



# Soil Mechanics and Subgrade

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 土木工程类

# 土力学与路基

主 编 田亚护  
副主编 沈宇鹏  
主 审 刘建坤



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

# 土力学与路基

田亚护 主 编

沈宇鹏 副主编

刘建坤 主 审

图例 (a) 图例 (b) 图例 (c) 图例 (d)

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书系统介绍土力学与路基工程的基本知识,全书共14章,前7章介绍土力学的内容,包括土的组成、性质与工程分类,土的压实原理与填筑,土的渗透性与渗流,土体中的应力计算,土的压缩与固结,土的抗剪强度和地基承载力;后7章为路基部分,内容包括路基的构造,路基的受力与变形,路基排水与防护,路基边坡稳定性分析,路基挡土墙设计,特殊条件下的路基和既有路基状态评价及病害治理。

本书作为高等学校轨道交通类道路与铁道工程专业全日制或在职学习的本、专科学生的教学用书,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

土力学与路基/田亚护主编. —北京:北京交通大学出版社,2012.10

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-1195-0

I. ① 土… II. ① 田… III. ① 土力学—高等学校—教材 ② 铁路路基—高等学校—教材 IV. ① TU43 ② U213.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第215352号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:林欣

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:17.25 字数:431千字

版 次:2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1195-0/TU·95

印 数:1~3 000册 定价:36.00元

---

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

# 高等教育轨道交通“十二五”规划教材·土木工程类

## 编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：张顶立 陈 庚

委 员：（按姓氏笔画排序）

王连俊 毛 军 白 雁

李清立 杨维国 张鸿儒

陈 岚 朋改非 赵国平

贾 影 夏 禾 黄海明

## 编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：贾慧娟

成 员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥 郝建英 徐 琤

# 出版说明

为促进高等轨道交通专业交通土木工程类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学交通土木建筑工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体,联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·土木工程类”教材。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本套教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。

本套教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《材料力学》、《结构力学》、《土木工程材料》、《水力学》、《工程经济学》、《工程地质》、《隧道工程》、《房屋建筑学》、《建设项目管理》、《混凝土结构设计原理》、《钢结构设计原理》、《建筑施工技术》、《施工组织及概预算》、《工程招投标与合同管理》、《建设工程监理》、《铁路选线》、《土力学与路基》、《桥梁工程》、《地基基础》、《结构设计原理》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通土木工程专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会  
2012年8月

# 总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通运输行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输行业带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输具有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,取得了快速的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到18万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加,以及新技术的开发与引进,管理和技术人员队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有职工也要进行知识更新。企业急需培养一支符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室和“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生参考和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和交通土木工程四个系列,涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域,每本教材都是由该领域的

专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研、精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘及编辑人员的辛勤努力，这套丛书才得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会

2012年8月

# 前 言

本书是根据北京交通大学高等教育轨道交通类“十二五”规划系列教材而编写的土木工程类教学用书。本书作为高等学校轨道交通类道路与铁道工程专业全日制或在职学习的本专科教学用书，在编写时注重考虑了以培养有较强技能的应用型人才为目的，侧重实际工作岗位操作技能的培养。

近年来，随着国内公路、铁路及城市轨道交通基础设施建设的飞速发展和道路技术标准的提高，路基也越来越成为道路工程中的一个重要环节。因此，对于从事道路工程专业的技术人员来说，迫切需要掌握相关原理和实用技术与方法。道路工程中的路基一般是由松散的土体填筑或在土体中开挖而成的土工构筑物，其质量的好坏与土体的性质密切相关，而土又因其颗粒成分、土中的水分和外界条件等因素的变化会表现出不同的工程性质，从而导致实际运营中路基工程的质量不同。因此，深刻理解和掌握土的工程性质、土体的强度及变形等理论，对于路基工程课程的学习和深刻理解，以及路基工程的设计、施工及养护维修都有重要作用。

