

第5章：土的抗剪强度

主讲：刘勇健



第5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



建筑地基必须满足下列两个基本要求：

(1) 地基变形条件：

包括地基的沉降量、沉降差、倾斜与局部倾斜，都不超过国家《规范》规定的地基变形允许值；

(2) 地基强度条件：

在建筑物的上部荷载作用下，确保地基的稳定性，不发生地基剪切或滑动破坏。



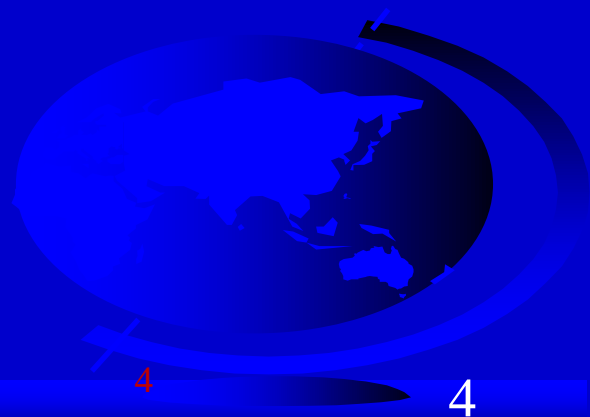
第五章： 土的抗剪强度

✧ 本章提要

- 土的抗剪强度及极限平衡条件
- 土的抗剪强度试验
- 三轴压缩试验及孔隙水压力系数
- 土在剪切过程中的性状
- 应力路径概念

✧ 学习难点

- 莫尔-库仑强度理论
- 抗剪强度指标及测试方法
- 抗剪强度指标的选取



§5.1 概 述

☞ 土体强度及其特点

- 土的抗剪强度
- 土的强度的特点

☞ 工程中土的强度问题

- 各种类型的滑坡(sliding)
- 挡土和支护结构的破坏
- 地基的破坏
- 砂土的液化(liquefaction)

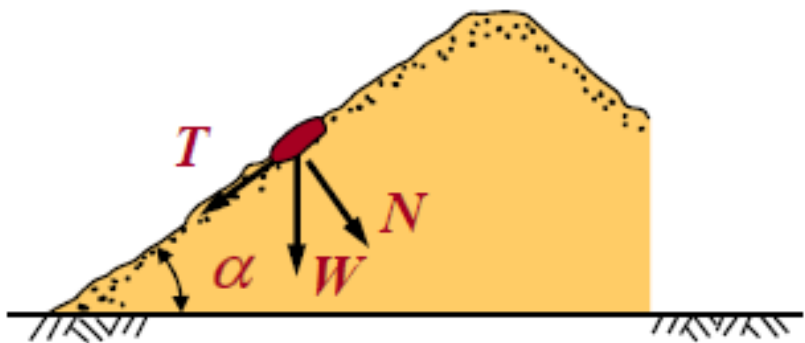
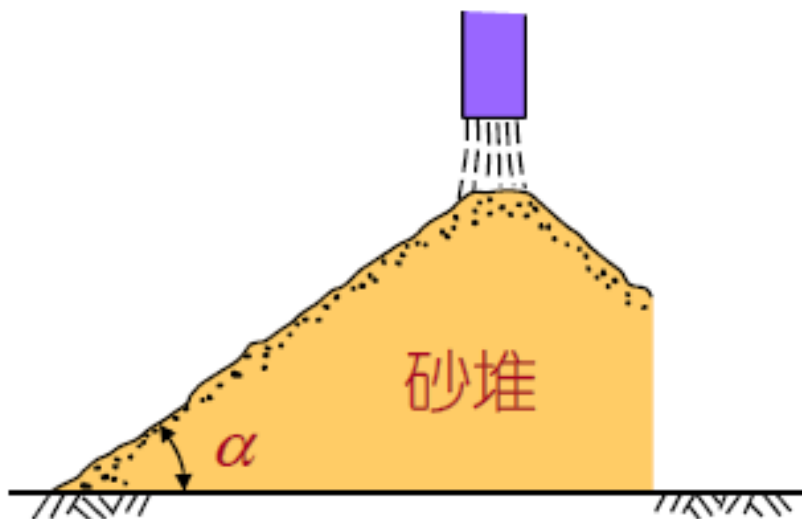


■ 天然状态下的砂

沿坡方向的平衡：

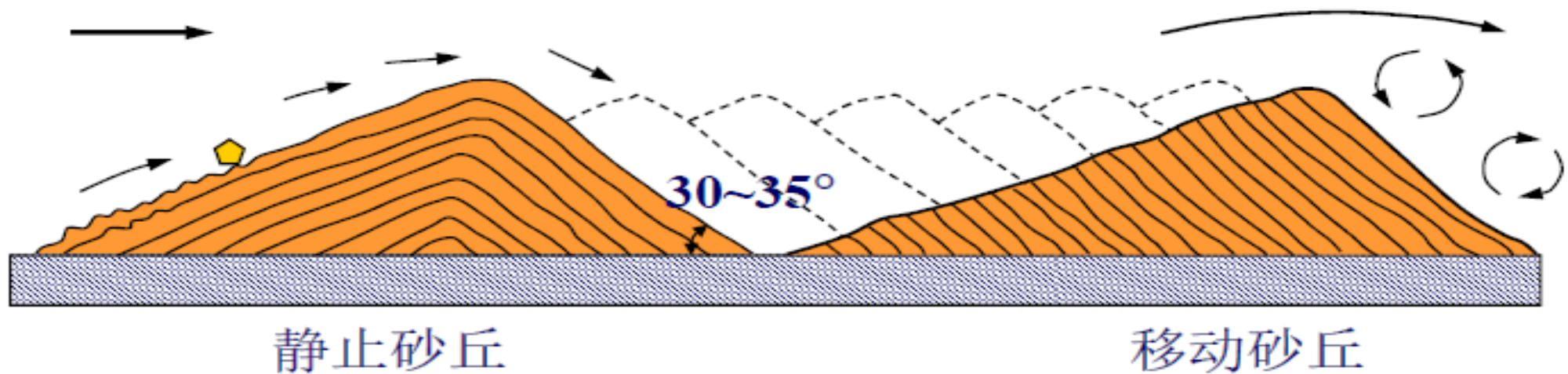
$$T = N \tan \alpha \quad \Rightarrow \quad \tan \alpha = \frac{T}{N}$$

☞ α 天然休止角，也是最松状态下的砂内摩擦角



土的强度及其特点

■ 天然状态下的沙丘



👉 固定沙丘背风坡角度接近天然休止角，一般为 $\phi = 30^\circ - 35^\circ$ ，大于矿物滑动摩擦角

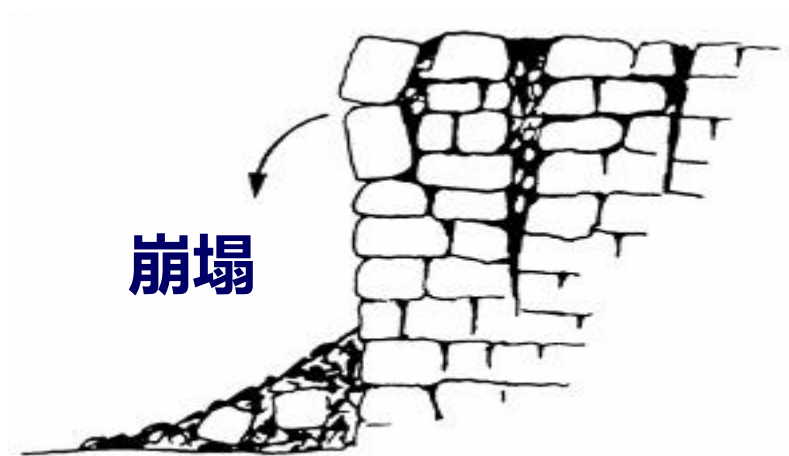


颗粒间存在一定的咬合作用

土的强度及其特点

- ❏ **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，颗粒间黏聚力与摩擦力。
- ❏ **三相体系：**荷载传递 —— 有效应力原理
- ❏ **自然变异性：**土的强度的结构性与复杂性
- ❏ **土的抗剪强度：**指土抵抗剪切破坏的极限能力。

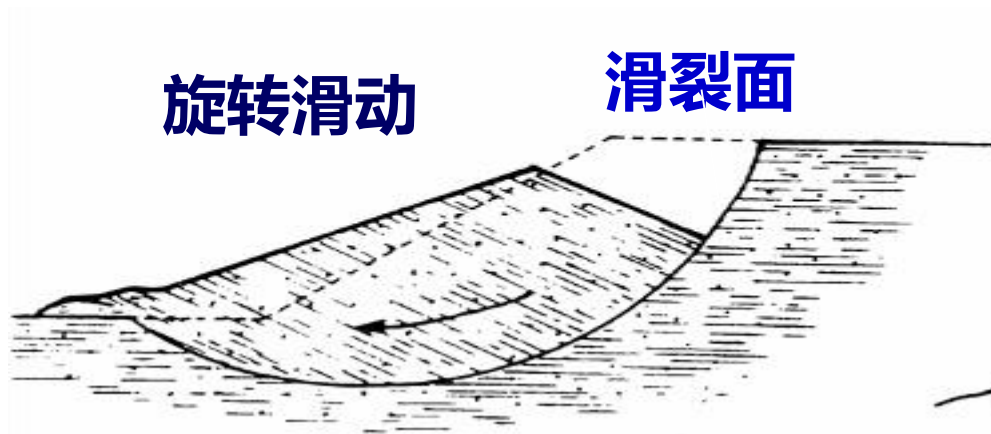
土体强度的特点



崩塌

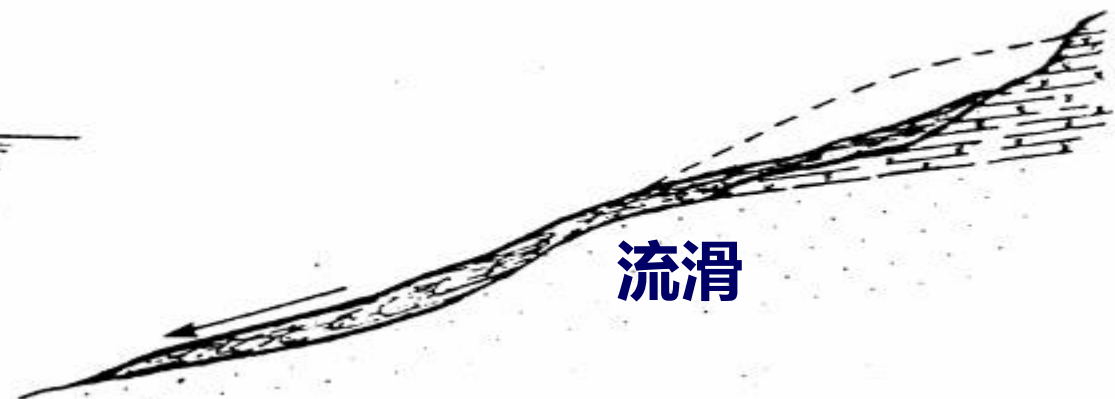


平移滑动



旋转滑动

滑裂面



流滑

各种类型的滑坡



唐家山堰塞湖

California, 1996



Salvador, 2001



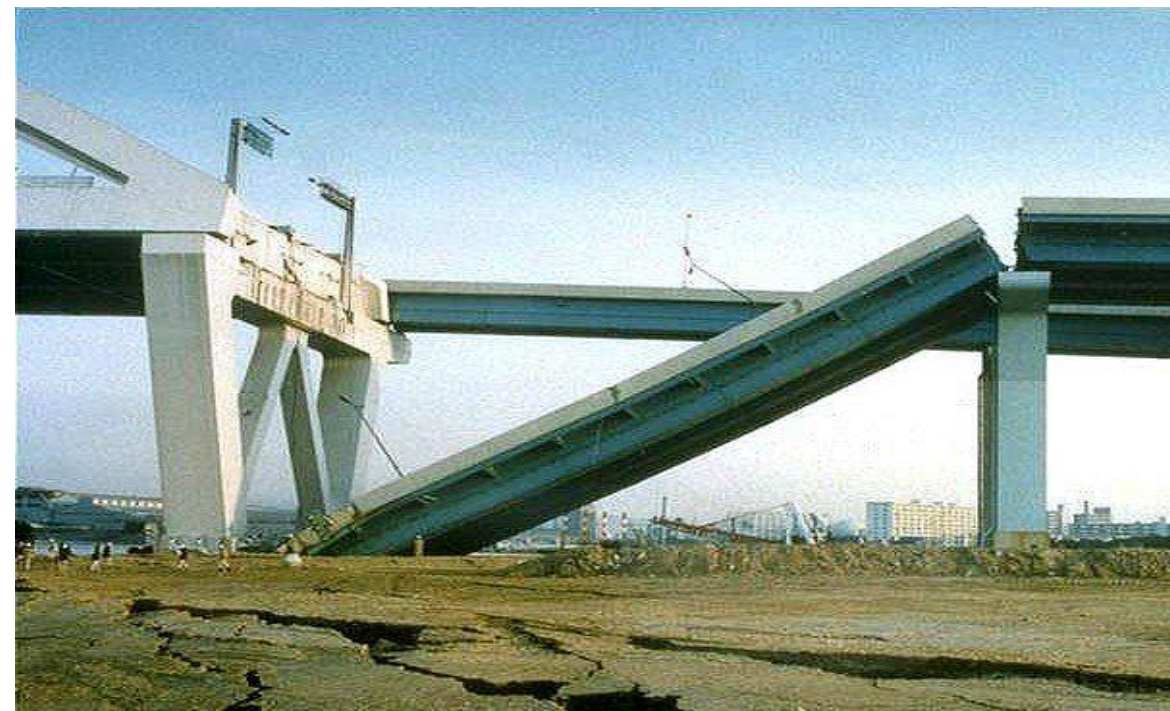
滑 坡 实 例

某谷仓地基的破坏





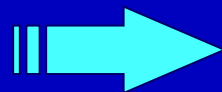
**1964年日本新潟
地震引起大面积液化**



**1995年日本神户
地震液化造成桥梁垮塌**

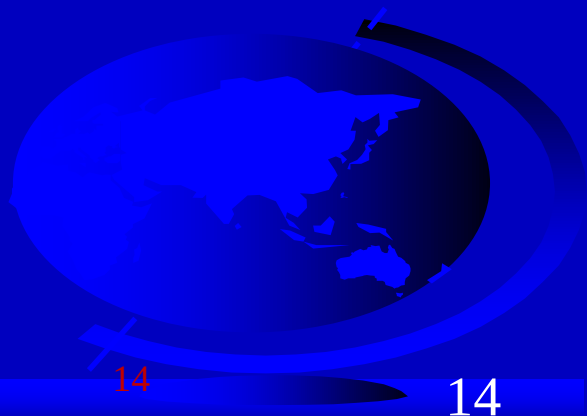
砂土的液化(liquefaction)

- 各种类型的滑坡
- 挡土结构物破坏
- 地基的破坏
- 砂土的液化

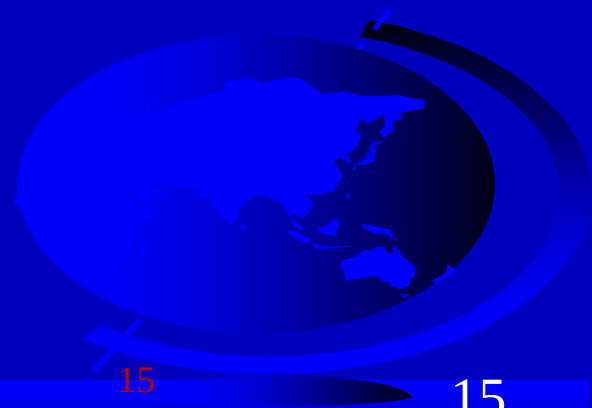


- ☞ 边坡稳定性
- ☞ 土压力
- ☞ 地基承载力
- ☞ 振动液化特性

核心问题： 土体的强度理论



§5.2 土的抗剪强度与极限平衡条件



问题1：土的强度指的是什么？

问题2：土的强度如何表达？其指标是什么？

问题3：土的强度指标如何获得？



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



一、库仑定律



库仑

(C. A. Coulomb)
(1736-1806)

