

高等学校教材

岩体力学

肖树芳 杨淑碧 编

地质出版社

前 言

《岩体力学》是高等地质院校工程地质专业四年制工程地质教材之一。本书是根据地质矿产部1981年6月制定的《岩体力学》教学大纲写成的。

全书共分八章，每章均附有习题。其中，绪论部分及第一、二、三章由肖树芳编写，四、五、六、七、八章由杨淑碧编写。本书先经陶振宇、李铁汉、蒋觉光、孔宪立、芦盛松、苏伯苓等老师的初步审查；又经1985年3月地质矿产部工程地质教材编审委员会主持召开的审稿会议审定。会后作者根据评审意见作了补充、修改，最后由肖树芳统编完成。

武汉地质学院北京研究生部李铁汉副教授对本书作了最后的审阅和编辑加工，在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中的缺点和问题在所难免，恳请读者教正。

编 者

一九八六年二月

内 容 简 介

本书主体内容分为八章，分别阐述了岩石和岩体的变形及强度特征及强度理论，地下洞室的围岩应力分布及围岩压力计算，斜坡岩体稳定性计算，坝基应力及稳定性计算以及有限元基础。另外，对岩体力学这门学科近年来的一些主要进展作了介绍。

本书可作为高等地质院校水文及工程地质专业教材，亦可供一般高等院校有关专业师生及科技工作者参考。

※ ※ ※

本书由李铁汉副教授担任主审，经地质矿产部高等学校工程地质教材编审委员会于1985年3月主持召开的审稿会议审定，同意作为高等学校教材出版。

※ ※ ※

高 等 学 校 教 材

岩 体 力 学

肖树芳 杨淑碧 编

责任编辑：李铁汉 王肇芬

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：13 字数：304,000

1987年5月北京第一版·1987年5月北京第一次印刷

印数：1—6,500册 定价2.10元

统一书号：13038·教277

目 录

绪 论	1
§ 1 岩体力学与生产实践	1
§ 2 岩体力学研究的对象	2
§ 3 岩体力学研究的内容	2
§ 4 当前岩石力学若干进展及发展动向	3
第一章 岩石的变形特征	5
§ 1—1 材料的变形性质	5
§ 1—2 岩石单向受压条件下的变形	5
一、应力-应变曲线上变形阶段的划分及特征应力值	6
二、岩石轴向应力-应变曲线基本形状、变形指标及变形机理	6
三、荷载条件对岩石单轴压缩变形、强度性质的影响	11
§ 1—3 岩石在三轴应力下的变形及强度	15
一、岩石在三轴等围压受力条件下的变形及强度	15
二、岩石在三轴不等应力条件下的力学特征	17
三、应力途径对岩石变形及强度的影响	19
四、温度对岩石变形及强度的影响	21
§ 1—4 岩石的流变	21
一、岩石的蠕变及流动	21
二、岩石的长期强度	25
三、岩石的流变模型	28
习题	35
第二章 岩体变形及强度	39
§ 2—1 岩体变形特征	39
一、岩体的压力-变形曲线及变形指标	40
二、岩体压力-变形曲线的解释	41
三、岩体变形的结构效应	43
四、岩体变形本构方程	47
§ 2—2 结构面的力学特征	49
一、平直光滑无充填结构面的力学特征	49
二、粗糙起伏无充填结构面的力学特征	50
三、非贯通断续结构面的力学特征	53
四、具充填物的软弱结构面的力学特征	55
五、结构面的剪切粘滞	58
§ 2—3 岩体的强度	59
一、结构面产状的强度效应	59
二、结构面密度对岩体强度的影响	63

三、节理化岩体强度	84
四、围压对节理化岩体强度的影响	85
§ 2—4 岩体力学介质划分	85
习题	87
第三章 岩石的强度理论	88
§ 3—1 概述	88
§ 3—2 最大正应变理论	88
§ 3—3 莫尔强度理论	69
一、莫尔应力圆	69
二、莫尔强度准则	71
§ 3—4 剪应变能强度理论和八面体应力理论	74
一、剪应变能强度理论	74
二、八面体应力理论	76
三、强度条件的几何意义	78
§ 3—5 联合强度理论	79
§ 3—6 格里菲斯 (Griffith) 强度理论	79
一、裂纹扩展的能量准则	80
二、裂纹扩展的应力准则	80
三、修正的格里菲斯理论	85
§ 3—7 霍克-布朗岩石破坏经验判据	88
习题	90
第四章 地下硐室的围岩应力计算及应力分布	91
§ 4—1 概述	91
§ 4—2 岩体的天然应力状态	91
一、天然应力场的计算	91
二、天然应力场的分布规律	93
§ 4—3 弹性岩体中圆形水平硐室的围岩应力计算及应力分布特征	97
一、静水压力式的天然应力场	97
二、 $\sigma_v \neq \sigma_H$ 的非均布天然应力场	98
§ 4—4 弹性岩体中其它硐形的围岩应力	101
一、水平椭圆形硐室围岩应力分布特征	101
二、水平矩形硐室围岩应力分布特征	104
§ 4—5 粘弹性岩体中圆形断面硐室的围岩应力及变形特征	105
§ 4—6 竖井的围岩应力及水平软弱夹层所引起的变形破坏	109
§ 4—7 有压隧洞的岩石力学计算	112
一、有压隧洞的围岩应力	112
二、围岩的弹性抗力系数	115
三、有压隧洞上覆岩层的最小厚度	115
四、斜坡附近的有压隧洞	117
习题	118
第五章 围岩压力	119

