

中等专业学校教材



岩体力学基础

四川省水利电力学校 段士腾 主编



TU45
2

中等专业学校教材

岩体力学基础

四川省水利电力学校 段士腾 主编

(京)新登字115号

内 容 提 要

本教材全书共分六章,分别论述了岩石的工程地质特征。岩体力学的地质基础,结构面的力学特征,岩体的力学特征,岩体工程质量分类,岩体稳定性分析计算。其中,对岩体结构特征及软弱夹层的特性作了较为深入的阐述。

本书力图反映岩体力学研究领域的主要认识,注重实践应用。本书兼顾工程地质与岩体力学相结合的要求,除作为工程地质中专教材外,也可供从事水利水电、矿山建设、煤炭开采、地下建筑、铁路交通的工程技术人员和岩体力学工作者,以及其他有关专业师生参考。

中等专业学校教材

岩体力学基础

四川省水利电力学校 段士腾 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

河北省三河市印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.5印张 257千字

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数 0001—2,300 册

ISBN 7-120-01831-0/TV·660

定价 5.35 元

前 言

本教材是根据“1990~1995年中等专业学校水利水电类专业教材选题和编审出版规划”，并按照1984年4月水利电力部教育司颁布的《岩体力学基础》课程教学大纲的内容要求组织编写的。

岩体力学基础，是工程地质学在岩体研究方面的重要基础理论部分。本教材十分强调地质研究与岩体力学分析必须相互紧密结合，并着重以岩体力学的基础知识为主要内容；编者汇集了岩体力学研究领域的主要认识，力图在本教材中较为全面地论述岩石的工程地质特征、岩体力学的地质基础、结构面的力学特征、岩体的力学特征及岩体工程质量分类。其中，对岩体结构特征及软弱夹层的特性作了较为深入的阐述；并在此基础上简明地论述了岩体稳定性分析的一般原理，边坡、坝基、地下洞室围岩稳定性常用的计算方法，以使学生能对岩体力学研究建立起完整的概念，便于在实践中应用。

本书由四川省水利电力学校段士腾主编。参加编写的有四川省水利电力学校熊昌健（第一、三、四章）；段士腾（绪论、第二、五章）；湖北省武汉电力学校刘正（第六章）。

本书由陕西省水利学校刘德兴主审，对书稿进行了细致的审阅，提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中，承蒙有关兄弟院校、生产单位、科研部门及个人提供了大量资料和若干有益的建议，使编写工作得以顺利完成。编者在此一并表示衷心感谢！

本书兼顾工程地质与岩体力学相结合的要求，故除作为水利水电类工程地质专业教材使用外，也可供从事矿山建设、煤炭开采、地下建筑、铁路交通的工程技术人员和岩体力学工作者参考。

由于编者水平所限，书中缺点、错误在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1992.11.

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 岩石的工程地质特征	5
第一节 岩石的物理性质及水理性质	5
第二节 岩石的变形特征	11
第三节 岩石的强度特征	24
第二章 岩体力学的地质基础	38
第一节 岩体结构理论概述	38
第二节 结构面的工程地质研究	39
第三节 结构体的工程地质研究	60
第四节 岩体的结构类型	63
第五节 岩体赋存的地质物理环境特征	67
第三章 结构面的力学特征	82
第一节 结构面的变形特性	82
第二节 结构面的抗剪强度	86
第三节 结构面的剪切粘滑	97
第四章 岩体的力学特征	99
第一节 岩体的变形特征	99
第二节 岩体的强度	108
第五章 岩体工程质量分类	115
第一节 岩体分类的一般原则及发展趋势	115
第二节 巴顿岩体分类	116
第三节 比尼威斯基岩体分类	119
第四节 水利水电勘察规范分类	121
第六章 岩体稳定性分析	126
第一节 概述	126
第二节 边坡及坝基稳定性计算	128
第三节 地下洞室围岩稳定性分析	150
主要参考文献	177

绪 论

一、岩体力学与生产实践

岩体力学是研究岩体在各种应力场作用下变形和破坏规律的一门年轻的 应用性 基础学科。

人类生存在地球上,要寻找矿产,要开发资源、能源,要防治地质灾害,特别是要进行各类工程建设,均与地壳岩体有关。而要解决这些领域的许多理论研究和生产实践课题,都需要采用岩体力学的科学理论和技术方法。

岩体力学涉及许多学科和生产部门,尤其与一系列工程建设的关系更为密切,如水利水电、矿山建设、煤炭开采、土木建筑、铁路交通及国防工程等。岩体力学在地学领域中也占有重要位置,如地壳变形、矿产贮存、地震形成与传播规律的研究等。

