

岩石力学

特性的时间效应

● 蒋昱州 王瑞红 徐卫亚 朱杰兵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

岩石力学 特性的时间效应

蒋昱州 王瑞红 徐卫亚 朱杰兵 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

岩石力学特性的时间效应一直是岩石力学研究中的重要课题,与岩石工程长期稳定与安全紧密相关。本书系统介绍了岩石蠕变、弹性后效、应力松弛等试验,针对岩石流变力学参数优化搜索的辨识方法、非线性流变力学本构模型、长期强度确定方法、工程长期稳定性分析等方面进行了详细的叙述。全书共分 11 章,主要内容包括:绪论、经典岩石流变力学模型、岩石流变力学参数辨识方法、岩石流变试验设备与试验加载方式、岩石蠕变力学特性试验、岩石力学弹性后效特性试验、岩石应力松弛特性试验、含裂隙岩石蠕变力学特性试验研究、岩石非线性流变本构模型理论研究、岩石长期强度确定方法研究、岩石工程长期稳定性分析。

本书可供从事水利工程、土木工程、矿山工程等研究领域的工程技术人员参考,亦可作为从事岩石力学及其相关专业的科研工作者、高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学特性的时间效应 / 蒋昱州等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5170-5074-2

I. ①岩… II. ①蒋… III. ①岩石力学性质—时间效
应—研究 IV. ①TU452

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第323211号

书 名	岩石力学特性的时间效应 YANSHI LIXUE TEXING DE SHIJIAN XIAOYING
作 者	蒋昱州 王瑞红 徐卫亚 朱杰兵 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.25 印张 267 千字
版 次	2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
定 价	36.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

岩石力学特性的时间效应是岩石力学研究中的重要课题之一，是研究在应力、应变、湿度、温度、辐射等条件下岩石材料与时间因素有关的变形、流动和破坏的规律，也称作岩石的流变特性；它包括岩石的蠕变、松弛、弹性后效等力学现象。近年来，岩石工程的规模越来越大，所面临的岩石力学问题也愈来愈复杂，岩土工程稳定性的时效特性问题日益引人注目，其中在已建成的工程中出现的岩土时间效应问题更为突出，很多岩土工程的变形与失稳破坏并不是立刻就发生的，而是随时间的增长逐渐酝酿、发展并最终完成的。当前所规划建设的许多大型岩土工程项目的服务使用年限一般都超过几十年的时间，故既需要保证工程项目在施工建设期间的安全可靠，同时还需要对其在长期使用与运营期间的安全稳定进行评估；工程项目从开工建设到完成服务年限期间，其关键部位的变形是否会随时间的增长，是否在允许范围内，是否会逐渐产生破裂、失稳等，这一系列的问题均是岩石力学时效特性研究的对象与任务。因此，在岩石工程中充分考虑流变现象，明确岩石力学特性的时间效应与破裂机理，建立能够描述岩石流变力学特性的本构模型，探讨流变力学参数的非定常规律与长期强度的确定方法，无论从经济合理的角度还是从稳定安全的角度来说都是十分必要的。

本书采用岩石全自动三轴流变伺服试验系统，针对砂岩、泥岩、蚀变岩、片麻岩、软硬互层岩等，开展了较为系统的单轴、三轴、剪切流变试验，研究了岩石蠕变、弹性后效、应力松弛特性。分析了不同围压作用下岩石变形随时间的变化规律，研究了不同种类岩石流变过程中的变形特性，探讨了加速流变阶段岩石变形的发展趋势和特征；同时通过对岩石流变破裂断口进行微细观电镜扫描实验，分析了岩石流变破裂形式与机制。将优化算法嵌入到普通最小二乘法中，得到一种能快速准确地逼近精确解，并且不易收敛于局部极小点的算法。基于获得的岩石流变试验结果，采用优化后的算法，对流变模型参数进行辨识，探讨了流变参数与围压、应力水平的非定常性规律。综合分析了不同的岩石长期强度确定方法，并基于岩石稳态流变阶段的流变速率与应力水平的关系，提出了一种应力区间的稳态蠕变速率岩石长期强度

