# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

✧ 本章提要

- 土的压缩性 -测试方法和指标
- 地基的最终沉降量-分层总合法
- 地基的沉降过程-饱和土渗流固结理论

✧ 本章特点

- 有一些较严格的理论
- 有较多经验性假设和公式

✧ 学习难点

- 应力历史及先期固结压力
- 不同条件下的总沉降量计算
- 渗流固结理论及参数

## 土的压缩变形问题

- 土的压缩性测试方法 → 试验方法
- 一维压缩性及其指标 → 压缩性指标
- 地基的最终沉降量计算 → 沉降的大小
- 饱和土体的渗流固结理论 → 沉降的过程

# 土的压缩性与地基沉降计算

# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述

§5.1　土的压缩性测试方法

§5.2　一维压缩性及其指标

§5.3　地基的最终沉降量计算

§5.4　饱和土体的渗流固结理论

P86　5.1

左部：1709年
右部：1622年
地基：20多米厚粘土

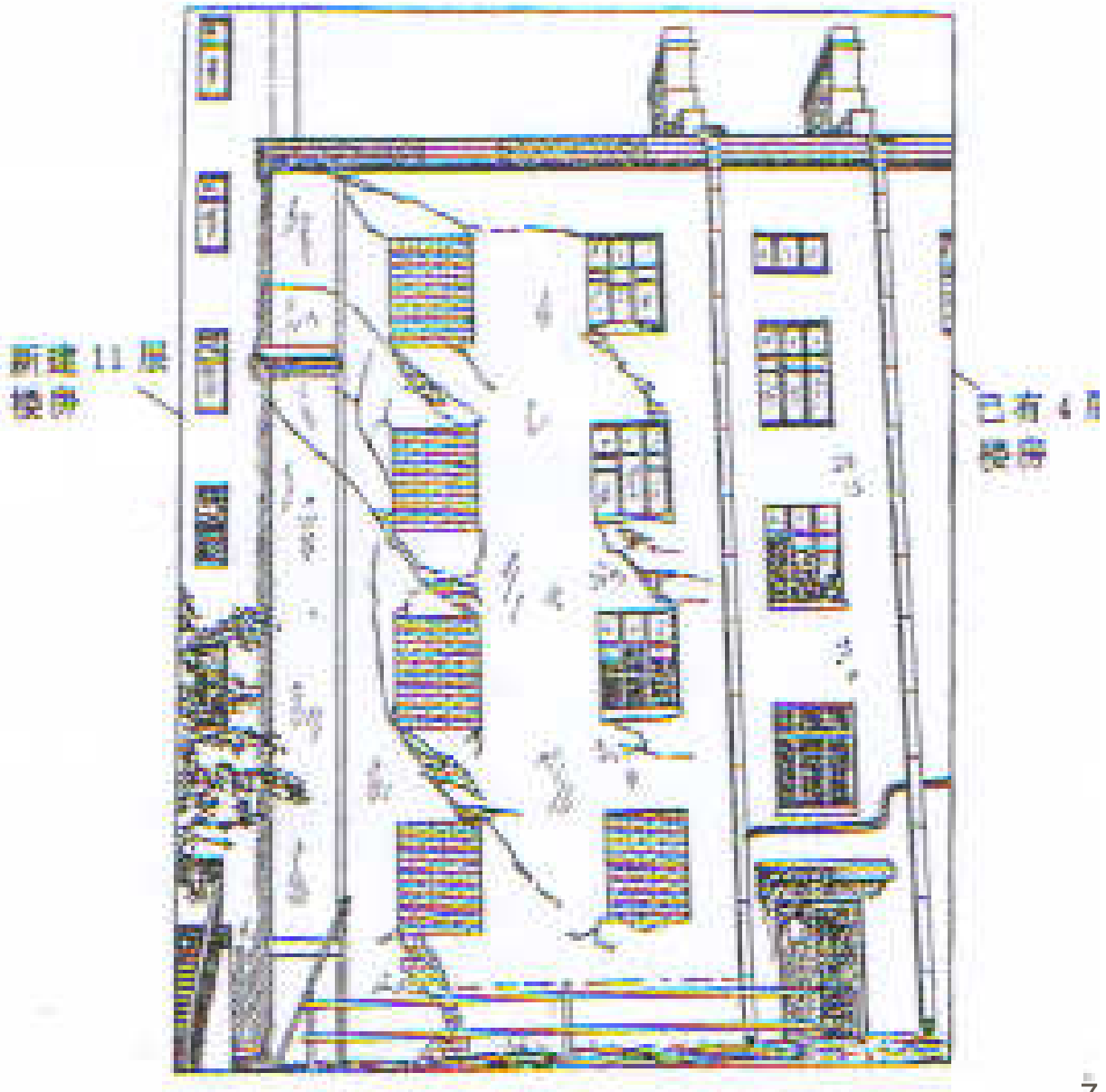
问题：
沉降2.2米，且左右两部分存在明显的沉降差。左侧建筑物于1969年加固

# 工 程 实 例

# 工 程 实 例

# 工 程 实 例

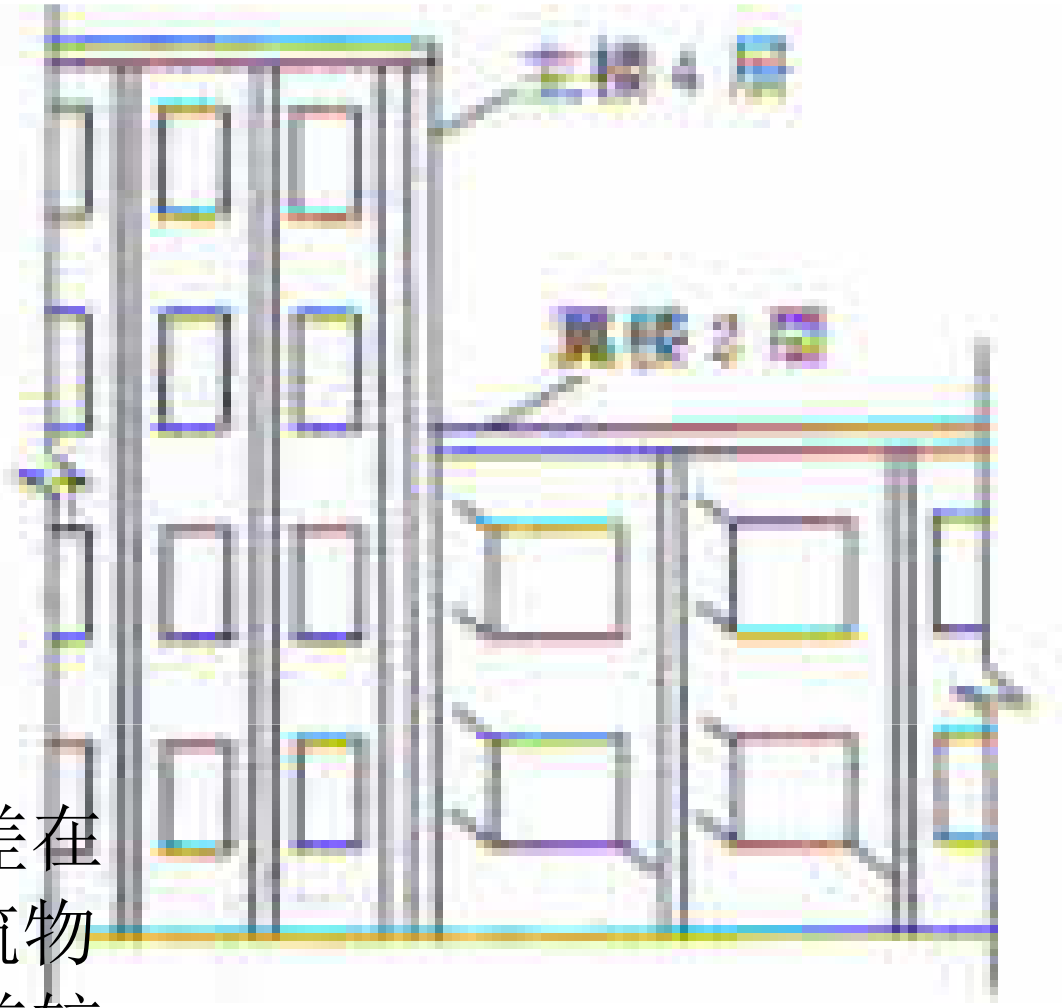
新建筑引起原有建筑物开裂



高层建筑物由于不均匀沉降而被爆破拆除

# 工 程 实 例

# 建筑物立面高差过大

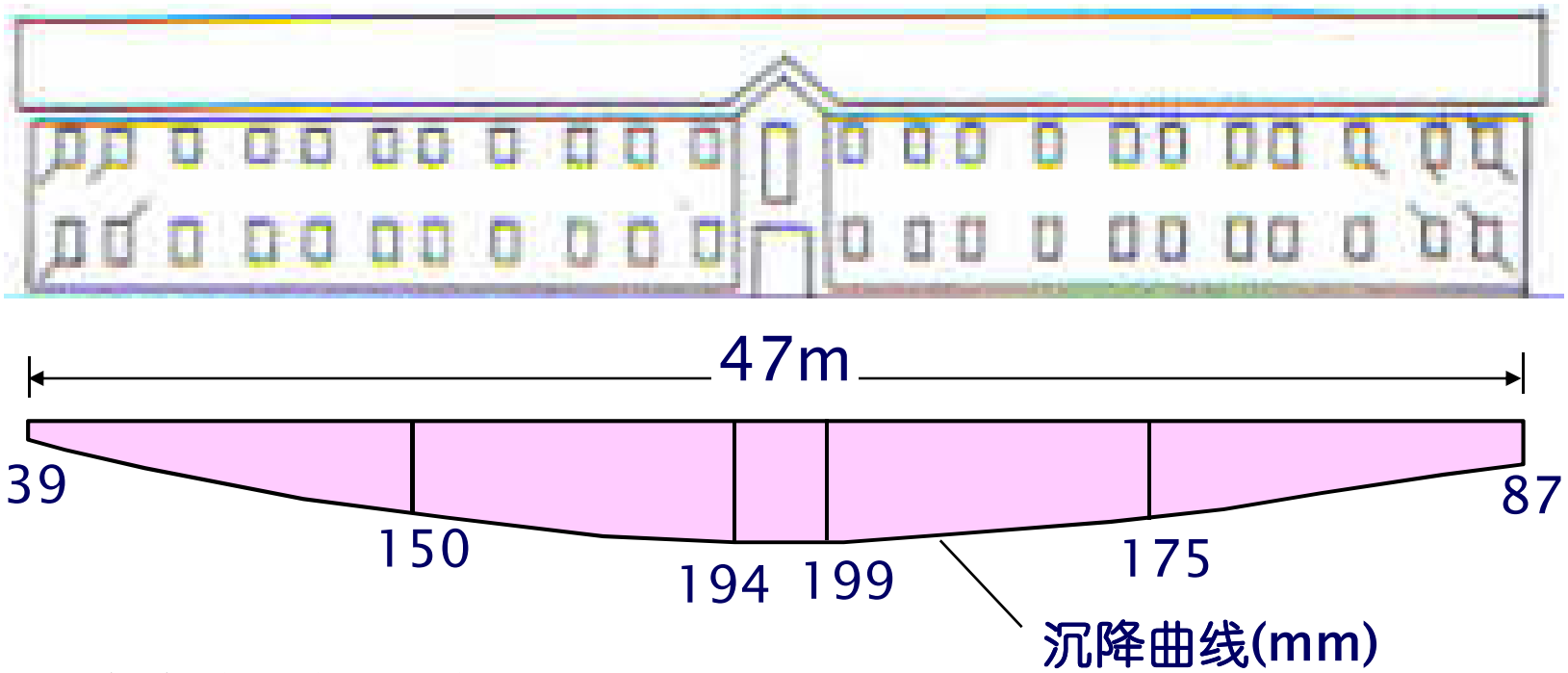


当建筑物立面高差在6 m以上，或建筑物有错层且楼层高差较大，或建筑物各部分结构刚度截然不同时，应设防震缝。

## 工 程 实 例

控制建筑物的长高比及合理布置墙体

建筑物过长：长高比7.6:1




长高比过大的建筑物因不均匀沉降墙体产生裂缝 中部沉降大

工 程 实 例

## §5.1 概述

☞ 压缩性测试
- 室内：三轴压缩
  侧限压缩
- 室外：荷载试验
  旁压试验

→ §5.1 土的压缩性测试方法
§5.2 一维压缩性及其指标

☞ 最终沉降量
- 一维压缩：基本方法
- 复杂条件：修正

→ §5.3 地基的最终沉降量计算

☞ 沉降速率
- 一维固结
- 三维固结

→ §5.4 饱和土体的渗流固结理论

☞ 主线、重点：一维问题！

# 概　述

# 第四章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述 √

§5.1　土的压缩性测试方法

§5.2　一维压缩性及其指标

§5.3　地基的最终沉降量计算

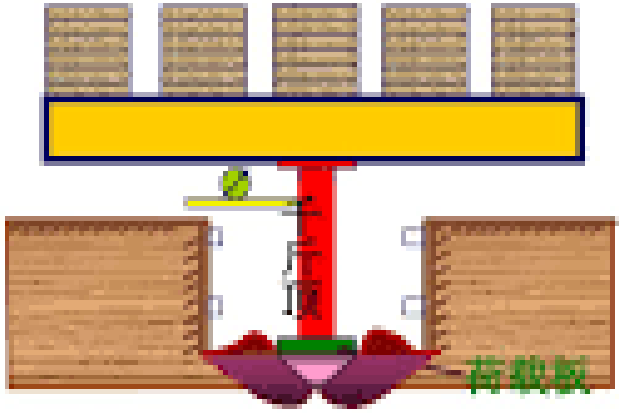
§5.4　饱和土体的渗流固结理论

P87　5.2

室内试验
- 侧限压缩试验 → 一维问题
- 三轴压缩试验 → 三轴应力状态
- 其它特殊试验

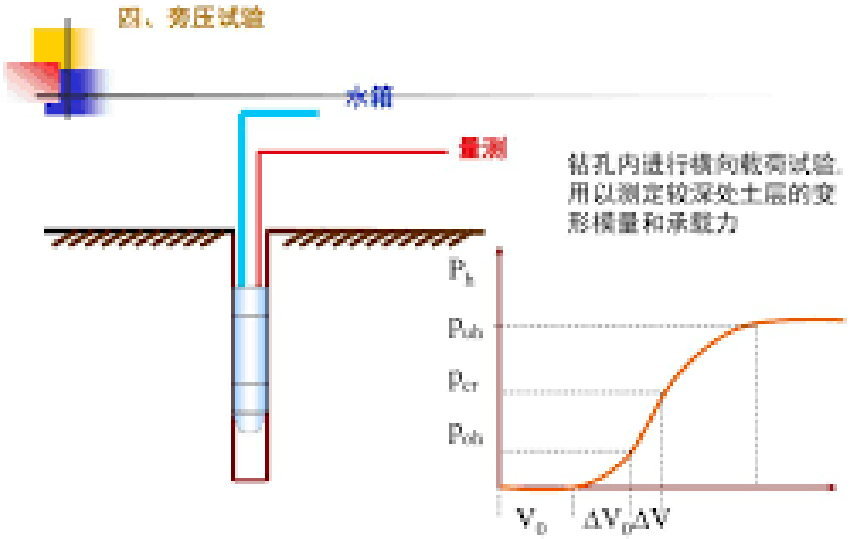
现场试验
- 荷载试验
- 旁压试验

# 土的变形特性测定方法



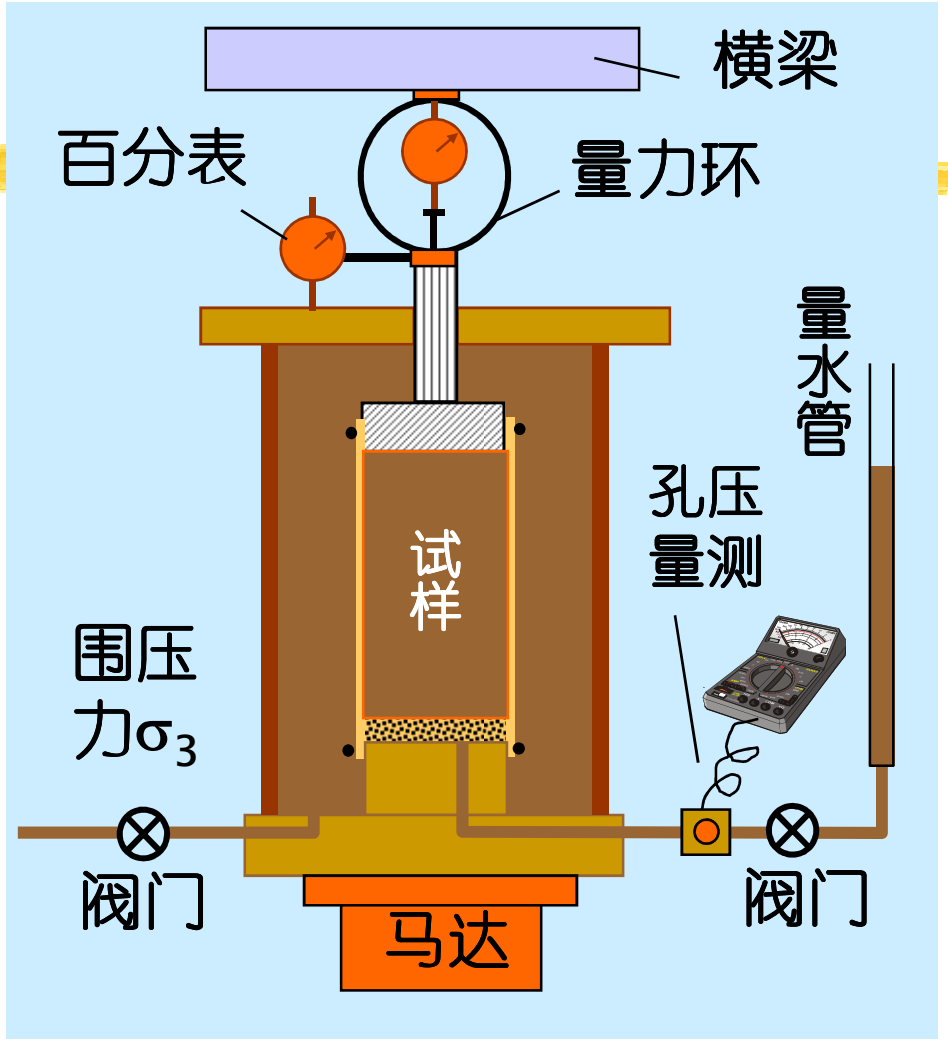
- 荷载试验

原位试验确定地基承载力



## 常用试验类型

| 类型 | 施加 $\sigma_3$ | 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 |




# 常规三轴压缩试验

## ■ 一般化的应力应变曲线

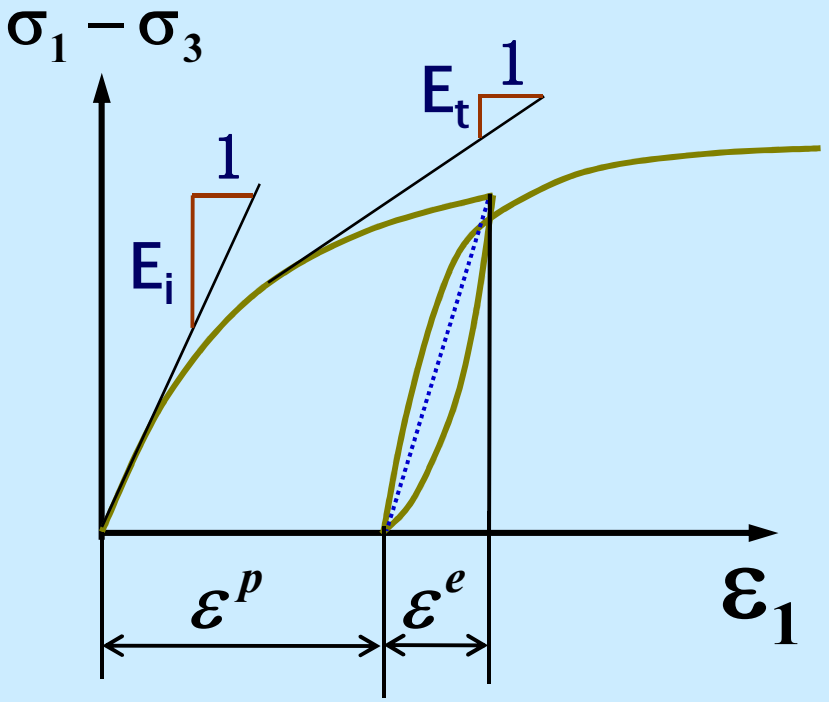
- 变形模量： $E = \dfrac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}$

  ≠ 弹性模量

- 泊松比： $\nu = -\dfrac{\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_z} = -\dfrac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1}$

