



普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材



# 土力学

主 编 朱宝龙 郭进军

副主编 文 华 谢 冰 靳湘梅



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材

# 土力学

主 编 朱宝龙 郭进军  
副主编 文 华 谢 冰 靳湘梅



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书为“普通高等教育土木与交通类‘十二五’规划教材”之一，根据全国高等学校土木工程学科专业指导委员会对土木工程专业的培养要求和目标编写而成。

本书系统介绍了土力学的基本原理及基本方法，其内容包括：绪论、土的物理性质与工程分类、土的渗透性及渗流、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、挡土结构物上的土压力计算、土质边坡稳定性分析、地基承载力、土的工程性质的原位测试、特殊土地基、地基处理与复合地基等，每章均附有例题、思考题与习题。

本书可作为高等学校土木工程及相关专业的教材，也可供工程技术人员参考。

## 图书在版编目（C I P）数据

土力学 / 朱宝龙, 郭进军主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2011. 7  
普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5084-8590-4

I. ①土… II. ①朱… ②郭… 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(2011)第151327号

|      |                                                                                                                                                                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材<br><b>土力学</b>                                                                                                                                                                                |
| 作 者  | 主编 朱宝龙 郭进军 副主编 文华 谢冰 靳湘梅                                                                                                                                                                                           |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                    |
| 印 刷  | 北京瑞斯通印务发展有限公司                                                                                                                                                                                                      |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 17.25印张 409千字                                                                                                                                                                                     |
| 版 次  | 2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷                                                                                                                                                                                            |
| 印 数  | 0001—3000册                                                                                                                                                                                                         |
| 定 价  | <b>35.00元</b>                                                                                                                                                                                                      |

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前言

本书系根据全国高等学校土木工程专业指导委员会对土木工程专业培养要求和目标以及《普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材》的要求编写而成。本书由多年从事土力学教学的教师编写,在编写过程中,充分吸收了同类教材的优点和近年本学科工程技术的新进展,采用了国家及有关行业的最新规范与技术标准,同时还采纳了有关院校土力学教材应用的经验与要求。

土力学是一门理论性和实践性都十分强的课程,本书充分强调理论联系实际,尽可能地反映一些既经过工程实践验证过的,且又符合本课程教学要求的内容,以便更好地满足土木工程专业的教学需求,同时又对一些工程问题进行具体分析,更利于培养学生适应工程实践与分析实际问题的能力。

在编写过程中,重点对内容进行了融合,为进一步加强学生对土力学基本原理与基本方法的理解与应用,突出了土力学基本原理的应用,如在介绍土的渗透性及渗流内容后,引入了目前工程中常用的“止水帷幕”的概念;地基承载力确定方法介绍后即引申出承载力不足的处置措施,并紧紧结合土力学基本原理进行阐述。为培养与训练学生分析问题、解决问题的能力,每章均附有例题、思考题与习题,有利于学生的自学。

本书由西南科技大学朱宝龙、洛阳理工学院郭进军主编,西南科技大学文华、洛阳理工学院谢冰、廊坊师范学院靳湘梅参与编写,其中绪论、第1章、第2章、第5章由朱宝龙编写;第3章由靳湘梅编写;第4章、第8章由郭进军编写;第6章、第9章由文华编写;第7章、第10章、第11章由谢冰编写。