确定方法,该方法便捷直观,适用于稳态流变阶段较为显著岩石来确定其长期强度。提出了一种非线性牛顿体,并结合其他元件组合得到了一个能较好地反映岩石流变的非线性特征的黏弹塑性流变模型,利用试验得到的流变曲线对非线性流变力学本构模型的参数进行辨识。认为岩石加速流变过程中的流变损伤定义为与应力水平和时间有关,提出相应的损伤演化方程,将提出的非线性硬化函数和损伤演化方程引入到 Maxwell 流变模型中去,得到了一个能够较好地反映岩石非线性流变的三个阶段损伤流变模型。假定岩石非线性加速流变变形过程中,岩石内部的损伤量服从时间的 Weibull 分布,利用统计损伤来描述加速流变阶段的非线性流变变形,在 Burgers 流变模型中加入统计损伤,得到相应的损伤流变模型。利用岩石流变力学试验数据作为神经网络系统的输入和输出的分析样本,通过神经网络内部一个高度非线性的动态模拟系统,对学习样本的自学习来掌握岩石流变力学特性,从而建立了神经网络岩石流变本构模型。基于第一级应力水平所对应的蠕变参数,根据相对卸荷量的变化引入损伤来描述其他各级蠕变参数的弱化规律,得到了通过一组参数与基于相对卸荷量的损伤演化方程来统一描述卸荷蠕变特性的参数取值方法。基于三维 Burgers 蠕变本构模型,引入相对卸荷量及蠕变时间相关的损伤演化方程,得到可以统一反映分级加载条件下蠕变特性,且能够描述加速蠕变变形阶段非线性特征的岩石卸荷非线性损伤蠕变模型。依据岩石蠕变变形不同阶段的力学特征,划分出了岩石由变形发展至破裂需经历的不同黏弹塑性状态,并给出了相应状态的蠕变力学特性;假定岩石在三轴压缩试验条件下,发生延性剪切破坏,推导了应变空间 Drucker-Prager 准则的临界状态转化的最大剪应变判别式;基于 Perzyna 黏塑理论,考虑后继屈服硬化作用,引入统计损伤因子,构建了能描述非线性加速蠕变特性的黏弹塑性损伤演化模型。将提出的岩石非线性黏弹塑性流变本构与经典的 Mohr-Coulomb 模型进行相应的串联,并用基于 Mohr-Coulomb 准则确定的岩石长期强度作为开始进入非线性加速流变阶段的阈值,构建出一个既能反映岩石弹塑性变形特性又能很好地描述岩石流变阶段变形的复合非线性黏弹塑性流变模型。

依托小湾水电站坝基与向家坝地下厂房长期稳定性工程实际,开展了相关研究工作。基于三维非线性数值分析方法,采用黏弹塑性流变本构模型,模拟了小湾水电站长期运营条件下的流变力学行为,并与弹塑性计算条件下进行了对比分析。结果表明:小湾水电站拱坝及坝肩岩体长期流变变形明显大于弹塑性变形;考虑岩石流变作用使得应力场随时间增长发生重分布,局部应力集中现象有所缓解;坝肩岩体受力初期表现出较为显著的流变特性,流变一定时间后,流变速率变得恒定平稳,流变变形趋于稳定。模拟了向家坝水电站地下洞室围岩的流变力学行为,根据主厂房顶拱位移变化率规律确

定出了开挖洞室二次支护的时间；对比分析了瞬时弹塑性条件下与考虑流变特性条件下洞室开挖后，围岩的位移变形，应力场及塑性区的分布；数值模拟结果表明，由于着软弱夹层的影响，洞室围岩发生较大的变形，特别是在开挖洞室与软弱夹层的交汇处围岩随着时间的长期变形量会更大，这对洞室的稳定性有着一定的影响；对于水电站地下洞室的长期稳定性分析，充分考虑岩体流变效应是非常重要和必要的。

本书所包含的研究成果，得到了国家自然科学基金项目（No. 51579017, No. 51479102, No. 51109014）、长江科学院基本科研业务费项目（CKSF2016008/YT）、长江科学院院级创新团队及培育期创新团队建设项目（CKSF2017066/YT）、防灾减灾湖北省重点实验室（三峡大学）开放基金项目（2016KJZ01）的资助。在撰写过程中得到了长江科学院、河海大学、三峡大学等有关单位和个人的支持和帮助，在此表示衷心地感谢。