目前，在高等教育土木（道路与铁道）工程专业教学中，“土力学”课程一般是作为土木工程专业必修的专业基础课，而“路基工程”课程一般是作为道路与铁道工程专业必修的专业课程，这两门课程是先后分开讲授。而根据编者的教学实践，分开讲授会使得教学过程中学生对于“路基工程”课程的学习较难做到深刻理解和系统掌握；而土力学与路基工程作为一门课程来整体学习，可使学生更易在教学及学习过程中理解和掌握土力学知识点在路基工程实际问题中的应用。

为了使學生能系统理解和掌握路基工程和土力学知识点之间的理论关系，本教材对既有土力学和路基工程理论及最新技术标准等方面的学术成果进行整理。本书由北京交通大学田亚护任主编，沈宇鹏任副主编，刘建坤教授任主审。在本书的编写过程中，得到了北京交通大学陈立宏、陈佳宇和荆鹏等人的帮助，在此一致表示感谢。

由于编者水平所限，时间仓促，书中不免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编者  
2012年6月

# 目 录

|                    |    |                 |     |
|--------------------|----|-----------------|-----|
| 绪论                 | 1  | 5.2 土的压缩性       | 75  |
| 第1章 土的组成、性质与工程分类   | 3  | 5.3 地基沉降的计算     | 82  |
| 1.1 概述             | 3  | 5.4 土的固结理论      | 88  |
| 1.2 土的物质组成         | 4  | 习题              | 91  |
| 1.3 土的物理性质指标       | 10 | 第6章 土的抗剪强度      | 93  |
| 1.4 土的物理状态指标       | 16 | 6.1 概述          | 93  |
| 1.5 土的工程分类         | 20 | 6.2 土的强度理论      | 94  |
| 1.6 土的结构与构造        | 23 | 6.3 土的抗剪强度测定方法  | 97  |
| 习题                 | 24 | 6.4 应力路径的概念     | 104 |
| 第2章 土的压实原理与路基填筑    | 26 | 习题              | 105 |
| 2.1 土的压实原理         | 26 | 第7章 地基承载力       | 106 |
| 2.2 压实土的优点         | 29 | 7.1 概述          | 106 |
| 2.3 影响土压实性的因素      | 32 | 7.2 地基的变形和失稳    | 107 |
| 2.4 路基填土的压实        | 34 | 7.3 确定地基承载力的方法  | 109 |
| 习题                 | 39 | 习题              | 121 |
| 第3章 土的渗透性与渗流       | 40 | 第8章 路基的构造       | 122 |
| 3.1 概述             | 40 | 8.1 一般铁路路基      | 122 |
| 3.2 土的渗透性和渗透理论     | 40 | 8.2 高速铁路路基      | 135 |
| 3.3 土中渗流的作用力及渗透变形  | 48 | 8.3 一般公路路基      | 141 |
| 习题                 | 52 | 习题              | 150 |
| 第4章 土体中的应力计算       | 53 | 第9章 路基的受力与变形    | 151 |
| 4.1 概述             | 53 | 9.1 铁路路基受力状况    | 151 |
| 4.2 土体中的自重应力计算     | 53 | 9.2 公路路基受力状况    | 157 |
| 4.3 基础底面压力         | 56 | 9.3 路基的变形与临界动应力 | 159 |
| 4.4 空间问题的附加应力计算    | 60 | 习题              | 164 |
| 4.5 平面问题的附加应力计算    | 68 | 第10章 路基排水与防护    | 165 |
| 4.6 成层地基中附加应力的分布规律 | 71 | 10.1 路基排水       | 165 |
| 4.7 土中的有效应力原理      | 72 | 10.2 路基防护       | 171 |
| 习题                 | 74 | 习题              | 177 |
| 第5章 土的压缩与固结        | 75 | 第11章 路基边坡稳定性分析  | 178 |
| 5.1 概述             | 75 | 11.1 路基边坡的破坏形式  | 178 |

