

高等学校土木工程专业规划教材

GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土力学

舒志乐 刘保县 ■ 主 编
赵宝云 张 英 ■ 副主编

TU LI XUE



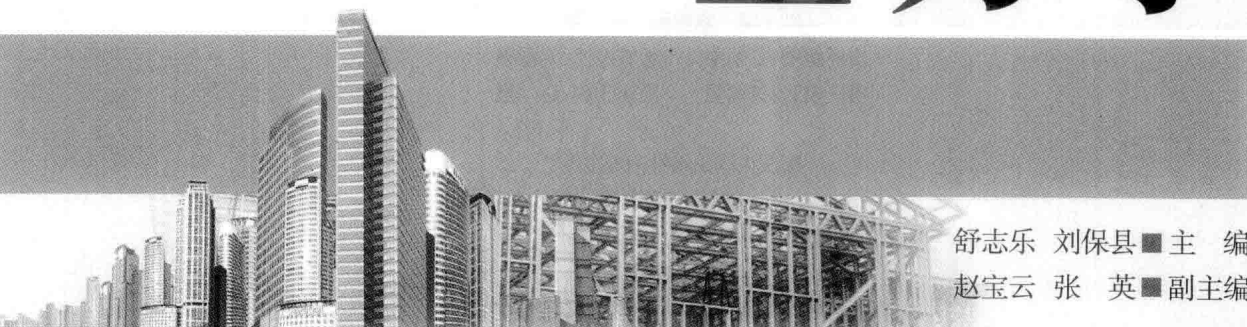
重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

高等学校土木工程

GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

土力学



舒志乐 刘保县 ■ 主 编
赵宝云 张 英 ■ 副主编

TU LI XUE

重庆大学出版社

内容提要

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》对“土力学”课程的要求,注册结构工程师、注册岩土工程师考试大纲中对该课程的要求以及现行国家、行业相关规范,并结合作者长期教学与工程设计的经验编写而成。全书共分8章,主要包括绪论、土的物理性质及工程分类、土的渗透性与渗流、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度与地基承载力、土压力理论以及土坡稳定分析。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材,也可作为从事土木工程勘察、设计、施工技术人员和报考土木工程等专业硕士研究生、注册结构工程师、注册岩土工程师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/舒志乐,刘保县主编. —重庆:重庆大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5624-9233-7

I. ①土… II. ①舒…②刘… III. ①土力学—高等学校—教材 IV. ①TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 142451 号

高等学校土木工程专业规划教材

土力学

主 编 舒志乐 刘保县

副主编 赵宝云 张 英

责任编辑:刘颖果 版式设计:刘颖果

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:418 千

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-9233-7 定价:34.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

在面向 21 世纪的课程体系里,“土力学”是土木、路桥、水利等有关专业的重要专业基础课,同时被列入国家工科力学基地建设的课程之一。为深入贯彻落实《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》及全国普通高等学校教学工作会议的有关精神,深化教育教学改革,提高土木工程专业基础知识的教学质量,按照教育部“以教育思想、观念改革为先导,以教学改革为核心,以教学基本建设为重点,注重提高质量,努力办出特色”的基本思路,同时基于土力学学科迅速发展的需要,我们编写了这本《土力学》教材。

本教材是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和本课程教学大纲的要求编写的。在编写过程中征求了有关学校对本课程教学的意见,考虑了宽口径专业设置教学改革的需要,对教学内容进行了拓宽,涵盖了建筑工程、公路与城市道路、桥梁工程、地下建筑工程等专业知识。全书在写作上力求重点突出、深入浅出,同时注重并加强了各章之间的相互衔接;各章还附有习题,以进一步巩固学生对本课程知识的掌握。

“土力学”是高等学校土木工程专业必修的一门课程,其理论性和实践性都很强。本书在基本原理和方法的选用上以工程实用为主,并兼顾反映国内外的先进技术水平。理论部分以讲解基本假定和基本概念为主;应用部分注重贯彻现行规范、标准的规定,但尽量以共性内容为主,避免其简单地成为规范的说明书,有利于培养读者的工程实践能力。

本教材广泛吸收了国内外优秀教材及研究成果,具有体系完整、内容全面、例题丰富、适应面广等特点。在编写过程中,努力做到内容深入浅出、重点突出、图文详尽、例题典型,力求考虑学科发展新水平,结合新规范,反映土力学的成熟成果与观点。

