

不飽和土の非排水三軸圧縮試験における 変形強度特性および水分特性

河井克之¹・軽部大蔵²・嘉戸善胤³・加藤正司⁴

¹正会員 工博 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²フェロー会員 工博 (株)セージ (〒541-0045 大阪市中央区道修町 4-5-22)

³正会員 工修 大阪府茨木土木事務所 (〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町 5-10)

⁴正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

不飽和供試体の非排水三軸圧縮試験を行い、不飽和土の非排水変形強度特性および水分特性について調べた。試験は、まず飽和状態にある供試体を加圧板法で不飽和化し、その後供試体の間隙空気圧を一定に保ち、非排水状態で軸圧縮を行った。比較的飽和度が高い供試体では、間隙水圧は、せん断による体積圧縮とともに増加し、膨張とともに消散した。しかしながら、せん断による体積膨張量が顕著になってくると、再び間隙水圧は増加した。一方、飽和度が低い供試体では、体積変化とは無関係に、間隙水圧が増加するという傾向が現れた。これは、バルク水とメンスカス水の骨格変形に対する作用の違いとして説明できることが分かった。また、サクシジョン応力を用いれば排水試験と同様の破壊基準を用いることができ、飽和土の限界状態線と一致することがわかった。

Key Words: triaxial test, unsaturated soil, water distribution, undrained strength, dilatancy, water retention curve

1. はじめに

盛土や堰堤などの人工土構造物や、自然斜面を構成しているのは、通常、土間隙に空気相を含む不飽和土である。不飽和土塊内では、一般的に負の水圧が生じているが、この負圧をどのように扱うかが問題となった。Bishop¹⁾は、不飽和土の有効応力を次式で表した。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

ここで、 σ' は有効応力、 σ は全応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧である。 χ は飽和度に関するパラメーターであり、式(1)は、基底応力(ネットストレス) $\sigma_N = \sigma - u_a$ とサクシジョン $s = u_a - u_w$ の2つの応力成分でもって挙動を表している。つまりBishopらは、サクシジョンが不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼすことを示した。

しかし、サクシジョンは間隙水の形態によってその作用が異なり、有効応力理論にそのまま適用することができない。サクシジョンは、飽和土における有効応力のように骨格圧縮応力として作用するだけでなく、圧縮による硬化とは別に土の剛性を高める作用がある。現在では、これらの作用を考慮した不飽和土構成モデルがいくつか提案されており、それぞれ

パラメーターの選択により不飽和土の挙動を表すことができる。

ところで、これらの構成モデルは、試験中のサクシジョンを制御する「排水試験」から導かれたものであるが、サクシジョンを制御しない「非排水試験」への適用に制限は付けられていない。従って、構成モデルの検証方法の一つは非排水試験を行うことである。Bishopら²⁾は、間隙空気圧と間隙水圧を測定した非排水非排水三軸圧縮試験を行い、不飽和土の挙動に及ぼす応力成分を検討している。また、Satiya³⁾は、供試体に作用させる空気圧を一定に保ち、非排水三軸圧縮試験を行い、拘束圧によって間隙水圧の変化に差が生じることを確かめている。しかし、両者とも不飽和土に作用する応力成分を定性的に検討するに留まっている。一方、Vanapalliら⁴⁾は非排水強度に関して有効飽和度の導入により定量的な評価をしているものの、応力ひずみ関係については言及していない。このように、既存の構成モデルは非排水試験によって定量的に検証されたことはない。

本研究では、既存の水分特性曲線を考慮した構成モデルを用いて外応力とサクシジョンの相関関係を求めることを目的としている。試料には、透水性の高いシルト質粘土を用いて、不飽和土用三軸試験機で不飽和供試体を、種々の条件下で非排水せん断した。

