

朱珍德 阮怀宁 平扬 著

裂隙岩体非线性 流变力学



科学出版社

裂隙岩体非线性流变力学

朱珍德 阮怀宁 平 扬 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面、系统介绍了非线性流变的有关理论和最新研究成果,以锦屏二级水电站深埋长大引水隧洞工程的建设为工程依托,通过对现场采集的板岩、大理岩进行室内试验,包括单轴压缩流变试验、双轴压缩流变试验、剪切流变试验等来分析岩样的流变力学特性。以流变试验结果为依据,由浅入深地系统介绍了岩石非线性流变的研究思路,建立非正常参数的蠕变模型;考虑到锦屏二级水电站处于高地应力、高地温、高水压的复杂环境条件,把温度因素也引入非正常模型中,建立了基于温度效应的非正常参数流变模型;从蠕变损伤的角度阐明岩石的非线性流变规律,应用内时损伤理论建立了非线性的流变模型,并且自主开发了参数辨识程序和数值计算程序,对理论解进行验证。

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

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体非线性流变力学/朱珍德,阮怀宁,平扬著. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-046640-2

I. ①裂… II. ①朱…②阮…③平… III. ①岩体流变学 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 300858 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:295 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

裂隙岩体作为一类非均质的、含有大量细微裂纹及不连续结构面的各向异性介质,广泛存在于坝基、边坡、地下洞室等岩体工程中,它的强度、变形和长期稳定等力学特性一直被国内外岩石力学与工程界所关注。

随着我国西部大开发战略的实施,在西南和西北地区将有相当多的大型水力发电工程和蓄能电站进入兴建期,并且多数都设计有大型或超大型的地下洞室群作为主要的水工建筑物。由于我国西部地区山高谷深、地势异常陡峭的特殊地形条件,大型的洞室群和深埋长大引水隧洞将会遇到极为复杂的地质条件、高地应力和高外水压力等问题,在如此复杂的条件下长大隧洞的开挖与运行期的安全性问题已经成为亟待解决的世界性的岩石力学前沿课题。

众所周知,与经典弹塑性理论的解答不同,从工程流变学的观点而言,岩体中的应力-应变状态及其关系并不是恒定和单一的,它将随时间历程而增长与发展变化。在复杂的工程环境下,尤其是高地应力和高水压以及开挖扰动等的作用下,岩体呈现出强大的流变性,岩体的黏滞系数(或蠕变柔量)不再是不变的常数,而是与当时的应力水平、加载持续时间以及不同的应力-应变状态的本构特征等密切相关,使得非线性流变问题的求解更加复杂。

《裂隙岩体非线性流变力学》一书是关于复杂环境下岩石非线性流变力学理论的最新研究成果,汇集了著者的智慧和创意,取得了可喜的成绩。书中系统介绍了非线性流变的有关理论和最新研究成果,以锦屏二级水电站深埋长大引水隧洞工程的建设为工程依托,通过对现场采集的板岩、大理岩进行室内试验,包括单轴压缩流变试验、双轴压缩流变试验、剪切流变试验等来分析岩样的流变力学特性。以流变试验结果为依据,由浅入深地系统介绍了岩石非线性流变的研究思路,建立了非定常参数的蠕变模型、基于温度效应的非定常参数的流变模型,并且从蠕变损伤的角度阐明岩石的非线性流变规律,应用内时损伤理论建立了非线性的流变模型。这些都对岩石非线性流变的研究进展作出贡献,最后还介绍了参数辨识的改进算法,这也为非线性流变的研究者提供了有利的研究工具。

该书的作者多年来一直从事裂隙岩体宏观力学特性及多场耦合下流变特性的研究,主持和参与了多个相关领域的科研项目,在复杂环境下裂隙岩体的流变特性研究方面颇有建树,陆续发表了多篇相当高水平的学术论文。该书作为作者多年潜心研究成果的总结,是岩石非线性流变力学研究的一部佳作,对岩石力学的持

续发展起到很好的推动作用。

欣贺著作付梓,是以为序。

王思敬

中国工程院院士

2015年10月6日于北京

前 言

人类社会的迅速发展,人类活动的日益频繁,涉及岩体高边坡的设计、水电工程流域控制、有害核废料的储存、矿井的疏干降压排水、石油以及地下水资源的开发利用等方面。人类工程活动的安全性、对地质环境的影响程度以及地质环境对工程活动的反作用等问题,是科学家最关心的问题之一。如何定量评价和预测人类工程开挖干扰力、初始地应力等作用对人类工程岩体和岩质高边坡稳定性的影响,一直是国内外岩石力学与工程界所关注的重要研究课题。

