

第5章：土的抗剪强度

主讲：刘勇健



§5.5 土在剪切过程中的性状



一、砂土的剪切性状

(一) 砂土的内摩擦角

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \varphi$$

$$c = 0$$

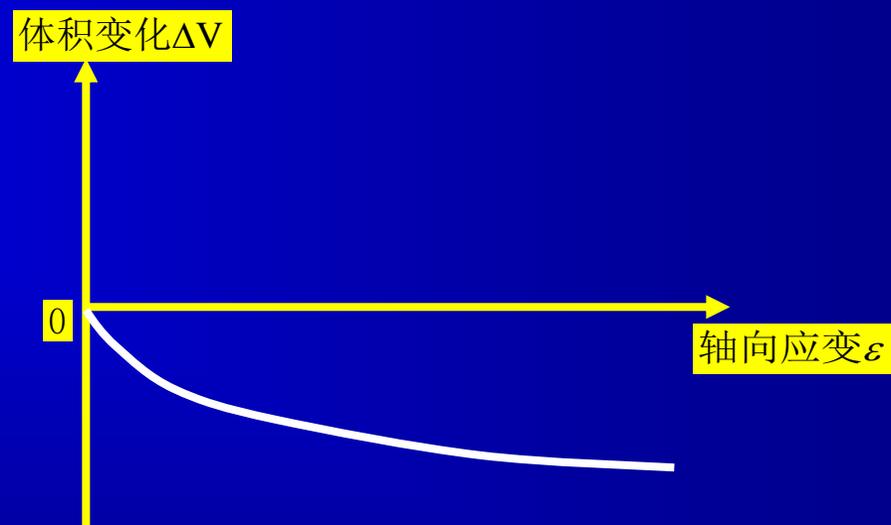
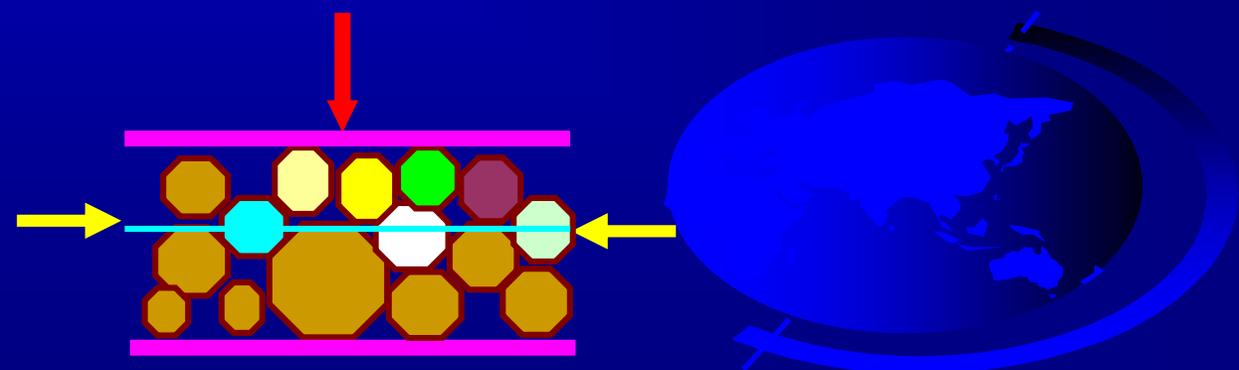
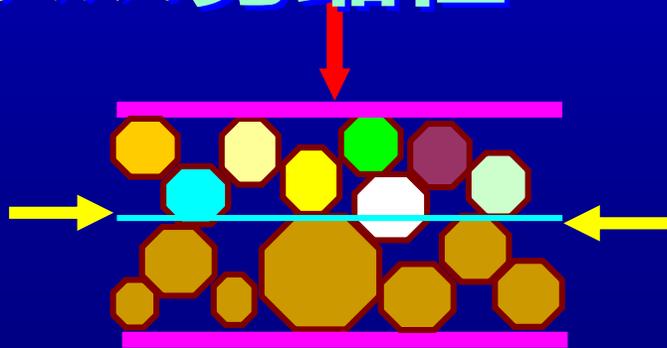
砂土抗剪强度影响因素：剪切面上的法向应力、**密度**、**颗粒形状**、**粒径大小**、**级配**、**饱和度**等。



一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变

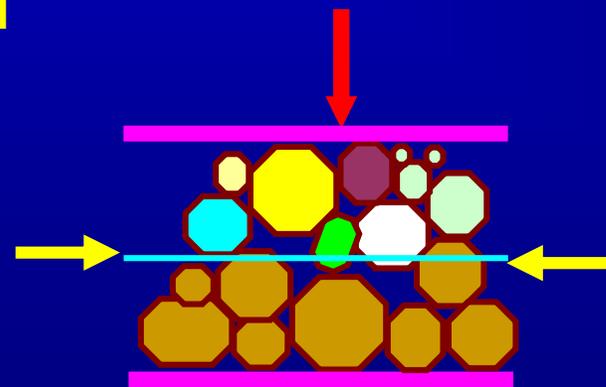
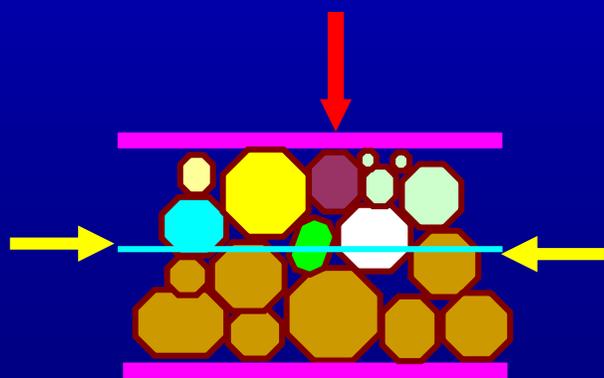
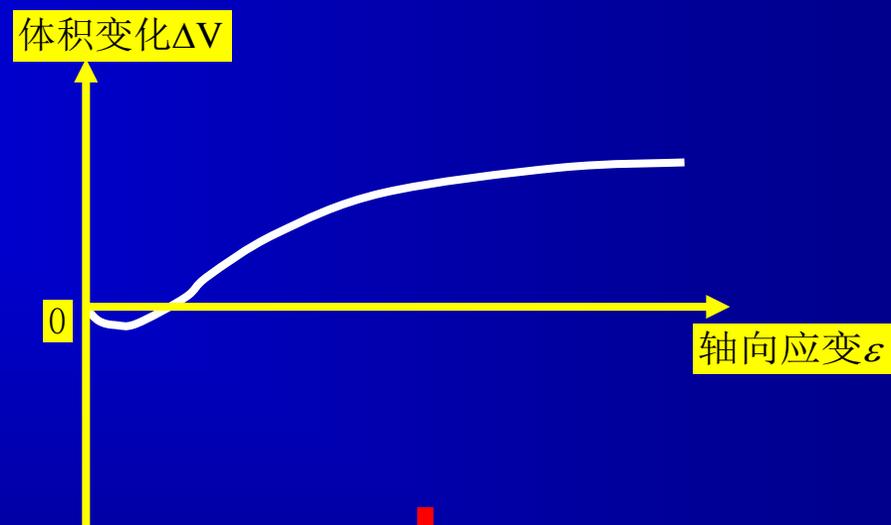
松砂受剪时，颗粒滚落到平衡位置，排列得更紧密些，所以它的体积缩小，把这种因剪切而体积缩小的现象称为**剪缩性**。



一、砂土的剪切性状

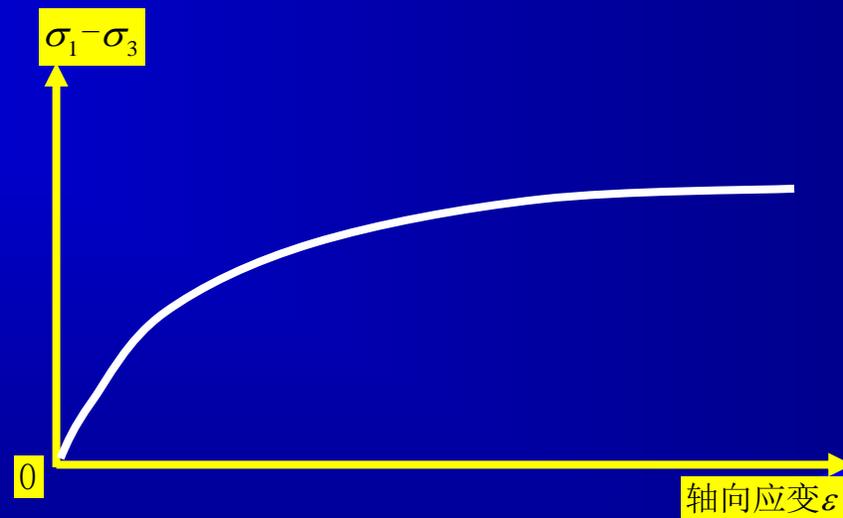
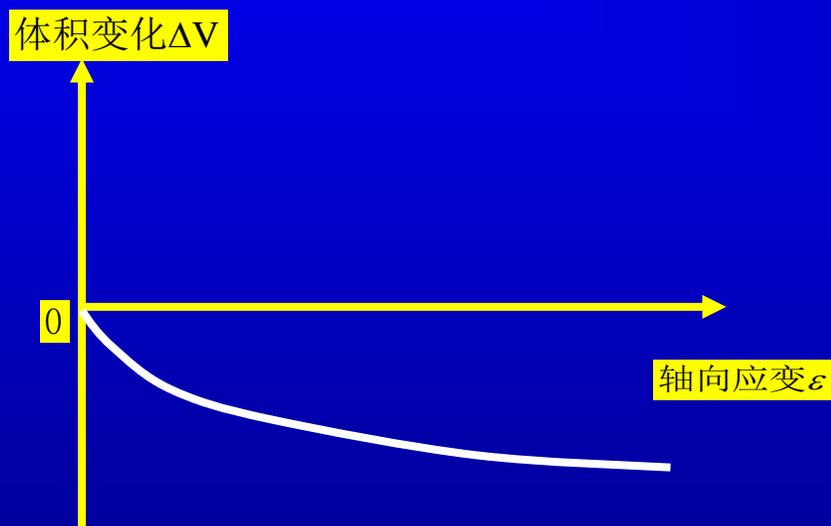
(二) 砂土的应力~轴向应变~体变

紧砂受剪时，颗粒必须升高以离开它们原来的位置而彼此才能相互滑过，从而导致体积膨胀，把这种因剪切而体积膨胀的现象称为**剪胀性**



一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变 (松砂)

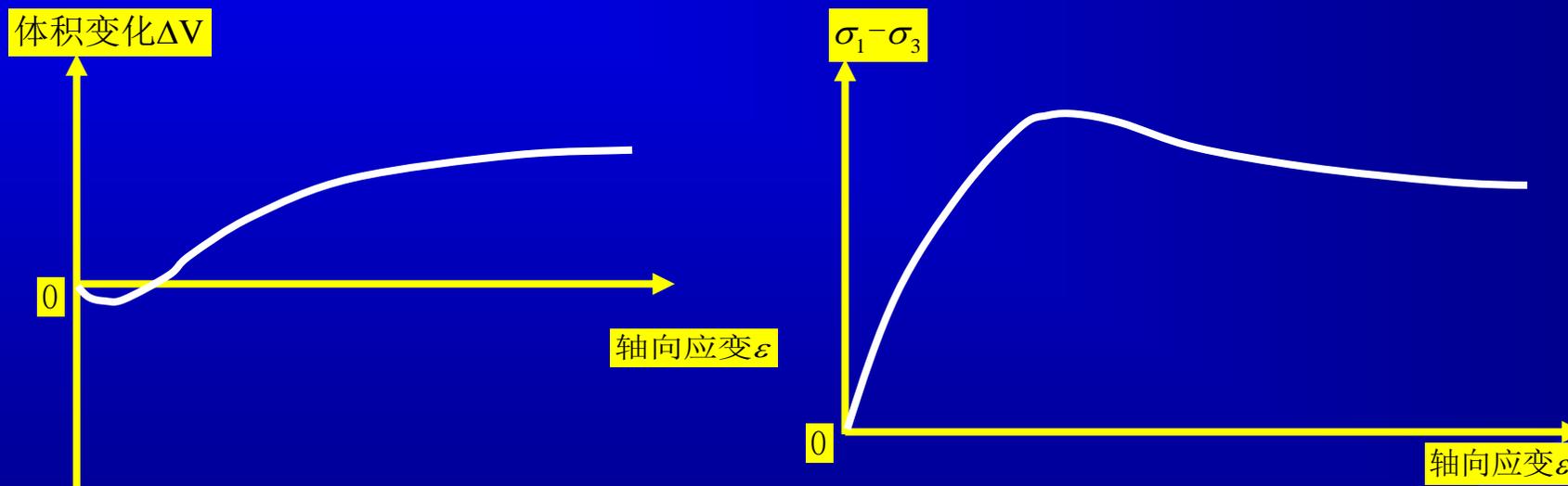


松砂→应变硬化型，剪缩（土体积减小）。



一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变 (紧砂)



