

21世纪 高等学校本科系列教材

总主编 罗固源

岩石力学

(19)

吴德伦 黄质宏 赵明阶 主编



重庆大学出版社
新疆大学出版社

岩石力学

吴德伦 黄质宏 赵明阶 主编

重庆大学出版社
新疆大学出版社

内 容 简 介

岩石力学是研究岩石和岩体的工程力学性质,为岩石工程提供分析和设计的理论基础。

本书的内容主要包括岩石和岩体的物理性质,岩石和洞室围岩的应力状态,岩石的强度和变形,岩石屈服与破坏,岩石性能试验和本构参数的确定等基本内容,结合岩石工程,其内容包括岩石开挖、岩石地基、岩石边坡和岩体中的洞室工程等。书中还包含岩石实验相似模拟、岩体弹塑性数值分析的有单元法等内容。

本书可读性强,既便于教学,也便于自学参考,可作为土木、水力、采矿等专业的教材,亦可作为岩土工程的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学/吴德伦,黄质宏,赵明阶主编. —乌鲁木齐:新疆大学出版社,
重庆:重庆大学出版社,2002.8
土木工程专业本科系列教材
ISBN 7-5631-1384-3

I. 岩... II. ①吴...②黄...③赵... III. 岩石力学—高等学校—
教材 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 051266 号

岩 石 力 学

吴德伦 黄质宏 赵明阶 主 编

责任编辑:梁涛 刘乃亭 版式设计:梁涛
责任校对:廖应碧 责任印制:张永洋

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内
邮编:400044

电话:(023)65102378 65105781

传真:(023)65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆璧山印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:480千

2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印数:1—6 000

ISBN 7-5631-1384-3/TU·5 定价:25.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有 翻印必究

序言

人们早在远古时代就使用岩石做工具,用天然岩洞或挖掘岩洞做居室,古埃及约在 4 700 年前,开采岩石建造金字塔,最高达 146.5m,10 万劳工耗时约 30 年。公元 1600 年后,火药传入欧洲用以采矿和开挖隧道,19 世纪铁路系统的大发展,要求限制铁道的坡度,导致隧道技术的快速发展。20 世纪大型水电建设对岩石基础、边坡、地下洞室和隧道工程提出了更高的要求。20 世纪 50 年代末法国 Malpasset 拱坝的失事和 60 年代初意大利 Vaiont 大坝水库高边坡的崩溃,终于促成国际岩石力学学会在 1962 年成立,岩石力学形成为一门独立的学科。

岩石力学是固体力学的一个新的分支,用以研究岩石的材料力学性能和岩石工程的特殊设计方法。岩石材料不同于一般的人工制造的固体材料,岩石经历了漫长的地质构造作用,岩体内部产生了很大的内应力,具有各种规模的不连续面和孔洞,它们还可能含有液相和气相,岩石远不是均质的、各向同性的弹性连续体,这些就决定了必须开发的测试原理、装置和方法。

岩石工程也和一般的结构工程有着本质的不同。例如,混凝土结构是根据外力的大小和设计规范来计算结构的尺寸,可以根据设计要求制造混凝土材料的性能和强度,并能严格检验和控制质量。

岩石工程则不然,它一般所承受的外力比岩体地应力重分布所产生的力小,但岩石的地应力不易测定,岩石的性能和强度更是受到很多因素的影响,例如,不连续面的分布形式、地下水的渗压、开挖和钻爆的动力效应等,特别困难的是岩体的非均质、各向异性、非弹性以及流变特性。上述的各种因素和特性不仅变异性很大,在岩石开挖前很难预测,岩石开挖后也只能观察表面的情况。因而岩石工程形成了一整套独特的设计方法,把规划、概念设计、引导工程(pilot project)、技术设计、施工、现场监测、反分析、修改设计、加固等阶段形成一个有机的系统工程。

岩石力学经过近四十年来的发展,在土木工程、水利工程、采矿工程、石油工程等领域中得到了广泛的应用。国际岩石力学教育工作委员会制定了一项课程指南,强化了岩石力学的基本概念、原理及方法。吴德伦教授主编的这本教材,完满地体现了这些观点,可供本科和专科生作为教材,也可供岩土工程技术人员作为技术参考书。

朱可善
2001 年 12 月

前言

岩石是天然地质体,人类生产和生活活动与岩石有着密切的关系。在石器时代,先人巢穴而居、琢石为器,石器成了划分时代的标志;在古代,人们在岩石中找寻矿物,将岩石矿物作医药,并发展了炼丹术(原始化学);在现代,岩石依然是农田、水利、土木、采矿、化工等部门的工作对象和开采的重要资源。当前,我国在西部大开发中,以科学的观点认识岩石,对合理利用岩石资源和保护岩土环境具有十分重要的意义。