限于编者的水平,书中难免存在不妥之处,敬请专家学者和广大读者批评指正。

编者
2015 年 6 月

目录

第1章 绪论	1
1.1 土力学的概念及学科特点	1
1.2 土力学的发展简史	2
1.3 土力学在工程建设中的地位	3
1.4 土力学课程的特点及学习方法	3
第2章 土的物理性质及工程分类	5
2.1 土的形成	5
2.2 土的三相组成与土的结构	7
2.3 土的物理性质指标	15
2.4 土的物理状态指标	21
2.5 土的胀缩性、湿陷性和冻胀性	28
2.6 土的压实性	30
2.7 土的工程分类	35
习 题	39
第3章 土的渗透性与渗流	41
3.1 土的渗透性与达西定律	41
3.2 层状土的等效渗透系数	50
3.3 二维渗流及应用	52
3.4 渗透力与渗透破坏	56
习 题	61
第4章 土中应力计算	63
4.1 土中自重应力	63
4.2 基底压力计算	67
4.3 地基中附加应力计算	72
4.4 有效应力原理	87
习 题	93
第5章 土的压缩性与地基沉降计算	96
5.1 固结试验及压缩性指标	96

5.2 土的压缩性原位测试	102
5.3 应力历史对压缩性的影响	107
5.4 地基沉降计算	109
5.5 地基沉降与时间的关系	125
5.6 地基变形特征与地基允许变形值	135
习 题	139
第6章 土的抗剪强度与地基承载力	141
6.1 土的抗剪强度理论	141
6.2 土的抗剪强度试验	146
6.3 土的孔隙压力系数	153
6.4 土的抗剪特性	155
6.5 应力路径	159
6.6 土的抗剪强度机理和影响因素	161
6.7 地基破坏模式	164
6.8 地基临塑荷载和极限荷载	166
6.9 地基极限荷载	171
6.10 地基容许承载力和地基承载力特征值	178
习 题	185
第7章 土压力理论	188
7.1 挡土结构和土压力类型	188
7.2 静止土压力计算	190
7.3 朗肯(Rankine)土压力理论	190
7.4 库仑(Coulomb)土压力理论	195
7.5 几种常见情况下的土压力	200
7.6 朗肯土压力理论与库仑土压力理论比较	222
习 题	223
第8章 土坡稳定分析	225
8.1 无黏性土坡稳定性分析	225
8.2 黏性土坡的稳定性分析	230
8.3 土坡稳定分析的总应力法和有效应力法	243
8.4 天然土体上的边坡稳定	251
8.5 地基的稳定性	254
8.6 工程常见情况的土坡稳定	256
习 题	259
参考文献	260

第1章 绪论

1.1 土力学的概念及学科特点

土力学是研究土体的应力、变形、强度、渗流及长期稳定性的一门学科。广义的土力学又包括土的生成、组成、物理化学性质及分类在内的土质学。土力学也是一门实用的学科,它是土木工程的一个分支,主要研究土的工程性质,解决工程问题。

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的集合体,其工程性质在很大程度上取决于它的矿物成分,而土就是岩石风化的产物。土是由岩石经物理、化学、生物风化作用以及剥蚀、搬运、沉积作用等在交错复杂的自然环境中所生成的各类沉积物。因此,土的类型及其物理、力学性状千差万别,但在同一地质年代和相似沉积条件下,又有其相近性状的规律性。强风化岩石接近土性,也属于土质学与土力学的研究范畴。

土中固体颗粒是岩石风化后的碎屑物质,简称土粒。土粒集合体构成土的骨架,土骨架的孔隙中存在液态水和气体。因此,土是由土粒(固相)、土中水(液相)和土中气(气相)所组成的三相物质;当土中孔隙被水充满时,则是由土粒和土中水组成的二相体。土体具有与一般连续固体材料(如钢、木、混凝土及砌体等建筑材料)不同的孔隙特性,它不是刚性的多孔介质,而是大变形的孔隙性物质。在孔隙中水的流动显示土的渗透性(透水性);土孔隙体积的变化显示土的压缩性、胀缩性;在孔隙中土粒的错位显示土内摩擦和黏聚的抗剪强度特性。土的密度、孔隙率、含水量是影响土的力学性质的重要因素。土粒大小悬殊甚大,大于60 mm 粒径的为巨粒粒组,小于0.075 mm 粒径的为细粒粒组,介于0.075~60 mm 粒径的为粗粒粒组。

工程用土总的分为一般土和特殊土。广泛分布的一般土又可以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、粉性土和黏性土四大类。当土中巨粒、粗粒粒组的含量超过全重的50%时,属于碎石类的土或砂类土;反之,属于粉性土或黏性土。碎石土和砂类土总称为无黏性土,一般特征是透水性大,无黏性,其中砂类土具有可液化性;黏性土的透水性小,具有可塑性、湿陷性、胀缩性和冻胀性;而粉性土兼有砂类土的可液化性和黏性土的可塑性等。特殊土有遇水沉陷的湿陷性土(如常见的湿陷性黄土)、湿胀干缩的胀缩性土(习惯上称膨胀土)、冻胀性土(习惯上称冻土)、红黏土、软土、填土、混合土、盐渍土、污染土、风化岩与残积土等。