|               |                    |     |               |                           |     |
|---------------|--------------------|-----|---------------|---------------------------|-----|
| 11.2          | 直线滑面的边坡稳定性分析       | 179 | 13.3          | 黄土路基                      | 234 |
| 11.3          | 圆弧滑面的边坡稳定性分析       | 180 | 13.4          | 盐渍土路基                     | 238 |
| 11.4          | 任意形状滑面的边坡稳定性<br>分析 | 186 | 13.5          | 冻土地区路基                    | 242 |
|               | 习题                 | 187 |               | 习题                        | 245 |
| <b>第 12 章</b> | <b>路基挡土墙</b>       | 188 | <b>第 14 章</b> | <b>既有路基状态评价及<br/>病害治理</b> | 246 |
| 12.1          | 概述                 | 188 | 14.1          | 既有路基状态评价                  | 246 |
| 12.2          | 土压力计算              | 192 | 14.2          | 路基常见病害及治理                 | 248 |
| 12.3          | 重力式挡土墙设计           | 212 |               | 习题                        | 262 |
|               | 习题                 | 217 | <b>附录 A</b>   | <b>模拟试题</b>               | 263 |
| <b>第 13 章</b> | <b>特殊条件下的路基</b>    | 219 | A1            | 模拟试题一                     | 263 |
| 13.1          | 软土路基               | 219 | A2            | 模拟试题二                     | 264 |
| 13.2          | 膨胀土路基              | 230 | <b>参考文献</b>   |                           | 266 |

# 绪 论

土力学的研究对象是“工程土”。土是由不同成因的岩石在风化作用（物理风化、化学风化和生物风化）后经重力、流水、冰川和风力等搬运、沉积而成的自然历史产物。土的组成及工程性质与母岩的成分、风化的性质，以及搬运、沉积的环境条件有着密切的关系。土的种类很多，按照沉积条件可分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖积土、海积土和风积土；按有机质含量可分为有机土、无机土、泥炭质土和泥炭；按颗粒级配或塑性指数可分为碎石土、砂土、粉土和黏性土；根据工程性质的特殊性又可分为软黏土、杂填土、冲填土、素填土、黄土、膨胀土、冻土、盐渍土等。土是一种特殊的变形体材料，它既服从连续介质力学的一般规律，又有其特殊的应力—应变关系和特殊的强度及变形规律，形成了土力学不同于一般固体力学的分析方法和计算方法。因此，研究土的工程问题不能不以工程地质学为基础，从宏观的、历史的角度分析各种特殊工程性质的形成机理及其变化的规律。土力学主要研究土的各种基本性质，土的强度理论、渗透理论和变形理论，为工程建设服务。

由于土的性质复杂性，许多土力学的计算理论和公式都是在某些假设和忽略某些因素的前提下建立的，如土的应力计算、土的压缩变形与地基固结沉降计算方法、土的抗剪强度理论等。一方面，应当了解这些理论难以模拟、概括地基土各种力学性状全貌的不完善之处，注意这些理论在工程中的适用条件；另一方面，这些理论和公式仍然是目前解决工程实际问题的理论依据，它们在长期的工程实践中发挥着不可替代的作用，并且在不断进行完善与发展。

路基是经过开挖或填筑而形成的土工建筑物。在铁路上，路基是轨道的基础，其主要作用是满足轨道的铺设、承受轨道和列车产生的载荷、提供列车运营的必要条件。在公路上，路基是路面的基础，它承受着本身土体的自重和路面结构的重量，同时还承受由路面传递下来的行车荷载。无论在铁路还是公路工程中，路基工程具有以下特点。①材料复杂。路基工程主要以土为材料，其力学性质具有极大的不确定性，土的成因、成分、颗粒大小、级配、结构不同，其力学性质就会明显不同，在计算路基变形和稳定性分析中所用的参数就会不同。因此，能否正确确定土的应力应变关系和计算参数，能否正确预报路基的变形是路基设计计算的关键。②路基受环境影响大。路基完全暴露在大自然中，很容易受到气候、水和四季温度变化的影响。例如，膨胀土路基干缩湿胀会引起边坡破坏；北方地区路基受寒冷的影响会引起冻胀；黄泛区粉土路基经常由于雨水的影响而遭受潜蚀破坏；西北一些地区的路基容易受到风蚀沙埋等。③路基同时承受动、静载荷的作用。路基上的轨道或路面结构及附属结构物产生的静载荷、运行的列车或车辆产生的动载荷是路基病害产生的重要原因。