§ 5—1 概述	119
§ 5—2 弹、塑性理论计算围岩压力	120
一、塑性区的应力计算及应力分布	120
二、围岩压力公式	122
§ 5—3 松散围岩的围岩压力计算	125
一、普氏理论计算围岩压力	125
二、浅埋洞室的围岩压力计算	133
三、太沙基理论计算围岩压力	135
§ 5—4 块体平衡理论估算围岩压力	137
一、楔形危岩体顶围岩压力	137
二、柱形危岩体顶围岩压力	138
三、斜柱危岩围岩压力	138
四、密集节理切割围岩的围岩压力	138
§ 5—5 粘弹性岩体的强度状态	140
一、洞室围岩为线性弹性体的强度状态	141
二、洞室围岩为波恩廷-汤姆逊流变模型的粘弹性体的强度状态	142
习题	142
第六章 斜坡岩体稳定性计算	144
§ 6—1 斜坡应力分布及变形破坏	144
一、斜坡岩体应力分布特征	144
二、斜坡变形破坏及其基本类型	147
§ 6—2 极限平衡分析方法的原理	149
§ 6—3 平面问题的斜坡稳定性验算	151
一、由一个滑面构成的滑动体	151
二、由两个结构面组成滑动面的滑动体	153
三、由多个结构面组成滑动面的滑动体	159
§ 6—4 图解法、图表法验算斜坡（平面问题）稳定性	160
一、图解法	160
二、图表法	161
§ 6—5 空间问题的稳定性分析	162
§ 6—6 某些特殊破坏型斜坡的力学分析	164
习题	168
第七章 坝基应力及稳定性计算	168
§ 7—1 坝基内应力分布的一般概念	168
§ 7—2 坝基抗滑稳定性验算	170
一、表层滑动的稳定性验算	171
二、深层滑动的稳定性验算	172
三、混合滑动形式的稳定性验算	175
§ 7—3 拱坝坝头的稳定性验算	176
一、拱坝坝头的受力分析	177
二、简单情况下的拱坝坝肩稳定性验算	178

习题	180
第八章 岩石力学中的有限单元法	182
§ 8—1 概述	182
§ 8—2 有限单元法的思路和解题方法	183
一、离散化	183
二、单元分析	184
三、总体分析	187
§ 8—3 三角形单元的位移计算	187
一、插入法	187
二、位移计算	188
§ 8—4 三角形单元的应变及应力计算	190
§ 8—5 单元等效结点荷载	191
§ 8—6 单元等效结点力	193
一、应变能概念	193
二、基本公式推导	194
§ 8—7 有限单元法在无拉力分析中的应用	197

绪 论

§1 岩体力学与生产实践

岩体力学是研究岩体在各种力场作用下变形和破坏规律的一门应用性很强的新兴学科。

岩体(石)力学涉及许多学科及生产领域。如水利水电工程、煤炭开采工程、铁道交通工程以及土木建筑、矿山建筑、国防工程、地震预报等都应用到岩体力学的理论与方法,但不同的学科和生产实践领域对岩体力学的要求和研究重点是不同的。概括起来,可分为三个方面:(1)为各类工程建筑及采矿工程服务的岩体力学,重点研究工程活动在岩体中引起的应力场重分布以及在这种应力场作用下岩石地基、边坡、洞室的变形和稳定性。(2)为地学研究,如寻找矿床、地震预报等服务的岩体力学,重点探索地壳形变规律,为此需研究高温高压下岩石变形和破坏规律以及与时间效应有关的流变特性。(3)为掘进、钻探及爆破工程服务的岩石力学,其主要研究岩石的切割和破碎理论,以及岩石动力学特性。以上三方面的研究虽各有所侧重,但对岩体(石)基本力学特性的研究却是共同的。本书主要是以各类工程建筑和采矿工程为服务对象而编写的,因此也可称为工程岩体力学。

