

高等教育“十二五”规划教材

岩体力学

Yanti Lixue

陈海波 兰永伟 徐 涛 主编

中国矿业大学出版社

高等教育“十二五”规划教材

岩体力学

主 编	陈海波	兰永伟
	徐 涛	
副主编	石建军	刘志军
	高文蛟	李兴伟

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了岩体力学的基本知识,主要包括:岩石的基本物理力学性质、岩石的本构关系、岩体结构及岩体力学性质、工程岩体分类、岩体地应力及其测量方法、岩体力学在地下工程中的应用、岩体力学在边坡工程中的应用、岩体工程模拟、矿山压力观测、岩体力学数值计算方法和新进展。本书在内容选取上注重基本知识与工程实例结合,整体结构合理,系统性和完整性好,具有实用性、先进性,便于学习。

本书可作为普通高等学校本、专科教材,其知识的深度和广度按照教学要求安排,适用于采矿工程、岩土工程、地质工程、石油工程、水利水电工程、铁道工程等专业教学使用,也可供从事相关专业的生产技术管理、科研、设计等部门的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩体力学 / 陈海波, 兰永伟, 徐涛主编. —徐州 :

中国矿业大学出版社, 2012. 2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1297 - 9

I. ①岩… II. ①陈…②兰…③徐… 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(2011)第 222240 号

书 名 岩体力学

主 编 陈海波 兰永伟 徐 涛

责任编辑 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 19 字数 474 千字

版次印次 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是作者结合多年来的教学实践和参考其他相关教材编写而成的。书中不但注意加强对基础理论的阐述,而且对岩体工程实践和设计中出现的问题作出了分析并提出了解决问题的方法,还将近年来国内外在岩体力学研究方面的最新成果作了介绍,特别就采矿工程专业相关的地下岩体工程的矿山压力观测作了较详细的阐述。本书的主要内容包括:岩石的基本物理力学性质、岩石的本构关系、岩体结构及岩体力学性质、工程岩体分类、岩体地应力及其测量方法、岩体力学在地下工程中的应用、岩体力学在边坡工程中的应用、岩体工程模拟、矿山压力观测、岩体力学数值计算方法和新进展。本书力求用最简明的语言系统而完整地把知识介绍给读者,由浅入深、说理透彻,具实用性、先进性,便于学习。本书可作为采矿工程、岩土工程、地质工程、石油工程、水利水电工程及铁道工程专业本、专科生的专业基础课教材,按 50 学时授课内容编写。

本书为高等教育“十二五”规划教材,由陈海波、兰永伟、徐涛任主编,陈海波统校定稿。全书共分 11 章,具体编写分工为:黑龙江科技学院陈海波编写第 1、2、9 章;黑龙江科技学院兰永伟编写第 6、11 章;鸡西大学徐涛编写第 3、8 章;华北科技学院石建军编写第 4 章;华北科技学院高文蛟编写第 5 章和第 10 章的 10.4.3,10.4.4;黑龙江科技学院刘志军编写第 7 章;黑龙江科技学院李兴伟编写第 10 章的 10.1,10.2,10.3,10.4.1,10.4.2。

本书在编写过程中吸收了以往相关教材的优点,参阅了近年来高校及设计部门的资料和文献,在教材立项、编写和出版过程中还得到了中国矿业大学出版社的关心与帮助,在此向所有被引用文献的作者、参与本书编写和出版工作的所有人员表示感谢!

由于编者学识所限,加之时间仓促,书中不当和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 8 月

目 次

第 1 章 绪论	1
1.1 岩体力学与工程实践	1
1.2 岩体力学的研究内容和研究方法	2
1.3 岩体力学与其他学科的关系	4
1.4 岩体力学的发展历史和概貌	5
思考题与习题	7
第 2 章 岩石的基本物理力学性质	8
2.1 岩石的基本构成和地质分类	8
2.2 岩石的物理性质	17
2.3 岩石的力学性质	23
2.4 岩石的变形性质	33
2.5 岩石的流变性质	41
2.6 影响岩石力学性质的因素	45
思考题与习题	49
第 3 章 岩石的本构关系	50
3.1 概述	50
3.2 岩石的弹性本构关系	50
3.3 岩石的塑性本构关系	52
3.4 岩石的流变本构关系	53
3.5 岩石强度理论	57
思考题与习题	65
第 4 章 岩体结构及岩体力学性质	66
4.1 概述	66
4.2 岩体结构面特征及类型	66
4.3 结构面的力学性质	76
4.4 岩体的变形特征	81
4.5 岩体的强度特征	88
4.6 岩体的动力学性质	95
4.7 岩体的水力学性质	100