综上所述,土的种类繁多,其工程性质十分复杂,通过土工试验发现土的应力-应变关系的非线性特点,在没有深入了解土的力学性质的变化规律,在没有条件进行精确计算以前,不得

不将土工问题计算做出必要的简化。例如,采用弹性理论求解土中应力分布,而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求解课题。20 世纪 60 年代以来,电子计算机问世,已可将更接近于土本质的力学模型进行复杂的快速计算,现代科学计算的发展也提高了土工试验的测试精度,发现了许多过去观察不到的新现象,为建立更接近实际的数学模型和测定正确的计算参数提供了可靠依据。但由于土的力学性质的复杂性,对土的本构模型(即土的压力—变形—强度—时间模型)的研究以及计算参数的测定,均远落后于计算技术的发展;而且计算参数的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,是土力学的两大重要研究课题。

在土木工程中,天然土层常被作为各种建筑物的地基,如在土层上建造房屋、桥梁、涵洞、堤坝等;或利用土作为建筑物周围的环境,如在土层中修筑地下建筑、地下管道、渠道、隧道等;还可利用土作为土工建筑物的材料,如修建土堤、土坝等。因此,土是土木工程中应用最广泛的一种建筑材料或介质。

地基基础与场地稳定性密切关联,要对场地稳定性进行评价,对建筑群选址或道路选线的可行性方案进行论证,对建筑物地基基础或路基进行经济合理的设计,尚需具备工程地质学、岩体力学等学科的基本知识,这也是土力学学科的一个特点。

1.2 土力学的发展简史

早在新石器时代,人类已开始建造原始的地基基础,西安半坡遗址的土台和石基础即为一例。公元前二世纪修建的万里长城,后来修建的南北大运河、黄河大堤以及宏伟的宫殿、寺庙、宝塔等建筑,都有坚固的地基基础,经历地震强风考验,留存至今。隋朝修建的河北省赵州桥,为世界最早最长的石拱桥,全桥仅一孔石拱横越洹河,净跨达 37.02 m。此石拱桥两端主拱肩部设有两对小拱,结构合理,造型美观,节料减重,简化桥台,增加稳定性,桥宽 8.4 m,桥下通航,桥上行车。桥台位于粉土天然地基上,基底压力达 500 ~ 600 kPa,从 1390 年以来沉降与位移甚微,至今安然无恙。1991 年赵州桥被列为“国际历史土木工程第 12 个里程碑”。公元 989 年建造开封开宝寺木塔时,预见塔基土质不均会引起不均匀沉降,施工时特意做成倾斜,待沉降稳定后塔身正好竖直。此外,在西北地区黄土中大量建窑洞,以及采用石料基垫、灰土地基等,积累了丰富的地基处理经验。

18 世纪产业革命后,城市建设、水利工程和道路桥梁的兴建,推动了土力学的发展。1773 年法国的库仑根据试验,创立了著名的土的抗剪强度的库仑定律和土压力理论;1857 年英国的朗肯又提出一种土压力理论;1885 年法国的布辛奈斯克(J. Boussinesq)求得半无限空间弹性体,在竖向集中力作用下,全部 6 个应力分量和 3 个变形的理论解;1922 年瑞典费伦纽斯为解决铁路滑坡,完善了土坡稳定分析圆弧法。这些理论与方法至今仍在广泛应用。1925 年美国土力学家太沙基发表第一部土力学专著,使土力学成为一门独立的学科。为了总结和交流世界各国的理论和经验,自 1936 年起,每隔 4 年召开一次国际土力学和基础工程会议。各地区也召开类似的专业会,提出大量论文与研究报告。

近年来,世界各国超高土石坝、超高层建筑与核电站等巨型工程的兴建,各国多次强烈地震的发生,促进了土力学的进一步发展。有关单位积极研究土的本构关系、土的弹塑性与黏弹性理论和土的动力特性。同时,各国研制成功多种多样的工程勘察、试验与地基处理的新设备,如

自动记录静力触探仪、现场孔隙水压力仪、径向膨胀仪、测斜仪、自进式旁压仪、应用放射性同位素测土的物理性质指标仪、薄壁原状取土器、高压固结仪、自动固结仪、大型三轴仪、振动三轴仪、真三轴仪、大型离心机、流变仪、震冲器、三重管旋喷器、粉喷机、塑料排水板插板机、扩底桩机械扩底机等,为土力学理论研究和地基基础工程的发展提供了良好的条件。

经过 30 多年的努力,现代土力学在下列几方面取得了重要进展:

- ①线性模型和弹塑性模型的深入研究和大量应用;
- ②损伤力学模型的引入与结构性模型的初步研究;
- ③非饱和土固结理论的研究;
- ④砂土液化理论的研究;
- ⑤剪切带理论及渐进破损问题的研究;
- ⑥土的细观力学研究。

