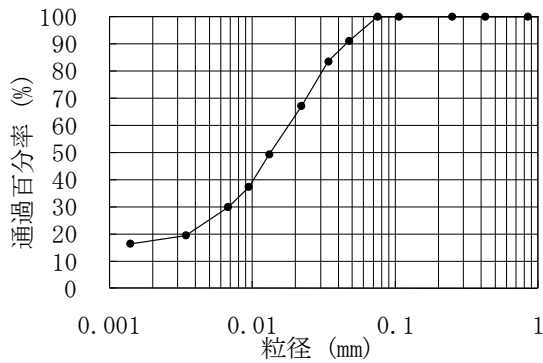


図1 粒径加積曲線

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 ¹⁾	w_L (%)	32.8
	w_p (%)	17.0
	I_p	15.8
粒度	シルト分 (%)	75
	粘土分 (%)	25

1) 液性限界，塑性限界の値は寺方[2]より引用した。

2.2 試験装置

試験装置は不飽和土用三軸圧縮試験装置を用いた。図2に三軸圧縮試験時の装置の概略図を示す。

セル圧，間隙空気圧，背圧をレギュレーターにより個別に制御するとともに，供試体底面の間隙水圧を計測した。供試体の体積変化量および排水量を，それぞれ内セルおよび二重管ビュレット（排水量測定用）内の水面変動量から測定した。

3. 方法

3.1 供試体作成

三軸セルにモールドを設置し，その中でスラリー状態から圧密して供試体を作成して三軸試験に供した。供試体作成方法は文献[3]で詳しく述べたので，ここではその概要を述べる。

モールドは，内径がペDESTALの外径にほぼ等しく，ペDESTALがモールド底部内面に接するように設置した。ペDESTAL側面にOリングを埋め込んで試料が漏れないようにした。

はじめに最大圧密圧力 50kPa で圧密した後，サクシオン 50kPa を作用させて不飽和化した。不飽和化が完了したら，試料をペDESTAL上に残したまま，モールドを引き上げて取り外した。供試体にゴムスリーブを被せて三軸圧縮試験に移行する。

用いた試料は，飽和状態では 50kPa で圧密しても自立しないので，サクシオンを作用させて不飽和化させることで自立できる状態にした。またこの試料はトリミングなどを行うと乱れ易いが，上記の方法では整形の必要がないので乱れを極力防ぐことができる。

3.2 三軸圧縮試験

作成した供試体は不飽和状態であるので，飽和状態で異方圧密を行うために，再度，飽和化した。飽和化は供試体の底面から給水することによって行った。飽和化が完了したら，有効拘束圧 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ ($=\sigma_3-u_w$) で等方圧密した。ただし， $\sigma_3=340$ ， $u_w=290$ (kPa) を作用させた (u_w は間隙水圧)。等方圧密後，軸方向荷重を増加させて，有効応力比 $R_{net} (=1/K_0)$ で異方圧密した。ここで $K_0 (= \sigma'_3/\sigma'_1)$ は Jaky の式： $K_0=1-\sin\phi'$ に基づ

