



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



简介

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

- 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。

H. J. Liao



主要内容

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

第1章 土的物理性质

第2章 土的渗透性

第3章 地基中的应力

第4章 土的压缩性

第5章 土的抗剪强度

第6章 地基承载力

第7章 土坡稳定性

第8章 土压力和挡土墙

H. J. Liao



第1章 土的物理性质和工程分类

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

1.1 土的生成

1.2 土的三相组成

1.3 土的结构、构造

1.4 土的物理性质三相
比例指标的测定及计算

1.5 无粘性土的特性

1.6 粘性土及粉土
的特性

1.7 粘性土水-土系统
的工程特性

1.8 土的工程分类

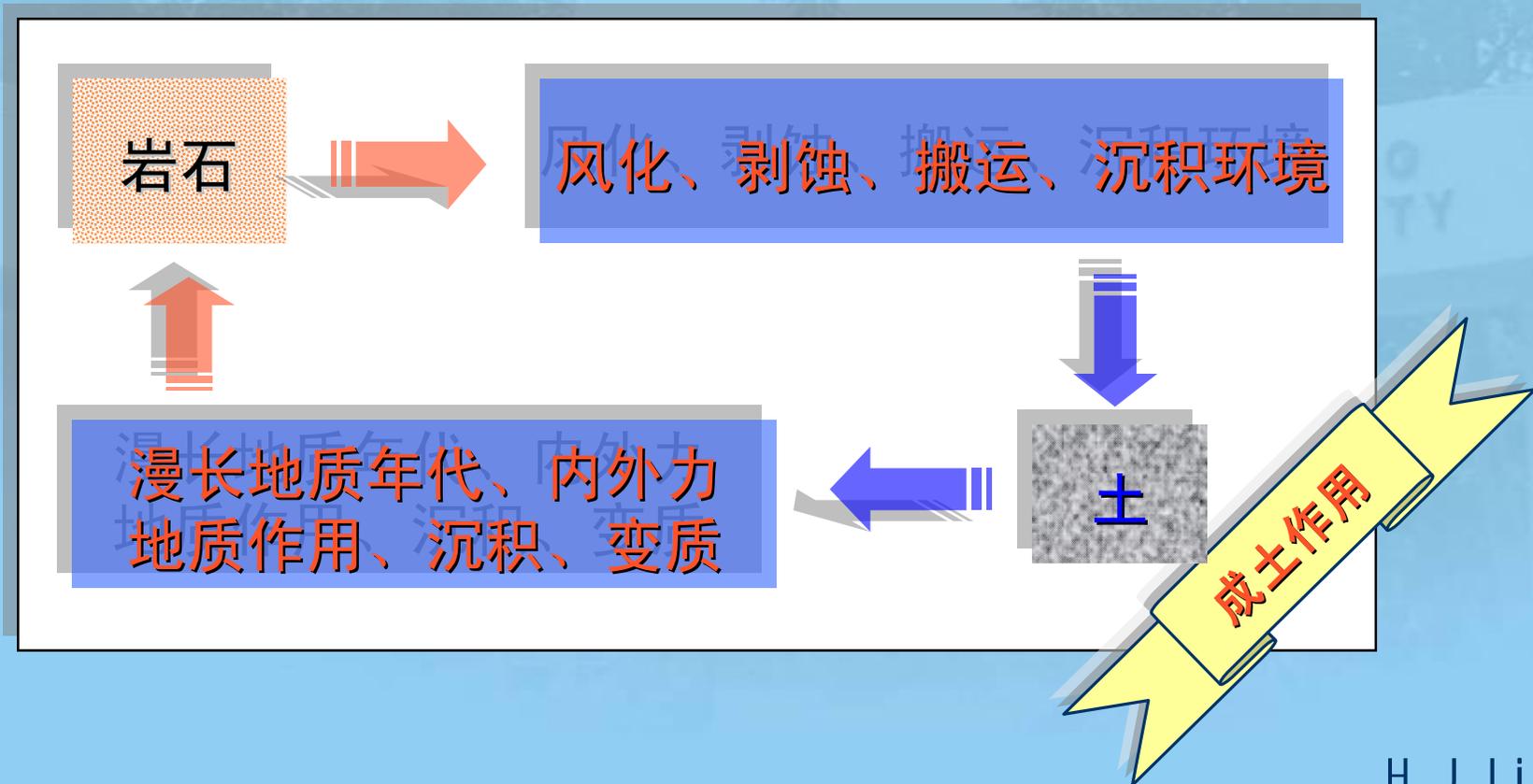
H. J. Li ao



§ 1.1 土的生成（一）

1.1.1 岩石风化的产物及成土作用

自然界的**岩石**不断经历着物理、化学和生物**风化作用**等，形成各种风化产物，又经搬运、沉积等作用形成**土**。





§ 1.1 土的生成 (二)

