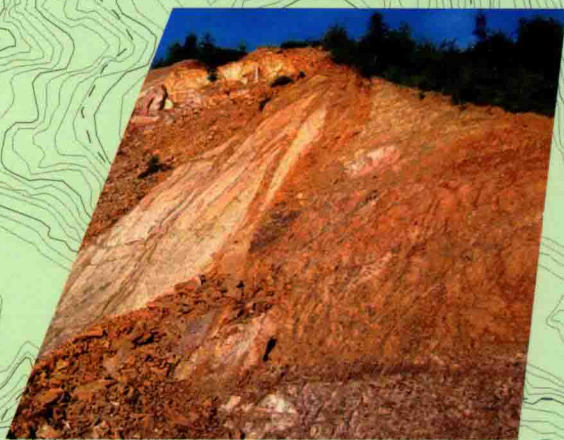


复杂地质环境下边坡流变机理及稳定性研究

王新刚 王家鼎 著



科学出版社

复杂地质环境下边坡流变 机理及稳定性研究

王新刚 王家鼎 著

国家自然科学基金重点项目 (41630639)

国家自然科学基金面上项目 (40972193、41372269)

铁道部重大科技攻关项目 (2005K001-A (G))

中国博士后基金 (2016M602743)

资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金重点项目和多项目面上项目的研究成果,针对边坡失稳中的科学问题和技术难点开展了大量的野外地质调查、现场及室内试验、数值模拟和力学分析等研究工作,获得了一系列创新性成果,内容包括饱水-失水循环作用下岩石的常规与流变试验研究,饱水-失水循环作用对岩石损伤的规律研究,饱水-失水循环作用下岩石损伤流变本构模型,岩石流变本构模型的二次开发与验证,渗透压与应力耦合作用下岩石流变机理研究,不同含水率下岩石剪切流变机理研究,复杂地质环境下考虑流变效应的边坡长期稳定性工程应用研究等。

本书可供广大从事地质灾害分析与防治、工程地质、岩土工程、水利水电、矿山、铁路、交通、建筑等行业的工程技术人员和有关高等院校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地质环境下边坡流变机理及稳定性研究 / 王新刚, 王家鼎著.
—北京: 科学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-03-055559-5

I. ①复… II. ①王… ②王… III. ①复杂地层-边坡-岩体流变学-研究
IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字 [2017] 第 283921 号

责任编辑: 张井飞 白 丹 郭 鹏 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 300 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 一

当代地球科学正面临着新的发展机遇和挑战。一方面,面对全球变化、社会发展需求和人类社会可持续发展,对地球科学提出了新的重大需求(资源、能源、生态、环境、灾害防治等);另一方面,地球科学在20世纪发展的基础上,正处于发展新的科学理论和知识体系的重要关键时期。其中,最突出的是发展当代地学占主导地位的板块构造理论,构建大陆构造与动力学理论体系。而迄今的发展业已表明,在天体地球构造运行演化中,物质运动的流变学问题就是其关键问题之一,而且是地学研究中的薄弱环节,所以流变学问题,尤其是大陆流变学问题,已成为地学研究中突出的核心问题之一。

