



# 第三章 土的抗剪强度

## ➤ 概 述

## ➤ 库仑公式和莫尔-库伦强度理论

## ➤ 抗剪强度的测定方法

## ➤ 孔隙压力系数

## ➤ 饱和粘性土的抗剪强度

## ➤ 应力路径

## ➤ 无粘性土的抗剪强度



# 一般物质材料强度理论

最大拉应力理论



复杂应力条件下引起材料断裂破坏的主要原因是最大拉应力

$$\sigma_1 \leq [\sigma_l]$$

最大拉应变理论



复杂应力条件下引起材料断裂破坏的主要原因是最大拉应力

$$\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma_l]$$

最大剪应力理论



复杂应力条件下引起材料断裂破坏的主要原因是最大拉应力

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sigma_s \Leftrightarrow \tau_{\max} = \tau_s$$

最大形状改变比能理论



复杂应力条件下引起材料屈服破坏的主要原因是最大形状改变比能。

$$\left\{ \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} = \sigma_s$$

双剪强度理论



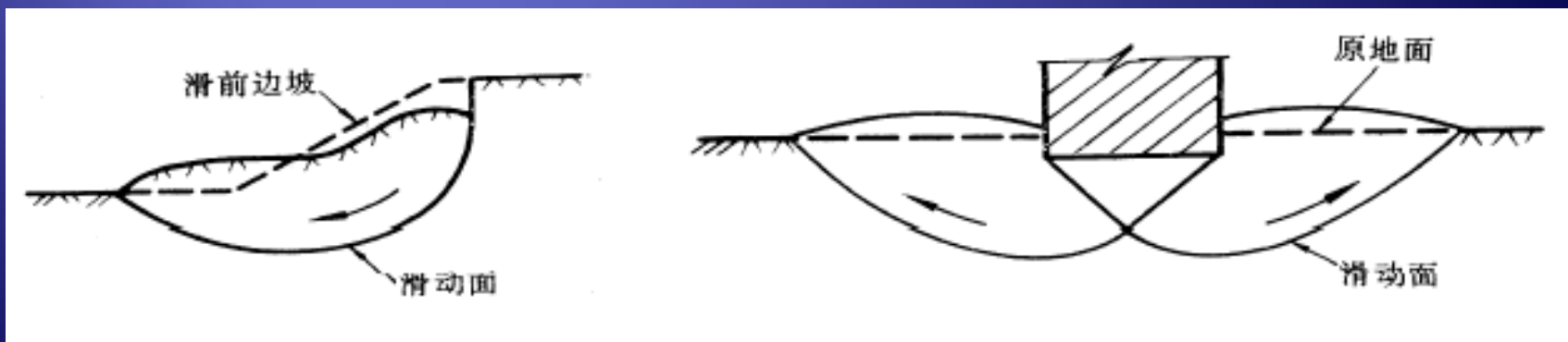
复杂应力条件下引起材料屈服破坏取决于两个较大剪应力

$$\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right) + \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \right] = \sigma_s$$
$$\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) + \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right) \right] = \sigma_s$$



# 土的抗剪强度

土体抵抗剪切破坏的极限能力，是土的重要力学性质之一





# 土的抗剪强度

土体抵抗剪切破坏的极限能力，是土的重要力学性质之一

## 土的强度特点：

1. 碎散性：强度不是颗粒矿物本身的强度，而是颗粒间相互作用——主要是抗剪强度与剪切破坏，颗粒间粘聚力与摩擦力；
2. 三相体系：三相承受与传递荷载——有效应力原理；
3. 自然变异性：土的强度的结构性与复杂性。



## 土的强度组成:

### 1、 摩擦强度（摩擦力）包括滑动摩擦和咬合摩擦

- ✓ 滑动摩擦由颗粒间接触面粗糙不平所引起。
- ✓ 咬合摩擦是指相邻颗粒对于相对移动的约束作用。
- ✓ 摩擦强度的影响因素有：
  - ✓ 颗粒形状、矿物成分、
  - ✓ 粒径级配、密度等。

### 2、 粘聚强度（粘聚力）

- ✓ 取决于土粒间的各种
- ✓ 胶结作用和静电引力。



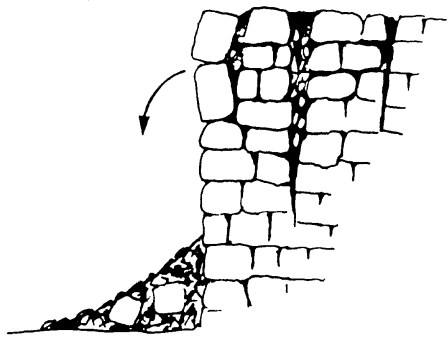
地基

外荷载

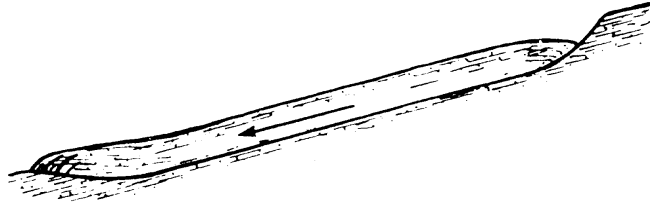
剪应力  
剪切变形

剪阻力被完全发挥

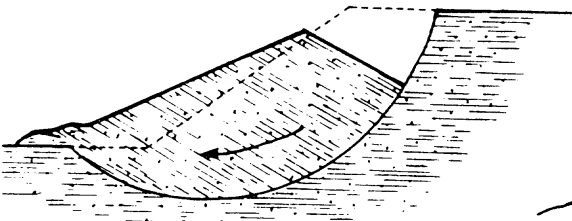
剪切破坏



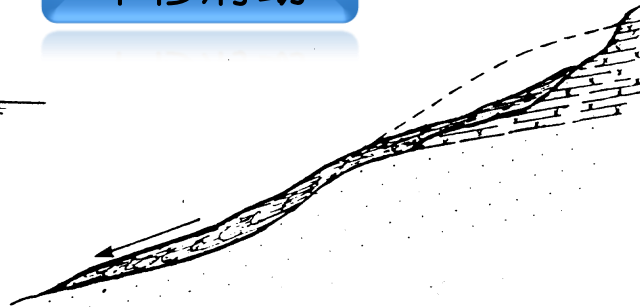
崩塌



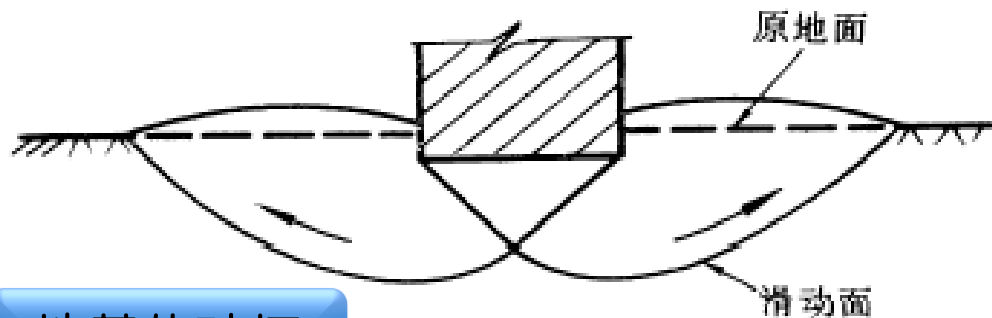
平移滑动



旋转滑动



流滑



地基的破坏







# 库仑公式和莫尔-库伦 强度理论

## 库仑公式

1773年C.A.库伦(Coulomb)

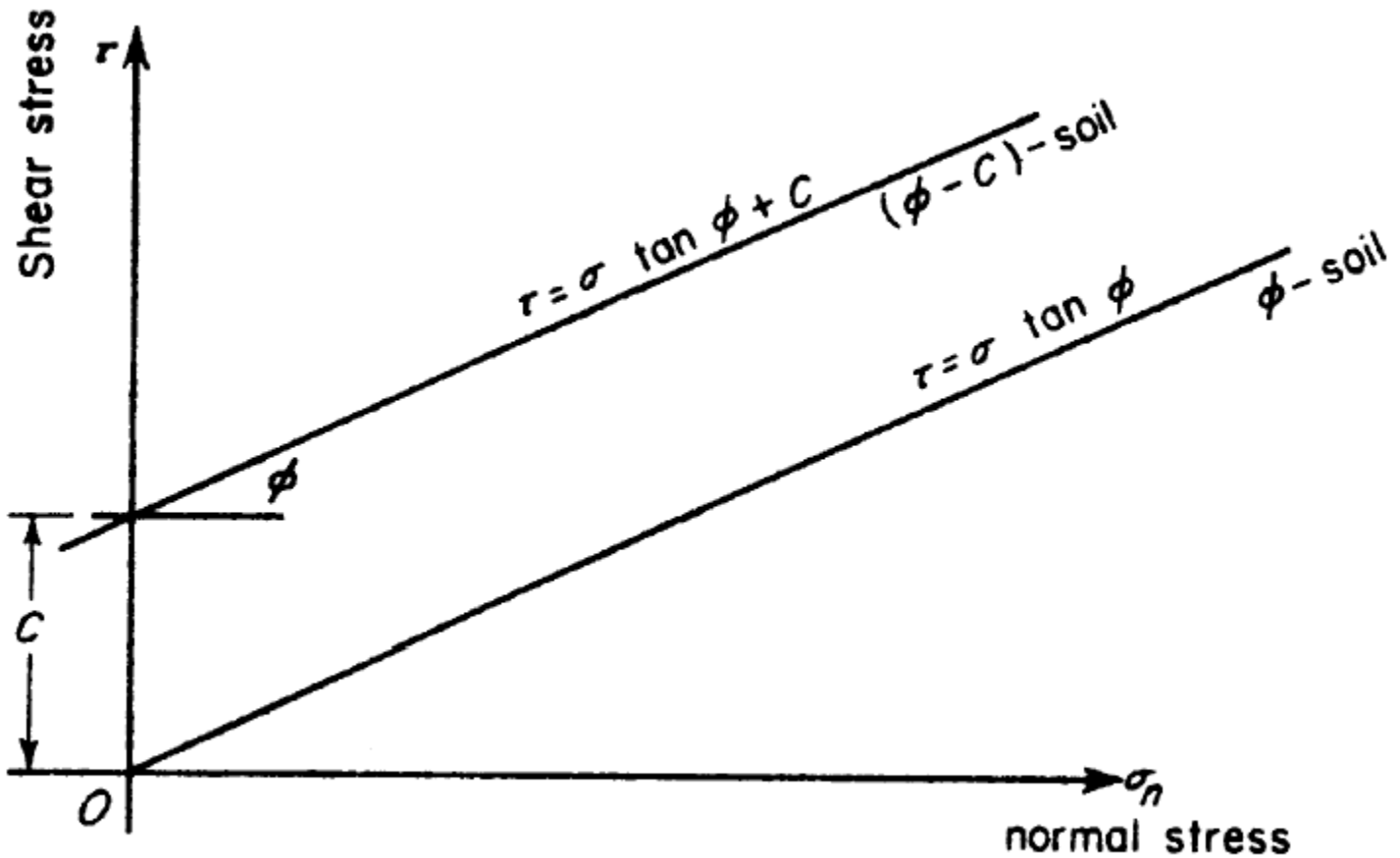
砂土:  $\tau_f = \sigma \tan \phi$

粘性土:  $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$

式中:  $\tau_f$ —土的抗剪强度,  $\text{kPa}$   
 $\sigma$ —剪切滑动面上的法向总应力,  $\text{kPa}$   
 $c$ —土的粘聚力(内聚力),  $\text{kPa}$   
 $\phi$ —土的内摩擦角, 度。

以上两式统称为库仑公式或库仑定律,  $c$ 、 $\sigma$  称为抗剪强度指标或抗剪强参数。





Shear strength graphically



## 根据K.太沙基(Terzaghi)的有效应力概念

$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi'$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

式中:

$\tau_f$ —土的抗剪强度,  $\text{kPa}$

$\sigma$ —剪切滑动面上的法向总应力,  $\text{kPa}$

$c$ —土的粘聚力(内聚力),  $\text{kPa}$

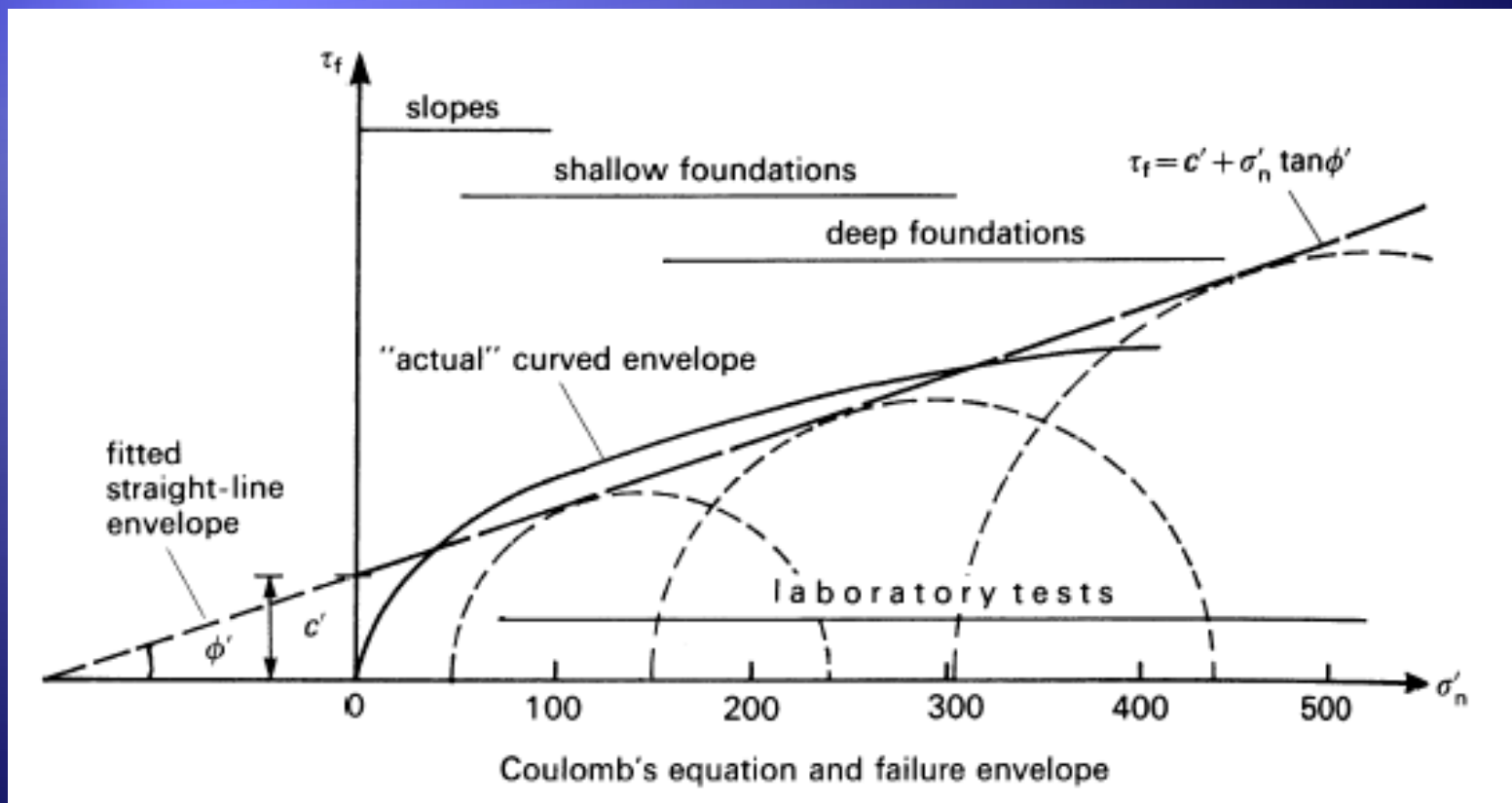
$\varphi$ —土的内摩擦角度。

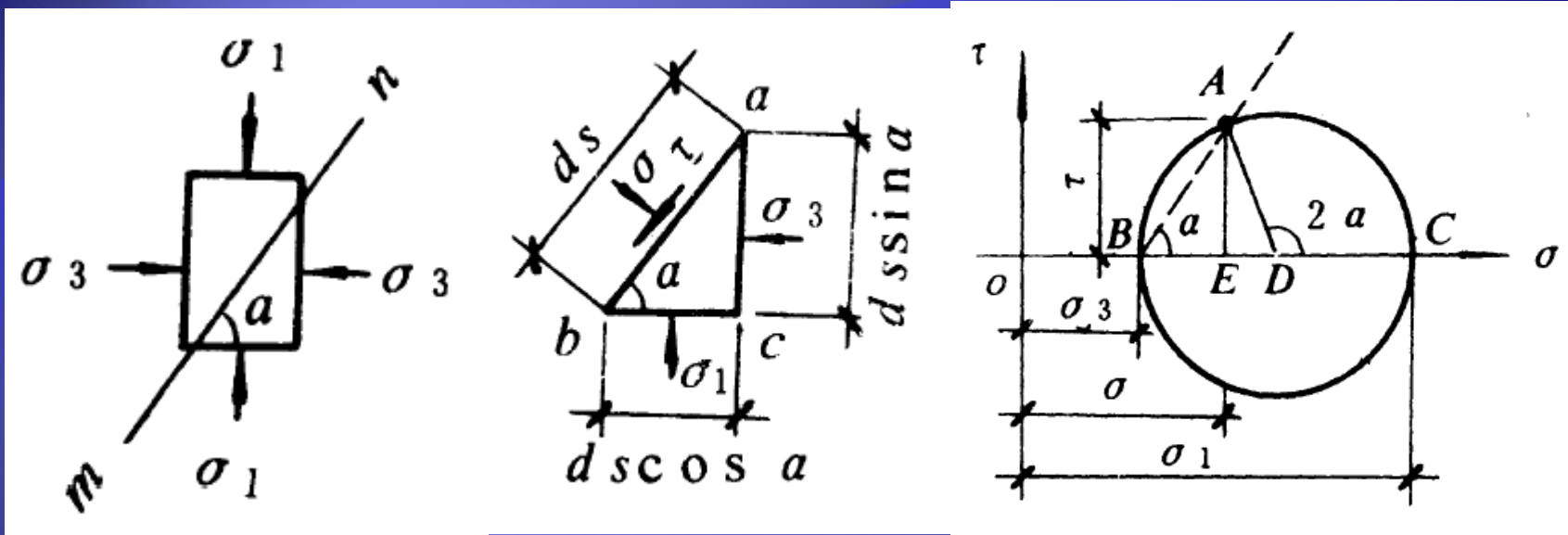


# 莫尔-库伦强度理论

$$\tau_f = f(\sigma)$$

莫尔包线



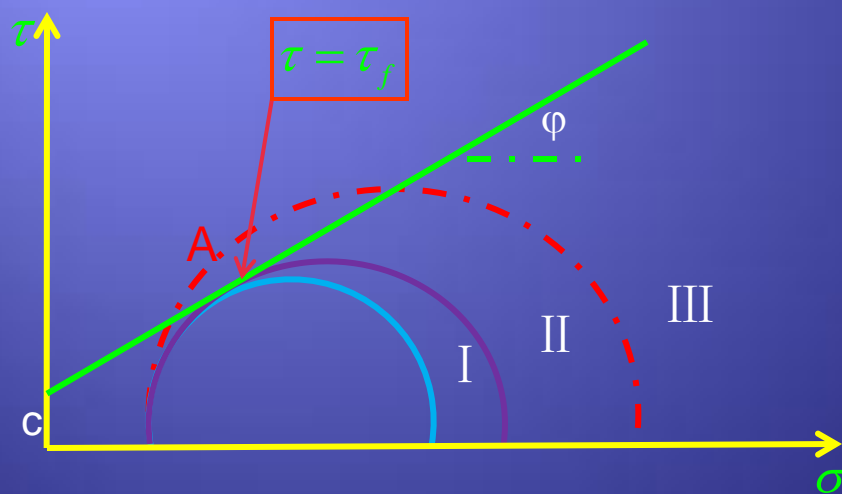


$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\}$$



# 莫尔—库伦破坏准则—土的极限平衡条件

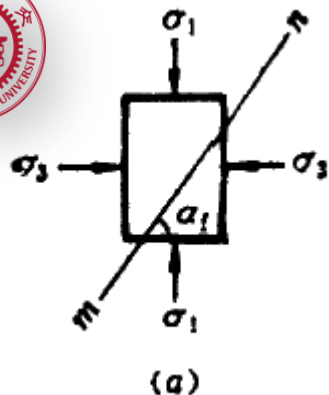
- 极限平衡状态时，大、小主应力之间的关系，称为莫尔—库伦破坏准则。
- 将抗剪强度包线与莫尔应力圆画在同一张坐标图上。它们之间的关系有以下三种情况。



I 稳定状态  
II 极限平衡状态  
III 不可能状态

莫尔圆与抗剪强度之间的关系





$$AD = RD \sin \varphi$$

因  $AD = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$

$$RD = c \cot \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

故  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = [c \cot \varphi + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)] \sin \varphi$

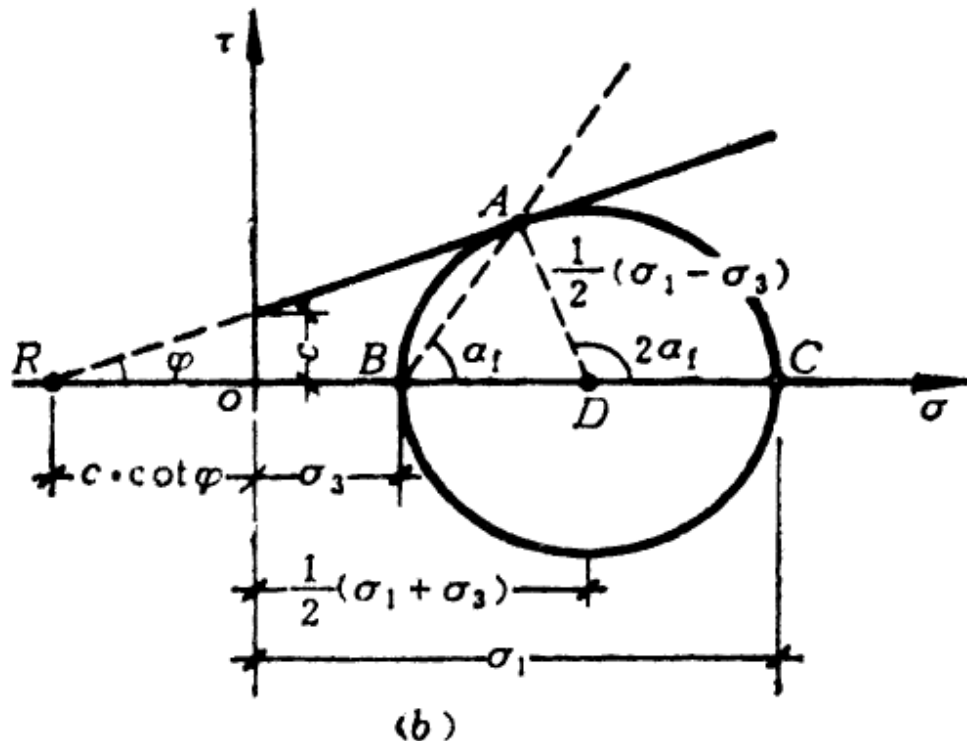
化简单后得

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}$$

粘性土的极限平衡条件:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$



非粘性土的极限平衡条件:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

破裂角

$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

说明破坏面与最大主应力  $\sigma_1$  的作用面的夹角为  $(45^\circ + \varphi/2)$ 。如前所述，土的抗剪强度  $\tau_f$  实际上取决于有效应力，所以， $\varphi$  取有效摩擦角  $\varphi$  时才代表实际的破裂角。



# 破坏判断方法

已知土中一点M的主应力 $\sigma_{1m}$ 和 $\sigma_{3m}$ ，以及土的粘聚力 $c$ 和内摩擦角 $\phi$ ，可以判断该点土体**是否破坏**。

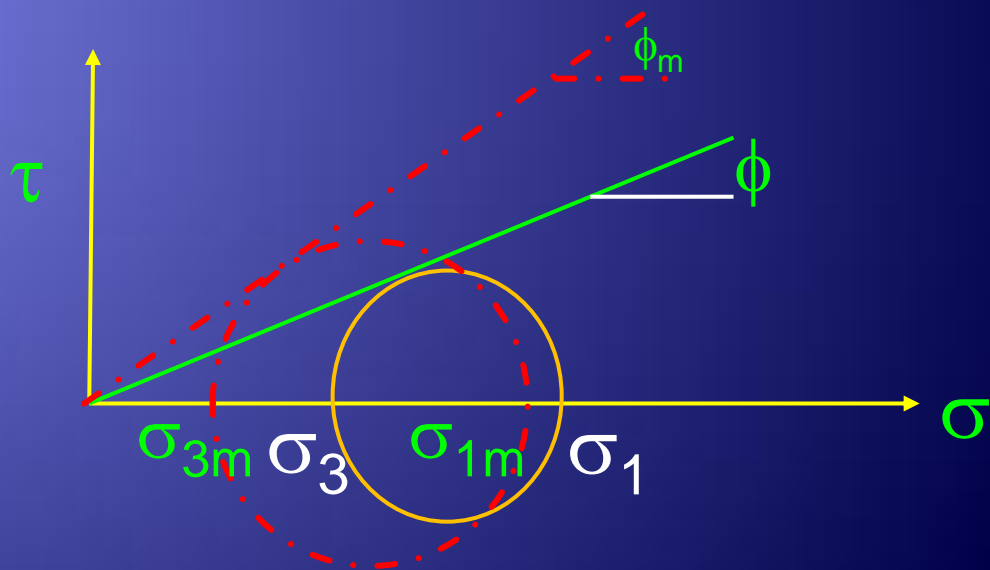
对于无粘性土：

$$\varphi_m = \sin^{-1} \frac{\sigma_{1m} - \sigma_{3m}}{\sigma_{1m} + \sigma_{3m}}$$