法国军事工程师，在摩擦、电磁方面做出了奠基性的贡献。1773年发表了关于土压力方面论文，成为土压力的经典理论



1、直接剪切试验



直剪试验

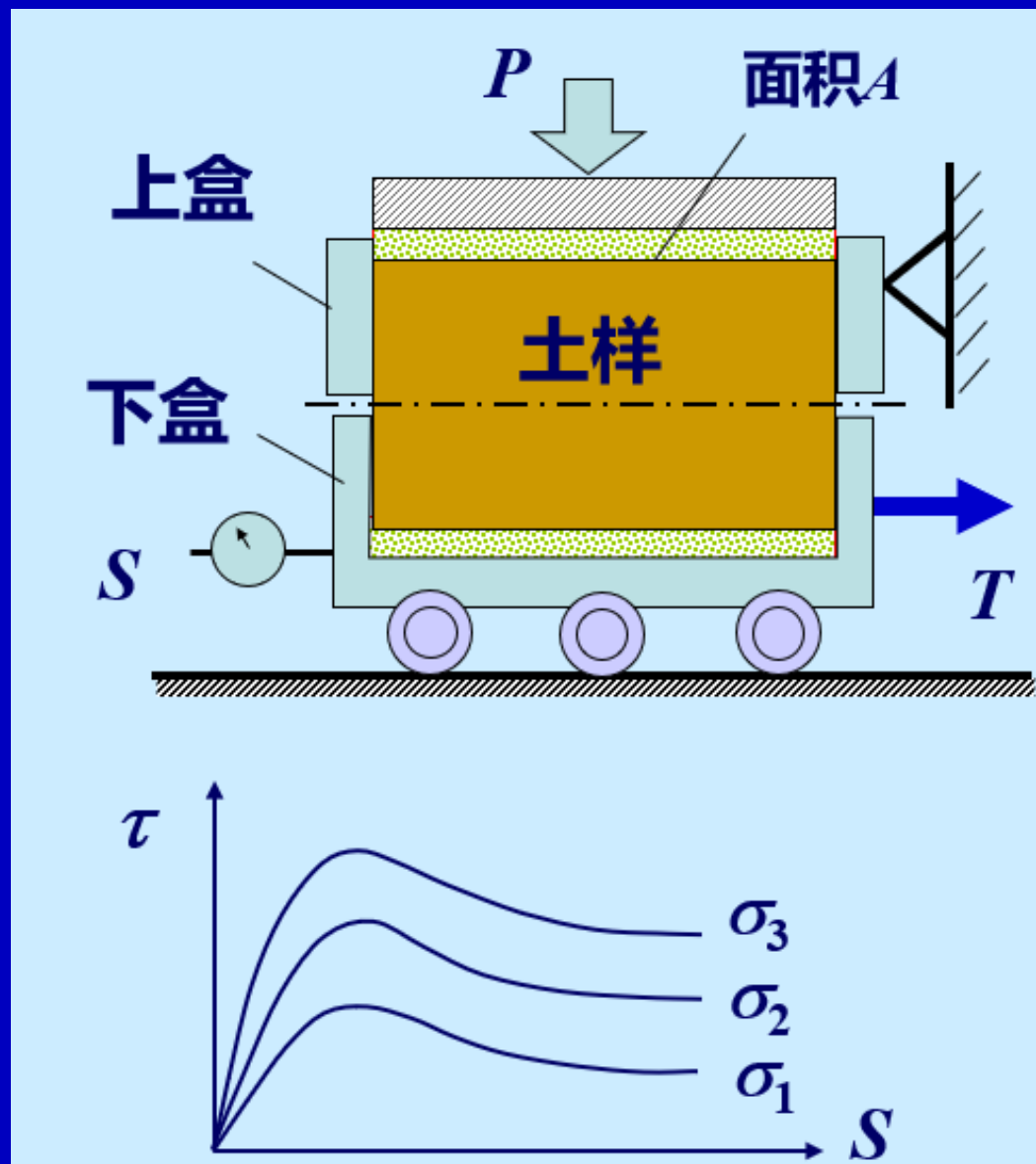
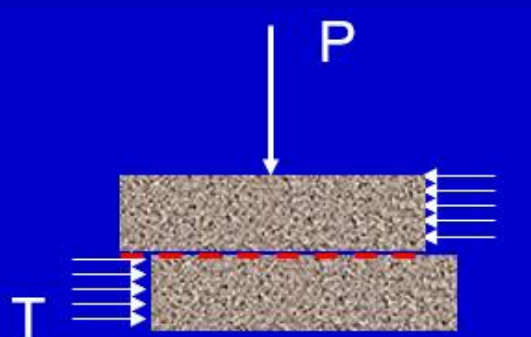
• 法向应力 σ :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

• 剪应力 τ :

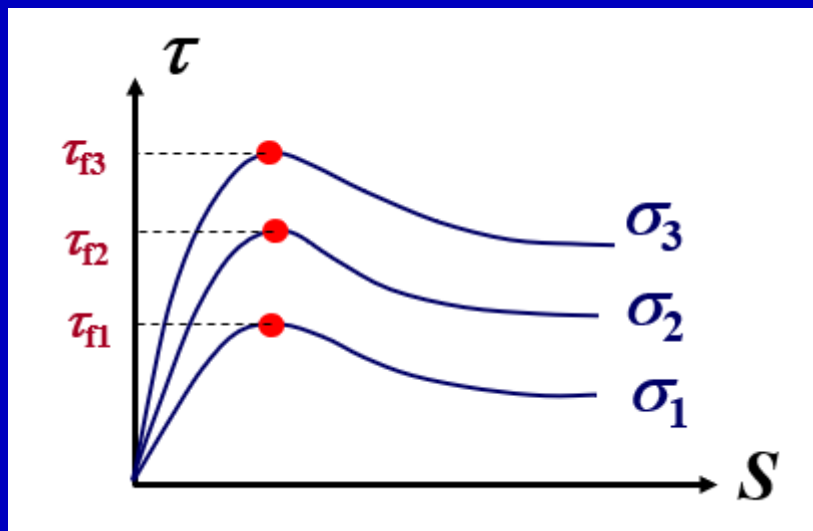
$$\tau = \frac{T}{A}$$

• 剪切变形 S

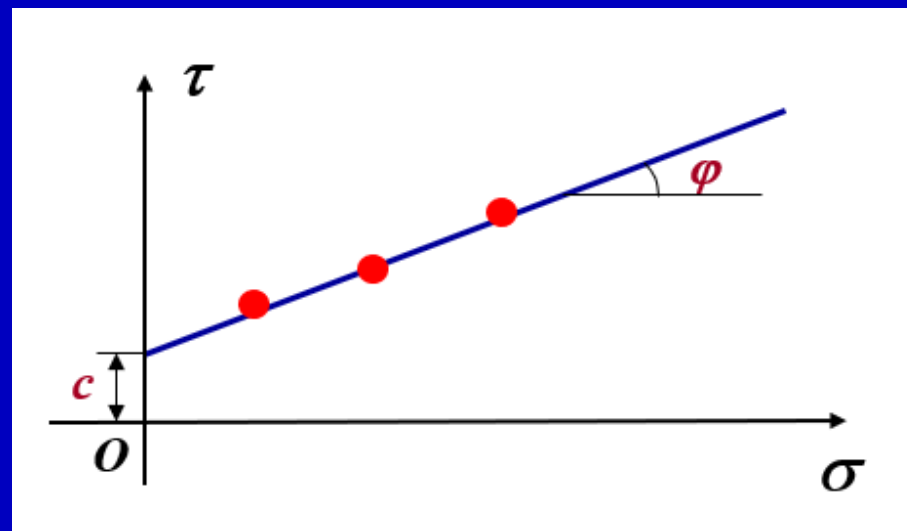


直剪试验

2、库仑公式： (1776)



直剪试验的强度包线



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

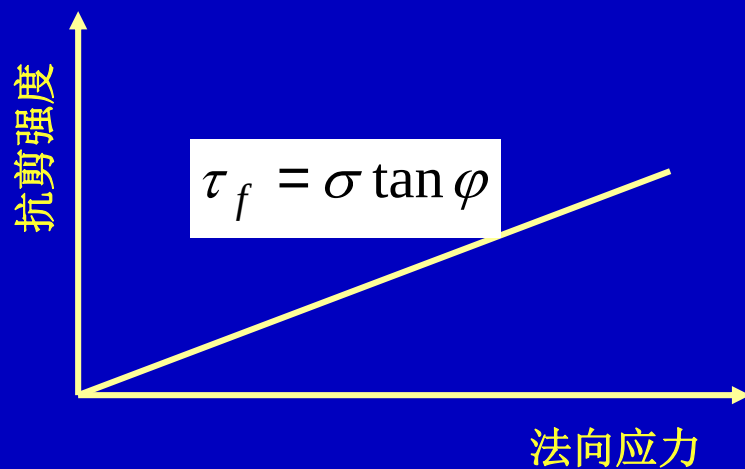
τ_f : 土的抗剪强度

$\sigma \tan \varphi$: 摩擦强度-正比于压力 σ

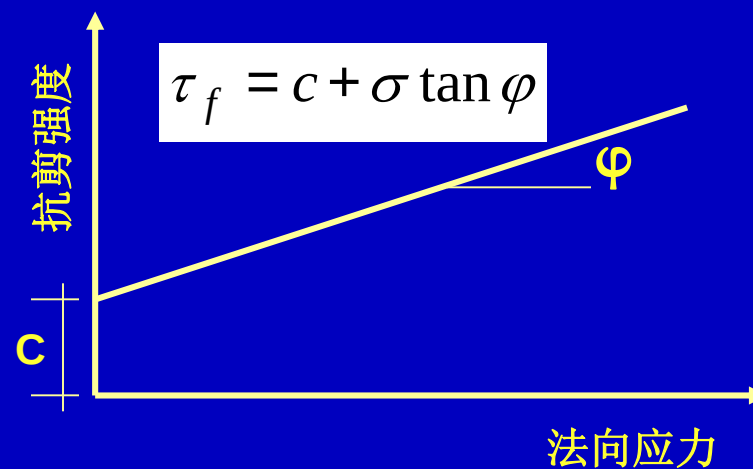
φ : 土的内摩擦角

c : 黏聚强度-与所受压力无关

黏性土与无黏性土的抗剪强度曲线:



无黏性土



黏性土



3、土的抗剪强度指标

■ 库仑公式:

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

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

☞ c 和 φ 是决定土的抗剪强度的两个指标，称为抗剪强度指标

- 当 σ 采用总应力时， c 和 φ 称为总应力抗剪强度指标
- 当 σ 采用有效应力时， c' 和 φ' 称为有效应力抗剪强度指标

➡ 对无黏性土通常认为，黏聚力 $c = 0$



4、土的强度来源

摩擦强度：决定于剪切面上的正应力 σ 和土的内摩擦角 φ

黏聚力：土粒间的胶结作用和电分子引力等因素形成的。

包括如下两个组成部分：

◆ 滑动摩擦

◆ 咬合摩擦

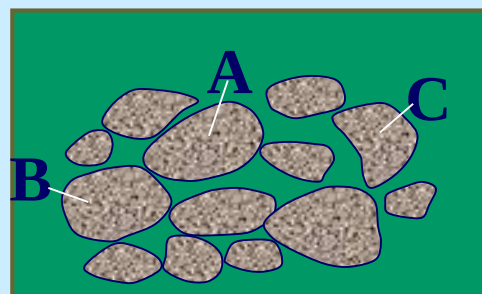
- 剪切滑动面相邻颗粒的摩擦力
- 由于颗粒之间矿物接触面粗糙不平所引起
- 对于给定的矿物，土颗粒间的滑动摩擦角 φ_u 的值基本为常数
- 如对饱和石英 $\varphi_u = 22 \sim 24.5^\circ$

■ 摩擦强度：决定于剪切面上的正应力 σ 和土的内摩擦角 φ

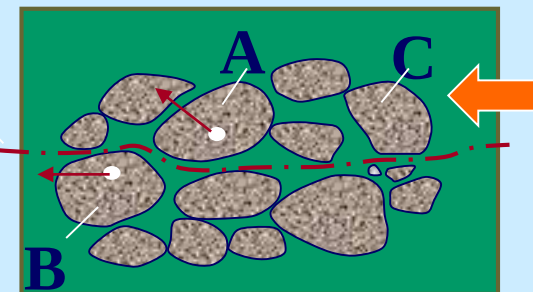
包括如下两个
组成部分：

◆ 滑动摩擦

◆ 咬合摩擦



剪切面



- 是指相邻颗粒对于相对移动的相嵌约束作用
- 当发生剪切破坏时，相互咬合着的颗粒A必须抬起，跨越相邻颗粒B，或在尖角处被剪断（C），才能移动。
- 土体中的颗粒重新排列，也会消耗能量

5、影响土的抗剪强度的主要因素:

- 👉 剪切面上的法向应力
- 👉 土的密度
- 👉 颗粒级配
- 👉 颗粒的矿物成分
- 👉 粒径的形状
- 👉 黏土颗粒表面的吸附水膜
- 👉 含水量
- 👉 土的结构



例题：通过试验已测得土体的抗剪强度指标 $\varphi=30^\circ$ ， $c=10\text{kPa}$ ，该土体某一截面上作用有法向应力 $\sigma=300\text{kPa}$ ，剪应力 $\tau=160\text{kPa}$ ，问该截面处于何种状态？当 τ 为多少时，截面将发生破坏？

解：（1）已知 $\sigma=300\text{kPa}$ ， $\varphi=30^\circ$ ， $c=10\text{kPa}$ ，则该截面的抗剪强度为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + c = 300 \tan 30^\circ + 10 = 183.2\text{kPa}$$

而现在截面实际所受的剪应力 $\tau=160\text{kPa} < \tau_f = 183.2\text{kPa}$ ，所以该截面处于稳定平衡状态。

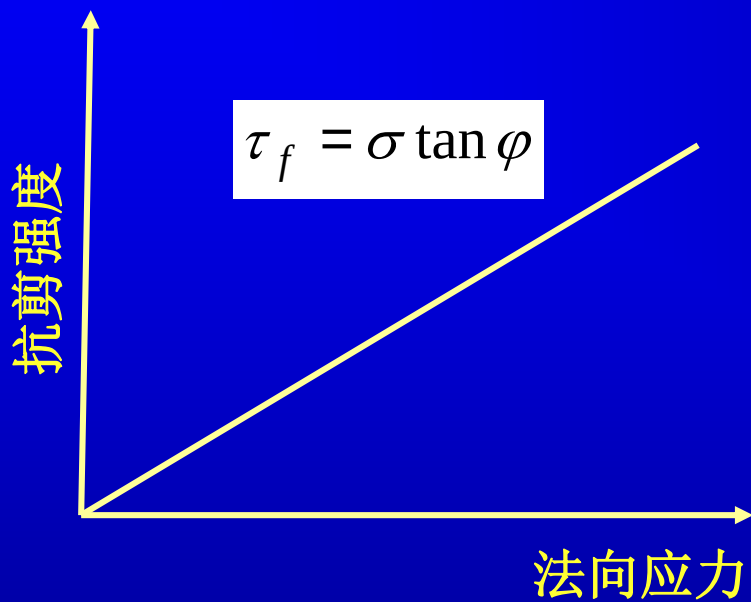
（2）当该截面上的剪应力 τ 超过抗剪强度 τ_f 时，即 $\tau > \tau_f = 183.2\text{kPa}$ 时，该截面发生破坏。



