土質力学Ⅰ及び演習（B班：小高担当）　配付資料 No.22　(2004.6.30)

【飽和粘土の力学（有効応力径路等）＆　その他】

モール・クーロンの破壊規準を用いて強度定数c,ϕや非排水せん断強度c_uの基礎的な強度定数を求めるだけであれば，今までの議論で十分であるが，もっと詳細に土の性質を知るためには，有効応力を用いてより詳しく試験結果を整理し，土の挙動を観察する必要がある。最近，常識的に行われている有効応力を用いた粘土の試験結果の整理法について簡単に解説する。

(1)用いるパラメータ（軸差応力と平均有効応力）

有効応力の重要なパラメータとして，以下の２つを用いる。

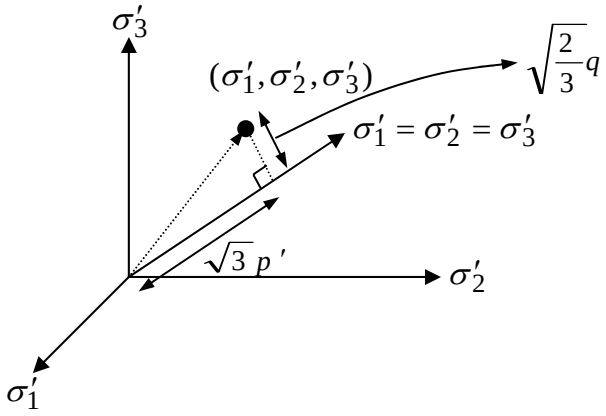
軸差応力　　$q=\sigma_1'-\sigma_3'\ \ (=\sigma_1-\sigma_3)$

平均有効応力　$p'=\dfrac{1}{3}(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')=\dfrac{1}{3}(\sigma_1'+2\sigma_3')$

軸差応力は，偏差応力とも呼び，最大主応力と最小主応力の差である。

平均有効応力は，全有効主応力の平均であるが，三軸試験では$\sigma_2'=\sigma_3'$であるので右辺のようになる。

もう少し，詳しくこれらを説明すると，p'，qはいずれも有効応力の不変量である。不偏量とは，例えば右図で 3 つの軸があるが，この軸をどのように回転させても，p'やqの値は変化しないことをいう。したがって，原地盤からサンプリングしてきた粘土を成形して三軸試験を行うが，どのような角度で実験しても，不偏量で整理している限りは，実験結果に影響はない。



また，p'とqのそれぞれの意味であるが，応力空間上に，$(\sigma_1',\sigma_2',\sigma_3')$という有効応力点があったとしたとき，その応力を表すのに，3 つの主応力軸とは別の尺度を導入する。すなわち，$\sigma_1'=\sigma_2'=\sigma_3'$という静水圧軸を基準として，静水圧軸に$(\sigma_1',\sigma_2',\sigma_3')$から垂線を降ろし，静水圧軸に平行な成分と，静水圧軸からの距離で，$(\sigma_1',\sigma_2',\sigma_3')$を表そうというものである。静水圧軸は 3 つの軸から常に等距離にあるために，$\sigma_1'=\sigma_2'=\sigma_3'$と表されるが，原点を固定して 3 主応力軸を任意に回転しても，静水圧軸の位置は変わらないことは直感的にもわかる。したがって，新たに導入したこの尺度は，座標の取り方に無関係な合理的なものである。平均有効応力p'は，静水圧軸に沿って，どれだけ等方的な静水圧応力があるのかを示している。また，偏差応力qは，静水圧軸からどれだけずれているのかを示している。

静水圧軸は，名前の通り，完全に等方的な応力を示しており，粘土の圧縮による体積変化を司る。また，偏差応力は，静水圧軸からのズレであり，このズレが大きいほど，せん断応力が大きくなることを意味する。

