



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专)

土力学

(第2版)

务新超 主编
熊昌健 祁孝珍 主审



黄河水利出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专)

土 力 学

(第2版)

主 编	务新超		
副主编	张茂林	王启亮	王玉珏
	谷云香	丁友斌	张建隽
主 审	熊昌健	祁孝珍	

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是按照国家对高职高专人才培养的规格要求及高职高专教学特点编写完成的。全书共 11 章,主要内容包括:土的物理性质指标及工程分类,土的渗透性,土中应力,土的压缩性与地基变形,土的抗剪强度,土压力,土坡稳定性分析,地基承载力,地基、基础设计,桩基础,软土地基处理与特殊土。

本书适用于高职高专院校水利水电工程、农业水利技术、道路桥梁及工业与民用建筑等土木工程类相关专业教学使用,也可供有关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/务新超主编. —2 版. —郑州:黄河水利出版社,
2009.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 525 - 1

I. 土… II. 务… III. 土力学 - 高等学校:技术
学校 - 教材 IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 105514 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:18.5

字数:427 千字

印数:15 101—19 200

版次:2003 年 1 月第 1 版

印次:2009 年 7 月第 5 次印刷

2009 年 7 月第 2 版

定价:29.00 元

再版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是根据《国务院关于大力发展职业教育的决定》、教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,以及教育部对普通高等教育“十一五”国家级规划教材建设的具体要求组织编写的。编写中考虑教材适用地域广阔,以及土木工程类各专业发展的需要,广泛征求了高职高专有关院校对本课程教学改革的意见,并吸收了本学科工程技术的最新进展。

考虑到高职高专学生的特点及培养目标的要求,在本书中主要体现以下特点:

(1)突出土力学的概念、原理以及有关计算公式的应用条件,减少了烦琐的公式推导过程,加强了工程应用内容,强调学生应用能力的培养。

(2)在有关知识点处提出了相关问题,便于学生在学习过程中进行深入思考,有利于培养学生的独立思考能力,加深理解。

(3)力求体现相关行业有关岩土工程的最新规范。本书吸收了国家以及水利、建筑、交通等行业颁布的最新规范,如《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)、《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)、《土工试验规程》(SL 237—1999)、《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)等不同行业的最新技术规范。

(4)本书在处理与技术规范的关系时,对不同行业的工程技术规范进行归纳分类,以介绍普遍性为主,同时兼顾不同行业的特殊性,使学生能灵活应用不同行业的规范,达到培养高职高专学生适应工程实践的目的。

(5)考虑到各行业之间的广泛联系,加强了地基、基础设计和地基处理内容,介绍了特殊土的有关性质。

土力学是土木工程类各专业的技术基础课。本书可用于水利水电工程、农业水利技术、工业与民用建筑以及道路桥梁等专业的专科教育,也可以供工程技术人员参考。

本书编写人员及编写分工如下:黄河水利职业技术学院务新超编写绪论、各章学习指导及小结,黄河水利职业技术学院王玉珏编写第一章,沈阳农业大学高等职业技术学院魏坤肖编写第二章,太原城市职业技术学院张建隽编写第三章,四川水利职业技术学院李姝编写第四章,沈阳农业大学高等职业技术学院谷云香编写第五章,黄河水利职业技术学院田玲编写第六章,山西水利职业技术学院张丹青编写第七章,安徽水利水电职业技术学院丁友斌编写第八章,山西水利职业技术学院王启亮编写第九章,内蒙古机电职业技术学院张茂林编写第十章。本书由务新超担任主编,并负责全书统稿;由张茂林、王启亮、王玉珏、谷云香、丁友斌、张建隽担任副主编;由四川水利职业技术学院熊昌健、沈阳农业大学高等职业技术学院祁孝珍担任主审。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请同行和广大读者批评指正。

编 者

2009年3月

目 录

再版前言

绪 论	(1)
第一章 土的物理性质及工程分类	(3)
第一节 土的组成与结构	(4)
第二节 土的物理性质指标	(13)
第三节 土的物理状态指标	(19)
第四节 土的击实性	(25)
第五节 土的工程分类	(29)
小 结	(36)
练习题	(37)
第二章 土的渗透性	(39)
第一节 达西定律	(39)
第二节 渗透系数的测定	(42)
第三节 渗流作用下土的应力状态	(47)
第四节 渗透变形	(51)
第五节 流网在渗流计算中的作用	(57)
小 结	(60)
练习题	(61)
第三章 土中应力	(63)
第一节 土的自重应力	(64)
第二节 基底压力	(67)
第三节 地基中的附加应力	(71)
小 结	(85)
练习题	(85)
第四章 土的压缩性及地基变形	(87)
第一节 土的压缩性	(88)
第二节 地基最终沉降量计算	(98)
第三节 饱和黏性土的单向渗透固结理论	(109)
小 结	(116)
练习题	(117)
第五章 土的抗剪强度	(118)
第一节 土的抗剪强度及其破坏准则	(119)
第二节 土的极限平衡条件	(121)