随着地下工程规模的不断增大,地下空间开发利用的深度越来越深,其中深度达千米乃至数千米的地下工程比比皆是。深部岩体工程与浅埋岩体工程表现显著不同的是“三高一扰动”(即高地温、高地压、高水压和开挖扰动)的复杂环境特点,因而使得深部地下工程岩体表现出特有的强大流变性,该流变特性用现有的弹性模型、弹塑性模型和黏弹性模型已经不能满足工程计算需要。因此,迫切需要对岩石非线性流变特性进行深入的研究,建立更能客观反映岩石流变规律的力学模型,并将其推广应用到深部岩体工程实践中。为此,出版一部论述岩石非线性流变基础的专著很有必要。

本书共7章,第1章简要介绍非线性流变问题的提出、研究意义与研究现状。第2章阐述岩石流变室内试验的研究进展,对取自锦屏二级水电站深埋引水隧洞围岩(大理岩、板岩)进行室内流变试验的研究。通过板岩单轴压缩流变试验,分析板岩在单轴压缩条件下流变力学特性;通过板岩剪切流变试验,分析板岩剪切流变特性;同时由于结构面的时效特性在岩体流变过程中有着至关重要的作用,控制或决定岩体的流变特性,因此针对含有结构面的板岩,在循环加卸载作用下开展流变试验,通过循环加卸载方式,更全面地揭示含结构面岩体流变过程的特点;地下洞室的边界(如顶板、底板和侧墙)常常处于双向压缩应力场中,即处于双向应力状态,针对这一特点,对板岩进行双轴压缩流变试验,分析在平面应力状态下岩石的流变特性;对大理岩泥夹层结构面和硬性结构面进行剪切流变试验,分析比较两种不同结构面情况下流变特性的不同。第3章通过室内流变试验和定常参数模型的分析,表明定常参数模型在分析岩石流变过程中有着明显的不足,因此引入非线性流变问题的研究,通过对瞬时弹性参数和黏弹性参数的非定常特性的研究,分析瞬时弹性参数和黏弹性参数随应力水平的变化规律和黏弹性参数随时间的变化规律,基于时间强化的黏塑性变形,提出可以描述第三期蠕变的非定常参数黏滞系数,从而建立起非定常参数流变力学模型,运用相似的方法,建立起单轴压缩条件下的非定常参数蠕变模型和双轴压缩条件下的蠕变模型。第4章在定常参数黏弹性模型的基础上,考虑参数的非定常性,建立非定常参数黏弹性剪切蠕变模型,通

过引入非定常参数黏弹塑性体,建立非定常参数黏弹塑性剪切模型。把温度影响因素引入非定常参数流变模型,建立考虑温度效应的非定常参数黏弹性剪切蠕变模型、非定常参数黏弹塑性剪切模型,并给出蠕变模型的三维表达形式。第5章分析岩石破坏的机理以及蠕变损伤的基本理论,从蠕变损伤的角度出发,研究岩石的非线性特性,建立岩石非线性蠕变损伤模型,另外通过内时理论的研究,建立内时损伤模型,并且进行验证。第6章进行模型参数辨识的研究。介绍传统的参数辨识的方法,重点介绍智能辨识方法——粒子群算法和遗传算法。但是考虑到粒子群算法和遗传算法的优缺点,直接把这两种算法用于参数反演不能达到理想的效果,因此,对这两种算法进行改进,一种改进方法是把粒子群算法和最小二乘法相结合,开发出粒子群-最小二乘算法,并且对模型参数进行反演,得到较好的结果;另一种方法是把粒子群算法和遗传算法相结合,利用两种方法的优点,对参数进行反演,也得到较好的结果。第7章介绍非线性流变模型的工程应用。针对锦屏二级水电站引水隧洞工程,首先对工程区域内的初始地应力进行反演计算,然后基于FLAC^{3D}建立深埋长大引水隧洞模型,利用非线性蠕变模型进行分析,得出引水隧洞长期变形的结果,对工程建设和运营期间的安全可以进行一定的指导。

