

“十四五”职业教育国家规划教材

“十四五”职业教育山东省规划教材

基础工程施工 (第二版)

主编 徐锡权

基础工程施工

(第二版)

主编 徐锡权



扫描二维码
共享立体资源

北京出版集团
北京出版社

北京出版集团
北京出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基础工程施工 / 徐锡权主编. — 2 版. — 北京:
北京出版社, 2021.2 (2023 重印)
高职十二五规划教材: 2014 版
ISBN 978-7-200-16309-4

I. ①基… II. ①徐… III. ①基础施工—高等职业教
育—教材 IV. ① TU753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 010164 号

基础工程施工 (第二版)

JICHU GONGCHENG SHIGONG (DI-ER BAN)

主 编: 徐锡权
出 版: 北京出版集团
北京出版社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总 发 行: 北京出版集团
经 销: 新华书店
印 刷: 定州启航印刷有限公司
版 印 次: 2021 年 2 月第 2 版 2023 年 6 月修订 2023 年 7 月第 2 次印刷
成品尺寸: 185 毫米 × 260 毫米
印 张: 17.5
字 数: 364 千字
书 号: ISBN 978-7-200-16309-4
定 价: 49.00 元

教材意见建议接收方式: 010-58572162 邮箱: jiaocai@bphg.com.cn

如有印装质量问题, 由本社负责调换

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

单元一 认识课程	1
学习任务 1 认识地基与基础	2
学习任务 2 课程学习指南	4
单元二 识读岩土工程勘察报告	7
学习任务 1 认识建筑场地	8
学习任务 2 认识地基土	15
学习任务 3 测定地基土的性质指标	46
学习任务 4 识读岩土工程勘察报告	57
单元三 塔吊基础安全计算	63
学习任务 塔吊基础安全计算	64
单元四 土方与基坑工程施工	92
学习任务 1 场地平整	93
学习任务 2 基坑、基槽土方施工	113
学习任务 3 深基坑工程施工	124
单元五 浅基础工程施工	139
学习任务 1 浅基础的类型与设计	140
学习任务 2 无筋扩展基础施工	146
学习任务 3 钢筋混凝土基础施工	162

单元六 桩基础施工	187
学习任务 1 钢筋混凝土预制桩施工	188
学习任务 2 混凝土灌注桩施工	207
单元七 地基处理	229
学习任务 1 换填垫层法	230
学习任务 2 强夯法	238
学习任务 3 水泥土搅拌桩	244
学习任务 4 高压喷射注浆地基	248
单元八 地基基础分部工程质量验收	254
学习任务 1 分项工程质量验收	255
学习任务 2 分部工程质量验收	265
参考文献	270

单元二 | 识读岩土工程勘察报告

单元描述

工程地质勘察是为查明影响工程建筑物的地质因素而进行的地质调查工作，其成果是岩土工程勘察报告。建筑施工时要充分阅读和分析勘察报告，针对工程项目的施工图纸，制定切实可行的建筑地基基础施工组织设计，对施工期间可能发生的岩土问题进行预测，提出监控、防范和解决问题的施工技术措施。本单元分四个任务，通过本单元的学习训练，掌握土的性质，能够阅读岩土工程勘察报告。学习沿着如下流程进行：

认识建筑场地→认识地基土→测定地基土的性质指标→识读岩土工程勘察报告。

学习任务 1 | 认识建筑场地

■ 任务目标

1. 掌握建筑场地类别划分的方法；熟悉建筑场地等级的分类方法；熟悉不良地质现象；熟悉地下水的分类及其对工程的影响。
2. 提高对建筑场地重要性的认识，培养综合分析问题的职业素养。

知识链接

地球在演化过程中，地壳经历了种种地质作用和地质事件。错综复杂的地质作用形成了不同的地层，使地球表面形成了高低起伏变化的不同的形态，称为地形。不同成因的地形称为地貌。

地质年代是各种地质事件发生的时代。地质学家和古生物学家根据地层自然形成的先后顺序，把地质相对年代划分为五大代，代下分纪、世、期等。不同岩土的性质与其生成的地质年代有关。生成年代越久，岩土的工程性质越好。

建筑物建造在地球的表面，就要研究所处建设地点的地层所处的地质年代，目前地表存在的土一般为新生代第四纪沉积土。如表 2-1 所示，对于新生代第四纪沉积土，一般更新世 Q_3 及其以前沉积的土称为老沉积土，第四纪全新世 Q_4 中近期沉积的土称为新沉积土。第四纪 Q 沉积土由于沉积时间不长，通常为松散软弱的多孔体。根据地质成因不同，第四纪 Q 主要的沉积物有残积物、坡积物、洪积物、冲积物、海洋沉积物、湖泊沉积物、冰川沉积物及风积物。



建筑场地布置

表 2-1 第四纪地质年代

纪	世		距今年代 / 万年
第四纪 (Q)	全新世	Q_4	2.5
	更新世	Q_3 晚更新世	15
		Q_2 中更新世	50
		Q_1 早更新世	100

一、建筑场地类别划分

(一) 建筑场地地段

建筑场地是指工程群体所在地，其范围相当于厂区、居民小区和自然村或不小于 1 km^2 的平面面积。任何一个建筑物，都坐落和嵌固在建筑场地的岩土地基上。建筑场地的地形、地貌和岩土的成分、分布、厚度与工程特性，都与地质作用有关。同样的

建筑物在不同的地质条件的场地上，在地震时的破坏程度明显不同。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010，2016年版)按照场地上的建筑物震害程度把建筑场地地段划分为有利、一般、不利和危险的地段，见表 2-2。

表 2-2 有利、一般、不利和危险地段的划分

地段类别	地质、地形、地貌
有利地段	稳定基岩，坚硬土，开阔、平坦、密实、均匀的中硬土等
一般地段	不属于有利、不利和危险的地段
不利地段	软弱土，液化土，条状突出的山嘴，高耸孤立的山丘，陡坡，陡坎，河岸和边坡的边缘，平面分布上成因、岩性、状态明显不均匀的土层(含古河道、疏松的断层破碎带、暗埋的塘河沟谷和半填半挖地基)，高含水量的可塑黄土，地表存在结构性裂缝等
危险地段	地震时可能发生滑坡、崩塌、地陷、地裂、泥石流等发展断裂带上可能发生地表错位的部位

选择建筑场地时，应根据工程需要和地震活动情况、工程地质和地震地质的有关资料，对抗震有利、一般、不利和危险地段做出综合评价。首先选择对抗震有利的地段，避开不利地段，当无法避开时，应采取适当的抗震措施，不应在危险地段建造建筑物。

(二) 场地土类型

场地土对地震波有放大和滤波效应，为了能够反映场地土对地震效应的影响，《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010，2016年版)根据场地土的剪切波速 v_s 将建筑场地土划分为岩石、坚硬土或软质岩石、中硬土、中软土、软弱土五类，具体分类见表 2-3。

剪切波速是指震动横波在土内的传播速度，单位是 m/s。可通过人为激震的方法产生震动波，在相隔一定距离处记录震动信号到达时间，以确定横波在土内的传播速度。

对于丁类建筑及层数不超过 10 层且高度不超过 24 m 的丁类及丙类建筑，当无实测剪切波速时，可根据岩土名称和性状，按表 2-3 划分土的类型，再利用当地经验在表 2-3 的剪切波速范围内估计各土层的剪切波速。

表 2-3 土的类型划分和剪切波速范围

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速范围 / (m/s)
岩石	坚硬、较硬且完整的岩石	$v_s > 800$
坚硬土或软质岩石	破碎或较破碎的岩石或软或较软的岩石，密实的碎石土	$800 \geq v_s > 500$
中硬土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂， $f_{ak} > 150$ kPa 的黏性土和粉土，坚硬黄土	$500 \geq v_s > 250$
中软土	稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细、粉砂， $f_{ak} \leq 150$ kPa 的黏性土和粉土， $f_{ak} > 130$ kPa 的填土，可塑新黄土	$250 \geq v_s > 150$
软弱土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的黏性土和粉土， $f_{ak} \leq 130$ kPa 的填土，流塑黄土	$v_s \leq 150$

注： f_{ak} 为由载荷试验等方法得到的地基承载力特征值 (kPa)； v_s 为岩土剪切波速。

(三) 场地类别

建筑的场地类别应根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度按表 2-4 划分为四类, 其中 I 类分为 I₀、I₁ 两个亚类。

表 2-4 各类建筑场地的覆盖层厚度 (m)

岩石的剪切波速或土的 等效剪切波速 (m/s)	场地类别				
	I ₀	I ₁	II	III	IV
	0	—	—	—	—
	—	0	—	—	—
$500 \geq v_{se} > 250$	—	<5 m	≥ 5 m	—	—
$250 \geq v_{se} > 150$	—	<3 m	3 ~ 50 m	>50 m	—
$v_{se} \leq 150$	—	<3 m	3 ~ 15 m	15 ~ 80 m	>80 m

建筑场地覆盖层厚度的确定, 应符合下列要求:

(1) 一般情况下, 应按地面至剪切波速大于 500 m/s 且其下卧各层岩土层的剪切波速均不小于 500 m/s 的土层顶面的距离确定。

(2) 当地面 5 m 以下存在剪切波速大于其上部各层土剪切波速 2.5 倍的土层, 且该层及其下卧各层岩土层的剪切波速均不小于 400 m/s 时, 可按地面至该土层顶面的距离确定。

(3) 剪切波速大于 500 m/s 的孤石、透镜体, 应视同周围土层。

(4) 土层中的火山岩硬夹层应视为刚体, 其厚度应从覆盖土层中扣除。

等效剪切波速是指覆盖层厚度内土层的平均剪切波速。土层的等效剪切波速应按下列公式计算:

$$v_{se} = \frac{d_0}{t} \quad (2-1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{v_{si}} \right) \quad (2-2)$$

式中: v_{se} ——土层等效剪切波速, 单位为 m/s;

d_0 ——计算深度, 取覆盖层厚度和 20 m 二者的较小值, 单位为 m;

t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间, 单位为 s;

d_i ——计算深度范围内第 i 土层的厚度, 单位为 m;

v_{si} ——计算深度范围内第 i 土层的剪切波速, 单位为 m/s;

n ——计算深度范围内土层的分层数。

【工程案例 2-1】某建筑物所在场地岩土工程详细勘察报告 C8 号钻孔资料如表 2-5 所示。试根据该资料确定场地土类型、建筑场地类别, 并根据建筑场地的类别判断为何建筑地段。

表 2-5 C8 号钻孔资料

土层底部深度 / m	土层厚度 d_i / m	岩土名称	土层剪切波速 v_{si} / (m/s)
2.64	2.64	杂填土	115
5.42	2.78	黏土	120
12.72	7.3	淤泥	90
25.21	12.49	淤泥质土	95
40.91	15.7	黏土	210
59.21	18.3	粉质黏土	230

解：(1) 确定地面下 20 m 土层的等效剪切波速。

由题意可知，覆盖层厚度大于 20 m，故取计算深度 $d_0 = 20$ m。

计算深度范围内土层厚度和相应剪切波速，由公式 (2-2)，得：

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}} = \frac{2.64}{115} + \frac{2.78}{120} + \frac{7.3}{90} + \frac{12.49}{95} \approx 0.258 \text{ (s)}$$

由公式 (2-1) 得等效剪切波速： $v_{se} = \frac{d_0}{t} = \frac{20}{0.258} \approx 78 \text{ (m/s)}$

(2) 确定场地类别。

场地内覆盖土层的等效剪切波速为 78 m/s，查表 2-3，确定场地土类型为软弱土。根据地质资料场地覆盖层厚度小于 60 m，查表 2-4 划分建筑场地类别为Ⅲ类。由表 2-2 可知，本场地内下覆厚层淤泥及淤泥质土，为对建筑抗震不利地段。

二、建筑场地等级

根据场地的复杂程度，《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001，2009 年版) 按下列规定分为一、二、三级三个场地等级。

(一) 符合下列条件之一者为一级场地 (复杂场地)

- (1) 对建筑抗震危险的地段。
- (2) 不良地质作用强烈发育。
- (3) 地质环境已经或可能受到强烈破坏。
- (4) 地形地貌复杂。
- (5) 有影响工程的多层地下水、岩溶裂隙水或其他水文地质条件复杂，需专门研究的场地。

(二) 符合下列条件之一者为二级场地 (中等复杂场地)

- (1) 对建筑抗震不利的地段。
- (2) 不良地质作用一般发育。
- (3) 地质环境已经或可能受到一般破坏。
- (4) 地形地貌较复杂。
- (5) 基础位于地下水位以下的场地。

(三) 符合下列条件者为三级场地 (简单场地)

- (1) 抗震设防烈度等于或小于 6 度, 或对建筑抗震有利的地段。
- (2) 不良地质作用不发育。
- (3) 地质环境基本未受破坏。
- (4) 地形地貌简单。
- (5) 地下水对工程无影响。

三、不良地质现象

建筑工程中, 常见的不良地质现象有以下几种。

(一) 断层

地壳岩层因受力达到一定强度而发生破裂, 并沿破裂面有明显相对移动的构造称断层, 如图 2-1 所示。

进行工程建设、水利建设等, 必须考虑断层构造。例如, 水库大坝应避免横跨在断层上, 一旦断层活动, 破坏挡水坝, 造成库水下泄, 相当于洪水, 后果不堪设想; 大型桥梁、隧道、铁路、大型厂房等如果通过或坐落在断层上, 必须考虑相应的工程措施。

(二) 滑坡

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体, 受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响, 在重力作用下, 沿着一定的软弱面或者软弱带, 整体或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。俗称“走山”“垮山”“地滑”“土溜”等。如图 2-2 所示。

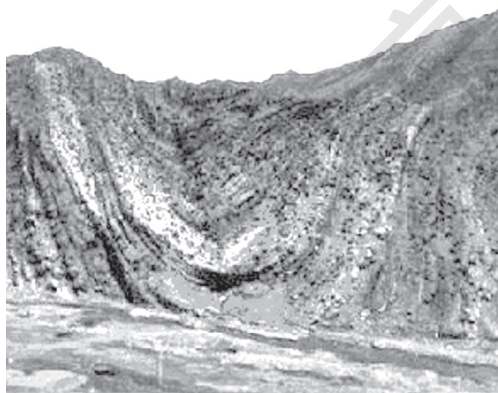


图 2-1 断层示意图



图 2-2 滑坡示意图

(三) 崩塌

崩塌 (崩落、垮塌或塌方) 是较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离母体崩落、滚动、堆积在坡脚 (或沟谷) 的地质现象。产生在土体中者称土崩, 产生在岩体中者称岩崩。规模巨大、涉及山体者称山崩。大小不等、零乱无序的岩块 (土块) 呈锥状堆积在坡脚的堆积物, 称崩积物, 也可称为岩堆或倒石堆。

2009 年 6 月 5 日 15 时, 重庆武隆县鸡尾山发生一起严重的山体崩塌 (图 2-3)。山



地质灾害预防

体垮塌共造成 64 人失踪，10 人遇难，8 人受伤。由于鸡尾山垮塌以及连续降雨导致鸡尾山堰塞湖形成。

(四) 地基土液化

地基土液化是指饱水的粉细砂或轻亚黏土在地震力的作用下瞬时失掉强度，由固态变成液态的力学过程。砂土液化主要是在静力或动力作用下，砂土中孔隙水压力上升，抗剪强度或剪切刚度降低并趋于消失所引起的。

振动液化造成建筑物的破坏，不仅仅一幢两幢、十幢八幢的事故，往往造成一个城市、一个地区大面积的灾害，使几百幢甚至几千幢建筑物毁坏，危害极大。

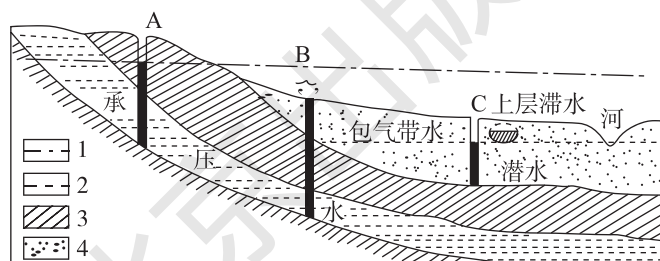


图 2-3 武隆县鸡尾山山体崩塌

四、地下水

(一) 地下水分类

地下水按照埋藏条件分为三类：上层滞水、潜水和承压水，如图 2-4 所示。



1. 承压水位; 2. 潜水位; 3. 隔水层; 4. 含水层;

A. 承压水井; B. 自流水井; C. 潜水井

图 2-4 地下水埋藏示意图

1. 上层滞水

积聚在局部隔水层上的水称为上层滞水。这种水靠雨水补给，有季节性。上层滞水范围不大，存在于雨季，旱季可能干涸。

2. 潜水

埋藏在地表下第一个连续分布的稳定隔离层以上，具有自由水面的重力水称为潜水。自由水面为潜水，水面的标高称为地下水位。地面至潜水的垂直距离称为地下水埋藏深度。潜水由雨水与河水补给，水位有季节性的变化。

3. 承压水

承压水是充满两个隔水层之间的含水层中的地下水，它有两种不同的埋藏类型，即埋藏在第一个稳定隔水层之上的潜水和埋藏在上下两个稳定隔水层之间的承压水。

典型的承压含水层可分为补给区、承压区及排泄区三部分。

(二) 地下水对工程的影响

地下水的水质、水量、水位、静压力、渗压力等会引起一系列工程问题。常见的有地基沉降、流砂、浮托、突涌，地下水对钢筋混凝土的腐蚀，对基础的潜蚀等。

1. 地基沉降

地基沉降是指过量抽取地下水引起含水层和隔水层的地基土发生地基土固结压缩，从而产生地面沉降。

2. 流砂

当基坑(槽)开挖低于地下水位 0.5 m 以下，采用坑内抽水时，坑(槽)底下部的土产生流动状态，随地下水一起涌进坑内，边挖边冒，无法挖深的现象称为流砂。

(1) 防治流砂的原则。

①减少或消除基坑内外地下水的水头差，例如采取先在基坑范围外以井点降低地下水后开挖，或在不排水基坑内以抓斗等工具进行水下挖土等施工方法。

②增长渗流路径，例如沿坑壁打入深度超过坑底的板桩，其长度足以使受保护土体内的水头梯度小于临界梯度。

③在向上渗流出口处地表用透水材料覆盖压重以平衡动水力(此法多用于闸坝下游处)。

当土中渗流的水头梯度小于临界梯度时，虽不致诱发流砂现象，但土中细小颗粒仍有可能穿过粗颗粒之间的孔隙被渗流挟带走，时间长了，在土层中将形成管状空洞，使土体强度降低，压缩性增大，这种现象称为机械潜蚀。