第三节	土的抗剪强度指标的测定	(125)
第四节	强度指标的表达式及指标的选用	(131)
小 结	.....	(138)
练习题	.....	(139)
第六章	土压力	(140)
第一节	挡土墙的土压力	(140)
第二节	朗肯土压力理论	(143)
第三节	库仑土压力理论	(150)
第四节	土压力计算的影响因素及减小土压力的措施	(157)
第五节	挡土结构设计简介	(161)
小 结	.....	(164)
练习题	.....	(164)
第七章	土坡的稳定性分析	(166)
第一节	滑坡产生的原因	(166)
第二节	无黏性土坡的稳定性分析	(167)
第三节	黏性土坡的稳定性分析	(169)
小 结	.....	(179)
练习题	.....	(179)
第八章	地基承载力	(180)
第一节	概 述	(180)
第二节	按塑性区开展的范围确定地基承载力	(183)
第三节	按极限荷载确定地基承载力	(187)
第四节	按规范确定地基承载力特征值	(193)
小 结	.....	(199)
练习题	.....	(199)
第九章	地基、基础设计	(201)
第一节	浅基础类型及设计原则	(201)
第二节	基础埋深的影响因素	(211)
第三节	基础底面尺寸的确定	(215)
第四节	建筑物地基变形及稳定验算	(220)
第五节	基础结构设计	(226)
小 结	.....	(242)
练习题	.....	(243)
第十章	桩基础	(244)
第一节	桩基础概述	(244)
第二节	单桩竖向极限承载力	(251)
第三节	群桩基础	(263)
第四节	桩的负摩阻力及桩的抗拔力	(268)

小 结	(271)
练习题	(272)
第十一章 软土地基处理及特殊土	(274)
第一节 软土地基处理的一般方法	(274)
第二节 特殊土简介	(278)
小 结	(285)
参考文献	(286)

绪 论

一、土的概念及特点

地球陆地表层多由岩石和土组成。未经风化的岩石,其矿物颗粒间有较强的联结,强度高、压缩性小、透水性弱,一般为坚硬的块体。而土是岩石风化的产物,是矿物颗粒的松散集合体。由于土的成土母岩以及形成历史不同,所以土体的种类繁多、分布复杂、性质各异。由于土粒之间的联结强度远小于土颗粒自身的强度,所以土体常表现出散体性;由于土的孔隙内存在水和空气,且受外界温度、湿度及压力的影响,所以土又具有多孔性、多样性和易变性等特点。

土与土木工程建筑有着密切的联系,工程中常将土作为建筑物的地基(如房屋、水闸、码头、公路、桥梁等),或作为建筑材料(如土坝、路基、堤防等),或作为建筑物周围环境(如隧道、涵洞、运河以及其他地下建筑物)。因此,土的性质对建筑物有着直接的影响。

二、与土有关的工程问题

建筑物的下部结构称为基础,不仅承担建筑物的上部结构荷载,而且要将此荷载传给基底面以下的土体,起着中间的连接作用。基底以下的土体中因修建工程建筑物而引起的应力增加值所不可忽略的那部分土层,称为建筑物的地基。直接与基底接触并承受基底压力的土层称为持力层;持力层下部的土层称为下卧层,下卧层中的软弱土层称为软弱下卧层。如图 0-1 所示。地基、基础以及建筑物的上部结构三者相互作用、相互影响,构成一个共同工作的整体。

建筑物在外荷载作用下,不仅要保证自身的强度和稳定性,还要求地基必须具有足够的强度和稳定性,并且不能产生过大的变形。在工程设计中,若缺乏对地基土性质的了解,或采用不规范的施工方法,往往会带来严重的后果。

我国连云港钢板桩码头的抛石棱体,1974 年发生多次滑坡,其主要原因是地基中有一层 5~6 m 厚的淤泥层,且带有倾向外部的坡度,如图 0-2 所示;美国纽约水泥仓库、加

