第5章： 土的抗剪强度

✧ 本章提要

- 土是如何破坏的？
- 如何衡量土的强度？
- 如何测定土的强度？
- 如何应用土的强度指标？

✧ 学习难点

- 土的抗剪强度理论及本质
- 土的抗剪强度指标及测试方法
- 土的抗剪强度指标的种类及选取

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述

§5.2 土体破坏与土的强度理论

§5.3 土的抗剪强度的测定试验

§5.4 应力路径与破坏主应力线 DEL

§5.5 土的抗剪强度指标及其工程应用

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

概　　述

☞ 土体强度及其特点

☞ 工程中土的强度问题

➔ 土的抗剪强度

➔ 土的强度的特点

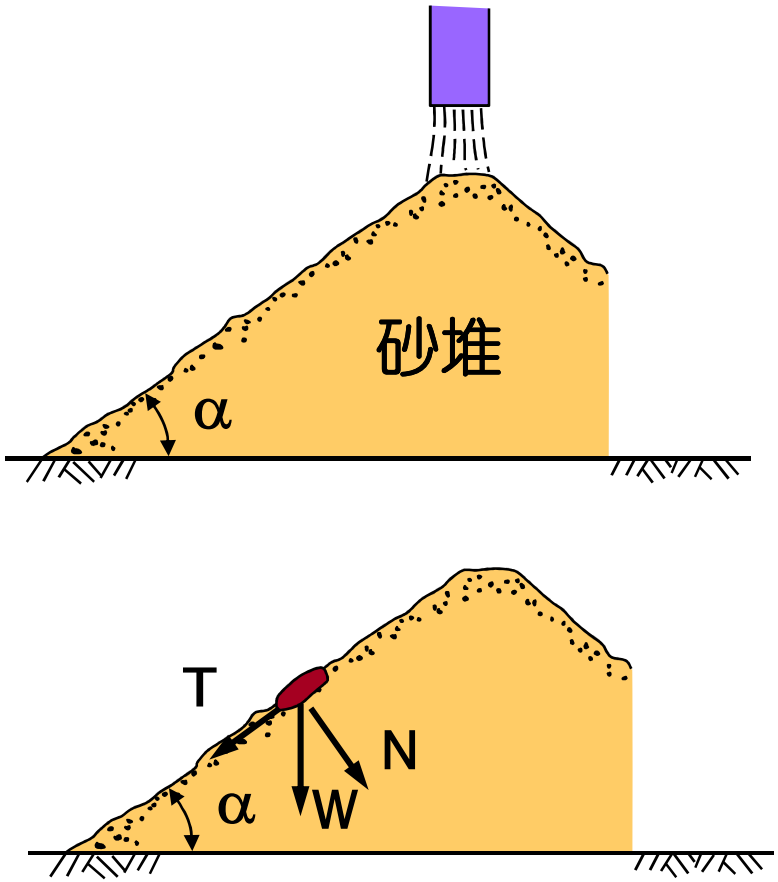
➔ 各种类型的滑坡(sliding)

➔ 挡土和支护结构的破坏

➔ 地基的破坏

➔ 砂土的液化(liquefaction)

土的强度及其特点



■ 天然状态下的砂

沿坡方向的平衡：

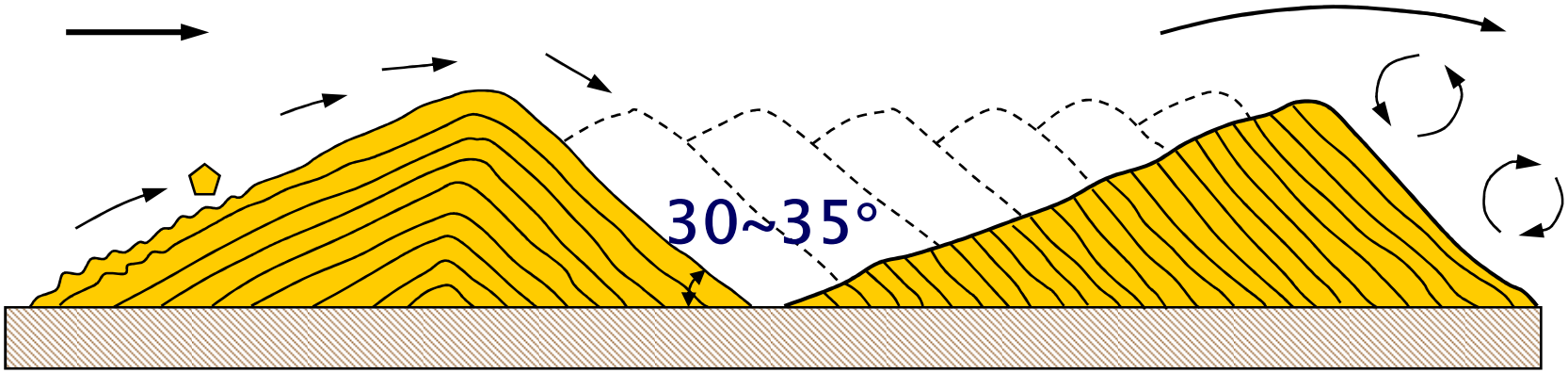
$$T = N\mathrm{tg}\alpha \quad \Rightarrow \mathrm{tg}\alpha = \frac{T}{N}$$

☞ α天然休止角，也是最松状态下的砂内摩擦角

我们坐在高高的谷堆旁边

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ϕ=30°-35°，大于矿物滑动摩擦角

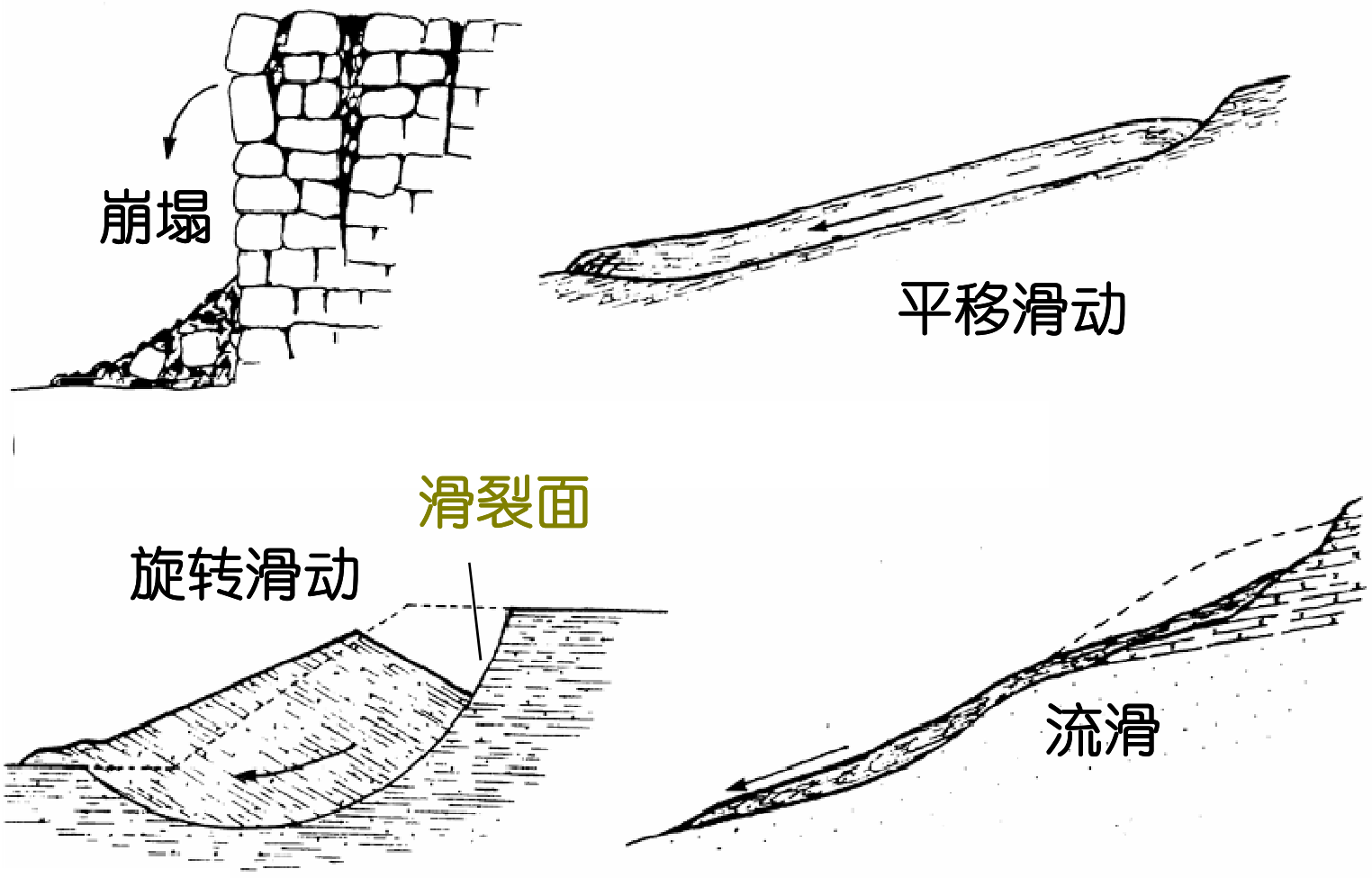
颗粒间存在一定的咬合作用

土体强度的特点

- 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，颗粒间粘聚力与摩擦力
- 三相体系：三相承受与传递荷载 – 有效应力原理
- 自然变异性：土的强度的结构性与复杂性

P177

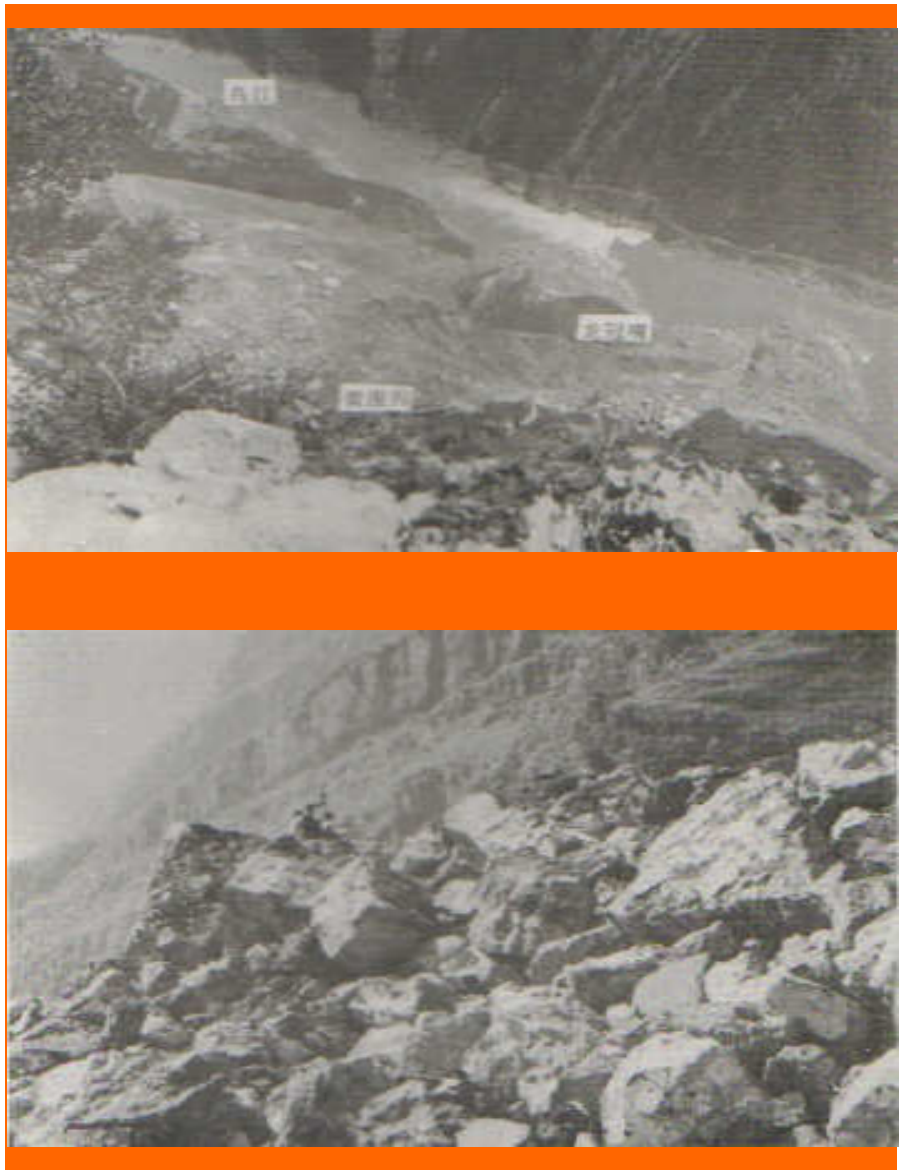
各种类型的滑坡



P178

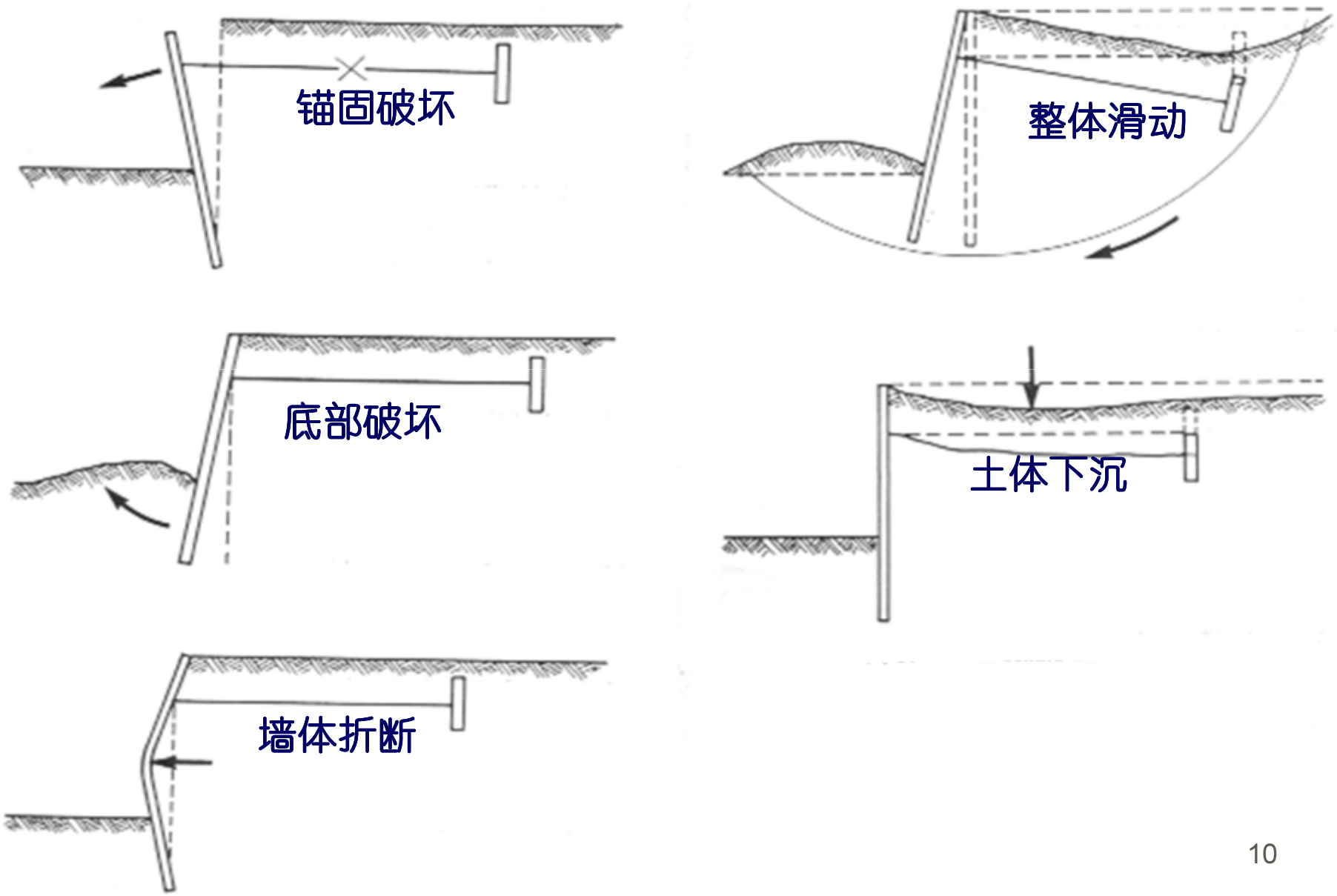
乌江武隆鸡冠岭山体崩塌

- 1994年4月30日
- 崩塌体积400万方，10万方进入乌江
- 死4人，伤5人，失踪12人；击沉多艘船只
- 1994年7月2-3日降雨引起再次滑坡
- 滑坡体崩入乌江近百万方；江水位差数米，无法通航。



2000年西藏易贡巨型滑坡

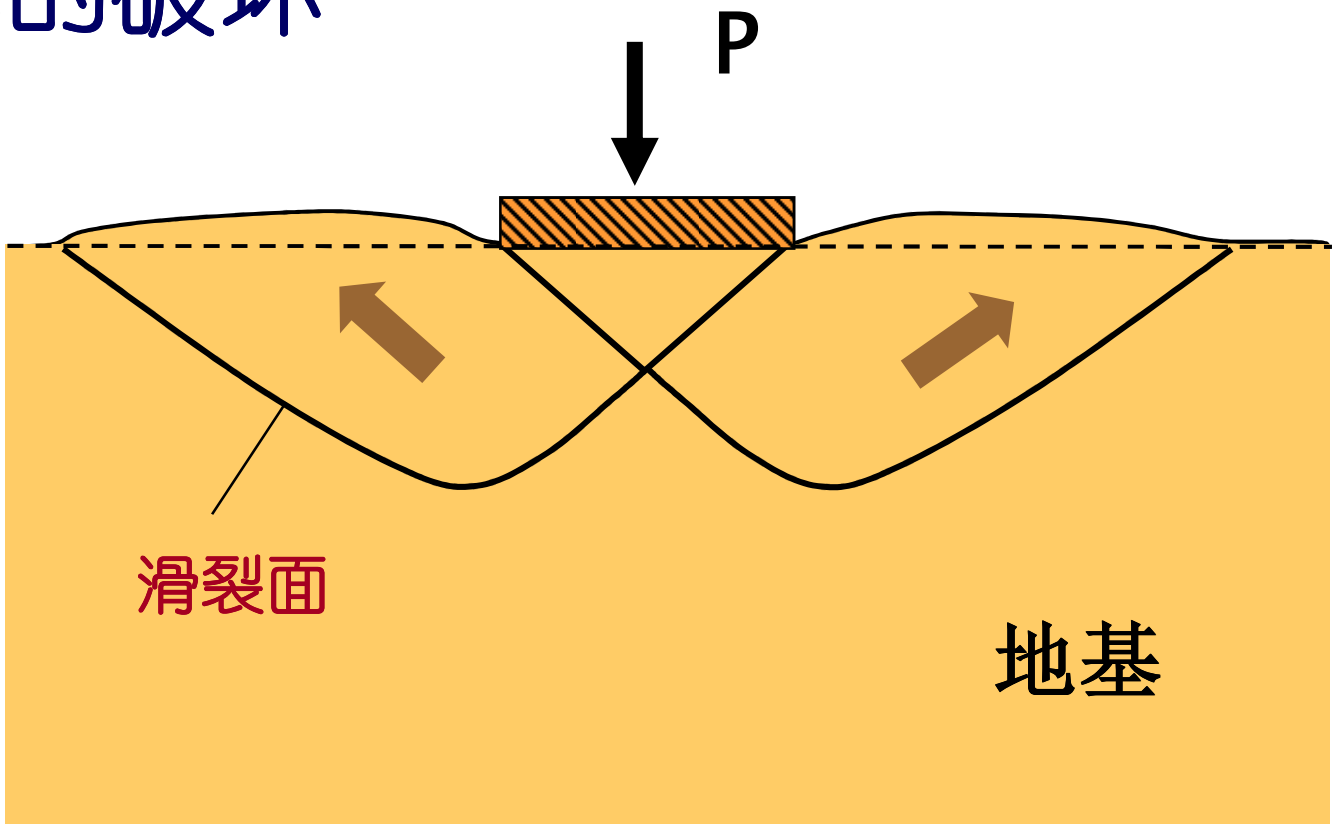
挡土支护结构的破坏



广州京光广场基坑塌方

大阪的港口码头挡土墙由于液化前倾

地基的破坏

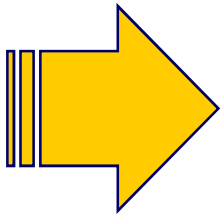


P178

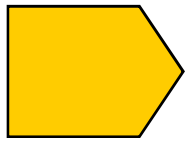
某谷仓地基的破坏

砂土的液化(liquefaction)

- 挡土结构物破坏
- 各种类型的滑坡
- 地基的破坏
- 砂土的液化



- 土压力
- 边坡稳定性
- 地基承载力
- 振动液化特性



核心问题：　土体的强度理论

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论

§5.3 土的抗剪强度的测定试验

§5.4 应力路径与破坏主应力线

§5.5 土的抗剪强度指标

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

土的抗剪强度理论

- 5.2.1 直剪试验与库仑公式
- 5.2.2 土的抗剪强度机理
- 5.2.3 莫尔-库仑强度理论

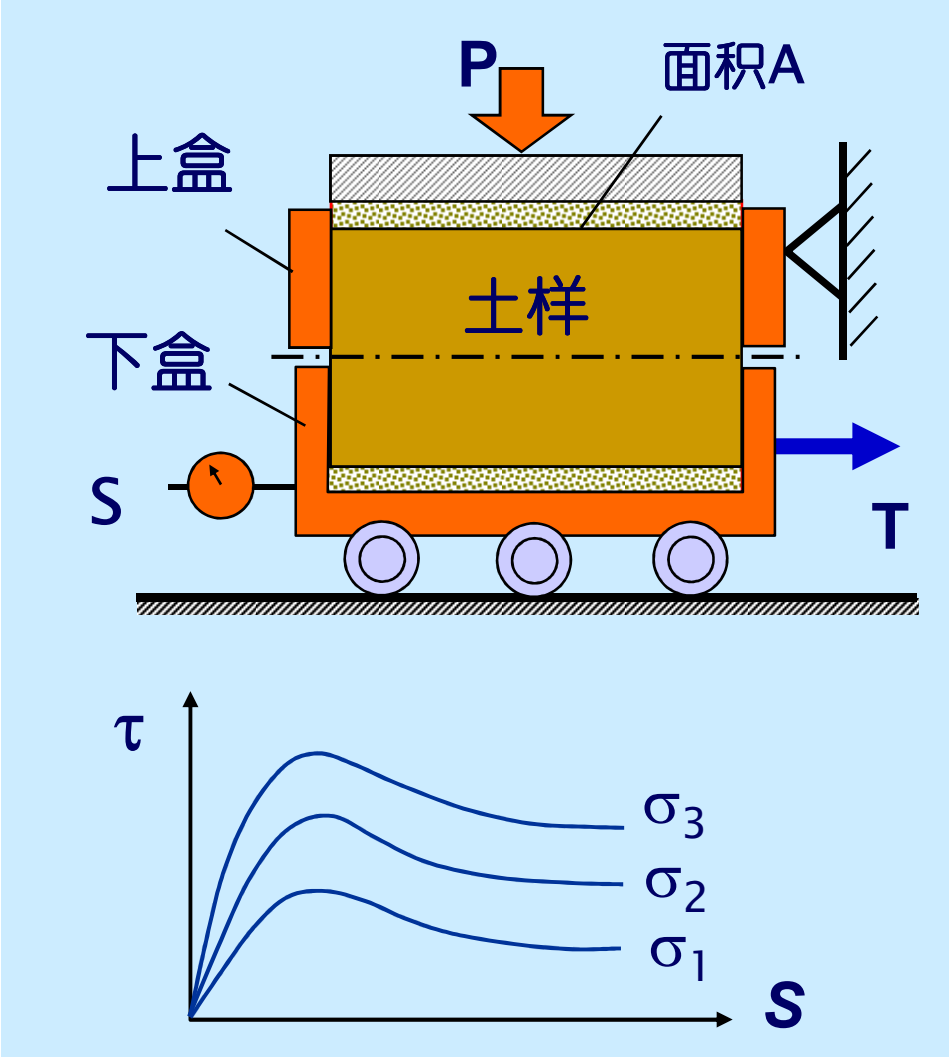
P179

库仑
（C. A. Coulomb）
(1736-1806)

