

三軸試験による粘性土の K_0 圧密特性に関する研究—不飽和化時の挙動—

K_0 Consolidated Characteristics of Unsaturated Soil in Traxial Test

落合祐介 Yusuke OCHIAI (鳥取大学大学院工学研究科)
中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学大学院工学研究科)

不飽和土の静止土圧係数 K_0 は、不飽和地盤の応力状態を推定する上で重要である。そのため、本研究では三軸試験を用いて、不飽和土の K_0 圧密特性に関する検討を2つ行った。1つは供試体を不飽和化した後 K_0 圧密を行い、 K_0 圧密過程における不飽和粘性土の K_0 値の挙動について調べた。その結果、Bishop の有効応力と飽和土の有効応力で整理した K_0 値が同じ挙動を示した。もう1つは K_0 圧密された飽和供試体に対し、定体積状態となるよう制御を行いつつサクシオンを作用させ、不飽和化時の K_0 値の挙動について調べた。その結果、サクシオンを増加させるに従って、基底応力で整理した K_0 値は0に近づき、Bishop の有効応力で整理した K_0 値はある程度一定の値に落ち着いていた。

キーワード : K_0 圧密, 不飽和土, サクシオン, 三軸試験 (IGC : D05, D06)

1. はじめに

清水らは不飽和土の一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、その後圧縮荷重を変化させていく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。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、側方にも収縮する可能性があり、一次元という条件を満たしていない可能性が考えられた。そのため、清水らは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試験によって明らかにすることを試みた²⁾。また、側方ひずみを制御して圧密を行う、いわゆる K_0 圧密を不飽和粘性土で行い、不飽和粘性土の力学的性質などの検討を行っている。

このような研究背景の下で、本研究では不飽和地盤の応力状態を推定する上で重要である、不飽和土の静止土圧係数 K_0 に着目し、不飽和土の K_0 圧密特性を調べるため、三軸試験によって2つの実験を行い検討した。1つは供試体を不飽和化した後 K_0 圧密を行い、 K_0 圧密過程における不飽和粘性土の K_0 値の挙動について調べた。もう1つは、 K_0 圧密された飽和供試体に対し、定体積状態となるように制御を行いつつ、サクシオンを作用させ、不飽和化時の K_0 値の挙動について調べた。定体積状態とする理由は、間隙比を一定とした状態で不飽和化を行ったとき、 K_0 値がどのような挙動を示すのかを調べるためである。

2. 試料

表-1 は試料の物理的性質、図-1 は粒径過積曲線を示している。試料は、DL クレーと $75\mu\text{m}$ ふるい通過分の藤森粘土の混合試料を用いた。混合試料を用いた理由は、DL クレーは透水性が良いため、不飽和化に要する時間を短縮できるが、DL クレーのみでは自立する飽和供試体の作製が困難なためである。炉乾燥した各試料を DL クレー40%、藤森粘土 60%の割合で混合した。

表-1 試料の物理的性質

試料名称	DL クレー	混合試料 DL クレー40% 藤森粘土 60%	藤森粘土
$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.702	2.676	2.668
$w_L(\%)$	NP	41.5	53.0
$w_p(\%)$	NP	28.6	32.0
I_p	NP	12.9	21.0
シルト分(%)	81.0	69.5	65.5
粘土分(%)	19.0	30.5	34.5

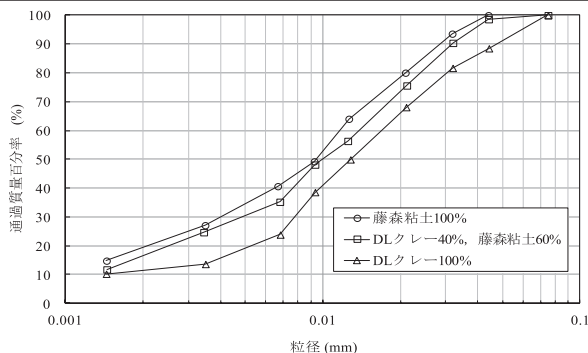


図-1 粒径過積曲線

3. 実験装置・実験方法・応力パラメータの整理方法

3.1 実験装置

本研究で使用した実験装置は不飽和土用三軸圧縮実験装置である。図-2 は実験装置の概略図であり、供試体不飽和化時の状態を表している。

供試体底面のペダスタル上盤には、ドーナツ状のセラミックディスクと円盤状のポーラスストーンが接着剤で固定されている。供試体の上面と下面にはそれぞれ特性が異なるフィルターを敷いており、供試体上面には、供試体の乾燥を防ぐためガラス繊維質のメンブレンフィルターを敷き、供試体下面には、細粒分が流出しない程度の目をもった定性ろ紙を敷いている。セラミックディスクは Air Entry Value (空気侵入値) が 300kPa のものを使用した。

セル圧、間隙空気圧、背圧は空気圧として各レギュレーターにより制御し、各圧力計により計測した。セル圧は三軸セル内に、間隙空気圧はキャップを介して供試体上面から空気圧として作用させ、背圧は二重管ビュレットを介して水圧として供試体に作用させた。

供試体の体積変化量は二重セル方式により、排水量は二重管ビュレットにより、それぞれの水面変動を差圧計により測定した。体積変化量の分解能は $0.028\text{cm}^3/\mu\text{e}$ 、排水量の分解能は $0.011\text{cm}^3/\mu\text{e}$ である。軸変位は軸変位計により計測し、分解能は $0.002\text{mm}/\mu\text{e}$ である。これらの測定計の精度について、供試体初期体積を高さ=7cm, 直径=3.5cm としたとき、体積変化量(内セル)は $\pm 0.042\%$ 、排水量は $\pm 0.018\%$ 、軸変位量は $\pm 0.019\%$ の精度で測定できる。これらの測定精度について、地盤工学会基準 (JGS0525-2009) に示されている基準³⁾より、体積変化量および排水量を $\pm 0.05\%$ 、軸変位量を $\pm 0.02\%$ の許容差で測定できるということを満足している。

