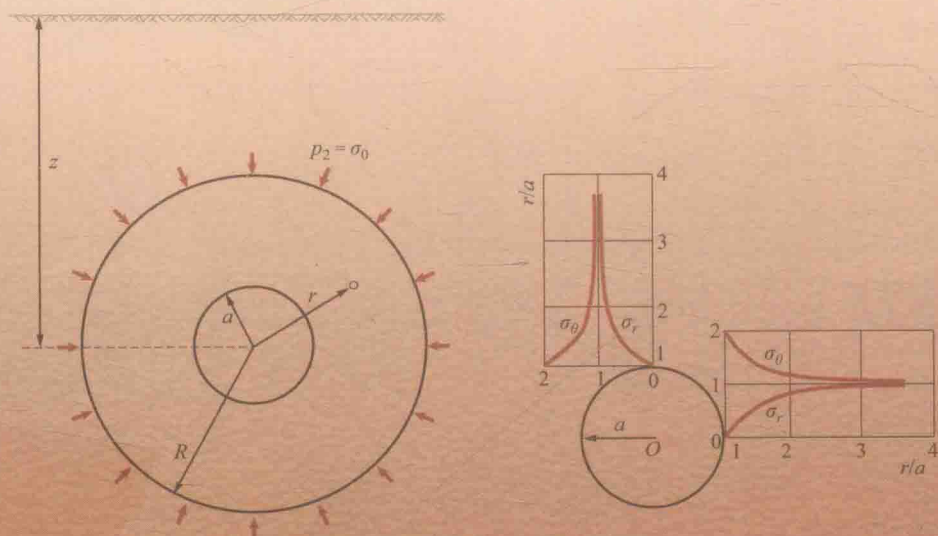


国家一类特色专业 国家卓越工程师教育培养计划
地质工程专业系列教材

ROCK MASS MECHANICS (2nd Edition)

岩体力学 (第二版)

肖树芳 杨淑碧 仵磊 张敏 林锋 编



地质出版社

绪 论

一、岩体力学与生产实践

岩体力学是研究岩体变形和破坏规律的一门应用性很强的学科。其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、土木建筑、矿山建筑、国防工程、地震预报等,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不同。概括起来可分为三方面: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及应力场,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,其中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,但对岩体基本力学特性的研究却是共同的。本书主要以各类工程建筑为服务对象而编写,因此也可称为工程岩体力学。

岩体力学的发展与人类工程实践活动密切相关。最初,由于工程数量少,规模也小,从事工程建筑时,受到当时测试技术水平的限制,往往凭经验来解决问题。随着工程建筑业的发展,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,如美国的圣·弗朗西斯科重力坝、意大利的瓦依昂大坝及法国的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,必须对建筑场地进行系统地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。近年来,岩体力学有了突飞猛进的发展。我国自20世纪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,成功解决了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325 m,水电站地下厂房的跨度达51 m,地下矿井的开挖深度超过3000 m。露天开采深度达300~500 m,石油开采深度已达9000 m,而在研究地壳变形时,涉及的深度达50~60 km、温度在1000℃以上,必须考虑的时间效应为几百万年;另外,世界上一些超巨型工程,如巴西伊泰普水电站(装机容量达1260万kW,为世界最大)、日本的青函跨海铁路隧洞(总长53830 m,海水以下最大深度240 m,海底以下最大深度为140 m)等的修建,都为岩体力学的发展提供了实践基础,使岩体力学理论和方法得到了迅速的发展和提高。

二、岩体力学的研究对象

岩体力学研究的对象是岩体。人们对岩体的认识是一个循序渐进的过程。在岩石(体)力学早期的研究中,把孤立的、完整的岩石试样作为研究对象。在评价工程建设中遇到的地基、边坡、地下洞室稳定性时,仅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20世纪50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为结构体。结构面和结构体的排列组合方式称为岩体结构。

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,主要表现在以下方面:

(1) 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、完整的岩体可视为连续介质),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对岩石性质的影响;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动性;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。

(2) 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。

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

(4) 岩体中存在着不同于自重应力场的天然应力场。

(5) 岩体赋存于一定的地质环境之中。岩体中的水、温度、应力场对岩体性质有较大的影响。

三、岩体力学的研究内容

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:

(1) 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。

(2) 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室内及现场测试方法和技术。

(3) 岩体天然应力分布规律及其测量理论和方法的研究。

(4) 地下硐室围岩稳定性研究。①研究由地下开挖引起的应力重分布；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。

(5) 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；③研究坝基抗滑稳定性及拱坝坝肩的稳定性。

(6) 天然及人工边坡稳定性研究。①研究边坡应力分布及变形破坏机制；②研究各类边坡的滑动稳定性。

(7) 数值法在岩体力学中的应用研究。

(8) 岩体工程的模型、模拟试验研究。

(9) 岩体改造技术的研究。

(10) 研究各种新技术、新方法在岩体力学中的应用。

四、岩体力学的发展动向

岩体力学近年来发展迅速，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。主要有以下进展和动向。

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，在一定程度上克服了岩体力学与工程地质脱节的现象。

2. 大力发展岩石、岩体测试及监测技术

测试及监测技术主要包括：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设计施工配合更密切，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四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、岩体基本性质的研究

