

## 2 土的物理性质与工程分类

### Chapter 2 Physical properties and Engineering Classification of Soil

## *Main Content:*

1 土的三相组成

Three phases of soil

2 土的三相比例指标及其换算

Physical indexes and conversion between them

3 无粘性土的密实度

Density of cohesionless soil

4 粘性土的物理特征

Physical features of cohesive soil

5 土的渗透性

Permeability of soil

6 岩土工程分类

Engineering classification of soil

## 2.1 土的三相组成

Three phases of soil

土体

固相

+

液相

+

气相

solid

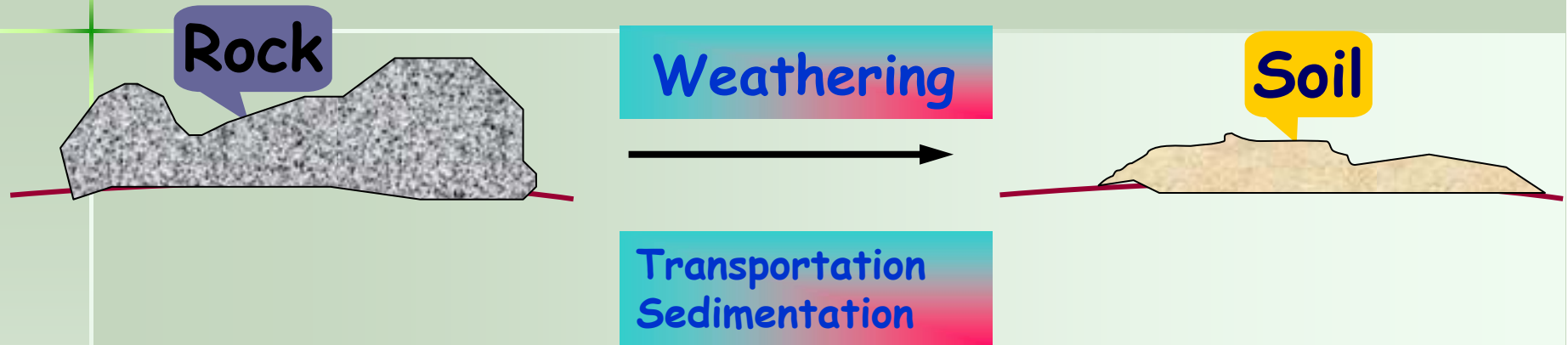
liquid

vapor phase

三相系

## 2.1.1 土固体颗粒

### 2.1.1.1 土的矿物成分



原生矿物 (Original mineral) 石英、长石、云母

次生矿物 (Secondary mineral) 粘土矿物，包括三种类型：高岭石(kaolinite)、伊利石(illite)、蒙脱石(montmorillonite)

## 2.1.1.2 土的颗粒级配 (Particle size distribution)

土粒粒组的划分

粒 组 名 称		粒径范围	一 般 特 征
漂石或块石颗粒 Boulder stone or block stone		> 200	透水性很大，无粘性，无毛细水
卵石或碎石颗粒 Pebble or macadam		200~20	
圆砾或角砾颗粒 Breccia	粗 Coarse 中 Middle 细 Fine	20~10 10~5 5~2	透水性很大，无粘性，毛细水上升高度不超过粒径大小
砂 粒 Sand	粗 Coarse 中 Middle 细 Fine 极细	2~0.5 0.5~0.25 0.25~0.1 0.1~0.075	易透水，当混入云母等杂质时透水性减小，而压缩性增加；无粘性，遇水不膨胀，干燥时松散，毛细水上升高度不大，随粒径变小而增大
粉 粒 Silt	粗 细	0.075~0.01 0.01~0.005	透水性小，湿时稍有粘性，遇水膨胀小，干时稍有收缩，毛细水上升高度较大较快，极易出现冻胀现象
粘 粒 Clay		<0.005	透水性很小，湿时有粘性、可塑性，遇水膨胀大，干时收缩显著，毛细水上升高度大，但速度较慢

