



交通土建高职高专统编教材

土质与土力学

(第二版)



Tuzhi Yu Tuli Xue

孟祥波 主编

高大钊 [同济大学] 主审



人民交通出版社

China Communications Press

交通土建高职高专统编教材

土质与土力学

Tuzhi Yu Tulixue

(第二版)

孟祥波 主编
高大钊[同济大学] 主审

人民交通出版社

目次 (CONTENTS)

第一章 绪论 1
第二章 土的组成 10
第三章 土的物理性质指标 25
第四章 土的液限、塑限和液性指数 45
第五章 土的压缩性 65
第六章 土的渗透性 85
第七章 土体中的应力 105
第八章 土体中的应变 125
第九章 土体中的本构关系 145
第十章 土体中的本构关系 165
第十一章 土体中的本构关系 185
第十二章 土体中的本构关系 205

ISBN 978-7-114-02683-3
定价：21.00元

中国标准书号：15110·10000

地址：北京人民交通出版社

电话：(010) 88382281

邮编：100000

印刷：北京人民交通出版社

开本：787×1092 1/16

印张：13.75

字数：336千字

版次：2002年8月第1版

印次：2002年8月第1次印刷

内 容 提 要

本教材为 21 世纪交通版交通土建高职高专统编教材,共九章,包括土质学和土力学两部分内容。土质学部分着重探讨土的物理性质及工程分类,考虑工程实践需要和高职教材的特点,介绍了土的野外鉴别、特殊土简介、土的动力性质和压实性。土力学部分主要介绍了土中应力计算、基础沉降计算、地基承载力计算、土压力计算和土坡稳定分析的基本方法,着重论述了土的压缩性指标和土的抗剪强度指标的测定方法,初浅探讨了有效应力原理、单向固结理论、莫尔-库伦理论破坏准则。

本教材主要作为高职高专道路与桥梁工程技术专业等交通土建类专业的教材,亦可供其他专业师生及工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

土质与土力学/孟祥波主编. —2 版. —北京: 人民交通出版社, 2005.8 (2008.1 重印)

交通土建高职高专统编教材

ISBN 978-7-114-05683-3

I. 土… II. 孟… III. ①土质学-高等学校: 技术学校-教材②土力学-高等学校: 技术学校-教材
IV. ①P642.1②TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086657 号

书 名: 交通土建高职高专统编教材
土质与土力学 (第二版)

著 者: 孟祥波

责任编辑: 卢仲贤

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 13.75

字 数: 336 千

版 次: 2002 年 8 月 第 1 版

2005 年 8 月 第 2 版

印 次: 2008 年 1 月 第 2 版 第 10 次印刷 总第 18 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-05683-3

印 数: 81001-86000 册

定 价: 21.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

21 世纪交通版
交通土建高职高专统编教材编审委员会

主任委员 张洪滨(吉林交通职业技术学院)

副主任委员 (按姓氏笔画为序)

田 平(河北交通职业技术学院)
张润虎(贵州交通职业技术学院)
陆春其(南京交通职业技术学院)
钟建民(山西交通职业技术学院)
彭富强(湖南交通职业技术学院)
谢远光(重庆交通职业技术学院)

刘建明(青海交通职业技术学院)
李全文(四川交通职业技术学院)
俞高明(安徽交通职业技术学院)
郭发忠(浙江交通职业技术学院)
程兴新(陕西交通职业技术学院)

委 员 (按姓氏笔画为序)

王 彤(辽宁交通高等专科学校)
王连威(吉林交通职业技术学院)
王常才(安徽交通职业技术学院)
白淑毅(广东交通职业技术学院)
张世海(甘肃交通职业技术学院)
张保成(内蒙古大学职业技术学院)
张郃生(河北交通职业技术学院)
李仕东(鲁东大学交通学院)
李加林(广东交通职业技术学院)
沈建康(徐州建筑职业技术学院)
赵树青(山东交通职业技术学院)
黄万才(四川交通职业技术学院)
周志坚(福建交通职业技术学院)
姚 丽(辽宁交通高等专科学校)
赵永平(黑龙江工程学院)
曹雪梅(四川交通职业技术学院)

王 亮(云南交通职业技术学院)
王海春(青海交通职业技术学院)
王穗平(河南交通职业技术学院)
刘 武(江西交通职业技术学院)
孙元桃(宁夏交通职业技术学院)
张美珍(山西交通职业技术学院)
李中秋(河北交通职业技术学院)
李绪梅(新疆交通职业技术学院)
杨晓丰(黑龙江工程学院)
陈方晔(湖北交通职业技术学院)
周传林(南京交通职业技术学院)
金 桃(贵州交通职业技术学院)
金仲秋(浙江交通职业技术学院)
夏连学(河南交通职业技术学院)
梁金江(广西交通职业技术学院)
薛安顺(陕西交通职业技术学院)

秘 书 长 卢仲贤(人民交通出版社)

总 序

针对高职高专教材建设与发展问题,教育部在《关于加强高职高专教材建设的若干意见》中明确指出:先用2至3年时间,解决好高职高专教材的有无问题。再用2至3年时间,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材,形成一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