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。如在弹塑性模型、低温及最小主应力条件的时间相关模型、大的天然不连续面的力学性质的模拟等方面均有很多成果。

4. 数值分析的应用

数值分析在岩体力学中应用广泛。有限元法、边界元法、离散元法等已成为解决岩体

力学问题的有力工具。

5. 在工程中的应用

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

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，但这门学科尚未成熟，现有的理论和方法在解决工程实际问题中还面临很多挑战。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 岩石与岩体的物理、水理性质

第一节 岩石中的矿物成分及工程意义

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、赤铁矿、褐铁矿等，其含量的多少因不同岩石而异。

分析和研究岩石中矿物成分的工程地质意义在于，岩石中所含矿物的稳定性是影响岩石抗风化能力的重要因素；矿物的属性直接影响岩石的强度和变形性能；岩石中的某些特殊矿物使岩石工程地质性质削弱或复杂化。

一、矿物成分的相对稳定性及其对岩石抗风化能力的影响

一般来说，岩石的形成环境与目前存在的环境相差越大越易风化。如对于火山岩，从矿物的生成顺序来说，愈先生成的矿物其形成环境与目前环境相差愈大，则愈易风化。对火山岩和沉积岩来说，由于火山岩的形成环境与目前其所处环境相差较大，故一般来说火山岩较沉积岩易风化。

岩石中矿物的稳定性对岩石抗风化能力有巨大的影响。各矿物的稳定性主要与其形成条件、化学成分及结晶特征有关。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、Mg，再次是 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 。

从结晶特征看，在硅酸盐类矿物中，同等大小的结晶颗粒，各种结晶结构的抗风化能力顺序大致如下：架状和岛状>单链和双链>层状。

根据以上内容，可将主要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，见表 1-1。

表 1-1 主要造岩矿物抗风化稳定性

抗风化 稳定性	矿物名称	化学成分	矿物特点			风化过程及最终产物
			结晶结构	低铁	生成序列	
非常稳定的	石英	SiO_2	岛状	无	最后	一般不被破坏
	锆石英	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	岛状	无	先	基本不被破坏
	白云母	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	层状	无	最后	基本上不被破坏或部分 K、Si 转移形成水云母
稳定的	正长石	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	架状	无	后	K、Na、Ca 全部转移，Si 部分转移，形成高岭石、绢云母、铝土矿、蛋白石等
	钠长石	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	架状	无	后	
较稳定的	酸性斜长石	钠长石多于钙长石	架状	无	中	

续表

抗风化 稳定性	矿物名称	化学成分	矿物特点			风化过程及最终产物
			结晶结构	低铁	生成序列	
较稳定的	角闪石	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe})_4(\text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	双链	有	中	Ca、Na、Mg 全部转移，Fe、Si 部分转移，Al 基本不转移，形成绿泥石、方解石、褐铁矿、蒙脱石等
	辉石	$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$	单链	有	先	
	黑云母	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	层状	有	中	K 全部转移，Mg、Fe、Si 部分转移，形成绿泥石、水云母、褐铁矿、高岭石等
不稳定的	基性斜长石	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ 多于 $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	架状	无	最先	Na、Ca 全部转移，Si 部分转移，形成高岭石、绢云母、铝土矿、蛋白石等
	霞石	$(\text{Na}, \text{K})[\text{AlSiO}_4]$	架状	无	先	Na 全部转移，Si、Al 基本不转移，形成高岭石、沸石、绢云母等
	橄榄石	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$	架状	有	先	Mg、Fe 部分转移，Si 基本不转移，形成蛇纹石、滑石、褐铁矿等
	黄铁矿	FeS_2	—	有	—	易氧化形成褐铁矿

由于岩石是矿物的集合体，矿物的相对稳定性必然影响到岩石的抗风化能力。

基性和超基性岩主要由易风化的橄榄石、辉石及基性斜长石组成，所以较易风化。酸性岩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，故其抗风化能力比起同样结构的基性岩要高，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，大多是原来岩石中较难风化的碎屑矿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。

二、岩石矿物成分对其强度的影响

新鲜完整岩石的力学强度，主要取决于岩石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更大一些。应指出，岩石中矿物的硬度和岩石的强度是两个既联系而又不同的概念。例如，即使组成岩石的矿物较为坚硬，但如果矿物之间联结较弱，岩石的强度也不一定高。但就大部分岩石来说，两者之间有相应的关系。如在许多岩浆岩中，其强度常随暗色矿物的增加而增加。在沉积岩中，砂岩的强度随石英含量的增加而增大，如图 1-1 所示。石灰岩强度常随其硅质混合物含量的增加而增大，随黏土质含量增加而降低。在变质岩中，任何片状的硅酸盐矿物，如云母、绿泥石、滑石、蛇纹石