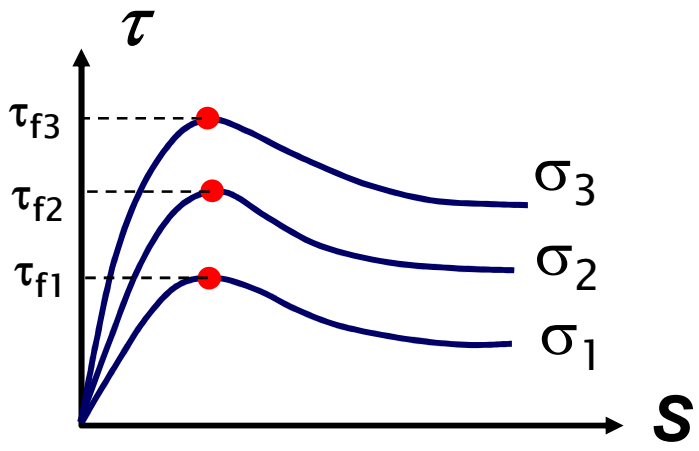
法国军事工程师，在摩擦、电磁方面做出了奠基性的贡献。1773年发表了关于土压力方面论文，成为土压力的经典理论

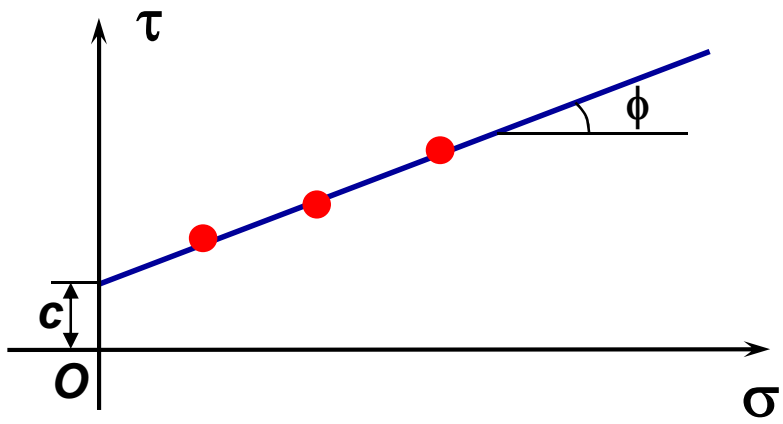
■ 直剪试验

- 法向应力σ：$\sigma = \frac{P}{A}$
- 剪应力τ：$\tau = \frac{T}{A}$
- 剪切变形S



直剪试验的强度包线





- 库仑公式：（1776）

$$\tau_f = c + \sigma tg\phi$$

τ_f：土的抗剪强度

$\sigma tg\phi$：摩擦强度-正比于压力σ

ϕ：土的内摩擦角

c：粘聚强度-与所受压力无关

P179 图5-4

土的抗剪强度指标

- 库仑公式： $\tau_f = c + \sigma tg\phi$ P179 式5-2

  ☞ 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，称为总应力抗剪强度指标
  - 当σ采用有效应力时，称为有效应力抗剪强度指标

P179 对无粘性土通常认为，粘聚力c=0

摩 擦 强 度

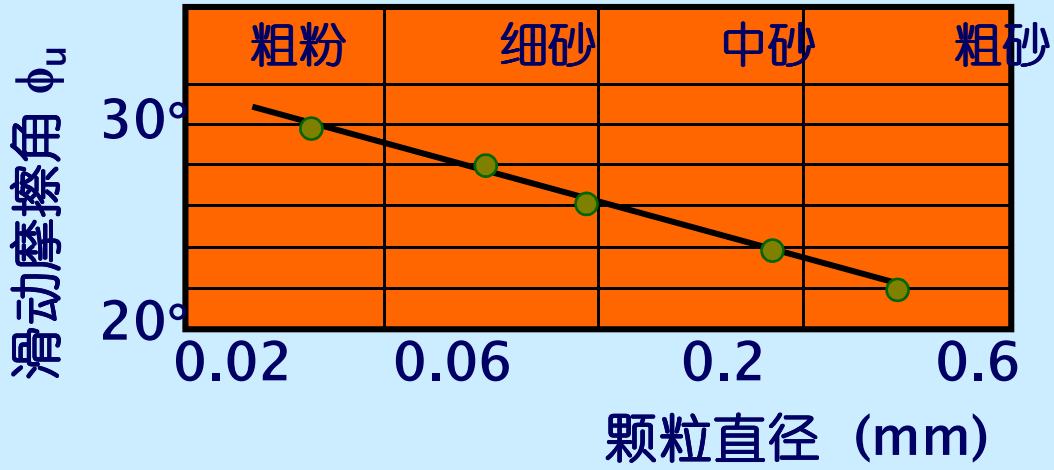
■ 摩擦强度：决定于剪切面上的正应力σ和土的内摩擦角ϕ

包括如下两个组成部分：

◈ 滑动摩擦

◈ 咬合摩擦

DEL P180



由颗粒之间发生滑动时颗粒接触面粗糙不平所引起，与颗粒的形状，矿物组成，级配等因素有关

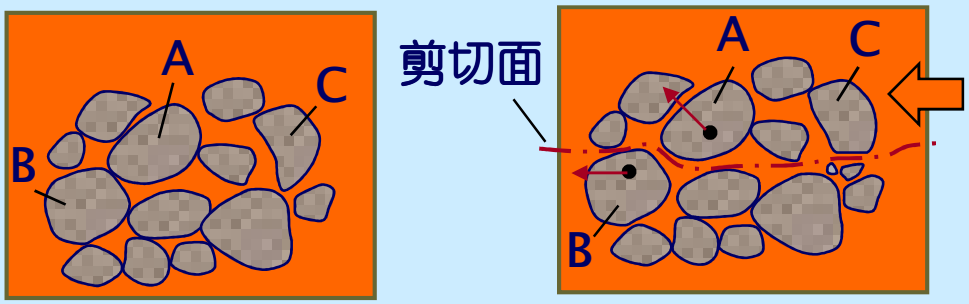
摩 擦 强 度

■ 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



- 是指相邻颗粒对于相对移动的约束作用
- 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

DEL P180

摩 擦 强 度

- 影响土的摩擦强度的主要因素：

  - 密度
  - 粒径级配
  - 颗粒的矿物成分
  - 粒径的形状
  - 粘土颗粒表面的吸附水膜

DEL P181

凝 聚 强 度

- 细粒土：粘聚力c取决于土粒间的各种物理化学作用力
  - 作用机理：库伦力（静电力）、范德华力、胶结作用力和毛细力等
  - 影响因素：地质历史、粘土颗粒矿物成分、密度与离子浓度

- 粗粒土：一般认为是无粘性土，不具有粘聚强度：
  - 当粗粒间有胶结物质存在时可具有一定的粘聚强度
  - 非饱和砂土，粒间受毛细压力，具有假粘聚力

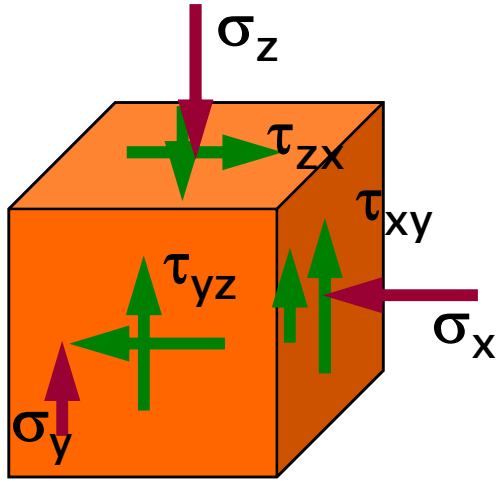
DEL P181

莫尔-库仑强度理论

- 应力状态与莫尔圆
- 极限平衡应力状态
- 莫尔-库仑强度理论
- 破坏判断方法
- 滑裂面的位置

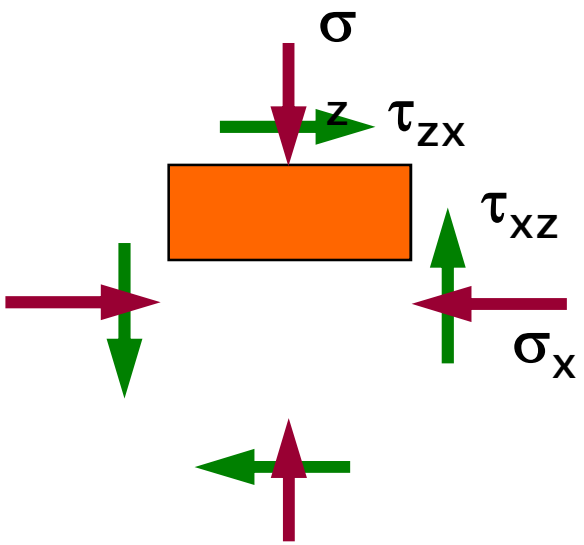
P181 5.2.3

应力状态



$$\sigma_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z\end{bmatrix}$$

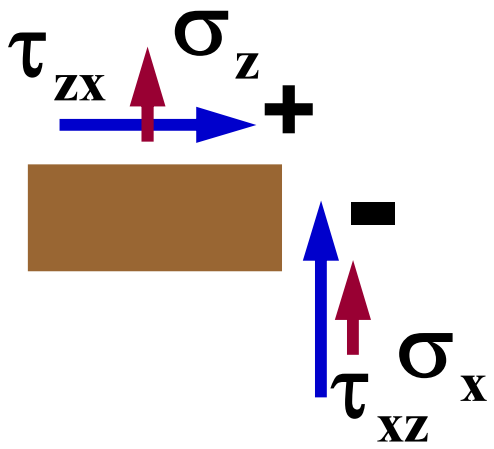
三维应力状态



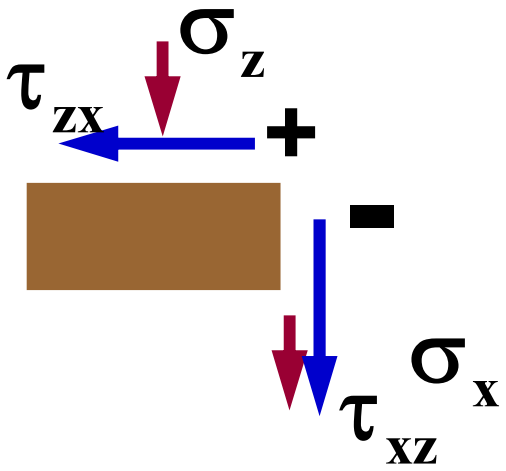
$$\sigma_{ij}=\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xz}\\ \tau_{zx} & \sigma_z\end{bmatrix}$$

二维应力状态

莫尔圆应力分析符号规定



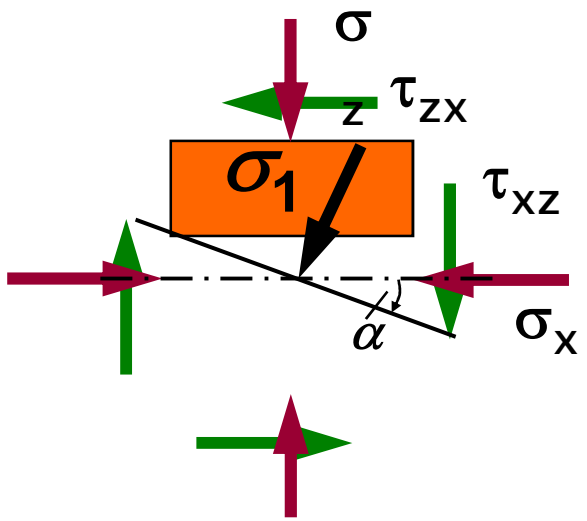
	正应力	剪应力
■ 材料力学	拉为正 压为负	顺时针为正 逆时针为负

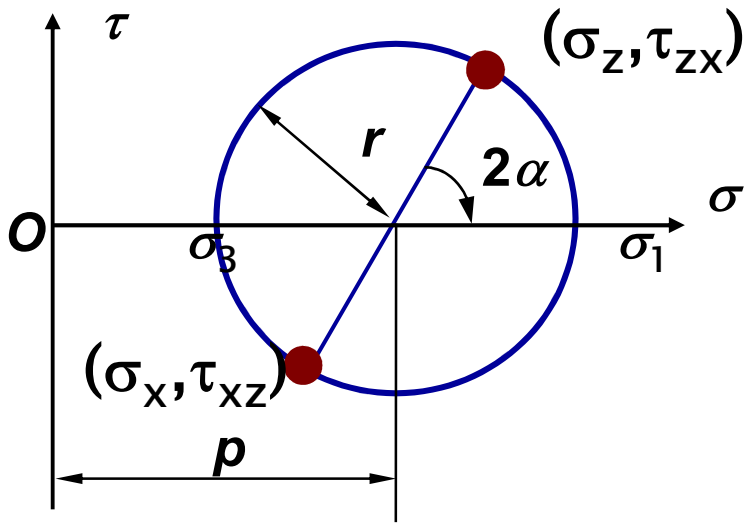


	正应力	剪应力
■ 土力学	压为正 拉为负	逆时针为正 顺时针为负

P182

应力莫尔圆





圆心： $p=(\sigma_x+\sigma_z)/2$

半径： $r=\sqrt{[(\sigma_x-\sigma_z)/2]^2+\tau_{xz}^2}$

大主应力： $\sigma_1=p+r$

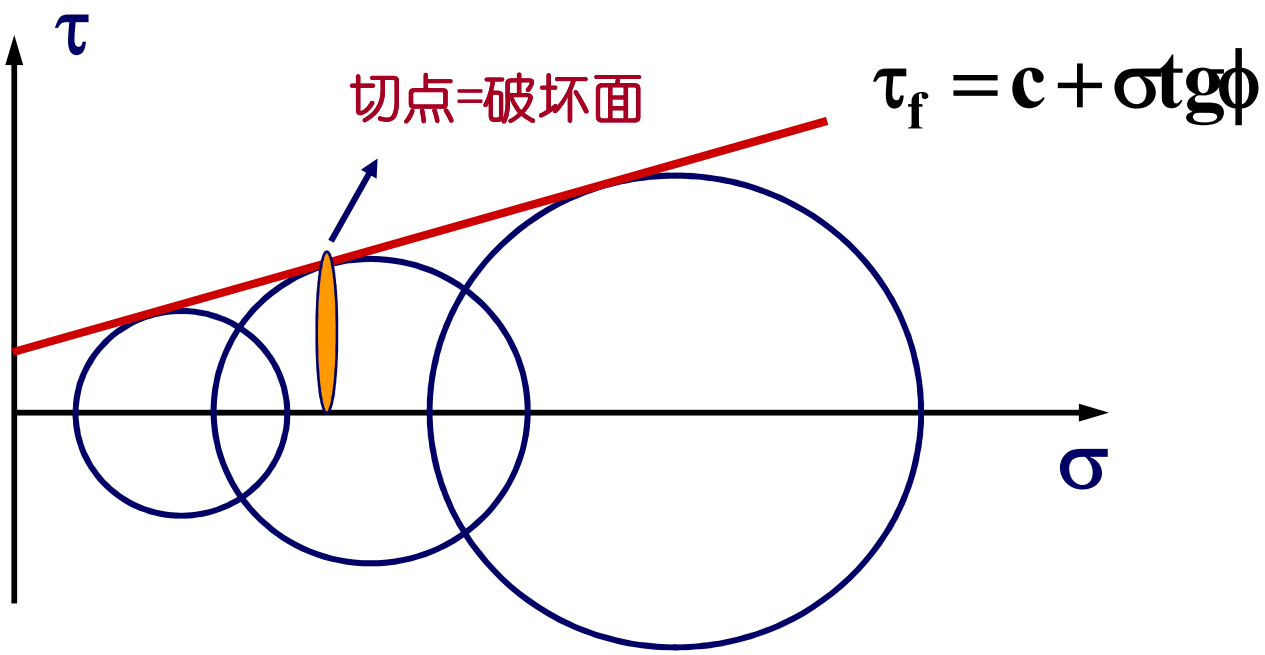
小主应力： $\sigma_3=p-r$

- 莫尔圆：单元的应力状态
- 圆上点：一个面上的σ与τ
- 莫尔圆转角2α：作用面转角α

P182

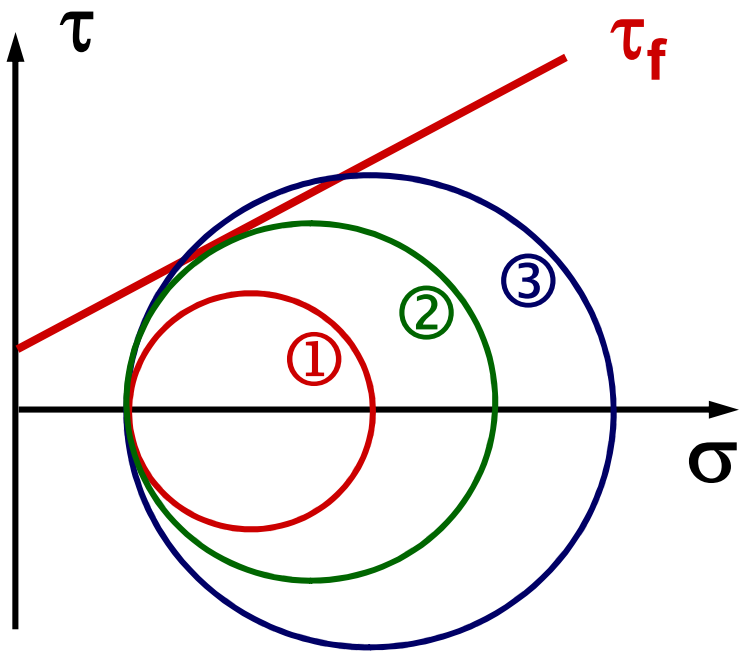
极限平衡应力状态

- 极限平衡应力状态：当一面上的应力状态达到$\tau=\tau_f$
- 土的强度包线：所有达到极限平衡状态的莫尔圆的公切线



P183 图5-9

应力莫尔圆与强度包线



① 强度包线以下：任何一个面上的一对应力σ与τ都没有达到破坏包线，不破坏

② 与破坏包线相切：有一个面上的应力达到破坏

③ 与破坏包线相交：有一些平面上的应力超过强度

⇨ 不可能发生

P183 图5-10

莫尔—库仑强度理论

1. 土单元的某一个平面上的抗剪强度τ_f是该面上作用的法向应力σ的单值函数，$\tau_f=f(\sigma)$（莫尔：1900年）
2. 在一定的应力范围内，可以用线性函数近似 $\tau_f=c+\sigma tg\phi$
3. 某土单元的任一个平面上$\tau=\tau_f$，该单元就达到了极限平衡应力状态

P184 3 理论归纳

如果可能发生剪切破坏面的位置已经预先确定，只要算出作用于该面上的应力（包括剪应力和正应力），就可判别剪切破坏是否发生。

但是在实际问题中，可能发生剪切破坏的平面一般不能预先确定。土体中的应力分析只能计算各点垂直于坐标轴平面上的应力（正应力和剪应力）或各点的主应力，故尚无法直接判定土单元体是否破坏。

因此，需要进一步研究莫尔-库伦破坏理论如何直接用主应力表示，这就是莫尔—库伦破坏准则，也称土的极限平衡条件

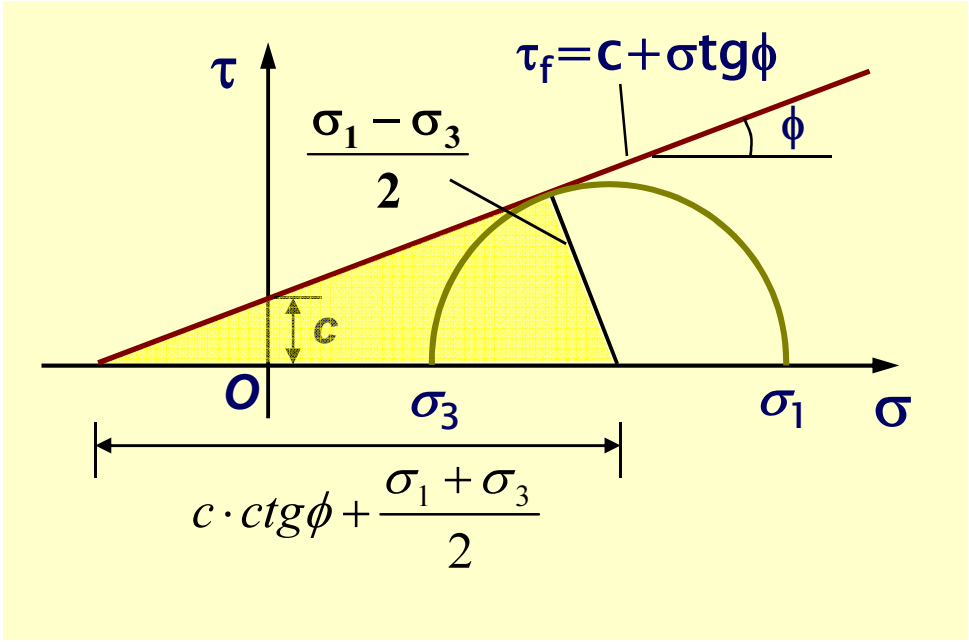
小增大减
牢记

莫尔-库仑强度理论的破坏准则

P176 推导一起看书

■ 土的极限平衡条件：

处于极限平衡状态时，
σ_1和σ_3之间应满足的关系



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

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

两边都有PHI

P185 式5-5

$$\sigma_3 = \sigma_1 tg^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 2c\cdot tg(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$$

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

P185 式5-6

P185 4 土的极限平衡条件

无粘性土

式5-11 <1

$$\sigma_3 = \sigma_1 tg^2(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

>1

$$\sigma_1 = \sigma_3 tg^2(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

式5-12

考试重点 P186

土单元是否破坏的判别

- 根据极限平衡条件可以用来判别一点土体是否已发生剪切破坏

  - ☞ 确定土单元体的应力状态（σ_x，σ_z，τ_{xz}）
  - ☞ 计算主应力σ_1，σ_3：$$\sigma_{1,3}=\frac{\sigma_x+\sigma_z}{2}\pm\sqrt{(\frac{\sigma_x-\sigma_z}{2})^2+4\tau_{xz}^2}$$
  - ☞ 判别是否剪切破坏：

    ⇨
    - 由σ_3 ⇨ σ_{1f}，比较σ_1和σ_{1f}
    - 由σ_1 ⇨ σ_{3f}，比较σ_3和σ_{3f}
    - 由σ_1，σ_3 ⇨ ϕ_m，比较ϕ和ϕ_m

