

T

U

LI

XUE

土力学

高等院校土木工程专业系列教材

◎ 主 编 徐东强
副主编 刘熙媛
主 审 李艳春

中国建材工业出版社

责任编辑 马学春 王文欣

封面设计 意博视觉

高等院校土木工程专业系列教材

土木建筑工程材料

土木工程施工

■
土力学

工程地质学

道路工程

土木工程制图

房屋建筑学

基础工程

钢结构设计原理

混凝土结构设计原理

建设项目管理

土木工程概预算与投标报价

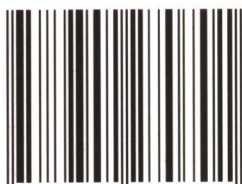
建设法规

测量学

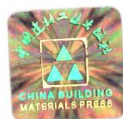
高层建筑混凝土结构设计

桥梁工程

ISBN 7-80227-070-7



9 787802 270701 >



ISBN 7-80227-070-7

定价：25.00元

高等院校土木工程专业系列教材

土 力 学

主 编 徐东强

副主编 刘熙媛

主 审 李艳春

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学/徐东强主编. —北京:中国建材工业出版社, 2006.9

(高等院校土木工程专业系列教材)

ISBN 7-80227-070-7

I. 土… II. 徐… III. 土力学—高等学校—教材

IV. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 089462 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了土力学的基本概念、基本原理和分析计算方法,结合长期教学与设计的经验,强调了土力学在工程实践中的应用。

本书内容可分为三部分:第一部分(第一章至第五章)主要介绍了土的物理力学性质及工程分类、土中应力计算、土中水的运动规律、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度;第二部分(第六章至第八章)重点介绍了土力学的三大传统课题,即土压力计算、土坡稳定分析及地基承载力理论;第三部分(第九章)简要介绍了土的动力学特性。每章均有较全面、详细的例题、思考题及习题,并附有习题的参考答案。

本书为高校土木工程专业教材,亦可作为土木工程、交通工程、水利工程以及采矿工程等的勘察、设计、施工技术人员和报考土木工程专业硕士研究生人员的参考书。

土力学

主编 徐东强

副主编 刘熙媛

主审 李艳春

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:16.5

字 数:404千字

版 次:2006年9月第1版

印 次:2006年9月第1次

定 价:25.00元

网上书店: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

土力学是高等学校土木工程专业一门必修课程,本书是遵循高等院校土木工程专业培养方案,综合诸多院校土木工程专业的土力学与基础工程教学大纲,在教学改革和实践的基础上编写而成的。根据新的专业目录要求对教学内容进行了拓宽,包括建筑工程、公路与城市道路、桥梁工程、隧道与地下建筑工程等在内的专业知识。

本教材编写主要遵循以下原则:

(1)强调基本概念、基本原理和基本计算与试验方法。力图准确地阐述土力学的基本概念和基本原理,使学生在理解基本原理的基础上掌握土力学基本计算。

(2)注重理论与实际相结合,通过对一些工程问题的分析,理解理论公式推导中一些假设的实际工程意义,有助于培养学生分析与解决实际问题的能力。

(3)反映我国规范编制建设的成果。在涉及规范处,强调我国设计规范在基本原则和基本规定方面内容的变化及其与土力学基本原理的关系。

(4)适应多层次教学与培养要求。将教材分为基本知识技能层次和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多样性的要求。

(5)适当吸收国内外土力学比较成熟的新内容。注意反映土力学学科发展的新方向 and 水平,对各章的一些关键词及专业术语采用双语(中文与英文对照)的表达方式,以便学生查阅外文资料。

本教材内容可分为三大部分:第一部分(第一章至第五章)主要介绍了土的物理性质、力学性质、土的分类、地基应力分析、土的渗透性与渗流、土的压缩性与地基变形分析。第二部分(第六章至第八章)重点介绍了土力学的三大传统课题,即挡土墙土压力理论、土坡稳定分析及地基承载力理论;第三部分(第九章)介绍了土的动力特性等内容。

本书由河北工业大学徐东强教授任主编,河北工业大学刘熙媛副教授任副主编,河北工业大学李艳春教授任主审。

各章编写人及编写单位如下:

绪论 徐东强;第一章 徐东强;第二章 刘熙媛;第三章 徐东强;第四章 刘熙媛;第五章 刘熙媛;第六章 王贵君;第七章 徐东强;第八章 王贵君;第九章 刘熙媛。

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。

徐东强
2006年3月

绪 论

一、土力学的学科特点

土力学(Soil Mechanics)是研究土体的应力、变形、强度、渗流以及稳定性的一门学科。广义的土力学又包括土的生成、组成、物理化学、物理生物性质及分类在内的土质学(Soil Geology)。