- 1.1.2 陆相沉积

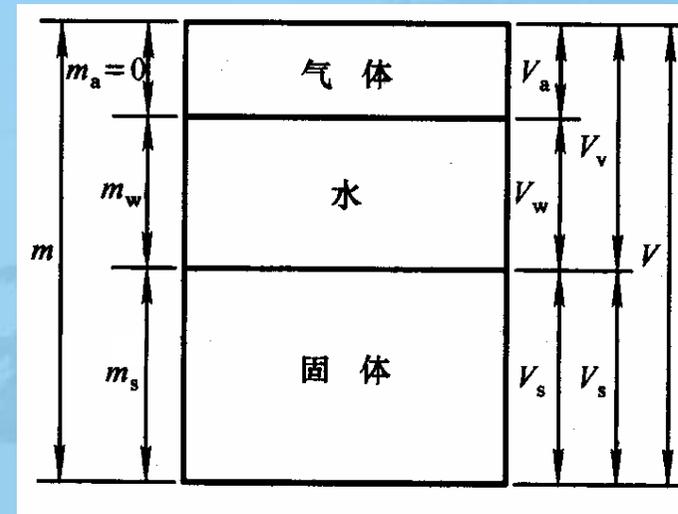
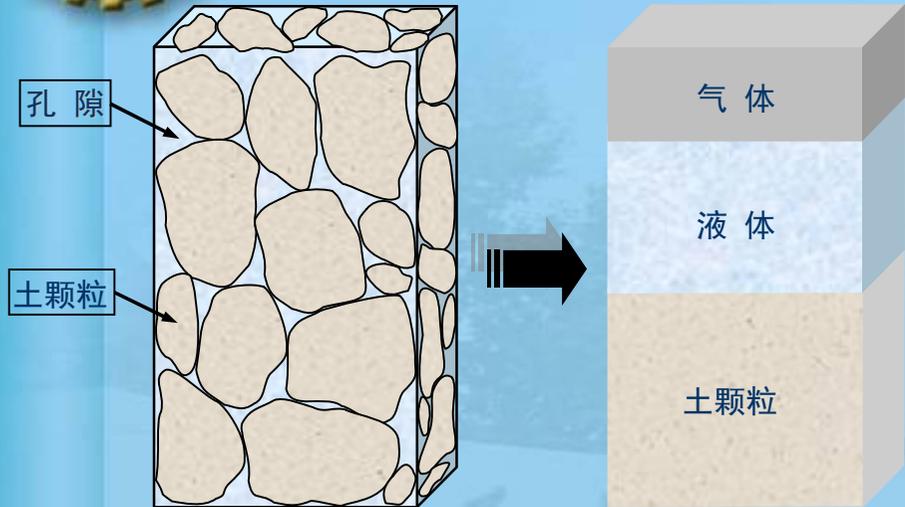
- ∅ 1. 残积层
- ∅ 2. 坡积层
- ∅ 3. 洪积层, 泥石流, 冰川堆积物
- ∅ 4. 河流冲积层
- ∅ 5. 湖积层
- ∅ 6. 风积层

- 1.1.3 海相沉积

- ∅ 1. 滨海及泻湖沉积
- ∅ 2. 浅海沉积
- ∅ 3. 深海沉积



§ 1.2 土的三相组成 (一)