本书在撰写过程中注意学科体系的完备性,强调基本概念描述的准确性、基本理论推理的严密性以及基本理论的实际应用性。本书内容新颖、理论性强,为了便于读者阅读,书中对一些重要的公式进行了较为详细的推导。

本书主要内容为国家自然科学基金面上项目(50674040)、国家自然科学基金重点项目(50539090)与国家重点基础研究发展(973)计划(2011CB013504)的研究成果。本书第1、3、4章由朱珍德撰写;第2、5章由阮怀宁教授撰写;第6、7章由平扬高工撰写。本书得到何志磊博士研究生的大力帮助,在此表示感谢。

笔者感谢中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭教授(国家杰出青年基金获得者、长江学者特聘教授)的一贯支持和鼓励,感谢国家“千人计划”特聘教授邵建富的鼎力相助。特别感谢为本书作出贡献的罗润林、朱明礼、李志敬、朱昌星四位博士,是他们无私的工作成绩,才使得本书较早与读者见面。

还要特别感谢中国工程院院士王思敬教授欣然为本书作序,给笔者以鼓舞与教导。

为了对岩石非线性流变有全面深入的了解,书中对国内外其他研究人员取得的成果也作了简要的介绍和应用,谨此致谢。

应该指出,岩石非线性流变理论的研究是岩石力学中极其重要的一个方面,目前有许多理论和实际应用还需进一步研究和完善。由于作者水平及经验有限,书中难免存在不足,恳请前辈及同仁不吝赐教。

朱珍德

2015年7月

于古都南京清凉山南麓

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石流变力学概述	1
1.2 岩石非线性流变力学的提出	2
1.3 非线性流变力学的研究进展	4
1.3.1 岩石流变力学特性的试验研究	4
1.3.2 岩石非线性流变力学本构模型研究	6
1.3.3 岩石流变模型参数反演研究	10
1.4 主要研究内容	11
第 2 章 深埋岩体工程围岩的流变试验研究	12
2.1 岩石流变试验概述	12
2.2 岩石单轴压缩变形试验研究	12
2.2.1 试验设备和试样制备	13
2.2.2 试验结果	13
2.3 板岩单轴压缩流变试验	14
2.3.1 试验设备和试样制备	14
2.3.2 板岩单轴压缩流变试验加载方案	15
2.3.3 试验结果及分析	15
2.4 板岩双向流变力学特性试验研究	17
2.4.1 试验设备及试样制备	17
2.4.2 双轴流变加载路径	17
2.4.3 试验结果及分析	18
2.5 板岩剪切流变试验	21
2.5.1 试验设备和试样制备	21
2.5.2 试验步骤	22
2.5.3 试验结果及分析	23
2.6 含结构面板岩在循环加载方式下的剪切蠕变试验	28
2.6.1 试验试样	28
2.6.2 试验设备	29
2.6.3 试验方案	29

2.6.4	试验结果及分析	30
2.6.5	板岩剪切蠕变速率规律分析	32
2.7	大理岩泥夹层结构面剪切蠕变试验研究	34
2.7.1	试验设备	34
2.7.2	试验方案	34
2.7.3	试验结果及分析	35
2.8	大理岩硬性结构面剪切蠕变试验研究	47
2.8.1	试验设备	47
2.8.2	岩样制作及试验方法	47
2.8.3	大理岩硬性结构面表面粗糙度描述	48
2.8.4	试验结果及分析	49
第3章	岩石非定常参数蠕变模型研究	58
3.1	引言	58
3.2	定常流变模型	59
3.3	剪切流变的非定常参数模型	61
3.3.1	瞬时弹性参数和黏弹性参数的非定常特性研究	61
3.3.2	黏弹性参数随时间变化规律研究	61
3.3.3	瞬时弹性参数和黏弹性参数随应力水平变化规律研究	63
3.3.4	基于时间强化的黏塑性变形	65
3.3.5	瞬时塑性变形的描述	66
3.3.6	可以描述第三期蠕变的非定常黏滞系数	67
3.3.7	剪切流变非定常参数模型的建立	69
3.3.8	岩石非定常参数流变模型的试验验证	70
3.4	板岩单轴压缩非定常蠕变模型	71
3.4.1	单轴压缩非定常模型	71
3.4.2	单轴压缩非定常参数蠕变模型试验验证	72
3.5	板岩双轴非定常参数蠕变理论分析	74
3.5.1	侧向变形的各向异性	74
3.5.2	板岩双轴非定常参数蠕变模型分析	74
3.6	非定常参数蠕变模型的三维形式	77
3.6.1	黏弹性三维本构关系	77
3.6.2	黏塑性三维本构关系	80
3.6.3	非定常参数蠕变模型的三维本构关系	82
3.6.4	三维非定常流变模型参数的确定	82
第4章	基于温度效应的岩石非定常剪切蠕变模型研究	85
4.1	引言	85