岩体力学的研究经常与一些重大工程项目相联系,往往涉及到巨大的经济效益。例如,某露天矿边坡的坡角,每提高 1° ,可减少剥离投资3000~5000万元,如果边坡角变化几度,则影响投资增减可达数亿元之巨;又如,某水利工程的大坝,其摩擦系数变化仅0.01,影响混凝土工程量就可达数十万立方米,投资增减为数百万元,从安全角度考虑,关系则更为重大。许多大坝因地基问题而失事,往往与岩体力学的判断失误有关。可见岩体力学研究在国民经济建设中的重要意义。

不同学科领域与生产部门,对岩体力学的研究内容各有所侧重,概括起来可以划分为以下三个方面。

(1)为各类工程建设服务的岩体力学。其重点是研究在工程活动引起的应力场作用下,地基、边坡、洞室等岩体的变形和稳定性。

(2)为地学研究服务的岩体力学。因寻找矿产、预报地震等均与地壳形变规律有关,故需重点研究高温高压环境下岩体的变形破坏规律,以及与时间效应有关的岩体流变特性。

(3)为钻探、掘进及爆破工程服务的岩体力学。其重点是研究岩石切割、破碎问题,以及岩石的动力特性。

岩体力学是在本世纪50年代才开始发展起来的,它比土力学的发展约迟缓30年。1957年在巴黎出版的塔罗勃(J. Talobre)的专著《岩石力学》是最早的一本较系统的著作。新中国成立以来,尤其是1958年以后,在社会主义建设事业中因工程实践的需要,岩体力学得到了应有的重视和发展,许多部门相继创立了岩体力学科研机构,研制出若干试验设备,成功地解决了许多复杂的工程问题,积累了较丰富的经验。但是也应该看到,当前某些重大工程中面临的岩体力学问题,其中有些往往超过国内外现有的经验和理论水平,而我国岩体力学研究水平,特别是在测试手段方面,同某些发达国家相比尚有一定差距,还需进一步发展和提高。

二、岩体的概念及其基本特点

人类利用岩体作为建材或地基虽历史已久,但较长时期内却将岩石与岩体混为一谈。从60年代起,国内外有关学者才注意到,完整小块岩石与自然环境中的岩体彼此性质的巨大差别,并明确了两者不同的概念。

1. 岩石

岩石即岩块,系指未包含显著软弱面的岩石块体,是岩体的组成单元。通常在研究岩体时,可视岩石(块)为均质、各向同性的连续性介质。

2. 岩体

岩体即地质体的一部分,是被视为力学对象研究的地质体。岩体是指位于一定的地质环境中,由一定的岩石成分组成,并被宏观地质界面分割形成一定结构的地质体。

岩体是地质历史的形成物,因形成过程中建造环境的变化,以及其后在内、外营力长期作用下,经受过变形,遭受过破坏,尤其是被各种分异面和断裂网络切割,工程地质性质具有相对的复杂性,表现为以下四方面。

(1)不连续性。岩体与其它物质的本质性差别是在于它是受宏观地质界面切割的多裂隙介质。各种不连续面导致岩体内应力集中,使整体强度较岩块大大削弱,且易于变形。不连续性是岩体最重要的特性。

(2)非均匀性。系指岩体的各种性质随空间位置转换而有所变化。虽为同一岩体内,然而不同位置试验成果可产生较大的离散性,故岩体性质的试验研究,应视具体情况划分为若干相对均匀的岩性单元。

(3)各向异性。系指岩体性质随作用方向转换而发生变化。因岩体中各种界面对应力传播、应力集中及渗流等均有方向性效应,故研究岩体性质时,必须明确其取向问题。

(4)环境赋存性。系指岩体存在于一定的自然地质环境中,其工程性质受各种环境因素的制约,如地应力、地下水、地温及各种风化营力等。有些赋存因素不仅可以构成岩体应力,而且可以改变岩体力学性质,甚至使岩体的力学作用过程发生某些变化。

基于上述的复杂特性,在岩体力学研究中必须强调重视宏观的地质研究。在此基础上配合各种物理力学测试手段,合理区分岩体的力学介质类型,使用与之相应的力学理论和方法进行分析,才能得到合乎实际的结论。

三、岩体力学与工程地质学

岩体力学是工程地质学在岩体研究方面的基础理论,是实现定量化的手段,它是工程地质学与力学相互渗透形成的边缘学科。

岩体力学和工程地质学均以地质体为研究对象,其间联系密切,但各有所侧重。岩体力学着重从力学的角度分析考察岩体,虽必须以地质研究为基础,但重点是试验研究和力学分析计算。工程地质学研究重点是在于阐明各种地质因素,评价工程地质问题,对岩体稳定性分析主要采用地质学研究的方法,并综合应用岩体力学成果作出判断。

