



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

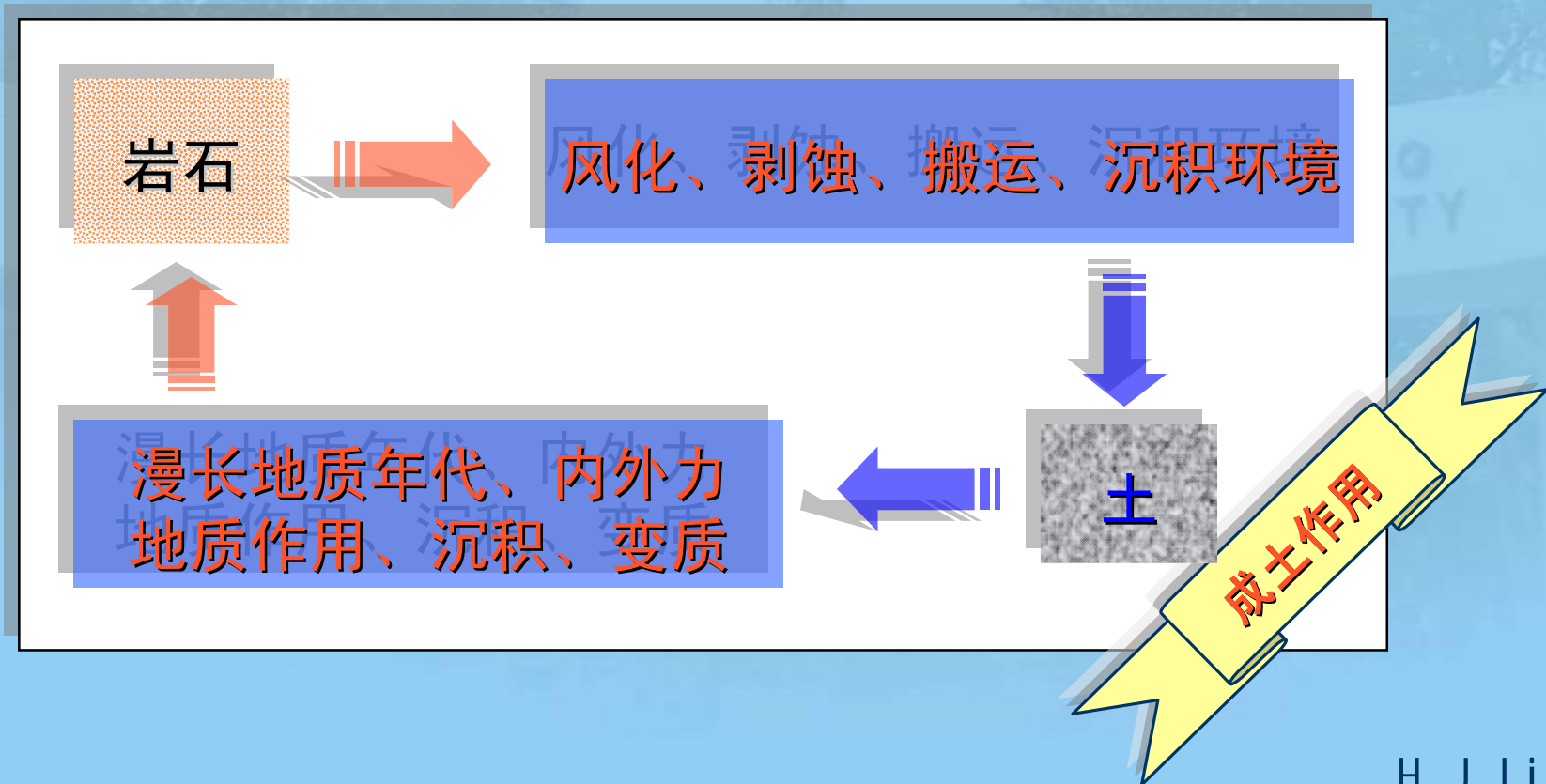
H. J. Li ao



## § 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

