

土木工程系列

高等学校“十二五”规划教材

# 岩土工程

王幼清 郝庆多 陈 兰 编著

013035780

TU4-43  
40

高等学校“十二五”规划教材·土木工程系列

内容简介

本书是土木工程专业岩土工程方向的一门专业基础课教材。本书主要介绍岩土工程的基本概念、基本理论、基本方法和基本设计原理。全书共分八章。第一章介绍岩土工程的发展概况、学科地位、研究内容、工程应用、专业特点、学习方法等。第二章介绍岩土体的物理力学性质。第三章介绍土体中的应力与应变。第四章介绍土体中的水与气。第五章介绍土体中的渗流。第六章介绍土体中的变形与破坏。第七章介绍土体中的稳定性。第八章介绍岩土工程中的数值分析。本书可作为土木工程专业岩土工程方向及相关专业的教材，也可供从事岩土工程工作的工程技术人员参考。

# 岩土工程

王幼清 郝庆多 陈兰 编著



北航

01643547

TU4-43  
40

哈尔滨工业大学出版社

013032790

高等工程教育“十二五”规划教材

## 内 容 简 介

本书系统介绍了岩土工程的基本理论和设计方法。主要内容包括岩土体的工程性质、岩土工程勘察、岩土地基工程、深基坑的开挖与支护、滑坡治理、地下洞室、岩土工程爆破、岩土工程防护技术、土工聚合物等。为了便于读者学习应用,书中还给出了相应计算表格、例题、复习思考题与习题。

本书可作为高等工科院校土木工程专业研究生和岩土工程专业本科生教学用书,也可供工程技术人员参考。

岩 土 工 程

## 图书在版编目(CIP)数据

岩土工程/王幼清编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.3

ISBN 978-7-5603-3756-2

I. ①岩… II. ①王… III. ①岩土工程 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 186142 号

策划编辑 郝庆多 段余男  
责任编辑 王桂芝 段余男  
封面设计 刘长友  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 450 千字  
版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-3756-2  
定 价 40.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

哈尔滨工业大学出版社

# 前 言

岩土工程是土木工程的重要组成部分,在房屋、市政、能源、水利、道路、航运、矿山、国防等各种工程建设中都占有重要地位。由于岩土工程与复杂多变的自然条件密切联系,往往成为工程建设的难点,所以岩土工程是保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键。随着我国基础设施建设规模的不断扩大,对岩土工程提出了一个又一个需要解决的新课题,和亟待解决的新问题。由于目前岩土工程方面的图书较少,因此编写一部理论联系实际的《岩土工程》教材具有重要意义。

本书是作者在多年为土木工程专业学生讲授岩土工程课程的教学实践基础上,通过广泛收集文献资料编写而成的。全书共分10章:第1~4章介绍岩体和土体的性能参数及分类方法与勘察测试方法,并介绍了各类岩土地基工程的设计分析方法及施工中深基坑支护结构的设计方法,其中包括对特殊地基和软弱地基的加固处理方法;第5章和第6章介绍岩土边坡工程的抗滑支护方法及对滑坡的分析和治理;第7章介绍地下洞室的稳定性分析和支护方法;第8章介绍岩土工程爆破施工法;第9章介绍岩土工程地表防护技术;第10章介绍土工聚合物在岩土工程中的应用技术。全书力求做到系统性与实用性相统一,除了介绍各种计算分析理论和计算例题外,还列有许多规范表格,以便于在实际工程中应用。此外,为了便于学习,书中还附有思考题和习题。

本书由哈尔滨工业大学王幼清、郝庆多和哈尔滨商业大学陈兰共同撰写,其中王幼清负责绪论和1~8章,郝庆多负责第9章,陈兰负责第10章。

本书编写过程中参考了大量文献,在此对文献作者表示衷心感谢。由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不当之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。