# 颗粒级配(Particle size distribution)

——各粒组的相对含量，用质量百分数来表示

## •确定方法

筛分法：适用于粗粒土(>0.1 mm)  
Sieve analysis

比重计法：适用于细粒土 (<0.1 mm)  
Hydrometer analysis

## •表述方法

粒径级配累积曲线

Particle-size distribution curve

特征粒径及定义

$d_{60}$ : 限定粒径

$d_{10}$ : 有效粒径

度量指标

(1) 不均匀程度:

$$C_u = d_{60} / d_{10}$$

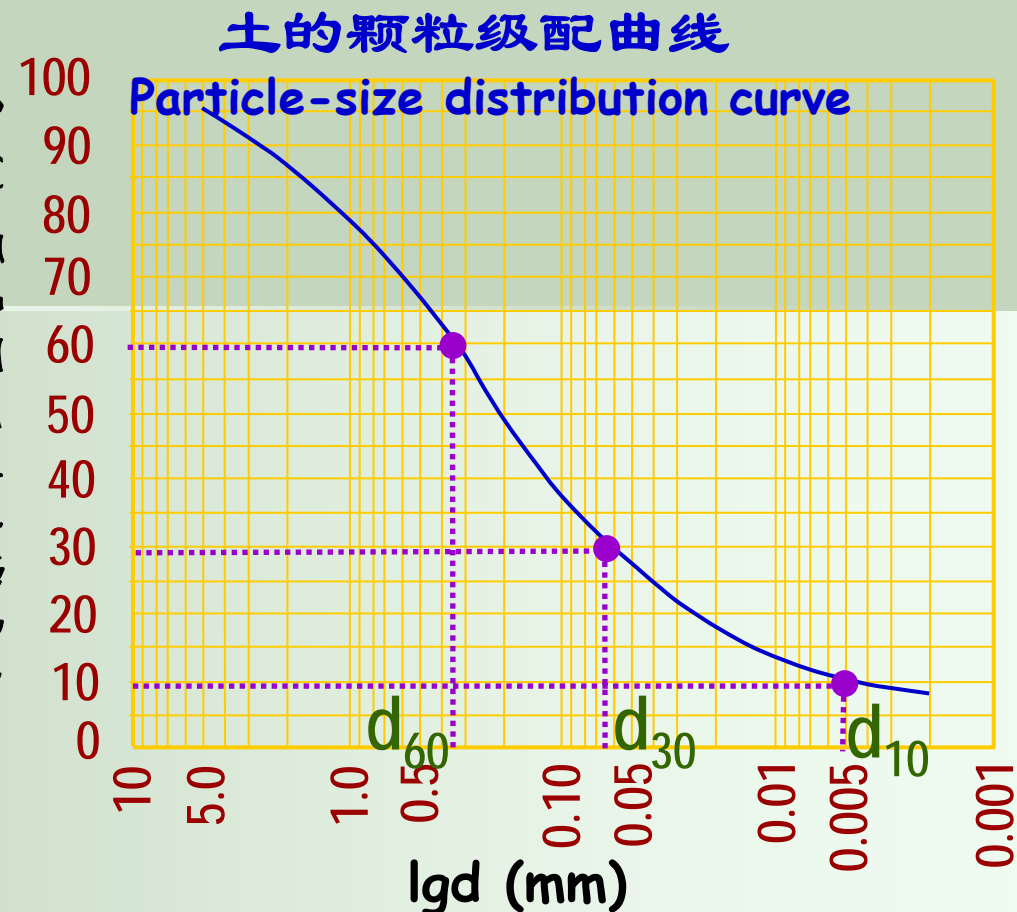
— 不均匀系数

$C_u \geq 5$ , 级配不均匀

(2) 粒径级配连续程度:

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{60} \times d_{10})$$

— 曲率系数



$d_{60}$	$d_{10}$	$d_{30}$	$C_u$	$C_c$
0.33	0.005	0.063	66	2.41

$C_c = 1 \sim 3$ , 级配连续性好

## 颗粒级配曲线及指标的用途:

### Particle-size distribution curve

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

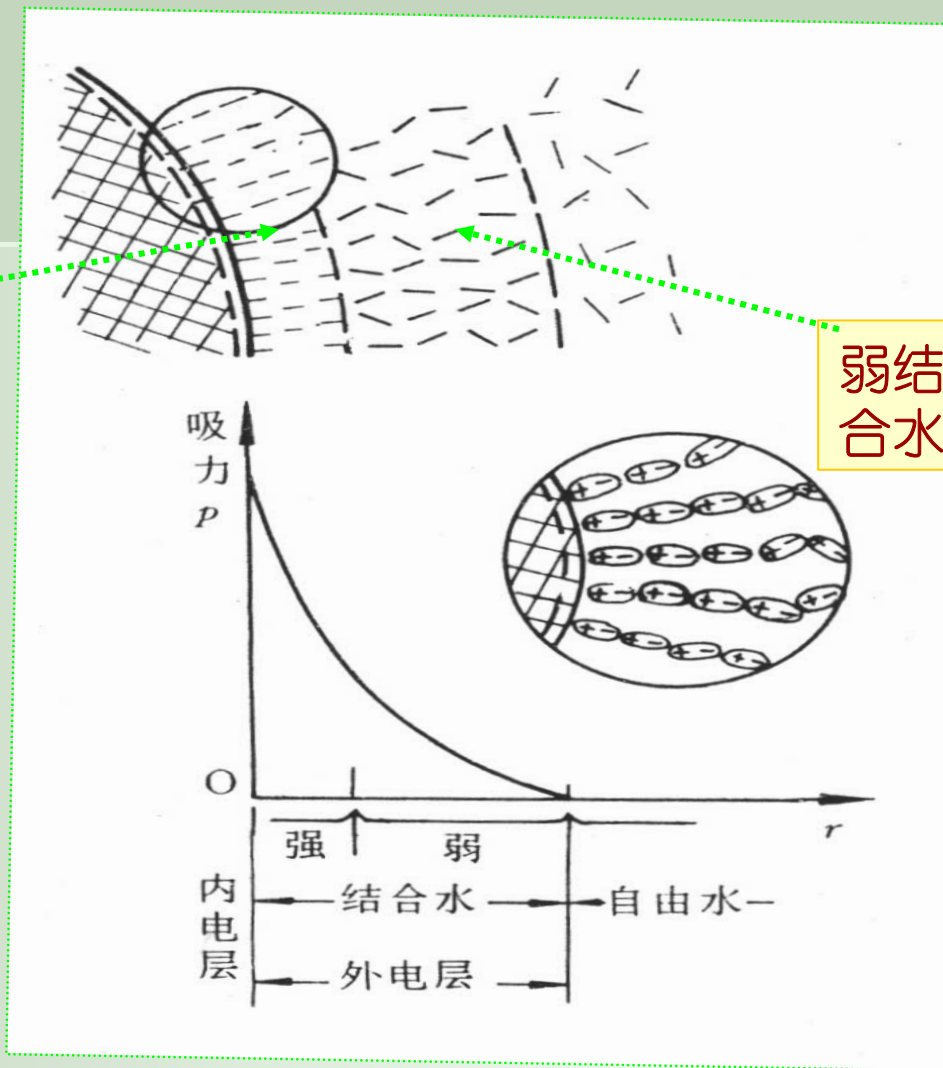


## 2.1.2 土中水 (liquid phase)

### 1、结合水

强结合水

弱结合水



### 2、自由水

重力水

毛细水

## 2.1.3 土中气体 vapor phase

土中气体按其所处的状态和结构特点可分以下几种类型：

- 自由气体：与大气连通，对土的性质影响不大
- 封闭气体：增加土的弹性；阻塞渗流通道

## 2.1.4 土的结构和构造

1. 单粒结构
2. 蜂窝结构
3. 絮凝结构

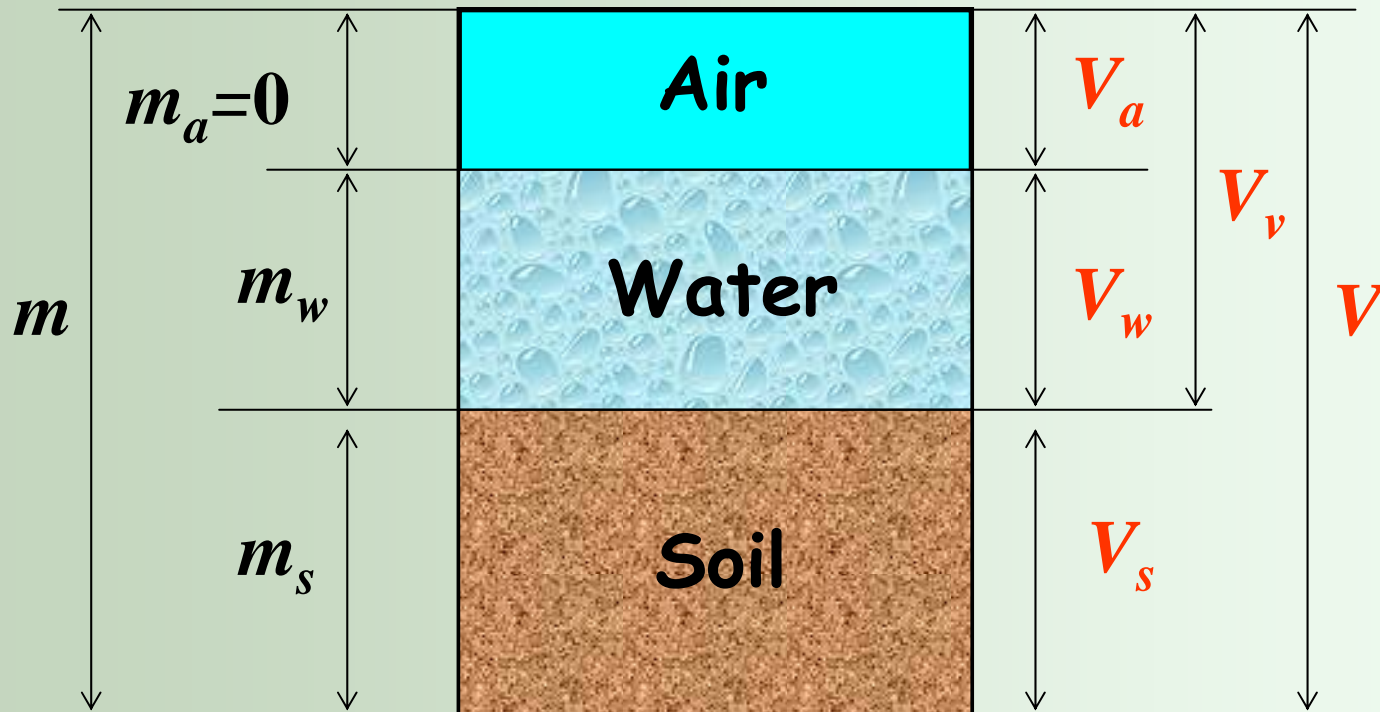
## 2.1.5 土的构造： 土体在空间构成上不均匀特征的总和。

不同土类和成因类型，构造特征不一样

1. 层状构造
2. 分散构造
3. 裂隙构造

## 2.2 土的三相比例指标

### 三相简图法 Three-phase diagram



质量 mass/quality

