

第 14 章 土の三軸圧縮試験

1. はじめに

1.1 三軸圧縮試験における粘着力とせん断抵抗角とは

土のせん断強さは、破壊時において破壊面上に作用しているせん断応力である。いくつかの拘束圧のもとでのせん断強さを求めることができれば、その結果を連ねることによりクーロンの破壊規準 (p.120 の図-1 参照) を適用することができる。しかし、三軸圧縮試験では破壊面の測定が難しいため、直接的にせん断強さを求めることができない。そこで、**破壊時の拘束圧と圧縮強さ（主応力差の最大値）に基づいて決定されるモール円に対して、モールの破壊理論を適用し、その包絡線を破壊規準としている。**これが、**モール・クーロンの破壊規準**である。土の強度定数である**粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ** は、この**破壊規準線の切片と傾き**をそれぞれ示している。

本章では、以下に示す CU 試験を除いた 3 種類の三軸圧縮試験の方法を解説している。

1.2 試験方法の概略

土のせん断強さは、せん断に先立って圧密を行うか、せん断中に排水を許すかどうかによって大きく異なる (p.120  参照)。そこで、三軸圧縮試験では、圧密時とせん断時の排水条件および間隙水圧の測定を組み合わせる 4 種類の試験を規定している。したがって、原位置の状態に近い条件に合わせて試験を行い、その土の強度・変形特性を求めるのが原則である。三軸圧縮試験における作業の流れを図-14.1 に、試験の種類、適用土質、試験条件、求められる強度定数を表-14.1 にまとめた。



図-14.1 三軸圧縮試験における作業の流れ

表-14.1 三軸圧縮試験の種類と試験結果の利用例

試験の種類	適用土質	排水バルブの状態		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 の推定
圧密非排水 ($\bar{C}U$) 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	—	砂質土地盤の安定問題、盛土の緩速施工、粘性土地盤掘削時の長期安定問題

注) CU 試験と $\bar{C}U$ 試験では、間隙水圧の測定の有無と軸ひずみ速度が異なる (CU 試験では 1%/min)。

1.3 結果の利用

各三軸圧縮試験の試験結果の利用例を上記の表-14.1 にまとめた。

1.4 結果の目安

通常、正規圧密粘土の UU 試験による強度定数は $\phi_u = 0^\circ$, $c_u = s_u$ となり、有効土被り圧 p_0 との比 s_u/p_0 は 0.36 程度となる。 $\bar{C}U$ 試験による正規圧密領域における強度増加率 s_u/p は 0.2~0.45 程度となる。CD 試験による強度定数 ϕ_d は土質、間隙比によって 26~45° 程度となる (図-14.14 参照)。

2. 試驗器具

2.1 三軸圧縮試験機

(圖-14.2 参照)

- ① 三軸圧力室（図-14.3, 図-14.4 参照）
- 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
- ⑤ 間隙水圧測定装置（ $\overline{CU}$ 試験に用いる）
- ⑥ 背圧供給装置（ $\overline{CU}$ 試験に用いる）
- ⑦ 体積変化測定装置（ $\overline{CU}$, CD 試験に用いる）

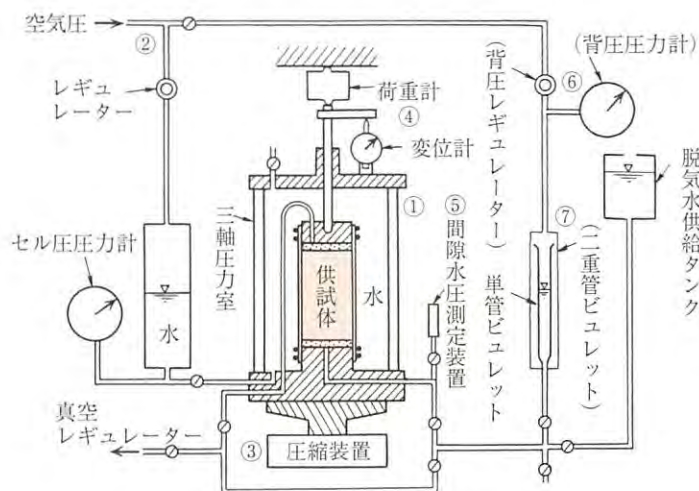


図-14.2 三軸圧縮試験機の構成例

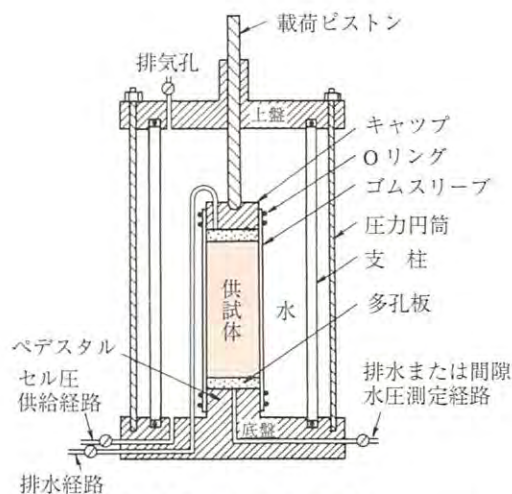


図-14.3 三軸圧力室の例
(キャップとピストンが剛結されていないタイプ)

2.2 供試体作製 器具

以下に示す器具のうち、トリミング法の場合は①～③（図-14.5参照）を、負圧法の場合は④、⑤を用いる。

- ①～③の詳細は、第3章4.1(2)(p.21)を参照する。

- ① トリマー
- ② マイターボックス
- ③ ワイヤソー、直ナイフ



図-14.5 供試体作製器具
(トリミング法の場合)

三軸圧力室には、キャップと
載荷ピストンが剛結されてい
るタイプ(図-14.4)とされてい
ないタイプ(図-14.3)がある。

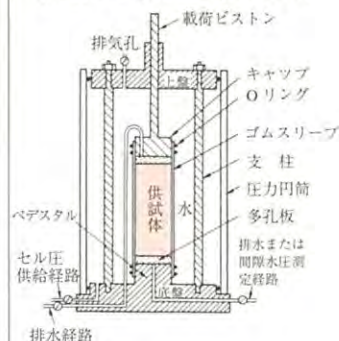


図-14.4 三軸圧力室の例
(キャップとピストンが
剛結されているタイプ)

荷重測定装置で、荷重計を三軸圧力室の外に設置する形式の場合は、ピストンと圧力室の摺動部との間に作用する摩擦力を測定して、軸圧縮力の測定値を補正する。荷重計を三軸圧力室の内部に設置する場合は、セル圧の影響を検定して補正する。

④ 負圧法による場合は⑤の器具として次のものを用意する。

- ・空中・水中落下法：漏斗、ノズル、多重ふるいなど
- ・締固め法：突き棒、締め固め用円板、プラスチックまたは木製ハンマー、振動機など

■凍結した試料などを成形する場合は必要に応じてコアカッター等を使用する。

- ④ 供試体作製用モールド
- ⑤ 試料供給器具，試料締固め器具

2.3 供試体の設置に用いる器具

- ① 負圧発生装置
- ② ゴムスリーブ：ゴムスリーブ拡張器よりも長く，自然状態で内径が供試体の 95%程度のもの。厚さは 0.15～0.3 mm 程度とする。
- ③ ゴムスリーブ拡張器：円筒形で，長さおよび内径は供試体高さおよび直径よりも 5～10%程度大きいもの。
- ④ フィルター：上下方向に取り付けるものは圧縮性の小さく摩擦が少ないもの，圧密時間短縮のために側面に巻くものはスリットを入れるなどせん断変形を拘束しないものを用いる。
- ⑤ Oリング，ゴムひも：Oリングは内径が締め付け部の直径の 80%程度のものを用いる
- ⑥ 供試体寸法測定器具：最小読取値が 0.1 mm 以下のもの。ノギスやバーニア付きスチールテープを用いる。
- ⑦ はかり：0.1 g まではかることができるもの(第 2 章 2.1 (p.8) 参照)。

フィルターは，供試体の透水性に比べて十分大きな透水性を有する必要がある。

2.4 その他の器具

- ① ストップウォッチまたは時計
- ② 含水比測定器具：第 3 章 2. (p.18 参照)。

3. 試料および供試体の作製・設置

試験に用いる試料の状態に応じて，表-14.2 に示す供試体作製方法を選択する。供試体の形状と標準寸法を表-14.3 に示す。

表-14.2 供試体作製方法の種類

作製方法の名称	試料の状態
トリミング法	室温で安定した塊状をなすもの，あるいは凍結したもの
負圧法	ときは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