(2) 流砂处理常用处理措施。

防治流砂的途径有：一是减小或平衡动水压力；二是设法使动水压力向下；三是截断地下水流。其具体措施有：

①利用枯水季节施工，以便减小坑内外水位差。

②用钢板桩打入坑底一定深度，增加地下水从坑外流入坑内的距离，从而减少水力坡度，达到减小动水压力，防止流砂发生。

③采用不排水的水下挖土，使坑内外水压相平衡，使其无发生流砂的条件，一般深井挖土均采用此法。

④建造地下连续墙以供承重、护壁，并达到截水防止流砂的发生。

⑤采用轻型井点、喷射井点、管井井点和深井泵点等人工降低地下水的方法进行土方施工，使动水压力方向向下，增大土粒间的动力，从而有效地制止流砂现象发生。

⑥抛大石块，在施工过程中如遇局部的或轻微的流砂，可组织人力分段抢挖，挖至标高后，立即铺设芦苇并抛大石块，增加土的压重，以平衡动水压力。

3. 基坑突涌

当基坑下存在承压含水层时，若基坑隔水板厚度小于含水层顶面的承压水头时，可引起基坑突涌。为防止基坑突涌现象的发生，应注意开挖基槽时保留槽底一定的安全厚度 h_s ，如图 2-5 所示。

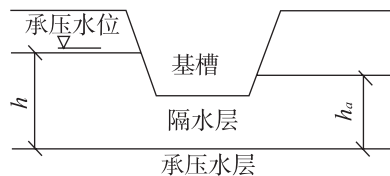


图 2-5 安全厚度示意图

$$h_a \geq \frac{\gamma_w}{\gamma} h \quad (2-3)$$

式中： γ ——隔水层的重度，单位为 kN/m^3 ；

γ_w ——水的重度，取 10 kN/m^3 ；

h ——承压水的上升高度（从隔水层底面起算），单位为 m ；

h_a ——隔水层安全厚度（槽底安全厚度），单位为 m 。

4. 地下水对钢筋混凝土具有腐蚀性

当地下水中的 SO_4^{2-} 含量大于 250 mg/L 时， SO_4^{2-} 将与混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成含水硫酸盐结晶，体积膨胀，内应力增大，导致混凝土开裂。当地下水的 CO_2 含量超过平衡浓度时，就会溶解混凝土中的 CaCO_3 ，腐蚀混凝土。

学习任务 2 | 认识地基土

■ 任务目标

1. 掌握地基土的三相物理指标及其换算关系、地基土的分类，熟悉地基土的物理力学性质，了解土的内部构成。
2. 提高对地基土的认识，培养严谨的逻辑思维能力和严谨的工作作风。

知识链接

土是连续、坚固的岩石在风化作用下形成的大小悬殊的颗粒，经过不同的搬运方式，在各种自然环境中生成的沉积物。在漫长的地质年代中，由于各种内力和外力地质作用形成了许多类型的岩石和土。岩石经历风化、剥蚀、搬运、沉积生成土，而土历经压密固结，胶结硬化也可再生成岩石。

一、土的组成

土是由固体颗粒、水和气体三部分组成的，即由固相、液相和气相组成。

（一）土的固体颗粒

土的固体颗粒是由大小不等、形状不同的矿物颗粒或岩石碎屑按照各种不同的排列方式组合在一起，构成土的骨架。这些固体相的物质称为“土粒”，是土中最稳定、变化最小的成分。土中的固体颗粒的大小和形状，矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。土中不同大小颗粒的组合，也就是各种不同粒径的颗粒在土中的相对含量，称土的颗粒组成；组成土中各种土粒的矿物种类及其相对含量称土的矿物组成。土的颗粒组成与矿物组成是决定土的物理力学性质的物质基础。

粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的碎屑,或是岩石中未产生化学变化的矿物颗粒,如石英和长石等,而细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物和生成过程中混入的有机物质。粗大土粒其形状都呈块状或粒状,而细小土粒其形状主要呈片状。土粒的组合情况就是大大小小土粒含量的相对数量关系。

1. 土的颗粒级配

在自然界中存在的土都是由大小不同的土粒组成的。自然界中的土粒,大小悬殊、性质各异,直径变化幅度(从数米的漂石到万分之几毫米的胶粒)很大,土粒的粒径由粗到细逐渐变化时,土的性质相应地发生变化,例如土的性质随着粒径的变细可由无黏性变化到有黏性。为了研究土中各种大小土粒的相对含量及其与土的工程地质性质的关系,就有必要将工程地质性质相似的土粒归并成组,按其粒径的大小分为若干组别,这种组别称粒组。各个粒组随着分界尺寸的不同而呈现出一定的变化。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。目前土的粒组划分方法并不完全一致,表 2-6 提供的是一种常用的土粒粒组的划分方法,表中根据界限粒径 200 mm、60 mm、2 mm、0.075 mm 和 0.005 mm 把土粒分为六大粒组:漂石(块石)颗粒、卵石(碎石)颗粒、圆砾(角砾)颗粒、砂粒、粉粒及黏粒。

工程上常以土中各个粒组的相对含量(即各粒组占土粒总重的百分数)表示土中颗粒的组成情况,这种相对含量称为土的颗粒级配。

表 2-6 土粒粒组的划分

粒组统称	粒组名称		粒径范围 / mm	主要特征	分析方法
巨粒	漂石(块石)粒		> 200	透水性很大,压缩性极小,颗粒间无黏结,无毛细性	直接测定
	卵石(碎石)粒		200 ~ 60		
粗粒	圆(角)砾	粗	60 ~ 20	透水性大,压缩性小,无黏性,毛细性上升高度不超过粒径	筛分法
		中	20 ~ 5		
		细	5 ~ 2		
	砂粒	粗	2 ~ 0.5	易透水,压缩性增加,无黏性,遇水不膨胀,干时松散,毛细性上升高度不大	
		中	0.5 ~ 0.25		
		细	0.25 ~ 0.075		
细粒	粉粒	粗	0.075 ~ 0.01	透水性小,压缩性中等,毛细上升高度较大,微黏性,易冻胀	沉降分析法
		细	0.01 ~ 0.005		
	黏粒		< 0.005	透水性极弱,压缩性变化大,具黏性和可塑性,遇水膨胀大	

注: 1. 漂石、卵石和圆砾颗粒呈一定的磨圆形状(圆形或亚圆形),块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角;
2. 粉粒或称粉土粒,粉粒的粒径上限 0.075 mm,相当于 200 号标准筛的孔径;
3. 黏粒或称黏土粒,黏粒的粒径上限也有采用 0.002 mm 为准的。

根据粒度成分分析试验结果，常采用粒径累计曲线（图 2-6）表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法，其特点是可简单获得指标，特别适用于几种土级配好与差的相对比较。粒径累计曲线法的横坐标为粒径，由于土粒粒径的值域很宽，因此采用对数坐标表示；纵坐标为小于（或大于）某粒径的土重（累计百分）含量。由粒径累计曲线的坡度可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如曲线较陡，表示粒径大小相差不多，土粒较均匀，级配不良；反之，曲线平缓，则表示粒径大小相差悬殊，土粒不均匀，级配良好。

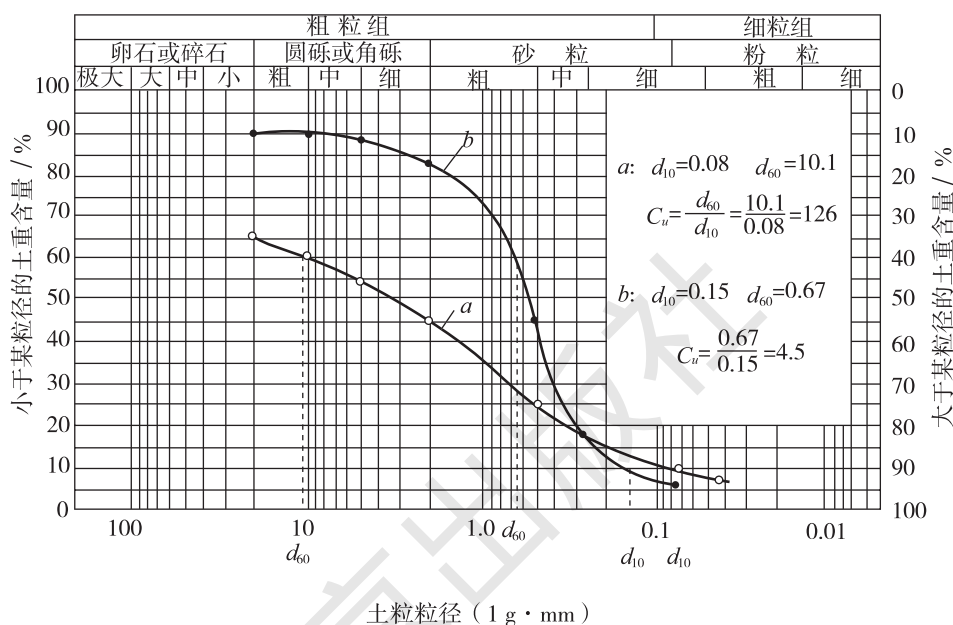


图 2-6 粒径累计曲线

根据描述级配的粒径累计曲线，可以简单地确定颗粒级配的两个定量指标，即不均匀系数 C_u 及曲率系数 C_c ，两者定义的表达式如下：

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-4)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}} \quad (2-5)$$

小于某粒径的土粒质量累计百分数为 10% 时，相应的粒径称为有效粒径 d_{10} 。小于某粒径的土粒质量累计百分数为 30% 时的粒径用 d_{30} 。当小于某粒径的土粒质量累计百分数为 60% 时，该粒径称为限定粒径，用 d_{60} 表示。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况。 C_u 越大，表示土粒大小的分布范围越大，其级配越良好，作为填方工程的土料时，则比较容易获得较大的密实度。曲率系数 C_c 描写的是累计曲线的分布范围，反映曲线的整体形状。

在一般情况下，工程上把 $C_u < 5$ 的土看作是均粒土，属级配不良， $C_u > 10$ 的土，属级配良好。实际上，单独只用一个指标 C_u 来确定土的级配情况是不够的，要同时考

考虑累计曲线的整体形状, 所以需参考曲率系数 C_c 值。一般认为: 砾类土或砂类土同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时, 则定名为良好级配砾或良好级配砂。

颗粒级配可以在一定程度上反映土的某些性质。对于级配良好的土, 较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充, 因而土的密实度较好, 相应的地基土的强度和稳定性也较好, 透水性和压缩性也较小, 可用作堤坝或其他土建工程的填方土料。

2. 土粒的矿物成分

土粒的矿物成分主要决定于母岩的成分及其所经受的风化作用。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响, 其中以细粒组的矿物成分尤为重要。

漂石、卵石、圆砾等粗大土粒都是岩石的碎屑, 它们的矿物成分与母岩相同。

砂粒大部分是母岩中的单矿物颗粒, 如石英、长石和云母等。其中石英的抗化学风化能力强, 在砂粒中尤为多见。

粉粒的矿物成分是多样性的, 主要是石英和 $MgCO_3$ 、 $CaCO_3$ 等难溶盐的颗粒。

黏粒的矿物成分主要有黏土矿物、氧化物、氢氧化物和各种难溶盐类(如碳酸钙等), 它们都是次生矿物。黏土矿物的颗粒很微小, 在电子显微镜下观察到的形状为鳞片状或片状, 经 X 射线分析证明其内部具有层状晶体构造。

黏土矿物基本上是由两种原子层(称为晶片)构成的。一种是硅氧晶片, 它的基本单元是 $Si-O$ 四面体; 另一种是铝氢氧晶片, 它的基本单元是 $Al-OH$ 八面体。

由于晶片结合情况的不同, 便形成了具有不同性质的各种黏土矿物, 其中主要有蒙脱石、伊里石和高岭石三类。

蒙脱石是化学风化的初期产物, 其结构单元(晶胞)是两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片所组成的。由于晶胞的两个面都是氧原子, 其间没有氢键, 因此联结很弱, 水分子可以进入晶胞之间, 从而改变晶胞之间的距离, 甚至达到完全分散到单晶胞为止。因此当土中蒙脱石含量较大时, 则具有较大的吸水膨胀和脱水收缩的特性。

伊里石的结构单元类似于蒙脱石, 所不同的是 $Si-O$ 四面体中的 Si^{4+} 可以被 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 所取代, 因而在相邻晶胞间将出现若干一价正离子 (K^+) 以补偿晶胞中正电荷的不足。所以伊里石的结晶构造没有蒙脱石那样活动, 其亲水性不如蒙脱石。

高岭石的结构单元是由一层铝氢氧晶片和一层硅氧晶片组成的晶胞。高岭石的矿物就是由若干重叠的晶胞构成的。这种晶胞一面露出氢氧基, 另一面则露出氧原子。晶胞之间的联结是氧原子与氢氧基之间的氢键, 它具有较强的联结力, 因此晶胞之间的距离不易改变, 水分子不能进入, 因此它的亲水性比伊里石还小。

由于黏土矿物是很细小的扁平颗粒, 颗粒表面具有很强的与水相互作用的能力, 表面积愈大, 这种能力就愈强。黏土矿物表面积的相对大小可以用单位体积(或质量)的颗粒总表面积(称为比表面)来表示。例如, 一个棱边为 1 cm 的正方体颗粒, 其体积为 1 cm^3 , 总表面积只有 6 cm^2 , 比表面为 $6 \text{ cm}^2/1 \text{ cm}^3 = 6 \text{ cm}^{-1}$, 若将 1 cm^3 正方体颗粒分割为棱边 0.001 mm 的许多正方体颗粒, 则其总表面积可达 $6 \times 10^4 \text{ cm}^2$, 比表面可达 $6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。由此可见, 由于土粒大小不同而造成比表面数值上的巨大变化, 必然导致土的性质的突变, 所以, 土粒大小对土的性质所起的重要作用是可以想象的。

除黏土矿物外, 黏粒组中还包括氢氧化物和腐殖质等胶态物质。如含水氧化铁,

它在土层中分布很广，是地壳表层的含铁矿物质分解的最后产物，使土呈现红色或褐色。土中胶态腐殖质的颗粒更小，能吸附大量水分子（亲水性强）。

由于土中胶态腐殖质的存在，使土具有高塑性、膨胀性和黏性，这对工程建设是不利的。

（二）土中的水和气

1. 土中水

土中水是土的液体相组成部分。在自然条件下，土中总是含水的。土中水可以处于液态、固态或气态三种形态。土中细粒愈多，即土的分散度愈大，水对土的性质的影响也愈大。研究土中水，必须考虑到水的存在状态及其与土粒的相互作用。

存在于土粒矿物的晶体格架内部或是参与矿物构造中的水称为矿物内部结合水，它只有在比较高的温度（80～680℃，随土粒的矿物成分不同而异）下才能化为气态水而与土粒分离。从土的工程性质上分析，可以把矿物内部结合水当作矿物颗粒的一部分。

水对无黏性土的工程地质性质影响较小，但黏性土中水是控制其工程地质性质的重要因素，如黏性土的可塑性、压缩性及其抗剪性等，都直接或间接地与其含水量有关。

存在于土中的液态水可分为结合水和自由水两大类：

（1）结合水。

实验表明，极细的土粒表面一般带有负电荷，围绕土粒形成电场，由于水分子是极性分子，即一端为正电荷，另一端显负电荷，在土粒电场范围内的水分子和阳离子一起吸附在土粒表面而定向排列形成一层薄的水膜，这层水就称为结合水。结合水是指受电分子吸引力吸附于土粒表面的土中水。这种电分子吸引力高达几千到几万个大气压，使水分子和土粒表面牢固地黏结在一起。

由于土粒（矿物颗粒）表面一般带有负电荷，围绕土粒形成电场，在土粒电场范围内的水分子和水溶液中的阳离子（如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 等）一起吸附在土粒表面。因为水分子是极性分子（氢原子端显正电荷，氧原子端显负电荷），它被土粒表面电荷或水溶液中离子电荷的吸引而定向排列（图2-7）。

土粒周围水溶液中的阳离子，一方面受到土粒所形成电场的静电引力作用；另一方面又受到布朗运动（热运动）的扩散力作用。在最靠近土粒表面处，静电引力最强，把水化离子和极性水分子牢固地吸附在颗粒表面上形成固定层。在固定层外围，静电引力比较小，因此水化离子和极性水分子的活动性比在固定层中大些，形成扩散层。固定层和扩散层中所含的阳离子（反离子）与土粒表面负电荷一起即构成双电层。

水溶液中的反离子（阳离子）的原子价愈高，它与土粒之间的静电引力愈强，则扩散层厚度愈薄。在实践中可以利用这种原理来改良土质，例如用三价及二价离子（如

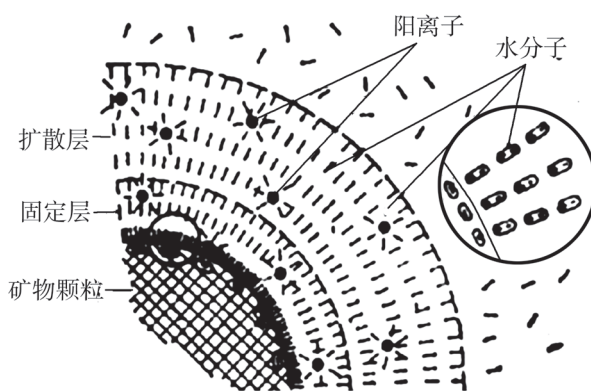


图 2-7 结合水分子定向排列图

Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) 处理黏土, 使得它的扩散层变薄, 从而增加土的稳定性和减少膨胀性, 提高土的强度。有时, 可用含一价离子的盐溶液处理黏土, 使扩散层增厚, 而大大降低土的透水性。

从上述双电层的概念可知, 反离子层中的结合水分子和交换离子, 愈靠近土粒表面, 则排列得愈紧密和整齐, 活动性也愈小。因而, 结合水又可以分为强结合水和弱结合水两种。强结合水是相当于反离子层的内层(固定层)中的水, 而弱结合水则相当于扩散层中的水。

①强结合水。

强结合水是指紧靠土粒表面的结合水。它的特征是: 没有溶解盐类的能力, 不能传递静水压力, 只有吸热变成蒸汽时才能移动。这种水极其牢固地结合在土粒表面上, 其性质接近固体, 密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$, 冰点为 $-78 \text{ }^\circ\text{C}$, 具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。如果将干燥的土移在天然湿度的空气中, 则土的质量将增加, 直到土中吸着的强结合水达到最大吸着度为止。土粒愈细, 土的比表面愈大, 则最大吸着度就愈大。砂土的最大吸着度约占土粒质量的 1%, 而黏土则可达 17%。黏土中只含有强结合水时, 呈固体状态, 磨碎后则呈粉末状态。

②弱结合水。

弱结合水紧靠于强结合水的外围形成一层结合水膜。它仍然不能传递静水压力, 但水膜较厚的弱结合水能向邻近的较薄的水膜缓慢转移。当土中含有较多的弱结合水时, 土则具有一定的可塑性。砂土比表面较小, 几乎不具有可塑性, 而黏性土的比表面较大, 其可塑性范围就大。

弱结合水离土粒表面愈远, 其受到的电分子吸引力愈弱小, 并逐渐过渡到自由水。

(2) 自由水。

自由水是存在于土粒表面电场影响范围以外的水。它的性质和普通水一样, 能传递静水压力, 冰点为 $0 \text{ }^\circ\text{C}$, 有溶解能力。

自由水按其移动所受作用力的不同, 可以分为重力水和毛细水。

①重力水。

重力水是在重力或压力差作用下运动的自由水, 它是存在于地下水位以下的透水土层中的地下水, 对土粒有浮力作用。重力水对土中的应力状态和开挖基槽、基坑以及修筑地下构筑物时所应采取的排水、防水措施有重要的影响。

