第5回　中部支部　地盤力学・工学講習会（初級編③）

せん断
－せん断試験と強度定数－

名城大学
理工学部建設システム工学科
小　高　猛　司

中部支部・第1部会（講習会）担当

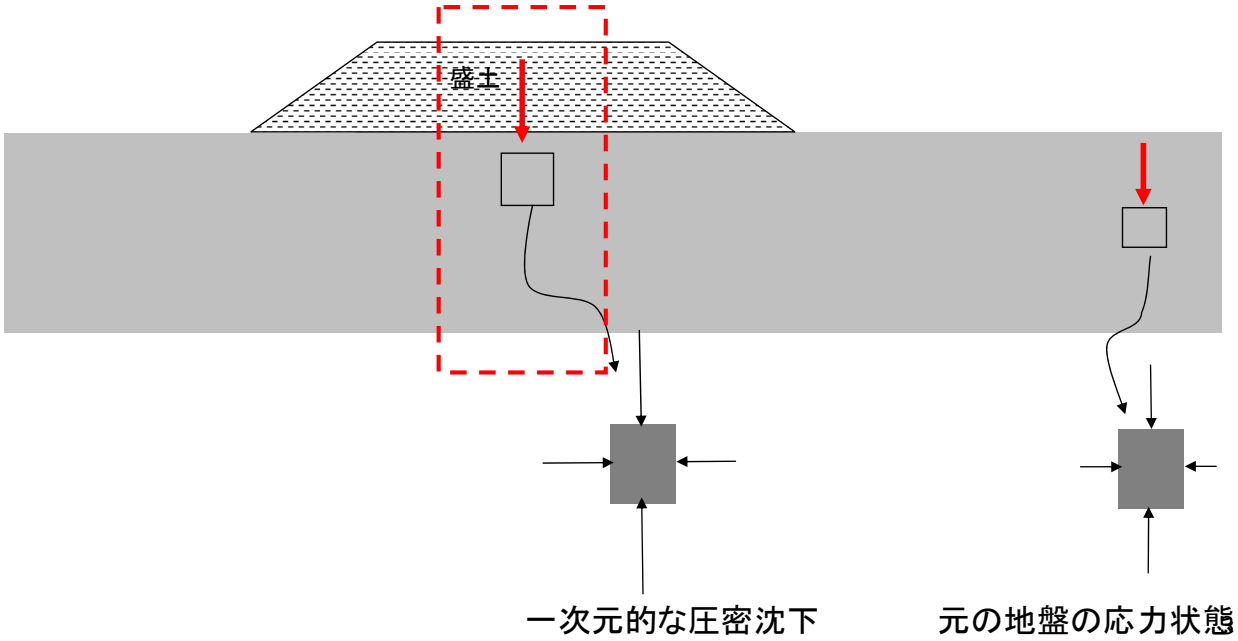
H21年度　地盤工学会中部支部講習会

回	開催日	内　　容	講師等　【所属】
1	5/15	初級編①　透水－土中水に関する基礎と考え方	杉井俊夫　【中部大学】
2	6/26	初級編②　圧密	中野正樹　【名古屋大学】
3	7/17	現場編①　地盤調査ボーリング作業～室内土質試験見学会	ジオラボ中部 中部地質調査業協会
4	7/31	技術編①　地盤環境Ⅰ　地盤汚染とその浄化技術	棚橋秀行　【大同大学】
5	9/11	初級編③　せん断－せん断試験と強度定数－	小高猛司　【名城大学】
6	10/16	初級編④　土圧	沢田和秀　【岐阜大学】
7	11/6	技術編②　地盤環境Ⅱ　土壌・地下水汚染を理解するための土の生物化学の基礎	片山新太　【名古屋大学】
8	11/27	中級編①　粘土の実験とカムクレイモデル	野田利弘　【名古屋大学】