表-14.3 三軸圧縮試験における供試体形状と標準寸法

供試体形状	円柱
直径	3.5～10 cm
高さ	直径の 1.5～2.5 倍
試料の最大粒径	供試体直径の 1/20 以下

3.1 トリミング法

- (1) 供試体の作製 ① 供試体側面を，所定の直径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成形する。
- ② 供試体端面をマイターボックス，ワイヤソー，直ナイフなどを用いて整形する。
- ③ 供試体の直径を供試体中央付近および両端付近において，0.1 mm 以下まではかり，その平均値を供試体の初期直径 D_i (cm) とする。

成形作業の詳細は，第 3 章 4.2 (p.22) や第 15 章 3.2 (p.152) を参考にする。

④モールドは，通常二つ割りにでき，ペDESTAL上組み立てたときの高さは供試体高さに等しく，内径は供試体直径に対し使用するゴムスリーブ厚の 2 倍分大きいもの。また，モールド内面に空気吸引孔を備えているもの。

①負圧発生装置は，負圧法で供試体を作製する場合にゴムスリーブをモールド内面に密着させる，および供試体を自立させるために負圧を与えるのに用いる (p.139 参照)。

③ゴムスリーブ拡張器は，図-14.4 のようにキャップとピストンが剛結されている試験機では，二つ割りの構造（気密構造）のものを用いることが望ましい。



二つ割れゴムスリーブ拡張器の例

試料の準備およびその取り扱いについては，第 2 章を参照する。

通常，乱さない粘性土試料にはトリミング法を，砂質土試料には負圧法を用いる。

粒径幅の広い試料では，供試体直径の 1/5 程度の最大粒径まで許容される。

試料のうち，明らかに乱れている部分は取り除く。また，試料の含水比が変化しないように作業は手際よく行う。

凍結した試料を成形する場合は，供試体作製器具をあらかじめ冷やしておく必要がある。

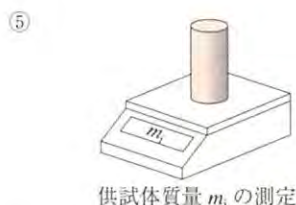
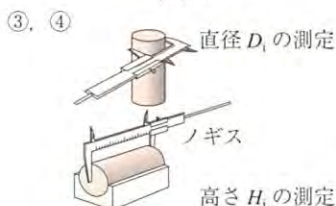
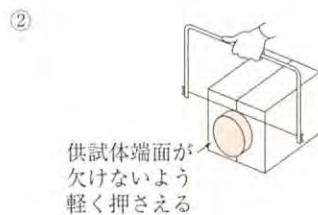
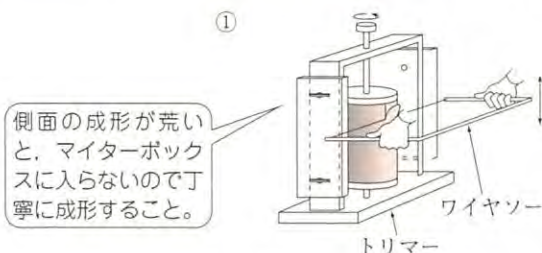
- ④ 供試体高さを、3カ所で0.1 mm 以下まではかる。その平均値を供試体の初期高さ H_i (cm) とする。
- ⑤ 供試体の質量 m_i (g) を、0.1 g 以下まではかる。
- ⑥ 供試体成形時に削り取った土の中から代表的な試料を分取し、初期含水比 w_i (%) を測定する。

必要に応じて、初期状態の湿潤密度 ρ_{di} 、乾燥密度 ρ_{di} 、間隙比 e_i 、飽和度 S_{ri} 、相対密度 D_{ri} を算定する。

供試体の初期体積 V_i (cm³) は次式で求める。

$$V_i = (\pi/4) D_i^2 H_i$$

試験後の供試体を炉乾燥して含水比を求める場合は、削り取った土の含水比測定を省いても良い。



試料をワイヤーボックスに入れて、はかりまで運ぶときは、ワイヤーボックスを水平にして傾けないよう注意する。

(2) 供試体の設置 ① 三軸ベDESTALの上に、供試体下端用ポーラスストーンおよびろ紙を載せ、その上に供試体を設置する。

荷重ピストンと供試体の中心軸を合わせるよう設置する。

② 供試体側面とポーラスストーンにフィルターを巻く。

③ 供試体上端にろ紙とポーラスストーンを載せる。その上に荷重キャップを載せる。

④ ゴムスリーブ拡張器の内側にゴムスリーブを張り、上下を折り返した後、枝管を吸いゴムスリーブを内壁に密着させる。

あらかじめゴムスリーブの厚さをはかっている。

⑤ ゴムスリーブ拡張器を供試体、ベDESTALおよびキャップにかぶせる。

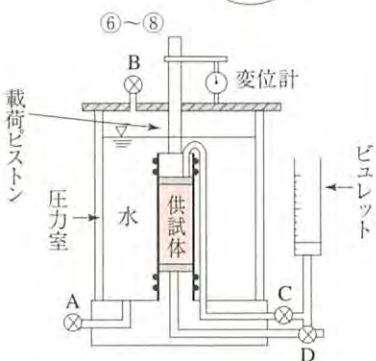
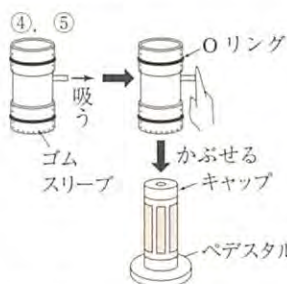
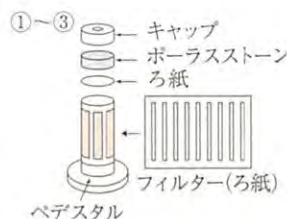
⑥ ゴムスリーブの上下端を拡張器から外し、OリングでキャップおよびベDESTAL部分をシールする。

⑦ 圧力室を組み立て、軸変位測定用の変位計 (CU 試験の場合は、間隙水压計も) 等をセットする。

⑧ バルブ C, D は閉じ、三軸圧力室上盤に付いている空気抜きバルブ B を開け、バルブ A から圧力室内に水を徐々に入れる。

⑨ 凍結試料の場合は排水バルブ C, D を開き、バルブ B から 20 kN/m² 程度の等方圧力を供試体に加えた状態で試料を解凍する。

解凍による供試体の軸変位量 ΔH_i (cm) および体積変化量 ΔV_i (cm³) をはかる。



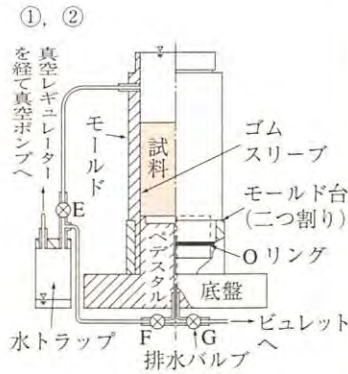
② 供試体側面に巻くフィルターは、一度水に濡らした後、水を十分に切っておくと供試体に巻き付きやすい。また、その形状は、長方形で縦方向にスリットを設けたものを用いることが多い。

キャップとピストンが剛結されていない試験機 (図-14.3) では、円筒型ゴムスリーブ拡張器を用いて供試体にゴムスリーブをかぶせた後、拡張器を外せばよい。一方、キャップとピストンが剛結されている試験機 (図-14.4) では、二つ割りゴムスリーブ拡張器 (2.3③参照) を用いて供試体にゴムスリーブをかぶせた後、分割して取り外すことになる。

< 1 kgf/cm² = 98.1 kN/m² >

3.2 負 圧 法

- ① ゴムスリーブの下端をペデスタルにかぶせ、Oリングでシールする。
- ② モールド台をペデスタル周囲に設置し、モールドを組み立てる。ゴムスリーブ上端を折り返す。バルブEを開け、バルブFは閉じてモールド内面とスリーブの間に負圧を与えて、スリーブを密着させる。



試料がモールドの外へこぼれないように注意する。

ゴムスリーブの折り返し部分に試料がこぼれていないか確認する。

- ③ 排水バルブGを閉じ、モールド内に試料を充填する。供試体の密度を調整する場合は、試料を数回に分けて入れ、各層ごとに突き棒などで締固めて、投入した試料の高さを調整する。
- ④ モールド内で試料が所定の高さに達したら、供試体上面を平滑に整形する。
- ⑤ 供試体上面にろ紙、ポーラスストーンおよびキャップをのせ、ゴムスリーブ上端をモールドからはずしてキャップに密着させ、Oリングでシールする。
- ⑥ バルブE, Gを閉じ、Fを開けた状態で供試体内に5~10 kN/m²程度の負圧を加え、モールドおよびモールド台を取り外す。
- ⑦ 供試体に与えている負圧を20 kN/m²程度に増加させた後、供試体直径を上, 中, 下部の3カ所でゴムスリーブの上から0.1 mm以下まではかる。その平均値から、ゴムスリーブの厚さを補正して、**供試体の初期直径 D_i (cm)**とする。
- ⑧ 供試体高さを、3カ所で0.1 mm以下まではかる。この平均を**供試体の初期高さ H_i (cm)**とする。
- ⑨ **供試体の質量 m_i (g)**は、あらかじめ用意した試料の質量と供試体作製後の残存量を0.1 g以下まではかり、その差から求めるか、あるいは試験後に全試料を回収して求める。
- ⑩ 圧力室を組み立て、変位計(CU試験の場合は、間隙水压計も)等をセットする。
- ⑪ 三軸圧力室上盤に付いている空気抜きバルブを開け、圧力室内に水を徐々に入れる。
- ⑫ **セル圧、負圧および軸荷重を制御して、供試体の有効応力を変化させないで負圧をセル圧に置き換える。**