岩石力学研究岩石和岩体的工程力学性质,为岩石工程提供分析和设计的理论基础。岩石的力学性质不像人造材料可以控制,由于岩石,特别是岩体自身的复杂性,岩石力学发展成为一门学科并作为一门课程进入高等工科教育还是近几十年的事情。我国已有不少高校将岩石力学作为土木工程、水利工程、采矿工程等专业中的技术基础课程,列入了教学大纲或作为选修课。岩石力学与岩石工程课程的重要性可以这样来认识:在土木工程教育中它与工程地质、土力学与基础工程等课程一样,是岩土工程(大地工程)设计、施工的理论基础;在水利工程中,岩石环境的水工建筑设计与施工离不开岩石力学的理论指导;在采矿工程中,岩石力学在矿山设计、采掘工艺、开挖机械、采矿安全等方面的作用也愈来愈明显。正是由于现代大规模的土木、水利、采矿工程活动和相关科学的进步才推进了岩石力学的发展,也才使岩石力学登上了高等工程教育的大雅之堂。

本书的内容主要包括岩石和岩体的物理性质、岩石和洞室围岩的应力状态、岩石的强度和变形、岩石屈服与破坏、岩石性能试验和本构参数的确定等基本内容。结合岩石工程,其内容包括岩石开挖、岩石地基、岩石边坡和岩体中的洞室工程等。在数值分析方面概述了岩体弹塑性分析的有限单元法。

本书编写的思路是:在认识岩石和岩体的物理性质和几何性质后,一方面从岩石强度入手讲岩石的应力状态、强度准则和岩石的强度参数试验;另一方面则讲岩石的变形特性和变形参数的实验确定,以岩石的强度和变形理论为基础处理岩石工程问题,讲述了岩石地基、岩石边坡和地下岩石洞室以及岩石开挖等工程分析方法和设计理论。岩石试

验和数值模拟都是服务于岩石工程的。如何从岩石的一般理论过渡到处理岩体工程问题,这无论是对科学工作者还是对岩石工程师都是十分棘手的问题,目前只好用岩体分类来解决。由于岩体分类知识的综合性和工程的经验性,本书放在最后讲述。根据上述思路,本书共分16章,其中第1,2,5,10,12,15,16章由吴德伦编写,第3章由叶明亮编写,第4章由唐晓玲编写,第6,7,8,9章由赵明阶编写,第11章由扬明编写,第13,14章由黄质宏编写。在各章编写的基础上,第3,4,13,14章由黄质宏负责统稿,其余12章由吴德伦统稿。在统稿过程中对各章的内容和风格作了局部调整。

本书在编写过程中,十分注意岩石力学学科的科学性和系统性,反映了现代岩石力学与岩石工程的主要理论成果和技术成果,使之具有鲜明的先进性和技术上的可参考性;在文笔上注意可读性,便于教学,便于自学参考;全书结构严谨、合理。本书可作为土木、水力、采矿等专业的教材,也可作为岩土工程的技术参考书。

本书约需30学时的讲课和辅导。其先修课为:工程地质学、微分方程初步、材料力学。学生学完本门课程后,应具有脆性和延性岩石材料和节理岩体的物理力学性质的初步知识,应具有应用极限平衡或有限元法等进行岩石开挖、边坡和地下洞室的初级设计能力。在试验方面,至少应有岩石单轴压缩试验、岩石三轴试验、岩石直剪试验和岩石巴西劈裂拉伸试验等,有条件时还可安排参观现场岩体试验,各试验项目的大纲可根据各自的试验条件确定。

本书出版之际,中国岩石力学与工程学会的发起人之一,重庆大学岩土工程博士生导师朱可善教授为本书作序,本书编者对他的鼓励和支持表示感谢。

岩石力学还是一门年轻的学科,其课程的内容、方法、体系等方面还不很成熟,需要在教学和学科发展的过程中不断完善和修正,把岩石力学与工程结合起来,提高本学科的理论水平和教育水平。在这方面,本书仅是一个探索,书中必有不足和错误之处,我们热诚欢迎各位老师、学生和读者提出批评和修改意见,以期共同促进岩石力学的发展。