  - 与围压有关
  - 非线性（弹塑性）
  - 剪胀性

土的一般化的应力应变曲线




**固结排水试验**

- 固结容器：

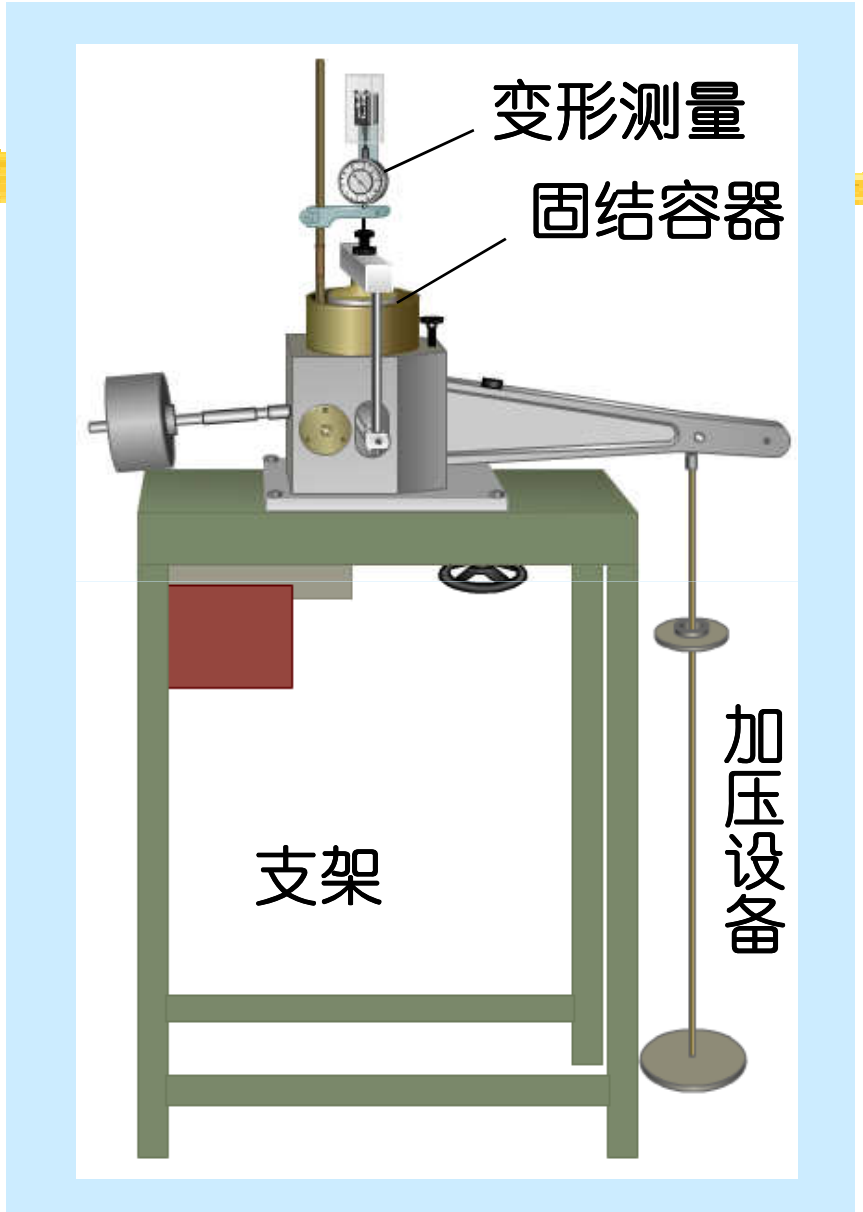
  环刀、护环、导环、透水石、加压上盖和量表架等

- 加压设备：杠杆比例

1:10/12

- 变形测量设备

**侧限压缩（固结）仪**




P87　5.2.1

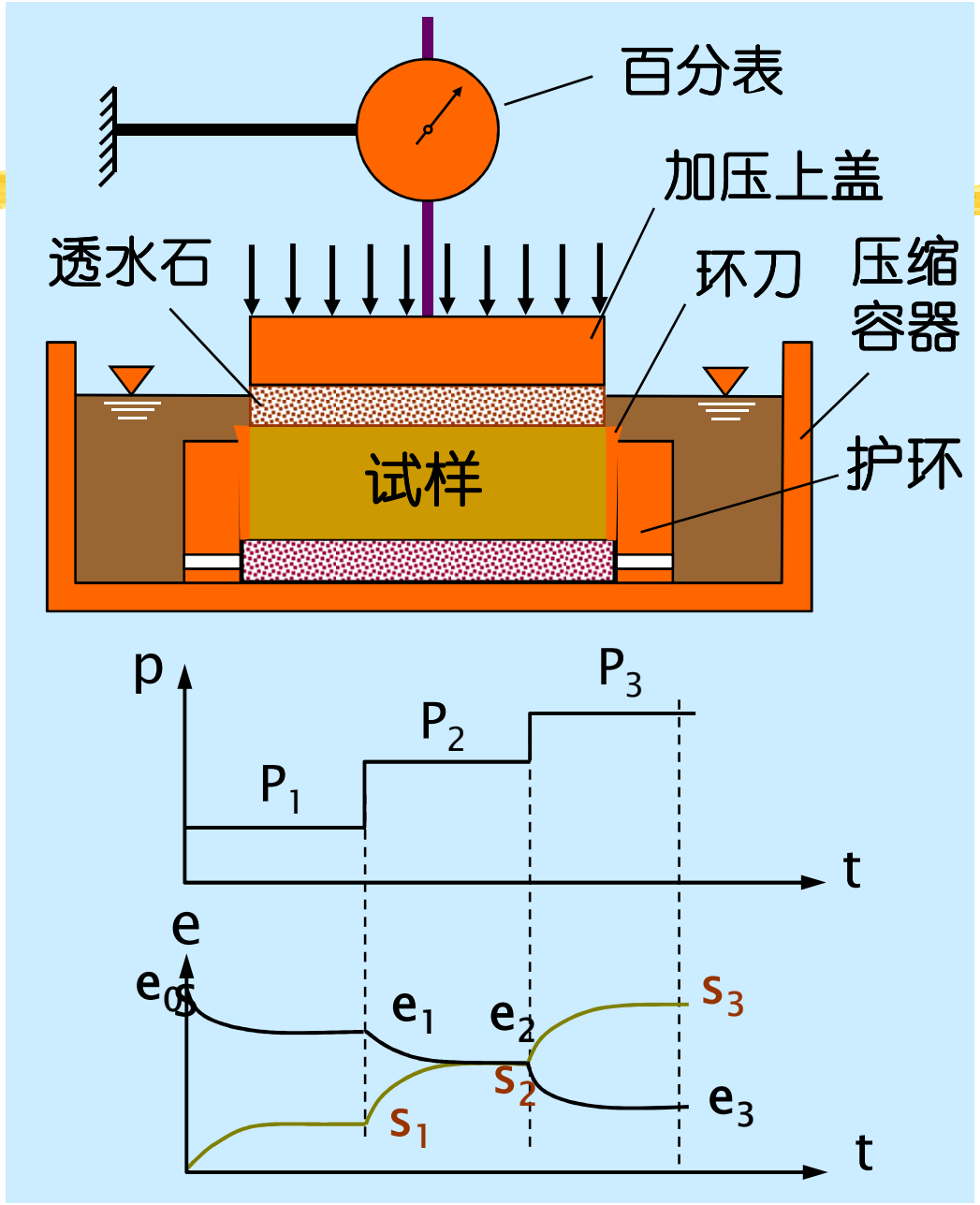
## §5.1 土的压缩性测试方法

### ■ 侧限压缩试验

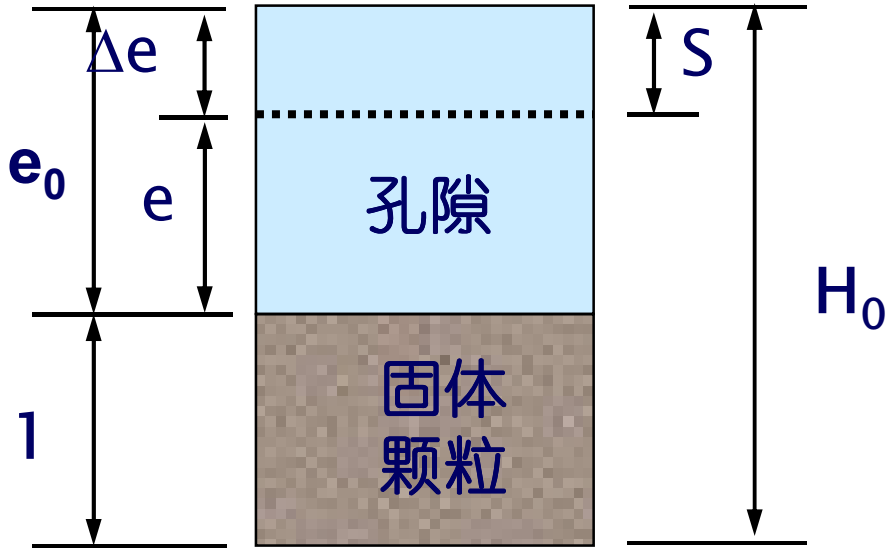
- 施加荷载，静置至变形稳定
- 逐级加大荷载

### ■ 测定：

- 轴向压缩应力
- 轴向压缩变形



P128 图4-2




由三相草图：

$$\frac{H_0}{H_0 - S} = \frac{1 + e_0}{1 + e}$$

$$e = e_0 - (1 + e_0)\frac{S}{H_0}$$

可得到e-p关系

P88 式5-7

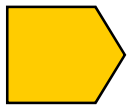
# 侧限压缩试验

## ■ 压缩曲线及特点

- 侧限变形（压缩）模量：

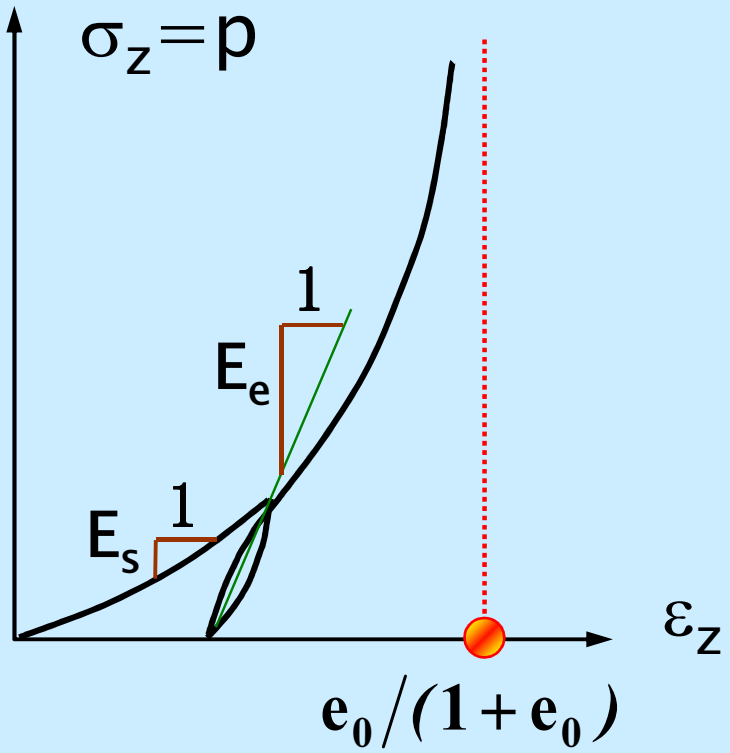
加载： $E_s = \dfrac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}$

卸载和重加载： $E_e = \dfrac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}$



非线性
弹塑性

土的一般化的压缩曲线




# 侧限压缩试验

土体的变形特性 → 土体的特点：散粒体

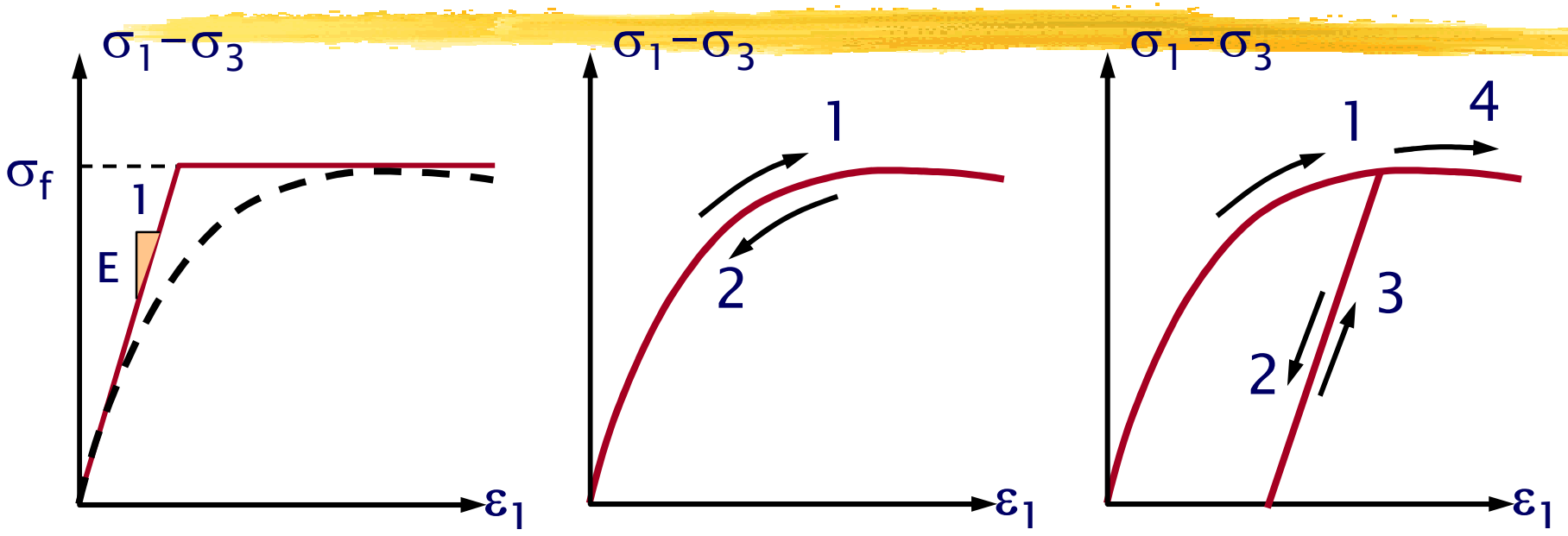
- 弹性变形
  - 接触点处弹性变形
  - 弹性挠曲变形
  - 颗粒翻转的可逆性
  - 封闭气泡受压

- 塑性变形
  - 大孔隙消失
  - 接触点颗粒破碎
  - 颗粒相对滑移
  - 扁平颗粒断裂

☞ 体应变主要由孔隙体积变化引起
☞ 剪应变主要由土颗粒的大小和排列形态变化引起

# 土体变形的机理

DEL




线弹性-理想塑性　　非线性弹性　　弹塑性

# 土的本构模型

DEL

自学

P134 5个特性

土工设计中，采用有代表性的土样，在符合或接近实际应力状况的条件下进行实验，才能获得较为正确的应力变形指标

**荷载试验与旁压试验**

DEL

# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述 √

§5.1　土的压缩性测试方法 √

§5.2　一维压缩性及其指标

§5.3　地基的最终沉降量计算

§5.4　饱和土体的渗流固结理论

- ε – p（或σ′）曲线
- e – p（或σ′）曲线
- e – lgp（或lgσ′）曲线

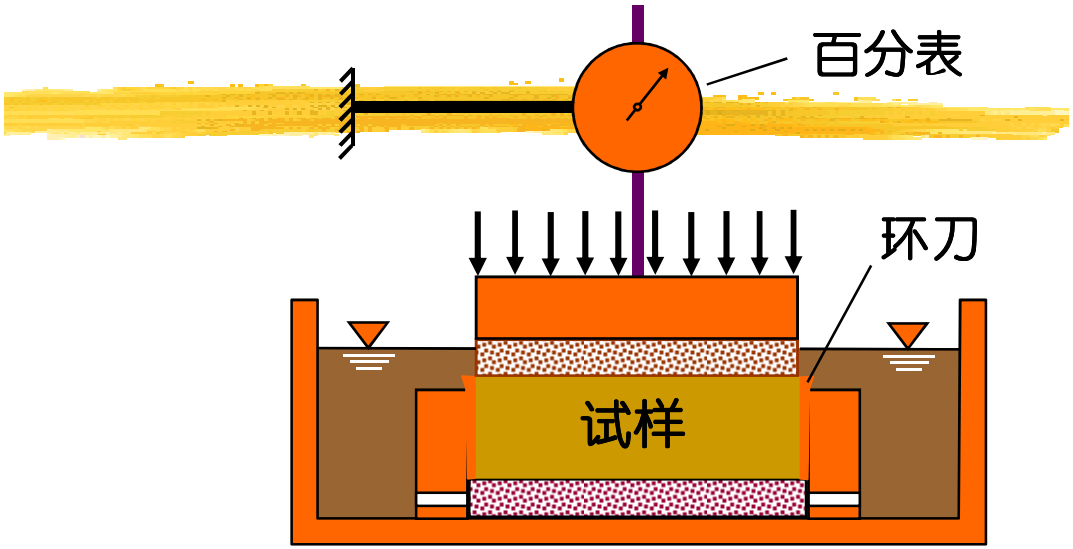
} 由侧限压缩试验整理得到的三条常用曲线

- 先期固结压力
- 原位压缩曲线及原位再压缩曲线

P89 3

# 一维压缩性及其指标

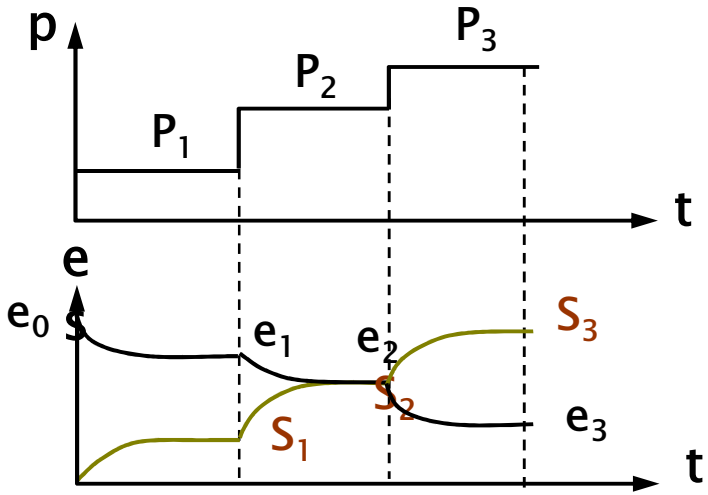
- 已知：
  - 试样初始高度$H_0$
  - 试样初始孔隙比$e_0$



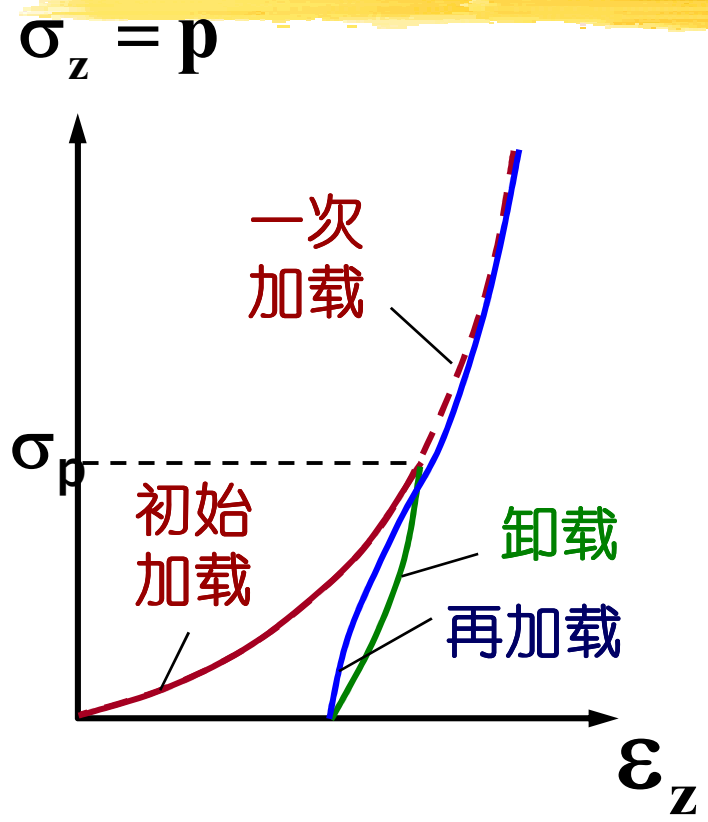

- 试验结果：

每级压力p作用下，
试样的压缩变形S

# 侧限压缩试验



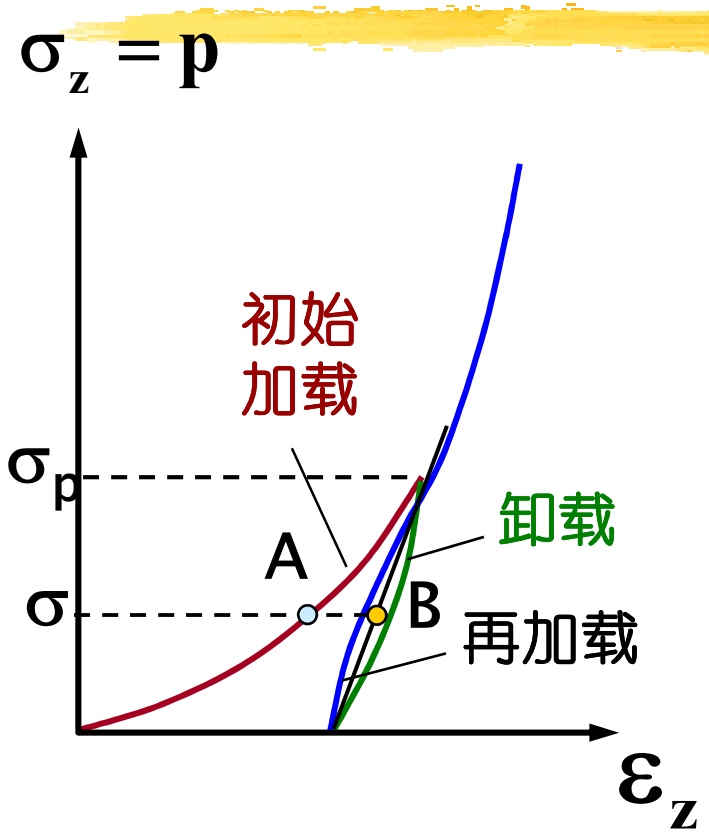
## ■ 卸载和再加载曲线




- 在试验曲线的卸载和再加载段，土样的变形特性同初始加载段明显不同，前者的刚度较大
- 在再加载段，当应力超过卸载时的应力$\sigma_p$时，曲线逐渐接近一次加载曲线
- 卸载和再加载曲线形成滞回圈

**侧限压缩试验**

## ■ 应力历史及影响




■ 土体在历史上所承受过的应力情况（包括最大应力等）称为应力历史

☞ 土样在A和B点所处的应力状态完全相同，但其变形特性差别很大

应力历史的影响非常显著

**侧限压缩试验**

- 侧限压缩（变形）模量

KPa ,MPa

$$E_s = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon}$$

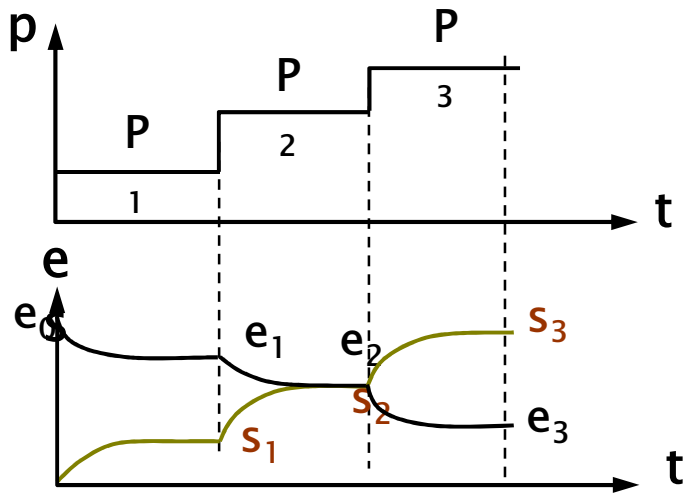
初始加载$E_s$

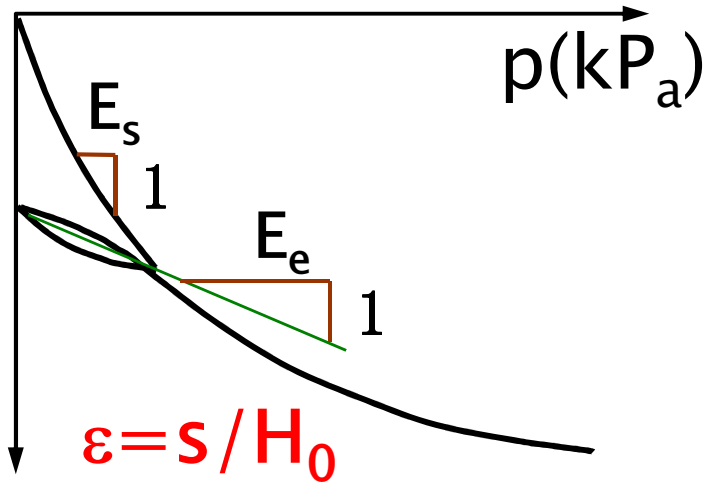
卸载和重加载$E_e$

P90 式5-13

- 体积压缩系数：$m_v = \frac{1}{E_s}$

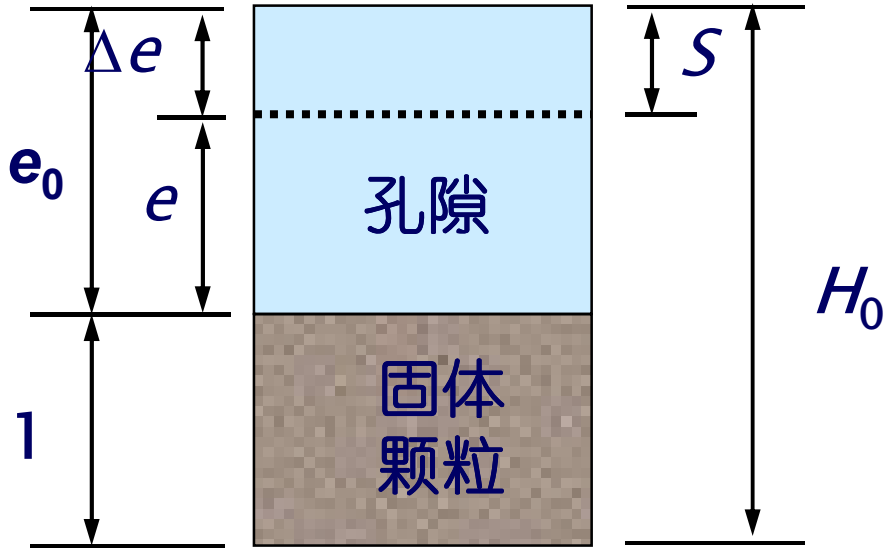
单位压应力变化引起的应变的变化




**ε – p曲线**

P128 图4-2




由三相草图：

$$\frac{H_0}{H_0 - S} = \frac{1 + e_0}{1 + e}$$

$$e = e_0 - (1 + e_0)\frac{S}{H_0}$$

可得到*e*–*p*关系

# 侧限压缩试验

P88　式5-7

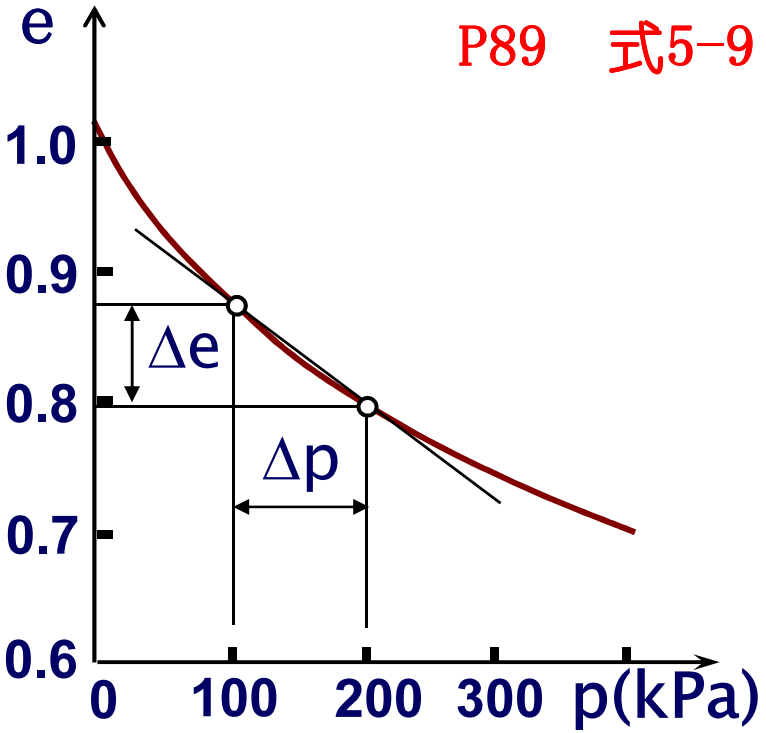
前面已经给出

■ 压缩系数

KPa$^{-1}$，MPa$^{-1}$

$$a = -\frac{\Delta e}{\Delta p}$$

P89 式5-9

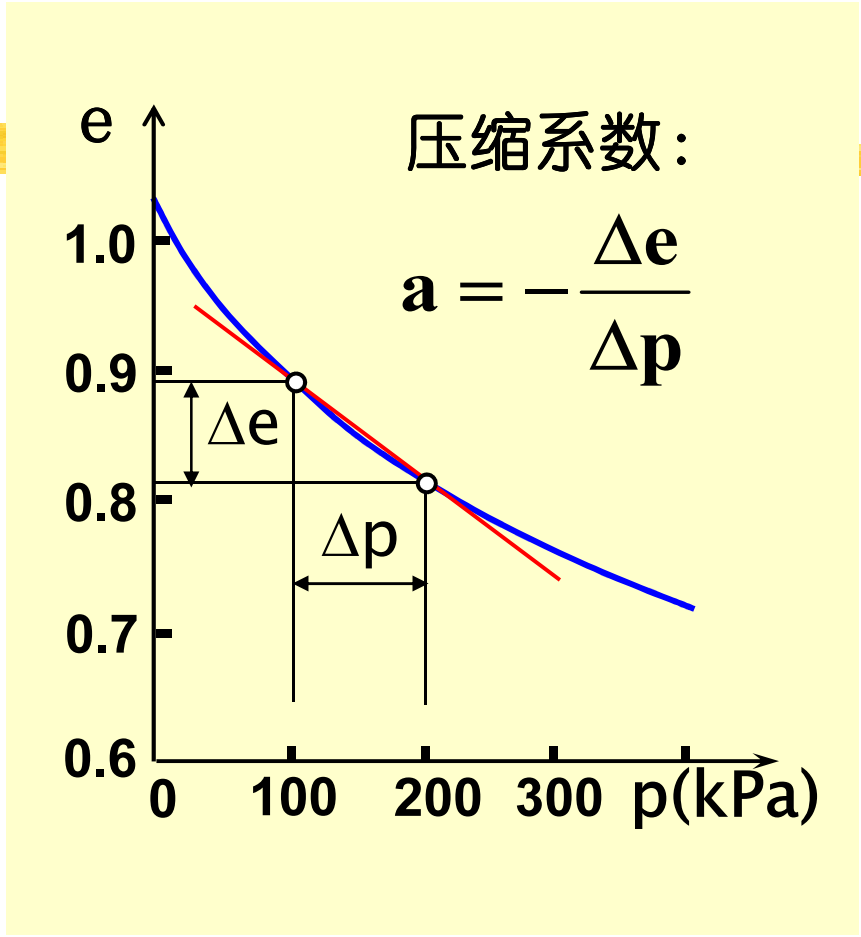



- 不同土的压缩系数不同，a越大，土的压缩性越大
- 同种土的压缩系数a不是常数，与应力p有关
- 通常用$a_{1-2}$即应力范围为100-200 kPa的a值对不同土的压缩性进行比较，$a_{1-2}$

