



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

4.3 土的压缩性原位测试

4.5 应力历史对地基沉降的影响

4.7 地基沉降计算的其它情况

4.9 地基容许变形值及防止地基有害变形的措施

4.2 土的压缩性及压缩性指标

4.4 地基沉降量计算

4.6 地基沉降与时间的关系

4.8 非饱和土的固结理论简介



§ 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)

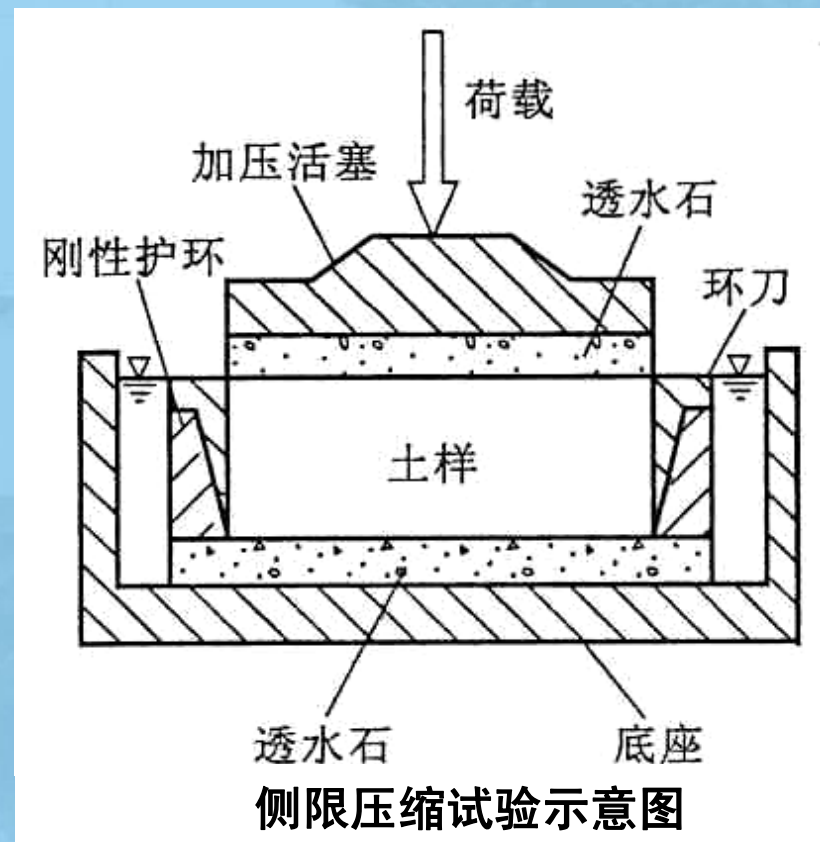
4.2.2 侧限压缩试验及土的压缩性指标

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)

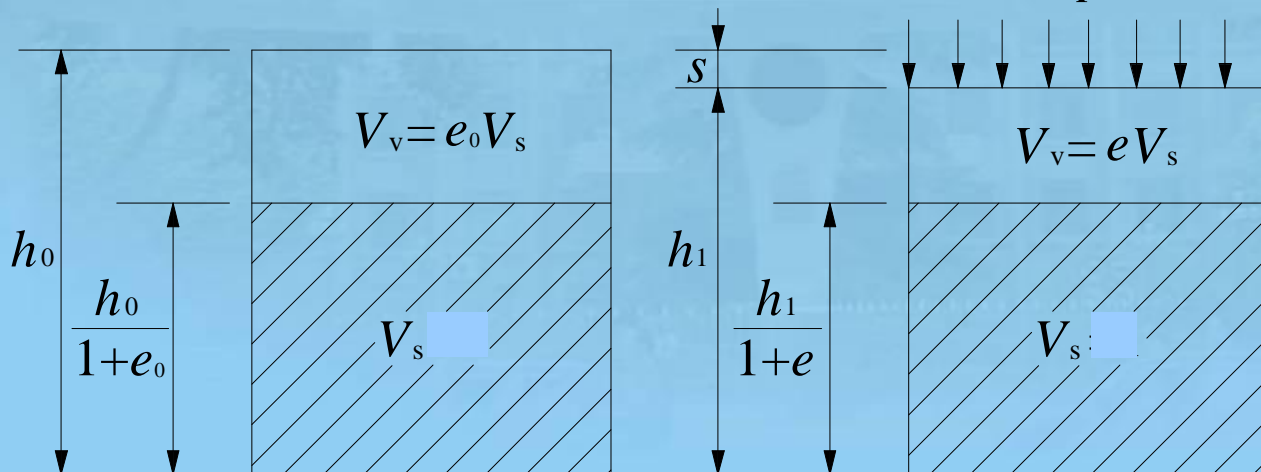
$$Q V_0 = h_0 A = V_v + V_s = e_0 V_s + V_s = (1 + e_0) V_s$$

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

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

- 压缩量计算公式:

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

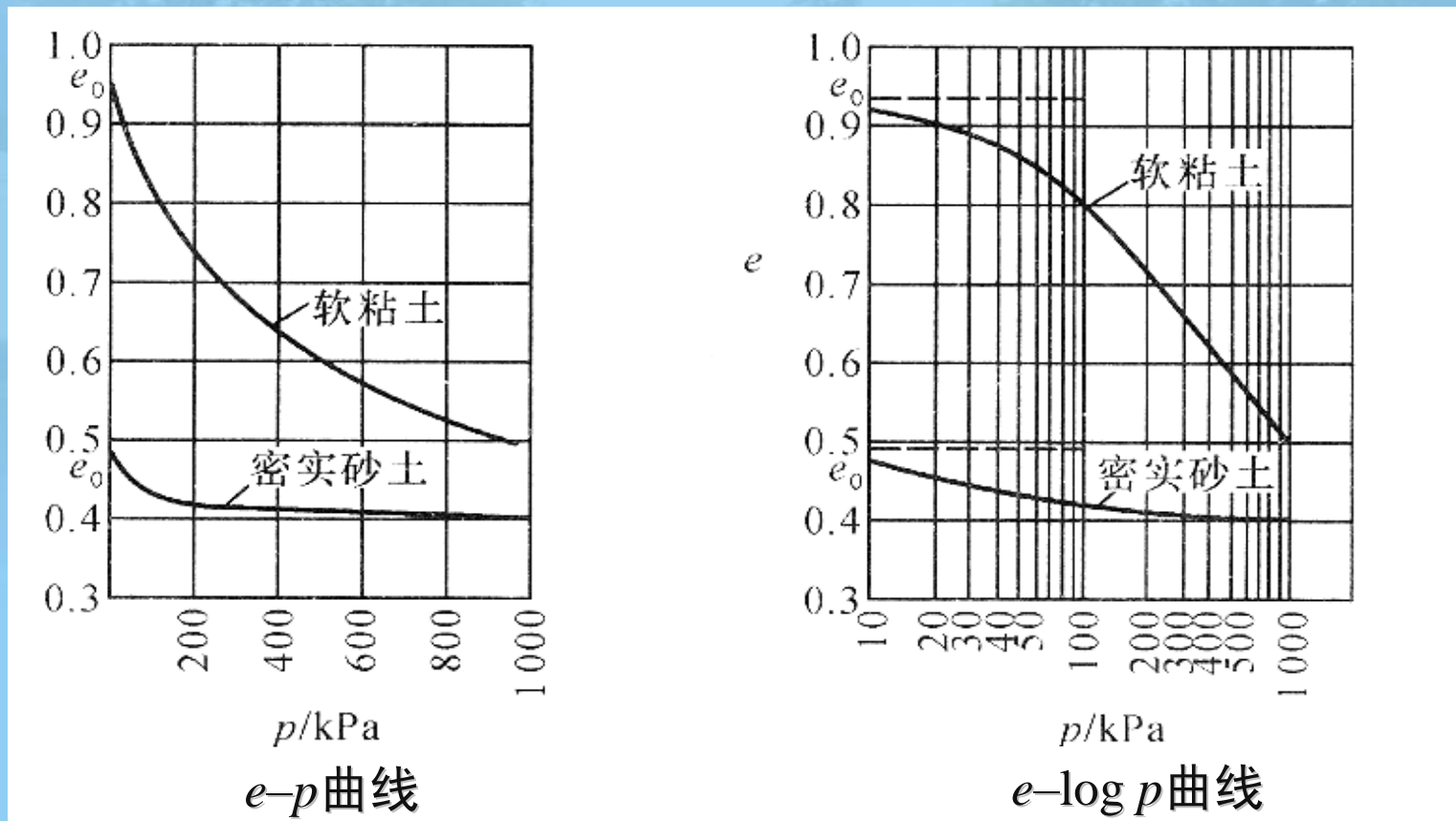




§ 4.2 土的压缩性及压缩性指标 (四)