3.2 実験の流れ

図-3 に不飽和土の K_0 圧密実験と定体積状態での不飽和化実験について、各実験の流れを図-3 に示す。

まず不飽和土の K_0 圧密実験の流れを説明する。図-3(1)の供試体作製では、スラリー状にした試料を錘で予圧密を行い、自立した供試体を作製するため不飽和化を行った後、ゴムスリーブを供試体に装着し、三軸セルを組み立てた。図-3(2)の等方圧密過程では、有効拘束圧 50kPa で等方圧密を行った。図-3(3)のサクシオン作用過程では、供試体にサクシオンを作用させ不飽和化した。図-3(4)の K_0 圧密過程では、不飽和土の K_0 圧密を行った。

次に定体積状態での不飽和化実験の流れを説明する。図

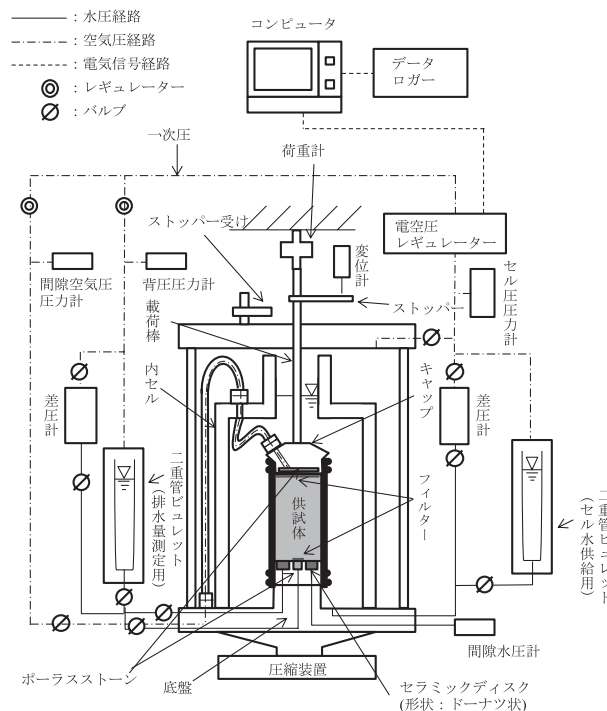


図-2 実験装置概略図

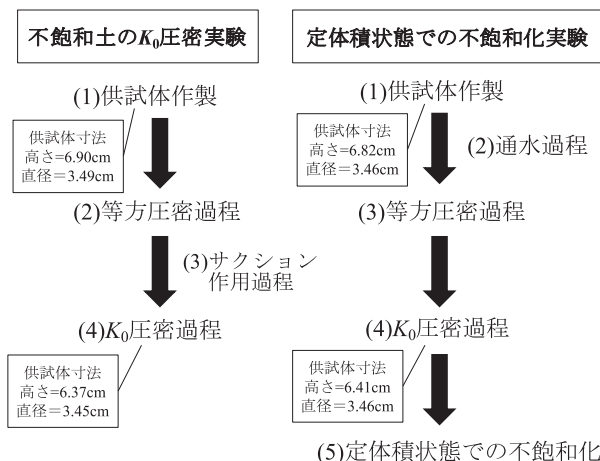


図-3 各実験ケースのフロー図

-3 (1)の供試体作製は不飽和土の K_0 圧密実験と同じである。図-3(2)の通水過程では、供試体を飽和化した。図-3(3)の等方圧密過程では、有効拘束圧 50kPa で等方圧密を行った。図-3(4)の K_0 圧密過程では、飽和土の K_0 圧密を行った。図-3(5)の定体積状態での不飽和化では、 K_0 圧密後の供試体を、軸変位を固定して定体積状態でサクシオンを作用させて不飽和化を行った。

各実験ケースの供試体の寸法は、供試体作製後と K_0 圧密過程後において図-3 に示すようになった。なお、具体的な実験方法については以下の 3.3 と 3.4 で説明する。

3.3 不飽和土の K_0 圧密実験

(1) 供試体作製

含水比 60%となるように脱気水を加えスラリー状にした混合試料を、三軸セル内に組み立てた圧密モールドに流し込んだ。その後、錘により上面排水・底面非排水条件で $10.4\text{kPa} \rightarrow 16.3\text{kPa} \rightarrow 49.4\text{kPa}$ と段階的に供試体を圧密した。圧密後、自立した供試体を作製するためサクシオン 50kPa で不飽和化を行った。不飽和化は、三軸セル上部からセル圧 50kPa を作用させ、供試体上面を排気条件、供試体底面を排水条件とすることにより、サクシオン 50kPa で不飽和化した。不飽和化後、モールドと三軸セルを解体して自立した供試体の高さや直径を計測し、ゴムスリーブを装着した後、再び三軸セルを組み立てた。

(2) 等方圧密過程

供試体底面を排水条件、供試体上面は間隙空気圧経路のため非排水条件とし、セル圧 200kPa 、供試体底面より間隙水圧 150kPa を作用させ、有効拘束圧 50kPa で等方圧密を行った。有効拘束圧を 50kPa にした理由は、不飽和化した実地盤を考えたときに深度が 5m より浅い位置の土圧を想定しているためである。

(3) サクシオン作用過程

はじめに供試体底面を排水条件とし、供試体上面からキャップを介して間隙空気圧を供試体底面の間隙水圧と同じ 150kPa を作用させ、サクシオン($s=u_w-u_a$)を 0kPa とした。次に、間隙空気圧 150kPa を一定とした状態で、供試体底面の間隙水圧を減少させることで任意のサクシオンを作用させた。サクシオンは 20kPa 、 50kPa 、 70kPa 、 90kPa と段階的に作用させた。各サクシオン作用過程終了時の判断は排水量が落ち着いた時とした。具体的には2時間あたりの排水量が、排水量の最小分解能である 0.011cm^3 以内となるところとし、これは K_0 圧密を行うに先立って K_0 圧密中の飽和度がほとんど変化しない値である。

(4) K_0 圧密過程

サクシオンを一定とした、排気・排水条件で K_0 圧密を行った。 K_0 圧密は軸ひずみ速度 $11.14 \times 10^{-3}(\%/min)$ で載荷台を上昇させ供試体を圧縮しつつ、側方ひずみが $\pm 0.05\%$ 以内となるようにセル圧をコンピュータ制御により制御した。軸ひずみ速度の設定は、排水条件で供試体に過剰間隙水圧が生じない一定のひずみ速度となるように、せん断速度を変えた実験により検討して決定した。 K_0 圧密終了の判断は、 K_0 値がある程度一定の値となった所とした。供試体の体積変化量は、二重セル方式による内セルの水面変動により計測した。