試料の充填方法には以下のよう
な方法がある。
・ 空中落下法
・ 水中落下法
・ 締固め法

負圧を加える時は、等方応力状態を保持するため、キャップの鉛直変位を拘束しないこと。また、負圧は所定の圧密終了時の有効側方向応力よりも低くする。

供試体の初期体積 V_i (cm³)は次式で求める。
$$V_i = (\pi/4) D_i^2 H_i$$

負圧の大きさを真空レギュレーター等で調整できる場合は、負圧を段階的に徐々に減少させ、負圧の減少分だけ供試体に与える等方圧が増加するようにセル圧と軸荷重を制御し、負圧が0となるまでこの操作を繰り返す。負圧の大きさが調整できない場合は、排水バルブを開いた状態で、負圧と同じ大きさの等方圧を加え、その後、排水バルブを解放する。

- 3.3 供試体の飽和 ① 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。その量は供試体体積の3倍程度以上とし、通水速度は極力遅くする。
- ② **供試体内の有効応力を変化させずに、供試体内部に背圧 u_b (kN/m²) と供試体外部に等方圧力を同時に作用させる。**背圧を用いる場合、その値は**50~200 kN/m²程度**とし、加圧に際しては供試体の有効応力の変動をさけるために、次のように徐々に加えること。

- 1) ピュレットに通じる排水バルブを閉じて、最終的な背圧の値の 1/4～1/2 程度に相当する等方応力増分を供試体に加える。
- 2) 同量の背圧を加えておいて排水バルブを開く。
- 3) このように、常に供試体に作用する等方応力と背圧との差を最初に設定した圧力差に保ちながら、背圧が所定の値に達するまでこの操作を繰り返す。

背圧と等方応力増分は同量与え、供試体の有効応力は一定に保たねばならない。

- ③ 初期状態から圧密前までに生じた供試体の軸変位置 $\Delta H_i(\text{cm})$ および体積変化量 $\Delta V_i(\text{cm}^3)$ をはかる。

4. 試験方法

4.1 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。

(1) UU 試験

- ① 変位計および間隙水压計の原点を調整する。
- ② 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。

(2) CU 試験

- ① 変位計および間隙水压計の原点を調整する。
- ② 間隙水压測定経路に通じるバルブを開いて、間隙水压計の値が所定の背圧 $u_b(\text{kN/m}^2)$ を示していることを確認する。
- ③ ピュレットの最初の読みを記録し、ピュレットに通じる排水バルブを閉じ、等方応力と背圧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する。
- ④ バルブを開いて圧密を開始する。
- ⑤ 圧密中の体積変化量 $\Delta V_i(\text{cm}^3)$ および可能な場合はあわせて軸変位置 $\Delta H_i(\text{cm})$ を適当な時間ごとにはかり図示する。少なくとも一次圧密が終了するまで圧密を続け、圧密による体積変化量 $\Delta V_c(\text{cm}^3)$ と軸変位置 $\Delta H_c(\text{cm})$ を求める。

背圧 (back pressure) は、供試体の飽和度を高めるため、または CU試験で負の間隙水压が予想される場合に間隙水压を正の領域で測定するために用いられる。背圧の大きさは原位置の地盤の静水压を上回る程度の値に選べばよい。

体積変化 $\Delta V_i(\text{cm}^3)$ を直接測定できない場合は、供試体に等方的なひずみが生じたものと仮定して、次式で算定してもよい。

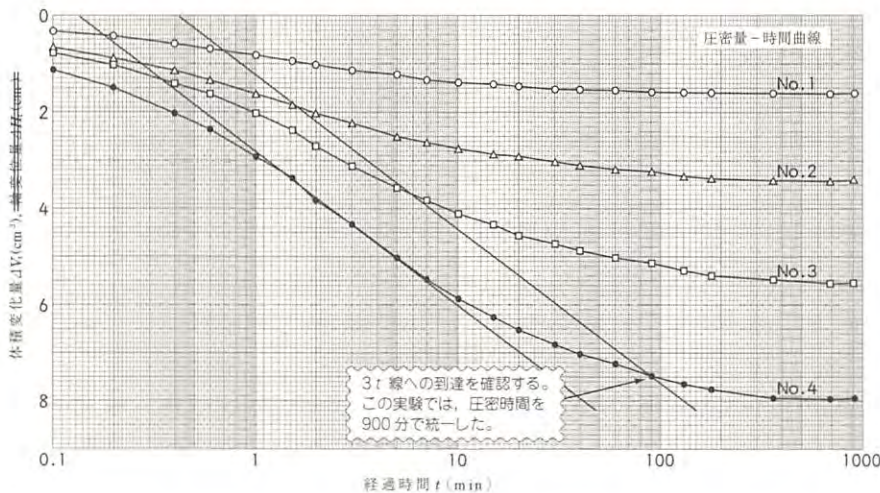
$$\Delta V_i = \frac{3\Delta H_i}{H_i} V_i$$

キャップとピストンが剛結している場合は、ピストンに作用する軸圧縮力とキャップに作用する軸方向応力の関係をあらかじめ求めておく必要がある。この関係は、キャップの直径、ピストン-キャップ系の自重およびピストンと圧力室との間の摩擦力が分かれば計算できる。

ピストンとキャップが剛結されていない試験機では、この操作の前に荷重計、ピストン、キャップを接触させる。また、この試験機で圧密中の軸変位置を測定できない場合は、供試体に余分な力を加えないようにピストンをキャップに接触させて変位計の読みを取り、その値を圧密による軸変位置 $\Delta H_c(\text{cm})$ とする。

測定の間隔は第12章 4.2 ③ (p.107) を目安とする。圧密の打ち切り時間は、3r 法 (第12章 p.107) における d を ΔV_i に置き換える) で判断することを標準とする。過圧密粘土のように一次圧密が明確に認められない場合は、直径 3.5 cm の供試体は圧密開始から 100 分、直径 5 cm 以上の供試体は 150 分を越える適当な時間で打ち切る。

p.149, 図-14.18 参照。



- ⑥ ピュレットに通じる排水バルブを閉じ、等方応力を $\Delta\sigma$ (kN/m²) 増加させる。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 Δu (kN/m²) をはかる。この間の応力の変化の様子を模式的に示すと図-14.6 になる。
- ⑦ 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。

⑥の操作において供試体の B 値を測定している (5.3 参照)。

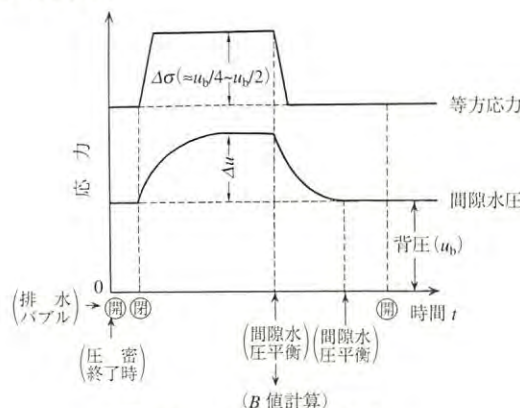


図-14.6 B 値の測定方法

(3) CD 試験

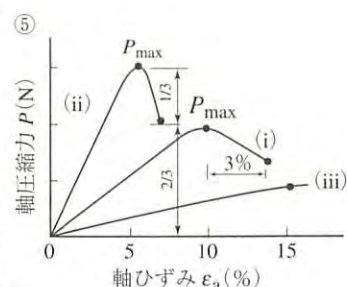
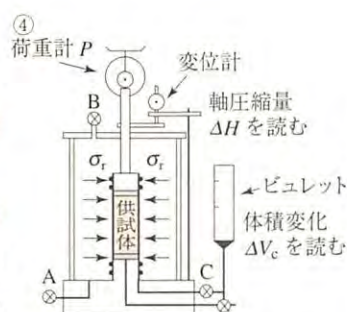
供試体が砂の場合は、圧密はバルブを開けた後、数秒で終了する。それ以後も排水が続く場合は、排水量～時間関係をプロットする。直線関係が得られた場合は、ゴムスリーブが破れているのでセルを解体し、供試体を設置し直す。

