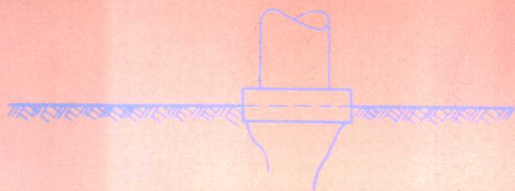
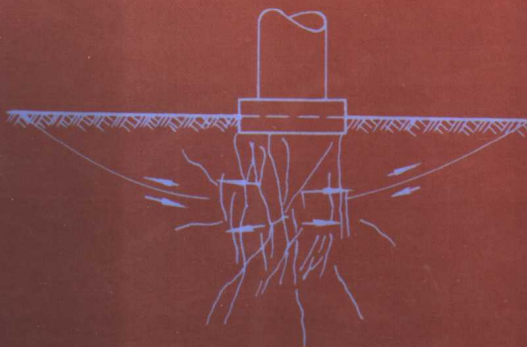
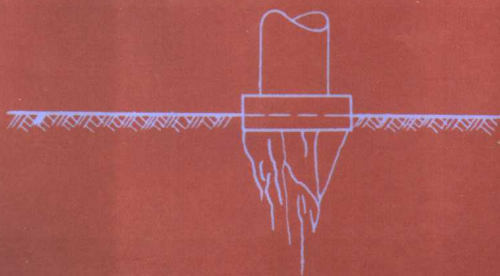


# 岩体力学

沈明荣 主编



SHENMINGRONG ZHUBIAN



YANTILIXUE



同济大学出版社

# 岩 体 力 学

沈明荣 主编

同济大学出版社

## 内 容 提 要

本书共分十章,主要介绍岩石的基本物理性质、岩体分类、结构面的力学性能、岩体的力学效应、岩石的动力学、岩石的力学性质、岩体的初始应力及岩体力学在洞室工程、边坡工程、岩基工程中的应用;还介绍岩体力学数值计算法和最新发展。本书在岩体力学最基本的理论方面,其推理严谨,阐述清晰,由浅入深。

本书可作为高等院校建筑工程专业本科生的专业基础课的教材。也可作为岩土工程、地下建筑、工程地质、水利水电、冶金等土木工程技术人员以及高等院校和科研单位有关专业人员的参考书。

责任编辑 解明芳

封面设计 陈益平

## 岩体力学

沈明荣 主编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号 邮编:200092)

新华书店上海发行所发行

上海青年报社印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:352 千字

1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—1000 定价:18.50 元

ISBN7-5608-2000-X/TU·296

## 前 言

岩体力学是介于地学与力学两门学科之间的一门边缘学科。在地质、地下建筑、水利电力、铁道交通、采矿以及国防工程等部门都广泛地涉及并应用这门学科的理论 and 知识。几十年来,随着国内外岩石工程的不断增多,工程规模和复杂程度的不断加大,使岩体力学的研究工作得到了飞速的发展,获得了丰富的实践经验和显著的理论成果。这些成就为本书的编写提供了丰富的材料。

本书是在同济大学多年来的教学实践和原有的教材的基础上编写的,书中不但注意加强基础理论的阐述,而且对岩石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上的科学成就也作了介绍。本书在内容安排上有:岩石与岩体的基本物理性质;岩石的动力学基础;岩体的工程分类和地应力状态;岩体力学在地下洞室、边坡、地基工程中的应用;在最后一章中,简要地介绍了岩体力学发展的前景。本书在叙述上力求由浅入深、说理透彻,使读者在掌握基础理论后能够分析并解决地下洞室、边坡、地基等的岩石工程问题。

