

岩石力学与
工程研究著作丛书

岩体流变理论及其 数值模拟

◎王芝银 李云鹏 著



科学出版社

www.sciencep.com

TU452/3

2008

岩石力学与工程研究著作丛书

岩体流变理论及其数值模拟

王芝银 李云鹏 著

国家自然科学基金研究项目(No. 50374049)

科学出版社

元 00.84 价 00

(中 华 人 民 共 和 国 北 京)

内 容 简 介

本书基于岩体流变基本理论,以作者在岩体流变理论、相关实验、数值模拟、反演分析及其工程应用等方面的研究工作为基础,对不同应力状态下岩石黏弹塑性变形全过程的表述方式、对应的本构关系,建立了包括加速流变过程的岩石三维黏弹塑性分析方程;对岩体岩梁与岩板结构,探讨了黏弹性变形解析、分岔失稳与屈曲稳定理论;对岩体流变有限元模拟方法进行了系统研究,包括岩体黏弹塑性分析、流变反演理论、流变损伤、断裂、大变形、流-固耦合与流-固-热耦合流变分析和数值模拟等;同时,介绍了相关理论和模拟方法的工程应用,涉及隧道工程、地下油气储库工程等。

本书适用于力学、水利、交通、石油、采矿、岩土工程及相关领域科研人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩体流变理论及其数值模拟/王芝银,李云鹏著. —北京:科学出版社, 2008

(岩石力学与工程研究著作丛书/冯夏庭主编)

ISBN 987-7-03-020555-1

I. 岩… II. ①王… ②李… III. 岩体流变学-数值模拟 IV. TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 005733 号

责任编辑:沈 建 刘宝莉 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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

*

2008年1月第 一 版 开本:720×1000 B5

2008年1月第一次印刷 印张:17 3/4

印数:1—3 000 字数:335 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副主编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘汉东	刘汉龙	刘宝莉	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长达 400 多 m;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

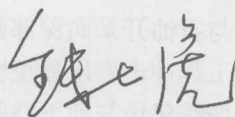
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007~2011年,分期分批出版。到2007年底,已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应以及各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无比的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

前 言

岩石材料及岩体结构在外力及工程环境影响下大多呈现出与时间相关的力学行为,同时受到应力场、渗流场或温度场的变化及其相互作用,有可能使岩体流变变形路径改变,出现加速变形与分岔或由静态过程转变为动态运动,导致出现岩土工程灾害。因此,岩体流变理论与数值模拟长期以来一直是岩石力学与工程应用研究的重要内容之一。随着岩体相关理论、数值模拟方法、宏细微观研究的发展,岩体流变理论与数值模拟的研究更加深入,工程应用领域日益拓展,了解和掌握岩石材料及岩体结构流变性状、复杂条件非线性流变过程及其多场耦合理论、数值模拟方法,已成为岩土力学与工程界的广泛需要,并有助于各类岩土工程、隧道工程、地下工程等进行设计方案优选、快速反馈分析、稳定性超前预测和安全度评价。

本书主要内容是作者在岩体流变理论、相关实验、数值模拟、反演分析及其工程应用等方面的研究工作的总结、提升和发展。其中大部分内容已在国内外重要学术期刊发表,有的已被成功应用于岩体工程实际。全书基于岩体流变基本理论和基本数值方法,首先在第2章对不同应力状态下岩石黏弹塑性变形全过程的表述方式、对应的本构方程、蠕变方程、蠕变破坏时间、蠕变变形与破坏属性等,建立了包括加速流变过程的岩石三维黏弹塑性基本方程;第3章考虑岩体的结构性,探讨了黏弹性岩体不同结构变形解析、分岔失稳与屈曲稳定理论;第4~7章研究给出了岩体流变有限元模拟方法,包括岩体流变有限元模拟方法、流变反演理论、流变损伤、断裂、大变形、流-固耦合与流-固-热耦合流变分析和数值模拟等;第8章介绍了相关理论和模拟方法的工程应用,涉及隧道工程、地下储油岩库工程等。书中内容覆盖:岩石流变实验研究及变形解析,岩板与岩梁黏弹性力学行为分析;岩板与岩梁黏弹性屈曲稳定;岩体损伤、断裂、大变形与分叉;岩体工程流变反演理论;多场耦合流变变形与数值模拟等;既有流变理论解析、相关实验,又涵盖流变数值模拟及工程应用。

