

神戸大学大学院自然科学研究科 正会員 加藤正司  
 岐阜工業高等専門学校 正会員 吉村優治  
 電源開発 頭本忠夫

## 1. はじめに

不飽和土の研究は当初、サクシオンを有効応力に取り込んだ Bishop 式<sup>1)</sup>の成立をめぐる議論がなされた。その後 Coleman<sup>2)</sup>によりサクシオンを独立変数として取り扱う考え方が示された。現在では考え方に基づいたいくつかの構成モデル<sup>3),4)</sup>が提案されている。これらのモデルでは、サクシオンの影響は粘着力またはサクシオン応力の形式で単純に取り扱われている。しかし、あるサクシオンのもとでの水分量の違いの影響に関しては評価されていない。

サクシオンと土塊内の水分量の関係は、水分特性曲線として知られている。近年の研究では、この水分特性曲線と不飽和土の挙動を結びつける研究がなされている。Fredlund et al.<sup>5)</sup>は水分特性曲線の脱水曲線に基づき、破壊強度を推定する方法を示している。水分特性曲線においては、あるサクシオンのもとでの水分量の異なる状態 (ヒステリシス)が存在する。軽部らは水分特性曲線におけるヒステリシスの影響を構成式に取り込む評価方法<sup>6)</sup>と、その考え方に基づく構成モデル<sup>7)</sup>を提案している。

一方、不飽和土の一軸圧縮試験に関する研究としては、現在まで飽和状態に近い不飽和土を対象とした研究がなされている。三田地・工藤<sup>8)</sup>および Shimizu & Tabuchi<sup>9)</sup>は、サクシオンが負の間隙水圧として有効応力に寄与する高い飽和度状態において、変形および強度に対して Terzaghi の有効応力式が成立する結果を示している。Ridley<sup>10)</sup>は一軸圧縮試験を非排水試験ととらえ、高い飽和度状態において限界含水比~サクシオン関係の存在を示している。

本研究では飽和度の低い状態の不飽和土について、サクシオンと体積変化を測定した一軸圧縮試験を行った。そして、変形および強度特性に与えるサクシオンと間隙水分量の影響について考察を行った。

## 2. 試料および実験方法

試料には DL クレー ( $\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3, w_L=NP$ )を用いた。気乾状態の試料を JSF T 711-1990, A-a 法 (10cm モールドと 2.5kg ランマーにより、3層に分け、各層 25 回の締固めを行う方法)により締固めた。図-1はこの試料と締固め方法を用いた、繰返し法による締固め試験結果を示している。一軸圧縮試験に用いる締固め試料作製時の目標含水比は約 12~22%である。これらの含水比は最適含水比以下となることが図よりわかる。締固めた試料を乾燥を防ぐ処置をして数日間恒温室内に保管し、試験前に取り出して成形して直径 50mm、高さ 100mm

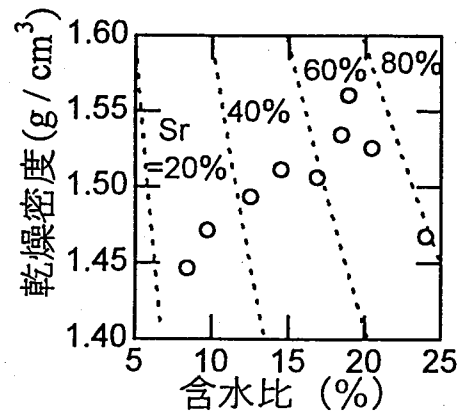


図-1 締固め試験結果 (繰返し法)

の供試体として用いた。試験時に供試体にはメンブレンを被せ、間隙空気は载荷キャップ内の経路を通して大気へ解放された。試験装置はペDESTALにセラミックディスク (A.E.V.=5kgf/cm<sup>2</sup>)を埋め込んだ一軸圧縮試験装置である。外セルを有しており、試験時にはセル内部に水を満たす。そして、セル内へのセル水の吸排

Strength and Deformation of a Compacted Clay in Unconfined test, Shoji Kato (Graduate School of Science and Technology, Kobe University), Yuji Yoshimura (Gifu National College of Technology), and Tadao Kashiramoto (Dengenkaihatu Co.Ltd).