思考题与习题·····	104
第 5 章 工程岩体分类·····	105
5.1 工程岩体分类的目的和原则 ·····	105
5.2 工程岩体代表性分类 ·····	105
5.3 岩体质量评价及其分类的发展趋势 ·····	112
思考题与习题·····	113
第 6 章 岩体地应力及其测量方法·····	114
6.1 地应力的概念与意义 ·····	114
6.2 岩体中的初始应力场 ·····	115
6.3 岩体中地应力成因及分布规律 ·····	120
6.4 地应力的测量方法 ·····	127
6.5 高地应力地区的主要岩体力学问题 ·····	142
思考题与习题·····	145
第 7 章 岩体力学在地下工程中的应用·····	146
7.1 岩体二次应力状态的基本概况 ·····	146
7.2 岩体地下工程围岩应力解析法分析 ·····	147
7.3 围岩压力与控制 ·····	161
7.4 软岩工程 ·····	181
思考题与习题·····	187
第 8 章 岩体力学在边坡工程中的应用·····	188
8.1 概述 ·····	188
8.2 边坡岩体中的应力分布特征 ·····	189
8.3 边坡岩体的变形与破坏 ·····	191
8.4 边坡岩体稳定性分析的步骤 ·····	195
8.5 边坡岩体稳定性计算 ·····	197
8.6 滑坡的监测和治理 ·····	205
思考题与习题·····	211
第 9 章 岩体工程模拟·····	212
9.1 相似材料模拟法 ·····	212
9.2 光弹模拟法 ·····	222
思考题与习题·····	233
第 10 章 矿山压力观测 ·····	234
10.1 概述·····	234

10.2 矿压观测仪器·····	236
10.3 采煤工作面“三量”观测·····	254
10.4 采场附近巷道矿山压力观测方法·····	269
思考题与习题·····	284
 第 11 章 岩体力学数值计算方法和新进展简介 ·····	285
11.1 岩体力学的发展与工程地质学等地质学科发展的关系·····	285
11.2 固体力学的成就在岩体力学中的应用·····	286
11.3 岩石力学试验与测试方法的进展·····	287
11.4 数值分析在岩石力学中的应用和进展·····	288
11.5 位移反分析方法在岩体力学中的应用·····	292
11.6 新的数学方法和软科学在岩石力学中的应用·····	293
思考题与习题·····	294
 参考文献 ·····	295

第1章 绪 论

岩体力学是近代发展起来的一门新兴和边缘学科,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、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多与岩体工程相关的工程领域。一方面,岩体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使了岩体力学的诞生和发展。

1.1 岩体力学与工程实践

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。诸如高坝坝基岩体和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。对这些问题能否作出正确的分析和评价,将会对工程建设和生产的安全性 with 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很多。例如,1928年美国圣·弗朗西斯重力坝失事,是坝基软弱、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 28 m/s 的速度下滑,激起 250 m 高的巨大涌浪,溢过坝顶冲向下游,造成 $2\,500$ 多人丧生。类似的例子在国内也不少,例如,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埋掉价值约 200 万元的生产设备,并造成停产 3 年。再如,新中国成立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。以上重大事故的发生,多是对工程地区岩体的力学特性研究不够和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,则会致使工程投资大大增加、工期延长,从而造成不应有的浪费。

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 335 m (前苏联的 Rogun 坝);地下厂房边墙高达 $60 \sim 70 \text{ m}$,跨度已超过 30 m ;露天采矿边坡高度可达 $500 \sim 700 \text{ m}$,最高可达 $1\,000 \text{ m}$ (新西兰);地下采矿深度已超过 $4\,000 \text{ m}$ 。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 17 680 MW,列世界第一),英吉利海峡隧道(长 50 km)和日本的青函跨海隧道(长 53.85 km)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。

1.2 岩体力学的研究内容和研究方法

1.2.1 研究内容

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须是广泛而复杂的。但对任何岩体工程领域来讲,下列的基本内容都是要首先进行研究的。