$\varphi_m > \varphi$       剪切破坏

$\varphi_m = \varphi$       极限平衡

$\varphi_m < \varphi$       稳定状态

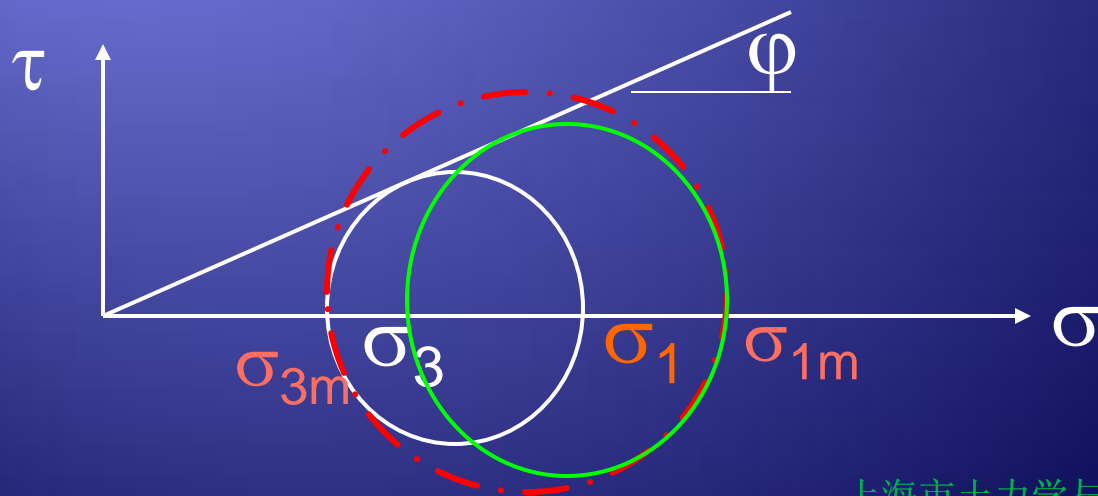


$$\sigma_1 = \sigma_{3m} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

{	$\sigma_1 > \sigma_{1m}$	稳定状态
	$\sigma_1 = \sigma_{1m}$	极限平衡
	$\sigma_1 < \sigma_{1m}$	剪切破坏

$$\sigma_3 = \sigma_{1m} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

{	$\sigma_3 > \sigma_{3m}$	剪切破坏
	$\sigma_3 = \sigma_{3m}$	极限平衡
	$\sigma_3 < \sigma_{3m}$	稳定状态



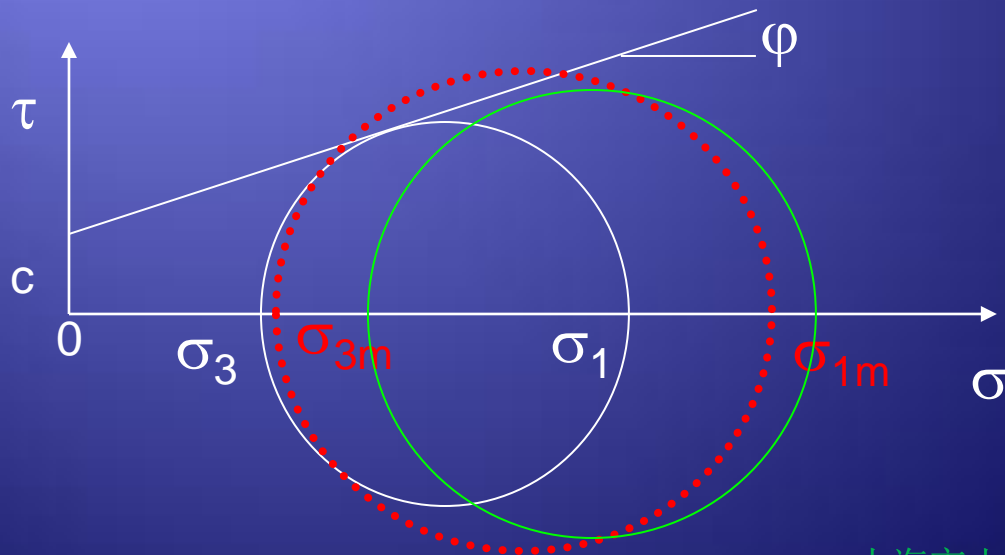
对于粘性土:

$$\sigma_1 = \sigma_{3m} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 > \sigma_{1m} \quad \text{稳定状态} \\ \sigma_1 = \sigma_{1m} \quad \text{极限平衡} \\ \sigma_1 < \sigma_{1m} \quad \text{剪切破坏} \end{array} \right.$$

$$\sigma_3 = \sigma_{1m} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_3 > \sigma_{3m} \quad \text{剪切破坏} \\ \sigma_3 = \sigma_{3m} \quad \text{极限平衡} \\ \sigma_3 < \sigma_{3m} \quad \text{稳定状态} \end{array} \right.$$





## 莫尔—库伦强度理论的要点：

- 1、破裂面上，材料的抗剪强度是法向应力的函数。
- 2、当法向应力不大时，抗剪强度可以简化为法向应力的线性函数，即服从库伦定律。
- 3、土单元体中，任意一个面上的剪应力大于该面上土的抗剪强度时，土单元即发生破坏；用破坏准则表示的应力条件即为极限平衡条件。
- 4、破坏面与大主应力作用面的夹角一定。



### 例题

地基内某点的应力为  $\sigma_z=250$  kPa、 $\sigma_y=100$  kPa、 $\tau_{zy}=-\tau_{yz}=40$  kPa，并已知土的强度

指标  $\varphi=30^\circ$ 、 $c=0$ ，

- (1) 该点是否剪坏？ (2) 如果  $\sigma_z$  和  $\sigma_y$  不变， $\tau_{zy}$  值增加至 60 kPa，该点又如何？

解：(1)

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2} = 175 + 85 = 260 \text{ kPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2} = 175 - 85 = 90 \text{ kPa}$$

剪坏面与最大主应力作用平面的夹角是  $(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = 60^\circ$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos(2 \times 60^\circ) = 175 + 85 \times (-0.5) = 132.5 \text{ kPa}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin(2 \times 60^\circ) = 85 \times 0.866 = 73.61 \text{ kPa}$$

$$\tau_t = \sigma \times \tan 30^\circ = 0.577 \times \sigma = 76.4525 > 73.61$$

安全



(2)

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2} = 175 + 96.05 = 271.05 \text{ kPa}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{zy}^2} = 175 - 96.05 = 78.95 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2 \times 60^\circ) = 175 + 96.05 \times (-0.5) = 126.975 \text{ kPa}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2 \times 60^\circ) = 96.05 \times 0.866 = 83.18 \text{ kPa}$$

$$\tau_t = \sigma \times \tan 30^\circ = 0.577 \times 126.975 = 73.26 < 83.18$$

不安全



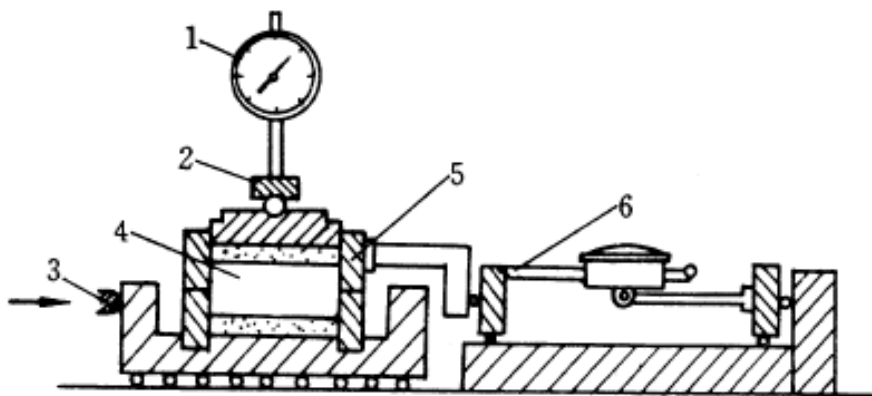


# 抗剪强度的测定方法

## 直接剪切试验

应变控制式：等速推动试样产生位移，测定相应的剪应力

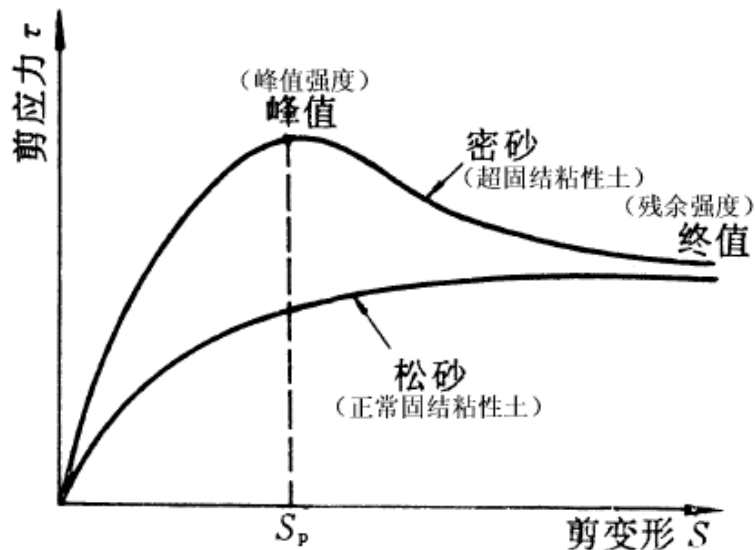
应力控制式：对试件分级施加水平剪应力测定相应的位移



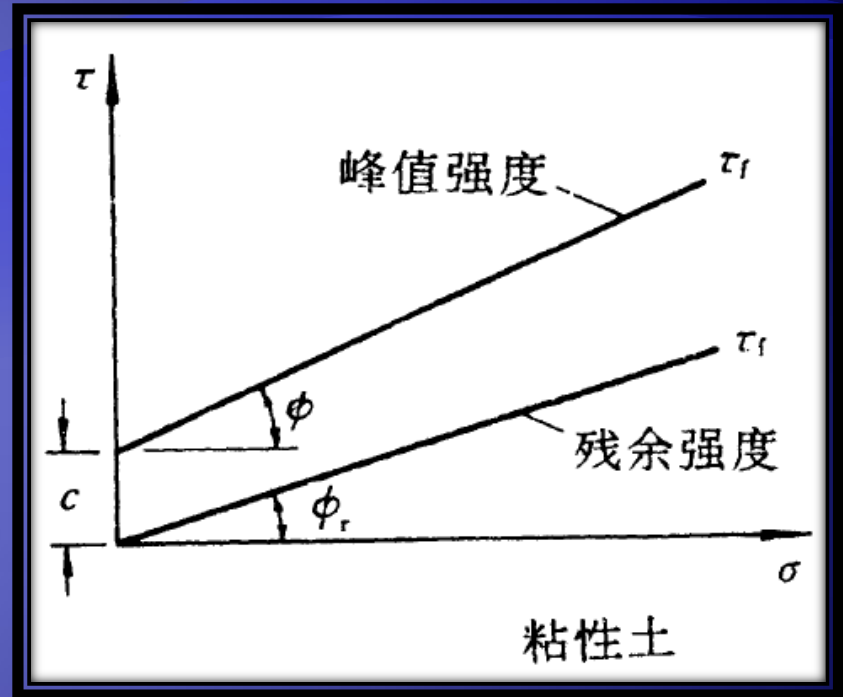
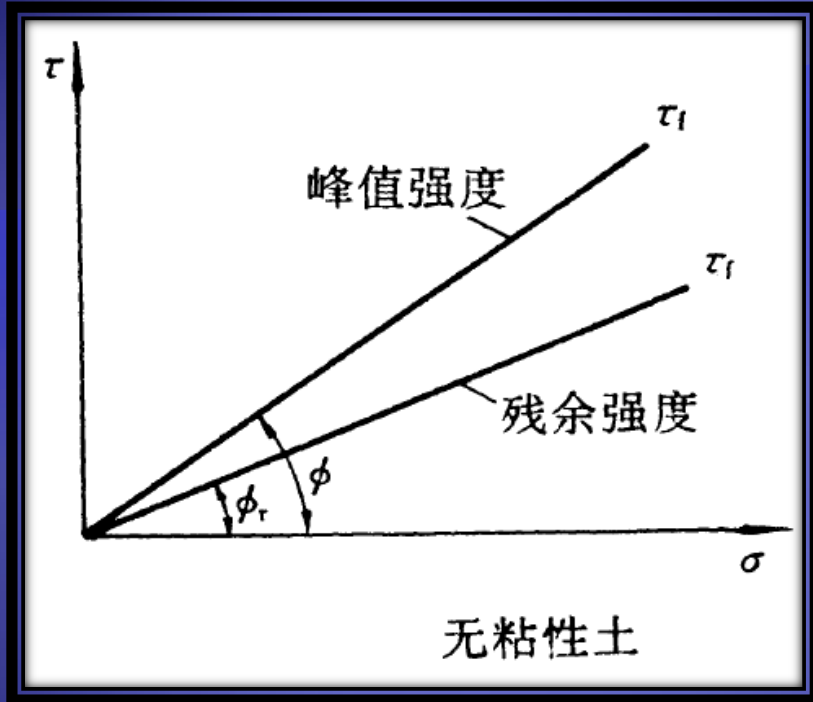
应变控制式直接剪切仪

