

高等院校土木工程专业教材

Soil Geology and Soil Mechanics

# 土质学与土力学

主 编 李艳春  
副主编 张建新 刘熙媛  
主 审 刘春原

中国建材工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

土质学与土力学/李艳春主编. —北京:中国建材工业出版社, 2005.8

ISBN 7-80159-944-6

I. 土... II. 李... III. ①土质学—高等学校—教材②土力学—高等学校—教材 IV. ①P642.1②TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 079212 号

## 内 容 提 要

本书系统介绍了土质学与土力学的基本概念及计算理论和方法,内容包括绪论、第一章 土的物理性质及工程分类、第二章 黏性土的物理化学性质、第三章 土中水的运动规律、第四章 土体中的应力场、第五章 土的压缩性与地基沉降计算、第六章 土的抗剪强度特性、第七章 土的动力特性、第八章 土压力计算、第九章 土坡稳定分析、第十章 地基承载力分析理论。各章均附有较经典的例题、习题及思考题,并附有习题的参考答案。

本教材是根据全国高校大土木工程的教学大纲编写而成,其内容广泛、适应面广。可用作建筑工程、公路与城市道路工程、桥梁工程、隧道与地下工程、水利工程等专业的本科教材,也可作为上述专业的工程技术人员及报考相关专业方向硕士研究生的参考书。

土质学与土力学

主 编 李艳春

副主编 张建新 刘熙媛

主 审 刘春原

出版发行 中国建材工业出版社

地 址 北京市西城区车公庄大街6号

邮 编 100044

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京鑫正大印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.25

字 数 374千字

版 次 2005年8月第一版

印 次 2005年8月第一次

定 价 23.00元

---

网上书店 : [www.ecool100.com](http://www.ecool100.com)

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

# 前 言

1998年7月教育部对高等学校本科专业目录做了修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,包括建筑工程、公路与城市道路工程、桥梁工程、隧道与地下工程等近8个专业的内容。《土质学与土力学》作为“大土木”的一门专业基础课,本教材的编写本着培养“宽口径”复合型人才的原则,力求突出本专业基础课共性的内容。在处理与专业技术规范的关系时,遵循以阐明土质学及土力学的基本原理为主并有助于学生正确理解规范的原则,教材中对不同行业规范的内容进行列举及比较,使学生能灵活使用不同行业的工程建设规范,有利于培养学生适应工程实践的能力。

本教材是综合全国高校土木工程各专业教材指导委员会指定的《土力学》教学大纲编写而成。主要遵循以下原则:(1)强调基本概念、基本原理与方法。突出重点、兼顾全面,对比较庞杂、冗余的部分尽量削枝强干。(2)扩展土木工程专业学生的知识面,并注意理论与实际相结合,通过对一些工程问题的分析,有助于培养学生分析与解决实际问题的能力。(3)注意适应多层次教学与培养的要求。将教材分为基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,以适应各高校人才培养规格及教学需求多样性的要求。(4)反映我国有关土木工程方面新规范的成果。注意体现原创性内容,并注意反映土质学与土力学学科发展新方向和水平,适当吸收国内外在该研究领域比较成熟的新内容。

为了满足国家建设形势的发展及土木工程建筑内容的新特点、各行业新规范的需要,根据近年来教学实践的探讨、各行业需求的特点及工程实践的需要,本书对黏土的物理化学性质进行研究,并单列一章,对土中各种水的运动规律进行了系统研究,使其适用面更宽。对各章的一些关键词及专业术语采用了双语(中文与英文)的表达方式,以方便同学查阅外文资料。

本教材包括以下内容:绪论、第一章土的物理性质及工程分类、第二章黏性土的物理化学性质、第三章土中水的运动规律、第四章土体中的应力场、第五章土的压缩性与地基沉降计算、第六章土的抗剪强度特性、第七章土的动力特性、第八章土压力计算、第九章土坡稳定分析、第十章地基承载力分析理论。

参加编写人员为具有多年教学经验和实践经验的一线教师编写。本书由河北工业大学李艳春教授任主编,天津城建学院张建新教授、河北工业大学刘熙媛讲师任副主编,徐东强教授、尚军讲师参编,河北工业大学刘春原教授任主审。

各章编写情况如下:李艳春编写:绪论、第三章、第四章;张建新编写:第一章、第二章;刘熙媛编写:第五章、第六章、第七章;徐东强编写:第九章;尚军编写:第八章、第十章。

由于编者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。书中引用了一些现有教材及文献的研究成果,在此,向原作者表示深深的致谢!

