

高职高专规划教材

YAN SHI LI XUE

岩石力学

杨建中 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高职高专规划教材

岩石力学

杨建中 主编
韩延清 副主编

北京
冶金工业出版社
2008

内 容 提 要

本书详细阐述了岩石力学的基本概念和基本理论,对岩石力学在硐室工程、地下采场工程、边坡工程、岩基工程中的应用作了重点论述。取材注重实际应用,力求使读者尽快掌握岩石力学的基本概念和分析解决实际工程问题的基本思路与方法。

本书为高职高专院校矿业类专业的教学用书,可供工程地质、道桥等相关专业使用,也可供从事岩体工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学/杨建中主编. —北京:冶金工业出版社, 2008. 7

高职高专规划教材

ISBN 978-7-5024-4583-6

I. 岩… II. 杨… III. 岩石力学—高等学校:技术学校—教材 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099246 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 白 迅 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4583-6

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 7 月第 1 版, 2008 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.5 印张; 328 千字; 186 页; 1-3000 册

26.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

岩石力学是应用力学的一个分支，也是一门年轻的学科。随着经济建设的不断发展，在各行各业的建设和生产过程中，不断出现的岩体工程灾害一直影响着经济建设和生产的正常进行，威胁着人民的生命财产。众多的专家、学者对岩石力学的研究，取得了卓有成效的成果。国内外有关岩石力学的教材、专著甚多，其深度、层次和适应范围各不相同。

本教材为冶金教育学会确定的高职高专矿业类专业“十一五”规划教材，主要是为高职高专矿业类专业学生学习岩石力学课程而编写的。教材编写中考虑到工程地质和道桥等专业的适用性，特增加了“岩石力学在岩基工程中的应用”一章内容。书中内容的选择，既考虑了比较全面系统反映本学科基本知识、基本理论和发展现状，也考虑了解决岩体工程的生产与技术管理中出现的岩石力学问题的实际需要，并着力体现高职高专教学的针对性和应用性。鉴于本书读者基础理论知识不足，故本书的编写着眼于通过从感性到理性的引导，使初学者尽快掌握岩石力学学科的基本概念和分析解决实际工程问题的基本思路、基本方法，而不是着眼在用数学和力学方法的严密论证和推导。为便于初学者理清思路、明确基本概念，本书在内容编排上作了一定的梳理，前4章为岩石力学的基本概念和基本理论，后4章为岩石力学在岩体工程中的应用。教学中，教师可根据不同专业的要求进行内容的取舍，如矿业类专业，在教学中可不讲授“岩石力学在岩基工程中的应用”；工程地质、道桥专业可不讲授“岩石力学在地下采场中的应用”一章。

本教材以杨建中老师多年从事岩石力学教学的教案和讲稿为蓝本，在内容上作了补充和修改。编写分工如下：第1章、第3章~第6章、第8章由昆明冶金高等专科学校杨建中编写；第7章由辽宁科技学院韩延清编写；第2章由

昆明冶金高等专科学校杨平编写。

全书由杨建中担任主编，韩延清担任副主编。

由于作者水平所限，加之时间仓促，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 岩石力学的研究任务与内容	2
1.2.1 岩石力学的研究任务	2
1.2.2 岩体力学的研究内容	2
1.3 岩石力学的研究方法	3
1.4 岩石力学的产生及其发展	4
思考题及习题	5
2 岩石的基本物理力学性质	6
2.1 概述	6
2.2 岩石的基本物理性质	6
2.2.1 岩石的密度指标	6
2.2.2 岩石的孔隙性	7
2.2.3 岩石的水理性质	8
2.2.4 岩石的其他特性	11
2.3 岩石的变形特性	11
2.3.1 岩石在单向压缩应力作用下的变形特性	11
2.3.2 岩石在三向压缩应力作用下的变形特性	16
2.4 岩石的流变特性	17
2.4.1 岩石的蠕变性质	17
2.4.2 岩石的松弛性质	18
2.4.3 岩石的长期强度	19
2.4.4 岩石介质力学模型	19
2.5 岩石的强度特性	21
2.5.1 岩石的破坏形式	22
2.5.2 岩石的单轴抗压强度	22
2.5.3 岩石的抗拉强度	22
2.5.4 岩石的抗剪强度	24
2.6 岩石的破坏判据	26
2.6.1 最大拉应变理论	26
2.6.2 莫尔判据及莫尔-库仑判据	27
2.6.3 格里菲斯判据及修正的格里菲斯判据	29
思考题及习题	30