(1) 岩石、岩体的地质特征。内容包括: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、水理和热力学性质。

(3) 岩石的基本力学性质。内容包括:① 岩块在各种力学作用下的变形和强度特征以及力学指标参数;② 影响岩石力学性质的主要因素,包括加载条件、温度和湿度等;③ 岩石的变形破坏机理及其破坏判据。

(4) 结构面的力学性质。内容包括:① 结构面在法向压应力和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和方法。

(5) 岩体的力学性质。内容包括:① 岩体变形和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计;③ 影响岩体力学性质的主要因素;④ 岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

(6) 原岩应力(地应力)分布规律及其测量理论与方法。

(7) 工程岩体的稳定性。内容包括:① 各类工程岩体在开挖荷载作用下的应力、位移分布特征;② 各类工程岩体在开挖荷载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) 岩体工程稳定性维护技术。包括岩体性质的改善与加固技术等。

(9) 各种新技术、新方法和新理论在岩石力学中的应用。

(10) 工程岩体的模型模拟实验和原位监测技术的研究。模型模拟实验包括数值模型模拟、物理模型模拟等,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和稳定性分析成果的正确与否,同时也可以及时地发现问题并采取相应的合理措施加以解决。

1.2.2 研究方法

由于岩体力学是一门边缘交叉学科,研究的内容广泛、对象复杂,这就决定了岩体力学研究方法的多样性。根据所采用的研究手段或所依据的基础理论所属学科领域的不同,岩体力学的研究方法可大概归纳为以下四种。

(1) 工程地质研究方法。该方法着重于研究与岩石和岩体的力学性质有关的岩石和岩体地质特征。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。

(2) 科学实验方法。科学实验是岩体力学发展的基础,它包括实验室岩体力学参数的测定、模型实验、现场岩体的原位试验及监测技术、地应力的测定和岩体构造的测定等。试验结果可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,还可以用某些试验结果(如模拟实验及原位应力、位移、声发射监测结果等)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。随着岩体力学的不断发展,其涉及的实验范围也越来越宽,如地质构造的勘测、大地层的力学测定等,可为岩体力学提供必要的研究资料。另外,室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。近代发展起来的新的实验技术都已不断地应用于岩体力学领域,如遥感技术、激光散斑和切层扫描技术、三维地震勘测成像和三维地震CT成像技术、微震技术等,都已逐渐为岩体工程服务。

(3) 数学力学分析方法。数学力学分析是岩体力学研究中的一个重要环节。它是通过建立工程岩体的力学模型和利用适当的分析方法,预测工程岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为岩体工程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、流变模型、断裂力学模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等。常用的分析方法有:① 数值分析方法,包括:有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法、无界元法、流形元法、不连续变形分析法、块体力学和反演分析法等;② 模糊聚类和概率分析,包括:随机分析、可靠度分析、灵敏度分析、趋势分析、时间序列分析和灰色系统理论等;③ 模拟分析,包括:光弹应力分析、相似材料模型实验和离心模型实验等。在边坡研究中,还普遍采用极限平衡的分析方法。

(4) 整体综合分析方法。就整个工程进行多种方法并以系统工程为基础的综合分析,这是岩体力学与岩体工程研究中极其重要的一套工作方法。由于岩体力学与工程研究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并考虑多种因素(包括工程的、地质的和施工的等)进行综合分析和评价,特别注重理论和经验相结合,才能得出符合实际情况的正确结论。就岩体工程而言,整体综合分析方法又必须以不确定性分析方法为指导,因为在岩体工程问题中存在着工程的、地质的和施工的等多方面的不确定性因素。只有采用不确定性研究方法,才能彻底摆脱传统的固体力学、结构力学的确定性分析方法的影响,使研究和分析的结果更符合实际、更可靠和实用。现代非线性科学理论、信息科学理论、系统科学理论、模糊数学、人工智能、灰色理论和计算机科学技术的发展等为不确定性分析方法奠定了必要的技术基础。

1.2.3 岩体力学研究的主要问题

岩体力学的服务对象是岩体工程,岩体力学是在研究和解决岩体工程所遇到的各种问题的过程中不断发展起来的。岩体工程所要研究的问题很多,下面只是纲领性地归纳出它的主要研究问题。