由于编者水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2011年1月

# 目 录

## 前言

|                 |    |
|-----------------|----|
| 绪论              | 1  |
| 0.1 学习土力学的目的    | 1  |
| 0.2 土力学的研究内容    | 2  |
| 0.3 学习土力学的要求    | 2  |
| 0.4 土力学的发展简史    | 3  |
| 0.5 土力学的发展方向    | 4  |
| 第1章 土的物理性质与工程分类 | 6  |
| 1.1 概述          | 6  |
| 1.2 土的形成        | 6  |
| 1.3 土的三相组成      | 10 |
| 1.4 土的结构与构造     | 27 |
| 1.5 土的三相含量指标    | 30 |
| 1.6 土的物理状态及有关指标 | 36 |
| 1.7 土的压实性       | 43 |
| 1.8 土(岩)的工程分类   | 47 |
| 思考题             | 53 |
| 习题              | 53 |
| 第2章 土的渗透性及渗流    | 55 |
| 2.1 概述          | 55 |
| 2.2 土的渗透性及渗透规律  | 56 |
| 2.3 渗透系数及其测定    | 60 |
| 2.4 二维渗流及流网     | 66 |
| 2.5 渗透力及渗透破坏    | 70 |
| 思考题             | 76 |
| 习题              | 77 |
| 第3章 土中应力计算      | 79 |
| 3.1 概述          | 79 |
| 3.2 土中自重应力      | 80 |
| 3.3 基底压力        | 82 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 3.4 地基中的附加应力·····             | 84         |
| 3.5 饱和土的有效应力原理·····           | 95         |
| 思考题·····                      | 96         |
| 习题·····                       | 96         |
| <b>第4章 土的压缩性与地基沉降计算</b> ····· | <b>98</b>  |
| 4.1 概述·····                   | 98         |
| 4.2 土的压缩特性和压缩指标·····          | 98         |
| 4.3 地基最终沉降量的计算·····           | 106        |
| 4.4 饱和黏性土地基沉降与时间的关系·····      | 116        |
| 4.5 建筑物的沉降观测和地基允许变形值·····     | 123        |
| 4.6 土的压缩特性在工程上的应用·····        | 125        |
| 思考题·····                      | 125        |
| 习题·····                       | 126        |
| <b>第5章 土的抗剪强度</b> ·····       | <b>128</b> |
| 5.1 概述·····                   | 128        |
| 5.2 土的抗剪强度理论·····             | 128        |
| 5.3 抗剪强度试验·····               | 133        |
| 5.4 三轴压缩试验中的孔隙压力系数·····       | 142        |
| 5.5 三轴压缩试验中土的剪切性状·····        | 147        |
| 5.6 应力路径·····                 | 161        |
| 思考题·····                      | 165        |
| 习题·····                       | 165        |
| <b>第6章 挡土结构物上的土压力计算</b> ····· | <b>167</b> |
| 6.1 概述·····                   | 167        |
| 6.2 静止土压力计算·····              | 168        |
| 6.3 朗金土压力理论·····              | 169        |
| 6.4 库仑土压力理论·····              | 176        |
| 6.5 几种特殊情况下的库仑土压力计算·····      | 181        |
| 6.6 关于朗金与库仑土压力理论的讨论·····      | 187        |
| 6.7 挡土墙设计·····                | 188        |
| 思考题·····                      | 195        |
| 习题·····                       | 195        |
| <b>第7章 土质边坡稳定性分析</b> ·····    | <b>197</b> |
| 7.1 概述·····                   | 197        |
| 7.2 无黏性土的土坡稳定性分析·····         | 198        |
| 7.3 黏性土的土坡稳定性分析·····          | 199        |
| 7.4 土坡稳定性分析的几个问题·····         | 208        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.5 增加土坡稳定性的一些措施 .....       | 211 |
| 思考题 .....                    | 213 |
| 习题 .....                     | 213 |
| <b>第8章 地基承载力</b> .....       | 214 |
| 8.1 概述 .....                 | 214 |
| 8.2 临塑荷载和临界荷载的确定 .....       | 216 |
| 8.3 极限承载力计算公式 .....          | 220 |
| 8.4 地基承载力设计值的确定 .....        | 225 |
| 8.5 关于地基承载力的讨论 .....         | 230 |
| 8.6 提高地基承载力的方法 .....         | 232 |
| 思考题 .....                    | 232 |
| 习题 .....                     | 233 |
| <b>第9章 土的工程性质的原位测试</b> ..... | 234 |
| 9.1 概述 .....                 | 234 |
| 9.2 取土方法对土的试验指标的影响 .....     | 234 |
| 9.3 土的工程性质的原位测试方法 .....      | 236 |
| 9.4 原位测试与室内试验指标之间的关系 .....   | 238 |
| 9.5 工程实例分析 .....             | 240 |
| 思考题 .....                    | 246 |
| <b>第10章 特殊土地基</b> .....      | 247 |
| 10.1 概述 .....                | 247 |
| 10.2 湿陷性黄土地基 .....           | 247 |
| 10.3 膨胀土地基 .....             | 252 |
| 10.4 红黏土地基 .....             | 254 |
| 10.5 冻土地基 .....              | 255 |
| 10.6 盐渍土地基 .....             | 258 |
| 10.7 地震区地基 .....             | 260 |
| 思考题 .....                    | 263 |
| 习题 .....                     | 264 |
| <b>第11章 地基处理与复合地基</b> .....  | 265 |
| 11.1 地基处理 .....              | 265 |
| 11.2 复合地基 .....              | 267 |
| 思考题 .....                    | 269 |
| <b>参考文献</b> .....            | 270 |

# 绪 论

## 0.1 学习土力学的目的

所有建筑物都是修建在地壳上的，建筑物的全部重量和所传递的荷载最终均由地壳承担。连接地表上这部分的建筑物称为下部结构，或称为基础。它的作用是把上部结构的重量连同所传递的荷载，一并均匀分布到地壳上，这部分地壳称为地基，如图 0-1 所示。未经人工处理就可以满足设计要求的地基称为天然地基。如果地基软弱，其承载力不能满足设计要求时，则需对地基进行加固处理（如采用换土垫层、深层密实、排水固结、化学加固、加筋土技术等方法进行处理），称为人工地基。组成地基的介质可能是分散的土体或整体的岩体。其中，土具有独特的力学性质，是本门学科的主要研究对象。