李艳春

2005年5月30日

# 目 录

绪 论.....	1
第一章 土的物理性质及工程分类.....	5
第一节 土的生成.....	5
第二节 土的组成及土的颗粒特征.....	6
第三节 土的物理特性指标(三相比例指标).....	11
第四节 黏性土的界限含水量及状态指标.....	15
第五节 无黏性土的密实度.....	17
第六节 土的工程分类.....	19
思考题.....	23
习 题.....	23
第二章 黏性土的物理化学性质.....	25
第一节 键力的基本概念.....	25
第二节 黏土矿物颗粒的结晶结构.....	26
第三节 黏土颗粒的胶体化学性质.....	28
第四节 黏性土的工程性质及其变化机理.....	30
思考题.....	32
第三章 土中水的运动规律.....	33
第一节 土的毛细性.....	33
第二节 土的渗透性.....	37
第三节 二维渗流与流网.....	48
第四节 冻土现象及其工程问题.....	54
思考题.....	57
习 题.....	57
第四章 土体中的应力场.....	59
第一节 概述.....	59
第二节 土体中自重应力场.....	61
第三节 地基中的附加应力场.....	64
第四节 有效应力原理.....	89

思考题 .....	93
习 题 .....	93
第五章 土的压缩性与地基沉降计算 .....	95
第一节 概述 .....	95
第二节 土的压缩性及土的压缩性指标 .....	96
第三节 地基沉降计算.....	105
第四节 太沙基一维固结理论.....	118
思考题.....	131
习 题.....	132
第六章 土的抗剪强度理论.....	133
第一节 概述.....	133
第二节 土的抗剪强度与强度指标.....	134
第三节 土的抗剪强度指标的试验方法及其应用.....	138
第四节 孔隙压力系数及土的剪胀性.....	147
第五节 对土的抗剪强度研究的若干问题简介.....	153
思考题.....	158
习 题.....	159
第七章 土的动力特性.....	160
第一节 动荷载类型及其应用.....	160
第二节 土的动力特性试验.....	162
第三节 动荷载下土的应力-应变关系及动力特性参数 .....	168
第四节 土在动荷载下的强度特性.....	171
第五节 土的振动液化.....	173
第六节 土的压实性.....	178
思考题.....	182
习 题.....	182
第八章 土压力.....	183
第一节 概述.....	183
第二节 静止土压力.....	184
第三节 朗肯土压力理论.....	185
第四节 库仑土压力理论.....	190
第五节 土压力计算中的几个应用问题的讨论.....	197
思考题.....	199
计算题.....	199

第九章 土坡稳定分析.....	200
第一节 概述.....	200
第二节 无黏性土土坡的稳定分析.....	201
第三节 黏性土土坡稳定分析.....	202
第四节 非圆弧滑动面土坡稳定分析.....	212
第五节 土坡稳定分析的几个问题讨论.....	215
思考题.....	216
习 题.....	216
第十章 地基承载力分析理论.....	218
第一节 地基的破坏模式.....	218
第二节 临塑荷载、临界荷载的确定 .....	219
第三节 地基极限承载力的计算.....	222
第四节 地基容许承载力的确定及讨论.....	228
思考题.....	230
计算题.....	230
附录 习题参考答案.....	231
参考文献.....	233

# 绪 论

土是由地壳表层的整体岩石经受风化作用后形成的松散的不连续的介质体。在工程建设中,土体可以作为支撑任何建筑物的地基,也可作为一种建筑材料(如铁路、公路路基,工业与民用建筑物的修建场地、堤坝等的填料),或作为结构物的周围介质或环境(如地下工程、隧道周围的土体)。

## 一、土力学学科的特点及研究对象

土力学是一门研究与土的工程问题有关的学科。

现代土力学是由土质学与土力学共同构成的,两者虽属两个分支,但其关系非常密切,并在发展过程中相互渗透、互相结合。土质学(Soil Geology)是地质学科的一个分支,它是从土的成因出发,研究土的基本工程性质及影响土性质变化的本质因素。土力学(Soil Mechanics)是工程力学的一个分支,主要研究土体在荷载作用下,土中的应力、变形、强度和稳定性,及渗流规律的一门学科。

土力学学科的产生与发展源于社会生产力的发展,与工程实践有密切的关系。无论将土作为地基、作为一种建筑材料,或作为结构物的周围环境介质均与土力学学科所研究的内容有关。

土力学的研究对象是分散土。从工程的角度来看,它的范围很大,包括由  $1 \times 10^{-6}$ mm 的极细黏土颗粒到几米大小的岩石碎块。分散土广泛地分布在地壳表面,其性质随形成过程和自然环境的不同而有差异。与其他材料相比,土体具有以下三个基本特征:

(1)分散性。土体不是一种连续介质,它是由各种不同粒径的颗粒集合组成的,颗粒间的粘结强度远比颗粒本身强度小得多,因此土是散粒体介质,具有分散性。

(2)土是三相体系。由土颗粒构成土的骨架,其间存在孔隙,孔隙中有水与空气的存在,因而将土看做由固相(土颗粒)、液相(水)和气相(空气)所组成的三相体系。土的三相之间在质量和体积上的比例关系,尤其孔隙水的作用,将对土的物理、物理-化学性质及力学性质有很大影响。

(3)土的自然变异性和不均匀性。因沉积年代和地质历史条件不同,使土的工程性质具有地域的差异。如黄土为干旱、半干旱地区的沉积物,而软土则多为沿海地区海相或湖相沉积物,在黄土地区的黄土,表层是形成历史较短的新近堆积的近期  $Q_4$  黄土,深层可能为沉积历史较长的更新世  $Q_3$ 、 $Q_2$  的黄土,它们的物理力学性质则有较大的差别。

由于土具有上述基本特征,因而与钢材、混凝土等材料相比,土的工程特性表现为具有复杂性(土的性质随其成因、历史的不同而有差异)、易变性(由于土的分散性,其性质易受到外界环境如温度、湿度的影响而发生变化),这增加了对土的工程性质研究的困难程度。在进行工程建设时,应特别注意土的特点和工程性质差异,进行认真勘探和调查,并注意密切结合土的实际性质进行设计和施工。否则,会影响工程的经济合理性和安全使用。

## 二、土力学研究的内容和研究方法

通常土力学研究的内容包括以下几方面：

1. 研究土的基本性质。即土的物理性质、黏土的物理化学性质、土的压缩性质、土的渗透性质及土的抗剪强度特性。
2. 研究土的应力与变形的关系。即研究土体在外荷载与自重作用下，土中应力的分布规律，应力状态随时间发生变化的情况，土体的变形总量，以及变形随时间发展的过程。
3. 研究作为工程设计中最基本的计算理论和方法。如有关挡土墙土压力计算的库仑理论和朗肯理论，边坡稳定性验算的毕肖普理论，有关地基承载力计算的太沙基理论、普朗特理论等；有关土中水渗流分析的达西渗流理论。
4. 研究土工试验技术。如土的基本物性指标的检测、土的颗粒分析试验，土的室内压缩试验、室外载荷试验方法，土的直接剪切试验、三轴剪切试验等试验技术及试验成果的分析应用。

由于土具有分散性、复杂性及易变性的非连续介质特点，因此不能单凭数学和力学的方法进行研究。在研究土工问题时，既要运用一般连续体力学的基本原理和方法，建立力学模型，并将土的性质、加荷载条件和边界条件理想化，对土工问题的解决办法作一定程度的简化。又要借助现场勘察、测试和室内试验等手段获取计算参数进行计算，并在工程进行过程中，不断采集数据进行分析，以避免理论计算出现的误差对工程造成的危害。

近年来国内外一些学者与工程技术人员提出了各种反映土的应力-应变非线性关系的本构定律，运用数值分析方法进行研究，可以解决复杂的土质条件、荷载情况和边界条件下的土工问题。同时，近年来在土力学学科中，概率统计方法在研究土性状的变异性与不确定性的可靠度理论亦有很大的发展。土力学与振动理论、随机过程理论及振动测试技术的结合，形成了土动力学，使研究土的动力特性（如地震或在动荷载作用下的土的动强度、动弹性模量、动土压力及饱和砂土的振动液化等）成为可能。

## 三、土力学的发展简介

人类自远古以来就广泛利用土作为建筑物地基和建筑材料。从新石器时代的半坡村遗址的土台和石基到春秋战国时代至秦朝的万里长城、隋朝的郑州超化寺、赵州安济桥，从中国宏伟的宫殿、寺院到埃及古老的金字塔、雅典的神庙，无一不体现着人类与土打交道进行工程建设的丰富实践经验和高超的工程技术水平。

土力学的研究始于18世纪工业革命时期。欧洲工业革命的兴起，大规模的城市、水利和道路、铁路的兴建，遇到了很多与土力学有关的问题，随着这些问题的解决，土力学的理论逐步地产生并得到发展。1773年，法国学者库仑(C. A. Coulomb)根据实验提出了砂土抗剪强度理论和挡土墙土压力的滑楔理论，即库仑理论；1856年，法国学者达西(H. Darcy)创立了砂土的渗透定律，即达西定律；1869年，英国学者朗肯(W. J. M. Rankine)又从不同的途径建立了挡土墙的土压力理论，即朗肯理论；1885年，法国学者布辛奈斯克(J. Boussinesq)求得半无限弹性体在垂直集中力作用下的应力和变形的理论解答。