V_s 、 V_w 、 V_a 分别为固体、水、气体部分的体积；

$V_v = V_w + V_a$ ， V_v 为土中孔隙的体积；

$V = V_s + V_v$ ， V 为土样的总体积；

m_s 、 m_w 、 m_a 分别为固体、水、气体部分的质量， m_a 可以忽略；

$m = m_s + m_w$ ， m 为土样的总质量。



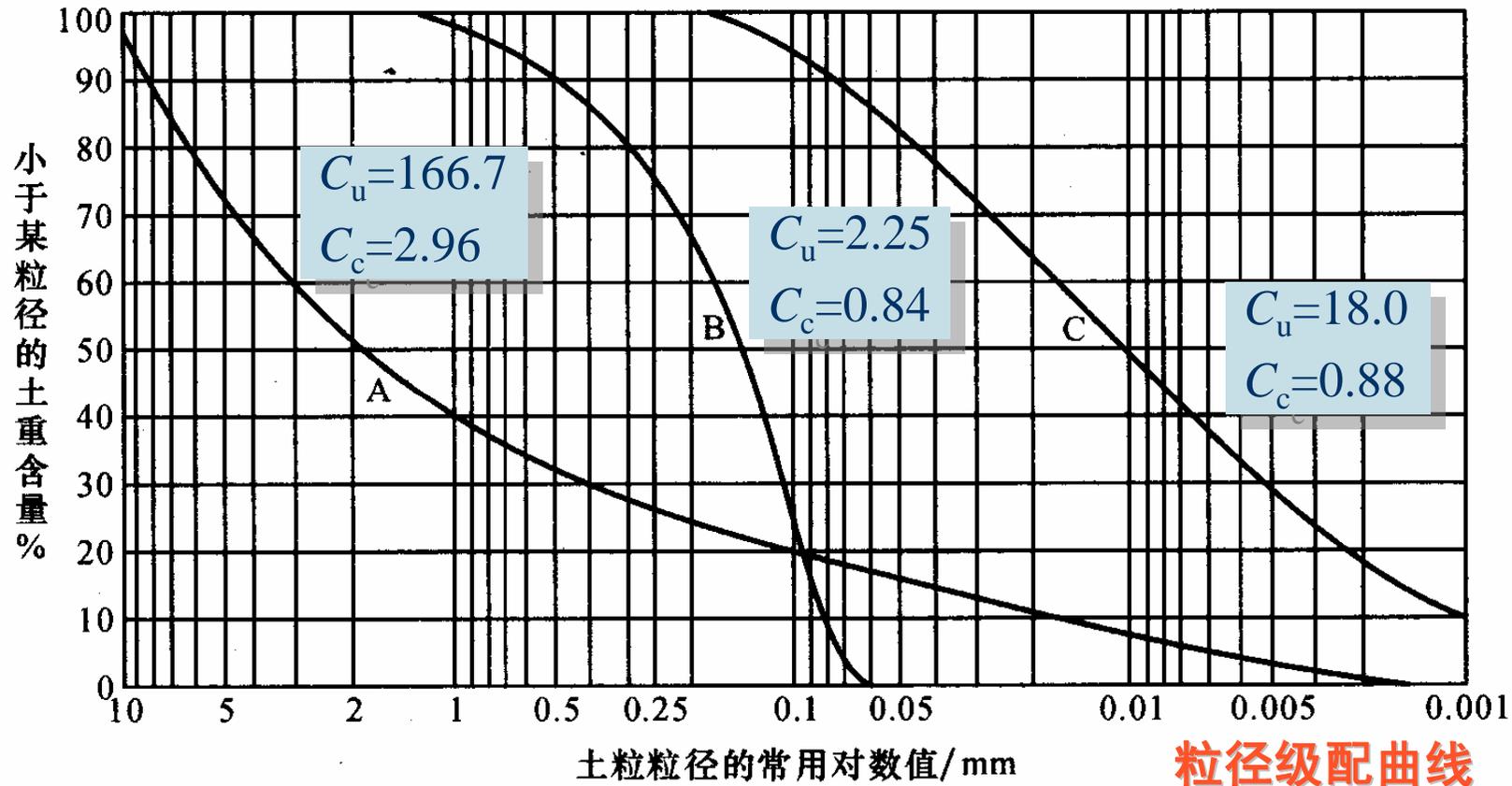
§ 1.2 土的三相组成（二）

1.2.1 土中的固体颗粒

- Ø **粒度**：土颗粒的大小；
 - Ø **粒径**：土颗粒当量小球体的直径；
 - Ø **粒组**：按粒径大小把粒径相近、工程性质相近土颗粒划分为若干组；
 - Ø **粒径级配曲线**：表达颗粒分析结果的曲线；
 - Ø **有效粒径**： d_{10}
 - Ø **连续粒径**： d_{30}
 - Ø **控制粒径**： d_{60}
- } 定量表示粒径级配曲线的特征及工程意义；
- Ø **颗粒级配不均匀系数**：表示曲线的斜率， $C_u = d_{60} / d_{10}$ ；
 - Ø **曲线的曲率系数**：表示曲线的连续性状况， $C_c = d_{30}^2 / (d_{10} d_{60})$ 。



§ 1.2 土的三相组成 (三)



当 $C_u > 10$ 且 $C_c = 1 \sim 3$: 级配良好的土;

若不能同时满足上述两个条件: 级配不良的土。



§ 1.2 土的三相组成（四）

- 土粒的矿物化学成分

- Ø **原生矿物**：岩石风化后化学成分未变化、化学性质稳定的矿物；
- Ø **次生矿物**：经反复风化和搬运，化学成分和性质变化形成的新矿物；
- Ø **有机质**：生物遗骸及其分解物，形成有机质土、泥炭等；
- Ø **可溶、难溶及不溶盐类，各种化合物及多种微量元素。**

- 粘土矿物对粘性土的工程影响

- Ø **颗粒极细，比表面积极大**：可衡量土粒间连接的牢固程度；
- Ø **吸附能力极强**：具有很强的离子吸附及交换作用；
- Ø **粘土矿物颗粒的带电性。**



§ 1.2 土的三相组成（五）

1.2.2 土中的水

∅ 矿物结晶水或化学结合水

通常在高温或长期加热下发生变化，不包括在土的含水量计算中。

∅ 结合（吸附）水

强结合水：吸附紧贴在土颗粒表面的水膜固定层，厚度1~5nm；

弱结合水：强结合水膜外圈的水膜扩散层，厚度10~100nm。

∅ 自由水

毛细水：存在于地下水位以上土颗粒间孔隙中的水，有溶解作用；

重力水：地下水位以下的液态水，受重力规律支配，有浮力作用。



§ 1.2 土的三相组成（六）

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

- 1.2.3 土中的气体

∅ 自由气体

与外界大气相通，当土层受荷载作用压缩时，易使之逸出。

∅ 封闭气泡

粒径较细的土中，与大气隔绝，受荷载作用时，会被压缩或溶解，压缩性增加，透水性减小，使土体不易压实。

∅ 有毒性气体、可燃性气体

造成地质灾害。

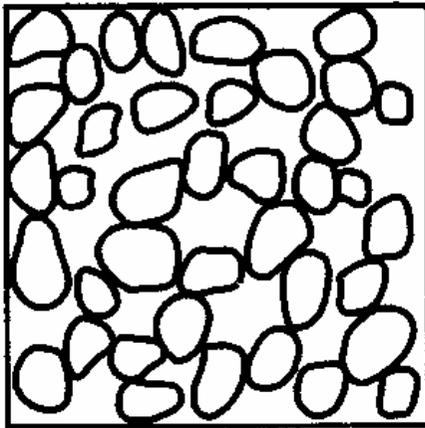
H. J. Li ao



§ 1.3 土的结构、构造 (一)