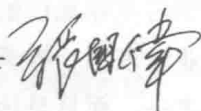
在地球科学中,流变学是探索研究地球组成物质,即岩石,包括从深部核幔到地壳的不同岩石在不同条件下的介质材料,随时间的流动规律的科学。中国大陆属于多块体拼合的大陆,长期处于全球特殊复合构造部位,具有长期、多期活动性,其地表系统和造山带极其复杂,成为当代地学发展前沿领域得天独厚的研究基地与天然实验室,也是大陆流变学试验与研究的良好场所。其中,中国大陆复杂地表系统的工程地质问题,尤其是未成岩松散或未完全固结的各类土质介质材料,如黄土和类黄土的松散介质材料的工程地质问题,就是一个突出的复杂性问题,其流变性,尤其是流体参与下的流变学问题就更为复杂突出。王家鼎教授与其团队长期从事地质灾害机理与防控关键技术研究,取得了重要成果,有新发现、新认识、新成果。该书主要是针对多种高边坡开展的一系列流变试验与理论方面的探索研究的初步总结,获得的创新性研究成果是:①以国家重点工程龙滩水电站的坝址区库岸高边坡“消落带”砂岩、泥板岩的流变试验成果为基础,总结后创新性地提出“非线性黏弹塑性流变模型”(DNBVP模型),并对其进行了二次开发与验证;②以三峡库区典型库岸滑坡岩体为例,进行渗透压与应力耦合作用下的岩石三轴流变试验,研究渗透压作用下岩石的蠕变规律与蠕变模型;③以西藏邦铺矿区花岗岩为对象,进行不同含水状态的剪切蠕变试验,分析不同含水状态下的剪切蠕变规律,并建立一种考虑含水率损伤的非线性黏弹塑性剪切蠕变模型;④根据所提出的流变本构模型,以室内试验和理论研究所研究的边坡稳定性进行概括总结分析。

该书涉及的水电工程、高陡露天采矿工程等的边坡,开挖规模巨大,在内、

外地质动力作用下, 此类高陡边坡所受的地质演化环境变得更为复杂, 造成高陡边坡特殊、复杂的运行环境和荷载条件, 因而其稳定性要求比一般工程更高、安全服役时间更长, 边坡设计、施工与运行的难度也更大。该书的出版正是对复杂地质环境下边坡长期稳定性和工程地质学中的许多重要问题的实验、实施和理论综合分析的总结, 因而具有十分重要的工程意义和科学价值。该书针对工程地质中未成岩介质材料的流变学行为及其构造作用和意义所提出的新认识、新理论可为流变构造学研究提供实际资料、理论参考与工程应用示例。

该书可供工程地质和构造地质研究者与有兴趣的读者阅读和参考。

中国科学院院士



2017年8月于西安

序 二

中国是山地大国,包括高原和丘陵在内,约有山地面积 666 万 km^2 , 占国土总面积的 69.4%, 山区人口占全国总人口的 1/3 以上。随着国家“一带一路”倡议的提出与“西部大开发”的不断深入,我国西部的水利水电、矿山、铁路、公路等都有了蓬勃发展,然而,西部建设的大型工程大多位于深山峡谷地区,地形高低悬殊,地质构造复杂,因此,出现了大量复杂地质环境下的高陡边坡,其使中国灾害成因具有过程复杂性和成灾环境多样性的特点,制约着区域经济发展和社会的进步。

这些复杂地质环境下的边坡影响着周边的工程建设与运营安全,我们既要重视此类边坡施工期间的临时稳定性问题,更要保证日后运营的长期稳定性。然而,边坡工程的变形乃至失稳破坏往往涉及岩体的流变性质,因此,有必要对其性质进行深入研究以充分掌握其流变规律,才能确保此类复杂地质环境下边坡工程的长期稳定性和安全性。

王家鼎教授所带领的研究团队,多年来一直致力于复杂工程地质环境下地质灾害问题的研究,并获得了国际同行的高度认可。该书是其团队在以往研究理论和工程应用实例基础上的总结和提炼,主要包含以下几点创新性成果:①研究了典型库岸边坡“消落带”岩石试样在饱水-失水循环作用下的劣化机理和效应,在 Hoek-Brown 强度准则(简称 GH-B 强度准则)的基础上引入饱水-失水循环作用后岩石累积损伤率,考虑了饱水-失水循环作用对岩石的损伤影响,改进了 GH-B 强度准则,构建了改进的 GH-B 强度准则对应的“GSI 量化取值表格”;②在流变试验的基础上,提出了考虑岩石饱水-失水循环次数 n 损伤的“非线性黏弹塑性流变模型(DNBVP 模型)”,使用 VC++ 编程对该模型进行了基于 FLAC3D 软件的二次开发;③研究了渗透压与应力耦合作用下的岩石流变机理及不同含水率下的岩石剪切流变机理,提出了相应的流变本构模型;④根据所提出的流变本构模型,结合室内试验和理论研究成果分析了龙滩水电站坝址区库岸边坡、三峡库区马家沟库岸边坡、西藏邦铺矿区露采高陡边坡的长期稳定性。研究成果为大量存在的复杂地质环境下边坡岩体的流变机理及其长期稳定性的评价提供了经验积累和理论依据。