作者

2012年10月

# 目 录

|                  |     |
|------------------|-----|
| 绪论               | 1   |
| 第1章 岩土体的工程性质     | 6   |
| 1.1 土体的设计参数      | 6   |
| 1.2 岩体的设计参数      | 12  |
| 1.3 岩体地应力测试      | 21  |
| 1.4 土的工程分类       | 34  |
| 1.5 岩体的工程分类      | 36  |
| 本章小结             | 43  |
| 复习思考题            | 43  |
| 第2章 岩土工程勘察       | 46  |
| 2.1 岩土工程勘察的基本任务  | 46  |
| 2.2 岩土工程勘察的基本程序  | 46  |
| 2.3 岩土工程勘察的分级    | 47  |
| 2.4 岩土工程勘察的阶段    | 49  |
| 2.5 岩土工程勘察的主要工作  | 51  |
| 2.6 岩土工程勘察与测试方法  | 53  |
| 本章小结             | 77  |
| 复习思考题            | 77  |
| 第3章 岩土地基工程       | 78  |
| 3.1 一般土质地基       | 78  |
| 3.2 特殊土质地基       | 85  |
| 3.3 软弱地基处理       | 107 |
| 3.4 岩石地基         | 117 |
| 本章小结             | 124 |
| 复习思考题            | 124 |
| 第4章 基坑工程         | 126 |
| 4.1 基坑护臂结构土压力的特点 | 126 |
| 4.2 深基坑支护类型与设计计算 | 130 |
| 4.3 深基坑开挖        | 141 |
| 4.4 深基坑排水        | 144 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 本章小结·····             | 147 |
| 复习思考题·····            | 149 |
| 第5章 岩土边坡工程·····       | 152 |
| 5.1 锚杆·····           | 152 |
| 5.2 抗滑桩·····          | 163 |
| 5.3 挡土结构·····         | 176 |
| 5.4 支护结构·····         | 186 |
| 5.5 岩石边坡工程·····       | 187 |
| 本章小结·····             | 196 |
| 复习思考题·····            | 197 |
| 第6章 滑坡治理·····         | 199 |
| 6.1 滑坡的勘测·····        | 199 |
| 6.2 滑坡的类型和稳定性分析·····  | 202 |
| 6.3 滑坡的整治措施·····      | 207 |
| 6.4 滑坡的监测·····        | 210 |
| 本章小结·····             | 211 |
| 复习思考题·····            | 211 |
| 第7章 地下洞室·····         | 213 |
| 7.1 洞室的类型与位置选择·····   | 213 |
| 7.2 影响洞室稳定性的主要因素····· | 216 |
| 7.3 围岩压力·····         | 217 |
| 7.4 地下洞室支护措施·····     | 230 |
| 7.5 地下洞室岩爆及其特征·····   | 235 |
| 本章小结·····             | 238 |
| 复习思考题·····            | 238 |
| 第8章 岩土工程爆破·····       | 240 |
| 8.1 爆破作用原理·····       | 240 |
| 8.2 岩土爆破工程的分类·····    | 242 |
| 8.3 岩土爆破参数的设计计算·····  | 247 |
| 8.4 爆破器材与起爆方法·····    | 249 |
| 8.5 爆破工程施工·····       | 255 |
| 本章小结·····             | 257 |
| 复习思考题·····            | 257 |
| 第9章 岩土工程防护技术·····     | 258 |
| 9.1 岩石边坡的防护·····      | 258 |

---

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 9.2 土质边坡植草防护 .....           | 267        |
| 9.3 喷射混凝土防护 .....            | 269        |
| 9.4 冲刷防护 .....               | 271        |
| 本章小结 .....                   | 273        |
| 复习思考题 .....                  | 274        |
| <b>第 10 章 土工聚合物</b> .....    | <b>275</b> |
| 10.1 土工聚合物的特点和类型 .....       | 275        |
| 10.2 土工聚合物在岩土工程中的作用 .....    | 276        |
| 10.3 利用土工聚合物的设计 .....        | 277        |
| 10.4 岩土工程中应用土工聚合物的施工要点 ..... | 290        |
| 本章小结 .....                   | 291        |
| 复习思考题 .....                  | 292        |
| <b>参考文献</b> .....            | <b>293</b> |

## 绪 论

### 0.1 岩土工程的定义及内容

在我国因不同的历史沿革,形成了传统的岩土工程和广义的岩土工程。传统的岩土工程其前身为土力学和基础工程,或称为土工工程;广义的岩土工程是以岩土体为工作对象,以工程地质学、岩石力学、土力学和基础工程学为基本内容,涉及岩体和土体的利用、整治和改造的一门综合性工程技术学科,是土木工程的一个组成部分。

岩土工程包括岩土工程勘察、岩土工程设计、岩土工程施工和岩土工程监测,涉及工程建设的全过程。作为工程技术学科,岩土工程要处理好各种条件下的场地地基及土工结构,确保工程建筑物地基和土工结构中土体的强度、变形和稳定性要求,就必须具有材料科学、地质学、水文地质、土质学、土体加固技术、土工结构及地下工程等学科知识。由此可见,岩土工程是广泛的土木工程边缘学科,研究的内容非常广泛。

### 0.2 岩土工程的重要性

岩土工程在房屋、市政、能源、水利、道路、航运、矿山、国防等各种工程建设中,都有十分重要的意义。由于岩土工程与复杂多变的自然条件密切联系,往往成为工程建设的难点,成为保证工程质量、缩短工程周期、降低工程造价、提高工程经济效益和社会效益的关键。

土木工程包括对各种不同结构及体系进行分析、设计与施工。作为建筑物的地基起着支撑与传力作用;作为地下工程,其周围岩土体通过围岩压力对建筑物起着施力作用;作为坡脚附近的建筑物,坡体的稳定性直接关系到建筑物的安全;作为建筑材料,则最直接地决定着土木工程结构的可靠性。每个建筑工程中岩土工程的性状及建筑物在施工过程中和竣工后与岩土体之间的相互作用关系,都直接影响着工程的质量、经济和安全生产。