由于本书完成时间紧迫，作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者与专家批评指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石工程中的流变现象	1
1.2 岩石流变力学的主要范畴	2
1.3 岩石流变力学的产生与发展	3
第 2 章 经典岩石流变力学模型	6
2.1 广义开尔文流变模型	6
2.2 伯格斯流变模型	7
2.3 西原正夫流变模型	9
第 3 章 岩石流变力学参数辨识方法	12
3.1 正反分析辨识法	12
3.2 最小二乘法原理	13
3.3 优化搜索算法的流变参数识别	13
3.4 Quasi-Newton 优化算法搜索的最小二乘法	15
3.5 粒子群优化算法搜索的最小二乘法	16
3.6 混沌直接搜索粒子群优化算法	16
第 4 章 岩石流变试验设备与试验加载方式	19
4.1 岩石力学特性试验设备	19
4.2 岩石流变试验加载方式与 Boltzmann 叠加原理	21
第 5 章 岩石蠕变力学特性试验	24
5.1 单轴压缩蠕变试验	24
5.2 单轴流变力学参数辨识	26
5.3 三轴加、卸载蠕变试验	29
5.4 岩石剪切流变力学试验研究	49
第 6 章 岩石力学弹性后效特性试验	62
6.1 引言	62
6.2 试验设备与方法	62
6.3 试验结果分析	64
6.4 模型研究及参数辨识	65

6.5 小结	69
第7章 岩石应力松弛特性试验	70
7.1 引言	70
7.2 岩石应力松弛试验	70
7.3 松弛与蠕变等价性研究	72
7.4 松弛与蠕变耦合作用	75
第8章 含裂隙岩石蠕变力学特性试验研究	76
8.1 非贯通裂纹岩石压缩试验及其非线性回归分析	76
8.2 含断续软弱夹层岩石流变力学特性研究	85
第9章 岩石非线性流变本构模型理论研究	97
9.1 岩石非线性黏弹塑性流变模型研究	97
9.2 岩石非线性损伤流变模型研究	102
9.3 基于统计损伤的岩石流变模型	105
9.4 神经网络岩石流变模型研究	108
9.5 岩石卸荷非线性损伤蠕变模型研究	111
9.6 基于西原模型改进的非线性卸荷蠕变模型	116
9.7 基于应变屈服临界的岩石黏弹塑性蠕变模型研究	125
9.8 基于莫尔-库仑长期强度准则的岩石流变模型研究	132
第10章 岩石长期强度确定方法研究	138
10.1 引言	138
10.2 应力-应变等时曲线法	138
10.3 过渡蠕变法	140
10.4 第一拐点法	141
10.5 体积扩容法	141
10.6 应力松弛法	142
10.7 应力区间的稳态蠕变速率法	143
第11章 岩石工程长期稳定性分析	145
11.1 含蚀变岩高拱坝拱肩槽长期变形分析	145
11.2 水电站大型地下洞室长期稳定性数值分析	158
参考文献	166

第 1 章

绪 论

1.1 岩石工程中的流变现象

目前,我国正处于重要的发展战略机遇期;随着社会经济的高速发展,各类灾害风险日益凸显,严重影响社会的可持续发展及国家目标的实现。《国家综合防灾减灾规划》报告中明确要求强化防灾减灾工作,将防灾减灾作为公共服务领域的重要任务之一;为全面提高国家防灾减灾能力,国家已将防灾减灾的理念从“被动救灾”向“主动防灾”转变,指出需充分发挥科技创新对防灾减灾工作的支撑和引领作用。

岩石流变力学是岩石力学中的重要课题之一,是研究在应力、应变、湿度、温度、辐射等条件下岩石材料与时间因素有关的变形、流动和破坏的规律,也称作岩石的时效特性;它包括岩石的蠕变、松弛、弹性后效等力学现象。近年来,岩石工程的规模越来越大,所面临的岩石力学问题也越来越复杂,岩土工程稳定性的时效特性问题日益引人注目,其中在已建成的工程中出现的岩土时间效应问题更为突出,很多岩土工程的变形与失稳破坏并不是即刻就发生的,而是随时间的增长逐渐酝酿、发展最终完成的。