- ① 変位計を取り付け、原点を調整する。また、ピュレットの初期値を読みとる。
- ② ピュ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。
- ③ 排水バルブを開いて圧密を開始する。
- ④ 圧密中の体積変化量 ΔV_i (cm³) および可能な場合はあわせて軸変位量 ΔH_i (cm) を適当な経過時間 t ごとにはかり、図示する。少なくとも一次圧密が終了するまで圧密を続け、圧密による体積変化量 ΔV_c (cm³) および軸変位量 ΔH_c (cm) を求める。

④ピストンとキャップが剛結されていない試験機では、この操作の前に荷重計、ピストン、キャップを接触させる。また、この試験機で圧密中の軸変位量を測定できない場合は、供試体に余分な力を加えないようにピストンをキャップに接触させて変位計の読みを取り、その値を圧密による軸変位量 ΔH_c (cm) とする。
④4.1 (2) ⑤の補足を参照する。

4.2 軸圧縮過程

- ① 荷重計と変位計の原点の確認、調整を行う。
- ② CU 試験では排水バルブを閉じる。
- ③ セル圧一定で、軸ひずみ速度一定で連続的に供試体を圧縮する。
- ④ 圧縮中は、軸圧縮力 P (N)、軸変位量 ΔH (cm) をはかる。CU 試験では間隙水圧変化量 Δu (kN/m²) も、CD 試験では体積変化量 ΔV (cm³) もはかる。



- ⑤ 荷重計の読みが最大となってから引き続き、(i) 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、(iii) 軸ひずみが 15% に達したら圧縮を終了する。

軸圧縮力と軸変位量を連続記録しない場合は、これらの測定間隔は、主応力差一軸ひずみ曲線が滑らかに描くことのできる程度とする。例えば、軸圧縮力の最大値までは軸変位量を 0.02 mm 間隔、それ以降は 0.05 mm を越えない間隔が望ましい。

④軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ は、
UU 試験：1%/min
CU 試験：シルト分の多い試料で 0.1%/min 程度、粘土分の多い試料で 0.05%/min 程度を目安とする。
CD 試験：主応力差最大時の軸ひずみ ϵ_{af} が予想できる場合は、次式の計算値を超えないものとする。
 $\dot{\epsilon}_a = \epsilon_{af} / 15 t_c$
 t_c ：圧密時間 (min)
ただし、上式の計算値にかかわらず、0.5%/min を越えないものとする。

- ⑥ 供試体を三軸圧力室から取り出し、供試体の変形・破壊状況などを観察し、記録する。その後、供試体の炉乾燥質量 m_s (g) をはかる。

削り屑を用いて含水比を求めた場合にはこれを省いてよい。

供試体の変形・破壊状況が、最も顕著に見える方向からの観察を記録する。すべり面が見られる場合は、勾配が最も急な角度を記録する。供試体の不均質状態や異物の混入状況なども記録する。

5. 結果の整理

5.1 圧密前の供試体の状態

圧密前の供試体体積 V_0 (cm³) と供試体高さ H_0 (cm) を式 (14.1) および式 (14.2) で算定する。

$$V_0 = V_i - \Delta V_i \quad (14.1)$$

$$H_0 = H_i - \Delta H_i \quad (14.2)$$

ここに、 V_i : 供試体初期体積 (cm³) (↪ 3.1 (1) ③④, 3.2 ⑦⑧)

H_i : 供試体初期高さ (cm) (↪ 3.1 (1) ④, 3.2 ⑧)

ΔV_i : 初期状態から圧密前までに生じた供試体体積変化量 (cm³) (↪ 3.3 ③)

ΔH_i : 初期状態から圧密前までに生じた供試体の軸変位量 (cm) (↪ 3.3 ③)

必要に応じて、供試体の間隙比 e_0 を次式で算定する。

$$e_0 = \frac{V_0 \cdot \rho_s}{m_s} - 1$$

UU 試験では、試験前の供試体断面積 A_0 (cm²) と乾燥密度 ρ_{d0} (g/cm³) を次式で算定する。

$$A_0 = V_0 / H_0 \quad (14.3)$$

$$\rho_{d0} = m_s / V_0 \quad (14.4)$$

ここに、 m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g) (↪ 4.2 ⑥)

5.2 圧密過程 ① 圧密後の供試体体積 V_c (cm³) を式 (14.5) で算定する。

(CU, CD 試験)

$$V_c = V_0 - \Delta V_c \quad (14.5)$$

ここに、 ΔV_c : 圧密による体積変化量 (cm³)

(↪ 4.1 (2) ⑤ および 4.1 (3) ④)

② 圧密後の供試体高さ H_c (cm) を式 (14.6) で算定する。

$$H_c = H_0 - \Delta H_c \quad (14.6)$$

ここに、 ΔH_c : 圧密による軸変位量 (cm)

(↪ 4.1 (2) ⑤ および 4.1 (3) ④)

③ 圧密後の供試体の断面積 A_c (cm²) を式 (14.7) で算定する。

$$A_c = V_c / H_c \quad (14.7)$$

④ 圧密後の供試体の乾燥密度 ρ_{dc} (g/cm³) を式 (14.8) で算定する。

$$\rho_{dc} = m_s / V_c \quad (14.8)$$

ここに、 m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g) (↪ 4.2 ⑥)

必要に応じて、圧密後の供試体の間隙比 e_c を次式で算定する。

$$e_c = \frac{V_c \cdot \rho_s}{m_s} - 1$$

ピストンとキャップが剛結されていない場合、あるいは圧密による ΔH_c の測定が不確実と判断される場合は、供試体に等方的なひずみが生じたものと仮定して、 H_c (cm) を次式で算定する。

$$H_c = \left(1 - \frac{\Delta V_c}{3V_0}\right) \times H_0$$

5.3 間隙圧係数 B の計算 (CU 試験)

圧密後の供試体の B 値を式 (14.9) で算定する。

$$B = \Delta u / \Delta \sigma \quad (14.9)$$

ここに、 $\Delta \sigma$: 等方応力の増加量 (kN/m²) (↪ 4.1 (2) ⑥)

Δu : $\Delta \sigma$ に伴う間隙水圧の増加量 (kN/m²) (↪ 4.1 (2) ⑥)

飽和土としての B 値の目安は、 $B \geq 0.95$ である。軟らかい粘土の場合は $B = 0.95$ でもよいとされている。

5.4 軸圧縮過程の計算 ① 各試験における供試体の軸ひずみ ϵ_a (%) を式 (14.10) あるいは式 (14.11) で算定する。

$$\epsilon_a = \Delta H / H_c \times 100 \quad (\text{CU, CD 試験}) \quad (14.10)$$

$$\epsilon_a = \Delta H / H_0 \times 100 \quad (\text{UU 試験}) \quad (14.11)$$

ここに、 ΔH : 供試体の軸変位量 (cm) (↪ 4.2 ④)

- ② CD 試験では、軸ひずみ ε_a (%) の時の **体積ひずみ ε_v (%)** (圧縮を正とする) を式(14.12)で算定する。

$$\varepsilon_v = \Delta V / V_c \times 100 \quad (\text{CD 試験}) \quad (14.12)$$

ここに、 ΔV : 供試体の体積変化量 (cm³) (4.2④)

- ③ 軸ひずみ ε_a (%) の時の **主応力差 ($\sigma_a - \sigma_r$) (kN/m²)** を試験条件に応じて次式で算定する。

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A_0} \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100} \right) \times 10 \quad (\text{UU 試験}) \quad (14.13)$$

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A_c} \left(1 - \frac{\varepsilon_a}{100} \right) \times 10 \quad (\overline{\text{CU}} \text{ 試験}) \quad (14.14)$$

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A_c} \left(\frac{1 - \frac{\varepsilon_a}{100}}{1 - \frac{\varepsilon_v}{100}} \right) \times 10 \quad (\text{CD 試験}) \quad (14.15)$$

単位換算のために、10 を乗じていることを確認せよ。

ここに、 P : 軸ひずみ ε_a (%) の時に供試体に加えられた軸圧縮力 (N)。ただし、等方圧縮中は $P = 0$ (4.2④)

σ_a : 供試体に作用する軸方向応力 (kN/m²)

σ_r : 供試体に作用する側方向応力 (kN/m²)

- ④ 間隙水圧増分の計算 ($\overline{\text{CU}}$ 試験)

