

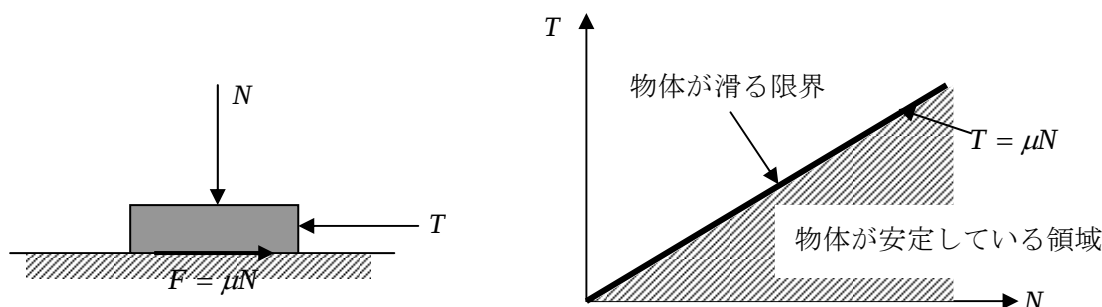
第5回 中部支部 地盤力学・工学講習会（初級編③） 「せん断」 名城大・小高
 【土の破壊基準（垂直応力とせん断応力の重要性）】

応力（ベクトル）は作用している面に対して垂直成分（垂直応力）と平行成分（せん断応力）を知ることが重要である。なぜ、それが重要なのかを土の破壊特性と関連づけて説明する。

(1) 摩擦性材料としての土

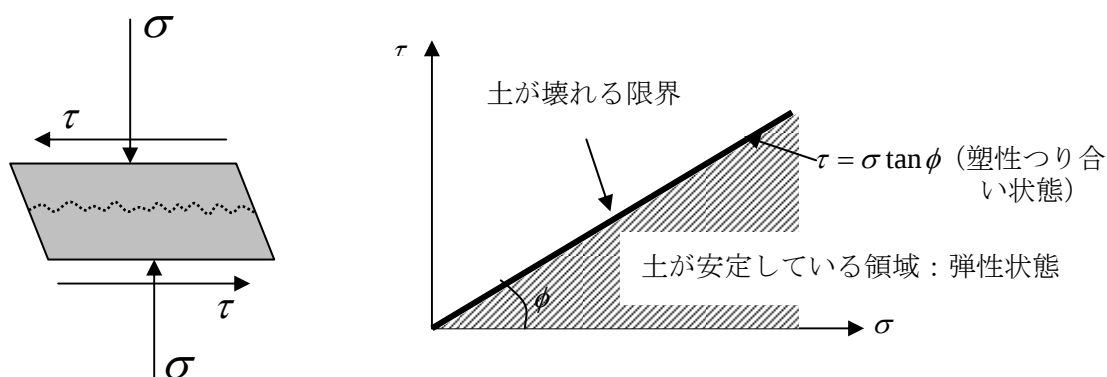
復習：摩擦力

摩擦力 F は、垂直抗力 N に比例して大きくなる。摩擦係数 μ を用いれば $F = \mu N$ と表される。下図のように摩擦のある水平な台の上に、物体が置いてあり、その物体を上から N の力で押しつけているとする。今、横から T という水平力を与えてこの物体を滑らそうとすると、 $T \geq F$ となったときに、物体は台上をすべり始める。すなわち、右のグラフ上で考えると、摩擦力を表す直線の下側では物体は安定しており、上側では物体は滑ることになる。



以上の摩擦力の概念を、土に当てはめてみる。

垂直応力 σ だけを考えれば、 σ をいくら大きくしても土は通常は壊れることはないが、せん断応力 τ が加わることによって、土はせん断変形し始める。土にも「摩擦則」が成立し、垂直応力 σ に比例したせん断抵抗力 r が発揮される。物体の外部から加わる外力の状態により、物体内部に発生するせん断応力 τ が、このせん断抵抗力 r と同じ大きさに達すると、せん断変形は急激に大きくなり、やがて下図のように土は破壊する。破壊が目に見えて観察できる場合の典型例は、図のように不連続面が発生する場合であり、この不連続面のことを「すべり面」と呼ぶ。



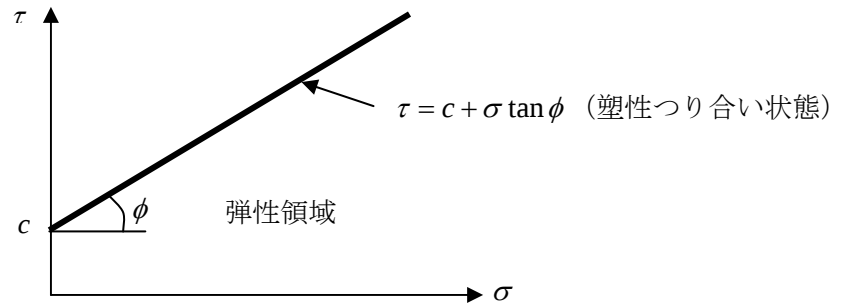
土の摩擦則では、比例定数である摩擦係数は用いず、せん断抵抗角（内部摩擦角） ϕ を用いて表す。

(2) クーロン (Coulomb) の破壊基準

クーロンは土の垂直応力とせん断応力には右図のような関係が成り立つと仮定した。

$\tau < c + \sigma \tan \phi$ の領域：土は弾性領域（可逆的な変形をする領域）にあり、変形は小さい。

$\tau = c + \sigma \tan \phi$ の状態：土は塑性つり合い状態（非可逆的な変形をする状態）になり、大きな変形をしてやがて壊れる。



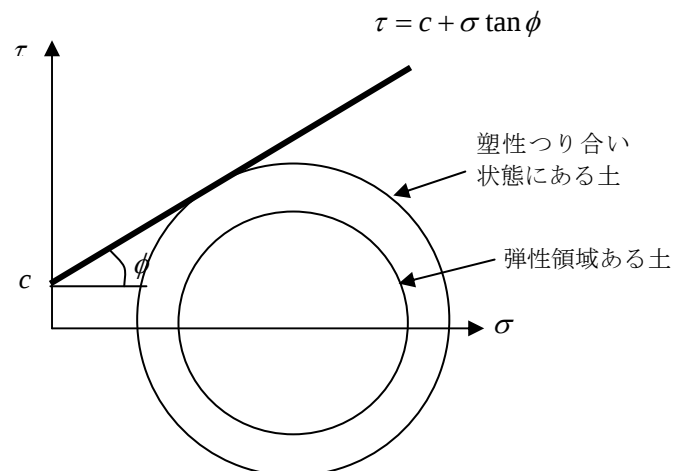
粘着力 c ：粒状体である土は、つぶつぶ同士を拘束する圧力（拘束圧）がなければバラバラになってしまう。そのため、(1)の図で示したように σ がゼロならば τ もゼロとなる。しかし、実際の土は、場合によっては拘束圧がゼロの状態でも幾分かのせん断抵抗応力を持つ。これを粘着力 c 呼ぶ。呼び名は「粘着力」だが、次元（単位）は応力なので注意する。

粘着力の原因：粘性土の場合には、化学的な作用によりセメンテーションが発達して、土粒子同士がくっつき粘着力が発生する。過圧密粘土の場合にも粘着力が発揮される（理由はあとで）。砂の場合、密詰め砂では砂粒子間の結合力が大きいため粘着力が発揮される（これは、過圧密粘土が粘着力を発揮するのと同じ理由）。また、砂や粘土に限らず、不飽和土の場合には、サクションの作用により粘着力が発生する。

せん断抵抗角（内部摩擦角） ϕ ：垂直応力が増えればせん断応力も大きくなるという「摩擦モデル」は、砂の場合では粒径の大きいザラザラの砂粒を想像すれば比較的イメージしやすい。しかし、非常に土粒子が小さい粘土でも、「摩擦モデル」を同じようにイメージできるだろうか？
実は、粘土の場合には、同じように摩擦則が成り立っていても、砂とはかなり異なるメカニズムでせん断応力が増加している。粘土は、垂直応力が加えられると圧密して間隙比が小さくなる。そのため、垂直応力が大きいほど、間隙比は小さくなり、せん断抵抗力（せん断強度）は大きくなっていく。粘土の「せん断強度」は間隙比と1対1の関係にある（非常に重要）。したがって、粘土の場合、クーロンの破壊基準は1本の直線で表されているが、その線上のひとつひとつの点は、実は間隙比の異なる粘土のそれぞれのせん断強度がプロットされていることになる。