2001年7月,由人民交通出版社发起组织,15所交通高职院校的路桥系主任和骨干教师相聚昆明,研讨交通土建高职高专教材的建设规划,提出了28种高职高专教材的编写与出版计划。后在交通部科教司路桥工程学科委员会的具体指导下,在人民交通出版社精心安排、精心组织下,于2002年7月前完成了28种路桥专业高职高专教材出版工作。

这套教材的出版发行首先解决了交通高职教育教材的有无问题,有力支持了路桥专业高职教育的顺利发展,也受到了全国各高职院校的普遍欢迎。

随着高职教育教学改革的深入发展、高职教学经验的丰富与积累,以及本行业有关技术标准规范的更新,本套教材在使用了2至3轮的基础上,对教材适时进行修订是十分必要的,时机也是成熟的。

2004年8月,人民交通出版社在新疆乌鲁木齐召开了有19所交通高职院校领导、系主任、骨干教师共41人参加的教材修订研讨会。会议商定了本套教材修订的基本原则、方法和具体要求。会议决定本套教材更名为“交通土建高职高专统编教材”,并成立了以吉林交通职业技术学院张洪滨为主任委员的“交通土建高职高专统编教材编审委员会”,全面负责本套教材的修订与后续补充教材的建设工作。

经修订后,本套高职高专教材具有以下特色:

——顺应交通高职院校人才培养模式和教学内容体系改革的要求,按照专业培养目标,进一步加强教材内容的针对性和实用性,适应学制转变,合理精简和完善内容,调整教材体系,贴近模块化教学的要求;

——实施开放式的教材编审模式,聘请高等院校知名教授和生产一线专家直接介入教材的编审工作,更加有利于对教材基本理论的严格把关,有利于反映科研生产一线的最新技术,也使得技能培训与实际密切结合;

——全面反映2003年以来的公路工程行业已颁布实施的新标准规范;

——服务于师生、服务于教学,重点突出,逐章均配有思考题或习题,并给出本教材的参考教学大纲;

——注重学生基本素质、基本能力的培养,教材从内容上、形式上力求更加贴近实际。

本套教材的出版与修订再版始终得到了交通部科教司路桥工程学科委员会和全国交通职教路桥专业委员会的指导与支持,凝聚了交通行业专家、教师群体的智慧和辛勤劳动。

愿我们共同向精品教材的目标持续努力。

向所有关心、支持本套教材编写出版的各级领导、专家、教师、同学和朋友们致以敬意和谢意。

交通土建高职高专统编教材编审委员会

人民交通出版社

2005年5月



第一版前言

本教材根据2001年7月在昆明召开的全国交通职教路桥专业教学与教材建设研讨会上讨论的《土质与土力学》教材编写大纲编写。在编写过程中,遵照路桥专业高职教材编审的原则意见(试行),体现针对性与先进性、实用性与可操作性以及综合性与科学性。并以现行规范为准则,较全面地反映出本学科的内容。教材中着重论述基本概念、基本原理和基本方法,理论内容的深度和广度高于中等职业教育的水平,但又不同于本科教材,力求突出学生实践技能的培养,注重学生综合素质的提高。

本教材包括土质学和土力学两部分内容。土质学部分着重探讨土的物理性质及工程分类,考虑工程实践需要和高职教材的特点,介绍了土的野外鉴别、特殊土简介、土的动力性质和压实性。土力学部分主要介绍了土中应力计算、基础沉降计算、地基承载力计算、土压力计算和土坡稳定分析的基本方法,着重论述了土的压缩性指标和土的抗剪强度指标的测定方法,初浅探讨了有效应力原理、单向固结理论、莫尔—库伦理论破坏准则。

本教材由烟台师范学院交通学院孟祥波主编,烟台师范学院交通学院朱建德副主编,四川省交通职业技术学院杨甲奇主审。具体编写分工:朱建德编写第一章、第二章、第三章、第四章和第九章;孟祥波编写第五章、第六章、第七章和第八章。在本教材的编写和审稿中,曾得到路桥工程学科委员会副主任张润虎和人民交通出版社卢仲贤的帮助,在此表示感谢。

限于编者水平和出版时间要求紧,书中缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2002年4月

第二版前言

本教材第一版是根据2001年7月在昆明召开的全国交通职教路桥专业教学与教材建设研讨会上讨论的《土质与土力学》教材编写大纲编写的,2002年出版发行。该教材使用近三年了,先后8次印刷,发行量近4万册,使用地域遍及全国各地,使用对象的类型包括高等专科学校、成人教育、电大、函大、自考和高等职业教育等。从使用学校师生反馈的信息表明,教材力求达到的针对性与先进性、实用性与可操作性以及综合性与科学性等特点均得到了体现。

2004年8月,在乌鲁木齐召开了交通土建高职高专统编教材修订研讨会,与会成员认真总结了首轮教材取得的经验和存在的问题,提出了第二版的修订意见。本教材正是在此基础上修订再版的。