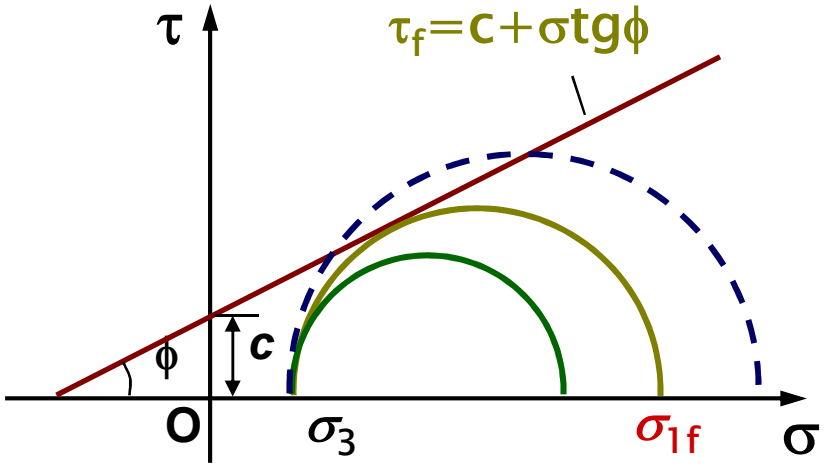
考试重点

P186 主应力比较法

土单元是否破坏的判别

■ 方法一： 由σ_3 ⇨ σ_{1f}，比较σ_1和σ_{1f}

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



☞ $\sigma_1=\sigma_{1f}$ 极限平衡状态（破坏）

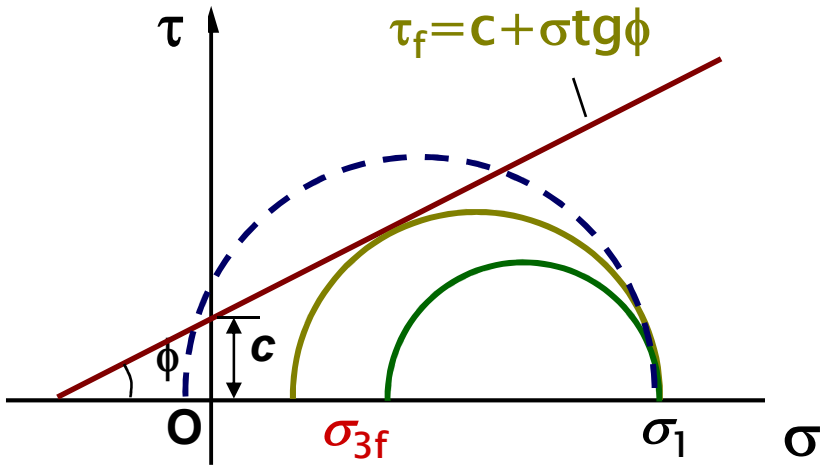
☞ $\sigma_1<\sigma_{1f}$ 安全状态

☞ $\sigma_1>\sigma_{1f}$ 不可能状态（破坏）

土单元是否破坏的判别

■ 方法二： 由σ_1 ⇨ σ_{3f}，比较σ_3和σ_{3f}

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



☞ $\sigma_3 = \sigma_{3f}$ 极限平衡状态（破坏）

☞ $\sigma_3 > \sigma_{3f}$ 安全状态

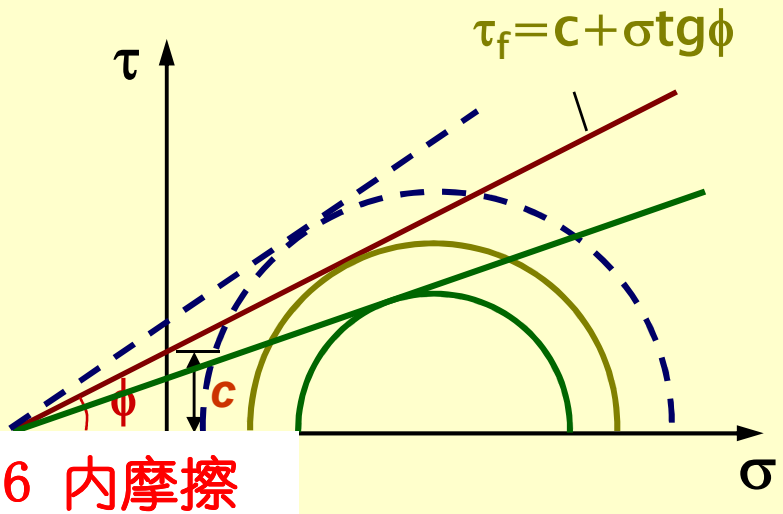
☞ $\sigma_3 < \sigma_{3f}$ 不可能状态（破坏）

土单元是否破坏的判别

■ 方法三： 由σ_1，σ_3 ⇨ ϕ_m，比较ϕ和ϕ_m

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

☞ 处于极限平衡状态所需的内摩擦角



☞ $\phi_m < \phi$ 安全状态

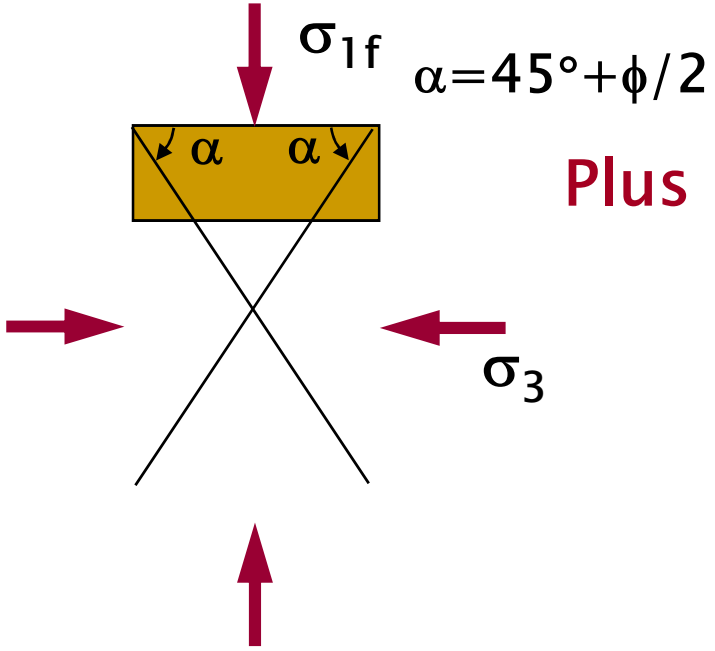
☞ $\phi_m = \phi$ 极限平衡状态（破坏）

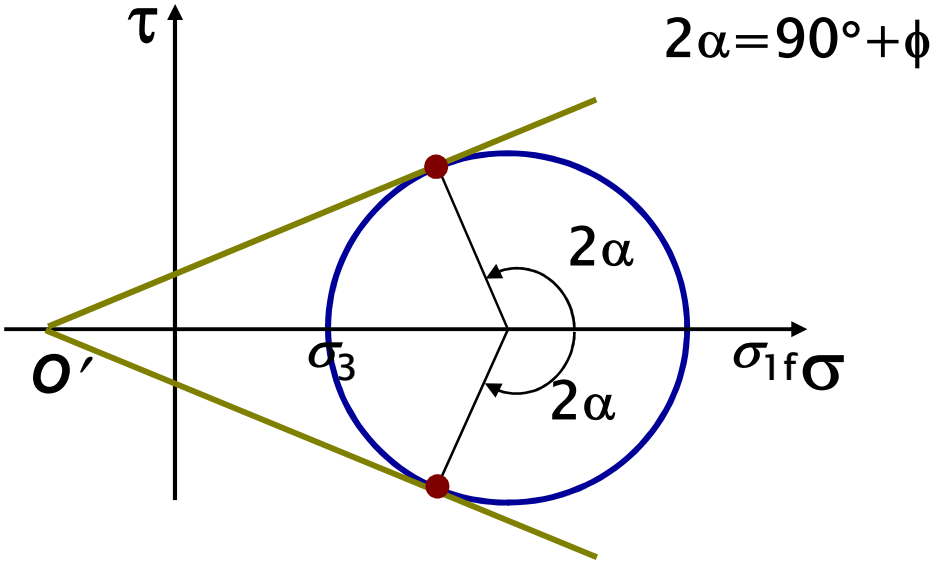
☞ $\phi_m > \phi$ 不可能状态（破坏）

P186 内摩擦角比较法

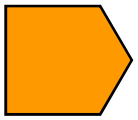
注意：大主应力面
P187 图5-15

剪切破坏面的位置





■ 与大主应力作用面夹角:



$$\theta = 45^\circ + \phi/2$$

P187 图5-15
考查点

☞ 可见土体破坏的剪切破坏不在45°最大剪应力面上，为什么？

下面分析土体中剪切破坏面的位置。

在三轴剪切试验中，试样周围的压力为σ_3，破坏时的轴向应力为σ_{1f}。在$\tau-\sigma$坐标上绘制土样破坏时的应力圆，如图5-15所示，按照莫尔-库伦破坏理论，破坏圆必定与破坏包线相切。显然，切点所代表的平面满足$\tau=\tau_f$的条件，因此，这就是试样的破裂面 。

从图5-15的几何关系，显然有 ：

即破裂面与大主应力面成 $\theta=45^\circ+\phi/2$ 的夹角。

由此可见，土与一般连续性材料（如钢、混凝土等）不同，是一种具有内摩擦强度的材料，这种材料的破裂面不产生于最大剪应力面，而与最大剪应力面成 $\theta=45^\circ+\phi/2$ 的夹角。

如果土质均匀，且试验中能保证试件内的应力、应变均匀分布，则试件内将会出现两组完全对称的破裂面，如图5-15所示

two X-shaped shear
bands are clearly visible

小 结

☞ 直剪试验与库仑公式

- 直剪试验
- 库仑公式
- 土的抗剪强度指标c和ϕ

☞ 土的抗剪强度机理

- 摩擦强度：滑动、咬合摩擦
- 凝聚强度

☞ 莫尔-库仑强度理论

- 应力状态与莫尔圆
- 极限平衡应力状态
- 莫尔-库仑强度理论
- 土体破坏判断方法
- 滑裂面的位置

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论 √

§5.3 土的抗剪强度的测定试验

§5.4 应力路径与破坏主应力线

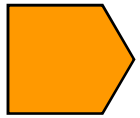
§5.5 土的抗剪强度指标

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

P189

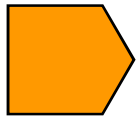
抗剪强度测定试验

- 室内试验：
  - 直剪试验
  - 三轴试验等



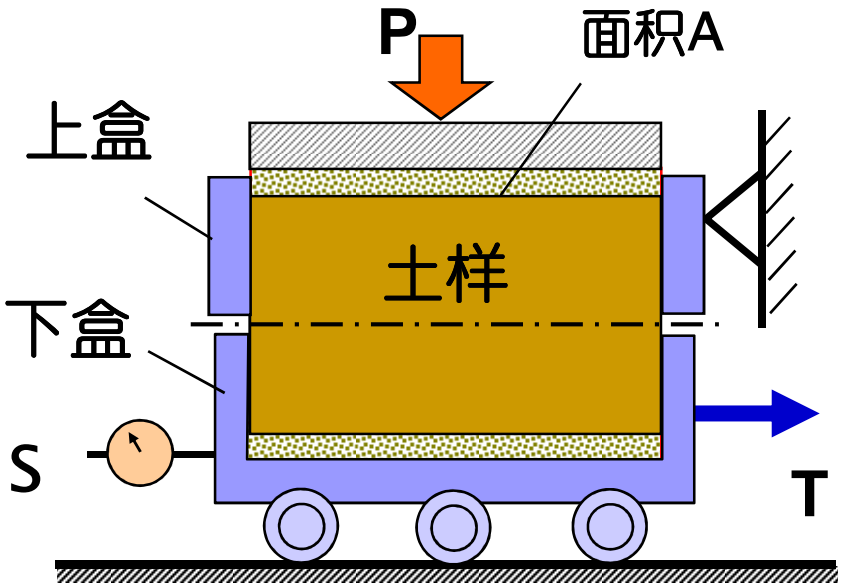
- ☞ 重塑土制样或现场取样
- ☞ 缺点：扰动
- ☞ 优点：应力和边界条件清楚，易重复

- 野外试验：
  - 十字板扭剪试验
  - 旁压试验等

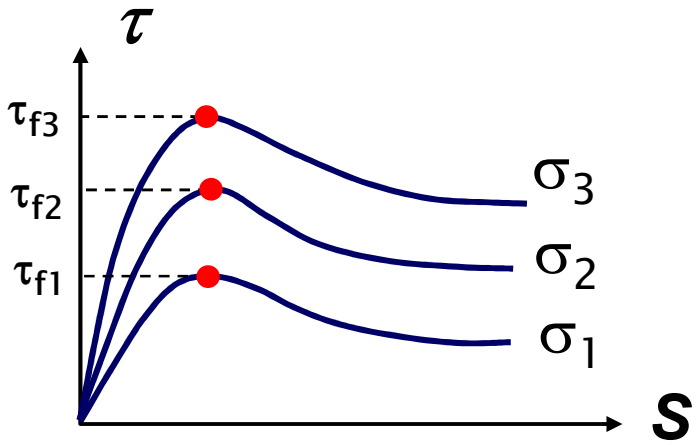


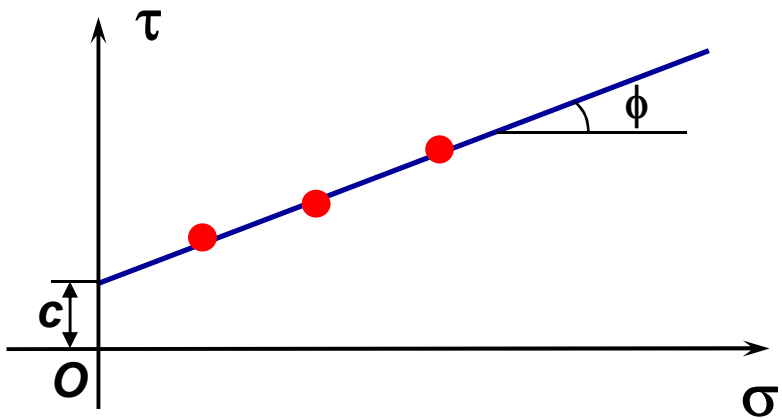
- ☞ 缺点：应力和边界条件不易掌握
- ☞ 优点：原状土的原位强度

直 剪 试 验



直剪仪
(direct shear test apparatus)

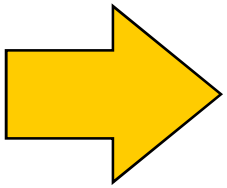




P190

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，<0.02mm/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

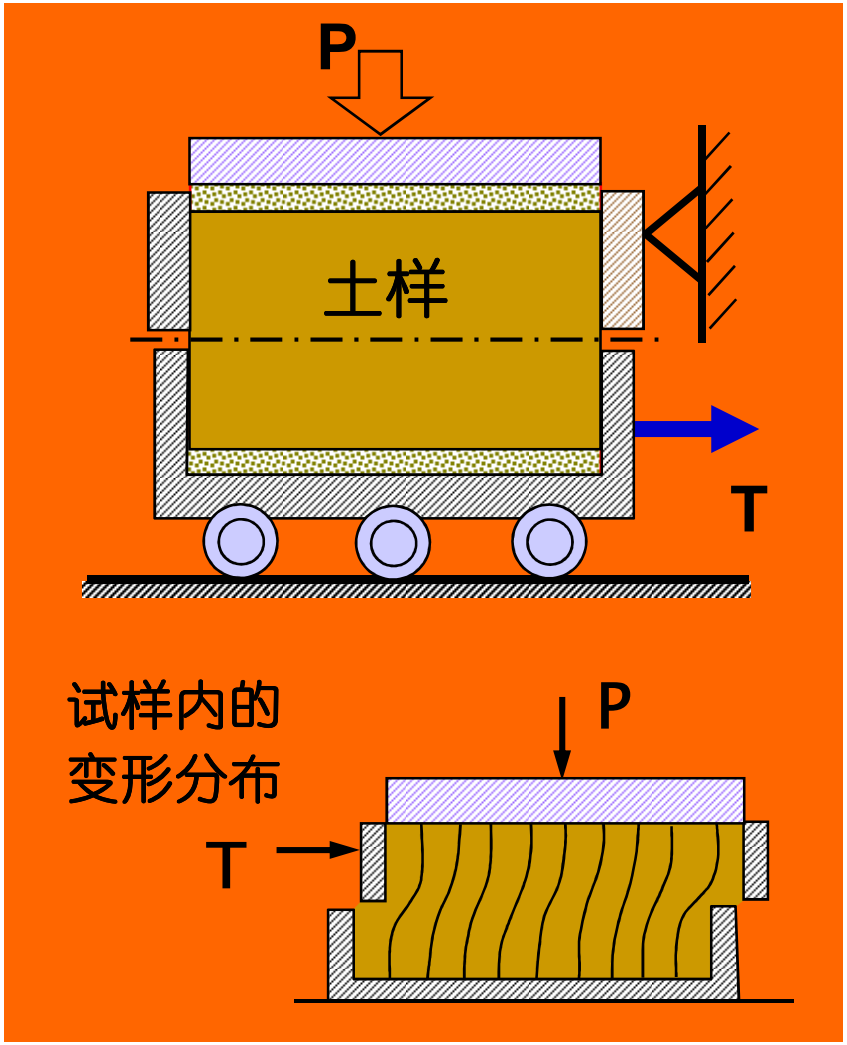
- 施加正应力后立即剪切
- 3-5分钟内剪切破坏

P191

直剪试验的优缺点

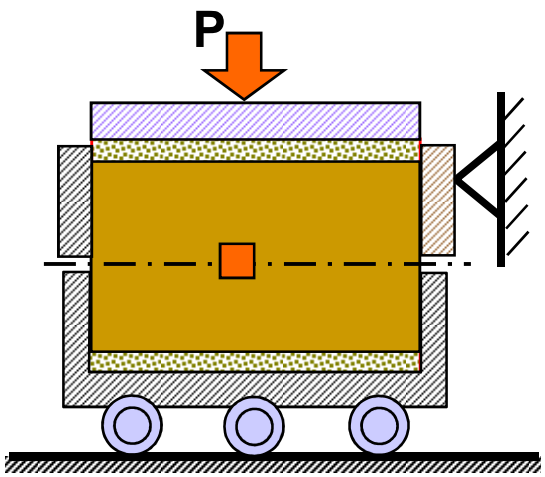
- 设备和操作简单
- 人为固定剪切面
- 剪切面应力状态复杂
  - 应力、应变不均匀
  - 主应力方向旋转
- 剪切面积逐渐减小
- 排水条件不明确

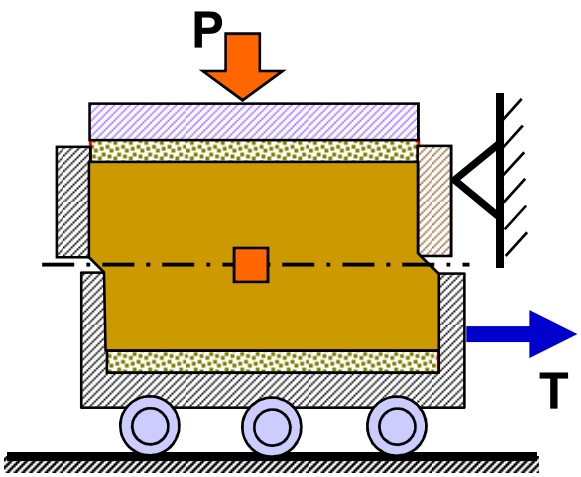
P191



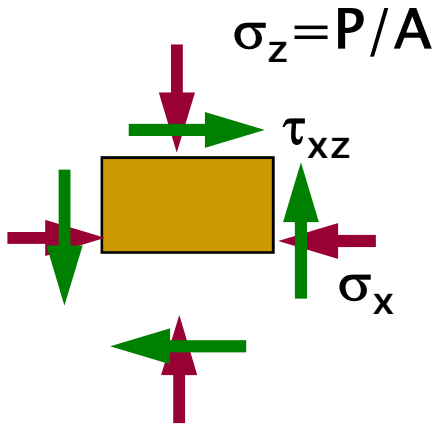
P192图5-20

直剪试验中的应力状态





剪切破坏时

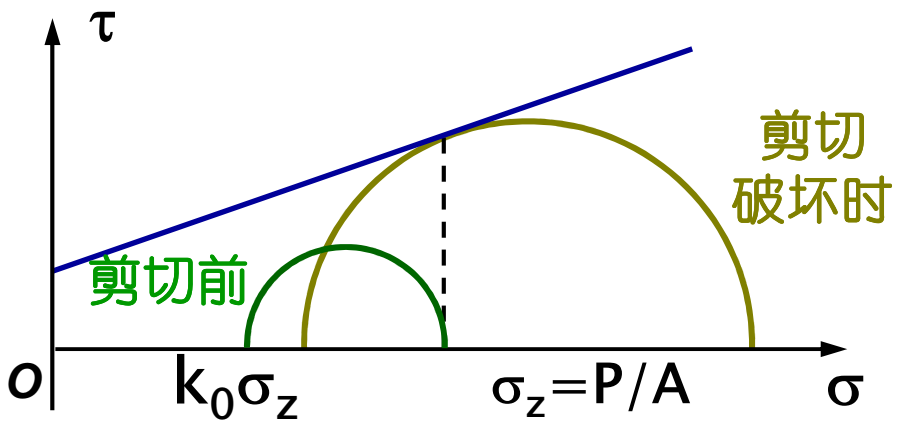


剪切前

$\sigma_z = P/A$

$\sigma_x = k_0\sigma_z$

$\tau_{xz} = 0$



P192

这张图图示了试样在试验过程中的应力状态的变化

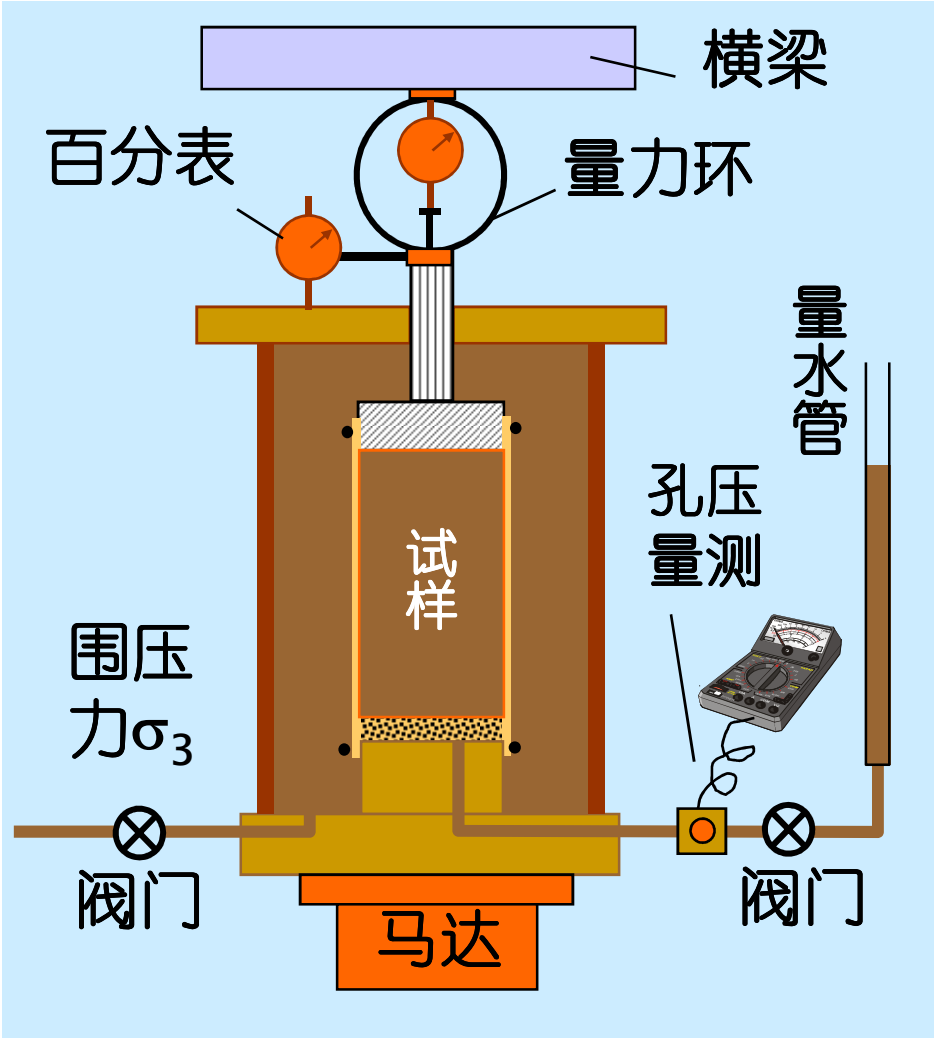
在加剪应力以前，大主应力σ_1就是作用于试件上的竖向应力σ_z。试件处于侧限状况，所以$\sigma_2=\sigma_3=k_0\sigma_1$。

