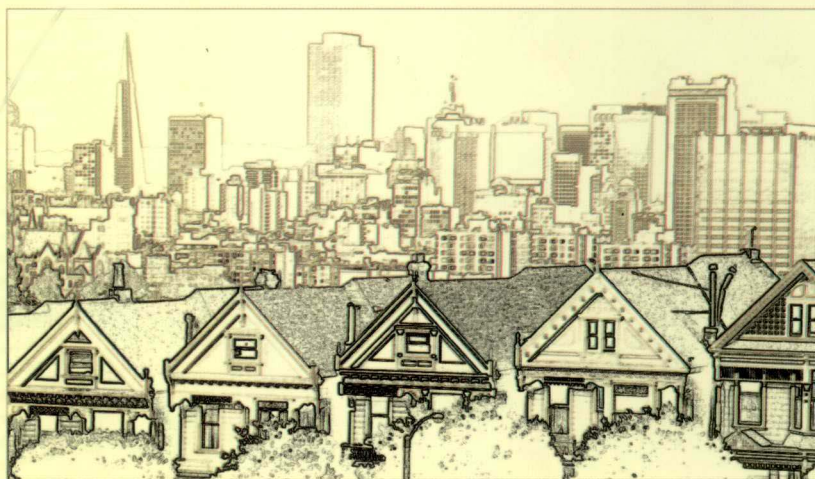


普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土力学

● 张春梅 主编

EDUCATION



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土 力 学

主 编 张春梅
副主编 叶洪东 雷华阳
参 编 刘熙媛 张岳文



机械工业出版社

土力学是土木工程专业的专业基础课程,具有较强的理论性和实践性,本书主要介绍土的力学基本概念和基本计算原理,包括绪论、土的物理性质及工程分类、土中应力计算、土的渗透性和渗流问题、土的变形性质及地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力及挡土结构、地基承载力、土坡稳定性分析。为便于学习,每章末均附有复习思考题及习题。

本书可作为高等学校土木工程专业及相近专业的教材,也可作为从事土木工程勘察、设计、施工技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土力学/张春梅主编. —北京:机械工业出版社,
2012.6

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-38124-2

I. ①土… II. ①张… 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(2012)第076906号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 臧程程

版式设计:霍永明 责任校对:刘秀丽

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·357千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38124-2

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

编 审 委 员 会

主任委员：

姜忻良 天津大学 教授、博导

副主任委员：

张向东 辽宁工程技术大学 教授、博导

李自林 天津城市建设学院 教授、博导

委 员：

李 珠 太原理工大学 教授、博导

魏连雨 河北工业大学 教授、博导

王成华 天津大学 教授

李 斌 内蒙古科技大学 教授

赵根田 内蒙古科技大学 教授

胡启平 河北工程技术大学 教授

张瑞云 石家庄铁道大学 教授

段树金 石家庄铁道大学 教授

段敬民 天津城市建设学院 教授

张敏江 沈阳建筑大学 教授

徐世法 北京建筑工程学院 教授

曹启坤 辽宁工程技术大学 教授

张泽平 太原理工大学 教授

前 言

土力学是土木工程专业的专业基础课程，具有较强的理论性和实践性。本书是根据《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》的要求及现行国家、行业相关规范，并结合长期教学与工程设计经验编写的。

1925年美国土力学家太沙基（Terzaghi）发表了第一部土力学专著，使土力学成为了一门独立的学科，由于世界各国工程建设的需要，推动了土力学迅速发展。本书作为大学本科教材，选用了土力学中最基本、最成熟的理论与典型的经验，紧密结合新修订的相关国家规范和行业标准，内容尽量做到少而精，力求反映学科发展新水平。通过引入工程实例分析土力学原理在实际工程中的应用现状和发展前景，注重知识的实用性。

本书共9章，主要介绍土的力学基本概念和基本计算原理，包括绪论、土的物理性质及工程分类、土中应力计算、土的渗透性和渗流问题、土的变形性质及地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力及挡土结构、地基承载力、土坡稳定性分析。为便于学习，每章末均附有复习思考题及习题。

