



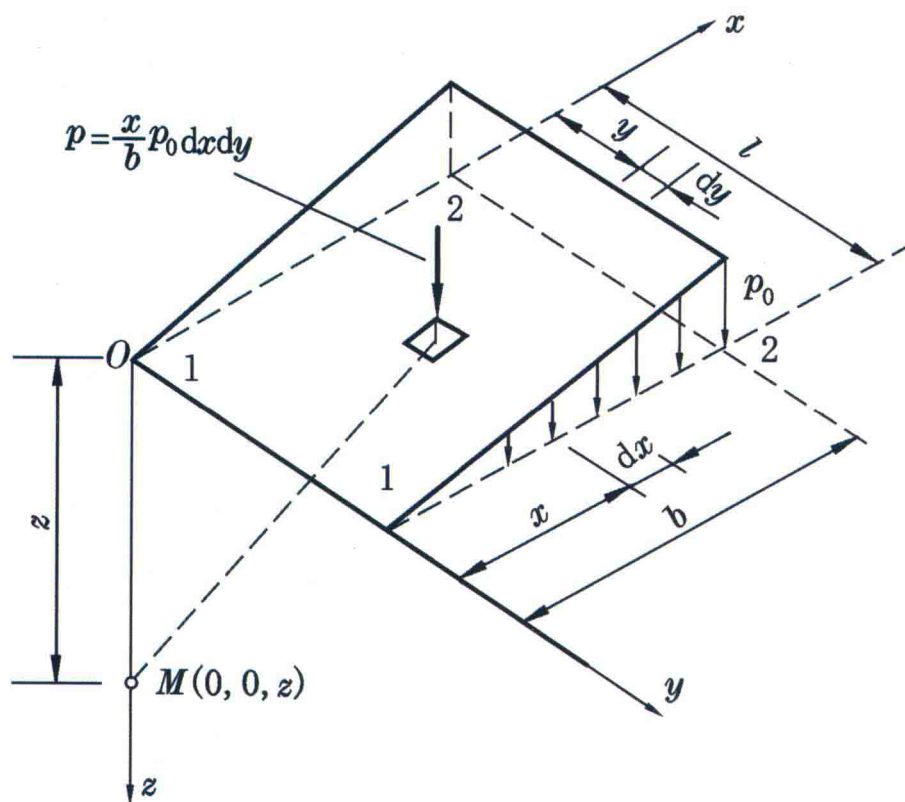
普通高等教育“十二五”住建部规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

土力学与基础工程

——土力学部分

T L X Y J C G C

赵明华 主编
陈昌富 副主编



WUTP



武汉理工大学出版社



普通高等教育“十二五”住建部规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

土力学与基础工程

——土力学部分

主 编 赵明华
副主编 陈昌富

武汉理工大学出版社
· 武 汉 ·

图书在版编目(CIP)数据

土力学与基础工程——土力学部分/赵明华主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2017.3
ISBN 978-7-5629-5436-1

I. ①土… II. ①赵… III. ①土力学 ②基础(工程) IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 283631 号

项目负责人:高 英 汪浪涛
责任编辑:高 英
责任校对:雷红娟
装帧设计:橙子工作室
出版发行:武汉理工大学出版社
社 址:武汉市洪山区珞狮路 122 号
邮 编:430070
网 址:<http://www.wutp.com.cn>
经 销:各地新华书店
印 刷:湖北恒泰印务有限公司
开 本:889×1194 1/16
印 张:10.75
字 数:317 千字
版 次:2017 年 3 月第 1 版
印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷
印 数:1—3000 册
定 价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87785758 87384729 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

前 言

为适应国家关于土木工程专业“宽口径”培养、“卓越工程师”计划等战略要求,在武汉理工大学出版社的组织和大力支持下,根据普通高等学校土木工程专业系列教材编委会提出的教材选题与编审原则,编写了本书。

本分为上、下两册:上册为土力学部分,下册为基础工程部分,其内容结构与编排系根据高等学校土木工程专业指导委员会编制的《高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案及课程教学大纲》与《高等学校土木工程本科指导性专业规范》等要求精心组织而成,可作为土木工程专业所开设的“土力学”和“基础工程”两门核心课程的课程用书。

上册土力学部分系统地阐述了土的性质与工程分类、土中应力计算、土的变形性质与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力理论与挡土墙设计以及地基承载力与边坡稳定等土力学核心内容。

下册基础工程部分重点介绍了天然地基上的浅基础设计、桩基础设计以及基坑工程;对沉井基础、墩基础以及地下连续墙等其他深基础的设计计算方法与施工工艺等进行了简要介绍;并对我国区域性地基及其常用的地基处理技术等进行了讨论。

本书上册由赵明华任主编,陈昌富任副主编,分为7章,其中:第1、6章由湖南大学赵明华编写,第2章由湖南大学刘晓明编写,第3章由湖南大学张玲编写,第4章由中南大学赵衡编写,第5章由湖南大学邹新军编写,第7章由湖南大学陈昌富编写。

本书下册由赵明华任主编,邹新军任副主编,分为7章,其中:第1章由湖南大学赵明华编写,第2章由湖南大学邹新军编写,第3章由湖南大学杨明辉编写,第4章由长沙理工大学刘建华编写,第5章由湖南大学陈昌富编写,第6章由湖南大学张玲编写,第7章由湖南大学刘晓明编写。

