

1. 序論

不飽和土の一次元圧縮試験において、供試体にサクシオンを作用させて不飽和化すると、荷重を載荷していても、側方に収縮する可能性がある。著者らは側方収縮量をノギスと写真によって測定し、サクシオン作用後に荷重を載荷していくと供試体周辺部の隙間が小さくなっていくという結果を得た。しかし、ノギス法や写真法では精度に限界があり、隙間を定量的に評価することが難しいことがわかった。そこで、本研究では三軸圧縮試験によって軸方向変位と体積変化を測定することによって側方の変位（ひずみ）を算定することを試みた。

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オンを作用させて不飽和化したときの側方収縮量を定量的に評価することである。そのために三軸圧縮試験においても、飽和状態で K_0 異方圧密した後に、サクシオンを作用させて不飽和化した。

本論文における記号について、セル圧は σ_3 、間隙水圧は u_w 、間隙空気圧は u_a 、軸差応力は q である。

2. 試料

試料として DL クレーを用いた。DL クレーは透水性がよいため、供試体からの排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。試料の自然含水比は 0.3% である。

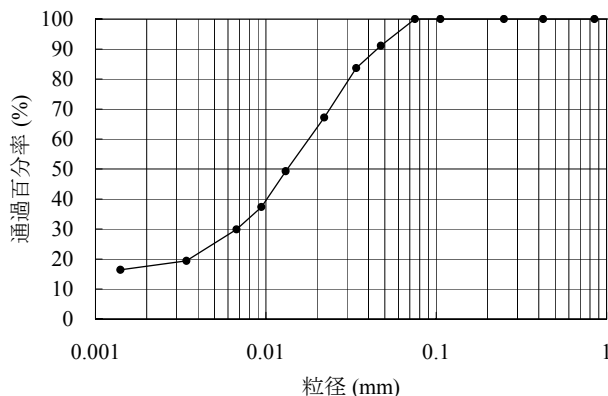


図 1 粒径加積曲線

表 1 試料の物理的性質

試料名	DL クレー
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.703
液性限界 w_l (%)	32.8 注
塑性限界 w_p (%)	17.0 注
塑性指数 I_p	15.8 注
シルト分 (%)	75
粘土分 (%)	25