本教材中着重论述基本概念、基本原理和基本方法,理论内容的深度和广度高于中等职业教育的水平,但又不同于本科教材,力求突出学生实践技能的培养,注重学生综合素质的提高。教材包括土质学和土力学两部分内容。土质学部分着重探讨土的物理性质及工程分类,考虑工程实践需要和高职教材的特点,介绍了土的野外鉴别、特殊土简介、土的动力性质和压实性;土力学部分主要介绍了土中应力计算、基础沉降计算、地基承载力计算、土压力计算和土坡稳定分析的基本方法,着重论述了土的压缩性指标和土的抗剪强度指标的测定方法,初浅探讨了有效应力原理、单向固结理论、莫尔—库伦理论破坏准则。

第二版教材主要做了以下改动:

1. 在每章的开头,增加了本章学习要求。
2. 原第一版土工试验内容没有,使读者阅读不便,所以在第二版书后附录增加了相应试验内容。
3. 将第一版中第四章特殊土简介,调整为第二章,并增加红粘土内容;将冻土内容归到第三章第三节;另外,部分内容做了改动。
4. 增加的附录中介绍了本教材的教学大纲、试验大纲和试验指导书,作为教学参考。
5. 增加了部分考研习题,便于引导和提高学生的兴趣。
6. 更正原第一版中的一些疏漏。

本教材由烟台鲁东大学交通学院孟祥波副教授主编。参与第一版编写的烟台鲁东大学交通学院朱建德同志,在工作繁忙中,对第二版的编写提出了许多宝贵的意见。交通土建高职高专统编教材编审委员会特邀同济大学高大钊教授担任主审,高教授认真审核了本书,对本书的编写给予了很高的评价,并提出许多中肯的意见。在本教材的编写和审稿中,得到人民交通出版社卢仲贤和贵州交通职业技术学院张润虎的帮助。在此对本书出版给予关心和帮助的所有同志表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者
2005年8月

目 录

绪论	1
第一章 土的物理性质	3
第一节 土的三相组成	3
第二节 土的结构	13
第三节 土的物理性质指标及物理状态指标	15
思考题	25
习题	26
第二章 特殊土简介	28
第一节 软土	28
第二节 黄土	32
第三节 膨胀土	34
第四节 盐渍土	37
第五节 红粘土	42
第六节 沙漠土	43
思考题	48
第三章 土的工程分类及野外鉴别	49
第一节 土的工程分类	49
第二节 土的野外鉴别	57
思考题	61
习题	61
第四章 土中水的运动规律	62
第一节 土的毛细性	62
第二节 土的渗透性	65
第三节 冻土	73
思考题	76
习题	76
第五章 土中应力计算	77
第一节 概述	77
第二节 土中自重应力计算	78
第三节 基础底面压力分布与计算	79
第四节 土中附加应力计算	82
第五节 建筑物基础下地基应力的计算	93
思考题	94

习题	95
第六章 土的压缩性和沉降计算	97
第一节 概述	97
第二节 有效应力原理	98
第三节 土的压缩性指标和确定方法	98
第四节 分层总和法计算基础的沉降量	102
第五节 基础沉降与时间的关系	106
思考题	112
习题	112
第七章 土的抗剪强度与地基承载力	114
第一节 概述	114
第二节 莫尔—库伦破坏准则	115
第三节 抗剪强度指标的确定	117
第四节 地基容许承载力的确定	126
思考题	138
习题	138
第八章 土压力与土坡稳定	139
第一节 概述	139
第二节 静止土压力计算	140
第三节 朗金土压力理论	142
第四节 库伦土压力理论	149
第五节 土坡稳定分析	165
思考题	175
习题	176
第九章 土的动力性质和压实性	177
第一节 土在动荷载作用下的变形和强度性质	177
第二节 砂土和粉土的振动液化	182
第三节 土的压实性	186
思考题	193
习题	193
附录一 《土质与土力学》课程教学大纲	194
附录二 《土质与土力学》课程试验教学大纲	196
附录三 《土质与土力学》课程试验指导书	200
参考文献	205

绪论

本章学习要点:

1. 了解本学科研究的对象和基本内容;
2. 掌握本学科在道路与桥梁工程中的作用及研究的意义。

一、土质学及土力学研究的内容

土质学及土力学研究的对象是土。土是一种天然的地质材料,它是由地壳表层的整体岩石经过风化、搬运和沉积过程后形成的。

土质学属于地质学科的一个分支,它是从土的成因出发,研究土的物理、化学性质和影响土的性质变化的主要原因,并根据土的主要工程特性进行科学的分类。土力学属于工程力学的一个分支,它是从土的力学性能(或称工程特性,包括土的压缩性、渗透性和抗剪强度)角度,研究土在外荷载作用下引起的力学方面的变化规律,讨论地基的承载力、基础的沉降量和作用在建筑物上的土压力等工程实际问题。由于土的非均质性,各向异性,因地制宜,带来其学科特点:综合性强,经验性强和地区性强。人们不得不通过建立多种力学模型,并借助大量土工试验来获取对工程实践有用的计算参数或经验公式,因此土力学又是一门实践性很强的学科。