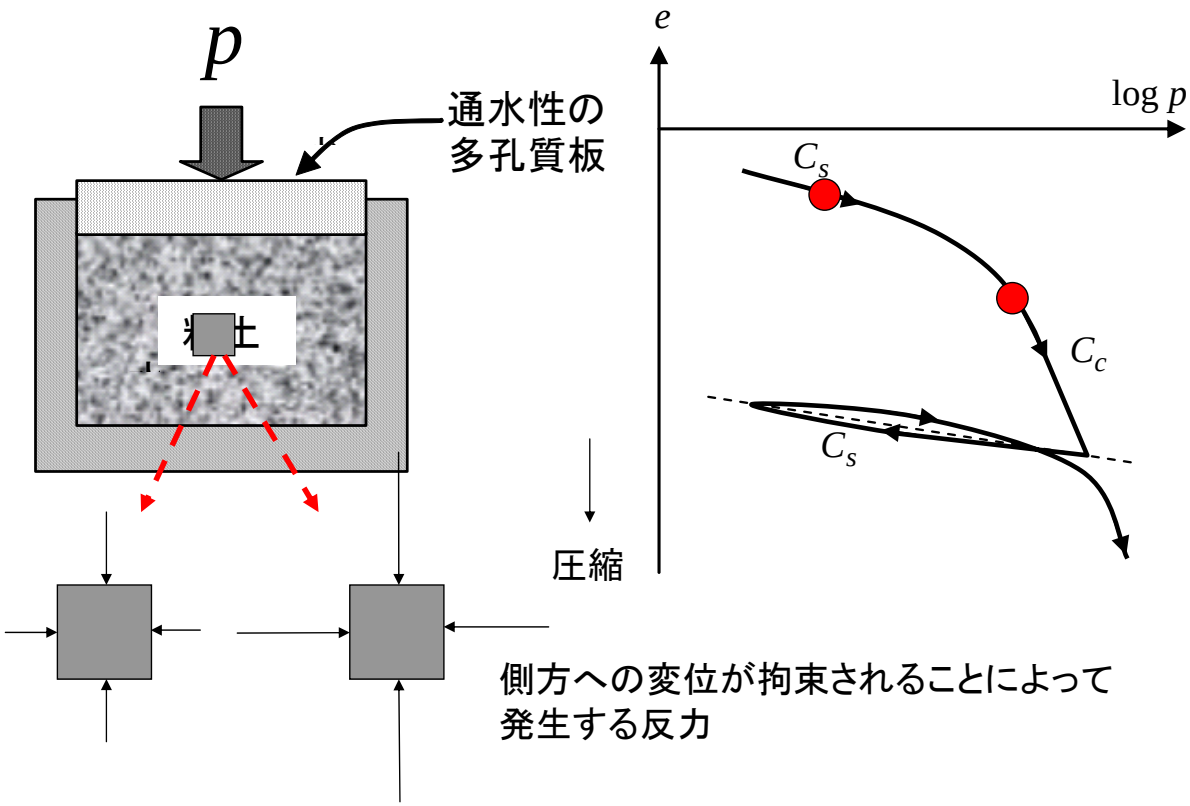
H22年度・・・　サマースクール，集中講義，・・・（考え中）

盛土の下の地盤の状態

土の応力状態



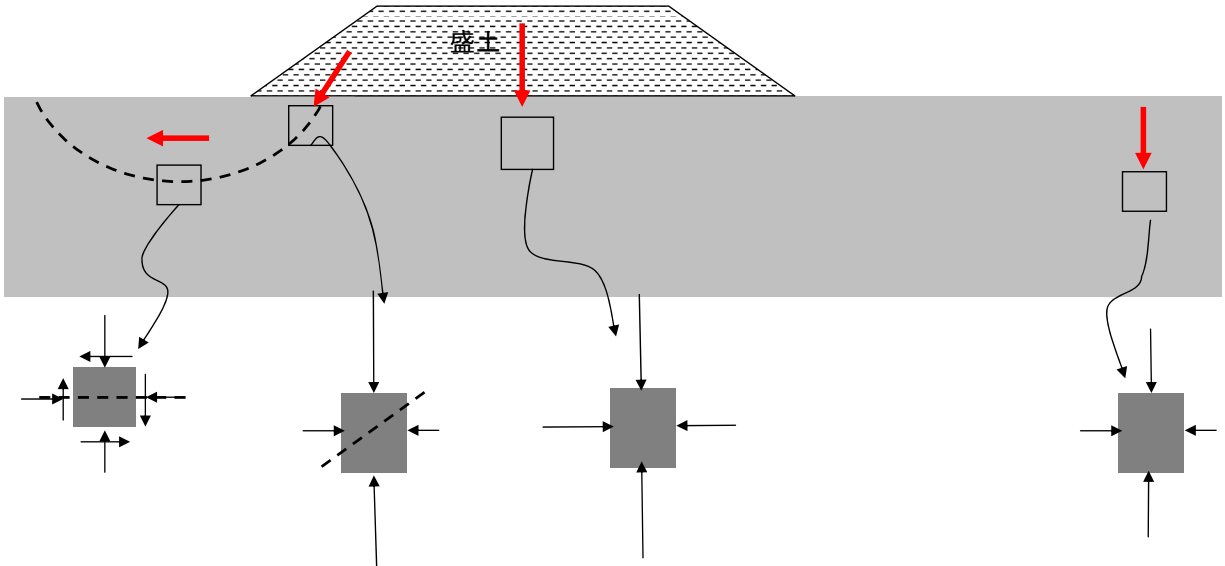
（一次元）圧密



盛土の下の地盤の状態

どれだけ盛土を高くできるか？

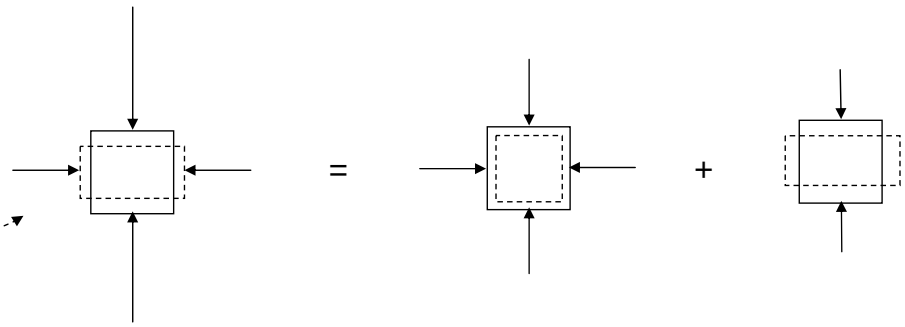
土の応力状態



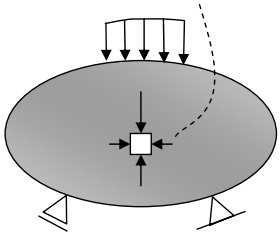
盛土荷重により応力状態が変化　　一次元的な圧密沈下　　元の地盤の応力状態

教科書の土質力学

「圧密」と「せん断」



物体の変形　　等方圧縮変形　　せん断変形

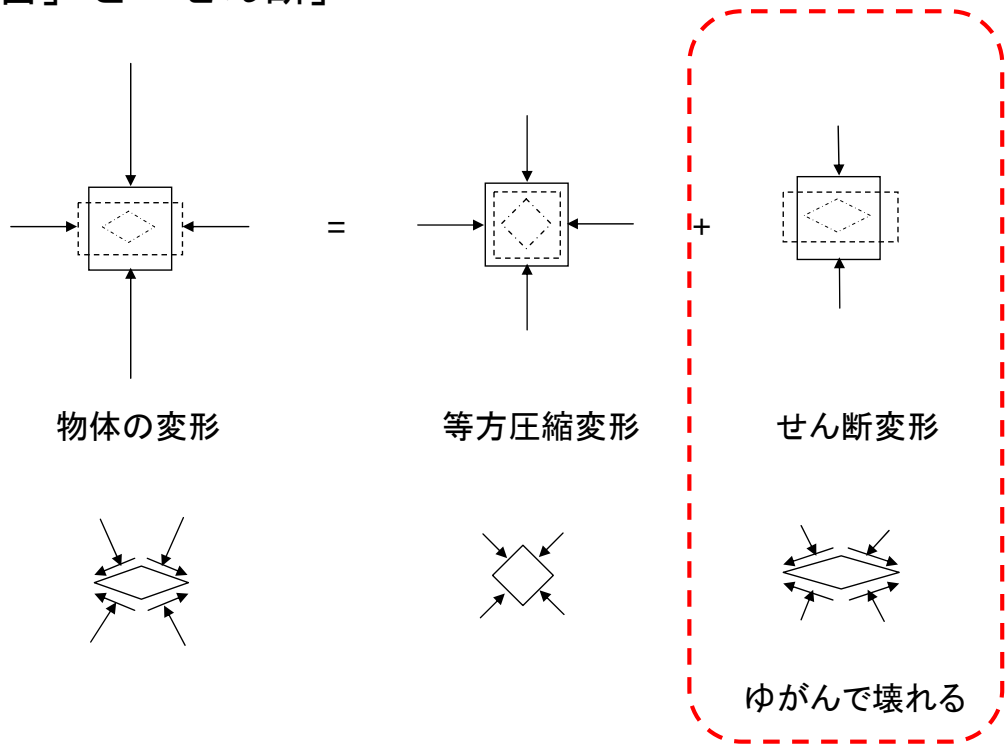


いつまでたっても壊れない　　いつかは壊れる

圧密　　せん断

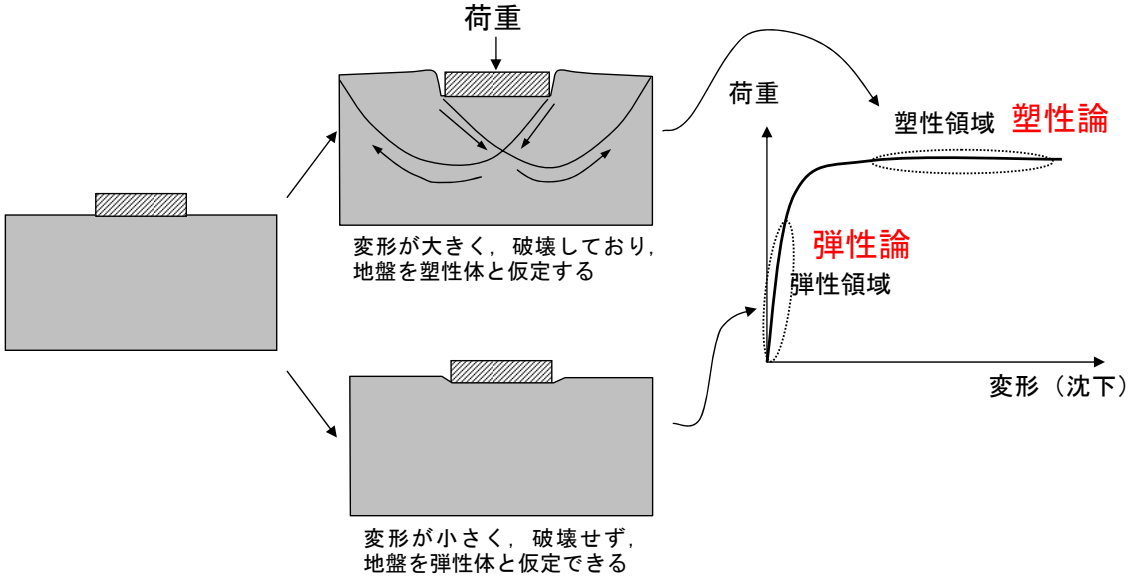
教科書の土質力学

「圧密」と「せん断」



教科書の土質力学

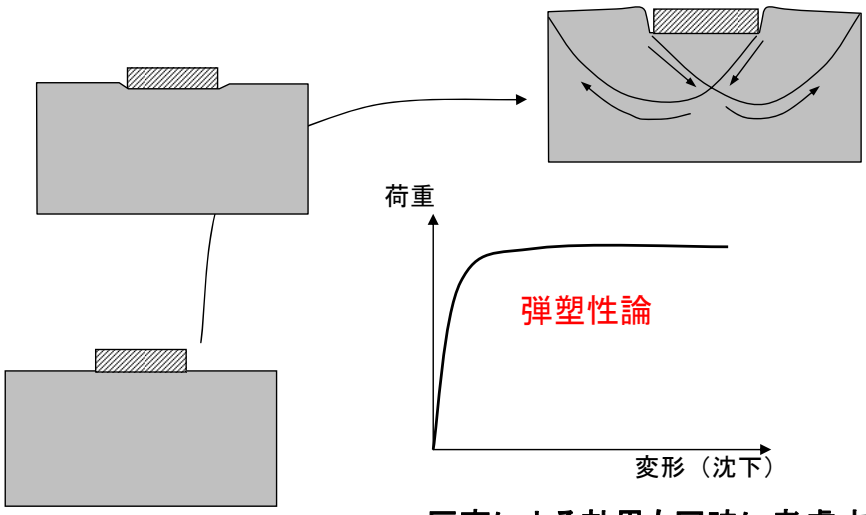
例えば，浅い基礎の即時沈下と支持力を考えれば



圧密による効果（沈下ならびに強度増加）は別途考慮する。

本当の現象

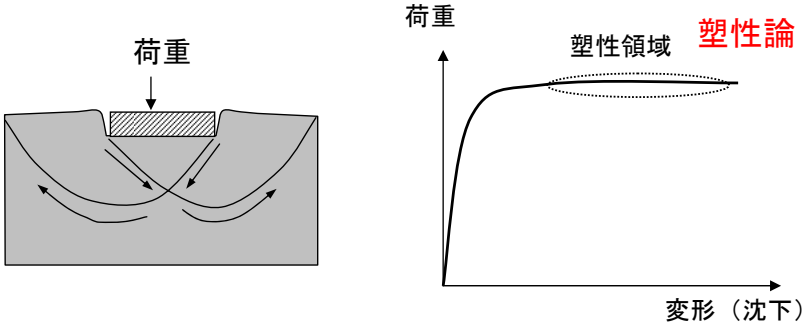
変形から破壊まで連続している



圧密による効果も同時に考慮する。

教科書の土質力学

塑性論による破壊解析



極限定理：　弾塑性体の塑性崩壊状態，すなわち極限荷重系と崩壊機構（メカニズム）は途中の経路によらず最終の荷重形態のみによって決定される。

↓

要するに，途中の細かいこと（どれだけ変形したか）は分からなくても，塑性論だけで最終的な強度や壊れ方だけは知ることができる。

教科書の土質力学

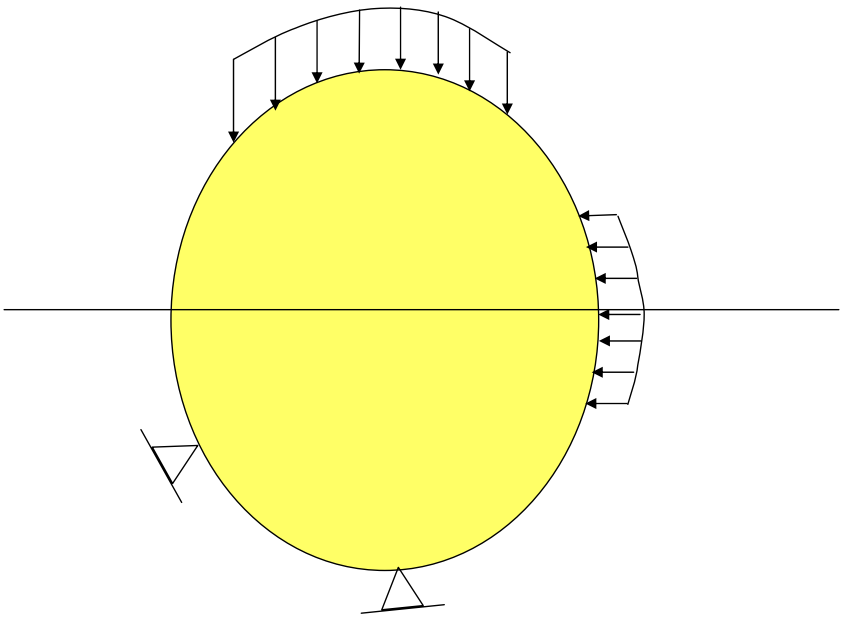
土の性質，分類
締固め

透　水　：　骨格の変形は無視
圧　密　：　弾性圧密理論，一部弾塑性？
せん断　：　塑性理論　　強度定数c, φが中心

土　圧　：　塑性理論
支持力　：　塑性理論
斜面安定：　塑性理論
地盤内応力と変形：弾性理論

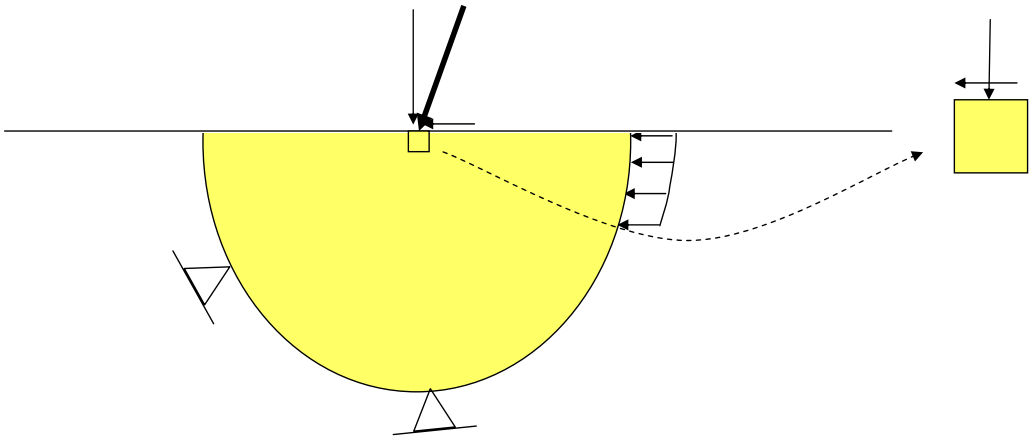
破壊時のみをターゲット
（安全率，破壊荷重）

力のつり合いと内部の応力状態

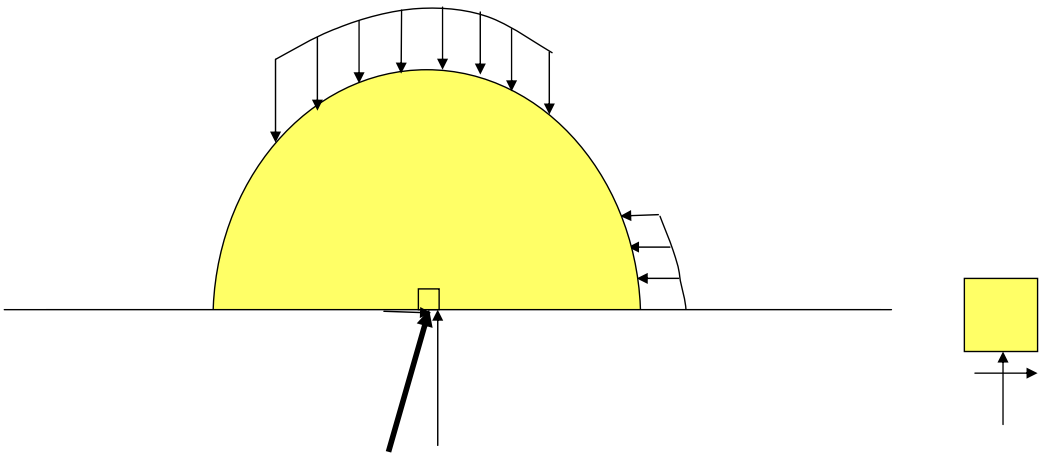


力のつり合いと内部の応力状態

単位面積あたりの力（応力ベクトル）

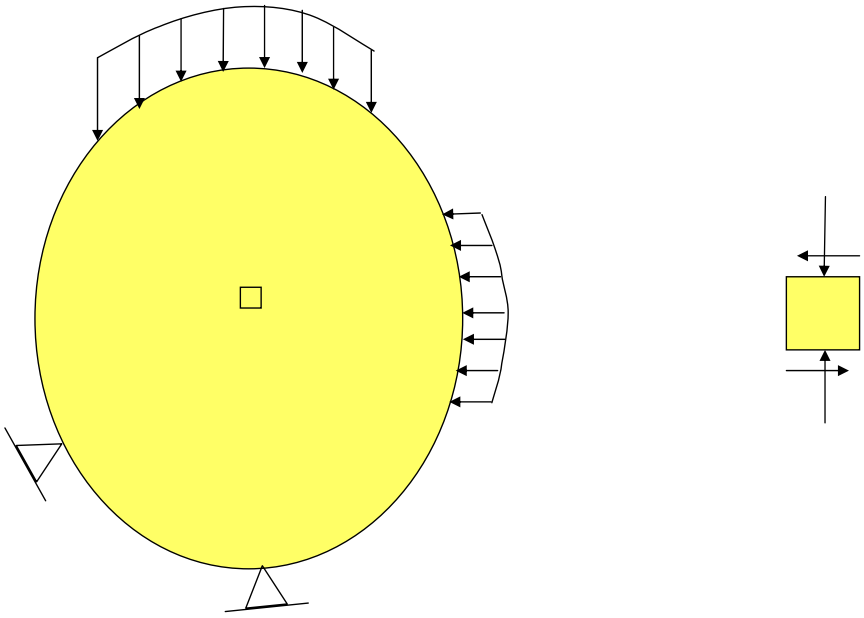


力のつり合いと内部の応力状態

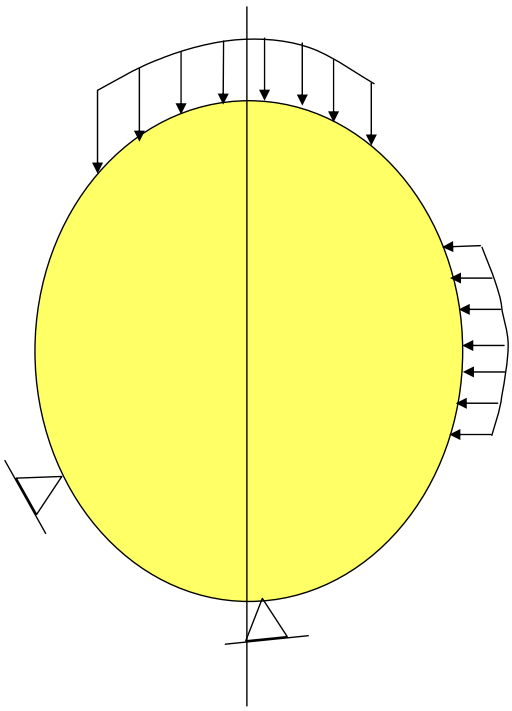


（反作用として存在する）単位面積あたりの力

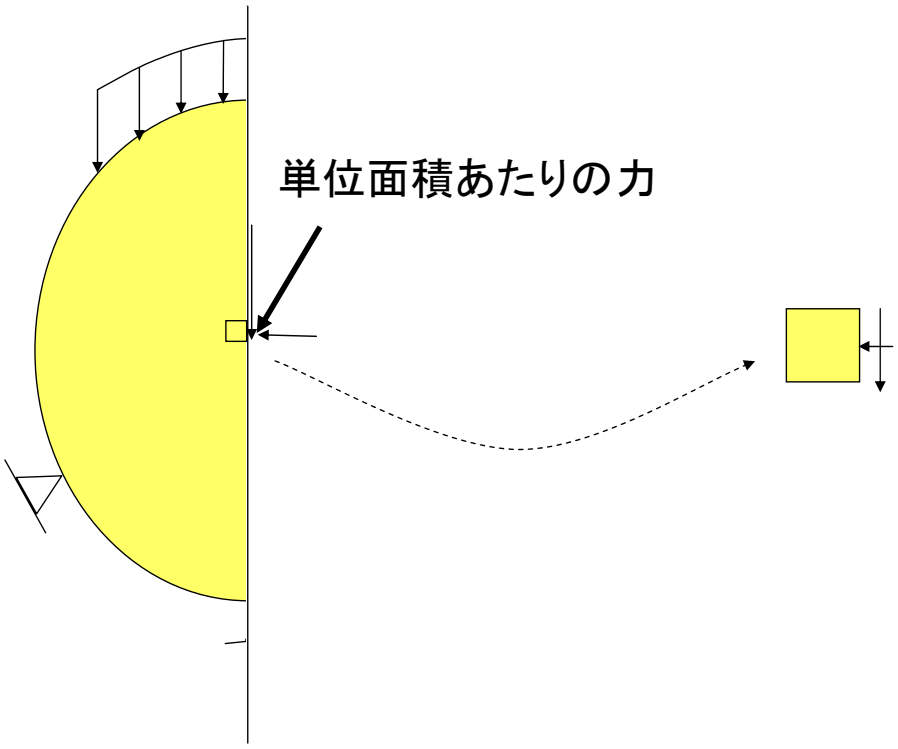
力のつり合いと内部の応力状態



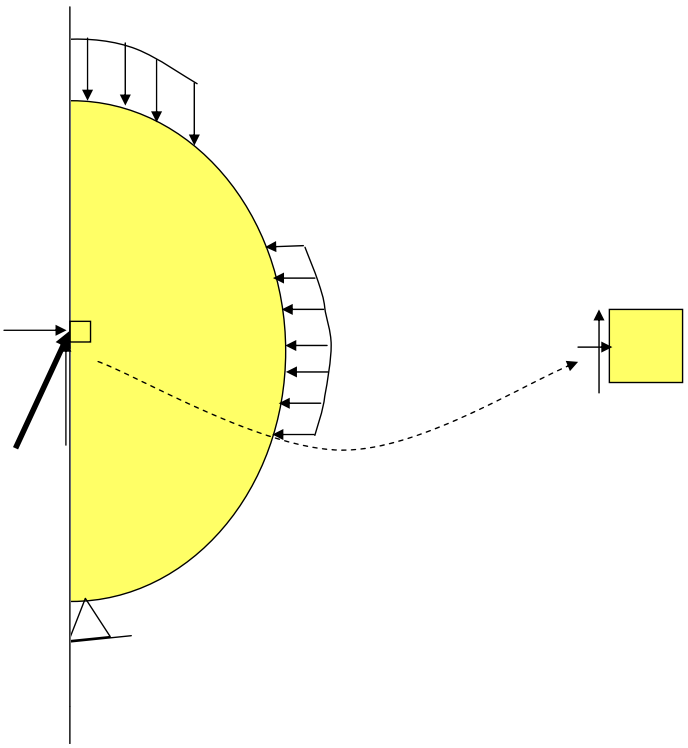
力のつり合いと内部の応力状態



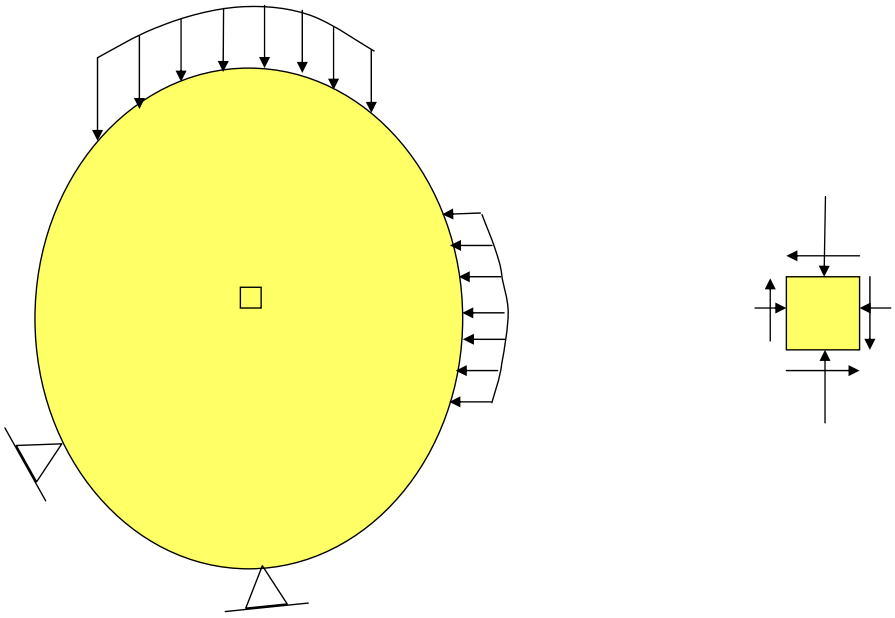
力のつり合いと内部の応力状態



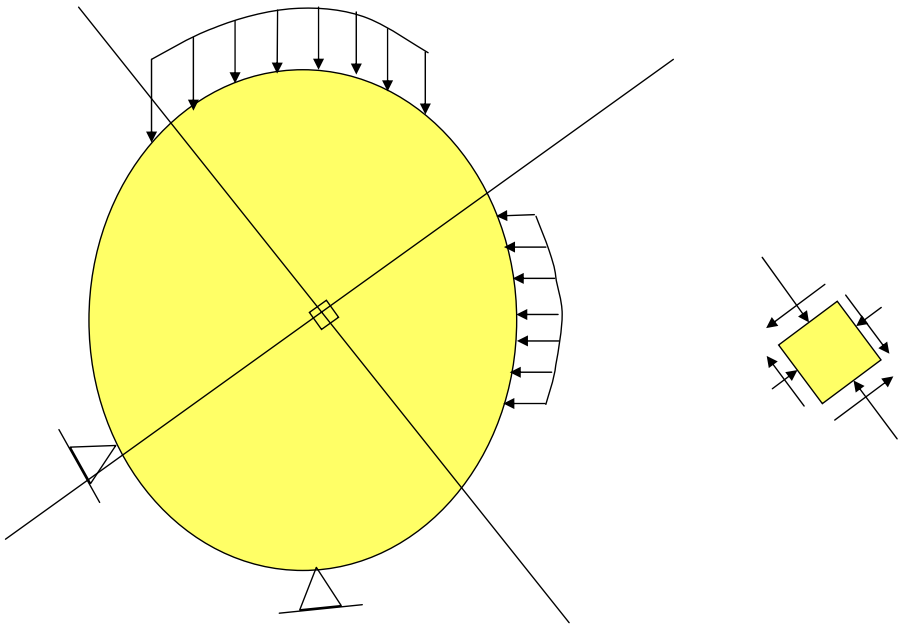
力のつり合いと内部の応力状態



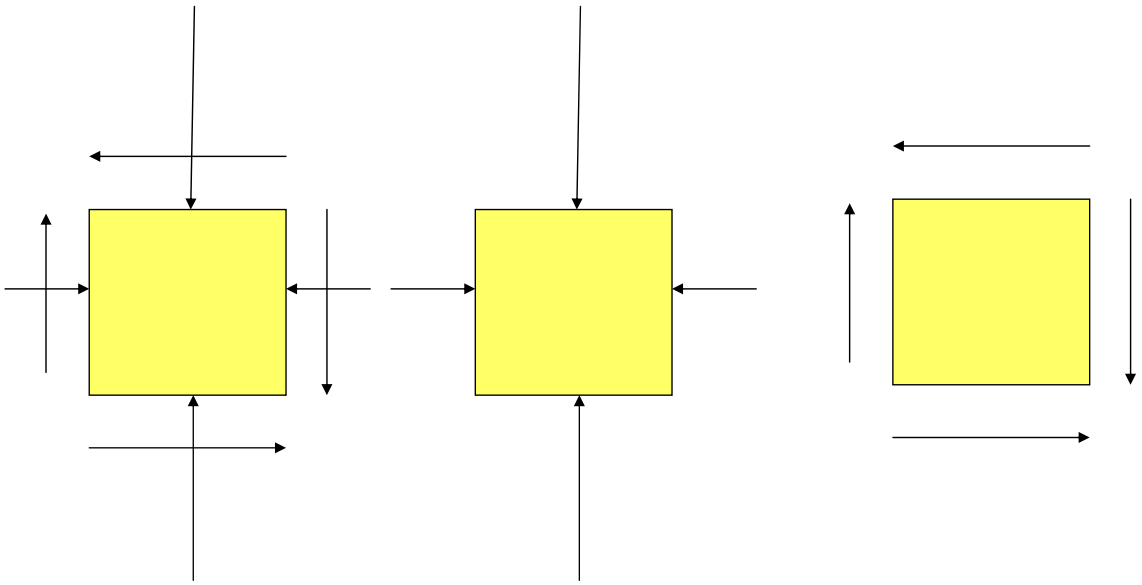
力のつり合いと内部の応力状態



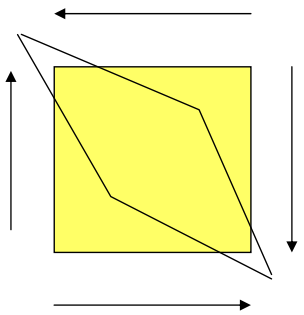
力のつり合いと内部の応力状態



力のつり合いと内部の応力状態

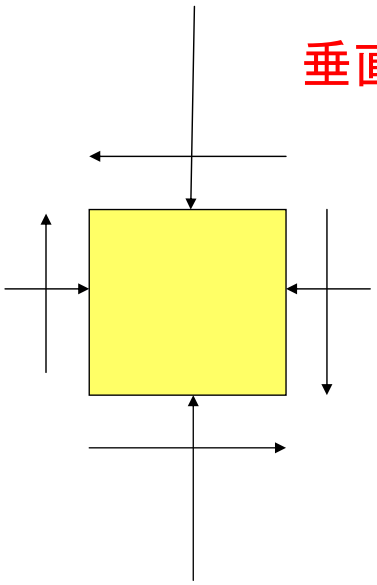


垂直応力　　せん断応力



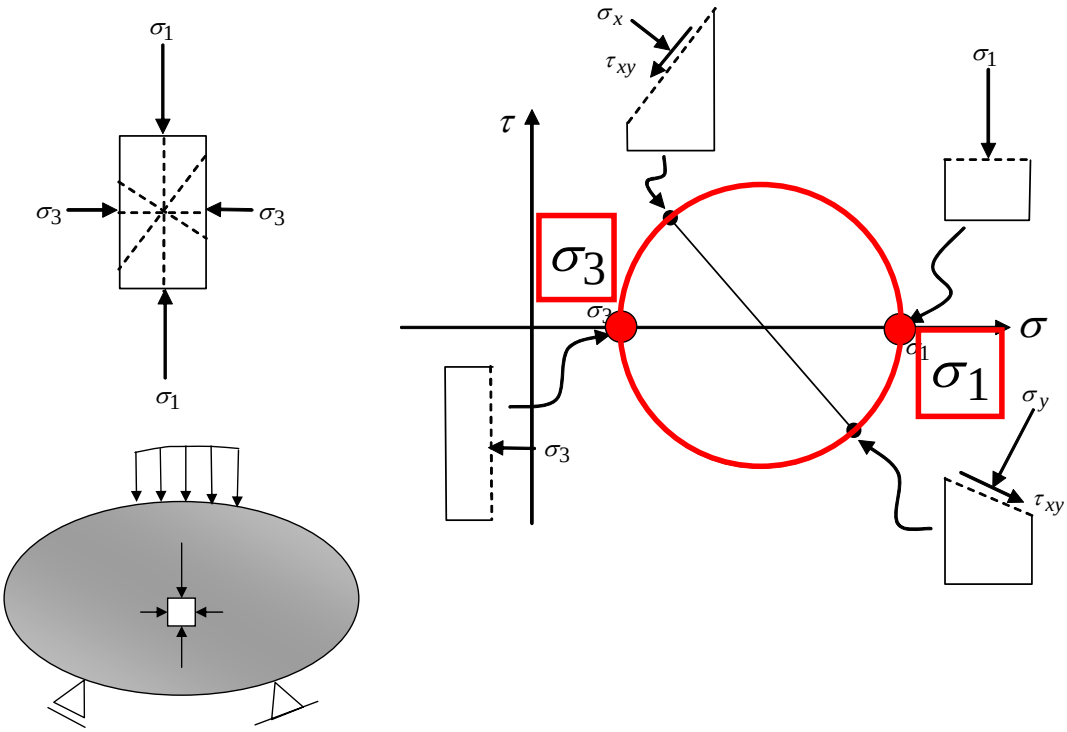
せん断応力

力のつり合いと内部の応力状態



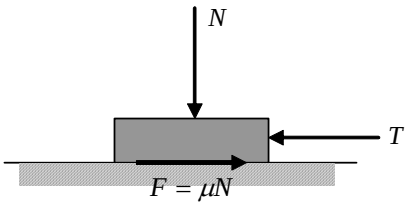
垂直応力とせん断応力との比が重要！

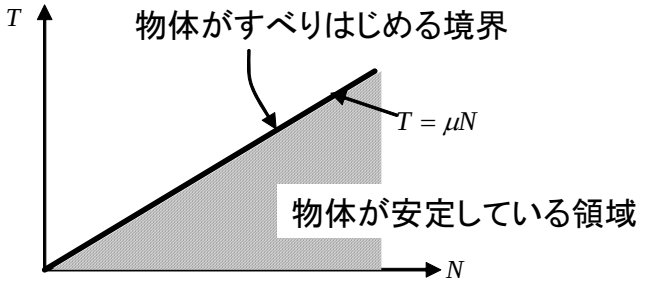
異なる切り口における土の応力状態とモールの応力円



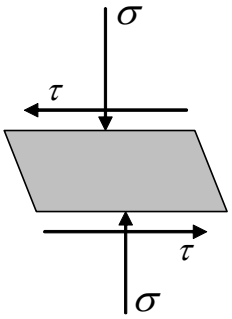
摩擦性材料としての土

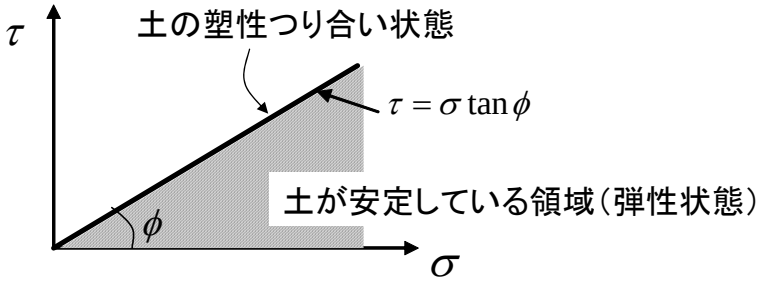
一般の摩擦則



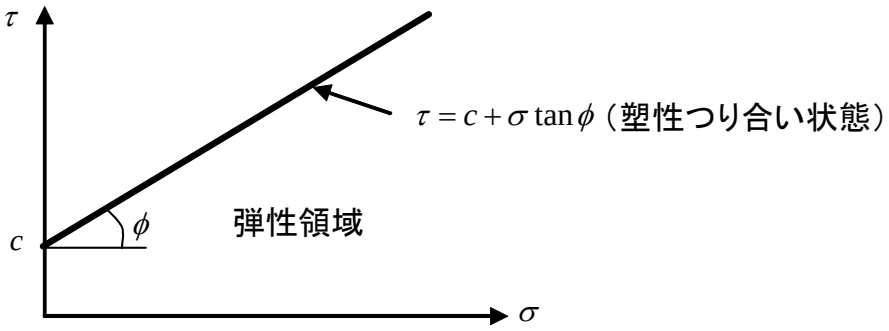


土の摩擦則



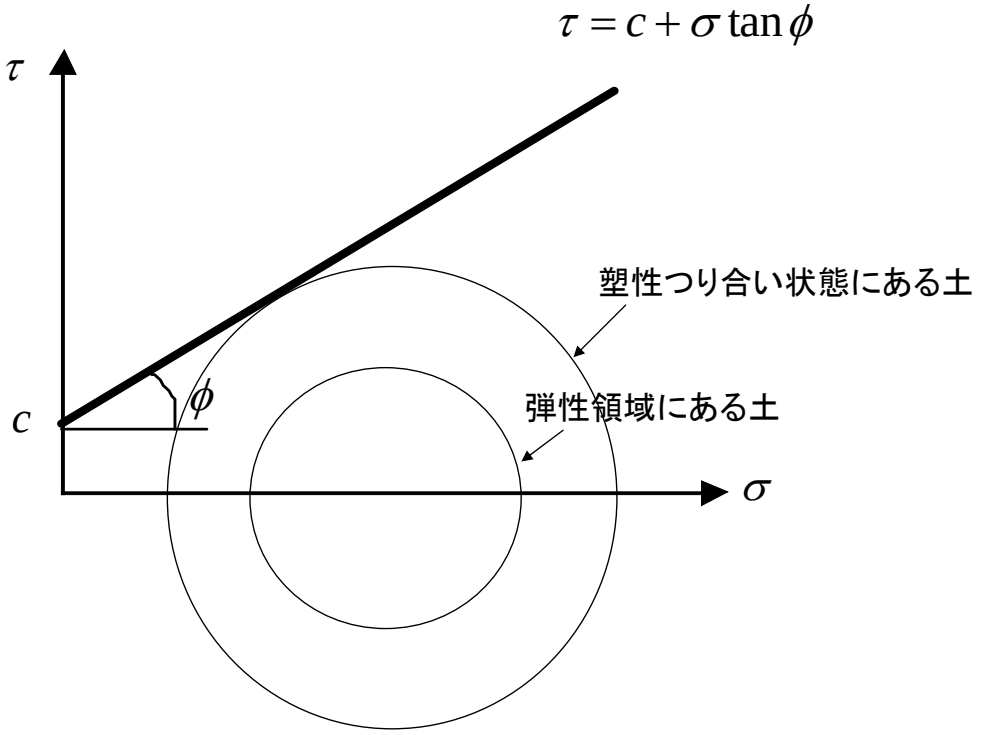


クーロンの破壊規準



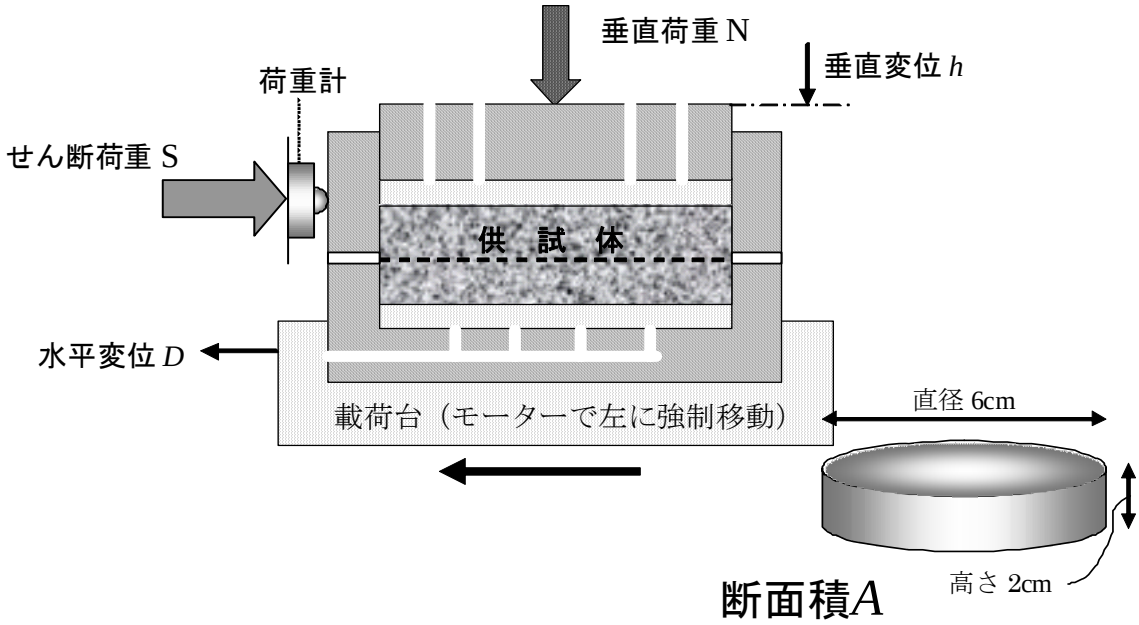
c：粘着力
　セメンテーション，サクション，インターロッキング，過圧密履歴・・・