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

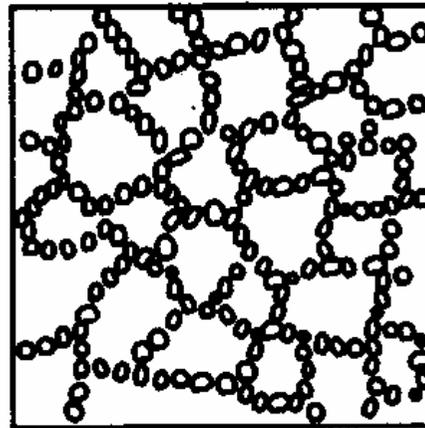
1.3.1 土粒结构



(a)

单粒结构

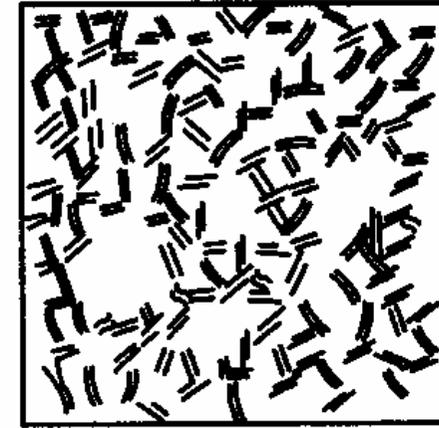
较粗颗粒的土，如砾石、砂粒等



(b)

蜂窝状结构

较细颗粒的土，如粉粒等



(c)

絮凝状结构

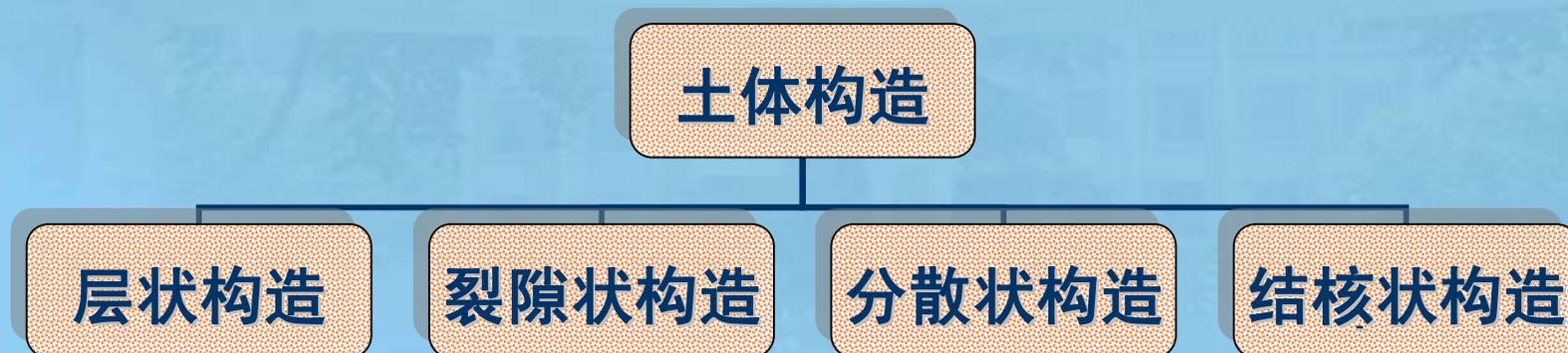
微小的黏粒、胶体颗粒



§ 1.3 土的结构、构造（二）

- 1.3.2 土体构造

- Ø 土体中各组成部分之间的排列、分布及外貌特征，如土层的层理及裂隙等宏观特征。
- Ø 反映了土的成因、土形成时的地质环境、气候特征及土层形成后的演变结果等。





§ 1.4 土的物理性质三相比例指标的测定及计算 (一)

1.4.1 常用物理性质指标的定义及应用

1. 基本指标

∅ 土粒相对密度

实验室测定：相对密度瓶法

$d_s = m_s / m_w = \rho_s / \rho_w$, m_w 为4°C时同体积水的质量

∅ 土的天然含水量

$w = m_w / m_s$ (%)

烘干法

∅ 土的天然密度

$\rho = m / V$ (g/cm³)

环刀法

实测指标



§ 1.4 土的物理性质三相比例指标的测定及计算 (二)

2. 换算指标

∅ 孔隙比 $e = V_v / V_s$ $e = d_s (1 + w) r_w / r - 1$

∅ 孔隙率 $n = V_v / V$ (%) $n = e / (1 + e)$

∅ 饱和度 $S_r = V_w / V_v$ (%) $S_r = d_s w / e$

∅ 干密度、干重度 $r_d = r / (1 + w)$

$\rho_d = m_s / V$ (g/cm³)、 $\gamma_d = \rho_d g$ (kN/m³)