全书共8章。第1、4、6、7章和2.4~2.5节由王芝银撰写,第2.1~2.3节和第3、5、8章由李云鹏撰写。王芝银负责全书统稿。另外,参加本书蠕变实验、实验数据整理与结果分析的有博士研究生韩冰、王怡、唐明明等。

岩体的流变现象处处可见。如地层在地应力的长期作用下,发生蠕滑、断裂,人工洞室、隧道围岩随时间发生长期变形,有的甚至坍塌、破坏或岩层失稳,岩梁、岩板、岩柱屈曲失稳,建筑物或构筑物地基长期沉降,煤层采掘引起地层运移、地表沉陷,山地人工活动引起边坡变形随时间的蠕滑或产生快速或高速滑坡等。本书

对其中部分问题进行了探讨,涉及内容十分有限,许多问题还有待进一步深入研究;同时,书中一些观点及理论成果也有待于进一步完善,期待与同行切磋和交流,以促进继续发展和更深层次的探索研究。

书中近期研究成果及本书的出版得到国家自然科学基金(No. 50374049)的资助,作者在此深表谢意。同时,本书的出版得到了《岩石力学与工程研究著作丛书》编辑委员会的专家和学者的关注和支持,谨此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足和欠妥之处,恳切希望读者予以批评指正。

作者

2007年9月于中国石油大学(北京)

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩体流变实验与理论研究	1
1.2 岩体流变数值模拟及工程应用研究	2
1.3 含缺陷岩体流变力学研究	3
1.4 岩体流变参数反演研究	4
1.5 本书的主要内容	4
第 2 章 岩石流变理论与解析方法	6
2.1 岩石流变模型	6
2.1.1 基本模型及流变特性	6
2.1.2 模型选取原则	13
2.1.3 模型参数辨识	14
2.2 三维本构关系与解析方法	19
2.2.1 流变微分型本构关系的一维通式	19
2.2.2 三维本构关系	20
2.2.3 象空间中的黏弹性参数变换式	23
2.2.4 黏弹性问题的解析求解方法	23
2.2.5 黏弹性问题求解示例	24
2.3 现场流变荷载实验解析	27
2.3.1 黏弹性一般解	27
2.3.2 不同流变模型下的变形分析	28
2.3.3 黏弹性参数与模型识别实例	30
2.4 三轴蠕变实验与解析解	37
2.4.1 三轴蠕变实验	37

2.4.2	三轴蠕变实验解析与参数识别	46
2.4.3	花岗岩三轴蠕变实验结果分析	50
2.5	岩石蠕变变形全过程	52
2.5.1	岩石蠕变变形全过程分析	53
2.5.2	岩石蠕变全过程本构方程	55
2.5.3	岩石蠕变全过程本构方程的应用	59
第3章	黏弹性岩体结构变形解析与稳定理论	64
3.1	黏弹性岩板弯曲理论	64
3.1.1	单边自由固支岩板的黏弹性解析	64
3.1.2	复杂边界岩板的黏弹性分析	68
3.2	黏弹性岩板稳定性分析	73
3.2.1	岩层黏弹性分析的薄板力学模型	73
3.2.2	线黏弹性岩板的稳定平衡方程	74
3.2.3	岩板的临界载荷	75
3.3	黏弹性岩梁变形分析	76
3.3.1	黏弹性地基上岩梁的力学模型	76
3.3.2	黏弹性地基上岩梁力学行为分析实例	79
3.4	黏弹性岩梁屈曲稳定分析	81
3.4.1	直立顺层边坡蠕变屈曲的微分方程	81
3.4.2	直立顺层边坡压屈的时间相关性分析	82
3.4.3	直立边坡屈曲载荷与极限坡高分析	84
3.5	层状岩体的变形与分叉	85
3.5.1	岩层平衡路径分支与分叉点	85
3.5.2	岩梁在分叉点的稳定性及后屈曲性态	86
3.5.3	岩层失稳灾变判据及实例	88
3.5.4	考虑不同拉压特性的边坡岩层屈曲变形	93
3.5.5	层状边坡叠梁结构屈曲性态分析	93
3.6	黏弹性岩板动力分析	98
3.6.1	黏弹性薄板振动微分方程	98
3.6.2	不同黏弹性模型岩板振动分析比较	102

