



工学结合·基于工作过程导向的项目化创新系列教材
国家示范性高等职业教育土建类“十三五”规划教材

土工

试验指导

SHIYAN
ZHIDAO
TUGONG

>> 主审 付丽文
主编 昌永红



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



工学结合·基于工作过程导向的项目化创新系列教材
国家示范性高等职业教育土建类“十三五”规划教材

土工 试验指导

TUGONG
SHIYAN
ZHIDAO

主 审 付丽文
主 编 昌永红
副主编 王 胜 张立柱



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

内 容 简 介

本书共包括 10 个项目,包括土的物理性质与工程分类、土样的制备、颗粒分析试验、密度试验、含水率试验、土粒比重试验、界限含水率试验、固结试验、直接剪切试验和击实试验,对所述试验的基本原理、仪器设备、成果整理等做了较为详细的介绍。为便于读者学习,在相关章节安排了拓展训练和拓展提高,并附有参考答案。

本书适用于高职高专建筑工程技术、工程监理、基础工程技术、工程造价等专业,也可供相关专业工程技术人员、施工管理人员参考。

为了方便教学,本书还配有教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网(www.ibook4us.com)免费注册并浏览,或者发邮件至 husttujian@163.com 免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

土工试验指导/昌永红主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2017. 6

国家示范性高等职业教育土建类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5680-2786-1

I. ①土… II. ①昌… III. ①土工试验-高等教育-教材 IV. ①TU41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 095958 号

土工试验指导

Tugong Shiyian Zhidao

昌永红 主编

策划编辑: 康 序

责任编辑: 王 莹

责任监印: 朱 玢

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话: (027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编: 430223

录 排: 武汉正风天下文化发展有限公司

印 刷: 武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 7

字 数: 173 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 28.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言



为了实现高等职业教育的培养目标,配合“地基与基础”这一学科的试验教学和技能培训,帮助学生尽快掌握土工试验的方法、操作步骤及成果整理等,我们编写了本教材,它既是独立教材,又是《地基与基础》的补充教材。

本教材依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)等现行的规范、标准编写。全书共 10 个项目,包括土的物理性质与工程分类、土样的制备、颗粒分析试验、密度试验、含水率试验、土粒比重试验、界限含水率试验、固结试验、直接剪切试验和击实试验。为便于读者学习,在相关章节安排了拓展训练和拓展提高,并附有参考答案。

本书由辽宁建筑职业学院的昌永红担任主编,王胜、张立柱任副主编,付丽文担任主审。具体编写分工如下:昌永红编写项目 1 及项目 6 至项目 10,王胜编写项目 2 和项目 3,张立柱编写项目 4 和项目 5,参考答案由昌永红整理。全书由昌永红审核并统稿。

为了方便教学,本书还配有教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书”网(www.ibook4us.com)免费注册并浏览,或者发邮件至 husttujian@163.com 免费索取。

由于本教材编写时间仓促,加之编者水平有限,书中难免有欠妥之处,欢迎广大师生指正。

编 者

2017 年 5 月

目录

项目 1 土的物理性质与工程分类	(1)
任务 1 土的形成与组成	(2)
任务 2 土的物理性质指标	(8)
任务 3 土的物理状态指标	(13)
任务 4 土的压实性	(17)
任务 5 地基土(岩)的工程分类	(19)
任务 6 地基土的野外鉴别方法	(25)
拓展训练	(27)
项目 2 土样的制备	(29)
任务 1 概述	(30)
任务 2 仪器设备	(30)
任务 3 试验步骤	(31)
任务 4 成果整理	(34)
拓展训练	(35)
项目 3 颗粒分析试验	(36)
任务 1 概述	(37)
任务 2 试验目的	(37)
任务 3 试验方法和原理	(37)
任务 4 仪器设备	(37)
任务 5 试验步骤	(38)
任务 6 成果整理	(38)
任务 7 注意事项	(40)
拓展提高	(40)
拓展训练	(41)
项目 4 密度试验	(42)
任务 1 指标的含义	(43)
任务 2 试验目的	(43)
任务 3 试验方法和原理	(43)
任务 4 仪器设备	(43)
任务 5 试验步骤	(44)
任务 6 成果整理	(44)