∅ 饱和密度、饱和重度 $r_{sat} = (d_s + e) r_w / (1 + e)$

$\rho_{sat} = (m_s + V_v \rho_w) / V$ (g/cm³)、 $\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$ (kN/m³)

∅ 有效密度、有效重度 $r' = (d_s - 1)(1 - n) r_w$

$\rho' = (m_s - V_s \rho_w) / V$ (g/cm³)、 $\gamma' = \rho' g$ (kN/m³)



§ 1.4 土的物理性质三相比例指标的测定及计算 (三)

推导各指标间的关系

假设 $V_s = 1$ 则 $V_v = \frac{V_v}{V_s} = e$

$$m_s = \frac{m_s}{V_s} = r_s = \frac{r_s}{r_w} r_w = d_s r_w$$

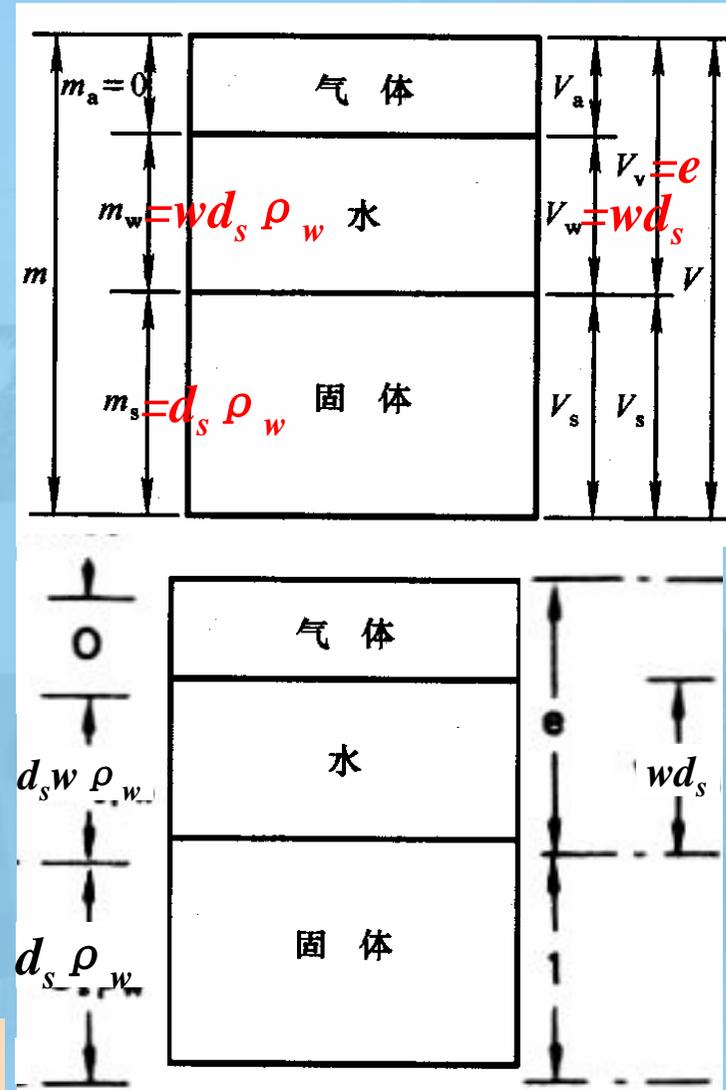
$$m_w = w m_s = w d_s r_w$$

$$V_w = \frac{V_w}{V_s} = \frac{m_w}{m_s} \frac{r_s}{r_w} = w d_s$$

于是根据定义式就便可推出各个指标间的换算式。

例如 $S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w d_s}{e}$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e}$$





例题1

在进行某地基勘察时，取一原状土样，由试验测得：土的天然密度 $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$ ，土粒相对密度 $d_s = 2.70$ ，土的天然含水量 $w = 18.0\%$ ，试求其余六个指标。

$$\text{解: } e = \frac{d_s(1+w)r_w}{r} - 1 = \frac{2.7(1+0.18) \times 1}{1.8} - 1 = 0.77$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.77}{1+0.77} \times 100\% = 43.5\%$$

$$S_r = \frac{d_s w}{e} \times 100\% = \frac{2.7 \times 0.18}{0.77} \times 100\% = 63.1\%$$

$$r_d = \frac{r}{1+w} = \frac{1.8}{1+0.18} = 1.525 (\text{g/cm}^3)$$

$$r_{sat} = \frac{d_s + e}{1+e} r_w = \frac{2.7 + 0.77}{1 + 0.77} \times 1 = 1.96 (\text{g/cm}^3)$$

$$r' = \frac{d_s - 1}{1+e} r_w = \frac{2.7 - 1}{1 + 0.77} \times 1 = 0.96 (\text{g/cm}^3)$$