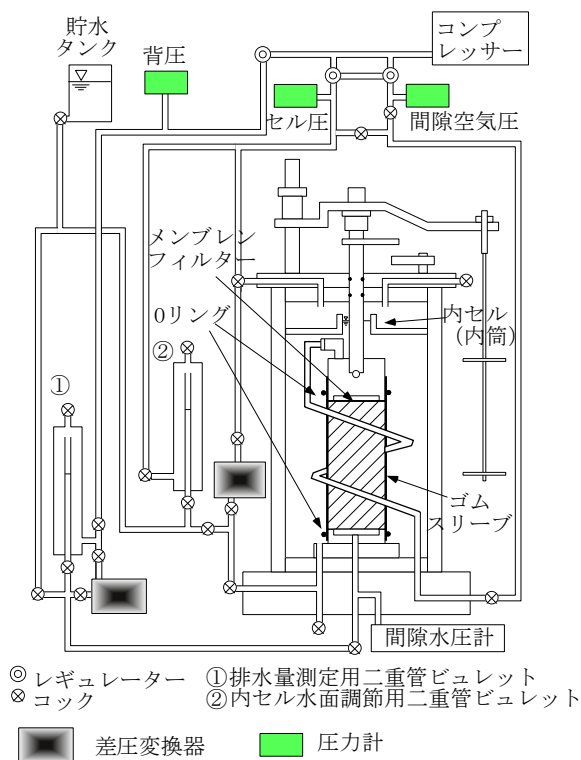


図2 不飽和度用三軸圧縮試験装置

いて推定した． ϕ' は過去の研究[2]を参考にして 36° にした．

異方圧密が終了すると，サクシオン s ($=u_a - u_w$) を 70kPa まで段階的に作用させて供試体を不飽和状態にした．サクシオンは，セル圧を 340kPa に保った状態で，間隙空気圧 $u_a=290\text{kPa}$ を作用させ，背圧（底面間隙水圧 u_w ）を 290kPa から段階的に 220kPa まで減少させることで作用させた．

次に，応力制御方式によってせん断した．サクシオン作用後の応力比 R_{net} ($=\sigma_{1\text{net}}/\sigma_{3\text{net}}$) は 2.5 ，正味の軸方向応力 $\sigma_{1\text{net}}$ ($=\sigma_1 - u_a = \sigma_3 + q - u_a$) は 125kPa である．

応力制御によるせん断は次の三通りの方法で行った．

方法①：正味の側方拘束圧 $\sigma_{3\text{net}}$ ($=\sigma_3 - u_a$) を 50kPa に保ち，軸方向応力 $\sigma_{1\text{net}}$ を増加させた．常にセル圧 $\sigma_3=340$ ，間隙空気圧 $u_a=290$ ，間隙水圧 $u_w=220$ (kPa) である．

方法②：まず $\sigma_3=340\text{kPa}$ で一定にして， $u_a=340$ ， $u_w=270$ (kPa) に設定してサクシオン s を 70kPa に保ち， $\sigma_{3\text{net}}=0\text{kPa}$ にした．この時，ゴムスリーブにしわができたので，ゴムスリーブと供試体の間に隙間ができたと考え，5分後に， $u_a=337$ ， $u_w=267$ (kPa) に設定し， $\sigma_{3\text{net}}=3\text{kPa}$ にして，ゴムスリーブと供試体を密着させた．その後， $\sigma_{3\text{net}}=3\text{kPa}$ の状態に保ち，軸方向荷重を増加，即ち $\sigma_{1\text{net}}$ を増加させた．

方法③：まず $\sigma_3=340\text{kPa}$ で一定にして， $u_a=337$ ， $u_w=267$ (kPa) に設定して s を 70kPa に保ち， $\sigma_{3\text{net}}=3\text{kPa}$ に設定した．その後， $\sigma_{3\text{net}}=3\text{kPa}$ の状態に保ち， $\sigma_{1\text{net}}$ を増加させた．

4. 結果及び考察

側方ひずみ (ε_3)，軸ひずみ (ε_1)，体積ひずみ (ε_v) はそれぞれの実験における異方圧密終了時を基準とする．ひずみは長さまたは体積が減少するとき正の値をとるように定義している．