任务 7 注意事项	(45)
拓展提高	(45)
拓展训练	(47)
项目 5 含水率试验	(48)
任务 1 指标的含义	(49)
任务 2 试验目的	(49)
任务 3 试验方法和原理	(49)
任务 4 仪器设备	(49)
任务 5 试验步骤	(50)
任务 6 成果整理	(50)
任务 7 注意事项	(51)
拓展提高	(51)
拓展训练	(52)
项目 6 土粒比重试验	(53)
任务 1 指标的含义	(54)
任务 2 试验目的	(54)
任务 3 试验方法和原理	(54)
任务 4 仪器设备	(54)
任务 5 试验步骤	(55)
任务 6 成果整理	(56)
任务 7 注意事项	(57)
拓展训练	(57)
项目 7 界限含水率试验	(58)
任务 1 指标的含义	(59)
任务 2 试验目的	(59)
任务 3 试验方法和原理	(59)
任务 4 仪器设备	(59)
任务 5 试验步骤	(60)
任务 6 成果整理	(61)
任务 7 注意事项	(63)
拓展提高	(63)
拓展训练	(65)
项目 8 固结试验	(66)
任务 1 概述	(67)
任务 2 试验目的	(68)
任务 3 试验方法和原理	(68)
任务 4 仪器设备	(69)
任务 5 试验步骤	(69)
任务 6 成果整理	(70)

任务 7 注意事项	(71)
拓展训练	(72)
项目 9 直接剪切试验	(73)
任务 1 指标的含义	(74)
任务 2 试验目的	(75)
任务 3 试验方法和原理	(75)
任务 4 仪器设备	(77)
任务 5 试验步骤	(78)
任务 6 成果整理	(79)
任务 7 注意事项	(80)
拓展提高	(80)
拓展训练	(84)
项目 10 击实试验	(86)
任务 1 指标的含义	(87)
任务 2 试验目的	(87)
任务 3 试验方法及原理	(87)
任务 4 仪器设备	(88)
任务 5 操作步骤	(89)
任务 6 成果整理	(90)
任务 7 注意事项	(92)
拓展训练	(92)
参考答案	(93)
参考文献	(102)

土的物理性质与工程分类

学习目标



☆ 知识目标

- (1) 了解土的形成、土的基本结构与构造；
- (2) 理解土的三相组成的基本概念；
- (3) 掌握土的物理性质指标和物理状态指标的含义以及各指标的测定方法；
- (4) 了解土的压实特性；
- (5) 熟悉土的工程分类与野外鉴定方法；
- (6) 了解特殊土的类型及分布。

☆ 能力目标

- (1) 能区分碎石土与砂土、黏土与粉质黏土、粉土与粉砂等；
- (2) 能正确计算土的物理性质指标和物理状态指标；
- (3) 依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)，能对土定名并判断其状态。

☆ 素质目标

- (1) 培养勤奋向上、严谨细致的良好学习习惯和科学的工作态度；
- (2) 具有爱岗敬业与团队合作精神。

土是岩石经过风化、搬运、沉积所形成的产物。一般来说,土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)所组成的三相体系。不同土的颗粒大小和矿物成分差异很大,三相间的数量比例也各不相同。