当前所规划建设的很多大型岩土工程项目的服务使用年限一般都超过几十年的时间,故既需要保证工程项目在施工建设期间的安全可靠,同时还需要对其在长期使用与运营期间的安全稳定进行评估;工程项目从开工建设到完成服务年限期间,其关键部位的变形是否会随时间的增长,是否在允许范围内,是否会逐渐产生破裂、失稳等,这一系列的问题均是岩石流变力学的研究对象与任务。目前越来越多的工程项目事故、现场的监测资料和相关室内岩石力学试验都表明,在长期恒定外荷载作用下,随着时间的推移岩石会发生流变现象;特别是强度较低的软弱岩石或是含有大量节理、裂隙和强风化后的粉泥物质以及软弱夹层破碎带的岩石材料在较高的地应力作用下其表现出来的流变特征更为明显。许多铁路、公路的隧道穿越存在大量软岩的山脉时,即使经过初期的支护加固措施后隧道围岩的变形速率也可以达到 $3\sim 4\text{cm/d}$,围岩的变形过大会严重威胁着隧道施工的安全性。随着水利水电工程的规模越来越大,地下洞室群的规模也逐渐增大,主厂房的宽能够达到几十米,高能够超过上百米。当地下洞室所处位置的地质条件不理想,存在有较大的断层或是软弱夹层等,洞室顶拱和边墙的变形的时间效应将十分显著。当隧道新奥施工法引入到我国初期时,在下坑、吴庄、岭前等工程中投入施工应用后,对建成的工程变形状况进行持续观测,两年后隧道的支护加固的衬砌应力与变形都随着时间的推移而逐渐增加。位于广西红水河上的龙滩水电站在施工开挖期间内,其左岸坝肩高陡边坡的岩体慢慢地发生滑坡倾倒,其中许多部位甚至发生开裂、坍塌,水电站枢纽区边坡的长期变形与安

全稳定性对工程项目的施工及运行有着巨大的影响。三峡工程的五级巨型船闸在开挖后，其边坡与底槽在卸荷后的变形不是即刻就发生完成的，具有较强的时间效应；对边坡的加固支护的一部分钢筋锚索在经过一段时间后被拉断或是失去加固效果；船闸对其表层所建造的钢筋混凝土结构有着较高的要求，尤其是闸门部位附近的精度则要求更为苛刻；工程岩体变形量过大的话，混凝土结构会破坏，闸门滑道变形超过允许范围，闸门就无法正常升降工作。

岩土工程的时间效应现象普遍存在于实际工程中，如图 1.1 所示。例如，高速公路、铁路及大型建筑物的地基沉降变形过程可延续几十年；地下隧道可以在运营使用数十年后发生流变断裂或大变形洞型收敛；在采矿和水电工程中的岩石高边坡由于变形与蠕变，而引起的灾害性滑坡破坏过程可持续数十年时间。目前，在岩石实际工程计算与设计时常采用的本构模型与参数仍然是线弹性和弹塑性的，这对于日趋多样化和复杂化的重大工程来说是不能很好满足要求的；在高应力围岩强度比的地质条件下，地下工程软弱围岩开挖卸荷后的二次支护时间极为重要，如果支护时间过早，围岩卸荷回弹所产生的巨大应变能量无法得到有效释放，支护结构将难以抵抗围压变形能而发生失效破坏，如果支护时间过晚，围岩卸荷回弹变形过大，岩体将产生松动破裂，形成非稳定塑性区，使得围岩丧失自承能力而破坏。



图 1.1 工程实际中的流变现象

因此，在岩石工程中充分考虑时间效应的影响，明确工程岩体的蠕变变形、弹性后效及破裂机理，建立能够描述岩石时效特性的本构模型，探讨蠕变力学参数非定常规律与长期强度的确定方法，分析岩体工程的最佳支护时间与长期稳定性，无论从经济合理的角度还是从安全稳定的角度来说都是十分必要的。

1.2 岩石流变力学的主要范畴

岩石具有流变性质，具体地讲就是岩石矿物组构或者骨架随时间增长而逐渐调整重组，导致其应力、应变状态亦随时间而持续增长变化的现象。影响岩石流变性质的因素可以分为内在因素和外在因素。内在因素是岩石本身材料的性质，例如，岩石组成矿物性

质、孔隙性、含水量以及层理构造。外在因素是岩石所处的环境或试验条件,例如,地应力、温度、湿度、围压、偏应力、加载速率。在实验室岩石流变试验中,温度、湿度和偏应力的变动,也会导致岩石流变变形量的变化。目前所研究的岩石流变力学的性质主要如下。

(1) 蠕变特性。指在恒定长期荷载作用下,岩石总应变随时间增长而逐渐增长的现象。

(2) 应力松弛特性。指在保持恒定应变情况下,岩石应力随着时间增长而逐渐衰减的现象。

(3) 流动特性。指岩石的应变速率是应力的函数,即应变速率随着应力逐渐增长的现象。

(4) 弹性后效和滞后效应(黏滞效应)。加载时继瞬间发生的弹性变形之后,仍有部分后续的黏性变形呈历时增长;此外,在一定的应力水平持续作用下,在卸荷之后,这部分黏性变形虽属可恢复的,但其恢复过程却需要一定的滞后时间。对于加载过程中其变形随时间的逐渐增长称为“滞后效应”;而在卸荷之后,其变形随时间的逐渐恢复,则称为“弹性后效”。二者统称为“黏滞效应”,都归属于流变岩体的黏性特征。