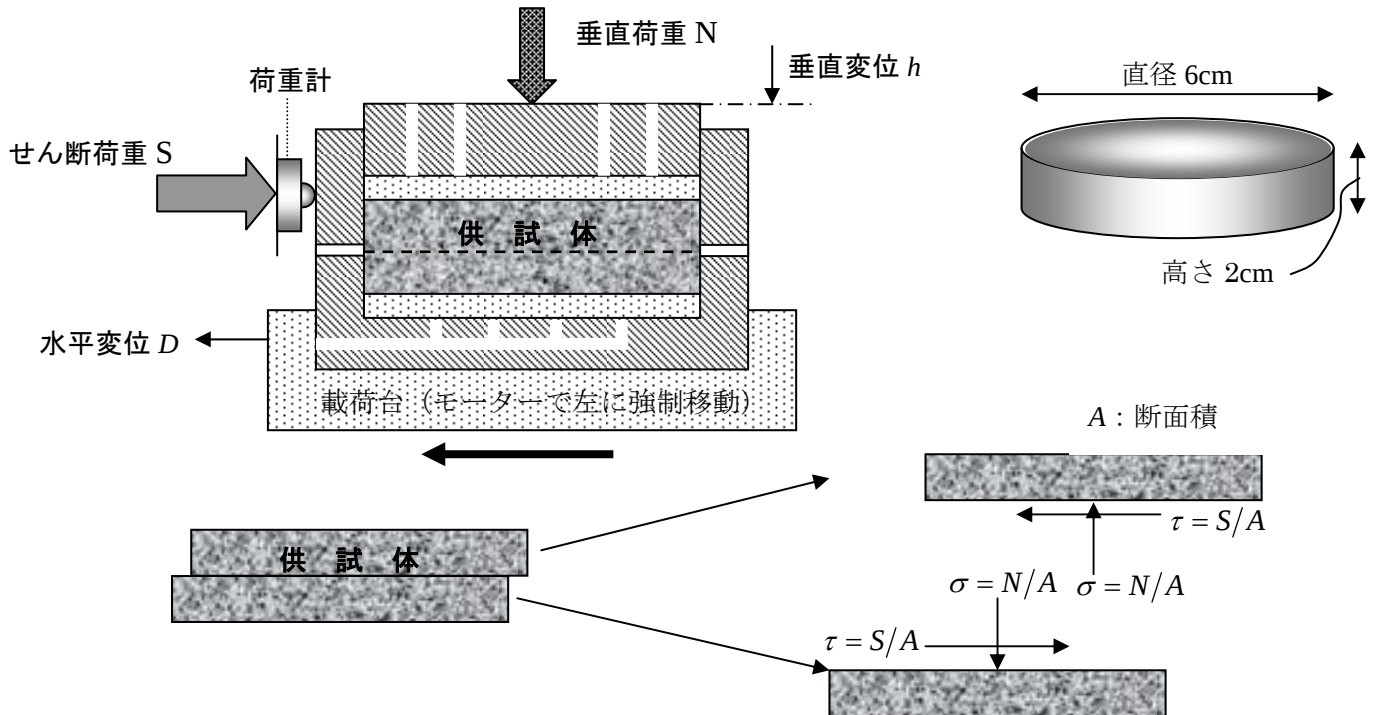
(3) モールの応力円と破壊基準の関係

モールの応力円は物体内のあらゆる作用面にたいする応力状態（垂直応力とせん断応力の組合せ）をプロットしたものであった。したがって、図の外側の円のように、モールの応力円が破壊基準の直線に接していたら、その時点でその接点の応力状態は破壊状態（塑性つり合い状態）にあることにある。別の作用面での応力状態が、破壊基準の直線よりも下回っていても、作用面を回転させて見ると、実は破壊基準に達していると言う場合が生じる。図の内側の円のように、モールの応力円を描いてみて、破壊基準に接しなければ、あらゆる作用面に対してその土は弾性領域にあることを示している。



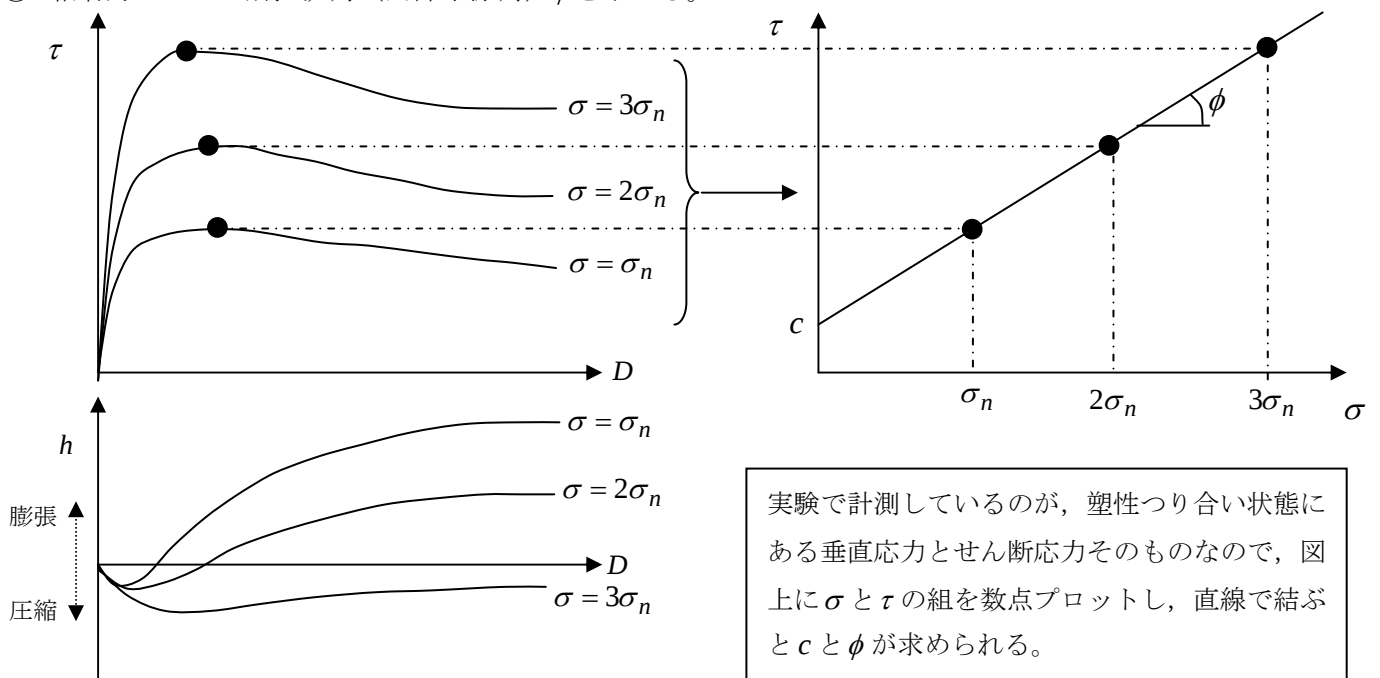
【土のせん断強度を測定する試験(1)：一面せん断試験と一軸圧縮試験】

(1) 一面せん断試験

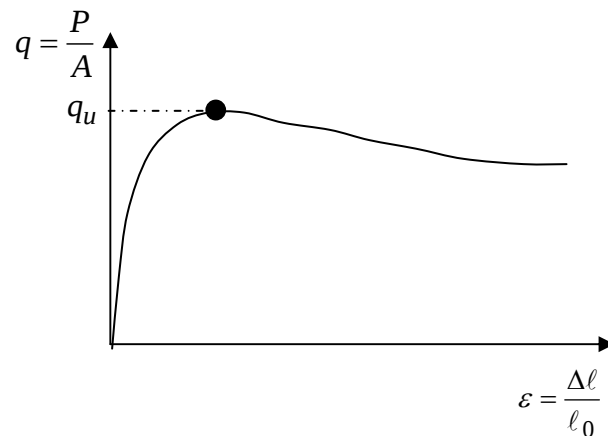
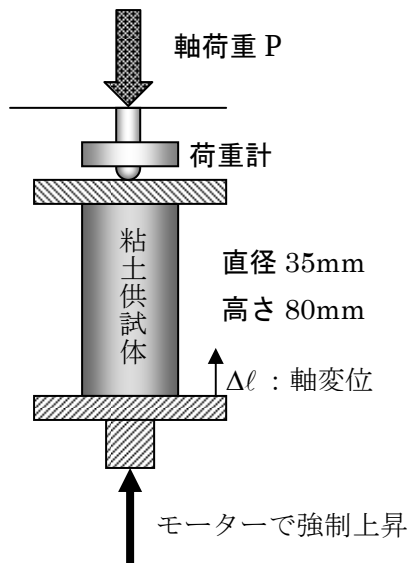


試験方法：

- ① 垂直荷重 N を載荷する。粘土の場合は十分圧密が終了してから②に進む。砂の場合は、瞬時に圧密は終わるので、すぐに②に進む。
- ② 垂直荷重 N を載荷したまま、せん断箱の下側を一定の速度でずらしてゆく（水平変位 1cm 程度まで）。
- ③ 水平変位～せん断応力の関係、水平変位～垂直変位の関係、の2つを記録してグラフを描く。
- ④ 何種類か垂直荷重を変えて、①～③の実験を行う。
- ⑤ それぞれの実験の垂直荷重 N から求められる σ と③で記録されるせん断荷重の最大値 $S_{\max}$ から求められる $\tau_{\max}$ の2つの応力を $\sigma \sim \tau$ 図にプロットする。
- ⑥ 粘着力 c とせん断抵抗角（内部摩擦角） ϕ を求める。



(2) 一軸圧縮試験

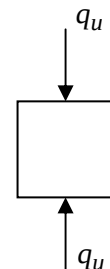


試験方法：

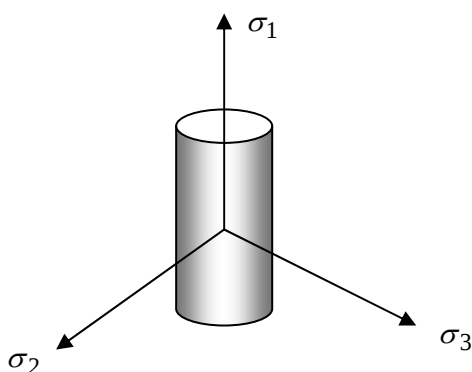
- ① 載荷台を一定の速度で上昇させてゆく（垂直変位 1.5cm 程度まで）。
- ② 軸変位から軸ひずみを計算し、軸荷重から軸応力を計算し、軸応力と軸ひずみの関係（応力～ひずみ関係）をグラフに描く。
- ③ 軸応力の最大値を一軸圧縮強度 q_u とする。

特徴：

- ① 要素試験である。要素：供試体の中の応力やひずみは一樣
- ② 鉛直方向の主応力のみを載荷している。
- ③ 一軸圧縮強度 q_u のみ計測でき、 c や ϕ はわからない。
- ④ 非排水条件のせん断しかできない。