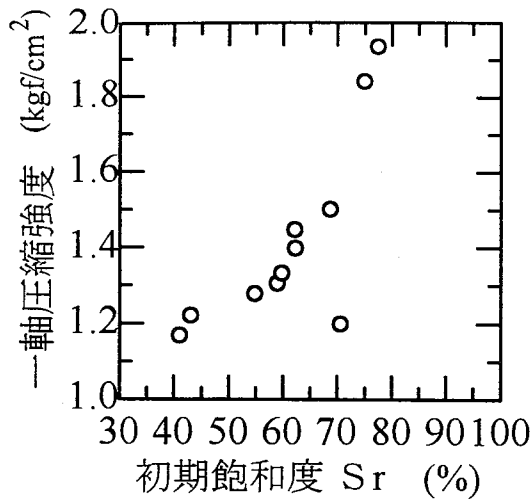


図-2 初期飽和度と一軸圧縮強度の関係

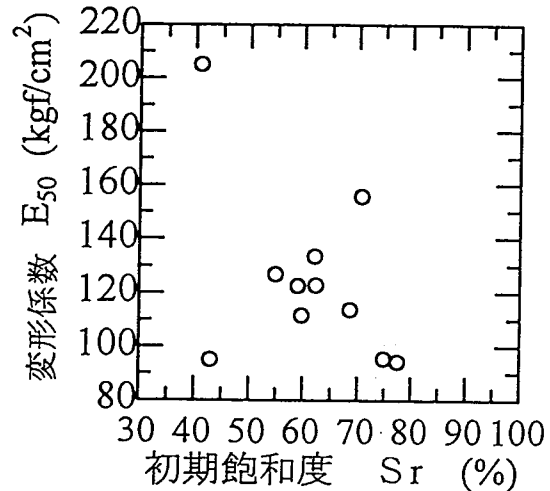


図-3 変形係数 E<sub>50</sub>と初期飽和度の関係

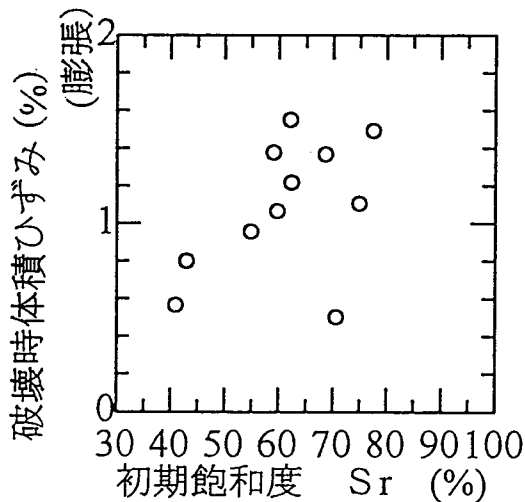


図-4 破壊時の体積ひずみと初期飽和度の関係

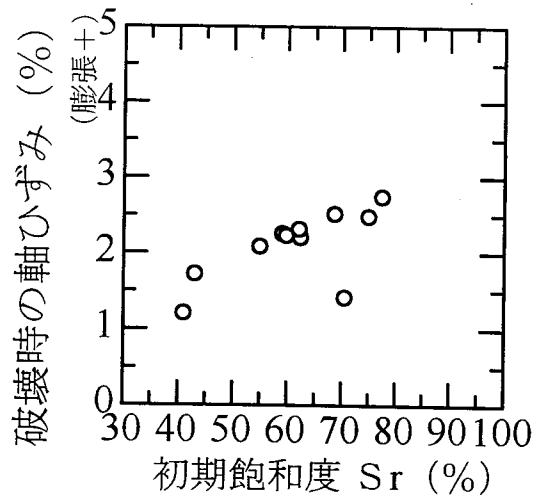


図-5 破壊時の軸ひずみと初期飽和度の関係

水量を測定し、それに対しピストンの貫入体積を補正することにより供試体の体積変化を知ることが可能である。試験時の軸ひずみ速度は、試料と供試体作製方法が同じである、過去に行われた一斉試験<sup>11)</sup>を参考に0.2%/分とした。