軸ひずみ ε_a (%) のときの **軸圧縮にともなう間隙水圧増分 u_e (kN/m²)** を式(14.16)で算定する。

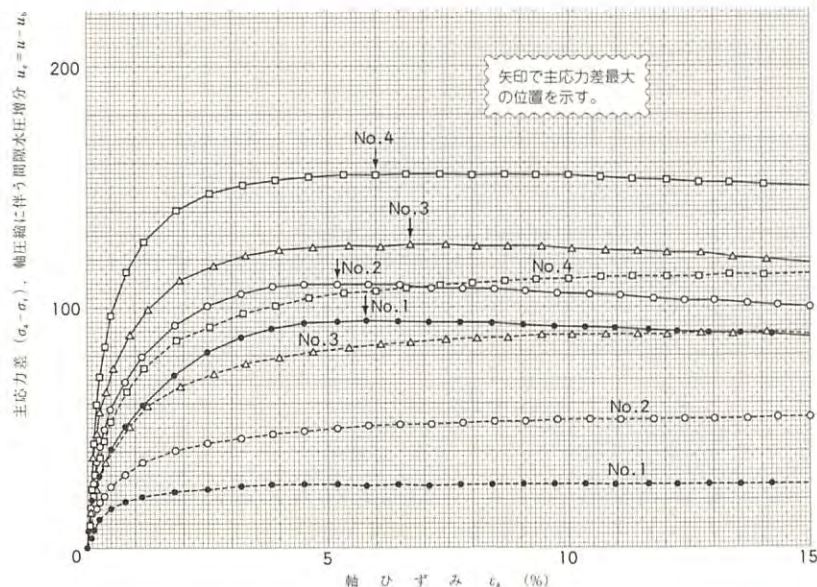
$$u_e = u - u_b \quad (14.16)$$

ここに、 u : 供試体に作用する間隙水圧 (kN/m²) (4.2④)

u_b : 背圧 (kN/m²) (3.3②)

せん断初期において S 字型の主応力差-軸ひずみ曲線が現れる場合がある。これは、キャップとピストンが剛結されていない場合に生じることが多く、ピストンとキャップが接触するときに生じるガタが原因と考えられる。このような場合には軸変位量に関する初期補正を行うことが望ましい。

- ⑤ 主応力差を縦軸に、軸ひずみを横軸にとって、**主応力差-軸ひずみ曲線**を描く。 $\overline{\text{CU}}$ 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。



$\overline{\text{CU}}$ 試験では、体積 V は一定であるため、

$$V = A_c H_c = A H \rightarrow A = \frac{H_c}{H} A_c$$

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_c} \frac{H}{H_c}$$

$$\frac{\varepsilon_a}{100} = \frac{H_c - H}{H_c} = 1 - \frac{H}{H_c}$$

以上より、式(14.14)が誘導される (式(14.13)も同様)。

CD 試験では体積が変化する。

$$V_c = A_c H_c \rightarrow A_c = V_c / H_c$$

$$V = A H \rightarrow A = V / H$$

$$\sigma_a - \sigma_r = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_c} \frac{A_c}{A}$$

$$= \frac{P}{A_c} \frac{H / H_c}{V / V_c}$$

$$\frac{\varepsilon_a}{100} = \frac{H_c - H}{H_c} = 1 - \frac{H}{H_c}$$

$$\frac{\varepsilon_v}{100} = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c}$$

以上より、式(14.15)が誘導される。

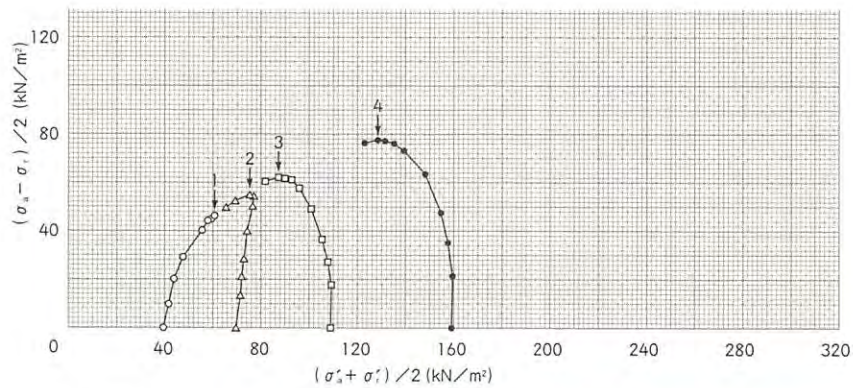
主応力差-軸ひずみ曲線および最大主応力差は、ピストンとキャップが剛結している場合と、していない場合で必ずしも一致しない。前者の場合は、供試体端面がせん断中に常に水平に保たれるため、後者の場合に比べ最大主応力差およびピーク前の立ち上がり勾配が大きくなり、ピーク後も急激に低下しにくい傾向を示し、供試体変形の一様性が保たれている。しかし、後者の場合は、ピーク付近でキャップが傾き始めると、圧縮の進行とともにこの傾向が加速され、キャップからの軸方向応力が一様に供試体にかかりにくくなる。

p.149, 図-14.19 参照。

- ⑥ $0 < \varepsilon_a \leq 15\%$ の範囲の主応力差の最大値 $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ を図上から求め、**圧縮強さ**とする。
- ⑦ $\overline{\text{CU}}$ 試験の場合は、圧縮過程の有効主応力 σ'_a (kN/m²) および σ'_r (kN/m²) を式(14.17)および式(14.18)で算定し、 $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ を縦軸に、 $(\sigma'_a + \sigma'_r)/2$ を横軸にとって、**有効応力経路図**を描く。

$$\sigma'_r = \sigma_r - u \tag{14.17}$$

$$\sigma'_a = (\sigma_a - \sigma_r) + \sigma'_r \tag{14.18}$$



p.149, 図-14.20 参照。

- ⑧ $\overline{\text{CU}}$ 試験の場合は、主応力差最大時の有効軸方向応力 σ'_{af} (kN/m²) および有効側方向応力 σ'_{rf} (kN/m²) を次式で算定する。

$$\sigma'_{rf} = \sigma_{rf} - u_f \tag{14.19}$$

$$\sigma'_{af} = (\sigma_a - \sigma_r)_{\max} + \sigma'_{rf} \tag{14.20}$$

ここに、 u_f : 主応力差最大時の間隙水圧 (kN/m²)

5.5 強度定数の求め方

c' 、 ϕ' は $\overline{\text{CU}}$ 試験において全応力から過剰間隙水圧を差し引いて求められる有効応力表示の強度定数、 c_d 、 ϕ_d は CD 試験において過剰間隙水圧が発生しない条件での有効応力 (= 全応力) 表示の強度定数である。一般に $\phi' = \phi_d$ となるため、有効応力で強度定数を表現した場合、排水と非排水の差はない。次に全応力で表示された強度定数は、排水条件によって異なる。UU 試験のように圧密させずに非排水試験で得られた強度定数を c_u 、 ϕ_u 、CU 試験による強度定数を c_{cu} 、 ϕ_{cu} 、CD 試験による強度定数を c_d 、 ϕ_d として区別する。

$\overline{\text{CU}}$ 三軸圧縮試験では、通常主応力差の最大値 $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ を破壊とみて強度を整理するが、有効応力比の最大値 $(\sigma'_a/\sigma'_r)_{\max}$ を破壊とみる場合もある。両者による強度定数は異なる (第 13 章 5.4(1) (p.129) 参照)。

(1) 破壊時のモール円から求める方法

同じ試料から作られた供試体の試験結果において、図-14.7 に示すように、破壊時の応力 $(\sigma_{af}$ および σ_{rf} 、あるいは σ'_{af} および $\sigma'_{rf})$ 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 を読みとる。

(1)~(3)の方法は、 c_d 、 ϕ_d および c' 、 ϕ' を求めるために適用される方法である。

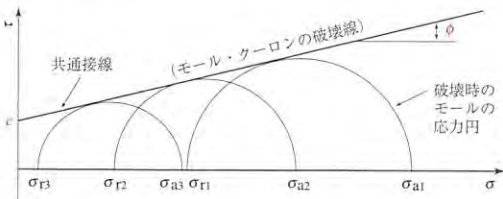


図-14.7 破壊時のモール円から求める方法

CU 試験における全応力のモール円に接線を引いてもその物理的意味はない。

(2) 圧縮強さと圧密応力から求める方法

図-14.8 に示すように、縦軸に圧縮強さ、横軸に圧密応力を取り、実験結果をプロットする。実験結果を最小二乗法により直線近似する。その直線の勾配が m_0 、傾きが f_0 であるとき、強度定数は式(14.21)および式(14.22)により与えられる。