土是一种自然环境下生成的堆积物，不同地区不同位置土的性质存在差异。土是一种材料，具有强度，在荷载作用下产生变形，甚至破坏。土的性质极为复杂，远不同于常用的钢材、混凝土或其他材料。

土力学是研究土的物理性质以及在荷载作用下土体内部的应力、变形和强度变化规律，从而解决工程中土体强度、变形和稳定问题的一门学科。

建造各类建筑物几乎都涉及土力学课题，要保证建筑物施工期的安全、竣工后的安全

和正常使用。土力学学科需研究和解决工程中的三大类问题。一是土体强度问题，主要研究土体中的应力和强度，例如地基的强度与稳定、地基地震液化以及土坡的稳定等。当土体的强度不足时，将导致上部建筑物或影响范围内建筑物的失稳或破坏。二是土体变形问题，即使土体具有足够的强度能保证自身稳定，然而土体的变形尤其是沉降与不均匀沉降不应超过建筑物的设计允许值，否则，轻者导致建筑物的倾斜、开裂，降低或失去使用价值，重者将会酿成毁坏事故。三是对于土工建筑物（如土坝、土堤、岸坡）、水工建筑物地基，或其他挡土挡水结构，除了在荷载作用下土体要满足前述的强度和变形要求外，还要研究水的渗流对土体变形和稳定的影响。为了解决上述工程问题，则需要研究土的物理性质及变形特性、强度特性和渗透特性等，弄清其内在规律，作为解决土体稳定和变形问题的基本依据。

土力学是岩土工程学科的基础，是土木工程、水利水电工程、地质工程、道路与铁道工程、桥梁与隧道工程等专业的基础力学课程之一，属于专业基础课程，是解决许多工程

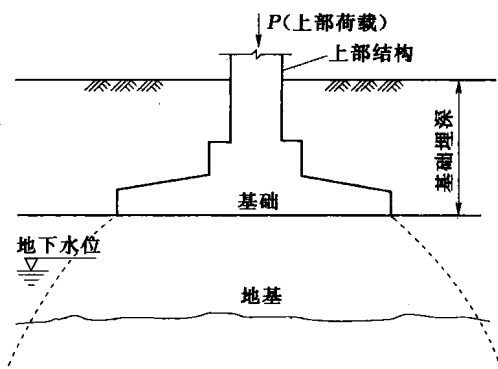


图 0-1 地基及基础示意图



问题的有力工具。

## 0.2 土力学的研究内容

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。土力学的研究对象是土,土是以矿物颗粒组成骨架的松散颗粒集合体。由于其形成年代、生成环境及物质成分不同,工程特性亦复杂多变。例如我国沿海及内陆地区的软土,西北、华北和东北等地区的黄土,高寒地区的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。土力学这门学科将研究土的基本物理力学性质,提供地基基础和土工结构的设计计算方法及不良地基的处理措施。其所包含的主要内容有以下几方面。

(1) 土的物理性质。指土的基本物理和化学等性质,如颗粒矿物成分、颗粒形状及结构,土的三相关系等。

(2) 土的渗透性。研究土中水的渗流规律,以及由于渗流而产生的力学作用、流网计算等。

(3) 土的变形性质。研究在荷载作用下土中应力的分布规律以及土的变形(沉降)规律,用以预测工程结构在修建和使用阶段土体的沉降量。

(4) 土的抗剪强度和稳定性。研究土在外力作用下的破坏形态和规律,从而推导地基承受荷载的能力,即地基承载力问题;研究土坡等在重力及其他外力作用下的滑动稳定问题。

(5) 土压力。在交通、水利、房屋建筑等工程中,大量遇到的是支挡结构的土压力计算问题。

(6) 土动力学。随着交通运输逐步向高速、重载方向发展,加上世界范围的频繁地震灾害,对研究土的动力性质提出了越来越高的要求,要求进一步研究在不同动力条件下,土的强度和变形性质的变化规律,以及饱和砂土的振动液化问题等。

(7) 其他问题。如不良地基的人工处置措施等。

在土力学的研究方法上,由于土的物理、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土的特性的研究一般通过专门的土工试验技术进行探讨。

## 0.3 学习土力学的要求

土是由固态、液态、气态物质组成的三相体系。土不同于其他材料,与各种连续体材料相比,天然土体物理力学性质十分复杂,受土的生成条件、环境因素影响很大。土力学已形成一定的理论体系,但现有的土力学理论还难以全面客观地模拟和概括天然土体的各种力学行为。一方面,要通过实践,尤其是通过室内实验及现场测试研究来揭示土的力学行为,丰富和完善土力学理论;另一方面,要应用土力学理论指导实践。