3 岩体的基本力学性质	32
3.1 岩石、岩体与岩体结构	32
3.1.1 岩石与岩体区别	32
3.1.2 岩体结构	33
3.2 结构面的特征及类型	35
3.2.1 结构面的成因类型	35
3.2.2 结构面的规模与分级	38
3.2.3 结构面的空间分布	38
3.2.4 软弱结构面	40
3.3 结构面的剪切强度特性	40
3.3.1 结构面的抗剪强度	40
3.3.2 结构面的抗摩擦强度	41
3.4 结构面的力学效应	42
3.4.1 单节理的力学效应	42
3.4.2 多节理的力学效应	44
3.5 岩体的力学特性	44
3.5.1 岩体的变形特性	44
3.5.2 岩体变形模量的测定	45
3.5.3 岩体强度的测定	46
3.5.4 准岩体强度	47
3.5.5 岩体的强度特征	47
3.6 工程岩体分类	48
3.6.1 工程岩体分类的目的与原则	48
3.6.2 工程岩体代表性分类简介	49
3.6.3 岩体工程分类的发展趋势	55
思考题及习题	55
4 岩体的原岩应力状态	57
4.1 概述	57
4.2 岩体原岩应力场及其影响因素	57
4.2.1 原岩应力的成因	57
4.2.2 自重应力和构造应力	59
4.3 岩体初始应力场的分布规律	60
4.3.1 地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场	60
4.3.2 实测垂直应力基本等于上覆岩层的重量	61
4.3.3 水平应力普遍大于垂直应力	61
4.3.4 平均水平应力与垂直应力的比值随深度增加而减小	62
4.3.5 最大水平主应力和最小水平主应力也随深度呈线性增长关系	62

4.3.6	两个水平主应力一般相差较大, 显示出很强的方向性	62
4.4	岩体初始应力的测量方法	63
4.4.1	地应力测量的基本原理	63
4.4.2	水压致裂法	64
4.4.3	应力解除法	66
4.4.4	应力恢复法	68
4.4.5	声发射法	69
4.5	高地应力地区主要岩体力学问题	71
4.5.1	高地应力判别准则和高地应力现象	71
4.5.2	岩爆及其防治措施	73
	思考题及习题	75
5	岩石力学在硐室工程中的应用	77
5.1	概述	77
5.2	地下硐室围岩弹性区的次生应力	77
5.2.1	圆形硐室的次生应力	77
5.2.2	椭圆形硐室周边应力分布	79
5.2.3	矩形硐室围岩应力分布	80
5.2.4	硐室围岩的弹性位移	81
5.3	地下硐室围岩塑性区的次生应力	82
5.3.1	塑性区的特点	82
5.3.2	圆形硐室塑性区应力 ($\lambda = 1$)	82
5.3.3	岩体变形状态及应力状态	83
5.3.4	塑性区半径 R	84
5.3.5	不同 λ 条件下的塑性区	85
5.3.6	圆形硐室塑性区的位移	86
5.4	围岩压力	88
5.4.1	围岩压力的基本概念	88
5.4.2	地压的分类	89
5.4.3	围岩与支架共同作用原理	90
5.5	围岩压力计算	92
5.5.1	变形围岩压力计算	92
5.5.2	松动围岩压力计算	92
5.6	喷锚支护	98
5.6.1	喷射混凝土支护计算	98
5.6.2	锚杆支护计算	99
5.6.3	喷锚支护 (喷锚网联合支护) 计算	103
	思考题及习题	106

6 岩石力学在地下采场中的应用	109
6.1 概述	109
6.1.1 采场地压的研究内容	109
6.1.2 与采矿方法相关的地压问题	109
6.1.3 采场地压的分析研究方法	110
6.2 采场的极限跨度及矿柱尺寸	113
6.2.1 采场极限跨度	113
6.2.2 缓倾斜矿体中矿柱的尺寸	114
6.2.3 倾斜矿柱的间柱及顶柱尺寸	117
6.2.4 免压拱与屈服矿柱	118
6.3 空场采矿法的地压显现规律及空区处理	119
6.3.1 空场法的地压显现形式	119
6.3.2 覆盖岩层的变形和破坏	121
6.3.3 地表的变形和破坏	122
6.3.4 采空区处理	124
6.4 崩落法开采中的地压问题	126
6.4.1 壁式采矿法的地压活动	126
6.4.2 应用崩落法开采倾斜、急倾斜矿体地压活动	127
6.5 充填体及其作用	129
6.5.1 充填体对地压显现的作用	129
6.5.2 充填体的稳定性	130
6.6 采场地压控制及回采顺序	131
6.6.1 采场地压控制方法综述	131
6.6.2 合理回采顺序实例	132
思考题及习题	133
7 岩石力学在边坡工程中的应用	135
7.1 赤平极射投影原理	135
7.1.1 赤平极射投影原理	135
7.1.2 投影网	136
7.1.3 赤平投影的基本作图方法	137
7.1.4 用赤平投影方法确定优势结构面	139
7.2 边坡的变形和破坏	141
7.2.1 边坡的变形和破坏的发展过程	141
7.2.2 露天矿边坡的破坏类型	142
7.3 影响露天矿边坡稳定性的因素	143
7.3.1 岩石的组成	143
7.3.2 岩体的结构特征	144

