

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
 J R 東海建設 (株) 学生会員 深尾 和文
 愛知県立西尾実業高校 中村 幸弘

1. はじめに

近年、サクシジョン（負の間隙水圧）を測定した不飽和土の一軸圧縮強度に関する研究^{1)、2)}が行われているが、それらは比較的飽和度の高い状態の不飽和土を対象としている。本研究では、低飽和度の不飽和土を用いた一軸圧縮試験を実施し、その結果から得られるサクシジョン～ボンド応力（粘着成分）関係について、過去に行われた不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験結果³⁾によるサクシジョンとボンド応力関係との対応を示すものである。なお、以下ではサクシジョン s を間隙空気圧 (u_a) と間隙水圧 (u_w) の圧力差 ($s = u_a - u_w$) と定義する。また、応力は $\text{Net stress} = \sigma - u_a$ (σ : 全応力) を用いるものとする。

2. サクシジョンの粘着力に対する影響

図-1 に示す2球モデルに関して、粒子間に水のメニスカスが存在する場合に生じる圧縮内力について考えてみる。この圧縮内力は粒子接平面に垂直に作用し、次式で与えられる⁴⁾。

$$F = \pi r_2 (u_a - u_w) + 2 \pi r_2 T \quad (1)$$

ここに、 T は水の表面張力であり、 r_2 は図-1 で示されるメニスカス半径である。

式(1)の右辺第1項はサクシジョン（圧力差）の圧縮内力への寄与分を示しており、第2項は表面張力の寄与分を示している。すなわち、メニスカスが存在する場合に生じる圧縮内力には、サクシジョンと表面張力の両方が寄与することになる。不飽和土の土塊内部の土粒子接点には多数のメニスカスが存在する。そして、各接点のメニスカスにより生じる圧縮内力は、粒子接点でのすべりに対する抵抗を増加する。このため、粒子接点でのすべりは、メニスカスが無い場合に比べて遅れることになる。よって、土塊全体の変形に対する土の骨格剛性は増加し、破壊時の土塊全体の強度は増加する。この圧縮内力により生じる強度の増加分は、破壊時のモール円の包絡線の縦軸切片（粘着力 c ）として発揮されていると考えられる。そして、粘着力 c は