土是岩石经过物理、化学、生物风化作用以及剥蚀、搬运、沉积作用所生成的各类沉积物。因此,土的类型及其物理、力学性状是千差万别的,但在同一地质年代和相似的沉积环境中,又有其相近性状的规律性。土的生成机制在根本上决定了土的基本物理力学性质。从工程角度来看,土分为一般土和特殊土。广泛分布的一般土可分为无机土和有机土。原始沉积的无机土大致可分为碎石类土、砂类土、粉性土和黏性土。碎石类土和砂类土总称为无黏性土,其一般特征是透水性大,无黏性;黏性土的透水性小,而粉土的性质介于砂土和黏性土之间。特殊土有湿陷性土(如湿陷性黄土)、膨胀土、冻土、红黏土、软土、盐渍土等。与其他材料相比,土体具有以下三个特征:

(1)分散性。土体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,它在变形、强度等力学性质上都与固体连续介质力学性质有根本不同。所以,仅靠材料力学、弹性力学和塑性力学等连续介质力学知识,尚不能描述土体在受力后所表现出来的性状及由此所引起的工程问题。土力学就是利用上述力学的基本知识,考虑散体介质特性(压缩性、渗透性、颗粒间的接触强度特性)的理论所建立的一门独立学科。

(2)土是三相体系。土是由固体颗粒构成土的骨架,土骨架的孔隙中存在液态水与气体,因而将土看作固相(土颗粒)、液相(水)和气相(气体)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,尤其是孔隙水的作用,将对土的物理、物理-化学性质和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,使土的工程性质不仅具有分层性,而且还具有地域的差异。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,表层是形成历史较短的新近堆积的全新世 Q_4 黄土,深层可能为沉积历史较长的更新世 Q_3 的黄土,它们的物理力学性质有较大的差别。

由于土具有上述特征,且种类繁多,其工程性质十分复杂。因此,在进行工程建设时,应特别注意土的工程特点和工程性质差异,进行认真勘察,结合土的实际情况进行设计和施工。否则,会影响工程的经济合理性和安全使用。

二、土力学的发展历史

自远古以来人类就广泛利用土作为建筑地基和建筑材料。如我国的万里长城、大运河、桥梁、宫殿庙宇和世界上知名建筑物,如比萨斜塔、埃及金字塔等的修建,都体现了古代劳动人民

丰富的土木工程经验。但是由于社会生产力和技术条件的限制,直到十八世纪中叶,对土的认识还停留在经验积累的感性认知阶段。

土力学的研究始于 18 世纪工业革命时期,由于工业发展的需要,大规模的城市、公路、铁路的兴建,促使人们对地基土和路基土的一系列技术问题进行研究。1773 年法国库仑(C. A. Coulomb)根据试验创立了砂土抗剪强度公式,提出了挡土墙土压力的滑楔体理论——库仑理论;1856 年,法国工程师达西(H. Darcy)研究了砂土的渗透性,创立了砂土渗透性的达西定律;1857 年,英国学者朗肯(W. J. M. Rankine)发表了挡土墙土压力塑性平衡理论——朗肯理论,对土体强度理论的发展起到了很大的作用;1885 年法国学者布辛奈斯克(J. Boussinesq)求得半无限弹性体在竖向力作用下的应力和变形的理论解答。这些古典理论对土力学的发展起到了很大的推动作用,至今还是土力学的基本理论。

20 世纪 20 年代开始,对土力学的研究有了迅速的发展。1915 年,瑞典学者彼德森(K. E. Petterson)首先提出,后由瑞典费兰纽斯(W. Fellenius)及美国的泰勒(D. W. Taylor)进一步发展的土坡稳定分析的整体圆弧滑动面法。1920 年,法国学者普朗特(L. Prandtl)发表了地基剪切破坏滑动面形状和极限承载力公式。1925 年美籍奥地利人太沙基(K. Terzaghi)写出了第一本《土力学》专著,他重视土的工程性质和土工试验,导出了饱和土的有效应力原理,将土的主要力学性质,如应力-变形-时间各因素相互联系起来,并应用于解决一系列的土工问题。从此土力学称为一门独立科学。

在土力学论著方面,1931 年,前苏联学者格尔谢万诺夫(H. M. Герсенов)出版了《土体动力学原理》专著。伦杜利克(L. Rendulic)1936 年发现了土的剪胀性,土的应力-应变非线性关系,土具有加工硬化与软化等性质。1957 年,D. C. Drucker 提出的加工硬化塑性理论,对土的应力-应变规律方面的研究起到了很大的推动作用。许多学者提出各种应力-应变模型,如 J. M. Duncan 与 C. Y. Chang 提出的著名的 Duncan-Chang 模型、剑桥模型以及南京水利科学研究院模型、清华模型。美国温特科恩(H. F. Winterkorn)和方晓阳 1975 年主编的《基础工程手册》一书,由 7 个国家 27 位岩土工程界著名专家编写而成,该书 25 章内容包括地基勘察、土力学、基础工程三大部分。1993 年费雷德隆德(D. G. Fredlund)和拉哈尔佐(H. Rahardjo)出版了《非饱和土力学》一书,日益引起国内外学术界的注意。