相信该书不仅对我国复杂地质环境下边坡流变机理及其长期稳定性的研究有

所促进,而且对我国水利水电、矿山、铁路、公路等工程建设具有重要的参考价值。特为之序。

中国科学院院士

陈鹤鸣

2017年8月于成都

序 三

中国是一个灾害频发的国家，其中大多灾害与边坡相关，如滑坡、山崩、坠石和泥石流等灾害，都是直接危害人民生命财产的重大自然灾害，因此边坡工程的灾变失稳机制与稳定性研究一直是众多学者研究的重点工作。由于受地质条件复杂性、水文条件多样性及荷载条件多样性等多方面的影响，边坡工程处于一个复杂的孕灾环境中，因此边坡失稳破坏问题是一项集复杂性、高度不确定性及动态变化特性于一体的系统性问题，涉及面广、涵盖内容多。

随着中国“一带一路”战略的提出和“西部大开发”的不断深入，中国的水利水电、矿山、铁路、公路等方面都有了蓬勃发展，这些涉及的大型工程大多地处崇山峻岭中的深山峡谷地区，地形高差悬殊，地质构造复杂，因此，出现了大量的复杂地质环境下的高陡边坡，致使中国灾害成因具有过程复杂性和成灾环境的多样性，制约区域经济的发展和社会进步。

王教授与其团队长期从事地质灾害机理与防控技术研究，成就斐然。该专著是过去科研工作的延伸和深化，针对多种复杂地质环境下的高边坡开展的一系列流变试验与理论方面的科研工作，取得了一系列创新性成果：①改进了 Hoek-Brown 强度准则，并构建了新的“GSI 量化取值表格”；②创新性的提出了一种“非线性黏弹塑性流变模型（DNBVP 模型）”，并对其进行了二次开发与验证；③对渗透压与应力耦合作用下岩石流变机理和不同含水率下岩石剪切流变机理进行了研究，提出了相应的流变本构模型。王教授与其团队的研究成果为大量存在的复杂地质环境下边坡的流变机理及稳定性评价，提供了试验积累和理论依据。

该专著将理论与实践相结合，介绍了中国一些复杂地质环境下边坡工程的流变问题，提出了新认识、新理论。该专著的出版，将有力地推动世界范围内地质灾害的防治和工程地质学的发展，具有十分重要的工程意义和科学价值。我非常乐意为此书作序，希望王教授及其团队持之以恒，取得更加丰硕的成果。

加拿大渥太华大学教授 *V. Gai Krishna*

2017. 09. 30

Preface 3

China is a natural disaster-prone country; most of these disasters are related to slope failures which include landslides, slump slides, rockfalls and mudflows. These disasters have a significant impact on human lives, natural and man-made slope terrain and civil engineering infrastructure. For this reason, the slope failing mechanism and analysis of slope stability problems have attracted the attention of numerous researchers. Slope problems are complex, highly uncertain, dynamic and systemic problems, covering a wide range of research fields, since the failure of slope is developed under fairly complicated geological, hydrological and loading conditions.

Professor Jia-Ding Wang and his research group members have worked on loess slopes for several decades. Research under his leadership contributed to the development of constitutive and numerical models to better understand the mechanism of loess slope failures and prevention along with the treatment of loess landslides. Most of the investigations based on large scale in-situ and extensive experimental studies using state-of-the-art equipment. This monograph is a summary as well as an extension of their work in the past which includes a series of rheological tests and theoretical researches that were carried out on high loess slopes in complicated geological environment. The achievements include: ① the Hoek-Brown strength criterion was modified, and a new GIS quantized value form was proposed; ② a nonlinear viscoelastic-plastic rheological model (i.e. DNBVP model) was proposed, tested and validated; ③ the rheological behaviour of rocks under the coupling effects of osmotic pressure and stresses and the shearing and rheological behaviour of rocks with various water contents were investigated, and a rheological constitutive model was proposed. These achievements provide theoretical references for researches related to the rheological behaviour and stability analysis of high loess slopes in complicated geological environment.