**e-p曲线**

✧ 压缩系数$a_{1-2}$常用作比较土的压缩性大小

| 土的类别 | $a_{1-2}$ (MPa$^{-1}$) |
|---|---|
| 高压缩性土 | >0.5 |
| 中压缩性土 | 0.1-0.5 |
| 低压缩性土 | <0.1 |

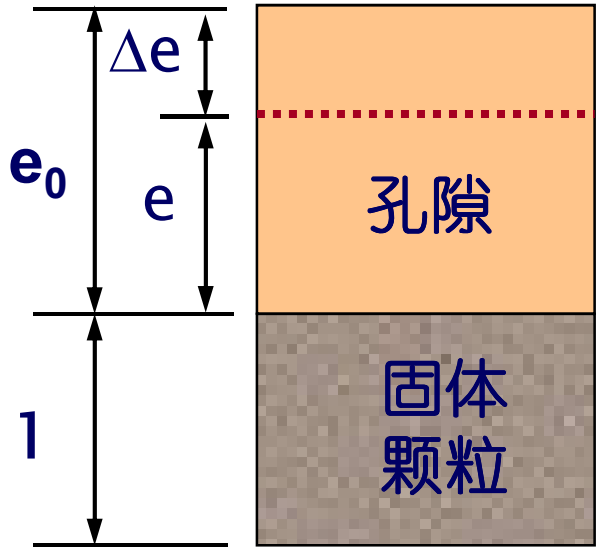



# e–p曲线–压缩系数a

P88 图5–2

■ 侧限压缩模量 $E_s = \dfrac{\Delta p}{\Delta \varepsilon}$ P90 式5-13

■ 压缩系数 $a = -\dfrac{\Delta e}{\Delta p}$




$$\Delta \varepsilon = -\frac{\Delta e}{1+e_0} \Rightarrow E_s = \frac{1+e_0}{a}$$

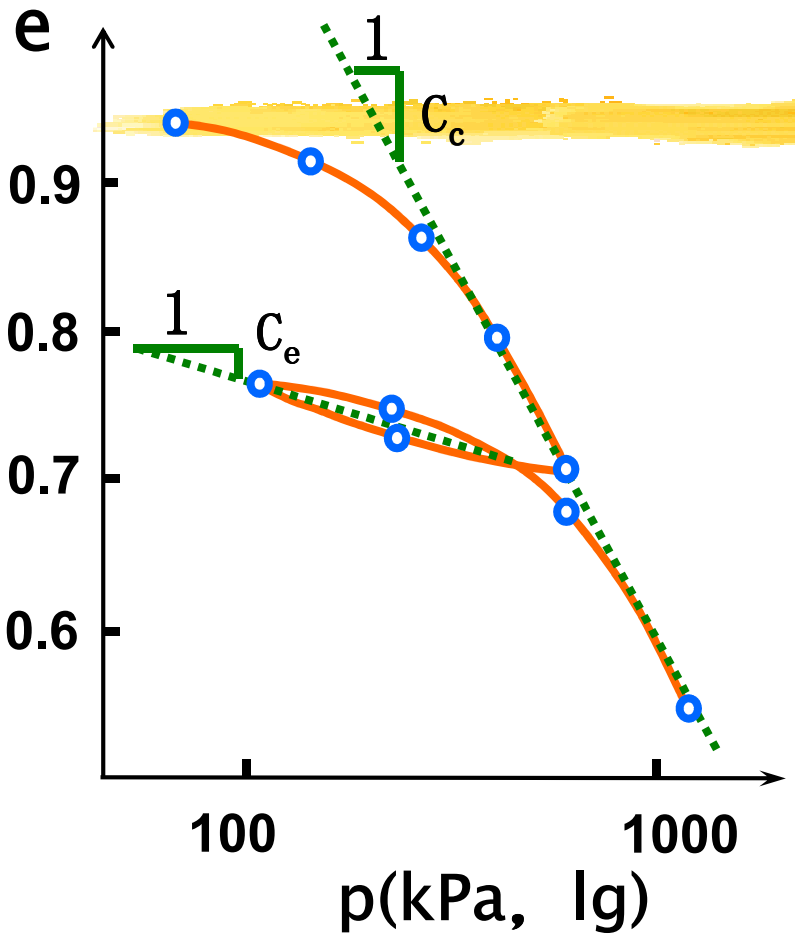
P91 式5-15 记住

■ 体积压缩系数 $m_v = \dfrac{1}{E_s} = \dfrac{a}{1+e_0}$ DEL

P135 Eq. (4-12)

# 压缩指标间的关系

P91 式5-15




■ 特点：在压力较大部分，接近直线段

反映了土的应力历史

■ 指标：

- 压缩指数 $C_c = -\dfrac{\Delta e}{\Delta(\lg p)}$

P90 式5-10

- 回弹指数（再压缩指数） $C_e$

$C_e << C_c$，

一般$C_e \approx 0.1\text{-}0.2C_c$

P90 图5-4

# e-lgp曲线

记住

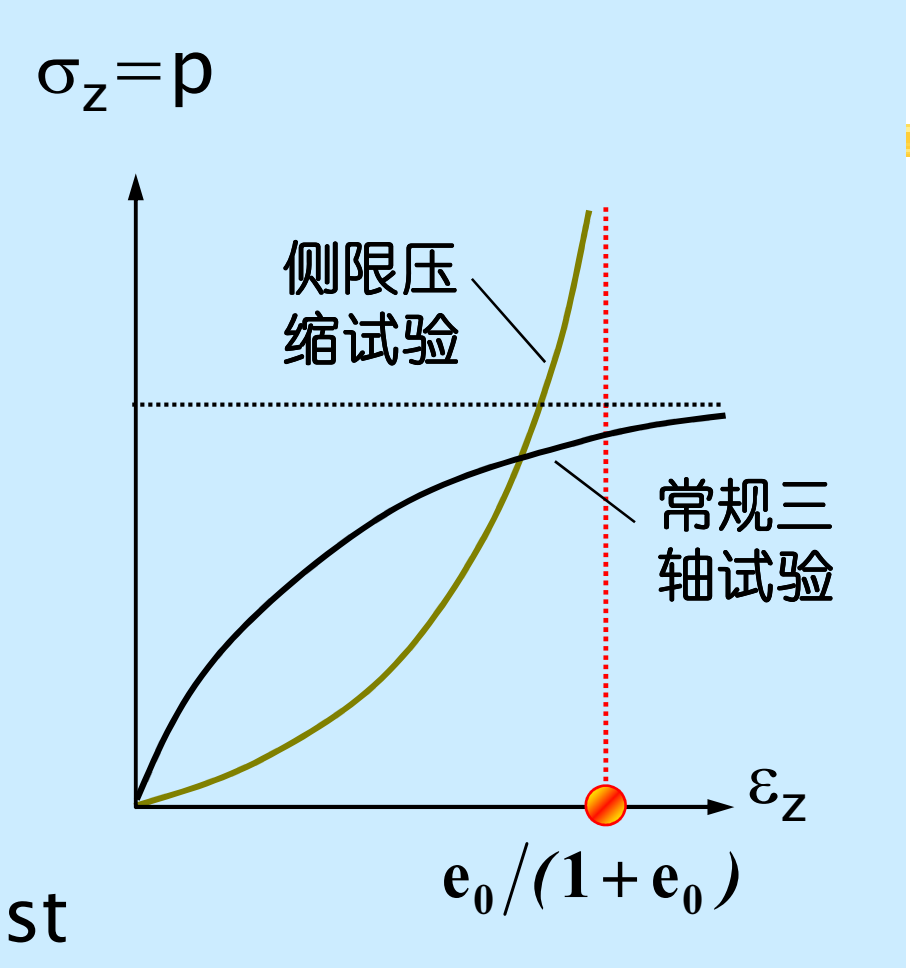
| 指标 | 名称 | 定义 | 曲线 |
|---|---|---|---|
| $E_s$ | 侧限压缩模量 | $\Delta p/\Delta \varepsilon$ | ε–p曲线 |
| $m_v$ | 体积压缩系数 | $\Delta \varepsilon/\Delta p$ | |
| a | 压缩系数 | $-\Delta e/\Delta p$ | e–p曲线 |
| Cc | 压缩指数 | $-\Delta e/\Delta(\lg p)$ | e–lg(p)曲线 |
| Ce | 回弹指数 | $-\Delta e/\Delta(\lg p)$ | |

# 侧限压缩试验指标汇总

Well done

## ■ 应力应变关系曲线的比较

- ☞ 常规三轴：
  - 存在破坏应力
- ☞ 侧限压缩试验：
  - 不存在破坏应力
  - 存在体积压缩极限




confined compression test

triaxial shear test

**常规三轴与侧限压缩试验**

DEL

P133 Eq (4-10)

## ■ 变形模量 E 与侧限变形模量 $E_s$间的关系

虎克定律

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)$$

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

$$\Delta\varepsilon_y = \frac{\Delta\sigma_y}{E} - \frac{\nu}{E}(\Delta\sigma_z + \Delta\sigma_x)$$

侧限条件

$$\Delta\varepsilon_x = \Delta\varepsilon_y = 0$$

$$\sigma_x = \sigma_y$$

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

则：

$$\Delta\varepsilon_z = \Delta\sigma_z\left(\frac{1}{E} - \frac{\nu}{E}\cdot\frac{2\nu}{1-\nu}\right) = \frac{\Delta\sigma_z}{E}\left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}\cdot\left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) = \beta E_s$$

$$E < E_s$$

5.2.2 现场原位测试压缩性指标

P92 式5-17

常规三轴与侧限压缩试验

- ε – p（或σ′）曲线
- e – p（或σ′）曲线
- e – lgp（或lgσ′）曲线

} 由侧限压缩试验整理得到的三条常用曲线

- 先期固结压力
- 现场压缩曲线及现场再压缩曲线

P139-140 总结了三个特点

# 小　　结

# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述 √

§5.1　土的压缩性测试方法 √

§5.2　一维压缩性及其指标 √

§5.3　地基的最终沉降量计算　P92　5.3

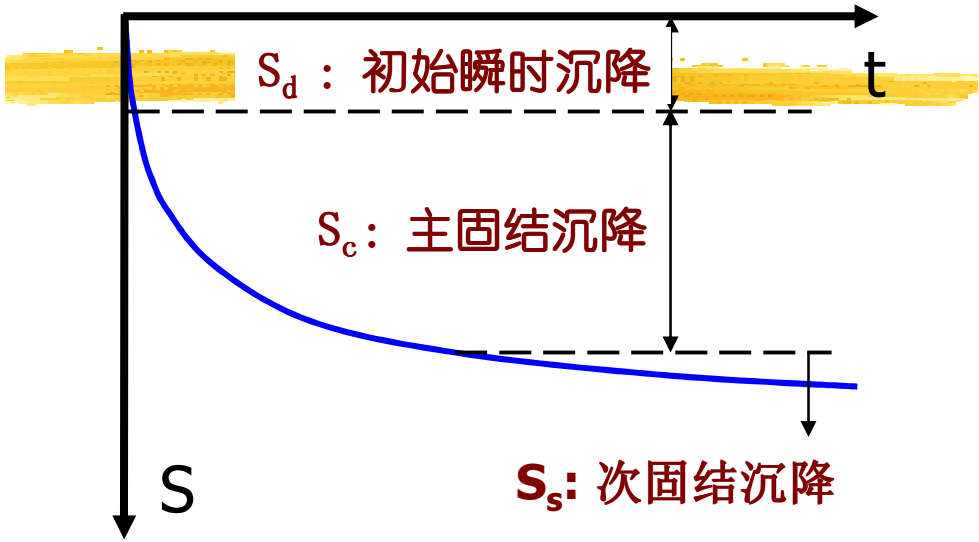
§5.4　饱和土体的渗流固结理论

土工网格加筋土堤坝的研究

http://d.wanfangdata.com.cn/Thesis/Y241458

- 粘性土地基的沉降量S由机理不同的三部分沉降组成：

  - ☞ 初始瞬时沉降 $S_d$：在不排水条件下，由剪应变引起侧向变形导致
  - ☞ 主固结沉降 $S_c$：由超静孔压消散导致的沉降，通常是地基变形的主要部分
  - ☞ 次固结沉降 $S_s$：由于土骨架的蠕变特性引起的变形

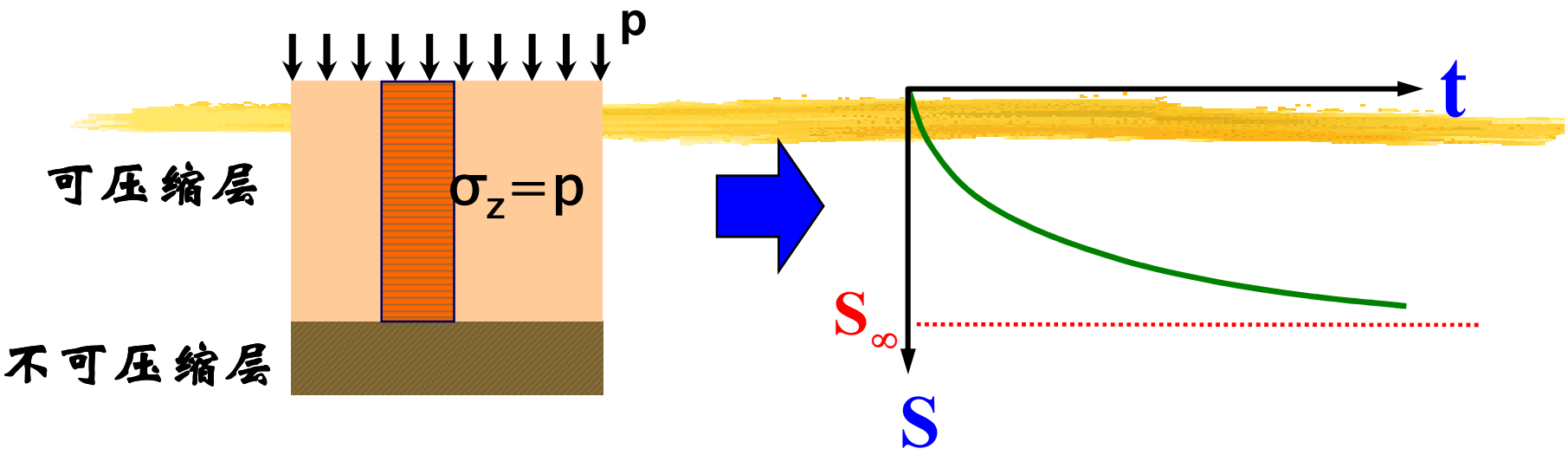



总变形：

$$S = S_d + S_c + S_s$$

DEL

# 粘性地基的沉降类型




■ **最终沉降量$S_\infty$：** t→∞时地基最终沉降稳定以后的最大沉降量，不考虑沉降过程。

■ **计算方法：** 以一维侧限应力状态土的压缩特性为基础的分层总和法

# 地基的最终沉降量计算

Page 142-152

- 单一土层一维压缩问题
- 地基最终沉降量分层总和法
- 地基沉降计算的若干问题

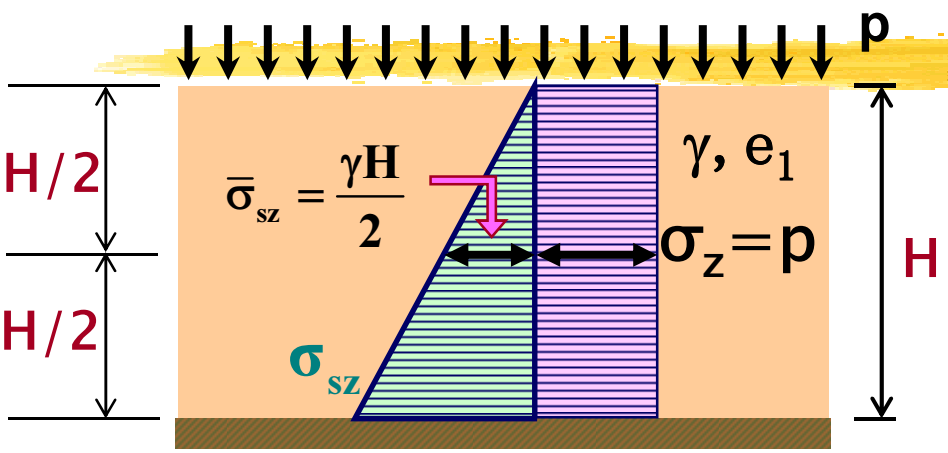
P92-101

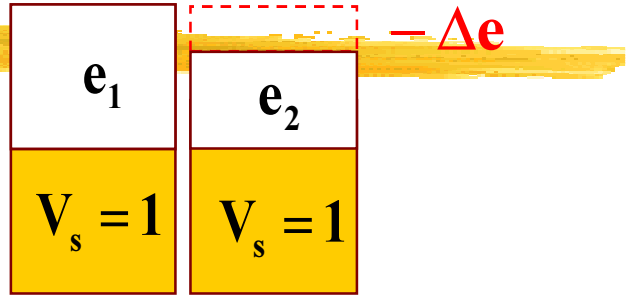
# 地基的最终沉降量计算

P142
4.3.1

## ■ 计算简图

$$S = \varepsilon_z H = \varepsilon_v H$$




$$\varepsilon_z = \varepsilon_v = \frac{-\Delta e}{1+e_1} = \frac{e_1 - e_2}{1+e_1}$$

**压缩前**

$p_1 = \bar{\sigma}_{sz}$

$e_1$

**压缩后**

$p_2 = \bar{\sigma}_{sz} + \sigma_z$

$e_2$

$$S = \varepsilon_z H = \varepsilon_v H = \frac{e_1 - e_2}{1+e_1} H$$

P94 式5-18

(a) e-p曲线

(b) e-lgp曲线

# 单一土层一维压缩问题

## ■ 计算公式：e-p曲线

$$e_1 - e_2 = a(p_2 - p_1)$$

$$S = \frac{a}{1+e_1}(p_2 - p_1)H = \frac{a}{1+e_1}pH$$

$$S = \frac{a}{1+e_1}A \qquad A = pH$$

作用在土层厚度内的附加应力分布图面积 P143

$$S = m_v pH = m_v A$$

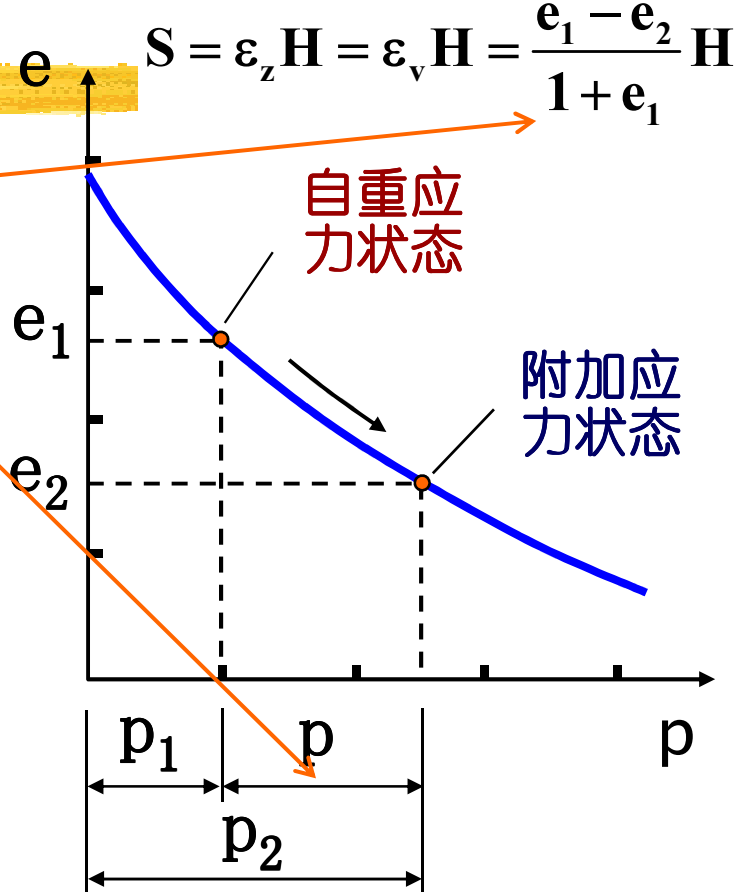
$m_v = a/(1+e_1)$

式4-13 体积压缩系数

$$S = \frac{pH}{E_s} = \beta\frac{pH}{E}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}$$

$$S = \varepsilon_z H = \varepsilon_v H = \frac{e_1 - e_2}{1+e_1}H$$




# 单一土层一维压缩问题

## ■ 计算公式：e-lgp曲线

**优点：**

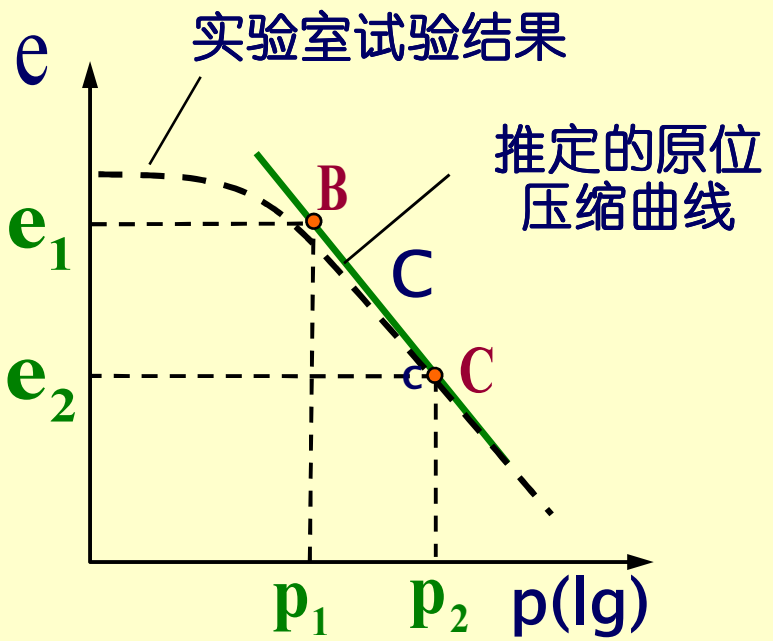
- ☞ 可使用推定的原位压缩和再压缩曲线
- ☞ 可考虑土层的应力历史，区分正常固结土和超固结土分别进行计算

# 单一土层一维压缩问题

## ■ 计算公式：e-lgp曲线-正常固结土

☞ 可使用推定的原位压缩曲线的$C_c$值进行计算：

$$S = \varepsilon_z H = \varepsilon_v H = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H$$




$$S = \frac{-\Delta e}{1 + e_1} H$$

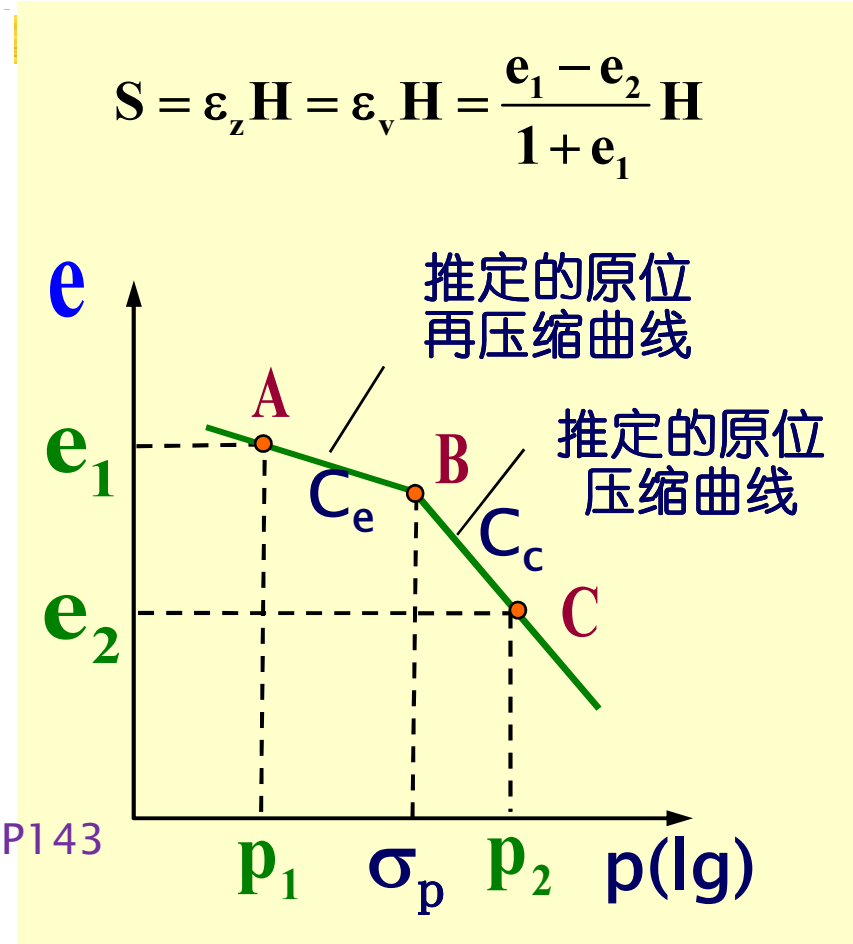
$$= C_c \frac{H}{1 + e_1} \lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

# 单一土层一维压缩问题

## ■ 计算公式：e-lgp曲线-超固结土

☞ 可使用推定的原位压缩和再压缩曲线的$C_c$和$C_e$值进行计算：

$$S=\varepsilon_z H=\varepsilon_v H=\frac{e_1-e_2}{1+e_1}H$$




- 当$p_2>\sigma_p$

$$S=\frac{H}{1+e_1}\left(C_e\lg\left(\frac{\sigma_p}{p_1}\right)+C_c\lg\left(\frac{p_2}{\sigma_p}\right)\right)$$