岩体力学的发展是和人类工程实践活动分不开的。最初,由于工程数量少,规模也小,从事工程建筑时,测试技术受到当时技术水平的限制,往往凭经验来解决问题。因此,岩体力学学科的形成和发展要比土力学晚得多。随着工程建筑事业的发展,工程规模越来越大,所遇到的地质条件越来越复杂,加上一些重大工程事故,如圣·弗朗西斯重力坝(美)、瓦依昂大坝(意)、马尔帕塞大坝等失事的惨痛教训,使人们认识到为了选择相对优良的工程场址、防止重大事故,保证顺利施工,必需对建筑场地进行系统的岩体力学试验研究和理论分析,以准确预测岩体在应力场作用下的变形和稳定性,为合理的工程设计提供可靠的岩体力学数据。因此近20年来,岩体力学这门新兴的学科有了突飞猛进的发展。我国自50年代末以来,在许多工程中应用岩体力学理论、方法及试验研究,成功地解决了或正在解决着一系列复杂的岩体力学问题。诸如:长江葛洲坝、乌江渡水利水电工程、大冶露天铁矿边坡工程、金川镍矿地下开采工程等。

今天,由于世界上在矿产资源勘探、能源开发以及地球动力学研究方面的需要,对岩体力学提出了更多更高的要求。当前,国际上正建的大坝高达325m,水电站地下厂房的跨度达61m,地下矿井的开挖深度超过3000m,露天开采深度达300~500m,石油开采深度已达9000m,而在研究地壳变形时,涉及到的深度达50~60km、温度在1000℃以上,必需考虑的时间效应为几百万年;另外,当前世界上正在建筑的一些超巨型工程,如巴西伊泰普(Itaipu)水电站(装机容量达1260万kW,为世界最大)、日本的青函(Seikan)跨海铁路隧洞(总长53830m,海水面以下最大深度240m,海底以下最大深度为140m)等的修建,都使岩体力学面临许多前所未遇的问题。因此迅速发展和提高岩体力学理论和方法的

研究水平，已成为当前十分紧迫的问题。

§ 2 岩体力学研究的对象

岩体力学研究的对象是岩体。人们对岩体的认识是有一个过程的。在岩石（体）力学早期研究中，把孤立的完整的岩石试件作为研究对象。在评价工程建筑中遇到的地基、边坡、地下洞室稳定性时，又把岩体看作岩石材料，把材料力学研究中发展起来的连续介质力学理论直接加以引用。大量实践证明，这种方法与实际情况有很大出入。从五十年代起，国内外都注意到完整小块岩石的性质和存在于自然环境中的岩体具有很大的差别。在工程地质和岩石力学研究中，对岩体概念给出如下定义。

岩体是地质体的一部分，它位于一定的地质环境之中，是在各种宏观地质界面（断层、节理、破碎带、接触带、片理等）分割下形成的有一定结构的地质体。这些地质界面，统称结构面或不连续面。被结构面切割成的岩石块体称结构体。结构面和结构体的排列组合方式称岩体结构。

由于岩体在其形成和存在的整个地质历史时期中，经受过各种复杂而不均衡的地质作用，这就使其工程性质变得十分复杂，这种复杂性，表现在以下几方面：

一、不连续性：由于岩体中存在着各种结构面，因此，从岩体总体来看是不连续的介质（大块、完整的岩体可看成连续介质），岩体的这种不连续性，使岩体力学性质与其他连续介质有很大的差别。布洛伊里（Broili）把这种区别归纳为：（1）岩体结构对岩体力学性质的影响大于岩石性质的影响；（2）岩体强度是不同结合程度的多块体的残余强度；（3）岩体变形取决于组成岩体单元的活性；（4）岩体强度和变形决定于岩体的结构特征。这些认识，在许多情况下是符合实际的。

二、非均质性：指岩体物理-力学性质随空间位置不同而有性质的差异，岩体的这一特性，使其试验结果常具有较大的离散性。

三、各向异性：指岩体性质随岩体结构的取向面有差异的性质。这是由于岩体中结构面的分布往往有一定的方向。因此工程力与结构面的方位之间的关系，对岩体性质有很大影响。

四、岩体中存在着不同于自重应力场的天然应力场。

五、岩体赋存于一定地质环境之中，岩体中的水、温度、应力场，对岩体性质有较大的影响。

岩体的上述特性，使岩体力学的理论、方法和手段与其他连续介质力学有所不同，目前正逐渐形成自己的完整学科系统。

§ 3 岩体力学研究的内容

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内容必然是广泛而复杂的。从工程观点来看，大致可归纳为以下几方面：

一、岩石、岩体工程地质特征的研究

岩体工程地质特征的研究，是岩体力学分析的基础。用岩体力学观点研究岩体的工程

地质特征主要有:

1. 研究岩体结构的地质特征及其对岩体变形破坏机制的影响;
2. 研究岩石物质组成及结构面的几何特征等对岩体力学性质及其在时间和空间上变化的影响;
3. 了解岩体赋存的地质环境及其对岩体力学特性的影响;
4. 总结岩体在天然条件下变形和破坏的规律以预测岩体在工程力作用下的变形和稳定性。

二、岩石及岩体基本力学性质的研究

1. 研究岩石和岩体在不同力作用下的变形和强度特征以及表征岩石、岩体这些特征的指标;

2. 研究岩石与岩体在各种力作用下的变形和破坏机制、本构方程和破坏准则;
3. 研究荷载条件、时间、温度等对岩石岩体变形和强度的影响;
4. 研究岩石及岩体力学性质的试验室及现场测试方法和技术。

三、岩体天然应力分布规律及其测量理论和方法的研究

四、地下硐室围岩稳定性研究

1. 研究由地下开挖引起的重分布应力;
2. 研究硐室围岩在重分布应力作用下的变形和破坏规律;
3. 研究作用于支护上的围岩压力;
4. 研究硐室围岩变形和破坏的监测方法;
5. 研究围岩的加固理论和方法。

五、岩基(厂基、桥基、坝基)稳定性研究

1. 研究岩基在工程力作用下的应力分布;
2. 研究岩基的承载力(主要是桥基);
3. 研究坝基抗滑稳定性及拱坝坝肩的稳定性。

六、天然及人工边坡稳定性研究

1. 研究斜坡应力分布及变形破坏机制;
2. 研究各类斜坡的滑动稳定性。

七、数值法在岩体力学中的应用研究

八、工程岩体的模型、模拟试验研究

九、研究各种新技术、新方法在岩体力学中的应用

§4 当前岩石力学若干进展及发展动向

岩体力学近十年来发展迅速,学术交流活动频繁,探讨问题的深度和广度都有新的突破,测试技术水平正在提高,与工程勘探和设计施工的结合日趋紧密。从国际岩石力学第五届会议及全国第一届岩石力学与工程会议所交流的论文来看,有以下的进展和动向:

1. 重视工程地质宏观研究

岩体力学工作者在大量工程实践中,日益认识到发展岩体力学,一定要具备工程地质方面的知识,并借此来加强对岩体特性的宏观判断能力。事实上,世界上许多岩体工程失

事，大都不是由于计算错误，而是由于对工程地质条件、岩体条件的宏观判断错误所造成的。因此在岩体力学研究中、加强了工程地质实践，使岩体力学与工程地质脱节的现象有一定的克服。

2. 大力发展岩石及岩体测试及监测技术

主要方面有：（1）试验方法的标准化和国际上的统一；（2）岩体力学的测试方法与地质勘探和设计施工配合更密切，一孔多用的测试手段有了新发展，仪器设备的自动化和轻型化，以及数据采集及处理的电子计算机程序化等，都有很大的提高；（3）岩石（体）物理力学试验，地质力学模型、原位观测和数值分析三者之间有机的内在联系，愈来愈被人们所认识，因而通过工程实例的研究和根据监测资料的反分析来寻求岩体变形、破坏规律的分析方法也有了很大的发展。

3. 加强对岩石（体）基本性质的研究

大范围岩体及结构面的几何特性、本构方程，以及破坏准则方面的研究有所进展。如在弹性模型、弹塑性模型、低温及低最小主应力条件的时变相关模型、大的天然不连续面的力学性状的模拟等方面均有不少成果。

4. 数值分析在岩体力学中的广泛应用

有限元法、边界元法、离散元法等理岩块模型、冠块（石）理论等已成为解决岩体力学问题的有力工具。

5. 强调岩体力学在工程上的应用，研究的重点转向地下工程

6. 重视工程实例的总结分析及现场的判断和专家系统的建立

总的来说，岩体力学虽然发展很快，但这门学科远非成熟，现有的理论和方法还远不能满足解决工程实际问题的要求，因此，大力加强岩体力学研究，更快地推动这门学科的发展，是工程实践的客观要求。

第一章 岩石的变形特征

§1—1 材料的变形性质

材料受力时会产生变形。如按其应力-应变-时间关系,可将其变形性状划分为:

弹性:指材料在外力作用下产生变形,而撤去外力后立即恢复到它原有的形状和尺寸的性质。外力撤去后能够恢复的变形称为弹性变形,如果应力-应变关系呈直线关系,称线弹性,如图1—1a;不呈直线关系称非线性弹性。

