

## 不飽和土の一軸圧縮試験における強度とサクシヨンの挙動

## Strength and Suction of Unsaturated Soil in Unconfined Compression Tests

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学大学院工学研究科)  
景山 健 Ken KAGEYAMA (基礎地盤コンサルタンツ株)

低塑性シルト試料を用いて、スラリーから予圧密・不飽和化して作製した供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。供試体を水分保持特性に基づいて湿潤側と乾燥側に分け、さらに圧縮試験開始時の初期サクシヨンと不飽和化時に作用させたサクシヨンの相対的な大きさも考慮して、圧縮応力-ひずみ関係、圧縮応力-サクシヨン関係および一軸圧縮強度について考察した。主な結論として、Bishop の有効応力に基づいて一軸圧縮強度を予測すると乾燥側供試体に対しては強度を過小に、湿潤側供試体に対しては過大に評価することを示した。

キーワード：一軸圧縮試験，せん断強度，サクシヨン，有効応力

(IGC : D-5, E-2)

## 1. はじめに

本研究の目的は不飽和土のせん断強度評価方法を確立することである。これまでに不飽和土の三軸圧縮試験を実施して、Bishop の有効応力<sup>1)</sup>と Fredlund ら<sup>2)</sup>の考え方を取り上げてせん断強度を評価するうえでの適用性を検討してきた<sup>3)</sup>。先の研究<sup>4)</sup>において一軸圧縮強度を Bishop の有効応力で説明することを試みたが、限られた個数の試験結果を用いていたため明確な結論を引き出すには至らなかった。また、結果のばらつきの原因を深く追求するには至らなかった。

一軸圧縮試験時の応力-ひずみ挙動や強度特性を考察する上で供試体のサクシヨンの影響を調べるのが重要である。そのためには所定のサクシヨンを有する供試体を高い再現性で作成する必要がある。この観点から本研究ではスラリーから予圧密・不飽和化して供試体を作製する方法を採用している。この方法では、締固めをせず、また供試体を整形することもないためばらつきを抑えることができる。

ところが圧縮試験直前に供試体が有するサクシヨン（初期サクシヨン）が不飽和化時に作用させたサクシヨンと等しくならない。このことが結果のばらつきを生み、考察する上での障害になる。本論文では初期サクシヨンと不飽和化時に作用させたサクシヨンの相対的な大きさを考慮して結果を考察する。また、試料の水分保持特性に基づいて供試体を湿潤側と乾燥側に分けて、一軸圧縮試験時の応力-ひずみ関係やサクシヨンの挙動を議論する。

## 2. 試料・方法

## 2.1 試料の物理的性質

試料は、市販の粉末試料（DL クレー）であり、粘土分も含まれているが、シルト分が 90%以上の細粒土である（表-1 および図-1 参照）。

表-1 試料の物理的性質

土粒子の密度	$\rho_s$	Mg/m <sup>3</sup>	2.689
コンシステンシー*	$w_L$	(%)	32.8
	$w_P$	(%)	17.0
粒度	シルト分	(%)	92.4
	粘土分	(%)	7.6

\*寺方<sup>5)</sup>による。

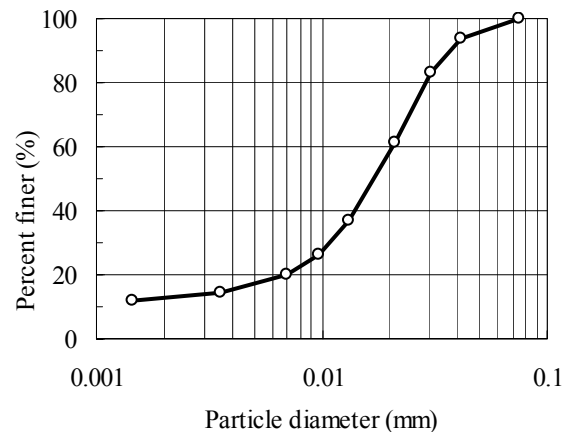


図-1 試料の粒径加積曲線

この試料は塑性がきわめて低く、塑性限界が大きくばらつき、液性限界は JIS の方法で決定することができなかった。そのため、従来、著者らの研究において、同試料を非塑性シルトと分類していた。

表-1 のコンシステンシー限界は以下に述べる方法で求められた<sup>5)</sup>。塑性限界試験を 5 人で同時に実施し、各試験者が塑性限界と判断した状態を一人の代表者が塑性限界として適当かどうか判定した。この方法で塑性限界のばらつきが抑えられた。また、液性限界試験において、JIS に定められた標準的な量の試料では溝が切れなかったため、試料の量を少なくして測定された。

## 2.2 装置

不飽和土用三軸圧縮試験装置を用いた。供試体作製時の装置概要を図-2 と図-3 に、一軸圧縮試験時の装置を図-4 にそれぞれ示している。詳細は関連する場所で述べる。

なお、荷重計は容量 2kN のものを使用した。軸方向変位は最小読み取り値 1/500mm の変位計で、間隙水圧は最小読み取り値 0.25kPa の圧力変換器でそれぞれ測定した。また、排水量は差圧容量 100cmH<sub>2</sub>O の差圧変換器を用いて計測した。いずれもひずみゲージタイプの電気式変換器である。測定およびデータ収録にはデータロガーを用いた。

