



普通高等教育土建类规划教材

岩石力学 基础教程

● 侯公羽 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育土建类规划教材
中国矿业大学（北京）“地下工程”系列规划教材

岩石力学基础教程

主编 侯公羽
参编 李 涛 刘 波 牛晓松



机械工业出版社

本书分4部分共计10章。第1部分重点介绍了岩石与岩体的基本概念、岩石的基本物理、力学性能(第1、2、3章);第2部分重点介绍了结构面、岩体的基本力学性能及地应力(第4、5、6章);第3部分重点介绍了岩石力学基本理论在岩石地下工程、岩石边坡工程、岩石地基工程中的应用(第7、8、9章),突出介绍了岩石地下工程的稳定性分析与力学计算问题;第4部分重点介绍了智能岩石力学、细观岩石力学、卸荷岩石力学等新理论、新方法与新进展(第10章)。

本书可作为涉及岩石地下工程的各专业本科生的通用教材,也可作为土木工程、水利工程、石油工程、地质工程、交通运输工程等专业的本科生教材,以及相关专业教师、科研人员和工程技术人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学基础教程/侯公羽主编.—北京:机械工业出版社,2010.12
普通高等教育土建类规划教材
ISBN 978-7-111-31954-2

I. ①岩… II. ①侯… III. ①岩石力学—高等学校—教材
IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第183763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

版式设计:张世琴 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·359千字

标准书号:ISBN 978-7-111-31954-2

定价:28.00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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

序

地下工程是随着国民经济建设及城市化发展需要应运而生的土木工程类专业的一个重要领域，是高等学校土木工程学科中极其重要而又人才短缺的本科专业方向。

中国矿业大学(北京)的土木工程学科是在原矿山建设工程专业基础上发展起来的，矿山建设工程专业一直是我校的传统优势学科，在1999年专业调整中，矿山建设工程更名为“岩土工程”。2007年以中国矿业大学和中国矿业大学(北京)的岩土工程学科为主建成了“深部岩土力学与地下工程”国家重点实验室。地下工程方向是中国矿业大学(北京)土木工程类专业的传统优势学科，在矿山建设工程、深部地下工程、城市地下工程等领域拥有良好的人才培养软、硬件环境和教学条件、在相关研究领域拥有坚实的研究基础和多项国家级科技奖励、国家级教学研究成果。

鉴于此，在总结多年矿山建设工程和城市地下工程的教学经验和科学研究的基础上，中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院组织了学校长期从事地下工程教学和科学研究的专家，规划和编写了具有矿山建设与地下工程特色的“地下工程”系列规划教材，以促进培养工程实践能力强和创新能力强的应用复合型人才及研究发展型人才，努力探索基于研究的教学和以探索为本的学习机制，引导学生在研究和开发中学习。根据地下工程课程培养体系的要求、课程培养规律和学科知识层次，本系列规划教材分为岩石力学基础教程、土力学、基础工程、矿山建设工程、城市地下工程等几个方面，全面覆盖了地下工程专业培养体系的范畴，满足学生学习和教师教学的需求。

地下工程是一个复杂的系统工程，因此本系列规划教材注重强调创新的理念——系统性、集成性、过程性、信息性，始终贯穿地下工程的设计、施工与管理的思想；同时，注重理论与工程实际结合，强调解决地下工程的实际问题，努力培养学生的实际动手能力。

本系列规划教材内容精炼、合理，可供土木工程、市政工程、水利水电工程，采矿工程、冶金工程、地质勘探工程等专业本科生、研究生和教师以及相关工程技术人员参考使用。

本系列规划教材由中国矿业大学(北京)单仁亮教授负责总体规划、统筹协调和部分具体的编写工作。

在本系列规划教材编写过程中，得到了中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院、教务处等部门的大力支持与帮助，在此表示最诚挚的谢意！

编 者

前 言

岩石力学是与地质学科和力学学科相结合的一门边缘学科。岩石力学的应用对象是基础工程建设和自然资源的开发,因此与相关工程科学的结合是必然的。随着国内外岩石工程建设的不断发展,工程规模和复杂程度的不断加大,促进了岩石力学的飞速发展——理论研究获得重大突破、工程实践经验得以系统地总结和提升。同时,大量的岩石工程建设,对岩石力学人才的培养、岩石力学课程建设等亦提出了更高的要求。

本书是在中国矿业大学(北京)十余年的岩石力学课程讲义的基础上、参考兄弟院校的最新教材成果编写而成,定位于普通高等院校岩石力学课程的基础教材。本书力求反映岩石力学的基本概念、基本原理、基本内容以及最新研究思想与进展,力求基础性、系统性、完整性与前沿性、实践性的统一,引导学生融会贯通、学以致用,提高学生运用所学内容简单地分析乃至解决岩石工程中简单的工程实际问题的能力。

本书内容分4部分共计10章。第1部分重点介绍了岩石与岩体的基本概念、岩石的基本物理、力学性能(第1、2、3章);第2部分重点介绍了结构面、岩体的基本力学性能及地应力(第4、5、6章);第3部分重点介绍了岩石力学基本理论在岩石地下工程、岩石边坡工程、岩石地基工程中的应用(第7、8、9章),突出介绍了岩石地下工程的稳定性分析与力学计算问题;第4部分重点介绍了智能岩石力学、细观岩石力学、卸荷岩石力学等新理论、新方法与新进展(第10章)。