20 世纪 50 年代,陈宗基教授对岩石的流变学和黏土结构进行了研究;黄文熙院士对土的液化进行了探讨,并提出了考虑土侧向变形的地基沉降计算方法,在 1983 年主编了一本理论性较强的土力学专著《土的工程性质》,书中系统地介绍了国内外各种土的应力-应变本构模型的理论和研究成果。沈珠江院士在土体本构模型,土体静、动力数值分析,非饱和土理论研究等方面取得令人瞩目的成就,2000 年出版了《理论土力学》专著,较全面地总结了近 70 年来国内外学者的研究成果。

三、土力学研究内容和研究方法

土力学主要研究内容包括:土的颗粒组成、黏土的物理化学性质和土的分类,在建筑物荷载及土的自重作用下土体中应力、土的力学性质、土的渗透性和渗流分析,土的压缩性和地基变形,强度理论和挡土墙土压力理论,土坡稳定分析和地基极限承载力理论等。

土力学属于工程力学范畴,注重对土体的自然现象的观察和描述是土力学的重要特点。由于土具有分散性、复杂性和易变性,要很确切地描述土体的受力条件、施工过程以及环境的

影响等,还存在许多困难。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,既要运用一般连续力学的基本原理和方法,将土的性质、加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、土工测试技术、试验等手段获取计算参数进行计算。并在工程进行中,不断采集监测数据进行分析,以避免理论计算出现的误差或工程地质条件变化对工程造成危害。

近年来利用已经提出的各种反映土的应力-应变非线性关系的本构模型,运用数值分析的方法进行研究,可以解决复杂的土质条件、荷载情况和边界条件下的岩土工程问题。不过应该看到,由于土的力学性质的复杂,对于土的本构关系的研究以及计算参数的测定,均远落后于计算技术的发展;而且计算参数选择不当所引起的误差,远大于计算方法本身的精度范围。因此,对土的基本力学性质的研究和对土的本构模型与计算方法的验证,是土力学的两大主要研究课题。另外,利用概率统计方法在研究土性状的变异以及岩土工程可靠度方面有了很大的发展。利用土的动力学原理研究土的动力特性,如地震或在动荷载作用下土的动强度、动弹性模量、动土压力及饱和砂的振动液化等亦取得了发展。

四、土力学与其他学科的联系及学习方法

土力学是以连续介质力学为基础,如弹性力学、材料力学等,同时又与工程地质、水力学、流变力学等学科密切相关。建筑物、桥梁和水坝等工程的基础设计与施工、道路路基设计、挡土结构的土压力计算、地基承载力计算、边坡的稳定性分析计算与加固、软土地基处理等都应用土力学理论。因此,土力学是土木工程专业的技术基础课。

土力学还是一门发展中的学科,由于土体的复杂性,所以对于许多的复杂工程问题,需要做近似处理,因而应用土力学解决实际问题时,常带有许多的条件约束。另外,有些章节之间相对独立性较强,逻辑系统性和依赖关系不太紧密。因此,学习土力学一般应注意以下几点:

(1)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特性的基础。

(2)掌握土力学的基本计算方法,注意土力学引用其他学科理论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添了什么假定,以及这些假定与实际问题的相符程度如何。

(3)注意综合利用土性知识和土力学理论解决岩土工程实际问题。土力学问题一般是根据土的基本力学性质,应用数学及力学计算,得出最后结果。学习这一部分时一方面应避免陷于单纯的理论推导,而忽略了推导中引用的条件和假设。另一方面还要分析解题中给定的条件在实际中怎么具体体现,改变这些条件可能导致哪些工程后果。

(4)掌握土工试验的基本方法和技能。岩土工程问题计算中,岩土计算参数的选取对计算的精度有重要影响。因此,掌握土的室内和现场试验测试方法,准确确定土的物理力学参数,对土力学计算有重要意义。

(5)在土力学的学习中,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,使得对许多工程问题需要做简化假定,因而必然带来一定的误差;对同一问题的求解,往往会因为假定不同,因而求解的方法不同,结果也不相同。习惯于高等数学求唯一解的思维方式往往不适于解决工程力学问题。要逐渐接受和掌握多种方法求解一个问题,对多种解答做出综合评判的思维方式。

