

THEORIES OF UNLOADING ROCK MASS
MECHANICS AND ITS ENGINEERING PRACTICE

卸荷岩体力学 原理与应用

李建林 王乐华 等 著



科学出版社

卸荷岩体力学原理与应用

Theories of Unloading Rock Mass Mechanics
and Its Engineering Practice

李建林 王乐华 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是三峡大学过去十年来有关卸荷岩体力学的最新研究成果,涵盖了工程地质条件分析,卸荷岩体质量评价,卸荷岩体各向异性、尺寸效应、流变特性、断裂性能、屈服准则、本构关系和加固机理,卸荷岩体地震作用,开挖优化设计与分析方法,以及卸荷岩体参数反分析和卸荷岩体力学的工程应用等内容。

本书可供水利工程、土木工程、交通工程等相关领域的科研工作者和高等院校师生使用,也可供上述相关部门的领导、专家和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卸荷岩体力学原理与应用=Theories of Unloading Rock Mass Mechanics and Its Engineering Practice/李建林等著. —北京:科学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-03-046306-7

I. ①卸… II. ①李… III. ①岩石力学-研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 267743 号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 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:38 1/4

字数:747 000

定价:268.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

众所周知,天然岩体中存在初始应力状态,工程中岩体开挖会导致这种应力卸荷,使岩体中产生应力重分布。对于含有节理、裂隙等结构面的岩体,加载时其仍具有很好的力学性能,而一旦遭遇卸荷,特别是当卸荷导致岩体出现拉应力时,岩体的力学特性将发生本质变化,这将导致岩体质量迅速劣化,其力学性质与加载状态下的力学特性有着本质区别。因此,在对复杂卸荷岩体工程进行分析研究时,必须重点考虑卸荷这个影响因素。只有这样,才能比较真实地反映复杂卸荷岩体工程的开挖特征。

原中国长江三峡工程开发总公司总工程师哈秋龄教授等曾以三峡永久船闸高边坡为研究对象,应用系统工程原理和方法组织多学科对岩体在卸荷条件下的力学特性进行了一系列深入的研究,据此对岩体卸荷力学特性进行理论上的创新和工程上的应用,并最终提出卸荷岩体力学的概念。自哈秋龄教授等提出卸荷岩体力学的概念以来,卸荷岩体力学理论越来越受到专家学者们的认同,在此期间,卸荷岩体力学的研究也获得长足的进展。

随着我国“西部大开发”战略的提出,众多水利水电、道路交通、铁道运输、矿山煤田等工程建设向西部地区转移,而西部地区大多是高山峡谷地区,环境条件恶劣,地质构造更为复杂,复杂卸荷岩体工程所遇到的建设难度也越来越大。令人欣慰的是,我国众多科技工作者没有在越来越难的研究课题面前畏缩不前,而是以开山劈路的大无畏精神,勇往直前,取得了一个又一个佳绩,为我国复杂卸荷岩体工程的顺利建设做出了不可磨灭的贡献,也为我国在国际舞台上赢得了国际同行们的充分肯定。在这众多的科技工作者中,本书作者李建林同志就是其中的一位佼佼者。

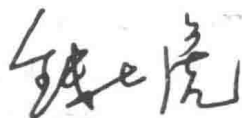
本人参与过三峡工程的科研工作,由于三峡工程科研工作的关系,很早就认识了李建林同志,在科研工作中与他有了更多的交流。早在李建林同志作为哈秋龄教授的博士研究生参与国家重大科技项目攻关时,我就对他有了较为深刻的印象:对待科研工作一丝不苟,特别能吃苦,有问题能及时虚心向专家学者们请教。虽然李建林同志当时已经担任了一定的行政职务,但他的科研成果尤其是博士论文获得了评审专家们的一致好评,其对卸荷岩体力学的提出与发展做出了重要贡献。李建林同志后来一直在卸荷岩体力学的研究道路上孜孜不倦地努力,遇难不退缩,并在三峡大学逐渐形成了一个稳定的“卸荷岩体力学”科研团队。在他的带领下,该团队取得了一个又一个佳绩。在基础理论研究方面,该团队获得了众多国家和

