

# 予圧密した不飽和土の一軸圧縮強度特性

清水正喜・景山 健  
鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻

## Unconfined Compressive Strength of Unsaturated Soil Prepared by Consolidation

Masayoshi SHIMIZU and Ken KAGEYAMA  
Department of Management of Social Systems and Civil Engineering  
The Graduate School of Engineering, Tottori University  
Tottori, 680-8552 Japan  
Email: mshimizu@cv.tottoriu.ac.jp

**Abstract:** Unconfined compression tests were conducted on a silt sample. Unsaturated specimens were prepared by applying suction to the saturated sample having been one-dimensionally consolidated. Compressive stress-strain-suction behavior is discussed. Bishop's effective stress and Fredlund et al.'s shear strength equation were applied to explain unconfined compressive strengths. Conclusions show that the suction decreases during compression more for specimens of low initial suction than for those of high initial suction; Bishop's effective stress explains well the strength for specimens of high degree of saturation but underestimates it for specimens of low degree of saturation; and Fredlund et al.'s equation would be applied with the consideration of a nonlinear relationship of the parameter  $\phi^b$  included in the equation with the suction.

**Keywords:** Unsaturated soil, Unconfined compression test, Unconfined compressive strength, Suction, Effective stress

### 1. はじめに

本研究の目的は不飽和土の一軸圧縮強度に及ぼすサクシオンと飽和度の影響を調べることである。これまでに、締固めによって作製した供試体を対象にした[1][2]が、締固めた供試体では、初期状態や結果の再現性がよくなかったため、結果の解釈が難しいという問題があった。

本研究では、締固めでなく、スラリー状の試料を圧密したあとにサクシオンを作用させて不飽和化する方法（予圧密法）によって不飽和の供試体を作製した。不飽和化するために作用させるサクシオンの大きさを変えることで飽和度の異なる供試体を作製することができる。

本報告では応力 - ひずみ・サクシオンの挙動を考察するとともに、Bishop の有効応力および Fredlund らの強度式に基づいて、一軸圧縮強度を評価し、それらの一軸圧縮強度に対する適用性を検討する。

### 2. 試料および供試体作製方法

試料は DL クレーを用いた。試料の物理的性質を表 1 に、粒径加積曲線を図 1 に示す。

表 1 試料の物理的性質

土粒子密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.701
コンシステンシー	液性限界 (%)	NP
	塑性限界 (%)	NP
粒度	シルト分 (%)	86
	粘土分 (%)	14

(NP は非塑性であることを示す)

供試体は不飽和土用三軸圧縮試験装置を用いて作製した (図 2)。

図のようにペDESTAL に内径 3.5cm の円筒モールドを設置し、そこに含水比 60% で十分に練り混ぜて脱気したスラリー状の試料を流し込んだ。試料の量は、不飽和化後に供試体高さが約 8cm になるよ

