



国家骨干高等职业院校建设成果
中央财政支持重点建设专业教材

地基基础施工与 试验检测

■ 邹建风 安宏科 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



国家骨干高等职业院校建设成果
中央财政支持重点建设专业教材

地基基础施工与试验检测

邹建风 安宏科 主编
刘光唯 主审

中国铁道出版社

2013年·北京

内 容 简 介

本书共分七个学习项目,重点介绍了土的物理性质测试与鉴别、土的工程特性分析、浅基础施工、桩基础施工、沉井基础施工、地基处理和地基基础施工质量检测等内容。注重突出职业教育的针对性、职业性与通用性,系统培养学生职业能力、团队合作能力和可持续发展能力。

本书不仅适于高职铁道工程技术专业,而且辐射高速铁路技术、城市轨道交通工程技术等专业的《土工试验与检测》、《基础工程》课程教学,并可作为相关领域工程技术人员培训、阅读与学习的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

地基基础施工与试验检测/邹建风,安宏科主编. —北京:中国铁道出版社,2013. 12
国家骨干高等职业院校建设成果 中央财政支持重点建设专业教材
ISBN 978-7-113-17748-5

I. ①地… II. ①邹… ②安… III. ①地基—基础(工程)—工程施工 ②地基—基础(工程)—土工试验 ③地基—基础(工程)—质量检验 IV. ①TU753 ②TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 288170 号

书 名:地基基础施工与试验检测
作 者:邹建风 安宏科 主编

责任编辑:李丽娟 编辑部电话:010-51873135 读者热线:400-668-0820
封面设计:崔 欣
责任校对:马 丽
责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:北京铭成印刷有限公司

版 次:2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:11.25 字数:281 千

书 号:ISBN 978-7-113-17748-5

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480



前言

本教材是国家骨干高职院校铁道工程技术重点专业建设的系列成果之一,由陕西铁路工程职业技术学院联合中国中铁、中铁建、铁路局等合作企业共同开发。教材坚持“质量一流、特色鲜明、合编共用”的原则,编写中吸收了骨干教师与企业资深专家多年的教学及施工经验,以适应当前铁路施工企业、运营企业对专业岗位的要求,满足职业岗位群对技术技能人才在知识、能力及素质等方面的需求。

本书共分七个学习项目,重点介绍了土的物理性质测试与鉴别、土的工程特性分析、浅基础施工、桩基础施工、沉井基础施工、地基处理和地基基础施工质量检测等内容,注重突出职业教育的针对性、职业性与通用性,系统培养学生职业能力、团队合作能力和可持续发展能力。

本书不仅适于高职铁道工程技术专业,而且辐射高速铁路技术、城市轨道交通工程技术等专业的《土工试验与检测》、《基础工程》课程教学,并可作为相关领域工程技术人员培训、阅读与学习的参考资料。

本书由陕西铁路工程职业技术学院邹建风和安宏科主编,中铁一局集团公司高级工程师刘光唯主审,参加本书编写的还有陕西铁路工程职业技术学院李英杰、中铁二局集团公司总工戴建平、中铁十三局集团公司高级技师杨德龙。编写分工如下:项目一由邹建风编写,项目二由安宏科编写,项目三由邹建风和戴建平编写,项目四由安宏科和戴建平编写,项目五、项目六由李英杰编写,项目七由杨德龙编写。在本书的编写过程中,得到中铁一局集团公司、中铁二局集团公司和中铁十三局集团公司的有关专家的大力支持和帮助,并参考、借鉴和引用了大量的有关文献、书籍及资料,在此向有关专家及文献资料的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,难免有疏漏、不妥之处,恳请希望各院校师生及相关读者提出批评及改进意见。