注：液性限界，塑性限界，塑性指数については寺方¹⁾より値を引用。

3. 試験装置

試験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概略図を示す。

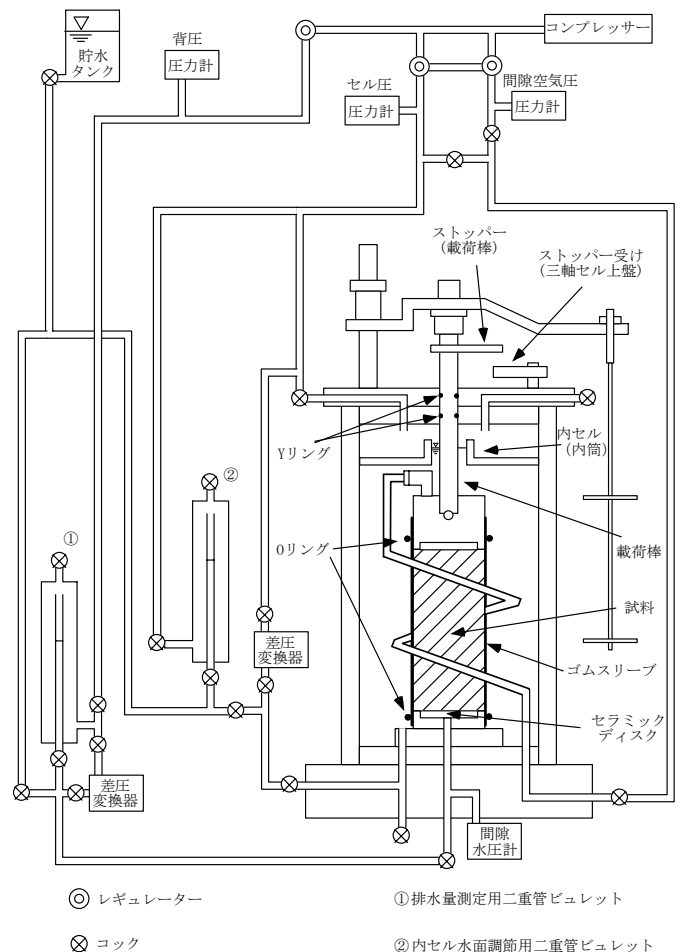


図 2 不飽和土用三軸圧縮試験装置

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．

4. 試験方法

4.1 供試体作成

供試体は三軸セルに設置したモールド内でスラリー状の試料を予圧密した後（最大圧密応力 49.2kPa），不飽和化して作製した．DL クレーは飽和状態では乱れやすく，自立しないので，サクシヨン 50kPa を作用させて，不飽和化させることで自立できる乱れの少ない供試体を作製した．

4.2 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，供試体に給水して飽和化した．その後，有効拘束圧 σ_3' ($=\sigma_3 - u_w$) = 50(kPa) で等方圧密した．等方圧密後，軸方向有効応力 σ_1' を増加させて，有効応力比 R' ($=1/K_0=\sigma_3'/\sigma_1'$) で異方圧密した．ここで K_0 は Jaky の式 ($K_0=1-\sin\phi'$) に基づいて設定した． ϕ' は過去の研究²⁾を参考にして 36° と設定した．次に，サクシヨン s ($=u_a - u_w$) を 70(kPa) まで作用させて不飽和化した．不飽和化が終了した後，応力制御方式によるせん断を行った．不飽和化終了時の応力比 R_{net} ($=\sigma_{1net}/\sigma_{3net}$) は 2.5，正味の軸方向応力 σ_{1net} ($=\sigma_1 - u_a = \sigma_3 + q - u_a$) は 125kPa である．

せん断は方法①と方法②の二通りの方法で行った．方法①正味の側方拘束圧 σ_{3net} ($=\sigma_3 - u_a$) を 50kPa に保ち，正味の軸方向応力を増加させた．方法②まず $\sigma_{3net}=0$ (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， $\sigma_{3net}=3$ (kPa)にして，ゴムスリーブと供試体を密着させた．その後， $\sigma_{3net}=3$ (kPa)の状態に保ち， σ_{1net} を増加させた．

5. 実験結果

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．

5.1 異方応力状態における不飽和化(サクシヨン増加段階)

図 3 は方法①のサクシヨン増加段階であり，図 4 は方法②のサクシヨン増加段階である．このグラフから，異方応力状態で不飽和化をすると側方に収縮することがわかる．

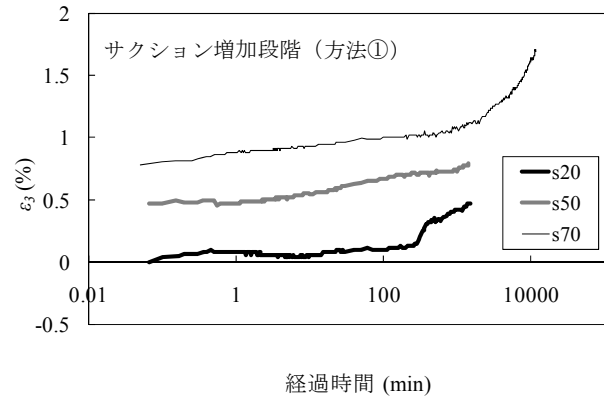


図 3 サクシヨン増加段階（方法①）

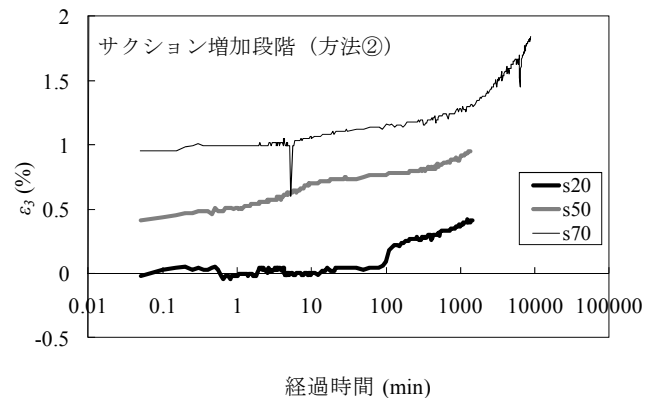


図 4 サクシヨン増加段階（方法②）

5.2 応力制御方式によるせん断過程

図 5，図 6，図 7 は，それぞれ方法①におけるせん断過程の各段階の ε_3 ， ε_1 ， ε_v と時間の関係を示したものである．せん断応力レベルは応力比 R_{net} で表した．

