

基础地质学

第七章 工程地质

刘建国

清华大学环境学院

010-62782029

jgliu@tsinghua.edu.cn

主要内容

7.1 工程地质概述

7.2 岩土的工程性质

7.3 区域稳定性问题

7.4 岩土体稳定性问题

7.5 渗透稳定性问题

§ 7.1 工程地质概述

- **工程地质学**：是一门研究与**工程建设**有关的地质问题，为工程建设服务的地质学科。它是地质学的分支学科，属于应用地质学的范畴。
- 工程地质工作的目的：
 - ✓ （1）查明各类工程场区的地质条件，**选择最优场地**；
 - ✓ （2）对工程相关的各种地质问题进行综合**评价**；
 - ✓ （3）分析**预测**在工程活动作用下，地质条件可能出现的变化和作用；
 - ✓ （4）提出解决不良地质问题的**工程措施**，为保证工程的合理设计、顺利施工及正常使用提供可靠的科学依据。

§ 7.1 工程地质概述

➤ **工程地质条件**：各种对工程建设有影响的地质因素的总称。

- 地层岩性
- 地质构造
- 地貌
- 水文地质条件
- **岩土体的工程性质**
- 物理地质现象（滑坡、崩塌、岩溶、泥石流等）
- 天然建筑材料

§ 7.1 工程地质概述

➤ **工程地质问题**：与人类工程活动相关的地质问题。工程建设与地质环境相互作用、相互制约，地质环境对工程施工和运行产生影响，同时工程施工与运行也会对地质环境产生影响。

- 区域稳定性（活断层、地震、水库诱发地震、砂土液化和地面沉降）
- 岩土体稳定性（地基、斜坡、洞室）
- 渗透稳定性（渗透变形、岩溶渗漏）
- 侵蚀淤积（河流侵蚀淤积、海湖边岸磨蚀堆积）

§ 7.1 工程地质概述

- 工业与民用建筑工程：地基的变形、强度和稳定问题；
- 铁路道路工程：路基边坡、隧洞围岩和桥墩桥台稳定问题，冻胀问题；
- 地下建筑工程：围岩稳定、涌水及影响建筑施工的高地应力、高地热和有害气体问题、岩爆问题；
- 水利水电工程：区域稳定、坝基、边坡和地下洞室岩土体稳定，库坝区渗漏、库岸稳定、水库淤积、滨库区浸没、水库诱发地震等问题；
- 矿山工程：露天矿边坡及地下巷道的稳定及涌水、地面塌陷问题；
- 海港工程：码头地基、岸坡的稳定、海浪侵蚀及回淤问题；
- 红土、黄土、淤泥、膨胀土等特殊土的工程地质问题；
- 由于大量抽取地下水、石油及天然气而造成大范围地面沉降问题

§ 7.1 工程地质概述

➤ 工业与民用建筑工程：地基的变形、强度和稳定问题



意大利比萨斜塔

1173年9月8日动工，1178年到第4层中部，高度约29m时，因塔明显倾斜而停工。94年后复工，6年时间建完第7层，高48m，再次停工，于1360年复工至1370年竣工。全塔共8层，高度55m，基础底面平均压力约50kPa。

目前塔向南倾斜，南北两端沉降差1.8m，塔顶离中心线5.27m，倾斜 5.5° ，成为危险建筑。

§ 7.1 工程地质概述

➤ 工业与民用建筑工程：地基的变形、强度和稳定问题



加拿大特朗斯康谷仓地基沉降致建筑倾倒

设计时未对谷仓地基承载力进行调查研究，而采用了邻近建筑地基352kPa的承载力，事后1952年的勘察试验与计算表明，基础下埋藏有厚达16m的软粘土层，该地基的实际承载力为193.8 ~ 276.6kPa，远小于谷仓地基破坏时329.4kPa的地基压力，地基因超载而发生强度破坏。

§ 7.1 工程地质概述

- 工业与民用建筑工程：地基的变形、强度和稳定问题



墨西哥城地基沉降及不均匀沉降

墨西哥城的土层为深厚的湖相沉积层，土层具有极高的压缩性，导致建筑发生显著的沉降及不均匀沉降。

§ 7.1 工程地质概述

➤ 铁路道路工程：路基边坡、隧洞围岩和桥墩桥台稳定问题，冻胀问题；



道路边坡塌方



高危边坡支护

§ 7.1 工程地质概述

- 地下建筑工程：围岩稳定、涌水及影响建筑施工的高地应力、高地热和有害气体问题、岩爆问题；



高速公路隧道工程



地下洞室围岩涌水

§ 7.1 工程地质概述

- 水利水电工程：区域稳定、坝基、边坡和地下洞室岩土体稳定，库坝区渗漏、库岸稳定、水库淤积、滨库区浸没、水库诱发地震等问题；



长江三峡大坝



黄河龙羊峡大坝

§ 7.1 工程地质概述

- 水利水电工程：区域稳定、坝基、边坡和地下洞室岩土体稳定，库坝区渗漏、库岸稳定、水库淤积、滨库区浸没、水库诱发地震等问题；



三峡工程地下电站



溪洛渡电站地下洞室

§ 7.1 工程地质概述

- 水利水电工程：区域稳定、坝基、边坡和地下洞室岩土体稳定，**库坝区渗漏**、库岸稳定、**水库淤积**、滨库区浸没、水库诱发地震等问题；



水库淤积



水库大坝渗漏溃坝

§ 7.1 工程地质概述

➤ 矿山工程：露天矿边坡及地下巷道的稳定及涌水、地面塌陷问题



采矿导致地面塌陷

§ 7.1 工程地质概述

- 由于大量抽取地下水、石油及天然气而造成大范围地面沉降问题



地下水超采采矿导致地面沉降

§ 7.2 岩土的工程性质

➤ 岩石、岩体、土

- 岩石和土都是具有一定结构和构造的矿物集合体，是自然地质作用的产物。土是岩石风化、搬运、沉积的产物。
- 岩石矿物颗粒之间具有牢固的连结，这是岩石重要的结构特征，是岩石区别于土，具有更为优良的工程地质性能的主要原因。
- 岩体是岩石块体组成的结构体，被各种地质界面（结构面）所分割和限制而成，其工程性质由岩石和结构面共同决定。
- 岩体具有不连续性、非均质性和各向异性（不同于岩石），结构比土复杂，地应力比土高。

§ 7.2 岩土的工程性质

➤ 物理性质

- 密度，孔隙度，比热容

➤ 力学性质：岩土在各种静力、动力作用下表现出的性质。

在应力作用下，岩土首先发生变形，然后发生破坏。

- 变形：弹性模量（应力/弹性应变）；变形模量（应力/总应变）；泊松比（横向应变/纵向应变）
- 强度：岩土抵抗外荷作用而不发生破坏的能力。**抗压强度**（单向受压）；**抗拉强度**（单向受拉）；**抗剪强度**（剪切）

➤ 水理性质：岩土与水作用时表现出的性质。

- 吸水性，透水性，软化性，抗冻性

§ 7.2.1 岩体的工程性质

- 岩体的工程性质，主要取决于内部和外部两方面因素。
- 内部因素：矿物成分、结构、构造、成因、产状等
 - 矿物成分：不同矿物强度存在较大差异；取决于其中强度较低的矿物（如花岗岩中的黑云母，灰岩、砂岩中的粘土类矿物等）
 - 结构：结晶连接的岩石（大部分的岩浆岩、变质岩和部分沉积岩）强度较高，胶结物连接的岩石强度取决于胶结物（硅>钙>铁>泥）
 - 构造：反映岩石中矿物分布的不均匀性，如变质岩的片理构造，物理力学性质突变，容易遭受外力破坏
 - 成因
 - 产状

§ 7.2.1 岩体的工程性质

- 岩体的工程性质，主要取决于内部和外部两方面因素。
- 外部因素：地质构造、水的作用、风化作用等
 - 地质构造：层理、裂隙、孔隙等的发育影响岩石连续性和完整性，促进水的作用及风化作用
 - 水的作用：水沿着层理、裂隙、孔隙等进入岩石，削弱矿物颗粒间的连接，降低其整体强度
 - 风化作用：破坏岩石完整性，改变岩石矿物成分，降低岩石强度，增加其压缩性和透水性
- 评价岩体工程性质：从上述主要内外部因素着手

§ 7.2.1 岩体的工程性质

- 岩体是岩石和结构面的组合体，其稳定性取决于二者的组合特征。
- 结构面：岩体中没有或只有较低抗拉强度的力学不连续面，是存在于岩体中的各种地质界面的总称，如断层、节理、裂隙、软弱夹层等。
- 结构面特征：产状、间距、持续性、粗糙度、结构面壁强度、裂缝开度、充填物、渗透、节理组数、岩块尺寸等。
- 结构体：被结构面分割而成的岩石块体

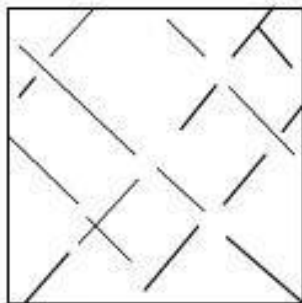
§ 7.2.1 岩体的工程性质

➤ 岩体结构类型及其特征

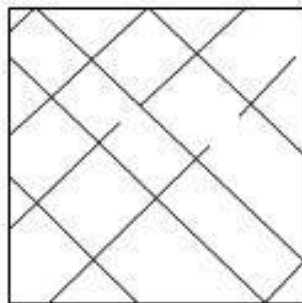
岩体结构类别		地质背景	结构面特征	结构体特征
整体块状结构	整体结构	岩性单一、构造变形轻微的巨厚层沉积岩、变质岩和火山熔岩、火成侵入岩	结构面少，一般不超过三组，延续性极差，多呈闭合状态，无填充或含少量碎屑	巨型块状
	块状结构	岩性较单一，受轻微构造作用的厚层沉积岩和变质岩、火成岩侵入体	结构面一般2-3组，裂隙延续性极差，多呈闭合状态。层面有一定的结合力	块状、菱形块状
层状结构	层状结构	受构造破坏或较轻的中厚层(大于30cm)岩体	结构面2-3组，以层面为主，有时也有软弱夹层或层间错动面，其延续性较好，层间结合力较差	块状、柱状、厚板状
	薄层状结构	厚度小于30cm，在构造作用下发生强烈褶曲和层间错动	层理、片理发达，原生软弱夹层、层间错动和小断层不时出现。结构面多为泥膜、碎屑和泥质充填	板状、薄板状
碎裂结构	镶嵌结构	一般发育于脆硬岩层中，结构组数较多，密度较大	以规模不大的结构面为主，但组数多，密度大，延续性差，闭合无填充或充填少量碎屑	形状不规则，但菱角显著
	层状碎裂结构	受构造裂隙切割的层状岩体	以层面、软弱夹层、层间错动面等为主，构造裂隙甚发达	以碎块状、板状、短柱状为主
	碎裂结构	岩性复杂，构造破碎较强烈，弱风化带	延续性差的结构面，密度大，相互交切	碎屑和大小不等的岩块。形状多种，不规则
散体结构		构造破碎带、强烈的风化带	裂隙和节理很发达，无规则	岩屑、碎片、碎块、岩粉

§ 7.2.1 岩体的工程性质

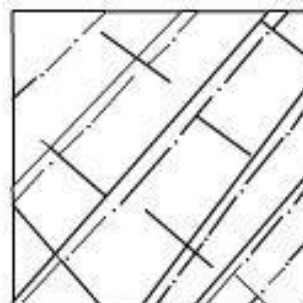
➤ 岩体结构类型及其特征



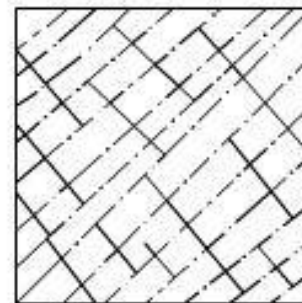
(a)



