

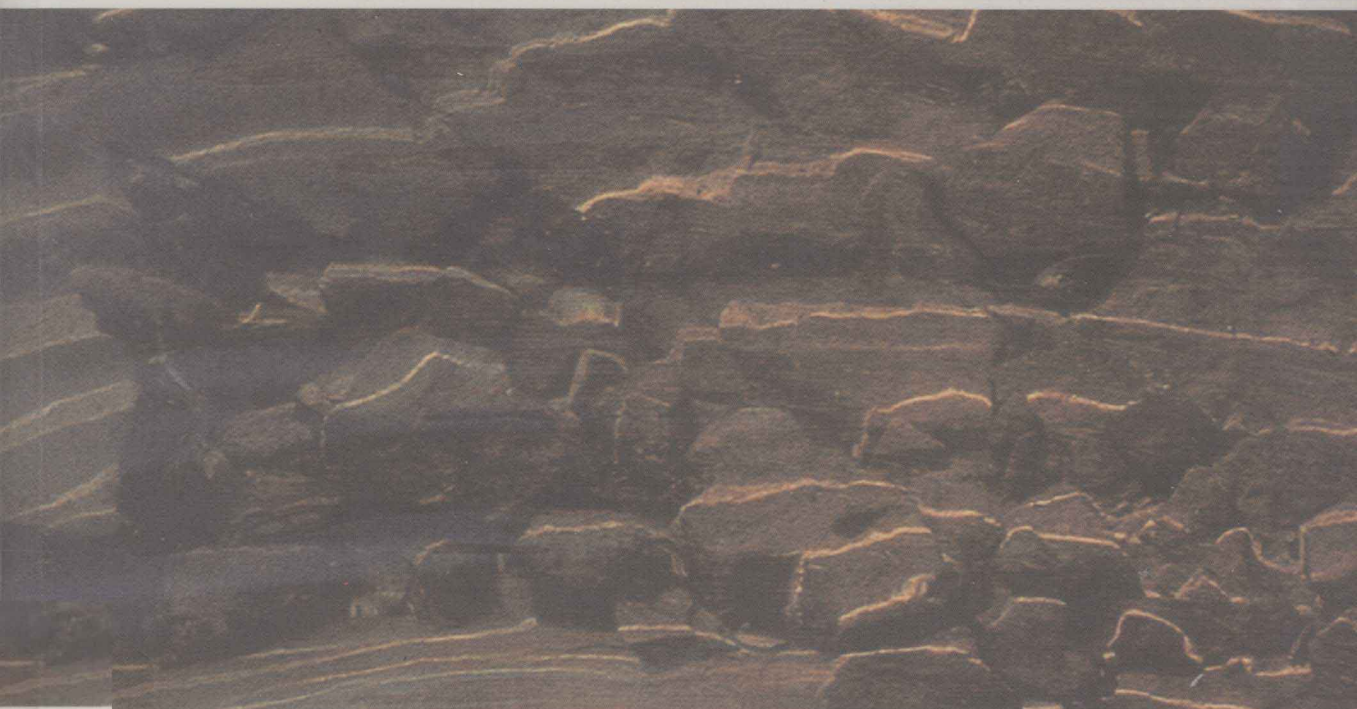


高等学校“十一五”规划教材

国家自然科学基金重大项目(50490270)资助

岩石力学简明教程

贺永年 韩立军 王衍森 编著



中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

岩石力学是岩土工程、采矿工程、地质工程等众多专业的基础课。本书是普通高等学校“十一五”规划教材,是岩土工程领域中的通用教材。

本书根据“以岩性为基础、以原岩应力为源、以次生应力场力学现象和参量为重点、以合理维护为目标”原则编写而成,突出地下工程特点,并反映了国内外最新理论成果,叙述简明扼要。全书主要包括:绪论,第一编(岩石结构及其物理性质),第二编(岩块变形与强度、岩石的流变性质、岩石弱面变形与强度、岩体变形与强度),第三编(原岩应力基础知识),第四编(地下工程稳定分析的解析方法、实测和模拟方法、岩石力学数值计算方法、地下工程维护)。

本书不仅可作为本科生教材使用,也可作为研究生的教材,还可作为高等院校相关专业的教师、科研院所和工程部门的科研人员及工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学简明教程 / 贺永年,韩立军,王衍森编著. —徐州:
中国矿业大学出版社,2010.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0731 - 9

