


The background of the cover features a close-up, high-contrast photograph of a rock surface. The rock is dark brown to black with a rough, porous, and fractured texture. The lighting is dramatic, highlighting the irregularities and creating deep shadows and bright highlights. The rock appears to be split or broken, with a jagged edge visible. The overall color palette is dominated by warm, earthy tones of brown and orange.

岩体力学

王文星 主编  中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩体力学/王文星主编. —长沙:中南大学出版社,
2004. 10

ISBN 7-81061-989-6

I. 岩... II. 王... III. 岩体力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 109635 号

岩体力学

王文星 主编

责任编辑 黄尚安

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

经 销 湖南省新华书店

印 装 湖南大学印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16 印张 18 字数 442 千字

版 次 2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-81061-989-6/O · 053

定 价 28.00 元

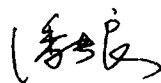
图书出现印装问题,请与经销商调换

序

在20世纪50年代末和60年代初世界各地相继发生了一些重大的岩体工程灾害，例如，1959年12月法国马尔帕塞混凝土坝的基础发生破坏，引起洪水泛滥；1963年意大利瓦扬大坝水库岸坡滑坡，激起250 m高的浪涌翻过坝顶导致下游2500多人丧生；1960年南非一座煤矿倒塌；在我国锡矿山矿务局、盘古山钨矿、大吉山钨矿等用空场采矿法的矿山采场相继发生了大范围崩塌。这些灾害引起了世界各国岩石工程界的极大关注和投入研究，使岩体力学得到有效的发展，形成了一门有特定研究范畴的新兴的工程类学科，与此同时，为了适应培养人才的需要，在国外高校的岩石工程类的各个专业纷纷设置岩石力学课程。在我国由于文革的严重干扰，岩体力学作为采矿工程的专业基础课程，只是在恢复高考招生的第一届（即新77级）才开始设置。

本书作者从设立这门课程开始就参与岩体力学教材编写和课程的讲授，一直至今，作者根据岩体力学发展状况和发展趋势、教学改革的需要，以及长期在岩体力学方面的教学和科研工作实践，把他编写的经过十余年试用讲义进行修改和充实，最终撰写成本书。

本书在课程体系结构、内容的取舍、论述方法等方面都做了新的尝试，可贵之处是它的实用性（把岩体力学理论与岩体工程实践紧密结合）、广泛性（适用于采矿工程、地下空间工程、水利水电工程和土木工程等岩石工程专业类的需要）、先进性（它吸纳了岩石力学近年来的最新成就）和基础性（较好地把握了本科和研究生课程内容在深与浅、易与难、宽与窄方面的区别和联系）。相信本书对岩石工程学科教学的发展具有推动作用。



2004年9月

前 言

岩体力学是应用力学的一个分支,是一门年轻的学科,众多的专家和学者投入到岩体力学的研究工作,“八仙过海,各显神通”,其发展势头方兴未艾。国内外的岩体力学教材、专著甚多,其深度、层次和适应面也各不相同。

本教材基于笔者多年学习和讲授岩体力学的体会,在原有的经过十余年试用的讲义的基础上,结合岩体力学学科近年来的发展修改而成。编写本书的基本想法有六点:

1. 岩石与岩体都是地质作用的产物,岩体力学特性和岩体工程的力学问题与岩体的地质特征具有紧密的联系。因此,在本书的编写中尽量结合岩石、岩体的地质实际。

2. 从岩石学的角度考虑,岩石与岩体没有区别,从岩体力学考虑,岩石与岩体是不可分的,又有区别的,其主要区别在于岩石与岩体的结构构造。处于不同岩石类型和不同结构的岩体中的岩体工程,又具有不同的力学特征。因此,本书基本上按岩石、岩体和岩体工程三个范畴编写,并注意了它们相互间的联系。

3. 岩体力学是应用力学的一个分支,本书对所用到的经典力学知识不作重复讲授和详细的公式推导。

4. 现代岩体力学的理论和技术相当丰富,也相当复杂。本书的服务对象主要是本科生,因此,在内容的取舍上考虑了本科生与研究生的区别,主要讲授岩体力学最基本的理论和技术,同时对某些正在发展的前缘的研究成果也作了适当的介绍,目的在于为有志攻读研究生的学生提供一点信息,使本科教学不致于与研究生教学完全脱节。

5. 从教学方便考虑,在内容的处理上,尽量将相关知识点集中讲授,便于学生系统掌握有关知识。

6. 在岩体构造的空间分布规律研究中,要用到赤平极射投影和实体比例投影的基本原理和方法,如果将这部分单独编进正文,与全书的系统不协调;关于坑道围岩稳定性分析和压力计算的弹塑性分析公式的推导比较复杂,未放入正文。这两部分分别作为附录 I 和附录 II 放在正文后。

