

土の三軸圧縮試験

大塚 菜都美*

* OTSUKA Natsumi、株式会社サムシング 調査部 東京都江東区木場 1-5-25 深川ギャザリアタワー S 棟 4F

1. はじめに

三軸圧縮試験は、乱れの少ない試料を用いて供試体を作成し、土中の拘束状態を人工的に再現し、土中の圧力によって拘束された状態での力学特性を得る試験である。三軸圧縮試験は、せん断前に試料を圧密させるかさせないか、せん断中に排水を許すか許さないかの2つの条件があり、これらの組み合わせにより以下の3種類に分けられる。

- ① 非圧密非排水三軸圧縮試験 (UU 試験)
- ② 圧密非排水三軸圧縮試験 (CU 試験、 \overline{CU} 試験)
- ③ 圧密排水三軸圧縮試験 (CD 試験)

試験条件については括弧書き内の記号で示すことが一般的であり、Consolidate(圧密させる) + Drain(排水する)の頭文字をとり、圧密させない又は排水させない条件の場合は否定を意味する「Un-」の頭文字をとっている。三軸圧縮試験の種類と試験結果の利用例については表-1 に示す通りである。

UU 試験では、せん断前に圧密を行わず、せん断中も試料から全く排水させない試験方法である。この試験から得られた結果は、施工中の粘土地盤の安定や支持力度を推定するような短期的な検討に用いられる。

CU 試験では、あらかじめ試料に圧力を加えて圧密を生じさせた後にせん断力を加える方法で、せん断中には試料からの排水を許さない。この試験の結果は地盤を圧密させた後に期待しうる地盤の強さを推定するときなどに用いられる。

\overline{CU} 試験は、CU 試験と同じ方法であるが、せん断中に発生する過剰間隙水圧を測定し、試料内の有効応力を知る方法である。この試験結果は、CU 試験と同じように地盤を圧密させた後に期待しうる地盤の強さを推定するときなどに用いられる他、掘削あるいは大きな圧密降伏応力を有する粘土などの長期間にわたる安定性を検討するときに用いられる。

CD 試験は、予め試料に圧力を加えて圧密を生じさせた後にせん断力を加える方法で、せん断中は試料内に過剰間隙水圧が発生しないように試料からの排水を許す方法である。この試験の結果は砂質土地盤の支持力度や安定性、または、粘性土地盤では掘削あるいは大きな圧密降伏応力を有する粘土などの長期間にわたる安定性を検討するときに用いられる。

2. 試験概要

一般に用いられている三軸圧縮試験機は、図-1 に示す

表-1 三軸圧縮実験の種類と試験結果の利用例¹⁾

試験の種類	適用土質	排水パルプの状態		間隙水圧の測定	求められる強度定数		試験結果の利用例
		圧密過程	軸圧縮過程				
非圧密非排水 (UU) 試験	飽和粘性土	閉じる	閉じる	しない	C_u, ϕ_u		非排水せん断強さの推定, 粘性土地盤の短期安定問題, 支持力・土圧の算定
圧密非排水 (CU) 試験	飽和粘性土	開ける	閉じる	しない	$C_{cu}, \phi_{cu}, s_u/p$	—	粘性土地盤を圧密させてからの短期安定問題, 強度増加率 s_u/p 推定
圧密非排水 (CU) 試験				する		C', ϕ'	上記および有効応力に基づく強度定数を有効応力解析に用いる
圧密排水 (CD) 試験	飽和土	開ける	開ける	しない	C_d, ϕ_d		砂質土地盤の安定の問題, 盛土の緩速施工, 粘性土地盤掘削時の長期安定問題

