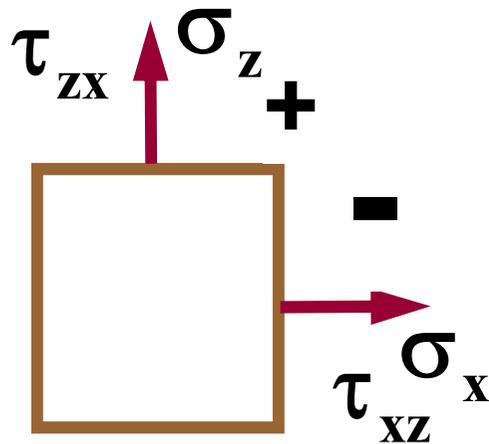
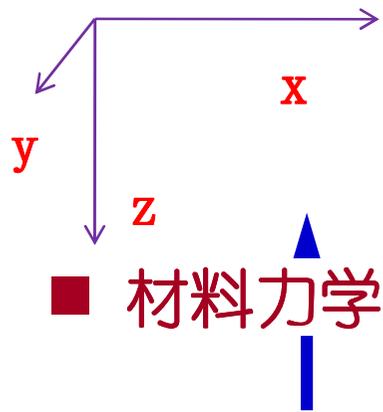


# 第3章：土体中的应力计算

- § 3.1 应力状态及应力应变关系
- § 3.2 有效应力原理
- § 3.3 自重应力
- § 3.4 基底压力计算
- § 3.5 地基附加应力
- § 3.6 常规三轴压缩试验



# 土力学中应力符号的规定



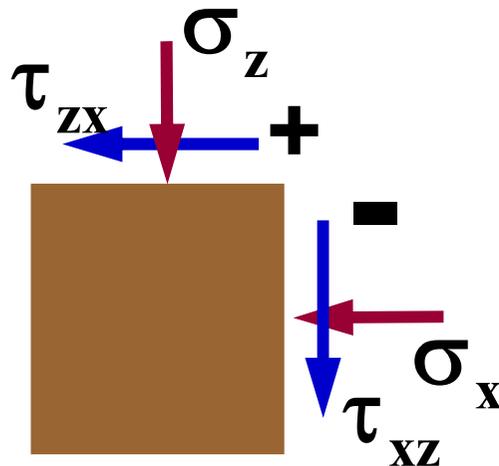
正应力

剪应力

拉为正  
压为负

顺时针为正  
逆时针为负

土力学



压为正  
拉为负

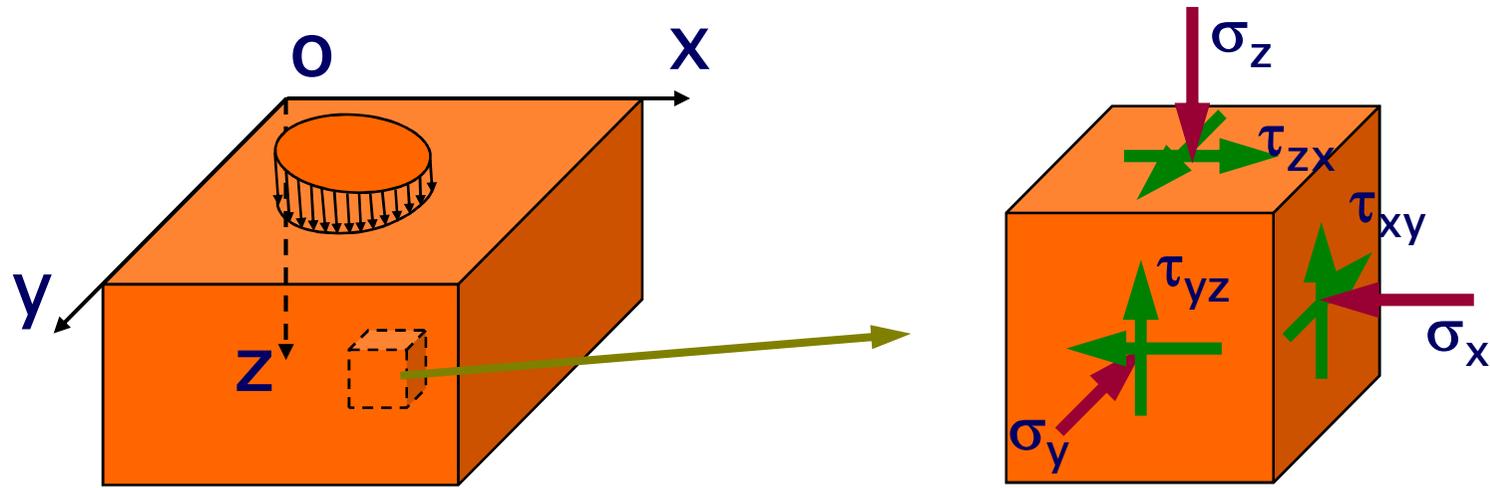
逆时针为正  
顺时针为负

P87 3.1

正应力与轴相反时，切应力与轴相反时为正 P56

# 地基中的应力状态 (1)

## ■(1) 三维应力状态 (一般应力状态)



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

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

地基中常见的应力状态有哪些呢？

# 地基中的应力状态 (1)

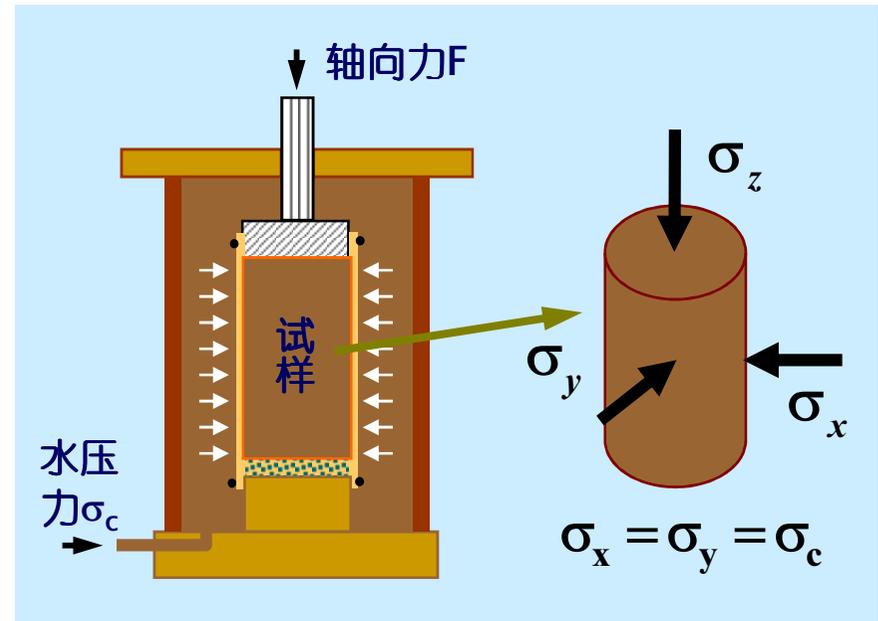
## ■ (4) 三维应力状态 (三轴应力状态)

◇ 应变条件  $\varepsilon_x = \varepsilon_y$   
 $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$

◇ 应力条件  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$   
 $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$

$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c; \sigma_z$

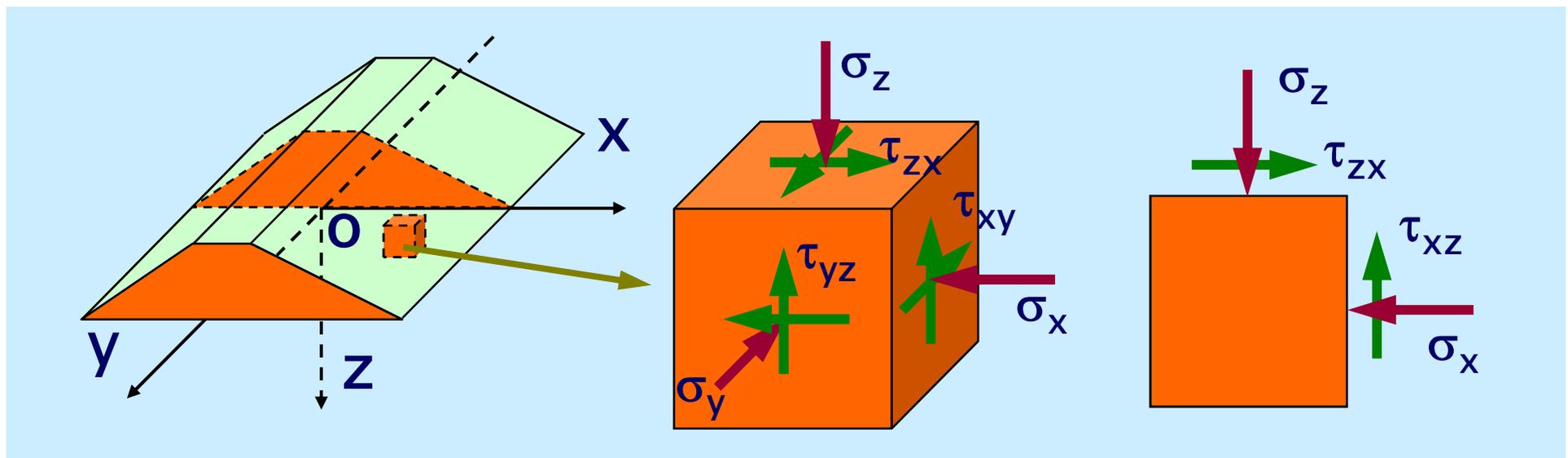
$\varepsilon_x = \varepsilon_y; \varepsilon_z$



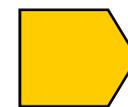
$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_c & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_c & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

## 地基中的应力状态 (2)

### ■ (2) 二维应力状态 (平面应变状态)



- 垂直于y轴断面的几何形状与应力状态相同
- 沿y方向有足够长度,  $L/B \geq 10$
- 在x, z平面内可以变形, 但在y方向没有变形



$$\begin{aligned}\epsilon_y &= 0 \\ \gamma_{yx} &= \gamma_{yz} = 0\end{aligned}$$

## 地基中的应力状态 (2)

### ■ (2)二维应力状态 (平面应变状态)

◇ 应变条件  $\varepsilon_y = 0$   
 $\gamma_{yx} = \gamma_{yz} = 0$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

◇ 应力条件  $\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_z) = 0$   
 $\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ \tau_{zx} & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

◇ 独立变量

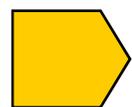
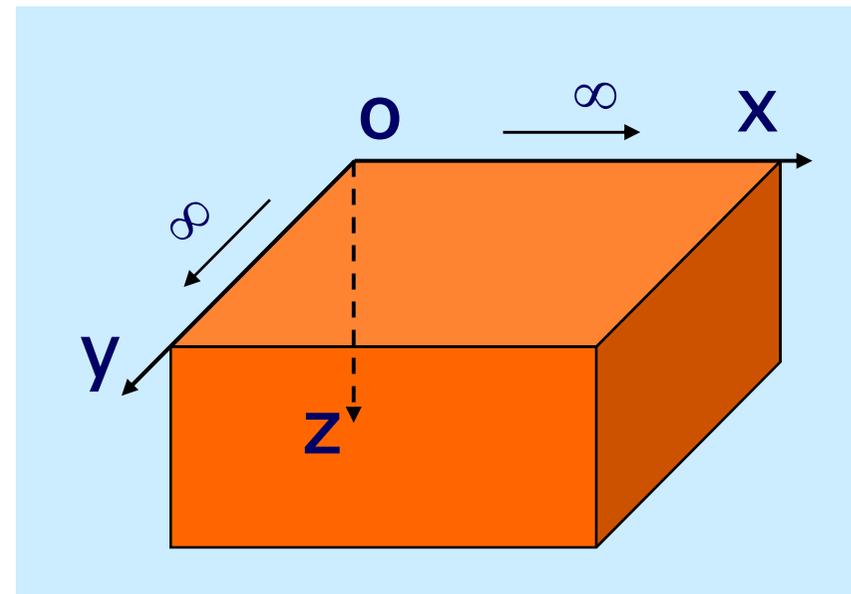
$$\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}; \quad \varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}$$



## 地基中的应力状态 (3)

### ■ (3)侧限应力状态：指侧向应变为零的一种应力状态

- 水平地基→半无限空间体
- 半无限弹性地基内的自重应力只与Z有关
- 土质点或土单元不可能有侧向位移→侧限应变条件
- 任何竖直面都是对称面



应变条件

P87-88 一段表述

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x = 0$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$$

## 地基中的应力状态 (3)

■ (3)侧限应力状态：侧向应变为零的一种应力状态

◇ 应变条件

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x = 0$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$$

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

◇ 应力条件

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_y + \sigma_z) = 0$$

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix}$$

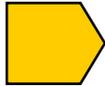
$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z = K_0 \sigma_z$$

◇ 独立变量

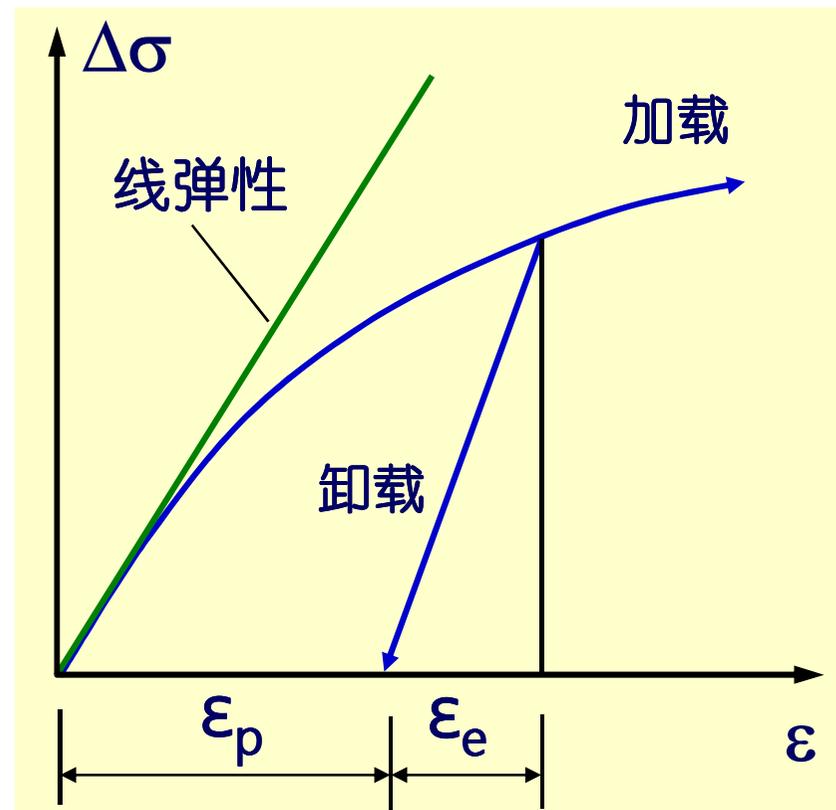
$$\sigma_z; \quad \varepsilon_z = F(z)$$

侧压力系数

# 应力计算时的基本假定

- 碎散体  连续介质 (宏观平均)
- 非线性弹塑性  线弹性体 (应力较小时)
- 成层土各向异性  均质各向同性体 (土层性质变化不大)

$E$ 、 $\mu$ 与位置和方向无关



- 理论：弹性力学解→求解“弹性”土体中的应力
- 方法：解析方法→优点：简单，易于绘成图表等

# 小 结

 土力学中应力符号的规定

 地基中常见的应力状态

 应力计算时的基本假定



- 三维应力状态
- 三轴应力状态
- 平面应变状态
- 侧限应力状态

- 连续
- 弹性
- 均质各向同性

# 第3章：土体中的应力计算

§ 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓

§ 3.2 有效应力原理



• 有效应力原理

§ 3.3 自重应力 ✓

• 有效应力计算

§ 3.4 基底压力计算 ✓

• 孔压系数

§ 3.5 地基附加应力 ✓

§ 3.6 常规三轴压缩试验



# 太沙基 – 土力学的奠基人

太沙基

(Karl Terzaghi)

(1883–1963)

1921–1923年提出土的有效应力原理和土的固结理论，1925年出版经典著作《土力学》，首次将各种土工问题归纳成为系统的有科学依据的计算理论，奠定了他作为土力学创始人的地位



# Soil Mechanics in Engineering Practice

Third Edition

*Karl Terzaghi*

Late Professor of the Practice of Civil Engineering  
Harvard University  
Lecturer and Research Consultant in Civil Engineering  
University of Illinois

*Ralph B. Peck*

Professor of Foundation Engineering, Emeritus  
University of Illinois

*Gholamreza Mesri*

Professor of Civil Engineering  
University of Illinois



A Wiley-Interscience Publication

JOHN WILEY & SONS, INC.

New York • Chichester • Brisbane • Toronto • Singapore



## § 3.2 有效应力原理

# 有效应力原理

- 土体是由固体颗粒骨架、孔隙流体（水和气）三相构成的碎散材料，受外力作用后，总应力由土骨架和孔隙流体共同承受
  - 对所受总应力，骨架和孔隙流体如何分担？
  - 它们如何传递和相互转化？
  - 它们对土的变形和强度有何影响？



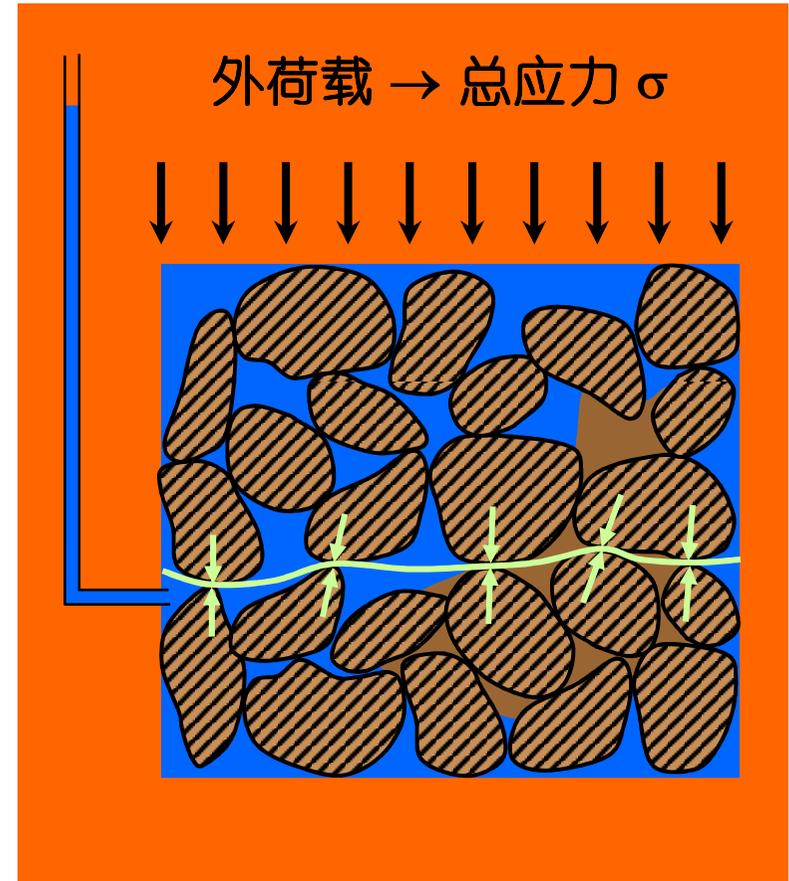
P89 3.2.1



Terzaghi的有效应力原理和固结理论

# 饱和土中的应力形态

- 饱和土是由固体颗粒骨架和充满其间的孔隙水组成的两相体。受外力后，总应力分为两部分承担：
  - ☞ 由土骨架承担，并通过颗粒之间的接触面进行应力的传递，称之为**粒间应力**
  - ☞ 由孔隙水来承担，通过连通的孔隙水传递，称之为**孔隙水压力**。孔隙水不能承担剪应力，但能承受法向应力





# 饱和土的有效应力原理

☞ 饱和土体内任一平面上受到的总应力可分为两部分  $\sigma'$  和  $u$ ，并且：
$$\sigma = \sigma' + u$$

☞ 土的变形与强度都只取决于有效应力

一般地， 
$$[\sigma] = [\sigma'] + [u]$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma'_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma'_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma'_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u & 0 & 0 \\ 0 & u & 0 \\ 0 & 0 & u \end{bmatrix}$$

总应力已知或易知

孔隙水压测定或计算

$$\sigma' = \sigma - u$$



有效应力

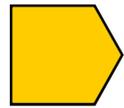
P90 考概念?两小段

# 有效应力原理的讨论

◇ 孔隙水压力的作用

◇ 有效应力的作用

◇ 讨论



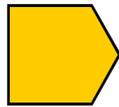
- ◇ 它在各个方向相等，只能使土颗粒本身受到等向压力，不会使土颗粒移动，导致孔隙体积发生变化。由于颗粒本身压缩模量很大，故土粒本身压缩变形极小
- ◇ 水不能承受剪应力，对土颗粒间摩擦、土粒的破碎没有贡献
- ◇ 因而孔隙水压力对变形强度没有直接影响，称为中性应力

# 有效应力原理的讨论

◇ 孔隙水压力的作用

◇ 有效应力的作用

◇ 讨论



◇ 是土体发生变形的原因：  
颗粒间克服摩擦相对滑移、滚动以及在接触点处由于应力过大而破碎均与 $\sigma'$ 有关

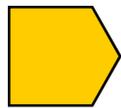
◇ 是土体强度的成因：土的凝聚力 and 粒间摩擦力均与 $\sigma'$ 有关

# 有效应力原理的讨论

◇ 孔隙水压力的作用

◇ 有效应力的作用

◇ 讨论

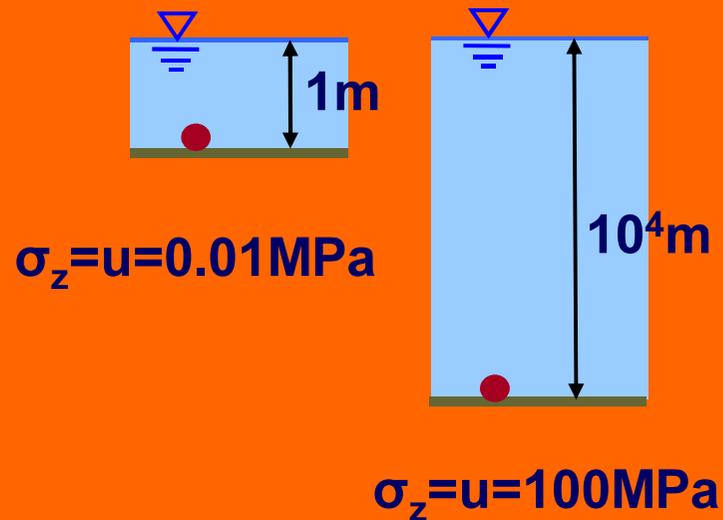


四周均承受，只有作用于砂粒上的重力与浮力之差

DEL

讨论：

海底与土粒间的接触压力  
哪一种情况下大？



# 第3章：土体中的应力计算

§ 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓

§ 3.2 有效应力原理

§ 3.3 自重应力 → • 水平地基中的自重应力

§ 3.4 基底压力计算

§ 3.5 附加应力

§ 3.6 常规三轴压缩试验



P91

# 土体的自重应力

- **定义：**在修建建筑物以前，地基中由土体本身的有效重量而产生的应力
- **目的：**确定土体的初始应力状态
- **假定：**水平地基 → 半无限空间体 → 半无限弹性体  
有侧限应变条件 → 一维问题
- **计算：** 地下水位以上用天然容重  
地下水位以下用浮容重

## § 3.1 自重应力

# 土体的自重应力

### 3.3.1 地基中自重应力计算的基本方法

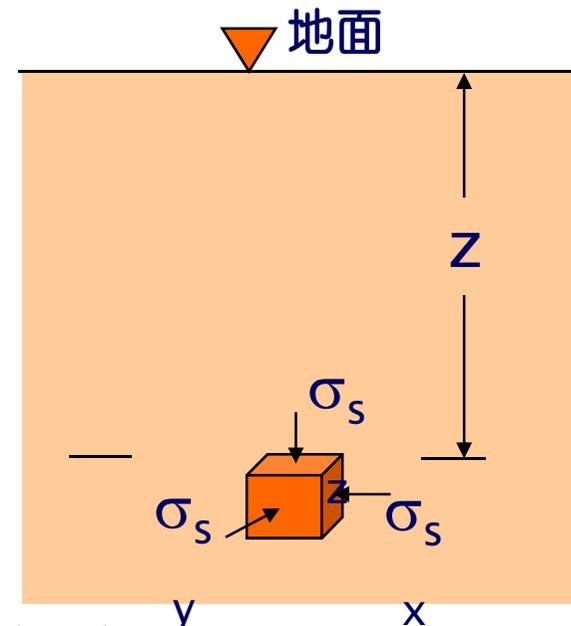
- 竖直向自重应力：土体中无剪应力存在，故地基中Z深度处的竖直向自重应力等于单位面积上的土柱重量