本教材的编写得到资源与安全工程学院负责人和岩土力学与工程研究所潘长良教授、曹平教授、王李管教授、唐礼忠教授和中南大学教务处杨殿教授的热情支持、鼓励和帮助。书中引用了许多国内外专家、学者的著述,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 8 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 岩石的力学特性	(5)
1.1 岩石的静力学特性	(5)
1.1.1 岩石在单轴压拉条件下的力学特性	(5)
1.1.2 岩石在剪切荷载条件下的力学特性	(15)
1.1.3 岩石在三轴压缩条件下的力学特性	(17)
1.2 岩石的流变特性	(21)
1.2.1 岩石的蠕变曲线及其特征	(21)
1.2.2 岩石蠕变试验的加载方法	(22)
1.2.3 岩石的本构模型	(23)
1.3 影响岩石力学性质的因素	(30)
1.3.1 矿物成分对岩石力学性质的影响	(30)
1.3.2 岩石的结构构造对岩石力学性质的影响	(31)
1.3.3 水对岩石力学性能的影响	(34)
1.3.4 温度对岩石力学性能的影响	(39)
1.4 岩石的破坏判据	(40)
1.4.1 最大拉应变判据	(40)
1.4.2 莫尔判据及莫尔-库仑判据	(40)
1.4.3 格里菲斯判据及修正的格里菲斯判据	(44)
第二章 岩体的力学特性	(48)
2.1 岩体中的结构面和结构体的特征	(48)
2.1.1 结构面的特征	(48)
2.1.2 结构体的特征	(50)
2.2 岩体的静力学特性	(51)
2.2.1 不连续面在剪切荷载作用下的力学特性	(51)
2.2.2 岩体破坏机理	(58)
2.2.3 岩体破坏判据及岩体强度和变形参数的估算	(60)
2.2.4 原位岩体变形参数与强度测定	(68)
2.3 岩体的动力学特性	(71)
2.3.1 弹性波在岩体中的传播特性	(71)
2.3.2 弹性波探测技术	(77)

2.3.3	声发射技术	(83)
2.4	岩体的水力学特性	(88)
2.4.1	岩体的水文地质结构	(89)
2.4.2	岩体中的渗流	(91)
2.5	岩体的热力学特性	(94)
第三章	岩体综合调查及岩体分类	(100)
3.1	岩体综合调查方法	(100)
3.1.1	钻孔取心调查	(100)
3.1.2	沿暴露面调查	(101)
3.1.3	结构面的空间分布规律	(106)
3.1.4	结构面间距的统计规律	(109)
3.2	岩体结构分类	(111)
3.3	岩体工程分类	(112)
3.3.1	岩体工程分类的参考因素	(113)
3.3.2	蒂尔的岩石质量指标分类	(114)
3.3.3	宾尼奥夫斯基的节理岩体地质力学分类	(114)
3.3.4	巴顿等人的岩体分类	(116)
第四章	岩体初始应力	(121)
4.1	岩体自重应力	(121)
4.2	岩体构造应力	(123)
4.2.1	构造应力场的概念	(123)
4.2.2	构造运动的起因	(124)
4.2.3	构造应力场分析	(127)
4.3	岩体初始应力测定	(132)
4.3.1	应力解除法	(132)
4.3.2	水压致裂法	(137)
4.4	岩体初始应力分布状态	(139)
第五章	岩石边坡	(143)
5.1	潜在边坡问题的评价	(143)
5.1.1	边坡破坏的基本类型	(143)
5.1.2	边坡岩体结构图的编制	(143)
5.2	平面破坏分析	(151)
5.2.1	平面破坏的条件	(151)
5.2.2	平面破坏的分析方法	(151)
5.3	楔体破坏分析	(155)
5.3.1	只考虑摩擦力的楔体破坏分析	(155)

5.3.2	同时考虑摩擦力、粘结力和水压力的楔体破坏分析	(157)
5.3.3	楔体破坏的一般分析法	(159)
5.4	边坡监测与预报	(170)
5.5	边坡维护	(173)
第六章	地下坑硐	(180)
6.1	地下坑道	(180)
6.1.1	坑道围岩与衬砌的应力分布	(180)
6.1.2	坑道围岩稳定性分析与压力计算	(188)
6.1.3	坑道支护及监测技术	(205)
6.2	竖井	(222)
6.2.1	竖井围岩应力分布	(222)
6.2.2	竖井围岩稳定性评价	(223)
6.2.3	竖井井壁压力计算	(227)
第七章	岩 基	(233)
7.1	垂直荷载作用下的岩基	(233)
7.1.1	岩基中的应力分布	(233)
7.1.2	岩基的沉降	(235)
7.1.3	岩基的承载力	(237)
7.2	倾斜荷载作用下的岩基	(239)
7.2.1	岩基中的应力分布	(239)
7.2.2	岩基承载力	(244)
附录 I	: 岩体结构单元的赤平极射投影和实体比例投影	(248)
附录 II	: 轴对称情况下圆形坑道围岩稳定性与压力计算的弹塑性分析	(268)
参考文献	(276)