根据路基工程的特点，为使路基正常工作，路基除断面尺寸应符合设计标准外，还应满

足以下要求。

### 1. 路基必须具有足够的整体稳定性

路建成后，改变了原来地面的天然平衡状态。在土质不良地区，修筑路基则可能使原地面的不平衡状态加剧；开挖路堑使两侧边坡土体失去支承力，可能导致边坡溜坍或滑坡；天然坡面特别是陡坡面上的路堤，可能因自重而下滑。对于上述种种情况，都必须因地制宜地采取一定措施以保证路基的整体稳定性。

### 2. 路基必须具有足够的强度和刚度

强度和刚度是两个不同的力学特性，两者既有区别，又有联系。强度是指路基抵抗应力作用和避免破坏的能力，刚度则是指路基抵抗变形的能力。

为防止路基在车辆荷载及各种自然因素作用下发生破坏与失稳，同时给轨道或路面提供一个坚实的基础，必须针对具体情况，采取一定的措施保证路基具有足够的强度。同时，为保证路基在荷载作用下，不致产生超过允许范围的变形，也要求路基具有一定的刚度。

### 3. 路基必须具有足够的水热稳定性

路基在地表水和地下水作用下，其强度会降低。特别是在季节性冰冻地区，由于周期性的冻融作用，在水和负温度的共同作用下，土体会发生冻胀，造成轨面或路面变形，春融期局部土层过湿软化，路基强度急剧下降。因此，不仅要求路基有足够的刚度和强度，而且还应保证在最不利的水热条件下，在冰冻期路基不致冻胀和在春融期强度不致发生显著降低，这就要求路基具有足够的水热稳定性。

路基工程的主要研究内容包括路基本体工程、路基防护工程、路基排水工程、路基支挡和加固工程，以及路基常见病害及整治方法等。

# 第1章

## 土的组成、性质与工程分类

### 【本章内容概要】

本章主要讨论土的物质组成,以及土的物理性质指标,包括土的三相组成、土的三相指标、土的换算物理性质指标,还介绍土的物理状态指标、土的工程分类和土的结构等内容。这些内容是学习土力学原理和路基工程设计与施工技术所必需的基本知识,也是评价土的工程性质、分析与解决土的工程技术问题的最基本内容。

### 【本章学习重点与难点】

学习重点:土的三相组成、土的三相指标和土的物理性质指标之间的换算关系;能绘制土颗粒的级配曲线,并可评价土的工程性质。

学习难点:土的三相指标计算和通过土颗粒的级配曲线评价土的工程性质。

### 1.1 概 述

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的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。

土的物质成分包括作为土骨架的固态矿物颗粒、孔隙中的水及其溶解物质和气体。因此,土是由颗粒(固相)、水(液相)和气(气相)所组成的三相体系。各种土的颗粒大小和矿物成分差别很大,土的三相间的数量比例也不尽相同,而且土粒与其周围的水又发生了复杂的物理化学作用。所以,要研究土的性质就必须了解土的三相组成,以及在天然状态下土的结构和构造等特征。

土的三相组成、物质的性质、相对含量,以及土的结构构造等各种因素,必然在土的轻重、松密、干湿、软硬等一系列物理性质和状态上有不同的反映。土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质,所以物理性质是土的最基本的工程特性。

