第1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 土的物理状态
§1.4 土的结构
§1.5 土的工程分类
§1.6 土的压实性

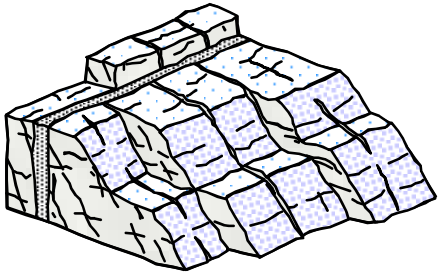
西南林大张庆文 土的风化与形成视频

土 的 形 成

过程、条件

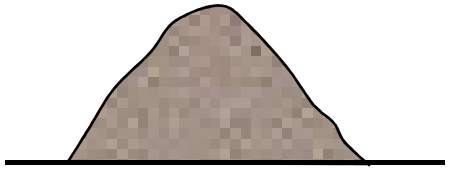
土的组成、结构和物理力学性质

成壤作用



风化、搬运、沉积

地质成岩作用



岩石

土

成岩作用

P4

土的形成与风化作用

- ✧ 物理风化
- ✧ 化学风化
- ✧ 生物活动

- 岩石和土的粗颗粒受各种气候等物理因素的影响产生胀缩而发生裂缝，或在运动过程中因碰撞和摩擦而破碎
- 是颗粒大小发生量的变化
- 矿物成分与母岩相同，称原生矿物
- 产生无粘性土

P5

土的形成与风化作用

- ✧ 物理风化
- ✧ 化学风化
- ✧ 生物活动

- 母岩表面和碎散的颗粒受环境因素的作用而改变其矿物的化学成分，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，最主要为粘性颗粒及可溶盐类

土的形成与风化作用

- ✧ 物理风化
- ✧ 化学风化
- ✧ 生物活动

- 包括植物、动物和土壤微生物的作用
- 可加剧物理和化学风化
- 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

搬运与沉积

- ✧ 残积土
  无搬运
- ✧ 运积土
  有搬运

母岩表层经风化作用破碎成岩屑或细小颗粒后，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

P4-5

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

P5

第一章：土的物理性质与工程分类

§1.1 土的形成 ✓ → • 搬运与沉积
• 风化作用

§1.2 土的三相组成

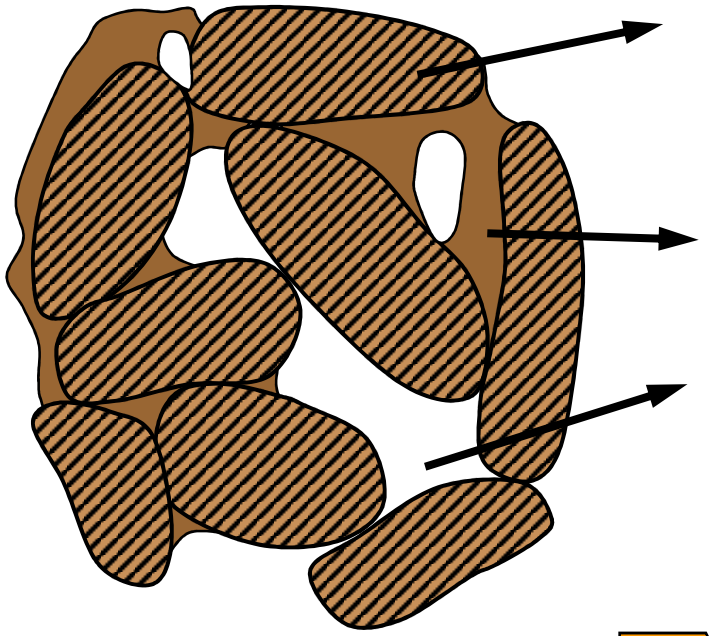
§1.3 土的物理状态

§1.4 土的结构

§1.5 土的工程分类

§1.6 土的压实性

土体的三相构成



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

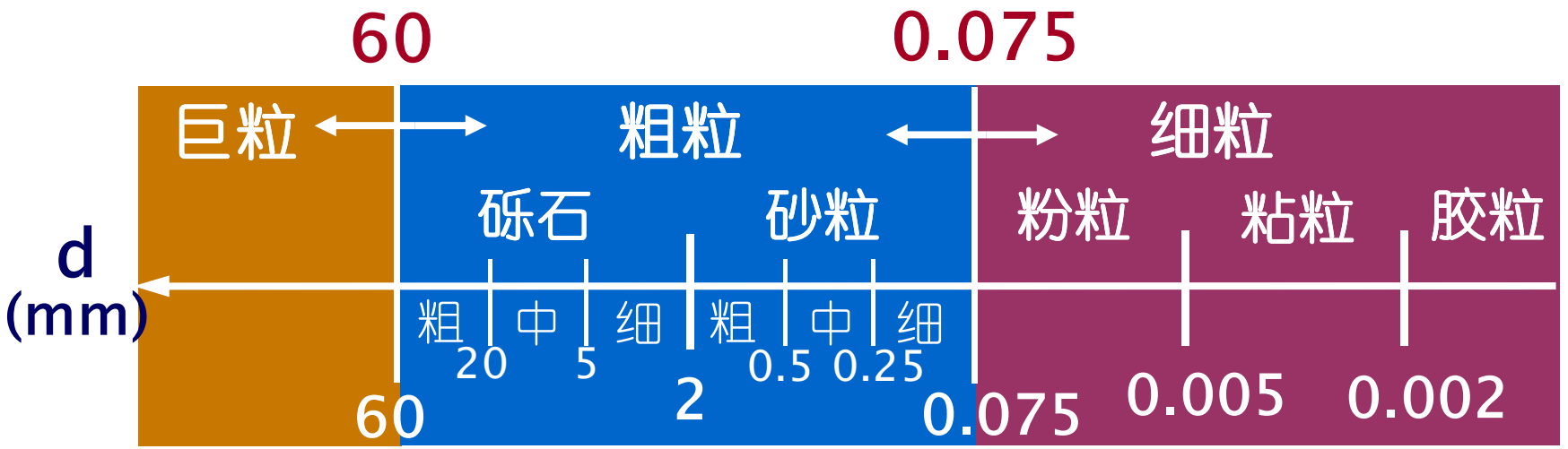
干　土　：土体孔隙完全被气充满

非饱和土：孔隙中水和气均存在

P7

固体颗粒 - 颗粒大小

- 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：以砾石和砂砾为主要组成的土，也称无粘性土。

细粒土：以粉粒、粘粒和胶粒为主要组成的土，也称粘性土。

P8

固体颗粒 - 粒径级配

☞ 粒径级配：各粒组的相对含量，用质量百分数来表示

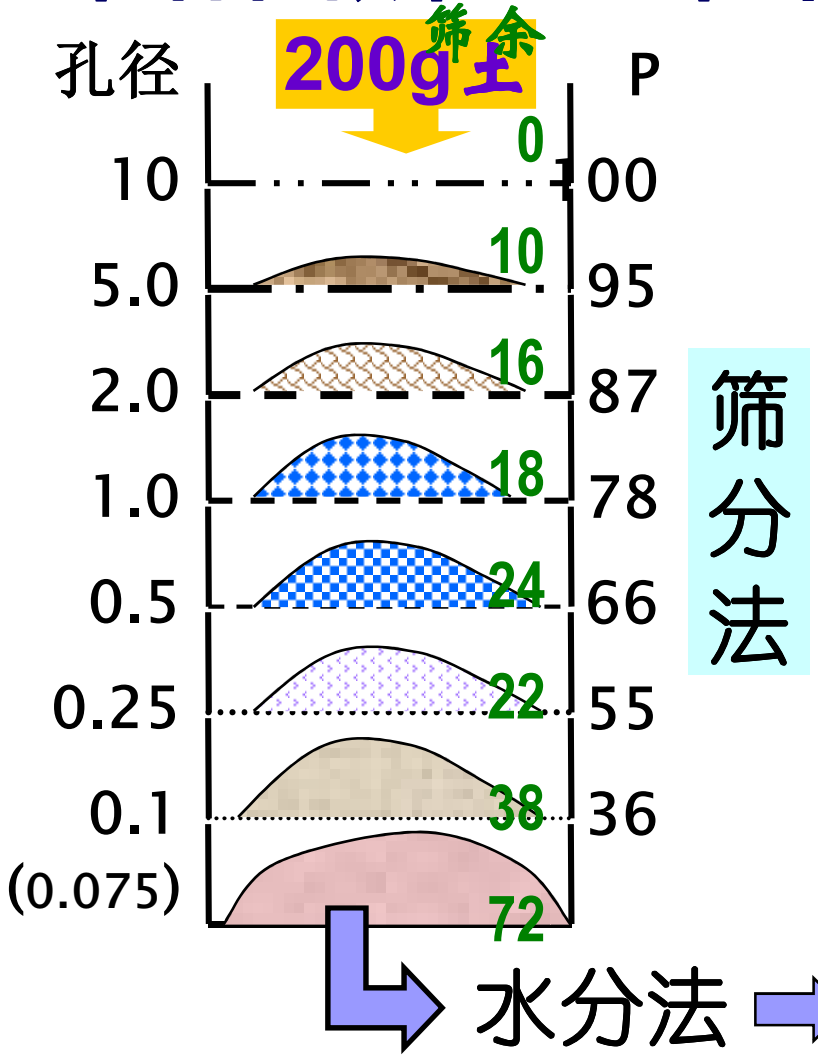
☞ 分析方法：

- 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

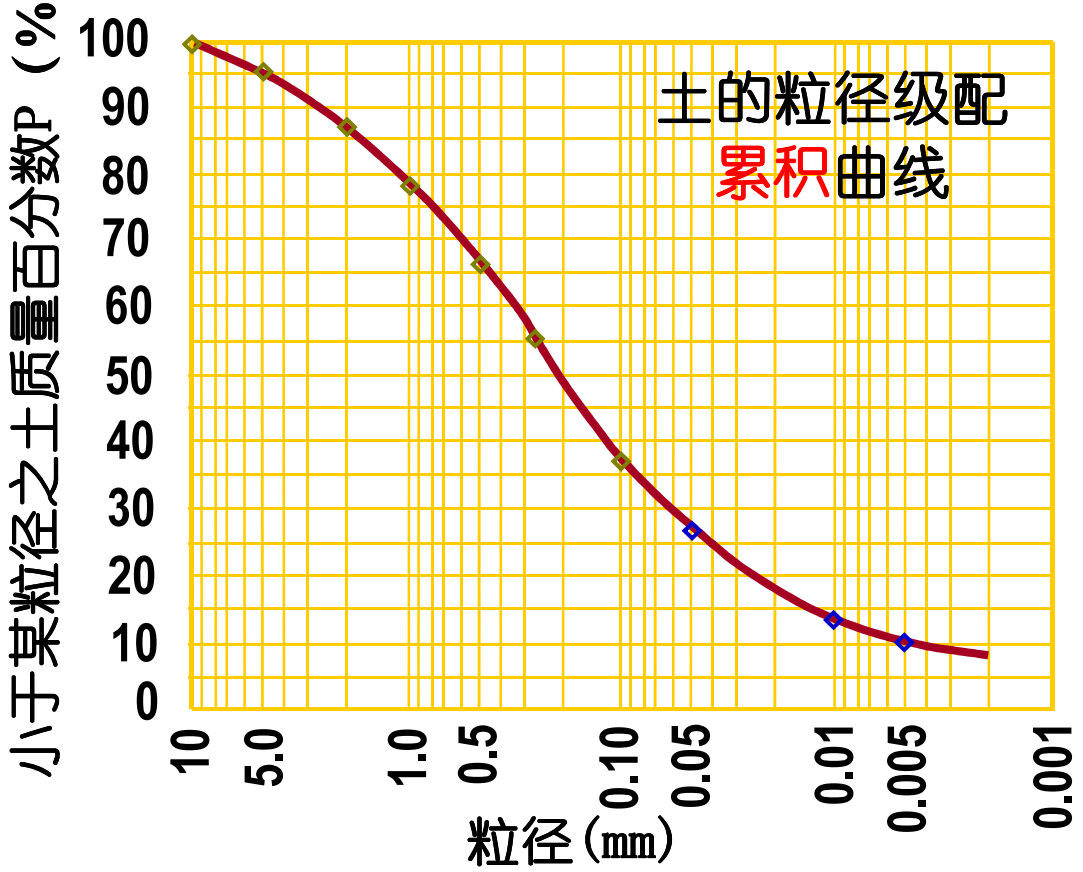
P8

固体颗粒 – 粒径级配



筛分法

水分法



粒径(mm)	0.05	0.01	0.005
百分数P(%)	26	13.5	10

P8

分法和比重计法.pdf - Adobe Acrobat Reader DC
窗口(W) 帮助(H)
土力学（清华二版-... 地层岩性及土的物... SoilMechWu 01 筛... ×
26 / 30 66.2%

比重计法

10 待将搅拌器提离液面的同时开动秒表计时，将比重计轻轻放入悬液中

固体颗粒 – 级配曲线

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:

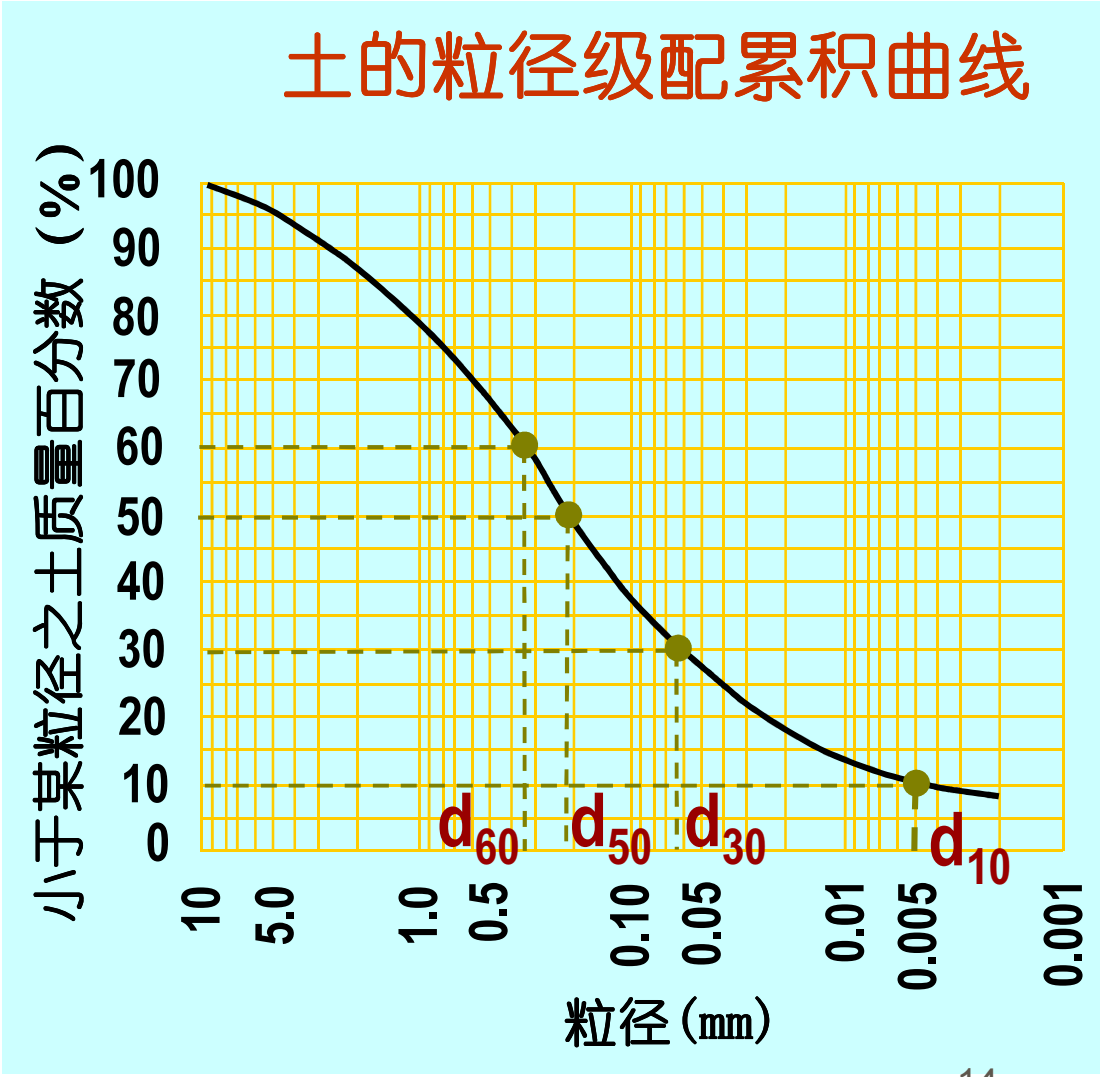
d_{50}：平均粒径

d_{60}：控制粒径

d_{10}：有效粒径

d_{30}

P10



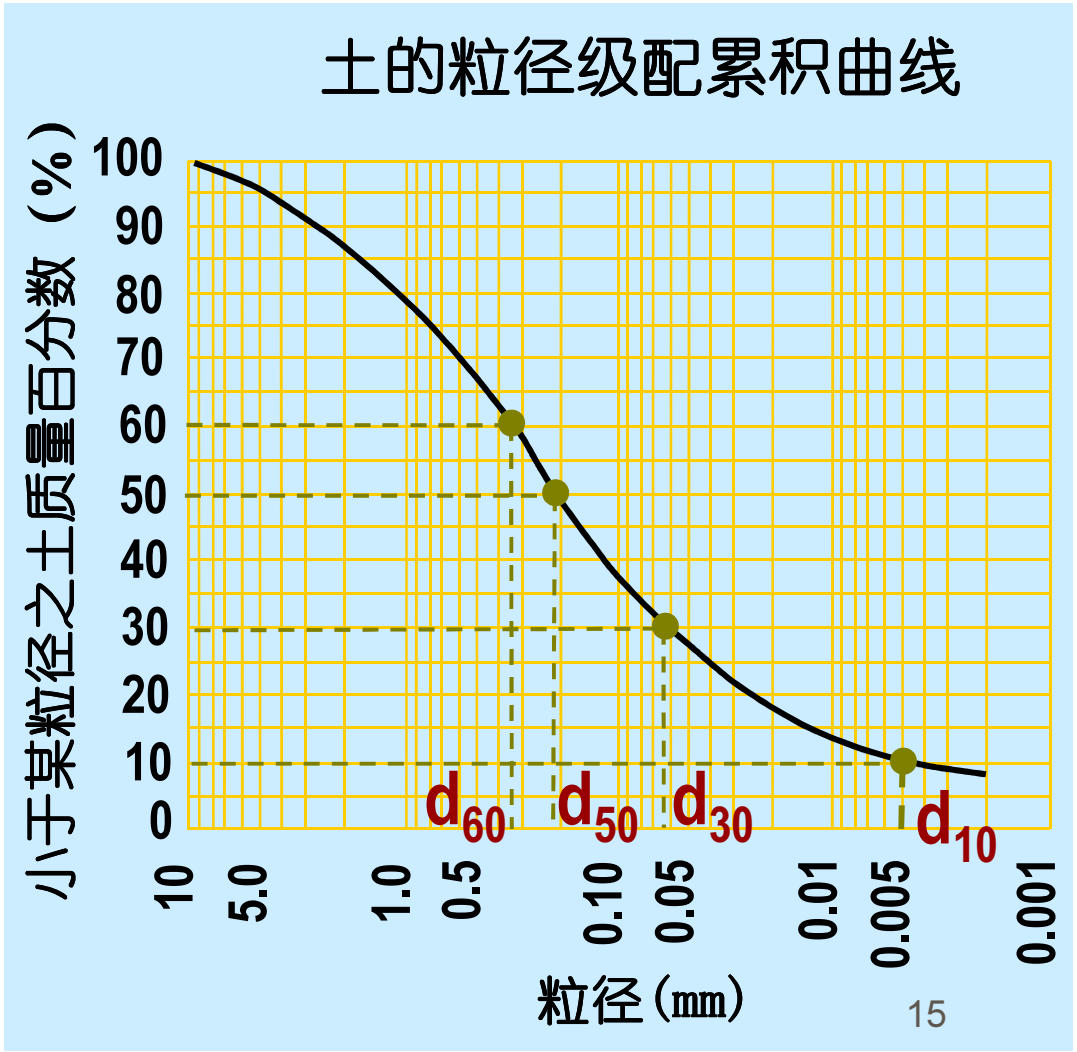
固体颗粒 – 级配曲线

- 土的粗细度：用d_{50}表示
- 土的不均匀程度：用不均匀系数：$C_u = d_{60} / d_{10}$表示，$C_u \geq 5$，称为不均匀土，反之称为均匀土 un-Uniformity Coeff
- 连续程度：用曲率系数