本书由同济大学沈明荣、孔宪立、程鸿鑫编写。第二、七章由沈明荣执笔;第一、四、八、九章由孔宪立执笔;第三、五、六、十章由程鸿鑫执笔。全书由沈明荣统稿。

作者衷心地感谢同济大学及兄弟院校有关教师对本书出版的关怀以及感谢他们为本书的编写提出了宝贵的意见。恳切希望广大读者对本书中的缺点和错误之处批评指正。

编 者  
1998 年

## 符号说明

各种符号都在其出现时加以定义。各符号的单位标注在其定义后的括号里。以下列出了本书中常用的符号。

$A$ ——截面面积。

$a, b$ ——分别为基础的长度和宽度。

$BQ$ ——岩体基本质量指标。

$c, \phi$ ——分别表示岩石的内聚力和内摩擦角。

$c_j, \phi_j$ ——分别表示结构面的内聚力和摩擦角。

$E, E_d$ ——分别表示岩石静态和动态的弹性模量。

$e_1, e_2$ ——梯形分布的侧向围岩压力。

$e$ ——孔隙比。

$f$ ——摩擦系数;或岩石的坚固系数。

$G$ ——岩石的质量;有时也表示剪切模量。

$H$ ——洞室的埋深;或边坡的坡高。

$h$ ——洞室的高度;有时也表示水头高度。

$J_v$ ——岩体的体积裂隙数。

$JR C$ ——结构面的粗糙度系数。

$JCS$ ——结构面的面壁强度。

$K$ ——岩体的完整性系数;有时也用于表示各类修正系数、稳定系数和渗透系数。

$k$ ——刚度系数。

$N$ ——承载能力系数。

$p_0$ ——岩体的初始应力。

$q$ ——作用于洞室顶部的围岩压力。

$R_c, R_t$ ——分别表示岩石的单轴抗压强度和抗拉强度。

$R_{cc}, R_{cd}$ ——分别表示岩石烘干和饱和状态下的单轴抗压强度。

$RQD$ ——岩石的质量指标。

$r$ ——岩体中任意一点离洞室中心轴的距离。

$r_a$ ——洞室的开挖半径。

$S$ ——建筑物的沉降量。

$S_0, S_c, S_m$ ——分别为基础中心处沉降量、角点处沉降量和平均沉降量。

$u, v$ ——分别表示径向位移和切向位移。

$V_p, V_s$ ——分别表示纵波波速和横波波速。

$V, V_c, V_v$  分别表示岩石的体积、岩石中固体的体积和孔隙的体积。

$w$ ——岩体或其他介质的质量。

$\beta$ ——结构面与最大主应力的夹角。

$\gamma, \gamma_c, \gamma_d$ ——分别表示岩石的天然密度、干密度和饱和密度。

$\gamma_w$ ——水的密度。

$\delta$ ——结构面的法向位移。

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ——分别表示最大主应变、中间主应变和最小主应变。

$\epsilon_v$ ——体积应变。

$\dot{\epsilon}$ ——应变速率。

$\eta$ ——岩石的粘滞系数；有时也用于表示岩石的软化系数。

$\theta$ ——方位角；有时也用于表示体积应变。

$\lambda$ ——侧压力系数；有时也用于表示拉梅常数。

$\mu, \mu_d$ ——分别表示岩石的静态泊松比和动态泊松比。

$\rho$ ——介质的密度。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——分别表示最大主应力、中间主应力和最小主应力。

$\sigma_n, \tau_n$ ——分别表示作用在物体上的正应力和剪应力。

# 目 录

## 符号说明

第一章 绪论	(1)
第一节 岩石与岩体	(1)
第二节 岩体力学的研究任务与内容	(2)
第三节 岩体力学的研究方法	(4)
第四节 岩体力学在其他学科中的地位	(5)
第五节 岩体力学的发展简史	(6)
第二章 岩石的基本物理力学性质	(8)
第一节 岩石的基本物理性质	(8)
第二节 岩石的强度特性	(12)
第三节 岩石的变形特性	(21)
第四节 岩石的强度理论	(36)
第三章 岩石动力学基础	(44)
第一节 岩石的波动特性	(44)
第二节 影响岩体波速的因素	(50)
第三节 岩体的其他动力学特性	(58)
第四章 岩体的基本力学性能	(60)
第一节 岩体结构面的分析	(60)
第二节 结构面的变形特性	(64)
第三节 结构面的力学效应	(74)
第四节 碎块岩体的破坏	(77)
第五节 岩体的应力-应变分析	(82)
第六节 岩体力学性能的现场测试	(85)
第五章 工程岩体分类	(95)
第一节 工程岩体分类的目的与原则	(95)
第二节 工程岩体代表性分类简介	(97)
第三节 我国工程岩体分级标准(GB50218-94)	(104)
第六章 岩体的初始应力状态	(109)
第一节 初始应力状态的概念与意义	(109)
第二节 组成岩体初始应力状态的各种应力场及其计算	(109)
第三节 岩体初始应力状态的现场量测方法	(116)
第四节 岩体初始应力状态分布的主要规律	(125)
第五节 高地应力地区的主要岩石力学问题	(127)
第七章 岩体力学在洞室工程中的应用	(131)