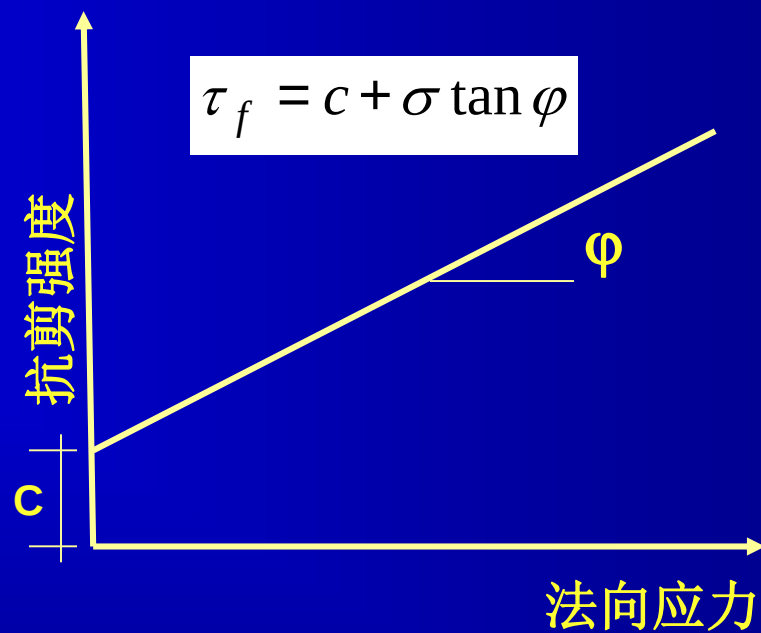
§5.2 土的抗剪强度与极限平衡条件



一、库仑定律



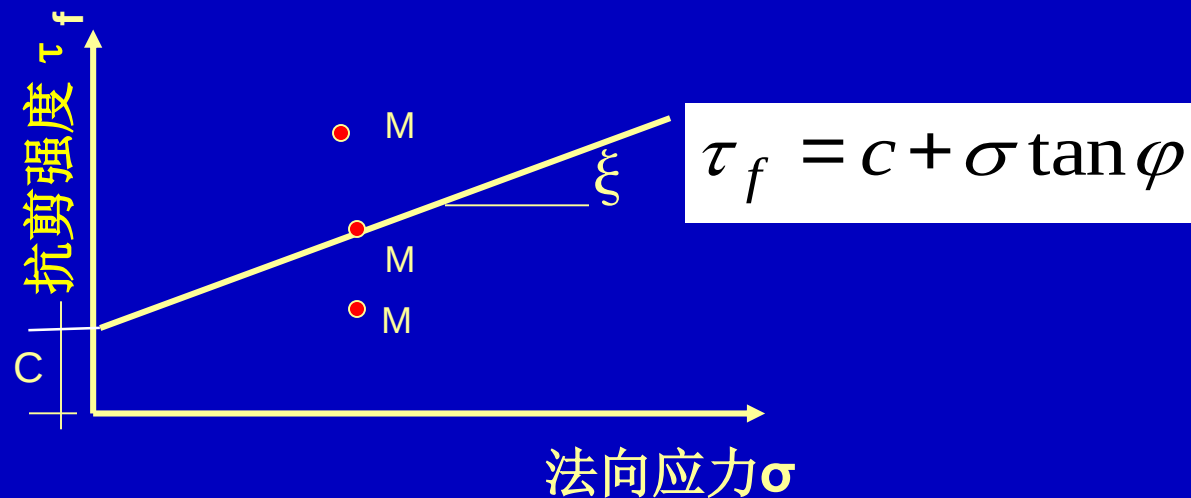
无黏性土



黏性土



M点与库仑强度曲线的三种关系：



M点在曲线的下方， $\tau < \tau_f$ ，说明 处于稳定平衡状态；

M点恰好落在库仑强度曲线上， $\tau = \tau_f$ ，说明 处于极限平衡状态；

M点在曲线的上方，说明 $\tau > \tau_f$ ，说明 已经破坏。

二、摩尔—库仑强度理论

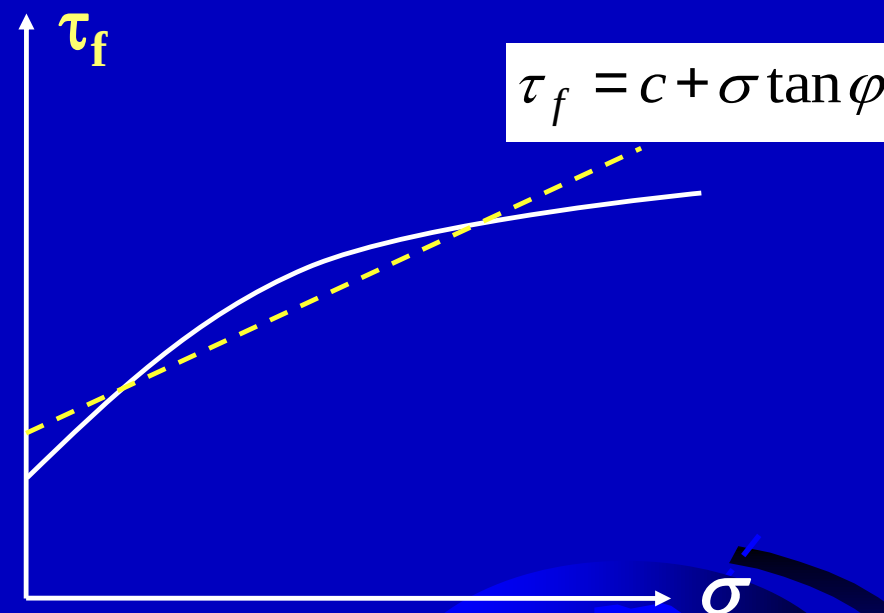
莫尔强度理论：认为材料受荷载发生破坏是剪切破坏，在破坏面上的剪应力 τ_f 是法向应力 σ 的函数：

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

——摩尔强度包线

库仑公式：

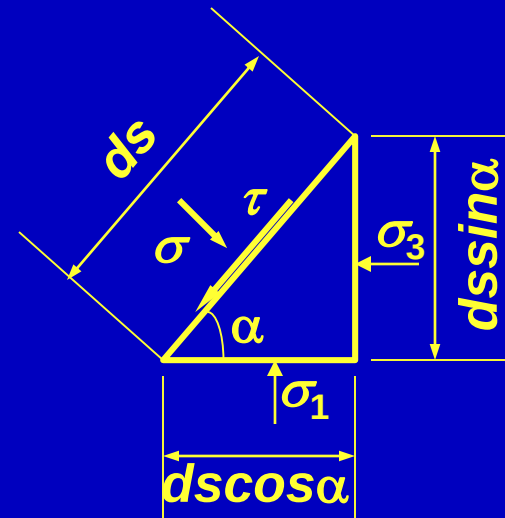
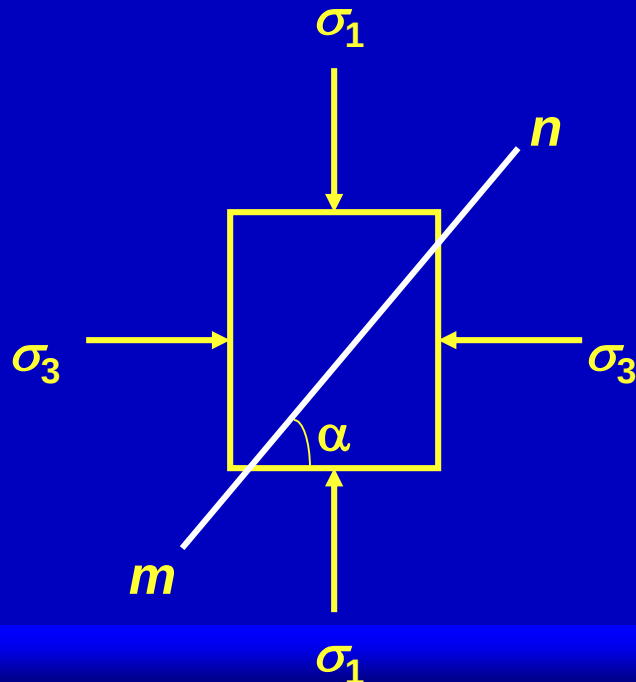
$$\tau_f = f(\sigma) = c + \sigma \tan \varphi$$



用库仑公式表示莫尔强度包线的理论称为莫尔—库仑强度理论。

1、土中一点应力状态

对于平面问题：在土体中一微单元，设作用在微单元的两个主应力：大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 ，在与大主应力作用面成 α 的mn面上的有正应力 σ 和剪应力 τ 。

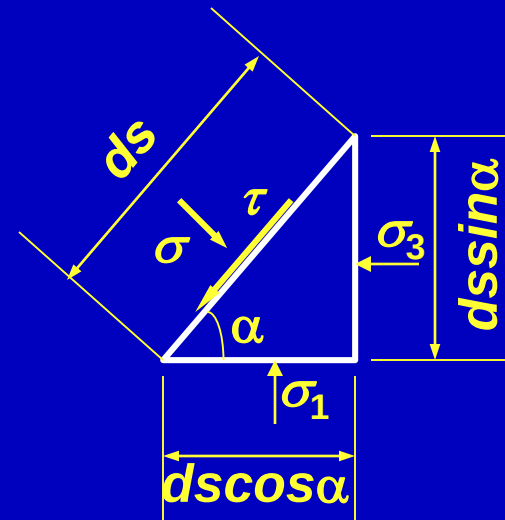
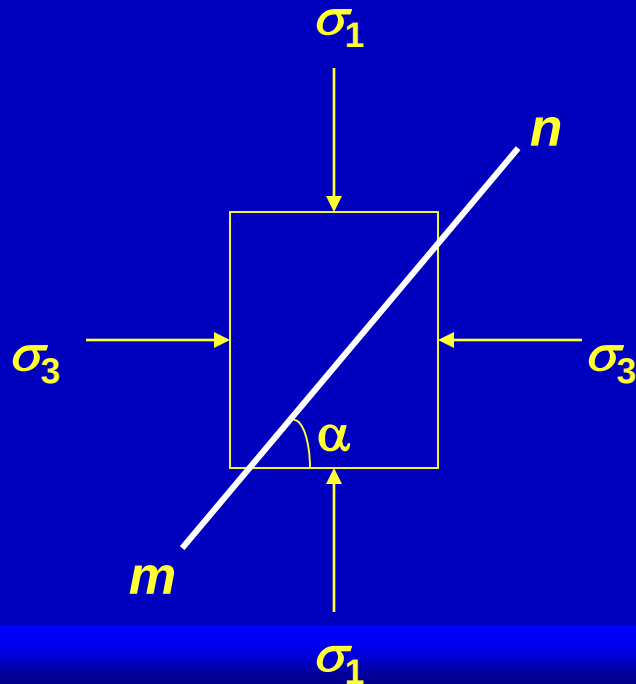


土中一点应力状态

由静力平衡条件，可得：

$$\sum F_x=0, \sigma_3 d s \sin \alpha - \sigma d s \sin \alpha + \tau d s \cos \alpha = 0$$

$$\sum F_y=0, \sigma_1 d s \cos \alpha - \sigma d s \cos \alpha - \tau d s \sin \alpha = 0$$

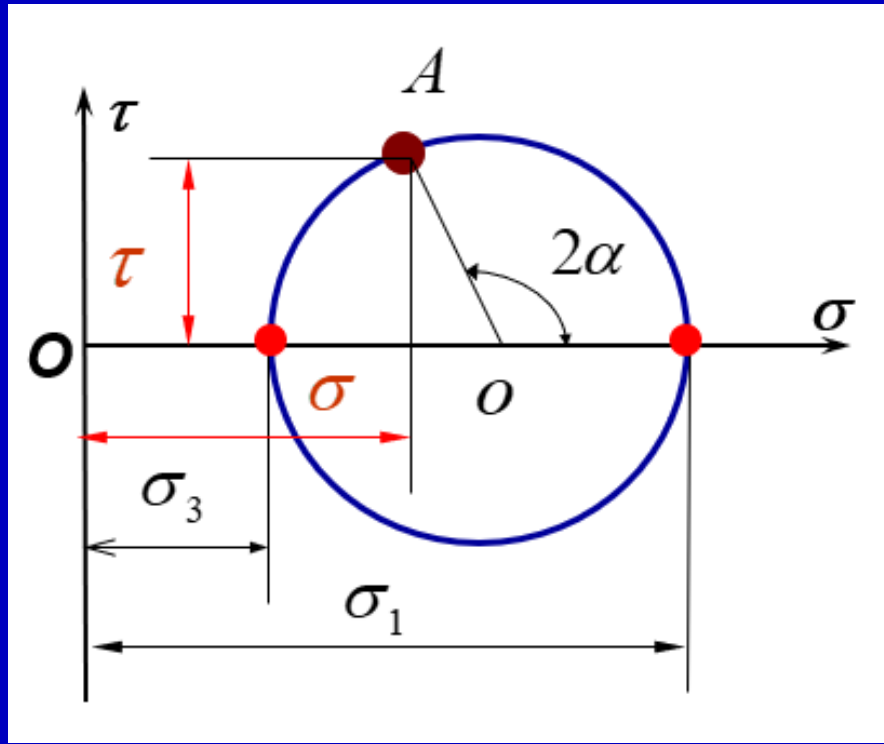


- 斜面 mn 上的正应力 σ 和剪应力 τ :

$$\begin{cases} \sigma = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha / 2 \\ \tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha / 2 \end{cases}$$

- σ 、 τ 与 σ_1 、 σ_3 的关系也可以用莫尔应力圆表示,
- 表示相应平面上的法向应力和剪应力。



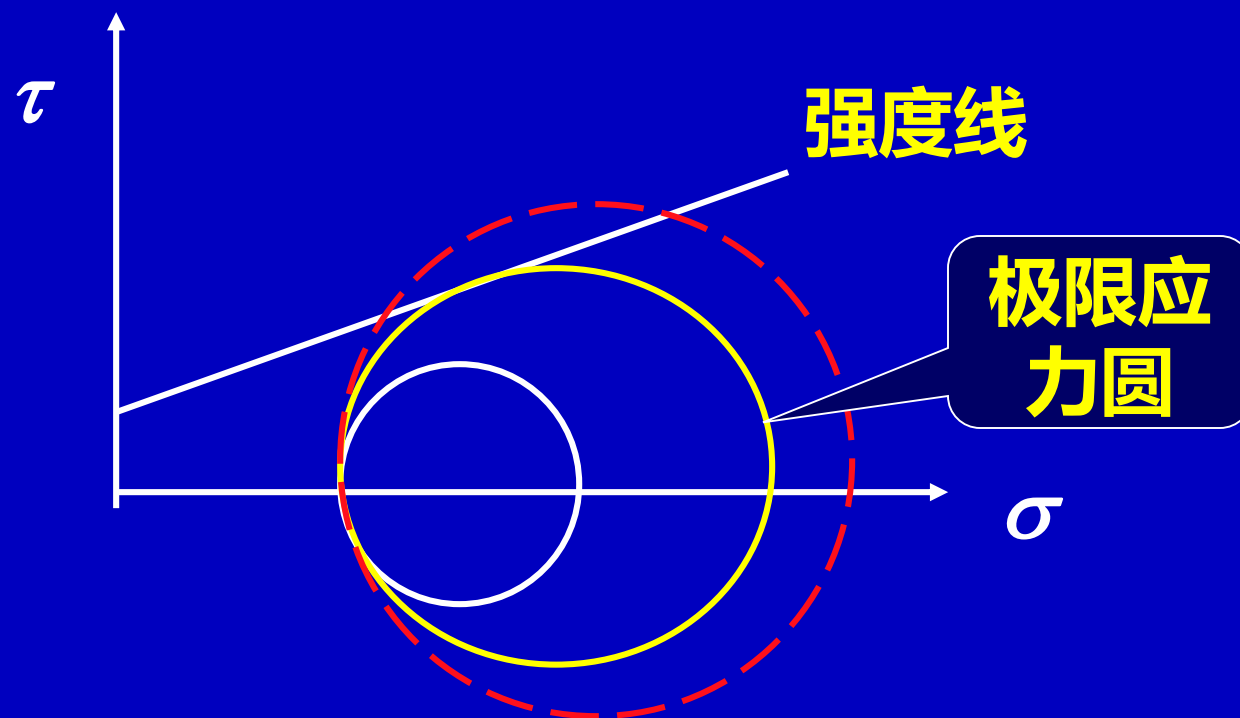


圆心: $\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0 \right)$

半径 $R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$

莫尔应力圆：代表一个土单元的应力状态；
圆上一点坐标：代表一个面上的两个应力 σ 与 τ

2. 极限平衡应力状态



应力圆与强度线**相离**:

$$\tau < \tau_f$$

弹性平衡状态

应力圆与强度线**相切**:

$$\tau = \tau_f$$

极限平衡状态

应力圆与强度线**相割**:

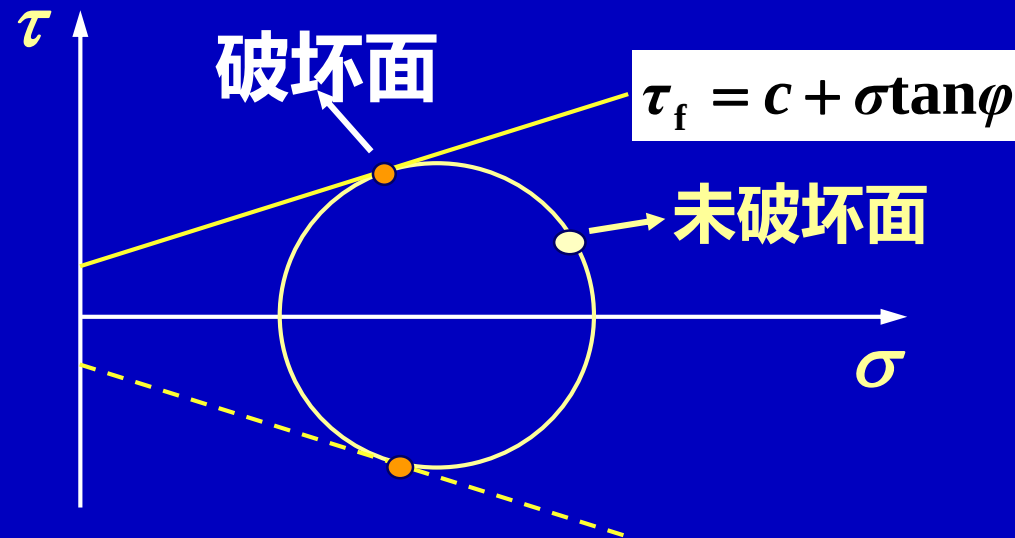
$$\tau > \tau_f$$

破坏状态

👉 **极限平衡状态：** 当土单元体发生剪切破坏时，即破坏面上剪应力达到其抗剪强度 $\tau = \tau_f$

👉 **极限平衡条件：** 极限平衡状态的应力条件称为极限平衡条件。

👉 **规定：** 土单元体只要有一个面发生剪切破坏，则认为该土单元体就达到破坏或极限平衡状态。

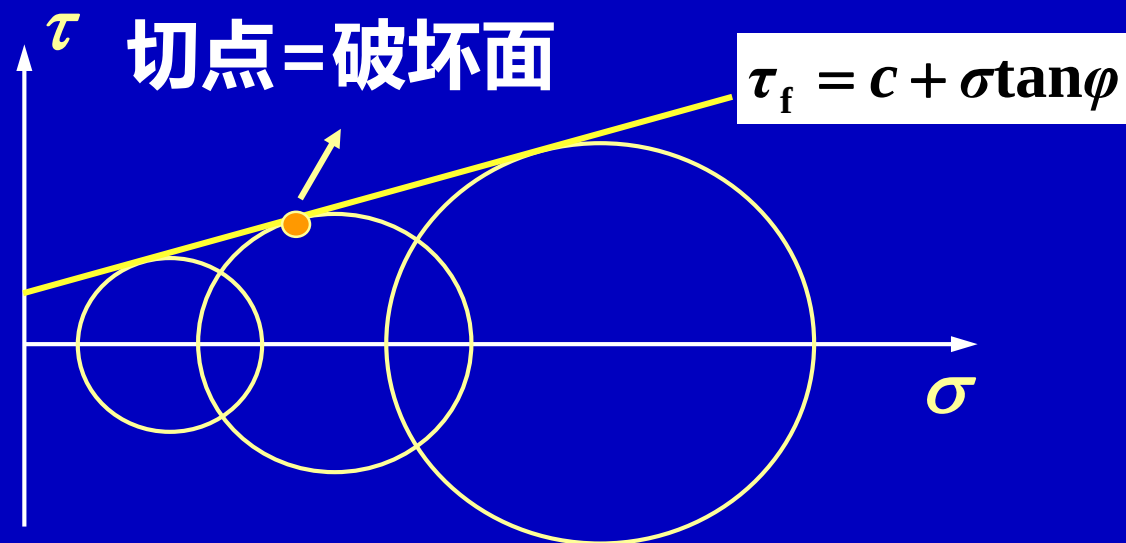


极限平衡应力状态



👉 **土的强度包线：** 所有极限平衡状态莫尔圆的公切线

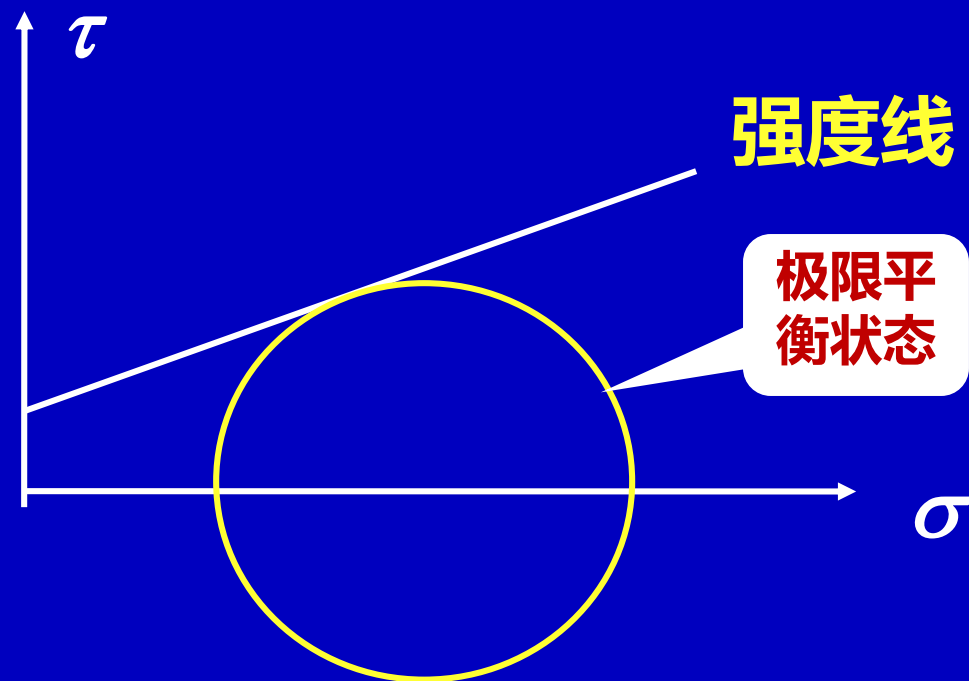
👉 在应力莫尔圆图上，土单元体发生剪切破坏的极限状态莫尔圆同强度包线相切，切点所对应的面即为破坏面



极限平衡应力状态



莫尔 - 库仑破坏准则

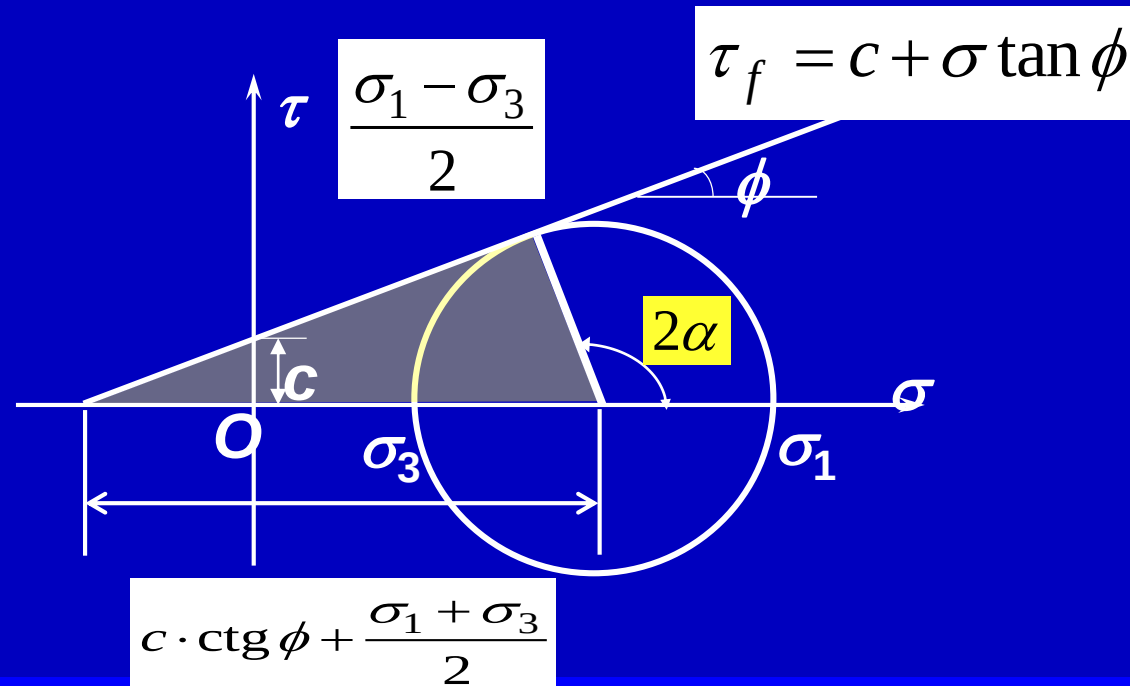


**莫尔应力圆与库仑强度线相切的应力状态作为
土的破坏准则**



3.极限平衡条件式

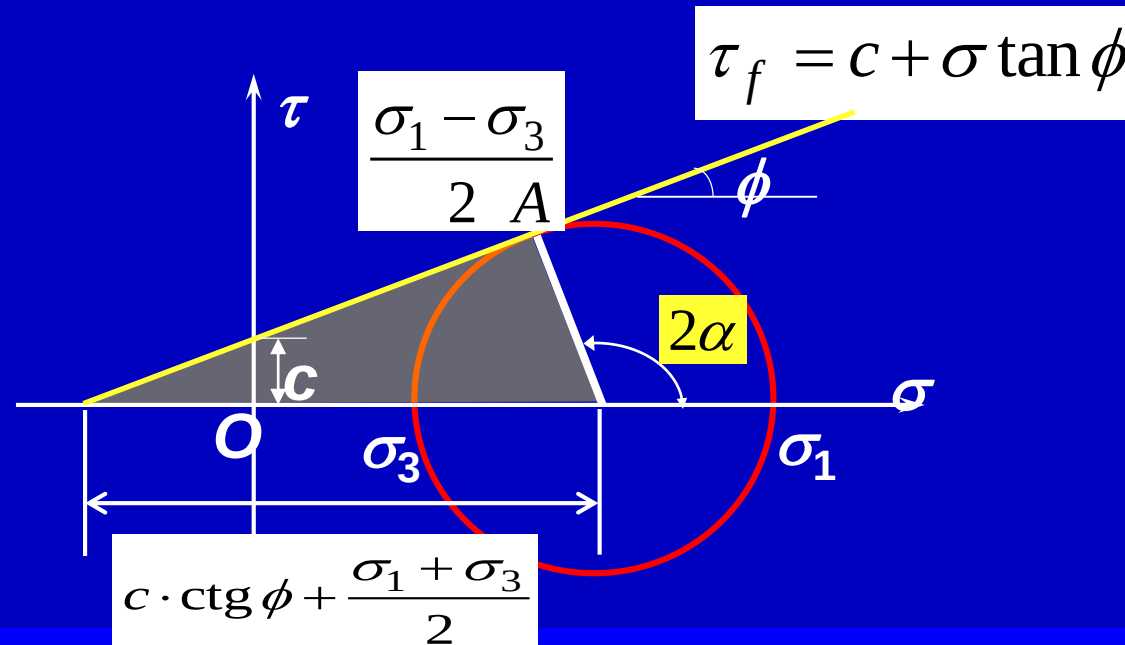
$$\sin \phi = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cdot \operatorname{ctg} \phi} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \phi}$$



极限平衡条件

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$



4. 破坏判断方法

$\sigma_1 = \text{常数}$:

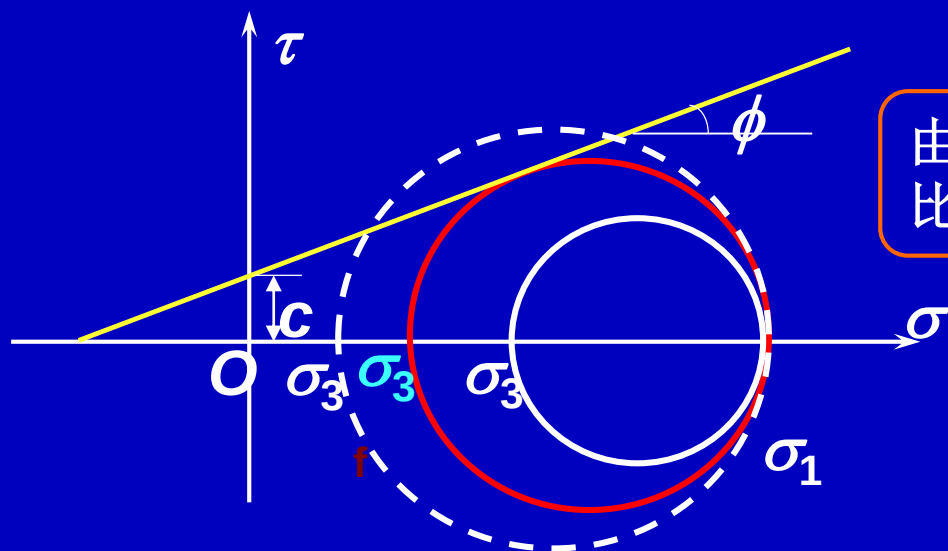
$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}$$

(P106均布条形荷载下土中附加应力)

根据应力状态计算出
大小主应力 σ_1 、 σ_3



判断破坏可能性



由 σ_1 计算 σ_{3f}
比较 σ_3 与 σ_{3f}

$\sigma_3 > \sigma_{3f}$ 安全状态

$\sigma_3 = \sigma_{3f}$ 极限平衡状态

$\sigma_3 < \sigma_{3f}$ 不可能状态

$$\sigma_{3f} = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

4. 破坏判断方法

$\sigma_3 = \text{常数}$:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}$$

根据应力状态计算出
大小主应力 σ_1 、 σ_3

判断破坏可能性

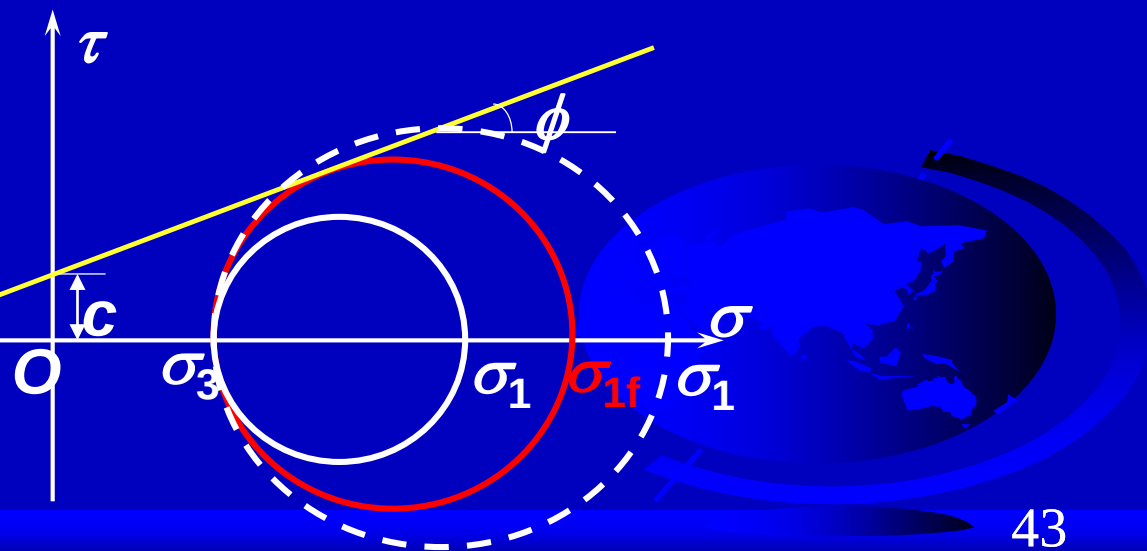
$\sigma_1 < \sigma_{1f}$ 安全状态

$\sigma_1 = \sigma_{1f}$ 极限平衡状态

$\sigma_1 > \sigma_{1f}$ 不可能状态

由 σ_3 计算 σ_{1f}
比较 σ_1 与 σ_{1f}

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$



极限平衡条件

- 用有效强度指标表达:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)$$
$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) - 2c' \tan \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$\alpha_f = \frac{1}{2} (90^\circ + \phi') = 45^\circ + \frac{\phi'}{2}$$