本书由浅入深、概念清晰、层次分明、重点突出、理论联系实际,力求反映最新的土力学研究成果与基础工程学科的新发展,并适当吸取了国内外较为成熟的基础工程新理论、新工艺、新技术,既可作为高等学校土木工程专业(包括建筑工程、桥梁工程、道路工程、岩土工程、工程管理等专业方向)的教材,又可供土木工程专业技术人员阅读参考,同时还可作为国家注册土木工程师(岩土)等执业资格注册考试辅导用书。

诚然,一本好的教材,往往要通过反复使用,发现其存在的问题,经多次修订方能逐步完善。限于编者水平,书中不妥之处恳请读者批评指正。

编 者
2016年8月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 土力学的概念及其特点	(1)
1.2 土力学的发展概况	(1)
1.3 本课程的特点和学习要求	(2)
2 土的性质与工程分类	(4)
2.1 概述	(4)
2.2 土中三相的性质	(4)
2.2.1 固相	(4)
2.2.2 液相	(9)
2.2.3 气相	(12)
2.3 土的物理性质指标	(12)
2.3.1 指标定义	(13)
2.3.2 指标换算	(15)
2.4 土的物理状态	(17)
2.4.1 无黏性土的物理状态	(17)
2.4.2 黏性土	(18)
2.5 土的结构性和触变性	(20)
2.5.1 土的结构和构造	(20)
2.5.2 土的灵敏度	(22)
2.5.3 土的触变性	(22)
2.6 土的渗透性	(22)
2.6.1 土中水的渗透	(22)
2.6.2 土的渗透系数	(22)
2.6.3 土的渗透系数测定	(24)
2.6.4 动水力及临界水头	(25)
2.6.5 渗透破坏	(26)
2.7 土的液化特性与其他水理性质	(27)
2.7.1 土的振动液化	(27)
2.7.2 土的特殊水理特性	(28)
2.8 土的压实性质	(29)
2.8.1 土的击实试验	(29)
2.8.2 土的压实原理	(30)
2.8.3 土的压实特性影响因素	(31)
2.9 土的工程分类	(31)

2.9.1	土作为地基的工程分类	(32)
2.9.2	土作为填筑材料的工程分类	(35)
	思考题	(36)
	习题	(37)
3	土中应力	(40)
3.1	土的自重应力	(40)
3.1.1	均质土的自重应力	(40)
3.1.2	成层土的自重应力	(40)
3.2	基底压力	(41)
3.2.1	基底压力分布	(41)
3.2.2	基底压力的简化计算方法	(42)
3.2.3	基底附加压力	(44)
3.3	地基附加应力	(45)
3.3.1	竖向集中力作用下的地基附加应力	(45)
3.3.2	分布荷载作用下地基附加应力	(47)
3.3.3	非均质和各向异性地基中的附加应力	(59)
	思考题	(61)
	习题	(61)
4	土的压缩性与地基沉降计算	(64)
4.1	土的压缩性	(64)
4.1.1	基本概念	(64)
4.1.2	侧限压缩试验及压缩性指标	(64)
4.1.3	土的载荷试验及变形模量	(68)
4.1.4	旁压试验及旁压模量	(70)
4.2	地基最终沉降量计算	(71)
4.2.1	分层总和法	(72)
4.2.2	《建筑地基基础设计规范》方法	(76)
4.2.3	弹性力学方法	(80)
4.2.4	最终沉降量计算方法讨论	(82)
4.2.5	地基最终沉降量的组成	(82)
4.3	应力历史对地基沉降的影响	(83)
4.3.1	天然土层的应力历史	(83)
4.3.2	先期固结压力的确定	(84)
4.3.3	考虑应力历史的最终沉降计算	(85)
4.4	地基变形与时间的关系	(86)
4.4.1	饱和土的渗透固结	(87)
4.4.2	太沙基一维固结理论	(87)
4.4.3	实测沉降-时间关系的经验公式	(92)
	思考题	(93)

习题	(93)
5 土的抗剪强度	(95)
5.1 土的抗剪强度理论	(95)
5.1.1 库仑公式	(95)
5.1.2 莫尔-库仑强度理论	(97)
5.2 抗剪强度的测定方法	(99)
5.2.1 直接剪切试验	(99)
5.2.2 三轴压缩试验	(100)
5.2.3 无侧限抗压强度试验	(102)
5.2.4 十字剪切板试验	(103)
5.3 孔隙压力系数	(104)
5.4 抗剪强度指标的选用	(106)
5.4.1 不同试验条件下黏性土抗剪强度指标	(106)
5.4.2 黏性土的残余强度指标	(111)
5.4.3 无黏性土的抗剪强度指标	(112)
5.4.4 抗剪强度指标的选择	(113)
5.5 应力路径	(113)
思考题	(114)
习题	(115)
6 土压力与挡土墙设计	(116)
6.1 概述	(116)
6.2 朗金土压力理论	(118)
6.2.1 基本概念	(118)
6.2.2 主动土压力	(118)
6.2.3 被动土压力	(120)
6.2.4 几种情况下的土压力计算	(121)
6.3 库仑土压力理论	(123)
6.3.1 基本假定	(123)
6.3.2 主动土压力	(123)
6.3.3 被动土压力	(125)
6.3.4 黏性土的库仑土压力理论	(126)
6.3.5 《建筑地基基础设计规范》推荐的公式	(126)
6.3.6 楔体试算法	(127)
6.3.7 土压力计算的几个应用问题	(128)
6.4 挡土墙设计	(129)
6.4.1 挡土墙类型选择	(129)
6.4.2 挡土墙的计算	(130)
6.4.3 重力式挡土墙的构造措施	(133)
6.5 加筋土挡土墙简介	(134)