In summary, the publication of this monograph will undoubtedly promote the advancement of prevention and treatment of geological disaster and principles of geological engineering around the world, and hence is of great value to engineering practice and scientific research. I am very honored to write a preface for this monograph; I wish Professor Wang and his research group all the best and will be eagerly waiting to learn more about their on-going research achievements for addressing loess slope problems in the near future.

V. Gai Krishna

Professor of Civil Engineering, University of Ottawa

前 言

随着人类工程活动的日益频繁及范围的扩大,我国的水利水电、露天矿山等方面都出现了大量高陡开挖边坡。水电开发往往在高山峡谷中进行,山体雄厚,危岩体发育,地质环境复杂多样;水电工程边坡具有规模巨大、坡度陡峻、运营时间长、设计和施工难度大等特点。露天采矿边坡的地质环境条件也通常极为复杂,露采边坡具有高度大、总体边坡角度陡、开采过程扰动因素大、开采时间长、失稳危害严重等特点。

鉴于此,迫切需要对这些大型水利水电、露天矿山边坡的岩体流变力学特性进行更深入的研究。建立恰当的流变本构模型来描述和模拟岩石力学特性与时间之间的关系,从而为进行此类复杂地质环境下边坡岩体的流变机理及其长期稳定性评价与分析,提供试验积累和理论依据。

本书主要介绍了作者近年来在龙滩水电站库岸边坡、三峡库区库岸边坡、西藏邦铺矿区高陡露天采矿边坡开展的一些研究工作。内容包括饱水-失水循环作用下岩石的常规与流变试验研究,饱水-失水循环作用对岩石损伤的规律研究,饱水-失水循环作用下岩石损伤流变本构模型,岩石流变本构模型的二次开发与验证,渗透压与应力耦合作用下岩石流变机理研究,不同含水率下岩石剪切流变机理研究,复杂地质环境下考虑流变效应的边坡长期稳定性工程应用研究等。

本专著的成果是在国家自然科学基金重点项目(编号:41630639)、中国博士后基金(2016M602743)等项目的资助下完成的。

本书可供广大从事地质灾害分析与防治、工程地质、岩土工程、水电水利、矿山、铁路、交通、建筑等行业的工程技术人员和有关高等院校相关专业的师生参考使用。

在本书的研究工作中,中国地质大学唐辉明教授,胡新丽教授,胡斌教授,李长东教授给予了莫大的帮助,西北大学谢婉丽副教授、谷天峰副教授、贾鹏飞讲师等同事提出很多建设性意见及建议,同时有数十名博士、硕士研究生参与了本书的现场调研、室内试验、理论分析工作,感谢连宝琴博士、蒋海飞硕士对本书文字校对方面做了大量细致的工作。借此机会,特向对本书研究提供帮助、支持和指导的所有领导、专家和同行表示衷心的感谢!

由于学术水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年10月1日

目 录

序一	
序二	
序三	
前言	
第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 岩石流变试验研究	3
1.2.2 考虑水作用的岩石流变研究现状	3
1.2.3 流变本构模型的研究	4
1.2.4 流变本构模型参数辨识与反演研究	4
1.2.5 流变本构模型的二次开发研究	5
1.3 工作思路	5
1.4 主要成果	6
第2章 饱水-失水循环作用下岩石的常规与流变试验研究	8
2.1 取样位置与岩样制取	10
2.2 “饱水-失水”循环试验方案与设备	12
2.3 岩石单轴压缩试验	13
2.3.1 试验步骤	14
2.3.2 试验成果整理及计算方法	14
2.4 岩石抗拉强度试验	16
2.4.1 试验步骤	16
2.4.2 试验成果整理及计算方法	17
2.5 岩石三轴试验	17
2.5.1 试验步骤	18
2.5.2 试验结果	18
2.6 岩石三轴流变试验	24
2.6.1 试验步骤	25
2.6.2 三轴流变试验后破坏形态分析	28
2.7 本章小结	32