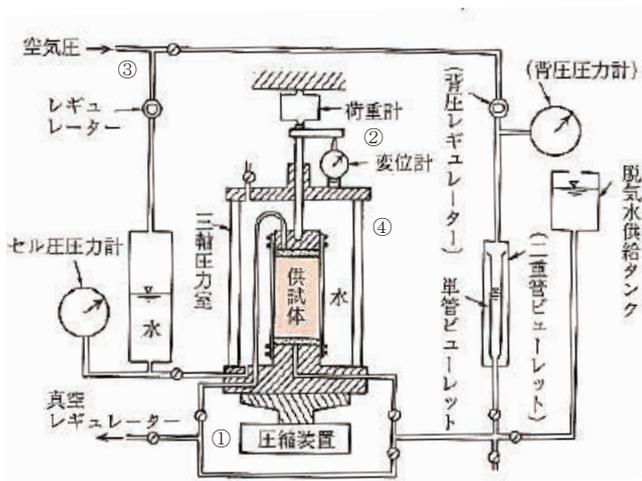


図-1 三軸圧縮試験機の構成 ¹⁾に加筆

ように①三軸圧力室、②セル圧供給装置、③圧縮装置、④荷重測定装置および変位測定装置から構成され、供試体を三軸圧力室の中で圧縮するものである。

2.1 供試体の作成・設置

試験に用いる試料の状態に応じて、トリミング法または負圧法により供試体を作成する。通常、トリミング法はブロックサンプリングや各種サンプラーで採取された乱れの少ない試料を、負圧法は砂質土試料のように、ときほぐされた状態で与えられ締固めや圧密によっても塊状にできないものに用いられる。

写真-1、図-2はトリミング法による供試体の作製状況である。サンプリング試料の表面は試料採取時の摩擦による乱れ等が生じている為、直径3.5~10cmとなるようにトリマー、ワイヤソー、直ナイフなどを用いて供試体側面を成形し、直径の1.5~2.5倍の高さとなるようにマイターボックス、ワイヤソー、直ナイフなどを用いて供試体端面を成形する。

成形した供試体をペDESTALと呼ばれる台座の上に置き、キャップを載せ側面をゴムスリーブで覆い、ゴムスリー

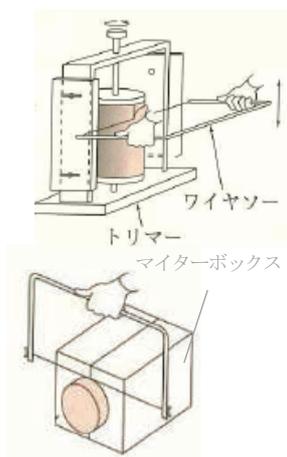


写真-1 供試体側面の成形状況 図-2 供試体の作成方法 ¹⁾に加筆

ブの上下端をキャップおよびペDESTALにOリングでシールする(写真-2:左側)。圧力室を組み立て、変位計をセットし圧力室内に水を徐々に入れる(写真-2:右側)。

2.2 供試体の飽和

圧力室が水で満たされた後、供試体下端の排水経路より供試体内部に脱気水を通水する。供試体内の有効応力を変化させずに、供試体内部に背圧と供試体外部に等方圧力を同時に作用させる。

2.3 等方応力の載荷過程および圧密過程

供試体の設置および飽和の後に、UU試験では等方応力の載荷過程を、CU試験およびCD試験では圧密過程を以下の手順で行う。

UU試験：変位計および間隙水圧計の原点を調整する。セル圧レギュレーターを操作し、所定の等方応力状態になるように供試体に加圧する。

CU試験、CD試験：変位計を取り付け、原点を調整し、ビューレットの初期値を読み取る。CU試験の場合はこの時、間隙水圧計の原点も調整し、間隙水圧計の値が所定の背圧を示していることを確認する。ビューレットに通じる排水バルブを閉じ、等方応力と背圧との差が所定の圧密応力になるように等方応力のみを増加させる。排水バルブを開いて圧密を開始する。圧密中の体積変化量および可能な場合は軸変化量を適当な経過時間ごとにはかり図示する。一時圧密が終了するまで圧密を続け、圧密による堆積変化量および軸変位量を求める。CU試験ではビューレットに通じる排水バルブを閉じ、等方応力を増加させ、それによって生じる間隙水圧の変化が落ち着く時間および間隙水圧の増加量を測定する。等方応力を元の値に戻し、間隙水圧の値が落ち着くのを待って排水バルブを開く。