②毛细水。

毛细水是受到水与空气交界面处表面张力作用的自由水。毛细水存在于地下水位以上的透水层中。毛细水按其是否与地下水面是否联系可分为毛细悬挂水(与地下水无直接联系)和毛细上升水(与地下水相连)两种。当土孔隙中局部存在毛细水时, 毛细水的弯液面和土粒接触处的表面引力反作用于土粒上, 使土粒之间由于这种毛细压力而挤紧, 土因而具有微弱的黏聚力, 称为毛细黏聚力。

在施工现场常常可以看到稍湿状态的砂堆, 能保持垂直陡壁达几十厘米高而不坍落, 就是因为砂粒间具有毛细黏聚力的缘故。在饱水的砂或干砂中, 土粒之间的毛细压力消失, 原来的陡壁就变成斜坡, 其天然坡面与水平面所形成的最大坡角称为砂土的自然坡度角。在工程中, 要注意毛细上升水的上升高度和速度, 因为毛细水的上升

对于建筑物地下部分的防潮措施和地基土的浸湿和冻胀等有重要影响。此外，在干旱地区，地下水中的可溶盐随毛细水上升后不断蒸发，盐分便积聚于靠近地表处而形成盐渍土。土中毛细水的上升高度可用试验方法测定。

地面下一定深度的土温，随大气温度而改变。当地层温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，土体便会因土中水冻结而形成冻土。某些细粒土在冻结时，往往发生体积膨胀，即所谓冻胀现象。土体发生冻胀的机制，主要是由于土层在冻结时，周围未冻区土中的水分向冻结区迁移，集聚所致。弱结合水的外层在 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻结，越靠近土粒表面，其冰点越低，在 $-20\sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下才能全部冻结。当大气负温传入土中时，土中的自由水首先冻结成冰晶体，弱结合水的最外层也开始冻结，使冰晶体逐渐扩大，于是冰晶体周围土粒的结合水膜变薄，土粒产生剩余的分子引力。另外，由于结合水膜的变薄，使得水膜中的离子浓度增加，产生了渗附压力，在这两种引力的作用下，下卧未冻区水膜较厚处的弱结合水便被上吸到水膜较薄的冻结区，并参与冻结，使冻结区的冰晶体增大，而不平衡引力却继续存在。假使下卧未冻区存在着水源（如地下水位距冻结深度很近）及适当的水源补给通道（即毛细通道），能继续不断地补充到冻结区来，那么，未冻结区的水分（包括弱结合水和自由水）就会继续向冻结区迁移和积聚，使冰晶体不断扩大，在土层中形成冰夹层，土体随之发生隆起，出现冻胀现象。当土层解冻时，土中积聚的冰晶体融化，土体随之下陷，即出现融陷现象。土的冻胀现象和融陷现象是季节性冻土的特性，亦即土的冻胀性。

2. 土中气

土中的气体存在于土孔隙中未被水所占据的部位。在粗粒的沉积物中常见到与大气相联通的空气，它对土的力学性质影响不大。在细粒土中则常存在与大气隔绝的封闭气泡，使土在外力作用下的弹性变形增加，透水性减小。

对于淤泥和泥炭等有机质土，由于微生物（嫌气细菌）的分解作用，在土中蓄积了某种可燃气体（如硫化氢、甲烷等），使土层在自重作用下长期得不到压密，而形成高压缩性土层。

（三）土的结构和构造

土的结构是指由土粒单元的大小、形状，相互排列及其联结关系等因素形成的综合特征。一般分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

1. 单粒结构

单粒结构是由粗大土粒在水或空气中下沉而形成的。全部由砂粒及更粗土粒组成的土都具有单粒结构。因其颗粒较大，土粒间的分子吸引力相对很小，所以颗粒间几乎没有联结，至于未充满孔隙的水分只可能使其具有微弱的毛细水联结。单粒结构可以是疏松的，也可以是紧密的（图 2-8）。

呈紧密状单粒结构的土，由于其土粒排列紧密，在动、静荷载作用下都不会产生较大的沉降，所以强度较大，压缩性较小，是较为良好的天然地基。

具有疏松单粒结构的土，其骨架是不稳定的，当受到震动及其他外力作用时，土粒易于发生移动，土中孔隙剧烈减少，引起土的很大变形，因此，这种土层如未经处理一般不宜作为建筑物的地基。

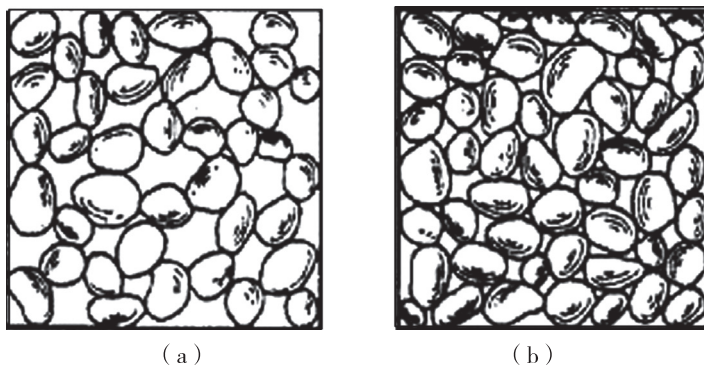


图 2-8 常见土的结构示意图

2. 蜂窝结构

蜂窝结构是主要由粉粒 ($0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$) 组成的土的结构形式。据研究, 粒径在 $0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$ 的土粒在水中沉积时, 基本上是以单个土粒下沉, 当碰上已沉积的土粒时, 由于它们之间的相互引力大于其重力, 土粒就会停留在最初的接触点上不再下沉, 从而形成具有很大孔隙的蜂窝状结构。

3. 絮状结构

絮状结构是由黏粒 ($< 0.005 \text{ mm}$) 集合体组成的结构形式。黏粒能够在水中长期悬浮, 不因自重而下沉。当这些悬浮在水中的黏粒被带到电解质浓度较大的环境中 (如海水), 黏粒凝聚成絮状的集粒 (黏粒集合体) 而下沉, 并相继和已沉积的絮状集粒接触, 而形成类似蜂窝而孔隙很大的絮状结构。

具有蜂窝结构和絮状结构的黏性土, 其土粒之间的联结强度 (结构强度), 往往由于长期的压密作用和胶结作用而得到加强。

在同一土层中的物质成分和颗粒大小等都相近的各部分之间的相互关系的特征称为土的构造。土的构造的最主要特征就是成层性, 即层理构造, 它是在土的形成过程中, 由于不同阶段沉积的物质成分、颗粒大小或颜色不同, 而沿竖向呈现的成层特征, 常见的有水平层理构造和交错层理构造。土的构造的另一特征是土的裂隙性, 如黄土的柱状裂隙, 裂隙的存在大大降低了土体的强度和稳定性, 增大了透水性, 对工程不利。此外, 也应注意土中是否有包裹物 (如腐殖物、贝壳、结核体等) 以及天然或人为的孔洞。这些构造特征都易造成土的不均匀性。

二、地基土的工程分类

在天然地基中, 土的种类很多, 为了评价岩土的工程性质以及进行地基基础的设计与施工, 必须根据岩土的主要特征, 按工程性能近似的原则对岩土进行工程分类。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 把作为建筑地基的岩土分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土六类。

(一) 岩石

岩石是指颗粒间牢固联结, 呈整体或具有节理裂隙的岩体, 其坚硬程度划分为坚

硬岩、较硬岩、较软岩、软岩和极软岩(表 2-7);按其完整程度划分为完整岩、较完整岩、较破碎岩、破碎岩和极破碎岩(表 2-8)。当缺乏试验资料时,可在现场通过观察定性划分,划分标准见表 2-9 和表 2-10。

表 2-7 岩石坚硬程度的划分

坚硬程度类别	坚硬岩	较硬岩	较软岩	软岩	极软岩
饱和单轴抗压强度标准值 f_{rk} / MPa	$f_{rk} > 60$	$30 < f_{rk} \leq 60$	$15 < f_{rk} \leq 30$	$5 < f_{rk} \leq 15$	$f_{rk} \leq 5$

表 2-8 岩石完整程度划分

完整程度划分	完整岩	较完整岩	较破碎岩	破碎岩	极破碎岩
完整性指数	> 0.75	$0.55 \sim 0.75$	$0.35 \sim 0.55$	$0.15 \sim 0.35$	< 0.15

注:完整性指数为岩体纵波速度与岩块纵波波速之比的平方。选定岩体岩块测定波速时应有代表性。

表 2-9 岩石坚硬程度的定性划分

名称		定性鉴别	代表性岩体
硬质岩	坚硬岩	锤击清脆有回弹,振手,难击碎;基本无吸水反应	未风化-微风化的花岗岩、闪长岩、辉绿岩、玄武岩、安山岩、片麻岩、石英岩、硅质砾岩、石英砂岩、硅质石灰岩
	较硬岩	锤击声较清脆,有轻微回弹,稍振手,轻难击碎;有轻微吸水反应	微风化的坚硬岩;未风化-微风化的大理岩、板岩、石灰岩、钙质砂岩等
软质岩	较软岩	锤击声不清脆,无回弹,轻易击碎;指甲可刻出印痕	中风化的坚硬岩和较硬岩;未风化-微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩等
	软岩	锤击声哑,无回弹,有凹痕,易击碎;浸水后,可捏成团	强风化的坚硬岩和较硬岩;中风化的较软岩;未风化-微风化的凝灰岩、泥质砂岩、泥岩等;微风化的凝灰岩、千枚岩、砂质泥岩、泥灰岩等
极软岩		锤击声哑,无回弹,有较深凹痕,手可捏碎;浸水后,可捏成团	风化的软岩;全风化的各种岩石;各种半成岩

表 2-10 岩石完整程度的划分

名称	结构面组数	控制性结构面间距 / m	代表性结构类型
完整岩	1 ~ 2	> 1.0	整体结构
较完整岩	2 ~ 3	0.4 ~ 1.0	块状结构
较破碎岩	> 3	0.2 ~ 0.4	镶嵌状结构
破碎岩	> 3	< 0.2	碎裂状结构
极破碎岩	无序	—	散体状结构

(二) 碎石土

碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。按其颗粒形状及颗粒组含量可分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾、角砾, 见表 2-11。

表 2-11 碎石土的分类

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

注: 分类时应该根据粒组含量栏从上到下以符合者确定。

(三) 砂土

砂土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过全重的 50%、粒径大于 0.075 mm 颗粒含量超过全重 50% 的土。按粒组含量可分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂, 见表 2-12。

表 2-12 砂土的分类

土的名称	粒组含量
砾砂	粒径大于 2 mm 的颗粒含量占全重 25% ~ 50%
粗砂	粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量超过全重 50%
中砂	粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量超过全重 50%
细砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 85%
粉砂	粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 25% ~ 50%

注: 分类时应根据粒组含量栏从上到下最先符合者确定。

(四) 粉土

粉土是指粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全重的 50%、塑性指数 $I_p \leq 10$ 的土。其性质介于砂土及黏性土之间。

(五) 黏性土

黏性土是指塑性指数 $I_p > 10$ 的土。按其塑性指数可分为黏土和粉质黏土, 见表 2-13。

表 2-13 黏性土分类

塑性指数	土的名称	塑性指数	土的名称
$I_p > 17$	黏土	$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土

(六) 人工填土

人工填土是指由于人类活动而堆填的土。其物质成分杂乱，均匀性差。按其组成和成因可分为素填土、压实填土、杂填土和冲填土。

素填土是指由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土。经过压实或夯实的素填土为压实填土。杂填土是指含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土。冲填土是指由水力冲填泥砂形成的填土。

除了上述六类土之外，还有一些特殊土，如淤泥和淤泥质土、红黏土和次生黏土、湿陷性黄土和膨胀土等，它们都具有特殊的性质。

三、土的基本物理性质指标

(一) 土的三相图

土的三相组成实际上是混合分布的，为了使三相比例关系形象化和阐述方便，将它们分别集中起来画出土的三相示意图，如图 2-9 所示。

V —— 土的总体积，单位为 cm^3 ； m —— 土的总质量，单位为 g ； V_s —— 土中固体颗粒实体的体积，单位为 cm^3 ； m_s —— 土中固体颗粒质量，单位为 g ； V_v —— 土中孔隙体积，单位为 cm^3 ； m_w —— 土中液体的质量，单位为 g ； V_w —— 土中液体的体积，单位为 cm^3 ； m_a —— 土中空气的质量 ($m_a=0$)； V_a —— 土中气体的体积，单位为 cm^3 。

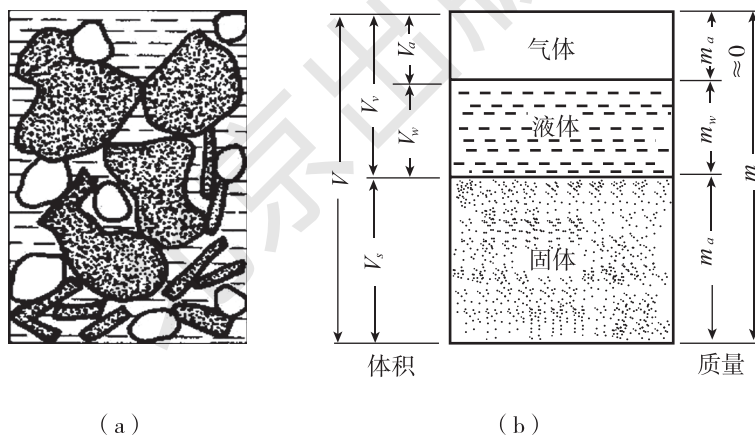


图 2-9 土粒三相比例示意图

(二) 指标定义

1. 三个基本的三相比例指标

三个基本的三相比例指标是指土粒相对密度 d_s 、土的含水量 w 和密度 ρ ，一般由实验室直接测定其数值。

(1) 土粒相对密度 d_s 。

土粒质量与同体积的 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时纯水的质量之比，称为土粒相对密度 d_s ，无量纲，即

$$d_s = \frac{m_s}{V_s \rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (2-6)$$

式中: m_s ——土粒质量, 单位为 g;

V_s ——土粒体积, 单位为 cm^3 ;

ρ_s ——土粒密度, 即土粒单位体积的质量, 单位为 g/cm^3 ;

ρ_{w1} ——纯水在 4°C 时的密度, 等于 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 或 $1 \text{ t}/\text{m}^3$ 。

表 2-14 土粒相对密度参考值

土的种类		砾类土	砂类土	粉土	粉质黏土	黏土
土粒相对密度 / (g/cm^3)	常见值	2.65 ~ 2.75	2.65 ~ 2.70	2.65 ~ 2.70	2.68 ~ 2.73	2.72 ~ 2.76
	平均值	—	2.66	2.68	2.71	2.74

(2) 土的含水量 w 。

土中水的质量与土粒质量之比, 称为土的含水量 (率) w , 以百分数计, 亦即

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (2-7)$$

一般所说的含水量指的是天然含水量, 土的含水量由于土层所处自然条件 (如水的补给、气候、离地下水位的距离等)、土层的结构构造 (松密程度) 以及沉积历史等的不同, 其数值相差较大。如近代沉积的三角洲软黏土或湖相黏土, 含水量可达 100% 以上, 有的甚至高达 200% 以上; 而有些密实的第四纪老黏土 (Q_3 以前沉积), 孔隙体积较小, 即使孔隙中全部充满水, 含水量也可能小于 20%。干旱地区, 土的含水量可能微不足道或只有百分之几。一般砂类土的含水量都不会超过 40%, 以 10% ~ 30% 为常见值, 一般黏性土的常见值为 20% ~ 50%。

(3) 土的密度 ρ 。

土单位体积的质量称为土的 (湿) 密度 ρ , 单位为 g/cm^3 , 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-8)$$

天然密度的大小取决于矿物成分、孔隙大小和含水情况, 综合反映了土的物质组成和结构特征。土越密实, 含水量越高, 则天然密度就越大; 反之就越小。由于自然界土的松密程度与含水量变化较大, 故天然密度变化较大, 一般值为 $1.6 \sim 2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$, 小于土粒密度值, 它是一个实测指标。

2. 特殊条件下土的密度

(1) 土的干密度 ρ_d 。

土单位体积中固体颗粒部分的质量, 称为土的干密度 ρ_d , 单位为 g/cm^3 , 即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2-9)$$

在工程上常把干密度 ρ_d 作为评价土体紧密程度的标准, 尤以控制填土工程的施工质量作为常见。

(2) 饱和密度 ρ_{sat} 。

土孔隙中充满水时的单位体积质量, 称为土的饱和密度 ρ_{sat} , 单位为 g/cm^3 , 即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (2-10)$$

式中 ρ_w 为水的密度，近似等于 $\rho_{w1} = 1 \text{ g/cm}^3$ 。

(3) 土的浮密度 ρ' 。

在地下水位以下，土单位体积中土粒的质量与同体积水的质量之差，称为土的浮密度 ρ' ，单位为 g/cm^3 ，即

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} \quad (2-11)$$

工程实际中，常将土的密度换算成土的重度 (γ)，重度等于密度乘以重力加速度 g ，即

$$\gamma = \rho g \quad (2-12)$$

式中的重力加速度常近似取 10 m/s^2 ，当 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ，则 $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ 。与天然密度、干密度、饱和密度对应的重度分别称为天然重度 (γ)、干重度 (γ_d) 及饱和重度 (γ_{sat})。另外，处于地下水位以下的土层，如果土层是透水的，此时土受水的浮力作用，土的实际重量将减小，那么这种处于地下水位以下的有效重度常特称为土的浮重度 (r')，即

$$r' = \frac{(m_s - V_s \rho_w)}{V} g = \frac{m_s + m_w - V \rho_w}{V} g \quad (2-13)$$

浮重度等于土的饱和重度减去水的重度 (γ_w)，即

$$r' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (2-14)$$

对于同一种土来讲，土的天然重度、干重度、饱和重度、浮重度在数值上有如下关系：

$$\gamma_{\text{sat}} > \gamma > \gamma_d > r'$$

3. 描述土的孔隙体积相对含量的指标

(1) 土的孔隙比 e 。

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比，用小数表示，即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-15)$$

土的孔隙比说明土的密实程度，按其大小可对砂土或粉土进行密实度分类。如在《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001, 2009年版)中，用天然孔隙比来确定粉土的密实度。 $e < 0.75$ 为密实， $0.75 \leq e \leq 0.9$ 为中密， $e > 0.9$ 为稍密的粉土。

(2) 土的孔隙度 n 。

孔隙度又称孔隙率，指土中孔隙总体积与土的总体积之比，用百分数表示，即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2-16)$$

土的孔隙度取决于土的结构状态, 砂类土的孔隙度常小于黏性土的孔隙度。土的孔隙度一般为 27% ~ 52%。新沉积的淤泥, 孔隙度可达 80%。土的孔隙度是一个计算指标。