第一节	岩体二次应力状态的基本概念	(131)
第二节	深埋圆形洞室二次应力状态的弹性分布	(132)
第三节	深埋圆形洞室弹塑性分布的二次应力状态	(142)
第四节	节理岩体中深埋圆形洞室的剪裂区及应力分析	(147)
第五节	围岩压力	(150)
第六节	松散岩体的围岩压力计算	(158)
第七节	塑性变形压力的计算	(167)
第八节	新奥法简介	(169)
<b>第八章</b>	<b>岩体力学在边坡工程中的应用</b>	<b>(171)</b>
第一节	边坡的应力分布	(171)
<b>第九章</b>	<b>岩体力学在岩基工程中的应用</b>	<b>(185)</b>
第一节	岩基中的应力分布	(185)
第二节	岩基上基础的沉降	(187)
第三节	岩基的承载能力	(191)
第四节	岩基的抗滑稳定	(197)
第五节	岩基的加固措施	(199)
<b>第十章</b>	<b>岩体力学数值计算方法及新进展简介</b>	<b>(201)</b>
<b>参考文献</b>		<b>(211)</b>



# 第一章 绪 论

岩体力学(Rock Mass Mechanics)是一门研究岩体在各种不同受力状态下产生变形和破坏规律的学科。岩体力学的原名是岩石力学(Rock Mechanics),由于科学技术的发展,岩石与岩体已有严格的区分,因而将岩石力学改为岩体力学更切合实际。但是,岩石力学这名词沿用已久,且使用很普遍,在许多研究岩体力学问题的著作中,都冠称其为“岩石力学”。因而岩石力学一词又可理解为“广义的‘岩石力学’”。也可称为岩体力学。

## 第一节 岩石与岩体

地球体的表层称为地壳,它的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,都局限在这地壳的最表层范围内,因而岩石和由岩石派生出来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形成的自然物体。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其为造岩矿物。如常见的石英( $\text{SiO}_2$ )、正长石( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ )、方解石( $\text{CaCO}_3$ )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。例如作为代表性结构的有,沉积岩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。

按岩石的成因可分为三大类: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,由非结晶矿物组成的岩石是很少的。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、钙质胶结的沉积岩胶结强度较大,而泥质胶结的沉积岩和一些粘土岩强度就较小。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、甚至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,它的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的指标是在试验室里用一定规格的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间的岩石小块,称为岩块。岩块就成了相应岩石的代表。我们平时所称的岩石,在一定程度上都是指的岩块,于是这两个概念也就不严格加以区分了。因为岩块是不包含有显著弱面的岩石块体,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,除了岩石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的现象和地质构造形迹,使地质体内部存在着各种各样的地质界面。例如不整合、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原岩石块要广泛得多。在岩体力学中,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理定性能。由此可见,岩体是由岩石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不仅是岩石块,而是岩石块与结构面的综合体,而在大多数情况下,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了岩体整体强度,导致稳定性的降低。可见岩石与岩体是既有联系又有区别的两个概念。

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、延展性和粘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。

## 第二节 岩体力学的研究任务与内容

### 一、岩体的力学特征

岩体力学的研究对象是岩体,在力学性质上,岩体具有以下特征:

(1) 不连续性。岩体的不连续性主要受结构面对岩体结构的隔断性质所控制,因而岩体多数是属不连续介质,而岩石块本身则可作为连续介质看待。

(2) 各向异性。由于岩体中结构面有优先位向排列的趋势,随着受力岩体的结构取向不同,其力学性质也各异。实验表明,岩体的强度和变形都是与岩体结构的方向性有关。因而岩体力学的性质通常具有各向异性的特征。

(3) 不均匀性。岩体中结构面的方向、分布、密度、及被结构面切割成的岩石块单元体(结构体)的大小、形状和镶嵌情况等各部位都很不一致,造成许多岩体具有不均匀性的特

征。

(4) 岩石块单元体的可移动性。岩体是由具有不同连结程度的岩石块单元体所镶嵌排列而组成。岩体的变形破坏往往取决于组成岩体的岩石块单元体的移动的影响,它与岩石块本身的变形破坏共同组成岩体的变形破坏。

(5) 赋存地质因子的特性。岩体是处于一定的地质环境中,使岩体赋存有不同于自重应力场的地应力场、水、气、温度以及地质历史遗留的形迹等。这些地质因子都会对岩体有一定的作用。