2.4 軸圧縮過程

荷重計と変位計の原点の確認・調整を行う。CU試験で



写真-2 供試体の設置(左)・圧力室給水状況(右)

は排水バルブを閉じる。セル圧を一定として、軸ひずみ速度が一定となるように台全体が上がることで連続的に供試体を圧縮する（写真-3）。圧縮中は、軸圧縮力、軸変位量をはかる。CU試験では間隙水圧変化量、CD試験では体積変化量もはかる。荷重計の読みが最大となってから(i)引き続き軸ひずみが3%以上生じるか、(ii)荷重計の読みが最大値の2/3程度に減少するか、または(iii)軸ひずみが15%に達したら圧密を終了する（図-3）。供試体を圧力室から取出し、供試体の変形・破壊状況などを観察し、記録する。

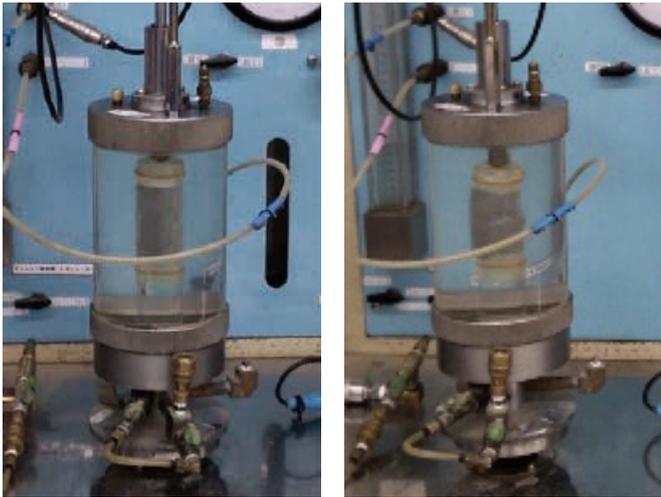


写真-3 UU試験圧縮状況（左：加圧前、右：加圧後）

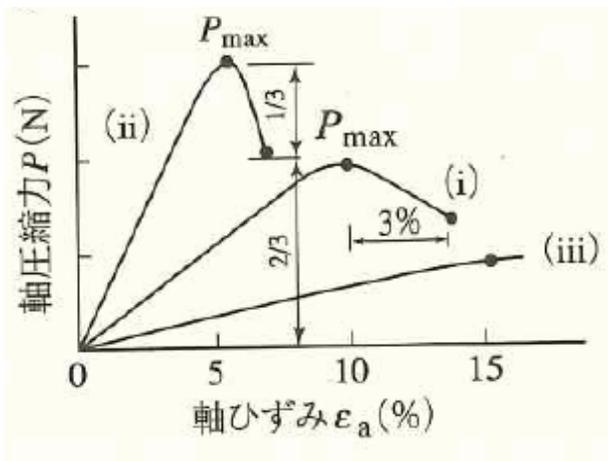


図-3 圧縮終了条件¹⁾

3. 結果の整理

各試験における供試体の軸ひずみ ε_a (%) を計算し、この時の主応力差 ($\sigma_a - \sigma_r$) (kN/m²) を計算により求める。

σ_a : 供試体に作用する軸方向応力

σ_r : 供試体に作用する側方向応力

算出した主応力差を縦軸に、軸ひずみを横軸にとって、主応力差 - ひずみ曲線を描く。CU試験の場合は、間隙水圧を縦軸に、軸ひずみを横軸にとって、軸圧縮にともなう間隙水圧増分 - 軸ひずみ曲線を描く。CD試験の場合は、体積ひずみを縦軸に、軸ひずみを横軸にとって体積ひずみ - 軸ひずみ曲線を描く。 $0 < \varepsilon_a \leq 15\%$ の範囲の主応力差の最大値 ($\sigma_a - \sigma_r$)_{max} (kN/m²) を図上から求め、圧縮強さとする（図-5）。