学习本课程之前需先学习高等数学、理论力学、材料力学、水力学,之后可进一步学习基础工程、地基处理等土木工程学科的相关课程。在学习本课程时,主要要求掌握土力



学的基本理论,学会解决实际问题的基本方法。在学习土力学课程之后,应掌握土的物理性质的研究方法;会计算土体应力,了解应力分布规律;掌握土的渗流理论、压缩特性、固结理论及有效应力原理、应力历史的概念,能熟练地进行地基沉降和固结计算;掌握土的强度理论及其应用,熟练地进行土压力计算、土坡稳定验算、地基承载力的确定等。结合理论学习要培养自己进行各种物理力学试验的技能。土力学课程各章有相对独立性,但全课程内容的关联性和综合性很强。要做到融会贯通,学会由此及彼,由表及里的学习方法,培养综合解决问题的能力。

## 0.4 土力学的发展简史

土力学是土木工程学科的基础课程,是一门既古老而又年青的应用基础学科。我国古代劳动人民创造了灿烂的文化,留下了令今人叹为观止的工程遗产,恢宏的宫殿寺院,灵巧的水榭楼台,巍峨的高塔,蜿蜒万里的长城、大运河等。这些工程无不体现出能工巧匠的高超技艺和创新智慧。然而这些还仅局限于工程实践经验,受到当时生产力水平的限制,未能形成系统的土力学和工程建设理论。

土力学逐渐形成理论始于18世纪兴起工业革命的欧洲。那时,为满足资本主义工业化的发展和市场向外扩张的需要,工业厂房、城市建筑、铁路等大规模的兴建,提出了许多与土力学相关的问题。1773~1776年,法国A·库仑(Coulomb)创立了著名的砂土抗剪强度公式,提出了计算作用在挡土墙上土压力的滑动土楔理论,土力学才进入古典理论时期;1840年,彭思莱特(Poncelet)对线性滑动土楔理论得出了更完善的解。1869年,英国朗金(Rankine)依据强度理论从另一角度推导了土压力计算公式,对土力学的发展产生了深远的影响。1885年,法国J·布辛涅斯克(Boussinesq)求得了弹性半无限空间在竖向集中力作用下的应力与变形的理论解,为以后计算地基承载力和地基变形建立了理论根据。1856年,达西(Darcy)通过试验建立了达西层流渗透公式,为研究土中渗流和渗流固结打下了理论基础。1922年,瑞典的费伦纽斯(Fellenius)提出了土坡稳定分析方法。这些古典的理论和方法到现在仍有着实用价值,影响着后人。许多学者前赴后继的努力,为本学科的系统发展作出了贡献。1925年,K·太沙基(Terzaghi)归纳了以往的研究成果,提出了一维渗流固结理论,阐述了有效应力原理,发表了第一本德文版《土力学》专著,将土力学推向了一个新的高度,标志着近代土力学学科的形成。此后,在众多学者的努力下,有效应力原理得到了深化和广泛应用,发展了二维与三维固结理论;土的强度理论与稳定问题、变形理论、流变理论、动力特性等研究与应用都取得了重要成就,有力地推动了土力学学科的发展。1956年在美国科罗拉多州波德尔(Boulder, Colorado)举行的黏土抗剪强度学术会议和1963年罗斯柯(Roscoe)等人对伦敦黏土的研究,创建发表了著名的剑桥弹塑性模型,标志着人们对土性质的认识和研究进入了一个崭新的阶段。

自20世纪60年代以后,电子计算机的改进和推广,促使计算技术快速发展,因而有可能在土力学计算中引入较复杂的弹塑性和黏弹(塑)性等本构模型,并对这些本构模型进行广泛而深入的研究。



土力学不单是一个理论问题,它离不开土工试验。随着理论研究的开展,试验方法和手段也必须改进和提高。20世纪50年代,土工试验方法和手段还很简单,近年来得到大幅度改进和提高。精密的三轴压缩仪、动三轴仪等许多土工试验室已配备,限于技术及价格的原因,专门用于研究工作的真三轴仪还未普及。关于原位测试设备也有长足进展,如静力触探仪,已由单桥探头发展到双桥和带孔压的探头等;而旁压仪也由预钻式发展到自钻式。总之,试验设备正在向高、精、尖方向发展。

新中国成立之前,土力学领域在我国还是一片空白,新中国成立后,一批留学海外的青年学者相继回国,他们中的一部分在大学或科研单位开设土力学课程或开展土力学研究,并建立土工试验室,为国家培养出一大批岩土工程技术人才,在教育、交通、水利、城市建设以及其他土建工程中发挥了重要作用。

1957年,我国土木工程学会开始组建全国土力学及基础工程学术委员会,并于当年参加了国际土力学及基础工程学会组织。1962年在天津召开了第一届全国土力学及基础工程学术会议,1966年在武昌召开了第二届全国会议。以后由于“文化大革命”而中断活动,直到1979年才在杭州召开第三届全国会议,以后差不多每4年召开一次全国会议,会后出版论文选集。对于国际会议,基本上每届都派代表或推选论文参加。