(1) 采矿工程:① 井下开采中巷道和采场围岩稳定性问题,特别是软岩巷道和深部开采地压控制问题;② 采场稳定性及开采优化(采场结构、开采顺序、开挖步骤等)设计问题;③ 矿井突水预测、预报及预处理理论和技术;④ 岩爆、煤与瓦斯突出预测及预处理理论和技术;⑤ 采空区处理及地面沉降问题;⑥ 露天采矿边坡设计及稳定加固技术;⑦ 岩石破碎问题。

(2) 水利水电工程:① 坝基和坝肩稳定性、防渗加固理论和技术;② 有压和无压引水隧

道设计、施工及加固理论技术;③ 大跨度高边墙地下厂房的围岩稳定及加固技术;④ 高速水流冲刷的岩体力学问题;⑤ 水库诱发地震的预报问题;⑥ 库岸稳定及加固方法。

(3) 铁道和公路建设工程:① 线路边坡稳定性分析;② 隧道设计和施工技术;③ 隧道施工中的地质超前预报及处理;④ 高地应力区的岩爆理论及处理;⑤ 隧道入口施工技术及洞脸边坡角的确定和加固措施;⑥ 地铁施工技术。

(4) 土木建筑工程:① 高层建筑地基处理与加固技术;② 大型地下硐室、地下建筑空间设计、施工与加固理论技术;③ 地面建筑物沉降、倾斜控制和纠偏技术;④ 山城或山坡及临坡建筑物基础滑坡监测预报与防治技术。

(5) 石油工程:① 岩体应力与岩体渗透性;② 岩体力学与地球物理勘探综合研究;③ 钻探技术与井壁稳定性;④ 岩体力学与采油技术(水压致裂、水平钻孔);⑤ 油层压缩及地表沉陷;⑥ 石油、天然气运输、储存工程及环境影响。

(6) 海洋勘探与开发工程。

(7) 核电站建设中核废料处理技术。

(8) 地层热能资源开发技术问题。

(9) 地震预报中的岩体力学问题。

以上只是一些主要方面,随着岩体工程建设的发展,还会有新问题不断提出。

1.3 岩体力学与其他学科的关系

岩体力学涉及两大学科:地质学科和力学学科。

1.3.1 地质学科在岩体力学中的作用

岩体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,所以在研究岩体的力学问题时,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体力学问题。岩体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。这就需要运用历史地质学、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综合处理岩体的力学问题。

1.3.2 力学学科在岩体力学中的作用

岩体力学是力学学科的一个分支,属固体力学范畴。但岩体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,因此理论力学在岩体力学中的应用受到约束,但理论力学知识能提供物体运动规律和平衡条件,这为岩体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。岩体力学的变形研究是基于上述力学发展起来的。问题是岩体是一个多相体,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,因而利用一般变形物体的力学理论和方法时会

一门学科,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,岩体则含有岩石块和节理裂隙,因而它们与土的结构构造有很大的不同。岩石与岩体受荷载后其变形是岩石块本身及节理裂隙的变形和岩石块的变位。可见,岩体力学与土力学的研究对象是不同的。但是,土与岩石有时是难以区分的,例如,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,它们之间没有明显的区分界线。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。岩石力学或岩体力学成为一门学科比土力学要晚,这是因为20世纪后期重大的岩体工程建设增多,仅凭土力学的理论和技术已不能解决岩体工程中的力学问题,因而岩石或岩体力学应运而生,解决了土力学所不能解决的岩体力学问题。

1.4 岩体力学的发展历史和概貌

岩体力学按其发展进程可划分四个阶段:

(1) 初始阶段(19世纪末~20世纪初)

该阶段是岩体力学的萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的力学计算问题。例如,1912年海姆(A. Heim)提出的静水压力理论。他认为地下岩体处于一种静水压力状态,作用在地下岩体工程上的垂直压力和水平压力相等,均等于单位面积上覆岩层的重力。朗金(W. J. M. Rankine)和金尼克(A. Н. Динник)也提出了相似的理论。但他们认为只有垂直压力等于单位面积上覆岩层的重力,而水平压力应为垂直压力乘一个侧压系数。由于当时地下岩体工程埋藏深度不大,因而人们曾一度认为这些理论是正确的。但随着开挖深度的增加,越来越多的人认识到上述理论是不准确的。

(2) 经验理论阶段(20世纪初~20世纪30年代)

