

# 不飽和土の三軸圧縮せん断挙動における排水条件の影響

清水 正喜・坂本 創  
鳥取大学工学部土木工学科

## Effects of drainage conditions on the triaxial compression behavior of unsaturated soil

Masayoshi SHIMIZU and Sou SAKAMOTO  
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University  
Koyama, Tottori, 680-8552 Japan

**Abstract:** Triaxial compression tests were conducted on unsaturated silty clay in which the drainage of pore water was not allowed and the suction was held constant in the shearing stage. The results were compared with those from ordinary drained tests. The effects of the drainage conditions on the deformation and strength behavior were discussed. One of conclusions showed that the lower shear strength was mobilized under the undrained condition than under the drained one. The reason of this behavior was explained by the fact that the net confining stress decreased in undrained tests.

**Key words:** unsaturated soil, triaxial compression test, shear strength, undrained condition

### 1. はじめに

地盤工学の対象となる土は多くの場合不飽和状態にある。本研究の最終的な目的は不飽和状態にある地盤の安定性を推定するために、不飽和土のせん断強度を室内試験によって合理的に評価する方法を確立することである。合理的な評価とは、応力条件が明確な試験を通して結果を力学的に正しく評価することである。

これまでに、不飽和土用三軸圧縮試験装置を試作・改良し[1,2,3]、強度要因としてサクシオン( $s=u_a-u_w$ )と正味の拘束圧( $\sigma_{3net}=\sigma_3-u_a$ )に着目して基礎的な試験を行った。

本研究では、先に製作された不飽和土用三軸圧縮試験装置をさらに改良した後、不飽和供試体の排水及び非排水三軸圧縮試験を行った。本報告では、特に排水条件の影響について考察する。

### 2. 試料及び供試体作成方法

試料は藤森粘土を用いた。気乾試料の 425  $\mu\text{m}$  ふるい通過・75  $\mu\text{m}$  ふるい残留分に 75  $\mu\text{m}$  ふるい通過分を 5%加えたもので供試体を作成した。当初、試験時間を短縮するために 425  $\mu\text{m}$  ふるい通過・75  $\mu\text{m}$  ふるい残留分のみで供試体を作成して試験を試みたが、供試体が自立しなかった。そこで 75  $\mu\text{m}$  ふるい通過分を 5%加えた。

粒度調整は以下の方法で行った。425  $\mu\text{m}$  ふる

い通過分を 75  $\mu\text{m}$  ふるいの上で水洗いし細粒分を取り除いた。その 75  $\mu\text{m}$  ふるい残留分を長時間水浸させた後、再度 75  $\mu\text{m}$  ふるいの上で水洗いすることで粗粒分に付着した細粒分を取り除いた。物理的性質を表 1 に、粒径加積曲線を図 1 に示す。

表 1: 試料の物理的性質。

$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.653	細砂分 (%)	74.3
w <sub>L</sub> (%)	60.7	シルト分 (%)	13.8
w <sub>P</sub> (%)	33.1	粘土分 (%)	11.9
I <sub>P</sub>	27.6		

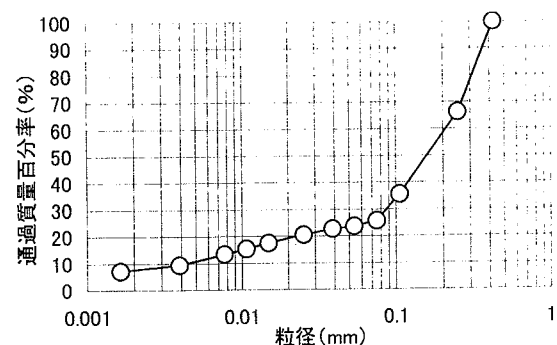


図 1: 粒径加積曲線。

予圧密により飽和供試体を作成した。試料の含水比を約 80%に調整し、内径 60 mm, 高さ

120 mm のモールド内で最大圧密圧力 49 kPa で圧密した後、除荷した。圧密終了は 3 t 法により判定した。予圧密した試料をトリミング法により直径約 3.5 cm、高さ約 8.0 cm の円柱形供試体に成形した。