本书可作为涉及岩石地下工程的各专业本科生的岩石力学课程的通用教材,也可作为土木工程、水利工程、石油工程、地质工程、交通运输工程等专业的本科生教材,以及高等院校相关专业教师、相关部门的科研人员和工程技术人员的技术参考书。

本书由中国矿业大学(北京)侯公羽教授主编。各章节分工为:侯公羽(第1、3、5、7、10章,及第4章的4.3~4.6节);李涛(第2、8、9章,及配套的电子课件制作);刘波(第6章);牛晓松(第4章的4.1、4.2、4.7节)。研究生张华栋、裘彬、刘宏伟等为本书的顺利编写查阅、整理了大量的文献资料,并参与了书稿的校对清样工作。

本书所用资料,不限于书后所列的文献资料,限于教材编写之特点,未能一一详尽提及。在此谨向提及与未提及的所有单位和作者表示感谢。

限于水平,书中难免有欠妥之处,敬请读者、同仁批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石与岩体	1
1.2 岩石力学的研究范畴与内容	2
1.3 岩石力学的研究方法	4
1.4 岩石力学涉及的两大学科——地质学 和力学	5
1.5 岩石力学的发展与未来	5
复习思考题	8
第 2 章 岩石的基本物理性质	9
2.1 岩石的重度和密度	9
2.2 岩石的空隙性	10
2.3 岩石的水理性质	11
2.4 岩石的热学性质	15
复习思考题	17
第 3 章 岩石的基本力学性质	18
3.1 岩石的强度性质	18
3.2 岩石的变形性质	28
3.3 岩石的弹性本构关系	34
3.4 岩石的强度准则	35
3.5 岩石的流变性质	45
复习思考题	59
第 4 章 岩体的基本力学性能	61
4.1 岩体结构面的几何特征与分类	61
4.2 岩体结构面的自然特征与描述	62
4.3 岩体结构面的变形特性	66
4.4 结构面的强度特性	69
4.5 岩体的强度及其影响因素分析	71
4.6 岩体的变形性质	78
4.7 岩体的水力学性质	82

复习思考题	85
-------------	----

第 5 章 工程岩体的分类	86
5.1 工程岩体分类的目的与原则	86
5.2 工程岩体代表性分类简介	88
5.3 我国工程岩体分级标准 (GB 50218— 1994)	94
5.4 国内外不同行业工程岩体分级标准	98
5.5 岩石分类 (级) 标准的有效应用	103
复习思考题	103
第 6 章 地应力	104
6.1 地应力的概念与意义	104
6.2 地应力的主要分布规律	107
6.3 高地应力区域的主要岩石力学问题	110
6.4 地应力测量方法	116
复习思考题	123
第 7 章 岩石力学在地下工程中的 应用	125
7.1 围岩二次应力状态的基本概念	125
7.2 深埋圆形洞室围岩二次应力状态的 弹性分析	126
7.3 深埋圆形洞室围岩二次应力状态的 弹塑性分析	136
7.4 节理岩体中深埋圆形洞室的剪裂区及 应力分析	142
7.5 围岩压力成因及影响因素	144
7.6 地下洞室围岩压力及稳定性验算	148
7.7 松散岩体的围岩压力计算	151
7.8 新奥法简介	157
7.9 立井围岩压力计算	161
7.10 斜巷围岩压力计算	164
7.11 围岩—支护相互作用流变变形机制的 概念模型建立与分析	165

复习思考题	168	9.2 岩基变形与沉降计算	196
第 8 章 岩石力学在边坡工程中的		9.3 岩石地基的承载力	201
应用	169	9.4 岩基的抗滑稳定分析	208
8.1 岩质边坡的应力分布特征	169	9.5 岩基的加固	210
8.2 岩质边坡变形与破坏类型	171	复习思考题	211
8.3 岩质边坡稳定性分析	177	第 10 章 岩石力学新理论与新方法	212
8.4 岩质边坡加固简介	189	10.1 智能岩石力学	212
复习思考题	191	10.2 细观岩石力学	215
第 9 章 岩石力学在基础工程中的		10.3 卸荷岩石力学	219
应用	193	复习思考题	225
9.1 岩基的类型及其应力分布特征	193	参考文献	226

第1章 绪 论

岩石力学(Rock Mechanics)是近代发展起来的一门新兴学科和边缘学科,是一门应用性和实践性很强的应用基础学科。它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁路、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多与岩石工程相关的工程领域。一方面,岩石力学是上述工程领域的理论基础;另一方面,正是上述工程领域的实践促进了岩石力学的诞生和发展。

1966年,美国科学院岩石力学委员会对岩石力学给予以下定义:“岩石力学是力学的一个分支,是研究岩石力学性状,探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的一门理论和应用学科”。

由于科学技术的发展,岩块与岩体已有严格的区分。但是,作为一门学科发展至今天,岩石力学既包含岩块的力学问题又包含岩体的力学问题,因此,本书作以下约定:①岩石为不分“岩体”和“岩块”时的统称;②岩体=岩块+结构面;③岩体中由结构面分割包围的即是岩块。