岩体力学与工程地质学相互依存,必须紧密结合。岩体力学工作者通过大量的实践深刻认识到,岩体力学研究一定要与工程地质相结合。如果不真正了解地质情况就进行岩体力学试验与分析,即使有最完备的试验手段也会脱离实际,所得出的数据再精确也是毫无

意义的。事实表明,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的宏观判断失误所致。现代工程地质学研究的一个非常重要的特色在于:地质分析和力学机制分析并重,定性与定量评价并重。这就迫切要求工程地质和岩体力学相结合,大量引用岩体力学的新成就,以便能深入探索工程地质问题形成和变化的力学机制,促进理论的发展和更新。显见,现代工程地质学的基础理论是岩体力学,工程地质学理论的发展离不开岩体力学的指导;反过来,岩体力学研究又必须以地质研究为基础,其学科发展及实际预测能力的进步,得依赖于工程地质科学水平的提高。因此,两者相互结合是发展的必然趋势。

综上所述可见,岩体力学工作者和工程地质工作者要相互紧密配合,必须有相互渗透的知识结构。岩体力学工作者应具备一定的地质基本知识和实践认识能力,而工程地质工作者也需要较好的掌握岩体力学的基本理论知识及研究方法,以便于相互配合,并使专业基础理论水平得到充实与提高。这也是本书内容安排方面的一个主要出发点。

四、岩体力学的研究方法与发展简况

岩体力学是研究地质体的力学,由于研究对象的特殊性和复杂性,必须综合采用下列研究方法。

(1) 工程地质研究法。用于研究岩体的地质特征,从宏观上判断岩体的变形破坏机制,确定地质模型。应着重阐明与岩体力学性质和力学作用有关的岩性组成、岩体结构与赋存环境等项地质因素,其中对软弱结构面的研究是关键性的工作。

(2) 试验研究法。测试、试验是岩体力学特有的重要研究方法,包括:室内试验、野外原位试验、钻孔测试、天然应力量测、模型与模拟试验、变形监测及位移反分析等。通过试验研究可以获取变形和稳定分析计算所需的各种定量参数,也可以通过模拟得出各种岩体的变形和稳定性状况。

(3) 力学分析法。岩体力学在应用方面的主要任务,就是以定量的形式预测出岩体在各种应力场作用下的变形和稳定性。通常是在广泛搜集地质信息的基础上,将地质模型抽象成某类岩体力学模型,采用相应的力学理论进行分析计算。最为常见的是刚体极限平衡理论方法及弹性理论分析方法,有限元法、边界元法、离散元节理岩块模型、冠块理论等数值分析方法已逐渐成为分析岩体力学问题的有力工具。

纵观历史,岩体力学的形成和发展大体上可以划分为以下3个阶段。

在岩体力学形成的早期,在对岩体基本特征尚未能深入研究的情况下,简单地把地基岩体和洞室围岩看成是岩石材料,用材料力学研究中发展起来的连续介质力学分析一切岩体力学问题,故许多专著和教科书都是以“岩石力学”为题阐述与此有关的知识。这些理论与岩体实际多半是脱节的,解决问题实际上主要还得靠经验。作为一个发展阶段,可以称为材料力学阶段。

第二次世界大战后,世界各国经济飞跃,随着工程规模不断增大,经济与技术要求愈来愈高,凭经验已难以满足工程要求,需要从理论上寻求新的见解。60年代前后国际上工程事故相继发生,其中尤以1959年法国的马尔帕塞坝溃坝及1963年意大利的瓦依昂坝肩山体滑坡事故教训惨痛,震惊世界。大量研究表明,这些事故的发生主要是对岩体内发育的不

连续面没有足够重视造成的。自60年代以来把碎裂岩体力学特性研究作为中心课题，从而使岩体力学发展进入了一个新阶段，即碎裂岩体力学阶段。在这一阶段内，奥地利学派起了很大的推动作用，1974年缪勒(L. Müller)主编的《岩石力学》文集代表了这一阶段的研究方向。

在70年代，我国谷德振教授在长期工程地质实践基础上，提出了岩体结构的概念，并指出岩体结构控制着岩体力学作用，建立了岩体工程地质力学理论基础，这是岩体力学发展的又一次重大突破。自从岩体结构观点形成以后，岩体结构的力学效应研究愈来愈受到重视，它不仅对岩体力学性质，而且对岩体变形和破坏有明显地控制作用。岩体结构观念的建立和以岩体结构为基础，考虑岩性及地应力条件，将岩体划分为多种力学介质，提出岩体力学是由块裂介质力学、碎裂介质力学及连续介质力学等组成的岩体力学理论体系，从而推动岩体力学进入了岩体结构力学阶段，为建立完整的岩体力学理论体系迈进了一步。