加剪应力τ后，主应力的方向产生偏转，如图中所示。剪应力愈大，偏转角也愈大，所以试验过程中主应力的方向是不断变化的。破坏时，莫尔圆和强度包线相切，破坏面为水平面，法向应力仍为σ_z

P193 5.3.2

三轴试验

- 试样应力特点与试验方法
- 强度包线
- 试验类型
- 优缺点

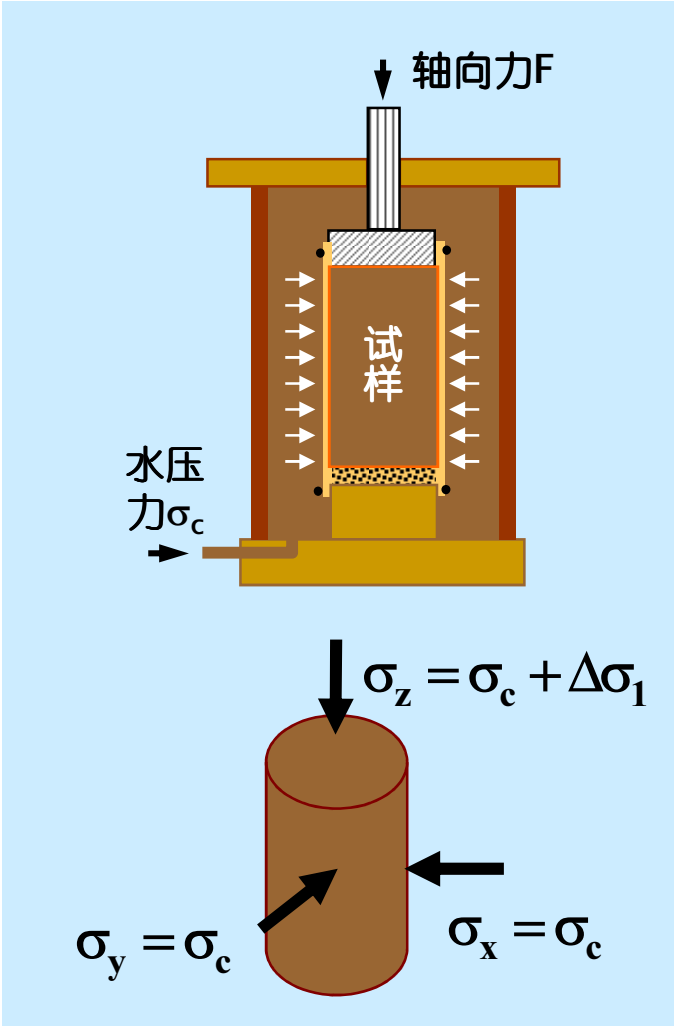


P193 5.3.2

应力特点与试验方法

- 应力特点：
  - 试样是轴对称应力状态
  - 垂直应力σ_z一般是大主应力σ_1
  - 侧向应力总是相等$\sigma_x=\sigma_y$，且为中、小主应力$\sigma_2=\sigma_3$

- 方法与两个阶段：P193-194
  - 固结：试样施加围压力$\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$
  - 剪切：施加应力差$\Delta\sigma_1=\sigma_1-\sigma_3$

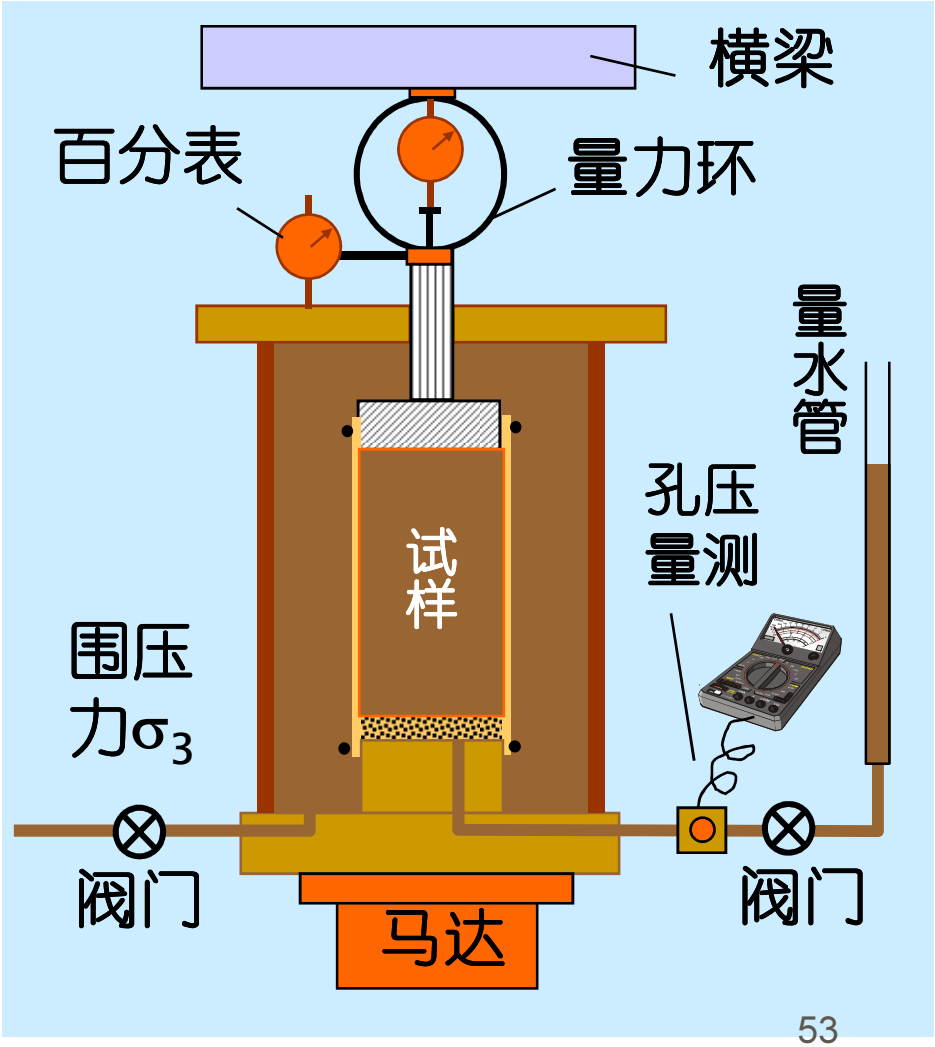


P193-194 图 5-22

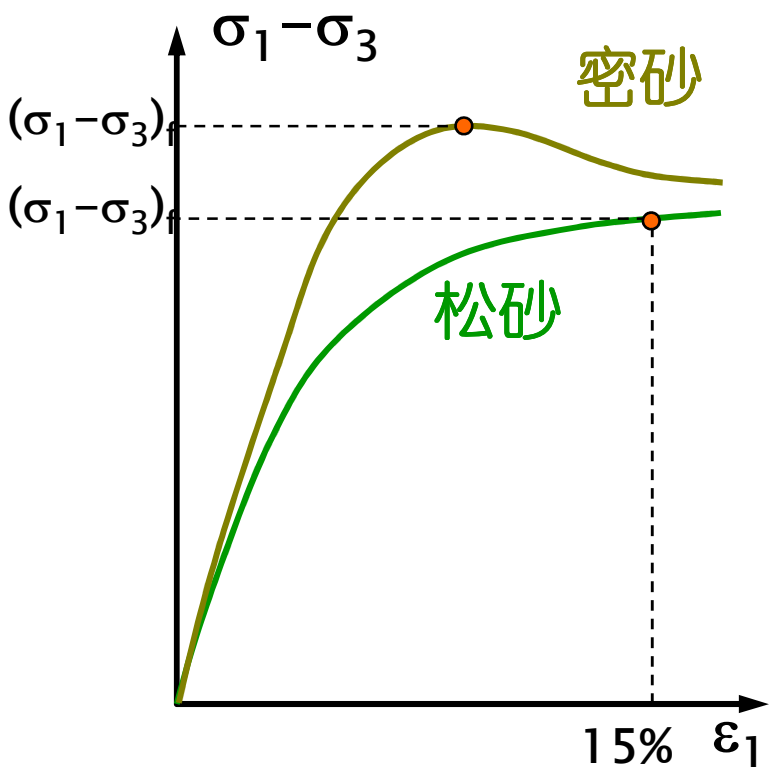
应力特点与试验方法

常用试验类型

类型	施加 σ_3	施加 $\sigma_1-\sigma_3$	量测
固结排水	固结	排水	体变
固结不排水	固结	不排水	孔隙水压力
不固结不排水	不固结	不排水	孔隙水压力



破坏偏差应力取值方法

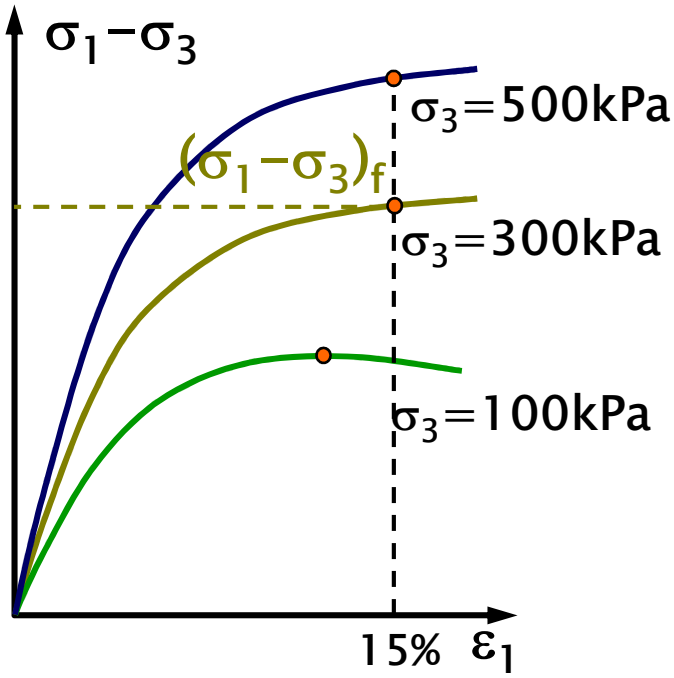


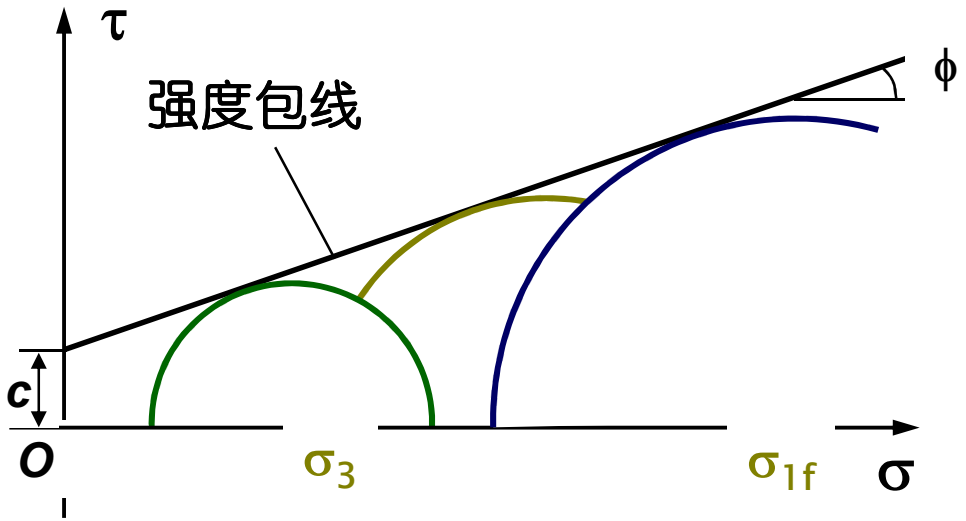
P193 图5-23

- 取曲线的最大偏差应力值作为$(\sigma_1-\sigma_3)_f$
- 取规定的轴向应变值（通常15%）所相应的偏差应力作为$(\sigma_1-\sigma_3)_f$
- 以最大有效主应力比$((\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$处的偏差应力值作为$(\sigma_1-\sigma_3)_f$

P185

三轴试验确定土的强度包线



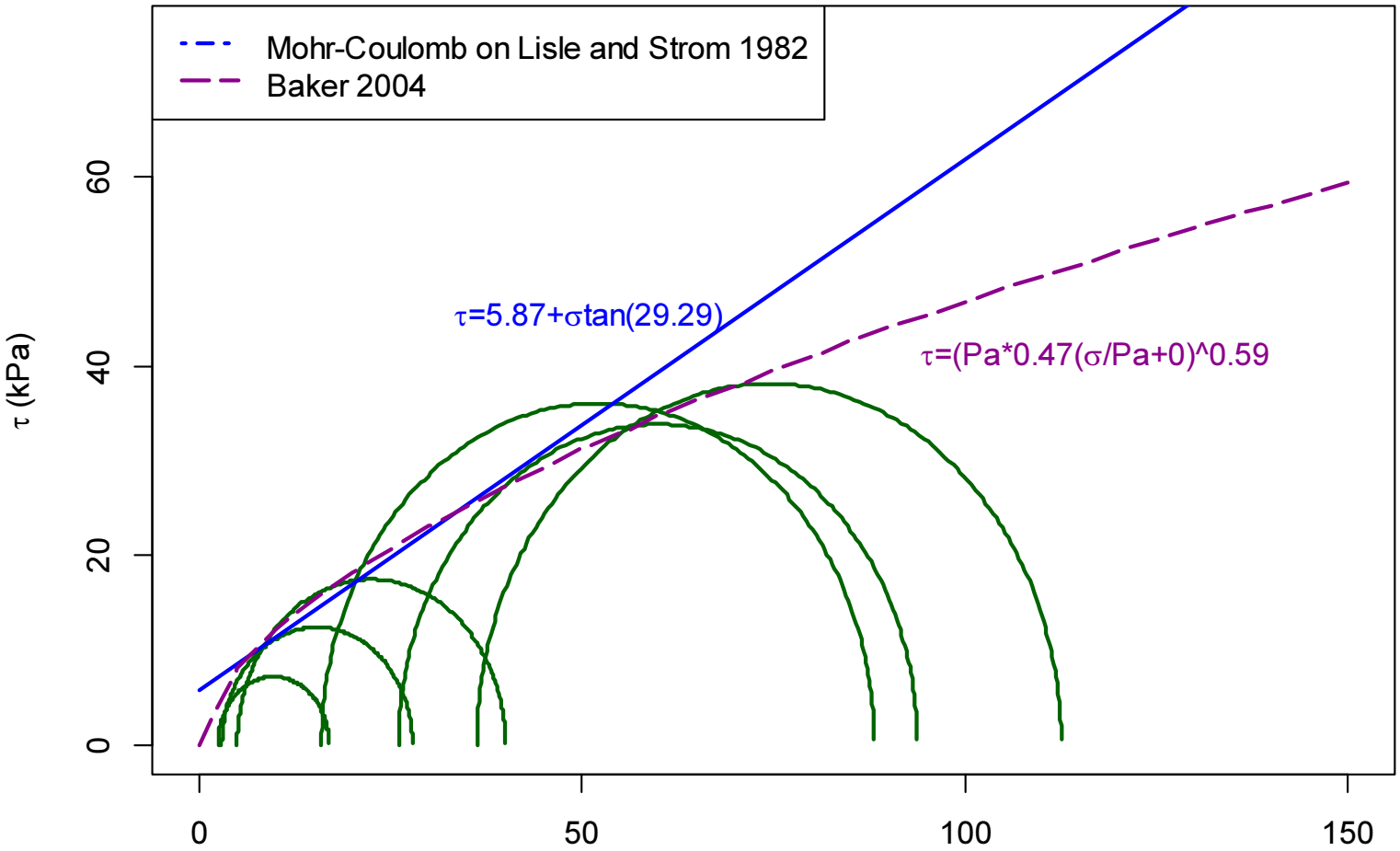


☞由不同围压σ_3的三轴试验，得到破坏时相应的$(\sigma_1-\sigma_3)_f$

☞分别绘制破坏状态的应力摩尔圆，其公切线即为强度包线，可得强度指标c与ϕ

基于R语言的岩土三轴剪切试验数据处理方法

辛军霞[1,2]，吴兴征[3]，方有亮[3]
（1.北京市建筑工程研究院，北京 100039；2.北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司，北京 100039；
3.河北大学建筑工程学院，河北 保定 071002）



D:\RTeach\ExamplesByWu\02TriaxialTest

47 ChineseJ mohr coulomb Baker others optimal solutions via R215.r.pl

试验类型与强度指标

☞ 固结排水试验（CD试验）
Consolidated Drained Triaxial test (CD)
总应力抗剪强度指标： c_d ϕ_d （c' ϕ'）

☞ 固结不排水试验（CU试验）
Consolidated Undrained Triaxial test（CU)
总应力抗剪强度指标：c_{cu} ϕ_{cu}

☞ 不固结不排水试验（UU试验）
Unconsolidated Undrained Triaxial test（UU)
总应力抗剪强度指标： c_u ϕ_u （ c_{uu} ϕ_{uu} ）

三轴试验的类型

P195

常规三轴试验优缺点

- 单元体试验，试样内应力和应变相对均匀
- 应力状态和应力路径明确
- 排水条件清楚，可控制
- 破坏面不是人为固定的

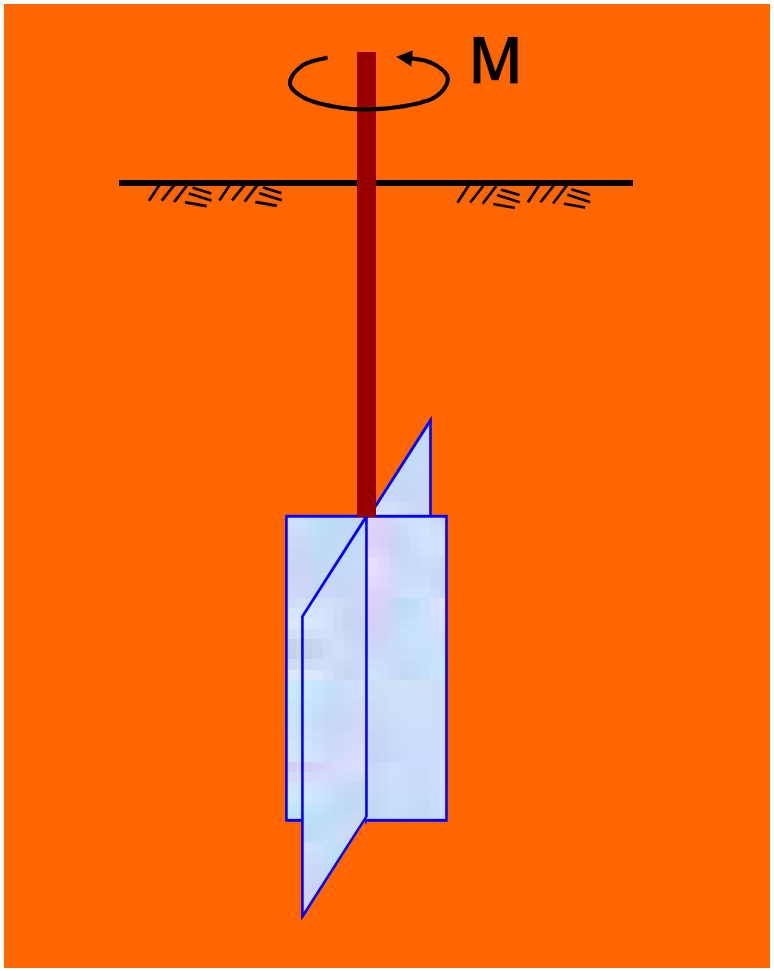
- 设备操作复杂
- 现场无法试验
- 常规三轴试验不能反映σ_2的影响

P196 5.3.3 一起看书 无侧限抗压强度试验

说明： $\sigma_3=0$ 即为无侧限抗压强度试验

十字板剪切试验

- 一般适用于测定软粘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



P196 5.3.4

DEL

十字板剪切试验

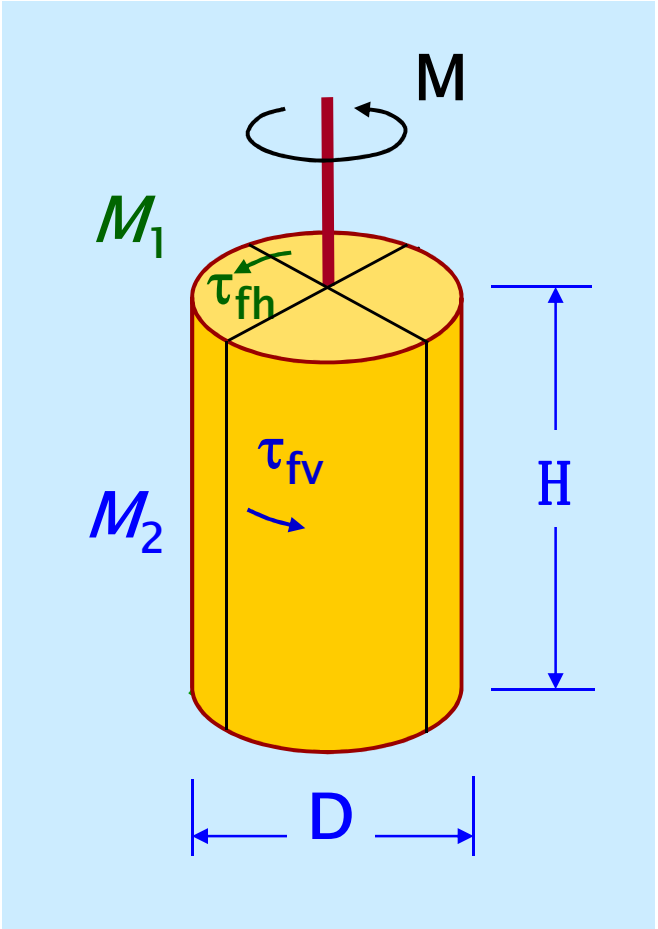
$$M_1 = 2\int_0^{D/2} \tau_{fh} \cdot 2\pi r \cdot r dr = \frac{\pi D^3}{6}\tau_{fh}$$

$$M_2 = \pi DH \cdot \frac{D}{2} \cdot \tau_{fv}$$

假定土体为各向同性，$\tau_{fh}=\tau_{fv}=\tau_f$：

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

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



DEL

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论 √

§5.3 土的抗剪强度的测定试验 √

§5.4 应力路径与破坏主应力线

§5.5 土的抗剪强度指标

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

P199

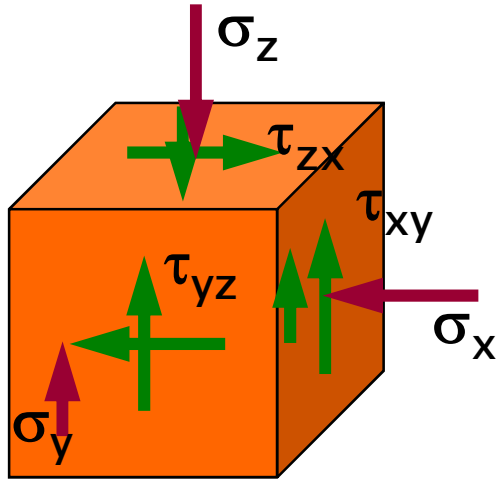
应力路径与破坏主应力线

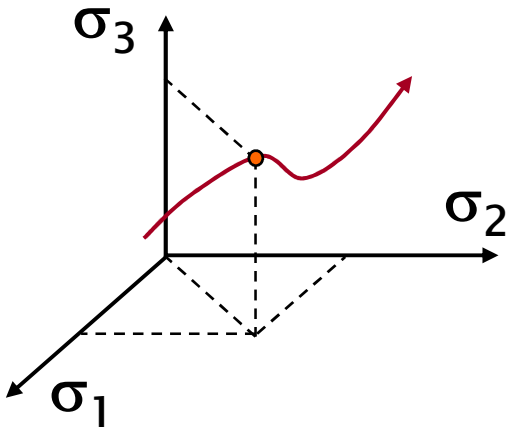
- 5.4.1 应力路径及表示法
- 5.4.2 强度包线与破坏主应力线
- 5.4.3 总应力路径与有效应力路径