(2)有効応力径路

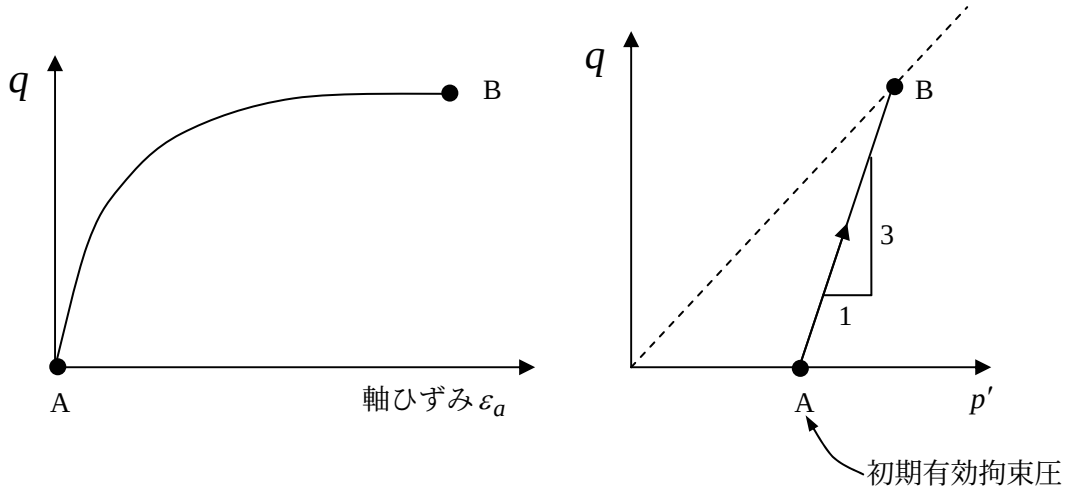
有効応力径路とは，せん断中に平均有効応力p'と偏差応力qがどのように変化するのかを記録した図である。CU 試験の有効応力径路を調べることにより，実験に用いている粘土の特性を知ることが可能である。

①CD 試験の有効応力径路

排水せん断では，過剰間隙水圧は発生しないので，常に有効応力＝全応力となる。

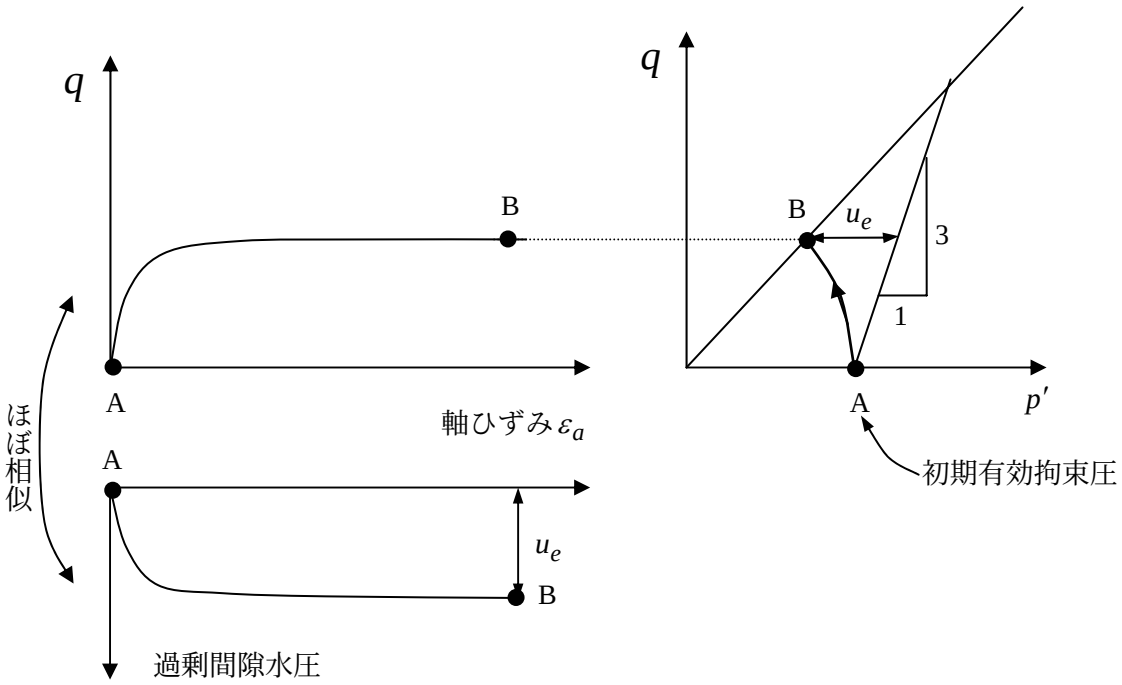
三軸条件では，$\Delta q = \Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3'$ ，$\Delta p' = \frac{1}{3}(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')$ となるので，

