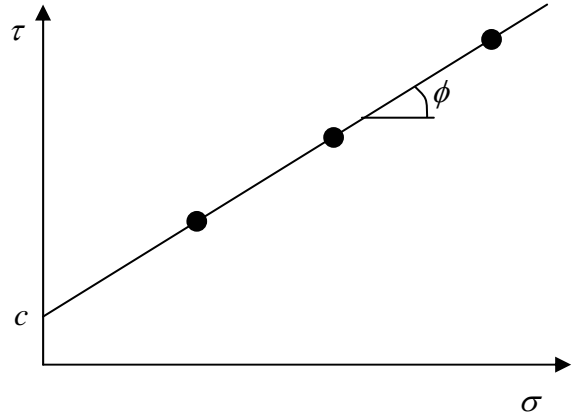


【三軸試験とモール・クーロンの破壊規準】

【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。

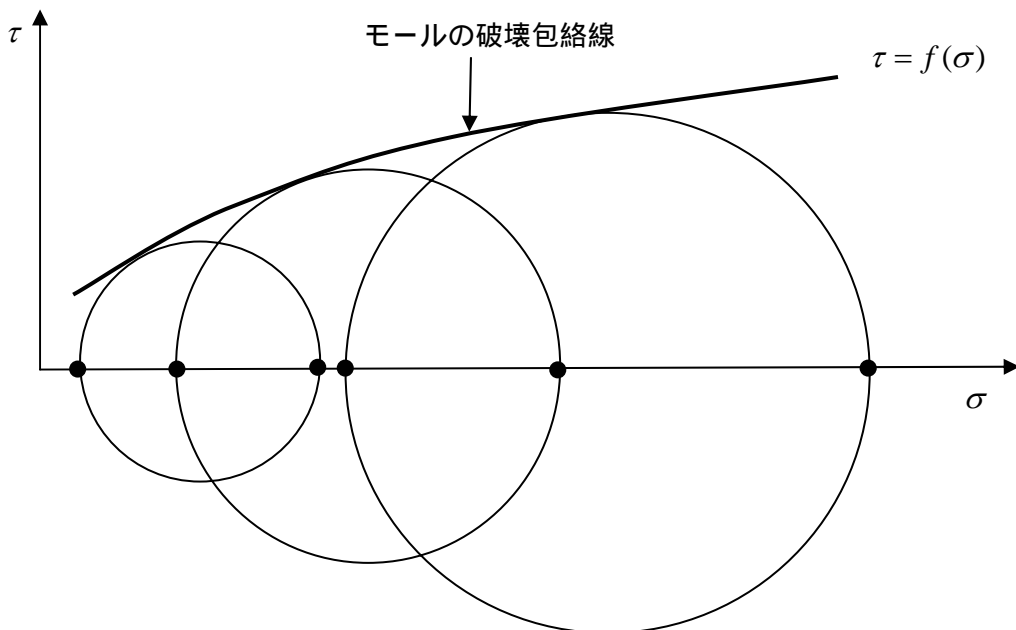


このとき, 切片を c , 直線の傾きの角度を ϕ として, 次式のように土が破壊する条件を表した。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{クーロンの破壊規準}$$

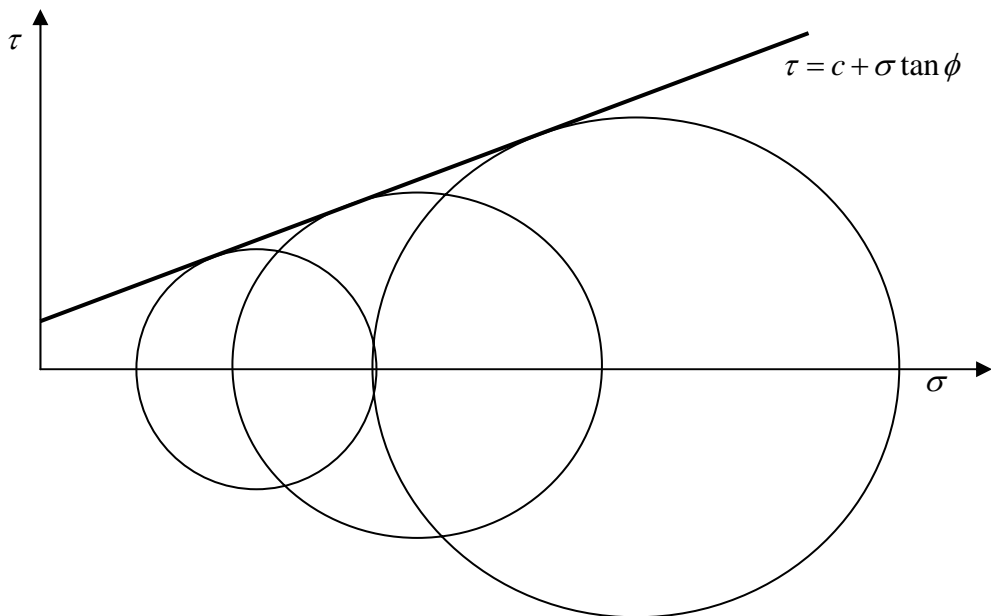
モール (Mohr) の破壊規準 :

