



西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

# 土力学 (第2版) 电子课件

廖红军  
H. J. Liao

新世纪土木工程系列教材

## 土力学

(第2版)

赵树德 廖红军 主编

高等教育出版社

H. J. Liao



- 本电子课件为高等教育出版社土木工程系列教材《土力学》第2版(赵树德、廖红建主编)的配套课件。基于作者长期主讲《土力学》的电子教案编制而成。限于编者水平, 难免存在不妥之处, 恳请大家批评指正。
- 《土力学》第2版经修订共有10章内容, 其中1-8章是土力学的核心部分, 9-10章为选学内容。故本课件以1-8章的主要教学内容作为电子教案, 可为使用本教材的教师和学生提供教学和学习上的便利。



# 第4章 土的压缩性和地基沉降计算

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

4.1 概述

4.2 土的压缩性及  
压缩性指标

4.3 土的压缩性原位测试

4.4 地基沉降量计算

4.5 应力历史对地基沉降  
的影响

4.6 地基沉降与时间的关系

4.7 地基沉降计算的  
其它情况

4.8 非饱和土的固结  
理论简介

4.9 地基容许变形值及防止  
地基有害变形的措施

H. J. Li ao



## § 4.1 概述

### - 基本概念

- 地基中**应力**：自重应力、附加应力
- 地基的**变形**：主要由**附加应力**产生
- 影响地基变形**因素**：

基底附加压力、土的压缩性、地下水位变化、地下采空、侵蚀、湿陷、膨胀、冻胀等。

### - 地基的**竖向变形—沉降**：

均匀沉降、不均匀沉降（沉降差、倾斜）

- 对**最大沉降量**和**沉降差**应在规定的**允许范围**内。



## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (一)

### 4.2.1 土的压缩性

Ø 土体材料的**压缩**主要由三部分**组成**:

1. 固体土颗粒本身被压缩, 极小, 工程上可忽略;
2. 土中液体水及封闭气体被压缩, 在工程荷载下一般不计;
3. 受荷载作用后土中的**水和气体从孔隙中挤出**, 孔隙减小, 土体**压缩变形**。

Ø 土压缩性的主要**影响因素**:

1. **土本身的性状**: 土粒级配、成分、结构构造、孔隙水等
2. **环境因素**: 应力历史、应力路径、温度等

Ø 评价土的压缩性的**方法**:

1. **室内侧限压缩试验** (室内固结试验);
2. **现场荷载试验**



## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (二)

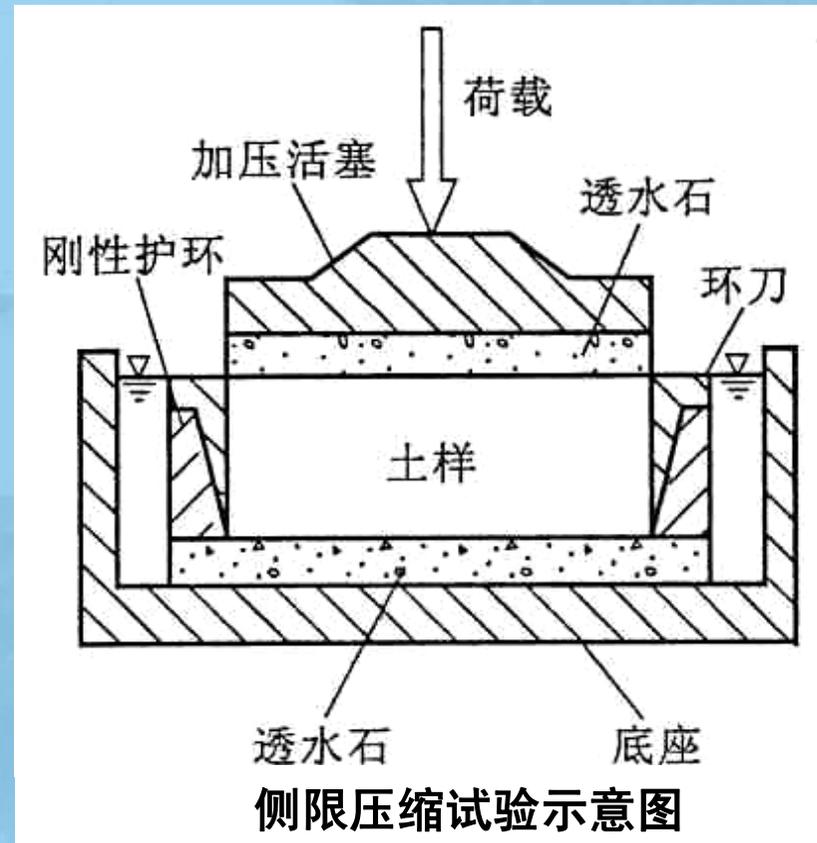
### 4.2.2 侧限压缩试验及土的压缩性指标

#### 侧限压缩试验

是指土在压缩过程中只能发生**竖向变形**，而不能发生侧向变形。

#### 加载方式

**逐级**加载，要等到土样压缩相对稳定后才能施加下一级荷载。可加载、卸载、再加载。





## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (三)

- 在侧限压缩条件下 (如图)

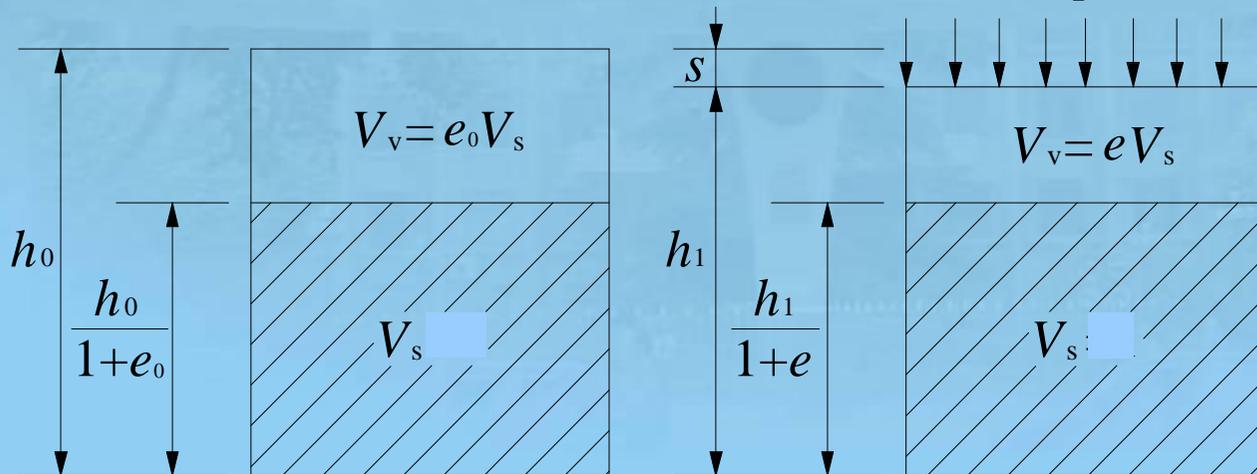
$$Q V_0 = h_0 A = V_v + V_s = e_0 V_s + V_s = (1 + e_0) V_s$$

$$V_1 = (h_0 - s) A = V_v + V_s = e V_s + V_s = (1 + e) V_s$$

$$\therefore V_s = \frac{h_0 A}{(1 + e_0)} = \frac{(h_0 - s) A}{(1 + e)}$$

- 压缩量计算公式:

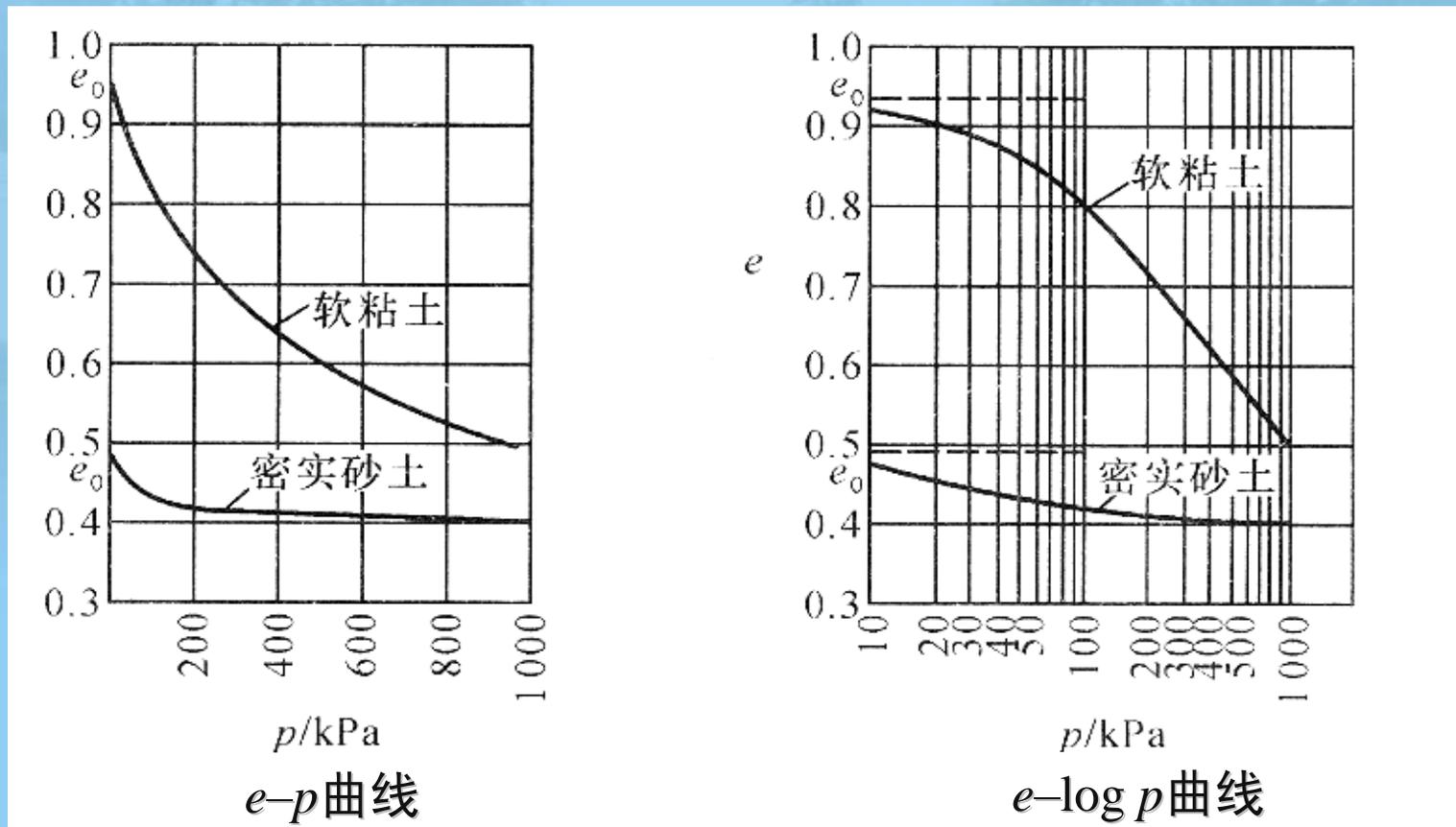
$$s = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} h_0 \quad \text{或} \quad e = e_0 - \frac{s}{h_0} (1 + e_0)$$





## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (四)

- 压缩曲线
- 由压缩试验测定各级荷载 $p_i$ 下土样的稳定变形量 $s_i$ ，按压缩量公式计算 $e_i$ ，绘制孔隙比与压力关系曲线。





## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (五)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### 土的压缩性指标

#### (1) 压缩系数 $a$

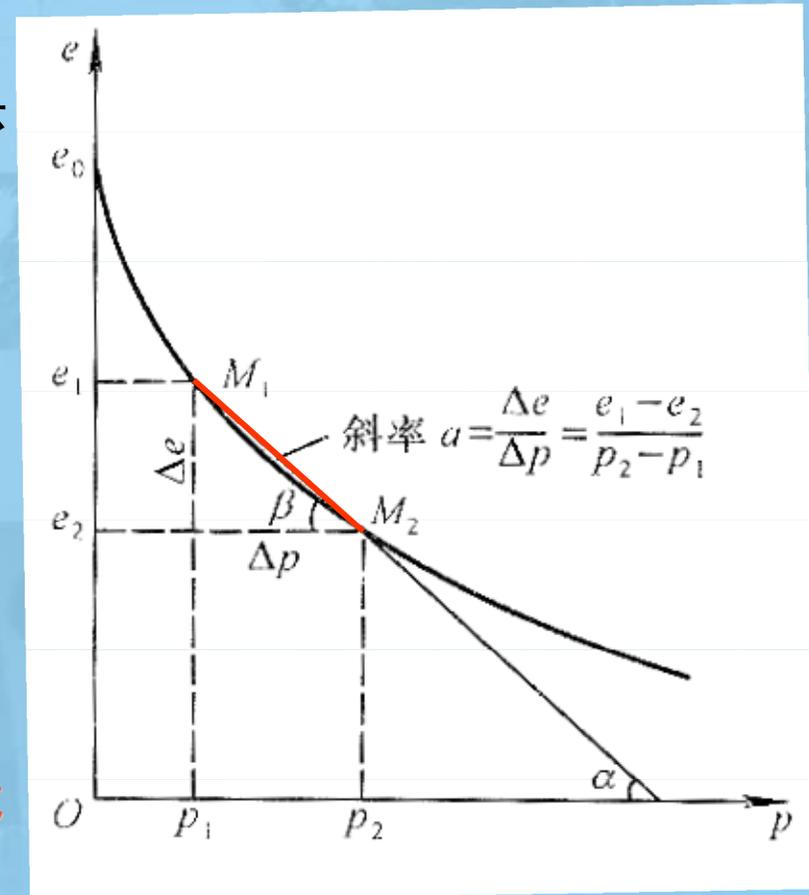
$e-p$ 曲线上任一点的切线斜率 $a$ 表示压力 $p$ 作用下的压缩性

$$a = -\frac{de}{dp}$$

当压力变化范围 $p_1 \sim p_2$ 不大时, 将相应的曲线用直线 $M_1M_2$ 来代替

$$a = \tan b = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1}$$

压缩系数 $a$ 值越大, 土的压缩性就越大。



$e-p$ 压缩曲线

H. J. Li ao



## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (六)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

- 国家标准《**建筑地基基础设计规范**》(GB 50007-2002)

取压力 $p_1=100\text{kPa}$ 、 $p_2=200\text{kPa}$  压力区间对应的压力系数 $a_{1-2}$ 评价土的压缩性。

$$a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$$



低压缩性土

$$0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$$



中压缩性土

$$a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$$



高压缩性土



## § 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (七)

### (2) 压缩指数 $C_c$

$e-\log p$  曲线直线段的斜率

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1} = \frac{e_1 - e_2}{\lg(p_2/p_1)}$$

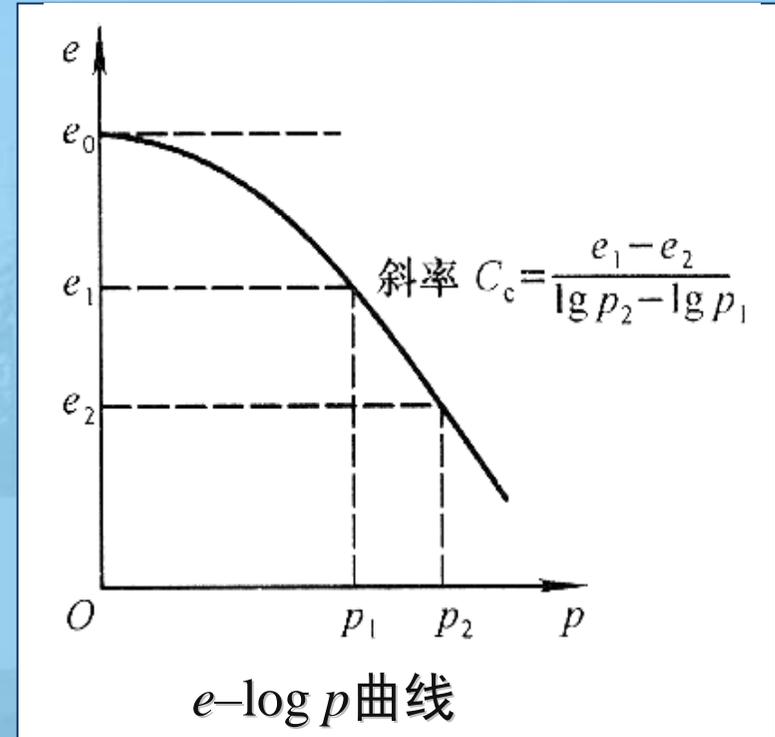
- 压缩指数  $C_c$  越大，土的压缩性越大。

### (3) 压缩模量 $E_s$

在完全侧限条件下，土体竖向附加应力  $\sigma_z$  与相应的应变增量  $\varepsilon_z$  之比：

$$E_s = \frac{s_z}{e_z} = \frac{p_2 - p_1}{\frac{h_1 - h_2}{h_1}} = \frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2} h_1 = \frac{p_2 - p_1}{e_1 - e_2} (1 + e_1) = \frac{1 + e_1}{a}$$