## 二、岩体力学的研究任务

岩体力学的研究任务主要有以下四个方面:

(1) 基本原理方面。有岩石和岩体的地质力学模型和本构规律,岩石和岩体的连续介质和不连续介质力学原理,岩石和岩体的破坏、断裂、蠕变、损伤的机理及其力学原理,岩石和岩体计算力学。

(2) 试验方面。有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。

(3) 实际应用方面。有地下工程、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、地学、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,岩体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。

## 三、岩体力学的研究内容

(1) 岩体的地质力学模型及其特征方面。这是岩体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、温度以及各种地质形迹等。它们对岩体的静、动力学特性有影响。这方面的基本内容在本书内第三、五、六章中讨论。

(2) 岩石与岩体的物理力学性质方面。这是表征岩石与岩体的力学性能的基础,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。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、动荷载下岩石和岩体力学性能的变化规律,这方面的基本内容在本书的第二、三、四章讨论。

(3) 岩体力学在各类工程上应用方面。岩体力学在岩体工程上应用是非常重要的,许多重大工程更显出其重要性。洞室围岩、岩基和岩坡等,其稳定与安全皆与岩体力学的恰当应用息息相关。过去由于岩体不稳定而失事的例子实属不少,如著名的法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝于1959年12月2日坝基岩体位移导致整个拱坝倒塌。意大利瓦依昂(Vajont)水库于1963年10月9日岩坡滑动,在1min内约有 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 岩石崩入水库内,顿时造成高达150~250m的水浪,致使下游郎加郎市的城镇遭到毁灭性的破坏。在我国的水工史上也曾

发生过许多岩石工程事件。如1963年发生梅山连拱坝坝基(花岗岩)滑动;70年代葛洲坝水电站江基坑开挖,发生岩层沿软弱夹层随时间而发展的水平位移。岩坡失稳事故在我国也常有所闻。如1986年6月湖北省盐池磷矿发生灾难性的大崩塌,高160m的体积约 $100 \times 10^3 \text{m}^3$ 的山体岩石突然崩落,将四层楼的房子抛至对岸撞碎,造成重大伤亡;1981年4月甘肃舟曲县东南5km白龙江泄流发生重大滑坡,滑动土石方约达 $4000 \times 10^4 \text{m}^3$ ,堵塞了白龙江,形成回水长约4.5km的水库,严重威胁上下游的安全;四川云阳县城东发生的鸡扒子滑坡,滑坡体达 $1500 \times 10^4 \text{m}^3$ ,前缘约 $180 \times 10^4 \text{m}^3$ 土石方推入长江之中,使长约600余米的江段水位普遍提高20~25m,构成了对长江航运安全的严重威胁。此外,洞室围岩崩塌、矿山地表沉陷和开裂以及房屋岩基的失稳等,在我国的基本建设中也时有发生。从上述事例可认识到,为了选择相对优良的工程场址,防止重大岩体工程事故,保证顺利施工,必须对建筑场地进行系统的岩体力学试验及理论研究和分析;预测岩体的强度、变形和稳定性,为工程设计提供可靠的数据和有关材料。

岩体力学在岩体工程中的应用有以下几个方面:

(1) 地下洞室围岩的稳定性研究。包括地下开挖引起的应力重分布、围岩变形、围岩压力以及围岩加固等的理论与技术。在本书第七章讨论。

(2) 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。在本书第九章讨论。

(3) 岩坡的稳定性研究。包括天然斜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。在本书第八章讨论。

(4) 岩体力学的新理论新方法的研究。当今各门学科发展很快,岩体力学理论的发展要充分利用其他学科的成果。例如电子计算机的发展,带动了能够用于岩体力学的数值计算的发展;岩体本身很复杂,而又加上天然和工程环境的影响,直接力学计算有时难以获取可靠数据,且有些数据是难以一时从试验得到的,因而,岩体力学近年又兴起反演分析技术;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,岩体力学将利用这些新兴的理论、方法和试验技术来发展自己。有关这方面的内容,将在本书第十章中作简要的讨论。

### 第三节 岩体力学的研究方法

岩体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。

科学实验是岩体力学研究工作的基础,这是岩体力学研究中的第一性资料。岩体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,作为建立岩体力学的概念、模型和分析理论的基础。

岩体力学的理论是建立在科学实验的基础上。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体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