## 2.3 供試体作製方法

三軸セルに設置した円筒モールド内でスラリー試料を一次元的に予圧密・不飽和化した(図-2)。

モールド内径は 35mm で、ペダスタル外径に等しくしており、ペダスタルがモールドの底に来るように設置した。モールドの内面にシリコンオイルを塗布した。2 種

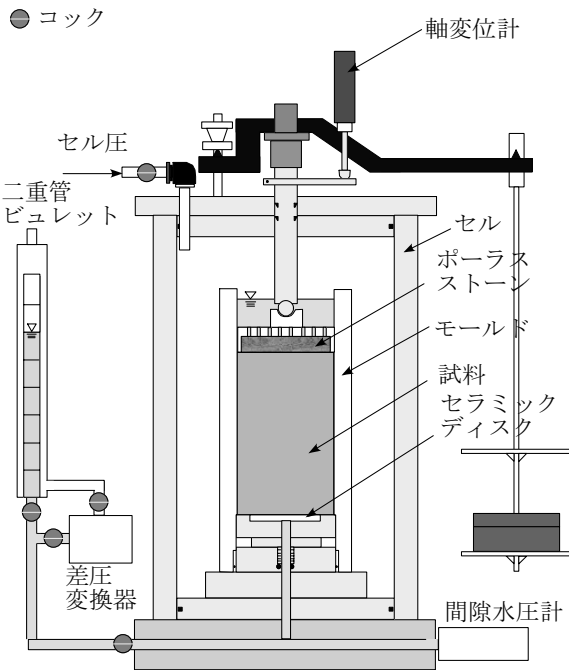


図-2 供試体作製のための装置(圧密によって排水した水がモールド内に溜まった状態を示している)

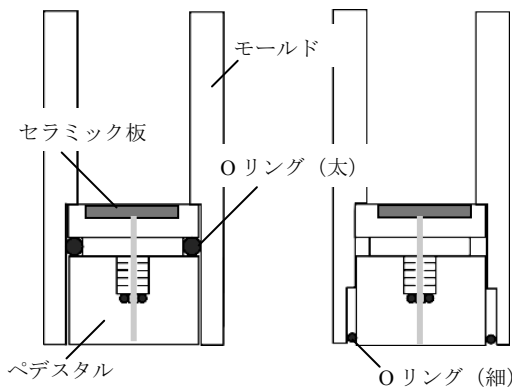


図-3 モールドの詳細(左:改良前, 右:改良後)

類のモールドを使用した(図-3)。予圧密が終了したらモールドを取り外すが、取り外しの際にできるだけ供試体を乱さないように改良を加えた。取り外しの手順と取り外しによる供試体の乱れについてそれぞれ後述する。

スラリーは含水比 60%で、その量は、下で述べる方法でサクシオンを作用させた後に供試体の高さが約 80mm になるように調整した。

### (1) 飽和状態での圧密

はじめに飽和状態で鉛直応力を段階的に最大 50kPa で圧密した。鉛直応力は錘で載荷した。底面非排水・上面排水の条件で行った。排水した水は供試体上面に溜まる。排水量は直接測定していないが、供試体が飽和状態であると考えられるので、供試体の圧縮量から推定した。

図は圧密によって供試体から排水した水がモールド内で供試体上面に溜まった状態を示している。次の不飽和化の段階において底面排水条件でセル圧を作用させるので、溜まった水が再び供試体内へ流入し供試体底面から排水される。この再流入・再排水に相当の時間を要する。研究を始めた当初は、再流入・再排水を許していたが、その後、圧密が終了したら一旦セルを取り外し溜まった水を吸い取るようにした(その質量を測定した)。吸い取り後、セルを再び装着した。

### (2) 不飽和化

飽和状態での圧密が終了した後、所定の大きさのサクシオン ( $s_a$ ) を作用させて供試体を不飽和状態にした。サクシオンは加圧板法で制御した。

三軸セルに空気圧 ( $u_c$ ) を作用させると  $u_c$  は供試体の間隙空気圧 ( $u_a$ ) として作用する。一方、底面排水の条件にして、供試体底面に接するセラミック板の下部から所定の水圧を作用させると、それが間隙水圧 ( $u_w$ ) として働く。本研究では  $u_a$  と  $u_w$  の差 ( $u_a - u_w$ ) をサクシオン  $s$  とする。

サクシオンを作用させると供試体の底面から排水する。排水量は二重管ビュレット内水面の変動量を差圧変換器で測定して求めた。排水とともに不飽和化が進む。

飽和度の異なる供試体を作成するため、サクシオンは 40~80kPa の範囲で設定した。具体的には、二重管ビュレット内水面を大気圧に開放し、40~80kPa の範囲で所定の大きさのセル圧を作用させた。この不飽和化の段階で作用させたサクシオンを  $s_a$  と記す。

一部の供試体に対してサクシオンの履歴を与えた。まず  $s = s_{a1}$  で不飽和化し、次にサクシオンを低下させて  $s = s_{a2}$  ( $s_{a2} < s_{a1}$ ) で吸水させた。これは、後述のように、供試体に乱れを与えるとサクシオンが低下するという仮定の下に、人為的に供試体に乱れを与えることを模擬したものである。 $s_{a1}$  として 70 または 50kPa,  $s_{a2}$  として 40 または 20kPa に設定した。