- 压缩模量和压缩系数成反比，压缩模量越大压缩性越小。





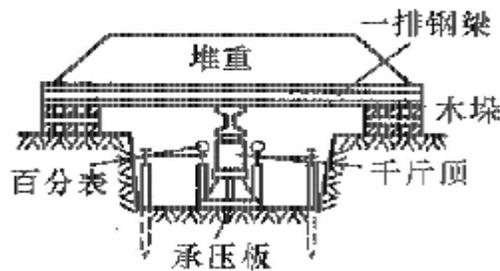
## § 4.3 土的压缩性原位测试 (一)

### 4.3.1 载荷试验

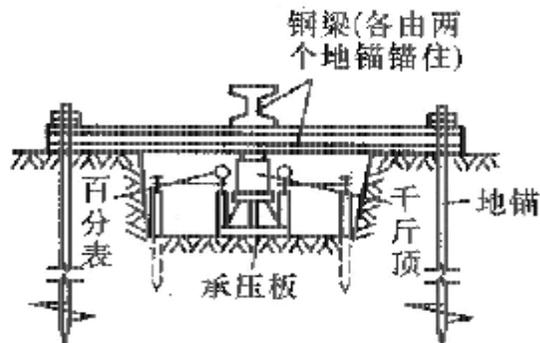
#### Ø 载荷试验原理

在试验土面上逐级加荷载并测定每级荷载下土的变形，绘制荷载-沉降曲线。

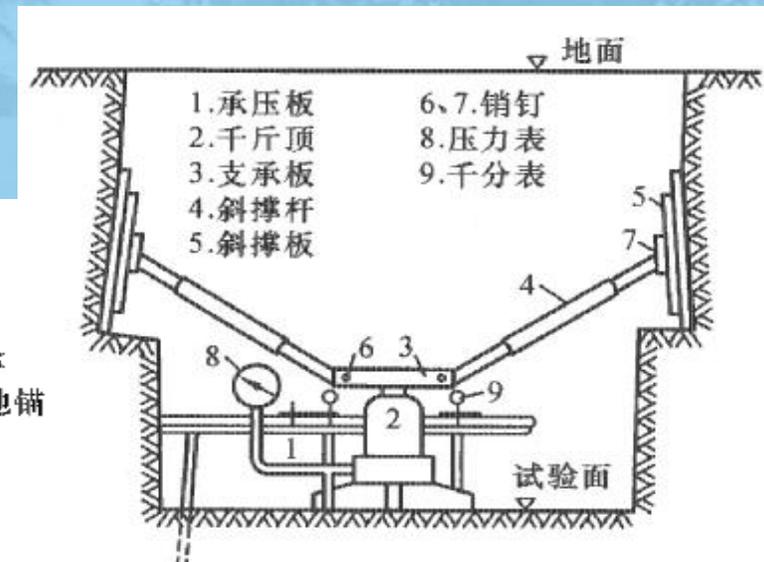
#### Ø 载荷试验装置和方法



(a) 堆重-千斤顶式



(b) 地锚-千斤顶式



(c) 基槽承载式



## § 4.3 土的压缩性原位测试（二）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 载荷试验方法及加荷标准

- ∅ 开挖试坑
- ∅ 试验时必须注意保持试验土层的原状结构和天然湿度
- ∅ 第一级荷载相当于开挖试坑卸除土的自重应力
- ∅ 第二级荷载以后每级荷载：软土10~25kPa，硬土50kPa
- ∅ 加荷等级不少于8级，最大加载量不少于荷载设计值的2倍
- ∅ 测记承压板沉降量

### - 荷载试验终止加载的条件

- (1) 承载板周围的土明显侧向挤出或发生裂纹；
- (2) 沉降 $s$ 急剧增大，荷载 $p$ —沉降 $s$ 曲线出现陡降段；
- (3) 在某一荷载下，24小时内沉降速率不能达到稳定标准；
- (4) 沉降 $s \geq 0.08b$ （ $b$ 为承压板宽度或直径）。

H. J. Li ao



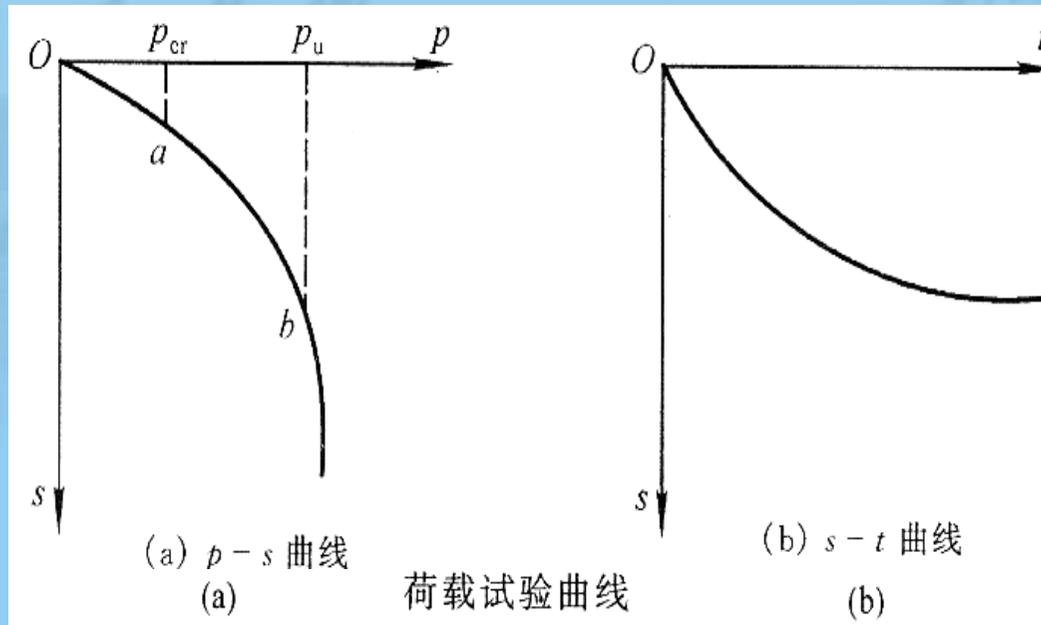
## § 4.3 土的压缩性原位测试（三）

### 地基应力与应变的关系

荷载-沉降曲线 ( $p-s$  曲线) 可以分为三个变形阶段:

- 1 直线变形阶段 (比例界限荷载或临塑荷载  $p_{cr}$ )
- 2 局部变形阶段 (塑性变形区逐渐扩大, 压力板沉降显著增大)
- 3 完全破坏阶段 (地基失稳破坏, 极限荷载  $p_u$ )

实际荷载不允许达到极限荷载  $p_u$ , 通常安全系数  $K=2\sim 3$ 。





## § 4.3 土的压缩性原位测试（四）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### 一 地基土的变形模量

地基土的变形模量是指**无侧限**情况下单轴受压时应力与应变之比。 $p-s$  曲线的 $oa$ 段近似成直线关系，运用弹性理论计算**变形模量** $E_0$ 为：

$$E_0 = \omega(1 - \nu^2) \left( \frac{p_{cr} b}{s} \right)$$

式中： $p_{cr}$  — 比例界限荷载；

$s$  — 实测的沉降量；

$\omega$  — 沉降系数（方形板0.88，圆形板0.79）；

$b$  — 矩形荷载的短边或圆形荷载的直径。

H. J. Li ao



## § 4.3 土的压缩性原位测试（五）

### 土的变形模量与压缩模量的关系

变形模量 $E_0$ 是在现场土柱周围的土体起到一定的侧限作用测得的；而压缩模量 $E_s$ 是在室内土体完全侧限条件下测得的。

理论上 $E_0$ 和 $E_s$ 可以通过材料力学进行换算。由理论换算两者的关系：

$$E_0 = \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) E_s = (1 - 2\nu K_0) E_s = b \cdot E_s$$