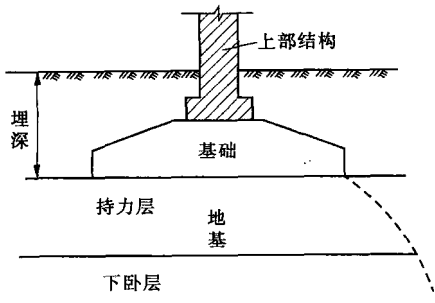


图 0-1 地基与基础示意

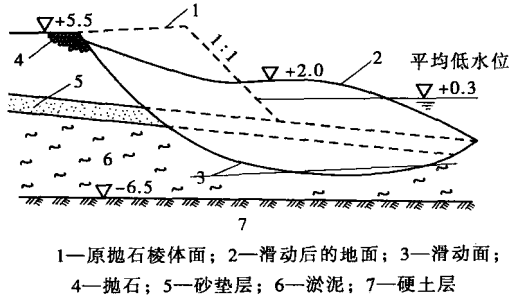


图 0-2 连云港钢板桩码头抛石棱体滑动示意

拿大特朗斯康谷仓的倾斜破坏都是由于地基强度不足而引起的;而墨西哥市艺术宫、原上海锦江饭店都是因地基产生过大的变形而影响了正常使用;意大利比萨斜塔、苏州虎丘塔、瑞典皇宫等工程均因地基不均匀沉降而导致严重倾斜。又如,软弱地基高速公路的“桥头跳车”问题、软弱地基处理问题、振动液化问题,以及水利工程的渗透稳定问题、土坝滑坡问题等都是与土有关的工程问题。

三、土力学及其发展简介

土力学是利用力学知识和土工试验技术来研究土的强度、变形及其规律等的一门科学。它既是一门古老的工程技术,又是一门年轻的应用科学。古人兴建的大型水利工程、宫殿、庙宇、堤坝、桥梁以及灵巧的水榭楼台、巍峨的高塔、蜿蜒万里的长城、大运河等,都为本学科的发展积累了丰富的经验,奠定了古典土力学的基础。然而,这些仅限于工程实践经验,未能形成系统的理论。土力学的系统理论始于18世纪兴起工业革命的欧洲。随着大量建筑物的兴建,促使人们对土进行进一步的研究,并开始在经验的基础上作理论解释。经过17、18世纪很多学者的研究,如法国的库仑(C. A. Coulomb)和达西(H. Darcy)、英国的朗肯(W. J. M. Rankine)等学者都为土力学的发展作出了大量的贡献,初步奠定了土力学的理论基础。但直至1925年,美国著名科学家、土力学奠基人太沙基(K. Terzaghi)归纳前人的成就,发表了《土力学》一书,比较系统地介绍了土力学的基本内容,土力学才成为一门独立的学科。20世纪60年代后期,由于计算机的出现、计算方法的改进与测试技术的发展以及本构模型的建立等,又迎来了土力学发展的新时期。现代土力学主要表现为一个模型(即本构模型)、三个理论(即非饱和土的固结理论、液化破坏理论和逐渐破坏理论)、四个分支(即理论土力学、计算土力学、实验土力学和应用土力学)。其中,理论土力学是龙头,计算土力学是筋脉,实验土力学是基础,应用土力学是动力。未来人类的发展将面对资源与环境对人类生存的挑战,更多的岩土工程问题需要解决,青年学生作为祖国的栋梁,将要肩负起历史的重任。

四、土力学研究内容与学习方法

土力学主要有以下三部分内容:一是土的基本性质,包括物理性质和力学性质;二是土体受力后的稳定与变形问题;三是工程应用的要求和措施,主要是地基设计与处理等。

土力学的学习内容包括理论、试验和经验。理论是土力学研究中的一些方法,理论研究中常做一些假设,学习中要重点掌握理论公式的意义和应用条件,明确理论的假定条件,掌握理论的适用范围;试验是了解土的物理性质和力学性质的基本手段,学习中要重点掌握基本的土工试验技术,尽可能多动手操作,从实践中获取知识,积累经验;经验在工程应用中是必不可少的,工程技术人员要不断从实践中总结经验,以便能切合实际地解决工程实际问题。学习土力学还要注意着重搞清基本概念,抓住中心内容,重点落实应用。

每一门课都有特有的基本概念,对于这些基本概念要着重理解概念的含义和有关概念之间的关系,在理解的基础上尽可能熟记。土力学主要是解决工程中土体的稳定和变形问题,这就是本课程的中心内容,所以整个课程都是围绕土体的稳定和变形进行阐述的。学习时要找出各章之间的联系,明确学习的重点,做到零而不乱。

第一章 土的物理性质及工程分类

三基导学

(一) 基本概念与指标

土的形成过程(岩石、风化、搬运、沉积),土的类别(残积土、坡积土、洪积土、冲积土、淤积土、冰积土、风积土)。

物理风化、化学风化、生物风化、粒径、界限粒径、颗粒级配、重力水、毛细水、自由水、结合水、稠度、界限含水率、缩限 ω_s 、塑限 ω_p 、液限 ω_L 、塑性图、压实度 P 。

密度 ρ 、含水率 ω 、土粒比重(土粒相对密度) G_s 、重度 γ 、饱和重度 γ_{sat} 、干重度 γ_d 、有效重度 γ' 、干密度 ρ_d 、饱和密度 ρ_{sat} 、孔隙率 n 、孔隙比 e 、饱和度 S_r 、不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 、相对密度 D_r 、塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、最优含水率 ω_{op} 、最大干密度 ρ_{dmax} 。