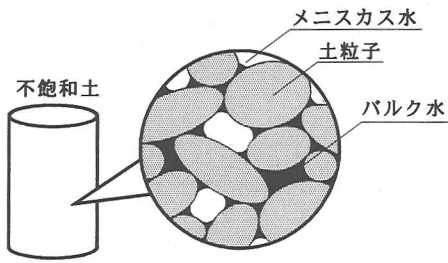


図-1 不飽和土中の間隙水の種類

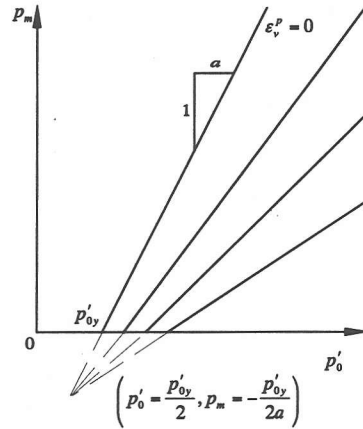


図-2 等方応力面内での等塑性体積ひずみ線群

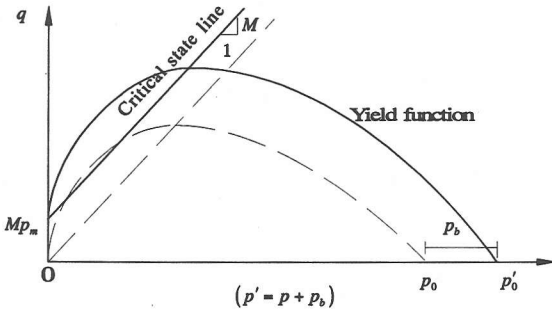


図-3 $p' \sim q$ 平面での降伏関数

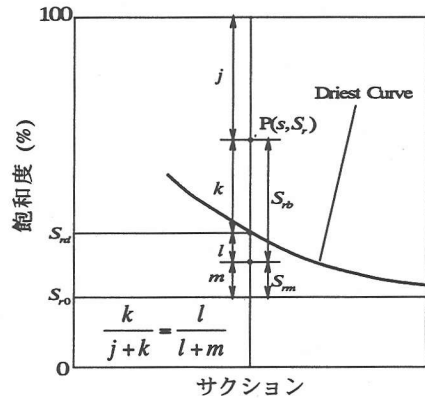


図-4 最乾燥水分線を用いた間隙水分布推定法

さらに、これまで行われた排水試験との比較から既存の構成モデルへの適用性の検討を行った。

2. 軽部らの不飽和土構成モデル

不飽和土は土中間隙に水と空気の相を持つ。そのため、界面作用が生じ次式で表されるサクシオンが生じる。

$$s = u_a - u_w \quad (2)$$

ここで、 s はサクシオン、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧を表す。サクシオンは不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼすが、その減少が土骨格の膨張だけでなくコラプスと呼ばれる圧縮挙動を引き起こす原因となることから、サクシオンを変形と強度を統一的に表す有効応力として定義することができない。このコラプス現象を表現し得る構成モデルがいくつか提案されている(Alonso ら^{5),6)}、Kohgo ら^{7),8)}が、軽部らは土中の間隙水の構成割合から応力成分を算

定し、モデルを構築することで、飽和土の挙動を包括する構成モデルを提案している。

軽部ら^{9),10)}は、不飽和土中の間隙水を、バルク水とメニスカス水に分類した。バルク水は図-1中で示すように土粒子間隙を占める間隙水、メニスカス水は図-1の土粒子接点に存在する間隙水である。飽和度が高いほどバルク水の占める割合が大きくなり、飽和度の低下とともにメニスカス水の割合が増してくる。サクシオンは、この2つの間隙水の形態によって作用が異なる。バルク水に作用するサクシオンは、飽和土における負の間隙水圧と同等であって、体積圧縮を引き起こすことを通じて土骨格の剛性を強める。一方、メニスカス水に作用するサクシオンは、土粒子接点に対して垂直に働くので、体積圧縮を伴わず剛性を強める。不飽和土特有のコラプス現象は、このメニスカス水に作用するサクシオンが減少し剛性が弱まるために起こると説明した。この2つの応力成分は、土骨格に対して等方的に作用し、それぞれバルク応力 p_b 、メニスカス応力 p_m と名付けられた。軽部らは、これらの応力成分を用いて不飽

和土の等方圧縮挙動を次式で与えた.

$$\frac{\partial e}{\partial p'_0} = -\frac{\lambda}{p'_0 + ap_m} \quad (3)$$

ここで, e は間隙比, p' は骨格圧縮応力であり $p' = p + p_b$ で表される. p は平均基底応力であり $p = p_r - u_e$ で表される. p_r は外応力として作用する全応力表示の平均主応力. λ は飽和状態での圧縮指数. 添え字 0 は, 等方応力成分を意味する. 式(3)は骨格圧縮応力 p' に対する土骨格の剛性が $(p' + ap_m)$ に比例するという考えに基づく. a は, メニスカス応力 p_m の剛性への寄与率である. 弾塑性状態では間隙比 e は p' と p_m の状態量であるとし, 初期降伏関数を式(4)で仮定し, Cam-Clay 理論を適用すると体積ひずみ式(5)が得られる.

$$p'_0 = p'_{y0} + ap_m \quad (4)$$

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \log_e \frac{p'_0 + ap_m}{p'_{y0} + 2ap_m} \quad (5)$$

ここで, p'_{y0} は $p_m = 0$ のときの p'_0 , κ は飽和状態での膨張指数, ε_v^p は塑性体積ひずみ, e_i は基準点の間隙比. 図-2 は式(5)で表される等塑性体積ひずみ線群を表している.

軽部らはさらに三軸圧縮状態のエネルギー式を式(6)で与え, 関連流動則を適用し式(7)の降伏関数を得た.

$$q = M(p' + p_m) - p' (d\varepsilon_v^p / d\varepsilon_s) \quad (6)$$

$$\frac{q}{M} = -p' \log_e \frac{p'}{p'_0} + p_m \left(1 - \frac{p'}{p'_0} \right) \quad (7)$$

ここで, M は限界状態での応力比 $q/(p' + p_m)$, ε_s はせん断ひずみ, p'_0 は $q = 0$ のときの p' を表す. 図-3 は式(7)を図示したものである.