该阶段出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论是普罗托吉雅柯诺夫(М. М. Прото́джко́нов)提出的自然平衡拱学说,即普氏理论。该理论认为,围岩开挖后自然塌落成抛物线拱形,作用在支架上的压力等于冒落拱内岩体的重力,仅是上覆岩体重力的一部分。于是,确定支护结构上的荷载大小和分布方式成了地下岩体工程支护设计的前提条件。太沙基(K. Terzahi)也提出相同的理论,只是他认为塌落拱的形状是矩形,而不是抛物线形。但事实上,围岩的塌落并不是形成围岩压力的唯一来源,也不是所有的地下空间都存在塌落拱。进一步地说,围岩和支护之间并不完全是荷载和结构的关系问题,在很多情况下围岩和支护形成一个共同承载系统,而且维持岩体工程的稳定最根本的还是要发挥围岩的作用。因此,靠假定的松散地层压力来进行支护设计是不合实际的。尽管如此,上述理论在一定历史时期和一定条件下还是发挥了一定作用的。

(3) 经典理论阶段(20世纪30年代~20世纪60年代)

该阶段是岩体力学学科形成的重要阶段,弹性力学和塑性力学被引入岩体力学,确立了一些经典计算公式,形成围岩和支护共同作用的理论。结构面对岩体力学性质的影响受到重视、有关岩体力学文献和著作的出版、实验方法的完善、岩体工程技术问题的解决,这些都说明岩体力学发展到该阶段已经成为一门独立的学科。

在经典理论发展阶段,形成了“连续介质理论”和“地质力学理论”两大学派。

连续介质理论是以固体力学作为基础,从材料的基本力学性质出发来认识岩体工程的稳定问题,这是认识方法上的重要进展,抓住了岩体工程计算的本质问题。早在 20 世纪 30 年代,萨文(Р. Н. Савин)就用无限大平板孔附近应力集中的弹性解析解来计算分析岩体工程的围岩应力分布问题。20 世纪 50 年代,鲁宾涅特(К. В. Руллененит)运用连续介质理论写出了求解岩体力学领域问题的系统著作。同期,有人用弹塑性理论研究围岩的稳定问题,导出著名的芬纳(R. Fenner)—塔罗勃(J. Talobre)公式和卡斯特纳(H. Kastner)公式。塞拉塔(S. Serata)用流变模型进行了隧洞围岩的黏弹性分析。

20 世纪 60 年代,运用早期的有限差分和有限元等数值分析方法,出现了考虑实际开挖空间和岩体节理、裂隙的围岩和支护共同作用的弹性或弹塑性计算解,使运用围岩和支护共同作用原理进行实际岩体工程的计算分析和设计变得普遍起来。

地质力学理论注重研究地层结构和力学性质与岩体工程稳定性的关系,它是 20 世纪 20 年代由德国人克罗斯(H. Cloos)创立起来的。该理论反对把岩体当做连续介质简单地利用固体力学的原理进行岩体力学特性的分析;强调要重视对岩体节理、裂隙的研究,重视岩体结构面对岩体工程稳定性的影响和控制作用。1951 年 6 月在奥地利成立了以斯梯尼(J. Stini)和米勒(L. Müller)为首的“地质力学研究组”,在萨尔茨堡举行了第一届地质力学讨论会,形成了“奥地利学派”。从此该理论迅速发展,并广泛应用于岩体工程,在全世界产生了广泛的影响。该理论对岩体工程的最重要贡献是提出了“研究工程围岩的稳定性必须了解原岩应力和开挖后岩体的力学强度变化”以及“节理裂隙对岩体工程稳定性的影响”等观点。该理论同时重视岩体工程施工过程中应力、位移和稳定性状态的监测,这是现代信息岩体力学的雏形。该学派重视支护与围岩的共同作用,特别重视利用围岩自身的强度维持岩体工程的稳定性。在岩体工程施工方面,提出了著名的“新奥法”,该方法特别符合现代岩体力学理论,至今仍被国内外广泛应用。1962 年 10 月,在第 13 届地质力学讨论会上成立了国际岩石力学学会,米勒担任第一任主席,这是岩体力学发展史上的重要事件。

(4) 现代发展阶段(20 世纪 60 年代至今)