例题2

某原状土样的总体积 $V=140\text{cm}^3$ ，湿土质量 $m=258\text{g}$ ，干土质量 $m_s=208\text{g}$ ，土粒的相对密度 $d_s=2.68$ ，求土样的密度、重度、干密度、干重度、含水量、孔隙比及饱和重度。

解：
$$r = \frac{m}{V} = \frac{258}{140} = 1.84(\text{g/cm}^3)$$

$$g = r \times g = 1.84 \times 10^3 \times 10 = 18.4(\text{KN/m}^3)$$

$$r_d = \frac{m_s}{V} = \frac{208}{140} = 1.49(\text{g/cm}^3)$$

$$g_d = r_d \times g = 1.49 \times 10^3 \times 10 = 14.9(\text{KN/m}^3)$$

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{258 - 208}{208} \times 100\% = 24\%$$

$$e = \frac{d_s r_w}{r_d} - 1 = \frac{2.68 \times 1}{1.49} - 1 = 0.8$$

$$g_{sat} = \frac{d_s + e}{1 + e} \times g_w = \frac{2.68 + 0.8}{1 + 0.8} \times 10 = 19.3(\text{KN/m}^3)$$



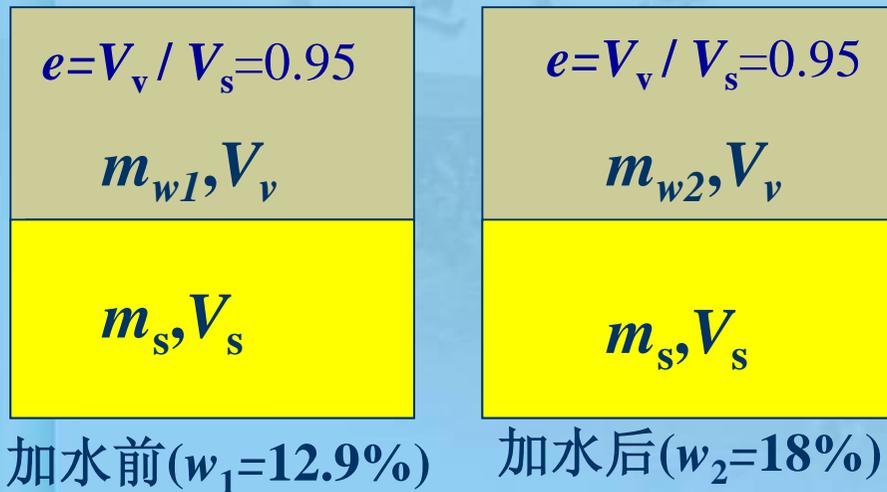
例题3

某填土工程，土料的 $e=0.95$ ， $S_r=37\%$ ， $d_s=2.72$ ，若孔隙比不变，使其达到 $w=18\%$ ，问：1)每 $1m^3$ 土中需要加水多少？2)每 $1000kg$ 土中需要加水多少？

解：如图分析： e 不变，且 m_s 和 V_s 不变，就是孔隙体积不变；总体积不变。假定加水前土的含水量为 w_1 ，则：

$$w_1 = \frac{S_r e}{d_s} = \frac{37\% \cdot 0.95}{2.72} = 12.9\%, \quad m_s = r_d V = \frac{d_s}{1+e} r_w V = 1.39 \cdot 10^3 (kg)$$

$$r = \frac{d_s (1+w_1) r_w}{1+e} = \frac{2.72 \cdot (1+0.129) \cdot 10^3}{1+0.95} = 1.57 \cdot 10^3 (kg/m^3)$$



填土材料

1) 每 $1m^3$ 土中需要加水

$$Dm_w = m_{w2} - m_{w1} = m_s (w_2 - w_1) = 1.39 \cdot 10^3 (18 - 12.9)\% = 70.89 (kg)$$

2) 每 $1000kg$ 土中需要加水

$$m_w = \frac{m}{r} \cdot Dm_w = \frac{10^3}{1.57 \cdot 10^3} \cdot 70.89 = 45.15 (kg)$$



§ 1.5 无粘性土的特性（一）

无粘性土的工程性质主要用**密实度**来描述。

1.5.1 孔隙比

土的名称 分类	密实度			
	密实	中密	稍密	松散
砾,粗,中砂	$e < 0.6$	$0.6 \leq e \leq 0.75$	$0.75 < e \leq 0.85$	$e > 0.85$
细粉砂	$e < 0.7$	$0.7 \leq e \leq 0.85$	$0.85 \leq e \leq 0.95$	$e \geq 0.95$

Ø 优点：简便

Ø 缺点：不能全面地考虑**土颗粒的级配影响**。



§ 1.5 无粘性土的特性 (二)

- 1.5.2 相对密实度

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

$1.0 \geq D_r > 0.67$ 密实

$0.67 \geq D_r > 0.33$ 中密

$0.33 \geq D_r > 0$ 松散

Ø e 土的天然孔隙比;

Ø e_{\max} 土的最大孔隙比, 以砂土样最疏松状态制备;

Ø e_{\min} 土的最小孔隙比, 以砂土样振捣紧密状态制备;

Ø 优点: 考虑土的粒径级配影响;

Ø 缺点: 试验影响因素较多。



§ 1.5 无粘性土的特性 (三)

