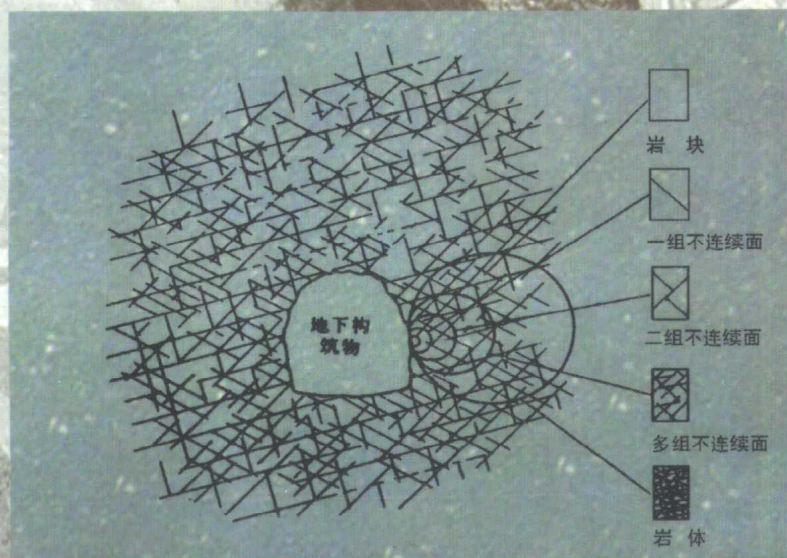


中国地质大学“211工程”建设重点资助教材

岩体力学

刘佑荣 唐辉明 编著



中国地质大学出版社

内容简介

全书分十章,包括:绪论,岩块和岩体的地质特征,岩石的物理、水理及热学性质,岩块的变形与强度性质,结构面的变形与强度性质,岩体的力学性质,岩体中的天然应力,地下洞室、边坡及地基岩体稳定性分析。

本书是作者在总结自己多年教学经验基础上,博采近年来国内外同类教材之所长,同时反映了本学科最新研究成果,较系统全面地介绍了岩体力学基本理论、基本知识及其在工程上的应用。全书体系合理,内容充实、新颖,实用性强,叙述清楚,深入浅出。

本书可作为岩土工程、地质工程、工业民用建筑、地下建筑及环境工程专业本科生教材,亦可供高等院校有关专业师生及从事相关专业工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体力学/刘佑荣,唐辉明编著. —武汉:中国地质大学出版社,1999.9

ISBN7-5625-1429-1

I. 岩…

II. ①刘…②唐…

III. 力学-岩体

IV. TU45

岩体力学

刘佑荣 唐辉明编著

责任编辑:张晓红

责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路31号)

邮编:430074

电话:(027)87482760

传真:87803537

E-mail:cho@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

开本 787×1092 1/16

字数:360千字 印张:13.875

版次:1999年9月第1版

印次:1999年9月第1次印刷

印刷:武汉测绘院印刷厂

印数:1—2000册

ISBN 7-5625-1429-1/TU·18

定价:18.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

《岩体力学》作为岩土工程、水利水电工程及建筑工程专业本科生的专业基础课。本教材按50学时授课内容编写,全书分十章。主要介绍岩块、结构面与岩体的基本地质特征及物理、力学性质和岩体天然应力等基本理论及其在地下工程、边坡工程及地基工程中的应用。

为适应本科生的知识结构及使用专业的特点,本教材编写遵循以下原则:①岩体作为力学介质或材料研究时,与其他力学介质的根本区别在于,岩体是一种多裂隙、非均质、各向异性、非连续的三相介质,并赋存于一定的地质环境(天然应力、地温及地下水等)中。因而,可将岩体视为岩块和结构面网络组成的地质体。因此,在本课程教学中,应力图使学生建立岩体的基本概念,并贯彻始终。②注重培养学生分析思维和解决岩体力学问题的能力,即按体现工程地质模型—物理、力学模型—计算模型—岩体力学问题求解和评价的思路组织教材内容。③适当介绍岩体力学的最新研究成果和动向,帮助学生了解本学科的发展前沿。④结合国家现行规范、规程和标准组织教材内容,同时努力结合工程实践,编入适量的经验数据和实用方法。⑤本课程以课堂讲授为主,根据大纲要求还安排5~6次实验及3~4次课外习题,为此本课程还编有实验指导书和习题集,与之相配套。

本教材由刘佑荣、唐辉明主编,各章节分工为:刘佑荣编写第一、二、三、四、五、六、八章;唐辉明编写第七、九章;贾洪彪编写第十章。全书由刘佑荣、唐辉明统校定稿。

本书曾几易其稿。初稿完成后由编者所在教研室组织有关教师对书稿进行了评审,于1996年4月开始内部使用。在使用中曾发现不少错漏之处,并在重印中予以改正。由于使用情况良好及教学的需要,经校教材编审委员会批准正式出版。同时,还组织了国内同行专家对书稿进行了再次评审。评审组由杨裕云教授任主审(中国地质大学(武汉)),成员有:王园副教授(中国地质大学(武汉))、王建峰副教授(中国科学院力学研究所)、吴文副研究员(中国科学院武汉岩土力学研究所)及张荣堂副教授(武汉市城市建设学院)。之后,作者根据评审中提出的意见进行了修改。编者对以上审稿人表示深深的谢意。

校绘图室的同志为本书绘制了全部插图。另外,校教务处欧阳建平教授、教材科李秋华副教授等也给予了热情的支持。编者对以上为本书出版工作付出辛勤劳动的同仁表示衷心的感谢。

