

不飽和土の三軸圧縮強度特性における試験条件の影響

清水 正喜・寺方 淳治
鳥取大学工学部土木工学科

Effects of Testing Conditions on Triaxial Shear Strength Characteristics of Unsaturated Soil

Masayoshi SHIMIZU and Junji TERAOKATA
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: This study aims to examine effects of testing conditions on shear strength characteristics of unsaturated soil. Triaxial compression tests were conducted on a silt sample under three conditions: 1) undrained water and constant volume, 2) undrained water and undrained air, and 3) drained water and drained air. Results showed that the Fredlund et al.'s equation for the shear strength would not be successfully applied to explain the results from triaxial tests; and therefore the equation was modified by replacing the net normal stress, σ_{net} , with Bishop's effective stress. The modified equation gave an explanation why the cohesion intercept in the τ - σ_{net} diagram is not a linear function of the suction.

Key Words: Unsaturated soil, Shear strength, Suction, Triaxial compression tests

1. はじめに

著者らは、不飽和土供試体に対して、排水および非排水条件で三軸圧縮試験を行い、強度特性における試験条件の影響を調べている[1]-[5]。本研究では、非排水・定体積及び非排水・非排気条件で試験を行い、変形挙動と強度に対する試験条件の影響についてさらに検討した。また、今回実施した試験の結果と過去の結果[2][3]とを用いて、三軸圧縮強度特性を検討した。

尚、本論文は第二著者の土木工学科卒業研究の成果に基づいている。

2. 試料及び供試体作製方法

試験装置は従来の研究[1]-[5]で使用したものと同一である(図1)。排水量は二重管ビュレット内水位、体積変化量はセル内水位の変化量を測定することで算定できる。Yリング装着型載荷棒を用いてセル水がセル外に蒸発するのを防いだ。

試料は非塑性シルトである DL クレー ($s = 2.697\text{g/cm}^3$, シルト分 83%, 粘土分 17%) を用い

た。

供試体は三軸セル内で一次元的に予圧密して作成した[2]。まず、試料を含水比 60%で十分に練り返し、モールドに入れ、49.2kPa まで段階的に1次元圧密し、5.7kPa まで除荷した。次に、サクシオン 30kPa を作用させて供試体を不飽和化した。予圧密終了後、モールドを取り外し、ゴムスリー

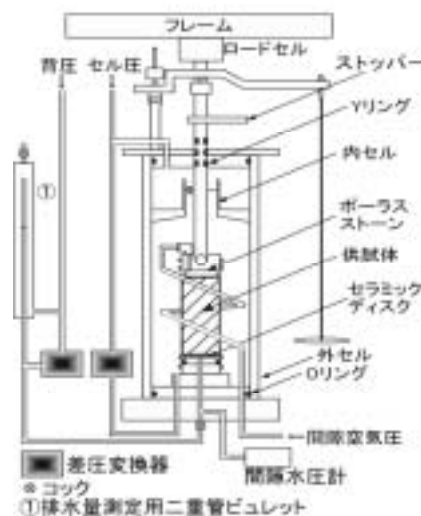


図1 試験装置(三軸圧縮試験時)

ブを被せた後，三軸圧縮試験を行った．

3．試験方法

三軸圧縮試験は等方圧縮過程と軸方向圧縮過程から成る（表1）．

等方圧縮過程では所定の正味の拘束圧 $\sigma_{3net} = \sigma_{3netc}$ とサクション $s = s_c$ を作用させた．ここに

$$\sigma_{3net} = \sigma_3 - u_a \quad (1)$$

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

u_a ：間隙空気圧， u_w ：間隙水圧である．また，添え字 c は等方圧縮時の値であることを意味する．

軸方向圧縮は，排水（D）または非排水の条件で行った．非排水試験は，非排気（Uair）と定体積（CV）の2通りの条件で行った．どの試験もセル圧 σ_3 を一定に保った．軸圧縮速度は，排水試験で $0.0051\%/min$ ，非排水試験では， $0.0244\%/min$ である．

表1 試験条件（単位：kPa）

等方圧縮過程		軸方向圧縮過程	破壊時		
σ_{3netc}	s_c	試験条件	σ_{3netf}	s_f	q_f
50kPa	80kPa	D	51	78	112
		Uair	57	60	172
		CV	43	54	150
150kPa		CV	192	0	261

注：上面はすべて排水で，底面は，D試験では排水、Uair及びCV試験では非排水である．

4．試験結果及び考察

4.1 定体積試験

図2に定体積試験（ $\sigma_{3netc} = 150kPa$ ）の結果を示す．定体積試験は，体積を一定にするために u_a を操作する．せん断初期に，体積が減少傾向を見せたので u_a を増加（ σ_{3net} を減少）させた．その後，徐々に体積が膨張傾向に転じたので u_a を減少（ σ_{3net} を増加）させた．