- 均质地基：
$$\sigma_{sz} = \gamma z$$

- 水平向自重应力：
$$\sigma_{sx} = \sigma_{sy} = K_0 \sigma_{sz}$$

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

$K_0$  为侧压力系数，也称为静土压力系数  
该系数与土的性质、结构与形成条件有关，可通过室内或原位试验测定

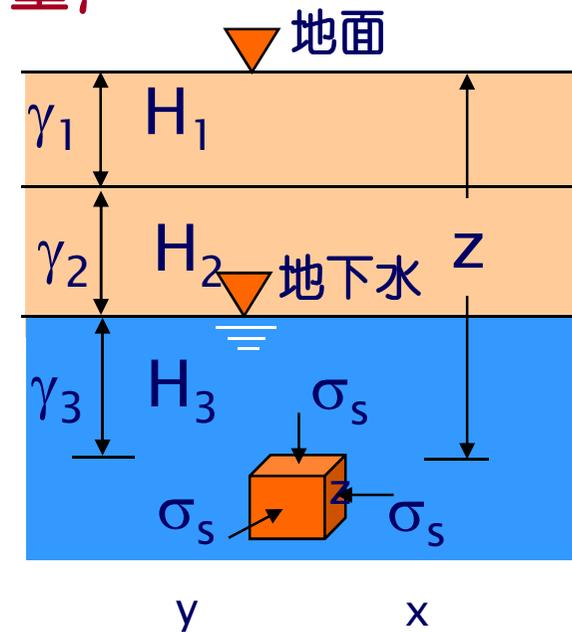


## § 3.1 自重应力

# 土体的自重应力

• 成层地基：
$$\sigma_{sz} = \sum \gamma_i H_i$$

☞ 容重： 地下水位以上用天然容重 $\gamma$   
地下水位以下用浮容重 $\gamma'$

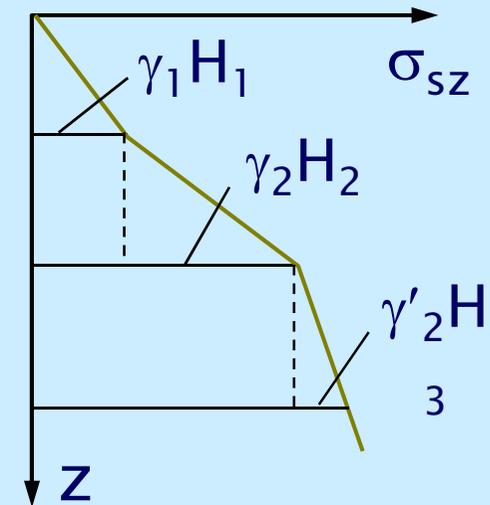
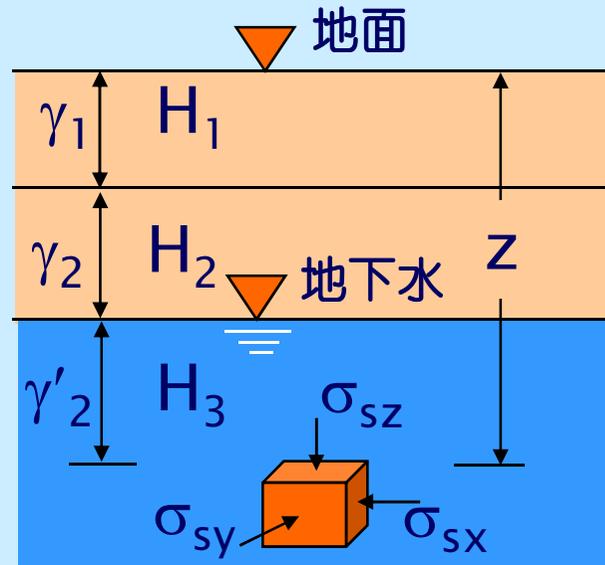


P92 3.3.2 地下水 静水与自重应力的计算

1 地基中有地下水存在时；2 地基中有不透水层存在时

# 土体的自重应力

## ■ 分布规律



- ☞ 分布线的斜率是容重
- ☞ 在等容重地基中随深度呈直线分布
- ☞ 自重应力在成层地基中呈折线分布
- ☞ 在土层分界面处和地下水位处发生转折或突变（水平应力）

列表格式（由左至右）  
 土层分布  
 x-z坐标系  
 有效自重应力 水压力

# 饱和土孔压和有效应力计算

- 自重应力情况  
(侧限应变条件)
    - 3.3.2 P92
      - 静水条件
      - 稳定渗流条件
  - 附加应力情况
    - 3.3.3 P93
      - 单向压缩应力状态
      - 等向压缩应力状态
      - 偏差应力状态
- 地下水水位  
海洋土  
毛细饱和区

# 自重应力情况

## ■ 静水条件：地下水位

- 总应力：单位土柱和水柱的总重量

$$\sigma = \gamma H_1 + \gamma_{\text{sat}} H_2$$

- 孔隙水压力：净水压强

$$u = \gamma_w H_2$$

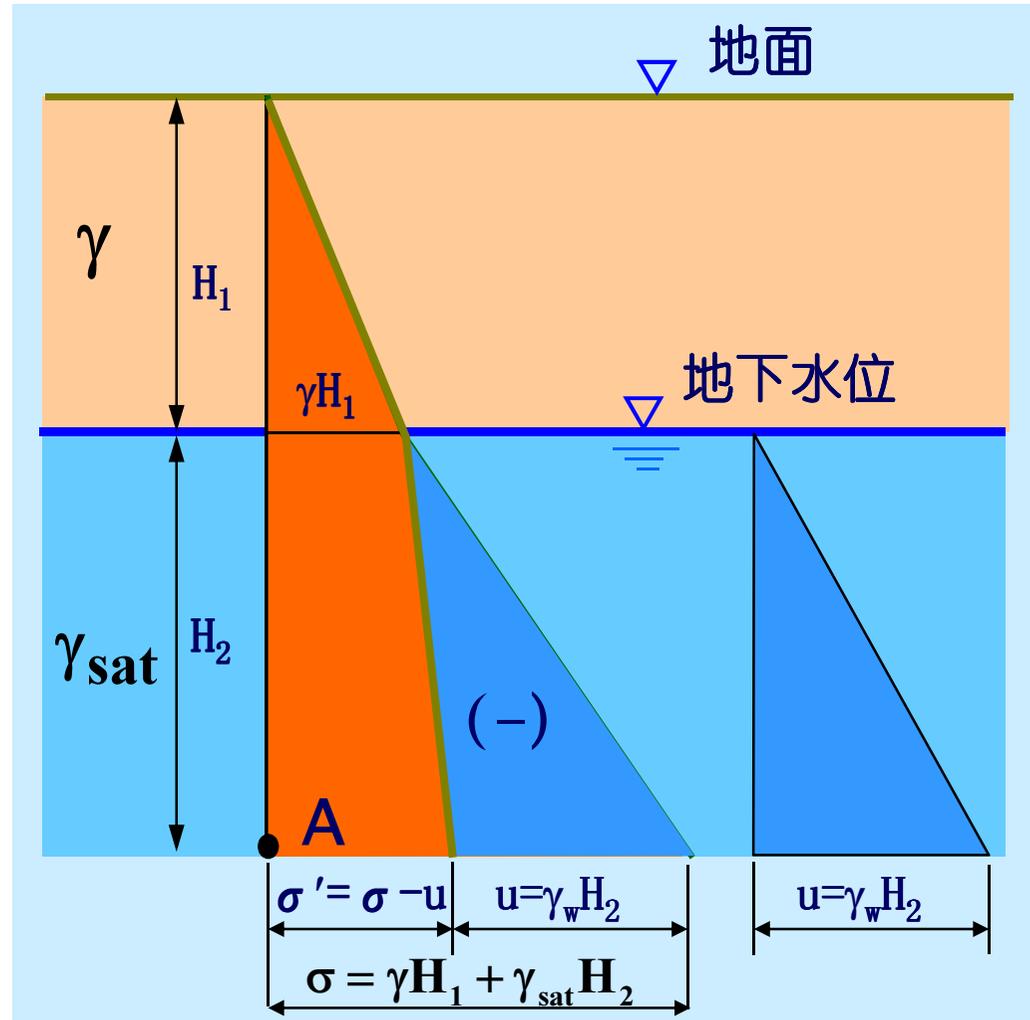
- 有效应力：

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - u \\ &= \gamma H_1 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) H_2 \\ &= \gamma H_1 + \gamma' H_2 \end{aligned}$$

3.3.2 P92

列表格式

①	②	③	④
H	$\sigma$	u	$\sigma'$



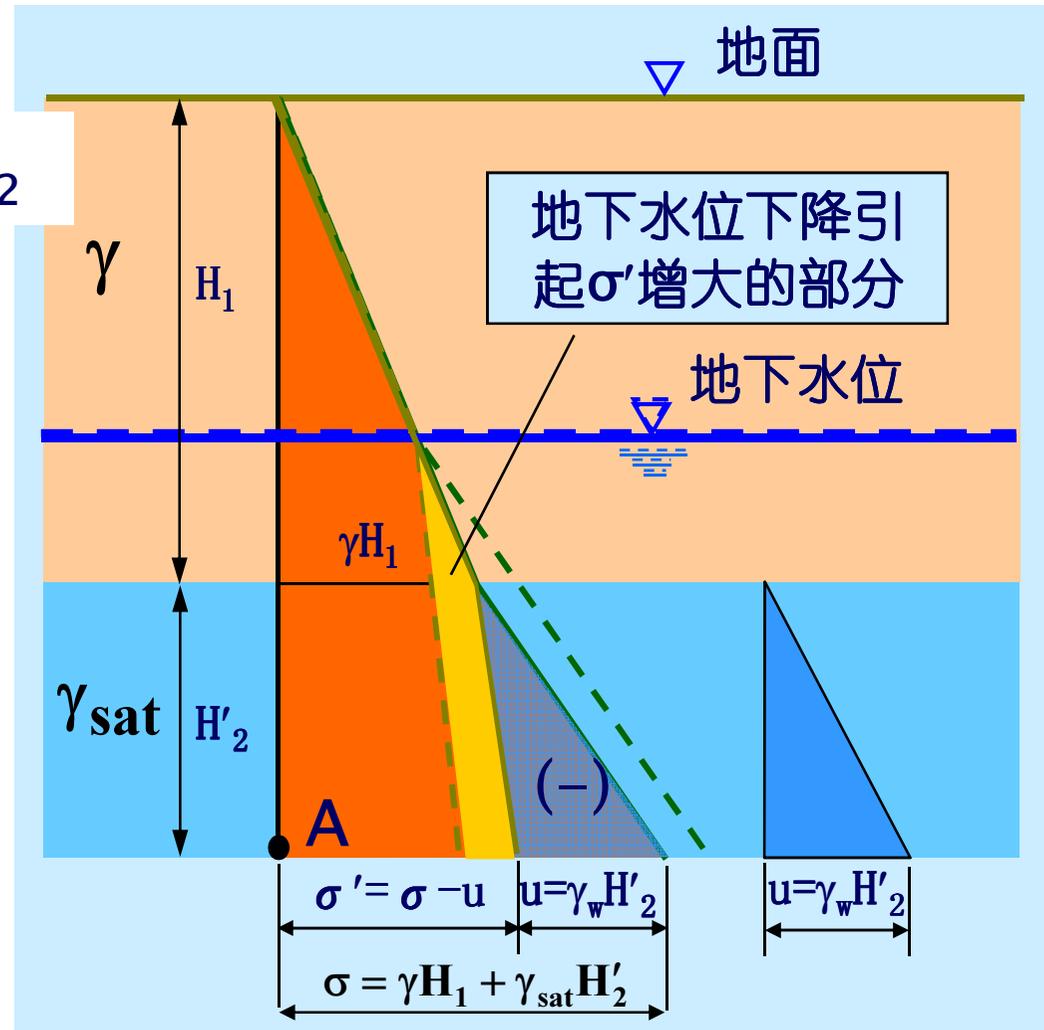
# 自重应力情况

## ■ 静水条件：水位下降

- 总应力： $\sigma = \gamma H_1 + \gamma_{\text{sat}} H'_2$
- 孔隙水压力： $u = \gamma_w H'_2$
- 有效应力：

$$\sigma' = \sigma - u$$

↑  
➡ 地下水位下降会引起 $\sigma'$ 增大，土会产生压缩，这是城市抽水引起地面沉降的一个主要原因



## § 3.4 有效应力原理

# 自重应力情况

### ■ 静水条件：海洋土

- 总应力：单位土柱和水柱的总重量

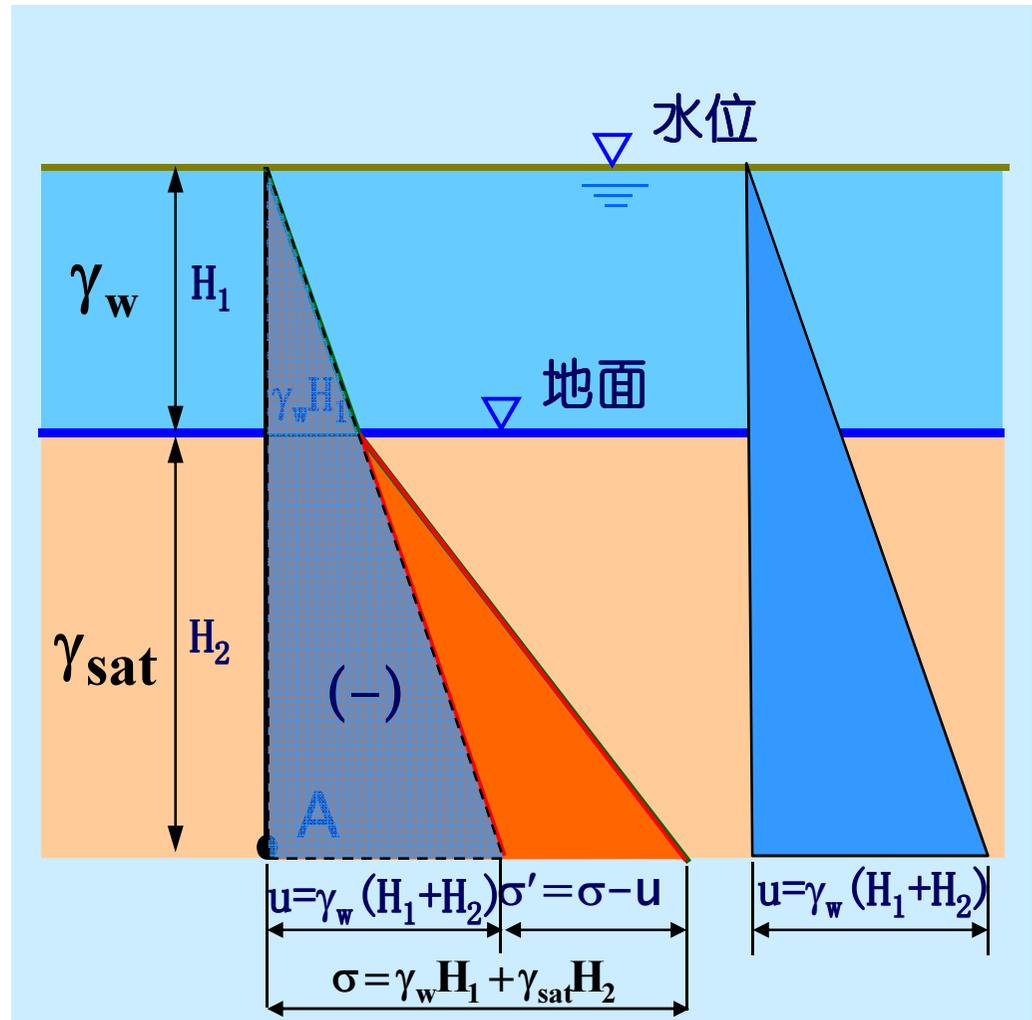
$$\sigma = \gamma_w H_1 + \gamma_{\text{sat}} H_2$$

- 孔隙水压力：净水压强

$$u = \gamma_w (H_1 + H_2)$$

- 有效应力：

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma - u \\ &= \gamma' H_2\end{aligned}$$



## § 3.4 有效应力原理

# 自重应力情况

### ■ 静水条件：毛细饱和区

- 总应力：单位土柱和水柱的总重量

$$\sigma = \gamma H_1 + \gamma_{\text{sat}} H$$

- 孔隙水压力：净水压强

$$u = \gamma_w H_2$$

- 有效应力：

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - u \\ &= \gamma H_1 + \gamma_{\text{sat}} H_c + \gamma' H_2 \end{aligned}$$

3.3.2 P92

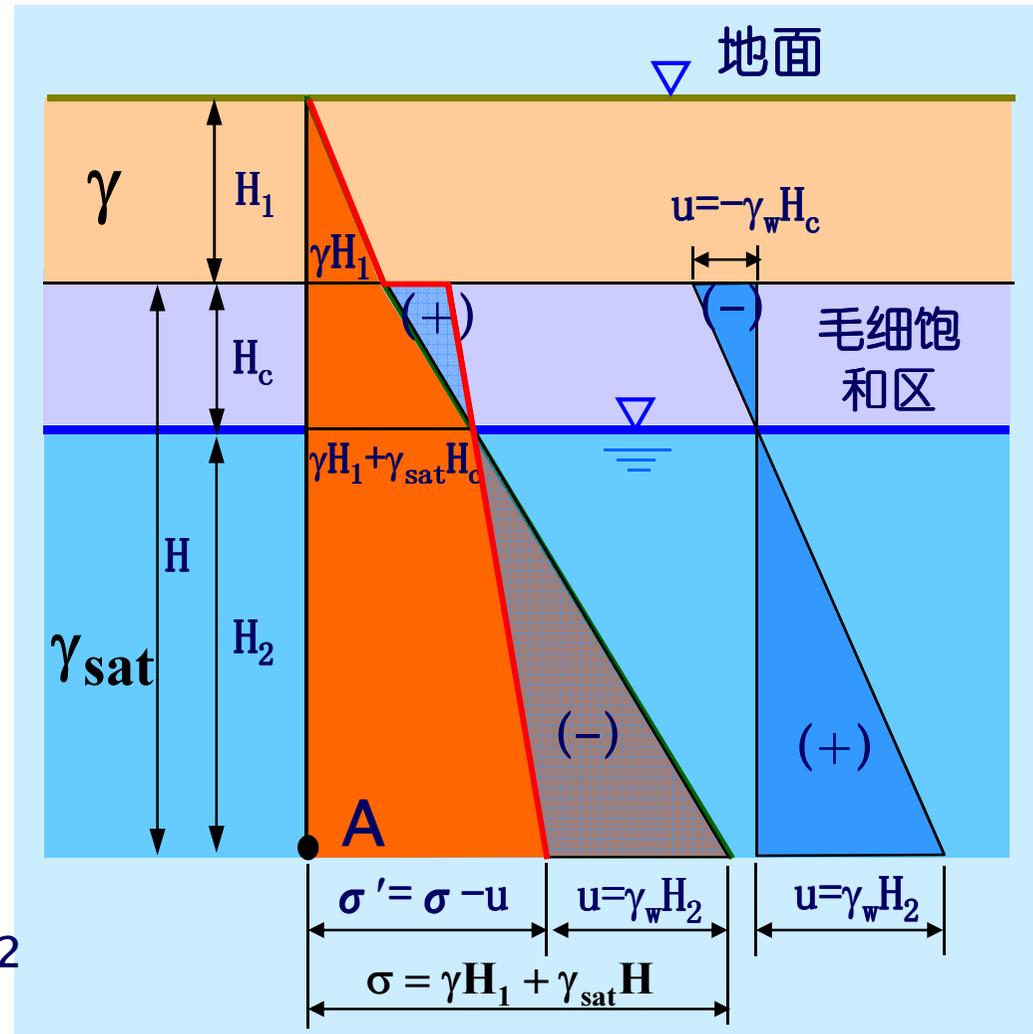
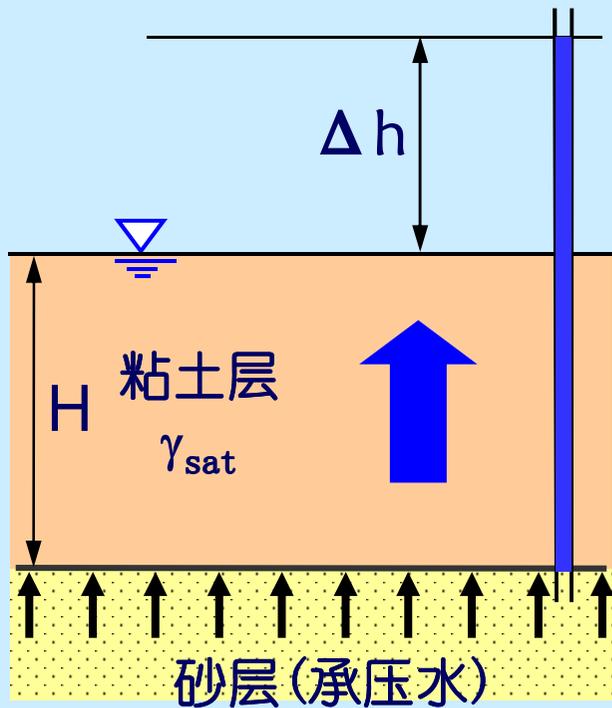


图3-10<sub>30</sub>

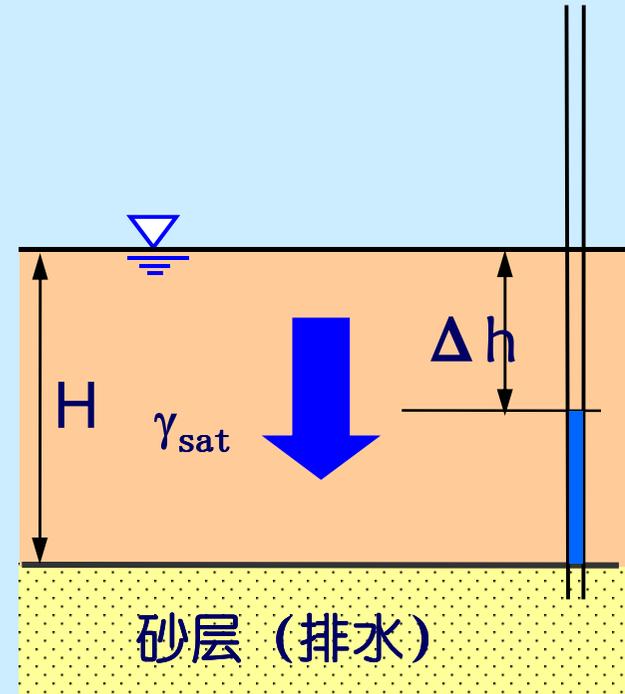
§ 3.4 有效应力原理

# 自重应力情况

■ 稳定渗流条件:



向上渗流



向下渗流

3.3.3 P93

# 自重应力情况

## ■ 稳定渗流条件：向上渗流

- 总应力：单位土柱和水柱的总重量

$$\sigma = \gamma_{\text{sat}} H$$

- 孔隙水压力：净水压强

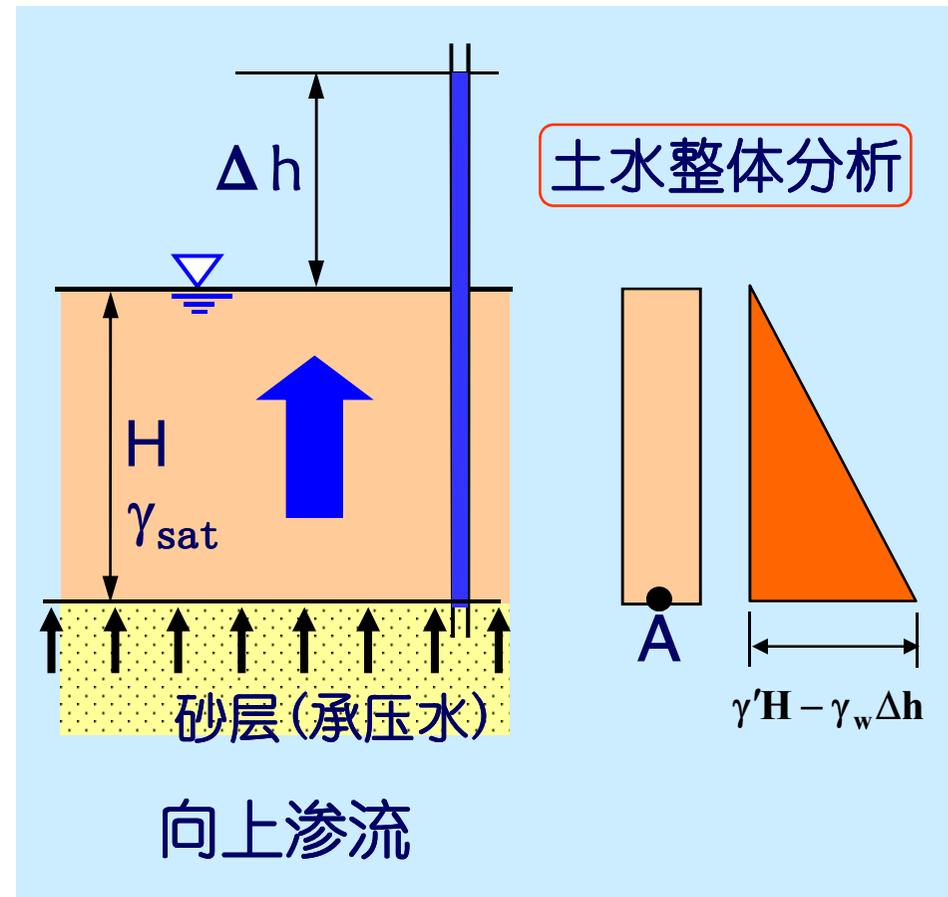
$$u = \gamma_w (H + \Delta h)$$

- 有效应力：

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$= \gamma_{\text{sat}} H - \gamma_w H - \gamma_w \Delta h$$

$$= \gamma' H - \gamma_w \Delta h$$



P93



渗透压力，向上渗流使得有效应力减小  
称渗流浮托

# 自重应力情况

## ■ 稳定渗流条件：向下渗流

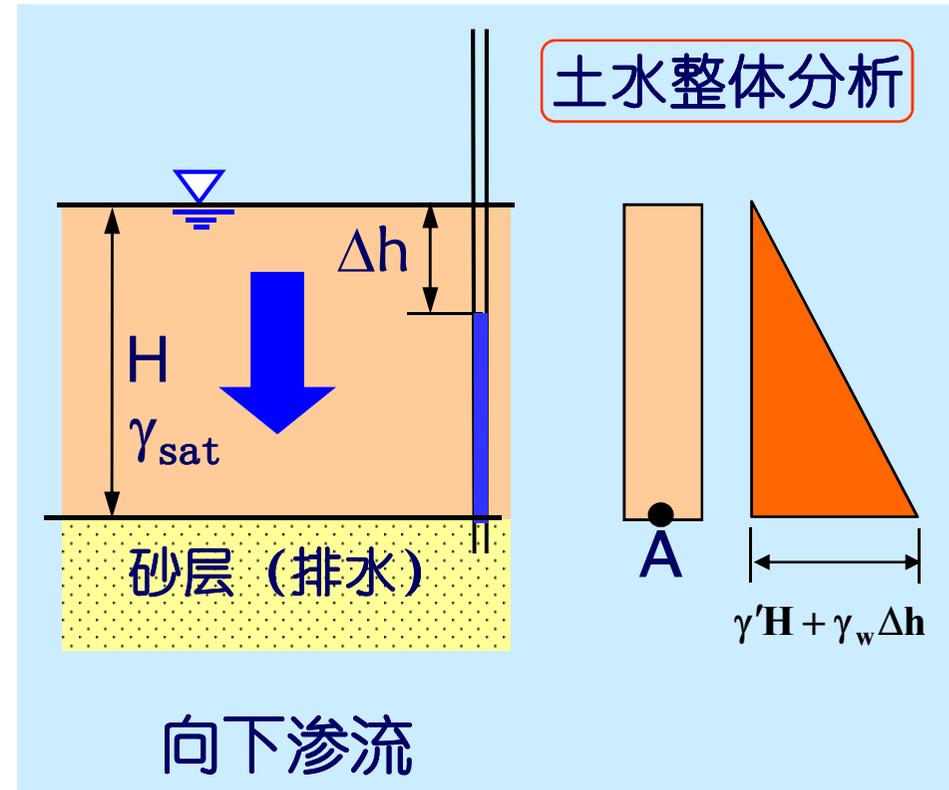
• 总应力： $\sigma = \gamma_{\text{sat}} H$

• 孔隙水压力：

$$u = \gamma_w (H - \Delta h)$$

• 有效应力：

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma - u \\ &= \gamma_{\text{sat}} H - \gamma_w H + \gamma_w \Delta h \\ &= \gamma' H + \gamma_w \Delta h\end{aligned}$$



渗透压力，向下渗流使得有效应力增加  
可导致土层发生压密变形，称渗流压密

# 自重应力情况

## ■ 稳定渗流条件：向上渗流

- 孔隙水压力：净水压强

$$u = \gamma_w(H + \Delta h)$$

- 有效应力：自重应力+渗透力

自重应力：  $\sigma'_{sz} = \gamma' H$

渗透应力：  $\sigma'_{jz} = -\frac{J}{A} = -\frac{jV}{A} = -jH$   
 $= -\gamma_w \Delta h$

J为总渗透力

j为渗透力 =  $\gamma_w i$

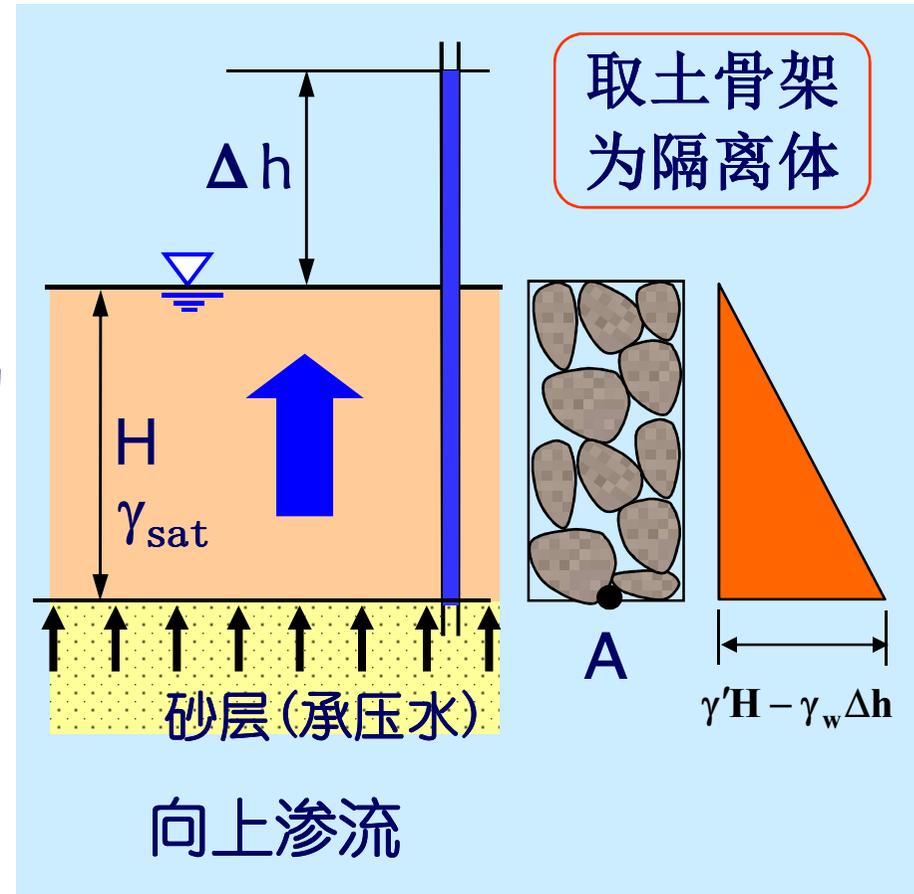
$$\sigma' = \gamma' H - \gamma_w \Delta h$$

- 总应力：

$$\sigma = \sigma' + u = \gamma' H - \gamma_w \Delta h + \gamma_w (H + \Delta h) =$$

$$\gamma_{sat} H$$

P95  
P96 例题3-1&3-2 重要



# 第3章：土体中的应力计算

§ 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓

§ 3.2 有效应力原理 ✓

§ 3.3 自重应力 ✓

§ 3.4 基底压力计算 →

- 影响因素
- 计算方法
- 分布规律

§ 3.5 附加应力

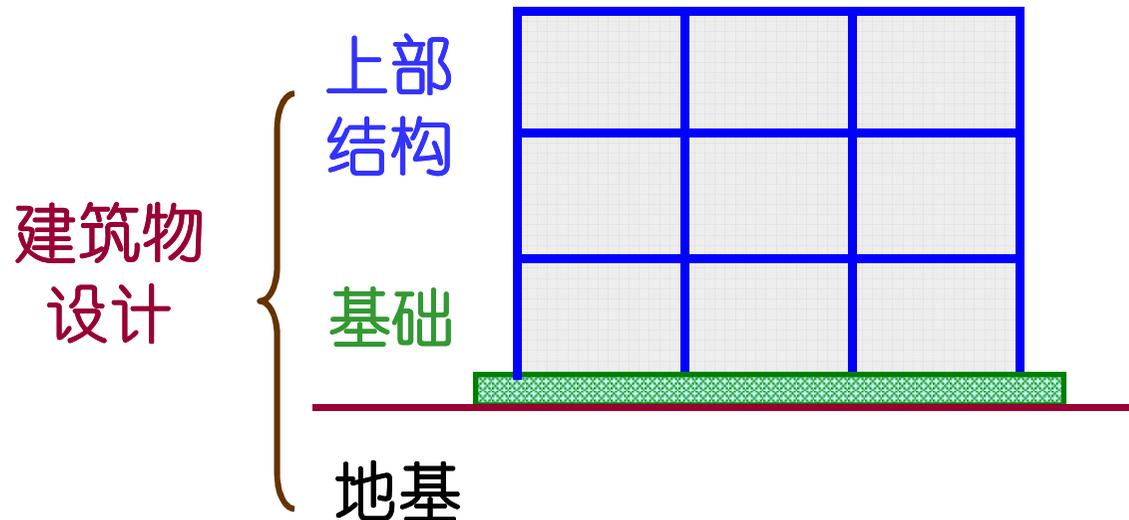
§ 3.6 常规三轴压缩试验



建筑物荷载通过基础传给地基称为基础底面压力，即基底压力，与基底压力相对应的地基土对基底的反作用力称为地基反力。

## § 3.4 基底压力计算

# 基底压力计算



- 👉 **基底压力**：基础底面传递给地基表面的压力，也称基底接触压力。
- 👉 基底压力既是计算地基中附加应力的外荷载，也是计算基础结构内力的外荷载，上部结构自重及荷载通过基础传到地基之中

与基底压力相对应的地基土对基底的反作用力称为地基反力。

3.4 P97

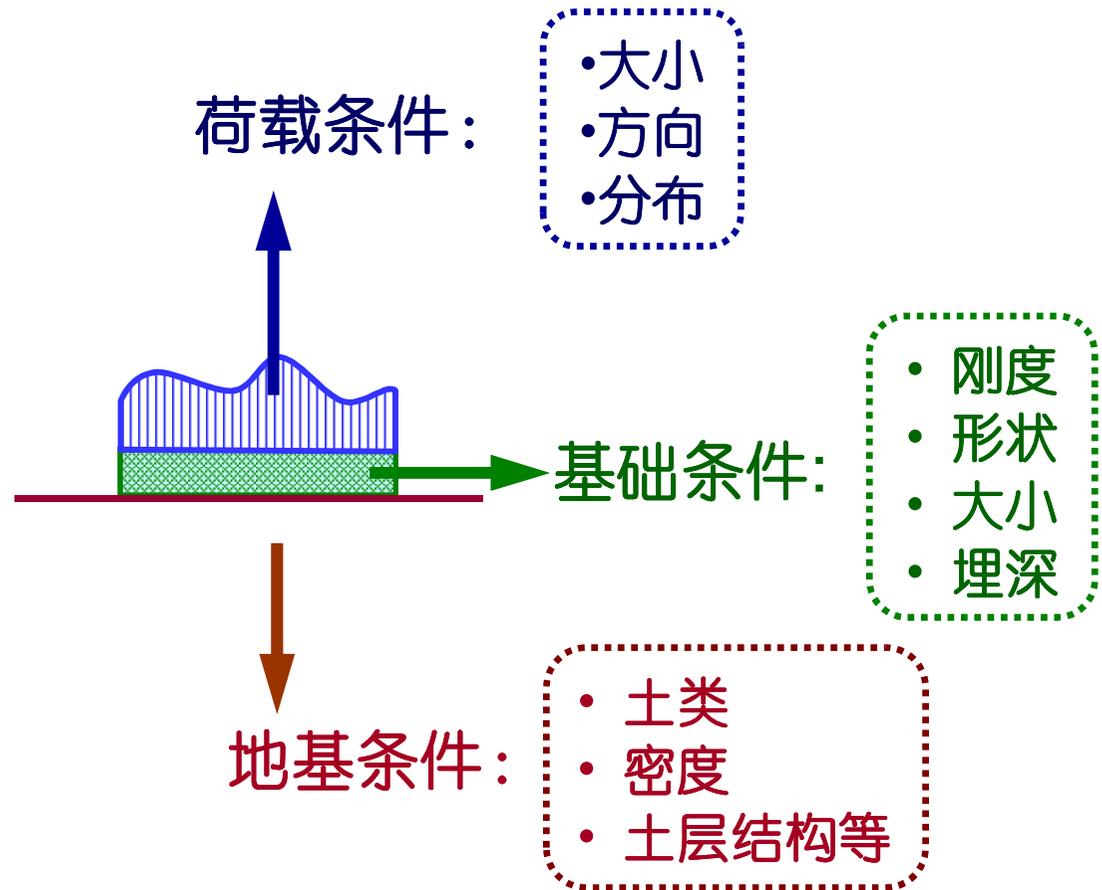
基底压力与地基反力二者方向相反，大小相等



# 基底压力的影响因素

■ 基底压力是地基和基础在上部荷载作用下相互作用的结果，受荷载条件、基础条件和地基条件的影响

暂不考虑上部结构的影响，用荷载代替上部结构，使问题得以简化



## § 3.4 基底压力计算

# 基底压力的分布

### ■ 弹性地基，完全柔性基础

- ◇ 基础抗弯刚度 $EI=0 \rightarrow M=0$
- ◇ 基础变形能完全适应地基表面的变形
- ◇ 基础上下压力分布必须完全相同，若不同将会产生弯矩

### ■ 弹性地基，绝对刚性基础

- ◇ 抗弯刚度 $EI=\infty \rightarrow M \neq 0$
- ◇ 基础只能保持平面下沉不能弯曲
- ◇ 分布：中间小，两端无穷大

P98-99 3.4.1

### 1 基础刚度的影响

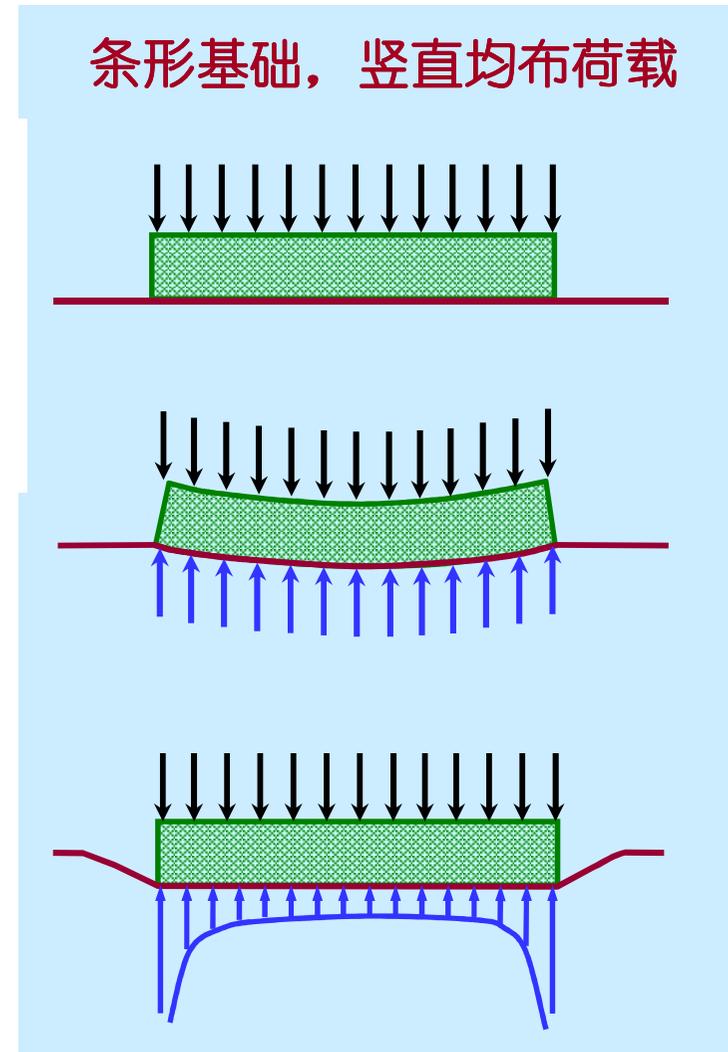


图3-16

## § 3.4 基底压力计算

# 基底压力的分布

### ■ 弹塑性地基，有限刚度基础

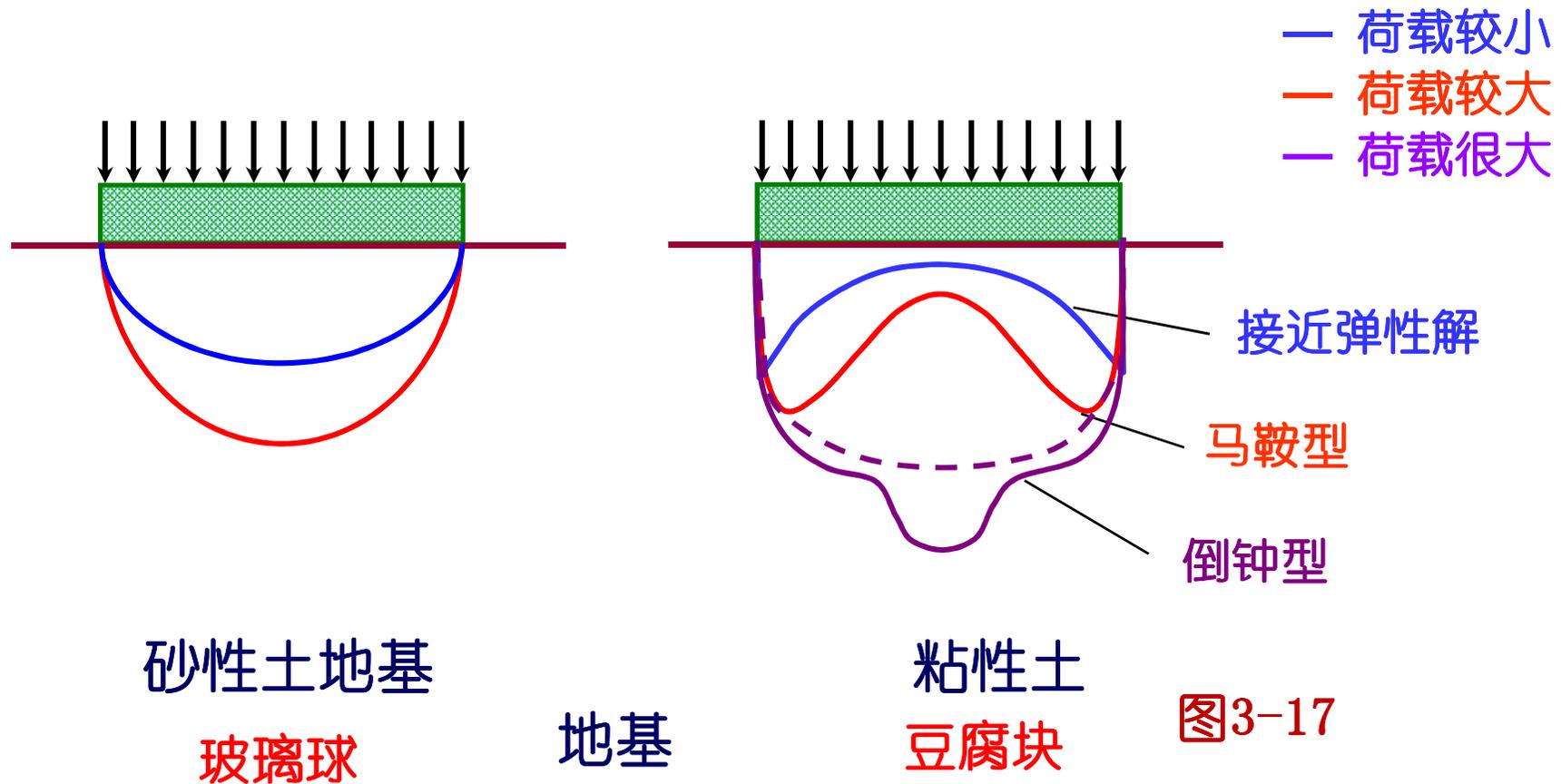


图3-17

P99 3.4.1

2 荷载及土性的影响

# 基底压力的简化计算

基底压力的  
分布形式十  
分复杂

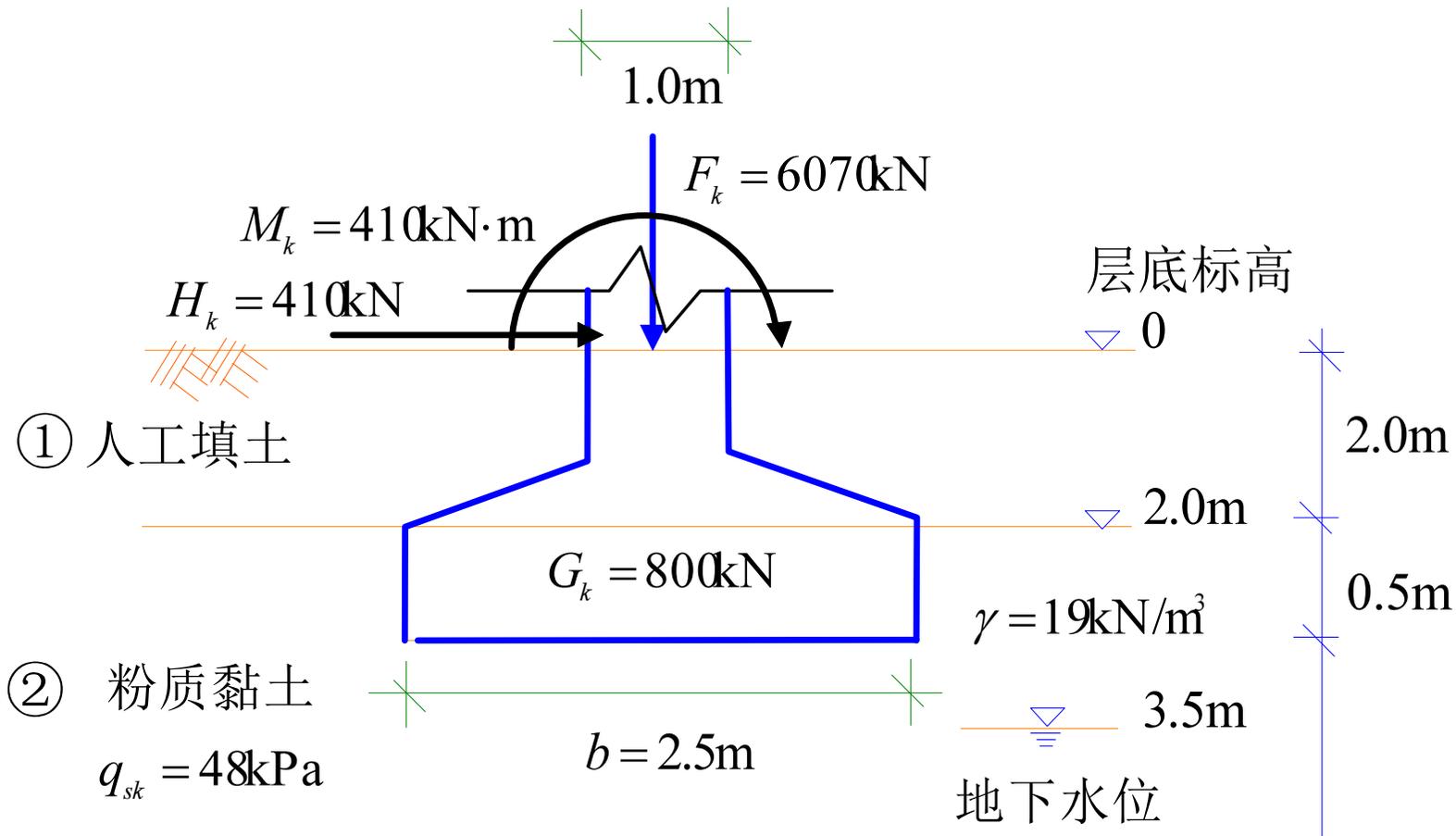
圣维南原理：

基底压力分布的影响仅限于一定深度范围，之外的地基附加应力只取决于荷载合力的大小、方向和位置

如果作用在弹性体某一小块面积（或体积）上的荷载的合力和合力矩都等于零，则在远离荷载作用区的地方，应力就小得几乎等于零。

简化计算方法：

假定基底压力按直线分布的材料力学方法

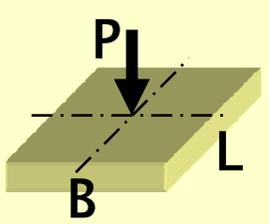
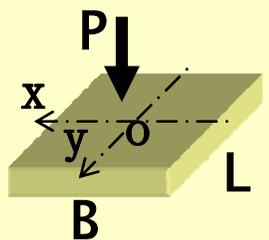
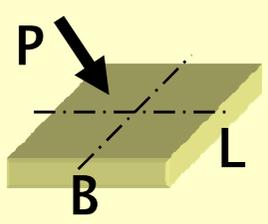
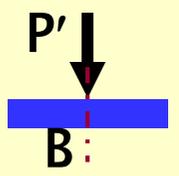
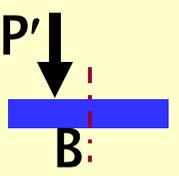
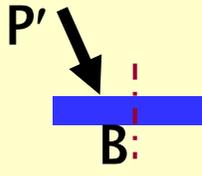