等都会降低岩石的强度，特别是当这些矿物平行排列时。

三、某些易溶矿物、黏土矿物、不稳定矿物成分对岩石工程地质性质的影响

岩石中，某些易溶矿物、黏土矿物、特殊矿物的存在，常使岩土工程地质性质复杂化。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，从而使岩石孔隙性加大，结构变松，强度降低。一些含有芒硝的岩石，由于芒硝的物态变化（液态变固态，不含结晶水变为含结晶水）能引起体积的变化，因此，在温度由 32.5℃ 以上变成 32.5℃ 以下，或由干燥变潮湿时，会导致芒硝由液态变为固态，由无水变为含水，体积增大，引起岩石膨胀。

含石膏的岩石，也会由于硬石膏（ CaSO_4 ）水化成石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）时体积增大而发生膨胀。

另外，黏土岩中的蒙脱石使岩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膨润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。可见在研究岩石工程地质性质时，对其矿物成分应特别注意。

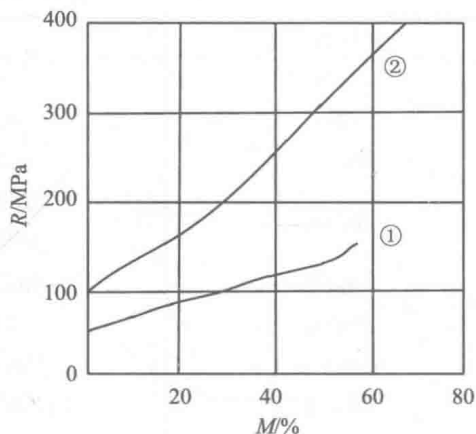


图 1-1 砂岩与粉砂岩强度与矿物成分之间的关系

(据 Price, 1958)

① 泥质胶结粉砂岩；② 钙质砂岩

R—单轴抗压强度；M—石英含量

第二节 岩石的物理、水理性质

岩石的物理、水理性质包括的内容很多，与工程密切有关的有岩石的重量、空隙性、吸水性、软化性、抗冻性、透水性等。

岩石由固体、水、空气三相组成，具有比重、容重等重量指标，岩石的重量指标，是选择建筑材料、计算边坡稳定和围岩压力等所必需的计算指标。

一、岩石的比重

岩石的比重是指单位体积固体的重量，其表达式为

$$G = \frac{W}{V_s} \quad (1-1)$$

式中，G 为岩石的比重， kN/m^3 ； V_s 为岩石固体部分的体积， m^3 ；W 为体积为 V_s 的岩石固体部分的重量，kN。

岩石的比重取决于组成岩石的矿物比重及其在岩石中的相对含量。表 1-2 列出了主要造岩矿物的比重值。

表 1-2 主要造岩矿物的比重

矿物名称	化学成分	比重/(kN·m ⁻³)
石英	SiO ₂	26.5
正长石	K[AlSi ₃ O ₈]	25.0~26.0
斜长石	Ca ₂ [Al ₂ Si ₂ O ₈]	26.1~27.6
角闪石	Ca ₂ Na(Mg,Fe) ₄ (Al,Fe) [(Si,Al) ₄ O ₁₁] ₂ (OH) ₂	29.0~34.0
辉石	Ca(Mg,Fe,Al) ₂ [(Si,Al) ₂ O ₆]	32.0~36.0
橄榄石	(Mg,Fe) ₂ [SiO ₄]	33.0~44.0
石榴子石	(Mg,Fe,Mn) ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	30.0~40.0
黑云母	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	27.0~30.0
方解石	CaCO ₃	26.0~28.0
白云石	CaMg(CO ₃) ₂	28.0~29.5
绿泥石	(Mg,Fe) ₅ Al[AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₈	26.5~37.0
滑石	Mg ₃ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₂	27.0
石膏	CaSO ₄ ·2H ₂ O	22.0~24.0
褐铁矿	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	36.0~40.0
黄铁矿	FeS ₂	49.0~52.0
高岭石	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	26.0~26.3

由表 1-2 可见，含有 Fe、Mn 的深色矿物（如角闪石、辉石、橄榄石、石榴子石、褐铁矿、黄铁矿等）的岩石比重较大，因此，含这些矿物较多的基性岩和超基性岩，一般具有较大的比重；而那些含有比重较小的矿物的岩石（如酸性岩）比重就较小。因此，当鉴定出岩石的矿物成分后，就可对岩石的比重进行粗略估计。例如石灰岩的比重与方解石的比重相近，石英砂岩的比重接近于石英，并略低于石英。