4.1 異方応力状態・不飽和化過程（サクシオン増加段階）における側方ひずみの挙動

異方応力状態での不飽和化過程における ε_3 と経過時間の関係を図3と図4に示した．この過程

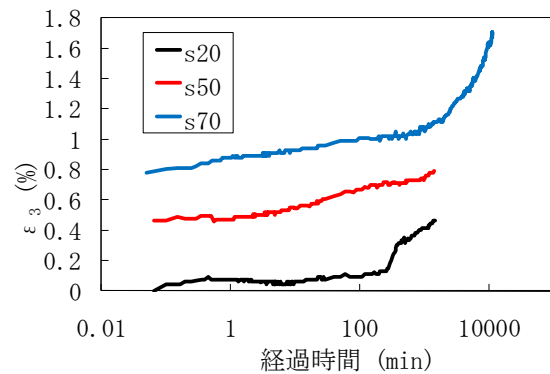


図3 サクシオン増加段階（方法①）

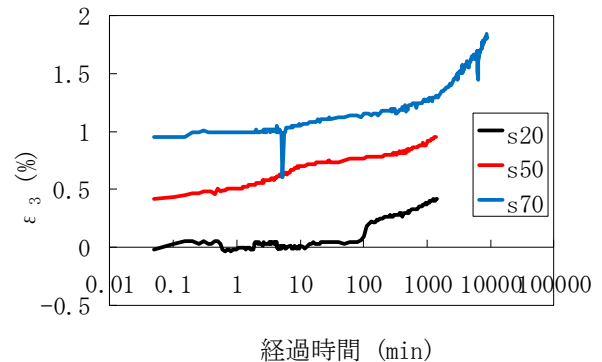


図4 サクシオン増加段階（方法②）

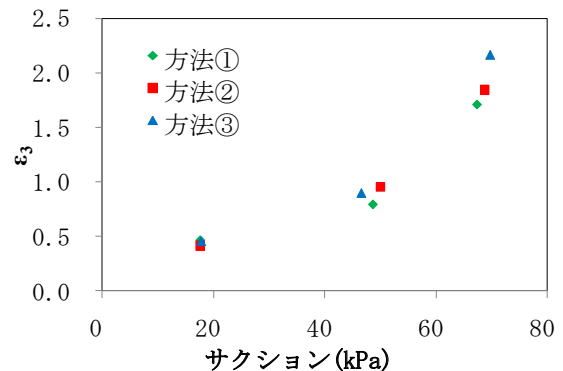


図5 各サクシオン作用段階終了時のサクシオンと ε_3 の関係

の応力条件はすべての試験（方法①，②および③）で共通であるので，例として方法①と方法②の試験の結果を示した．図3は方法①の，図4は方法②の試験である．これらの図から，異方応力状態でサクシオンを作用させると側方に収縮することがわかる．

図3および図4の，各サクシオンの段階で生じたひずみ ε_3 をサクシオンに対してプロットすると

図 5 のようになった。サクシオンと ε_3 の間にはほぼ一義的な関係があることがわかる。

4.2 不飽和状態でのせん断過程におけるひずみの挙動

(1) 方法①

方法①の試験におけるせん断過程で生じた ε_3 , ε_1 および ε_v と時間の関係を図 6(a), (b) および (c) にそれぞれ示す。せん断応力レベルは応力比 R_{net} で表した。

図 6(a) より, $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ の時は, R_{net} が 5.4 より小さい時は経過時間約 100 分までほとんど変化がなく, 経過時間約 100 分以降は側方に収縮している。 R_{net} が 5.8 より大きいと経過時間約 300 分までは側方に膨張し, 経過時間約 300 分以降は収縮している。

図 6(b) より, 応力比が増加すると ε_1 が増加している。さらに, R_{net} が 6.5 より大きい応力比で経過時間が 10 分以降は, R_{net} が 6.1 より小さい応力比に比べて, ε_1 の増加量が大きいことがわかる。

図 6(c) より, R_{net} が 6.1 より小さい時は応力比が増加すると ε_v が増加しているが, R_{net} が 6.1 より大きい時は応力比が増加しても, ε_v の挙動がほとんど同じ変動傾向を示している。