第3章 饱水-失水循环作用对岩石损伤的规律研究	34
3.1 岩石饱水-失水循环次数与单轴抗压强度关系	34
3.2 岩石饱水-失水循环次数与抗拉强度关系	37
3.3 岩石饱水-失水循环次数与三轴力学性质的关系	39
3.4 岩石物理力学参数向岩体力学参数过渡的研究	41
3.5 本章小结	54
第4章 饱水-失水循环作用下岩石损伤流变本构模型	56
4.1 岩石的元件组合流变模型	56
4.2 饱水状态下岩石的流变本构模型	62
4.2.1 饱水状态下岩样流变规律分析	62
4.2.2 岩石流变模型的辨识方法与基本原则	69
4.2.3 流变模型辨识与参数求解软件——OriginLab 介绍	71
4.2.4 饱水状态下岩样流变模型辨识	74
4.2.5 一种非线性黏弹塑性流变模型建立	81
4.3 饱水-失水循环损伤下岩石损伤流变本构模型	89
4.4 本章小结	95
第5章 流变本构模型的二次开发与验证	97
5.1 DNBVP 模型在 FLAC3D 软件中的实现	102
5.1.1 FLAC3D 软件自定义本构模型	102
5.1.2 编译环境的设置	103
5.1.3 DNBVP 模型程序开发流程	104
5.2 DNBVP 模型算例验证	108
5.2.1 流变二次开发模型黏弹性部分程序验证	108
5.2.2 流变二次开发模型黏塑性部分程序验证	109
5.2.3 流变二次开发模型饱水-失水循环劣化损伤部分程序验证	112
5.3 本章小结	115
第6章 渗透压与应力耦合作用下岩石流变机理研究	116
6.1 取样位置与试验成果	116
6.1.1 岩石取样位置及其物质成分分析	116
6.1.2 岩石三轴压缩试验	117
6.1.3 渗透压与应力耦合下的三轴流变试验	119
6.1.4 三轴流变试验成果	120
6.2 流变应变时效规律分析	121
6.2.1 轴向应变规律	121
6.2.2 环向应变规律	125

6.2.3 体积应变规律	128
6.3 应变速率分析	131
6.3.1 非加速应变速率	131
6.3.2 加速应变速率	145
6.4 岩石长期强度分析	148
6.4.1 等时应力-应变曲线法	148
6.4.2 稳态流变速率法	150
6.4.3 对比分析	152
6.5 黏弹性流变模型辨识及其参数求解	153
6.6 本章小结	163
第7章 不同含水率下岩石剪切流变机理研究	164
7.1 取样位置与工程概述	164
7.2 试验仪器与试验方法	165
7.2.1 试验仪器	165
7.2.2 试验方法	166
7.3 剪切流变试验结果与分析	167
7.4 考虑含水状态的损伤流变本构	170
7.4.1 考虑含水损伤效应的流变模型	171
7.4.2 DNVPB 模型一维流变方程	173
7.4.3 DNVPB 模型三维流变方程	173
7.5 剪切流变模型的参数辨识及验证	175
7.6 本章小结	176
第8章 复杂地质环境下考虑流变效应的边坡长期稳定性工程应用研究	178
8.1 龙滩水电站坝址区库岸边坡长期稳定性分析	178
8.1.1 工程基本概况	178
8.1.2 不考虑流变特性的坝址区库岸高边坡稳定性分析	180
8.1.3 流变参数反演与考虑流变特征的坝址区库岸边坡稳定性分析	206
8.2 西藏邦铺矿区露采边坡长期稳定性分析	216
8.3 本章小结	220
参考文献	223