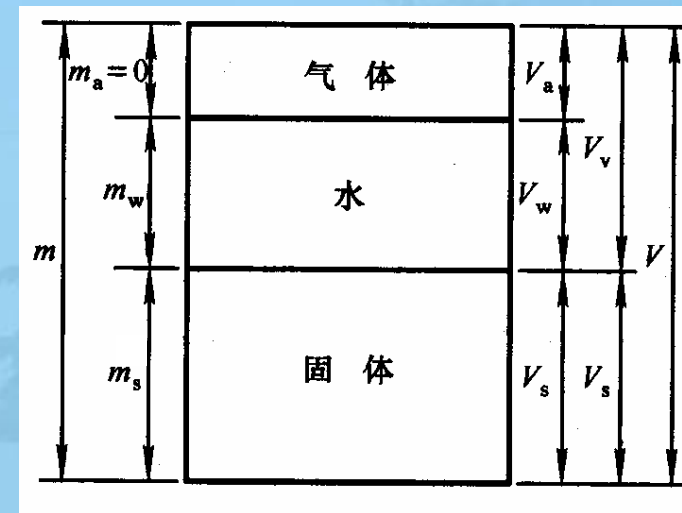
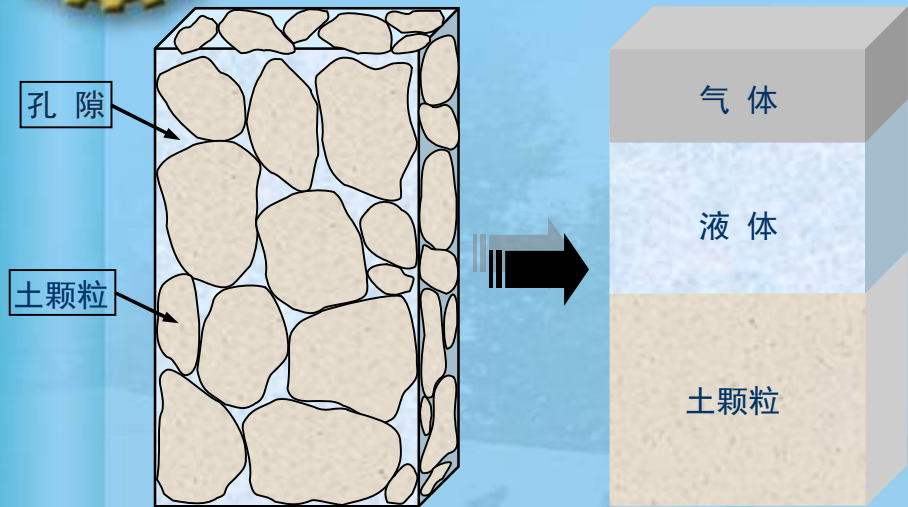
- ∅ 1. 残积层
- ∅ 2. 坡积层
- ∅ 3. 洪积层, 泥石流, 冰川堆积物
- ∅ 4. 河流冲积层
- ∅ 5. 湖积层
- ∅ 6. 风积层