図 5 より， $\sigma_{3net}=50$ (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 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(min)以降は、 R_{net} が 6.1 より小さい応力比に比べて、 ε_I の増加量が大きいことがわかる。

図 7 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。

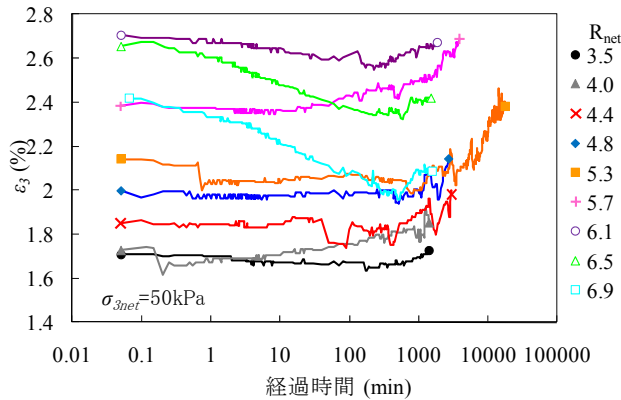


図 5 応力制御方式によるせん断（方法①） ε_3

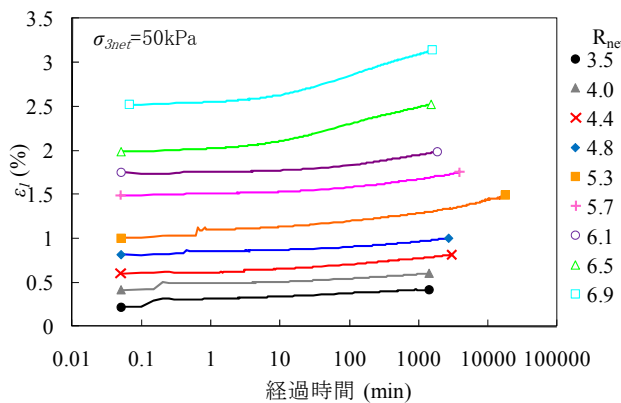


図 6 応力制御方式によるせん断（方法①） ε_I

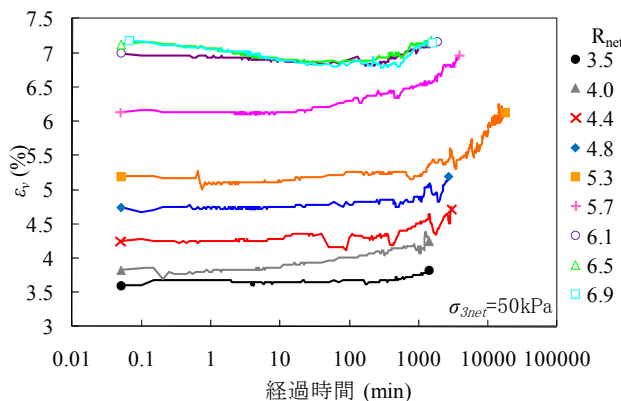


図 7 応力制御方式によるせん断（方法①） ε_v

図 8, 図 9, 図 20 は、それぞれ方法②におけるせん断過程の各段階の ε_3 , ε_I , ε_v と時間の関係を示したものである。

図 8 の $\sigma_{Inet}=77.9(\text{kPa})$ において、経過時間 0.5(min)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(min)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(min)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(min)より前は $\sigma_{3net}=0(\text{kPa})$ に、経過時間 5(min)より後は $\sigma_{3net}=3(\text{kPa})$ に設定したためである。

図 8 より、方法②の場合では、 $\sigma_{Inet}=77.9(\text{kPa})$ の段階から側方に膨張していることがわかる。

図 9 より、 $\sigma_{Inet}=130.7(\text{kPa})$ と $\sigma_{Inet}=151.2(\text{kPa})$ の段階は ε_I が増加している。 $\sigma_{Inet}=77.9(\text{kPa})$ の段階は経過時間約 5(min)の時点で ε_I 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_{Inet} 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約 0kPa にしたことによって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(min)の時点で ε_I が増加しているのは、 σ_{3net} を 0(kPa)から 3(kPa) に設定した影響であると考えられる。