式4-24 P143

- 当$p_2<\sigma_p$

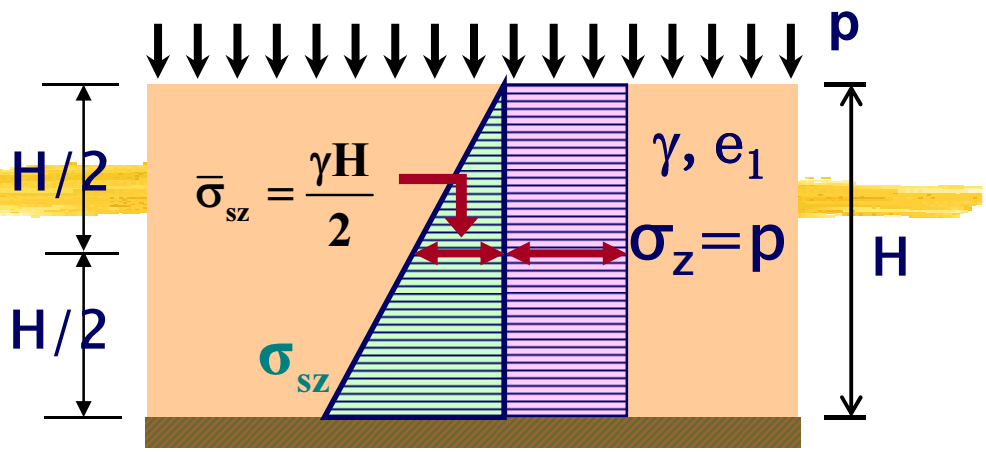
$$S=\frac{H}{1+e_1}C_e\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

式4-23 P143

# 单一土层一维压缩问题

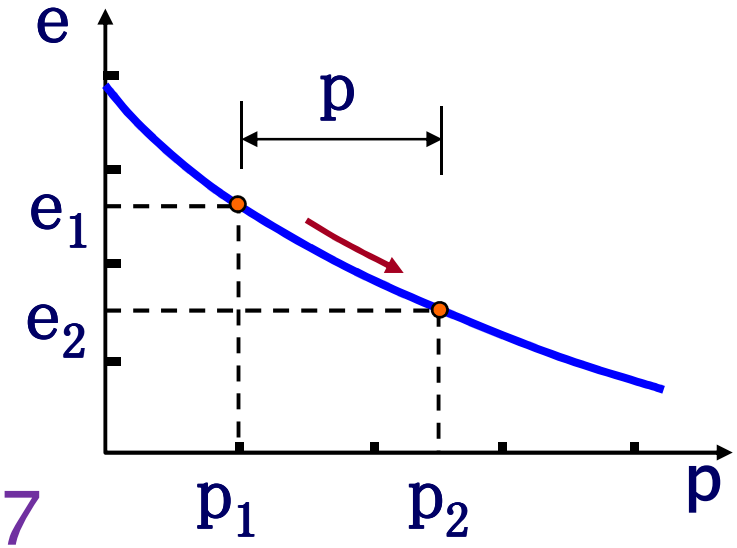
## ■ 计算步骤：

以公式 $S=\dfrac{e_1-e_2}{1+e_1}H$ 为例




- 确定： $H;\ \bar{\sigma}_{sz};\ \sigma_z$
- 查定： $p_1=\bar{\sigma}_{sz}\Rightarrow e_1$

  $p_2=\bar{\sigma}_{sz}+\sigma_z\Rightarrow e_2$
- 算定： $S=\dfrac{e_1-e_2}{1+e_1}H$




P142 Eq4-17

# 单一土层一维压缩问题

## ■ 基本假定和基本原理：

公路软土地基沉降与固结分析软件系统

- ☞ 假设基底压力为线性分布
- ☞ 附加应力用弹性理论计算
- ☞ 侧限应力状态，只发生单向沉降
- ☞ 只计算固结沉降，不计瞬时沉降和次固结沉降
- ☞ 将地基分成若干层，认为整个地基的最终沉降量为各层沉降量之和：

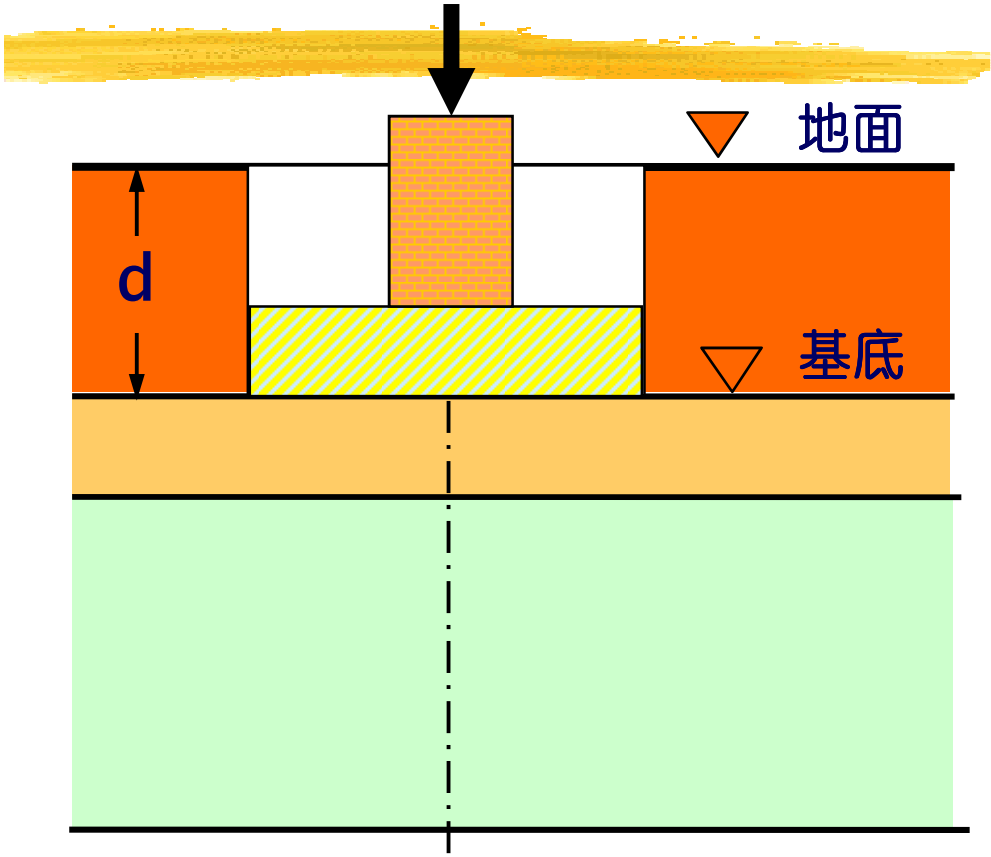
$$S = \sum S_i$$

理论上不够完备，缺乏统一理论，
是一个半经验性方法

**地基最终沉降量分层总和法**

## ■ 施工步骤

- ☞ 基坑开挖：基础土层卸载，基础底面回弹
- ☞ 基础施工：基础土层重加载，基础底面再压缩
- ☞ 基坑回填：基础土层重加载，基础地面再压缩
- ☞ 建筑物施工：基础土层压缩沉降




# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算步骤

### ☞ 情况1：不考虑地基回弹

- 沉降量从原基底算起
- 适用于基础底面积小，埋深浅，施工快的情况

### ☞ 情况2：考虑地基回弹

- 沉降量从回弹后的基底算起
- 基础底面大，埋深大，施工期长的情况

已知：地基各土层的压缩曲线 → 原状土压缩曲线

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算步骤 – *情况1*

a) 原地基的自重应力分布$\sigma_{sz}$

b) 基底附加压力$p_0$

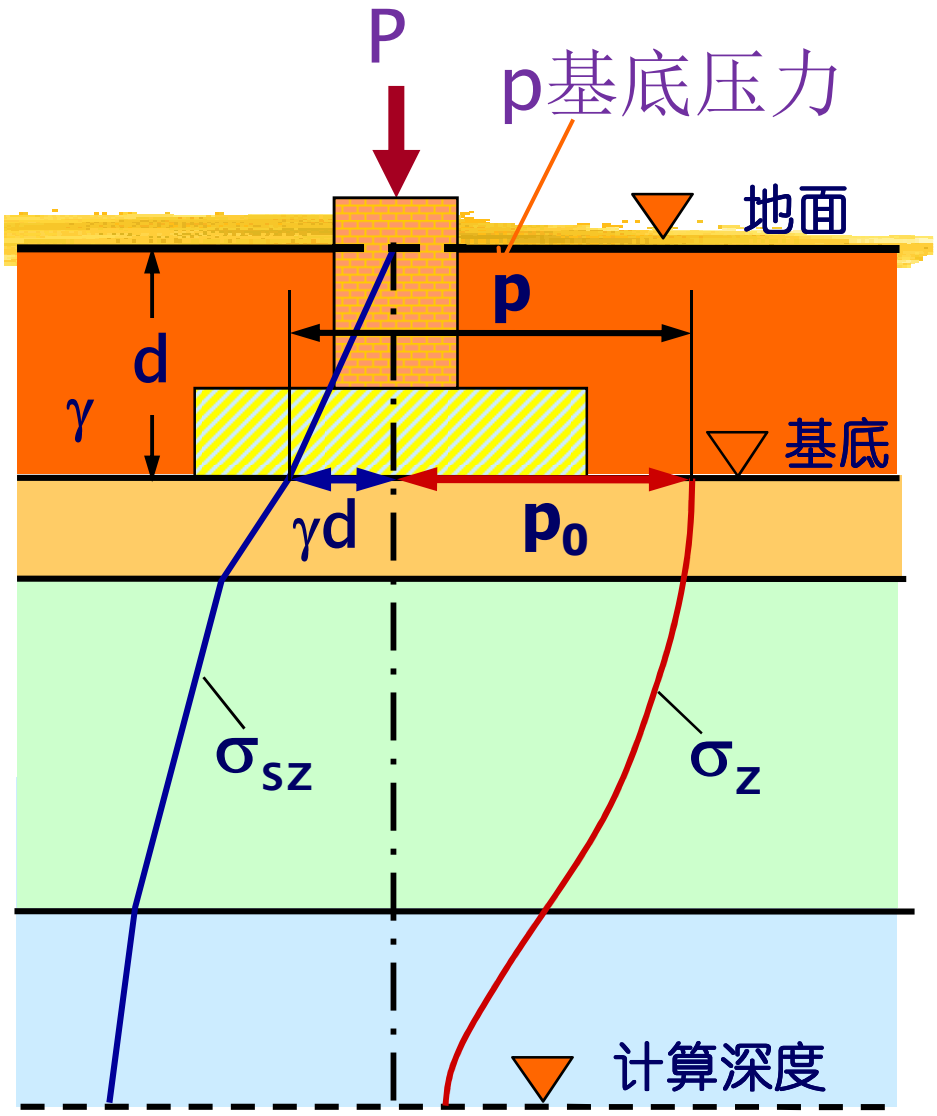
c) 确定地基中附加应力$\sigma_z$分布

d) 确定计算深度$z_n$

e) 地基分层$H_i$

f) 计算每层沉降量$S_i$

g) 各层沉降量叠加$\Sigma S_i$




- $\sigma_{sz}$从地面算起；
- $\sigma_z$从基底算起，由基底附加压力$p_0=p-\gamma d$引起

P93

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算步骤 – 情况1

…… 

d) 确定计算深度$z_n$

e) 地基分层$H_i$

f) 计算每层沉降量$S_i$

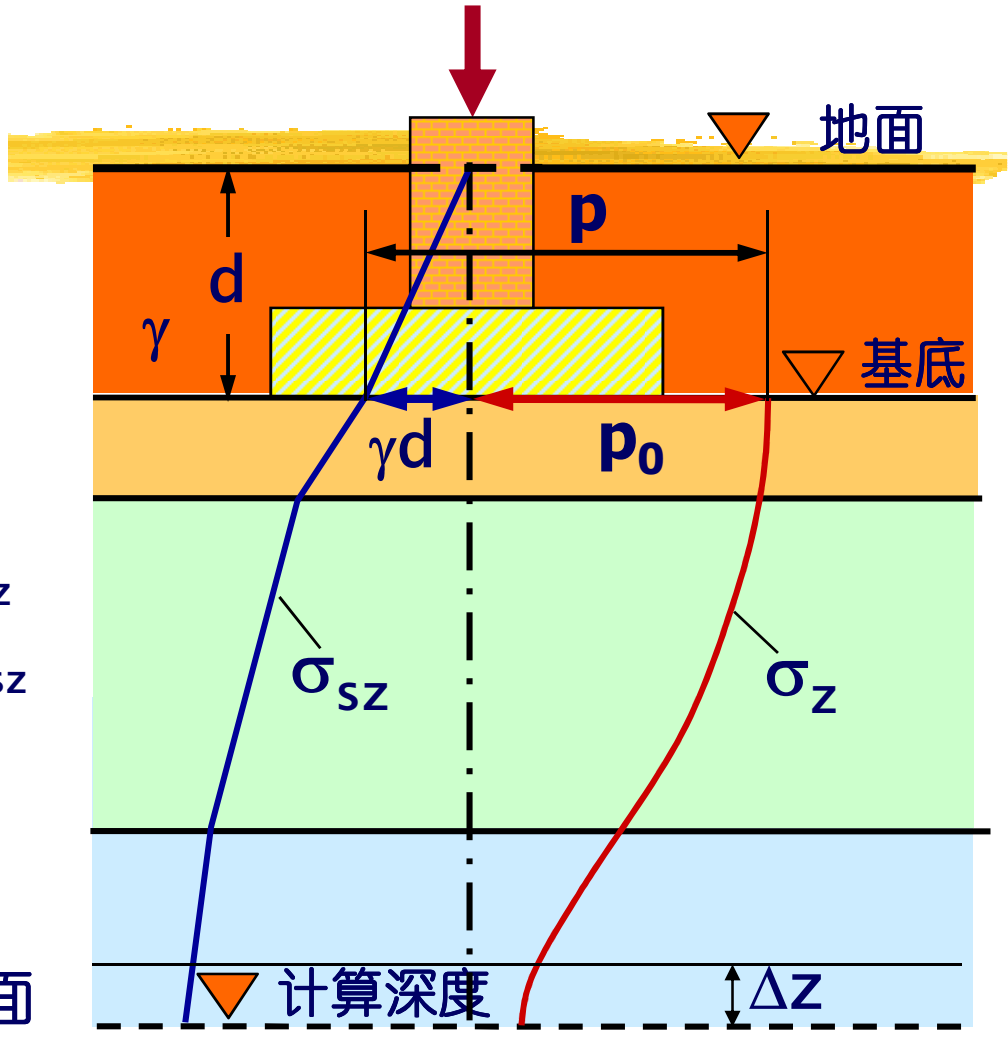
g) 各层沉降量叠加$\Sigma S_i$

- 经验法：

  一般土层：$\sigma_z=0.2\sigma_{sz}$

  软土层：$\sigma_z=0.1\sigma_{sz}$

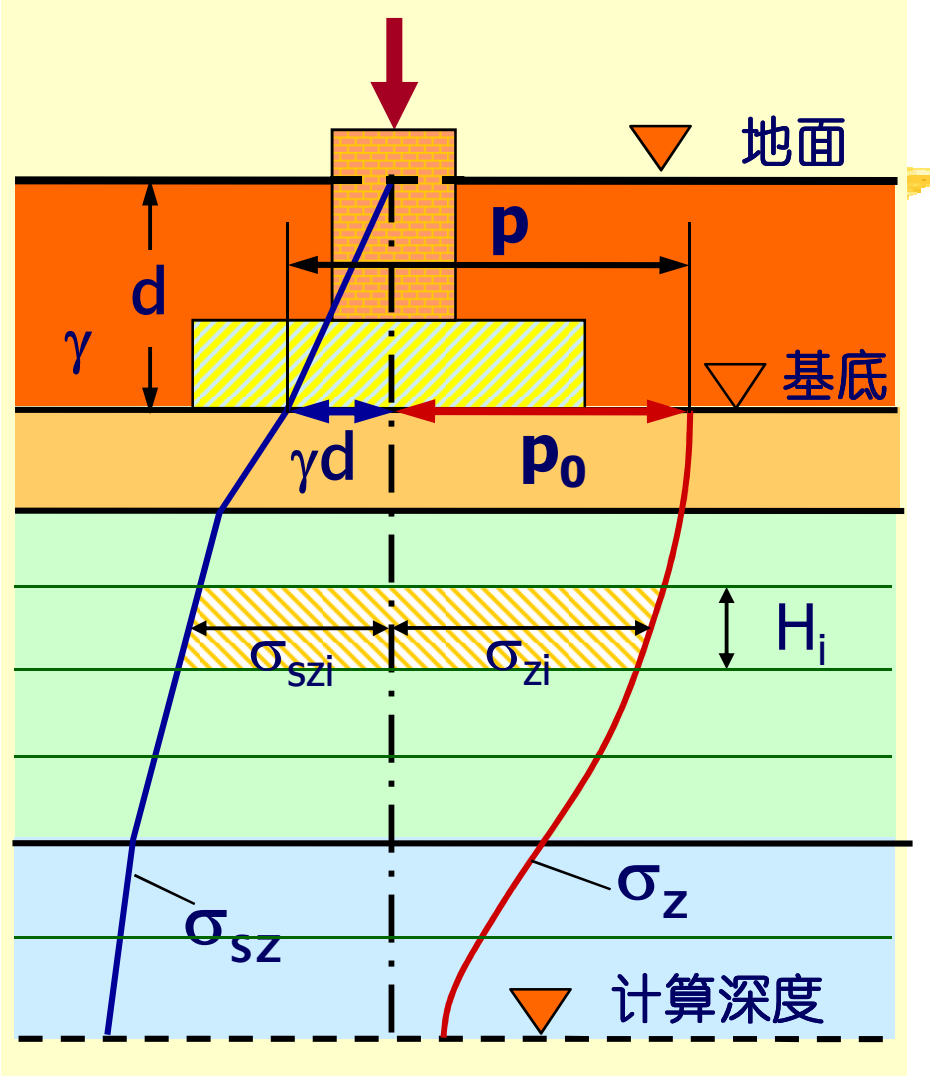
- 规范法：$\Delta S' \le 0.025S$
- 经验公式：$Z_n=B(2.5-0.4\ln B)$
- 计算到压缩性较大土层底面




# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算步骤 – 情况1

a) 原地基的自重应力分布$\sigma_{sz}$
b) 基底附加压力$p_0$
c) 确定地基中附加应力$\sigma_z$分布
d) 确定计算深度$z_n$
e) 地基分层$H_i$
f) 计算每层沉降量$S_i$
g) 各层沉降量叠加$\Sigma S_i$




- 不同土层界面
- 地下水位线
- 每层厚度不宜>0.4B或4m
- $\sigma_z$ 变化明显的土层，适当取小

B基础宽度

**地基最终沉降量分层总和法**

基础面积和埋深均较大

一起读书P147

## ■ 计算步骤 – 情况2

a) 原地基的自重应力分布$\sigma_{sz}$

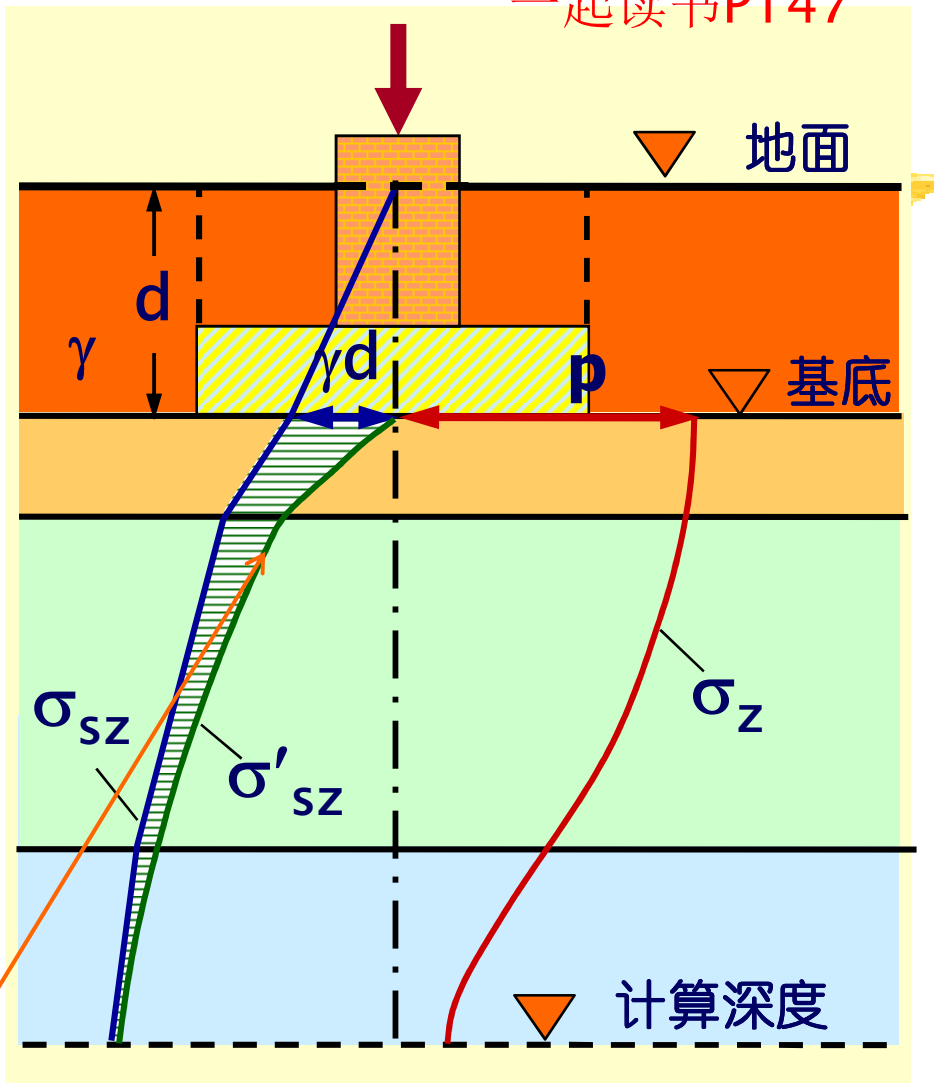
b) 开挖后地基中自重应力分布

$$\sigma'_{sz}=\sigma_{sz}-f(\gamma d,z)$$

c) 确定地基中附加应力$\sigma_z$分布

$$\sigma_z=f(p,z)$$

下同情况1




可以近似认为深度d以上土层全部挖除时，其自重应力分布变为

DEL

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算公式：e–p曲线

对土层i有：

**压缩前**

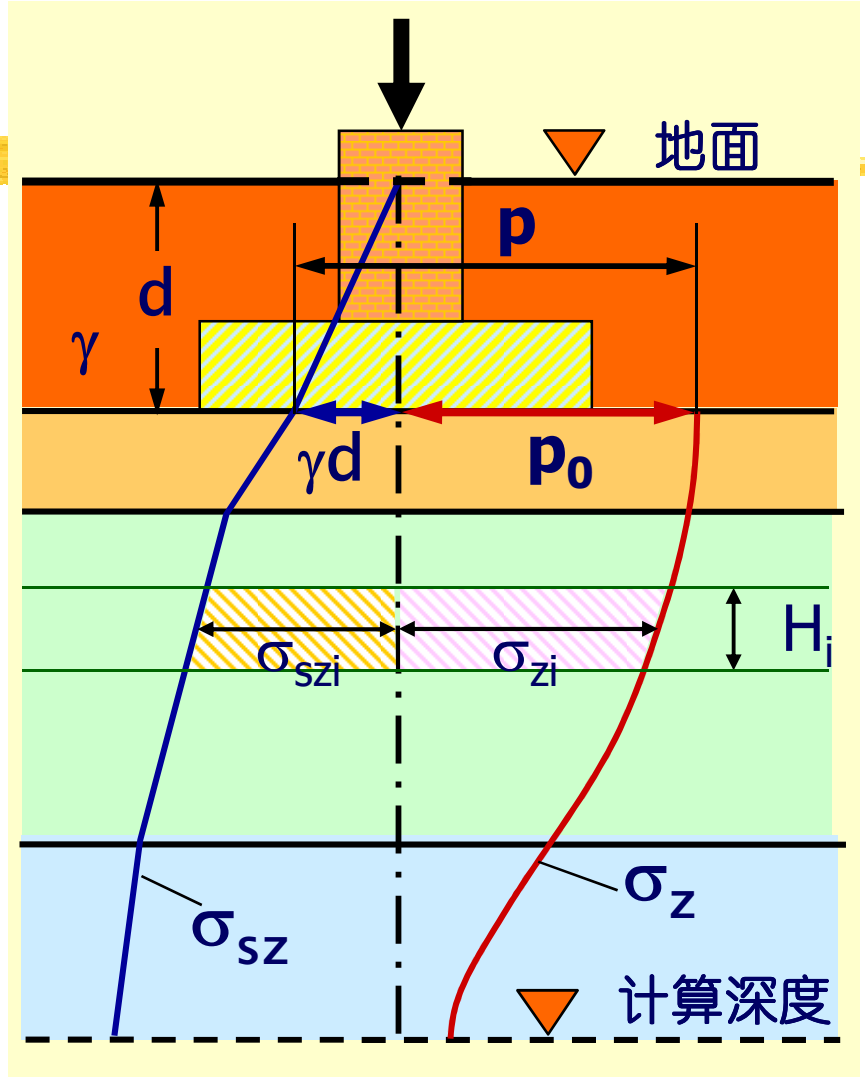
$p_{1i}=\sigma_{szi}$

$e_{1i}$

**压缩后**

$p_{2i}=\sigma_{szi}+\sigma_{zi}$

$e_{2i}$




$$S_i=\frac{a_i}{1+e_{1i}}(p_{2i}-p_{1i})H_i=\frac{a_i}{1+e_{1i}}\sigma_{zi}H_i$$