これらの降伏関数を求めるためには, バルク応力とメニスカス応力の定量的な評価が必要である. 軽部ら¹¹⁾は, 水分特性曲線を表すサクシオン~飽和度平面に最乾燥水分線を仮定し, 間隙水の構成割合を示した(図-4). 最乾燥水分線は, バルク水の存在しない最も乾燥側の水分特性曲線であり, 高サクシオン域では, 主吸水曲線(吸着水しか存在しない状態, 相当にサクシオンが大きな状態からの吸水曲線であり, 吸水曲線の下限值)と一致する. 最乾燥水分線上の飽和度 S_{rd} を用いてバルク応力, メニスカス応力を次式で与えた.

$$p_b = \frac{S_{rb}}{100 - S_{r0}} \times s = \frac{S_r - S_{rd}}{100 - S_{rd}} \times s \quad (8)$$

$$p_m = \frac{S_{rm}}{100 - S_{r0}} \times s = \frac{(100 - S_r)(S_{rd} - S_{r0})}{(100 - S_{r0})(100 - S_{rd})} \times s \quad (9)$$

表-1 試料の物理的性質

	G_s	$w_L(\%)$	$w_P(\%)$	I_P
No.5 クレ-	2.70	43.0	29.6	13.4

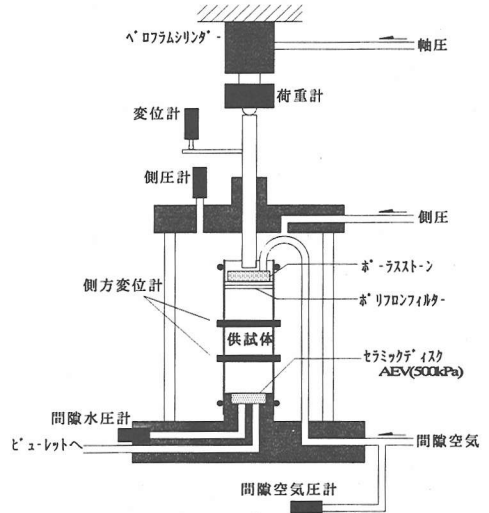


図-5 不飽和土用三軸試験機

ここで, S_r は飽和度, S_{rb} はバルク水の占める飽和度分, S_{rm} はメニスカス水の占める飽和度分, S_{r0} は残留飽和度であり, 水分特性曲線の下限值を示す. また, 式(6)に見られるようにサクシオンの剛性を強める作用はこの2つの応力成分の和で表され, サクシオン応力 p_s として次式で与えた.

$$p_s = p_b + p_m = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \times s \quad (10)$$

3. 非排水三軸圧縮試験

(1) 試料および試験装置

試料には, 透水性の高い市販の No.5 クレーを用いた. その物理的性質を表-1 に示す. 液性限界の2倍の含水比に調整したスラリー状の No.5 クレーを一次元圧密容器(直径 100mm)に入れ, 段階载荷で 313.6kPa まで予圧密した. 予圧密ブロックサンプルを直径 35mm, 高さ 80mm に成形し, 不飽和土用三軸試験機に設置した. なお, 試験時間は長期に及ぶため, ゴムスリーブを介して供試体内の水が蒸発するのを防ぐために, 2重にしたゴムスリーブの間にシリコングリースを塗布した.

試験装置には不飽和土試験用に改良された三軸試験機を用いる. その概要を図-5 に示す. 本試験機内では供試体上部より直接空気圧を作用させ, 供試体下部のセラミックディスクを介して, 排水量または

表-2 供試体に与えたサクシオン履歴と等方圧密終了時の供試体状態

供試体	サクシオン履歴 (kPa)	非排水圧縮段階での 応力条件		非排水圧縮段階開始時の供試体状態			試験時間 (hour)
		p (kPa)	u_e (kPa)	間隙比	含水比 (%)	飽和度 (%)	
I-1	0→245	245	245	0.959	28.8	81.2	188
I-2	0→294→48→245	245	245	0.919	23.1	67.8	538
I-3	0→392→48→245	245	245	0.950	19.7	55.9	694
I-4	0→490→245	245	245	0.975	13.5	37.5	404
II-1	0→245	441	245	0.905	27.7	82.6	191
II-2	0→490→245	441	245	0.920	13.9	40.9	550
III-1	0→294	245	294	0.923	21.0	61.6	180
III-2	0→294	441	294	0.881	20.6	63.2	215

間隙水圧が測定できる。このとき、排水状態であれば、載荷空気圧がそのままサクシオンとなり、非排水状態であれば載荷空気圧と測定された間隙水圧の差がサクシオンを示す。

(2) 試験方法

試験はサクシオン載荷段階、等方圧密段階、非排水軸圧縮せん断段階の3段階で行った。

サクシオン載荷段階では、基底応力 $p = 19.6$ (kPa) 下で予めスラリー状態から圧密された飽和供試体に直接空気圧を作用させること(加圧法)により不飽和化させた。このときに種々のサクシオン履歴を与えることで、サクシオンと飽和度の組合せが異なる供試体となるようにした。その後、サクシオンを一定に保ち、排水条件で等方圧密した(等方圧密段階)。非排水軸圧縮せん断段階では、等方圧密された不飽和供試体に作用している間隙空気圧を一定に保ち、ビューレットを閉じて、 p 一定せん断試験を行った。このときのサクシオンは載荷間隙空気圧と測定された間隙水圧の差となる。表-2に飽和供試体に加えられたサクシオン履歴、非排水軸圧縮せん断中の応力条件および非排水軸圧縮せん断開始時の供試体状態を示す。表中のIシリーズの4つの試験はせん断時の応力条件(拘束圧、間隙空気圧)はすべて同じであるが、せん断開始時の飽和度の異なる供試体である。

4. 試験結果および考察

(1) 非排水せん断中の不飽和土の体積変化

図-6は、 $p = 245$ (kPa)、 $u_e = 245$ (kPa) で非排水せん断したときの、応力～ひずみ関係および間隙水圧の変化である。飽和度によって、間隙水圧の発生の仕方が異なるのがわかる。飽和度が高い供試体(I-1)では、間隙水圧は、せん断初期の体積圧縮とともに増