### - 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）

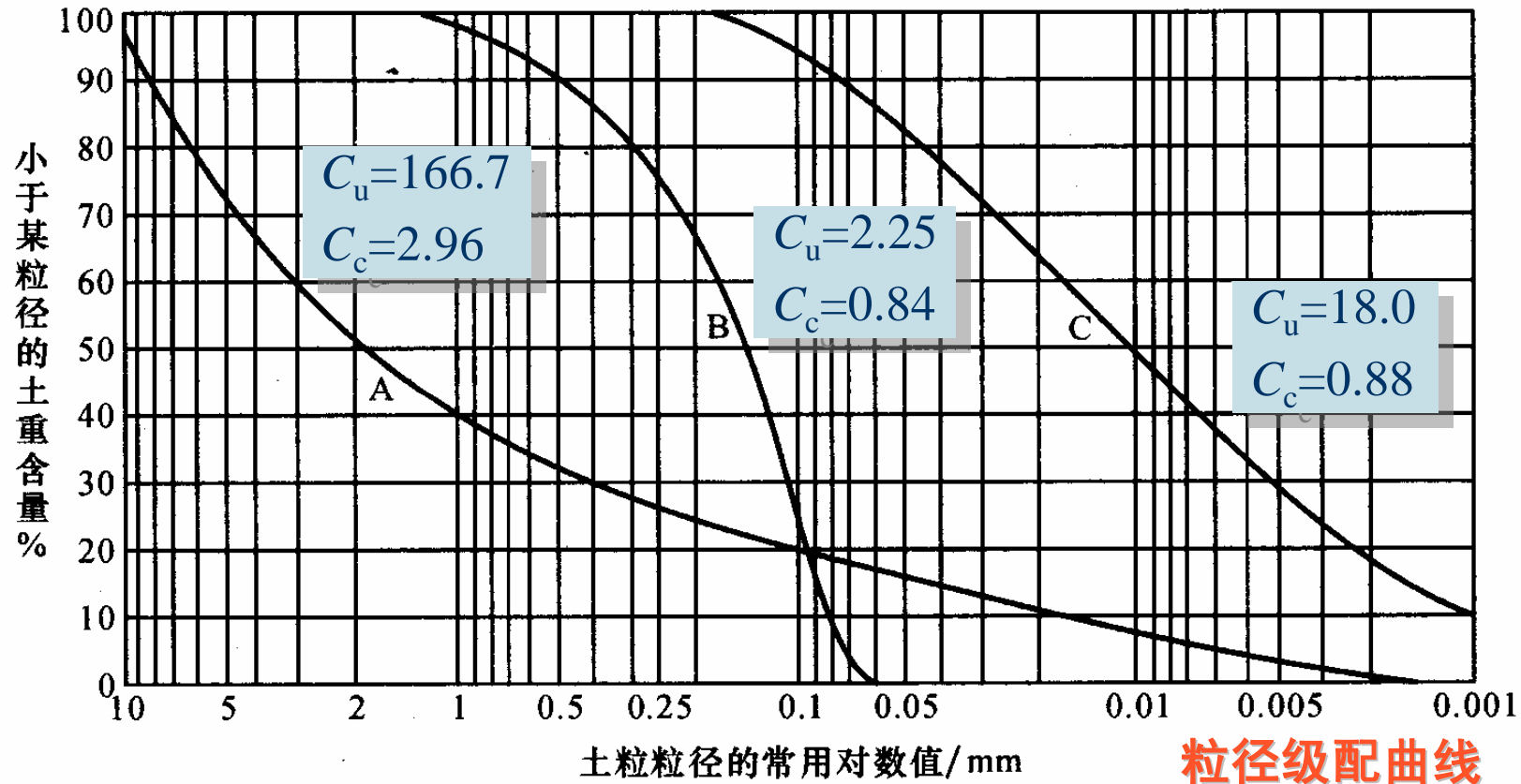
### 1.2.1 土中的固体颗粒

- 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）

### - 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

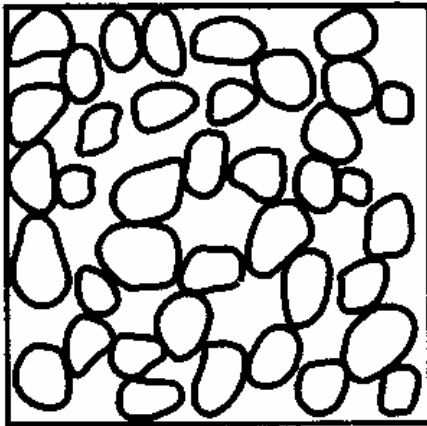
造成地质灾害。



## § 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

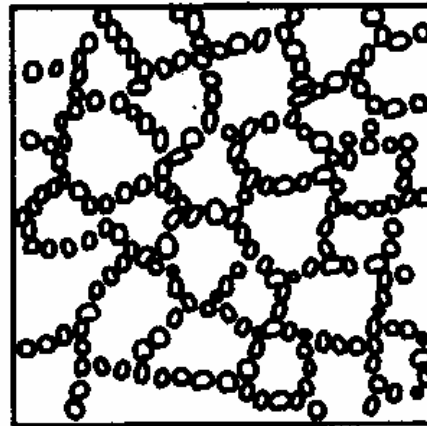
### 1.3.1 土粒结构



(a)