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

- 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。



H. J. Li ao



§ 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

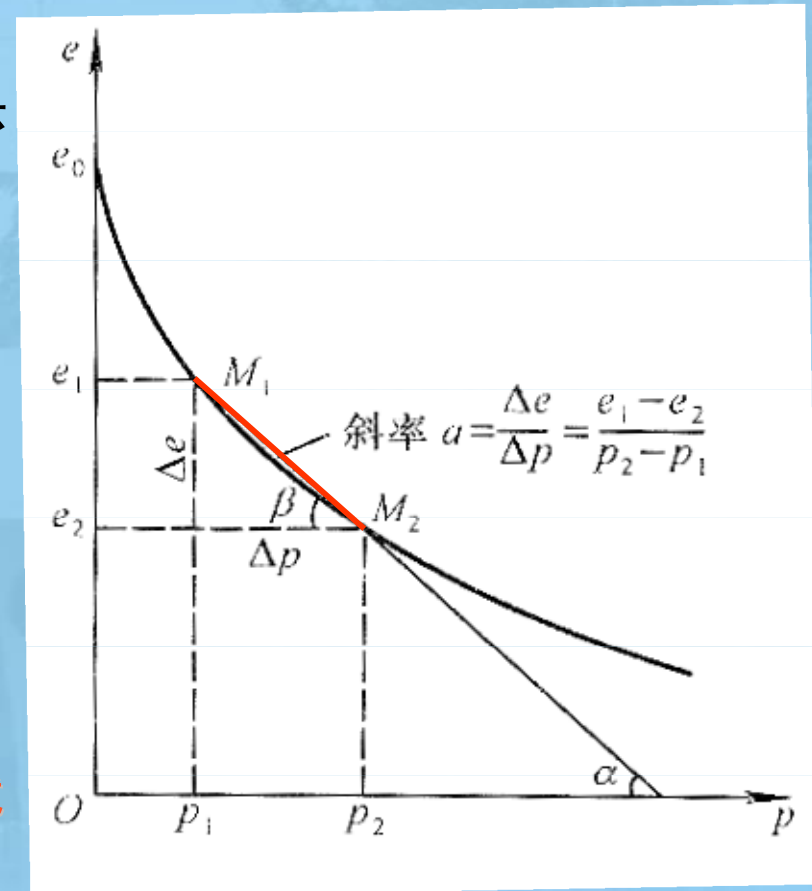
$e-p$ 曲线上任一点的切线斜率 a 表示压力 p 作用下的压缩性

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

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

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

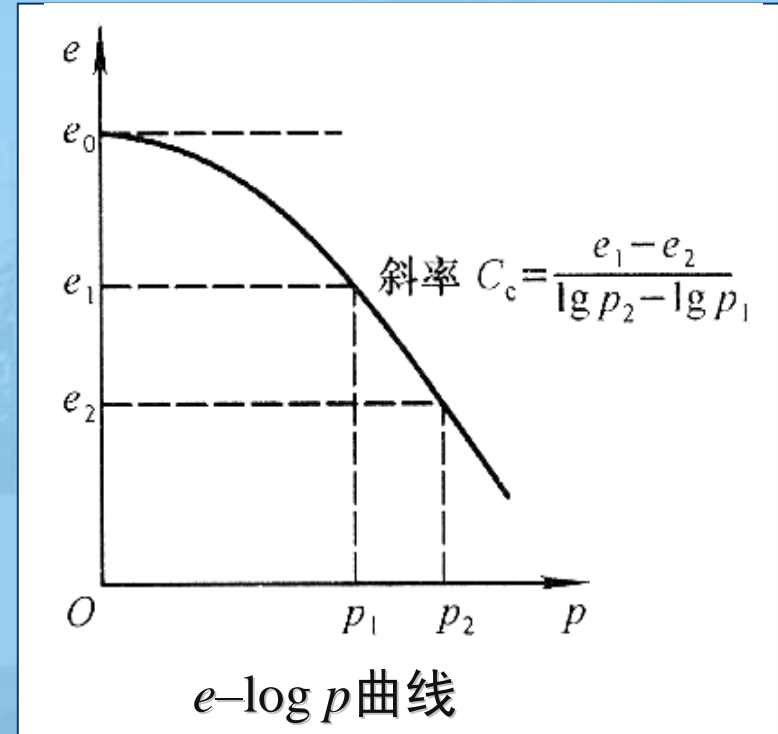
- 压缩指数 C_c 越大，土的压缩性越大。

(3) 压缩模量 E_s

在完全侧限条件下，土体竖向附加应力 σ_z 与相应的应变增量 ε_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。





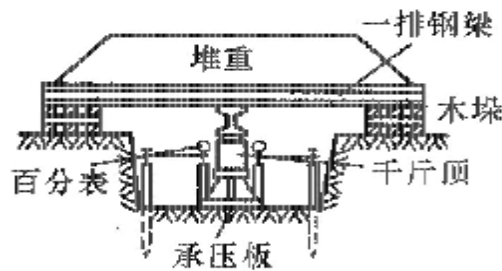
§ 4.3 土的压缩性原位测试 (一)