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。



【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,

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi$$

と表すことができる。

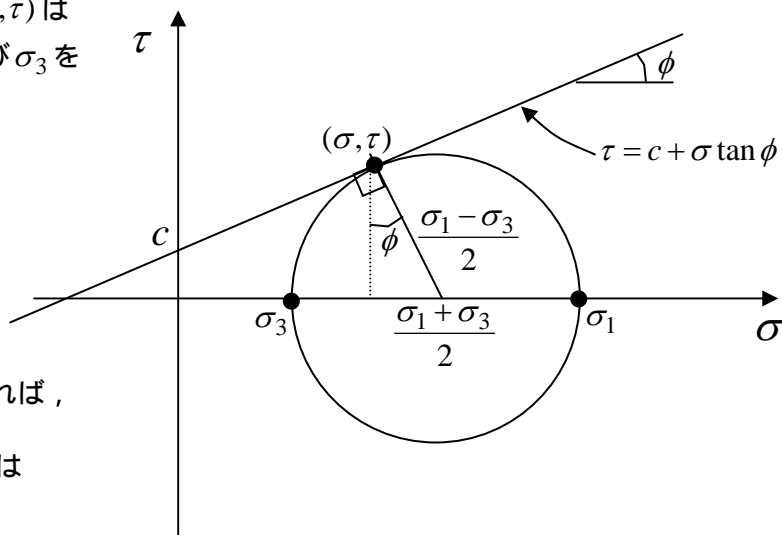
これを元の破壊規準 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ に代入すれば,

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \quad \text{または}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi$$

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, $(c \cot \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}) \sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ からも直接求めることができる。



【有効応力の破壊規準】

以下の三軸試験を行った場合には、常に有効応力状態を把握することが可能であり、有効応力で破壊規準を表すことが可能となる。

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \leftarrow \text{有効応力の破壊規準}$$