#### 单粒结构

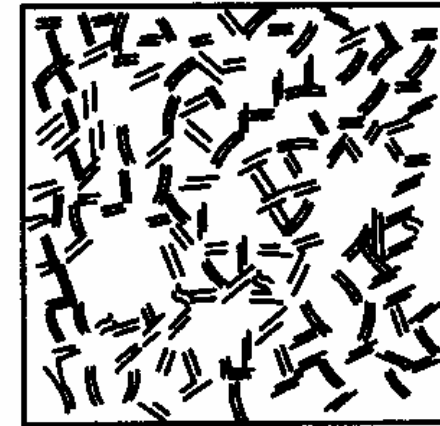
较粗颗粒的土，如砾石、砂粒等



(b)

#### 蜂窝状结构

较细颗粒的土，如粉粒等



(c)

#### 絮凝状结构

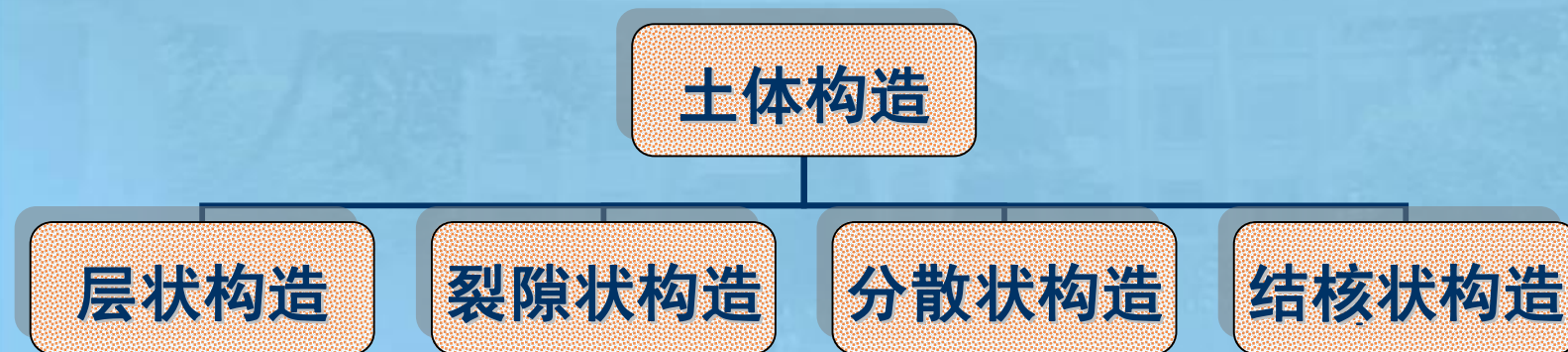
微小的黏粒、胶体颗粒



## § 1.3 土的结构、构造（二）

### - 1.3.2 土体构造

- ∅ 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。
- ∅ 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/cm<sup>3</sup>)

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)

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

### 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/cm<sup>3</sup>)、 $\gamma_d = \rho_d g$  (kN/m<sup>3</sup>)

∅ 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/cm<sup>3</sup>)、 $\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$  (kN/m<sup>3</sup>)

∅ 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/cm<sup>3</sup>)、 $\gamma' = \rho' g$  (kN/m<sup>3</sup>)