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

度量，C_c=1~3为连续级配，>3或<1为不连续级配 Curvature Coeff

P10



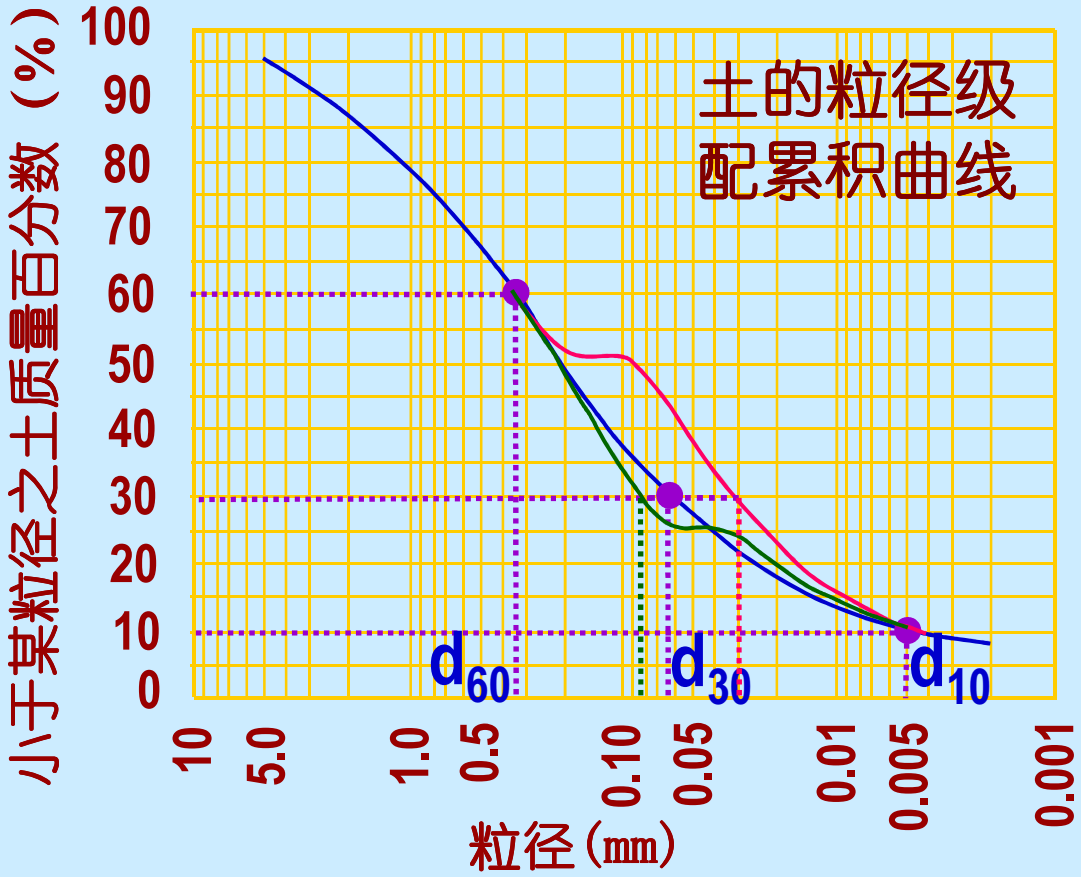
曲率系数举例

C_c=1~3，级配连续

缺少小颗粒，C_c↑

缺少大颗粒，C_c↓

P11



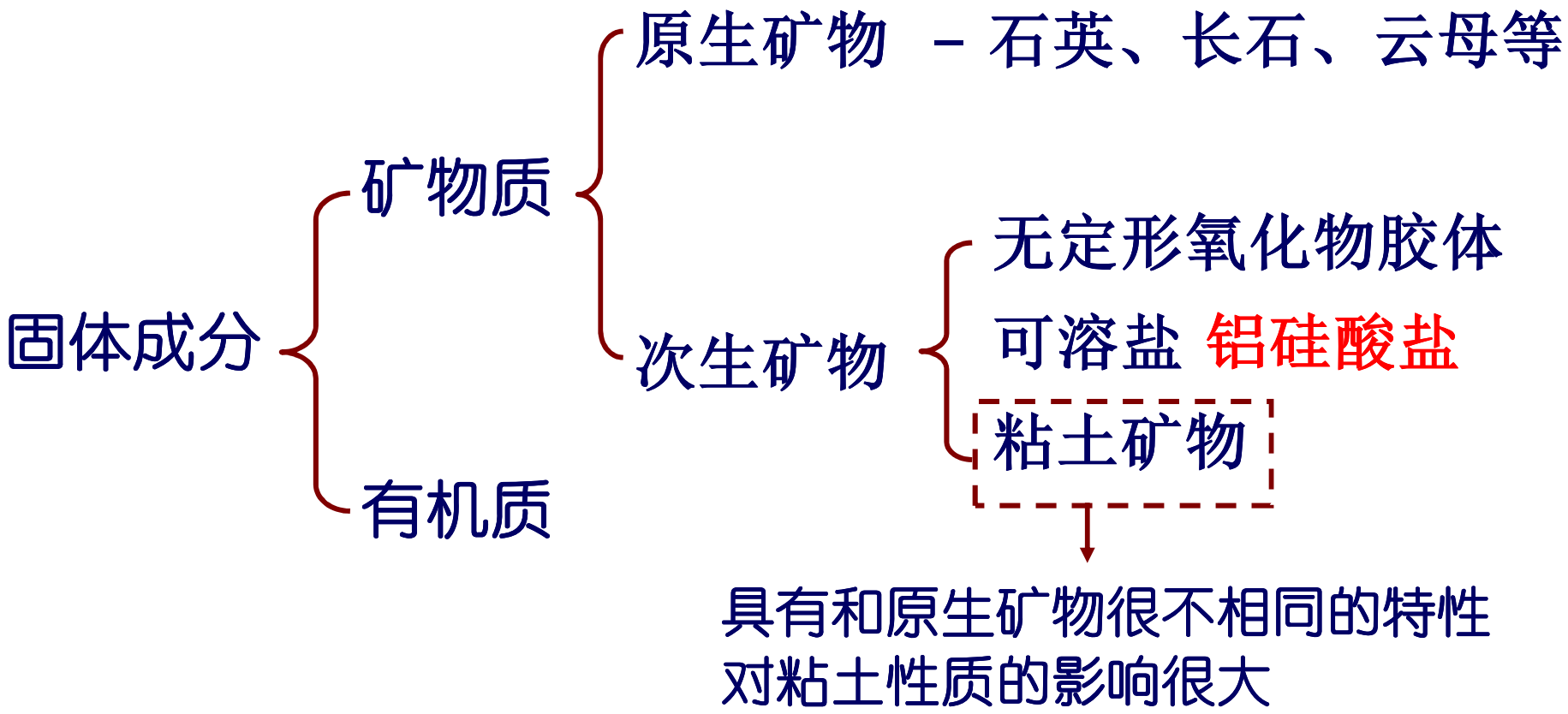
曲线	d_{60}	d_{10}	d_{30}	C_u	C_c
L	0.33	0.005	0.081	66	3.98
M			0.063		2.41
R			0.030		0.545

粒径级配曲线和指标的应用

- 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 =1~3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=1~3为级配 良好的土；如果C_u< 5 或 C_c>3 >>填方
  或C_c<1为 级配 不良的土 >>反滤料

P11 书上划下这句话

固体颗粒 - 土粒成分 / 矿物成分

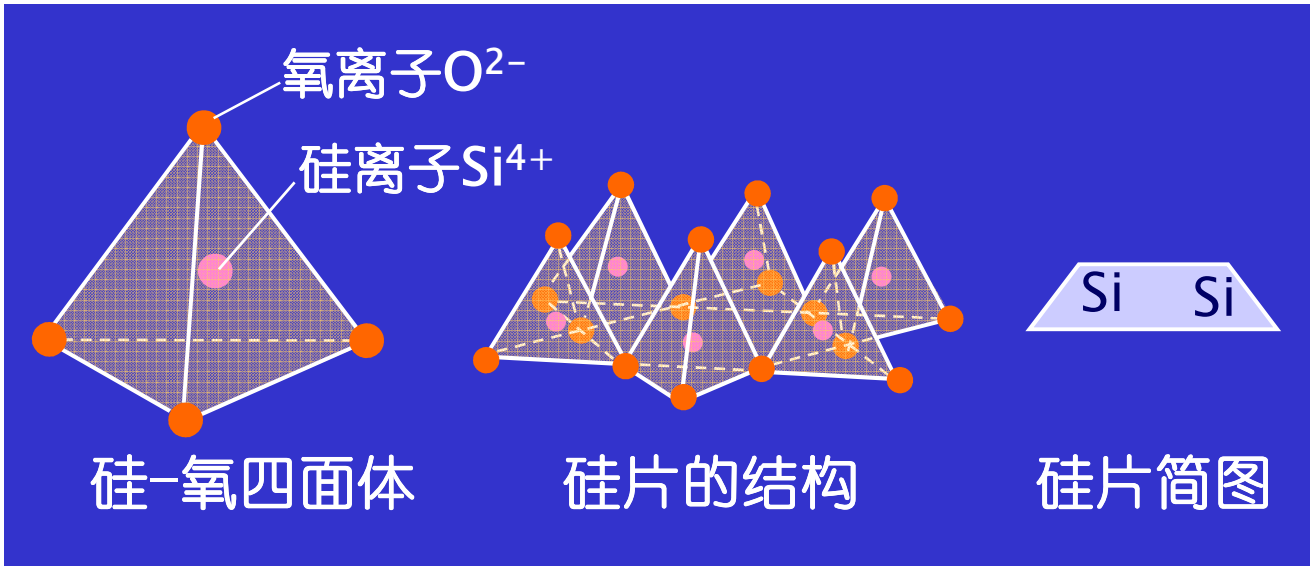


P12 倍半氧化物主要是说在矿物中能以R2O3表示金属离子与氧组成的氧化物

粘 土 矿 物

粘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、伊利石和蒙特石三种类型。

- ✧ 硅片
- ✧ 铝片



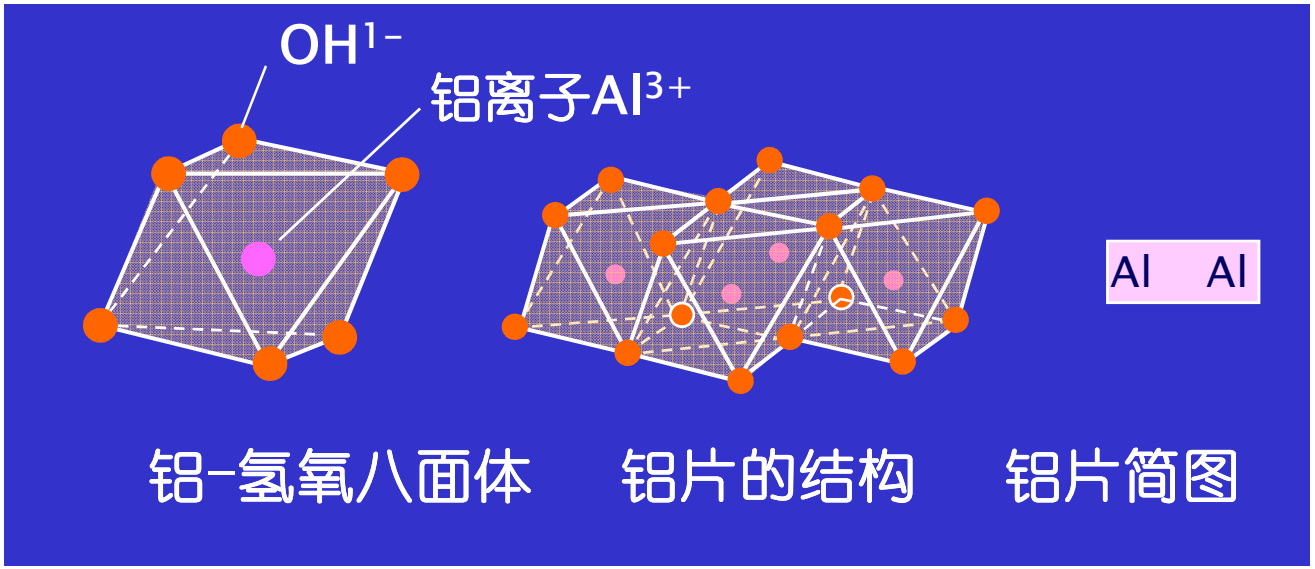
DEL

粘 土 矿 物

粘土矿物是一种复合的铝-硅盐晶体，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、伊利石和蒙特石三种类型。

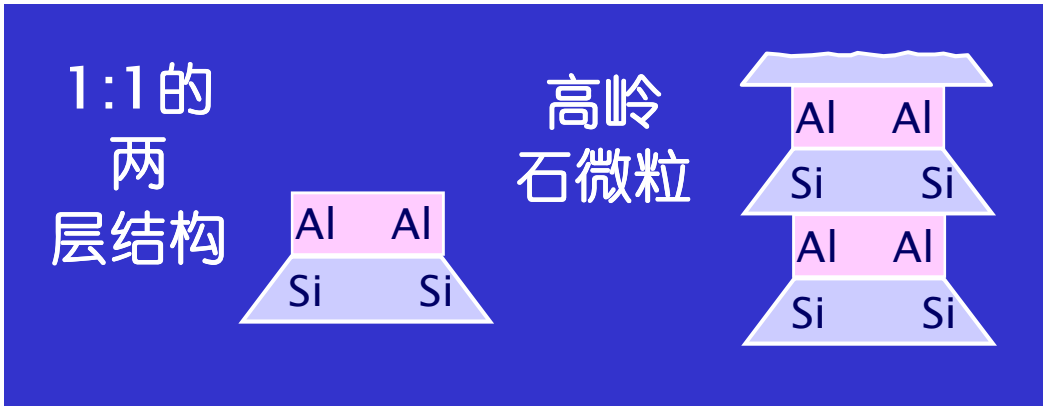
- ✧ 硅片
- ✧ 铝片

DEL



粘 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：



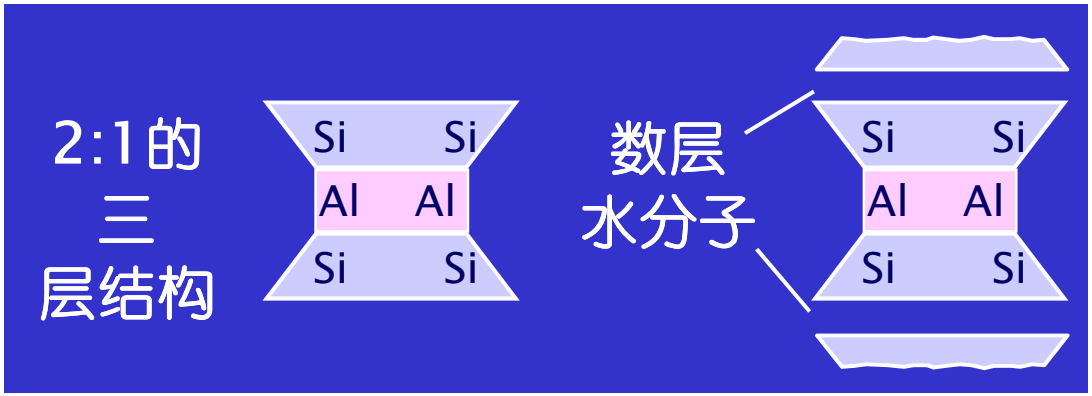
- ✧ 高岭石
- ✧ 蒙特石
- ✧ 伊利石

DEL

- 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
- 能组叠很多晶层，多达百个以上，成为一个颗粒。颗粒长宽约0.3-3μ，厚约0.03-1μ。
- 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。

粘 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
- ✧ 蒙特石
- ✧ 伊利石

- 晶层间是O^{2-}对O^{2-}的连结，联结力很弱，水很容易进入晶层之间。
- 每一颗粒能组叠的晶层数较少。颗粒大小约为0.1-1μ，厚约0.001-0.01μ。
- 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。