DEL

应力状态及应力路径

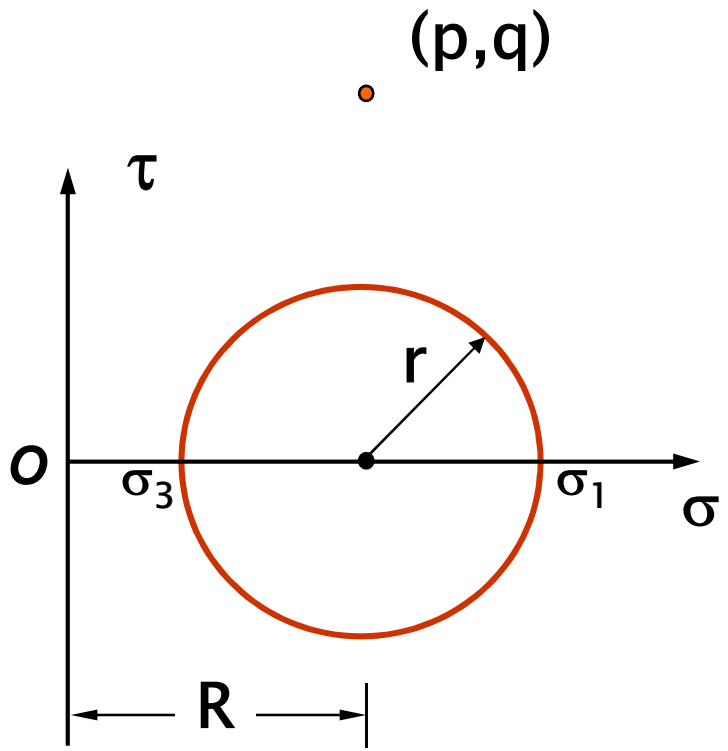
- 应力状态：土体中一点（微小单元）上作用的应力的大小与方向
- 应力路径：土体中一点应力状态连续变化，在应力空间（平面）中的轨迹





DEL

应力状态及莫尔圆



■ 应力状态可用莫尔圆表示

- 圆心坐标：　$R=(\sigma_1+\sigma_3)/2$
- 半径：$r=(\sigma_1-\sigma_3)/2$
- 顶点坐标：(p, q)

其中，$p=(\sigma_1+\sigma_3)/2$

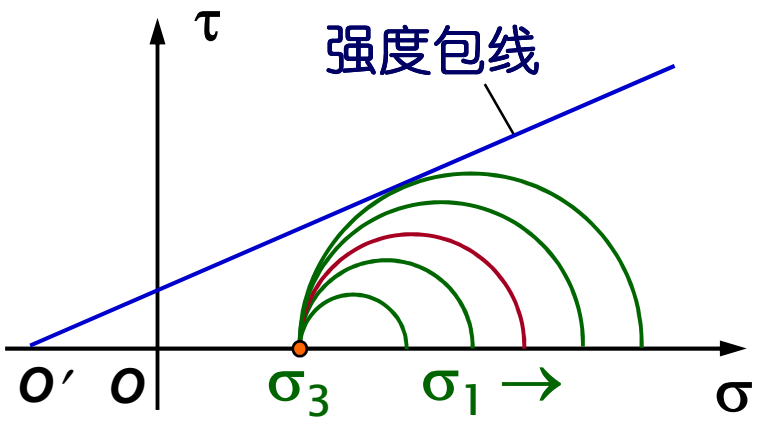
$q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$

应力状态也可用莫尔圆上的点，如（p, q）来表示

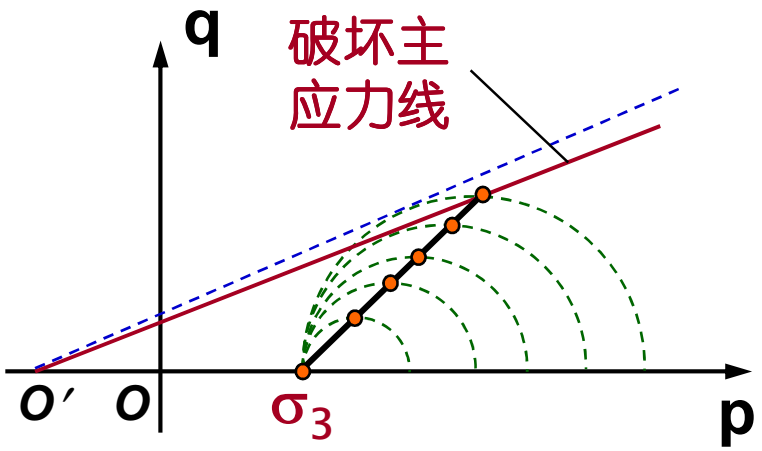
DEL

P200 图5-31

应力路径及破坏主应力线



- 方法一：用一系列的莫尔圆表示
  - 破坏时的莫尔圆与强度包线相切
  - 不直观，易混乱



- 方法二：用p-q图上莫尔圆的顶点坐标的变化线表示
  - 破坏点位于破坏主应力线上
  - 方法直观，使用方便

DEL 应力变化过程的较为简易的表示方法就是选择土体中某一个特定的面上的应力变化来表示土单元体的应力变化。通常选择莫尔圆的顶点作为代表点最为方便

莫尔圆与应力路径的比较

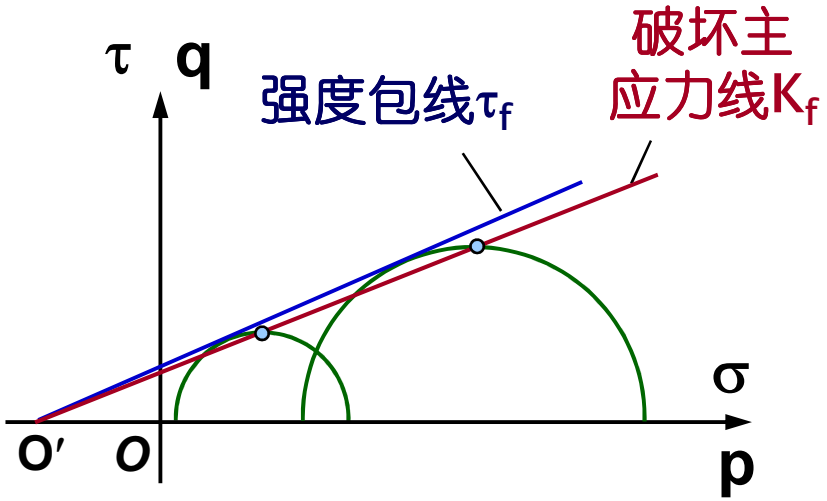
	莫尔圆	p-q应力平面
土中一点的 应力状态	一个莫尔圆	一点
应力的 变化过程	一系列莫尔圆	一条线 （应力路径）
极限应力 状态	与强度包线相切的莫尔圆	破坏主应力线上的一点

DEL

强度包线与破坏主应力线

- 强度包线τ_f ：在σ~τ 坐标系中所有破坏状态莫尔圆的公切线
- 破坏主应力线 K_f ：在p~q 坐标系中所有处于极限平衡应力状态点的集合

两条直线与横坐标交于一点O′

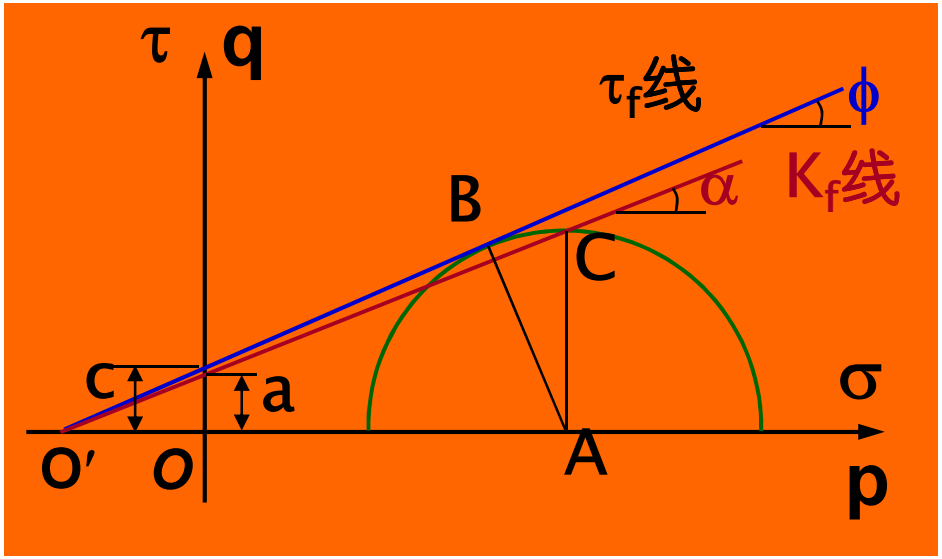


DEL

强度包线与破坏主应力线

■ 二者参数之间的关系

$$R = AB = O'A\sin\phi$$
$$R = AC = O'A\operatorname{tg}\alpha$$
$$O'O = \frac{a}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{c}{\operatorname{tg}\phi}$$



$$\sin\phi = \operatorname{tg}\alpha$$
$$a = c\cdot\cos\phi$$

$(\phi > \alpha,\ c > a)$

确定强度指标：

- 用最小二乘法确定a 和α
- 然后计算强度指标c和ϕ

DEL

P201 5.4.3

总应力路径与有效应力状态

有效应力原理： $\sigma = \sigma' + u$ 或 $\sigma' = \sigma - u$

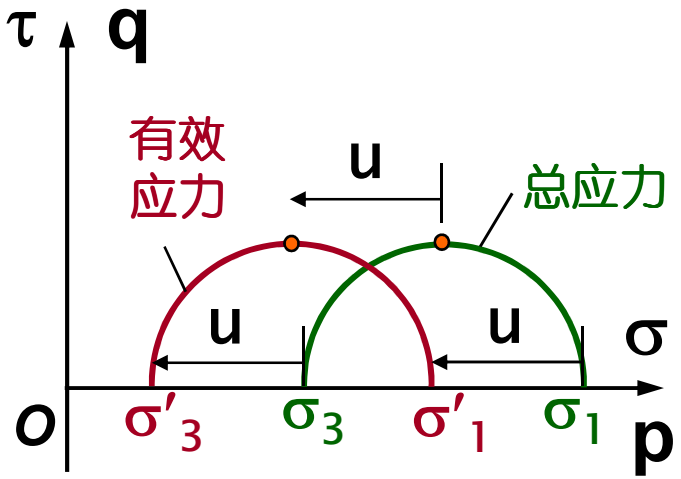
孔隙水压力： $\Delta u = B\Delta\sigma_3 + AB(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ P121 3-44

$$p' = \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3') = \frac{1}{2}(\sigma_1 - u + \sigma_3 - u)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - u = p - u$$

$$q' = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') = \frac{1}{2}(\sigma_1 - u + -\sigma_3 + u)$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) = q$$



DEL

三轴试验的总应力路径

我们以常规三轴试验为例，

- 固结过程：

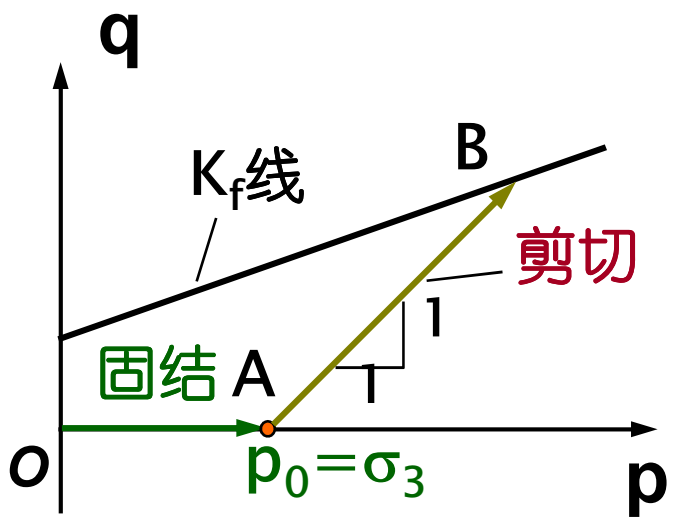
$$p = 0 \quad \Rightarrow \quad p_0 = \sigma_3$$

- 剪切过程： $\Delta\sigma_3 = 0$ $\Delta\sigma_1 \neq 0$

$$\Delta p = \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_3) = \frac{1}{2}\Delta\sigma_1$$

$$\Delta q = \frac{1}{2}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) = \frac{1}{2}\Delta\sigma_1$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta p} = 1$$



DEL

三轴试验的有效应力路径

- 固结过程：

$$p = 0 \quad \Rightarrow \quad p_0 = \sigma_3$$

- 剪切过程：

$$\Delta\sigma_3 = 0 \qquad \Delta\sigma_1 \neq 0 \qquad u \neq 0$$

$$p' = p - u$$

$$q' = q$$

$$u = A(\sigma_1 - \sigma_3)$$

饱和土固结不排水试验

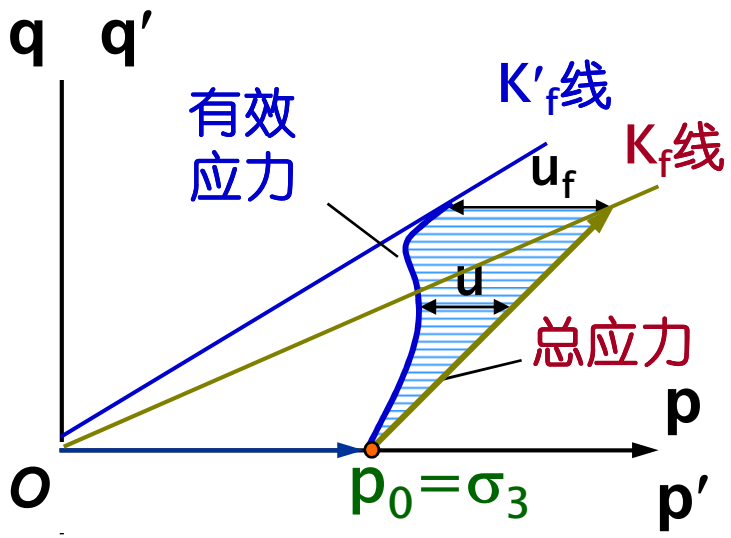


图5-35

当孔压系数A是常数时，有效应力路径为直线，

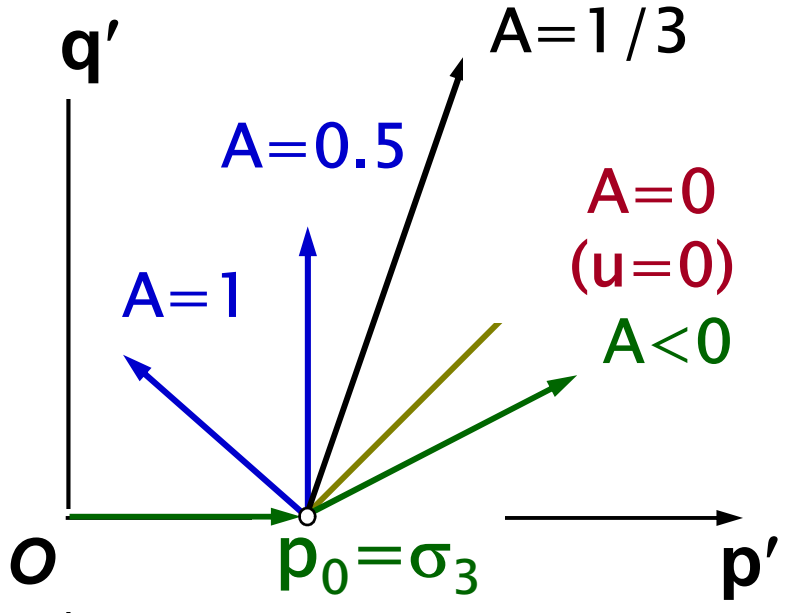
一般情况下A不为常数，有效应力路径为曲线

DEL

P204 图5-36

孔压系数A与有效应力路径

饱和土固结排水试验



- 弹性体：A=1/3
- 松砂或正常固结粘土：剪缩 A>1/3
- 密砂或超固结粘土：剪胀 A<1/3

DEL

小　结

- 应力路径
- p-q平面上的应力路径与莫尔圆
- 强度包线与破坏主应力线

  $\sin\phi = \mathrm{tg}\alpha$；$a = c\cos\phi$
- 总应力路径与有效应力路径
  - 有效应力原理
  - 孔隙水压力系数
  - 总应力状态与有效应力状态
  - 三轴试验的总应力路径与有效应力路径

DEL

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论 √

§5.3 土的抗剪强度的测定试验 √

§5.4 应力路径与破坏主应力线 √

§5.5 土的抗剪强度指标

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

土的抗剪强度指标

- 库仑公式: $\tau_f = c + \sigma tg\phi$

c和ϕ ⇨称为土的抗剪强度指标

讨论有关抗剪强度指标的问题

特别是排水条件对结果影响较大

- ☞ 强度指标的类型
- ☞ 5.5.1 总应力指标与有效应力指标
- ☞ 5.5.2 三轴试验强度指标
- ☞ 5.5.3 直剪试验强度指标
- ☞ 5.5.5 土的强度指标的工程应用

P207 5.5 一起看书

抗剪强度指标的类型

- 三种强度指标：

  - 峰值强度与残余强度指标 → 根据应力变形特性分
  - 总应力强度与有效应力强度指标 → 根据应力分析方法分
  - 直剪强度与三轴试验指标 → 根据试验方法分

P207 5.5

总应力指标与有效应力指标

- 抗剪强度的有效应力指标 c'，ϕ'
- $\tau = c' + \sigma' \tan\phi'$

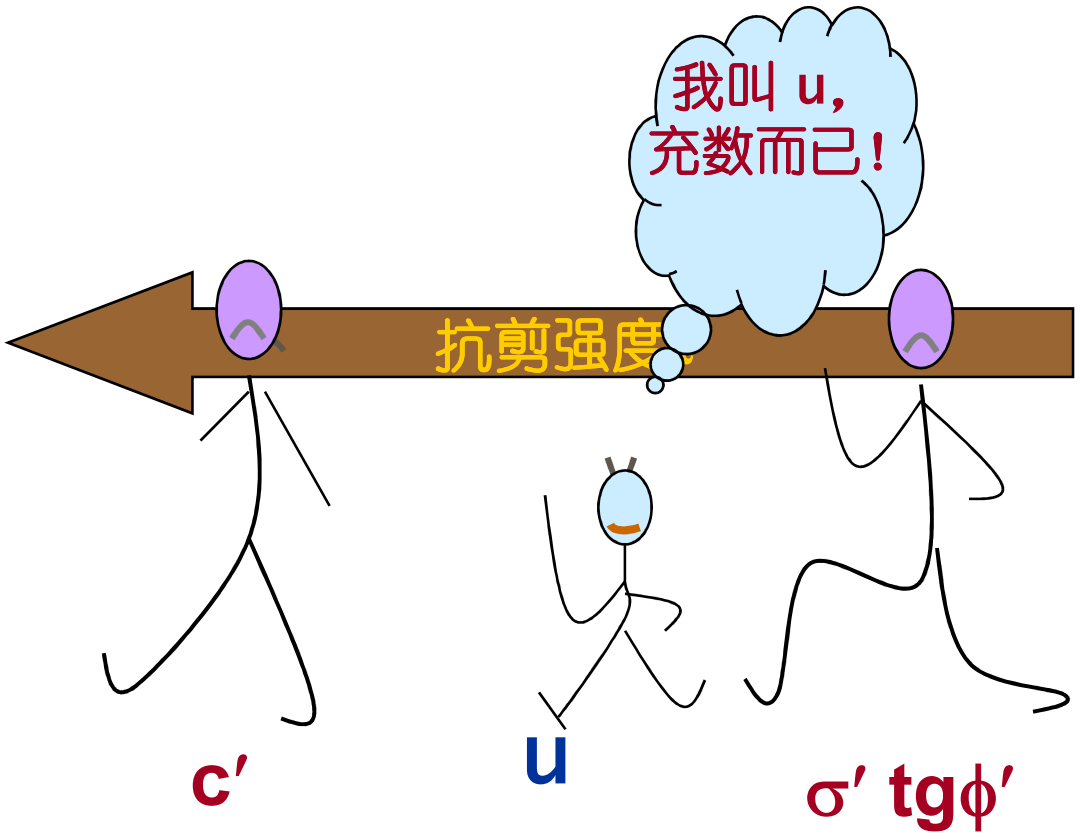
  $\sigma' = \sigma - u$

  符合土的破坏的机理，但有时孔隙水压力u无法确定

- 抗剪强度的总应力指标c，ϕ
- $\tau = c + \sigma \tan\phi$
- 是一种“全额生产率”的概念，因u不能产生抗剪强度，不符合强度机理。在无法确定u时便于应用，但要符合工程条件