此阶段是岩体力学理论和实践的新进展阶段,其主要特点是,用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩体力学问题,把力学、物理学、系统工程、现代数理科学、现代信息技术等的最新成果引入岩体力学。而电子计算机的广泛应用为流变学、断裂力学、非连续介质力学、数值方法、灰色理论、人工智能、非线性理论等在岩体力学与工程中的应用提供了可能。

从总体上来讲,现代岩体力学理论认为,由于岩石和岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性,岩体力学既不能完全套用传统的连续介质理论,也不能完全依靠以节理、裂隙和结构面分析为特征的传统地质力学理论,而应采用系统论的方法来进行岩体力学与工程的研究。用系统概念来表征岩体,可使岩体的复杂性得到全面的科学的表述。从系统角度来讲,岩体的组成、结构、性能、赋存状态及边界条件构成其力学行为和工程功能的基础,岩体力学研究的目的是认识和控制岩石系统的力学行为和工程功能。

20 世纪 60 年代和 70 年代,原位岩体与岩块的巨大工程差异被揭示出来,岩体的地质结构和赋存状况受到重视,不连续性成为岩体力学研究的重点,从“材料”概念到“不连续介质”概念是岩体力学理论上的飞跃。

随着计算机科学的进步,20 世纪 60 年代和 70 年代开始出现用于岩体工程稳定性计算

的数值计算方法,主要是有限元法。20世纪80年代数值计算方法发展很快,有限元、边界元及其混合模型得到广泛的应用,成为岩体力学分析计算的主要手段。20世纪90年代数值分析终于在岩体力学学科中扎根,岩体力学专家和数学家合作创造出一系列新的计算原理和方法。例如,损伤力学和离散元法的进步,DDA法和流形方法的发展,岩体力学专家建立起自己独到的分析原理和计算方法。

现代计算机科学技术的进步也带动了现代信息技术的发展。20世纪80年代和90年代,岩体工程三维信息系统、人工智能、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等迅速发展起来,并得到普遍的重视和应用。

20世纪90年代,现代数理科学的渗透是非线性科学在岩体力学中的重要应用。从本质上讲,非线性和线性是互为依存的。耗散结构论、协同论、分叉和混沌理论正在被试图用于认识和解释岩体力学的各种复杂过程。岩体力学和相邻的工程地质学都因受到研究对象的“复杂性”挑战,而对非线性理论倍加青睐。

、岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性致使岩体力学所研究的目标和对象存在着大量不确定性,因而有人从20世纪80年代末提出不确定性研究理论,目前已被越来越多的人所认识和接受。现代科学技术手段如模糊数学、人工智能、灰色理论和非线性理论等为不确定性分析研究方法和理论体系的建立提供了必要的技术支持。

可以说,从“材料”概念到“不连续介质”概念是现代岩体力学的第一步突破;进入计算力学阶段是第二步突破;而非线性理论、不确定性理论和系统科学理论进入实用阶段,则是岩体力学理论研究及工程应用的第三步意义更为重大的突破。

思考题与习题

1. 何谓岩体力学?
2. 岩体力学的研究内容和研究方法是什么?
3. 岩体力学研究的主要问题有哪些?

第2章 岩石的基本物理力学性质

岩体是由岩块和结构面组成的。一般来说,岩块的力学性能比岩体的力学性能要好得多。大多数岩块的力学性能均可满足一般建筑的要求,而岩体则不能。因此岩体力学研究的主要对象是岩体,而不是岩块。那么,研究岩块的意义何在呢?我们说岩体力学研究岩块性质的意义在于:

① 在岩体性质接近岩块性质时,如裂隙不发育的厚层、巨厚层岩体和块状岩体,则可通过岩块力学性质的研究外推岩体的力学性质,并解决有关的岩体力学问题。

② 岩块是岩体的组成部分,当研究岩体在不同加载条件下的强度和变形性质时,不能忽视岩块性质的研究。

③ 在评价石材性能时,必须研究相关岩块的物理力学性质。

④ 在评价岩石的可黏性和可破碎性时,也要研究岩块的物理力学性质。

⑤ 在工程岩体分类中,岩块强度和变形模量作为重要分类指标,这时也要研究岩块的物理力学性质。

因此,研究岩体的物理力学性质,首先要研究岩块的物理力学性质。

2.1 岩石的基本构成和地质分类

岩石是自然界中各种矿物的集合体,是天然地质作用的产物。一般而言,大部分新鲜岩石质地均较坚硬致密、孔隙小而少、抗水性强、透水性弱、力学强度高。

岩石是构成岩体的基本组成单元。相对于岩体而言,岩石可看做连续的、均质的、各向同性的介质。但实际上只要稍微深入研究,就不难发现岩石中也存在一些如矿物节理、微裂隙、粒间空隙、晶格缺陷、晶格边界等内部缺陷,统称微结构面。因此,自然界中的岩石又是一种受到不同程度损伤的材料。