本书由内蒙古科技大学张春梅任主编，河北工程大学叶洪东、天津大学雷华阳任副主编。具体编写分工如下：第1、2章由张春梅编写；第3章由张岳文编写；第4、5章由雷华阳编写；第6、8章由刘熙媛编写；第7、9章由叶洪东编写。全书由张春梅统稿。本书参考了部分文献，在此向文献的作者表示衷心感谢。本书的出版得到了内蒙古科技大学教材基金的资助，也得到了机械工业出版社的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加上编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 土力学、地基及基础的概念	1
1.2 土力学的学习内容和研究方法	3
1.3 本学科的历史发展	4
复习思考题	4
第2章 土的物理性质及工程分类	5
2.1 概述	5
2.2 土的三相比例组成及土的结构	6
2.3 土的三相比例指标	12
2.4 无黏性土的物理状态	16
2.5 黏性土的物理特征	19
2.6 土的压实	22
2.7 土的工程分类	25
复习思考题	31
习题	31
第3章 土中应力计算	33
3.1 概述	33
3.2 土中自重应力	34
3.3 基底压力	36
3.4 地基的附加应力	39
复习思考题	53
习题	53
第4章 土的渗透性和渗流问题	55
4.1 土的渗透性和渗流定律	55
4.2 渗流力与渗流稳定分析	67
4.3 二维渗流与流网	75
复习思考题	80
习题	80
第5章 土的变形性质及地基沉降	
计算	81
5.1 土的压缩性	81
5.2 地基的最终沉降量	90
5.3 应力历史与土压缩性的关系	106
5.4 地基沉降与时间的关系	113
复习思考题	123
习题	123
第6章 土的抗剪强度	125
6.1 概述	125
6.2 库仑定律和莫尔—库仑强度理论	126
6.3 抗剪强度指标的试验方法及应用	130
6.4 孔隙压力系数及土的剪胀性	138
6.5 土的抗剪强度特性的若干问题	144
复习思考题	155
习题	155
第7章 土压力及挡土结构	157
7.1 概述	157
7.2 静止土压力计算	159
7.3 朗肯土压力理论	160
7.4 库仑土压力理论	166
7.5 挡土墙设计	177
7.6 加筋土挡土墙简介	183
复习思考题	185
习题	185
第8章 地基承载力	186
8.1 概述	186
8.2 浅基础的地基破坏模式	186
8.3 地基临塑荷载与临界荷载	188
8.4 地基的极限承载力	192
8.5 地基承载力的确定	199
复习思考题	203
习题	203
第9章 土坡稳定性分析	204

9.1 概述	204	9.5 滑坡的防治原则与措施.....	222
9.2 无黏性土坡的稳定分析.....	205	复习思考题	223
9.3 黏性土坡的稳定分析	208	习题	224
9.4 土坡稳定分析的几个问题	219	参考文献.....	225

第1章 绪 论

1.1 土力学、地基及基础的概念

土 (Soil) 是地壳岩石经过长期地质营力作用风化后覆盖在地表上的没有胶结或胶结很弱的碎散矿物颗粒的集合体, 因此, 土具有“松散性”。根据其生成环境、形成年代、土粒的大小及物质组成的不同, 其工程性质比较复杂。土的工程性质还会因地下水、所承受的压力变化而发生变化, 因此, 土的工程性质具有自然“易变性”。土的颗粒之间有许多孔隙, 使土具有“孔隙性”。通常, 土中的孔隙由水和空气填充, 所以, 土是由土体颗粒 (固相)、土中水 (液相) 和土中空气 (气相) 组成的多相体, 即土具有“多相性”。

土在地壳表层的分布, 决定了它在工程建筑中的主要作用和广泛用途。土的“松散性”、“易变性”、“孔隙性”和“多相性”, 以及其形成时的沉积方式、顺序、沉积范围、天然土层埋藏条件等复杂因素, 必对土的工程性质产生较大的影响, 所以深入研究、准确掌握土的计算原理、方法及其在工程上的应用, 对解决一系列的土工问题具有积极的意义。

土力学 (Soil mechanics) 是研究土的碎散特性及其受力后的应力、应变、强度、稳定和渗透等规律的一门学科。它是力学的一个分支, 研究与工程建筑有关的土的变形和强度特性, 并据此计算土体的固结与稳定, 为各项工程服务。土力学不仅研究土体当前的性状, 也要分析其性质的形成条件, 并结合自然条件和建筑物修建后对土体的影响, 分析并预测土体性质的可能变化, 提出有关的工程措施, 以满足各类工程建筑的要求。土力学是一门实践性很强的学科, 它是进行地基基础设计和计算的理论依据。

任何建筑物都建造在一定的土层或岩层上, 受建筑物荷载的影响, 建筑物下一定范围内的土层将产生应力、变形, 受应力和变形影响的那部分土层称为地基 (Ground), 如图 1-1 所示。此受力土层也称为持力层, 在地基范围内持力层以下的土层称为下卧层。

地基一般分为两类: 天然地基和人工地基。天然地基是未经人工处理就可以满足地基承载力、变形、稳定性要求的地基。若地基土较软弱, 不能满足上述要求, 则需对地基进行加固处理 (如采用换土垫层、排水固结、深层夯实、化学加固、加筋土技术等方法处理), 称为人工地基。一般天然地基要比人工地基的工期短、造价低, 所以建筑物要尽量采用天然地基。

各类建筑物的建造都涉及土力学的问题, 为保证建筑物的安全施工和正常使用, 土力学设计、计算必须解决工程中的三个问题。

1) 土体的强度问题。作用于地基上的荷载不超过地基的承载能力, 当土体的强度不足时, 将导致边坡、建筑物的失稳和破坏。

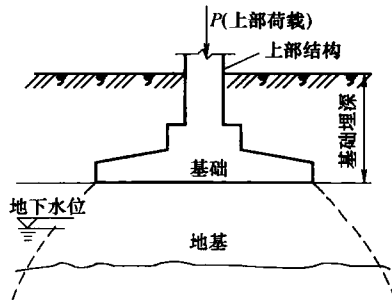


图 1-1 地基、基础示意图

2) 土体的变形、稳定问题。土体的变形尤其是沉降或不均匀沉降不应超过地基变形的允许值, 否则, 轻者会引起建筑物的开裂、倾斜, 重者会酿成工程事故。

3) 土体的渗流问题。不同程度的渗透会影响工程的施工进度, 降低土体的稳定性, 直接影响工程的安全。

为满足稳定性的要求, 建筑物应建在受力较好的土层上, 一般要埋入地下一定的深度, 埋入地下的这部分, 既支撑上部结构的受力, 还将上部结构的荷载传给地基, 此部分就称为基础 (Foundation)。按基础的埋置深度不同, 基础可分为浅基础和深基础。浅基础的埋深较小 ($\leq 5\text{m}$), 采用挖槽、排水等简单的施工程序就可以建造, 如独立基础, 条形基础, 十字交叉基础, 筏形、箱形基础等。若地表浅层土质不良, 需把基础埋置于深处 ($> 5\text{m}$) 的土层时, 借助特殊的施工方法建造的基础, 称为深基础, 其埋深较大, 相对于浅基础而言, 其造价高, 施工工期长, 如桩基础、地下连续墙、墩基、沉井、桩箱、桩筏基础等。