绪 论

一、岩体力学的产生及其发展

岩体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,它的理论和技术是岩体工程学科的专业基础。

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,岩体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,逐步认识了岩体力学研究的重要性,在工程地质研究的基础上,开始了岩体力学的研究。特别是一些重大的岩体工程事故的发生,大大地推动了岩体力学的发展。例如,1959年法国的马尔帕塞大坝因左坝肩岩体沿弱面滑动造成溃坝事件。1963年,意大利瓦扬坝上游左岸山体滑动,激起250 m高浪涌漫过坝顶,死亡2500人。这些惨痛的教训,唤起了国内外工程界人士对岩体力学研究的高度重视。我国在20世纪70年代中后期岩体力学的发展进入了一个崭新的时期,岩体力学研究室在煤炭、冶金、铁道、水电等部门迅速成立,岩体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,岩体力学的发展大致可分为三个阶段^[35],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,是与人们对岩体的认识发展水平密切相关的。

早期,人们把岩体当做一种连续体,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。这是岩体力学发展的第一阶段——材料力学阶段。

从20世纪50年代开始,工程技术人员和岩体力学工作者逐步认识到岩体中不连续面的力学作用,特别是诸如马尔帕塞坝和瓦扬坝失事的惨痛教训,推动岩体力学发展进入了第二阶段——裂隙岩体力学阶段。在这一阶段,奥地利学派起了很大的推动作用。1974年米勒(L. Müller)主编的《岩体力学》文集总结了这一阶段的研究方法、方向和基本成果,是岩体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,是岩体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体力学研究,将岩体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,以及为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,岩体力学的发展也大致在相同的时期进入第三阶段。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,岩体力学的理论分析、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。

二、岩体力学的研究内容及研究方法

(一) 研究内容

岩体力学的研究内容可分为三大块:即岩石、岩体和岩体工程。岩石是指由各种裂隙(统称为不连续面)切割而形成的岩块,又称为结构体;岩体是包括结构体和不连续面的地质体,岩体工程则包括岩基和岩体中各种半地下或地下坑硐。这三大块之间既有联系又有其各自的特征。岩体和岩体工程都离不开岩石,因此,岩石、岩体和岩体工程的力学效应是互相联系的。

1. 岩石的力学特性

岩石中虽存在孔隙和微裂纹,但仍可作为一种连续介质来看待,可当作一种材料来研究,故有岩石材料之称。岩石的力学特性主要是指岩石在瞬时静荷载和长期静荷载作用下的变形特征、强度特征和岩石的破坏准则。

2. 岩体的力学特性

岩体是一种地质体,它由不连续面和结构体(即岩石)组成,岩体的力学特性是岩体原生结构、构造运动中所产生的不连续面,以及由不连续面切割成的结构体的力学特性在一定的地质环境中的综合表现,即使在同类岩石中,岩体结构特征和所处的地质环境也是随位置不同而变化的,因此,笔者认为,不宜将岩体的力学特性称之为力学性质。通常认为,力学性质以相对稳定的力学指标或参数为代表,对于岩体,只能测定局部位置的力学参数,它们一般不能代表大范围岩体的力学特性,大范围岩体的力学特性既有统计学的概念,又有模糊的概念。因此,可将岩体的力学特性称之为力学效应。

岩体的力学效应与岩体的构造分布特征和地下水密切相关,因此要进行岩体综合调查。由于岩体的复杂性,一般不能笼统地将一个工程区域的岩体概化为一种力学介质模型进行研究。因此,在岩体综合调查的基础上,要进一步对岩体进行结构分类和工程分类,以便对不同结构类型的岩体概化为不同的力学介质模型,并对岩体进行工程分类,作为岩体工程设计、开挖和支护的基础。

岩体的力学效应包括岩体的静力学特性、动力学特性、水力学特性和热力学特性。岩体的静力学特性主要受岩体结构控制,因此,在了解岩体结构特征的基础上,研究不连续面的力学特性、含结构面(包括不连续面)岩体的破坏机理和破坏判据、强度和变形参数的估算、原位岩体变形和强度测定。岩体动力学特性包括弹性波(如爆破应力波、地震波和声波)在岩体中的传播特性、岩体破坏的声发射特征,弹性波观测和声发射技术是岩体完整性探测、变形和破坏状态的监测及预报的基础。岩体热力学特性是指岩石、岩体在中高温条件下的热学

特性和力学特性,它们是研究地表温度变化和某些地下工程如核废料贮存库、地下冷库、热库围岩稳定性的基础。岩体水力学特性指岩体中的地下水对岩体力学特性的影响及地下水充填在岩体裂隙中和在裂隙中流动所产生的力学效应。在有地下水的情况下,地下水对岩体工程的影响是不可忽视的因素。