在本书付梓之际,编者深切怀念已故的潘别桐教授,本书的基本框架是他生前确定下来的,他的敬业精神和严谨的治学态度使编者受益匪浅。

由于编者学识所限,不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

1998年7月15日于武昌

目 录

第一章	绪论	(1)
第一节	岩体力学与工程实践	(1)
第二节	岩体力学的研究内容和研究方法	(2)
一、	研究内容	(2)
二、	研究方法	(3)
第三节	岩体力学发展的概况与动态	(4)
第四节	本书的主要内容与学习方法	(7)
第二章	岩块和岩体的地质特征	(8)
第一节	概述	(8)
第二节	岩块	(8)
一、	岩块的物质组成	(8)
二、	岩块的结构与构造	(9)
三、	岩块的风化程度	(10)
第三节	结构面	(11)
一、	结构面的成因类型	(11)
二、	结构面的规模与分级	(13)
三、	结构面特征及其对岩体性质的影响	(14)
四、	软弱结构面	(18)
第四节	岩体	(18)
一、	岩体的定义与组成	(18)
二、	岩体的结构特征	(19)
三、	岩体成因与岩体特征	(21)
第五节	岩体的工程分类	(22)
一、	岩块的工程分类	(23)
二、	岩体的工程分类	(23)
三、	岩体工程分类的发展趋势	(30)
第三章	岩石的物理、水理与热学性质	(32)
第一节	岩石的物理性质	(32)
一、	岩石的密度	(32)
二、	岩石的空隙性	(33)
第二节	岩石的水理性质	(34)
一、	岩石的吸水性	(34)
二、	岩石的软化性	(35)
三、	岩石的抗冻性	(36)

四、岩石的透水性·····	(36)
第三节 岩石的热学性质·····	(37)
一、岩石的比热容·····	(37)
二、岩石的导热系数·····	(39)
三、岩石的热膨胀系数·····	(40)
四、温度对岩石特性的影响·····	(40)
第四章 岩块的变形与强度性质·····	(42)
第一节 概述·····	(42)
第二节 岩块的变形性质·····	(43)
一、单轴压缩条件下的岩块变形性质·····	(43)
二、三轴压缩条件下的岩块变形性质·····	(49)
三、岩石的蠕变性质·····	(52)
第三节 岩块的强度性质·····	(57)
一、单轴抗压强度·····	(57)
二、三轴压缩强度·····	(60)
三、单轴抗拉强度·····	(63)
四、剪切强度·····	(65)
第四节 岩石的破坏判据·····	(67)
一、概述·····	(67)
二、库仑-纳维尔判据·····	(68)
三、莫尔判据·····	(69)
四、格里菲斯判据·····	(71)
五、八面体强度判据·····	(73)
第五章 结构面的变形与强度性质·····	(75)
第一节 概述·····	(75)
第二节 结构面的变形性质·····	(75)
一、结构面的法向变形性质·····	(75)
二、结构面的剪切变形性质·····	(82)
第三节 结构面的强度性质·····	(85)
一、平直无充填的结构面·····	(85)
二、粗糙起伏无充填的结构面·····	(86)
三、非贯通断续的结构面·····	(89)
四、具有充填物的软弱结构面·····	(90)
第六章 岩体的力学性质·····	(93)
第一节 概述·····	(93)
第二节 岩体的变形性质·····	(93)
一、岩体变形试验及其变形参数确定·····	(93)
二、岩体变形参数估算·····	(97)
三、岩体变形曲线类型及其特征·····	(99)
四、影响岩体变形性质的因素·····	(102)

第三节 岩体的强度性质	(103)
一、岩体的剪切强度	(103)
二、裂隙岩体的压缩强度	(106)
三、裂隙岩体强度的经验估算	(108)
第四节 岩体的动力学性质	(110)
一、岩体中弹性波的传播规律	(110)
二、岩体中弹性波速度的测定	(111)
三、岩体的动力变形与强度参数	(113)
第五节 岩体的水力学性质	(116)
一、单个结构面的水力特征	(116)
二、裂隙岩体的水力特征	(118)
三、应力对岩体渗透性能的影响	(120)
四、渗流应力	(121)
第七章 岩体中的天然应力	(123)
第一节 概述	(123)
第二节 岩体中天然应力的分布特征	(125)
一、岩体中的铅直天然应力	(125)
二、岩体中的水平天然应力	(126)
三、岩体中天然水平应力与铅直应力的比值	(128)
四、天然应力状态	(129)
第三节 岩体天然应力量测	(130)
一、水压致裂法	(130)
二、扁千斤顶法	(131)
三、套心法	(133)
第四节 岩体中天然应力的估算	(135)
一、铅直天然应力估算	(135)
二、水平天然应力估算	(135)
第八章 地下洞室围岩稳定性分析	(138)
第一节 概述	(138)
第二节 围岩重分布应力计算	(139)
一、无压洞室围岩重分布应力计算	(139)
二、有压洞室围岩重分布应力计算	(148)
第三节 围岩的变形与破坏	(149)
一、各类结构围岩的变形破坏特点	(149)
二、围岩位移计算	(152)
三、围岩破坏区范围的确定方法	(154)
第四节 围岩压力计算	(157)
一、基本概念	(157)
二、围岩压力计算	(158)
第五节 围岩抗力与极限承载力	(167)