建筑物的地基、基础和上部结构, 功能不同、缺一不可, 研究方法各异, 三者是彼此联系、相互制约的一个整体。它们的勘察、设计和施工质量直接关系建筑物的正常和安全使用。若设计不合理, 发生事故, 会危及生命和财产损失。

加拿大特朗斯康谷仓 (图 1-2) 是一个典型的由于强度不足而引起地基破坏的事故。该仓由 65 个圆柱形筒仓组成, 高 31m, 它的基础是底面面积为 $59.4\text{m} \times 23.5\text{m}$, 厚 2m 的钢筋混凝土筏形基础。谷仓自重 $2 \times 10^5\text{kN}$, 当装谷 $2.7 \times 10^5\text{kN}$ 后, 发现谷仓明显失稳、下沉, 24h 内西端下沉 8.8m, 东端上抬 1.5m, 整体倾斜 $26^\circ 53'$ 。事后进行勘察, 发现基底之下为厚 16m 的高塑性淤泥质软黏土层, 该土层的地基极限承载力为 251kPa , 而谷仓的基底压力已超过 300kPa , 从而造成地基的整体滑动破坏。由于谷仓的整体刚度较大, 上部结构没有破坏, 事故后在地基中做了 70 多个支承于深 16m 基岩上的混凝土墩, 使用了 388 个 50kN 的千斤顶和支承系统, 才把仓体纠正, 然而纠正后的谷仓位置比原来低了 4m。

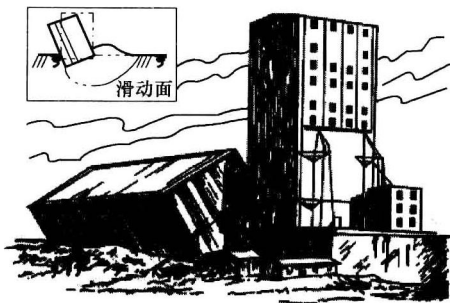


图 1-2 加拿大特朗斯康谷仓事故示意图

意大利比萨斜塔 (图 1-3) 是一个典型的由于变形问题引起的缺陷而造成的世界奇观。

比萨斜塔是比萨城大教堂的独立式钟楼, 是意大利托斯卡纳省比萨城北面的奇迹广场的一组古罗马建筑群中的钟楼。这座钟塔造型古朴、秀巧, 是罗马式建筑的范本。从 1173 年建造至今, 人们惊叹、诧异它的“斜而不倒”, 既忧虑它的安全, 又为能亲眼目睹这一奇迹而庆幸。究其原因, 比萨斜塔的基础建立在一半是软黏土, 一半是砂卵石的地基上而产生了倾斜。比萨斜塔塔高 56.7m, 由于次固结作用, 地基土层不均匀, 南侧下沉近 3m, 北侧下沉 1m 多。近一个世纪以来, 塔已向南倾斜了大约 30cm, 倾斜角度达到 8° , 塔身超过垂直平面 5.1m。1990 年停止开放。从 1990 年至 2001 年, 在斜塔北侧的塔基下码放了数百吨重的铅块, 并使用钢丝绳从斜塔的腰部向北侧拽住, 还抽走了斜塔北侧的许多淤泥, 在塔基地下打入 10 根 50m 长的钢柱。经

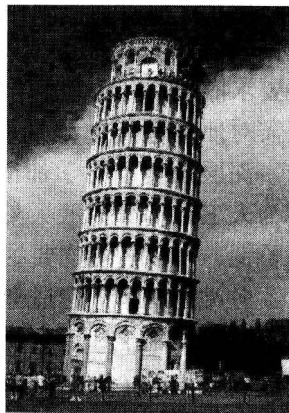


图 1-3 意大利比萨斜塔

过长达 11 年的修复,比萨斜塔的拯救工作才全部结束。纠偏校斜 43.8cm,除自然因素外,可确保 3 个世纪内比萨斜塔不会发生倒塌危险。

Teton 坝(图 1-4)是一个典型的由于土中水的渗流而引起的水力劈裂破坏的事故。Teton 坝位于美国艾德华州的 Teton 河上,坝高 126.5m,坝长 945m,是一个集灌溉、防洪、发电、旅游于一体的水利工程。于 1972 年开始动工,1975 年建设完成。1975 年的 11 月开始蓄水,1976 年的春季水库水位上涨,拟定水库水位上涨限制速率为 0.3m/d ,5 月份由于降雨,水库水位上涨速率达到 1.2m/d ,在 1976 年 6 月 5 日上午 10:30 左右,下游坝面有