7.3.3	水文地质条件	144
7.3.4	爆破震动	146
7.3.5	边坡的几何形状	148
7.3.6	其他影响因素	149
7.4	边坡稳定性的分析与计算	149
7.4.1	概述	149
7.4.2	边坡稳定性的初步评估	150
7.4.3	平面形滑坡	151
7.4.4	楔形滑坡	153
7.4.5	圆弧形滑坡	155
7.5	露天矿边坡的维护	158
7.5.1	滑坡防治方法分类	159
7.5.2	排水疏干	160
7.5.3	人工加固	160
7.5.4	边坡监测	163
	思考题及习题	163
8	岩石力学在岩基工程中的应用	165
8.1	概述	165
8.2	岩基中的应力分布	166
8.2.1	均质各向同性岩石地基	166
8.2.2	双层岩石地基	169
8.2.3	横观各向同性岩石地基	169
8.3	岩基上基础的沉降	170
8.3.1	浅基础的沉降	170
8.3.2	深基础的沉降	172
8.4	岩基的承载能力	174
8.4.1	岩基破坏模式	174
8.4.2	岩基承载力确定	175
8.5	坝基岩体的抗滑稳定性	178
8.5.1	坝基岩体承受的荷载分析	179
8.5.2	坝基岩体的破坏模式	180
8.5.3	坝基岩体抗滑稳定性计算	181
8.6	岩基的加固措施	184
8.6.1	岩基处理的要求	184
8.6.2	岩基处理的方法	185
	思考题及习题	185
	参考文献	186

1 绪 论

1.1 概述

岩石力学是运用力学原理和方法来研究岩石(体)在各种力场作用下变形和破坏规律的应用性很强的一门新兴学科。它不仅与国民经济基础建设、资源开发、环境保护、减灾防灾有密切联系,具有重要的实用价值,而且也是力学和地学相结合的一门基础学科。

岩石力学的发生与发展与其他学科一样,是与人类的生产活动紧密相关的。早在远古时代,我们的祖先就在洞穴中繁衍生息,并利用岩石做工具和武器,出现过“石器时代”。公元前2700年左右,古代埃及的劳动人民修建了金字塔。公元前6世纪,巴比伦人在山区修建了“空中花园”。公元前613~591年我国人民在安徽涘河上修建了历史上第一座拦河坝。公元前256~251年,在四川岷江修建了都江堰水利工程。公元前254年左右(秦昭王时代)开始出现钻探技术。公元前218年,在广西开凿了沟通长江和珠江水系的灵渠,筑有砌石分水堰。公元前221~206年在北部山区修建了万里长城。在20世纪初,我国杰出的工程师詹天佑主持建成了北京—张家口铁路上一座长约1km的八达岭隧道等等。

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屡见不鲜的。

1980年6月3日5点35分,湖北远安盐池河磷矿发生岩崩,摧毁整个盐池河矿务局,死亡284人。

2000年4月6日,武汉烽火村乔木湾发生地面塌陷,4h内发生大小陷坑19处,2栋楼房塌进陷坑,16栋楼房不同程度开裂、破损,为1977年来武汉市内发生的6起塌陷中规模最大的一次。

2000年4月9日20时,在西藏易贡发生巨型滑坡,历时10min,滑程8km,滑体3亿 m^3 ,堵塞了易贡藏布河道,形成15 km^2 的湖区,使4000多人被困,直接经济损失达1.4亿多元,危及318国道通麦大桥。