**注：**此关系是理论关系，由于实际中影响因素复杂，并不能完全反映 $E_0$ 与 $E_s$ 之间的关系。



## § 4.3 土的压缩性原位测试 (六)

### 4.3.2 旁压试验

当基础埋深较大在地下水位以下。

- **试验原理**：使工作腔的变形符合**平面应变状态**，腔体外部用一块**弹性膜**包起来，其受到压力作用后产生**膨胀**，挤压孔周围的土。

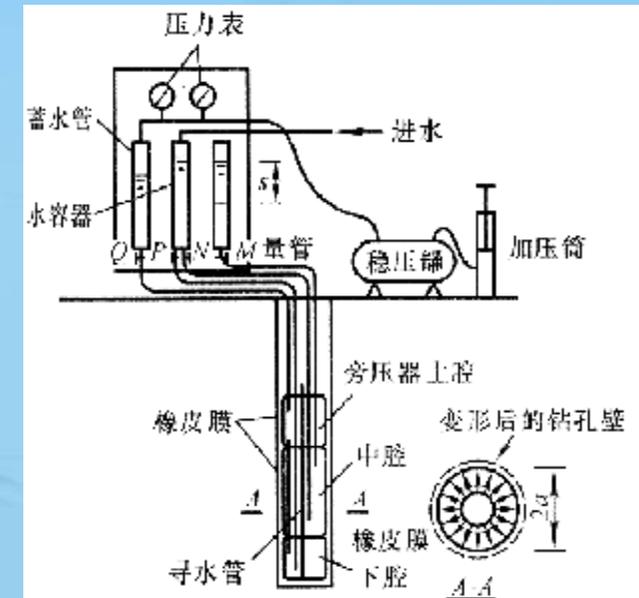
- **旁压试验曲线** $p-V$ 三个阶段：

- ⊗ 初步接触阶段（完全紧贴压力 $p_0$ ）；
- ⊗ 似弹性阶段（近似直线段，临塑压力 $p_f$ ）；
- ⊗ 塑性阶段（变形迅速增加，极限压力 $p_l$ ）。

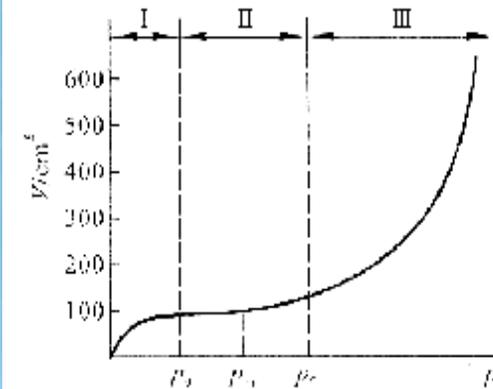
- **旁压模量**由曲线第二阶段的坡度可得：

$$E_M = 2(1 + \nu)(V + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

注：以上为水平向变形模量，对于各向异性材料尚需修正。



旁压仪示意图



旁压试验  $p-V$  曲线



## § 4.4 地基的沉降量计算（一）

### - 地基沉降量的组成

- Ø 瞬时沉降  $s_d$ : 地基受荷后立即发生的沉降
- Ø 主固结沉降  $s_c$ : 土体的孔隙压缩而产生的沉降
- Ø 次固结沉降  $s_s$ : 土骨架的蠕变变形所引起的沉降

因而，建筑物基础的**最终沉降量**：

$$S = S_d + S_c + S_s$$

### - 计算最终沉降量的目的

- Ø 确定建筑物最大沉降量、沉降差
- Ø 倾斜及局部倾斜
- Ø 判断是否超过容许值

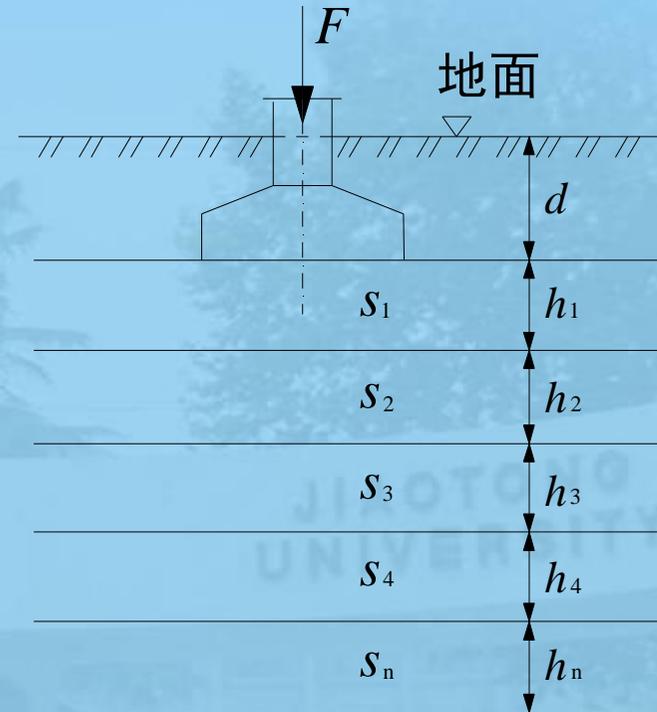


## § 4.4 地基的沉降量计算（二）

### 4.4.1 分层总和法

#### 基本假设和原理

- 对地基土分层，每一层都认为符合胡克定律
- 使用基底中心下的附加应力
- 地基土的变形条件假定为完全侧限条件，使用压缩模量
- 沉降计算深度，因附加应力扩散随深度而减小，工程上计算至某一深度即可。



$$S = \sum_{i=1}^n s_i$$

分层总和法计算简图



## § 4.4 地基的沉降量计算 (三)

### 计算方法与步骤

Ø (1) 计算**基底平均附加应力**:  $p_0 = \frac{F + G}{A} - g_0 d$

Ø (2) 绘制**分层剖面图**

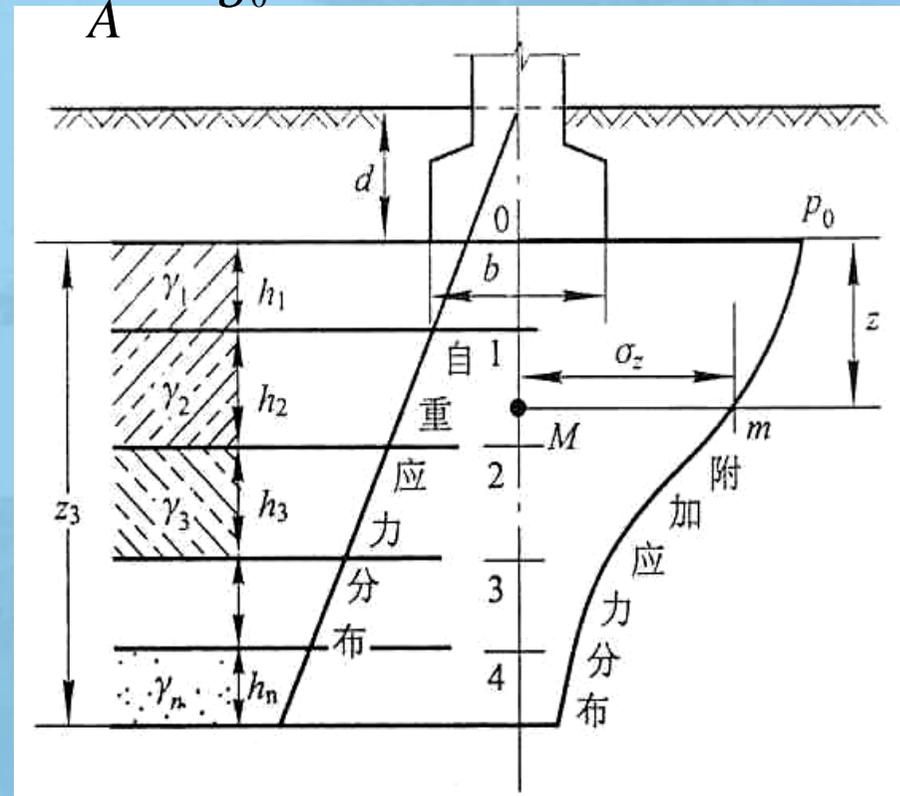
分层厚度  $0.4b$  或  $1 \sim 2\text{m}$ ; 计算分层界面处的自重应力  $\sigma_c$  和附加应力  $\sigma_z$ ; 确定计算深度  $\sigma_z = (0.1 \sim 0.2) \sigma_c$

Ø (3) 对每个**分层厚度**计算自重应力和附加应力**平均值**

$$\bar{s}_c = (s_{c上} + s_{c下}) / 2 = p_1$$

$$\bar{s}_z = (s_{z上} + s_{z下}) / 2$$

$p_2 = p_1 + \sigma_z$ , 可以查得  $p_1 \rightarrow e_1$ ,  $p_2 \rightarrow e_2$



分层总和法计算地基沉降量



## § 4.4 地基的沉降量计算（四）

Ø (4) 计算每一分层的压缩变形量

若已知土的侧限压缩模量  $E_s$

$$s_i = \frac{\bar{S}_{zi}}{E_s} h_i$$

若已知土的压缩系数  $a$

$$s_i = \frac{a_i (p_{2i} - p_{1i})}{1 + e_{1i}} h_i$$

若已知土的压缩曲线  $e-p$

$$s_i = \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i$$

Ø (5) 计算各层压缩变形量总和

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + \mathbf{L} + S_n = \sum_{i=1}^n S_i$$