目 录

诸 论

第一章 土的物理性质及工程分类	1
第一节 土的生成	1
第二节 土的三相组成	2
第三节 土的三相比例指标	11
第四节 无黏性土的密实度	17
第五节 黏性土的界限含水量及状态指标	18
第六节 土的工程分类	24
复习思考题	32
习题	32
第二章 土中的应力计算	34
第一节 概述	34
第二节 土中自重应力	36
第三节 基础底面压力及其简化计算	40
第四节 竖向荷载作用下地基附加应力计算	44
第五节 水平荷载作用下地基附加应力计算	64
第六节 有效应力原理	67
复习思考题	70
习题	70
第三章 土中水的运动规律	72
第一节 土的毛细性	72
第二节 土的渗透性	76
第三节 二维渗流与流网	83
第四节 渗流力及渗流稳定分析	89
第五节 渗流情况下的孔隙水压力与有效应力	93
复习思考题	95
习题	96
第四章 土的压缩性与地基沉降	97
第一节 概述	97
第二节 土的压缩性及压缩性指标	98
第三节 地基沉降计算	107
第四节 太沙基一维固结理论	124
复习思考题	137

习题	137
第五章 土的抗剪强度理论	139
第一节 概述	139
第二节 库仑定律和摩尔-库仑强度准则	140
第三节 抗剪强度指标的试验方法及其应用	144
第四节 孔隙应力系数及土的剪胀性	152
第五节 土的抗剪强度特性的几个问题	159
复习思考题	168
习题	168
第六章 土压力计算	170
第一节 概述	170
第二节 静止土压力计算	172
第三节 朗肯土压力理论	172
第四节 库仑土压力理论	179
习题	186
第七章 土坡稳定分析	188
第一节 概述	188
第二节 无黏性土土坡的稳定分析	189
第三节 黏性土土坡稳定分析	190
第四节 非圆弧滑动面土坡稳定分析	200
第五节 土坡稳定分析的几个问题讨论	203
复习思考题	205
习题	205
第八章 地基承载力	207
第一节 地基的破坏形态	207
第二节 临塑荷载与临界荷载	209
第三节 极限承载力	212
第四节 地基承载力的确定	220
习题	226
第九章 土的动力特性	227
第一节 动荷载类型及其应用	227
第二节 土的动力特性试验	229
第三节 动荷载下土的应力-应变关系及动力特性参数	236
第四节 土在动荷载下的强度特性	239
第五节 土的振动液化	241
第六节 土的压实性	247
复习思考题	250
习题	251
参考文献	252

第一章 土的物理性质及工程分类

本章要点

本章主要介绍了土的物质组成、颗粒特征以及土的结构和构造,包括土的三相指标、砂土的密实度、黏性土的界限含水量和地基土的工程分类等;讨论了土的湿陷性、冻胀性和黏性土的胀缩性。重点掌握土的三相指标及其换算关系、黏性土的塑性指数、液性指数的物理意义。

第一节 土的生成

土(soil)是岩石在地质作用下经风化、剥蚀、搬运、沉积等过程的产物,土经过压密固结、胶结硬化也可再生成岩石。岩石与土构成地球外表的地壳。土作为建筑物的地基,是土力学的主要研究对象。

岩石的风化一般可分为物理风化、化学风化和生物风化。物理风化就是指岩石经受风、霜、雨、雪的侵蚀,或受波浪的冲击,地震等引起各种力的作用,温度的变化,冻胀等因素使整体岩石产生裂隙、崩解碎裂成岩块、岩屑的过程。例如,岩体冷却时引起的温度应力或地表附近日常的气温变化都可导致岩体开裂,雨水渗入这些裂缝后冻胀将促使裂缝张开,最后岩体崩解成岩块。通过同样的过程,这些岩块又可进一步碎裂成岩屑。在干旱地区,大风刮起的砂、砾相互摩擦并撞击岩体,引起岩体剥落和岩块碎裂。这种风化作用,只改变颗粒的大小与形状,不改变岩石的矿物成分。化学风化是指岩体与水溶液和气体等发生溶解作用、水化作用、水解作用、碳酸化作用和氧化作用,形成新的矿物。化学风化不仅改变岩石的物理状态,同时也改变其化学成分。例如,正长石 $[K(AlSi_3O_8)]$ 经水解作用后,开始形成的 K^+ 与水中 OH^- 结合,形成 KOH 随水流失;析出一部分 SiO_2 可呈胶体溶液随水流失,或形成蛋白石($SiO_2 \cdot nH_2O$)残留于原地;其余部分可形成难溶于水的高岭石 $[Al_4(Si_4O_{12})(OH)_8]$ 而残留于原地。生物风化是指岩石在动、植物及微生物影响下所起的破坏作用。

第四纪沉积物是由原岩风化产物经过各种地质作用而形成的沉积物,距今有 100 万年的历史,由于沉积的历史不长,尚未胶结岩化。因此,第四纪形成的各种沉积物通常是松散软弱的多孔体,与岩石的性质有很大的差别。不同成因的第四纪沉积物也具有不同的工程特性。根据成因类型第四纪沉积物可分为残积物、坡积物、洪积物、冲积物和风积物等。

残积物也称为残积土,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,它的分布受地形控制。由于风化剥蚀产物是未经搬运的,颗粒磨圆度或分选性较差,没有层理构