4.2 大理岩非定常黏弹性剪切蠕变模型研究	85
4.2.1 定常黏弹性剪切蠕变模型	85
4.2.2 非定常参数的确定及其表达形式	86
4.2.3 非定常黏弹性剪切蠕变模型的建立	88
4.3 大理岩非定常黏弹塑性剪切蠕变模型	90
4.3.1 非定常黏弹塑性体	90
4.3.2 非定常黏塑性体的蠕变方程	92
4.3.3 岩体非定常黏弹塑性剪切蠕变模型	93
4.4 基于温度效应的非定常黏弹性剪切蠕变模型的研究	95
4.4.1 基于温度效应的非定常黏弹性剪切蠕变模型的本构方程	95
4.4.2 基于温度效应的非定常黏弹塑性剪切蠕变模型的本构方程	96
4.4.3 基于温度效应的非定常黏弹性剪切蠕变模型的蠕变方程及松弛方程	98
4.4.4 基于温度效应的非定常黏弹塑性剪切蠕变模型的蠕变方程及松弛方程	100
4.4.5 基于温度效应的岩体非定常蠕变模型的三维形式	103
第5章 岩石非线性损伤流变模型研究	107
5.1 引言	107
5.2 岩石蠕变损伤破坏机理研究	107
5.2.1 岩石损伤破坏机理	107
5.2.2 蠕变损伤基本理论	110
5.2.3 岩石时效损伤机制的研究	115
5.3 岩石非线性黏弹塑性损伤流变模型研究	117
5.3.1 岩石非线性损伤流变机制	117
5.3.2 岩石非线性蠕变损伤模型	119
5.3.3 模型验证	124
5.4 基于内时理论的软岩损伤模型研究	125
5.4.1 建立流变本构方程的基本思想	126
5.4.2 软岩内时损伤模型的建立	126
5.4.3 试验验证	134
第6章 岩石流变本构模型参数辨识方法研究	137
6.1 引言	137
6.2 传统的参数辨识方法	137
6.2.1 最小二乘法	137
6.2.2 LM算法	138
6.2.3 流变曲线分解法	139
6.3 智能辨识方法	140
6.3.1 粒子群优化算法	140

6.3.2 基于粒子群-最小二乘法的模型参数反演	145
6.3.3 遗传算法	154
6.3.4 遗传-粒子群优化算法	157
第7章 岩石非线性流变模型的工程应用	167
7.1 锦屏二级水电站引水隧洞工程概况	167
7.2 工程区域初始地应力	170
7.2.1 岩体初始地应力的综合分析	170
7.2.2 岩体初始地应力反演	172
7.3 FLAC ^{3D} 软件简介	183
7.3.1 计算步骤	184
7.3.2 二次开发环境	184
7.4 非定常参数蠕变模型的工程应用	185
7.4.1 非定常参数蠕变模型的三维增量形式	185
7.4.2 三维非定常参数蠕变模型数值分析的实现	187
7.4.3 非定常蠕变模型在隧洞工程中的应用	187
7.5 基于温度效应的非定常参数岩体蠕变模型的工程应用	191
7.5.1 岩体蠕变非定常参数蠕变模型的三维增量形式	191
7.5.2 岩体蠕变非定常参数蠕变模型数值程序的实现	191
7.5.3 蠕变模型在隧洞工程中的应用	192
7.6 岩石非线性蠕变损伤模型的工程应用	202
7.6.1 岩石非线性蠕变损伤模型	202
7.6.2 三维情况下差分形式的本构方程	203
7.6.3 算例验证及工程应用	206
参考文献	217

第 1 章 绪 论

1.1 岩石流变力学概述

流变(rheology)一词源于古希腊哲学家 Heraclitus 的理念,意即“万物皆流”。简而言之,所有的工程材料都具有一定的流变特性,岩土类材料也不例外。只要岩土介质受力后的应力水平值达到或超过该岩土材料的流变下限,就会产生随时间而增长发展的流变变形^[1]。