3. 岩体工程的稳定性

岩体工程包括岩石边坡、地下坑硐工程和岩基三大类。这些工程各有其特殊性,因此分别进行讨论。

岩体工程处于不同的地应力、地下水和地温条件下,这三方面的条件构成了岩体工程的地质环境。其中初始应力是岩体工程的力学边界条件。岩体工程与其他地表建筑的重要区别之一就是岩体中存在初始应力,这种初始应力主要由岩体自重应力和构造应力组成,不能通过计算求得,一般只能通过实际测定才能了解,其他地表建筑工程的荷载和应力可以根据工程结构设计和材料自重计算出来;岩体工程是在初始应力场中开挖和建造,要进行可靠的设计和稳定性分析研究,必须首先测定岩体初始应力。因此,岩体初始应力测定原理与方法也是岩体力学工作者应当掌握的基本知识。

岩体工程开挖后,对于能够自稳的岩体工程,可不进行支护和加固,对于不能自稳或存在安全隐患的岩体工程必须进行支护和加固,在这种情况下,工程围岩和支护结构共同组成一个承载结构,它们相互作用,共同承受原岩对围岩的压力。如何充分发挥围岩的自支承作用是非常重要的。

岩体工程围岩的破坏,直接关系到安全和工程的使用,因此,岩体工程的监测是预测、预报或判断岩体工程稳定状态和采取控制措施的依据。

岩体工程还有一种特殊的动力学问题,即岩爆,目前的研究还很不成熟,本书未作介绍。

(二)研究方法

岩体力学的研究方法包括三个方面:(1)室内试验;(2)现场量测;(3)理论分析与计算。

1. 室内试验包括:(1)岩石的物理、水理性质、热学性质和力学性质测定;(2)不连续面的力学性质测定;(3)模型试验,即光弹模型试验和相似材料模型试验。目前光弹模拟试验有被数值模拟代替的趋势,所以本书对光弹模拟试验未作介绍。

2. 现场量测包括:(1)原地岩体变形和强度参数测定;(2)岩体应力测定;(3)围岩对支护压力测定,以及围岩应力、变形、移动和岩体破坏的监测和预报,包括支护结构的监测。

3. 理论分析与计算包括:(1)建立岩石、岩体的破坏机理和破坏准则;(2)岩石、岩体的变形特性研究,以及岩体强度和变形参数的估算;(3)岩体工程稳定性分析与计算;(4)岩体变形破坏的控制等。

各种研究方法的目的是为了解岩石、岩体和岩体工程的力学特征,为解决岩体工程的力学问题服务。岩体工程的稳定性分析及变形、破坏的控制是岩体工程力学问题的核心。岩体工程的力学问题除与岩体初始应力有关之外,岩体的结构构造对岩体力学效应和岩体工程稳定性的影响是非常重要的因素。岩体结构构造特征随区域不同而变化,从而决定了岩体工程稳定性分析方法不是单一的,在不同的岩体结构和构造情况下,其力学分析方法有所不同。例如,在岩石边坡稳定性分析中,由不连续面所切割成的结构体的稳定性分析是一个重要方面;在地下坑道围岩稳定性分析中,对于比较完整的岩体,可采用弹塑性力学分析

方法,对于不连续面切割形成的危险结构体可采用块体平衡理论的分析方法,对于松软破碎的岩体可采用松散体力学分析方法。

三、岩体力学与其他学科的关系

岩体力学是应用力学一个独立的力学分支,它与材料力学、弹塑性力学和流变力学等力学有纵向联系,人们常常结合岩石岩体的地质特征运用这些力学知识,使岩体力学得到发展。

岩体是复杂的地质体,形成之后经历了长期的地质作用,岩体工程围岩赋存于一定的地质环境之中。因此,岩体力学研究不能脱离岩体的地质环境,岩体力学与工程地质学、构造地质学和地质力学有十分密切的联系。

岩体力学是为解决岩体工程中的力学问题服务的。这些工程学科包括:采矿和其他地下空间工程、交通工程、水电工程和基础工程等。因此,岩体力学是各种岩体工程学科的专业理论基础。

目前,岩体力学还是一门相当年轻的学科,还有大量的问题有待于进一步的探索。岩体力学的研究对象的复杂性居于固体力学之首。因此,当前在岩体力学研究中,许多学科的理论都得到了应用,呈现出“八仙过海,各显神通”的局面,在学术观点上“百花齐放,百家争鸣”。这是一门新兴学科发展中的正常现象,经过一定时期的发展,必将形成“千条大河归大海”之势。本书针对本科教学的需要,讲授基本的、相对成熟的部分,大量的前沿知识留给研究生教学和博士生自学。为了避免本科教学与研究生教学脱节,对涉及基本知识的某些部分的研究动态作了适当介绍,为有志继续深造的学生提供一些信息。打算未来从事岩体力学研究的学生,应该遵循实践—认识—再实践—再认识的认识规律,在新的探索研究途中,总结经验教训,找到通向成功之路,为岩体力学的发展作出贡献。