6.5.1	面板	(134)
6.5.2	筋带	(135)
6.5.3	填料	(135)
6.5.4	加筋土的设计计算	(135)
	思考题	(137)
	习题	(137)
7	地基承载力与土坡稳定性	(139)
7.1	概述	(139)
7.2	地基的破坏形式与过程	(140)
7.2.1	整体剪切破坏	(140)
7.2.2	局部剪切破坏	(140)
7.2.3	冲剪破坏	(140)
7.2.4	地基破坏形式的影响因素及其特征	(140)
7.3	临塑荷载与临界荷载	(141)
7.3.1	塑性区边界方程和最大发展深度	(141)
7.3.2	临塑荷载 p_{cr} 和临界荷载 $p_{1/4}$ 、 $p_{1/3}$	(142)
7.4	地基的极限承载力	(143)
7.4.1	普朗德尔公式	(143)
7.4.2	太沙基公式	(145)
7.4.3	汉森公式	(146)
7.4.4	地基承载力的安全度	(147)
7.5	无黏性土坡稳定性分析	(148)
7.5.1	干燥或静水位下无黏性土坡	(148)
7.5.2	有渗流作用的无黏性土坡	(148)
7.6	黏性土坡稳定性分析	(149)
7.6.1	整体圆弧滑动法	(149)
7.6.2	瑞典条分法	(150)
7.6.3	毕肖普法	(151)
7.6.4	传递系数法	(153)
7.6.5	土坡稳定性分析有效应力法	(154)
7.7	土坡稳定性分析的几个问题	(157)
7.7.1	土体强度指标选取	(157)
7.7.2	土体容许安全系数	(158)
7.7.3	最危险滑动面的确定	(159)
	思考题	(160)
	习题	(160)
	参考文献	(162)

1 绪 论

1.1 土力学的概念及其特点

土是矿物或岩石碎屑构成的松软集合体。在自然界中,地壳表层分布有岩石圈(广义的岩石包括基岩及其覆盖土)、水圈和大气圈。岩石是一种或多种矿物集合体,其工程性质很大程度上取决于它的矿物成分,而土就是岩石经物理、化学、生物等风化作用以及剥蚀、搬运、沉积等交错过程。在复杂的自然环境中所生成的各类沉积物。由于土的形成年代、生成环境及物质成分不同,其类型及物理力学等工程特性亦千差万别。例如,我国沿海及中部地区的软土,西北、华北和东北等地区的黄土,高寒地区的永冻土以及分布广泛的红黏土、膨胀土和杂填土等,其性质各不相同。因此,在建筑物设计前,必须充分了解、研究建筑场地相应土(岩)层的成因、构造、地下水情况、土的工程性质、是否存在不良地质现象等,对场地的工程地质条件做出正确的评价。

土力学是利用力学的一般原理,研究土的物理、化学和力学性质及土体在荷载、水、温度等外界因素作用下工程性状的应用科学。由于土力学的研究对象是以矿物颗粒组成骨架的松散颗粒集合体,其物理、化学和力学性质与一般刚性或弹性固体以及流体等都有所不同。因此,必须通过专门的土工试验技术进行探讨。

由于土是岩石风化后碎屑物质的集合体,因此,天然状态下,土体一般由固相(固体颗粒)、液相(土中水)和气相(气体)三部分组成,它与一般的连续固体材料(如钢材、木材、混凝土等建筑材料)具有不同的孔隙特征,这导致了土体的大变形特性、水流的渗透性、变形的滞后性及其胀缩性等。此外,孔隙中土粒的错位移动又会引起土体的内部摩擦及黏聚力等,导致其抗剪强度特性的不同。土的密度、孔隙率、含水量是影响土的力学性质的重要因素。

土的种类繁多,工程性质极为复杂,给工程应用带来了很大的困难,通常需做出一些必要的假定和简化。例如,采用弹性理论求解土中应力分布,用塑性理论求解地基承载力,将土体的变形和强度分别作为独立的课题求解等。随着人类对土的认识逐步深入,试验方法和测试技术的不断发展,土的本构模型(即土的压力-变形-强度-时间模型)也在逐步完善和切合实际。因此,对土的基本力学性质的研究以及土的本构模型和计算方法的不断发展是土力学的两大重要研究课题。

1.2 土力学的发展概况

随着人们生产的不断发展和生活上的需要,人类很早就懂得利用土进行工程建设。例如,我国都江堰水利工程、举世闻名的万里长城、隋朝南北大运河、黄河大堤、赵州石拱桥以及许许多多遍及全国各地的宏伟壮丽的宫殿寺院、巍然挺立的高塔等,尽管经历了无数次强震、强风,但因奠基牢固而安然无恙。这些都促进了土力学理论的发展,尤其是18世纪工业革命以后,大规模的城市建设和水利、铁路的兴建面临着许多与土有关的问题,从而促进了土力学理论的产生和发展。1773年,法国的库仑(Coulomb)根据试验创立了著名的砂土抗剪强度公式,提出了计算挡土墙土压力的滑楔理论。1869年,英国的朗金(Rankine)又从另一途径提出了挡土墙土压力理论,这对后来土体强度理论的发展起了很大的促进作用。此外,法国布辛奈斯克(Boussinesq)于1885年求得了在弹性半空间表面作用竖向集中力的应力和变形的理论解答;1855年,法国

达西(Darcy)创立了土的层流渗透定律;1922年,瑞典费伦纽斯(Fellenius)为解决铁路塌方提出了土坡稳定分析法。这些古典的理论和方法,至今仍不失其理论和实用价值。