本章将介绍土的物质组成、土的结构,以及土的物理性质和土的分类。它们对土的力学性质和渗透性质起决定性作用,并有助于对土的表现和行为进行深入了解,增加对土所表现的力学性质的内在原因和机理的认识。

## 1.2 土的物质组成

土由固体颗粒、液体水和气体 3 部分组成,称为土的三相组成。土中的固体矿物(有时含有有机质,如半腐烂和全腐烂的植物物质和动物残骸等)构成骨架,称为土骨架。土骨架之间贯穿着孔隙,孔隙中有时充填着水和空气,三相比不同,土的状态和工程性质也不相同。例如,土体完全被气体充满,称为干土,干黏土较硬,干砂呈松散状态;土体一部分被气体占据,另一部分被液体占据,称为湿土,湿的黏土多为可塑状态;土体完全被液体充满,称为饱和土,饱和粉细砂受震动可能产生液化,而饱和黏土地基沉降需很长时间才能稳定。

由此可以看出,这 3 部分本身的性质及它们之间的比例关系和相互作用关系决定着土的物理性质。因此,研究土的工程性质,首先必须从最基本的、组成土的三相,即固体颗粒、液体水和气体本身开始研究。

### 1.2.1 固体颗粒

固体颗粒构成土骨架,土中固体颗粒的大小、形状、矿物成分、颗粒的相互搭配情况、颗粒与水的相互作用及气体在孔隙中的相对含量是影响土的物理、力学性质的主要因素。因此,土的固体颗粒对土的物理、力学性质起决定性作用。研究固体颗粒就要分析粒径的大小及其在土中所占的百分比,称为土的粒径级配(粒度成分)。此外,还要研究固体颗粒的矿物成分,以及颗粒的形状。这三者之间密切相关。

#### 1. 颗粒的矿物成分及粒组的划分

土的颗粒一般由各种矿物组成,也含有少量有机质。土颗粒的矿物成分可以分为原生矿物和次生矿物两种。

(1) 原生矿物。即物理风化所产生的粗颗粒矿物,它们就是原来原始的矿物成分。一般粗颗粒的矿物成分都是原生矿物,形状多为粒状,如长石、石英、角闪石和云母等。

(2) 次生矿物。即化学风化后产生的矿物,一般颗粒很细的土,其成分大多是次生矿物,形状多为片状和针状,如高岭土、伊利土和蒙脱土等。矿物成分对黏性土的性质影响很大。例如,黏性土中含有大量的蒙脱土时,这种土就具有强烈的膨胀性,同时,它的收缩性和压缩性也很大。

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。颗粒的粗细对土的性质影响很大,颗粒愈细,单位体积内颗粒的表面积就愈大,其与水接触的面积就愈多,颗粒的相互作用就愈强。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，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，这种组别称为粒组。各个粒组随着分界尺寸的不同而呈现出一定质的变化。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各国、各部门并不完全一致。表1-1和表1-2分别为我国铁路和公路部门关于路基填土的粒组划分方法。

表 1-1 我国铁路部门关于土的颗粒分组

| 颗 粒 名 称          |   | 粒径 $d/\text{mm}$        |
|------------------|---|-------------------------|
| 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 | $60<d\leq 200$          |
|                  | 中 | $40<d\leq 60$           |
|                  | 小 | $20<d\leq 40$           |
| 圆砾（浑圆、圆棱）或角砾     | 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               |   | $0.005\leq d\leq 0.075$ |
| 黏粒               |   | $d<0.005$               |

表 1-2 我国公路部门关于土的颗粒分组

mm

| 巨粒组        |             | 粗粒组   |   |   |     |      |       | 细粒组   |    |
|------------|-------------|-------|---|---|-----|------|-------|-------|----|
| 漂石<br>（块石） | 卵石<br>（小块石） | 砾（角砾） |   |   | 砂   |      |       | 粉粒    | 黏粒 |
|            |             | 粗     | 中 | 细 | 粗   | 中    | 细     |       |    |
| 200        | 60          | 20    | 5 | 2 | 0.5 | 0.25 | 0.075 | 0.002 |    |