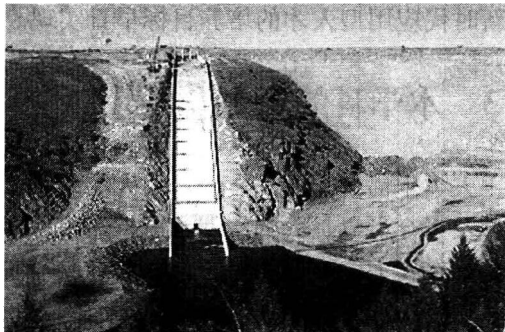


图 1-4 美国 Idaho 州的 Teton 坝

水渗出并带出泥土。11:00 左右洞口不断扩大并向坝顶靠近,泥水流量增加。11:30 洞口向上扩大,泥水冲蚀了坝基,主洞的上方又出现一渗水洞。流出的泥水开始冲击坝趾处的设施。11:50 左右洞口扩大加速,泥水对坝基的冲蚀更加剧烈。11:57 坝坡彻底坍塌,泥水狂泻而下。Teton 坝的破坏造成的直接损失为 8000 万美元,间接损失达 2.5 亿美元,死 14 人,受灾 2.5 万人,受灾土地面积 60 万亩($1\text{亩}=666.6\text{m}^2$),其中包含 32km 的铁路。

所以掌握、学习好土的强度、变形、渗透问题,才能选择安全可靠、经济合理、技术先进、施工方便的设计方案,将是正确解决工程问题的主要途径。

1.2 土力学的学习内容和研究方法

土力学是一门理论和实践性都较强的学科。土力学的研究内容包括:土的物理性质与工程分类、土中应力的计算、地基的沉降量计算、土的固结理论、土的抗剪强度和地基承载力计算、土压力理论、土坡稳定性的分析。这些理论内容与工程地质学、工程力学、建筑材料、建筑结构和施工技术等学科密切相关,涉及面广,理论性、综合性强。土力学是土木工程中应用有关原理知识,分析、解决实际地基基础设计和施工问题的理论基础,是后续课程—基础工程的理论基础和依据,也是工程专业技术人员必需掌握的理论知识。

土力学是岩土工程学科的基础,是一项古老的工程技术,又是一门年轻的偏于计算的应用科学。从古代采用石料修筑石拱桥基础、采用填土击实技术处理地基的传统方法到蜿蜒万里的长城及上海的环球金融中心的建立,无不体现着我国劳动人民的智慧和科学应用工程技术结合的成果。

由于土的易变性、多样性和工程地质条件千差万别的特点,所以,在课程的学习中,必须学习工程地质勘察知识,掌握有关的土工试验技术,正确评价建筑场地条件,综合地基、基础和上部结构的关系,理论联系实际,选择合理的地基基础方案,做到所设计的地基基础方案经济合理、安全可靠、技术先进。

根据土力学的研究内容,学习中应掌握以下几点:

- 1) 要有工程的观点,掌握本课程的基本原理和实际中的实用工艺和设计施工方法。
- 2) 要充分熟知规范规定,以规范为技术依据,结合实际工程情况,合理遵守、调整,

做到有据可依,符合计算设计原理,解决高难度、大规模的复杂工程。

3) 应用理论指导,培养学生分析、解决不同工程地质条件的工程实际问题的能力,做到新时代应用型人才的培养目标早日实现。

1.3 本学科的历史发展

人类生活的需要及发展,使人类懂得了利用土建造土台、房屋、运河。闻名世界的万里长城及当今世界最大的水利水电枢纽工程三峡工程,都有坚固的地基与基础。这些都表明我国人民在土力学方面积累了丰富的经验与知识。

18 世纪欧洲的工业革命,推动了工业的迅猛发展,促进了桥梁、铁路、公路等事业的发展,也解决了土的有关问题。1773 年,法国的 C. A. 库仑 (Coulomb) 根据试验提出了土的抗剪强度公式和土压力理论公式。1856 年,法国工程师 H. 达西 (Darcy) 研究了水在土中的透水性,提出了达西定律。1857 年,英国的朗肯 (W. J. M. Rankine) 根据不同假设提出了挡土墙的土压力理论。1885 年,法国的布辛奈斯克 (J. Boussinesq) 计算求出了半无限弹性体在垂直集中力作用下应力和变形的理论解答。1922 年瑞典的费兰纽斯 (Fellenius) 为解决铁路的坍方问题,提出了土坡稳定分析方法。这些公式、理论和方法,至今还在土力学学科中使用,为土力学学科的发展奠定了一定理论基础。1925 年美国的太沙基 (K. Terzaghi) 在总结前人研究的基础上,比较系统的发表了第一部《土力学》专著,从此,土力学成为一门独立的学科。1929 年太沙基又与其他作者一起发表了《工程地质学》(Ingénierurgéologie)。从此土力学与基础工程就作为独立的学科而取得不断的进展。

随着弹性力学的研究成果的不断深入及引用,土体变形和破坏问题的研究得到了迅速发展。1936 年,提出了明德林 (R. D. Mindlin) 公式并在桩基沉降计算中得到应用。1943 年, Terzaghi 进行了关于极限土压力的研究并提出了地基承载力公式。