第一章 岩石的工程地质特征

岩石的工程地质特征是指与工程建设有关的各种技术特征,通常是由工程建设所需的各种工程地质性质的定量指标来具体表征的。

岩石是自然历史的产物。研究岩石的工程地质性质时,必须结合其成因和使用条件,论证在工程作用下可能发生的各种变化,预测对建筑物产生的各方面影响。

应强调指出,工程建筑物对地基、围岩或地质环境的影响与作用,决定于岩体的工程地质性质,而不直接决定于岩石(块)的有关性质。岩块的各种工程技术性质一般均可满足建筑物要求,而反映这些性质的指标并不一定能直接用于工程设计。

研究岩石的工程地质特征其意义在于:①评价岩石作为天然建材的适宜性;②评价岩体的抗风化稳定性;③进行岩石工程分类,便于类比岩体特征;④在一般情况下取代岩体的物理性质,若对于完整性好的岩体,可代替岩体性质;⑤岩石性质的研究有助于从理论上认识岩体性能,因此它是分析岩体性质的基础。

所以,在工程建设与岩体工程地质研究中,进行岩石性质的研究是很必要的。

岩石工程地质性质主要包括:物理性质、水理性质和力学性质三个方面。但必须指出,这些性质所表现的各种差异与变化,最根本的原因在于岩石本身的物质组成、结构和构造的不同。

第一节 岩石的物理性质及水理性质

一、岩石的物理性质

岩石的物理性质系指岩石的自然性状,包括岩石的重量和空隙性,它主要决定于岩石固相的组成和性质,以及固、液、气三相的相对比例与相互排列。

(一) 岩石的重量

岩石的重量,一般指岩石的比重和容重,是选择建筑材料、计算边坡稳定和围岩压力等的重要计算指标。

1. 岩石比重(G)

岩石比重是指岩石固体颗粒单位体积的重量与4℃时同体积水的重量之比,即

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

式中 G ——岩石比重,无量纲;

V_s ——岩石固体颗粒的体积, m^3 ;

W_s ——岩石固体颗粒的重量, N ;

γ_w ——水的容重, N/m^3 。

岩石比重取决于组成矿物的比重及相对含量，而与空隙和含水多少无关。据岩石所含矿物可粗略估计其比重的大致范围。基性、超基性岩浆岩比重较大，为2.7~3.3；酸性岩为2.5~2.85；中性岩约为2.6~3.1；硅质胶结的石英砂岩比重近于石英，约2.60；石灰岩和大理岩接近方解石比重，约2.70。

2. 岩石容重

岩石单位体积的重量称为岩石容重。所谓单位体积是包含空隙在内的体积。依空隙含水程度，可分为天然容重、干容重和饱和容重。

(1) 天然容重(γ)。指岩石在天然含水状态下的单位体积重量，即

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-2)$$

式中 W ——天然状态下的岩石重量，N；

V ——岩石的体积， m^3 。

(2) 干容重(γ_d)。指岩石在完全不含水状态下的单位体积重量，即

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} \quad (1-3)$$

式中 W_d ——岩石烘干后的重量，N。

(3) 饱和容重(γ_H)。指岩石浸水饱和后的单位体积重量，即

$$\gamma_H = \frac{W'}{V} \quad (1-4)$$

表 1-1

主要岩石的比重和容重

岩 石 名 称			比 重	容重($10^4 N/m^3$)
岩 浆 岩	花 岗 岩		2.50~2.84	2.30~2.80
	正 长 岩		2.50~2.90	2.40~2.85
	闪 长 岩		2.60~3.10	2.52~2.98
	辉 长 岩		2.70~3.20	2.55~2.98
	辉 绿 岩		2.60~3.10	2.53~2.97
	玢 岩		2.60~2.84	2.40~2.80
	玢 岩		2.30~2.84	2.20~2.74
	粗 面 岩		2.40~2.70	2.30~2.67
	安 山 岩		2.40~2.80	2.30~2.70
	玄 武 岩		2.60~3.30	2.50~3.10
沉 积 岩	凝 灰 岩		2.56~2.78	0.75~1.40
	砾 岩		2.67~2.71	2.30~2.60
	砂 岩		2.60~2.75	2.00~2.71
	页 岩		2.57~2.77	2.00~2.62
变 质 岩	灰 岩		2.48~2.85	2.30~2.77
	片 麻 岩		2.63~3.01	2.3~3.00
	片 岩		2.65~3.02	2.09~2.92
	石 英 岩		2.63~2.84	2.40~2.80
	大理 岩		2.70~2.85	2.60~2.70
	板 岩		2.68~2.76	2.31~2.75