1.1 岩石与岩体

地球体的表层称为地壳,其上部最基本的物质是由岩石所构成,人类的一切生活和生产实践活动,都局限在地壳的最表层范围内,因而岩石和由岩石风化形成的土构成了人类生存的物质基础以及生活和生产实践活动的环境。

岩石是由矿物或岩屑在地质作用下按一定的规律聚集而成的自然物体。岩石有其自身的矿物成分、结构与构造。所谓矿物,是指存在于地壳中的具有一定化学成分和物理性质的自然元素和化合物,其中构成岩石的矿物称为造岩矿物。如常见的石英(SiO_2)、正长石($\text{KAl-Si}_3\text{O}_8$)、方解石(CaCO_3)等。它们绝大部分是结晶质的。所谓岩石的结构,是指组成岩石最主要的物质成分、颗粒大小和形状以及其相互结合的情况。例如,沉积岩内存在有碎屑结构、泥质结构和生物结构等结构特征。所谓岩石的构造,是指组成成分的空间分布及其相互间的排列关系。代表性结构如沉积岩中的层理构造和变质岩中的片理构造等。岩石中的矿物成分和性质、结构、构造等的存在和变化,都会对岩石的物理力学性质产生影响。

岩石按其成因可分为三大类:岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩浆岩是岩浆冷凝而形成的岩石。绝大多数的岩浆岩是由结晶矿物所组成的,由非结晶矿物组成的岩石很少。由于组成岩浆岩的各种矿物的化学成分和物理性质较为稳定,它们之间的联结是牢固的,因此岩浆岩通常具有较高的力学强度和均质性。

沉积岩是由母岩(岩浆岩、变质岩和早已形成的沉积岩)在地表经风化剥蚀而产生的物质,通过搬运、沉积和硬结成岩作用而形成的岩石。组成沉积岩的主要物质成分为颗粒和胶结物。颗粒包括各种不同形状及大小的岩屑及某些矿物。胶结物常见的成分为钙质、硅质、铁质以及泥质等。沉积岩的物理力学特性不仅与矿物和岩屑的成分有关,而且与胶结物的性质有很大的关系。例如,硅质、钙质胶结的沉积岩其胶结强度较大,而泥质胶结的沉积岩和一些黏土岩其强度就较小。另外,由于沉积环境的影响,沉积岩具有层理构造,这就使得沉积岩沿不同方向表现出不同的力学性能。

变质岩是由岩浆岩、沉积岩和早已形成的变质岩在地壳中受到高温、高压及化学活动性流体的影响下发生变质而形成的岩石。它在矿物成分、结构构造上具有变质过程中所产生的特征，也常常残留有原岩的某些特点。因此，其物理力学性能不仅与原岩的性质有关，而且与变质作用的性质及变质程度有关。

岩石的物理力学性能指标是在试验室里按一定的条件和标准对岩石试件进行试验而测定的。这种岩石试件是在钻孔中获取的岩芯或是在工程中用爆破以及其他方法所获得的岩块经加工而制成的。用这种方法所采集的标本仅仅是自然地质体中的岩石小块，称为岩块。岩块就成了相应岩石的代表。平时所称的岩石，大部分都是指的岩块。因为岩块是不包含有显著弱面的岩块体，所以通常都把它作为连续介质及均质体来看待。

在地壳的自然地质体中，除了岩块为主要组成部分外，还含有各种节理、裂隙、孔隙、孔洞等，这些自然地质体经历了漫长的地质历史过程，经受过各种地质作用。在地应力的长期作用下，在地质体内部保留了各种各样的永久变形和地质构造形迹，使地质体内部存在着各种各样的地质界面，如不整合、褶皱、断层、层理、片理、劈理和节理等。因而，自然地质体中所包含的内容比岩块要广泛得多。在岩石力学中，通常将在一定工程范围内的自然地质体称为岩体。这就是说，岩体的概念是与工程联系起来的。岩体内存在各种各样的节理裂隙称之为结构面。所谓结构面，是指具有极低的或没有抗拉强度的不连续面，包括一切地质分离面。被结构面切割成的岩块称之为结构体，结构面与结构体组成岩体的结构单元。结构面的存在使岩体具有不连续性，因而，这类岩体被称为不连续岩体，也被称为节理岩体。一般来说，结构面是岩体中的软弱面，由于它的存在，增加了岩体中应力分布及受力变形的复杂性。同时，还降低了岩体的力学强度和稳定性能。

由此可见，岩体是由岩块和各种各样的结构面共同组成的综合体。对岩体的强度和稳定性能起作用的是岩块与结构面的综合体。在大多数情况下，结构面所起的作用更大。许多工程实践表明，在某些岩石强度很高的洞室工程、岩基或岩坡工程中，发生大规模的变形破坏，甚至崩塌、滑坡，分析其原因，不是岩石强度不够，而是岩体的整体强度不够，岩体中结构面的存在将大大地削弱岩体整体强度，导致稳定性的降低。