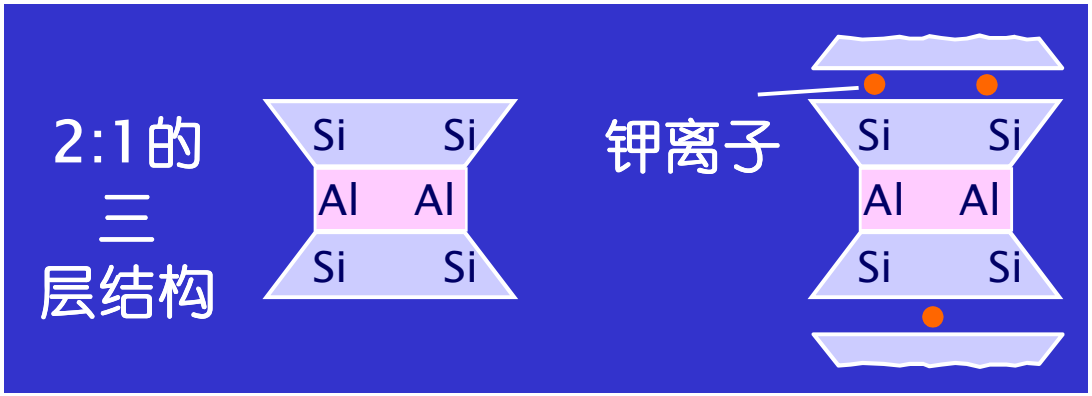
DEL

粘 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
- ✧ 蒙特石
- ✧ 伊利石

DEL

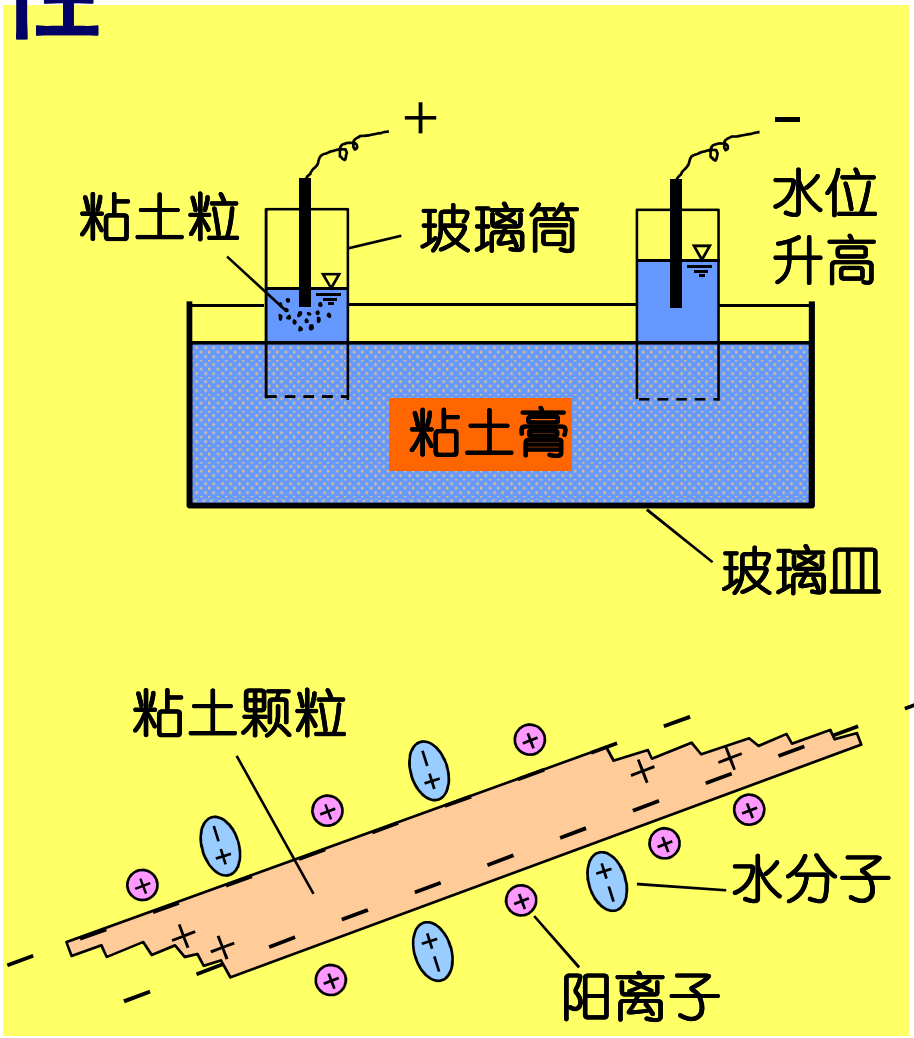


- 是云母在碱性介质中风化的产物。
- 与蒙特石相似，由两层硅片夹一层铝片所形成的三层结构，但晶层之间有钾离子连结。
- 主要特征：连结强度弱于高岭石而高于蒙特石，其特征也介于两者之间。

粘土矿物的带电特性

粘土的电泳和电渗现象

（列依斯，1809）



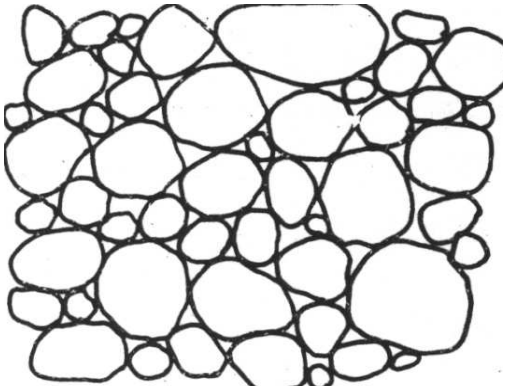
粘土矿物的带电性质

研究表明，片状粘土颗粒表面常带有电荷，净电荷通常为负电荷

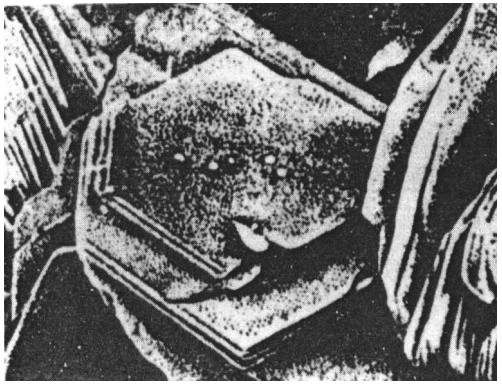
DEL

颗粒形状和比表面积

- ✧ 原生矿物：一般颗粒较粗，呈粒状。有圆状、浑圆状、棱角状等。
- ✧ 次生矿物：颗粒较细，多呈针状、片状、扁平状。
- ✧ 比表面积：单位质量土颗粒所拥有的总表面积。对于粘性土，其大小直接反映土颗粒与四周介质，特别是水，相互作用的强烈程度，是代表粘性土特征的一个很重要的指标。
  高岭石的比表面积为：10-20m^2/g，伊利石：80-100m^2/g，蒙特石：800m^2/g



粗颗粒的形状



粘土颗粒的形状

P14

土 中 水

- 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

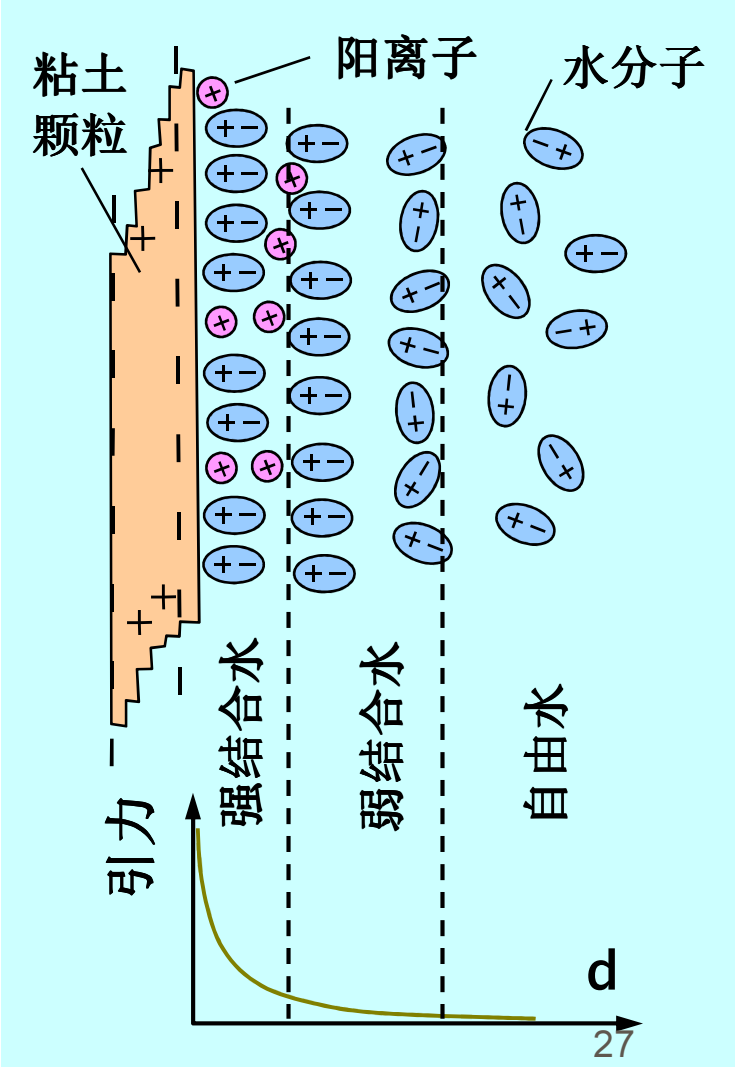
P16 1.2.2

土中水 – 结合水

- **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

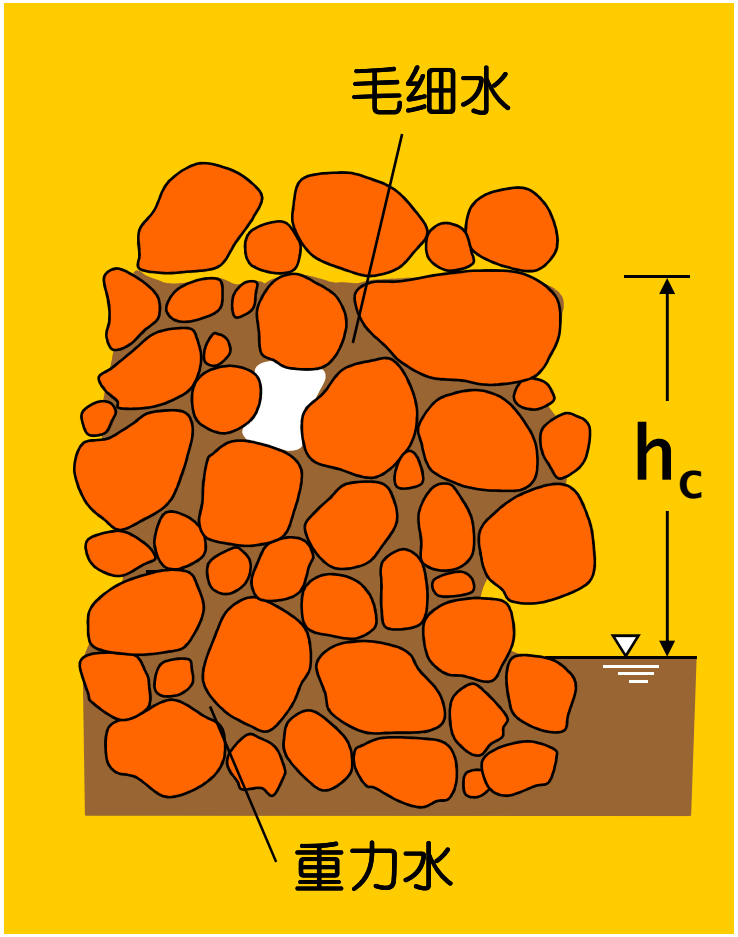
  – 强结合水：
  - 排列致密，密度>1g/cm³
  - 冰点处于零下几十度
  - 完全不能移动，具有固体的特性
  - 温度略高于100° C时可蒸发