吴德伦

2002年1月于重庆大学土木工程学院

目录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 岩石力学与岩石工程的研究对象.....	(1)
1.2 岩石与岩体.....	(3)
1.3 岩体几何描述的赤平极坐标投影法.....	(5)
1.4 岩石的物理性质.....	(8)
1.5 岩石工程设计原理.....	(11)
第 2 章 岩石的应力状态	(14)
2.1 力与应力.....	(14)
2.2 平面应力状态.....	(17)
2.3 岩体中的应力状态.....	(20)
2.4 岩体侧压力系数.....	(22)
2.5 节理应力状态.....	(25)
第 3 章 岩石的强度与屈服	(29)
3.1 强度准则和屈服准则的概念.....	(29)
3.2 二维应力空间的强度准则.....	(29)
3.3 岩石的屈服准则.....	(41)
3.4 其他强度和屈服准则.....	(45)
第 4 章 岩石的断裂	(53)
4.1 岩石裂纹起裂和传播.....	(53)
4.2 Griffith 裂纹理论.....	(54)
4.3 断裂力学基础.....	(58)
4.4 断裂韧度试验.....	(61)
4.5 脆性岩石断裂理论与断裂准则.....	(66)
第 5 章 岩石室内试验	(70)
5.1 概述.....	(70)

5.2	岩石单轴压力试验	(71)
5.3	岩石的单向拉伸试验	(73)
5.4	岩石的剪切试验	(76)
5.5	岩石三轴试验	(78)
5.6	岩石试验的若干问题	(82)
5.7	岩石的动力试验	(86)
第6章	岩石的可变形性	(90)
6.1	变形的基本概念	(90)
6.2	虎克定律	(91)
6.3	岩石变形的各向异性	(93)
6.4	岩石应力应变试验	(98)
6.5	刚性压力机与全应力应变曲线	(108)
第7章	开挖引起的应力和变形	(111)
7.1	近地表和深层岩体中的应力	(111)
7.2	应力集中的概念	(116)
7.3	应力释放的概念	(117)
7.4	开挖自由面的主应力	(117)
7.5	岩石开挖的变形观测	(119)
第8章	岩体现场试验	(123)
8.1	岩体现场试验的必要性	(123)
8.2	岩体现场试验的分类	(123)
8.3	岩体现场变形试验	(124)
8.4	岩体现场强度试验	(129)
8.5	岩体地应力测量	(132)
8.6	工程岩体弹性波测试	(139)
第9章	岩石的粘性、温度和膨胀特性	(146)
9.1	岩石粘性的概念	(146)
9.2	岩石蠕变性能	(146)
9.3	岩石流变试验	(155)
9.4	流变模型	(161)
9.5	岩石的温度性能	(168)
9.6	膨胀岩机制	(173)
第10章	岩石力学中的解析方法	(174)
10.1	概述	(174)

10.2	弹性力学平面问题	(175)
10.3	半平面体	(180)
10.4	弹性岩体中的圆孔	(184)
10.5	弹性岩体中的非圆孔问题	(188)
10.6	浅埋圆形洞室	(190)
10.7	圆形洞室的弹塑性分析	(192)
10.8	圆形洞室的温度应力	(198)
第 11 章 数值方法 (201)		
11.1	概述	(201)
11.2	有限元法基本步骤	(202)
11.3	非线性问题有限元法分析	(204)
11.4	常用的弹塑性模型	(205)
11.5	岩石工程中数值分析的特殊问题	(208)
11.6	例题	(215)
第 12 章 物理模拟 (218)		
12.1	概述	(218)
12.2	量纲分析原理	(218)
12.3	模型材料	(222)
12.4	模型制作和试验技术	(224)
12.5	模型试验结果	(225)
第 13 章 岩石地基 (228)		
13.1	概述	(228)
13.2	岩石地基的变形分析	(230)
13.3	岩基承载力	(234)
13.4	岩石地基上的基础形式	(238)
13.5	岩溶地基	(243)
第 14 章 岩坡稳定分析 (248)		
14.1	概述	(248)
14.2	岩坡的破坏类型	(249)
14.3	岩坡平面滑动稳定性分析	(250)
14.4	楔形滑动岩坡稳定分析	(252)
14.5	圆弧法岩坡稳定分析	(254)
14.6	倾倒破坏	(258)
14.7	赤平极射投影在岩坡稳定分析中的应用	(260)
14.8	岩质边坡的加固措施	(271)

第 15 章 地下洞室	(273)
15.1 概述	(273)
15.2 地下洞室围岩的变形和破坏	(274)
15.3 散体的松动压力	(276)
15.4 竖井和斜井的围岩压力	(283)
15.5 围岩压力的经验估计	(284)
第 16 章 工程岩体的分级	(288)
16.1 岩体分级的意义	(288)
16.2 岩石分级	(289)
16.3 岩体分级	(292)
16.4 我国的工程岩体分级	(295)
16.5 岩体分级的发展	(297)
参考文献	(298)