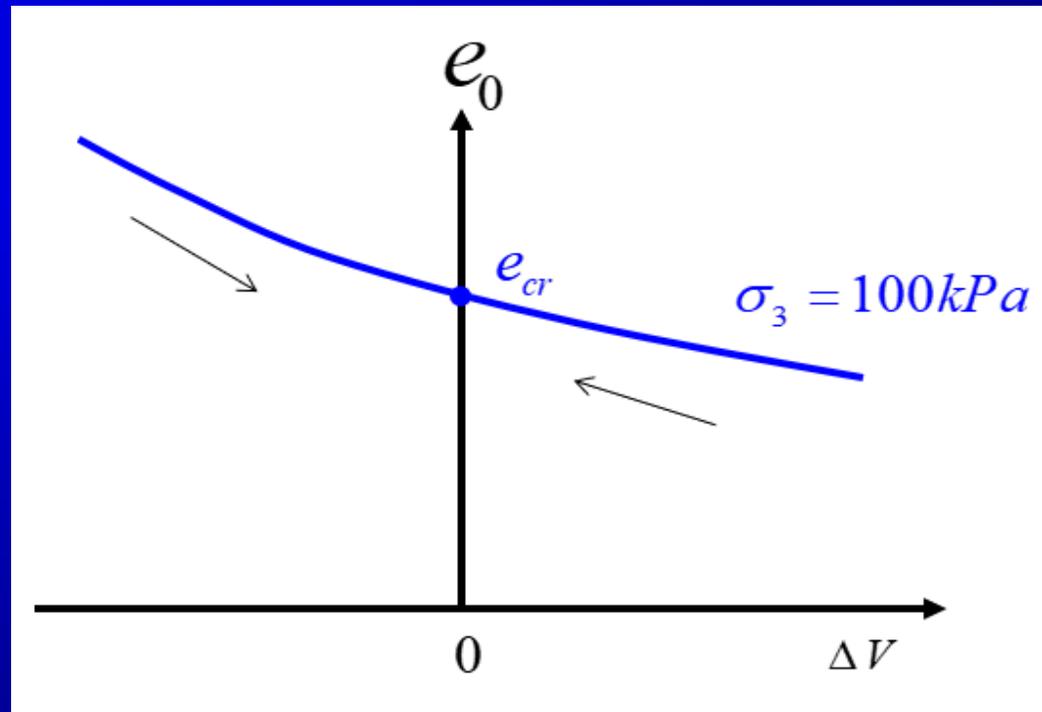
紧砂→应变软化型，剪胀（土体积先小幅减小，然后增大）。

一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变

临界孔隙比 e_{cr} :

