

第1章：土的物理性质与工程分类

主讲：刘勇健



第一章：土的物理性质与工程分类

✧ 本章提要

- 解释土的特性
- 定量描述土的组成和状态

✧ 学习要点

- 理清各节间联系
- 注意物理概念的把握

土的形成过程

- ✧ 土的三相组成
- ✧ 土的物理状态
- ✧ 土的结构

决定

渗透特性
变形特性
强度特性

土的工程分类：便于研究和应用
土的压实性：如何获得较好的土

第一章：土的物理性质与工程分类

§1.1 土的形成

§1.2 土的三相组成

§1.3 土的三相比例指标

§1.4 土的物理状态

§1.5 土的结构

§1.6 土的工程分类

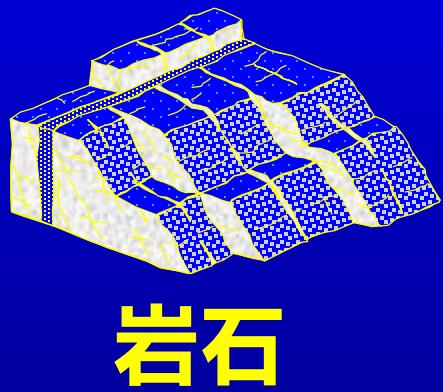
§1.7 土的压实性

§1.1 土的形成





土 的 形 成

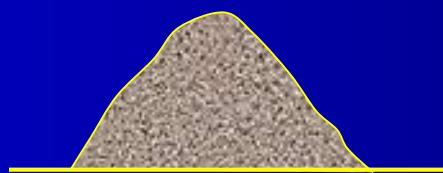


过程、条件

土的组成、结构
和物理力学性质

风化、搬运、沉积

地质成岩作用



✧ 物理风化

✧ 化学风化

✧ 生物风化



- 岩石和土的粗颗粒受大气、水、生物的作用或在运动过程中机械性破碎
- 颗粒大小发生量的变化
- 矿物成分与母岩相同，称原生矿物
- 产生无黏性土

土的形成与风化作用

✧ 物理风化

✧ 化学风化

✧ 生物风化

- 形成新的矿物
- 颗粒成分发生质的变化
- 矿物成分与母岩不同，称次生矿物
- 形成十分细微的土颗粒，如黏性颗粒及可溶盐类

土的形成与风化作用

✧ 物理风化

✧ 化学风化

✧ 生物风化

- 包括植物、动物和土壤微生物的作用
- 构成土中有机质和营养物质的生物循环
- 导致腐殖质的形成，改变土壤的结构

土的形成与风化作用

◆ 残积土
无搬运

◆ 运积土
有搬运

风化产物：岩屑或细小颗粒后，
未经搬运残留在原地的堆积物

残积土
强风化
弱风化
微风化
母岩体

- 颗粒表面粗糙
- 多棱角
- 粗细不均
- 无明显层理

搬运与沉积

◆ 残积土
(无搬运)

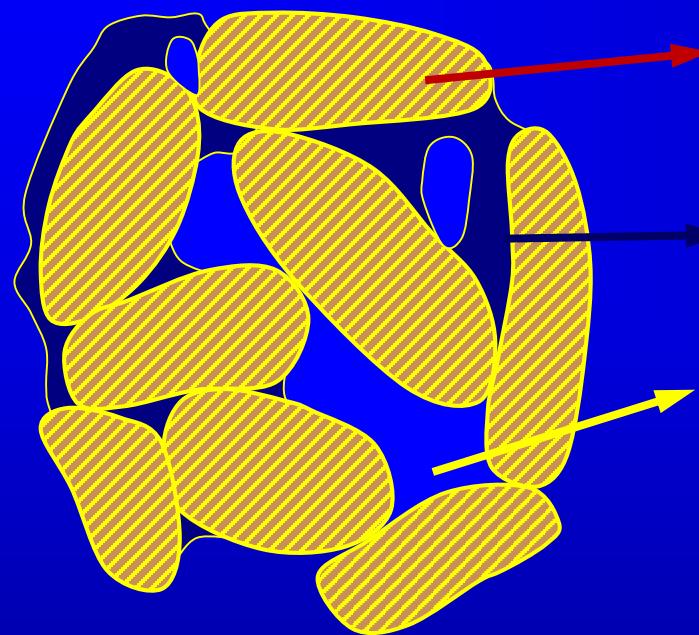
◆ 运积土
(有搬运)

风化所形成的土颗粒，受自然力的作用搬运到远近不同的地点所沉积的堆积物

- 坡积土：土粒粗细不同，性质不均
- 洪积土：有分选性，近粗远细
- 冲积土：浑圆度分选性明显，土层交迭
- 湖泊沼泽沉积土：含有机物淤泥，土性差
- 海相沉积物：颗粒细，表层松软，土性差
- 冰积土：土粒粗细变化较大，性质不均匀
- 风积土：颗粒均匀，层厚而不具层理

搬运与沉积

§1.2 土的三相组成



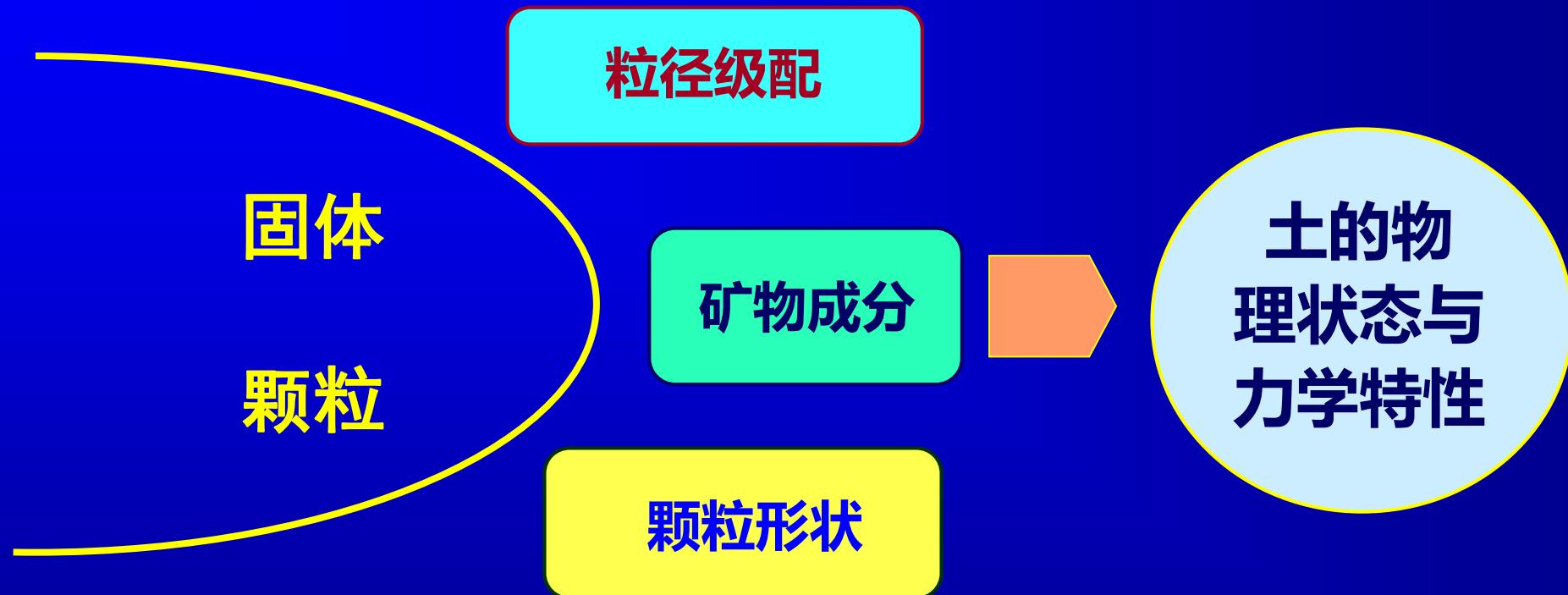
固体颗粒 固相 构成土体骨架
起决定作用

土中水 液相 重要影响

土中气体 气相 次要作用

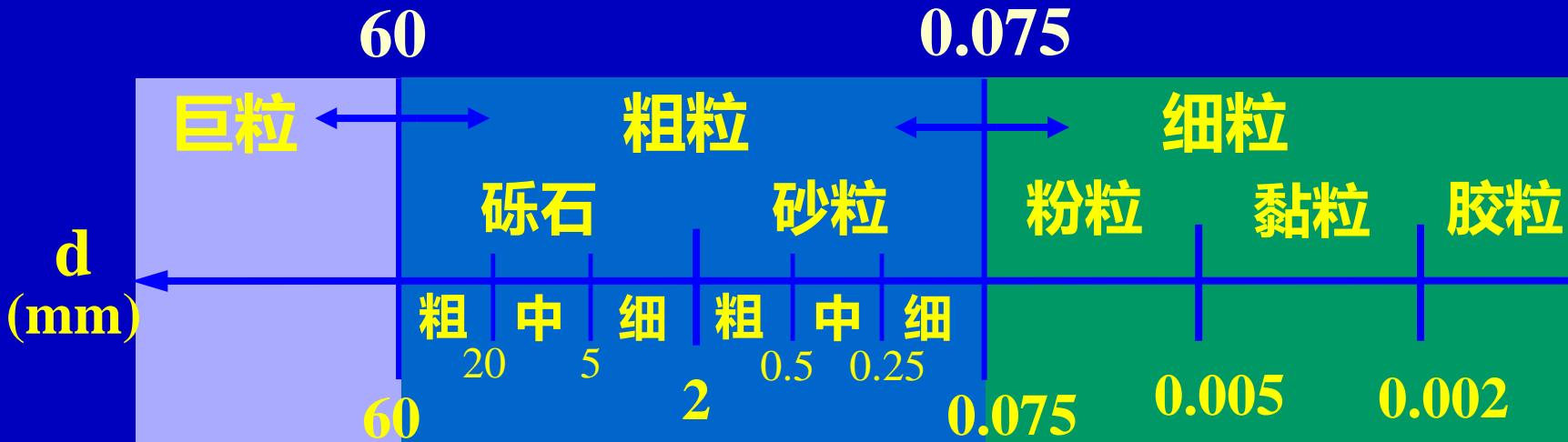
饱和土：土体孔隙完全被水充满
干 土：土体孔隙完全被气充满
非饱和土：孔隙中水和气均存在

土体的三相构成



固体颗粒三要素

粒组：按粗细进行分组，将粒径接近的归成一类界限粒径



- 粗粒土：以砾石和砂粒为主要组成的土，也称无黏性土
细粒土：以粉粒、黏粒和胶粒为主要组成的土，也称黏性土

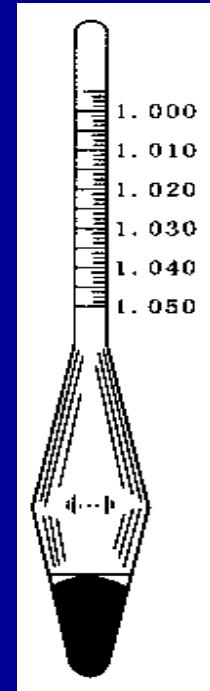
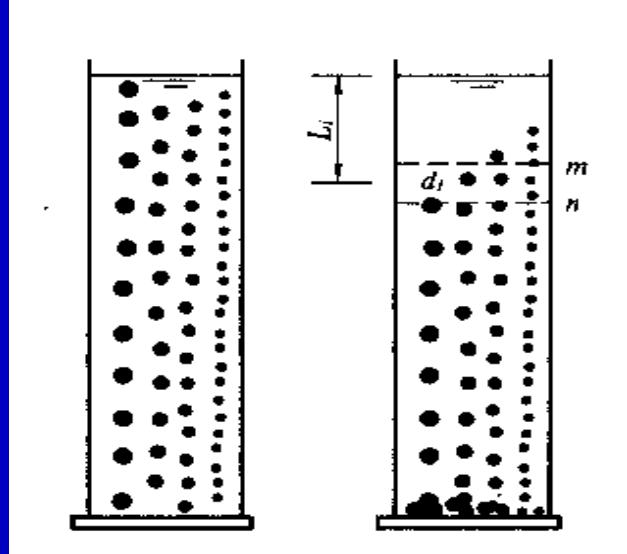
固体颗粒 – 颗粒大小

- ☞ 粒径级配：各粒组的相对含量，用质量百分数来表示
- ☞ 分析方法：
 - 筛分法：适用于粗粒土 → 孔径大小不同的筛子
 - 水分法：适用于细粒土 → 常采用比重计法
- ☞ 表述方法：粒径级配累积曲线

固体颗粒 - 粒径级配

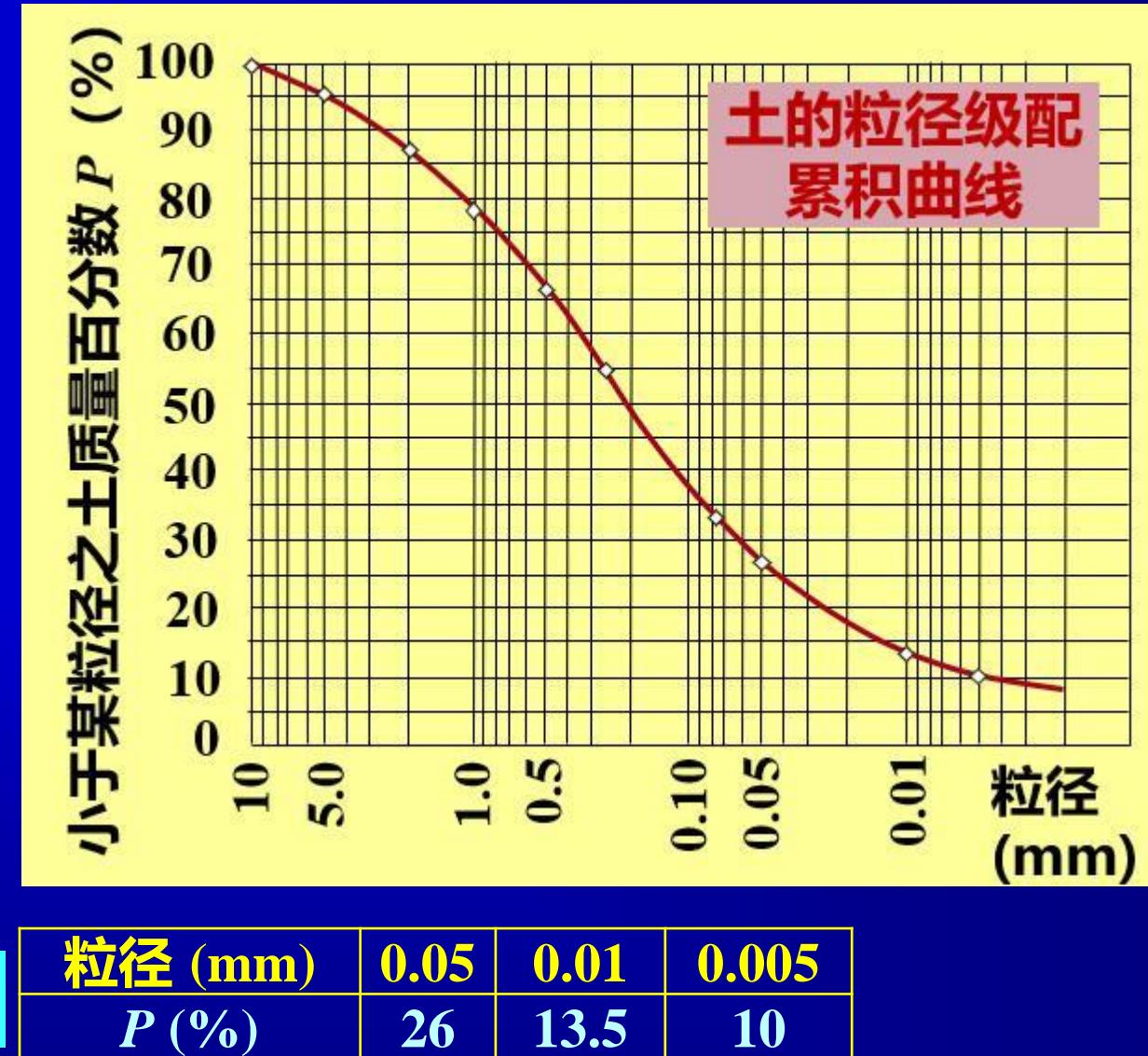
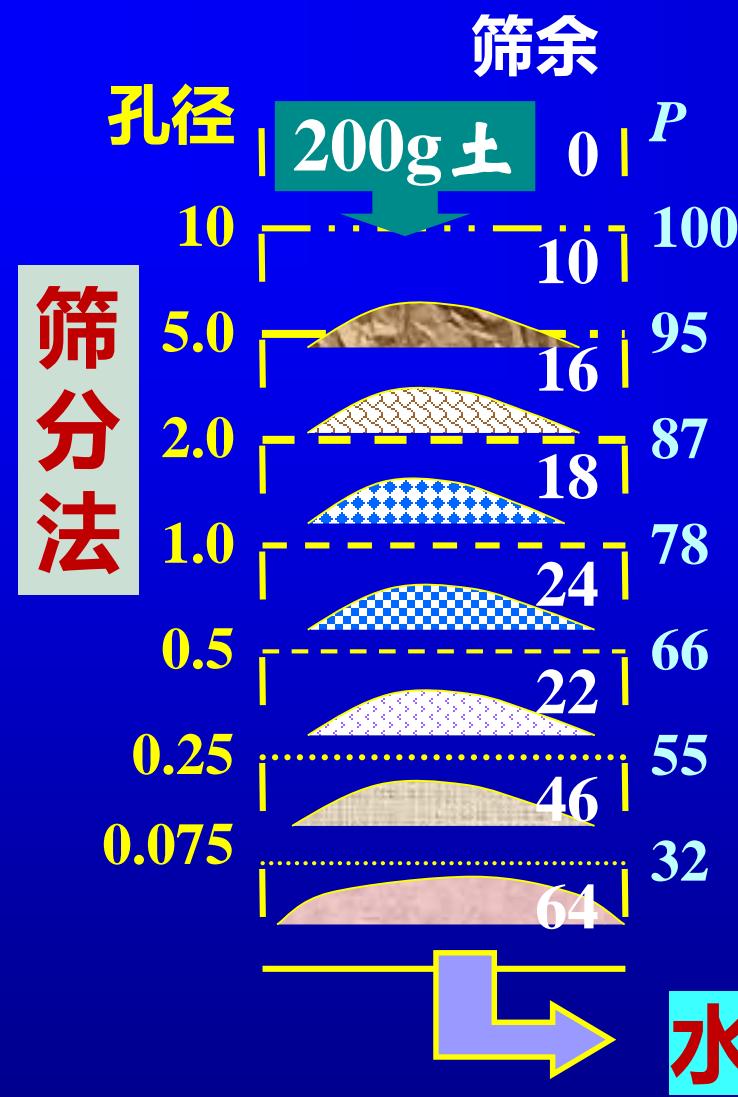