1.3 土力学在工程建设中的地位

所有的工程建设项目,包括高层建筑、高速公路、机场、铁路、桥梁、隧道等,都与它们赖以存在的土体有着密切关系,在很大程度上取决于土体能否提供足够的承载力,取决于工程结构是否遭受超过允许的沉降和差异变形等,这就要涉及土中应力计算、土的压缩性、土的抗剪强度以及地基极限承载力等土力学基本理论。

在路基工程中,土既是修筑路堤的基本材料,又是支承路堤的地基。路堤的临界高度和边坡的取值都与土的抗剪强度指标及土体的稳定性有关;为了获得具有一定强度和良好水稳定性的路基,需要采用碾压的施工方法压实填土,而碾压的质量控制方法正是基于对土的击实特性的研究成果;挡土墙涉及的侧向荷载——土压力的取用需借助于土压力理论计算;近年来,我国高速公路大量修建,对路基的沉降与控制提出了更高的要求,而解决沉降问题需要对土的压缩特性进行深入研究。

水工建筑物在复杂荷载作用(尤其是水平荷载)下,常发生水平滑移和倾斜,这种现象在我国港口及近海工程中较为常见。如原胜利 4 号坐底式钻井平台和前渤海 2 号沉垫自升式钻井平台,由于波浪水流等荷载的作用,在渤海湾浅水区作业时,曾发生多次水平滑移,致使正在钻井的井位报废,造成重大经济损失。同样,在水平荷载作用下,水工建筑物发生倾覆也是建筑物破坏的形式之一。

由此可见,土力学这门课程与土木工程专业课的学习和今后的土木工程技术工作有着非常密切的关系,对地基的设计、施工及对建筑的抗震性能具有相当重要的作用,对土木工程的发展起着举足轻重的作用。它主要研究土体的地质特性及其在工程活动影响下的应力、变形、强度和稳定性。随着人口不断密集,人类活动的范围日益狭小,现代工程建设不得不向高(高层建筑)、深(地下工程)、远(高速公路/铁路)的方向发展。同时通过对不良场地土体的改善进行工程建设,可以充分利用日益紧缺的土地资源。因此,土力学在现代交通、土木工程建设事业中拥有非常重要的地位。

1.4 土力学课程的特点及学习方法

本课程是土木工程专业的一门主干的专业基础课程。其涉及工程地质学、结构设计和施工

等几个学科领域,内容广泛,综合性、理论性和实践性都很强,故学习应突出重点、顾及全面。下面就如何学习这门课程,提出几点建议以供参考。

①着重搞清基本概念、基本理论,掌握基本计算方法,同时还应注意它们的基本假定和使用条件。基本概念、基本理论是进行分析、计算的前提,概念、理论的掌握要重在理解,把握实质;基本计算方法多是一些通用的、易于掌握的方法,应充分理解,熟练掌握。由于土力学问题十分复杂,其中的许多计算理论和公式是在某些假设和简化前提下建立的,如土中应力计算、土的压缩变形与地基固结沉降计算方法、土的抗剪强度等。因此,在学习当中应当了解这些理论难以模拟、概括土各种力学性状全貌的不完善之处,注意这些理论在工程实际使用中的适用条件,全面掌握这些基本理论和方法,学会将其应用到工程实际中,并通过实际工程中经验的积累,对其进行验证、完善和发展。

②把握各理论之间的相互联系,明晰学习思路。尽管土力学内容非常广泛,但教材各章都是从不同的角度阐述土的应力、变形、渗流及稳定问题,抓住这一线索,找出各章间的内在联系,做到融会贯通,使得纷杂的土力学知识变得相对体系化。

③重视理论和计算的同时,应注意掌握土力学指标和参数的相关试验技术。解决岩土工程问题的关键步骤之一是土的计算指标和参数的确定,以及土的工程性质指标,包括物理性质和力学性质指标,要掌握颗粒分析,密度,含水量和液、塑限等基本物理性质的测定方法,以及直剪、固结等基本力学性质指标的测定方法,了解三轴试验的基本原理和数据分析处理方法。

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,还必须掌握有关的土工试验技术及地基勘察知识,对建筑场地的工程地质条件作出正确的评价,才能运用土力学的基本知识去正确解决基础工程中的疑难问题。

第2章 土的物理性质及工程分类

地壳的表层是由基岩及其覆盖土组成的。岩石发生风化作用后,原来高温高压下形成的矿物被破坏,形成一些在常温常压下较稳定的新矿物,构成陆壳表层风化层。风化层之下的完整岩石称为基岩,所谓覆盖土是指覆盖于基岩之上各类土的总称。土是由岩石经风化、剥蚀、搬运、沉积作用形成的松散沉积物。没有经过搬运,堆积在原来地方的土称为残积土,一般分布在山顶或山坡上。土由于生成条件、环境的不同,土的成分、结构和构造也不同,其物理力学性质相差很大。土既可以作为建筑工程材料,用来烧制砖瓦或作为路基材料,也可以作为建筑物及构筑物地基。不加处理就能满足强度和变形要求,直接进行工程建设的地基,称为天然地基;经过换土垫层、排水固结等措施处理后才能进行工程建设的地基,称为人工地基。

