鳥取大学正会員 清水 正喜

鳥取大学大学院 学生会員 景山 健 寺方 淳治

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 サクション,飽和度の影響を調べることである.こ れまでに,締め固めによって作製した供試体を対象 にした¹⁾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 圧密した後にサクションを作用させて不飽和化する 方法(予圧密法という)によって,不飽和の供試体 を作製した.不飽和化時に作用させたサクションの 大きさを変えることにより飽和度の異なる供試体を 作製した.

本報告では応力 ひずみ・サクションの挙動を考 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 (表 1). 表中の NP は 非塑性であることを表す.

表1 試料の物理的性質

土粒子密度(g/cm ³)	2.701
液性限界w _L (%)	NP
塑性限界wp(%)	NP
シルト分(%)	86%
粘土分(%)	14%

供試体はスラリー状の試料を 1 次元的に予圧密し た後,サクションを作用させて不飽和化した.

不飽和土用三軸セルペデスタルに円筒モールド (内径 35mm)を設置し,そこに含水比 60%で十分 練り混ぜて脱気したスラリーを流し込んだ.次に, 上面排水・底面非排水条件で圧密圧力を 49.2kPa まで 段階的に載荷した.圧密終了後,8.8kPa まで除荷し, 上面および底面排水条件で,セル圧と底面水圧を制 御し,所定のサクションを作用させた(圧密圧力を 5.7kPa に調整した).サクショ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,供試体をペデスタル上に残して,モール ドを取りはずし,一軸圧縮試験に移行した.

なお,モールド内周面にシリコンオイルを塗布した.これは,モールドを取りはずすときの供試体表面の乱れを防ぐためである.

3. 一軸圧縮試験方法

三軸セルを再度組み立て,底面非排水条件でセル $E \sigma_c$ (=100kPa)を作用させ,供試体底面の間隙水圧 を測定した.セル圧 σ_c (= u_a :間隙水圧)と測定した間 隙水圧 u_w から初期サクション s_0 (= u_a - u_w)を決定し た.

その後,セル圧100kPaを作用させた状態で,間隙 水圧を測定しながら軸方向圧縮した.

4.結果および考察

4.1 不飽和化過程

(1)排水挙動

図 1 に不飽和化過程における排水挙動を示す.例 としてサクション 50kPa の場合と,70kPa の場合を示 す.

図より,高いサクションを作用させると全排水量 が増え,排水が終了するまでに長時間を要すること がわかる.



図1 不飽和化時の排水挙動

(2)サクションと飽和度,含水比,排水量の関係 図 2 に不飽和化時に作用させたサクション(*s_a*と 書く)と不飽和化終了時の飽和度 *S_r*,含水比 *w* およ び排水量 *ΔV_w* との関係を示す. 図 2 より, *s_a* が 60kPa より小さいときは, *S_r*, *w*, *V_w*の変動は小さいが, *s_a* が 60kPa を超えると *s_a* と ともに *V_w* が増え,低含水状態に移行している.こ のことからこの試料の不飽和化直後の AEV(空気浸 入値)は約 60kPa と判断できる.



図 2 サクションと飽和度 ,含水比,排水量の関係(不 飽和化終了時)

4.2 軸圧縮過程

図 3 に圧縮中のサクションと応力の関係を ,図 4 に応力とひずみの関係をそれぞれ示す. 凡例中の数 値は不飽和化時に作用させたサクションの大きさ (*s_a*)を示す.

両図より, 挙動を 2 つのタイプに分けることがで きる. *s_a* が 60kPa 以上の供試体は, サクションの変 動が比較的小さく, *q_u* が大きい. 一方 *s_a* が 55kPa 以 下の供試体はサクションの変動が大きく, *q_u* も小さ い.

図3より

せん断初期にサクショ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ョンが 減少し始める.初期サクションが低いほどサクショ ンの減少が急で,減少量も大きい.図にサクション が減少し始める点を小さいマークで示している.

初期サクションの低いものは圧縮応力がピーク に達する直前にサクションが一度少し増加するが, ピークを過ぎると再び減少することがわかる.

図4より

せん断初期に見られたサクション変化の小さい 応力域では,ひずみが小さく,それを超えるとひず みは大きくなる. 初期サクションが低いほど,上記の応力域を超 えてから,ひずみの変化が急で,圧縮応力が最大に なるまでのひずみが大きい.