二、岩石的容重

岩石的容重即单位体积岩石的重量，岩石的容重可分为干容重和湿容重。

干容重 γ_d 是单位体积岩石绝对干燥时的重量，其表达式为

$$\gamma_d = \frac{W_1}{V} \tag{1-2}$$

湿容重 γ 就是天然含水或饱水状态下，单位体积岩石的重量，其表达式为

$$\gamma = \frac{W}{V} \tag{1-3}$$

式中， γ_d 为岩石的干容重，kN/m³； γ 为岩石的湿容重，kN/m³； W_1 为岩石烘干后的重量，kN； W 为岩石的重量，kN； V 为岩石试样的体积（包括空隙体积），m³。

岩石干容重取决于岩石的矿物成分、孔隙裂隙的发育程度。致密而孔隙、裂隙少的岩石，其干容重与湿容重数值上差别不大，与岩石比重也比较接近。随着孔隙、裂隙的增加，岩石干容重减小。对于矿物成分相近的岩石，干容重反映了其孔隙、裂隙的发育程度。岩石的湿容重除了与岩石矿物成分，孔隙、裂隙发育程度有关外，还与其含水情况有关。

一些主要岩石的比重、容重值见表 1-3。

表 1-3 某些岩石的比重及容重值

岩石名称		比重/ (kN · m ⁻³)	容重/ (kN · m ⁻³)
岩浆岩	花岗岩	25.0~28.4	23.0~28.0
	正长岩	25.0~29.0	24.0~28.5
	闪长岩	26.0~31.0	25.2~29.6
	辉长岩	27.0~32.0	25.5~29.8
	辉绿岩	26.0~31.0	25.3~29.7
	玢岩	26.0~28.4	24.0~28.0
	斑岩	26.2~28.4	27.0~27.4
	粗面岩	24.0~27.0	23.0~26.7
	安山岩	24.0~28.0	23.0~27.0
	玄武岩	26.0~33.0	25.0~31.0
	凝灰岩	25.6~27.8	22.9~25.0
沉积岩	砾岩	26.7~27.1	24.0~26.6
	砂岩	26.0~27.5	22.0~27.1
	页岩	25.7~27.7	23.0~26.2
	灰岩	24.8~28.5	23.0~27.7
变质岩	片麻岩	26.3~30.1	23.0~30.0
	片岩	27.5~30.2	20.9~29.2
	石英岩	25.3~28.4	24.0~28.0
	大理岩	28.0~28.5	26.0~27.0
	板岩	26.8~27.6	23.1~27.5

三、岩石的空隙性

岩石中的孔隙、裂隙总称为空隙。岩石的空隙性常用空隙率表示。另外，吸水率和饱水率也是反映岩石空隙性的指标。

岩石的空隙率是指岩石中空隙体积与岩石总体积之比，以百分数表示，由于岩石中空隙有的不与外界相通，为封闭型空隙，有的与外界相通，为张开型空隙，而张开型空隙又有大小之分，分别称为大开型空隙和小开型空隙，因此，岩石的空隙率就分为总空隙率 n 、大开空隙率 n_b 、小开空隙率 n_s 、总开空隙率 n_o 和闭空隙率 n_c 五种。并可按图 1-2 和式 (1-4) ~ 式 (1-8) 分别计算：

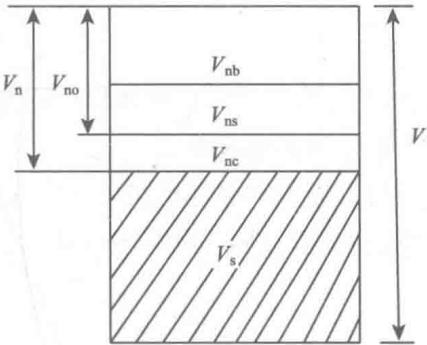


图 1-2 岩石的空隙组成示意图

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{G - \gamma_d}{G} \times 100\% \tag{1-4}$$

$$n_b = \frac{V_{nb}}{V} \times 100\% \tag{1-5}$$

$$n_o = \frac{V_{no}}{V} \times 100\% \tag{1-6}$$

$$n_s = \frac{V_{ns}}{V} \times 100\% = n_o - n_b \quad (1-7)$$

$$n_c = \frac{V_{nc}}{V} \times 100\% = n - n_o \quad (1-8)$$

式中, V 为岩石的体积, m^3 ; V_n 为岩石中空隙总体积, m^3 ; V_{no} 为岩石中开型空隙总体积, m^3 ; V_{nb} 为岩石中大开型空隙总体积, m^3 ; V_{ns} 为岩石中小开型空隙总体积, m^3 ; V_{nc} 为岩石中闭型空隙总体积, m^3 ; G 为岩石的比重, kN/m^3 ; γ_d 为岩石的干容重, kN/m^3 。

一般提到岩石的空隙率系指岩石的总空隙率。岩石因形成条件及后期经受的变化不同, 空隙率变化很大, 可以从小于 1% 到百分之几十。新鲜的结晶岩类其空隙率一般较低, 很少大于 3%。沉积岩的空隙率稍高, 一般多小于 10%。部分砾岩和充填胶结较差的砂岩, 其空隙率可高达 10%~20%。随着风化程度的加剧, 岩石的空隙率也相应增加, 可高达 30%。表 1-4 为部分岩石的空隙率值。