土是由固相、液相、气相组成的三相体系,其中固相指的是土颗粒,它是土的骨架;液相指的是土中的水;气相指的是土中的气体。土在特定条件下也可以为二相体系,如当土中没有水或没有气体的时候。土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体,各种土的矿物成分、颗粒大小不尽相同,故土体性质复杂,极不均匀,因此,土的三相之间的比例关系差别很大。同时,在荷载作用下土中的气体和水可以排出,三相之间的比例关系还会随时间、荷载条件和气候条件等不断发生变化,这将直接影响土的工程性质。因此,要研究土的性质,就必须研究土的三相组成以及土的结构、构造等特征。

从物理的观点,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)是非常必要的。土的三相组成物质、三相比例、土的结构和构造不同,土的密度、密实程度、软硬或干湿状态等就会有所不同,土的物理性质又在一定程度上决定了它的力学性质(如压缩性、强度、渗透性等),因此土的物理性质是土最基本的工程特性。

2.1 土的形成

地球表面的整体岩石在阳光、大气、水和生物等因素影响下发生风化作用,使岩石崩解、破碎,经流水、风、冰川等动力作用,形成形状各异、大小不一的颗粒。这些颗粒受各种自然力作用,在各种不同的自然环境下堆积起来,就形成了土。因此,通常说土是岩石风化的产物。

堆积下来的土,在很长的地质年代中发生复杂的物理化学变化,逐渐压密、岩化,最终又会形成岩石,这就是沉积岩。这种长期的地质过程称为沉积过程。因此,在自然界中,岩石不断风化破碎形成土,而土又不断压密、岩化而形成岩石。这一循环过程永无休止地重复进行。

2.1.1 风化作用

岩石的风化是岩石在自然界各种因素和外力作用下遭到破碎和分解,产生颗粒变小及化学成分改变的现象。岩石风化后产生的物质,其性质与原生岩石的性质有很大区别。通常把风化作用分为物理风化、化学风化和生物风化3类。这3类风化经常是同时作用并且互相联系的。

1) 物理风化

岩石中发生的只改变颗粒的大小与形状,而不改变原来矿物成分的变化过程称为物理风化。物理风化一般包括岩石在经受风、霜、雨、雪等自然力的影响下而发生的机械破碎作用、周围环境的温度和湿度发生变化引起的不均匀膨胀与收缩而产生的破裂作用等。

2) 化学风化

岩石与周围环境中的水、氧气和二氧化碳等物质的长间接接触,其内部的化学成分逐渐发生变化,从而导致其组成矿物成分发生改变的过程称为化学风化。由化学风化而产生的一些新的矿物成分称为次生矿物。

3) 生物风化

动植物和人类活动对岩石的破坏作用称为生物风化。例如,树在岩石缝隙中生长时树根伸展使岩石缝隙扩展开裂,人类开采矿石、修建隧道时的爆破工作,对周围岩石产生的破坏等。生物风化的方式又可分为物理生物风化和化学生物风化两种形式。

2.1.2 不同形成条件下的土

土的工程特性与其形成条件有很大的关系。根据土的形成条件可将土分为两大类,一类为残积土,另一类为运积土。

1) 残积土

岩石风化后产生的碎屑物质,一部分被风和降水带走,一部分保留在原地。保留在原地的风化碎屑物质所构成的土称为残积土,它的特征是颗粒表面粗糙、多棱角、粗细不均、无层理。

2) 运积土

运积土是指风化所形成的土颗粒,受自然力的作用,被搬运到远近不同地点所沉积的堆积物,其特点是颗粒经过滚动和摩擦作用而变圆滑。在沉积过程中因受水流等自然力的分选作用而形成颗粒粗细不同的层次,由于粗颗粒下沉快,细颗粒下沉慢而形成不同粒径的土层。搬运和沉积过程对土的性质影响很大,下面将根据搬运动力不同,介绍几类运积土。

①坡积土:残积土受重力和暂时性流水(雨水、雪水)的作用,搬运到山坡或坡脚处沉积起来的土,坡积颗粒随斜坡自上而下呈现由粗而细的分选性和局部层理。

②洪积土:残积土和坡积土受洪水冲刷、搬运,在山沟出口处或山前平原沉积下来的土,随离山远近有一定的分选性,颗粒有一定的磨圆度。

③冲积土:河流的流水作用搬运到河谷坡降平缓的地带沉积下来的土,这类土经过长距离的搬运,颗粒具有较好的分选性和磨圆度,常形成砂层和黏性土层交叠的地层。

④风积土:由风力搬运形成的土,其颗粒磨圆度好,分选性好。我国西北地区黄土就是典型的风积土。

⑤湖泊沼泽沉积土:在湖泊及沼泽等极为缓慢水流或静水条件下沉积下来的土,或称淤积土。这类土除了含大量细微颗粒外,常伴有生物化学作用所形成的有机物,成为具有特殊性质的淤泥或淤泥质土。