一、围岩抗力系数及其确定	(167)
二、围岩极限承载力的确定	(169)
第九章 边坡岩体稳定性分析	(172)
第一节 概述	(172)
第二节 边坡岩体中的应力分布特征	(173)
一、应力分布特征	(173)
二、影响边坡应力分布的因素	(174)
第三节 边坡岩体的变形与破坏	(175)
一、边坡岩体变形破坏的基本类型	(175)
二、影响岩体边坡变形破坏的因素	(176)
第四节 边坡岩体稳定性分析的步骤	(178)
一、几何边界条件分析	(178)
二、受力条件分析	(178)
三、确定计算参数	(179)
四、稳定性系数的计算和稳定性评价	(179)
第五节 边坡岩体稳定性计算	(179)
一、平面滑动	(179)
二、楔形体滑动	(185)
第六节 边坡岩体滑动速度计算及涌浪估计	(186)
一、边坡岩体滑动速度计算	(186)
二、库岸岩体滑动的涌浪估计	(188)
第十章 地基岩体稳定性分析	(190)
第一节 概述	(190)
第二节 地基岩体中的应力分布特征	(190)
一、各向同性、均质、弹性地基岩体中的附加应力	(190)
二、层状地基岩体中的附加应力	(192)
第三节 地基岩体的承载力	(194)
一、基本概念	(194)
二、地基岩体承载力的确定	(194)
三、地基岩体基础沉降的确定	(198)
第四节 坝基岩体抗滑稳定性分析	(201)
一、坝基岩体承受的荷载分析	(202)
二、坝基岩体的破坏模式	(204)
三、坝基岩体抗滑稳定性计算	(206)
第五节 坝肩岩体抗滑稳定性分析	(210)
主要参考文献	(213)

第一章 绪 论

第一节 岩体力学与工程实践

岩体力学(rockmass mechanics)是力学的一个分支学科,是研究岩体在各种力场作用下变形与破坏规律的理论及其实际应用的科学,是一门应用型基础学科。

岩体力学的研究对象是各类岩体,而服务对象则涉及到许多领域和学科。如水利水电工程、采矿工程、道路交通工程、国防工程、海洋工程、重要工厂(如核电站、大型发电厂及大型钢铁厂等)以及地震地质学、地球物理学和构造地质学等地质学科都应用到岩体力学的理论和方法。但不同的领域和学科对岩体力学的要求和研究重点是不同的。概括起来,可分为三个方面:①为各类建筑工程及采矿工程等服务的岩体力学,重点是研究工程活动引起的岩体重分布应力以及在这种应力场作用下工程岩体(如边坡岩体、地基岩体和地下洞室围岩等)的变形和稳定性。②为掘进、钻井及爆破工程服务的岩体力学,主要是研究岩石的切割和破碎理论以及岩体动力学特性。③为构造地质学、找矿及地震预报等服务的岩体力学,重点是探索地壳深部岩体的变形与断裂机理,为此需研究高温高压下岩石的变形与破坏规律以及与时间效应有关的流变特征。以上三方面的研究虽各有侧重点,但对岩石及岩体基本物理力学性质的研究却是共同的。本书主要是以各类建筑工程和采矿工程为服务对象编写的,因此,也可称为工程岩体力学。

在岩体表面或其内部进行任何工程活动,都必须符合安全、经济和正常运营的原则。以露天采矿边坡坡角选择为例,坡角选择过陡,会使边坡不稳定,无法正常采矿作业,坡角选择过缓,又会加大其剥采量,增加其采矿成本。然而,要使岩体工程既安全稳定又经济合理,必须通过准确地预测工程岩体的变形与稳定性、正确的工程设计和良好的施工质量等来保证。其中,准确地预测岩体在各种应力场作用下的变形与稳定性,进而从岩体力学观点出发,选择相对优良的工程场址,防止重大事故,为合理的工程设计提供岩体力学依据,是工程岩体力学研究的根本目的和任务。

岩体力学的发展是和人类工程实践分不开的。起初,由于岩体工程数量少,规模也小,人们多凭经验来解决工程中遇到的岩体力学问题。因此,岩体力学的形成和发展要比土力学晚得多。随着生产力水平及工程建筑事业的迅速发展,提出了大量的岩体力学问题。诸如高坝坝基岩体及拱坝拱座岩体的变形和稳定性;大型露天采坑边坡、库岸边坡及船闸、溢洪道等边坡的稳定性;地下洞室围岩变形及地表塌陷;高层建筑、重型厂房和核电站等地基岩体的变形和稳定性;以及岩体性质的改善与加固技术等等。对这些问题能否做出正确的分析和评价,将会对工程建设和生产的安全性与经济性产生显著的影响,甚至带来严重的后果。

在人类工程活动的历史中,由于岩体变形和失稳酿成事故的例子是很多的。例如,1928年美国圣·弗朗西斯重力坝失事,是由于坝基软弱,岩层崩解,遭受冲刷和滑动引起的;1959年法国马尔帕塞薄拱坝溃决,则是由于过高的水压力使坝基岩体沿着一个倾斜的软弱结构面滑

动所致;1963年意大利瓦依昂水库左岸的大滑坡,更是举世震惊, $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 的滑动岩体以28m/s的速度下滑,激起250m高的巨大涌浪,溢过坝顶冲向下游,造成2500多人丧生。类似的例子在国内也不少,例如,1961年湖南拓溪水电站近坝库岸发生的滑坡;1980年湖北远安盐池河磷矿的山崩,是由于采矿引起岩体变形,使上部岩体中顺坡向节理被拉开,约 $1 \times 10^6 \text{m}^3$ 的岩体急速崩落,摧毁了矿务局和坑口全部建筑物,死亡280人。又如盘古山钨矿一次大规模的地压活动引起的塌方就埋掉价值约200万元的生产设备,并造成停产三年。再如,解放前湖南锡矿山北区洪记矿井大陷落,一次就使200多名矿工丧失了生命,等等。以上重大事故的发生,多是由于对工程地区岩体的力学特性研究不够,对岩体的变形和稳定性估计不足引起的。与此相反,假如对工程岩体的变形和稳定问题估计得过分严重,或者由于研究人员心中无数,不得不从“安全”角度出发,在工程设计中采用过大的安全系数,致使工程投资大大增加,工期延长,造成不应有的浪费。