第1章 绪 论

1.1 研究背景

随着人类工程活动的日益频繁和范围扩大，我国的水利水电、露天矿山等方面出现了大量的高陡开挖边坡，见表 1-1，而且在此类开挖边坡开口线之上还可能存在数百米甚至千米以上的自然边坡。水电开发往往在高山峡谷中进行，山体雄厚，危岩体发育，地质环境复杂多样，水电工程边坡具有规模巨大，坡度陡峻，运营时间长，设计和施工难度大等特点（周创兵，2013）；露天采矿边坡的地质环境条件通常也极为复杂，露采边坡具有高度大、总体边坡角度陡、开采过程扰动因素大、开采时间长、失稳危害严重等特点（王新刚等，2011）。

表 1-1 我国部分水电、露天矿工程高边坡

序号	工程名称 (水电站)	自然坡度 /(°)	开挖坡高 /m	序号	工程名称 (露天矿)	最终边坡角 /(°)	开挖坡高 /m
1	小湾	47	670	1	大冶铁矿	41~43	444
2	锦屏一级	>55	530	2	峨口铁矿	42	720
3	大岗山	>40	380~410	3	南芬	35~46	500
4	溪洛渡	>60	300~350	4	抚顺西	25~30	400
5	天生桥	50	350	5	平庄西	32~37	400
6	糯扎渡	>43	300~400	6	水厂	30~47	700
7	白鹤滩	>42	400~600	7	厂坝	43~48	600
8	乌东德	>43	430	8	松树南沟	42~49	340
9	龙滩	>40	420	9	西藏邦铺	35~38	1065

岩体大多处于流变变形中，岩体的流变性是岩石力学研究和工程预测中的基本理论问题（陈宗基和康文法，1991；孙钧，1999）。岩体的流变特征与岩土工程的长期稳定性和安全性密切相关，大量的工程实践和研究都表明了岩体失稳破坏与时间有着密切的关系（Xu et al.，2012；王新刚等，2014；Wang et al.，2016），岩体流变常常会引起如滑坡、地基失稳等自然灾害（蒋海飞等，2013；王新刚等，2016；Jane，2017）。通过研究岩石的流变性能，可以分析复杂地质环境下边坡岩体长期稳定性和工程地质学中的许多重要问题。

如果忽视了岩土体的流变特性,往往会引发灾难性后果,如意大利 Vaiont 大坝库岸因水库蓄水影响下软弱层的流变效应而发生大滑坡,造成了 1925 人死亡,700 余人受伤 (Hendron and Patton, 1987; 王新刚等, 2014); 法国的马尔帕塞大坝因岩体中的断续裂隙面不断地蠕变、扩展,进而产生宏观断裂,最终发生溃决破坏 (黄达和黄润秋, 2010), 造成 500 余人死亡和失踪,财产损失达 300 亿法郎; 1989 年发生在甘肃省永靖县盐锅峡镇焦家崖头的高速滑坡 (王家鼎, 1992), 1990 年天水市锻压机床厂发生的大型滑坡 (王家鼎等, 1993), 均是由于岩土体蠕动变形而发生滑带岩土体抗剪强度降低的情况,在重力作用下蠕动变形达到一定的临界值,发生灾害。

水利水电、露天矿山等涉及的高边坡工程,它们的服务年限长达数十年甚至上百年,这些大型工程的开挖边坡既需要重视施工期间的稳定性问题,更要保证日后运营的长期稳定性,而其边坡工程的变形乃至失稳破坏往往涉及岩体的流变性质,因此,必须考虑边坡岩体的流变性质,并且有必要对其流变性质进行深入研究以充分掌握其流变规律,才能确保此类边坡工程的长期稳定性和安全性。