造。

坡积物也称为坡积土,是雨雪流水的地质作用将高处原岩风化剥蚀后的产物缓慢地洗刷剥蚀,顺着斜坡逐渐向下移动,沉积在较平缓的山坡上而形成的沉积物。一般坡积土土质不均,且其厚度变化很大,尤其是新近堆积的坡积土,土质疏松,压缩性较高。

洪积物也称为洪积土,是由于暴雨或大量融雪集聚而成的山洪急流,它冲刷地表并夹带大量的碎屑物质堆积于山谷冲口或山前平缓地带而形成沉积物。靠近沟口的洪积土颗粒较粗,地下水位埋藏较深,土的承载能力一般较高,是良好的天然地基;离山较远的地段是洪积层外围的细碎屑沉积段,其成分均匀,厚度较大,通常也是良好的地基。

冲积物也称为冲积土,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。冲积土分布范围很广,其主要类型有山区河谷冲积土、山前平原冲积土、平原河谷冲积土、三角洲冲积土等,其特点是具有明显的层理构造。碎屑物质常呈圆形或亚圆形颗粒,其搬运的距离越长,则沉积的物质越细。

风积物也称为风积土,是由风力带动土粒经过一段搬运距离后沉积下来的堆积物。主要有砂土和黄土,分布在西北、华北各省。风积土没有明显的层理,颗粒以带角的细砂粒和粉粒为主,同一地区颗粒较均匀。干旱地带粉质土粒细小,土粒之间的联结力很弱。典型的风积土,如黄土(或黄土类土)具有肉眼可见的竖直细根孔,颗粒组成以带角的粉粒为主,常占干土总质量的 60%~70%,并含有少量的黏土和盐类胶结物。由于黄土天然孔隙比一般在 1.00 左右,具有一些大孔隙,因而密度很低。黄土分布在干旱地区,含水率很低,一般为 10% 左右,干燥时胶结强度较大,可是一经遇水,土体结构即遭破坏,胶结强度迅速降低,黄土地基会在自重或建筑物荷载作用下急剧下沉,黄土的这种性质称为湿陷性。在黄土地区修造建筑物时一定要充分注意到黄土的这一性质。

除上述五种成因类型的沉积物外,还有湖泊沉积物、海洋沉积物、冰川沉积物等。

第二节 土的三相组成

土(soil)是由固体土颗粒、水和气体组成的三相分散系。固体颗粒是三相分散系中的主体,构成土的骨架,颗粒大小及其搭配是影响土的性质基本因素。土粒的矿物成分与土粒大小有密切的关系,通常粗大土粒其矿物成分往往保持母岩未被风化的原生矿物,而细小土粒主要是次生矿物等无机物质以及土生成过程中混入的有机质。土粒的形状与土粒大小也有很大关系,粗大土粒其形状都是块状或柱状,而细小土粒主要呈片状。土中水是溶解各种离子的溶液,其含量也明显影响土的性质,如含水量高的土往往比较软,特别是由细小颗粒组成的黏性土,含水多少直接影响土的强度。土中气体可以与大气相连,也可以气泡形式存在,对土性影响相对较小。土的性质一方面取决于每一相的特性,另一方面取决于土的三相比例关系。由于气体易被压缩,水能从土体流进或流出,土的三相相对比例会随时间和荷载条件的变化而变化,土的一系列性质也随之改变。土在形成过程中所经历的每一个环节以及在形成后沉积时间的长短、外界环境的变化,都对土的性质有显著的影响。

土的三相组成物质、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、湿干、软硬等一系列物理性质上有不同反应。土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质,所以土的三相组成是土的最基本的力学特性。

一、土中固体颗粒

(一) 土粒的矿物成分

土粒分为无机矿物颗粒与有机质,无机矿物颗粒由原生矿物和次生矿物组成。原生矿物是指地壳岩浆在冷凝过程中形成的矿物,常见的如石英、长石、云母、角闪石等。原生矿物是原岩经物理风化形成的,其物理化学性质较稳定,其成分与母岩完全相同。原生矿物经化学风化后形成次生矿物,其矿物成分与母岩不同。次生矿物主要有黏土矿物,如蒙托石、伊利石和高岭石;无定形的氧化物胶体(如 Al_2O_3 、 Fe_2O_3);以及盐类(如 CaCO_3 、 CaSO_4 、 NaCl 等)。有些条件下微生物参与风化过程,在土中产生有机质成分,如多种复杂的腐殖质,此外,土中的植物残骸等有机质残余物,形成土中的泥炭。

粗大土颗粒往往是岩石经过物理风化作用形成的岩石碎屑,是物理化学性质比较稳定的原生矿物颗粒,一般有单矿物颗粒和多矿物颗粒两种形态。细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物颗粒以及生成过程中有机质物质的介入,次生矿物的成分、性质及其与水的作用均很复杂,是细粒土具有塑性特征的主要因素之一,对土的工程性质影响很大。有机质同样对土的工程性质也有很大的影响。