### 3. 実験結果および考察

#### a) 破壊時の変形・強度特性

図-2は供試体成形時の飽和度である初期飽和度と一軸圧縮強度の関係を示している。最適含水比付近と考えられる飽和度80%近くまで、強度は初期飽和度とともに増加している。この結果は、従来言われている「最適含水比より乾燥側において一軸圧縮強度が最大となる」という傾向とは異なっている。図-3は軸圧縮応力～軸ひずみ関係より求められた変形係数 E<sub>50</sub>と初期飽和度の関係を示している。ばらつきはあるものの、初期飽和度の増加とともに E<sub>50</sub> が小さくなる傾向を示している。図-4は破壊（ピーク強度）時の体積ひずみと初期飽和度の関係を示している。破壊時の体積ひずみ（膨張側）は初期飽和度の増加とともに増加する傾向を示している。図-5は破壊時の軸ひずみと初期飽和度の関係を示している。破壊時の軸ひずみが初期飽和度の増加とともに増加する傾向を示している。一般に飽和土の一軸圧縮試験結果の場合、破壊時の強度が大きいものほどその時の軸ひずみ小さくなり、体積ひずみは膨張側に生じる傾向を示す。しかし、図-3、4、5の傾向はそれとは異なっている。

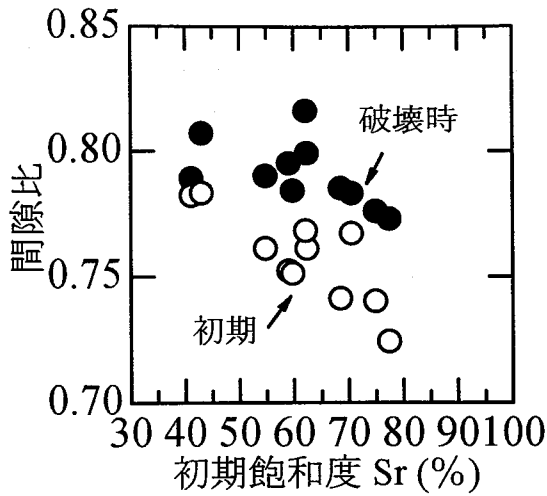


図-6 初期および破壊時間隙比と初期飽和度の関係

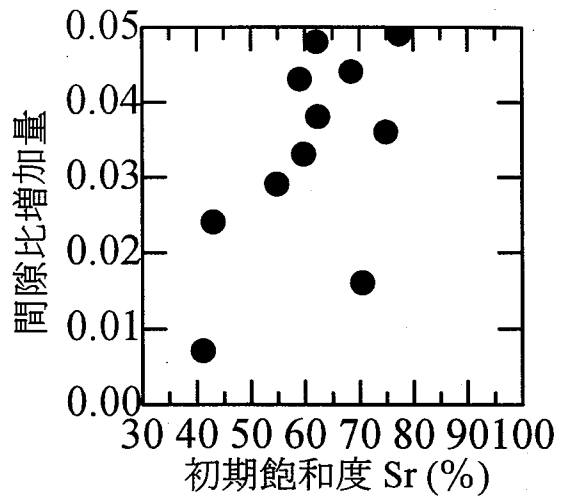


図-7 間隙比増加量と初期飽和度の関係

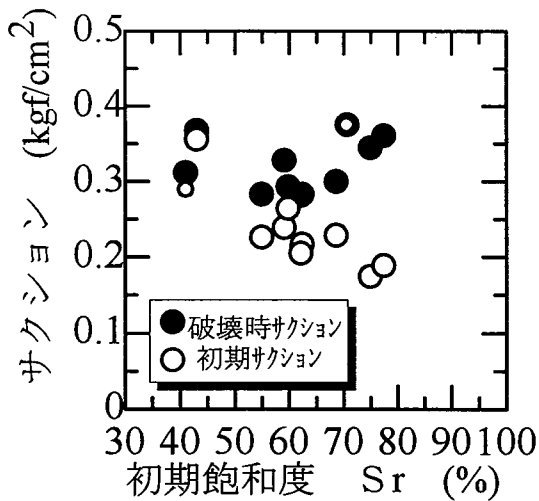


図-8 初期および破壊時サクシヨンと初期飽和度の関係

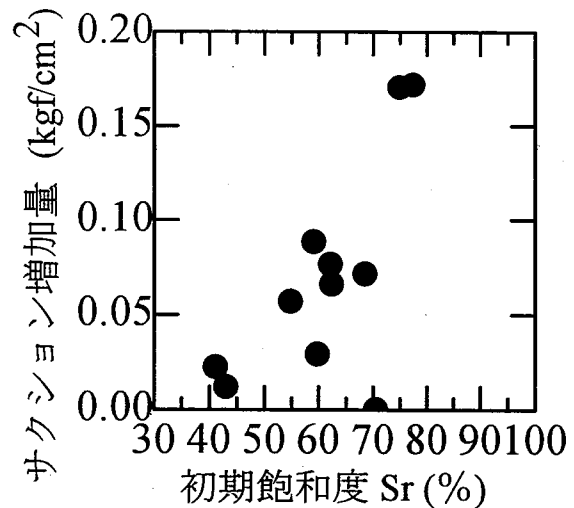


図-9 サクシヨン増加量と初期飽和度の関係