第 1 章

绪 论

1.1 岩石力学与岩石工程的研究对象

1.1.1 人类与岩石

我国古代科学家认为,金、木、水、火、土“五行”是人类赖以生存和发展进化的最基本的物质条件,“五行”相生相克,生成、变化、演变构成了丰富多彩的物质世界。“五行”之金与土,狭义地理解可认为是指岩石和土壤。因此,岩石、土壤与水和空气一样是人类最早认识的客观世界。人类创造的第一种工具是石器,石器时代也是人类历史最长久的一个时代。最早发明的石器主要是用石英岩、燧石、砾石、硬质砂岩等打磨而成,可用以砍、磨、钻、锤击等,在原始的生产、生活或战争场合使用。我国公元前 5 世纪的《山海经》中《五藏山经》一篇对古代使用石器作了总结,其中记录了岩石种类 89 种,并提到从硬度、颜色、光泽、透明度、敲击发音等方面识别岩石的方法。

人类最早的岩石工程活动源于采矿和土木建筑。现代考古证明:人类历史文化遗产多与岩石有关。例如,世界文化遗产中的埃及金字塔、狮身人面像、伊朗帕赛里斯宫殿、我国敦煌、龙门石窟、乐山大佛等。

现代社会中,以岩石作为工程对象的有地质、采矿、石油、水利水电、交通、国防、建筑工程等部门。岩石工程是以岩石为主的各种工程活动的总称。岩石工程是人类利用岩石的特性所进行的创造性工程活动。

在岩石工程活动中,值得注意的是一些技术飞跃进步的事实:我国 7 世纪发明黑火药,13 世纪经印度、阿拉伯传入欧洲;1867 年发明炸药和硝酸炸药;1876 年发明电雷管;1881 年隧道钻孔机问世;1909 年开始采用喷射砂浆;1918 年始用岩石锚杆;1942 年始用喷射砼;1940 年始用合金钻头;1950 年始用新奥法;1971 年始用(油)液压冲击钻。科学和技术的进步使我们可以完成各式各样的岩石工程,可以监测和预报地面和地下岩体运动,可以通过计算模拟岩石工程的活动预测岩石工程的未来。

岩石力学是研究岩石的物理力学性质及岩体的强度、变形和稳定性的一门科学,岩石力学研究的目的是认识岩体、利用岩体、保护岩体和有效地破碎岩石。

岩石力学既是适应现代社会的生产、生活和战争环境而发展起来的,也是在各种灾害中发展起来的。滑坡、大坝垮塌导致财产的巨大损失,采矿工程中的岩爆问题等都促使人们对岩石学科进行研究。

目前,岩石力学的研究活动已逐渐由地表走向地壳深层。德国、俄罗斯等国都已进行5 000m以下的深井探测。我国已于2001年初开始进行位于江苏东海县的深井探测,该井深5 000m,直径155mm,总投资1.6亿人民币。深井探测不仅对岩石力学、地球化学、岩石物理学等是必需的,而且对研究大陆板块运动、地震、火山过程、生命起源以及全球气候变化等都具有十分重要的意义。

现在,岩石力学发展趋势主要表现在以下几方面:①向深层发展:例如地下空间的开发与利用、废料储存、油气储存等;②向细观、微观研究发展;③向环境科学渗透:例如岩土地层中的各种物质迁移及其对影响人类生活圈的保护。由于岩石是一种天然的地质材料,岩石力学发展中 also 面临一些基本困难,例如岩体的不连续性,对岩体实验在尺度上的有限性,数值分析结果的有效性评价等。

1.1.2 岩石工程

如前所述,岩石工程是以岩石为对象的工程活动的总称。在土木工程中,按工程的性质可分为洞室工程、边坡工程和基础工程。洞室工程包括对于天然洞室的利用和新的岩体内空间的开发与利用。例如地下厂房、地下水电站、发射井、地下核废料储库、人防掩体、防空洞等。边坡工程是对自然的或人工的斜坡进行利用与维护、加固,使之维持其自身稳定性所采取的工程技术措施。例如抗滑桩、锚杆支护、喷网砼护面等。基础工程是指在岩体上修建建筑物时所采取的岩石工程措施以控制建筑物的沉降和维持地基的稳定性,例如嵌岩基础,锚桩基础等。在岩石破碎方面,岩石开挖、破碎、切割、钻凿,以及岩石产品加工等工程活动是为了利用岩石本身和开发岩体空间所必需的,由于其涉及的范围广、工艺方法多,可以认为是岩石力学研究的延伸与岩石工程的扩展。目前,岩石爆破、岩石钻凿、岩石破碎、岩石产品加工等已经形成若干独立的岩石工程产业部门,相应地也分化出一些专门的学科;它们的工作对象精细到宝石的开采与加工,粗犷到岩石原料开采,如采石场。由此可见,岩石工程是与人类的生产、生活密切相关的。