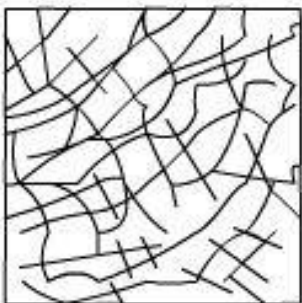
(b)



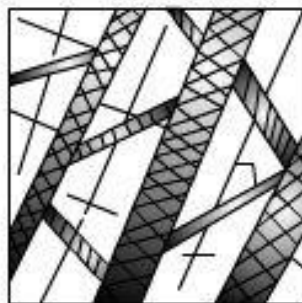
(c)



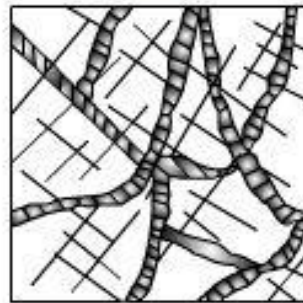
(d)



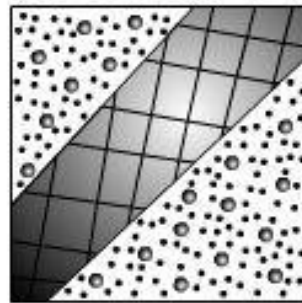
(e)



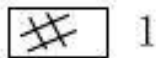
(f)



(g)



(h)



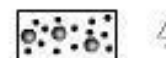
1



2



3



4

§ 7.2.1 岩体的工程性质

➤ 岩体结构类型及其工程地质性质

岩体结构类型	结构面特征	块度	整体性	变形、模量、 承载力、抗滑力	抗风化	工程地质总评价
整体块状结构	数量稀少	大	好	高，接近均质 弹性体	强	理想的工程地质 条件
层状结构	较多层面、 不密节理	较大	结构体整体 性好，结构面 情况不一	总体较高，结 构面结合力不强 时均有降低	较强	工程地质条件较好
碎裂结构	节理、裂隙 发育	不大	差	镶嵌的硬岩石 较高，碎裂结 构低	较差	镶嵌结构岩体工程 地质条件尚好，碎裂 结构较差
散体结构	节理、裂隙 非常发育	小	极差	很低	极差	按碎石土考虑

§ 7.2.1 岩体的工程性质

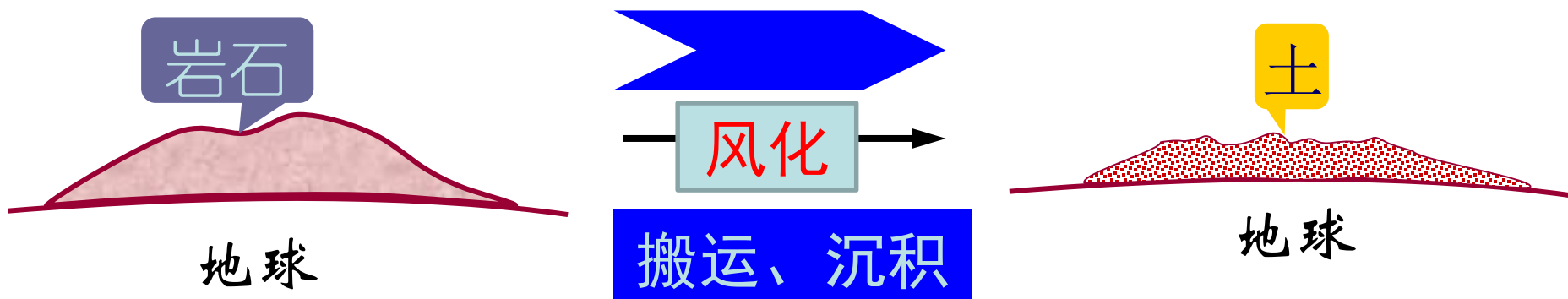
- **岩体稳定性**：岩体在工程施工和运营阶段**发生（抵抗）变形和破坏**的特性。
- **岩体失稳**：在工程施工和运营期间发生的**不能容许的变形和破坏**。
- 岩体稳定性问题是工程地质学最主要的研究内容，是野外勘测、室内外试验和理论研究的核心工作。
- 岩体稳定性主要是由岩体结构决定的。应力状态也很重要，但其作用主要还是通过岩体结构的力学效应表现出来。

§ 7.2.1 岩体的工程性质

- 岩体所在位置周围地质环境的稳定性对该环境内的岩体稳定性有**宏观控制作用**。地质环境的稳定性包括**区域稳定性、山体稳定性和地面稳定性**。
- **岩体本身的特征和其中地下水的作用**是决定岩体稳定性的**内在因素**，是岩体稳定性评价最重要的根据。
- **岩体初始应力状态及所受工程荷载**是决定岩体稳定性的**主要外部因素**，是岩体稳定性评价的重要边界条件。
- 岩体稳定性还与工程施工及运营管理水平有密切关系。

§ 7.2.2 土的工程性质

- **土**：岩石风化、搬运、沉积的产物，松散的颗粒堆积物
- 物理风化：水、风、温度作用，量变过程，颗粒较粗
 - 化学风化：碳酸化、氧化、水化，质变过程，颗粒较细



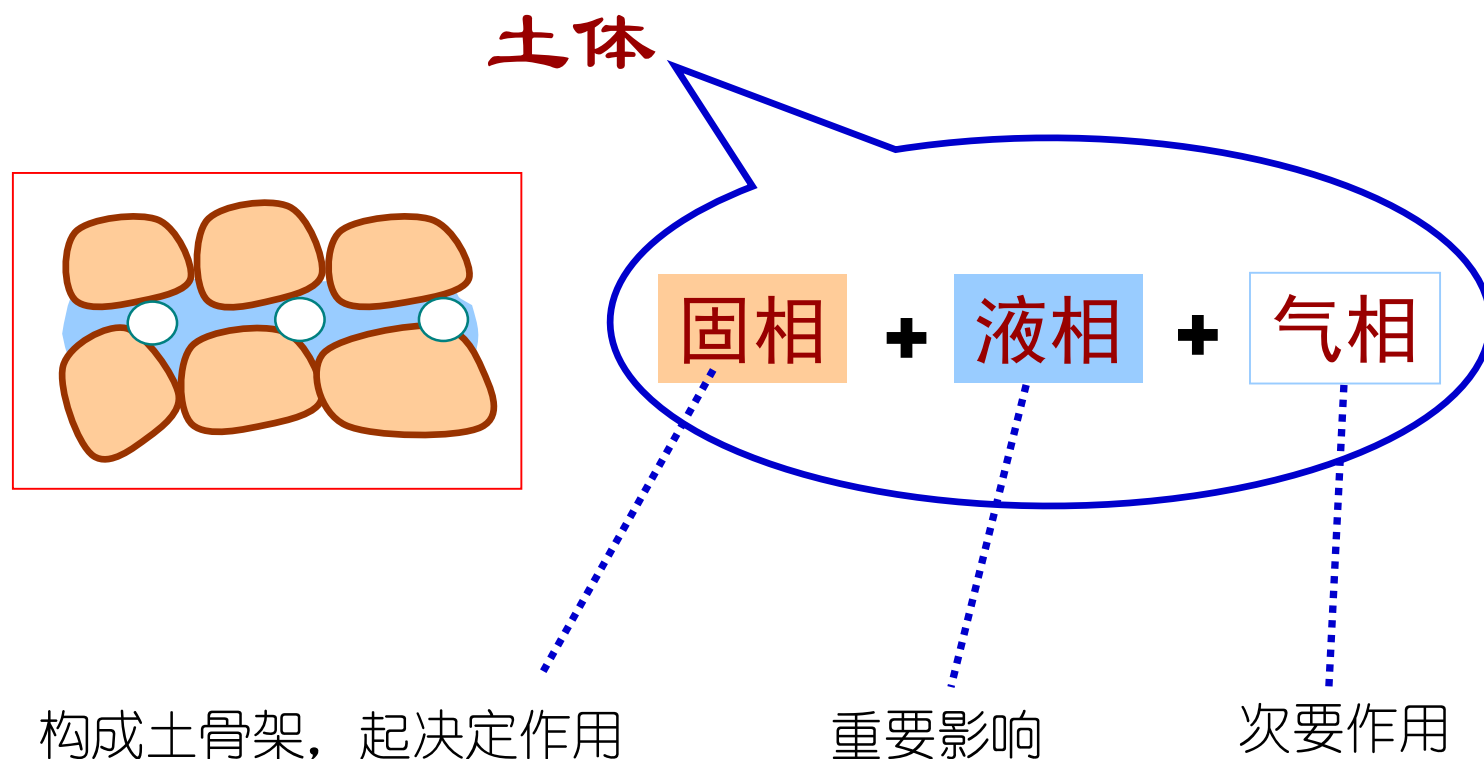
土的成因类型

- 残积土
- 坡积土
- 洪积土
- 冲积土
- 湖积土
- 海积土
- 冰积土
- 风积土



土的组成

- 土是固体颗粒、水和空气的混合物，常称土为三相系

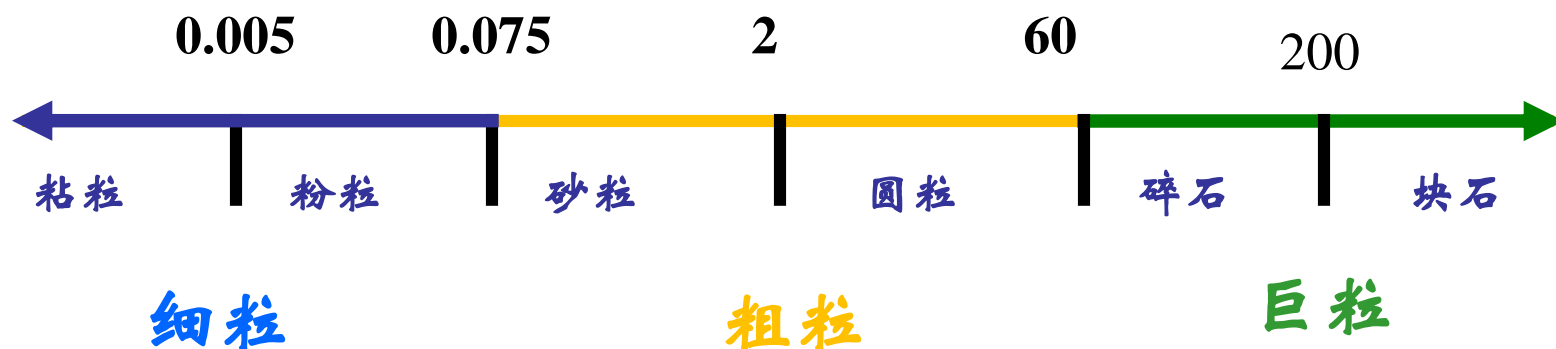


土的组成

- **矿物成分：**土的固相部分是由各种矿物颗粒或矿物集合体组成的，包括原生矿物、次生矿物和有机质。
- **原生矿物：**岩石经物理风化破碎但成分没有发生变化的矿物碎屑。如石英、长石、云母、角闪石、辉石、橄榄石、石榴石等。粗粒的主要组分，性质较稳定。
- **次生矿物：**原生矿物经过化学风化作用，使其进一步分解，形成颗粒更细小的新矿物，主要为粘土矿物（高岭石、蒙脱石、伊利石）、次生 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_3O_4 等，粘粒的主要组分。
- **有机质：**是土中动植物残骸和微生物及其合成和分解的产物，如泥炭、腐殖质等。对农业及生态而言是有益组分，工程而言是有害组分。