### (3) モールドの取り外し

不飽和化が完了すると、セルを取り外し、供試体をペダスタル上に残した状態で円筒モールドを鉛直上方に抜くようにして取り外した。供試体をペダスタル上に残すために、載荷ロッドと圧縮試験機載荷フレームに固定さ

れた荷重計の間に支え棒を設けて載荷板が上方に動かないようにした。

先に触れたように、モールドの内面にシリコンオイルを塗布して、供試体の表面が剥離したり乱れたりするのを避けている（モールド内面にオイルを塗布しない場合に供試体表面が乱れることを既に確認している<sup>6)</sup>。シリコンオイルを塗布しても、モールドの取り外しの動作は供試体に余分な力を与えて供試体を乱す可能性がある。とくに、供試体のサクシジョンに与える影響について詳細に検討した。方法と結果は第3章で詳述する。

## 2.4 一軸圧縮試験の方法

上に述べた方法で圧密・不飽和化した供試体は自立できるので一軸圧縮試験を行うことができる。一軸圧縮試験に用いた装置を図-4に示した。圧縮試験の開始前に供試体のサクシジョン（初期サクシジョン、 $s_0$ ）を測定した。なお、供試体にはメンブレンを被せていない。

### (1) 初期サクシジョンの測定

供試体底面を非排水の条件にしてセル圧、即ち間隙空気圧（ $u_a$ ）を作用させ、セラミック板の下部で間隙水圧（ $u_w$ ）を測定する。その差（ $u_a - u_w$ ）が初期サクシジョン  $s_0$  である。すべての試験においてセル圧として 100kPa を作用させた。

### (2) 圧縮試験

初期サクシジョン  $s_0$  を測定した後、そのまま軸方向に圧縮した。圧縮中の挙動と一軸圧縮強度とに対する圧縮速度の影響を調べるために圧縮速度を変えた。早いものは供試体高さが 80mm のとき 0.987%/min であり、遅いものは 0.084~0.095%/min である。一つの供試体に対してのみ中間の速度 0.34%/min で圧縮した。

圧縮中は圧縮応力、圧縮量およびサクシジョンを測定し

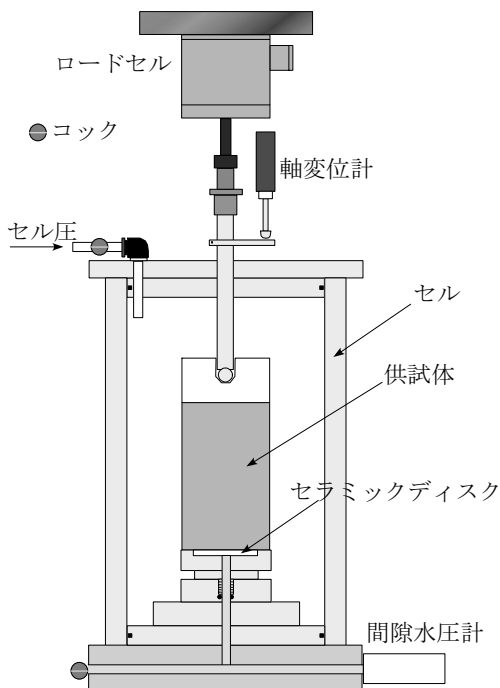


図-4 一軸圧縮試験装置

た。本研究では軸圧縮中の供試体の体積変化を測定していないので、圧縮中体積が一定であるとして結果の整理を行った。体積を一定としたことの、強度特性の評価に対して与える影響については3.4節で考察する。

## 3. 結果と考察

### 3.1 初期サクシジョン

#### (1) 初期サクシジョン $s_0$ と作用サクシジョン $s_a$ の関係

図-5は、すべての供試体の初期サクシジョン  $s_0$  を不飽和化時に作用させたサクシジョン  $s_a$  に対してプロットしたものである。図において、改良後のモールドを使用したものと改良前のモールドを使用したものを区別し、さらに後者のうち、強制的に吸水させたものを区別した。なお、強制的に吸水させたものは吸水時のサクシジョンの値（ $s_{a2}$ ）を横軸にとった。

所定の大きさのサクシジョンを持った一軸圧縮試験の供試体を作製する目的で所定のサクシジョン  $s_a$  を作用させたが、圧縮試験直前に測定したサクシジョン  $s_0$  は必ずしも  $s_a$  に等しくならない。 $s_a$  より大きくなるものや逆に小さくなるものが存在している。