b) せん断時のサクシヨン変化に与える間隙水分布の影響

図-6は、供試体の初期および破壊時間隙比と初期飽和度の関係を示している。初期間隙比は初期飽和度の増加とともに減少しており、締固め曲線に見られる乾燥密度の増加に対応していると考えられる。破壊時間隙比は、初期間隙比よりもばらつきが小さくなっている。そして、すべての供試体はせん断時に膨張していることがわかる。図-7はこの時の間隙比増加量と初期飽和度の関係を示している。両者の関係が一つの直線で近似される傾向を示している。

図-8は、供試体の初期および破壊時サクシヨンと初期飽和度の関係を示している。初期サクシヨンは初期飽和度が高くなるほど小さくなる傾向を示している。このような初期サクシヨンの傾向は、図-3に示した変形係数  $E_{50}$  の傾向と対応している。破壊時サクシヨンは、初期飽和度の増加とともに減少から増加傾向へと変化している。そして、すべての供試体におけるサクシヨンは、

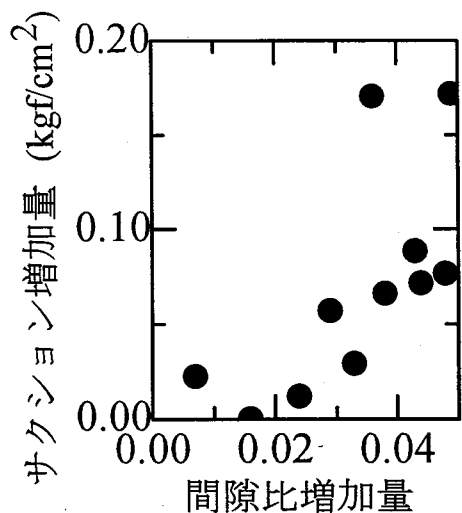


図-10 間隙比増加量とサクシヨン増加量の関係

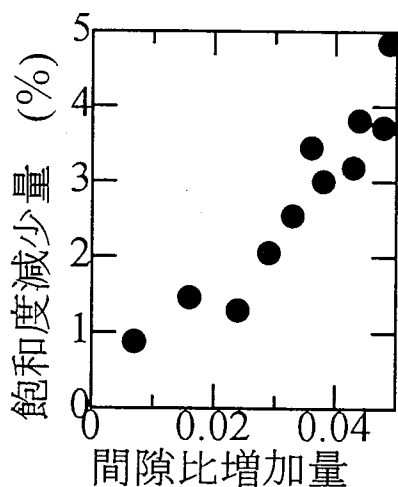


図-1-1 間隙比増加量と飽和度減少量の関係

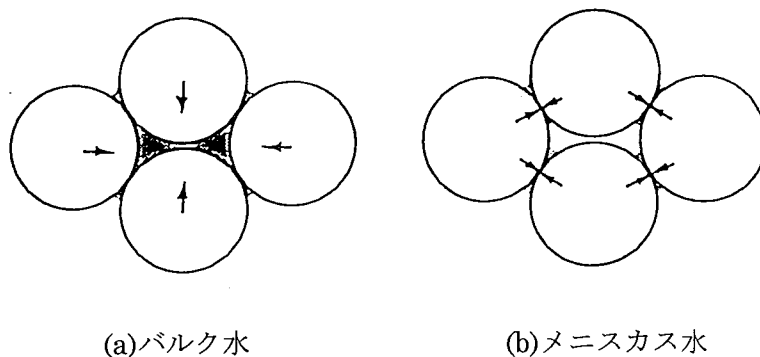


図-1-2 バルク水とメニスカス水の概念図

せん断開始時から破壊に至るまでに増加していることがわかる。図-9はこのサクシオン増加量と初期飽和度の関係を示している。サクシオン増加量は初期飽和度の増加とともに大きくなっている。図-7の結果とあわせて考えるならば、初期飽和度が大きく、間隙比増加量（膨張量）の大きなものほどサクシオン増加量が大きくなっていることがわかる。