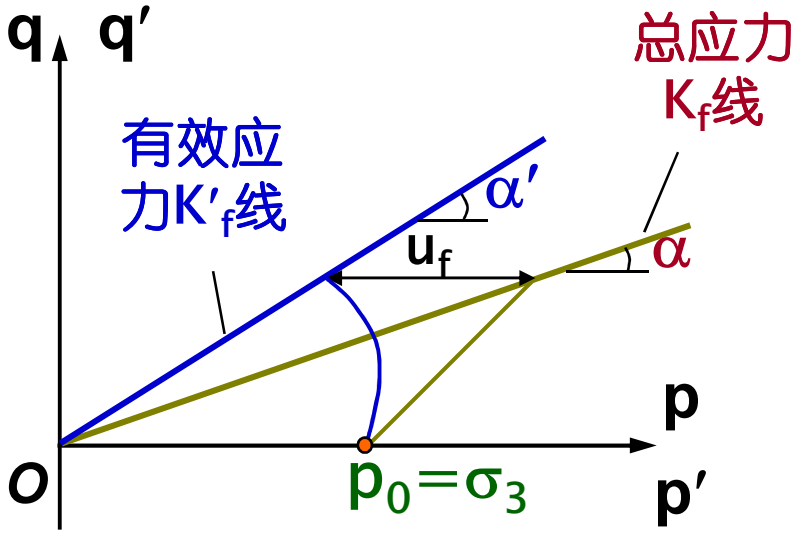
P205 5.5.1

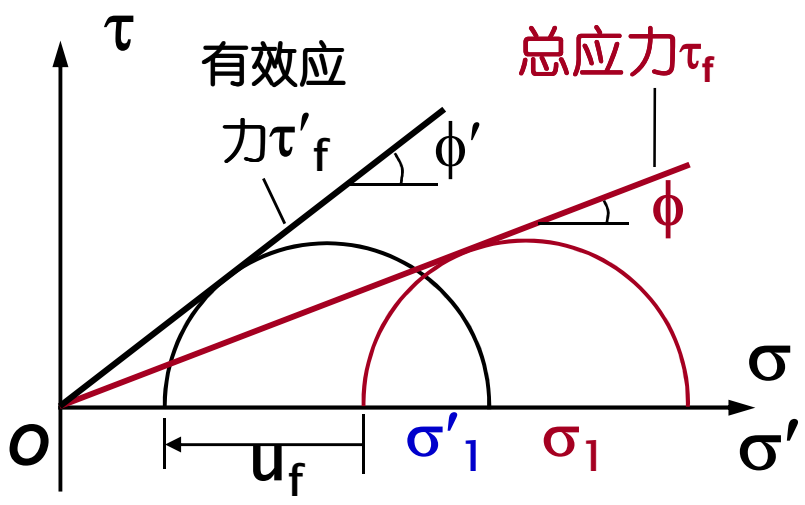
抗剪强度的总应力指标



- 在难以确定孔隙水压力的情况下使用
- 注意正确使用的方法：确定c，ϕ的试验中，应能大致模拟工程现场孔隙水压力的特性

正常固结土的有效和总应力指标



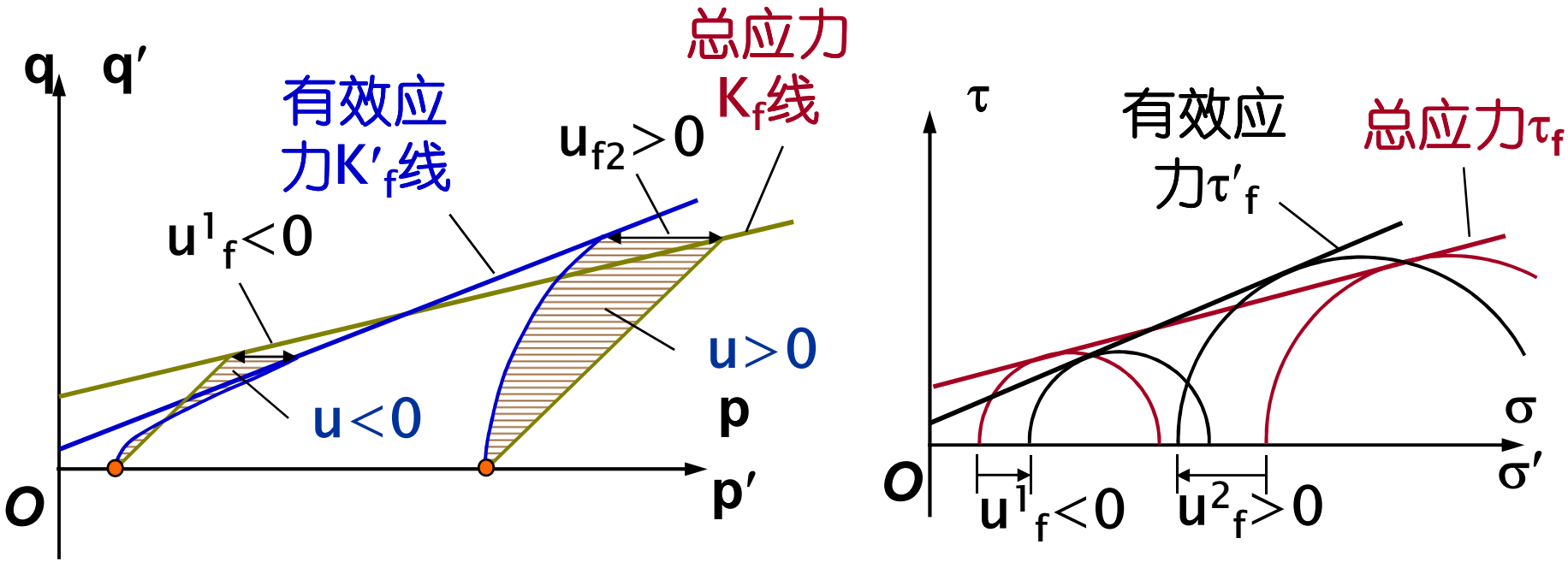


思考题1：实际破裂面的方向？ 是$45^\circ+\frac{\phi'}{2}$？ 还是$45^\circ+\frac{\phi}{2}$？

思考题2：如果破坏时孔隙水压力u<0(负孔压)，有效应力莫尔圆在总应力莫尔圆哪边？

P209 图5-45 DEL

超固结粘土的有效应力与总应力指标



P212 图5-46 DEL

常规三轴压缩试验

■ 试验类型与强度指标

类型	施加 σ_3	施加 $\sigma_1-\sigma_3$	量测	强度指标
固结排水 **CD**	固结	排水	体变	c_d,ϕ_d $=(c',\phi')$
固结不排水 **CU**	固结	不排水	孔隙水压力	c_{cu},ϕ_{cu} c',ϕ'
不固结不排水 **UU**	不固结	不排水	孔隙水压力	c_u,ϕ_u

固结排水试验

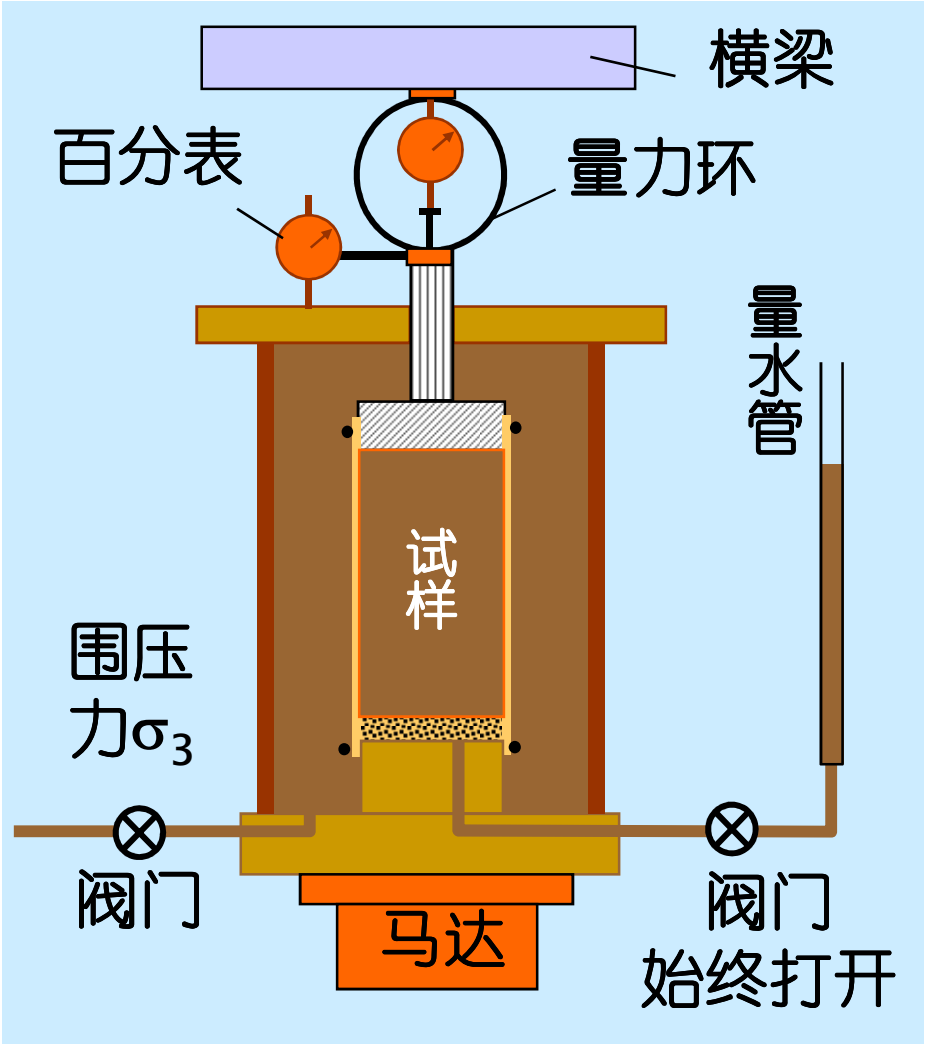
- 强度指标：c_d，ϕ_d = c'，ϕ'

- 试验条件
- 松砂与正常固结粘土试验曲线与强度包线
- 密砂与超固结粘土试验曲线与强度包线
- 超固结粘土+正常固结粘土的强度包线

固结排水试验

■ 试验条件

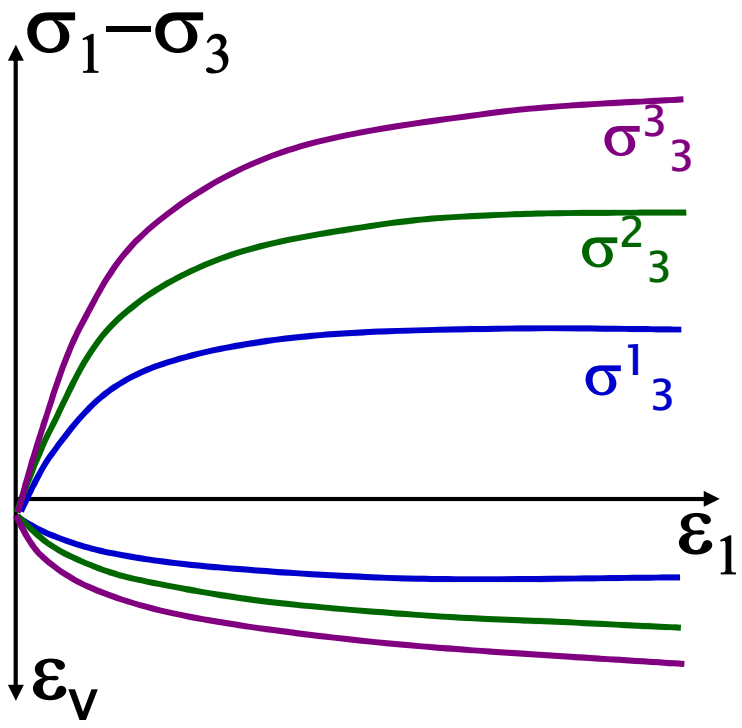
- ☞ 施加围压σ_3充分固结
- ☞ 施加(σ_1 -σ_3)时，排水阀门始终打开，剪切速度慢足以使试样内的孔压消散
- ☞ 始终u=0，$\sigma'=\sigma-u=\sigma$，总应力指标即为有效应力指标



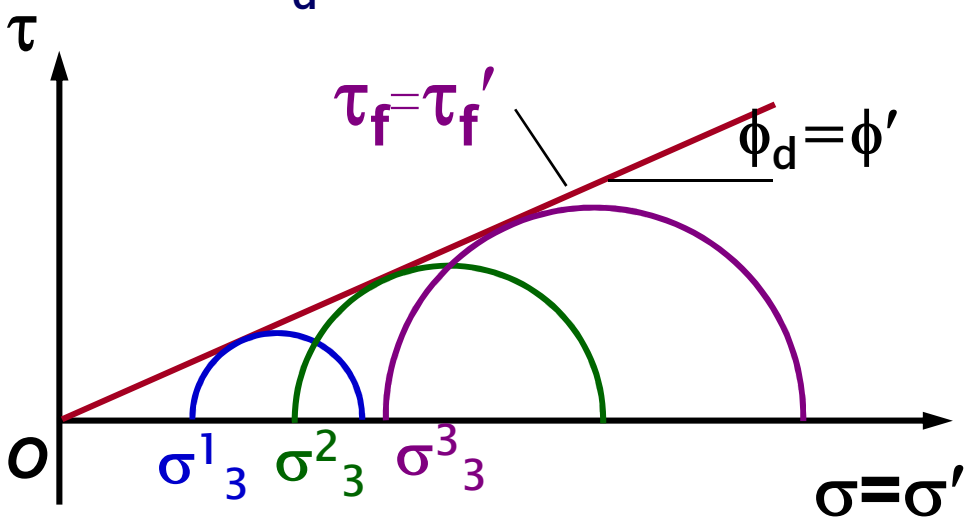
P209 5.5.2

固结排水试验

■ 松砂与正常固结粘土试验曲线与强度包线



- 轴向应力渐进增加
- 体应变是体缩
- 最终二者均趋于稳定
- 强度包线过原点
  $c_d=0$



P210 图5-43 DEL

固结排水试验

思考题1：为什么正常固结粘土强度包线过原点？

? 什么是实验室三轴试验中的正常固结粘土

☞ 有效固结压力σ_3 等于先期固结压力σ_p

? 地基中的正常固结粘土，取样在试验室进行三轴试验时，是否一定为正常固结土

☞ 如对一个三轴试验 $\sigma_3 < \sigma_p = \gamma' z$，则不是正常固结土

在三轴试验中，固结压力为0的正常固结粘土，是在其历史上最大固结压力为0的土，也即处于泥浆状态的土，其抗剪强度为0

固结排水试验

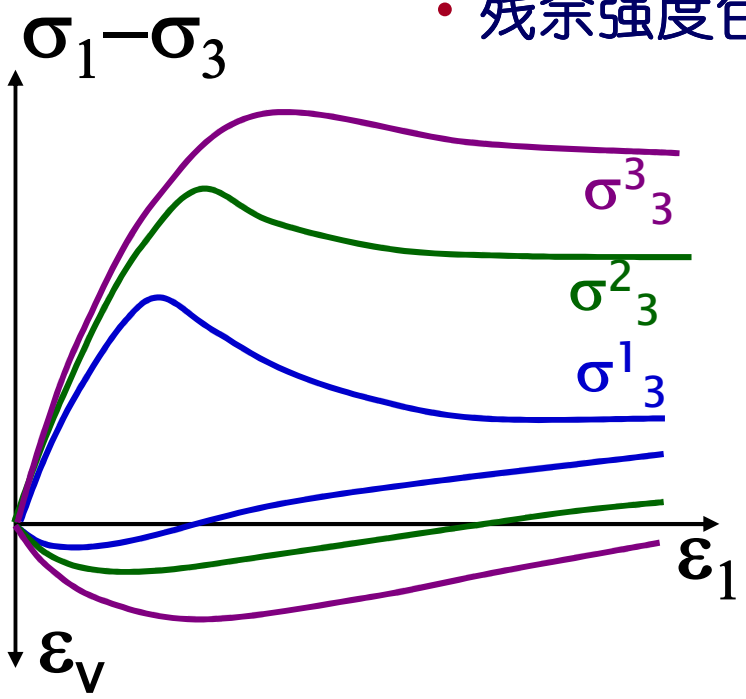
思考题2： c=0是否意味着正常固结粘土无粘聚力?

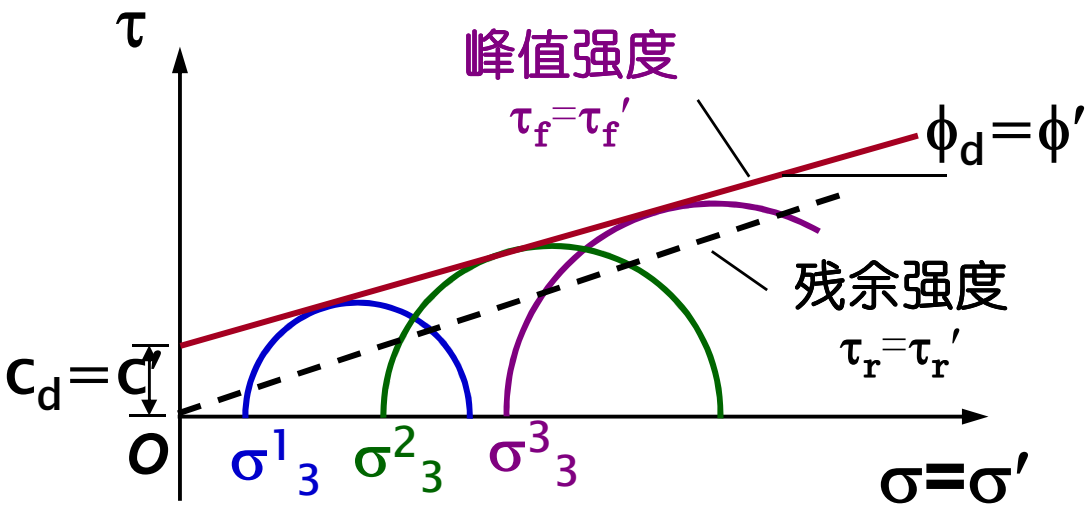
- 粘性土粘聚力的存在是客观的。在正常固结情况下，粘聚力c随σ增加而增加，从而使其隐含在摩擦强度之内
- c和ϕ在物理意义上并不严格“真实”地反映粘聚和摩擦两个抗剪强度分量，而通常是“你中有我，我中有你”，从而失去其物理意义，变成仅为计算参数的含义

固结排水试验

■ 密砂与超固结粘土试验曲线与强度包线

- 应力应变关系软化，体应变后段发生剪胀
- 峰值强度包线，密砂过原点，超固结粘土不过原点
- 残余强度包线两者均过原点



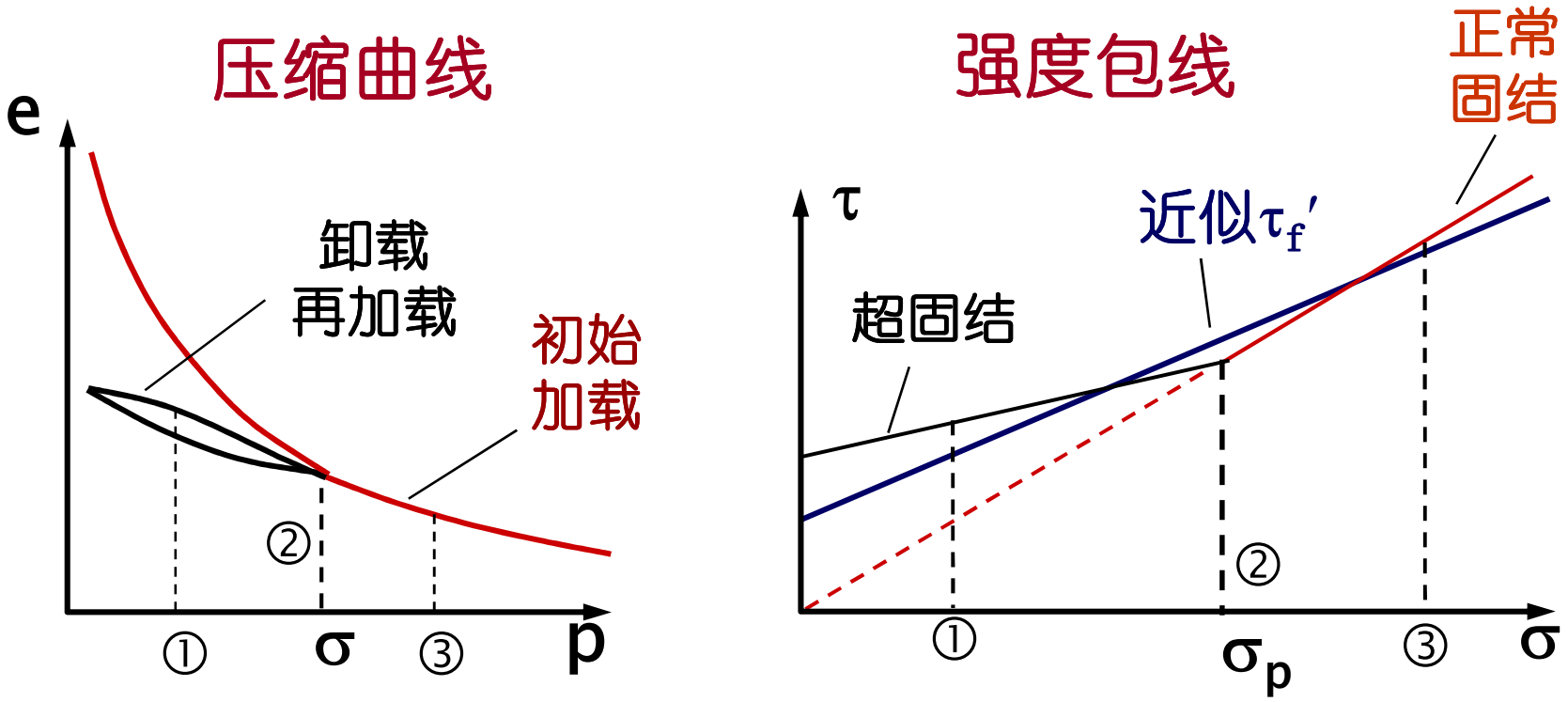


P210 图5-44 DEL

固结排水试验

- 天然土的强度包线 - 先期固结压力σ_p

☞ $\sigma \geq \sigma_p$时正常固结粘土；$\sigma < \sigma_p$时超固结粘土



P211 图5-45 DEL p

固结排水试验小结

- 松砂与正常固结粘土试验曲线与强度包线 → 应变硬化与体积收缩，$c_d=0$
- 密砂的试验曲线与强度包线 → 应变软化与剪胀性，$c_d=0$
- 超固结粘土试验曲线与强度包线 → 应变软化与剪胀性，c_d与ϕ_d
- 天然粘土：超固结+正常固结粘土的强度包线 → 折线 →$c\neq0$的直线近似

固结不排水试验

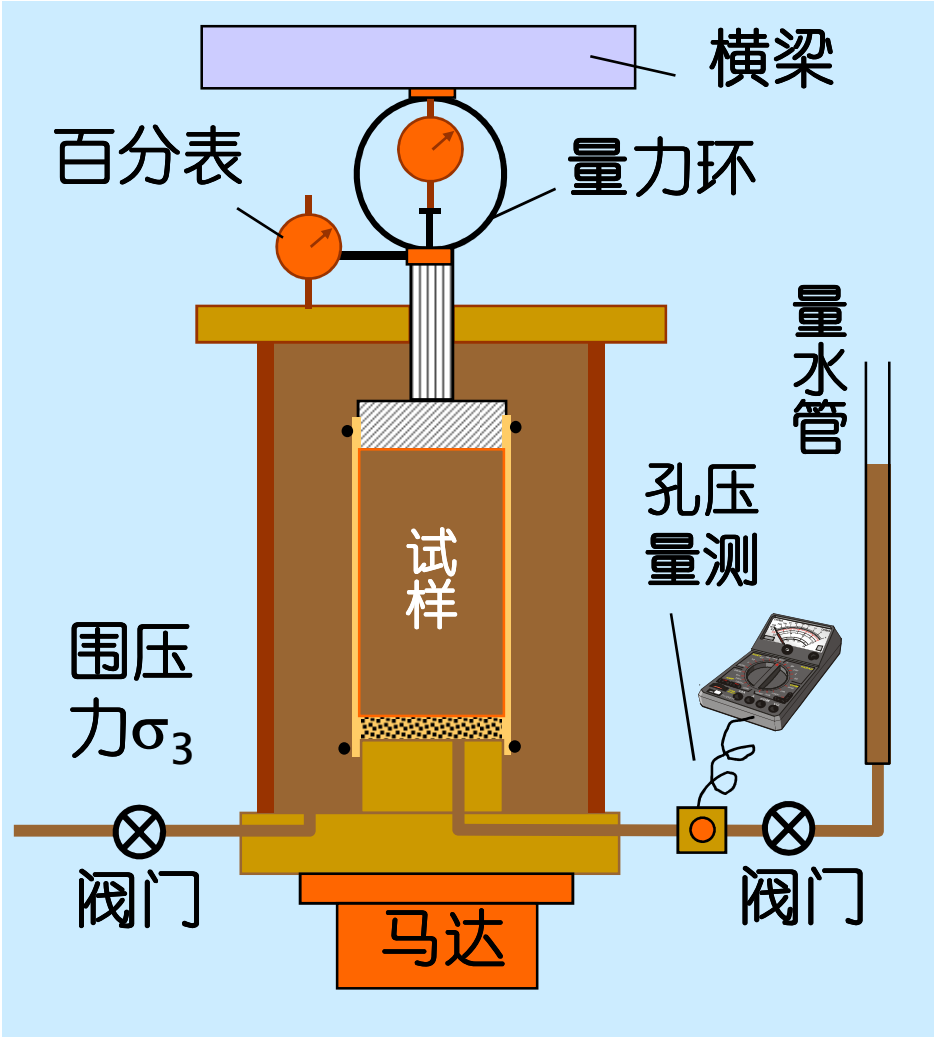
- 强度指标：c_{cu}，ϕ_{cu} ⇨ c'，ϕ'