式中 W' ——岩石饱和后的重量, N。

岩石容重取决于组成岩石的矿物成分, 也与空隙发育情况及含水多少有关。当岩石完整致密时, 能进入水的空隙不多, 则天然容重、干容重、饱和容重三者很接近, 而当空隙发育且含水时, 则干容重减小, 三者差值增大。因此, 利用容重值可以判断岩石空隙发育程度, 以间接地评价同类岩石的致密程度与坚固性。由于大多数岩石的空隙很少, 三项容重值差值甚微, 通常在未加说明含水状态时即指干容重。现将主要岩石的比重和容重列于表1-1。

(二) 岩石的空隙性

岩石具有孔隙和裂隙的特性统称为岩石的空隙性。岩石的空隙性用空隙率表示。由于岩石具有牢固的结构连结, 它的空隙除相互连通者之外, 尚存在互不连通且与大气隔绝的封闭空隙。与大气连通的空隙称为开口空隙, 其中也有大小的区别。各类空隙对岩石工程地质特性有着不同的影响, 应予区分。

岩石空隙率是指岩石空隙体积占岩石总体积的百分数。根据空隙的不同类型, 在同一块岩石试样中, 应有区别地表示为: 总空隙率(n)、大开空隙率(n_b)、小开空隙率(n_l)、总开空隙率(n_o)、闭空隙率(n_c)等五种。可按以下公式分别进行计算:

$$n = \frac{V_n}{V} \times 100\% = \left(1 - \frac{\gamma_d}{G\gamma_w}\right) \times 100\% \quad (1-5)$$

$$n_b = \frac{V_{nb}}{V} \times 100\% \quad (1-6)$$

$$n_o = \frac{V_{no}}{V} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$n_l = \frac{V_{nl}}{V} \times 100\% = n_o - n_b \quad (1-8)$$

$$n_c = \frac{V_{nc}}{V} \times 100\% = n - n_o \quad (1-9)$$

式中 V ——岩石试样体积, m^3 ;

V_n ——岩石中空隙总体积, m^3 ;

V_{nb} ——岩石中大开型空隙体积, 该空隙在常压下即可被水充满, m^3 ;

V_{no} ——岩石中所有开型空隙的体积, 该空隙体积包括在高压条件下始能为水充满的小开型空隙, m^3 ;

V_{nl} ——岩石中小开型空隙体积, m^3 ;

V_{nc} ——岩石中闭型空隙体积, m^3 ;

G ——岩石比重, 无量纲;

γ_d ——岩石干容重, N/m^3 。

一般提到的空隙率, 系指总空隙率(n)。

因形成条件的差异及其后期经历不同, 岩石空隙率变化较大, 变化范围可从小于百分之一至百分之几十。新鲜结晶岩类空隙率很低, 很少大于3%; 沉积岩空隙率较高, 一般小于10%, 但部分胶结差的砂岩、砾岩, 空隙率高达10%, 甚至20%以上; 岩石风化程度

加剧, 同类岩石的空隙率相应增加。主要岩石的空隙率列于表1-2。

表 1-2

某些岩石的空隙率(n)

岩石名称	空隙率 (%)	岩石名称	空隙率 (%)	岩石名称	空隙率 (%)
花岗岩	0.5~4.0	砾岩	0.8~10.0	云母片岩	0.8~2.1
闪长岩	0.18~5.0	砂岩	1.6~42.0	千枚岩	0.4~3.6
辉长岩	0.29~4.0	泥岩	3.0~7.0	板岩	0.1~0.45
辉绿岩	0.29~5.0	页岩	0.4~10.0	大理岩	0.1~6.0
玢岩	2.1~5.0	灰岩	0.5~27.0	石英岩	0.1~8.7
安山岩	1.1~4.5	泥灰岩	1.0~10.0	蛇纹岩	0.1~2.5
玄武岩	0.7~7.2	白云岩	0.3~25.0	第三系砂岩	2.2~42.0
火山集块岩	2.2~7.0	片麻岩	0.7~2.2	白垩系砂岩	7.2~37.7
火山角砾岩	4.4~11.2	花岗片麻岩	0.3~2.4	三迭系砂岩	1.6~27.7
凝灰岩	1.5~25.1	石英片岩	0.7~3.0		

岩石的空隙性可以用于间接判别岩石其它的工程地质性质。通常, 空隙率高的岩石强度较低, 易于变形, 渗透性大, 抗风化稳定性差。可溶岩空隙率高的, 易于产生溶蚀。利用同类岩石空隙率的差别, 也可以判别风化程度。