在剪切过程中，相应于土体积变化为0的孔隙比。



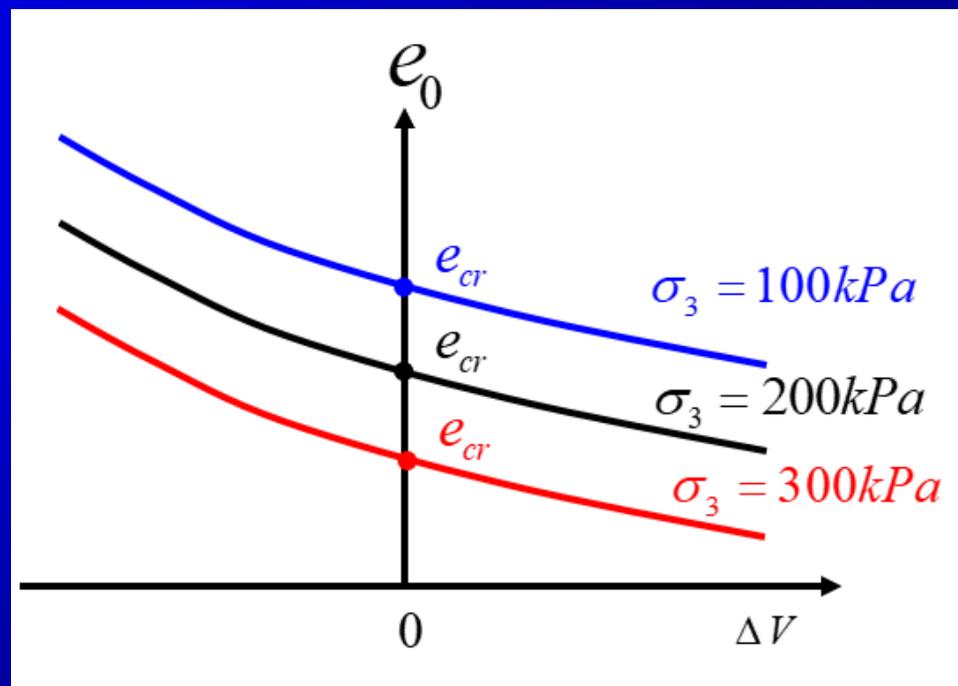
砂土的临界孔隙比将随周围压力的增加而减小。

一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变

临界孔隙比 e_{cr}

在剪切过程中，相应于土体积变化为0的孔隙比。

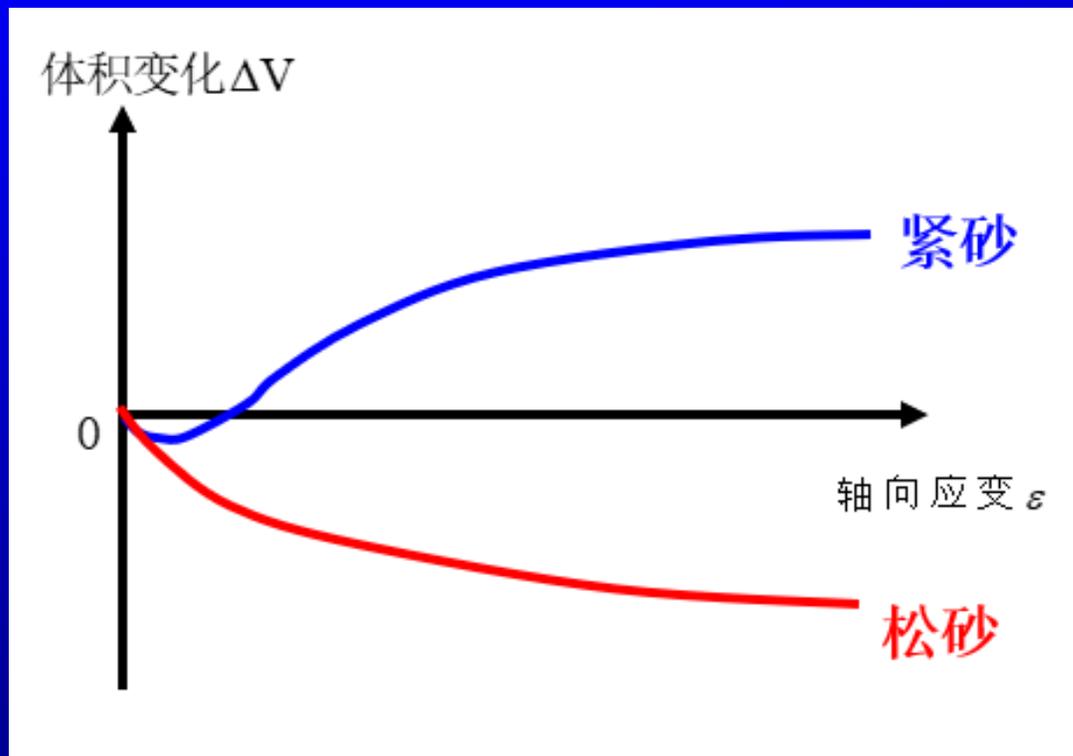


砂土的临界孔隙比将随周围压力的增加而减小。



一、砂土的剪切性状

(二) 砂土的应力~轴向应变~体变



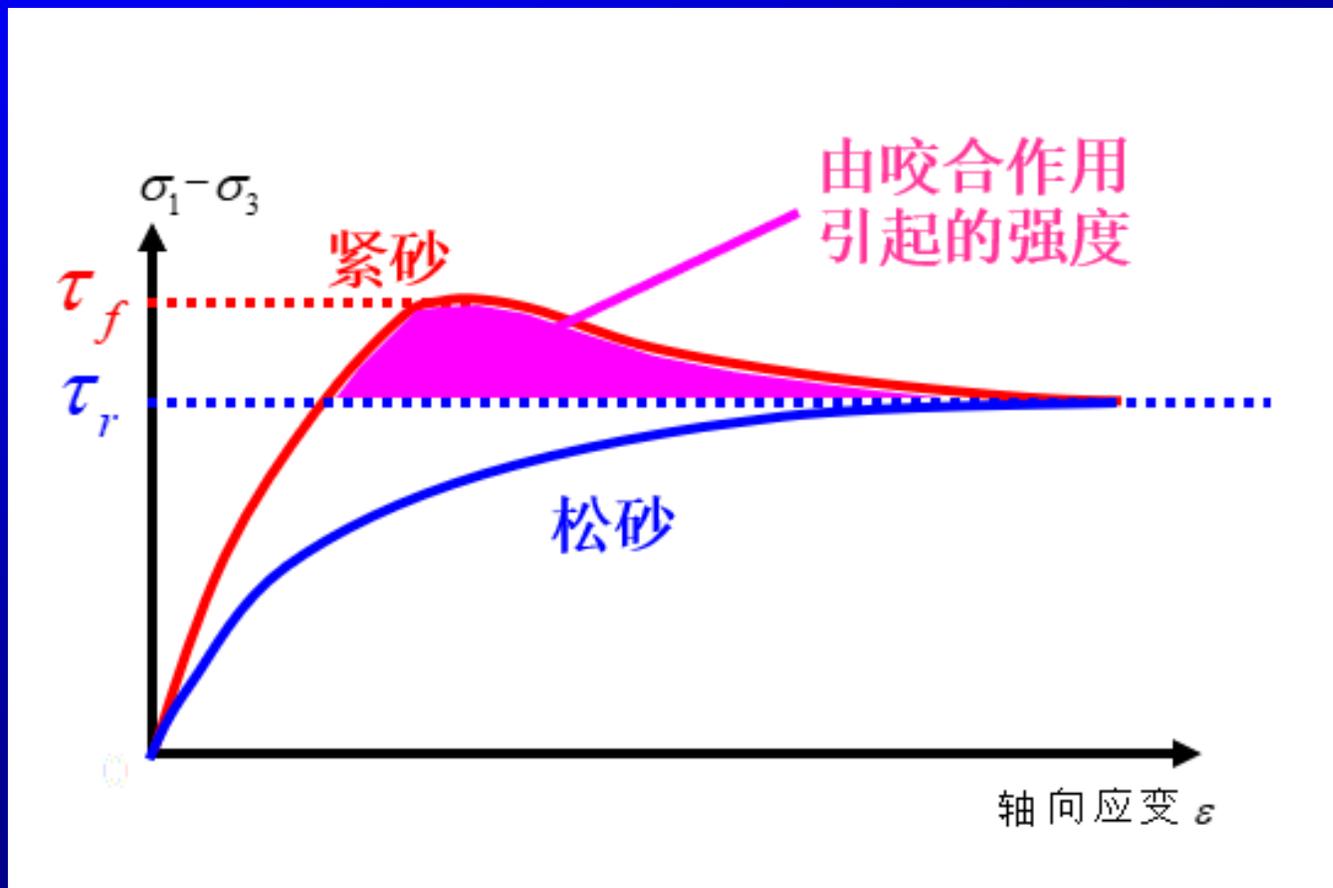
饱和紧砂→固结不排水剪→负孔隙水应力

饱和松砂→固结不排水剪→正孔隙水应力



一、砂土的剪切性状

(三) 砂土的残余强度



一、砂土的剪切性状

(三) 砂土的液化

液化：任何物质转化为液体的行为或过程。

砂土液化：由于周期性荷载或地震荷载作用下，饱和松砂土、粉土由于孔隙水来不及排出，孔隙水压力急剧上升，有效应力急剧下降，土体失去强度而像土体一样的现象。

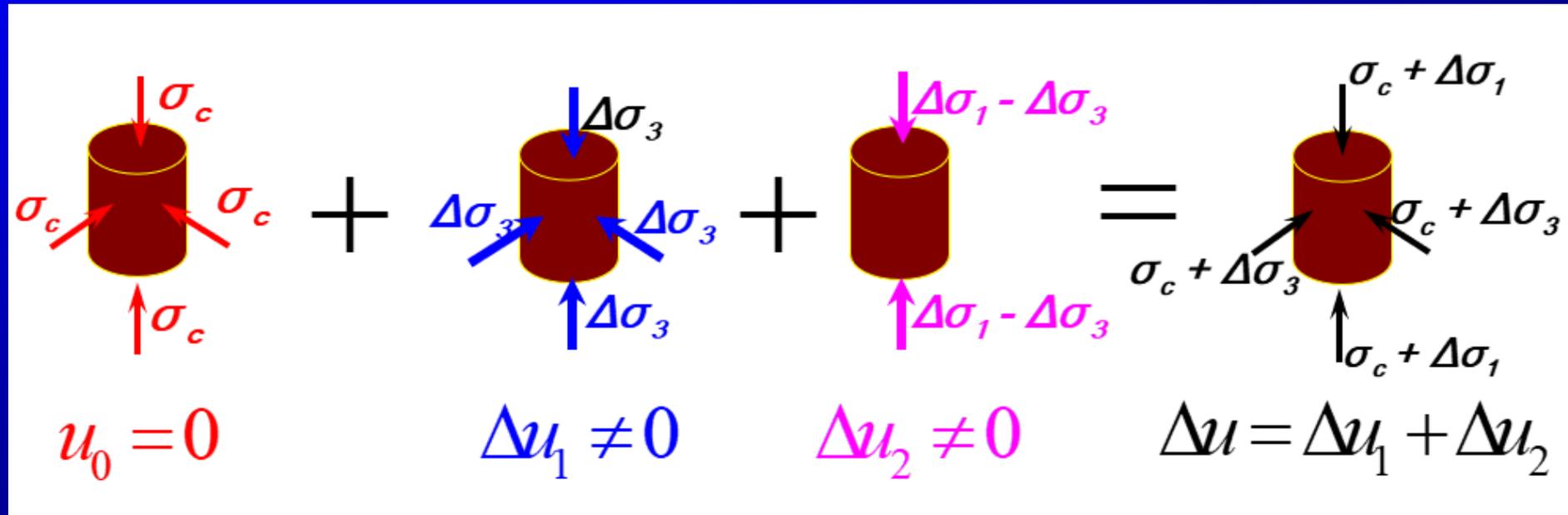
$$\tau_f = \sigma' \tan \varphi = (\sigma - u) \tan \varphi$$



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

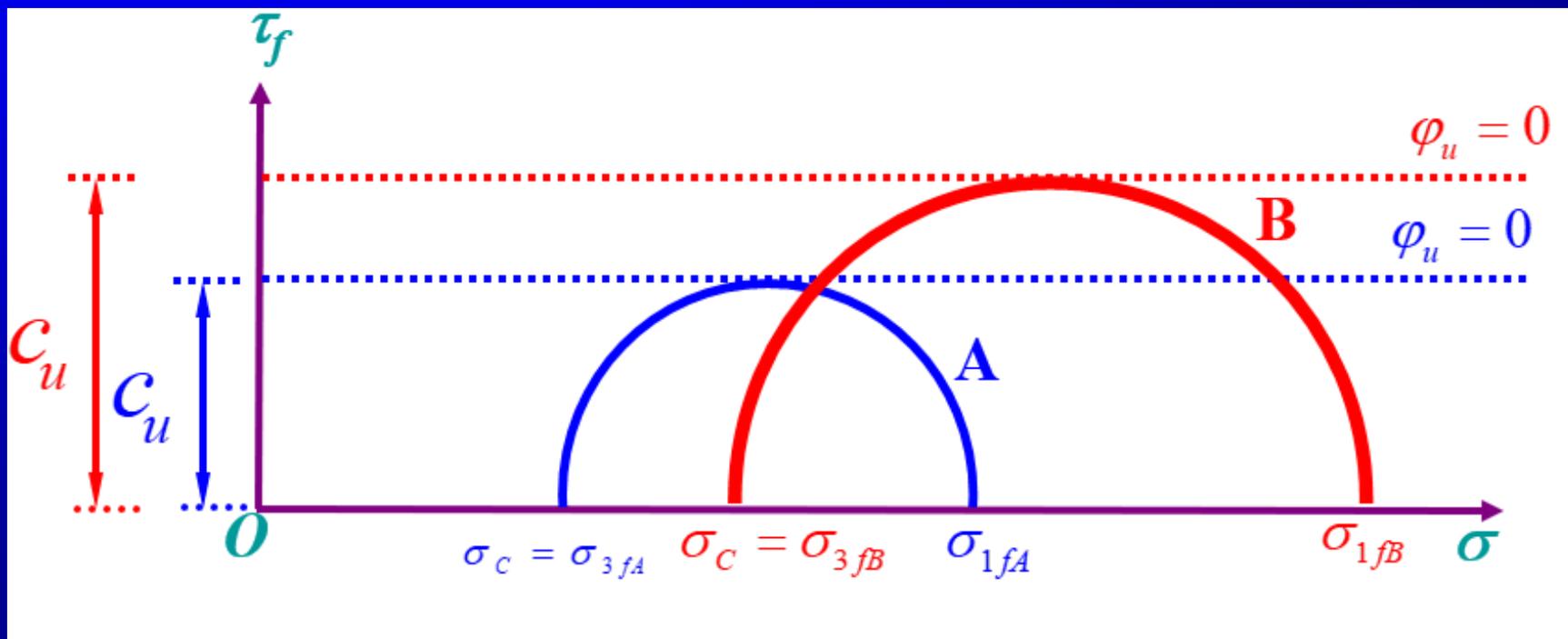
1、不固结不排水强度 (UU)



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

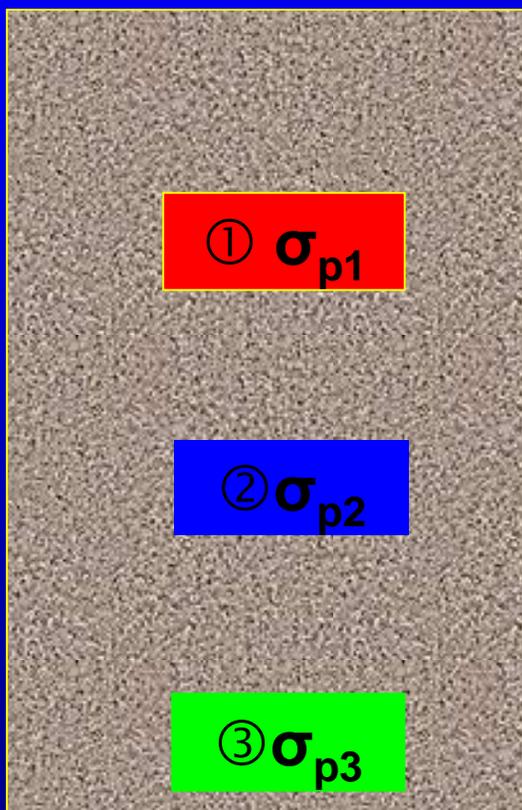
1、不固结不排水强度 (UU) (不同土A、土B)



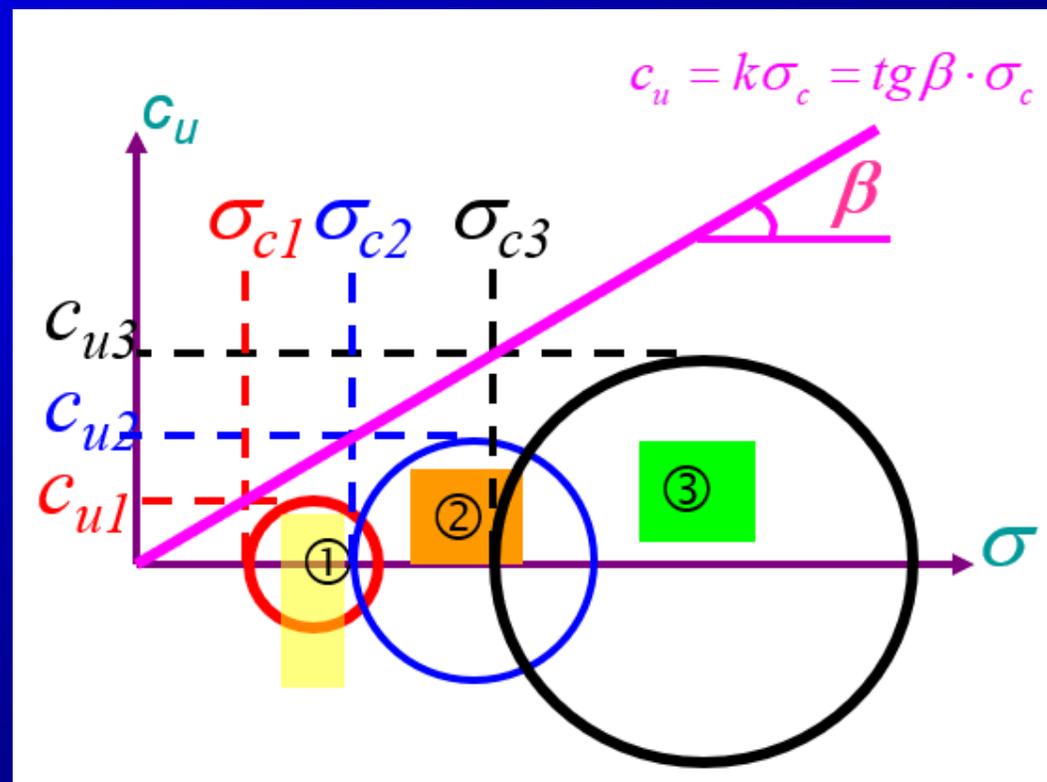
二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

1、不固结不排水强度 (UU)