$$\text{せん断抵抗角 } \phi = \sin^{-1} \{m_0 / (2 + m_0)\} \quad (14.21)$$

$$\text{粘着力 } c = \frac{f_0}{2\sqrt{1 + m_0}} \quad (14.22)$$

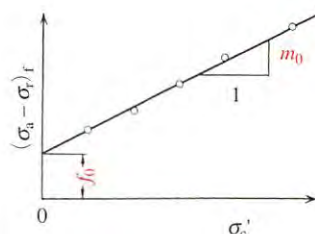


図-14.8 圧縮強さと圧密応力から求める方法

(3) 圧縮強さの1/2と平均有効応力から求める方法

図-14.9 に示すように、縦軸に圧縮強さの1/2、横軸に主応力差最大時の軸方向応力と側方向応力の平均から背圧を引いた値 $((\sigma_a + \sigma_r)/2 - u_b)$ をプロットする。実験結果を最小二乗法で近似する。得られた直線の勾配を m_1 、縦軸切片を f_1 とすると、強度定数は式(14.23)および式(14.24)により与えられる。

$$\text{せん断抵抗角 } \phi = \sin^{-1} m_1 \quad (14.23)$$

$$\text{粘着力 } c = \frac{f_1}{\sqrt{1 - m_1^2}} \quad (14.24)$$

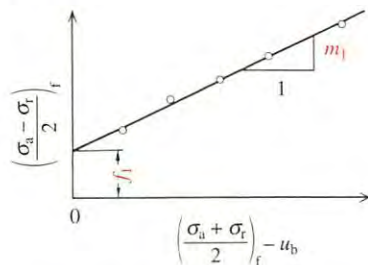
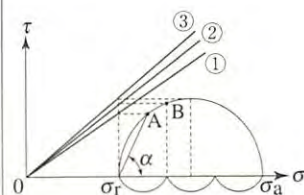


図-14.9 圧縮強さの1/2と主応力差最大時の平均有効応力から求める方法

(2), (3)に示した方法とともに、包絡線にすべてのモール円が接することを前提としている。よって、プロット点にはばらつきが大きい場合には、個々のデータについてばらつきの原因を検討し、原因が明らかな場合には、そのデータを除いて計算を行うなどの配慮が必要である。

CU 三軸圧縮試験から、全応力表示の強度定数 c_{cu} 、 ϕ_{cu} を求める方法として下図に示す3つの方法が考えられる。

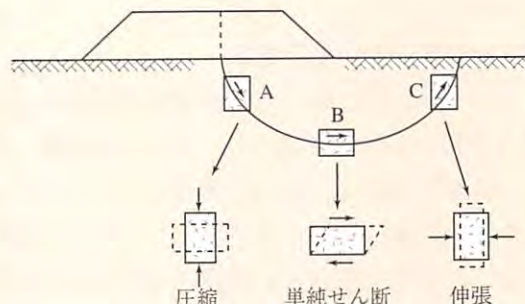
- ①モール円上のすべり面を表す点 A の τ を圧縮応力 σ_r の上にプロットする。
 - ②モール円の直径の3等分点の τ を σ_r の上にプロットする。
 - ③モール円の頂点の τ を σ_r の上にプロットする。
- これらはいずれも複数のプロットを連ねて破壊線を引く。本来①が正しいが、すべり面の角度 α が必ずしも求められないので実際のでない。③は強度を過大評価するので避けるべきである。②は平均主応力面(角度約 55°)上の応力を表わしており、実用的な方法である。



<すべり面と三軸試験の関係>

本章では、軸荷重を増加させて供試体を破壊する三軸圧縮試験について説明したが、軸荷重を減少させて、または側圧(セル圧)を増加させて供試体を破壊することも可能である。このような試験では供試体が軸方向に伸びるので、**三軸伸張試験**という。

右図のように地盤に盛土を載荷した場合の応力・変形状態は、A点では圧縮試験が、B点では単純せん断試験(≒一面せん断試験)が、C点では伸張試験が対応すると考えられている。一般に、すべり面に沿う土の強度は異なり、**強度異方性**を示す(第15章 p.157 参照)。



6. 結果の活用と応用

6.1 土の破壊規準とモールの応力円の関係

土のせん断強さ τ_f は p.120  に示したように、垂直応力 σ に比例し、その関係はクーロンの式 $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$ で表すことができる。この c (粘着力) と ϕ (せん断抵抗角) は強度定数として、斜面安定、土圧、支持力などの計算に用いられる。

しかし、三軸圧縮試験では、試験から直接得られるものは、側圧に応じた圧縮強さ $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ であり、これから破壊面上のせん断強さ τ_f (図-14.10 参照) を求めるためには、モールの円を用いる必要がある。このため、一連の試験から得られた破壊時の有効応力をモールの応力円群で表し、各供試体のすべり面が最大主応力面 (水平面) となす角 α を測って、それぞれのモールの円上にすべり面の位置を求め、これを連ねればクーロンの破壊線が得られる。しかし、 α を正確に測定することは困難である。そこで、モールの破壊理論に従えば、破壊時の応力のモールの円から $\tau_f = f(\sigma)$ という関係を利用して、破壊応力はすべり面が見えなくても応力円群の包絡線で表すことができる。これがモールの破壊規準 (図-14.11 参照) である。よって、三軸試験において観察されるすべり面の方向は、モールの円と包絡線との接点から予測される保証はない。

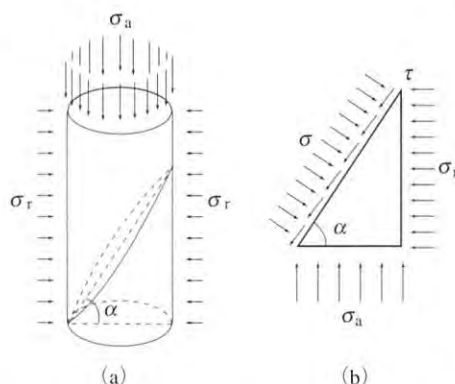


図-14.10 三軸供試体の応力条件

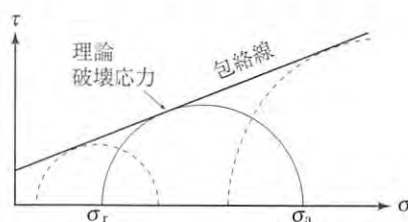


図-14.11 モール・クーロンの破壊規準

※6.1 の解説は有効応力を基準に考えたものである。

※c, ϕ の値は有効応力あるいは全応力のどちらを基準にするか、試験時の排水条件、またせん断時のひずみ速度をどのように設定するかにより異なる値を持つ。

※「圧縮強さ」と「せん断強さ」は異なるものである。

※供試体がセル内部でセル圧を受けている状態で、 α を測定することが必要であるが、現在の三軸圧力室の構造では難しい。

6.2 UU 試験結果の工学的利用と解釈

(1) 飽和度の高い粘性土の場合

UU三軸圧縮試験より得られる包絡線は、図-14.12(a)に示すように、ほぼ水平 ($\phi_u = 0$) となる。したがって、結果の工学的適用は第15章一軸圧縮試験の場合と同様、過圧密の程度があまり大きくない地盤の支持力、斜面安定、土圧などの算定に用いる非排水強度の推定、杭の周面摩擦力の算定に用いる付着力の推定などに利用される。

(2) 飽和度の低い土の場合

UU三軸圧縮試験による破壊包絡線は、図-14.12(b), (c)に示すように、上に凸の曲線、あるいは勾配を持つ ($\phi_u > 0$) 直線となる。このような試験結果に対しては、想定したすべり面に対応した有効土被り圧を考慮して想定した強度定数 (c_u , ϕ_u) を用いて設計を行うこともある¹⁾。

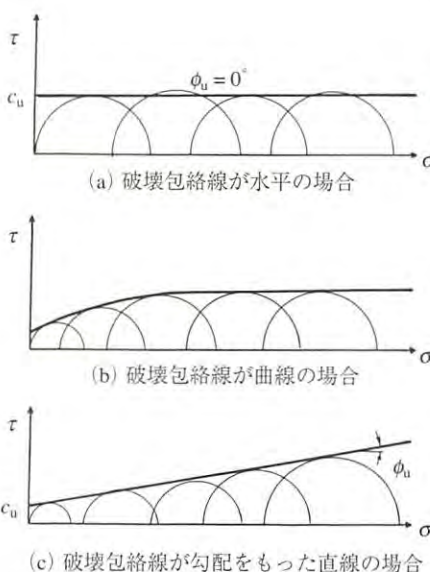


図-14.12 UU試験における破壊時のモールの応力円と破壊包絡線

※この結果に基づく設計法を「 $\phi_u = 0$ 法」と呼ぶ (第15章 6.1 (p.155) 参照)。

※飽和度が低い状態では、空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する。このため、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。

1) 矢部正宏: c と ϕ を考える、3. 粘性土、 N 値および c と ϕ の考え方、土質工学会, pp.65 ~ 70, 1987.