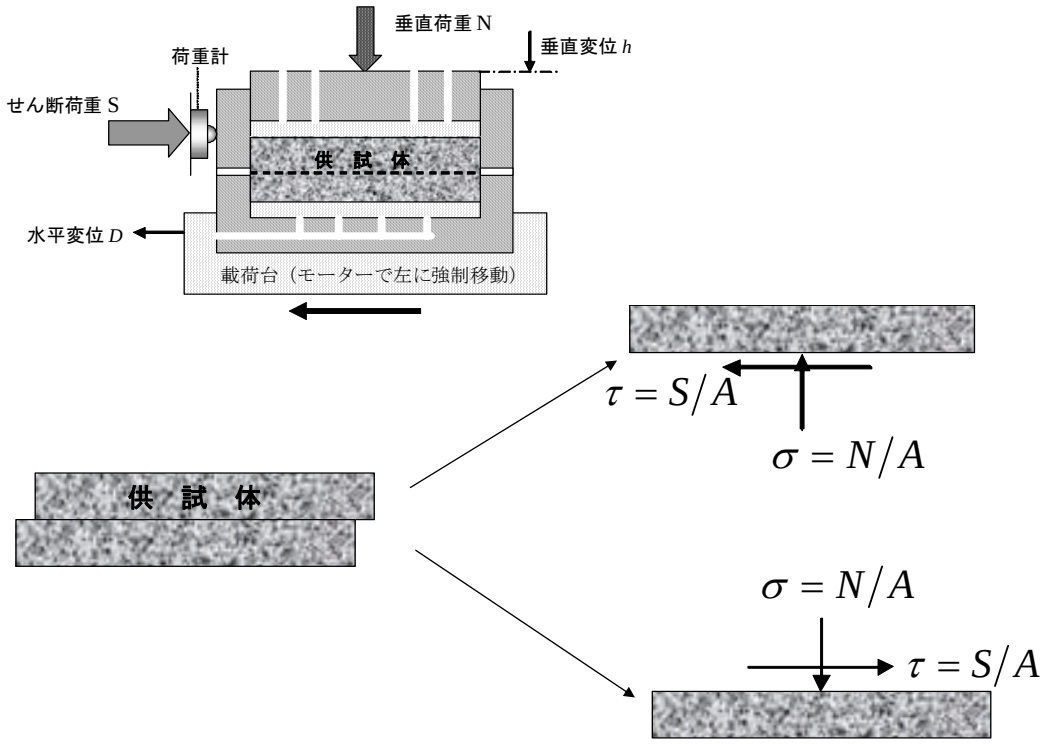
φ：せん断抵抗角（内部摩擦角）
　砂の場合は直感的な摩擦性
　粘土の場合は圧密による間隙比の減少が主因となることに注意



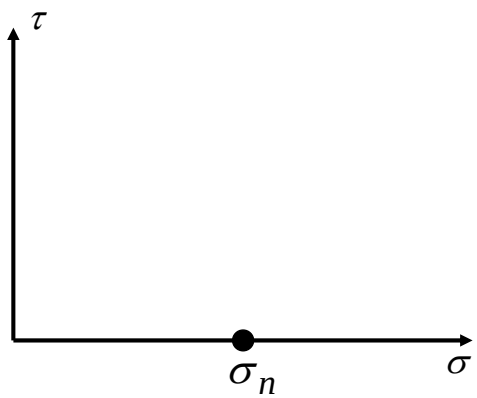
土の強度定数c, ϕを求めるための試験

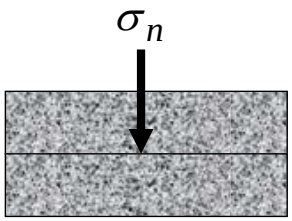
一面せん断試験

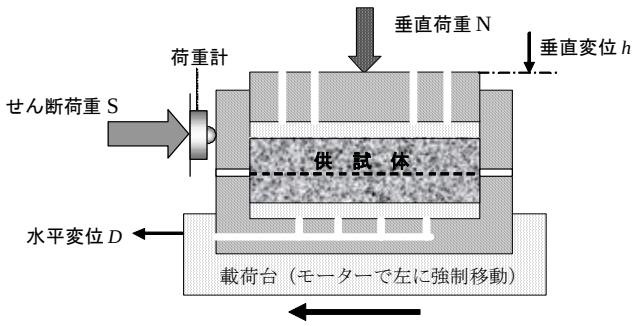




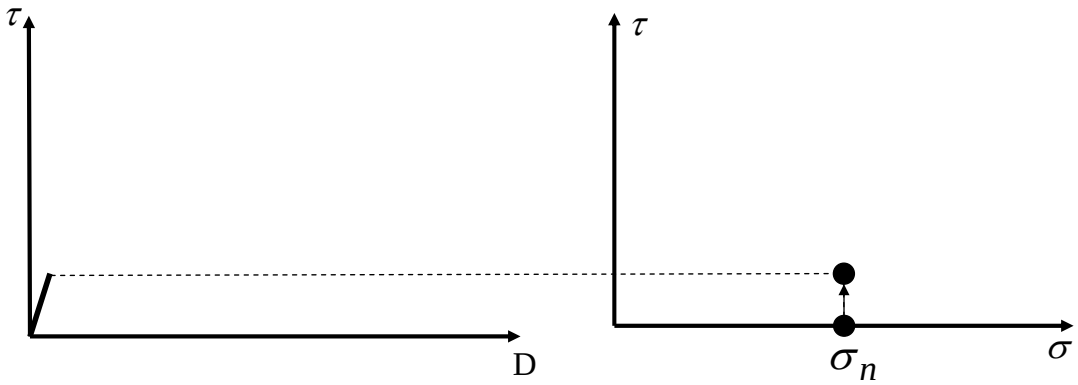
一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

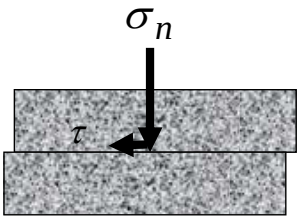


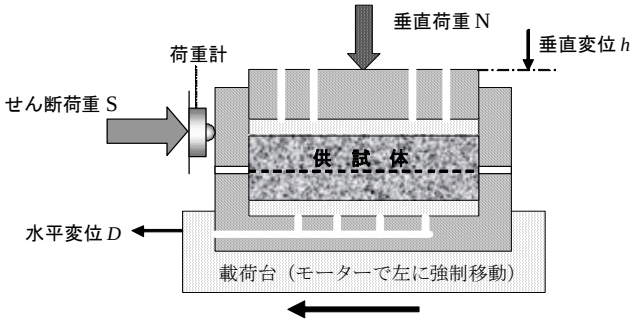




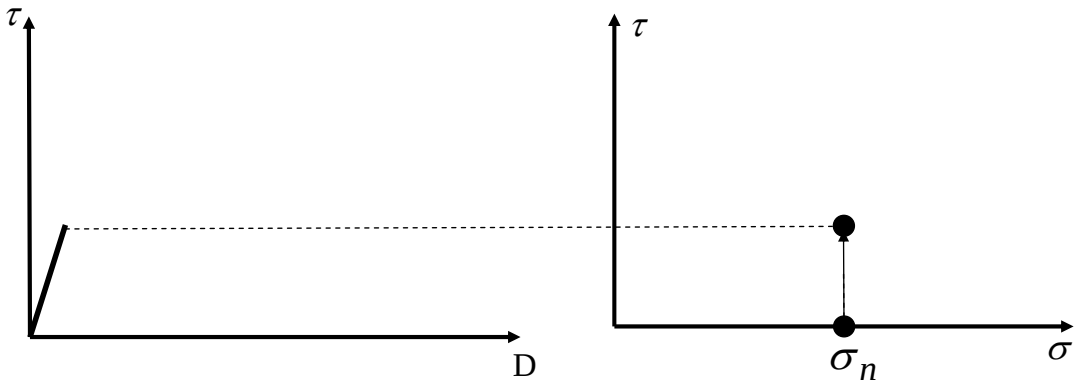
一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

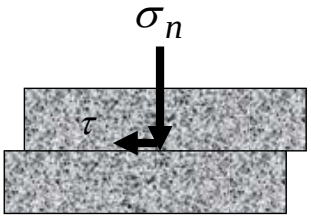


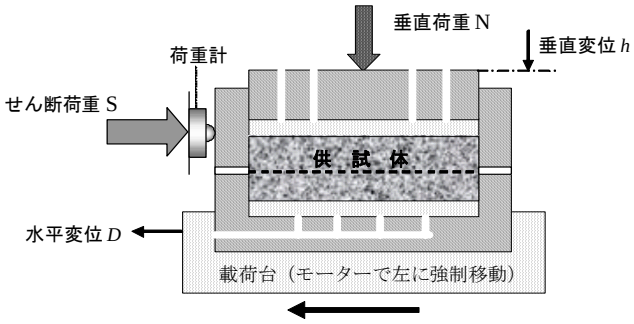




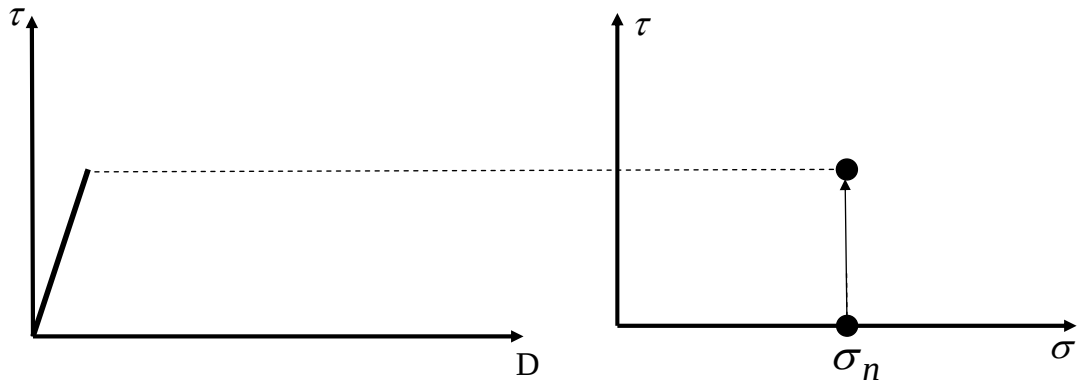
一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

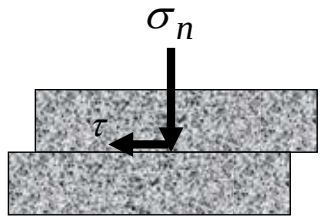


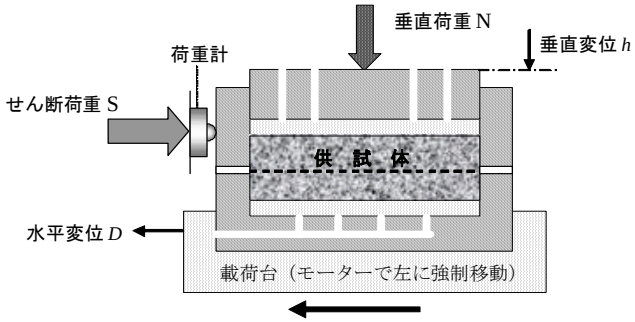




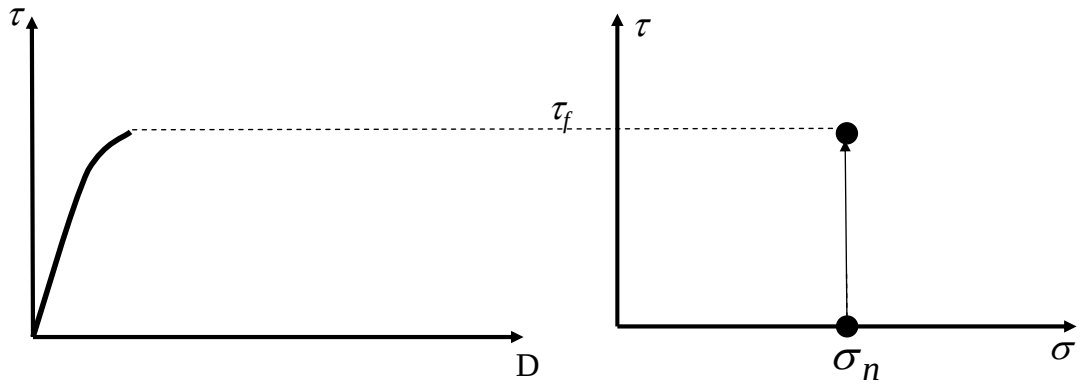
一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

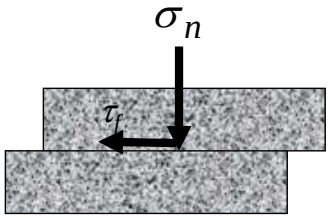


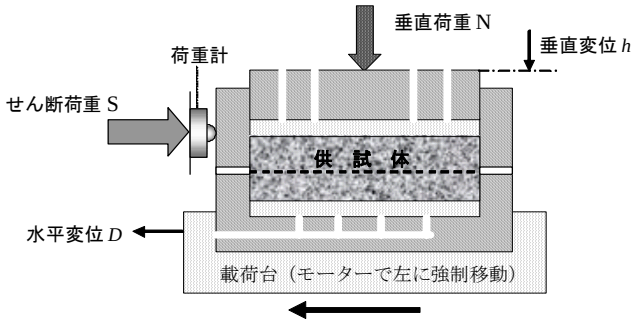




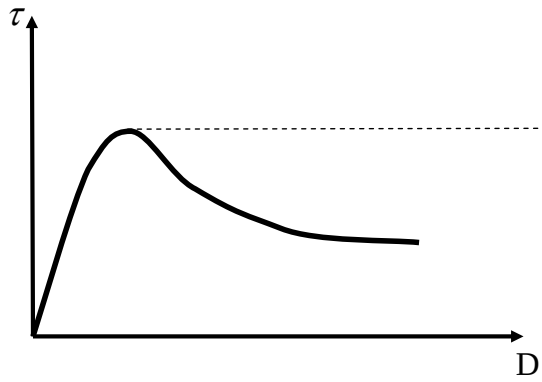
一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