今天,由于矿产资源勘探开采、能源开发及地球动力学研究等的需要,工程规模越来越大,所涉及的岩体力学问题也越来越复杂。这对岩体力学提出了更高的要求。例如,在水电建设中,大坝高度达335m(前苏联的Rogun坝);地下厂房边墙高达60~70m,跨度已超过30m;露天采矿边坡高度可达300~500m,最高可达1000m(新西兰);地下采矿深度已超过1000m以上。另外,当前世界上正在建设或已经建成的一些超巨型工程,如中国的三峡水电站(装机容量达17680MW,列世界第一),英吉利海峡隧道(长50km)和日本的青函跨海隧道(长53.85km)等。这些都使岩体力学面临许多前所未有的问题和挑战,急需要发展和提高岩体力学理论和方法的研究水平,以适应工程实践的需要。

第二节 岩体力学的研究内容和研究方法

如前所述,岩体力学服务的对象非常广泛,它涉及到国民经济的许多领域(如水利水电、采矿、能源开发、交通、国防和工业与民用建筑等)及地质基础理论研究领域(如地球动力学、构造地质学等)。不同的服务对象,对岩体力学的要求不尽相同,其研究的内容也不同。例如,重力坝和拱坝,对坝基和拱座岩体不均匀变形和水平位移限制比较严格;而路堑边坡、露天矿坑边坡等岩体边坡,在保证岩体不致产生滑动失稳的条件下,往往允许发生一定的变形;许多国防工程对岩体动态性能研究要求比较高;而非地震区的一般工程,却常常只需要研究岩体的静态性能等。

岩体力学的研究对象,不是一般的人工材料,而是在天然地质作用下形成的地质体。由于岩体中具有天然应力、地下水等,并发育有各种结构面,所以它不仅具有弹性、脆性、塑性和流变性,而且还具有非线性、非连续性,以及非均质和各向异性等特征。对于这样一种复杂的介质,不仅研究内容非常复杂,而且其研究方法和手段也应与连续介质力学有所不同。

一、研究内容

由于岩体力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩体力学研究的内容也必然是广泛而复杂的。从工程观点出发,大致可归纳为如下几方面的内容。

(1)岩块、岩体地质特征的研究。岩块与岩体的许多性质,都是在其形成的地质历史过程中形成的。因此,岩块与岩体地质特征的研究是岩体力学分析的基础。主要包括:①岩石的物质组成和结构特征;②结构面特征及其对岩体力学性质的影响;③岩体结构及其力学特征;④岩

体工程分类。

(2)岩石的物理、水理与热学性质的研究。

(3)岩块的基本力学性质的研究。为了全面了解岩体的力学性质,或者在岩体力学性质接近于岩块力学性质的条件下,可通过岩块力学性质的研究,减少或替代原位岩体力学试验研究。内容包括:①岩块在各种力作用下的变形和强度特征以及力学参数的室内实验技术;②荷载条件、时间等对岩块变形和强度的影响;③岩块的变形破坏机理及其破坏判据。

(4)结构面力学性质的研究。结构面力学性质是岩体力学最重要的研究内容。内容包括:①结构面在法向压应力及剪应力作用下的变形特征及其参数确定;②结构面剪切强度特征及其测试技术与方法。

(5)岩体力学性质的研究。岩体力学性质是岩体力学最基本的研究内容。内容包括:①岩体的变形与强度特征及其原位测试技术与方法;②岩体力学参数的弱化处理与经验估算;③荷载条件、时间等因素对岩体变形与强度的影响;④岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

(6)岩体中天然应力分布规律及其量测的理论与方法的研究。

(7)边坡岩体、地基岩体及地下洞室围岩等工程岩体的稳定性研究。这是岩体力学实际应用方面的研究,内容包括:①各类工程岩体中重分布应力的大小与分布特征;②各类工程岩体在重分布应力作用下的变形破坏特征;③各类工程岩体的稳定性分析与评价等。

(8)岩体性质的改善与加固技术的研究,包括岩体性质、结构的改善与加固,地质环境(地下水、地应力等)的改良等。

(9)各种新技术、新方法与新理论在岩体力学中的应用研究。

(10)工程岩体的模型、模拟试验及原位监测技术的研究。模型模拟试验包括数值模型模拟、物理模型模拟和离心模型模拟试验等,这是解决岩体力学理论和实际问题的一种重要手段。而原位监测既可以检验岩体变形与稳定性分析成果的正确与否,同时也可及时地发现问题。

以上10个方面是岩体力学所要研究的基本内容。由于课时限制,本课程仅讨论前七个方面内容的基本原理与方法,其余方面的内容可参考有关文献。

二、研究方法

岩体力学的研究内容决定了在岩体力学研究中必须采用如下几种研究方法。

(1)工程地质研究法。目的是研究岩块和岩体的地质与结构特征,为岩体力学的进一步研究提供地质模型和地质资料。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解岩体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律,等等。

(2)试验法。科学试验是岩体力学研究中一种非常重要的方法,是岩体力学发展的基础。包括岩块力学性质的室内实验、岩体力学性质的原位试验、天然应力量测、模型模拟试验及原位岩体监测等方面。其目的主要是为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验成果(如模拟试验及原位监测成果等)直接评价岩体的变形和稳定性,以及探讨某些岩体力学理论问题。因此应当高度重视并大力开展岩体力学试验研究。

(3)数学力学分析法。数学力学分析是岩体力学研究中的一个重要环节。它是通过建立岩

体力学模型和利用适当的分析方法,预测岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为设计和施工提供定量依据。其中建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学力学分析中的关键。目前常用的力学模型有:刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、断裂力学模型和损伤力学模型及流变模型等等。常用的分析方法有:块体极限平衡法,有限元、边界元和离散元法,模糊聚类和概率分析法等等。近年来,随着科学技术的发展,还出现了用系统论、信息论、人工智能专家系统、灰色系统等新方法来解决岩体力学问题。

(4)综合分析法。这是岩体力学研究中极其重要的一套工作方法。由于岩体力学工作中每一环节都是多因素的,且信息量大。因此,必须采用多种方法考虑各种因素(包括工程的、地质的及施工的等)进行综合分析和综合评价,才能得出符合实际情况的正确结论,而综合分析判断是该阶段常用的方法。