I. ①岩… II. ①贺… ②韩… ③王… III. ①岩石力学—
高等学校—教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 153543 号

书 名 岩石力学简明教程
编 著 贺永年 韩立军 王衍森
责任编辑 杨 洋 潘俊成
责任校对 张海平
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 365 千字
版次印次 2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本教材延续了1986年《岩石力学简明教程》(李世平编)、1997年《岩石力学简明教程》(李世平、吴振业、贺永年、李晓编)的内容和格式,为中国矿业大学“岩石力学”课程的长期教学用书。原教材曾获原煤炭工业部教材成果二等奖,在学生中反响较好,且在岩石力学界,尤其是矿山系统中得到良好的评价。本教材是作者总结了近十余年岩石力学的发展,并结合自身在岩石力学领域中科学研究成果和教学经历的基础上编写完成的。

本教材主要内容包括绪论、第一编(岩石组构及其物理性质)、第二编(岩块变形与强度、岩石的流变性质、岩石弱面变形与强度、岩体变形与强度)、第三编(原岩应力基础知识)、第四编(地下工程稳定分析的解析方法、实测和模拟方法、岩石力学数值计算方法、地下工程维护),并专门附设各章的思考题。

本教材仍然沿袭了原教材的特点:①理论与实践并重。②概念与“过程”兼顾,偏重概念;贯彻“概念和原理是创新的基础,‘过程’作为掌握解决问题手段”的思想。③突出岩石地下工程特点。本教材不追求全面,与其他课程重复的内容,在教材中尽量避免或简化。本教材不涉及岩石基础工程、边坡工程等内容。

本教材增加了有关岩石物理性质测试及其新成果的部分,并增加了与施工影响密切相关的内容,以及近期发展的数值方法,还特别介绍了近期成功采用的岩石工程支护和加固技术等。本教材删减或修改了原教材中比较过时的,或者过于专业的内容。

作者感谢国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”(50490270)的资助,教材编写中也贯穿了作者在项目研究中的思想。

本教材难免有不当之处,恳请读者对书中的问题提出批评指正。

编 者

2010年1月

目 次

绪论	1
----	---

第一编 岩石组构及其物理性质

第一章 岩石组构及其物理性质	5
第一节 岩石的生成及其组构*	5
第二节 岩石中的水及其渗流	7
第三节 岩石中的声波*	14
思考题	17
参考文献	17

第二编 岩石力学性质

第二章 岩块变形与强度	21
第一节 岩块变形试验与方法	21
第二节 岩块单轴压缩全应力应变曲线	24
第三节 岩块三轴压缩变形性质	28
第四节 岩块变形特征的综合分析*	31
第五节 岩块强度特性与强度试验*	36
第六节 岩石强度准则及其应用	42
思考题	50
参考文献	51
第三章 岩石的流变性质	53
第一节 流变问题的基本内容	53
第二节 流变模型理论	55
第三节 经验方程方法	67
第四节 长时强度	67
思考题	69
参考文献	69

第四章 岩石弱面变形与强度	71
第一节 弱面的力学处理	71
第二节 弱面的变形性质	73
第三节 弱面强度	78
思考题	83
参考文献	83
第五章 岩体变形与强度	84
第一节 岩体力学试验	84
第二节 岩体变形与本构方程	86
第三节 岩体强度	88
第四节 损伤力学与岩石分形*	92
思考题	97
参考文献	98

第三编 原岩应力

第六章 原岩应力基础知识	103
第一节 原岩应力及其成因	103
第二节 原岩应力场的一般规律	106
第三节 原岩应力测量方法基本知识	109
第四节 应力解除法	110
第五节 水压致裂法	114
第六节 声发射法*	116
第七节 反分析方法*	117
思考题	121
参考文献	121

第四编 地下工程稳定分析与维护

第七章 地下工程稳定分析的解析方法	125
第一节 概述	125
第二节 围岩弹性应力状态解析	126
第三节 围岩弹塑性应力状态解析	136
第四节 峰后区围岩稳定分析方法	142
第五节 围岩与支护的共同作用原理	143

第六节 古典地压学说	145
第七节 岩爆、岩震、煤与瓦斯突出	155
思考题	157
参考文献	157
第八章 实测和模拟方法	159
第一节 实测方法	159
第二节 模拟方法	167
思考题	169
参考文献	170
第九章 岩石力学数值计算方法	171
第一节 概述	171
第二节 有限单元法	172
第三节 离散单元法	176
第四节 流形元法*	183
第五节 扩展有限元法*	188
思考题	190
参考文献	191
第十章 地下工程维护	193
第一节 地下工程维护原则	193
第二节 锚喷支护	196
第三节 注浆加固围岩	206
第四节 普通支护	208
第五节 可缩性支护	211
第六节 岩体工程分类与工程类比法	215
第七节 软岩巷道支护与新奥法	218
第八节 深部巷道维护	225
思考题	229
参考文献	229