(3) 饱和度 S_r 。

土孔隙中所含水的体积与土中孔隙体积的比值称为土的饱和度, 以百分数表示, 即

$$S_r = \frac{V_w}{V_n} \times 100\% \quad (2-17)$$

饱和度可以说明土孔隙中充水的程度, 其数值为 0 ~ 100%。干土: $S_r = 0$; 饱和土: $S_r = 100\%$ 。工程实际中, 饱和度主要用于评述砂类土的含水状况 (或湿度), 按饱和度大小常将砂类土划分为如下三种含水状况: $S_r < 50\%$, 稍湿的; $50\% \leq S_r \leq 80\%$, 很湿的; $S_r > 80\%$, 饱和的。

饱和度是一个计算指标, 对黏性土, 由于主要含结合水, 结合水膜厚度的变化将引起土体积的膨胀或收缩, 改变原状土中孔隙的体积。另外, 结合水的密度大于 1, 计算饱和度时, 一般取水的密度为 1.0 g/cm^3 。因此, 最终计算得到的饱和度值常大于 100%, 显然与实际不符。工程实际中, 一般不用饱和度评价黏性土的湿度。

(三) 指标的换算

通过土工试验直接测定土粒相对密度 d_s 、土的含水量 w 和密度 ρ 这三个基本指标后, 可计算出其余三相比例指标。

应用三相比例关系 (简化的三相图), 按照各指标的定义来计算导出指标更为简便。在三相示意图中, 令 $V_s = 1$, 则 $V_v = e$, $V = 1 + e$, $m_s = \rho_s$, $m_w = w\rho_s$, $m = \rho(1 + w)$, 则各导出指标便很容易求得:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{m}{\rho V_s} - 1 = \frac{\rho_s(1 + w)}{\rho} - 1 \quad (2-18)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho_s}{1 + e} = \frac{\rho_s}{1 + \frac{\rho_s(1 + w)}{\rho} - 1} = \frac{\rho}{1 + w} \quad (2-19)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{\rho_s + e\rho_w}{1 + e} = \rho_d + n\rho_w \quad (2-20)$$

$$\gamma' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} g = \frac{\rho_s - \rho_w}{1 + e} \cdot g = \frac{(\rho_s - \rho_w)\rho}{\rho_s(1 + w)} \cdot g \quad (2-21)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1 + e} = \left[1 - \frac{\rho}{\rho_s(1 + w)} \right] \times 100\% \quad (2-22)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_n} = \frac{m_w / \rho_w}{e} = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} \times 100\% \quad (2-23)$$

因此, 只要测得三个实测指标, 其余导出指标便可求得, 三个基本实测指标的精度直接影响着各导出指标的精度。为此, 在测定三个指标的时候应力求原状土样未受扰动, 仪器设备可靠, 操作过程要认真细致。土的三相比例指标换算见表 2-15。

【工程案例 2-2】某原状土样，经试验测得 $\rho = 1.85 \text{ g/cm}^3$ ， $w = 25\%$ ， $\rho_s = 2.70 \text{ g/cm}^3$ ，求 ρ_d 、 e 、 n 、 S_r 。

$$\text{解： } \rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{1.85}{1+0.25} = 1.48 (\text{g/cm}^3)$$

$$e = \frac{\rho_s(1+w)}{\rho} - 1 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2.70}{1.48} - 1 = 0.824$$

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.824}{1+0.824} = 45.2\%$$

$$S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w} = \frac{0.25 \times 2.70}{0.824 \times 1.0} = 81.9\%$$

表 2-15 土的三相比例指标换算公式

性质	指标名称	符号	定义	表达式	单位	常见值	求法及常用换算公式
土粒密度	土粒密度	ρ_s	土的固体颗粒单位体积质量	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$	g/cm^3	2.65 ~ 2.75	直接测定(扰动样)
土的密度	天然密度	ρ	天然状态下土的单位体积质量	$\rho = \frac{m}{V}$	g/cm^3	1.60 ~ 2.20	直接测定(原状样)
	干密度	ρ_d	土的单位体积中固体颗粒的质量	$\rho_d = \frac{m_s}{V}$	g/cm^3	1.30 ~ 1.70	直接测定(原状样)或换算求得 $\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$
	饱和密度	ρ_{sat}	孔隙中全部充满液态水时，土的单位体积质量	$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V}{V}$	g/cm^3	1.80 ~ 2.30	换算求得 $\rho_{\text{sat}} = \rho_d + n\rho_w$
含水性	天然含水量	w	天然状态下，土中水分的质量与固体颗粒质量之比	$w = \frac{m_w}{m_s}$	%	10 ~ 50	直接测定(扰动样)
	饱和度	S_r	土中水的体积与孔隙体积之比	$S_r = \frac{V_w}{V}$	%	40 ~ 100	换算求得 $S_r = \frac{w\rho_s}{e\rho_w}$
孔隙度	孔隙度	n	土的孔隙体积与土的总体积之比	$n = \frac{V_v}{V}$	%	33 ~ 50	换算求得 $n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$
	孔隙比	e	土的孔隙体积与固体颗粒体积之比	$e = \frac{V_v}{V_s}$		0.5 ~ 1.0	换算求得 $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$

注：水的重度 $\gamma_w = \rho_{\text{wg}} = 1 \text{ t/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \times 10^3 \text{ N/m}^3 \approx 10 \text{ kN/m}^3$ 。

四、土的物理特征指标

(一) 无黏性土的密实度

无黏性土的密实度指的是碎石土和砂土的疏密程度。

无黏性土的密实度与其工程性质有着密切的关系, 密实的无黏性土由于压缩性小, 抗剪强度高, 承载力大, 可作为建筑物的良好地基。但若处于疏松状态, 尤其是细砂和粉砂, 其承载力就有可能很低。因为疏松的单粒结构是不稳定的, 在外力作用下很容易产生变形, 且强度也低。很难做天然地基。若它位于地下水水位以下, 在动荷载作用下还有可能由于超静水压力的产生而发生液化。例如我国海城 1975 年 2 月 4 日的 7.3 级地震, 震中区以西 25 ~ 60 km 的下辽河平原, 发生强烈砂土液化, 大面积喷砂冒水, 许多道路、桥梁、工业设施、民用建筑遭受破坏。1976 年 7 月 28 日唐山的 7.8 级地震, 也引起了大区域的砂土液化。因此, 凡工程中遇到无黏性土时, 首先要注意的就是它的密实度。

对于同一种无黏性土, 当其孔隙比小于某一限度时, 处于密实状态, 随着孔隙比的增大, 则处于中密、稍密直到松散状态。无黏性土的这种特性, 是因为它所具有的单粒结构决定的。

密实度的评价方法有三种:

- (1) 室内测试孔隙比确定相对密实度的方法。
- (2) 利用标准贯入试验等原位测试方法。
- (3) 野外观测方法。

无黏性土的相对密实度: 以最大孔隙比 e_{\max} 与天然孔隙比 e 之差和最大孔隙比 e_{\max} 与最小孔隙比 e_{\min} 之差的比值 D_r 表示, 即

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2-24)$$

无黏性土的最小孔隙比是最紧密状态的孔隙比, 用符号 e_{\min} 表示, e_{\min} 一般采用“振击法”测定; 无黏性土的最大孔隙比是土处于最疏松状态时的孔隙比, 用符号 e_{\max} 表示。 e_{\max} 一般用“松砂器法”测定。

从式 (2-24) 可知, 若无黏性土的天然孔隙比 e 接近于 e_{\min} , 即相对密度 D_r 接近于 1 时, 土呈密实状态, 当 e 接近于 e_{\max} 时, 即相对密度 D_r 接近于 0, 则呈松散状态。

无黏性土的天然孔隙比 e 如果接近 e_{\max} (或 e_{\min}), 则该无黏性土处于天然疏松 (或密实) 状态, 这可用无黏性土的相对密实度进行评价。

根据 D_r 值可把砂土的密实度状态划分为下列三种:

- $1 \geq D_r > 0.67$, 砂土的密实度状态为密实的;
- $0.67 \geq D_r > 0.33$, 砂土的密实度状态为中密的;
- $0.33 \geq D_r > 0$, 砂土的密实度状态为松散的。

相对密实度试验适用于透水性良好的无黏性土, 如纯砂、纯砾等。

对于不同的无黏性土, 其 e_{\min} 与 e_{\max} 的测定值也是不同的, e_{\min} 与 e_{\max} 之差 (即孔隙比可能变化的范围) 也是不一样的。一般土粒粒径较均匀的无黏性土, 其 e_{\max} 与 e_{\min} 之差较小; 对不均匀的无黏性土, 则其差值较大。

相对密实度是无黏性粗粒土密实度的指标，它对于土作为土工构筑物和地基的稳定性，特别是在抗震稳定性方面具有重要的意义。

对于砂土，也可用天然孔隙比 e 来评定其密实度。但是矿物成分、级配、粒度成分等各种因素对砂土的密实度都有影响，并且在具体的工程中，难于取得砂土原状土样，因此，利用标准贯入试验、静力触探等原位测试方法来评价砂土的密实度得到了工程技术人员的大量采用。砂土根据标准贯入试验的锤击数 N 分为松散、稍密、中密及密实四种密实度，其划分标准见表 2-16。

表 2-16 按标准贯入击数 N 划分砂土密实度 (GB 50021—2019)

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

注：标贯击数 N 系实测平均值。

(二) 黏性土的物理状态指标

1. 黏性土的物理性质

土的物理性质一般指的是黏性土的液限、塑限（由实验室测得）及由这两个指标计算得来的液性指数和塑性指数。这几个指标也是工程中必须提供的。对于饱和黏性土还有灵敏度和触变性。

2. 黏性土的界限含水量

黏性土由于其含水量的不同，而分别处于固态、半固态、可塑状态及流动状态（图 2-10）。可塑状态就是当黏性土在某含水量范围内，可用外力塑成任何形状而不发生裂纹，并当外力移去后仍能保持既得的形状。土的这种性能叫作可塑性。黏性土由一种状态转到另一种状态的分界含水量，叫作界限含水量，它对黏性土的分类及工程性质的评价有重要意义。

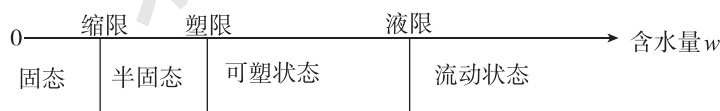


图 2-10 黏性土的四种状态

图 2-10 所示，土由可塑状态转到流动状态的界限含水量叫作液限（也称塑性上限含水量或流限），用符号 w_L 表示；土由半固态转到可塑状态的界限含水量叫作塑限（也称塑性下限含水量），用符号 w_p 表示；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叫缩限，用符号 w_s 表示。它们都以百分数表示。

我国目前采用锥式液限仪（图 2-11）来测定黏性土的液限 w_L 。其工作过程是：将调成均匀的浓糊状试样装满盛土杯内（盛土杯置于底座上），刮平杯口表面，将 76 g 重圆锥体轻放在试样表面的中心，使其在自重作用下徐徐沉入试样，若圆锥体经 5 s 恰好

沉入 10 mm 深度, 这时杯内土样的含水量就是液限 w_L 值。为了避免放锥时的人为晃动影响, 可采用电磁放锥的方法, 可以提高测试精度, 实践证明其效果较好。

黏性土的塑限 w_p 采用搓条法测定, 即用双手将天然湿度的土样搓成小圆球 (球径小于 10 mm), 放在毛玻璃板上再用手掌慢慢搓滚成小土条, 用力均匀, 搓到土条直径为 3 mm, 出现裂纹, 自然断开, 这时断裂土条的含水量就是塑限 w_p 值。

上述测定塑限的搓条法存在着较大的缺点, 主要是由于采用手工操作, 受人为因素的影响较大, 因而成果不稳定。近年来许多单位都在探索一些新方法, 以便取代搓条法, 如以联合法测定液限和塑限。

根据大量试验资料看, 它接近于一根直线, 如同时采用圆锥仪法及搓条法分别做液限、塑限试验进行比较, 则对应于圆锥体入土深度为 10 mm 及 2 mm 时土样的含水量分别为该土的液限和塑限。

因此, 在工程实践中, 为了准确、方便、迅速地求得某土样的液限和塑限时, 则需用电磁放锥的锥式液限仪对土样以不同的含水量做几次 (一般做三次) 试验, 即可在坐标纸上以相应的几个点近似地定出直线, 然后可在直线上求出液限和塑限, 详见国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)。

3. 黏性土的塑性指数和液性指数

(1) 塑性指数 I_p 。

塑性指数是指液限和塑限的差值 (省去 % 符号), 即土处在可塑状态的含水量变化范围, 用符号 I_p 表示, 即

$$I_p = w_L - w_p \quad (2-25)$$

显然, 塑性指数愈大, 土处于可塑状态的含水量范围也愈大。塑性指数的大小与土中结合水的可能含量有关, 土中结合水的含量与土的颗粒组成、土粒的矿物成分以及土中水的离子成分和浓度等因素有关。从土的颗粒来说, 土粒越细, 且细颗粒 (黏粒) 的含量越高, 则其比表面和可能的结合水含量愈高, 因而 I_p 也随之增大。从矿物成分来说, 黏土矿物可能具有的结合水量大 (其中尤以蒙脱石类为最大), 因而 I_p 也大。从土中水的离子成分和浓度来说, 当水中高价阳离子的浓度增加时, 土粒表面吸附的反离子层的厚度变薄, 结合水含量相应减少, I_p 也小; 反之随着反离子层中的低价阳离子的增加, I_p 变大。

由于塑性指数在一定程度上综合反映了影响黏性土特征的各种重要因素, 因此, 在工程上常按塑性指数对黏性土进行分类。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 规定黏性土按塑性指数 I_p 值可划分为黏土和粉质黏土。

(2) 液性指数 I_L 。

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (2-26)$$



图 2-11 锥式液限仪

从式(2-26)中可见,当土的天然含水量 w 小于 w_p 时, I_L 小于0,天然土处于坚硬状态;当 w 大于 w_L 时, I_L 大于1,天然土处于流动状态;当 w 在 w_p 与 w_L 之间时,即 I_L 在0~1之间,则天然土处于可塑状态。

因此,可以利用液性指数 I_L 来表示黏性土所处的软硬状态。 I_L 值愈大,土质愈软;反之,土质愈硬。

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定黏性土根据液性指数值划分为坚硬、硬塑、可塑、软塑及流塑五种软硬状态,其划分标准见表2-17。

表 2-17 黏性土的状态 (GB 50007—2011)

状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
液性指数	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.25 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1.0$	$I_L > 1.0$

4. 黏性土的灵敏度和触变性

天然状态下的黏性土通常都具有一定的结构性,当受到外来因素的扰动时,土粒间的胶结物质以及土粒、离子、水分子所组成的平衡体系受到破坏,土的强度降低和压缩性增大,土的结构对强度的这种影响,一般用灵敏度来衡量。土的灵敏度是以原状土的强度与同一土经重塑(指在含水量不变条件下使土的结构彻底破坏)后的强度之比来表示的。

重塑试样具有与原状试样相同的尺寸、密度和含水量,测定强度所用的常用方法有无侧限抗压强度试验和十字板抗剪强度试验,对于饱和黏性土的灵敏度 S_i ,可按下式计算

$$S_i = \frac{q_u}{q_u'} \quad (2-27)$$

式中: q_u ——原状试样的无侧限抗压强度,单位为kPa;

q_u' ——重塑试样的无侧限抗压强度,单位为kPa。

根据灵敏度可将饱和黏性土分为低灵敏($1 < S_i \leq 2$)、中灵敏($2 < S_i \leq 4$)和高灵敏($S_i > 4$)三类。土的灵敏度愈高,其结构性愈强,受扰动后土的强度降低就愈多。所以在基础施工中应注意保护基槽,尽量减少土结构的扰动。

饱和黏性土的结构受到扰动,导致强度降低,但当扰动停止后,土的强度又随时间而逐渐增长。这是由于土粒、离子和水分子体系随时间而逐渐趋于新的平衡状态的缘故。黏性土的这种抗剪强度随时间恢复的胶体化学性质称为土的触变性。例如在黏性土中打桩时,桩侧土的结构受到破坏而强度降低,但在停止打桩以后,土的强度渐渐恢复,桩的承载力逐渐增加,这也是受土的触变性影响的结果。

【工程案例 2-3】某土样不同粒组的含量见表2-18,已知试验测得天然重度 $\gamma = 16.6 \text{ kN/m}^3$,含水量 $w = 9.43\%$,土粒相对密度 $d_s = 2.7$,处于密实状态时的干重度 $\gamma_{d\max} = 16.2 \text{ kN/m}^3$,处于最松散时的干重度 $\gamma_{d\min} = 14.5 \text{ kN/m}^3$,试确定土的名称并判别该土的密实状态。

表 2-18 某土样不同粒组的含量

粒径/mm	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.1~0.25	0.075~0.1
占全重的百分比/%	3.1	6	14.4	41.5	26	9

解：查表，粒径大于 0.25 mm 颗粒含量超过全重的 50%，故该土定为中砂。

$$\text{砂土的天然孔隙比 } e = \frac{d_s \gamma_w (1+w)}{\gamma} - 1 = \frac{2.7 \times 10 \times (1+0.0943)}{16.6} - 1 = 0.78$$

$$\text{砂土的最大孔隙比 } e_{\max} = \frac{d_s \gamma_w}{r_{d\min}} - 1 = \frac{2.7 \times 10}{14.5} - 1 = 0.86$$

$$\text{砂土的最小孔隙比 } e_{\min} = \frac{d_s \gamma_w}{\gamma_{d\max}} - 1 = \frac{2.7 \times 10}{16.2} - 1 = 0.67$$

$$\text{相对密度 } D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{0.86 - 0.78}{0.86 - 0.67} = 0.42$$

因为 $0.33 < D_r < 0.67$ ，所以该砂处于中密状态。

【工程案例 2-4】A、B 两种土样，试验结果见表 2-19，试确定该土的名称及软硬状态。

表 2-19 土样试验结果

土样	天然含水量 $w / \%$	塑限 $w_p / \%$	液限 $w_L / \%$
A	40.4	25.4	47.9
B	23.2	21.0	31.2

解：A 土塑性指数 $I_p = w_L - w_p = 47.9 - 25.4 = 22.5$

$$\text{液性指数 } I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{40.4 - 25.4}{22.5} = 0.67$$

因为 $I_p > 17$ ， $0.25 < I_L \leq 0.75$ ，所以该土为黏土，可塑状态。

B 土塑性指数 $I_p = w_L - w_p = 31.2 - 21 = 10.2$

$$\text{液性指数 } I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = \frac{23.2 - 21}{10.2} = 0.22$$

因为 $10 < I_p \leq 0.75$ ， $0 < I_L \leq 0.25$ ，所以该土为粉质黏土，硬塑状态。

五、土的力学指标

(一) 土的压缩性

1. 土的压缩性

土在外荷载作用下，其孔隙间的水和空气逐渐被挤出，土的骨架颗粒之间相互挤紧，封闭气泡的体积也将缩小，从而引起土层的压缩变形，土在外力作用下体积缩小的这种特性称为土的压缩性。

土的压缩性主要有两个特点：①土的压缩主要是由于孔隙体积减小而引起的。对于饱和土，土是由颗粒和水组成的，在工程上一般的压力作用下，固体颗粒和水本身的体积压缩量都非常微小，可不予考虑，但由于土中水具有流动性，在外力作用下会沿着土中孔隙排出，从而引起土体积减小而发生压缩。②由于孔隙水的排出