H. J. Li ao





# § 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  $V_v = \frac{V_v}{V_s} = e$

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

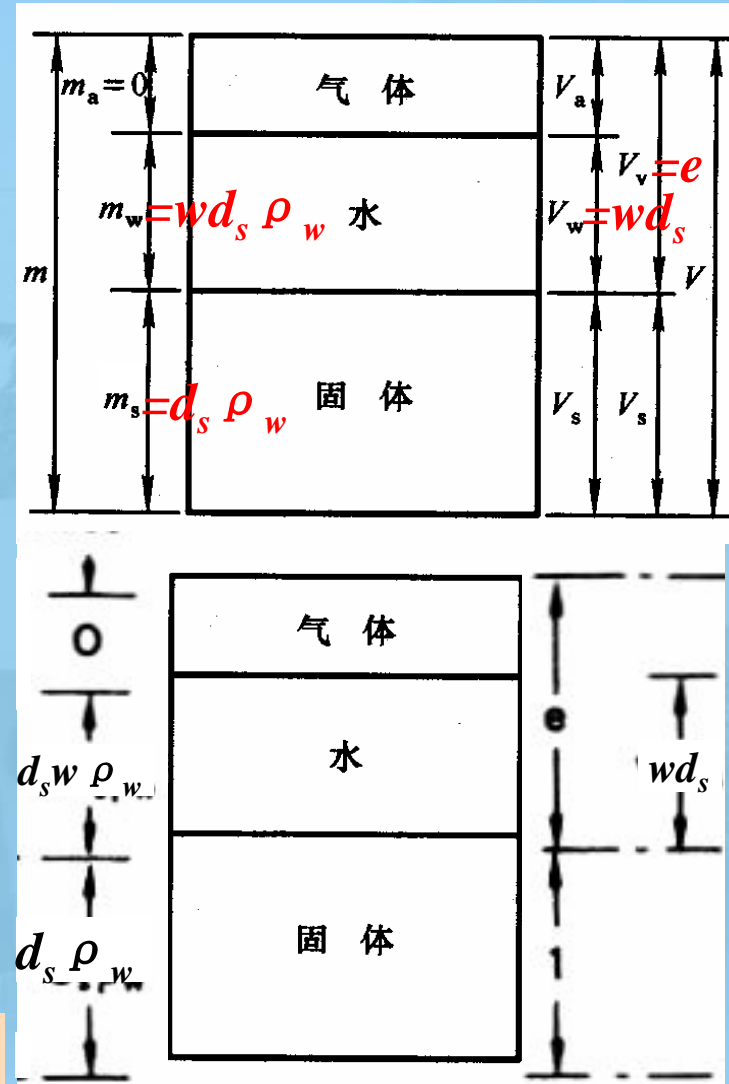
$$m_w = w m_s = w d_s r_w$$

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

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

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

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

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

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

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

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



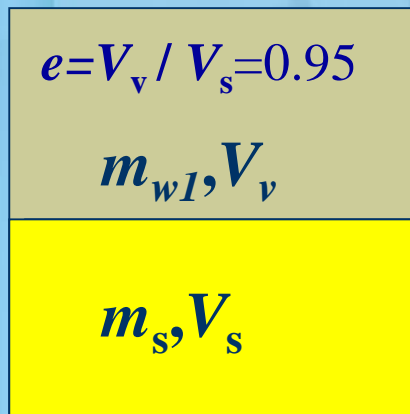
# 例题3

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？

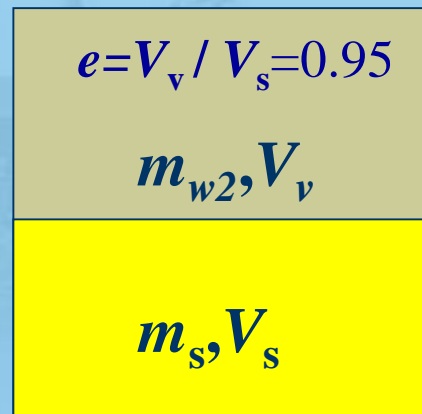
解：如图分析： $e$ 不变，且 $m_s$ 和 $V_s$ 不变，就是孔隙体积不变；总体积不变。假定加水前土的含水量为 $w_1$ ，则：

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

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



加水前( $w_1=12.9\%$ )



加水后( $w_2=18\%$ )