地方纵向项目的支持,多项国家和省部级的奖励,以及多项发明专利的授权,撰写了多部专著和教材,发表了多篇有影响力的学术论文;在服务工程建设方面,该团队与国内众多水利水电勘察设计研究院、水电开发公司及水利水电施工单位展开全方位的合作,利用自己的科研成果,及时为相关复杂卸荷岩体工程提供技术服务和技术咨询,为相关工程的顺利推进提供了强有力的技术支撑。尤其难能可贵的是,李建林同志秉承“前人栽树、后人乘凉”的育人理念,努力为团队里的年轻人提供各种锻炼机会。在他的带领下,一批批年轻的科研人员茁壮成长起来,逐渐成为团队和相关单位的中坚力量。

今天,李建林同志及其科研团队拟将十多年的研究成果结集出版,以飨业界众多科研工作者,这对岩石力学与工程学术界来说是一项重要的学术交流活动。细细读来,发觉该书在卸荷岩体力学研究方面补充了不少重要的我所未知的好成果。这些成果在多个大型水利水电工程中得到了成功应用,取得了显著的经济社会效益,具有广阔的推广应用前景。唐代贾岛在《剑客》中所云“十年磨一剑”,用来形容李建林同志及其科研团队的工作恰如其分。多年的辛勤耕耘,终于换来了今日的“硕果累累”,可喜可贺!

路漫漫其修远兮,吾将上下而求索。科研之路注定是一条永远没有终点、永远充满艰辛的探索之路,需要我们淡泊名利、顽强坚守和默默付出。此时此刻,我乐意为该书写序,并乐意推荐该书到科学出版社出版。同时,希望本书作者及其科研团队能够秉承屈子的“求索”精神,在科研之路上取得更多的研究成果,为我们国家的经济社会发展再做贡献!

中国工程院院士



2014年5月20日

前 言

本书是本团队在过去研究的基础上,近十年来有关卸荷岩体力学方面研究的最新成果的系统总结,涵盖卸荷岩体力学研究涉及的各个方面。应该说,自从哈秋龄教授提出卸荷岩体力学概念以来,经历三代科技工作者的努力,有二十多年长期坚持研究的成果。本团队的研究工作促进了卸荷岩体力学研究的深入开展,无论是试验研究、理论探索,还是工程实践,均取得较大的进展。到目前为止,本团队获得十多项省部级以上的奖励、发表上百篇论文并应用于许多的实际工程中。通过上述研究,我们取得以下一些有意义的成果。

(1) 系统地总结了本团队从事卸荷岩体力学各个方面的研究成果,涵盖了卸荷岩体力学研究的全新、全部内容,包括工程地质条件分析,卸荷岩体质量评价,卸荷岩体的各向异性、尺寸效应、流变特性、断裂性能、屈服准则、本构关系和加固机理,卸荷岩体地震作用,开挖优化设计与分析方法,以及卸荷岩体参数反分析和卸荷岩体力学的工程应用等方面。

(2) 通过对岩体分类的系统研究,提出了将岩体开挖卸荷效应中的卸荷量作为国际上通用的工程岩体分类方法(rock mass rating, RMR)中的一个因素进行考虑,揭示了岩体 RMR 值随开挖后卸荷量的增大基本呈线性递减的趋势,给出了相应的计算公式。改进后的 RMR 方法更适合于开挖卸荷岩体的工程分类与质量评价。

(3) 为了深入研究卸荷岩体的各向异性特性,通过对含显著平行、垂直层理和不同夹角节理的砂岩进行三轴加、卸荷各向异性试验研究,揭示了节理岩体变形特征、强度特征和破坏特征各向异性变化特性与规律,并给出了相应的各向异性力学参数计算公式。

(4) 通过对完整及节理岩体进行三轴卸荷流变力学特性试验研究,揭示了岩体的卸荷流变变化规律,掌握了节理对岩体流变长期强度弱化作用明显的特点,得出了不同倾角的节理岩体流变长期强度差异性显著的结论,并据此提出了相应的损伤演化方程,建立了新的岩石非线性卸荷流变损伤模型。

(5) 为了掌握卸荷岩体的本构理论,进行了大量的三轴卸荷流变力学试验,并根据砂岩保持应力差不变的卸围压试验和升轴压卸围压等方面的复杂应力试验研究,建立了增量型的卸荷弹脆塑型本构模型;根据岩体卸荷应力应变关系为曲线的特征,提出了卸荷双曲线型非线性弹性本构模型。这些本构模型均已应用于实际工程的计算中。