作为天然地质作用产物的岩石,在自然界中多姿多彩、纷繁复杂。对于初学者,准确地认识岩石并不是一件简单的事。为了使大家对岩石有一个较为深入的了解,本节将从岩石的基本构成入手介绍岩石的基本特征,从岩石的地质成因入手介绍岩石的地质分类。

2.1.1 岩石的基本构成

岩石的基本构成是由组成岩石的物质成分和结构两大方面来决定的。

2.1.1.1 岩石的主要物质成分

岩石中主要的造岩矿物有正长石、斜长石、石英、黑云母、白云母、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭石和赤铁矿等。它们的含量,因不同成因的岩石而异。岩石中的矿物成分会影响岩石的抗风化能力、物理性质和强度特性。

岩石中矿物成分的相对稳定性对岩石抗风化能力有显著的影响,各矿物的相对稳定性

主要与其化学成分、结晶特征及形成条件有关。从化学元素活动性来看, Cl^- 和 SO_4^{2-} 最易迁移, 其次是 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 再次是 SiO_2 , 最后是 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 , 至于低价铁离子则易氧化。

基性和超基性岩石主要是由易于风化的橄榄石、辉石及基性斜长石组成, 所以非常容易风化。酸性岩石主要由较难风化的石英、钾长石、酸性斜长石及少量暗色矿物(多为黑云母)组成, 故其抗风化能力比同样结构的基性岩石要高。中性岩则居两者之间, 变质岩的风化性状与岩浆岩类似。沉积岩主要由风化产物组成, 大多数为原来岩石中较难风化的碎屑物或是在风化和沉积过程中新生成的化学沉积物。因此, 它们在风化作用中的稳定性一般都较高。但是矿物成分并不是决定岩石风化性状的唯一因素, 因为岩石的性状还取决于岩石的结构和构造特征, 所以不能将矿物抗风化的稳定性与岩石的抗风化性等同起来。

通常可以将造岩矿物分为非常稳定的、稳定的、较稳定的和不稳定的四类(表 2-1)。

表 2-1 主要造岩矿物抗风化相对稳定性

抗风化稳定性	非常稳定的			稳定的		较稳定的				不稳定的			
矿物名称	石 英	钾 长 石	白 云 母	正 长 石	钠 长 石	酸 性 斜 长 石	角 闪 石	辉 石	黑 云 母	基 性 斜 长 石	霞 石	橄 榄 石	黄 铁 矿

新鲜岩石的力学性质主要取决于岩石的矿物成分和颗粒间的联结。对于具有结晶联结的岩石, 其矿物成分的影响要大一些。应当指出, 岩石中矿物的硬度和岩石的强度是两个既有联系而又不同的概念。例如, 即使组成岩石的矿物都是坚硬的, 岩石的强度也不见得一定是高的, 因为矿物之间的联结可能是弱的。但就大部分岩石来说, 两者之间还是有相应关系的。如在许多岩浆岩中, 其强度常随暗色矿物(辉石, 特别是橄榄石)含量的增加而增大。在沉积岩中, 砂岩的强度常随石英相对含量的增加而增大; 石灰岩的强度常随其硅质混合物含量的增加而增大, 随黏土质含量的增加而降低。在变质岩中, 任何片状的硅酸盐类矿物、盐岩矿物, 如云母、绿泥石、滑石、蛇纹石等将使岩石强度降低, 特别是当这些矿物呈平行排列时。

岩石中某些易溶物、黏土矿物、特殊矿物的存在, 常使岩石物理力学性质复杂化。一些易溶矿物, 如石膏、芒硝、岩盐、钾盐等在水的作用下易被溶蚀, 从而使岩石的孔隙率加大, 结构变松, 强度降低。一些含芒硝的岩石, 由于芒硝的物态变化(液态变固态, 不含结晶水变含结晶水)能引起体积的变化, 因此, 在温度由 32.5°C 以上变成 32.5°C 以下, 或由干燥变潮湿时, 会导致芒硝由液态变固态, 由无水变含水, 体积增大, 引起岩石膨胀。含石膏的岩石, 也会由于石膏(CaSO_4)转变为水化石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)时体积增大而发生膨胀。