二、岩石的水理性质

岩石的水理性质系指岩石与水相互作用所表现的性质, 通常包括: 吸水性、透水性、软化性和抗冻性等。

(一) 岩石的吸水性

岩石在一定试验条件下的吸水性能, 称为岩石的吸水性、用吸水率、饱水率和饱水系数表征。

(1) 岩石吸水率(w_1)。指岩石试件在1个大气压下进行吸水试验, 达到饱和时吸入水的重量(W_{w1})与岩石试件干重(W_s)之比值, 用百分数表示, 即

$$w_1 = \frac{W_{w1}}{W_s} \times 100\% \quad (1-10)$$

由于吸水试验在常压下进行, 水只能进入大开型空隙中, 因而可根据吸水率(w_1)计算大开空隙率(n_b), 即

$$n_b = \frac{V_{wb}}{V} = \frac{W_s}{V} \cdot \frac{V_{wb}}{W_s} = \gamma_s \frac{W_{w1}}{\gamma_w W_s} = \gamma_s \frac{w_1}{\gamma_w} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 V ——岩石试件体积, m^3 ;

W_{w1} ——岩石在1个大气压下饱和时吸入水的重量, N 。

将某些新鲜岩石的吸水率 w_1 值列于表1-3。

(2) 岩石饱水率(w_2)。指岩石试件在强制状态下(真空抽气达到负740mmHg)进行饱和吸水试验, 达到饱和状态时吸入水的重量(W_{w2})与岩石干重(W_s)之比, 以百分数表示, 即

$$w_2 = \frac{W_{w2}}{W_s} \times 100\% \quad (1-12)$$

表 1-3

某些岩石的吸水率 (w_1)

岩 石 名 称	吸 水 率 (%)	岩 石 名 称	吸 水 率 (%)
花 岗 岩	0.1~4.0	石 灰 岩	0.1~4.5
闪 长 岩	0.3~5.0	泥 灰 岩	0.5~3.0
辉 长 岩	0.5~1.0	白 云 岩	0.1~3.0
玢 岩	0.4~1.7	片 麻 岩	0.1~0.7
辉 绿 岩	0.8~5.0	花 岗 片 麻 岩	0.1~0.85
安 山 岩	0.3~4.5	石 英 片 岩	0.1~0.3
玄 武 岩	0.3~2.8	云 母 片 岩	0.1~0.6
火 山 集 块 岩	0.5~1.7	绿 泥 石 片 岩	0.1~0.6
火 山 角 砾 岩	0.2~5.0	千 枚 岩	0.5~1.8
凝 灰 岩	0.5~7.5	板 岩	0.1~0.3
砾 岩	0.3~2.4	大 理 岩	0.1~1.0
砂 岩	0.2~9.0	石 英 岩	0.1~1.5
泥 岩	0.7~3.0	蛇 纹 岩	0.2~2.5
页 岩	0.5~3.2		

在这种试验条件下, 通常认为水能进入所有开型空隙中, 所以可据饱水率求出总开空隙率(n_s), 即

$$n_s = \frac{V_{ss}}{V} = \frac{W_s V_{ss}}{V W_s} = \gamma_s \frac{W_{w1}}{\gamma_w W_s} = \gamma_s \frac{w_1}{\gamma_w} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中各项符号意义同前。

吸水率和饱水率均受到岩石成因、岩性和成岩地质历史等因素的影响。大部分岩浆岩与变质岩的吸水率多变化于0.08%~1.5%之间, 饱水率变化于0.1%~0.2%之间。沉积岩的吸水性一般较高于岩浆岩与变质岩, 多变化于0.2%~7.0%范围, 而饱水率变化范围多为0.25%~12%之间。

(3) 岩石饱水系数(K_s)。指吸水率(w_1)与饱水率(w_s)之比值。即

$$K_s = \frac{w_1}{w_s} \quad (1-14)$$

饱水系数反映了岩石中大开型空隙与小开型空隙之间的相对数量关系, 即 K_s 愈大, 岩石中大开型空隙愈多, 而小开型空隙数量相对减少。一般岩石 K_s 值多数在0.6~0.9之间。

饱水系数对评价岩石抗冻性有相当作用, 因为岩石在含水冻结时, 大开型空隙受冻胀力产生变形, 此时小开型空隙因在常压下未充水无冻胀作用, 反而可以提供使大开型空隙冻胀力缓解的变形空间, 使应力集中程度减弱, 因而有利于岩石抗冻性。一般认为: 当吸水率 $w_1 < 0.5\%$ 时, 均匀粒状岩石 $K_s < 0.8$, 而不均匀或层状岩石 $K_s < 0.7$ 即视作抗冻岩石, 反之则为不抗冻岩石。