$F_k$ 为相应于荷载效应标准组合时，上部结构传至基础顶面的竖向压力值（kN）作用点在地面上

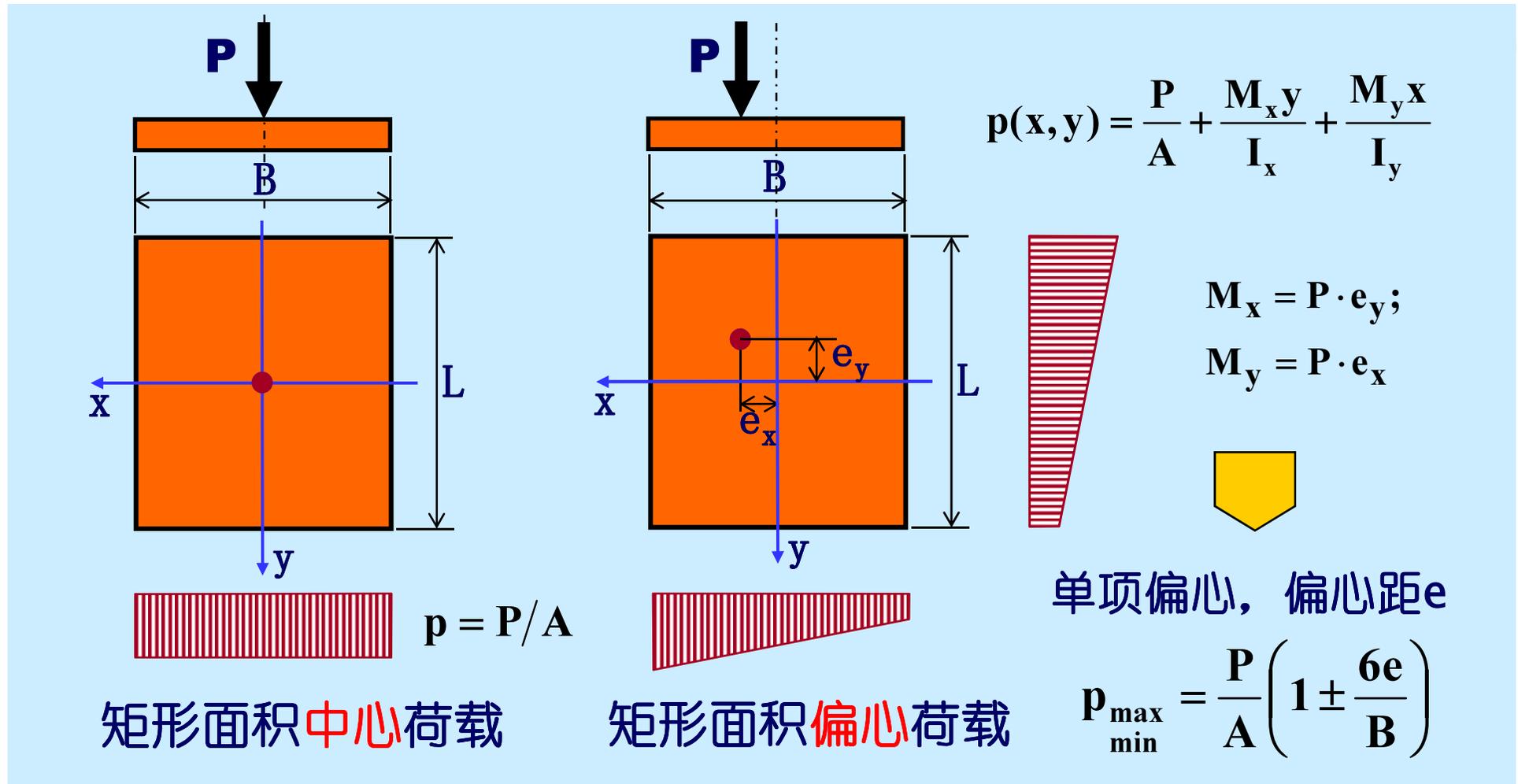
$G_k$ 为基础自重和基础上的土重（kN）作用点在底面上

$P_k = F_k + G_k$

# 基础形状与荷载条件的组合

	1	2	3
	竖直中心	竖直偏心	倾斜偏心
矩形	 $p = P/A$	 $p(x,y) = \frac{P}{A} + \frac{M_x y}{I_x} + \frac{M_y x}{I_y}$	 $\vec{P} = \vec{P}_v + \vec{P}_h$
条形	 $p = P'/B$ <p><math>P'</math>:单位长度上的荷载</p>	 $p(x) = \frac{P'}{B} + \frac{M_x}{I}$	 $\vec{P}' = \vec{P}'_v + \vec{P}'_h$

# 矩形基础上的集中荷载



## § 3.4 基底压力计算

# 矩形面积单向偏心荷载

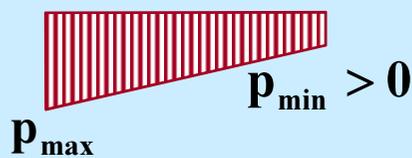
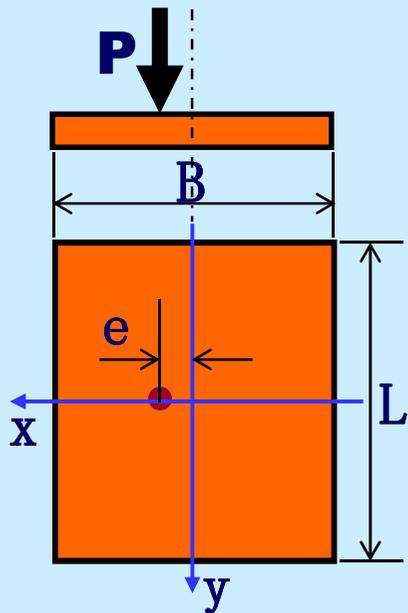
式3-14

$$p_{\max}^{\min} = \frac{P}{A} \left( 1 \pm \frac{6e}{B} \right)$$

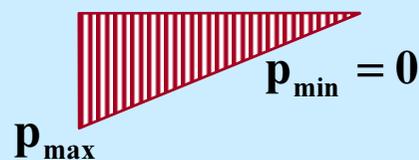
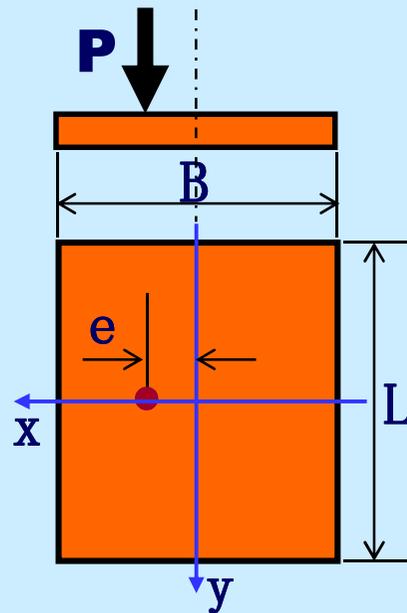
出现拉力时，  
应进行压力调整，  
原则：基底压力合力与  
总荷载相等



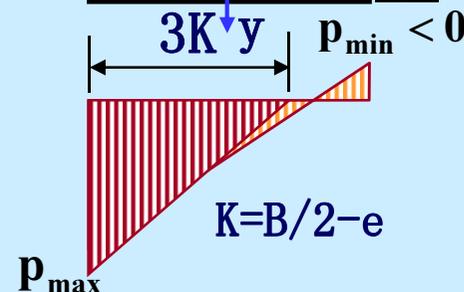
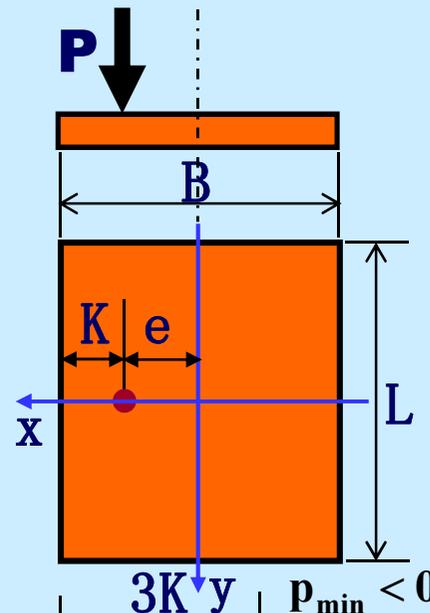
$$p_{\max} = \frac{2P}{3KL}$$



$e < B/6$ : 梯形



$e = B/6$ : 三角形



$e > B/6$ : 出现拉应力区

## 基底的抵抗矩

截面抵抗矩（ $W$ ）就是截面对其形心轴惯性矩与截面上最远点至形心轴距离的比值

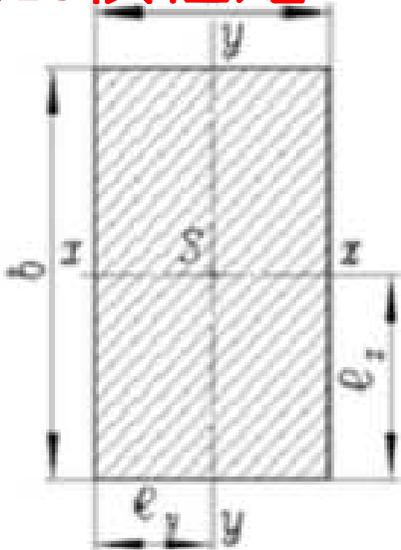
矩形截面抵抗矩

$$W = \frac{bl^2}{6}$$

$$W = bh^2 / 6$$

( $b, h$ 分别为截面的宽与高)

## 基底的惯性矩 inertia



$$I_x = \frac{ab^3}{12}$$

$$I = \frac{bl^3}{12}$$

符号意义及单位:

$I_x$  —— 长方形截面对  $x$  轴的惯性 ( $\text{cm}^4$ )

$a$  —— 长 (cm)

$b$  —— 宽 (cm)

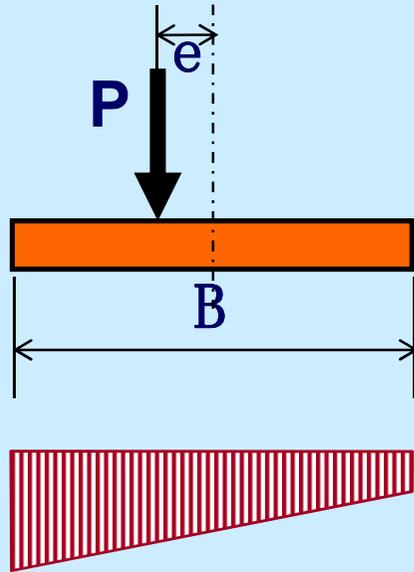
<https://zhidao.baidu.com/question/586716311.html?fr=iks&word=%B9%DF%D0%D4%BE%D8&ie=gbk>

截面惯性矩是衡量截面抗弯能力的一个几何参数。

## 抵抗矩与惯性矩 之间的关系

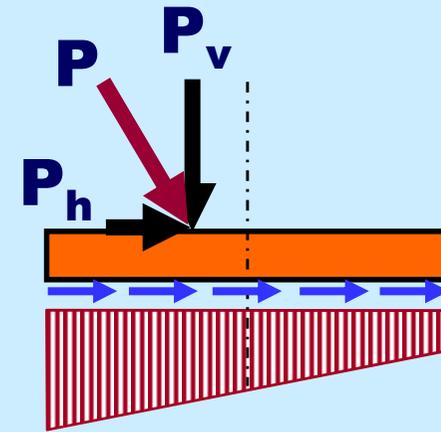
截面抵抗矩是截面本身所具有的特性，与外力无关，所以要用  $W=2I_x/h$  计算，当然这个公式也只是适用于对称截面，对于非对称截面，要除以中和轴到外边缘的距离

# 其它荷载



$$p_{\max} = \frac{P'}{B} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right)$$
$$p_{\min} = \frac{P'}{B} \left( 1 - \frac{6e}{B} \right)$$

条形基础竖直偏心荷载



分解为竖向和水平向荷载，水平荷载引起的基底水平应力视为均匀分布

倾斜偏心荷载

## § 3.4 基底压力计算

# 小 结

👉 基底压力分布的影响因素

- 荷载条件
- 基础条件
- 地基条件

👉 基底压力的分布形式

- 弹性地基
- 弹塑性地基

👉 简化计算方法



假定基底压力按直线分布的材料力学方法

## P96-97 单向偏心荷载下基底附加压力

### 小偏心公式

$$p_{k \max} = \frac{F + G}{A} + \frac{M_x}{W}$$

P100 公式3-13

### 大偏心公式

$$p_{k \max} = \frac{2(F + G)}{3la}$$

P101 公式3-15

$$p_{\max} = \frac{2P}{3KL}$$

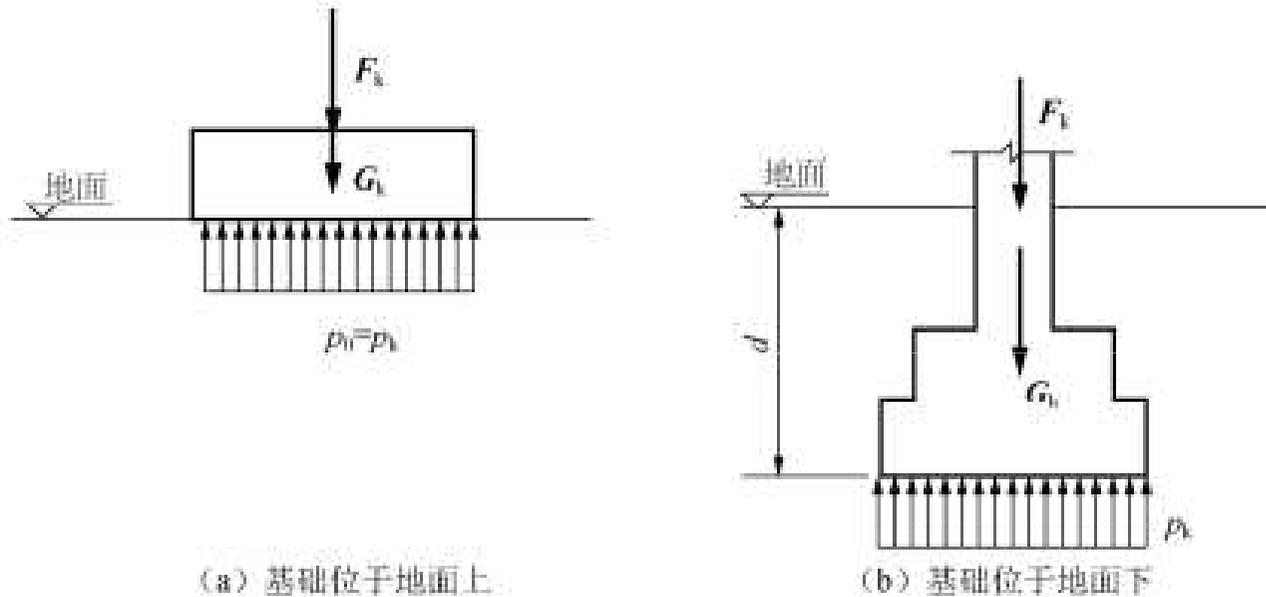
$l$ 为垂直于力矩作用方向的基底边长

$a$ 为合力作用点至最大压力边缘的距离,  
 $=b/2-e$

# 思考 为何要减去 $\gamma_m d$ 图 考点

## 2. 基础位于地面下

设基础建在地面下，见图 4-12 (b)，则基础底面的附加压力为



### 土力学

$$p_0 = p_k - \gamma_m d \quad (4-17)$$

式中， $p_0$  为基础底面的附加压力； $d$  为基础埋置深度； $\gamma_m$  为基础底面以上地基土的加权平均重度，地下水位以下取有效重度的加权平均值。

思考：式 (4-17) 为什么要减去  $\gamma_m d$  ?

在施工上部结构的加载初期，当增加的荷载相当于挖土所卸除的荷载时，基底实际上没有增加荷载，地基内不产生附加应力，因而也不产生变形。直至加载重量超过挖除的土重，地基方产生变形，这就是所谓的补偿作用。

参见基础工程**P144**

# 第3章：土体中的应力计算

- § 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓
- § 3.2 有效应力原理
- § 3.3 自重应力 ✓
- § 3.4 基底压力计算 ✓
- § 3.5 地基附加应力
- § 3.6 常规三轴压缩试验



# 地基中的附加应力

- 附加应力是由于修建建筑物之后在地基内新增加的应力，它是使地基发生变形而引起建筑物沉降的主要原因
- 目前采用的地基中的附加应力的计算方法是根据弹性力学理论推导出来的。因此，假设地基满足以下三个条件：
  - 1) 地基是半无限空间弹性体；
  - 2) 地基土是连续且均匀的，即变形模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 处处相等；
  - 3) 地基土是各向同性的，不同方向是不变的

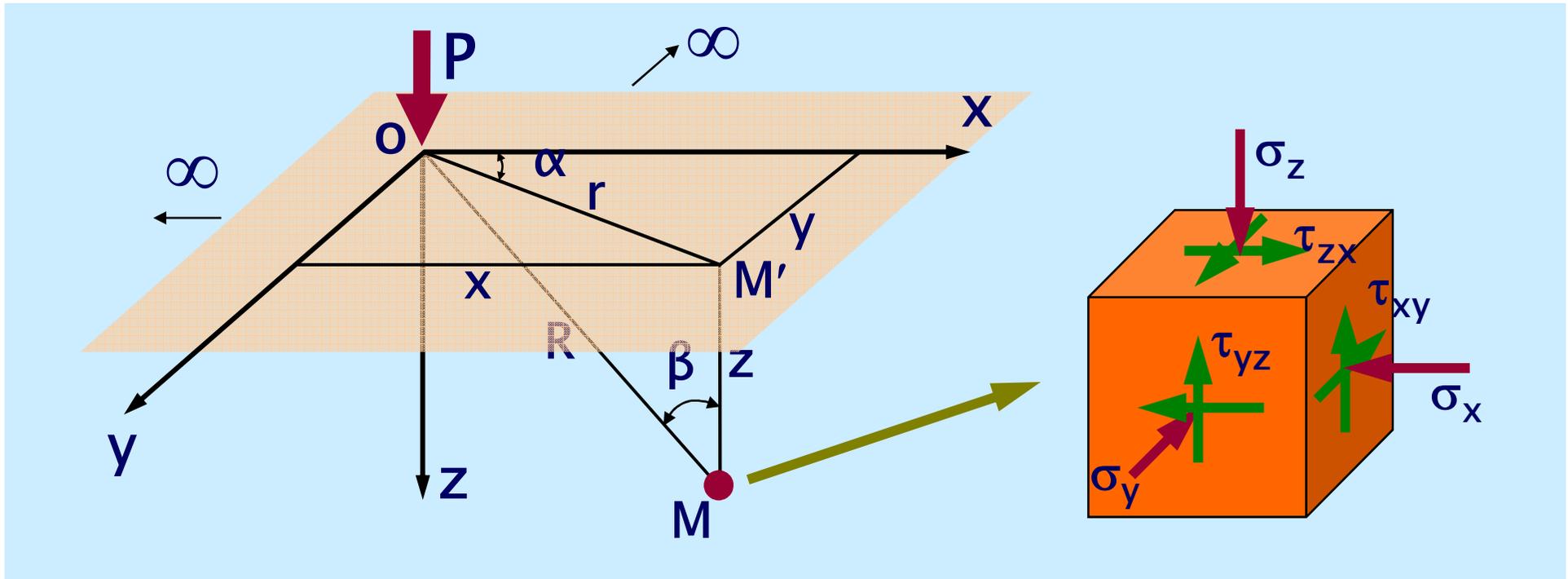
# 地基中的附加应力

- 地基中的附加应力比较复杂，主要分为以下几种情况

- 集中荷载作用下的附加应力 → 基本解
  - 矩形分布荷载作用下的附加应力
  - 条形分布荷载作用下的附加应力
  - 圆形分布荷载作用下的附加应力
  - 影响应力分布的因素
- 叠加原理

# 集中荷载的附加应力

## ■ 竖直集中力－布辛内斯克课题 Boussinesq



$$R^2 = r^2 + z^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$(P; x, y, z; R, \alpha, \beta)$$

P102 3.5.1

# 集中荷载的附加应力

## ■ 竖直集中力－布辛内斯克课题

👉 法国数学家布辛内斯克 (J. Boussinesq) 1885年推出了该问题的理论解，包括六个应力分量和三个方向位移的表达式

➡ 教材P102-103页

👉 其中，竖向应力 $\sigma_z$ ：

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^5} \frac{z^3}{[1+(r/z)^2]^{5/2}} \frac{P}{z^2} = K \frac{P}{z^2}$$

R demo 01

集中力作用下的  
应力分布系数 → 查图3-23

P102

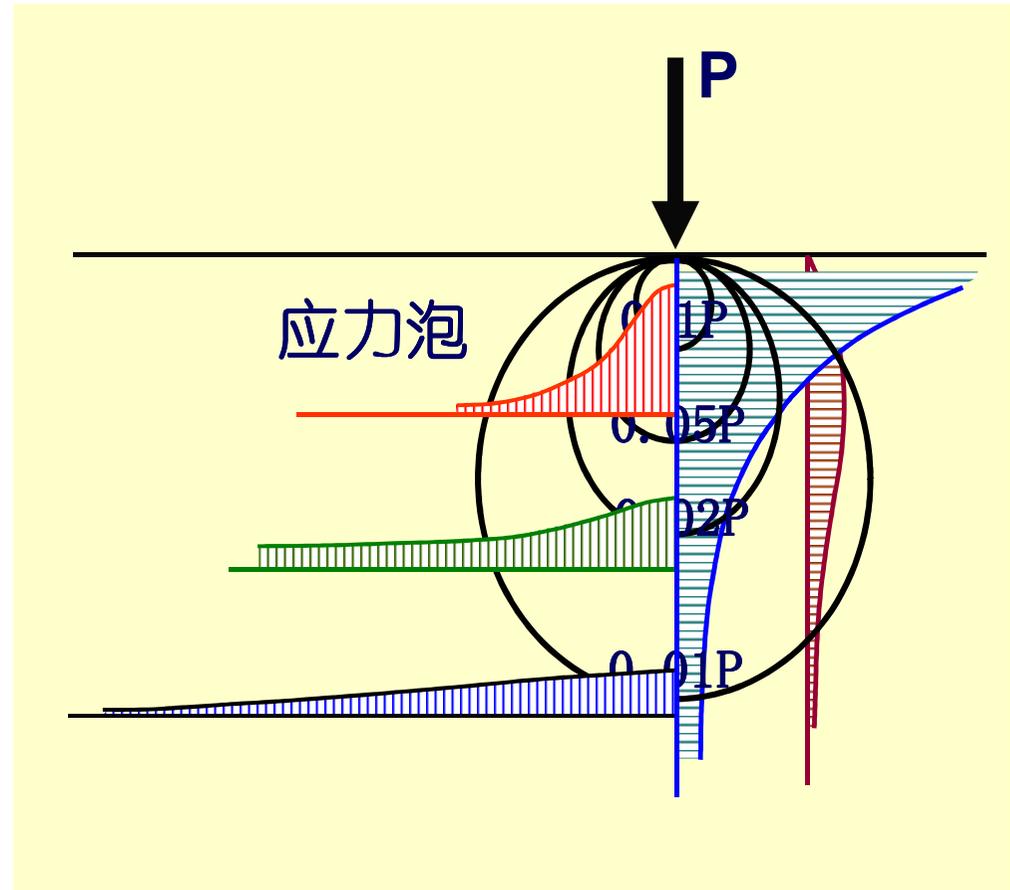
# 集中荷载的附加应力

## ■ 竖直集中力—布辛内斯克课题

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{[1 + (r/z)^2]^{5/2}} \frac{P}{z^2} = K \frac{P}{z^2}$$