1——垂直变形量表；2——垂直加荷框架；

3——推动座；4——试样；5——剪切盒；6——量力环。



剪应力-剪变形关系曲线



一般取峰值作为该级压力下的抗剪强度  $\tau_f$ 。必要时可取终值(残余强度)作为抗剪强度。



# 直接剪切试验方法

## 快剪试验

在试样施加垂直压力  $\sigma$  后，立即快速施加水平剪应力使试样剪切破坏。

## 固结快剪

在试样施加垂直压力后，允许试样充分排水，待固结完成后，再快速施加水平剪应力使试样剪切破坏。

## 慢剪试验

在试样施加垂直压力  $\sigma$  后，允许试样充分排水，待固结完成后，以缓慢的速率施加水平剪应力使试样剪切破坏。





# 直接剪切试验优缺点

优点：构造简单，操作方便,结果便于整理，操作时间短等

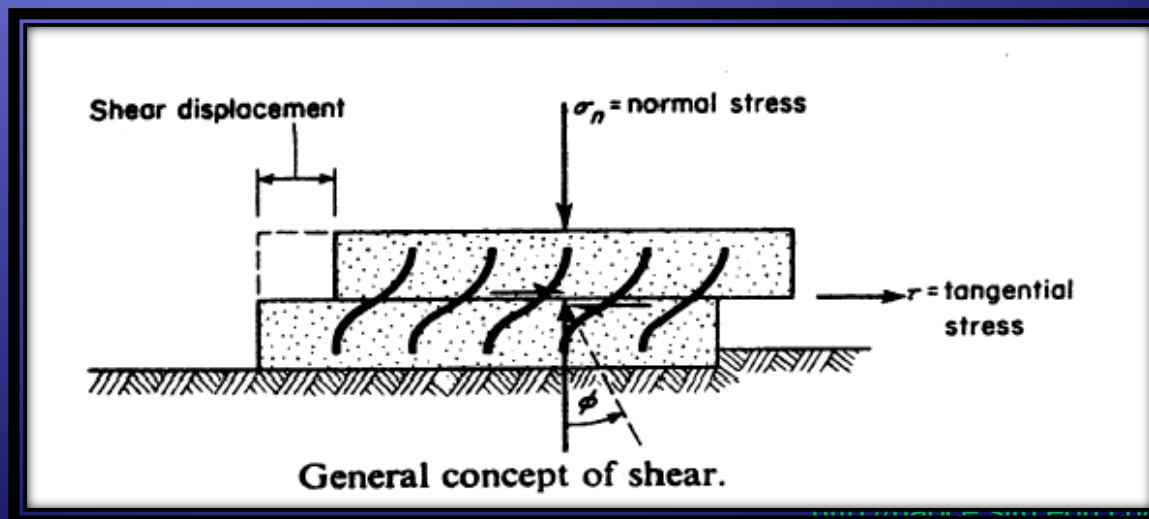
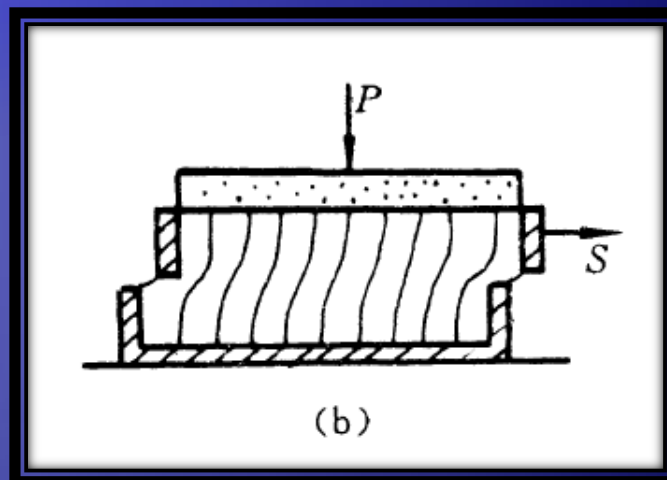
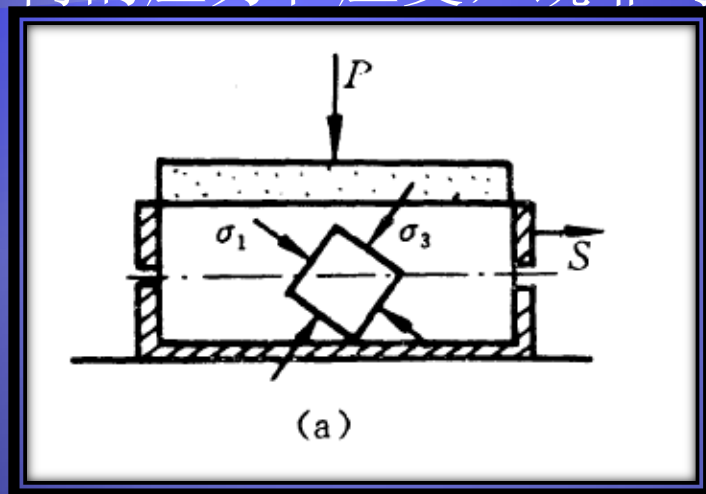
缺点：

1. 剪切面限定在上下盒之间的平面，而不是沿土样最薄弱的面剪切破坏；
2. 剪切面上剪应力分布不均匀，土样剪切破坏时先从边缘开始，在边缘发生应力集中现象；
3. 在剪切过程中，土样剪切面逐渐缩小，而在计算抗剪强度时却是按土样的原截面积计算；
4. 试验时不能严格控制排水条件，不能量测孔隙水压力、在进行不排水剪切时，试件仍有可能排水，特别对于饱和粘粘性土。

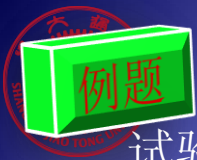


# 直剪仪内试件的应力和应变

在剪切过程中，特别是在剪切破坏时，试件内的应力和应变，既非均匀又难确定。







某种土在 $100 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ kPa}$ 、 $300 \text{ kPa}$ 、 $400 \text{ kPa}$ 的法向压力下进行直剪试验，测得抗剪强度分别为 $67 \text{ kPa}$ 、 $119 \text{ kPa}$ 、 $161 \text{ kPa}$ 、 $215 \text{ kPa}$ ，（1）试用作图法求土的抗剪强度指标  $c$ 、 $\varphi$  值；（2）若作用在这种土某平面上的法向应力与剪应力分别是 $200 \text{ kPa}$ 与 $100 \text{ kPa}$ ，问该土是否剪坏？

解：（1）

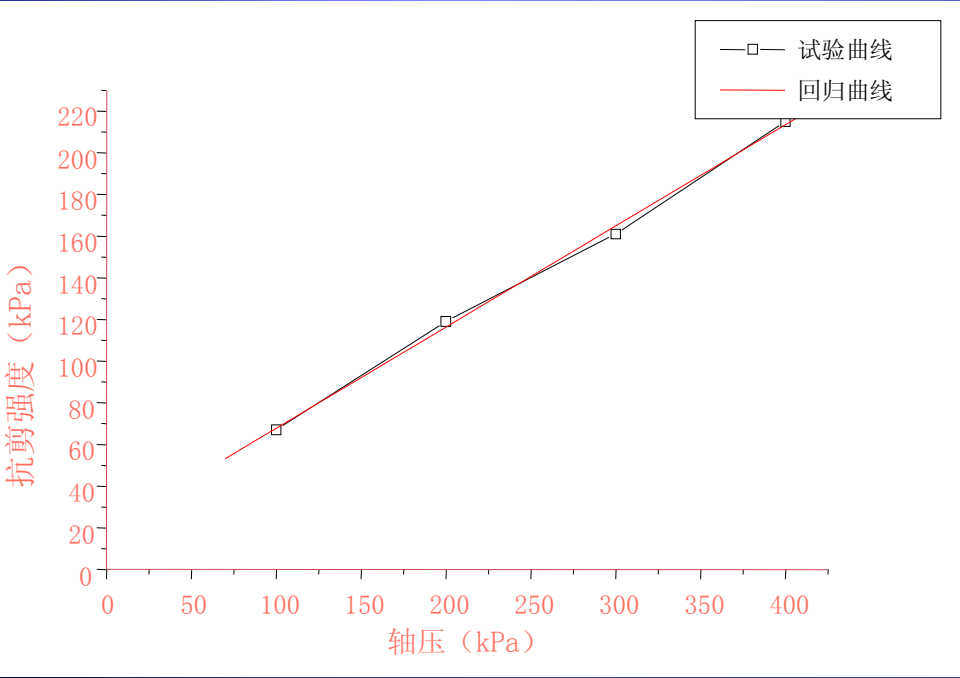
回归得到直线方程为  $Y = 19 + 0.468 X$

则  $c = 19 \text{ kPa}$

$\varphi = \arctan(0.468) = 25.08^\circ$

（2）

$$\begin{aligned} \tau_f &= c + \sigma \tan \varphi \\ &= 19 + 0.468\sigma \\ &= 19 + 0.468 \times 200 \\ &= 112.6 > 100 \end{aligned}$$



土体不会受剪破坏

## 例题

已知某种土直剪试验的结果，在法向压力 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 作用下，测得土的峰值抗剪强度分别为  $\tau_f = 105$  kPa、151 kPa、207 kPa、260 kPa，终值抗剪强度分别为  $\tau_f = 34$  kPa、65 kPa、93 kPa、123 kPa。

- (1) 试用作图法求该土的峰值和终值抗剪强度指标，并阐明这两种指标的用法；
- (2) 若作用在这种土某平面上的法向应力和剪应力分别是 267 kPa 和 188 kPa，试分析是否剪坏？

解： (1)