塑性:指材料受力,在应力超过屈服应力时仍能继续变形而不即行断裂,撤去外力后,变形又不能完全恢复的性质。不能恢复的变形,称塑性变形。材料塑性变形的实质是材料内部晶格之间在剪应力作用下发生的滑动。塑性材料理想的应力-应变曲线如图1—1b。由图可见,当应力低于屈服应力 σ_y 时,材料性质为弹性;应力达到屈服应力之后,变形不断增长而应力不变,应力-应变曲线为水平线。在屈服点之后,应力-应变曲线呈上升曲线,说明晶粒滑到新位置之后,导致粒间相嵌、挤紧和晶粒增大,如使之继续滑动,要相应增大应力。这种现象称应变硬化,如图1—1c。

粘性:指材料受力后变形不能在瞬间完成,且应变的速率随应力的大小而改变的性质。理想的粘性材料,其应力-应变速率曲线呈直线关系,且通过原点。见图1—1d。应变速率随应力而变化的变形称流动变形。

岩石是矿物的聚合体,具有复杂的成分和结构。岩石在外力作用下呈现何种性状,一方面取决于其成分和结构,另一方面还和它的受力条件,如载荷的大小及其组合情况、加载的方式及速率、加载的过程等密切有关。此外,岩石所赋存的条件,如温度、水、地应力等对其性状影响也很大。

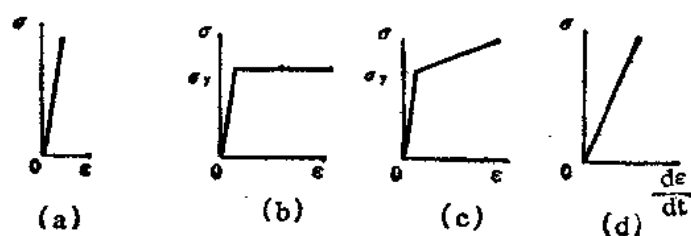


图 1—1 材料的变形性状

§1—2 岩石单向受压条件下的变形

对一定形状(圆柱体、长方体等)的岩石试件,用材料试验机按一定时间间隔施加单向压力,测量加压过程中各级应力及相应的轴向和横向应变值。并由此可计算出体积应变值

和绘出以压应力为纵坐标，以各类应变为横坐标的应力—应变曲线，如图1—2。岩石的这种应力—应变曲线，反映了它在单轴压缩条件下的变形特征。

一、应力—应变曲线上变形阶段的划分及特征应力值

岩石在单轴加压（正常加载速率）条件下的应力—应变全过程大致可分为以下五个阶段，见图1—2。

1. $o—a$ 段，在这一阶段，岩石的应力—轴向应变（ $\sigma—\epsilon_a$ ）曲线微呈上凹形，岩石的应力—横向应变（ $\sigma—\epsilon_c$ ）曲线陡，体积随压力增加而压缩，即 ϵ_v 为正值。

2. $a—b$ 段，岩石的应力—轴向应变曲线近呈直线。相应于 b 点的应力值称比例极限（或弹性极限）。

3. $b—c$ 段，曲线由 b 点开始偏离直线，特别是 $\sigma—\epsilon_v$ 曲线，其斜率随 σ 的增大而变陡直至相反，岩石的体积由压缩转为膨胀，相应于 c 点的应力值称屈服极限。

4. $c—d$ 段， $\sigma—\epsilon_a$ 曲线斜率迅速减小，岩石体积膨胀加速，变形随应力迅速增长。至 d 点，应力达最大值。相应于 d 点的应力值称为峰值强度或单轴极限抗压强度，以 σ_c 表示。

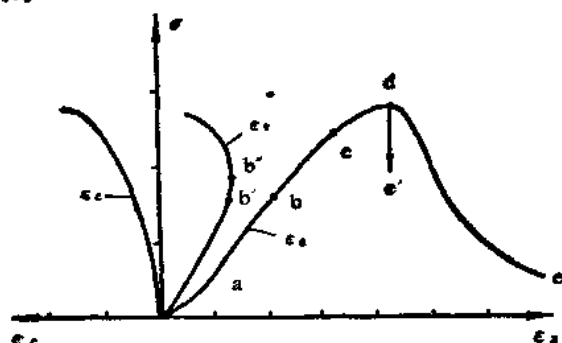


图1—2 岩石单轴压缩应力—应变全过程曲线
 σ —应力； ϵ_a —轴向应变； ϵ_c —侧向应变； ϵ_v —体积应变

5. d 点以后阶段，由于普通试验机刚度不够，加上采用传统的等加载速率的加载方式，必然使压力机在岩石受压变形过程中贮存大量变形能。当岩石达最大承载力之后，岩石的破裂控制不了压力机变形能的突然释放，致使岩石急剧破坏（见图1—2之 de' 线）而得不到 d 点之后之曲线。刚性压力机的出现，使岩石 d 点之后的破坏得到控制，从而获得了岩石应力—应变全过程曲线 $oabcde$ 。 d 点以后的曲线说明，岩石在破裂点 d 之后，并不是完全