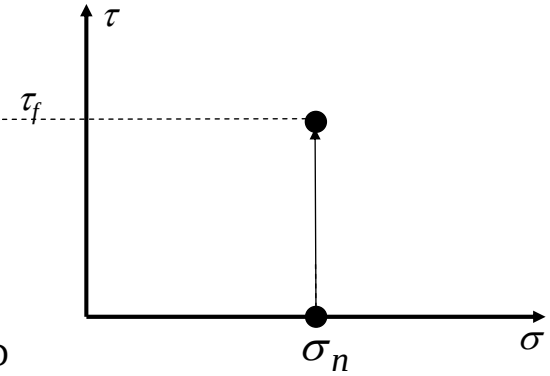


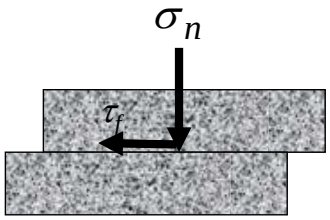


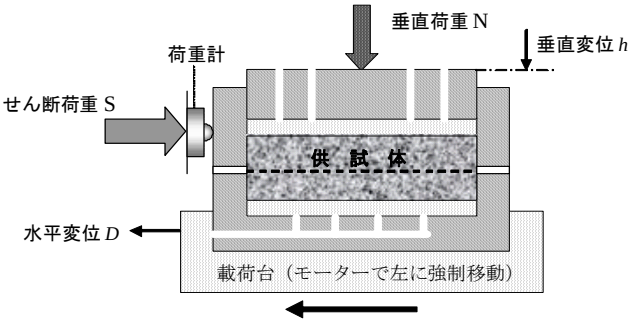


一面せん断試験におけるせん断中の応力状態の変化

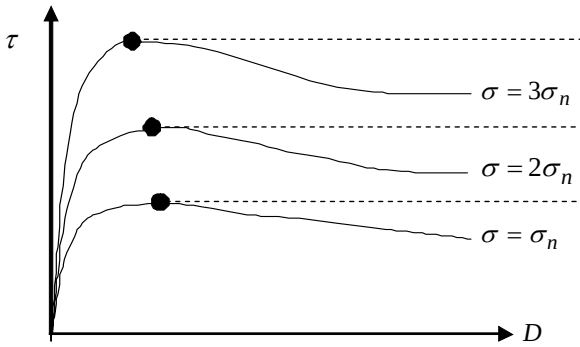


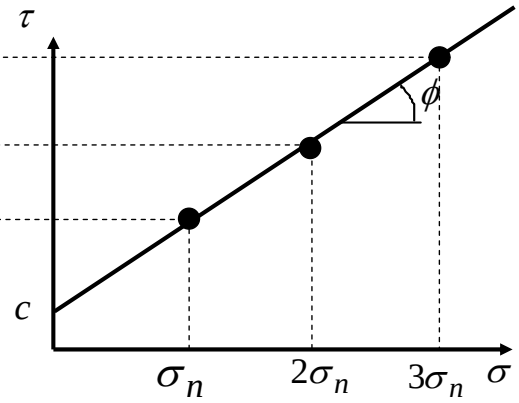


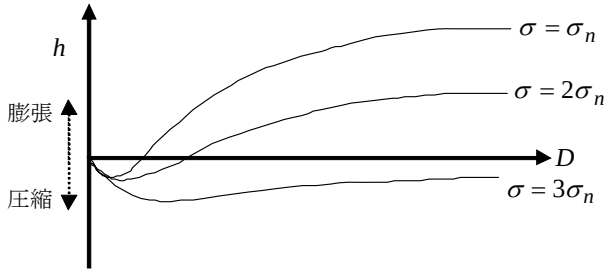


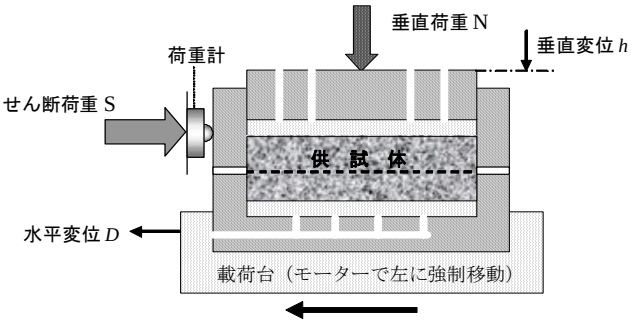


一面せん断試験

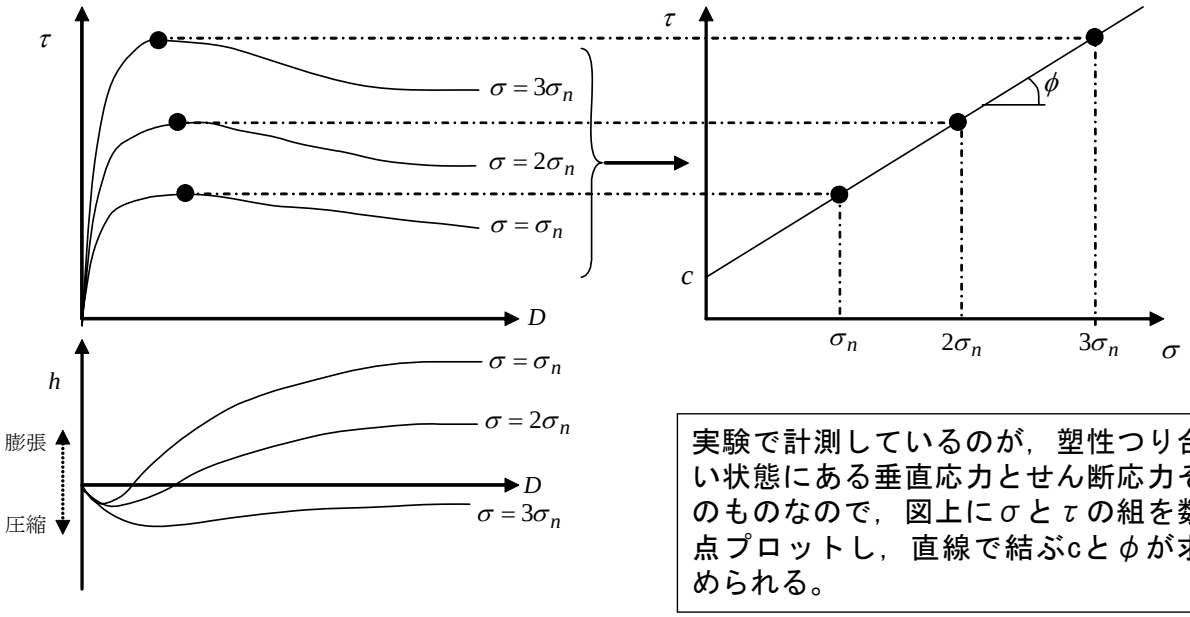








一面せん断試験

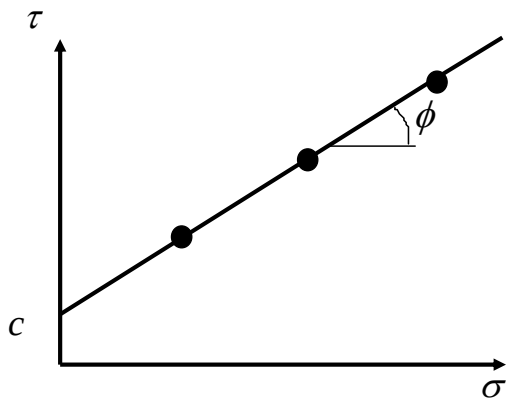


実験で計測しているのが，塑性つり合い状態にある垂直応力とせん断応力そのものなので，図上にσとτの組を数点プロットし，直線で結ぶcとϕが求められる。

ダイレイタンシーの傾向（圧縮するか膨張するか）程度は分かるが，
基本的には，各垂直応力での最大せん断応力しか情報は得られない。

境界条件が複雑すぎて，破壊に至るまでのひずみや応力の把握は困難
（ただし，定圧試験の話）

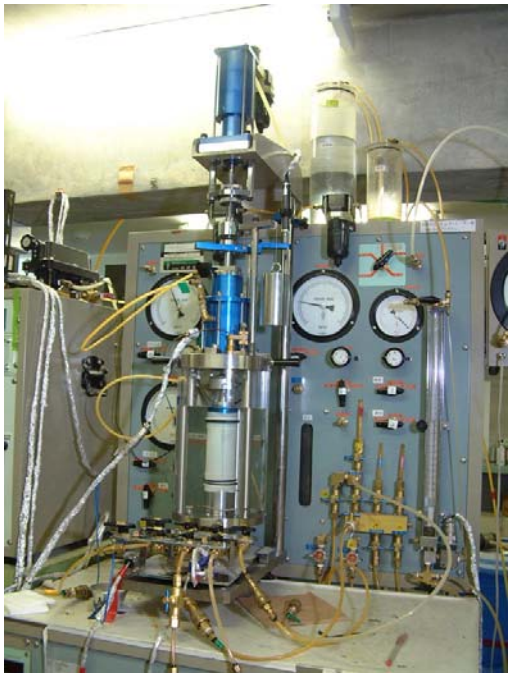
クーロン（Coulomb）の破壊規準



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

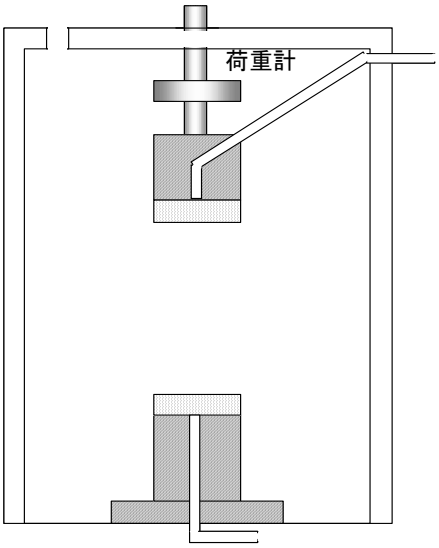
土の強度定数c, φを求めるための試験

三軸圧縮試験



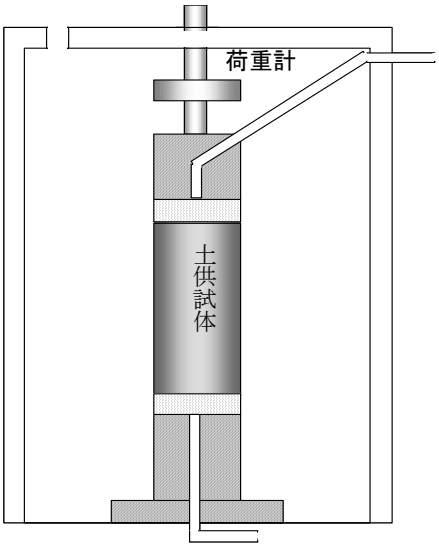
三軸圧縮試験

供試体の設置



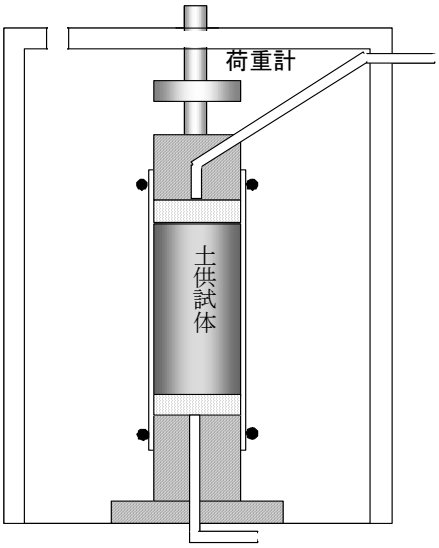
三軸圧縮試験

供試体の設置



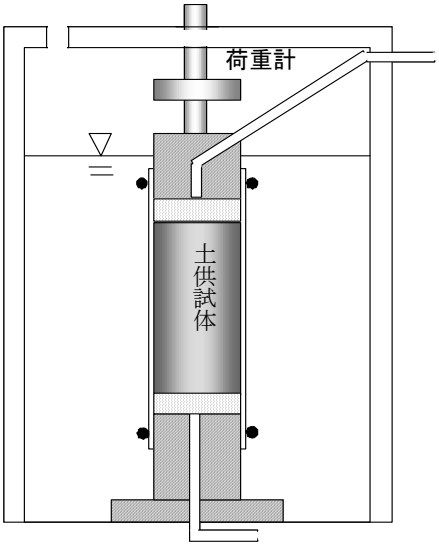
三軸圧縮試験

ゴムスリーブで
供試体を覆う



三軸圧縮試験

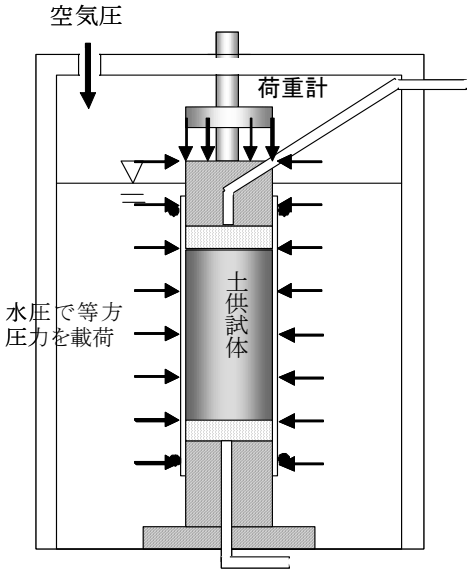
圧力室に水を入れる



三軸圧縮試験

水圧を増加させて
供試体に等方的な
圧力を載荷する

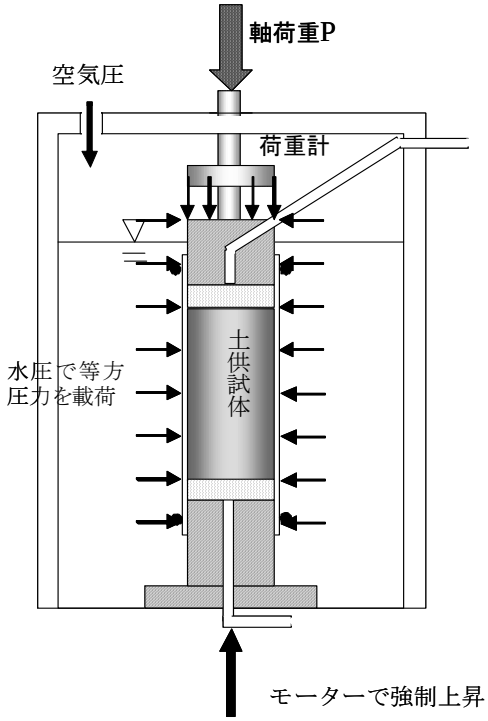
圧密過程



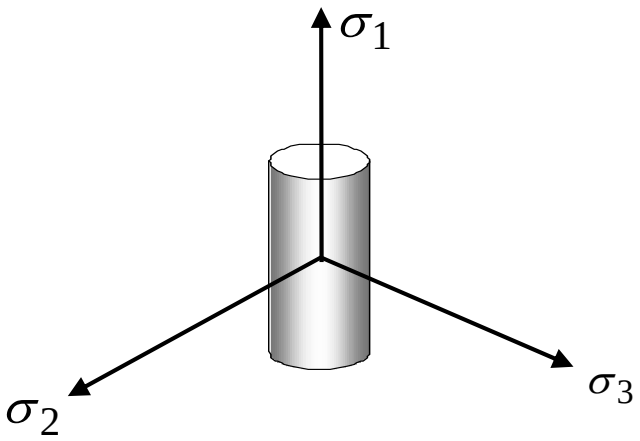
三軸圧縮試験

軸圧を増加させて
土が破壊するまで
載荷する

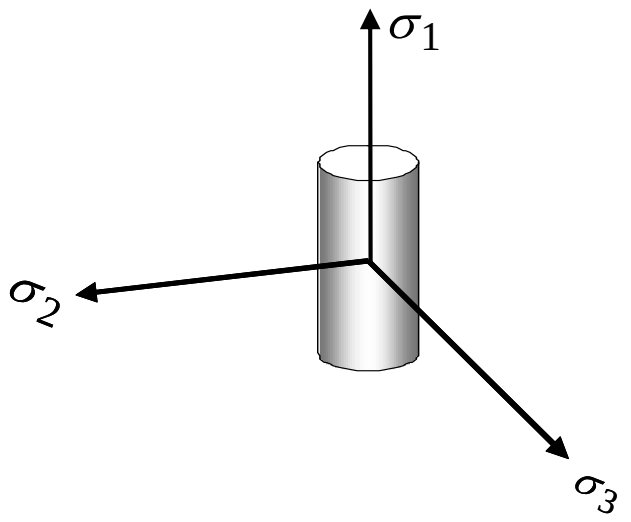
せん断過程



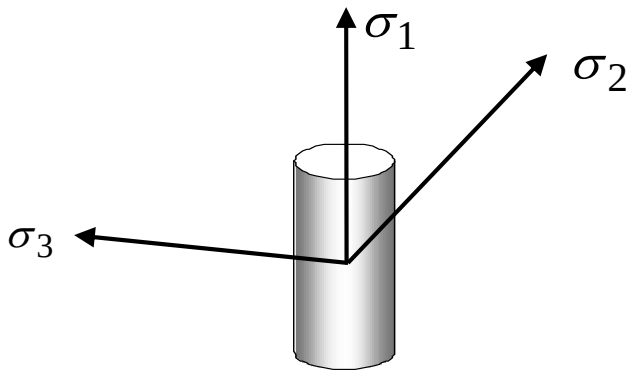
ところで三軸とは？



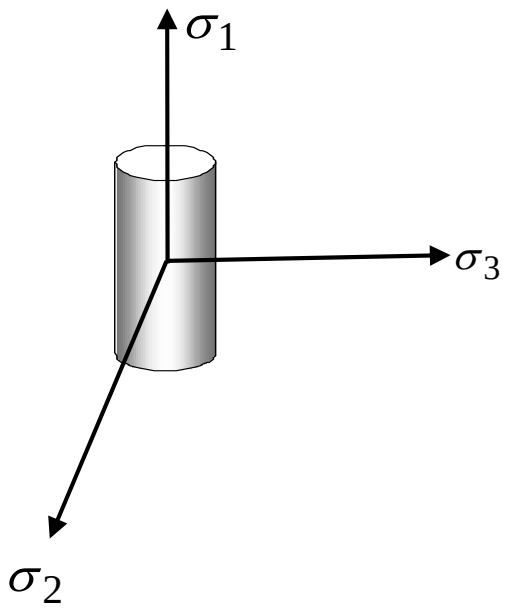
ところで三軸とは？



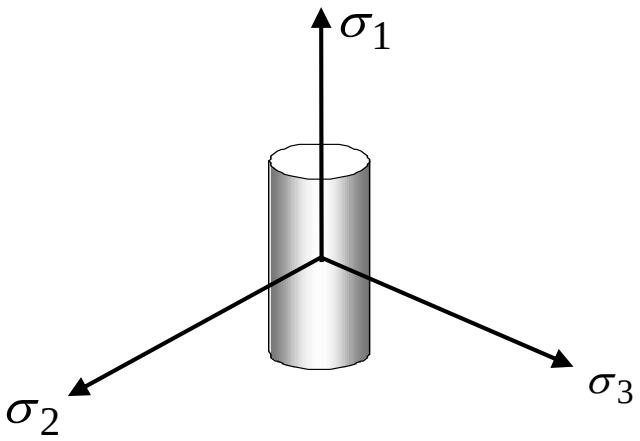
ところで三軸とは？



ところで三軸とは？



ところで三軸とは？

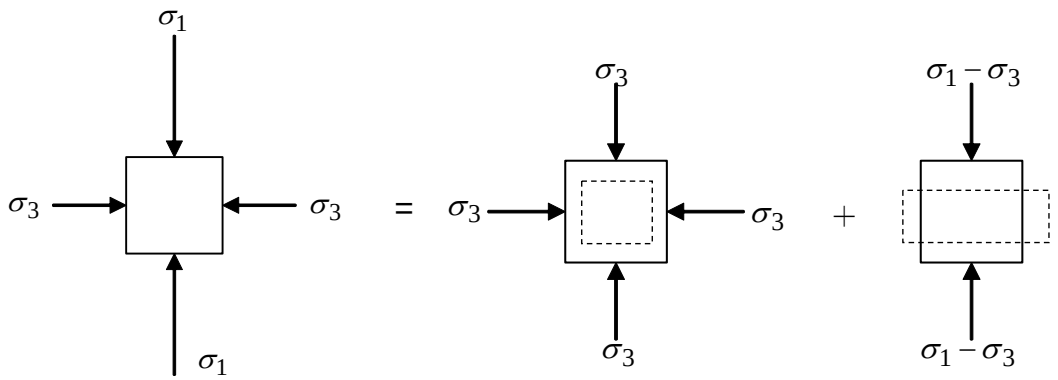


三軸圧縮試験では,

σ_1 （最大主応力）と

$\sigma_2 = \sigma_3$ （最小主応力）を載荷する。

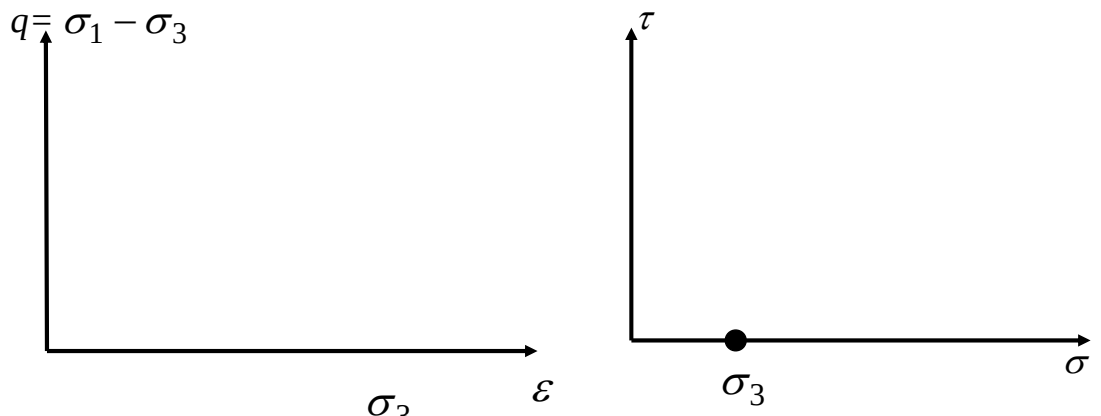
三軸（圧縮）試験において供試体に作用する応力

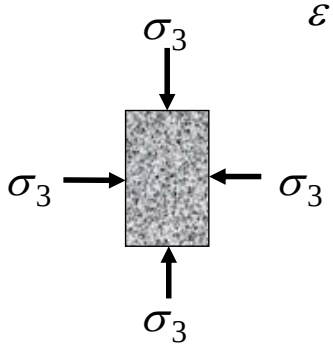


三軸試験中の応力状態　　圧密過程で作用する応力（圧密過程）　　せん断過程で作用する応力（せん断過程）

省略しているが，画面の手前から奥へσ_3が作用していることに注意する

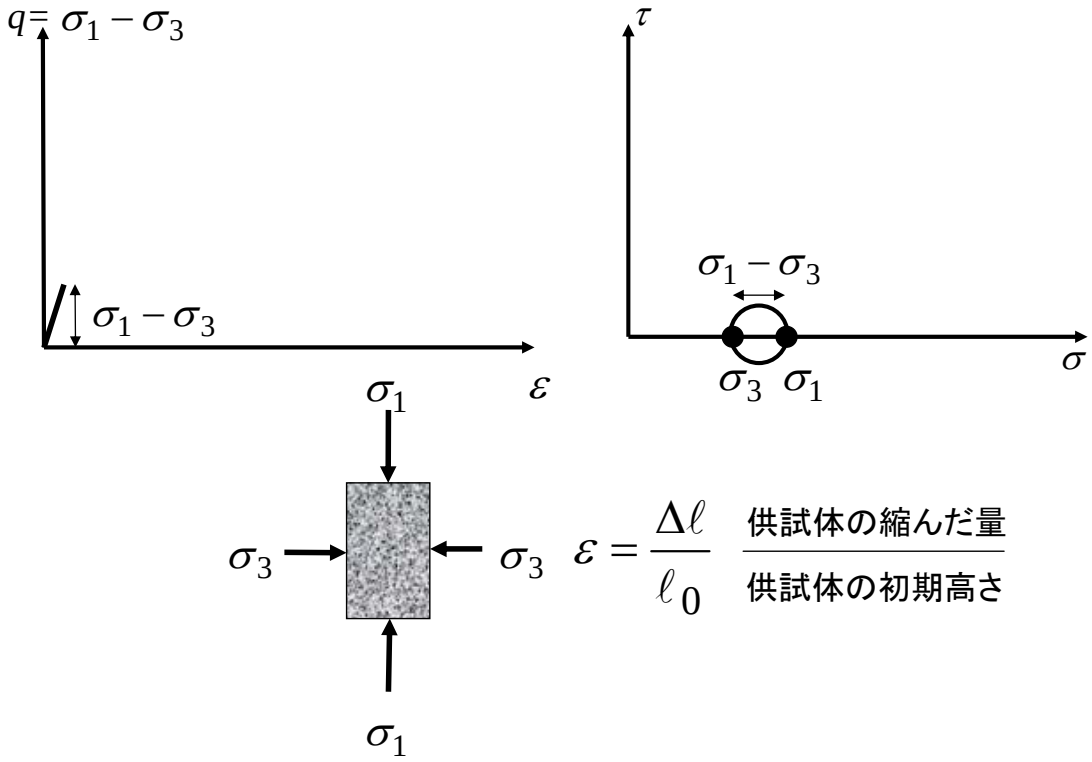
三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化





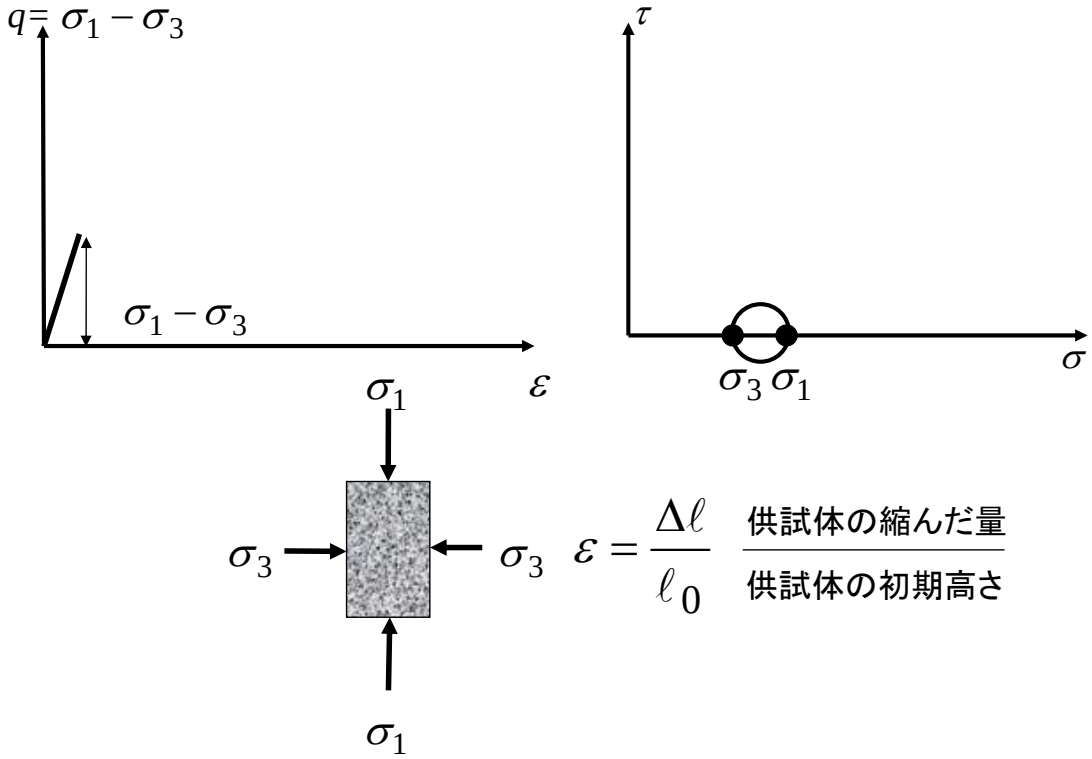
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



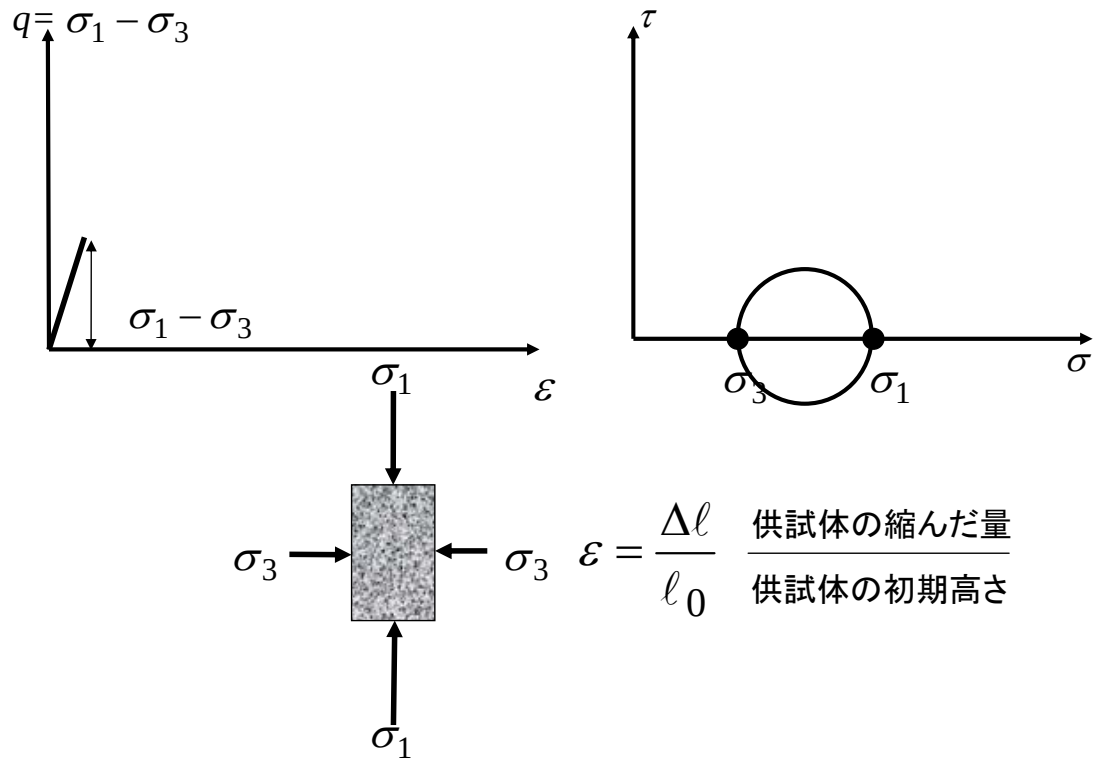
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



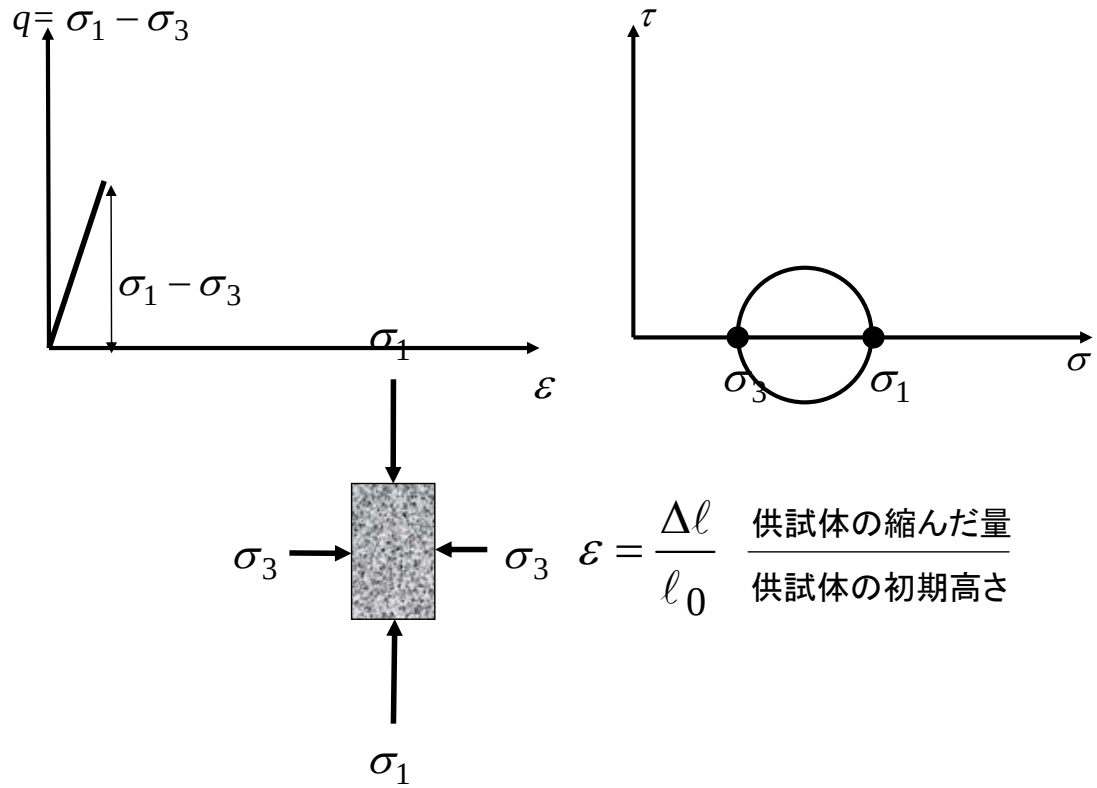
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