就岩土体本身而言,基于工程影响范围内岩土体边界条件的不确定性,岩土材料性质的可变性、力学性质取决于应力历史与水平,同时由于岩土工程性质还会受时间和外部环境等多种因素的影响,以致要获得相关的准确分析资料及设计参数往往难度很大,但其复杂性也从另一个侧面反映了岩土工程的重要性。

### 0.3 岩土工程的新进展

岩土工程是一个快速发展的新学科,随着科技的进步和文明的发展,岩土工程不断出现新课题,使岩土工程面临着一个又一个的巨大挑战,但同时也为岩土工程领域展示出广阔的发展前景。主要表现在以下几方面:

(1)随着全球范围内人口的迅速增加,人类的生存空间逐渐受到压缩,生产和生活活动势

必向岩土环境复杂的地区扩展。

(2)随着人们对生活质量的要求越来越高,交通居住设施对岩土体变形的要求也更加严格。

(3)为了满足环境保护和可持续发展的需求,岩土工程的设计与施工必须起好协调作用。我国岩土工程的发展与国民经济的发展战略密切相关,特别是沿海地区经济的飞速发展,高速交通工程系统的全面铺开、西部大开发等,对岩土工程从理论、材料到施工工艺都提出了全方位的系统的要求。

国内外从事岩土工程研究和开发的人员多,学术组织和会议也多。如我国1986年在北京召开的国际深基础学术讨论会,1988年在北京召开的亚洲区域性土力学学术讨论会,1986年在上海召开的全国地基处理学术讨论会,还有全国土工织物学术讨论会,全国高层建筑大直径桩墩技术学术讨论会,深基坑开挖支护学术讨论会,全国土动力学学术讨论会,国际上还有专门的国际土力学和基础工程协会等,可见会议频繁,交流活跃。现将岩土工程的新进展作如下概述。

### 0.3.1 材料本构关系和计算

土的性质是十分复杂的,作为典型的多相散粒体结构,在低应力水平下土的应力应变关系(常称为土的本构关系)便呈现出明显的非线性特征。随着计算机的发展、计算方法和试验技术的进步,特别是大型岩土工程(如数百米高的土石坝、核电站地基等)的需要,促使人们更深入地探讨土的应力应变关系,掌握土的变形规律。在20世纪70年代,土的本构模型的研究形成了高潮,国内外取得的研究成果也十分突出,我国著名学者黄文熙院士发表了一系列关于土的弹塑性应力应变模型理论的文章,并建立了相应的本构关系。关于岩土数值计算方法和依据现场量测信息反演确定有关参数方法的岩土工程反演理论研究也已成为国内外研究学者普遍关注的课题。1998年在北京召开的第二届国际非饱和土会议,会上反映了各国对非饱和土的研究成果。

### 0.3.2 基础结构分析和设计

由于传统的地基应力的计算方法未能考虑基础埋深和多层土地基的影响,以及经典土力学理论计算中的弹性计算原理的缺陷等原因,使得传统的基础设计计算分析方法中关于沉降计算方法,越来越难以满足现代建筑条件下基础设计时沉降分析的需要。近几年来通过实际工程监测和分析,研究人员对传统估算公式的修正系数进行了调整,并力图从理论和方法两方面有所突破。

关于高层建筑基础设计中要考虑上部结构、基础和地基的共同作用课题,取得了预期的进展。通过对具体工程基底接触应力、钢筋应力及基础沉降的测试,积累了资料,为共同作用的研究提供了可靠的依据。

单桩与群桩的承载力、变形机理、设计理论和工程应用等取得了新进展,桩型、成桩工艺和施工设备也有所创新,如长大桩的端阻力和摩阻力的尺寸效应;嵌岩桩的承载机理、承载力计算和嵌岩桩的设计;螺旋成桩法、旋挖成桩法、大小长螺旋套钻成桩法及钻孔桩后压浆成桩法等。

在岩土工程的设计理论方面,随着高速公路和高速铁路的修建,传统上以“强度”为设计依

据的准则,逐渐由“变形”准则向“功能”准则过渡。在岩土工程的分析中引入了可靠性设计理论,以便适应结构极限状态设计方法的发展趋势,由于岩土工程从材料准备到施工工艺整个过程中的不确定性,使可靠性设计水平要达到定值设计的可靠水平,仍需进行长期的试验检测和数据积累。

### 0.3.3 地基处理

近 30 多年来,地基处理技术发展较快。在方法上有灌浆加固法、强夯法、砂石桩法、搅拌桩法、排水固结法、真空预压法等。在应用上从解决一般工程软弱地基加固向解决各类超软、深厚、深挖等大型工程地基加固方面发展,如在深厚软弱地基上高速公路和深基坑开挖中的应用等。在地基处理的目的是从以提高地基承载力与稳定性为目的向解决基础过大沉降和不均匀沉降为目的的方向发展。在设计理论和设计方法上,依据大量的工程实践,修正了地基处理规范和设计手册。但从整体上看,地基处理的设计原理、计算方法、质量检测和评价还滞后于工程的应用,有待今后深入研究和解决。