(3) 中間土の場合

塑性指数 I_p が 35 前後より小さい土または粘土分が 35% より少ない土では、一軸圧縮強さは応力解放の影響を受けて過小評価される傾向にある。このような場合に、UU三軸圧縮試験の利用が考えられる。

(4) 亀裂性の粘性土の場合

一軸圧縮強さは UU三軸圧縮強さに比べてかなり小さい値を与える場合があるため、UU三軸圧縮強さを設計に用いるのが合理的である。

6.3 CU 試験結果の工学的利用と解釈

(1) セン断速度

飽和粘性土の非排水せん断強さ s_u はせん断速度により変化するが、現場の問題に適用するには 0.01% 程度のせん断速度が適当と考えられている。CU試験では間隙水圧を測定するためにゆっくりしたせん断速度が用いられており、この点に関しては正確な強度が得られているといえる。

(2) 有効応力に基づくせん断抵抗角と塑性指数

有効応力に基づく ϕ' と塑性指数 I_p の関係²⁾については、図-14.13(a)がよく知られている。日本の海成粘土について両者の関係をまとめると図-14.13(b)のようになり³⁾、高塑性領域でも ϕ' は低下せず、 I_p との関係は有意ではない。

(3) 強度増加率

正規圧密領域における圧密応力 p に対する非排水せん断強さ s_u の比、すなわち強度増加率 s_u/p は圧密応力によらずほぼ一定であることが確かめられている。世界各国の約 100 種類の粘性土について、正規圧密状態の s_u/p 値を調べたデータ⁴⁾によれば、0.2～0.45 の範囲の値をとるものが多い。

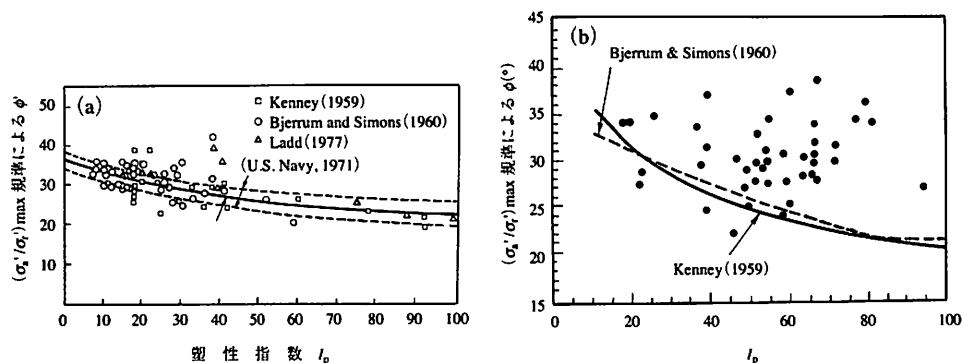


図-14.13 塑性指数とせん断抵抗角の関係^{2), 3)}

6.4 CD 試験結果の工学的利用と解釈

この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。粘性土地盤についても、掘削を行った場合のような長期安定問題が当てはまる。この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、前述したような条件を満足する状況にあることが必要である。試験条件が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しなければならない。図-14.14 にせん断抵抗角、間隙比と土質の関係の例を示す。

※ 中間土：第6章 5.2(1) (p.56) 参照。

※ s_u はせん断速度だけでなく以下の要因に影響を受けると考えられている。

- ・ 試料の物理的性質（塑性指数や砂分含有率）
- ・ 機械的な乱れの程度など

2) Holtz, R.D. and Kovacs, W.D.: An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall Inc. p.544, 1981.

3) 田中洋行, Lacat, J.: 塑性指数に関する再考察, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.9～12, 1998.

4) Mayne, P.W.: Cam clay predictions of undrained strength, ASCE, Vol.106, GT11, pp.1219～1242, 1980.

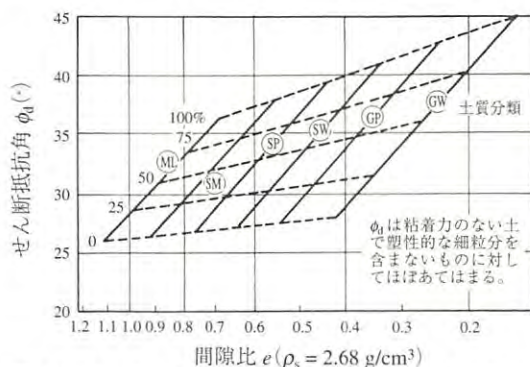


図-14.14 せん断抵抗角、間隙比と土質の関係の例⁵⁾

5) Holtz, R.D. and Kovacs, W.D.:
An introduction to geotechnical
engineering, Prentice-Hall Inc.
pp.517~518, 1981.

7. 設問

- 1) 三軸圧縮試験における排水条件と試験結果の利用について説明せよ。
- 2) 三軸 $\overline{CU}$, CD 試験において背圧を用いる目的を説明せよ。
- 3) 式(14.14)および式(14.15)を誘導せよ。
- 4) せん断時に正、負の間隙水圧が発生する場合、全応力と有効応力によるモール円の位置関係を説明せよ。
- 5) 主応力比が最大の場合を破壊とする場合に c , ϕ を求める手順を説明せよ。
- 6) 土のせん断強さと三軸試験で求められる圧縮強さを破壊時の主応力に基づくモール円上で図示せよ。
- 7) 三軸圧縮試験に、クーロンの破壊規準 (p.120 参照) が適用されない理由を説明せよ。
- 8) モール・クーロンの破壊規準と土のせん断抵抗角および粘着力との関係を説明せよ。

8. データシートの記入例

[illegible]

C66(杜) 地盤工学会 6731

図-14.15 土の三軸試験の供試体作製・設置の記入例

[illegible]