$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{3(\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3')}{\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3'}$ となるが，通常 $\Delta\sigma_3' = 0$ であるので，結局，$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = 3$ となる。図示すると，



②CU 試験の有効応力径路

非排水せん断中に，過剰間隙水圧が発生する。そのため，正規圧密粘土の場合，有効応力径路は 1:3 の勾配を持つ全応力径路から，徐々に左側にずれてくる（過圧密粘土の場合は，負の過剰間隙水圧が発生すると全応力径路より右にずれる）。また，正規圧密粘土の場合は，偏差応力～軸ひずみの関係と，過剰間隙水圧～軸ひずみの関係はほぼ相似形になることが知られている。過剰間隙水圧の発生量については次節で述べる。



(3)スケンプトンの間隙圧係数

スケンプトン(Skempton)は，間隙水圧の変動量を次のように表した。

$$\Delta u = B\{\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\}$$

水を非圧縮として，粘土が完全に飽和しているとすれば，上式の B は 1 となる。したがって，

$$\Delta u = \Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$$

通常の三軸圧縮試験では，$\Delta\sigma_3 = 0$ であるので，右辺第 1 項目の $\Delta\sigma_3$ による効果は，特殊な試験条件か，UU 試験のように非圧密条件で $\Delta\sigma_3$ を載荷するような場合に限る。したがって，通常の CU 試験ならば，

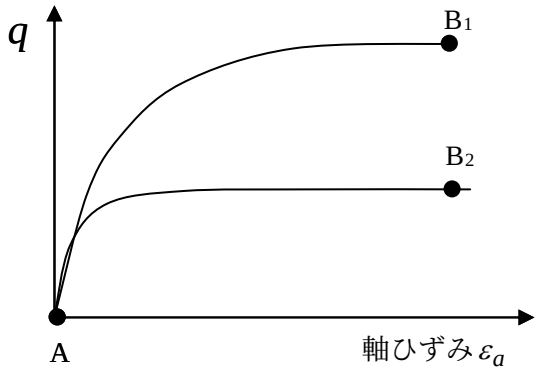
$$\Delta u = A\Delta\sigma_1 = A\Delta q$$

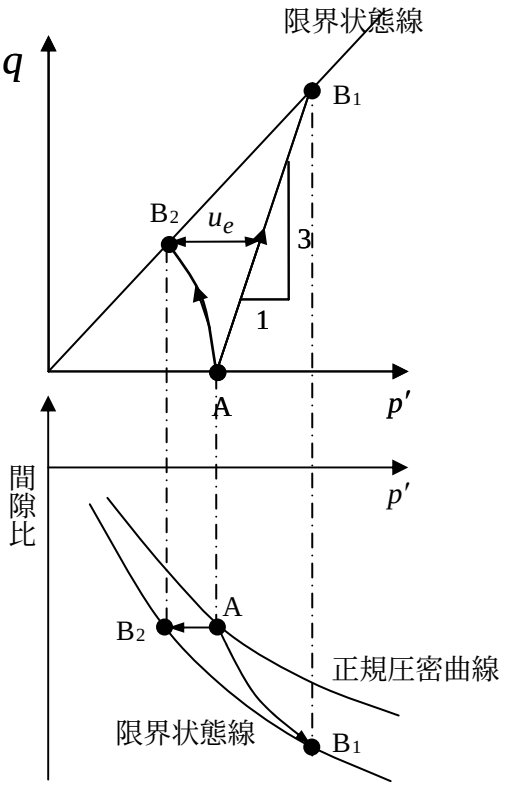
として良い。そうなると，過剰間隙水圧が q と相似形であると考えてイメージしやすい。

実験等で明らかになっている破壊時の間隙圧係数 A の具体的な値は次の通りである。

正規圧密粘土	0.5～1.0
締固めた砂質粘土	0.25～0.75
やや過圧密な粘土（軽過圧密粘土）	0～0.5
非常に過圧密な粘土（重過圧密粘土）	-0.5～0