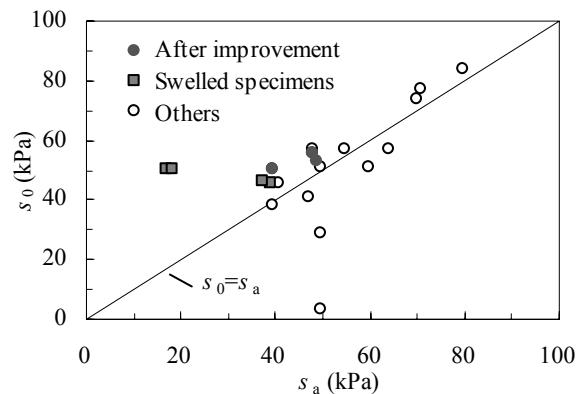


図-5 不飽和化時に与えたサクシジョン  $s_a$  と測定した初期サクシジョン  $s_0$  の関係

#### (2) 取り外し動作が初期サクシジョン $s_0$ に与える影響

モールドの取り外すと供試体は大気に曝されるので乾燥を受けるとともに間隙水圧は低下する。よって、モールドの取り外しに伴って機械的な乱れが生じないと仮定すると、モールド取り外し後時間とともにサクシジョンは増加（間隙水圧は減少）するものと考えられる。その場合、初期サクシジョン  $s_0$  は  $s_a$  より大きくなる。

一方、機械的な乱れを与えると供試体の間隙水圧が上昇する、即ち、サクシジョンが低下する。機械的な乱れは供試体とモールド内面との間の摩擦や取り外しという動作そのものの不安定さに起因する。供試体とモールド内面との間の摩擦はシリコンオイルを塗布することによって軽減できることをすでに確かめている<sup>6)</sup>。

取り外し動作が初期サクシジョン  $s_0$  に与える影響を以下の方法によって調べた。

表-2  $s_a, s_{01}, s_{02}$ の比較

供試体 No.	$s_a$	$s_{01}$ ( $s_{01}-s_a$ )	$s_{02}$ ( $s_{02}-s_a$ )	$s_{02}-s_{01}$
1	49.2	51.6 (2.4)	21.8 (-27.4)	-29.8
2	49.9	48.9 (-1.0)	42.7 (-7.2)	-6.2
3	75.8	76.0 (0.2)	70.5 (-5.3)	-5.5
4	48.7	51.8 (3.1)	53.0 (4.3)	1.2

注：改良前のモードを使用。No.1, 2, 3はOリングを装着。No.4はOリングを装着せず。

供試体は、先に述べた方法で、予圧密および不飽和化させた。不飽和化終了後、セルを取り外さず（モードも設置した状態で）、底面を非排水にして、セル圧100kPaを作用させて間隙水圧  $u_w$ 、したがってサクションを測定した（測定したサクションを  $s_{01}$  と記す）。次に、通常の方法で初期サクションを測定した。即ち、セル取り外し・モード取り外し・セル再設置という手順を経て、セル圧 100kPa を作用させてサクションを測定した（測定したサクションを  $s_{02}$  と記す）。

検証実験は4つの供試体に対して行った。結果を表-2に示す。図-3の改良前モードを使用した時、No.1, 2および3は図に示したようにペDESTALとモードの間にOリングを装着し、No.4はOリングを装着しないで行った。

表より、すべての供試体において  $s_a$  と  $s_{01}$  はほぼ等しい値を示すことがわかる。即ち作用させたサクションは確かに供試体に付与されている。一方、 $s_{02}$  は、供試体 No.4を除いて、 $s_{01}$  に比べ減少している。また、減少量は試験によって異なっている。 $s_{01}$  と  $s_{02}$  の測定の間にはモードの取り外し作業のみを行っている。このことから、モードの取り外しによって供試体の初期サクションは減少したり場合によっては増加する。

Oリングを装着しなかったNo.4では、 $s_{02}$  と  $s_{01}$  はほぼ同じであり、どちらも  $s_a$  より低くならなかった。このことから、モードの取り外しの際、乱れを与える主な要因は、Oリングとモードとの摩擦のために、モードを引き上げるのに大きな力が必要となり、モードをスムーズに引き上げることが困難になっていたと考えられる。

(3) モードの改良

上の結果を考慮して、図-3に示したようにモードを改良した。細いOリングを用いて、さらにOリングをモードの下端に位置するよう取り付けすることで、小さな力でモードを取り外せるようにした。実際、図-5からわかるように、改良したモードを用いると  $s_0$  が  $s_a$  より低くなることはなかった。

3.2 試料の水分保持特性

不飽和化時に作用させたサクション  $s_a$  と飽和度  $S_r$  の関係を図-6に示す。吸水させた供試体は吸水前と後のそれ

ぞれの関係を示した。この図から、 $s_a$  が 55kPa より大きくなると試料の飽和度が急に低下する、即ち、試料の空気侵入値 AEV は約 55kPa と判定できる。なお、飽和度に関する閾値は約 80%である。一軸圧縮時の挙動や強度を考察する際に、作用させたサクション  $s_a$  のレベルによって  $s_a \geq 55kPa$  の場合を「乾燥側 (Dry)」,  $s_a < 55kPa$  の場合を「湿潤側 (Wet)」に分ける。