⑥海相沉积土:由河流流水搬运到海洋环境下沉积下来的土。

⑦冰积土:由冰川或冰水夹带搬运形成的沉积物,其颗粒粗细变化大,土质不均匀。

3) 土的特点

土的上述形成过程决定了它具有特殊的物理力学性质。与一般建筑材料相比,土具有3个重要特点。

①散体性:颗粒之间无黏结或有一定的黏结,存在大量孔隙,可以透水、透气。

②多相性:土往往是由固体颗粒、水和气体组成的三相体系,相系之间质和量的变化直接影响它的工程性质。

③自然变异性:土是在自然界漫长的地质历史时期演化形成的多矿物组合体,性质复杂,不均匀,且随时间还在不断变化。

2.2 土的三相组成与土的结构

如前所述,土是由固体颗粒、水和气体三部分所组成的三相体系。土的固体颗粒主要由矿物颗粒、有机物颗粒及岩屑颗粒构成土的骨架部分,即固相;土孔隙中的水及其溶解物构成土中液体部分,即液相;空气及其他气体构成土中气体部分,即气相。

2.2.1 土中固体颗粒

土的固体颗粒(简称土颗粒或土粒)的大小、形状、矿物成分及其组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。粗大的土粒往往是岩石经物理风化形成的碎屑,其形状呈块状或粒状;细小的土粒往往是化学风化形成的次生矿物(如颗粒极细的黏土矿物)和有机质,其形状主要呈片状。土颗粒越细,单位体积内颗粒的表面积就越大,与水接触的面积就越多,颗粒间相互作用的能力就越强。

1) 颗粒级配

颗粒的大小用粒径来表示。土粒的粒径变化时,土的性质也相应地发生变化。因此,可将土中各种不同粒径的土粒,按粒径的大小分组,即某一级粒径的变化范围,称为粒组。同一粒组内的土颗粒具有相似的性质。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。根据界限粒径 200, 20, 2, 0.075 和 0.005 mm 把土粒分为六大粒组,如表 2.1 所示。

表 2.1 土粒粒组的划分

粒组名称		粒径范围/mm	一般特征
漂石或块石颗粒		> 200	透水性很大,无黏性,无毛细水,不能保持水分
卵石或碎石颗粒		200 ~ 20	
圆砾或角砾颗粒	粗	20 ~ 10	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小,不能保持水分
	中	10 ~ 5	
	细	5 ~ 2	
砂粒	粗	2 ~ 0.5	易透水,无黏性,无可塑性,毛细水上升高度很小
	中	0.5 ~ 0.25	
	细	0.25 ~ 0.1	
	极细	0.1 ~ 0.075	
粉粒	粗	0.075 ~ 0.01	透水性小,湿时稍有黏性,毛细水上升高度较大、较快,在水中易悬浮,易出现冻胀现象
	细	0.01 ~ 0.005	
黏粒		< 0.005	透水性很小,湿时有黏性、可塑性,其性质随含水量变化,毛细水上升高度大,但其速度较慢

注:①漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆形状(圆形或亚圆形),块石、碎石和角砾颗粒都带有棱角;

②粉粒或称粉土粒,粉粒的粒径上限 0.075 mm 相当于 200 号标准筛的孔径;

③黏粒或称黏土粒,黏粒的粒径上限也采用 0.002 mm 为准。

为了定量地描述土颗粒的组成情况,不仅要了解土颗粒的粗细,而且要了解各种颗粒所占的比例,特别是不同粒组在混合土中所占的比例。混合土的性质不仅取决于所含颗粒的大小程度,更取决于不同粒组的相对含量,即土中各粒组的含量占土样总质量的百分数。土中各种大小的粒组中土粒的相对含量称为土的级配。土的级配好坏将直接影响土的工程性质,级配良好的土,压实后能达到较高的密实度,因而其强度高、压缩性低;反之,级配不良的土,其压实密度小、强度低。

(1) 颗粒分析试验

测定土中各粒组颗粒质量占该土总质量的百分数,确定粒径分布范围的试验称为土的颗粒分析试验。通过试验可以了解土的颗粒级配情况,以便进行土的工程分类及判别土的工程性质。常用的试验方法有筛分法和水分法(又称沉降分析法)两种。筛分法适用于粒径大于 0.075 mm 的土,水分法适用于粒径小于 0.075 mm 的土。当土中兼有大于和小于 0.075 mm 土粒的混合土样时,配合使用这两种方法便可以确定各粒组的含量。