図-10はせん断開始時から破壊に至るまでの間隙比増加量とサクシオン増加量の関係を示している。一軸圧縮試験時は非排水状態となっている。このため、間隙比増加量（膨張量）が大きいほどサクシオンは大きくなることが予測される。図-10における関係では、間隙比増加量が0.02付近まで、サクシオン増加量が増える傾向はほとんど見られない。しかし、間隙比増加量が0.02を越えると、サクシオン増加量も大きくなる傾向を示している。図-11は、せん断開始時から破壊に至るまでの間隙比増加量と飽和度減少量の関係を示している。両者の関係はほぼ比例していることがわかる。図-10に示される傾向とあわせて考えると、間隙比増加量が0.02までは、せん断時の間隙膨張がサクシオンの増加に反映されていないことになる。このような現象には、供試体内の間隙水分分布が影響しているものと考えられる。

図-12は軽部ら<sup>6)</sup>により提案されたバルク水とメニスカス水の概念図を示している。土中の水分量が少なくなると、間隙水はメニスカス水の状態で存在する。そして水分量が多くなると、バルク水の状態で存在する間隙水が多くなる。間隙水がバルク水として多く存在するようになると、間隙水は連続してゆく。この状態で間隙が膨張すると、その時の間隙水圧変化は連続した間隙水を通して土塊外部でも測定可能である。一方、独立したメニスカス水が多い場合には、間隙の変形により生じる間隙水圧変化は土塊外部で測定することはできない。図-10における間隙増加量が0.02付近のデータは、図-7より初期飽和度が40%程度であると推定される。よって、これより水分量が多い状態より、飽和度の増加とともにバルク水の影響が現れていると考えられる。

### c) 間隙水分量を考慮したサクシオン応力に基づく破壊時の変形・強度特性

加藤・軽部ら<sup>7)</sup>は不飽和土内における間隙水分分布を取り入れたモデルにおける考察から、不飽和土に対する応力成分として①メニスカス水に起因する内部応力を含む断面応力としての等方応力、と②内部応力を除いた載荷応力としての等方応力の2種類の応力を区別する必要があることを指摘した。そして、土塊のせん断強度や体積圧縮に対する剛性(体積圧縮係数の逆数)は、次式で与えられる①の内部応力を含む断面応力としての等方応力に比例するとした。

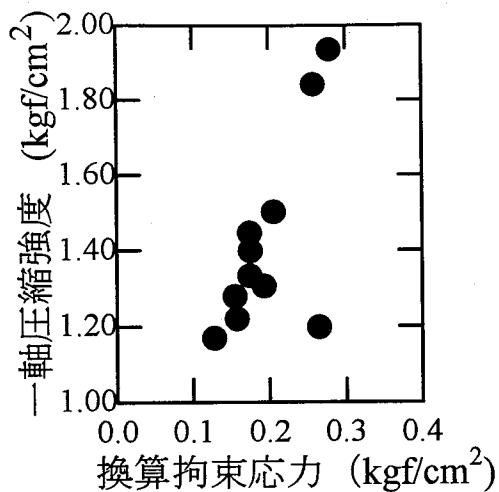


図-13 換算拘束圧と一軸圧縮強度の関係

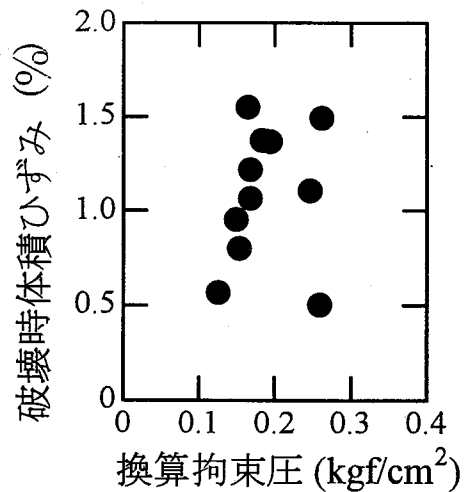


図-14 換算拘束圧と破壊時の体積ひずみの関係

$$\text{内部応力を含む断面応力としての等方応力} = p + p_b + p_m \quad (1)$$

ここに、 $p$  : Net stress、 $p_b$  : バルク水に起因するバルク応力、 $p_m$  : メニスカス水に起因するメニスカス応力である。

そして、バルク応力とメニスカス応力の和として定義されるサクシオン応力  $p_s$  は次式で与えられるとした。

$$p_s = p_b + p_m = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot s \quad (2)$$