2001年5月1日20点30分,重庆武隆县发生了一起基岩滑坡,造成79人死亡,摧毁1栋9层楼房。

1985年6月12日3点52分,由于后部岩崩加载,导致新滩滑坡复活,所幸的是由于预报准确,新滩镇全镇1371人全部安全转移。

马尔帕塞薄拱坝,坝高60m,坝基为片麻岩,1959年左坝肩沿一个倾斜的软弱面滑动,造成溃坝惨剧,400余人丧生。

瓦依昂双曲拱坝,坝高261.6m,坝基为断裂十分发育的灰岩。1963年大坝上游左岸山体发生大滑坡,约有2.7亿~3.0亿 m^3 的岩体突然下塌,水库中有5000万 m^3 的水被挤出,激起250m高的巨大水浪,高150m的洪波溢过坝顶,死亡3000余人。

在人类发展的历程中,我们的祖先创造了无数辉煌灿烂的文明,人类也承受了太多太多的灾难。然而只要人类发展不停,工程活动将无休止,要想科学地利用、开发、保护地球,我们必须首先掌握岩土体的性质,尤其是它们的力学性质。

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；矿床地下开采和地下硐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及经济性产生显著的影响，甚至带来严重的后果。

近年来，虽然岩石力学得到突飞猛进的发展，但与岩体失稳有关的大坝崩溃，边坡滑动，矿山瓦斯爆炸，围岩地下水灾害等惨剧时有发生。诸如此类的工程实例，都充分说明能否安全经济地进行工程建设，在很大程度上取决于人们是否能够运用近代岩石力学的原理和方法去解决工程上的问题。当前世界上正建和拟建的一些巨型工程及与地学有关的重大项目都把岩石力学作为主要研究对象。

1.2 岩石力学的研究任务与内容

岩石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）及地学基础理论研究领域（如地球动力学、构造地质学等）。不同的服务对象，对岩石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，而且还具有非线性弹性、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。

1.2.1 岩石力学的研究任务

岩石力学研究的任务主要有以下四个方面：

(1) 基本原理方面。岩石和岩体的力学模型和本构关系，岩石和岩体的连续介质和不连续力学原理；岩石和岩体的破坏、断裂、蠕变、损伤的机理及力学原理；岩石和岩体计算力学；深部岩体的力学规律研究相关的基本原理。

(2) 试验方面。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，各种岩石和岩体物理力学指标的统计和分析，试验设备与技术的改进。

(3) 实际应用方面。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) 监测方面。通常量测岩体应力和变形变化、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，预测各项岩体力学数据。

综上所述，岩石力学要解决的任务是很广泛的，且具有相当大的难度。要完成这些任务，必须从生产实践中总结岩体工程方面的经验，提高理论知识，再回到实践中去，解决生产实践中提出的有关岩体工程问题，这就是解决岩体力学任务的最基本的原则和方法。

1.2.2 岩石力学的研究内容

由于岩石力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性，决定了岩石力学研究的内容也必然

是广泛而复杂的。从工程观点出发,大致可归纳为以下几方面的内容。

(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石力学分析的基础。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石力学性质的影响;3) 岩体结构及其力学特征;4) 岩体工程分类。

(2) 岩石与岩体的物理力学性质方面。岩石与岩体的物理力学性质指标是评价岩体工程的稳定性最重要的依据。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。

(3) 岩体的地质力学模型及其特征方面。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;研究结构面的空间分布规律及其地质概化模型;研究岩体在自重应力、构造应力、工程应力作用下的力学响应及其对岩体的静、动力学特性的影响;研究赋存于岩体中的各类地质因子,如水、气、温度以及时间、化学因素等相互的耦合作用。

(4) 结构面力学性质的研究。结构面力学性质是岩石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。岩体力学性质是岩石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、地基岩体及地下硐室围岩等工程岩体的稳定性研究。这是岩石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分布大小与分布特征;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石力学中的应用研究。

(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。

1.3 岩石力学的研究方法

岩石力学是一门新兴的学科,又是一门应用性很强的交叉学科和边缘学科,是用力学的观点对自然存在的岩石和岩体进行研究,为岩体工程的设计与施工提供有利于岩体稳定的方案和理论依据。主要研究方法为:

(1) 工程地质研究法。研究岩块和岩体的地质与结构特征,为岩石力学的进一步研究提供地质模型和地质资料。

(2) 试验法。为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。

(3) 数学力学分析法。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。

(4) 综合分析法。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,得出符合实际情况的正确结论。

1.4 岩石力学的产生及其发展

岩石力学是应岩土工程建设的需要产生和发展起来的,它是应用力学一个独立的力学分支,它的理论和技术的专业基础。

在古代,最早的岩体工程是采矿窿洞、道路和石桥。这些工程规模小,且大多处于地表或地壳浅处,工程稳定问题不突出,可凭感性认识和经验进行处理,加之相关学科的发展水平尚低,岩石力学研究不可能提到议事日程上来。