任务 1 土的形成与组成

一、土的形成

土的形成原因很多,不同成因的土具有不同的分布规律和工程地质特征。根据不同的搬运和沉积情况,土可分为以下几种类型。

1. 残积物

1) 概念

岩石经风化作用而残留在原地的碎屑堆积物,称为残积物,如图 1-1 所示。

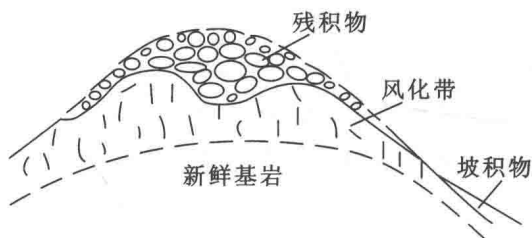


图 1-1 残积物示意图

2) 分布

残积物主要分布在岩石出露地表,经受强烈风化作用的山区、丘陵地带与剥蚀平原。

3) 主要工程地质特征

残积物没有层理构造,裂隙多,均质性很差,因此土的物理力学性质很不一致;土颗粒一般较粗且带棱角,作为建筑物地基时,应注意不均匀沉降和土坡稳定性等问题。

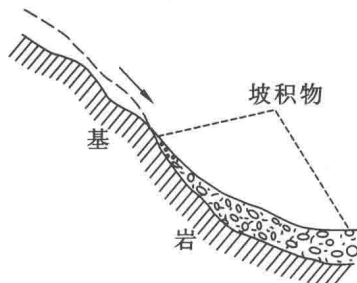


图 1-2 坡积物示意图

2. 坡积物

1) 概念

高处的风化物在雨水、雪水或本身的重力作用下被搬运后,沉积在较平缓的山坡上的堆积物,称为坡积物,如图 1-2 所示。

2) 分布

坡积物分布在坡腰至坡脚。

3) 主要工程地质特征

坡积物会沿下卧基岩倾斜面滑动;土颗粒粗细混杂,土质不均匀,厚度变化大,土质疏松,压缩性高,作为建筑物地基时,应注意不均匀沉降和稳定性等问题。

3. 洪积物

1) 概念

在山区或高地由暂时性山洪急流作用而形成的山前堆积物,称为洪积物,如图 1-3 所示。

2) 主要工程地质特征

洪积物呈现不规则交替层理构造,如有夹层、尖灭或透镜体等。靠近山体的洪积物颗粒较粗,地下水位较深;而离山较远地段的洪积物颗粒较细,成分均匀,厚度较大,土质密实,一般为良好的天然地基。

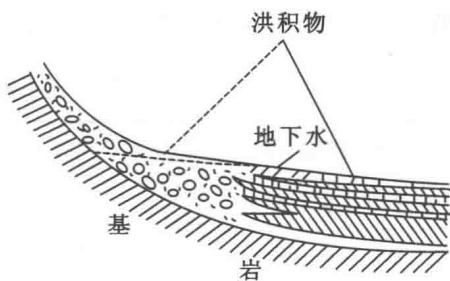


图 1-3 洪积物示意图

4. 冲积物

1) 概念

由河流中流水的作用在平原河谷或山区河谷中形成的沉积物,称为冲积物。冲积物分为平原河谷冲积物、山区河谷冲积物和三角洲冲积物。

2) 主要工程地质特征

冲积物呈现明显的层理构造。

二、土的组成

土是由固体颗粒、液体和气体三部分组成的,通常称为土的三相组成。随着三相物质的质量和体积的比例不同,土的性质也将不同。因此,研究土的三相组成,应先对土中的固体颗粒、水和气体进行分析。

1. 土的固体颗粒

土的固相物质包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架的最基本物质,称为土的固体颗粒(土粒)。

1) 土的矿物成分

土中的矿物成分分为两大类。

(1) 原生矿物:岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等,由它们组成的粗粒土,例如漂石、卵石、圆砾等,都是岩石的碎屑,其矿物成分与母岩相同。

(2) 次生矿物:原生矿物经风化作用后形成的产物。

2) 土的颗粒级配

(1) 粒组

自然界中的土都是由大小不同的颗粒组成的,土的性质与土颗粒的大小密切的关系,如

土粒的粒径由粗变细,土的渗透性由大变小,由无黏性变为有黏性等。因此,工程中可用不同粒径颗粒的相对含量来描述土的颗粒组成情况。

土中不同粒径的土颗粒按适当的粒径范围划分为若干小组,称为粒组。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。划分时应使粒组界限与粒组性质的变化相适应。