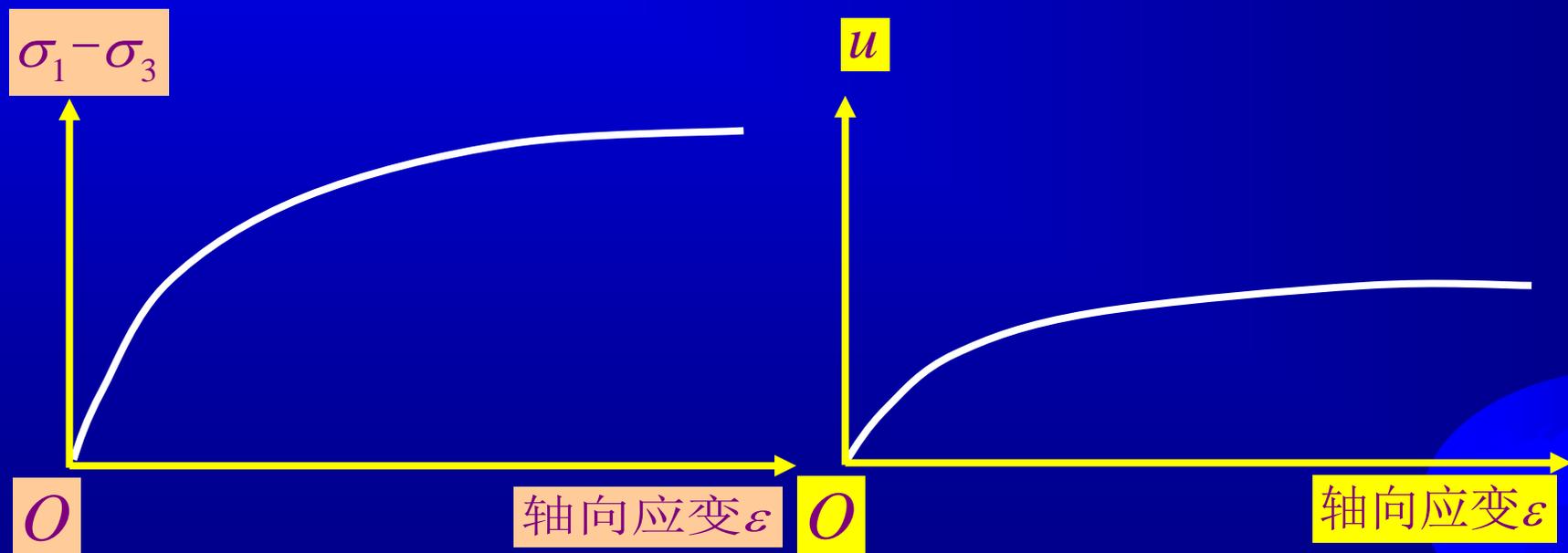
正常固结黏土层



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

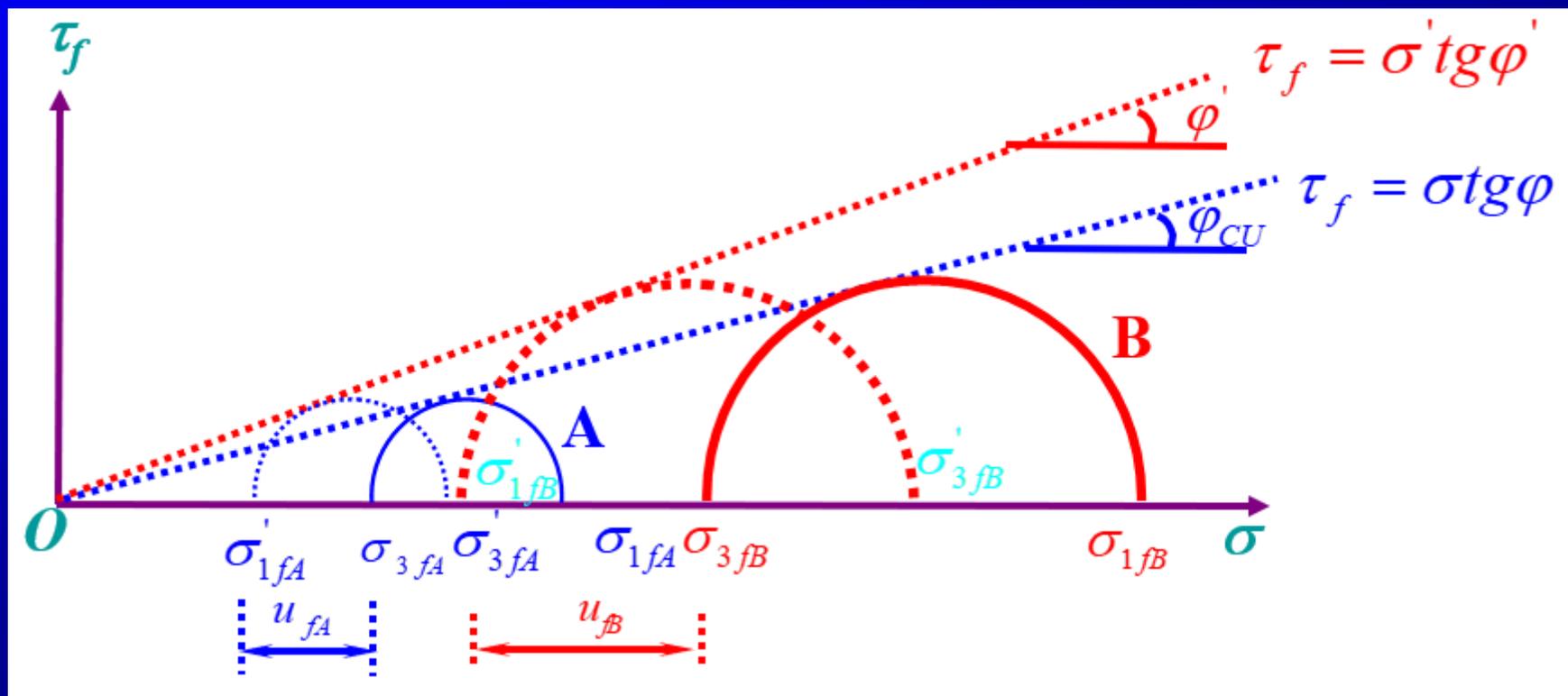
2、固结不排水强度 (CU)



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

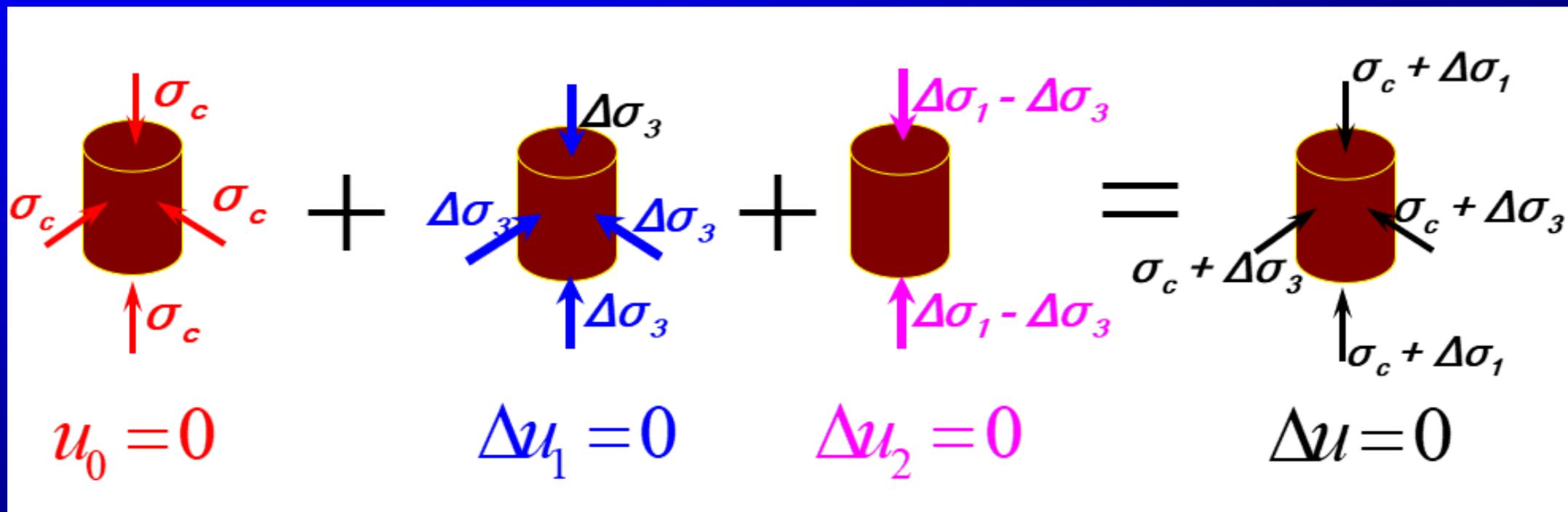
2、固结不排水强度 (CU)



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

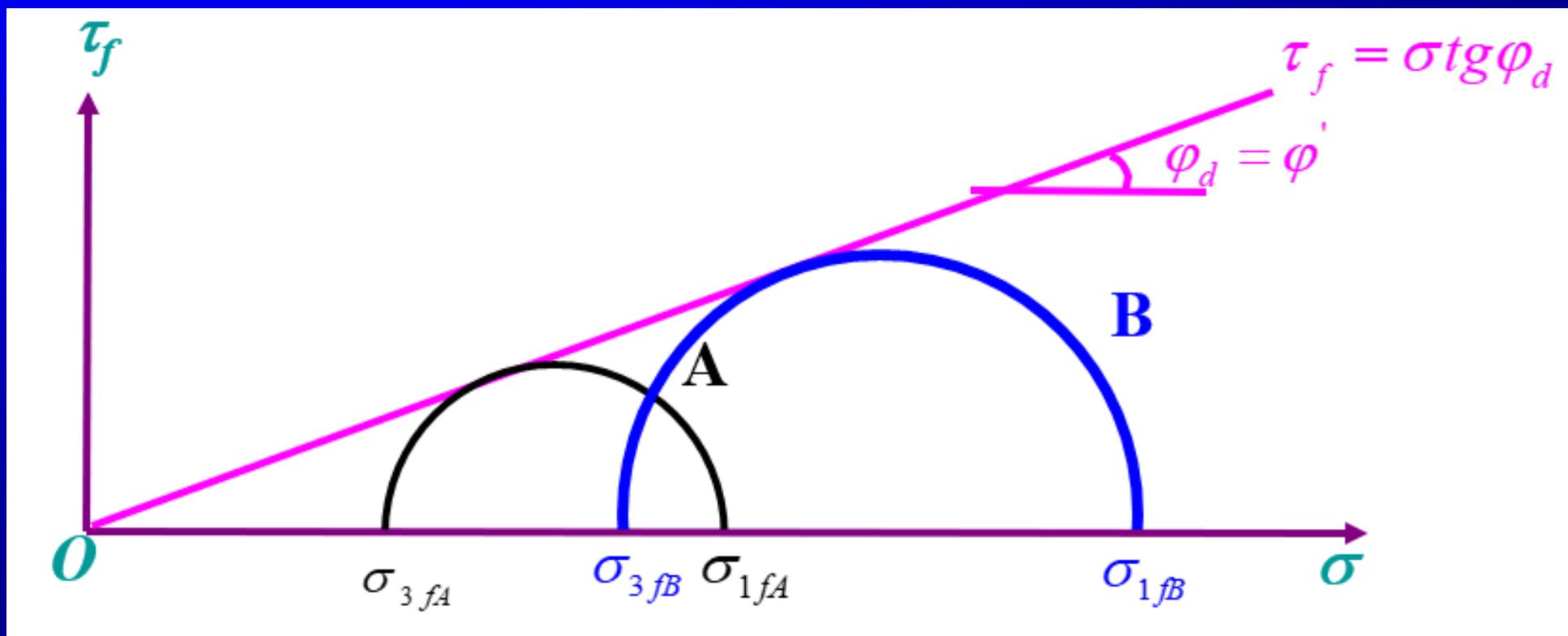
2、固结排水强度 (CU)



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

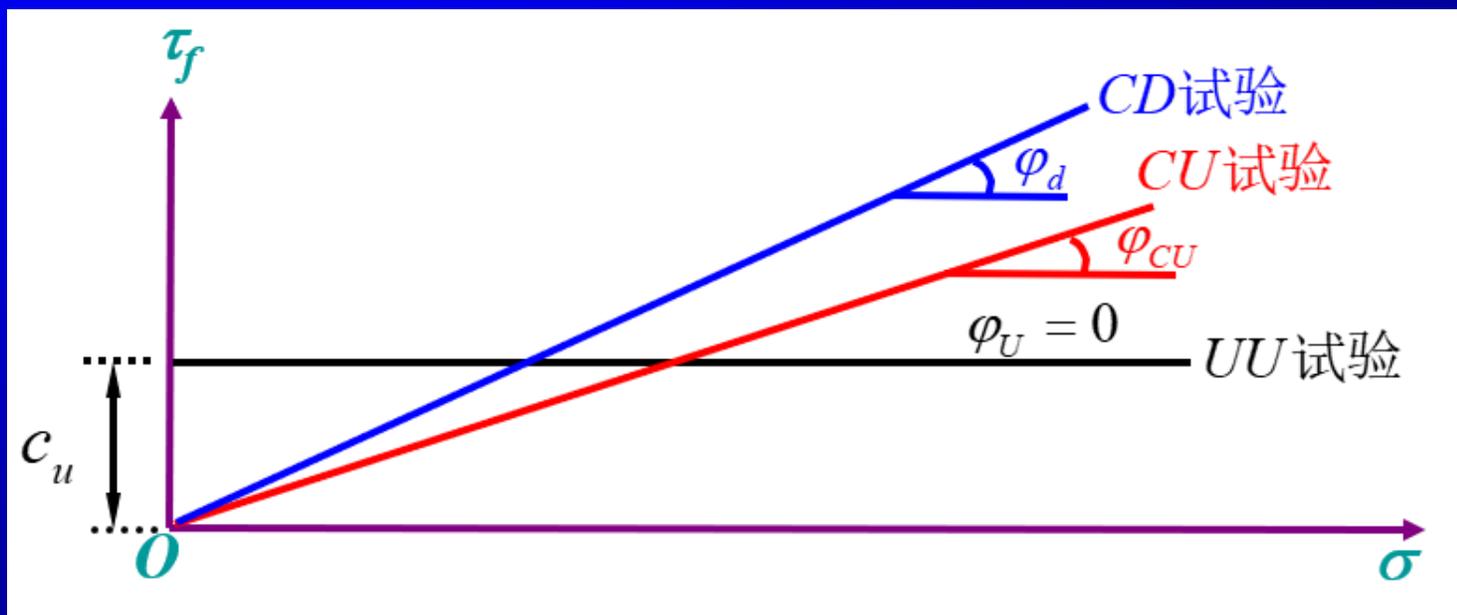
2、固结排水强度 (CD)