20世纪20年代开始,土力学的研究有了迅速发展。1915年,瑞典彼得森(Petterson)、费伦纽斯(Fellenius)和美国泰勒(Taylor)进一步发展了土坡稳定分析的整体圆弧滑动面法;1920年,法国普朗德尔(Prandtl)给出了地基剪切破坏时的滑动面形状和极限承载力公式;1925年,美籍奥地利人太沙基(Terzaghi)创导的饱和土有效应力原理及其第一本《土力学》专著问世,使土力学成为一门独立的学科;进而伦杜利克(Rendulic)于1936年发现了土的剪胀性、应力-应变非线性关系以及土具有加工硬化与软化的性质。随之,有关土力学的论著与教材也蓬勃发展起来,例如苏联学者格尔谢万诺夫(Герсеванов)的《土体动力学原理》专著(1931)和崔托维奇(Цытович)的《土力学》教材(1935);太沙基的《工程实用土力学》;前苏联索科洛夫斯基(Соколовский)的《松散介质静力学》(1954);美籍华人吴天行的《土力学》(1966)以及弗雷德隆德(Fredlund)和哈尔佐(Rahardjo)的《非饱和土土力学》(1993)等。

随着生产的发展和科学的进步,土力学的研究领域和途径日益更新。土的基本特征、有效应力原理、固结理论、变形理论、土体稳定问题、动力特性、土的流变学等在土力学中得到了广泛应用。斯开普顿(Skempton)的有效应力原理;毕肖普(Bishop)简布(Janbu)的边坡理论;我国学者黄文熙在土的强度和变形及本构关系,陈宗基在黏土微观结构和土的流变,沈珠江在土体本构模型、静动力数值分析及非饱和土理论等方面都取得了突出性的成就。

随着土力学理论与应用研究的不断深入,相关学术活动也日益展开,从1936—2013年,共召开了十八届国际土力学及基础工程学术会议,分别在坎布里奇(1936,一届)、鹿特丹(1948,二届)、瑞士(1953,三届)、伦敦(1957,四届)、巴黎(1961,五届)、加拿大(1965,六届)、墨西哥(1969,七届)、莫斯科(1973,八届)、东京(1977,九届)、斯德哥尔摩(1981,十届)、旧金山(1985,十一届)、里约热内卢(1989,十二届)、新德里(1993,十三届)、汉堡(1997,十四届)、伊斯坦布尔(2001,十五届)、大阪(2005,十六届)、亚历山大(2009,十七届)、巴黎(2013,十八届)等地召开,自十五届起改名为国际土力学及岩土工程学术会议。我国自1957年起,也在北京设立了全国性的中国土力学及基础工程学会学术委员会,并于1978年成立了中国土木工程学会土力学及基础工程学会。自1962—2015年共召开了12届全国土力学及岩土工程学术会议,其地点分别为:天津(1962,一届)、武汉(1966,二届)、杭州(1979,三届)、武汉(1983,四届)、厦门(1987,五届)、上海(1991,六届)、西安(1995,七届)、南京(1999,八届)、北京(2003,九届)、重庆(2007,十届)、兰州(2011,十一届)、上海(2015,十二届)。这些学术会议的召开活跃了土力学的学术研究,拓展了研究领域,进一步促进了土力学学科的发展。

1.3 本课程的特点和学习要求

本课程是土木工程专业的一门主干课程。它涉及工程地质学、工程力学以及结构设计和施工等学科领域,内容广泛,综合性、理论性和实践性很强。学习时应从土木工程专业的要求出发,重视工程地质学的基本知识,培养阅读和使用工程地质勘察资料的能力;牢固掌握土的应力、变形、强度和地基计算等土力学基本原理,并能应用这些基本概念和原理,结合有关结构理论和施工知识,分析和解决地基基础问题。

本书共分为7章:第1章绪论;第2章介绍了土的性质及其工程分类,是本课程的基本知识;第3章至第5章是土力学的基本理论部分,也是本课程的重点内容,主要介绍了各种情况下土中的应力分布、土的压缩特性与地基沉降计算、土的抗剪强度及极限平衡概念等,并扼要地介绍了土工试验的有关知识;第6章主要介绍了土压力的基本理论与计算方法,以及挡土墙的基本形式及其设计计算方法;第7章阐述了地基承载力的确定方法及土坡稳定性分析方法。

在本课程的学习中,必须自始至终抓住土的变形、强度和稳定性问题这一重要线索,并特别注意认识土的多样性和易变性等特点。此外,还必须掌握有关土工试验的基本原理和操作技术及地基勘察知识,了解为确定地基承载力和解决某些土工问题需要做哪些室内和现场土工试验;掌握一般建筑物设计中有关土力学内容的设计计算方法,例如地基承载力、土坡稳定和挡土墙土压力计算等;同时还应了解在建筑物设计之前需要进行哪些勘察工作,掌握地基土野外鉴别能力,学会使用工程地质勘察报告书对建筑场地的工程地质条件做出正确的评价,合理解决基础设计和施工中的疑难问题。

本课程与材料力学、结构力学、弹性力学、建筑材料、建筑结构及工程地质等有着密切的关系,本书在涉及这些学科的有关内容时仅引述其结论,要求理解其意义及应用条件,而不把注意力放在公式的推导上。学习时必须深入理解书中基本原理与概念,掌握计算方法,注重理论联系实际,融会贯通。

2 土的性质与工程分类

本章提要

本章重点介绍了土中三相的性质、土的物理性质指标、土的物理状态、土的结构性和触变性、土的渗透性；简要介绍了土的压实性质、土的工程分类、土的液化特性以及其他水理性质。

要求掌握：土的结构和构造，土的三相比例指标的意义和计算方法，土的物理状态指标，土的渗透特性及渗透系数的测定方法，土的工程分类；熟悉土的压实原理及影响压实效果的因素；了解土中三相物质的成分及其特性。