二、研究土质学及土力学的意义

从土质学与土力学研究的对象——土的作用来看,无论是作为土工建筑物本身的构筑材料,还是作为支承建筑物荷载的地基或作为建筑物周围的赋存介质,都具有十分重要的作用。

在道路工程中,路基一般是用土填筑而成。土作为构筑材料,为了满足行车的要求,保证路基的强度及稳定性,必须得到充分的压实。因此需要研究土的压实性,包括土的压实机理、压实方法和压实指标。自然环境的变化将影响路基的稳定性。如我国北方地区的道路,由于温度的强烈变化常常发生冻胀及翻浆现象。而南方地区的道路,由于雨水的侵袭,常常发生坍塌和滑坡破坏。因此需要研究土的冻胀机理,进行边坡的稳定分析,并制定出防治措施。路基是承受车辆荷载重复作用的结构物,因此需要研究土在重复荷载下的变形特性。还有作用于路基挡墙上的土压力,需要计算出符合实际的值,从而保证挡土墙的稳定。

在桥梁工程中,土作为支承建筑物荷载的地基具有非常重要的地位。例如:我国苏州的虎丘塔和意大利的比萨斜塔,都是因为基础的不均匀沉降造成塔身的严重倾斜,危及了塔的安全。因此需要计算出不同时间的基础沉降量,还需确定地基容许承载力,特别对于超静定结构的桥梁更为重要。另外,桥台台背后的土压力等,也需要应用土力学的方法进行计算。

三、土质学及土力学的发展简介

作为本学科理论基础的土力学,始于18世纪兴起了工业革命的欧洲。1773年,法国的库伦(Coulomb)发表了著名的砂土抗剪强度公式和土压力的滑楔理论。其后,英国的朗金(Rankine, 1869)又从强度理论方面提出与之结果相同且能应用于粘性土中的土压力理论。此外,法国的布辛奈斯克(Boussinesq, 1885)得出了半无限弹性体在竖向集中力作用下的应力与变形的理论解答;法国的达西(Darcy, 1856)通过水在砂土中的渗流试验,建立了达西定律;瑞典的费兰纽斯(Fellenius, 1922)为解决铁路塌方问题,提出了土坡稳定分析方法。这些古典的理论和办法,为土力学成为一门独立学科奠定了初步的理论基础。

1925年美国著名土力学家太沙基(Terzaghi)的《土力学》专著问世,使土力学成为一门独立的学科。1936年成立了国际土力学和基础工程学会,并举行了第一次国际学术会议,以后每隔四年召开一次,至今已召开了数十次国际会议。每年还有若干次专题讨论会,提出了大量的论文和研究成果报告,使本学科得到了快速发展。特别是现代科技成就,尤其是电子技术渗入到了土力学基础工程的研究领域,使其在基本理论、计算方法、实验技术及设备等诸方面都得到了革命性的发展。基本理论方面,如岩土本构关系的研究,将各种应力——应变——时间的非线性模型应用于实际问题;在计算方法方面,广泛采用计算机,用数值计算方法,如有限元法、差分法等解决以往无法解决的复杂边界和初始条件以及不均匀土层问题;在实验技术和设备方面,采用静、动三轴仪、离心模型机、触探仪、旁压仪等,广泛用计算机程序控制试验过程,并自动采集和加工试验数据。

土质学作为一门独立学科,始于20世纪。早期土质学的著作如Приклонский的《土质学》和Денисов的《粘性土的工程性质》,系统地论述了土质学的基本原理,为土质学的进一步发展奠定了基础,也对我国土的研究有很大的影响;近代的著作如黄文熙的《土的工程性质》和Mitchell的《Fundamentals of Soil Behavior》代表了从两个不同角度深入研究土的工程性质所达到的新水平。

本学科是一门综合性学科,由于土的性质很复杂,目前许多理论尚待今后发展和完善。

又意谓等式土力学土力学

土力学的发展历史源远流长,早在公元前,人们就利用土的性质来建造房屋、修筑道路、开凿运河等。随着生产力的发展,土木工程技术不断进步,对土的性质和规律的研究也越来越深入。17世纪,库伦提出了砂土抗剪强度公式,朗金提出了土压力理论,达西提出了渗流定律,费兰纽斯提出了土坡稳定理论,这些古典的理论和办法,为土力学成为一门独立学科奠定了初步的理论基础。1925年美国著名土力学家太沙基(Terzaghi)的《土力学》专著问世,使土力学成为一门独立的学科。1936年成立了国际土力学和基础工程学会,并举行了第一次国际学术会议,以后每隔四年召开一次,至今已召开了数十次国际会议。每年还有若干次专题讨论会,提出了大量的论文和研究成果报告,使本学科得到了快速发展。特别是现代科技成就,尤其是电子技术渗入到了土力学基础工程的研究领域,使其在基本理论、计算方法、实验技术及设备等诸方面都得到了革命性的发展。基本理论方面,如岩土本构关系的研究,将各种应力——应变——时间的非线性模型应用于实际问题;在计算方法方面,广泛采用计算机,用数值计算方法,如有限元法、差分法等解决以往无法解决的复杂边界和初始条件以及不均匀土层问题;在实验技术和设备方面,采用静、动三轴仪、离心模型机、触探仪、旁压仪等,广泛用计算机程序控制试验过程,并自动采集和加工试验数据。土质学作为一门独立学科,始于20世纪。早期土质学的著作如Приклонский的《土质学》和Денисов的《粘性土的工程性质》,系统地论述了土质学的基本原理,为土质学的进一步发展奠定了基础,也对我国土的研究有很大的影响;近代的著作如黄文熙的《土的工程性质》和Mitchell的《Fundamentals of Soil Behavior》代表了从两个不同角度深入研究土的工程性质所达到的新水平。本学科是一门综合性学科,由于土的性质很复杂,目前许多理论尚待今后发展和完善。