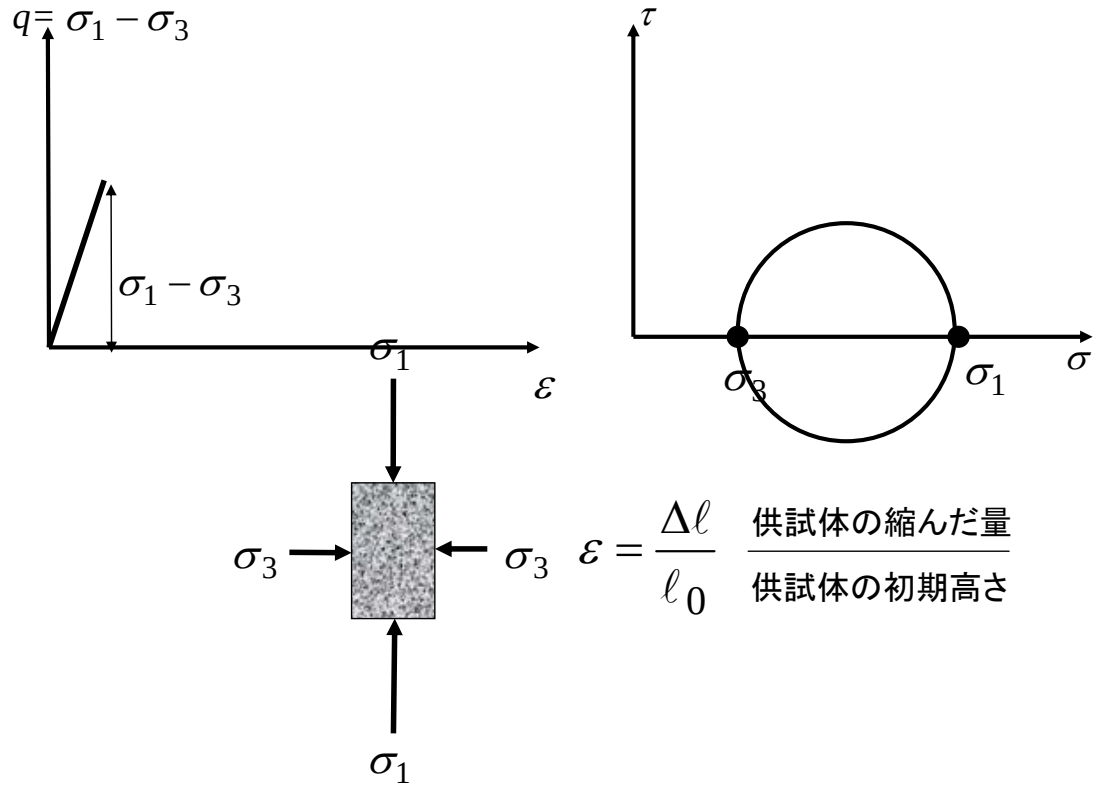
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



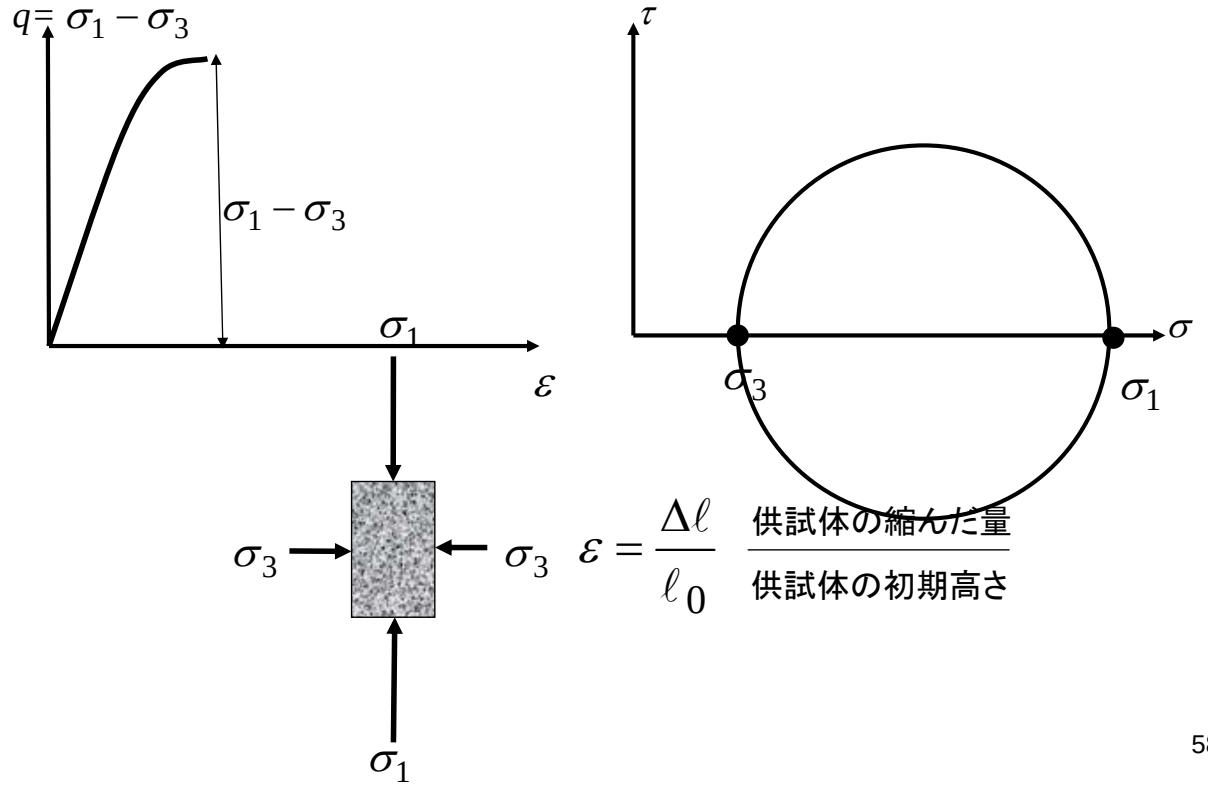
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



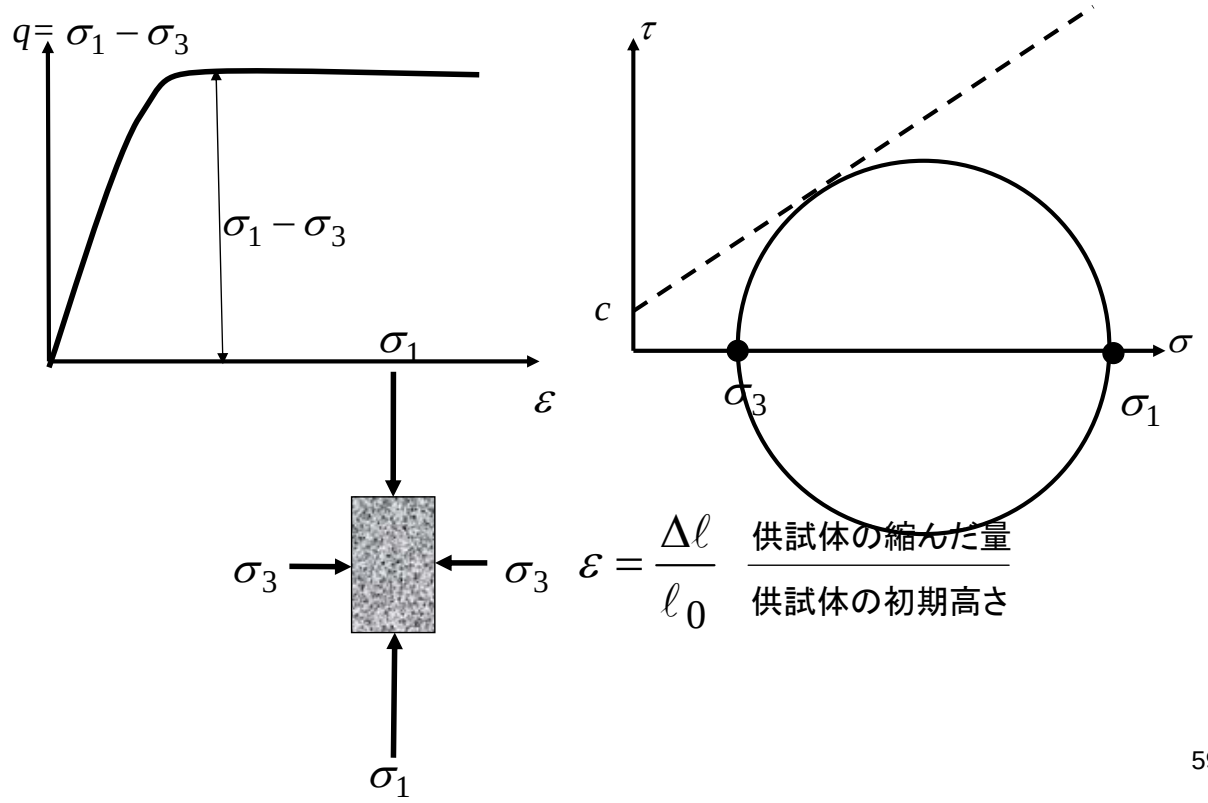
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

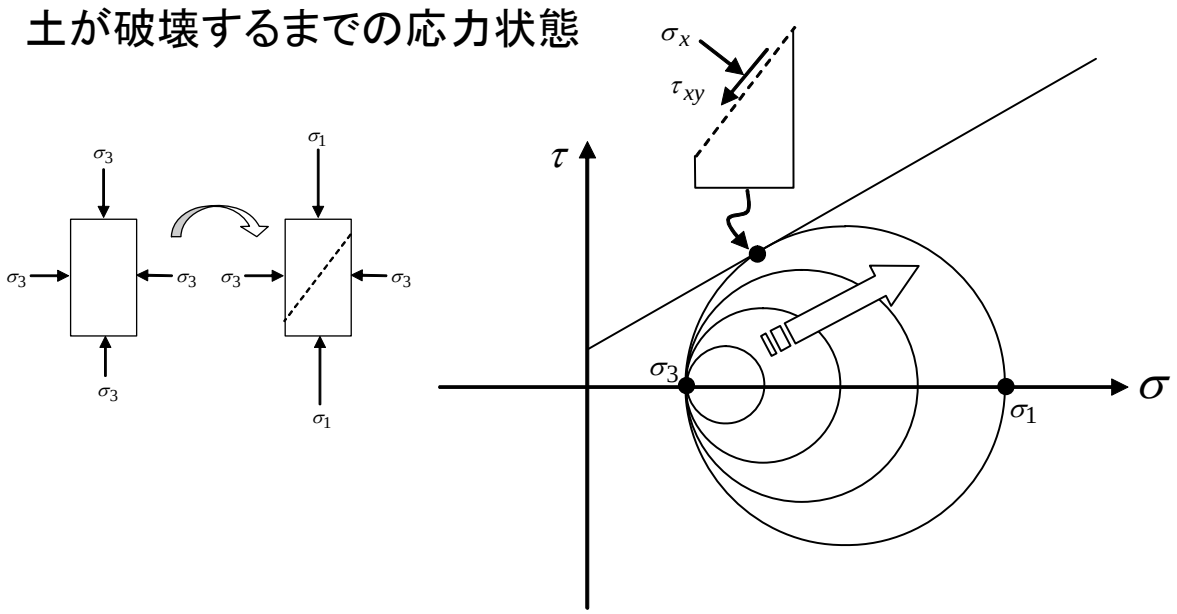
三軸圧縮試験におけるせん断中の応力状態の変化



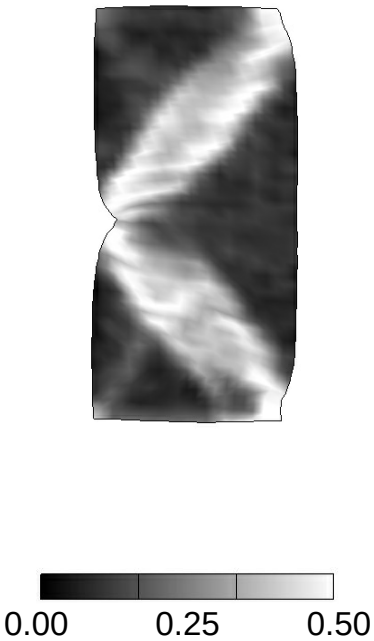
$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \quad \frac{\text{供試体の縮んだ量}}{\text{供試体の初期高さ}}$$