4.3.1 载荷试验

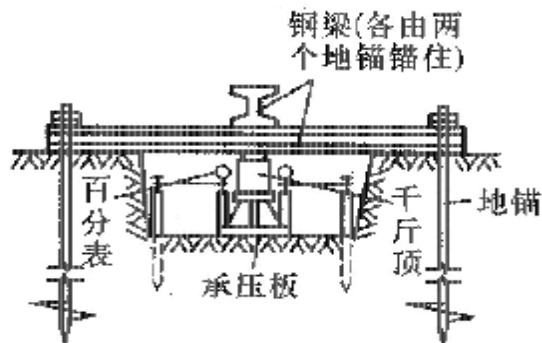
Ø 载荷试验原理

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。

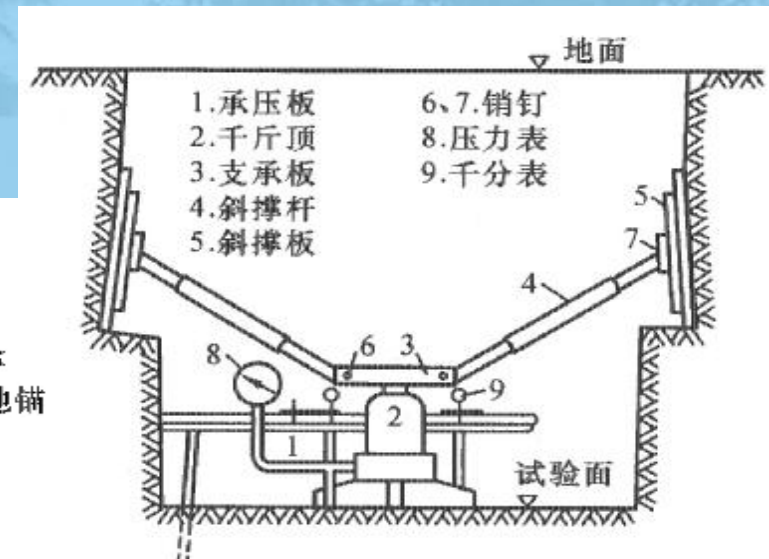
Ø 载荷试验装置和方法



(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



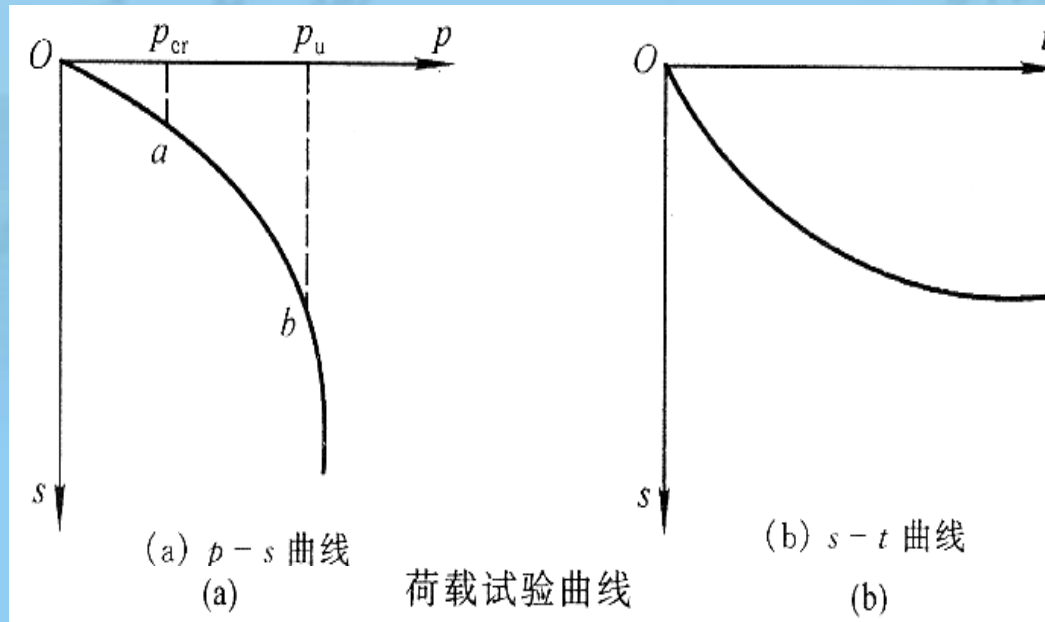
§ 4.3 土的压缩性原位测试（三）

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；

ω — 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。

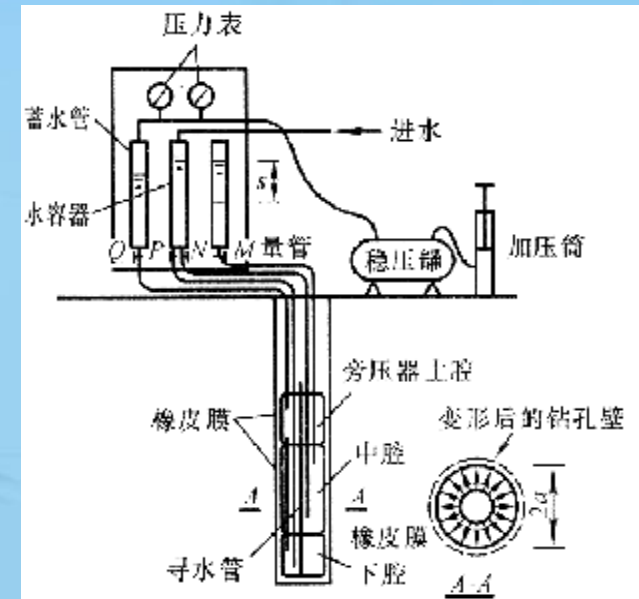
- **旁压试验曲线** $p-V$ 三个阶段：

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

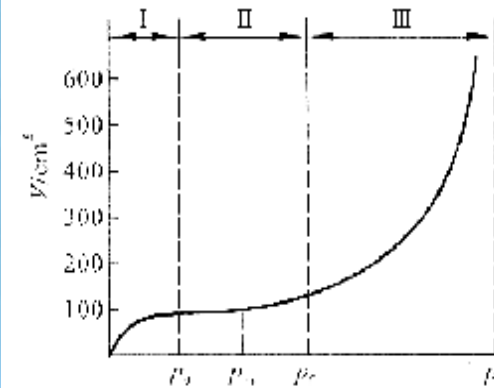
- **旁压模量**由曲线第二阶段的坡度可得：

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

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

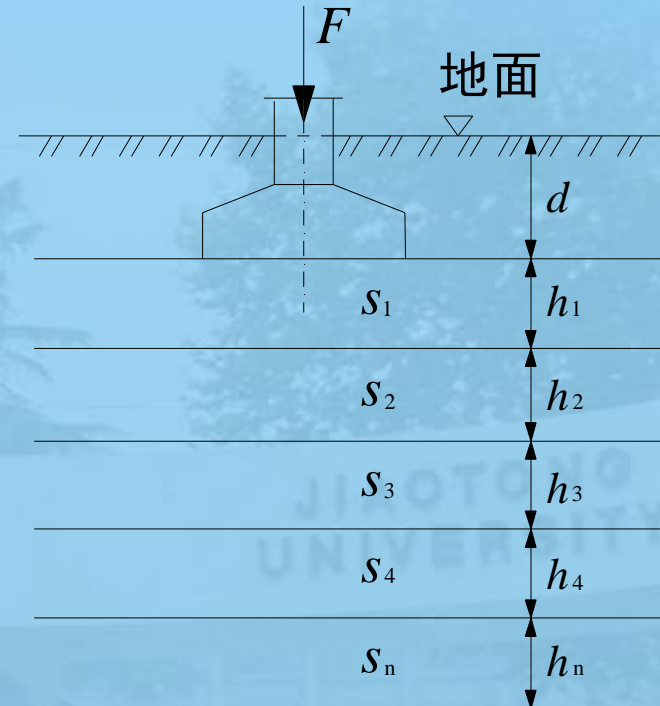


§ 4.4 地基的沉降量计算（二）

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**

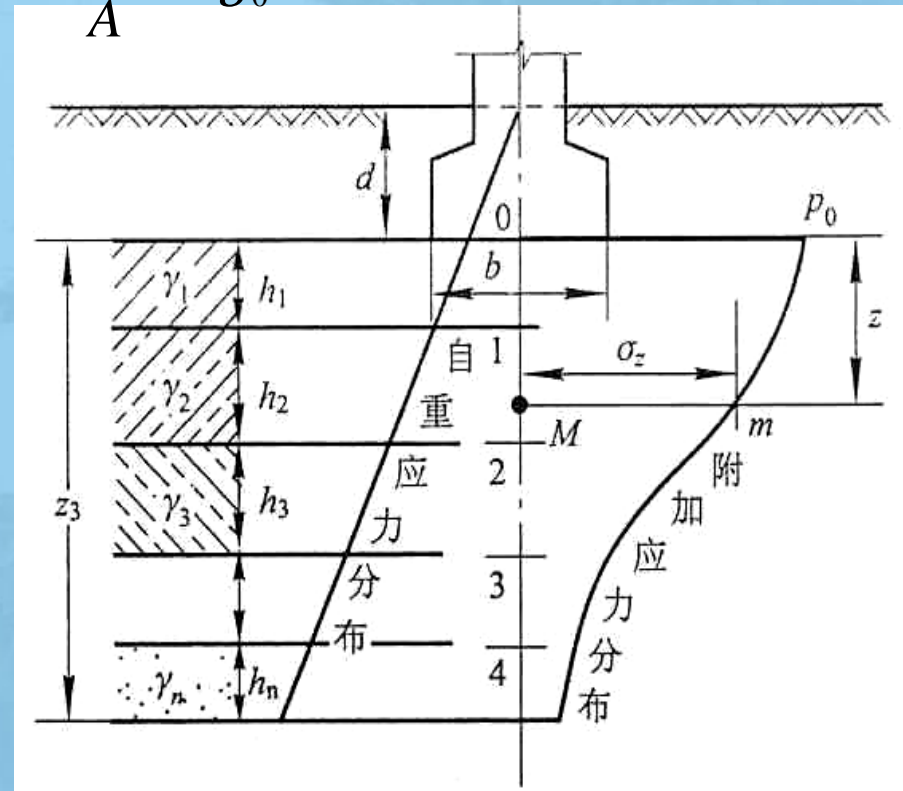