而引起的压缩对于饱和黏性土来说是需要时间的，土的压缩随时间增长的过程称为土的固结。

2. 土的压缩曲线及有关指标

固结试验（亦称压缩试验）是研究土的压缩性的基本方法。固结试验就是将天然状态下的原状土或人工制备的扰动土，制备成一定规格的土样，然后置于固结仪内，在不同荷载和在完全侧限条件下测定土的压缩变形。

由固结试验可得到土的压缩变形 ΔH 与荷载 p 之间的关系，并可进一步得到相应的孔隙比 e 与荷载 p 之间的关系： $e-p$ 曲线或 $e-\lg p$ 曲线。

如图 2-12 所示，设土样的初始高度为 H_0 ，初始孔隙比为 e_0 ，在荷载 p 作用下，土样稳定后的总压缩量为 ΔH ，假设土粒体积 $V_s=1$ （不变），根据土的孔隙比的定义 $e=V_v/V_s$ ，则受压前后土粒体积不变，且土样横截面积不变，所以受压前后试样中土粒所占的高度不变，因此，根据荷载作用下土样压缩稳定后的总压缩量 ΔH ，即可得到相应的孔隙比 e 的计算公式

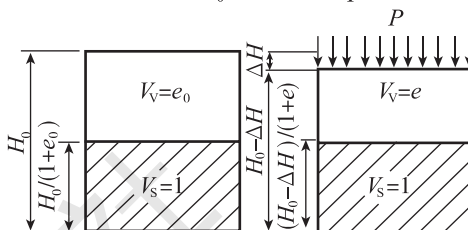


图 2-12 固结试样中土样孔隙比的变化

$$\frac{H_0}{1+e_0} = \frac{H}{1+e} = \frac{H_0 - \Delta H}{1+e} \quad (2-28)$$

于是有：

$$e = e_0 - \frac{\Delta H}{H_0} = (1+e_0) \quad (2-29)$$

式中 $e_0 = \frac{G_s(1+w_0)}{\rho_0} = \rho_w - 1$ ，其中， G_s 为土粒比重， w_0 为土样的初始含水量， ρ_0 为土样的初始密度 (g/cm^3)， ρ_w 为水的密度 (g/cm^3)。

如此，根据式 (2-29) 即可得到各级荷载 p 下对应的孔隙比 e ，从而可绘制出土的 $e-p$ 曲线等。

(1) 压缩系数 a 。

压缩系数 a 表示在单位压力增量作用下土的孔隙比的减小。因此，曲线上任一点的切线斜率就表示相应的压力作用下土的压缩性高低。当压力变化范围不大时，土的压缩性可近似为图 2-13 中割线。

从图 2-13 还可以看出，压缩系数 a 值与土所受的荷载大小有关。为了便于比较，一般采用压力间隔 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ 至 $p_2 = 200 \text{ kPa}$ 时对应的压缩系数 a_{1-2} 来评价土的压缩性。

当 $a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$ 时，为低压缩性土；

当 $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时，为中压缩性土；

当 $a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ 时，为高压缩性土。

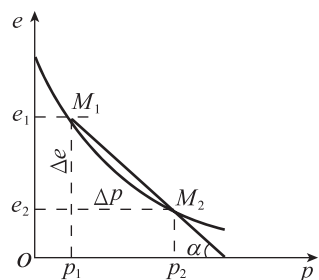


图 2-13 土的压缩曲线

(2) 压缩模量 E_s 。

由 $e-p$ 曲线, 还可以得到另一个压缩指标——压缩模量 E_s 来表示。其定义为土在完全侧限的条件下竖向应力增量 Δp 与相应的应变增量 $\Delta \varepsilon$ 的比值, 由图 2-14 可得到:

$$E_s = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta p}{\Delta H / H_1} \quad (2-30)$$

式中: E_s ——压缩模量, 单位为 MPa。

在无侧向变形, 即横截面积不变的情况下, 同样根据土粒所占高度不变的条件, 土样高度的变化 ΔH 可用相应的孔隙比的变化 $\Delta e = e_1 - e_2$ 来表示:

$$\frac{H_1}{1+e_1} = \frac{H_2}{1+e_2} = \frac{H_1 - \Delta H}{1+e_2} \quad (2-31)$$

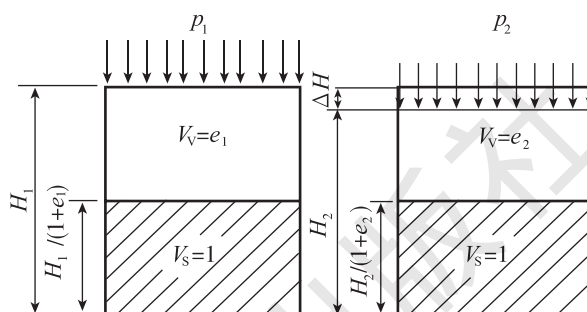


图 2-14 侧限条件下土样高度变化与孔隙比变化的关系

得到:

$$\Delta H = \frac{e_1 - e_2}{1+e_1} H_1 = \frac{\Delta e}{1+e_1} H_1 \quad (2-32)$$

将式 (2-31) 代入式 (2-30) 得:

$$E_s = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta p}{\Delta H / H_2} = \frac{\Delta p}{\Delta e / (1+e_1)} = \frac{1+e_1}{a} \quad (2-33)$$

同压缩系数 a 一样, 压缩模量 E_s 也不是常数, 而是随着压力的变化而变化。显然在压力小的时候, 压缩系数 a 大, 压缩模量 E_s 小; 在压力大的时候, 压缩系数 a 小, 压缩模量 E_s 大。在工程上, 一般采用压力间隔 100 kPa 至 200 kPa 时对应的压缩模量 E_{1-2} ; 也可根据实际竖向应力的大小, 在压缩曲线上取相应的值计算压缩模量。

(二) 土的抗剪强度

土的抗剪强度是指土体对于外荷载所产生的剪应力的极限抵抗能力。当土中某点由外力所产生的剪应力达到土的抗剪强度时, 土体就会发生一部分相对于另一部分的移动, 该点便发生了剪切破坏。

1. 库仑定律

土的抗剪强度一般由库仑定律表示如下:

$$\text{砂土:} \quad \tau_f = \sigma \tan \phi \quad (2-34)$$

$$\text{黏性土:} \quad \tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (2-35)$$

式中: τ_f ——土的抗剪强度, 单位为 kPa;

σ ——作用在剪切面上的法向应力, 单位为 kPa;

c ——土的黏聚力, 单位为 kPa;

ϕ ——土的内摩擦角, 单位为 $^\circ$ 。

以 σ 为横坐标轴, τ_f 为纵坐标轴, 抗剪强度如图 2-15 所示。直线在纵坐标轴上的截距为黏聚力 c , 与横坐标的夹角为 ϕ 。 c 、 ϕ 称为土的抗剪强度指标。

【讨论】土的抗剪强度不是一个定值, 而是剪切面上的法向总应力 σ 的线性函数; 对于无黏性土, 其抗剪强度仅仅由粒间的摩擦力 ($\sigma \cdot \tan \phi$) 构成; 对于黏性土, 其抗剪强度由摩擦力 ($\sigma \cdot \tan \phi$) 和黏聚力 (c) 两部分构成。

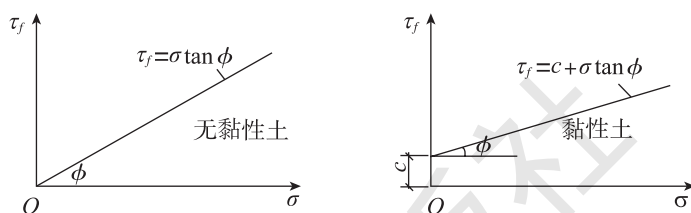


图 2-15 土的抗剪强度

2. 土的极限平衡条件

(1) 土中一点的应力状态。

在自重与外荷作用下土体 (如地基) 中任意一点的应力状态, 对于平面应力问题, 只要知道应力分量即 σ_x 、 σ_z 和 τ_{xz} , 即可确定一点的应力状态。对于土中任意一点, 所受的应力又随所取平面的方向不同而发生变化。但可以证明, 在所有的平面中必有一组平面的剪应力为零, 该平面称为主应力面。其作用于主应力面的法向应力称为主应力。那么, 对于平面应力问题, 土中一点的应力可用主应力 σ_1 和 σ_3 表示。 σ_1 称为最大主应力, σ_3 称为最小主应力。由材料力学可知当土中任一点的应力 σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} 为已知时, 主应力可以由下面的应力转换关系得出:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \tau_{xy}\right)^2} \quad (2-36)$$

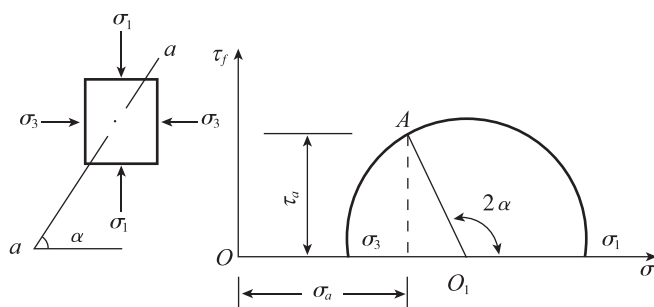


图 2-16 莫尔圆表示一点的应力状态

主应力平面与任意平面间的夹角由下式得出：

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{xy}}{\sigma_z - \sigma_x} \right) \quad (2-37)$$

α 角的转动方向与莫尔应力圆图上的一致。

(2) 土的极限平衡条件。

把莫尔应力圆与库仑抗剪强度包线绘于同一坐标系中（图 2-17），按其相对位置判别某点所处的应力状态。

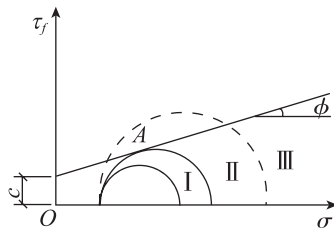


图 2-17 不同应力状态下的莫尔圆

① 应力圆 I 与强度包线相离，即 $\tau < \tau_f$ ，该点处于弹性平衡状态。

② 应力圆 II 与强度包线在 A 点相切，即 $\tau = \tau_f$ ，该点处于极限平衡状态；应力圆 II 称为极限应力圆。此时，该点处于濒临破坏的极限状态。

③ 应力圆 III 与强度包线相割，即 $\tau > \tau_f$ ，该点处于破坏状态。实际不能绘出。

莫尔-库仑破坏准则：

把莫尔应力圆与库仑强度包线相切的应力状态作为土的破坏准则，即莫尔-库仑破坏准则。

根据土体莫尔-库仑破坏准则，建立某点大、小主应力与抗剪强度指标间的关系。

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-38)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-39)$$

公式 (2-38) 和 (2-39) 可以用来判断土体中一点的应力状态。

【讨论】上两公式是等价的。

上两公式即为土的极限平衡条件式。对于无黏性土， $c=0$ ，有

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-40)$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2-41)$$

依图 2-18 可分析出：土处于极限平衡状态时，破坏面与大主应力作用面的夹角为 α_f 为：

$$\alpha_f = \frac{1}{2} (90^\circ + \phi) = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (2-42)$$

【讨论】剪破面并不产生于最大剪应力面，而与

大主应力作用面成 $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 的夹角。

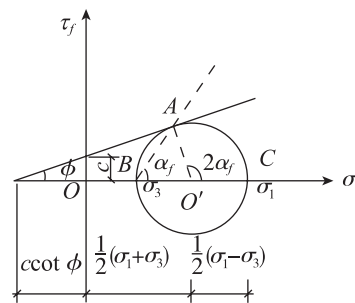


图 2-18 极限平衡时的莫尔圆

【工程案例 2-5】地基中某一单元土体上的大主应力为 430 kPa，小主应力为 200 kPa。通过试验测得土的抗剪强度指标 $c=15$ kPa， $\phi=20^\circ$ 。试问：①该单元土体处于何种状

态? ②单元土体最大剪应力出现在哪个面上? 是否会沿剪应力最大的面发生剪破?

解: ①利用极限平衡条件式判别。

比较 $\sigma_{1f} \sim \sigma_1$, 如果 $\sigma_1 > \sigma_{1f} \rightarrow$ 土体破坏, 如果 $\sigma_1 < \sigma_{1f} \rightarrow$ 土体稳定。见图 2-19。

也可比较 $\sigma_{3f} \sim \sigma_3$, 可画应力圆与抗剪强度直线参考。

②利用定义判别, 即比较与大主应力作用面成 $45^\circ + \phi/2$ 面上的 τ 与 τ_f , 比较最大剪应力作用面 (与大主应力作用面成 45° 面) 上的 τ 与 τ_f 。

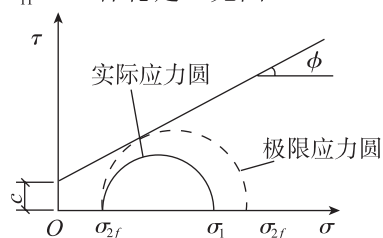


图 2-19

3. 抗剪强度试验方法

土的抗剪强度指标 c 、 ϕ 值是土的重要力学指标,

在确定地基土的地基力、挡土墙的土压力及验算土坡稳定性等问题时都要用到土的抗剪强度指标。因此, 正确地测定和选择土的抗剪强度指标是土工试验与设计计算中十分重要的问题。土的抗剪强度指标通过土工试验确定。试验方法分为室内土工试验和现场原位测试两种。室内试验常用的方法有直接剪切试验、三轴剪切试验; 现场原位测试的方法有十字剪切板试验和大型直接剪切试验。

(1) 直接剪切试验。

在直接剪切试验中, 不能量测孔隙水压力, 也不能控制排水, 所以只能以总应力法来表示土的抗剪强度。但是为了考虑固结程度和排水条件对抗剪强度的影响, 根据加荷速率的快慢将直剪试验划分为快剪、固结快剪和慢剪三种试验类型。

①快剪。竖向压力施加后立即施加水平剪力进行剪切, 使土样在 $3 \sim 5$ min 内剪坏。由于剪切速度快, 可认为土样在这样短暂时间内没有排水固结或者说模拟了“不排水”剪切情况。得到的强度指标用 c_q 、 ϕ_q 表示。

②固结快剪。竖向压力施加后, 给以充分时间使土样排水固结。固结终了后施加水平剪力, 快速地 (在 $3 \sim 5$ min 内) 把土样剪坏, 即剪切时模拟不排水条件。得到的指标用 c_{cq} 、 ϕ_{cq} 表示。

③慢剪。竖向压力施加后, 让土样充分排水固结, 固结后以慢速施加水平剪力, 使土样在受剪过程中一直有充分时间排水固结, 直到土被剪破, 得到的指标用 c_s 、 ϕ_s 表示。

由上述三种试验方法可知, 即使在同一垂直压力作用下, 由于试验时的排水条件不同, 作用在受剪面积上的有效应力也不同, 所以测得的抗剪强度指标也不同。在一般情况下, $\phi_s > \phi_{cq} > \phi_q$ 。

上述三种试验方法对黏性土是有意义的, 但效果要视土的渗透性大小而定。对于非黏性土, 由于土的渗透性很大, 即使快剪也会产生排水固结, 所以常只采用一种剪切速率进行排水剪切试验。

直剪试验的优点是仪器构造简单, 操作方便。它的主要缺点是: 不能控制排水条件; 剪切面是人为固定的, 该面不一定是土样的最薄弱的面; 剪切面上的应力分布不均匀。

因此, 为了克服直剪试验存在的问题, 后来又发展了三轴压缩试验方法, 三轴压缩仪是目前测定土抗剪强度较为完善的仪器。

(2) 三轴剪切试验。

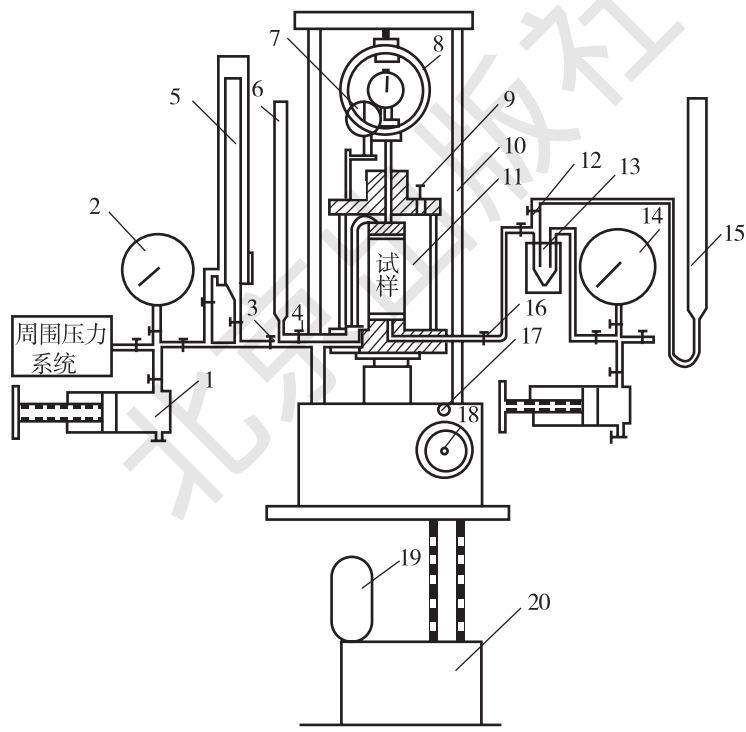
三轴剪切试验是试样在某一固定周围压力下, 逐渐增大轴向压力, 直至试样破坏的

一种抗剪强度试验,是以莫尔-库仑强度理论为依据而设计的三轴向加压的剪力试验。

三轴剪切试验是测定土体抗剪强度的一种比较完善的室内试验方法,通常采用3~4个圆柱形试样,分别在不同的周围压力下测得土的抗剪强度,再利用莫尔-库仑破坏准则确定土的抗剪强度参数。三轴剪切试验可以严格控制排水条件,可以测量土体内的孔隙水压力。另外,试样中的应力状态也比较明确,试样破坏时的破裂面是在最薄弱处,而不像直剪试验那样限定在上下盒之间,同时三轴剪切试验还可以模拟建筑物和建筑物地基的特点以及根据设计施工的不同要求确定试验方法,因此对于特殊建筑物(构筑物)、高层建筑、重型厂房、深层地基、海洋工程、道路桥梁和交通航务等工程有着特别重要的意义。

根据土样固结排水条件和剪切时的排水条件,三轴试验可分为不固结不排水剪试验(UU)、固结不排水剪试验(CU)、固结排水剪试验(CD)以及K0固结三轴试验等。

仪器设备:三轴仪依据施加轴向荷载方式的不同,可以分为应变控制式和应力控制式两种,目前室内三轴试验基本上采用的是应变控制式三轴仪。应变控制式三轴仪由以下几个部分组成,见图2-20。



1. 调压筒; 2. 周围压力表; 3. 周围压力阀; 4. 排水阀; 5. 体变管; 6. 排水管; 7. 变形量表;
8. 量力环; 9. 排气孔; 10. 轴向加压设备; 11. 压力室; 12. 量管阀; 13. 零位指示器;
14. 孔隙压力表; 15. 量管; 16. 孔隙压力阀; 17. 离合器; 18. 手轮; 19. 马达; 20. 变速箱