  – 弱结合水：
  - 受电场引力作用，为粘滞水膜
  - 外力作用下可以移动
  - 不因重力而流动，有粘滞性

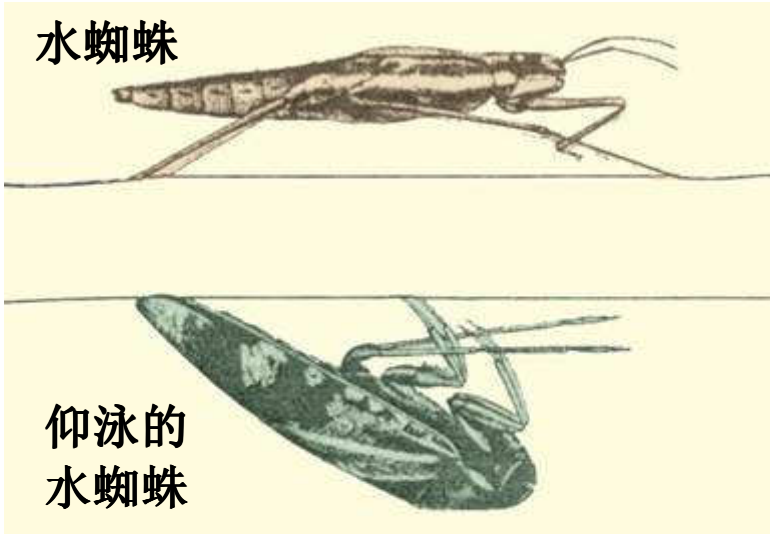


土中水 – 自由水

- 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

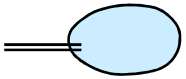


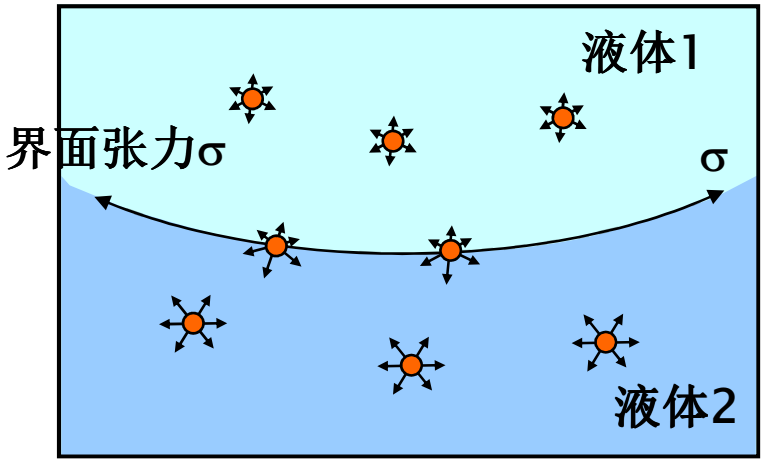
界面张力



收缩膜

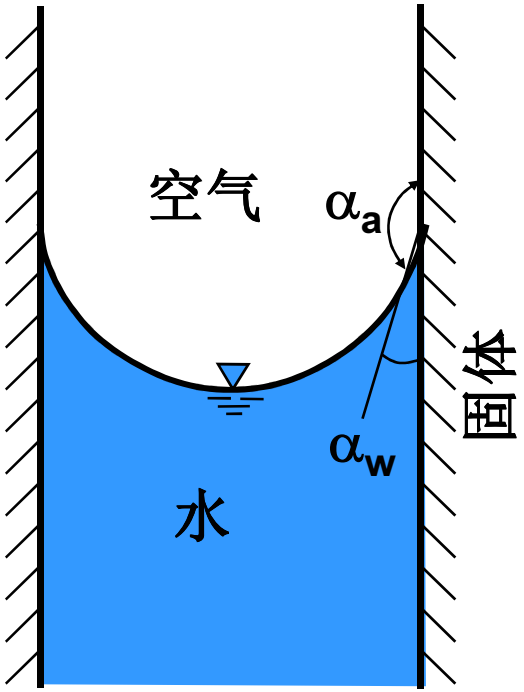
内压 > 外压

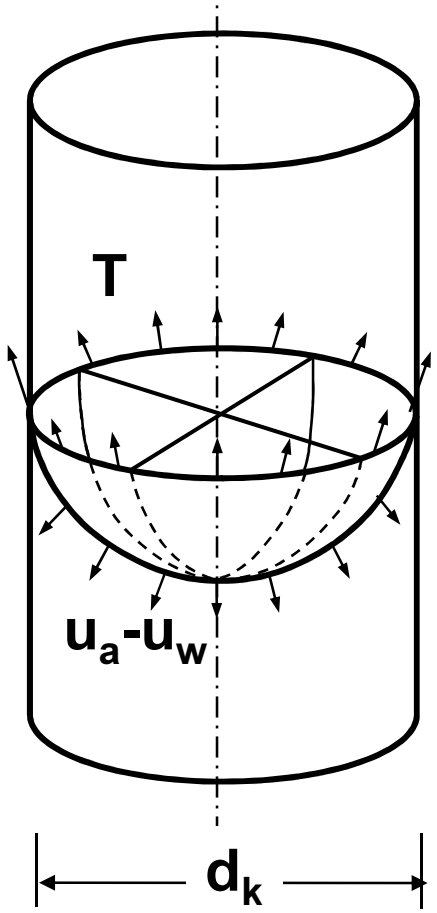




生活在水面收缩膜顶面和地面的昆虫

毛管中流体的界面效应





α =湿润角

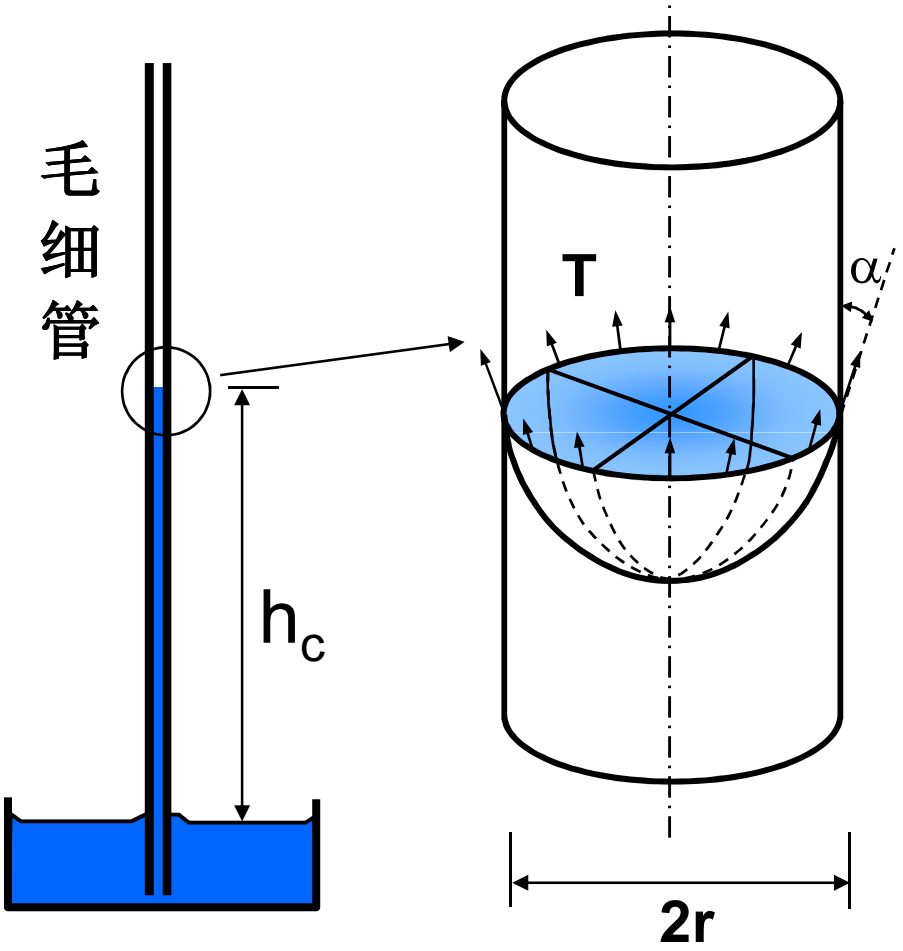
T =界面张力

D_k=毛管直径

u_a-u_w =压力差

P16

土中毛细水上升高度



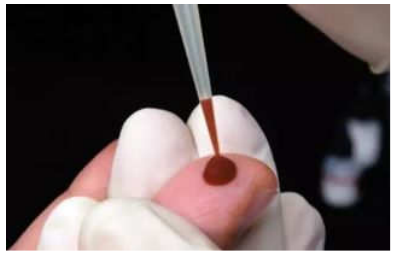
液面压力与表面张力

$\pi r^2 h_c \gamma_w = 2\pi r T \cos\alpha$

上升高度 $h_c = \dfrac{2T\cos\alpha}{r\gamma_\omega}$

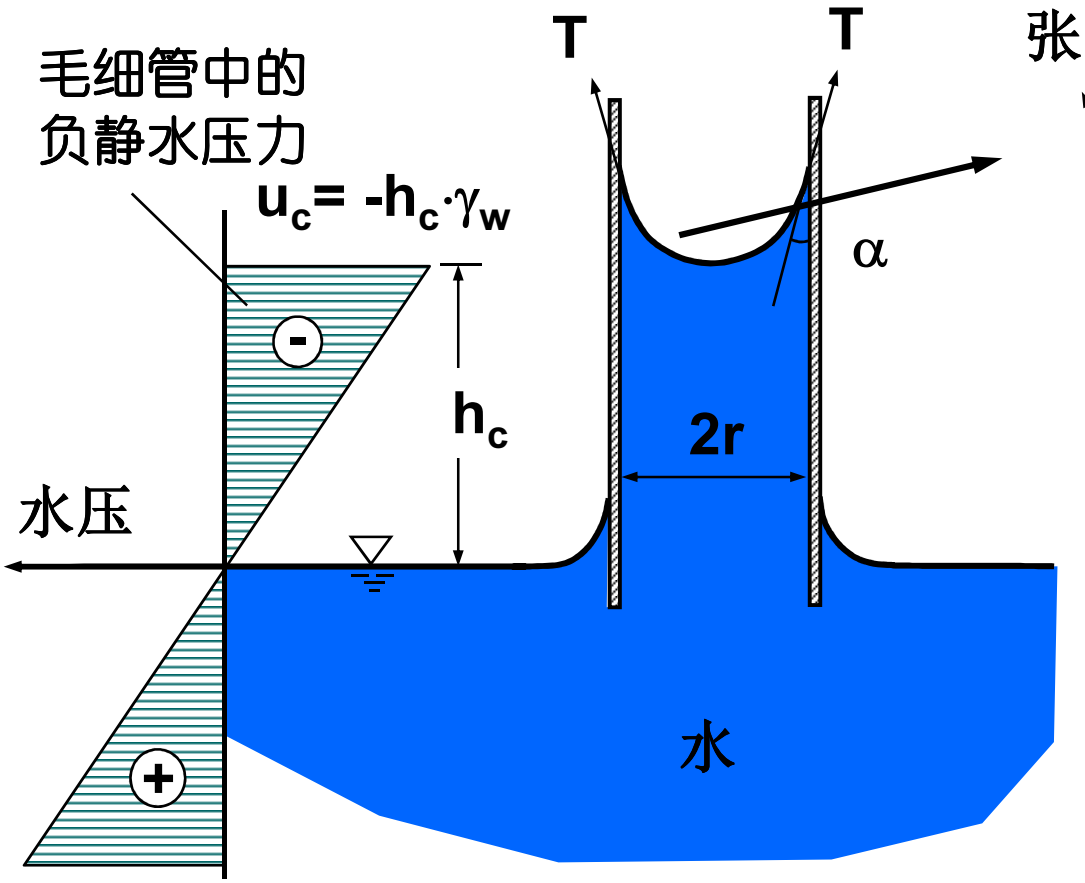
毛细升高与孔径成反比

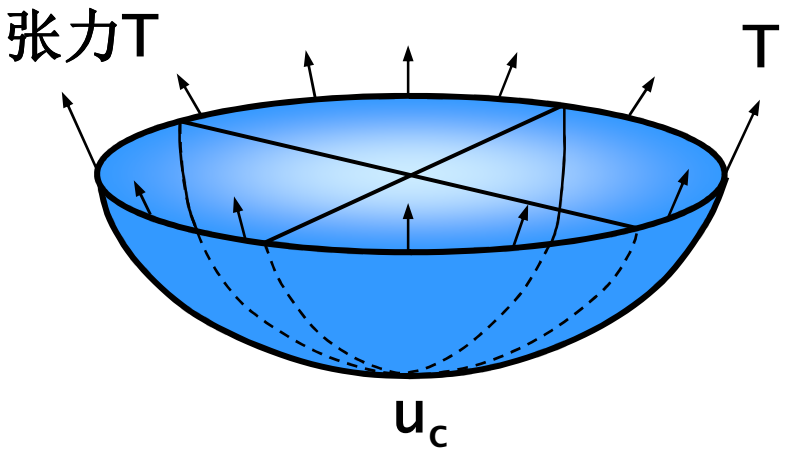
粘土
粉土
砂土
砾石



P16 式1-4

毛细水压力





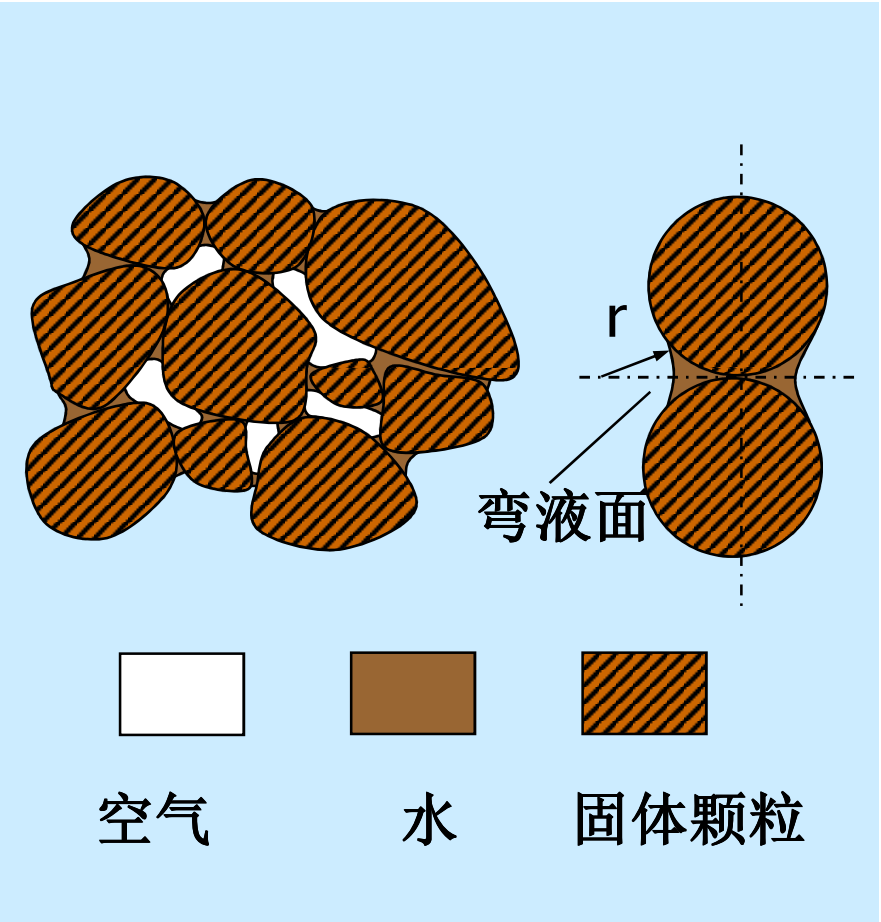
$$2\pi r T\cos\alpha + u_c \pi r^2 = 0$$

则毛细压力：

$$u_c = -\gamma_\omega h_c$$

P16

土颗粒缝隙处的弯液面



- 在非饱和土中，孔隙中含有水和气，此时水多集中于颗粒间的缝隙处，称毛细角边水。
- 由于毛细张力的作用，会形成如图所示的弯液面，使毛细角边水产生负压力，颗粒则受正压力。
- 这是稍湿的砂土颗粒间存在假凝聚力的原因

P17

气相 - 土中气体

- (4) 自由气体：与大气连通的气体
  对土的性质影响不大
- (3) 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
- (2) 溶解在水中的气体
- (1) 吸附于土颗粒表面的气体