(5) 长期强度。岩石强度随时间而持续有限降低,并逐渐趋于一个稳定收敛的低限定值,这个低限定值则称为岩石的长期强度。

1.3 岩石流变力学的产生与发展

流变学是研究物质的流动和变形的科学。在古代,人们在日常生活、建筑物的构筑、控制河流的流动中,已经获得关于物质的流动和变形的知识。公元前6世纪就流传着希腊哲学家赫拉克里的名言:“一切在流,一切在变。”流变学源于希腊语 rheos (流动之意),由其演化为英语的 Rheology (流变学),流变学一词即由此而来。流变学出现在20世纪20年代。学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土以及金属等工业材料,岩土、石油、矿物等地质材料,以及血液、肌肉骨骼等生物材料的性质的过程中,发现使用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论已不能说明这些材料的复杂特性,于是就产生了流变学的思想。英国物理学家麦克斯韦尔和开尔文很早就认识到材料的变化与时间存在紧密联系的时间效应。

经过长期探索,人们终于得知,材料都具有时间效应,于是出现了流变学,并在20世纪30年代后得到蓬勃发展。1922年Bingham出版了著作《流动和塑性》,并于1929年倡议美国创建流变学会,标志着流变学成为一门独立的学科。1939年,荷兰皇家科学院成立了以伯格教授为首的流变学小组;1940年英国出现了流变学家学会。当时,荷兰的工作处于领先地位,1948年国际流变学会议就是在荷兰举行的。法国、日本、瑞典、澳大利亚、奥地利、捷克斯洛伐克、意大利、比利时等国也先后成立了流变学会。

在地球科学中,人们较早就意识到时间过程这一重要因素。流变学为研究地壳中的地球物理现象提供了物理、数学工具,如冰川期以后的上升、层状岩层的褶皱、造山作用、地震成因以及成矿作用等。对于地球内部流变过程,如岩浆活动、地幔热对流等,现在则

可利用高温、高压岩石流变试验来模拟,从而发展了地球动力学。

岩石流变力学的创立是由材料流变学发展而来的,是材料流变学的一个重要的分支。起初,材料的流变学形成于19世纪30年代,是探讨材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下,材料与时间因素相关的变形、流动和破坏的规律性,即时间效应。之后,岩石力学研究工作者开始探讨岩石流变力学性质的相关问题。在第一届国际岩石力学特性研讨会上就有相关的研究人员探讨了能够较为准确地反映岩石流变力学性质的本构模型。于1979年召开了第四次国际岩石力学研讨会,该会议首次把岩石流变力学特性的相关问题作为讨论的主题,这也使得对岩石流变力学特征的研究掀开了新的一页。我国著名土力学、岩石力学、流变力学和地球动力学家陈宗基先生1954年首创了土流变学,提出了“陈氏固结流变理论”、发明了“陈氏流变仪”等,并于1988年成功研制了800kN高温高压伺服三轴流变仪,为我国岩土流变力学研究的奠基人。陈宗基先生利用岩土流变学的观点解决了一系列国民经济建设中的所遇到的重要问题,涉及的主要工程有:长江三峡、葛洲坝、雅砻江二滩等水利枢纽工程,南京长江大桥、湖北大冶铁矿、辽宁抚顺露天煤矿以及其他一些大型国防工程,为岩石流变力学在我国的发展指明了方向,并有越来越多的专家学者参与其中,一些基于岩土体流变的理论专著相继出版。其中具有代表性的著作,例如,范广勤(1993)的《岩土工程流变力学》、刘雄(1994)的《岩石流变学概论》、金丰年(1998)的《岩石的非线性流变》、孙钧(1999)的《岩土材料流变及其工程应用》、高延法等编著的《岩石流变及其扰动效应试验研究》、王芝银等编著的《岩体流变理论及其数值模拟》、丁秀丽等编著的《岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识》等。

近年来,国内外学者从不同层次、角度及时空尺度上对岩石在长期恒载下的时效特性开展了大量的研究工作,并且取得了一定的进展和成效。涉及的主要内容有以下几个方面:

(1) 岩石流变试验研究,包括岩石单轴压缩、单轴拉伸、三轴压缩、弱面剪切等类型的流变和松弛试验,还有弯曲试验、扭转试验、现场压缩蠕变试验等。在岩石时效特性试验方面,国内外已有试验研究成果中大部分成果是针对盐岩、煤岩以及泥岩等软岩的,并且研究对象多为相对完整的岩石,对含有节理岩石的三轴流变力学特性试验罕有文献报道;且在有关岩石流变力学特性的试验研究中,关于岩石蠕变与松弛的试验开展的相对较多,成果中瞬时弹性变形、初期以及稳态蠕变经常被观测到,而岩石加速蠕变阶段变形特征、弹性后效特性以及复杂应力路径条件下的研究成果较少有相关文献报道,该方面的研究工作有待加强。