$$S_i=\frac{\sigma_{zi}H_i}{E_{si}}=\beta\frac{\sigma_{zi}H_i}{E_i}$$

Es侧限压缩模量式4-12

E变形模量4-8

P94　式5-19

**地基最终沉降量分层总和法**

■ 计算公式：e–p曲线　规范法

P96 5.3.2

$$S_i = \frac{a_i}{1+e_{1i}}\sigma_{zi}H_i = \frac{a_i}{1+e_{1i}}A_i$$

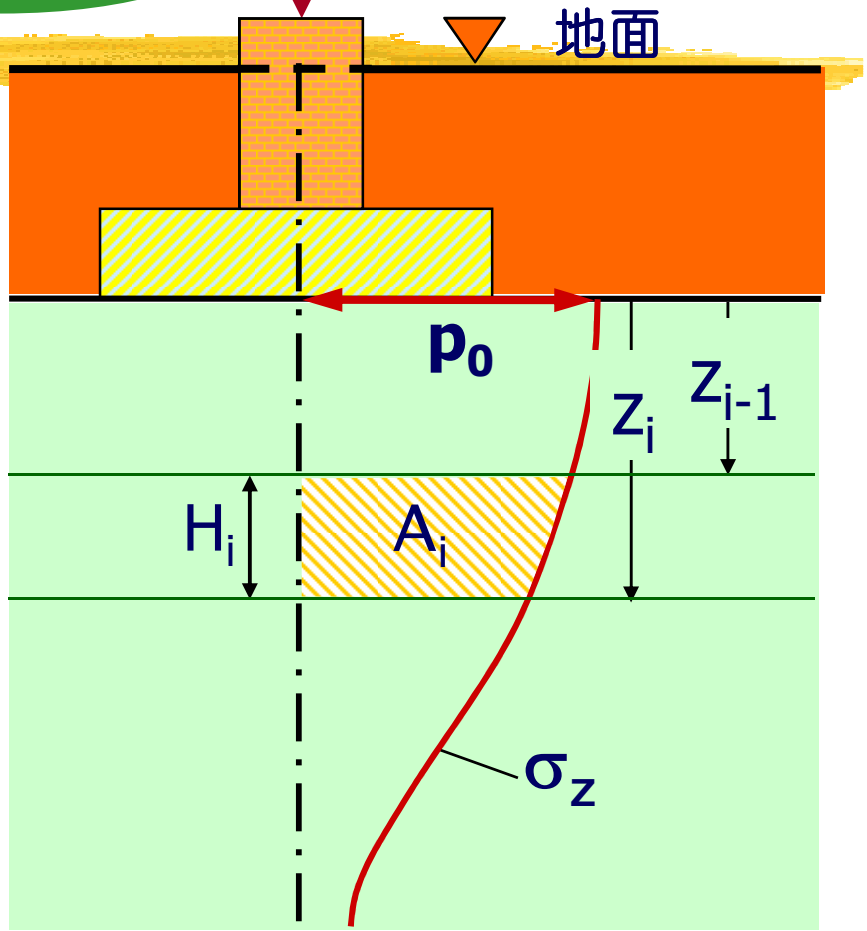
$$A = \int_0^z \sigma_z dz = \int_0^z p_0 \alpha dz$$

$$= p_0 \int_0^z \alpha dz = p_0 \cdot z \cdot \overline{\alpha}$$

深度z范围内平均附加应力系数(表4－5)

$$A_i = p_0(z_i\overline{\alpha}_i - z_{i-1}\overline{\alpha}_{i-1})$$

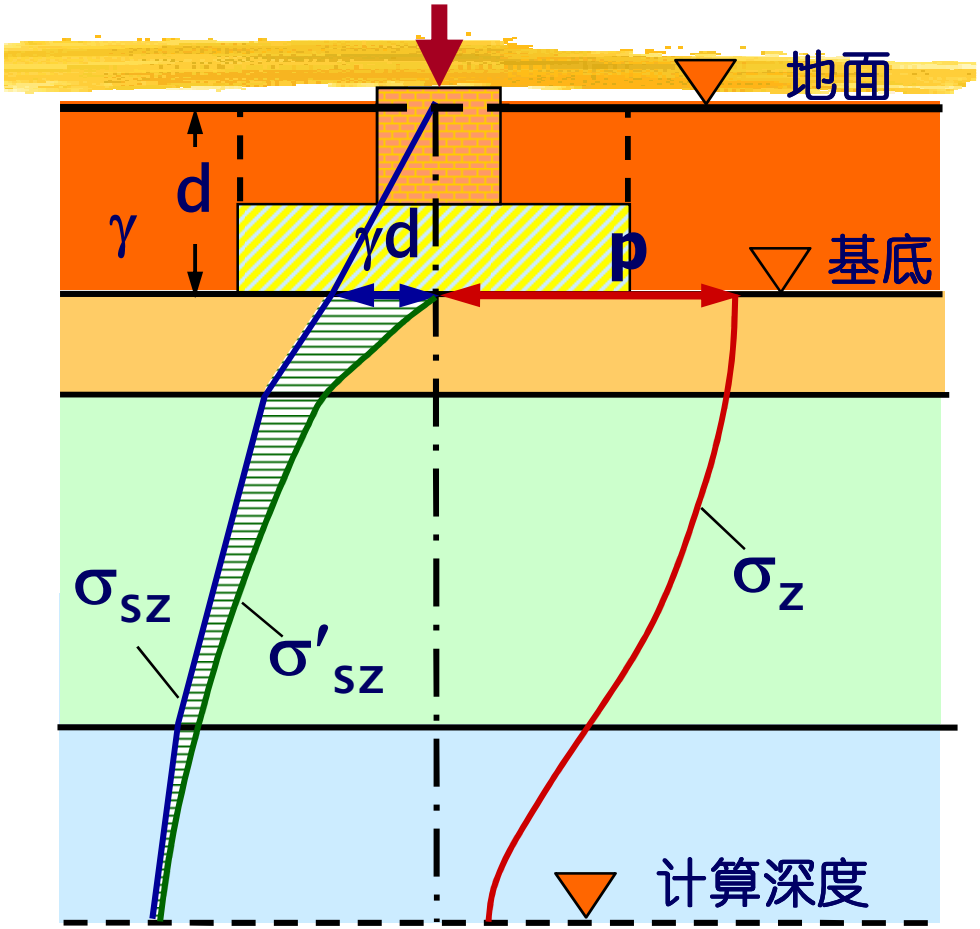
P146




P91　式5-15　**地基最终沉降量分层总和法**

## ■ 计算公式：情况2考虑地基回弹

- 条件：基面面积大，埋深大，施工期长
- 以原地基为正常固结土为例进行讨论




☞ 对土层i有：

- 开挖前：$\sigma_{szi}$ → 相当于先期固结压力$\sigma_{pi}$
- 开挖后：$\sigma'_{szi}$
- 压缩后：$\sigma'_{szi}+\sigma_{zi}$

DEL

# 地基最终沉降量分层总和法

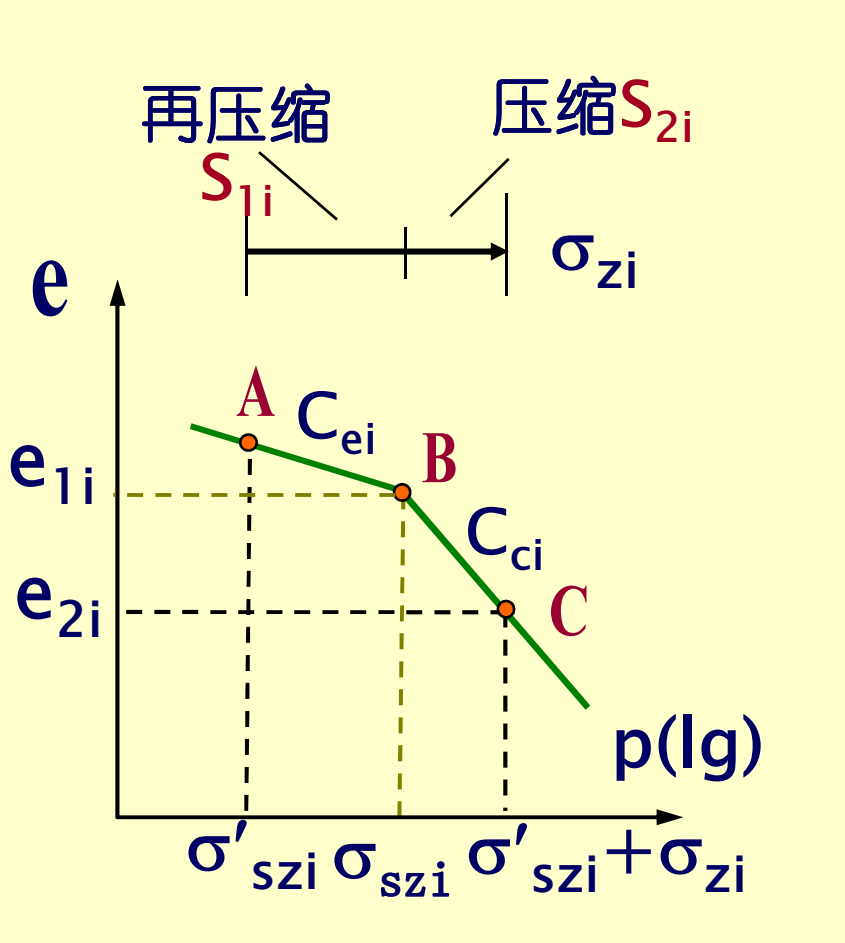
## ■ 计算公式：情况2考虑地基回弹

☞ 对土层i有：

沉降量$S_i=S_{1i}+S_{2i}$

$$S_{1i}=\frac{C_{ei}}{1+e_{1i}}H_i\lg\left(\frac{\sigma_{szi}}{\sigma'_{szi}}\right)$$

$$S_{2i}=\frac{C_{ci}}{1+e_{1i}}H_i\lg\left(\frac{\sigma'_{szi}+\sigma_{szi}}{\sigma_{szi}}\right)$$




DEL

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算公式：情况2考虑地基回弹

- ☞ 类似于超固结土的计算方法
- ☞ 无论回弹、再压缩或压缩，均相对于开挖前的拟定基底高程为基准点，故在计算公式中采用开挖前地基的天然孔隙比$e_{1i}$
- ☞ 原本$S_i=S_{回弹i}+S_{1i}+S_{2i}$，但由于沉降量从建筑物开始修建的高程起算，$S_{回弹i}$部分已经被挖除，故实际的 $S_i=S_{1i}+S_{2i}$

DEL

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 结果修正

- 基底压力线性分布
- 弹性附加应力计算
- 单向压缩
- 只计主固结沉降
- 原状土现场取样的扰动
- 参数为常数
- 按中点下附加应力计算

会导致S的计算误差，如：

①取中点下附加应力值，使S偏大
②侧限压缩使计算值偏小
③地基不均匀性导致的误差等

$$S_{修}=\psi_s \times S$$

$\psi_s$经验修正系数

- 软粘土（应力集中）S偏小，$\Psi s>1$
- 硬粘土（应力扩散）S偏大，$\Psi s<1$

P100 3

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 结果修正

表4-6 沉降计算经验系数$\psi_s$

| 基底附加应力 | $\bar{E}_s$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2.5 | 4.0 | 7.0 | 15.0 | 20.0 |
| $p_0 \geq f_k$ | 1.4 | 1.3 | 1.0 | 0.4 | 0.2 |
| $p_0 \leq 0.75\ f_k$ | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 0.4 | 0.2 |

$$\bar{E}_s = \sum A_i \Big/ \sum \frac{A_i}{E_{si}} \qquad A_i = p_0(z_i\bar{\alpha}_i - z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1})$$

$f_k$：地基承载力标准值

$$S_{修} = \psi_s \times S$$

经验修正系数

$\psi_s = 1.4 - 0.2$,

☞与土质软硬有关

☞与基底附加应力$p_0/f_k$的大小有关

**地基最终沉降量分层总和法**

① 准备资料
- 建筑基础（形状、大小、重量、埋深）
- 地基各土层的压缩曲线 → 原状土压缩曲线
- 计算断面和计算点

② 应力分布
- 自重应力
- 基底压力→基底附加应力
- 附加应力

③ 沉降计算
- 确定计算深度
- 确定分层界面
- 计算各土层的$\sigma_{szi}$，$\sigma_{zi}$
- 计算各层沉降量
- 地基总沉降量

P99 式5-26 计算深度
一起看书

④ 结果修正

$$S_{修}=\psi_s \times S$$

P149例题4-2要求看会

P94 例题5-1
P100 例题5-2
必须看会

# 分层总和法要点小结

P101 5.3.3

考虑应力历史条件下地基沉降量的计算

1 天然土层的应力历史

2 先期固结压力的确定

3 原始压缩e-lgp曲线及压缩性指标

4 考虑应力历史影响的地基最终沉降量计算

# 1 天然土层的应力历史 P102

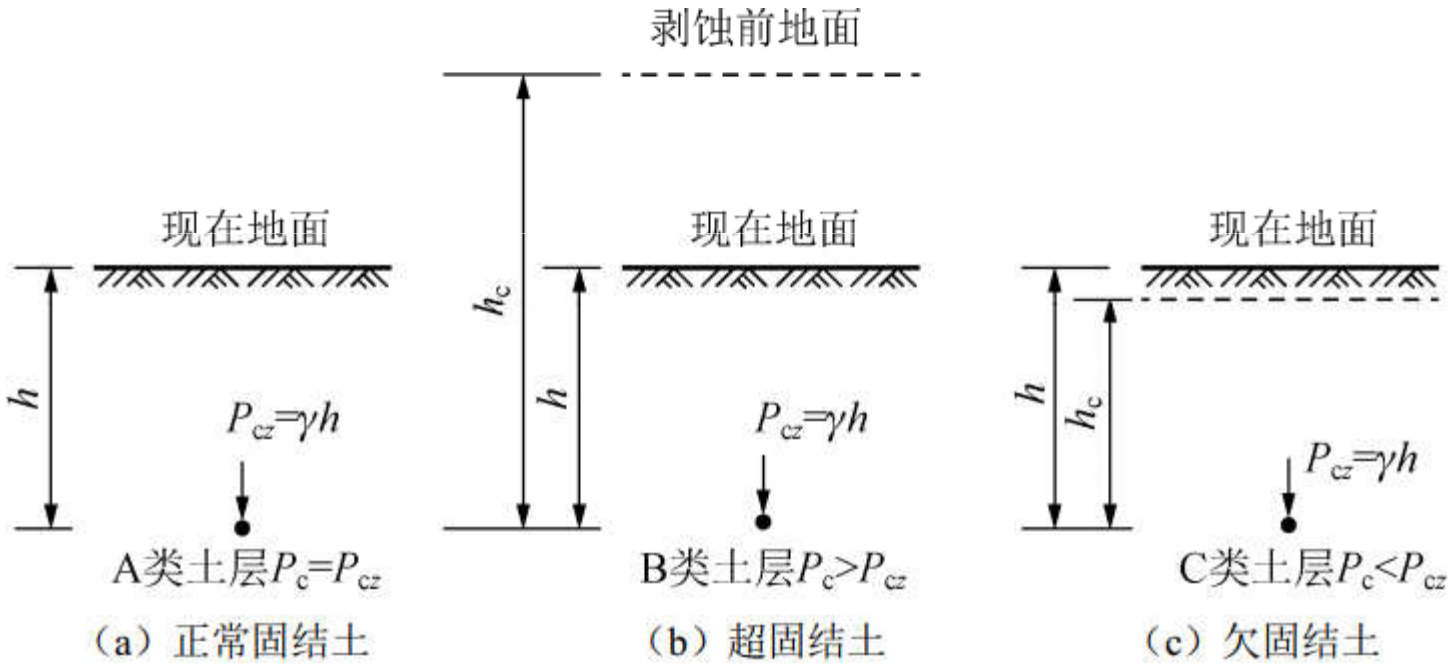



图 5-8 天然土层按超固结比分类

4.2.2 P136

- 先期固结压力：土层历史上所经受到的最大压力$\sigma_p$

如土层当前承受的自重压力为$\sigma_s$ ⇒

- $\sigma_p = \sigma_s$：正常固结土
- $\sigma_p > \sigma_s$：超固结土
- $\sigma_p < \sigma_s$：欠固结土

历史上有无承受超载

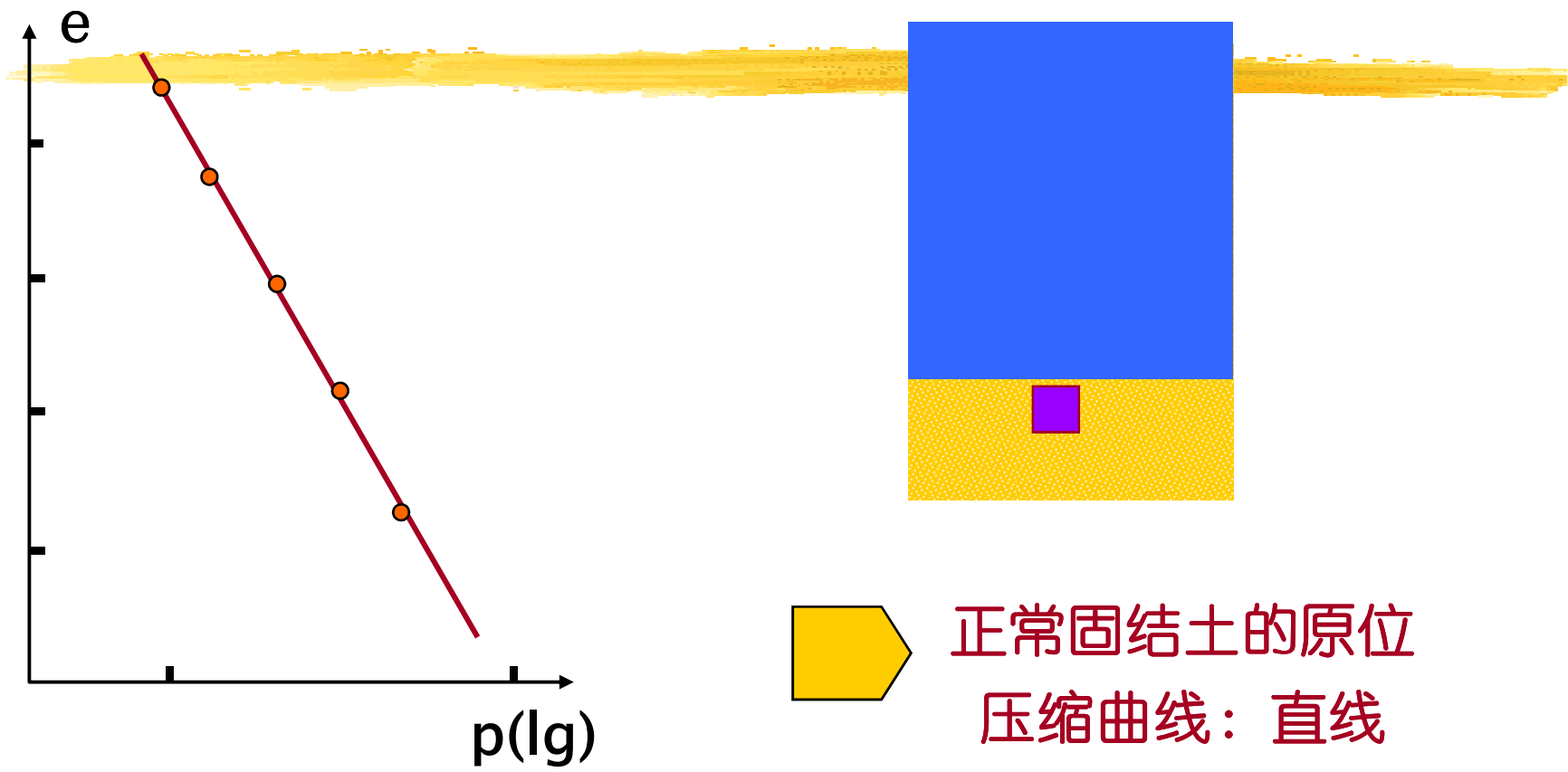
- 超固结比：$OCR = \dfrac{\sigma_p}{\sigma_s} = Pc/Ps$ ⇒
  - OCR=1：正常固结
  - OCR>1：超固结
  - OCR<1：欠固结

☞ 相同$\sigma_s$ 时，一般OCR越大，土越密实，压缩性越小

s --- self weight ; p --- previous; c--- confined

# 先期固结压力

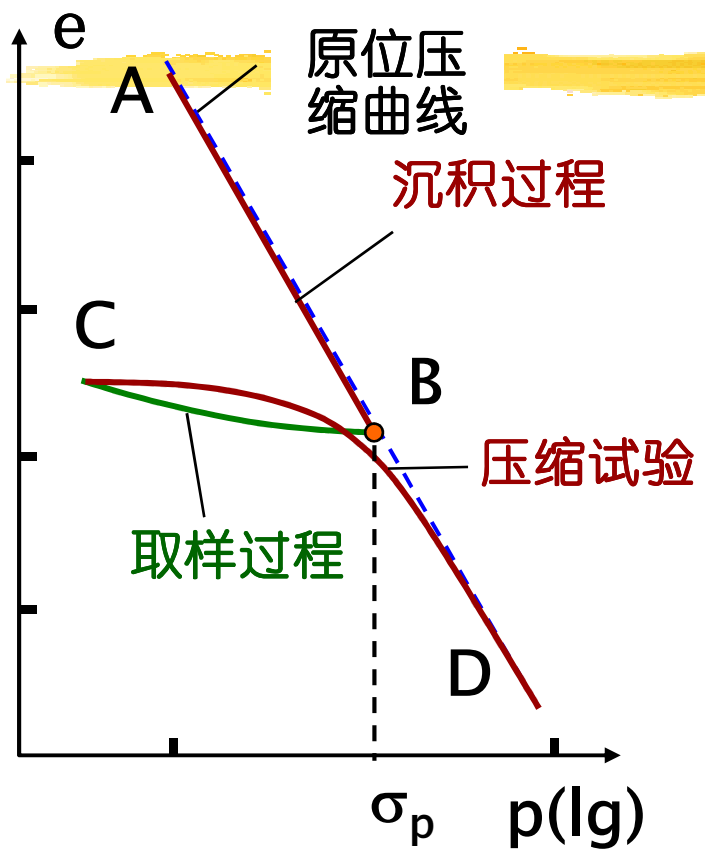
P101 式5-29




正常固结土的原位压缩曲线：直线

P102

# 正常固结土初始压缩曲线




- AB：沉积过程，到B点应力为$\sigma_p$
- BC：取样过程，应力减小，先期固结应力为$\sigma_p$
- CD：压缩试验曲线，开始段位于再压缩曲线上，后段趋近原位压缩曲线

在先期固结压力$\sigma_p$附近发生转折，据此可确定$\sigma_p$

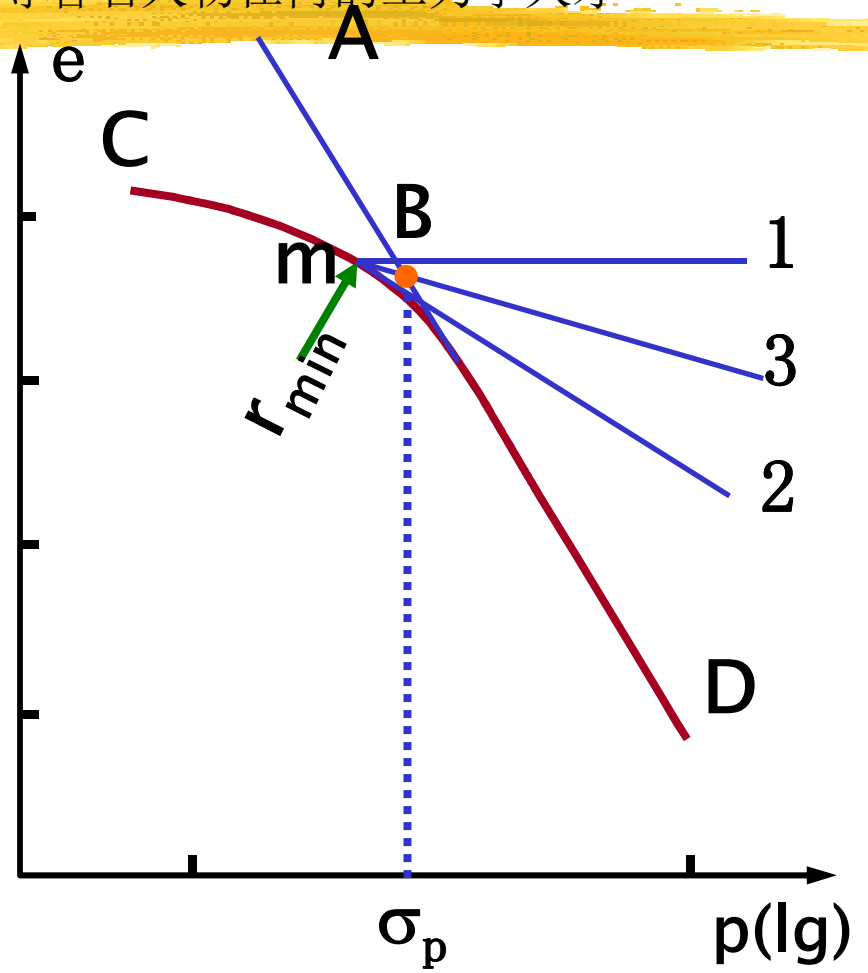
# 先期固结压力

P102

Arthur Casagrande (1902 – 1981)生于奥地利， 1926 年到美国定居，先在公共道路局工作，之后作为 Terzaghi 最重要的助手在麻省理工学院从事土力学的基础研究工作。并培养了包括Janbu等著名人物在内的土力学人才

## ■ Casagrande 法

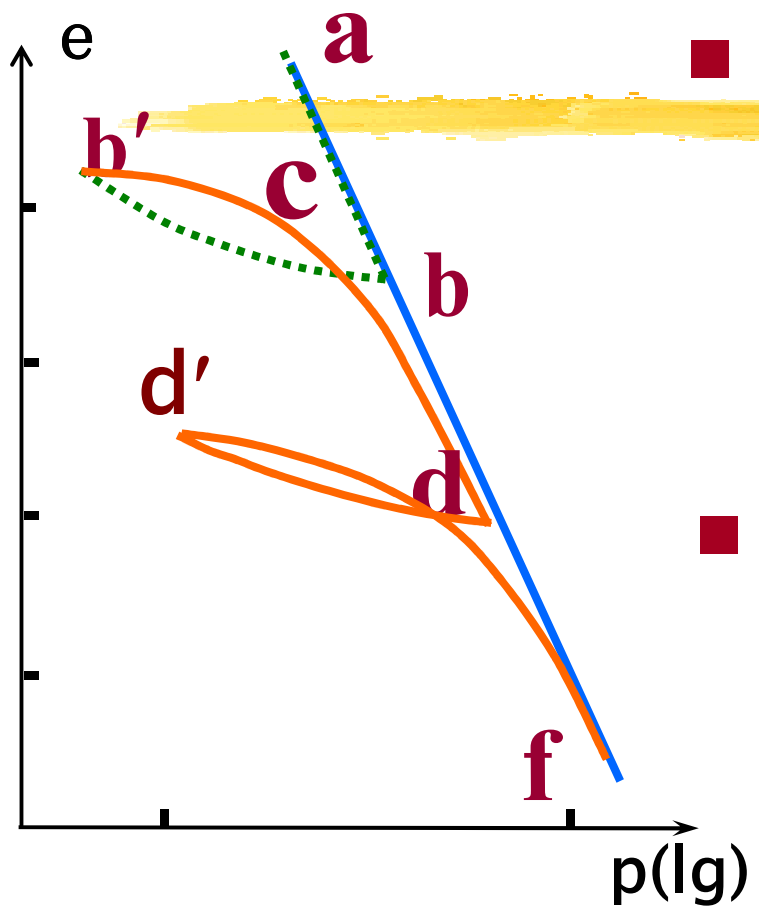
1. 在e-lgp曲线上，找出曲率最大点m
2. 作水平线m1
3. 作m点切线m2
4. 作m1,m2 的角分线m3
5. m3与试验曲线的直线段交于点B
6. B点对应于先期固结压力$\sigma_p$