3.4 定体積状態での不飽和化実験

(1) 供試体作製

不飽和土の K_0 圧密実験と同じである。

(2) 通水過程

供試体を飽和するためセル圧 13kPa 、背圧 15kPa の圧力差 2kPa で通水を行った。圧力差 2kPa は、ゴムスリーブが通水により膨張しない程度の圧力として設定した。通水経路は、供試体底面から通水させた。通水終了の判断は、通水量が供試体作製時に不飽和化で排水された排水量と、キャップとチューブ内容積を満たす水量の和を上回る時点とした。

(3) 等方圧密過程

不飽和土の K_0 圧密実験と同じであるが、後述の定体積状態での不飽和化過程時のサクシオンを十分に作用させるため、セル圧 250kPa 、背圧 200kPa の有効拘束圧 50kPa で等方圧密を行った。なお、 B 値 $=0.95$ 以上であることを確認し、以後の試験を行った。

(4) K_0 圧密過程

排水条件で K_0 圧密を行った。 K_0 圧密時の側方ひずみの制御方法は不飽和土の K_0 圧密実験と同様であり、軸ひずみ速度 $11.16 \times 10^{-3}(\%/min)$ で供試体を圧縮し、 K_0 値がほぼ一定となったことを確認した後、圧縮を止めた。供試体の体積変化量は、飽和土の K_0 圧密のため排水量により計測した。なお、軸ひずみ速度の設定理由は、不飽和土の K_0 圧密実験と同様である。

(5) 定体積状態での不飽和化

K_0 圧密後の載荷台を固定して軸変位を一定とし、側方の変位は、側方ひずみが $\pm 0.05\%$ 以内となるように K_0 圧密と同様に制御した。 K_0 圧密された飽和供試体にはこの定体積状態でサクシオンを作用させた。なお、サクシオンは不飽和土の K_0 圧密実験のサクシオン作用過程と同様の方法で作用させた。サクシオンは 20kPa 、 50kPa 、 70kPa 、 90kPa 、 110kPa 、 130kPa 、 150kPa と段階的に作用させた。各サクシオン作用過程終了の判断は排水量が落ち着いた時とした。具体的には2時間あたりの排水量が、排水量の最小分解能である 0.011cm^3 以内となるところとしている。

3.5 K_0 圧密時の側方向ひずみ制御

図-4に不飽和土の K_0 圧密実験と定体積状態での不飽和化実験の K_0 圧密時の軸ひずみと側方ひずみ、図-5に軸ひずみと軸差応力、体積変化量の結果を示す。図-4と図-5より、どちらも軸差応力 q が大きくなり供試体が圧縮されても、側方ひずみ ϵ_r が $\pm 0.05\%$ 以内に収まっているため、 K_0 圧密時にセル圧の制御により K_0 状態を維持できていることがわかる。

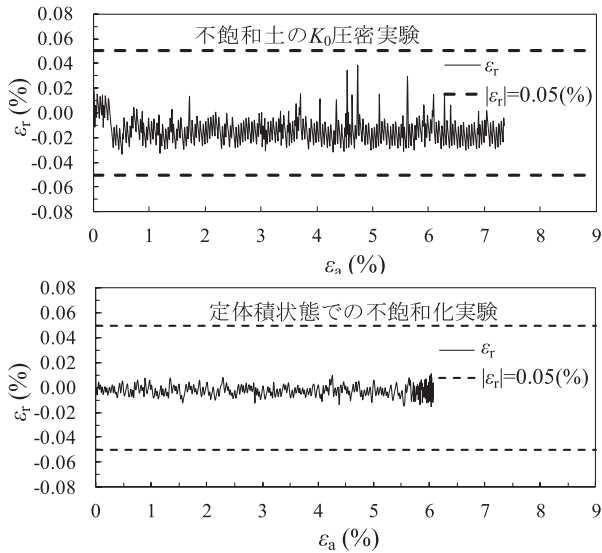


図-4 K₀圧密時の側方ひずみ制御

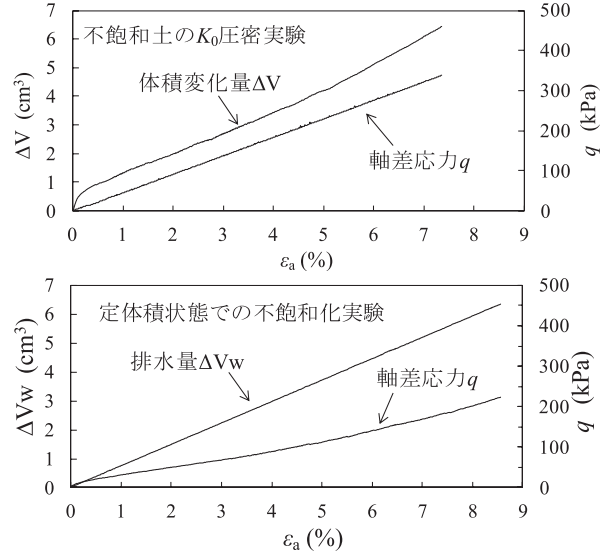


図-5 K₀圧密時の軸差応力と体積変化量

3.6 応力パラメータの整理方法

本研究で用いた結果の整理方法について説明する。本研究では、式 (1) の飽和土の有効応力、式 (2) の基底応力、式 (3) の Bishop の有効応力の 3 つの整理方法を適用している。式 (2) の基底応力は記号に net の添え字、式 (3) の Bishop の有効応力は記号に B の添え字を付けて表記している。以降の説明にはこれらの記号を用いる。本研究で不飽和土の応力を評価するにあたって、基底応力を採用した理由は、地盤工学会の基準でもあるように、不飽和土の応力を評価する際の一般的な方法であるためである。一方、Bishop の有効応力を採用した理由は、Bishop の有効応力式の適用限界の下限が、粘性土ではおよそ飽和度 85~90%程度であり⁴⁾、本実験の試料および実験装置で実験を行うにあたって適していると考えたためである。また、Bishop の有効応力式のパラメータ χ に飽和度の値をそのまま適用して評価しようと考えたためである。このパラメータ χ は理論的には飽和度に対応するものであるが、乾湿の繰返し・粘土鉱物などに関連する実験定数である⁵⁾。しかし、既往の研究のパラメータ χ と飽和度の関係⁴⁾より、本研究ではパラメータ χ を直接飽和度に適用した。