モール・クーロンの破壊規準と破壊面との関係

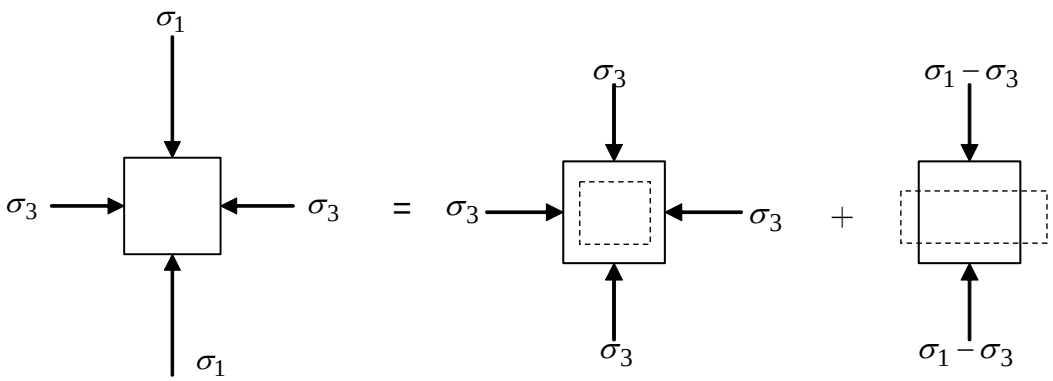
土が破壊するまでの応力状態



局所的な変形の様子



三軸（圧縮）試験において供試体に作用する応力

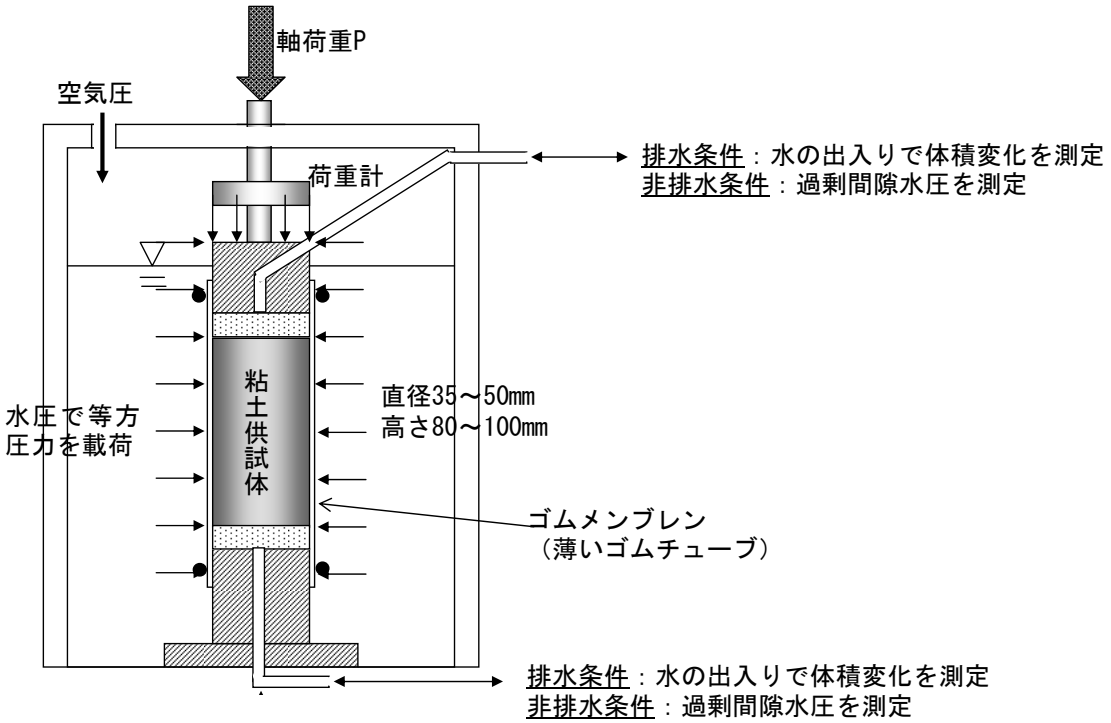


三軸試験中の応力状態　　圧密過程で作用する応力（圧密過程）　　せん断過程で作用する応力（せん断過程）

省略しているが，画面の手前から奥へσ_3が作用していることに注意する

土の強度定数c, φを求めるための試験

三軸試験



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

U: Unconsolidated

C: Consolidated

圧密過程

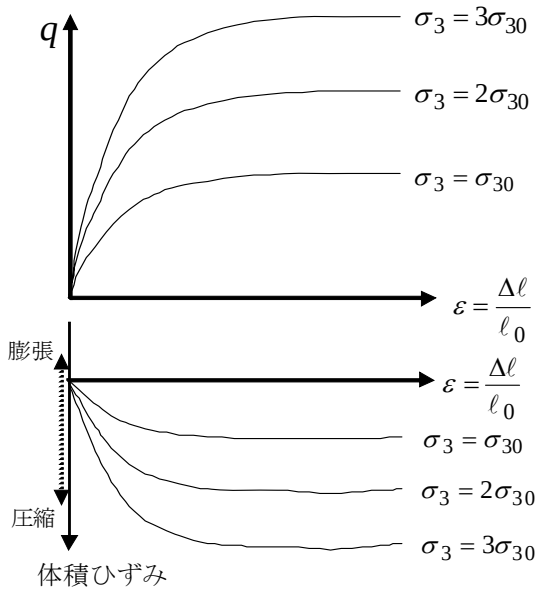
三軸圧縮試験の種類（3種類）

	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

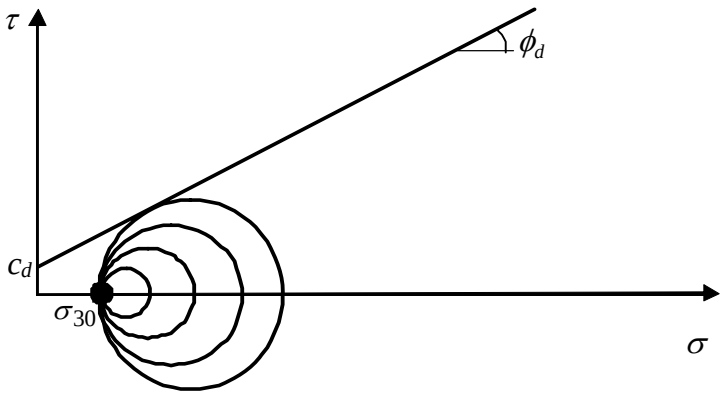
U: Unconsolidated　　**U: Undrained**

C: Consolidated　　**D: Drained**

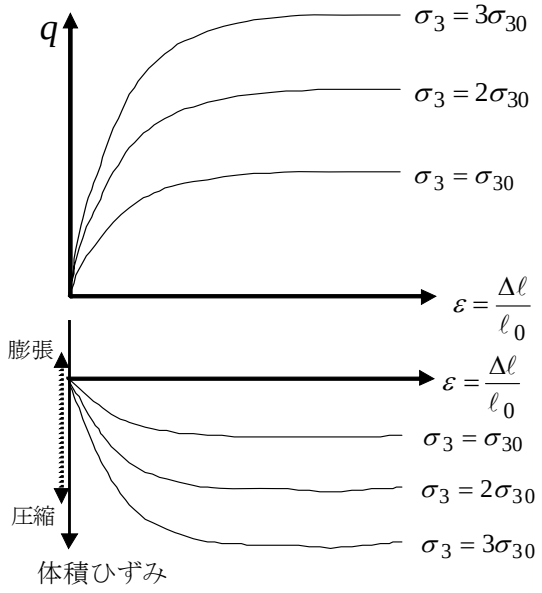
圧密過程　　**せん断過程**



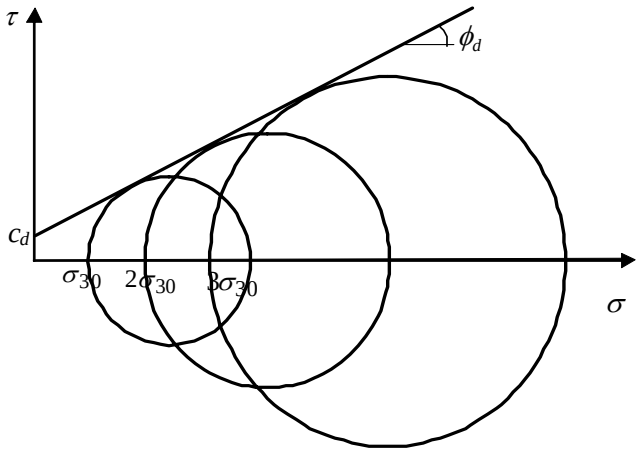
圧密排水せん断試験（CD試験）



載荷してから破壊に至るまでのモールの応力円の変化（CD試験）

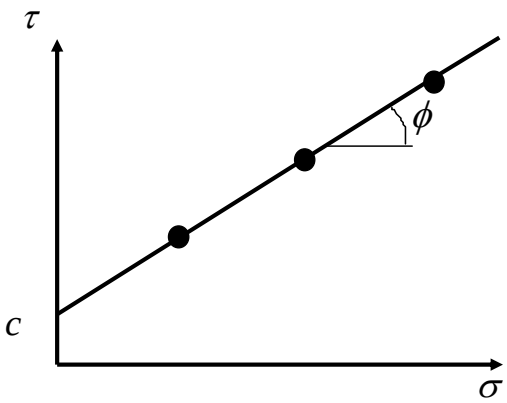


圧密排水せん断試験（CD試験）



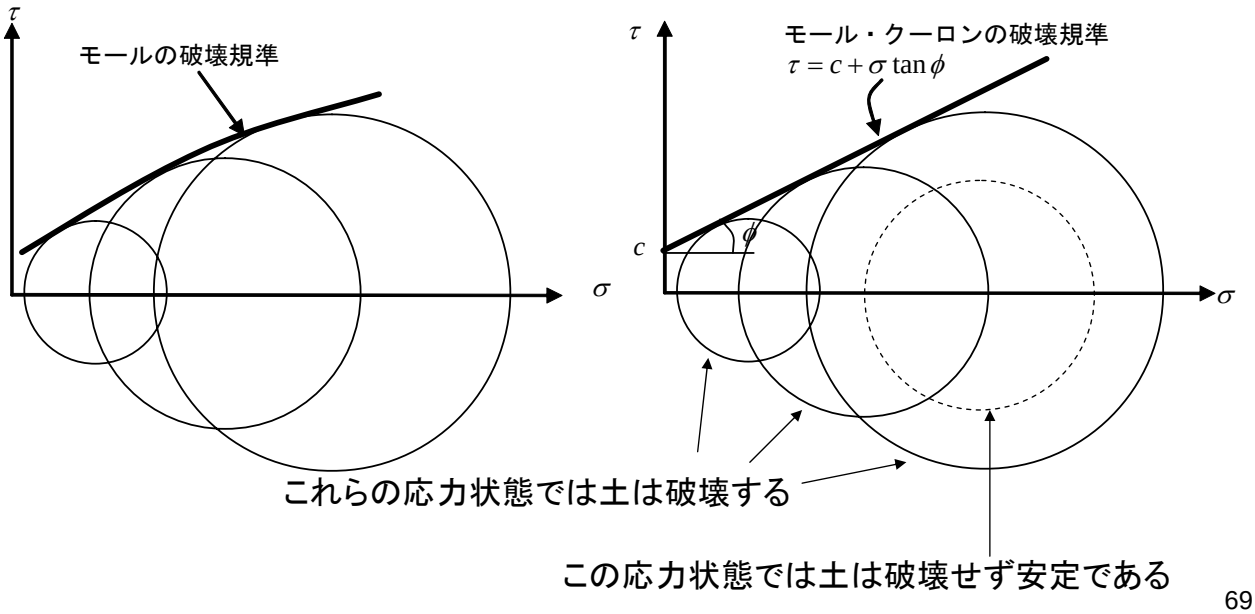
破壊時のモールの応力円（CD試験）

クーロン（Coulomb）の破壊規準

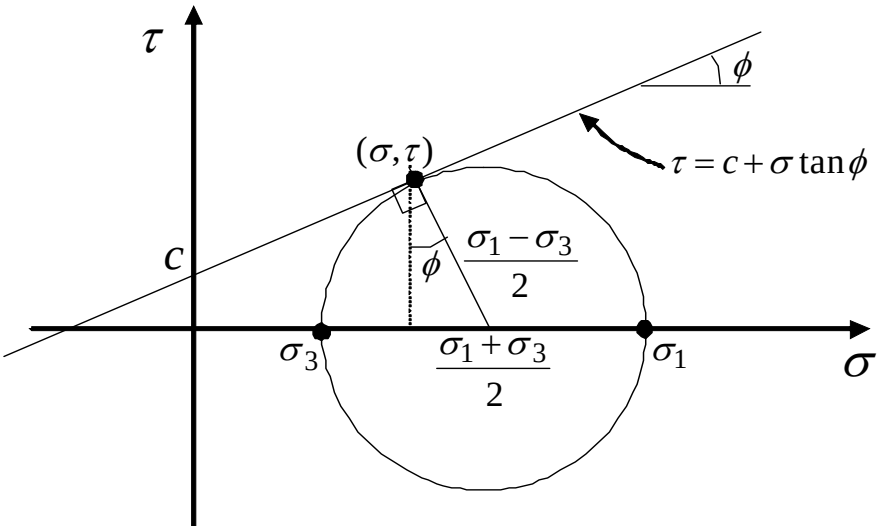


$$\tau = c + \sigma \tan\phi$$

モール・クーロンの破壊規準



モール・クーロンの破壊規準の主応力表示



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

モール・クーロンの破壊規準の主応力表示

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

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

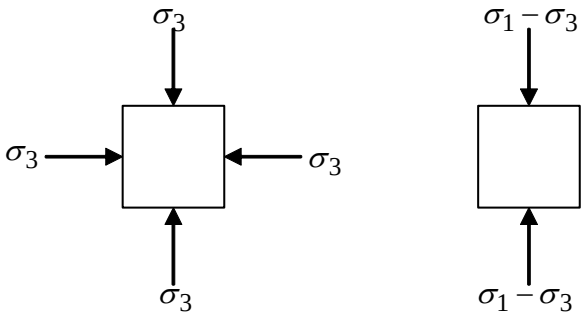
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c\cos\phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\sin\phi$$ または

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

三軸圧縮試験の種類（主に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
CD試験	圧密	排水せん断

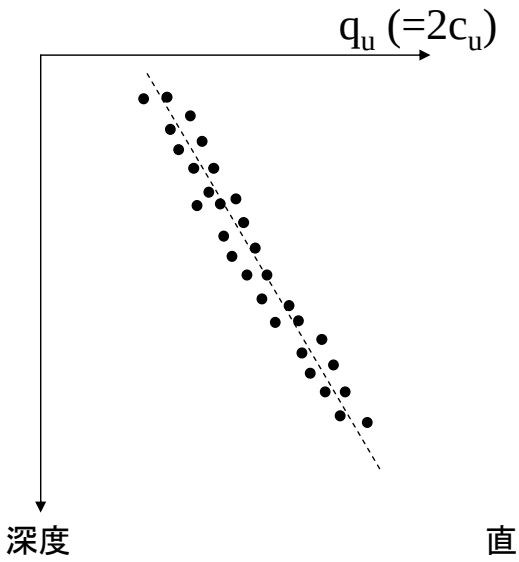
CU / CU

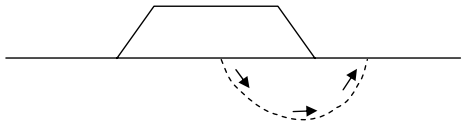


（圧密過程）　　（せん断過程）

それぞれの三軸試験の実務での利用法（粘土地盤を例として）

原地盤での非排水せん断強度の推定

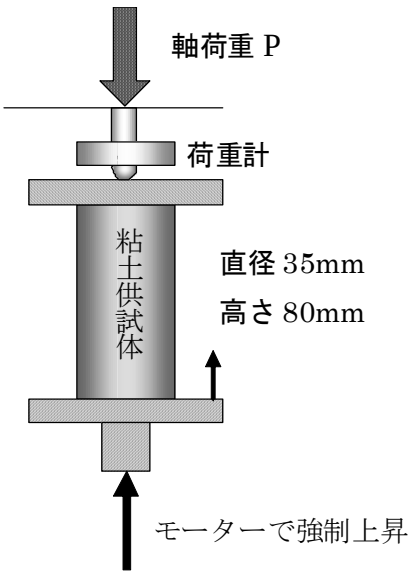


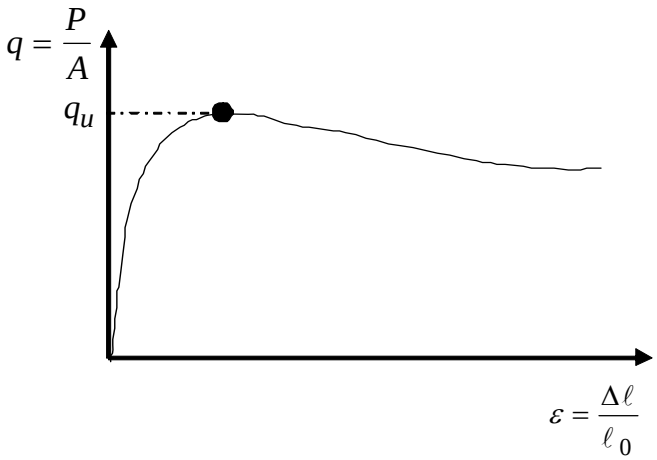


深さ方向に非排水せん断強度（一軸圧縮強度）が増加する正規圧密粘土地盤の強度分布を推定する。

直接的に最もわかりやすい方法は，
異なる深度でサンプリングした試料について
一軸圧縮試験またはUU三軸試験を行う。

一軸圧縮試験





軸応力の最大値：一軸圧縮強さ q_u

一軸圧縮試験とUU試験（非圧密非排水せん断試験）

サンプリング前後で原地盤内と間隙比が変化していないとすれば，有効応力は変化していない（はず）

一軸圧縮試験の供試体

$\sigma_3 = 0$

$\sigma_3' = \sigma_3 - u_s$

$u = u_s - \sigma_3 < 0$

負圧

サンプリング

地上

有効応力を維持するための残留サクションが保持されている（はず）

原位置

$\sigma_3 = \sigma_3$

$\sigma_3' = \sigma_3 - u_s$

$u = u_s$

実際は，サクションは多少解放されるし，サンプリング時に乱れ，ゆるみもある。

有効応力の原理

$$\sigma_3 = \sigma_3' + u_s$$

一軸圧縮試験とUU試験（非圧密非排水せん断試験）

UU試験の供試体

$\sigma_3 = 0$

$\sigma_3' = \sigma_3 - u_s$

$u = u_s - \sigma_3 < 0$

負圧

三軸セル内

$\sigma_3 = \sigma_3 - u_s$

$\sigma_3' = \sigma_3 - u_s$

$u = 0$

地上

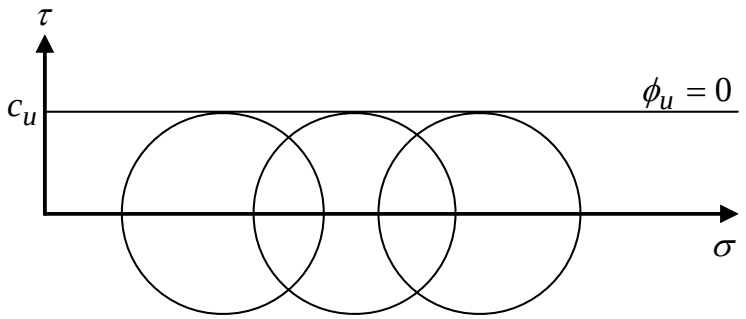
地上

セル圧を載荷する理由

・最低でも元の原地盤での有効応力分だけセル圧を載荷して，残留サクションを供試体からなくす。

・サンプリングによる応力解放による乱れやゆるみによる影響を低減する。

UU試験の結果の整理

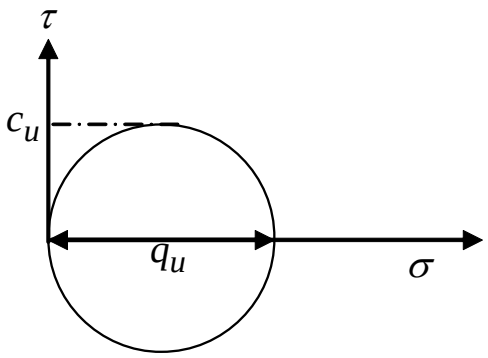


拘束圧を色々変えて実験を行っても，拘束圧を作用させた時点から，間隙比は変わらず，そのため有効応力も変化しないので，結果としてせん断強度も増加しない。
拘束圧を増加させた分はすべて間隙水圧の変化となっている。

UU試験で得られる土質定数は，

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

一軸圧縮試験の結果の整理

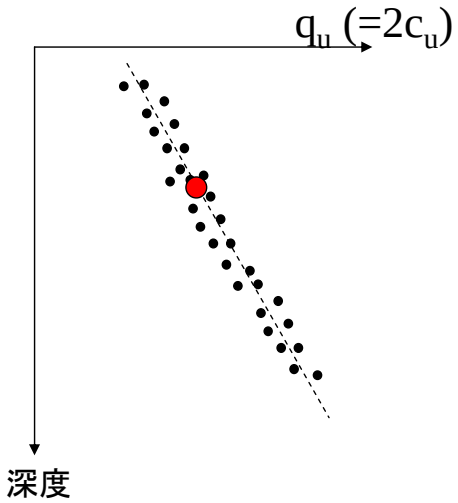


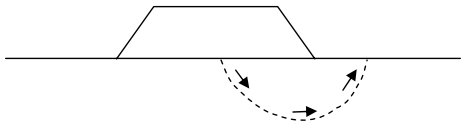
一軸圧縮試験は，UU試験における $\sigma_3 = 0$ の特殊な場合

一軸圧縮試験で得られる土質定数は，

一軸圧縮強度： $q_u = \sigma_{1f} = 2c_u$ （f は破壊時の意味）

CU試験による強度増加率の推定



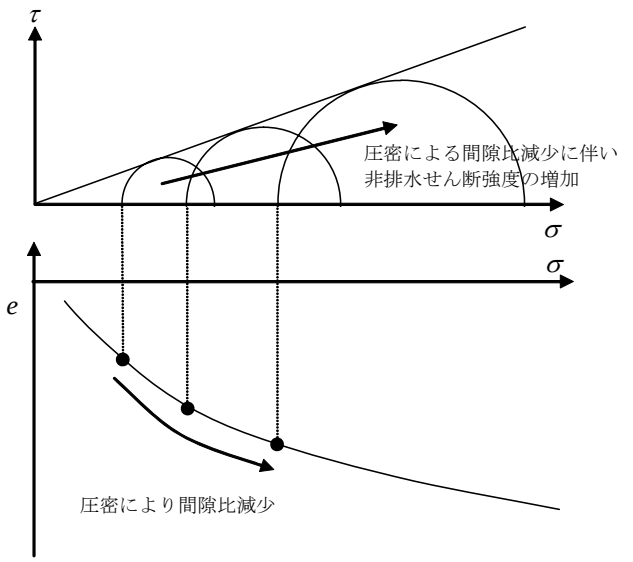


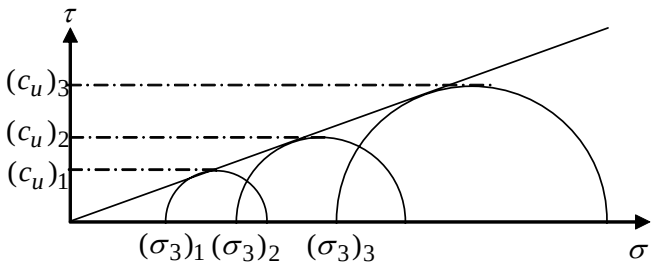
粘土地盤がある程度均質ならば，CU試験によりある深さでサンプリングした粘土だけを使用して，深さ方向の強度増加率を求めることができる。

↓

少ないサンプリングで強度分布が推定可能

もちろん人為的な圧密による強度増加の推定もできる



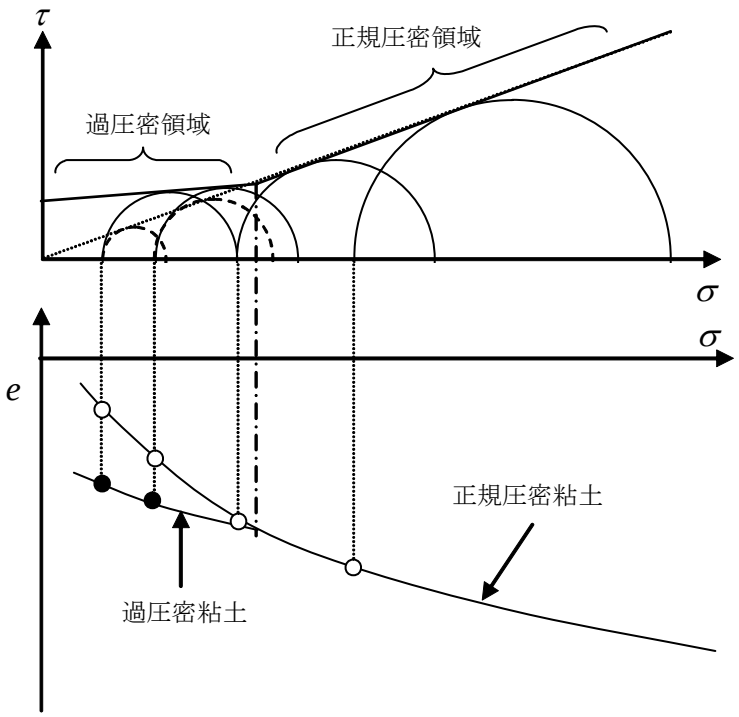


強度増加率

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

1本のサンプリングチューブの試料を用いて3本以上の実験すれば，強度増加率を求めることができ，わざわざ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くなる。

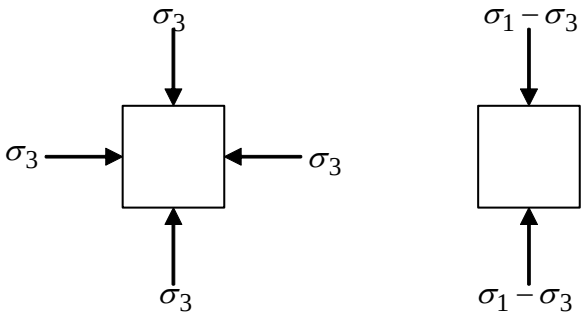
しかしながら，過圧密粘土だったりすると，強度増加率自体はそれほど意味はない



三軸圧縮試験の種類（主に3種類）

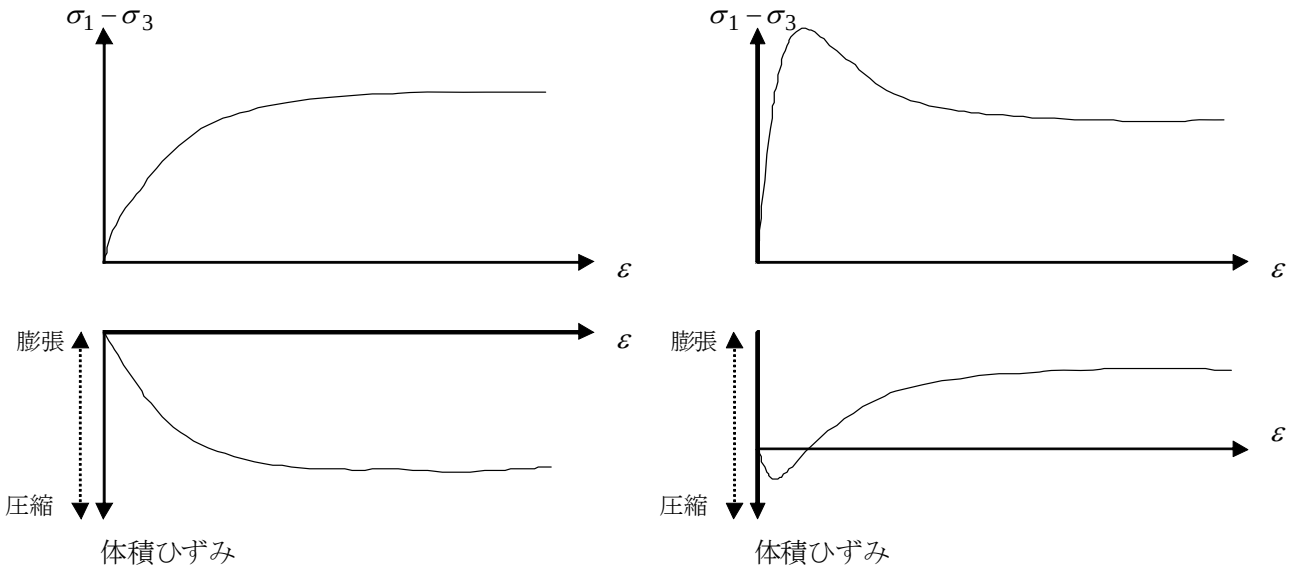
	等方圧力による 圧密過程	軸圧縮による せん断過程
UU試験	非圧密	非排水せん断
CU試験	圧密	非排水せん断
CD試験	圧密	排水せん断

CU / CU



（圧密過程）　　（せん断過程）

実際の砂の挙動（排水条件CD試験）



ゆる詰め砂の場合

（あるいは正規圧密粘土）

密詰め砂の場合

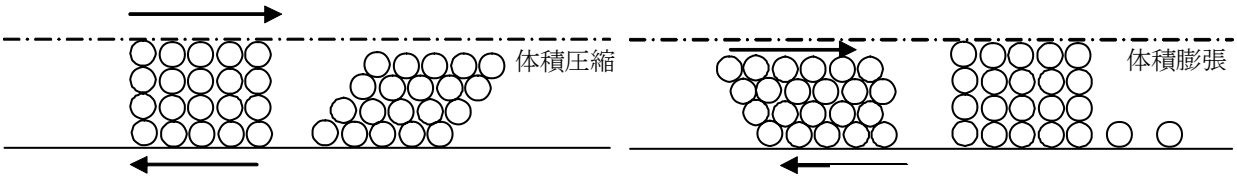
（あるいは過圧密粘土）

ダイレイタンシー

粒状体

Dilatancy: ダイレイタンシー

せん断変形（よこずれ変形）に伴う体積膨張や圧縮



ゆるづめの場合　　密づめの場合

【負のダイレイタンシー※】　　【（正の）ダイレイタンシー】

土の性質

身近なダイレイタンシーの例を考えてみよう！

密詰めの粒状体にせん断変形を与えるとゆる詰めになろうとする.