(2) 岩石流变模型与参数辨识研究,包括岩石流变元件模型、岩石流变经验模型、基于内时理论流变模型及其本构方程、流变特性的研究,流变模型辨识,以及依据先进数据处理手段确定相应的流变模型参数。尽管在岩石流变模型方面已经取得了一些相关研究成果,但岩石非线性流变本构模型理论的研究远没有达到成熟,特别是在描述岩石非线性加速流变阶段方面的理论需要更加深入的研究。已有的经典流变力学模型和大部分改进的流变本构模型相应的力学参数为一成不变的定值,不随应力水平、围压以及节理的空间分布形态等改变而相应变化,这与岩体实际受力状态不相吻合,不能很好地描述岩石非线性流变的规律。

(3) 岩石长期强度确定方法研究, 岩土体长期流变强度是进行工程设计及长期运行稳定分析的重要参数, 如何准确、便捷地确定长期强度的方法一直是岩土工程中十分棘手的问题。目前对于岩石长期强度的研究并不多, 而对于长期强度的确定方法研究则少之又少。长期强度的确定方法有直接法和间接法, 直接法费时而昂贵, 目前大部分采用室内试验进行的间接法确定岩石的长期强度。过渡蠕变法、等时曲线法、应变速率法及第一拐点法等间接确定长期强度的方法, 对岩石蠕变试验曲线的规整性要求较高, 当蠕变特征不明显, 变形量不够大的情况下, 其在选取曲线的拐点时, 需要人为判断, 含有一定的主观性和随意性。对其进行系统研究具有重要的理论价值和工程意义。

(4) 岩石流变的数值模拟和工程应用, 包括数值解析方法、数值模拟软件的开发与应用等; 如何根据工程岩体长期变形特性选取适宜的流变模型, 选用合适的流变参数是分析具体工程实际长期稳定性的关键。

(5) 其他一些问题的研究, 包括岩石流变损伤断裂力学特性、各向异性流变特性、考虑不同含水量的岩石流变、热流变、多场耦合流变、流变电磁效应等问题。

第 2 章

经典岩石流变力学模型

岩石线性黏弹塑性流变模型是通过一些基本元件，如弹簧、黏壶、塑性体等基本元素来反映线性黏弹塑性材料的性质，通过这些基本元件的相互并联或是串联组合成线性流变本构模型。以下介绍几种较为经典通用的线性流变本构元件模型。

2.1 广义开尔文流变模型



图 2.1 广义开尔文流变模型示意图

广义开尔文流变模型是由一个弹性胡克元件与一个黏性牛顿元件进行并联再与另一个弹性胡克元件进行串联组合而成的，也可以认为是一个弹性胡克元件与开尔文流变模型串联而成的，模型如图 2.1 所示；广义开尔文流变模型属于黏弹性流变模型。

图 2.1 中 σ 和 ϵ 分别为流变模型总的应力和应变； σ_1 和 σ_2 分别为 1 和 2 部分的应力； ϵ_1 和 ϵ_2 分别为 1 和 2 部分的应变； E_1 、 E_2 、 η_2 分别为材料的弹性、黏性参数。

在外荷载长期作用下，当应力 σ 时，广义开尔文流变模型相应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \epsilon_1 \\ \sigma_2 &= E_2 \epsilon_2 + \eta_2 \dot{\epsilon}_2 \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

根据式 (2.1)，消去方程中的下标获得系统总的应力、应变本构方程为

$$\eta_2 \ddot{\sigma} + (E_1 + E_2) \dot{\sigma} = E_1 \eta_2 \ddot{\epsilon} + E_1 E_2 \dot{\epsilon} \quad (2.2)$$

设在时间 $t=0$ 时刻，施加一个恒定不变的应力 σ_0 ，将 σ_0 代入式 (2.1)，同时考虑初始条件满足式 (2.3)：

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_i(0) &= \ddot{\sigma}_i(0) = 0 \\ \dot{\epsilon}_i(0) &= \ddot{\epsilon}_i(0) = 0 \\ (i &= 1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