1.1.3 岩石力学与岩石工程课程与其他学科之关系

力学是研究能量和力及其对物体作用与效应的一门传统学科。岩石力学是以岩石为研究对象,属于力学的一个分支。岩石工程处理采矿、隧道、基础、滑坡等有关的设计、施工和维护问题。国际上已经用岩石工程师(Rock Engineer)称呼专门从事于岩石工程的技术人员。岩石工程师的职责不仅要研究处理岩石力学问题,包括岩石的运动蠕变、岩石爆破等复杂力学问题,还必须具有对地质材料性能、地下水、地应力等问题的评价能力;不仅对影响岩石工程的各种状态变量要有所了解,还必须评价它们之间的相互影响,包括人为的工程活动所造成的影响等;不仅是主动地研究自然、认识自然,还在于能动地改造自然,不断地在采矿、构筑地下空间、公路、水库、发电站等场合创造工程业绩;不仅为岩石工程的建造负有责任,还要保护好自然生态环境。

岩石工程与地质工程、地球物理工程也有一定的联系。从经典地质学的观点看,地质学家强调了解岩石的历史,而地质工程师或工程地质师则重在预测地质材料在工程中的未来行为,例如岩石作为骨料或填充物的性能,或因开挖后岩壁的稳定性的如何?对岩石工程活动的这种前瞻性是工程地质师的职责。地球物理学家是运用物理学原理研究岩石材料的行为,重在研

究岩石的地质过程,例如,地球的地壳、地幔、地核在高温高压条件下岩石的演变。大多数关于深层地质结构的信息是来自地球物理探测,主要是应用深层地震波的反射来确定地壳的层状及其物理性质。

大型岩石工程常常是多学科交叉的,例如我国的三峡工程就是岩石力学、岩石工程、工程地质、地球物理等多方面的专家协同工作的事例。

1.1.4 学习岩石力学的方法

认识岩体、利用岩体、保护岩体和破碎岩体是学习岩石力学的基本目的。

学好本学科读者应遵循以下思路:

- ①从认识岩石出发,学习岩石力学中的基本理论和分析方法,结合岩石工程实际,发现新现象,发展新的理论和方法;
- ②十分注意岩石和岩体的各种地质、物理和力学参数,不断积累岩石工程和灾害工程的经验;
- ③充分利用现代科学技术成果,能用数值模拟和数值分析进行评价,立足于岩石工程应用;
- ④把勘测、实验、类比与经验结合起来;
- ⑤结合结构工程、道路工程、桥梁工程、水电工程的实际学习。

1.2 岩石与岩体

岩石按其地质成因可以分为三大类:岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩浆岩是由岩浆冷凝而形成的。绝大多数岩浆岩由结晶矿物组成,其结晶紧密,粘性好,通常结构均质有较高的强度。沉积岩是由地表经风化剥蚀的物质,通过搬运,沉积和胶结作用而形成的岩石。沉积岩主要由岩石或矿物颗粒骨架和胶结物组成,颗粒物和胶结物、颗粒形状和胶结状态等都影响沉积岩的力学性质。胶结物主要是钙、硅、铁及泥质等,由于沉积过程、沉积岩具有层理构造,因此又表现出各向异性性质。变质岩是由于地壳中的岩石受到高温、高压及化学活动的流体作用发生变质而形成的岩石,其物理力学性质不仅与原岩的性质有关,而且与变质作用的过程有关。以上三类岩石是以其成因来划分的,每类岩石又有多种岩石,特别是变质岩,虽然在地壳组成中约占25%,但已命名的岩石就达2000多种,对岩石工程而言,则可以采用其工程名称。岩石的工程命名可以参考国际岩石力学学会(ISRM,1981)给出的命名表。

岩体描述必须包括岩石和节理两个方面。对工程岩体应知道以下一些主要物理力学性质和工程性质。

对于岩石(岩块)

- 岩石的名称
- 颜色、矿物组成、蚀变性
- 母体、晶粒尺度和形状
- 重度、孔隙性、含水量

对于节理

- 岩块的尺度和形状
- 节理组数及其类型
- 节理特征

岩石力学

- 强度、硬度、各向异性
- 耐久性、塑性、膨胀性

岩体与岩石的重要区别就是岩体包含若干结构面。结构面是岩体形成过程中所遗留下来的地质界面,是岩体中各种不连续界面的总称。结构面无受拉强度,或受拉强度很小。根据国际岩石力学学会现场试验标准委员会的建议,结构面的描述可用10个节理特性参数,它们是:产状、间距、连续状态、粗糙度、面壁岩石强度、裂隙开度、充填物、渗透性、节理组数和岩块尺寸等,并且对这些参数都规定了测试方法。在岩石工程中,获取结构面的以上各种参数,对于岩体分级,围岩体压力分级,开挖和支护设计都是十分重要的。现在将几个重要的结构面参数说明如下:

(1) 产状

所谓产状就是描述结构面位置参数的量,即走向、倾向和倾角。走向是结构面与水平面交线的方位角,倾向为与走向垂直的方向,倾角为垂直面内倾向与结构面之夹角。地质图上可按图1.1所示的方法表示节理。一般节理[图1.1(a)]表示为走向线、倾向块、倾角数三要素,水平节理和垂直节理如图1.1(b)和(c)所示。

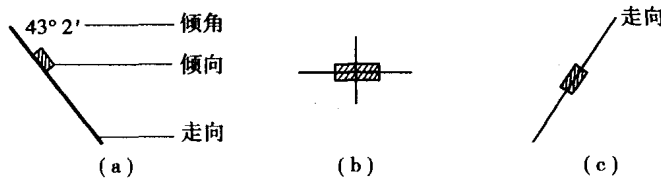


图 1.1

岩石工程中,由于节理的多组性,完全用图1.1的表示方法不太方便,可以用倾向A和倾角B来描述一个节理面,如图1.2所示,记作“A/B”。规定倾向为从正北矢顺时针量起的角并用三位数000°~360°表示,倾角为0°~90°,例如,“128°/23°”。

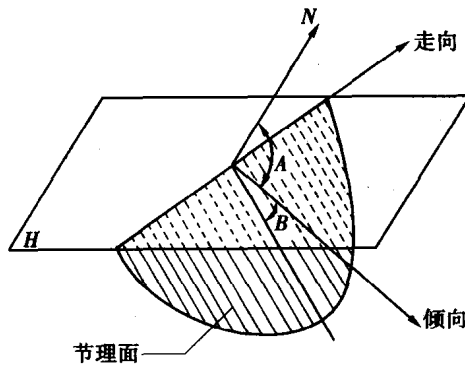


图 1.2

由于岩体的出露面所见的岩体结构面与水平面的夹角不能真实地代表它的倾角,因此称为视倾角,如图1.3所示。一组节理与水平面的夹角为视角 γ ,而非真倾角 α 。为了求真倾角 α ,从水平面上可以确定结构面的走向AE,而量测面的走向为CE,于是可以测出CE与AE间的夹角 β (取 $< 90^\circ$),于是结构面倾角 α 容易由几何关系求得

$$\tan \alpha = \frac{\tan \gamma}{\sin \beta} \quad (1.1)$$

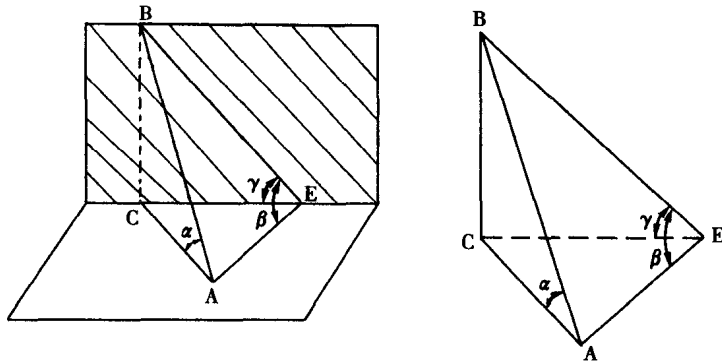


图 1.3

(2) 节理间距

节理间距容易由水平测线与结构面相交的点数确定。在垂直面上,长度为 L 的水平测线与结构面相交 N 次,则结构面的平均间距为

$$d = \frac{L \sin \alpha}{N} \quad (1.2)$$

式中 L ——测线长度;

N ——通过测线的一组结构面的数目;

α ——结构面的倾斜角。

若把测线取作垂直线,结构与测线相交 M 次,则该组节理间距为

$$d = \frac{L \cos \alpha}{M} \quad (1.3)$$

式中 L ——垂直方向测线长度;

M ——与测线相交的结构面数;

α ——结构面的倾斜角。

由于岩体不止含一组节理,以上测节理间距只能一组一组地测,其岩体节理间距可取 3 组特征节理的平均值即可。

岩石工程中有时用体积节理模数来表示节理的空间密集程度。体积节理模数的定义是单位长度内各组结构面数之和,即

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{L_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} \quad (1.4)$$

式中 L_i ——与 i 组结构面相垂直的测长;