2. 颗粒级配和颗粒分析

为了具体说明某种土的组成情况，不仅要了解土颗粒的粗细，更要了解土中各种颗粒所占的比例。当然，不仅要知道每一种颗粒的相对含量，而且要了解不同粒组在混合土中所占的比例，因为土的性质不仅取决于所含颗粒的粗细，更取决于不同粒组所占的比例，即土中各粒组的质量占总质量的百分数，这个百分数通常称为土的颗粒级配。进行颗粒大小分析的目的就是确定土的颗粒级配，即确定土中各粒组颗粒的相对含量。颗粒级配是影响土（特别是无黏性土）工程性质的主要因素，因此常常用来作为土的分类和定义的标准。进行颗粒分析的方法有两种：对于粒径大于 0.075 mm，但小于 60 mm 的粗粒土，可用筛分法；对于小

于 0.075 mm 的细粒土可用密度计法。

筛分法的主要设备是一套分析筛。这套筛子中的各筛按筛孔孔径大小的不同自上至下排列, 上加顶盖、下加底盘, 叠在一起。分析筛有粗筛和细筛两种, 粗筛的孔径为 60、40、20、10、5 和 2 mm, 细筛的孔径为 2、1、0.5、0.25 和 0.075 mm。试验时, 将烘干或风干的土样称重后置于振筛机上, 充分振动后依次称出留在各层筛子上的土粒质量, 计算出各粒组的相对含量及小于某一粒径的土颗粒含量百分数。

斯托克斯 (Stokes) 定理认为, 球状的细颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比。因此, 不同粒径的土在水中的下沉速度也就不同。根据这一原理, 可以将小于 0.075 mm 的细颗粒土进一步分组, 密度计法就是基于这种原理。在《土工试验规程》或各部门的土工试验规范中都有详细介绍密度计法的具体操作过程及注意事项, 本书不再详述。

对于颗粒大小分析的试验结果, 可以用以下两种方法表达。

### 1) 表格法

表格法是列表说明土样中各粒组的土质量占土样总质量的百分数, 其虽简单但不方便评价土中粒径含量的组合情况。表 1-3 是根据试验所得数据, 表 1-4 为列出的土样颗粒级配表。

表 1-3 粗粒部分筛分试验记录

| 孔径/mm         | 10    | 5     | 2     | 1     | 0.5   | 0.25  | 0.1   | 0.075 | <0.075 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 各层筛子上土粒质量/g   | 971.3 | 739.7 | 622.9 | 177.3 | 255.4 | 157.3 | 173.5 | 40.3  | 120.8  |
| 各层筛子上土粒含量/%   | 29.8  | 22.7  | 19.1  | 5.4   | 7.9   | 4.8   | 5.3   | 1.2   | 3.7    |
| 小于各层孔径的土粒含量/% | 70.2  | 47.5  | 28.4  | 22.9  | 15.1  | 10.3  | 4.9   | 3.7   | 0      |

表 1-4 颗粒级配

| 粒径/mm   | >10  | 5~10 | 2~5  | 1~2 | 0.5~1 | 0.25~0.5 | 0.1~0.25 | 0.075~0.1 | <0.075 |
|---------|------|------|------|-----|-------|----------|----------|-----------|--------|
| 粒组的含量/% | 29.8 | 22.7 | 19.1 | 5.4 | 7.8   | 4.8      | 5.3      | 1.2       | 3.7    |

### 2) 颗粒级配曲线法

颗粒级配曲线法是一种图示的方法, 通常用半对数纸绘制, 如图 1-1 所示。图 1-1 中颗粒级配曲线的纵坐标表示小于某粒径的土颗粒含量占总土样的百分数, 这个百分数是一个