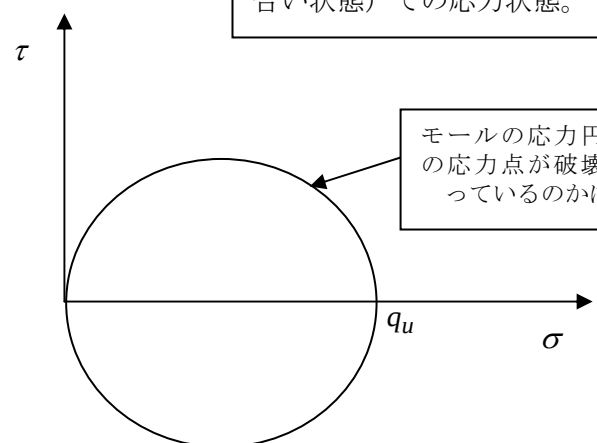
一軸圧縮試験でのピーク荷重時（破壊状態・塑性つり合い状態）での応力状態。



三軸：直 する つの**主応力軸**のこと。

軸あれば 次元の応力状態はすべて表すことができる。

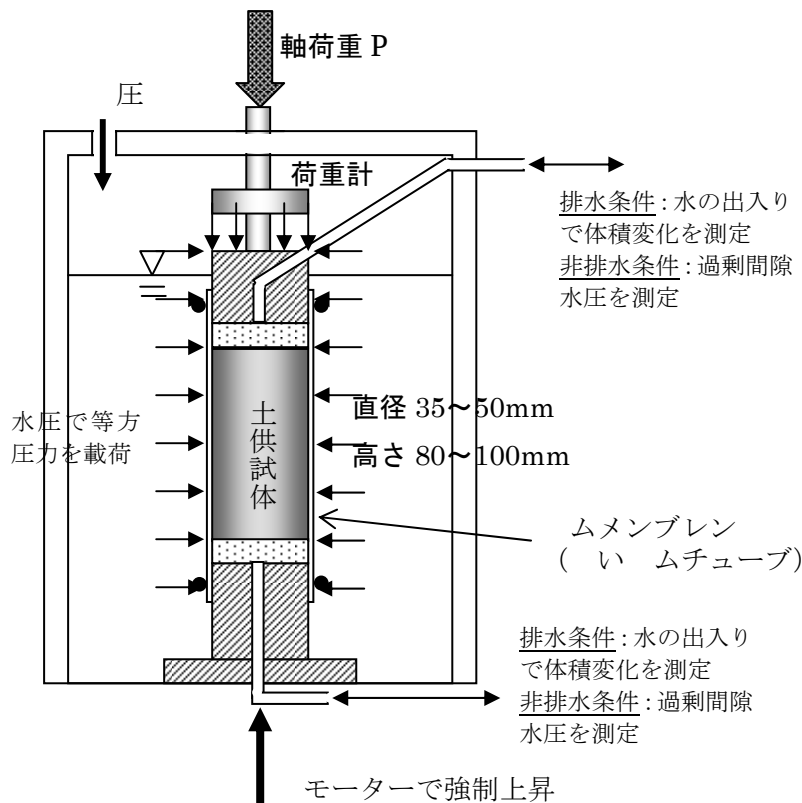
一軸圧縮試験は側方応力をゼロとして、鉛直応力だけ載荷する試験。



モールの応力円上のどの応力点が破壊状態になっているのかは不明

一軸圧縮試験で得られるモールの応力円

【土のせん断強度を測定する試験(2)：三軸圧縮試験】



三軸圧縮試験の種類（3種類）

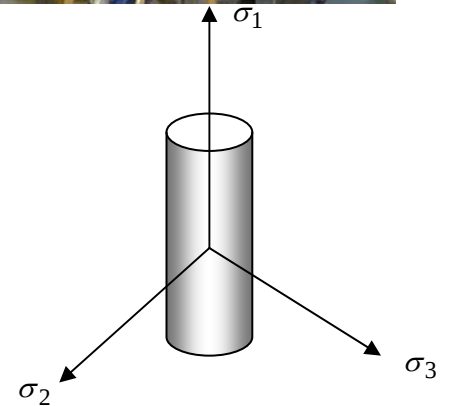
	等方圧力による 圧密過程	軸圧縮による せん断過程
UU 試験	非圧密	非排水せん断
CU 試験	圧密	非排水せん断試験
CD 試験	圧密	排水せん断

(注：読むときは、「非圧密非排水せん断試験」というようにつなげて読む)

以下、簡単のため、CD 試験に限定して話をする。

試験方法：

- ① 供試体を取りまく水による水圧で等方的な圧力を载荷する。粘土の場合は十分圧密が終了してから②に進む。砂の場合は、瞬時に圧密は終わるので、すぐに②に進める。
(圧密終了した時点で、等方的に载荷した圧力はすべて有効応力になっていることから、この圧力を有効拘束圧と呼ぶ)
- ② 等方圧力を载荷したまま、三軸セルの下側から一定の速度で台全体を上昇させて、円柱型の供試体を軸圧縮させる(鉛直変位 2cm 程度まで)。
- ③ 軸変位から軸ひずみを計算し、軸荷重から軸差応力を計算し、軸差応力と軸ひずみの関係(応力～ひずみ関係)をグラフに描く。
- ④ 供試体から出入りする排水量から体積ひずみ(=排水した間隙水の体積/初期の供試体体積)を計算し、体積ひずみと軸ひずみの関係をグラフに描く。



三軸圧縮試験では、 σ_1 (最大主応力) と $\sigma_2 = \sigma_3$ (最小主応力) を载荷する。

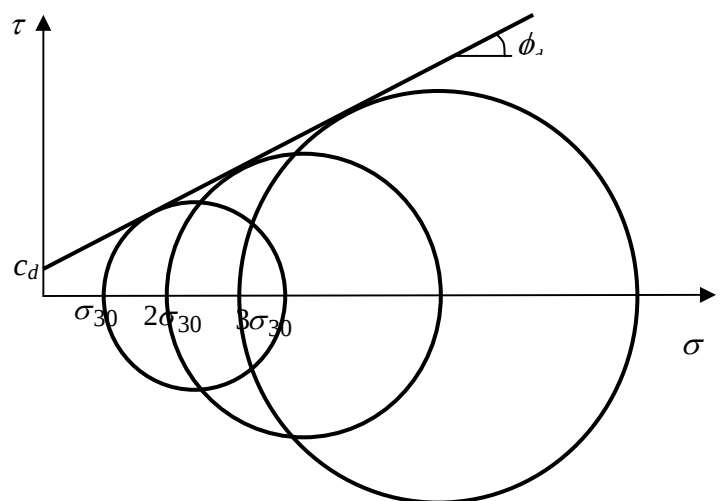
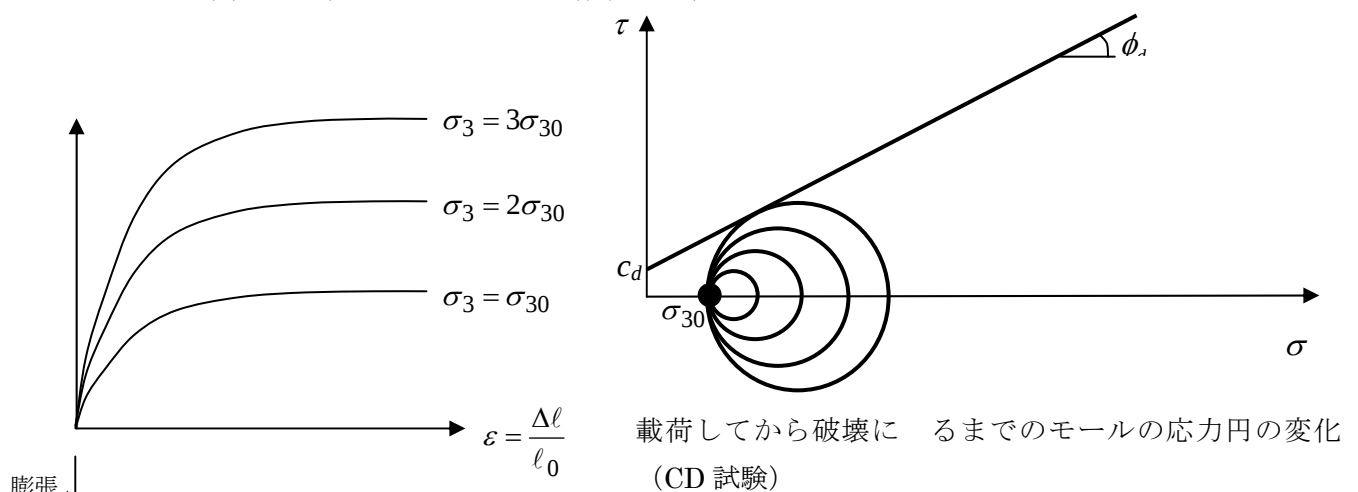
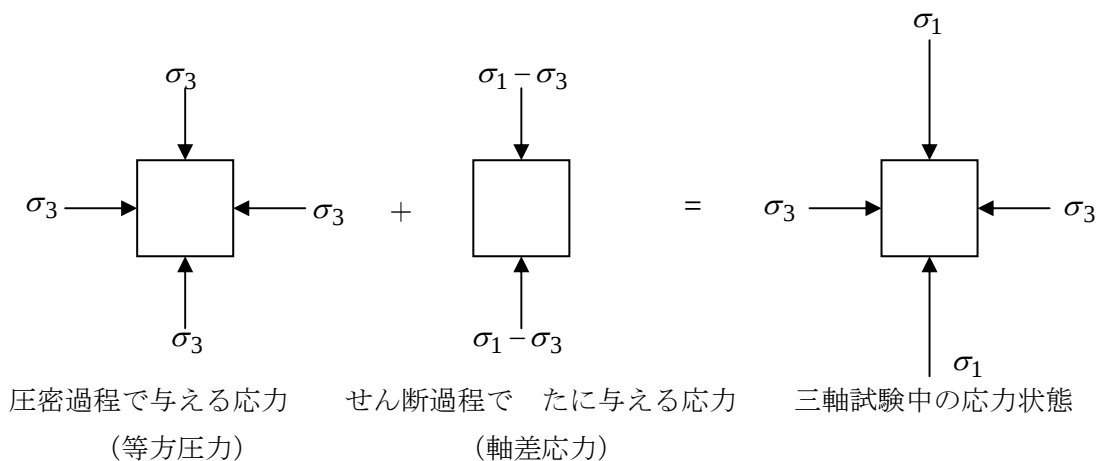
- ⑤ 何種類か側方圧力を変えて、①～④の実験を行う。
- ⑥ それぞれの実験の等方応力（最小主応力）と軸差応力（最大主応力と最小主応力の差）から求められる最大主応力を用いて、モールの応力円を描く。