实况之间是存在着一定的差距,但应尽量缩小其距离。目前,尚有许多岩体力学问题,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,这是为岩体力学理论和技术发展提供的基本方法。

现代计算技术的迅速发展,计算机已广泛地应用于岩体力学的计算中,这不仅为岩体力学问题的分析解决了复杂的计算,而且为岩体力学的数值法计算提供了有效的计算手段。目前,力学范畴的数值法,如有限元、离散元、边界元等方法,已在岩体力学中得到普遍的应用。

为了有系统地获取各项数据,研究岩体力学的步骤可用如图 1-1 的框图表示。

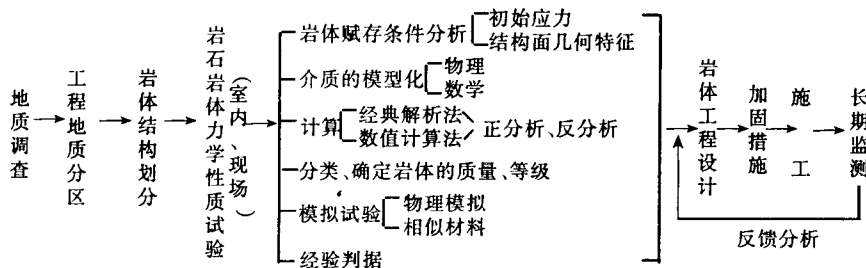


图 1-1 岩体力学研究步骤的框图

上列框图内容和步骤视岩体特点和工程需求,可作调整。

## 第四节 岩体力学在其他学科中的地位

岩体力学涉及两大学科:地质学科和力学学科。

### 一、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。

### 二、力学学科在岩体力学中的作用

岩体力学是力学学科中的一个分支,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,对于岩石块,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。随着经济与建设发展,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。岩石与岩体在受荷载后其变形是岩石块本身及节理裂隙的变形以及岩石块的变位。可见岩体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,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,它们之间没有一条明显的区分界线。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,这就是因为 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。

## 第五节 岩体力学的发展简史

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。原始人曾利用岩石造成简陋的工具和兵器。人类进化后,又进行挖洞采矿石,利用岩石作为建筑材料,建房屋、水坝、防御工事等。可见,人类与岩石打交道由来已久,将岩石或岩体力学作为一门技术学科并持续地发展起来则是在 20 世纪中期以后的事。

20 世纪初期,在国外,研究自然地质材料的科学已兴起,土力学已受到工程部门所重视,1925 年,泰沙基的《建筑土力学》一书,是第一本土力学专著。以后,由于岩石工程的增多,单凭借用土力学的原理和技术来解决岩体工程问题已不很适用。特别是在第二次世界大战后世界各国在大量兴建各项的岩石工程的背景下,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(或岩体力学)。这门学科从 20 世纪 50 年代以来的发展过程中,出现了以地质学为观点的地质力学的岩石力学学派和以工程为观点的工程岩石力学学派。

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

工程岩石力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,注重以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,这是该学派最早的代表著作。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。

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。

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,如岷山都江堰、自贡深达数百米的盐井、万里长城等。但是,由于我国长期的经济和工业的落后,束缚了生产力的发展,也限制了岩石工程的发展。在新中国成立后,随着社会主义建设事业的发展,大规模的厂矿、交通、国防、水利等基本建设的兴起,对岩体力学的发展起了重大的推动作用。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,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,开始了岩体力学研究的系统规划和实施。这一时期是我国岩体力学发展处于萌芽阶段。第二阶段,60年代中期至70年代中期,由于大部分工程停建和缓建,使岩体力学发展非常缓慢,成为我国自解放以来岩体力学发展的低谷。第三阶段,70年代后期至今,为实现我国四化的宏伟目标,在各项大规模工程的兴建中,提出了许多岩体力学的新课题,使岩体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体力学的理论水平和测试技术,开展了大规模的室内和原位测试研究工作,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州坝和三峡坝区、湖北的大冶和江西的德兴的露天矿场、秦山核电站岩基与高边坡以及铁道交通上的长隧洞工程等一系列岩石工程问题,而且在岩体力学理论研究方面(如岩体结构、岩石流变以及岩坡和围岩稳定性研究等)皆有重大的成就,这些成就在国际上占有重要的地位。