(二) 岩石的透水性

岩石(块)本身被水渗透的性能, 称为岩石的透水性, 它取决于岩石中空隙的大小、数量、方向性及连通情况, 由于岩石主要通过内部相互连通的微细空隙进行水流渗透, 因

而服从达西定律, 透水性用渗透系数表达。岩石渗透系数一般为实验室测定, 因岩石类型和岩样中微细空隙发育特征而异, 但大多数岩石均可视为不透水。现将某些岩石的渗透系数列于表1-4。

表 1-4 某些岩石的渗透系数值

岩 石	空隙情况	渗透系数K (cm/s)	岩 石	空隙情况	渗透系数K (cm/s)
花 岗 岩	较 致 密 含微裂隙 含微裂隙及一些粗 裂隙	$1.1 \times 10^{-12} \sim 9.5 \times 10^{-11}$ $(1.1 \sim 2.5) \times 10^{-11}$ $2.8 \times 10^{-8} \sim 7 \times 10^{-8}$	石 灰 岩	致 密 含微裂隙、空隙 空隙较发育	$3 \times 10^{-12} \sim 6 \times 10^{-11}$ $2 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-8}$ $9 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-7}$
辉 绿 岩	致 密	$< 10^{-13}$	页 岩	微裂隙较发育	$2 \times 10^{-11} \sim 8 \times 10^{-11}$
流纹斑岩	致 密	$< 10^{-13}$	片 岩	微裂隙发育	$10^{-8} \sim 5 \times 10^{-8}$
玄武岩	致 密	$< 10^{-13}$	片 麻 岩	致密	$< 10^{-13}$
安山玢岩	含微裂隙	8×10^{-11}		含微裂隙	$9 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-7}$
砂 岩	较 致 密	$10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-11}$	石 英 岩	微裂隙发育	$2 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-8}$
	空隙较发育	5.5×10^{-8}		含微裂隙	$(1.2 \sim 1.8) \times 10^{-10}$

(三) 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。它与岩石的空隙性、矿物成分及胶结物质等有关, 大开型空隙发育而且含有较多亲水性或可溶性矿物成分的岩石, 当浸水以后, 颗粒间连结强度会发生明显下降, 极易出现软化现象。

岩石的软化性用软化系数(η)表征。软化系数是指岩石浸水以后达到饱和状态时的抗压强度(R_w)与岩石烘干以后达到恒重时的抗压强度(R_d)之比值, 即

$$\eta = \frac{R_w}{R_d} \quad (1-15)$$

软化系数小于1。通常认为 $\eta > 0.75$, 为不易软化的岩石, 抗水、抗风化和抗冻性均较强; $\eta < 0.75$, 为易软化岩石, 工程地质性质较差。常见岩石软化系数列于表1-5。

表 1-5 某些岩石的软化系数

岩 石 名 称	软 化 系 数 (η)	岩 石 名 称	软 化 系 数 (η)
花 岗 岩	0.62~0.87	石 灰 岩	0.70~0.90
闪 长 岩	0.72~0.90	砂 岩	0.35~0.95
玄 武 岩	0.80~0.95	泥 岩	0.10~0.50
凝 灰 岩	0.50~0.83	页 岩	0.24~0.74

(四) 岩石的抗冻性

岩石抵抗冻融破坏的性能, 称为岩石的抗冻性。岩石经过若干次冻融后, 其强度往往会降低, 甚至还会解体破坏, 因此在寒冷或高山地区应对岩石抗冻性作出评价。

岩石冻融过程中由于岩石中不同矿物颗粒之间膨胀收缩性有差异和岩石空隙中的水在

冻结中体积骤增产生较大的内应力,致使其结构改变、联结松动和破坏。

岩石抗冻性可通过抗冻试验测定。将饱和岩样置于一定负温条件下(一般为 -25°C)反复冻融10~25次,不仅观察岩石破坏程度做直接描述外,而且计算重量损失率和抗冻系数,以此表征岩石的抗冻性。

(1) 重量损失率(K_d)。指冻融试验前后干试样重量之差值与冻融前干试样重量之比值,以百分数表示,即

$$K_d = \frac{W_s - W_{s1}}{W_s} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中 W_s ——冻融试验前岩石试样干重, N;

W_{s1} ——冻融试验后岩石试样干重, N。

(2) 抗冻系数(K_{dp})。指冻融前后干试样抗压强度之比值。即

$$K_{dp} = \frac{R_o}{R_d} \quad (1-17)$$

式中 R_o ——冻融试验后试样干抗压强度, Pa;