并对式 (2.1) 做拉普拉斯变换及其逆变换，可得到相应的蠕变方程：

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right) \quad (2.4)$$

对式 (2.4) 两边分别对时间 t 求一阶、二阶导数可得

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (2.5)$$

$$\ddot{\epsilon} = -\frac{\sigma_0 E_2}{(\eta_2)^2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (2.6)$$

由式 (2.5)、式 (2.6) 可知, $\dot{\epsilon} > 0$ 而 $\ddot{\epsilon} < 0$ 。恒定应力 σ_0 施加后, 模型产生有瞬时弹性变形及蠕变变形, 且随着时间的不断增加, 蠕变速率逐渐减小, 最终稳定于零。

对于广义开尔文流变模型, 初始条件为时间 $t=0$ 时刻, 施加一个恒定不变的应变 ϵ_0 , 将 ϵ_0 代入式 (2.1), 对该式进行拉普拉斯变换及其逆变换, 可以得到松弛方程为

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 E_1 E_2}{E_1 + E_2 \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right)} \quad (2.7)$$

初始条件时间 $t=0$ 时刻, $\sigma = \sigma_0$, 随着时间 t 的增加, 在经历极长的时间后 $t \rightarrow \infty$, 应力会逐渐衰减并最终趋于定值为

$$\sigma_\infty = \frac{\epsilon_0 E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad (2.8)$$

故广义开尔文流变模型可以较好地描述岩石的瞬时弹性变形与初期流变变形, 同时也能较好地反映岩石的松弛现象。

2.2 伯格斯流变模型

伯格斯 (Burgers) 流变模型是由一个弹性胡克元件与一个黏性牛顿元件串联在另一个黏性牛顿元件和一个黏性牛顿的并联进行串联组合而成的。Burgers 流变模型可以认为该模型为 Maxwell 模型与 Kelvin 模型的组合体, 其一维应力状态下的流变模型如图 2.2 所示; Burgers 流变模型属于黏弹性流变模型。图中 σ 和 ϵ 分别为流变模型总的应力和应变; σ_1 和 σ_2 分别为 1 和 2 部分的应力; ϵ_1 和 ϵ_2 分别为 1 和 2 部分的应变; E_1 , E_2 , η_1 , η_2 分别为材料的弹性、黏性参数。

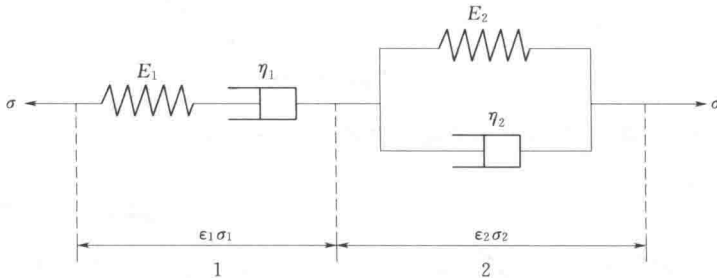


图 2.2 伯格斯流变模型示意图

在外荷载长期作用下, 当应力 σ 时, Burgers 流变模型相应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \epsilon_{11} \\ \sigma_1 &= \eta_1 \dot{\epsilon}_{12} \\ \sigma_2 &= E_2 \epsilon_{22} + \eta_2 \dot{\epsilon}_{22} \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 \\ \epsilon &= \epsilon_{11} + \epsilon_{12} + \epsilon_{22} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

根据式 (2.9), 消去方程中的下标获得系统总的应力、应变本构方程为

$$\eta_2 \eta_1 \sigma + (E_1 \eta_2 + E_1 \eta_1 + E_2 \eta_2) \sigma + E_1 E_2 \sigma = E_1 \eta_2 \eta_1 \ddot{\epsilon} + E_1 E_2 \eta_1 \dot{\epsilon} \quad (2.10)$$

设在时间 $t=0$ 时刻, 施加一个恒定不变的应力 σ_0 , 将 σ_0 代入式 (2.9), 同时考虑初始条件满足式 (2.11):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\sigma}_i(0) &= \ddot{\sigma}_i(0) = 0 \\ \dot{\epsilon}_i(0) &= \ddot{\epsilon}_i(0) = 0 \\ (i &= 1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

并对式 (2.9) 做拉普拉斯变换及其逆变换, 可得到相应的蠕变方程:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) \quad (2.12)$$

对式 (2.12) 两边分别对时间 t 求一阶、二阶导数可得

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (2.13)$$

$$\ddot{\epsilon} = -\frac{\sigma_0 E_2}{(\eta_2)^2} e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \quad (2.14)$$