绪 论

一、概述

(一) 岩石力学定义和研究内容

人类触角在伸向宇宙空间的同时,也在向地表以下深处探索。矿井工程,以及许多隧道工程、水利水电工程、军事和人防工程,都需要在地下数百米,甚至超千米的地层中建设。目前最深的矿井(南非金矿)已经达 4 000 多米,煤矿也已经深达 1 500 m 以上。随着人类对地下资源开发强度的加剧,以及大规模地下空间的利用,给从事地下工程的工程技术人员带来了严峻的考验,同时也促进了岩石力学的发展。

岩石力学的定义有许多,本教材仍推荐美国地质学会岩石力学委员会的定义:“岩石力学是研究岩石力学性状(behaviour)的一门理论科学,同时也是应用科学;它是力学的一个分支,研究岩石对于各种物理环境的力场所产生的效应。”定义明确了岩石力学的基本性质和研究内容,说明岩石力学研究的岩石具有自身独特力学特征,研究的内容包括其基本性状和在各种工程和自然物理环境下的力场效应。理论与应用都不能偏颇。

因此,岩石力学的研究内容,除岩石力学性状外,还有岩层开挖爆破或机械破岩、地面或地下岩石工程稳定(stability)、地下水 and 气(瓦斯或煤层气)的渗流(permeability)、地下高温环境下的岩石力学响应、地壳运动和地震(earthquake)等地球物理内容,以及边坡工程(slope engineering)、泥石流(debris flow)等地质灾害方面的问题。

(二) 岩石力学发展史

早期的岩石力学研究只是零星的,多借用土力学的成果。第一部以《岩石力学》命名出版的专著为 1934 年苏联秦巴列维奇(П. М. Цимбаревич)的《Механика горных пород》。20 世纪 50 年代后期,岩石力学形成独立发展的趋势。1957 年,法国人塔罗勃(J. Talober)出版了西方版最早的岩石力学专著《La mecanique des roches》。1969 年,著名的岩石力学专家耶格(J. C. Jaeger)和库克(N. G. W. Cook)合作撰写的《Fundamentals of Rock Mechanics》^[1]问世,成为近代一本权威的岩石力学专著。

自 20 世纪 50 年代以后,随着世界采矿工程和土木水利工程的发展,大型水库、跨海隧道及军事工程的兴建,岩石力学无论是在理论或实验研究方面,还是在工程应用方面都取得了长足的进展。为适应岩石力学发展及工程应用,1952 年国际岩石力学学会(ISRM)成立,相继成立的还有世界采矿大会的国际岩石力学局(IBRM),并定期召开国际大会。半个多世纪以来,岩石力学方面的研究获得了丰硕的成果,包括刚性试验机 and 伺服控制试验机的应用,岩石压缩全应力应变曲线的获得,节理特性及其对岩体性质影响的研究,节理单元处理方法的形成,用于原岩应力测量的各种应力解除法和水压致裂法及相应深到地下数千米的比较完整的原岩应力的获得,弹塑性理论对巷道稳定问题的解释及流变学研究的进展,新奥法原理在软岩隧道施工中的成功应用,以及损伤力学、缺陷体力学和块体力学等理论方法

的出现,有限元、边界元、离散元等数值计算方法在岩石力学中的广泛应用等。进而形成了声、电、光、磁(雷达)、热、射线(CT)等实验手段百花齐放的新局面。值得注意的是,我国学者近年来在岩石力学中采用诸如分形等现代非线性理论方法的努力,受到世界各国学者的瞩目,逐渐成为解决岩石力学复杂问题的有效手段。

最近四五十年,岩石力学一直是国内外学者研究的热门学科。但是,岩石力学毕竟还是一门发展中的学科,并且研究对象很复杂,因此地下岩石工程还存在着大量工程技术人员难以解决的疑难。当前,一方面面临“入地也不易”的问题,另一方面又具有“21 世纪的土木工程是地下工程的世纪”的背景,可见发展岩石力学既是一项紧迫而繁重的任务,又是一份具有广阔前景的工作。

二、编写思想

本教材得到国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”(50490270)的资助,教材内容贯穿了作者通过项目研究所获得的成果。

本教材将延续以前版本的《岩石力学简明教程》的编写思想和框架,努力使之适应时代发展的需要。笔者根据几十年的教学经验和科学研究实践,向学生传授一些正确的概念,尽量多地传达一些比较现代的基本知识内容,新的方法和成果。本教材贯彻以下原则:

① 理论与实践并重。既重视基本理论分析,又重视工程实践应用;既重视试验结果,又重视现代试验方法。在处理岩石力学问题时,采用综合研究方法,主张将理论分析、数值计算、实测模拟的实验以及统计方法相结合。

② 概念与推导兼顾,但偏重概念。概念和原理是创新的基础,推导是解决问题的一种手段。因此,教材以“掌握概念、清晰原理,得以举一反三而应用自如,介绍理论推导以学会解决问题的方法”为目标。