筛分法适用于颗粒大于 0.075 mm 的土。它是将风干、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(如 20, 2, 0.5, 0.25, 0.1, 0.075 mm),称出留在各筛子上的干土重,即可求各粒组的相对含量,通过计算可得到小于某一筛孔直径土粒的累计质量及累计质量百分含量。

沉降分析法用于分析粒径小于 0.075 mm 的土。沉降分析法的理论基础是土粒在水(或均匀悬液)中的沉降原理,如图 2.1 所示。当土样被分散于水中后,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

用斯托克斯(Stokes, 1845)定律来计算:

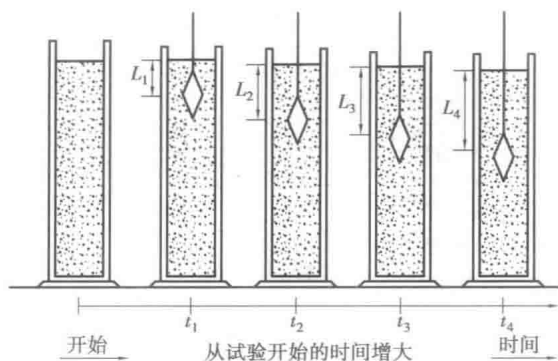


图 2.1 土粒在悬液中的沉降

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} g d^2 \quad (2.1)$$

式中 v ——土粒在水中的沉降速度, cm/s;

g ——重力加速度, 9.81 m/s^2 ;

ρ_s, d ——分别为土粒的密度(g/cm^3)和直径(cm);

ρ_w, η ——分别为水的密度(g/cm^3)和黏滞度($10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。

进一步考虑将速度 v 和土粒密度 ρ_s 分别表达为:

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

代入式(2.1), 可变换为:

$$d = \sqrt{\frac{18\eta}{(d_s - 1)\rho_w g}} \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (2.2)$$

水的 η 值由温度确定, 斯托克斯定律假定: 颗粒是球形的; 颗粒周围的水流是线流; 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 处的悬浮密度, 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) 颗粒级配曲线

根据粒度成分分析试验结果, 常用粒径累计曲线表示土的颗粒级配。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与差的相对比较。粒径累计曲线法的横坐标为粒径, 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, 如图 2.2 所示。由粒径累计曲线的坡度可以大致判断土粒均匀程度或级配是否良好。如曲线较陡(曲线 a), 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(曲线 b), 则表示粒径大小相差悬殊, 土粒不均匀, 级配良好。

为了判断土的级配优劣, 采用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个指标:

$$\text{不均匀系数} \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.3)$$

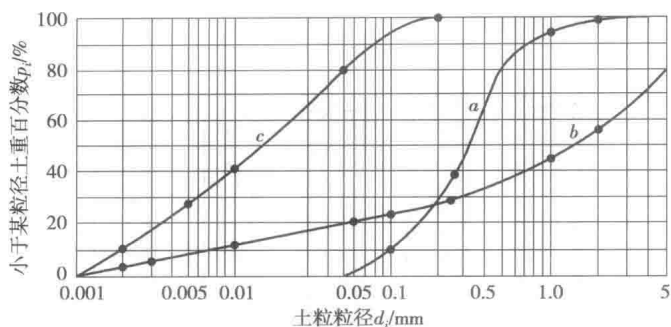


图 2.2 土的颗粒级配曲线

曲率系数

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad (2.4)$$

式中 d_{60} ——累积曲线上小于某粒径的质量分数为 60% 时所对应的粒径值,称为土的限制粒径;

d_{10} ——累积曲线上小于某粒径的质量分数为 10% 时所对应的粒径值,称为土的有效粒径;

d_{30} ——累积曲线上小于某粒径的质量分数为 30% 时所对应的粒径值,称为土的中值粒径。

不均匀系数 C_u 越大,表示土中所含粒径越不均匀。工程上把 $C_u \geq 5$ 看成级配不均匀,把 $C_u < 5$ 看成级配均匀。曲率系数 C_c 反映累积曲线弯曲的程度。当 $C_c = 1 \sim 3$ 时,则认为级配是合适的。级配良好的土必须同时满足两个条件,即 $C_u \geq 5, C_c = 1 \sim 3$ 。

【例 2.1】土工试验颗粒分析的留筛质量见表 2.2,底盘内试样质量 20 g,试计算试样的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。

表 2.2 土工试验颗粒分析的留筛质量

筛孔孔径/mm	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075
留筛质量/g	50	150	150	100	30

【解】土的总质量 = 50 + 150 + 150 + 100 + 30 + 20 = 500 (g)