失去承载能力，而是保持较小的数值，即为残余强度。

由上可见，通过对岩石应力—应变关系阶段的划分，可得到四个特征应力值，即：比例极限、屈服极限、峰值强度及残余强度。应指出的是，岩石由于成分、结构不同，其应力—应变关系不尽相同，并非所有岩石都可明显划分出五个变形阶段。因此，有必要对岩石轴向应力—轴向应变曲线（ $\sigma—\epsilon_a$ 曲线）作简单的分类。

二、岩石轴向应力—应变曲线基本形状、变形指标及变形机理

（一）峰值前变形阶段

1. 变形曲线基本形状及变形指标

岩石峰值前轴向应力—应变曲线可归纳为图1—3中的四个基本类型，即：直线型、下凹型、上凹型及S型。

• 与固体力学中材料屈服概念不同。见岩石变形机理一节。

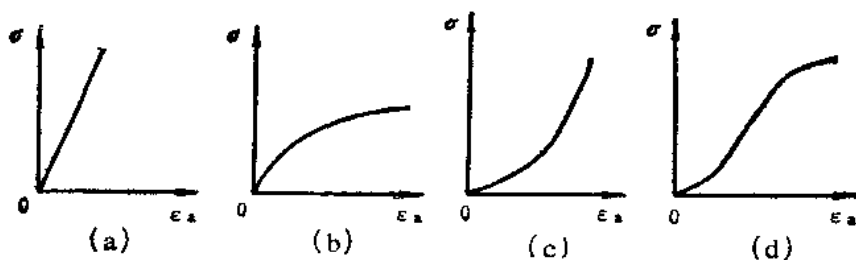


图 1—3 岩石峰值前轴向应力-应变曲线的基本类型
(a) —直线型；(b) —下凹型；(c) —上凹型；(d) —S型；

根据各种类型应力-应变曲线，可以确定岩石的变形指标。在工程实践中，最常用的岩石变形指标有弹性模量 E 和泊松比 μ 。

岩石弹性模量 E 是指单轴压缩条件下轴向压应力与轴向应变之比*。

当轴向的应力-应变曲线呈直线型（如图1—4）时，则

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

式中 E ——岩石弹性模量 (kPa或MPa)；

σ ——轴向的应力-应变曲线上任一点 M 的轴向应力 kPa或MPa)；

ϵ ——对应于 σ 的轴向应变。

当轴向的应力-应变关系不呈直线时，岩石的变形特征可以用以下几种模量说明，如图1—5。

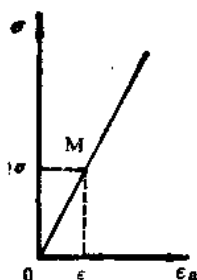


图 1—4 轴向的应力-应变呈
直线关系时岩石弹性模量

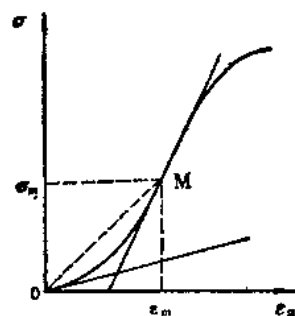


图 1—5 岩石的各种模量的确定

初始模量，是应力-应变曲线在原点切线的斜率，即

$$E_0 = \left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0}$$

切线模量，是对应于曲线上某一点 M 的切线的斜率，即

$$E_w = \left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_m}$$

* 也有定义为在弹性变形范围内轴向压应力与轴向应变之比。

割线模量，是曲线上某一点 M 与坐标原点连线的斜率，即

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m}$$

岩石的另一重要的变形指标是泊松比。

泊松比 μ ，是岩石在单向受压条件下横向应变与纵向应变之比。一般说来，由于这一指标是由弹性理论引入的，故只适用于岩石弹性变形阶段，当岩石受压内部出现破裂时，泊松效应失效。

弹性模量和泊松比是岩石变形的两个最基本的指标。还有一些从不同方面反映岩石变形特征的指标，将在后面有关部分陆续阐述。

2. 峰值前的变形机理

岩石由于成分，结构不同，其变形机理比较复杂，但大致可归纳为三种类型：

(1) 以裂纹行为为主导的变形

一些中-粗粒结构的岩石，如花岗岩、大理岩、砂岩等，常具有许多晶间或晶内裂纹，如矿物之间的界面、缝隙、矿物内部的解理等。这些裂纹的大小与矿物颗粒直径属同一数量级。它们的存在，对岩石的变形和破坏起了控制作用。这类岩石的应力-应变曲线，主要反映了微裂纹在单轴受压条件下的力学行为。