③ 突出重点。本教材不追求全面,重点是针对岩石力学性质的特点,介绍地下岩石工程的一系列独特的处理方法。与一般材料及土力学相同的内容,在教程中尽量避免或简化。本教材不涉及岩石基础工程和边坡工程等内容。

三、课程安排与学习方法

考虑学生课时紧,本教材内容按学时多(48 学时)和学时少(32 学时)两种情况安排课时(表 1),其中实验课时建议均不少于 6 课时。学时少建议少讲或不讲的内容可以包括岩石流变、原岩应力实测、一般巷道弹性应力状态分析等,并相应地避免与其他课程内容的重复。另外,一部分内容(带“*”的章节)建议由学生自学或根据课时由教师选择讲解。

表 1 《岩石力学简明教程》建议学时分配计划

章 节	题目、内容	讲授学时数 学时多/学时少	实 验	总学时数 学时多/学时少
绪论、第一编(第一章)	绪论、岩石结构及其物理性质	4/2		4/2
第二编(第二章至第五章)	岩石力学性质	18/14	4	22/18
第三编(第六章)	原岩应力	4/2		4/2
第四编(第七章至第十章)	地下工程稳定分析与维护	16/8	2	18/10
总 计		42/26	6/6	48/32

注:实验内容在实验课讲授。

第一编

岩石组构及其物理性质

第一章 岩石结构及其物理性质

第一节 岩石的生成及其结构*

岩石是组成地球固体圈的主要成分,是经历了漫长地质史的大自然产物,是天然矿物晶体以及其他物质(例如有机质等)的集合体。

地壳是地球固体圈的最外表部分(图 1-1)。地壳的平均厚度约 35 km,其上部多为沉积岩,下部是花岗岩和玄武岩,在地幔上部有一层较厚的缓慢黏性流动的软弱带,地幔中的超基性岩浆会沿地壳的裂缝或断层深入地壳^[1],形成变质岩等复杂地质结构。再往深部就是地幔结构,这个界限约在地面以下 100 km^[2]。岩石工程所涉及的深部岩石一般不超过数千米,仅是地壳的最上层部分。

一、岩石的种类和一般特性^[3]

根据岩石的生成原因,岩石可以分为火成岩、沉积岩、变质岩。

火成岩是地壳深处的岩浆在地下或喷出地表后结晶、固化而形成的岩石;沉积岩是地表物质,或者岩石风化或溶解后的产物,经过搬运、沉积,并在不同固结作用下形成的岩石;变质岩是原有的岩石受到高温或高压作用,重新结晶或结合形成的新矿物结合体。不同种类的岩石具有明显不同的特性。

(一) 火成岩

火成岩也称岩浆岩。根据火成岩的生成条件不同,火成岩还可以分为在地下深处或浅层冷凝的侵入岩(花岗岩、辉长岩、闪长岩等)与因火山喷发到地表后冷凝的喷出岩(凝灰岩、安山岩、玄武岩等)。深层侵入岩往往是组成矿物颗粒粗大的岩石,而浅层的侵入岩则组织结构比较复杂,多数由细粒矿物构成,但视其生成情况不同,矿物颗粒的结晶大小、结晶程度、松密状况也有较大的差异。

火成岩一般被视为均质、各向同性体(喷出岩有较明显的流纹构造和冷凝收缩裂隙),物理力学指标相对较高。通常情况下,深层岩—浅层岩—喷出岩的强度和抗风化性能呈由高到低的顺序排列。但是,当火成岩再次受到侵入时,就会引起结构复杂化。侵入岩浆与周围岩石间形成含有收缩裂隙的岩脉,成为重要的弱结构。

(二) 沉积岩

沉积岩是地层表面部分布最广的一种岩石,包括机械沉积(砾岩、砂岩、黏土岩等)与化

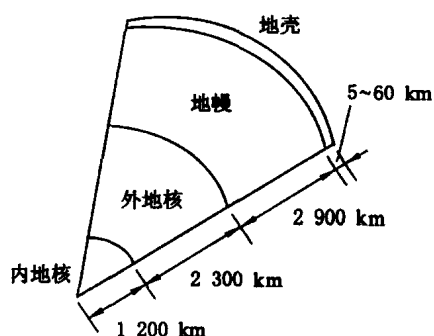


图 1-1 地壳构成示意图

学沉积(石灰岩、灰岩等)两种。机械沉积的组分主要包括颗粒成分和胶结成分。胶结成分有硅(砂)质、铁质、钙质、泥质等,硅质和铁质胶结的岩石相对较坚固,钙质胶结岩石容易溶解,泥质胶结岩石遇水会软化。细颗粒组成的沉积岩性质与颗粒的矿物成分关系密切,以高岭石、蒙脱石、伊利石最为典型,这类岩石孔隙率小、渗透性差、遇水极易泥化,且有严重的体积膨胀现象。化学沉积岩有不同的溶解性,因此其渗透裂隙发育,甚至有岩溶现象。