第一章

土的物理性质

本章学习要点:

1. 明确土的粒度、粒组、粒度成分的概念及粒度成分的分析与表示方法;
2. 掌握土的物理性质指标和物理状态指标的定义,能够利用绘制土的三相草图,进行指标换算;
3. 完成土的三大指标测定和液塑限测定试验。

土是地壳母岩经强烈风化作用的产物,包括岩石碎块(如漂石)、矿物颗粒(如石英砂)和粘土矿物(如高岭石)。风化作用有物理风化和化学风化,它们经常是同时进行而且是互相加剧其发展的进程。

物理风化是在地表或接近地表条件下,岩石在原地发生机械破碎而不改变其化学成分的过程。引起岩石发生物理风化作用的因素主要是岩石释重和温度的变化。此外,岩石裂隙中水的冻结与融化、盐类的结晶与潮解等,也能促使岩石发生物理风化作用。岩石在这些因素的作用下逐渐变成岩石碎块和细小的颗粒,其粒径大小差别很大,但它们的矿物成分仍与母岩相同,称为原生矿物。所以,物理风化后的土可以当成只是颗粒大小上量的变化。但是这种量变的积累结果使原来的大块岩体获得了新的性质,变成了碎散的颗粒。颗粒之间存在着大量的孔隙,可以透水和透气,这就是土的第一个主要的特征——碎散性。

化学风化是指母岩表面和碎散的颗粒受环境因素的作用而改变其矿物的化学成分,形成新的矿物,也称次生矿物。引起岩石发生化学风化作用的因素主要是水和氧气。化学风化的结果,形成十分细微的土颗粒,最主要的为粘土颗粒($< 0.002\text{mm}$)以及大量的可溶性盐类。细微颗粒的比表面积很大,具有吸附水分子的能力。因此,自然界的土,一般都是由固体颗粒、水和气体三种成分所构成。这是土的第二个主要特征——多相性。

在自然界中,土的物理风化和化学风化时刻都在进行,而且相互加强。由于形成过程的自然条件不同,自然界的土也就多种多样。同一场地,不同深度处土的性质也不一样,甚至同一位置的土,其性质还往往随方向而异。例如,沉积土往往垂直方向的透水性小,水平方向的透水性大。因此,土是自然界漫长的地质年代内所形成的性质复杂、不均匀、各向异性,且随时间而在不断变化的材料。这是土的第三个主要特征——自然变异性。

由此可知,要描述和确定土的性质,就必须具体分析和研究土的三相组成、土的结构和土的物理状态,并以适当的指标表示之。

第一节 土的三相组成

土的三相组成是指土由固体土粒、液体水和气体三部分组成。土中的固体矿物构成土的

骨架,骨架之间贯穿着大量孔隙,孔隙中充填着液体水和气体。

随着环境的变化,土的三相比例也发生相应的变化,土体三相比例不同,土的状态和工程性质也随之各异。例如:

固体 + 气体(液体 = 0)为干土。此时,粘土呈干硬状态,砂土呈松散状态。

固体 + 液体 + 气体为湿土。此时,粘土多为可塑状态。

固体 + 液体(气体 = 0)为饱和土。此时,粉细砂或粉土遇强烈地震,可能产生液化,而使工程遭受破坏;粘土地基受建筑荷载作用发生沉降需几十年才能稳定。

由此可见,研究土的各项工程性质,首先需从最基本的、组成土的三相(固相、液相和气相)本身开始研究。

一、土中固体颗粒

土中固体颗粒是土的三相组成中的主体,其粒度成分、矿物成分决定着土的工程性质。

(一) 粒度成分

土粒组成土体的骨架,各个土粒的特征以及土粒集合体的特征,对土的工程性质起着决定性的影响。本节仅论述组成土的各个土粒特征。

1. 土颗粒的大小与形状

自然界中的土是由大小不同的颗粒组成的,土粒的大小称为粒度。土颗粒大小相差悬殊,有大于几十厘米的漂石,也有小于几微米的胶粒。天然土的粒径一般是连续变化的,为便于研究,工程上把大小相近的土粒合并为组,称为粒组。粒组间的分界线是人为划定的,划分时应使粒组界限与粒组性质的变化相适应,并按一定的比例递减关系划分粒组的界限值。每个粒组的区间内,常以其粒径的上、下限给粒组命名,如砾粒、砂粒、粉粒、粘粒等。各组内还可细分为若干亚组。我国《土的工程分类标准》(GB 145—90)和《公路土工试验规程》(JTJ 051—93)中的粒组划分方案如表 1-1。