结构面是岩体内的主要组成单元，岩体的好坏，与结构面的分布、性质和力学特性有密切关系。特别是结构面的产状、切割密度、粗糙度、起伏度、延展性和黏结力以及充填物的性质等都是评定岩体强度和稳定性能的重要依据。

1.2 岩石力学的研究范畴与内容

1.2.1 岩石力学的研究范畴

岩石力学的研究范畴主要有以下四个方面：

(1) 基本原理研究 包括岩石的地质力学模型和本构规律，岩石的连续介质和不连续介质力学原理，岩石的破坏、断裂、蠕变、损伤的机理及其力学原理，岩石力学参数辨识与力学机制建模，岩石计算力学。

(2) 试验研究 包括室内和现场的岩石和岩体的力学试验原理、内容和方法，模拟试验，动静荷载作用下的岩石和岩体力学性能的反应，各项岩石和岩体物理力学性质指标的统计和分析，试验设备与技术的改进，现场监测技术。

(3) 应用研究 包括地下工程、采矿工程、地基工程、斜坡工程、岩石破碎和爆破工程、地震工程、岩体加固等方面的应用。

(4) 监测研究 通常量测岩石应力和变形变化、蠕变、断裂、损伤以及承载能力和稳定性等项目及其各自随着时间的延长而变化的特性,预测各项岩石力学数据。

综上所述,岩石力学的研究范畴是非常广泛的,而且具有相当大的难度。要完成这些研究,必须从实践中总结岩石工程方面的经验,不断地提高理论分析水平和技术,再应用到工程实践中去,解决实践中提出的有关岩石工程的问题,这就是解决岩石力学问题的最基本的原则和方法。

1.2.2 岩石力学的研究内容

(1) 岩石与岩体的地质性质研究 这是表征岩石的力学性能的基础,岩石的物理力学性质指标是评价岩石工程稳定性的最重要的依据。通过室内和现场试验获取各项物理力学性质数据,研究各种试验的方法和技术,静、动荷载下岩石力学性能的变化规律,这方面的基本内容在第2~4章讨论。

(2) 岩石的地质力学模型及其特征研究 这是岩石力学分析的基础和依据。研究岩石和岩体的成分、结构、构造、地质特征和分类,岩体的自重应力、天然应力、工程应力以及赋存于岩体中的各类地质因子,如水、气、温度和各种地质形迹等,以及它们对岩体的静、动力学特性的影响。这方面的基本内容在第5、6章中讨论。

(3) 岩石力学在各类工程中的应用研究 岩石力学在工程中的应用是非常重要的,在许多重大工程中更显出其重要性。洞室围岩、岩基和岩坡等的稳定与安全都与岩石力学的恰当应用密切相关。

过去由于岩体不稳定而发生事故的例子不少,如岩坡失稳事故、坝基失稳事故等。此外,洞室围岩崩塌、岩爆、矿山地表沉陷和开裂以及房屋岩基的失稳等,在我国的工程建设中也时有发生。

为了防止重大岩石工程事故发生,保证工程顺利施工,必须对岩石工程进行系统的岩石力学试验及理论研究和分析,预测岩石与岩体的强度、变形和稳定性,为工程设计提供可靠的数据和材料。

岩石力学在岩石工程中的应用有以下几个方面:

(1) 地下工程的稳定性研究 包括地下工程开挖引起的围岩应力重分布、围岩变形、围岩压力以及围岩加固等的理论与技术,在第7章讨论。

(2) 岩坡的稳定性研究 包括天然边坡与人工边坡的稳定性,岩坡的应力分布、变形和破坏,岩坡的失稳等的理论与技术,在第8章讨论。

(3) 岩基的稳定性研究 包括在自然力和工程力作用下,岩基中的应力、变形、承载力和稳定性等的理论与技术,在第9章讨论。

(4) 岩石力学的新理论、新方法的研究 当今各门学科发展很快,岩石力学理论的发展要充分利用其他学科的成果。岩体本身已很复杂,再加上天然和工程环境的影响,直接进行力学计算有时难以获取可靠结果,而且有些数据又一时难以从试验中得到,因而,岩石力学在20世纪70年代后期,兴起了反演分析技术。20世纪80年代末,伴随思维方法的变革而提出的不确定性系统分析方法、智能岩石力学等,为大型岩石工程分析和设计提供了有效的方法与手段。为使基础数据的采集更全面和深入,发展和采用了新的探测和实验技术,如

遥感技术、切层扫描技术、三维地震 CT 成像技术、高精度地应力测量技术、高温高压刚性伺服岩石试验系统和多功能高效率原位岩体测试系统等。现场检测除采用常规手段外，正大力发展和完善 GPS 检测技术、声发射和微振检测技术、岩体能量聚集和破裂损伤探测技术等。

此外，流变学、断裂力学、损伤力学及一些软科学近年来发展很快。无疑，岩石力学将利用这些新兴的理论、方法和试验技术来发展自己。第 10 章对智能岩石力学、细观岩石力学、卸荷岩石力学等将作简要的介绍。

1.3 岩石力学的研究方法

岩石力学的研究方法是采用科学实验、理论分析与工程紧密结合的方法。

科学实验是岩石力学研究工作的基础，这是岩石力学研究中的第一手资料。岩石力学工作的第一步就是对现场的地质条件和工程环境进行调查分析，建立地质力学模型，进而开展室内外的物理力学性质试验、模型试验或原型试验，作为建立岩石力学的概念、模型和分析理论的基础。