2.1 概 述

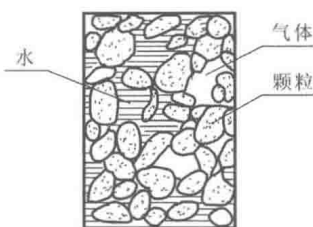


图 2.1 土的三相组成示意图

土的性质包括它的物理性质、力学性质、水理性质等。土是岩石在风化作用下形成的大小不同的颗粒，经搬运，在各种自然环境下沉积形成的产物（残积土是个例外，它未经搬运）。这些颗粒堆积在一起，中间贯穿着孔隙，孔隙中可存在水和空气（图 2.1）。因此，土一般由固体、液体、气体三相物质组成，所以土是三相体。土体的性质取决于三相物质的组成和比例。了解和掌握土中三相物质的成分、比例和相互作用，是理解土的各种性质以及对其进行工程分类的关键。

2.2 土中三相的性质

2.2.1 固相

固相是指土中固体部分，它构成了土的骨架。土木工程中需要土承受荷载作用，固相是自重和外荷载的最终实际载体，固相的矿物成分及其颗粒组成情况是决定土物理力学性质的重要因素。

2.2.1.1 土的矿物成分

土的矿物成分取决于母岩的成分及其所经受的风化作用，不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响。根据土中固相成分与母岩是否相同，可将土中的固体成分分为原生矿物和次生矿物。原生矿物是母岩中未风化的矿物，而次生矿物则是原生矿物经化学风化的产物。

(1) 原生矿物

原生矿物是岩浆在冷凝过程中形成的矿物，有石英、长石、云母等许多种。常见的漂石、卵石、砾、砂等没有黏性的土，其主要成分是原生矿物中的石英。原生矿物成分与母岩相同，颗粒一般体积较大，比表面积（单位体积内颗粒的总表面积）小，与水的作用能力弱，其抗水性和抗风化作用都强，故工程性质比较稳定。

(2) 次生矿物

次生矿物是原生矿物经化学风化作用后形成的新的矿物(例如黏土矿物)。次生矿物一般颗粒细小,呈片状,颗粒比表面积大。由于其粒径非常小(小于 $2\ \mu\text{m}$),具有很大的比表面积,亲水能力强,与水接触时能发生一系列复杂的物理、化学变化,导致土体具有独特的水理性质。自然界中很多类土具有黏性和可塑性(受外力作用性状改变而表面不发生裂纹的性质,称为可塑性),就是因为其含有一定比例的次生矿物。一般把能使土具有黏性和可塑性的次生矿物称为黏土矿物。黏土矿物的存在是土对水含量敏感的主要原因,因此,了解黏土矿物的性质是理解土性质的关键。

2.2.1.2 三种黏土矿物的结构特征和基本工程特性

自然界的黏土矿物有许多种,常见的黏土矿物有蒙脱石、伊利石和高岭石三种,这三种黏土矿物都能与水相互作用,但是程度不同。下面分别介绍这三种黏土矿物的结构特征和基本工程特性。

以上三种黏土矿物都是由两种原子层(简称晶片)组成的,分别称为硅片和铝片。所谓硅片的基本单元是硅-氧四面体,如图 2.2(a)所示,硅-氧四面体是由 1 个居中的硅离子和 4 个位于角点的氧离子所构成。6 个这样的硅-氧四面体可以组成一个硅片,如图 2.2(b)所示,简化图形如图 2.2(c)所示,梯形的底边表示氧原子面。所谓铝片的基本单元是铝-氢氧八面体,它是由 1 个铝离子和 6 个氢氧离子所构成,如图 2.3(a)所示。4 个八面体组成一个铝片,此时每个氢氧根离子被相邻两个铝离子所共有,如图 2.3(b)所示,形成牢固的结构。铝片的简化图形见图 2.3(c),矩形的底边表示氢氧根离子。这两种基本原子层之所以能组成 3 种黏土矿物,是因为硅片和铝片的组迭形式可以不同,由此得到的矿物性质也不同。

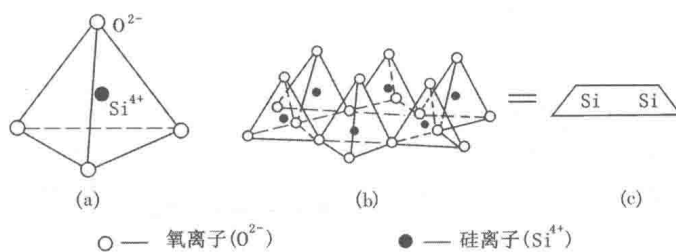


图 2.2 硅片的结构

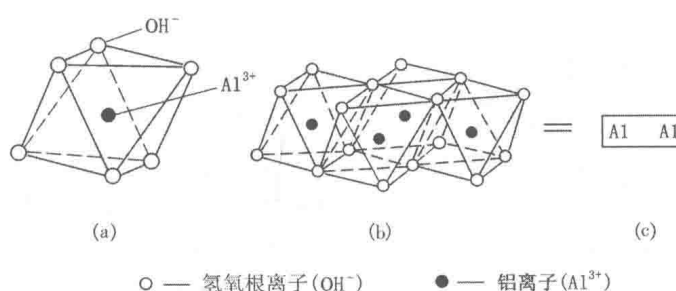


图 2.3 铝片的结构

(1) 蒙脱石

蒙脱石的结晶格架示意图如图 2.4(a)所示,可见其晶胞是由两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片所组成的,称为 2:1 型结构单位层或三层型晶胞。由于晶胞之间 O^{2-} 与 O^{2-} 的联结,分子间键力很弱,很容易被水分子楔入而分开。另外,夹在硅片内的 Al^{3+} 常为低价的其他离子(如 Mg^{2+})所替换,在晶胞之间出现多余的负电荷,从而吸附其他阳离子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 等)来补偿。这种阳离子吸引极性水分子成为水化离子,充填于结构单位层之间,从而改变晶胞的距离,直至达到完全分散到单晶胞为止。因此,蒙脱石矿物的晶格是活动的,吸水后体积发生膨胀,体积可增大数倍,脱水后则可收缩。土中如果蒙脱石含量在 5% 以上,则土遇水就会有明显的膨胀性。