(二) 黏土矿物的晶体结构

黏土颗粒的矿物成分主要由黏土矿物和其他化学胶结物或有机质组成,其中黏土矿物的结晶结构特性对黏性土的影响较大。黏性矿物基本上是由两种晶片构成的(图 1-1),一种是硅氧晶片(简称硅片),它的基本单元是硅-氧(Si-O)四面体,由一个居中的硅原子和四个在角点的氧原子组成;另一种是铝氢氧晶片(简称铝片),它的基本单元为铝-氢氧离子(Al-OH)八面体,由一个居中的铝离子和六个在角点的氢氧离子组成。而硅片和铝片构成了两种类型的晶胞(晶格),即由一层硅片和一层铝片构成的二层型晶胞(1:1 型晶胞)和由两层硅片中间夹一层铝片构成的三层型晶胞(2:1 型晶胞)。黏土矿物颗粒,基本上是由上述两种类型晶胞叠接而成,其中主要有蒙托石、伊利石和高岭石三类。

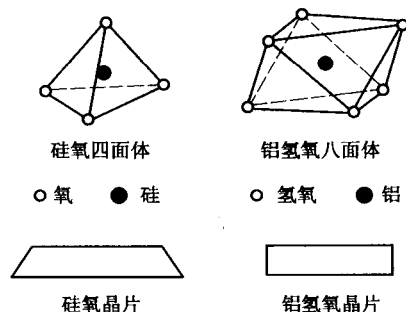


图 1-1 黏土矿物晶片示意图

蒙托石是由伊利石进一步风化或火山灰风化而成的产物,其结构单元是 2:1 型晶胞。晶胞间只有氧原子与氧原子的范德华键力联结,没有氢键,故其键力很弱,见图 1-2(a)。另外,夹在硅片中间的铝片内的 Al^{3+} 常为低价的其他离子(如 Mg^{2+})所代替,晶胞间出现多余的负电荷,可以吸引其他阳离子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 等)或水化离子。因此,晶胞活动性极大,水分子可以进入,从而改变晶胞之间的距离,甚至完全分散到单晶胞。因此,当土中蒙托石含量高时,则土具有很大的吸水膨胀和失水收缩的特性。

伊利石主要是云母在碱性介质中风化的产物,也是由三层型晶胞叠接而成,晶胞间同样有氧原子与氧原子的范德华键力。但伊利石构成时,部分硅片中的 Si^{4+} 被低价的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 等所取代,相应四面体的表面将镶嵌一正价阳离子 K^+ ,以补偿正电荷的不足,见图 1-2(b)。嵌入的 K^+ ,增加了伊利石晶胞间的联接作用。所以伊利石的结晶构造的稳定性优于蒙托石。

高岭石是长石风化的产物,其结构单元是二层型晶胞,见图 1-2(c)。这种晶胞间一面是露出铝片的氢氧基,另一面则是露出硅片的氧原子。晶胞之间除了较弱的范德华键力(分子键)之外,更主要的联结是氧原子与氢氧基之间的氢键,它具有较强的联结力,晶胞之间的距离不易改变,水分子不能进入。晶胞活动性较小,使得高岭石的亲水性、膨胀性和收缩性均小于伊利石,更小于蒙托石。

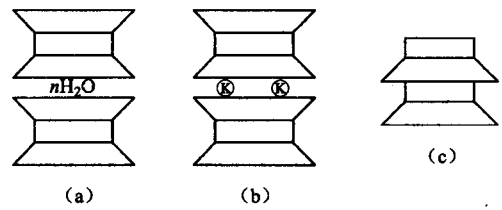


图 1-2 黏土矿物结构单元示意图

由于黏土矿物是很细小的扁平颗粒,颗粒表面具有很强的与水相互作用的能力,表面积越大,这种能力就越强。黏土矿物表面积的相对大小可以用单位体积(质量)颗粒的总表面积,即比表面(积)来表示。例如,一个棱边为 1mm 的立方体颗粒,其体积为 1mm^3 ,总表面积只有 6mm^2 ,比表面为 $6\text{mm}^2/1\text{mm}^3 = 6\text{mm}^{-1}$;若将 1mm^3 立方体颗粒分割为棱边 0.001mm 的许多立方体颗粒,则其表面积可达 $6 \times 10^3\text{mm}^2$,比表面可达 $6 \times 10^3\text{mm}^{-1}$ 。由此可见,由于土粒大小不同而造成的比表面数值上的巨大变化,必然导致土的性质突变。因此,在土颗粒矿物成分一定的条件下,黏土的比表面是反映其特性的一个重要指标。