众所周知,岩石的流变是指岩石矿物结构(骨架)随时间增长而不断调整重组,导致其应力、应变状态亦随时间而持续地增长变化。其主要研究内容包括^[2,3]:①蠕变,在常值应力持续作用下,岩体变形随时间而持续增长发展的过程;②应力松弛,在常值应变水平条件下,岩体应力随时间而不断地有一定程度衰减变化的过程;③长期强度,岩体强度随时间而持续有限降低,并逐渐趋近于一个稳定收敛的低限定值;④弹性后效及滞后效应(黏滞效应),加荷时继瞬时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,但其恢复过程需要一定的滞后时间,这部分的变形虽仍属于弹性变形的范畴,但在加荷过程中其变形随时间的逐渐增长,称为“黏后效应”,而在卸荷之后,其变形随时间的逐渐恢复,称为“弹性后效”,二者统称为“黏滞效应”,都属于流变岩体的黏性特征。

岩石的流变特性作为岩石的重要力学特征之一,与岩体工程的长期稳定性问题紧密相关。工程实践与研究表明,在许多情况下,岩体工程的破坏与失稳并不是在开挖完成或工程完工后立即发生,而是随着时间的推移,岩体的应力与变形不断调整、变化与发展,往往需要延续较长的一段时期。由于岩体的非均质性、不连续性和各向异性,在长期荷载作用下,工程岩体的应力-应变状态、变形破坏特征均随时间而不断发生变化,具有显著的流变时效特征。例如,在矿山开采、隧洞开挖过程中,经常可以看到一些与时间相关的现象:开挖初期,围岩不塌落,一段时间后,却大量塌落;支架上的压力或围岩上的位移在一段时间内随时间的增长而增加。这些现象用弹、塑性理论均无法解释,因为这些理论都与时间无关,但可以通过岩体流变力学的理论作出合理的解释。

早期的岩石流变特性的研究,大多是对流变定性规律的把握,而对于流变特性定量程度的研究成果较少。主要原因有两点:一是试验条件的限制,早期的力学试验机 and 测试装置无法达到研究不同荷载条件下岩石流变特性定量规律的程度;二

是实际岩土工程中所涉及的工程问题通过半经验半理论的设计与计算,利用弹性模型、弹塑性模型和黏弹性模型已能基本满足工程计算需要。但是,随着资源的开发和利用、土木和水利工程的建设、交通运输以及城市建设的发展,岩土工程的结构形式日趋多样化和复杂化,工程的规模和投资越来越大,工程环境也变得越来越复杂。无论从经济合理的角度还是稳定安全的角度出发,都迫切需要对岩石的流变特性进行更深入的研究,建立更能客观反映岩石流变规律的力学模型,并将其推广应用于岩土工程实践^[4]。

1.2 岩石非线性流变力学的提出

岩石非线性流变力学的提出和发展与工程实践紧密相关。在固体力学中有三个经典模型,即线弹性、理想塑性及线黏弹性。线黏弹力学建立比较早,研究始于1865年,1874年 Boltzmann 提出各向同性线黏弹的三维理论,1909年 Volterra 推广到各向异性。以后,线黏弹力学的研究发展很慢,20世纪50年代以后,由于在工程上得到应用,又重新得到重视和发展,岩石力学工作者开始利用线黏弹力学解释岩石工程中与时间有关的静力学现象,取得定量的解释^[5]。

起初,在运用线黏弹力学对岩石流变问题开展研究时,由于涉及应力、应变和时间的关系,问题将变得复杂,此时通常是把岩石材料作为一种线性流变体,采用对应性原理和拉普拉斯变换进行解答。以一维问题为例,对应性原理可以表述为,对于线弹性应变情况:

$$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (1.2.1)$$

而对于线性黏弹性应变率情况:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta} \sigma \quad (1.2.2)$$

式中, E 和 η 均为不变的常数。

由式(1.2.1)和式(1.2.2)可知,若相对应地将式(1.2.1)中的 ϵ 置换为式(1.2.2)中的 $\dot{\epsilon}$,将式(1.2.1)中的 E 置换为式(1.2.2)中的 η ,则可方便地将线弹性问题的解换为线性黏弹性问题的解。在这种情况下,采用黏弹性法则来描述问题,可以了解其变形发展的时间历程,但其最终的变形达到稳定的收敛值时将按线弹性问题的解所得的相应结果完全相同。