四、岩石的吸水性

岩石吸水性指岩石在一定试验条件下的吸水性能, 可用吸水率和饱水率表示, 这两个指标也是表示孔隙性的指标。

1. 岩石的吸水率

岩石吸水率是指岩石在 1 大气压下吸入水的重量 W_{w1} 与岩石干重量 W_1 的比值, 以百分数表示。即

$$w_1 = \frac{W_{w1}}{W_1} \times 100\% \quad (1-9)$$

岩石在 1 大气压下吸水时, 水被认为只进入岩石的大开型空隙中, 而不能进入小开型空隙中, 所以, 根据岩石的吸水率可以求得岩石的大开空隙率 n_b , 即

$$n_b = \frac{V_{nb}}{V} = \frac{\gamma_d \cdot w_1}{\gamma_w} \quad (1-10)$$

式中, V_{nb} 为大开型空隙体积; V 为岩石总体积; γ_d 为岩石的干容重; γ_w 为水的容重。

2. 岩石的饱水率

岩石的饱水率是指在 150 大气压的高压条件下或真空中吸入水的重量 W_{w2} 对于岩石干重量的比值, 以百分数表示, 即

$$w_2 = \frac{W_{w2}}{W_1} \times 100\% \quad (1-11)$$

在这种条件下, 通常认为水能进入所有的开型空隙之中, 因此岩石的饱水率能用来说明岩石中开型空隙的多少, 即求得总开空隙率 n_o 为

$$n_o = \frac{V_{no}}{V} = \frac{\gamma_d \cdot w_2}{\gamma_w} \quad (1-12)$$

式中, W_{no} 为总开型空隙体积; V 为岩石总体积; w_2 为岩石的饱水率; γ_d 为岩石干容重; γ_w 为水的容重。

由于岩石饱水率反映了总开型空隙的发育程度, 因此可用它来间接判定岩石的抗冻性和抗风化能力。

3. 饱水系数

吸水率与饱水率的比值称为岩石的饱水系数。即

$$K_s = \frac{w_1}{w_2} \quad (1-13)$$

岩石的吸水率与饱水率在数值上的差别，反映了岩石中微细裂隙的发育情况。饱水系数反映了岩石中大开型空隙与微小开型空隙的相对含量。饱水系数愈大，说明岩石中大开型空隙相对愈多，而微小开型空隙越少。一般岩石的饱水系数在 0.5~0.8 之间。饱水系数也可用来反映岩石的抗冻性。

一些岩石的吸水率见表 1-4。

表 1-4 一些岩石的空隙率及吸水率

岩石类型	岩石名称	空隙率/%	吸水率/%
岩浆岩	花岗岩	0.50~4.00	0.1~4.0
	闪长岩	0.18~5.00	0.3~5.0
	辉长岩	0.29~4.00	0.5~4.0
	辉绿岩	0.29~5.00	0.8~5.0
	安山岩	1.10~4.50	0.3~4.5
	玢岩	2.10~5.00	0.4~1.7
	玄武岩	0.50~7.20	0.3~2.8
	火山集块岩	2.20~7.00	0.5~1.7
	火山角砾岩	4.40~11.20	0.2~5.0
	凝灰岩	1.50~7.50	0.5~7.5
沉积岩	砾岩	0.80~10.00	0.3~2.4
	砂岩	1.60~28.00	0.2~9.0
	泥岩	3.00~7.00	0.7~3.0
	页岩	0.40~10.00	0.5~3.2
	石灰岩	0.50~27.00	0.1~4.5
	泥灰岩	1.00~10.00	0.5~3.0
	白云岩	0.30~25.00	0.1~3.0
变质岩	片麻岩	0.70~2.20	0.1~0.7
	花岗片麻岩	0.30~2.40	0.1~0.9
	石英片岩及角闪片岩	0.70~3.00	0.1~0.3
	云母片岩及绿泥石片岩	0.80~2.10	0.1~0.6
	千枚岩	0.40~3.60	0.5~1.8
	板岩	0.10~0.45	0.1~0.3
	大理岩	0.10~6.00	0.1~1.0
	石英岩	0.10~8.70	0.1~1.5
	蛇纹岩	0.10~2.50	0.2~2.5