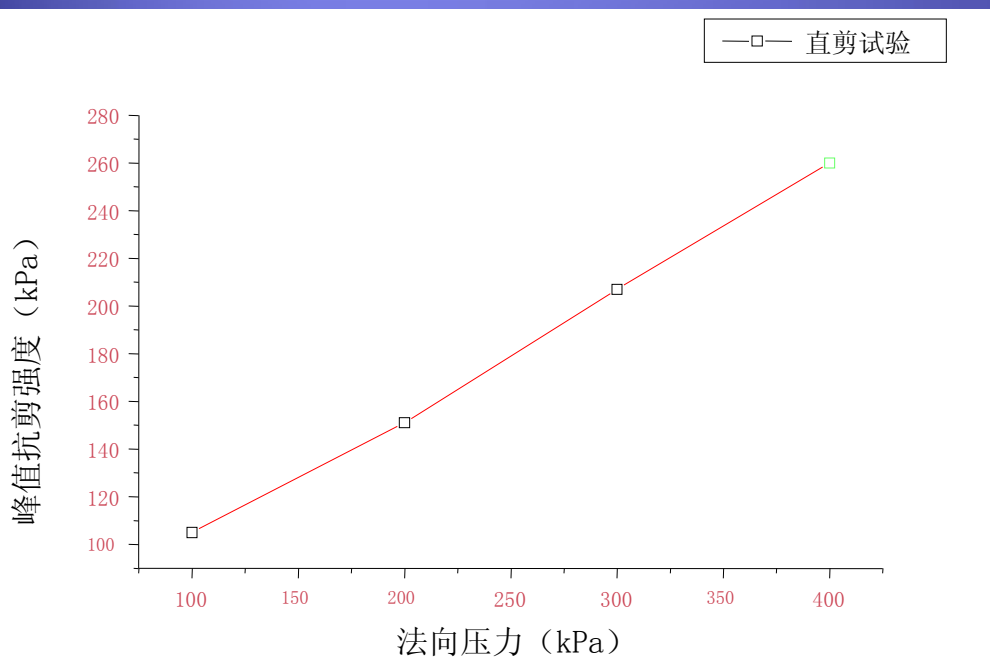
回归得：

$$\tau_f = 50.5 + 0.521\sigma$$

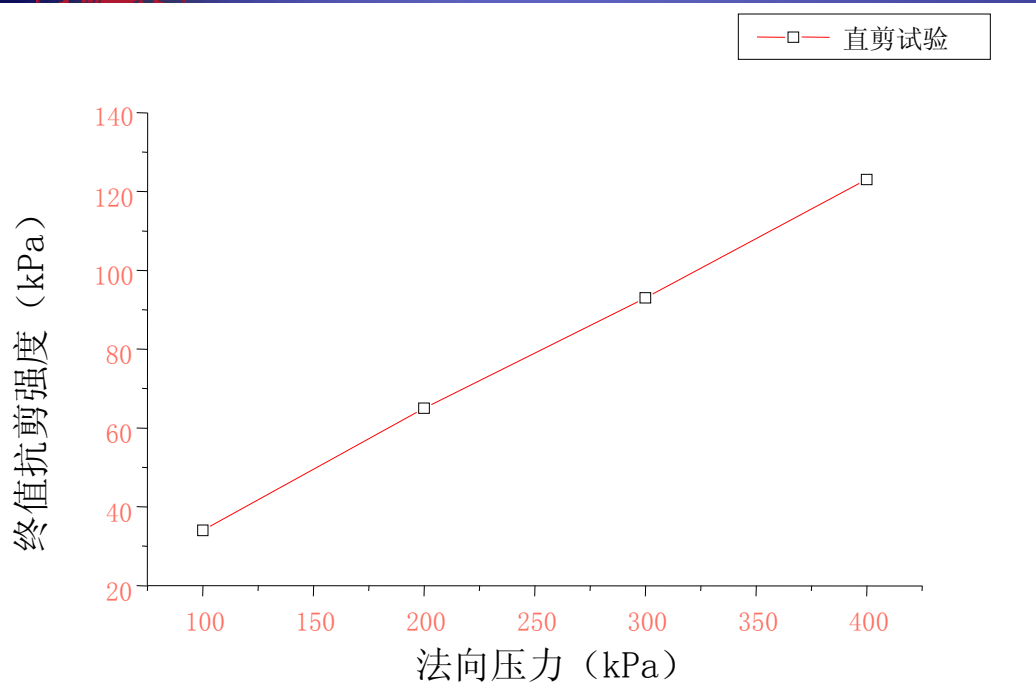
所以

$$c = 50.5 \text{ kPa}$$

$$\varphi = \arctan(0.521) = 27.52^\circ$$







回归得：

$$\tau_f = 5 + 0.295\sigma$$

故  $c = 5kPa$

$$\varphi = \arctan(0.295) = 16.44^\circ$$

(2) 验算终值抗剪强度： $5 + 267 \times 0.295 = 83.765 < 188$ ，不安全

验算峰值抗剪强度： $50.5 + 267 \times 0.521 = 189.607 > 188$ ，安全

由此可知，此土样是否剪坏与其应力历史有关，若其已经进入软化阶段，则破坏，否则安全。

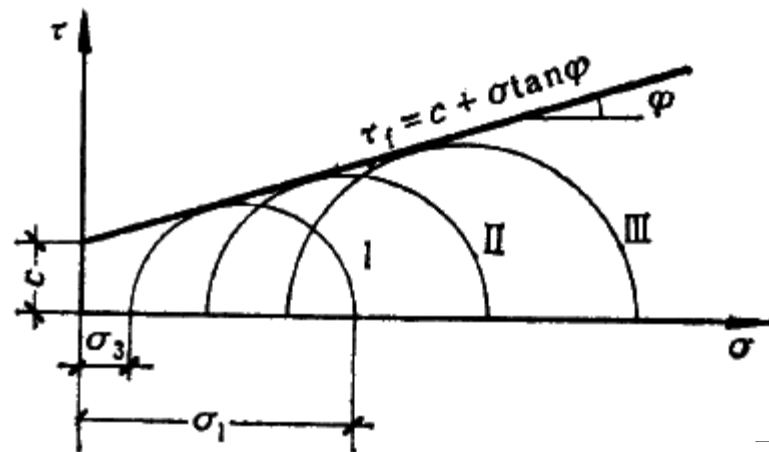
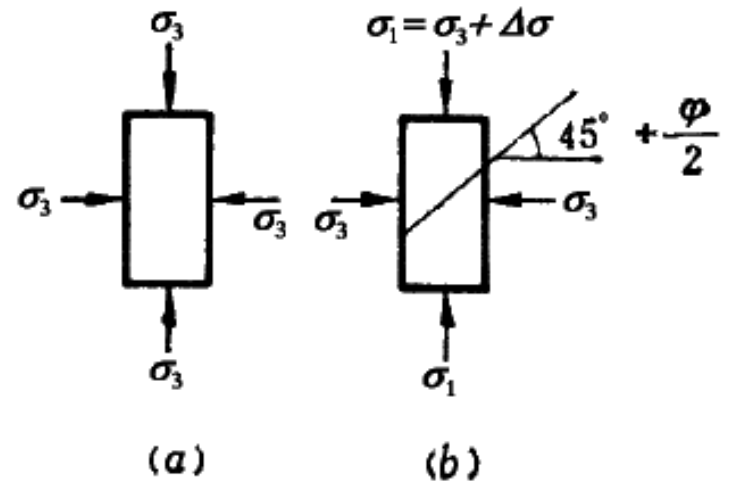
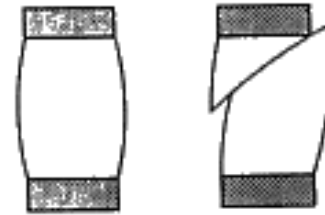
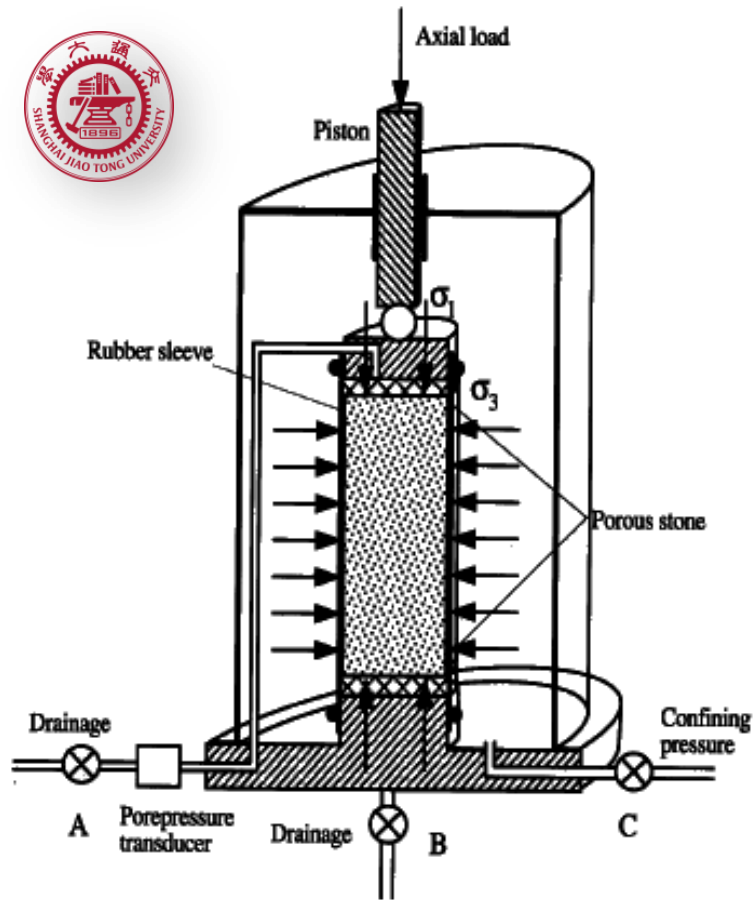


## 三轴压缩试验

三轴压缩试验也称三轴剪切试验，是测定土抗剪强度的一种较为完善的方法。三轴压缩仪由压力室、轴向加荷系统、施加围压系统、孔隙水压力量测系统等组成。

### ➤ 主要步骤

1. 将土样切成圆柱体套在橡胶膜内、放在密封的压力室中。然后向压力室内压入水，使试样各向受到围压 $\sigma_3$ ，并使液压在整個试验过程中保持不变，这时试样内各向的三个主应力都相等、因此不发生剪应力。
2. 然后通过传力杆对试样施加竖向压力，这样，竖向主应力就大于水平向主应力。水平向主应力保持不变。而竖向主应力逐渐增大，试件终于至剪切破坏。





## 三轴压缩试验方法

1. 不固结不排水试验(UU Test): 试样在施加周围压力和随后施加竖向压力直至剪切破坏的整个过程中都不允许排水, 试验自始至终关闭排水阀门。
2. 固结不排水试验(CU Test): 试样在施加周围压力  $\sigma_3$  后打并排水阀门, 允许排水固结, 稳定后关闭排水阀门, 再施加竖向压力、使试样在不排水的条件下剪切破坏。
3. 固结排水试验(CD Test): 试样在施加周围压力  $\sigma_3$  时允许排水固结, 待固结稳定后, 再在排水条件下施加竖向压力至试样剪切破坏。



# 三轴压缩试验优缺点

## ➤ 优点：

- 1 应力状态和应力路径明确；
- 2 可严格控制排水条件；
- 3 破坏面不是人为固定的；
- 4 试验采用单元体试验

## ➤ 缺点：

- 1 中主应力  $\sigma_2 = \sigma_3$ 。与实际未必相符。
- 2 设备相对复杂，现场无法试验

真三轴仪中的试样可在不同的三个主应力 ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) 作用下进行试验。













# SJ-1A.G 三轴剪力仪压力测控柜

# SJ-1A.G 三轴剪力仪压力测控柜



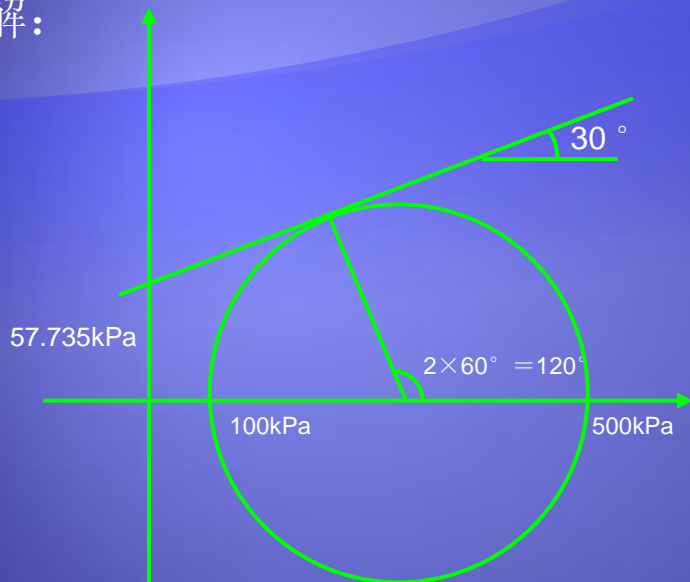




## 例题

某土样进行三轴压缩试验，剪坏时  $\sigma_1=500$  kPa， $\sigma_3=100$  kPa，剪坏面与大主应力面交角为  $60^\circ$ ，试绘出极限应力圆，求出  $c$ 、 $\phi$  值，并计算剪坏面上的正应力与剪应力？

解：



由图解法得此时

$$\tau_f = 57.735 + \tan 30^\circ \cdot \sigma = 57.735 + 0.577\sigma$$

$$\phi = 30^\circ, c = 57.735 \text{ kPa}$$

剪坏面与最大主应力作用平面的夹角是  $(45^\circ + \frac{\phi}{2}) = 60^\circ$

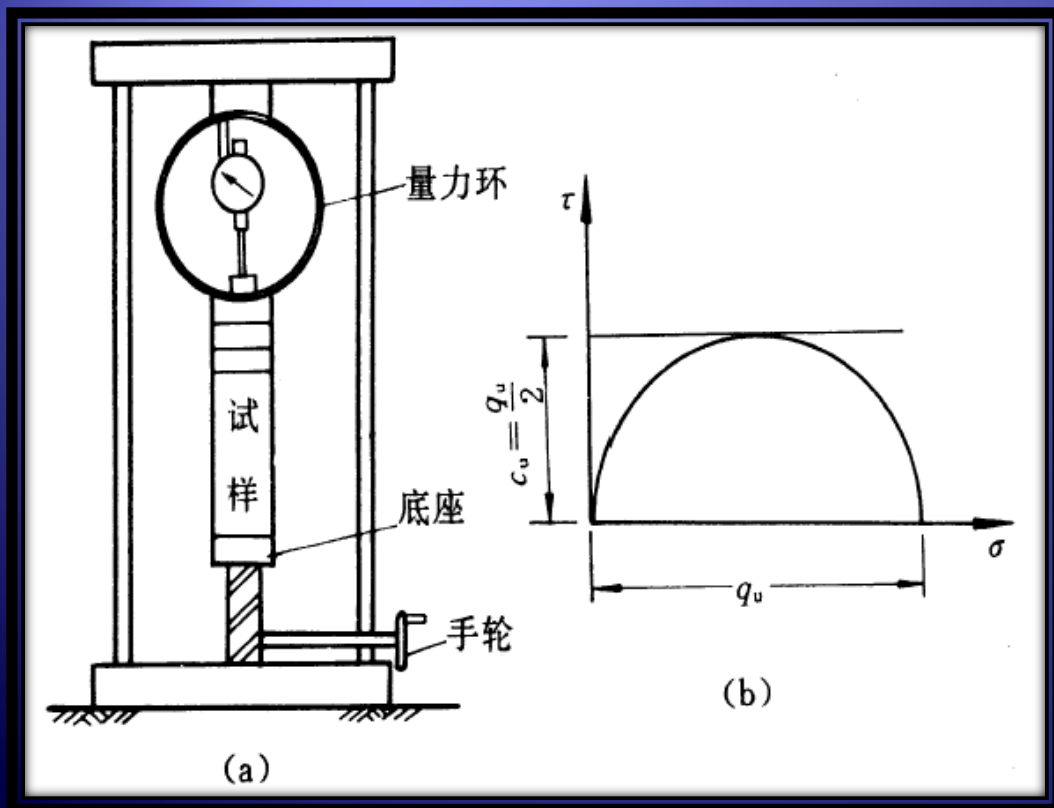
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos(2 \times 60^\circ) = 300 + 200 \times (-0.5) = 200 \text{ kPa}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin(2 \times 60^\circ) = 200 \times 0.866 = 173.2 \text{ kPa}$$



# 无侧限抗压强度试验

将圆柱形试样放在无侧限抗压试验仪中，在不加任何侧向压力的情况下施加垂直压力，直到使试件剪切破坏为止，剪切破坏时试样所能承受的最大轴向压力称为无侧限抗压强度。



$$\tau_f = c_u = \frac{q_u}{2}$$

$c_u$  — 土的不排水抗剪强度

灵敏度:

原状土与重塑土无侧限抗压强度的比值。





# 十字板剪切试验

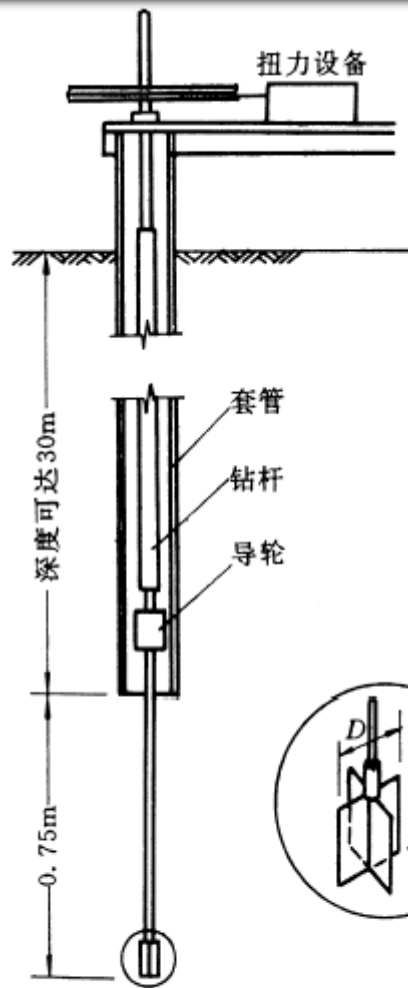
十字板剪切试验就地进行，它不需取原状土样，试验时的排水条件、受力状态与土所处的天然状态比较接近。