式で用いた応力について、 σ_a は軸方向の全応力、 σ_r は側方の全応力であり、セル圧である。 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧を表す。 χ はサクシヨン $s = u_a - u_w$ が有効応力にどれくらい寄与するかを表すパラメータであり、本研究では χ を飽和度 S_r としている。軸方向応力と側方応力の応力比である K_0 値は、式 (1)、式 (2)、式 (3) を用いてそれぞれ求めた。式 (4) の K_0' は飽和土の有効応力、式 (5) の K_{net0} は基底応力、式 (6) の K_{B0} は Bishop の有効応力によって、軸方向応力と側方応力の応力比 K_0 値をそれぞれ表している。

$$\sigma_r' = \sigma_r - u_w, \quad \sigma_a' = \sigma_a - u_w \quad (1)$$

$$\sigma_{met} = \sigma_r - u_a, \quad \sigma_{anet} = \sigma_a - u_a \quad (2)$$

$$\sigma_{rB} = \sigma_r - u_a + \chi (u_a - u_w), \quad \sigma_{aB} = \sigma_a - u_a + \chi (u_a - u_w) \quad (3)$$

$$K_0' = \frac{\sigma_r'}{\sigma_a'} = \frac{\sigma_r - u_w}{\sigma_a - u_w} \quad (4)$$

$$K_{net0} = \frac{\sigma_{met}}{\sigma_{anet}} = \frac{\sigma_r - u_a}{\sigma_a - u_a} \quad (5)$$

$$K_{B0} = \frac{\sigma_{rB}}{\sigma_{aB}} = \frac{\sigma_r - u_a + \chi (u_a - u_w)}{\sigma_a - u_a + \chi (u_a - u_w)} \quad (6)$$

4. 不飽和土の K_0 圧密実験

4.1 K_0 圧密開始時における間隙比と飽和度

実験ケースは、サクシヨン 90kPa の不飽和土の K_0 圧密実験と、定体積状態での不飽和化実験の 2 ケースである。本節においては、サクシヨン 90kPa の不飽和土の K_0 圧密実験を不飽和土実験、定体積状態での不飽和化実験を、 K_0 圧密過程までは飽和土であるため飽和土実験と呼ぶ。図-6 と図-7 に各実験ケースにおける各実験段階終了時の間隙比と飽和度の結果を示す。ここでは、各実験ケースの K_0 圧密開始時における間隙比と飽和度を比較する。図-6 より、不飽和土実験の間隙比は $e=1.04$ 、飽和度は 92% となった。図-7 より、飽和土実験の間隙比は $e=1.06$ となった。これより、 K_0 圧密開始時の間隙比 e の差は 0.02 となり、この間隙比の差は小さく、 K_0 圧密時の比較にあたって問題ないと判断した。

4.2 K_0 圧密に伴う側方応力と軸方向応力の挙動

図-8 には横軸を軸ひずみ ϵ_a とし、縦軸に基底応力 σ_{met} と σ_{anet} , σ_r' と σ_a' の関係を示した. 図-9 には横軸を軸ひずみ ϵ_a とし、縦軸に Bishop の有効応力 σ_{rB} と σ_{aB} , σ_r' と σ_a' の関係を示した.

図-8 より σ_{met} と σ_{anet} , σ_r' と σ_a' は 50kPa から始まるが、図-9 より σ_{rB} と σ_{aB} は 130kPa から始まっている. これは式 (3) で示したように σ_{rB} と σ_{aB} は、 σ_{met} と σ_{anet} に飽和度とサクシジョンの積を加えているためである.

図-10 に K_0 圧密時の飽和度の挙動を示した. 図-10 より、不飽和土実験の飽和度は K_0 圧密中はほぼ変化していないことがわかる. そのため、式 (3) で示した Bishop の有効応力の飽和度とサクシジョンの積の項は K_0 圧密中はほぼ一定値となる. したがって、 K_0 圧密開始時からの各応力の変化量は基底応力の変化量とほぼ同じである.

図-8 と図-9 より、 K_0 圧密中の各応力挙動を比較した結果、軸方向応力 σ_a は基底応力と Bishop の有効応力のどちらも、飽和土実験より不飽和土実験の方が大きい結果となった. 側方応力 σ_r も同様である. これより、不飽和土実験の供試体は不飽和化による強度増加により、変形し難くなったと考えられる.

4.3 K_0 圧密時の側方応力と軸方向応力の関係

図-11 に基底応力、Bishop の有効応力、飽和土の有効応力それぞれの軸方向応力と側方応力の関係を示す. なお、図中の点線は等方応力線であり、実線の途中にある印は $\epsilon_a=5\%$ 時点である.

はじめに、 K_0 圧密開始時から側方応力が増加し始める軸ひずみを検討する. ここで図-12 は、図-11 の K_0 圧密開始時から軸方向応力 200kPa までを拡大したものである. 図-13 には、各実験ケースの K_0 圧密開始時から $\epsilon_a=1\%$ までの側方応力の挙動を示した. 図-12 に示した印は、図-13 より側方応力が増加し始めた軸ひずみの側方応力と軸方向応力である. なお、図-12 と図-13 は不飽和土実験の Bishop の有効応力の結果を省略している. この理由として、Bishop の有効応力は 4.2 で説明したように、 K_0 圧密開始時の応力の値は基底応力の値と異なるが、 K_0 圧密開始時からの Bishop の有効応力の変化量は基底応力の変化量とほぼ同じであるためである. 図-12 より、側方応力が増加し始めたときの軸方向応力は、不飽和土実験は $\sigma_{anet}=114.7\text{kPa}$ となり、飽和土実験は $\sigma_a'=59.0\text{kPa}$ となった. 図-13 より、側方応力が増加し始めたときの軸ひずみは、不飽和土実験は $\epsilon_a=0.39\%$ 、飽和土実験は $\epsilon_a=0.04\%$ となった. これより、不飽和土実験の方が、側方応力が増加し始めたときの軸ひずみと軸方向応力が大きいことがわかる.