土的组成

- 土的粒度：土的固相颗粒大小
- 粒径级配：各粒组土的相对含量百分数



土的组成

➤ 粗粒土与细粒土

粗粒土
(无粘性土)

孔隙大、透水性强，毛细上升高度很小，既无可塑性，也无胀缩性，压缩性极弱，强度较高。

细粒土
(粘性土)

主要由次生矿物组成，孔隙很小，透水性极弱，毛细上升高度较高，有可塑性、胀缩性，强度较低。

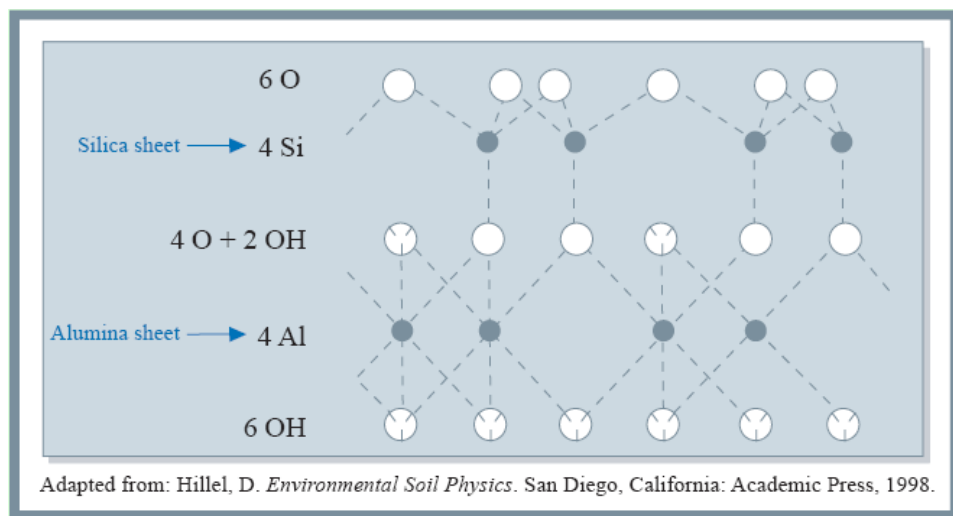
土的组成

土的矿物成分与粒度的关系

粒组		名称	漂石粒、卵石粒 砾粒组	砂粒组	粉粒组	粘 粒 组		
		范围值 (mm)				粗	中	细
最常见的矿物			>2	2-0.075	0.075 -0.005	0.005 -0.001	0.001 -0.0001	>0.0001
原生矿物	母岩碎屑 (多矿物结构)							
	单矿物颗粒	石 英						
		长 石						
		云 母						
次生矿物	次生二氧化硅 (SiO ₂)							
	粘土矿物	高岭土						
		伊利石						
		蒙脱石						
	倍半氧化物 (Al ₂ O ₃ - Fe ₂ O ₃)							
	难溶盐 (CaCO ₃ , MgCO ₃)							
腐 殖 质								

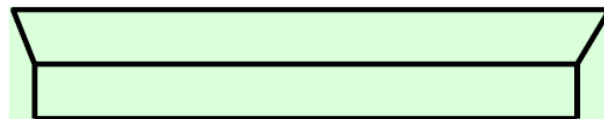
土的组成

➤ 主要粘土矿物结构



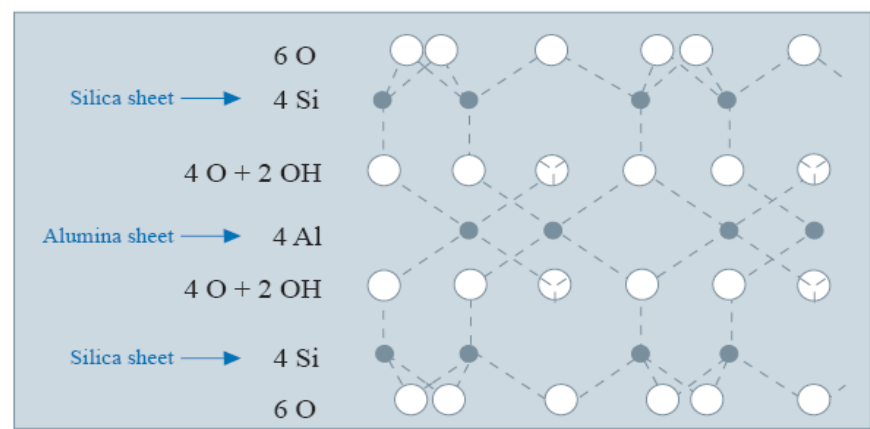
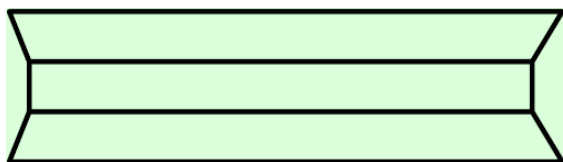
高岭石:

硅氧四面体 + 铝氧八面体



蒙脱石:

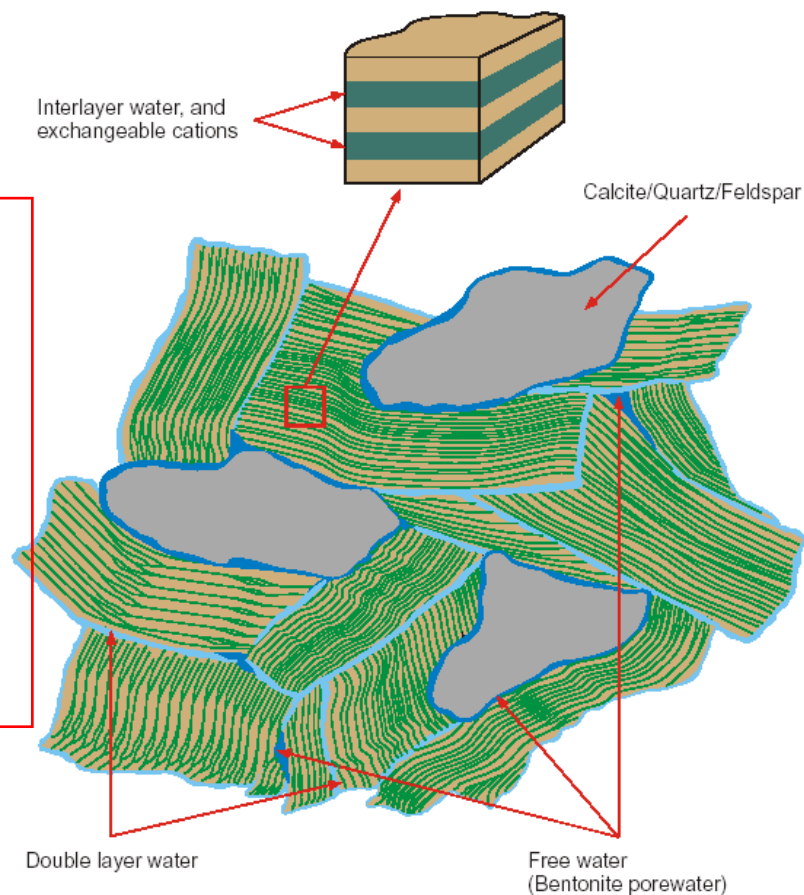
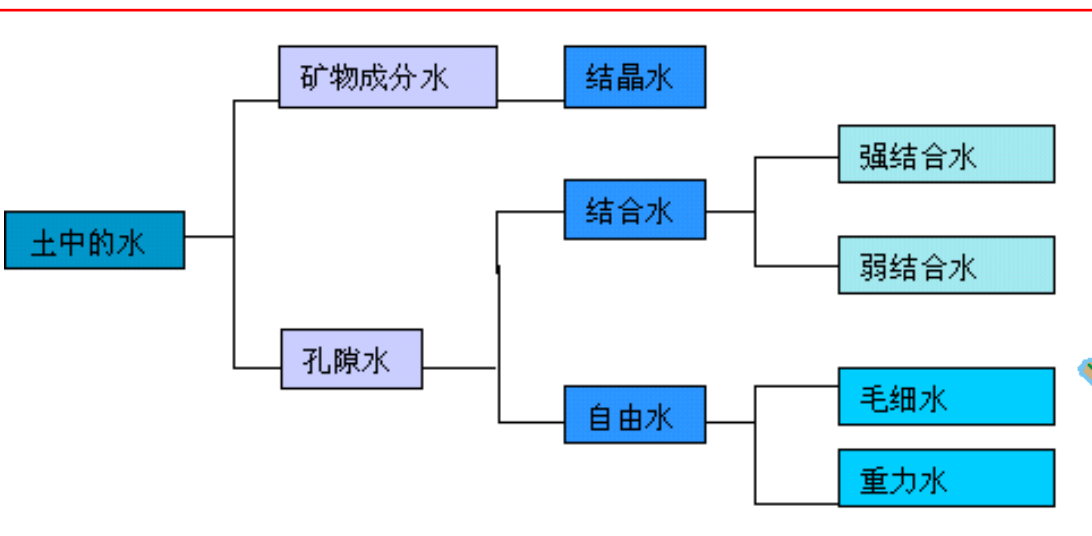
硅氧四面体 + 铝氧八面体
+ 硅氧四面体



Adapted from: Hillel, D. *Environmental Soil Physics*. San Diego, California: Academic Press, 1998.