以上几种方法紧密结合并且相互促进,相辅相成,缺一不可。

第三节 岩体力学发展的概况与动态

岩体力学是在岩石力学的基础上发展起来的一门新兴学科,因此,目前国际上仍沿用岩石力学(rock mechanics)这一名词。如岩体力学的国际组织叫国际岩石力学学会(The International Society for Rock Mechanics,简称 ISRM),我国的国家组织相应地也叫中国岩石力学与工程学会(Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering,简称 CSRME)。但是从所研究的内容上讲,它实际上已属于岩体力学的范畴了,因此通常意义上的岩石力学就是岩体力学。

岩体力学的形成与发展历史是从岩石力学的兴起开始的。尽管岩石力学的诞生之日难以考查,但一般认为,岩体力学形成于 20 世纪 50 年代末,其主要标志:是 1957 年法国的塔罗勃(J·Talobre)所著《岩石力学》的出版,以及 1962 年国际岩石力学学会(ISRM)的成立。岩体力学作为一门独立的学科至今才 40 余年的历史,这是很短暂的,但其形成的历史是漫长的,这与当时的生产力水平低,工程建设数量少、规模小有关。对于岩体力学的形成历史,在此不拟详细介绍,这里仅就其形成以后的发展过程与特点作一简要介绍。以使读者了解岩体力学的发展动态。

为了考察岩体力学的发展,先列举一些对岩体力学形成与发展有重要影响的事件如下:

1951 年,在奥地利的萨茨堡(Salzburg)创建了第一个岩石力学学术组织,叫地质力学研究组(Study Group for Geomechanics),并形成了独具一格的奥地利学派,其基本观点是岩体的力学作用主要取决于岩体内的结构面及其对岩体的切割特征。同年,国际大坝会议设立了岩石力学分会。

1956 年,美国召开了第一次岩石力学讨论会。

1957 年,第一本《岩石力学》(J·Talobre 著)专著出版。

1959 年,法国马尔帕塞坝因左坝肩岩体沿软弱结构面滑移而溃决,引起了许多岩体力学工作者的关注和研究。

1962 年,在国际地质力学研究组的基础上成立了国际岩石力学学会(ISRM),由奥地利岩石力学家缪勒(L·Müller)担任主席。

1963 年,意大利瓦依昂水库左岸岩体大滑坡,吸引了许多岩石力学工作者的关注。

1966 年,第一届国际岩石力学大会在葡萄牙的里斯本召开,由葡萄牙岩石力学家罗哈

(M·Rocha)担任主席。以后每4年召开一次大会,至今已召开了八次。这八次国际岩石力学学术会议内容广泛,当代岩石力学的主要热点问题都得到了交流和讨论,无疑代表了当代国际岩石力学的水平。

第九届国际岩石力学大会将于1999年8月在法国巴黎召开,会议总的主题为面向未来。届时将组织:①应用岩石力学,环境安全与控制;②力学现象与热学、流体力学及化学现象的耦合;③岩石动力学与构造物理学;④监测、原位测试四个专题的讨论。

这期间,我国的岩体(石)力学研究也得到了长足的发展。陆续建立了中国科学院武汉岩土力学研究所、地质研究所工程地质研究室,长江科学院岩基室等科研机构。并在许多高等院校的相关专业建立了岩石力学实验室,开设了岩体(石)力学课程。围绕一些重点工程建设开展了一系列岩体力学科研、生产工作,获得了一系列重大成果。其中,陈宗基教授把流变学引入岩体力学,提出了岩体流变、扩容与长期强度等概念,进一步发展了岩石流变扩容理论。谷德振教授等根据岩体由于受结构面切割而具有的多裂隙性,提出了岩体工程地质力学理论,将岩体划分为整体块状、块状、碎裂状、层状及散体状几种结构类型。另外,我国于1985年正式成立了全国岩石力学与工程学会,至今已召开了四次全国性学术大会,并派团参加了第四至第八届国际岩石力学大会,参与了国际学术交流。

这一时期岩体力学的研究工作有如下特点。

1. 对岩体及其力学属性的认识不断深入

在岩体力学形成的初期,人们把岩体视为一种地质材料。其研究方法是取小块试件,在室内进行物理力学性质测试,并用以评价其对工程建筑的适宜性。这种研究实质上还是材料力学方法,可称为岩块力学或岩石力学。大量的工程实践表明:用岩块性质来表征作为建筑地基的大范围岩体特征是不合适的。

自20世纪60年代起,国内外岩体力学工作者都逐步认识到了被结构面切割的岩体性质与完整的小岩块性质有本质的区别。即如果相对而言可将岩块视为均质、连续和各向同性的弹性介质,而岩体则是非均质、非连续和各向异性的非弹性介质。只有在某些情况下,如裂隙不发育的完整块状岩体等,其力学属性才能近似地看成与岩块相同。在这种认识的前提下,人们开展对岩体的研究,并重视原位试验在确定岩体力学参数中的作用。这一时期内,奥地利学派起了很大的推动作用,缪勒(1974)主编的《岩石力学》代表了这一时期的研究方向和水平。但这一时期人们还是多把岩体视为岩块的砌体来研究,而对结构面在岩体变形、破坏机理中的影响及其重要性还认识不足,在岩体力学分析计算中未作全面考虑。

到70年代中后期,岩体力学工作者越来越认识到岩体结构的实质及其在岩体力学作用中的重要性,开展了大量的研究(如奥地利、中国、美国等国家的学者)。如我国从70年代开始,以谷德振为首的科研群体就开展了对岩体结构与结构面力学效应等理论问题的研究,并应用于解决工程问题,提出了岩体工程地质力学的学说,出版了《岩体工程地质力学基础》(1979)等一系列专著。进而又提出了岩体结构控制论的观点(《岩体结构力学》,孙广忠,1988),认为岩体的变形和稳定性主要受控于岩体结构及结构面的力学性质,因此必须重视对岩体结构和结构面力学性质及其力学效应的研究。