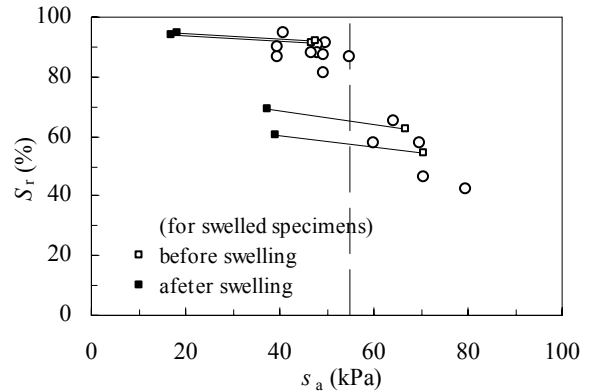


図-6 水分保持特性

3.3 応力-ひずみ・サクションの関係

(1) 応力-ひずみ関係

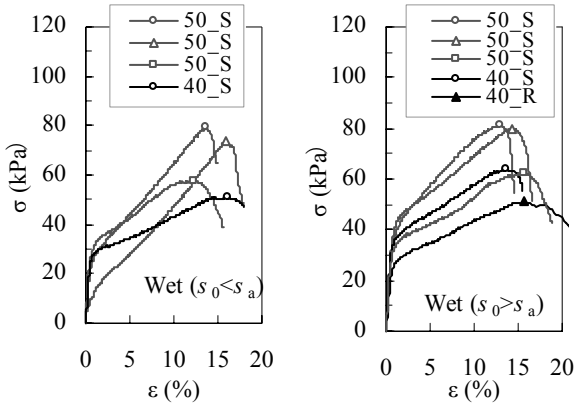
図-7に圧縮応力とひずみの関係を示す。湿潤側の供試体に対する結果を(a)に、乾燥側の結果を(b)にそれぞれ示した。さらに、湿潤および乾燥側において  $s_0 > s_a$  の場合と  $s_0 < s_a$  の場合に分けている。図中の凡例の最初の数字は不飽和化時に作用させたサクション ( $s_a$ ) の値を示す。凡例に ( ) があるものは強制的に吸水させた供試体を表して、最初の数値は不飽和化時に作用させたサクション ( $s_{a1}$ ) を、( ) 内の数値は吸水時のサクション ( $s_{a2}$ ) の値を表す。また、圧縮速度の違いを R (速い速度), M (中間の速度), S (遅い速度) で区別した。

まず、湿潤側と乾燥側の結果を比べる。 $s_0$  の  $s_a$  に対する相対的な大きさによらず、乾燥側では小さいひずみで圧縮応力がピークに達している。湿潤側では圧縮初期に急激に応力が増加するが、あるレベルに達すると剛性が低下し、大きなひずみでようやくピークに達する。

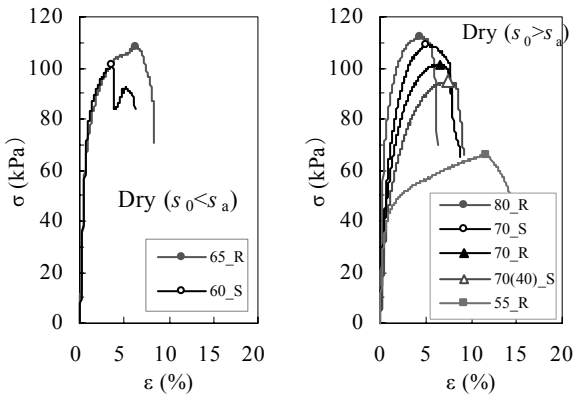
次に、湿潤側に着目し、 $s_0 > s_a$  の場合と  $s_0 < s_a$  の場合を比較する。圧縮応力のピーク値に大きな違いは見られないが、上述の剛性が低下し始めるときの応力に違いがあるように見える。 $s_0 > s_a$  の方がその応力レベルが高い。

乾燥側の場合には、 $s_0 < s_a$  となった供試体が少ないので  $s_0$  の  $s_a$  に対する相対的な大きさの影響について明確な傾向を読み取ることができない。

さらに、各図において、 $s_a$  が大きいほど圧縮強度が大きくなること、 $s_a$  が同じであれば圧縮速度が遅い方が強度が大きくなること、吸水させると  $s_a$  が同じであっても強度が低下することなどがわかる。



(a) 湿潤側供試体



(b) 乾燥側供試体

図-7 応力-ひずみ挙動

(2) サクシジョンの挙動

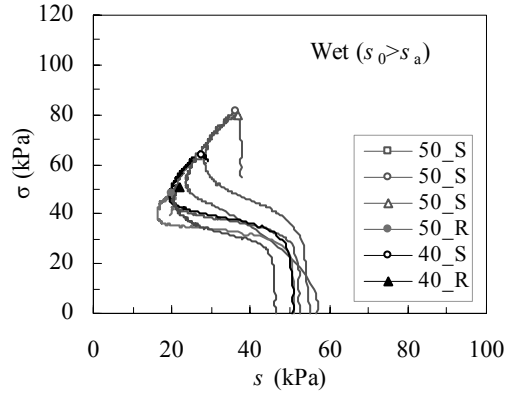
図-8 に圧縮応力とサクシジョンの関係を示した。(a)は湿潤側で  $s_0 > s_a$  の場合、(b)は湿潤側で  $s_0 < s_a$  の場合、(c)は乾燥側の場合の結果である。

図-8(a)より、圧縮の初期にサクシジョンがほとんど変動しない応力の範囲が存在し、その応力レベルを超えるとサクシジョンが急に低下し、次にサクシジョンが増加するという挙動が見られる。サクシジョンの変動が見られない初期の応力範囲は、応力-ひずみ関係における初期の立ち上がり部分に相当している。