二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

4、三种试验方法所得强度指标比较



$$c_U > c_{CU} = c_d = 0$$

$$\varphi_d > \varphi_{CU} > \varphi_U = 0$$

二、黏性土的剪切性状

(一) 正常固结黏土

5、剪破面的位置

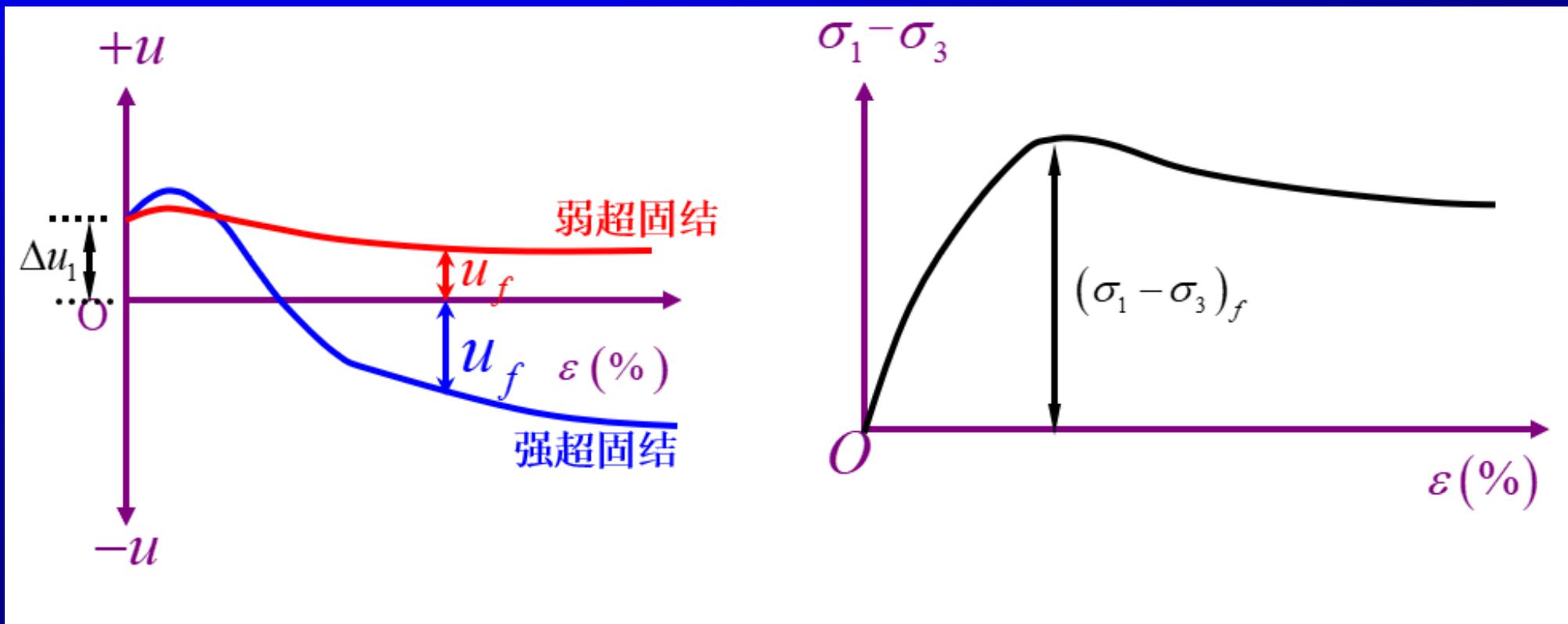
$$\varphi_f = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2}$$



二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

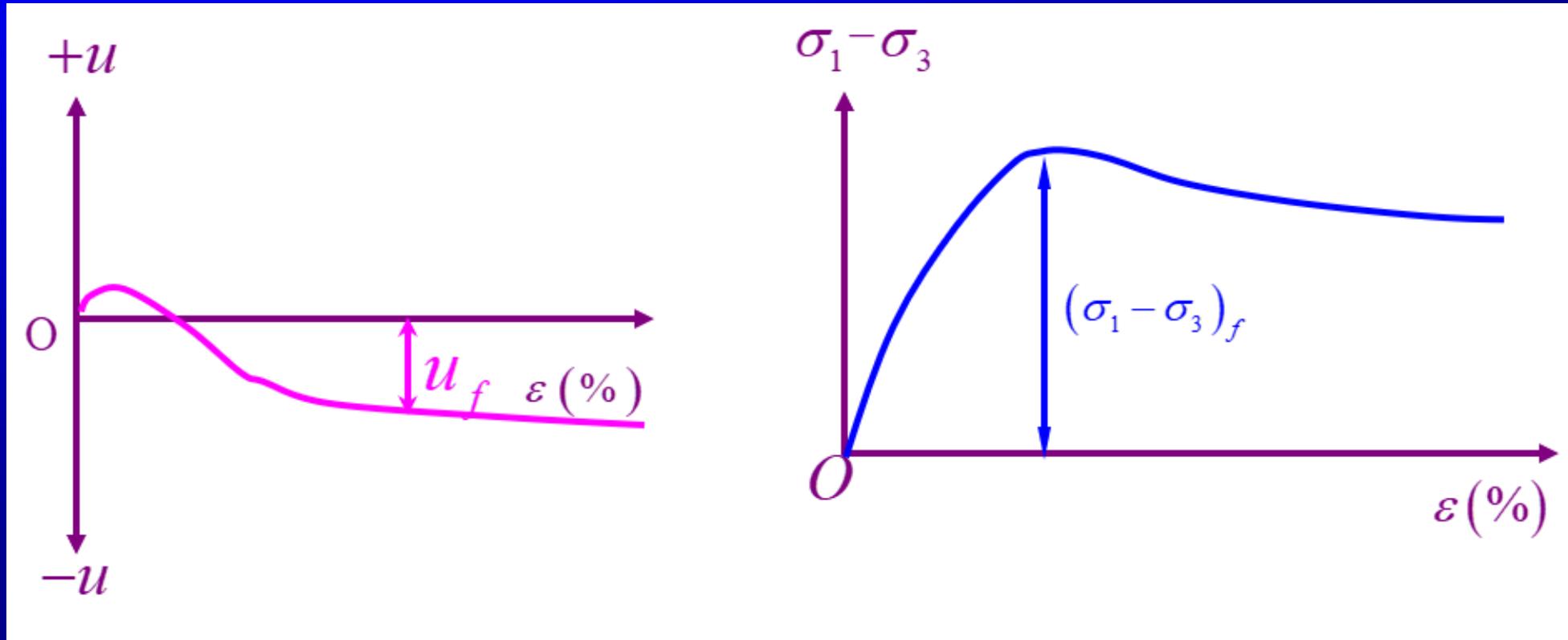
1、不固结不排水强度 (UU)



二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

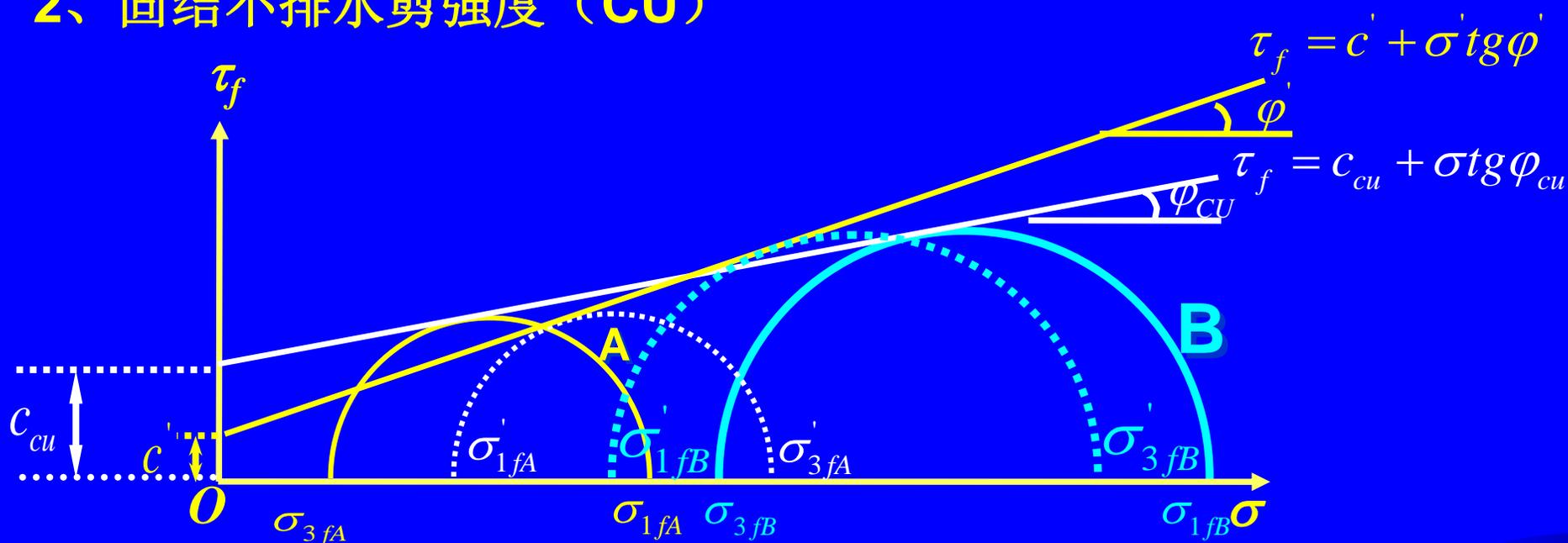
2、固结不排水剪强度 (CU)



二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

2、固结不排水剪强度 (CU)