不飽和供試体の三軸圧縮試験は、このようにして作成した飽和供試体を三軸セル内で排水条件の下、空気圧を与えることにより不飽和化した。

### 3. 試験装置

試験に用いた装置は岡本[3]が改良したものを使用した。装置の概略図を図 2 に示す。

岡本は、本試験装置では、上部ステンレス盤の軸受け部と载荷棒の僅かな隙間から内セル水の蒸発が起こり体積圧縮量を過大評価してしまうことを指摘している[3]。小川[4]は、不飽和土の一次元圧縮試験において载荷棒に Y リングを装着することにより、隙間をなくし、蒸発を防ぐことができることを実証した。そこで、本研究においても、Y リング装着型载荷棒(図 3)を作成し、その蒸発防止効果を検討した。通常の载荷棒と Y リング装着型载荷棒を取り付けた場合について、セル内に水を張り、セル圧 300 kPa を作用させた状態で内セル内水位の時間的変動を比較した。結果を図 4 に示した。通常の载荷棒を使用すると隙間からの空気漏出のため水位が大きく低下している。しかし、Y リング装着型载荷棒を使用した場合は、水位の変動はなく蒸発が防げていると考えられる。このことから本研究では Y リング装着型载荷棒を使用することとした。また、Y リングと軸受け部の摩擦を極力なくすために、Y リングにはシリコングリースを塗布した。

### 4. 三軸圧縮試験方法

等方圧縮過程から軸圧縮過程へと段階的に試験を行った。軸圧縮過程では排水と非排水の条件で試験を行った。

#### 4.1 等方圧縮過程

等方圧縮過程は排水および非排水試験ともに同じ方法で行った。以下にその手順を述べる。なお、今回の実験では、初期に同じ大きさのセル圧と間隙空気圧を作用させておき、間隙空気圧を下げることにより正味の拘束圧を作用させた。

まず、第 1 段階として正味の拘束圧  $\sigma_{3net}=2$  kPa を作用させ、供試体とゴムスリーブの間の空気を取り除いた。その後、正味の拘束圧とサクシオンをその順番で作用させた。拘束圧を与える段階は非排水で行い、間隙水圧の変化がおさま

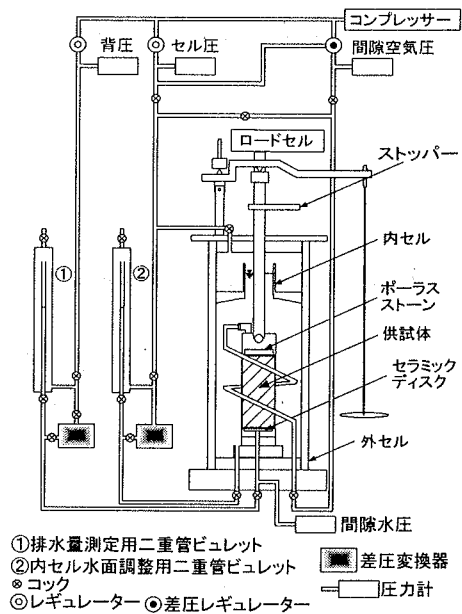


図 2：装置の概略図。

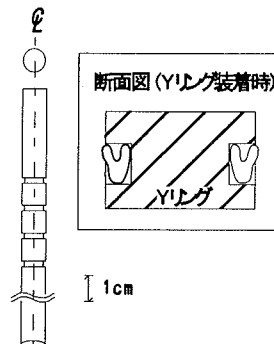


図 3：Y リング装着型载荷棒。

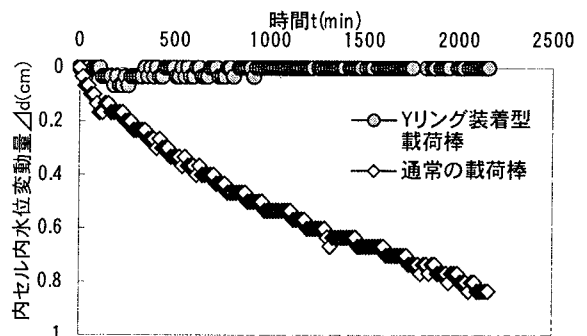


図 4：内セル内水位変動。

次第、サクシオンを作用させる段階に移行した。サクシオン作用段階は排水量の変化がおさまったことを確認して終了した。このとき排水の終了は 3t 法により判定した。

#### 4.2 軸圧縮過程

##### (1) 非排水試験

排水用コックを閉じ、排気/底面非排水状態で

一定の速度で圧縮台を上昇させた。せん断速度は、0.0196 mm/min で行った(供試体高さが 80 mm のとき 0.0244 %/min)。間隙水圧の変化量と同じだけ間隙空気圧を変化させることによりサクシオンを一定に保って、せん断した。せん断は、軸方向ひずみが 15 %を超えるか、もしくは軸圧縮力のピークを迎えてから軸方向ひずみが約 3 %進行するまで行った。

**(2) 排水試験**

排水用コックを開いたまま、排気/排水状態で一定の速度で圧縮台を上昇させた。採用した速度は 0.0041 mm/min である(供試体高さが 80 mm のとき 0.0051 %/min)。せん断中に過剰間隙水圧が発生しないように、せん断速度は十分低速にした。せん断終了の条件は、非排水試験の場合と同じである。