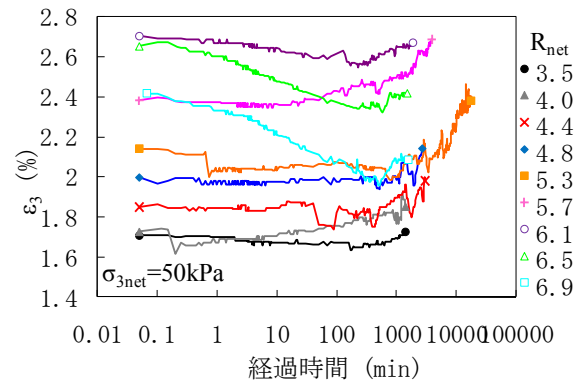
(2) 方法②

方法②の試験結果を図 7(a), (b) および (c) に示す。

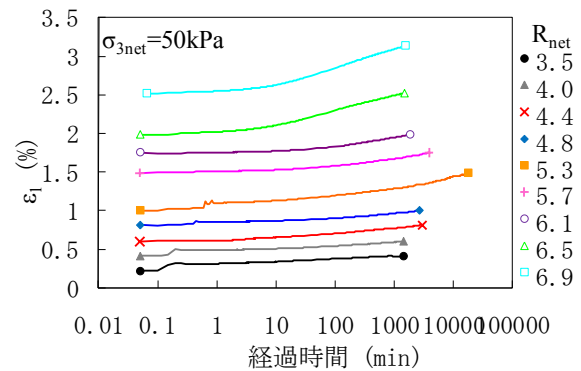
図 7(a) の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ において, 経過時間 0.5 分までに急激に内セルの水面が上昇した。そのため, 内セルから水が溢れない様にするため, 排水コックと間隙空気圧コックを閉じた。これより, 経過時間 0.5~1 分の間は供試体が側方に膨張していない結果となった。経過時間 5~30 分で側方ひずみが 0.1% から 0.7% へ側方に収縮している。これは, 先に述べたが, 経過時間 5 分より前は $\sigma_{3net}=0\text{kPa}$ に, 経過時間 5 分より後は $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に設定したためである。

図 7(b) より, 方法②の場合では, $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階から側方に膨張していることがわかる。

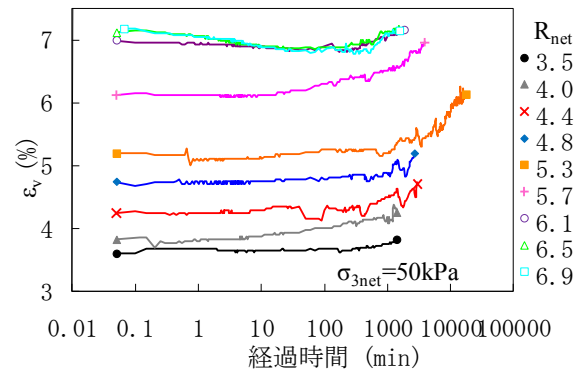
図 7(c) より, $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ と $\sigma_{1net}=151.2\text{kPa}$ の段階は ε_1 が増加している。 $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階は経過時間約 5 分の時点で ε_1 が増加しているが, ほとんど変化がないことがわかる。これは, 不飽和化終了時に比べて σ_{1net} が 50kPa 小さくなったことによる供試体の膨張が, 正味の側方拘束圧を



(a) 側方ひずみ ε_3



(b) 軸方向ひずみ ε_1



(c) 体積ひずみ ε_v

図 6 せん断時のひずみの挙動 (方法①)

約 0kPa にしたことで応力比の増加による供試体軸方向の収縮によって相殺されたと考えられる。経過時間約 5 分の時点で ε_1 が増加しているのは, σ_{3net} を 0kPa から 3kPa に設定した影響であると考えられる。

図 7(c) より, $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階は ε_1 がほとんど変化していなかったため, ε_3 と同様の挙動となった。 $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ と $\sigma_{1net}=151.2\text{kPa}$ の段階は ε_v の挙動がほとんど同じ変動傾向を示している。