(6) 在模拟岩体加固理论与方法方面,采用等效计算试块法,揭示了加锚裂隙岩体在不同加卸载路径作用下力学特性差异性较大的特征,验证了裂隙岩体加固前的应力状态对加固效果有显著影响的结论。由此得知,在分析卸荷岩体边坡加固时,必须考虑裂隙岩体卸荷历史作用所带来的影响。此外,还提出了岩体加固的区域、时间、措施优化等问题。

(7) 为了确定开挖边坡的最优开发体型,基于边坡岩体的开挖卸荷效应原理,综合考虑开挖边坡的稳定性和经济性两大因素,提出了工程中如何确定边坡开挖体型的最优方案。研究表明,考虑开挖卸荷效应后,开挖边坡的计算参数的选用在一定程度上有所降低,但工程造价则会相应提高。

(8) 为了有效地确定岩体宏观力学参数,在人工神经网络法中考虑岩体的开挖卸荷效应,运用人工神经网络方法来反演岩体力学参数,并运用反演结果对开挖卸荷岩体进行正分析计算。与实际工程监测结果的对比分析表明,该方法比传统分析方法更加贴近工程实际。

(9) 针对拱坝的受力特点,提出并考虑了岩体开挖卸荷效应影响下坝肩开挖边坡与坝体的相互作用问题,基于该方法的计算成果与监测结果较吻合。研究表明,在实际工程中应该考虑岩体的开挖卸荷效应,也就是要运用开挖卸荷岩体力学理论来研究坝体与边坡的相互作用问题。

(10) 通过理论与工程实践,本团队进一步完善了卸荷岩体力学理论与方法体系,极大地丰富了卸荷岩体力学的研究内容,凝练了开挖卸荷岩体工程的分析思路与流程,并将该理论成功地应用于国内 30 余个复杂条件下的水利水电工程中,解决了工程中存在的一些关键科学技术难题,取得了显著的经济效益和社会效益。

需要说明的是,本书的研究成果是作者本人和团队成员在近十年的研究基础上形成的,这一阶段为卸荷岩体力学理论与方法的全面完善和广泛应用阶段。在此期间,作者先后主持并完成了 4 项国家自然科学基金项目,1 项国家“十一五”科技支撑计划项目,3 项湖北省和教育部项目,10 余项三峡、清江、大渡河、澜沧江、金沙江、雅砻江等流域科研项目。作者本人和团队要特别感谢这些项目的支持单位,因为这些项目的研究为卸荷岩体力学的理论与应用提供了重要支撑,没有这些项目的研究,不可能有今天的成果。研究过程中首先启动的是多项国家自然科学基金项目及相关的纵向科研项目,然后进行的是解决工程实际问题的横向科研项目。在研究过程中,本团队纵、横向项目交叉推进,互为依托、相互印证。另外,本团队多年来一直依托三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室、三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心、原国电公司岩土工程研究中心等重点基地开展研究工作。正是因为充足的科研经费、完善的软硬件设施及各方面的科研政策支持,才有了本团队取得的一系列研究成果。

多年来,在本团队中参与相关项目研究,并且参与本专著编写工作的有王乐华、邓华锋、刘杰、黄宜胜、王孔伟、王瑞红、王宇、赵二平、郭永成、孙旭曙、王兴霞等博士,其中第一章由李建林编写,第二章由王孔伟编写,第三章由王瑞红编写,第四章由王兴霞编写,第五章由孙旭曙编写,第六章由王宇编写,第七、八、十四章由刘杰编写,第九章由赵二平编写,第十章由邓华锋编写,第十一、十六章由黄宜胜编写,第十二章由郭永成编写,第十三、十五章由王乐华编写,最后由王乐华、黄宜胜统稿,李建林审核。在本团队学习过的许多硕士研究生也参与了部分项目的研究和内容的编写工作。正是团队成员们的共同努力和无私奉献,才使得项目研究如期完成,本书得以出版,在此,本人对为本团队项目研究和本书的编写付出辛勤劳动的各位表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,作者及团队成员参阅了大量的书籍、论文和工程报告等专业资料。虽然书中已尽量列出这些参考资料的出处,但有些参考资料仍有可能遗漏。值此本书出版之际,作者对所列参考文献的作者表示衷心的感谢,并对部分尚未列出的参考文献的作者表示深深的歉意。特别需要说明的是,三峡大学刘国霖教授对本书的编写和出版给予了细心指导,并提出宝贵建议,使得本书研究内容得以更加完善,在此对刘国霖教授致以深深的谢意!特别要感谢中国工程院院士、中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎教授对本书研究成果的肯定,并为本书作序!