分层厚度 $0.4b$ 或 $1 \sim 2\text{m}$; 计算分层界面处的自重应力 σ_c 和附加应力 σ_z ; 确定计算深度 $\sigma_z = (0.1 \sim 0.2) \sigma_c$

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

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

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；

ψ_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

ψ_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 $z_n = b(2.5 - 0.4 \ln b)$

Ⅰ 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 ψ_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 ψ_s , 很麻烦



§ 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (一)

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

4.5.1 土的回弹性曲线和再压缩曲线

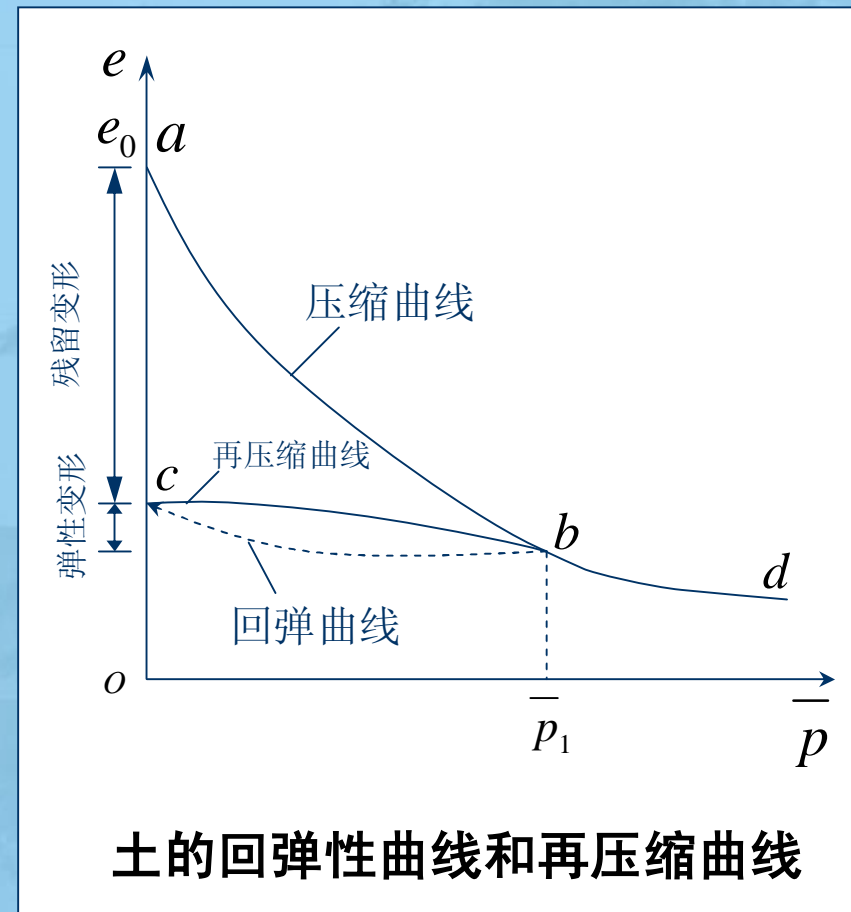
∅ 压缩曲线 (逐级加载)

∅ 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



H. J. Li ao



§ 4.5 应力历史对地基沉降的影响 (二)