图 2-20 应变控制式三轴剪切仪

试验用的土样为正圆柱形,常用的高度与直径之比为2:2.5。土样用薄橡皮膜包裹,以免压力室的水进入。试样上、下两端可根据试样要求放置透水石或不透水板。试验中试样的排水情况由排水阀B控制。试样底部与孔隙水压力量测系统相接,必要

时借以测定试验过程中试样的孔隙水压力变化。

试验时,先打开阀门,向压力室压入液体,使土样在三个轴向受到相同的周围压力 σ_3 ,此时土样中不受剪力。然后再由轴向系统通过活塞对土样施加竖向压力 q ,此时试样中将产生剪应力。在周围压力 σ_3 不变情况下,不断增大 q ,直到土样剪坏。其破坏面发生在与大主应力作用成 $\alpha_f = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 的夹角处。这时作用于土样的轴向应力 $\sigma_1 = \sigma_3 + q$, σ_1 为最大主应力,周围压力 σ_3 为最小主应力。用 σ_1 和 σ_3 可绘得土样破坏时的一个极限应力圆。若取同一种土的3~4个试样,在不同周围压力 σ_3 下进行剪切得到相应的 σ_1 ,便可绘出几个极限应力圆。这些极限应力圆的公切线,即为抗剪强度包线。它一般呈直线形状,从而可求得指标 c 、 ϕ 值。

若在试验过程中,通过孔隙水测读系统分别测得每一个土样剪切破坏时的孔隙水压力的值,就可以得出土样剪切破坏时有效应力 $\sigma_1' = \sigma_1 - u$, $\sigma_3' = \sigma_3 - u$,绘制出相应的有效极限应力圆,根据有效极限应力圆,即可求有效强度指标 c' 、 ϕ' 。

根据土样在周围压力及侧应力条件下是否排水固结的要求,三轴剪切试验指标对应有以下三种:

①不固结不排水剪(UU)试验,指标用 c_u 、 ϕ_u 表示。

②固结不排水剪(CU)试验,指标用 c_{cu} 、 ϕ_{cu} 表示。

③固结排水剪(CD)试验,指标用 c_d 、 ϕ_d 表示。因三轴剪切仪有上述诸多优点,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)推荐采用本方法,特别是对于一级建筑物地基土应予采用。

三轴试验和直剪试验的三种试验方法在工程实践中如何选用是个比较复杂的问题,应根据工程情况、加荷速度快慢、土层厚薄、排水情况、荷载大小等综合确定。一般来说,对不易透水的饱和黏性土,当土层较厚,排水条件较差,施工速度较快时,为使施工期土体稳定可采用不固结不排水剪。反之,对土层较薄,透水性较大,排水条件好,施工速度不快的短期稳定问题可采用固结不排水剪。击实填土地基或路基以及挡土墙及船闸等结构物的地基,一般认为采用固结不排水剪。此外,如确定施工速度相当慢,土层透水性及排水条件都很好,可考虑用排水剪。当然,这些只是一般性的原则,实际情况往往要复杂得多,能严格满足试验条件的很少,因此还要针对具体问题做具体分析。

(3) 无侧限抗压强度试验。

无侧限抗压强度试验方法适用于饱和黏性土试验所采用。无侧限抗压强度试验所用试样为原状土样,试验时按《土工试验方法标准》中有关规定制备。

(4) 十字板剪切试验。

十字板剪切仪如图2-21所示。

试验时,先钻孔至需要试验的土层深度以上750mm处,然后将装有十字板的钻杆放入钻孔底部,并插入土中750mm,施加扭矩使钻杆旋转直至土体剪切破坏。土体剪切面为十字板旋转所形成的圆柱面。土的抗剪强度可按下式计算:

$$\tau_f = K_c (P_c - f_c) \quad (2-43)$$

式中: P_c ——土发生剪切破坏时的总作用力, 由弹簧秤读数读得, 单位为 N;

f_c ——轴杆及设备的机械阻力, 在空载时弹簧秤事先测得, 单位为 N;

K_c ——十字板常数。

$$K_c = \frac{2R}{\pi D^2 h \left(1 + \frac{D}{3h}\right)} \quad (2-44)$$

式中: h 、 D ——分别为十字板的高度和直径, 单位为 mm;

R ——转盘的半径, 单位为 mm。

十字板剪切试验适用于软塑状态的黏性土。它的优点是不需钻取原状土样, 对土的扰动较小。

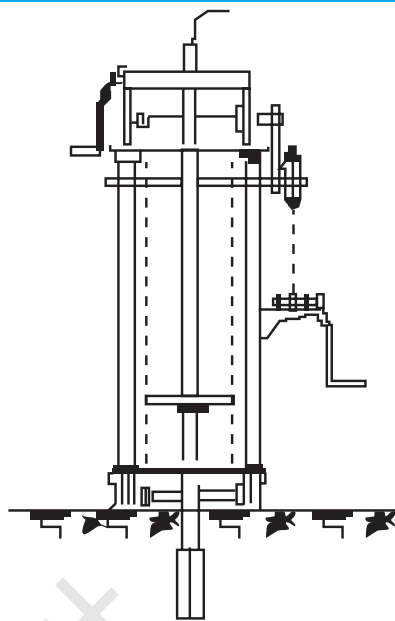


图 2-21 十字板剪切仪

(三) 地基承载力

目前确定的地基承载力的方法可由载荷试验或其他原位测试、公式计算, 并结合工程实践经验等方法综合确定。

1. 现场载荷试验

载荷试验项目包括浅层平板载荷试验和深层平板载荷试验, 它是在一定面积的承压板上向地基土逐级施加荷载, 观测地基土的承受压力和变形的原位试验。其成果一般用于评价地基土的承载力, 也可用于计算地基土的变形模量, 以及现场测定湿陷性黄土地基的湿陷起始压力。

在拟建建筑物场地上将一定尺寸和几何形状 (圆形或方形) 的刚性板, 安放在被测的地基持力层上, 逐级增加荷载, 并测得每一级荷载下的稳定沉降, 直至达到地基破坏标准, 由此可得到荷载 (p)—沉降 (s) 曲线 (即 p - s 曲线)。典型的平板载荷试验 p - s 曲线可划分为三个阶段:

(1) 直线变形阶段: p - s 曲线为直线段 (线性关系), 对应于此段的最大压力 p_0 , 称为比例界限压力 (也称为临塑压力), 土体以压缩变形为主。

(2) 剪切变形阶段: 当压力超过 p_0 , 但小于极限压力 p_u 时, 压缩变形所占比例逐渐减少, 而剪切变形逐渐增加, p - s 线由直线变为曲线, 曲线斜率逐渐增大。

(3) 破坏阶段: 当荷载大于极限压力 p_u 时, 即使维持荷载不变, 沉降也会急剧增大, 始终达不到稳定标准。

直线变形阶段: 受荷土体中任意点产生的剪应力小于土体的抗剪强度, 土的变形主

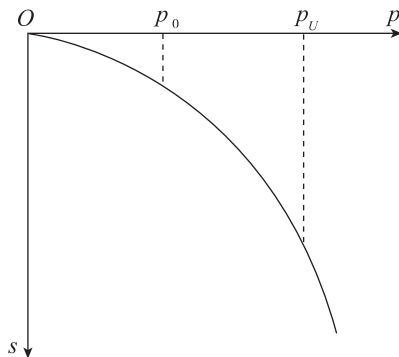


图 2-22 载荷试验 p - s 曲线

要由土中空隙的压缩引起，并随时间趋于稳定。可以用弹性理论进行分析。

剪切变形阶段：土体除了竖向压缩变形之外，在承压板的边缘已有小范围内土体承受的剪应力达到或超过了土的抗剪强度，并开始向周围土体发展。此阶段土体的变形主要由压缩变形和土粒剪切变形共同引起。可以用弹塑性理论进行分析。破坏阶段：即使荷载不再增加，承压板仍会不断下沉，土体内部开始形成连续的滑动面，承压板周围土体面上各点的剪应力均达到或超过土体的抗剪强度。地基土浅层平板载荷试验可适用于确定浅部地基土层的承压板下应力主要影响范围内的承载力和变形参数，承压板面积不应小于 0.25 m^2 ，对于软土和粒径较大的填土不应小于 0.5 m^2 。

试验基坑宽度不应小于承压板宽度或直径的 3 倍。应注意保持试验土层的原结构和天然湿度。宜在拟压表面用不超过 20 mm 厚的粗中砂找平。

加荷分级不应小于 8 级，最大加荷量不应少于设计要求的 2 倍。每级加载后，按间隔 10 min 、 10 min 、 10 min 、 15 min 、 15 min 测读一次沉降量，以后间隔半小时测读一次沉降量，在连续 2 h 内，每小时沉降量小于 0.1 mm 时，则认为已经趋于稳定，可加下一级荷载。最终得到载荷试验 $p-s$ 曲线。

当出现下列情况之一时，即可终止加载：

- ① 载荷板周围的土明显地侧向挤出。
- ② 沉降 s 急剧增大， $p-s$ 曲线出现陡降段。
- ③ 某级荷载下 24 h 内沉降速度不能达到稳定标准。
- ④ $s/d \geq 0.06$ (d 承压板宽度或直径)。

满足前三种情况之一时，其对应的前一级荷载定为极限荷载。

2. 承载力特征值的确定

- ① 当 $p-s$ 曲线上有明显比例界限时，取该比例界限所对应的荷载值。
- ② 当极限荷载小于对应比例界限的 2 倍时，取极限荷载值的一半。
- ③ 当不能按上述两点确定时，如承压板面积为 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}^2$ ，可取 $s/d=0.01 \sim 0.015$ 所对应的荷载，但其值不应大于最大加荷量的一半。

同一土层参加统计的试验点不应少于 3 点，各试验实测值的极差不得超过其平均值的 30%，取此平均值作为该土层的地基承载力特征值。

3. 按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 确定地基承载力特征值

规范规定，当基础宽度大于 3 m 或埋置深度大于 0.5 m 时，从载荷试验或其他原位测试、经验值等方法确定的地基承载力特征值，尚应按下列修正：

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \quad (2-45)$$

式中： f_a ——修正后的地基承载力，单位为 kPa ；

f_{ak} ——地基承载力特征值，单位为 kPa ；

η_b 、 η_d ——基础宽度和埋深的地基承载力修正系数，按基底类别查表 2-20；

γ ——基础底面以上土的重度，地下水位以下取浮重度，单位为 kN/m^3 ；

γ_m ——基础底面以上土的加权平均重度，地下水位以下取浮重度，单位为 kN/m^3 ；

b ——基础底面宽度,当基宽小于 3 m 按 3 m 取值,大于 6 m 按 6 m 取值 m;
 d ——基础埋深宽度 (m),一般自室外底面标高算起。在填方整平地区,可自填土底面标高算起,但填土在上部结构施工后完成时,基础埋置深度自室外地面标高算起;对于地下室,如采用箱基或筏基时,基础埋置深度自室外地面标高算起;当采用独立基础或条基时,应从室内地面标高算起。

表 2-20 承载力修正系数

土的类型	η_b	η_d
淤泥和淤泥质土	0	1.0
人工填土、 e 大于等于 0.85 的黏土	0	1.0
红黏土含水比 $\alpha_w > 0.8$	0	1.2
红黏土含水比 $\alpha_w \leq 0.8$	0.15	1.4
大面积压实填土压实系数 > 0.95 、黏粒含量 $\rho_c \geq 10\%$ 的粉土	0	1.5
大面积压实填土最大密度大于 2.1 t/m^3 级配砂石	0	2.0
粉土黏粒含量 $\rho_c \geq 10\%$	0.3	1.5
粉土黏粒含量 $\rho_c < 10\%$	0.5	2.0
e 及 I_L 均小于 0.85 的黏粒土	0.3	1.6
粉粒、细砂 (不包括很湿与饱和时的稍密状态)	2.0	3.0
中砂、粗砂、砂砾和碎石土	3.0	4.4

注:地基承载力特征值按深层平板载荷试验确定 η_d 取 0; $\alpha_w = w/w_L$ 。

4. 按地基强度理论确定地基承载力特征值

当偏心距 e 不大于 0.033 倍基础底面宽度时,根据土的抗剪强度指标确定地基承载力特征值可按下式计算,并应满足变形要求:

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (2-46)$$

式中: f_a ——由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值,单位为 kPa;

M_b 、 M_d 、 M_c ——承载力系数,按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)表 5.2.5 承载力系数确定;

c_k ——基底下一倍短边深度内土的黏聚力标准值,单位为 kPa。

【工程案例 2-6】某土层资料如图 2-23 所示,建筑物基础为独立基础。已知地基承载力特征值 $f_{ak} = 150 \text{ kPa}$,试求修正后的地基承载力特征值。

解:(1) 基础底面以上土的加权平均重度为

$$\gamma_m = \frac{\sum \gamma_i h_i}{h_i} = \frac{17.6 \times 0.8 + 16.66 \times 0.6 + 18.62 \times 0.4}{0.8 + 0.6 + 0.4} = 17.51 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

由持力层土为粉砂层,查表得, $\eta_d = 3.0$, $\eta_b = 2.0$ 。

修正后的持力层土的承载力特征值为:

$$\begin{aligned} f_a &= f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \\ &= 150 + 2 \times 18.62 \times (3.2 - 3) + 3.0 \times 17.51 \times (1.8 - 0.5) \\ &= 225.7 \text{ (kPa)} \end{aligned}$$

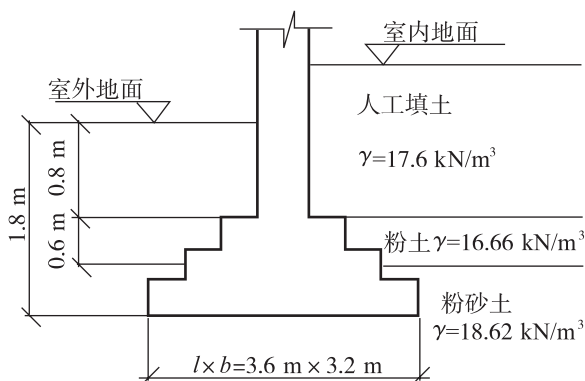


图 2-23 工程案例

【工程案例 2-7】 已知某基底面面宽 $b=3\text{ m}$ ，埋深 $d=1.5\text{ m}$ ，荷载合理的偏心距 $e=0.05\text{ m}$ ，地基为粉质黏土，内聚力 $c_k=10\text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\phi_k=30^\circ$ ，地下水位距地表为 1.0 m ，地下水位以上的重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ ，地下水位以下土的重度 $\gamma_{\text{sat}}=19.5\text{ kN/m}^3$ ，试确定该地基土的承载力值。

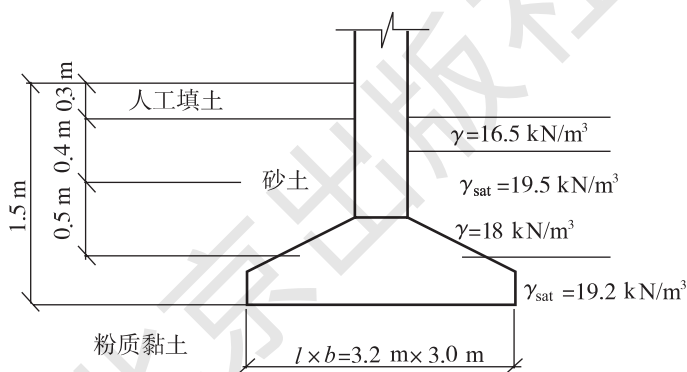


图 2-24 工程案例 2-7

解：因为 $e=0.05\text{ m} < 0.033 b=0.099\text{ m}$ ，所以按抗剪强度理论确定地基承载力。由 $\phi_k=30^\circ$ ，查《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) 表 5.2.5 得： $M_b=1.90$ ， $M_d=5.59$ ， $M_c=7.95$ 。

因为地基土位于地下水位以下，则

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19.5 - 10 = 9.5 (\text{kN/m}^3)$$

$$\gamma_m = \frac{1.0 \times 18 + 0.5 \times (19.5 - 10)}{1.5} = 15.17 (\text{kN/m}^3)$$

$$\begin{aligned} f_a &= M_b \gamma' b + M_d \gamma_m d + M_c c_k = 1.9 \times 9.5 \times 3 + 5.59 \times 15.17 \times 1.5 + 7.95 \times 10 \\ &= 260.85 (\text{kPa}) \end{aligned}$$

学习任务 3 | 测定地基土的性质指标

■ 任务目标

1. 掌握土的密度（环刀法）、含水率及抗剪强度试验，熟悉颗粒分析试验，了解击实试验。
2. 提高动手操作能力，培养理论数据来源于试验的科学素养。

任务实施

操作训练一 颗粒分析试验（筛析法）

（一）试验目的

测定干土各粒组占该土总质量的百分数，以便了解土粒的组成情况，供砂类土的分类、判断土的工程性质及建材选料之用。

（二）试验原理

土的颗粒组成在一定程度上反映了土的性质，工程上常依据颗粒组成对土进行分类，粗粒土主要是依据颗粒组成进行分类的，细粒土由于矿物成分、颗粒形状及胶体含量等因素，则不能单以颗粒组成进行分类，而要借助于塑性图或塑性指数进行分类。颗粒分析试验可分为筛析法和密度计法，对于粒径大于 0.075 mm 的土粒可用筛析法测定，而对于粒径小于 0.075 mm 的土粒则用密度计法来测定。筛析法是将土样通过各种不同孔径的筛子，并按筛子孔径的大小将颗粒加以分组，然后再称量并计算出各个粒组占总量的百分数。



测定地基土的性质
指标案例

人生启迪

“大自然是人类赖以生存发展的基本条件。尊重自然、顺应自然、保护自然，是全面建设社会主义现代化国家的内在要求。必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，站在人与自然和谐共生的高度谋划发展”。在进行房屋建设选址时，我们既要科学进行地质勘察，更要注重选址，既要建设好建筑物，更要注重人与自然和谐共生，做到相统一，“精益求精、一丝不苟”，建设我们的家园。

（三）仪器设备

- (1) 标准筛：孔径 10 mm、5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.075 mm。

- (2) 天平：称量 1 000 g，分度值 0.1 g。
- (3) 台秤：称量 5 kg，分度值 1 g。
- (4) 其他：毛刷、木碾等。

(四) 操作步骤

- (1) 备土：从大于粒径 0.075 mm 的风干松散的非黏性土中，用四分对角法取出代表性的试样。
- (2) 取土：取干砂 300 ~ 500 g 称量准确至 0.2 g。
- (3) 摇筛：将称好的试样倒入依次叠好的筛，然后按照顺时针或逆时针进行筛析。振摇时间一般为 10 ~ 15 min。
- (4) 称量：逐级称取留在各筛上的质量。

(五) 试验注意事项

- (1) 将土样倒入依次叠好的筛子中进行筛析。
- (2) 筛析法采用振筛机，在筛析过程中应能上下振动，水平转动。
- (3) 称重后干砂总重精确至 ± 2 g。
- (4) 试验误差小于 1%。