粘着力 c とせん断抵抗角（内部摩擦角） ϕ を求める。

実際には、圧密とせん断が別々に発生するようなことはないが、実験室では圧密とせん断を分けることができる。ここでいう圧密とせん断とは、

圧密：等方的な圧力、あるいは1次元応力のように、土に圧縮変形を与え、体積変化を起こさせることで、破壊には直接関係しない。

せん断：軸差応力（縦軸と横軸の応力に差がある状態）を与えることにより、せん断応力を発生させることによって、土にせん断変形を与え、やがて土を破壊させる。



6 破壊時のモールの応力円 (CD 試験)

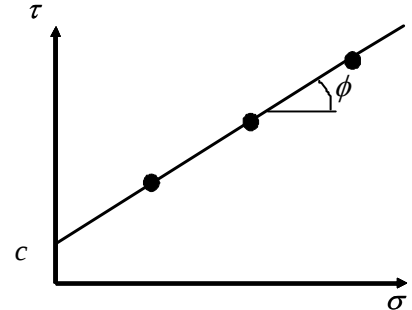
【三軸試験とモール・クーロンの破壊規準】

【モール・クーロンの破壊規準】

クーロン（Coulomb）の破壊規準：

一面せん断試験は、計測している応力状態（垂直応力とせん断応力）が破壊面での応力状態そのものであるので、例えば、3種類の垂直応力で一面せん断試験を実施して、それぞれの（最大せん断応力）が求められれば、それを右図のようにプロットすれば、ほぼ直線に並ぶ。このとき、切片を c 、直線の傾きの角度を ϕ として、次式のように土が破壊する条件を表した。

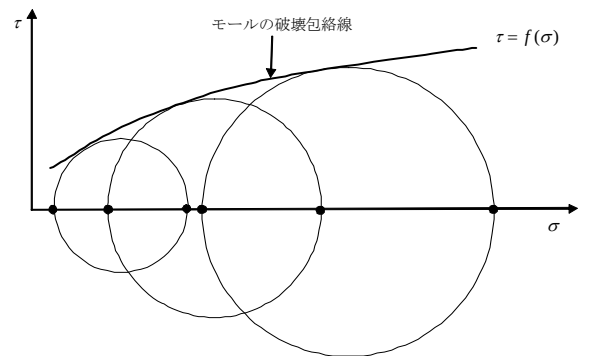
$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$



モール（Mohr）の破壊規準：

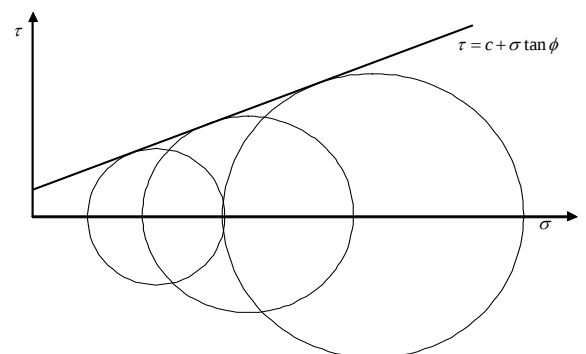
三軸試験（CUあるいはCD試験）を3種類以上の拘束圧で実施し、それぞれについて破壊時の主応力状態※を用いてモールの応力円を描いた場合、下図のように、モールの応力円の包絡線を描くことが出来る。この包絡線は、クーロンの破壊規準と同様に、それより上の領域では、土は壊れていることを意味しており、モールの破壊規準と呼ばれている。この図のように、包絡線が曲線（特に上に凸の曲線）となるのは、不飽和土の場合に多く見られる。

（※三軸試験では、主応力しか計測していない。）

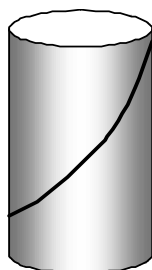


モール・クーロン（Mohr-Coulomb）の破壊規準：

モールの破壊規準の場合と全く同様に、三軸試験の結果からモールの応力円を描いた場合、特に飽和土や砂の場合には、破壊包絡線は直線となる場合が多い。その場合の直線は、クーロンの破壊規準における直線と同じものである。このように、モールの応力円の包絡線から、クーロンの破壊規準と同様の直線を引いて破壊規準を定めたものを、2つの破壊規準をあわせてモール・クーロンの破壊規準と呼ぶ。



【三軸試験で観察されるせん断面】



せん断面の傾きは、供試体の形状や実験条件（载荷速度、排水条件等）によって変わるが、

$$\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

に近い角度が観察されることが多い。

【モール・クーロンの破壊規準の主応力表示】

破壊規準の直線 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 上にある点 (σ, τ) は三軸試験の試験で計測された主応力 σ_1 および σ_3 を用いて、

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi, \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi$$

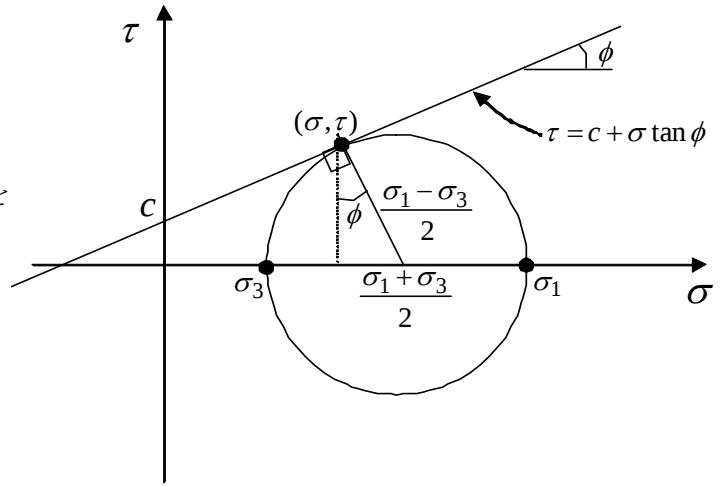
と表すことができる。

これを元の破壊規準 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ に代入すれば、

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi = c + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \right) \tan \phi \quad \text{または} \quad \sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi$$

となる。これをモール・クーロンの破壊規準の主応力表示と呼ぶ。

もちろん、上図の幾何学的な関係 $(c \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}) \sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ から直接求めることができる。



【モール・クーロンの破壊規準と破壊面との関係】

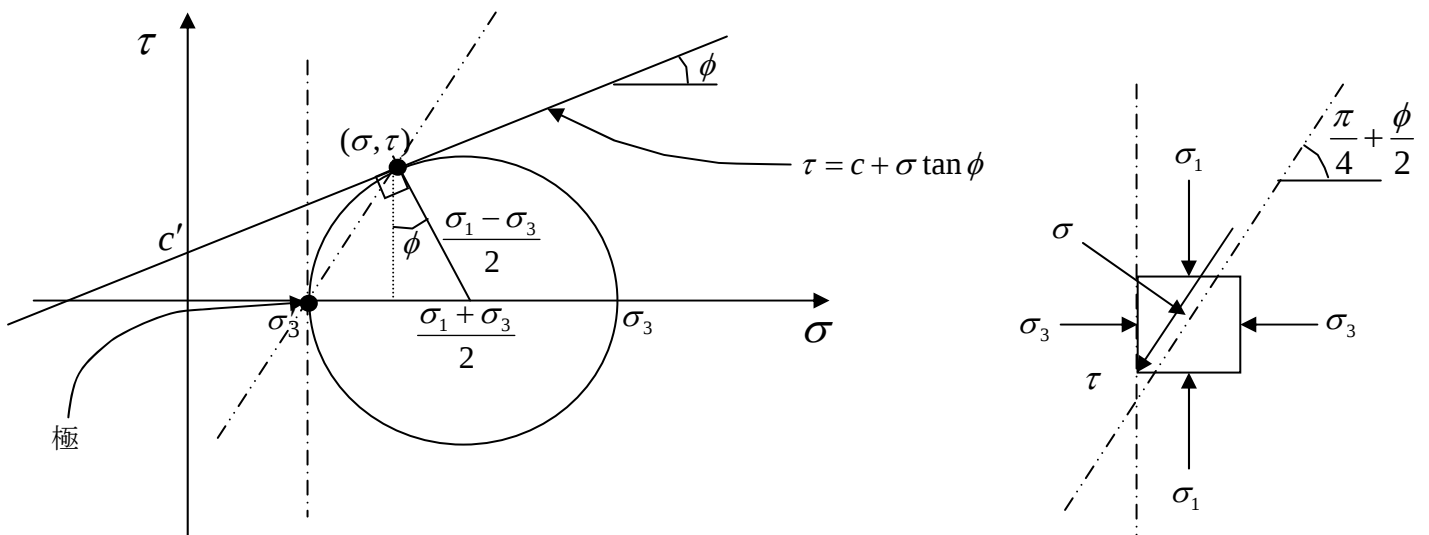
砂の CD 条件の三軸試験において、モール・クーロンの破壊規準を考えた場合、破壊時の主応力が σ_1 および σ_3 だった場合に、破壊条件に達している（すなわち、破壊規準の直線上にある）垂直有効応力とせん断応力の値はそれぞれいくらかになるのか考察する。また、そのような破壊規準に達している応力状態が作用する面は、水平面（すなわち最小主応力 σ_3 が作用する面）から、どれだけ傾いているのかも考察する。下図より、モールの応力円の幾何学的な関係から、破壊基準 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ に達している応力状態 (σ, τ) は、

$$\sigma' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi, \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi$$

となる。

それらが働く面の方向は、 σ_3 が働く最小主応力面をモールの応力円の図上に描けば、 $(\sigma_3, 0)$ が極であることが求まり、その極から (σ, τ) へ引いた線がその応力が働く面となる。したがって、幾何学的な関係

から、最小主応力面からは $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ ，最大主応力面からは $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ 傾いた面となる。



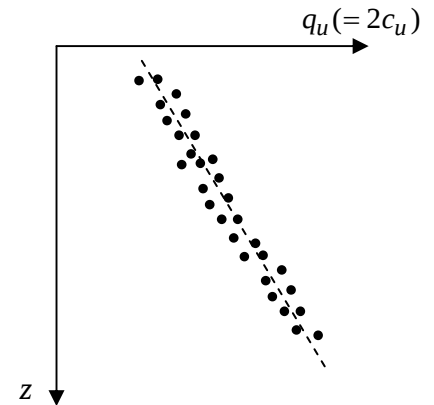
【一軸圧縮試験と三軸圧縮試験による飽和粘土地盤のせん断強度調査】

(1) 原位置の正規圧密粘土地盤

原位置にある正規圧密粘土地盤は、深度に応じた有効土被り圧によって圧密が完了している。そのため、粘土は深くなるにしたがって、大きな有効拘束圧（圧密応力）で圧密されているので、深くなるほど間隙比は小さくなり、せん断強度は大きくなる。