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

4.5.2 天然土层的应力历史

∅ 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 $p_c = \gamma h$

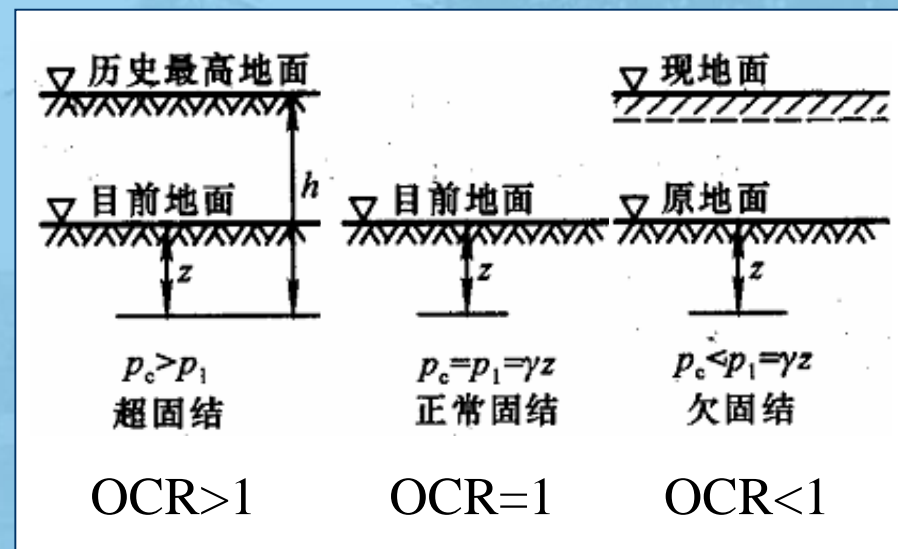
∅ 现有自重压力 $p_1 = \gamma z$

∅ 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

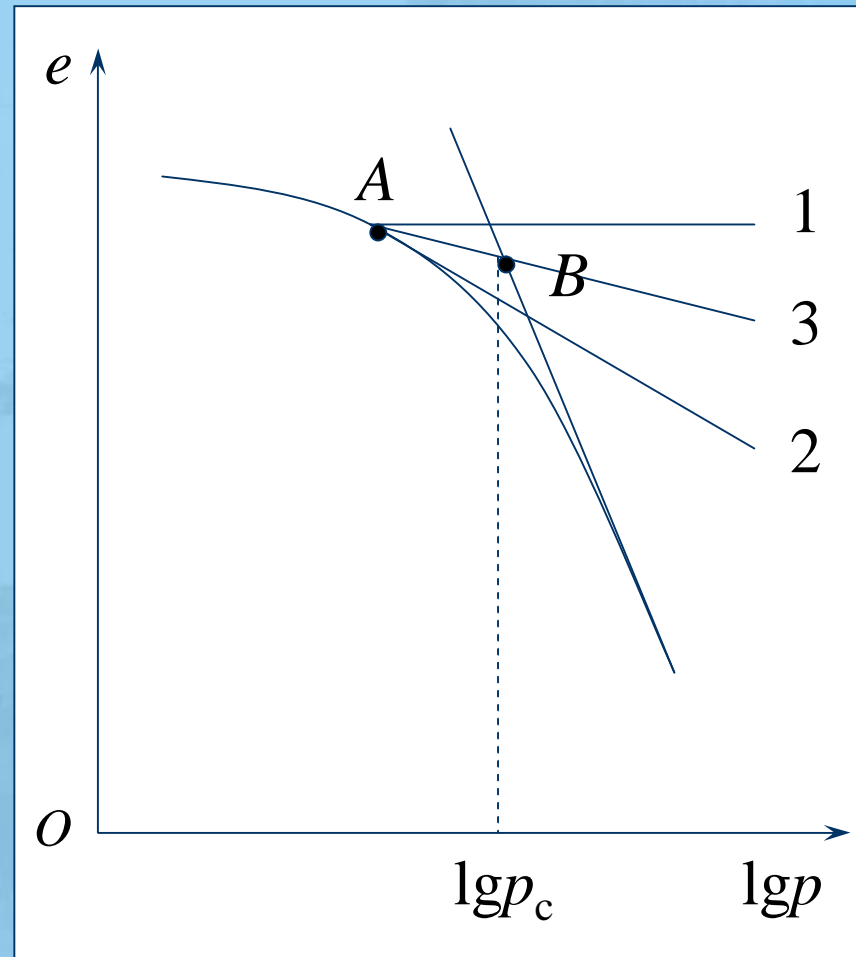
4.5.3 现场原始压缩曲线

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**

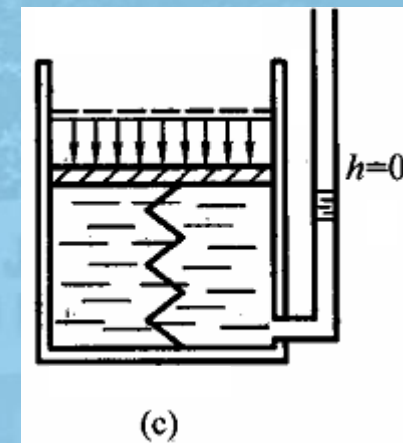
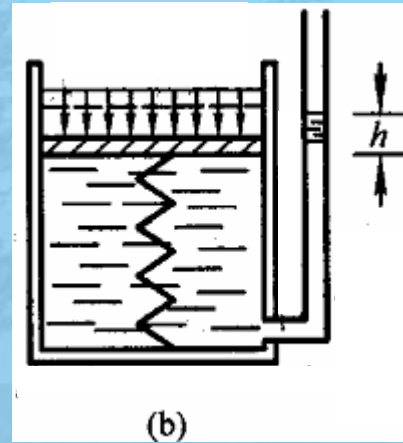
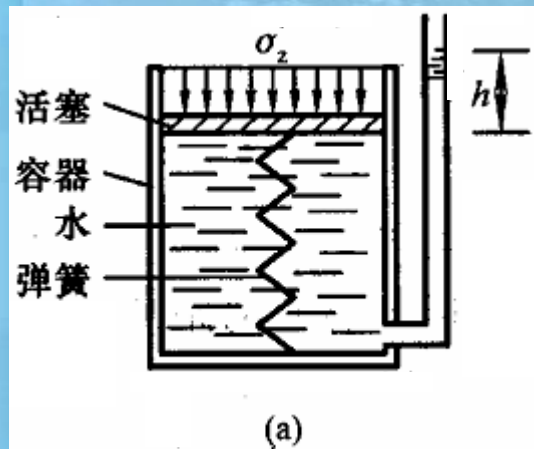
H. J. Liao