飽和土を対象とし、圧密非排水せん断（CU）試験を実施し、せん断過程に発生する間隙水圧を計測する場合。

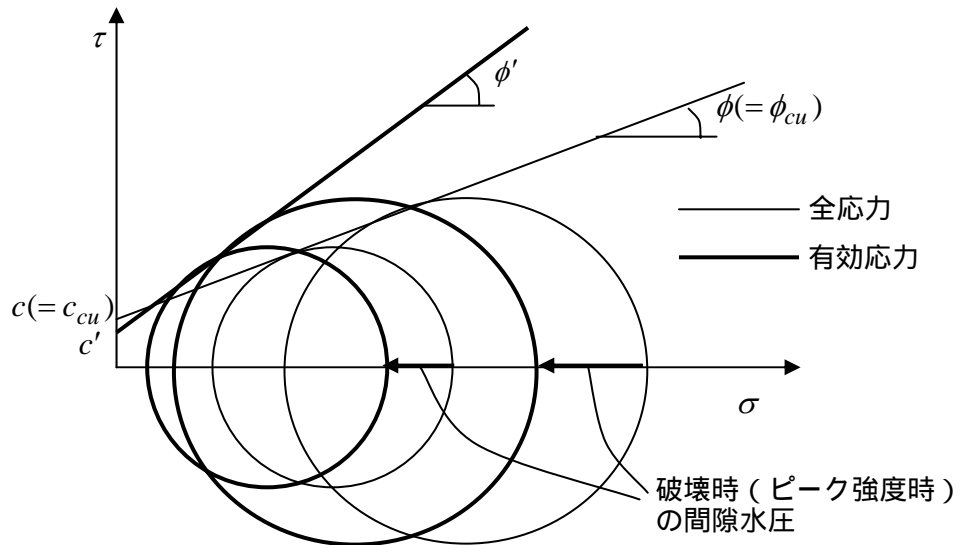
飽和土を対象とし、圧密排水せん断（CD）試験を実施した場合。

乾燥砂を対象とし、圧密排水（実際は排気）せん断試験を実施した場合。

の場合には、計測した垂直応力から計測した間隙水圧を引いて有効応力を求めればよい。

と の場合には、計測しているものはすべて有効応力に等しいと考えて良い。

右図は、 の場合の、飽和土のCU試験の場合の全応力のモール・クーロンの破壊規準と有効応力の破壊規準との関係を表したものである。



上記の3条件以外で行う三軸試験では、供試体に作用する有効応力を把握することは難しいので、通常全応力で整理し、有効応力を用いることはほとんどない。

例：不飽和土の実験，UU試験，

【有効応力の破壊規準と破壊面との関係】

三軸試験において、有効応力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。

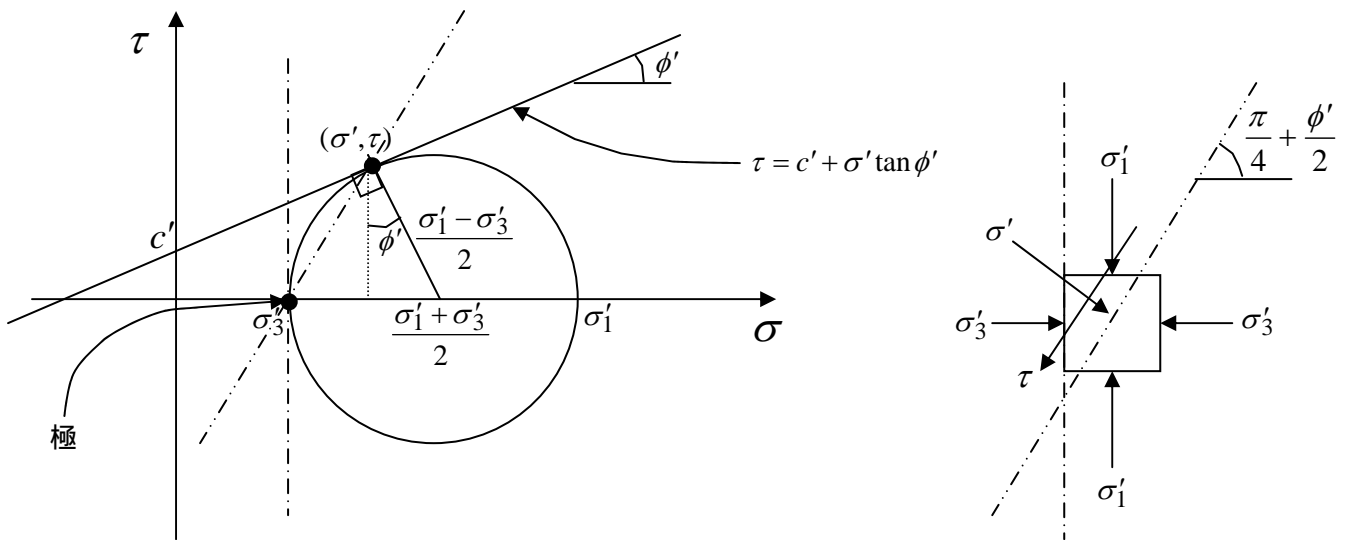
次ページの図から、有効応力で描いたモールの応力円の幾何学的な関係から、有効応力の破壊基準 $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ に達している有効応力状態 (σ', τ) は、

$$\sigma' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \sin \phi', \quad \tau = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \cos \phi'$$

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

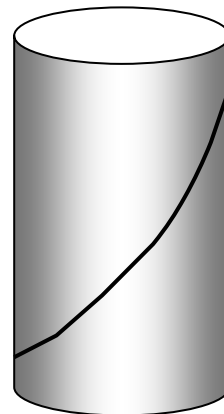
から、最小主応力面からは $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2}$ 、最大主応力面からは $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}$ 傾いた面となる。



この考察は非常に重要な意味がある。

このように、三軸試験では、主応力で載荷することにより、垂直応力とせん断応力の比が最も危険となる、すなわち破壊規準を満たす組み合わせとなる、応力状態が自ずと現れるようにしている。また、その応力状態が作用する面は、土のせん断抵抗角によって決まる傾きとなる。

*せん断応力は、等方的な垂直応力（常に物体の面に対して垂直に加わる）である水圧の影響は無い。そのため、垂直応力は有効応力が全応力かを慎重に考えなければならないが、せん断応力は有効応力も全応力も関係ない。



三軸圧縮試験（CU 試験）後の粘土供試体

実際に三軸試験した粘土の供試体には、上の図のように「せん断面」と呼ばれる不連続面が観察される場合がある。この面の傾きは、供試体の形状や実験条件（載荷速度、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。