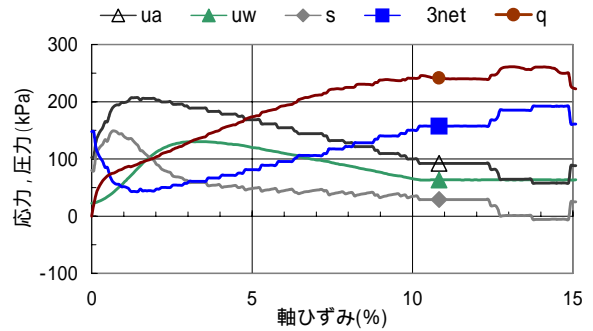


図2 定体積試験（ $\sigma_{3netc} = 150kPa$ ）結果

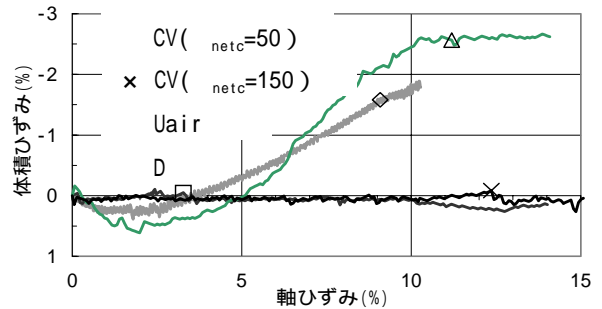


図3 軸ひずみと体積ひずみの関係

u_a の変化に伴って u_w が変化している．従って s も変化している．ただし， u_w は軸ひずみ 10%以降はほとんど変化していない．一方， u_a は，定体積を維持するために下げ続ける必要があったため，軸ひずみ 13.8%以降で s が負になってしまっている．しかし，負の値は非常に小さく測定誤差の影響と考えられる． q の挙動をみると，軸ひずみ 1.5%以降は， σ_{3net} の挙動と似ている．これは，定体積を維持するために， σ_{3net} を上昇させたことにより， q も上昇したためと考えられる．

図3に体積ひずみの挙動を示す．比較のため，その他の試験の結果も併せて示した．定体積試験でも， $\pm 0.25\%$ 程度の体積ひずみが生じているが，その他の試験の体積ひずみと比較すると十分小さいことが分かる．定体積の条件をほぼ満たしていると言える．

4.2 非排気試験

非排気試験の結果を図4に示す．この試験では，間隙空気の入りを遮断しているため， u_a が変化する．したがって σ_{3net} も変化する． u_a の変化挙動は，供試体の体積の変化に関する．せん断初期

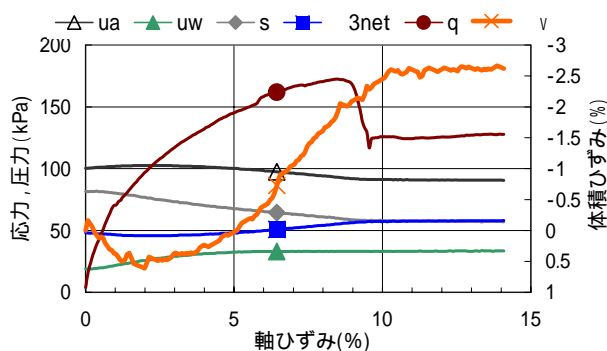


図4 非排気試験の結果

に体積圧縮が起こり、その後膨張に転じている。体積が減少すると間隙空気が圧縮されて u_a は上昇し、体積が増加すると間隙空気が膨張して u_a は低下した。

間隙水圧 u_w の挙動は必ずしも u_a の挙動から類推できるものではない。即ち、体積圧縮から膨張に転じたとき u_a は増加から減少に転じたが、 u_w は体積膨張後もしばらく増加し、軸ひずみ 5%以降ほとんど変化しなかった。

4.3 せん断強度

せん断強度は s と σ_{3net} の影響を受ける。

試験条件が同じであれば、 s よりも σ_{3net} の影響をより強く受ける[2]。実際、2つの定体積試験を比べると、破壊時のサクシオン (s_f) が 0 になった $\sigma_{3net}=150\text{kPa}$ の試験の方が、 $s_f=54\text{kPa}$ であった $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ の試験よりも強度が高くなった(表1参照)。