五、岩石的透水性

岩石能被水透过的性能称为岩石的透水性。

岩石的透水性可用渗透系数来衡量。其大小主要取决于岩石中空隙的大小、数量、方向及相互连通情况。几种岩石的渗透系数值见表 1-5。

表 1-5 某些岩石的渗透系数值

岩 石	空隙情况	渗透系数 $K/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
花岗岩	较致密、微裂隙	$1.1 \times 10^{-12} \sim 9.5 \times 10^{-11}$
	含微裂隙	$1.1 \times 10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-11}$
	微裂隙及一些粗裂隙	$2.8 \times 10^{-9} \sim 7.0 \times 10^{-8}$
辉绿岩	致密	$< 1.0 \times 10^{-13}$
流纹斑岩	致密	$< 1.0 \times 10^{-13}$
玄武岩	致密	$< 1.0 \times 10^{-13}$
安山玢岩	微裂隙	8.0×10^{-11}
砂岩	较致密	$1.0 \times 10^{-13} \sim 2.5 \times 10^{-11}$
砂岩	空隙较发育	5.5×10^{-6}
石灰岩	致密	$3.0 \times 10^{-12} \sim 6.0 \times 10^{-10}$
	微裂隙、孔隙	$2.0 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-6}$
	空隙较发育	$9.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4}$
页岩	微裂隙发育	$2.0 \times 10^{-10} \sim 8.0 \times 10^{-9}$
片岩	微裂隙发育	$1.0 \times 10^{-9} \sim 5.0 \times 10^{-8}$
片麻岩	致密	$< 1.0 \times 10^{-13}$
	微裂隙	$9.0 \times 10^{-8} \sim 4.0 \times 10^{-7}$
	微裂隙发育	$2.0 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-5}$
石英岩	微裂隙	$1.2 \times 10^{-10} \sim 1.8 \times 10^{-10}$

六、岩石的软化性及抗冻性

1. 岩石的软化性

岩石浸水后强度降低的性能称为岩石的软化性。

由于水使岩石内部联结减弱，故一般岩石湿抗压强度都低于干抗压强度，也就是说，都具有软化性。特别是当岩石具有较大的空隙率、含有较多的亲水矿物和可溶矿物时更为明显，为了说明水对岩石强度影响的大小，常用软化系数 (K_d) 来表示。

软化系数为岩石饱水状态的抗压强度 R_w 与干燥状态的抗压强度 R_d 之比，即

$$K_d = \frac{R_w}{R_d} \tag{1-14}$$

软化系数一般小于 1。一般将软化系数 $K_d > 0.75$ 认为是软化性弱，抗水、抗风化、抗冻性强的岩石，而 $K_d < 0.75$ ，则认为是工程地质性质较差的岩石。

几种主要类型岩石的软化系数列于表 1-6。

表 1-6 各类岩石的软化系数

岩浆岩		沉积岩		变质岩	
岩石名称	软化系数	岩石名称	软化系数	岩石名称	软化系数
花岗岩	0.72~0.97	砾岩	0.50~0.96	片麻岩	0.75~0.97
闪长岩	0.60~0.80	石英砂岩	0.65~0.97	石英片岩及角闪岩	0.44~0.84
闪长玢岩	0.78~0.81	泥质砂岩、粉砂岩	0.21~0.75	云母片岩及绿泥石片岩	0.53~0.69
辉绿岩	0.33~0.90	泥岩	0.40~0.60	千枚岩	0.67~0.96
流纹岩	0.75~0.95	页岩	0.24~0.74	硅质板岩	0.75~0.79
安山岩	0.81~0.91	石灰岩	0.70~0.94	泥质板岩	0.39~0.52
玄武岩	0.30~0.95	泥灰岩	0.44~0.54	石英岩	0.94~0.96
火山集块岩	0.60~0.80				
火山角砾岩	0.57~0.95				
安山凝灰集块岩	0.61~0.74				
凝灰岩	0.52~0.86				

2. 岩石抗冻性

岩石抵抗冻融破坏作用的性能称为岩石的抗冻性。岩石浸水后，当温度在 0℃ 以下时，岩石空隙中的水将冻结，其体积增大 9%，对岩石产生较大的膨胀力，使岩石的结构和联结受到破坏，反复冻融循环，使岩石强度降低。

可以用强度损失率来说明岩石中水的冻融对岩石强度的影响。

强度损失率是饱和岩石在一定低温（一般为 -25℃）条件下，冻融 10~25 次（视当地工程要求而定，对有的特殊工程要求冻融 100~200 次或更高），冻融前后抗压强度的差值与冻融前抗压强度的比值，以百分数表示，即

$$R = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中， R 为强度损失率； R_2 为冻融前饱和岩石的抗压强度； R_1 为冻融后饱和岩石的抗压强度。

也可用重量损失率来间接说明岩石受冻融的影响。重量损失率是岩石在上述冻融条件下，冻融前后干试样的重量差与冻融前干试样重量的比值，以百分数表示。

岩石的强度损失率、重量损失率的大小主要取决于岩石中开型空隙的发育程度、亲水性和可溶性矿物的含量以及矿物颗粒间的联结强度。开型空隙越多，亲水性、可溶性矿物含量越多，则强度损失率越高。一般认为强度损失率小于 25%，重量损失率小于 2% 的岩石为抗冻的。