鉴于此,迫切需要对这些大型水利水电、露天矿山边坡的岩体流变力学特性进行深入研究。建立恰当的流变本构模型来描述和模拟岩石力学特性与时间之间的关系,从而为进行此类复杂地质环境下边坡岩体的流变机理及其长期稳定性评价与分析提供试验积累和理论依据。

1.2 国内外研究现状

国内外学者在岩石流变学等相关领域进行了大量卓有成效和富有开拓性的研究,积累了丰富的研究经验,取得了一定的研究成果,使岩石流变力学获得了重大进展,并为相关的岩土工程问题的解决提供了新的思路和重要的理论依据。在国内,陈宗基院士等率先提出并开展了岩石流变力学问题的研究。在孙钧院士等一大批研究学者的推动下,岩石流变力学从试验研究、理论分析到本构模型的识别等方面得到了系统的发展与突破 (王思敬, 2004)。

流变学是一门研究物体在力场或其他外界因素作用下,物体的流动与变形的科学。它的基本研究内容是揭示物体应力-应变状态规律和其随时间的变化情况,并建立与之相应的流变本构方程,从而解决工程实际中所遇到的相应问题 (孙钧, 1999)。

岩石的流变特性是岩土工程研究领域应当认真对待的重要问题。岩土工程中所遇到的诸多问题往往都与岩石的流变特性有着密不可分的联系 (王芝银和李云鹏, 2008; Wang et al., 2016; Wu et al., 2017)。

多年来,众多学者研究探讨了采用流变力学理论来解释和处理边坡 (Furuya

et al., 1999)、地下洞室 (Debernardi and Barla, 2009; Barla et al., 2012)、大坝坝基 (张强勇等, 2011) 等工程中所遇到的各种随时间变化有关的问题和现象 (徐卫亚等, 2006; 王新刚等, 2014, 2016; Wu et al., 2017)。进行岩石流变力学特性研究, 发掘岩石在流变破坏过程中的规律, 对水利水电、矿山、道路交通、核能工程、民用建筑等领域具有十分重要的现实意义。

1.2.1 岩石流变试验研究

岩石流变试验分为室内和现场两种。Griggs (1939) 最早对岩石进行了流变试验研究; 葛修润 (1987) 介绍了岩石大型三轴试件的变形和强度特性; 陈宗基和康文法 (1991) 对泥板岩、砂岩进行了长达 8400h 的流变试验, 研究探讨了岩石的流变、封闭应力和扩容现象; Boukharov 等 (1995) 对易碎岩体的流变三阶段进行了研究; 陈卫忠 (1998) 通过模型试验、理论分析和数值计算方法系统地研究了断续节理岩体的蠕变损伤断裂机理; 徐卫亚等 (2005) 对绿片岩进行了流变试验, 建立了七元件的岩石非线性黏弹塑性流变模型; Fabre 和 Pellet (2006) 介绍了三种高比例黏土颗粒泥岩的静态和循环单轴流变试验结果, 分析其流变特性; Aydan 等 (2014) 代表 ISRM (国际岩石力学学会) 对岩石流变特性的试验方法进行了建议。

流变试验是获取岩石流变行为特性的一个主要方法。因此, 在过去的几十年里, 很多学者对各种岩石——岩盐 (Yahya et al., 2000; Zhou et al., 2011; Fuenkajorn et al., 2012; Sheinin and Blokhin, 2012)、泥岩 (Pham et al., 2007)、页岩 (Yang and cheng, 2011)、泥灰岩 (Tomanovic, 2006)、石灰石 (Maranini and Brigooli, 1999; Nedjar and Le Roy, 2013)、黏土岩 (Pellet et al., 2013; Gilles et al., 2017)、花岗岩 (Wang et al., 2016)、凝灰岩 (Ma and Daemen, 2006)、砂岩 (Jiang et al., 2013; Brantut et al., 2014; Wu et al., 2017) 等的室内单轴或三轴流变行为试验进行了研究。

