

鳥取大学大学院 正会員 清水 正喜
 鳥取大学大学院 学生会員 ○下垣 克夫
 鳥取大学 非会員 来海 康弘

1. 序論

粘性土の一次元圧密試験（側方拘束試験）において、飽和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。供試体が側方に収縮すると一次元という条件が満たされなくなる。

これまでに、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り、異方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化したときの側方収縮量を定量的に評価した¹⁾。不飽和化の方法によって Bishop の有効応力に基づく応力比が減少することがわかった。

本研究の目的は不飽和化時の応力比を正味の垂直応力 (σ_{net}) に基づく応力比と Bishop の有効応力に基づく応力比で制御した場合における変形挙動の違いを検証すること、さらに、不飽和化後、軸方向応力を増加させて、不飽和化により生じた収縮量を超える膨張量が生じる時の応力比を求めることである。

飽和状態で、等方圧密後に異方圧密した供試体を、異方応力状態で不飽和化し、次に応力制御によるせん断を行った。

一次元圧密試験において供試体が収縮すると正味の側方応力が 0 になることを考慮して、不飽和化後のせん断時に、正味の側方応力を極力低く設定した。

2. 試料および試験装置

(1) 試料

試料として DL クレーを用いた。図 1 に粒径加積曲線、表 1 に試料の物理的性質を示す。

(2) 装置

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

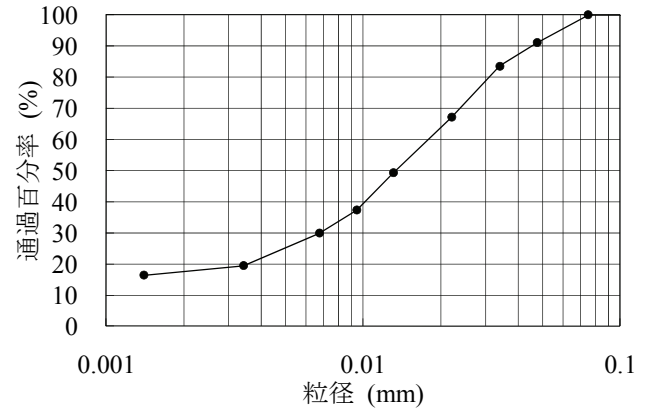


図 1 粒径加積曲線

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：清水・寺方²⁾より値を引用。

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. 試験方法

(1) 供試体作成方法

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）、サクシオン 50kPa を作用させることで不飽和化を行い作製した。DL クレーは飽和状態では乱れやすいので、不飽和化させることで乱れの少ない自立でき