- 例题：某砂土地基 $\varphi=30^\circ$ ， $c=0$ 。某点应力 $\sigma_1=100kPa$ ， $\sigma_3=30kPa$ ，问该点是否剪破？

【解1】：把 $\sigma_1=100kPa$ ， $\varphi=30^\circ$ ， $c=0$ 代入公式，得

$$\sigma_{3f} = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \varphi/2) = 33kPa$$

实际的 $\sigma_3=30kPa$ ，小于计算值 $\sigma_{3f}=33kPa$ ，

表明实际摩尔圆大于极限状态的摩尔圆，与抗剪强度线相交。

故可判断该点已剪破。



- 例题：某砂土地基 $\varphi=30^\circ$, $c=0$ 。某点应力 $\sigma_1=100kPa$, $\sigma_3=30kPa$, 问该点是否剪破？

【解2】：把 $\sigma_3=30kPa$, $\varphi=30^\circ$, $c=0$ 代入公式，得

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) = 90kPa$$

实际的 $\sigma_1=100kPa$ ，大于计算值 $\sigma_1=90kPa$ ，
实际圆大，故可判断该点已剪破。



- 例题：某砂土地基 $\varphi=30^\circ$ ， $c=0$ 。某点应力 $\sigma_1=100\text{kPa}$ ， $\sigma_3=30\text{kPa}$ ，问该点是否剪破？

【解3】：对 $c=0$ 的无黏性土，有 $\sin \varphi=(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$

把 σ_1 、 σ_3 、 φ 、 c 代入上式，得

$$\varphi_f = \sin^{-1}(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)=32^\circ 41'$$

计算的 φ_f 大于强度指标 φ ，仍可判断该点已剪破。



- 例题：某砂土地基 $\varphi=30^\circ$, $c=0$ 。某点应力 $\sigma_1=100\text{kPa}$, $\sigma_3=30\text{kPa}$, 问该点是否剪破？

【解4】：先计算出破裂面上的正应力和剪应力：

$$\alpha_f = 45^\circ + \varphi / 2 = 60^\circ$$

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\alpha_f / 2 = 47.5\text{kPa}$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha_f / 2 = 30.31\text{kPa}$$

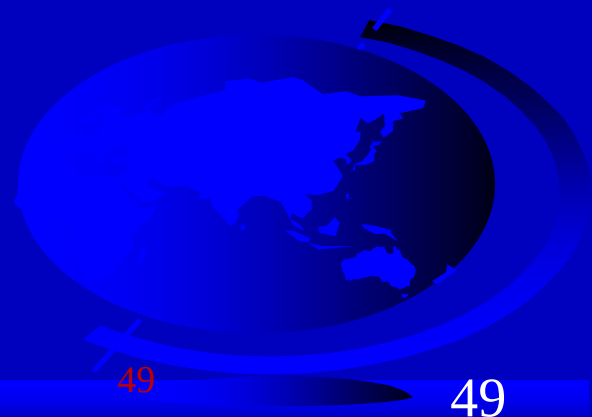
而破裂面上的抗剪强度：

$$\begin{aligned}\tau_f &= c + \sigma \tan \varphi = 0 + 47.5 \tan 30^\circ = 27.42\text{kPa} < \tau \\ &= 30.31\text{kPa}\end{aligned}$$

故也可判断该点已剪破。



§5.3 土的抗剪强度试验方法及强度指标



抗剪强度测定方法

室内试验

三轴试验、直剪试验、无侧限抗压等

制样（重塑土）或现场取样

缺点：扰动

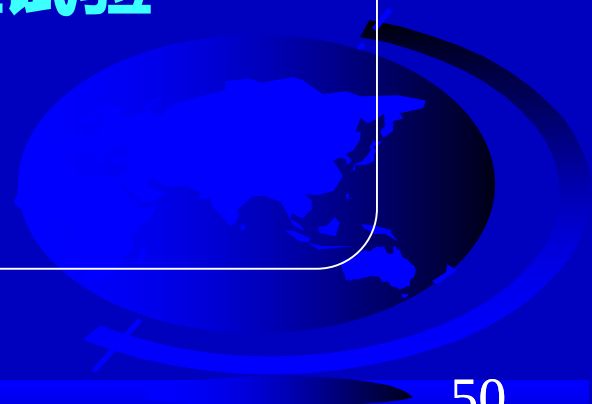
优点：应力条件清楚，易重复

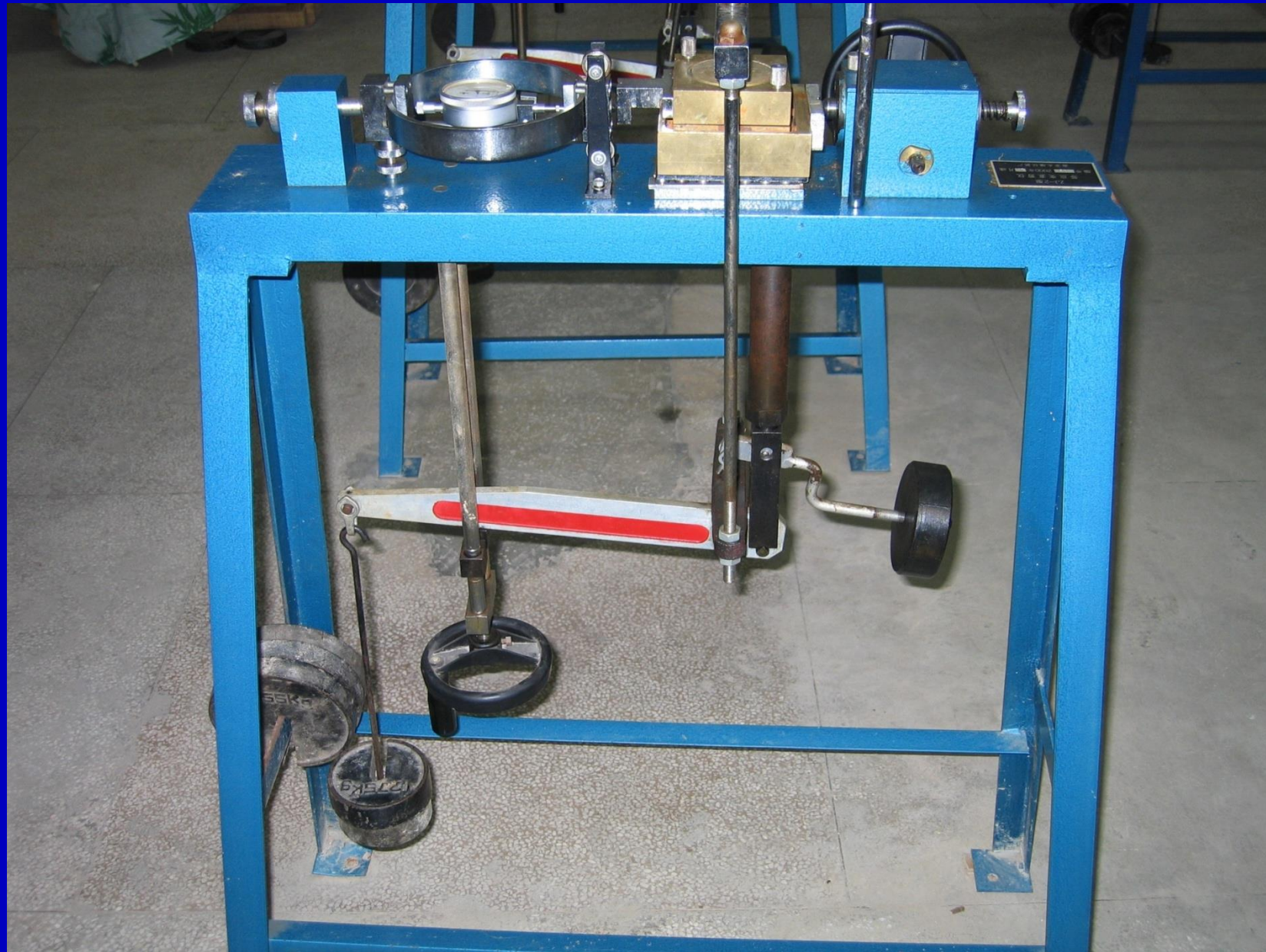
野外试验

十字板剪切试验、旁压试验等原位试验

缺点：应力条件不易掌握

优点：原状土的原位强度





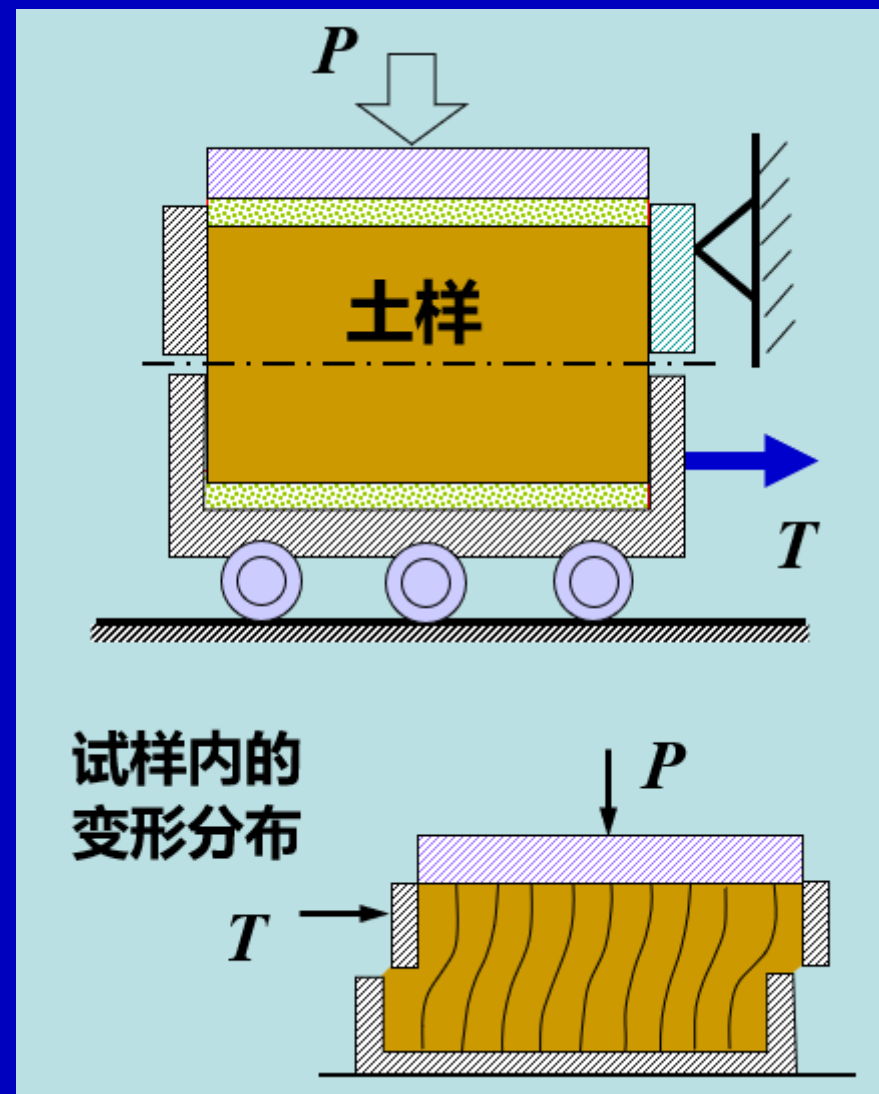
一、直剪试验

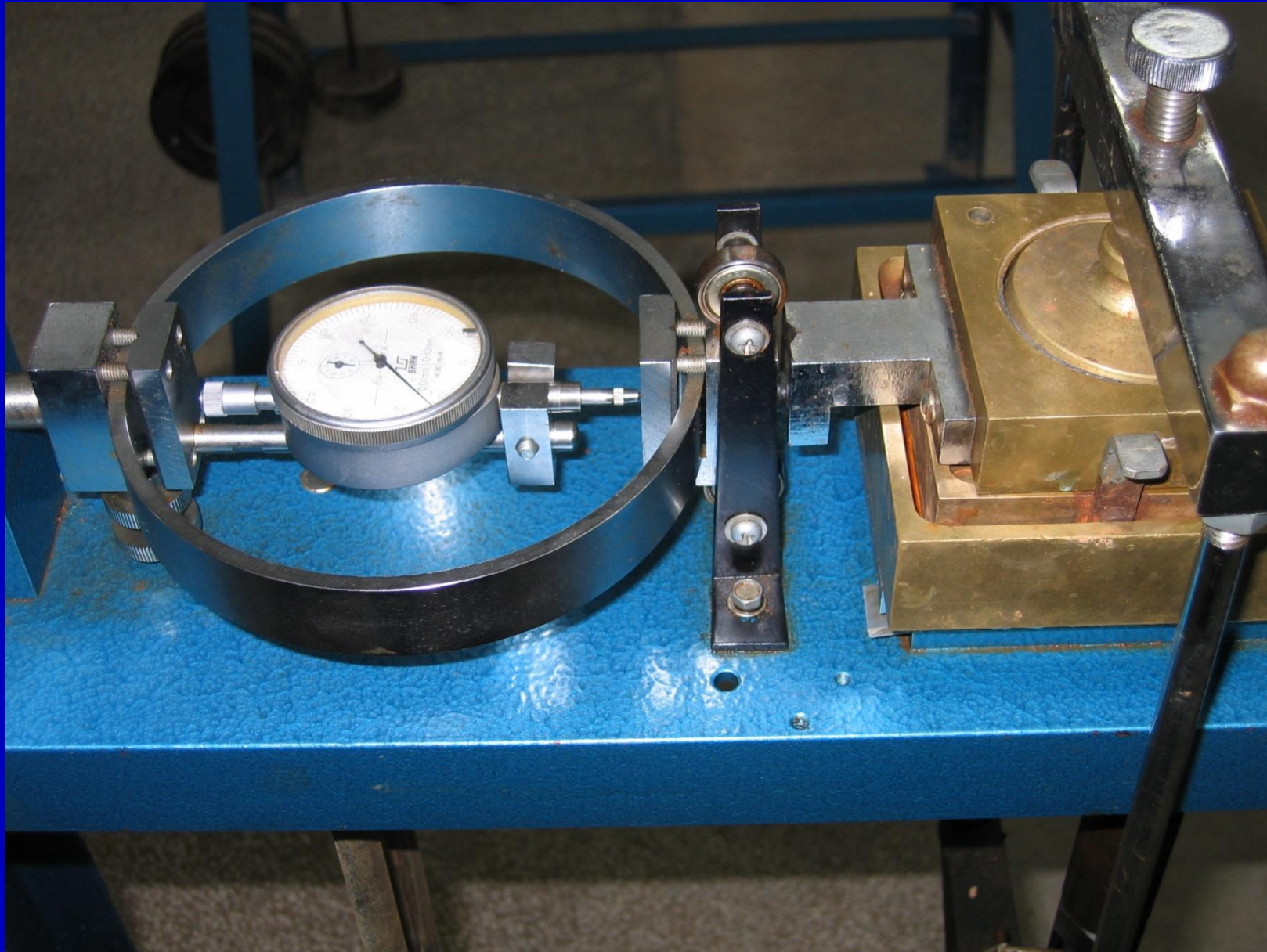
直剪仪装置:

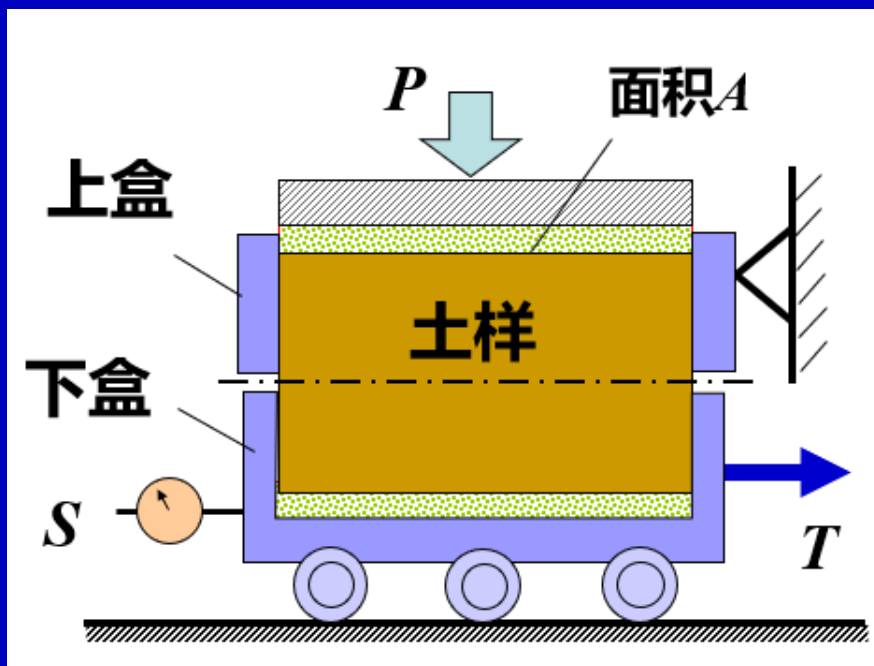
- 1、可装土样的上、下盒
- 2、竖直及水平加荷部分
- 3、量测剪切变形装置

试验方法:

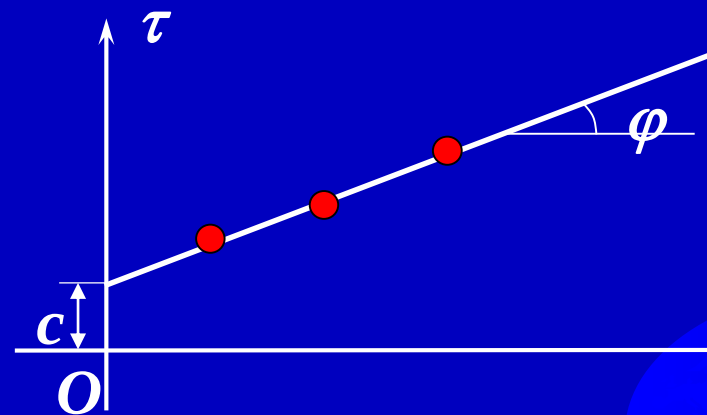
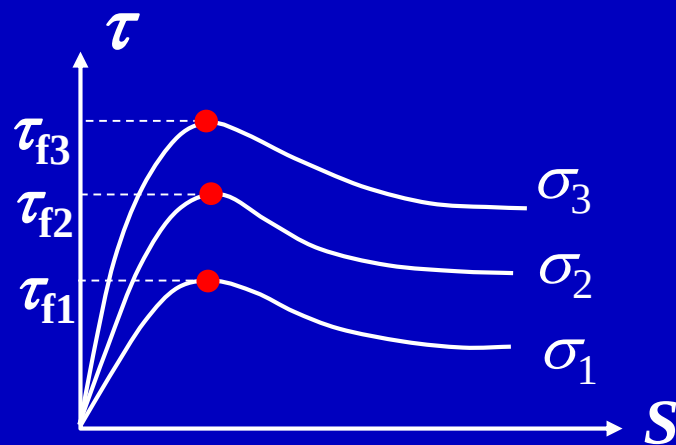
- 1、用环刀切取土样然后推入上、下盒中;
- 2、由杠杆系统对试样施加垂直压力;
- 3、轮轴匀速推进下盒（应变控制式），使试样沿上、下盒水平接触面产生剪切位移;
- 4、读取量力环上的百分表读数，直至最大数出现。







直剪仪



直剪试验

直剪试验的类型

通过控制
剪切速率
近似模拟
排水条件



(1) 固结慢剪

- 施加正应力-充分固结
- 剪切速率很慢, $<0.02\text{mm/分}$,
- 以保证无超静孔压

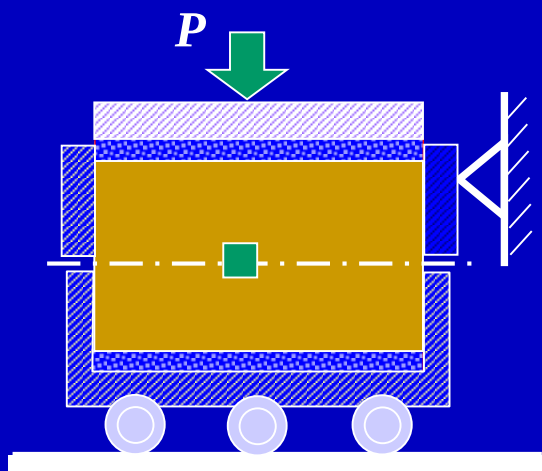
(2) 固结快剪

- 施加正应力-充分固结
- 在3-5分钟内剪切破坏

(3) 快剪

- 施加正应力后立即剪切
- 3-5分钟内剪切破坏



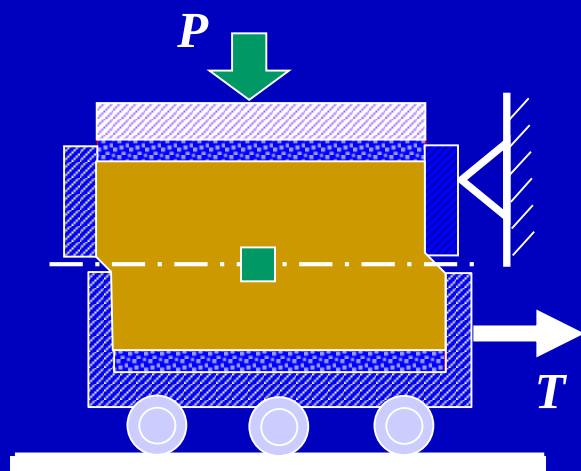


剪切前

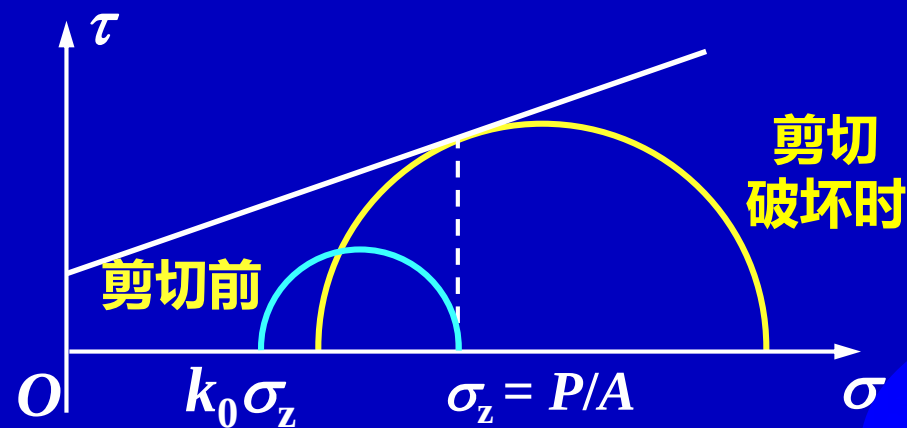
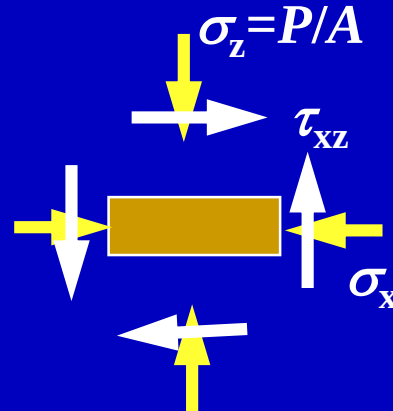
$$\sigma_z = P / A$$

$$\sigma_x = k_0 \sigma_z$$

$$\tau_{xz} = 0$$



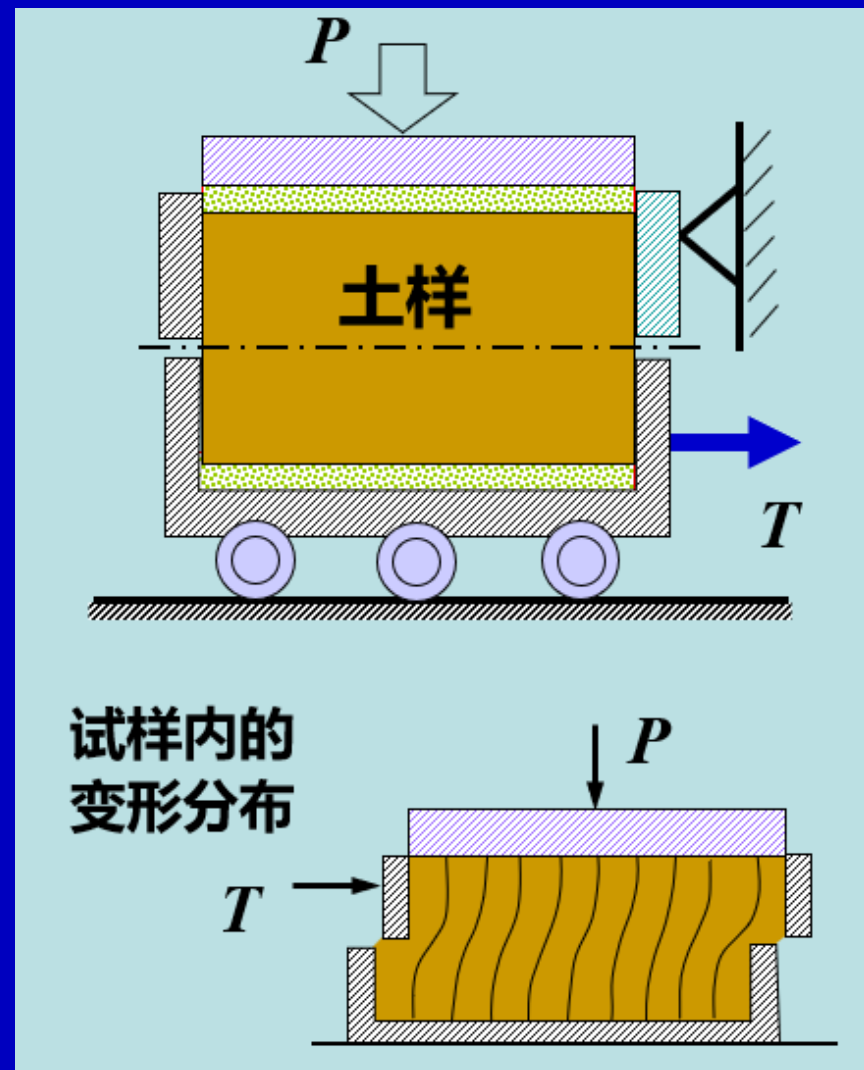
剪切破坏时



直剪试验中的应力状态

直剪试验的优缺点

- 👍 设备和操作简单
- 👎 人为固定剪切面
 - 应力、应变不均匀
 - 主应力方向旋转
- 👎 剪切面应力状态复杂
- 👎 剪切面积逐渐减小
- 👎 排水条件不明确



三轴压缩试验



二、三轴试验

1、试验方法与试样应力特点

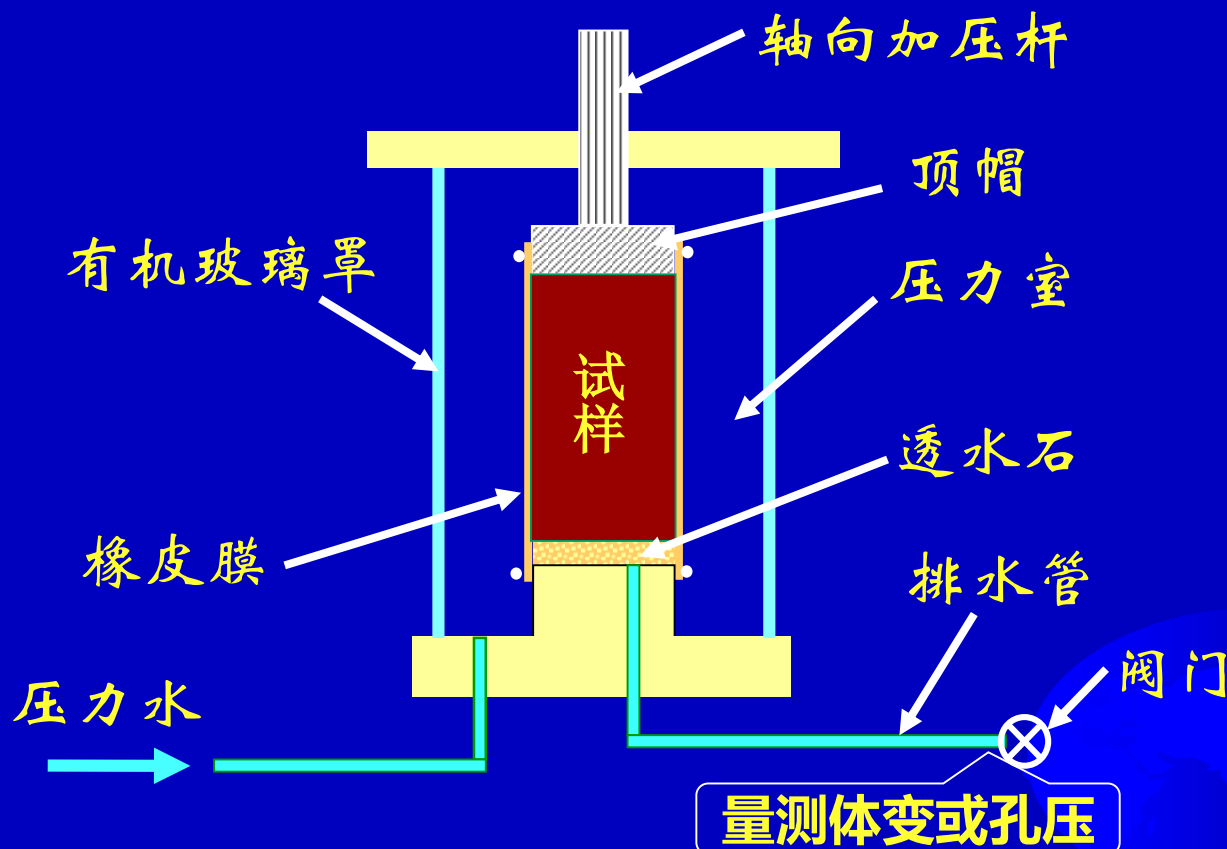
2、强度包线

3、试验类型

4、优缺点

压力室由三部分组成：

- (1) 周围压力系统
- (2) 轴向加压系统
- (3) 孔隙水压力测读系统





应变控制式三轴仪

压力室由三部分组成:

- (1) 周围压力系统
- (2) 轴向加压系统
- (3) 孔隙水压力测读系统

压力室



1、试验方法与试样应力特点

方法:

首先试样施加围压 σ_3

然后通过活塞杆施加的是应力差 σ_3

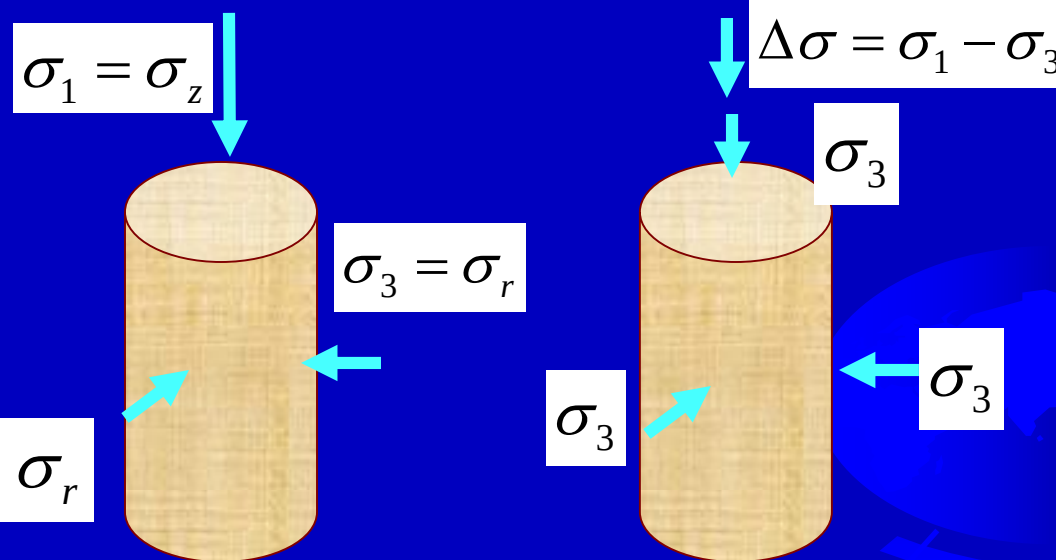
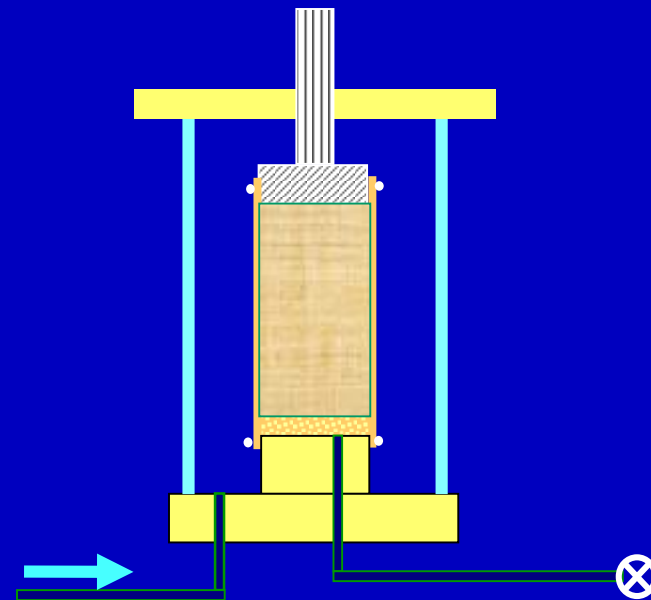
$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3。$$