1.5.3 现场试验

- Ø **标准贯入试验** 使用 63.5 ± 0.5 kg重穿心锤，以 0.76 ± 0.02 m高度自由落下，将一定规格尺寸的标准贯入器。先在孔底预打入土中15cm，不计锤击数，然后测计再打入30cm的**锤击数 N** 。

砂类土的密实度	密实	中密	稍密	松散
标贯试验击数 N	$N > 30$	$15 < N \leq 30$	$10 < N \leq 15$	$N \leq 10$

- **优点**：可以排除取原状土样的困难，减少室内试验的影响因素；
- **缺点**：中、小型工程不太经济。



§ 1.6 粘性土及粉土的特性 (一)

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

1.6.1 粘性土粘性的来源

- 原始内聚力：物质分子间及微粒间的微观力所构成的凝聚力；
- 固化内聚力：土体内含有的矿物质和化学物质产生的胶结固化作用。

1.6.2 含水状态特征及界限含水量的测定



H. J. Liao



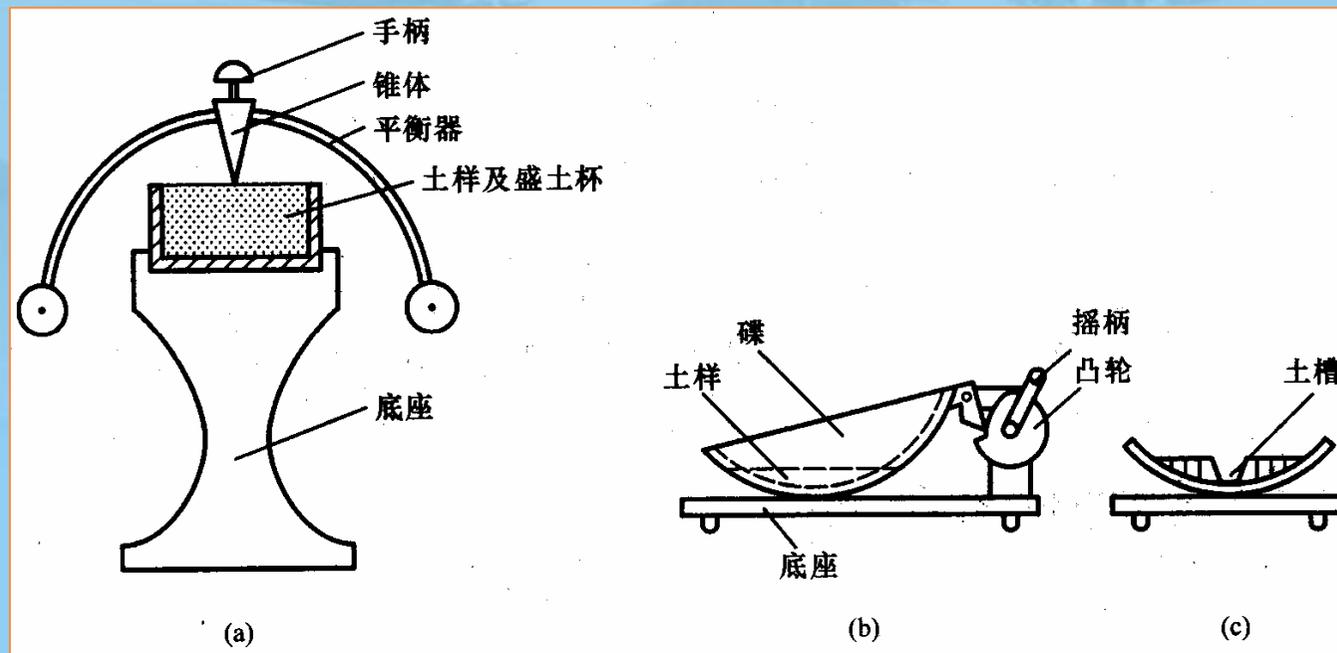
§ 1.6 粘性土及粉土的特性 (二)

- 常用的界限含水量液限 w_L 和塑限 w_p 测定

Ø 液限 w_L : 液限仪: 锥式 (图a)、碟式 (图b、c)

Ø 塑限 w_p : 搓条法

Ø 液限塑限联合测定仪: $w_p = aw_L + b$





§ 1.6 粘性土及粉土的特性 (三)

1.6.3 两个重要指标及其工程应用

1、**塑性指数** $I_p = w_L - w_p$ I_p 越大土的可塑性范围越大。

对黏性土分类: $17 < I_p$ **黏土**; $10 < I_p \leq 17$ **粉质黏土**

2、**液性指数** $I_L = (w - w_p) / I_p$ 表示粘性土含水软硬状态。

黏性土的软硬状态分类

软硬状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流动
液性指数	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1.0$	$I_L > 1.0$