次に、図-11 より軸ひずみ $\epsilon_a=5\%$ 時の飽和土実験と不飽和土実験の各応力を比較する. $\epsilon_a=5\%$ 時点に印をとった理由として、飽和土実験と不飽和土実験では、 K_0 圧密終了時の軸ひずみ ϵ_a が異なっている. そのため、 K_0 圧密終了時付近の同じ軸ひずみ ϵ_a 時点での、飽和土実験と不飽和土実験の各応力を比較するため、飽和土実験の K_0 圧密終了時付近の $\epsilon_a=5\%$ を基準にした. その結果、不飽和土実験の方が飽和土実験より右上に位置した. これは、不飽和土実験でサクシジョンを作用させていることにより強度が増加し、各応力が飽和土実験より大きくなったと考えられる.

4.4 K_0 圧密時の静止土圧係数の挙動

図-14 に軸ひずみと K_{net} , K_B , K' の K_0 値とした K_{net0} , K_{B0} , K_0' の挙動と、Jaky の式で求めた K_0 値を示す. Jaky の式について、静止土圧係数の値は、一般に、土の内部摩擦角 ϕ によって変化するといわれており、正規圧密状態に対して、Jaky の式は $K_0=1-\sin\phi$ として与えられる⁶⁾. また、内部摩擦角 ϕ は既往の研究より飽和および不飽和で一定であるため⁴⁾、飽和土の圧密非排水三軸せん断試験によって求めた内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ を用いて Jaky の式により K_0 値を算定し、図-12 には $K_0=0.50$ となった値の点線を示した.

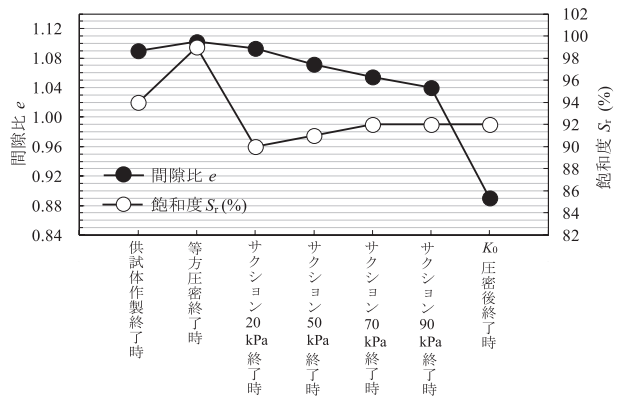


図-6 不飽和土の K_0 圧密実験における各実験段階の間隙比と飽和度

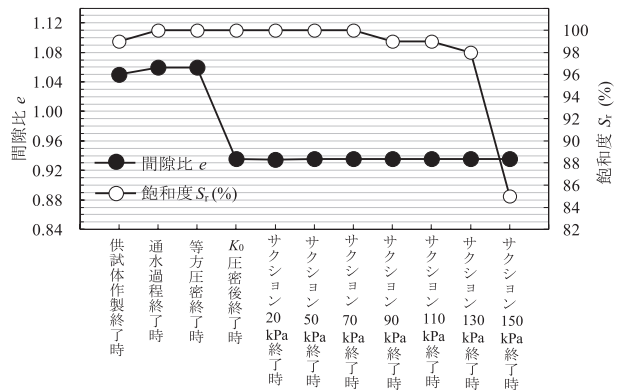


図-7 定体積状態での不飽和化実験における各実験段階の間隙比と飽和度

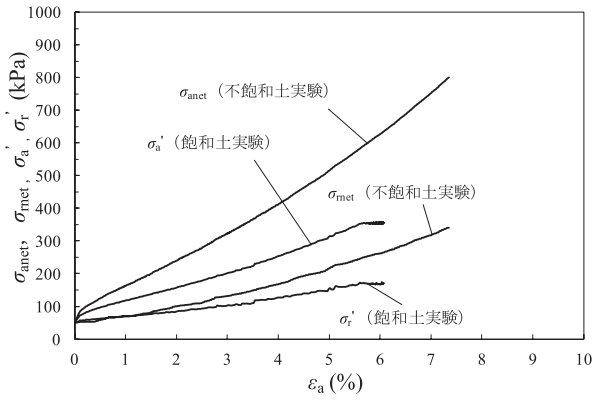


図-8 K_0 圧密時の軸ひずみと基底応力

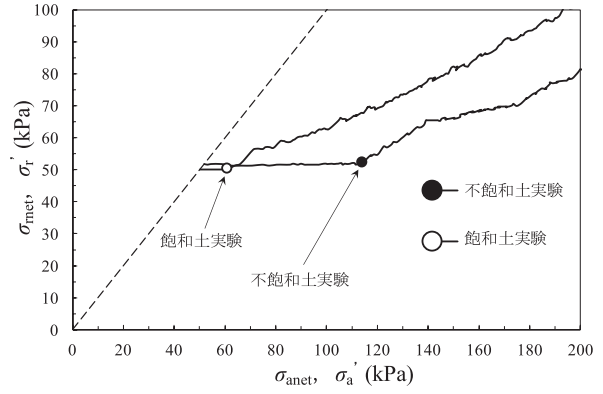


図-12 軸方向応力-側方応力関係 (K_0 圧密開始付近)

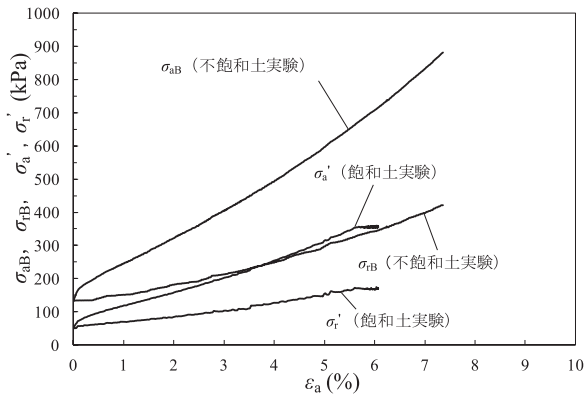


図-9 K_0 圧密時の軸ひずみと Bishop の有効応力

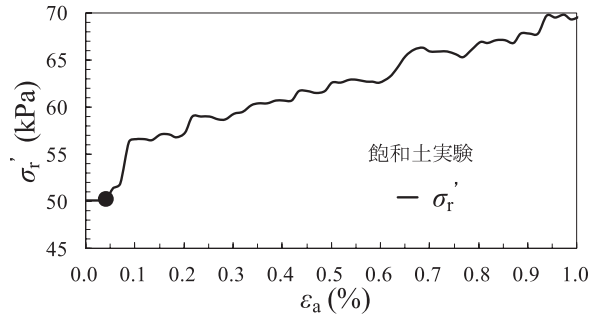
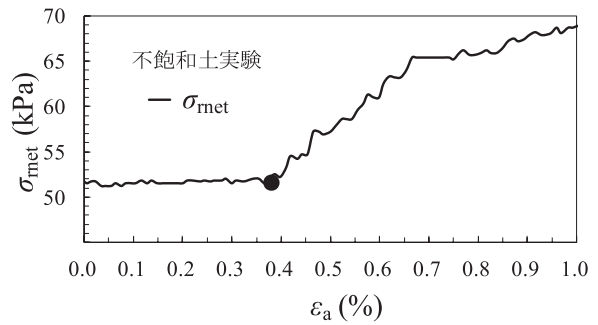