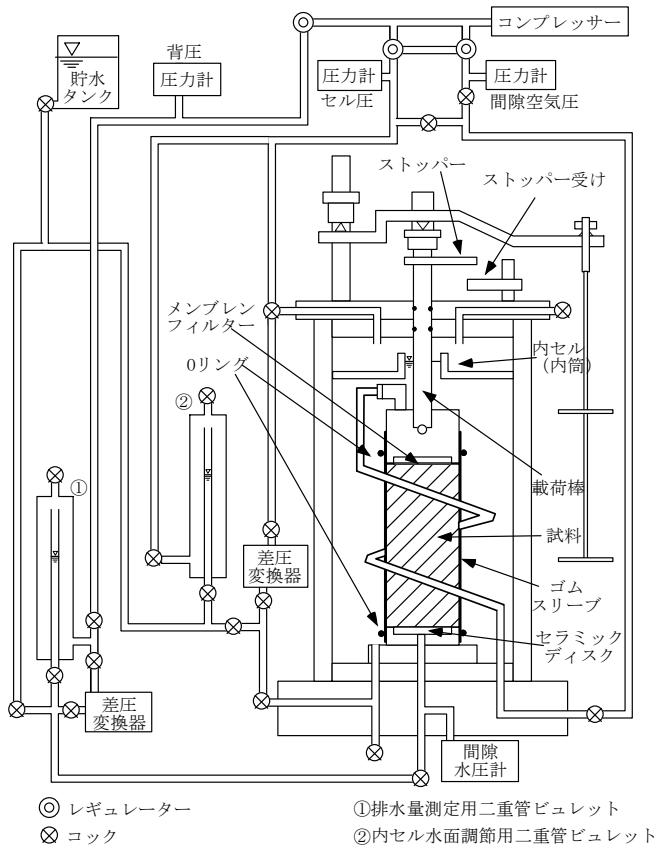


図2 不飽和土用三軸圧縮試験装置

る供試体を作製した。

(2) 三軸圧縮試験

作成した供試体は不飽和状態である。飽和状態で異方圧密を行うために、供試体に通水して飽和化した。有効応力 50kPa で等方圧密した後、 $\sigma_r'=50\text{kPa}$ 、 $\sigma_a'=R'\sigma_r'$ で異方圧密した。近似的に K_0 状態にするために $R'=1/K_0$ とした。 K_0 は Jaky の式 ($K_0=1-\sin\phi'$) と過去の研究²⁾ ($\phi'=36^\circ$) を参考にして設定した。

次に、サクシヨン $s (=u_a-u_w)$ を 70kPa まで段階的に作用させて不飽和化した。不飽和化は、応力比をどのように設定するかによって2通りの方法(方法1と2)で行った。

方法1 (試験 1a, 試験 1b)

不飽和化時に、 σ_{net} で定義した応力比 R_{net} (式(1)) が飽和状態での異方圧密時の応力比 R' に等しくなるようにした。即ち、飽和異方圧密時に作用させた間隙水圧に等しい間隙空気圧 u_a を供試体上端から作用させた状態で間隙水圧 u_w を段階的に減少させた。

$$R_{\text{net}} = \frac{\sigma_{\text{anet}}}{\sigma_{\text{met}}} \quad (1)$$

ここに

$$\sigma_{\text{anet}} = \sigma_a - u_a = \sigma_r + q - u_a \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{met}} = \sigma_r - u_a \quad \sigma_{\text{met}} = \sigma_r u_a \quad (3)$$

この方法では、不飽和化時に Bishop の有効応力で定義した応力比 R_B (式(4)) が減少する。

方法2 (試験 2) R_B が減少しないように軸差応力 q を調整した。 u_a と u_w は方法1と同じである。具体的には、サクシヨン作用後10分後に $R_B=R'$ となるように軸差応力 q を増やした。

$$R_B = \frac{\sigma_{aB}}{\sigma_{rB}} \quad (4)$$

$$\sigma_{aB} = \sigma_r + q - u_a + S_r(u_a - u_w) \quad (5)$$

$$\sigma_{rB} = \sigma_r - u_a + S_r(u_a - u_w) \quad (6)$$

不飽和化が終了した後、応力制御でせん断した。最初に、 σ_a 、 σ_r および s を変えないで、 u_a と u_w を制御して σ_{net} を 3kPa に減少させた。 σ_{net} の減少により R_{net} と R_B はともに増加するが、 R_{net} の方が大きく増加する。

次に、 $\sigma_{\text{net}}=3\text{kPa}$ に保ち、軸差応力を段階的に増加させた。

研究の当初(試験 1a)では、最初の段階で σ_{net} を一旦 0kPa にしたがゴム膜が供試体に密着しない恐れがあったので、せん断開始から5分後に 3kPa に設定した。それ以降の試験ではせん断開始時から 3kPa を作用させた。