図 6(a) と図 7(a) より, 応力制御方式によるせ

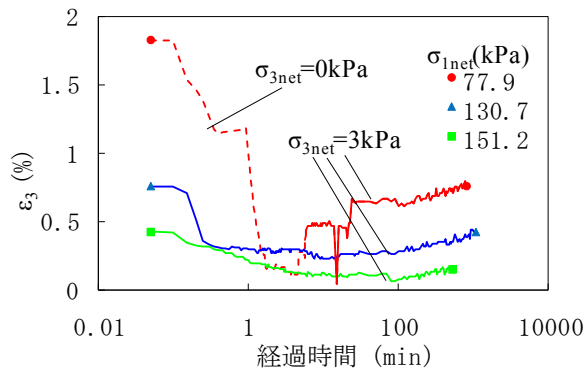
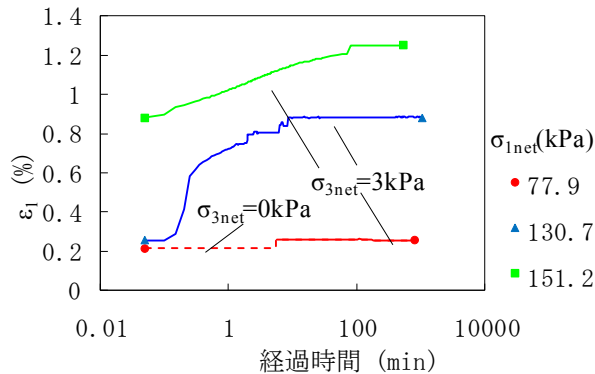
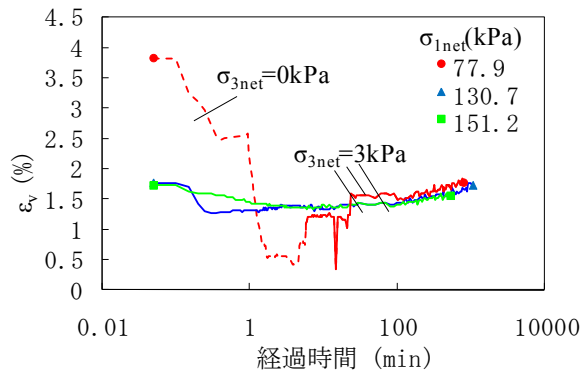
(a) 側方ひずみ ε_3 (b) 軸方向ひずみ ε_1 (c) 体積ひずみ ε_v

図7 せん断時のひずみの挙動 (方法②)

せん断の方法①の $R_{net}=3.5$ の試験開始時点の ε_3 (約 1.7) と方法②の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の試験開始時点の ε_3 (約 1.8) は同じような値となっている。 ε_1 と ε_v についても同様のことが言える。 ε_1 については方法①, 方法②ともに約 0.2, ε_v については方法①が約 3.6, 方法②が約 3.7 である。

方法①では, $R_{net}=6.9$ ($\sigma_{1net}=346\text{kPa}$) の段階までに, ε_3 は 0 にならなかった。方法②では $\sigma_{1net}=151\text{kPa}$ の段階の経過時間約 100 分で $\varepsilon_3=0.1$

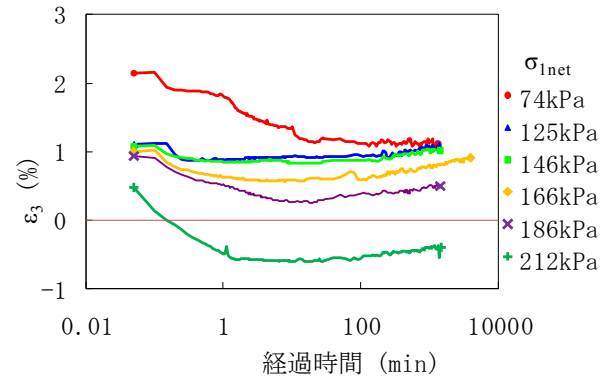
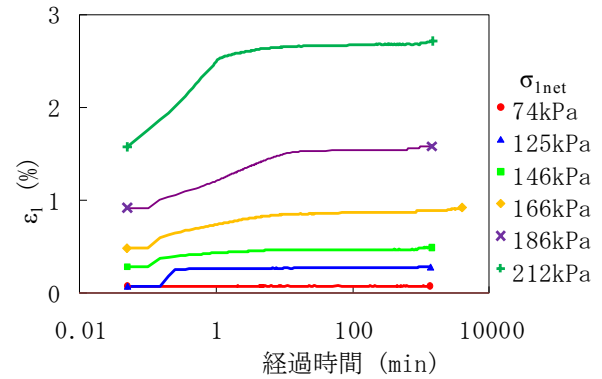
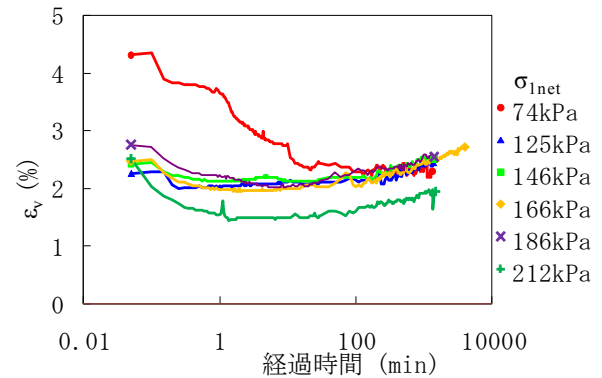
(a) 側方ひずみ ε_3 (b) 軸方向ひずみ ε_1 (c) 体積ひずみ ε_v