R_d ——冻融试验前试样干抗压强度, Pa。

K_d 和 K_{dp} 值的大小主要决定于岩石中开型空隙的发育程度和亲水性、可溶性矿物的含量及颗粒之间联结的牢固程度。若大开空隙绝对数量与相对数量多,且富含亲水、可溶性矿物以及结构联结弱的岩石,则 K_d 较大而 K_{dp} 较小。通常认为,重量损失率 $K_d < 2\%$,或者抗冻系数 $K_{dp} > 0.75$ 的岩石为抗冻的。

岩石的抗冻性还与吸水率、软化系数、饱水系数有密切关系,一般认为:当 $w_i < 0.5\%$, $\eta > 0.75$, $K_s < 0.7$ 时,可视为抗冻的岩石。

第二节 岩石的变形特征

一、基本概念

岩石在外力作用下,其内部应力状态发生变化,使质点产生绝对或相对位移,结果引起岩石形状和尺寸的变化,这称为岩石变形。

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,具有何种变形特征,一方面取决于成分和结构,另一方面还和它的受力条件,如荷载的大小及其组合情况,加载方式及速率,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。

尽管岩石变形特征是复杂的,但就一般情况而言,坚硬完整岩石在常温常压环境中,通常可近似地视作弹脆性体,以弹性理论为基础进行研究。

二、岩石在单轴压力作用下的变形

对岩石进行室内试验研究时,岩石的变形特性主要是通过岩石的压缩试验来实现的。岩石压缩试验就是对一定形状(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（图 1-1）。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）典型的轴向应力-应变曲线

岩石典型的轴向应力-应变曲线大致可划分为以下 5 个阶段，见图 1-1 所示。

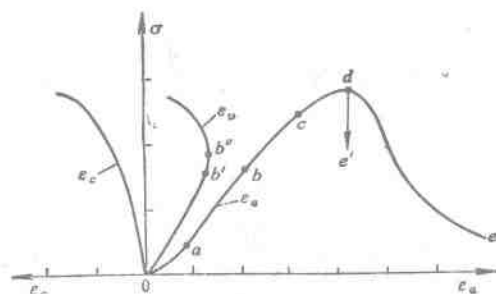


图 1-1 岩石典型的轴向应力-应变曲线
 σ —应力； ϵ_a —轴向应变； ϵ_e —横向应变； ϵ_v —体积应变

（1）0— a 段。岩石的应力-轴向应变曲线（ σ - ϵ_a ）微呈上凹形。相应于 a 点的应力值称压密极限强度。

（2） a — b 段。岩石的应力-轴向应变曲线近于直线。相应于 b 点的应力值称为比例极限或弹性极限强度。

（3） b — c 段。曲线由 b 点开始偏离直线，尤其是应力-体积应变曲线，其斜率随应力的增加而变陡直至反曲，岩石的体积由压缩转变为膨胀，相应于 c 点的应力值称为屈服极限强度。

（4） c — d 段。岩石的应力-轴向应变曲线斜率迅速减小，岩石体积膨胀加速，变形随应力迅速增加。到 d 点，应力达到最大值。相应于 d 点的应力值称为峰值强度或单轴极限抗压强度。

（5） d 点后阶段。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 $0abcde$ 。 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力，而是保持较小的数值，称之为残余强度。

由上表明，对岩石应力-应变曲线各阶段的划分，可获得 5 个特征应力值，即：压密极限强度，比例极限，屈服极限，峰值强度和残余强度。在此还需指出：由于岩石的成分、结构不同，其应力-应变曲线不尽相同，并非所有岩石都可明显划分出 5 个变形阶段。为了便于问题研究的深入，探明其变形机理，有必要对岩石轴向应力-应变曲线（ σ - ϵ_a ）进行分类。

（二）变形曲线的基本形状、变形指标及变形机理

1. 峰值前阶段

（1）变形曲线基本形状和变形指标。根据大量岩石变形试验资料表明，岩石峰值前

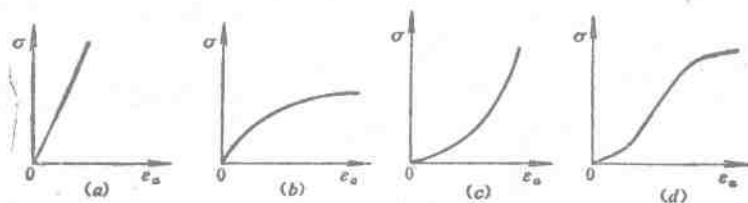


图 1-2 岩石峰值前轴向应力-应变曲线的基本类型
 (a)直线型；(b)下凹型；(c)上凹型；(d)S型