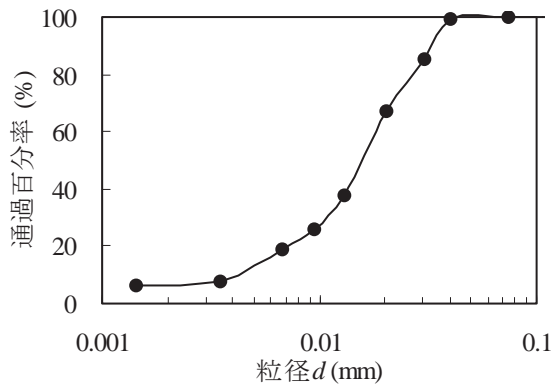


図1 粒径加積曲線

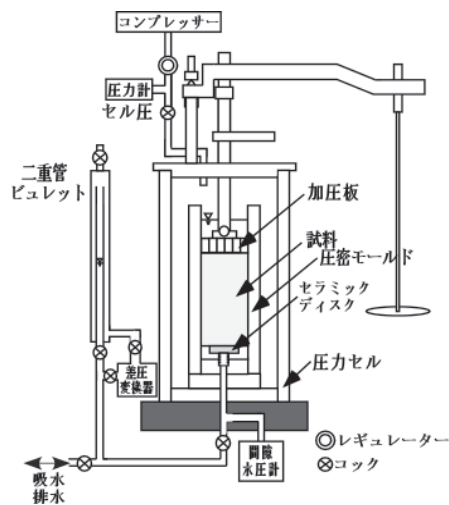


図2 装置図

うに調整した。

まず、上面排水・底面非排水条件で圧密圧力を8.8, 19.8, 49.2kPaと段階的に载荷した。圧密終了後、圧密圧力を8.8kPaまで除荷した。次に不飽和化のために上面および底面排水条件で所定のサクシオンを作用させた。また、二重管ビュレットは大気圧に開放し、サクシオンはセル圧により調節した。なお、この際の圧密圧力は5.7kPaになるように調整した。

サクシオンの作用により供試体底面から排水し、供試体は不飽和になった。不飽和化終了後、セル圧を0(大気圧)にして、セルを解体した。その後、供試体がペDESTAL上に残るように、モールドを取りはずし、一軸圧縮試験に移行した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 供試体

供試体の完成時の様子を写真1に示す。(a)(b)はモールド内周面に何も塗布せずに作製したものの、(c)はモールド内周面にシリコンオイルを塗布して作製したものである。

モールド内面に何も塗布せずに供試体を作製すると、(a)(b)の様に表面が剥がれ落ち、滑らかにならなかった。(b)は試料の空気侵入値(AEV;後述)より高いサクシオンを作用させて作製したものであるが、表面が剥がれ落ちると同時に小さなひび割れなども生じた。

そこで、モールド内周面にシリコンオイルを塗布し供試体作製を行うと(c)の様に表面が滑らかになった。なお、モールド内で行った供試体作製段階の結果にはすべての供試体の結果を用いたが、一軸圧縮試験の結果には表面が滑らかになった供試体のみを用いた。

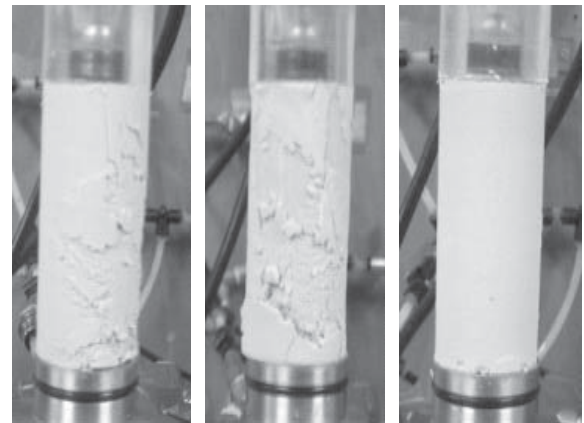


写真1 完成時の供試体

#### 3.2 不飽和化過程

##### (1) 排水挙動

図3に不飽和化過程における排水挙動を示す。どの試験も同じような挙動を見せたため、例として、作用させたサクシオンが試料の空気侵入値より高い試験(70kPa)と低い試験(50kPa)のものを示す。図より作用させたサクシオンが高いほうが排水に長時間を要することと排水量が増えることがわかる。

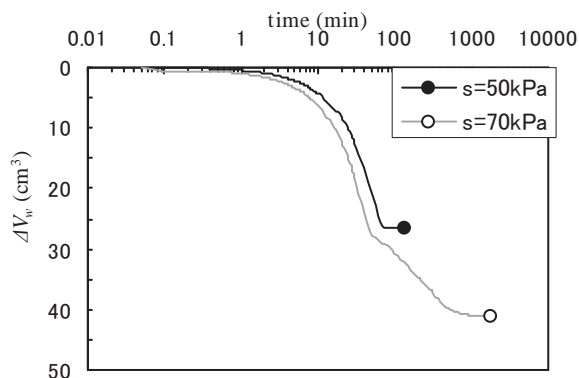


図3 排水挙動

## (2) 水分保持特性

図4に不飽和化時に作用させたサクシオン ( $s$ ) と不飽和化終了時の飽和度 ( $S_r$ ), 含水比 ( $w$ ), 排水量 ( $\Delta V_w$ ) の関係を示す。

図より  $s$  が約 60kPa 以下では  $S_r$ ,  $w$ ,  $\Delta V_w$  はほぼ一定値を示し,  $s$  が 60kPa を超えると  $\Delta V_w$  は増え始め,  $S_r$ ,  $w$  は低含水状態へ移行して行くことがわかる. このことより, 試料の AEV は約 60kPa と判断できる.