从上述岩体力学的发展过程,我们不难看出,人们对岩体及其力学属性的认识是不断深化的。

2. 研究领域愈益扩大,并强调在工程中的应用

在岩体力学形成初期,主要是针对矿山建设中的围岩压力问题进行工作。现在岩体力学已

被广泛应用于采矿、能源开发、国防工程、水利水电工程、交通及海洋开发工程、环境保护及减灾防灾工程、古文物保护工程、地震、地球动力学等等许多领域。而且随着工程建设的增多和规模的不断加大,特别是一些复杂的重大工程(如三峡工程)的实施,将给岩体力学带来许多新的复杂课题,这对于岩体力学来说既是发展的机遇,也是一种挑战。

3. 重视岩体中天然应力的研究

过去人们提到天然应力主要是指自重应力,现在人们已经认识到在很多情况下只考虑自重应力是不行的,必须考虑除自重应力以外如构造应力等的影响。从60年代开始,逐渐重视和加强了岩体中天然应力及其量测技术的研究,积累了丰富的实测资料,并获得了一些非常有意义的结论。同时天然应力的确定方法和量测手段也有了长足的进展。

4. 岩体的测试技术和监测技术大力发展

在开始的室内常规岩块力学参数测试的基础上,逐渐发展了岩石三轴试验、高温高压试验、刚性试验、伺服技术、结构面力学试验、原位岩体力学试验及原位监测技术和模型模拟试验等。另外,岩石微观结构研究等也逐渐应用于岩体力学中。

5. 注意岩体动力学、水力学性质及流变性质的研究

随着地下爆炸试验、地震研究、国防工程和水利水电工程的发展,岩体在振动、冲击等动载荷作用下的变形和强度特性、破坏规律、应力波传播与衰减规律及结构防护等以及岩体在长期荷载作用下的流变性能和长期强度;水岩耦合及水岩与应力耦合所表现出来的水力学性质等等,都日益受到广泛的重视,并取得了一些成果。

6. 新理论、新技术及新方法的应用

首先,计算机技术的应用与普及,为岩体力学解决许多复杂的岩体力学问题提供了有力的手段,提高了岩体力学解决生产实际问题的能力和效率。另外,从70年代末开始,块体理论、概率论、模糊数学、断裂力学、损伤力学、分形几何等理论相继引入岩体力学的基础理论与工程稳定性研究中,取得了一系列重大成果。近年来,还有不少学者将系统论、信息论、控制论、人工智能专家系统、灰色系统、突变理论、耗散结构理论及协同论等软科学引入岩体力学研究中,取得了一系列研究成果。最近又提出了利用神经网络(Sach, Dheores 等, 1994; 冯夏庭, 王泳嘉等, 1995)来预测岩体边坡稳定性等等。这些新理论、新方法的引入,大大地促进了岩体力学的发展。

总之,到目前为止,岩体力学工作者从各个方面对岩体力学与工程进行了全面的研究,并取得了可喜的进展,为国民经济建设与学科发展作出了杰出的贡献。但是,岩体力学还不成熟,还有许多重大问题仍在探索之中,还不能满足工程实际的需要。因此,大力加强岩体力学理论和实际应用的研究,既是岩体力学发展的需要,更是工程实践的客观要求。

在今后一段时期内,岩体力学的前沿研究课题有:①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;②裂隙化岩体的强度、破坏机理及破坏判据问题;③岩体与工程结构的相互作用与稳定性评价问题;④软岩(包括松散岩体、软弱岩体、强烈应力破碎及风化蚀变岩体、膨胀性和流变性岩体等)的力学特性及其岩体力学问题;⑤水岩耦合及水岩与应力耦合作用及岩体工程稳定性问题;⑥高地应力岩体力学问题;⑦岩体结构整体综合仿真反馈系统与优化技术;⑧岩体动力学、水力学与热力学问题;⑨岩体流变与长期强度问题;⑩岩体工程计算机辅助设计与图像自动生成处理;等等。以上课题,虽然有些已有一些研究成果,某些问题甚至已达到一定的深度,但多数仅限于科学探讨性的和定性或半定量的研究,离实际应用还有一定的距离,不能满足工程实际的需求,需要进一步探索与研究。

当前,随着科学技术的飞速发展,各门学科都将以更快的速度向前发展,岩体力学也不例外。而各门学科协同合作,相互渗透,不断引入相关学科的新思想、新理论和新方法是加速岩体力学发展的必要途径。

第四节 本书的主要内容与学习方法

本教材是为岩土工程、水利水电工程、建筑工程专业及其相关专业本科生编写的专业基础课教材,教材分十章。

第一章绪论,主要介绍岩体力学的研究任务、内容与方法,以及岩体力学的发展历史与研究动态。

第二章讨论岩块、结构面及岩体的物质组成、结构特征及岩体工程分类。使读者弄清影响岩块及岩体物理力学性质的各种地质因素的类型、特征及工程岩体分类方法。

第三、四章讨论岩块的物理力学性质,包括各种性质指标的定义、测定方法、相互关系、影响因素及其经验值。同时在第四章中还讨论了目前工程中常用的几种强度判据,它们的含义、判据方程及其使用条件。