第一章 岩石的力学特性

1.1 岩石的静力学特性

通常将岩石在静荷载作用下的力学特性,称为岩石的静力学特性,下面分别介绍岩石在单轴压缩、单轴拉伸、剪切和三轴压缩条件下的力学特性。

1.1.1 岩石在单轴压拉条件下的力学特性

一、岩石的单轴压缩条件下的力学特性

(一) 普通试验机上的应力应变曲线

米勒(L. Müller)用普通材料试验机做 28 种岩石的单轴压缩试验,将岩石的应力 - 应变曲线分为六类,如图 1-1 所示。

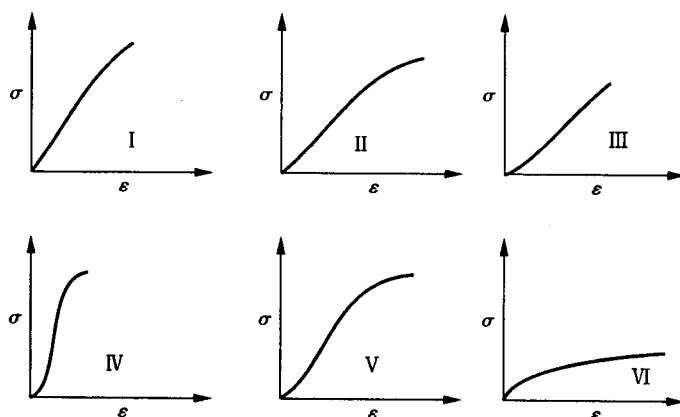


图 1-1 岩石的六种单轴应力 - 应变曲线

I. 弹性的; II. 弹塑性的; III. 塑弹性的; IV. 塑 - 弹 - 塑性的;

V. 塑 - 弹 - 塑性的; VI. 弹 - 塑 - 蠕变的

类型 I: 应力 - 应变曲线近于直线,直到试件发生突然破坏,曲线不发生明显弯曲,即近于线弹性变形特征。玄武岩、石英岩、辉绿岩、白云岩和非常坚硬的石灰岩等致密、坚硬的岩石表现出这种变形特征。

类型 II: 应力 - 应变曲线开始为直线,当应力增大到一定值后,曲线向下弯曲,其斜率随应力增大而减小,直至试件发生破坏,即表现为弹塑性变形特征。石灰岩、粉砂岩、凝灰岩等一些致密但岩性较软的岩石表现出这种变形特征。

类型 III: 应力 - 应变曲线开始上凹,而后变为直线,直至破坏,称之为塑弹性变形特征。

花岗岩、砂岩等具有孔隙和微裂隙的坚硬岩石反映出这种变形特征。应力-应变曲线开始段的上凹部分是孔隙和微裂隙逐渐压密的反映。

类型Ⅳ：应力-应变曲线呈S型，中部有一较陡并较长的直线段，两端曲线段较短，这种变形特征叫塑-弹-塑性特征。一些比较坚硬、致密的变质岩，如大理岩、片麻岩等表现出这种变形特征。

类型Ⅴ：应力-应变曲线也呈S型，但与类型Ⅳ相比，直线段较短，斜率较小，两端曲线段较长。一般压缩性较高的岩石，如片岩在垂直片理方向受压时，表现出这种变形特征，也叫塑-弹-塑性特征。

类型Ⅵ：应力-应变曲线开始有一段直线，接着便是非弹性变形和连续的蠕变，称之为弹-塑-蠕变特征。岩盐就具有这种变形特征。

上述六类应力-应变曲线代表了不同岩性及其结构构造对变形特征的影响，定性地反映了岩石的变形特征。

(二) 岩石的全应力-应变曲线及破坏后的性态

图1-1所示的六类岩石应力-应变曲线，都是在普通材料试验机上的试验结果，只反映了岩石受力在达到极限强度以前的变形特征，没有反映出岩石在发生宏观破坏(即所受应力达到其极限强度)之后的变形特征。如果采用刚性试验机或伺服控制试验机，则可以做出岩石从开始受力到发生宏观破坏，直至完全破坏的应力-应变曲线，通常叫做全应力-应变曲线或应力-应变全图，如图1-2所示。