図8 せん断時のひずみの挙動 (方法③)

となり, 方法①とは違い ε_3 が 0 に近い値となった。これから, 側方ひずみの挙動と側方拘束圧や応力比の間に関連性があるのではないかと考える。

(3) 方法③

方法③の結果を図 8(a), (b)および(c)に示す。

図 8(a)より, $\sigma_{1net}=212\text{kPa}$ の約 0.1 分で ε_3 が 0 となり, その後, マイナスの値となった。このことから, 軸方向の荷重を増加させることで供試体は側方に膨張し, 不飽和化時で側方に収縮した変

位よりも膨張させることができると分かった。

図 7(b)の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ と図 8(b)の $\sigma_{1net}=74\text{kPa}$ では、どちらも ε_1 はほとんど変化していない。これは、せん断開始直前が $\sigma_{1net}=125\text{kPa}$ 、 $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ である状態をせん断開始時に σ_{1net} を約 75kPa に、 $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に除荷したため、 σ_{1net} と σ_{3net} の応力の比によって軸方向に圧縮する変化量と σ_{1net} が減少したことによる軸方向への膨張する変化量が等しいことため、ほとんど変化しなかったと考えられる。

図 7(c)と図 8(c)のどちらも $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に除荷した最初の段階では体積が膨張している。これは、正味の側方拘束圧と正味の軸方向応力が減少したことで、供試体全体が膨張したためである。図 7(c)では $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ から、図 8(c)では $\sigma_{1net}=125\text{kPa}$ から体積の変化がほとんどない状態となった。

5. 結論

本研究で得られた主な結果を列挙する。

- (1) 異方応力状態で供試体を不飽和化すると、供試体は側方に収縮する。
- (2) 異方応力状態で供試体を不飽和化した後に軸方向応力を増加させていくと、ある応力状態を境に供試体が側方に膨張する。
- (3) $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ において、軸方向の荷重を増加させることにより、不飽和化時で側方に収縮した量よりも大きな膨張量が生じる。

これより、異方応力状態で供試体を不飽和化した後に軸方向応力を増加させることで、異方応力状態で供試体を不飽和化した時に生じた供試体側方の収縮を打ち消すことができると考えられる。よって、一次元圧縮試験においても、不飽和化時に供試体が側方に収縮し、供試体と圧密容器の間に隙間が生じたとしても、 $\sigma_{3net}=0\text{kPa}$ であるため、供試体に荷重をかけることで供試体と圧密容器の間の隙間がなくなると考えられる。

今回の実験ではシルト試料を対象とした。今後、粘性土でも同じような現象が起こるかどうか検討する予定である。

参考文献

- [1] 秋原真人：不飽和土の一次元圧縮試験における側方収縮に関する検討，鳥取大学工学部土木工学科卒業論文，2009。
- [2] 清水正喜，寺方淳治，景山健：不飽和土のせん断強度特性に対する空隙比および圧密履歴の影響，第 44 回地盤工学研究発表会，No.317，2009。
- [3] 清水正喜，景山健：予圧密不飽和土の一軸圧縮強度特性，鳥取大学工学部研究報告，第 39 号，pp.59-63，2009。

(受理 平成 22 年 10 月 29 日)