(三)黏土颗粒的带电性

黏土颗粒的带电现象早在 1809 年就被莫斯科大学列依斯(Reuss)发现。把潮湿的黏土块放在一个玻璃器皿内,将两个无底的玻璃筒插入黏土块中。向筒中注入相同深度的清水,并将阴阳电极分别放入两个筒内的清水中,然后将直流电源与电极连接。通电后发现,放阳极的筒中水位下降,水逐渐变混浊;放阴极的筒中水位逐渐上升,如图 1-3(a)所示。这说明黏土颗粒本身带有一定的负电荷,在电场作用下向阳极移动,这种现象称为电泳;而极性水分子与水中的阳离子(K^+ , Na^+ 等)形成水化离子,在电场的作用下这类水化离子向负极移动,这种现象称为电渗。电泳、电渗是同时发生的,统称为电动现象。工程中利用黏土的这种电动现象对透水性很差的黏土地基进行电渗法排水固结。

黏土颗粒一般为扁平状(片状),与水作用后扁平状颗粒的表面带负电荷,但颗粒(断裂)的边缘,局部却带有正电荷,如图 1-3(b)所示。

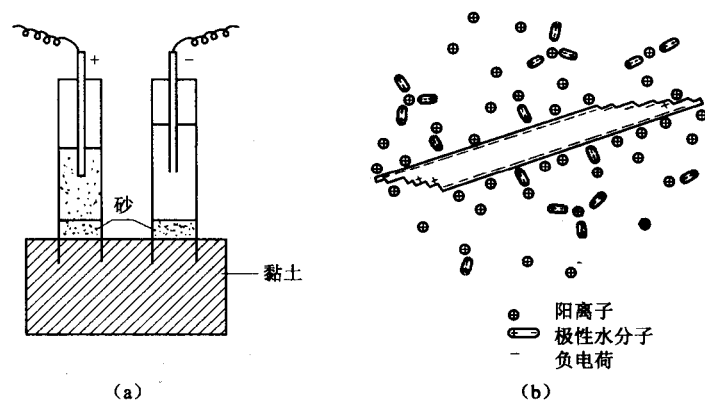


图 1-3 黏土颗粒表面带电现象
(a)电渗、电泳现象;(b)黏土颗粒的表面带电性

(四)粒组的划分

自然界中的土都是由大大小小不同粒径的土粒组成的。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,划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。各个粒组随着分界尺寸的不同,土的主要性质也相应呈现出一定质的变化。如:

- 粒 径:从大到小;
- 可塑性:从无到有;
- 黏 性:从无到有;
- 透水性:从大到小;
- 毛细水:从无到有。

目前,粒组划分的界限尺寸在不同的国家,甚至同一国家的不同部门根据用途不同都有不同的规定。表 1-1 提供的是《土的分类标准》(GBJ 145—90)土粒粒组的划分方法。

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 性
巨 粒	漂石(块石)粒	$d > 200$	透水性很大,无黏性,无毛细水
	卵石(碎石)粒	$200 \geq d > 60$	
粗 粒	砾粒 粗砾 细砾	$60 \geq d > 20$ $20 \geq d > 2$	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
	砂粒	$2 \geq d > 0.075$	易透水,无黏性,遇水不膨胀,干燥时松散,毛细水上升高度不大
细 粒	粉粒	$0.075 \geq d > 0.005$	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,易冻胀
	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. 粉粒或称粉粒土,粉粒的粒径上限 0.075 相当于 200 号筛的孔径。
3. 黏粒或称黏粒土,黏粒的粒径上限也采用 0.002mm 为标准。

(五)土的颗粒级配

工程土通常是不同粒组的混合物,而土的性质主要取决于不同粒组的相对含量。土的颗粒级配(又称土的粒度成分)是指大小土粒的搭配情况,通常以土中各个粒组干土的相对含量的百分比来表示。为了解各粒组的相对含量,需进行颗粒分析,颗粒分析的方法有筛分法和沉降分析法。

《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)规定:筛分法适用于粒径在 60~0.075mm 的土。试验时,将风干的均质土样放入一套孔径不同的标准筛,标准筛的孔径依次为 60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm、0.075mm,经筛析机上、下振动,将土粒分开,称出留在每个筛上的土重,即可求出留在每个筛上土重的相对含量。

对于粒径小于 0.075mm 的土,可用沉降分析法,沉降分析法有密度计法、移液管法等。沉降分析法的原理是土粒在水中的沉降原理,见图 1-4,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,土中在深度 L_i 处只含有粒径小于等于 d_i 的土粒,悬液浓度降低了。如在深度 L_i 处考虑一小区段 mn ,则 mn 段悬液的浓度(t_i 时)与开始($t = 0$)浓度之比,即可求得粒径小于等于 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, 981 cm/s^2 ;

ρ_s ——土粒的密度, g/cm^3 ;

d ——土粒的直径, cm;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 ;