从20世纪20年代起，对土的研究有了迅速发展。如1920年法国学者普朗特(L. Prandtl)推出了地基滑动面的数学公式。1922年，瑞典学者费兰纽斯(W. Fellenius)提出了进行土坡稳

定性分析的圆弧滑动面法,即条分法;1925年,美国著名科学家、土力学的奠基人太沙基(K. Terzaghi)归纳了前人的成就,出版了《土力学》专著,使土力学成为一门独立的学科。

我国一些学者将土力学的发展划分为三个阶段:①奠基阶段。从库仑、朗肯、费兰纽斯等人建立的土力学理论起到太沙基《土力学》专著为止;②土力学理论的发展与逐步完善阶段,从太沙基的专著《土力学》一书的出版,到有效应力原理、一维固结理论的应用与发展、土的非线性理论、土的剪胀性及土的加工硬化与软化理论的建立与应用;③土力学的新时期,20世纪60年代以后,现代科技的发展尤其电子技术渗入到土力学的研究领域,计算机的出现、计算方法的改进与发展、测试技术的发展、本构模型的建立与发展等,推动了土力学研究工作的深入开展,土力学的理论发展也有了令人瞩目的成就。

也有一些学者将土力学的发展划分为两个阶段:①经典土力学阶段。时间为1923~1962年,其标志是一个原理(有效应力原理)、两个理论(饱和土固结理论和土体极限平衡理论);②现代土力学阶段。时间为1963年以后,其标志是一个模型(本构模型)、三个理论(非饱和土固结理论、液化破坏理论和逐渐破坏理论)、四个分支(理论土力学、计算土力学、实验土力学和应用土力学)。

#### 四、土力学与其他学科的联系及学习方法

土力学涉及的自然科学范围很广。土力学的基础是连续介质力学,同时土力学又与工程地质、水力学、流变力学、高等数学、材料力学、弹性力学等学科密切相关。在“大土木”专业中(无论是建筑工程,还是道路与桥梁工程,矿井建设工程等)都要涉及岩土工程。比如建筑物或构筑物、桥梁、水坝等的基础设计与施工,道路路基设计及路基填筑材料的选择,山区或丘陵地带施工的挡土结构计算,山坡的稳定性分析及加固,软土地基的加固处理等都离不开土力学理论。因此土力学是土木工程专业重要的技术基础课。

由于土力学涉及的学科较多,因此本课程中出现的新名词及术语较多,另外各章节之间的相结独立性较强,联系不太紧密,不像其他力学那样具有严格的逻辑系统性和依赖关系。对于初学者来说,常会感到头绪繁多,抓不住中心,难以消理解。为此,在学习土力学课程时一般应注意以下几点:

(1)注意牢固而准确地掌握土的三相性、分散性等基本概念,土的三相性是理解和掌握土的其他物理力学特性的基础。

(2)着重于搞清基本概念,掌握基本计算方法。土力学的每一章都有一些重要而基本的概念和相应的计算方法。对土力学中的计算公式,应注意其适用条件。注意土力学所引用的其他学科理论(如一般连续力学基本原理本身的基本假定和适用范围),分析土力学在利用这些理论解决土的力学问题时又新增了哪些假定,以及这些新的假定与实际问题相符合的程度如何。

(3)抓住中心建立联系。教材中的一、二章反映土的物理作用、化学作用,这些作用影响到土的工程性质。土的变形与土中应力的大小有关,与土中水的移动有关。而挡土墙土压力计算、边坡稳定性验算、地基承载力的计算公式均是基于土的强度理论推导的。因此学习中应注意它们之间的联系。

(4)注意综合利用土性知识和土力学理论解决地基实际问题。学习中应注意给定的条件在实际工程中具体会怎样体现,改变这些条件可能导致哪些工程的后果。

(5)在学习土力学过程中,要善于转变对问题求解的思维方式。由于土的复杂性和易变性,使得对许多较复杂的工程问题需要做近似处量,因而应用土力学理论去解决实际问题时,常带有较多的条件性和作一些在工程上可以允许的假定,如基底应力的简化计算、对条形基础的假定、土中水的流动形式、墙后及边坡土体滑动面的形式等,因而必然带来一定的误差,对同一习题的求解,会因为假定的不同,而采用不同的方法,其结果也不同。习惯于高等数学求唯一解的思维方式往往不适于解决土的工程力学问题,要逐渐接受和掌握多种方法求解一个问题并对多种解答做出综合评判的思维方式。