岩石力学的理论是建立在科学实验的基础上的。由于岩体具有结构面和结构体的特点，所以要建立岩体的力学模型，以便分别采用如下的力学理论：连续介质或非连续介质理论；松散介质或紧密固体理论；在此基础上，按地质和工程环境的特点分别采用弹性理论、塑性理论、流变理论以及断裂、损伤等力学理论进行计算分析。采用哪种理论作为岩石力学的研究的依据是非常重要的，否则，将会导致理论与实际相脱离。当然，理论的假设条件与岩体实况之间存在着一定的差距，但应尽量缩小其距离。目前，尚有许多岩石力学问题，应用现有的理论、知识，仍然不能得到完善的解答。因此，紧密地结合工程实际，重视实践中得来的经验，发展上升为理论或充实理论，这是发展岩石力学理论和技术的基本方法。

现代计算技术的迅速发展，计算机已广泛地应用于岩石力学的计算中，这不仅为岩石力学的分析解决了复杂的计算问题，而且为岩石力学的数值法提供了有效的计算工具。目前，力学范畴的数值法（如有限元、离散元、边界元等）已在岩石力学中得到普遍的应用。

研究岩石力学的步骤可用图 1-1 所示的框图表示。其中，框图的内容和步骤视岩石工程的特点和需要可作调整。

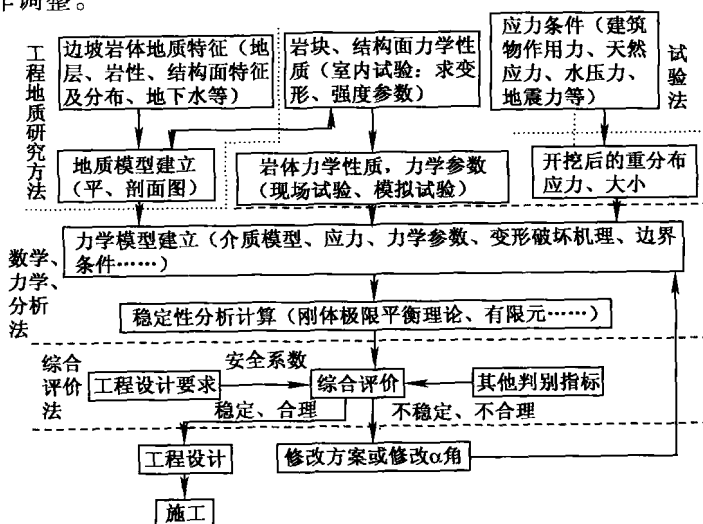


图 1-1 岩石力学研究步骤的框图（以边坡为例）

1.4 岩石力学涉及的两大学科——地质学和力学

1.4.1 地质学在岩石力学中的作用

岩石本身是一种地质材料,这种材料的属性是由于地质历史和地质环境影响形成的,所以在研究岩石的力学问题时,首先要进行地质调查,利用地质学所提供的基本理论和研究方法来帮助解决岩石力学问题。岩石力学与工程地质学紧密相关。

此外,岩体中含有节理裂隙,并赋存地应力、水、气及其他地质作用的因子,它们对岩体的力学性质和稳定性影响很大。这就需要运用构造地质学和岩石学以及地球物理学等地质学科的理论技术和研究方法来自综合处理岩体的力学问题。

1.4.2 力学在岩石力学中的作用

岩石力学是力学学科中的一个分支,属固体力学范畴。但岩石有别于一般的致密固体。在力学学科的历史发展过程中,最初建立的是刚性体的力学规律,这就是理论力学。在自然界中,是没有不变形的固体的,因此,理论力学在岩石力学中的应用受到限制,但理论力学知识能提供物体运动规律和平衡条件,这为岩石力学奠定了一个非常重要的力学理论基础。

研究变形物体的固体力学有弹性力学、塑性力学和流变学等。岩石力学的变形研究是基于上述力学发展起来的。但工程岩体是一个多相体,且含有结构面和结构体等结构构造,许多岩体的力学性质具有非连续和非均质的特性,因而在利用一般变形物体的力学理论和方法时会受到限制。但是,对于岩块,采用上述力学作为基础理论来解决问题,一般认为是可行的,与实测结果的数据颇为接近。

天然的地质固体材料有岩石与土。土力学在 20 世纪初已成为一门学科,土力学的研究对象是土体。土是一种疏松的物质,具有孔隙和弱连接的骨架、受荷载后容易发生孔隙的减小而变形。而岩石则是致密固体,岩体则含有岩块和节理裂隙。岩石与土的结构、构造有很大的不同。岩石与岩体在受荷载后其变形是岩块本身及节理裂隙的变形以及岩块的变位。可见岩石力学与土力学各自的研究对象是不同的。但是,土与岩石有时是难以区分的,如某些风化严重的岩石、某些岩性特别软弱或胶结很差的沉积岩,它们既可称岩石,也可称土。因而,在此类岩石中,使用土力学的理论和方法往往会得到较为接近实际的结果。