现代科学的发展,使土力学的研究领域得到了明显的扩大,特别是进入 20 世纪 70 年代以来,土力学计算理论技术得到飞速的发展。先进的计算手段和有限元理论结合,岩土工程数值计算与分析方法大量运用对土这个具有弹、塑、粘性的非线性受力体的研究更加深入,传统的土力学研究方法、计算理论得到提高,地基—基础—上部结构共同作用的设计计算方法逐步成熟,地基基础的计算理论逐步完善,设计的方案更切合实际。在地基处理方面取得了更大的进展,基坑支挡工程的应用更为广泛。在勘察、测试技术方面具有更高精度、操作更方便的仪器设备得到开发及应用。这些都为人类的城镇、水利、交通建设提供更为有利的保障,为土力学的进一步发展和逐步完善作出了积极的贡献。

复习思考题

1. 简述地基、基础的概念。
2. 在工程中常见的土力学问题有哪几种?
3. 查阅相关文献,实地调查本地区的常用基础形式,并举例说明本地区工程中遇到的土力学问题。

第2章 土的物理性质及工程分类

2.1 概述

岩石经过物理与化学风化作用而形成大小不同的颗粒，这些颗粒在不同的自然环境条件下堆积（或经搬运沉积），即形成了具有松散、易变、多孔隙性质的沉积物——土。通常，土是由土体颗粒（固相）、土中水（液相）和土中空气（气相）组成的三相体。土按其堆积或沉积的条件可以分为以下几种类型。

1. 残积土

残积土是指岩石经风化后仍残留在原地未经搬运的堆积物。残积土的厚度和风化程度主要受气候条件和岩石暴露时间的影响。在湿热、温差大的地带，风化速度快，残积土主要由黏粒组成，残积土的厚度可达几米至几十米；在严寒、温差较小的地带，残积土主要由岩块和砂组成，残积土土层的厚度较小。残积土的明显特征是：颗粒多为角粒。残积土的性质主要由母岩的种类来决定。母岩质地优良，由物理风化作用生成的残积土，通常较坚固和稳定，承载力高，变形小；母岩质地不良或经严重化学风化作用的残积土，其土大多松软，性质易变，承载力低。残积土一般是良好的建筑土料，但作为建筑地基使用时要注意土性和厚度随其所处不同位置的变异性，应进行详细的勘探。

2. 坡积土

当雨水和融雪水洗刷山坡时，将山坡表面的岩屑顺着斜坡搬运到较平缓的山坡或山麓处，逐渐堆积而成的土为坡积土。由于坡积土距搬运地点不远，其颗粒由搬运地逐渐变细。坡积土的土质极不均匀，土的孔隙大，压缩性高，且土层薄厚不均，未经处理作为建筑物的地基时，易造成地基的不均匀沉降和地基的稳定性下降。

3. 冲积土

降雨形成的地表径流流经地表时，由于流水动能的作用，冲刷或搬运土粒后在较平缓的地带沉积下来的土为冲积土。这些被搬运的物质来自山区、平原或江河河床冲蚀及两岸剥蚀的产物，所以冲积土的分布范围很广。其主要类型有山前平原冲积土、山区河谷冲积土、平原河谷冲积土、三角洲冲积土等。河流的流速决定了土体颗粒的大小，大小不同的颗粒堆积在不同的部位，所以冲积土具有颗粒的分选性和不均匀性。

4. 洪积土

由暴雨或大量融雪形成的山洪急流，冲刷并搬运大量岩屑，流至山谷出口与山前倾斜平原，堆积而形成洪积土层。由于谷口处的地形窄，流速大，所以洪积土在谷口附近多为大块石、碎石、砾石和粗砂；而谷口外地势越来越开阔，山洪的流速逐渐减慢，谷口外较远的地带颗粒变细。其地貌特征为：靠谷口处陡而窄，谷口外逐渐变为缓而宽的洪积扇。洪积扇中的洪积土层常为不规则的粗细颗粒交替层理构造，往往存在黏性土夹层、局部尖灭和透镜体等产状。故以洪积土层作为建筑物地基时，应注意土层的尖灭和透镜体引起的不均匀沉降。

5. 风积土

在干旱和半干旱地区, 由风力带动土粒经过搬运后沉积下来的堆积物称为风积土。其种类主要有黄土和砂土。风积土没有明显的层理性, 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, 易被风力带动吹向天空, 经过长距离搬运后再沉积下来。

典型的风积土是黄土, 颗粒组成以带角的粉粒为主, 并含有少量黏粒和盐类胶结物。黄土具有大孔隙, 密度低, 含水率也很低, 干燥时由于土粒之间有胶结作用, 其胶结强度较大, 很疏松时也能维持陡壁或承受较大的建筑物荷载。但是一遇水, 土体结构便遭到破坏, 胶结强度迅速降低, 在自重或建筑物荷载作用下剧烈下沉, 即黄土具有湿陷性。所以, 在黄土地区修造建筑物时一定要充分注意黄土的湿陷性。

2.2 土的三相比例组成及土的结构

土是由土体颗粒(固相)、土中水(液相)和土中空气(气相)组成的三相体系, 如图 2-1 所示。固相部分主要是土粒, 有的有粒间胶结物和有机质, 液相部分为水, 气相部分由空气和其他气体组成。土体中矿物成分和颗粒大小差别很大, 各组成部分的比例不同, 其物理性质和力学性能会不同; 土中的孔隙由水和空气填充, 当孔隙完全被水充满时, 它是饱和土; 当孔隙完全被空气充满时, 是干燥土; 研究掌握了土的固体颗粒、水、空气三相的质量与体积间的相互比例关系以及固、液两相相互作用表现出来的性质, 才能更好地掌握土的工程性质。