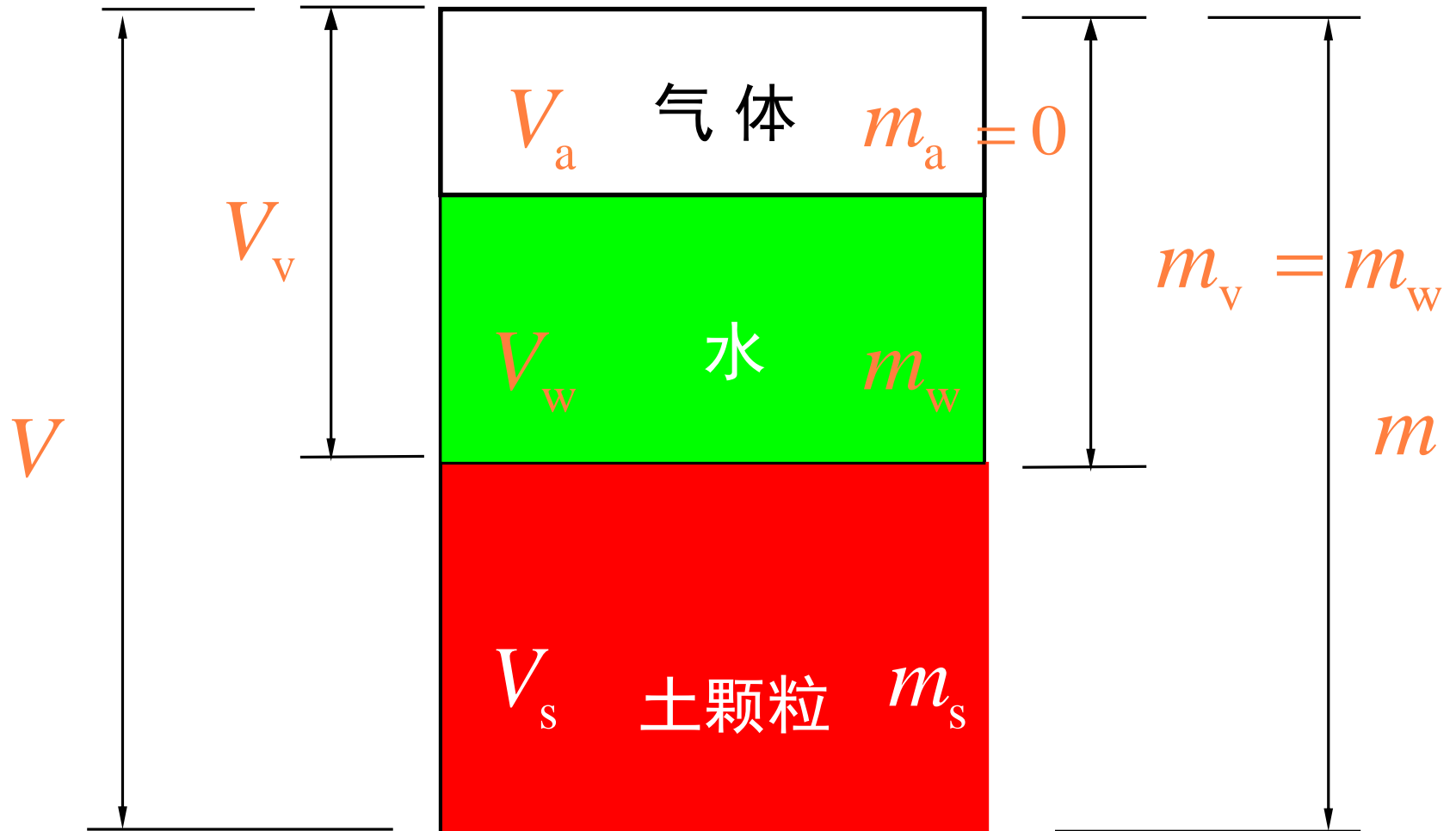
土的组成

➤ 土中的水



土的物理性质

► 土的物理性质



土的物理性质

➤ 土的三个基本试验指标

- 土的天然密度 $\rho=m/V$, 环刀法测定
- 土的含水率 $w= m_w/m_s$, 烘干法测定
- 土粒密度 $d_s=m_s/V_s$, 比重瓶法测定

土的物理性质

➤ 土的其它物理性质指标

➤ 土的干密度 $\rho_d = m_s / V$

➤ 饱和密度 $\rho_{\text{sat}} = (m_s + \rho_w V_v) / V$

➤ 土的孔隙比 $e = V_v / V_s$

➤ 土的孔隙率 $n = V_v / V$

➤ 土的饱和度 $S_r = V_w / V_v$

土的物理性质

- 粘性土的**稠度**：粘性土因含水率的变化而表现出各种不同的稀稠软硬等物理状态，如固态、半固态、塑态、液态等
- 稠度界限：随着含水率的变化，粘性土可由一种稠度状态转变为另一种稠度状态，相应转变点的含水率称为界限含水率，也称为稠度界限
 - **液限**（ w_L ）——从流动状态转变为可塑状态的界限含水率，也就是可塑状态的上限含水率；
 - **塑限**（ w_p ）——从可塑状态转变为半固体状态的界限含水率，也就是可塑状态的下限含水率；
 - **缩限**（ w_s ）——从半固体状态转变为固体状态的界限含水率，亦即粘性土随着含水率的减小而体积开始不变时的含水率。

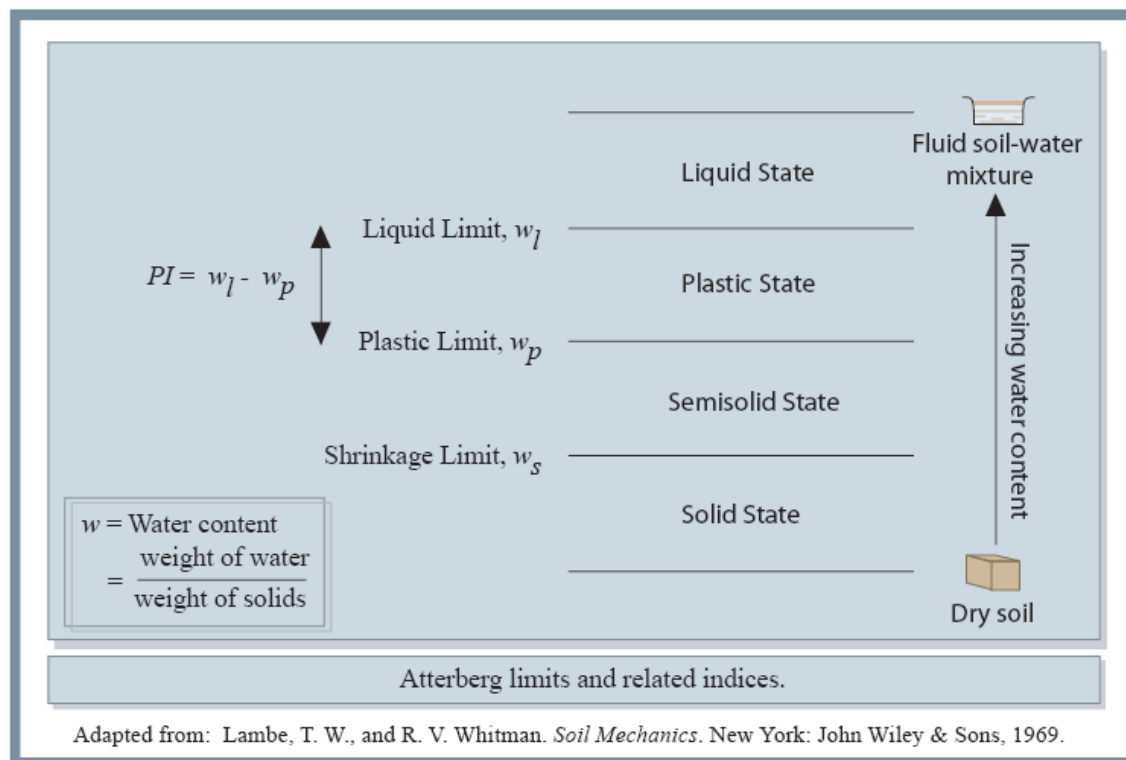
土的物理性质

➤ 塑性指数

$$I_P = w_L - w_P$$

➤ 液性指数

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P}$$



状 态	坚 硬	硬 塑	可 塑	软 塑	流 塑
液性指数	$I_L < 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1$	$I_L > 1.0$

土的力学性质

- 土的力学性质：土在外力作用下所表现出来的性质，主要是压缩性、抗剪性
 - 压缩性：土在压应力作用下体积缩小的性质，
变形
 - 抗剪性：土在剪应力作用下抵抗剪切破坏的
能力，强度

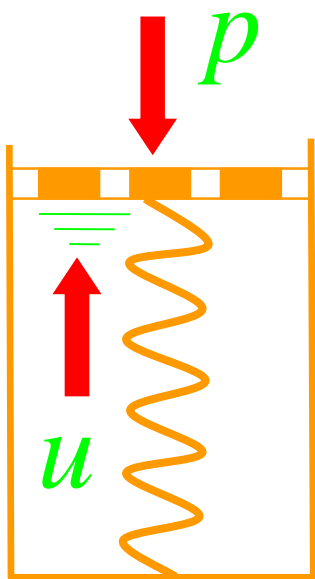
土的力学性质

➤ 土的压缩性

- 土是由固、液、气三相物质组成的，土受压后体积缩小，必然是土的三相组成部分中的各部分体积减小的结果，本质上是孔隙体积减小的结果。当土孔隙中的水分和气体被挤出时，土粒相互移动靠拢，致使土的孔隙体积减小，而引起土体积减小。
- 饱水土的压缩过程是孔隙水压力的消散过程。饱水土在一定荷载作用下的渗透压密过程，称为渗透固结。饱和砂土的孔隙较大，透水性强，在压力作用下孔隙中的水很快排出，压缩很快完成，但砂土的孔隙总体积较小，其压缩量也较小。饱和粘性土的孔隙小而多，透水性弱，在压力作用下孔隙中的水不可能很快被挤出，土的压缩常需相当长的时间，但其压缩量较大。