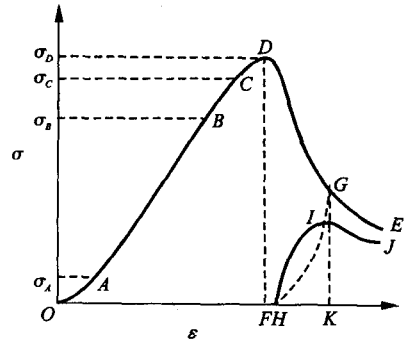


图1-2 岩石的全应力-应变曲线

岩石的全应力-应变曲线可分为两个大区段；*OD*段叫破坏前区，*DE*段叫破坏后区。根据曲线形状和试验中观测到的声发射(即材料内部开始破坏而发射出声波)现象，可将这条曲线划分为五个阶段。*OA*段为上凹曲线，叫微裂隙压密段；*AB*段近于直线，叫弹性变形段。在*B*点处开始有声发射现象，直至*C*点，声发射现象变化不大。声发射现象的发生，说明试件内部微裂隙开始分枝、扩展或产生了新的微裂隙。在*BC*阶段，声发射现象变化不大，并且当停止加载时，微裂纹停止扩展，故称为微裂隙分枝和稳定扩展段。从*C*点开始，声发射活动加剧，即使停止加载，微裂纹也会继续扩展，直至*D*点，试件开始宏观破坏，故将*CD*段称为微裂隙不稳定扩展到破坏阶段。*D*点以后，试件继续破坏，微裂纹继续扩展并相互连接形成宏观的破裂面，岩石试件承载能力下降，直至*E*点，试件完全破坏，*DE*段叫破坏后区。相应各阶段的应力 σ_A 、 σ_B 、 σ_C 、 σ_D 和 σ_E ，分别叫做微裂隙压密极限、弹性极限、峰值强度和剩余强度。

岩石的全应力-应变曲线全面地反映了岩石从受力开始到静态破坏的全过程变形特征，其破坏前区的应力-应变曲线与普通试验机上做出的应力-应变曲线相同。下面讨论岩石在峰值荷载后的性态。

在刚性试验机和伺服控制试验机尚未出现之前，用普通材料试验机只能测出岩石在峰值强度以前的应力-应变曲线。这是因为普通材料试验机是一种柔性试验机，不具备足够的刚度，也没有载荷和变形的控制能力，不能研究岩石在峰值荷载以后的性态，只有利用刚性试

验机或伺服控制试验机才能研究这种性态。

所谓刚度，是指物体产生单位位移所需的外力，即：

$$k = \frac{P}{u} \quad (1-1)$$

式中 K ——物体的刚度， kN/mm （千牛[顿]/毫米）；

P ——加在物体上的外力， N ；

u ——在外力作用下物体发生的位移， mm 。

对于弹性体来说，产生弹性变形，则在物体内部贮存弹性变形能 W ，其值为：

$$W = \frac{1}{2}Pu = \frac{P^2}{2k} \quad (1-2)$$

由上式可见，在相同载荷作用下，刚度小的物体贮存的弹性变形能比刚度大的物体多。同理，对试验机来说，在岩石试件受力达到其强度极限时，刚度小的试验机比刚度大的试验机内贮存的弹性变形能多。如图 1-3 所示，直线 OG 和 OH 分别代表不同刚度的试验机的力 - 变形曲线，这两条曲线下面阴影部分的面积，代表在岩石试件受力达到极限强度时试验机内贮存的弹性变形能。

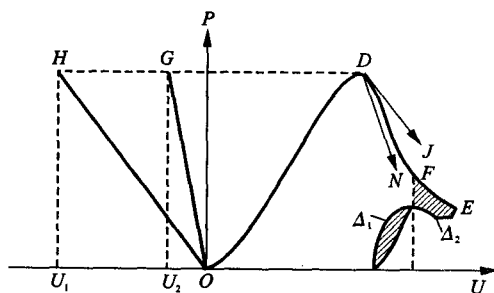


图 1-3 试验机工作原理

试验机与岩石试件组成一个封闭的压力系统。在峰值压力以前，试验机压力与试件抗力总是处于动态平衡状态。正是因为试件受力尚未达到其极限承载能力，所以试验机的压力（由油泵产生）得以上升。由于试件和试验机都发生了弹性变形，所以在试件和试验机中都贮存了弹性变形能。

当压力 P 达到试件的极限承载能力时，试件开始发生宏观破坏，承载能力下降，机器压力下降。机器内部贮存的弹性变形能则开始释放，对试件产生一个附加压力。刚度小的试验机，贮存的弹性变形能多，弹性变形能释放时产生的附加压力也大，有迫使试件沿着 DJ ($DJ // OH$) 路径变形的趋势，提供了超过试件静态破坏所需的能量，故做不出破坏后区的应力 - 应变曲线，试件发生猛烈破坏；反之，刚度大的试验机，贮存的弹性变形能少，弹性恢复趋势线为 DN ($DN // OG$) 所提供的能量不足以引起试件猛烈破坏，则可以做出某些岩石的破坏区应力 - 应变曲线。

对于某些岩石，即使采用刚性试验机，也做不出全应力 - 应变曲线，而必须采用伺服控制试验机。这是因为岩石试件在破坏后期所消耗的能量的一个重要部分是在破坏前区贮存的弹性变形能，有些岩石在其受力达到其极限承载能力时，贮存的弹性变形能释放就足以引起试件完全破坏。因此，在这种情况下，只有借助于伺服控制试验机的载荷控制能力，在峰值荷载后，使试件逐步卸载，才能做出全应力 - 应变曲线。