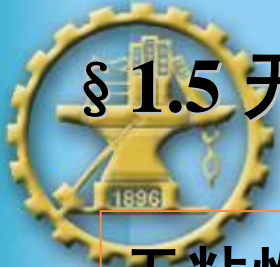
**填土材料**

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 $63.5 \pm 0.5$  kg重穿心锤，以 $0.76 \pm 0.02$  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。

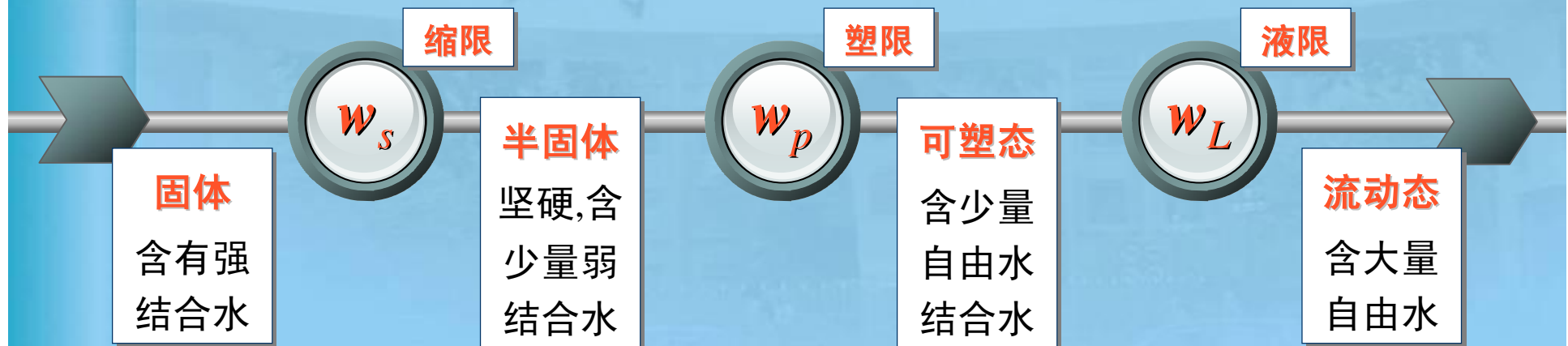


## § 1.6 粘性土及粉土的特性 (一)

### 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







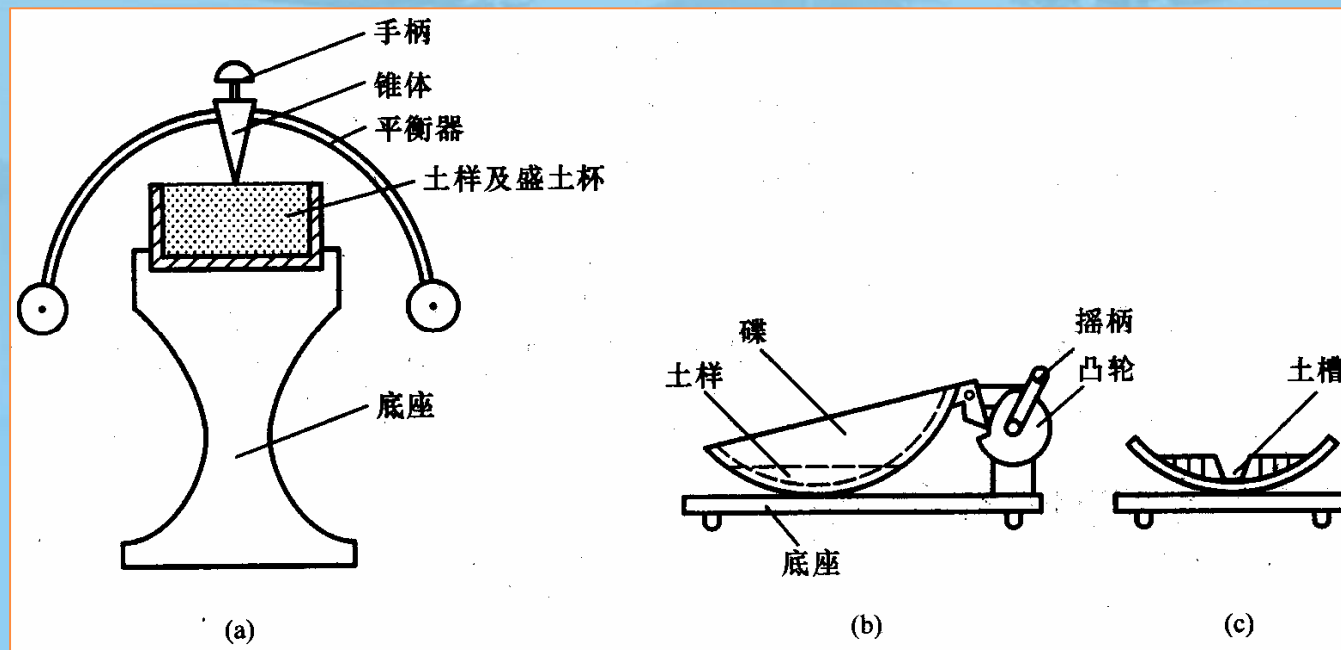
## § 1.6 粘性土及粉土的特性 (二)