第五章讨论结构面的变形与强度特征,指标定义及其测定方法。

第六章岩体的力学性质,讨论岩体的变形、强度及动力学与水力学特性;岩体原位力学试验的原理方法及裂隙化岩体变形与强度参数的经验估算方法。

第七章岩体中的天然应力,讨论地壳浅部岩体中的天然应力分布特征、研究意义及其量测技术的原理与方法。

第八、九、十章讨论边坡岩体、地基岩体及地下洞室围岩中的重分布应力特征、计算方法与岩体的变形与破坏特征及其稳定性分析方法等。

本教材的编写旨在使学生掌握岩体力学的基本原理与方法,并力求实用。学生在学习过程中应在深刻理解基本概念的基础上,切实掌握分析研究问题的思路和方法,培养解决岩体力学问题的能力。因此,对于书中的基本概念、原理和方法,要加强理解,举一反三,把它弄懂弄通,切忌死记硬背。对于书中的公式,重点要求理解其推导思路、应用条件和使用方法。而真正要记的公式不是太多,对少数必须记住的公式,也应在理解的基础上去记,这样才能记得牢,用得活。

此外,岩体力学是工程地质与工程力学交叉发展起来的边缘学科,它的理论基础相当广泛,涉及工程地质学、水文地质学、固体力学、流体力学、计算数学、弹塑性力学、构造地质学、地球物理学及建筑结构等学科。因此,要学好岩体力学,必须具备以上基础知识。特别是固体力学和弹塑性力学等力学基础更应牢固掌握。

第二章 岩块和岩体的地质特征

第一节 概 述

岩体力学研究的对象是在各种地质作用下形成的天然岩体。这些岩体,尤其是与人类工程活动密切相关的地壳表层岩体,其物理力学性质和力学属性,在很大程度上受形成和改造岩体的各种地质作用过程所控制,往往表现出非均匀、非连续、各向异性和多相性特征。因此,在岩体力学研究中,应将岩体地质特征的研究工作置于相当重要的地位。

岩块和岩体均为岩石物质和岩石材料。传统的工程地质方法往往是按岩石的成因,取小块试件在室内进行矿物成分、结构构造及物理力学性质的测定,以评价其对工程建筑的适宜性。大量的工程实践表明,用岩块性质来代表原位工程岩体的性质是不合适的。因此,自 20 世纪 60 年代起,国内外工程地质和岩体力学工作者都注意到岩体与岩块在性质上有本质的区别,其根本原因之一是岩体中存在有各种各样的结构面及不同于自重应力的天然应力场和地下水。因而,从岩体力学观点出发提出了岩块、结构面和岩体等基本概念。本章将重点讨论岩块、结构面和岩体的地质特征,影响岩块与岩体物理力学性质的主要地质因素以及岩体工程分类等问题。

第二节 岩 块

一、岩块的物质组成

岩块(rock 或 rock block)是指不含显著结构面的岩石块体,是构成岩体的最小岩石单元体。这一定义里的显著一词是个比较模糊的说法,一般来说,能明显地将岩石切割开来的分界面叫显著结构面,而包含在岩石块体内结合比较牢固的面如微层面、微裂隙等都属于不显著的结构面。在国内外,有些学者把岩块称为结构体(structural element)、岩石材料(rock material)及完整岩石(intact rock)等等。

岩石是由具有一定结构构造的矿物(含结晶和非结晶的)集合体组成的。因此,新鲜岩块的力学性质主要取决于组成岩块的矿物成分及其相对含量。一般来说,含硬度大的粒柱状矿物(如石英、长石、角闪石、辉石等)愈多时,岩块强度愈高;含硬度小的片状矿物(如云母、绿泥石、蒙脱石和高岭石等)愈多时,则岩块强度愈低。自然界中的造岩矿物有:含氧盐、氧化物及氢氧化物、卤化物、硫化物和自然元素五大类。其中以含氧盐中的硅酸盐、碳酸盐及氧化物类矿物最常见,构成了几乎 99.9% 的地壳岩石。而其他矿物的工程地质意义不大。

常见的硅酸盐类矿物有长石、辉石、角闪石、橄榄石及云母和粘土矿物等。这类矿物除云母和粘土矿物外,硬度大,呈粒、柱状晶形。因此,含这类矿物多的岩石如花岗岩、闪长岩及玄武岩等,强度高,抗变形性能好。但该类矿物多生成于高温环境,与地表自然环境相差较大,在各种风化营力的作用下,易风化成高岭石、水云母等。尤以橄榄石、基性斜长石等抗风化能力最差,

长石、角闪石次之。

粘土矿物属层状硅酸盐类矿物,主要有高岭石、水云母及蒙脱石三类,具薄片状或鳞片状构造,硬度小。因此含这类矿物多的岩石如粘土岩、粘土质岩,物理力学性质差,并具有不同程度的胀缩性,特别是含蒙脱石多的膨胀岩,其物理力学性质更差。

碳酸盐类矿物是石灰岩和白云岩类的主要造岩矿物。岩石的物理力学性质取决于岩石中 CaCO_3 及酸不溶物的含量。 CaCO_3 含量越高,如纯灰岩、白云岩等强度高、抗变形和抗风化性能都比较好。泥质含量高的,如泥质灰岩、泥灰岩等,力学性质较差。但随岩石中硅质含量的增高,岩石性质将不断变好。另外,碳酸盐类岩体中,常发育各种岩溶现象,使岩体性质趋于复杂化。

氧化物类矿物以石英最常见,是地壳岩石的主要造岩矿物。呈等轴晶系、硬度大,化学性质稳定。因此,一般随石英含量增加,岩块的强度和抗变形性能都明显增强。

岩块的矿物组成与岩石的成因及类型密切相关。岩浆岩多以硬度大的粒柱状硅酸盐、石英等矿物为主,所以其岩块物理力学性质一般都很好。沉积岩中的粗碎屑岩如砂砾岩等,其碎屑多为硬度大的粒柱状矿物,岩块的力学性质除与碎屑成分有关外,在很大程度上取决于胶结物成分及其类型。细碎屑岩如页岩、泥岩等,矿物成分多以片状的粘土矿物为主,其岩块力学性质很差。变质岩的矿物组成与母岩类型及变质程度有关。浅变质的副变质岩如千枚岩、板岩等多含片状矿物(如绢云母、绿泥石及粘土矿物等),岩块力学性质较差。深变质岩如片麻岩、混合岩、石英岩等,多以粒柱状矿物(如长石、石英、角闪石等)为主,因而其岩块力学性质好。