(六) 计算及制图

- (1) 按下列公式计算小于某颗粒直径的土质量百分数：

$$X = \frac{m_A}{m_B} \times 100\%$$

式中：X——小于某颗粒直径的土质量百分数，单位为 %；

m_A ——小于某颗粒直径的土质量，单位为 g；

m_B ——所取试样的总质量，单位为 500 g。

- (2) 用小于某粒径的土质量百分数为纵坐标，颗粒直径 (mm) 的对数值为横坐标，绘制颗粒大小分配曲线。

(七) 试验记录

表 2-21 颗粒分析试验记录表 (筛析法)

土样编号 _____ 干土质量 500 g 试验者 _____
 土样说明 粗砂 试验日期 _____ 校核者 _____

孔径 / mm	留筛土质量 / g	累积留筛土质量 / g	小于该孔径的土质量 / g	小于该孔径的土质量百分数 / %
20	0.0	0.0	500.0	100.0
10	17.0	17.0	483.0	96.6
5	45.0	62.0	438.0	87.6
2	65.5	127.5	372.5	74.5
1	85.0	212.5	287.5	57.5

续表

孔径 / mm	留筛土质量 / g	累积留筛土质量 / g	小于该孔径的土质量 / g	小于该孔径的土质量百分数 / %
0.5	110.5	313.0	187.0	37.4
0.25	122.0	435.0	65.0	13.0
0.075	60.0	495.0	5.0	1.0
底盘总计	5.0	500.0	—	—

操作训练二 密度试验 (环刀法)

(一) 试验目的

测定土的湿密度, 以了解土的疏密和干湿状态, 供换算土的其他物理性质指标和工程设计以及控制施工质量之用。

(二) 试验原理

土的湿密度 ρ 是指土的单位体积质量, 是土的基本物理性质指标之一, 其单位为 g/cm^3 。环刀法是采用一定体积环刀切取土样并称土质量的方法, 环刀内土的质量与体积之比即为土的密度。密度试验方法有环刀法、蜡封法、灌水法和灌砂法等。对于细粒土, 宜采用环刀法; 对于易碎裂、难以切削的土, 可用蜡封法; 对于现场粗粒土, 可用灌水法或灌砂法。

(三) 仪器设备

- (1) 环刀: 内径 6 ~ 8 cm, 高 2 ~ 3 cm。
- (2) 天平: 称量 500 g, 分度值 0.01 g。
- (3) 其他: 切土刀、钢丝锯、凡士林等。

(四) 操作步骤

- (1) 量测环刀: 取出环刀, 称出环刀的质量, 并涂一薄层凡士林。
- (2) 切取土样: 将环刀的刀口向下放在土样上, 然后用切土刀将土样削成略大于环刀直径的土柱, 将环刀垂直下压, 边压边削使土样上端伸出环刀为止, 然后将环刀两端的余土削平。
- (3) 土样称量: 擦净环刀外壁, 称出环刀和土的质量。

(五) 试验注意事项

- (1) 称取环刀前, 把土样削平并擦净环刀外壁。
- (2) 如果使用电子天平称重则必须预热, 称重时精确至小数点后两位。

(六) 计算公式

按下列公式计算土的湿密度:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_1 - m_2}{V}$$

式中： ρ ——密度，计算至 0.01 g/cm^3 ；

m ——湿土质量，单位为 g ；

m_1 ——环刀加湿土质量，单位为 g ；

m_2 ——环刀质量，单位为 g ；

V ——环刀体积，单位为 cm^3 。

密度试验需进行二次平行测定，其平行差值不得大于 0.03 g/cm^3 ，取其算术平均值。

(七) 试验记录

表 2-22 密度试验记录表（环刀法）

试验者_____

校核者_____

试验日期_____

土样编号	环刀号	环刀加湿土质量 m_1 / g	环刀质量 m_2 / g	湿土质量 m / g	环刀体积 V / gcm^3	密度 $/(\text{g/cm}^3)$	
						单值	平均值

操作训练三 含水率试验（烘干法）

(一) 试验目的

测定土的含水率，以了解土的含水情况，是计算土的孔隙比、液性指数、饱和度和其他物理力学性质不可缺少的一个基本指标。

(二) 试验原理

含水率反映土的状态，含水率的变化将使土的一系列物理力学性质指标随之而异。这种影响表现在各个方面，如反映在土的稠度方面，使土成为坚硬的、可塑的或流动的；反映在土内水分的饱和程度方面，使土成为稍湿、很湿或饱和的；反映在土的力学性质方面，能使土的结构强度增加或减小、紧密或疏松，构成压缩性及稳定性的变化。测定含水率的方法有烘干法、酒精燃烧法、炒干法、微波法等。

(三) 仪器设备

- (1) 烘箱：采用温度能保持在 $105 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱。
- (2) 天平：称量 500 g ，分度值 0.01 g 。
- (3) 其他：干燥器、称量盒等。

(四) 操作步骤

(1) 湿土称量：选取具有代表性的试样 $15 \sim 20 \text{ g}$ ，放入盒内，立即盖好盒盖，称出盒与湿土的总质量。

(2) 烘干冷却：打开盒盖，放入烘箱内，在温度 $105 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重后，将试样取出，盖好盒盖放入干燥器内冷却，称出盒与干土质量。烘干时间随土质不同而定，对黏质土不少于 8 h ；砂类土不少于 6 h 。



土的含水量试验

(五) 试验注意事项

- (1) 刚刚烘干的土样要等冷却后才称重。
- (2) 称重时精确至小数点后两位。

(六) 计算公式

按下式计算土的含水率:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\%$$

式中: w ——含水率, 计算至 0.1%;

m_0 ——盒质量, 单位为 g;

m_1 ——盒加湿土质量, 单位为 g;

m_2 ——盒加干土质量, 单位为 g;

$m_1 - m_2$ ——土中水质量, 单位为 g;

$m_2 - m_0$ ——干土质量, 单位为 g。

含水率试验需进行二次平行试验, 其平行差值: 含水率 < 10% 不得大于 0.5%, 含水率 10% ~ 40% 不得大于 1.0%, 含水率 > 40% 不得大于 2.0%, 取其算术平均值。

(七) 试验记录

表 2-23 含水率试验记录表 (烘干法)

试验者_____

校核者_____

试验日期_____

土样编号	盒号	盒质量 m_0 / g	盒加湿土质量 m_1 / g	盒加干土质量 m_2 / g	水质量 $m_1 - m_2 / g$	干土质量 $m_2 - m_0 / g$	含水率 / %	
							单值	平均值

操作训练四 界限含水率试验 (液限、塑限联合测定法)

(一) 试验目的

测定黏性土的液限 w_L 和塑限 w_p , 并由此计算塑性指数 I_p 、液性指数 I_L , 进行黏性土的定名及判别黏性土的软硬程度。

(二) 试验原理

液限、塑限联合测定法是根据圆锥仪的圆锥入土深度与其相应的含水率在双对数坐标上具有线性关系的特性来进行的。利用圆锥质量为 76 g 的液塑限联合测定仪测得土在不同含水率时的圆锥入土深度, 并绘制其关系直线图, 在图上查得圆锥下沉深度为 17 mm 所对应的含水率即为液限 (注: 土的定名采用圆锥下沉深度为 10 mm 液限), 查得圆锥下沉深度为 2 mm 所对应的含水率即为塑限。

(三) 试验设备

(1) 液塑限联合测定仪(图 2-25): 有电磁吸锥、测读装置、升降台等, 圆锥质量 76 g, 锥角 30°, 试样杯等。

(2) 天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g。

(3) 其他: 刮土刀、不锈钢杯、凡士林、称量盒、烘箱、干燥器等。

(四) 操作步骤

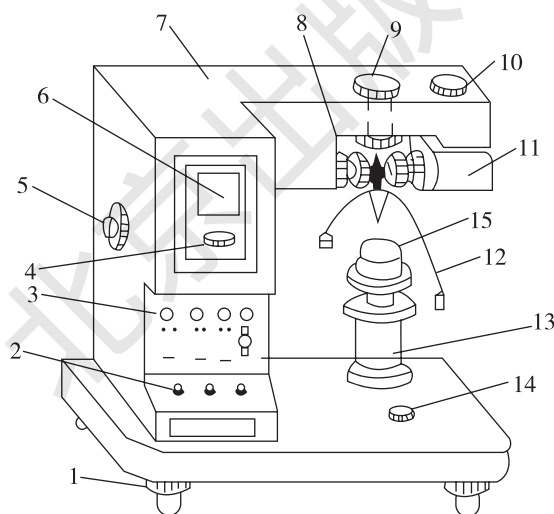
(1) 土样制备: 当采用风干土样时, 取通过 0.5 mm 筛的代表性土样约 200 g, 分成三份, 分别放入不锈钢杯中, 加入不同数量的水, 然后按下沉深度为 4 ~ 5 mm、9 ~ 11 mm、15 ~ 17 mm 范围制备不同稠度的试样。

(2) 装土入杯: 将制备的试样调拌均匀, 填入试样杯中, 填满后用刮土刀刮平表面, 然后将试样杯放在联合测定仪的升降座上。

(3) 接通电源: 在圆锥仪锥尖上涂抹一薄层凡士林, 接通电源, 使电磁铁吸住圆锥。

(4) 测读深度: 调整升降台, 使锥尖刚好与试样面接触, 切断电源使电磁铁失磁, 圆锥仪在自重下沉入试样, 经 5 s 后测读圆锥下沉深度。

(5) 测含水率: 取出试样杯, 测定试样的含水率。重复以上步骤, 测定另两个试样的圆锥下沉深度和含水率。



1. 水平调节螺丝; 2. 控制开关; 3. 指示灯; 4. 零线调节螺钉;
5. 反光镜调节螺钉; 6. 屏幕; 7. 机壳; 8. 物镜调节螺钉; 9. 电池装置;
10. 光源调节螺钉; 11. 光源装置; 12. 圆锥仪; 13. 升降台; 14. 水平泡; 15. 盛土杯

图 2-25 光电式液塑限仪结构示意图

(五) 试验注意事项

(1) 土样分层装杯时, 注意土中不能留有空隙。

(2) 每种含水率设三个测点, 取平均值作为这种含水率所对应土的圆锥入土深度, 如三点下沉深度相差太大, 则必须重新调试土样。

(六) 计算公式

(1) 计算各试样的含水率:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\%$$

式中符号意义与含水率试验相同。

(2) 以含水率为横坐标, 圆锥下沉深度为纵坐标, 在双对数坐标纸上绘制关系曲线, 三点连一直线。当三点不在一直线上, 可通过高含水率的一点与另两点连成两条直线, 在圆锥下沉深度为 2 mm 处查得相应的含水率。当两个含水率的差值 $\geq 2\%$ 时, 应重做试验。当两个含水率的差值 $< 2\%$ 时, 用这两个含水率的平均值与高含水率的点连成一条直线 (如图 2-26 中的 B 线)。

(3) 在圆锥下沉深度与含水率的关系图上, 查得下沉深度为 17 mm 所对应的含水率为液限; 查得下沉深度为 2 mm 所对应的含水率为塑限。

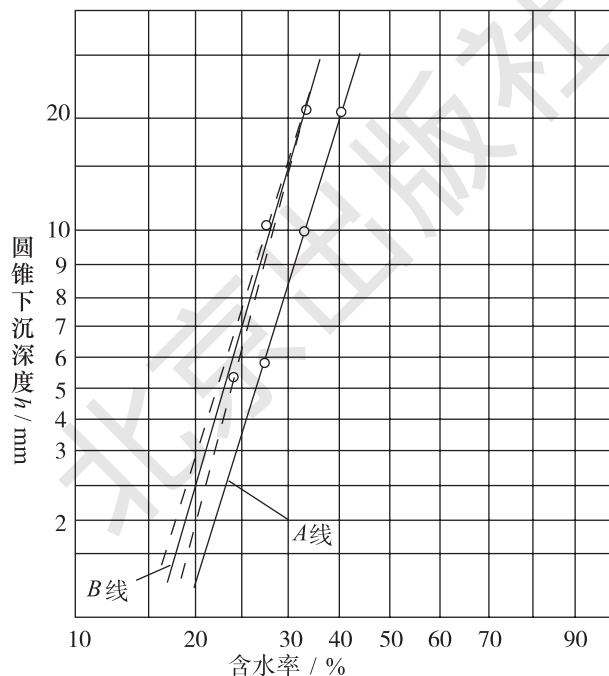


图 2-26 圆锥下沉深度与含水率关系图

(七) 试验记录

表 2-24 液限、塑限联合试验记录表

工程名称 _____
 试样编号 _____
 试验日期 _____

试验者 _____
 计算者 _____
 校核者 _____

试样 编号	圆锥 下沉 深度/ mm	盒号	盒质量 m_0 / g	盒加 湿土 质量 m_1 / g	盒加 干土 质量 m_2 / g	水质量 m_w / g	干土 质量 m_s / g	含水率 w / %	液限 w_L / %	塑限 w_P / %
1										
2										
3										

操作训练五 击实试验

(一) 试验目的

在击实方法下测定土的最大干密度和最优含水率，是控制路堤、土坝和填土地基等密实度的重要指标。

(二) 试验原理

土的压实程度与含水率、压实功能和压实方法有密切的关系。当压实功能和压实方法不变时，土的干密度随含水率增加而增加，当干密度达到某一最大值后，含水率继续增加反而使干密度减小，能使土达到最大密度的含水率，称为最优含水率 w_{op} ，与其相应的干密度称为最大干密度 ρ_{dmax} 。

(三) 仪器设备

- (1) 击实仪(图 2-27): 锤质量 2.5 kg, 筒高 116 mm, 体积 947.4 cm³。
- (2) 天平: 称量 200 g, 分度值 0.01 g。
- (3) 台秤: 称量 10 kg, 分度值 5 g。
- (4) 筛: 孔径 5 mm。
- (5) 其他: 喷水设备、碾土器、盛土器、推土器、刮土刀等。

(四) 操作步骤

(1) 制备土样: 取代表性风干土样, 放在橡皮板上用木碾碾散, 过 5 mm 筛, 土样量不少于 20 kg。

(2) 加水拌和: 预定 5 个不同含水量, 依次相差 2%, 其中有两个大于和两个小于最优含水量。

所需加水量按下式计算:

$$m_w = \frac{m_{w0}}{1 + w_0} (w - w_0)$$

式中: m_w ——所需加水质量, 单位为 g;

m_{w0} ——风干含水率时土样的质量, 单位为 g;

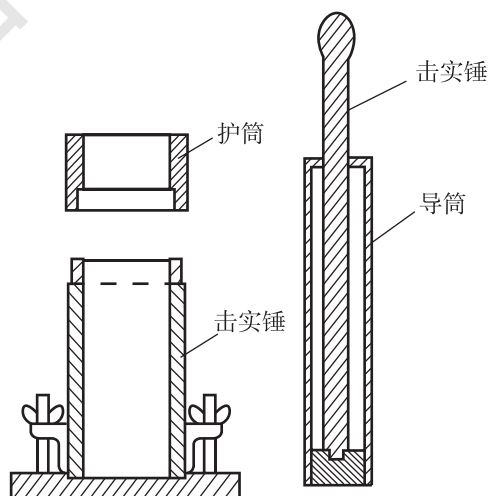


图 2-27 击实仪示意图

w_o ——土样的风干含水率, 单位为 %;

w ——预定达到的含水率, 单位为 %。

按预定含水率制备试样, 每个试样取 2.5 kg, 平铺于不吸水的平板上, 用喷水设备向土样均匀喷洒预定的加水量, 并均匀拌和。

(3) 分层击实: 取制备好的试样 600 ~ 800 g, 倒入筒内, 整平表面, 击实 25 次, 每层击实后土样约为击实筒容积的 1/3。击实时, 击锤应自由落下, 锤迹须均匀分布于土面。重复上述步骤, 进行第二、三层的击实。击实后试样略高出击实筒 (不得大于 6 mm)。

(4) 称土质量: 取下套环, 齐筒顶细心削平试样, 擦净筒外壁, 称土质量, 准确至 0.1 g。

(5) 测含水率: 用推土器推出筒内试样, 从试样中心处取 2 个各 15 ~ 30 g 土测定含水率, 平行差值不得超过 1%。按 (2) ~ (4) 步骤进行其他不同含水率试样的击实试验。

(五) 试验注意事项

(1) 试验前, 击实筒内壁要涂一层凡士林。

(2) 击实一层后, 用刮土刀把土样表面刨毛, 使层与层之间压密, 同理, 其他两层也是如此。

(3) 如果使用电动击实仪, 则必须注意安全。打开仪器电源后, 手不能接触击实锤。

(六) 计算及绘图

(1) 按下式计算干密度:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w}$$

式中: ρ_d ——干密度, 单位为 g/cm^3 ;

ρ ——湿密度, 单位为 g/cm^3 ;

w ——含水率, 单位为 %。

以干密度 ρ_d 为纵坐标, 含水率 w 为横坐标, 绘制干密度与含水率关系曲线 (图 2-28)。曲线上峰值点所对应的纵横坐标分别为土的最大干密度和最优含水率。如曲线不能绘出准确峰值点, 应进行补点。

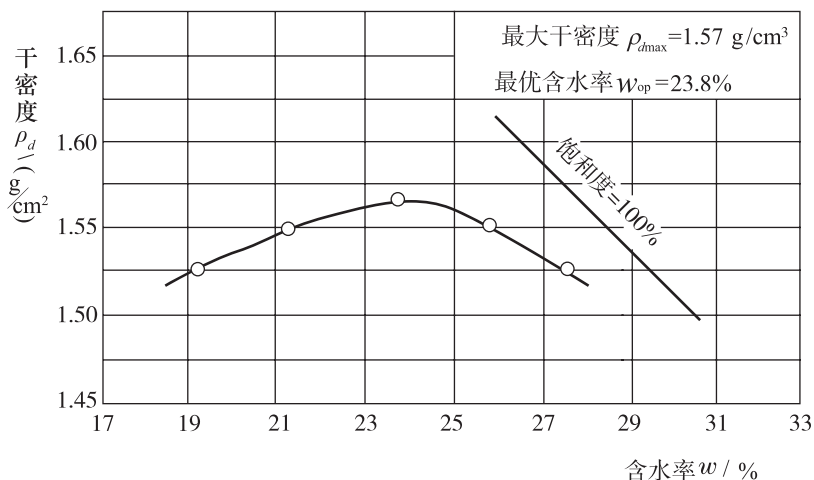


图 2-28 ρ_d-w 关系曲线

(七) 试验记录

表 2-25 击实试验记录

土样编号 _____ 土粒比重 _____ 试验者 _____
 土样类别 _____ 每层击数 _____ 校核者 _____
 风干含水率 _____ 试验仪器 _____ 试验日期 _____

试验 序号	干密度					含水率							
	筒加 土质 量 / g	筒 质 量 / g	湿土 质量 / g	密度 / (g/cm ³)	干密度 / (g/cm ³)	盒 号	盒加 湿土 质量 / g	盒加 干土 质量 / g	盒质量 / g	水 的 质 量 / g	干土 质量 / g	含 水 率 / %	平 均 含 水 率 / %
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			(1) — (2)	$\frac{(3)}{V}$	$\frac{(4)}{1+0.1w}$					(6) — (7)	(7) — (8)	$\frac{(9)}{(10)}$ $\times 100$	
1													
2													
3													
4													