十字板剪切仪适用于饱和软粘土，特别适用于难于取样或试样在白重作用下不能保持原有形状的软粘土。它的优点是构造简单，操作方便，试验时对土的结构扰动也较小，故在实际中广泛得到应用。

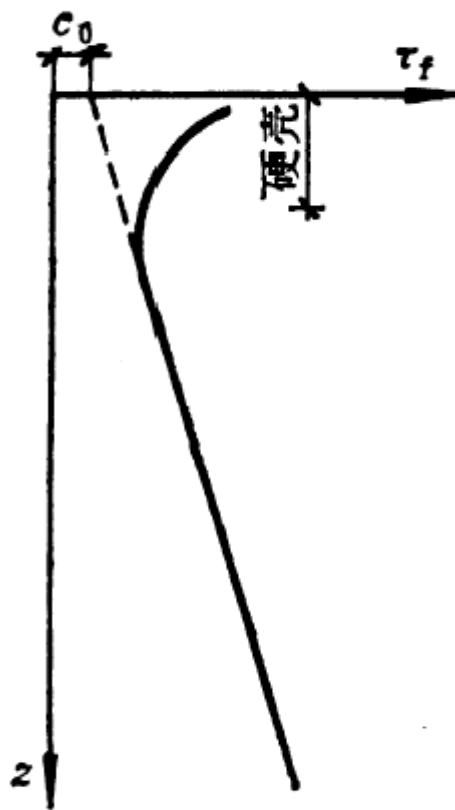
属于不排水  
剪切的试验条件

$$\tau_f \approx \frac{q_u}{2}$$





十字板试验装置



土的抗剪强度  
随深度的变化

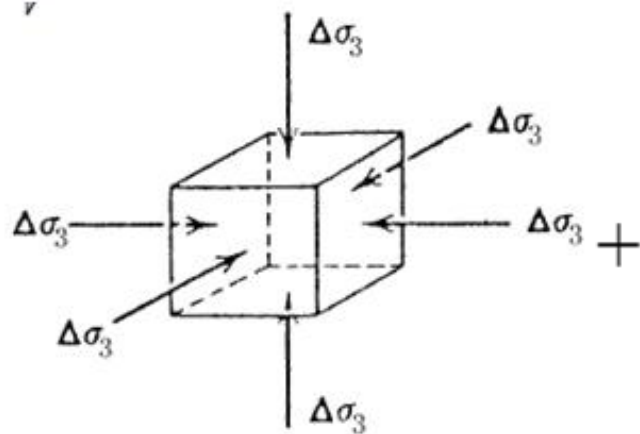




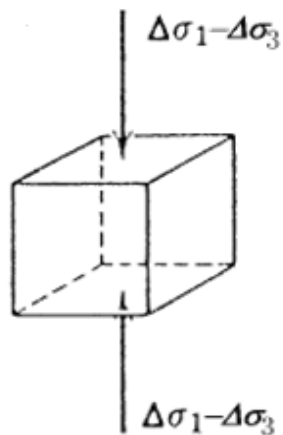
# 孔隙压力系数

1954年斯开普顿 (Skempton) 给出了孔隙压力系数A和B用来表述试样在三轴不排气、不排水条件下的孔隙压力随总应力变化的反映。他假定土是具有各向同性、弹性材料的性质，孔隙流体的体积变化与应力之间呈线性关系。根据有效应力原理、弹性理论，和三轴试验结果，建立**轴对称**应力状态下土中孔隙压力与大、小主应力之间的关系。

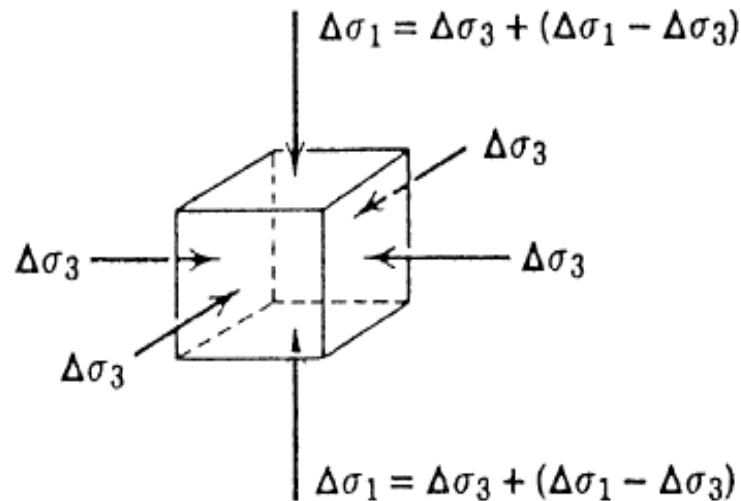
1. 土单元在各向相等的有效应力作用下固结，初始孔隙水压力  $u_0 = 0$ ，模拟试样的原位应力状态。
2. 土单元受到各向相等的压力  $\Delta\sigma_3$  的作用，孔隙压力的增长为  $\Delta u_3$ 。
3. 如果在试样上施加轴内压力增量  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ，孔隙水压力增量为  $\Delta u_1$ 。



等向压缩应力状态



偏差应力状态



有效应力  
弹性理论

$$\Delta u_3 = B \Delta \sigma_3$$

$$B = \frac{\Delta u_3}{\Delta \sigma_3}$$

$$\Delta u_1 = B \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

$$= AB (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 - A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$



# 孔压系数讨论

## ① 等向压缩应力状态—孔压系数

孔压系数表示单位等向压力增量所引起的孔压增量。

对于完全饱和土，孔隙全部被水充满，则对于干土，孔隙中全部为空气，空气的压缩性很大，因而对于部分饱和土，值介于0~1之间。所以值可用作反映土体饱和程度的指标.对于具有不同饱和度的土，可通过室内三轴试验进行值的测定。



## ② 偏差应力状态—孔压系数A

孔压系数A是饱和土体在单位偏差应力增量( $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ )作用下产生的孔隙水压力增量，可用来反映土体剪切过程中的胀缩特性。孔压系数A值的大小，对于弹件体是常量 $A=1/3$ ，对于土体则不是常量。它取决于偏差应力增量( $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ )所引起的体积变化，主要与土的类型、状态、应力历史以及加载过程等因素有关，如果 $A < 1/3$ ，属于剪胀土，如密实砂和超固结粘性土等。如果 $A > 1/3$ 则属于剪缩土，如较松的砂和正常固结粘性土等。



## 饱和粘土的 $A_f$ 值

土类	$A_f$	土类	$A_f$
高灵敏粘土	0.75~1.5	弱超固结粘土	0~0.5
正常固结粘土	0.5~1.0	压实粘质砾石	-0.25~0.25
压实砂质粘土	0.25~0.75	强超固结粘土	-0.5~0





# 饱和粘性土的抗剪强度

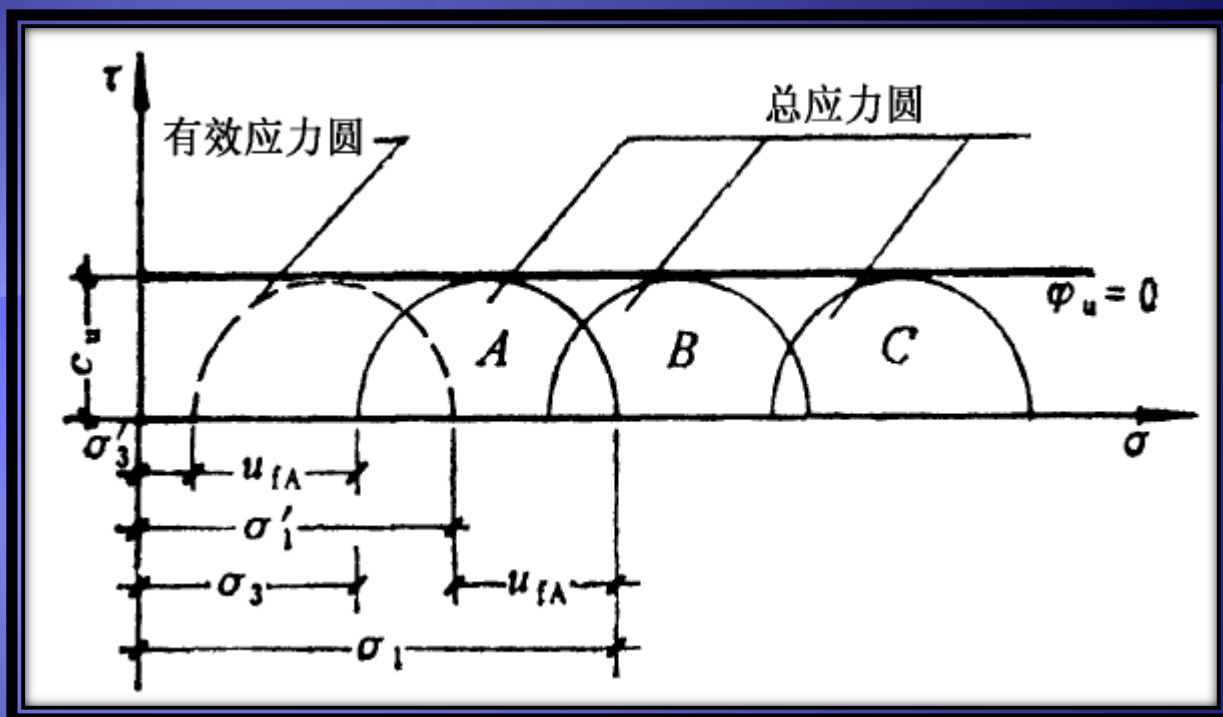
## 不固结不排水抗剪强度(下次课从这开始)

不固结不排水试验是在施加周围压力和轴向压力直至剪切破坏的整个试验过程中都不允许排水。

不排水条件下，试样在试验过程中含水量不变，体积不变，孔压系数 $B=1$ ，改变围压增量只能引起孔隙水压力的变化，并不会改变试样中的有效应力，各试样在剪切前的有效应力相等，因此抗剪强度不变。

不固结不排水试验的“不固结”是在三轴压力室压力下不再固结.而保持试样原来的有效应力不变，如果饱和粘性土从未固结过，将是一种泥浆状土，抗剪强度也必然等于零。从天然土层中取出的试样，相当于在某一压力下已经固结，具有一定的天然强度。不排水抗剪强度取决于天然土层有效固结压力。





$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_A = (\sigma_1 - \sigma_3)_B = (\sigma_1 - \sigma_3)_C$$

$$\varphi_u = 0$$

$$\tau_f = c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

一般只用于测定饱和土的不排水强度



## 固结不排水抗剪强度

在研究粘性土的固结不排水强度时，要区别试样是正常固结还是超固结。如果试样所受到的  $\sigma_3 > p_c$ ，属于正常固结试样；如果  $\sigma_3 < p_c$ ，则属于超固结试样。

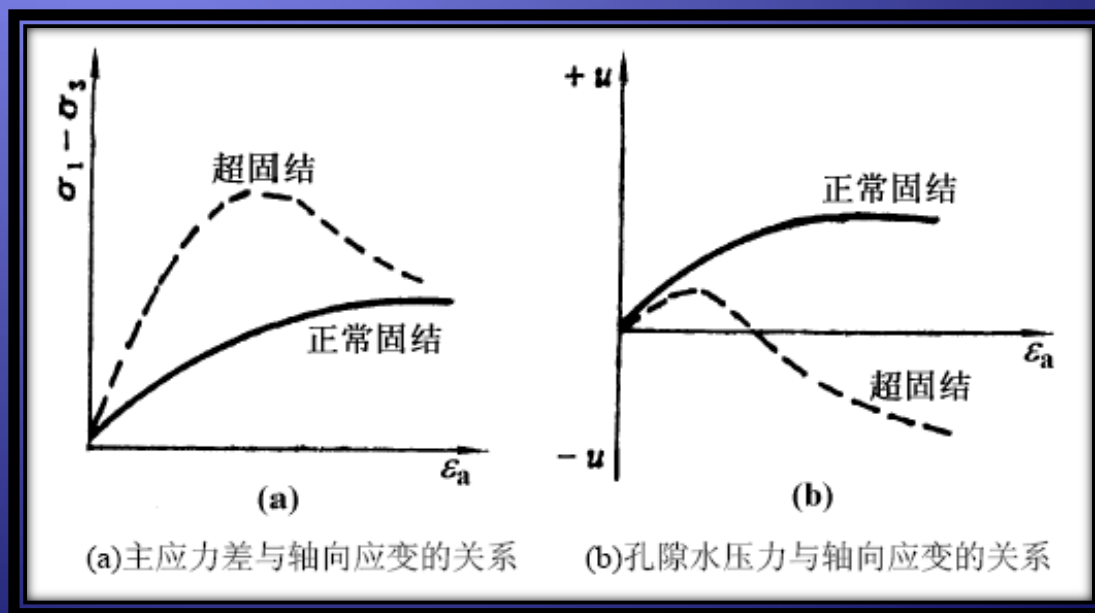
饱和粘性土固结不排水试验时，试样在  $\sigma_3$  作用下充分排水固结， $\Delta u_3 = 0$ ，在不排水条件下，施加偏应力剪切时，试样中的孔隙水压力随偏应力的增加而不断变， $\Delta u_1 = A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$ 。