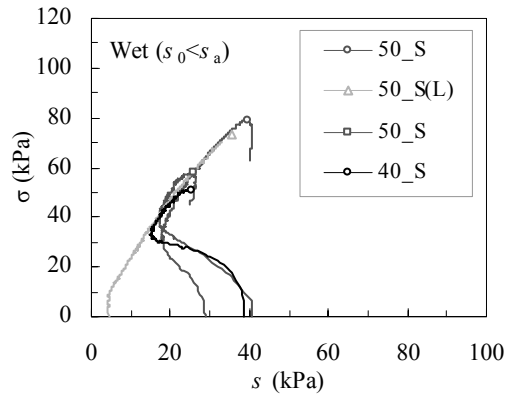
同図(b)では、例外(50S-Lの試験)を除いて、圧縮の最初からサクシジョンが低下していて、図(a)で見られたようなサクシジョンの変動が少ない応力範囲が存在しない。供試体の乱れの影響と見ることができる。例外の試験は供試体作製時にモールドを引き上げるのに失敗して自立はしたが試験前に樽状を呈したものである。換言すると極端に乱した供試体である。

乾燥側の供試体は、55Rの試験を除いて、サクシジョンは応力がピークに達するまでわずかに減少するものの、湿潤側の供試体で見られたような急激なサクシジョンの減少が見られない。この55Rの試験は、 $s_a=55\text{kPa}$ なので乾燥側として扱ったが挙動そのものは湿潤側の挙動と似ている。

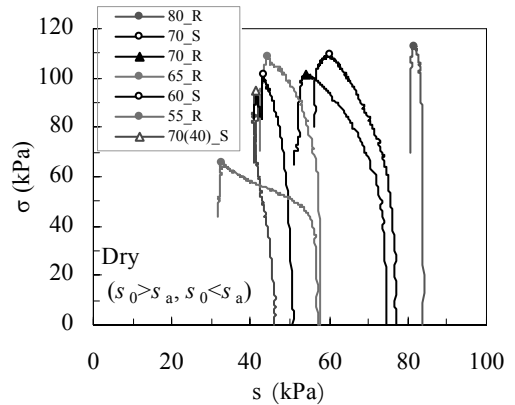
乾燥側の供試体のもう一つの特徴は強度がサクシジョン



(a) 湿潤側で  $s_0 > s_a$  となった供試体



(b) 湿潤側で  $s_0 < s_a$  となった供試体



(c) 乾燥側の供試体

図-8 圧縮中のサクシジョンの挙動

の初期値 ( $\sigma=0$  におけるサクシジョンの値) と相関を示していないことである。応力-ひずみ関係で指摘したように強度は  $s_a$  と相関的であるが  $s_0$  とは相関を示さないということである。

3.4 有効応力による一軸圧縮強度の評価

(1) Bishop の有効応力と破壊基準

一軸圧縮試験における圧縮応力最大時の主応力状態は

$$\sigma_1 = \sigma_c + q_u, \quad \sigma_3 = \sigma_c \quad (1)$$

となる．ここに  $\sigma_c$  はセル圧 (=間隙空気圧  $u_a$ )．また，正味の主応力 (基底主応力) は

$$\sigma_{1net} = \sigma_1 - u_a = q_u, \quad \sigma_{3net} = \sigma_3 - u_a = 0 \quad (2)$$

Bishop の有効垂直応力  $\sigma'_B$  は

$$\sigma'_B = \sigma_{net} + S_r \cdot s \quad (3)$$

で表される．ここに， $s = u_a - u_w$  ( $u_w$  は間隙水圧)．一軸圧縮試験時には

$$\sigma'_{1B} = \sigma_{1net} + S_r \cdot s = q_u + S_r \cdot s, \quad \sigma'_{3B} = \sigma_{3net} + S_r \cdot s = S_r \cdot s \quad (4)$$

$\sigma'_B - \tau$  応力面で次式の破壊包絡線が存在すると仮定する (図-9 参照) :

$$\tau = \sigma'_B \tan \phi'_B + c'_B \quad (5)$$

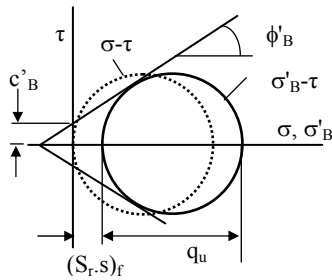


図-9 破壊時の Bishop の有効応力円と破壊包絡線

応力円が破壊包絡線に接するための条件から

$$q_u = \frac{2}{1 - \sin \phi'_B} \{ c'_B \cos \phi'_B + (S_r \cdot s)_f \sin \phi'_B \} \quad (6)$$

$c'_B = 0$  のとき

$$q_u = \frac{2 \sin \phi'_B}{1 - \sin \phi'_B} (S_r \cdot s)_f \quad (7)$$

後掲の図-11 に示すように，これまでに行った三軸圧縮試験の結果によれば， $\phi'_B$  は  $\phi'$  を下限近くに含む範囲で変動する ( $33.4^\circ < \phi'_B < 41.0^\circ$ ;  $\phi' = 34.7^\circ$ ， $\phi'$  は飽和状態での有効応力に関するせん断抵抗角)．また，同図より  $c'_B$  はすべての結果を包絡する場合でも 7kPa と非常に小さいので本研究では  $c'_B = 0$  とおくことにする．よって，式(7)を用いて考察する．