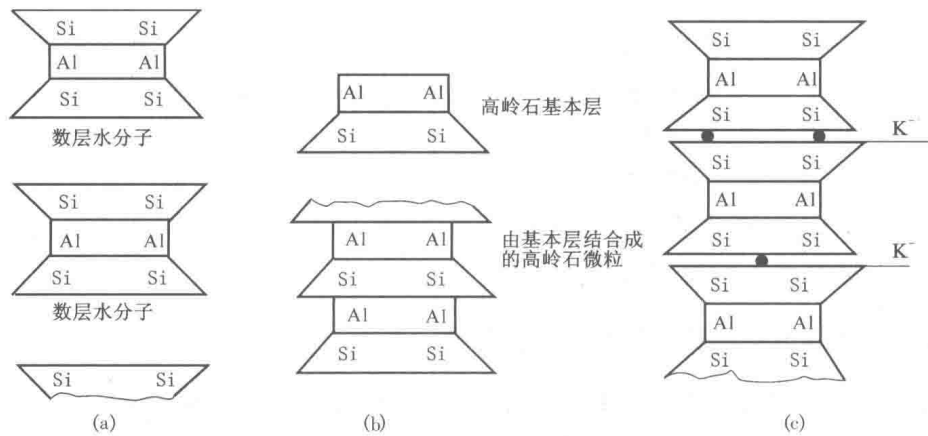


图 2.4 黏土矿物结晶格架示意图

(a)蒙脱石;(b)高岭石;(c)伊利石

(2) 高岭石

高岭石的基本晶体结构示意图如图 2.4(b)所示,它是由一层硅氧晶片和一层铝氢氧晶片组成的晶胞,属于 1:1 型结构单位层或两层型晶胞。这种晶胞一面露出氢氧基,另一面则露出氧原子。晶胞之间的联结是氧原子与氢氧基之间的连接,氢氧根中的氢与相邻晶胞中的氧形成氢键,它具有较强的联结力,因此,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、膨胀性和收缩性显著小于蒙脱石。它的水稳性好、可塑性低、压缩性低、亲水性差。

(3) 伊利石

伊利石的结晶格架示意图见图 2.4(c),与蒙脱石一样,同属 2:1 型结构单位层,晶胞之间键力也较弱。但是,与蒙脱石不同之处是,由于风化环境的差异,在伊利石两层晶胞之间存在钾离子,钾离子增强了晶胞与晶胞之间的连接作用,水分子难以进入。所以,伊利石遇水膨胀、失水收缩的能力低于蒙脱石,其力学性质介于高岭石与蒙脱石之间。

可见,土的矿物结晶格架的差异,从本质上决定了它的工程性质不同。

2.2.1.3 土的粒组

天然土体不但土粒大小变化悬殊,而且形状也不一样。颗粒大的可能有数米,小的只有千分之几毫米,形状有块状、粒状、片状等。土粒的大小和形状不仅与土的成分有关,也与其所经历的风化、搬运、沉积过程有关。土粒的大小称为粒度。土的粒度不同、矿物成分不同,其工程性质也就不同。例如,颗粒粗大的卵石、砾石和砂组成的土体,土粒大多数为浑圆和棱角状的石英颗粒,土体具有较大的透水性而无黏性;颗粒细小的黏粒,则属于针状或片状的黏土矿物,由其组成的土体具有黏滞性而透水性低。

为便于描述,工程中把大小、性质相近的土粒合并为一组,称为粒组。而划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。对于粒组的划分方法,各国、各行业并不完全统一。表 2.1 给出了一种常用土粒粒组的划分方法[引自《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)]:用界限粒径 60 mm、0.075 mm 先将土粒粒组粗分为巨粒、粗粒和细粒三个统称,然后再用 200 mm、2 mm、0.005 mm 等界限粒径进行细分,形成六个粒组:漂石(块石)、卵(碎)石、砾粒、砂粒、粉粒和黏粒等。

表 2.1 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	60~200	

续表 2.1

粒组统称	粒组名称		粒径范围(mm)	一般特征
粗粒	圆砾或 角砾颗粒	粗	20~60	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	5~20	
		细	2~5	
	砂粒	粗	0.5~2	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	0.25~0.5	
		细	0.075~0.25	
细粒	粉粒		0.005~0.075	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、速度较快,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: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。

2.2.1.4 土的颗粒级配

(1) 颗粒级配

自然界绝大多数土都是由几种粒组混合组成。因此,为了说明天然土的颗粒组成情况,不仅要了解土粒的大小,而且要了解各种颗粒所占的比例。土中所含各粒组的相对含量以土粒总重的百分数表示,其组合称为土的颗粒级配。表 2.2 列举了三种土的颗粒级配。为了直观起见,通常用颗粒级配曲线表示(图 2.5)。曲线的纵坐标表示小于某尺寸土粒的累计质量百分数,横坐标是用对数值表示的土粒尺寸,用对数表示可以把粒径相差上千倍的大、小颗粒含量都表示出来,尤其能把占总质量的比例小,但对土的性质有重要影响的微小土粒部分清楚地表达出来。