N_i ——与 L_i 相交的结构面数目;

d_i —— i 组结构面的间距。

节理的其他特征,如连续状态、粗糙度、面壁岩石强度、裂隙开度、充填物、渗透性、节理组数和岩块尺寸等,可参考国际岩石力学学会试验标准委员会的规定。

1.3 岩体几何描述的赤平极坐标投影法

岩体是由若干节理、裂缝、裂隙的填充物所分割的岩块组合而成的。根据岩块的几何状

态,大致可将岩体分为块状岩体、板状岩体、柱状岩体和楔形岩体。

前面已讲到:表示节理的方法是用倾向和倾角表示。倾向是节理而与水平面交线的垂直方向,规定从北向矢顺时针量起,并在 $000^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 中以三位数表示;倾角为倾向矢量向下转到节理面的夹角,如图 1.2 所示,记作“节理”“ A/B ”,意义是对于该组节理倾向为 A ,倾角为 B 。

在岩石工程中,为了表示多组不同的节理,可在赤道平面上表示节理的投影,常称赤平投影。目前国内外的赤平投影法有两种:

- ①赤平极坐标投影法;
- ②赤平极射投影法。

两种方法有一定的联系,但画出的图形完全不同。赤平极坐标投影法以赤道平面上一个点表示一个空间平面,特别适合于表达多组节理或节理组的情况,因此用以表示岩体的几何结构特别方便;赤平极射投影法用赤道平面上的投影圆表示一空间平面,在节理较少时有利于表示节理之间的关系,因此在边坡的稳定性分析中十分有用。在国内地质工程中以赤平极射投影法为主。赤平极射投影法将在边坡稳定性分析中讲述,本节只讲赤平极坐标投影法。

赤平极坐标投影法的原理如图 1.4 所示。

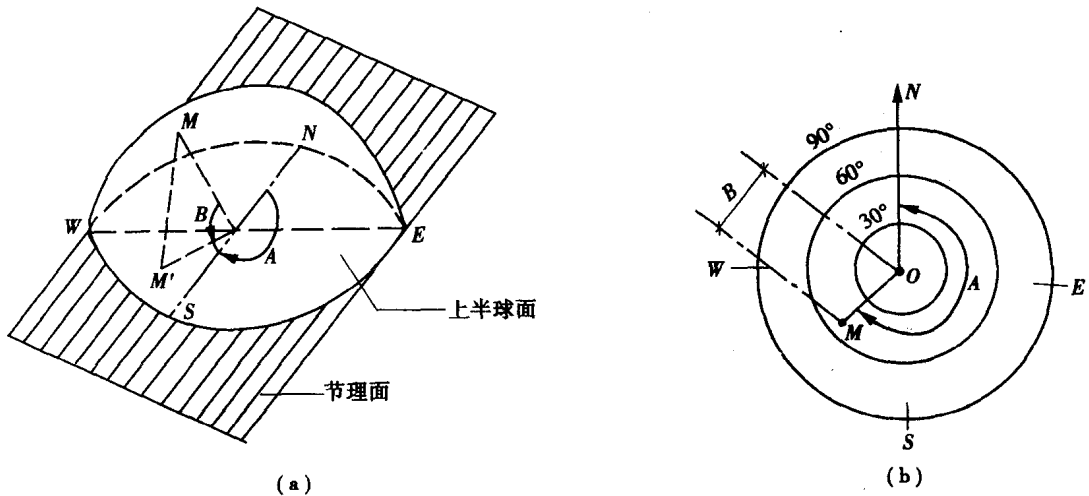


图 1.4

首先作一单位球面,其赤道平面为水平面,使节理面过球心,取上半球面作为节理的投影面。现在过球心作一已知节理面的法线交单位球面于 M ,此点叫做该节理的极点。然后由极点 M 向赤道平面作投影得 M' ,此点叫做该节理的赤平极坐标投影。显然,节理与极坐标投影点是一一对应的,且是惟一的。水平节理的赤平投影在赤道平面中心,而垂直节理的赤平投影则在赤道平面大圆边上。

现在作赤平投影极坐标图。半球的纬度投影为同心圆 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,经度投影为射线 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。

由此可绘出赤平投影面的极坐标图。极坐标图上任一点的坐标为上半球面上点的经度和纬度。对于已知节理,其倾向角 A 和倾斜角 B 可用“ A/B ”表示,在极坐标图上的投影点为 M' ,则 M' 点的坐标(经度/纬度),即是节理的“ A/B ”的极点 M 在球面上的“经度/纬度”位置,即代表节理“ A/B ”。所以,在这种赤平极坐标图上,任意点代表一个节理面,它的经、纬度都对应着该节理面的倾向和倾角(dip direction and dip angle)。

赤平极坐标投影的性质是:

- ①若投影点从赤平图中心向边缘移动时,表示节理的倾角从水平向垂直变化;
- ②赤平图上关于圆心对称的两个投影点表示两个节理的倾角相同但倾向相反;
- ③若投影点在图中心,则为水平节理;若投影点在赤平图大圆上,则为垂直节理。