在近代,随着高层建筑的出现,地表不均匀沉降和倾斜的防治越来越重要;随着地下空间的开发利用的发展,大跨度、高边墙的地下工程的稳定问题越来越突出;随着交通运输业的发展,公路、铁路穿山越岭,路堑边坡、隧洞、桥基稳定问题逐渐显露出来;随着水利水电事业的发展,许多拦河大坝横江而立,坝基稳定问题悬系着许多人的心;随着采矿工业的发展,机械化采矿的出现,矿山岩体工程结构转入系统化,开采深度逐年延伸,采出矿岩的体积越来越大,地下矿山的地压问题、露天矿山的边坡稳定问题,不断干扰矿山生产的正常进行和危及矿山工人的安全。人们在这些岩体工程的设计、开挖、支护、加固和破坏控制的实践中,逐步认识了岩石力学研究的重要性,在工程地质研究的基础上,开始了岩石力学的研究。特别是一些重大的岩体工程事故的发生,一系列惨痛的教训,唤起了国内外工程界人士对岩体力学研究的高度重视,大大地推动了岩石力学的发展。我国在20世纪70年代中后期岩石力学的发展进入了一个崭新的时期,岩石力学研究室在煤炭、冶金、铁道、水电等部门迅速成立,岩石力学作为一门独立的学科登上大学讲台。

自20世纪30~40年代开始,在大半个世纪的时间里,岩石力学的发展大致可分为三个阶段,即材料力学阶段、裂隙岩体力学阶段和岩体结构力学阶段。这三个阶段的发展进程,是与人们对岩石的认识发展水平密切相关的。

早期,人们把岩石当做一种连续体,用孤立的岩块的力学性质代替岩体的力学效应,直接运用经典力学知识解决岩体工程的实际问题。人们熟视岩体中普遍存在的断层、节理等不连续面,但对其力学作用没有足够的认识。这是岩石力学发展的第一阶段——材料力学阶段。

从20世纪50年代开始,工程技术人员和岩石力学工作者逐步认识到岩体中不连续面的力学作用,推动岩石力学发展进入了第二阶段——裂隙岩石力学阶段。在这一阶段,奥地利学派起了很大的推动作用。1974年缪勒(L. Müller)主编的《岩石力学》文集总结了这一阶段的研究方法、方向和基本成果,是岩石力学发展第二个阶段的代表作。

认识岩体是不连续的裂隙介质,是岩石力学发展的第一次突破。但是,对裂隙和被裂隙切割的岩体的力学效应的认识还不足。在我国,以谷德振为代表的一批工程地质工作者参加了岩石力学研究,将岩石力学的发展推向了第三个阶段,即岩体结构力学阶段。他们认为,岩体不是一块岩石所能代表的,它是地质体的一部分,处于一定的地质环境中。岩体中的断层、节理等不连续面,以及被它们所切割成的岩石块体,组成了一定的岩体结构;岩体的力学效应,是一种结构效应,并提出了“结构控制论”的思想。在国际上,岩石力学的发展也大致在相同的时期进入了第三阶段。虽然对岩体结构的表述方法有所不同,但对岩体结构的力学效应的认识是基本一致的。今天,岩石力学的理论分析、数值计算、模拟实验乃至现场测试,都无例外地考虑了岩体结构构造的影响。



思考题及习题

- 1-1 叙述岩石力学的定义。
- 1-2 岩石力学的研究对象是什么，你能举出几个岩体变形破坏的事例？
- 1-3 岩石力学的研究方法有哪些，有什么区别？
- 1-4 你对岩石力学的形成与发展有哪些了解？

2 岩石的基本物理力学性质

2.1 概述

岩石的基本物理力学性质是岩体最基本、最重要的性质之一，也是整个岩石力学中研究最早、最完善的力学性质。作为描述完整岩石的物理力学性质的参数，从其大类上说，大致有岩石的质量指标、水理性质指标、描述岩石抗风化能力的指标以及完整岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、三向压缩强度和与各种受力状态相对应的变形特性等。在获得这些参数时，试验方法和环境的不同将对这些参数产生较大的影响。加载的速率、试验机的刚度、岩石试件的形状和尺寸等甚至会改变岩石的力学性状。而刚性试验机的诞生，应力-应变全过程曲线的获得，对岩石的变形特性的认识，进入了一个全新的阶段。有人甚至说这是岩石力学试验上的一次革命。