- 试验条件
- 正常固结粘土试验曲线与强度包线
- 超固结粘土试验曲线与强度包线
- 固结不排水试验确定的的强度参数
- 粘性土的孔隙比~有效应力~抗剪强度唯一性关系

固结不排水试验

■ 试验条件

- ☞ 施加围压σ_3充分固结
- ☞ 施加(σ_1 -σ_3)时，排水阀门关闭，量测剪切过程中产生的超静孔隙水压力u
- ☞ 一般u≠0，$\sigma'=\sigma-u=\sigma'$，总应力指标同有效应力指标不同



P211 2 三轴固结不排水试验

固结不排水试验

■ 剪切过程中的超静孔隙水压力Δu

☞ 对于饱和土试样：孔压系数B=1.0 ⇨ $\Delta u = A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$

- 无剪缩（弹性体）：A=1/3
- 剪缩： A>1/3
- 剪胀： A<1/3

（甚至可能A<0，u <0 ）

⇨ 超静孔压由土骨架体积变形的趋势决定，骨架收缩的趋势使孔压增加

⇨ 不排水试验的孔压，同相应排水试验的体变之间常有类似的规律

DEL

固结不排水试验

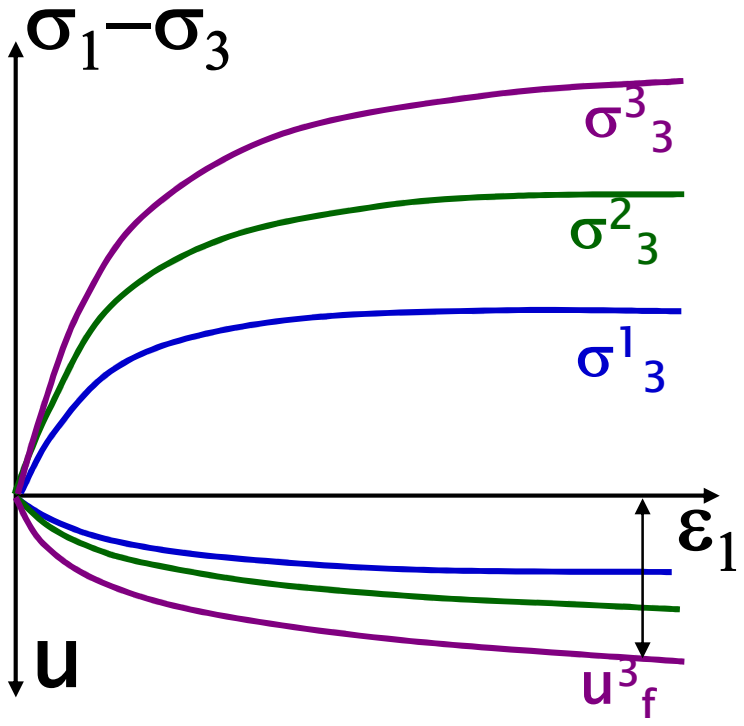
■ 确定的强度指标

- ☞ 试验量测的项目：σ_3，$\sigma_1-\sigma_3$，u
- ☞ 计算的项目：$\sigma_3' = \sigma_3-u$ ； $\sigma_1'-\sigma_3' = \sigma_1-\sigma_3$
- ☞ 确定的强度指标：c_{cu}，ϕ_{cu}

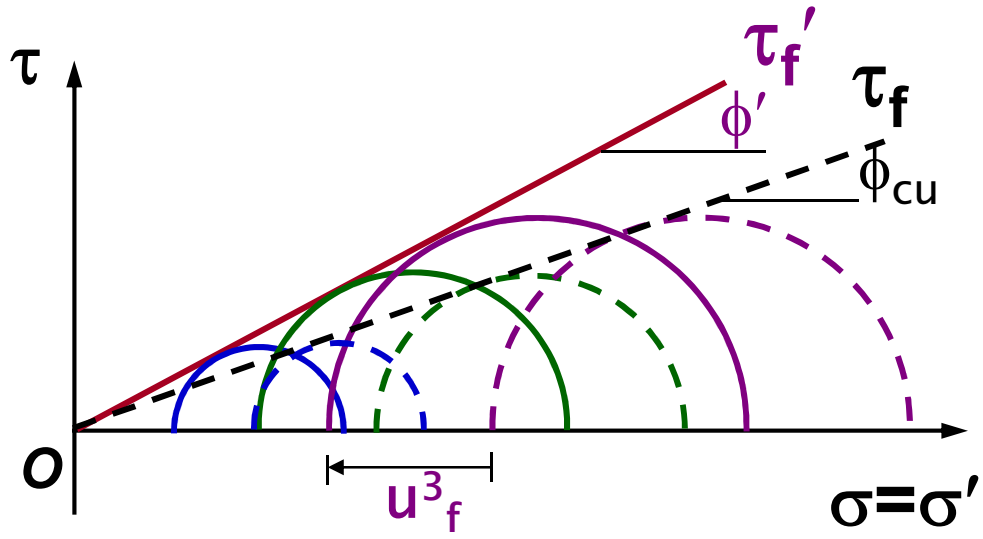
  c'，ϕ'

固结不排水试验

■ 正常固结粘土试验曲线与强度包线



- 轴向应力和孔压u渐进增加并趋于稳定
- $u>0$，$\phi_{cu}<\phi'$
- 强度包线过原点$c_{cu}=c'=0$

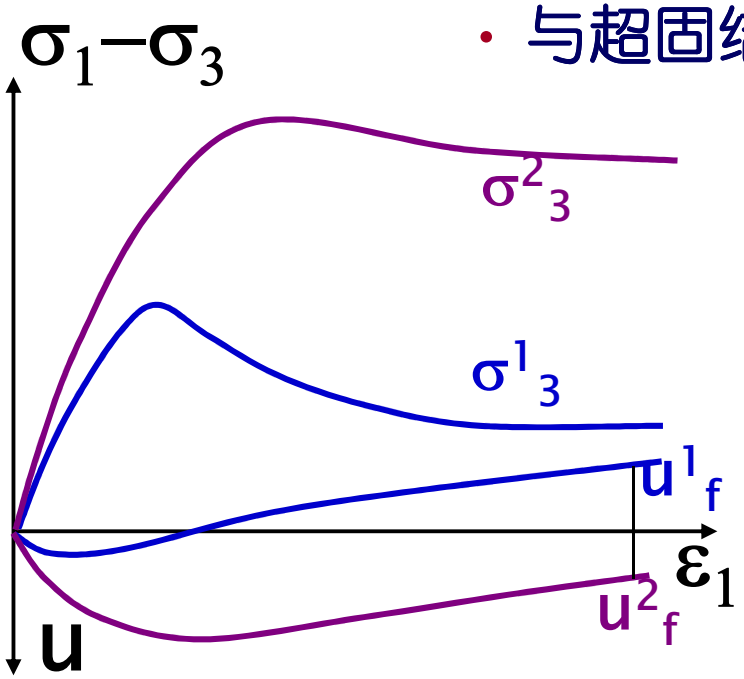


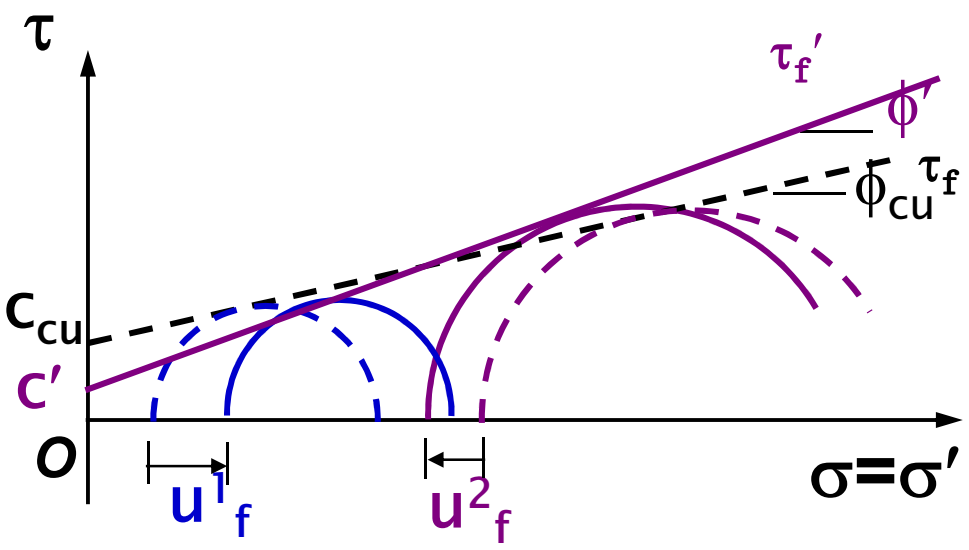
P212 图5-46

固结不排水试验

■ 超固结粘土试验曲线与强度包线

- 应力应变关系软化，孔压后段减小，可小于零
- 强度包线不过原点，$c_{cu}>c'$，$\phi_{cu}<\phi'$
- 与超固结度有关





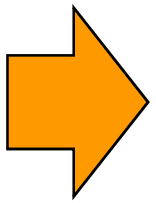
P213 图5-47 DEL

固结不排水试验小结

- 剪切过程中的超静孔压：$\Delta u = A\Delta(\sigma_1-\sigma_3)$
- 试验确定的强度指标：ϕ_{cu}，c_{cu} 和 ϕ'，c'
- 正常固结粘土：$\phi_{cu} < \phi'$；$c_{cu}=c'=0$
- 超固结粘土：$\phi'> \phi_{cu}$；$c_{cu}>c'>0$

粘性土有效应力~密度~抗剪强度间的唯一性关系

- Henkel(1960)等学者证实，对饱和正常固结粘土，在有效应力~密度~抗剪强度间存在唯一性关系：
  - 存在单一的有效应力强度包线
  - 破坏时含水量（孔隙比）和强度间存在唯一性关系
  - 土体有效应力和含水量（孔隙比）间存在唯一性关系

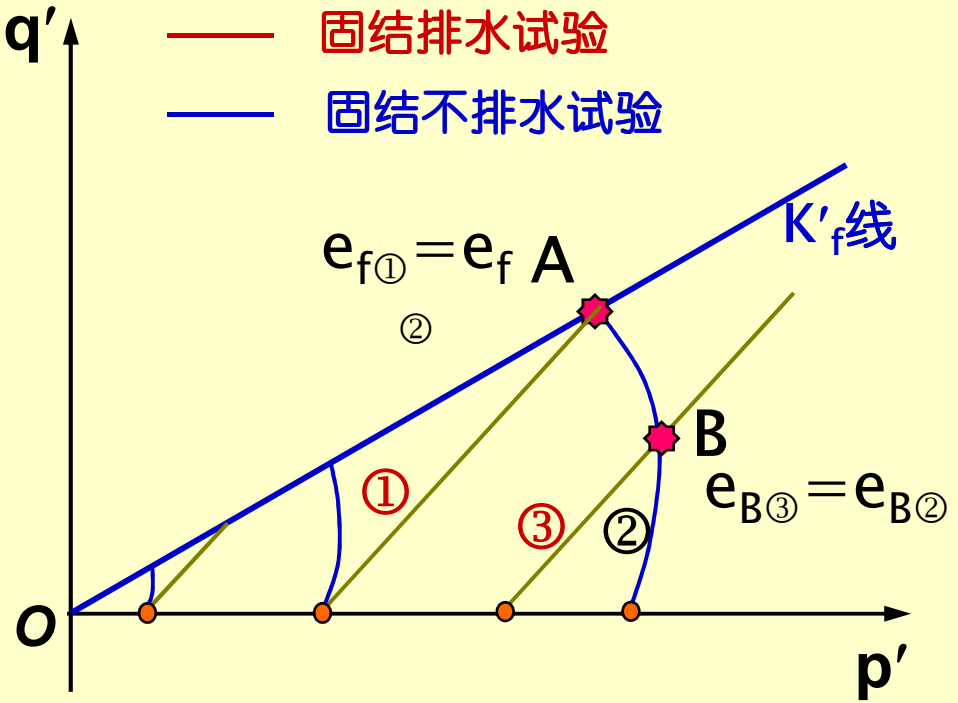


和试验的类型及应力路径等无关

- 对具有相同的前期固结压力的超固结土也有相似的规律

P212 3.

粘性土有效应力~密度~抗剪强度间的唯一性关系



土样的密度不变，强度相同

- 两种试验得到相同的 K'_f线
- K'_f线上，p'_f~q_f~e_f间存在唯一性关系
  ⇨ A点： $e_{f①}=e_{f②}$
- 有效应力和孔隙比间存在唯一性关系
  ⇨ B点： $e_{B③}=e_{B②}$

P213-214 图5-49 DEL 一起看书

不固结不排水试验

- 强度指标：$c_{uu}(c_u)$, $\phi_{uu}(\phi_u)$

☞ 试验条件

☞ 饱和试样的不排水强度指标c_u

☞ 不排水试验与固结不排水试验

☞ 无侧限压缩试验：$\sigma_3=0$的不排水试验

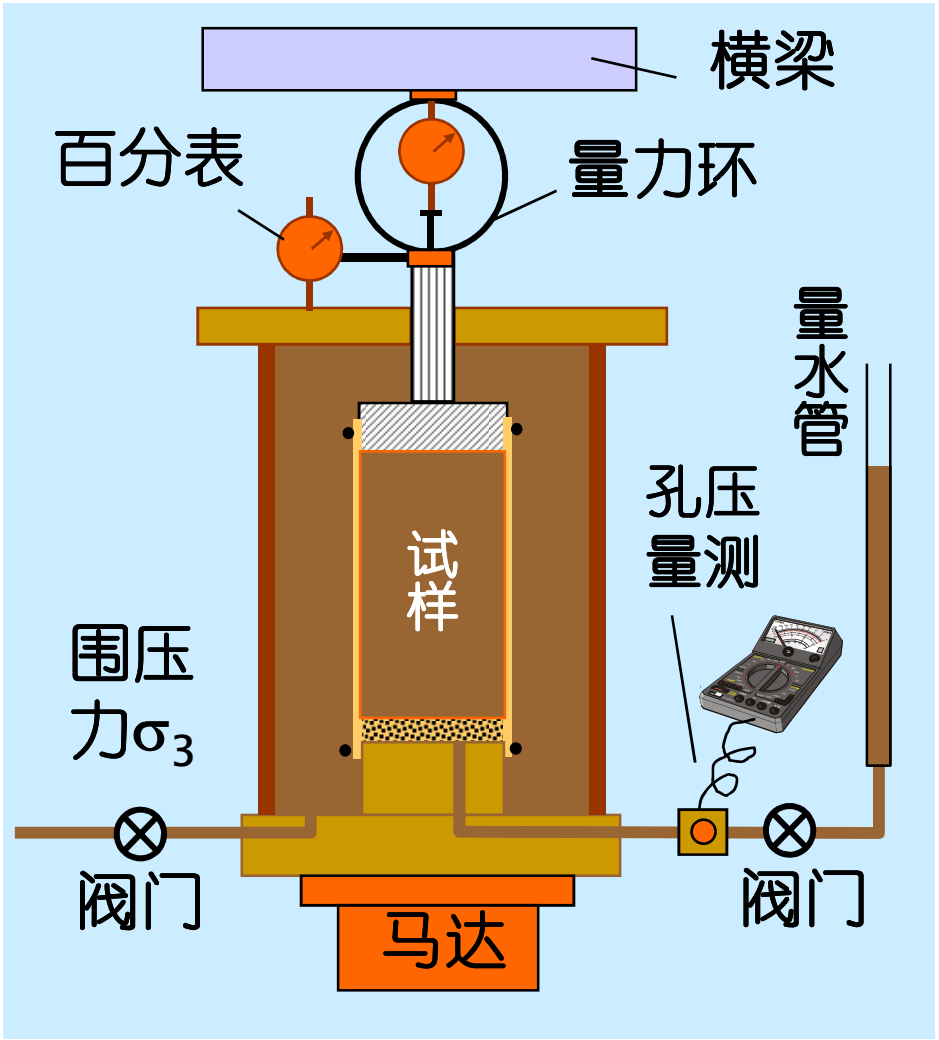
☞ 不饱和试样的不排水强度

P214 4. DEL

不固结不排水试验

■ 试验条件

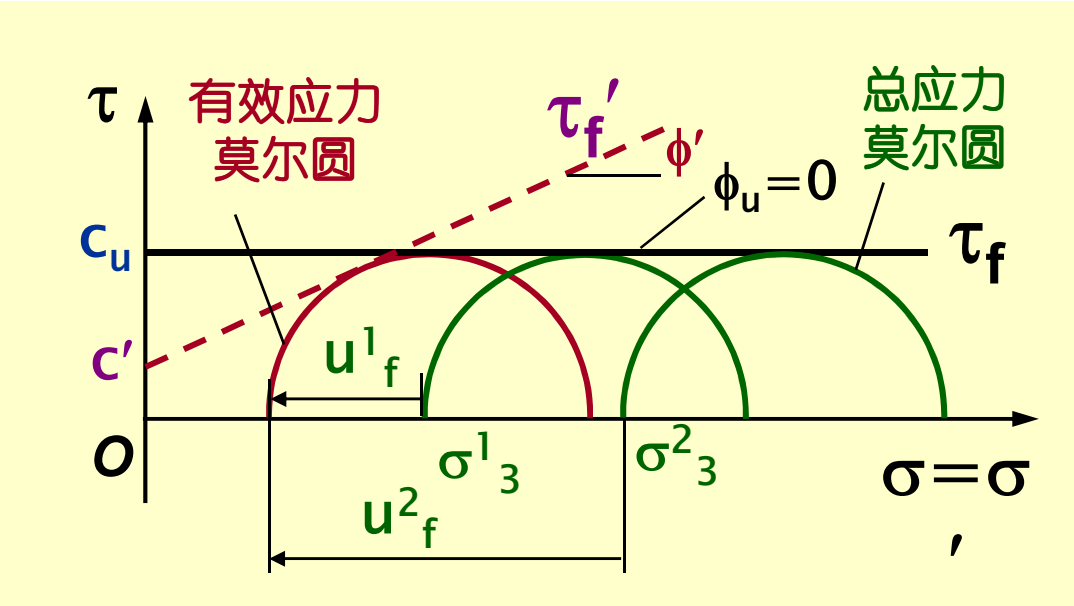
- ☞ 排水阀门关闭，施加围压σ_3，产生孔隙水压力 $\Delta u_1 = B\Delta\sigma_3$
- ☞ 施加$(\sigma_1 - \sigma_3)$时，排水阀门关闭，量测剪切过程中产生的超静孔隙水压力$\Delta u_2 = BA\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$



P214

不固结不排水试验

- 饱和试样的不排水强度指标c_u
  - B=1 饱和度
  - $\Delta u_1 = \Delta\sigma_3$
  - $\Delta u_2 = A\,\Delta(\sigma_1-\sigma_3)$
  - 剪切时的胀缩