沉积岩为各种层理结构,致密程度相对较低,力学性能一般比较差,各层的构成和性能差异可以很大,具有各向异性的特点。因为煤矿地层属于沉积岩相,所以其巷道的维护往往比较困难。

(三) 变质岩

变质岩的岩性受母岩的性质以及变质程度的影响,因此其成分、结构和性能的差异比较大。沉积岩经过变质后(如石灰岩变质成为大理岩),其力学性能会改善,且一般变质程度越高越有利于控制其变形。变质岩一般具有结晶和定向排列的特点,使岩石具有强烈的各向异性。比如片理结构的岩石就容易导致岩石沿片理结构破裂,若夹有黑云母等易风化矿物时,更容易成为不稳定结构。

二、岩石循环圈的概念^[2]

岩石和土都是构成地球的基本物质。虽然在漫长的地质年代中,因为承受各种大自然的作用而发生结构或者形态上的变迁,但是它们仍然是构成地球的基本物质。因此,无论这种或者那种岩石,都是岩石循环圈(rock cycle)过程中的产物(图 1-2)。因此,无论哪种岩石,其成分、性质等都有一定的联系。

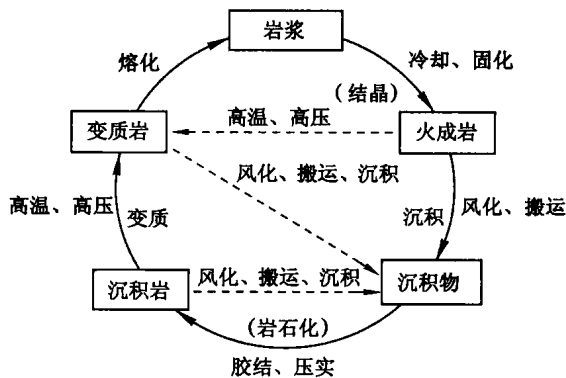


图 1-2 岩石循环圈

三、岩石的组构^[4~6]

岩石组构(fabric),通常指其组织(texture)与构造(structure)。

岩石的组构包括各种规模的微观和宏观组构单元。在较大范围内,岩石是被节理、断层所切割的组合物;在较小范围内,岩石是多种矿物晶体或其与胶结物等物质构成的组合物。因此,岩石力学的研究内容包含了岩石基本单元岩块(rock element)和节理(joint)等特性在内的大范围岩体(rock mass)两个方面内容,疏忽任何一方都不恰当,特别是忽视岩体的结构影响,就很难真正解决岩石工程实际问题。

岩石是岩块和岩体的统称,除在特殊场合下需要专门区别外,一般根据具体的研究对象是可以明确的。

对于工程而言,岩石既是一种工程材料,又是一种地质体。岩石的组构有以下特性:

① 从宏观到微观,各种规模的岩石组构单元都充满了各式缺陷,从断层(fault)、层面(bedding plane)、节理(joint)结构,到矿物晶体颗粒与非晶体集合与强度各异的胶结物、孔隙(pore)、裂隙(crack)等组织,都可能成为影响岩石变形和破坏的主要因素。

② 节理是岩石组构的一个最独有的特征。岩石可以说是一种含弱面(plane of weakness)的天然材料。节理大小不等,大的可以延展数米或十几米。由于有这些节理存在,岩体的强度通常要小于岩块。节理通常成组出现,有一组是主节理,平行排列,另外还有交叉节理,这时的岩体就会具有各向异性的特点。因此,大的节理(包括断层等结构)都要经过地质探查,单独考虑其对工程的影响。

③ 微小的节理裂隙肉眼难辨。因为岩石是多种矿物晶体或非晶体的集合体,或被胶结在一起,因此岩石不仅会有许多原生的节理裂隙,而且在受力破坏前,即使是结晶较好的晶体边界,其内部很容易产生新的开裂。因此,岩石表现了声发射,以及明显的脆性和强度上的尺度效应等特点。目前对细小的节理裂隙还不能逐一考虑,其影响通常由试验结果反映在统一的指标中。

④ 岩石的空隙(节理、裂隙、孔隙)是贮存水、气体(如瓦斯)的地方,当岩石受力时,无论是处于静止状态还是流动状态,这些流体都会和岩石的一个组成成分一样,与岩石产生相互影响。还有试验证明,当岩石破裂时,会改变瓦斯等气体的吸附和释放状态。