筛分法适合
于粗粒径
 $(d > 0.075\text{mm})$



密度计法适合于细粒径
 $(d < 0.075\text{mm})$

固体颗粒 - 粒径级配



固体颗粒 – 粒径级配

斜率: 某粒径范围内颗粒的含量

陡-相应粒组含量多

缓-相应粒组含量少

平台-相应粒组缺乏

特征粒径

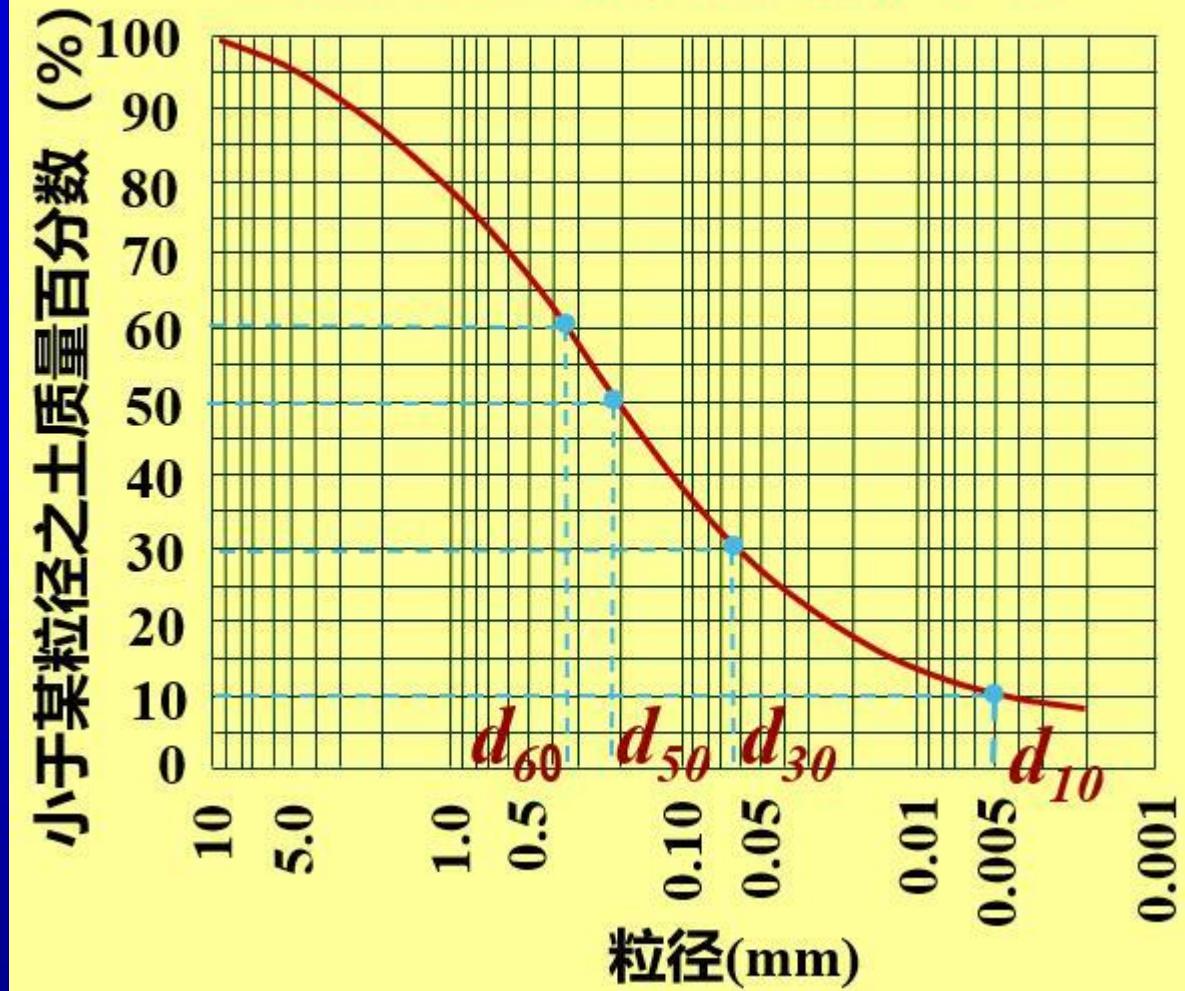
d_{50} : 平均粒径

d_{60} : 控制粒径

d_{10} : 有效粒径

d_{30}

土的粒径级配累积曲线



固体颗粒 – 级配曲线

✧ 土的粗细度：用 d_{50} 表示

✧ 土的不均匀程度：

不均匀系数 $C_u = d_{60} / d_{10}$

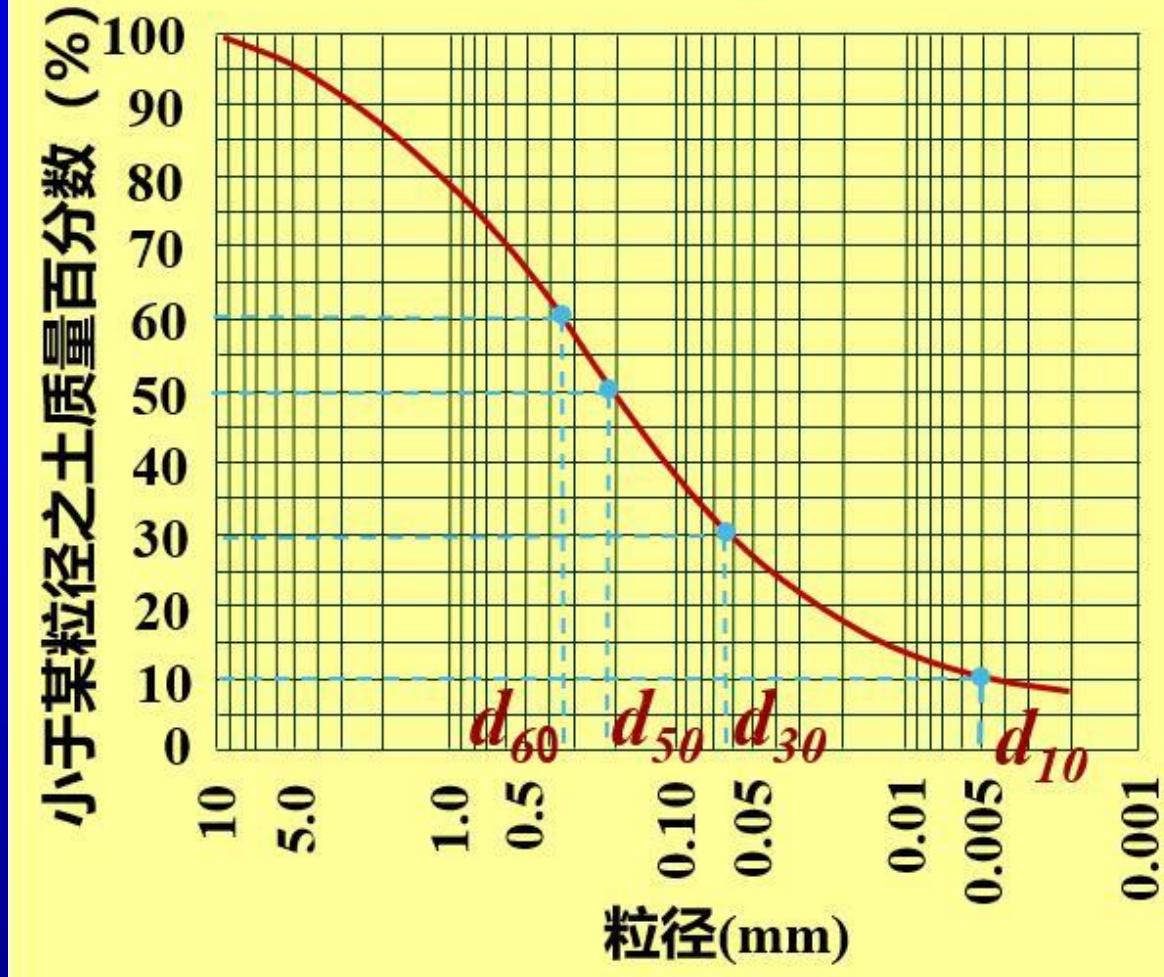
$C_u \geq 5$ 为不均匀土，反之
称为均匀土

✧ 连续程度：

曲率系数 $c_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$

$c_c = 1 \sim 3$ 为连续级配，反
之为不连续级配

土的粒径级配累积曲线



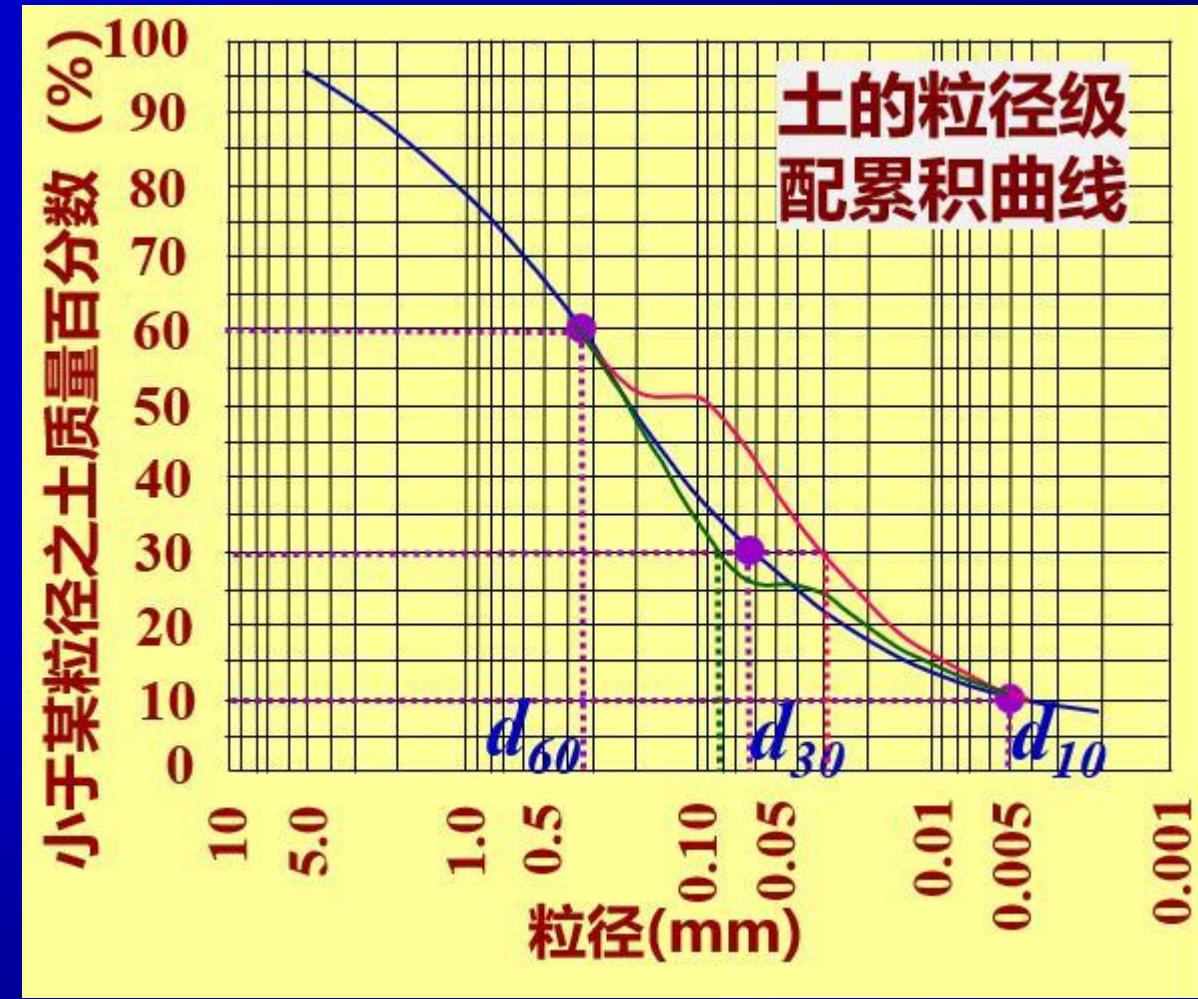
固体颗粒 – 级配曲线

曲线	d_{60}	d_{10}	d_{30}	C_u	C_c
L			0.081		3.98
M	0.33	0.005	0.063	66	2.41
R			0.030		0.545