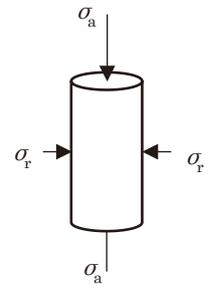


図-4 供試体の応力条件

各基準とも、同一試料から作製した3個以上の供試体について、異なる側方向応力に対して試験を行い、圧縮強さ及び圧縮中の応力 - ひずみ関係を求める。側方向応力は、試料の飽和度、現場の有効土被り圧、三軸圧力室の耐力容量などを考慮する。

強度定数を求めるには、破壊時の応力に基づくモール円をすべて同じ座標軸上に描き、包絡線（共通接線）を引く。その包絡線の縦軸との切片から粘着力 c を、接線の傾きから、せん断抵抗角 ϕ を読み取る（図-6）。

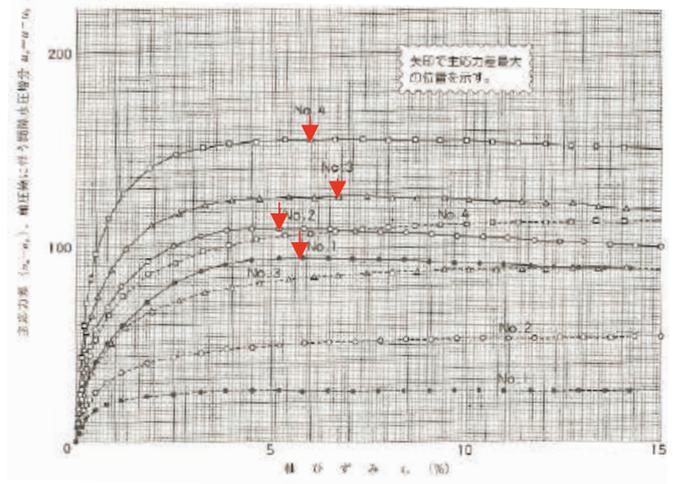


図-5 応力-ひずみ曲線¹⁾に加筆

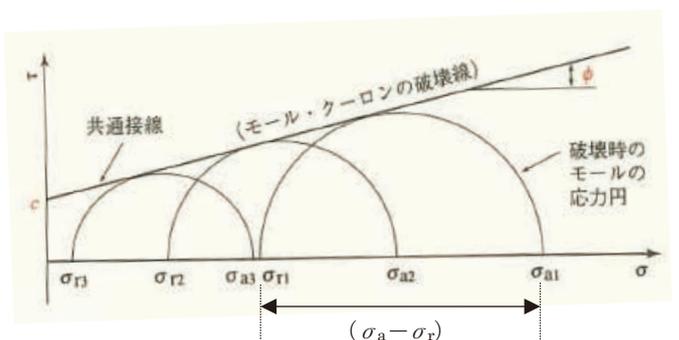


図-6 破壊時のモール円から求める方法¹⁾に加筆

4. 結果の解釈および留意点

UU試験は、非圧密非排水条件であり原位置での有効応力は再現されない。一般に、飽和した粘土の強度は非圧密非排水条件では変化せず、見かけ上 $\phi_u = 0^\circ$ となる(図-7 (a))。このことは拘束圧が0の場合、すなわち一軸圧縮強度 q_u が最大主応力差と一致することを意味する。一軸圧縮試験において、中間土では応力解放の影響を受けて過小評価される傾向があり、また、亀裂性の高い粘性土ではUU試験に比べ圧縮強さが小さくなる場合があるため、このような試料を対象とする場合はUU試験の利用が考えられる。なお、飽和度が低い土の場合は、間隙内の空気が拘束圧により圧縮するため、非排水条件でも供試体は圧縮し、強度が拘束圧の増加とともに大きくなり、破壊包絡線は勾配を持つようになる(図-7 (b) (c))。