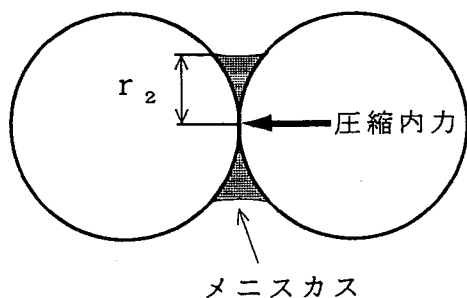


図-1 2球モデルにおける圧縮内力

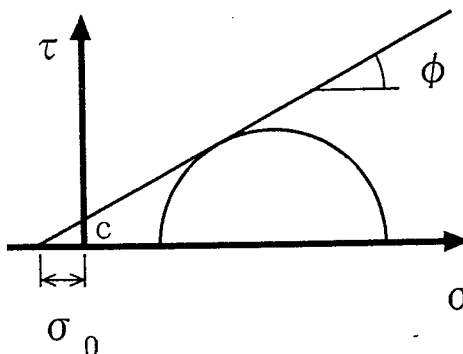


図-2 ボンド応力の定義

図-2に示されるように、次式のボンド応力 σ_0 （粘着成分）として表すことができる。

$$\sigma_0 = c \cdot \cot \phi \quad (2)$$

ここに、 ϕ :内部摩擦角。

サクシオンと土中の水分量との関係は、水分特性曲線として知られている。図-3はその概念図を示している。サクシオンが0の状態では水分量を持つ土では、サクシオンが増加してもある大きさまで水分量の変化はない（図-3中、A点）。このA点のサクシオンの大きさを、エアーエントリーボリューム（A.E.V.と略す）と呼ぶ。続いてサクシオンが増加すると、間隙内に空気が侵入することにより径の大きな間隙中から間隙水（バルク水）が排水され、土粒子接点周りにメニスカスを形成する⁵⁾。すなわち、A.E.V.以下のサクシオン状態では間隙の多くはバルク水またはバルク水と閉塞された間隙空気（エントラップドエア）により飽和されていると考えられる。このためテルツアギーの有効応力式が成立し、サクシオンは負の間隙水圧として有効応力に寄与すると考えられる。一方、A.E.V.以上のサクシオン状態では前述のように粒子接点周りにメニスカスが形成されていると考えられる。この時は式(1)に示されるように、サクシオンのみが粒子間に作用する圧縮内力に寄与するわけではない。また、サクシオンの寄与の割合も、図-1におけるメニスカス半径 r_s と関連するメニスカス水量に依存することになる。（サクシオンが増加するとメニスカス水量は減少する。）よって、土塊全体として発揮される粘着力も、サクシオンの増加に伴って変化する。その増加傾向は図-4のようになるものと考えられる。すなわち、A.E.V.以下のサクシオンの大きさでは、サクシオンがすべて有効応力として作用し、このため、粘着力もサクシオンの増加に比例的して増加する。サクシオンの大きさがA.E.V.以上となると、有効応力に対するサクシオンの寄与率が低下してゆく。そして、粘着力の増加傾向も緩やかなものとなる。サクシオン増加に伴う内部摩擦角の変化はわずかであると考えられるので、式(2)で示されるボンド応力（粘着成分）のサクシオン増加に対する変化の傾向も同様なものになると考えられる。

3. 一斉一軸・三軸圧縮試験結果と低飽和度の不飽和土を用いた一軸圧縮試験結果における

サクシオン～ボンド応力関係の比較

a) 一斉一軸・三軸圧縮試験結果におけるサクシオン～ボンド応力関係

ここでは、平成4年に実施された一斉一軸・三軸圧縮試験結果を再整理し、三軸圧縮試験から得られるサクシオン～ボンド応力関係と一軸圧縮試験から得られる破壊時のサクシオンとボンド応力の関係を比較する。

一斉試験に用いられた試料は市販のシルト質粘土（商品名：DLクレイ）で、その物理的性質は、 $G_s=2.65$ 、 $w_L=NP$ 、 $I_p=NP$ 、シルト分=92%である。目標含水比に調整した試料をJSFT711-1190, A-a法に従い3層に

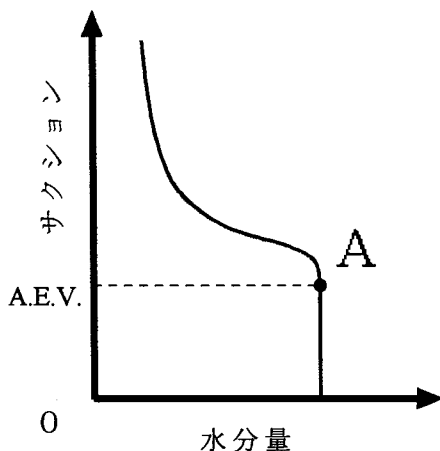


図-3 水分特性曲線の概念図

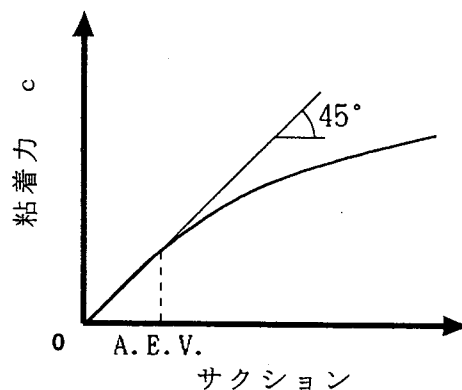


図-4 サクシオン増加による粘着力の変化

分けて 10cm モールドに投入し、2.5kg ランマーで各層を 25 回ずつ締固めて円柱型のブロックサンプルを製作し、脱型した試料をトリミングして直径 50mm、高さ 100mm の供試体として使用している。この方法により DL クレーを用いて行った締固め試験結果の例を図-5 に示す。一軸圧縮試験に用いられた供試体の飽和度は 30~60% 程度である。三軸圧縮試験の応力経路としては等方圧縮過程として所定のサクシオン ($s = 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 \text{ kgf/cm}^2$) を与えた後、平均有効応力を増加し、その後、サクシオンおよび側圧一定で排水条件で圧縮せん断試験を実施している。なお、一軸圧縮試験時には、サクシオンを測定して実験を行っている。図-6 は、試験結果を再整理して得られた一斉一軸・三軸圧縮試験結果に基づくサクシオン~ボンド応力関係を示している。(一軸圧縮試験の整理方法は次節を参照のこと。) 図-4 に示すサクシオン~粘着力関係に近い傾向を示していることがわかる。