# 第一章 土的物理性质及工程分类

## 本章要点

本章主要讨论土的物质组成以及定性、定量描述其物质组成的方法,包括土的三相组成、土的三相指标、土的结构构造、黏性土的界限含水量、砂土的密实度和地基土的工程分类等。这些内容是学习土力学原理和基础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时讨论的最基本内容。

土(soil)是由固体土颗粒(又称固相)、水(液相)和气体(气相)所组成,一般情况下为三相体。当土是由土颗粒和空气(干土)或由土颗粒和水(饱和土)组成时,土为二相体系。土中颗粒的大小、成分及三相之间的比例关系,反映出土的不同性质,如干湿、轻重、松紧及软硬等。土的这些物理性质与力学性质之间有着密切的联系。如土松而湿则强度低而压缩性大;反之,则强度高而压缩性小。故土的物理性质是土的最基本性质,在研究土的各种工程性质时,首先注意到土的物理性质。

用物理的观点,定量地描述土粒的物理特性、土的物理状态,以及三相比例关系,即构成土的各种物理指标特性。本章将分别阐明土的组成、土的基本物理性质指标及其有关特征,并利用这些指标及特征对地基土进行工程分类。

## 第一节 土的生成

土是由连续、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(堆)积物。在漫长的地质年代中,由于各种内力和外力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,而土又经压密固结、胶结硬化也可再生成岩石。作为建筑物地基的土,是土力学研究的主要对象。

岩石(rock)是一种或多种矿物的集合体。它的特征及其工程性质,在很大程度上决定于它的矿物成分。矿物是地壳中天然生成的自然元素或化合物,它具有一定的物理性质、化学成分和形态。组成岩石的矿物称为造岩矿物。岩石按成因划分,可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。

由原岩风化产物经各种地质作用而成的沉积物,至今其沉积历史不长,所以只能形成未经胶结硬化的沉积物,也就是通常所说的“第四纪沉积物”或“土”。不同成因类型的第四纪沉积物,各具有一定的分布规律和工程地质特征。以下介绍其中主要的几种成因类型。

残积物是残留在原地未被搬运的那一部分原岩风化剥蚀后的产物,而另一部分则被风和降水所带走。它的分布主要受地形的控制。由于风化剥蚀产物是未经搬运的,颗粒磨圆或分选较差,没有层理构造。

坡积物是雨雪水流的地质作用将高处岩石风化产物缓慢地洗刷剥蚀、顺着斜坡向下逐渐移动、沉积在较平缓的山坡上而形成的沉积物。一般坡积物土质不均匀,且其厚度变化很大,尤其是新近堆积的坡积物,土质疏松,压缩性较高。

由暴雨或大量融雪骤然集聚而成的暂时性山洪急流,它冲刷地表,挟带着大量碎屑物质堆积于山谷冲沟出口或山前倾斜平原而形成洪积物。靠近山地的洪积物的颗粒较粗,地下水埋藏较深,土的承载力一般较高,常为良好的天然地基;离山较远地段较细的洪积物,其成分均匀、厚度较大,通常也是良好的地基。

冲积物是河流流水的地质作用将两岸基岩及其上部覆盖的坡积、洪积物质剥蚀后搬运、沉积在河流坡降平缓地带形成的沉积物。其特点是具有明显的层理构造。碎屑物质常呈亚圆形或圆形颗粒,其搬运距离越长,则沉积的物质越细。

除了上述四种成因类型的沉积物外,还有海洋沉积物、湖泊沉积物、冰川沉积物及风积物等。

## 第二节 土的组成及土的颗粒特征

### 一、土的组成

#### (一)土的固体颗粒

岩石经风化作用形成的大小不同的固体土颗粒(简称土粒,soil particle),它的矿物成分、颗粒大小、形状及级配是影响土的物理性质的重要因素。

土粒分无机矿物颗粒和有机质,成为土的骨架。矿物颗粒由原生矿物(original mineral)和次生矿物(secondary mineral)组成。

原生矿物是指岩浆在冷凝过程中形成的矿物,如石英、长石、云母等。原生矿物经化学风化作用后发生化学变化而形成新的次生矿物,次生矿物按其与水的作用可分为可溶的或不可溶的。次生矿物的成分和性质均较复杂,对土的工程性质影响也较大。