图 1-4 是 INSTRON 伺服控制试验机的闭环控制试验系统示意图。其工作原理是：高压油从液动力源进入伺服阀 7 后输给作动器 4，作动器 4 动作并对试件施加载荷。根据不同的伺服控制模式，分别借助载荷传感器 2、引伸计 6 和线性差动变压器 5 测量试件所受的载

荷、试件应变和变形。这些测量信号进入伺服控制中心，与函数发生器输入的预定的载荷、应变和位移随时间的单调增长率进行每秒钟上千次的比较，并将其偏差经偏差放大器和伺服放大器放大后送入伺服阀调节器，调节伺服阀的进油量，使作动器朝着消除偏差的方向运动，从而实现闭环控制。

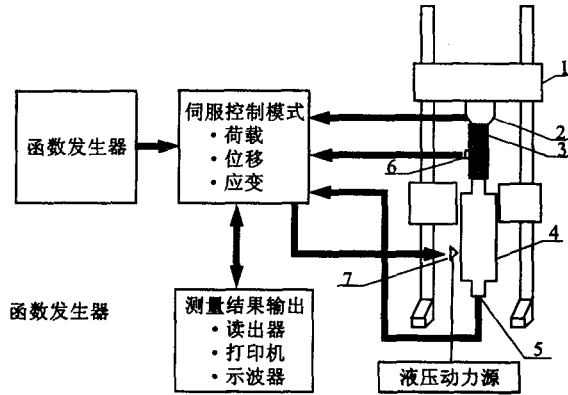


图 1-4 INSTRON 伺服控制试验系统

1—架载架；2—荷载传感器；3—试件；4—作动器；5—线性差动变压器；6—引伸计；7—伺服阀

瓦威尔西克(WAWER SIK, 1968)^[1]对岩石开始宏观破坏后的性态作了仔细研究，所得结果如图 1-5 所示。他认为岩石在发生宏观破坏以后的性态分为两种类型。

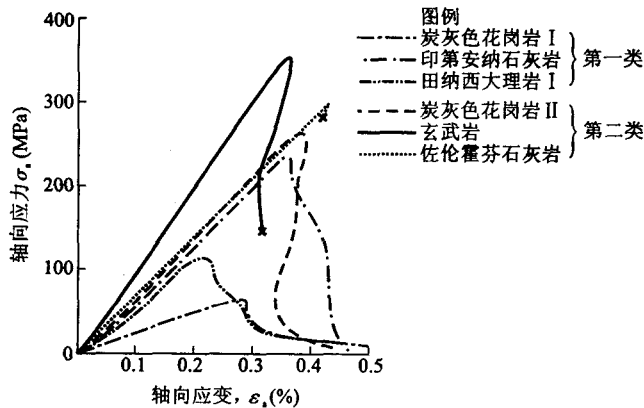


图 1-5 WAWER SIK 的试验结果

类型 I，试件仍保留有一定的强度。要使试件进一步破坏，试验机必须进一步做功，这种类型为稳定破坏型，应力-应变曲线的破坏后区斜率为负；类型 II，试件受力达到其极限强度以前贮存的弹性变形能就足以使试件完全破坏，不但不需要试验机进一步做功，还要逐步卸载，才能做出破坏后区应力-应变曲线，因此，应力-应变曲线的破坏后区斜率为正。

进一步的研究表明，孔隙率大的沉积岩和部分结晶岩的性态属于类型 I，细粒结晶岩属于类型 II 的情况。

但是，在应变率较大的情况下，属于类型 I 的岩石的破坏性态也可以转化为类型 II。

(三) 岩石在循环加卸载条件下的应力 - 应变曲线

对于弹 - 塑性岩石来说，在循环加 - 卸载条件下的应力 - 应变曲线随卸载点应力的大小而具有不同的特征。

如图 1-6(a) 所示，当卸载点 M 的应力低于弹性极限即 σ_e (b 点对应的应力) 时，卸载曲线将沿加载曲线回到原点，变形可以完全恢复。不过其中有 10% ~ 20% 的弹性变形要滞后一段时间才能恢复，如不考虑时间效应，则加卸载曲线重合。这种弹性变形滞后恢复的现象叫做弹性后效。

如果卸载点 M 的应力高于弹性极限 σ_e ，如图 1-6(b)，则卸载后存在塑性变形 ϵ_p 。弹性变形 ϵ_e 可以完全恢复，塑性变形则不能恢复，弹性后效依然存在。

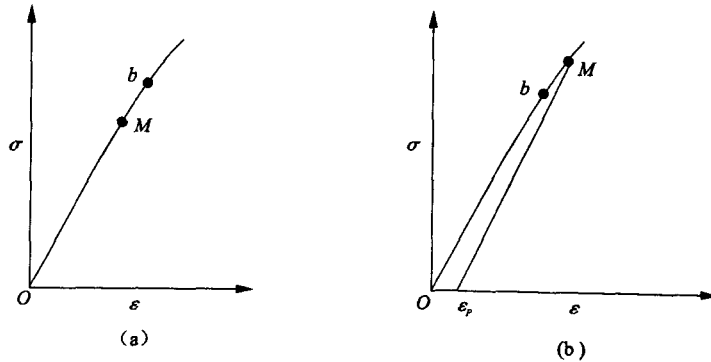


图 1-6 弹 - 塑性岩石加卸载应力应变曲线

(a) 卸载点在弹性极限以下; (b) 卸载点在弹性极限以上

对于塑 - 弹性岩石或塑 - 弹 - 塑性岩石来说，如进行循环加卸载，则卸载曲线与下一次加载曲线不重合，如图 1-7 所示。加卸载曲线围成一个环形面积，叫塑性滞环。