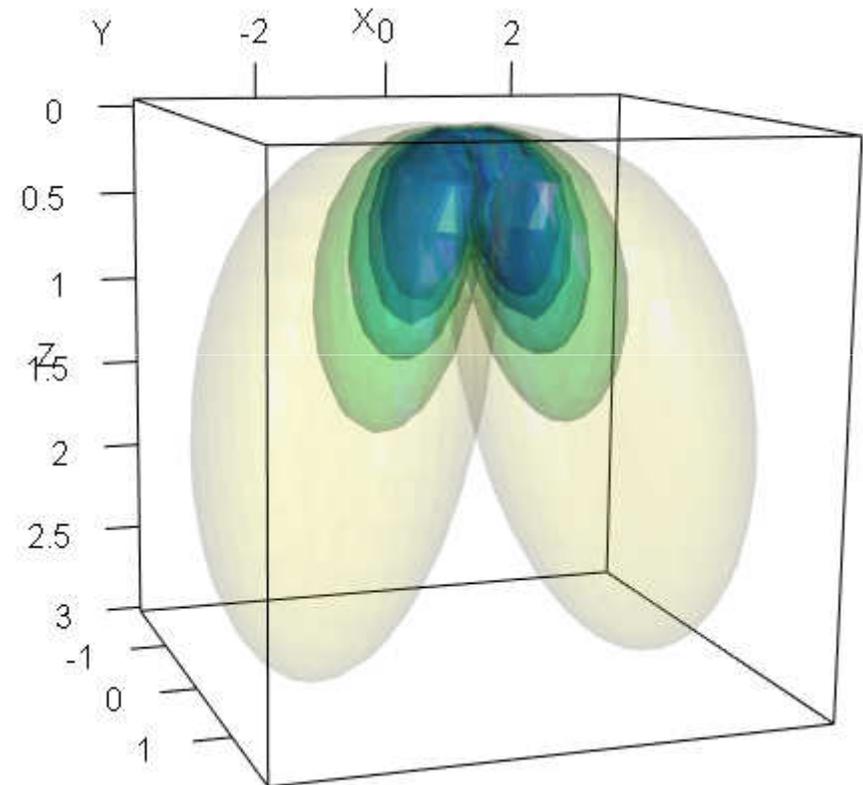
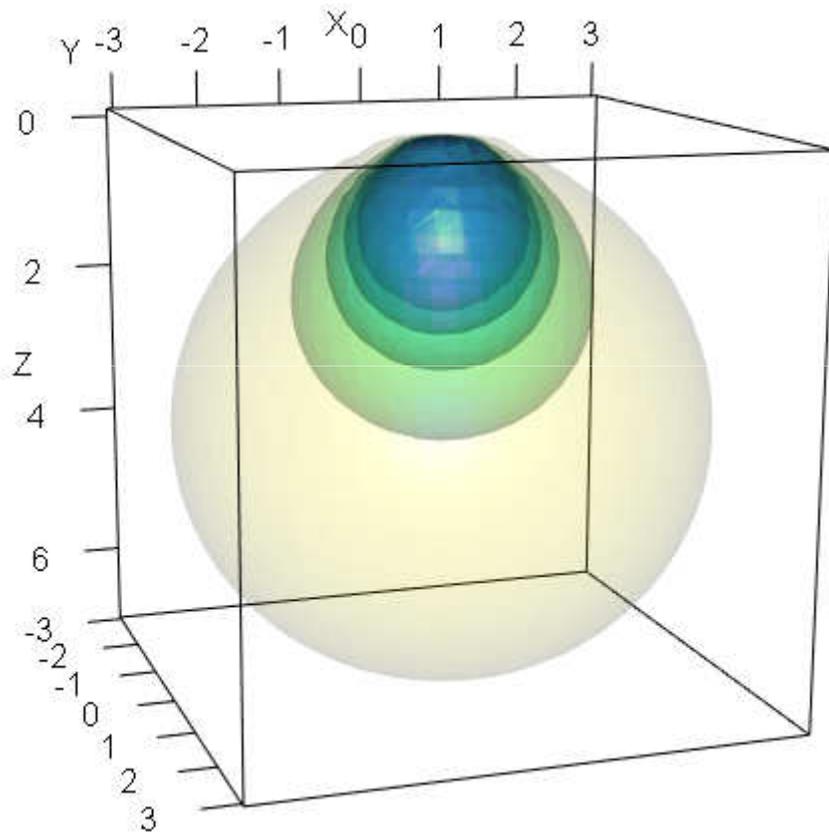
➤  $\sigma_z$  与  $\alpha$  无关，呈轴对称分布

- 👉 P作用线上 ❗
- 👉 在某一水平面上 ❗
- 👉 在  $r > 0$  的竖直线上 ❗
- 👉  $\sigma_z$  等值线-应力泡 ❗



# 集中荷载作用下地基中的附加应力分布

通过R语言计算在集中荷载 $P=500\text{kPa}$ 作用下，地基中的竖向附加应力分布如下图所示：



本科毕设：郭志远

指导老师：吴兴征

2019.5.23

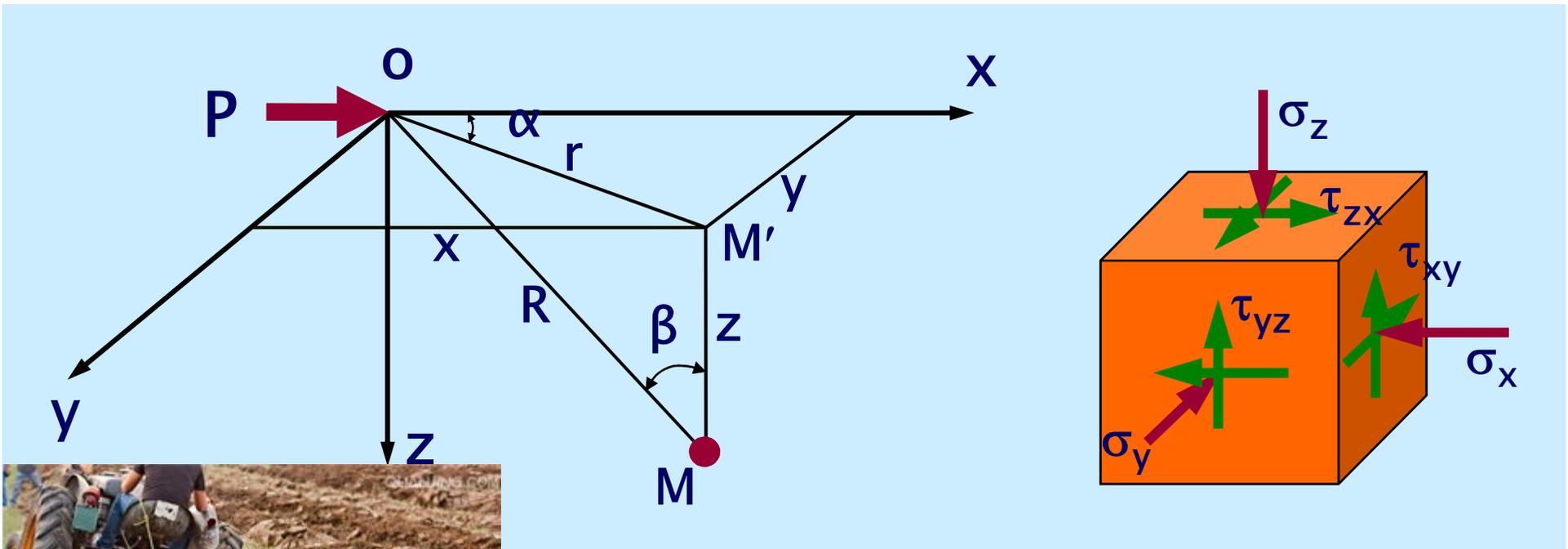


地基中附加应力场的计算与  
塑性区开展范围确定

$\sigma_x$

# 集中荷载的附加应力

## ■ 水平集中力 - 西罗提Cerruti V课题



$$\sigma_z = \frac{3P_h}{2\pi} \frac{xz^2}{R^5}$$

P104  
3.5.1

# 矩形分布荷载的附加应力

## ■ 矩形面积竖直均布荷载

1) 角点下的垂直附加应力: Boussnesq氏解的应用

$$d\sigma_z = \frac{3dP}{2\pi} \frac{z^3}{R^5} = \frac{3p}{2\pi} \frac{z^3}{R^5} dx dy$$

$$\sigma_z = \int_0^B \int_0^L d\sigma_z = \sigma_z(p, m, n) \quad \Rightarrow \quad \sigma_z = K_s p$$

$$m=L/B, \quad n=z/B$$

$m \geq 1$

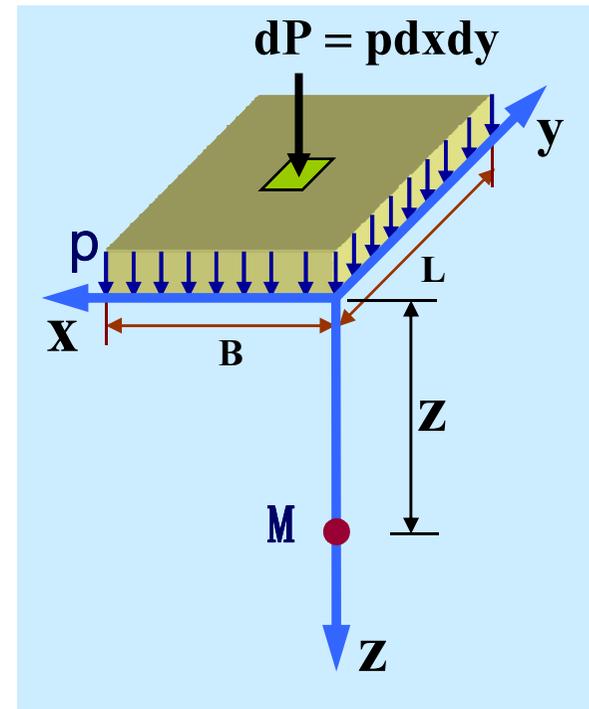
$$K_s = F(B, L, z) = F\left(\frac{L}{B}, \frac{z}{B}\right) = F(m, n)$$

R demo 02

矩形竖直向均布荷载角点下的应力分布系数 $K_s$ :

表3-5 in P106

B-breadth  
L-length



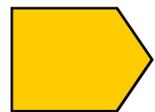
Ding's Edition  
少了此图 致命!



# 矩形分布荷载的附加应力

## ■ 矩形面积竖直三角形分布荷载

$$\sigma_z = \int_0^B \int_0^L d\sigma_z = \sigma_z(p_t, m, n)$$

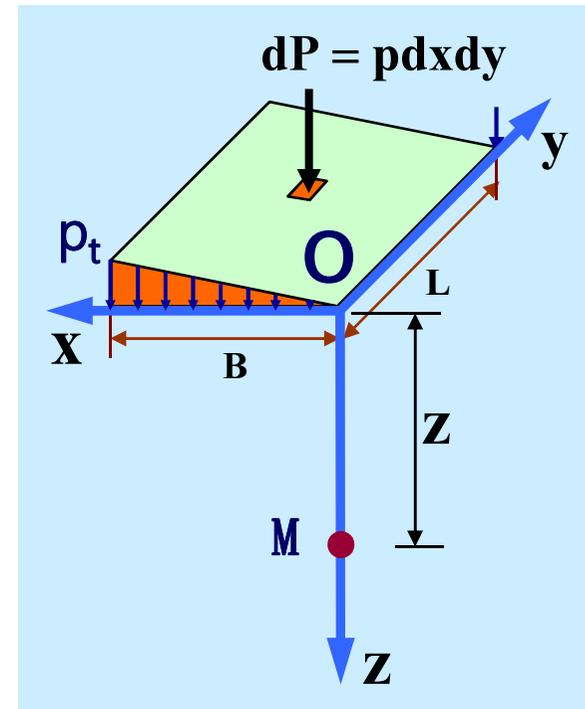

$$\sigma_z = K_t p_t$$

$$K_t = F(B, L, z) = F\left(\frac{L}{B}, \frac{z}{B}\right) = F(m, n)$$

└─ 矩形面积竖直三角分布荷载角点下的  
应力分布系数：表3-6 in page 110

P109-110

把荷载强度为零的一个角点作为坐标原点



# 矩形分布荷载的附加应力

## ■ 矩形面积水平均布荷载

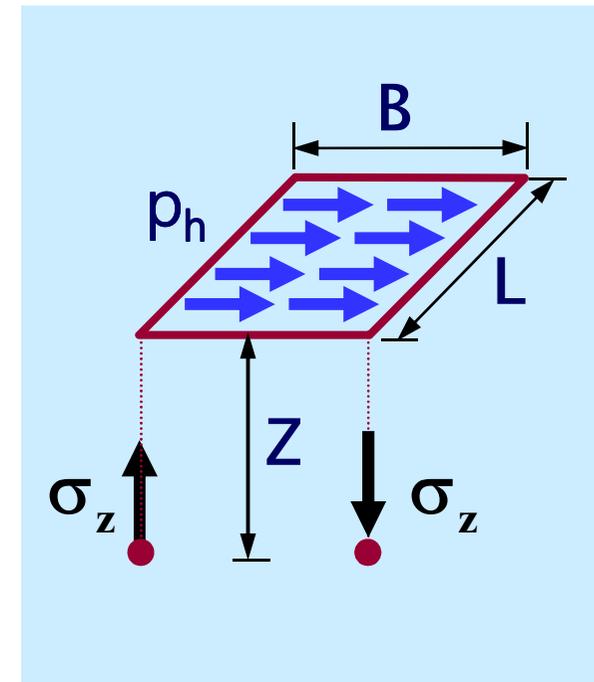
角点下的垂直附加应力：Cerruti氏解的应用

$$\sigma_z = \mp \mathbf{K}_h \mathbf{p}_h$$

$$\mathbf{K}_h = \mathbf{F}(\mathbf{B}, \mathbf{L}, \mathbf{z}) = \mathbf{F}\left(\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{B}}, \frac{\mathbf{z}}{\mathbf{B}}\right) = \mathbf{F}(\mathbf{m}, \mathbf{n})$$



矩形面积作用水平均布荷载时角点下的应力分布系数：表3-7 in Page 111



# 条形分布荷载的附加应力

## ■ 竖直线布荷载 - 弗拉曼解 Flamant

- Boussinesq氏解的应用

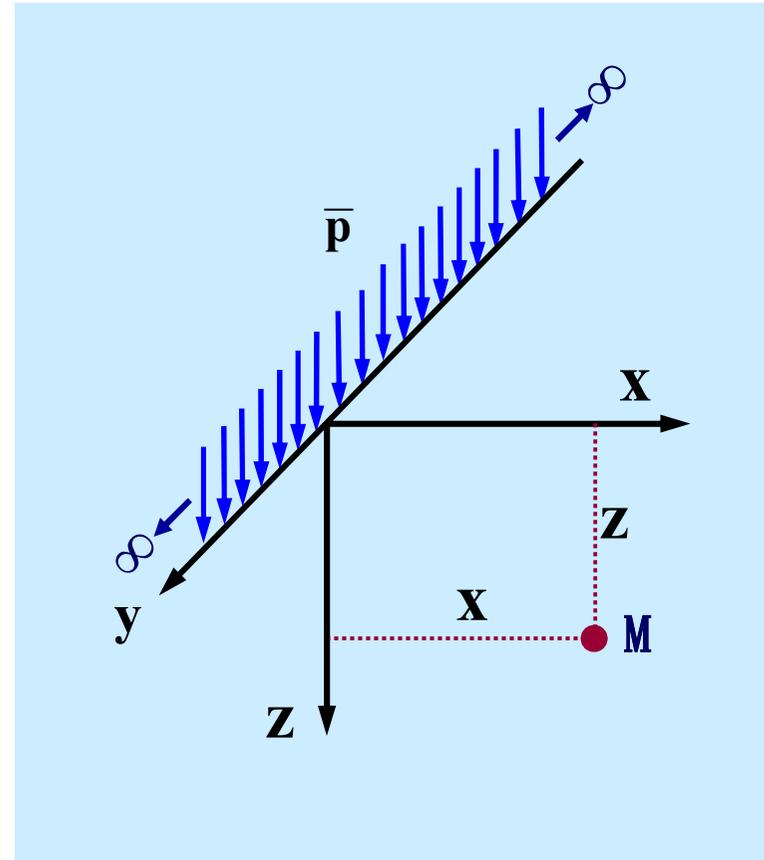
$$\sigma_z = \frac{2\bar{p}z^3}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$\sigma_x = \frac{2\bar{p}x^2z}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$\tau_{zx} = \frac{2\bar{p}xz^2}{\pi(x^2 + z^2)^2}$$

$$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z)$$

P112 3.5.3



当截面两侧荷载面积的延伸长度均大于等于5b

# 条形分布荷载的附加应力

## ■ 条形面积竖直均布荷载

任意点的附加应力：F氏解的应用

$$\sigma_z = K_z^s p$$

P113

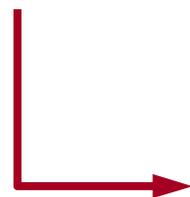
$$\sigma_x = K_x^s p$$

式3-38

$$\tau_{xz} = K_{xz}^s p$$

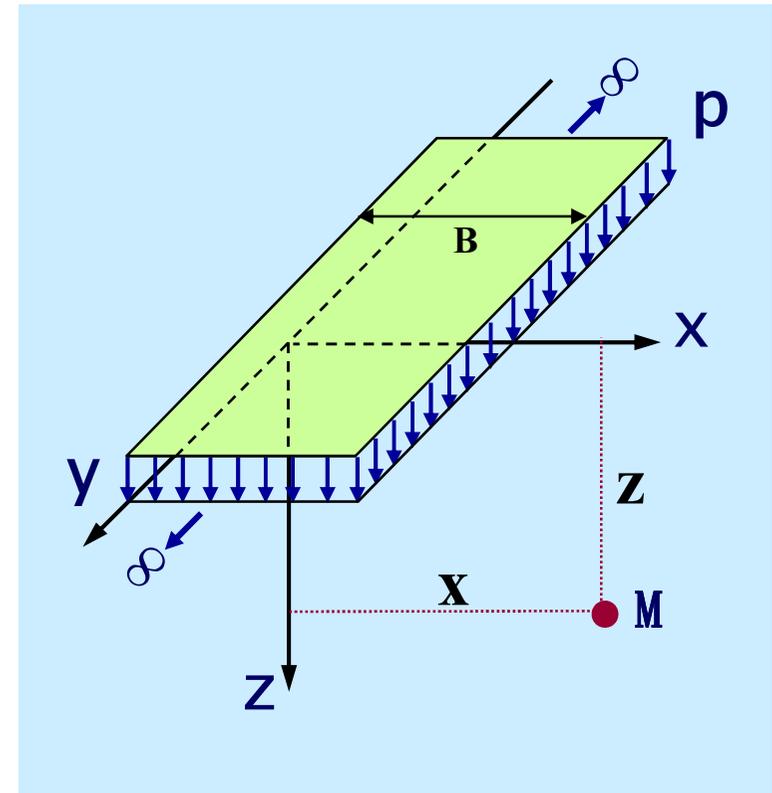
$$K_z^s, K_x^s, K_{xz}^s = F(B, x, z)$$

$$= F\left(\frac{x}{B}, \frac{z}{B}\right) = F(m, n)$$



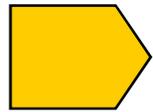
条形面积竖直均布荷载作用时的应力分布系数：表3-8 in page 114

P113



## 其它荷载的附加应力

### ■ 条形面积其它分布荷载

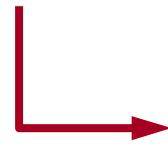


P116页：表3-9

### ■ 圆形面积均布荷载作用

- 圆心下的附加应力计算

$$\sigma_z = F(r/z)p = K_0 p$$



P120页：表3-14

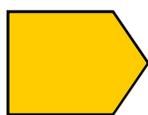
### § 3.3 地基附加应力

# 小

# 结

$$\sigma_z = K \frac{P}{z^2}$$

$$\sigma_z = K_s p$$



K →

底面形状  
荷载分布  
计算点位置

- $K$  —— 竖直集中荷载作用下 (图3-23) P103
- $K_s$  —— 矩形面积竖直均布荷载作用角点下 (表3-5) P106
- $K_t$  —— 矩形面积三角形分布荷载作用角点下 (表3-6) P110
- $K_h$  —— 矩形面积水平均布荷载作用角点下 (表3-7) P111
- $K_z^s$  —— 条形面积竖直均布荷载作用时 (表3-8) P114
- $K_z^t$  —— 条形面积三角形分布荷载作用时 (表3-10) P117
- $K_z^h$  —— 条形面积水平均布荷载作用时 (表3-11) P118
- $K_0$  —— 圆形面积均布荷载作用时圆心点下 (表3-14) P120
- $K_z^L$  —— 条形面积梯形分布荷载作用时 (图3-38) P117

**P107 例3-3 可做考题**

# 影响土中应力分布的因素

## ■ 非均匀性-成层地基

👉 上层软弱，下层坚硬

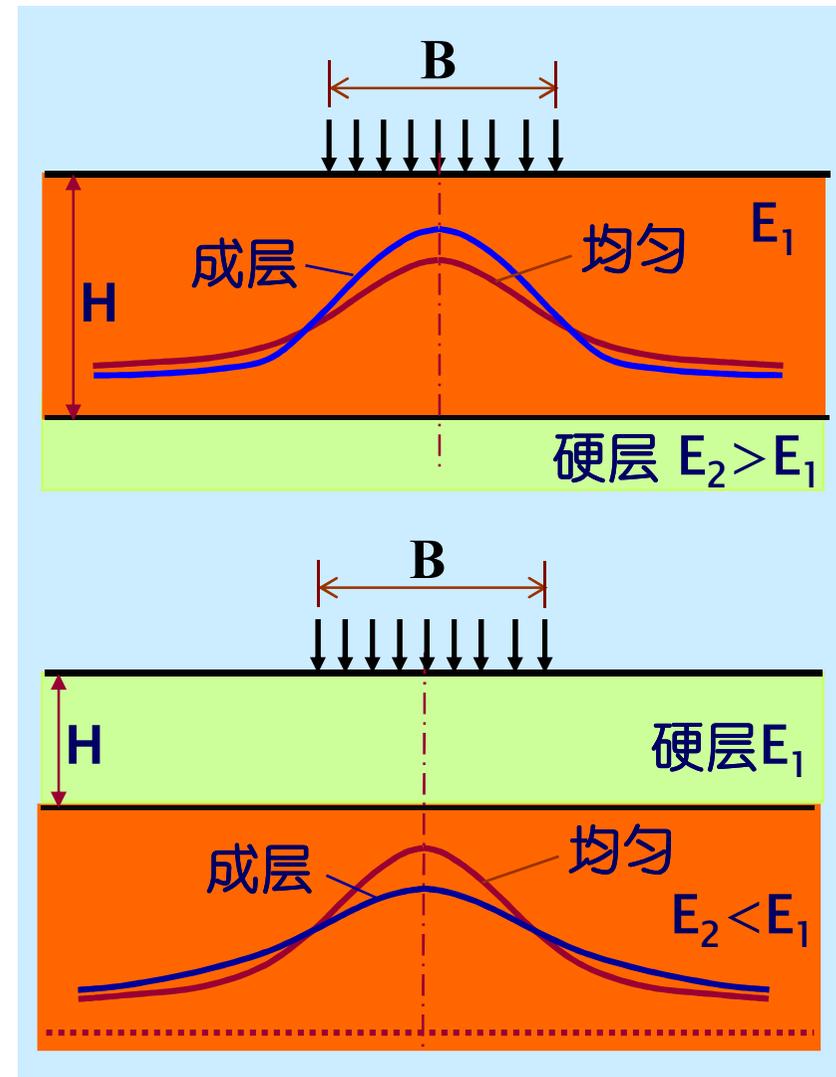
- 轴线附近应力集中， $\sigma_z$ 增大
- 应力集中程度与土层刚度比有关
- 随 $H/B$ 增大，应力集中减弱

👉 上层坚硬，下层软弱

- 轴线附近应力扩散， $\sigma_z$ 减小
- 应力扩散程度与土层刚度比有关
- 随 $H/B$ 的增大，应力扩散增强

3.5.5 P120

DEL



# 影响土中应力分布的因素

## ■ 非线性和弹塑性

- 对竖直应力计算值的影响不大
- 对水平应力有显著影响

## ■ 变形模量随深度增大的地基

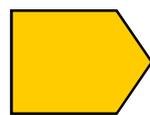
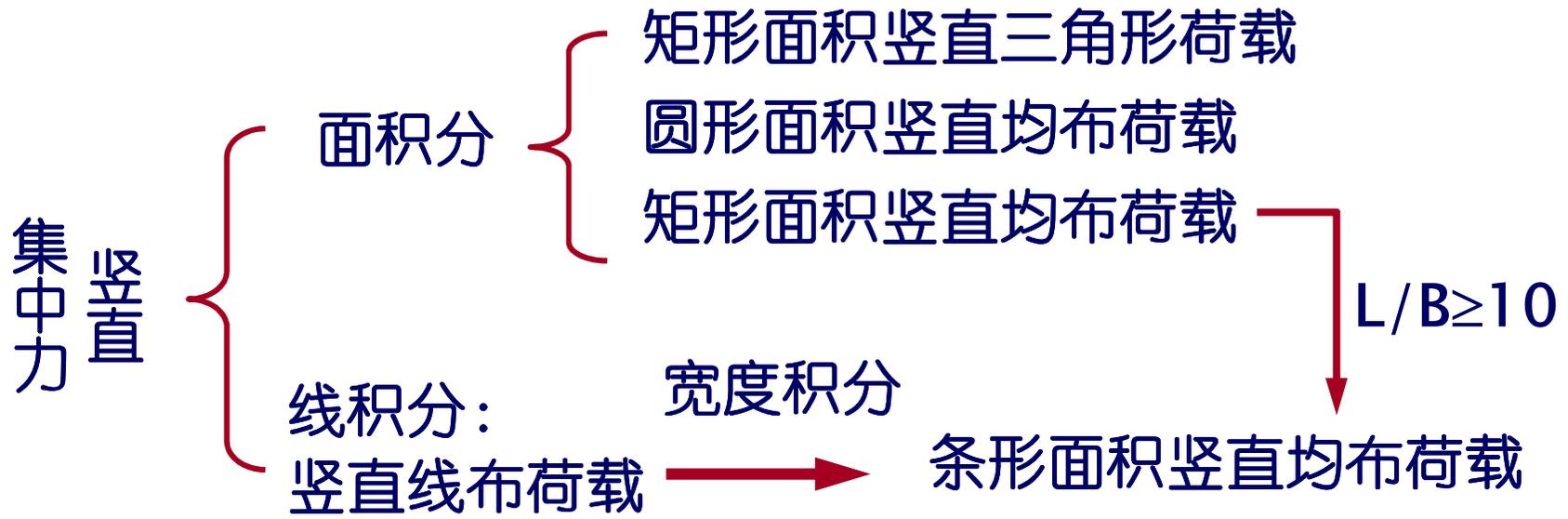
- 是一种连续非均质现象，在砂土地基中尤为常见
- 使应力向应力的作用线附近集中