重要なポイント：粘土のせん断強度は間隙比と有効応力と 1 対 1 対 1 の関係であり、間隙比が小さいほどせん断強度は大きくなる

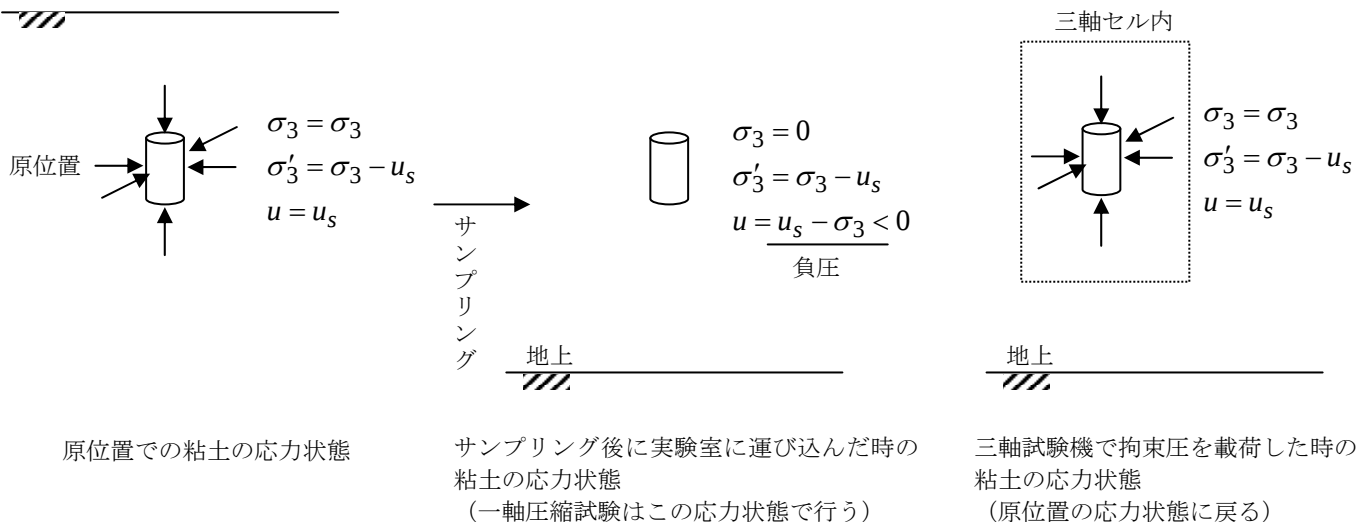
原位置の粘土をボーリングによってサンプリングし、一軸圧縮試験を行い、それぞれの一軸圧縮強度 q_u （=非排水せん断強度 c_u の 2 倍）をプロットしたものが右図である。プロットの数だけ一軸圧縮試験をしたことを示している。通常、ここまで多数の実験をすることは少ないが、一軸圧縮試験によって、地盤全体の非排水せん断強度を把握するためには、ある程度の数の実験が必要である。



(2) 非圧密非排水せん断試験（UU 試験）の役割

原位置からサンプリングしてきた粘土を、なるべく原位置の状態に近づけて実験を行う。

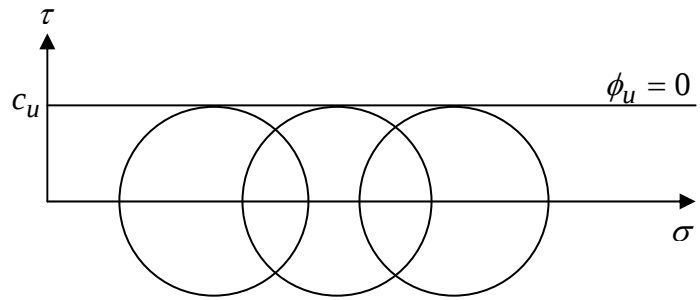
そのため、サンプリング時から原位置での粘土の含水比（間隙比）を変えないように注意して、実験室に搬入して三軸試験機にセットし、原位置の有効土被り圧と同等の拘束圧を、間隙比を変えないように非排水のまま載荷する。ここでの、拘束圧は粘土内部の応力状態を、原位置に近づけるためのものである。



- I. 原位置では、土被りに相当する σ_3 が全応力で粘土に作用しており、深度に応じた静水圧 u_s も作用しているため、有効応力は全応力から静水圧を差し引いた $\sigma'_3 - u_s$ となる。
- II. サンプリングして地上に出された粘土には外から圧力が作用しないので、全応力はゼロになる。しかし、サンプリング後にも間隙比が変わっていないので、有効応力は原位置の時と同じである。そのため、全応力から有効応力を引いたものが水圧であるが、この場合は $u_s - \sigma_3$ となり、粘土の中は負の間隙水圧となる。
- III. 三軸セル内で圧力を加えることにより、粘土は原位置の応力状態に戻る。ただし、I～IIIを通して、粘土の間隙比は変わらないので、有効応力はずっと同じである。

(3) 非圧密非排水せん断試験（UU 試験）の結果の整理

拘束圧 σ_3 を色々変えて実験を行っても、拘束圧を作用させた時点から非排水状態の非圧密であるので、間隙比は変わらず、有効応力も変化せず、結果としてせん断強度も増加しない。拘束圧を増加させた分はすべて間隙水圧の変化となる。



破壊時の応力状態をモールの応力円で

表すと右図のようになる。 σ_3 を何通りも変えても、半径が同じ応力円となるので、破壊包絡線は水平になる。そのため、内部摩擦角 ϕ は 0° となるが、これは UU 試験で得られる特別なものであることに注意する。

UU 試験で得られる重要な土質定数は、

$$\text{非排水せん断強度} : c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \quad (f \text{ は破壊時の意味})$$

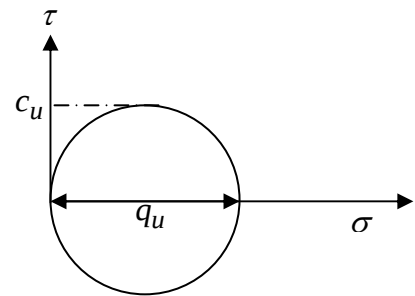
この非排水せん断強度 c_u は粘土の短期安定問題を念頭においた設計に非常によく用いられる重要な土質定数である。また、この c_u を用いて行う解析を破壊包絡線が 0° であることから、 $\phi_u = 0$ 解析法 と呼ばれる（全応力解析の代表）。

(4) 一軸圧縮試験と UU 試験の関係

一軸圧縮試験は、UU 試験において、 $\sigma_3 = 0$ の特殊な場合と同じと考えて良い。

求められる土質定数は、一軸圧縮強度 $q_u = \sigma_1 f = 2c_u$

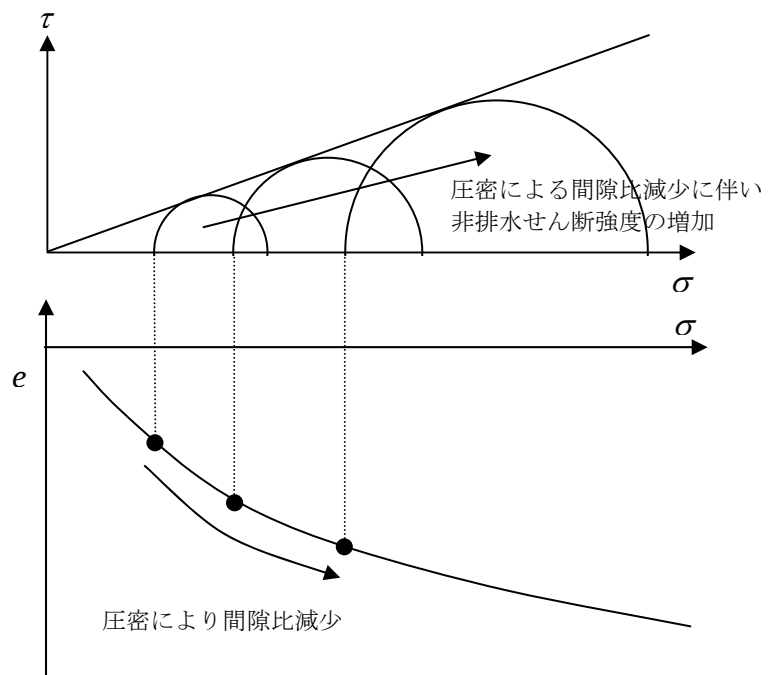
摩擦則を思い出すと、通常拘束圧が無ければ土はせん断強度を持たないはずであるが、飽和粘土の場合には、全応力がゼロになっても、負の間隙水圧（ダイレイタンシーで学んだように、負の水圧は吸い着ける効果がある）が有効拘束圧の役割を果たし、有効応力を維持するために、せん断強度を発揮できる。

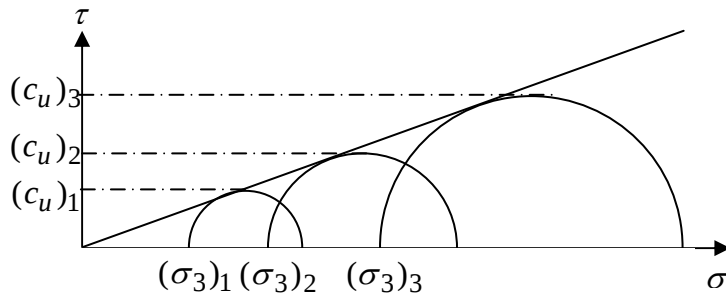


(5) 圧密非排水せん断試験（CU 試験）の役割 1

UU 試験は三軸セル内で原位置の応力状態に戻すようにしているが、実際の地中の応力状態は異方的（縦と横の応力が違う）であり、また、内部の有効応力状態も完全には把握できない。そのため、CU 試験ではサンプリングしてきた粘土を、一旦完全に圧密し直すことにより、非排水せん断時の有効応力状態を明確にして実験を行うことができる。