### 0.3.4 土动力学

地震与各种外界振动因素的出现和影响,使得土动力学和土工抗震处于岩土工程的研究前沿,研究的内容主要表现在土的动力特性、本构关系、震液化、地震反应分析及土工抗震措施上。如岩土工程界已经认识到中主应力是影响饱和砂土孔隙变化的一个不容忽视的因素,开展了对原状土、非饱和土、垃圾土、冻土、海洋土及粉土等不同种类土的动力特性的试验研究;采用了压电陶瓷材料制作的弯曲单元(bender elements)测定最大剪切模量  $G_{\max}$  这一重要动力参数;研究了若干描述饱和砂土在往复荷载作用下应力应变关系的本构模型;提出了用不同的方法判别砂土液化的可能性、液化引起的土体永久变形,以及提高地基抗液化性能的措施等。

### 0.3.5 材料领域

材料领域主要表现在两个方面:一方面是土工合成材料的迅猛发展和广泛应用;另一方面是特殊土地区地基土材料的研究。人类有史以来就广泛使用木材、棉花、皮革和羊毛等天然材料,以后又逐渐扩展到蚕丝、沥青、橡胶等,这些材料的相对分子质量都很高,由几十万到几百万,所以统称为高分子材料,又由于是天然产物,故又称为天然高分子材料。随着社会生产力的发展和科学技术的不断提高,天然高分子材料已不能满足社会生产和人类生活的需要,于是发明了用人工合成的方法制造高分子材料,高分子材料一经合成,就显示出造价低廉和用途广泛的优点,引起了各方面的注意,形成了高分子合成材料工业。合成材料种类很多,可归纳为 3 大类,即合成树脂、合成橡胶和合成纤维。1939 年,合成纤维品种——尼龙正式大规模投入工业生产。合成材料用于岩土工程时称为土工合成材料。天然高分子材料和人工高分子材料都具有很高相对分子质量,但前者最显著弱点是耐久性差,强度也比较低;而后者则具有较高的强度(一根手指粗的锦纶可吊起一辆满载的解放牌汽车,树脂的抗拉强度仅稍低于钢材),其耐霉烂性和耐腐蚀性更是合成材料独具的优点。土工合成材料现广泛应用于隔离、防渗、疏排、加固、防护、美化等岩土工程和环境工程中。关于地基土材料研究方面,主要表现在特殊土地区遇到相应的岩土工程问题上,从而促进了对它们的研究,如我国沿海地区的软土,以及西

南地区出现较为广泛的膨胀土,西北地区的黄土和我国北方的冻土等。

### 0.3.6 地下工程

地下工程在地应力的测试、工程设计理论和施工等多方面都取得了很大的进展,这里仅介绍可称之为世界隧道工程中具有划时代技术革命意义的新奥法。

新奥法是一种崭新的隧道工程施工方法。该方法发明于20世纪50年代,60年代得到了迅速的发展。新奥法名称是该法的主要发明者拉布希维兹(L. V. Rabcewicz)教授为了有别于奥地利老方法而取名的。新奥法不用厚壁混凝土衬砌的传统支护方法,而采用了喷射混凝土和锚杆技术,将隧道支护分次构筑。即在洞室断面开挖之后,随机打入锚杆,然后在适当的时候喷射一层混凝土,该层混凝土喷层构成第一次支护,第一次支护喷层应具有一定的柔性,其喷层厚度应有所控制;带围岩变形稳定后,立模浇注混凝土构成的第二次支护。在上述二次支护的共同作用下维持围岩平衡,保持洞室稳定。

新奥法虽然利用了喷锚技术,但并不等于一般的喷锚。因为新奥法只是利用锚杆使围岩的整体性得到加强,然后掌握围岩开始变形→变形发展→破坏这一过程中某一有利时机给予喷层支护。第一次喷层既有一定强度又有一定柔性,有利于围岩构成承载环,使围岩的自稳时间得以延长,又使围岩应力释放得以控制。围岩在自稳时间内所释放的应力不再需要混凝土衬砌承担,从而减轻了衬砌的荷载,减薄了传统的衬砌断面的厚度。

### 0.3.7 岩土构筑物

诸如边坡、堤坝、支挡建筑物、地下岩土工程、环境工程等土工构筑物,亦在实际工程中进行了有针对性的研究和应用,取得了大量、明显的进步。高边坡工程和滑坡防治是土工构筑物的一个重要领域,采用极限平衡原理的瑞典圆弧法、条分法、传递系数法和块体法,因积累的经验较多,目前工程设计中仍广泛采用,但它们都是粗略的近似方法,计算中未考虑材料的应力应变关系。现在发展的能量法以塑性力学为理论基础,考虑了材料的应力应变关系,不同于前述极限法,此方法在边坡稳定性分析方面是一大进步。而近年又发展起来的数值分析方法,尤其是有限单元法,它能考虑土的实际的非线性应力应变关系,可以求出边坡在各种工作状态下内部应力的分布,以及破坏区的位置和破坏范围的发展情况,确定一个破坏标准,并以此来衡量边坡的安全程度,为边坡稳定分析开辟了一个新途径。