所谓线性流变体是指虽然物体的本构关系,即应力-应变关系,在不同的时刻是不同的,但在同一时刻,本构关系仍然是线性的,反映在应力-应变关系图上就是不同时刻下的每条应力-应变等时曲线呈线性黏弹性直线或线性黏塑性折线(当黏塑性变形发生时,应力-应变等时曲线就成为折线)。线性流变体的黏弹性或黏

塑性黏滞系数也都只是时间的函数,而与应力水平无关。随着研究的深入,大量工程实践和室内试验表明,许多岩石特别是一些软岩都是非线性流变体,非线性特征主要表现在应力与应变之间、应力与应变速度之间呈非线性关系。在一定应力水平下,它将发生非线性流变而且还表现出加速蠕变特征,反映在应力-应变图上,其应力-应变等时曲线不再是直线或折线,而是一簇曲线,非线性流变的黏弹性或黏塑性黏滞系数也不再仅仅是时间的函数,还与应力水平有关,如图 1.2.1 所示。因此,若仍然使用线性流变特性来研究岩石的流变问题,必然会与实际情况有较大偏差,所以就有必要研究岩石的非线性流变特性,用非线性流变理论来研究岩石的流变问题,这也就是岩石非线性流变力学的提出。

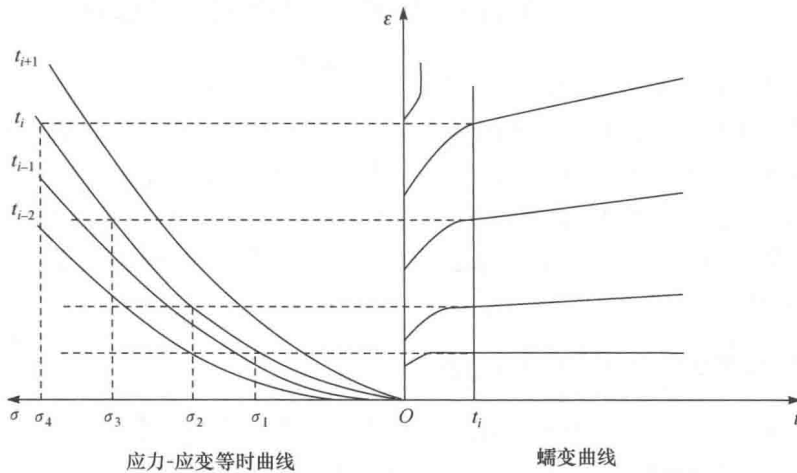


图 1.2.1 非线性流变曲线簇

通常岩石非线性流变的处理方法有三种^[2]。

(1) 在非线性流变的发展程度不高,即所谓低度非线性问题的情况下,仍可以以线性流变的西原模型(弹-黏弹-黏弹塑模型)为基础,而只在其黏塑性部分内再加上一项非线性的经验黏性元件作为对线性流变模型的一点修正,非线性黏性元件的经验系数可以由相应的流变试验确定。这种近似处理,对量大面广的一般性工程问题的研究是比较适用的,目前这方面的研究相对比较多。

(2) 采用由试验拟合的经验本构关系式,式中的诸待定系数可由试验结果逐一拟合确定。这种处理方法较适合在一些特定的重大工程中采用。

(3) 将 η 值视为非定常的变数值,而由试验确定,再进行线性流变本构关系的分析计算。这种处理较为理想,学术理念上也较为严格,但计算处理则比较烦琐而困难。

对于一个固体力学问题,平衡条件和几何方程都和材料性质无关,无论对于弹

性体、塑性体还是黏弹性体都一样,只要求得符合岩石特性的本构方程(物理方程),在满足初始条件和边界条件的基础上就可以求得岩石中的应力、应变和位移。因此,在岩石流变本构模型研究中,就要求所建立的本构模型必须能充分表达材料的内部结构及其物理力学特性,正确反映应力、应变、时间三者之间的关系,这样才能保证由模型推导出来的本构方程能正确反映材料的特性。因此,如何建立岩石流变本构模型成为岩石流变力学研究中的关键所在,国内外的学者在这方面做了许多的工作,研究成果丰富,建立了各种岩石流变的模型。近年来,随着非线性流变问题的大量出现,所谓非线性流变本构模型的研究备受重视。