粒组划分表

表 1-1

粒组统称	《土的工程分类标准》(GB 145—90)		《公路土工试验规程》(JTJ 051—93)	
	粒组名称	粒组范围(mm)	粒组名称	粒组范围(mm)
巨粒	漂石(块石)	> 200	漂石(块石)	> 200
	卵石(碎石)	200 ~ 60	卵石(小块石)	200 ~ 60
粗粒	粗砾	60 ~ 20	粗砾	60 ~ 20
	砾粒	20 ~ 2	砾(角砾)	中砾 20 ~ 5
	细砾	2 ~ 0.075	细砾	5 ~ 2
	砂砾	2 ~ 0.075	粗砂	2 ~ 0.5
细粒	粉粒	0.075 ~ 0.005	砂	中砂 0.5 ~ 0.25
	粘粒	< 0.005	细砂	0.25 ~ 0.074
			粉粒	0.074 ~ 0.002
		粘粒	< 0.002	

关于划分粒组的名称,已被我国目前工程地质学界广泛采用。至于对粒组划分的粒径界限值,至今尚无完全统一的标准,各个国家,甚至一个国家各个部门也有不同的规定,但总的来看,仍可认为是大同小异。

土粒形状对土体的密度及稳定性有显著影响。大部分粉砂粒及砂粒是浑圆的或棱角状的,而云母颗粒往往是片状的,粘土颗粒则往往是薄片状的。土粒的形状取决于矿物成分,它反映土料的来源和地质历史。

在描述土粒形状时,常利用两个指标:浑圆度及球度。

浑圆度为 $\sum_{i=1}^N (r_i/R)/N$, r_i 为颗粒突出角的半径, R 为土粒内接圆的半径, N 为颗粒尖角的数量。浑圆度可反映土粒尖角的尖锐程度。

球度为 D_d/D_c , D_d 为在扁平面上与土粒投影面积相等的圆的半径, D_c 为最小外接圆的半径。球度反映土粒接近圆球的程度,球度为 1,即为圆球体。

在有些文献资料中,还用体积系数和形状系数描述土粒形状。

体积系数 V_c :

$$V_c = \frac{6V}{\pi d_m^3} \quad (1-1)$$

式中: V ——土粒体积;

d_m ——土粒的最大直径。

V_c 愈小,土粒离圆体愈远。圆球 $V_c = 1$;立方体 $V_c = 0.37$;棱角状土粒 V_c 更小。

形状系数 F :

$$F = \frac{C/B}{B/A} = \frac{AC}{B^2} \quad (1-2)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为土粒的最大、中间、最小尺寸。

2. 粒度成分及粒度成分分析方法

土的粒度成分是指土中各种不同粒组的相对含量(以干土重量的百分比表示)。或者说土是由不同粒组以不同数量的配合,故又称为“颗粒级配”。例如某砂粘土,经分析,其中含粘粒 25%,粉粒 35%,砂粒 40%,即为该土中各粒组干重占该土总干重的百分比含量。粒度成分可用来描述土的各种不同粒径土粒的分布特征。

为了准确地测定土的粒度成分,所采用的各种手段统称为粒度成分分析或颗粒分析。其目的在于确定土中各粒组颗粒的相对含量。

目前,我国常用的粒度成分分析方法有:对于粗粒土,即粒径大于 0.074mm 的土,用筛分法直接测定;对于粒径小于 0.074mm 的土,用沉降分析法。当土中粗细粒兼有时,可联合使用上述两种方法。

(1) 筛分法 将所称取的一定质量风干土样放在筛网孔逐级减小的一套标准筛上摇振,然后分层测定各筛中土粒的质量,即为不同粒径粒组的土质量,并计算出每一粒组占土样总质量的百分数,并可计算小于某一筛孔直径土粒的累计重量及累计百分含量。

有关筛分试验的详细内容,请参见《公路土工试验规程》有关内容。

(2) 沉降分析法 沉降分析法就是根据土粒在液体中沉降的速度与粒径的平方成正比的关系由司笃克斯(Stokes)定理确定。

土粒越大,在静水中沉降速度越快;反之,土粒越小,沉降速度越慢。设有一个圆球形颗粒在无限大的不可压缩的粘滞性液体中,它在重力作用下产生的稳定沉降速度 V 可以用司笃克斯公式计算。

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} d^2 \quad (1-3)$$

或者写成为
$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \sqrt{V} \quad (1-4)$$

式中： V ——球形颗粒在液体中的稳定沉降速度(m/s)；

d ——球形颗粒的直径(m)；

γ_s 、 γ_w ——分别为土粒及液体的容重(N/m³)；

η ——液体的粘滞度(Pa·s)。

若近似地取 $\gamma_w = 9.81 \times 10^3 \text{N/m}^3$ (水溶液)， $\eta = 0.00114 \text{Pa} \cdot \text{s}$ (15℃时水溶液的粘滞度)， $\gamma_s = 26 \times 10^3 \text{N/m}^3$ ，则代入式(1-4)得：

$$d = 0.001126 \sqrt{V} \quad (\text{m})$$

若土粒直径 d 以 mm 计，则上式成为：

$$d = 1.126 \sqrt{V} \quad (\text{mm}) \quad (1-5)$$

式(1-5)表明：粒径与沉降速度的平方根成正比。应当指出，实际土粒并不是刚性的圆球形颗粒，因此，用司笃克斯公式求得的颗粒直径并不是实际土粒的尺寸，而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的直径，称为水力直径。