除以上两个直接指标外，岩石吸水率和饱水系数都是岩石抗冻性的间接指标。一般认为吸水率小于 0.5% 的岩石；软化系数大于 0.75 的岩石；饱水系数大于 0.6~0.8 的岩石均为抗冻的岩石。

第二章 岩石的基本力学性质

岩石的力学性质是指岩石在各种静、动力作用下所表现的性质。它包括：①岩石的变形性质，如应力-应变-时间关系全过程、剪胀性、流变性等；②岩石的强度特征，如抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、长期强度、疲劳强度、残余强度等；③动力性质，如岩石中波的传播特征等。

本章主要从岩石试样的室内试验来研究岩石力学性质，在这种尺度范围内，一般不能把岩石简单看成是完全均质的、各向同性和连续的介质（如玻璃），而应充分考虑岩石内微结构面，特别是微裂隙的影响。

岩石的力学性质，不仅取决于岩石成分、结构等因素，而且与岩石的受力条件有很大关系。在本章中，将分别讨论岩石在不同受力条件下的力学性质。

第一节 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、塑性和黏性。

弹性 指材料在外力作用下产生变形，撤去外力后立即恢复到原有的形状和尺寸的性质。外力撤去后能够恢复变形称为弹性变形，如果应力-应变关系呈直线关系，称为线弹性，如图 2-1a 所示，不呈直线关系称为非线弹性。

塑性 指材料受力条件下，在应力超过屈服应力时仍能继续变形而不立即断裂，撤去外力后变形又不能完全恢复的性质。不能恢复的变形，称为塑性变形。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滑动。塑性材料理想的应力-应变曲线如图 2-1b 所示。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，导致晶粒间相嵌、挤紧和晶粒增大，如使之继续滑动，要相应增大应力。这种现象称为应变硬化，如图 2-1c 所示。

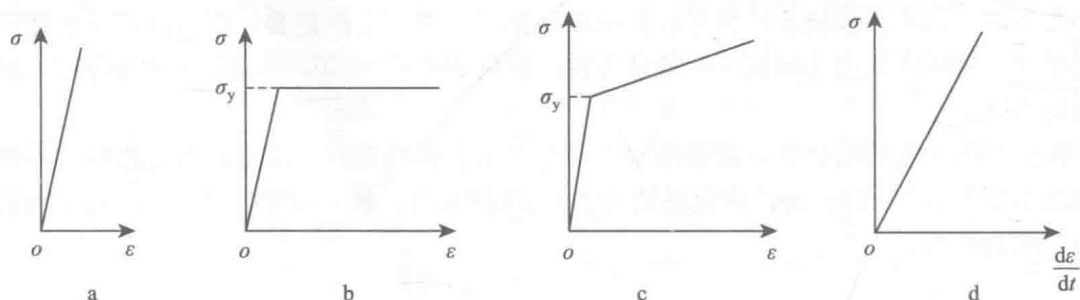


图 2-1 材料的变形性状

黏性 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。理想的黏性材料,其应力-应变速率曲线呈直线关系,且通过原点,如图 2-1d 所示。应变速率随应力而变化的变形称为流动变形。

岩石是矿物的集合体,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、加载的过程等密切相关。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。

第二节 岩石单轴受压条件下的变形

一、岩石的应力-应变曲线及变形阶段

1. 应力-应变曲线的绘制

在直径 $D=5\text{ cm}$, 高 $L=2\sim 3D$ 的圆柱形标准岩石试样上贴轴向和横向应变片,将试样置于压力机上,以一定速率加载直至试样破坏。在施加荷载时,记录各级应力相应的纵向应变 ϵ_a 及横向应变 ϵ_c ,并计算出体积应变 ϵ_v 。以压应力 σ 为纵坐标,以各类应变为横坐标,即可得到压应力-纵向应变曲线 ($\sigma-\epsilon_a$); 压应力-横向应变曲线 ($\sigma-\epsilon_c$) 和压应力-体积应变曲线 ($\sigma-\epsilon_v$),如图 2-2 所示。这三条曲线,是研究岩石变形机制的重要依据。

2. 岩石的变形阶段

通过分析典型的岩石应力-应变曲线,可将岩石变形过程划分为五个阶段,如图 2-2 所示。

(1) 微裂(孔)隙压密阶段:即图 2-2 中 $\sigma-\epsilon_a$ 曲线的 $o-a$ 段,呈上凹形,曲线斜率 $\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} \neq \text{常数}$,而随荷载加大而增大,在这个阶段,岩石侧向膨胀较小,体积随压力增加而减小。说明岩石中原有的微裂隙、微孔隙等在荷载作用下逐渐被压密。 a 点相应的荷载,称为压密极限强度。