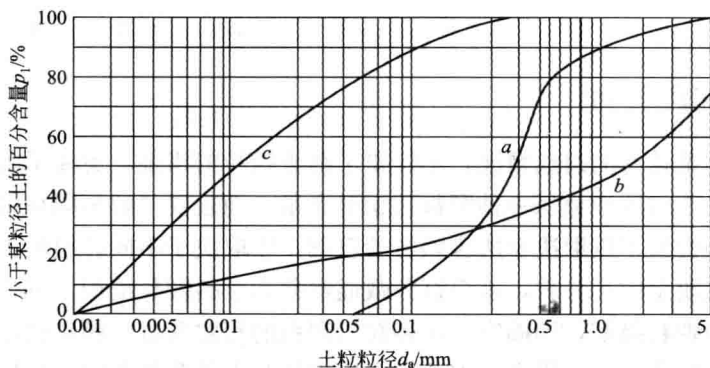


图 1-1 土的颗粒级配曲线 (a、b、c 表示 3 种不同土样的级配曲线)

积累百分数,表示的是所有小于该粒径的各粒组含量百分数之和。由于土中所含粒组的粒径往往跨度很大、相差悬殊,横坐标一般采用对数比例尺表示某一粒径。

土的颗粒级配曲线是工程上最常用的曲线之一,由此曲线的连续性特征及走势的陡缓可以直接判断土的颗粒粗细、颗粒分布的均匀程度和颗粒级配的优劣,从而评价土的工程性质。

在分析级配曲线时,经常用到的几个典型粒径为  $d_{50}$ 、 $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ 。土颗粒的粗细一般用  $d_{50}$  平均粒径表示,它的物理意义是土中大于此粒径和小于此粒径的土粒含量各占 50%,该数值大则整体上颗粒较粗;反之,则整体上颗粒较细。 $d_{10}$  表示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  $d_{10}$ ;小于某粒径的土粒质量累计百分数为 30% 时的粒径用  $d_{30}$  表示;小于某粒径的土粒质量累计百分数为 60% 时的粒径用  $d_{60}$  表示。

上述 3 种粒径之间的关系,构成以下级配指标。

不均匀系数:

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

曲率系数:

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

$C_u$  是描述土颗粒均匀性的,  $C_u$  越大,土颗粒分布越不均匀。 $C_c$  是描述土颗粒级配曲线的曲率情况的,当  $C_c > 3$  时,说明曲率变化较快,土较均匀;当  $C_c < 1$  时,说明曲线变化过于平缓,说明在此段内粒组含量较少。

如果  $C_u$  越大,  $d_{60}$  和  $d_{10}$  就相距越远,那么土颗粒的级配是连续的,表示土中含有粗细不同的粒组,所含颗粒的直径相差就越大,土越不均匀。体现在级配曲线上就是  $C_u$  越大,曲线就越平缓;反之,则曲线越陡峭。

在工程上,常用以下标准来衡量土的级配和性质。

(1) 级配曲线连续光滑,不存在平台段,坡度平缓,土粒粗细颗粒连续,能同时满足  $C_u > 5$  和  $C_c = 1 \sim 3$  两个条件的土,属于级配良好的土,比较容易获得较大的密实度,具有较小的压缩性和较大的强度,工程性质优良,如图 1-1 中的曲线  $b$ 。

(2) 级配曲线连续光滑,不存在平台段,但坡度陡峭,土粒粗细颗粒连续但较均匀;或者级配曲线虽然平缓但存在平台段,土粒粗细虽然不均匀,但存在不连续粒径。这两种情况体现为不能同时满足  $C_u > 5$  及  $C_c = 1 \sim 3$  两个条件,属于级配不良土,不容易获得较高的密实度,工程性质不好,如图 1-1 中的曲线  $a$  和曲线  $c$ 。

## 1.2.2 土中的水

在天然土的孔隙中通常含有一定量的水,它可以处于各种不同的状态。土中的水可以处于液态、固态或气态 3 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。研究土中的水,必须考虑到水的存在状态及其与土粒的相互作用。