## ■ 各向异性地基

- $E_x/E_z < 1$  时， $E_x$  相对较小，不利于应力扩散 → 应力集中
- $E_x/E_z > 1$  时， $E_x$  相对较大，有利于应力扩散 → 应力扩散

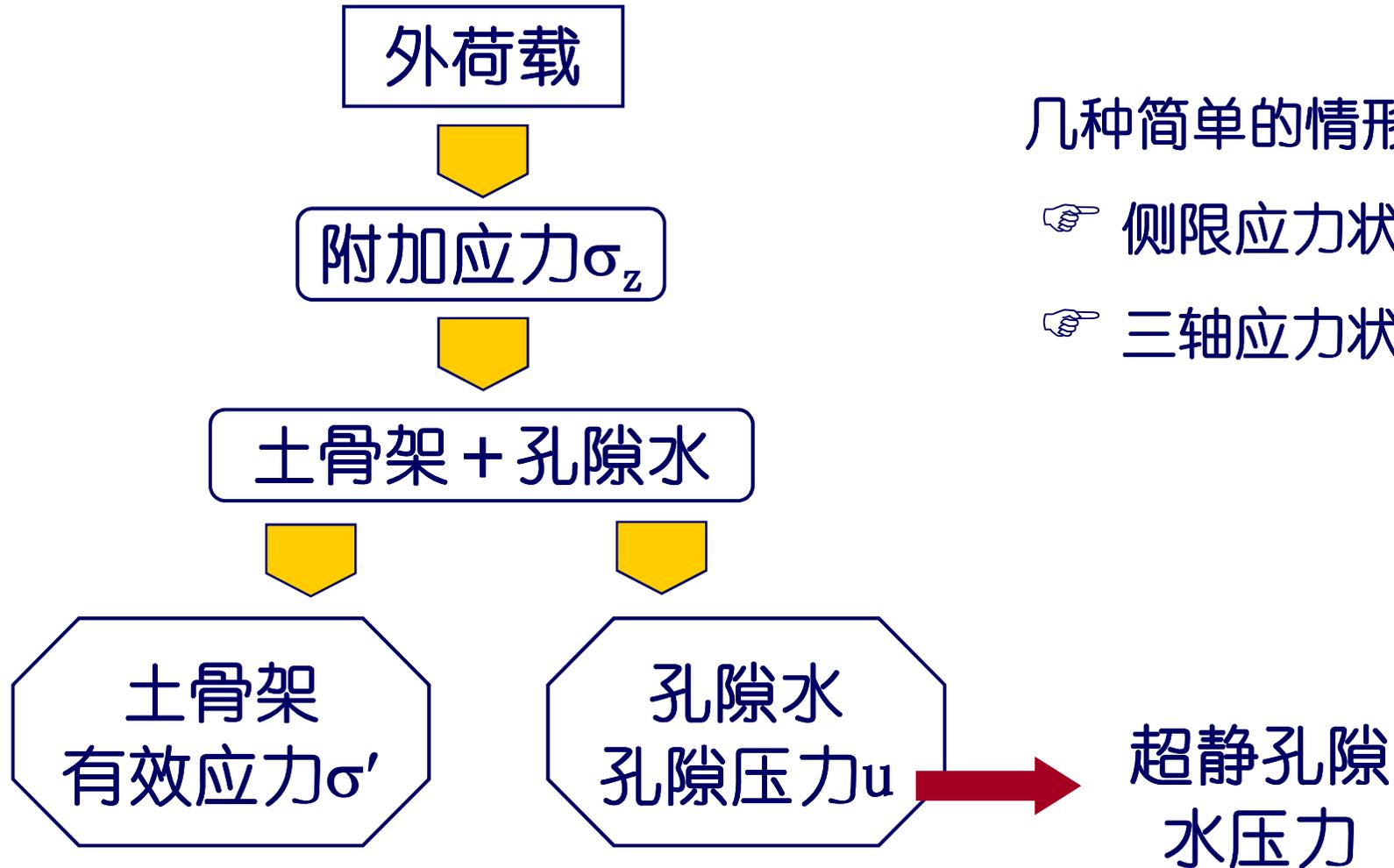
DEL

# 小 结



满足叠加原理，可对各种特殊荷载和面积进行分解和组合，利用已知解和求解

# 附加应力情况



DEL+

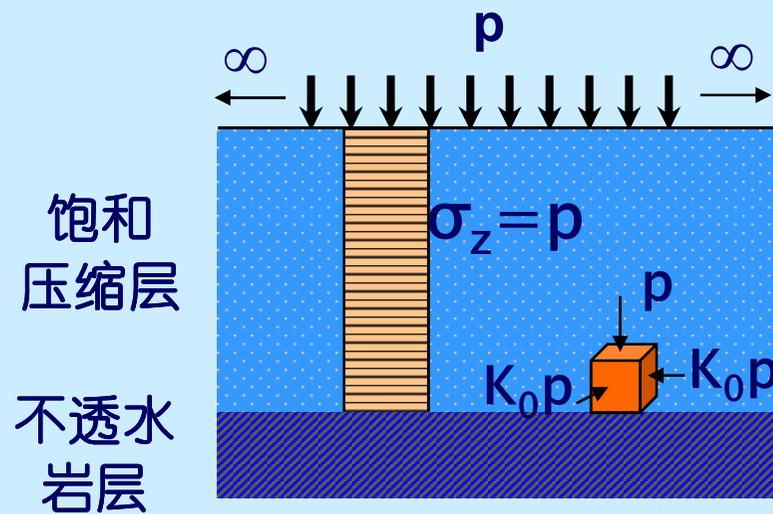
几种简单的情形：

- ☞ 侧限应力状态
- ☞ 三轴应力状态

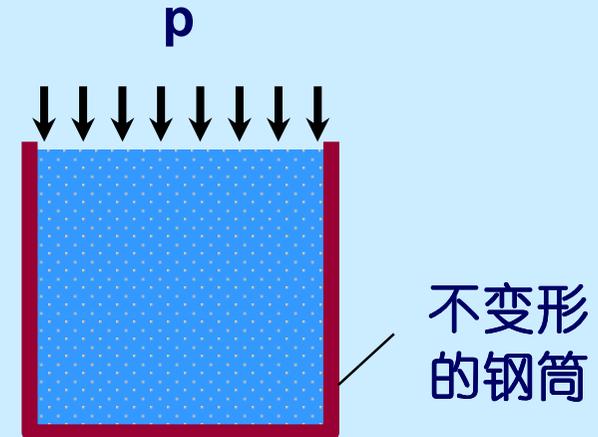
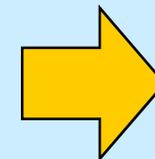
# 附加应力情况

## ■ 侧限应力状态及一维渗流固结

- 实践背景：大面积均布荷载



## 侧限状态的简化模型

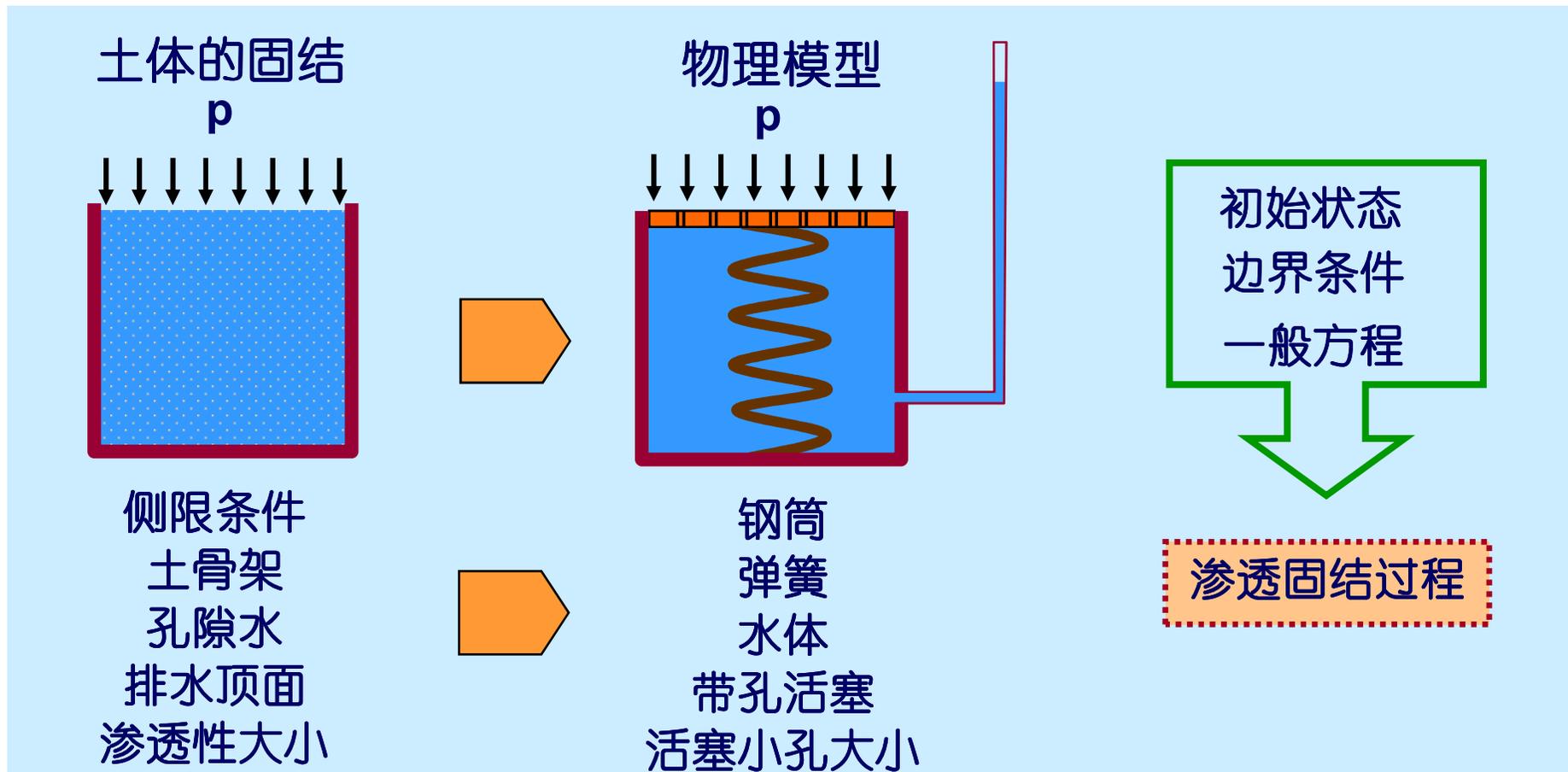


土体不能发生侧向变形，称侧限状态

# 附加应力情况

## ■ 侧限应力状态 – 太沙基渗压模型

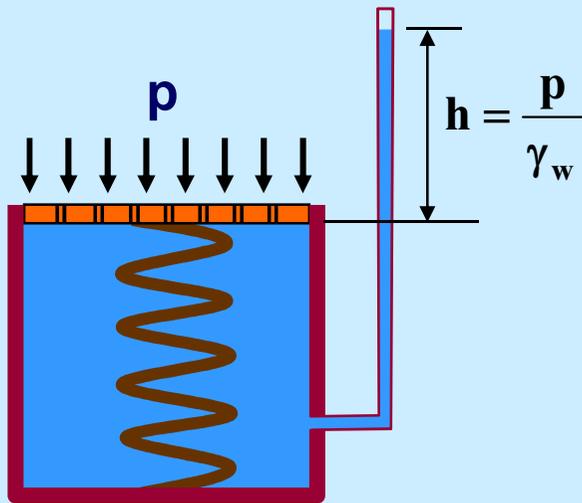
§ 3.6 p124



# 附加应力情况

## ■ 侧限应力状态 – 太沙基渗压模型

§ 3.6 p124

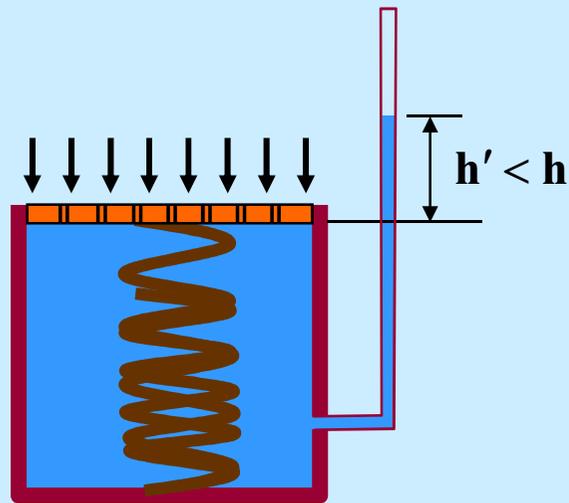


$t = 0$

附加应力:  $\sigma_z = p$

超静孔压:  $u = \sigma_z = p$

有效应力:  $\sigma'_z = 0$

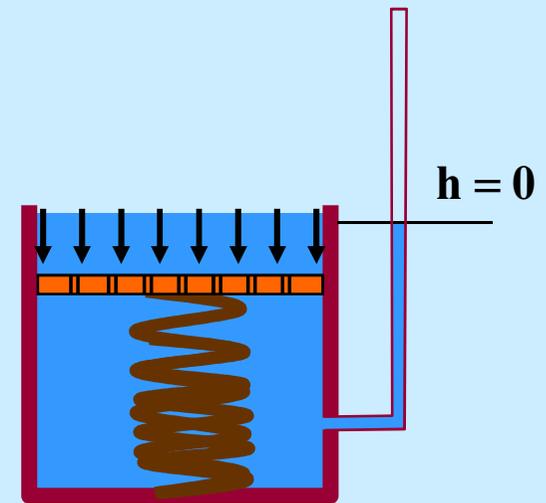


$0 < t < \infty$

附加应力:  $\sigma_z = p$

超静孔压:  $u < p$

有效应力:  $\sigma'_z > 0$



$t \rightarrow \infty$

附加应力:  $\sigma_z = p$

超静孔压:  $u = 0$

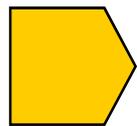
有效应力:  $\sigma'_z = p$

# 附加应力情况

§ 3.6.2 p125

## ■ 侧限应力状态及一维渗流固结

☞ 土体在受到外荷载后，产生超静孔隙水压力，超静孔隙水压力随时间逐步消散，土体骨架的有效应力逐渐增加，这一过程称土体的**渗流固结**



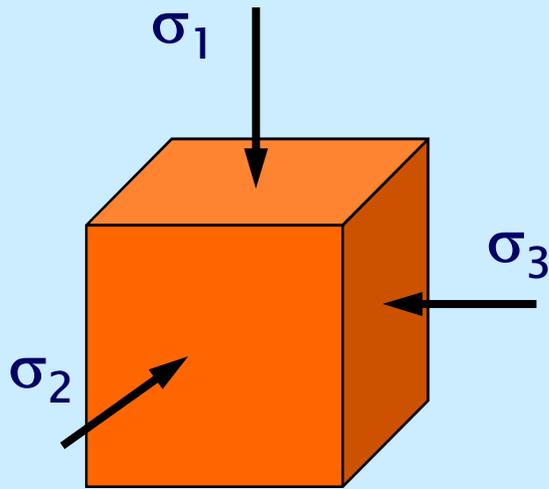
- 固结过程中， $u$ 和 $\sigma'$ 随时间变化，固结过程的实质就是土中两种不同应力形态的转化过程
- 超静孔压力 $u$ 是由外荷载引起的，它是超出静水位以上的那部分孔隙水压力， $u_{\text{总}} = u_{\text{静}} + u_{\text{超静}}$
- 侧限条件 $t=0$ 时的超静孔压在数值上等于外荷载增量，也即，孔压系数：

$$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_z} = 1$$

DEL+

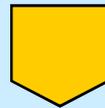
# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态



$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & & 0 \\ & \sigma_2 & \\ 0 & & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_3 & & 0 \\ & \sigma_3 & \\ 0 & & \sigma_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_3 & & \\ & 0 & \\ & & 0 \end{bmatrix}$$



三轴应  
力状态



等向压缩  
应力状态

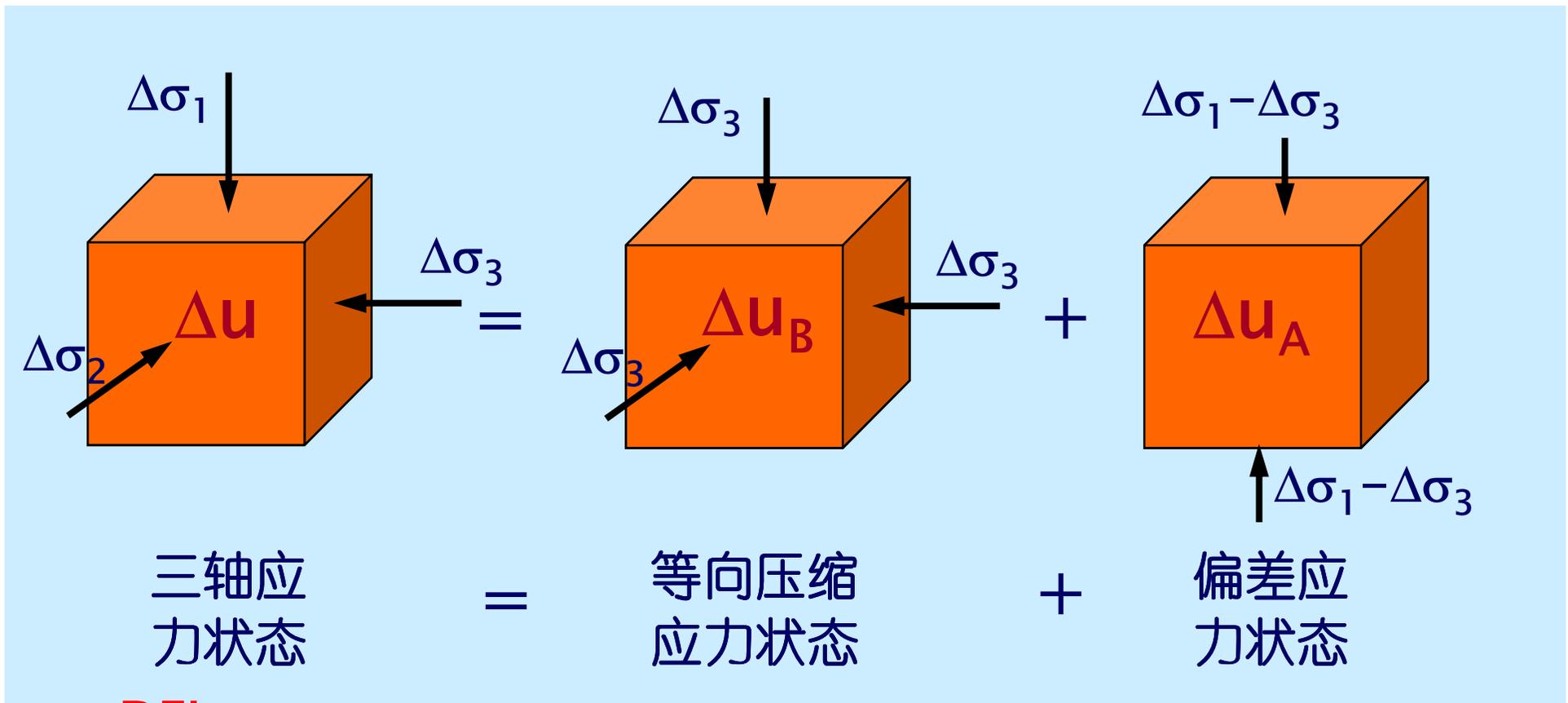


偏差应  
力状态

DEL

# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态



DEL

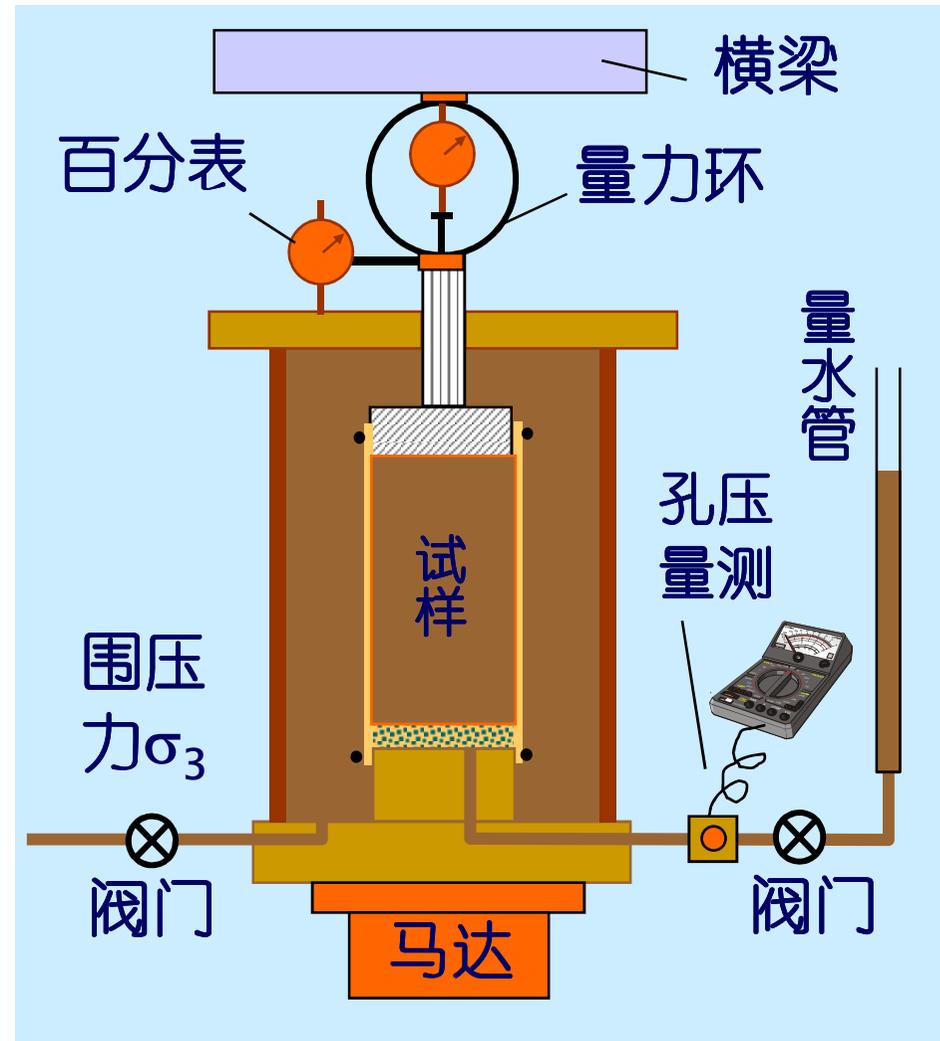
# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态

### ☞ 不固结不排水试验

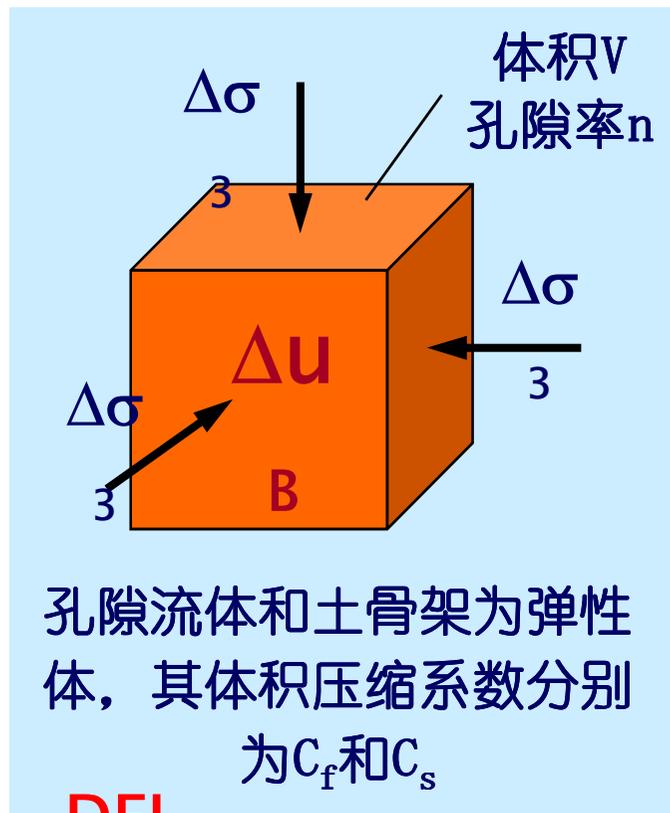
- 关闭排水阀门，连接孔压传感器，施加围压 $\sigma_3$ ，量测超静孔隙水压力  $\Delta u_B$
- 施加 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 进行剪切时，关闭排水阀门。用孔压传感器量测剪切过程中产生的超静孔隙水压力  $\Delta u_A$