支挡建筑物及深基坑工程中土压力的计算也取得了进展,主要表现在根据支撑结构的变形特点合理地确定土压力,使用的方法除传统的极限平衡原理外,还有数值计算方法、能量法和离心模型试验方法等。

深基坑工程和地下工程近几年发展迅猛,基坑深度越来越深(超过20 m),并与逆作法施工结合进行,在理论上也推动了土压力理论、土的变形特性和计算方法的发展。

土工构筑物的加固和改良是土体工程近20年来最具革命性进展的领域,土工合成材料、土钉、土锚和加筋土这样的新概念,被人们视为对传统土力学的挑战,目前已成为国内外广为接受和采用的常规技术。

### 0.3.8 在岩土试验技术

为了更准确地描述岩土材料在复杂应力状态和动力作用下的变形行为,岩土试验设备获

得了相应的发展,特别值得提出的是大型动力精密试验设备。另一方面,工业的数字化(digitization)进程又为试验的数据采集和处理提供了前所未有的便利条件,从而提高了试验结果的可靠性。相似材料和模型试验的理论研究与实际应用也随着大型离心机的星际简称和使用得到了进一步发展,从而使得岩土体及相应工程结构物在复杂地质条件和工作状态下的行为能在实验室内得到模拟和研究。目前精密而昂贵的岩土仪器设备主要有真三轴仪、平面应变仪、扭转压缩仪、高压大型三轴仪和离心模型试验机等。

## 0.4 本书的内容与特点

《岩土工程》一书是普通高校土木专业新编系列教材中的专业课教材之一,通过本课程的学习,使学生对岩土工程领域相关知识有较全面、系统和深入的了解,具有较强的从事岩土工程实际工作的能力,并能初步具备研究和开发的能力。

本书内容包含3大部分,7个主要课题。阐明岩土体工程性质和建筑场地特征的有岩体和土体工程性质及评价、岩土工程勘察和原位测试技术;讲述主要岩土工程问题的有土地地基和岩石地基工程、边坡工程和滑坡、深基坑的开挖与支护、地下洞室的基本知识与理论;介绍使岩土工程面貌为之一新的土工聚合物。此外,对岩土工程爆破和岩石工程的新进展也进行了一般性介绍。

岩土工程作为专业课,内容十分丰富。编者对教与学两方面提出下述建议:

- (1) 要注意每个章节都是很具体的实际问题,联系实际,培养解决实际问题的能力;
- (2) 本书的参考资料很多,但编写的目的仍然是为了使使学生打好理论基础,获得未来发展的能力;
- (3) 与选修课程有前后衔接和互相渗透的内容,但不是简单的重复,而是为了保持内容的整体性,从而有利于更深入的学习;
- (4) 对超出学生所学的基础理论部分,要注重概念理解和实际应用。

# 第 1 章 岩土体的工程性质

作为建筑物地基的岩体或土体是保证建筑物安全稳定、正常运行的基本要素之一,因此充分了解岩体和土体的工程性质及其评价原则是非常必要的。

土体工程性质的主要设计参数包括压缩性参数、渗透性参数和强度参数,本章重点讨论以上 3 类参数的确定方法及其主要影响因素,这些内容对于解决本专业经常遇到的土体利用和处理工程问题极为重要,将是选择合理的地基基础方案的主要依据之一。

岩体工程性质的主要设计参数包括强度参数、变形参数和流变参数。本章不仅讨论 3 类参数的确定方法,同时对工程岩体质量的评价和岩体地应力的测试进行介绍,有助于对工程岩体的工程性质充分了解和掌握,更好地指导工程实践。

在工程实践中常常要进行岩土的分类。本章重点讨论了岩体和土体的分类原则和依据,以便使用者在今后的工程实践中能够正确理解各种分类方法的异同,并且正确判别不同类别岩体或土体的工程性质的差异。

## 1.1 土体的设计参数

### 1.1.1 压缩性参数

土在压力作用下体积缩小的特性称为土的压缩性。一般来说,在荷载作用下,透水性大的无黏性土,其压缩过程在短时间内就可以结束;而对于透水性低的饱和黏性土,土体中水的排除所需时间较长,压缩过程的完成持续时间较久,有时甚至几十年。土的压缩随时间而增长的过程称为固结。因此,在荷载作用下,建筑物的总沉降由 3 部分组成,即瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降。

$$s = s_i + s_c + s_s$$

式中  $s$ ——总沉降;

$s_i$ ——瞬时沉降;

$s_c$ ——主固结沉降;

$s_s$ ——次固结沉降。

对于一般工程,常用室内侧限压缩试验确定土的压缩性指标。虽然其试验条件不完全符合土的实际工作状况,但有其实用价值。

#### 1. 压缩性曲线和压缩性指标

由压缩性试验结果绘制土的压力和孔隙比的关系曲线有两种: $e-p$  曲线或  $e-\lg p$  曲线,这些曲线称为土的压缩曲线,如图 1.1 所示。对于曲线上任意两点 $(p_1, e_1)$ 和 $(p_2, e_2)$ ,定义压缩系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \times 1\,000 \quad (1.1)$$