第4章 岩体流变有限元模拟理论及方法	106
4.1 黏弹塑性有限元基本方程	106
4.1.1 有限单元法基本方程	106
4.1.2 黏弹塑性有限单元法基本方程	109
4.2 岩体黏弹塑性损伤有限元分析	120
4.2.1 岩体黏弹塑性损伤本构模型与损伤演化方程	120
4.2.2 岩体黏弹塑性损伤有限元分析方程	122
4.2.3 有限元分析程序设计	123
4.2.4 黏弹塑性损伤分析实例	124
4.3 黏弹塑性问题大变形分析	127
4.3.1 岩体黏弹塑性大变形仿真模拟	127
4.3.2 黏弹塑性损伤大变形有限元分析及其实实施过程	130
4.4 岩石断裂过程的有限元模拟	131
4.4.1 基本方程	131
4.4.2 岩石断裂过程有限元模拟的应用	132
4.5 岩体流变加速变形与稳定性	141
4.5.1 岩体流变加速变形系统稳定性问题	142
4.5.2 单元惯性力矩阵的积分	144
4.5.3 流变加速变形分析实例	145
第5章 岩体流变位移的反演理论	148
5.1 反演理论概述	148
5.2 反演分析的基本理论	151
5.2.1 初始地应力与等效节点力	151
5.2.2 线弹性位移反演方程	154
5.3 黏弹性反分析的基本方程	158
5.3.1 黏弹性问题的简化	158
5.3.2 黏弹性本构关系	158
5.3.3 黏弹性有限元位移反分析的基本方程	160
5.4 隧道围岩流变参数反演方程	162
5.4.1 消除部分位移丢失的修正方程	163

5.4.2	考虑空间效应的修正方程	164
5.5	隧道围岩黏弹性参数的反演方法	165
5.5.1	参数回归反演法	166
5.5.2	参数优化反演法	168
5.6	直接反分析法	170
5.6.1	优化反分析法	170
5.6.2	实验设计反分析法	174
5.7	量测支护位移反分析	182
5.7.1	量测支护位移的线弹性增量反分析	183
5.7.2	支护条件下黏弹性位移反分析	190
5.7.3	支架荷载反分析	193
第6章	岩体流-固耦合流变模型及其数值模拟	200
6.1	概述	200
6.2	流-固耦合流变分析的平衡方程	201
6.2.1	平衡方程的基本格式	201
6.2.2	平衡方程的空间离散	202
6.2.3	平衡方程的时间离散	204
6.3	连续性方程	205
6.3.1	连续性方程的基本格式	205
6.3.2	连续性方程的空间离散	214
6.3.3	连续性方程的时间离散	216
6.4	总体控制方程及应用	217
6.4.1	总体控制方程	217
6.4.2	流-固耦合流变损伤分析总体方程	218
6.4.3	流-固耦合流变分析示例	219
第7章	岩体流-固-热耦合流变模型及其数值模拟	222
7.1	概述	222
7.2	流-固-热耦合分析平衡方程	223
7.2.1	本构方程	223
7.2.2	平衡方程的空间离散	223

7.2.3 平衡方程的时间离散	225
7.3 连续性方程	226
7.3.1 连续性方程的基本格式	226
7.3.2 连续性方程的空间离散	232
7.3.3 连续性方程的时间离散	233
7.4 能量守恒方程	234
7.4.1 物体导热的傅里叶定律	234
7.4.2 岩体能量守恒方程	234
7.4.3 能量方程的有限元格式	239
7.5 总体控制方程及有限元实施分析	241
7.5.1 流-固-热耦合流变分析总体方程	241
7.5.2 流-固-热耦合流变损伤分析总体方程	242
7.5.3 理论模型在储存 LNG 岩洞工程中的应用	242
第 8 章 岩体流变数值模拟工程应用	244
8.1 施工建造过程的模拟	244
8.1.1 开挖模拟方法	244
8.1.2 喷射混凝土和衬砌支护模拟	246
8.1.3 锚杆支护的模拟	247
8.1.4 增加荷载的模拟	247
8.2 岩体结构特征及非线性问题的模拟	248
8.3 岩体流变有限元分析步骤	248
8.4 隧道围岩流变有限元分析	249
8.4.1 计算模型与计算参数	249
8.4.2 计算结果分析	250
8.5 地下储油岩洞流变有限元分析	254
8.5.1 计算分析模型及参数	254
8.5.2 流变数值模拟结果分析	255
主要参考文献	259
附录 主要参数说明	265