§ 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。



$t = 0:$

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

$0 < t < +\infty:$

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

$t = \infty:$

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

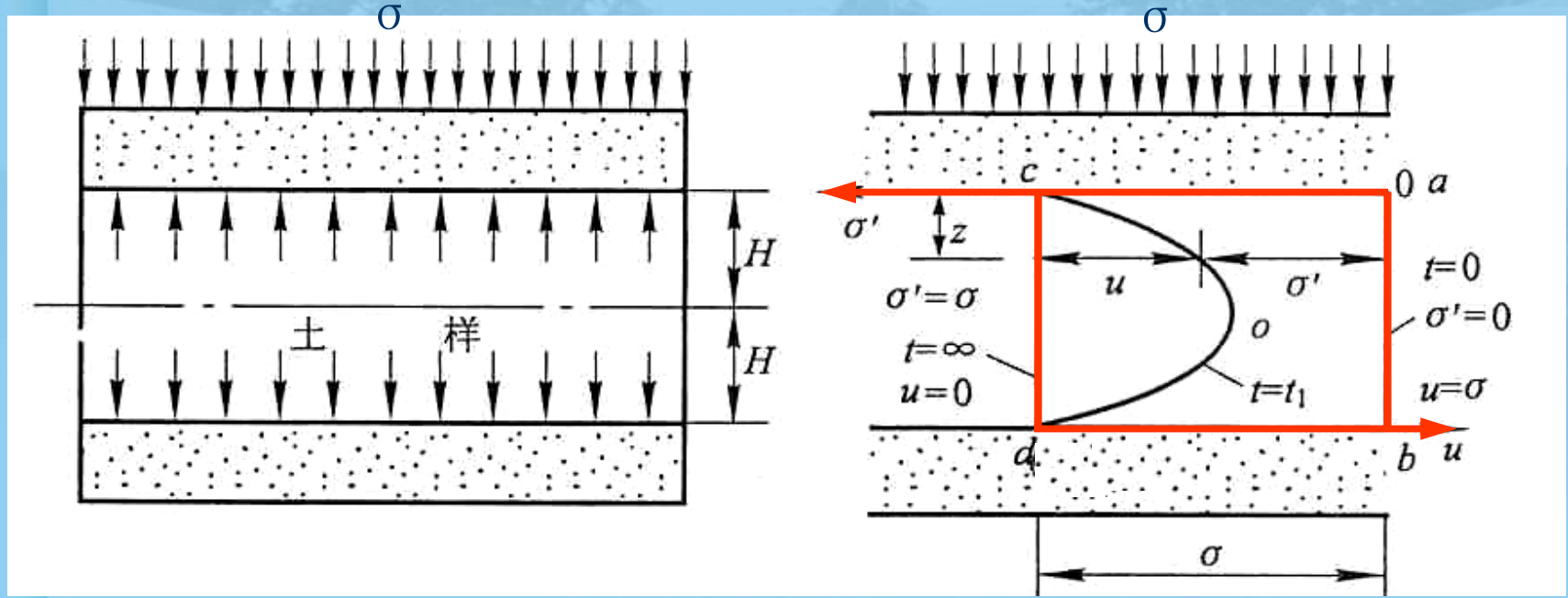
可见，饱和土体的渗流固结，是土中的孔隙水压力消散、逐渐转移为有效应力的过程。



§ 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。

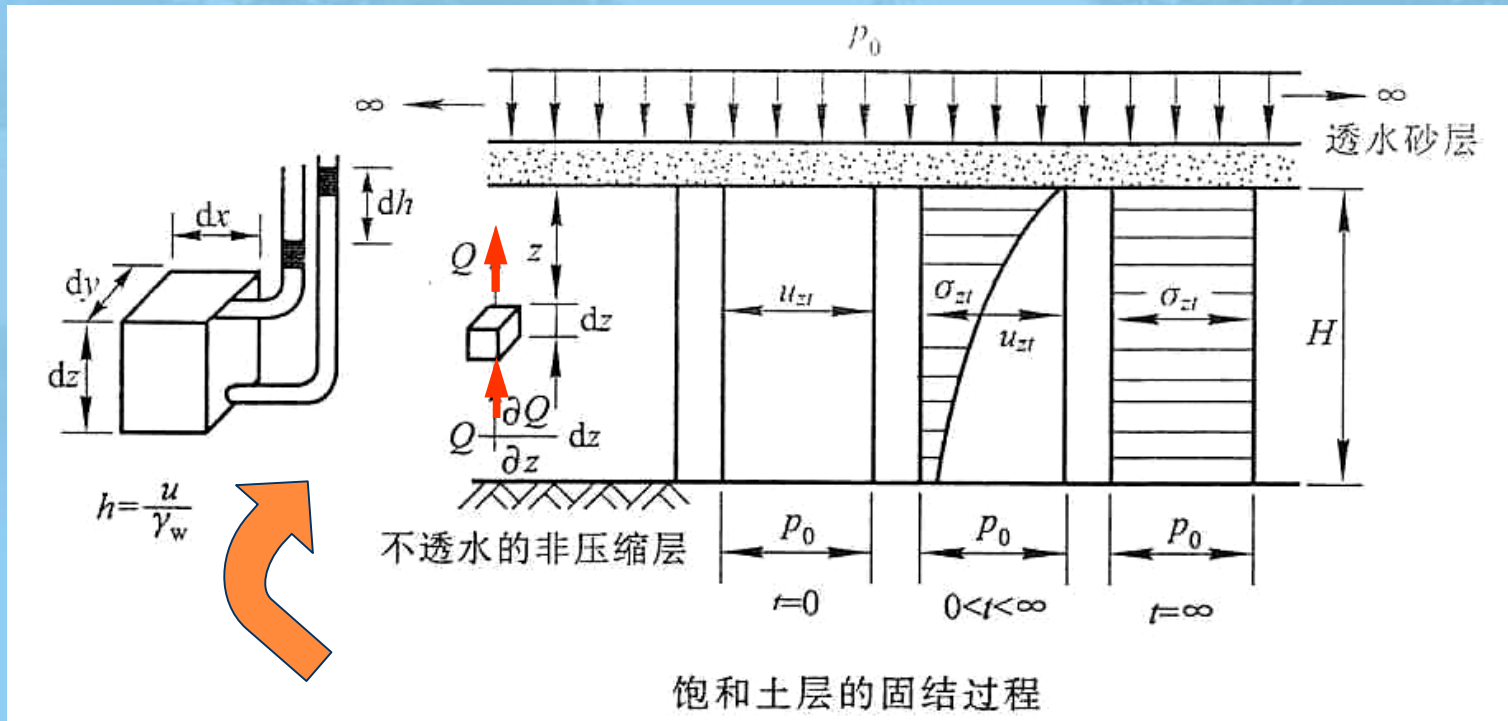
H. J. Li ao



§ 4.6 地基沉降与时间的关系 (五)

固结微分方程式的建立