DEL



# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态 等向压缩应力状态



DEL

- 孔隙流体产生超静孔压 $\Delta u_B$
- 土骨架有效附加应力： $\Delta\sigma_3 - \Delta u_B$
- 孔隙流体的体积变化：

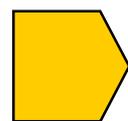
$$\Delta V_1 = C_f \cdot \Delta u_B \cdot V_v = C_f \cdot \Delta u_B \cdot nV$$

- 土骨架体积变化：

$$\Delta V_2 = C_s \cdot \Delta\sigma'_3 \cdot V = C_s (\Delta\sigma_3 - \Delta u_B) V$$

- 不排水、不排气： $\Delta V_1 = \Delta V_2$

$$C_f \cdot \Delta u_B \cdot nV = C_s (\Delta\sigma_3 - \Delta u_B) V$$

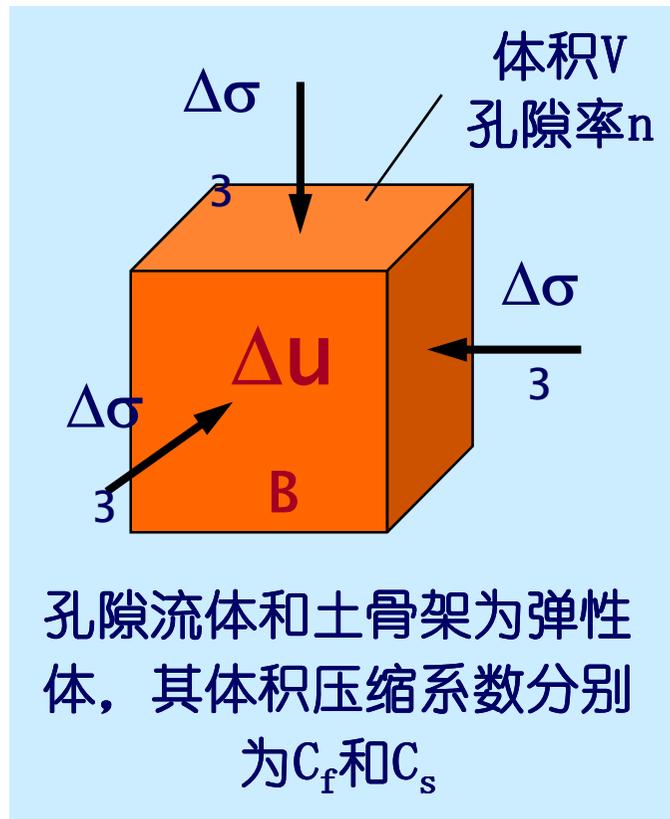


$$\Delta u_B = \frac{1}{1 + n \cdot C_f / C_s} \Delta\sigma_3$$

### § 3.4 有效应力原理

## 附加应力情况

### ■ 三轴应力状态 等向压缩应力状态



DEL

$$\Delta u_B = \frac{1}{1 + n \cdot C_f / C_s} \Delta \sigma_3$$

孔压系数B:  $\Delta u_B = B \Delta \sigma_3$


$$B = \frac{1}{1 + n \cdot C_f / C_s}$$

表示单位周压力增量所引起的孔压力增量

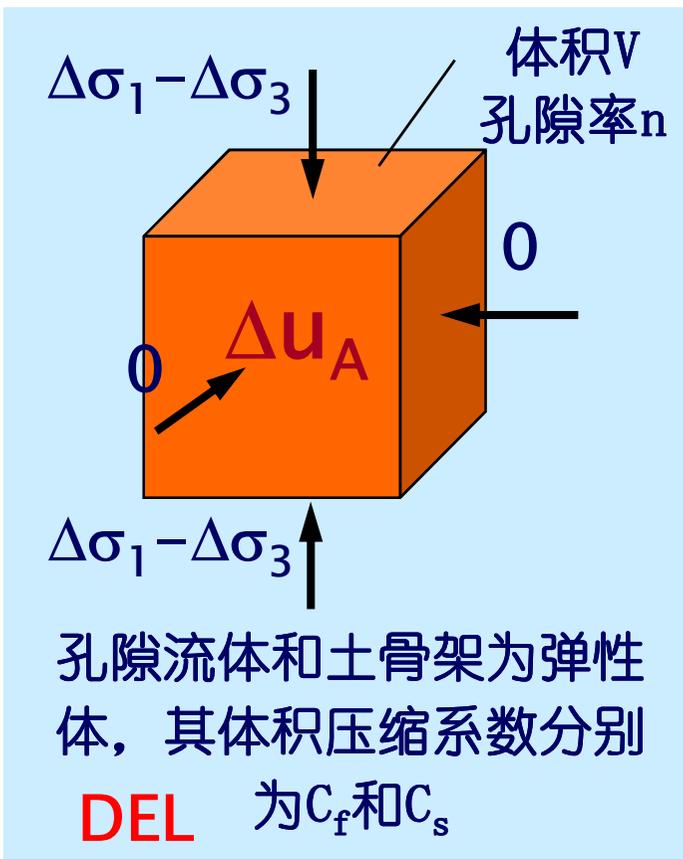
- 饱和土:  $C_f = C_w \ll C_s \rightarrow B \cong 1.0$
- 干土:  $C_f \gg C_s \rightarrow B = 0$
- 非饱和土:  $B = 0-1$ 之间



B是一个反映土饱和程度的指标

# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态 偏差应力状态



- 孔隙流体产生超静孔压  $\Delta u_A$
- 孔隙流体的体积变化:

$$\Delta V_1 = C_f \cdot \Delta u_A \cdot V_v = C_f \cdot \Delta u_A \cdot nV$$

- 土骨架体积变化:

$$\Delta V_2 = \Delta \varepsilon_v \cdot V = (\Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3) V$$

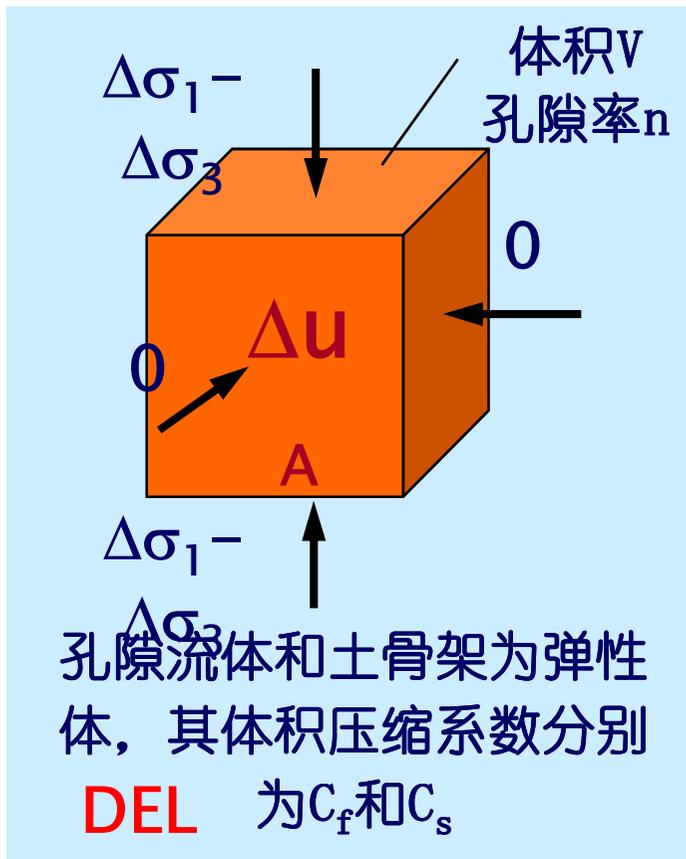
	轴向	侧向
总应力增量	$\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$	0
有效附加应力	$\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 - \Delta u_A$	$-\Delta u_A$

$$\Delta \varepsilon_1 = [(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 - \Delta u_A) - 2\nu(-\Delta u_A)] / E$$

$$\Delta \varepsilon_2 = [-\Delta u_A - \nu(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 - \Delta u_A) - \nu(-\Delta u_A)] / E$$

# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态 偏差应力状态



- 土骨架体积变化：胡克定律

$$\begin{aligned}\Delta V_2 &= \frac{1-2\nu}{E}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3 - 3\Delta u_A) \cdot V \\ &= \frac{1}{3}C_s[(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) - 3\Delta u_A]V\end{aligned}$$

- 不排水、不排气：  $\Delta V_1 = \Delta V_2$

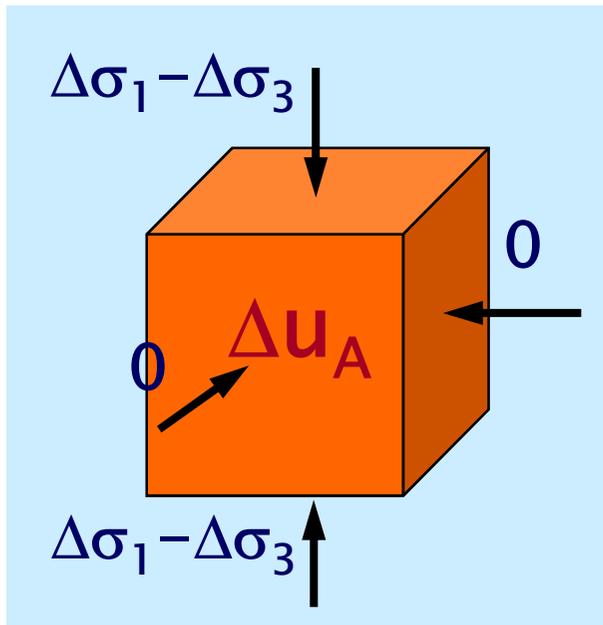
$$\begin{aligned}\Delta u_A &= \frac{1}{1+n \cdot C_f/C_s} \left[ \frac{1}{3}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \right] \\ &= B \cdot \frac{1}{3}(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\end{aligned}$$

► 孔压系数A

$$\Delta u_A = B \cdot A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)_{82}$$

# 附加应力情况

## ■ 三轴应力状态 偏差应力状态



孔压系数A:  $\Delta u_A = B \cdot A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$

对饱和土,  $B=1$



$$A = \frac{\Delta u_A}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}$$



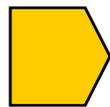
剪切作用引起的孔压响应

对于线弹性体:  $A=1/3$

剪胀:  $A < 1/3$

剪缩:  $A > 1/3$

DEL



A 是一个反映土体剪胀性强弱的指标, 其大小与土性有关。A不是常数, 随加载过程而变化

## 附加应力情况

### ■ 三轴应力状态

等向压缩应力状态

$$\Delta u_B = \mathbf{B} \Delta \sigma_3$$

偏差应力状态

$$\Delta u_A = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

三轴应力状态

$$\Delta u = \Delta u_B + \Delta u_A$$

$$\Delta u = \mathbf{B} [\Delta \sigma_3 + \mathbf{A} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

DEL

# 小 结

👉 有效应力原理

饱和土体内任一平面上受到的总应力可分为两部分  $\sigma'$  和  $u$ ；土的变形与强度都只取决于有效应力

👉 有效应力计算

- 自重应力情况：静水条件  
稳定渗流条件
- 附加应力情况：单向压缩应力状态  
等向压缩应力状态  
偏差应力状态

👉 固结模型与  
孔压系数  $A$ 、 $B$

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

DEL

# 第3章：土体中的应力计算

§ 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓

§ 3.2 有效应力原理 ✓

§ 3.3 自重应力 ✓

§ 3.4 基底压力计算 ✓

§ 3.5 地基附加应力 ✓

§ 3.6 常规三轴压缩试验

--- 教材 § 3.1.2

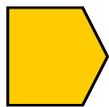
P130 (2nd)

§ 5.3.2

P192 (3rd)

# 常规三轴压缩试验

- Casagrande 1930年首先使用
- 试样采用圆柱形土样，用橡皮膜包裹，放在密封压力室的压力水中，施加轴向力，应力状态明确；变形量测简单
- 可控制排水条件；可完整的描述试样受力、变形和破坏的全过程；可进行不同应力路径的试验