土的力学性质

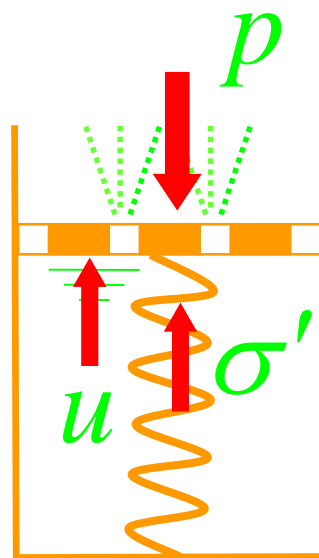
土的渗透固结过程



$$t = 0$$

$$u = p$$

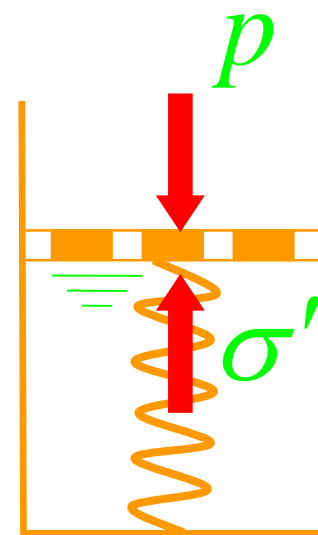
$$\sigma' = 0$$



$$t > 0$$

$$0 < u < p$$

$$0 < \sigma' < p$$



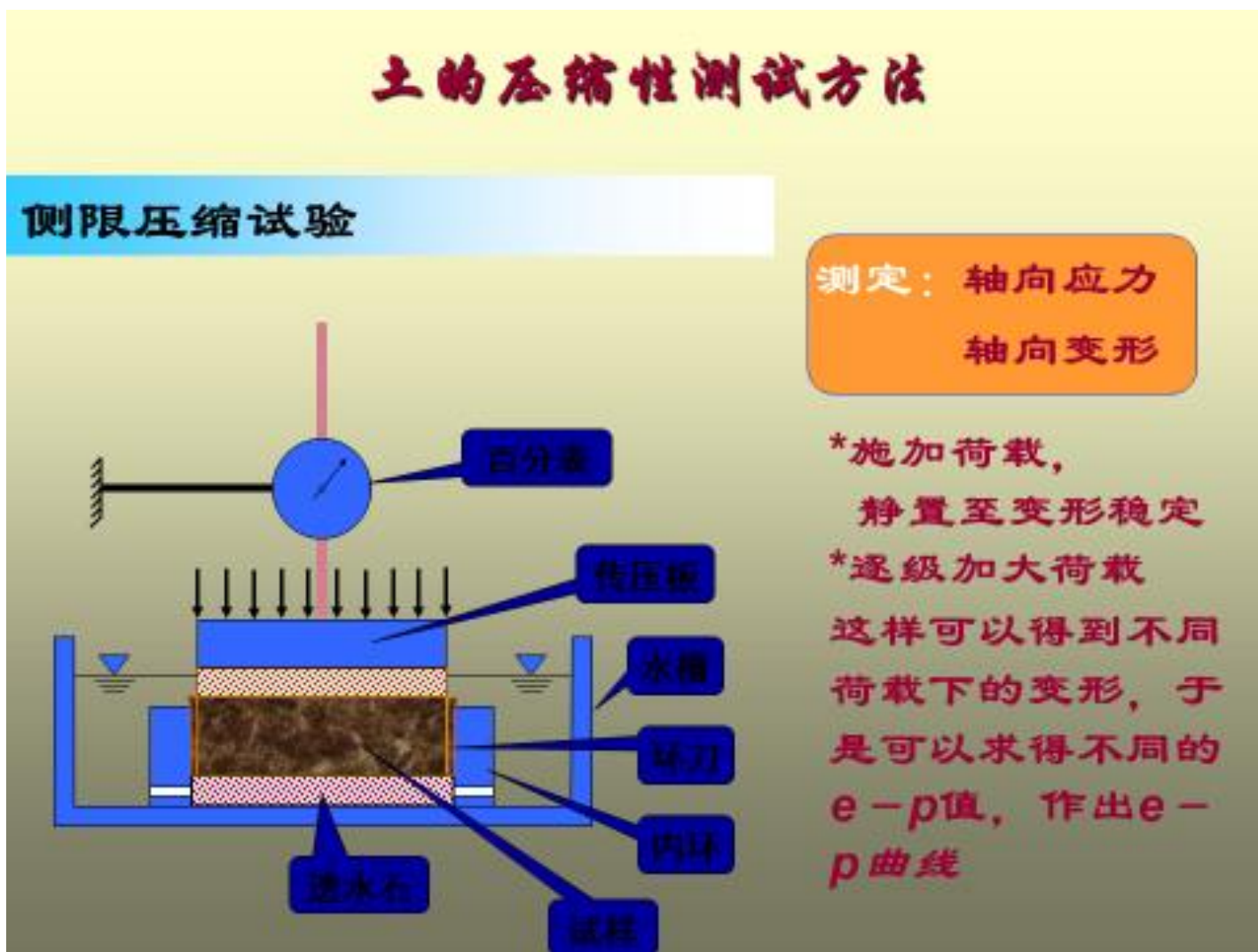
$$t = \infty$$

$$u = 0$$

$$\sigma' = p$$

土的力学性质

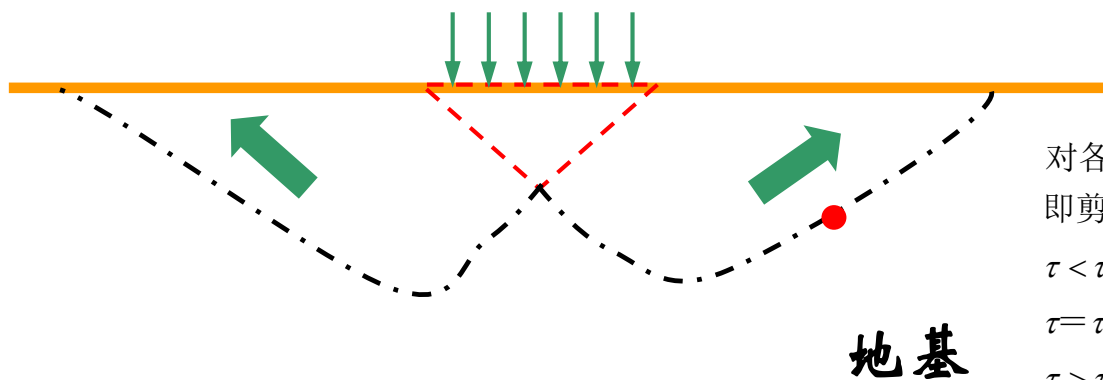
- 土的压缩性测试方法：压缩系数，压缩模量，变形模量



土的力学性质

➤ 土的抗剪性

- 许多建筑物地基的破坏、人工和自然斜坡的滑动以及挡土墙移动和倾倒等，都是由于土内的剪应力超过其本身的抗剪强度而引起的。因此，抗剪性是决定土体稳定性的一个极为重要的工程地质性质。研究土的强度特性，主要是研究土的抗剪性。



对各种地质体（斜坡或建筑地基），都存在两个力，即剪应力（ τ ）和抗剪强度（ τ_f ），一般都存在下列关系：

$\tau < \tau_f$, 土体处于稳定状态

$\tau = \tau_f$, 处于极限平衡状态

$\tau > \tau_f$, 处于滑动破坏状态

土的力学性质

➤ 土的抗剪性



FIGURE 1.6 Failure of the Transcona Grain Elevator. (Photo courtesy of Parrish and Heimbecker Limited.)

土的力学性质

土的抗剪性：直接剪切试验

库仑公式：

粘性土：

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

非粘性土：

$$\tau_f = \sigma \tan \phi$$

c 粘聚力

ϕ 内摩擦角

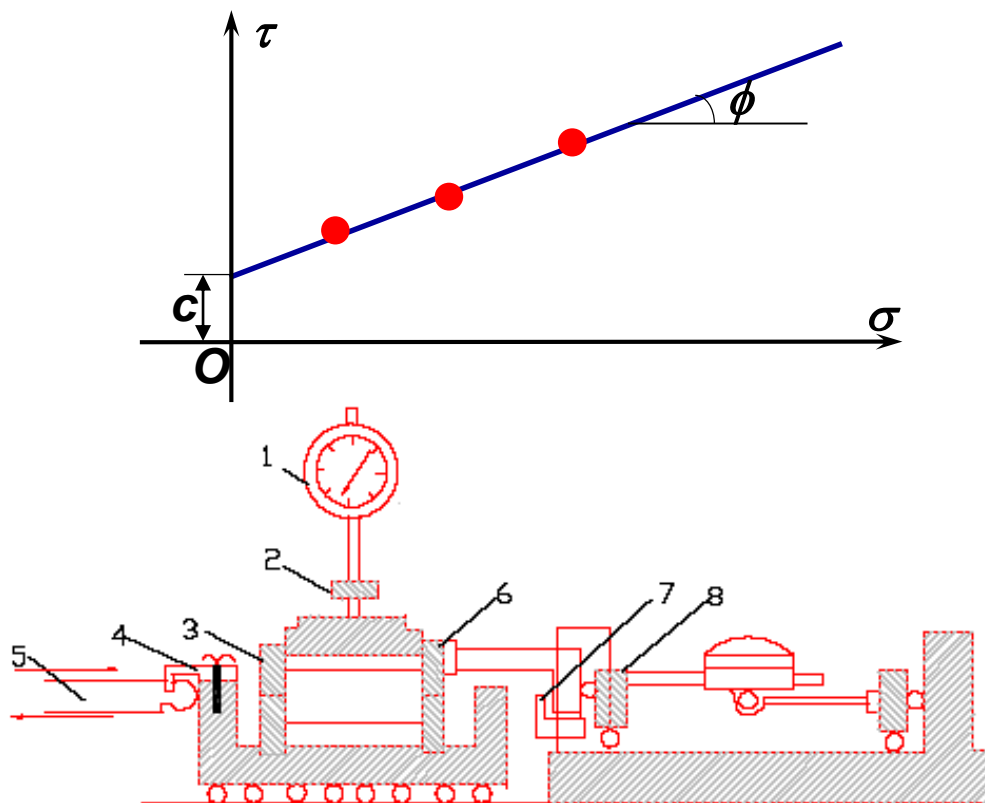


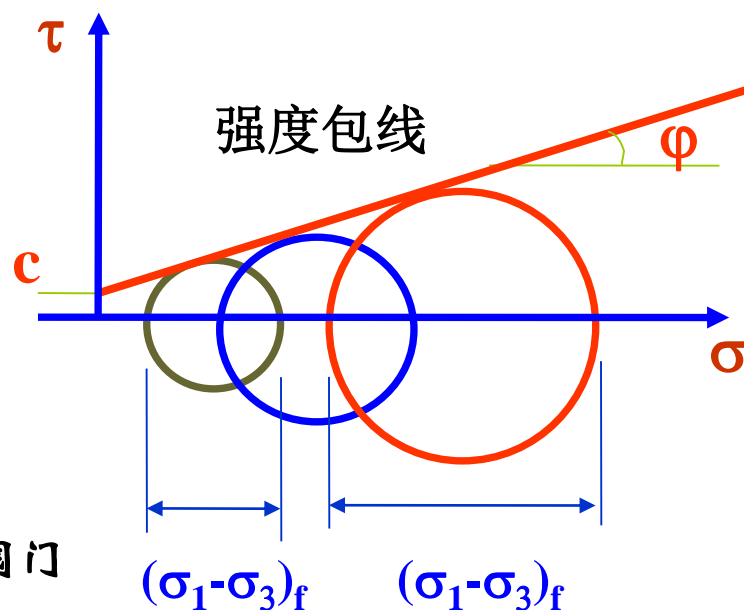
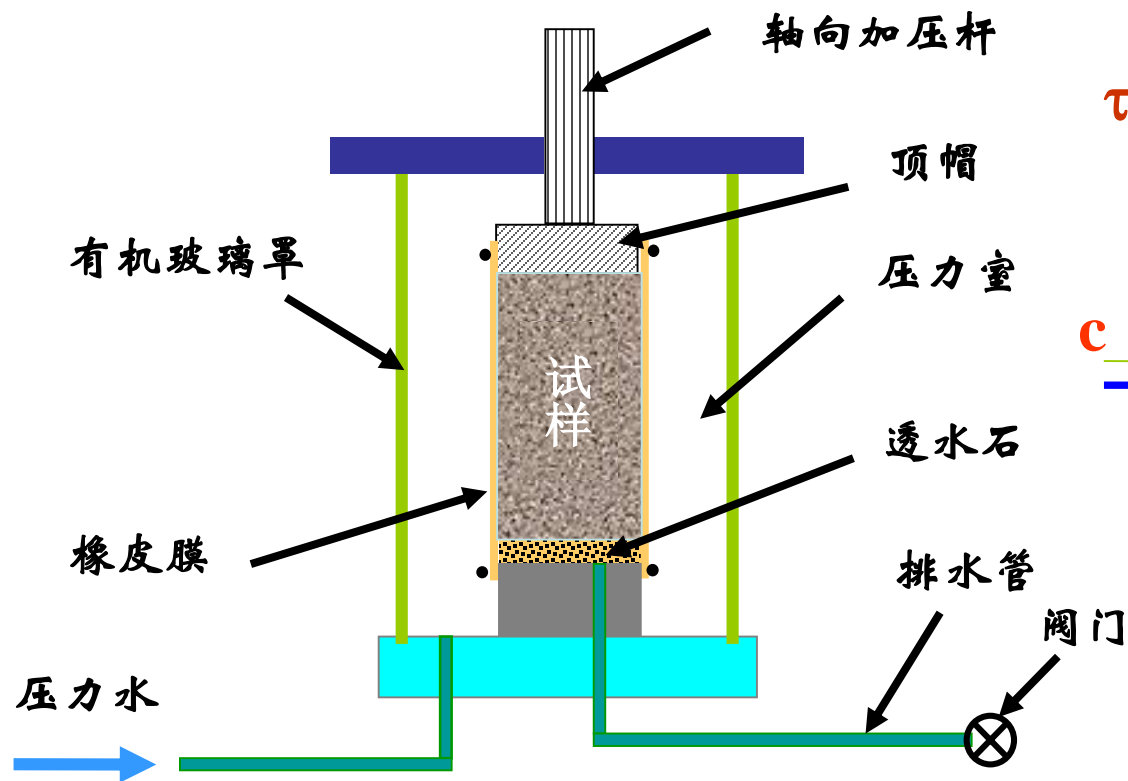
图 19.0.2 反复直剪仪示意图