また、この配付資料のはじめに示した図のように、正規圧密粘土地盤は深さ方向にせん断強度が増加してゆくが、その強度増加率を正確に把握するには UU 試験では、サンプリング深さが異なる試料を何本か用いて試験をしなければならない。しかし、粘土地盤がある程度均質ならば、CU 試験によりある深さでサンプリングした粘土だけを使用して、深さ方向の強度増加率を求めること





強度増加率

$$\frac{(c_u)_1}{(\sigma_3)_1} = \frac{(c_u)_2}{(\sigma_3)_2} = \frac{(c_u)_3}{(\sigma_3)_3} = \frac{c_u}{p}$$

ができる。なお、普通1本のサンプリングチューブ約1mで（要するに1回のボーリングで）、数本の試験用供試体が採取できるため、同じチューブの試料を用いて実験すれば、他の深度からサンプリングしてきた粘土を用いて実験するよりも圧倒的に経費が安いのは明らかである。

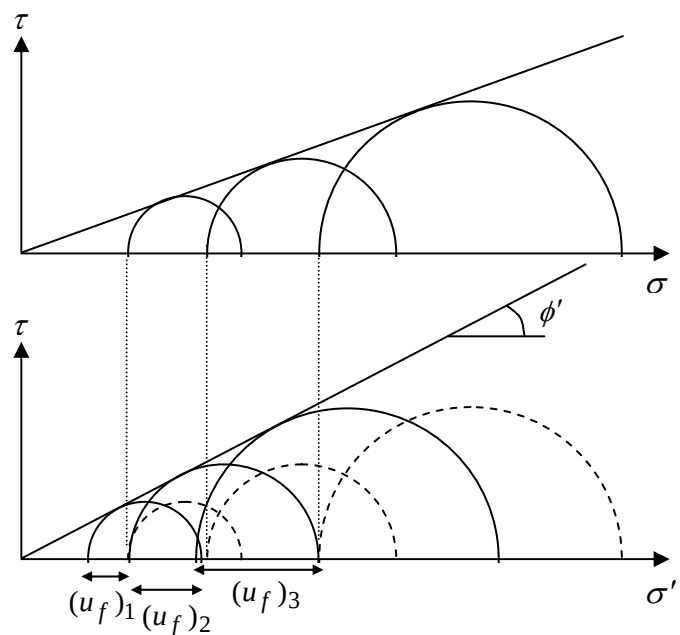
上図のように、全応力のモールの応力円でのCU試験結果の整理は、強度定数 c, ϕ を求めるというよりも、全応力解析である $\phi_u = 0$ 解析法の延長上で、拘束圧 σ_3 の増加に伴い、どれだけ非排水せん断強度 c_u が増加するかを検討するために用いられる。

同じ深度の粘土を用いても、上図のように、3種類以上の有効拘束圧を用いてCU試験をすれば、強度増加率が求められる。強度増加率は、言うまでもなく、本資料の最初の図の深度方向に強度が大きくなることを示す直線の傾きと等価である。

(6) 圧密非排水せん断試験（CU試験）の役割2

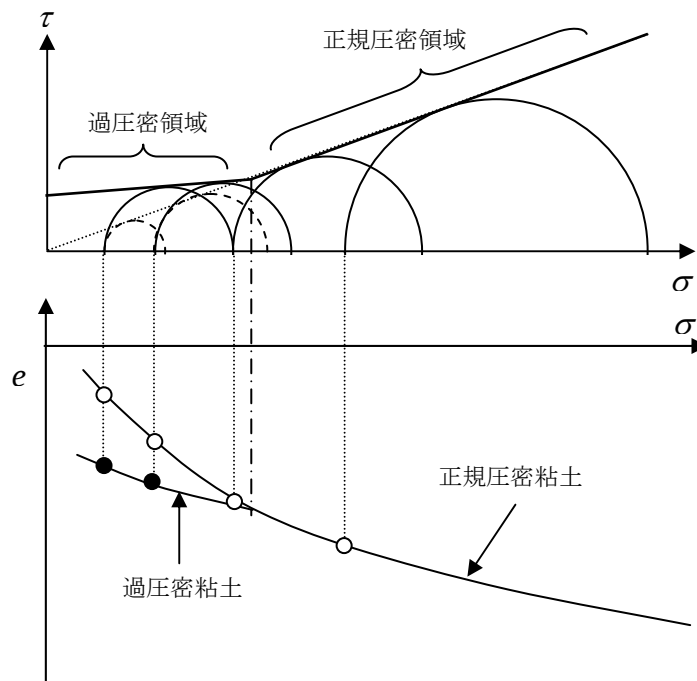
CU試験の最大の特長は、試験中の間隙水圧を正確に計測できることから、圧密、せん断の両過程を通して、試験中の有効応力状態が明確であることである。そのため、有効応力規準の c', ϕ' を求めることができる。粘土の場合、排水せん断試験CD試験は長時間を要するために実務向きではないために、せん断中の有効応力を把握するためにはCU試験が最も実用的でよく用いられている。

以前は、 c', ϕ' を求めるのは長期安定問題を検討するためであったが、最近では別の用途でせん断中の有効応力状態を把握することが非常に重要となってきた。近年、コンピュータの発達はめざましく、数値解析が実務上もよく用いられるようになってきた。土の挙動を正確に数値解析するためには、精度の高い土のモデルを用いる必要がある。それらは土骨格自身のモデルのため、有効応力で記述されている。そのため、数値解析を行うのにあたり、CU試験を行いモデルのパラメータを決定することになる（研究用途であるが、モデル化自身を行うためにも、もちろんCU試験は必要不可欠である）。



(7) 過圧密粘土の CU 試験結果

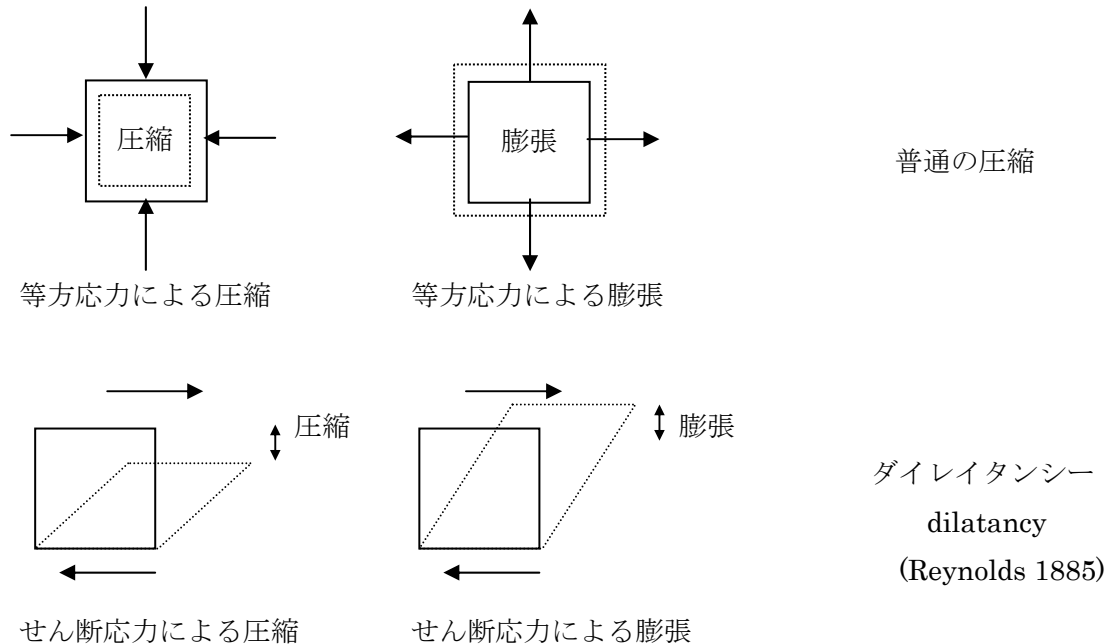
下図は、過圧密粘土も含めたモールの応力円（全応力表示）である。正規圧密粘土ではモールの応力円の破壊包絡線は原点を通る直線となるが、過圧密粘土になると包絡線は上側に移動し原点を通らなくなる。過圧密粘土の場合、正規圧密粘土と同じ有効拘束圧であっても間隙比はずっと小さいために、非排水せん断強度は正規圧密粘土よりもだいぶ大きくなる。また、下側の圧縮曲線を見てもわかるように、過圧密粘土の圧縮指数（圧縮曲線の傾き）は小さいために、有効拘束圧が多少変化しても間隙比に大きな変化はなく、非排水せん断強度に大きな差は生じない。そのため、過圧密粘土の破壊包絡線は上側に上昇し、傾きは小さくなる。その結果、見かけの粘着力が発生するようになる。