(社)地盤工学会 6233

図-14.16 $\overline{CU}$ 試験(初期状態, 圧密過程)の記入例

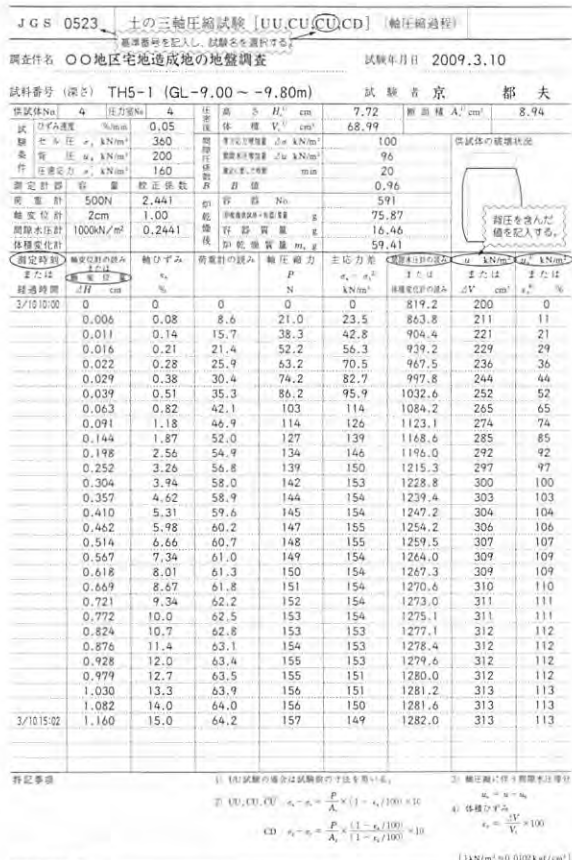


図-14.17 CU 試験(軸圧縮過程)の記入例

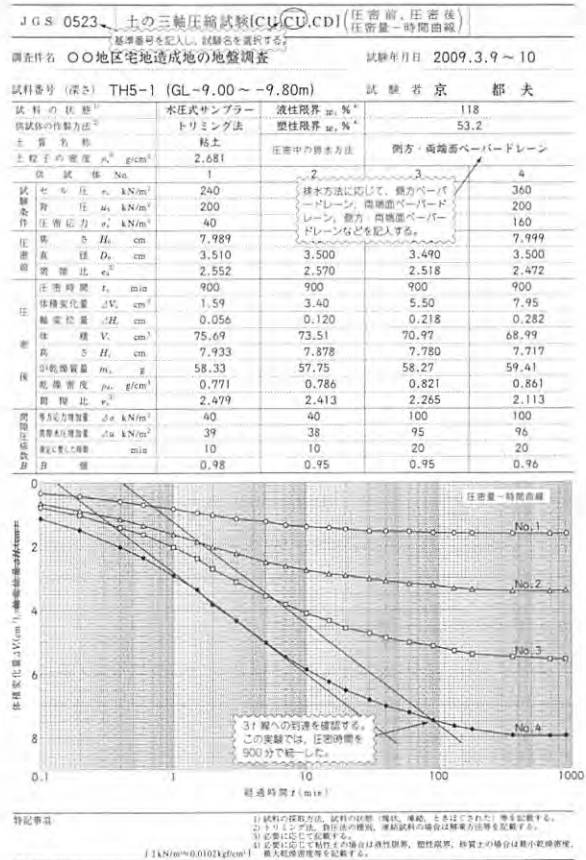


図-14.18 CU 試験(圧密量-時間曲線)の記入例

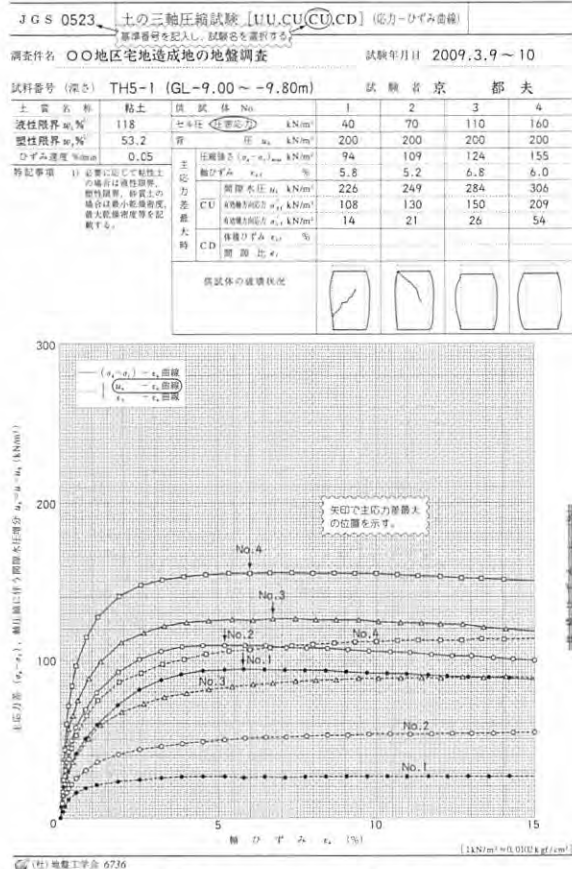
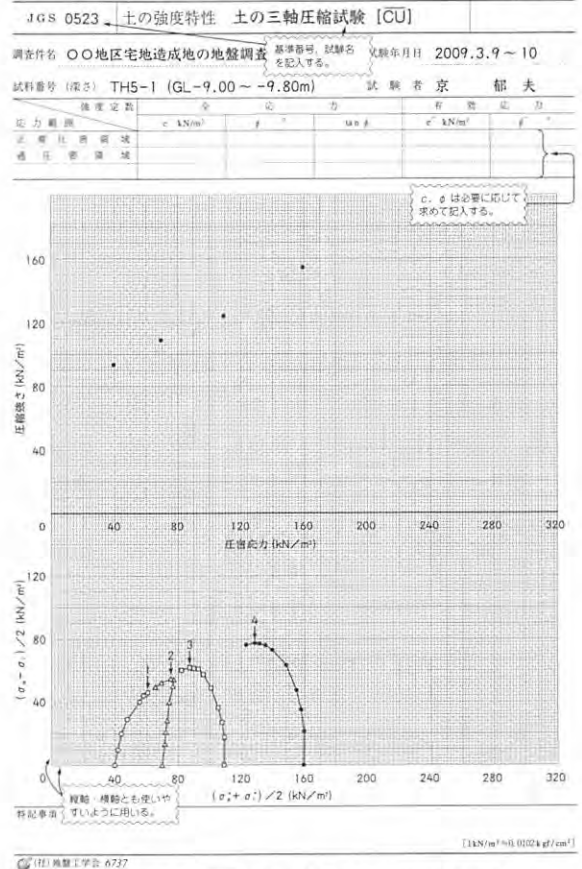


図-14.19 CU 試験(応力-ひずみ曲線)の記入例





<土の繰返し非排水三軸試験>

1) 砂の液状化

液状化とは、図-14.21のようにゆるく堆積した飽和砂地盤に地震動、波浪などの短時間の繰返し荷重が作用することによって、砂粒子間の接触が切れて有効応力が消失する結果、地盤は強さを失い、土被り圧に等しい間隙水圧が発生して液体状となることをいう。地震の多い我が国では地震時における地盤や土構造物の挙動や安定性を調べるのが重要である。このような繰返し荷重に対する飽和土の非排水条件下での強度特性を調べるために繰返し非排水三軸試験が行われる。1995年の阪神・淡路大震災で見られたように液状化による地盤災害は非常に大きな被害を引き起こすため、特に砂質土に対する繰返し非排水三軸試験が重視される。

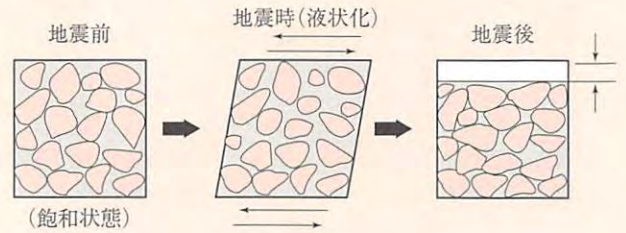


図-14.21 液状化発生のメカニズム

2) 繰返し非排水三軸試験装置

図-14.22に示すように繰返し非排水三軸試験装置は通常の三軸試験装置と基本的には同一の装置であるが、油圧や空気圧により軸方向に繰返し荷重が載荷できるような構造になっている。実際の地震波の繰返し応力の振幅と周期は不規則であり、室内試験で再現することは困難であるため、等方応力で圧密した供試体にセル圧一定の非排水条件で、図-14.23に示すような一定振幅の正弦波形の圧縮と伸張の軸荷重を繰返し載荷し（両者の平均を供試体断面積で除したものが繰返し軸差応力 σ_d ）、軸ひずみ ϵ_a 、過剰間隙水圧 Δu を測定して液状化強度特性を求める。

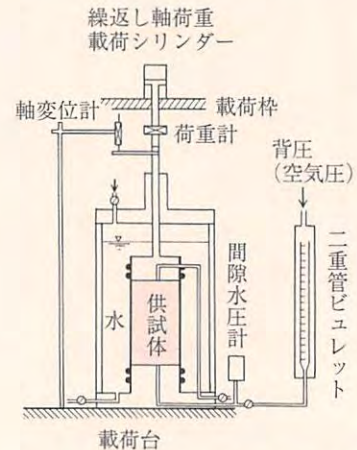


図-14.22 繰返し三軸試験装置

3) 液状化強度曲線

試験結果は、通常、繰返し軸差応力の片振幅 σ_d の1/2を有効拘束圧 σ'_0 で除した繰返し応力振幅比 $\sigma_d/(2\sigma'_0)$ を縦軸に、両振幅軸ひずみ $DA=1, 2, 5\%$ および過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0=95\%$ となるときの繰返し載荷回数 N_c の対数を横軸に採って図示する。数種類に $\sigma_d/(2\sigma'_0)$ を変えて試験を行うと図-14.24に示すような関係（一般に液状化強度曲線と呼ぶ）が得られる。通常、土の相対密度が大きくなるほど、同じ N_c に対する $\sigma_d/(2\sigma'_0)$ は大きくなり、液状化に対する抵抗力を把握することができる。

この試験結果から、一般に $DA=5\%$ の $N_c=20$ 回における $\sigma_d/(2\sigma'_0)$ を読みとり、それを液状化強度比 R と定義し、地震時に想定される繰返しせん断強度比 L との比 $F_L (=R/L)$ が地盤の液状化判定に用いられている。なお、土の動的性質、液状化現象および液状化判定法の詳細については以下の文献6)を参照するとよい。

6) 液状化対策の調査設計から施工まで：現場技術者のための土と基礎シリーズ20，地盤工学会，1993。

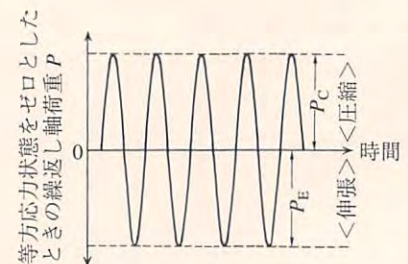


図-14.23 繰返し荷重（正弦波）

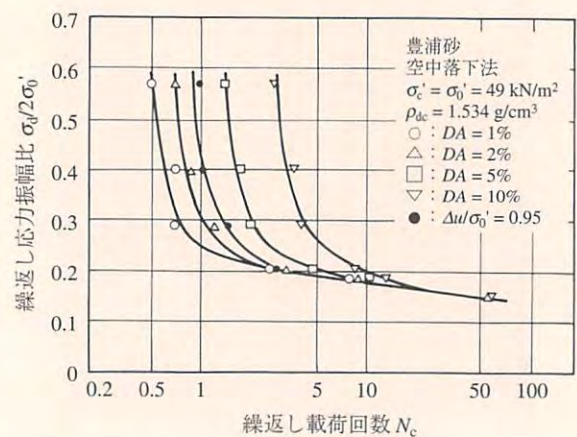


図-14.24 液状化強度曲線の例