表 2.2 土的颗粒级配

土粒组成(%) 土样编号	粒径 (mm)	粒径范围(mm)				d_{60}	d_{10}	d_{30}	C_u	C_c
		2~10	0.05~2	0.005~0.05	<0.005					
A		0	99	1	0	0.165	0.11	0.15	1.5	1.24
B		0	66	30	4	0.115	0.012	0.044	9.6	1.40
C		44	56	0	0	3.00	0.15	0.25	20	0.14

由曲线的形态可评定土颗粒大小的均匀程度。如曲线平缓则表示粒径大小相差悬殊,颗粒不均匀,级配良好(如图 2.5 曲线 B 所示,大颗粒的间隙可由小一点的颗粒填充,形成密实、骨架完整的土体);反之,则颗粒均匀,级配不良(图 2.5 中曲线 A、C)。为了定量表示,工程中用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 来反映土颗粒级配的不均匀程度。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \times d_{60}} \quad (2.2)$$

式中 d_{60} ——小于某粒径的土粒质量占土总质量 60% 的粒径,称为限定粒径;

d_{10} ——小于某粒径的土粒质量占土总质量 10% 的粒径,称为有效粒径;

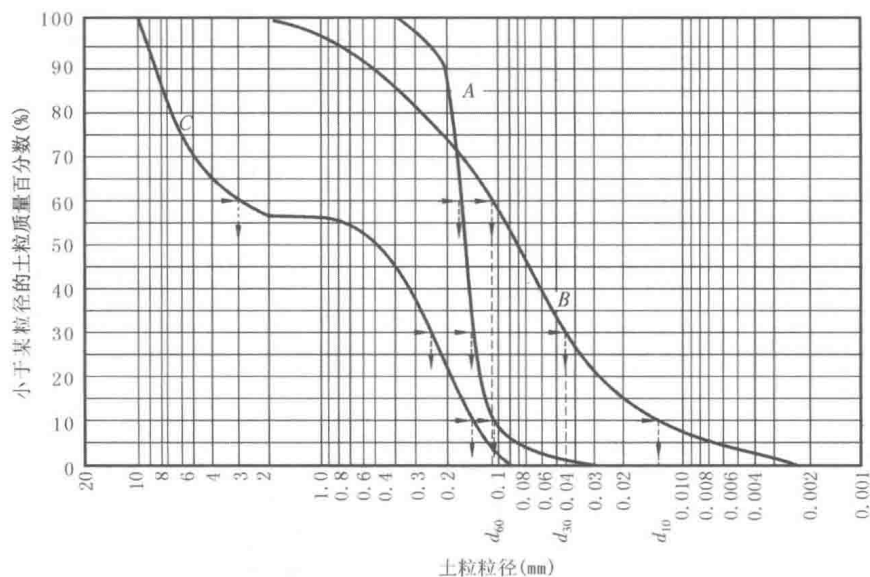


图 2.5 土的颗粒级配曲线

d_{30} ——小于某粒径的土粒质量占土总质量 30% 的粒径,称为中值粒径。

工程中土的级配是否良好可按如下规定判断:

① 对于级配连续的土: $C_u > 5$,级配良好; $C_u < 5$,级配不良。

② 对于级配不连续的土,级配曲线呈台阶状(图 2.5 曲线 C),采用单一指标 C_u 难以全面有效地判断土的级配好坏,需同时满足 $C_u > 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 两个条件时,才为级配良好,反之则为级配不良。

工程中用级配良好的土作为路堤、堤坝填筑材料时,比较容易获得较大的密实度和强度。

(2) 颗粒分析试验

确定土中各个粒组相对含量的方法称为土的颗粒分析试验。对于粒径大于 0.075 mm 的粗粒土,可用筛分法。对于粒径小于 0.075 mm 的颗粒,无法筛分,可采用沉降分析法(水分法)分析其颗粒分布。这两种方法分别介绍如下:

① 筛分法。用一套标准筛子(如孔径分别为 60 mm、40 mm、20 mm、10 mm、5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm、0.075 mm),将试样风干、分散后,取有代表性样本倒入标准筛内摇振,然后分别称出留在各筛子上的土重,并计算出各粒组的相对含量,即得土的颗粒级配。

② 沉降分析法。该法是依据 Stokes(斯托克斯)定理开发的。Stokes 定理为:“球状颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比”。将待分析的土样制成均匀的悬浊液,静置一定时间后,因大颗粒下沉速度快,在一定深度处,将不再含有大于某一粒径的颗粒,其效果等同于将其筛分出去。这一粒径值可以依据深度和时间两个参数,根据斯托克斯原理计算得到。而该粒径对应土粒的含量,可以通过对这一深度处的悬浊液取样、称量、计算得到(图 2.6),或者测量该深度悬浊液的比重后由计算得到(前者称为移液管法,后者称为比重计法)。

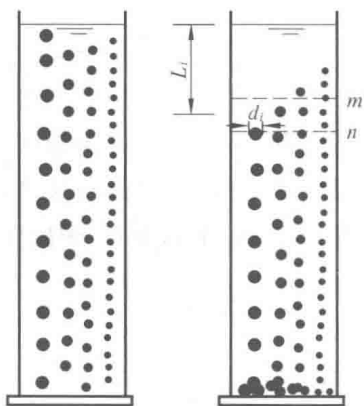


图 2.6 土粒在悬浮液中的沉降

含有多个粒组的土,其颗粒级配分析往往要先进行筛分,先得到粒径大于 0.075 mm 颗粒的含量,然后对粒径小于 0.075 mm 的部分进行沉降分析,最后将所有数据统一处理,得到土的完整颗粒级配。