体积 volume

## 2.2.1 室内测定的三个物理性质指标

---土的密度、土粒的相对密度、土的含水量

### 1、土的密度 $\rho$ Density of soil

定义：土单位体积的质量

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

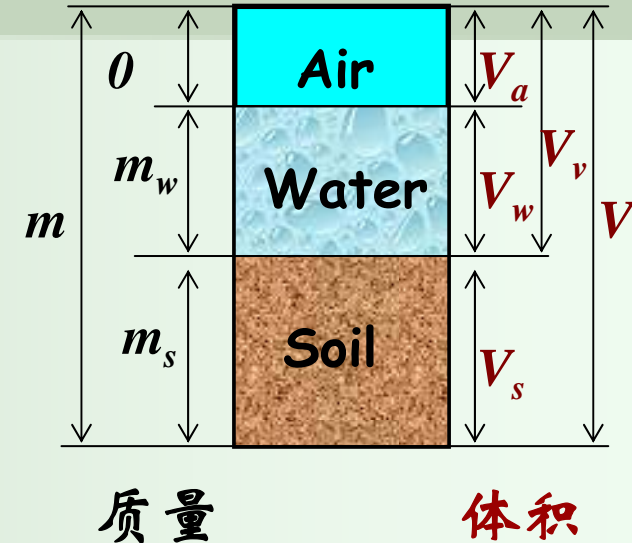
单位： $\text{kg/m}^3$  或  $\text{g/cm}^3$

Kilogram per cubic meter

相关指标：

土的重度  $\gamma$   
Unit weight

$\gamma = \rho g$       单位： $\text{kN/m}^3$



环刀法

## 2、土粒相对密度 $d_s$      Specific gravity of soil

定义：土粒的密度与4°C时纯蒸馏水的密度的比值。

表达式：  $d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4^\circ\text{C}}}$       单位：无量纲

$\rho_w^{4^\circ\text{C}}$       4°C时纯蒸馏水的密度

$\rho_s$ ：土粒的密度，单位体积土粒的质量

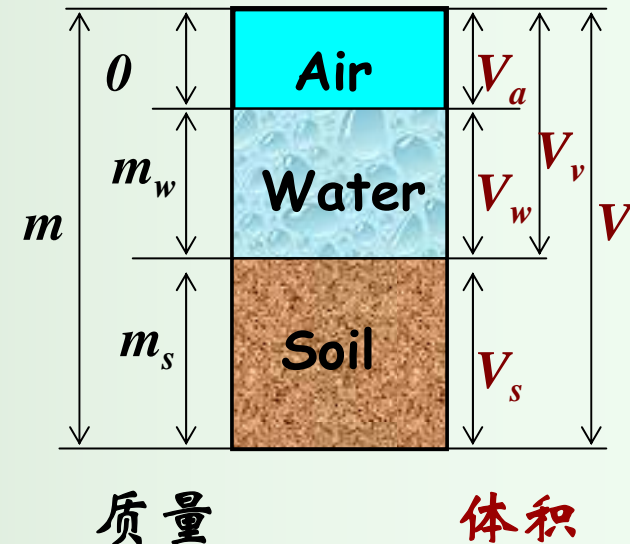
$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