目前常使用的粒组划分方法如表 1-1 所示,表中将土粒分成 6 组,即漂石或块石颗粒、卵石或碎石颗粒、圆砾或角砾颗粒、砂粒、粉粒和黏粒。

表 1-1 土粒的粒组划分

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

土中各粒组的相对含量(各粒组占土粒总质量的百分比),称为颗粒级配,这是决定无黏性工程性质的主要因素,是确定土的名称和选用建筑材料的重要依据。

(2) 颗粒分析试验

土的颗粒级配是通过土的颗粒分析试验测定的。颗粒分析方法有筛析法、密度计法或移液瓶法。筛析法适用于粒径大于 0.075 mm 的土;密度计法或移液瓶法适用于粒径小于 0.075 mm 的土。

(3) 颗粒级配曲线

根据颗粒大小分析试验结果,在半对数坐标上,以纵坐标表示小于某粒径颗粒含量占土总质量的百分数,横坐标表示颗粒直径,绘出颗粒级配曲线,如图 1-4 所示。

由曲线的陡缓大致可判断土的均匀程度,如:曲线平缓,表示粒径大小相差悬殊,颗粒不均匀,级配良好;反之,曲线陡峭,则颗粒均匀,级配不良。

(4) 级配指标

为了定量反映土的级配特征,工程中常用两个级配指标来描述。

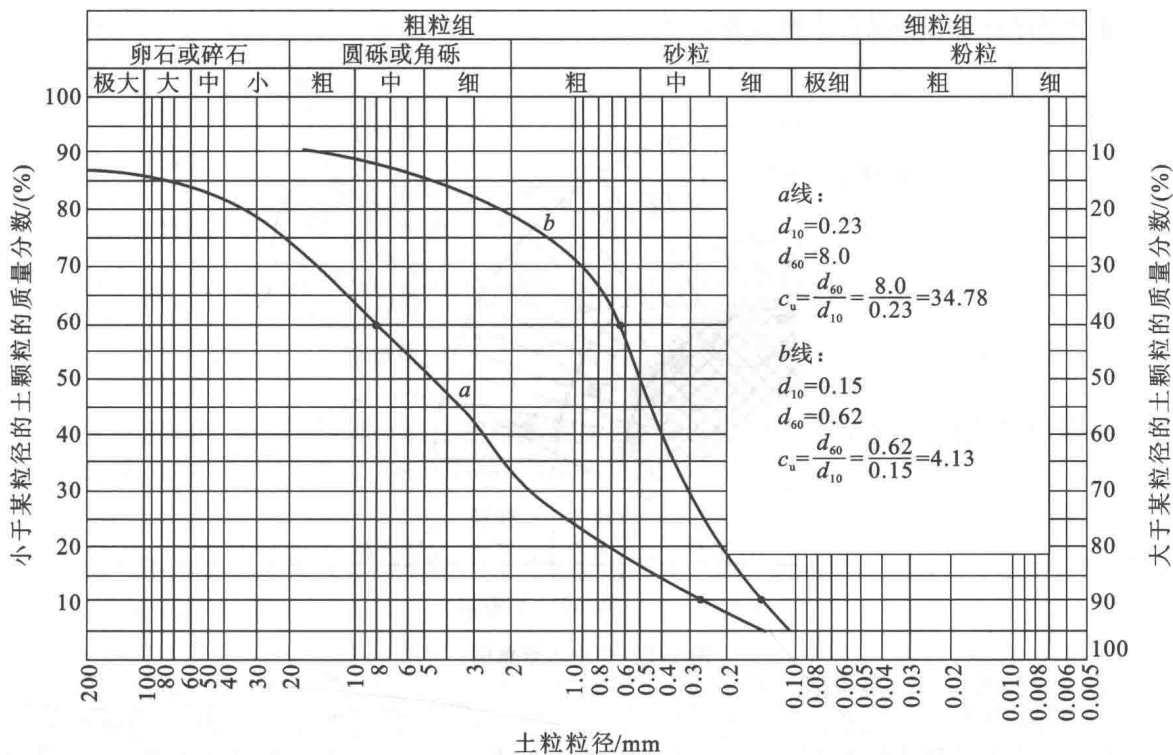


图 1-4 土的颗粒级配曲线

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (1-2)$$

式中, d_{60} ——小于某粒径的土颗粒重量占总土重的 60% 时的粒径, 该粒径称为限定粒径;