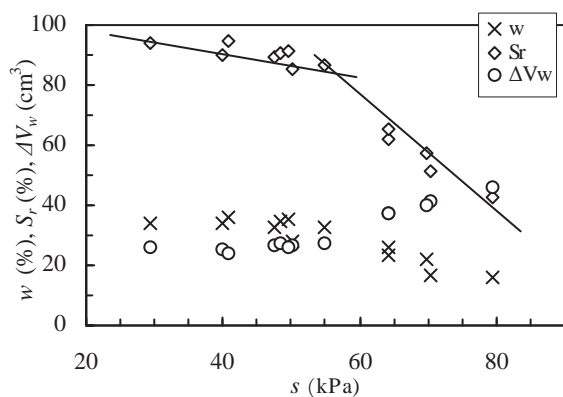


図4 サクシオンと飽和度, 含水比, 排水量の関係 (不飽和化終了時)

## 3.3 軸圧縮過程

図5に圧縮中におけるサクシオンと軸方向圧縮応力との関係を, 図6に圧縮応力と軸方向圧縮ひずみとの関係を示す. 図中, 凡例の数字は不飽和化時に作用させたサクシオンの大きさを表す. 塗りつぶしのマークは飽和度の高い試験 (サクシオンが AEV 以下), 白抜きマークは飽和度の低いもの (サクシオン AEV 以上) を表す.

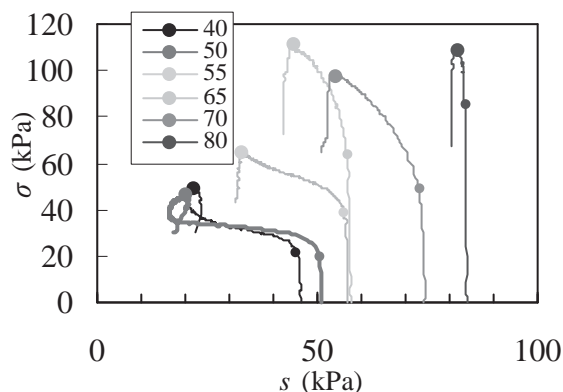


図5 軸圧縮応力とサクシオンの関係

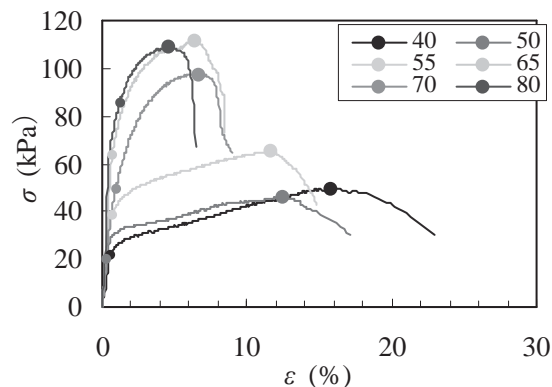


図6 軸圧縮応力と圧縮ひずみ関係

図5より, せん断初期にサクシオンがほとんど変化しない応力域があり, その応力域を過ぎるとサクシオンが大きく減少していることがわかる. このサクシオンが減少し始める点を小さなマークで示している.

また圧縮開始時のサクシオン (初期サクシオン) が低いものは圧縮応力がピークに達する前にサクシオンが一旦上昇し, ピークを過ぎると再び減少した.

図6より, せん断初期に見られたサクシオンの変化が小さい応力域では, ひずみが小さく, この応力域を過ぎるとひずみが大きくなることがわかる.

また, 初期サクシオンが低いものほど圧縮応力最大時のひずみが大きい.