⑤ 岩石组构的不同影响程度会使岩性在很大范围内变化,岩石的非均质、非连续、非线性、各向异性等特点,在不同条件下的表现会有很大的差异。当工程范围内节理不发育或者节理被约束而影响不大时,岩体可以作为相对完整的连续体考虑;当节理极端发育而无法单独计及每个节理时,就要将岩体碎块作为“松散体”考虑。因此,岩石的组构也是岩石分类的重要依据。对于岩石的属性,应该具体问题具体分析,笼统地、过分地强调某一个极端都不会获得恰当的结果。

第二节 岩石中的水及其渗流

在岩石力学深入发展的同时,更深层次的岩石物理性质也被更多地揭示。同时,岩石物理性质的广泛揭示又促进了岩石力学性质和工程问题的研究。目前的岩石物理性质已经远不止于密度、含水量、孔隙率等岩石组成方面的内容,还包括了声、电、热、磁、辐射等跨学科及其交叉的岩石性质内容,并已经成为岩石力学研究领域中的重要部分。岩石的一般物理性质可参阅相关的土力学教材,本书主要介绍岩石中的水和声波等问题。

一、概述

水对地下岩石和岩石工程的影响主要是水对岩石的物理化学影响,以及水对岩石的力学作用。水在岩石中使岩石膨胀,并使岩石的力学性质恶化,甚至导致岩石承载能力完全丧失,所以它会给地下岩石工程稳定带来困难。地下水还会形成对岩石的压力作用,使岩石破坏而造成岩石工程的灾难。1959年法国玛尔帕塞水坝因为蓄水导致岩石裂隙张裂而形成溃坝事故。2010年国内王家岭矿因附近老矿水突入掘进巷道而造成淹井事故也是一个典型的例子。因此,地下工程技术人员必须充分认识到水危害的严重性。

二、水对岩石物理性质的影响

(一) 岩石软化和崩解

岩石软化主要指岩石受潮或吸水后引起的力学强度降低的特性。岩石受潮强度降低的主要原因是水与岩石中的黏土矿物成分形成新的水溶物或吸附水层,改变了矿物的原有结构,削弱了矿物结构间的联系^[7]而导致其强度降低,或者从岩石中剥裂。前者称为岩石的软化,后者称为岩石的崩解。这些岩石矿物的共同特点是具有不同程度的亲水性。

黏土矿物的遇水软化性根据吸水程度不同而不同,有的最终会泥化成软土状。

软化影响程度采用软化系数(R_w)表示:

$$R_w = \frac{S_{cw}}{S_c} \quad (1-1)$$

式中 S_{cw} ——饱和岩石的单轴抗压强度,MPa;

S_c ——干燥岩石单轴抗压强度,MPa。

研究表明^[8],一种岩石崩解是岩石中局部富集的黏土矿物,由于吸水形成电离层而破坏了原有矿物间的连接并膨胀,从而造成崩解;另一种崩解与岩石内微裂隙吸水形成的水楔作用有关。崩解总是和软化联系在一起,崩解性用岩石的耐崩解性指标表示,参见文献[9]。

(二) 岩石的遇水膨胀性

岩石的遇水膨胀性以泥岩最为典型。泥岩含有大量细颗粒(粒径小于 0.005 mm)的黏土矿物成分,比表面积大(比表面积为单位体积或单位质量颗粒的表面积)。通常情况下,比表面积越大其亲水性越高。例如 1 cm³ 颗粒的比表面积为 6 cm⁻¹,如果是 1 μm³ (黏性土中高岭石矿物粒径小于 2 μm)颗粒,则其比表面积达到 6×10⁴ cm⁻¹。而且黏性颗粒往往是扁平颗粒,比表面积更大。例如,泥岩中的蒙脱石、伊利石、高岭石都有膨胀性,其中以蒙脱石为最强。蒙脱石属于鳞片状结构的细颗粒(比表面积达 730 m²/g 以上),吸水后在片状结构间形成水膜而膨胀。同时,当其风干脱水后,蒙脱石再遇湿气或水就会有更大的膨胀性。试验表明,含蒙脱石的岩石膨胀量视其含量不同可达百分之几到百分之二百。

泥岩遇水后的膨胀性可以造成较大的膨胀压力。若对膨胀变形加以限制,膨胀压力可以达到 0.01~2 MPa。岩石膨胀率和膨胀力测定方法与土的同种试验类似。图 1-3 为某泥岩遇水膨胀及其强度软化的试验结果^[10]。