d_{10} ——小于某粒径的土颗粒重量占总土重的 10% 时的粒径, 该粒径称为有效粒径;

d_{30} ——小于某粒径的土颗粒重量占总土重的 30% 时的粒径。

工程上将 $C_u < 5$ 的土称为匀粒土, 属级配不良; $C_u > 10$ 的土称为级配良好土。考虑级配曲线整体形状, 一般认为, 砾类土或砂类土同时满足 $C_u > 5$ 及 $1 < C_c < 3$ 两个条件时, 称其级配良好。

2. 土中水

土中水是指存在于土孔隙中的水。土中细粒越多, 水对土的性质影响越大。按照水与土相互作用程度的强弱, 可将土中水分为结合水和自由水两大类。

1) 结合水

结合水是指在电分子引力下吸附于土粒表面的水。由于土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一起被吸附在土粒表面, 极性水分子被吸附后呈定向排列, 形成结合水膜, 如图 1-5 所示。根据结合水离土粒表面的距离, 结合

水又分为强结合水和弱结合水两大类。

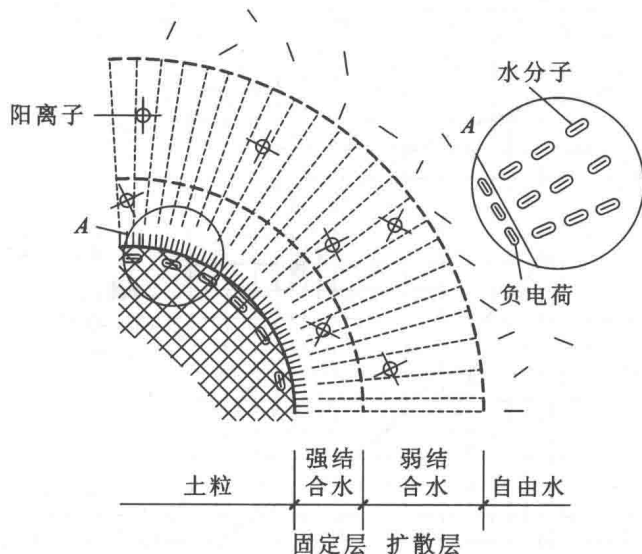


图 1-5 土中水示意图

(1) 强结合水

强结合水因受到土粒表面引力的控制而不能传递静水压力,没有溶解盐类的能力,性质接近于固体,其密度为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点为 -78°C ,具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度。当黏土只含有强结合水时,呈固体状态;砂土只含有强结合水时,呈散粒状态。

(2) 弱结合水

弱结合水存在于强结合水外侧,仍不能传递静水压力,但弱结合水可以从较厚的水膜处慢慢地迁移到较薄的水膜处。当黏性土中含有较多的弱结合水时,土体具有一定的可塑性。

2) 自由水

自由水是存在于土孔隙中土粒表面电场影响范围以外的水,它的性质与普通水一样,能传递静水压力,具有溶解能力,冰点为 0°C 。按照其移动时所受作用力的不同,自由水可分为重力水和毛细水。

(1) 重力水

重力水是存在于土中在重力作用下能自由运动的地下水,对土粒具有浮力作用。在地下水以下的土,受重力水的浮力作用,土中应力状态会发生改变。施工时,重力水对基坑开挖、地下构造物的防水等会产生较大影响。

(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,能沿着土的细孔隙从潜水面上升到一定的高度,存在于地下水位以上的透水土层中。

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张力反作用于土粒上,使土粒之间由于这种毛细压力而挤紧,土呈现黏聚现象,这种毛细压力称为毛细黏聚力,如图 1-6 所示。