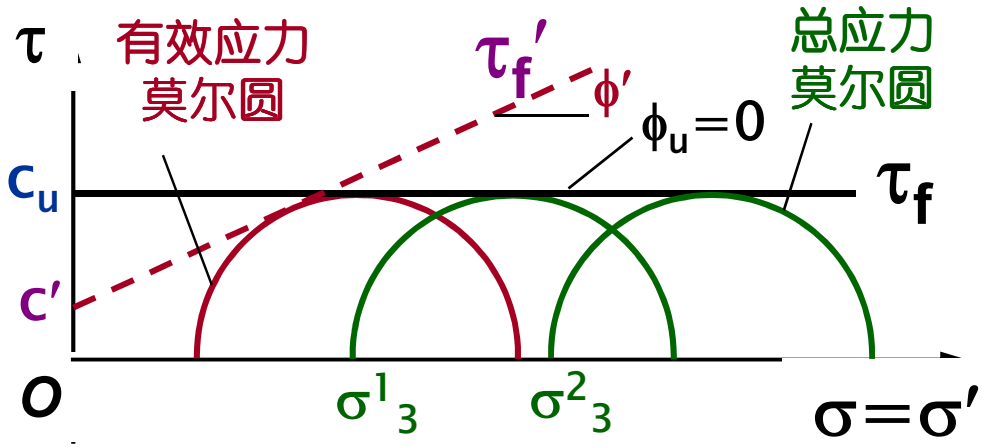


试验过程中不排水，试样密度不变，不论周围压力σ_3多大，抗剪强度和破坏时的有效应力状态相同

- 总应力抗剪强度包线水平 ⇨ $\phi_u=0$， $c_u=(\sigma_1-\sigma_3)_f/2$
- 破坏时不同σ_3试验的有效应力莫尔圆相同

P214 图5-50

不固结不排水试验



思考题1：不排水试验的破裂面的方向？

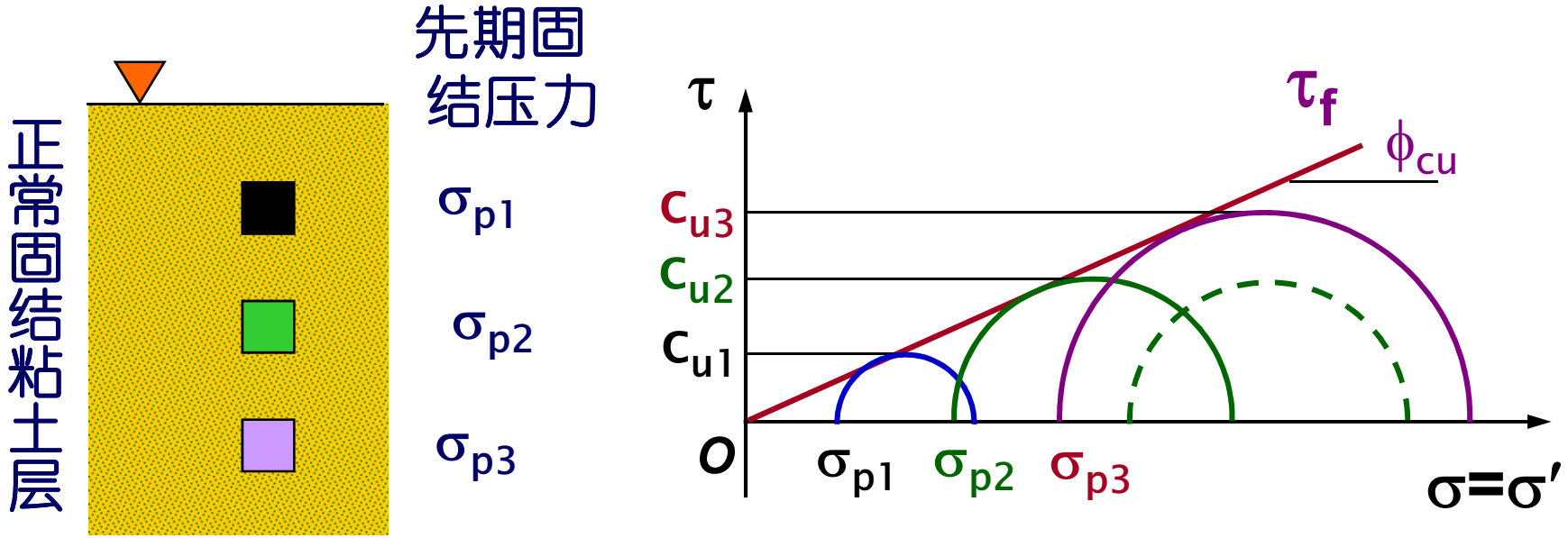
思考题2：ϕ_u=0是否意味着土体不具有摩擦强度？

思考题3：可否由UU试验确定有效应力强度指标？

P214

不固结不排水试验

■ 不排水试验与固结不排水试验

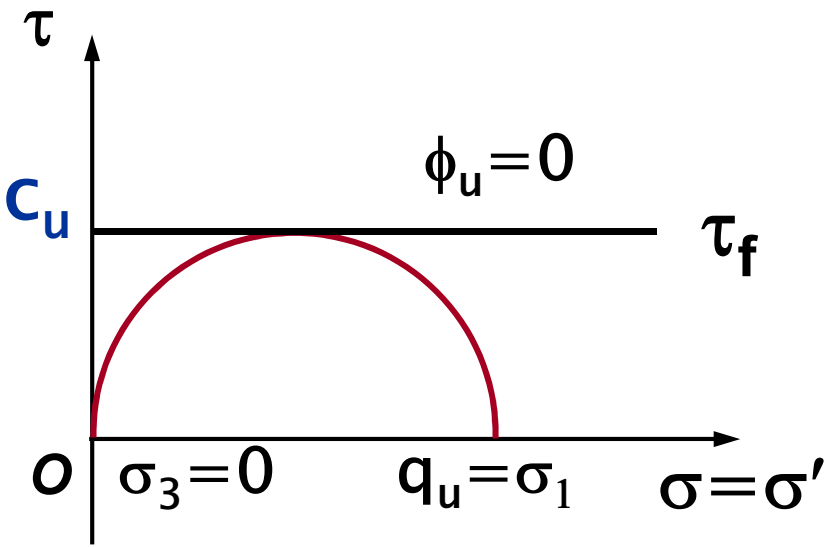


固结不排水试验强度包线上的每一点对应于一个具有相同先期固结压力的不排水强度指标

P216 图

不固结不排水试验

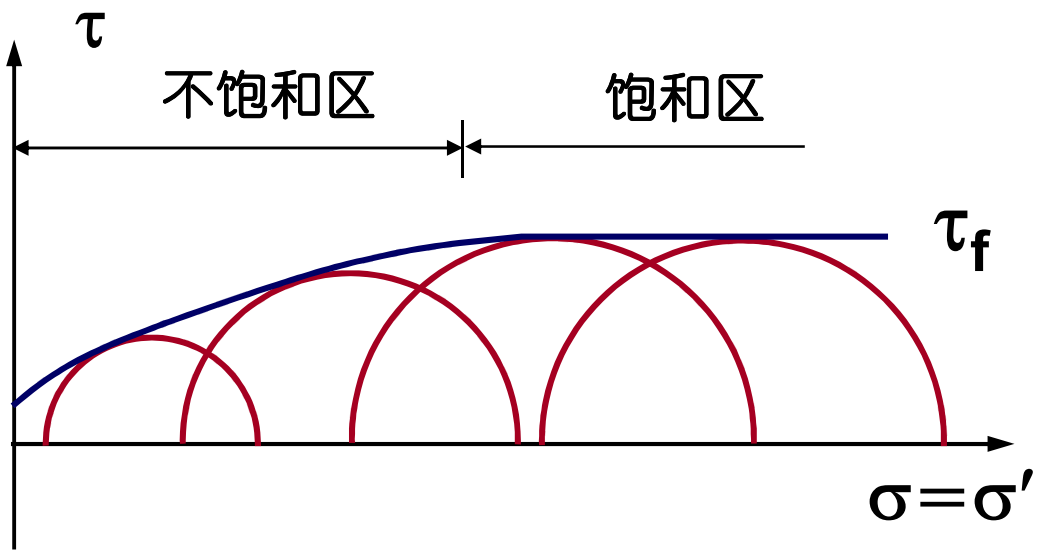
- 无侧限压缩试验



- $\sigma_3=0$的不排水试验
- $\tau_f=c_u=q_u/2$
- 由于土样扰动等的影响，一般稍低于原位不排水强度

不固结不排水试验

■ 不饱和试样的不排水强度



- ☞ 开始段非饱和，有效应力随围压增加增加，试样密度增加，强度增高
- ☞ 围压较大时，孔隙气被压缩或溶解于水，试样饱和，强度包线趋于水平线

P216 图5-53

不固结不排水试验小结

- 饱和试样的不排水强度指标：$\phi_u = 0$ ，c_u
- 饱和CD与CU强度指标： 有关联
- 无侧限压缩试验： $\sigma_3=0$，是特殊的UU试验
- 不饱和试样的UU强度指标： 随σ_3增加而增加并趋于稳定

直剪试验类型和强度指标

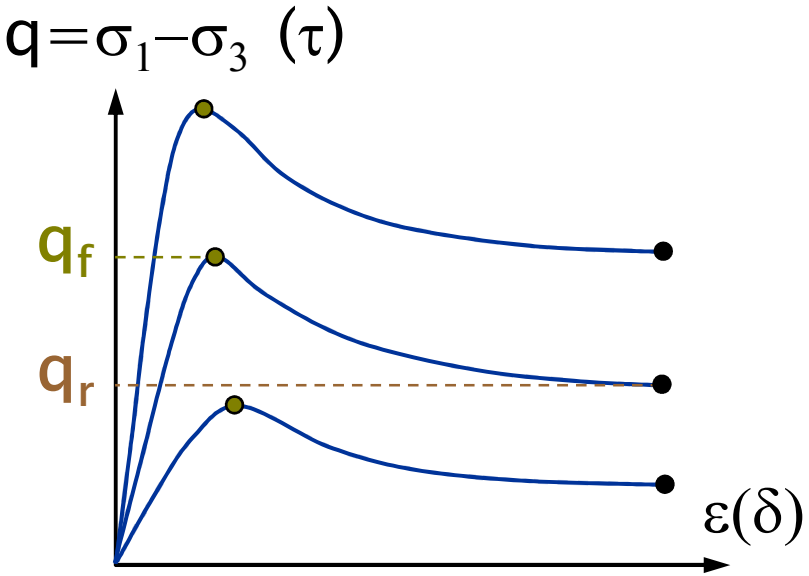
试验类型	试验方法	强度指标
慢剪 Slow Shear	施加正应力-充分固结 慢剪，保证无超静孔压	c_s，ϕ_s
固结快剪 Consolidated Quick Shear	施加正应力-充分固结 快剪，在3-5分钟内剪切坏	c_{cq}，ϕ_{cq}
快剪 Quick Shear	施加正应力后不固结， 立即快剪，3-5分钟内剪坏	c_q，ϕ_q

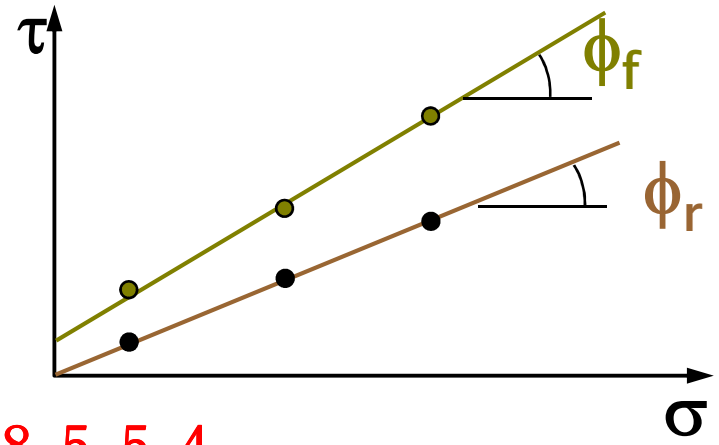
P216 5.5.3

直剪试验强度指标

- 排水条件不明确，但可以模拟实际工程问题

  - 对于砂土，三种试验结果都接近于c' ϕ'
  - 对于粘性土，
    - 慢剪：$c_s \approx c'$，$\phi_s \approx \phi'$，
      一般强度指标稍大，常乘系数0.9
    - 固结快剪：$c_{cq} \approx c_{cu}$ $\phi_{cq} \approx \phi_{cu}$
    - 快剪： 对于 $k < 10^{-7}$cm/s的粘土 $c_q \approx c_u$ $\phi_q \approx \phi_u$





P218 5.5.4

峰值强度&残余强度指标

直剪和三轴试验中应变软化时：

ϕ_f 峰值强度指标

ϕ_r 残余强度指标

☞ 大变形完全破坏了土的结构强度和咬合作用，残余强度破坏包线通过原点，其内摩擦角ϕ_r只决定于土的矿物成分，与其所受的应力历史等因素无关

土的强度指标的工程应用

- 有效应力指标还是总应力指标？
- 三轴试验指标还是直剪试验指标？
- 峰值强度指标还是残余强度指标？

P219 5.5.5

土的强度指标的工程应用

■ 有效应力指标与总应力指标

☞ 凡是可以确定（测量、计算）孔隙水压力u的情况，都应当使用有效应力指标c′，ϕ′

☞ 采用总应力指标时，应根据现场土体可能的固结排水情况，选用不同的总应力强度指标

P219 5.5.5

土的强度指标的工程应用

■ 三轴试验指标与直剪试验指标

- ☞ 应优先采用三轴试验指标
- ☞ 应按照不同土类和不同的固结排水条件，合理选用直剪试验指标
- ☞ 砂土：c', ϕ' 三轴CD试验与直剪试验（直剪偏大）
- ☞ 粘土：有效应力指标：三轴CD或CU试验

  总应力指标：三轴CU、UU试验

  或直剪cq、q试验

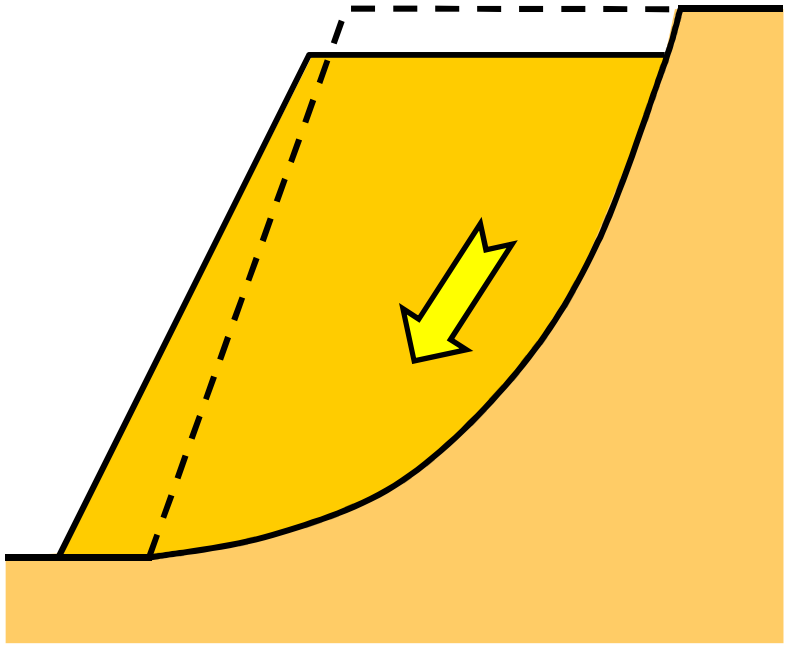
土的强度指标的工程应用

- 峰值强度指标与残余强度指标

☞ 峰值强度 ：一般问题

☞ 残余强度

- 古旧滑坡
- 断层夹泥
- 大变形问题

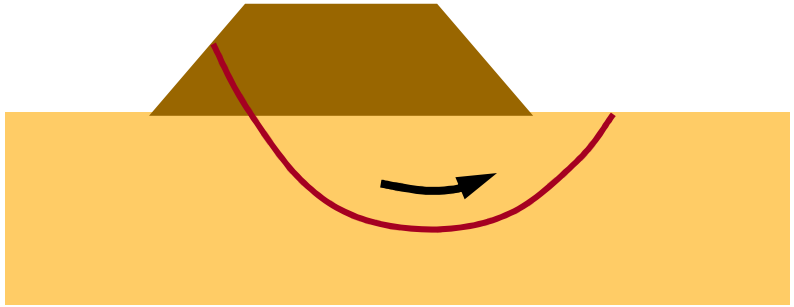


土的强度指标的工程应用

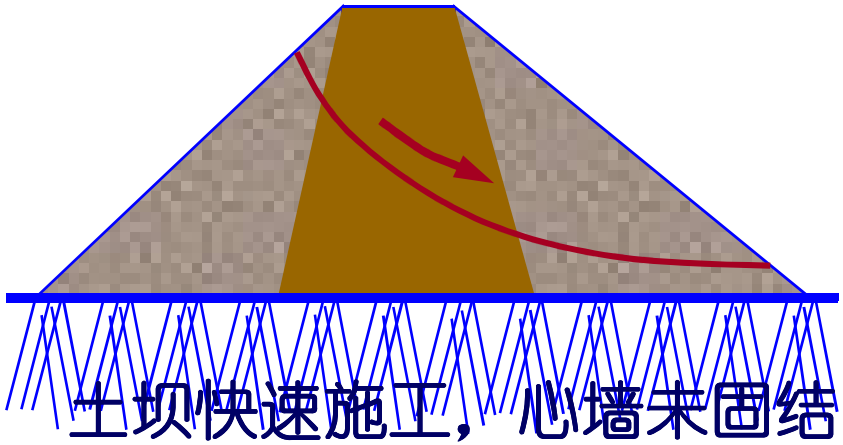
名称	指标	应用
不排水剪 （快剪）	c_u、ϕ_u c_q、ϕ_q	软土地基 快速施工
固结不排水剪 （固结快剪）	c_{cu}、ϕ_{cu} c_{cq}、ϕ_{cq}	固结完成后 受突然荷载
固结排水剪 （慢剪）	c_d、ϕ_d c_s、ϕ_s	地基透水性强 施工较慢或正常运行期

土的强度指标的工程应用

- 不固结不排水剪（快剪） c_u、ϕ_u（c_q、ϕ_q）

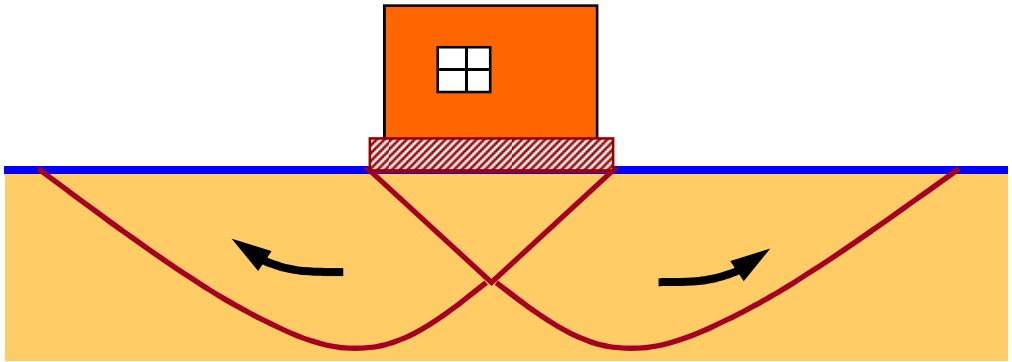


软土地基上的快速填方



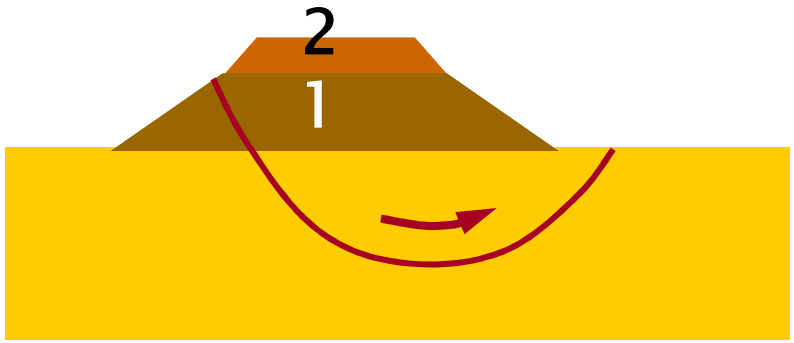
土坝快速施工，心墙未固结

粘土地基上快速施工的建筑物

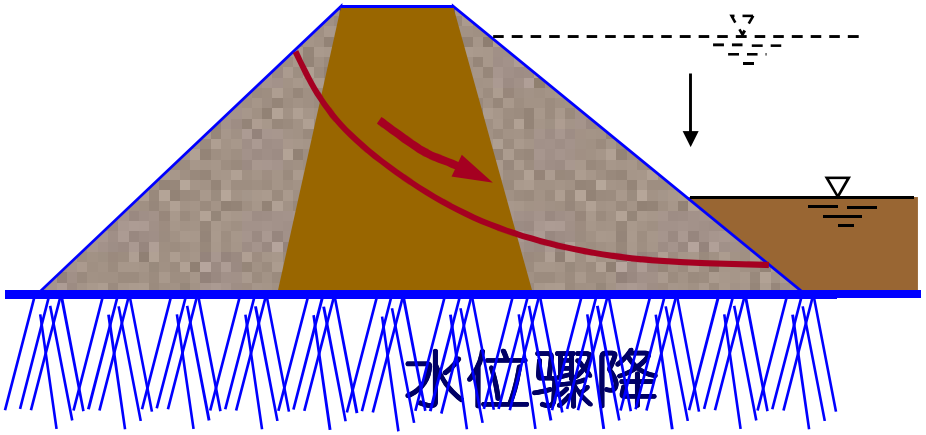


土的强度指标的工程应用

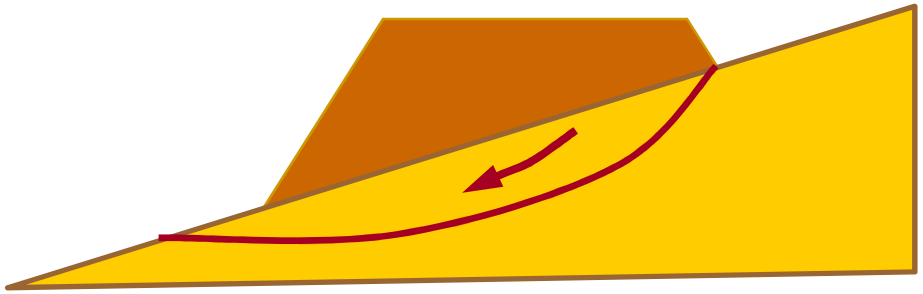
- 固结不排水剪（固结快剪） c_{cu}、ϕ_{cu}（c_{cq}、ϕ_{cq}）



在1层固结后，施工2层

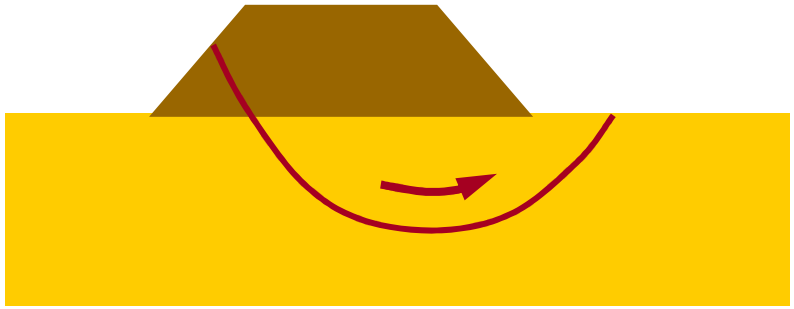


在天然土坡上快速填方

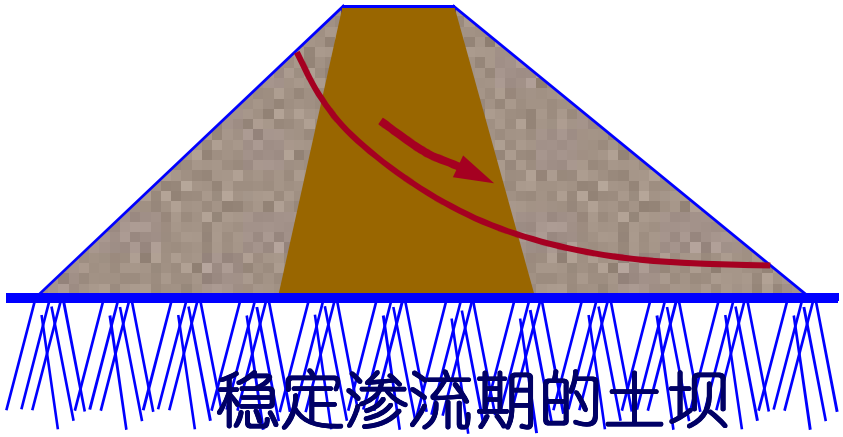


土的强度指标的工程应用

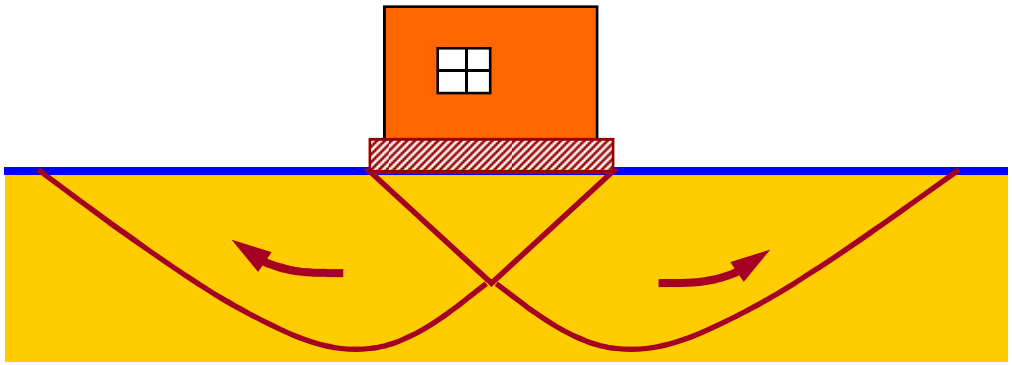
- 固结排水剪（慢剪）　c_{cd}、ϕ_{cd}（c_s、ϕ_s）



粘土地基上的分层慢速填方



稳定渗流期的土坝



粘土地基上慢速施工的建筑物

土的抗剪强度指标小结

- 强度指标的类型
- 总应力指标与有效应力指标
- 三轴试验强度指标
- 直剪试验强度指标
- 土的强度指标的工程应用

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论 √

§5.3 土的抗剪强度的测定试验 √

§5.4 应力路径与破坏主应力线 √

§5.5 土的抗剪强度指标 √

§5.6 土的动强度与砂土的振动液化

第5章： 土的抗剪强度

§5.1 概述 √

§5.2 土的抗剪强度理论 √

§5.3 土的抗剪强度的测定试验 √

§5.4 应力路径与破坏主应力线 √

§5.5 土的抗剪强度指标 √

小　　结

- ☞ 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

Ref: 李广信 张丙印 于玉贞 土力学 第三版 清华大学出版社 2022.08

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com