b) 低飽和度の不飽和土を用いた一軸圧縮試験におけるサクシオン~ボンド応力関係

試験にはセラミックディスクをペDESTAL に装着した不飽和土用三軸セルを用いた。試験前には、セラミックディスクに通じた排水経路を脱気しておき、試験時には排水経路端部に取り付けた間隙水圧計によりセラミックディスクを通じてサクシオンを測定した。また、試験時には供試体をメンブレンで覆い、セル内に

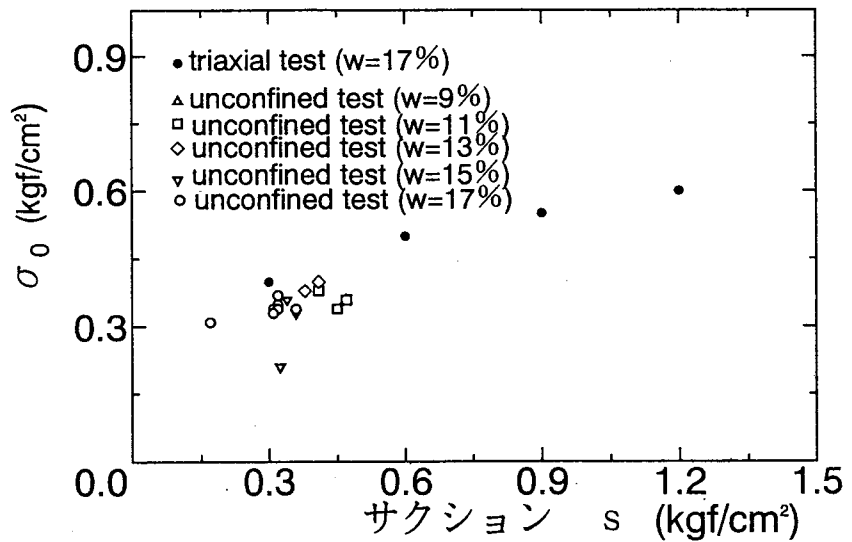
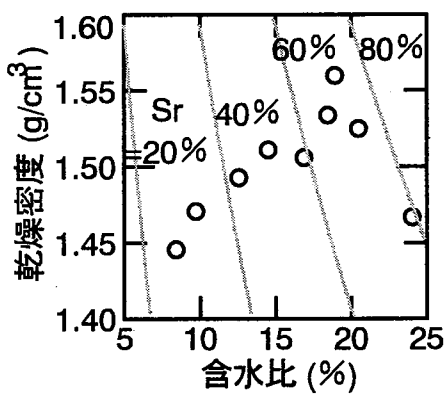