土粒相对密度一般范围：

粘性土 2.70—2.75

砂 土 2.67

有机质土 < 2.5



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

### 3、土的含水率 $w$ *Moisture content*

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

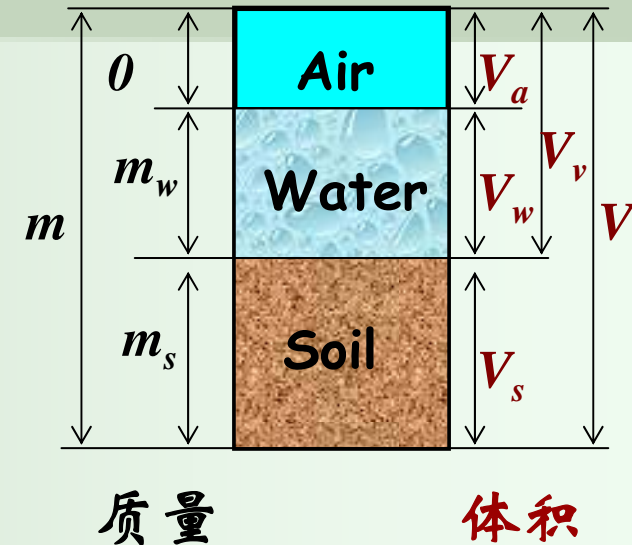
土的含水率一般范围：

粘性土 > 3%

砂土 0~40%

烘干法  
酒精燃烧法

adustion method



## 2.2.2 间接指标

❖ 表示土中孔隙含量的指标

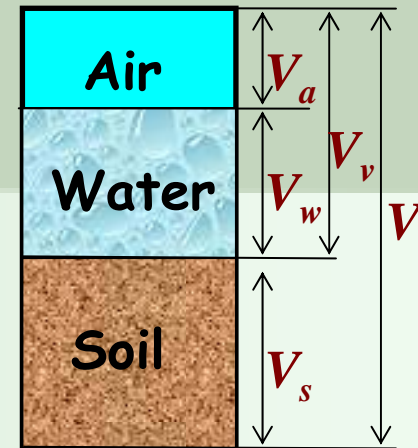
### 1、孔隙比 $e$

*Void ratio*

定义：土中孔隙体积与固体颗粒体积之比，无量纲

表达式：

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s}$$



体积

在某种程度上反映土的松密

$e < 0.6$  低压缩性，密实

$e > 1.0$  高压缩性，疏松

$$e = \frac{d_s(1+w) \rho_w}{\rho} - 1$$



## 2、孔隙率 $n$ *porosity*

定义：土中孔隙体积与总体积之比，用百分数表示

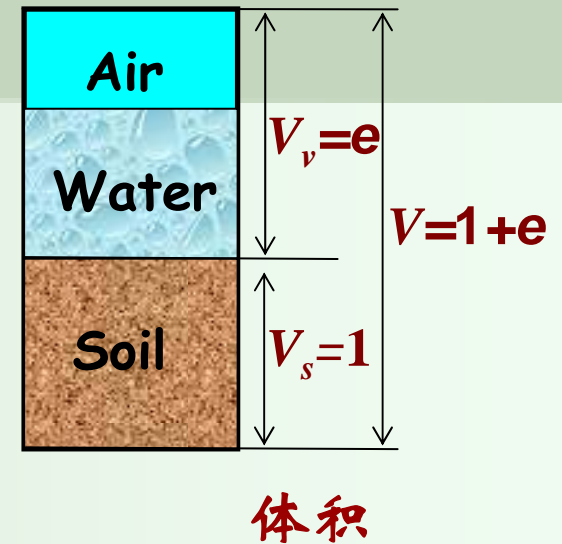
表达式：

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} = \frac{V_w + V_a}{V_w + V_a + V_s}$$

关系：

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

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



三相简图可用于确定  
物性指标之间的关系

表示土中含水程度的指标

含水率

$$w(\%) = \frac{m_w}{m_s}$$

### 3、饱和度 $S_r$ Degree of saturation

定义：土中水的体积与孔隙体积的比值

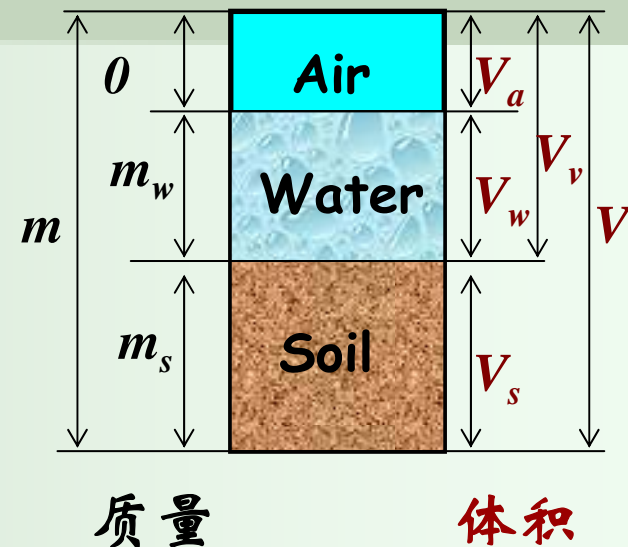
表达式： 
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_w + V_a}$$