【土のダイレイタンスー】

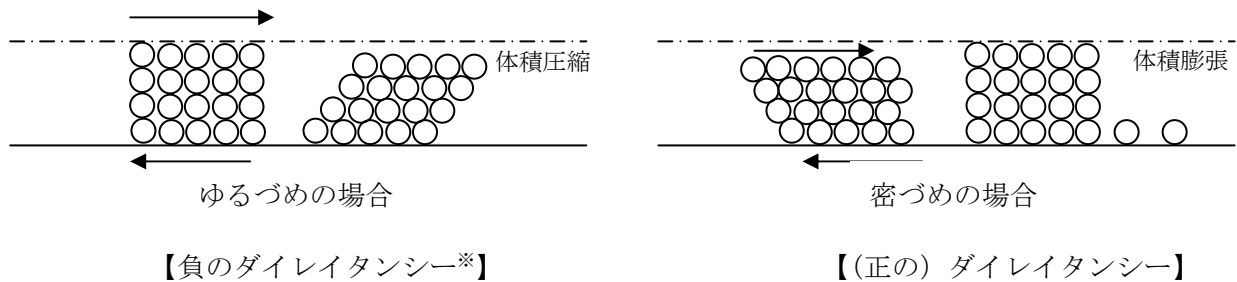
(1) ダイレイタンスーとは

圧縮や膨張などの体積変化は、通常は等方的な応力が作用して発生する。しかし、せん断応力が作用して体積変化が起こる場合がある。これをダイレイタンスーと呼ぶ。



(2) ダイレイタンスーの発生原因

ダイレイタンスーは粒状体の典型的な挙動である。



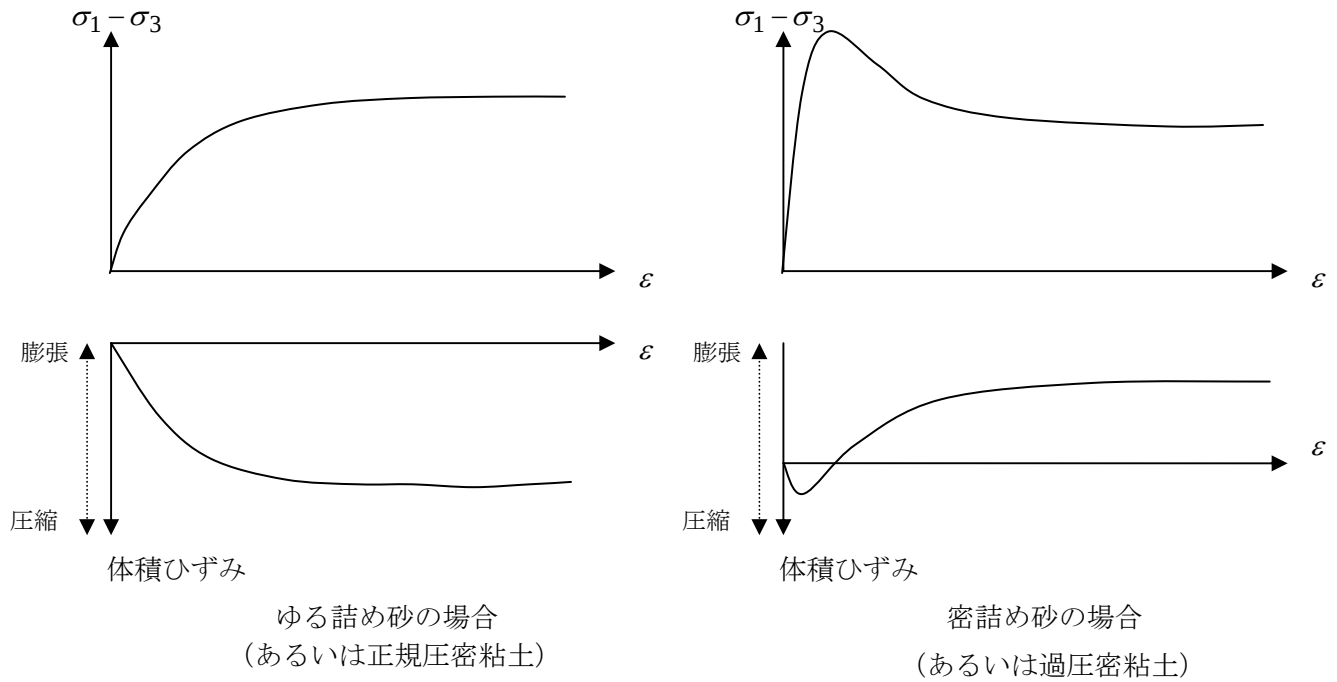
(3) 身近なダイレイタンスーの例

- ・ 砂浜の波打ち際で砂を踏むと一瞬乾いたように（水が吸い込まれていくように）見える。
- ・ 小麦粉などの粉を器に入れるときに、ゆするとたくさん入るようになる。
- ・ コーヒー豆をミルで挽くとき、抑えるものが無くてもコーヒー豆は粉になる。
- ・ 金属の玉がたくさん入った箱の中にむやみに手をいれようとするとき、あふれてしまう。
- ・ 満員電車で降りるために動くと、大きな抵抗を受ける。

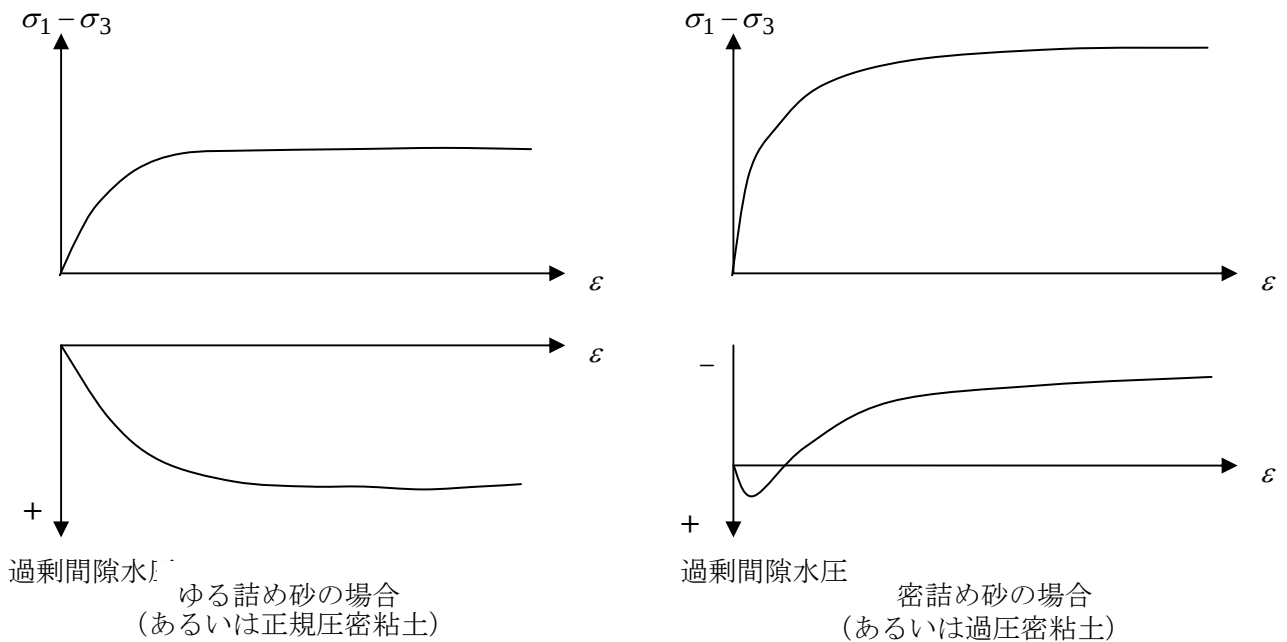
（他にもいろいろ考えてみましょう）

(4) 実際の砂の挙動（排水条件 CD 試験）

砂粒の間の間隙が水で満たされており、その水が出入り自由な排水条件である場合には、軸圧縮に伴うせん断により、ゆる詰め砂は圧縮してゆき、密詰め砂は膨張する。密詰め砂が最初に少し圧縮するのは弾性圧縮のためである。ダイレイタンスーは塑性挙動であり、弾性圧縮が終わったあとに、大きく発生する。



(5) 実際の砂の挙動 (非排水条件 CU 試験)



間隙水の出入りを許さない条件 (非排水条件・等体積条件) でせん断すると、

ゆる詰め砂 (あるいは正規圧密粘土) の場合：

砂粒の立場では、圧縮したいのにさせてもらえない。圧縮させないように砂粒を膨らまそうとする内力が働く (これが、正の過剰間隙水圧)

水の立場では、隙間が狭くなろうとして窮屈なので外に出たいが出られない。押し込められた水には正の過剰水圧が発生。

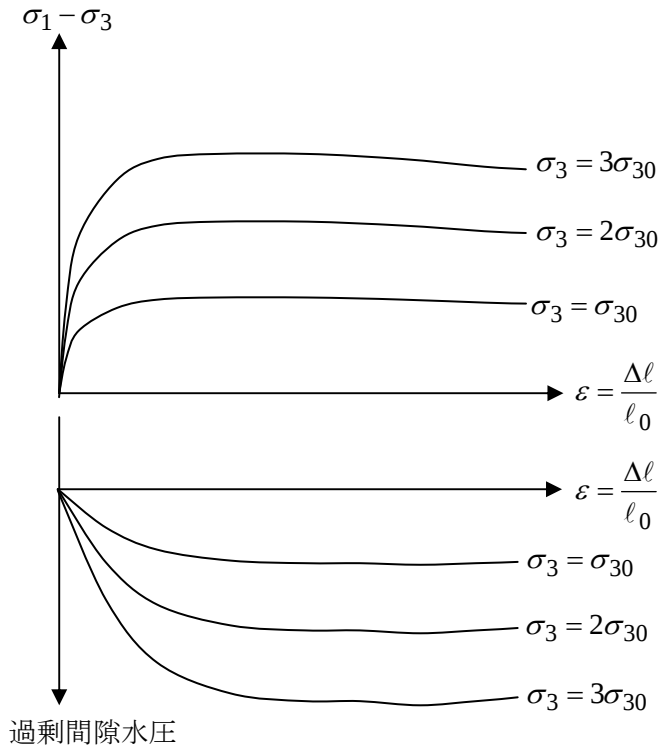
密詰め砂 (あるいは過圧密粘土) の場合：

砂粒の立場では、膨張したいのにさせてもらえない。膨張させないように砂粒を凝集・吸着しようとする内力が働く (これが、負の過剰間隙水圧)

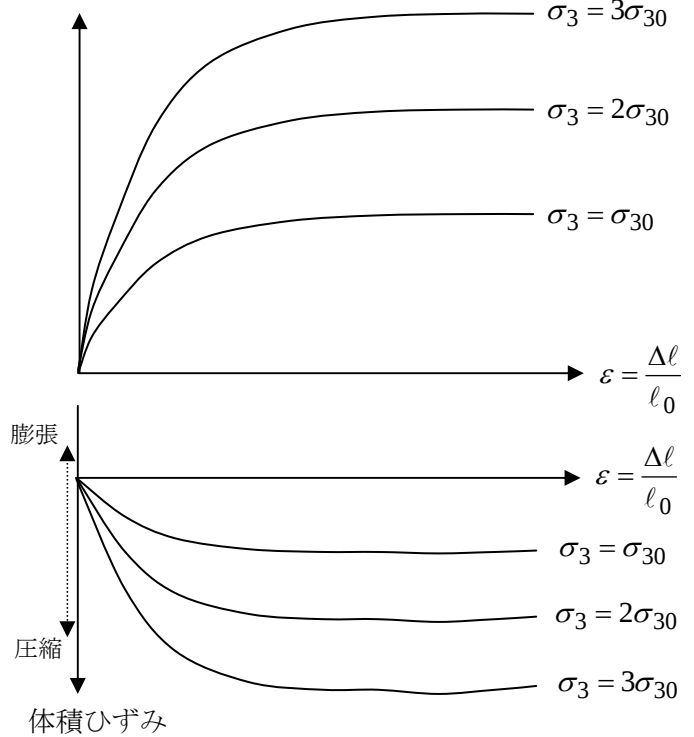
水の立場では、隙間が広くなろうとするので、外から入ってきてほしいがこない。引っ張られる水には負の過剰水圧が発生。