4. 試験結果

側方ひずみ (ϵ_r) は各試験における飽和状態での異方圧密終了時の供試体の直径を基準として計算を行っている。

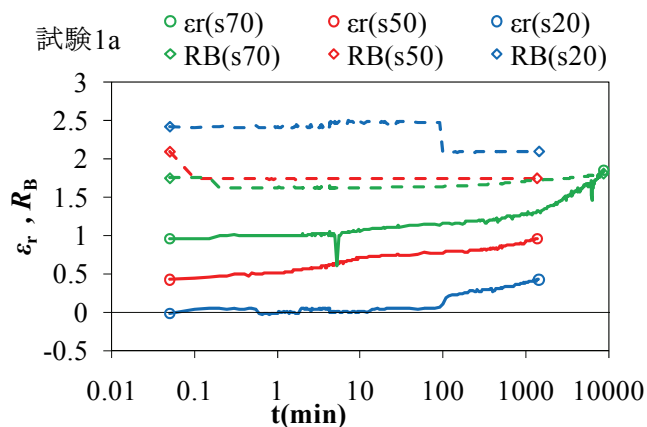
(1) 不飽和化時の側方ひずみの挙動

図3(a), (b)および(c)に各試験の不飽和化段階における ϵ_r と有効応力比 (R_B) の時間変化を示す。

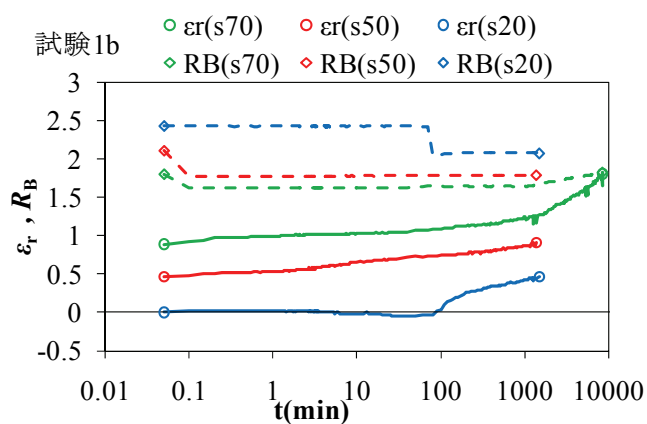
試験 1a および 1b

不飽和化終了までの試験条件が一緒であるので、両試験で似た結果となった。

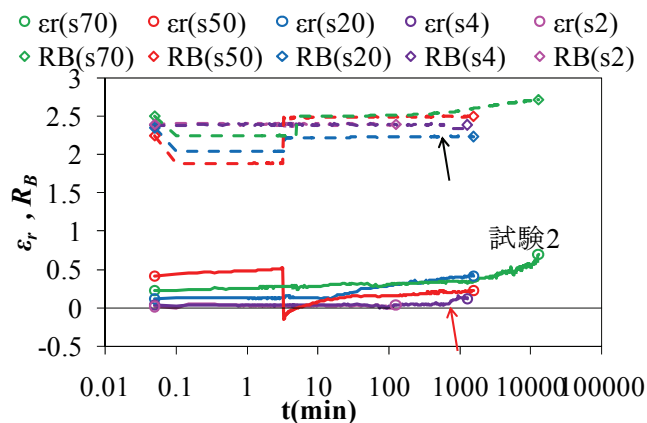
最初の段階 ($s=20\text{kPa}$) で、経過時間100分までは間隙空気圧経路内に水が存在しており、供試体の不飽和化が始まっていなかった(その間 $s=0\text{kPa}$ として R_B を計算した)。その後不飽和化が進行すると、側