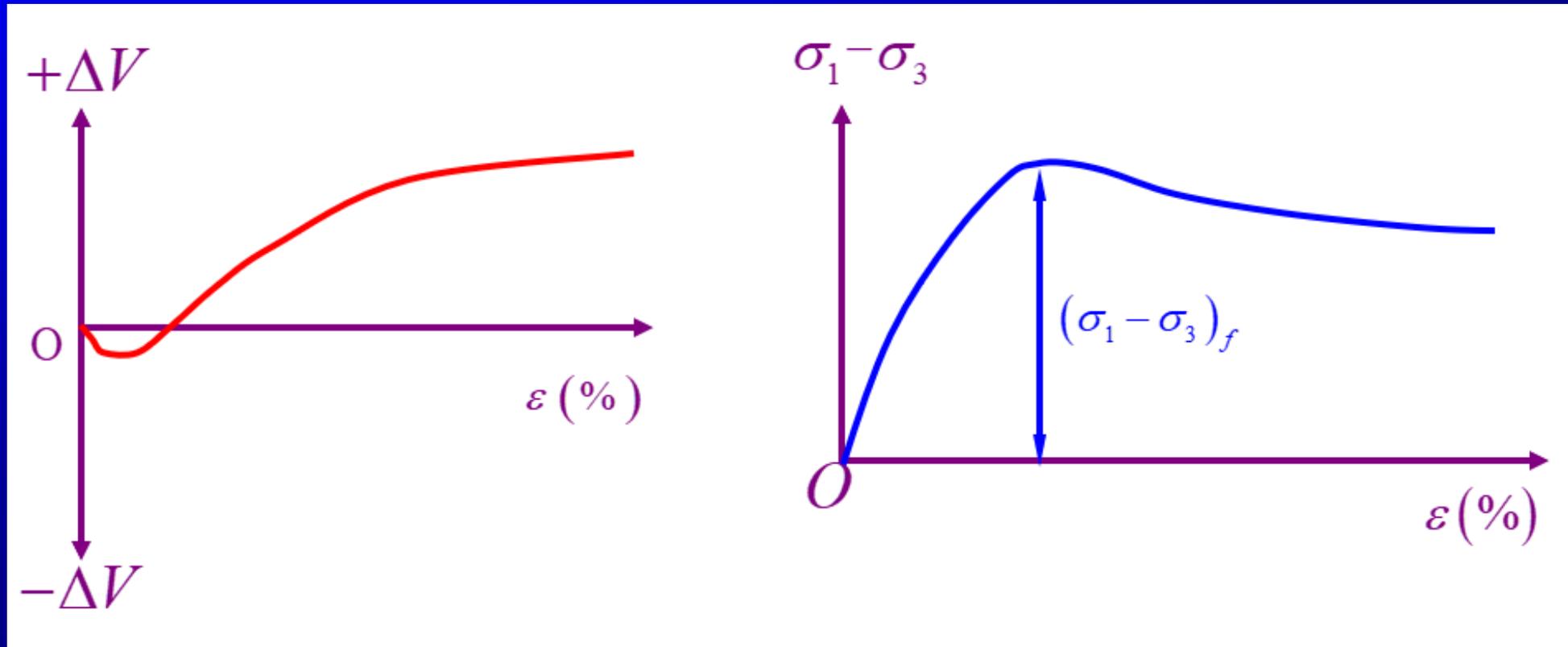
$$c' < c_{cu} \quad \phi' > \phi_{cu}$$



二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

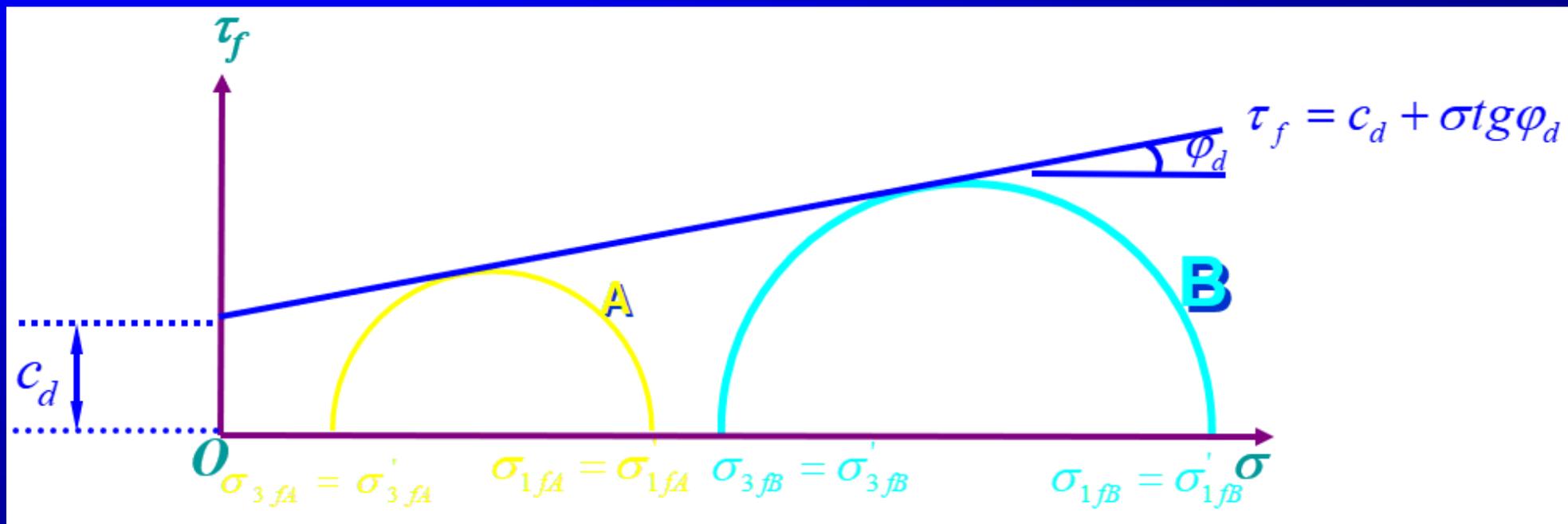
3、固结排水剪强度 (CD)



二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

3、固结排水剪强度 (CD)



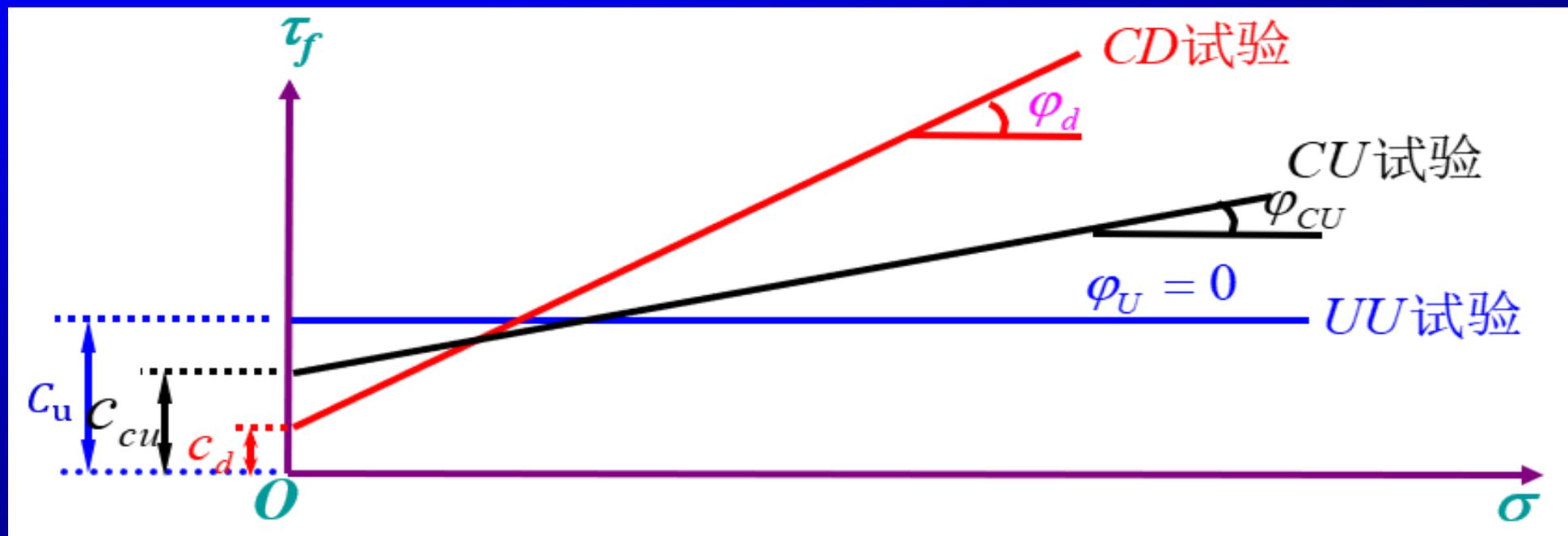
$$c' = c_d$$

$$\phi' > \phi_d$$

二、黏性土的剪切性状

(二) 超固结黏土

4、三种试验方法所得强度指标比较



$$c_u > c_{cu} > c_d$$

$$\varphi_d > \varphi_{cu} > \varphi_U = 0$$

二、黏性土的剪切性状

(三) 黏土的残余强度

超固结黏土在剪切试验中，当强度随着剪位移达到峰值后，如果剪切继续进行，随着剪位移继续增大，强度显著降低，最后稳定在某一数值不变，该不变的值即称为

黏土的残余强度。

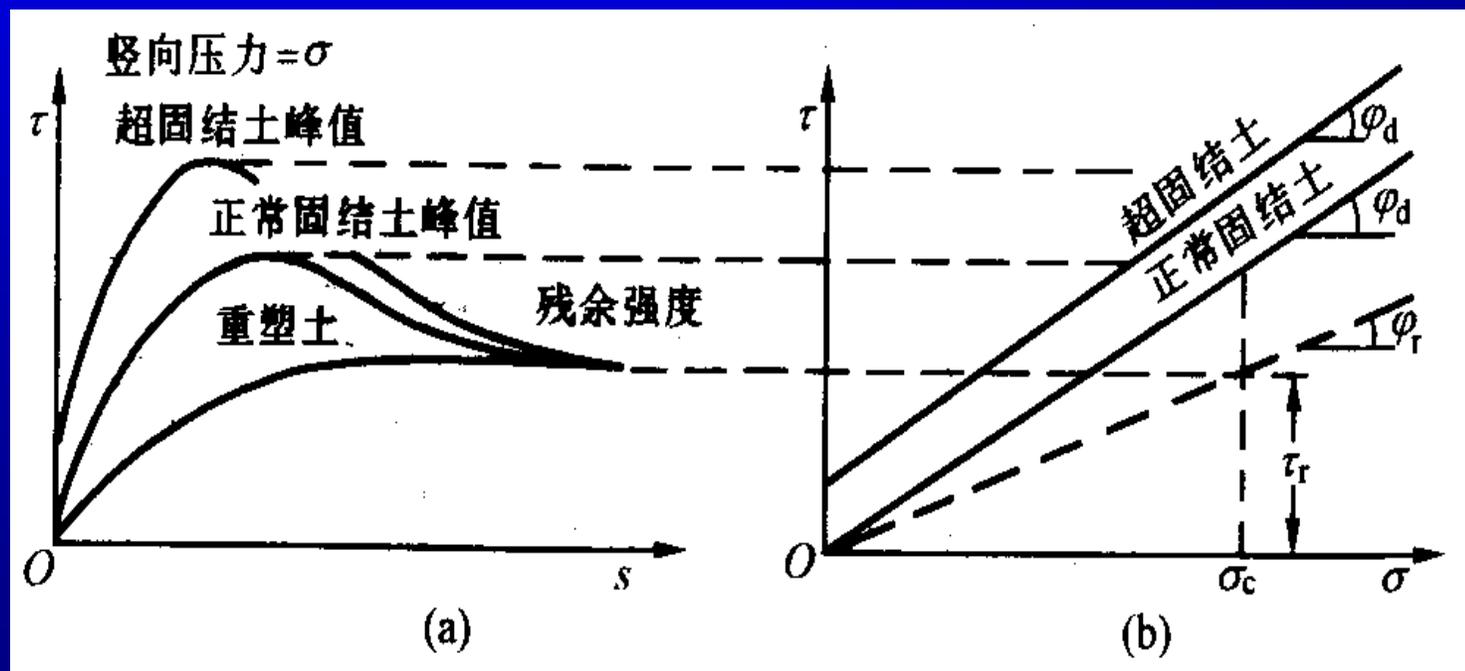
正常固结黏土亦有此现象。



二、黏性土的剪切性状

(三) 黏土的残余强度

- 1、黏土的残余强度与它的应力历史无关；
- 2、在大剪位移下超固结黏土的强度降低比正常固结黏土的大；



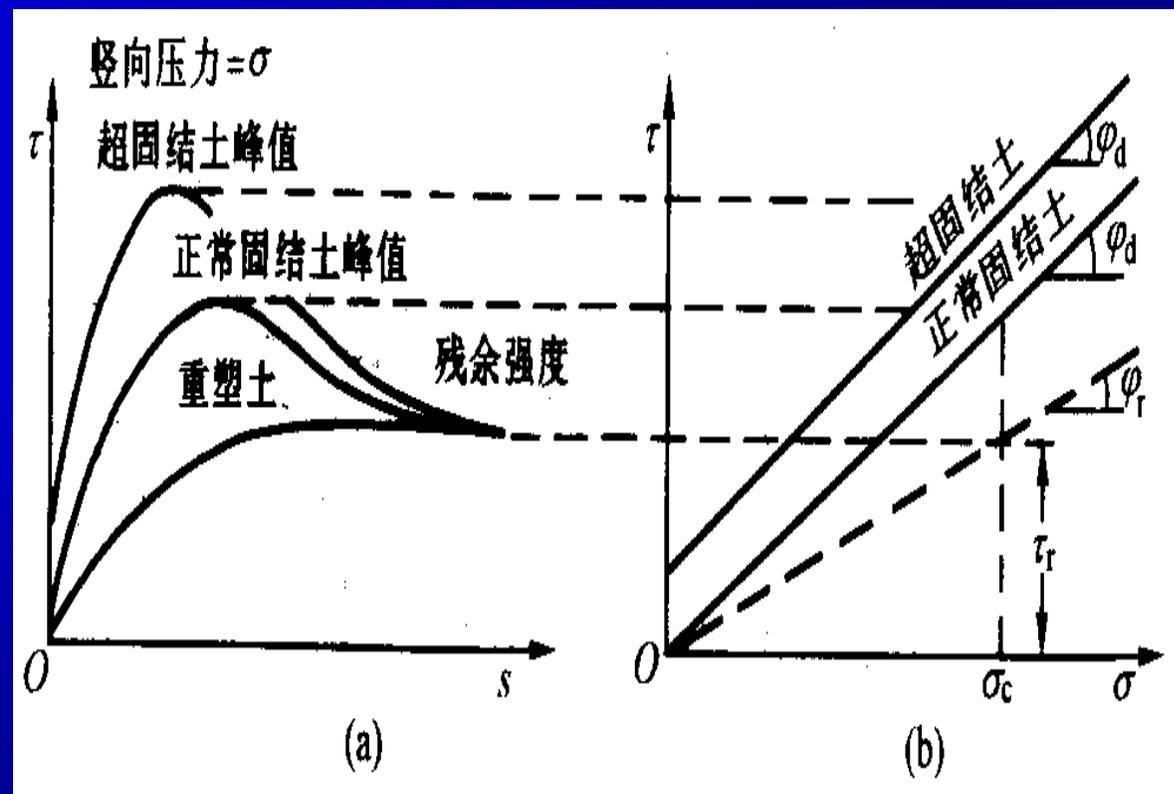
二、黏性土的剪切性状

(三) 黏土的残余强度

3、残余强度线为通过坐标原点的直线，即

$$\tau_r = \sigma \operatorname{tg} \varphi_r$$

式中： τ_r ——黏土的残余强度；
 σ ——剪破面上的法向应力；
 φ_r ——残余内摩擦角。



二、黏性土的剪切性状

（三）黏土的残余强度

在大位移下黏土强度降低的机理与紧砂不同。

紧砂是由于土粒间咬合作用被克服，结构崩解变松的结果；而黏土被认为是由于在受剪过程中土的结构性损伤、土粒的排列变化及粒间引力减少；吸着水层中水分子的定向排列和阳离子的分布因受剪而遭到破坏。