P18 1.2.3

小　结

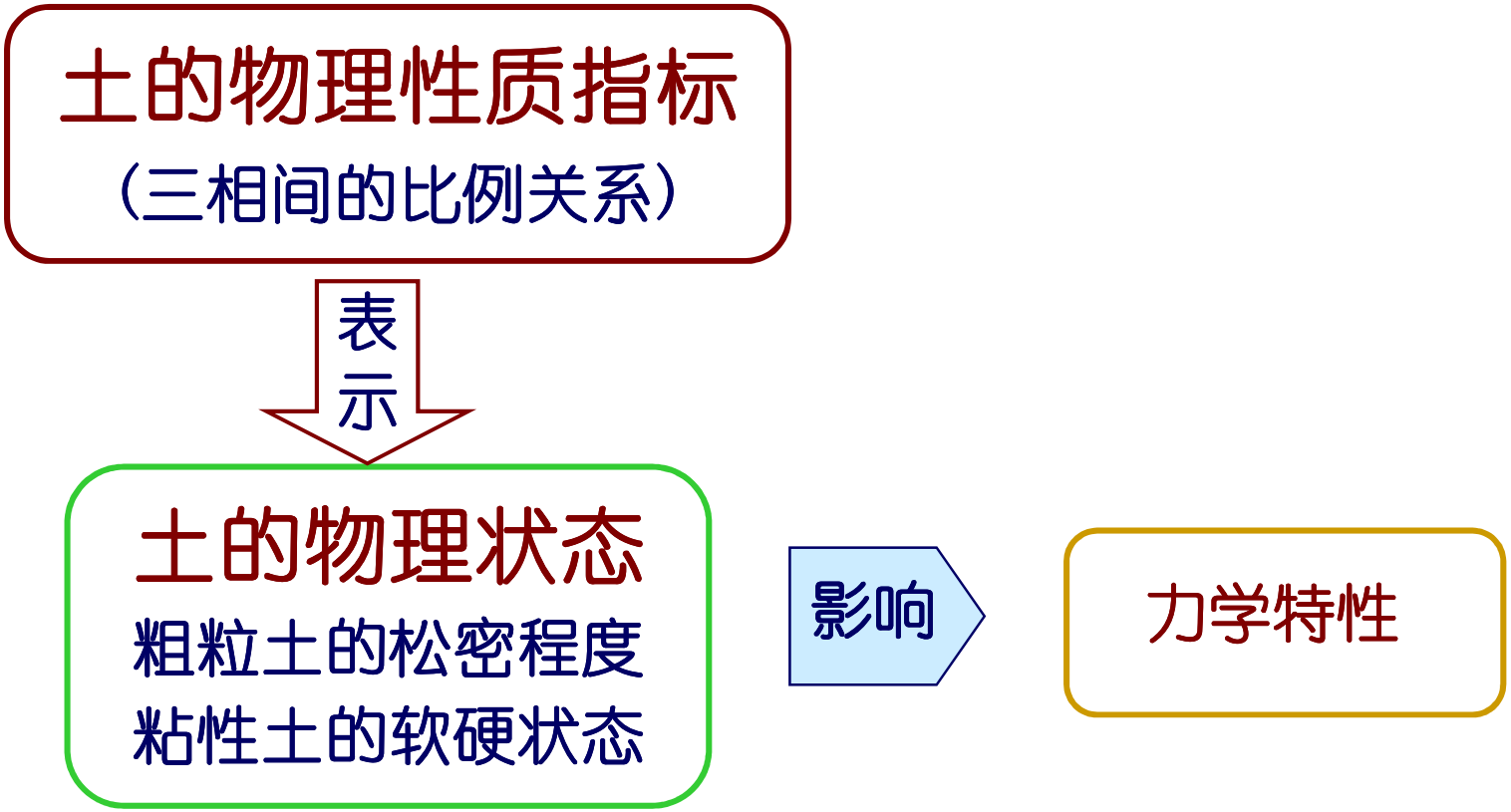
土体有三个组成部分：固相、液相和气相

- 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

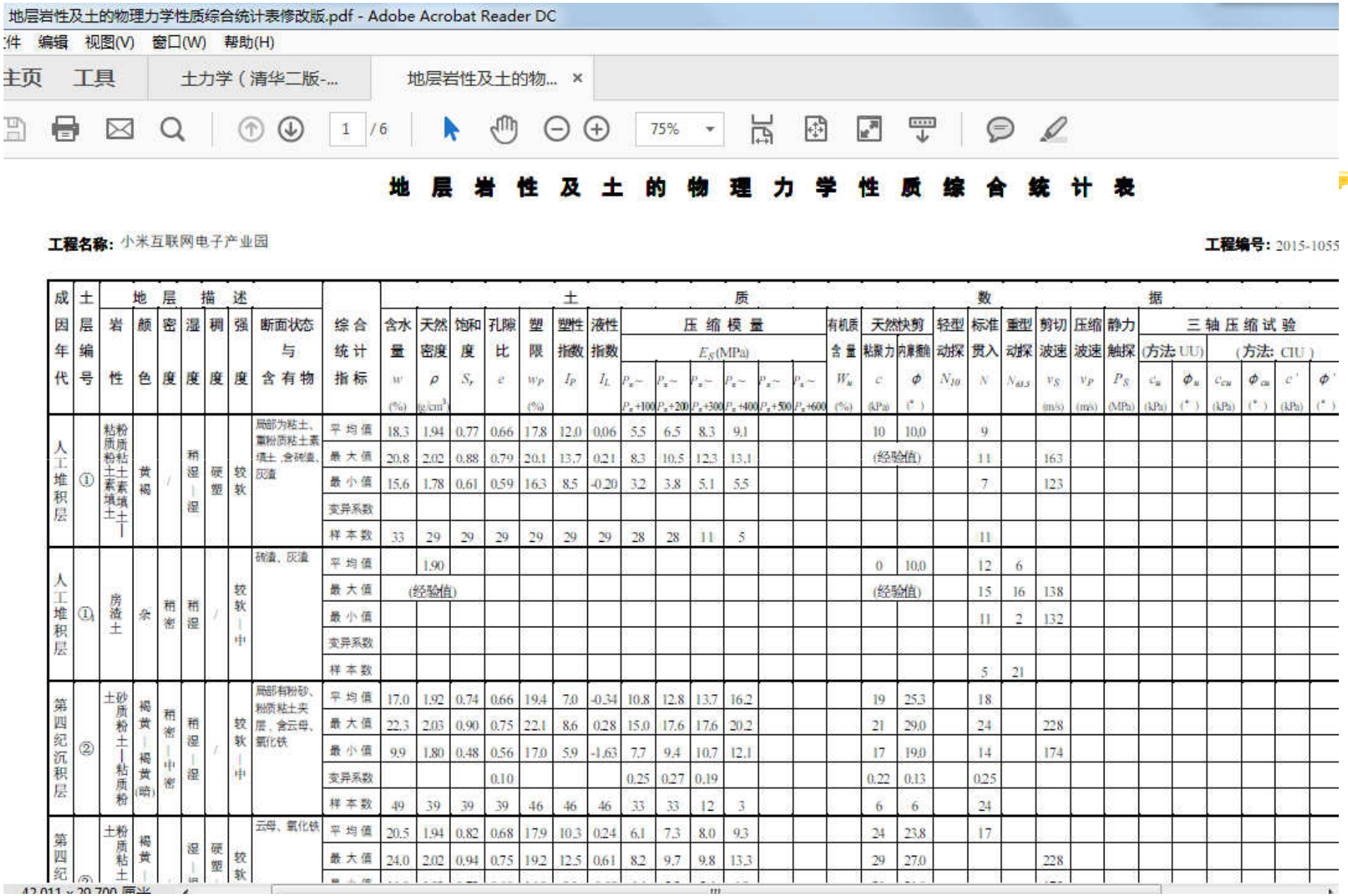
第1章：土的物理性质与工程分类

§1.1 土的形成 ✓
§1.2 土的三相组成 ✓
§1.3 土的物理状态
§1.4 土的结构
§1.5 土的工程分类
§1.6 土的压实性

土的物理状态



P18　1.3



地 层 岩 性 及 土 的 物 理 力 学 性 质 综 合 统 计 表

工程名称： 小米互联网电子产业园　　**工程编号：** 2015-1055

成因年代	土层编号	地层描述：岩性	颜色	密度	湿度	稠度	强度	断面状态与含有物	综合统计指标	土质数据：含水量 w (%)	天然密度 ρ (g/cm³)	饱和度 S_r	孔隙比 e	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩模量 E_S(MPa) P_z～P_z+100	P_z+100～P_z+200	P_z+200～P_z+300	P_z+300～P_z+400	P_z+400～P_z+500	P_z+500～P_z+600	有机质含量 W_u (%)	天然快剪 粘聚力 c (kPa)	天然快剪 内摩擦角 ϕ (°)	轻型动探 N_{10}	标准贯入 N	重型动探 $N_{63.5}$	剪切波速 v_S (m/s)	压缩波速 v_P (m/s)	静力触探 P_S (MPa)	三轴压缩试验（方法：UU） c_u (kPa)	ϕ_u (°)	（方法：CIU） c_{cu} (kPa)	ϕ_{cu} (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
人工堆积层	①	粉质粘土素填土—粘质粉土素填土	黄褐	/	稍湿—湿	硬塑	较软	局部为粘土、粗粉质粘土素填土，含砖渣、灰渣	平均值	18.3	1.94	0.77	0.66	17.8	12.0	0.06	5.5	6.5	8.3	9.1				10	10.0		9										
									最大值	20.8	2.02	0.88	0.79	20.1	13.7	0.21	8.3	10.5	12.3	13.1				（经验值）			11		163								
									最小值	15.6	1.78	0.61	0.59	16.3	8.5	-0.20	3.2	3.8	5.1	5.5							7		123								
									变异系数																													
									样本数	33	29	29	29	29	29	29	28	28	11	5							11										
人工堆积层	①	房渣土	杂	稍密	稍湿	/	较软—中	砖渣、灰渣	平均值		1.90												0	10.0		12	6									
									最大值	（经验值）													（经验值）			15	16	138								
									最小值																		11	2	132								
									变异系数																												
									样本数																		5	21								
第四纪沉积层	②	砂质粉土—粘质粉土	褐黄—褐黄(暗)	稍密—中密	稍湿—湿	/	较软—中	局部有粉砂、粉质粘土夹层，含云母、氧化铁	平均值	17.0	1.92	0.74	0.66	19.4	7.0	-0.34	10.8	12.8	13.7	16.2				19	25.3		18										
									最大值	22.3	2.03	0.90	0.75	22.1	8.6	0.28	15.0	17.6	17.6	20.2				21	29.0		24		228								
									最小值	9.9	1.80	0.48	0.56	17.0	5.9	-1.63	7.7	9.4	10.7	12.1				17	19.0		14		174								
									变异系数				0.10				0.25	0.27	0.19				0.22	0.13		0.25										
									样本数	49	39	39	39	46	46	46	33	33	12	3				6	6		24										
第四纪	⑤	粉质粘土	褐黄—		湿—	硬塑	较软	云母、氧化铁	平均值	20.5	1.94	0.82	0.68	17.9	10.3	0.24	6.1	7.3	8.0	9.3				24	23.8		17										
									最大值	24.0	2.02	0.94	0.75	19.2	12.5	0.61	8.2	9.7	9.8	13.3				29	27.0				228								

物理性质指标

同一种土，密实时抗剪强度高，松散时抗剪强度低；对于细粒土，含水量少时则硬，多时则软。这说明土的性质不仅取决于三相组成的性质，还与三相之间的比例关系有关。

密实程度
干湿程度
……

定义

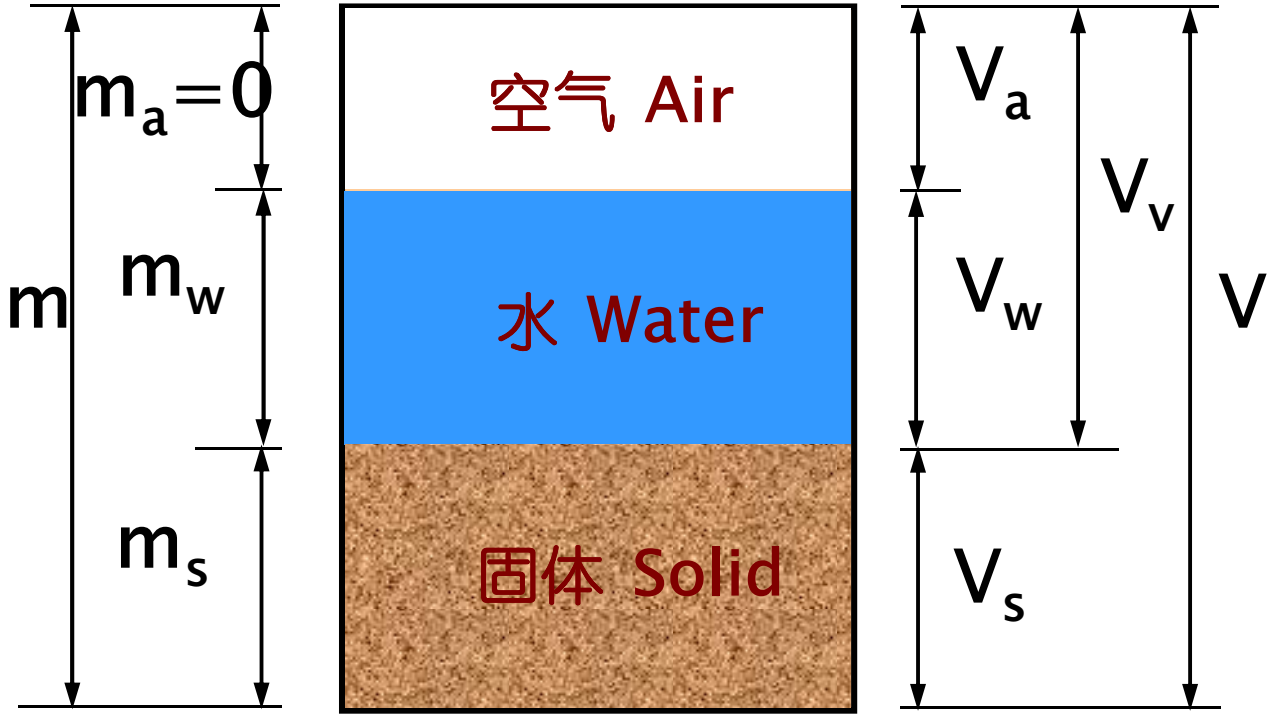
土的三个组成相的体积和质量上的比例关系

- ✧ 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

P18

三 相 草 图

沉底绘图原则自下而上
质量左侧体积右侧
记住英文



P19 图1-17
应指出实际土体不是三明治

$M_w = 1 * V_w = V_w$

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:

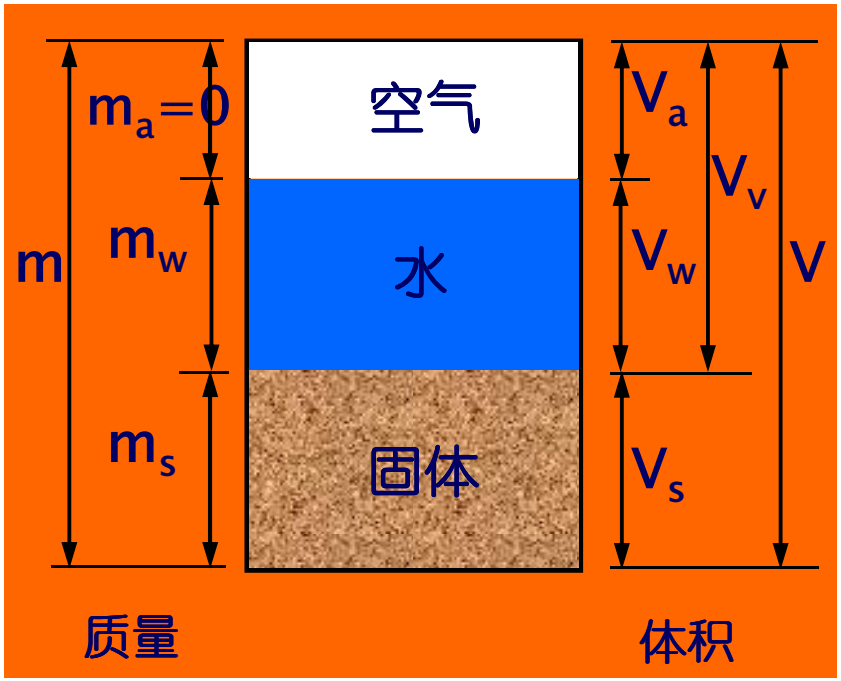
$$m = m_s + m_w + m_a$$

$$m_a \approx 0$$

$$m_w = \rho_w V_w$$

$$V = V_s + V_a + V_w$$

$$V_v = V_a + V_w$$



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

基本物理性质试验

为了确定三相草图诸量中的三个量，通常进行三个基本的物理性质试验：

- ☞ 土的密度试验
- ☞ 土粒比重试验
- ☞ 土的含水量试验

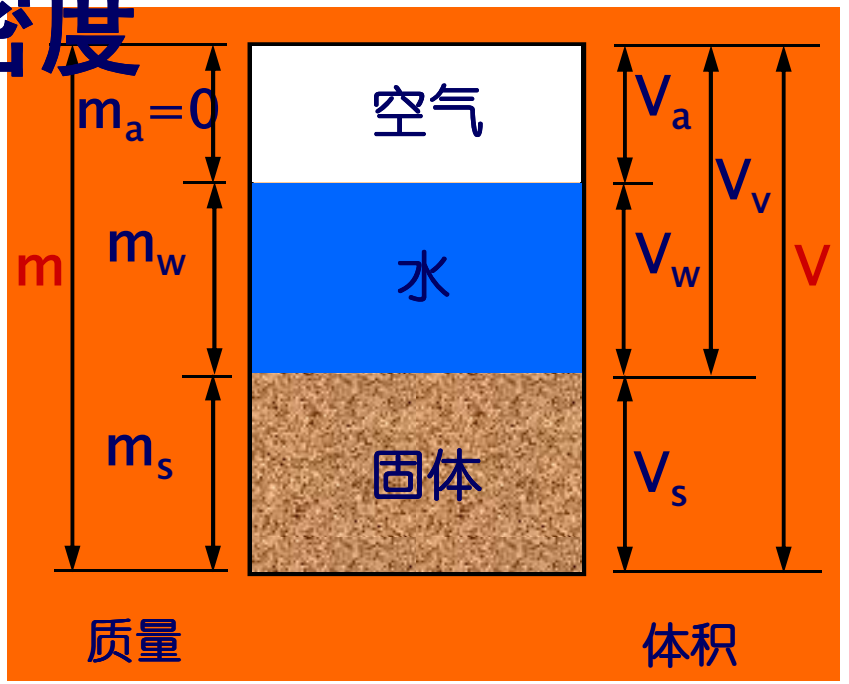
P19-20

基本试验指标-土的密度

■ 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/m³ 或 g/cm³
- 一般范围: 1.60~2.20 g/cm³

环刀法

相关指标：　土的容重 $\gamma=\rho g$

单位：kN/m³ 亦称为重度

工程上更常用，用于计算土的自重应力

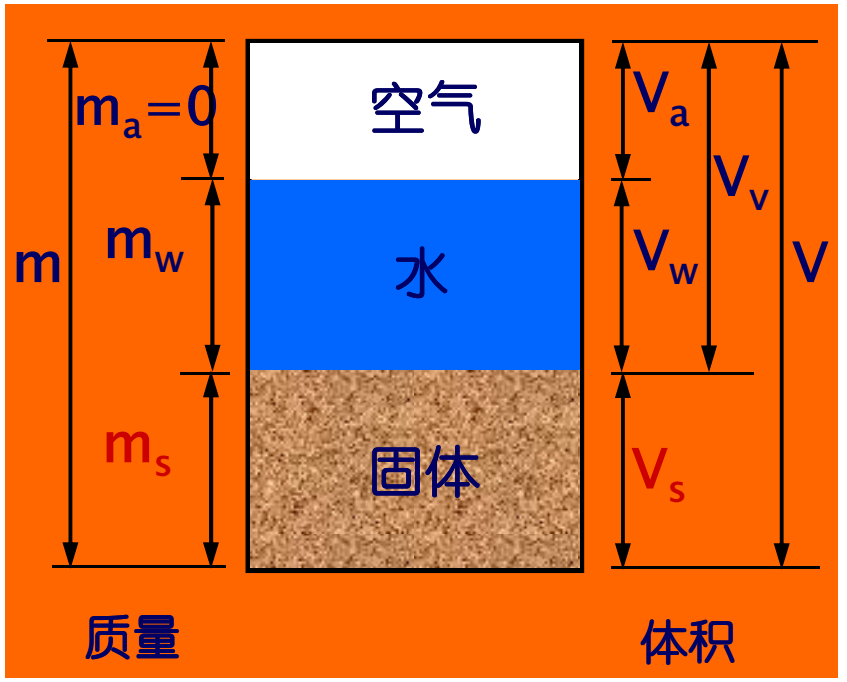
抄写下来该定义：土粒在105 ˚C至110 ˚C温度下烘至恒重时的质量与同体积4 ˚C时的纯水的质量之比

基本试验指标-土粒比重

■ 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：

$$G_s = \frac{m_s}{V_s(\rho_w^{4^\circ C})} = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4^\circ C}}$$



- 单　　位：无量纲
- 一般范围：粘性土 2.70~2.75，砂土 2.65

P20 式1-9

$\rho_w^{4^\circ C}$ =1.0 g/cm³

土粒比重在数值上等于土粒的密度

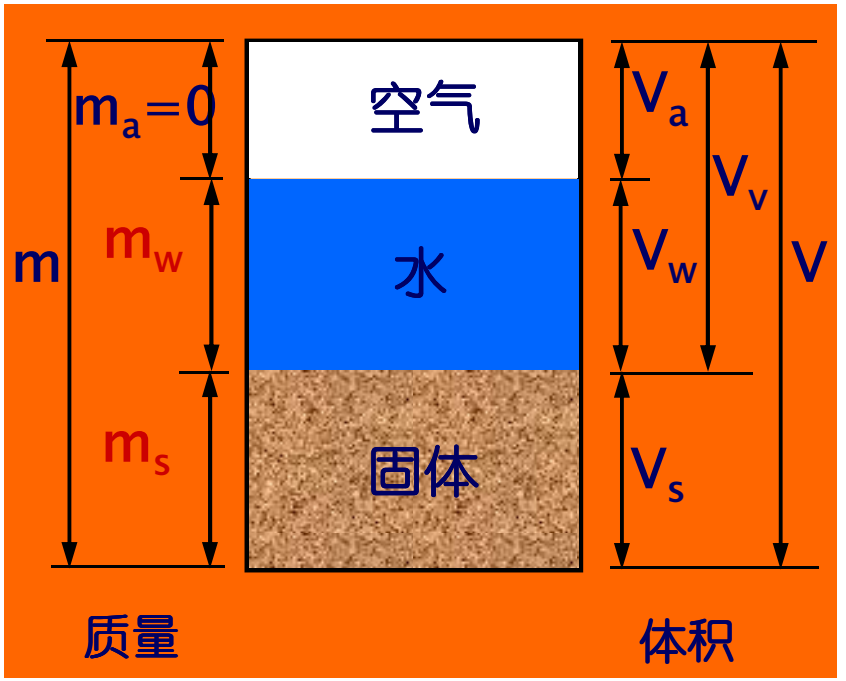
基本试验指标 – 含水量

■ 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%

P20　测定方法

表示土中孔隙含量的指标

- 孔隙比e：土中孔隙体积与固体颗粒体积之比，为无量纲

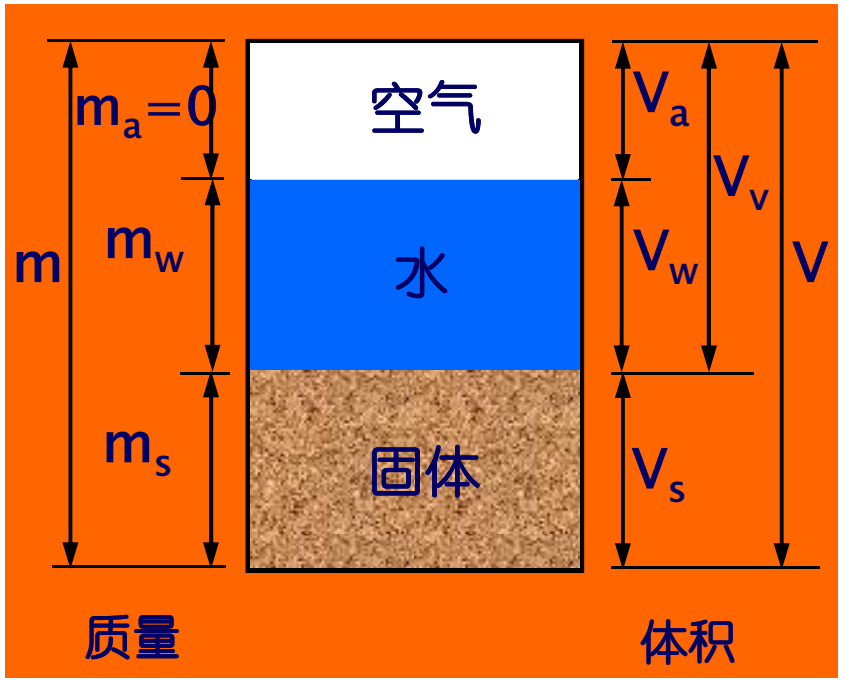
$$e = V_v / V_s$$

- 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%

粘性土：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：

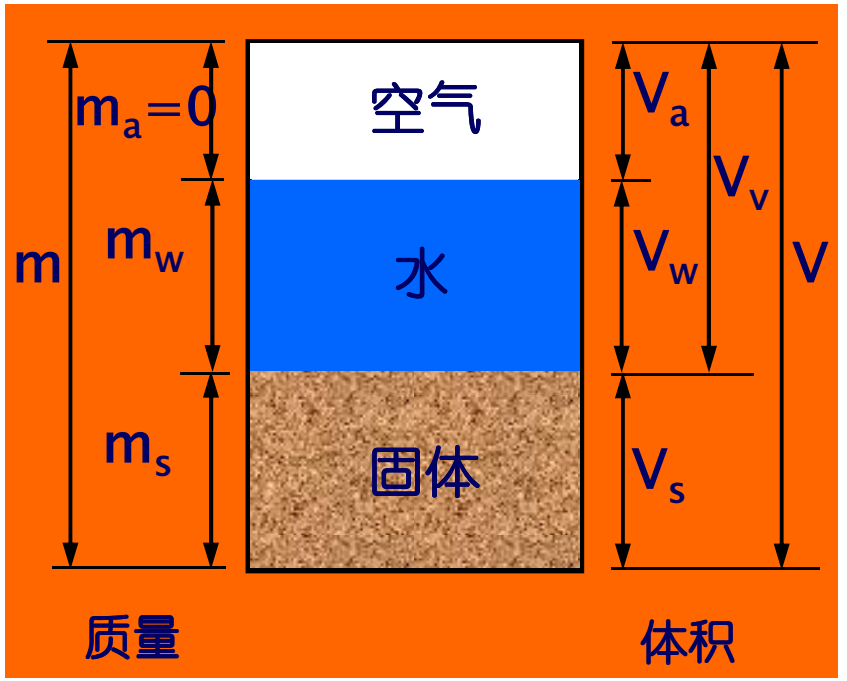
$$n = \frac{e}{1+e} \qquad e = \frac{n}{1-n}$$