- 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



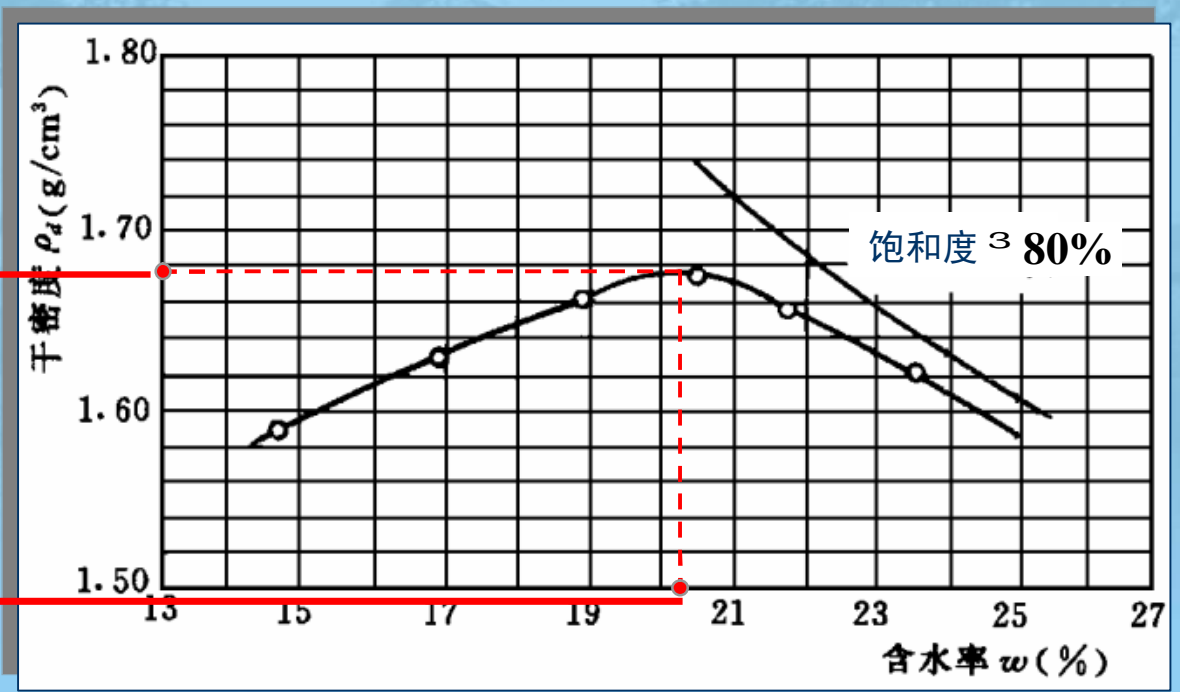
# § 1.7 粘性土水-土系统的工程特性 (一)

## 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