1—垂直变形位移计, 2—加压框架, 3—试样, 4—连接件,

5—推动轴, 6—剪切盒, 7—限制连接件, 8—测力计

土的力学性质

土的抗剪性：三轴剪切实验

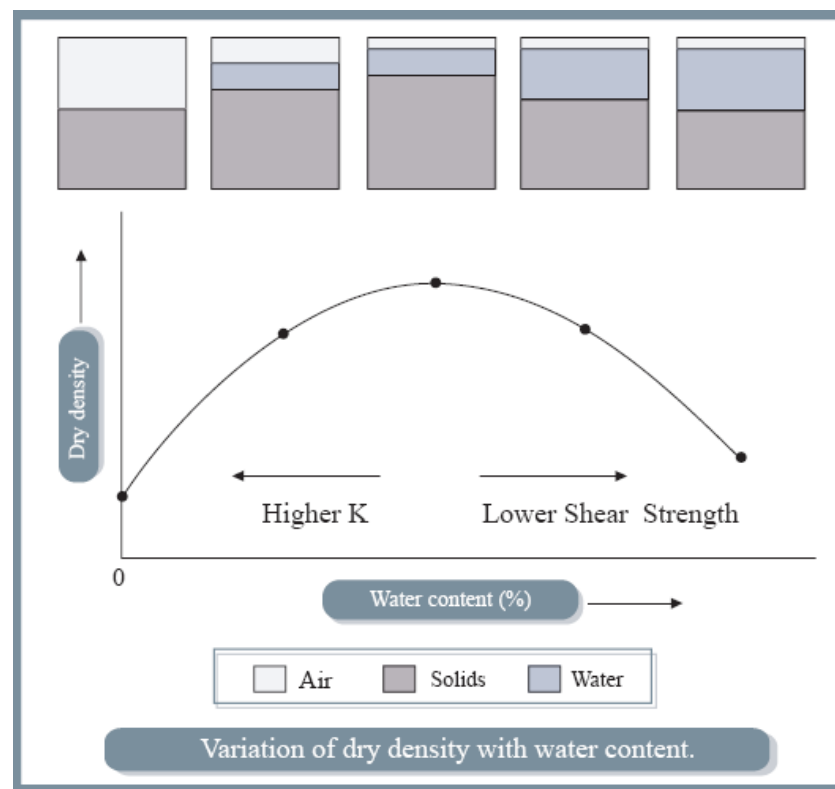


土的力学性质

- 土的压实性：指在一定的含水率下，以人工或机械的方法，使土能够压实到某种密实度的性质，主要针对粘性土。
- 粘性土是路基、土堤、土坝、土屋、运动场、防渗结构等土质建筑物的主要建筑材料，为了满足这类建筑物稳定性的要求，当土填入其内时，须用夯实和碾压等方法把土压实，使土的密度增大，强度增高，变形减小，透水性降低。
- 击实试验：是用锤击实土样以了解土的压实特性的一种方法。用不同的击实功（锤重×落距×锤击次数）分别锤击不同含水量的土样，并测定相应的干容重，从而求得最大干容重、最优含水量，为工程的设计、施工提供依据。击实试验可分标准击实法和单层击实法两种。

土的力学性质

- **击实曲线**：粘性土的击实效果用干密度来衡量。干密度与含水率、干密度与击实功的关系曲线称为击实曲线。
- 土的压实效果最好（即干密度最大）时的含水量称最优含水率。



§ 7.3 区域稳定性问题

- 区域稳定性：指工程建设区内，在内外力（以内动力为主）的综合作用下，现状地壳及其表层的相对稳定程度。
- 活断层和地震是两种密切相关的工程动力地质作用，它们对工程建筑物的影响范围较大，是区域性的，而且往往突然发生，酿成严重灾害。
- 在工程地质学科领域内，将由活断层和地震活动所产生的工程地质问题称为区域稳定性问题。

§ 7.3.1 活断层

➤ **活断层**：目前还在持续活动的断层，或在历史时期或**近期地质时期**活动过，极可能在不远的将来重新活动的断层。后一种情况也可称为潜在活断层。

➤ **近期地质时期**：

- A. 全新世以来（1.1万年）
- B. 3.5万年以来（C¹⁴测试）
- C. 晚更新世之后（10万年）
- D. 中更新世中期以来（50万年）
- E. 第四纪以来（250万年）

活断层分类分级

➤ 按规模

活断层按规模分级

规模 (长度)	>1000km	100-1000km	N*10km	1-10km
级别	巨型	大型	中型	小型

➤ 按错动速率

活断层按错动速率分级

级 别	错动速率 (mm/a)	活动性
AA	>10	极高速率活动断层
A	1—10	高速率活动断层
B	0.1—1	中速率活动断层
C	0.01—0.1	低速率活动断层
D	<0.01	基本上不活动

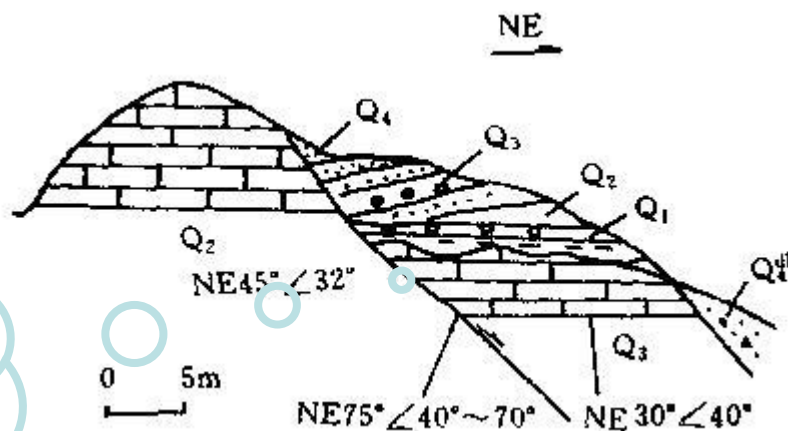
➤ 按活动方式

- 蠕滑：连续的滑动过程，不伴随大地震，仅伴有小震或无地震活动。
- 粘滑：断层发生快速错动，在突发快速错动前断层呈闭锁状态，往往没有明显的位移发生。

活断层判别标志

- 活断层可从地质、地貌、水文地质、地球物理、地变形测量等方面的标志进行判别。
- 地质：第四纪地层，特别是晚更新世以来的地层产生断裂错动、变形、褶曲，砾石层中的砾石受剪断或压碎；断层构造带松散、未胶结，构造岩成分新鲜；沿断层带第四纪火山锥或熔岩作线状排列

第四系包括全新统被断层切断而直接与奥陶纪灰岩接触



太原呼延村采石场剖面

活断层判别标志



San Andreas Fault offsetting streams
On the Carrizo Plain

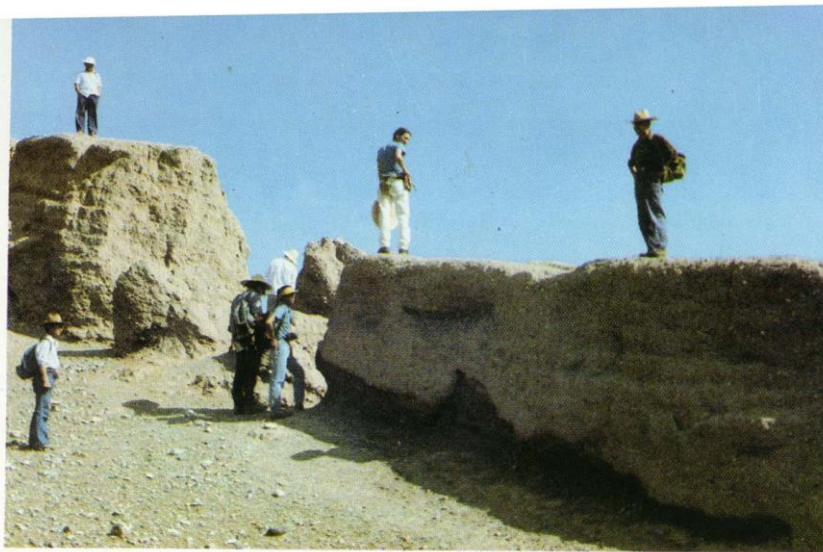


San Andreas Fault
crossing the Carrizo Plain,
North of Santa Barbara

活断层判别标志

- 地貌：两大地貌单元长距离直线相接；夷平面解体；深切的直线型河谷或沉陷谷地，断层陡坎，断层三角面新鲜；同级阶地的高程在断层两侧发生突然变化，有时可相差数十米；陡坎山山前经常分布有大规模的崩塌或滑坡；山脊、山谷被错开，这是平移断层的标志；水系呈现规律变迁。
- 水文地质：地下水位在断层两侧有明显的变化；沿断层带温泉、地热异常带呈带状分布；水化学成分异常
- 历史地震：沿断层带历史上有发生地震的记录，震中呈有规律的带状分布；沿断层带有发生地震断层的历史记录
- 其它标志：大地测量表明断层有明显的位移或蠕动，位移大于0.1毫米每年的即为活断层；地球物理场分布和变化异常；现代测年方法

活断层判别标志



照片 2 红果子沟长城东断点。镜头向北西。

(垂直断错1.5米)



蠕滑，左旋断错十二毫米（碑前）

活断层评价

- 活断层评价是区域稳定性评价的核心问题。
- 区域优势活动性断裂：常以地震形式影响工程场地稳定性
- 场区优势活动性断裂：常以错动和蠕动等方式影响场地稳定性



Cypress Freeway Structure, Oakland —
Loma Prieta Earthquake, 1989



San Francisco City Hall, 1906

活断层区工程选址与建设

- 建筑物场址一般应避开活动断裂带
- 线路工程必须跨越活断层时，尽量使其大角度相交，并
避开主断层
- 必须在活断层地区兴建的建筑物，应尽可能地选择相对
稳定地块即“安全岛”，尽量将重大建筑物布置在断层
相对稳定盘
- 在活断层地区兴建工程，应采用适当的抗震结构和建筑
型式

§ 7.3.2 地震

- **地震**：在地壳表层因弹性波传播所引起的振动称为地震。
- **地震效应**：在地震影响范围内，出现各种震害和破坏现象称为地震效应：
 - 振动破坏效应
 - 场地破坏效应
- **地震效应与场地工程地质条件、震级大小和震中距有关**，也与建筑的类型和结构有关。

振动破坏效应

- **振动破坏效应：**由地震直接引起的建筑物破坏。一般包括建筑物的水平滑动或晃动，以及共振等。在地震效应中这是主要的震害。
- 由于地震波的垂直加速度分量较水平的小，仅为其 $1/2 \sim 1/3$ ，且建筑物的竖向安全储备一般较大，所以设计时，在一般情况下只考虑水平地震力。
- 振动周期与振动时间的影响：建筑物地基受地震波冲击而振动，同时也引起建筑物的振动。当地基土的卓越周期与建筑物的自振周期相等或相近时，两者便发生共振，从而使振动作用力、振幅和时间大大增加，导致建筑物的严重破坏。

振动破坏效应

- 岩土体的卓越周期：由于地表岩土体对不同周期的地震波有选择放大作用，某种岩土体总是以某种周期的波选择放大得尤为明显而突出，使地震记录图上的这种波记录得多而好。这种周期即为该岩土体的特征周期，也叫做卓越周期
- 建筑物的自振周期：取决于建筑物所用的材料、尺寸、高度及结构类型。柔性建筑物周期长，刚性建筑物周期短。1、2层结构物约为0.2秒；4、5层结构物约为0.4秒；11、12层可达1秒。建筑物越高，自振周期也越长。
- 振动时间：地振动持续的时间越长，建筑物的破坏也越严重。土质越软弱、土层越厚，振动的历时也越长。软土场地可比坚硬场地历时长几秒~十几秒。