1.5 岩石力学的发展与未来

1.5.1 岩石力学的发展简介

一门学科的诞生和发展都与当时的社会状况、经济发展和工业建设等有关。人类早就与岩石有密切关系。但直到 20 世纪中期,岩石力学才作为一门技术学科发展起来。

岩石力学研究的早期多为零星的研究,且多数借助土力学理论,发展缓慢。第一部出版的以《岩石力学》命名的专著,是 1934 年前苏联秦巴列维奇(п. м. цимбаревич)写的《Механика горных пород》。随后,由于岩石工程的增多,特别是在第二次世界大战后世界

各国在大量兴建各类岩石工程的背景下,促进了岩石力学的研究,并使其逐渐发展成一门独立学科——岩石力学。这门学科从20世纪50年代以来的发展过程中,出现了以地质力学为观点的地质力学岩石力学学派和以工程为观点的工程岩石力学学派。

地质力学岩石力学派称奥地利学派又称萨尔茨堡学派,是由缪勒(L. Muller)和斯体尼(J. Stini)开创的。此学派偏重于地质力学方面,主张岩块与岩体要严格区分;岩体的变形不是岩块本身的变形,而是岩块移动导致岩体的变形;否认小岩块试件的力学试验,主张通过现场(原位)力学测定,才能有效地获取岩石力学的真实性。这个学派创立了新奥地利隧道掘进法(新奥法),为地下工程技术做了一项重大的技术革新,促进了岩石力学的发展。

工程岩石力学学派以法国塔洛布尔(J. Talober)为代表,该学派以工程观点来研究岩石力学,偏重于岩石的工程特性方面,注重于弹塑性理论方面的研究,将岩体的不均匀性概化为均质的连续介质,小岩块试件的力学试验与原位力学测试并举。塔洛布尔1951年著有《岩石力学》一书,是该学派最早的代表作。尔后,英国的耶格(J. C. Jaeger)于1969年按此观点又著有《岩石力学基础》一书,这是一本在国际上较为著名的著作。

在岩石力学的发展历史上,有几个阶段是有标志性成果的:

(1) 初始阶段(19世纪末至20世纪初)——对地应力进行了估算

1) 海姆的静水压力理论 $\sigma_v = \sigma_h = \gamma H$

2) 朗金的侧压理论 $\sigma_v = \gamma H$, $\sigma_h = \lambda \gamma H$, $\lambda = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$

3) 金尼克的侧压理论 $\sigma_v = \gamma H$, $\sigma_h = \lambda \gamma H$, $\lambda = \frac{\nu}{1 - \nu}$

(2) 经验理论阶段(20世纪初至20世纪30年代)——对围岩压力进行了估算

1) 普罗托吉雅克诺夫—普氏理论:顶板围岩冒落的自然平衡拱理论。

2) 太沙基理论:塌落拱理论。

(3) 经典理论阶段(20世纪30~60年代)——这是岩石力学形成的重要阶段

1) 弹性力学、塑性力学和流变理论被引入岩石力学,导出经典计算公式。

2) 形成围岩与支护体共同作用理论,结构面影响受到重视。

3) 实验方法完善。

4) 连续介质理论特点与不足。

5) 后来的有限单元方法被引入。

6) 地应力测量受到重视。

7) 形成地质力学理论与学派。

8) 形成工程岩石力学学派。

(4) 现代发展阶段(20世纪60年代至今)——以非线性问题为主

1) 现代力学、数学、计算机数值分析方法的广泛应用。

2) 流变学、断裂力学、非连续介质、数值方法、人工智能、神经网络、专家系统。

3) 损伤力学、离散元法、DDA法、数值流形分析。

4) 非线性理论、分叉混沌理论等。

1959年法国乌尔帕塞拱坝坝基失事和1963年意大利瓦依昂水库岩坡滑动,震动了世界各国从事岩石工程的工作者,因此,成立了“国际岩石力学学会”,并于1966年在里斯本

召开了第一次国际岩石力学大会。从此，每四年召开一次会议，并出版了相应的刊物，对促进岩石力学的发展起到了很大的作用。

国际上有关岩石力学的期刊，主要有以下 3 种：

1) 在英国伦敦出版的《国际岩石力学与采矿科学杂志及岩土力学文摘》(International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts)，1963 年创刊。

2) 在美国出版的《岩石力学与岩石工程》(Rock Mechanics and Rock Engineering)，1969 年创刊。

3) 在英国出版的《国际岩土力学数值及解析方法杂志》(International Journal for Analytical Methods in Geomechanics)，1976 年创刊。

1.5.2 我国岩石力学的发展概况

在我国，岩石力学作为一门专门学科起步较晚，尽管我们的祖先曾创建过震动全世界的工程建设，如都江堰、自贡深达数百米的盐井、万里长城等。回顾我国岩石力学的发展，大体上可划分为三个阶段：

第一阶段，20 世纪 50 年代至 60 年代中期，这一时期，我国也建设了一些中、小型的岩石工程，也进行了与其相适应的岩石力学试验研究工作，但这时期的理论和实验研究与国外相似，是运用材料力学、土力学、弹塑性理论等作为基础来开展的。1958 年三峡岩基组的成立，开始了岩石力学研究的系统规划和实施。这一时期是我国岩石力学发展处于萌芽阶段。