式中,压力单位为 kPa,压缩系数单位为  $\text{MPa}^{-1}$ 。显然,对于  $e-p$  曲线上的不同区段,  $\alpha$  值不是相等的。《建筑地基基础设计规范》取  $p_1$  为上覆土层自重,  $p_2$  为上覆土层自重  $p_1$  和建筑物产生的附加压力  $\Delta p$  之和。为了统一评价土的压缩性,规定取  $p_1 = 100 \text{ kPa}$ ,  $p_2 = 200 \text{ kPa}$  时的压缩系数  $\alpha_{1-2}$  作为评价土的压缩性高低的指标。

低压缩性土:

$$\alpha_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$$

中等压缩性土:

$$0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq \alpha_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$$

高压缩性土:

$$\alpha_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$$

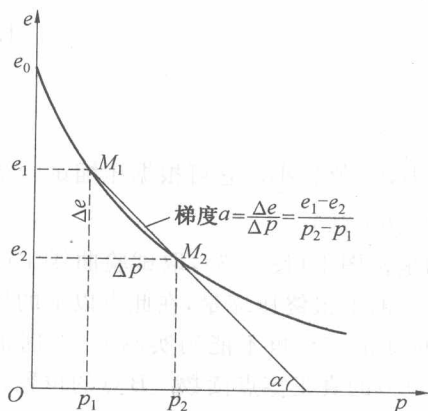
试验证明,正常固结情况下,  $e-\lg p$  曲线为一直线。压缩指数定义为

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1} \quad (1.2)$$

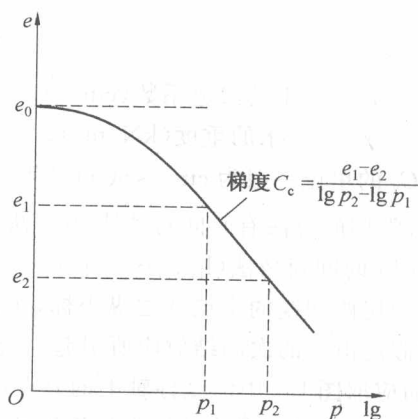
对于超固结土,  $e-\lg p$  曲线的前段并非直线,如图 1.1(b) 所示。

由压缩系数  $\alpha$  和压缩指数  $C_c$  的定义可以推出

$$C_c = \frac{\alpha \Delta p}{\lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1}\right)} \quad \text{或} \quad \alpha = \frac{C_c \lg \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1}\right)}{\Delta p} \quad (1.3)$$



(a) 以  $e-p$  曲线确定压缩系数  $\alpha$



(b) 在  $e-\lg p$  曲线中求  $C_c$

图 1.1 压缩曲线

在完全侧限条件下土的竖向压缩应力  $\sigma_z$  与竖向单位变形  $\epsilon_z$  之比,称为土的压缩模量  $E_s$ ,其单位为 kPa,即

$$E_s = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} \quad (\text{侧限条件下})$$

由式(1.1),并且  $\sigma_z = \Delta p$ ,  $\epsilon_z = -\frac{\Delta e}{1 + e_1}$ ,得

$$E_s = \frac{\Delta p}{-\frac{\Delta e}{1 + e_1}} = \frac{1 + e_1}{\alpha} \quad (1.4)$$

在完全侧限条件下,土层单位厚度受单位压力增量作用所引起的压缩量称为土的体积压缩系数  $m_v$ ,其单位为  $\text{kPa}^{-1}$ 。因此,  $m_v$  为  $E_s$  的倒数,即

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{\alpha}{1 + e_1} \quad (1.5)$$

## 2. 回弹指数 $C_s$

压缩试验中,在某压力  $p_i$  下卸荷回弹至  $p_{i+1}$ ,再加荷压缩,于是可得表征土的回胀特征的减压曲线,如图 1.2 中的线段 AB 和再压缩曲线图 1.2 中的线段 BA'。试验表明,不同压力下卸荷回弹再压缩曲线的平均梯度基本保持相同,定义回弹指数  $C_s$  为

$$C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} = \frac{\Delta e}{\lg \frac{p_{i+1}}{p_i}} \quad (1.6)$$

该指标在预测土的回弹测量时使用。

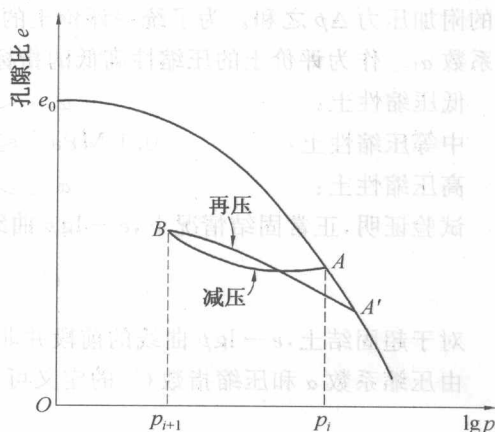


图 1.2 回弹再压缩曲线

## 3. 固结系数 $C_v$

土的固结系数  $C_v$  是表征土固结速率的一个特征系数,表达式为

$$C_v = \frac{k(1+e)}{\alpha \gamma_w} \quad (1.7)$$

式中  $k$ ——土的渗透系数(cm/s);