(二) 基本方法

(1) 试验方法:颗粒分析(筛分法、比重计法)、密度(环刀法、灌砂法、灌水法、核子密度仪法等)、含水率(烘干法、酒精燃烧法)、土粒比重(比重瓶法)、塑限(搓条法、液塑限联合测定)、液限(圆锥仪、碟式液限仪、液塑限联合测定)。

(2) 土的分类方法:水利行业中粗粒土按颗粒级配分类、细粒土按塑性图分类,工民建行业中粗粒土按颗粒级配分类、细粒土按塑性指数分类。

教学基本要求

(一) 土的组成

掌握颗粒级配的概念、评价指标和评价标准。理解土的粒组概念、划分标准及其颗粒分析方法,土中水的类型及其特点。了解土的矿物组成、特点,以及土中气体对土性质的影响,土的结构与灵敏度。

(二) 土的物理性质指标

掌握土的各物理性质指标的概念及获取方法和相互间的关系。理解土的三相草图。明确各物理性质指标在工程中的应用。

(三) 土的物理状态指标

掌握现行规程中的液限和塑限的测定方法,塑性指数、液性指数的概念及其作用,掌握无黏性土密实度的评价方法及黏性土稠度的判别。理解无黏性土密实度的概念,黏性土的稠度及状态。明确土的物理状态指标在工程中的应用。

(四) 土的击实性

掌握黏性土击实试验的目的、方法以及成果的应用。理解黏性土击实性的影响因素。了解黏性土击实曲线与饱和曲线的关系以及砂土的击实特性。

(五) 土的工程分类

掌握《土工试验规程》(SL 237—1999)对土的分类定名方法。了解《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)对土的分类方法。

能力培养目标

(1)能通过颗分试验绘出颗粒级配曲线,用颗粒级配曲线判别土的颗粒级配的优劣;能根据工程要求选择料场。

(2)能测定土的物理性质指标和物理状态指标,进行有关指标的计算及土的性状评价。

(3)会根据击实试验成果确定压实参数、进行填土压实质量的检查。

(4)能对土体分类定名。

学习重点与难点

重点是土的基本物理性质和物理状态指标,土工试验成果及其应用,土的工程分类。

难点是物理性质指标之间的换算,有关指标在工程中的应用,物理状态指标及其应用。

第一节 土的组成与结构

一、土的组成

天然状态的土一般由固体、液体和气体三部分组成。这三部分通常称为土的三相。其中,固相即为土颗粒,它构成土的骨架。土颗粒之间存在有许多孔隙,孔隙为水和气体所填充。水和溶解于水的物质构成土的液相,空气以及其他气体构成土的气相。若土中孔隙全部由气体填充,称为干土;若孔隙全部由水填充,称为饱和土;若孔隙中同时存在水和气体,称为湿土。饱和土和干土都是二相系,湿土为三相系。这三相物质本身的特征以及它们之间的相互作用对土的物理、力学性质影响很大。下面将分别介绍三相物质的属性及其对土的物理、力学性质的影响。

二、土的固相

土的固相是土中最主要的组成部分。它由各种矿物成分组成,有时还包括土中所含的有机质。土粒的矿物成分不同、粗细不同、形状不同,土的性质也不同。

(一) 土的矿物成分和土中的有机质

土的矿物成分取决于成土母岩的成分以及所经受的风化作用。按所经受的风化作用不同,土的矿物成分可分为原生矿物和次生矿物两大类。

1. 原生矿物和次生矿物

岩石经物理风化作用后破碎形成的矿物颗粒称为原生矿物。原生矿物在风化过程中,其化学成分并没有发生变化,它与母岩的矿物成分是相同的。常见的原生矿物有石英、长石和云母等。

岩石经化学风化作用所形成的矿物颗粒称为次生矿物。次生矿物的矿物成分与母岩不同。常见的次生矿物有高岭石、伊利石(水云母)和蒙脱石(微晶高岭石)三大黏土矿物。另外,还有一类易溶于水的次生矿物,称水溶盐。水溶盐的矿物种类很多,按其溶解度可区分为难溶盐、中溶盐和易溶盐三类。难溶盐主要是碳酸钙(CaCO_3),中溶盐常见的是石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),易溶盐常见的是各种氯化物(如 NaCl 、 KCl 、 CaCl_2)以及钾与钠的硫酸盐和碳酸盐等。

2. 各粒组中所含的主要矿物成分

自然界的土是岩石风化的产物,其颗粒大小的变化很大,相差极为悬殊。大的土颗粒可大至数百毫米以上,小的土颗粒可小至千分之几甚至万分之几毫米。通常把自然界的土颗粒划分为漂石或块石、卵石或碎石、砾石、砂粒、粉粒和黏粒等六大粒组(划分标准详见表 1-1)。不同粒组的土,其矿物成分不同,性质也差别很大。

表 1-1 GB 50021—2001 及 GB 50007—2002 粒组划分标准

粒组名称	漂石(块石)粒组	卵石(碎石)粒组	砾石粒组	砂粒组	粉粒组	黏粒组
粒组范围(mm)	>200	20~200	2~20	0.075~2	0.005~0.075	<0.005