我国几十年来在土力学基本理论方面(如土的本构模型、非饱和土的强度理论研究等),在土力学先进仪器制造方面(如生产制造较复杂的静力三轴试验仪和动力三轴试验仪及各种原位测试仪等),在新材料和新工艺运用方面(如土工合成材料及粉煤灰在路基中的运用),在地基基础加固方面(如深层搅拌桩、钻孔桩桩端压浆加固)等,都取得了丰硕成果,有的已达到国际先进水平。我们相信,随着我国基础设施建设的大力推进,对基础工程要求的日益提高,我国的土力学学科的发展也必将进入到一个新的高度。

## 0.5 土力学的发展方向

从现在发展趋势看,土力学的发展大致可分为如下几方面。

(1) 土的本构模型研究。土的本构模型选择关乎到土体的设计、计算。土的本构模型研究一直是土力学中的一大热点问题。到目前为止,提出的各类模型已不下百余种,但能得到广泛认可并能实际应用的却为数不多。

(2) 土动力学研究。由于地震对土体的动力破坏,高速重载铁路和高速公路中车辆周期动力荷载对土体的动力作用,一般土体的静力学知识已不能阐明土在各种动力条件下的强度和变形性质,故必须研究土的动力性质,研究它的动应力与动应变的关系以及在动力作用下的响应,同时还要探讨饱和砂土地基的振动液化问题,这对防止地震灾害,提高抗震能力大有裨益。

(3) 土力学试验设备改进。试验设备的改进直接影响土力学的发展。以前研究土工结构和基础工程往往采用较小尺寸的模型试验,但是遇到的一个棘手问题就是如何模拟土的自重,目前较有成效的办法是利用离心机,通过高速旋转产生离心力来模拟土的重力,所以近几十年土工离心机发展得很快,不仅用来研究高坝、边坡、深基坑在重力作用下的应力状态,而且可以模拟地震力、降雨、爆炸等作用下的土和结构的相互作用及力学行为。



(4) 复合地基的设计计算。在较软弱的地基中置入强度较高的其他材料，形成复合地基，如碎石桩、旋喷桩（水泥和土混合）等；在软土面铺设合成材料，其上填筑路基，以及在加筋土中铺设金属或钢筋混凝土筋条而构成复合土体等，这些利用新材料、新工艺加固软弱土的方法，近年来得到逐步推广、应用，已产生明显的经济效益。目前存在的问题是设计理论跟不上施工技术的发展，对于复合体中的应力分布还没完全搞清，对复合体的稳定和变形尚未找到一个合理的计算方法，尚需要进一步深入研究。

# 第 1 章 土的物理性质与工程分类

## 1.1 概 述

土是连续、坚固的岩石在风化作用下形成的大小不等的颗粒，经过不同的搬运方式，在各种自然环境中生成的沉积物。地壳表层母岩经过风化、搬运后的颗粒（有时还存在有机质）堆积在一起，中间贯穿着孔隙，孔隙中存在水和空气，如图 1-1 所示。因此在天然状态下，土一般由固相（固体颗粒）、液相（土中水）和气相（气体）三部分组成，简称为三相体系。

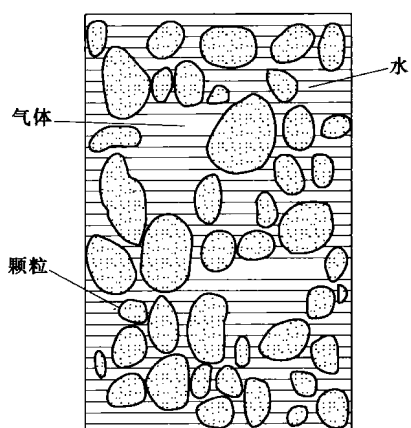


图 1-1 土的三相组成示意图

土中固体颗粒的矿物成分各异，其土粒间的联结也比较微弱，土粒还可能与周围的水发生一系列复杂的物理、化学作用。因此，在外力作用下，土体并不显示出一般固体的特性，土粒间的联结也并不像胶体那样易于相对位移，也不表现出一液体的特性。因此，在研究土的工程性质时，既有别于固体力学，也有别于流体力学。

在古典土力学中，研究土的各种工程性质时，首先注意到土粒的物理特性（如土粒的大小、形状等）、土的物理状态以及土的三相比比例关系。而在近代土力学中，还注意到土的三相在空间的分布、排列以及土粒间的联结对土的性质的性质的重要影响。

本章首先介绍土的三相组成及结构，然后介绍土的物理指标及其换算方法，无黏性土的密实度，黏性土的物理特性以及土的压实原理和地基土（岩）的分类。

## 1.2 土 的 形 成

天然土的三相物质成分、相互关系和作用是十分复杂和各不相同的。其主要原因是土的生成条件和生成历史等很不相同。

土是地壳表层的岩石长期经受风化作用如水流、冰川、风等自然力的剥蚀、搬运及堆积作用而形成的松散堆积物。其历史在地质年代中一般较短，多数是在 100 万年内，即属于第四纪堆积，见表 1-1。