3.4 一軸圧縮強度の理論的評価

(1) Bishop の有効応力に基づく評価

Bishop の有効応力に基づくとき、 $q_u$  は次式で表される[2]

$$q_u = \frac{2 \sin \phi'_B}{1 - \sin \phi'_B} S_{rf} s_f \quad (1)$$

ここに $\phi'_B$ は Bishop の有効応力に関するせん断抵抗角、添え字の f は破壊時を意味する。

図 7 に $\phi'_B$ の値を 30~40° の範囲で変化させたときの  $q_u$  と  $S_{rf} \cdot s_f$  の理論的關係、即ち式(1)による計算値と実験結果を示す。 $\phi'_B = \phi'$  ( $\phi'$ は飽和土の内部摩擦角)と仮定し、三軸圧縮試験から決定した $\phi' = 35^\circ$ を適用すると、作用させたサクシオンが低い試験は実験結果をほぼ説明できるが、作用させたサクシオンが高い試験は実験結果に相当する $\phi'_B$ に幅のある結果となった。

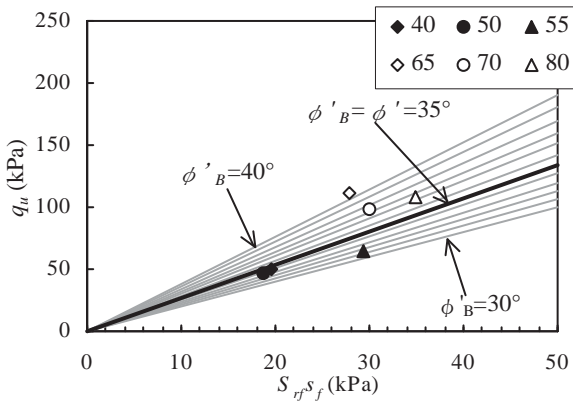


図 7 Bishop の有効応力に基づく評価

(2) Fredlund らの強度式による評価

Fredlund らは次式で不飽和土のせん断強度  $\tau_f$  を評価することを提案している。

$$\tau_f = \sigma_{netf} \cdot \tan \phi' + s_f \cdot \tan \phi^b \quad (2)$$

$\phi'$ は飽和土の有効応力に関する内部摩擦角、 $\phi^b$ は  $\sigma_{net}$  を一定としたときの  $\tau_f$  に対する破壊時のサクシオンの影響を表すパラメータである。

応力円が上式の破壊包絡線に接すると仮定すると

$$q_u = \frac{2 \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} s_f \cdot \tan \phi^b \quad (3)$$

という式が成り立つ。式(3)から $\phi^b$ のサクシオン依存性について考察する。式(3)より、

$$\phi^b = \tan^{-1} \frac{q_u}{\left( \frac{2 \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \right) \cdot s_f} \quad (4)$$

この式から、 $q_u$  と  $s_f$  の実験値に対応する $\phi^b$ を求めることができる。そのようにして求めた $\phi^b$ を  $s_f$  に対してプロットすると図 8 を得る。図より、 $s_f$  が大きくなるにつれ $\phi^b$ が小さくなっていることがわかる。

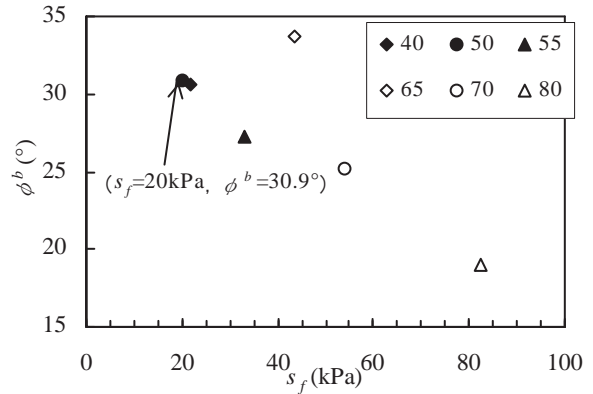


図 8  $s_f$  と  $\phi^b$  の関係

図 9 は、 $s_f$  が最小となった結果 ( $s_f = 20 \text{ kPa} = s_{fr}$ ),  $\phi^b = 30.9^\circ = \phi_r^b$  を基準として $\phi^b$  と  $s_f$  を正規化し、 $\phi^b / \phi_r^b$  と  $s_f / s_{fr}$  の対数との関係を示したものである。傾向からはずれた 1 つのプロットを除くと、次の直線的な関係で近似できる。

$$\frac{\phi^b}{\phi_r^b} = a \log \left( \frac{s_f}{s_{fr}} \right) + 1 \quad (a \text{ は定数}) \quad (5)$$