- 分层总和法概念明确，计算简单。但假设过于理想，从而误差较大。分层总和法计算结果对于密实、硬土偏大，对松软土层偏小，可根据工程经验乘以修正系数进行调整。



## § 4.4 地基的沉降量计算（五）

### 4.4.2 《地基基础规范》法计算沉降量

#### 基本公式

$$s = y_s s' = y_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (\bar{a}_i z_i - \bar{a}_{i-1} z_{i-1})$$

$s$  — 《建筑地基基础规范》(GB 50007-2002) 推荐方法计算的地基**最终沉降量**；

$s'$  — **分层总和法**计算的地基最终沉降量；

$\psi_s$  — 沉降计算**经验系数**；

$\bar{a}_i, \bar{a}_{i-1}$  — 基础底面计算点至第*i*层、第*i-1*层土底面范围内中心点下**平均附加应力系数**，可查表；

$z_i, z_{i-1}$  — 基础底面至第*i*层、第*i-1*层土底面的距离。



## § 4.4 地基的沉降量计算（六）

### Ø 沉降计算经验系数

$\psi_s$  的确定与地基土的压缩量  $E_s$  及承受荷载有关，可查表。

压缩模量 $\bar{E}_s$ / MPa	2.5	4.0	7.0	15.0	20.0
基底附加应力 $p_0$ / kPa					
$p_0 \geq f_{ak}$	1.4	1.3	1.0	0.4	0.2
$p_0 \leq 0.75f_{ak}$	1.1	1.0	0.7	0.4	0.2

注： $\bar{E}_s$ —沉降计算深度范围内**压缩模量当量值**： $\bar{E}_s = \sum A_i / \sum A_i / E_{si}$   
 $A_i$ —第*i*层土的平均附加应力系数沿土层深度的积分值， $f_{ak}$ —地基承载力标准值。

### Ø 地基沉降计算深度 $z_n$

Ⅰ 无相邻荷载的基础中点下  $z_n = b(2.5 - 0.4 \ln b)$

Ⅱ 存在相邻荷载影响  $\Delta s_n' \leq 0.025 - \sum \Delta s_i'$



# § 4.4 地基的沉降量计算（七）

## 《地基基础规范》法与分层总和法的比较

表 4.4.5 两种地基沉降计算方法的比较

项 目	分层总和法	《建筑地基基础设计规范》 (GB 50007—2002) 推荐法
计算原理	分层计算沉降, 叠加。 $s = \sum_{i=1}^n s_i$ , 物理概念明确	采用附加应力面积系数法
计算公式	$s = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}} h_i, s = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{1 + e_i} \bar{\sigma}_{zi} h_i, s = \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i$	$s = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1})$
计算结果与实测值关系	中等地基 $s_{计} \approx s_{实}$ 软弱地基 $s_{计} < s_{实}$ 坚实基础 $s_{计} > s_{实}$	引入沉降计算经验系数 $\psi_s$ , 使 $s_{计} \approx s_{实}$
地基沉降计算深度	一般土 $\sigma_z = 0.2\sigma_{cs}$ 的深度 软土 $\sigma_z = 0.1\sigma_{cs}$ 的深度 注: $z$ 即 $z_n$	(1) 无相邻荷载的基础中心下 $z_n = b(2.5 - 0.4 \ln b)$ (2) 存在相邻荷载影响 $\Delta s'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta s'_i$
计算工作量	① 绘制土的自重应力曲线 ② 绘制地基中的附加应力曲线, 计算和 $p$ 对应的 $e$ ③ 沉降计算每层厚度 $h_i \leq 0.4b$	应用积分法, 如为均质土, 无论厚度多大, 只计算一次, 简便, 但计算 $E_{si}$ , $z_n$ , 确定 $\psi_s$ , 很麻烦



## § 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (一)

### 4.5.1 土的回弹性曲线和再压缩曲线

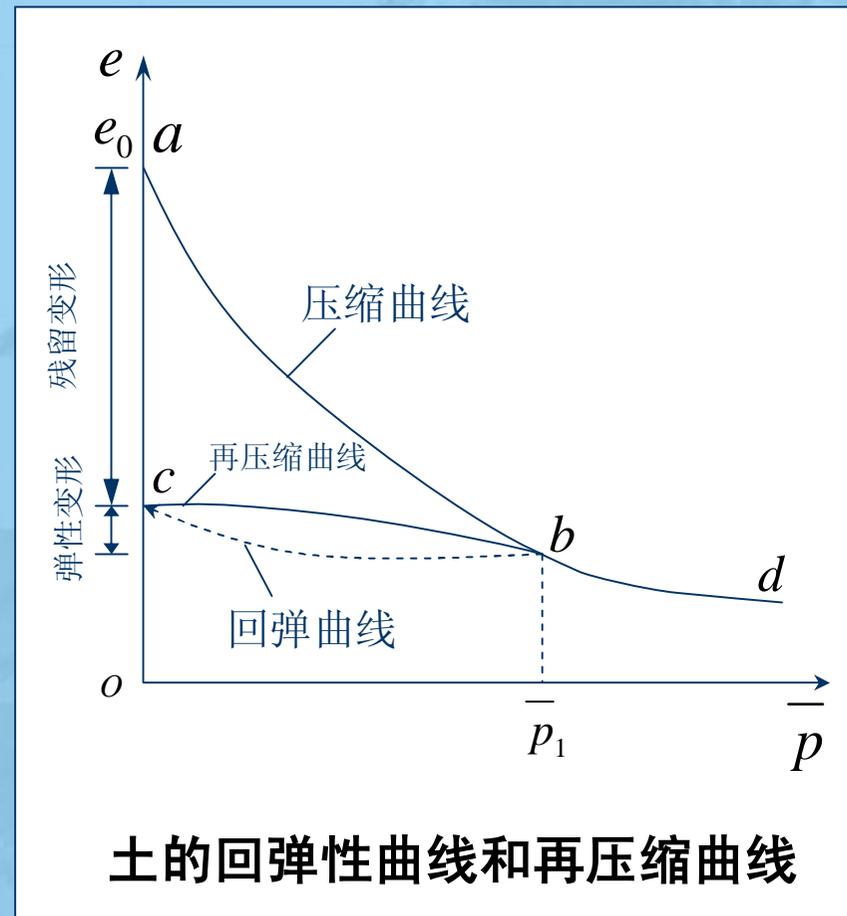
∅ 压缩曲线 (逐级加载)

∅ 回弹曲线

逐级卸载, 土体膨胀,  
变形不能恢复—残余变形

∅ 再压缩曲线 (再加载)