### 1.2.1 风化作用

风化作用是由于气温变化、大气、水及生物活动等自然条件使岩石产生破坏的地质作用。风化作用可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。



表 1-1

土的形成年代

| 纪 (或系)  | 世 (或统)                |                        | 年代 (距今) (万年) |
|---------|-----------------------|------------------------|--------------|
| 第四纪 (Q) | 全新世 (Q <sub>4</sub> ) | Q <sub>43</sub> (晚期)   | <0.25        |
|         |                       | Q <sub>42</sub> (中期)   | 0.25~0.75    |
|         |                       | Q <sub>41</sub> (早期)   | 0.75~1.2     |
|         | 更新世 (Q <sub>p</sub> ) | 晚更新世 (Q <sub>3</sub> ) | 1.2~12.8     |
|         |                       | 中更新世 (Q <sub>2</sub> ) | 12.8~73      |
|         |                       | 早更新世 (Q <sub>1</sub> ) | 73~248       |

物理风化作用的主要因素是气温变化。在昼夜、晴雨的气温变化中,岩石表面的温度变化比内部大,因而表里胀缩不均,加之所含不同矿物的膨胀系数不同,在气温变化时也削弱了矿物间的结合作用,久而久之,使岩石产生裂隙,由表及里遭到破坏。这种现象在大陆性干燥气候地区表现最为显著。另外,在冷湿地区,渗入岩石裂隙中的水由于气温变化而不时地冻结和融化,导致裂隙逐渐扩大,岩石崩裂破碎。在干旱地区,大风挟带砂砾对岩石的打磨也可使岩面迅速剥蚀。

物理风化作用只引起岩石的机械破坏,其产物如砂、砾石和其他粗粒土,其矿物成分与母岩相同。

化学风化作用是岩石在与水溶液和大气中的氧、二氧化碳等的化学作用下受到的破坏作用。化学风化作用有水化作用、水解作用、氧化作用、碳酸化作用及溶解作用等。化学风化作用不仅使岩石破碎,而且使其化学成分发生变化,形成性质不同的新矿物。

生物风化作用是指生物活动过程中对岩石产生的破坏作用,可分为物理生物风化和化学生物风化两种。如植物根部生长在岩缝中,使岩石产生机械破坏;动植物新陈代谢所排出的各种酸类物质、动植物死亡后遗体的腐烂产物以及微生物作用等,则使岩石遭到腐蚀破坏,岩石成分发生变化。

上述风化作用常常是同时存在、互相促进的。但在不同环境,会有不同的主次。风化作用对不同岩石成分和结构构造的破坏程度也会有很大差别。

### 1.2.2 土类型的地质成因分类

常见的岩石风化产物因经受不同自然营力的剥蚀、搬运和堆积作用而生成不同类型的土。不同地质成因的土具有不同的地质特征和工程性质。按其搬运和堆积方式的不同,主要有如下几种。

#### 1. 残积土

残积土是指母岩表层经风化作用破碎成为岩屑或细小颗粒后,未经搬运和分选,残留在原地的堆积物。它的特征是颗粒表面粗糙、多棱角、孔隙大、无层理构造、均匀性差。残积土与母岩之间没有明显的界限,通常经过一个母岩风化层而直接过渡到新鲜母岩,因而其矿物成分在很大程度上与下伏母岩相一致。例如,砂岩风化剥蚀后生成的砂岩碎块,两者矿物成分基本一致。



残积土主要分布在山区、丘陵地带以及剥蚀平原。残积土厚度及特征随所处区域的岩石不同而不同。在残积土上建造建筑物,应当注意地基不均匀沉降和土坡稳定问题。如果其厚度较小,可以将其挖除,将建筑物基础直接置于下伏基岩上。

## 2. 运积土

运积土是指岩石经风化所形成的土颗粒受自然营力的作用,搬运到远近不同的地点所沉积的堆积物。其特点是颗粒经过相互摩擦等作用,具有一定的磨圆度,即颗粒因摩擦作用而变圆滑。在沉积过程中因受水流等自然营力的分选作用而形成颗粒粗细不同的层次,粗颗粒下沉快,细颗粒下沉慢而形成不同粒径的土层。根据搬运的动力不同,运积土又可分为如下几类。

(1) 坡积土。坡积土是指在雨、雪水流的冲刷作用下,将山上岩石风化产物顺着斜坡搬运到较平缓的山坡或山麓处形成的沉积物。坡积土搬运距离不远,它一般分布在半山腰或山麓处,其上部与残积土相接。岩屑来源于当地山上,颗粒由坡顶向坡脚呈现逐渐由粗变细的分选现象。但其矿物成分与下伏母岩没有直接关系,这一点与残积土不同。由于水流强弱大小不同,强水流从山上冲下粗大颗粒的岩屑,弱水流只能冲下细小颗粒的土。因此坡积土不仅厚薄不同,土质也很不均匀,还有一些垂直裂缝,看起来很疏松。由于坡积土的孔隙大、压缩性高,且可能发生沿下伏基岩倾斜面的滑动,如果在坡积土上建造建筑物,还应注意地基不均匀沉降和稳定性问题。