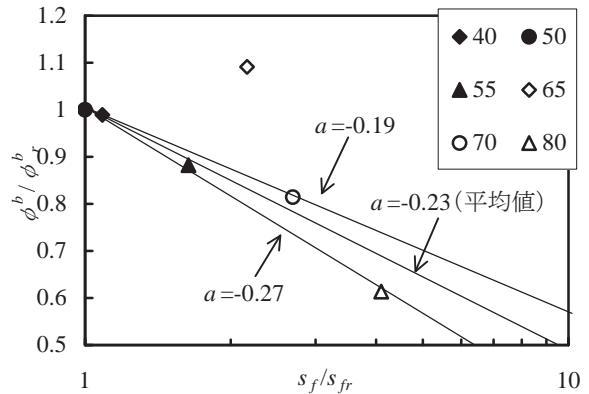


図 9  $s_f / s_{fr}$  と  $\phi^b / \phi_r^b$  の関係

図中に、上限と下限に相当する  $a$  の値、および、その平均値を示した。  $a$  の各値に対して式(5)から  $\phi^b$  を  $s_f$  の関数として表すことができる。その関係を用いて、式(3)より  $q_u$  と  $s_f$  の関係を計算できる。結果を図 10 に示す。図中、3本の曲線は  $a$  の各値に対応する計算値、プロットは実験結果である。

図 10 より、 $\phi^b$  の  $s_f$  に対する非線形性を考慮することによって実験値をある程度説明することができる。非線形性を考慮しないと Fredlund らの強度式では実験値を説明することが困難である。

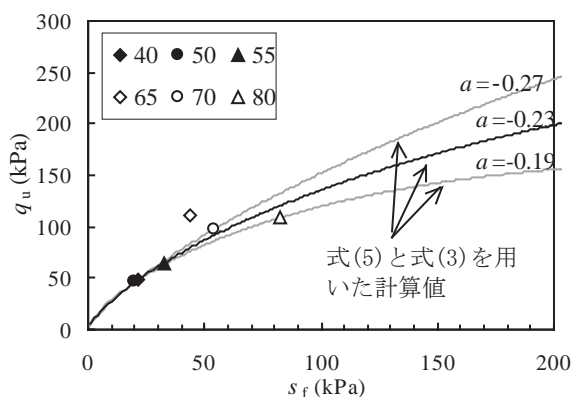


図 10 Fredlund らの強度式による評価

#### 4. 結論

##### (1) 供試体作製

供試体作製時にモールド内周面にシリコンオイルを塗布することにより、モールドを取りはずした際の供試体表面の乱れを防ぐことができた。

##### (2) 圧縮応力とサクシオン・ひずみ関係

応力 - サクシオン・ひずみの挙動は圧縮中のサクシオンの変動が大きいものと小さいものに分けることができる。初期サクシオンの低いものは、サクシ

ヨンの変動が大きく、圧縮応力が最大になるまでのひずみが大きい。一方、初期サクシオンの高いものは、サクシオンの変動が小さく、圧縮応力が最大になるまでのひずみが小さい。

また、初期サクシオンが高いものほど一軸圧縮強度は大きい。

##### (3) 強度特性

Bishop の有効応力に基づく、飽和度の高い供試体の一軸圧縮強度  $q_u$  は評価できるが、飽和度の低い供試体の強度  $q_u$  は過小評価される。

Fredlund らの強度式では幅広い飽和度の試験結果を説明するためには、 $\phi^b$  のサクシオン依存性を考慮しなければならない。

#### 謝辞

本研究の一部は、第二著者が土木工学科卒業研究として実施したものであり、土木工学講座榎明潔教授、技術部岩成敬介氏にご指導を賜った。また、実験に際して寺方淳治氏にお世話になった。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 清水正喜, 木下聡, 西岡龍二: 締固めた不飽和土の締固め特性と一軸圧縮挙動, 土木学会第 61 回年次学術講演会, III-363, 2006.
- [2] 清水正喜, 柳瀬佳史: 締固めた不飽和シルトの一軸圧縮強度特性: 粒子間垂直応力に基づく考察, 土木学会第 62 回年次学術講演会, III - 107, 2007.

(受理 平成 20 年 10 月 6 日)