η ——水的粘滞度, $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

速度 v 和土粒密度 ρ_s 可表示为

$$v = \frac{\text{距离}}{\text{时间}} = \frac{L}{t} \text{ 和 } \rho_s = G_s \rho_w \approx G_s \rho_w$$

代入式(1-1),可变换为

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (1-2)$$

水的 η 值由温度确定,斯笃克斯假定: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 处的悬液密度,可采用密度计法(即比重计法)或移液管法测得,并由此计算出小于该粒径 d_i 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。

颗粒分析的结果可用三种方式表达:列表法、级配曲线法、三角坐标法。

1. 列表法:列出表格直接表达各粒组的百分含量。

2. 累计曲线法:根据筛分试验结果,采用累计曲线法表示土粒的颗粒级配或粒度成分。该法是比较全面和通用的一种图解法,其特点是可简单获得定量指标,特别适用于几种土级配好坏的相对比较。半对数坐标的颗粒级配曲线如图 1-5 所示,横坐标代表粒径,以对数坐标表示;纵坐标表示小于(或大于)某粒径的土重累计百分含量。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。

常用两个级配指标描述土的级配特征:不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

不均匀系数

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-3)$$

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} \tag{1-4}$$

式中 d_{10} ——有效粒径,在级配曲线上小于该粒径的土粒质量累计百分数为 10%;
 d_{30} ——中值粒径,对应级配曲线上小于该粒径的土粒质量累计百分数为 30%;
 d_{60} ——限制粒径,在级配曲线上小于该粒径的土粒质量累计百分数为 60%。

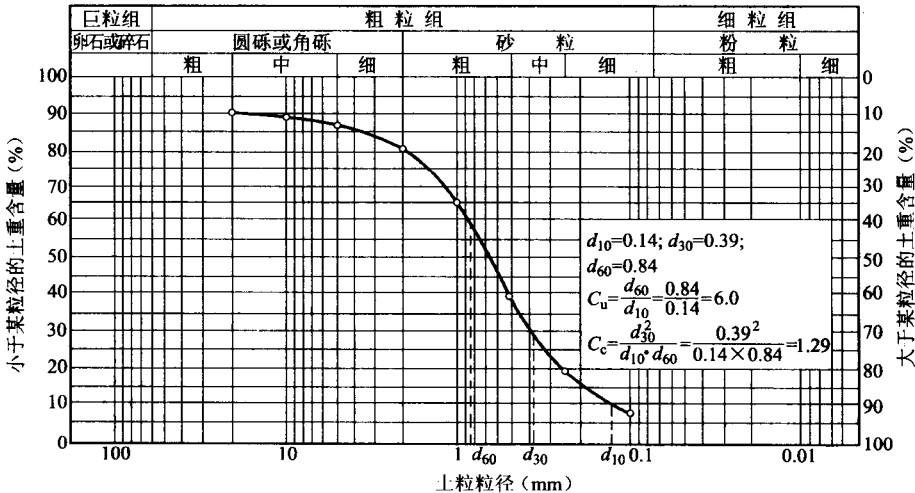


图 1-5 颗粒级配累计曲线

从图 1-6 级配曲线可以看出, A 曲线的坡度平缓表示该土的粒径分布范围宽, d_{10} 与 d_{60} 相距远, 土的不均匀系数 C_u 大, 土粒不均匀。大颗粒形成的孔隙有足够的小颗粒充填, 土体易于密实, 故在工程上是级配良好的土。相反, 曲线 B 的坡度陡, 表示该土的粒径分布范围窄, d_{10} 与 d_{60} 靠近, 土的不均匀系数 C_u 小, 土粒均匀。因此, 不均匀系数 C_u 的大小可用来衡量土中土粒的不均匀程度。一般说来, 土的不均匀系数 C_u 大, 土就有足够的细土粒去充填粗土粒形成的孔隙, 当它压实时就能得到较高的密实度。但是某些级配不连续的土, 例如, 缺乏中间粒径的土, 粒径分布曲线呈台阶形, 见图 1-6 曲线 C。尽管其不均匀系数 C_u 较大, 但由于缺乏土中的中间粒径, 孔隙体积较大, 当有水流动时, 易将小颗粒带走, 渗透稳定性差, 容易产生管涌。所以, 土的不均匀系数 C_u 大, 未必表明土中粗细粒的搭配就好。粒径分布曲线的形状可用曲率系数 C_c 来反映。若曲率系数过大, 表示粒径分布曲线的台阶出现在 d_{10} 与 d_{30} 之间。反之, 若曲率系数过小, 表示台阶出现在 d_{30} 与 d_{60} 之间。

在一般情况下, 工程上把 $C_u < 5$ 的土称为匀粒土, 属级配不良; $C_u > 10$ 的土, 属于级配良好。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, 见图 1-6 中曲线 C。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, 则为级配良好的土; 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充填, 这一连锁充填效应, 使土的密实度较好。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, 是土建工程良好的填方用土。