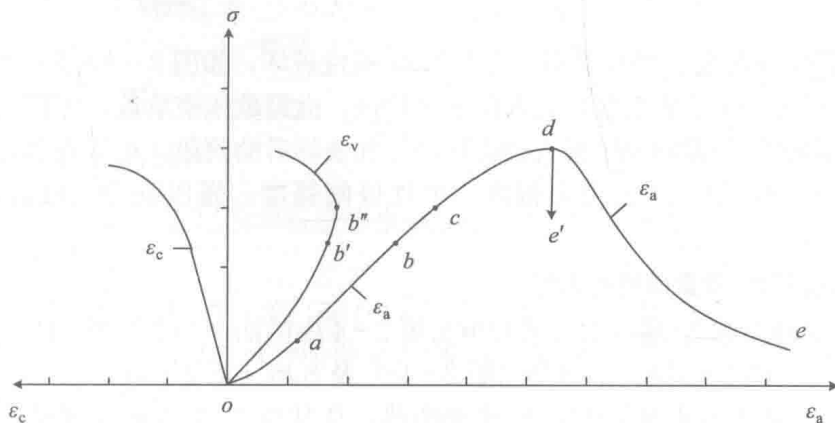


图 2-2 岩石单轴压缩应力-应变全过程曲线

(2) 弹性变形阶段：曲线上为 $a-b$ 段，应力-应变关系近于直线，即 $\frac{d\sigma}{d\epsilon_a} = \text{常数}$ 。岩石体积继续被压缩，说明此段变形反映微裂隙继续压缩和岩石的弹性变形。 b 点的应力称为弹性极限强度。

(3) 裂纹发生和扩展阶段：相当于曲线 $b-c$ 段，在这一阶段， $\sigma-\epsilon_a$ 曲线基本仍呈直线，但在 $\sigma-\epsilon_c$ 曲线则出现非线性，同时岩块体积发生膨胀，如图 2-2 中的 $\sigma-\epsilon_v$ 曲线。此时在平行轴向方向产生张性裂纹，而且随荷载强度的增大，张性裂纹在逐渐发展， c 点的应力称为屈服强度，它约为最大荷载强度的 60%~90%。

(4) 裂隙加速扩展直到破坏阶段：相当于 $c-d$ 段，这时曲线 $\sigma-\epsilon_a$ 和 $\sigma-\epsilon_c$ 更加平缓， $\frac{d\sigma}{d\epsilon_a}$ 和 $\frac{d\sigma}{d\epsilon_c}$ 均减小，体积膨胀加速。此时斜交轴向的裂隙扩展，局部破损逐渐扩大并连接形成滑动面导致岩石完全破坏。 d 点的应力达到最大值，称为峰值强度或单轴极限抗压强度，用 σ_c 表示。

(5) 破坏后的阶段：即 d 点以后曲线，对于非刚性压力机，由于在岩石变形阶段蓄存了大量的变形能，当岩石破坏而失去支撑能力时，压力机变形能突然释放，故得不到这一段曲线。如采用刚性压力机，则可取得部分或全部岩石破坏后的变形特征曲线，这段曲线，一般用荷载强度 p 和变形 u_1 来表示，即 $p-u_1$ 曲线，在单向压缩条件下，岩石的 $p-u_1$ 曲线一般有两种情况：

1) 破坏后 (d 点以后) 曲线呈近于垂直的坡度下降，荷载强度下降幅度也很大。表现为突发式脆性破坏，如图 2-3a 所示；

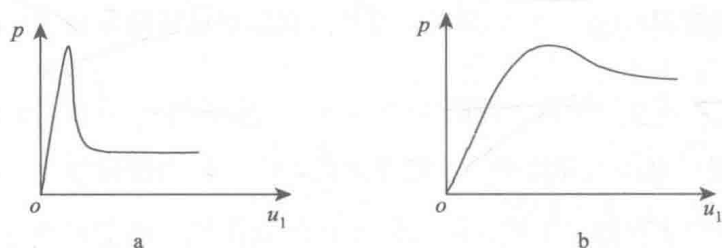


图 2-3 岩石两种不同破坏型式的 $p-u_1$ 曲线

2) 破坏后荷载强度 p 缓慢下降，表现为延-脆性破坏，如图 2-3b 所示。

由上述可见，相应于岩石变形过程的五个阶段：微裂隙压密阶段、弹性变形阶段、裂隙发生和扩展阶段、裂隙加速扩展直到破坏阶段和破坏后的阶段，可以得到五个相应的界限应力（强度）值，即：压密极限强度、弹性极限强度、屈服强度、峰值强度及残余强度。

3. 岩石单轴应力-应变曲线的类型

岩石峰值前轴向应力-应变曲线可归纳为图 2-4 中的四个基本类型，即：直线型（图 2-4a）、下凹型（图 2-4b）、上凹型（图 2-4c）及 S 型（图 2-4d）。

图 2-5 为几种岩石典型单轴应力-应变曲线，从其应力-应变曲线可见，岩石的变形特征是与其矿物成分和结构密切相关的。为进一步说明岩石变形特性，仅对曲线进行定性的形状描述是不够的，必须进一步引用一些变形的定量指标。