図-13 $\epsilon_a=1\%$ までの側方応力挙動

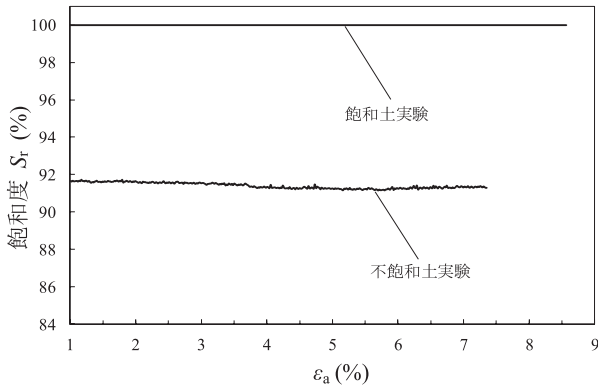


図-10 K_0 圧密時の飽和度の挙動

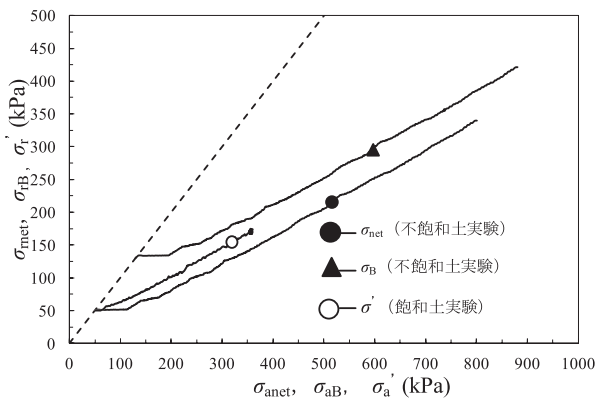


図-11 軸方向応力-側方応力関係

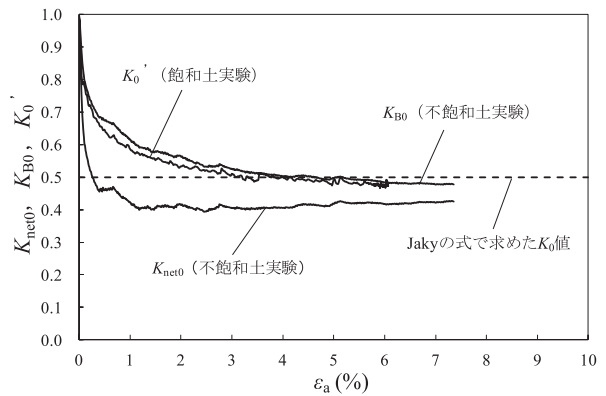


図-14 軸ひずみ- K_0' , K_{B0} , K_{net0} の挙動

各 K_0 値の挙動について、 K_{net0} は $\varepsilon_a=1\%$ 付近までに減少した後、ほぼ一定の挙動を示して減少し、最終的に $K_{net0}=0.41$ となった。 K_{B0} と K_0' は、ほぼ同じ挙動を示して減少し、最終的に $K_{B0}=0.49$ 、 $K_0'=0.48$ となった。 K_{B0} と K_0' がほぼ同じ挙動を示したことから、 K_{B0} を構成する不飽和土の Bishop の有効応力と、 K_0' を構成する飽和土の有効応力はほぼ等しい挙動となった。しかし、不飽和土実験はサクシオン 90kPa の 1 ケースであり、また飽和度が 92% と高く、より低い飽和度で実験を行って比較検討するため、サクシオンを変えて実験を行う必要がある。

各 K_0 値と Jaky の式による K_0 値、 $K_0=0.50$ を比較する。図-14 に示すように、 K_{net0} 、 K_{B0} 、 K_0' は Jaky の式による K_0 値より小さくなり、その差は K_{net0} が 0.09、 K_{B0} が 0.01、 K_0' が 0.02 となった。

5. 定体積状態での不飽和化実験

5.1 各サクシオン終了時における間隙比と飽和度

図-7 に定体積状態での不飽和化実験において、各実験段階における飽和度と間隙比を示す。ここでは、飽和供試体の K_0 圧密終了時から、定体積状態で不飽和化を行ったサクシオン 150kPa 終了時までの間隙比と飽和度を考察する。図-7 より、 K_0 圧密終了時の間隙比は $e=0.934$ 、飽和度は 100% であった。その後、各サクシオン終了時においては供試体を定体積状態にしているため、間隙比はすべて K_0 圧密終了時の値となった。飽和度は、サクシオン 90kPa 終了時から減少しはじめ、サクシオン 150kPa 終了時では飽和度が 98% から 85% に大きく減少したため、この供試体の空気侵入値(AEV)は 130kPa から 150kPa の間と考えられる。

また、図-15 に定体積状態での不飽和化実験前における K_0 圧密時の排水量の挙動を示す。図-15 より、 K_0 圧密終了の判断は、単位時間あたりの排水量が $0.023\text{cm}^3/\text{hour}$ 以内となるところとした。これは、次の実験過程であるサクシオン 30kPa 作用時の排水量が 0cm^3 であることから、問題はないと判断している。

5.2 サクシオン作用時の体積変化量と排水量の挙動

図-16(a)～図-16(d)にサクシオン作用過程において、飽和度が減少し始めたサクシオン 90kPa 作用時から、サクシオン 110kPa、130kPa、150kPa 作用時における供試体の排水量、体積変化量、側方ひずみ ε_r (%) の時間的挙動を示す。