1.3 非线性流变力学的研究进展

经过几十年的努力,岩石流变力学取得了重要进展,并为一些岩石工程问题的解决提供了重要的理论依据。中国科学院武汉岩土力学研究所陈宗基院士等提出并率先开展了岩石流变学的研究。岩石力学的时效性,包括蠕变、应力松弛、长期强度等均获得深入的研究,尤其是软弱结构面的流变特性研究有重要的实用价值。在同济大学孙钧院士等推动下,岩石流变学从试验工作、理论模型到分析原理皆得到系统的发展和突破^[6]。

1.3.1 岩石流变力学特性的试验研究

岩石流变力学试验是研究岩石流变力学特性的主要研究手段,岩石非线性流变力学的研究也是以流变试验为基础,这里简单对其进行介绍。流变力学试验分为室内试验和现场试验。由于室内试验具有易于操作、利于长期观测、可严格控制试验条件且重复性较高等优点,所以在岩石流变研究过程中,岩石流变力学特性的试验研究多集中于室内试验。通过室内试验可以为流变力学模型的建立提供可靠的数据,也可以为工程应用提供参考。岩石流变力学试验包括单轴压缩蠕变试验、双轴压缩蠕变试验、三轴压缩蠕变试验、卸荷蠕变试验、剪切蠕变试验等,国内外学者已经对此开展了大量的研究,取得了丰硕的成果。

1. 岩石室内流变试验

1) 单轴压缩蠕变试验

岩石单轴压缩蠕变试验的研究开展得比较早,成果也比较丰富。Okubo 等^[7]研制开发了刚性流变试验机,并采用该设备对大理岩、砂岩和安山岩等岩样进行单轴压缩蠕变试验,获得了岩石加速蠕变阶段的完整应变-时间曲线,并建立了相应的蠕变方程。Maranini 等^[8]对 Pietra Leccese 石灰岩进行了单轴和三轴压缩蠕变试验,研究结果表明蠕变变形机理主要为低围压下裂隙扩展和高应力下孔隙塌陷。

Tsai 等^[9]对 Mushan 砂岩进行了多级加载-蠕变-卸载-再加载的试验,把应变分为弹性应变和黏塑性应变,认为黏塑性流动的方向与时间相关,黏塑性势函数与塑性势函数类似,而形状与时间具有相关性。许宏发^[10]通过软岩的单轴压缩蠕变试验,指出软岩的弹性模量和强度变化规律具有相似性,都随时间的延长而降低。张学忠等^[11]采用分级加载方式对攀钢朱矿辉长岩进行了单轴压缩蠕变试验,试验结果表明在较低应力水平下,岩石蠕变相对较小,而在较高应力水平下蠕变较为明显。朱定华等^[12]采用分级加载对南京红层软岩进行了单轴压缩蠕变试验,指出红层软岩的长期强度是其单轴抗压强度的 63%~70%。范庆忠等^[13]以山东东部的红砂岩为例,采用分级加载对岩石的蠕变特性进行了单轴压缩试验,重点分析了岩石的弹性模量和泊松比的变化规律。李化敏等^[14]采用分级加载方式对南阳大理岩进行了单轴压缩蠕变试验,试验结果表明在持续高应力作用下,大理岩仍表现出较强的时间效应。

2) 三轴压缩蠕变试验

Fujii 等^[15]对 Inada 花岗岩和 Kamisunagawa 砂岩进行了三轴蠕变试验。李晓^[16]对泥岩峰后区进行了三轴压缩蠕变试验。陈渠等^[17]对三种沉积软岩进行了单级三轴蠕变试验,分析了岩石的变形、变形速率和时间依存性等的关系。刘建忠等^[18]对煤岩进行了恒围压分级加轴压的三轴压缩蠕变试验,对煤岩在不同应力条件下的蠕变曲线特征进行了分析。徐卫亚等^[19]研究了锦屏一级水电站坝基绿片岩的流变力学性质,分析了不同围压下绿片岩的三轴流变基本规律。冒海军等^[20]对南水北调西线工程中的板岩进行了不同围压、分级加轴压的三轴压缩蠕变试验,重点分析了板岩的衰减蠕变和稳态蠕变过程。杨圣奇等^[21]对饱和状态下的大理岩和绿片岩进行了恒围压、分级加轴压的三轴流变试验,研究了硬岩轴向变形与侧向变形之间的关系,探讨了围压与粒径对岩石轴向以及侧向变形特性的影响规律,分析了岩石三轴流变过程中的塑性变形特性,讨论了应力水平对岩石侧向-轴向变形特性的影响规律。韩冰等^[22]通过三种不同应力路径的三轴蠕变试验,发现应力路径变化对轴向应变影响不大,对侧向应变影响较明显。朱杰兵等^[23]进行了页岩卸荷三轴流变试验,发现侧向塑性变形的发展速率明显比轴向快。