(4)CU 試験と CD 試験の比較





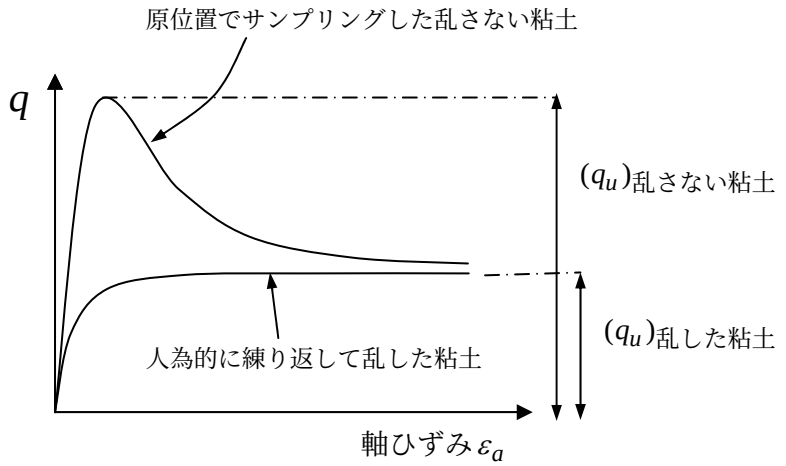
同じ初期有効拘束圧（A 点）から，CU 試験と CD 試験を行ったとする。CU 試験はせん断中は非排水条件なので，間隙比は一定のままであり，B_2 点に到達する。しかし，CD 試験ではせん断中に粘土は排水するために，間隙比はどんどん小さくなり B_1 点に到達する。CD 試験と CU 試験の破壊時の偏差応力を比較すると，せん断途中に排水し，間隙比が小さくなってゆく，CD 試験の方が，ずっと大きくなる。

なお，右図の右上の有効応力径路で見ても，右下の間隙比～有効応力関係で見ても，最終時の B_1 点と B_2 点は同じ線上にある。この線は，粘土の限界状態（破壊状態）を表すもので，**限界状態線**と呼ばれている。

(5)土のせん断強度に関するその他の話題

①自然堆積粘土のせん断強度

自然堆積粘土を一軸圧縮試験すると, 明確なピーク強度を持った応力～ひずみ曲線が得られる。しかし，その粘土を人為的に練り返して，乱してから再び一軸圧縮試験を行うと，ピーク強度を持たず，せん断強度は非常に小さくなる。この強度の比を鋭敏比といい，鋭敏比が大きい粘土を，鋭敏な粘土と呼ぶ。



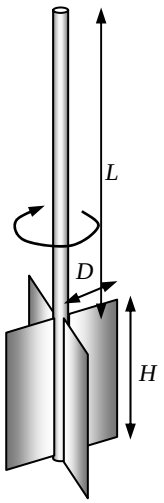
$$鋭敏比=\frac{(q_u)_{乱さない粘土}}{(q_u)_{乱した粘土}}\geq 1$$

②原位置で行うせん断試験

一面せん断試験，一軸圧縮試験，三軸圧縮試験は，原位置でサンプリングしてきた粘土を実験室の中で試験を行うものであったが，現場で行うせん断試験もある。

代表的なものが，コーン貫入試験やベーンせん断試験である。コーン貫入試験とは，円錐状のコーンを地盤に貫入させることにより，その抵抗値から地盤のせん断強度を推定するものである。過去のデータの集積により，経験的に非排水せん断強度c_uとの関係式が提案されている。

ベーンせん断試験は欧米をはじめとする海外で多く用いられているが，日本では一軸圧縮試験の方が一般的である。ベーンせん断試験とは，図のように 4 枚の羽根（ベーンプレート）がついたものを地盤内に押し込み，回転させることによって，回転トルクから地盤のせん断強度（ベーンせん断強度）を計測するものである。ベーンせん断強度と非排水せん断強度c_uとの関係の経験式も提案されている。



ベーンプレート
　高さ(*H*) 150mm or 100mm
　幅(*D*)　　75mm or　50mm
ベーンシャフト
　長さ(*L*)　750mm or 500mm