— 压缩—回弹—再压缩重复  
循环中, **应力路径不同**,  
表明土体受荷载应力历史  
不同的影响





## § 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (二)

### 4.5.2 天然土层的应力历史

#### Ø 前(先)期固结压力 $p_c$

天然土层在历史上所承受过的最大固结压力  $p_c = \gamma h$

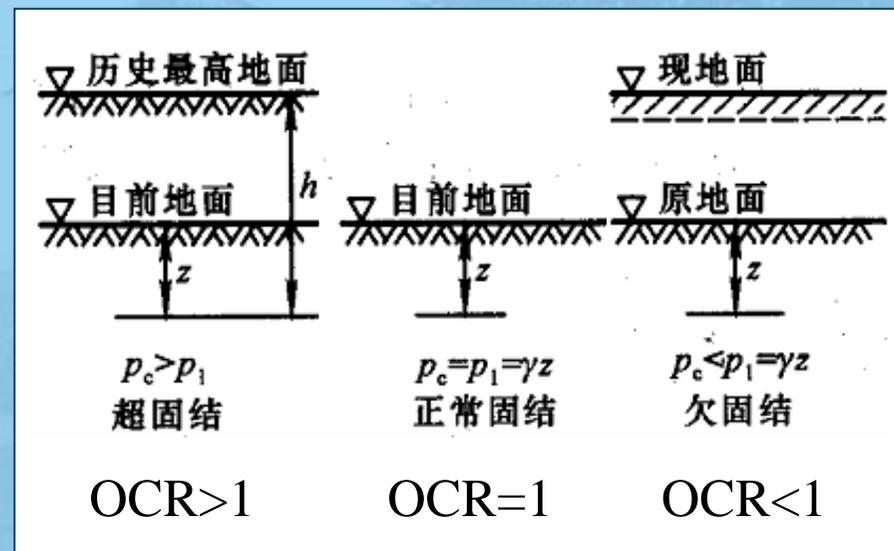
#### Ø 现有自重压力 $p_1 = \gamma z$

#### Ø 超固结比 $OCR = p_c / p_1$

(1) 正常固结土  $OCR = 1$

(2) 超固结土  $OCR > 1$

(3) 欠固结土  $OCR < 1$





## § 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (三)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

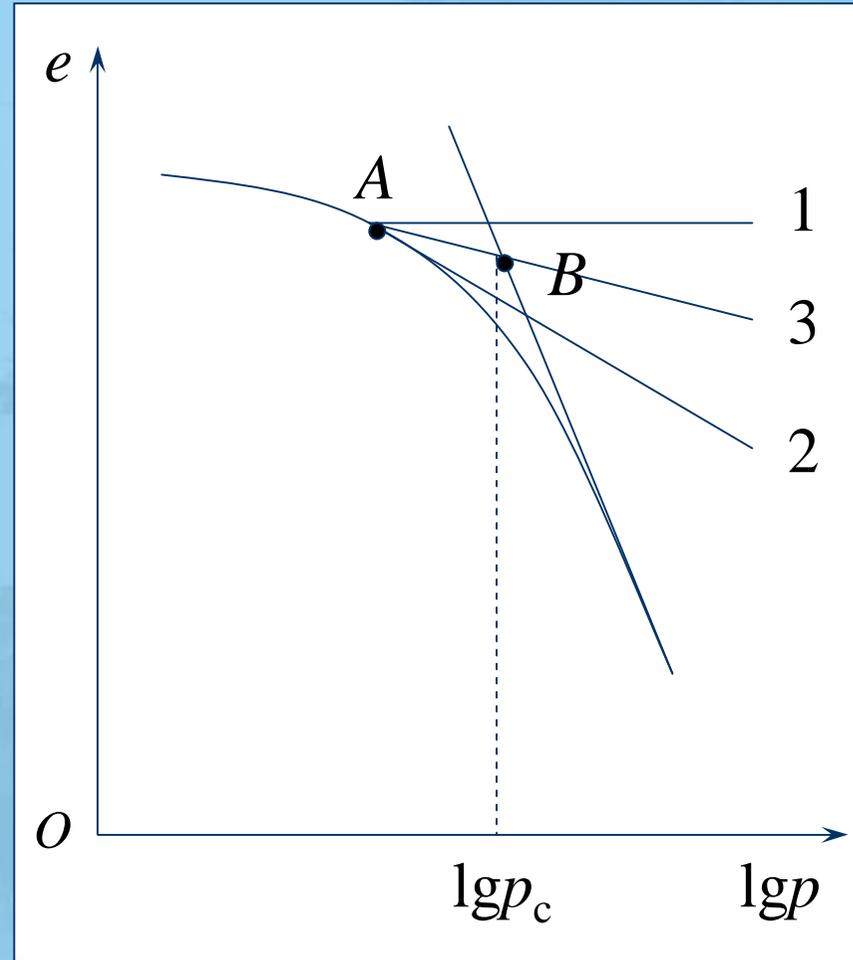
### 4.5.3 现场原始压缩曲线

前期固结压力的确定 (卡萨格兰德法)

Ø 从  $e - \lg p$  曲线上找出曲率半径最小的一点 **A**，过 A 点作水平线 A1 和切线 A2

Ø 作  $\angle 1A2$  的平分线 A3，与  $e - \lg p$  曲线中直线段的延长线交于 **B** 点

Ø B 点所对应的有效应力就是前期固结压力  $p_c$



H. J. Li ao



## § 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (四)

### 4.5.4 考虑应力历史影响的地基最终沉降量计算

- 正常固结土 ( $p_c = p_1$ )

$$s = \sum_{i=1}^n s_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i C_{ci}}{1 + e_{0i}} \left( \lg \frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{0i}} \right)$$

- 超固结土 ( $p_c > p_1$ )

⊗ 当附加应力  $\Delta p > (p_c - p_1)$

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{0i}} \left[ C_{ei} \lg \frac{p_{ci}}{p_{0i}} + C_{ci} \lg \frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{ci}} \right]$$

⊗ 当附加应力  $\Delta p \leq (p_c - p_1)$

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_{0i}} C_{ei} \lg \frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{0i}}$$

- 欠固结土 ( $p_c < p_1$ )

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{1 + e_i} C_{ci} \lg \frac{p_{0i} + \Delta p_i}{p_{ci}}$$



## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (一)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 4.6.1 概述

在工程实践中需要预估**一定时间**后的**沉降量**或达到某一沉降所需要的时间。

### - 建立**沉降与时间的关系**—土的固结理论

对于**饱和土**，沉降与土中**孔隙水**的排出有关；

孔隙水排出所需要的时间长短，与土层排水距离、土粒径与孔隙的大小、土层渗透系数、荷载大小和压缩系数等因素。

### - **太沙基单向固结理论，1925**

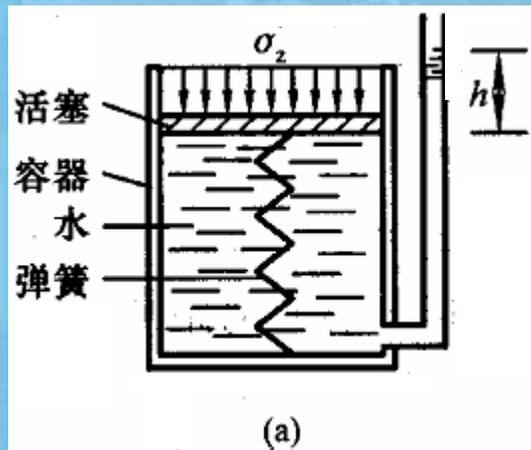
H. J. Liao



## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (二)