図 20 より、 $\sigma_{Inet}=77.9(\text{kPa})$ の段階は ε_I 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。 $\sigma_{Inet}=130.7(\text{kPa})$ と $\sigma_{Inet}=151.2(\text{kPa})$ 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。

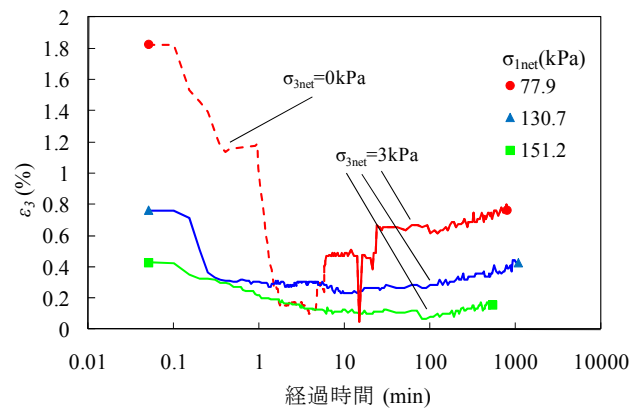


図 8 応力制御方式によるせん断（方法②） ε_3

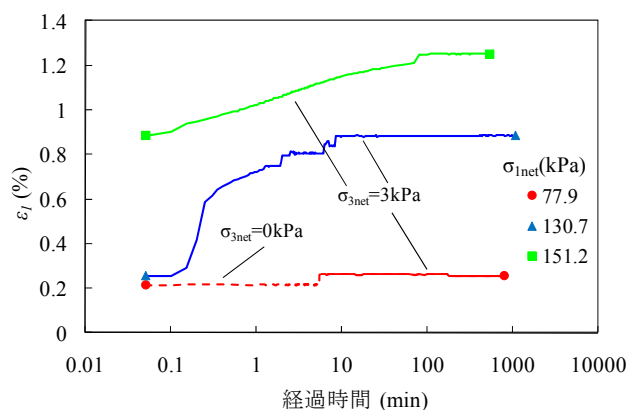


図9 応力制御方式によるせん断（方法②） ε_l

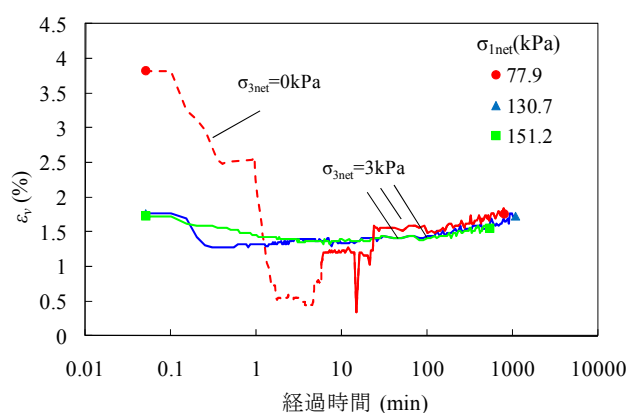


図20 応力制御方式によるせん断（方法②） ε_v

図5と図8より，応力制御方式によるせん断の方法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_l と ε_v についても同様のことが言える． ε_l 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 $\sigma_{1net}=151.2(\text{kPa})$ の段階の経過時間約100分で $\varepsilon_3=0.1$ 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．

6. 結論

今回の実験から，

- (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．

の2つの結果が得られた．

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，一次元圧縮試験装置においても，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，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をなくすことができると考えられる．

ただし，今回の実験方法では応力制御方式によるせん断において，不飽和化時の側方への収縮量を0にするような正味の軸方向応力を求めることができなかった．今後，不飽和化時の側方への収縮量を0にするような正味の軸方向応力を求める必要がある．

参考文献

- 1) 寺方淳治：不飽和土の三軸せん断強度特定に関する基礎的研究，鳥取大学大学院工学研究科土木工学専攻，修士論文，2009
- 2) 景山健：予圧密不飽和土の一軸圧縮強度特性，鳥取大学工学部土木工学科，卒業論文，2008