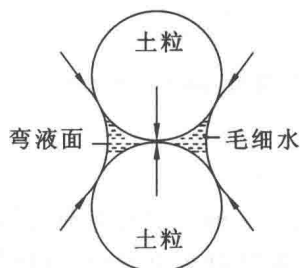


图 1-6 毛细水压力示意图

在施工现场可以看到稍湿状态的砂堆能保持垂直陡壁达数十厘米高,就是因为砂粒间具有毛细黏聚力的缘故。在饱和的砂或干砂中,土粒之间无毛细黏聚力,便不会出现垂直陡壁。在工程中,应特别注意毛细水上升对建筑物地下部分的防潮措施、地基土的浸湿以及地基与基础冻胀的重要影响。

3. 土中气体

土中气体是指填充在土的孔隙中的气体,分为与大气连通的自由气体和与大气不连通的封闭气体两类。

1) 自由气体

与大气连通的自由气体对土的工程性质影响不大,在受到外力作用时,这种气体能很快从孔隙中被挤出。

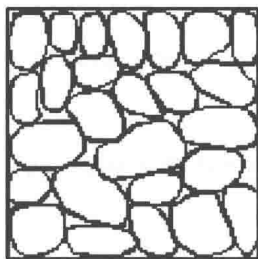
2) 封闭气体

与大气不连通的封闭气体对土的工程性质影响较大,在受到外力作用时,气泡被压缩,压力减小时,气泡会恢复原状,增大了土的弹性,使土不易被压实。

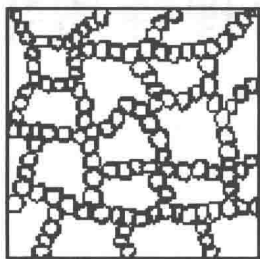
三、土的结构与构造

1. 土的结构

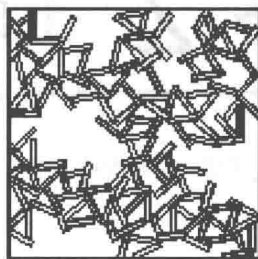
土的结构是指土粒的大小、形状、相互排列及其联结关系的综合特征,一般分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型,如图 1-7 所示。



(a) 单粒结构



(b) 蜂窝结构



(c) 絮状结构

图 1-7 土的结构

1) 单粒结构

单粒结构是无黏性土的结构特征,由较粗的砾石、砂粒在自重作用下沉积而成,其特点是土粒间没有联结,或联结非常微弱,可以忽略不计。

2) 蜂窝结构

蜂窝结构是以粉粒为主的土的结构特征。单个粉粒在水中下沉,当碰上已沉积的土粒时,由于土粒间的引力大于颗粒自重,所以下沉粉粒被吸引,不再下沉,因此形成很大孔隙的蜂窝结构。

3) 絮状结构

絮状结构是黏土颗粒特有的结构特征。悬浮在水中的黏粒不因重力而下沉,而是形成小链环状的土集料,这种小链环碰到另一链环时被吸引,形成大链环状的絮状结构。

上述三种结构中,密实单粒结构土的工程性质最好,蜂窝结构其次,絮状结构最差。后两种结构的土,如破坏其天然结构,则强度降低、压缩性变大,不可作为天然地基。

2. 土的构造

土的构造是指同一土层中土颗粒之间的相互关系特征,通常分为层状构造、分散构造和裂隙构造。

1) 层状构造

层状构造是土粒在沉积过程中,由于不同阶段沉积物的物质成分、粒径大小或颜色不同,沿竖向呈现层状特征。层状构造反映不同年代不同搬运条件形成的土层,是细粒土的一个重要特征。

2) 分散构造

分散构造其土层中的土粒分布均匀,性质相近,常见于厚度较大的粗粒土,通常其工程性质较好。

3) 裂隙构造

裂隙构造是土体被许多不连续的小裂隙所分割,某些硬塑或坚硬状态的黏性土具有此种构造。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。

任务 2 土的物理性质指标

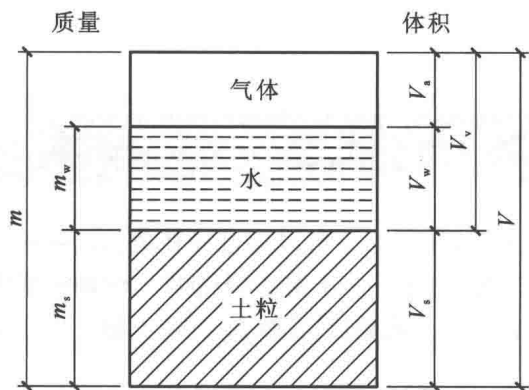
土的物理性质指标反映土的工程性质特征,土中三相之间的相互比例不同,土的工程性质就不同。