石英和长石多呈粒状,是砾石和砂的主要矿物成分,性质较稳定,强度很高。云母呈薄片状,强度较低,压缩性大,在外力作用下易变形。含云母较多的土,作为建筑物的地基时,沉降量较大,承载力较低;其作为筑坝土料时不易压实。

黏土矿物的颗粒很细,都小于 0.005 mm,多是片状(或针状)晶体,颗粒的比表面积(即单位体积或单位质量的颗粒表面积的总和)大、亲水性(指黏土颗粒表面与水相互作用的能力)强。不同类型的黏土矿物具有不同程度的亲水性。如蒙脱石是由多个晶体层构造而成的矿物颗粒,结构不稳定,水容易渗入而使晶体劈开,而且颗粒最小,所以它的亲水性最强;而高岭石颗粒相对较大,晶体结构比较稳定,亲水性较弱;伊利石则介于两者之间,但比较接近蒙脱石。黏土矿物的亲水性使黏性土具有黏聚性、可塑性、膨胀性、收缩性以及透水性小等一系列特性。

黏性土中的水溶盐,通常是由土中的水溶液蒸发后沉淀充填在土孔隙中的,它构成了土粒间不稳定的胶结物质。如黏性土中含有水溶盐类矿物,遇水溶解后会被渗透水流带走,导致地基或土坝坝体产生集中渗流,引起不均匀沉降以及强度降低。因此,通常规定筑坝土料的水溶盐含量不得超过 8%。如果水工建筑物地基土的水溶盐含量较大,必须采取适当的防渗措施,以防水土溶盐流失造成对建筑物的危害。

3. 土中的有机质

土中的有机质是在土的形成过程中动植物残骸及其分解物质与土混掺沉积在一起,经生物化学作用生成的物质。其成分比较复杂,主要是动植物残骸、未完全分解的泥炭和完全分解的腐殖质。有机质亲水性很强,因此有机土压缩性大、强度低。有机土不能作为堤坝工程的填筑土料,否则会影响工程的质量。

(二) 土的粒组划分

颗粒的大小及其含量直接影响着土的工程性质。例如:颗粒较大的卵石、砾石和砂粒

等,其透水性较大,无黏性和可塑性;而颗粒很小的黏粒则透水性较小,黏性和可塑性较大。土颗粒的大小常以粒径来表示。土的粒径与土的性质之间有一定的对应关系,土的粒径相近时,土的矿物成分接近,所呈现出的物理、力学性质基本相同。因此,通常将性质相近的土粒划分为一组,称为粒组。把土在性质上表现出有明显差异的粒径作为划分粒组的分界粒径。

粒组的划分标准,不同国家,甚至一个国家的不同部门都有不同的规定。在我国土建工程中,常用的规范系统有公路工程行业、水利工程行业和建筑工程行业等的行业规范,这三大行业的粒组划分标准是不相同的,现分别阐述如下:

建设部颁发的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)和《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中粒组划分标准如表 1-1 所示。水利部颁发的《土工试验规程》(SL 237—1999)在砂粒组与粉粒组的界限上与上述规范的划分标准基本相同,但要将卵石粒组与砾石粒组的分界粒径改为 60 mm,其粒组划分标准如表 1-2 所示。交通部颁发的《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中的粒组划分与水利部颁发的基本相同,只是将粉粒组与黏粒组的分界粒径改为 0.002 mm,其粒组划分标准如表 1-2 所示。

问题:为什么要划分粒组?一般划分为哪些粒组?

表 1-2 土的粒组划分

粒组统称	《土工试验规程》(SL 237—1999)			《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)	
	粒组划分		粒组范围(mm)	粒组划分	粒组范围(mm)
巨粒组	漂石(块石)		>200	漂石(块石)组	>200
	卵石(碎石)		200~60	卵石(小块石)组	200~60
粗粒组	砾粒 (角砾)	粗砾	60~20	粗砾	60~20
		中砾	20~5	中砾	20~5
		细砾	5~2	细砾	5~2
	砂粒	粗砂	2~0.5	粗砂	2~0.5
		中砂	0.5~0.25	中砂	0.5~0.25
		细砂	0.25~0.075	细砂	0.25~0.075
细粒组	粉粒		0.075~0.005	粉粒	0.075~0.002
	黏粒		≤0.005	黏粒	≤0.002

(三)土的颗粒级配

在自然界里,绝大多数的土都是由几种粒组混合搭配而成的,而土的性质取决于不同粒组的相对含量。土中各粒组的相对含量用各粒组质量占土粒总质量的百分数表示,称为土的颗粒级配。颗粒级配是通过颗粒大小分析试验来测定的。