👉 **三轴**：同“单轴”对应，表明土样在三个方向受力

👉 **常规**：同“真”对应，表明土样在两个方向受到相同压力（室压力）的作用，并非真正的三轴应

**DEL**->土力学实验

## § 3.5 常规三轴压缩试验

### ■ 组成：



主机系统

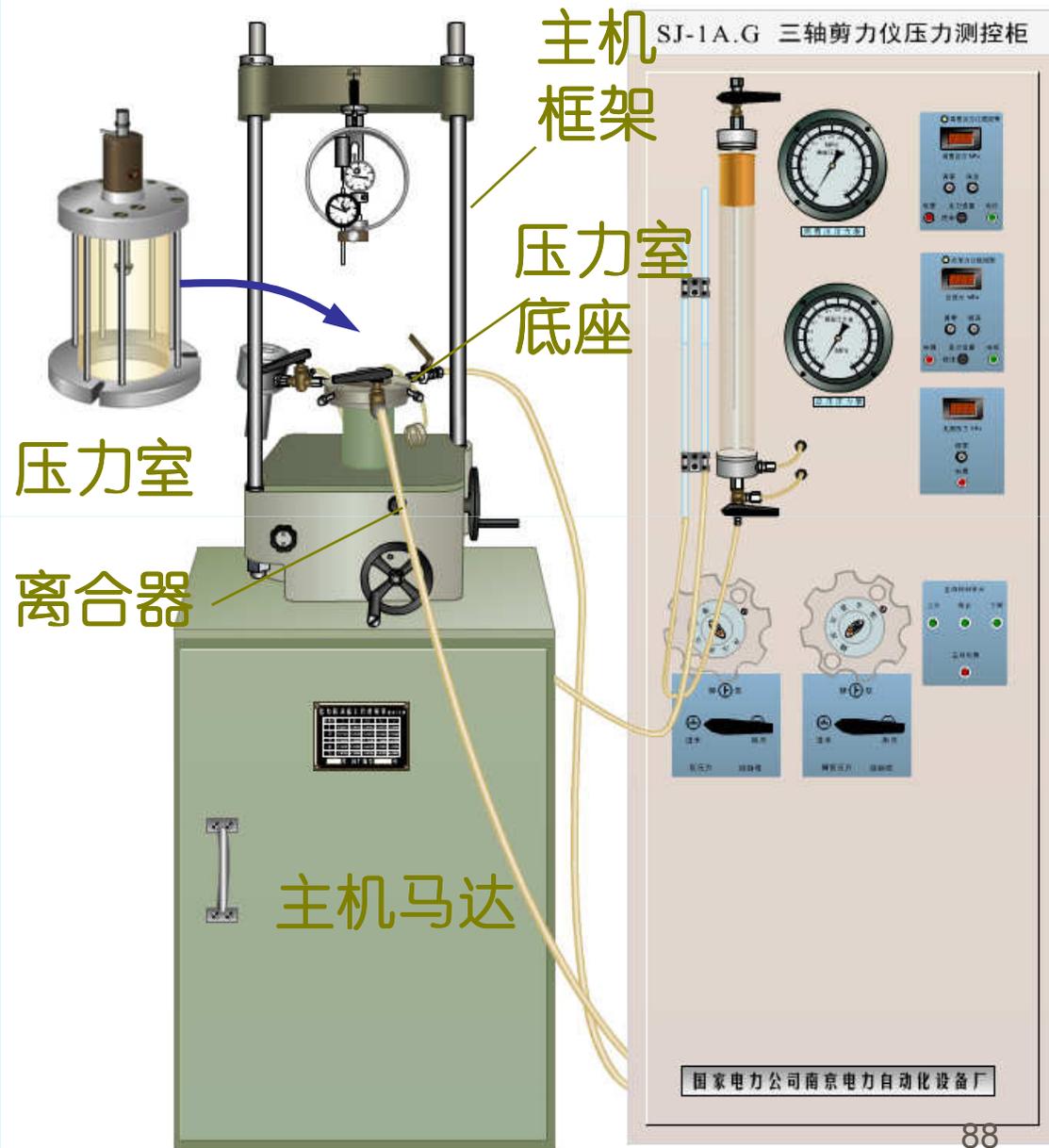


稳压调压系统



量测系统

## 常规三轴 压缩试验仪



## § 3.5 常规三轴压缩试验

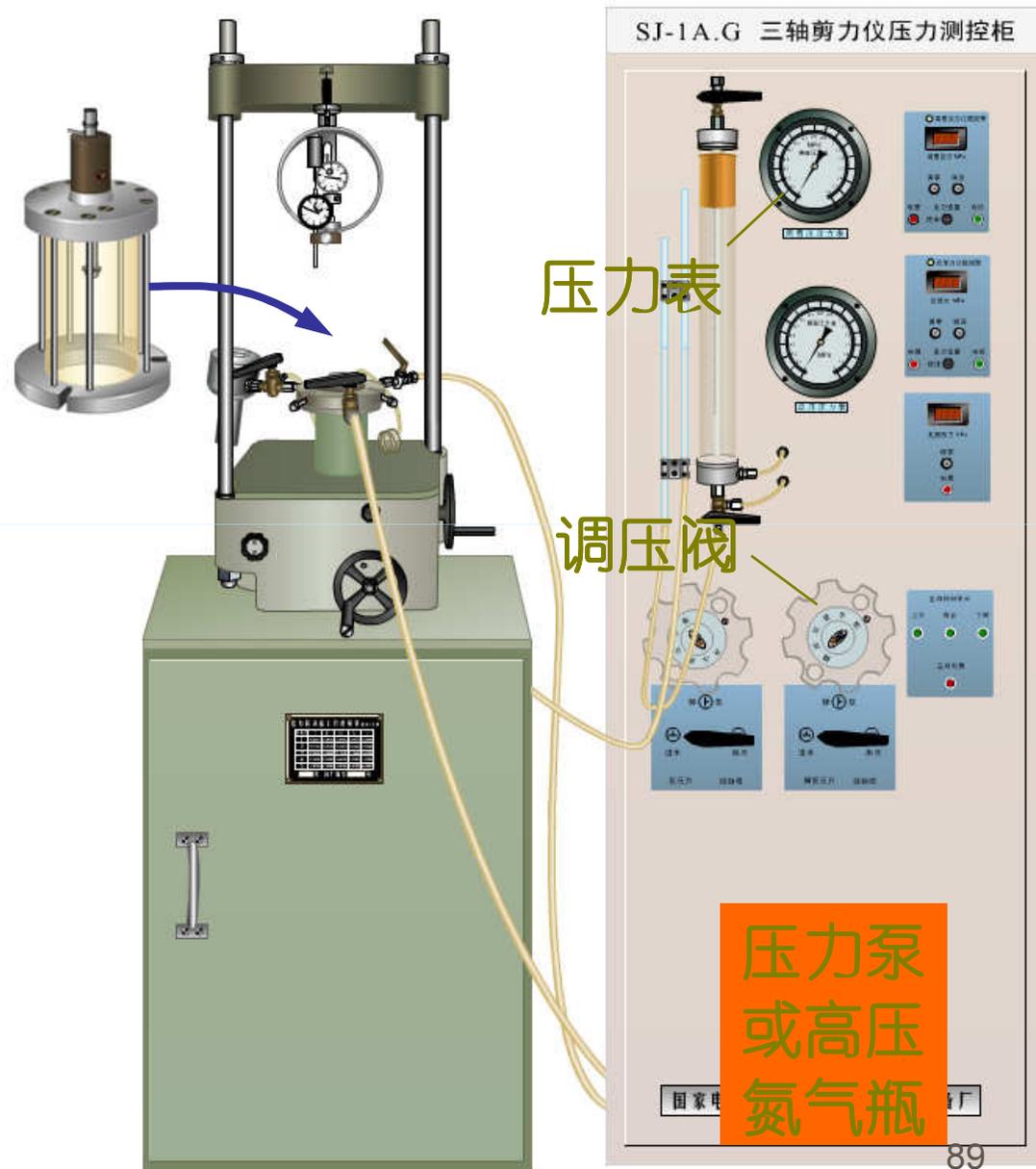
### ■ 组成：

☞ 主机系统

☞ 稳压调压系统

☞ 量测系统

## 常规三轴 压缩试验仪

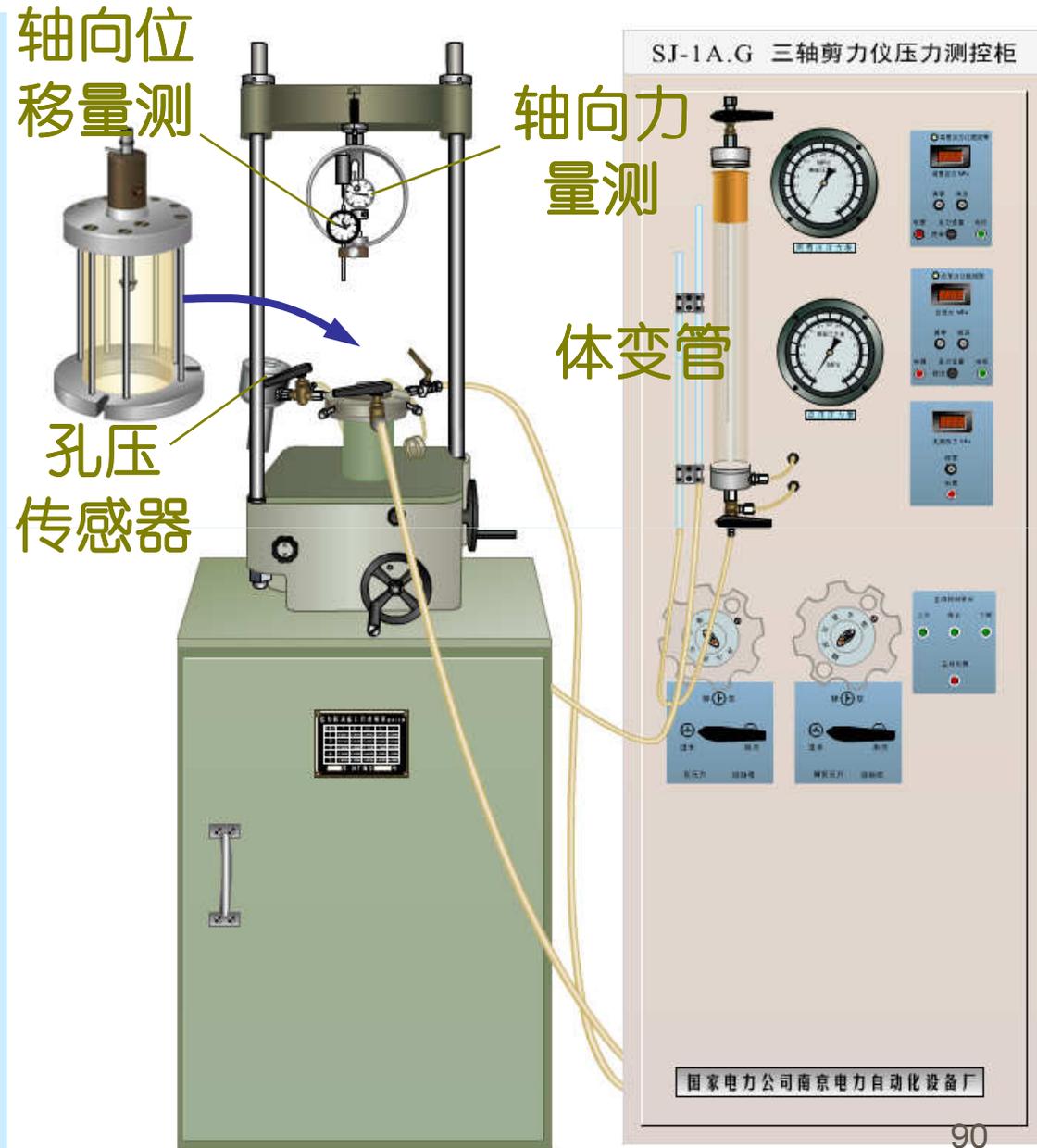


## § 3.6 常规三轴压缩试验

### ■ 组成：

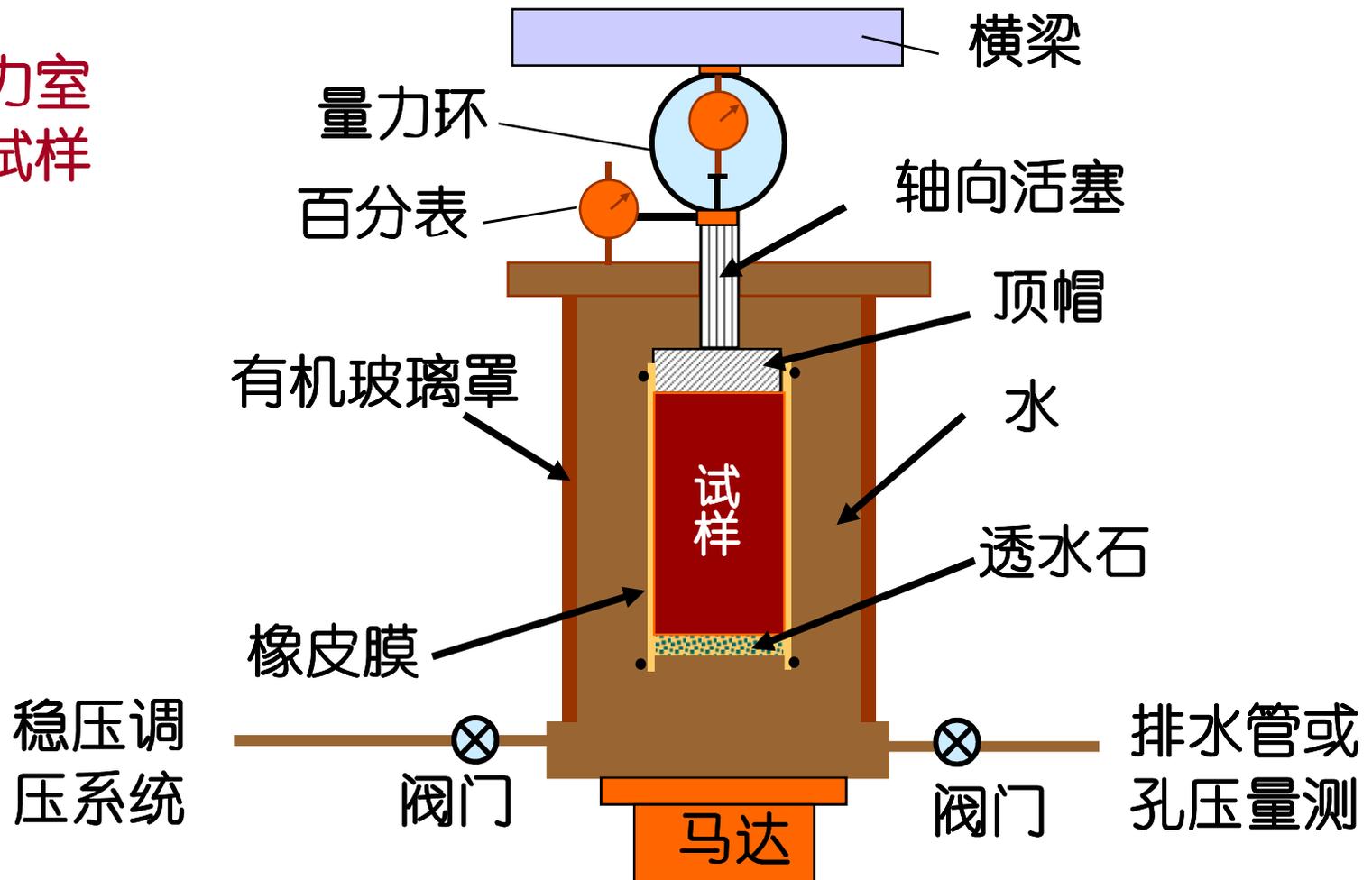
- ☞ 主机系统
- ☞ 稳压调压系统
- ☞ 量测系统

## 常规三轴 压缩试验仪



# 常规三轴压缩试验仪

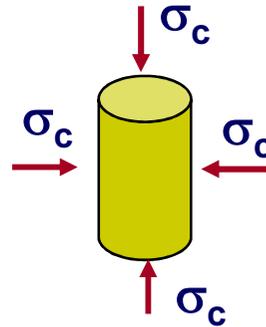
■ 压力室及试样



# 常规三轴压缩试验

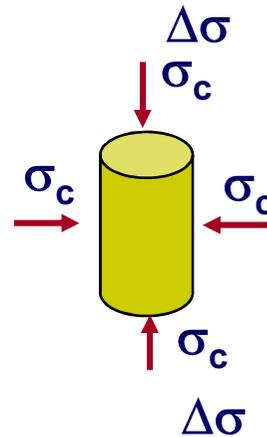
■ 通常试验分为两个阶段：

👉 施加周围压力 $\sigma_3$ ：



过程中，允许试样排水称为**固结**；不允许试样排水称为**不固结**

👉 施加轴向力，进行剪切：



过程中，允许试样排水称为**排水**；不允许试样排水称为**不排水**

# 常规三轴压缩试验

- **常规三轴压缩试验**  
conventional triaxial compression test
  - ☞ 不固结不排水试验[UU]  
unconsolidated-undrained test
  - ☞ 固结不排水试验[CU]  
consolidated-undrained test
  - ☞ 固结排水试验[CD]  
consolidated-drained test

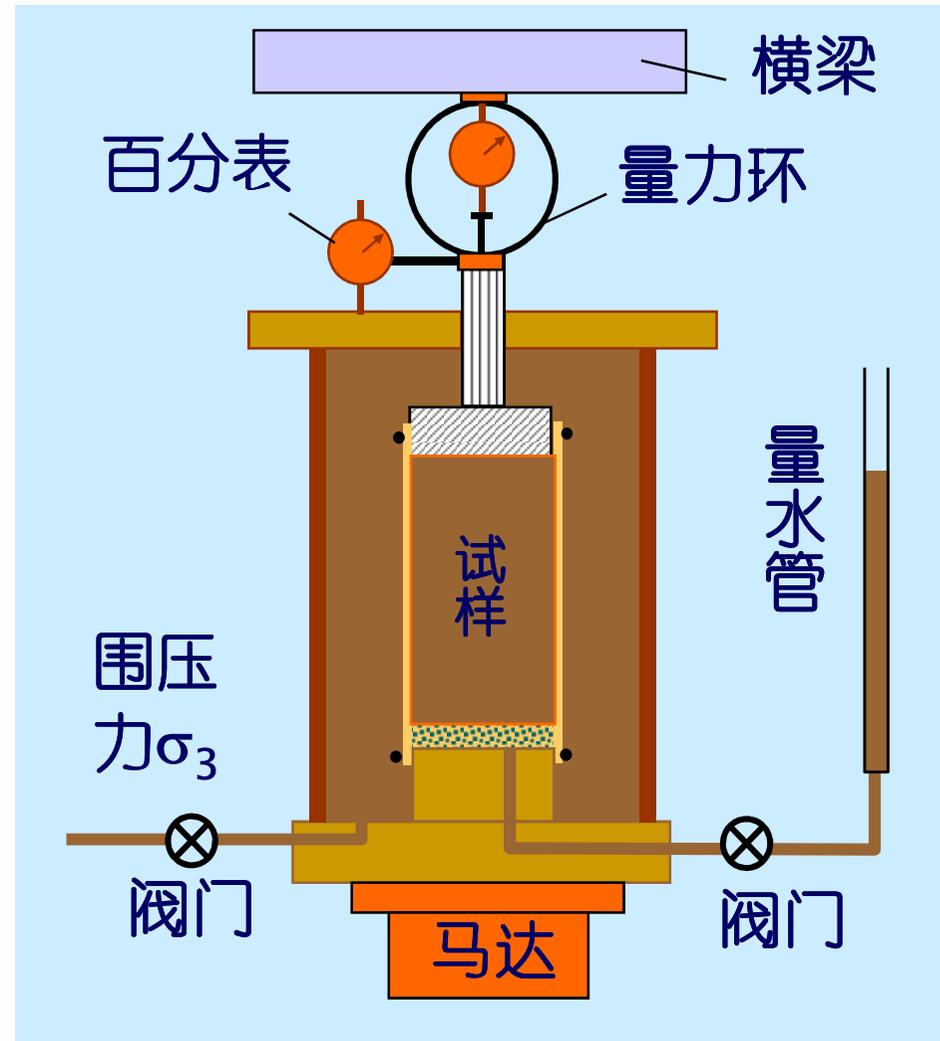
## 固结排水试验

### ■ 试验过程：

- 施加围压 $\sigma_3$ ，排水阀门始终打开，充分排水
- 施加 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 进行剪切时，排水阀门始终打开。剪切速度慢足以使孔压消散

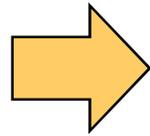
### ■ 测定：

- 轴向变形：轴向应变
- 轴向力：轴向应力
- 排水量：体积应变

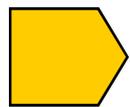


# 固结排水试验

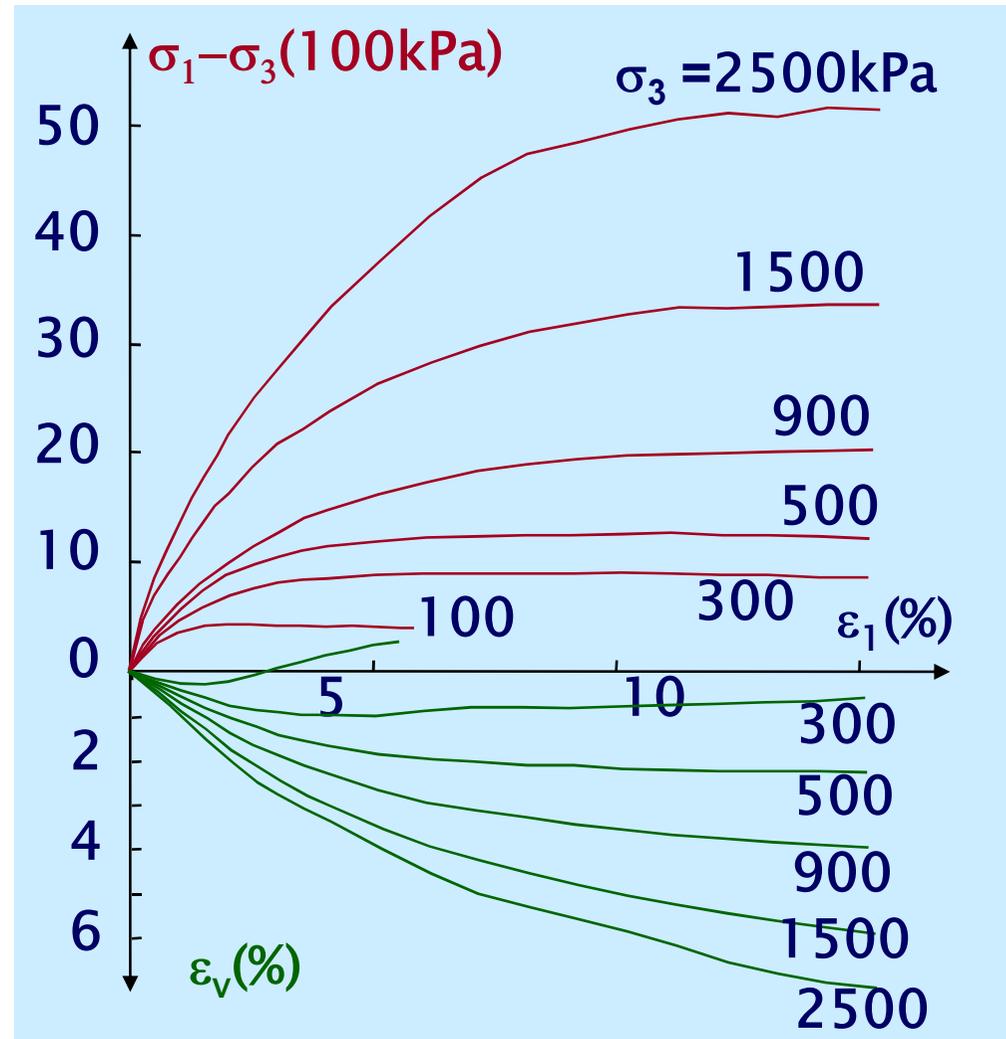
## ■ 典型试验结果



糯扎渡高心墙堆石坝  
心墙砾石土料试验结果



- 与围压有关
- 非线性
- 剪胀性



# 固结排水试验

## ■ 一般化的应力应变曲线

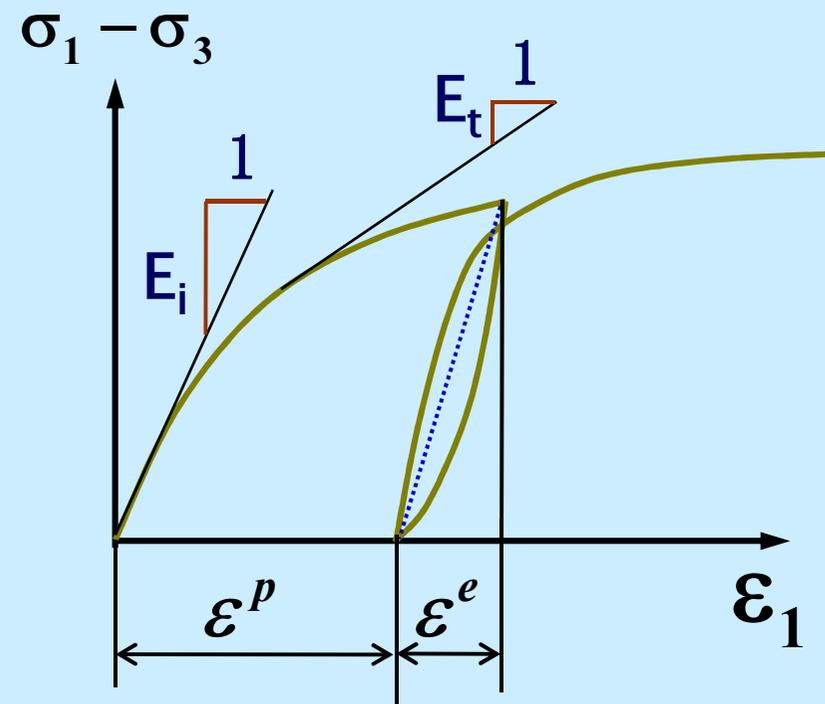
- 变形模量： $E = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}$

≠ 弹性模量

- 泊松比：

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_z} = -\frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1}$$

土的一般化的应力应变曲线



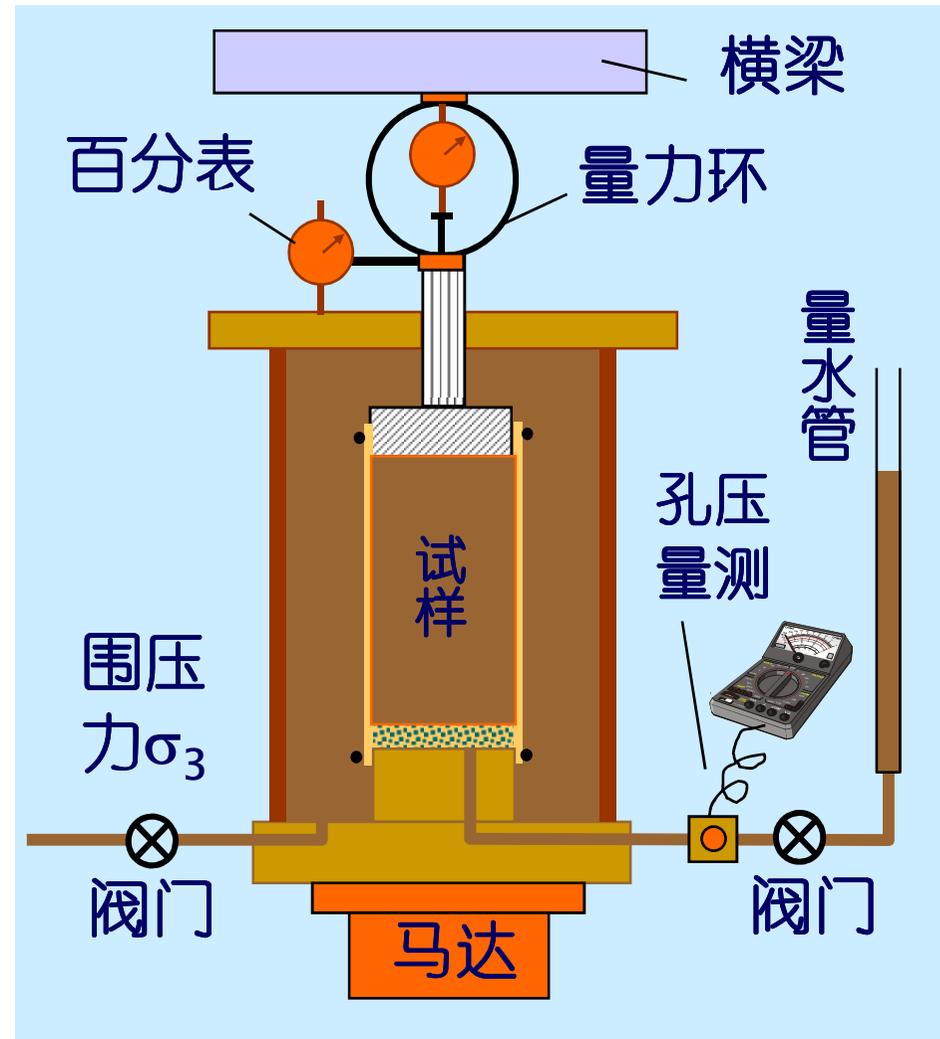
# 固结不排水试验

## ■ 试验过程

- 施加围压 $\sigma_3$ ，排水阀门始终打开，充分排水
- 施加 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 进行剪切时，排水阀门关闭。用孔压传感器量测剪切过程中产生的超静孔隙水压力 $u$

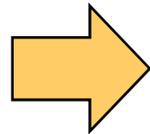
## ■ 测定：

- 轴向变形：轴向应变
- 轴向力：轴向应力
- 孔隙水压力

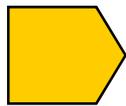


# 固结不排水试验

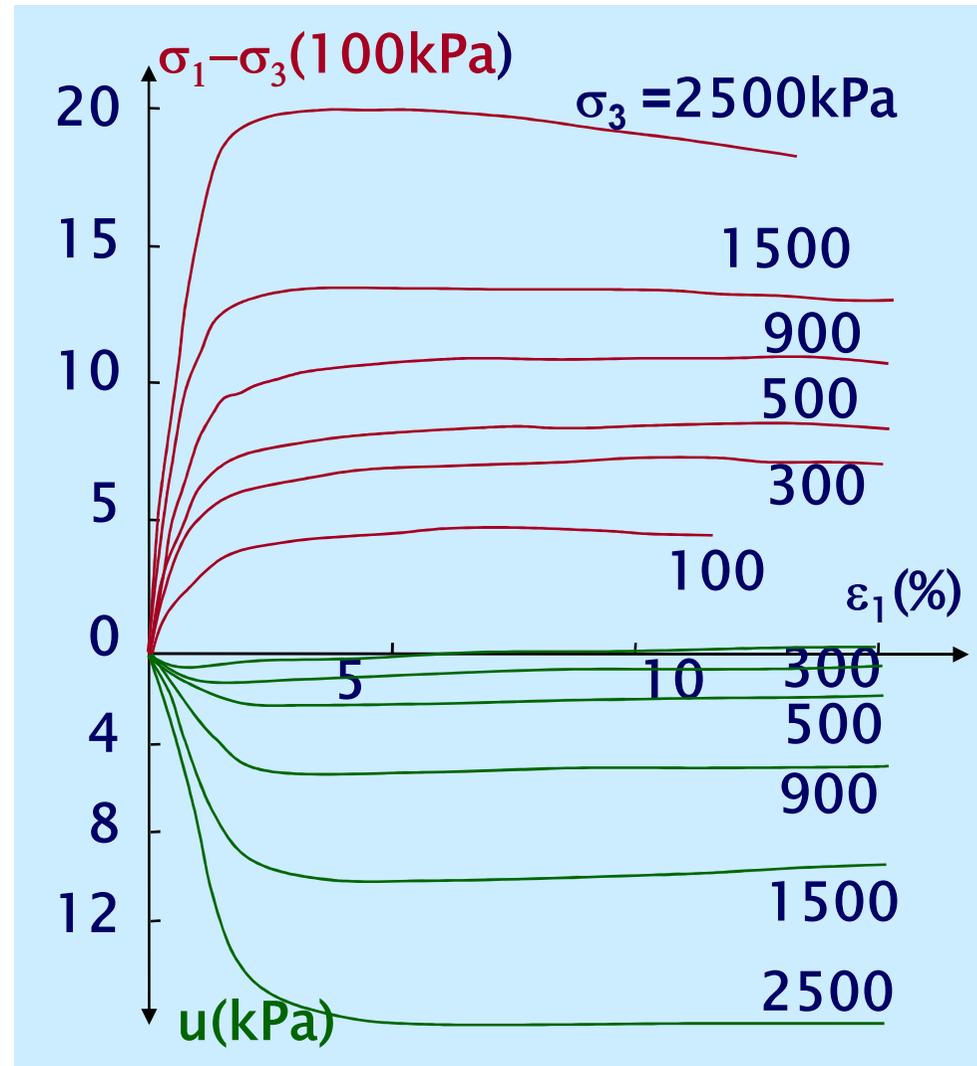
## ■ 典型试验结果：



糯扎渡高心墙堆石坝  
心墙砾石土料试验结果



- 与围压有关
- 非线性
- 剪切过程产生孔压



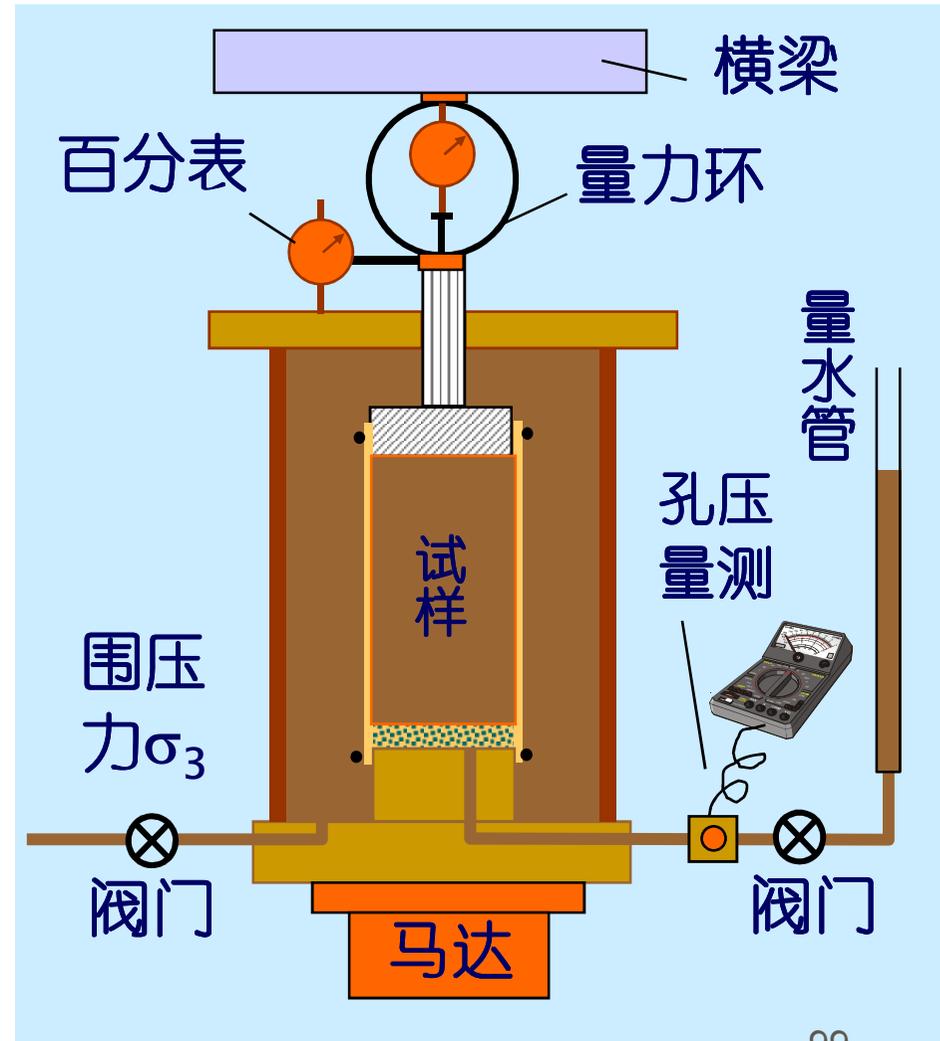
# 不固结不排水试验

## ■ 试验过程：

- 关闭排水阀门，连接孔压传感器，施加围压 $\sigma_3$ ，量测超静孔隙水压力  $\Delta u_B$
- 施加 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 进行剪切时，关闭排水阀门。用孔压传感器量测剪切过程中产生的超静孔隙水压力  $\Delta u_A$

## ■ 测定：

- 轴向变形：轴向应变
- 轴向力：轴向应力
- 孔隙水压力



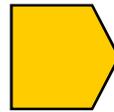
# 小 结

 试验仪器

 试验方法

 典型试验结果

 应力应变特点



- 不固结不排水试验[UU]
- 固结不排水试验[CU]
- 固结排水试验[CD]

# 第3章：土体中的应力计算

-  § 3.1 应力状态及应力应变关系 ✓
-  § 3.2 有效应力原理 ✓
-  § 3.3 自重应力 ✓
-  § 3.4 基底压力计算 ✓
-  § 3.5 地基附加应力 ✓
-  § 3.6 常规三轴压缩试验 ✓

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

Th e e n d

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](mailto:xingzhengwu@163.com)