図-5 DL クレーの締固め試験結果 図-6 一斉一軸・三軸圧縮試験によるサクシオン~ボンド応力関係

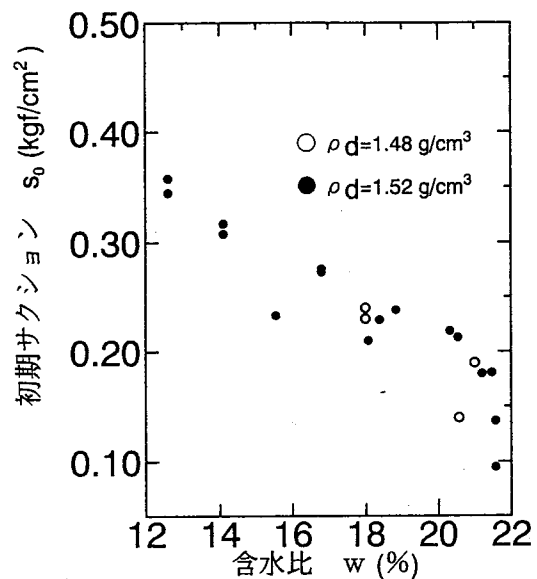
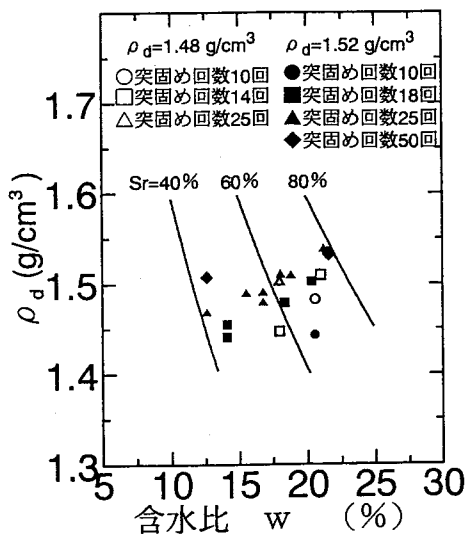


図-7 供試体作製時の含水比と乾燥密度の関係

図-8 初期サクシオン~含水比関係

水を満たし、セル内部への吸排水量を測定して供試体の体積変化を測定した。気乾状態の試料を含水比調整後、不飽和土の一斉試験に準じて供試体を作製した。なお、突固め回数と含水比を変えることにより、供試体作製条件として目標乾燥密度 $\rho_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$ のシリーズと $\rho_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$ のシリーズの2種類のシリーズで実験を行った。

図-7は供試体作製時の含水比と乾燥密度 ρ_d の関係を示している。供試体は40~80%程度の低飽和度状態にあることがわかる。図-8は初期サクシオンと含水比の関係を示している。プロットの傾向はサクシオンの増加とともにS字を描くように含水比が減少しており、水分特性曲線の形状と似ていることがわかる。図-9は $\rho_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$ のシリーズの軸ひずみ~軸応力関係を、図-10は同じデータの軸ひずみ~体積ひずみ関係を、図-11は同じデータの軸ひずみ~サクシオン関係をそれぞれ示している。含水比の低いデータ(●, ■印)と高いデータ(○, △印)で傾向が異なっている。そして、ピーク強度は含水比の低いデータと高いデータでは約 0.5 kgf/cm^2 程度の差が生じている。また、供試体のサクシオンはせん断時の体積膨張に対応して増加しているようである。

図-12は、一軸圧縮強度と初期及び破壊時のサクシオンの関係を示したものである。また、図-13は川上⁶⁾による飽和粘土を用いてサクシオン測定した一軸圧縮試験における、一軸圧縮強度と初期及び破壊時の