在进行粒度成分分析时，取一定质量的干土 m_s (g) 制成一定体积的悬液，搅拌均匀后，在刚停止搅拌的瞬间，各种粒径的土粒在悬液中是均匀分布的，即各种粒径的土粒在悬液中的浓度(单位体积悬液内含有的土粒重量)在不同深度处都相等。静置一段时间 t_i (s) 后，悬液中粒径为 d_i 的颗粒以相应的沉降速度 v_i 在水中下沉。较粗的颗粒在悬液中沉降较快，较细的颗粒则沉降较慢。如图 1-1 所示，在深度 L_i (m) 处，沉降速度为

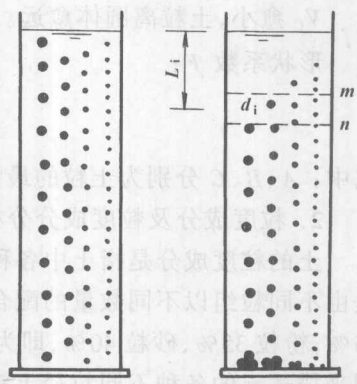


图 1-1 土粒沉降示意图

$v_i = L_i/t_i$ 的颗粒，其直径相当于 $d_i = 1.126 \sqrt{\frac{L_i}{t_i}}$ (mm)。所有大于 d_i 的土粒，其沉降速度必然大于 v_i ，因此，在 L_i 深度范围内，肯定已没有大于 d_i 的土粒。如在 L_i 深度处考虑一个小区段 $m-n$ ，则 $m-n$ 段内的悬液中只有小于及等于 d_i 的土粒，而且小于及等于 d_i 的颗粒的浓度与开始均匀悬液中小于及等于 d_i 的颗粒的浓度相等。

如果悬液体积为 1000cm^3 ，其中所含小于及等于 d_i 的土粒质量为 m_{si} (g)，则在 $m-n$ 段内的悬液的密度为：

$$\rho_i = \frac{1}{1000} \left[m_{si} + \left(1000 - \frac{m_{si}}{\rho_{s0}} \right) \rho_{w0} \right] \quad (1-6)$$

式中： ρ_i ——悬液密度(g/cm³)；

m_{si} ——悬液中 $\leq d_i$ 的土粒质量(g)；

ρ_{s0} ——土粒密度(g/cm³)；

ρ_{w0} ——水的密度(g/cm³)。

则
$$m_{si} = 1000 \frac{\rho_i - \rho_{w0}}{\rho_{s0} - \rho_{w0}} \rho_{s0} \quad (1-7)$$

悬液中小于及等于 d_i 的土粒质量 m_{si} 占土粒总质量百分比 P_i 为：

$$P_i = \frac{m_{si}}{m_s} \times 100\% \quad (1-8)$$

式(1-7)中的悬液密度 ρ_i , 可用比重计测读, 也可用吸管吸取 $m-n$ 段内的悬液试样测定。有关比重计法和移液管法的具体试验操作及计算, 请参阅《公路土工试验规程》有关内容。比重计法的优点是操作简便, 不需多次烘干称重; 而移液管法则比较麻烦, 但对于细砂及粘土, 它是可靠的方法。

3. 粒度成分的表示方法

常用的粒度成分的表示方法有: 表格法、累计曲线法和三角坐标法。

(1) 表格法 是以列表形式直接表达各粒组的相对含量。它用于粒度成分的分类是十分方便的。表格法有两种不同的表示方法, 一种是以累计含量百分比表示的, 如表 1-2 所示; 另一种是以粒组表示的, 如表 1-3 所示。累计百分含量是直接由试验求得的结果, 粒组是由相邻两个粒径的累计百分含量之差求得的。

粒度成分的累计百分含量表示法

表 1-2

粒径 d_i (mm)	粒径小于等于 d_i 的累计百分含量 p_i (%)			粒径 d_i (mm)	粒径小于等于 d_i 的累计百分含量 p_i (%)		
	土样 A	土样 B	土样 C		土样 A	土样 B	土样 C
10	-	100.0	-	0.10	9.0	23.6	92.0
5	100.0	75.0	-	0.075	-	19.0	77.6
2	98.9	55.0	-	0.01	-	10.9	40.0
1	92.9	42.7	-	0.005	-	6.7	28.9
0.5	76.5	34.7	-	0.001	-	1.5	10.0
0.25	35.0	28.5	100.0				

土的粒度成分分析结果

表 1-3

粒 组(mm)	粒度成分(以质量%计)			粒 组(mm)	粒度成分(以质量%计)		
	土样 a	土样 b	土样 c		土样 a	土样 b	土样 c
10~5	—	25.0	—	0.10~0.075	9.0	4.6	14.4
5~2	1.1	20.0	—	0.075~0.01	—	8.1	37.6
2~1	6.0	12.3	—	0.01~0.005	—	4.2	11.1
1~0.5	16.4	8.0	—	0.005~0.001	—	5.2	18.9
0.5~0.25	41.5	6.2	—	<0.001	—	1.5	10.0
0.25~0.10	26.0	4.9	8.0				