李建林

2015年6月10日

目 录

序言	
前言	
概述	1
第 1 章 绪论	5
1.1 引言	5
1.2 水利水电工程中岩体工程的特点	5
1.3 卸荷岩体力学研究的五个阶段	7
1.3.1 第一阶段:工程研究、实践与反思阶段(1990~1993 年)	8
1.3.2 第二阶段:提出卸荷岩体力学理论新概念,初步建立卸荷岩体力学理论体系阶段(1994~1995 年)	9
1.3.3 第三阶段:进一步完善卸荷岩体力学理论体系阶段(1996~2000 年)	11
1.3.4 第四阶段:卸荷岩体力学理论的初步应用阶段(2000~2005 年)	11
1.3.5 第五阶段:理论深入与推广应用阶段(2005~2015 年)	12
1.4 卸荷岩体力学研究的原则	12
1.5 卸荷岩体力学研究的方法	14
1.6 卸荷岩体力学研究的主要内容与进展	15
1.6.1 工程地质条件研究	15
1.6.2 岩体质量评价方法研究	16
1.6.3 岩体卸荷力学特性及力学参数的确定方法研究	16
1.6.4 卸荷岩体的力学模型研究	16
1.6.5 卸荷岩体稳定分析方法研究	16
1.6.6 工程结构与岩体结构相互作用研究	17
1.6.7 卸荷岩体的加固理论与方法研究	17
1.6.8 卸荷岩体的施工方法与过程模拟研究	17
1.6.9 卸荷岩体安全监测研究	18
1.6.10 卸荷岩体多场耦合作用研究	18
1.7 卸荷岩体力学研究的前景与展望	18
1.8 本章小结	20
第 2 章 工程地质条件分析	21
2.1 引言	21

2.2	地质环境评价	22
2.2.1	川青块体地质特征	23
2.2.2	川滇块体地质特征	26
2.2.3	区域地层和岩石类型特征	28
2.2.4	河谷地貌特征	30
2.2.5	区域水文地质条件特征	31
2.3	工程地质条件分析	31
2.3.1	边坡高陡,坡形复杂	32
2.3.2	高地应力	32
2.3.3	岩体的地质结构特征	34
2.3.4	西南地区高陡坡体演化的动力学过程	34
2.3.5	西南地区高陡坡体自然卸荷状态下地质力学模型	36
2.4	如美水电站岩体卸荷规律研究	38
2.4.1	区域地质背景	38
2.4.2	如美水电站高陡坡体自然卸荷状态下地质模型	47
2.5	本章小结	57
	参考文献	57
第3章	卸荷岩体质量评价	58
3.1	引言	58
3.2	岩体质量分级方法	58
3.2.1	《工程岩体分级标准》(GB 50218-94)	58
3.2.2	岩体质量指标	61
3.2.3	巴顿岩体质量分类	61
3.2.4	RMR 分类法	61
3.3	Hoek-Brown 准则及其参数估计式	64
3.3.1	RMR 与岩体力学参数的关系	64
3.3.2	建立在 GSI 基础上的 Hoek-Brown 准则	66
3.4	考虑开挖卸荷的岩体质量评价方法	68
3.5	工程实例	68
3.5.1	工程简介	68
3.5.2	开挖卸荷三维有限元分析	70
3.5.3	开挖卸荷区岩体质量评价	72
3.6	本章小结	83