一、土的三相组成草图

土中的土颗粒、水和气体是混杂在一起。为了计算方便,将这三部分集中起来,画出土的三相组成草图,如图 1-8 所示。

二、试验指标

通过试验直接测定的指标有土的密度 ρ 、土粒比重 d_s 和含水率 w ,它们是土的三个基本物理性质指标。



m_s —土粒质量； m_w —土中水质量； m —土的总质量； V_s —土粒体积；
 V_w —土中水体积； V_a —土中孔隙体积； V —土的总体积； V_a —土中气体体积

图 1-8 土的三相组成草图

1. 土的密度 ρ

单位体积土的质量称为土的密度(单位为 g/cm^3 或 t/m^3)，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$

单位体积土受到的重力称为土的重力密度，简称重度(单位为 kN/m^3)，即

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中，重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ，工程中可取 $g=10 \text{ m/s}^2$ 。

天然状态下土的密度变化范围较大，一般为 $1.60 \sim 2.20 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

土的密度一般采用“环刀法”测定。

2. 土粒相对密度(比重) d_s

土粒的密度与 4°C 时纯水的密度的比值，称为土粒相对密度(或比重)，即

$$d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (1-5)$$

式中， ρ_s ——土粒密度；

ρ_w ——纯水在 4°C 时的密度，等于 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

土粒相对密度变化幅度不大，一般砂土为 $2.65 \sim 2.69$ ，粉土为 $2.70 \sim 2.71$ ，黏性土为 $2.72 \sim 2.75$ 。

土粒相对密度在实验室采用“比重瓶法”测定。

3. 土的含水率 w

土中水的质量与土粒质量之比(用百分数表示)，称为土的含水率，即

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

含水率是表示土的湿度的一个重要指标。一般来说：同一类土，其含水率越大，则其强度就

越低。

含水率一般采用“烘干法”测定。

三、换算指标

除了上述三个试验指标之外,还有六个可以通过计算求得的指标,称为换算指标。换算指标包括:特定条件下土的密度(重度)指标——干密度(干重度)、饱和密度(饱和重度)、有效密度(有效重度),反映土的松密程度的指标——孔隙比、孔隙率,反映土的含水程度的指标——饱和度。

1. 特定条件下土的密度(重度)指标

1) 土的干密度 ρ_d 和干重度 γ_d

单位体积土中土颗粒的质量称为土的干密度,即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-7)$$

单位体积土中土颗粒受到的重力称为土的干重度,即

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (1-8)$$

土的干密度一般为 $1.3 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ 。

工程中常用土的干密度来评价土的密实程度,以控制填土、高等级公路路基和坝基的施工质量。土的干密度越大,土体压得越密实,土的工程质量就越好。

2) 土的饱和密度 ρ_{sat} 和饱和重度 γ_{sat}

当土孔隙中充满水时单位体积土的质量,称为土的饱和密度,即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-9)$$

单位体积土饱和时受到的重力称为土的饱和重度,即

$$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g \quad (1-10)$$

3) 土的有效密度 ρ' 和有效重度 γ'

地下水位以下,土体受到水的浮力作用时,扣除水的浮力后单位体积土的质量称为土的有效密度,即

$$\rho' = \frac{m_s - V_v \rho_w}{V} = \rho_{\text{sat}} - \rho_w \quad (1-11)$$

地下水位以下,土体受到水的浮力作用时,扣除水的浮力后单位体积土受到的重力称为土的有效重度,即

$$\gamma' = \rho' g = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1-12)$$

式中, $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ 。

2. 反映土松密程度的指标

1) 土的孔隙比 e

土中孔隙体积与土颗粒体积之比,称为土的孔隙比,以小数表示,即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-13)$$