#### (二)土中的水

土中水(water)可以处于液态、固态或气态。土中细粒越多,即土的分散度越大,土中水对土性影响也愈大。土中水对细粒土性质的影响,使其产生黏性、塑性及胀缩性等一系列变化。究其原因,可从土中水的存在形态及其与土粒的相互作用进行分析。土中液态水主要有结合水和自由水两类。

##### 1. 结合水

结合水是指土粒表面由电分子引力吸附的土中水。研究表明,细小土粒表面带负电荷,围绕土粒形成电场。在土粒电场范围内的水分子以及水溶液中的阳离子(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等)一起被吸附在土粒周围。水分子是极性分子,受电场作用而定向排列,且愈靠近土粒表面吸附愈牢固。随着距离的增大,吸附力减弱,活动性增大,因此可分为强结合水和弱结合水。强结合水为受土粒表面强大吸引力(可达几千至几万个大气压力)作用吸附于土粒表面的结合水,又称吸着水。它没有传递静水压力和溶解盐类的能力,不受重力作用,具有极大的黏滞性、弹性和抗剪强度。黏

性土仅含吸着水时呈固体状态,磨碎后则呈粉末状态;弱结合水又称薄膜水,是位于强结合水外围的一层水膜,具有较高的黏滞性和抗剪强度,不过仍不能传递静水压力,由于弱结合水的存在,使土具有可塑性。随着与土粒表面的距离增大,吸附力减小,弱结合水逐渐过渡为自由水。

## 2. 自由水

在土粒电场影响范围以外的水称自由水,它受重力作用,能传递静水压力和溶解盐类,温度在0℃时结冰。自由水按其移动时所受作用力的不同,可分为重力水和毛细水。重力水是在土孔隙中受重力作用能自由流动的水,一般存在于地下水水位以下的透水层中。重力水在土孔隙中流动时,产生动水压力,能带走土中细颗粒,而且还能溶解土中的盐类。这两种作用使土孔隙增大、压缩性提高和抗剪强度降低;毛细水是受水与空气界面的表面张力作用而存在于细孔隙中的自由水,一般存在于地下水水位以上的透水层中。由于表面张力作用,地下水沿着不规则的毛细孔上升,形成毛细水上升带。砂土、粉土及粉质黏土中毛细水含量较大。毛细水上升到地表会引起沼泽化、盐渍化,而且还会使地基润湿,降低强度,增大变形量。

### (三)土中气体

土中气体以两种形式存在,一种与大气相通;另一种则封闭在土孔隙中与大气隔绝。在接近地表的粗粒土中,土孔隙中的气体常与大气连通,其含量决定于孔隙的体积和孔隙被水填充的程度,它对土的性质影响不大。在细粒土中常存在与大气隔绝的封闭气泡,它不易逸出,因此增大了土的弹性和压缩性,同时降低了土的透水性。在淤泥和泥炭土层中,由于微生物的活动和分解,在土中产生了一些可燃气体(如硫化氢、甲烷等),使土层在自重作用下不易压密而具有高压缩性。

## 二、土的颗粒特征

### (一)土粒大小及粒组划分

土粒的大小称为粒度,通常以粒径表示。界于一定粒度范围内的土粒,称为粒组(grain-group)。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。土的粒组划分方法各行业部门并不完全一致,表1-1是一种常用的土粒粒组的划分方法,表中根据国标《土的分类标准》(GBJ 145—90)新规定的界限粒径200、60、2、0.075和0.005mm把土粒粒组划分为巨粒、粗粒和细粒三个粒组统称,再分为六大粒组:漂石或块石颗粒、卵石或碎石颗粒、圆砾或角砾颗粒、砂粒、粉粒及黏粒。

表 1-1 土粒粒组的划分

粒组统称	粒 组 名 称		粒径范围(mm)	一 般 特 征
巨 粒	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		200~60	
粗 粒	圆砾或角砾 颗 粒	粗	60~20	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	20~5	
		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,而压缩性增加,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	0.25~0.075	

粒组统称	粒组名称	粒径范围(mm)	一般特征
细粒	粉粒	0.075~0.005	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
	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

注:1.漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆状(圆形或亚圆形)块石、碎石和角砾颗粒均呈棱角状。

2.粉粒或称粉土粒,粉粒的粒径上限0.075mm相当于200号筛的孔径。

3.黏粒或称黏土粒,黏粒的粒径上限也有采用0.002mm为标准的。

## (二)土粒粒度分析方法

土粒的大小及其组成情况,通常以土中各个粒组的相对含量(是指土样各粒组的质量占土粒总质量的百分数)来表示,称为土的颗粒级配(grain-size gradation)或粒度成分。