$\gamma_w$ ——水的重度(kN/m<sup>3</sup>)。

$C_v$  的单位一般为 cm<sup>2</sup>/s 或 m<sup>2</sup>/年。土的渗透性越小,  $C_s$  值越小。它可根据压缩试验结果推算,常用的方法有时间对数法(lg  $t$  法)和时间平方根法( $\sqrt{t}$  法)。

(1) 时间对数法(lg  $t$  法)。在压缩量与时间对数的坐标图上(图 1.3),取试验曲线主段的切线与尾段切线的交点 A 之纵坐标,作为固结度  $U_t = 1.0$  时的最终压缩量,在此点以下的压缩量都假定由土的次固结效应所引起。此外,渗透固结的真正零点也不能用实测  $t = 0$  时的读数,而应取图 1.3 中纵坐标轴上的 B 点作为相应于  $U_t = 0.0$  的真正零点读数。B 点的位置按下列方法确定:根据曲线首段上较接近的两试验读数点 A 与点 B(两者的时间比值为 1:4)的压缩量读数差值  $y$ ,向上推相同的读数差值  $y$ ,画平行与时间坐标轴的虚直线交于纵坐标轴,即可得  $U_t = 0.0$  时的真正零点读数 B。这是因为,在直角坐标上,渗透固结理论曲线的首段符合抛物线特征,即纵坐标增加 1 倍,横坐标值就增加 4 倍。取得  $U_t = 0.0$  和  $U_t = 1.0$  首尾两个读数后,可算出相当于  $U_t = 0.5$  时的土层压缩量及相应的固结力系数,即

$$C_v = \frac{(T_v)_{0.5} H^2}{t_{0.5}} \quad (1.8)$$

式中  $(T_v)_{0.5}$ —— $U_t = 0.5$  时的时间因数,可从  $U_t - T_v$  曲线中按不同的情况查得;

$t_{0.5}$ —— $U_t = 0.5$  时的时间,由压缩量与时间关系曲线可得;

$H$ ——试样最远排水距离。

(2) 时间平方根法( $\sqrt{t}$  法)。在压缩量  $s$  与时间平方根  $\sqrt{t}$  的坐标上,如图 1.4 渗透固结理论曲线首段与主段(相当于  $U_t = 0.0 \sim 0.6$  的范围内)呈现为一根斜直线,故可根据试验曲线在该坐标上的直线段向左上方延伸交于纵坐标轴,即得真正零点读数  $s_0$ ,然后过  $s_0$  点绘制一虚直

线  $s_0c$ , 该直线上各点的横坐标值为试验曲线的主段延长线  $s_0b$  的横坐标值的 1.15 倍。 $s_0c$  交试验曲线于  $c$ 。研究表明,  $c$  点的纵坐标位置  $a$  相应于固结度  $U_t=0.9$  的压缩量, 而它的横坐标相应于  $\sqrt{t_{0.9}}$ 。于是

$$C_v = \frac{(T_v)_{0.9} H^2}{t_{0.9}}$$

式中  $(T_v)_{0.9}$ ——相应于  $U_t=0.9$  时的时间因数, 查  $U_t-T_v$  关系曲线可得;

$t_{0.9}$ —— $U_t=0.9$  时的时间;