第二阶段，20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期，由于大部分工程停建和缓建，岩石力学发展非常缓慢。

第三阶段，20 世纪 70 年代后期至今，在改革开放的大潮中，各项大规模工程的不断涌现，也提出了许多岩石力学的新课题，使岩石力学进入了一个全面的蓬勃发展的新阶段。我国岩石工程工作者结合我国的重大工程，为提高岩石力学的理论水平和测试技术，开展了大规模的研究工作，总结了一系列成功的经验与失败的教训，不仅成功地解决了像葛洲坝工程和三峡工程、湖北的大冶和江西德兴的露天矿场、秦山核电站岩基与高边坡以及铁道交通的长大隧洞工程等一系列岩石工程问题，而且在岩石力学理论研究方面(如岩体结构、岩石流变以及岩坡和围岩稳定性研究等)皆有重大成就，这些成就在国际上已产生重大的影响，并占有了重要的学术地位。

自 1978 年以来，我国陆续成立了分属各有关学会的岩石力学专业机构，如中国土木工程学会的隧道及地下工程分会和土力学及岩土工程分会、中国水利学会岩土力学专业委员会、中国力学学会土力学专业委员会、中国煤炭学会岩石力学专业委员会等。1985 年，我国正式成立了中国岩石力学与工程学会。

我国主要的岩石力学期刊有《岩土工程学报》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》、《地下空间与工程学报》等。

自 20 世纪 70 年代末期，国内许多高校相继出版了《岩石力学》或《岩体力学》教材。

上述工作和成就，对推动我国岩石力学学科的发展和学术水平的提高起到了积极的作用。

1.5.3 岩石力学与工程的发展前景

1. 工程发展

- 1) 水利枢纽工程、水电站大坝。
- 2) 地下厂房、储油库。
- 3) 露天矿边坡。
- 4) 深井开采。
- 5) 跨海隧道。

2. 前沿课题

- 1) 计算机数值模型、有限元位移反分析方法、有限元强度折减法。
- 2) 流变模型、流变实验、大变形理论、巷道流变大变形控制技术。
- 3) 非线性模型的唯一性、非线性方法、人工智能。
- 4) 裂隙化岩体的强度、破坏机理及破坏判据问题。
- 5) 岩体结构与结构面的仿真模拟、力学表述及其力学机理问题。
- 6) 岩体结构整体综合仿真反馈系统与优化技术。
- 7) 岩体与工程结构的相互作用与稳定性评价问题。
- 8) 软岩的力学特性及其岩体力学问题。
- 9) 高地应力岩石力学问题。
- 10) 水-岩-应力耦合作用及岩体工程稳定性问题。
- 11) 岩体动力学、水力学与热力学问题。

复习思考题

- 1-1 解释岩石与岩体的概念，指出两者的主要区别与联系。
- 1-2 岩石的结构与岩石的构造有何不同？
- 1-3 岩体的力学特征是什么？
- 1-4 自然界中的岩石按地质成因分类可分为几大类？各有什么特点？
- 1-5 简述岩石力学的研究范畴与内容。
- 1-6 岩石力学的研究方法有哪些？

第2章 岩石的基本物理性质

岩石的物理性质是岩石力学研究的最基本的内容,其性质指标也是岩石力学研究和岩石工程设计的基本参数与依据。

岩石由固体、液体和气体三相介质组成,其物理性质是指因岩石三相组成部分的相对比例关系不同所表现出来的物理状态。与工程密切相关的物理性质参数有密度、重度、相对密度、孔隙比、水理性、抗冻性、抗风化性及热学性质等。

2.1 岩石的重度和密度

岩石单位体积(包括岩石空隙体积)的重量,称为岩石的重度。根据岩石试样的含水情况不同,岩石重度可以分为天然重度、干重度和饱和重度,分别用 γ 、 γ_d 、 γ_{sat} 表示。

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{W}{V} = \frac{W_r + W_w}{V_a + V_r} \\ \gamma_d &= \frac{W_r}{V} = \frac{W_r}{V_a + V_r} \\ \gamma_{sat} &= \frac{W}{V} = \frac{W_r + V_a \gamma_w}{V} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中, W 为岩石试样的总重量; W_r 为岩石的重量; W_w 为岩石试样空隙中水的重量; V 为岩石试样的总体积; V_r 为岩石的体积(不包含岩石中空隙); V_a 为岩石试样中空隙的体积; γ_w 为水的重度。

岩石单位体积(包括岩石空隙体积)的质量称为岩石的密度。根据岩石试样的含水情况不同,岩石密度可分为天然密度、干密度和饱和密度,分别用 ρ 、 ρ_d 、 ρ_{sat} 表示。如果设岩石试样的总质量(包括空隙中的水)为 m ,岩石的质量为 m_r ,岩石试样空隙中水的质量为 m_w , ρ_w 为水的密度,则岩石的天然密度、干密度和饱和密度可分别用下式表示

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V} = \frac{m_r + m_w}{V_a + V_r} \\ \rho_d &= \frac{m_r}{V} = \frac{m_r}{V_a + V_r} \\ \rho_{sat} &= \frac{m}{V} = \frac{m_r + V_a \rho_w}{V} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