可用三相草图推出

P20 土的孔隙性

表示土中含水程度的指标

- 含水量：$w(\%)=\frac{m_w}{m_s}$
- 含水率



- 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：$S_r=1$

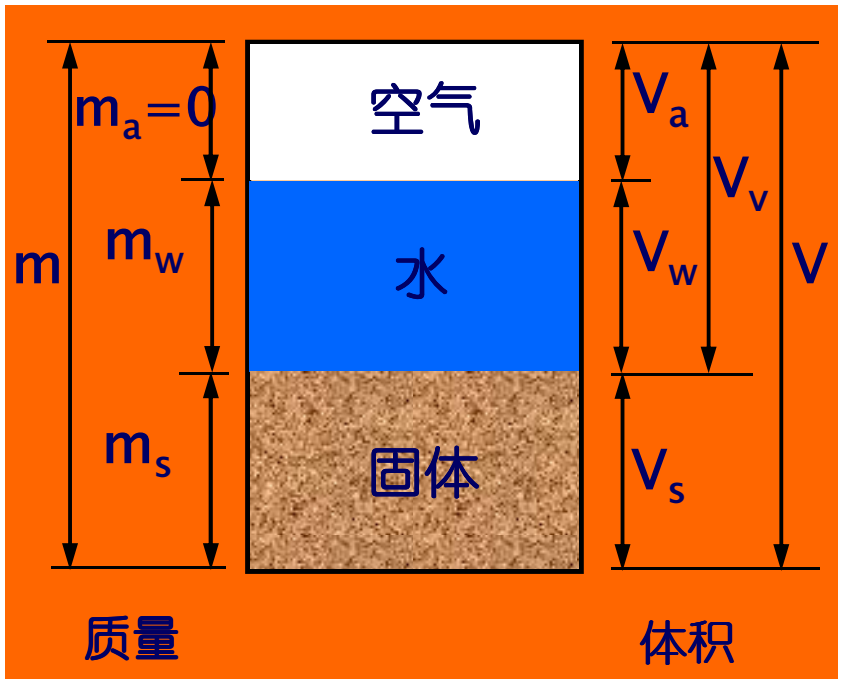
P21 式1-15

含水率的率是相对比值

孔隙率的率是总量比值

孔隙比的比是相对比值

表示土体密度和容重的指标



- 天然密度 $\rho=\dfrac{m}{V}=\dfrac{m_s+m_w}{V_s+V_w+V_a}$

  天然容重 $\gamma=\rho g$

- 干密度：土被烘干时的密度，

$$\rho_d=m_s/V$$

$\gamma_d=\rho_d g$ 干容重：

- 饱和密度：土被饱和时的密度，

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

$\gamma_{sat}=\rho_{sat} g$ 饱和容重：

- 浮容重： $\gamma'=\gamma_{sat}-\gamma_w$

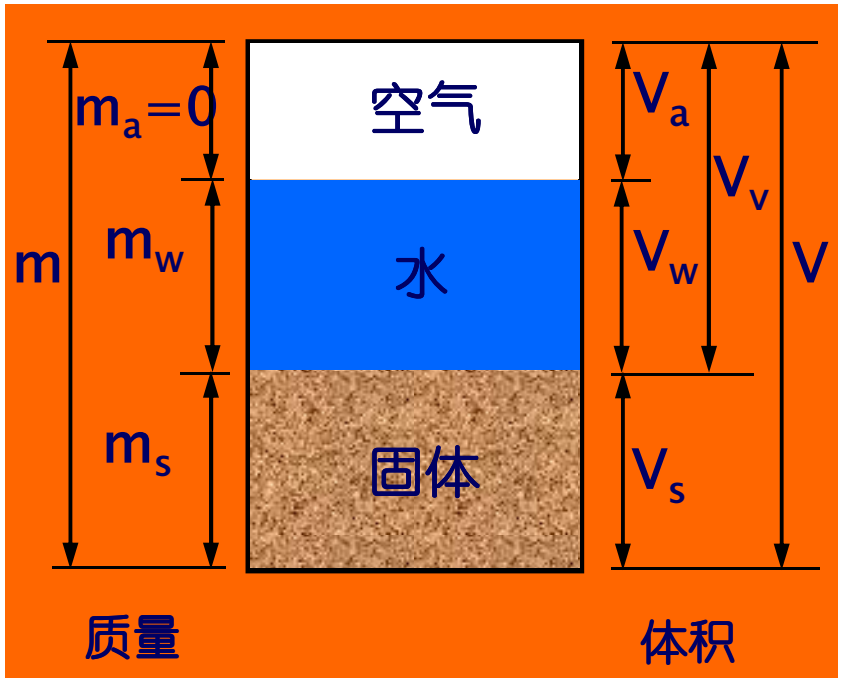
~~浮密度~~ 静水下的有效容重

P21 土的密度

各种密度容重间的大小关系

- 天然密度 $\rho = \dfrac{m}{V} = \dfrac{m_s + m_w}{V}$
- 干密度 $\rho_d = m_s / V$
- 饱和密度 $\rho_{sat} = \dfrac{m_s + \rho_w V_v}{V}$

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

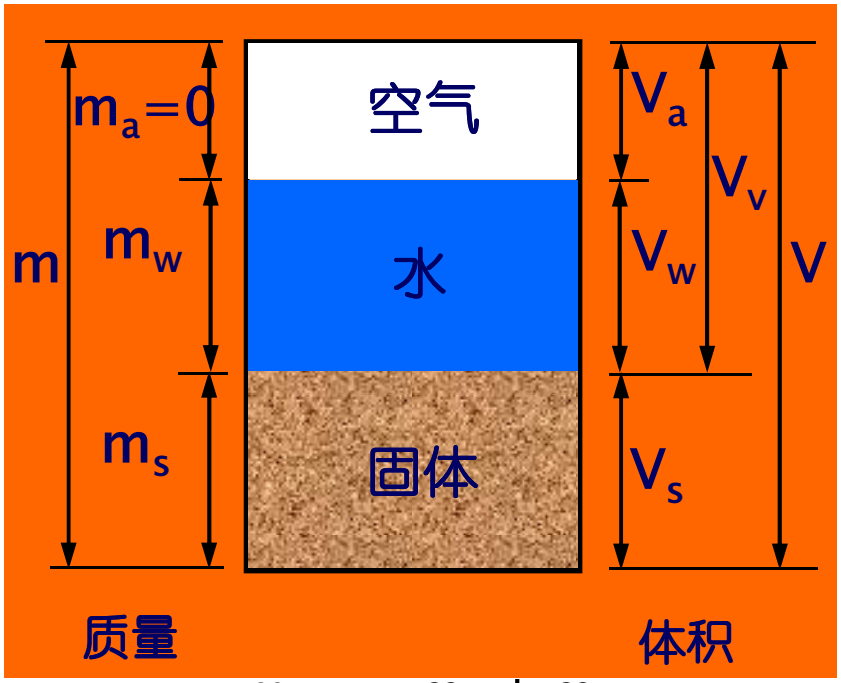


- 天然容重 $\gamma = \rho g$
- 干容重 $\gamma_d = \rho_d g$
- 饱和容重 $\gamma_{sat} = \rho_{sat} g$
- 浮容重 $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

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

沉底绘图原则自下而上
质量左侧体积右侧
记住英文

$$G_s = \frac{m_s}{V_s(\rho_w^{4^\circ C})} = \frac{\rho_s}{\rho_w^{4^\circ C}}$$



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

质量比

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

$$\rho_d = m_s / V$$

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

质量与体积比

$$e = V_v / V_s$$

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

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

体积比

小　结

常用的物理性质指标间的换算关系：

✧Vs=1 or V=1 看书

教科书 P23 表1-8

P21-23 例题1-3、1-4每年必考题

学习要点：

✧ 从物理意义上理解指标间的关系

✧ 不鼓励死记硬背

✧ 必要时利用三相草图推导

若有时间可以
讲解例题****

小　　结

密实程度
干湿程度
……

定义

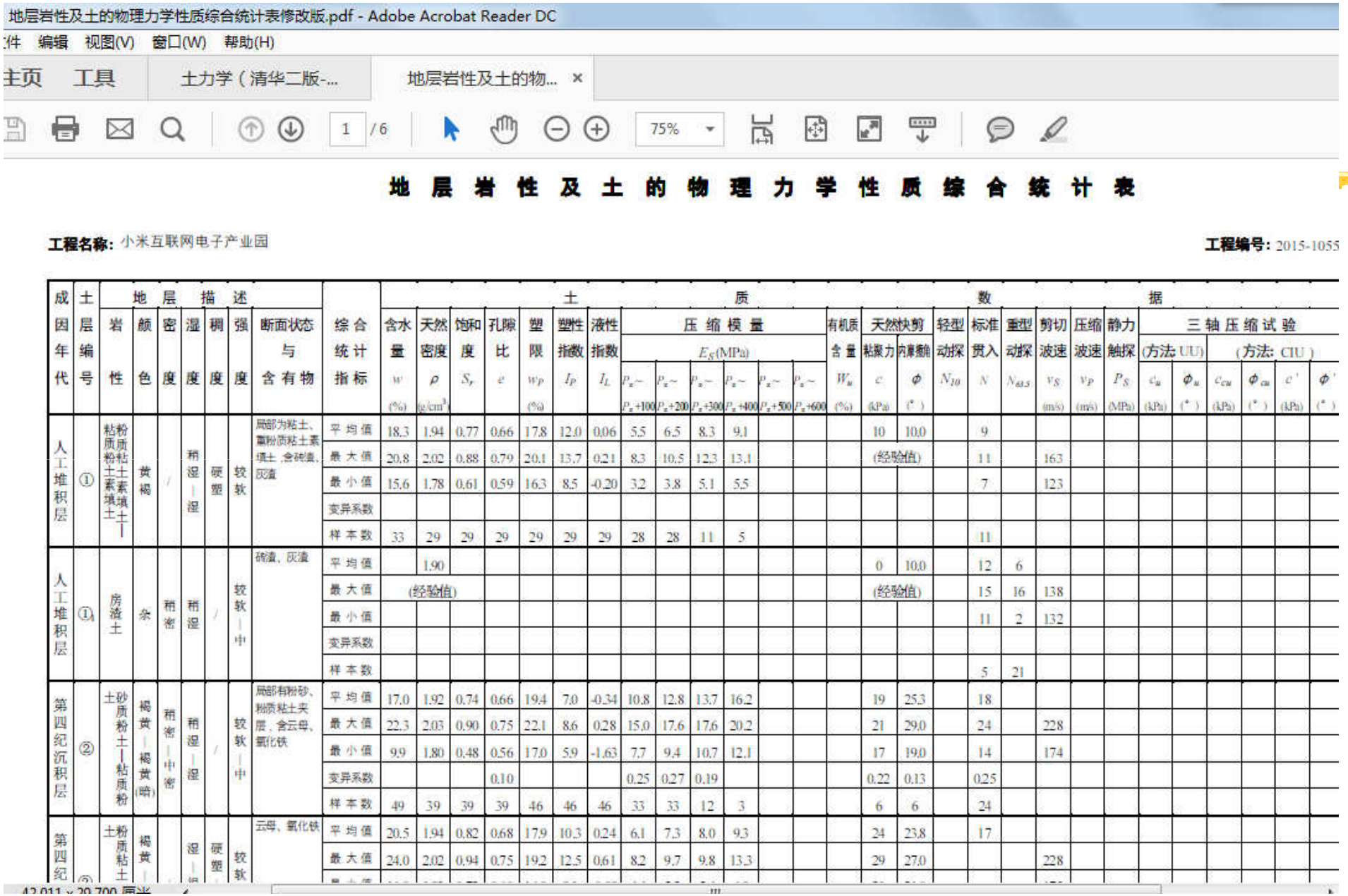
土的三个组成相的体积和质量上的比例关系

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
- ✧密度和容重

- 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



地层岩性及土的物理力学性质综合统计表修改版.pdf - Adobe Acrobat Reader DC

件 编辑 视图(V) 窗口(W) 帮助(H)

主页 工具 土力学（清华二版-... 地层岩性及土的物... ×

1 / 6 75%

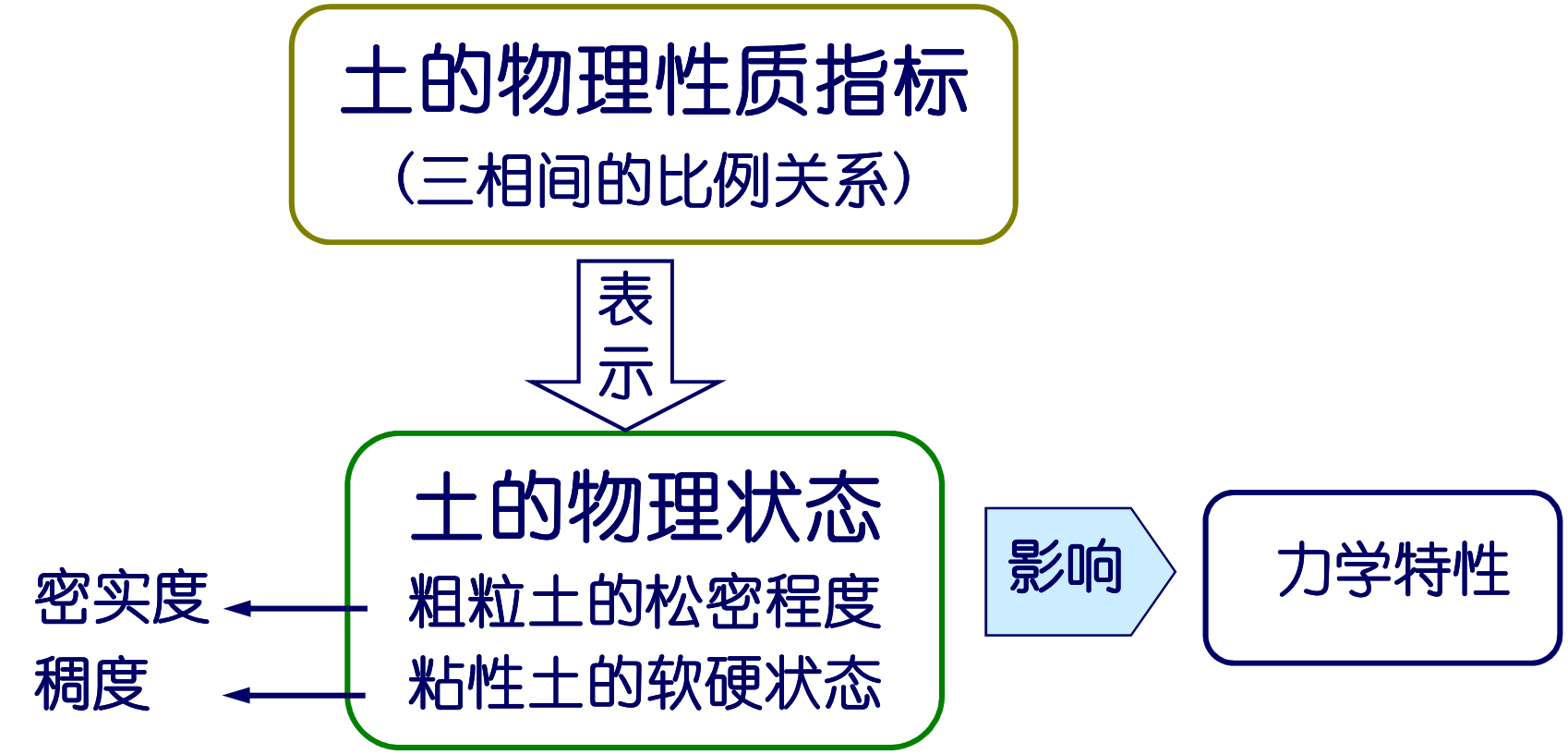
地 层 岩 性 及 土 的 物 理 力 学 性 质 综 合 统 计 表

工程名称： 小米互联网电子产业园 **工程编号：** 2015-1055

成因年代	土层编号	地层描述：岩性	颜色	密度	湿度	稠度	强度	断面状态与含有物	综合统计指标	土质数据：含水量 w (%)	天然密度 ρ (g/cm³)	饱和度 S_r	孔隙比 e	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩模量 E_S(MPa) P_z～P_z+100	P_z+100～P_z+200	P_z+200～P_z+300	P_z+300～P_z+400	P_z+400～P_z+500	P_z+500～P_z+600	有机质含量 W_u (%)	天然快剪 粘聚力 c (kPa)	天然快剪 内摩擦角 φ (°)	轻型动探 N_{10}	标准贯入 N	重型动探 $N_{63.5}$	剪切波速 v_S (m/s)	压缩波速 v_P (m/s)	静力触探 P_S (MPa)	三轴压缩试验 (方法: UU) c_u (kPa)	(方法: UU) ϕ_u (°)	(方法: CIU) c_{cu} (kPa)	(方法: CIU) ϕ_{cu} (°)	(方法: CIU) c' (kPa)	(方法: CIU) ϕ' (°)
人工堆积层	①	粉质粘土素填土—粘质粉土素填土	黄褐	/	稍湿—湿	硬塑	较软	局部为粘土、粗粉质粘土素填土，含砖渣、灰渣	平均值	18.3	1.94	0.77	0.66	17.8	12.0	0.06	5.5	6.5	8.3	9.1				10	10.0		9											
									最大值	20.8	2.02	0.88	0.79	20.1	13.7	0.21	8.3	10.5	12.3	13.1				(经验值)			11		163								
									最小值	15.6	1.78	0.61	0.59	16.3	8.5	-0.20	3.2	3.8	5.1	5.5							7		123								
									变异系数																													
									样本数	33	29	29	29	29	29	29	28	28	11	5							11										
人工堆积层	①	房渣土	杂	稍密	稍湿	/	较软—中	砖渣、灰渣	平均值		1.90												0	10.0		12	6									
									最大值	(经验值)													(经验值)			15	16	138								
									最小值																		11	2	132								
									变异系数																												
									样本数																		5	21								
第四纪沉积层	②	土砂质粉土—粘质粉土	褐黄—褐黄(暗)	稍密—中密	稍湿—湿	/	较软—中	局部有粉砂、粉质粘土夹层，含云母、氧化铁	平均值	17.0	1.92	0.74	0.66	19.4	7.0	-0.34	10.8	12.8	13.7	16.2				19	25.3		18											
									最大值	22.3	2.03	0.90	0.75	22.1	8.6	0.28	15.0	17.6	17.6	20.2				21	29.0		24		228								
									最小值	9.9	1.80	0.48	0.56	17.0	5.9	-1.63	7.7	9.4	10.7	12.1				17	19.0		14		174								
									变异系数				0.10				0.25	0.27	0.19				0.22	0.13		0.25										
									样本数	49	39	39	39	46	46	46	33	33	12	3				6	6		24										
第四纪	⑤	土粉质粘土	褐黄—		湿—	硬塑	较软	云母、氧化铁	平均值	20.5	1.94	0.82	0.68	17.9	10.3	0.24	6.1	7.3	8.0	9.3				24	23.8		17											
									最大值	24.0	2.02	0.94	0.75	19.2	12.5	0.61	8.2	9.7	9.8	13.3				29	27.0				228								

