

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

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

締固めた土の一軸圧縮強度 (q_u) 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、乾燥密度やサクシオン等の影響の仕方は単純ではない¹⁾。

ほぼ飽和した粘性土の q_u は、供試体のサクシオンによって支配される²⁾が、基本的には飽和土の有効応力の原理に基づいて説明できる。突き固めによって締固めた土の場合、飽和度が低いので飽和土の有効応力原理を適用できず、 q_u は不飽和土に適用可能な強度原理に基づいて評価しなければならない。飽和 / 不飽和土によらず、摩擦性せん断抵抗は粒子間摩擦に起因し、粒子間摩擦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³⁾。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。本報告では、不飽和土の三軸圧縮試験の結果⁴⁾を参考にして、一次近似として、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 (別報⁵⁾と一部重複する)。

2. 試料および方法

試料は DL クレーである (非塑性、シルト分 80%以上、 $\rho_s=2.690\text{Mg/m}^3$)。

締固めは、小型のモールド (内径約 3.5cm) を用いて、加水・非繰返し法で行った。一軸圧縮試験に供した供試体の締固めには、供試体の取り出しを容易にするためにモールド内面にプラスチックフィルムをはりつけた。単位体積当りの締固め仕事量はフィルム無しで 155, フィルム使用で 183 (kJ/m^3) である。

一軸圧縮試験は、通常の試験機を用いた試験と、不飽和土用三軸圧縮試験機を用いてサクシオンを測定した試験を実施した。サクシオンは加圧板法で測定した、即ち、セル圧 (= 間隙空気圧, 100kPa) を与えて発生する間隙水圧を測定した。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ためここではその違いを考慮しない)。

三軸圧縮試験はスラリー状態で一次元的に予圧密・不飽和化した供試体に対して、等方圧縮・軸圧縮の手順で行った。試験方法と結果の詳細は文献⁴⁾に譲る。

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。図には三軸圧縮試験における等方圧縮過程終了時のデータも併せて示した。飽和度が低い領域で突き固めによって締固めた供試体より ρ_d が大きくなった。細粒土であるという特徴が窺える。

一軸圧縮試験開始前にサクシオンを測定した (初期サクシオン)。初期サクシオン s_0 と飽和度 S_r の関係を図 3 に示す。図には三軸圧縮試験の等方圧縮終了時のデータおよびスラリー状態からサクシオンを作用させて乾燥させたときの水分保持特性曲線⁶⁾を比較のために示した。この試料では $S_r > 40\%$ の範囲で s_0 は高々 70kPa である。一軸圧縮試験中の間隙水圧の変化は小さかったためサクシオンは初期サクシオンで代表させる。

一軸圧縮強さ q_u と飽和度 S_r および乾燥密度 ρ_d の関係について結果

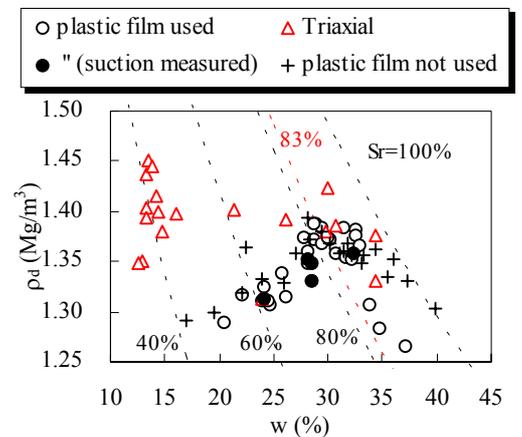


図 1 締固めの結果

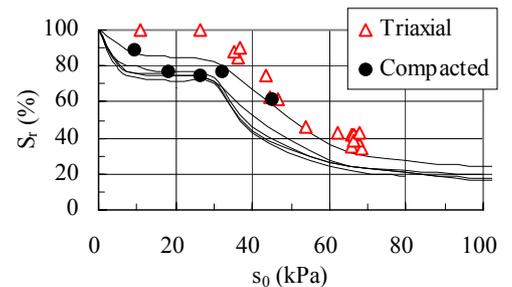


図 3 水分保持特性

キーワード：不飽和土、締固め、一軸圧縮強度、粒子間力、Bishop の有効応力

連絡先：鳥取市湖山町 鳥取大学工学部 清水正喜 TEL：0857-31-5290, FAX：0857-28-7899

のみを述べる(詳細は別報⁵⁾に述べた). 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 が低下した. 湿潤側では S_r が上がると 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 に対するこれらの明確な影響を読み取ることが難しい.