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。其中,水利水电岩石力学情报网办起了《岩石力学》的专门期刊。1985年在我国正式成立了中国岩石力学与工程学会,办起了《岩石力学与工程学报》,《岩土工程学报》等。自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。以上所述的工作和成就,对推动我国岩体力学学科的发展和学术水平的提高起到了积极的作用。

## 第二章 岩石的基本物理力学性质

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,也是整个岩体力学中研究最早、最完善的力学性质。本章主要叙述岩石基本物理、水理性质的参数以及获得这些参数的试验方法。并在此基础上,着重讨论了岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、三向压缩强度以及和各种受力状态相对应的变形特性与试验方法。最后介绍作为判别岩石是否破坏的各种强度理论。

### 第一节 岩石的基本物理性质

#### 一、岩石的质量指标

岩石以其成因可分为:岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。由于各种岩石所组成的矿物成分、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。

##### (一) 岩石的密度和比重

##### 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,即单位体积内岩石的质量。一块岩石可由固相(由矿物、岩屑等组成)、液相(由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)所组成。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,将会使密度发生变化。

##### (1) 天然密度 $\gamma$

天然密度是指岩石在自然条件下,单位体积的质量:

$$\gamma = G/V \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2-1)$$

式中  $G$ ——岩石试件的总质量;

$V$ ——该试件的总体积。

##### (2) 饱和密度 $\gamma_d$

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:

$$\gamma_d = \frac{G_1 + V_v \gamma_w}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2-2)$$

式中  $G_1$ ——岩石中固体的质量;

$V_v$ ——孔隙的体积;

$\gamma_w$ ——水的质量。

##### (3) 干密度 $\gamma_c$

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:

$$\gamma_c = G_1/V \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2-3)$$



上述是三种不同条件下的最常用的密度参数。密度试验通常用称重法。即先测量标准试件的尺寸,然后放在感量精度为 0.01g 的天平上称重,并计算密度参数。饱和密度可采用 48h 浸水法或抽真空法使岩石试件饱和。而干密度的测试方法为先,把试件放入 108℃ 烘箱中,将岩石烘至恒重(一般约为 24h 左右)。再进行称重试验。

密度参数是工程中应用最广泛的参数之一。通常应用密度参数计算岩体的自重应力。而在计算岩体的自重应力时,往往将密度转化为重力密度(简称重度)。两者的区别在于后者与重力加速度有关。其采用的单位为  $\text{kN/m}^3$ 。

## 2. 岩石的比重 $\Delta$

岩石的比重是指岩石固体的质量( $G_1$ )与同体积水在 4℃ 时的质量之比。其公式为

$$\Delta = G_1 / (V_c \gamma_w) \quad (2-4)$$

式中,  $V_c$  为固体的体积

岩石的比重可采用比重瓶法求得。首先,将岩石粉碎,并使岩粉通过直径为 0.16mm 的筛网筛选,然后,将其烘干至恒重,称出一定量的岩粉,将岩粉倒入已注入一定量煤油(或纯水)的比重瓶内,摇晃比重瓶将岩粉中的空气排出,静置 4h 后,由于加入岩粉使液面升高,读出其刻度,即加入岩粉后体积的增量;最后,必须测量液体的温度,修正由于液体温度的不同而造成的误差。按要求计算出岩石的比重。

## 二、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是反映了岩石中裂隙发育程度的指标。

### (一) 岩石的孔隙比( $e$ )

孔隙比是指孔隙的体积  $V_v$  与固体的体积  $V_c$  之比。其公式为

$$e = V_v / V_c \quad (2-5)$$

### (二) 岩石的孔隙率( $n$ )

孔隙率是指孔隙的体积  $V_v$  与试件总体积  $V$  的比值。其公式为

$$n = V_v / V \quad (2-6)$$

根据试件中三相体的相互关系,孔隙比  $e$  与孔隙率  $n$  存在着如下关系:

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

孔隙性参数可利用特定的仪器使孔隙中充满水银而求得。但是,在一般情况下,可通过有关的参数推算而得。如:

$$n = 1 - \gamma_c / (G \gamma_w)$$

## 三、岩石的水理性质

### (一) 岩石的含水性质

#### 1. 岩石的含水量( $\omega$ )

岩石的含水量是指岩石孔隙中含水的质量  $G_w$  与固体质量之比的百分数:

$$\omega = G_w / G_1 \quad (\%) \quad (2-7)$$

根据试件含水量状态的不同,可分成岩石在天然状态下的含水量和饱和状态下的含水