当第二次加载时，应力超过卸载点应力后，应力 - 应变曲线仍沿单调边载曲线上升，好像未曾经过卸载一样，如图 1-7 可见，岩石的加载曲线的连续性没有因卸载而改变。

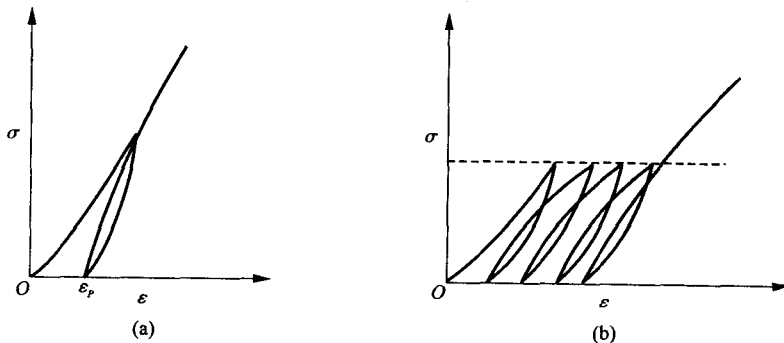


图 1-7 塑 - 弹性和塑 - 弹 - 塑性岩石循环加卸载

(a) 卸载点应力逐渐增大; (b) 卸载点应力不变

如果每次卸载点应力相同,则随循环次数增多,塑性滞环的面积将越来越窄最终趋于消失,如图1-7(b)。这是因为岩石中的微裂隙经反复压密,最后呈完全弹性变形。根据这种性质,可测得塑-弹性和塑-弹-塑性岩石的稳定的弹模。

由图1-2可见,如果卸载点在后破坏区,卸载后再加载,加载曲线的峰值点将低于卸载点。在加载曲线与卸载曲线之间也有一个滞环。从能量的观点看,曲线FE下面的面积应与重新加载曲线下面的面积相等,它们都等于F点后维持试件静态破坏所需的能量。

由峰值后区的卸载和加载曲线可知,岩石受力达到其极限强度,已经发生宏观破坏后,仍然具有弹性和一定的承载能力。这就是我们经常见到工程中有些围岩和矿柱虽已破裂却仍然能够继续承载的原因。

(四) 岩石弹性参数的确定

为了工程应用方便,必须对岩石的变形特征作定量描述。通常根据岩石在单轴压缩条件下的应力-应变曲线确定岩石的弹性参数,即弹性模量和泊桑比。下面介绍岩石弹模和泊桑比的确定方法。

1. 弹性模量 E 的确定

弹性模量 E 是指岩石在单轴压缩条件下,应力-应变曲线的斜率。当应力-应变曲线为直线时,如图1-1中类型I,弹性模量 E 由下式给出:

$$E = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (1-3)$$

式中 σ_i ——应力-应变曲线上任一点对应的轴向应力, MPa;

ε_i ——对应于 σ_i 的轴向应变。

当应力-应变曲线不是直线时,如图1-1中类型IV、V,曲线各段的斜率不相同。在实际工作中可用三种弹性模量来表示岩石的变形特征:即以应力-应变曲线过原点处切线的斜率为初始弹模 E_i ,以直线(或近于直线)段的斜率为切线弹模 E_t ;以及相应于极限应力50%的应力、应变点与原点连线的斜率为割线弹模 E_s ,如图1-8所示。

计算公式为:

$$E_i = \sigma_i / \varepsilon_i \quad (1-4)$$

$$E_t = \frac{\sigma_{a2} - \sigma_{a1}}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \quad (1-5)$$

$$E_s = \sigma_j / \varepsilon_j \quad (1-6)$$

$$\sigma_j = \frac{\sigma_c}{2}$$

式中 E_i ——初始弹模;

σ_i ——过原点切线上任一点的轴向应力;

ε_i ——对应于 σ_i 的轴向应变;

E_t ——切线弹模;

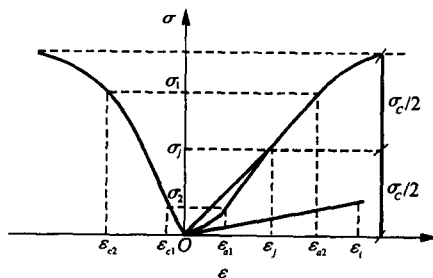


图1-8 弹性参数确定方法