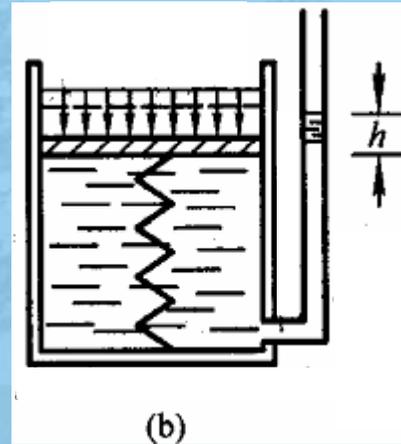
### 4.6.2 饱和土体渗流固结

渗透固结即为饱和土体排水、压缩和应力转移三者同时进行的一个过程。如下是饱和土体渗透固结模型。



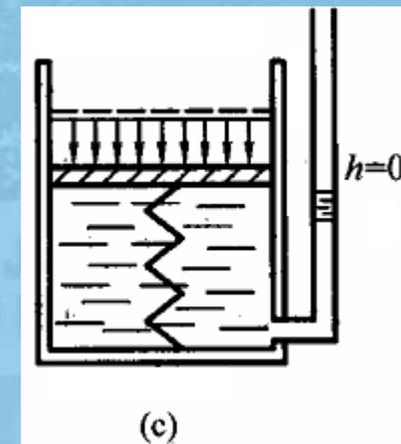
$t = 0:$

$$u = \sigma_z; \sigma' = 0$$



$0 < t < +\infty:$

$$u + \sigma' = \sigma_z; \sigma' > 0$$



$t = \infty:$

$$u = 0; \sigma' = \sigma_z$$

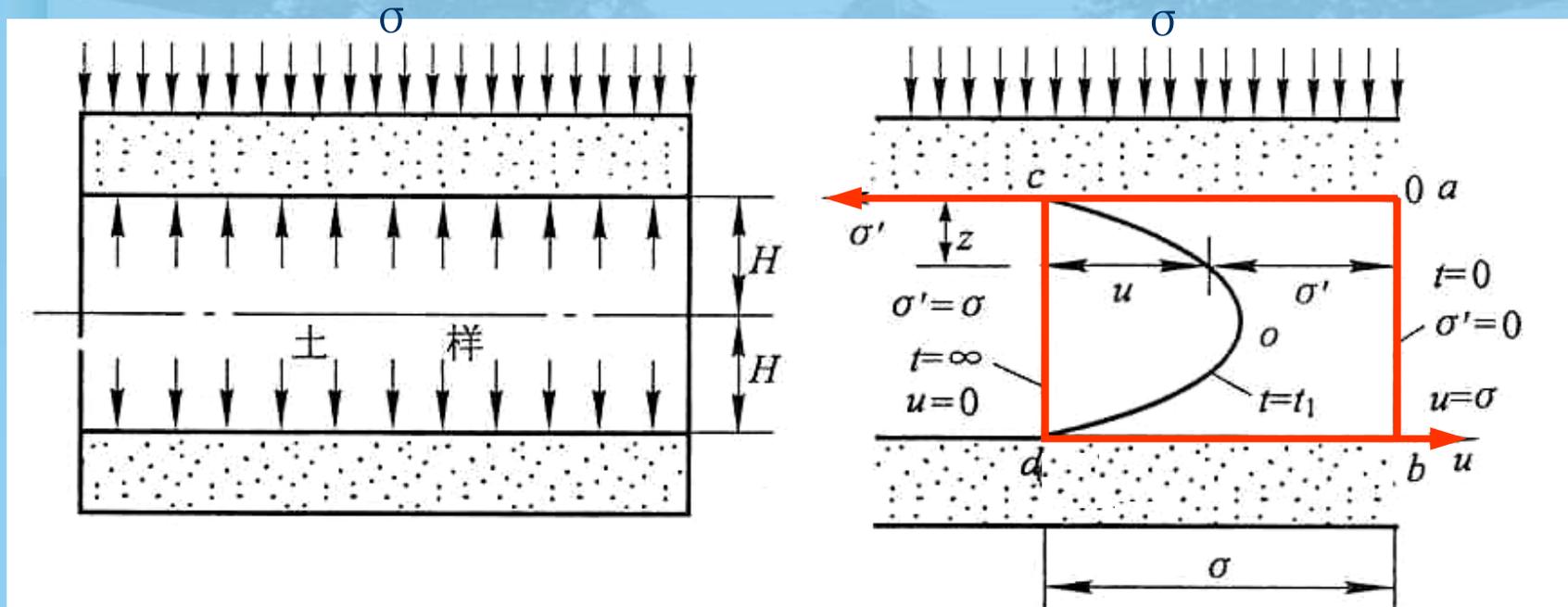
可见，饱和土体的渗流固结，是土中的孔隙水压力消散、逐渐转移为有效应力的过程。



# § 4.6 地基沉降与时间的关系 (三)

- 孔隙水压力和有效应力在深度上随时间的分布
- 土体的孔隙水压力和有效应力不仅是时间 $t$ 的函数，还与该点离透水面的距离 $z$ 有关。

$$u = f(z, t), \quad S = S'(z, t) + u(z, t)$$



固结试验土样中两种应力随时间与深度的分布



## § 4.6 地基沉降与时间的关系（四）

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 4.6.3 饱和土的单向固结理论

#### - 基本假定

- ∅ 土层是均质、完全饱和；
- ∅ 在固结过程中土粒和孔隙水是不可压缩的；
- ∅ 土层仅在竖向排水固结—单向；
- ∅ 渗流服从达西定律，渗透系数 $k$ 为常数；
- ∅ 压缩系数 $a$ 保持不变；
- ∅ 外荷载一次骤加，且沿土层深度均匀分布。

H. J. Li ao

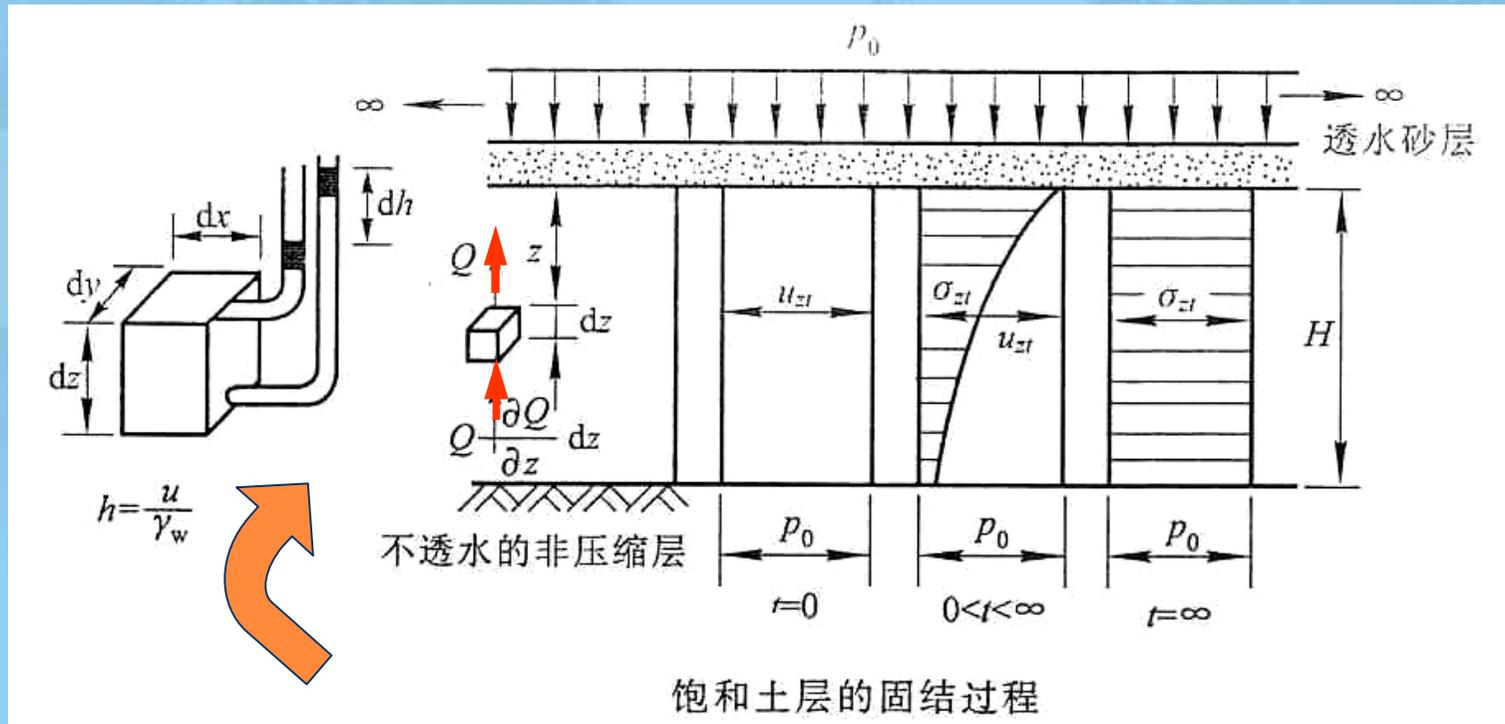


## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (五)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### 固结微分方程式的建立

Ø 以单向排水，在饱和土层顶面以下 $z$ 深度处取一微单元体进行分析。



注意：流入流出量差为孔隙体积变形量。

H. J. Li ao



## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (六)

取单元体分析:

$dt$ 时间内单元体的水量变化

$$\Delta Q = (Q + \frac{\partial Q}{\partial z} dz) dt - Q dt = \frac{\partial Q}{\partial z} dz dt$$

$$\text{由 } Q = vA = v dx dy \Rightarrow \frac{\partial Q}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} dx dy$$

$$\text{根据 } v = ki, \text{ 则有 } v = k \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$Qu = g_w h \Rightarrow h = \frac{u}{g_w}$$

$$\therefore v = k \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{k}{g_w} \frac{\partial u}{\partial z} \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{k}{g_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\therefore \Delta Q = \frac{k}{g_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dx dy dz dt$$

$dt$ 时间内单元体孔隙体积的变化

$$dV_v = \frac{\partial V_v}{\partial t} dt = \frac{\partial}{\partial t} (nV) dt$$

$$= \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e_t}{1+e_1} dx dy dz \right) dt = \frac{1}{1+e_1} \cdot \frac{\partial e_t}{\partial t} dx dy dz dt$$

$$Q \frac{de}{dS'} = -a, de = -ad(S_z - u) = adu = a \frac{\partial u}{\partial t} dt$$

$$\therefore \frac{\partial e_t}{\partial t} = a \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$dV_v = \frac{a}{1+e_1} \frac{\partial u}{\partial t} dx dy dz dt = \Delta Q$$

孔隙体积变化=水流量变化

$$\text{故 } \frac{a}{1+e_1} \frac{\partial u}{\partial t} dx dy dz dt = \frac{k}{g_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dx dy dz dt$$

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

$C_v$ 为土的竖向固结系数( $m^2/\text{年}$ ) H. J. Li ao



## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (七)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### - 固结微分方程式的求解

Ø 根据初始条件和边界条件

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

- 当  $t=0$ ,  $0 \leq z \leq H$  时,  $u = \sigma_z = p_0$ ,  $\sigma' = 0$ ;