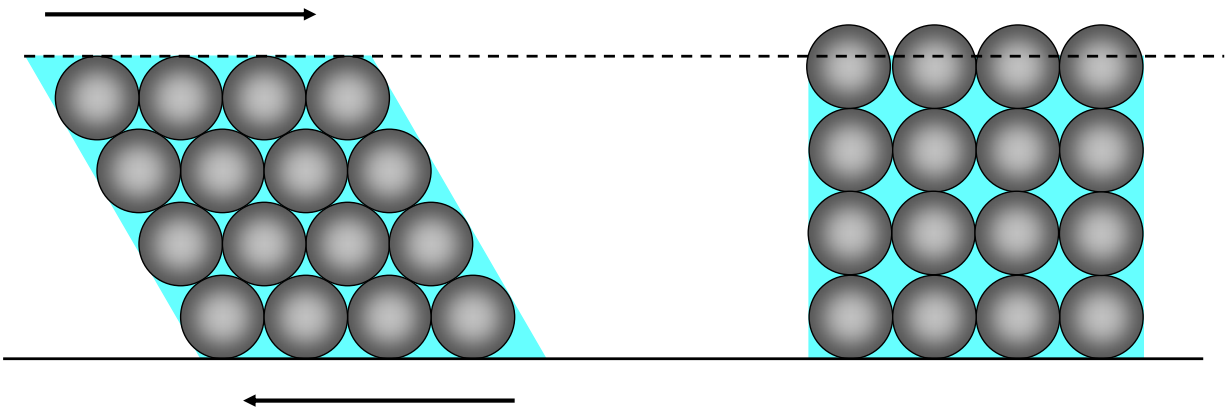
土の性質

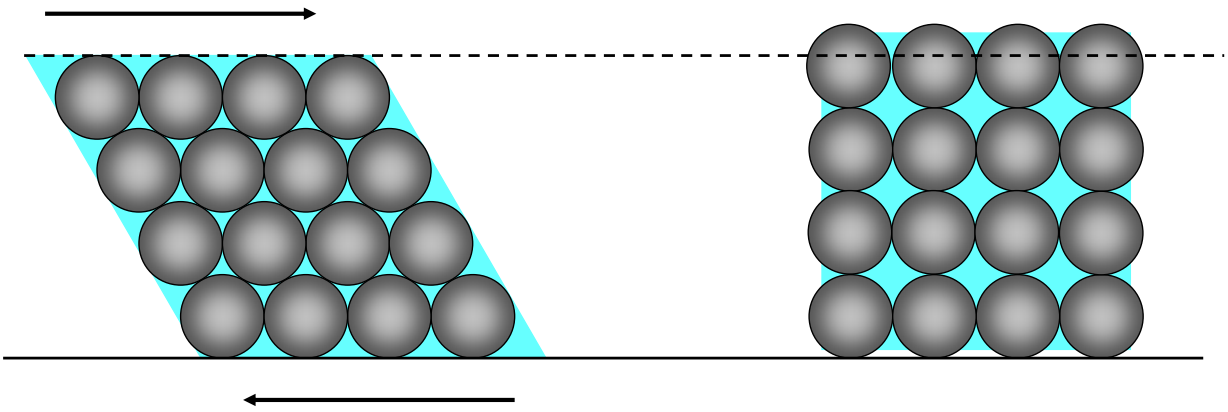
身近なダイレイタンシーの例を考えてみよう！

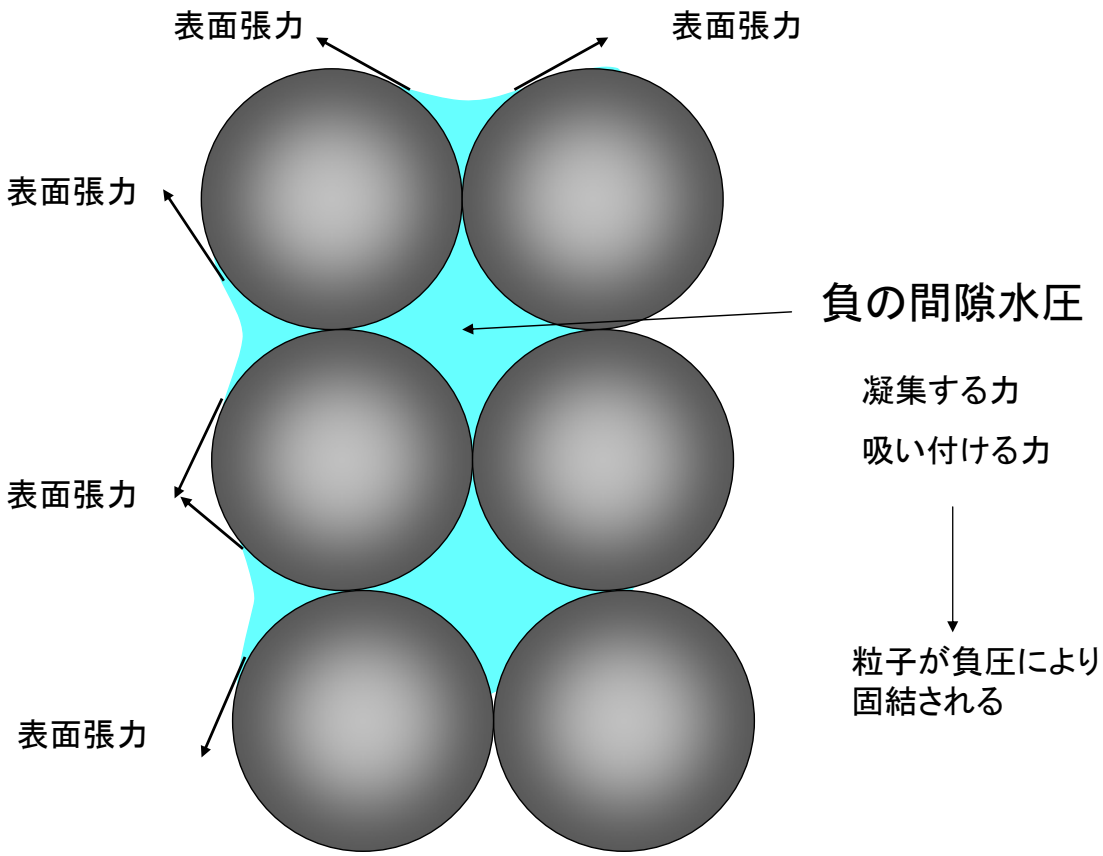
密詰めの粒状体にせん断変形を与えるとゆる詰めになろうとする.

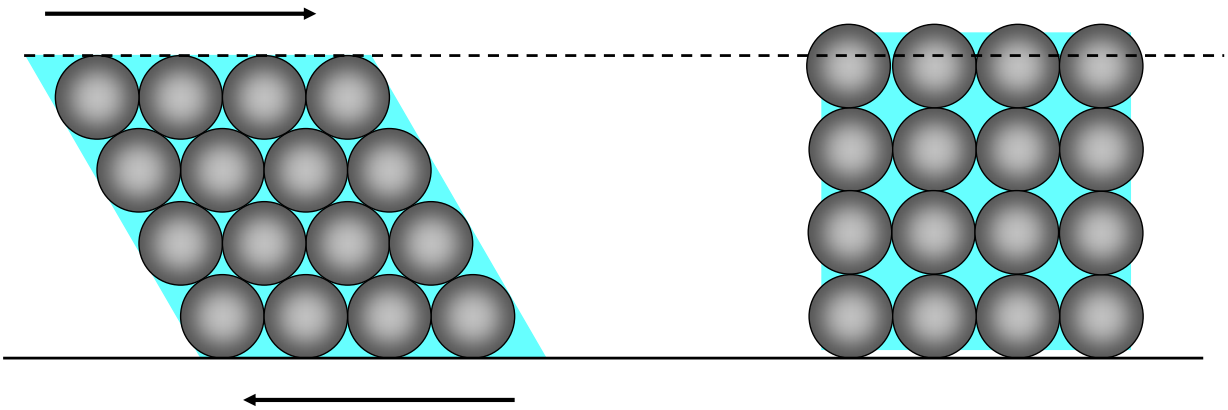
砂浜の足跡

嵐の宿題くんの「ダイラタンシー」ゲーム






表面張力
表面張力
表面張力
負の間隙水圧
凝集する力
吸い付ける力
表面張力
粒子が負圧により
固結される
表面張力



間隙水の圧力はゼロ

粒子に力は作用しない

間隙水の圧力はマイナス

粒子を引きつける力が作用

土の性質

身近なダイレイタンシーの例を考えてみよう！

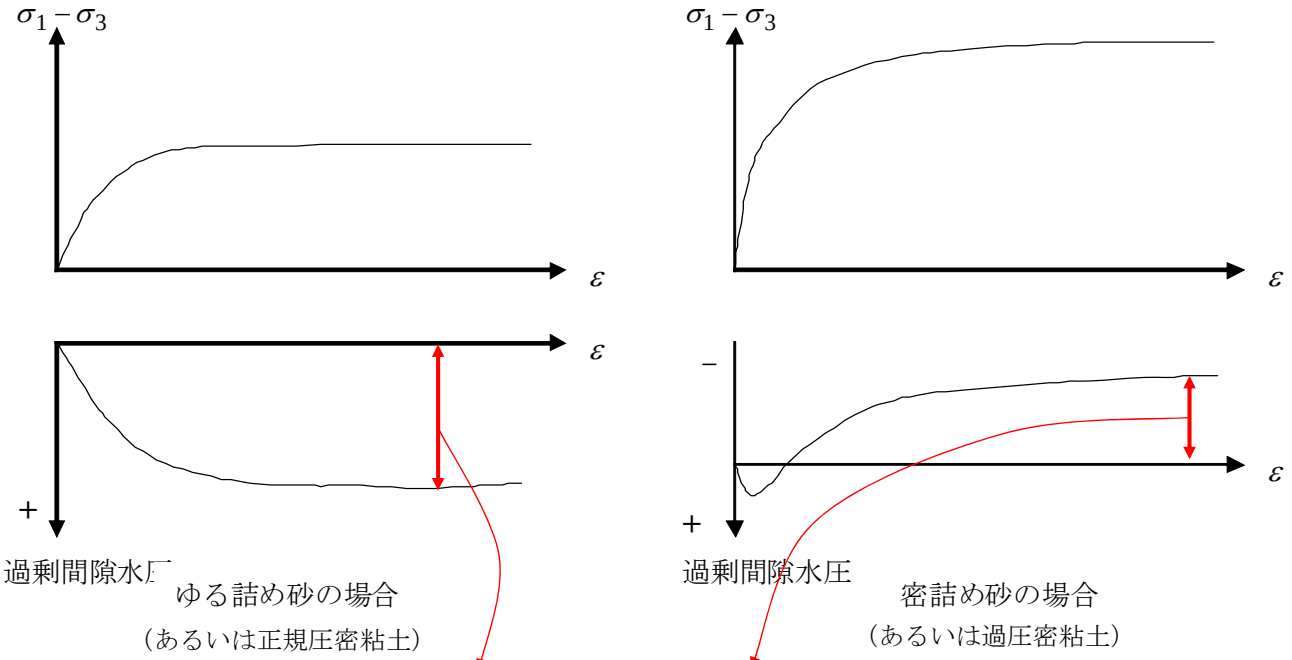
ゆる詰めの粒状体にせん断変形を与えると密詰めになろうとする.

土の性質

身近なダイレイタンシーの例を考えてみよう！

ゆる詰めの粒状体にせん断変形を与えると**密詰め**になろうとする.

実際の砂の挙動（非排水条件CU試験）



$$u_f = B_f \Delta\sigma_{3f} + A_f \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

実際の砂の挙動（非排水条件CU試験）

スケンプトンの間隙圧係数

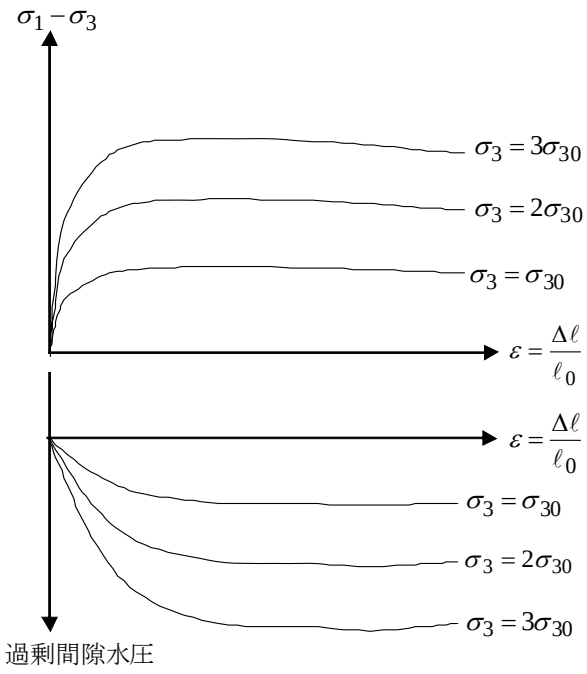
$$\boxed{u_f = B_f \Delta\sigma_{3f} + A_f \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$$

三軸試験の場合，$\Delta\sigma_3 = 0$ なので，

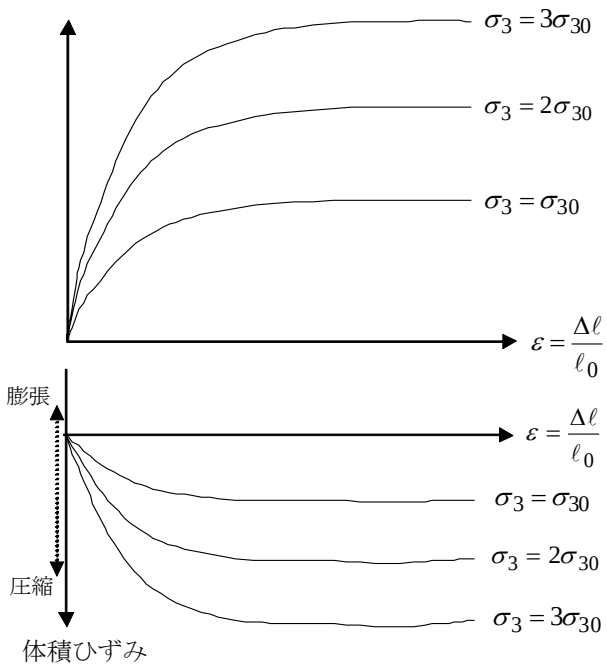
$$u_f = A_f \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)_f$$