P102

R编程实施
geophydics

**先期固结压力$\sigma_p$的确定**




■ 正常固结土：

① 沉积ab
② 取样bb′
③ 室内试验b′cd

原状土的原位压缩曲线：？

客观存在的，无法直接得到

■ 超固结土：水位上升、土层剥蚀、冰川融化 } 引起卸载，使土处于回弹状态

原状土的原位再压缩曲线：？

客观存在的，无法直接得到

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_s}$$

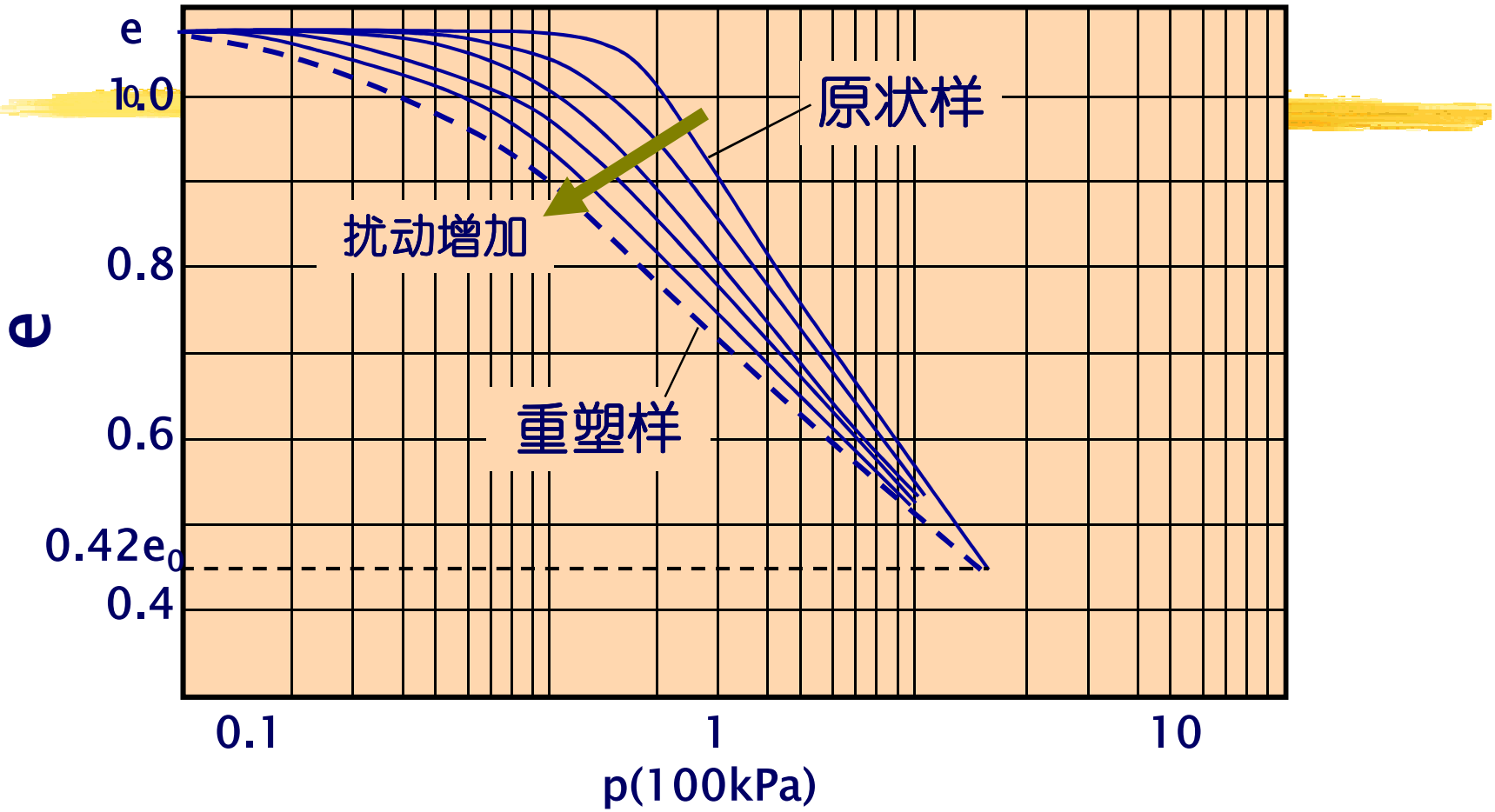
# 原位压缩及原位再压缩曲线

P102-103

Schmertmann P102

- 基本假定：
  - 取样后不回弹，即土样取出后孔隙比保持不变，($e_0$,$\sigma_s$)点位于原状土初始压缩或再压缩曲线上
  - 压缩指数Cc和回弹指数Ce为常数
  - 试验曲线上的0.42$e_0$点不受到扰动影响，未受扰动的原位初始压缩曲线也应相交于该点

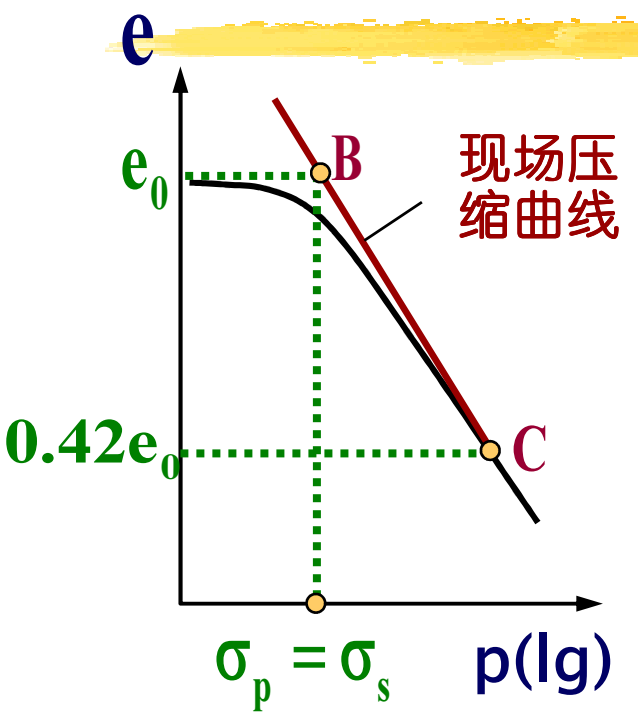
# 原位初始压缩曲线的推求




**不同扰动程度试样的室内压缩曲线**

弓箭比拟

## ■ 推定方法



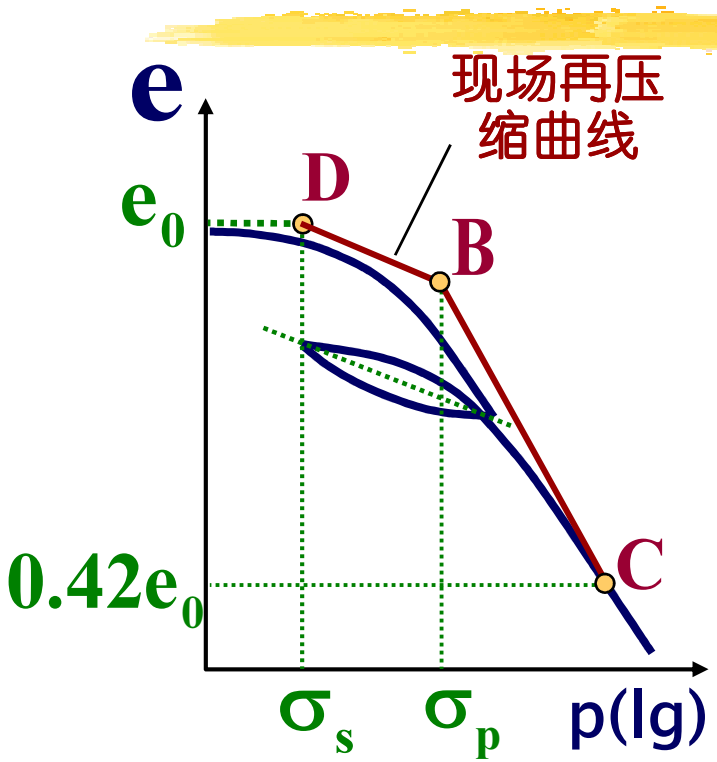

- 对正常固结土先期固结压力 $\sigma_p=\sigma_s$
- $(e_0, \sigma_p)$位于现场压缩曲线上
- 以$0.42e_0$在压缩曲线上确定C点
- 通过B、C两点的直线即为所求的现场压缩曲线

P139 大量实验表明，孔隙比达到$0.42e_0$，挠动对压缩性的影响可以忽略

**正常固结土现场压缩曲线的推求**

P102 图5-10

## ■ 推定方法




- ☞ 确定$\sigma_p$, $\sigma_s$的作用线
- ☞ 因为$\sigma_p > \sigma_s$, 点D($e_0$, $\sigma_s$)位于再压缩曲线上
- ☞ 过D点作斜率为Ce的直线DB, DB为现场再压缩曲线
- ☞ 以$0.42e_0$在压缩曲线上确定C点，BC为现场初始压缩曲线Cc
- ☞ DBC即为所求的现场再压缩和压缩曲线

P139 大量实验表明，孔隙比达到$0.42e_0$，挠动对压缩性的影响可以忽略

**超固结土现场再压缩曲线的推求**

P103 图5-11

## 4 考虑应力历史影响的地基最终沉降量计算

P103-P105 一起看书

## ■ 计算公式：e-lgp曲线

对土层i有：

**压缩前**

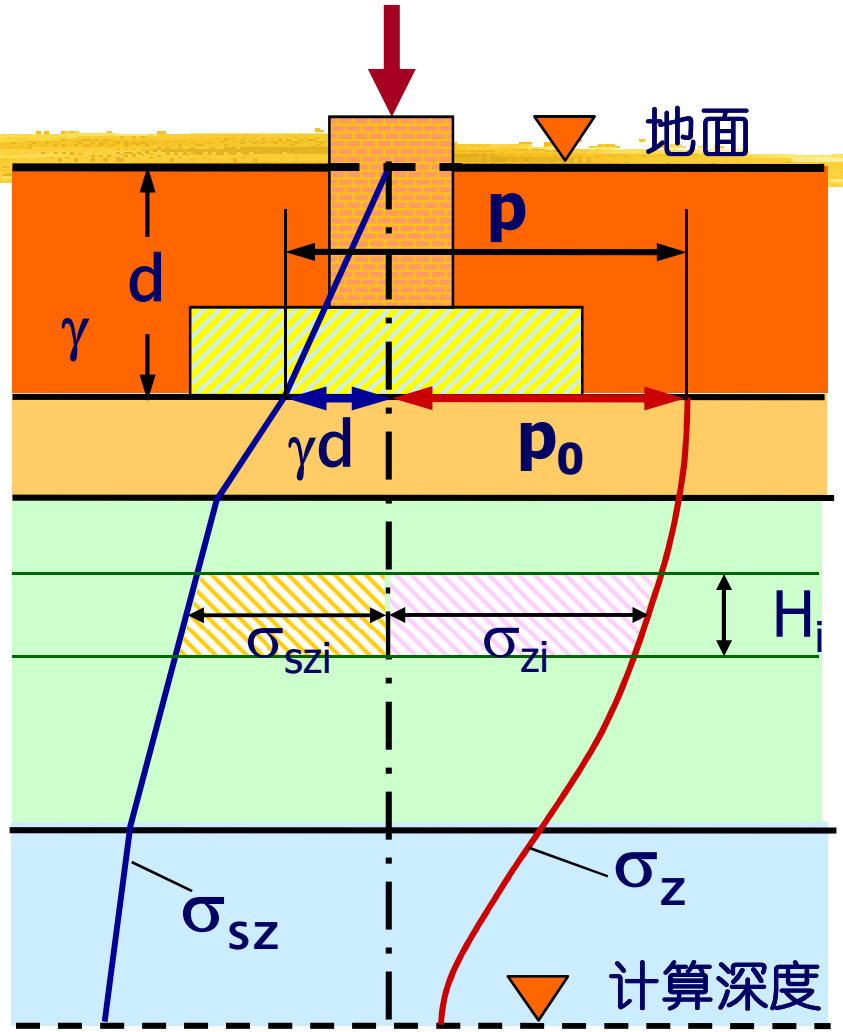
$p_{1i}=\sigma_{szi}$

$e_{1i}$

**压缩后**

$p_{2i}=\sigma_{szi}+\sigma_{zi}$

$e_{2i}$




$$S_i=\frac{-\Delta e_i}{1+e_{1i}}H_i=\frac{C_{Ci}}{1+e_{1i}}H_i\lg\left(\frac{\sigma_{szi}+\sigma_{zi}}{\sigma_{szi}}\right)$$

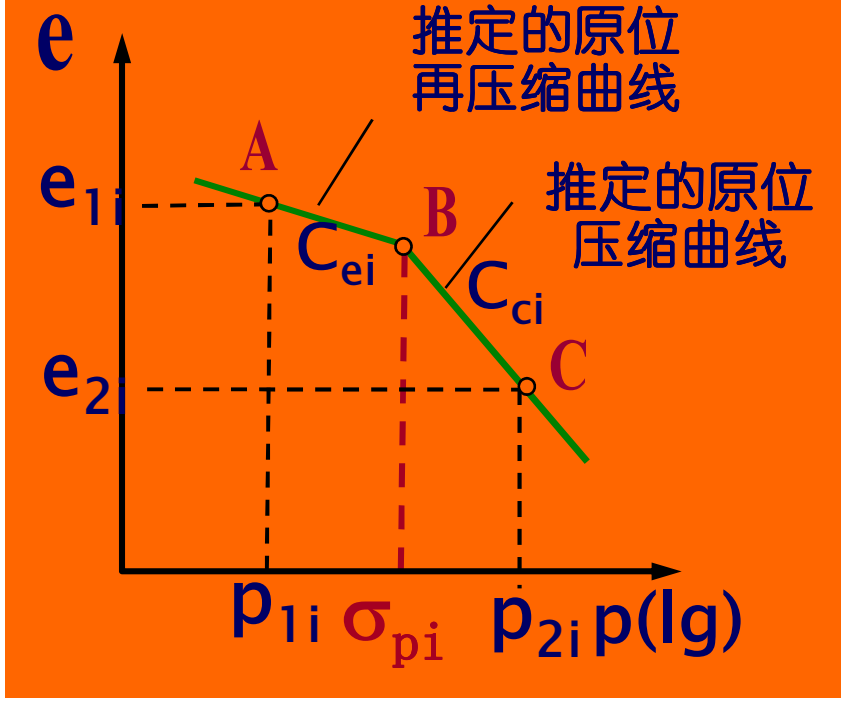
P103 式5-30

# 地基最终沉降量分层总和法

## ■ 计算公式：e-lgp曲线

$$p_{1i}=\sigma_{szi}\qquad p_{2i}=\sigma_{szi}+\sigma_{zi}$$

$$S=\varepsilon_z H=\varepsilon_v H=\frac{e_1-e_2}{1+e_1}H$$




- 当$p_{2i}>\sigma_{pi}$

$$S=\frac{H_i}{1+e_{1i}}\left(C_{ei}\lg\left(\frac{\sigma_{pi}}{p_{1i}}\right)+C_{ci}\lg\left(\frac{p_{2i}}{\sigma_{pi}}\right)\right)$$

P105 式5-33

- 当$p_{2i}<\sigma_{pi}$

$$S=\frac{H_i}{1+e_{1i}}C_{ei}\lg\left(\frac{p_{2i}}{p_{1i}}\right)$$

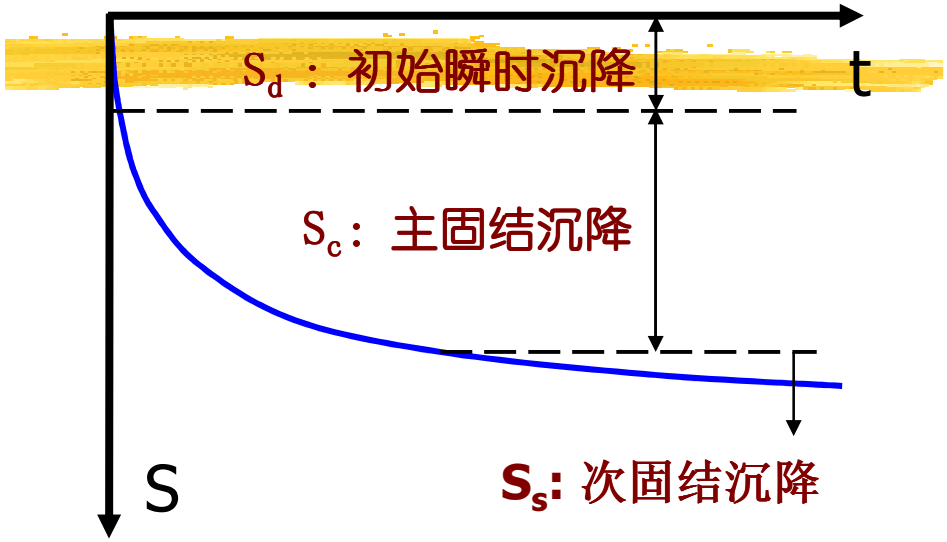
P105 式5-32

**地基最终沉降量分层总和法**

- 粘土地基的沉降量计算
- 砂性土地基的沉降计算
- 单向分层总和法的评价

# 地基沉降计算的若干问题

- 初始瞬时沉降 $S_d$，取决于剪切变形
- 主固结沉降 Sc，取决于渗透固结过程，通常是地基变形的主要部分
- 次固结沉降 Ss，取决于土骨架的蠕变变形




总变形：$S = S_d + S_c + S_s$

# 粘性地基的沉降量计算

DEL

自学

（详见P152-153）

# 粘土地基的沉降量计算

DEL

- **特点：** 砂性土地基的沉降速率较快，沉降绝对值一般不大，且大部分在施工期完成，运用期沉降量一般不会很大
- **问题：** 难以取到有代表性的土样
- **办法：** ✓ 原位冻结取样 → 单向分层总和法 → $s$ → $\psi_s s$

✓原位试验
- 标准贯入试验
- 静力触探试验
- 载荷板试验

$$E \rightarrow \Delta\varepsilon_z = \frac{\Delta p}{E} \rightarrow S = \int_0^H \Delta\varepsilon_z dz$$

# 砂性土地基的沉降量计算

DEL

## 基本假定：

(a) 基底压力为线性分布
(b) 附加应力用弹性理论计算
(c) 只发生单向沉降：侧限应力状态
(d) 只计算固结沉降，不计瞬时沉降和次固结沉降

## 优　点：

- 可计算成层地基
- 可计算不同形状基础 – 条性、矩形和园形等
- 可计算不同基底压力分布 – 均匀、三角和梯形分布
- 参数的试验测定方法简单
- 已经积累了几十年应用的经验，适当修正。

DEL

# 单向分层总和法的评价

☞ 计算精度：
- ✓相差比较大
- ✓修正靠经验

☞ e-p曲线与e-lgp曲线的对比：均需修正

**e-p**

① 原苏联
② 无法确定现场土压缩曲线
③ 不区分不同固结状态
④ 计算结果偏小

**e-lgp**

① 欧美
② 可判定原状土压缩曲线
③ 区分不同固结状态
④ 计算结果偏大

# 单向分层总和法的评价

DEL

# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述 √

§5.1　土的压缩性测试方法 √

§5.2　一维压缩性及其指标 √

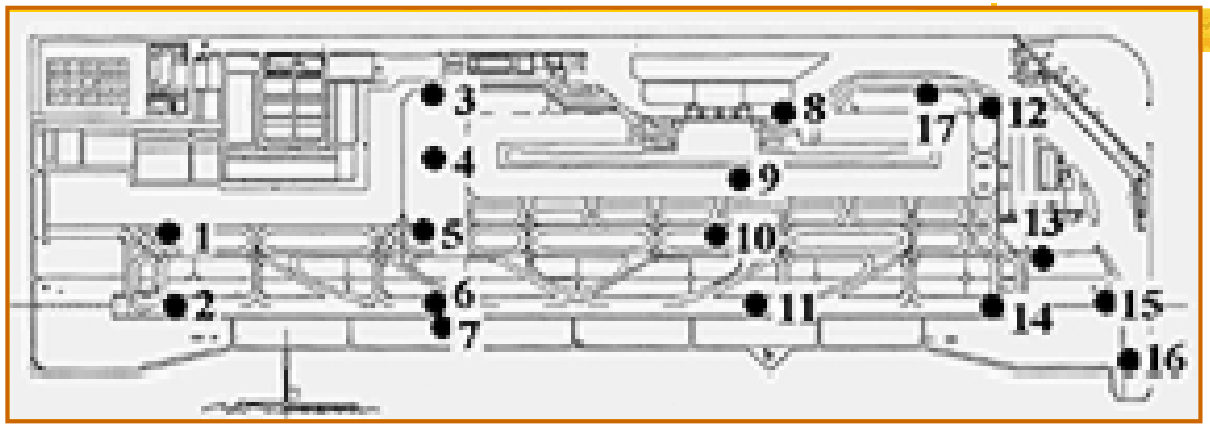
§5.3　地基的最终沉降量计算 √

§5.4　饱和土体的渗流固结理论

P105

- 1986年：开工
- 1990年：人工岛完成
- 1994年：机场运营
- 面积：4370m×1250m
- 填筑量：$180\times10^6m^3$
- 平均厚度：33m
- 地基：15-21m厚粘土
- 问题：沉降大
  且不均匀

# 日本关西国际机场

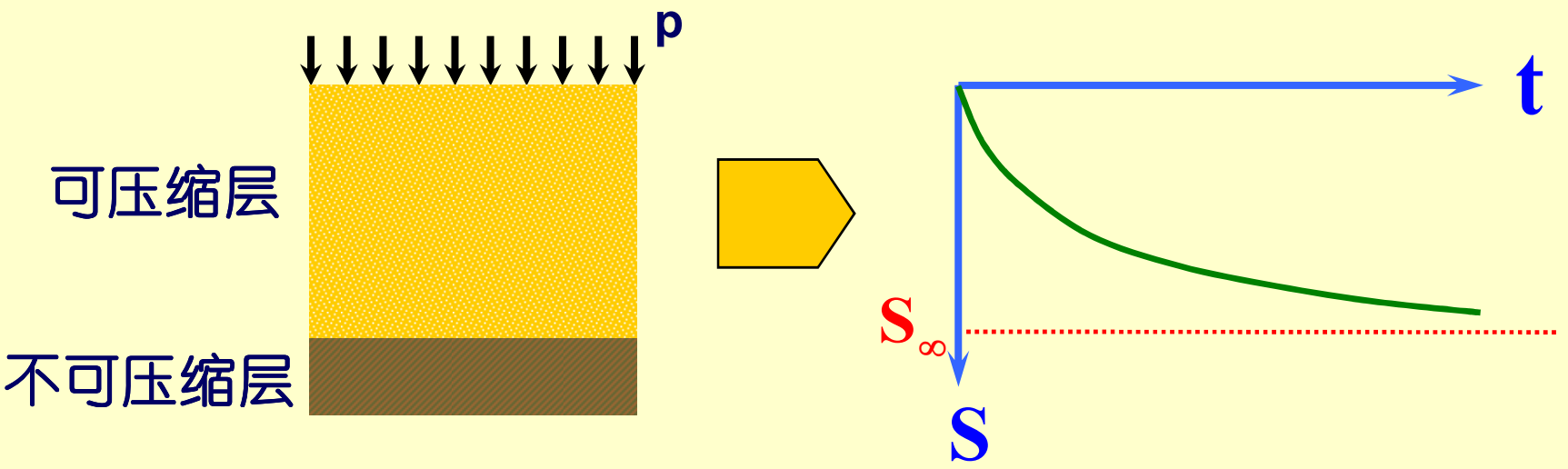



设计预测沉降：
5.7—7.5 m
完工实际沉降：
8.1 m，5cm/月
(1990年)
预测主固结完成：
20年后
比设计超填：
3.0 m

| 日期 | 测 点 | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 平均 |
| 00-12 | 10.6 | 9.7 | 12.8 | 11.7 | 10.6 | 13.0 | 11.6 | 10.3 | 12.7 | 12.5 | 9.0 | 14.1 | 11.7 |
| 01-12 | 10.8 | 9.9 | 13.0 | 11.9 | 10.7 | 13.2 | 11.8 | 10.5 | 12.9 | 12.7 | 9.1 | 14.3 | 11.9 |

# 关西国际机场

■ 沉降与时间之间的关系：饱和土层的渗流固结




问题：固结沉降的速度和程度 ？

超静孔隙水压力的大小 ？

一维渗流固结

P105

# 饱和土体的渗流固结理论

- 饱和土一维渗流固结理论（Terzaghi渗流固结理论）
- 固结度的计算
- 有关沉降－时间的工程问题
- 固结系数的测定
- 多维渗流固结理论简介

# 饱和土体的渗流固结理论

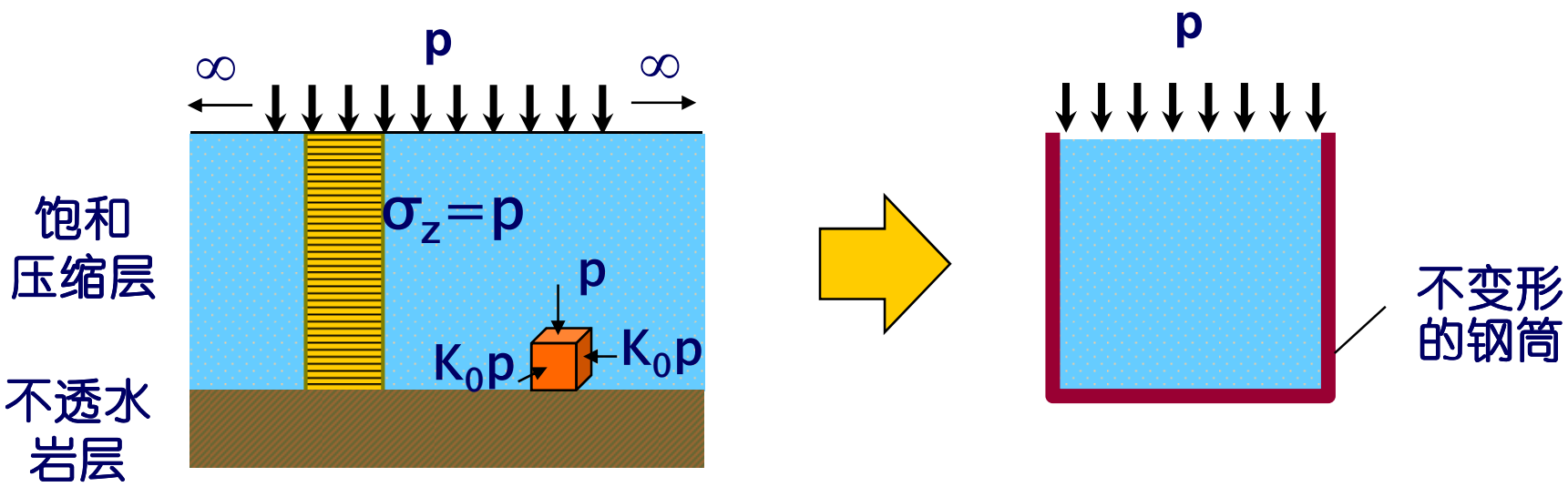
P105 5.4

- 渗透固结理论是针对土这种多孔多相松散介质，建立起来的反映土体变形过程的基本理论。土力学的创始人Terzaghi教授于20世纪20年代提出饱和土的一维渗透固结理论