(2) 洪积土。由暴雨或大量融雪形成的山洪急流,冲刷搬运大量岩屑,流至山谷出口与山前倾斜平原地带,堆积成洪积土。

山洪流出谷口后,水流速度骤减,被搬运的粗岩屑首先大量堆积下来,离山渐远,颗粒逐渐变细。在谷口附近多为块石、碎石、砾石、粗砂等粗粒物质,离谷口远的地带颗粒变细,其分布范围也逐渐扩大。因此,洪积土的地貌特征为,靠近谷口处窄而陡,离开谷口后逐渐变宽变缓,形如扇状,故称洪积扇。由相邻谷口的洪积扇组成洪积扇群。相邻洪积扇群连接起来即形成洪积平原的地貌单元。

通常自然界山洪的发生是周期性的,由于每次山洪的大小不尽相同,堆积物的粗细也随之不同,导致洪积土在垂直方向和水平方向上粒度分布变化较大。因此,洪积土常呈现不规则交错的层理构造,且往往存在黏土夹层、尖灭或透镜体等产状。土的力学性质以近山处较好。

(3) 冲积土。冲积土是岩石风化产物经江、河水流的搬运,沉积在河床较平缓地带后形成的沉积物。其特点是呈现明显的层理构造。在冲刷、搬运过程中,由于颗粒间的滚动摩擦和相互碰撞,岩屑物质由原来带棱角(块石、碎石、角砾)逐渐形成亚圆形或圆形(漂石、卵石、圆砾)。随着搬运距离的增加,颗粒变得越来越细。冲积土在地表的分布很广,主要类型有下列四种。

1) 山区河谷冲积土。在山区,河谷两岸陡峭,大多仅有河谷阶地。地表水和地下水基本都流入河床。山区江河水流流速大,细颗粒被冲走,河谷冲积土多为被砂粒所填充的漂石、卵石及圆砾。冲积土的厚度一般不超过10~15m。山间盆地和宽谷中存在河漫滩冲积物,其分选性差,组成物质主要为含泥的砾石,并具有透镜体和倾斜层理构造。通常在高阶地主要是岩石或坚硬土层,为良好地基。



2) 山前平原冲积洪积土。山前平原沉积土有分带性,近山一带由冲积和部分洪积的粗粒物质组成,离山远的平原为较细的砂土和黏性土冲积层。

3) 平原河谷冲积土。平原河谷地貌及沉积物均较复杂,包括河床、河漫滩、阶地及古河道等地貌单元及相应的沉积层。

(a) 河床冲积层。上游河床沉积层颗粒粗,下游颗粒细。因搬运的距离长,颗粒具有一定的磨圆度,没有巨大的漂砾,这与洪积土的砾石层有明显差别。山区河床冲积土厚度不超过 10m,但也有近百米的;而平原河床沉积层的厚度高达几十米至数百米,甚至千米。河床沉积层中粗砂与砾石密度较大,是良好的天然地基。

(b) 河漫滩沉积层。河流进入中下游地区,河面宽广,水流平缓。但出现洪水时,泥砂会随洪水的消涨而逐渐沉积,形成河漫滩沉积层。通常河漫滩沉积层为两层结构:上层为砂砾、卵石等粗颗粒土;下层为泛滥的细粒土,且往往局部夹有有机土、淤泥和泥炭。该地段地下水埋藏较浅,当沉积物为淤泥质和泥炭层时,压缩性高,强度低,以其作为建筑物地基时应慎重。当冲积物为砂层时,其承载力可能较高,因此开挖基坑时应注意可能发生的流砂现象。

(c) 河流阶地沉积层。由地壳的升降运动与河流的侵蚀、沉积等作用形成。如果地壳交替发生多次升降运动,就可形成多级阶地。由河漫滩向上依次称为一级阶地、二级阶地等。阶地位置越高,其形成的年代越早,通常土质越密实,强度亦越高,最适合作建筑物的地基。同时,由于高级阶地地形平坦,水源丰富,靠近河流航运方便,故许多大城市都建于此。如我国的兰州、重庆、武汉等。

(d) 古河道沉积层。由弯曲的平原河道取直改道后留下的古河道牛轭湖,逐渐淤塞而成。这种沉积层通常存在较厚的淤泥、泥炭土。其强度低、压缩性高,为不良地基。

4) 三角洲沉积层。江、河搬运的大量泥砂在入海口或入湖口沉积下来,形成厚度达数百米,面积宽广的三角洲沉积层。这种沉积层通常是淤泥质土或典型淤泥,并具有特殊的交错层构造。其含水率高、承载力低,若作为建筑物地基应慎重对待。