1.2.2 考虑水作用的岩石流变研究现状

水是影响岩土工程安全最活跃的因素 (王新刚等, 2013a, 2013b, 2013c; 王家鼎和王建斌, 2016), 诸多地质灾害, 如泥石流、降雨型滑坡、地面沉降、水库诱发地震、煤矿突水、岩溶塌陷等, 都是水-岩相互作用引起的结果。岩石在遇水后会产生弱化现象, 岩石的物理力学性质发生改变, 从而降低了岩土体的稳定性 (Agan, 2016)。而随着时间的推移, 水在岩石孔隙中进行扩散, 岩石的长期强度、峰值强度、弹性模量、黏滞系数等都有所减弱, 而流变速率却愈加显著, 水的存在加剧了岩石的流变特性 (王新刚等, 2014; Wang et al., 2017), 因此, 对饱水状态下岩石的流变特性进行研究具有十分重要的意义。Conil 等

(2004) 根据泥岩试验成果, 建立了用于描述损伤对水-力耦合影响的孔隙塑性模型; Xie 和 Shao (2006) 研究了岩石在饱和水条件下的弹塑性特性; 王芝银和李云鹏 (2008) 建立了岩体应力场与渗流场耦合作用下的流变分析模型; 杨圣奇等 (2006) 对饱和状态下的硬岩进行了三轴流变破裂机制研究; Okubo 等 (2008, 2010) 对饱和水和风干两种状态下的岩石蠕变特性进行了试验研究; Wang 等 (2016) 对不同含水率情况下的花岗岩进行了剪切流变试验研究; 王新刚等 (2016) 对渗透压力和应力耦合下的泥岩进行了流变试验, 提出了一种描述其流变特性的本构模型。

1.2.3 流变本构模型的研究

岩石的流变本构模型辨识一直是国内外学者研究的重点, 岩石流变的本构模型一般通过以下方法建立: ①经验流变模型; ②元件组合模型; ③采用非线性元件, 以及断裂力学、内时理论、损伤力学等理论来建立岩石流变本构模型。其中, 元件组合模型是用胡克体 (H)、牛顿体 (N)、圣维南体 (S) 等组合来模拟岩土体的弹性、塑性、黏弹性、黏塑性等流变力学特征, 在描述流变变形时灵活简便, 且能够较好地应用于工程实例的数值分析, 因此, 在描述岩石材料的流变特性中应用较广 (Cai et al., 2004)。但是因为元件模型是线性的流变体, 所以普遍存在以下几个问题 (王新刚, 2014): ①线性模型虽能够描述岩石变形的发展, 但却无法对岩石的破坏特性进行准确的描述, 更无法对岩石的强度载荷的速度效应给出定量分析; ②线性模型虽然能够反映岩石的模量随着载荷速度增加的变化规律, 但却与试验结果的差异甚大; ③对流变应力与流变时间之间的关系, 无法给出定量的描述; ④尽管其元件组合形式多变、复杂, 但均只能反映岩石的线性特征, 即只能描述岩石在加速流变阶段之前的线性特性, 而无法描述岩石的加速流变阶段的非线性特征, 为解决这一问题, 相关学者对元件模型进行了非线性化的改进。例如, Steipi 和 Gioda (2009)、Gao 等 (2010) 对岩石的流变模型进行了改进, 用以描述岩石的黏弹塑性流变力学特征; Yang 等 (2013) 对辉绿岩进行了流变试验研究, 并提出了一种描述其流变特性的非线性模型; Nedjar 和 Le Roy (2013) 针对石膏岩长期流变特性, 提出了一个黏弹性损伤模型; Chen 和 Wang (2014) 针对考虑温度效应的花岗岩, 提出了一种损伤力学流变模型; Sun 等 (2016) 对滑带碎石土的流变特性进行了研究, 提出了一种非线性流变模型。

通过以上学者的研究可见, 岩石非线性元件流变模型适用性较强, 但元件模型的非线性化仍是岩石流变力学理论发展的一个重要课题。

1.2.4 流变本构模型参数辨识与反演研究

流变本构模型参数确定的方法主要有试验数据取点法、绘图法、试验数据回归