第 1 章 绪 论

岩体的力学性态不仅表现出弹性和塑性,而且具有与时间相关的性质,这种性质被称为岩体的流变性。岩体尤其是工程岩体(工程岩体是指受到工程扰动影响范围内的岩体)大多处于广义的流变变形之中。随着工程活动、地质作用或各种自然环境变化,岩体或经过一段时间的变形之后处于相对稳定阶段,变形趋于稳定值,或处于长期缓慢蠕变之中。一旦有新的工程扰动、新的地质力学作用、新的自然环境变化,这种相对平稳状态就会被打破,可能又要经过一定的快速变形,进入另一阶段稳定或缓慢蠕变之中;也可能发生物理力学机理上的根本改变,由小变形变为大变形,由静态过程变为动态过程。这种状态或过程转变的出现,主要是岩体内场量的改变和相互作用,使得原来的岩体流变轨迹发生改变所致。从宏观上有时岩体产生较大变形,致使周围工程结构功能丧失,或岩体产生新的裂隙、裂纹,并逐渐扩展或快速发展,达到变形或运动状态急剧改变,以致工程岩体产生整体失稳。从细观和微观上,岩体中力场与环境场相互作用使岩体内部结构发生改变和改组,力学物理特性出现异常,导致出现各种宏观效应和现象。因此,以岩体为工程材料、以岩体为工程环境而建造的工程,常常与岩体相互依存,相互作用,相持平衡。而岩体的流变性,又使这些工程受到岩体材料和岩体结构产生的随时间的变形、应力松弛、时效强度和流变损伤断裂等影响,造成工程结构与环境介质产生长期变形,可能由小变形发展到大变形,由静态、准静态转化为动态位移与运动,导致局部或整体破坏失稳。

岩体流变理论就是研究岩石或岩体在外力、水力、温度、地质特征及施工扰动等各种环境、地质与工程因素作用下,岩体材料及岩体结构与时间相关的力学行为、本构关系、失稳与破坏的规律。它包括实验方法、解析理论、数值模拟及工程应用等研究。虽然,岩体流变理论及其数值模拟的研究已经历了较长的历史,取得了大量成果,但随着现代科学技术和基础工程建设的发展,深化系统地研究岩体在特定环境和条件下的流变理论及其在岩土工程中的应用,对进一步充实岩体流变理论、促进岩体流变理论的工程应用、更有效地评价岩体工程的长期稳定和运营安全均具有重要的理论价值和工程实际意义。

1.1 岩体流变实验与理论研究

岩石流变实验研究是建立岩体流变理论的基础,理论研究又促进了实验研究

的发展。从 20 世纪 30 年代至今,对岩石流变力学特性的实验与理论研究一直受到人们的广泛重视^[1]。流变实验方法涉及室内岩石材料的弯曲实验、扭转实验、单轴压缩实验、三轴压缩实验、剪切蠕变实验、室内岩体结构面剪切实验、现场岩体压缩实验、岩体及结构面剪切蠕变特性实验等;在加载方式上,有单级加载蠕变、分级加载蠕变、分级加卸载蠕变实验等;对于岩石的类别,有砂岩、泥板岩、页岩、盐岩、煤岩、大理岩、花岗岩等,既有软岩、中硬岩,也有高强度硬岩。基于岩石流变实验对本构关系的表述,既有对数和指数函数描述的形式,也有用幂函数定律描述实验结果的表述方式。许多研究者开展了大量的实验与理论研究,取得了丰富的研究成果^[1~20]。如 1939 年和 1940 年 Griggs^[1]对砂岩、泥板岩等进行的系列蠕变实验,从中获得了砂类岩石在荷载达到破坏荷载的 12.5%~80%时将发生蠕变变形的观点,而且蠕变本构关系可采用对数型经验公式来表述。1940 年 Griggs^[1]还证明,孔隙水压力对某些材料的蠕变有非常显著的效应。Ito^[7,8]等先后对 6 根花岗岩、3 根辉长岩试样进行了历时几十年的弯曲蠕变实验,这是迄今为止世界上持续时间最长的岩石蠕变实验。在我国陈宗基以流变学的基本观点对各种岩石力学问题做了一系列的研究^[2]。1961 年将岩体流变理论推广到各向异性岩体;1966 年通过对节理岩体的实验,研究了节理岩体的流变变形及现场流变性的测定;1979 年对岩石蠕变、扩容及本构方程进行研究,建立和发展了岩石流变扩容理论(1983 年)等。国内还有许多学者对岩石流变实验与理论开展了卓有成效的研究^[20],取得了不少新的研究成果^[10~15,20]。