次に、 $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ で行った3つの試験を比べ

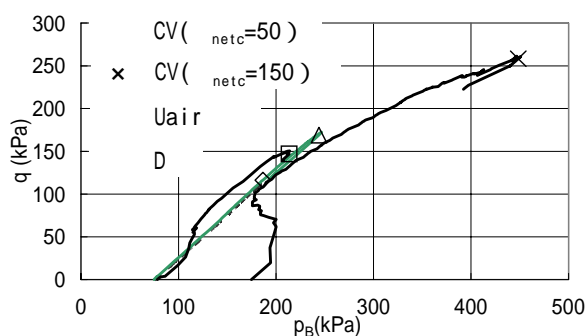


図5 応力経路比較図

る。排水試験は、破壊時の σ_{3net} が特に低いというわけでもなく、 s が他の試験より高い値を示したが、強度が最も低いという結果になった。定体積試験と非排気試験では、破壊時の σ_{3net} 、 s とともに非排気試験の方が高く、強度も高くなった。このように、せん断開始時の応力状態が同じであっても、試験条件によってせん断強度が異なる。

全ての試験の応力経路を図5にまとめた。縦軸に

$$q = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \quad (3)$$

を、横軸には Bishop の有効応力[6]に基づくパラメータ

$$p_B = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - u_a + S_r \cdot s \quad (4)$$

をとっている。

図より、強度 q_f (q の最大値) は、 p_B が大きいほど大きくなっていることがわかる。このように、特殊な試験条件下の強度も p_B で説明できるようなのである。これは、これまでの研究[5]の結果と矛盾しない。ただし、本研究の結果では p_B と q_f の関係は直線的でない。

5. 強度特性の評価

清水ら[2][3]の結果と今回の研究で行った試験の結果を用いて不飽和土の強度特性について再度検討する。

強度評価の方法として清水ら[3]は二つの方法を検討している。ひとつは、Fredlund のせん断強度式による方法であり、他は、Bishop の有効応力を用いた方法である。

5.1 Fredlund のせん断強度式による強度評価

Fredlund ら[7]の提案しているせん断強度式は、次のように示される。

$$\tau_f = \sigma_{netf} \tan \phi' + s_f \tan \phi^b + c' \quad (5)$$

ここに、 τ_f はせん断強度、 ϕ' はせん断抵抗角、 ϕ^b はサクシオンによる強度増加を表すパラメータ、 c' は見かけの粘着力である。

縦軸に τ_f 、横軸に σ_{net} をとり、モールの応力円を考える（図6）．破壊時のモールの応力円が式(5)に接するという条件より、 q_f と平均有効応力 p_{netf} の関係は次のようになる．

$$q_f = p_{netf} \sin \phi' + b_F \cos \phi' \quad (6)$$

ここに、

$$b_F = s_f \tan \phi^b + c' \quad (7)$$

であり、モールの応力円（図6）で破壊線の切片を表す． ϕ^b や c' が一定であればサクシジョンの一次関数となる．しかし、パラメーター ϕ^b が一定でないことを示す結果[4]が示されている．つまり、パラメーター ϕ^b の値を決めることが無理であるので、式(6)より

$$b_F = \frac{q_f - p_{netf} \sin \phi'}{\cos \phi'} \quad (8)$$

と変形し、この式(8)で b_F を評価した．

図7にこれまでの研究と本研究で行った全ての試験の b_F と s_f の関係を示した．図の b_B については後述する．図より b_F と s_f の間に線形性が認められないことが分かる．

5.2 Bishopの有効応力を用いた強度評価

せん断抵抗に寄与する粒子間垂直応力として、外力に釣り合うものと、外力が作用しなくても存在するもの（内力）がある[5]．

Bishopの有効応力はその導出過程から明らかのように外力に釣り合う粒子間力を表していると考えられる．一方、サクシジョンは外力が作用しなくても存在する．内力としてのサクシジョンの効果を現段階では具体的に表すことができない[5]ので、本論文では内力としてのサクシジョンを粒子間力に考慮しない．