正規圧密粘土 $A_f > 0$　　過圧密粘土 $A_f < 0$

CD試験とCU試験



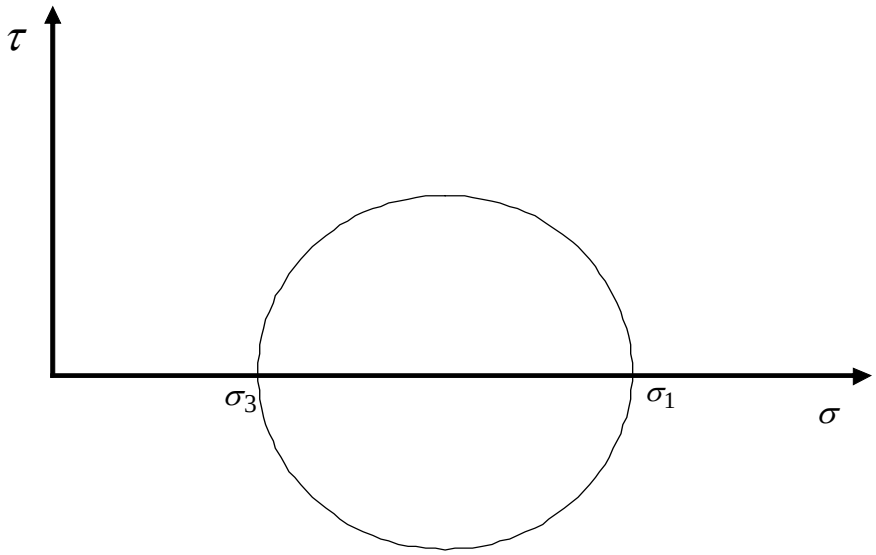
圧密非排水せん断試験（CU 試験）



圧密排水せん断試験（CD 試験）

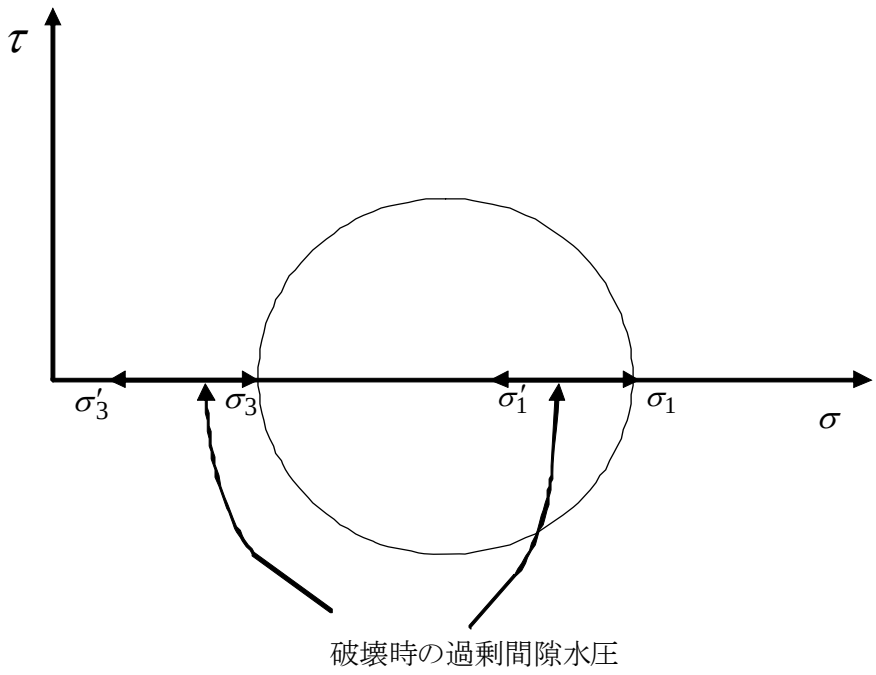
有効応力の原理：全応力＝有効応力＋間隙水圧

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



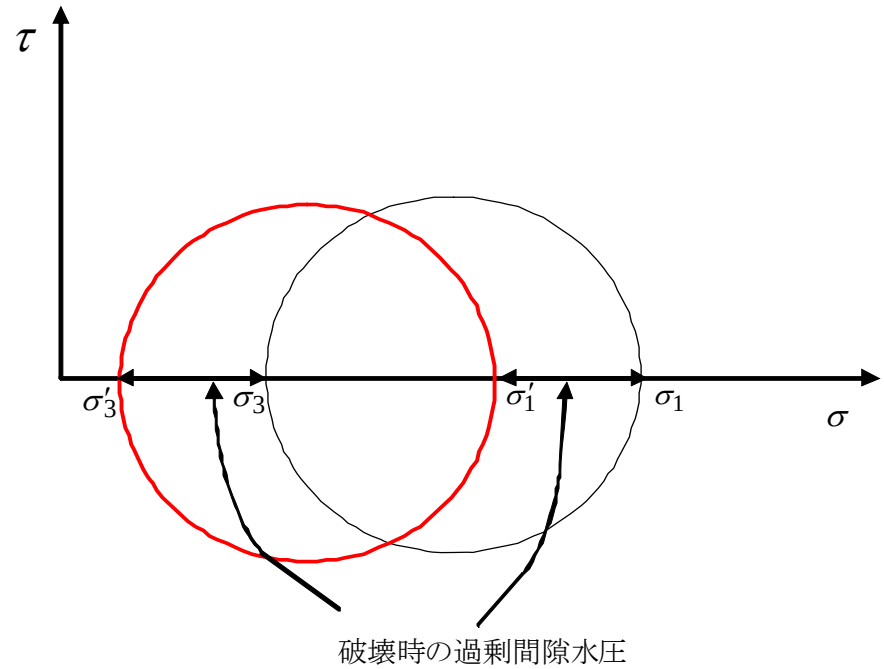
有効応力の原理：全応力＝有効応力＋間隙水圧

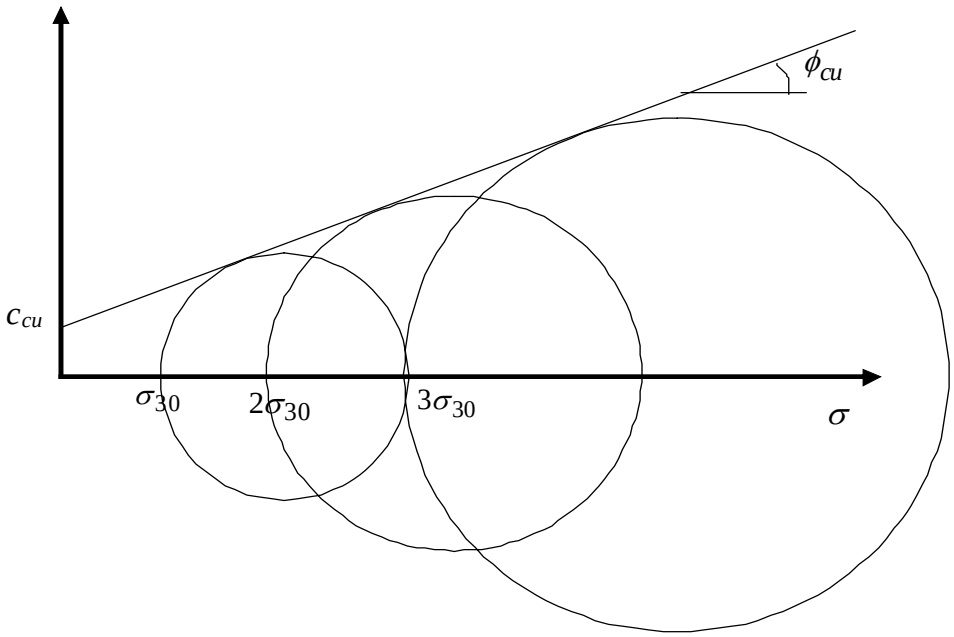
$$\sigma = \sigma' + u$$

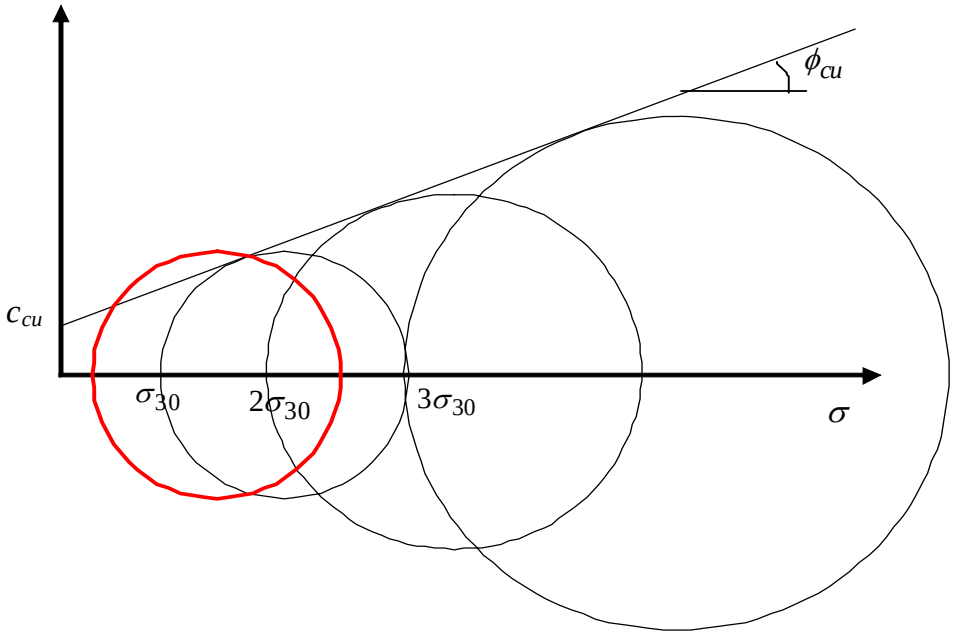


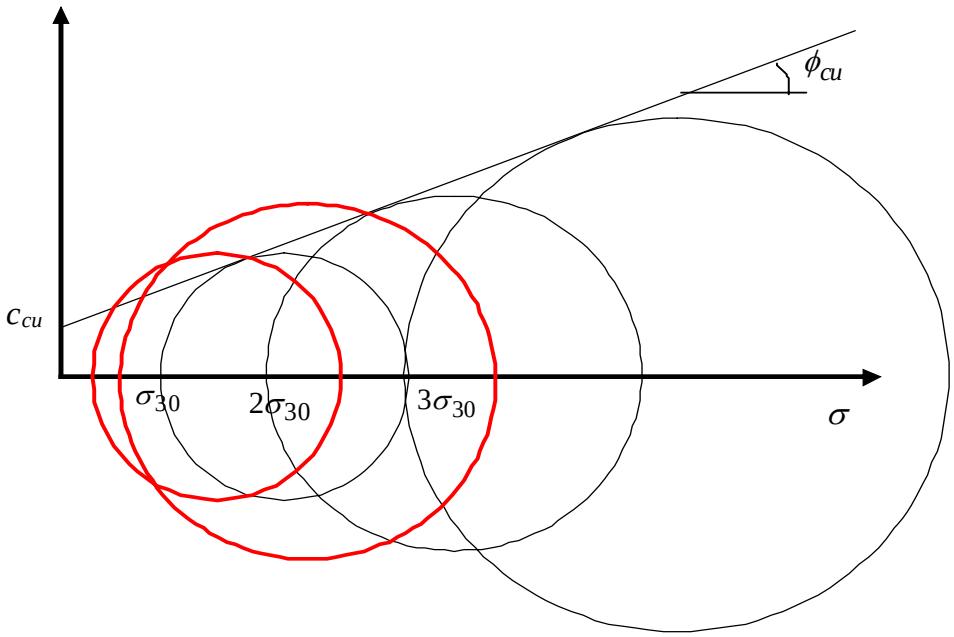
有効応力の原理：全応力＝有効応力＋間隙水圧

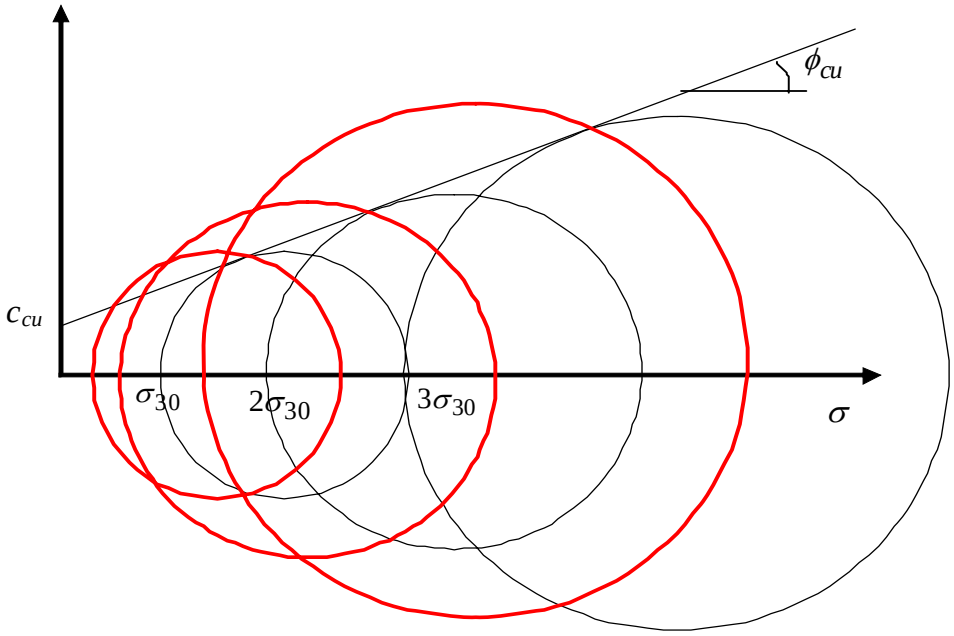
$$\sigma = \sigma' + u$$

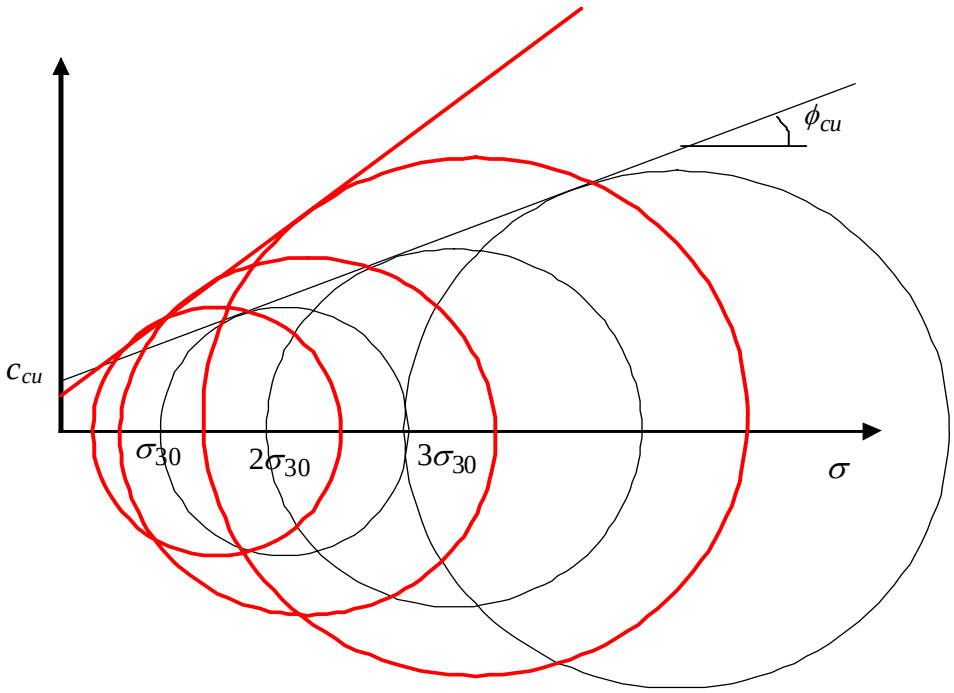





ϕ_{cu}
c_{cu}
σ_{30}
$2\sigma_{30}$
$3\sigma_{30}$
σ

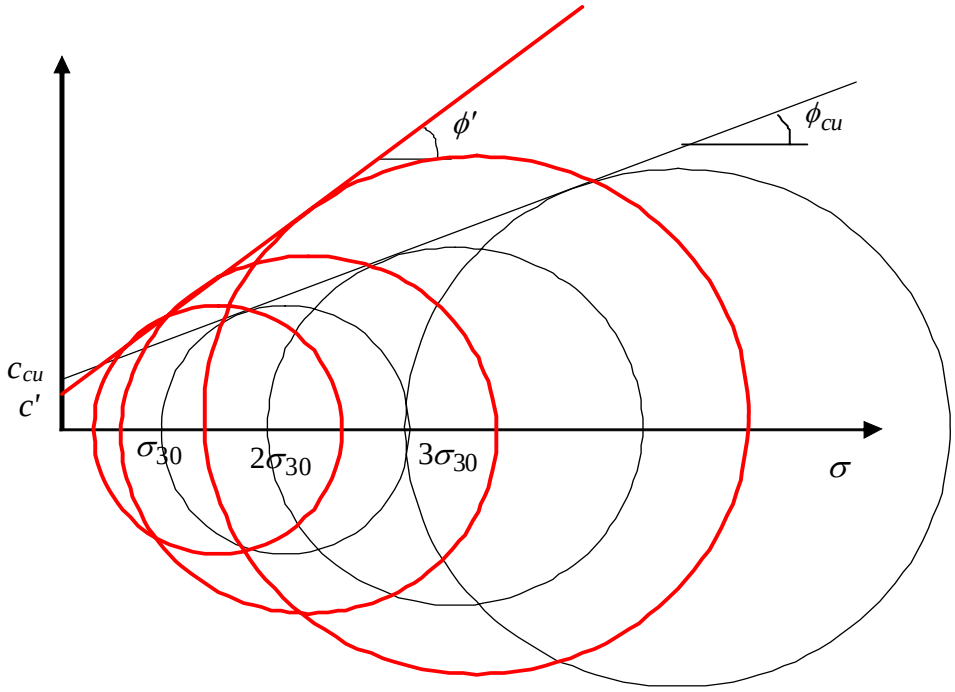

ϕ_{cu}
c_{cu}
σ_{30}
$2\sigma_{30}$
$3\sigma_{30}$
σ

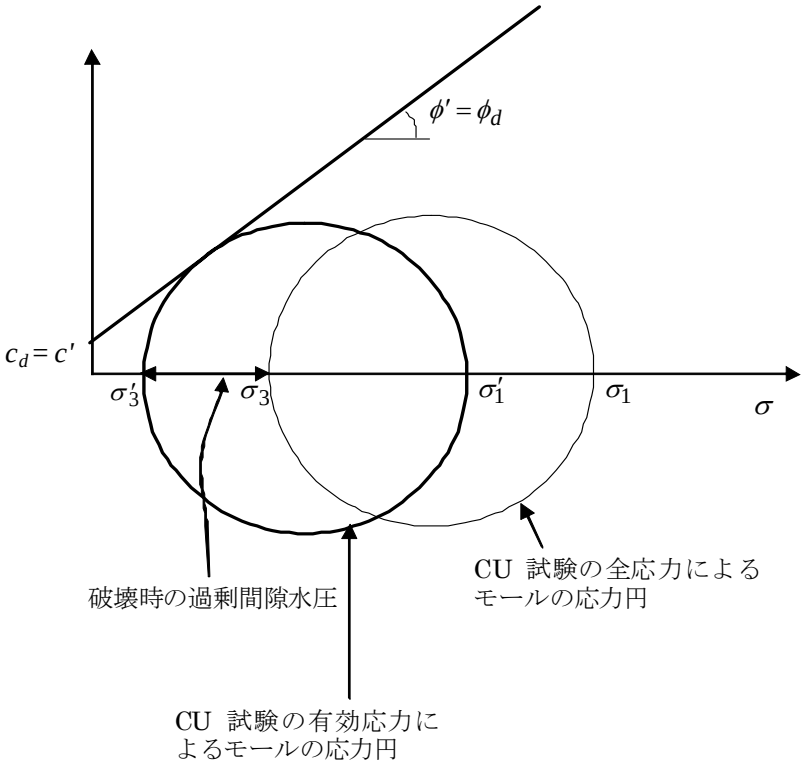

ϕ_{cu}
c_{cu}
σ_{30}
$2\sigma_{30}$
$3\sigma_{30}$
σ


ϕ_{cu}
c_{cu}
σ_{30}
$2\sigma_{30}$
$3\sigma_{30}$
σ

$\phi' > \phi_{cu}$　　$c' < c_{cu}$

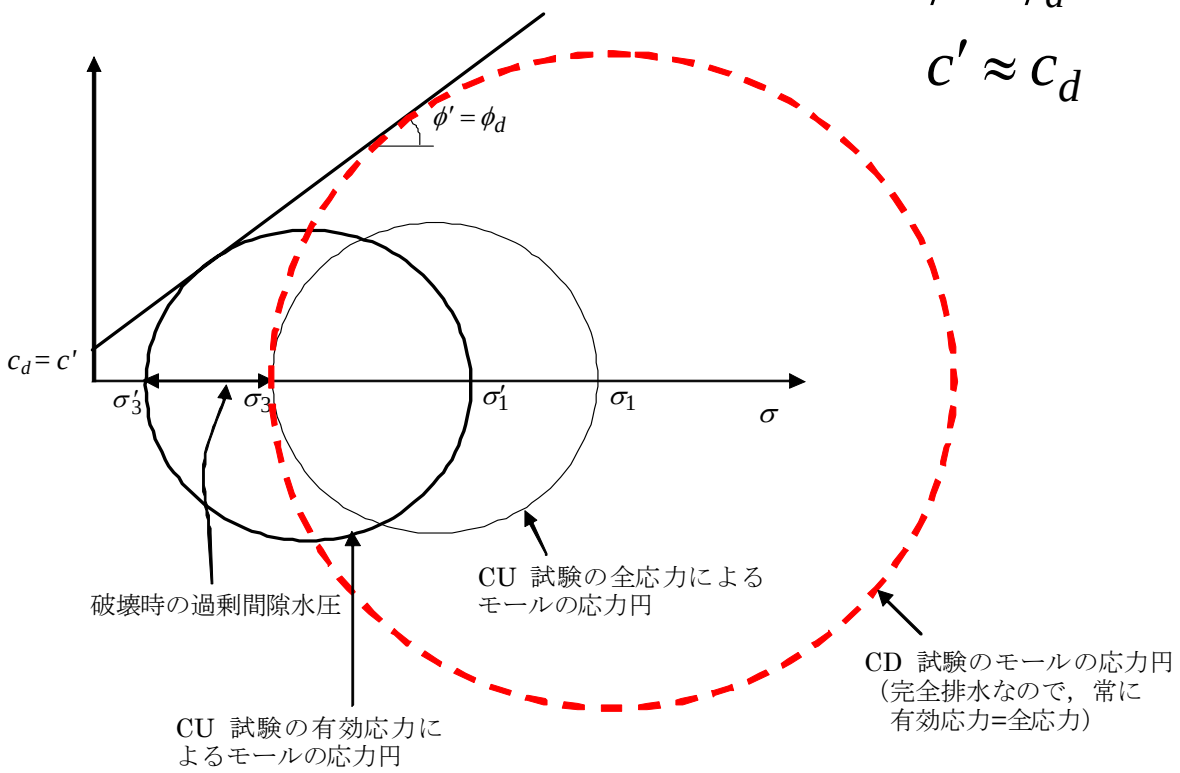
正規圧密粘土であればc'=0



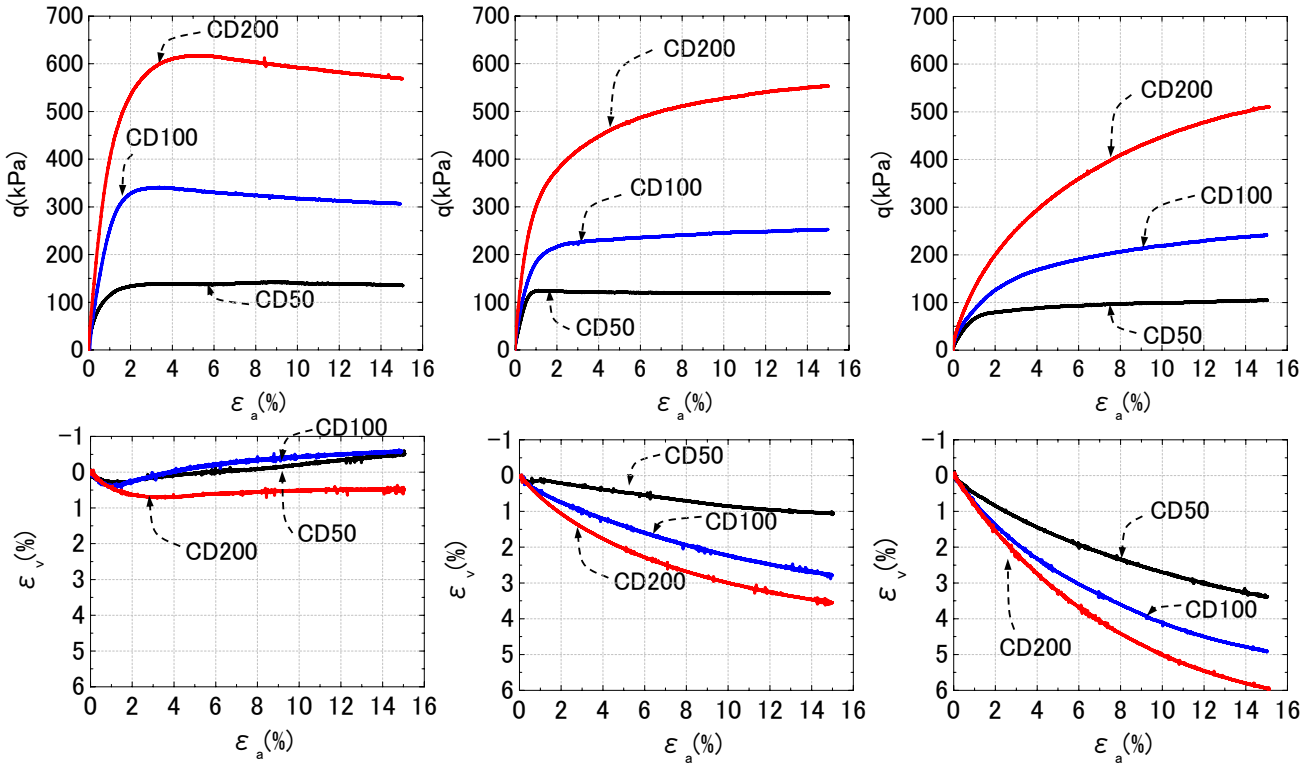


$$\phi' \approx \phi_d$$

$$c' \approx c_d$$

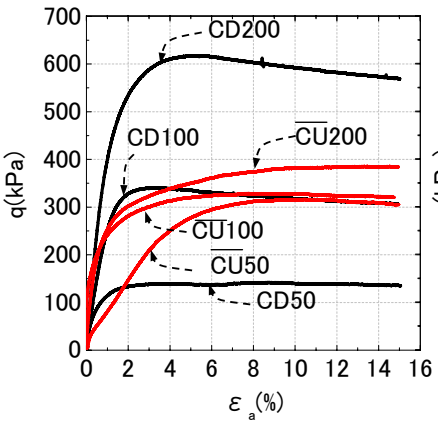


密度が異なる供試体でのCD試験の比較

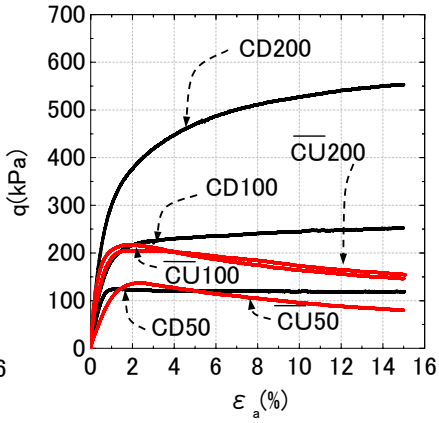


締固め度90%　　締固め度85%　　締固め度80%

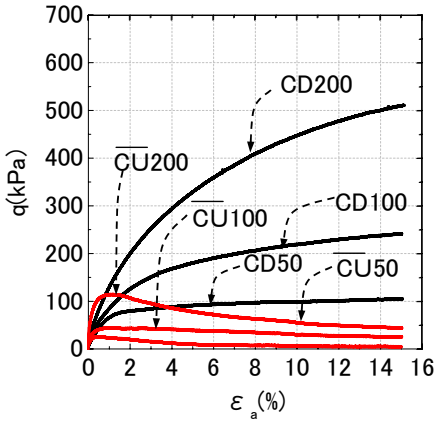
密度が異なる供試体でのCD試験とCU試験の比較



締固め度90%

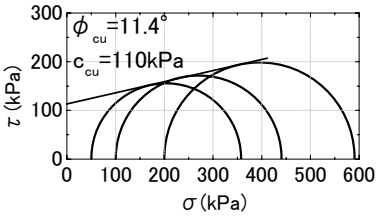


締固め度85%

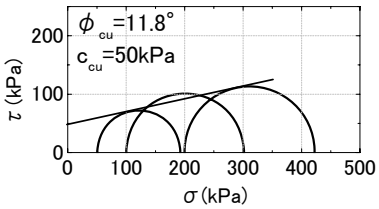


締固め度80%

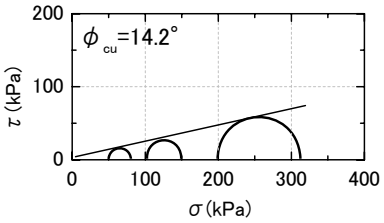
試験条件による強度定数の違い



締固め度90%



締固め度85%

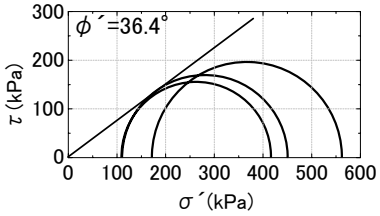


締固め度80%

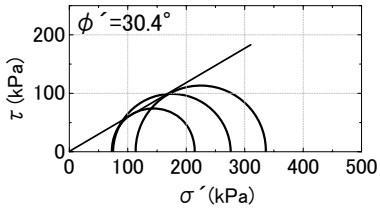
$\overline{\mathrm{CU}}$（全応力）

実験の種類	ϕ_{cu}(°)	c_{cu}(kPa)	ϕ' (°)	ϕ_d(°)
締固め度90%	11.4	110	36.4	38.8
締固め度85%	11.8	50	30.4	35.3
締固め度80%	14.2	0	23.1	34.3

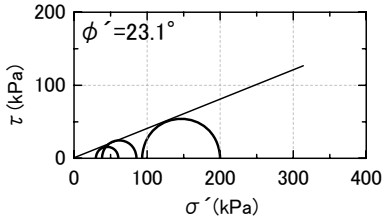
試験条件による強度定数の違い



締固め度90%



締固め度85%

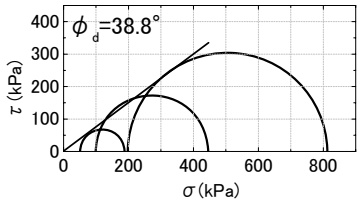


締固め度80%

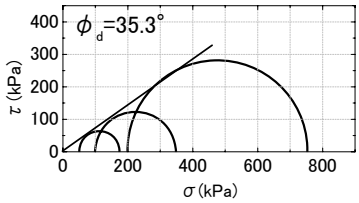
$\overline{\mathrm{CU}}$（有効応力）

実験の種類	ϕ_{cu}(°)	c_{cu}(kPa)	φ’ (°)	ϕ_d(°)
締固め度90%	11.4	110	36.4	38.8
締固め度85%	11.8	50	30.4	35.3
締固め度80%	14.2	0	23.1	34.3

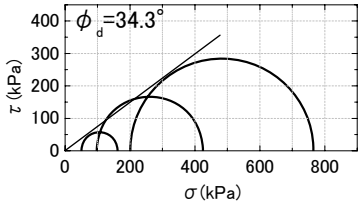
試験条件による強度定数の違い



締固め度90%



締固め度85%



締固め度80%

CD

実験の種類	ϕ_{cu}(°)	c_{cu}(kPa)	φ’ (°)	ϕ_d(°)
締固め度90%	11.4	110	36.4	38.8
締固め度85%	11.8	50	30.4	35.3
締固め度80%	14.2	0	23.1	34.3

実務での強度定数の使用法

土圧，斜面安定，支持力・・・

基本は全応力解析

粘性土地盤　一軸試験，UU試験 c_u　$\phi_u = 0$

まれに，長期安定問題として CD試験　ϕ_d　c_d

砂質土地盤　現在の有効応力状態が与えられていれば，

→　CU試験　ϕ_{cu}　c_{cu}

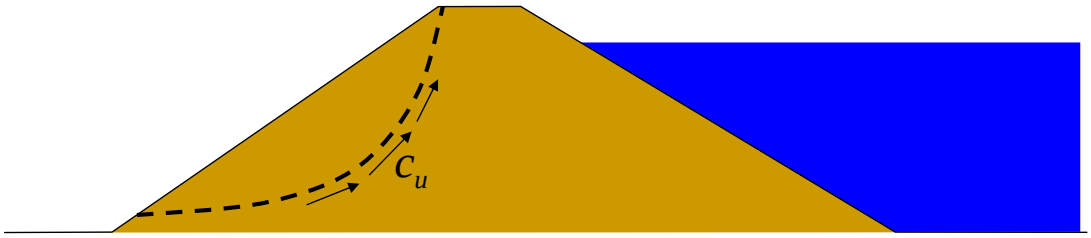
破壊時に容易に体積が変化できるならば

→　CD試験　ϕ_d　c_d

実務レベルで　ϕ'　c'　を使うのは難しい

例えば，河川堤防の安定解析では・・・

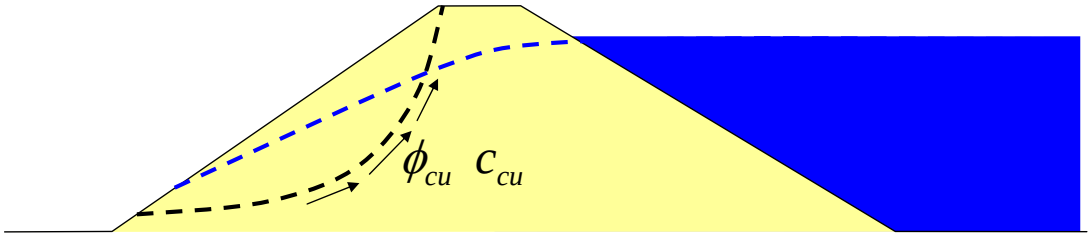
粘性土堤防



一軸試験，UU試験 c_u　$\phi_u = 0$

例えば，河川堤防の安定解析では･･･

砂質土堤防



CU試験　ϕ_{cu} c_{cu}

現時点（水が浸潤している状態）で河川堤防が有している安全度（余裕度）を計算するという考え方

CD試験　ϕ_d c_d

排水せん断強度を発揮するにはさらなる体積変化が必要

$\overline{\text{CU}}$試験 ϕ' c'

破壊時の過剰間隙水圧は事前にはわからない

終わり

ご清聴ありがとうございました。

kodaka@ccmfs.meijo-u.ac.jp

名城大学

最新版カラー資料は下記のHPからどうぞ

http://civil.meijo-u.ac.jp/lab/kodaka/

小高猛司　検索