§5.6 应力路径



§5.6 应力路径

对加荷过程中的土体某点，其应力状态的变化可在应力坐标中以应力点的移动轨迹表示，这种轨迹称为**应力路径**。

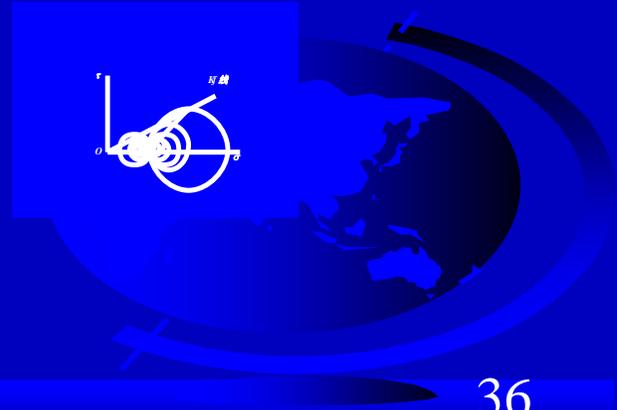
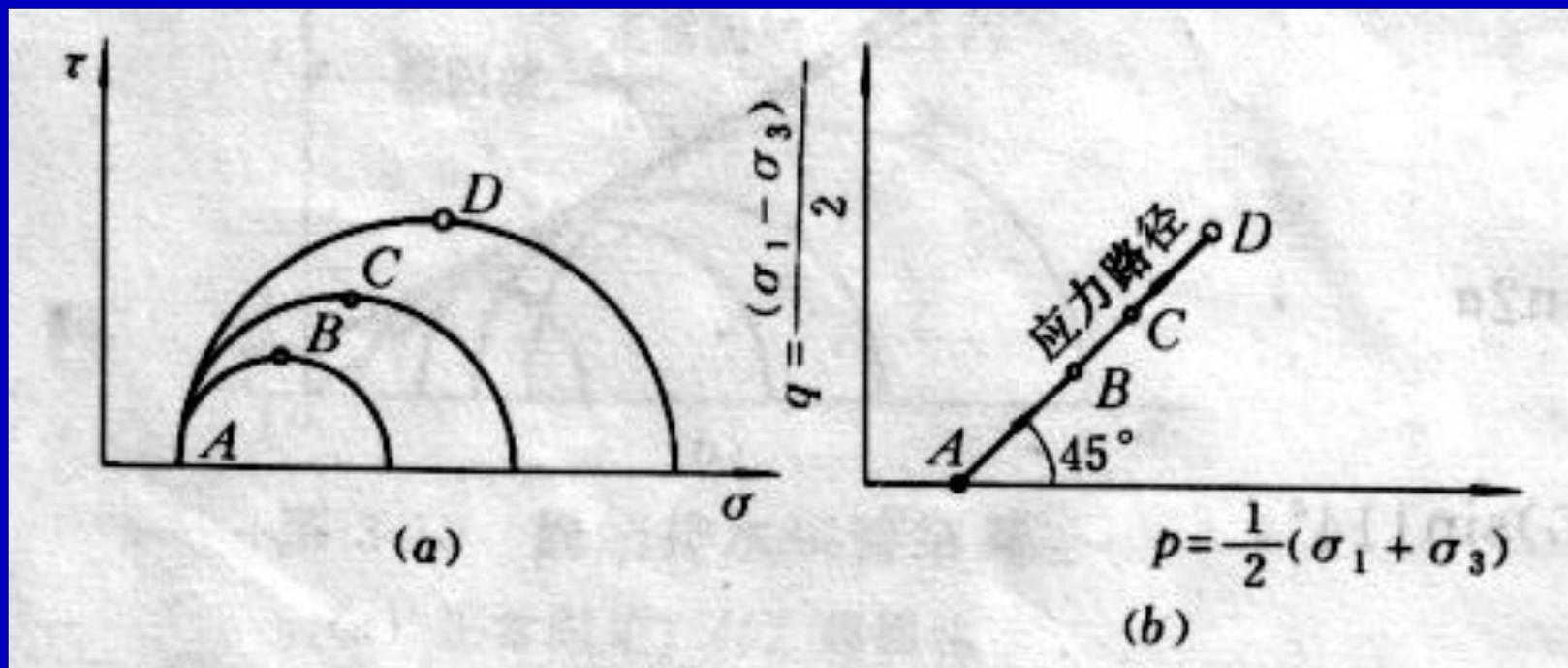
它是描述土体在外力作用下应力变化情况的一种方法。

分析应力变化过程对土的力学性质的影响。



应力路径

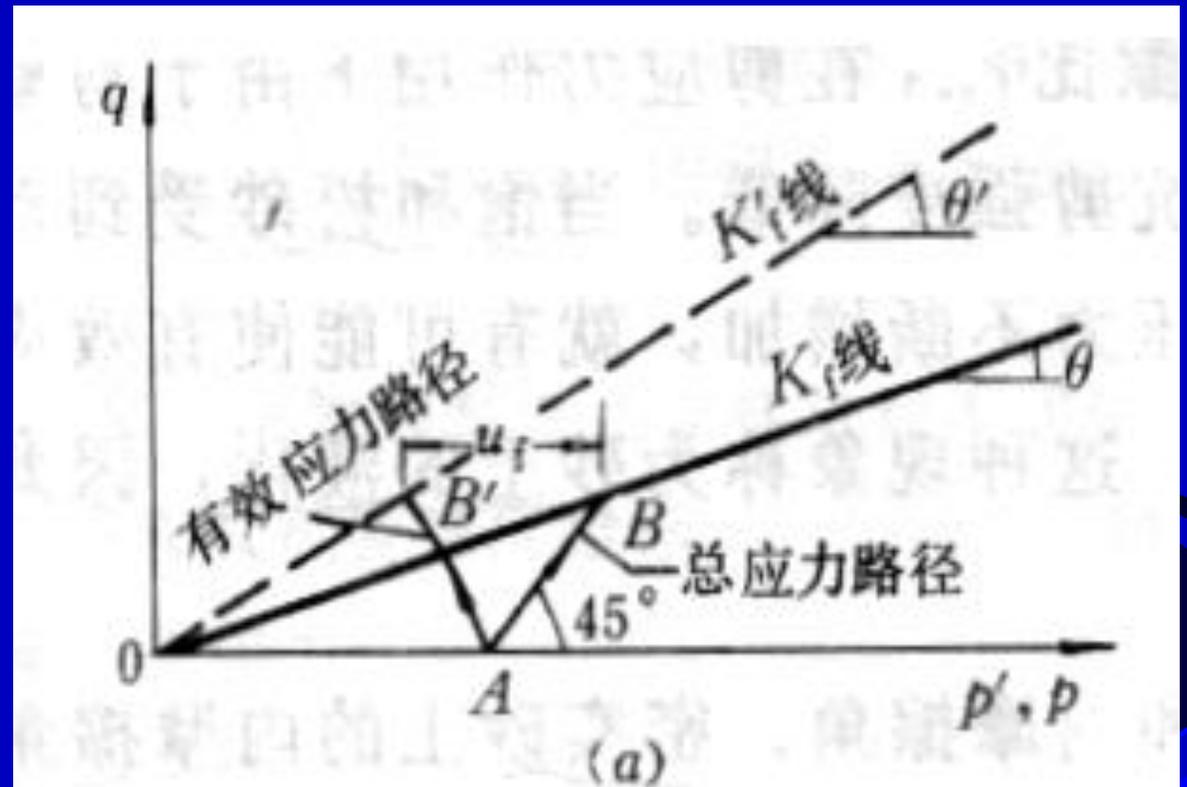
- F 以三轴试验为例，保持 σ_3 不变，增加 σ_1 ，应力变化过程可以用一系列应力圆表示，选择一个特征应力点，常用顶点（剪应力最大），
($p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$) 代表整个应力圆。按应力变化过程顺序把顶点连接起来就是应力路径，并以箭头指明应力状态的发展方向。



三轴固结不排水剪试验的应力路径(正常固结土)

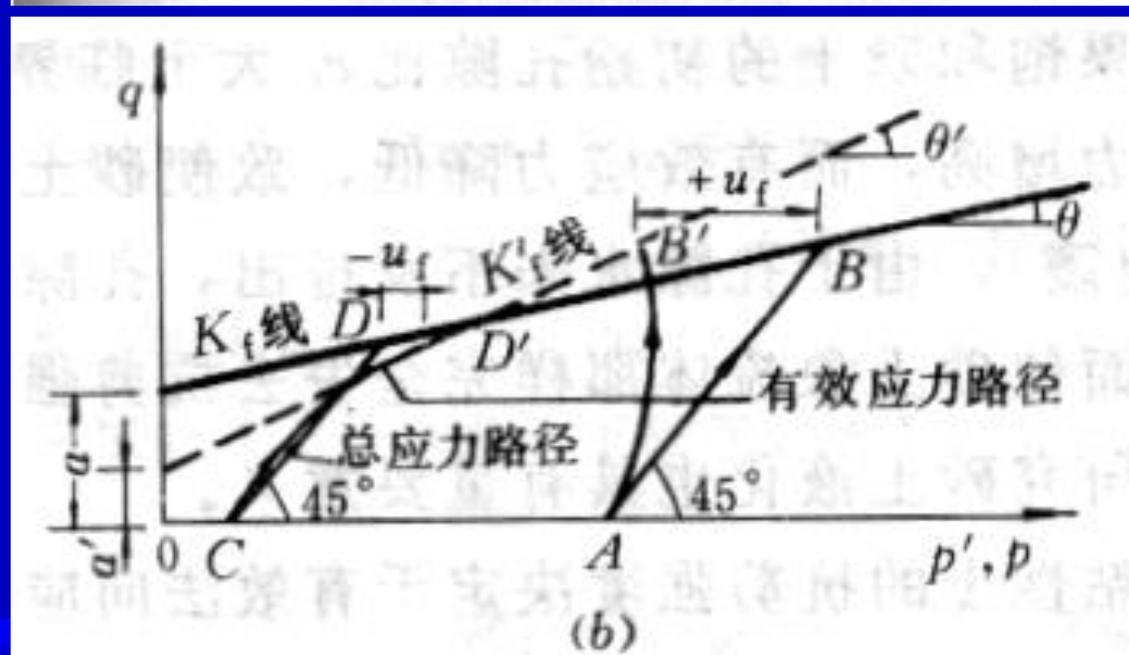
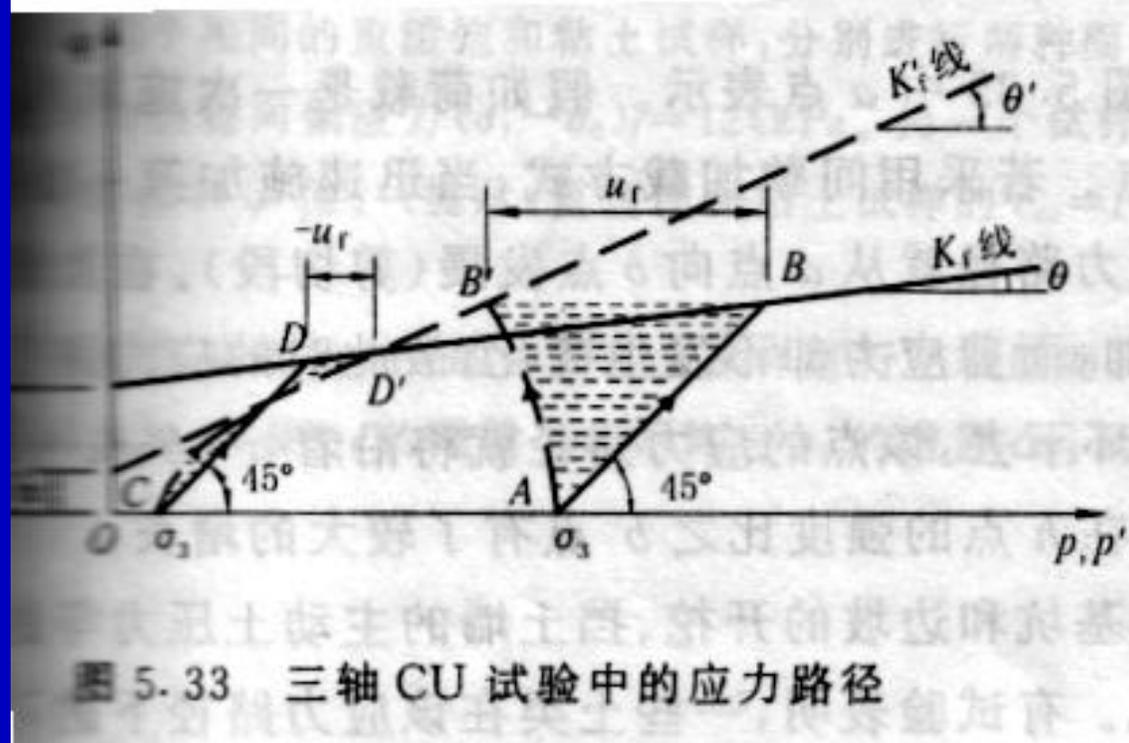
F 总应力路径的倾角是 45° 。由于是等向固结，有效应力路径与总应力路径出发于同一点，但有效应力路径是曲线。两者之间的距离为孔压 u 。