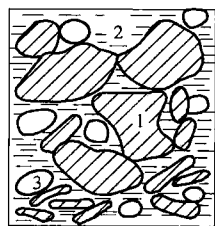


图 2-1 土的三相组成

1—固体颗粒 2—水
3—空气

2.2.1 土的固体颗粒

土的固相为土的固体颗粒, 由土的矿物成分组成所决定。

1. 土的矿物成分

(1) 原生矿物 由岩石经过物理风化作用而形成与母岩成分相同的矿物。包括:

单矿物颗粒——常见的如长石、石英、云母、角闪石与辉石等, 砂土为单矿物颗粒。

多矿物颗粒——母岩的碎屑, 如漂石、卵石和砾石等颗粒的矿物颗粒。

(2) 次生矿物 岩屑经化学风化作用而形成与母岩成分不同的一种新矿物颗粒, 颗粒较细。其成分主要是黏土矿物; 粒径较小, 肉眼看不清, 用电子显微镜观察为鳞片状。

黏土矿物颗粒的片状由硅片和铝片两种原子层(晶片)构成; 硅片是由 $\text{Si}-\text{O}$ 四面体构成的四面体的空间结构, 如图 2-2 所示, 还有一种由 $\text{Al}-\text{OH}$ 八面体构成的铝片, 如图 2-3 所示。因这两种晶片的结合情况不同, 基本上可形成以下 3 种矿物的主要类型:

高岭石——晶胞之间的联结是氢键, 其具有较强

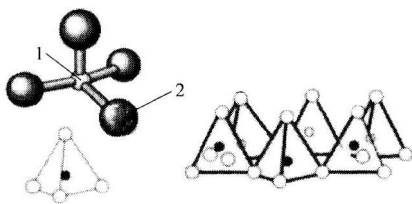


图 2-2 硅片的结构

1— Si^{4+} 离子 2— O^{2-} 离子

的联结力,且晶胞之间距离不易改变,水分子不能进入。因此,其亲水性最小,强度较高,具有较小的膨胀性,收缩性也较小。

伊利石(水云母)——伊利石在构成时,其中部分四面体中高价 Si 为低价铝、铁离子所取代,这样,损失的原子价由正价阳离子钾补偿其晶胞的不足。钾离子的进入,增强了晶格层组之间的结合力,其晶格层组之间的结合力小于高岭石的晶胞之间的联结力,亲水性高于高岭石。因此,其亲水性较小,膨胀性、收缩性都高于高岭石。

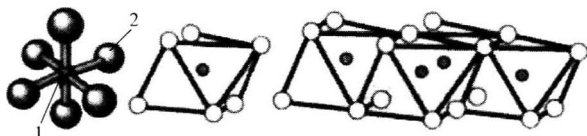


图 2-3 铝片的结构

1— Al^{3+} 离子 2— OH^- 离子

蒙脱石——两晶胞结构单元之间没有氢键,联结很弱,水分子可以进入两晶胞之间。因此其亲水性很高,此土的强度低,渗透性低,可塑性和压缩性高,具有较大的湿胀干缩的性质。

次生矿物还有次生二氧化硅与难溶盐等。

2. 土的粒组

(1) 土的粒组划分 自然界的土,都是由大小不匀的土粒组成的。土粒的大小通常以其直径表示,简称“粒径”,常用单位为 mm。土粒粒径的不同,影响其土粒的矿物成分和性质。为研究土的颗粒大小组成,需将自然界各种土粒划分为若干组别——“粒组”。划分粒组的方法是将自然界一定粒径范围内其具有相似成分和性质的土粒作为一个粒组,而划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。

土的颗粒粒径大小由分析试验的方法测定,方法有:筛分法和沉降分析法。土的粒径大于 0.075mm 的为粗颗粒,常用筛分法,沉降分析法适用颗粒小于 0.075mm 的细粒土的区分,有密度计法和移液管法。

筛分法是利用一套孔径大小不同的标准筛子,将称过质量的干土样过筛,放入一套从上到下、筛孔由粗到细排列的标准筛充分筛选,将留在各级筛上的土粒分别称重,然后计算此粒径占土粒的百分含量。标准筛孔粗孔径依次为:60mm、40mm、20mm、10mm、5mm、2mm;细孔径依次为:2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.075mm。

密度计法的基本原理是颗粒在水中下沉速度与粒径的平方成正比,粗颗粒下沉速度快,细颗粒下沉速度慢。颗粒在水中的下沉速度 v 与颗粒直径 d 成正比,可用式(2-1)表示为

$$d = 1.126 \sqrt{v} \quad (2-1)$$

(2) 土的颗粒级配 土中的颗粒大小及其组成情况,通常以土中各个粒组的相对含量(各粒组占土粒总土量的百分数)来表示,这就是土的颗粒级配。自然界的土都是由多个粒径组的土而组成,粒径的级配直接影响土的性质,如土的密实度、土的透水性、土的强度、土的压缩性等。工程中常用颗粒粒径级配曲线直接了解土的级配情况。曲线的横坐标为土的颗粒粒径,单位为 mm;纵坐标为小于某粒径土颗粒的累积含量,用百分比(%)表示。如图 2-4 所示为某土样的颗粒分析结果的颗粒级配曲线。