操作训练六 直接剪切试验

(一) 试验目的

(1) 采用 4 个试样，分别在不同的垂直压力 p 下，施加水平剪切力，测得试样破坏时的剪应力 τ 。

(2) 根据库仑定律确定土的抗剪强度参数内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c 。

(二) 仪器设备

(1) 应变控制式直剪仪 (图 2-29)：由剪切容器、垂直加压设备、推动座、量力环等组成。

(2) 天平：称量 500 g，感量 0.01 g。

(3) 其他：环刀、手表、钢直尺、圆木块、盛土盘等。

(三) 操作步骤

(1) 按要求的干密度，称出一个环刀体积所需的风干试样 (质量约为 100 g)。本试验使用原装土试样。

(2) 取出剪切容器的加压盖及上部透水石，将上下盒对准，插入固定销。

(3) 将试样徐徐倒入剪切容器内，在试样面上依次放好透水石、加压盖、钢珠和加力框架。

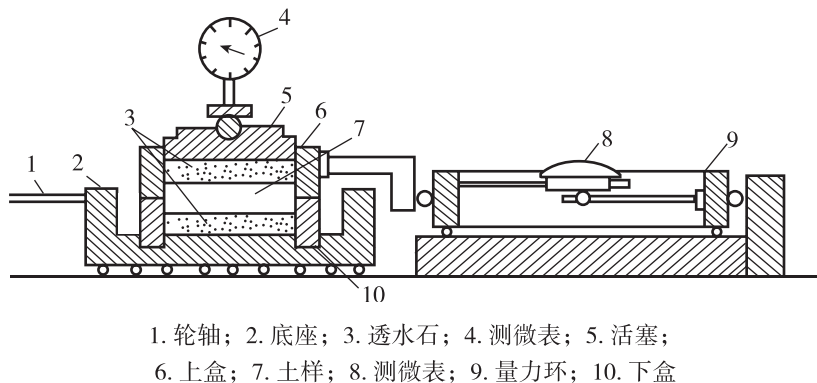


图 2-29 应变控制式直剪仪

(4) 徐徐转动手轮至量力环上的百分表长针微微转动为止, 记下百分表的初读数 R_0 , 或将百分表的长针调至零, 即 $R_0=0$ 。

(5) 在试样面上施加第一级垂直压力 $p=100 \text{ kPa}$ 。

(6) 拔去固定销, 以每分钟 6 转的均匀速率转动手轮, 直至剪损。当百分表读数不变或后退时, 应继续剪切至位移为 4 mm 时停止, 记下破坏值。当剪切过程中量力环百分表读数无峰值时, 则剪切至剪切位移达 6 mm 时停止。

(7) 卸除压力, 取下加力框架、钢珠、加压盖等倒出试样, 刷净剪切盒。

(8) 重复 (2) ~ (7) 步骤, 改变垂直压力, 使分别为 200 kPa、300 kPa、400 kPa 进行试验。

(四) 资料整理

(1) 各级压力下试样破坏时的剪应力按下式计算:

$$\tau = k (R_m - R_0)$$

式中: τ ——试样破坏时的剪应力, 单位为 kPa;

k ——量力环系数, 其值表明在各仪器的量力环上, 单位为 kPa;

R_m ——百分表最大的读数, 0.01 mm;

R_0 ——百分表初读数或等于 0, 0.01 mm。

(2) 绘图: 以抗剪强度为纵坐标, 垂直压力为横坐标 (两坐标比例应一致), 将试验所得各点绘至于坐标图上, 根据图上各点, 绘一视测的直线, 则此直线即为抗剪强度线; 其视角为土的内摩擦角 ϕ , 抗剪强度线在纵坐标轴上的截距为土的黏聚力 c 。

(五) 试验记录

表 2-26 直接剪切试验

工程名称: _____

试验者: _____

工程编号: _____

计算者: _____

试验日期: _____

校核者: _____

仪器编号				
试样面积 / cm^2				
垂直压力 p / kPa	100	200	300	400
量力环最大变形 R / (0.01 mm)				
量力环号数				
量力环系数 k / (kPa/0.01 mm)				
抗剪强度 $\tau=kR$ / kPa				
抗剪强度指标	$k=$ _____ kPa, $\phi=$ _____ °			

学习任务 4 | 识读岩土工程勘察报告

■ 任务目标

1. 了解工程地质勘察的目的与分类; 了解岩土工程测试方法; 熟悉岩土工程勘察报告的格式与内容。
2. 提高阅读方法的科学性、逻辑性, 培养利用数据分析问题、解决问题的工程素养。

知识链接

一、工程地质勘察

(一) 勘察的目的

工程地基勘察的目的在于使用各种勘察手段和方法, 调查研究和评价建筑场地和地基的工程地质条件, 为设计和施工提供所需的工程地质资料。

(二) 各阶段勘察的内容

建筑场地的岩土工程勘察宜分阶段进行, 可行性研究勘察应符合选择场址方案的要求; 初步勘察应符合初步设计的要求; 详细勘察应符合施工图设计的要求; 场地条件



静力触探试验

复杂有特殊要求的工程,宜进行施工勘察。

场地较小且无特殊要求的工程可合并勘察阶段。当建筑物平面布置已经确定,且场地或其附近已有岩土工程资料时,可根据实际情况,直接进行详细勘察。

1. 可行性研究勘察(规划性勘察、选址勘察)

可行性研究勘察,应对拟选场址的稳定性和适宜性做出评价。这一阶段的勘察工作如下:

(1) 搜集区域地质、地形地貌、地震、矿产,当地的工程地质、岩土工程和建筑经验等资料。

(2) 在充分搜集和分析已有资料的基础上,通过勘察了解场地的地层、构造、岩性、不良地质作用和地下水等工程地质条件。

(3) 当拟建场地工程地质复杂,已有资料不能满足要求时,要根据具体情况进行工程地质测绘和必要的勘探工作。

(4) 当有两个或两个以上拟选场址时,应比较分析。

根据我国的建设经验,下列地区、地段不宜选为场址:

(1) 不良地质发育现象且对场地稳定性有直接危害或间接威胁,如有大滑坡、强烈发育岩溶、地表塌陷、泥石流及江河岸边强烈冲淤区等。

(2) 地震基本烈度较高,可能存在地震断裂带及地震时可能发生滑坡、山崩、地表断裂的场地。

(3) 洪水或地下水对建筑场地有严重不良影响。

(4) 地下有尚未开发的有价值矿藏或未稳定的地下采空区。

2. 初步勘察

在场址选定批准后进行初步勘察,初步勘察应对场地内拟建建筑地段的稳定性做出评价,并进行下列主要工作:

(1) 搜集拟建工程的有关文件、工程地质和岩土工程资料以及对工程场地的稳定性做出评价。

(2) 初步查明地质构造、地层结构、岩土工程特性、地下水埋藏条件。

(3) 查明场地不良地质作用的成因、分布、规模、发展趋势,并对场地的稳定性做出评价。

(4) 对抗震设防烈度等于或大于六度的场地,应对场地和地基的地震效应做出初步评价。

(5) 季节性冻土地区,应调查场地土的标准冻结深度。

(6) 初步判定水和土对建筑材料的腐蚀性。

(7) 高层建筑初步勘察时,应对可能采取的地基基础类型、基坑开挖与支护、工程降水方案进行初步分析评价。

3. 详细勘察

经过可行性研究勘察和初步勘察之后,场地工程地质条件基本查明,详细勘察的任务就在于针对具体建筑物地基或具体工程的地质问题,为进行施工提供可靠依据或设计

计算参数。因此，详细勘察应按单体建筑物或建筑群提出详细的岩土工程资料和设计、施工所需的岩土参数；对建筑地基做出岩土工程评价，并对地基类型、基础形式、地基处理、基坑支护、工程降水和不良地质作用的防治等做出建议。主要应进行下列工作：

(1) 搜集附有坐标和地形的建筑总平面图，场区的地面整平标高，建筑物的性质、规模、荷载、结构特点、基础形式、埋置深度、地基允许变形等资料。

(2) 查明不良地质作用的类型、成因、分布范围、发展趋势和危害程度，提出整治方案和建议。

(3) 查明建筑范围内岩土层的类型、深度、工程特性，分析和评价地基的稳定性、均匀性和承载力。

(4) 对需进行沉降计算的建筑物，提供地基变形计算参数，预测建筑物的变形特征。

(5) 查明埋藏的河道、沟浜、墓穴、防空洞、孤石等对工程不利的埋藏物。

(6) 查明地下水的埋藏条件，提供地下水位及其变化幅度。

(7) 在季节性冻土地区，提供场地土的标准冻结深度。

(8) 判定水和土对建筑材料的腐蚀性。

对地震设防烈度等于或大于六度的场地，应进行场地和地基地震效应的岩石工程勘察，并应根据国家批注的地震震动参数区划和有关规范，提出勘察场地的抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计特征周期。应划分场地的类别，划分对抗震有利、不利或危险的地段，进行液化判别。

当建筑物采用桩基时，应查明场地各层岩土的类型、深度、分布、工程特性和变化规律；当采用基岩作为桩的持力层时，应查明基岩的岩性、构造、岩面变化、风化程度，确定其坚硬程度、完整程度和基本质量等级，判定有无洞穴、临空面、破碎岩体或软岩层；查明水文地质条件，评价地下水对桩基设计和施工的影响，判定水质对建筑材料的腐蚀性；查明不良地质作用，可液化土层和特殊性岩土的分布及其对桩基的危害程度，并提出防治措施的建议；评价成桩的可能性，论证桩的施工条件及其对环境的影响。

4. 施工勘察

遇到下列各种情况，都应配合设计、施工单位进行施工勘察，解决施工中的工程地质问题，并提出相应的勘察资料。

(1) 对较重要建筑物的复杂地基，需进行施工勘察。

(2) 基槽开挖后，地质条件与原勘察资料不符，并可能影响工程质量时。

(3) 深基础施工设计及施工中需进行有关地基监测工作。

(4) 当软弱地基处理时，需进行设计和检验工作。

(5) 地基中溶洞或土洞较发育，需进一步查明及处理。

(6) 施工过程中出现边坡失稳，需进行观测和处理。

(三) 岩土工程测试方法

岩土工程测试是测定岩土物理力学性指标的重要方法。岩土工程测试分为岩土勘探(现场原位测试)和室内试验两种。岩土工程勘探是指钻探、槽探、坑探、洞探以及物探、触探等工程勘察手段，是在工程地质测绘和调查所取得的各项定性资料的基础上，进一步对场地的工程地质条件进行定量评价。勘探的直接目的是为了查明岩土的性质和

分布, 采取岩土试样或进行原位测试; 勘探方法的选取依据勘察目的和岩土的特性。

1. 钻探

钻探是用钻探机具以机械动力或人工方法成孔并采取土样进行勘探的一种方法。场地内布置的钻孔分为鉴别孔和技术孔两类: 仅仅用以采取扰动土样, 鉴别土层类别、厚度、状态和分布的钻孔, 称为鉴别孔; 在钻进中按不同深度和土层采取原状土样的钻孔, 称为技术孔。

2. 井探

《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001, 2009 年版) 规定, 当钻探方法难以查明地下水情况时, 可采用井探、槽探进行勘探。井探适用于地质条件复杂的场地, 当场地的土层中含有块石、漂石, 钻探困难时可考虑采用井探。井探也称坑探或掘探, 是指在场地有代表性地段, 以人工或机械挖掘井坑取得原状土样和直观资料的一种勘探方法。探井(坑)深度为 3~4 m, 有时达 5~6 m; 井探完成后, 应分层回填与夯实。相关知识参见《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001, 2009 年版) 规定。

3. 岩土工程原位测试

原位测试是指在岩土体所在的位置, 基本保持岩土原来的结构、湿度和应力状态, 对岩土进行的测试。原位测试包括标准贯入试验、圆锥动力触探试验、静力触探试验、载荷试验、十字板剪切试验、旁压试验等方法。原位测试方法应根据岩土条件、设计对参数的要求、地区经验和测试方法的适用性等因素选用, 其中地区经验的成熟程度最为重要。

4. 室内土工试验

室内土工试验是指在现场取土后在实验室进行的试验操作, 以确定土的物理性质指标、物理状态指标、力学指标等, 为工程地质勘察报告书提供必要的基础资料。

二、工程地质勘察报告

(一) 勘察报告书的基本内容

岩土工程勘察工作最终成果是以报告书的形式提出的。勘察工作结束后, 把取得的野外工作和室内试验的记录和数据及搜集到的各种直接和间接资料分析整理、检查校对、归纳总结后, 做出建筑场地的工程地质评价。这些内容, 最后应以简要明确的文字和图表编成报告书。

岩土工程的规模大小各不相同, 各勘察阶段目的要求也不一样, 勘察对象的工程特点、自然条件差异很大, 不可能制定一个统一的报告书形式。但是, 为了保证勘察工程质量, 《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001, 2009 年版) 对勘察报告的基本内容做了明确的规定。

岩土工程勘察报告应根据任务要求、勘察阶段、工程特点和地质条件等具体情况编写, 并应包括下列内容:

- (1) 勘察目的、任务要求和依据的技术标准。
- (2) 拟建工程概况。

- (3) 勘察方法和勘查工作布置。
- (4) 场地地形、地貌、地层、地质构造、岩土性质及其均匀性。
- (5) 各项岩土性质指标，岩土的强度参数、变形参数、地基承载力的建议值。
- (6) 地下水埋藏情况、类型、水位及其变化。
- (7) 土和水对建筑材料的腐蚀性。
- (8) 可能影响工程稳定的不良地质作用的描述和对工程危害程度的评价。
- (9) 场地稳定性和适宜性的评价。

(二) 勘察报告的阅读和使用

为了充分发挥勘察报告在设计和施工工作中的作用，必须重视对勘察报告的阅读和使用。阅读时应先熟悉勘察报告的主要内容，了解勘察结论和计算指标的可靠程度，进而判断报告中的建议对该项工程的适用性，做到正确使用勘察报告。这里，需要把场地的工程地质条件与拟建建筑物具体情况和要求联系起来进行综合分析。下面我们通过实例来说明建筑场地和地基工程地质条件综合分析的主要内容及其重要性。

1. 地基持力层的选择

对不存在可能威胁场地稳定的不良地质现象的地段，地基基础设计应在满足地基承载力和沉降这两个基本要求的前提下，尽量采用比较经济的天然地基上的浅基础。这时，地基持力层的选择应该从地基、基础和上部结构的整体性出发，综合考虑场地的土层分布情况和土层的物理力学性质，以及建筑物的体型、结构类型和荷载的性质与大小等情况。

通过勘察报告的阅读，在熟悉场地各土层的分布和性质（层次、状态、压缩性和抗剪强度、土层厚度、埋深及其均匀程度等）的基础上，初步选择适合上部结构特点和要求的土层作为持力层，经过试算或方案比较后做出最后决定。

根据勘察资料的分析，合理确定地基土的承载力是选择地基持力层的关键。而地基承载力实际上取决于许多因素，采用单一的方法确定承载力未必十分合理。必要时，可以通过多种测试手段，并结合实践经验适当予以增减，这样会取得更好的实际效果。

某地区拟建十二层商业大厦，上部采用框架结构，设有地下室，建筑场地位于丘陵地区，地质条件并不复杂，表土层是花岗岩残积土，厚 14 ~ 25 m 不等，覆盖层下为强风化花岗岩。

场地勘探采用钻探和标准贯入试验进行，在不同程度处采取原状试样进行室内岩石和土的物理力学性质指标试验。试验结果表明：残积土的天然孔隙比 $e > 1.0$ ，压缩模量 $E_s < 5.0$ MPa，属中等偏高压缩性土。而标准贯入试验 N 值变化很大：10 ~ 25 击，由此可以得出地基土的承载力特征值为 $f_a = 120 \sim 140$ kPa。如果上述意见成立，该建筑物需采用桩基础，桩端应支承在强风化花岗岩上。

根据当地建筑经验，对于花岗岩残积土，由公式计算所得的值 f_a 常偏低。为了检验室内成果的可靠程度，以便对建筑场地做出符合实际的工程性质评价，又在现场进行 3 次静荷载试验，并按不同深度进行旁压试验 15 次，各次试验算出的 f_a 值均在 200 kPa 以上。此外，考虑到该建筑物可能采用筏板基础，基础的埋深和宽度都比较大，地基承载力还可提高。于是决定采用天然地基浅基础方案，并在建筑、结构和施工各方面采取了某些减轻不均匀沉降影响的措施，终于使该商业大厦顺利建成。

由上述事例可以看出，在阅读和使用勘察报告时，应该注意所提供资料的可靠性。有时，由于勘察工作不够详细，地基土特殊性质不明，以及勘探方法本身的局限性，勘察报告不可能充分或准确地反映场地的主要特征。或者，在测试工作中，由于人为和仪器设备的影响，也可能造成勘察结果的失真而影响报告的可靠性。因此，在编写和使用报告的过程中，应该注意分析发现问题，并对有疑问的关键性问题进一步查清，以便减少差错。但对于一般中小型工程，可用公式计算指标作为依据，不一定都要进行现场荷载试验或更多的工作。

2. 场地稳定性评价

地质条件复杂的地区，综合分析的首要任务是评价场地的稳定性；其次是地基的强度和变形问题。

场地的地质构造（断层、褶皱等）、不良地质现象（泥石流、滑坡、崩塌、岩溶、塌陷等）、地层成层条件和地震等都会影响场地的稳定性。在勘察中必须查明其分布规律、具体条件、危害程度。

在断层、向斜、背斜等构造地带和地震区修建建筑物，必须慎重对待，在可行性勘察研究中指明宜避开的危险场地。但对于已经判明为相对稳定的构造断裂地带，还是可以选作建筑场地的。实际上，有的厂房大直径钻孔桩还直接支承在断层带岩层上。

在不良地质现象发育且对场地稳定性有直接危害或潜在威胁的地区，如不得不在其中较为稳定的地段进行建筑，也须事先采取有力措施，防患于未然，以免中途改变场地或花费极高的处理费用。

任务实施

结合某工程岩土工程勘察报告进行阅读（详见附录）。

通过本任务，了解该房屋建筑的工程特点及场地特征，了解工程地质勘察的主要内容和工作的，土层分布和土层描述的内容；能看懂附图、附表等附件，理解报告中分析评价和结论建议。同时结合本工程基础类型、地基处理方法、基坑开挖与支护方案等方面进行分析，初步学会岩土工程勘察报告的使用。



识读岩土工程
勘察报告案例



职业技能知识点考核

人生启迪

“中国共产党人深刻认识到，只有把马克思主义基本原理同中国具体实际相结合、同中华优秀传统文化相结合，坚持运用辩证唯物主义和历史唯物主义，才能正确回答时代和实践提出的重大问题，才能始终保持马克思主义的蓬勃生机和旺盛活力”。岩土工程勘察报告的编制必须实事求是、科学严谨，才能为工程结构设计时提供可靠的数据，做人做事也要诚实守信、实事求是才行。