编者

2013年10月



目录

- 项目 1 土的物理性质测试与鉴别 1
 - 任务 1.1 土的颗粒级配分析 1
 - 任务 1.2 土的物理性质指标 6
 - 任务 1.3 土的物理状态指标 10
 - 任务 1.4 土的工程分类 16
 - 复习思考题 19
- 项目 2 土的工程特性分析 21
 - 任务 2.1 土的渗透性 21
 - 任务 2.2 土的击实性 28
 - 任务 2.3 土的压缩性 31
 - 任务 2.4 土的抗剪强度 49
 - 复习思考题 59
- 项目 3 浅基础施工 61
 - 任务 3.1 浅基础的类型与构造 61
 - 任务 3.2 刚性扩大基础的设计与计算 64
 - 任务 3.3 刚性扩大基础施工 71
 - 复习思考题 79
- 项目 4 桩基础施工 80
 - 任务 4.1 钻孔灌注桩施工 80
 - 任务 4.2 挖孔灌注桩施工 100
 - 任务 4.3 预制桩施工 106
 - 复习思考题 112
- 项目 5 沉井施工 113
 - 任务 5.1 沉井基础施工 113
 - 任务 5.2 沉井下沉问题处理 120
 - 复习思考题 123

项目 6 地基处理	125
任务 6.1 软弱土地基处理	125
任务 6.2 特殊土地基处理	137
任务 6.3 复合地基加固	139
复习思考题	142
项目 7 地基基础施工质量检测	143
任务 7.1 土的填筑质量检测	143
任务 7.2 处理地基质量检测	149
任务 7.3 基桩质量检测	159
复习思考题	173
参考文献	174

项目 1 土的物理性质测试与鉴别



项目描述

土是岩石风化产物经各种地质搬运作用而沉积下来的堆积物。土粒之间的孔隙被水和气体所填充,所以土是一种由固态、液态和气态物质组成的三相体系。与各种连续体(弹性体、塑性体、流体等)比较,天然土体具有一系列复杂的物理力学性质,而且容易受环境条件变动的影响。现有的土力学理论还难于模拟、概括天然土层在建筑物作用下所表现的各种力学性状的全貌。因此,我们要通过对土的物理性质测试取得有关物理性质指标,并紧密结合实践经验进行合理分析,妥善解决工程实际问题。



学习目标

1. 能力目标

(1)具备土颗粒分析试验、密度试验、含水率试验、颗粒密度试验、界限含水率试验的基本操作技能;

(2)具备使用相关规范对土进行工程分类的能力。

2. 知识目标

(1)掌握土的颗粒级配分析方法;

(2)掌握土的物理性质指标的测试方法;

(3)掌握土的物理状态指标的测试方法;

(4)掌握土的工程分类的确定方法。

任务 1.1 土的颗粒级配分析

1.1.1 工作任务

通过对土的颗粒级配分析的学习,能够完成以下工作任务:

(1)根据《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)合理选择试验方法;

(2)根据工程概况、地质状况等进行土的颗粒级配分析。

1.1.2 相关配套知识

1.1.2.1 几个基本概念

1. 地基

建筑物一般都建造在地层之上,支承建筑物全部荷载的那部分地层称为建筑物的地基。

在平原地区,由于基岩埋藏较深,地表第四纪覆盖土层较厚,因此建筑物常建造在由土构成的地基之上,这种地基称为土基。

在丘陵地带和山区,由于基岩埋藏较浅,甚至裸露于地表,因此建筑物将建造在由岩石构成的地基之上,这种地基称为岩基。

2. 基础

为了安全地将建筑物全部荷载传给地基,就需要在建筑物底部与地基接触的地方修建适当的结构,这个结构就称为建筑物的基础。可见,基础是建筑物结构的一个组成部分,基础与建筑物的上部结构是连在一起的。

3. 基础埋置深度

基础最下部距地表的距离称为基础埋置深度。

4. 天然地基

当基础底面直接放置在由物理、力学性状较好的天然沉积的土层组成的地基上时,其能满足建筑物对地基的要求,不至于出现强度、变形或渗流方面的隐患问题,这样的地基称为天然地基。

5. 软弱地基

不能满足建筑物对地基要求的地基称为软弱地基。地基是否属于软弱地基是相对的。

1.1.2.2 土的组成

1. 土的形成

土木建筑工程所称的土有狭义和广义两种概念。狭义概念所指的土,是岩石风化后的产物,即指覆盖在地表上松散的、没有胶结或胶结很弱的颗粒堆积物。广义的概念则将整体岩石也视为土。