(2) 累计曲线法 是一种图示的方法, 通常用半对数坐标纸绘制, 横坐标(按对数比例尺)表示粒径 d_i ; 纵坐标表示小于某一粒径的土粒的累计百分数 P_i (注意: 不是某一粒径的百分含量)。采用半对数坐标, 可以把细粒的含量更好地表达清楚, 若采用普通坐标, 则不可能做到这一点。

图 1-2 是根据表 1-3 提供的资料, 在半对数坐标纸上点出各粒组累计百分数及粒径对应的点, 然后将各点连成一条平滑曲线, 即得该土样的累计曲线。

累计曲线的用途主要有以下两个方面:

第一, 由累计曲线可以直观地判断土中各粒组的分布情况。曲线 a 表示该土绝大部分是由比较均匀的砂粒组成的; 曲线 b 表示该土是由各种粒组的土粒组成, 土粒极不均匀; 曲线 c 表示该土中砂粒极少, 主要是由细颗粒组成的粘性土。

第二, 由累计曲线可确定土粒的级配指标。

不均匀系数 C_u :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-9)$$

曲率系数(或称级配系数) C_c :
$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1-10)$$

式中: d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} ——分别相当于累计百分含量为 10%、30% 和 60% 的粒径; d_{10} 称为有效粒径; d_{60} 称为限制粒径。

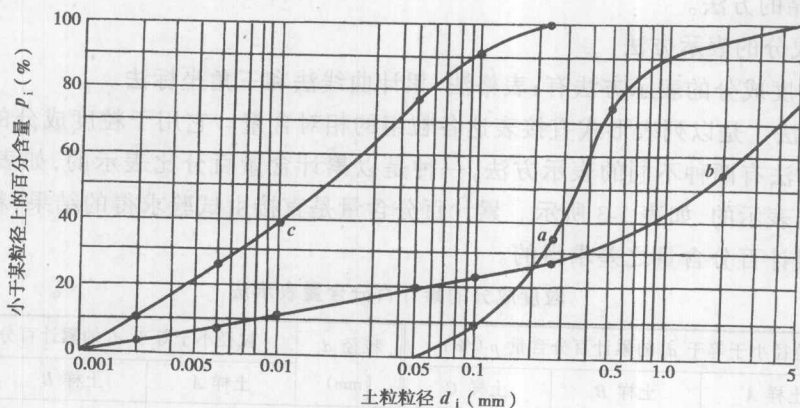


图 1-2 粒度成分累计曲线

不均匀系数 C_u 反映不同大小粒组的分布情况。 C_u 值愈大, 表明土粒大小分布范围大, 土的级配良好; C_u 值愈小, 表明土粒大小相近似, 土的级配不良。一般认为, 不均匀系数 $C_u < 5$ 时, 称为均粒土, 其级配不良; $C_u \geq 5$ 的土为非均粒土, 其级配良好。

实际上, 仅单靠不均匀系数 C_u 值一个指标来判定土的级配情况是不够的, 还必须同时考察曲率系数 C_c 值。曲率系数 C_c 描述累计曲线的分布范围, 反映累计曲线的整体形状。一般认为 $C_c = 1 \sim 3$ 之间, 土的级配较好; $C_c < 1$ 或 $C_c > 3$ 时, 累计曲线呈明显弯曲。当累计曲线呈阶梯状时, 说明粒度不连续, 即主要由大颗粒和小颗粒组成, 缺少中间颗粒, 表明土的级配不好, 其工程地质性质也较差。

在工程上, 常利用累计曲线确定的土粒的两个级配指标值来判定土的级配情况。当同时满足不均匀系数 $C_u \geq 5$ 和曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 这两个条件时, 土为级配良好的土; 若不能同时满足, 土为级配不良的土。

例如, 图 1-2 中曲线 a , $d_{10} = 0.11\text{mm}$, $d_{30} = 0.22\text{mm}$, $d_{60} = 0.39\text{mm}$, 则 $C_u = 3.5$, $C_c = 1.13$, 表明土样 a 为级配不良的土。

(3) 三角坐标法 这也是一种图示法。三角坐标法可用来表达粘粒、粉粒和砂粒三种粒组的百分含量。它是利用几何上等边三角形中任意一点到三边的垂直距离之和恒等于三角形的高的原理, 即 $h_1 + h_2 + h_3 = H$ 来表达粒度成分。如取三角形的高 $H = 100\%$, h_1 为粘土颗粒的含量, h_2 为砂土颗粒的含量, h_3 为粉土颗粒的含量, 则图 1-3 中 m 点即表示土样的粒度成分中粘粒、粉粒及砂粒的百分含量分别为 23%、47% 和 30%。

上述三种方法各有其特点和适用条件。表格法能很清楚地用数量说明土样的各粒组含量, 但对于大量土样之间的比较就显得过于冗长, 且无直观概念, 使用比较困难。

累计曲线法能用一条曲线表示一种土的粒度成分, 而且可以在一张图上同时表示多种土的粒度成分, 能直观地比较其级配状况。

三角坐标法能用一点表示一种土的粒度成分, 在一张图上能同时表示许多种土的粒度成分, 便于进行土料的级配设计。三角坐标图中不同的区域表示土的不同组成, 因而, 还可以用来确定按粒度成分分类的土名(见土的工程分类一节)。