二、岩块的结构与构造

岩块的结构是指岩石内矿物颗粒的大小、形状和排列方式及微结构面发育情况与粒间连结方式等反映在岩块构成上的特征。岩块的结构特征,尤其是矿物颗粒间连结及微结构面的发育特征对岩块的力学性质影响很大。

矿物颗粒间具有牢固的连结是岩石区别于土并赋予岩石以优良工程地质性质的主要原因。岩石的粒间连结分结晶连结与胶结连结两类。

结晶连结是矿物颗粒通过结晶相互嵌合在一起,如岩浆岩、大部分变质岩及部分沉积岩均具这种连结。它是通过共用原子或离子使不同晶粒紧密接触,故一般强度较高。但是不同的结晶结构对岩块性质的影响不同。一般来说,等粒结构的岩块强度比非等粒结构的高,且抗风化能力强。在等粒结构中,细粒结构岩块强度比粗粒结构的高。在斑状结构中,具细粒基质的岩块强度比玻璃质基质的高。总之,结晶愈细愈均匀,非晶质成分愈少,岩块强度愈高,如某粗粒花岗岩的抗压强度(σ_c)为120MPa,而其成分相同的细粒花岗岩 σ_c 可达250MPa。

胶结连结是矿物颗粒通过胶结物连结在一起,如碎屑岩等具这种连结方式。胶结连结的岩块强度取决于胶结物成分及胶结类型。一般来说,硅质胶结的岩块强度最高;铁质、钙质胶结的次之;泥质胶结的岩块强度最低,且抗水性差。如某地具不同胶结物的砂岩抗压强度为:硅质胶结的 $\sigma_c=207.5\text{MPa}$;铁质胶结的 $\sigma_c=105.9\text{MPa}$;钙质胶结的 $\sigma_c=84.2\text{MPa}$;泥质胶结的 $\sigma_c=55.6\text{MPa}$ 。从胶结类型来看,常以基底式胶结的岩块强度最高,孔隙式胶结的次之,接触式胶结的最低。

微结构面是指存在于矿物颗粒内部或颗粒间的软弱面或缺陷,包括矿物解理、晶格缺陷、粒间空隙、微裂隙、微层面及片理面、片麻理面等。它们的存在不仅降低了岩块的强度,还往往导致岩块力学性质具有明显的各向异性。

岩块的构造是指矿物集合体之间及其与其他组分之间的排列组合方式。如岩浆岩中的流线、流面构造,沉积岩中的微层状构造,变质岩中的片状构造及其定向构造等等。这些都可使岩块物理力学性质复杂化。

由上述可知岩块的结构构造不同,其力学性质及其各向异性和不连续性程度也不同。因此,在研究岩块的力学性质时也要注意其各向异性和不连续性。但是相对岩体而言,岩体的各向异性和不连续性更为显著,因此,在岩体力学研究中,通常又把岩块近似地视为均质、各向同性的连续介质。

三、岩块的风化程度

众所周知,风化作用可以改变岩石的矿物组成和结构构造,进而改变岩块的物理力学性质。一般来说,随风化程度的加深,岩块的空隙率和变形随之增大,强度降低,渗透性加大。

不同的岩石对风化作用的反应是不同的。如花岗岩类岩石,常先发生破裂,而后被渗入的雨水形成的碳酸所分解。碳酸与长石、云母、角闪石等矿物作用,析出 Fe, Mg, K, Na 等可溶盐以及游离 SiO_2 , 并被地下水带走,而岩屑、粘土物质和石英颗粒等残留在原地。基性岩浆岩的风化过程,与中酸性岩浆岩类似,只是其风化残留物多为粘土;石灰岩的风化残留物为富含杂质的粘土;砂砾岩的风化,常仅发生解体破碎,等等。因此,研究岩体风化时,应考虑到岩石的风化程度及风化产物的类型。

岩块的风化程度可通过定性指标和某些定量指标来表述。定性指标主要有:颜色、矿物蚀变程度、破碎程度及开挖锤击技术特征等。定量指标主要有风化空隙率指标和波速指标等。

风化空隙率指标(I_w)是汉罗尔(Hamral, 1961)提出的。 I_w 是快速浸水后风化岩块吸入水的质量与干燥岩块质量之比。借此可近似地反映风化岩块空隙率的大小。

国家标准《岩土工程勘察规范》GB50021-94 中提出用风化岩块的纵波速度(v_{cp})、波速比(k_v)和风化系数(k_f)等指标来评价岩块的风化程度,其中 k_v 、 k_f 的定义为:

$$k_v = \frac{v_{cp}}{v_{rp}} \quad (2-1)$$

$$k_f = \frac{\sigma'_{cw}}{\sigma_{cw}} \quad (2-2)$$

式中: v_{cp} 、 v_{rp} 分别为风化岩块和新鲜岩块的纵波速度(m/s); σ'_{cw} 、 σ_{cw} 分别为风化岩块和新鲜岩块的饱和单轴抗压强度(MPa)。

按岩块的 v_{cp} 、 k_v 和 k_f 将硬质岩石的风化分级划分如表 2-1。

表 2-1 硬质岩石按波速指标的风化分级表(据岩土工程勘察规范,1995)

风化程度	v_{cp} (m/s)	k_v	k_f
全风化	500~1 000	0.2~0.4	—
强风化	1 000~2 000	0.4~0.6	<0.4
中等风化	2 000~4 000	0.6~0.8	0.4~0.8
微风化	4 000~5 000	0.8~0.9	0.8~0.9
未风化	>5 000	0.9~1.0	0.9~1.0