3) 剪切蠕变试验

丁秀丽等^[24]针对三峡船闸区岩体结构面岩样进行了剪切蠕变试验,通过分析结构面在恒定荷载作用下的蠕变性状,提出结构面剪切蠕变方程。杨圣奇等^[25]进行了龙滩水电站泥板岩的剪切蠕变试验,研究了其剪切蠕变特性并建立了新的能够描述加速蠕变特性的岩体非线性流变模型。朱明礼等^[26]对锦屏水电站大理岩硬性结构面剪切蠕变特性进行了试验研究,通过引入与时间有关的非确定参数,提出了一种剪切蠕变模型。朱珍德等^[27]对含软弱夹层的板岩和大理岩进行了剪切流变试验,得出了岩石夹层标准线性体黏弹-塑性剪切流变模型。

4) 其他蠕变试验

除了上面介绍的常规的蠕变试验外,还有其他应力路径的蠕变试验。例如,日本学者 Ito 等^[28]对花岗岩试件进行了历时 30 年的弯曲蠕变试验,结果表明花岗岩呈黏滞流动而没有屈服应力。我国岩石力学界的先驱陈宗基等^[29]对宜昌砂岩进行了扭转流变试验,提出了采用单个岩样进行分级加载的试验方法,研究了岩石在流变过程中的封闭应力和扩容等特征,并着重指出“蠕变和封闭应力是岩石性状中的两个基本要素”。随着蠕变试验研究的不断深入,饱水状态下流变性质的试验^[30,31]与理论分析研究^[32]以及温度影响下的岩石流变研究也取得重要进展^[33~36],一些新的技术如显微镜、扫描电镜、激光全息干涉、CT 扫描等细观力学试验方法已应用于岩石蠕变研究中^[37~40]。例如,朱合华等^[41]通过对凝灰岩干燥和饱水状态下的单轴压缩蠕变试验,探讨了岩石蠕变受含水状态影响的规律性。刘浪等^[42]对深部饱水岩石进行单轴压缩单级加载和分级增量加载蠕变试验,得到不同应力状态下饱水岩石的流变试验曲线。范秋雁等^[43]开展了一系列南宁盆地泥质软岩的单轴压缩无侧限和有侧限压缩蠕变试验,配合扫描电镜,分析了泥岩蠕变过程中细观和微观结构的蠕变机制。

2. 岩体现场流变试验

相比于室内岩石的流变试验,现场的大尺度试验直接作用于岩体上,可以降低尺寸效应的影响,将更能直接反映岩体的流变力学性质。但是现场流变试验条件复杂,需要以大量的人力物力为代价,因此现场流变试验成本高、难度大,国内只有少数单位开展现场流变试验并取得了一些成果。例如,周火明等^[44]开展了三峡永久船闸边坡岩体的现场压缩蠕变试验,在对蠕变试验数据分析的基础上,提出了岩体蠕变参数的取值方法。徐平等^[45]开展了溪洛渡水电站坝址区岩体柔性板压缩蠕变试验,阐述了蠕变试验方法和试验结果。贺如平等^[46]在大岗山水电站坝基现场开展了大型刚性承压板压缩蠕变试验,介绍了蠕变试验过程、方法和试验成果,拟合得到压缩蠕变经验方程。熊诗湖等^[47]采用双柔性承压板进行了现场荷载蠕变试验,建议采用五参量广义 Kelvin 模型描述岩体蠕变特性。张强勇等^[48]详细介绍了大岗山水电站坝区辉绿岩脉现场剪切蠕变试验的过程、方法和结果,分析了岩体的剪切蠕变变形规律和剪切蠕变速率特性,辨识出岩体的剪切蠕变模型,通过优化反演获得坝区岩体的剪切蠕变参数。

1.3.2 岩石非线性流变力学本构模型研究

1. 岩石流变的经验模型

经验本构模型是在试验岩石流变经验的基础上,通过假设-试验-理论的方法来建立岩石的应力、应变和时间之间的函数关系模型。对每种不同的岩石材料,不