☞ $C_c = 1 \sim 3$, 级配连续

缺少小颗粒, $C_c \uparrow$

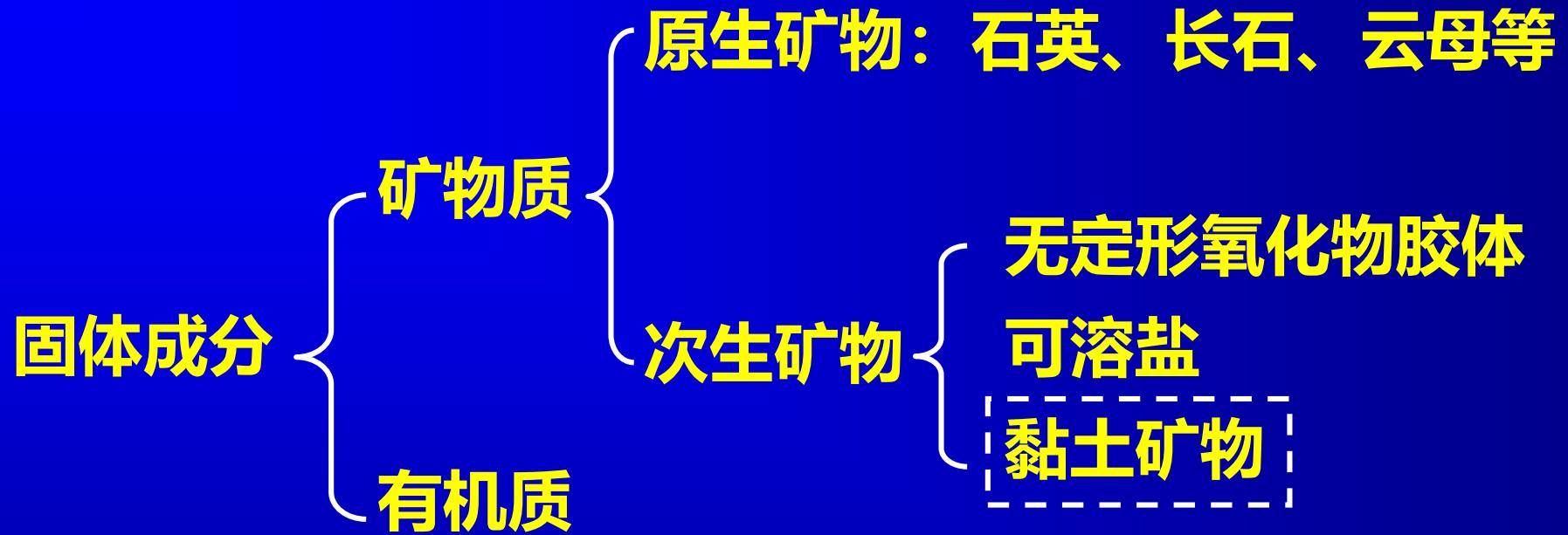
缺少大颗粒, $C_c \downarrow$



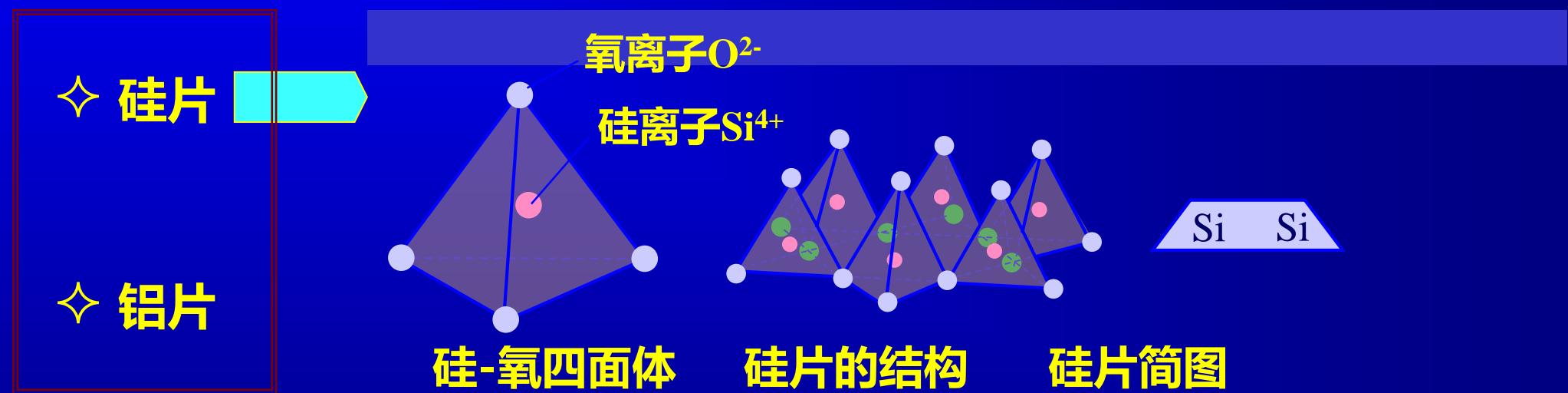
固体颗粒 - 曲率系数举例

- ☞ 粒组含量用于土的分类定名；
- ☞ 不均匀系数 C_u 用于判定土的不均匀程度：
 $C_u \geq 5$ 为不均匀土； $C_u < 5$ 为均匀土
- ☞ 曲率系数 C_c 用于判定土的连续程度：
 $C_c = 1\sim 3$ 为级配连续土； $C_c > 3$ 或 $C_c < 1$ 为级配不连续土
- ☞ 不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 用于判定土的级配优劣：
 $C_u \geq 5$ 且 $C_c=1\sim 3$ 为级配良好的土； 如果 $C_u < 5$ 或 $C_c > 3$ 或 $C_c < 1$ 为 级配不良的土

粒径级配曲线和指标的应用

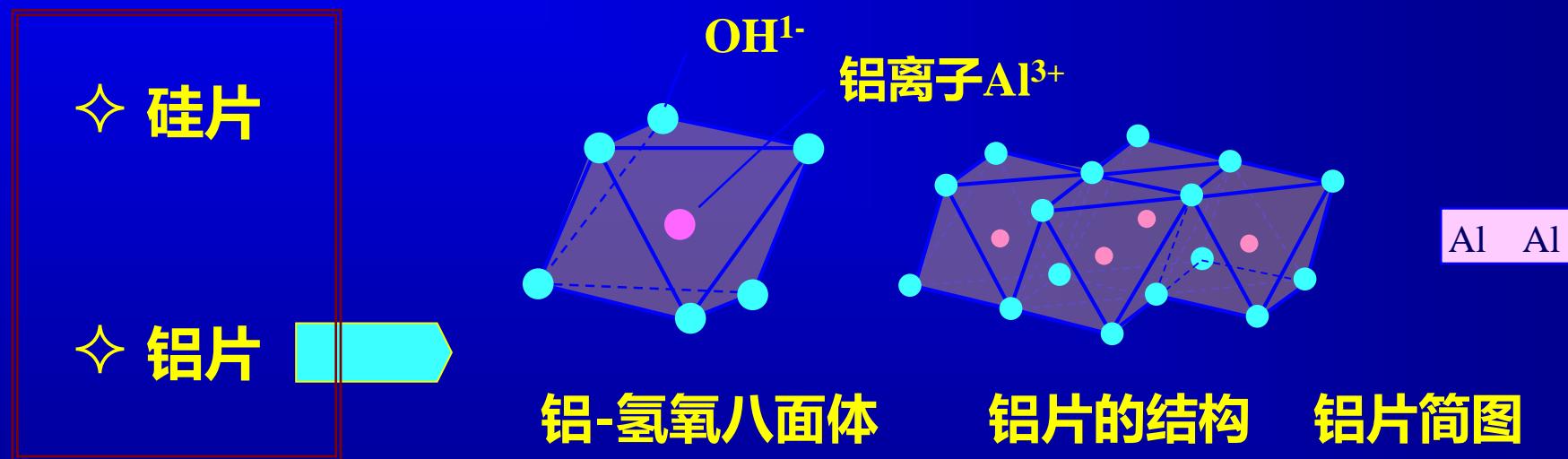


黏土矿物是一种复合的铝-硅酸盐晶体，颗粒呈片状，是由硅片和铝片构成的晶包所组合而成，可分成高岭石、伊利石和蒙脱石三种类型。



黏 土 矿 物

黏土矿物是一种复合的铝-硅酸盐晶体，颗粒呈片状，是由硅片和铝片构成的晶包所组叠而成，可分成高岭石、伊利石和蒙脱石三种类型。



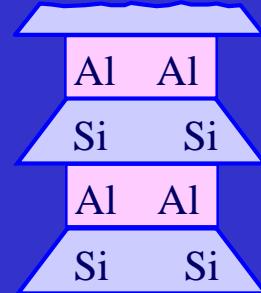
黏 土 矿 物

硅片和铝片组叠形
式可分成三种类型：

1:1的两
层结构



高岭
石微粒



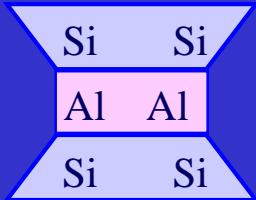
- ✧ 高岭石
- ✧ 蒙脱石
- ✧ 伊利石

- **晶层间**通过氢键联结，联结力强，晶格不能自由活动，水难以进入晶格间
- 主要特征：颗粒较粗，不容易吸水膨胀和失水收缩，或者说亲水能力差

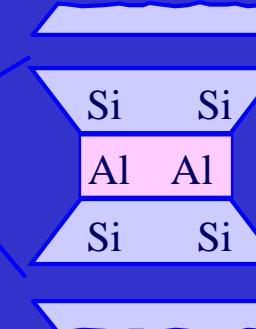
黏 土 矿 物

硅片和铝片组叠形
式可分成三种类型：

2:1的三
层结构



数层
水分子



- ✧ 高岭石
- ✧ 蒙脱石
- ✧ 伊利石

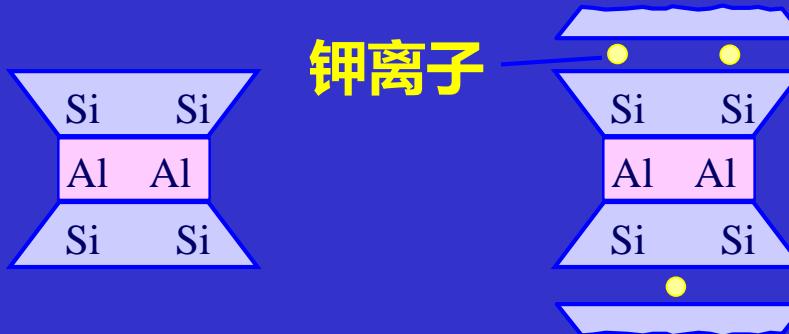
- 晶层间是O²⁻对O²⁻的连结，联结力很弱，
水很容易进入晶层之间
- 主要特征：颗粒细微，具有显著的吸水
膨胀、失水收缩的特性，或者说亲水能
力强

黏 土 矿 物

依硅片和铝片组叠形式的不同，可分成如下三种类型：

- ✧ 高岭石
- ✧ 蒙脱石
- ✧ 伊利石

2:1的三
层结构



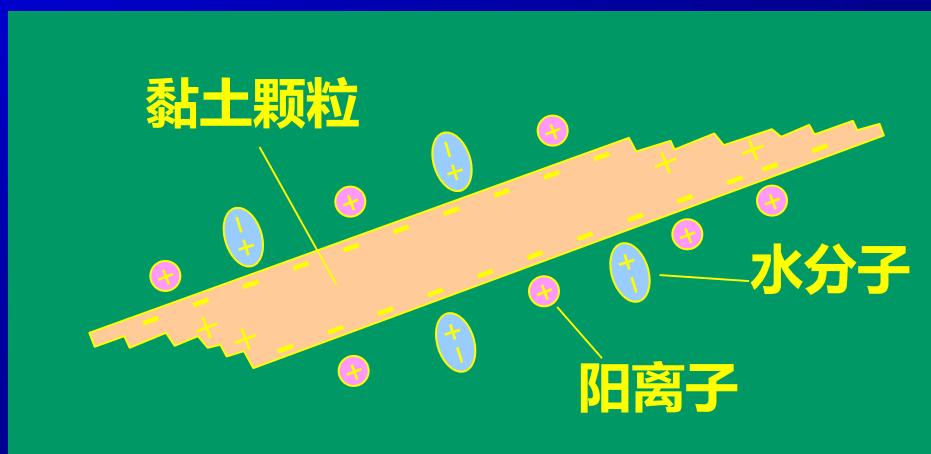
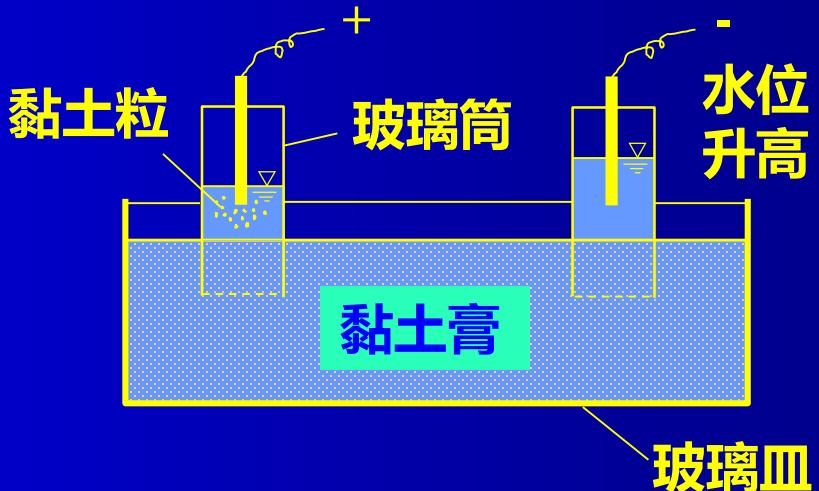
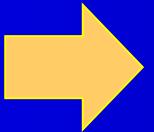
- 与蒙脱石相似，由两层硅片夹一层铝片所形成的三层结构，但晶层之间有钾离子连结。
- 主要特征：连结强度弱于高岭石而高于蒙脱石，其特征也介于两者之间

黏 土 矿 物

黏土的电泳和电渗现象 (列依斯, 1809)

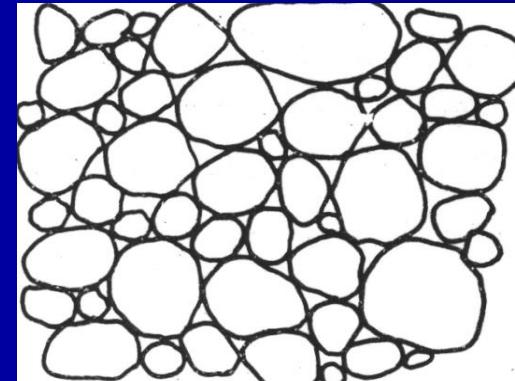
黏土矿物的带电性质

研究表明，片状黏土颗粒表面常带有电荷，净电荷通常为负电荷

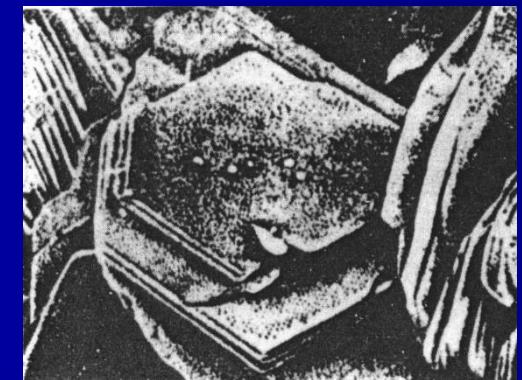


黏土矿物的带电特性

- ✧ 原生矿物：一般颗粒较粗，多呈粒状。
- ✧ 次生矿物：颗粒较细，多呈针状、片状等。
- ✧ 比表面积：单位质量土颗粒所拥有的总表面积。
代表黏性土特征的一个很重要的指标。
- ✧ 高岭石的比表面积为：
- ✧ $10\text{-}20\text{m}^2/\text{g}$, 伊利石： $80\text{-}100\text{m}^2/\text{g}$, 蒙脱石： $800\text{m}^2/\text{g}$



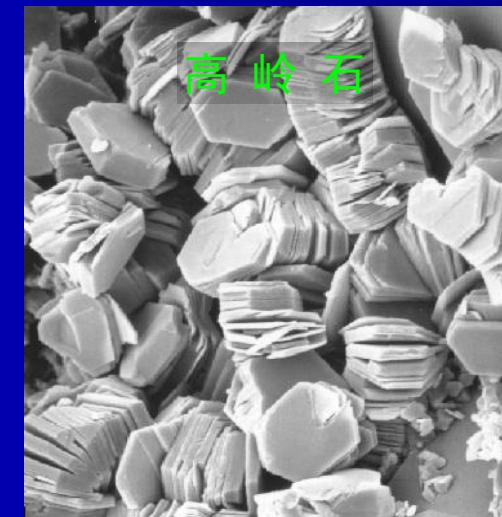
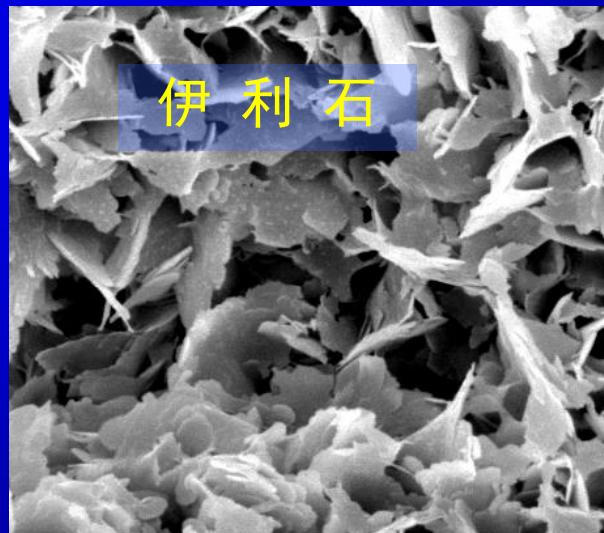
粗颗粒的形状