## 固结不排水抗剪强度

正常固结试样剪切时体积有减少的趋势(剪缩)。但由于不允许排水,产生正的孔隙水压力,超固结试样在剪切时体积有增加的趋势(剪胀)。

强超固结试样在剪切过程中,开始产生正的孔隙水压力,以后转为负值。

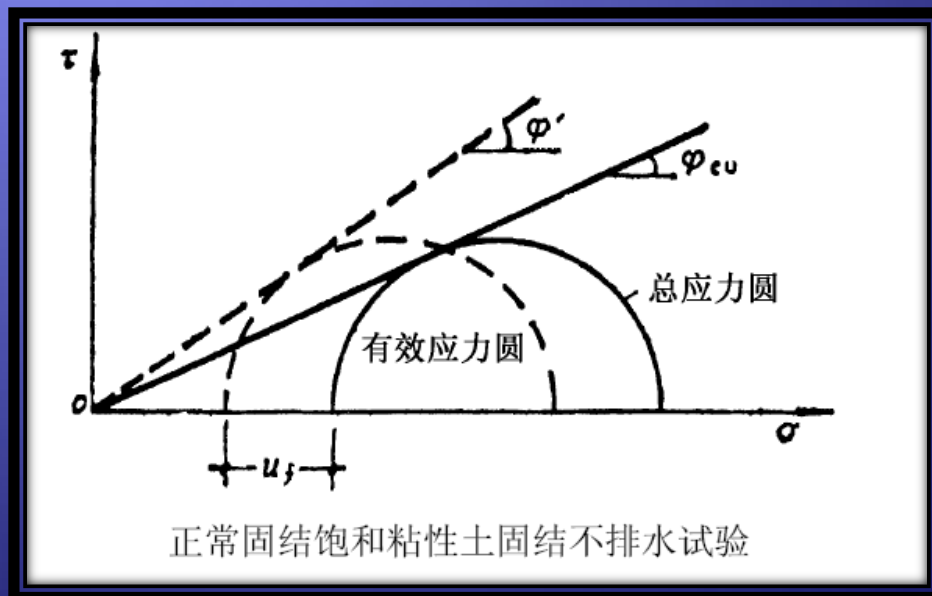




# 正常固结饱和粘性土固结不排水试验结果

有效应力圆与总应力圆直径相等、仅位置不同。两者之间的距离为 $u_f$ ，因为正常固结试样在剪切破坏时产生正的孔隙水压力，故有效应力圆在总应力圆的左方。总应力破坏包线和有效应力破坏包线都通过原点，说明未受任何固结压力的土(如泥浆状土)不具有抗剪强度。

总应力破坏包线的倾角以 $\phi_{cu}$ 表示，一般在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间，有效应力破坏包线的倾角 $\phi'$ 称为有效内摩擦角， $\phi'$ 比 $\phi_{cu}$ 大一倍左右。





## 超固结土的固结不排水试验结果

超固结土的固结不排水总应力破坏包线是一条平缓的曲线，可近似用直线ab代替，与正常固结破坏包线bc相交。bc的延长线仍通过原点，实用上将abc折线取为一条直线。

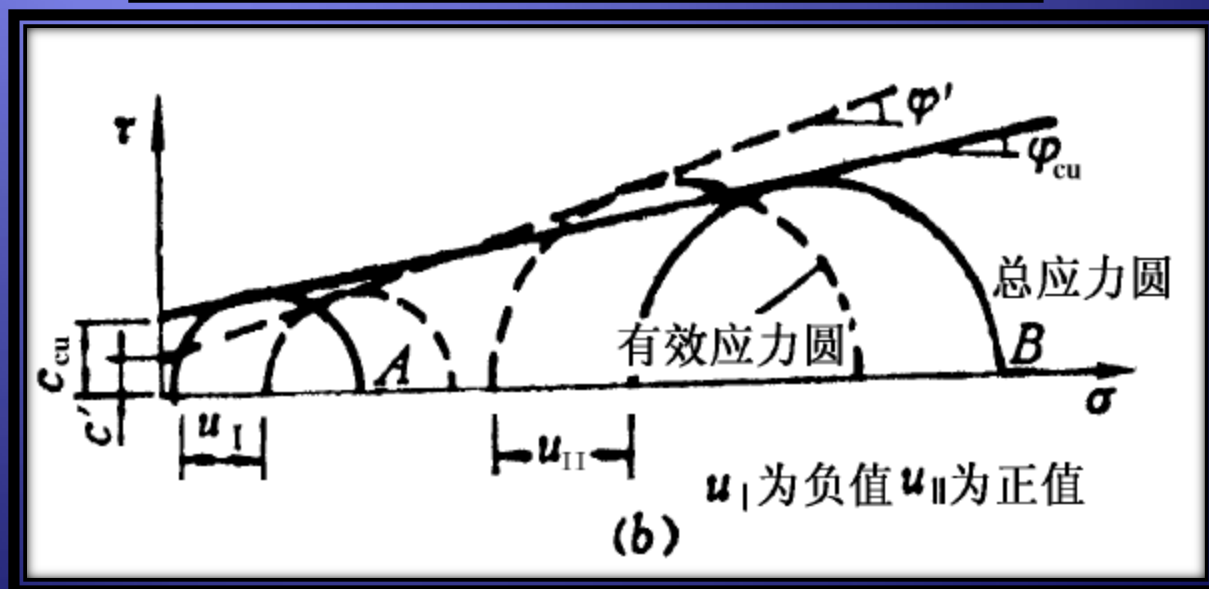
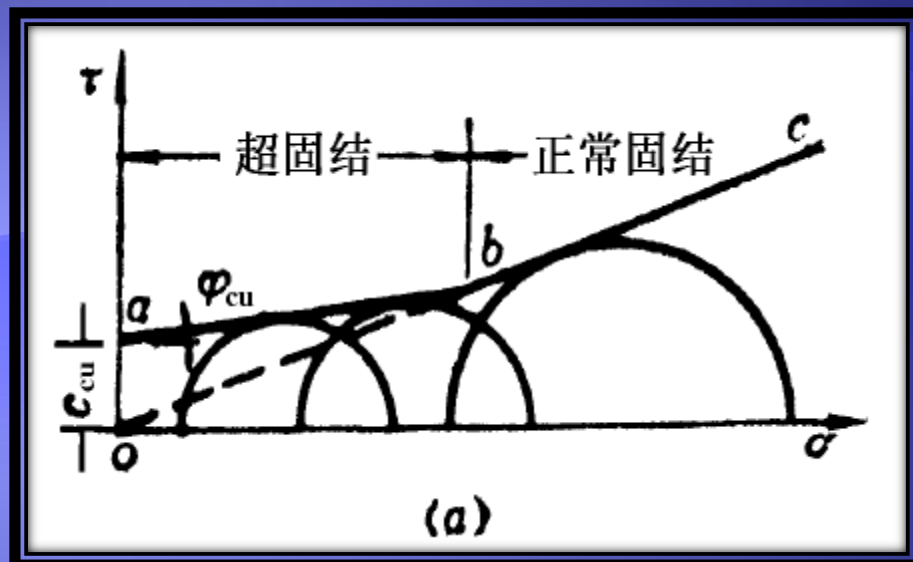
固结不排水剪的总应力强度包线可表达为：

$$\tau_f = c_{cu} + \sigma \tan \phi_{cu}$$

固结不排水剪的有效应力强度包线可表达为：

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \phi'$$

由于超固结土在剪切破坏时，产生负孔隙水压力，有效应力圆在总应力圆的右方，正常固结试样产生正的孔隙水压力，故有效应力圆在总应力圆的左方。通常  $c' < c_{cu}$ ， $\phi' > \phi_{cu}$ 。







## 固结排水抗剪强度

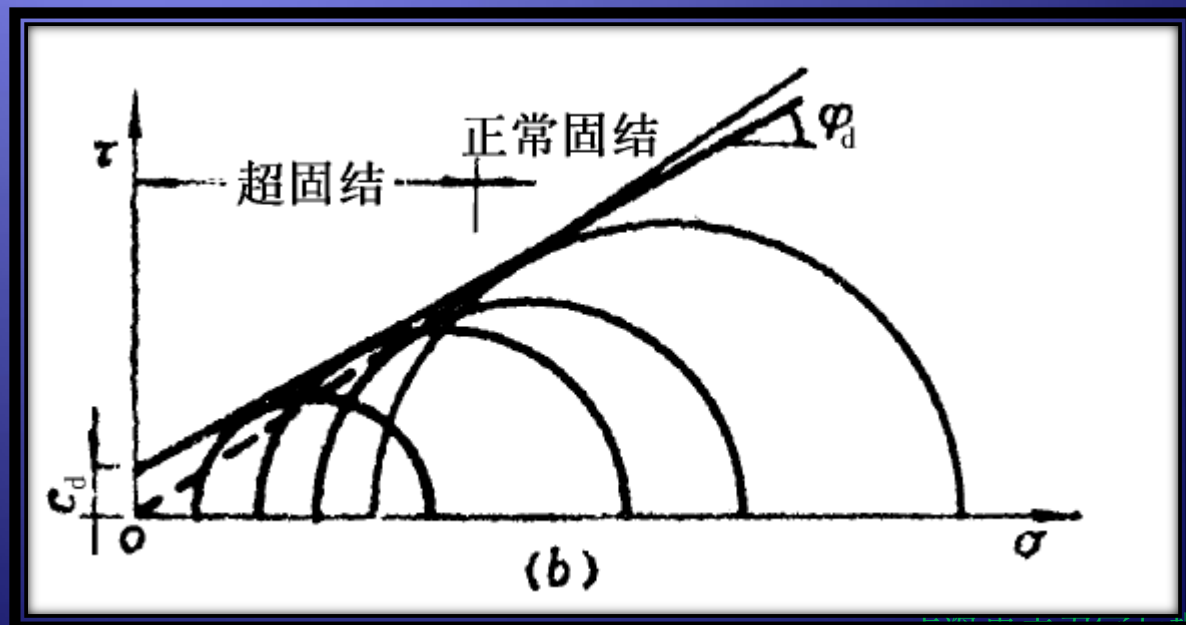
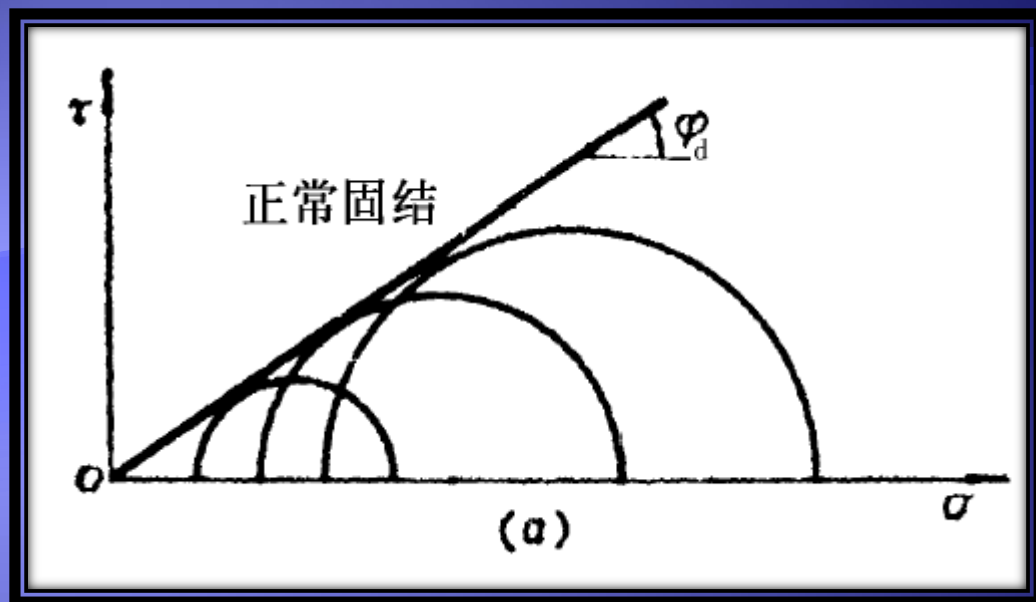
固结排水试验在整个试验过程中，孔隙水压力始终为零，总应力最后全部转化为有效应力，所以总应力圆就是有效应力圆.总应力破坏包线就是有效应力破坏包线。

固结排水剪的强度包线可表达为：

$$\tau_f = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

试验证明， $c_d$ 、 $\phi_d$  与固结不排水试验得到的  $c'$ 、 $\phi'$  接近，由于固结排水试验所需的时间太长.故实用上用  $c'$ 、 $\phi'$  代替  $c_d$ 、 $\phi_d$ ，但是两者的试验条件是有差别的，固结不排水试验在剪切过程中试样的体积保持不变，而固结排水试验在剪切过程中试样的体积一般发生变化，

$c_d$ 、 $\phi_d$  略大于  $c'$ 、 $\phi'$





# 抗剪强度指标的选择

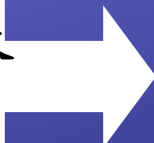
根据工程问题的性质确定分析方法，进而决定采用总应力或有效应力强度指标，然后选择测试方法。