- 物理模型 – 太沙基一维渗透固结模型
- 数学模型 – 渗透固结微分方程
- 方程求解 – 理论解答
- 固结程度 – 固结度的概念

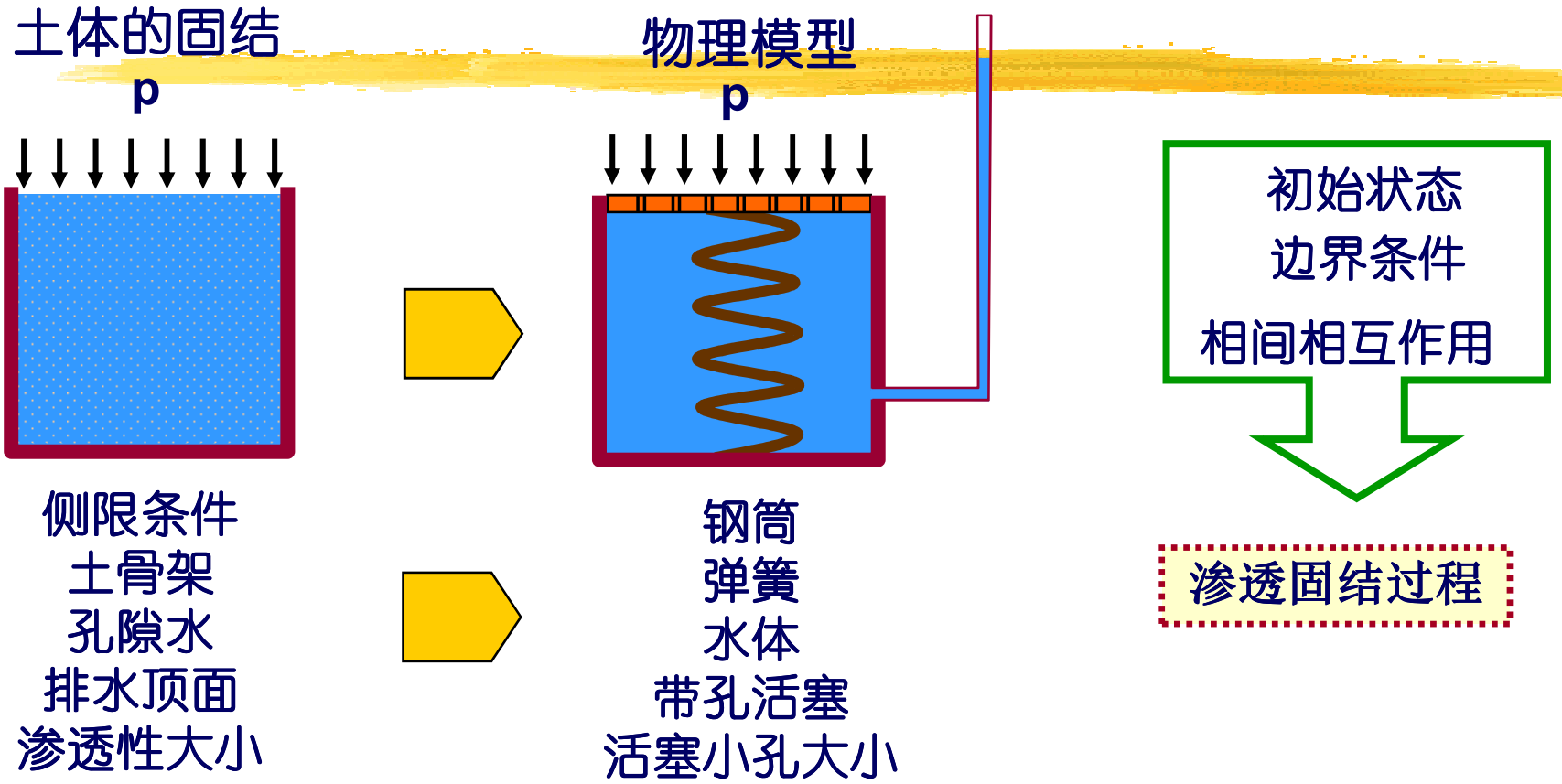
# 一维渗流固结理论

- 实践背景：大面积均布荷载　　侧限状态的简化模型



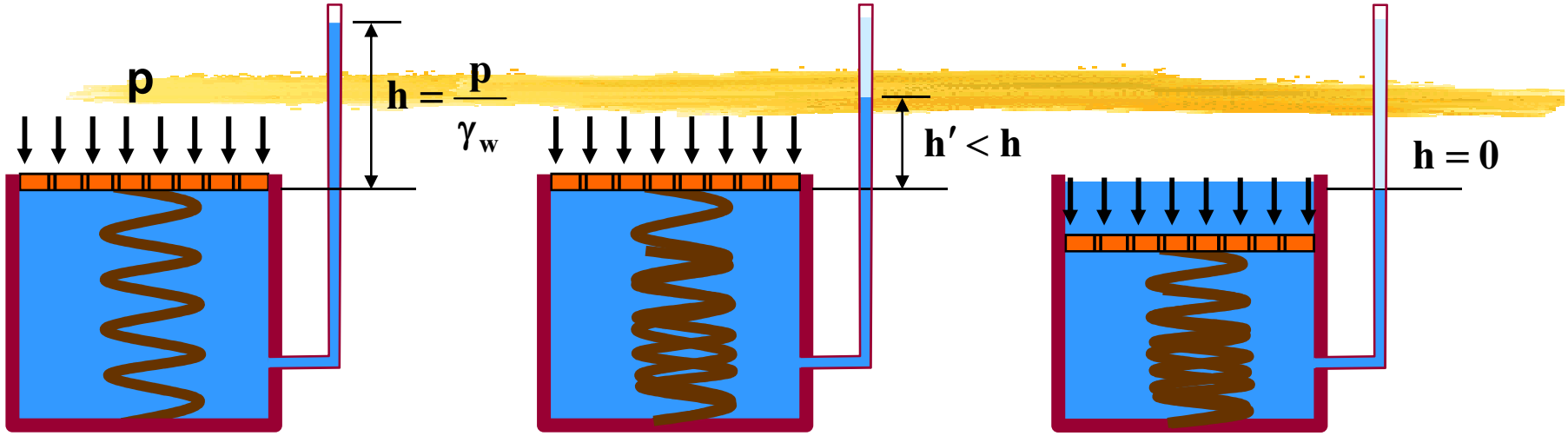

☞处于侧限状态，渗流和土体的变形只沿竖向发生

# Terzaghi一维渗流固结模型




# Terzaghi一维渗流固结模型

P105-106




| $t=0$ | $0<t<\infty$ | $t\to\infty$ |
|---|---|---|
| 附加应力: $\sigma_z=p$ | 附加应力:$\sigma_z=p$ | 附加应力:$\sigma_z=p$ |
| 超静孔压: $u=\sigma_z=p$ | 超静孔压: $u<p$ | 超静孔压: $u=0$ |
| 有效应力: $\sigma'_z=0$ | 有效应力: $\sigma'_z>0$ | 有效应力: $\sigma'_z=p$ |

P106 图5-15

# Terzaghi一维渗流固结模型

◆ 基本假定

1. 土层是均质且完全饱和
2. 土颗粒与水不可压缩
3. 水的渗出和土层压缩只沿竖向发生
4. 渗流符合达西定律且渗透系数保持不变
5. 压缩系数a是常数
6. 荷载均布，瞬时施加，总应力不随时间变化

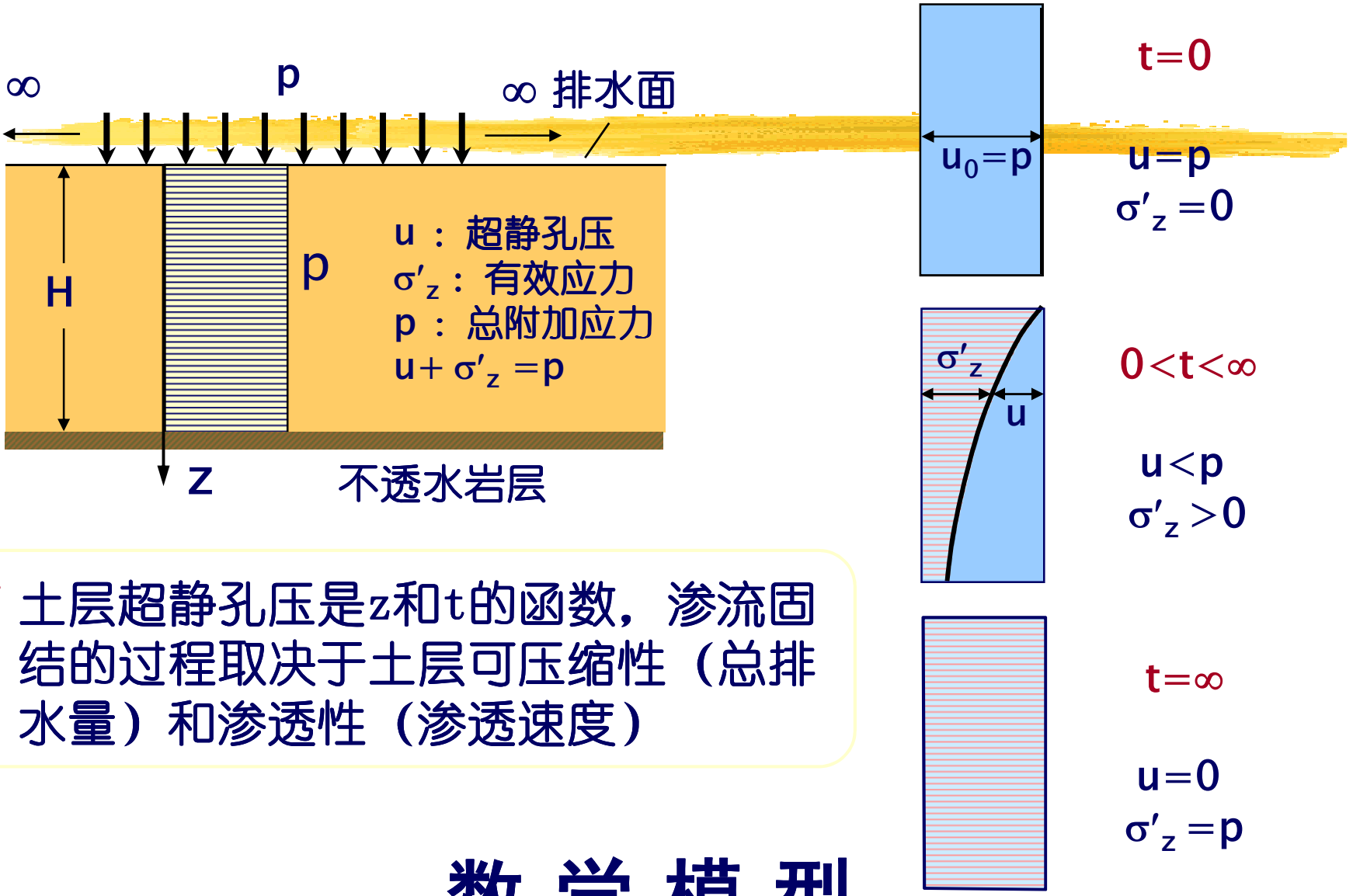
◆ 基本变量

总应力已知 → 有效应力原理 → 超静孔隙水压力的时空分布

一起读书

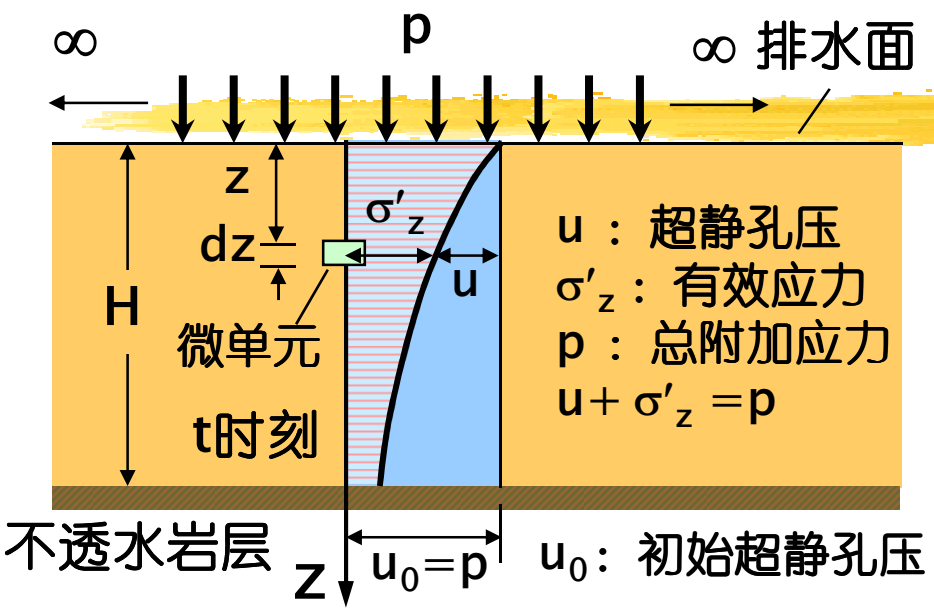
**数 学 模 型**

P106



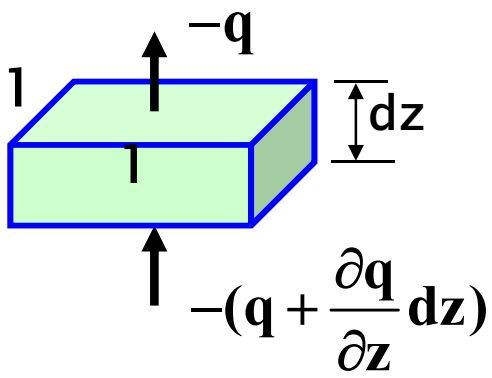

☞ 土层超静孔压是z和t的函数，渗流固结的过程取决于土层可压缩性（总排水量）和渗透性（渗透速度）

**数 学 模 型**




微小单元（1×1×dz）

微小时段（dt）

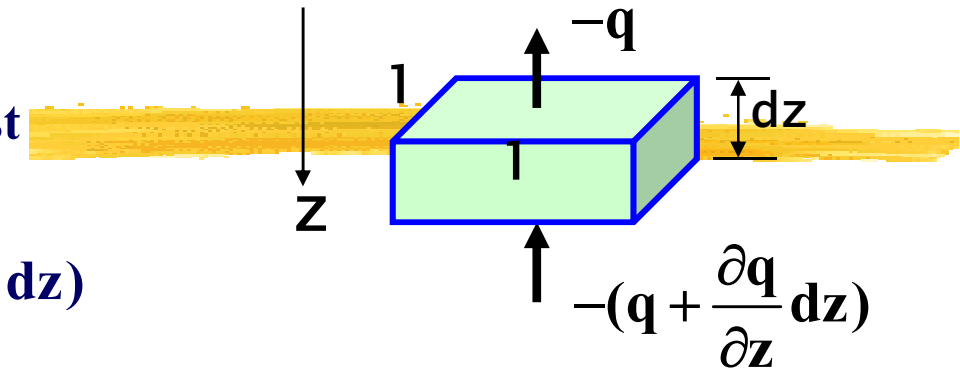



连续性条件 → 土骨架的体积变化 = 孔隙体积的变化 = 流入流出水量差 → · 土的压缩特性 · 有效应力原理 · 达西定律 → 渗流固结基本方程

# 数 学 模 型

固体体积：$V_1 = \frac{1}{1+e_1}dz = const$

孔隙体积：$V_2 = eV_1 = e(\frac{1}{1+e_1}dz)$




dt时段内：孔隙体积的变化＝流出的水量

$$\frac{\partial V_2}{\partial t}dt = \left\{-q-\left[-\left(q+\frac{\partial q}{\partial z}dz\right)\right]\right\}dt = \frac{\partial q}{\partial z}dzdt$$

P107 式5-34

$$\frac{1}{1+e_1}\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z}$$

P154 4-34

# 数 学 模 型

P107

dt时段内：孔隙体积的变化＝流出的水量

$$\frac{1}{1+e_1}\frac{\partial e}{\partial t}=\frac{\partial q}{\partial z}$$

达西定律：$q=Aki=ki=k\frac{\partial h_u}{\partial z}=\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial u}{\partial z}$

u – 超静孔压

P51 2-8

孔隙体积的变化＝土骨架的体积变化

P107 式5-39

土的压缩性：$\Delta e=-a\Delta\sigma'_z$

有效应力原理：$\sigma'_z=\sigma_z-u$

$$\frac{\partial e}{\partial t}=-a\frac{\partial \sigma'_z}{\partial t}=-a\frac{\partial(\sigma_z-u)}{\partial t}=a\frac{\partial u}{\partial t}$$

式5-41

$$\therefore \frac{a}{1+e_1}\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{k}{\gamma_w}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\quad\Rightarrow\quad \frac{\partial u}{\partial t}=\frac{k(1+e_1)}{\gamma_w a}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

式5-42

# 数 学 模 型

P108

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{k\left(1+e_1\right)}{\gamma_w a}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\Rightarrow\frac{\partial u}{\partial t}=C_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

P155 4-35

读书结束

☞ 固结系数: $C_v=\dfrac{k(1+e_1)}{a\gamma_w}$

- $C_v$ 反映土的固结特性：孔压消散的快慢－固结速度
- $C_v$ 与渗透系数k成正比，与压缩系数a成反比；
- 单位：$cm^2/s$；$m^2/year$，粘性土一般在 $10^{-4}$ $cm^2/s$ 量级

P108 式5-42

# 数 学 模 型

☞ 渗透固结微分方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

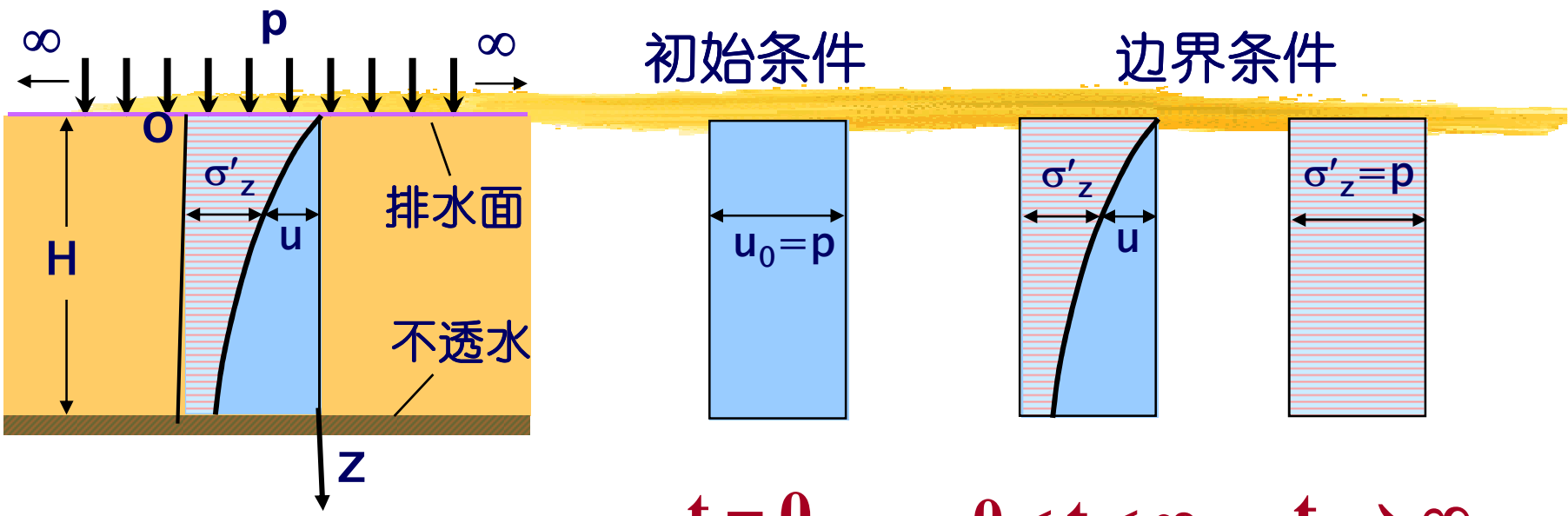
- 反映了超静孔压的消散速度与孔压沿竖向的分布有关
- 是一线性齐次抛物型微分方程式，与热传导扩散方程形式上完全相同，一般可用分离变量方法求解
- 其一般解的形式为：

$$u(z,t) = (C_1 \cos Az + C_2 \sin Az)e^{-A^2 C_v t}$$

- 只要给出定解条件，求解渗透固结方程，可得出u(z, t)

P108 5.4.2

# 方程求解 – 解题思路




u：超静孔压
$\sigma'_z$：有效应力
p：总附加应力
$u_0$：初始超静孔压

$$u+\sigma'_z=p$$

$t=0$

$0\le z\le H$: $u=p$

$0<t<\infty$

$z=0$: $u=0$

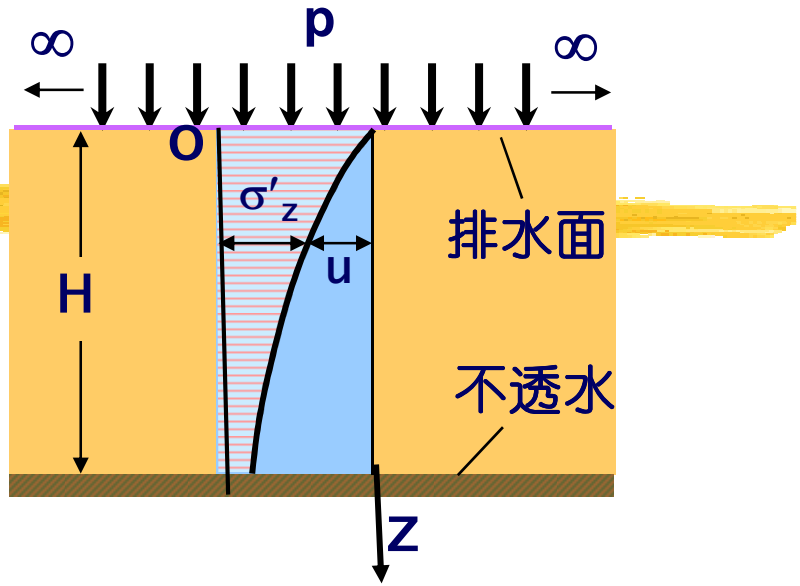
$z=H$: $\partial u/\partial z=0$

$t\to\infty$

$0\le z\le H$: $u=0$

# 方程求解 – 边界条件

- 微分方程：$\dfrac{\partial u}{\partial t}=C_v\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}$




- 初始条件和边界条件

- 方程的解：

$$u_{z,t}=\frac{4p}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi z}{2H}e^{-m^2\frac{\pi^2}{4}T_v}\qquad m=1,3,5\ldots$$

$T_v=\dfrac{C_v}{H^2}t$ 为无量纲数，称为时间因数，反映超静孔压消散的程度也即固结的程度

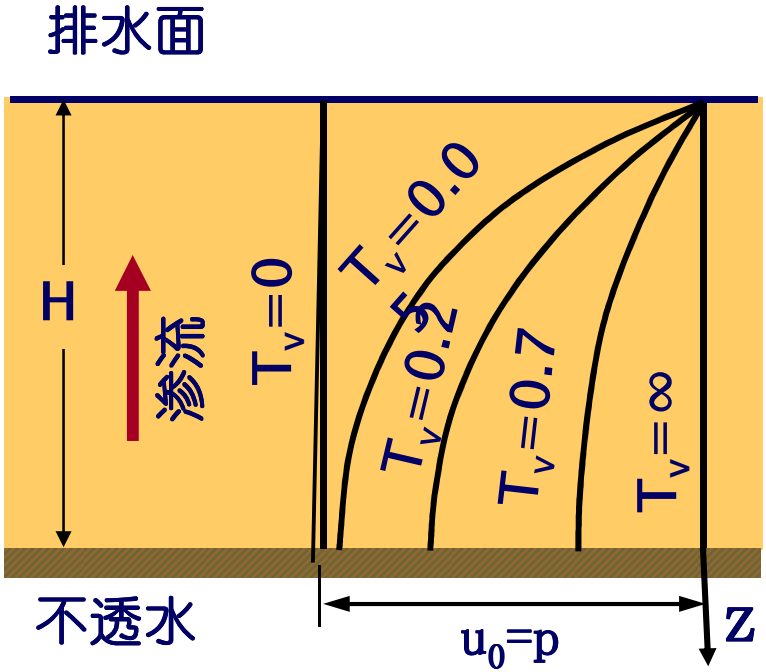
P155 4-38

# 方程求解 – 方程的解

P108 式5-43

- 方程的解：

$$u_{z,t}=\frac{4p}{\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi z}{2H}e^{-m^2\frac{\pi^2}{4}T_v}\qquad m=1,3,5\ldots$$