黏土颗粒的形状

颗粒形状和比表面积

粘土矿物



亲水性： 蒙脱石>伊利石>高岭石



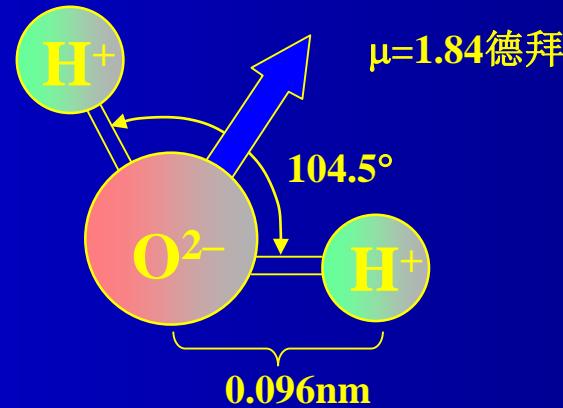
- ☞ 结晶水 矿物内部的水
- ☞ 结合水 吸附在土颗粒表面的水
- ☞ 自由水 电场引力作用范围之外的水

- ☞ 土中冰 由自由水冻成，冻胀融沉
- ☞ 水蒸气 存在孔隙空气中

土 中 水

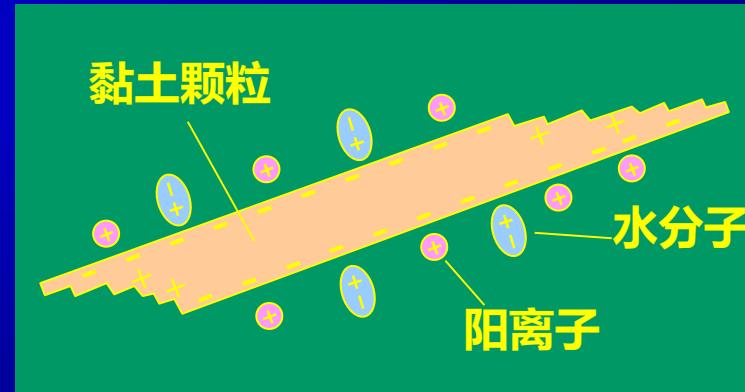
■ 水分子的结构：

水分子的正负电荷总体是平衡的，但在空间分布上却是不平衡的。因此，水分子是极性分子



■ 双电层：

- 黏土颗粒表面带负电，形成电场。水中阳离子被吸引，极性水分子发生定向排列
- 颗粒表面的负电荷构成电场的内层，吸引的阳离子和定向排列的水分子构成外层，称为双电层



黏土颗粒周围的双电层

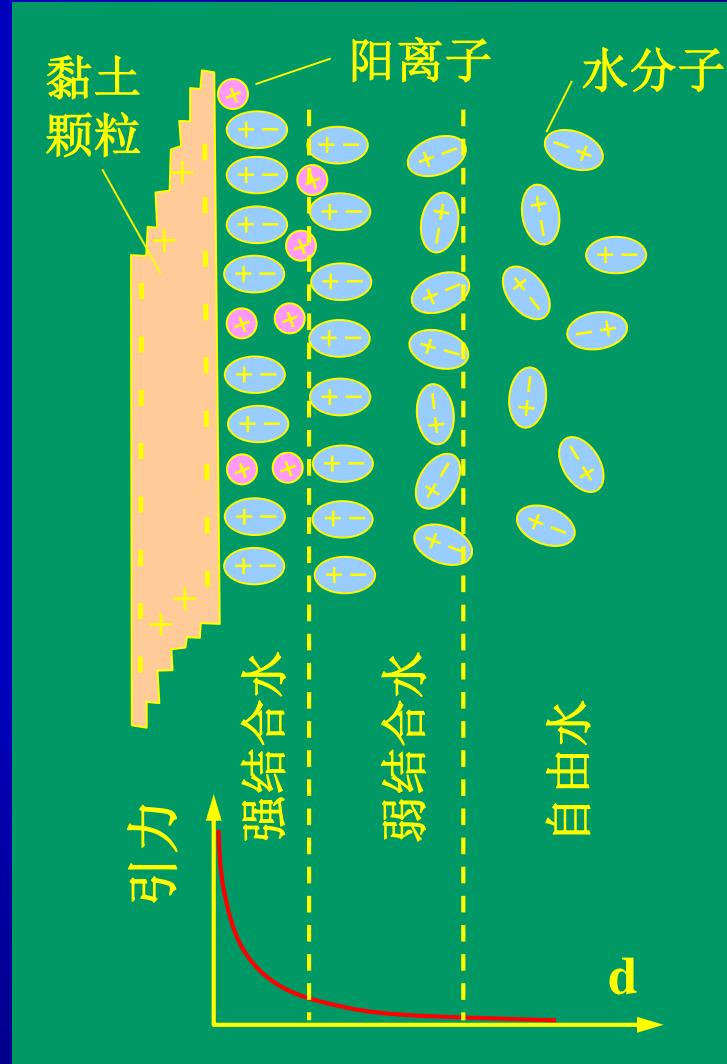
■ 结合水：受颗粒表面电场作用力吸引而包围在颗粒四周，不传递静水压力，不能任意流动的水

强结合水

- 排列致密，密度 $>1\text{g/cm}^3$
- 冰点处于零下几十度
- 完全不能移动，具有固体的特性
- 温度略高于100°C时可蒸发

弱结合水

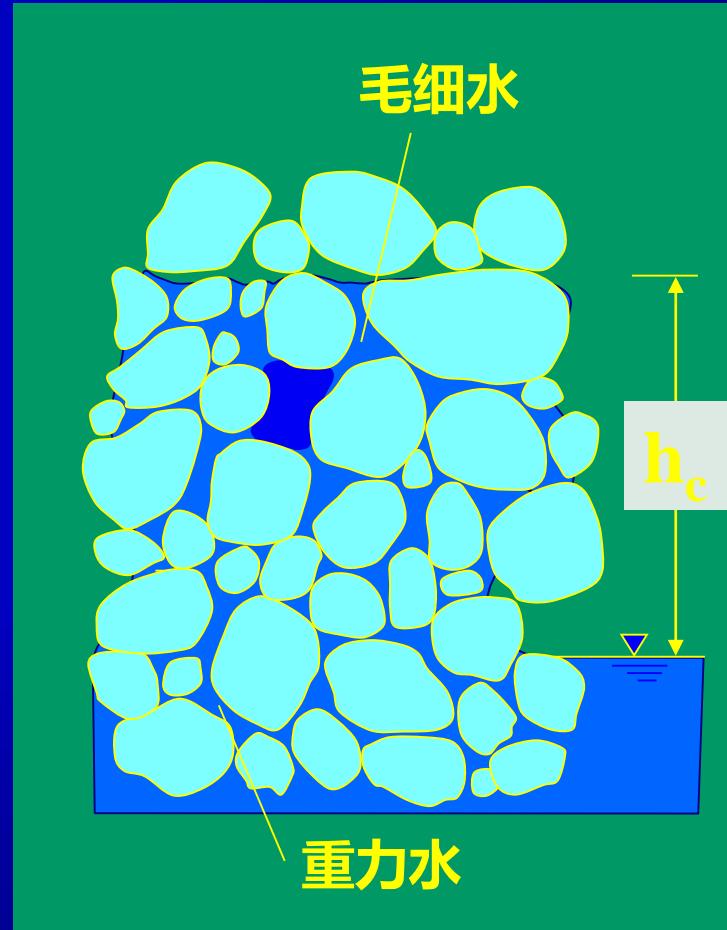
- 受电场引力作用，为黏滞水膜
- 外力作用下可以移动
- 不因重力而流动，有黏滞性
- 是黏性土表现出可塑性的原因



土中水 – 结合水

■ 自由水：不受颗粒电场引力作用的孔隙水

- 毛细水：由于土体孔隙的毛细作用升至自由水面以上的水。毛细水承受表面张力和重力的作用
- 重力水：自由水面以下的孔隙自由水，在重力作用下可在土中自由流动



土中水 – 自由水

☞ **自由气体：**

☞ **与大气连通的气体对土的性质影响不大**

☞ **封闭气体：**

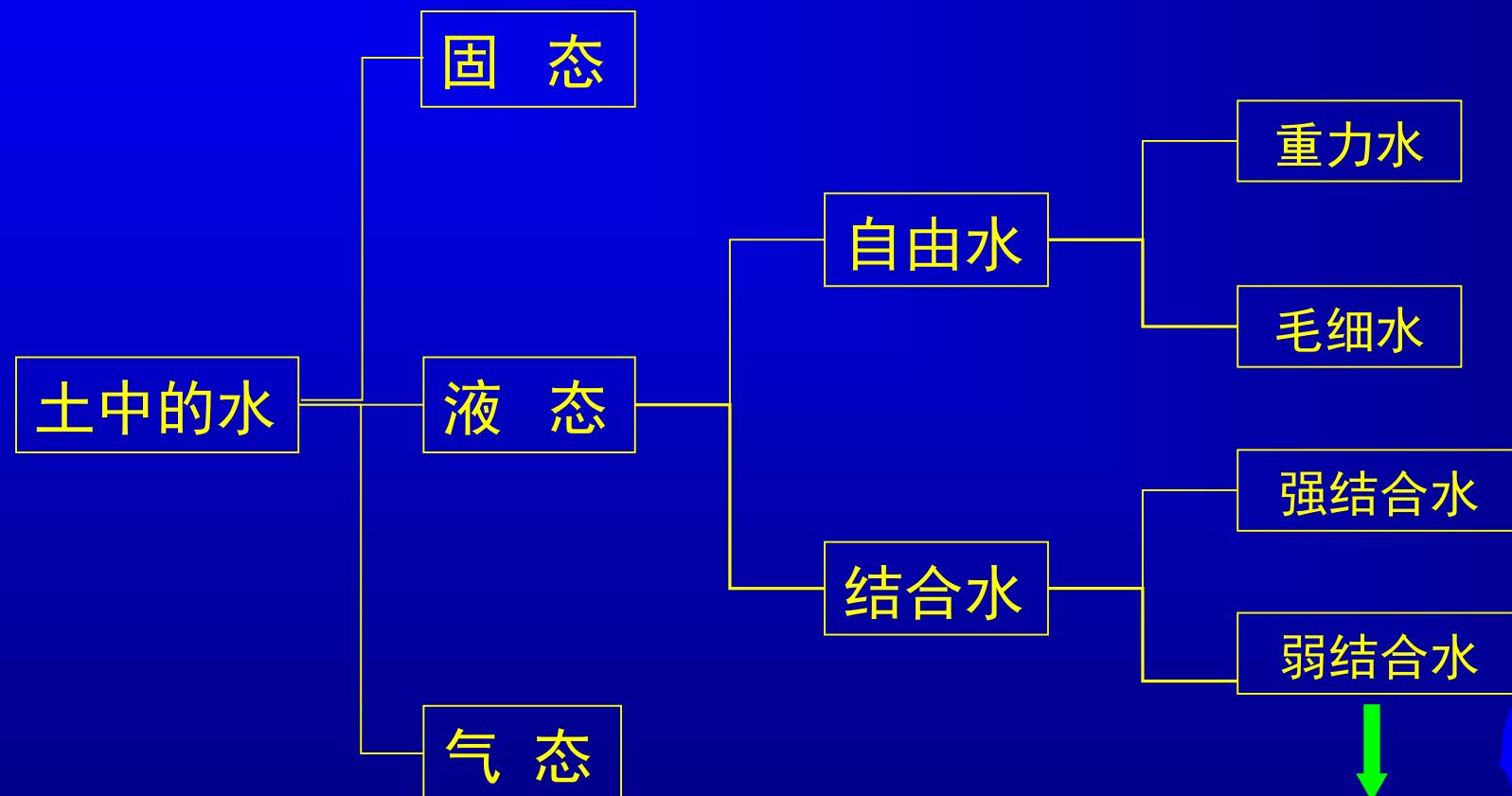
☞ **被土颗粒和水封闭的气体**

其体积与压力有关。会增加土的弹性；阻塞渗流通道，降低渗透性

气相 - 土中气

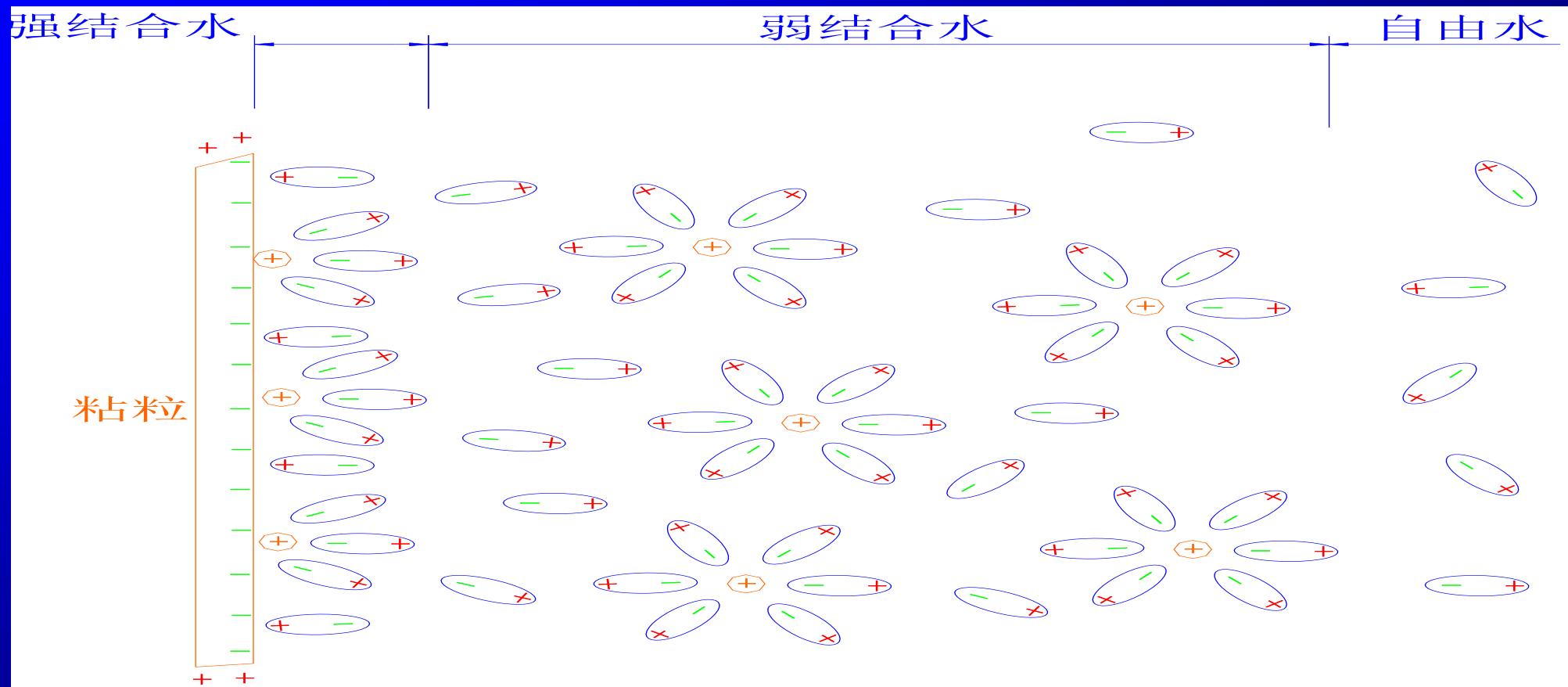
土中的水和气体

1. 土中的水



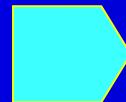
粘性土的性质





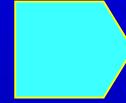
土体有三个组成部分：固相、液相和气相

☞ 固体颗粒



粒径级配
矿物成分
颗粒形状

☞ 土中水



结合水：强结合水、弱结合水
自由水：重力水、毛细水

☞ 土中气体



自由气体
封闭气体

小结

§1.3 土的三相比例指标

☞ 土的性质不仅决定于三相组成的性质，而且三相比例关系也是很重要的影响因素

**土的物理性质指标
(三相间的比例关系)**



土的物理状态指标
粗粒土的松密程度
黏性土的软硬状态

土的物理状态

土的物理
性质指标

定义

土的三个组成相的体积
和质量上的比例关系

- ✧ 特点：指标概念简单，数量很多
- ✧ 要点：名称、概念或定义、符号、表达式、
单位或量纲、常见值或范围、联系与区别
- ✧ 基本方法：三相草图法

物理性质指标



三相草图

九个物理量:

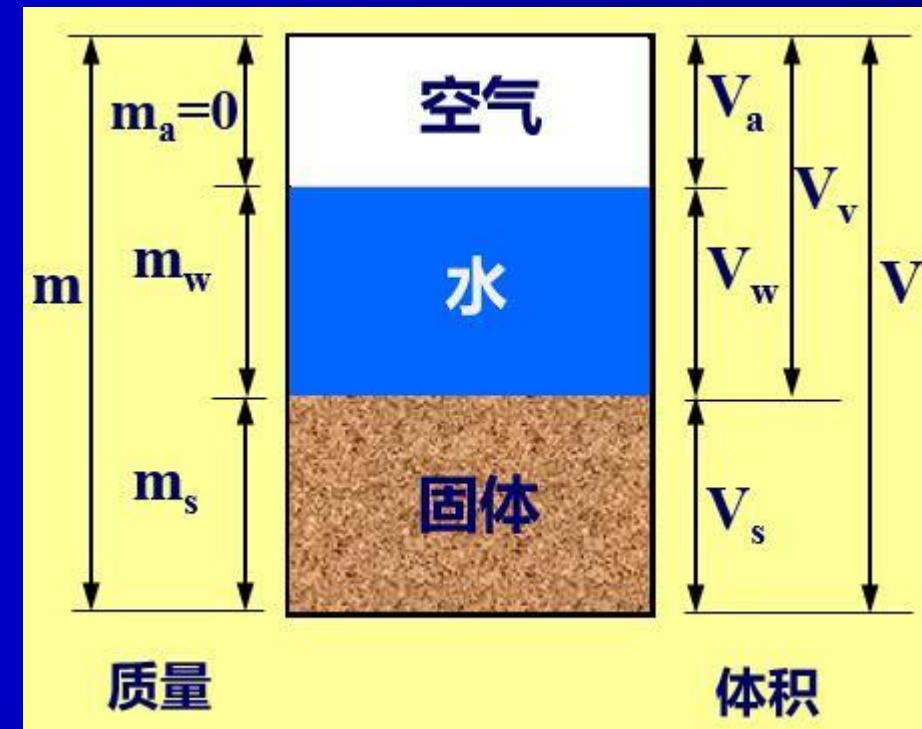
V V_v V_s V_a V_w
 m_s m_w m_a m

物性指标是比例关系: 可假设任一参数为1

物理量关系:

$$m = m_s + m_w + m_a$$
$$m_a \approx 0$$
$$m_w = \rho_w V_w$$

$$V = V_s + V_a + V_w$$
$$V_v = V_a + V_w$$



三个独立变量,
干土或饱和土二
个独立变量

实验室
测定

其它指标:
三相草图法计算

三相草图

三个基本的物理性质试验：

指向图标 **土的密度试验**

指向图标 **土粒比重试验**

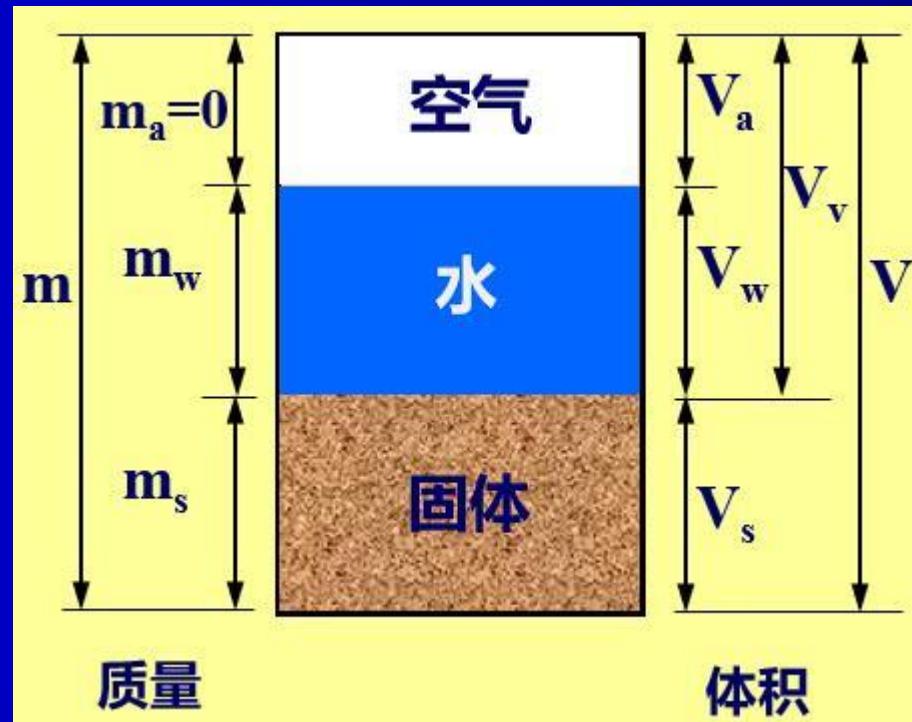
指向图标 **土的含水量试验**

三个直接指标

基本物理性质试验

■ 土的密度 ρ

- 定义：土单位体积的质量
- 表达式：
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a}$$
- 单位： kg/m^3 或 g/cm^3
- 一般范围： $1.60\sim2.20 \text{ g/cm}^3$



相关指标: 土的重度 $\gamma = \rho g$
单位: kN/m^3

工程上更常用,
用于计算土的自重应力

基本试验指标-土的密度

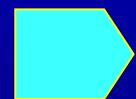
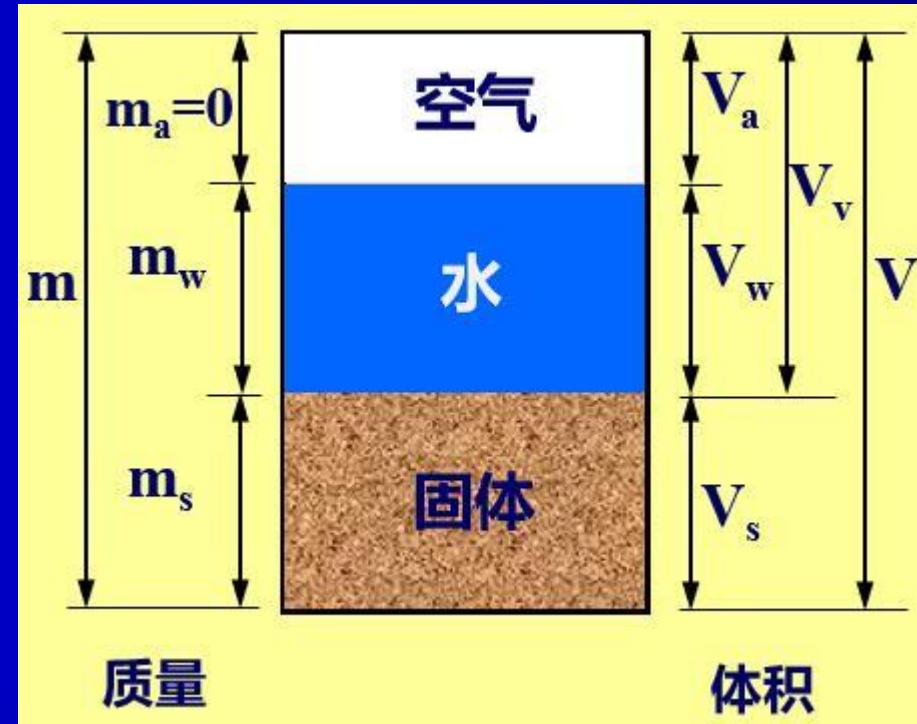
■ 土粒比重 G_s

- 定义：土粒的密度与4°C时纯蒸馏水密度的比值

- 表达式：
$$G_s = \frac{m_s}{V_s(\rho_w^{4^\circ\text{C}})} = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4^\circ\text{C}}}$$

- 单位：无量纲

- 一般范围：黏性土 2.70~2.75, 砂土 2.65



$$\rho_w^{4^\circ\text{C}} = 1.0 \text{ g/cm}^3$$



土粒比重在数值上
等于土粒的密度

基本试验指标-土粒比重

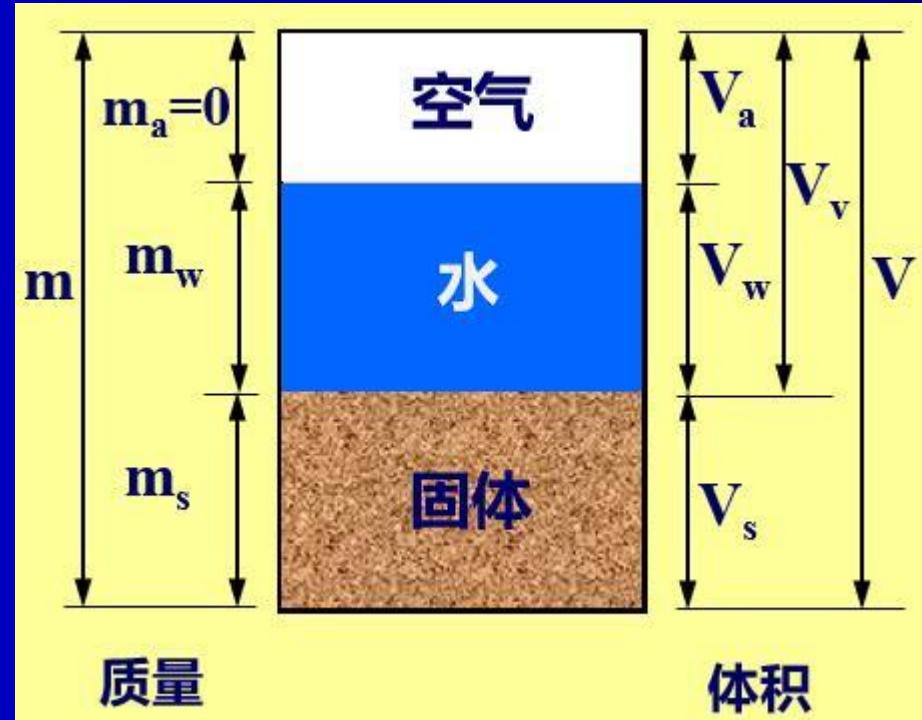
■ 土的含水量 W

- 定义：土中水的质量与土粒质量之比，用百分数表示

- 表达式：
$$w(\%) = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s}$$

- 单位：无量纲
- 一般范围：变化范围大

► 注意：其实是含水比，可达到或超过100%



基本试验指标 - 含水量

- 孔隙比 e : 土中孔隙体积与固体颗粒体积之比, 为无量纲

$$e = V_v / V_s$$

- 孔隙率(孔隙度) n : 土中孔隙体积与总体积之比, 用百分数表示

$$n(\%) = V_v / V$$

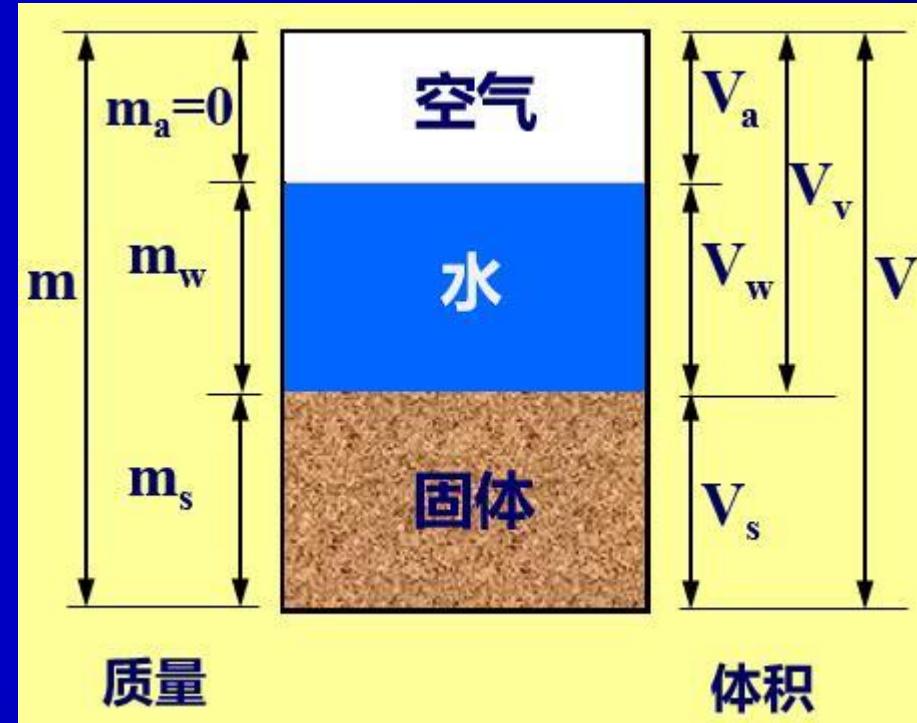
砂类土: 28-35%

黏性土: 30-50%, 有的可达60-70%

- 可表示同一种土的松密, 二者之间存在关系:

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

$$e = \frac{n}{1-n}$$



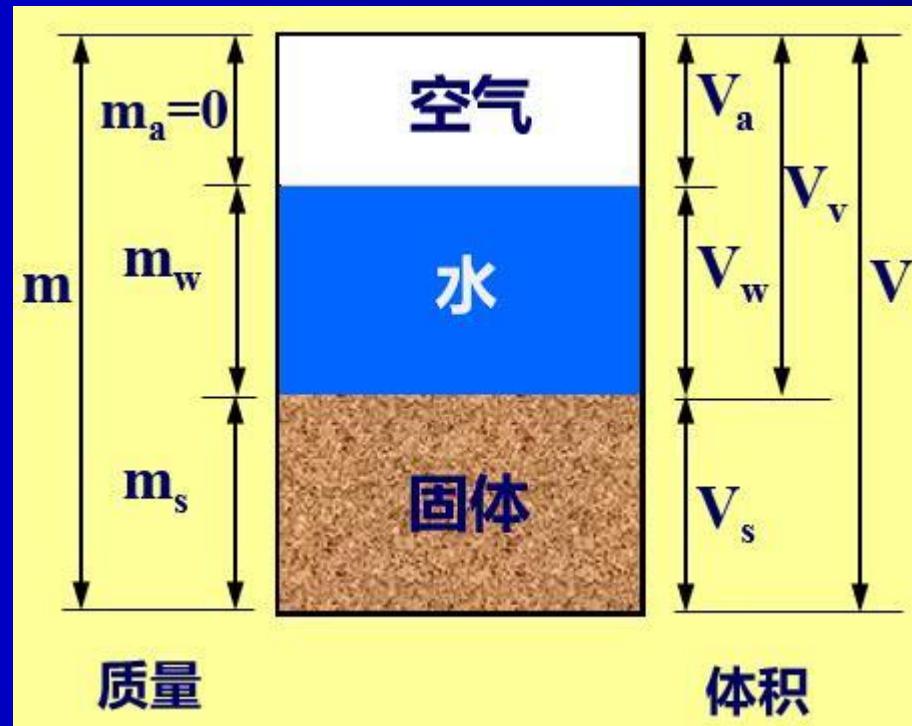
可用三相草图推出

表示土中孔隙含量的指标

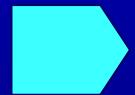
■ 含水量: $w(\%) = \frac{m_w}{m_s}$

■ 饱和度: 土中水的体积与孔隙体积的比值

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$



☞ 饱和度表示孔隙中充满水的程度:



对干土: $S_r=0$

对饱和土: $S_r=1$

表示土中含水程度的指标

■ 天然密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a}$$

天然重度

$$\gamma = \rho g$$

■ 干密度：土被烘干时的密度，

$$\rho_d = m_s / V$$

干重度：

$$\gamma_d = \rho_d g$$

■ 饱和密度：土被饱和时的密度，

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V}$$

饱和重度：

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$$

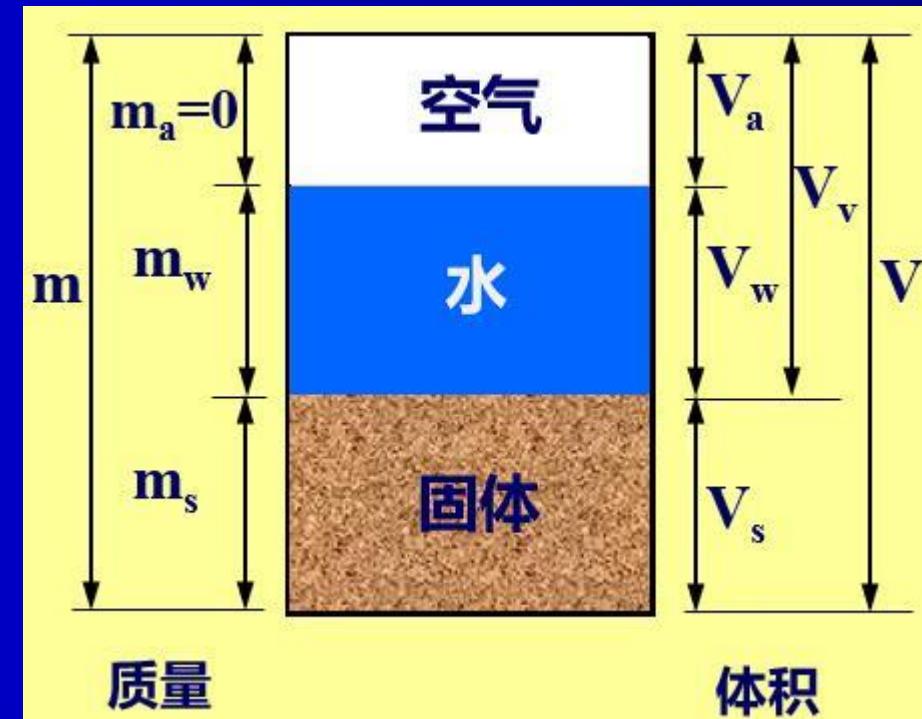
■ 浮重度：

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$



静水下的
有效重度

浮密度

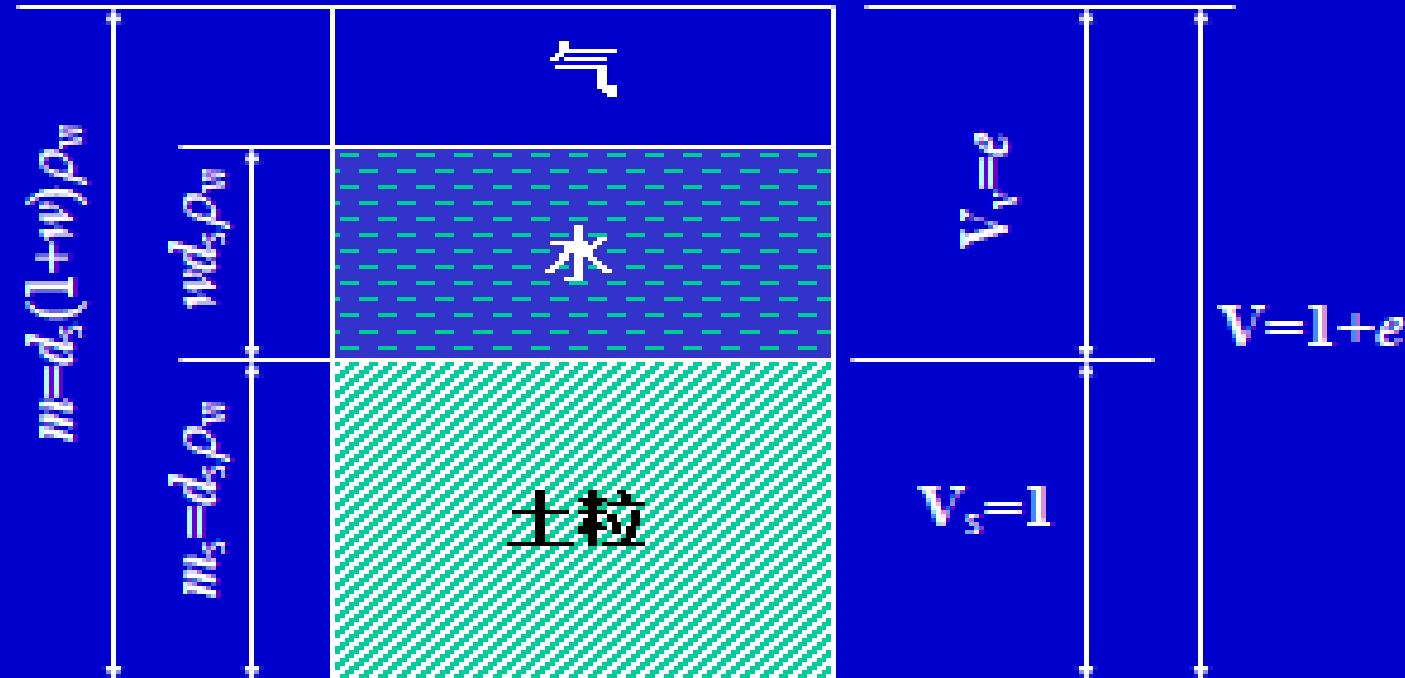


表示土体密度和重度的指标

指标的换算

质量

体积



土的三相组成简图

■ 天然密度

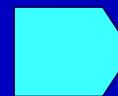
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V}$$

■ 干密度

$$\rho_d = m_s / V$$

■ 饱和密度

$$\rho_{sat} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V}$$



$$\rho_{sat} \geq \rho \geq \rho_d$$

■ 天然重度

$$\gamma = \rho g$$

■ 干重度

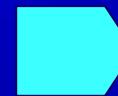
$$\gamma_d = \rho_d g$$

■ 饱和重度

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$$

■ 浮重度

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$



$$\gamma_{sat} \geq \gamma \geq \gamma_d > \gamma'$$

各种密度重度间的大小关系

土的物理
性质指标

土的三个组成相的体积和质
量上的比例关系

定义

室内测定三个基本
物理性质指标：

- ✧ 土的密度
- ✧ 土粒比重
- ✧ 土的含水量

三相草图法

其它物理性质指标

- ✧ 孔隙含量
- ✧ 含水程度
- ✧ 密度和重度

- 要点：
- 名称、概念或定义、符号、表达式、
单位或量纲、常见值或范围、联系与区别

小 结

§1.4 土的物理状态特性



土的物理性质指标 (三相间的比例关系)

表示

土的物理状态

粗粒土的松密程度
黏性土的软硬状态

密实度
稠度

影响

力学特性

土的物理状态指标

■ 粗粒土的密实度表征方法：

■ 密实度：通常指单位体积中固体颗粒含量的多少

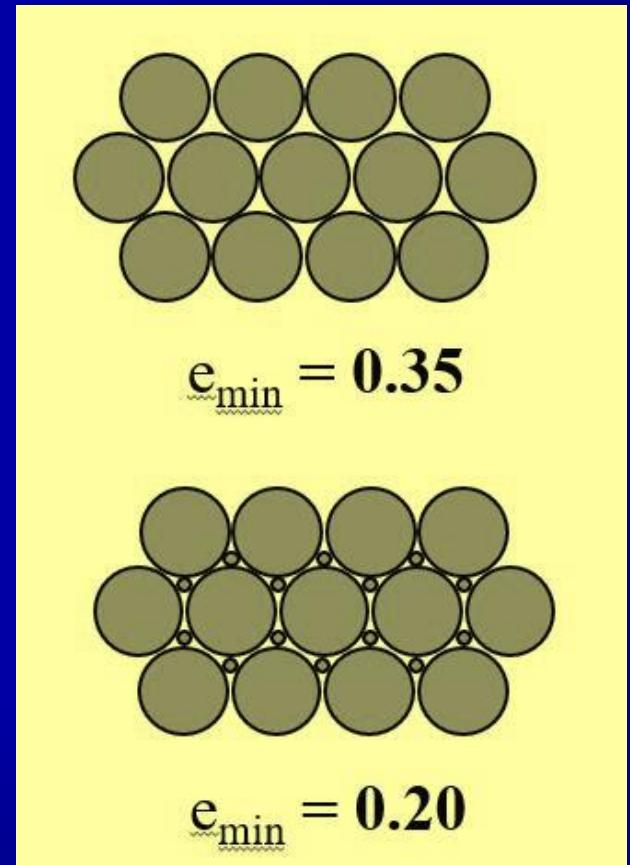
- (1) 物理性质指标：孔隙比 e (孔隙率 n)

干重度 ρ_d

► 简单方便，但只能用于同一种土，不能反映级配的影响

- (2) 相对密度： $D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

e_{max} 与 e_{min} ：最大与最小孔隙比



粗粒土的密实状态

- ☞ **最大孔隙比 e_{max}** : 将松散的风干土样通过长颈漏斗轻轻地倒入容器，避免重力冲击，求得土的最小干密度再经换算得到最大孔隙比
- ☞ **最小孔隙比 e_{min}** : 将松散的风干土样装入金属容器内，按规定方法振动和锤击，直至密度不再提高，求得土的最大干密度再经换算得到最小孔隙比

► 理论上的最大与最小孔隙比

在室内的测定有时很困难

粗粒土的最大与最小孔隙比

- 相对密度

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

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d min})\rho_{d max}}{(\rho_{d max} - \rho_{d min})\rho_d}$$

- 粗粒土的密实度标准

$D_r = 0$	
$D_r \leq 1/3$	
$1/3 < D_r \leq 2/3$	
$D_r > 2/3$	
$D_r = 1$	

最松状态
疏松状态
中密状态
密实状态
最密状态

粗粒土的相对密度

☞ 相对密度指标主要用于人工填土，对天然砂土层采用原位标准贯入试验法测定

(3) 标准贯入试验锤击数N

每次测试按要求贯入0.3m的锤击数N，称标贯击数N。

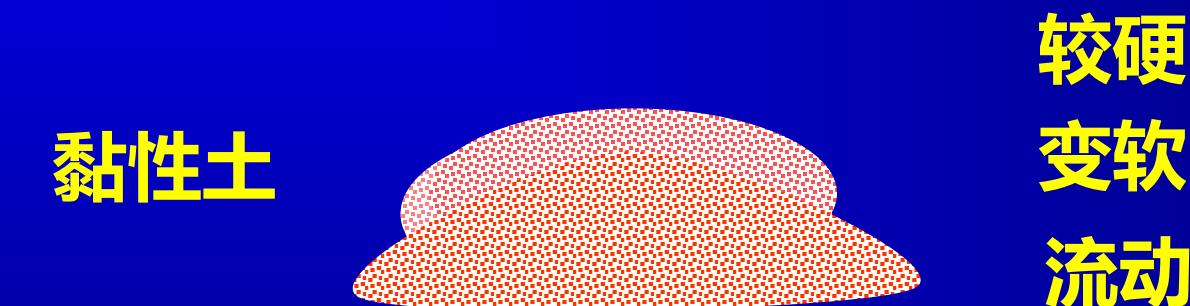
表 1—6 砂土的密实度

标贯击数 N	$N \leq 10$	$10 < N \leq 15$	$15 < N \leq 30$	$N > 30$
密实度	松散	稍密	中密	密实

黏性土的物理状态特征：

- 黏性土最主要的物理状态特征是它的**稠度**。
- 稠度是指土的软硬程度或土对外力引起变形或破坏的抵抗能力

► 稠度状态与含水量有关

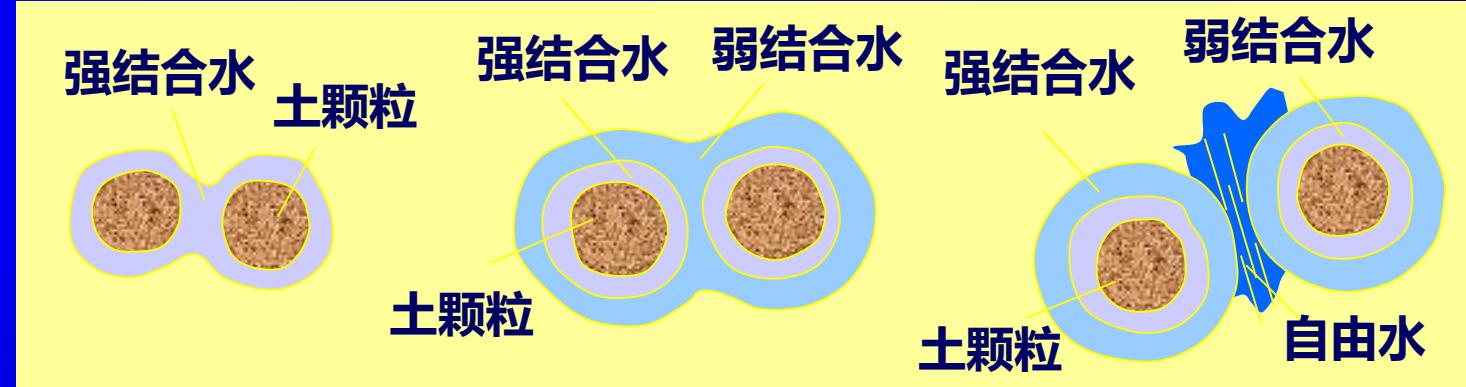


含水量 →

黏性土的稠度状态

示意图

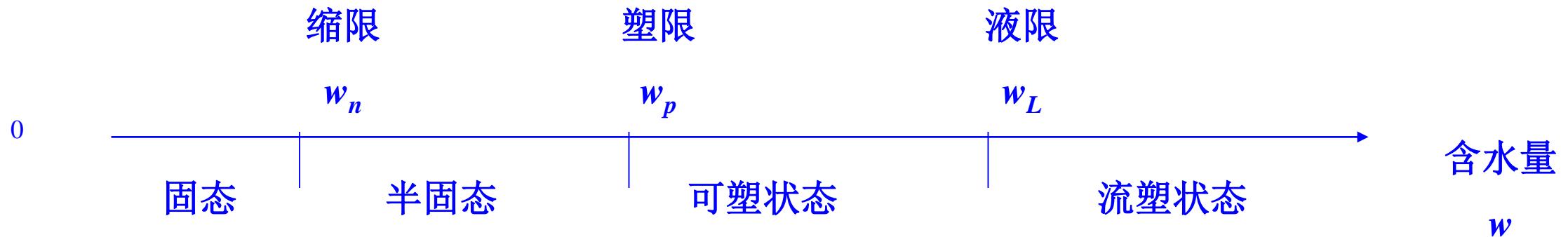
稠度状态
土中水的形态
含水量
稠度界限



► 黏性土的稠度反映土中水的形态

黏性土的稠度状态

界限含水量



土由可塑状态转移到流动状态的界限含水量称为液限 W_L ;

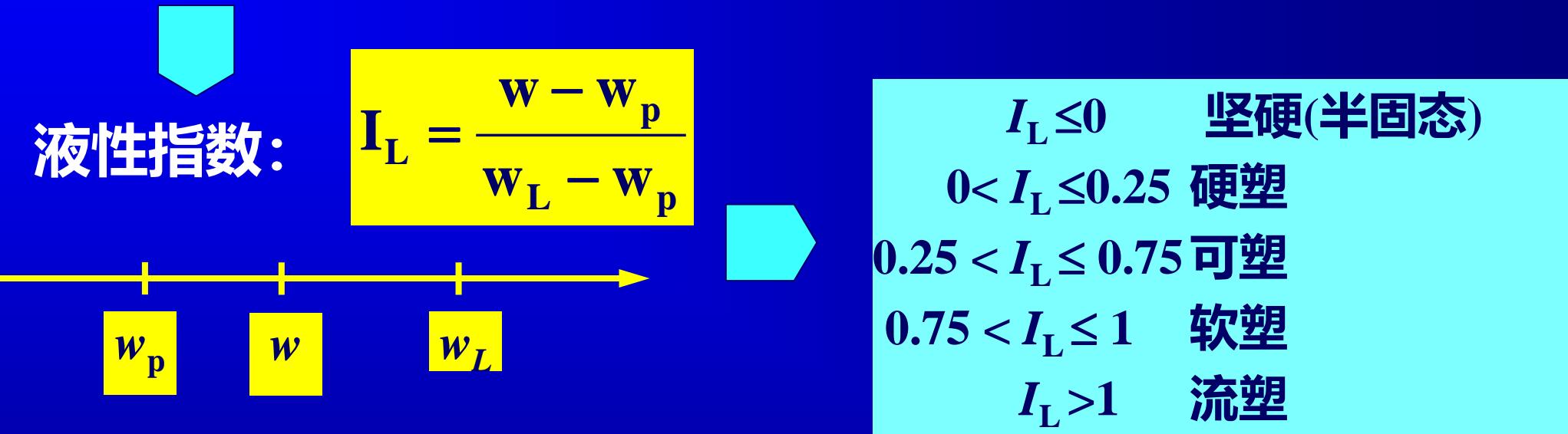
土由半固态转到可塑状态的界限含水量称为塑限 W_p ;

土由半固体状态不断蒸发水分，则体积逐渐缩小，直到体积不再缩小时土的界限含水量称为缩限 W_n 。

塑限和液限可采用锥式液塑限联合测定仪测定。



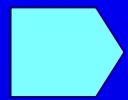
■ 不同的黏性土， w_p 、 w_L 大小不同。对于不同的黏性土，含水量相同，稠度可能不同



☞ 液性指数是表征土的含水量与分界含水量之间相对关系的指标。

土的稠度状态-液性指数

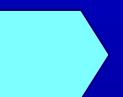
■ 定义: $I_p = w_L - w_p$ 大体上表示土的弱结合水含量



- 反映吸附结合水的能力，即黏性大小
- 大致反映黏土颗粒含量
- 细粒土工程分类的依据

■ 活性指数:

$$A = \frac{I_p}{P_{0.002}}$$



$A < 0.75$	非活性黏土
$A = 0.75 - 1.25$	正常黏土
$A > 1.25$	活性黏土



粒径小于0.002mm颗粒的质量占
总土总质量的百分比

塑性指数

☞ 粗粒土的密实状态指标：相对密度 D_r

- 定义
- 判别标准

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

☞ 细粒土的稠度状态指标：液性指数 I_L

- 定义
- 判别标准

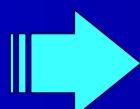
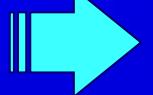
$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$$

- 界限含水量 w_p 、 w_L → 土中水形态
- 塑性指数 I_p → 吸附结合水的能力

小结

§1.5 土的结构

- 原状土和重塑土的强度
- 沉积或碾压土的各向异性
- ...