三轴固结  
不排水试验



地基的长期稳定性

不固结不排水  
试验



地基的短期稳定性





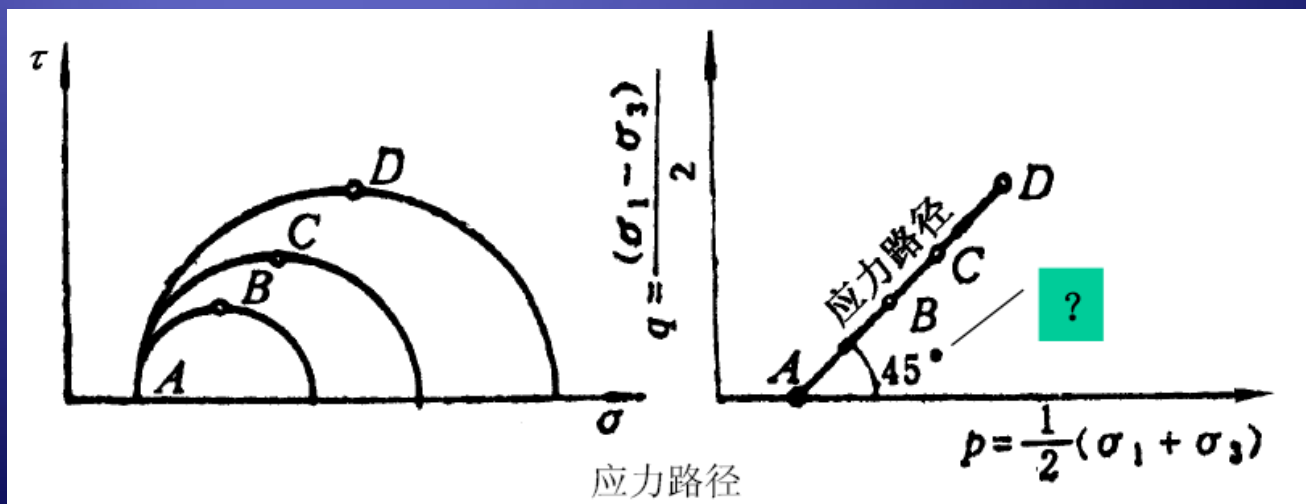
# 应力路径

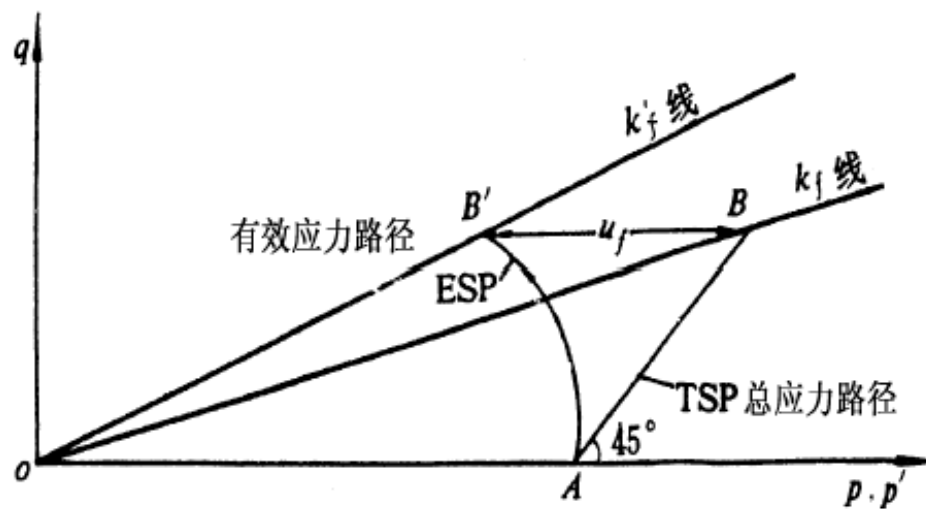
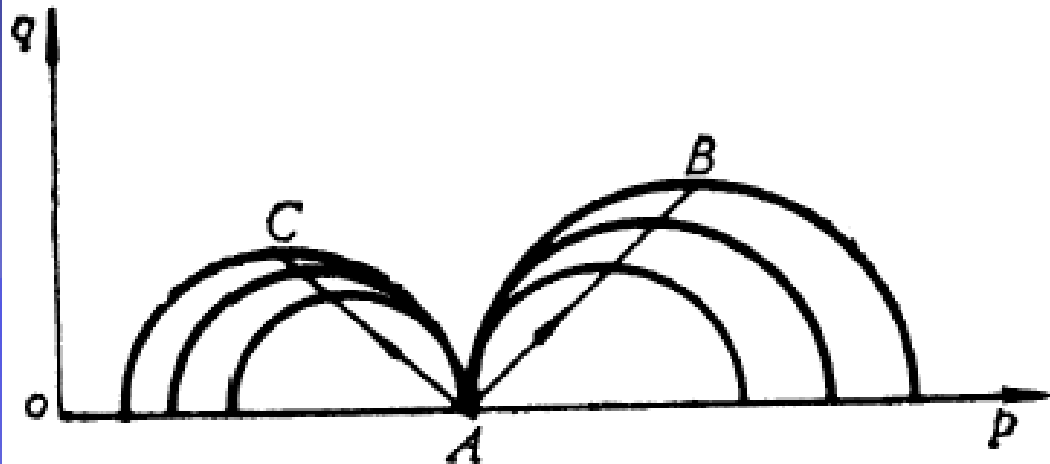
## 一：应力路径的基本概念

土体中一点的应力状态可以用应力空间中的一个应力点来描述。在荷载作用下，土体中一点应力状态的改变过程可以用对应的应力点在应力空间的运动轨迹来描述。应力点在应力空间的运动轨迹称为应力路径。

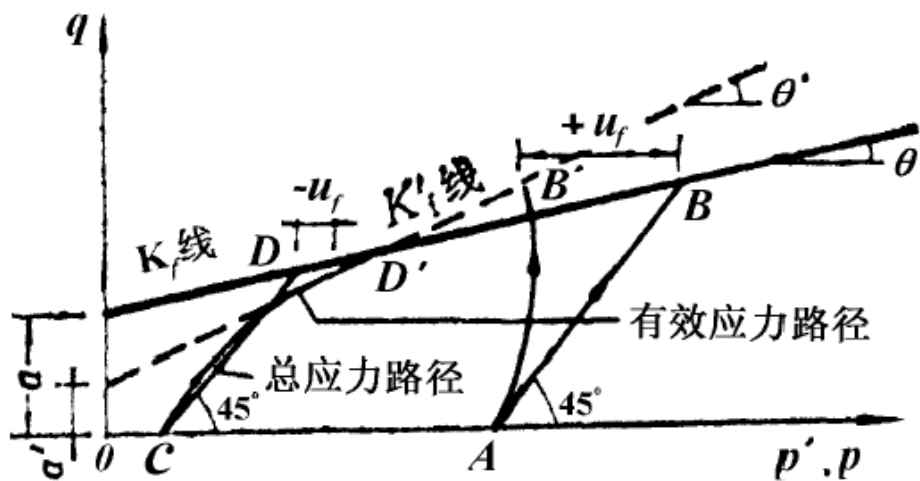
## 二：应力路径的绘制

可在莫尔圆上适当选择一个特征应力点来代表整个应力圆，常用的特征点是应力圆的顶点(最大剪应力处)，其座标为， $p = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$ ， $q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$  按应力变化过程顺序把这些点连接起来就是应力路径，并以箭头指明应力状态的发展方向。





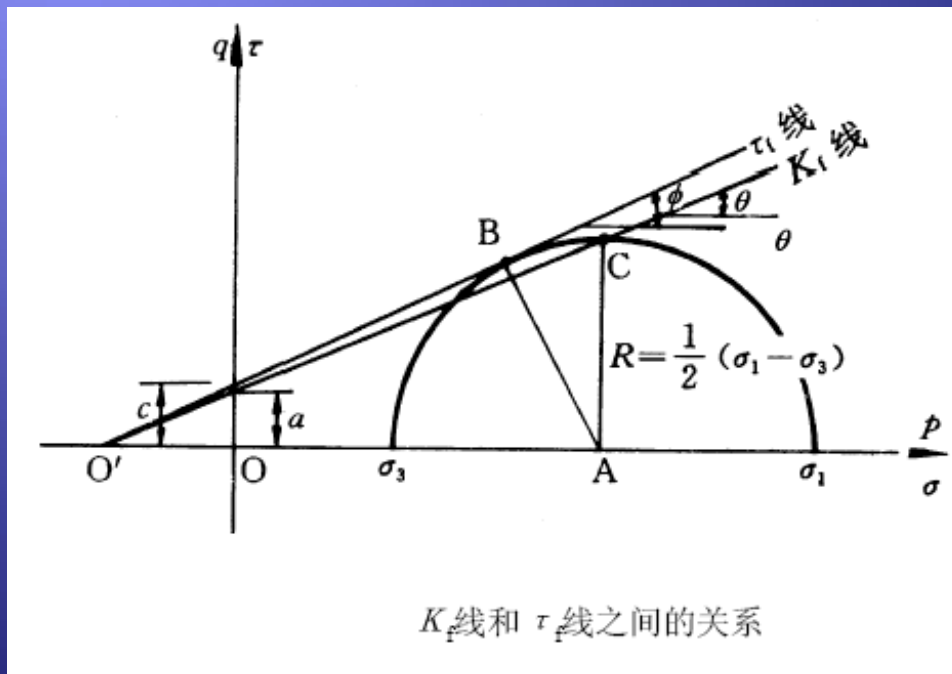
加荷方法不同，应力路径也不同，在三轴压缩试验中，如果保持 $\sigma_3$ 不变，逐步增加 $\sigma_1$ ，最大剪应力面上的应力路径AB线，如保持 $\sigma_1$ 不变，逐渐减少 $\sigma_3$ ，则应力路径为AC线。





## $K_f(K_f')$ 线和 $\tau_f$ 线之间的关系

- 总应力表示时  $\sin \phi = \tan \theta$   $c \cos \phi = \theta$
- 有效应力表示时  $\sin \phi' = \tan \theta'$   $c' \cos \phi' = \theta''$



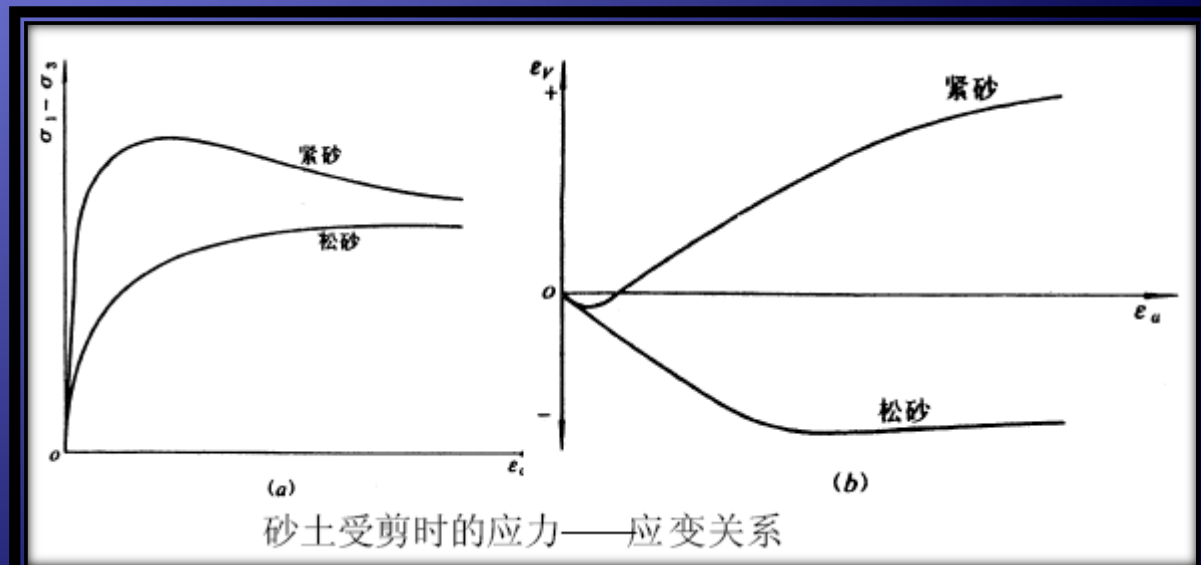
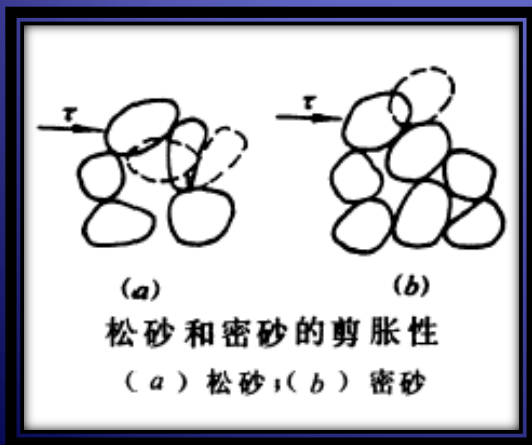




# 无粘性土的抗剪强度

密实的紧砂初始孔隙比较小，其应力超过峰值后，随应变的增加应力逐步降低，呈应变软化型，其体积变化是开始稍有减小，继而增加(剪胀)，这是由于较密实的砂土颗粒之间排列比较紧密，剪切时砂粒之间产生相对滑动，土颗粒之间的位置重新排列的结果。

松砂的强度随轴向应变的增加而增大.应力应变关系呈应变硬化型，其体积减少(剪缩)，对向一种土，紧砂和松砂的强度最终趋向同一值。在高周围压力下，不论砂土的松紧如何，受剪时都将剪缩。





谢谢大家!

上海市土力学与地基基础精品课程

<http://naoce.sjtu.edu.cn/sub/soil/new/index.php>