地球表面 30~80 km 厚的范围是地壳。地壳中原来整体坚硬的岩石经风化、剥蚀搬运、沉积,形成固体矿物、水和气体的集合体称为土。

岩石风化是指岩石在太阳辐射、大气、水和生物作用下出现破碎、疏松及矿物成分次生变化的现象。导致上述现象的作用称为风化作用。

风化作用有物理风化和化学风化两种。

物理风化作用是指地表岩石长期经受风、霜、雨、雪的侵蚀和动植物活动的破坏,逐渐由大块崩解为形状和大小不同的碎块的过程。物理风化只改变颗粒的大小和形状,不改变颗粒的成分。

化学风化作用是指物理风化后的碎块与水、氧气、二氧化碳和某些由生物分泌出的有机酸溶液等接触,发生化学变化,产生更细的并与原来的岩石成分不同的颗粒的过程。化学风化不仅改变颗粒的大小和形状,而且改变颗粒的成分。

2. 土的组成

土由固体颗粒,液体水和气体三部分组成,称为土的三相组成。土中的固体颗粒构成骨架,骨架之间贯穿着孔隙,孔隙中充填着水和空气,三相比例不同,土的状态和工程性质也不相同。

固体+气体为干土;

固体+液体+气体为湿土;

固体+液体为饱和土。

研究土的工程性质要从最基本的土的三相组成(固相、液相和气相)开始。

1)土的固体颗粒

(1)颗粒分组

土是由各种大小不同的颗粒组成的。颗粒粒径的大小称为粒度。

把粒度相近的土归为一组,称为粒组。

划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。

自然界中的土粒直径变化幅度很大。工程上所采用的粒组划分应能反映粒径大小变化引起土的物理性质变化这一客观规律。一般说,同一粒组的土,其物理性质大致相同,不同粒组的土,其物理性质则有较大差别。《铁路桥涵地基和基础设计规范》(TB 10002. 5—2005)采用界限粒径 200 mm、60 mm、20 mm、2 mm、0. 075 mm 和 0. 005 mm 把土粒分为七大粒组:漂石(块石)、卵石(碎石)、粗圆砾(粗角砾)、细圆砾(细角砾)、砂粒、粉粒及黏土粒粒组。对粒组划分见表 1. 1。

表 1. 1 土的颗粒分组

粒组的名称	粒径范围(mm)	
漂石(浑圆、圆棱)或块石(尖棱)	大	$d>800$
	中	$400< d \leq 800$
	小	$200< d \leq 400$
卵石(浑圆、圆棱)或碎石(尖棱)	大	$100< d \leq 200$
	小	$60< d \leq 100$
粗圆砾(浑圆、圆棱)或粗角砾(尖棱)	大	$40< d \leq 60$
	小	$20< d \leq 40$
粗圆砾(浑圆、圆棱)或粗角砾(尖棱)	大	$10< d \leq 20$
	中	$5< d \leq 10$
	小	$2< d \leq 5$
砂粒	粗	$0. 5< d \leq 2$
	中	$0. 25< d \leq 0. 5$
	细	$0. 075< d \leq 0. 25$
粉粒	$0. 005< d \leq 0. 075$	
黏粒	$d<0. 005$	

(2)用筛析法作土的颗粒大小分析

天然土常常是由各种不同大小的土粒组成的混合物,它包含着几种粒组的土粒。不同粒组在土中的相对含量在很大程度上决定着土的工程特性,因此,工程上常以土中各粒组的相对含量表示土中颗粒的组成情况。

各粒组的质量占土粒总质量的百分数称为颗粒级配。

对土的颗粒组成的测定称为颗粒分析。

土的颗粒分析的方法有以下两种:

①筛析法:适用于粒径小于或等于 200 mm,大于 0. 075 mm 的土。

②密度计法:适用于粒径小于 0.075 mm 的土。

颗粒级配的表示方法有表格法和级配曲线法。前者制作简单,后者更加便于评价粒径含量的组合情况。以下对应用较广的级配曲线法做一说明:

根据颗粒分析试验结果,在半对数坐标纸上,以对数横坐标表示粒径 d ,以纵坐标表示小于某粒径的土颗粒含量占总质量的百分数,绘出颗粒级配曲线如图 1.1 所示。

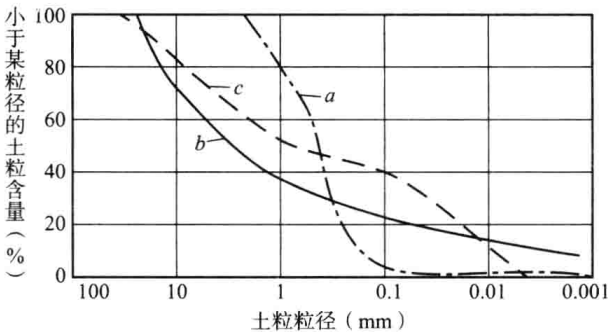


图 1.1 土的粒径级配累积曲线

曲线的坡度用于大致判断土的均匀程度。若曲线较陡,则表示粒径大小相差不多,土粒较均匀,即级配不良;若曲线平缓,则表示粒径大小相差悬殊,土粒不均匀,即级配良好。

在工程中,对于粗粒土常采用反映颗粒组成特征的级配指标不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来评价土的颗粒级配情况。

不均匀系数按下式计算:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{1.1}$$

曲率系数按下式计算

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \tag{1.2}$$

式中 C_u ——不均匀系数,计算至 0.01;

d_{60} ——限定粒径(mm),即土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的 60%;

d_{10} ——有效粒径(mm),即土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的 10%;

C_c ——曲率系数,计算至 0.01;

d_{30} ——土样中小于该粒径的土粒质量占土粒总质量的 30%的粒径值(mm)。

工程中,当 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 时,土粒不均匀,级配良好;当 $C_u < 5$ 或 $C_c \neq 1 \sim 3$ 时,土粒均匀,级配不良。

(3)土粒的矿物成分

根据组成土的固体颗粒的矿物成分的性质及其对土的工程性质影响不同,认为土中的矿物成分有以下三大类:原生矿物、次生矿物、有机质等。

①原生矿物:土中的原生矿物是岩石风化过程中的产物,保持了母岩的矿物成分和晶体结构,常见的如石英、长石、角闪石、云母等。这些矿物是组成土中卵石、砾石、砂粒和某些粉粒的主要成分。原生矿物的主要特点是:颗粒粗大,物理、化学性质比较稳定,抗水性和抗风化能力较强,亲水性弱或较弱。



②次生矿物:母岩风化后及在风化搬运过程中,如果原来的矿物因氧化、水化及水解、溶解等化学风化作用而进一步分解,就会形成一种新矿物,这就是次生矿物,其颗粒比原生矿物细小得多。次生矿物的主要特点是:颗粒细小,亲水性强,有一定黏性。

③有机质:是动植物残骸和微生物以及它们的各种分解和合成产物。通常把分解不完全的植物残体称为泥炭,其主要成分是纤维素;把分解完全的动、植物残骸称为腐殖质。

有机质的主要特点是:极具活性和亲水性,会导致土的塑性增强,压缩性增高,渗透性减小,强度降低。

2) 土中水

在自然条件下,土中常含有一定数量的水。土在常温条件下,根据水和土粒有无相互作用,土中的水可以分为结合水和自由水。

(1) 结合水

结合水是指受电分子吸引力吸附于土粒表面的水。结合水依据水分子与土粒表面结合的紧密程度分为强结合水(吸着水)与弱结合水(薄膜水)两类。

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,其性质接近于固体,密度约为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点为 -78°C ,具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。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。

弱结合水是指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,几乎不具可塑性,而黏性土的比表面较大,其可塑性范围就大。

(2) 自由水

自由水是指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°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。

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。

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。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。在工程中,要注意毛细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,含可溶盐的地下水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。

3) 土中气体

土中的气体存在于土孔隙中未被水所占据的部位。在粗粒土中常见到与大气相连通的自由气体,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增加,透水性减小。

3. 土的结构和构造

1) 土的结构

土的结构是指土颗粒本身的特点和颗粒间相互关系的综合特征,具体来说是指:

(1) 土颗粒本身的特点土颗粒大小、形状和磨圆度及表面性质(粗糙度)等。

(2) 土颗粒之间的相互关系特点,即粒间排列及其联结性质。

据此可把土的结构分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

单粒结构(散粒结构):指粗大土粒在重力作用下,一颗一颗沉积下来而形成的,每个土粒都受到周围各个土粒的支承,土粒间几乎没有连接。单粒结构对土的工程性质影响主要在于其松密程度。

蜂窝状结构:当土颗粒较细,在水中单个下沉,碰到已沉积的土粒,由于土粒之间的分子引力大于颗粒自重,则下沉土粒被吸引不再下沉,形成很大孔隙的蜂窝状结构。这种结构疏松、孔隙大,具有灵敏度高、强度低、压缩性高的特性。具有这种结构的土多为静水条件下的近代沉积物。

絮状结构:指在水中长期悬浮并在水中运动时形成的小链环状土集粒,在重力作用下下沉形成的结构。这种小链环在碰到另一小链环时被吸引,形成大链环状的絮状结构。该种结构强度低、压缩性大,因振动会破坏其天然结构,故不可用作天然地基。

2) 土的构造

土的构造是指同一土层中成分和大小相近的颗粒和颗粒集合体相互关系的特征。通常分为层状构造、分散构造、结核状构造和裂隙构造。

层状构造:土层由不同颜色、不同粒径的土组成层理,平原地区的层理通常为水平方向。层状构造是细粒土的一个重要特征。

分散构造:土层中土粒分布均匀,性质相近,如砂、卵石层为分散构造。

结核状构造:在细粒土中掺有粗颗粒或各种结核,如含礞石的粉质黏土、含砾石的冰碛土等均属结核状构造,其工程性质取决于细粒土部分。

裂隙状构造:土体中有很多不连续的小裂隙,部分硬塑与坚硬状态的黏土为此种构造。裂隙强度低,渗透性高,工程性质差。

任务 1.2 土的物理性质指标

1.2.1 工作任务

通过对土的物理性质指标的学习,能够完成以下工作任务:

(1) 认知土的物理性质指标并能根据《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)进行三个基本指标的测定;

(2) 根据基本指标计算其他导出指标。

1.2.2 相关配套知识

在任务 1.1 中介绍了土的组成和结构,特别是土的颗粒级配,但是,为了对土的基本物理性质有所了解,还需要对土的三相进行数量上的研究。在不同成分和结构的土中,土的三相之间具有不同的比例关系。

表达土的三相在质量和体积方面比例关系的指标,称为土的物理性质指标。主要指标有:天然密度、土粒密度、含水率(这三个指标需在实验室实测)和由它们计算得出的指标(干密度、饱和密度、孔隙率、孔隙比和饱和度等)。这些指标随着土体所处条件的变化而改变。土的物理性质指标是其物理性质的反映,也与其力学性质有内在联系。

1. 实测指标

为了便于说明和计算,用图 1.2 所示的土的三相组成草图来表示各部分之间的数量关系,图中符号的意义如下:

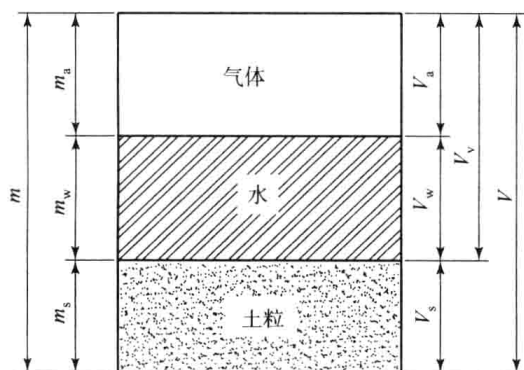


图 1.2 土的三相草图

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

1) 土的天然密度和重度

土的天然密度是指为土在天然状态下单位体积的质量,用 ρ 表示,单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 ,即:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

天然状态下土的密度变化范围较大。一般黏性土和粉土 $\rho = 1.8 \sim 2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$;砂土 $\rho = 1.6 \sim 2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$;腐殖土 $\rho = 1.5 \sim 1.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