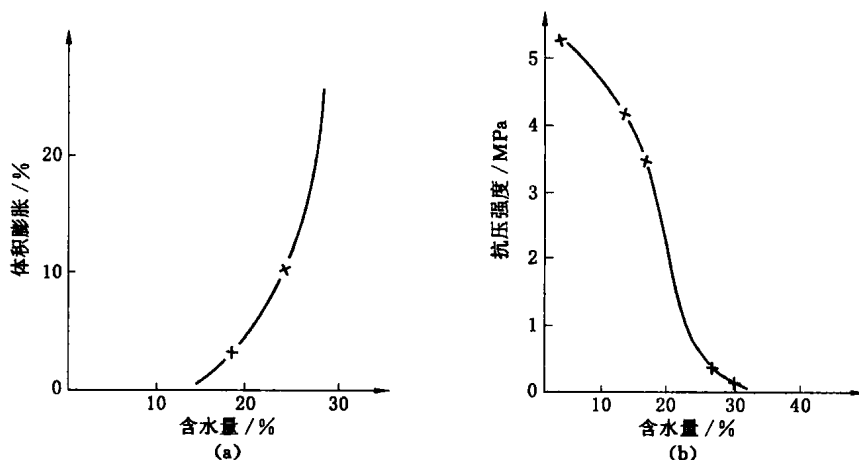


图 1-3 某泥岩含水 and 强度、膨胀率关系

(a) 含水量与膨胀率关系; (b) 含水量与单轴抗压强度关系

三、水在岩石中的渗流

有的岩层中存在大量空隙、裂隙,地下水可以在这些岩层中渗流,它们是地层中的含水层或渗流层。有的岩层渗透性很差,没有或者几乎没有渗水的通道,从而形成地下水的隔水层。

渗流是地下水的一种重要运动形式,而影响地下水渗流的一个关键因素是岩土介质的渗透性。目前,围绕岩石渗透问题的岩体水力学研究,正在成为岩石力学的一个重要方向。

(一) 渗流基本知识

1. 流体运动及流体的黏性

流体在压差(剪应力)作用下就会流动。流体运动的快慢和流体自身的黏性阻力有关。在一定的压差条件下,阻力越小,流动越快。

牛顿平板流体试验表明(图 1-4),剪应力和流体流动速度成正比关系。取厚度为 db 的矩形流体微元 $u \times db$ 分析(u 为流速),在上层黏性力 τ 带动下,其上层发生 du 变形,根据变形方程可知:

$$\tau = \eta \frac{du}{db} \quad (1-2)$$

式中 η ——流体的动力黏度。

当该比例系数为常数时,这种流体称为牛顿流体。可以把流体的运动看成是一种连续变形的过程。如果 db 厚上层流动增量 du 经过 dt 时间的位移是 $u = du dt$,这一部分用变形表示即为:

$$\gamma = \frac{u}{db} = \frac{du dt}{db}$$

代入式(1-2)有:

$$\tau = \eta \frac{\gamma}{dt} = \eta \dot{\gamma} \quad (1-3)$$

可见,流体的动力黏度 η 可以表示为剪切力与变形速率的比例系数。动力黏度的单位是泊(poise),用 P 表示($P = g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$)。常用的国际制单位是 $Pa \cdot s$ (帕·秒), $1 P = 0.1 Pa \cdot s$ 。

流体黏度在流体动力学中还采用所谓的运动黏度 ν 来表示:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-4)$$

式中 ρ ——流体密度, g/cm^3 。

可见,运动黏度的量纲为 $L^2 T^{-1}$, 常用单位为斯托克斯(St, $1 St = 1 cm^2 \cdot s^{-1}$)或厘斯(cSt, $1 cSt = 0.01 St$)。

2. 渗流规律

渗流规律是达西(H. Darcy, 1856 年)通过实验获得的(图 1-5),这就是著名的达西定律。

设水流通过某一平行管的两个相距 L 的断面,则单位时间内通过垂直于水流某断面(认为水流不可压缩,故

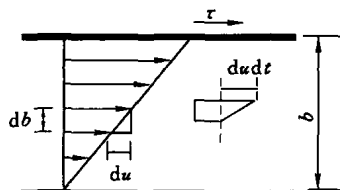


图 1-4 平板间的黏性流体

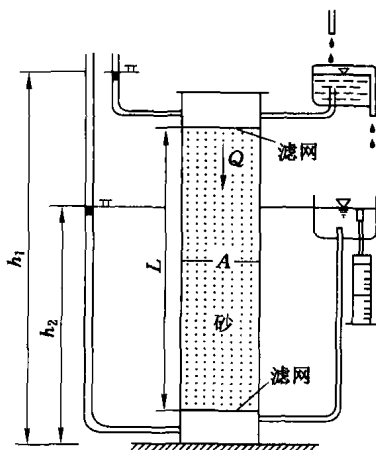


图 1-5 达西渗流试验

可为任意断面)的流量 Q 为:

$$Q = K(h_1 - h_2)/L \quad (1-5)$$

式中 h_1, h_2 ——两测量断面的水力压头, 即 $(h_1 - h_2)$ 表示两个断面间的压头差, m。

L ——水流通过的距离, m;