2.2.2 液相

2.2.2.1 黏土颗粒表面的带电现象

1807年,莫斯科大学列依斯的一项试验揭示黏土颗粒是带电的。他将两根带有电极的玻璃管插入一块潮湿的黏土块内。在玻璃管中撒一些洗净的砂,再加水至相同的高度,接通直流电后发现:在阳极管中,水自下而上地混浊起来,有黏土颗粒在向阳极移动;与此同时,玻璃管中水位逐渐下降;在阴极管中水始终是清澈的,但水位在慢慢升高(图 2.7)。这个试验说明黏土颗粒带有负电荷。如果在一块潮湿黏土块上直接插入两个直流电极,通电后会发现阳极周围的土逐渐变干,而阴极周围的土则逐渐变湿。我们把固体颗粒在直流电作用下向某一电极移动的现象称为电泳;而水分子向相反电极移动的现象称为电渗。

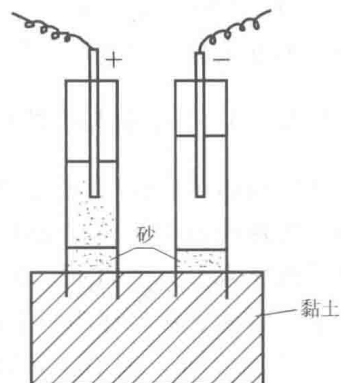


图 2.7 黏土颗粒表面的带电现象

对黏土颗粒表面带负电荷的解释有很多种,如:①离解说,即晶胞表面阳离子扩散于水中,阴离子留在颗粒表面;②替换说,即低价的阳离子,如 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 等替换了晶片内高价的 Si^{4+} 、 Al^{3+} ,导致土颗粒带负电;③吸附说,即土颗粒表面某些矿物吸附了水中的阴离子。黏土颗粒表面带电,导致黏土颗粒四周形成一个电场,在电场作用下,土中水里的阳离子会被吸引分布在颗粒周围,这些阳离子可以同时被所有相邻的土颗粒吸引,使得土颗粒得以聚拢在一起,形成黏聚力,如果有外力施加在这类土上,即便这些土颗粒之间出现相对位移,颗粒间也不会出现可见的裂缝,这就是土的可塑性。如果土中没有黏土矿物,只有原生矿物(如干净的砂),就没有黏性,也没有可塑性。湿砂可表现出一定黏性,但这种黏性来源于毛细水作用,其作用机理完全不同于黏土,后面会介绍到。

2.2.2.2 土中水的存在形态

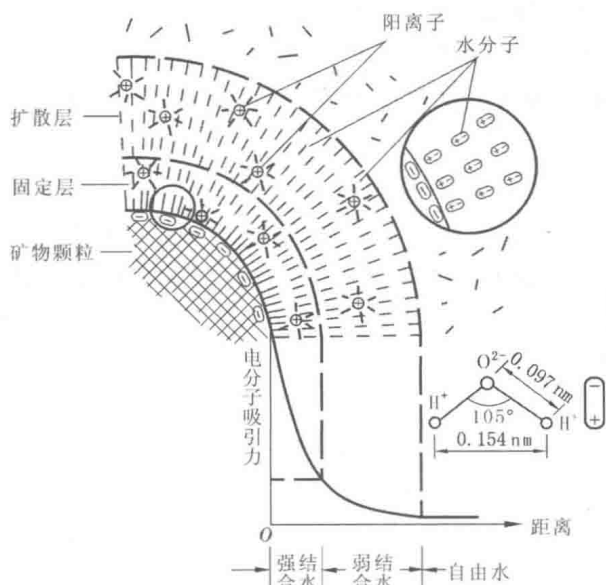


图 2.8 黏土矿物和水分子的相互作用

土中水按存在形态分为:固态水、液态水和气态水。固态水又称矿物内部结晶水或内部结合水,是指存在于矿物的晶体格架内部或是参与矿物构造的水。矿物内部结合水与土体矿物颗粒成为一体,只有在比较高的温度下($80\sim 680^{\circ}C$),才能化为气态水而与颗粒分离,对土的工程性质影响不大。土中的液态水可分为结合水和自由水两大类。结合水是指黏土颗粒表面受电分子吸引力作用的那部分水。这种电分子吸引力高达几千到几万个大气压,使水分子和土粒表面牢固地黏结在一起。结合水又可细分为强结合水和弱结合水两种(图 2.8),强结合水紧贴土粒表面,其性质接近于固体,密度为 $1.2\sim 2.4\text{ g/cm}^3$,冰点为 $-78^{\circ}C$,不能传递静水压力,具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。黏土只含强结合水时,土体非常干燥,呈固体状态,磨碎后呈粉末状态。

存在于强结合水外围、土颗粒表面电场作用范围内的水称为弱结合水。弱结合水虽然也受颗粒表面电荷所吸引,并定向排列于颗粒四周,但电场作用力因远离颗粒而较弱。这层水不是接近于固态而是一种黏滞水膜,受力时能由水膜较厚处缓慢转移到土颗粒其他位置。因此,弱结合水膜能发生变形,但因为不能脱离电场束缚,不能因重力作用而流动。弱结合水的存在使黏性土在某一含水率范围内表现出可塑性。土的冻胀也与弱结合水的性质有关。弱结合水对黏性土的影响最大。