参考文献	83
第 4 章 卸荷岩体各向异性	85
4.1 引言	85
4.2 不同倾角单一节理试件卸荷试验	86
4.2.1 节理面力学效应分析	86
4.2.2 试件设计	87
4.2.3 试验目的及方案	89
4.2.4 卸荷试验结果分析	90
4.2.5 不同倾角节理对试件力学特性的影响	105
4.2.6 卸荷速率对卸荷力学特性的影响	108
4.3 宜昌中砂岩加卸荷各向异性试验	116
4.3.1 试验方案	116
4.3.2 试验结果分析	117
4.4 本章小结	143
参考文献	144
第 5 章 卸荷岩体尺寸效应	146
5.1 引言	146
5.2 卸荷岩体尺寸效应物理试验研究	147
5.2.1 试验描述	147
5.2.2 试验结果及其分析	148
5.3 卸荷岩体尺寸效应数值模拟研究	152
5.3.1 分区分级力学参数模拟方法	152
5.3.2 分区分级法与尺寸效应	155
5.3.3 分区分级法计算模拟宏观力学参数的特点	155
5.3.4 工程算例	156
5.4 考虑各向异性条件下三维模型尺寸效应研究	162
5.5 本章小结	171
参考文献	172
第 6 章 卸荷岩体流变特性	174
6.1 引言	174
6.2 岩体流变力学特性试验研究	176
6.2.1 砂岩卸荷流变试验结果分析	176
6.2.2 泥质粉砂岩卸荷流变试验结果分析	181

6.3	岩体流变力学本构模型研究	191
6.3.1	岩体线性流变力学模型	191
6.3.2	岩体卸荷流变力学参数研究	195
6.3.3	岩体非线性卸荷流变模型研究	199
6.4	本章小结	203
	参考文献	204
第7章	卸荷岩体断裂性能	206
7.1	引言	206
7.2	节理岩体压剪断裂性能	206
7.2.1	岩体压剪断裂等效模型	206
7.2.2	H-B 准则下的等效断裂判据	209
7.2.3	关于 H-B 准则中的 m, s 值	210
7.2.4	等效模型的验证	211
7.2.5	岩体的强度预测	212
7.3	节理岩体拉剪断裂性能	212
7.3.1	岩体拉剪断裂分析模型	212
7.3.2	岩体拉剪断裂等效模型	213
7.3.3	关于 H-B 准则下的等效判据	215
7.3.4	关于 H-B 准则中的 m, s 取值	216
7.3.5	关于岩石 K_{Ic}, K_{IIc} 的计算	216
7.3.6	等效模型的验证	217
7.3.7	岩体抗拉强度预测	218
7.4	D-P 准则与岩体拉剪断裂韧度	219
7.4.1	D-P 准则	219
7.4.2	拉剪裂纹的端部应力	219
7.4.3	D-P 准则参数与 K_{Ic}, K_{IIc}	219
7.5	M-C 准则与岩体拉剪断裂韧度	221
7.5.1	M-C 准则	221
7.5.2	D-P 准则与 M-C 准则外接	222
7.5.3	D-P 准则与 M-C 准则内接	223
7.5.4	平面应变条件	224
7.6	H-B 准则与岩体拉剪断裂韧度(应力不均化)	225
7.6.1	H-B 准则	225

7.6.2 H-B 准则参数与 K_{Ic} 、 K_{IIc}	225
7.7 本章小结	227
参考文献	227
第 8 章 卸荷岩体屈服准则	229
8.1 引言	229
8.2 卸荷岩体加卸荷判别准则	229
8.2.1 岩体加卸载性质	230
8.2.2 不同工程中的加卸荷情况	231
8.3 抛物线型 D-P 准则	232
8.3.1 H-B 准则表达形式	232
8.3.2 抛物线型 D-P 准则表达形式	233
8.3.3 抛物线型 D-P 准则等面积变换类型	233
8.4 基于花岗岩拉剪试验的卸荷岩体屈服准则研究	235
8.4.1 卸荷岩体力学特性	235
8.4.2 新鲜闪云斜长花岗岩拉剪试验	236
8.4.3 卸荷岩体抛物线型 M-C 屈服准则	240
8.5 抛物线型屈服准则工程应用	247
8.6 本章小结	250
参考文献	250
第 9 章 卸荷岩体本构关系	252
9.1 引言	252
9.2 卸荷岩体本构研究	253
9.2.1 砂岩三轴恒轴压卸围压下卸荷岩体本构关系研究	253
9.2.2 砂岩保持大小主应力差不变或升轴压峰前卸围压下岩体本构关系研究	264
9.2.3 岩体卸荷双曲线型非线性弹性本构研究及应用	278
9.2.4 多尺寸节理岩体卸荷岩体非线性本构关系研究及应用	286
9.3 本章小结	300
参考文献	302
第 10 章 卸荷岩体加固分析	304
10.1 引言	304
10.2 加固机理研究	305
10.2.1 预应力锚索的作用机理研究	305