1. 颗粒大小分析试验

土的颗粒大小分析试验,简称颗分试验。常用的颗分试验方法有筛分法和密度计法两种。

筛分法适用于粒径大于 0.075 mm 的粗粒土。它是用一套从上到下孔径依次由大到小的标准筛(见图 1-1),将一定质量的有代表性的风干土样倒入标准筛的顶部,再经人工或机械的方法充分振摇,然后称出留在各筛上土的质量,分别算出小于某一孔径(即粒径)的土质量占土样总质量的百分数,简称为小于某粒径的质量百分数。

密度计法适用于粒径小于 0.075 mm 的细粒土。它是将一定质量的风干土样倒入盛水的玻璃量筒中,将其搅拌成均匀的悬液状。根据土颗粒的大小不同、在水中沉降的速度也不同的特性,将密度计放入悬液中,测记 1 min、5 min、30 min、120 min、1 440 min 的密度计读数,然后通过公式算出不同土粒的粒径及其小于该粒径的质量百分数。密度计法的原理和试验方法请参阅有关的土工试验规范。

若土中粗、细粒组兼有,可将土样用振筛法或水冲法过 0.075 mm 的筛子,使其分为两部分。粒径大于 0.075 mm 的土样用筛分法进行分析,粒径小于 0.075 mm 的土样用密度计法进行分析,然后将两种试验成果组合在一起。

问题:为什么采用不同的颗粒分析方法?

2. 颗粒级配曲线

土颗粒大小分析试验的成果,通常在半对数坐标系中点绘成一条曲线,称为土的颗粒级配曲线,如图 1-2 所示。图中曲线的纵坐标为小于某粒径的土的质量百分数,横坐标为用对数尺度表示的土粒粒径。因为土中的粒径通常相差悬殊,横坐标用对数尺度可以把

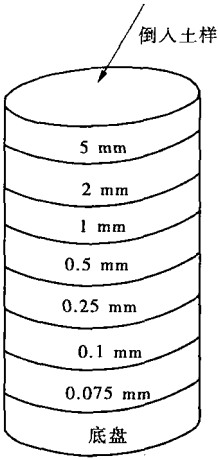


图 1-1 标准筛示意

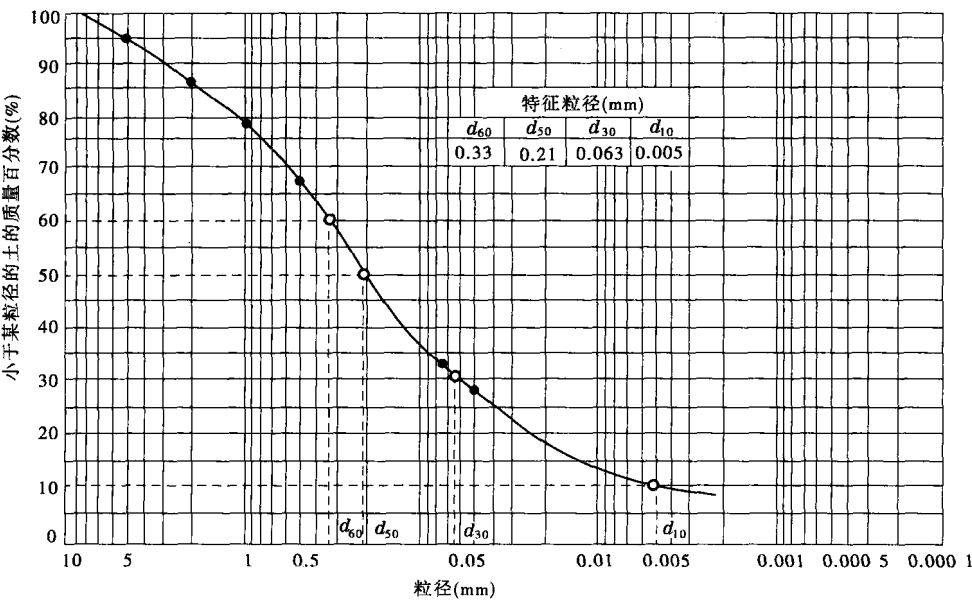


图 1-2 土的颗粒级配曲线

细粒部分的粒径间距放大,而将粗粒部分的粒径间距缩小,把粒径相差悬殊的粗、细粒的含量都表示出来,尤其能把占总质量比例小、但对土的性质影响较大的微小土粒部分的含量清楚地表示出来。