土的重度是指土在天然状态下单位体积所受的重力,用 γ 表示,单位为 kN/m^3 ,即:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho \cdot g \quad (1.4)$$

式中 G ——土的重力(量);

g ——自由落体加速度。

2) 土粒相对密度

(1) 土粒密度(颗粒密度)

土粒密度定义为土中固体颗粒的质量 m_s 与其颗粒体积 V_s 之比,即土粒的单位体积质量,用 ρ_s 表示:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.5)$$

(2)土粒相对密度

土粒相对密度定义为土粒质量与同体积纯蒸馏水在 4℃ 时质量之比,用 d_s 表示,为无量纲量,即

$$d_s = m_s / (V_s \times \rho_{w_1}) = \rho_s / \rho_{w_1} \tag{1.6}$$

式中 d_s ——土粒相对密度;
 ρ_{w_1} ——4℃ 时纯水的密度, $\rho_{w_1} = 1 \text{ g/cm}^3$;
 ρ_s ——土粒密度。

由于土粒相对密度变化不大,通常可按经验数值选用,一般参考值见表 1.2。

表 1.2 土粒相对密度参考值

土的名称	砂土	粉土	黏性土	
			粉质黏土	黏土
土粒相对密度	2.65~2.69	2.70~2.71	2.72~2.73	2.74~2.76

3)土的含水率

土的含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比,用 w 表示,以百分数计,即:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% \tag{1.7}$$

含水率 w 是标志土的湿度的一个重要物理指标。天然土层的含水率变化范围很大,它与土的种类、埋藏条件及其所处的自然地理环境等有关。一般干的粗砂土,含水率接近于零,而饱和砂土,含水率可达 40%;坚硬的黏性土的含水率约小于 30%,而饱和状态的软黏性土含水率则可达 60%或更大。一般说来,对同一类土,当其含水率增大时,其强度就降低。

2. 其他常用指标

在测定土的天然密度 ρ 、土粒密度 ρ_s 和土的含水率 w 这三个基本指标后,就可以根据三相草图计算工程上表示土的某些特征的几种指标。

1)表示土中孔隙含量的指标

工程上常用孔隙比 e 或孔隙率 n 表示土中孔隙的含量。孔隙比是指土中孔隙体积与土粒体积之比,即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{1.8}$$

孔隙比用小数表示,它是一个重要的物理性质指标,可用来评价天然土层的密实程度。一般地, $e < 0.6$ 的土是密实的低压缩性土, $e > 1.0$ 的土是疏松的高压缩性土。

孔隙率 n 是指土中孔隙体积与土总体积之比,以百分数计,即

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \tag{1.9}$$

2)表示土中含水程度的指标

含水率 w 当然是表示土中含水程度的一个重要指标。此外,工程上往往需要知道孔隙中充满水的程度,这可用饱和度 S_r 表示。土的饱和度 S_r 是指土中被水充满的孔隙体积与孔隙总体积之比,即

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \tag{1.10}$$

砂土根据饱和度 S_r 的数值分为稍湿、潮湿和饱和三种湿度状态,其划分标准见表 1.3。显然,干土的饱和度 $S_r=0$,而完全饱和土的饱和度 $S_r=100\%$ 。

表 1.3 砂土湿度状态的划分

砂土湿度状态	稍湿	潮湿	饱和
饱和度 $S_r(\%)$	$S_r \leq 50$	$50 < S_r \leq 80$	$S_r > 80$

3) 表示土的密度和重度的几种指标

除了天然密度 ρ 以外,工程计算中还常用到如下两种土的密度:饱和密度 ρ_{sat} 和干密度 ρ_d 。土的饱和密度是指土中孔隙完全被水充满时土的密度,表示为

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1.11)$$

土的干密度是指单位土体积中土粒的质量,表示为

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1.12)$$

与上述几种土的密度相对应的有土的天然重度 γ 、饱和重度 γ_{sat} 、干重度 γ_d 。在数值上,它们等于相应的密度乘以重力加速度 g ,即 $\gamma = \rho \cdot g$, $\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} \cdot g$, $\gamma_d = \rho_d \cdot g$ 。另外,对于地下水位以下的土体,由于受到水的浮力作用,将扣除水浮力后单位体积土所受的重力称为土的浮重度,以 γ' 表示,当认为水下土是饱和时,它在数值上等于饱和重度 γ_{sat} 与水的重度 γ_w ($\gamma_w = \rho_w \cdot g$) 之差,即:

$$\gamma' = \frac{m_s g - V_v \gamma_w}{V} = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1.13)$$