加し、体積膨張とともに消散0している。これは飽和土と同じ挙動である。しかし、せん断ひずみが進行すると、主応力差がピークを迎える辺りから、体積は膨張し続けているにも拘わらず、間隙水圧が再び上昇傾向を示すようになる。供試体の飽和度が低くなるにつれて、間隙水圧の変化量も小さくなっていくが、いずれも体積最大圧縮点および主応力差がピークとなる辺りで変曲点をもつことが確認できる。図-7は過去に同一試料で行った排水圧縮せん断試験の結果であるが、同様の間隙水の吸排水挙動が見られている。この様な挙動は土塊内の間隙水分布の影響を受けていると考えられる。間隙がバルク水で占められている土骨格では、骨格の変形をバルク水が受け持つため、非排水試験では圧縮の際には間隙水圧が増加し、膨張の際には間隙水圧が消散する。しかし、やがてこの土骨格の膨張が顕著になると、骨格に局所的な破壊が起こり、大径のバルクが形成される。そうすると、バルクに張っていたメニスカスが破れて、一気にメニスカス水に転化する。これに伴うメニスカス水の増加はサクシオンの減少につながり、間隙空気圧一定のもとでは結果的に間隙水圧の上昇となって現れる。土全体としては、このバルク水とメニスカス水の挙動の和が現れるが、間隙水圧の変化はバルク水量に支配されると考えられる。つまり、飽和度が高くバルク水を多く含む供試体ほど、先述したバルク水の挙動が顕著に表れると考えられる。なお、図-7(b)中、▲印の供試体については、■印の供試体よりも初期の飽和度が低く、よりメニスカス水の割合が多いと考えられる。そのため、常に排水挙動を示すことについては説明可能であるが、その量は■印よりも大きい。この排水挙動の一般性については現在検討中である。

図-7の定サクシオン下での排水試験結果では、飽和度が高い供試体ほどせん断初期に体積が圧縮し、その後の膨張量も小さいという結果となった。これは、式(8)で示される拘束圧として作用するバルク応

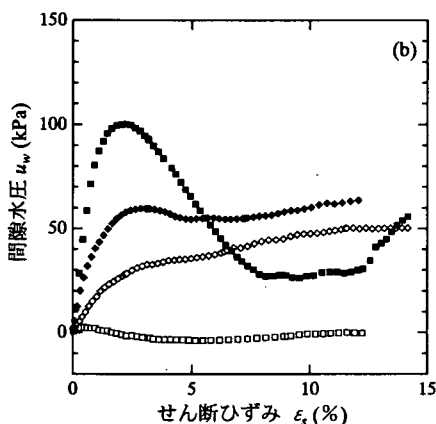
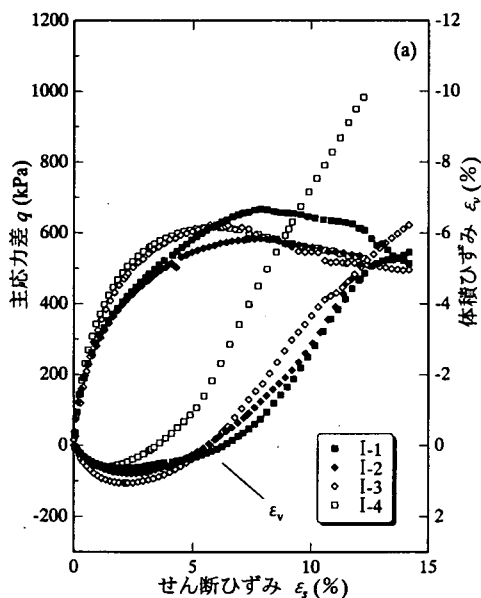


図-6 Iシリーズの応力～ひずみ関係および間隙水圧変化

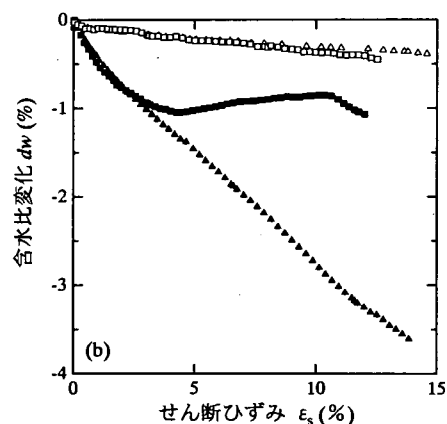
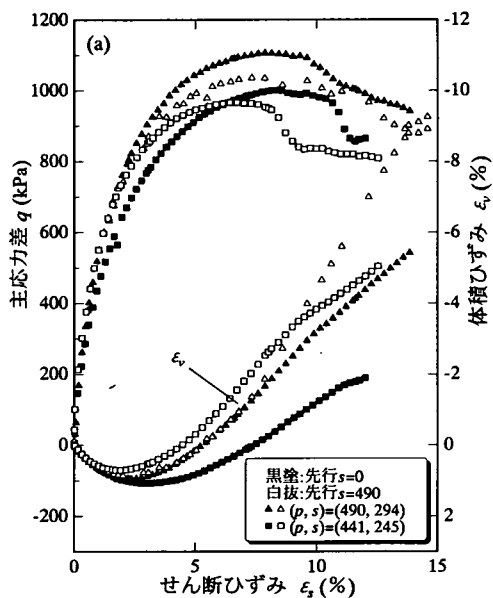