饱和度表示孔隙中充满水的程度



$S_r=0$  : 干土

$S_r=1$  : 饱和土



## 2.2.3 不同状态下的密度和重度 Various Unit-Weight Relationship

### 1、天然密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_w + V_a} \quad \text{单位: kg/m}^3 \text{ 或 g/cm}^3$$

### 天然重度

$$\gamma = \rho g \quad \text{单位: kN/m}^3$$

### 2、干密度

定义: 土被完全烘干时的密度, 等于单位体积内土粒的质量

表达式:  $\rho_d = \frac{m_s}{V}$

### 干重度

$$\gamma_d = \rho_d g$$

### 3、饱和密度

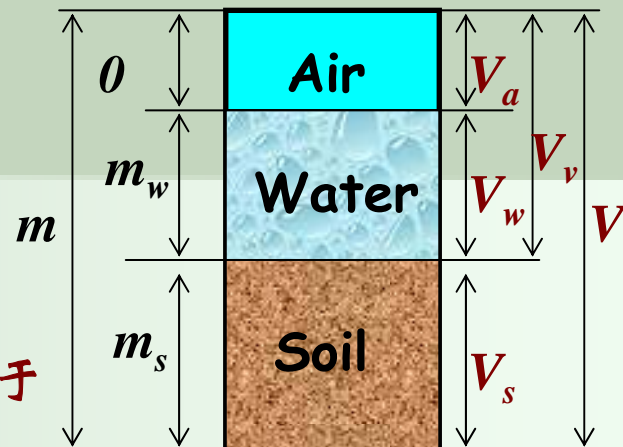
$$\rho_{sat} = \frac{m_s + \rho_w V_v}{V}$$

### 饱和重度

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

定义: 土空隙完全被水填充时的密度

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



质量

体积

### 4、浮密度

定义: 土体位于水下时的密度

$$\rho' = \frac{m_s - \rho_w V_s}{V}$$

有效重度

## 2.3 无粘性土的物理状态指标----密实度

### Compactness / Density

#### 1、相对密实度 Relative Density

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

$e_{\max}$ 与 $e_{\min}$ ：最大与最小孔隙比

$e_{\max}$ 与 $e_{\min}$ ：最大与最小孔隙比

## Void ratio of soil in the loosest/densest state

$e_{\max}$ ：最大孔隙比；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

$e_{\min}$ ：最小孔隙比；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

注意：室内测得理论上的最大与最小孔隙比有时很困难

$$e_{\max} = \frac{d_s \rho_w}{\rho_{d \min}} - 1 \qquad e_{\min} = \frac{d_s \rho_w}{\rho_{d \max}} - 1$$

## 相对密实度

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

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

## 粗粒土的密实状态指标

判别标准

$D_r \leq 1/3$	疏松状态	loose
$1/3 < D_r \leq 2/3$	中密状态	medium
$D_r > 2/3$	密实状态	dense

$D_r = 0$  , 最松状态 loosest  
 $D_r = 1$  , 最密状态 densest

工程上, 还可用标准贯入击数  $N_{63.5}$  来衡量粗粒土的密实状态, 划分为松散、稍密、中密、密实。

## 2、标准贯入试验 (SPT) Standard Penetration Test

- 要点：**质量为63.5kg的重锤**  
**从76cm高处落下**  
**将贯入器贯入土中30cm的锤击数**  
 **$15\text{cm} + 30\text{cm} = 45\text{cm}$**