一軸圧縮試験中の体積変化は測定していない．ここではせん断中体積が変化しないと仮定して  $q_u$  および破壊時の飽和度を算定した．この仮定の影響度を後に評価する．

(2) Bishop の有効応力に基づく一軸圧縮強度の評価

図-10 は式(7)による  $q_u$  と  $(S_r \cdot s)_f$  の理論的關係と実測値を比較したものである．

図中，3本の実線は， $\phi'_B = 30, 35$  および  $40^\circ$  の場合の理論的關係である．著者らによる飽和・不飽和状態の三軸圧縮試験の結果 (図-11 参照) によれば，飽和状態では  $\phi' = 34.7^\circ$  ( $\approx 35^\circ$ ) であり， $\phi'_B = 35^\circ$  の関係は  $\phi'_B = \phi'$  と仮定した場合の理論的關係とみなせる．

図-10 において，塗りつぶしたマークは湿潤側で不飽和化した供試体 ( $s_a < 55\text{kPa}$ ) の結果であり，白の (空白

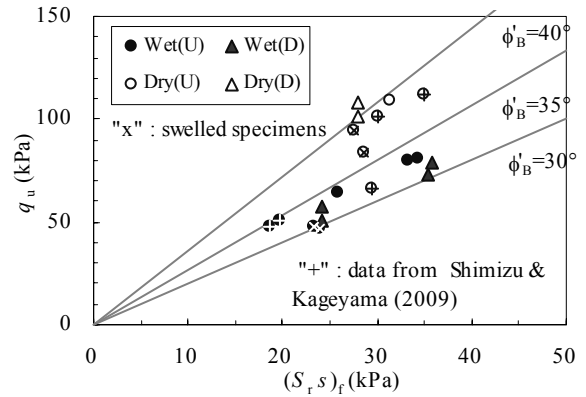


図-10 Bishop の有効応力に基づく一軸圧縮強度の評価 (理論値と実測値の比較)

の) マークは乾燥側 ( $s_a \geq 55\text{kPa}$ ) の結果である．また，(U)で識別したマーク (○, ●) は初期サクシオン  $s_0$  が  $s_a$  より大きくなったもの，(D) は  $s_0$  が  $s_a$  より小さくなったものである (U と D はそれぞれ Undisturbed と Disturbed の頭文字である)．さらに，"x" は吸水させた供試体 (人為的に乱した供試体) である．

なお，プラス記号 (+) を付したものは先の研究<sup>4)</sup>で用いたデータである．

図から以下のことがわかる：

- 1)  $\phi'_B = \phi'$  と仮定するとすべての結果の平均的な傾向を表す．このことは先の研究<sup>4)</sup>において限られた数のデータを用いて結論付けたことと合致している．
- 2) この平均的な関係 ( $\phi'_B = \phi'$ ) によれば，乾燥側の供試体の一軸圧縮強度を過小に評価し，湿潤側の強度を過大に評価する．
- 3) 乾燥側と湿潤側のそれぞれにおいて強制的に吸水させると (人為的に攪乱すると)  $q_u$  が低下する．
- 4) すべての実測値は， $30^\circ < \phi'_B < 40^\circ$  で予測される範囲に入っている．この  $\phi'_B$  の範囲は三軸圧縮試験の結果に基づく範囲とほぼ一致する．よって，不飽和状態における一軸圧縮強度は，不飽和状態における三軸圧縮強度を Bishop の有効応力で説明できるのと同程度に，Bishop の

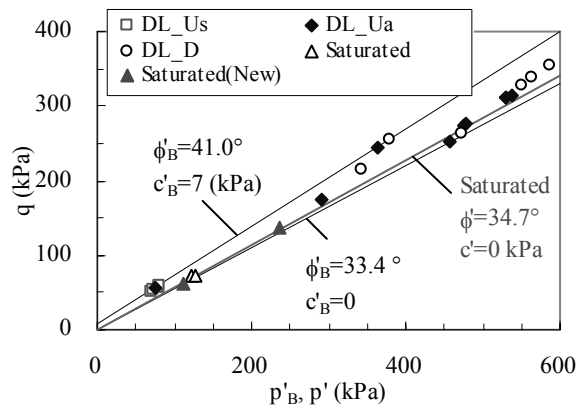


図-11 種々の排水条件で行った三軸圧縮試験の結果：破壊時の応力状態<sup>3)</sup>，ここに  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ ； $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ ．

有効応力で説明できるといえる。

(3) 体積変化の評価

先に述べたように一軸圧縮中に体積が変化しないと仮定した。この過程の妥当性を評価する。

図-12 は本研究で実施した一軸圧縮試験と同じ排水条件で行った間隙空気圧一定の非排水三軸圧縮試験の結果である。せん断中に体積が圧縮している。初期サクシジョンの低いものほどせん断中に生じた体積ひずみが大きいが高々4%であることがわかる。よって、一軸圧縮試験中に生じる体積変化を考慮しても図-10 の特性に大きな変化はないと思われる。