図-7 同一試料で行われた排水試験結果¹²⁾

力が、飽和度とサクシヨンの関数となっていることから説明できる。同じサクシオン値でも飽和度が高いほどバルク応力が大きくなり、拘束圧が発揮されるという理論に一致する。一方、非排水試験では、I-1→I-2→I-3と飽和度が低くなっているにも拘わらず圧縮量が増加している。これは、飽和度の高い供試体ほど、せん断中にサクシオンが減少し結果として式(8)のバルク応力が小さくなるからである。しかし、膨張量に関しては飽和度の低い供試体ほど大きくなり、従来の試験結果に一致し、式(8)を満たさない。先述したように、せん断が進み体積膨張が始まると、バルク水がその形状を保てず、バルク応力が発揮できなくなり、メニスカス応力によって骨格を保持(土粒子のバルクへの落ち込みを防止)しようとする作用が卓越してくると考えられる。メニ

スカス応力は、メニスカス水の割合が同じであれば、サクシオン値に依存するので、せん断による間隙水圧の変化が小さい、つまり飽和度の低い供試体ほど非排水せん断時に剛性が保たれると説明できる。

(2) 非排水せん断中の水分特性曲線変化

前節において、せん断中の間隙水圧と体積変化挙動を説明したが、間隙空気圧一定で間隙水圧が増加するということは式(2)でのサクシオン減少を、非排水状態での体積圧縮は飽和度の増大を意味する。つまり、供試体は水分特性曲線という、脱水曲線(サクシオン増加による飽和度の減少)および吸水曲線(サクシオン減少による飽和度の増加)上を動くことになる。図-8はせん断試験中の水分特性曲線である。図中には河井ら¹³⁾が提案している水分特性曲線モデ

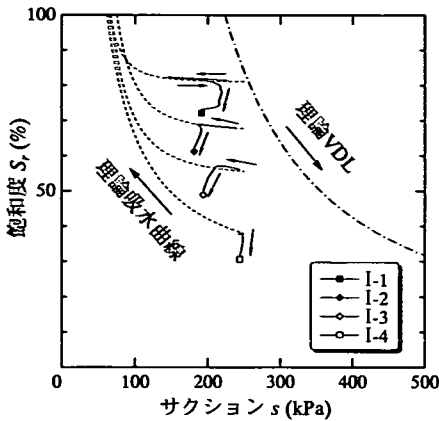


図-8 非排水圧縮段階での水分特性曲線

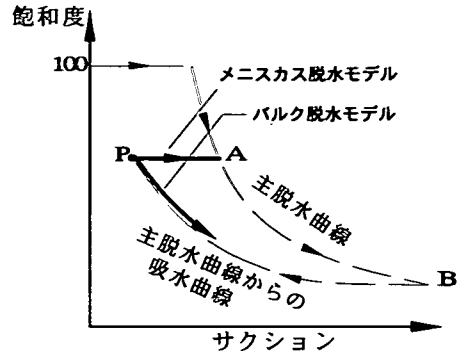


図-9 河井の水分特性曲線モデル

ルを用いて理論脱水曲線および吸水曲線が描かれている。この理論曲線は外力を一定に保った状態でサクシオンだけを独立に変化させた場合を示している。図中の「理論 VDL」は、飽和試料にサクシオンを作用させたときに得られる脱水曲線(主脱水曲線)である。実線で示した実測曲線は初期の体積圧縮段階では理論吸水曲線に一致し、体積が膨張に転じても当初は吸水曲線に沿うような脱水曲線を示している。

不飽和状態にある土の脱水曲線の挙動は明らかにされていない。河井¹⁴⁾は、任意の不飽和状態が主脱水曲線からの吸水曲線上にあると考え(図-9)、次のような脱水曲線モデルを提案している。現在の含水状態(点 P)は過去により高いサクシオン値(点 B)を経験しているのと同様に考えることができる。主脱水曲線は、土中の大きな間隙から順にバルク水膜が破られ、バルク水を排出していく過程である。吸水過程ではバルク水が排出された間隙を形成する骨格のメニスカス水のメニスカスの曲率半径が大きくなり、隣りのメニスカスと接触してバルク水となっていくが、インクビン効果(途中で径の異なる間隙が連続している場合、毛管圧が、排水過程では最小の径に、吸水過程では最大の径に依存すること)およびメニスカスの進行方向による曲率の違いが生じるため、同じ飽和度まで回復するのは脱水過程より低いサクシオン値である。これが現在の含水状態(点 P)であるとする、再脱水過程では2通りの考え方ができる。ひとつは、サクシオンが増加するときに、再びバルク水膜を破るためには、過去に受けた同じサクシオン値(点 A)に達しない限り、バルク水の排出は起こり得ないとする考え方である。点 P から点 A まで、メニスカス水の膨張・収縮はあるものの飽和度に大きく影響するバルク水の変化が少ないと考え、主脱水曲線に達するまでは飽和度は変化し