- 图中 K_f 线和 K_f' 线分别代表以总应力和有效应力表示的极限应力圆顶点的连线。
- 正常固结饱和土在受剪过程中产生正的孔压，所以有效应力路径在总应力路径的左边。



三轴固结不排水剪试验的应力路径(超固结土)

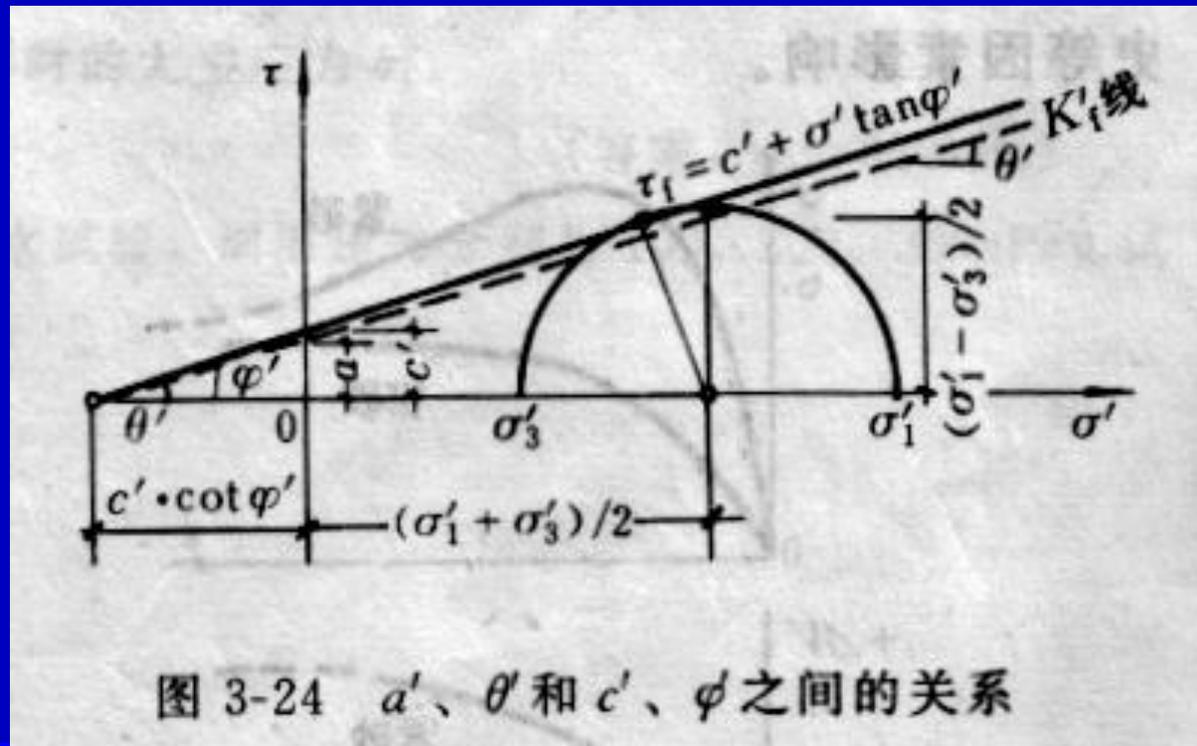
右图表示一**强超固结**试样的应力路径，由于**强超固结**试样开始出现正的孔压，以后逐渐转为负值，故有效应力路径开始在总应力路径的左边，后来逐渐转移到右边。



应力路径分析的目的

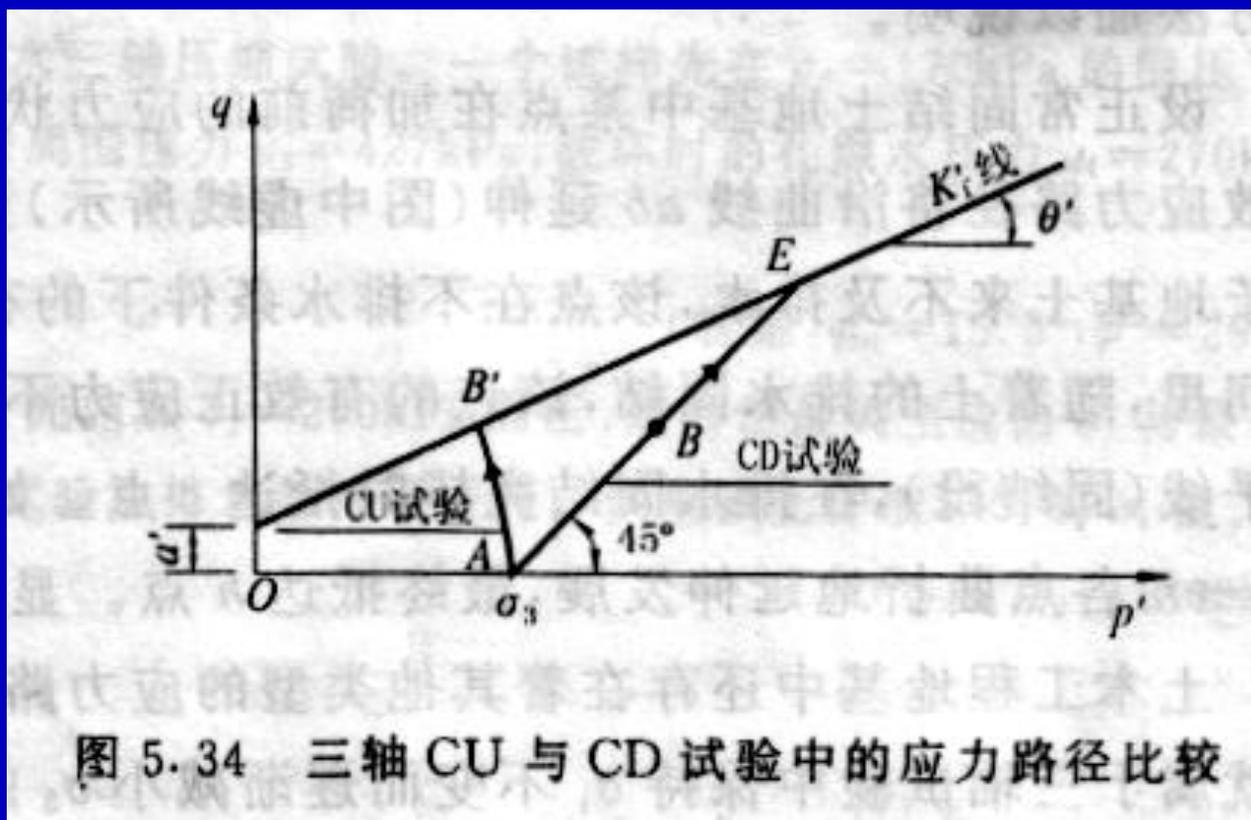
- F 利用 CU 试验的有效应力路径确定的 K_f' 线，可求得有效应力强度参数 c' 和 φ' 。在试样发生剪切破坏时，应力路径发生转折，因此可以认为这个转折点作为试样破坏的标准，由此得到 K_f' 线。通过几何关系可得出：

$$\sin \varphi' = \tan \theta'$$
$$c' = \frac{a'}{\cos \varphi'}$$



几个例子:

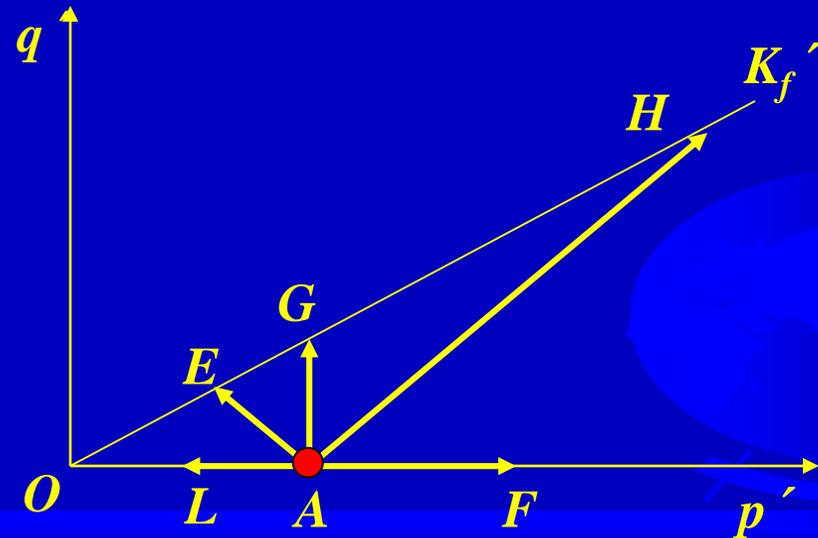
下图表示同一种土分别用CD试验和CU试验所得的不同的有效应力路径。可以看出排水剪的破坏剪应力大大高于CU试验的破坏剪应力。



几个例子:

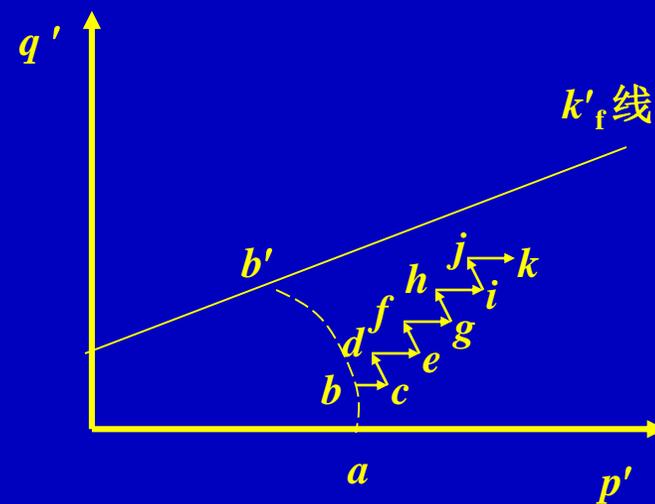
下图表示5条不同的加荷条件的CD有效应力路径

- **AF**线为各向等向压缩试验的应力路径，它不会与 K_f' 相交，因此不会发生剪切破坏；
- **AG**是 p' 为常数 ($p'=(\sigma_1'+\sigma_3')/2$) 的应力路径；
- **AH**为常规三轴试验；
- **AE**为卸载试验（保持 σ_1 不变，减小 σ_3 ）；
- **AL**为各向等压退压的应力路径。



通过控制应力路径合理安排施工进度：

- 假如荷载是一次性施加，则有效应力路径将从**a**点沿曲线至**b'**，土体很快就失稳破坏。
- 若采用间歇式加载方式，如此循环下去，该点的应力路径就将沿着**abcdefg**各点曲折地延伸发展，最终抵达**k**点。显然，土在**k**点的强度比之**b'**点有了较大的增长。



第五章： 土的抗剪强度

§5.1 概述

§5.2 土的抗剪强度与极限平衡条件

§5.3 土的抗剪强度试验方法及强度指标

§5.4 三轴压缩试验中的孔隙水压力系数

§5.5 土在剪切过程中的性状

§5.6 应力路径



👉 土的抗剪强度理论

- 直剪试验与库仑公式
- 土的抗剪强度机理
- 莫尔-库仑强度理论

👉 抗剪强度测定试验

- 室内：直剪试验、三轴试验
- 野外：十字板试验

👉 应力路径与破坏主应力线

- 应力路径及表示法
- 强度包线与破坏主应力线
- 总应力路径与有效应力路径

👉 抗剪强度指标

- 强度指标的类型及特点
- 强度指标的工程应用

👉 动强度与砂土液化

- 动三轴试验及动强度
- 砂土液化

小 结