特点:

试样是轴对称应力状态。

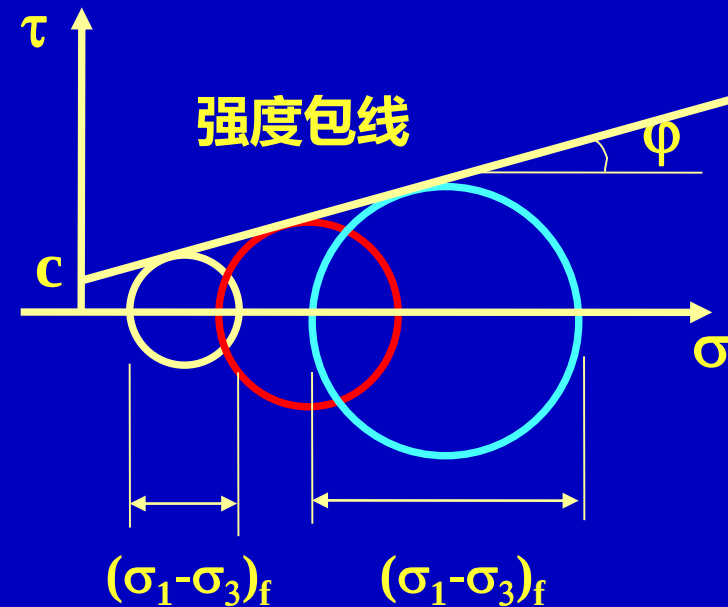
亦即 $\sigma_1 = \sigma_z$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r$$



2、强度包线

- ❖ 取不同围压 σ_3 ,
- ❖ σ_3^1 、 σ_3^2 、 σ_3^3 ,
- ❖ 如100kPa 、200kPa 、300kPa ,
则得到破坏时相应的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,
绘制极限莫尔应力圆
- ❖ 绘莫尔圆的公切线——强度包线, 得强度指标 c 与 φ

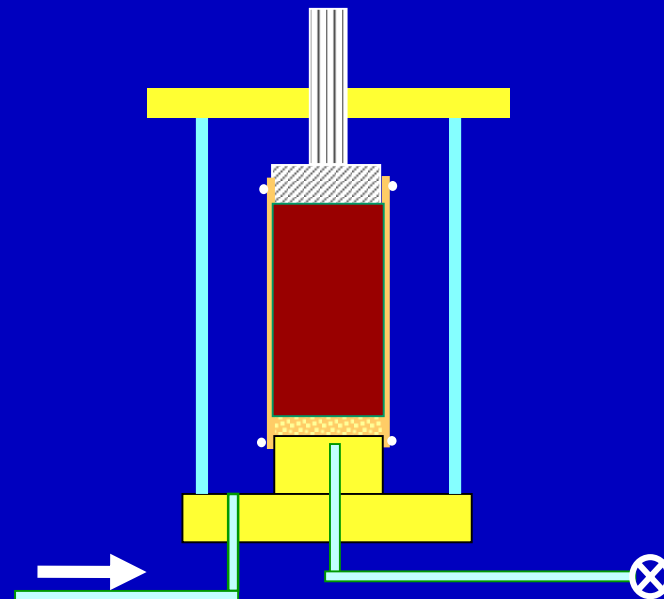


3、试验类型

❖ 固结排水试验（CD试验）

c_d 、 φ_d

- 1 打开排水阀门，施加围压 σ_3 后充分固结，超静孔隙水压力完全消散；
- 2 打开排水阀门，慢慢施加轴向应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 以便充分排水，避免产生超静孔压



❖ 固结不排水试验（CU试验）

c_{cu} 、 φ_{cu}

- 1 打开排水阀门，施加围压 σ_3 后充分固结，超静孔隙水压力完全消散；
- 2 关闭排水阀门，很快剪切破坏，在施加轴向应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 过程中不排水

❖ 不固结不排水试验（UU试验）

c_u 、 φ_u

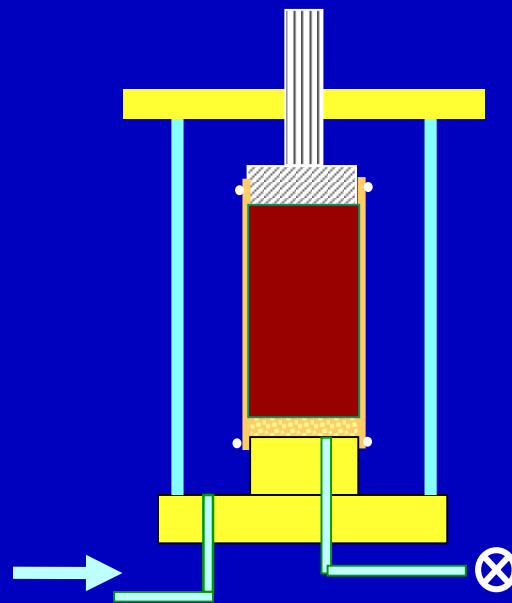
- 1 关闭排水阀门，围压 σ_3 下不固结；
- 2 关闭排水阀门，很快剪切破坏，在施加轴向应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 过程中不排水



4、优点和缺点

❖ 优点：

- 1 应力状态明确；
- 2 排水条件清楚，可控制；
- 3 破坏面不是人为固定的



❖ 缺点：

1. 设备相对复杂，现场难以试验
2. 上下端受约束，中间不受约束，试样破坏时常被挤压成鼓形

说明： $\sigma_3 = 0$ 即为无侧限抗压强度试验

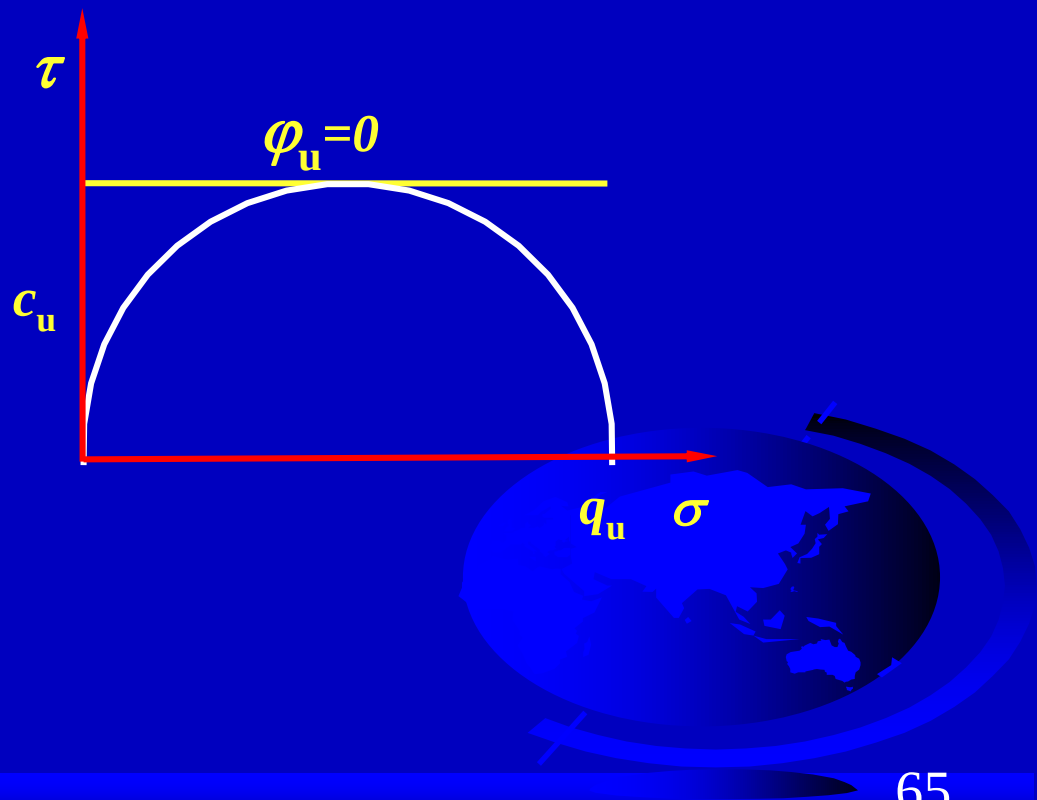
三.无侧限抗压强度实验

$\sigma_3=0$ ，仅施加垂直轴向压力 σ_1 ，剪切破坏时试样所能承受的轴向压力称为无侧限抗压强度 q_u 。

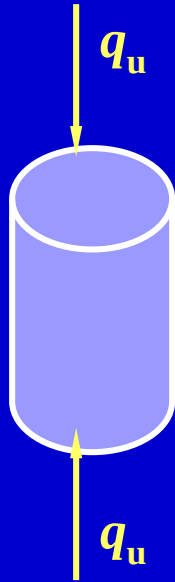
$$\sigma_1 = q_u = 2c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

对于饱和软黏土，在不固结不排水条件下进行剪切实验，可取 $\varphi=0$ ，此时其不排水抗剪强度 c_u 为：

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

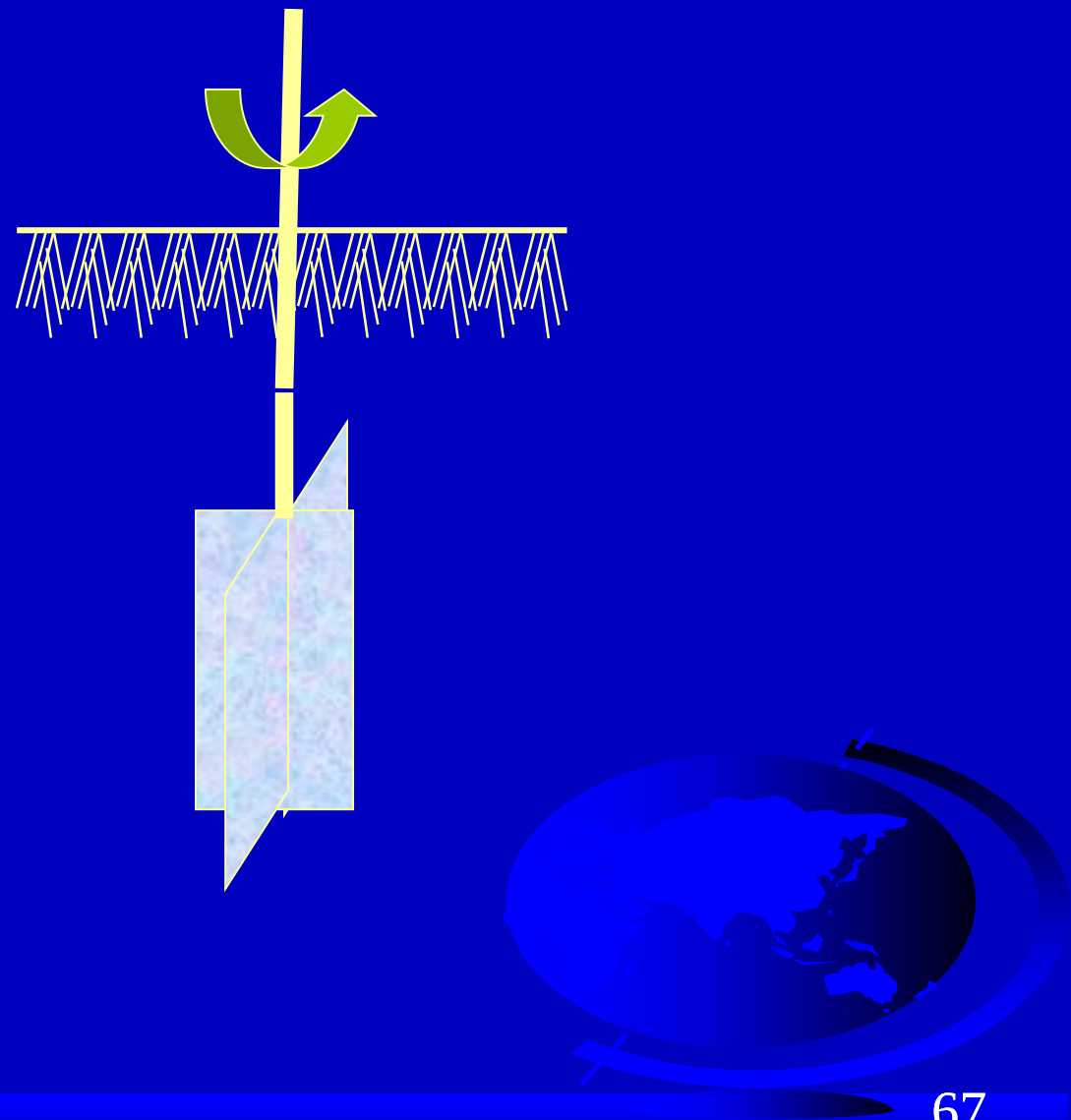


无侧限 压缩仪



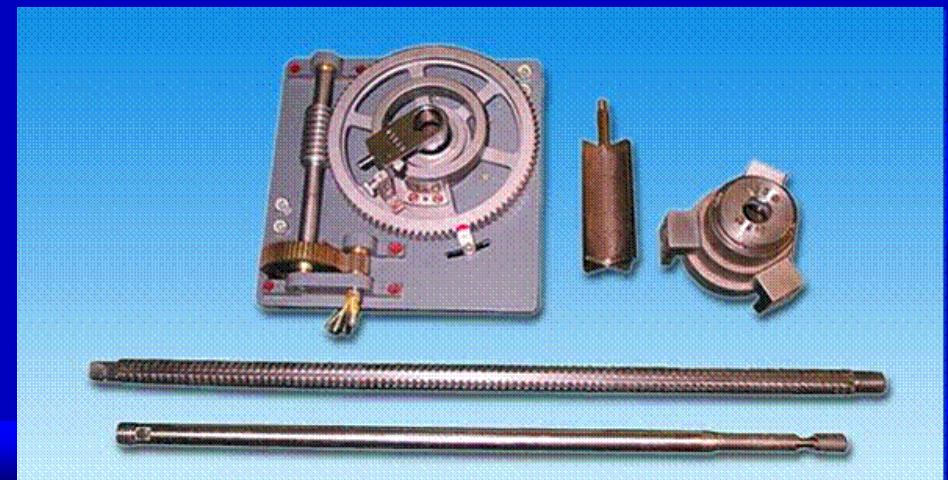
四、十字板剪切试验

- ❖ 一般适用于测定软黏土的不排水强度指标；
- ❖ 钻孔到指定的土层，插入十字形的探头；
- ❖ 通过施加的扭矩计算土的抗剪强度









土柱上的抗扭力矩:

$$M_{\max} = M_1 + M_2$$

$$M_1 = 2 \times \tau_{fh} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{D}{3} = \frac{\pi D^3}{6} \times \tau_{fh}$$