42.011 × 29.700 厘米

土的物理状态指标



无粘性土的力学性质主要受到密实程度的影响；
黏性土的力学性质主要受含水率变化的影响

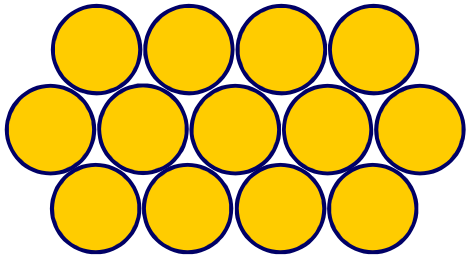
P24 1.3.2

粗粒土的密实状态

■ 密实度：通常指单位体积中固体颗粒含量的多少

● 物理性质指标：孔隙比e（孔隙率n）
干容重ρ_d

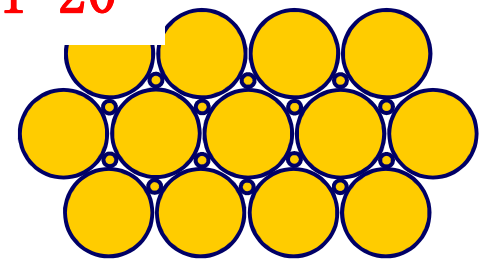
简单方便，但只能用于同一种土，不能反映级配的影响



$e_{min} = 0.35$

一起读书P24图1-20

● 相对密度：$D_r = \dfrac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$



$e_{min} = 0.20$

P25 式1-19

e_{max}与e_{min}：最大与最小孔隙比

粗粒土的最大与最小孔隙比

- 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

粗粒土的相对密度

- 相对密度

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \qquad D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{d\,min})\rho_{d\,max}}{(\rho_{d\,max} - \rho_{d\,min})\rho_d}$$

P25 式1-19 或P22　　P25 式1-20

- 粗粒土的密实度标准

$D_r = 0$	最松状态
$D_r \le 1/3$	疏松状态
$1/3 < D_r \le 2/3$	中密状态
$D_r > 2/3$	密实状态
$D_r = 1$	最密状态

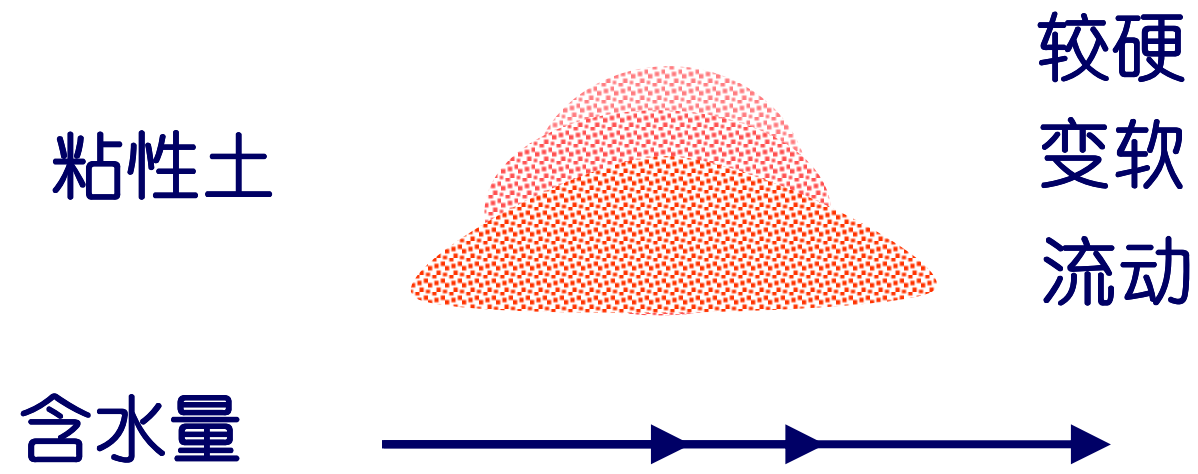
- 相对密度指标主要用于人工填土，对天然砂土层采用原位标准贯入试验法测定

P26 表1-10上面首行

粘性土的稠度状态

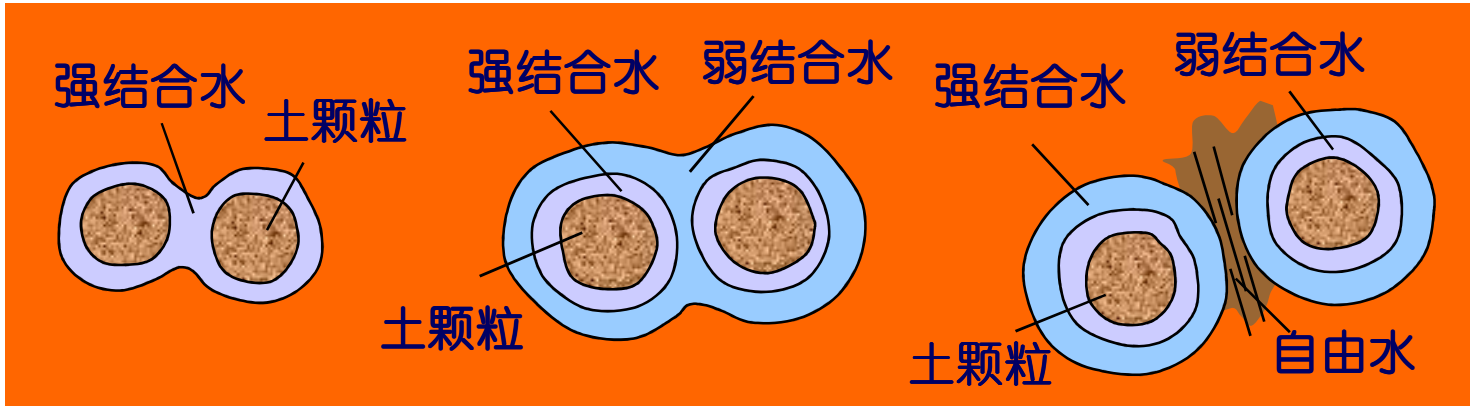
- 粘性土最主要的物理状态特征是它的稠度，稠度是指土的软硬程度或土对外力引起变形或破坏的抵抗能力

稠度状态与含水量有关



P26 2

粘性土的稠度状态



Atterberg limits → 粘性土的稠度反映土中水的形态

土的稠度状态–塑性指数Ip

- 定义： $I_p = w_L - w_p$ 式1-21 大体上表示土的弱结合水含量

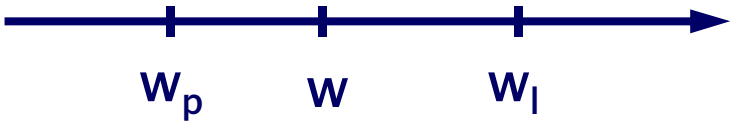
  - 反映吸附结合水的能力，即粘性大小
  - 大致反映粘土颗粒含量
  - 常作为细粒土工程分类的依据

- 问题：反映的是全部土颗粒吸附结合水的能力，不能充分反映粘土矿物表面活性的高低

土的稠度状态–液性指数IL

不同的粘土，w_p、w_l 大小不同。对于不同的粘土，含水量相同，稠度可能不同

液性指数：$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$$ 式1-22



$I_L \le 0$	坚硬(半固态)
$0 < I_L \le 0.25$	硬塑
$0.25 < I_L \le 0.75$	可塑
$0.75 < I_L \le 1$	软塑
$I_L > 1$	流塑

☞ 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。对重塑土较为合适。

小　　结

☞ 粗粒土的密实状态指标：　相对密度D_r

- 定义
- 判别标准

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

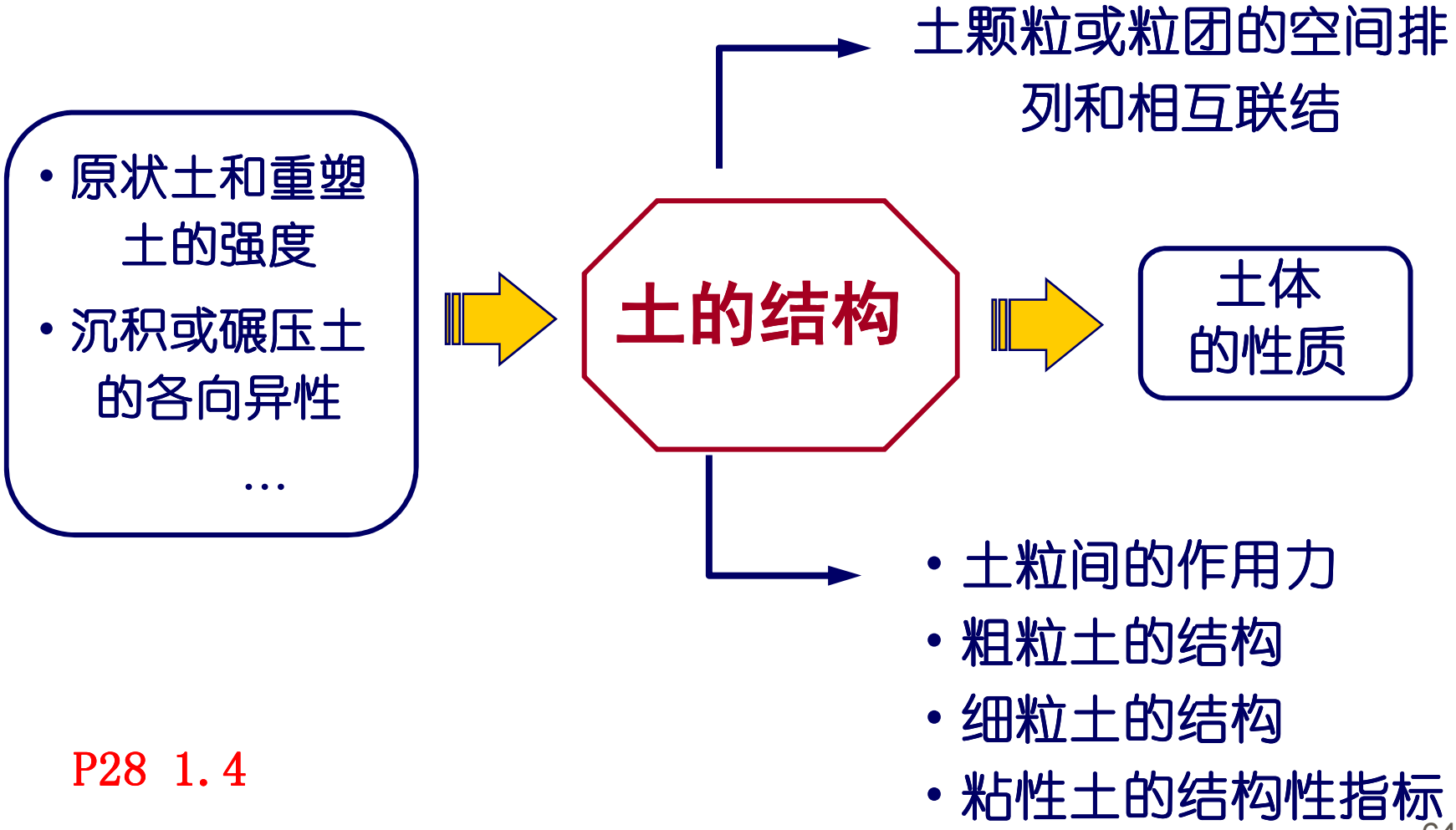
☞ 细粒土的稠度状态指标：　液性指数I_L

- 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

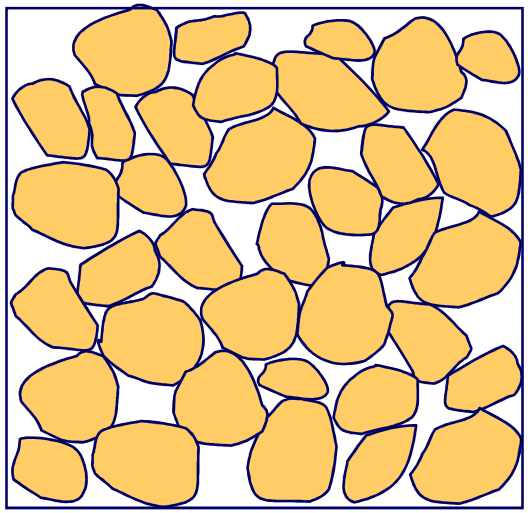
土 的 结 构


土颗粒或粒团的空间排列和相互联结
• 原状土和重塑土的强度
• 沉积或碾压土的各向异性
…
土的结构
土体的性质
• 土粒间的作用力
• 粗粒土的结构
• 细粒土的结构
• 粘性土的结构性指标

P28 1.4

粗粒土的结构

- 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

P30 1.4.1

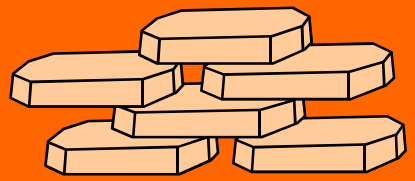
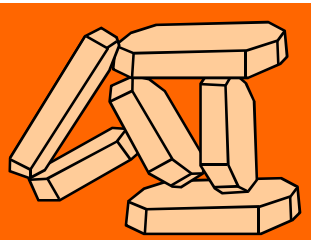
细土颗粒间的作用力

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(van der Waal's forces)：接触点处的分子引力，作用范围为几个分子的距离，是细粒土粘结在一起的主因
- ✧ 库仑力(Coulombic forces)：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(Cementation)：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(Capillary forces)：土中毛细作用形成的力

P31 1.4.2

细粒土的结构

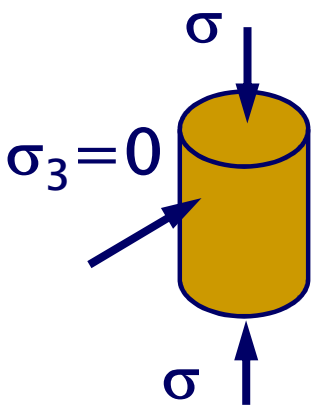
	分散结构	凝聚结构
示意图		
• 形成环境	淡水中沉积	海水中沉积
• 粒间作用力	表面力、胶结力 (粒间斥力占优势)	表面力、胶结力 (斥力减小引力增加)
• 排列形式	面与面	边、角与面 边、角与边