まず、図-16(a)～図-16(d)の各サクシオン作用過程にお

ける側方ひずみと体積ひずみより、側方ひずみは $\varepsilon_r=\pm 0.05\%$ 以内であり、体積変化量も変化していないことがわかる。これはサクシオン 30kPa、50kPa、70kPa 作用時においても同様である。そのため、サクシオン作用過程において定体積状態を維持できていることがわかる。

次に、図-16(a)～図-16(d)の各サクシオン作用過程における排水量は、サクシオン 90kPa 作用時から、サクシオン 110kPa、130kPa、150kPa 作用時の順に大きくなっている。これより、サクシオンが大きいほど排水量は大きくなり、減少する飽和度も大きくなる。各サクシオン終了の判断は実験方法で述べた通りであるが、サクシオン 150kPa 作用時のみ定体積状態を維持するためのセル圧制御が間隙空気圧とほぼ等しくなったため、途中で測定を打ち切った。

5.3 基底応力と Bishop の有効応力の応力経路

図-17 と図-18 は K_0 圧密時と各サクシオン作用過程時の基底応力ならびに Bishop の有効応力の応力経路を示した図であり、各サクシオン作用過程で色分けをしている。

図-17 と図-18 より、各応力は各サクシオン作用過程において減少する挙動を示している。これはサクシオンの影響により供試体が収縮しようとするのを、実験方法でも述べた定体積状態を維持するために、セル圧制御しているためである。

また、基底応力の各サクシオン開始時の σ_{net} と σ_{anet} は連続して減少する挙動を示すが、Bishop の有効応力の各サクシオン開始時は σ_{rB} と σ_{aB} が増加し、不連続のような挙動となった。これは、実験方法でも述べたように、サクシオン作用方法を加圧板法としているため、間隙空気圧 u_a を一定とし、間隙水圧 u_w を減少させている。そして、各サクシオン段階開始時は、非排水状態にした後、間隙水圧 u_w を制御して所定のサクシオンとする。その後、排水状態とすることで、サクシオンを作用させているためである。また、不連続のような挙動ではあるが、各応力は連続しており、線を繋いでいないだけである。

5.4 各サクシオン終了時の K_{net0} 、 K_{B0}

図-19 に、定体積状態での各サクシオン作用過程終了時における K_{net0} 、 K_{B0} 、飽和度の結果と、Jaky の式で求めた K_0 値、 $K_0=0.50$ の点線を示す。 K_{net0} は、サクシオン 50kPa までは減少し、サクシオン 70kPa でほぼ一定となるが、飽和度が減少し始めるサクシオン 90kPa 以降は、飽和度の減少に伴い K_{net0} も減少し、最終的に 0 に近づいた。これに対し、 K_{B0} はサクシオン 90kPa までは上昇し、その後は飽和度の減少に伴いほぼ一定値に落ち着く挙動を示した。以上より、定体積状態での不飽和化実験において、 K_{net0} 値は

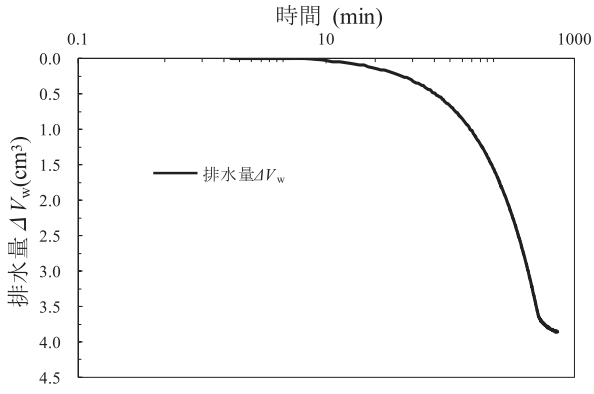


図-15 K_0 圧密時の体積変化量 ΔV_w

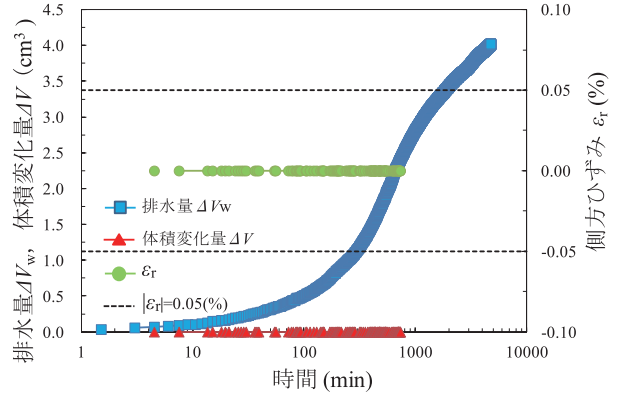


図-16(d) ΔV_w , ΔV , ε_r の挙動 (サクシオン 150kPa)

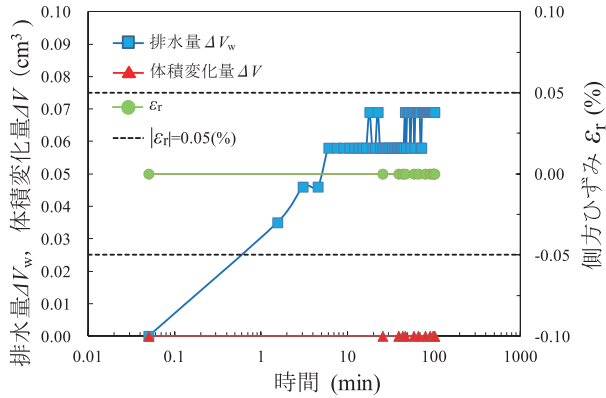


図-16(a) ΔV_w , ΔV , ε_r の挙動 (サクシオン 90kPa)