ないとしてモデル化することができる。もう一方は、吸水過程でバルク水が回復していく速度と再脱水過程でバルク水が減少していく速度が等しいとする考え方であり、主脱水曲線に達する(点 B)までは吸水曲線と再脱水曲線が一致する。この考え方は、Toll¹⁵⁾の再脱水曲線を定量的に表現したものである。この2つの概念に基づくモデルを、前者をメニスカス脱水モデル、後者をバルク脱水モデルと呼んでいる。河井は数本のデータではあるが、バルク脱水モデルの方が実際の挙動によく一致している¹⁴⁾。図-8におけるサクシオンの増加過程は、このバルク脱水モデルに相当する。しかしながら、せん断中の供試体の膨張が顕著になってくると、サクシオン変化による理論水分特性曲線から逸脱していく。この現象は不飽和土中の応力成分のひとつ、バルク応力によって説明することができる。図-10は Karube ら¹⁶⁾によって次式で具現化された最乾燥水分線とそのときのバルク応力分布である。

$$s \geq s_A : S_e = \frac{S_{rd} - S_{r0}}{100 - S_{r0}} = \left(\frac{s_w}{s} \right)^\alpha \quad (11)$$

$$s \leq s_A :$$

$$S_e = \left(\frac{s_w}{s_A} \right)^\alpha \left\{ -(\alpha + 1) \left(\frac{s}{s_A} \right)^2 + (\alpha + 2) \left(\frac{s}{s_A} \right) \right\} \quad (12)$$

ここで s_A, s_w はそれぞれ水分特性曲線の脱水曲線、吸水曲線に現れる変曲点であり空気侵入値、水侵入値である。 α は実測の吸水曲線を Brooks and Corey 式¹⁷⁾で近似したときに現れる曲率を表す形状パラメータである。この最乾燥水分線式は実際の吸水曲線のパラメータを用いて、最も飽和度が低い状態で描く吸水曲線式として表現しているため、実測の吸水曲線と交わることがないという点で合理的であるといえる。図中には図-8 で表した供試体を含むすべ

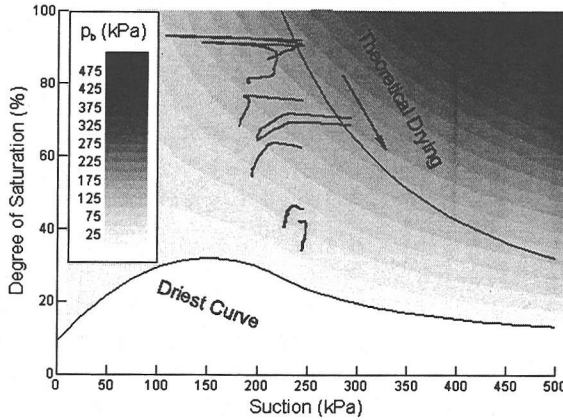


図-10 最乾燥水分線とバルク応力分布

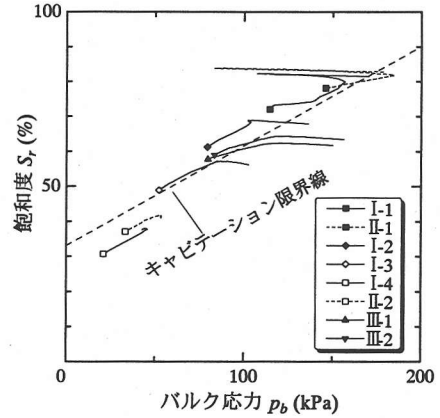


図-11 膨張がバルク応力 p_b に及ぼす影響

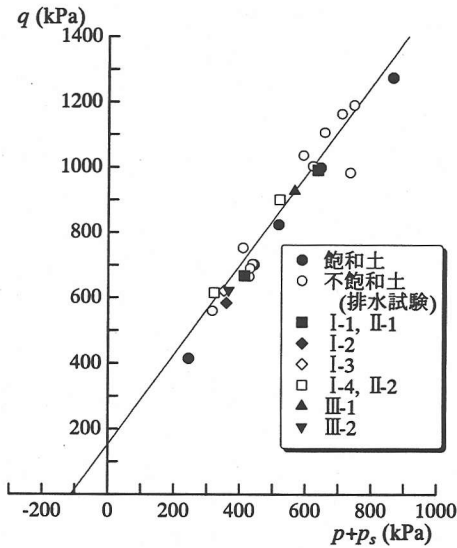


図-12 主応力差ピーク時の応力状態

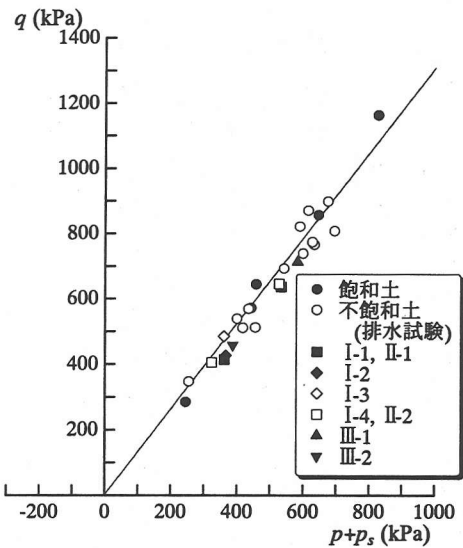


図-13 体積最大圧縮時の応力状態

ての供試体の水分特性変化をあわせて示しており、濃淡によってバルク応力の大小を表現している。図よりせん断によって体積が圧縮していく場合、サクシジョンの減少とともにバルク応力が減っていき、体積の膨張段階ではサクシジョン増加によりバルク応力が増加しているのが分かる。図-11 は、せん断中のバルク応力と飽和度の関係である。せん断による膨張につれて、状態径路は破線まで水平に動き、その後、破線に沿って推移する。これは、飽和度によって間隙水のキャピテーションが生じるサクシジョン値が決まっており、飽和度が高い場合は間隙水の量が多いため単位面積での抵抗サクシジョンが大きくなるということを意味している。図中では飽和度と限界のバルク応力の関係が線形関係にあるとして、その限界線を破線で描いている。このように、バルク応