对于岩石力学特性的认识，最终将体现在如何描述应力-应变的关系上。由于岩石介质的特殊性，在本构方程的研究上，相对比较薄弱。根据目前的研究现状，只能采用简化的方法，表述岩石的变形特性，包括其流变性。

作为判别岩石是否破坏的各种强度理论，是岩石的力学特性在工程中的应用的体现。完整岩石的破坏，有其自身的规律，无论是四大经典强度理论，还是莫尔强度理论、格里菲斯强度理论和 E. T. Brown 的经验强度理论，都存在着一一定的缺陷，都不能将所有岩石的强度规律涵盖。这就是目前岩石力学研究的现状。

随着岩体工程建设的发展，将开发出新的研究领域，需要采用新的研究方法，才能使岩石力学的理论更加完善。例如，不同加载路径对岩石力学特性的影响；深埋岩体中，岩石在高温、高压或者低温等条件下的力学特性，都将作为新的研究方向和课题。

2.2 岩石的基本物理性质

岩石按其成因可分为：岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。这三大岩类有着很明显的区别，各类岩石由于各种矿物的组成成分、结构构造和成岩条件的不同，对岩石的物理力学性质有很大的影响。

2.2.1 岩石的密度指标

2.2.1.1 岩石的密度

岩石的密度是指岩石试件的质量与试件的体积之比，即单位体积（包括岩石中孔隙体积）内岩石的质量。岩石是由固相（由矿物、岩屑等组成）、液相（充填于岩石孔隙中的液体组成）和气相（由孔隙中未被液体充满的剩余体积中的气体组成）组成的。很明显，这三相物质在岩石中所含的比例不同，矿物岩屑的成分不同，密度也会发生变化。

根据岩石试样的含水情况不同岩石的密度可分为天然密度（ ρ ）、干密度（ ρ_d ）和饱和密度（ ρ_{sat} ），一般未说明含水状态时指天然密度。

(1) 天然密度 ρ (kg/m^3)。天然密度是指岩石在自然条件下，单位体积的质量，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中 m ——岩石试件的总质量；

V ——该试件的总体积。

(2) 饱和密度 ρ_{sat} (kg/m^3)。饱和密度是指岩石中的孔隙都被水充填时单位体积的质量，即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_V \rho_w}{V} \quad (2-2)$$

式中 m_s ——岩石中固体的质量；

V_V ——孔隙的体积；

ρ_w ——水的密度。

(3) 干密度 ρ_d (kg/m^3)。干密度是指岩石孔隙中的液体全部被蒸发，试件中仅有固体和气体的状态下，其单位体积的质量，即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (2-3)$$

密度试验通常用称重法。在进行天然密度的实验时，首先应该保持被测岩石的含水量，其次要注意岩石中是否含有遇水溶解、遇水膨胀的矿物成分，若有类似的物质应该采用水下称重的方法进行试验，即先将试件的外表涂上一层厚度均匀的石蜡，然后放在水中称物体的重量，并计算天然密度；饱和密度可采用48h浸水法、抽真空法或者煮沸法使岩石试件饱和，然后再称重；而干密度的测试方法是先把试件放入105~110℃烘箱中，将岩石烘至恒重（一般约为24h左右），再进行称重试验。

2.2.1.2 重力密度

重力密度 γ (kN/m^3) 是指单位体积中岩石的重量，通常简称为重度。

$$\gamma = \rho g \quad (2-4)$$

式中 g ——重力加速度， m/s^2 。

2.2.1.3 岩石的颗粒密度

岩石的颗粒密度 ρ_s (kg/m^3) 是指岩石固体物质的质量 (m_s) 与固体的体积之比值。其公式为

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (2-5)$$

式中 V_s ——为固体的体积。

岩石的颗粒密度可采用比重瓶法测得。

2.2.2 岩石的孔隙性

岩石所具有孔隙和裂隙的特性，统称为岩石的孔隙性，是反映微裂隙发育程度的指标。通常用孔隙率和孔隙比两个指标来表征。

2.2.2.1 岩石的孔隙比

岩石的孔隙比 (e) 是指孔隙的体积 V_V 与固体体积 V_s 之比。其公式为

$$e = \frac{V_V}{V_s} \quad (2-6)$$