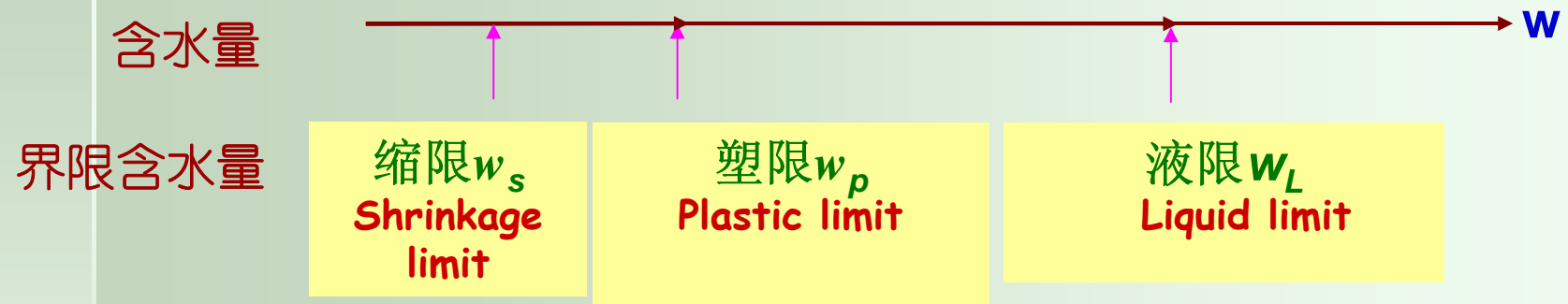
判定：

$N \leq 10$	松散状态
$10 < N \leq 15$	稍密状态
$15 < N \leq 30$	中密状态
$N > 30$	密实状态

## 2.4 粘性土的物理特征

### 2.4.1 界限含水量

Limit water content

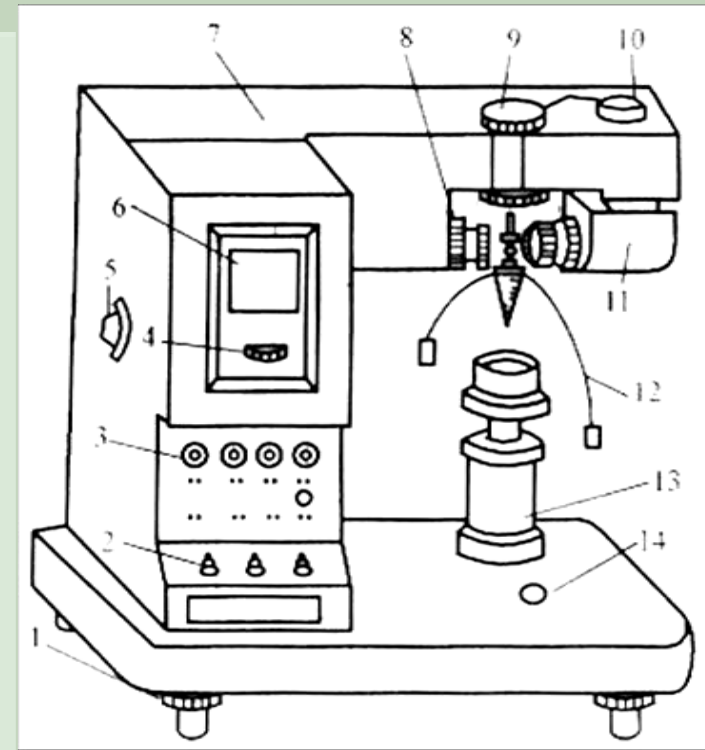




## 2.4.2 液塑限试验方法

### 联合测定仪

Liquid-Plastic limit combined device



目前在液限与塑限的测定中，根据平衡圆锥沉入深度与液限、塑限的对应关系而采取液、塑限联合测定法。

## 2.4.3 塑性指数 Plasticity index

$$I_p = w_L - w_p$$

——表示土处于可塑状态含水量的范围；粘性大小；大致反映粘土颗粒含量

常作为细粒土工程分类的依据

不同的粘土矿物结合水的能力不同



分类：

$I_p > 17$	粘土	clay
$17 \geq I_p > 10$	粉质粘土	silty clay

## 2.4.4 液性指数 Liquidity index

不同的粘土,  $w_p$ 、 $w_L$ 大小不同

$I_p$ 可能相同

软硬不同

液性指数

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

$I_L < 0$

坚硬状态

$I_L = 0 \sim 1$

可塑状态

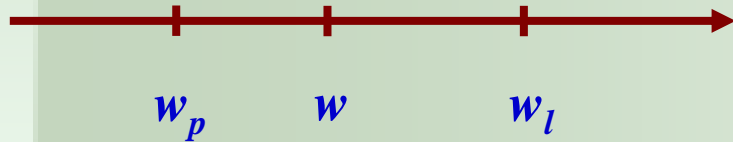
$I_L > 1$

流 态

0 - 0.25 硬塑

0.25 - 0.75 可塑

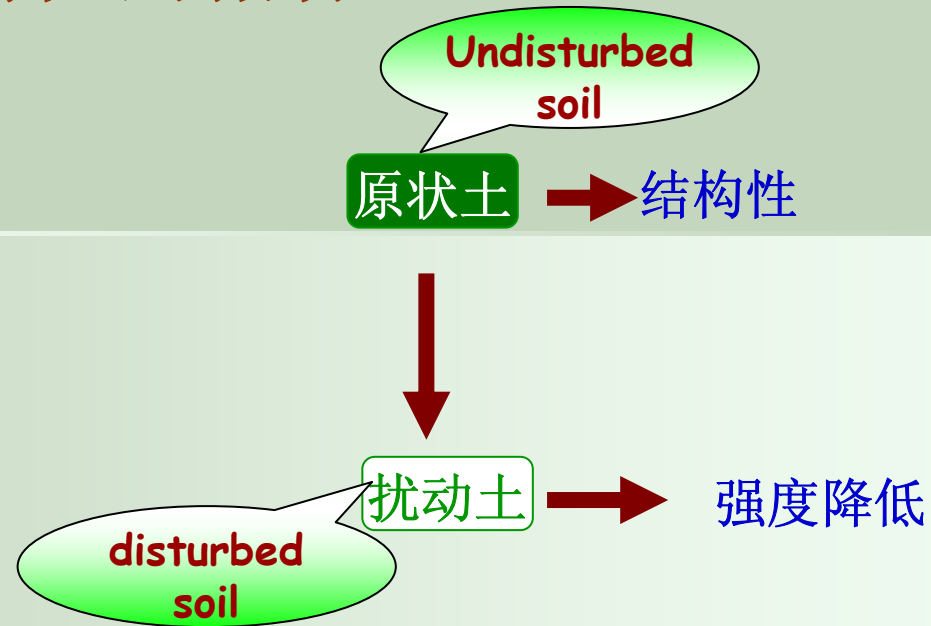
0.75 - 1.00 软塑



国标

## 2.4.5 反映粘性土结构性的指标

### 1. 粘性土的灵敏度— $S_t$ sensitivity



$$S_t = \frac{q_u}{\bar{q}_u} = \frac{\text{原状土的无侧限抗压强度}}{\text{扰动土的无侧限抗压强度}}$$

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

## 2. 粘性土的触变性 **thixotropy**

- 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。

- 目前尚没有合理的描述土触变性的方法和指标。

是将工程性质相近  
的土进行分类

## § 2.5 土的工程分类

**目的：** 便于研究及应用

**依据：** 能反映土的物理力学性质 -

土的组成  
土的状态  
土的结构

建筑地基基础设计规范-GB50007-2002 分类法

岩土工程勘察规范GB50021-2001 分类法