由颗粒级配曲线中可直接求得各粒组的颗粒含量及粒径分布的均匀程度,进而可估测土的工程性质。若曲线是连续的,曲线越平缓,表示颗粒粒径大小相差越大,颗粒不均匀,容易夯实,级配良好;反之,曲线越陡,表示土中的粒组变化范围窄,土粒均匀,不易夯实,

级配不良。为了更好地定量地说明问题,工程中,用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 反映土颗粒的不均匀程度。

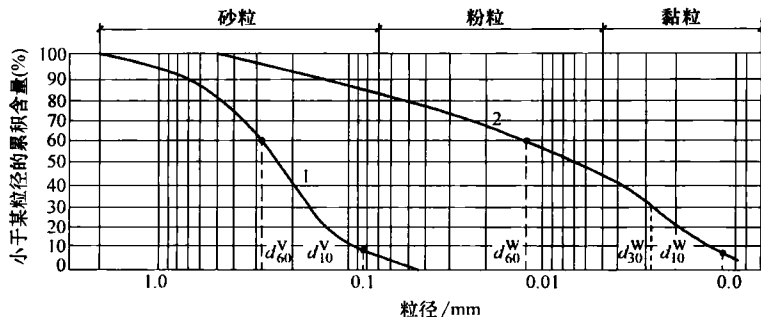


图 2-4 土的颗粒级配曲线

不均匀系数
$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2-2)$$

曲率系数
$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (2-3)$$

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

d_{10} ——小于某粒径的土粒质量占土的总质量 10% 的粒径,称有效粒径;

d_{30} ——小于某粒径的土粒质量占土的总质量 30% 的粒径,称中值粒径。

不均匀系数 C_u 反映大小不同粒组的分布情况, C_u 越大,表示粒组分布范围越广。级配连续的土,通常把 $C_u > 5$ 的土称为不均匀土,易于夯实,级配良好; $C_u \leq 5$ 的土称为均匀土,其级配不良。

如 C_u 过大,表示可能缺失中间粒径,属不连续级配,级配不连续的土即级配曲线成台阶状,故需同时用曲率系数来评价土的级配情况。曲率系数则是描述累计曲线整体形状的指标。采用两个指标判别土的级配时,则需同时满足 $C_u > 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$,才可以判定为级配良好。不同时满足,为级配不良。

颗粒级配相近的土,往往具有共同的性质。因此,级配可作为粗粒土的分类依据。级配良好的土,颗粒粗细的搭配较好,细的颗粒可以填充粗颗粒的孔隙,这样,土可以压实到较大密度,才能有较大的强度、较小的压缩性和良好的渗透性。

3. 黏土粒的带电性

土中的黏土颗粒在电场中会向阳极泳动的现象称为电泳。而土中的液体渗向阴极,称为电渗。这两种现象是同时发生的,称为电动现象,如图 2-5 所示。土的电泳、电渗现象可用于地基处理,即工程上的电渗排水法。

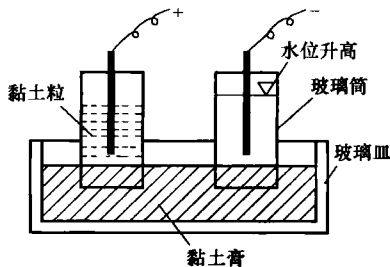


图 2-5 电泳、电渗装置图

2.2.2 土中的水

土中水可以处于固态、液态和气态。土中温度在 0°C 以下时,土中水冻结成冰,形成冻

土,冻土在冻结期间,强度增大;但其融化后,强度急剧降低。土中气态的水对土的性质影响不大,但土中液态的水会影响土的性质。土中液态水以结合水和自由水两种形态存在。结合水以结晶水的形式存在于固体颗粒的内部;自由水存在于土颗粒的孔隙中。

1. 结合水

黏土颗粒表面带有负电性,其颗粒表面的负电荷将吸附土孔隙中的阳离子和极性水分子,形成一层包围土粒的与自由水不同的水膜,称为结合水,如图2-6所示。在黏土颗粒表面电场作用力范围内,吸引在土颗粒周围的阳离子和极性水分子距离土颗粒越近,作用力越大;距离越远,作用力越小,直至不受电场力作用。

结合水越靠近土粒表面,作用力越大、吸附越牢固,水分子排列越规则,阳离子的密度越大,称为强结合水。其特点是不能传递静水压力,不能任意流动,牢固地结合在土粒表面上,性质几乎与固体一样,密度约为 $1.2 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$,冰点为 -78°C ,具有极大的粘滞性,也没有溶解能力。由于土颗粒的电场有一定的作用范围,因此结合水有一定的厚度,距土粒表面稍远的,作用力较小、吸附力略弱,阳离子的密度也减小,水分子排列没有强结合水那样规则,称为弱结合水。弱结合水是一种粘滞水膜,能以水膜形式由水膜较厚处缓慢迁移到水膜较薄的地方,能产生变形,不因重力作用而流动,与土的可塑性、冻胀性有关。