力の上限となる線が設定できれば、サクシジョンの変化を予測することができる。ただし、供試体 I-4, II-2 のように飽和度が小さくバルク水の割合が小さい場合は、サクシジョンの変化は小さく応力成分の変化はせん断時の体積変化による飽和度の変化にのみ依存し、結果として図-11 のような挙動となる。

(3) 非排水せん断強度

図-12 は、破壊時の応力状態をサクシジョン応力 p_s (式(10))で整理したものである。 p_s の算定には実測の水分特性曲線より得られた $S_{r,0} = 9(\%)$ を用いた。図中には排水条件で得られた既存の飽和・不飽和土の三軸試験結果も丸印で記している。これまでわかっているように、破壊時のダイレイタンス量は飽和度に依存し、ダイレイタンスの影響を含んだせ

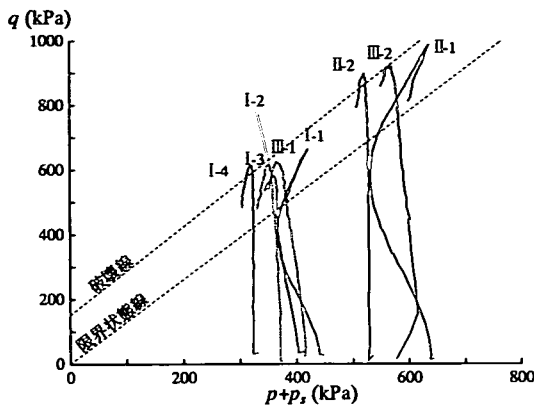


図-14 せん断中の応力径路

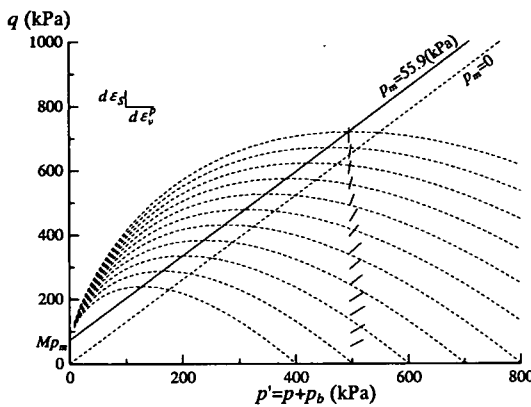


図-15 実測ひずみ増分方向と理論降伏線

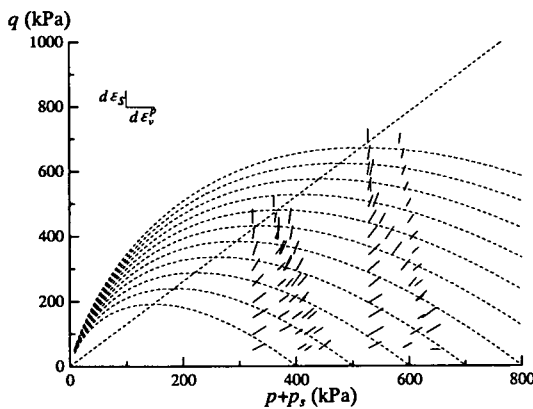


図-16 全供試体のひずみ増分方向と近似降伏線

ん断抵抗力からは限界状態を推定することはできない。限界状態の応力状態を正確に評価するには、ダイレイタンスー補正を行う必要があるが、ダイレイタンスーを規定するバルク応力の算定方法はまだ確立していない。そこで、ダイレイタンスーの影響が含まれない体積最大圧縮点で応力状態を表すと、図-13 が得られる。図より今回の非排水試験結果は、

既存の排水試験の結果とよく一致することが分かる。

(4) 非排水せん断中の応力ひずみ関係

図-14 は試験中の応力径路である。飽和土においては、非排水試験の描く応力パスは応力面上での等間隙比線を表すが、不飽和土では間隙空気体積変化が許容される。非排水せん断は、 p 一定で行われたので、サクシオン応力 p_s (式(10))が変化しなければ、 q 軸に平行な直線となる。飽和度が高い供試体 (I-1, I-2, I-3) は、主としてサクシオンの変動のために飽和砂に似た径路を示した。その他の供試体は、主としてピーク後の激しい体積膨張による飽和度の減少を反映して、径路が左下がりとなった。

つぎに、図-15 は式(7)で与えられる理論降伏線(破線)上に実測ひずみ増分方向(実線)を記入したものである。理論線は、両者が直交すると仮定して求められたが、せん断が進めば実際に直交状態が認められる。ただし、ここではせん断中に p_m の変化が最も小さい供試体 II-2 について検討を行っている。

p_m の異なる全供試体の直交状態を検討するために、図-16 では $p_m = 0$ と仮定し、横軸を $(p + p_s)$ として図を描いた。実際には $p_m = 0$ ではなく、それぞれの供試体において異なる降伏面を持ち、せん断試験中にも p_m の値が変わるため降伏関数の相似中心も変化するが、この応力面内では応力状態に比べて p_m は十分に小さいため、 $p_m = 0$ と仮定した降伏線との比較を行っても差し支えない。結果的に、せん断初期には供試体作製時の一次元圧密および弾性ひずみの影響でいくらか角度を持っているが、せん断の進行とともに降伏線とひずみ増分ベクトルは直交しているのが確認でき、関連流れ則の妥当性とともに降伏面が相似的に拡大するのが分かる。また、試験 I-1 や III-1 は、せん断中に拘束圧を表す $p + p_b$ が大きく変化しているにも拘らず、同じ応力状態なら他の供試体と同じひずみ増分ベクトルを有しており、応力径路への依存性は見られない。