$H$ ——试样的最远排水距离。

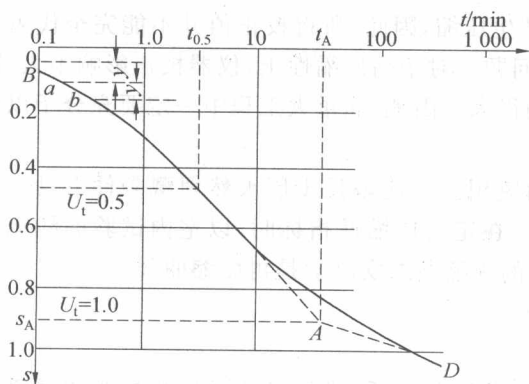


图 1.3 时间对数法

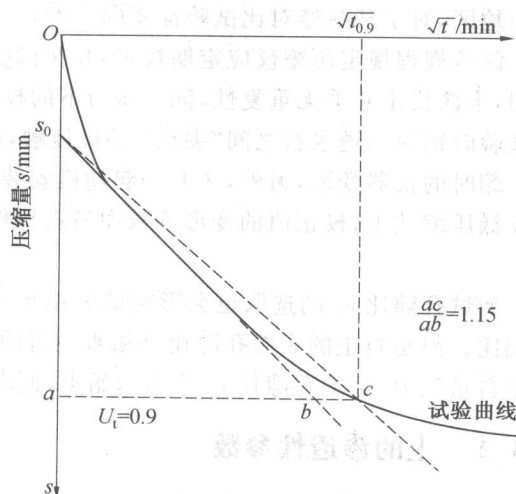


图 1.4 时间平方根法

时间对数法和时间平方根法的讨论。无论是时间对数法还是时间平方根法, 都难以准确确定土的固结系数, 这是因为土骨架的蠕变性能在渗透过程中或多或少都在起作用, 特别是对于坚实而结构性强的黏土, 蠕变影响可以说是在渗透的全过程都在发挥作用。即使是饱和软黏土, 在每级荷载增量作用下, 土的骨架蠕变作用大都会在渗透固结的后段逐渐发挥出来。因此, 用时间平方根法处理渗透固结曲线首段比较方便、精确; 而用时间对数法确定相应于  $U_t=1.0$  的变形量较为可靠。因而, 建议根据试验曲线的首段用时间平方根确定  $U_t=0.0$  的点, 而尾段则用时间对数法确定  $U_t=1.0$  的点, 以相互弥补不足之处。

#### 4. 次固结系数 $C_a$

大量试验表明, 次固结变形与时间在半对数坐标上接近一条直线。该直线的斜率称为次固结系数  $C_a$ 。

$$C_a = \frac{e_1 - e_2}{\lg t_2 - \lg t_1} = \frac{\Delta e}{\lg \frac{t_2}{t_1}} \quad (1.9)$$

次固结对大多数土而言, 相对于主固结是次要的, 可以不考虑。对于可塑性较大的软弱土, 以及淤泥与有机质土, 次固结在总沉降中占的比例较大, 不可忽略。

次固结系数也可用经验公式进行估算, 即

$$C_a = 0.018w_0 \quad (1.10)$$

式中  $w_0$ ——土的天然含水量,以小数计。

### 5. 影响压缩试验成果的一些因素

压缩试验所用土样多为  $\phi 79.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  与  $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 侧表面与体积之比为  $0.501 \sim 0.647 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ , 两端面与体积之比为  $0.5 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 。侧面切削和端面切削对土样均有扰动, 均应采用正确的切削方法和下压方式, 以减少对土样的扰动。

影响压缩实验结果的另一个因素是加荷持续时间。土工试验规程规定要求每级荷载持续 24 h, 对一些沉降完成较快的土, 也可按照每小时沉降量小于  $0.005 \text{ mm}$  的稳定标准。在有经验的地区, 对于某些经对比试验证实的土类, 一般工程可以使用快速法, 最后进行校正。

试验规程规定压缩仪应定期校正, 并在试验值中扣除一起变形值。然而, 一些单位的实验表明, 多次校正几乎无重复性, 同一压力下的校正值不唯一。这是因为用刚性铁块代替土样, 在试验时钢块与透水石之间“尖点”随机接触, 产生压缩, 因此, 所得校正值并不能完全代表土样压缩时的仪器变形, 另外, 还有一起随机安装问题。对于高压缩性土, 仪器校正影响不大, 而对于低压缩性土, 校正值的变形读数中所占比例很大。因此, 在重大工程中一定要充分予以重视。

初试孔隙比  $e_0$  的选取也会影响试验结果的应用。 $e_0$  应该是土层天然埋藏条件下具有的孔隙比。但是真正的天然孔隙比是很难测得的。在定义压缩性指标时, 以室内试验曲线上对应于自重压力  $p_1$  的孔隙比  $e_1$  作为起始点, 此时的压缩曲线实际上是再压缩曲线。

## 1.1.2 土的渗透性参数

土的渗透性一般是指水流通过土中孔隙难易程度的性质, 常用的渗透性指标为渗透系数  $k$ 。土的渗透系数可以通过室内渗透试验或现场抽水试验来测定。

室内准确测定  $k$  是一项困难的试验项目。在室内试验时应特别注意以下几个方面:

- (1) 试样的孔隙比应与实际工程相符合, 最好找出  $k-e$  曲线。
- (2) 试样必须完全饱和, 试验用水需经脱气处理, 水温应高于室温  $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 。
- (3) 室内切削试样应尽量减少对试样的扰动, 同时保证环刀与试样密合。

当无黏性土测定了毛管水上升高度时, 可用下式计算, 即

$$k = \frac{n}{2\eta} \left( \frac{n}{S} \right)^2 \quad (1.11)$$

$$\frac{n}{S} = \frac{h\rho}{Tg} \quad (1.12)$$

式中  $h$ ——毛管水上升高度;

$n$ ——孔隙率;

$S$ ——单位体积的毛细管表面积;

$\eta$ ——液体黏滞系数;

$T$ ——液体表面张力;

$\rho$ ——土的密度;

$g$ ——重力加速度。

对于渗透性很低的软土, 可通过由压缩试验测定的  $C_v$  计算, 即