

締固めた不飽和土の一軸圧縮強度特性

鳥取大学 正会員 清水正喜
(株) 守谷刃物研究所 柳瀬佳史

1. はじめに

突き固めによって締固めた不飽和土の一軸圧縮強度 q_u に対する乾燥密度 ρ_d やサクシヨン s の影響は、締固めの状態によって圧縮応力-ひずみ関係そのものが変わり、単純ではないこと。即ち、乾燥側では脆性的な、湿潤側では延性的な応力-ひずみ挙動を示し、乾燥側と湿潤側で q_u に対する ρ_d や s の影響度が異なる¹⁾。

飽和/不飽和土によらず、粒子間摩擦に起因する土のせん断強さは粒子間垂直力によって決まる。不飽和状態では、外力に釣り合う粒子間力とメニスカス表面張力によって生じる粒子間力がある。外力に釣り合う粒子間力は Bishop の「有効」応力 (σ'_B) で評価できる。異なった初期状態にある不飽和供試体に対して種々の条件で三軸圧縮試験を行った結果、一次近似として、 σ'_B のみに基づいてせん断強度を評価できる可能性がある²⁾。ここでは、せん断強さが σ'_B に比例すると仮定して締固めた不飽和土の一軸圧縮強度を説明することを試みる。

2. 試料および方法

試料として DL クレー (非塑性, $\rho_s=2.690\text{Mg/m}^3$) を用いた。締固めの方法は既報¹⁾と同じである。小型のモールド (内径約 3.5cm), カラー, ランマーを用いた。含水比は加水して調整し、非繰返し法で締固めた。モールドの内径を調節し、さらに供試体の取り出しを容易にするためにモールドの内面にプラスチックフィルムをはりつけた。その影響を調べるためにフィルム無しの条件でも締固めを行った。締固め後の単位体積当りの締固め仕事量 W_c はフィルム無しで 155, フィルム使用で 183 (kJ/m^3) である。

締固めた供試体に対して一軸圧縮試験を行った。フィルムを装着して締固めた供試体の一部に対して不飽和土用三軸圧縮試験機を用いてサクシヨンを測定した。サクシヨンは加圧板法で測定した、即ち、セル圧 (= 間隙空気圧) を 100kPa 与えて発生する間隙水圧を測定した。サクシヨンを測定しない試験は通常の一軸圧縮試験機を使用した。軸圧縮速度は 0.98 または 1.73 ($\%/min$) である (圧縮速度の影響は顕著でなかったのでここではその違いを考慮しない)。

3. 結果と考察

締固めの結果を図 1 に示した。フィルムの有無による違いは高含水状態で現れた。フィルム使用によって間隙水の一部がフィルムとモールドの間に浸出し試料の飽和度の上昇が抑えられた。飽和度約 83% で乾燥密度が最大になった。

一軸圧縮試験開始前にサクシヨンを測定した (初期サクシヨン s_0)。結果の一例を図 2 に示す。この例では s_0 は 18.3kPa である。一軸圧縮試験中の間隙水圧の変化は小さかったのでサクシヨンは初期サクシヨンで代表させる。初期サクシヨンと飽和度の関係を図 3 に示した。同じ試料に対してスラリー状態から乾燥させて得られた水分保持特性曲線³⁾を比較のために示した。供試体の準備方法が異なるが両者に大きな相違はない。

一軸圧縮強さ q_u と飽和度 S_r および乾燥密度 ρ_d の関係を図 4 および図 5 に示す。両図より、湿潤側においては S_r が高くなるほど、また ρ_d が小さくなるほど q_u が低下する傾向がある。湿潤側では S_r が

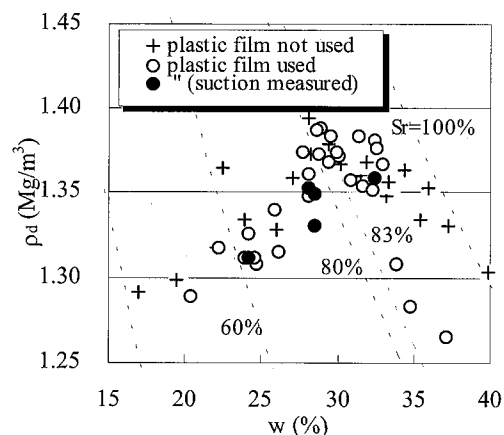


図1 締固めの結果

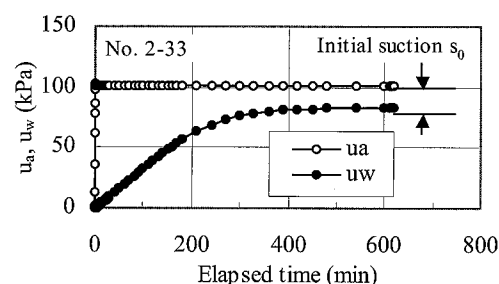


図2 初期サクシヨン測定例

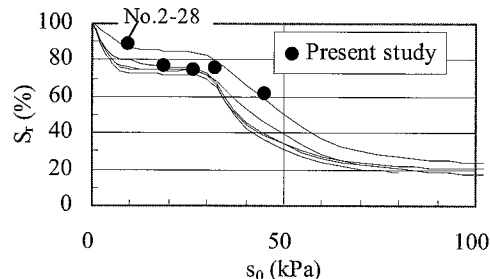


図3 水分保持特性

上がると ρ_d が下がるという、締固めの結果(図1)を反映している。一方、乾燥側では q_u に対するそれらの明確な影響を読み取ることが難しい。なお、サクシオンを測定した試験の q_u (特にNo.2-28)が他に比べて大きい傾向が見られるがその理由は明らかでない。