岩体流变实验与理论的研究使人们从中找到了比较普遍的规律,并由实验证明,对于许多岩石的实验室实验,用不同形式的介质模型可给出合理有效的表述。因此,通过基本变形元件(弹簧、阻尼器和摩擦元件)的不同串并联组合模型(如马克斯威尔模型、开尔文模型、广义开尔文模型、伯格模型、宾汉姆模型、西原模型等)建立一维本构方程,然后推广为三维形式,形成较完整的理论体系,并应用于实际问题的分析。如利用黏弹性流变模型研究矿山圆形竖井^[16]、地下巷道^[4]与隧道的围岩应力和变形、围岩与支护系统的相互作用^[17,18]、黏弹-塑性介质中围岩与衬砌的应力状态^[18,19]等相关成果很多,在此不一一列举。

1.2 岩体流变数值模拟及工程应用研究

岩体流变问题的研究与岩土工程密不可分,人们对岩体流变性能的认识,是随着在工程实际中的应用而逐步深入的。土基变形可延续数十年;地下隧道和地下洞库数十年后仍可出现蠕变断裂,如加拿大和欧洲有些隧洞,开始很完好,可是运营 20 多年以后发生开裂。某些岩类由于环境变化而产生的时效膨胀现象已对地下建筑产生严重的影响,瑞典有许多隧洞建在膨胀岩层中,几年之内隧洞收敛变形

达几十厘米,隧洞不能正常使用。我国的铁道隧洞、地下结构、地下洞室、库岸边坡、采掘工程以及深层掘进的煤爆或岩爆中亦有类似现象。对于这些问题,利用流变理论,可进行各种复杂黏弹性、黏塑性、黏弹塑性问题的求解。通常,对于较简单的岩体黏弹性和黏塑性流变问题,可寻找解析解,而大多数岩体流变问题则需要采用数值模拟方法来开展分析和研究,以便更真实地模拟在流变过程中受施工过程等各种工程因素影响的岩体变形行为。

孙钧^[20]对岩土材料的流变特性及其工程应用进行了较为全面系统地研究,涉及岩土材料流变的室内实验、本构模型、解析方法、数值模拟、参数确定与反演、流变细观力学实验、蠕变损伤与断裂以及岩体工程开挖、围岩与支护相互作用、岩质边坡稳定性、软基变形与沉降等工程实践应用的流变效应研究,取得了极为丰富的岩土材料流变与工程应用研究成果。许多学者对岩石流变非线性黏弹、黏塑以及黏弹塑性的数值模拟与工程应用进行了长期系列的研究,包括各种数值模拟软件的开发与应用研究,涉及岩体流变损伤、断裂、考虑不同含水量岩石流变、热流变、多场耦合流变、流变分岔等问题,内容十分丰富,成果甚多^[20~27]。这些研究成果均为发展岩体流变理论及其数值模拟方法奠定了良好的基础,促进了岩体流变问题研究的快速进展。许多成果被成功应用于我国的大型工程之中,获得了良好的效果。

1.3 含缺陷岩体流变力学研究

岩体是基于孔隙基质并含有多节理、多裂隙的非连续体,具有复杂孔隙的土体也有裂隙和多种缺陷结构。因此,对含缺陷岩土体流变学的研究,揭示岩土材料与时间相关的损伤演化、缺陷扩展、形变过程与破坏机理,探讨带缺陷岩体结构的黏弹塑性行为和失效准则,我国在这方面的研究已有可喜的进展。例如:含缺陷岩体流变过程的细观实验与理论研究^[28];含裂纹岩石的流变缺陷扩展与断裂^[29~34];对裂隙蠕变稳定性准则^[35]等方面进行的研究。在缺陷演化过程研究中发现,断裂过程的损伤特性呈现出细观裂纹损伤随时间而演化,细观主裂纹的扩展也具有时效特征,并与岩石宏观时效变形过程之间存在对应关系。还有许多研究者考虑流变损伤进行岩体工程数值模拟研究等^[36,37]。

对含缺陷岩体流变特性的研究,也涉及细观力学方面,如考虑岩体材料内部晶体和晶粒边界存在的空位、位错、晶界、裂纹、杂质等在应力和温度或辐射作用下,空位扩散、位错运动、微裂纹扩展等特殊机理,对于岩体材料流变性能的影响。另外,基于现象学方法的力学模型的研究和基于岩体物理学方法的物理模型的研究,使岩体蠕变、黏弹性蠕变断裂、裂隙岩体黏弹塑性、基于双孔介质的岩体黏弹塑性流变力学模型和物理模型的研究迅速发展。核废料的地下处置和在地层中的长期