# 建筑地基基础设计规范-GB50007-2002 分类法

土 { 岩石  
碎石土  
砂土  
粉土  
粘性土  
人工填土

# 碎石土

土的名称

颗粒形状

粒组含量

漂石  
块石

圆形及亚圆形为主  
棱角形为主

粒径大于200mm的颗粒超过全质量50%

卵石  
碎石

圆形及亚圆形为主  
棱角形为主

粒径大于20mm的颗粒超过全质量50%

圆砾  
角砾

圆形及亚圆形为主  
棱角形为主

粒径大于2mm的颗粒超过全质量50%



# 砂土

## 土的名称 粒组含量

砾砂

粒径大于2mm的颗粒占全质量  
25 -- 50%

粗砂

粒径大于0.5mm的颗粒超过全  
质量50%

中砂

粒径大于0.25mm的颗粒超过  
全质量50%

细砂

粒径大于0.075mm的颗粒超过  
全质量85%

粉砂

粒径大于0.075mm的颗粒超过  
全质量50%

## 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

## 粘性土

塑性指数 $I_p > 10$ 的土

$10 < I_p \leq 17$ 的土 粉质粘土

$I_p > 17$ 的土 粘土

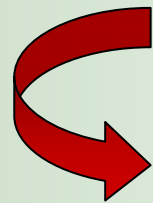
## 人工填土：由人类活动堆填形成的各类土

- 1 素填土：由碎石土、砂土、粉土、粘性土等组成的填土；
- 2 杂填土：含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土；
- 3 冲填土：由水力冲填泥砂形成的填土。

特征：通常人工填土的工程性质不良，强度低，压缩性大且不均匀。

第二章完

The end of chapter2



English Terms

physical properties	huge particle group
three phases of soil	gross particle group
Physical indexes	fine particle group
density	sieve analysis
cohesionless soil	hydrometer analysis
cohesive soil	coefficient of uniformity
permeability	coefficient of curvature
solid	three-phase diagram
liquid	mass/quality
vapor phase	volume
weathering	density of soil
transportation	unit weight
sedimentation	cutting ring
original mineral	specific gravity of soil
secondary mineral	moisture content
clay mineral	combined water
particle size distribution	free water