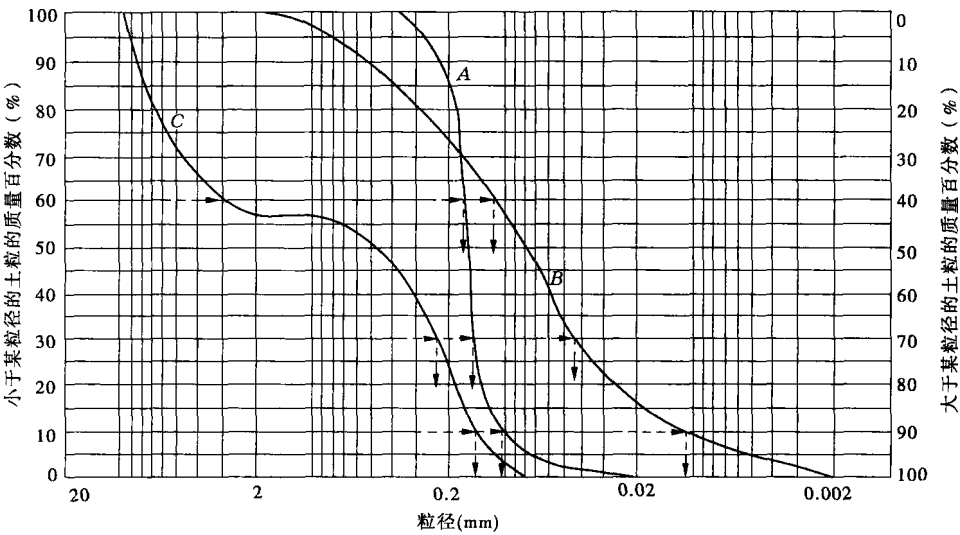
由于粒径相近的颗粒所组成的土,具有某些共同的成分和特性,所以常根据颗粒级配曲线计算各粒组的百分比含量,以此评价土的级配是否良好,并作为对土进行工程分类的依据。

土中各粒组的相对含量为两个小于分界粒径质量百分数之差。图 1-2 中的曲线,对应各粒组的百分比含量分别为:砾粒(60~2 mm)占 $100\% - 87\% = 13\%$,砂粒(2~0.075 mm)占 $87\% - 33\% = 54\%$ 。

3. 级配良好与否的判别

级配良好的土,粗、细颗粒搭配较好,粗颗粒间的孔隙被细颗粒填充,易被压实到较大的密度,因而渗透性和压缩性较小,强度较大。所以,颗粒级配常作为选择填筑土料的依据。在颗粒级配曲线上,可根据土粒的分布情况,定性地判别土的均匀程度或级配情况。

如果曲线的坡度是渐变的,则表示土的颗粒大小分布是连续的,称为连续级配;如果曲线中出现水平段,则表示土中缺乏某些粒径的土粒,这样的级配称为不连续级配。如图 1-3 中的曲线 C 所示,粒径 1~2 mm 曲线是水平的,说明该土缺少这部分粒径的土粒,所以颗粒大小分布是不连续的。如果曲线形状平缓(如图 1-3 中的曲线 B),土粒大小变化范围大,表示土粒大小不均匀,土的级配良好;如果曲线形状较陡(如图 1-3 中的曲线 A),土粒大小变化范围窄,表示土粒均匀,土的颗粒级配不良。



土样 编号	不同粒级 (mm) 的土粒组成 (%)				d_{60}	d_{10}	d_{30}	C_u	C_c
	10~2	2~0.075	0.075~0.005	<0.005					
A	0	95	5	0	0.165	0.11	0.15	1.5	1.24
B	0	52	44	4	0.115	0.012	0.044	9.6	1.40
C	43	57	0	0	3.00	0.15	0.25	20.0	0.14

图 1-3 三种不同土的颗粒级配曲线

为了能定量地衡量土的颗粒级配是否良好,常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个判别指标

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

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

式中 d_{60} 、 d_{30} 、 d_{10} ——颗粒级配曲线上纵坐标为 60%、30%、10% 时所对应的粒径, d_{10} 称为有效粒径, d_{60} 称为控制粒径。

不均匀系数 C_u 是反映级配曲线坡度和颗粒大小不均匀程度的指标。 C_u 值愈大,表示颗粒级配曲线的坡度愈平缓,土粒粒径的变化范围愈大,土粒就愈不均匀;反之, C_u 值愈小,表示颗粒级配曲线的坡度愈陡,土粒粒径的变化范围愈小,土粒也就愈均匀。工程上常将 $C_u < 5$ 的土称为均匀土,把 $C_u \geq 5$ 的土称为不均匀土。

曲率系数 C_c 是反映 d_{60} 与 d_{10} 之间曲线主段弯曲形状的指标。一般, C_c 值在 1~3 时,颗粒级配曲线主段的弯曲适中,土粒大小的连续性较好; C_c 值小于 1 或大于 3 时,颗粒级配曲线都有明显弯曲而呈阶梯状。如图 1-3 中的曲线 C,颗粒级配不连续,主要由粗颗粒和细颗粒组成,缺乏中间颗粒。

我国水利部和交通部制定的土工试验规程中规定:级配良好的土必须同时满足两个条件,即 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$,若不能同时满足这两个条件,则为级配不良的土。

问题: 颗粒级配曲线反映的是什么? 级配良好有什么意义? 如何判别级配是否良好?