不同粒径土粒所占百分率:

$$\text{粒径} < 2.0 \text{ mm} \quad 1 - \frac{50}{500} = 0.9 = 90\%$$

$$\text{粒径} < 1.0 \text{ mm} \quad 1 - \frac{50 + 150}{500} = 0.6 = 60\%$$

$$\text{粒径} < 0.5 \text{ mm} \quad 1 - \frac{50 + 150 + 150}{500} = 0.3 = 30\%$$

$$\text{粒径} < 0.25 \text{ mm} \quad 1 - \frac{50 + 150 + 150 + 100}{500} = 0.1 = 10\%$$

$$\text{粒径} < 0.075 \text{ mm} \quad 1 - \frac{50 + 150 + 150 + 100 + 30}{500} = 0.04 = 4\%$$

所以 $d_{60} = 1.0 \text{ mm}, d_{30} = 0.5 \text{ mm}, d_{10} = 0.25 \text{ mm}$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{30}} = \frac{1.0}{0.25} = 4$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}} = \frac{0.5^2}{0.25 \times 1.0} = 1.0$$

2) 矿物成分

曲率系数 C_c 反映累积曲线的分布范围, 曲线的整体形状。砂类土同时满足 $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 时为级配良好的砂或砾。土粒的矿物成分与其成土过程中的风化作用关系密切。在物理风化作用下, 土粒保持与成土原岩相同的矿物成分, 如长石、石英、云母颗粒, 在化学风化作用下, 由于改变了成土原岩原来的矿物成分, 形成了新矿物, 即次生矿物, 如蒙脱石、伊利石、高岭石颗粒。一般来说, 物理风化生成的原生矿物颗粒较粗, 如砾石、砂粒; 化学风化的次生矿物颗粒较细, 如某些黏土颗粒。

粉粒的矿物成分主要是由化学性稳定(如石英)或硬度较小的原生矿物(如白云母、长石)所组成。

在电子显微镜下观察到的黏土矿物呈鳞片状或片状的晶体。经 X 射线分析证明, 其内部具有层状晶体构造, 即其原子排列成一定的几何形态, 并且是由两个基本结晶单元(称为晶片)构成的: 一种是硅氧晶片, 它的基本单元是 Si—O 四面体; 另一种是铝氢氧晶片, 它的基本单元是 Al—OH 八面体, 如图 2.3 所示。

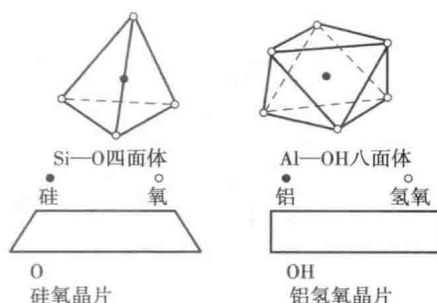


图 2.3 黏土矿物晶片示意图

由于晶片结合情况不同, 就形成了具有不同性质的各种黏土矿物, 其中主要有蒙脱石、伊利石、高岭石三类。

蒙脱石的结构单元是由两层硅氧晶片之间夹一层铝氢氧晶片结合而形成基本层组(也称晶胞), 多个层组叠加在一起形成一个矿物颗粒。由于这种层组表面分布的是氧原子, 其间没有氢键, 因此联结力很弱, 可以吸进很多水分子, 如图 2.4(a) 所示。吸入的水分子可以使颗粒从层组间断开, 而分成更小的颗粒, 甚至可分成单个层组的颗粒。所以蒙脱石颗粒最小, 亲水性最大, 具有膨胀性和收缩性。

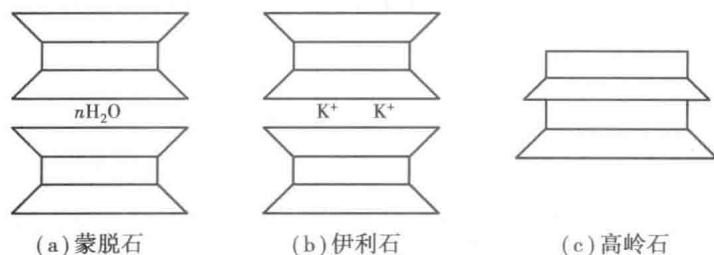


图 2.4 黏土矿物构造单元示意图

伊利石的结构单元类似于蒙脱石, 但 Si—O 四面体中的 4 价硅离子 Si^{4+} 可以部分被 3 价铝离子 Al^{3+} 和铁离子 Fe^{3+} 所取代, 并在相邻的层组间可能出现若干 1 价钾离子 K^+ , 使其联结力较蒙脱石大, 所以伊利石颗粒大小和亲水性介于蒙脱石和高岭石之间, 如图 2.4(b) 所示。

高岭石的结构单元是由一层硅氧晶片与一层铝氢氧晶片交替构成的基本层组, 许多这样的