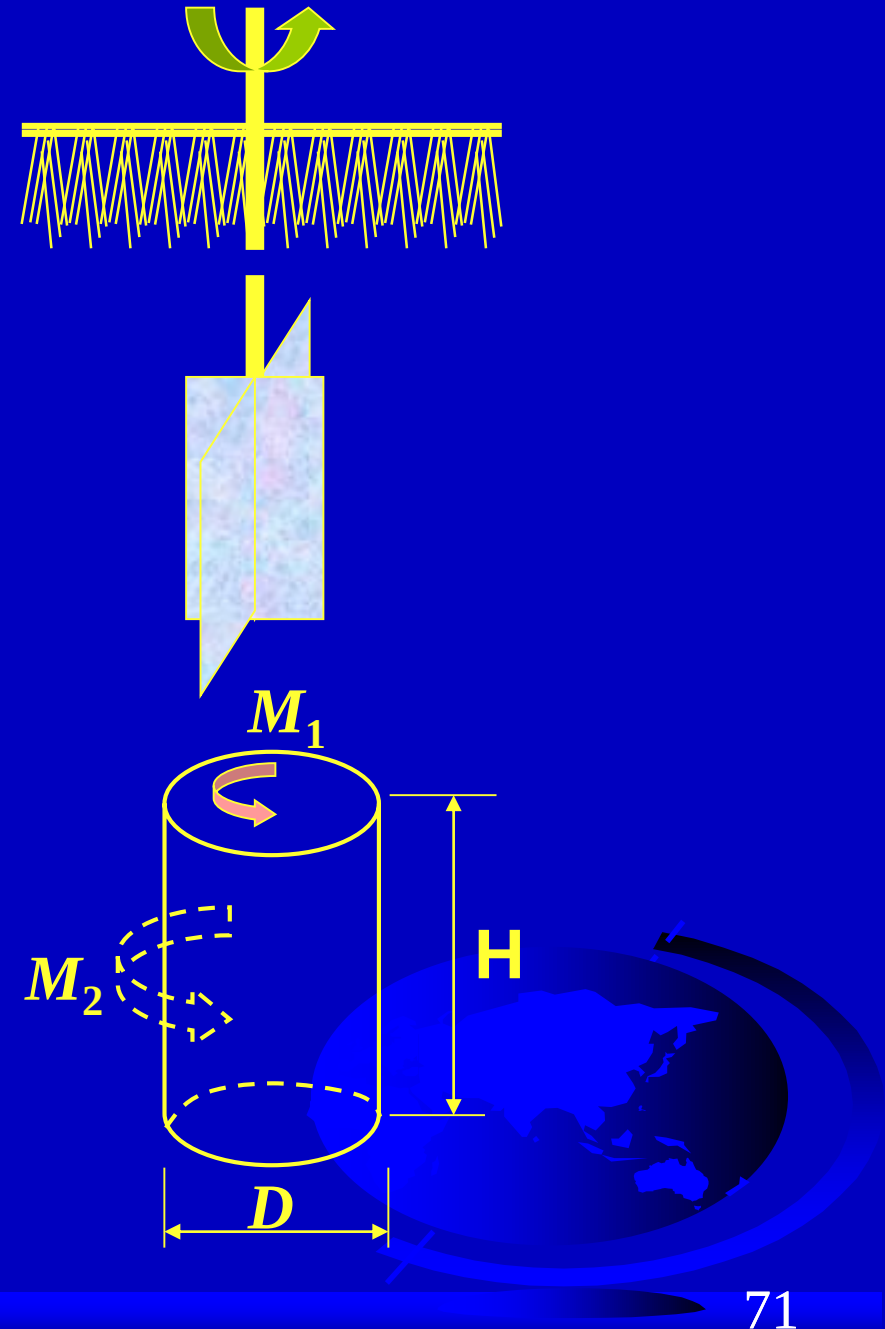
$$M_2 = \pi D H \times \frac{D}{2} \times \tau_{fv}$$

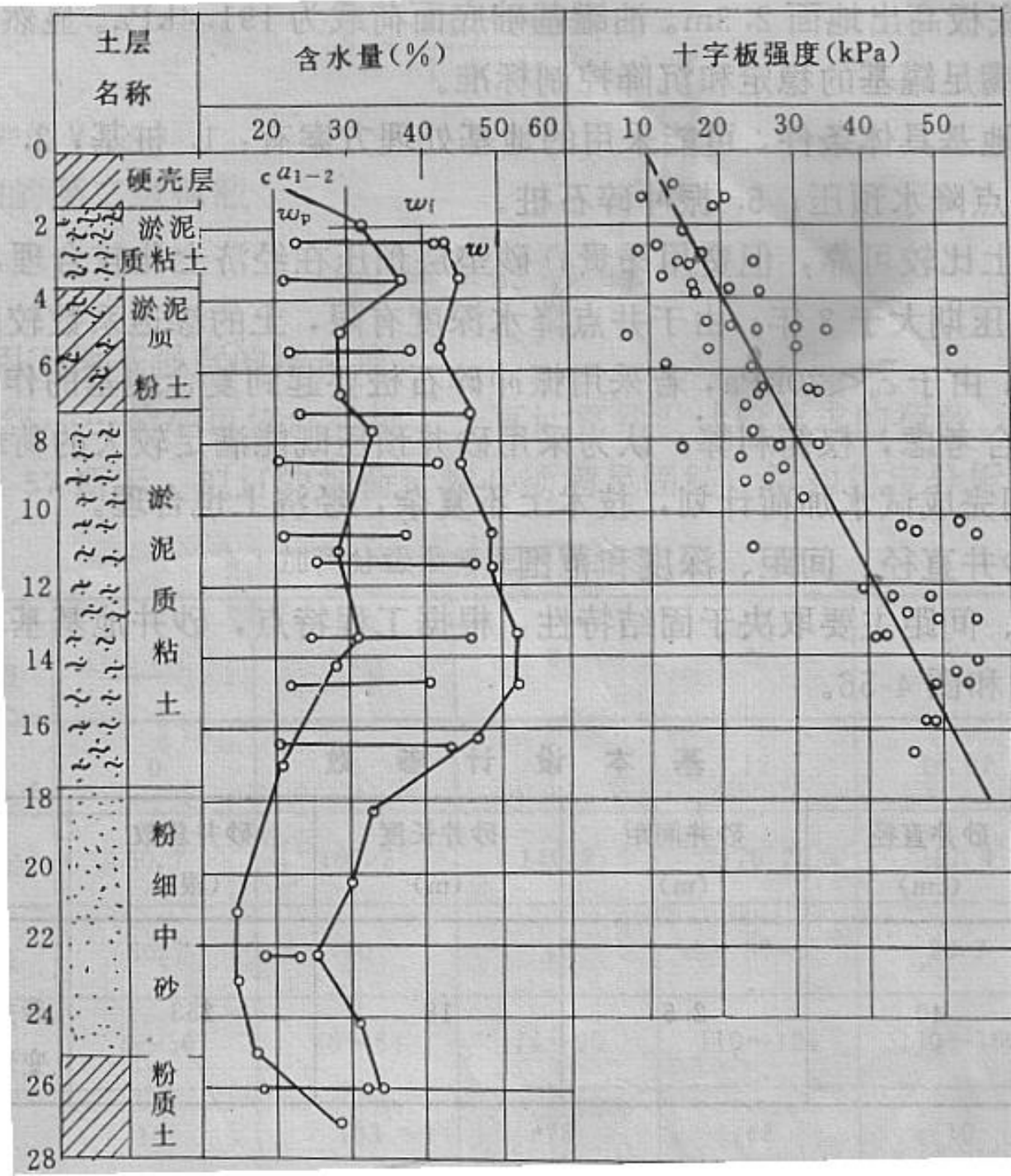
$$\tau_{fh} = \tau_{fv} = \tau_f \text{ 时:}$$

$$M_{\max} = M_1 + M_2 = \frac{\pi D^3}{6} \times \tau_f + \frac{\pi D^2 H}{2} \times \tau_f$$



$$\tau_f = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi D^2}{2} \left(\frac{D}{3} + H \right)}$$





试验成果的应用：

用于估算地基允许承载力；

用于地基抗滑稳定性分析；

用于估算桩的端阻力和侧阻力；

检验地基的加固效果；

可判定软土的固结历史

对饱和黏性土来说，十字板剪切试验所得成果，即为不排水抗剪强度 c_u 。

五、土的抗剪强度指标

(一) 总应力指标与有效应力指标

两种强度指标的比较

强度指标	有效应力指标 c', ϕ'	总应力指标 c, ϕ
抗剪强度	$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ $\sigma' = \sigma - u$	$\tau = c + \sigma \tan \phi$
简单评价	符合土的破坏机理， 但有时孔隙水压力 u 无法确定	便于应用，但 u 不能产生抗剪强度，不符合强度机理，应用时要符合工程条件



(二) 三轴试验强度指标

三种试验

	剪切前固结条件	剪切中排水条件
1.固结排水试验 (CD)	固结 Consolidated	排水 Drained
2.固结不排水试验 (CU)	固结 Consolidated	不排水 Undrained
3.不固结不排水试验 (UU)	不固结 Unconsolidated	不排水 Undrained



(三) 直剪试验强度指标

1. 慢剪(S)

施加正应力-充分固结

慢慢施加剪应力-小于0.02mm/分, 以保证无超静孔压

2. 固结快剪(CQ)

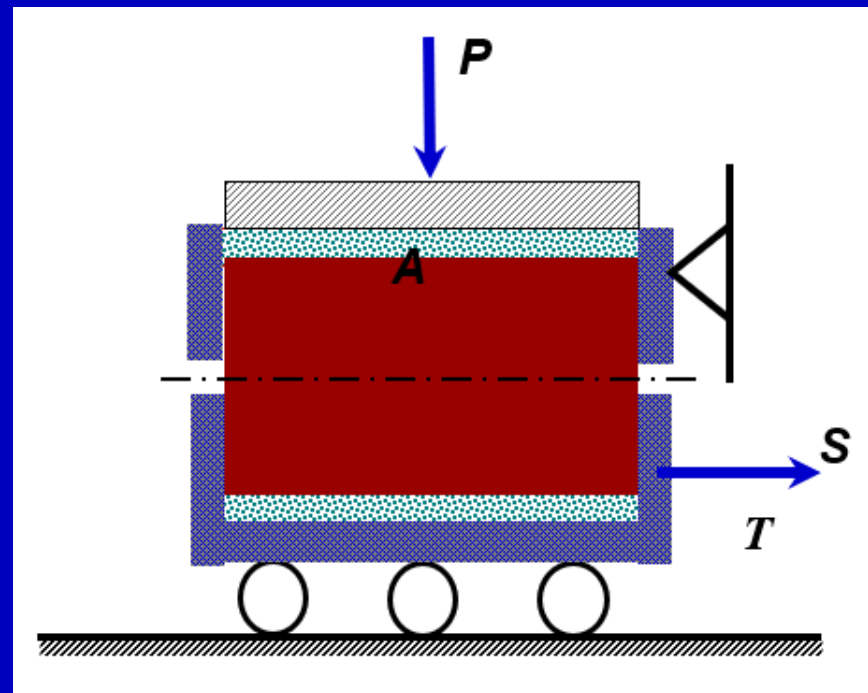
施加正应力-充分固结

在3-5分钟内剪切破坏

3. 快剪(Q)

施加正应力后

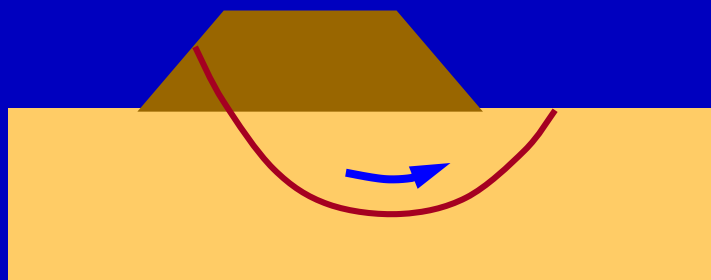
立即剪切3-5分钟内剪切破坏



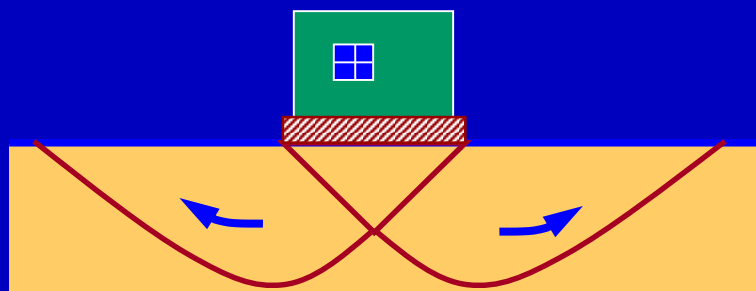
土的强度指标的工程应用

名称	指标	应用
不排水剪 (快剪)	c_u, φ_u c_q, φ_q	软土地基 快速施工
固结不排水剪 (固结快剪)	c_{cu}, φ_{cu} c_{cq}, φ_{cq}	固结完成后 受突然荷载
固结排水剪 (慢剪)	c_d, φ_d c_s, φ_s	地基透水性强 施工较慢或正常运行期

■ 不固结不排水剪（快剪） c_u 、 ϕ_u (c_q 、 ϕ_q)



软土地基上的快速填方

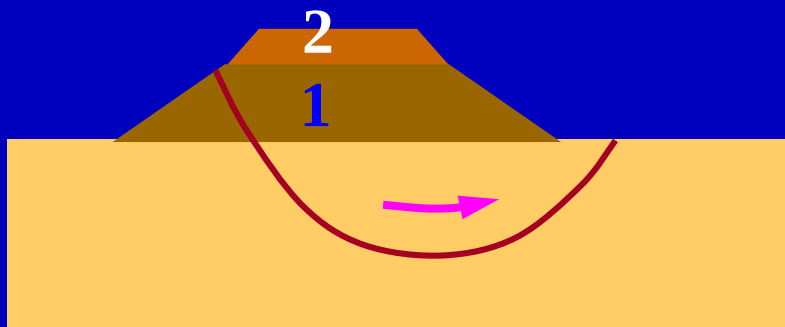


黏土地基上快速施工的建筑物

用于荷载增加所引起的超静孔隙水压力不消散，密度保持不变的情况

土的强度指标的工程应用

■ 固结不排水剪（固结快剪） c_{cu} 、 φ_{cu} (c_{cq} 、 φ_{cq})

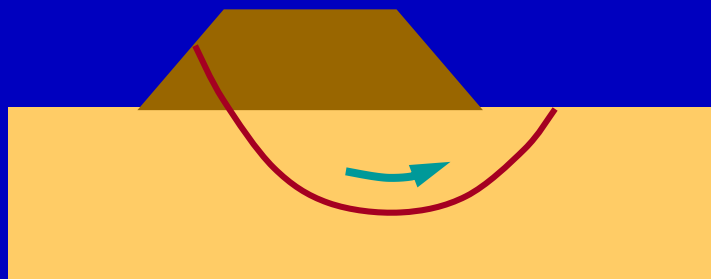


在1层固结后，施工2层

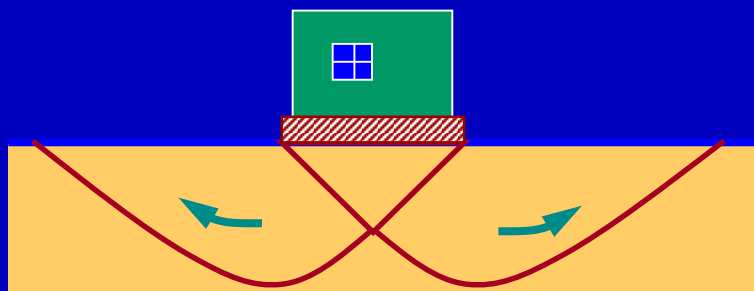
- 用于黏土先在某种应力下固结，然后再快速加载
- 也用于土体既非完全不排水，又非完全排水，而处于两者之间时的情况

土的强度指标的工程应用

■ 固结排水剪（慢剪） c_{cd} 、 φ_{cd} (c_s 、 φ_s)



软土地基上的慢速填方



黏土地基上慢速施工的建筑物

用于加载过程中，超静孔隙水压力全部及时消散，密度不断增加的情况

土的强度指标的工程应用

课后作业:

计算题 P.204

1, 2, 3, 4, 6

思考题:

如何理解土的固结过程就是孔隙水压力不断消散, 有效应力不断增长, 同时土的强度不断提高的过程。