- 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。



- 注意点：流入流出量差为孔隙体积变形量。



§ 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

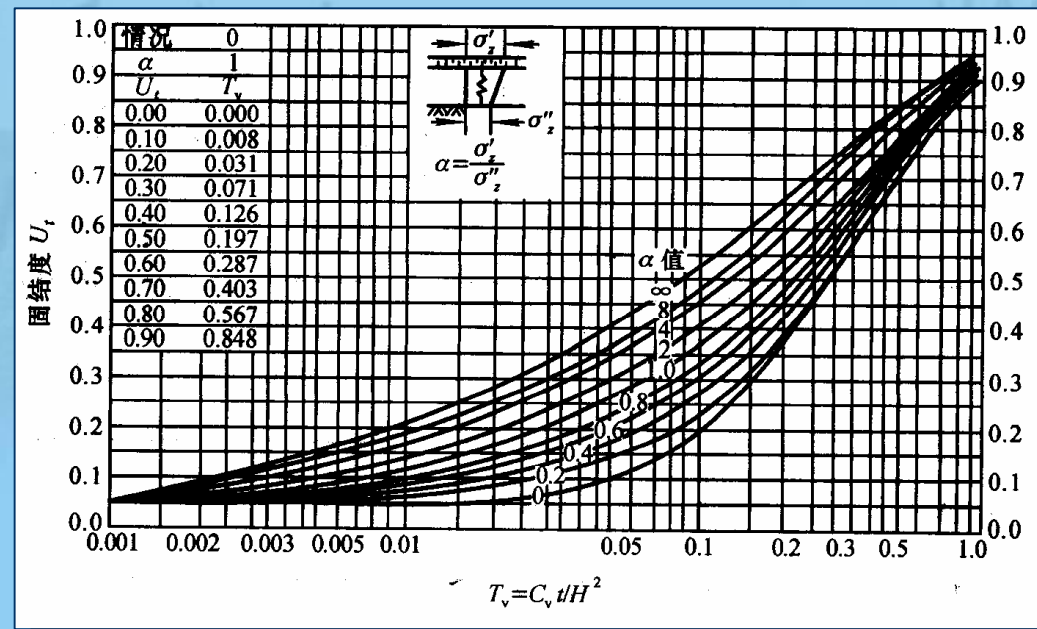


§ 4.6 地基沉降与时间的关系 (九)

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 :

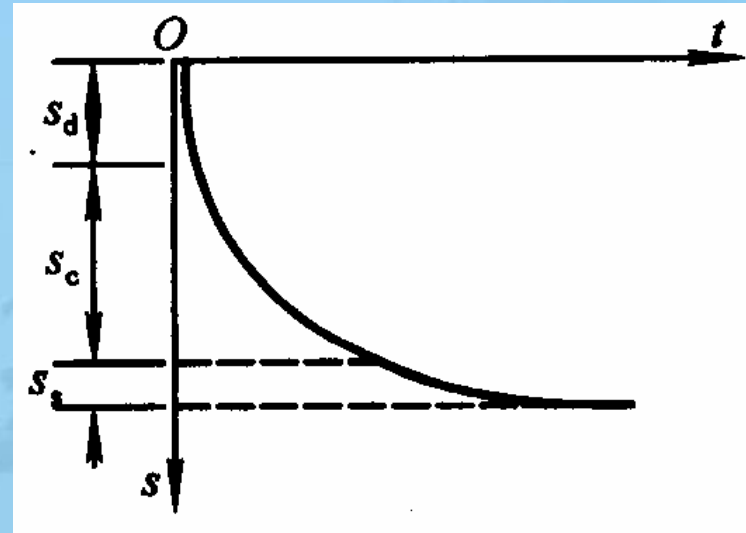
地基受荷后立即发生的沉降

∅ 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

Ø **减少沉降量**: 轻质材料减少荷载、增加基础埋深、地基处理等

Ø **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



- 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