【CU 試験と CD 試験】

ここでは、ゆる詰め砂 or 正規圧密粘土 を考える。



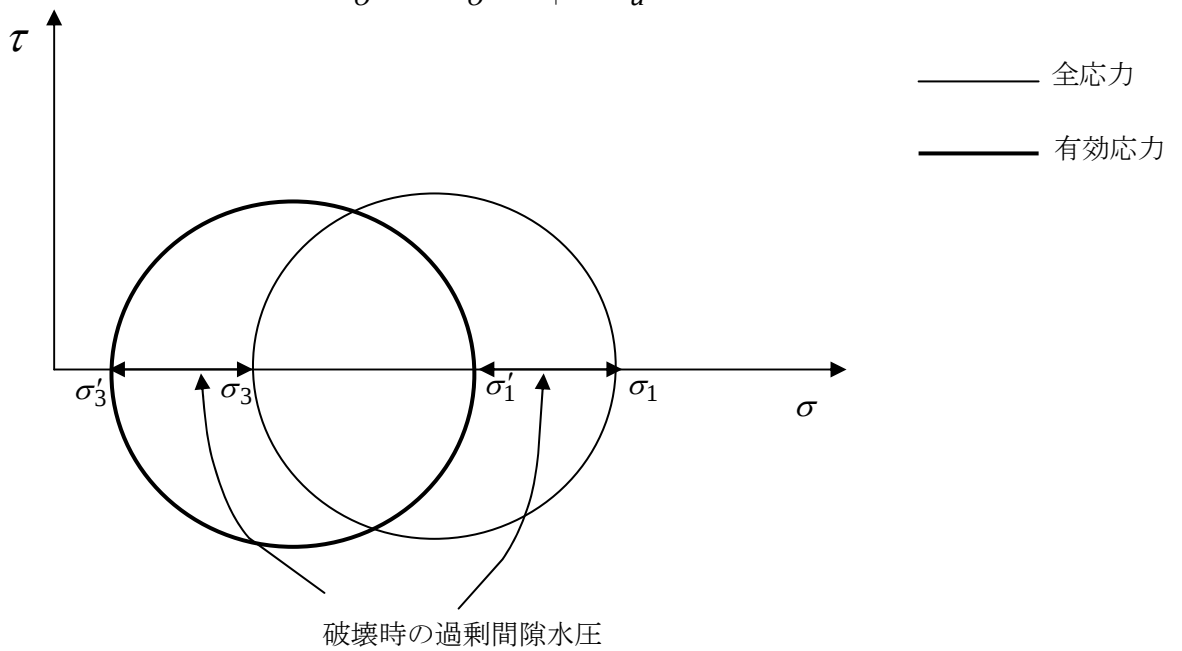
圧密非排水せん断試験 (CU 試験)



圧密排水せん断試験 (CD 試験)

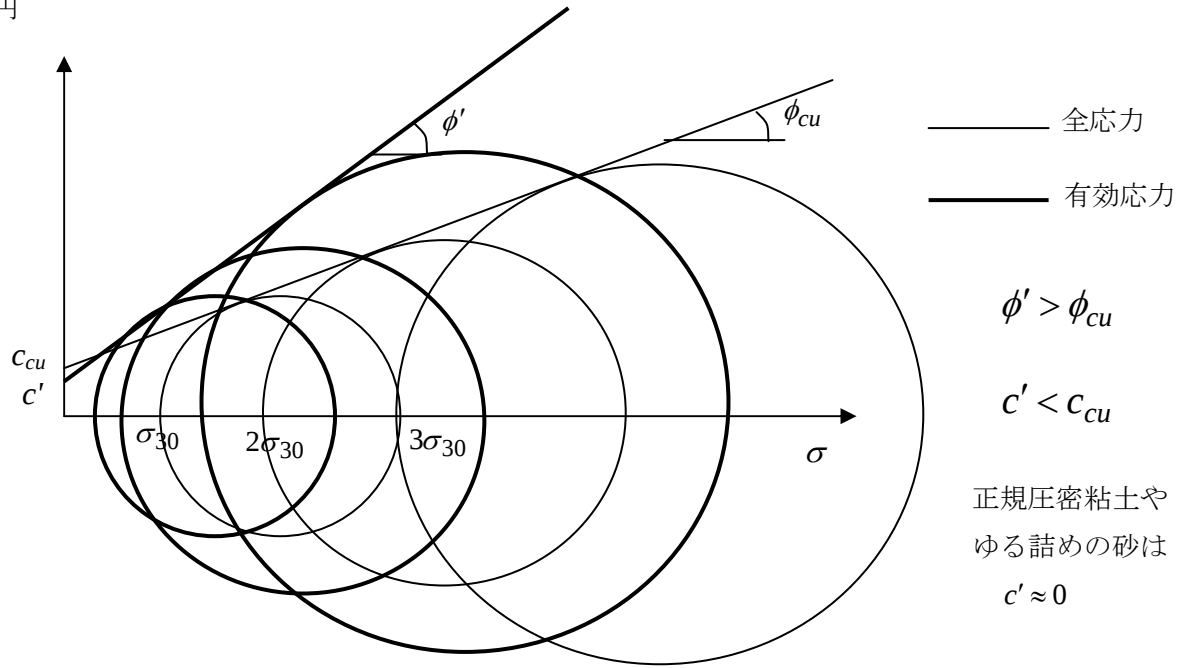
有効応力の原理：全応力＝有効応力＋間隙水圧

$$\sigma = \sigma' + u$$

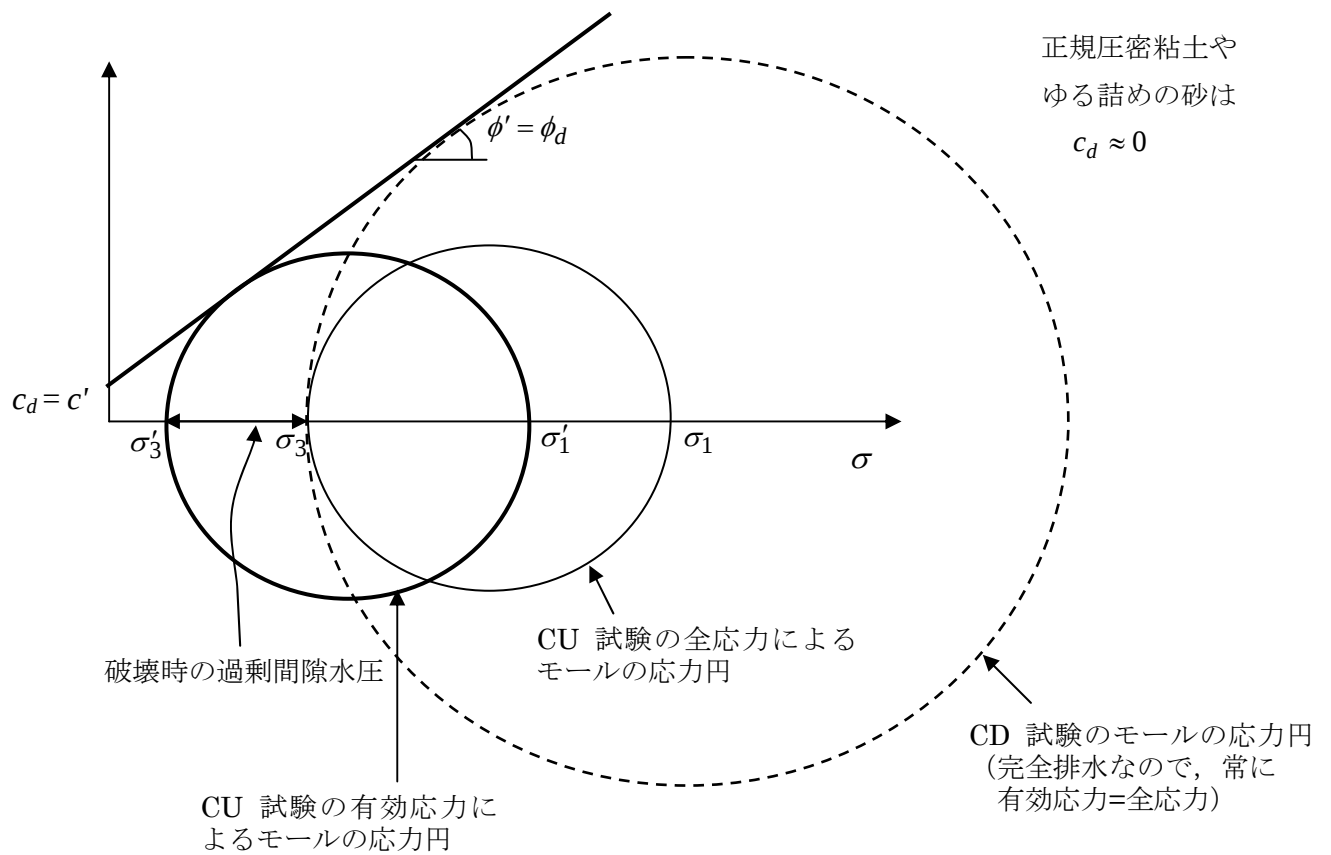


CU 試験の全応力でのモールの応力円と有効応力でのモールの応力円の関係

モールの応力円



CU 試験の全応力でのモールの応力円と有効応力でのモールの応力円による強度定数 (c , ϕ) の比較



CU 試験のモールの応力円と CD 試験のモールの応力円