5. 結論

不飽和土の非排水条件下での変形強度特性および外応力とサクシオンの関係について調べた。以下に本研究より得られた結論をまとめる。

- (1) 不飽和土中の間隙水は、土全体の体積変化によって複雑な挙動を呈する。間隙水圧変化はバルク水の割合に支配され、体積圧縮とともに間隙水圧が増加、体積膨張とともに間隙水圧が消散する。しかし、せん断変形による膨張量が卓越

してくると、膨張を拘束していたバルク水膜が壊れてしまい、再び間隙水圧が漸増する。

- (2) 不飽和土の非排水せん断試験での体積変化は、排水試験によるものと定量的に異なる。せん断初期の体積圧縮段階では、バルク応力による拘束圧の効果が発揮される。同じサクシオン値であれば飽和度が高いほどバルク応力が大きくなり、圧縮量も増加する。しかし、非排水試験においては飽和度の高い供試体において、圧縮による間隙水圧がより大きく上昇しサクシオンが減少するため、バルク応力が発揮されず、圧縮量も小さくなった。しかし、膨張に関してはこのバルク応力とは無関係に、既存の排水試験同様に、飽和度の低い供試体ほど膨張量が大きくなった。
- (3) せん断強度に関しては、サクシオン応力を適用し、体積最大圧縮点を限界状態として考えると、排水試験と非排水試験で同じ限界状態線を設定できることが分かった。この限界状態線は、飽和土のせん断試験から得られる限界状態線と同じである。
- (4) これまで、不飽和土におけるエネルギー式に関連流れ則を適用して降伏関数を求めていた。今回、応力空間に実測されたひずみ増分ベクトルを示した。その結果、降伏関数とひずみ増分ベクトルの直交性が確認された。

参考文献

- 1) Bishop, A.W. : The principal of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute* 32, pp.1-5, 1960.
- 2) Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E. and Donald, I. B. : Factors controlling the shear strength of partly saturated soils, in *ASCE Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils*, pp.503-532, 1960.
- 3) Satija, B. S. : Shear behavior of partly saturated soils, Ph.D. dissertation, Indian Inst. Of Technol., Delhi, 327pp., 1978.
- 4) Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, M. D. and Cifton, A. W. : Model for prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392, 1996.
- 5) Alonso, E.E., Gens, A. and Hight, D.W. : Special problem soils, General Report, *Proc 9th European RC-SMFE*, pp.1087-1146, 1987
- 6) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. : A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique* 40, pp.405-430, 1990.
- 7) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T. : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 8) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T. : Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 9) 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹羽尚人 : 不飽和土の三軸圧縮状態における降伏関数, *土木学会論文集*, No. 406/III-11, pp. 205-211, 1989.
- 10) 軽部大蔵 : ビショッパの有効応力を含む不飽和土の応力・ひずみ式, 「土質工学会 三軸試験方法に関するシンポジウム」発表論文集, pp.137-144, 1991.
- 11) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識 : 不飽和土の間隙水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, pp. 83-92, 1996.
- 12) 河井克之, 本田道識, 藤原照幸, 軽部大蔵 : 不飽和土の三軸圧縮強度に及ぼす間隙水分布の影響, *土木学会関西支部年次学術講演会*, III-45, 1994.
- 13) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤 : 間隙比を考慮した水分特性曲線モデル, *土木学会論文集*, No. 666/III-53, pp. 291-302, 2000.
- 14) 河井克之 : 水分特性曲線のモデル化および不飽和土における土骨格と土中水の連成問題, *神戸大学学位論文*, 2000.
- 15) Toll, G.D. : A conceptual model for the drying and wetting of soil, *Proc 1st Int Conf on Unsaturated Soils* 2, 805-810, 1995.
- 16) Karube, D., Kato, S., Honda, M. and Kawai, K. : A constitutive model for unsaturated soil evaluating effects of soil moisture distribution, *Proc 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, pp.485-490, 1998.
- 17) Brooks, R.H. and Corey, A.T. : Properties of porous media affecting fluid flow, *Proc ASCE 92 IR(92)*, pp.61-88, 1966.

(2001.11.9 受付)

THE MECHANICAL BEHAVIOR OF UNSATURATED SOILS AND WATER RETENTION CHARACTERISTICS ON UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TEST

Katsuyuki KAWAI, Daizo KARUBE, Yoshitane KADO and Shoji KATO

A series of triaxial compression tests is carried out on the unsaturated silty kaolin clays. Specimens are subjected to undrained compressive shear under the conditions of constant air pressure. The pore water pressure and volume change during shear are monitored. The pore water pressure develops with compression and then turns to decrease with expansion when the degree of saturation is relatively high. On the contrary to it, when the degree of saturation is low, the pore water pressure monotonically increases independent of volume change. These experimental facts can be explained from the effects of the bulk stress. Thus, throughout experimental investigations, it is revealed that the behaviors of unsaturated soils are consistently explained in terms of the meniscus and the bulk stresses. Particularly, it is found that the failure criterion on unsaturated soils can be uniquely described using the suction stress, which is defined as the summation of meniscus and bulk stresses.