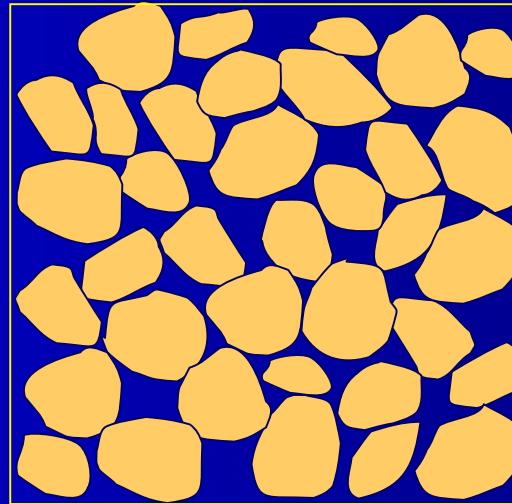
土颗粒或粒团的空间排列和相互联结

- 土粒间的作用力
- 粗粒土的结构
- 细粒土的结构
- 黏性土的结构性指标

土 的 结 构

☞ 粒间作用力：重力起决定性的作用。在非饱和土中，还受到毛细力的作用

☞ 排列形式：点与点
点与面



单粒结构示意图

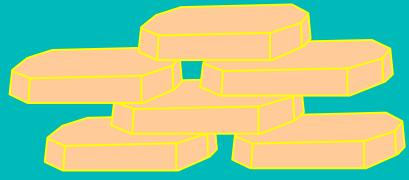
粗粒土的结构

土中细颗粒，比表面积大，重量轻，重力不起重要的作用，其他粒间力起主导作用：

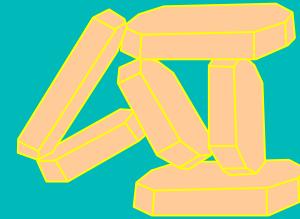
- 范德华力：接触点处的分子引力，作用范围为几个分子的距离，
是细粒土黏结在一起的主因
- 库仑力：
颗粒表面的静电引力或斥力，随距离衰减的速度比范德华力慢
- 胶结力：
土粒间通过胶体连结在一起，作用力是化合键，具有较高的强度
- 毛细力：
土中毛细作用形成的力

细土颗粒间的作用力

示意图



蜂窝结构



絮凝结构

- 形成环境
- 粒间作用力
- 排列形式

淡水中沉积

表面力、胶结力
(粒间斥力占优势)

面与面

海水中沉积

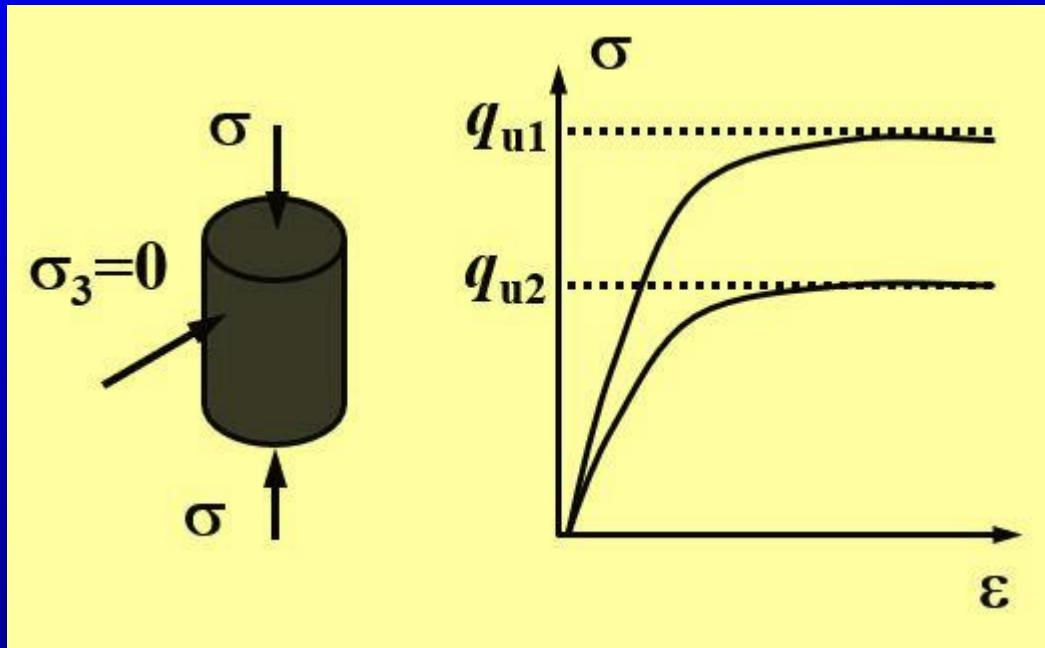
表面力、胶结力
(斥力减小引力增加)

边、角与面
边、角与边

细粒土的结构

- 灵敏度
- 触变性

→ 灵敏度 S_t : 原状土的无侧限抗压强度 q_{u1} 和重塑土的无侧限抗压强度 q_{u2} 之比



原状土
重塑土
相同含水量、密度

S_t	黏性土
1	不灵敏
1-2	低灵敏
2-4	中等灵敏
4-8	灵敏
8-	很灵敏
16	流动
>16	

反映黏性土结构性的指标

- 灵敏度
- 触变性



含水量不变，密度不变，因重塑而强度降低，又因静置而逐渐强化，强度逐渐恢复的现象，称为**触变性**。

☞ 土的触变性是土结构中联结形态发生变化引起的，是土结构随时间变化的宏观表现

反映黏性土结构性的指标

土的结构

土颗粒或粒团的空间排列和相互联结

粗粒土的结构

单粒结构

细粒土的结构

蜂窝结构 絮凝结构

重力起主导作用

粒间力起主导作用

黏性土的结构性指标

小 结

§1.6 土的工程分类



目的：

- 便于调查研究；
- 便于分析评价；
- 便于交流（基于共同的概念）



依据：最能反映土的物理力学性质的指标



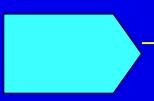
土的组成
土的状态
土的结构



《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011分类法

土的工程分类

土
岩石
碎石土
砂土
粉土
黏性土
人工填土



名称	颗粒形状	粒组含量
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于200mm的颗粒超过全质量50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于20mm的颗粒超过全质量50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于2mm的颗粒超过全质量50%
角砾	棱角形为主	

土

岩石
碎石土
砂土
粉土
黏性土
人工填土

土的名称



砾砂

粗砂

中砂

细砂

粉砂

粒组含量

粒径大于2mm的颗粒占全质量25 - 50%

粒径大于0.5mm的颗粒超过全质量50%

粒径大于0.25mm的颗粒超过全质量50%

粒径大于0.075mm的颗粒超过全质量85%

粒径大于0.075mm的颗粒超过全质量50%

土

岩石
碎石土
砂土
粉土
黏性土
人工填土

■ 粉土：粒径大于0.075mm的颗粒含量
小于全质量50%而塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土

■ 黏性土：塑性指数 $I_p > 10$ 的土

- ◆ 粉质黏土： $10 < I_p \leq 17$ 的土
- ◆ 黏 土： $I_p > 17$ 的土

- 非活性黏土： $A < 0.75$
- 正常黏土 $A = 0.75 - 1.25$
- 活性黏土 $A > 1.25$

建筑地基基础规范GB50007-2011

■ 土的分类

- 巨粒土和含巨粒土
- 粗粒土：砾类土、砂类土
- 细粒土：根据塑性图分类
- 特殊土：黄土、膨胀土、红黏土

水利部SL237-1999分类法

- 分类依据：
 - 土颗粒组成及其特性
 - 塑性指标：液限、塑限、塑性指数
 - 有机质含量

§1.7 土的压实性

土的压实性

- ☞ 室内击实试验
- ☞ 细粒土的压实性
- ☞ 粗粒土的压实性

- 土的压实：指通过夯实、振动、碾压等，使土体变得密实、以提高土的强度、减小土的压缩性和渗透性
 - 压实性：指土在一定压实能量作用下密度增长的特性
-
- 研究击实性的目的：
以最小的能量消耗获得最大的压实密度
 - 击实方法：
 - 室内击实试验
 - 现场试验：夯实、振动、碾压
- ## 土的压实性

☞ 试验设备：击实筒 $V=947.4\text{cm}^3$ ；击实锤 $w=25$ 牛顿

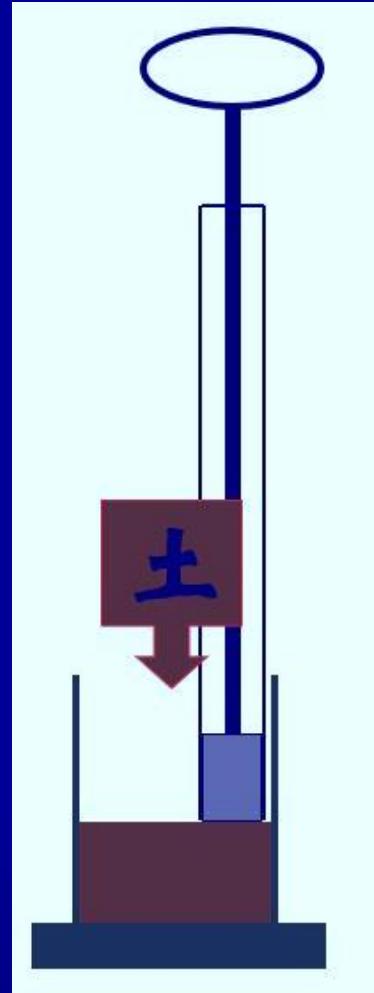
☞ 试验条件：土样分层 $n=3$ 层；落高 $d=30.5\text{cm}$ ；
击数 $N=25/\text{层}$

☞ 击实能量

$$E = \frac{wdNn}{V} = 603.6 \text{KN}\cdot\text{m} / \text{m}^3$$

☞ 试验方法：对 $w=\text{const}$ 的土，分三层压实；
测定击实后的 w 、 ρ ，算定 ρ_d

☞ 注意：仅适用于细粒土；
对粗粒土，可用较大尺寸的击实仪



室内轻型标准击实试验

■ 具有峰值

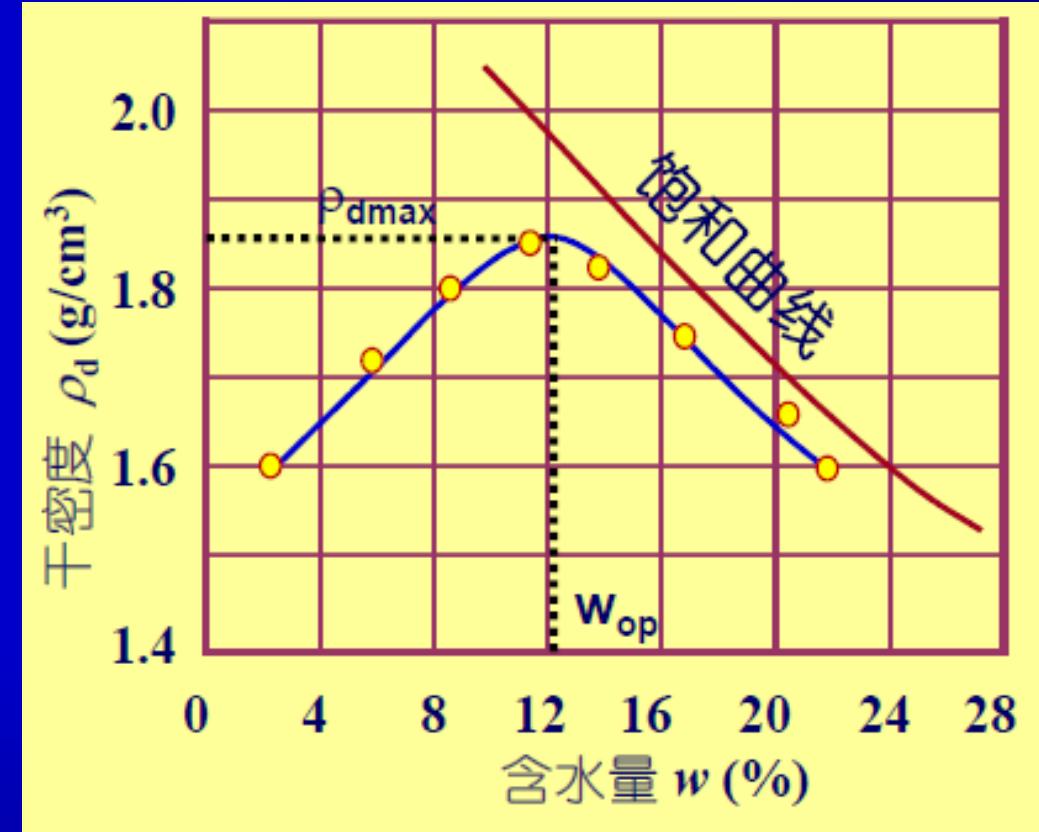
- 最大干密度 ρ_{dmax}

- 最优含水量 W_{op}

- 位于饱和曲线之下

$$\rho_d < (\rho_d)_{sat}$$

黏性土透水性小，击实过程中含水量几乎不变，要想击实到饱和状态是不可能的



$$\rho_d = \frac{G_s \rho_w}{1 + G_s w / S_r} \quad S_r=1 \rightarrow (\rho_d)_{sat} = \frac{G_s \rho_w}{1 + G_s w}$$

细粒土的压实性-击实曲线

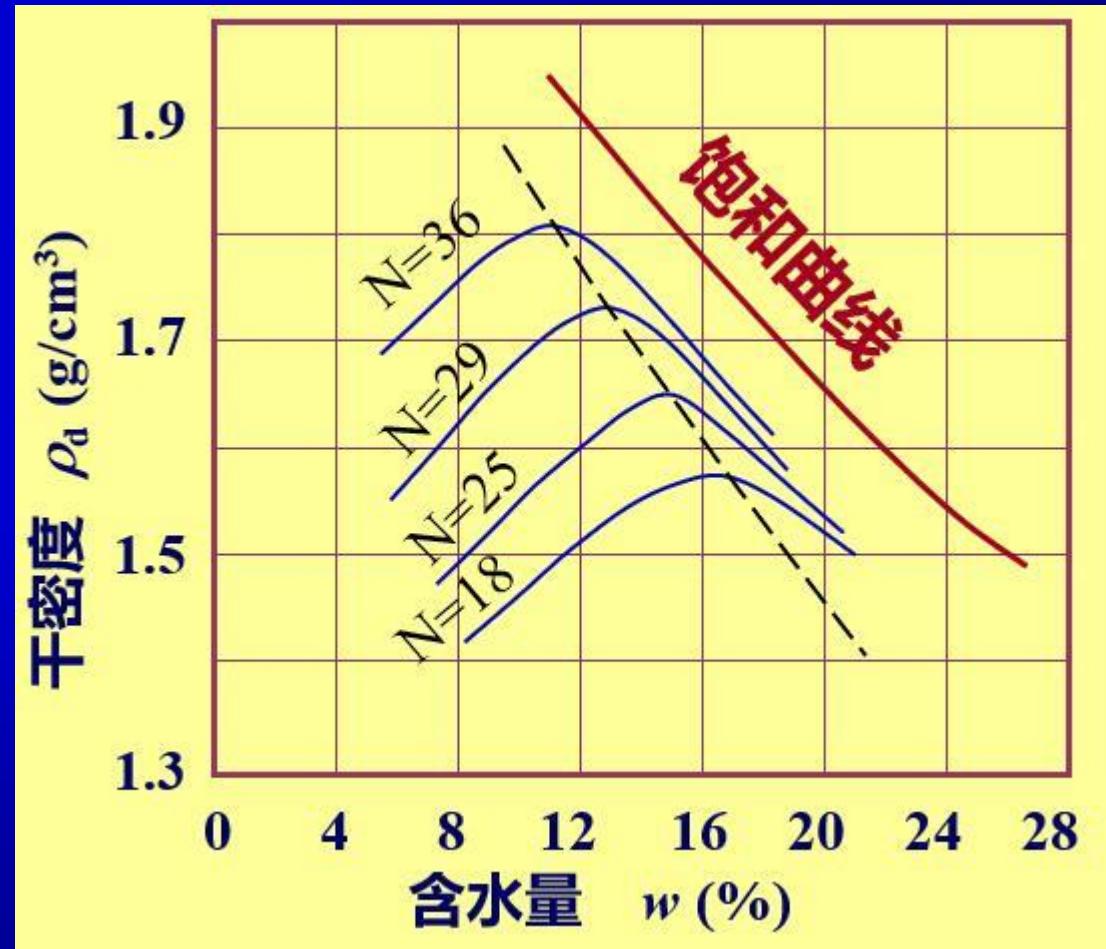
- **压实机理**
 - 颗粒破碎 (细粒土较少)
 - 粒间联结力被破坏，颗粒间孔隙被压缩
 - 土粒定向排列