由式 (2.13), 式 (2.14) 可知, $\dot{\epsilon} > 0$ 而 $\ddot{\epsilon} < 0$ 。恒定应力 σ_0 施加后, 模型产生有瞬时弹性变形及蠕变变形, 且随着时间的不断增加, 蠕变速率逐渐减小, 最终稳定于某一值。

对于 Burgers 流变模型, 初始条件为时间 $t=0$ 时刻, 施加一个恒定不变的应变 ϵ_0 , 将 ϵ_0 代入式 (2.9), 对该式进行拉普拉斯变换及其逆变换, 可以得到松弛方程为

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{\sqrt{p_1^2 - 4p_2}} [(-q_1 + q_2 \alpha) e^{(-\alpha t)} + (q_1 - q_2 \beta) e^{(-\beta t)}] \quad (2.15)$$

式中

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{\eta_1}{E_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{E_2}; \quad p_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2}; \quad q_1 = \eta_1; \quad q_2 = \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \\ \alpha &= \frac{1}{2p_2} (p_1 + \sqrt{p_1^2 - 4p_2}); \quad \beta = \frac{1}{2p_2} (p_1 - \sqrt{p_1^2 - 4p_2}) \end{aligned}$$

初始条件时间 $t=0$ 时刻, $\sigma = \sigma_0$, 随着时间 t 的增加, 在经历极长的时间后 $t \rightarrow \infty$, 应力会逐渐衰减并最终趋于零。

$$\sigma_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma = 0 \quad (2.16)$$

故 Burgers 流变模型可以较好地描述岩石的瞬时弹性变形、初期流变变形与稳态流变变形, 该模型同时也能反映岩石的松弛现象。

由小湾水电站典型黑云花岗片麻岩、角闪斜长片麻岩与蚀变岩的三轴流变试验曲线可以看出, 岩样在受到外荷载的即时会产生一个瞬时变形; 随着时间的推移流变变形量增加

的速率会由快逐渐变慢，最后达到一个稳定的流变速率；在应力水平较高时，试样还会出现加速流变现象。根据这些所表现出来的流变特征，选择 Burgers 流变模型来对试验曲线进行拟合。

2.3 西原正夫流变模型

西原正夫流变模型是由一个弹性胡克元件与一个黏性牛顿元件进行并联在另一个黏性牛顿元件和一个塑性圣维南体的并联及一个弹性胡克元件进行串联组合而成的，也可以认为是一个弹性胡克元件与开尔文流变模型及一个黏塑性体串联而成的，模型如图 2.3 所示；西原夫流变模型属于黏弹塑性流变模型。图 2.3 中 σ 和 ϵ 分别为流变模型总的应力和应变； σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为 1、2 和 3 部分的应力； ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 分别为 1、2 和 3 部分的应变； E_1 、 E_2 、 η_2 、 η_3 分别为材料的弹性、黏性参数； σ_s 为材料塑性体发生塑性变形的极限应力值。

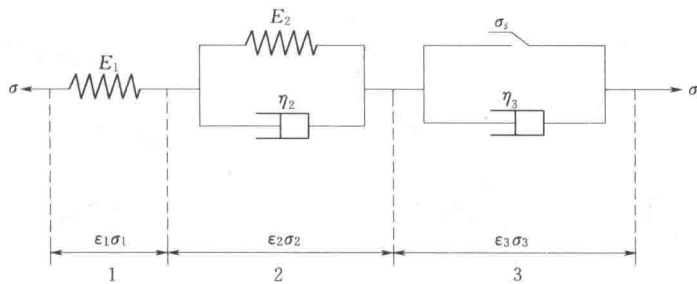


图 2.3 西原正夫流变模型示意图

在外荷载长期作用下，当应力 $0 < \sigma < \sigma_s$ 时，西原正夫流变模型中只有 1 和 2 部分起作用，相应的状态方程与广义开尔文流变模型一致为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \epsilon_1 \\ \sigma_2 &= E_2 \epsilon_2 + \eta_2 \dot{\epsilon}_2 \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

相应的蠕变方程为

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right) \quad (2.18)$$

在外荷载长期作用下，当应力 $0 < \sigma_s < \sigma$ 时，西原正夫流变模型中 1、2 和 3 部分都起作用，相应的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= E_1 \epsilon_1 \\ \sigma_2 &= E_2 \epsilon_2 + \eta_2 \dot{\epsilon}_2 \\ \sigma_3 &= \eta_3 \dot{\epsilon}_3 + \sigma_s \\ \sigma &= \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \\ \epsilon &= \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$