场地破坏效应

- 场地破坏效应：地震条件下场地岩土体受力条件发生较大变化，造成岩土体破坏，进而导致建筑物破坏。
- 地面效应：地震导致岩土体**直接出现破裂和位移**，从而引起附近的或跨越破裂带的建筑物变形或破坏
- 地基效应：地震导致地基岩土体的**振动压密、下沉、液化及塑流**，使地基失效，由此造成建筑物的破坏
- 斜坡效应：地震导致**斜坡岩土体失稳**，产生多种斜坡变形和破坏，引起斜坡地段出现位移或破坏。

场地破坏效应

- 砂土液化：指饱水的疏松粉细砂土在地震振动作用下突然破坏而呈现液态的现象，由于孔隙水压力上升，有效应力减小所导致的砂土从固态到液态的变化现象。
- 砂土液化机制是饱和的疏松粉、细砂土体在地震振动作用下有颗粒移动和变密的趋势，对应力的承受从砂土骨架转向水，由于粉细砂土渗透性较差，孔隙水压力会急剧增大，当孔隙水压力大到总应力值时，有效应力就降到0，颗粒悬浮在水中，砂土体即发生液化。



场地条件对地震破坏效应的影响

- **岩土层类型及性质**：地基刚度不同对建筑场地的烈度具有明显的影响；土层的厚度对震害也有明显影响
- **地形条件**：在孤立突出的山丘、山梁、山脊、河谷边岸或悬崖陡壁边缘部位，都表现为震害加大，烈度增高，而低洼沟谷则震害减小。
- **地下水**：地下水既影响岩土层的物理力学性质，也影响地震波的传播。饱水粉细砂地层容易发生液化现象，地表喷水冒砂，地基强度丧失。饱水的软粘土在振动作用下，强度明显降低。地下水埋深越浅，地震破坏越大。

地震区抗震设计原则

- 避开活动性断裂带和大断裂破碎带
- 避开孤立突出的地形位置作建筑场地
- 尽可能避开强烈振动效应和场地效应的地段作场地和地基，如：可能产生强烈沉降的淤泥层、厚填土层，可能产生液化的饱水砂土层以及可能产生不均匀沉降的地基、不稳定斜坡地段
- 尽可能避开地下水埋深过浅的地段作建筑场地
- 岩溶地区避开地下有容易塌陷大溶洞的地段
- 对抗震有利的场地条件是：地形较平坦开阔；基岩地区岩性均一坚硬，或上覆有较薄的覆盖层，若有较厚土层，则应较密实；无断裂；或有断裂但它与发展断裂无联系，且胶结良好；地下水埋藏较深；滑坡、崩塌、岩溶等工程地质现象不发育。

§ 7.4 岩土体稳定性问题

- **岩土体稳定性**：处于一定时空条件的岩土体，在各种力系（自然的、工程的）的作用下可能保持其力学平衡状态的程度。**岩土体承受应力导致在体积、形状或宏观连续性方面发生变化，当宏观连续性无显著变化时为变形，否则称为破坏。**变形破坏方式与进程的特点，既取决于岩土体的性质和结构，也与所承受的应力状态及其变化有关。
- 岩土体稳定性是工程地质分析中的一个中心问题，应对上述变化和效应作出论断和预测，并评价它们对人类活动可能造成的影响。分为斜坡稳定性和地基稳定性。

§ 7.4.1 斜坡稳定性

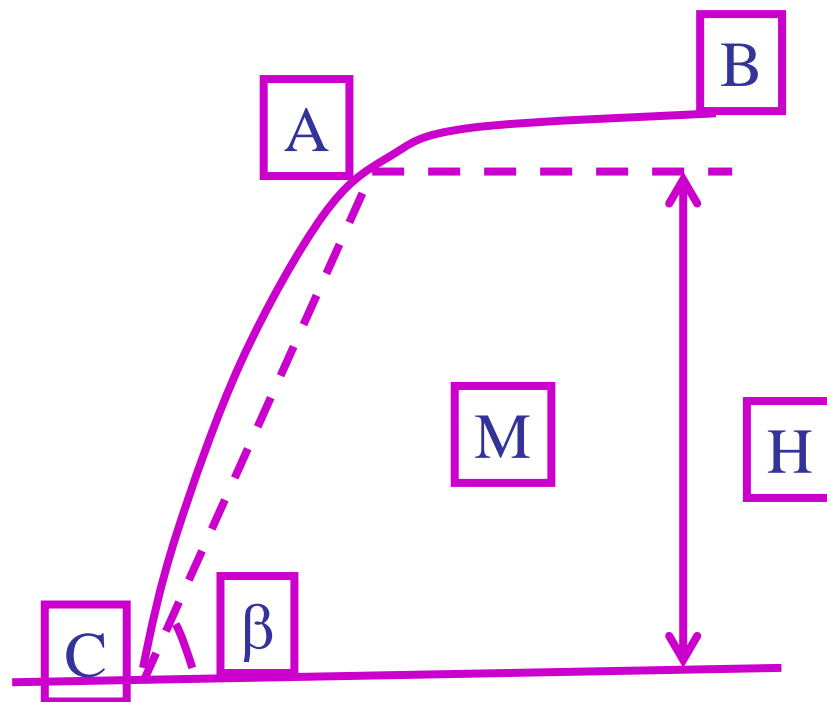
➤ 斜坡的基本要素：

(1)坡面AC (2)坡肩A

(3)坡顶AB (4)坡脚C

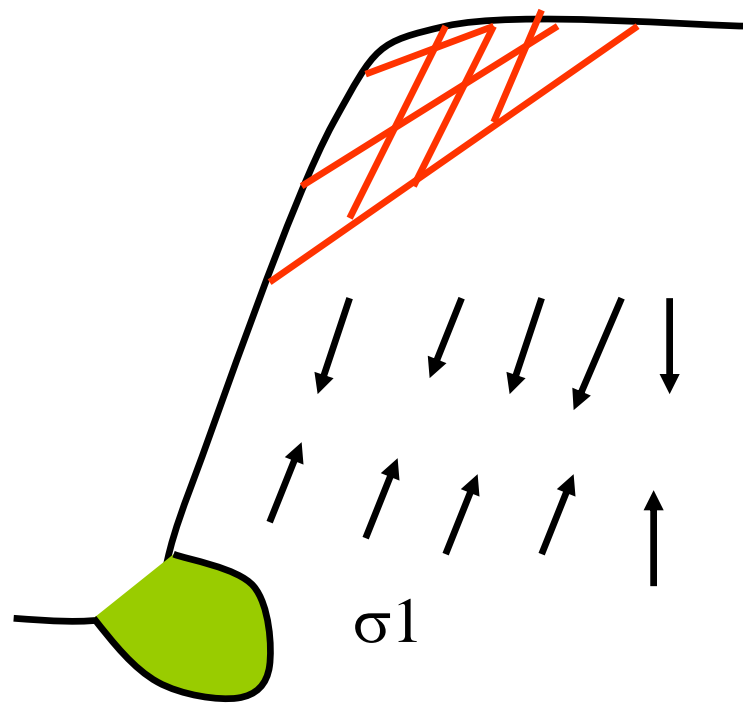
(5)坡高H (6)坡角 β

(7)坡体M

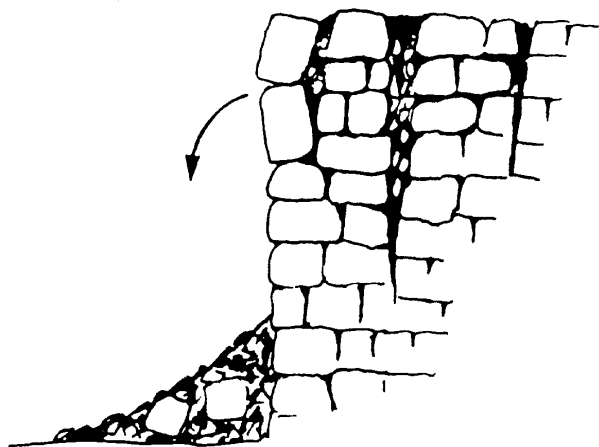


§ 7.4.1 斜坡稳定性

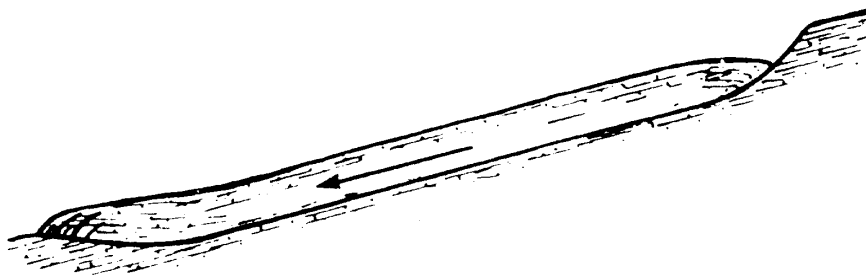
- 坡脚附近最大主应力显著增高，且愈近表面愈高，最小主应力显著降低。这一带是坡体中应力差或最大剪应力最高的部位，形成最大剪应力增高带，往往产生与坡面或坡底面平行的压裂面。
- 在坡顶面和坡面的某些部位，坡面的径向应力和坡顶面的切向力可转化为拉应力，形成张力带，易形成与坡面平行的拉裂面。