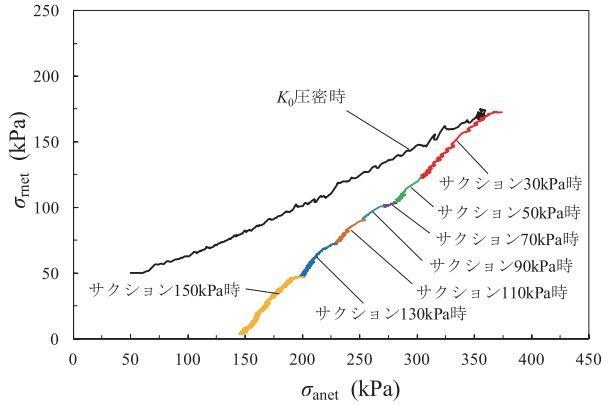


図-17 σ_{net} と σ_{anet} の応力経路

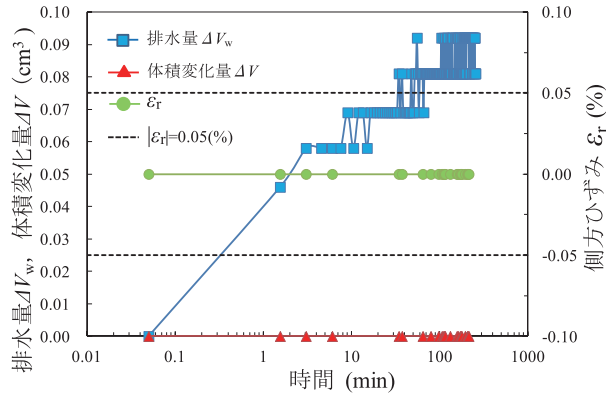


図-16(b) ΔV_w , ΔV , ε_r の挙動 (サクシオン 110kPa)

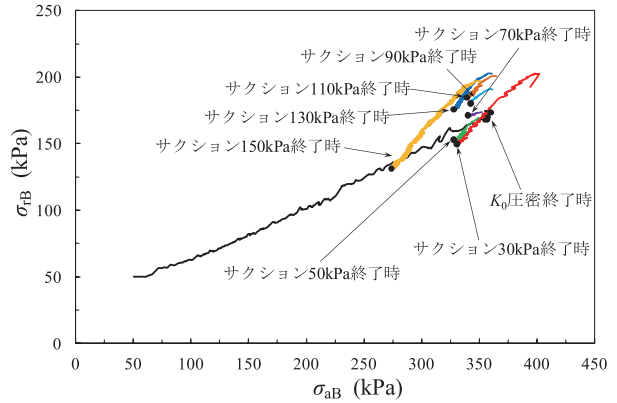


図-18 σ_{rB} と σ_{aB} の応力経路

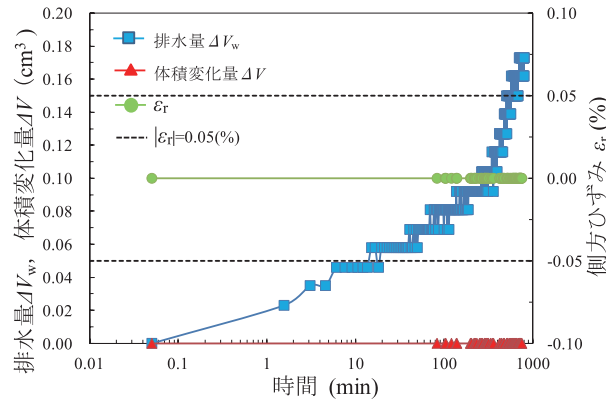


図-16(c) ΔV_w , ΔV , ε_r の挙動 (サクシオン 130kPa)

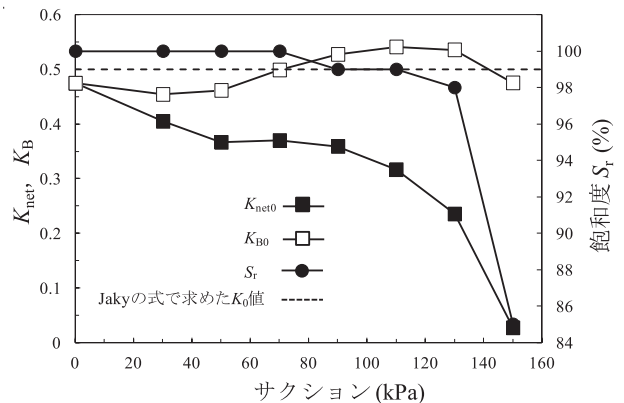


図-19 サクシオン作用過程における K_{net} , K_B

ほぼ0となり計測上不可能であるが、 K_{B0} 値は0.49となった。Jakyの式で求めた $K_0=0.50$ と比較すると、 K_{net0} 値はほぼ0であるが、 $K_{B0}=0.49$ であるためほぼ等しくなった。そのため、本研究で不飽和土の K_0 値を考えた場合による評価は、 K_{net0} 値より、 K_{B0} 値による評価が適切であると考えられる。また、不飽和土の K_0 圧密実験と定体積状態での不飽和化実験の K_0 値を比較すると、それぞれの K_{net0} 値は異なるが、 K_{B0} 値はほぼ同じとなった。

6. 結論

本研究では、三軸試験を用いて不飽和土の K_0 圧密特性に関する検討を2つ行った。1つは供試体を不飽和化した後 K_0 圧密を行い、 K_0 圧密過程における K_0 値の挙動について調べた。もう1つは K_0 圧密された飽和供試体に対し、定体積状態となるよう制御を行いつつサクションを作用させ、不飽和化時の K_0 値の挙動について調べた。以下に結論をまとめる。

- (1) 不飽和土の K_0 圧密実験において、飽和土の K_0 値である K_0 値と不飽和土の K_0 値である K_{B0} 値はほぼ同じとなった。今後、サクションを変えた不飽和土の K_0 圧密実験を行い、サクションや飽和度の大きさによる K_{B0} 値の評価の検討が必要である
- (2) 定体積状態での不飽和化実験において、 K_{net0} 値はほぼ0となり計測上不可能となるが、 K_{B0} 値は0.49となり、Jakyの式による $K_0=0.50$ と比較するとほぼ等しい値となった。そのため、この実験において K_0 値を考えた場合による評価は、 K_{net0} 値より、 K_{B0} 値の方が適切であると考えられる。
- (3) 不飽和土の K_0 圧密実験と定体積状態での不飽和化実験の K_0 値を比較すると、 K_{net0} 値は異なるが、 K_{B0} 値はほぼ同じとなった。

参考文献

- 1) 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) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説-二分冊の2-, pp.604-612, 2009.
- 4) Fredlund, D. J., Rahardjio, H.: Soil Mechanics for Unsaturated Soil, 1993.
- 5) 土質工学会：ジオテクノート5 不飽和土, pp.10-13, 1993.
- 6) 石原研而：土質力学, pp.242-246, 1988.

(2014年6月27日 受付)