図6は s_0 と q_u の関係である。 q_u と s_0 に負の相関が見られるが、サクシオンを測定した供試体では、水分特性として s_0 が小さいほど S_r が高く、締固め特性として S_r が高いほど ρ_d が大きくなり、結果として q_u も大きくなったためである。

Bishopの「有効」応力 σ'_B とは次式で表される：

$$\sigma'_B = \sigma_{net} + S_r \cdot s \quad (1)$$

ここに、 σ_{net} は正味の垂直応力($=\sigma - u_a$)、 $s = u_a - u_w$ 、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧。 $\sigma'_B - \tau$ 応力面で次式の破壊包絡線が存在すると仮定する：

$$\tau = \sigma'_B \tan \phi'_B + c'_B \quad (2)$$

さらに、見かけの摩擦角 ϕ'_B は飽和土の有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' に等しく、粘着力 c'_B は0であると仮定すると

$$\tau = \sigma'_B \tan \phi' \quad (3)$$

一軸圧縮試験における圧縮応力最大時に応力円が破壊包絡線に接するための条件から

$$\frac{q_u}{S_r \cdot s} = \frac{2 \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (4)$$

となる。締固めて作成した不飽和供試体においては、 ϕ' は乾燥密度の関数であると予想される。図8に比 $q_u/S_r \cdot s$ を乾燥密度に対してプロットした。比は ρ_d が大きいほど大きい。式(4)右辺の関数は $\phi' < 90^\circ$ において ϕ' の単調増加関数であるので、やはり ρ_d に関しても増加する関数である。図の結果はこのことに矛盾していない。

比の値から式(4)を用いて ϕ' を計算して同図に示した。 ϕ' が ρ_d とともに大きくなっている。ただし、特に供試体No.2-28で、実際にはあり得ない大きな ϕ' の値が計算されている。

以上の結果より締固めた不飽和土の一軸圧縮強度は $q_u = f(\rho_d) S_r s$ として評価できる。ここに $f(\rho_d)$ は ρ_d の関数である。

4. おわりに

締固めた不飽和土の一軸圧縮強度に対する飽和度、サクシオン、乾燥密度の影響をBishopの「有効」応力を用いて評価した。メニスカス表面張力に起因する粒子間力と粘着性せん断抵抗を考慮しなかったこと、検証に用いたデータが特異な挙動を示したことなど今後に残された課題である。

参考文献 1) 清水・木下・西岡(2006) 締固めた不飽和土の締固め特性と一軸圧縮挙動, 土木学会年次学術講演会, 721-722. 2) 清水・寺方(2007) 不飽和土の三軸圧縮強度特性における試験条件の影響, 土木学会中国支部研究発表会(投稿中). 3) 清水・杉浦・田原(2006) 一次元圧縮状態における不飽和土の吸・排水挙動と圧縮挙動に対するサクシオンの影響, 土木学会年次学術講演会, 727-728

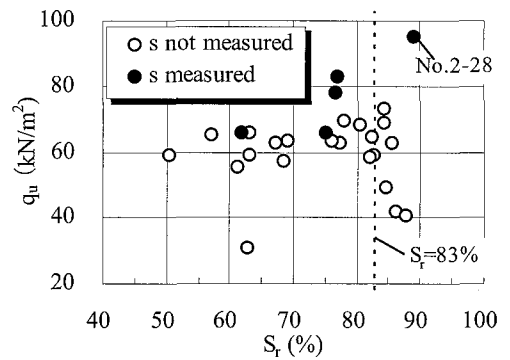


図4 一軸圧縮強さ q_u と飽和度 S_r の関係

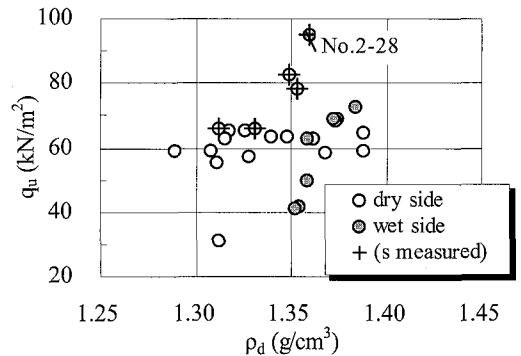
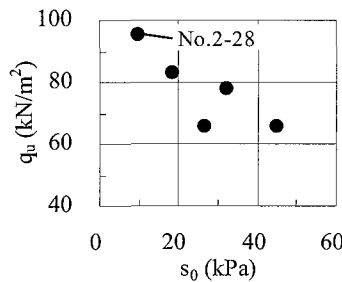
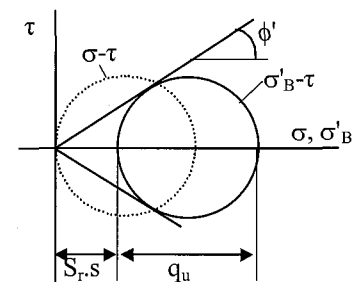


図5 一軸圧縮強度と乾燥密度 ρ_d の関係



(左) 図6 q_u と初期サクシオン s_0 の関係



(右) 図7 Bishopの「有効」応力円と破壊包絡線

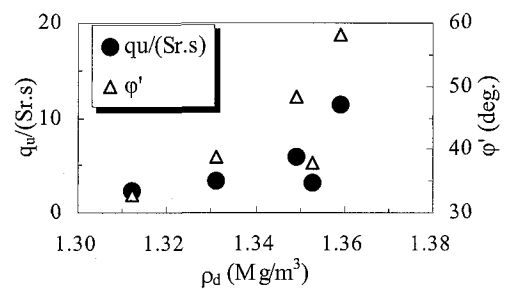


図8 ρ_d に対する $q_u/S_r \cdot s$ と ϕ' の関係