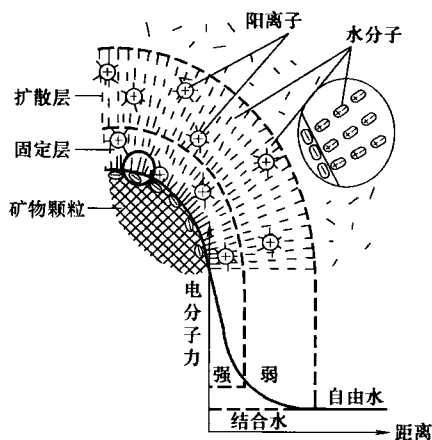


图2-6 黏土矿物与水分子的相互作用

2. 自由水

土孔隙中不受电场引力影响作用的水称为自由水。它的性质和普通水一样,能传递静水压力,冰点为 0°C ,有溶解能力。自由水又可分为毛细水和重力水。

1) 毛细水是受到水与空气交界面处表面张力的作用、存在于地下水位以上的透水层中的自由水。由于水分子与土颗粒之间的附着力和水、气界面上的表面张力,地下水将沿着孔道被吸引上来,从而在地下水位以上形成一定高度的毛细管水带,如图2-7所示。它与土中孔隙的大小、形状,土颗粒的矿物成分以及水的性质有关。在潮湿的粉、细砂中,由于孔隙中的气与大气相通,孔隙水中的压力也小于大气压力,此时孔隙水仅存于土颗粒接触点的周围。

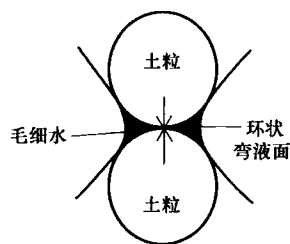


图2-7 毛细水压力示意图

2) 存在于地下水位以下,在重力本身作用下运动的水称重力水。重力水能在土体中自由流动。一般认为水不能承受剪力,但能承受压力和一定的吸力;一般情况下,水的压缩量很小,可以忽略不计。重力水对土中的应力状态和开挖基槽、基坑以及修筑地下构筑物时应采取的排水、防水等措施有重要的影响。

2.2.3 土中气体

在非饱和土中,土颗粒间的孔隙由液体和气体充满。土中气体一般以下面两种形式存在

于土中:

1) 封闭气体, 即四周被颗粒和水封闭的气体。封闭气体存在于黏土中, 在外力作用下, 体积缩小; 外力减小, 则体积增大。因此, 土中封闭气体增加了土的弹性。同时, 土中封闭气体的存在还能阻塞土中的渗流通道, 减小土的渗透性。

2) 自由气体, 即土中与大气相通的气体。土体在外力作用下, 气体很快从空隙中排出, 则土的强度和稳定性提高。土中的自由气体对工程无影响。

2.2.4 土的冻胀

当大气负温传入土中时, 土中的自由水首先冻结成冰晶体, 随着气温的继续下降, 弱结合水的最外层也开始冻结, 使冰晶体逐渐扩大, 冰晶体周围土粒的结合水膜减薄, 土粒产生剩余的分子引力; 另一方面, 水膜中的离子含量增加, 土粒就产生了渗透压力。在这两种引力作用下, 未冻结区的水分(弱结合水和自由水)就会不断地向冻结区迁移和积聚, 使冰晶体不断增大, 在土层中形成冰夹层, 土体随之发生隆起, 出现冻胀现象。

土的冻胀现象会对工程极为不利, 在高寒地区发生冻胀时会引起路基隆起, 刚性路面错缝、折断, 柔性路面鼓包、开裂; 会引起冻土上的建筑物的开裂、倾斜、不均匀沉降甚至倒塌; 引起土的沼泽化和盐渍化。

影响土的冻胀主要有三个方面的因素。

(1) 土。冻胀发生在细粒土(粉砂、粉土、粉质黏土和粉质亚砂土)中, 因为此土具有显著的毛细现象, 冻胀现象较严重。粗粒土因为无毛细现象, 基本无冻胀现象。故工程中常在地基或路基中换填砂土来防止土的冻胀。

(2) 水。由于水分的积聚和迁移, 当冻结区附近地下水位较高时, 毛细水上升高度能够达到或接近冻结线, 使冻结区能得到外部水源的补给, 冻胀现象就会严重。

(3) 温度。当气温骤降时, 冻结面会迅速向下推移; 若气温缓慢下降, 冷却强度小, 但负温持续时间较长, 未冻区水分不断地向冻结区迁移、积聚, 冻胀也会明显。当土层解冻时, 土中积聚的冰晶体融化, 土体随之下陷, 出现了融陷现象。

2.2.5 土的结构和构造

1. 土的结构

土的结构是指土粒单元的大小、形状、相互排列及其联结关系等因素形成的综合特征。其结构一般有单粒结构、蜂窝结构和絮凝结构三种类型。

(1) 单粒结构 土粒在空气或水中下沉时, 全部由砂粒或更粗土粒组成的土的颗粒较大, 在沉积过程中粒间力的影响与重力相比可以忽略不计, 所以土粒在沉积过程中在重力作用下可以落到较稳定的状态而形成的单粒结构(见图 2-8)。此结构的土粒之间以点与点的接触为主(见图 2-9a)。根据其排列情况, 可分为紧密和疏松两种排列。若是紧密结构的土, 其土粒排



图 2-8 土的单粒结构
a) 疏松的 b) 紧密的