**5. 結果及び考察**

**5.1 等方圧縮過程**

排水試験と非排水試験で同じ条件で行ったので、ここでは  $\sigma_{3net}=200$  kPa,  $s=30$  kPa の条件で行った排水試験の結果を例にとり考察する。

結果を図 5(a)と(b)に示した。(a)はサクシオン載荷時(排水過程)における体積圧縮量  $\Delta V$  と排水量  $\Delta V_w$  の時間的変化、(b)は拘束圧載荷時(非排水過程)における体積圧縮量  $\Delta V$  と間隙水圧  $u_w$  の時間的変化である。以下の考察のために、次のことに注意する。 $\Delta V \geq \Delta V_w$  のとき排気が、 $\Delta V \leq \Delta V_w$  のとき吸気が起こったことを表わす。

サクシオン載荷時に、はじめは排水量  $\Delta V_w$  と体積圧縮量  $\Delta V$  が同じであるが  $\Delta V$  の変動が小さくなってからは  $\Delta V_w$  のみ変動している。つまり、体積圧縮が収まってからも排水が引き続いている(図 5 (a))。

非排水で拘束圧を作用させたとき(図 5(b))、間隙水圧は、間隙空気圧の減少に伴って減少した後、一定に落ち着いている。体積圧縮が起こっていることから間隙空気が排気されていることがわかる。

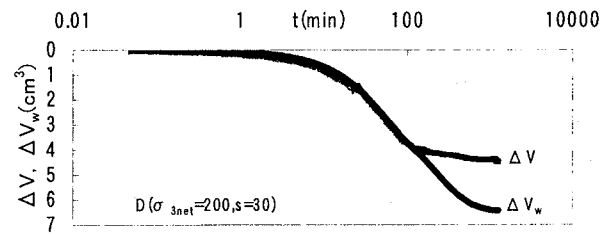
**5.2 軸圧縮過程**

**(1) 応力～ひずみ関係**

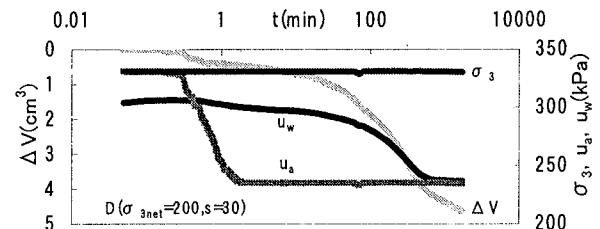
図 6 は、 $\sigma_{3net}=200$ ,  $s=30$  (kPa)で行った試験の軸圧縮過程の結果を示す。図は、軸差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )、体積圧縮量  $\Delta V$  および排水量  $\Delta V_w$  と軸ひずみ  $\epsilon$  との関係を示す。図中、D は排水試験を、U は非排水試験を表わす。また、↓は軸差応力のピークが現れたところを示す。

**a. 排水試験**

軸差応力は軸圧縮が進むにつれて徐々に上昇し、



(a)サクシオン載荷時(排水).



(b)拘束圧載荷時(底面非排水).

図 5 : 等方圧縮過程.

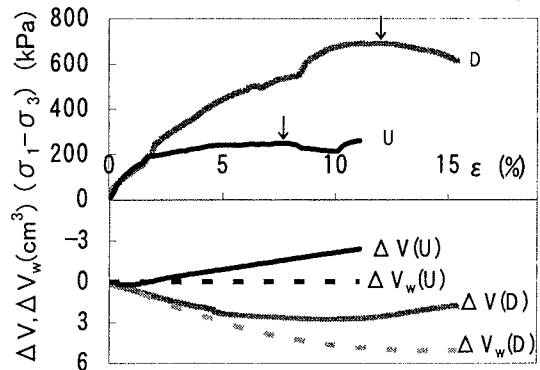


図 6 : 試験結果( $\sigma_{3net}=200, s=30$ kPa).

ピークを迎えている。

体積は、はじめ圧縮するが軸差応力のピークが現れる少し前から膨張方向に向かっている。供試体に明瞭なすべり面が現れたが、せん断帯で正のダイランシーを示したためと思われる。

排水量は軸圧縮開始から体積圧縮量より大きな値をとっており、吸気が起こっていることがわかる。軸差応力のピークが現れるころより排水は一定になった。

**b. 非排水試験**

せん断初期の強度の増加量が大きい、せん断途中から強度の増加量が極端に低下した。軸差応力の最大値は、軸ひずみがあまり進行していないところで現れており、排水試験の値に比べ小さい。

体積変化は初期に圧縮が起こり、その後膨張している。体積の膨張(吸気)のひとつの原因として、サクシオンを一定にするために間隙水圧の上昇と

同時に間隙空気圧を上げていった結果、正味の拘束圧  $\sigma_{3net}$  が低下したことの影響であると考えられる。供試体の形状はタル状に変形し、試験終了時にすべり面が観察された。