ここに、 $S_r$  : 飽和度、 $S_{r0}$  (%) : 残留飽和度 (%)、 $s$  : サクシオン。

一軸圧縮試験時には、拘束圧としての Net stress は 0 である。このため、拘束圧としてはサクシオン応力  $p_s$  のみが作用していることになる。このサクシオン応力を求めるためには、(2)式に示されるように、飽和度と残留飽和度およびサクシオンを知る必要がある。今回の試験においては、飽和度およびサクシオンは既知であるが、残留飽和度についてはデータが得られていない。阿部<sup>12)</sup>はスラリー状態の DL クレーについて脱水時のサクシオン～含水比曲線を求めている。その結果に基づくと、脱水時の残留状態における含水比は 2%以下であると判断される。これから類推して残留飽和度の影響は無視できるものとして、次式で与えられる換算拘束圧が破壊時に作用しているものと仮定する。

$$\text{換算拘束圧} = \frac{S_r}{100} \cdot s_f \quad (3)$$

ここに、 $s_f$  : 破壊時サクシオン。

図-13、14はこのように仮定した換算拘束圧と一軸圧縮強度および破壊時の体積ひずみの関係を示している。これらの結果は破壊時の挙動に与える間隙水分布の影響を示していると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では低飽和度の締固めたシルト質粘性土供試体を用いて、サクシオンと体積変化を測定した一軸圧縮試験を行った。そして、変形特係数、破壊時の間隙比およびサクシオン変化挙動に対して水分量が影響を与

えていることを示した。さらに、サクシヨンと水分量を考慮した換算拘束圧と一軸圧縮強度および破壊時の体積ひずみの関係は、ユニークな傾向となることを示した。このことは、一軸圧縮試験における破壊時の変形・強度特性に対し、サクシヨンの大きさのみならず水分量も影響することを意味するものである。

#### 参考文献

- 1) Bishop, A.W.: The Principle of Effective Stress, *Teknisk Ukeblad*, Vol.39, pp.859-863, 1959.
- 2) Coleman, J.D.: Stress/Strain Relations for Partly Saturated Soil, *Correspondence, Geotechnique*, Vol.12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 3) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A Constitutive Model for Partially Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol.40, No. 3, pp.405-430, 1990.
- 4) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Verification of the Generalized Elastoplastic Model for Unsaturated Soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-75, 1993.
- 5) Fredlund, D.G., Vanapalli, S.K., Xing, A. and Pufahl, D.E.: Predicting the Shear Strength Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve, *Proceedings of 1st International Conference on Unsaturated Soils*, Vol.1, pp.43-46, 1995.
- 6) 軽部大蔵、加藤正司、浜田耕一、本田道識：不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について、*土木学会論文集*、No.535、pp.83-92、1996.
- 7) 加藤正司、軽部大蔵、本田道識、藤原照幸：不飽和土の圧縮性に及ぼす間隙水分分布の影響に関する研究、*土木学会論文集*、No.554/Ⅲ-37、pp.57-69、1996.
- 8) 三田地利之、工藤 豊：サクシヨンと一軸圧縮強度に基づく粘土の非排水強度推定法、*土木学会論文集*、No.541/Ⅲ-35、pp.147-158、1996.
- 9) Shimizu, S. and Tabuchi, T.: Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.3, pp.28-39, 1993.
- 10) Ridley A. M. : Strength-suction-moisture content relationships for kaolin under normal atmospheric conditions, *Unsaturated Soils*, Alonso & Delage, Vol.1, pp.645-651, 1995.
- 11) 阿部廣史、畠山正則：不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験の結果について、不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題シンポジウム発表論文集、(社)土質工学会、pp.23-58、1993.
- 12) 阿部廣史：不飽和土地盤の安定性に関する研究委員会 一斉試験検討資料、1991.