【例 1-1】 如图 1-3 所示,曲线 A、B、C 分别表示三种不同粒径组成的土,试求三种土中各粒组的百分含量为多少? 各土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 为多少? 对各种土的颗粒级配情况进行评价。

解 (1) 由曲线 A 查得各粒组的含量百分比为

砂粒 (0.075 ~ 2 mm) $100\% - 5\% = 95\%$

粉粒 (0.005 ~ 0.075 mm) 5%

查曲线 A 得知 $d_{60} = 0.165$ mm, $d_{10} = 0.11$ mm, $d_{30} = 0.15$ mm, 则有

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.165}{0.11} = 1.5 < 5 \quad (\text{土粒均匀})$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} = \frac{0.15^2}{0.165 \times 0.11} = 1.24 \quad (\text{在 } 1 \sim 3 \text{ 之间})$$

虽然 C_c 在 1~3 之间,但 $C_u < 5$,其中有一个条件不满足,故 A 土为级配不良的土。

(2) 由曲线 B 查得各粒组的含量百分比为

砂粒 $100\% - 48\% = 52\%$

粉粒 $48\% - 4\% = 44\%$

黏粒 4%

查曲线 B 得知 $d_{60} = 0.115$ mm, $d_{10} = 0.012$ mm, $d_{30} = 0.044$ mm, 则有

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0.115}{0.012} = 9.6 > 5 \quad (\text{土粒不均匀})$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} = \frac{0.044^2}{0.115 \times 0.012} = 1.4 \quad (\text{在 } 1 \sim 3 \text{ 之间})$$

由于同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件,故 B 土为级配良好的土。

(3) 由曲线 C 查得各粒组的含量百分比为:

砾粒 $100\% - 57\% = 43\%$

砂粒 57%

查曲线 C 得知 $d_{60} = 3.00 \text{ mm}$, $d_{10} = 0.15 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.25 \text{ mm}$, 则有

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{3.00}{0.15} = 20 > 5 \quad (\text{土粒不均匀})$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} = \frac{0.25^2}{3 \times 0.15} = 0.14 \quad (\text{不在 } 1 \sim 3 \text{ 之间})$$

虽然 $C_u > 5$,但因缺乏中间粒径, C_c 不在 $1 \sim 3$ 之间,故 C 土为级配不良的土。

三、土中的水

(一) 结合水

研究表明,大多数黏土颗粒表面带有负电荷,因而在土粒周围形成了具有一定强度的电场,使孔隙中的水分子极化,这些极化后的极性水分子和水溶液中所含的阳离子(如钾、钠、钙、镁等的阳离子),在电场力的作用下定向地吸附在土颗粒周围,形成一层不可自由移动的水膜,该水膜称为结合水,如图 1-4(a)所示。最靠近颗粒表面的水分子受电场力的作用很强,可以达到 1000 MPa 。随着远离土粒表面,电场力迅速减小,当达到一定距离时电场力消失,如图 1-4(b)所示。为此,结合水又可根据受电场力作用的强弱分为强结合水和弱结合水。

1. 强结合水

强结合水是指被强电场力紧紧地吸附在土粒表面附近的结合水膜。这部分水膜因受电场力作用大,与土粒表面结合得十分紧密,所以分子排列密度大,其密度一般为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点很低,可达 -78°C ,沸点较高,在 105°C 以上才蒸发,而且很难移动,没有溶解能力,不传递静水压力,失去了普通水的基本特性,其性质接近于固体,具有很大的黏滞性、弹性和抗剪强度。

2. 弱结合水

弱结合水是指分布在强结合水外围的结合水。这部分水膜由于距颗粒表面较远,受电场力作用较小,它与土粒表面的结合不如强结合水紧密。其密度一般为 $1.0 \sim 1.7$

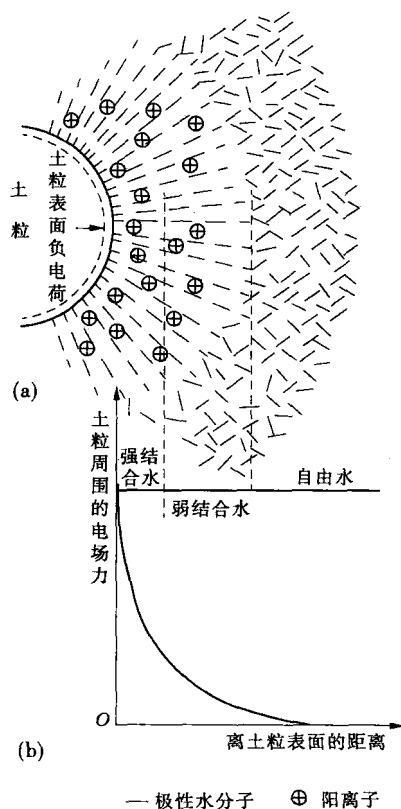


图 1-4 土粒与水分子相互作用的模拟