CU試験で得られる圧縮強さは、一軸圧縮試験やUU試験と関連づけるために、 $s_u = 1/2 (\sigma_a - \sigma_r)_{max}$ として、非排水せん断強さを定義することがよく行われる。これは、 $\phi = 0^\circ$ としたときの s_u が直接は開示のせん断強さを示すからである。さらに、圧密による強度増加を定量的に示す為に、圧密圧力 $p = \sigma_r - u_0$ として地盤の強度増加率 s_u/p を求めることが多い。しかし、このようにして求められた s_u/p 値をそのまま用いると一般に原位置の強度を過大に評価することになるので注意が必要である。

CD試験は、圧密によって強度が増加した後に、排水状態で載荷を受けるような条件を想定している。実際の土の問題でいえば、透水性の良い砂質土の安定問題や、盛土の

緩速施工のような場合に対応する。CD試験から得られた強度特性を安定問題に適用する場合には、対象となる土が条件を満足する状況にあることが必要で、対象地盤の状況と合わずに、実際よりも強度を過大評価しないよう注意が必要である。

5. おわりに

三軸圧縮試験は、一軸圧縮試験と比較して試験費用が高く住宅地盤で実施されることは少ないが、短期的な検討を目的としてUU試験を実施することがある。一軸圧縮試験では一軸圧縮強さ q_u から粘着力 c しか算出できないが、三軸圧縮試験では粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ の値を求めることができるため、より精度の高い支持力度計算や杭の検討を行う場合には適した試験である。ただし、沖積粘性土のような飽和土($\phi \approx 0$)では一軸圧縮試験とほぼ同じ結果(c)となるため、土質や試料状態等によって試験を使い分けられるよう理解を深める必要がある。

参考文献

- 1) (公社) 地盤工学会：土質試験 基本と手引き 第二回改訂版, 2010, 丸善出版

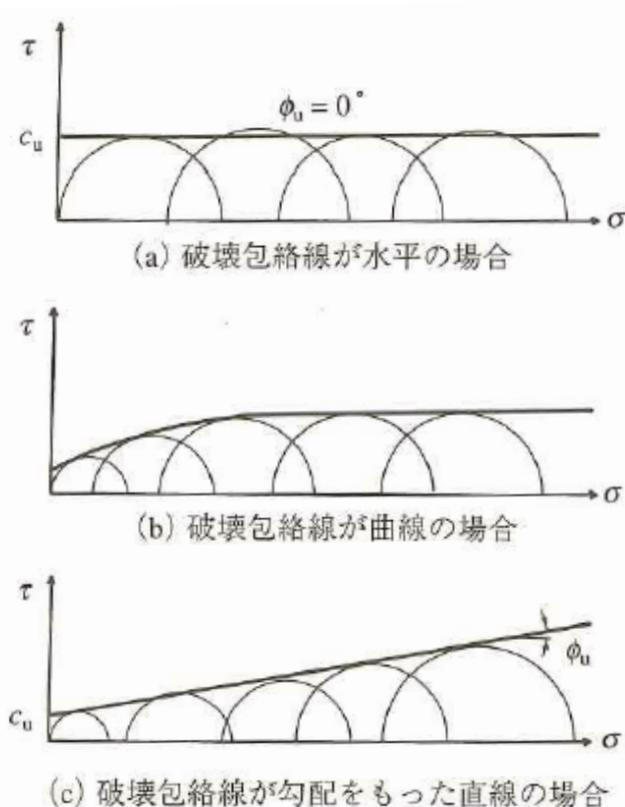


図-7 UU試験における破壊時のモール応力円と破壊包絡線¹⁾