P156 图4-26a

☞ 从超静孔压分布u-z曲线的移动情况可以看出渗流固结的进展情况

☞ u-z曲线上的切线斜率反映该点的水力梯度水流方向

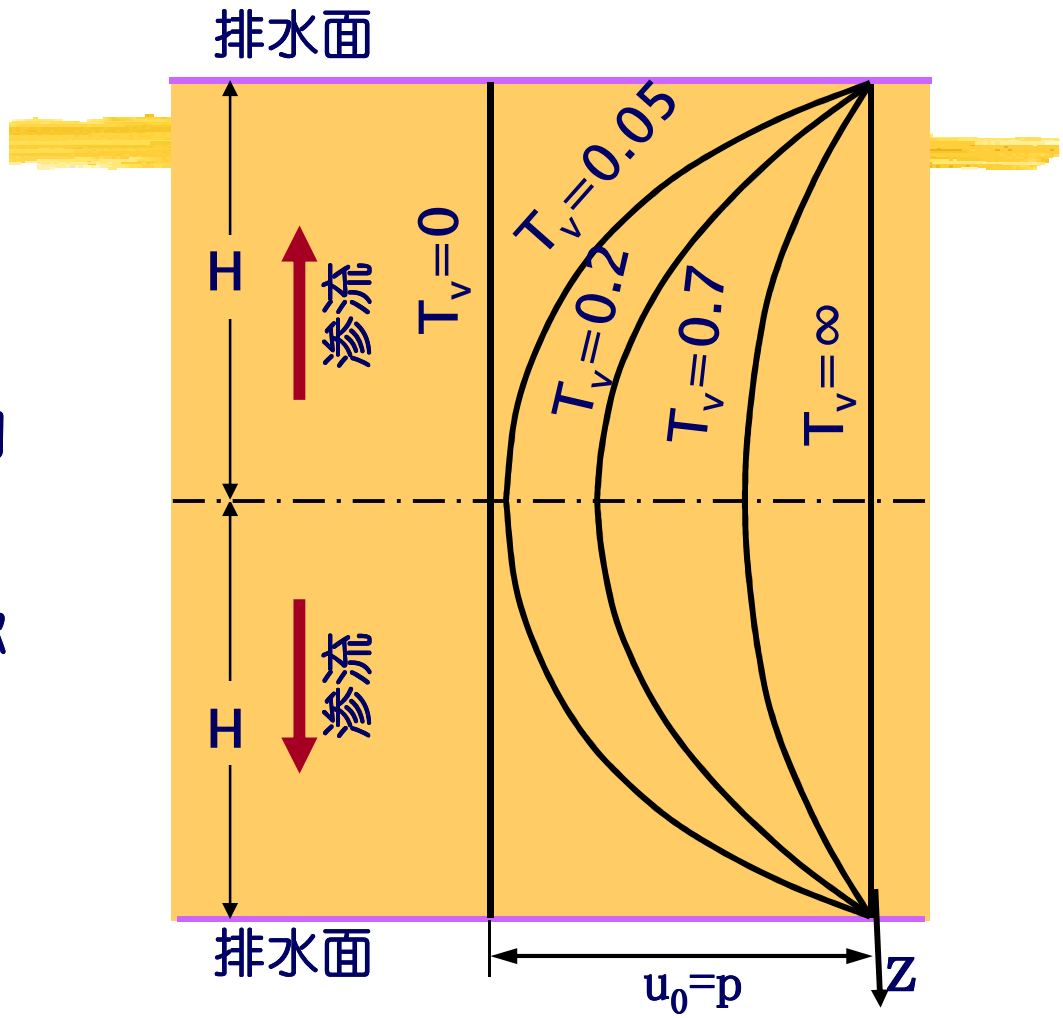
思考：两面排水时如何计算？

# 方程求解 – 固结过程

DEL

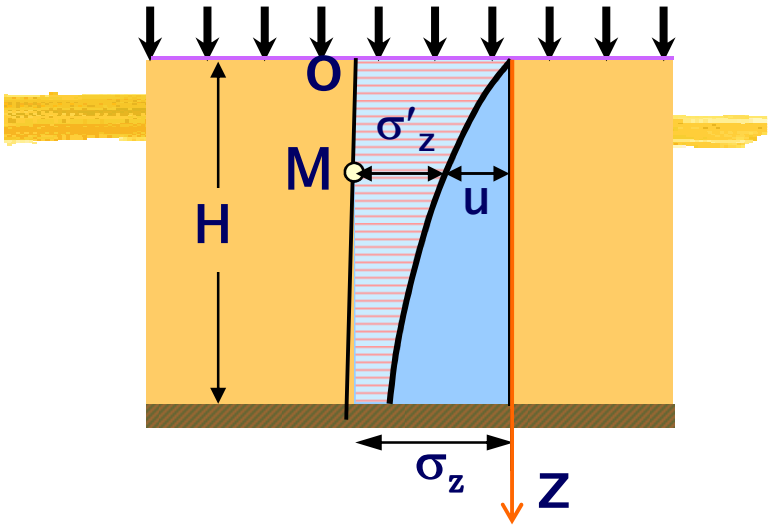
- 双面排水的情况

  - 上半部和单面排水的解完全相同
  - 下半部和上半部对称




# 方程求解 – 固结过程

☞ 一点M的固结度：其有效应力 $\sigma'_{zt}$ 对总应力 $\sigma_z$ 的比值




$$U_{z,t}=\frac{\sigma'_z}{\sigma_z}=\frac{\sigma_z-u_{z,t}}{\sigma_z}=1-\frac{u_{z,t}}{\sigma_z}$$

$U_{z,t}$=0～1：表征一点超静孔压的消散程度

☞ 一层土的平均固结度

$$U_t=\frac{\text{有效应力分布面积}}{\text{总应力分布面积}}=\frac{\int_0^H \sigma'_{z,t}dz}{\int_0^H \sigma_z dz}=1-\frac{\int u_{z,t}dz}{\int \sigma_z dz}$$

$U_t$=0～1：表征一层土超静孔压的消散程度

P108　5.4.3

# 固结度的概念

## ☞ 平均固结度$U_t$与沉降量$S_t$之间的关系

t时刻：

$$U_t=\frac{\text{有效应力分布面积}}{\text{总应力分布面积}}=\frac{\int\sigma'_{z,t}dz}{\int\sigma_z dz}=\frac{\int\frac{a\sigma'_{z,t}}{1+e_1}dz}{\frac{a\sigma_z}{1+e_1}H}=\frac{S_t}{S_\infty}$$

$$U_t=\frac{S_t}{S_\infty}$$

固结度等于t时刻的沉降量与最终沉降量之比

$$S_t=U_t\cdot S_\infty$$

- 确定沉降过程也即$S_t$的关键是确定$U_t$
- 确定$U_t$的核心问题是确定$u_{z.t}$

P156

# 固结度的概念

## ☞ 均布荷载单向排水

$$U_t = 1 - \frac{\int_0^H u_{z,t}\,dz}{\int_0^H \sigma_z\,dz}$$

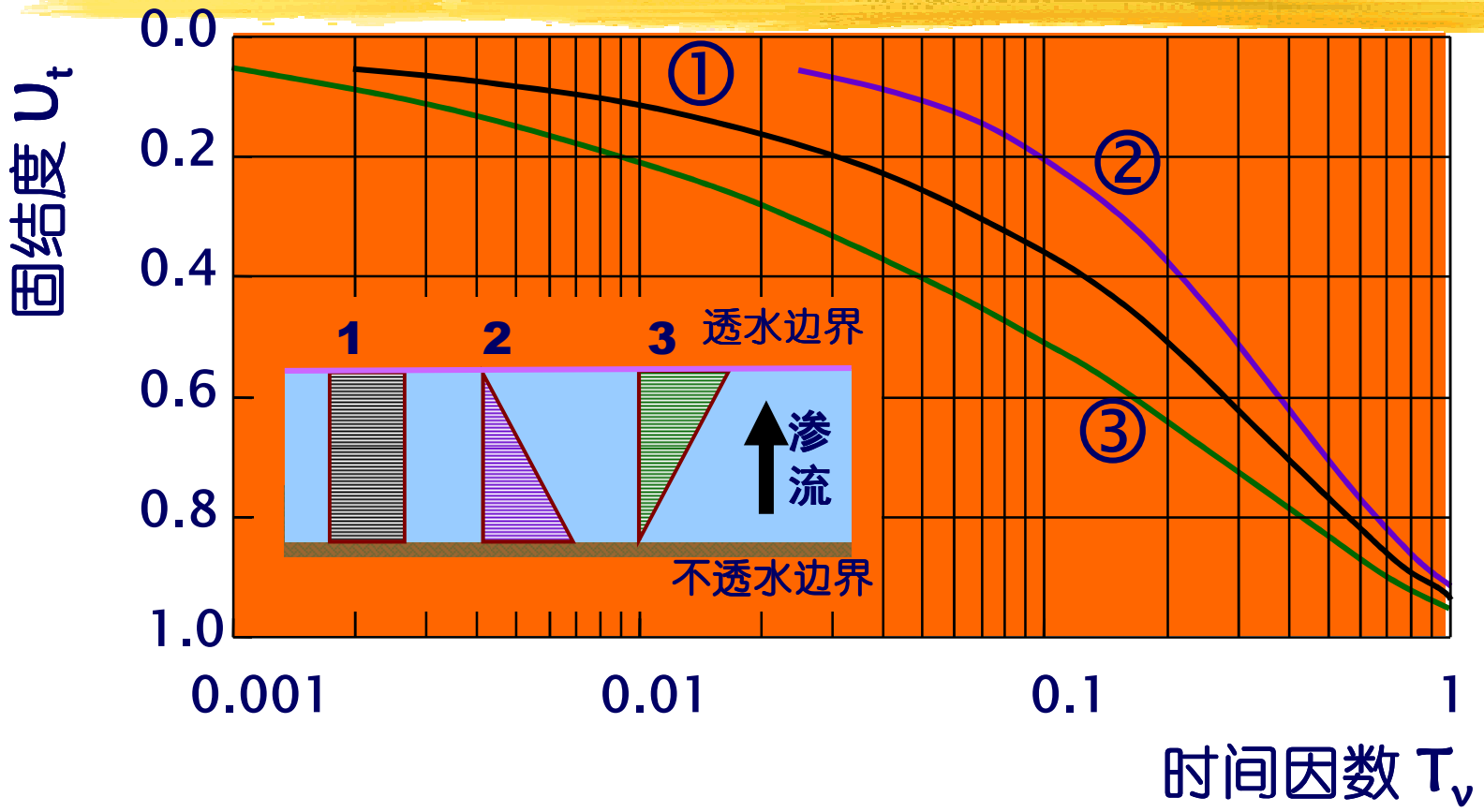
- 一般解：$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{m^2}e^{-m^2\left(\frac{\pi^2}{4}\right)T_v}$ 式4-42 式5-48
- 图表解： P157，图4-27，曲线①
- 近似解：$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2}e^{-\frac{\pi^2}{4}T_v}$ 式4-43 式5-49
- 简化解：
$$\begin{cases} T_v = \pi U_t^2/4 & (U_t < 0.6) \\ T_v = 0.933\lg(1-U_t) - 0.085 & (U_t > 0.6) \\ T_v \approx 3U_t & (U_t = 1) \end{cases}$$
式4-44 DEL

$U_t$是$T_v$的单值函数，$T_v$可反映固结的程度

书上备注

# 地基的平均固结度计算

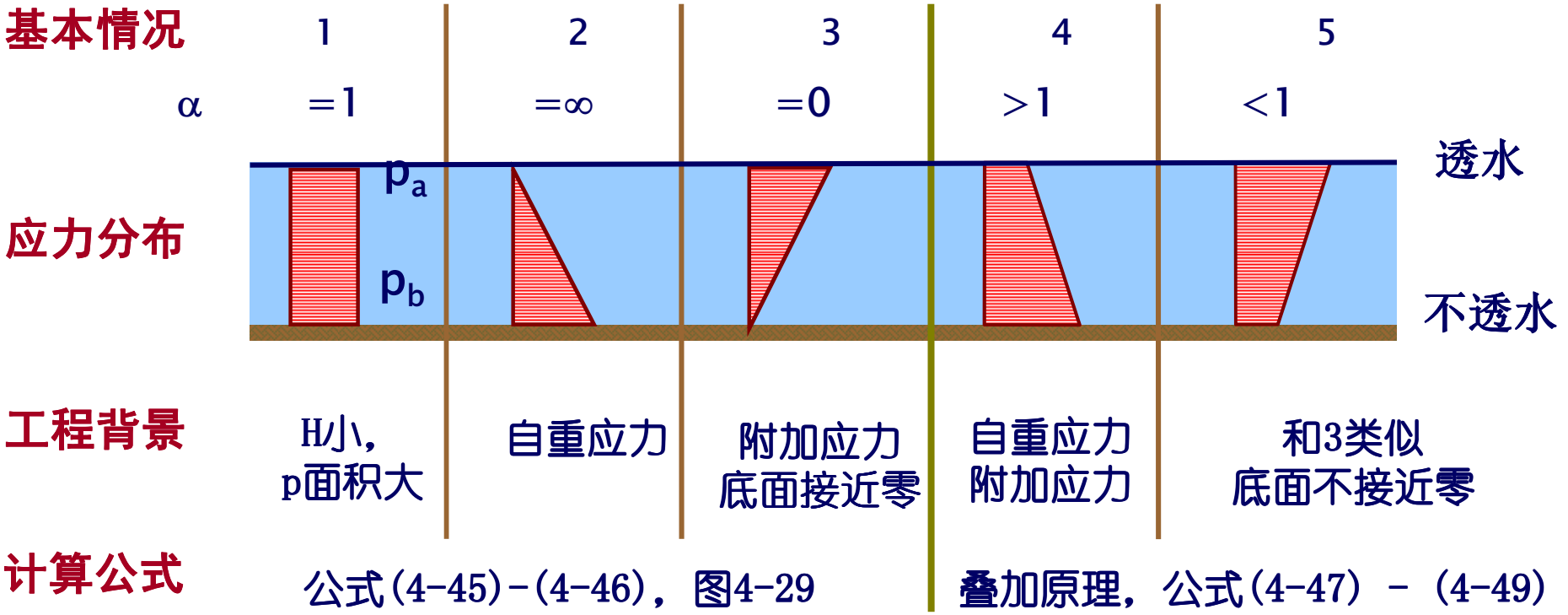
## ☞ 三种基本情况




DEL

# 地基的平均固结度计算

## ☞ 常见计算条件(1) 压缩应力分布不同时 $\alpha = p_b/p_a$

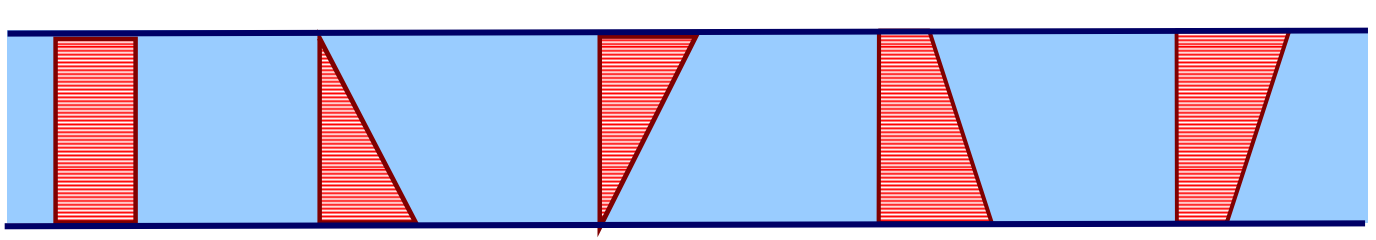



DEL

# 地基的平均固结度计算

## ☞ 常见计算条件　　(2) 双面排水时

基本情况　1　2　3　4　5

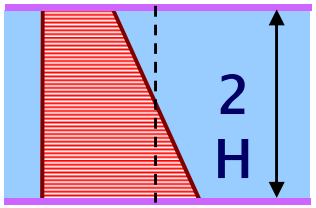



应力分布

☞ 无论哪种情况，均按情况1计算

☞ 压缩土层深度H取1/2值

$$T_v = \frac{C_v}{H^2} t$$




DEL

# 地基的平均固结度计算

P159

- 求某一时刻t的固结度与沉降量
- 求达到某一固结度所需要的时间
- 根据前一阶段测定的沉降－时间曲线，推算以后的沉降－时间关系

P111 5.4.4 实际应用　例题5-3 重要 一起看

# 5 有关沉降—时间的工程问题

- 求某一时刻t的固结度与沉降量

t

$$T_v = C_v t / H^2$$ 4-38

$$U_{t,(T_v)} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v}$$ 4-43

$$S_t = U_t S_\infty$$ P160 4-50

# 有关沉降—时间的工程问题

- 求达到某一沉降量(固结度)所需要的时间

$$U_t = S_t / S_\infty$$

P160 4-50

从 $U_t$ 查表（计算）确定 $T_v$

4-43

$$t = \frac{T_v H^2}{C_v}$$

4-38

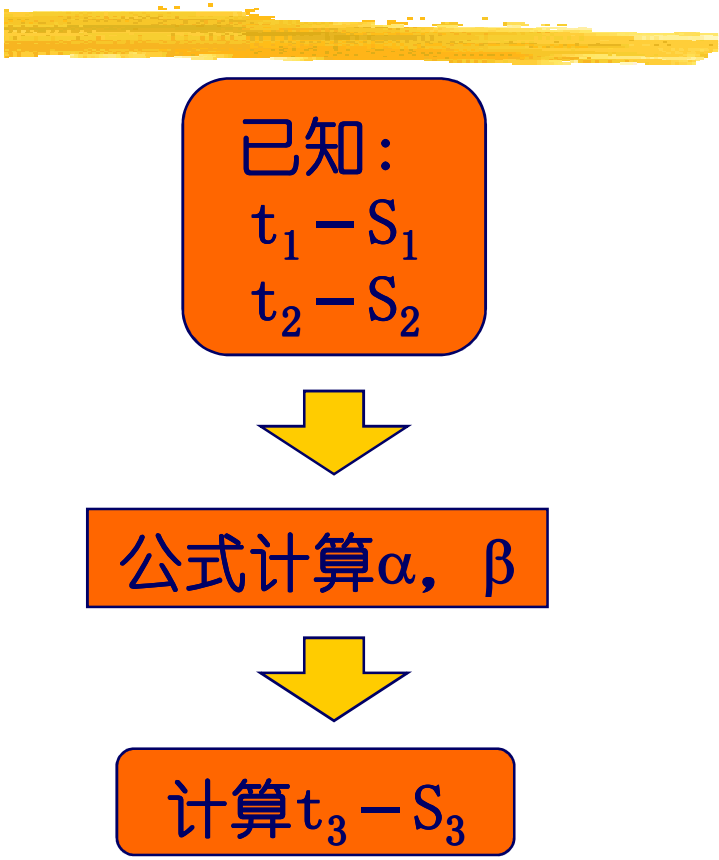
# 有关沉降—时间的工程问题

- 根据前一阶段测定的沉降－时间曲线，推算以后的沉降－时间关系

☞ 对于各种初始应力分布，固结度均可写成：

$$U_t = 1 - \alpha e^{-\beta t}$$

P160 4-51




# 有关沉降－时间的工程问题

■ 固结方程：$\dfrac{\partial u}{\partial t} = C_v \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ P160

☞ 固结系数 $C_v$为反映固结速度的指标，$C_v$ 越大，固结越快，确定方法有四种：

- 直接计算法
- 直接测量法
- 时间平方根法—经验方法
- 时间对数法—经验方法

# 6. 固结系数确定方法

- 压缩试验→ a
- 渗透试验→ k

$$C_v = \frac{k(1+e_1)}{\gamma_w a}$$

- k与a均是变化的
- $C_v$在较大的应力范围内接近常数
- 精度较低

**直接计算法**

- 压缩试验→ S–t曲线

  - 因为 $U_t=90\%$ → $T_v=0.848$

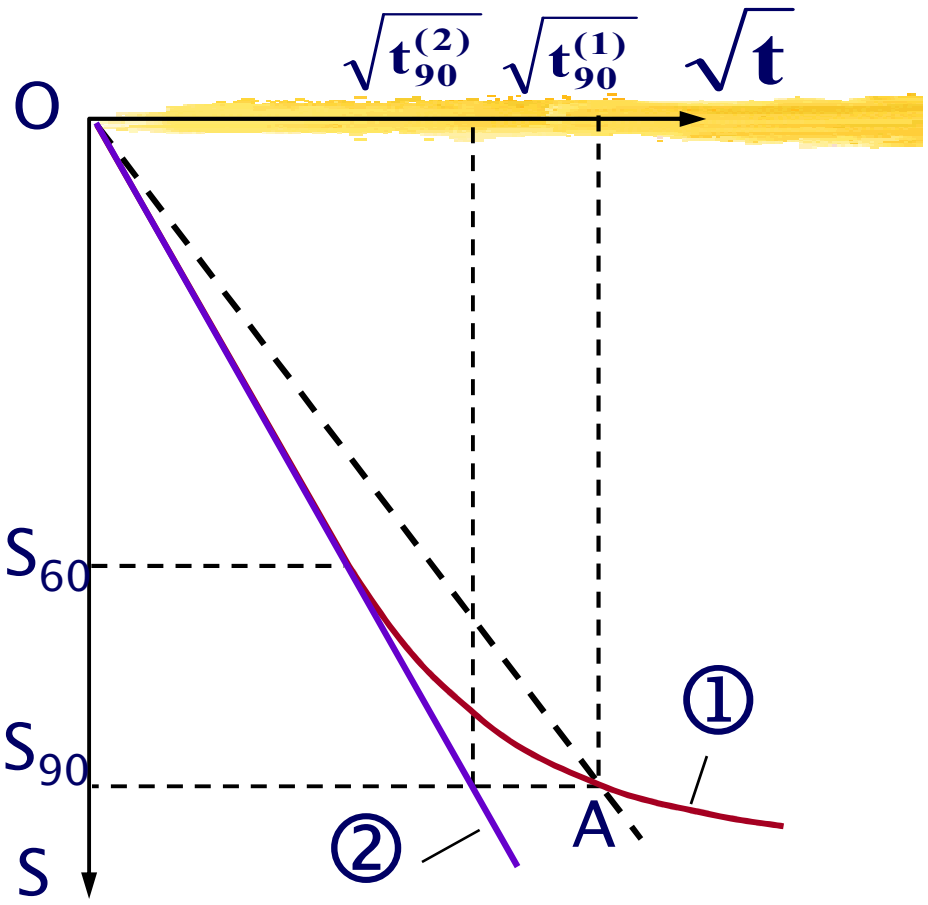
  $$C_v = 0.848H^2/t_{90}$$

  ☞ 由于次固结，$S_\infty$不易确定

  ☞ 存在初始沉降，产生误差

**直接测量法**

DEL




$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^2} e^{-m^2 \frac{\pi^2}{4} T_v} \qquad (1)$$

$$U_t = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{T_v} \qquad (2)$$

校正初始沉降误差

☞ $U_t \leq 60\%$时二线基本重合，之后逐渐分开

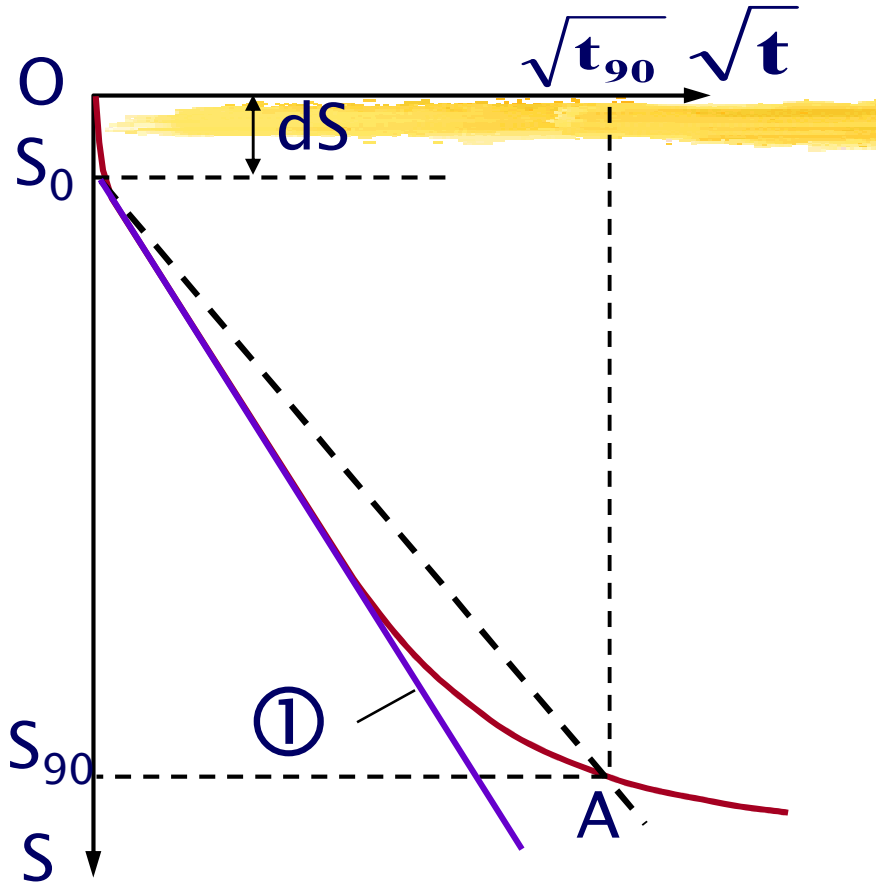
☞ 当$U_{t=90\%}$时，

$$\sqrt{T_{v90}^{(1)} / T_{v90}^{(2)}} = 1.15$$

去除次固结影响

# 时间平方根法

DEL




- 绘制压缩试验S–$t^{1/2}$ 曲线
- 做近似直线段的延长线交S轴于$S_0$，即为主固结的起点，dS为的初始压缩量
- 从$S_0$作直线$S_0A$，其横坐标为直线①的1.15倍
- 直线$S_0A$与试验曲线之交点A所对应的t值为$t_{90}$

$$C_v = 0.848H^2 / t_{90}$$

# 时间平方根法

DEL

选学

（详见P161-162）

# 时间对数法

DEL

详见：P162-164

选学

DEL

# 多维渗流固结理论简介

# 第五章：土的压缩性与地基沉降计算

§5.0　概述 √

§5.1　土的压缩性测试方法 √

§5.2　一维压缩性及其指标 √

§5.3　地基的最终沉降量计算 √

§5.4　饱和土体的渗流固结理论 √

- 土的压缩特性测试方法
  - 侧限压缩试验
  - 三轴压缩试验
  - 土的应力应变关系
- 一维压缩性及其指标
  - ε-p、e-p、e-lgp曲线
  - 先期固结压力
  - 原位压缩曲线及再压缩曲线
- 地基的最终沉降量计算
  - 单一土层一维压缩问题
  - 地基最终沉降量分层总和法
  - 地基沉降计算的若干问题
- 饱和土体的渗流固结理论
  - 一维渗流固结理论
  - 固结度的计算
  - 固结系数的测定

# 小　　结

# 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