K ——渗透系数, m/s。

于是 $(h_1 - h_2)/L$ 就表示 L 距离上的水力梯度, 即:

$$J = (h_1 - h_2)/L$$

式(1-5)即为著名的达西定律。当表示为单位面积通过的流量 q 时, 达西定律可写成:

$$q = KJ \quad (1-6)$$

对于三维渗流, 则达西定律表示为:

$$q = -K \text{grad } \varphi \quad (1-7)$$

式中 φ ——水流的势函数。

如果 J 在 x, y, z 的分量分别为 J_x, J_y, J_z , 则用势函数可表示为:

$$J_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad J_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad J_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

于是, 三个方向的流量公式表示为:

$$\begin{cases} q_x = -K \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ q_y = -K \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ q_z = -K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \end{cases} \quad (1-8)$$

达西定律适用于层流情况, 此时的雷诺数一般小于 10。根据试验研究, 一般情况下, 地下水在岩土孔隙或是裂隙介质中的渗流均属于层流^[11], 而岩石破碎后水的流动就会出现不属于层流的情况^[12]。

3. 渗透系数

达西定律中的 K 表示单位水头压力下流体在渗透介质中的通过能力, 称为渗透系数 (或称为水力传导系数)。它反映流体与渗透介质之间的相互影响。因此, 渗透系数的大小受渗流介质的孔隙率、通道大小与形状、平直程度等对流体流动影响, 还受流体自身的黏度、重度等因素的影响。由渗流公式可知, 渗透系数的量纲是 $L \cdot T^{-1}$ 。

如果将流体的黏性等影响因素分别考虑, 则渗透系数 K 可表示为:

$$K = k \frac{\gamma}{\eta} = k \frac{g}{\nu} \quad (1-9)$$

式中 k ——渗透率, 其量纲为 L^2 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

(二) 岩石渗透

1. 孔隙渗透

孔隙是渗流的一种通道。孔隙的体积大小用孔隙率 n 表示, 孔隙率为:

$$n = V_v/V \quad (1-10)$$

式中 V_v ——空隙的体积, m^3 ;

V ——总体积, m^3 。

孔隙的另一种评价指标是孔隙比 e , 表示孔隙体积 V_v 与固体体积 V_s 之比:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{1-n} \tag{1-11}$$

颗粒材料的孔隙率和颗粒形状、粒径以及颗粒的排列形式等因素有关。

部分空隙体积对于渗流没有作用, 它们有的与渗流通道不连通, 有的只是通道的闭端, 流体在这些空隙中实际是不流动的或不影响流动的。对于细小颗粒(如黏性土)间的孔隙, 由于电极效应, 周围还吸附着一层不易流动的黏滞水, 它们也将占有部分孔隙体积。因此实际可渗流的体积要较全部孔隙体积小很多。因此讨论渗透问题时, 要采用有效孔隙率。

达西试验所测定的 q 值是整个断面的平均值。实际通过的孔隙断面比较小, 故通过全部孔隙的平均值 q' 较 q 值更大, 即有:

$$q = nq' \tag{1-12}$$

典型的孔隙介质是土, 完整的岩石也有孔隙渗透。在实际工程中, 孔隙介质的孔隙率往往需要通过实测获得。表 1-1 列出了某些岩土介质的渗透系数。

表 1-1 某些岩土介质的渗透系数

土壤名称	渗透系数 K		土壤名称	渗透系数 K	
	$/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	$/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$		$/\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$	$/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
黏 土	<0.005	$<6 \times 10^{-6}$	粗 砂	20~50	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
粉质黏土	0.005~0.1	$6 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	均质粗砂	60~75	$7 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$
粉 土	0.1~0.5	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	圆 砾	50~100	$1 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
黄 土	0.25~0.5	$3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	卵 石	100~500	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$
粉 砂	0.5~1.0	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	无填充物卵石	500~1 000	$6 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$
细 砂	1.0~5.0	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	稍有裂隙岩石	20~60	$2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$
中 砂	5.0~20.0	$2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	裂隙多的岩石	>60	$>7 \times 10^{-2}$
均质中砂	35~50	$4 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$			

注: 本表资料引自中国建筑工业出版社的《工程地质手册》, 1992 年版。

2. 裂隙渗透

单一等宽光滑裂隙的渗流公式由 Louis 通过两光滑平行板间流体的试验获得。设开距(即裂隙张开度)为 b , 则有:

$$Q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J = \frac{gb^3}{12\nu} J$$

此时, 单一岩石裂隙的渗透系数 K_f 可表示为:

$$K_f = \frac{\gamma b^2}{12\mu} = \frac{gb^2}{12\nu} \tag{1-13}$$

考虑裂隙的不平整性(粗糙度)以及连通状态的影响, 式(1-13)可被修正为:

$$K_f = \frac{\beta gb^2}{12\nu C} \tag{1-14}$$