(4) 湖泊与沼泽沉积土。

1) 湖泊沉积土。湖泊沉积土分为湖边沉积土和湖心沉积土。湖边沉积土主要由湖浪冲刷湖岸、破坏岸壁形成的碎屑物质组成。近岸带沉积的多数是粗颗粒的卵石、圆砾和砂土,远岸带沉积的则是细颗粒的砂土和黏性土。湖边沉积物具有明显的斜层理构造。作为地基时,近岸带有较高的承载力,远岸带则差些。湖心沉积土是由河流和湖流挟带的细小悬浮颗粒到达湖心后沉积形成的,主要是黏土和淤泥,常夹有细砂、粉砂薄层,称为带状黏土。这种黏土压缩性高、强度低。

2) 沼泽沉积土是由湖泊逐渐淤塞和陆地沼泽化演变而成的。它主要由含有半腐烂的植物残余体逐年积累形成的泥炭所组成。由于泥炭具有以下特征:含水率极高(可达百分之百),这是因为腐殖质是吸水能力极高的物质,任何其他土类没有这种特点;透水性很低;压缩性很高且不均匀,承载能力很低。所以,泥炭层不宜作为永久性建筑物的地基。

(5) 海洋沉积土。海洋按海水深度及海底地形划分为滨海带、浅海区、陆坡区和深海区,相应的海洋沉积土分为以下几种。

1) 滨海沉积土。滨海地区是指海水高潮与低潮之间的地区。滨海沉积土主要由卵石、



圆砾和砂等粗碎屑物质组成,有的地区存在黏性土夹层,具有基本水平或倾斜的层理构造。例如,我国北戴河、青岛、烟台等地滨海均为砂土。作为地基,其强度尚高,但透水性较大。黏性土夹层干燥时强度高,但遇水软化后强度很低。此外,由于海水大量含盐,因而使形成的黏土具有较大的膨胀性。

2) 大陆架浅海沉积土。大陆架浅海是指海水深度为  $0\sim 200\text{m}$ , 宽度为  $100\sim 200\text{km}$  的地区。这一地区的沉积土主要有细颗粒砂土、黏性土、淤泥和生物化学沉积物(硅质和石灰质等)。离海岸越远,沉积物的颗粒越细。这种沉积物具有层理构造,但其密度小、含水率高,因而其压缩性高、强度低,对工程不利。

3) 陆坡和深海沉积土。浅海区与深海区的过渡地带,称宽陆坡区,水深度为  $200\sim 1000\text{m}$ , 宽度为  $100\sim 200\text{km}$ 。水深超过  $1000\text{m}$  的海域为深海区。这两个区的沉积物主要为成分均一的有机质软泥。

(6) 冰川沉积土。由冰川或冰水挟带搬运所形成的沉积物,由巨大的块石、碎石、砂、粉土及黏土混合组成。一般分选性极差,无层理,但冰川沉积土层常具有斜层理,颗粒呈棱角状,巨大的块石上常有冰川擦痕。此外,还有冰湖沉积,冰湖是由冰川溶解的水所形成的湖泊。冰湖沉积土主要以黏性土为主,性质较差。

(7) 风积土。风积土是指在干旱的气候条件下,岩石的风化破碎物由风力搬运所形成的堆积物。常见的风积土分为两类:一类是分布在我国华北、西北地区的黄土,它主要由粉粒或砂粒组成,含可溶性盐,土质均匀,孔隙比大。黄土又分为类黄土和黄土两种,区别在于前者无湿陷性(遇水剧烈下沉),后者具有湿陷性,在实际工程上应当注意区分。另一类是风积砂(沙漠、沙丘),它属于不稳定的土层,随着风向和风力的变化而不断迁移,在其上进行工程建设,常需要采取固砂措施。

## 1.3 土的三相组成

前已指出,土是由岩石风化形成的松散沉积物。其中的固体颗粒构成了土骨架,土骨架间存在孔隙,孔隙当中存在水和气体。一般情况下,土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)三部分组成的三相体系。土的三相组成不是固定的,不同成因形成的土其三相组成自然不同,即使是同一成因形成的土,在不同的条件下(如季节气候变化、地下水位升降、承受地面荷载前后等)其三相组成也会发生变化。土的三相组成不同时,会呈现出不同的物理状态,例如,干燥与潮湿、坚硬与软弱、密实与松散等,而土的物理状态与其力学性能有着密切联系。因此,要研究土的工程性质,必须首先分析和研究土的三相组成。

### 1.3.1 土的固体颗粒(固相)

在土的三相组成中,固体颗粒(简称土粒)构成土的骨架,其大小和形状、矿物成分及组成情况是决定土的物理力学性质的重要因素。粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的碎屑,或是岩石中未产生化学变化的矿物颗粒,如石英和长石等,其形状呈块状或粒状;而细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物和形成过程中混入的有机物质,其形状主要呈片状。土粒的组合情况就是大小土粒含量的相对数量关系。