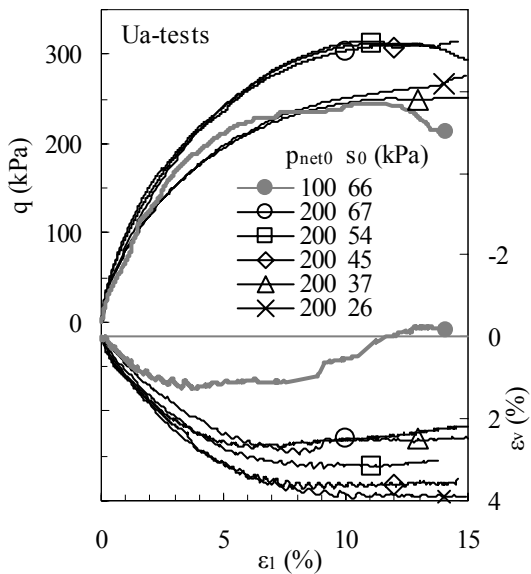


図-12  $u_a$ 一定非排水三軸圧縮試験の結果<sup>3)</sup>

4. 結論

スラリー状態で圧密した後、サクシジョンを作用させて不飽和化した供試体に対して一軸圧縮試験を行った。試料の水分保持特性と不飽和化のために作用させたサクシジョン  $s_a$  の大きさに基づいて供試体を乾燥側と湿潤側に分類した。また、一軸圧縮開始直前に測定したサクシジョン  $s_0$  は作用させたサクシジョン  $s_a$  と異なった。このことから、湿潤/乾燥の別と  $s_0$  の  $s_a$  に対する相対的な大きさを考慮して、一軸圧縮試験時の応力-ひずみ関係とサクシジョンの変化挙動、ならびに一軸圧縮強度特性を考察した。さらに、Bishop の有効応力に基づく破壊基準を仮定して一軸圧縮強度を表す式を導き、実測値と比較した。

応力-ひずみ挙動について得られた結果を述べる。

- (1)  $s_0$  の  $s_a$  に対する相対的な大きさによらず、乾燥側では小さいひずみで圧縮応力がピークに達した。湿潤側では圧縮初期に急激に応力が増加するがあるレベルに達すると剛性が低下し、大きなひずみでようやくピークに達した。
- (2) 湿潤側で  $s_0 > s_a$  となった供試体と乾燥側の供試体では、

圧縮の初期にサクシジョンがほとんど変動しない応力の範囲が存在し、その範囲は応力-ひずみ関係における初期の立ち上がり部分に相当している。

- (3) 湿潤側で  $s_0 < s_a$  となった供試体は、圧縮の最初からサクシジョンが低下しサクシジョンの変動が少ない応力範囲が存在しない。これは供試体の乱れによる影響と推察した。
- (4) 乾燥側の供試体では強度が初期サクシジョン  $s_0$  と相関を示さず、作用させたサクシジョン  $s_a$  と相関的であった。

Bishop の有効応力に基づいて算定した一軸圧縮強度と実測値を比較し、以下の知見を得た：

- (1)  $\phi'_B = \phi'$  と仮定するとすべての結果の平均的な傾向を表すことができる。
- (2) 平均的な関係 ( $\phi'_B = \phi'$ ) によれば、乾燥側の供試体の一軸圧縮強度を過小に評価し、湿潤側の強度を過大に評価する。
- (3) 乾燥側と湿潤側のそれぞれにおいて強制的に吸水させると (人為的に攪乱すると)  $q_u$  が低下する。
- (4) すべての実測値は三軸圧縮試験から決定された  $\phi'_B$  の範囲に入った。よって、不飽和状態における一軸圧縮強度は、不飽和状態における三軸圧縮強度を Bishop の有効応力で説明できるのと同程度に、Bishop の有効応力で説明できるといえる。

最後に、本論文の主要な部分は第二著者が鳥取大学大学院博士前期過程在学中に行った研究に基づくものであることを付記する。

参考文献

- 1) Bishop, A. W.: The principle of the effective stress, Teknisk Ukeblad, Vol. 106, pp. 859-863, 1959.
- 2) Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A.: The shear strength of unsaturated soils, Can. Geotech. J., Vol. 15, pp. 313-321, 1978.
- 3) Shimizu, M. Sakamoto, S. and Nishioka, T.: Effects of drainage conditions on the shear strength of unsaturated soil, Proc. 4th Int. Conf. Unsaturated Soils, SP.147, ASCE, Vol. 1, pp. 1223-1234, 2006.
- 4) Shimizu, M. and Kageyama, K.: Unconfined compressive strength of unsaturated soil prepared from slurry, Proc. of the 4th Asia Pacific Conf. on Unsaturated Soils, pp. 3-8, 2009.
- 5) 寺方淳治：不飽和土の三軸せん断強度特性に関する基礎的研究，鳥取大学大学院工学研究科修士論文，2009.
- 6) 清水正喜・景山健：予圧密した不飽和土の一軸圧縮強度特性，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 39, pp. 60-63, 2008.

(2010年7月20日 受付)