- 当  $0 < t < \infty$ ,  $z=0$  时,  $u=0$ ,  $\sigma' = \sigma_z = p_0$ ;

- 当  $0 < t < \infty$ ,  $z=H$  时, 土层不透水,  $Q=0$ , 则  $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$ ;

- 当  $t = \infty$ ,  $0 \leq z \leq H$  时,  $u=0$ ,  $\sigma' = \sigma_z = p_0$ 。

应用傅里叶级数, 求得固结微分方程的解为

$$u_{zt} = \frac{4s_z}{p} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} e^{-\frac{m^2 p^2}{4} T_v} \sin \frac{mpz}{2H}$$

$m$  为奇数正整数,  $T_v$  为时间因子  $T_v = \frac{C_v}{H^2} t$



## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (八)

西安交通大学 土木工程系  
Department of Civil Engineering  
Xi'an Jiao Tong University

### 一 固结度及其应用

∅ **固结度**：在某一固结应力下经**时间** $t$ 后，土体发生固结或孔隙水压力消散的程度。对于土层任一**深度** $z$ 处，经**时间** $t$ 后的固结度：

$$U_{zt} = \frac{s'_{zt}}{s} = \frac{s - u_{zt}}{s} = 1 - \frac{u_{zt}}{u_0}$$

∅ **平均固结度**：当土层为均质时，地基在固结过程中任一时刻 $t$ 时的**沉降量** $s_t$ 与**最终沉降量** $s$ 之比：

$$U_t = \frac{s_t}{s} = \frac{\frac{a}{1+e_1} \int_0^H s' dz}{\frac{a}{1+e_1} \int_0^H s_z dz} = \frac{\int_0^H (s_z - u_{zt}) dz}{\int_0^H s_z dz} = 1 - \frac{\int_0^H u_{zt} dz}{\int_0^H s_z dz}$$

∅ 固结度随固结过程逐渐增大： $t=0$ 时， $U_t=0$ ； $t \rightarrow \infty$ 时， $U_t=1.0$

H. J. Li ao

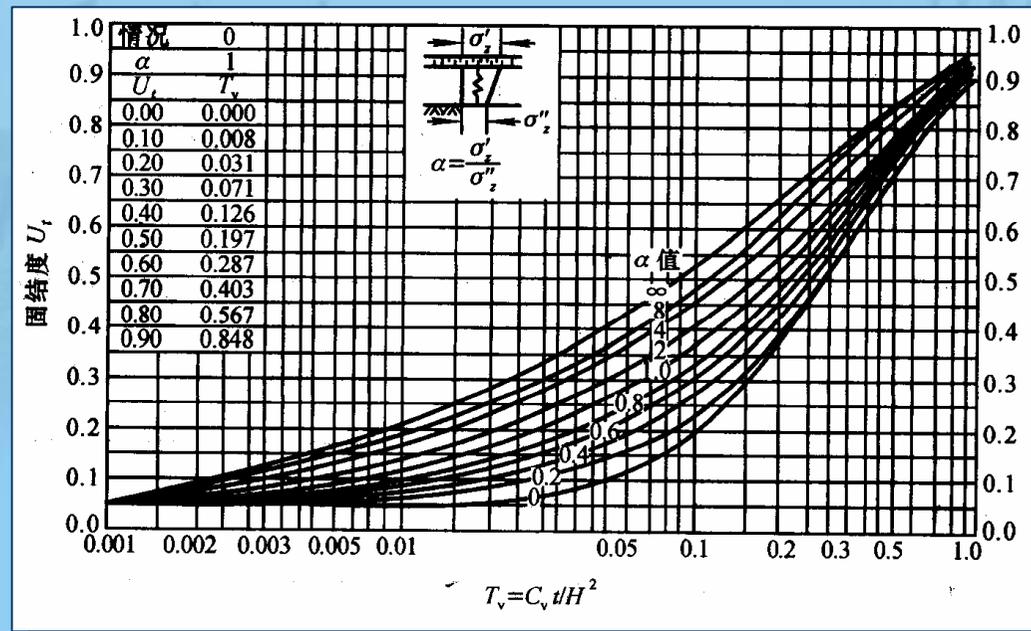


# § 4.6 地基沉降与时间的关系 (九)

将固结微分方程的解 $u_{zt}$  代入上式，并近似取第一项得：

$$U_t = 1 - \frac{8}{p^2} e^{-\frac{p^2}{4} T_V}$$

土层的平均固结度是时间因子 $T_V$ 的函数，可以绘制出不同附加应力分布及排水条件下的 $U_t$ 和 $T_V$ 关系曲线。





## § 4.6 地基沉降与时间的关系 (十)

### 4.6.4 地基沉降与时间关系的计算

已知土层的最终沉降量 $s$ ，可以解决如下两类问题：

#### (1) 求历时 $t$ 时刻的沉降 $s_t$

由渗透系数 $k$ ，压缩系数 $a$ ，初始孔隙比 $e_1$ ，土层厚度 $H$ 及所经历的时间 $t$ ，可计算：

$$C_v = \frac{k(1+e_1)}{ag_w} h_i, \quad T_v = \frac{C_v}{H^2} t$$

由 $T_v$ 查图得平均固结度 $U_t$ ，根据平均固结度定义式从而求得 $s_t$ 。

#### (2) 求土层到达沉降 $s_t$ 所需时间 $t$

先根据已知的沉降量 $s$ 和要达到的沉降量 $s_t$ 计算平均固结度 $U_t$ ，再查图得时间因子 $T_v$ ，然后求得所需时间 $t$ ：

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



## § 4.7 地基沉降计算的其它情况

### 地基最终沉降的组成

$$s = s_d + s_c + s_s$$

#### ∅ 瞬时沉降 $s_d$ :

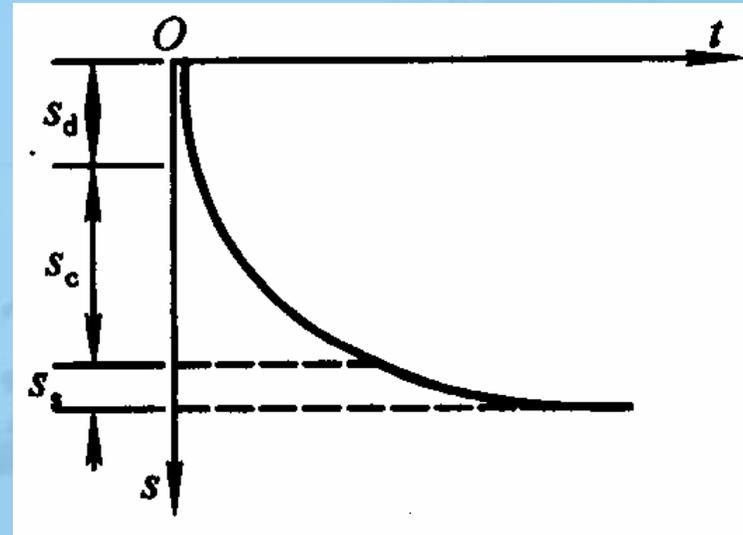
地基受荷后立即发生的沉降

#### ∅ 固结沉降 $s_c$ :

地基受荷后产生的附加应力，使土体的孔隙压缩而产生的沉降

#### ∅ 次固结沉降 $s_s$ :

在长期外荷作用下，土中超孔隙水压力完全消散，有效应力不变的情况下，由土骨架的蠕变所引起的沉降。





## § 4.9 地基允许变形值及防止地基有害变形的措施 (一)

### 4.9.1 地基变形特征

#### ∅ 沉降量

一般指基础中心的沉降量

#### ∅ 沉降差

同一建筑中，相邻两个基础沉降量之差

#### ∅ 倾斜

独立基础在倾斜方向两端点的沉降差与其距离比值

#### ∅ 局部倾斜

砖石砌体承重结构沿纵向6~10m内基础两点的沉降差与其距离的比值



## § 4.9 地基允许变形值及防止地基有害变形的措施（二）

西安交通大学 土木工程系  
Xi'an Jiao Tong University

### - 4.9.2 建筑物的沉降观测

### - 4.9.3 建筑物的地基变形允许值

根据《建筑地基基础规范》(GB 50007-2002) 列出不同形式建筑物**允许变形值**。

### - 4.9.4 防止地基有害变形的措施

∅ **减少沉降量**：轻质材料减少荷载、增加基础埋深、地基处理等

∅ **减少沉降差**：避免荷载偏心、设置沉降缝、加强上部结构、合理施工、地基处理等

H. J. Li ao



- 本电子课件中部分未列入的章节可作为选学内容。各个学校可根据学时情况作适当的调整。

交通大学

JIAOTONG  
UNIVERSITY