显然,几种密度和重度在数值上有如下关系:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{sat}} &\geq \rho \geq \rho_d \\ \gamma_{\text{sat}} &\geq \gamma \geq \gamma_d > \gamma' \end{aligned}$$

根据图 1.3 所示的三相草图,可以导出其余各指标,令 $V_s=1$,则

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{d_s(1+w)\rho_w}{1+e} \quad (1.14)$$

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{d_s \rho_w}{1+e} = \frac{\rho}{1+w} \quad (1.15)$$

$$e = \frac{d_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{d_s(1+w)\rho_w}{\rho} - 1 \quad (1.16)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} = \frac{(d_s + e)\rho_w}{1+e} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} = \frac{m_s - (V - V_v) \rho_w}{V} \\ &= \frac{m_s + V_v \rho_w - V \rho_w}{V} = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = \frac{(d_s - 1)\rho_w}{1+e} \end{aligned} \quad (1.18)$$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e} \quad (1.19)$$

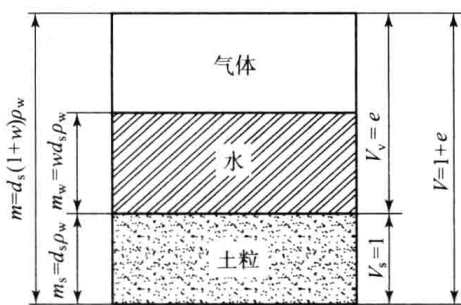


图 1.3 三相草图

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1.20)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{m_w}{V_v \rho_w} = \frac{w d_s}{e} \quad (1.21)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} \cdot g = \frac{d_s + e}{1 + e} \rho_w \cdot g = \frac{d_s + e}{1 + e} \gamma_w \quad (1.22)$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = \frac{d_s + e}{1 + e} \gamma_w - \gamma_w = \frac{d_s - 1}{1 + e} \gamma_w \quad (1.23)$$

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g = \frac{\rho}{1 + w} \cdot g = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (1.24)$$

【例题 1.1】某一原状土样,经试验测得的基本指标值如下:天然密度 $\rho = 1.67 \text{ g/cm}^3$,含水率 $w = 12.9\%$,土粒相对密度 $d_s = 2.67$ 。试求孔隙比 e 、孔隙率 n 、饱和度 S_r 、干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 以及浮密度 ρ' 。

【解】(1) $e = \frac{d_s(1+w)\rho_w}{\rho} - 1 = \frac{2.67(1+0.129)}{1.67} - 1 = 0.805$

(2) $n = \frac{e}{1+e} \times 100\% = \frac{0.805}{1+0.805} = 44.6\%$

(3) $S_r = \frac{w d_s}{e} = \frac{0.129 \times 2.67}{0.805} = 0.43$

(4) $\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{1.67}{1+0.129} = 1.48 (\text{g/cm}^3)$

(5) $\rho_{\text{sat}} = \frac{(d_s + e)\rho_w}{1 + e} = \frac{2.67 + 0.805}{1 + 0.805} = 1.93 (\text{g/cm}^3)$

(6) $\rho' = \rho_{\text{sat}} - \rho_w = 1.93 - 1 = 0.93 (\text{g/cm}^3)$

(7) $w = \frac{V_v \rho_w}{m_s} \times 100\% = \frac{0.354 \times 10}{1.744} \times 100\% = 20.3\%$

任务 1.3 土的物理状态指标

1.3.1 工作任务

通过对土的物理状态指标的学习,能够完成以下工作任务:

- (1)掌握土的物理状态指标并能进行指标的测定;
- (2)根据所学的知识分析土的物理状态。

1.3.2 相关配套知识

1.3.2.1 无黏性土物理状态

无黏性土一般指碎石土和砂土,粉土属于砂土和黏性土的过渡类型,但是其物质组成、结构及物理力学性质主要接近砂土,故列入无黏性土中讨论。

无黏性土的紧密状态是判定其工程性质的重要指标,它综合反映了无黏性土颗粒的岩石和矿物组成、颗粒级配、颗粒形状和排列等对其工程性质的影响。一般说来,无论在静荷载或动荷载作用下,密实状态的无黏性土与其疏松状态的表现都很不一样。密实者具有较高的强

度,结构稳定,压缩性小;而疏松者则强度较低,稳定性差,压缩性较大。

1. 决定无黏性土密实状态的因素

(1)与无黏性土的受荷历史和形成环境有关。例如形成年代较老或有超压密历史的无黏性土,相对密实度较大;洪积、坡积的比冲积、冰积和海积的无黏性土相对密实度较小。

(2)与无黏性土的组成颗粒、矿物成分及颗粒形状等因素有关。

组成颗粒愈粗,孔隙比愈小,土较密实。而组成颗粒愈细的,则孔隙比愈大,土愈疏松。

组成颗粒不均匀系数愈小,则粒间不易相互填充,使相对密实度较小;组成颗粒不均匀系数愈大,则小颗粒可以填充大颗粒孔隙,使相对密实度愈大。

当颗粒组成相同时,主要由云母组成的无黏性土(例如砂土)的孔隙比,要远大于主要由石英、长石组成的无黏性土。即主要由片状颗粒组成的土的孔隙比远大于由柱状和粒状颗粒组成的土。

所以,无黏性土的密实状态,不仅是从定量方面判定其工程性质的重要标志,而且在实质上也综合反映了无黏性土的矿物组成、颗粒级配及颗粒形状等内在因素对其工程性质的影响。因此,《铁路桥涵地基与基础设计规范》(TB 10002.5—2005)对一般工程采用相对密实度或孔隙比作为确定碎石土、砂土和粉土地基承载力基本值的主要指标是比较合适的。

2. 无黏性土紧密状态指标及其确定方法

1)砂土的密实状态

砂土的密实状态可以分别用孔隙比 e 、相对密实度 D_r 和标准贯入锤击数 N 进行评价。

(1)天然孔隙比 e

采用天然孔隙比作为砂土密实状态的分类指标,具体划分标准见表 1.4。

表 1.4 按天然孔隙比 e 划分砂土的紧密状态

砂土名称	实 密	中 密	稍 密	疏 松
砾砂、粗砂	<0.6	$0.60\sim0.75$	$0.75\sim0.85$	>0.85
细砂、粉砂	<0.7	$0.70\sim0.85$	$0.85\sim0.95$	>0.95

但是,采用天然孔隙比判定砂土的紧密状态,则要采取原状砂样,这在工程勘察中是比较困难的问题,特别是对位于地下水位以下的砂层采取原状砂样困难更多。

(2)相对密实度 D_r

采用天然孔隙比 e 的大小来判别砂土的密实度是一种较简捷的方法,但不足之处是它不能反映砂土的颗粒级配和颗粒形状对密实程度的影响。实践表明,有时较疏松的级配良好的砂土孔隙比,比较密实的颗粒均匀的砂土孔隙比还要小。

工程上为了更好地表明砂土所处的密实状态,采用将现场土的孔隙比 e 与该种土所能达到最密实时的孔隙比 $e_{\min}$ 和最松散时的孔隙比 $e_{\max}$ 相比较的办法,来表示孔隙比为 e 时土的密实程度。这种度量密实程度的指标称为相对密实度 D_r ,定义为

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1.25)$$

土的最大孔隙比 $e_{\max}$ 的测定方法是松散的风干土样,通过长颈漏斗轻轻地倒入容器,求得土的最小干密度再经换算确定;土的最小孔隙比 $e_{\min}$ 的测定方法是将松散的风干土样分批装入金属容器内,按规定的方法进行振动或锤击夯实,直至密实度不再提高,求得最大干密度