这类岩石轴向的应力-应变曲线属图1—3中之S型。在单向受压条件下，岩石变形直至破坏经历了：裂纹闭合—线性变形—裂纹稳定扩展的非线性变形—裂纹加速扩展至岩石破裂四个阶段，与上述岩石变形阶段的前四个阶段相对应，即

$0-a$ 段——裂纹压密段：

布雷斯 (Brace) 和耶格 (Jaeger) 认为这一阶段是由于极扁的张开裂纹在压应力作用下闭合面引起。随着压应力的增加，裂纹逐渐闭合，岩石刚度加大，应力-应变曲线斜率增大，呈上凹形。岩石的初始模量反映了张开裂纹的闭合刚度。

$a-b$ 段——岩石线性变形阶段：

岩石应力-应变曲线呈直线，但压力卸去后，岩石变形并不能完全恢复，即加载、卸载曲线不重合，见图1—6。因此，岩石在这阶段的变形除了岩石的弹性变形之外，还包括闭合裂纹的相互滑动。耶格曾对这一阶段裂纹的行为作如下的分析：

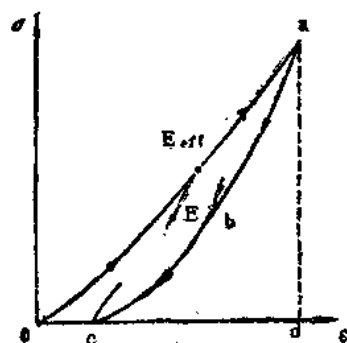


图 1—6 单轴受压下岩石加载和卸载应力-应变曲线的前两阶段
(根据耶格)

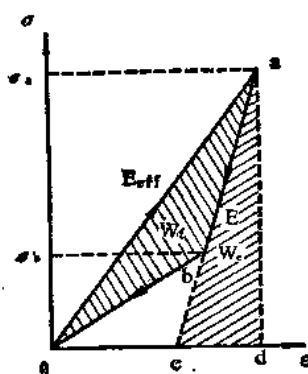


图 1—7 包含闭合裂纹的岩石变形前两阶段加载-卸载应力-应变图
(根据耶格)

耶格把包含裂纹岩石的弹性模量称为有效弹性模量 E_{eff} ，而把未受裂纹的存在所影响的岩石的弹性模量称为固有弹性模量 E 。

加载时，岩石变形包括弹性变形和闭合裂纹的相互滑动，因此加载曲线的斜率为岩石的有效弹性模量，它低于没有裂纹岩石的固有弹性模量。

卸载时，由于在较大的压应力 σ_c (图1—7) 作用下，裂纹表面摩擦阻力较大，使卸载初期裂纹表面不能作反向滑动。因此，卸载初期岩石的变形仅仅是岩石的弹性恢复变形，卸载初期曲线的斜率则代表岩石固有的弹性模量。如果延长该线与应变轴相交于 c 点，则 ac 线以下的面积 acd ，即为在最大荷载下贮存在没有裂纹岩石中的应变能 W_e 。

由图1—7还可见，当卸载至 b 点时，应力 σ_b 小到使裂纹表面的摩擦力不足以阻止裂纹作反向滑动，这时，卸载曲线变缓，卸载模量变小。如果把面积 oac 作为加载时裂纹面相互滑动时所做的功，这样，面积 oab 则为加载卸载过程中由于抵抗裂纹面之间摩擦所消耗的能量 W_f 。

应指出，图1—7是耶格为了便于分析而加以理想化了的图，实际岩石的加载、卸载曲线是如图1—6中所示的形状。

$b-c$ 段——裂纹稳定扩展的非线性变形阶段：

岩石中的微裂纹在偏应力作用下开始扩展，岩石中发生新的裂纹，压应力-体积应变曲线从 b' 点开始偏离直线，(见图1—2)， b' 点即为裂纹开始扩展的特征点。随着裂纹的继续发生和扩展，岩石的体积应变增量由压缩转为膨胀，这个力学过程，称扩容。图1—2中之 b'' 点即为扩容点。扩容现象，是岩石破坏的前兆，因此对地震预报有十分重要的意义。

$c-d$ 段——裂纹加速扩展直至岩石破裂：

随着裂纹的进一步扩展，裂纹在试件某些部位密集、搭接、相连，形成某些宏观裂缝。宏观裂缝又通过裂纹的阶梯状连接，形成有强烈应变集中的裂缝带，并不断向试件端部伸长，直至试件破裂。表现在应力-轴向应变曲线上斜率迅速减小，并呈下凹形。

由上述可见，对这类岩石，微裂纹的行为在岩石的变形过程中起了控制作用。 $a-b$ 段并不是完全的弹性变形，而且，岩石在应力达到屈服极限之后的行为，也和工程力学中材料的屈服概念不同，它表现为裂纹的加速扩展。