Bishopの有効応力 σ'_B は次式で定義される[6]．

$$\sigma'_B = \sigma_{net} + \chi s \quad (9)$$

パラメータ χ は飽和度 S_r と見なすことができる．

Fredlundらのせん断強度式における σ_{netf} を σ'_{Bf} に置き換えると、

$$\tau_f = \sigma'_{Bf} \tan \phi' + s_f \tan \phi^b + c' \quad (10)$$

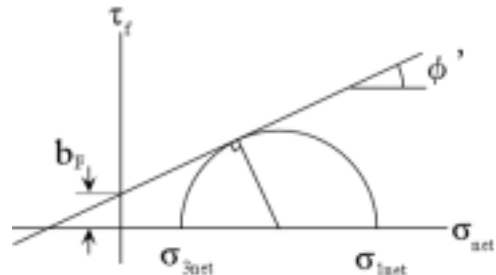


図6 モールの応力円

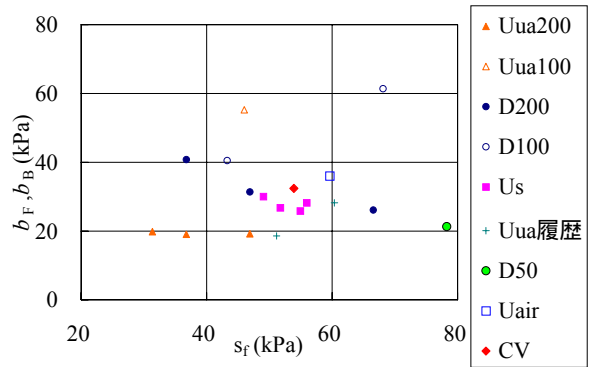


図7 b_F, b_B と s_f の関係．Uuaは非排水・ u_a 一定試験，Usは非排水・サクシジョン一定試験．

c' と ϕ' は、Fredlundらの式で用いられたものと同じであるが、サクシジョンの効果を表すパラメーター ϕ^b は異なるもの（ ϕ^b_B ）として扱っている．

式(10)を変形すると

$$\tau_f = \sigma_{netf} \tan \phi' + b_B \quad (11)$$

ここに、

$$b_B = s_f (S_{rf} \tan \phi' + \tan \phi^b_B) + c' \quad (12)$$

式(11)を q_f および p_{netf} で表すと、

$$q_f = p_{netf} \sin \phi' + b_B \cos \phi' \quad (13)$$

式(6)と式(13)を比べると

$$b_F = b_B \quad (14)$$

であることが分かる．即ち、 b_B も図6の破壊包絡線の切片である．しかし、式(12)より b_B は s_f のみでなく S_{rf} の関数でもある．このことは、先に指摘した b_F と s_f の間の非線形性の一因を説明している．

6. 結論

(1) 正味の拘束圧を調節することにより、不飽和土の定体積三軸試験が可能である。しかし、体積の変動を完全に抑えることができず、 $\pm 0.25\%$ 程度の体積ひずみが生じた。

(2) 定体積試験及び非排気試験のような特殊な試験条件下でのせん断強度を Bishop の有効応力パラメータ p_B を用いて評価することを試みた。その結果、せん断強度と p_B に良好な相関が見られた。 p_B は特殊な条件下でのせん断強度を説明し得ることがわかった。

(3) Fredlund らの式において、 σ'_{net} を Bishop の有効応力 σ'_B に置き換えて強度特性を調べた。その結果、破壊包絡線の切片 (b_F) がサクシヨンの一次関数にならないという試験結果を説明できる可能性があることが分かった。

今後の課題を挙げる。

(1) 本研究では、定体積試験と非排気試験の試験数が少なく、このような特殊な試験条件下での特性を十分に把握できたとはいえず、今後さらに検討する必要がある。

(2) 強度特性は圧密履歴の影響を受けると考えられる。本論文に示した試験では U_{ua} 履歴試験のみ過圧密の履歴を受けている(ただし、圧密履歴を表現する応力として Bishop の有効応力を用いた)。 U_{ua} 履歴試験の結果を除いても本論文の結論は変わらないので、本論文の考察には過圧密の影響は含まれていないと考えられる。今後、強度特性に対する過圧密の影響について明らかにしていく必要があると考えている。

参考文献

- [1] 清水正喜・岡本佳子(2000)：不飽和土の排気・排水三軸圧縮挙動，第52回土木学会中国支部研究発表会，pp.447-448。
- [2] 清水正喜・西岡龍二・坂本創(2005)：不飽和土の三軸圧縮挙動と強度に対する試験条件の影響，第60回土木学会年次学術講演会，pp.719-720。
- [3] 清水正喜・坂本創・西岡龍二(2006)：不飽和土のせん断強度に対するサクシヨンの影響に関する新たな考察，第41回地盤工学研究発表会，pp.831-832。
- [4] Shimizu, M., Sakamoto, S. & Nishioka, T. (2006): Effects of drainage conditions on shear strength of unsaturated soils, *Proc. of the 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication No. 147, ASCE, Vol.1*, pp.1223-1235.
- [5] Shimizu, M., Sakamoto, S. & Nishioka, T. (2007): Shear strength characterization based on inter-particle stresses for unsaturated soils, *Proc. of the 3rd Asian Conf. on Unsaturated Soils, Nanjing, PRC, Vol.1*, pp.291-296.
- [6] Bishop, A. W. (1959): The principle of the effective stress, *Teknisk Ukeblad*, Vol. 106, pp.859-863.
- [7] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. & Widger, R. A. (1978): The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geotech. J.* 15, pp. 313-321.

(受理 平成19年9月28日)