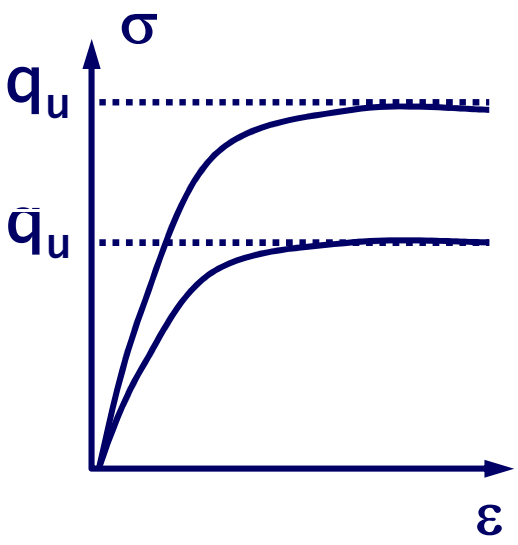
天然通常不是单一结构，可能是呈多种类型的综合结构。往往先形成团粒

反映粘性土结构性的指标

- ✧ 灵敏度
- ✧ 触变性

灵敏度S_t：原状土的无侧限抗压强度q_u和重塑土的无侧限抗压强度q_u之比





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

P32 1.4.3

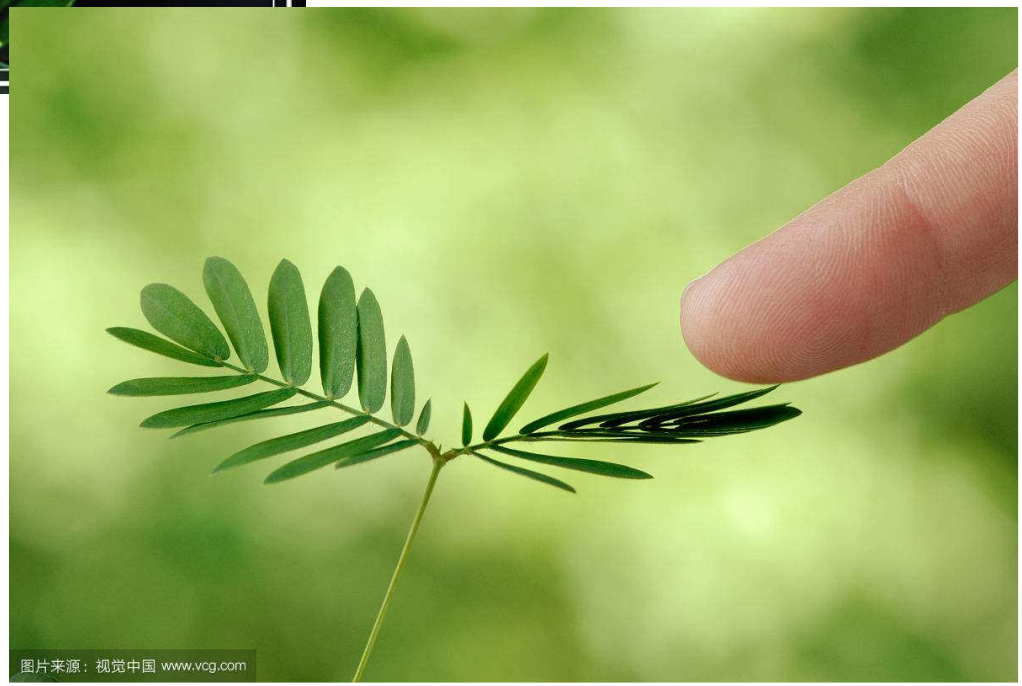
反映粘性土结构性的指标

- ✧ 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。

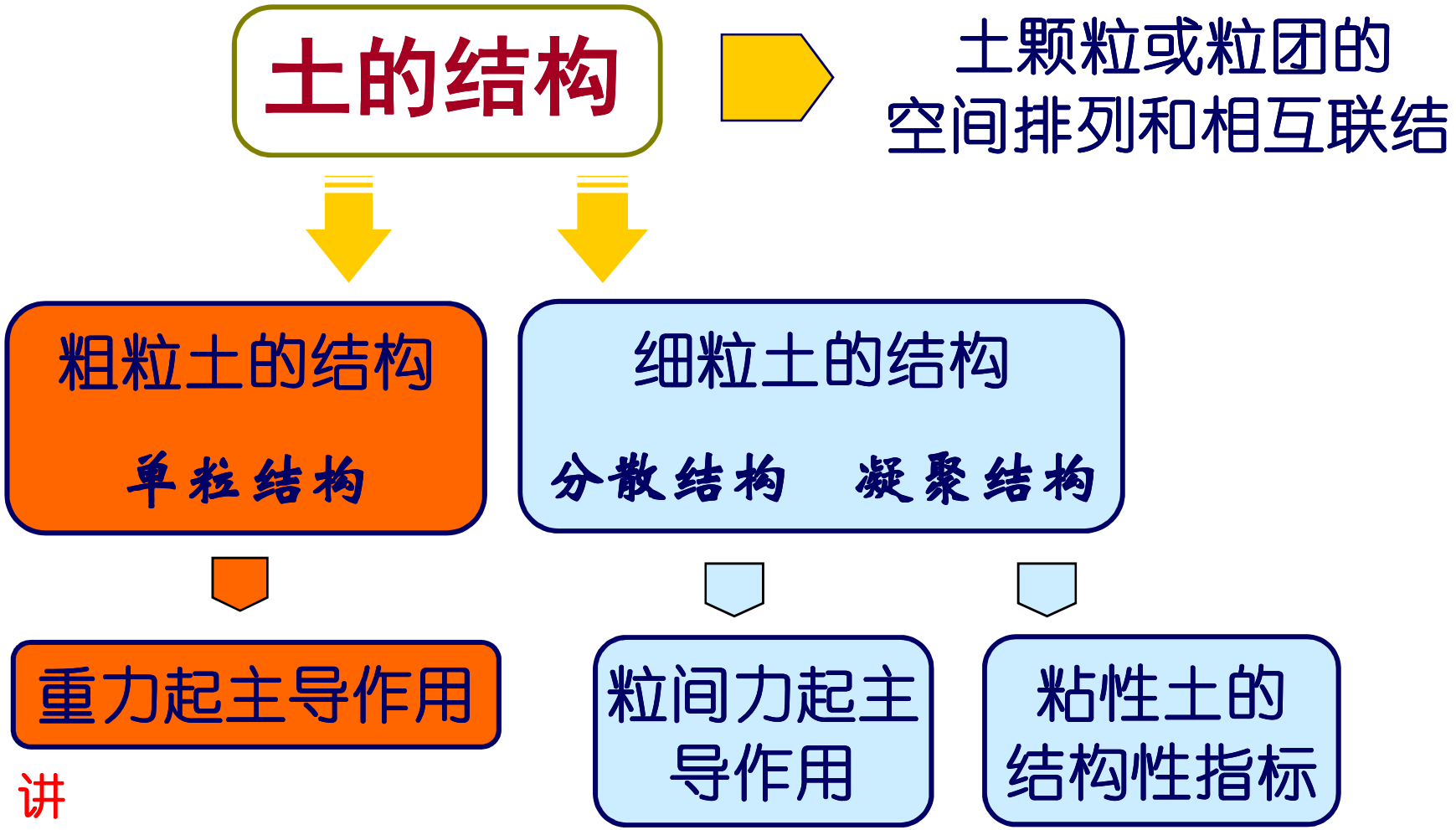
- ✧ 土的触变性是土结构中联结形态发生变化引起的，是土结构随时间变化的宏观表现。
- ✧ 目前尚没有合理的描述土触变性的方法和指标。

P33



P33

小　　结


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
分散结构　凝聚结构
重力起主导作用
讲
粒间力起主
导作用
粘性土的
结构性指标

第1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 土的物理状态 ✓

§1.4 土的结构✓

§1.5 土的工程分类

§1.6 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

第1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 土的物理状态 ✓

§1.4 土的结构 ✓

§1.5 土的工程分类

§1.6 土的压实性

1.5 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

☞ 要求：要有一定的逻辑性、系统性，纲目分明，简单易记，便于运用

→ 建筑地基基础设计规范- GB50007-2011分类法

水利部SL237-1999 土工试验规程 分类法

P33

仍在使用

建筑场地基基础规范GB50007-2011

土

- 岩石
- 碎石土
- 砂土
- 粉土
- 粘性土
- 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	

P37-38

建筑场地基基础规范GB50007-2011

岩石
碎石土
砂土
粉土
粘性土
人工填土

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%

建筑场地基基础规范GB50007-2002

岩石
碎石土
砂土
粉土
粘性土
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Ip≤10的土

- **粘性土**：塑性指数I_p>10的土

  - ✧ 粉质粘土：10<I_p≤17的土
  - ✧ 粘　土　：I_p>17的土

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

■ 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、红粘土

DEL

第1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 土的物理状态 ✓
- §1.4 土的结构 ✓
- §1.5 土的工程分类 ✓
- §1.6 土的压实性 ✓

土的压实性

- 土的压实：指通过夯打、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：夯打、振动、碾压

P40 1.6

室内击实试验

- 试验设备：击实筒V=1000cm³；击实锤w=25牛顿
- 试验条件：土样分层n=3层；落高d=30cm；
  击数N=27/层
- 击实能量

$$E = \frac{wdNn}{V} = 607.5KN \cdot m / m^3$$

- 试验方法：对w=constant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

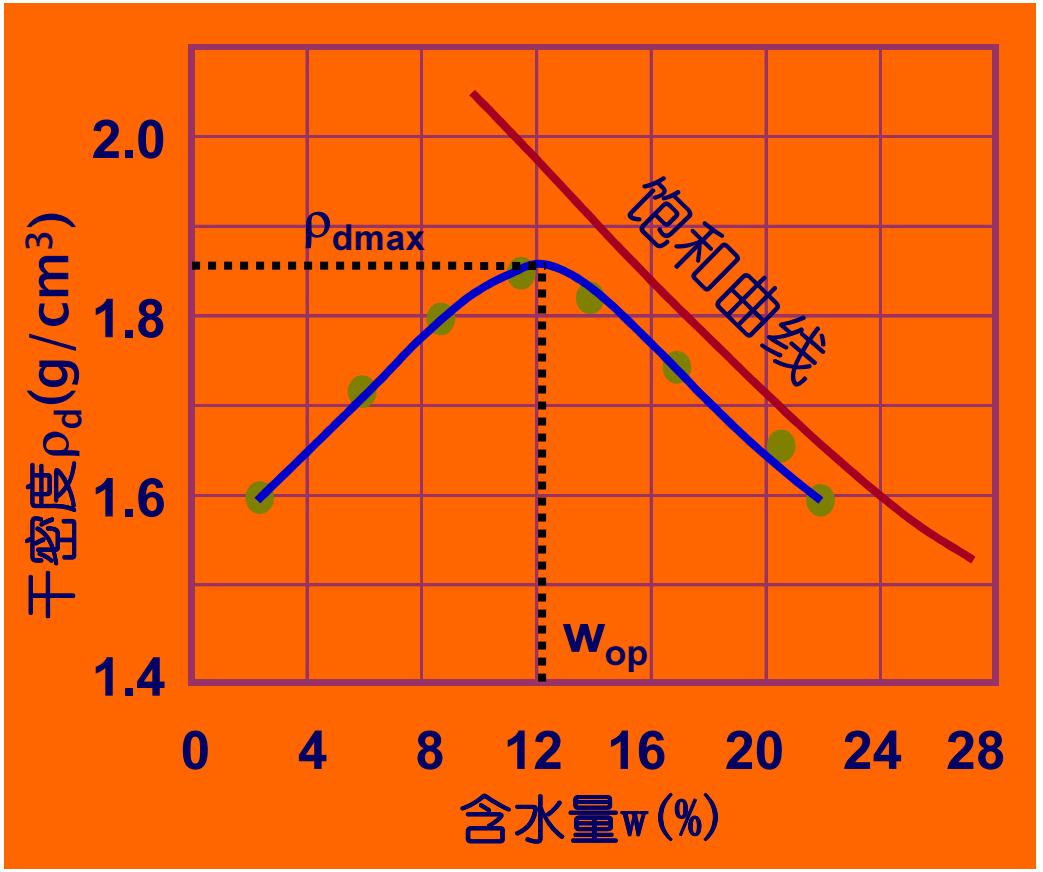
细粒土的压实性-击实曲线

- ✧ 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

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

粘性土透水性小，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。

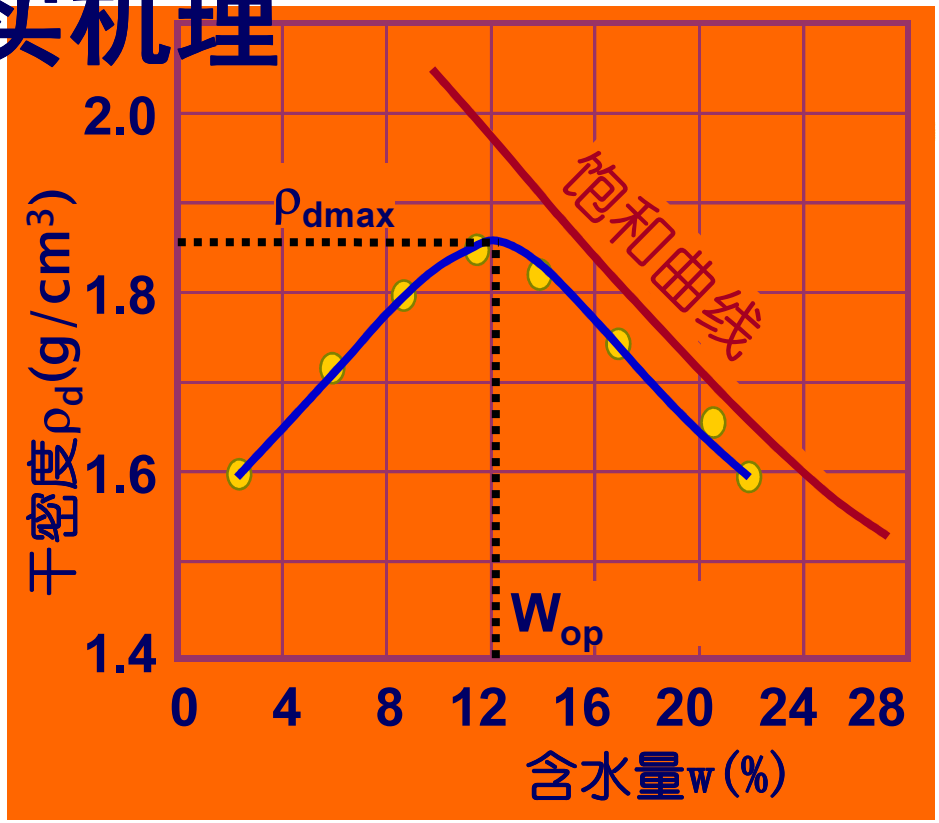


$$\rho_d = \frac{G_s\rho_w}{1+G_s w/S_r} \quad \boxed{S_r=1} \quad (\rho_d)_{sat} = \frac{G_s\rho_w}{1+G_s w}$$

P41 图1-32

细粒土的压实性-压实机理

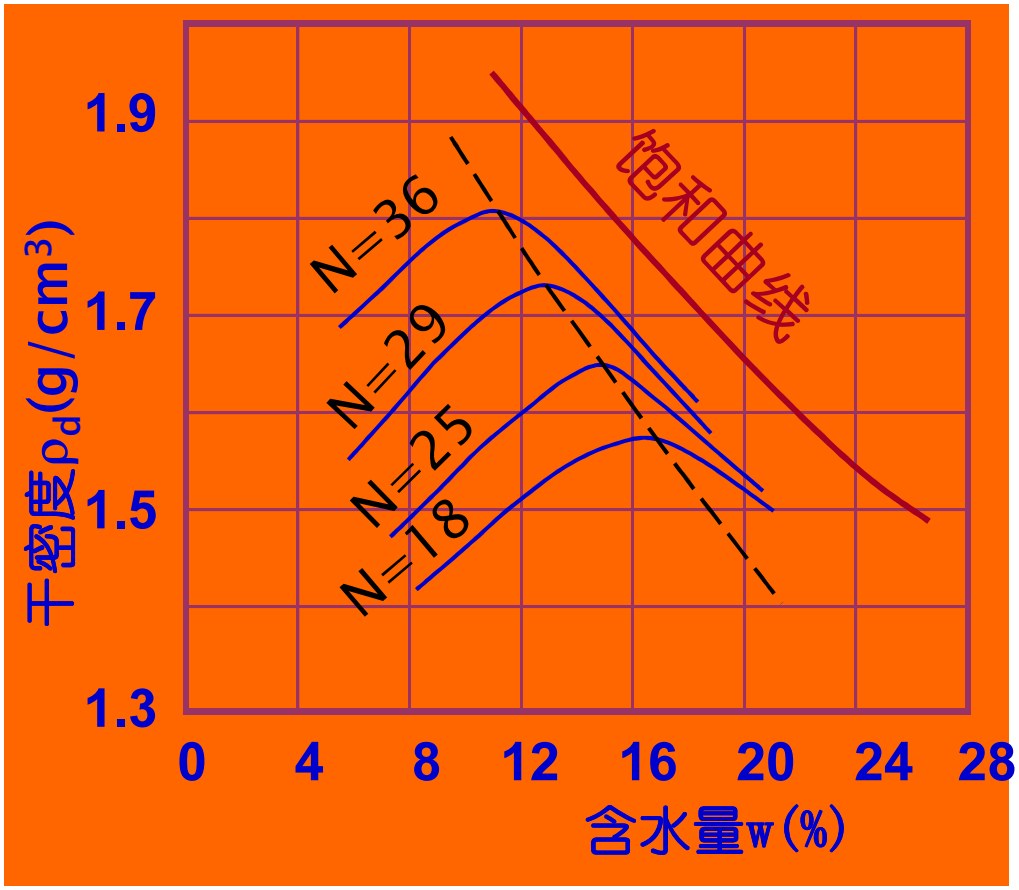
- 压实机理
  - 颗粒破碎（细粒土较少）
  - 粒间联结力被破坏，颗粒间孔隙被压缩
  - 土粒定向排列
- 压实与含水量



- 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，孔隙气尚没有形成封闭气泡，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-压实功能

- 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



壮汉与小孩揉面获得同样的和易性，用水量不同

P42 图1-33

细粒土的压实标准

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：

$$w = w_{op} \pm (2-3\%)$$

细粒土的压实标准

- 工程上常采用压实度D_c，作为填方压实密度控制的标准：

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

Ⅰ、Ⅱ级土石坝　D_c>95~98%

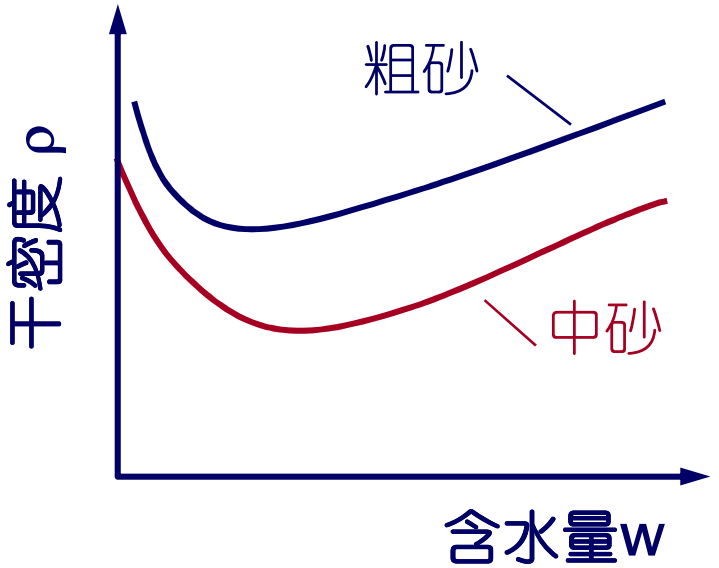
Ⅲ~Ⅴ 级土石坝　D_c>92~95%

P42 公式1-26

粗粒土的压实性

■ 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＝4~5%，中砂w＝7%时，干密度最小



■ 压实标准：常用相对密度控制　　Dr>0.7-0.75

P43 无粘性土的击实性

1.6.2

小　　结

☞ 室内击实试验

☞ 细粒土的压实性

- 击实曲线
- 最优含水量
- 最大干密度
- 压实功能
- 压实标准

☞ 粗粒土的压实性

- 击实曲线
- 压实标准

（1）击实能；（2）最优含水率；（3）有机质含量；（4）颗粒级配影响土体击实性的因素

Ref: 李广信 张丙印 于玉贞 土力学 第三版 清华大学出版社 2022.08

The end

文件名格式：班级 学号 姓名 简略实验名称

邮件标题同文件名

Any questions please 发送至

xingzhengwu@163.com