4.3 一軸圧縮強度に及ぼす影響要因

ー軸圧縮強度 q_uに影響を及ぼす要因として, せん 断前のサクションと飽和度を取り上げ q_u との関連性 を調べる.

(1)初期サクション

図 5 に初期サクション s₀ と q_uの関係を示す.図よ り s₀が高いほど,q_uは大きくなる傾向が見られる.

(2)飽和度

図6にせん断開始時の飽和度*S_{r0}とq_u*の関係を示す. 図より*S_{r0}が高いほど*,*q_u*は低くなる傾向がある.し かし,*S_{r0}が70%よ*り低い場合,*q_u*の変動は小さく, 一方,*S_{r0}が約90%と*高くなると,飽和度の変化によ る*q_u*の変動が大きい.



4.4 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, q_u は次式で表される ¹⁾

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

ここに, *ϕ*'_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 ϕ'_B を 30°~40°の範囲で変えたときの q_u と S_{rSf} の理論的関係(直線)を示す.同時に実験値も プロットした.図より実験値に相当する ϕ'_B の値は, S_{rfSf} とともに大きくなる傾向が見られる. $\phi'_B = \phi'(\phi'$ 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 $\phi'_B = 35°$ を適用すると,飽和度の高い試 験は実験値をほぼ説明できるが,飽和度の低い試験 では q_u を過小評価している.

(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 tyを評価することを提案している.

$$\tau_f = \sigma_{netf} \cdot \tan\phi + s_f \cdot \tan\phi^b \tag{2}$$



600 ♦ 40 ● 50 ▲ 55 500 ♦ 65 0 70 Δ 80 '=35° 400 ′=35.3° 005 (kPa) a = 0.27 q_u 200 a = -0.23-0.19100 0 式(5) 0 50 150 200 0 s + (kPa)

図 8 Fredlund の強度式による評価

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

という式が成り立つ¹⁾.この式は, ϕ^b が一定であれば, q_u が s_f の一次関数として表されていることを示している.

図 8 は実験値をプロットしたものである.図中の 直線は飽和土の内部摩擦角 $\phi=35^{\circ}$ と,先に著者ら²⁾ が三軸試験から推定した ϕ^b の値(35.3°)を用いた, 理論的な関係である(曲線は後述の方法で決定した 近似曲線である).図より,理論直線は s_f が約 40kPa までは実験値に近くなったが s_f がそれ以上になると, 実験値を過大に評価する.

次に, ϕ^{b} のサクションの依存性について考察する. 式(3)より,

$$\phi^{b} = \tan^{-1} \frac{q_{u}}{\left(\frac{2\cos\phi'}{1-\sin\phi'}\right) \cdot s_{f}}$$
(4)

この式から, $q_u \ge s_f$ の実験値に対応する ϕ^b を求める ことができる.図9に $s_f \ge \phi^b$ の計算値との関係を示 す.図より s_f が大きくなるにつれ, ϕ^b の計算値は減 少していることがわかる.

図 10 は, s_f が最小となった結果 ($s_f=s_{ff}=20$ kPa, $\phi^b = \phi_r^b = 30.9^\circ$)を基準として $\phi^b \ge s_f$ を正規化し, $\phi^b / \phi_r^b \ge s_f / s_{fr}$ 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.

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

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.式(5)で決定した *ф* を用いて, 理論曲線を引くと図8の曲線のようになる.

5. 結論

(1) 圧縮応力とサクション・ひずみの関係

応力 サクション・ひずみの挙動は圧縮中のサク ショ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.初期サクションの低いものは,サクシ ョンの変動が大きく,圧縮応力が最大になるまでの ひずみが大きい.一方,初期サクションの高いもの は,サクションの変動が小さく,圧縮応力が最大に なるまでのひずみが小さい.

また,初期サクションが高いものほど一軸圧縮強 度は大きくなる.

(2)強度特性

Bishop の有効応力に基づくと, 飽和度の高い試験 は,実験値を評価できるが, 飽和度の低い試験は, *q*_uを過小評価する.

Fredlund らの強度式では, ϕ^b を一定とすると実験 値を説明できない.幅広い飽和度の試験結果を説明 するためには, ϕ^b の s_f 依存性を考慮しなければなら ない.

参考文献:

清水・柳瀬(2007):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, 107

2) Shimizu,M., Sakamoto, S. and Nishioka, T. (2006): Effects of drainage conditions on the shear strength of unsaturated soil, Proc. 4th Int. Conf. On Unsaturated Soils, ASCE, STP147, pp.1223-1234