図4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, サクショ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 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(図5参照):

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

図6は三軸圧縮試験の破壊時の応力状態を $q-p'_B$ 面上で示したものである. ここに, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, $p'_B = (\sigma'_{1B} + \sigma'_{3B})/2$. 破線の直線はすべてのデータを包含する上・下限である. これより, 一次近似として, $c'_B = 0$ および ϕ'_B が一定と仮定する. 乾燥密度によって ϕ'_B は異なる値を持つと予想される. さらに, ϕ'_B は飽和土の有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' に等しいと仮定すると,

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

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. 試験結果に対して, 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, 実際にはあり得ない大きな ϕ' の値を示した結果もある.

以上の結果より締固めた不飽和土の一軸圧縮強度は

$$q_u = f(\rho_d) S_r \cdot s \quad (5)$$

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) Shimizu, M. and Tabuchi T. (1993): Effective stress behavior of clays in unconfined compression tests, Soils and Foundations, 33-3, pp. 18-39.
- 3) Shimizu, M. et al. (2007): Shear strength characterization based on inter-particle stresses for unsaturated soil, Proc. 3rd Asian Conf. Unsaturated Soils (印刷中).
- 4) Shimizu, M. et al. (2006): 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.
- 5) 清水・柳瀬(2007): 締固めた不飽和土の一軸圧縮強度特性, 土木学会中国支部研究発表会(投稿中)
- 6) 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ヨンの影響, 土木学会年次学術講演会, 727-728.

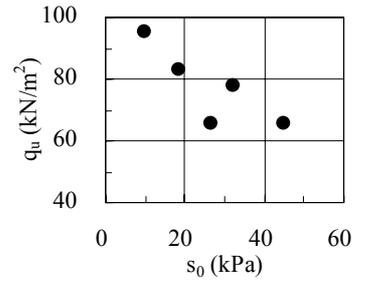


図4 q_u と s_0 の関係

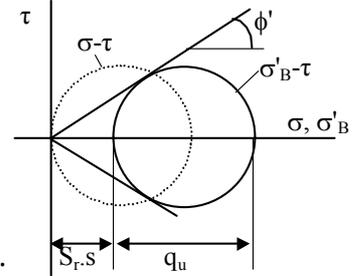


図5 一軸圧縮試験時の Bishop の「有効」応力円と破壊包絡線

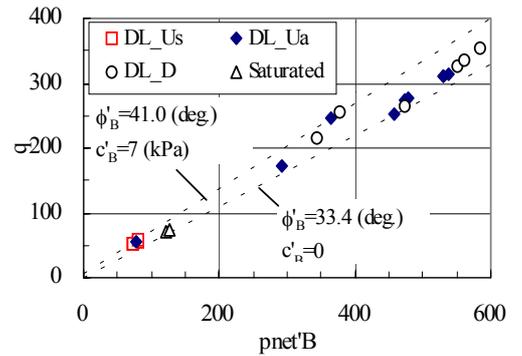


図6 三軸圧縮試験の結果

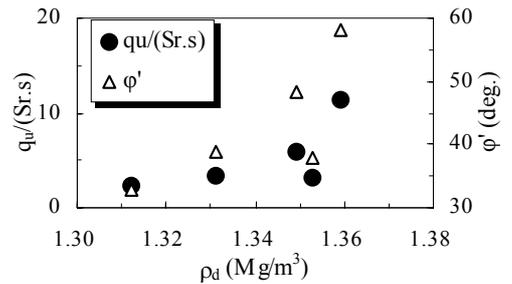


図8 ρ_d に対する $q_u/S_r \cdot s$ と ϕ' の関係