### 1. 颗粒分析试验

土的颗粒级配或粒度成分是通过土的颗粒分析试验测定的,常用的测定方法有筛分法和沉降分析法。前者是用于粒径小于等于60mm、大于0.075mm的粗粒组,后者用于粒径小于0.075mm的细粒组。当土内兼含大于和小于0.075mm的土粒时,两类分析方法可联合使用。沉降分析法有密度计法(比重计法)、移液管法等。

筛分法试验是将风干、分散的代表性土样通过一套自上而下孔径由大到小的标准筛(例如60mm、20mm、2mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm),称出留在各个筛子上的干土重,即可求得各个粒组的相对含量。通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累积重量及累计百分含量。

沉降分析法的理论基础是土粒在水中的沉降原理,见图1-1所示,将定量的土样与水混合倾注量筒中,悬液经过搅拌,使各种粒径的土粒在悬液中均匀分布,此时悬液浓度(单位体积悬液内含有的土粒重量)在上下不同深度处是相等的。但静置后,土粒在悬液中下沉,较粗的颗粒沉降较快,图中在深度 $L_i$ 处只含有 $\leq d_i$ 粒径的土粒,悬液浓度降低了。如在 $L_i$ 深度处考虑一小段 $mn$ ,则 $mn$ 段悬液的浓度( $t_i$ 时)与开始浓度( $t=0$ )之比,即可求得 $\leq d_i$ 的累计百分含量。关于 $d_i$ 的计算原理,土粒下沉时的速度与土粒形状、粒径、质量密度以及水的黏滞度有关。当土粒简化为理想球体时,土粒的沉降速度可以用G.G.斯笃克斯(Stokes,1845)定律计算:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} g d^2 \quad (1-1)$$

式中  $v$ ——土粒在水中的沉降速度,cm/s;

$g$ ——重力加速度,981cm/s<sup>2</sup>;

$\rho_s$ 、 $d$ ——土粒的密度, g/cm<sup>3</sup>和直径, cm;

$\rho_w$ 、 $\eta$ ——水的密度, g/cm<sup>3</sup>和黏滞度, 10<sup>-3</sup>Pa·s。

进一步考虑将速度 $v$ 和土粒密度 $\rho_s$ 可表达为:

$$v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t} \text{ 和 } \rho_s = G_s \rho_w \approx G_s \rho_w \quad (1-2)$$

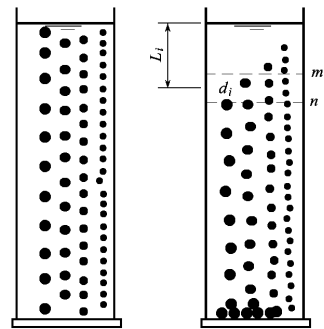


图 1-1 土粒在悬液中的沉降

代入式(1-1),可变换为 
$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-3)$$

水的  $\eta$  值由温度确定,斯笃克斯定律假定:①颗粒是球形的;②颗粒周围的水流是线流;③颗粒大小要比分子大得多。理论公式求得的粒径并不是实际的土粒尺寸,而是与实际土粒在液体中具有相同沉降速度的理想球体的直径(称为水力当量直径)。此时,土粒沉降距离  $L$  处悬液密度,可采用密度计法(即比重计法)或移液管法测得,并可由此计算出小于该粒径  $d$  的累计百分含量。采用不同的测试时间  $t$ ,即可测得细颗粒各粒组的相对含量。

## 2. 颗粒级配累计曲线(grading curve)

根据颗粒分析实验结果,常采用累计曲线法表示土的颗粒级配。该法是比较全面和通用的一种图解法,其特点是可以简单获得定量指标,特别适用于几种土级配好坏的相对比较。累计曲线图的横坐标为粒径,由于土粒粒径的值域很宽,因此采用对数坐标表示,纵坐标为小于(或大于)某粒径的土重(累计百分)含量,见图 1-2 所示。由累计曲线的坡度可以大致判断土粒的均匀程度或级配是否良好。如曲线较陡,表示粒径大小相差不多,土粒较均匀,级配不良;反之,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。