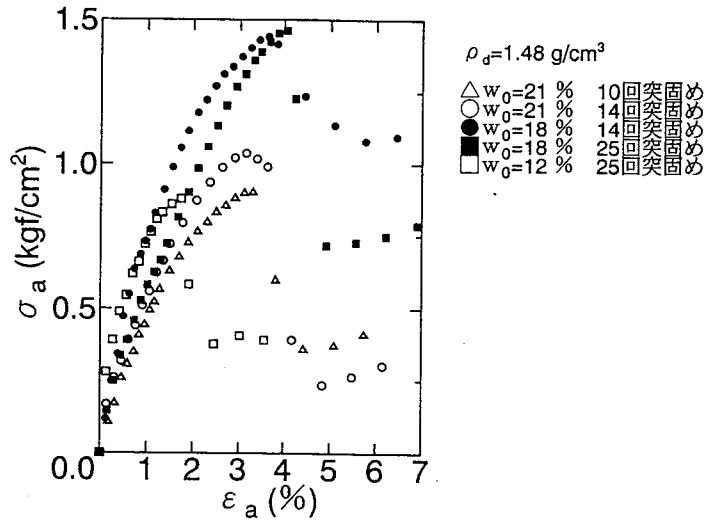


図-9 軸ひずみ~軸応力関係

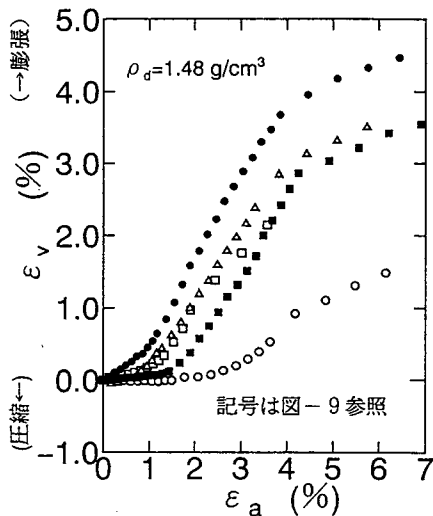


図-10 軸ひずみ~体積ひずみ関係

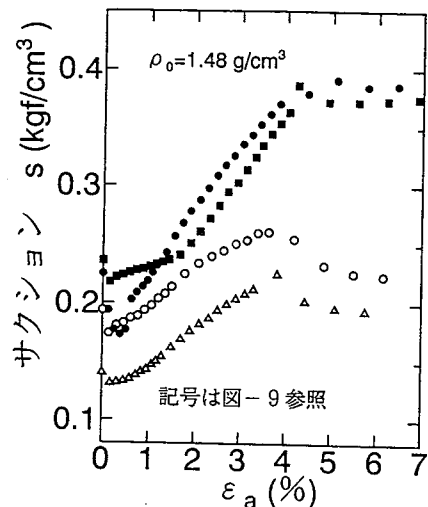


図-11 軸ひずみ~サクシオン関係

サクシヨンの関係を示している。図-12 に示す低い飽和度状態における一軸圧縮強度と破壊時のサクシヨンの関係は、図-13 に示す高い飽和度状態における場合と同様にユニークな直線関係を示している。

一軸圧縮強度 q_u と破壊時の平均有効主応力 p_f の関係は $q_u = 3p_f$ で与えられる。飽和状態における有効応力に関する DL クレーの内部摩擦角 $\phi' = 42^\circ$ のサクシヨン増加に対する変化はわずかであると考えられるので、図-14 に示す関係を用いて破壊時のボンド応力を推定することができる。図-15 は破壊時のサクシヨンと、図-14 に示す関係を用いて得られたボンド応力 σ_0 の関係を示している。図中の○印と●印の結果は一軸圧縮強度から推定したものである。また△印のデータは、図-6 の一斉三軸圧縮試験結果から得られたデータを再プロットしたものである。図中の○印と●印の結果は、△印のプロットと図-4 に示す傾向から推測される、原点より 45° 方向に立ち上がった点線付近に分布していることがわかる。

4. まとめ

低飽和度の不飽和土の一軸圧縮試験結果に基づくサクシヨン～ボンド応力関係は、三軸圧縮試験から予想される関係に近いことが示された。このことは、サクシヨンを測定した一軸圧縮試験によっても不飽和土の

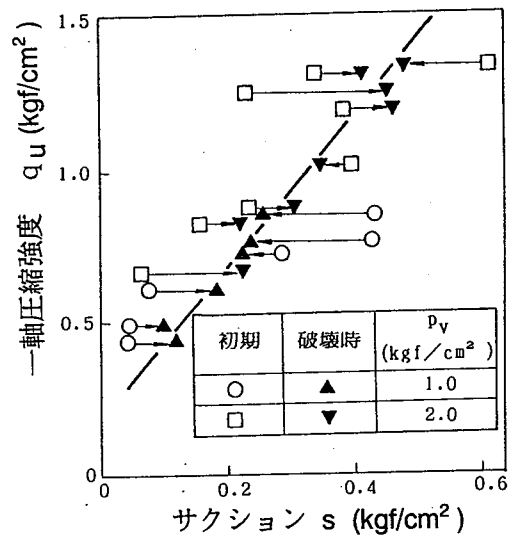
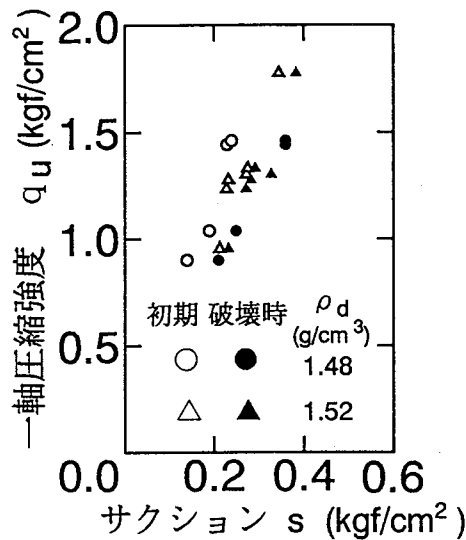