- **压实与含水量**

- 含水量 $< W_{op}$: 颗粒表面水膜很薄，相对移动困难
- 含水量 = W_{op} : 水膜润滑作用效果最佳，孔隙气尚未形成封闭气泡，易排出
- 含水量 $> W_{op}$: 水膜润滑作用不再明显增加；封闭气泡难以排出；水的相对含量增加

细粒土的压实性-压实机理

- 对于同一种土,最优含水量和最大干密度并不恒定,而随压密功能变化,压实功能愈大,最优含水量愈小,相应的最大干密度愈高
- 超过最优含水量后,压实功能的影响随含水量的增加逐渐减小。击实曲线均靠近于饱和曲线

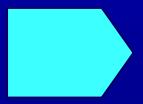


细粒土的压实性-压实功能

填土施工时应将土料含水量控制在 W_{op} 左右，以期用较小的能量获得最好的密度：

- 在 W_{op} 的干侧：常具有凝聚结构。土质比较均匀，强度较高，较脆硬，不易压密。但浸水时易产生附加沉降
- 在 W_{op} 的湿侧：常具有分散结构。土体可塑性大，适应变形的能力强。但强度较低，具有不等向性

在设计土料时应根据填土的要求和当地土料的天然含水量，选定合适的含水量，一般要求为：

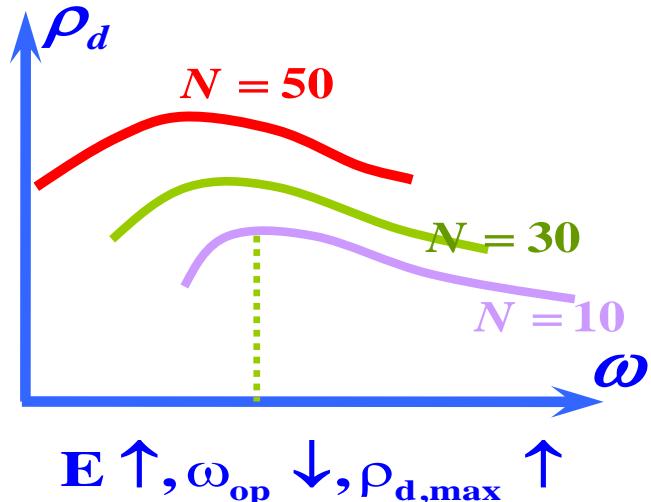


$$w = w_{op} \pm 2\%$$

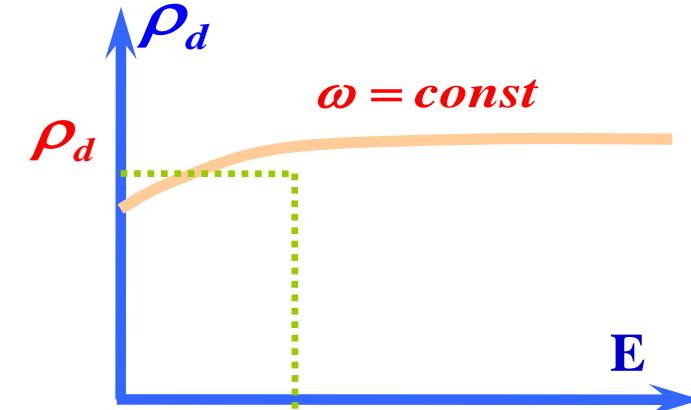
细粒土的压实标准

2. 影响因素

a. 击实功能

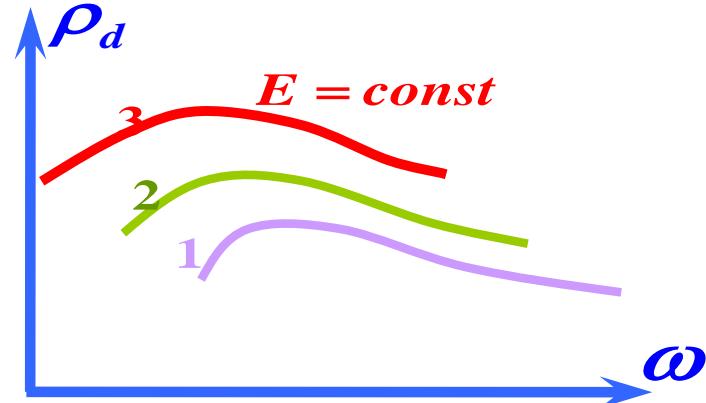


$E \uparrow, \omega_{op} \downarrow, \rho_{d,max} \uparrow$



$\omega = const, E \uparrow, \rho_d$ 存在一个上界

b. 土的级配



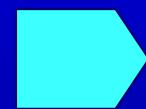
级配越好，其 $\rho_{d,max}$ 越大， ω_{op} 越小。

c. 击实方式

夯实、碾压、振动； 碾压对粘土比较合适，夯实对粗粒土较适合

■ 工程上常采用压实度 λ ，作为填方压实密度控制的标准：

$$\lambda = \frac{\text{填土的干密度}}{\text{室内标准击实试验的 } \rho_{d\max}} \times 100\%$$

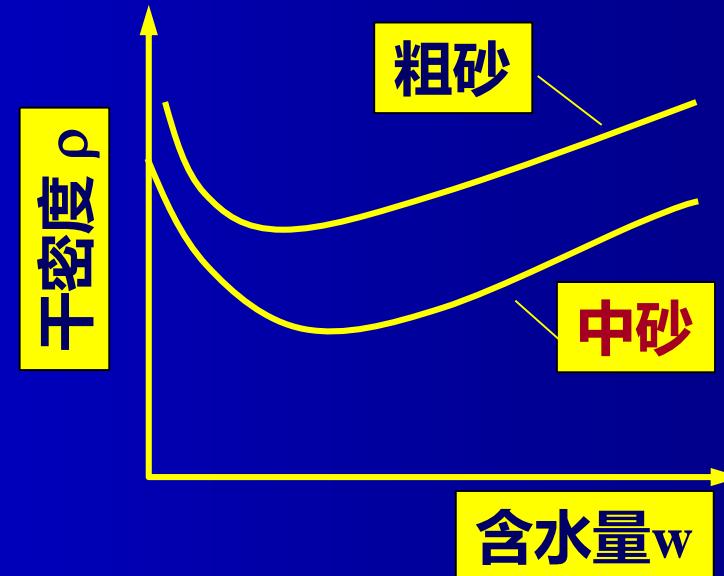


I、II级土石坝 $D_c > 98\sim 100\%$
III级以下土石坝 $D_c > 96\sim 98\%$

细粒土的压实标准

■ 击实曲线

- 不存在最优含水量，在完全风干或饱和状态下易于击实。在潮湿状态下，存在假凝聚力，加大了阻力
- 同细粒土不同，粗粒土在击实过程中可以自由排水
- 粗砂 $w=4\sim 5\%$ ，中砂 $w=7\%$ 时，干密度最小，



■ 压实标准：常用相对密度控制 $Dr>0.75$

粗粒土的压实性

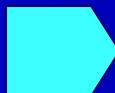


室内击实试验

- 击实曲线
- 最优含水量
- 最大干密度
- 压实功能
- 压实标准



细粒土的压实性



粗粒土的压实性



- 击实曲线
- 压实标准

小 结

第一章：土的物理性质与工程分类

§1.1 土的形成

§1.2 土的三相组成

§1.3 土的三相比例指标

§1.4 土的物理状态

§1.5 土的结构

§1.6 土的工程分类

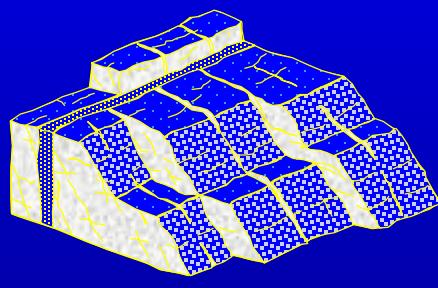
§1.7 土的压实性

过程、条件

土的组成、结构
和物理力学性质

风化、搬运、沉积

地质成岩作用

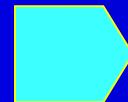


土

土 的 形 成

土体有三个组成部分：固相、液相和气相

☞ 固体颗粒

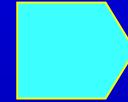


粒径级配

矿物成分

颗粒形状

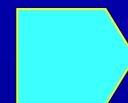
☞ 土中水



结合水：强结合水、弱结合水

自由水：重力水、毛细水

☞ 土中气体



自由气体

封闭气体

土的三相组成

土的物理
性质指标

定义

土的三个组成相的体积和质
量上的比例关系

室内测定三个基本
物理性质指标：

- ✧ 土的密度
- ✧ 土粒比重
- ✧ 土的含水量

三相草图法

其它物理性质指标

- ✧ 孔隙含量
- ✧ 含水程度
- ✧ 密度和重度

物理性质指标

☞ 粗粒土的密实状态指标：相对密度 D_r

- 定义
- 判别标准

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

☞ 细粒土的稠度状态指标：液性指数 I_L

- 定义
- 判别标准

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$$

- 界限含水量 w_p 、 w_L → 土中水形态
- 塑性指数 I_p → 吸附结合水的能力

物理状态指标

土的结构

土颗粒或粒团的空间排列和相互联结

粗粒土的结构

单粒结构

细粒土的结构

蜂窝结构 絮凝结构

重力起主导作用

粒间力起主导作用

黏性土的结构性指标

土的结构

☞ 目的：

- 便于调查研究；
- 便于分析评价；
- 便于交流 (基于共同的概念)

☞ 依据：最能反映土的物理力学性质的指标



土的组成
土的状态
土的结构

➤ 建筑地基基础设计规范- GB50007-2011分类法

水利部SL237-1999分类法

土的工程分类



✓ 特殊土

- 特殊土是指具有一定分布区域或工程上具有特殊成分、状态和结构特征的土。从目前工程实践来看，大体可分为软土、红粘土、黄土、膨胀土、多年冻土、盐渍土等。





- 是指沿海的滨海相、三角洲相，内陆的河流相、湖泊相、沼泽相等主要由细粒土组成的孔隙比大 ($e \geq 1$) 、天然含水量高 ($w > w_L$) 、压缩性高、强度低和具有灵敏性、结构性的土层。包括淤泥、淤泥质黏性土、淤泥质粉土等。
- 淤泥和淤泥质土是工程建设中经常遇到的软土。在静水或缓慢的流水环境中沉积，并经生物化学作用形成。
- 当黏性土的 $w > w_L$, $e \geq 1.5$ 时称为淤泥；而当 $w > w_L$, $1.5 > e \geq 1.0$ 时称为淤泥质土。



✓ 淤泥和淤泥质土（软土）

- 从塑性指数上看，属于粘性土，但与一般粘性土又有显著的不同：
 - 孔隙比大 ($e \geq 1$)；
 - 天然含水量高 ($w \geq w_L$)；
 - 压缩性高；
 - 强度低
 - 灵敏度高
 - 透水性极弱

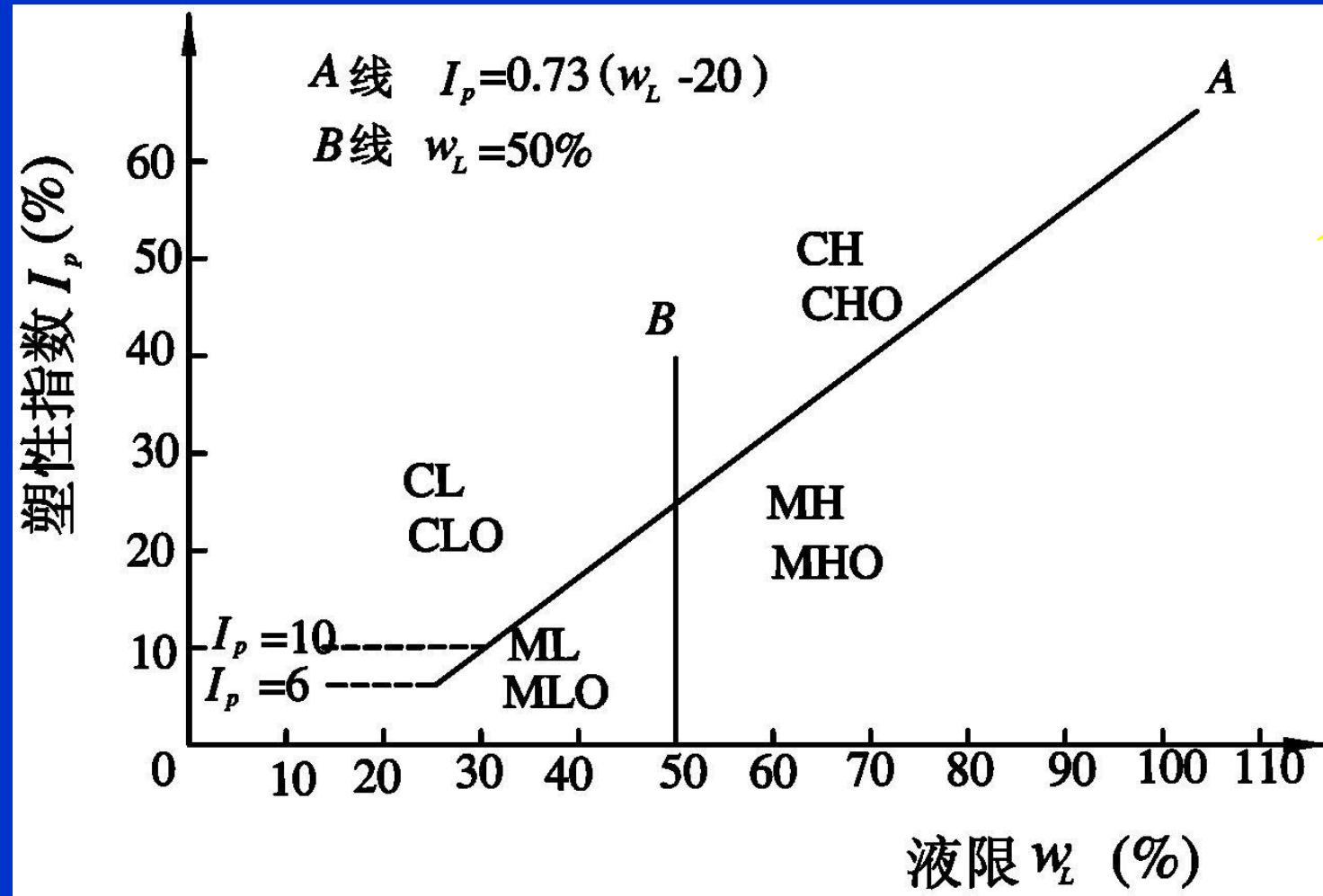


✓ 淤泥和淤泥质土（软土）

由于这类土组成的地基很软弱，承载力很低，因而使建筑物发生严重沉陷和坍塌，造成破坏，对建筑条件十分不利。在工程建设中常将这类土作为特殊土对待，勘测时应特别注意这类土的存在和工程地质性质的研究。



细粒土按塑性图分类



☞ 室内击实试验

- 击实曲线
- 最优含水量
- 最大干密度
- 压实功能
- 压实标准

☞ 细粒土的压实性 ➔

- 击实曲线
- 压实标准

☞ 粗粒土的压实性 ➔

土的压实性

课后作业：

P.59:

习题：4, 7, 8, 9, 10, 11, 12

其中：第12题要用坐标纸来画 $\rho_d \sim w$ 关系曲线

下次上课：第二章 土的渗透性