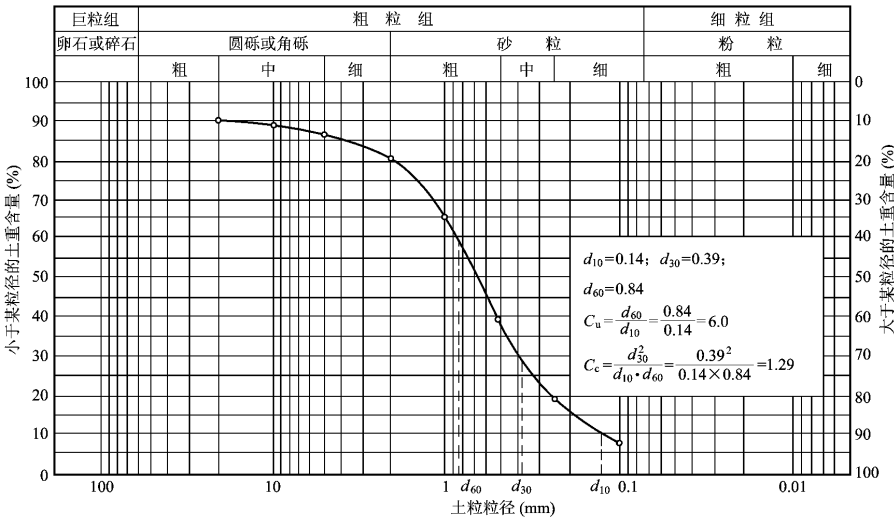


图 1-2 颗粒级配累计曲线

根据描述级配的累计曲线,可以简单地确定土粒级配的两个定量指标,即:不均匀系数  $C_u$  及曲率系数  $C_c$ ,其定义分别见表达式(1-4)和式(1-5)。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-4)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (1-5)$$

式中  $d_{60}$ 、 $d_{30}$  及  $d_{10}$  分别相当于小于某粒径土重累计百分含量为 60%、30% 及 10% 对应

的粒径,分别称为限制粒径、中值粒径和有效粒径。

不均匀系数  $C_u$  反映大小不同粒组的分布情况,即土粒大小(粒度)的均匀程度。 $C_u$  越大表示粒度的分布范围越大,土粒越不均匀,其级配越良好。曲率系数  $C_c$  描写的是累计曲线分布的整体形态,表示某粒组是否缺失的情况,反映了限制粒径  $d_{60}$  与有效粒径  $d_{10}$  之间各粒组含量的分布情况。

在一般情况下,工程上把  $C_u < 5$  的土看做是均粒土,属级配不良; $C_u > 10$  的土,属级配良好。对于级配连续的土,采用单一指标  $C_u$ ,即可达到比较满意的判别结果。但缺乏中间粒径( $d_{60}$  与  $d_{10}$  之间的某粒组)的土,即级配不连续,累计曲线上呈现台阶状,此时,再采用单一指标  $C_u$  则难以有效判定土的级配好坏。当砾类土或砂类土同时满足  $C_u \geq 5$  和  $C_c = 1 \sim 3$  两个条件时,则为良好级配砾或良好级配砂;如不能同时满足,则为级配不良。

对于级配良好的土,较粗颗粒间的孔隙被较细的颗粒所填充,这一连锁充填效应,使得土的密实度较好。此时,地基土的强度和稳定性较好,透水性和压缩性也较小,而作为填方工程的建筑材料,则比较容易获得较大的密实度,是堤坝或其他土建工程良好的填方用土。

### 三、土的结构和构造

#### (一)土的结构

很多试验资料表明,同一种土,原状土样和重塑土样的力学性质有很大差别。这就是说,土的结构和构造对土的性质也有很大影响。

土的结构是指土粒的原位集合体特征,是由土粒单元的大小、形状、相互排列及其联结关系等因素形成的综合特征。土粒的形状、大小、位置和矿物成分,以及土中水的性质与组成,对土的结构有直接影响。一般分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构。

##### 1. 单粒结构

单粒结构是由粗大土粒在水中或空气中下沉而形成的,土颗粒相互间有稳定的空间位置,为碎石类土和砂类土的结构特征。这类土的孔隙比的值域变化较宽,同时,因颗粒较大,土粒间的分子吸引力相对很小,颗粒间几乎没有联结。只是在浸润条件下(潮湿而不饱和),粒间会有微弱的毛细压力联结。

单粒结构可以是疏松的,也可以是紧密的(图 1-3)。呈紧密状态单粒结构的土,由于其土粒排列紧密,在动、静荷载作用下都不会产生较大的沉降,所以强度较大,压缩性较小,一般是良好的天然地基。具有疏松单粒结构的土,其骨架是不稳定的,当受到震动及其他外力作用时,土粒易发生移动,土中孔隙减少,引起土的很大变形。因此,这种土层如未经处理一般不宜作为建筑物的地基或路基。



图 1-3 土的单粒结构