## (2) 応力経路

図 7 は、今回行ったすべての試験の応力経路を示す。図に示す○と△は軸差応力の最大値を示す。ただし、初期拘束圧  $\sigma_{3net}=200$ ,  $s=70$  (kPa) で行った排水試験では一度強度が低下した後、再度強度が増加する挙動を示したが、はじめのピークをせん断強度とした。応力経路は排水試験では水平と  $45^\circ$  をなす直線となるが、非排水試験ではせん断中に  $s$  を一定に保ったので、 $u_w$  にしたがって  $u_a$  が変化することにより、経路は直線とまらない。

強度に対する排水条件の影響を調べるために、まず排水試験から得られた結果を示す。図 8 は岡本[3]が行った排水試験の結果である。同じサククションであれば、強度は拘束圧とともに増加すること、同じ拘束圧であれば、強度はサククションとともに増加することがわかる。このように排水状態では拘束圧とサククションの両方が強度に寄与している。

図 7 において、同じ初期拘束圧、同じサククションの排水試験と非排水試験を比較する。拘束圧の大きさに依らず、非排水試験の強度が低い。これは非排水試験では、せん断中にサククションを一定にするために間隙空気圧を増加させたので正味の拘束圧が低下したことの影響である。

次に、同じサククションで異なる初期拘束圧の非排水試験を比較する。排水試験と同様に拘束圧に依存していて、拘束圧が大きいとき強度が大きい。

さらに、同じ初期拘束圧で異なるサククションの非排水試験を比較する。 $s=30$  kPa の試験は  $s=70$  kPa の試験に比べ間隙空気圧の増加の割合が大きく、圧縮強度は低くなっている。

## 6. 結論

本研究の目的は、不飽和土の三軸圧縮試験における排水条件の影響を調べることである。また、三軸圧縮試験装置を改良することもひとつの目的である。本研究で得られた結果を以下に記す。

- (1) Yリング装着型載荷棒を使用することにより、内セル水の蒸発を防ぐことができた。
- (2) 圧縮強さ(軸差応力の最大値)は、同じ初期拘束圧の試験において非排水試験では排水試験より小さくなる。これは非排水試験において、せん断中に正味の拘束圧が低下した

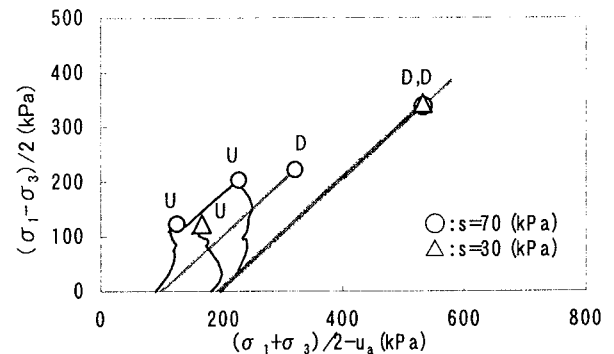


図 7: 応力経路.

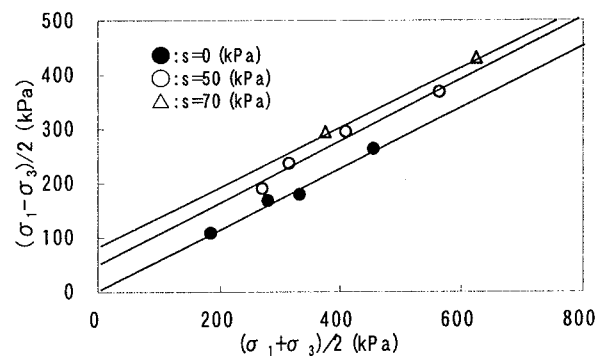


図 8: サククションによる強度変化.

ためと考えられる。

- (3) 同じ拘束圧でサククションを変えて行った非排水試験ではサククションが高いほど正味の拘束圧の減少量が小さく、圧縮強度は増加した。

非排水試験のサンプル数が少ないので考察が十分でない。さらに試験を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 藤井亮介：不飽和土の力学特性に関する基礎的研究 - 一次元圧縮及び三軸圧縮試験 -, 鳥取大学工学部土木工学科, 卒業論文, 1997.
- [2] 笹井維人：三軸圧縮試験による不飽和土のせん断特性, 鳥取大学工学部土木工学科, 卒業論文, 1998.
- [3] 岡本佳子：三軸圧縮試験による不飽和土の力学特性に関する基礎的研究, 鳥取大学工学部土木工学科, 卒業論文, 2000.
- [4] 小川博史：不飽和土の一次元圧縮特性に関する研究, 鳥取大学工学部土木工学科, 卒業論文, 2000.

(受理 平成 16 年 9 月 30 日)