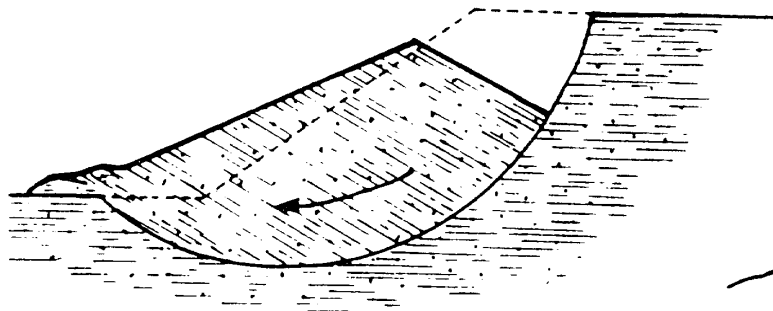
§ 7.4.1 斜坡稳定性



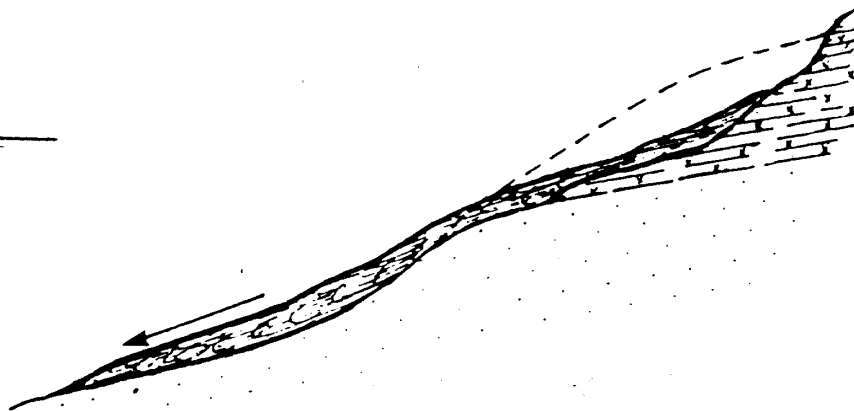
崩塌



平移滑动



旋转滑动



流滑

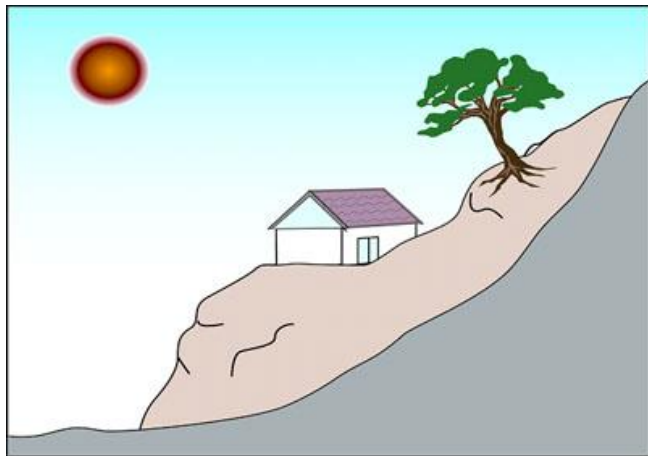
§ 7.4.1 斜坡稳定性



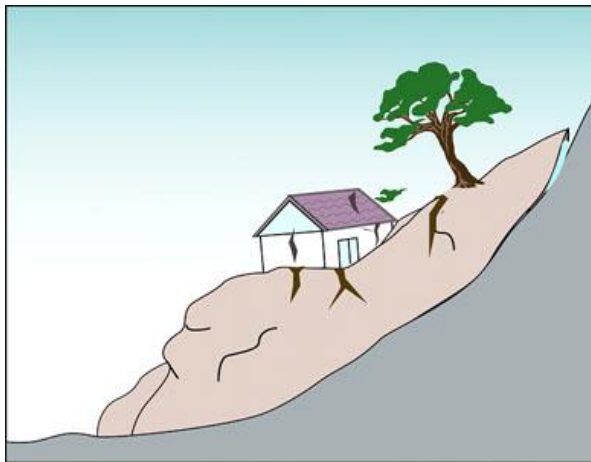
2015深圳滑坡事故

2015年12月20日11时40分，广东省深圳市光明新区凤凰社区恒泰裕工业园发生山体滑坡。滑坡覆盖面积约38万平方米，造成33栋建筑物被掩埋或不同程度受损，造成78人遇难。

§ 7.4.1 斜坡稳定性



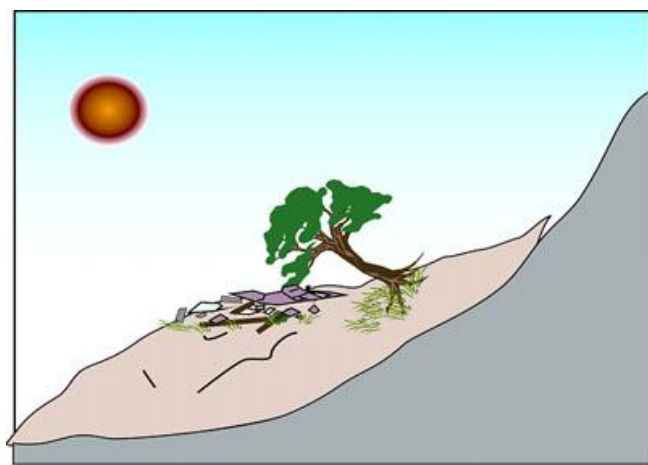
滑坡隐患



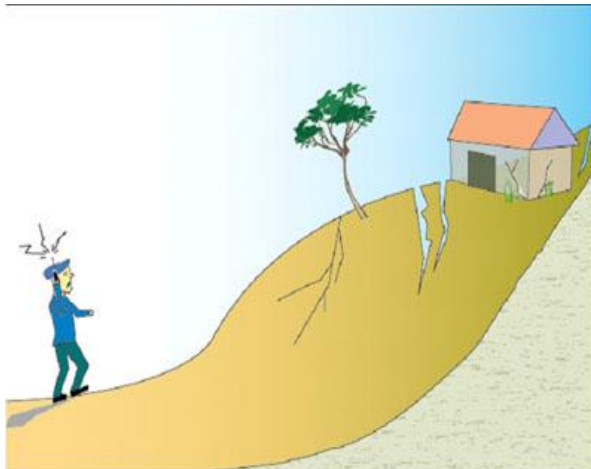
滑坡发生



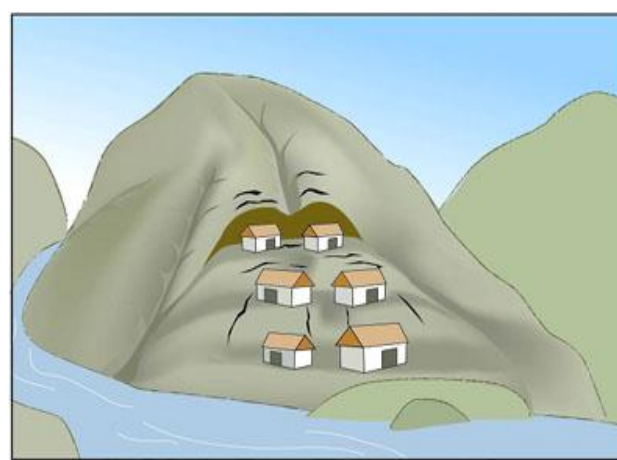
滑坡发展



滑坡停止

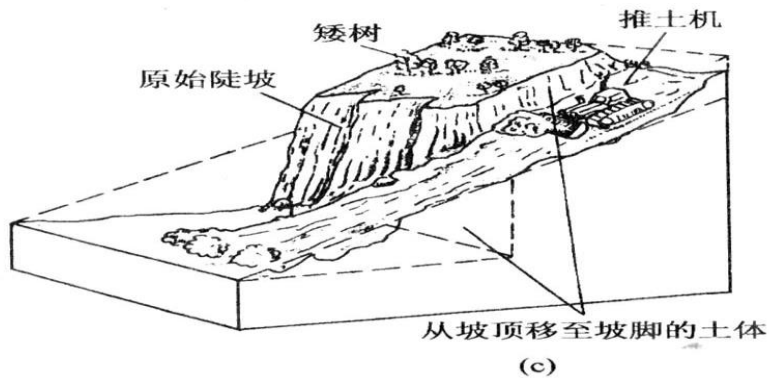
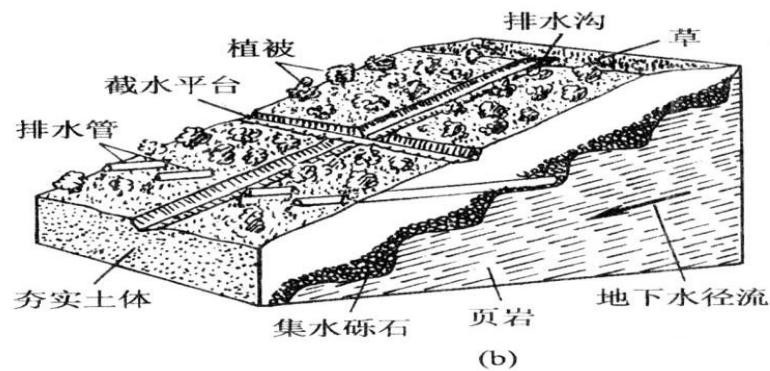
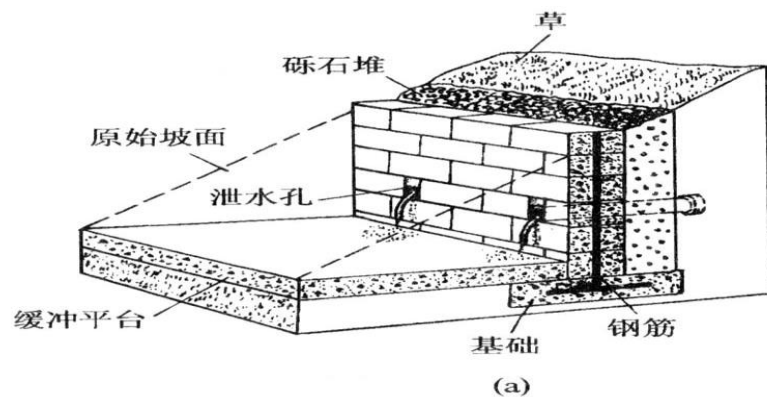


山坡出现裂缝往往是滑坡征兆，应及时报告



大量裂缝的出现，说明山坡已处于危险状态

§ 7.4.1 斜坡稳定性



滑坡治理工程措施

(a) 拦挡锚固 (b) 排水 (c) 削坡压脚

§ 7.4.1 斜坡稳定性

➤ 泥石流

- 具有土体的结构性
- 具有水体的流动性
- 流体是介于液体和固体之间的非均质流体
- 一般发生在山地沟谷区，具有较大的流动坡降

➤ 形成条件

- 物源
- 水源
- 地形地貌

§ 7.4.1 斜坡稳定性



甘肃舟曲特大泥石流灾害

2010年8月7日22时许，甘南[藏族自治州](#)舟曲县突降强降雨，县城北面的罗家峪、三眼峪泥石流下泄，由北向南冲向县城，造成沿河房屋被冲毁，泥石流阻断白龙江、形成[堰塞湖](#)。泥石流造成县城由北向南5公里长、500米宽区域被夷为平地（约250万平米）。舟曲“8·8”特大泥石流灾害中遇难1434人，失踪331人。

§ 7.4.2 地基稳定性

- 地基稳定性：是指与地基岩土体在承受建筑荷载条件下的沉降变形、深层滑动等对工程建设安全稳定的影响程度。
- 影响地基稳定性的因素较多，主要的是建筑物荷载的大小和性质，岩土体的类型及其空间分布，地下水的状况，以及地质灾害情况等。
- 地基的稳定性常用容许承载力、抗滑稳定性系数等参数来表征。
- 地基在建筑物荷载作用下，保证本身稳定以及建筑物沉降量、沉降差不超过容许值的承载能力，称为容许承载力。
- 可能滑动面上的抗滑力与滑动力的比值，称为抗滑稳定性系数。

§ 7.4.2 地基稳定性

- 房屋、桥梁等建筑物对地基施加的是铅直荷载，水坝对地基施加的是倾斜荷载。当建筑物修建在斜坡上时，其荷载方向与斜坡面斜交。同样质量的地基，能承受较大的铅直荷载，但不能抵抗过大的倾斜荷载。
- 相对易变形岩、土体的过量压缩，膨胀性岩土体的膨胀隆起等，均可使建筑物产生不容许的变形。
- 粘土、有机土等在荷载作用下容易产生剪切破坏。松软地层中地下水位下降、地下洞室的开挖及邻近建筑物的施工,可能引起地面和地基沉降。地震时细粒土的液化可以导致地基失效。开挖洞室、废旧矿坑、喀斯特洞穴等，可能导致地表和地基塌陷。
- 相反，当不存在地质灾害、地基均质、岩、土体质量好时，地基的稳定性就好。

§ 7.5 渗透稳定性

- **渗透变形**：岩土体在地下水渗透力（动水压力）的作用下，部分颗粒或整体发生移动，引起岩土体的变形和破坏的作用和现象。表现为鼓胀、浮动、断裂、泉眼、沙浮、土体翻动等。
- **管涌**：在渗流作用下，细颗粒沿土体骨架中的孔道发生移动带走，土的孔隙不断扩大，渗流量也随之加大，最终导致土体内形成贯通的渗流通道，土体发生破坏，又称潜蚀。
- **流土**：在渗透作用下，土体中的颗粒群或团块同时发生移动的现象。常发生于均质砂土层和亚砂土层中。

§ 7.5 渗透稳定性



思考题

- 岩土的主要工程性质有哪些？
- 工程地质研究主要关注岩土体的变形与破坏，其表现形式与影响因素有哪些？