另外, 黏土岩石中的蒙脱石遇水膨胀且强度降低; 凝灰岩中一些不稳定的物质极易分解成斑脱土, 遇水也易膨胀和软化。还有某些玻璃质和次生矿物, 如沸石等能促进岩石与磷之间的化学反应。

2.1.1.2 常见的岩石结构类型

岩石的结构, 是指岩石中矿物(及岩屑)颗粒相互之间的关系, 包括颗粒的大小、形状、排列、结构联结特点及岩石中的微结构面(即内部缺陷)。其中, 以结构联结和岩石中的微结构

面对岩石工程性质影响最大。岩石中结构联结的类型主要有两种,分别为结晶联结和胶结联结。

(1) 结晶联结

岩石中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的结构联结。这种联结使晶体颗粒之间紧密接触,故岩石强度一般较大,但随结构的不同而有一定的差异,如在岩浆岩和变质岩中,等粒结晶结构一般比非等粒结晶结构的强度大、抗风化能力强。在等粒结构中,细粒结晶结构比粗粒的强度高。在斑状结构中,细粒基质比玻璃基质的强度高。总之,晶粒愈细、愈均匀、玻璃质愈少,则强度愈高。粗粒斑晶的酸性深成岩强度最低,细粒微晶而无玻璃质的基性喷出岩强度最高。如粗粒花岗岩抗压强度一般只有 120 MPa,而同一成分的细粒花岗岩抗压强度则可达 260 MPa。

具有结晶联结的一些变质岩,如石英岩、大理岩等情况与岩浆岩类似。沉积岩中的化学沉积岩是以可溶的结晶联结为主,联结强度较大,一般以等粒细晶的岩石强度最高,如成分均一的致密细粒石灰岩抗压强度可达 260 MPa,但这种联结的缺点是抗水性差,能不同程度地溶于水中,对岩石的可溶性有一定的影响。固结黏土岩的联结有一部分是再结晶的结晶联结,其强度比其他坚硬岩石要差很多。

(2) 胶结联结

胶结联结是指颗粒与颗粒之间通过胶结物胶结在一起的联结,如沉积碎屑岩、部分黏土岩的结构联结。对于这种联结的岩石,其强度主要取决于胶结物及胶结类型。从胶结物来看,硅质、铁质胶结的岩石强度较高,钙质次之,而泥质胶结强度最低。从胶结类型来看,根据颗粒之间以及颗粒与胶结物间的关系,碎屑岩具有三种基本类型:

① 基质胶结:颗粒彼此不直接接触,完全受胶结物包围,岩石强度基本取决于胶结物的性质。如图 2-1(a)所示。

② 接触胶结:只有颗粒接触处才有胶结物胶结,胶结一般不牢固,故岩石强度低,透水性较强。如图 2-1(b)所示。

③ 孔隙胶结:胶结物完全或部分地充填于颗粒间的孔隙中,胶结一般较牢固,岩石强度和透水性主要视胶结物性质和其充填程度而定。如图 2-1(c)所示。

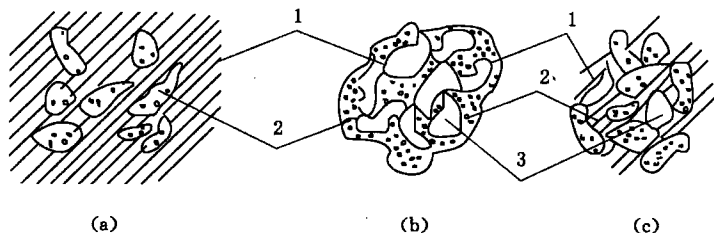


图 2-1 碎屑岩胶结类型

1——胶结物质;2——颗粒;3——未充填的孔隙

(3) 岩石中的微结构面

岩石中的微结构面(或称缺陷),是指存在于矿物颗粒内部或矿物颗粒及矿物集合体之间微小的弱面及空隙。它包括矿物的节理、晶格缺陷、晶粒边界、粒间空隙和微裂隙等。