岩石密度与重度之间存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \rho g \\ \gamma_d &= \rho_d g \\ \gamma_{sat} &= \rho_{sat} g \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中, g 为重力加速度。

描述岩石的密度还有相对密度的概念。所谓岩石的相对密度(d)是指岩石的干重量(或干质量)除以岩石的实体体积(不包括空隙)所得值与 4℃ 时纯水的重度 γ_w (或密度 ρ_w)之比值,即

$$d = \frac{W_r}{V_r \gamma_w} = \frac{m_r}{V_r \rho_w} \tag{2-4}$$

岩石的重度、密度与相对密度主要取决于组成岩石的矿物成分、空隙情况及其含水量。表 2-1 列出了某些岩石的重度、密度与相对密度值。从表中可以看出岩石的重度一般为 26.5 ~ 28.0kN/m³, 相对密度为 2.50 ~ 3.00, 密度为 2300 ~ 3300kg/m³。

表 2-1 常见岩石的物理性质指标

岩石类型	重度/(kN/m ³)	密度/(kg/m ³)	相对密度	孔隙率(%)	吸水率(%)	软化系数
花岗岩	26.0 ~ 27.0	2300 ~ 2800	2.50 ~ 2.84	0.5 ~ 1.5	0.1 ~ 4.0	0.72 ~ 0.97
闪长岩	26.0 ~ 30.0	2520 ~ 2960	2.85 ~ 3.00	0.2 ~ 0.5	0.3 ~ 5.0	0.60 ~ 0.80
辉绿岩	25.0 ~ 29.0	2530 ~ 2970	2.60 ~ 2.10	0.3 ~ 5.0	0.8 ~ 5.0	0.33 ~ 0.90
辉长岩	25.2 ~ 29.7	2550 ~ 2980	2.70 ~ 3.00	0.3 ~ 4.0	0.5 ~ 4.0	0.10 ~ 0.20
安山岩	22.0 ~ 26.8	2300 ~ 2700	2.65 ~ 2.85	1.1 ~ 4.5	0.3 ~ 4.5	0.81 ~ 0.91
玢岩	23.0 ~ 27.6	2400 ~ 2800	2.64 ~ 2.90	2.1 ~ 5.0	0.4 ~ 1.7	0.78 ~ 0.81
玄武岩	24.0 ~ 30.8	2500 ~ 3100	2.50 ~ 2.15	0.5 ~ 7.2	0.3 ~ 2.8	0.30 ~ 0.95
凝灰岩	22.0 ~ 24.7	2290 ~ 2500	2.20 ~ 2.50	1.5 ~ 7.5	0.5 ~ 7.5	0.52 ~ 0.86
砾岩	23.0 ~ 26.2	2400 ~ 2660	2.30 ~ 2.60	0.8 ~ 10.0	0.3 ~ 2.4	0.50 ~ 0.96
砂岩	21.5 ~ 27.0	2200 ~ 2710	2.20 ~ 2.70	1.6 ~ 28.0	0.9 ~ 9.0	0.65 ~ 0.97
页岩	22.0 ~ 26.0	2300 ~ 2620	2.30 ~ 2.60	0.4 ~ 10.0	0.5 ~ 2.2	0.24 ~ 0.74
石灰岩	22.5 ~ 27.0	2300 ~ 2770	2.30 ~ 2.70	0.5 ~ 27.0	0.1 ~ 4.5	0.70 ~ 0.94
泥灰岩	20.5 ~ 26.8	2100 ~ 2780	2.10 ~ 2.68	1.0 ~ 10.0	0.5 ~ 3.0	0.44 ~ 0.54
白云岩	20.0 ~ 26.5	2100 ~ 2700	2.00 ~ 2.62	0.3 ~ 25.0	0.1 ~ 3.0	0.80 ~ 0.96
片麻岩	22.4 ~ 29.5	2300 ~ 3000	2.30 ~ 3.00	7.0 ~ 2.2	0.1 ~ 0.7	0.75 ~ 0.97
石英片岩	20.4 ~ 26.7	2100 ~ 2700	2.10 ~ 2.69	0.3 ~ 3.0	0.1 ~ 0.3	0.44 ~ 0.84
绿泥石片岩	21.0 ~ 28.2	2100 ~ 2850	2.10 ~ 2.77	0.8 ~ 2.1	0.1 ~ 0.6	0.53 ~ 0.69
千枚岩	26.7 ~ 28.3	2710 ~ 2860	2.60 ~ 2.80	0.4 ~ 3.6	0.5 ~ 1.8	0.67 ~ 0.96
泥质板岩	22.8 ~ 27.8	2300 ~ 2800	2.29 ~ 2.78	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.3	0.39 ~ 0.52
大理岩	25.8 ~ 26.5	2600 ~ 2700	2.58 ~ 2.70	0.1 ~ 6.0	0.1 ~ 1.0	0.75 ~ 0.95
石英岩	23.6 ~ 27.6	2400 ~ 2800	2.40 ~ 2.76	0.1 ~ 8.7	0.1 ~ 1.5	0.94 ~ 0.96

2.2 岩石的空隙性