Ø **稠度指数** $I_c = (w_L - w) / I_p$ I_c 越大, 土体越稠、越硬。



§ 1.6 粘性土及粉土的特性（四）

1.6.4 黏性土的活动度、灵敏度及触变性

∅ 活动度

$$A = I_p / m$$

$$A < 0.75$$

不活动黏土

$$A = 0.75 \sim 1.25$$

一般黏土

$$A = 1.25 \sim 2.0$$

活动黏土

$$A > 2.0$$

强活动黏土

∅ 灵敏度

$$S_r = q_u / q'_u$$

$$S_r \leq 1.0$$

不灵敏

$$1.0 < S_r \leq 2.0$$

低灵敏

$$2.0 < S_r \leq 4.0$$

中等灵敏

$$4.0 < S_r \leq 8.0$$

灵敏

$$8.0 < S_r \leq 16.0$$

高灵敏

$$16.0 < S_r$$

流动

∅ 触变性



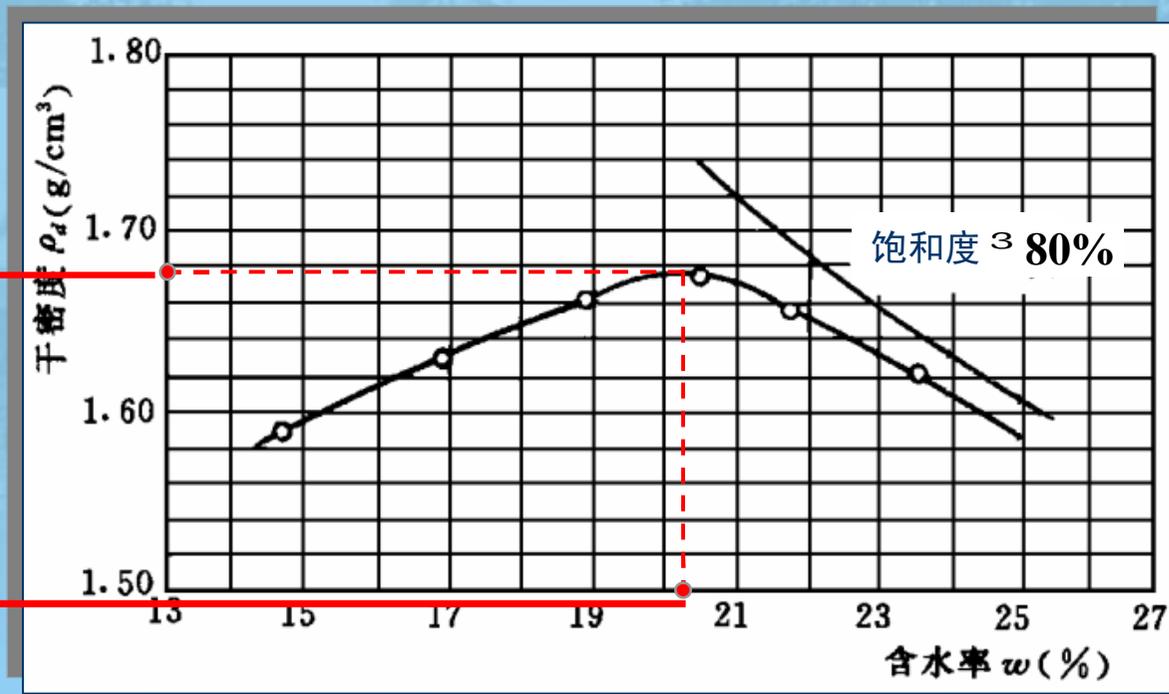
§ 1.7 粘性土水-土系统的工程特性 (一)

1.7.1 粘性土的夯(压)实性

- Ø 击实试验 $r_{di} = r_i / (1 + w_i)$ 以干密度和含水率关系作出击实曲线。
- Ø 击实曲线峰值点对应纵坐标为**最大干密度**，横坐标为**最优含水率 (量)**。

最大干密度
 r_{dmax}

最优含水率
 w_{op}





§ 1.7 粘性土水-土系统的工程特性 (二)

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

1.7.2 粘性土的收缩、膨胀、崩解

- ∅ **收缩**: 由于含水量的蒸发而引起土体积缩小的现象。土的收缩值和矿物成分有关。
- ∅ **膨胀**: 土体中粘粒、胶粒含量越多, 膨胀性越显著。如蒙脱土吸水膨胀显著, 失水收缩也显著。
- ∅ **崩解**: 土在胀缩过程中由于应力不均匀、土粒间距超过引力作用范围, 土体就出现崩解现象。

- 1.7.3 粘性土土质改良

- 1.7.4 粘土中的降、排水

- 1.7.5 冻结过程中水分的迁移和积聚

H. J. Li ao



§ 1.8 土的工程分类

- 可参见现行有关对土分类的标准、规范（规程），如：
 - Ø 国家标准《土的工程分类标准》（GB/T 50145—2007）；
 - Ø 建设部《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）；
 - Ø 建设部《岩土工程勘察规范》（GB 50021—2001）；
 - Ø 交通部《公路土工试验规程》（JTGE40—2007）；
 - Ø 水利部《土工试验规程》（SL 237—1999）。

- 常用土的分类有：
 - Ø 碎石、砾石类土；
 - Ø 砂类土；
 - Ø 粉土；
 - Ø 粘性土；
 - Ø 特殊土（湿陷性黄土、软黏土、膨胀土、盐渍土、冻土等等）。



- 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