实际上任何一组节理的倾向与倾角不可能完全相同,因此一组节理中的各个节理投影在赤平投影图上位于一个范围之内,这时可以用统计方法来确定这组节理的平均方向和倾角,或者记录其优势区间和可能值,例如“(125°~130°) 129°/(35°~40°) 37°”。典型的赤平极坐标投影如图 1.5 所示。图中显示该岩体存在三组优势节理:主节理 I、II 两组,投影点靠近赤平面大圆,互成直角,说明它们是相互垂直的陡倾节理;节理组 III 靠近赤平面中心,说明是近似水平的。

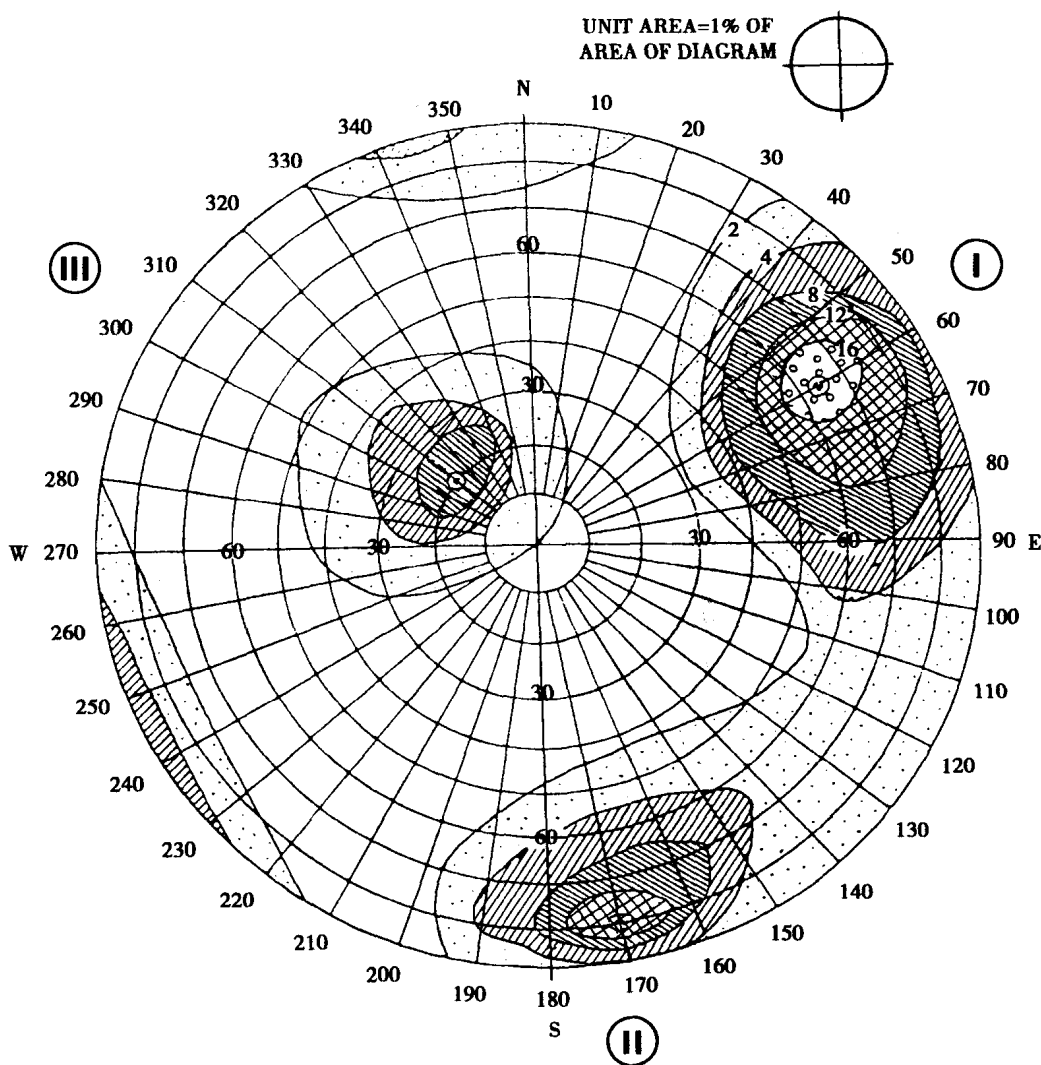


图 1.5 (From ISRM)

利用赤平极坐标投影方法可以把岩体的块体结构、板状结构、柱状结构以及楔形体结构等几种典型结构表示出来。因为这些结构的共同特征是由不同的节理组分割而成的。块体结构和板状结构一般是由互相正交的三组节理分割而成,它们的区别仅在于其中一组节理的间距