(2) 以弹性变形为主的变形

其应力-轴向应变曲线呈图1—3中之直线型。一些构造致密、岩性坚硬的岩石，如石英岩、玄武岩、硅质灰岩等的变形，多属这种类型。其特点是：应力-轴向应变曲线不具压密段 ($o-a$ 段)，曲线斜率一般较陡，比例极限和屈服极限十分靠近，且很快达到峰值。如在应力-应变直线段卸载时，变形可完全恢复，说明岩石的变形主要为弹性变形。也就是说，变形是由岩石内部物质质点 (分子、原子、离子) 组成的空间格架受力后发生的压密和歪斜所引起的。岩石轴向应力-应变曲线的斜率，即代表岩石固有的弹性模量。

(3) 以塑性变形为主的变形

其轴向的应力-应变曲线呈图1—3中之下凹型，其特点是：变形没有明显的阶段，而是随着压应力的增大而不断增长，卸载后大部分变形不能恢复。应力-应变曲线的斜率不是常数，而是随着应力的增加而降低。这种变形，主要反映了矿物晶格之间、粘土矿物聚片体之间的滑移。这种变形类型，不宜简单地用弹性模量等参数表征，最好还是用应力-应变曲线来描绘。岩盐、饱水的半坚硬泥岩，在加荷速率较低时变形呈这种类型。

(二) 峰值后变形阶段

传统的单轴压缩试验,是在普遍的材料试验机中把力作为控制变量,以恒定的加载速率加载。由于试验机的刚度不够,必然使加载系统在岩石受压变形过程中贮存了大量的变形能。在岩石承受的力达到峰值以后,随着变形的增加,岩石承载能力下降,如果

$$\frac{dp}{du} > K_m$$

式中 p ——试件单位面积上受的轴向压力;

u ——试件在压力作用下之位移;

K_m ——压力机加载系统的刚度。

这时,压力机加压系统贮存的变形能突然释放,在极短的时间内给试件增加一个较大的位移,以致试件在瞬间完全破坏,这时,岩石的破裂和破坏是一个概念, d 点可看成岩石完全破坏点*。

以上的情况,当试件在峰值后的压力-位移曲线下下降的斜率小于压力机的压力-位移曲线的斜率时是不会发生的。因此一些学者就想用提高压力机加压系统刚度的办法来获得岩石的应力-应变全过程曲线,这就导致刚性压力机的出现。最初的刚性压力机,是从加大机器的刚度入手,宾尼阿斯基(Bilinski)用平行钢柱与试件同时受压,使机器的刚度达 $1.85 \times 10^5 \text{MPa}$ (一般试验机刚度为 $0.9 \times 10^5 \text{MPa}$)。后来,库克(Cook)等人设计出热控制刚性试验机,其工作原理除了加大试验机刚度之外,在试件受的压力达50~70%峰值应力时,改用热控制加荷系统(即将加力筒处于热胀冷缩情况下加载和卸载)以控制应变速率,并获得了峰值后的曲线。七十年代以来,伺服控制的刚性试验机的出现,对岩石峰值后变形特性的研究起了很大的推动作用。其工作原理是用岩石试件的变形作为控制变量,并用这一信号的反馈来控制机器压板的位移速率或加载速率。例如,当岩石因裂纹扩展发生大应变时,通过传感器把这一信号输入伺服控制器中,伺服控制器给伺服阀信号,使伺服阀打开,压力下降,使试件保持恒定的变形速率,从而控制了岩石的破坏,并取得峰值后的变形曲线。

岩石峰值后的变形曲线,实质上是岩石破坏过程曲线。也就是说,在应力达峰值时,岩石只出现宏观破裂,但并未完全失去承载力,即未完全破坏。图1—2中之 $d-e$ 曲线段,反映了岩石出现宏观破裂之后,随变形发展直至完全破坏的过程。

根据峰值后的变形曲线(荷载-位移曲线)**,岩石峰值后变形、破坏发展的方式可分为两种类型:

1. 稳定破裂传播型

其荷载-位移曲线如图1—8。这种类型,其峰值后的荷载-位移曲线呈反坡型,试件在峰值后所贮存的变形能不能使破裂继续扩展,只有再对试件作功,才能使它进一步破裂。也就是说,试件在峰值之后仍能保持一定的强度,但其承载力随着位移的增加而降低,且降低的曲线不是光滑的,由于产生宏观裂缝而呈现大循环、鼓包和平缓部分相交替。每出现一个宏观裂缝,曲线就出现一个大循环和一个鼓包,直至曲线降落几乎呈水平。

较软的岩石,如大理岩、白云岩、页岩、红砂岩等往往呈这种变形、破坏型式。

* 见耶格《岩石力学基础》§4.2。

** 峰值后岩石应变值难以测得,一般用荷载-位移曲线。