図-12 低い飽和度の不飽和土における一軸圧縮強度～初期・破壊時サクシヨン関係

図-13 高い飽和度の不飽和土における一軸圧縮強度～初期・破壊時サクシヨン関係

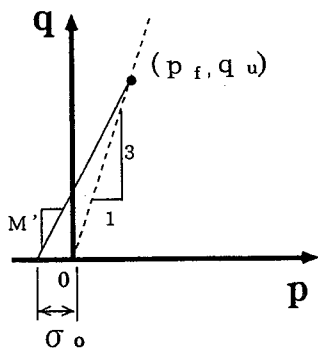


図-14 一軸圧縮強度とボンド応力

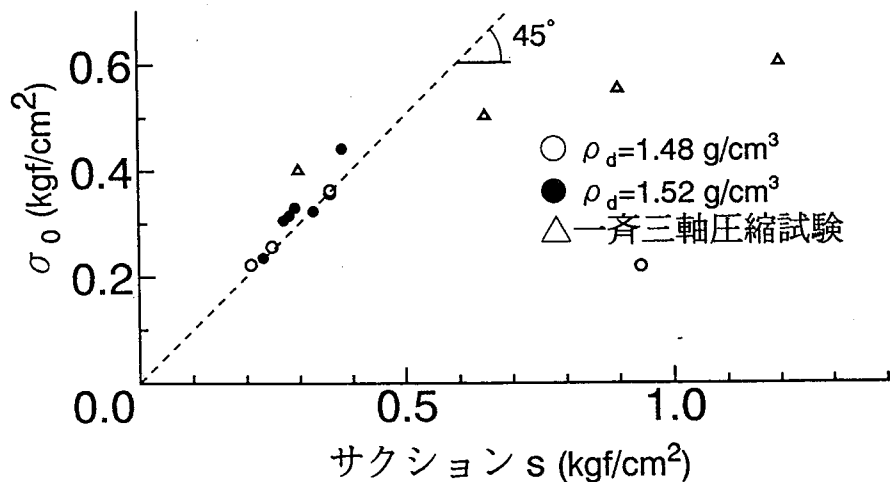


図-15 一斉三軸圧縮試験と一軸圧縮試験におけるサクシヨン～ボンド応力関係の比較

サクシオン～ボンド応力関係が予測可能であることを示している。よって、サクシオンを測定した一軸圧縮試験は、原位置のサクシオンが測定された場合にその地盤の有するボンド応力を知る簡便な方法の一つとなると考えられる。なお、今回の一軸圧縮試験により得られた結果は、破壊時のサクシオンが 0.5 kgf/cm^2 程度の低いものであった。今後破壊時のサクシオンの高いデータを蓄積する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 工藤 豊、三田地 利之 ほか、高残留有効応力を有する粘土試料のサクシオン測定と結果の利用、第 30 回土質工学研究発表会講演集その 1、No247、pp. 615-617、1995.
- 2) 田中政典、田中洋行 ほか、初期サクシオンと一軸強さの関係、第 30 回土質工学研究発表会講演集その 1、No249、 pp. 621-622、1995.
- 3) 阿部廣史、畠山政則：不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験結果について、不飽和地盤の調査・設計・施工に関する諸問題発表論文集、(社) 土質工学会、1993、pp23-58.
- 4) 山口伯樹、土質力学、技報堂出版、P29.
- 5) 軽部大蔵、加藤正司 ほか、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/Ⅲ-34、1996、83-92.
- 6) 川上 浩、不飽和土の負の間隙水圧計測と安定解析、不飽和土の工学的測定に関する信州セミナーテキスト、(社) 土質工学会、1989、pp. 52-69.