(a) 試験 1a



(b) 試験 1b



(c) 試験 2

図 3 不飽和化時における側方ひずみ (ε_r) と有効応力比 R_B の時間的变化

方ひずみが増加し始め、供試体の収縮が始まった。

サクシヨンの増加に伴い ε_r が増加(側方収縮)し、 $s=70\text{kPa}$ で 1.8%に達している。

また、先に指摘したように、これらの試験では RB

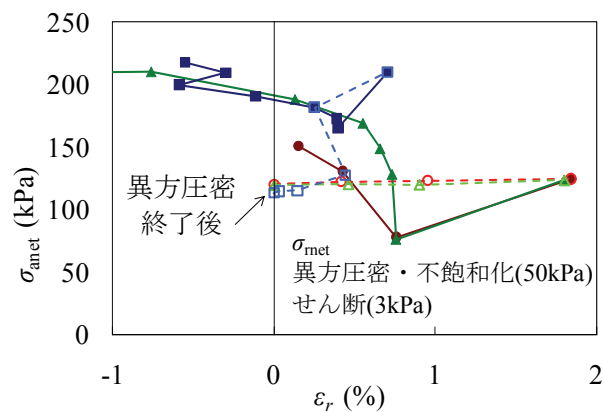


図 4 $\sigma_{\text{anet}}-\varepsilon_r$

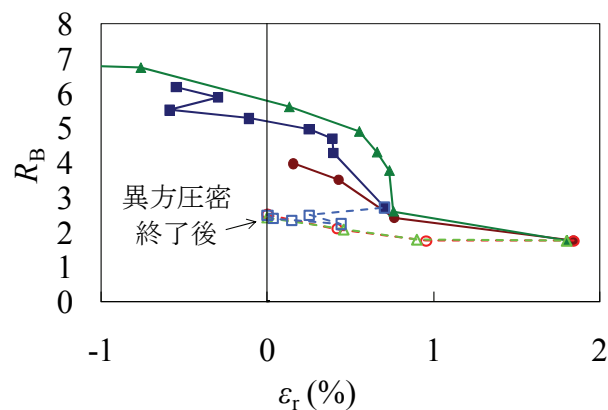


図 5 $R_B-\varepsilon_r$

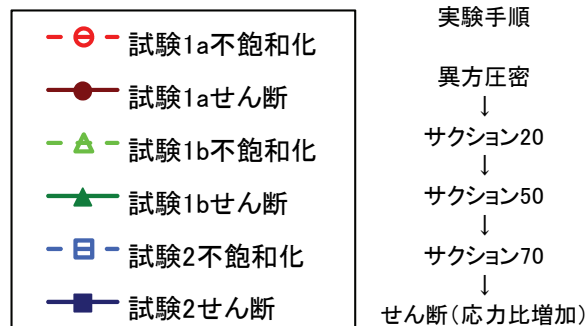


図 6 (図 4 と図 5 の) 凡例

が減少していることがわかる。

試験 2

試験 2 においても、 $s=4\text{kPa}$ の段階の約 300min までは間隙空気圧経路内に水が存在していた。それ以降、図中に矢印で示したように、 ε_r が増加、即ち側方に収縮し始めている。

$s=50\text{kPa}$ の段階において、約 10min で ε_r が減少し、側方に膨張した。この段階の約 10min で軸差応力を増加したことで、せん断変形が生じたと考えられる。

この試験では $s=70\text{kPa}$ の段階においても、 ε_r は

0.5%程度であり、先の試験 1a と 1b に比べて、小さい。これは、軸差応力を増加したことで、せん断に伴う側方膨張傾向が強まったためであると考えられる。

(2) せん断時の側方ひずみの挙動

異方圧密終了後の不飽和化およびせん断過程の各段階終了時における、 ε_r と σ_{anet} の関係を図 4 に、 ε_r と R_B の関係図 7 にそれぞれ示した。図 6 に両図の凡例を示す。なお、 σ_{anet} は不飽和化時 50kPa、せん断時 3kPa である。 s はせん断時 70kPa である。

図 4 より、試験 1b と試験 2 では、 $\varepsilon_r=0$ となる σ_{anet} は約 200kPa であること、また、図 5 より、 $\varepsilon_r=0$ となる R_B は約 5.5 であることがわかる。不飽和化時の応力比の制御方法の違いが影響していないといえる。

なお、試験 1a では、軸差応力載荷用の荷重を載せるスペースがなくなってしまったので、側方ひずみが負になるまで軸差応力を増加できなかった。

5. 結論

- (1) 異方応力状態であっても、不飽和化によって側方に圧縮した。側方圧縮量は不飽和化時にせん断応力を加えた試験（試験 2）において、小さくなった。
- (2) 異方圧密した供試体を不飽和化して側方に収縮させた後、軸方向応力を増加させながらせん断していくと、不飽和化により生じた側方の収縮以上に膨張する
- (3) 今回の試験条件において、不飽和化により生じた側方のひずみがせん断によって 0 となる応力状態は、 σ_{anet} では約 200kPa、 R_B では約 5.5 となった。
- (4) 不飽和化時にせん断応力を作用しても、せん断時に側方のひずみが 0 に戻る時の σ_{anet} および Bishop の有効応力に基づく応力比の値に大きな違いは見られなかった

以上のことより、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の側方収縮は、不飽和化後に軸方向応力を増加させることで元に戻すことができる。よって、側方拘束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、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ることが可能である。

参考文献

- 1) 清水正喜, 下垣克夫, 来海康宏: 不飽和度の三軸異方試験における乾燥とせん断に伴う側方変形挙動, 鳥取大学工学部研究報告, 第 41 号, pp71-76, 2010
- 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間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