10.2.2	岩体锚索内锚段的作用机理的数值模拟研究	313
10.3	考虑卸荷效应的加锚裂隙岩体宏观力学参数	319
10.3.1	裂隙岩体锚固的等效参数研究	320
10.3.2	数值模拟分析	321
10.4	卸荷岩体锚固预应力损失的影响因素分析	325
10.4.1	岩体的应力状态对预应力损失的影响	325
10.4.2	岩体的性质对预应力损失的影响	326
10.4.3	岩体的流变对预应力损失的影响	326
10.4.4	预应力锚固时间对预应力损失的影响	327
10.4.5	锚索的结构及布置对预应力损失的影响	329
10.4.6	施工操作方法对预应力损失的影响	329
10.4.7	外部环境的影响对预应力损失的影响	330
10.5	加固方法优化研究	330
10.5.1	合理的加固区域	331
10.5.2	合理的加固时间	331
10.5.3	加固措施的优化	332
10.6	水布垭电站溢洪道边坡加固方案优化分析	333
10.6.1	工程概况	333
10.6.2	力学参数	335
10.6.3	计算模型及计算工况	335
10.6.4	不同加固方案的计算结果及优化分析	337
10.6.5	加固方案的比较与优化分析	353
10.7	本章小结	356
	参考文献	357
第 11 章	卸荷岩体地震分析	358
11.1	引言	358
11.2	地震分析基本原理	358
11.3	均质岩体边坡地震响应影响因素分析	362
11.3.1	概述	362
11.3.2	计算模型	362
11.3.3	地震影响因素的分析	363
11.4	含软弱夹层的岩质边坡地震响应影响因素分析	379
11.4.1	概述	379

11.4.2	计算模型	380
11.4.3	地震影响因素分析	381
11.5	开挖卸荷岩体的地震响应分析	385
11.5.1	工程概况	385
11.5.2	有限元力学计算参数	385
11.5.3	位移及应力分析	387
11.5.4	塑性区分析	388
11.6	本章小结	389
	参考文献	390
第 12 章	岩体开挖优化设计	392
12.1	引言	392
12.2	岩体开挖方案优化设计的原则	392
12.3	岩体开挖稳定的敏感性分析	393
12.3.1	敏感性分析方法	394
12.3.2	均质岩石边坡算例	395
12.4	边坡开挖方案经济优化分析	402
12.5	董箐水电站泄槽段边坡开挖方案优化设计	403
12.5.1	工程简介	403
12.5.2	计算剖面	404
12.5.3	主要工程量及造价	405
12.6	本章小结	416
	参考文献	417
第 13 章	卸荷岩体分析方法	418
13.1	引言	418
13.2	变形分析方法	420
13.2.1	有限单元法	420
13.2.2	快速拉格朗日差分法	421
13.2.3	不同数值方法的相互配合	422
13.3	稳定分析方法	422
13.3.1	极限平衡法	422
13.3.2	有限元强度折减法	430
13.3.3	有限元容重增加法	432
13.3.4	三种边坡稳定系数计算方法对比研究	434

13.4	地应力模拟方法	444
13.5	计算模型选取原则	444
13.6	卸荷岩体模拟方法	446
13.6.1	岩石加、卸荷应力路径	446
13.6.2	岩体加卸荷力学参数	447
13.6.3	开挖边界释放荷载计算	447
13.6.4	岩体开挖卸荷模拟方法	448
13.7	开挖岩体卸荷区划分	449
13.7.1	自然边坡卸荷区划分方法	449
13.7.2	岩质高陡边坡开挖岩体卸荷区划分方法	450
13.8	开挖卸荷岩体分析方法	452
13.9	本章小结	453
	参考文献	454
第 14 章	卸荷岩体参数反分析	457
14.1	引言	457
14.2	神经网络	457
14.2.1	神经网络方法简介	457
14.2.2	BP 和 RBF 神经网络在边坡稳定性评价中的应用	458
14.3	工程实例	467
14.3.1	工程简介	467
14.3.2	地下厂房系统工程地质条件	468
14.3.3	力学模型	469
14.3.4	计算结果与监测值的比较分析	478
14.3.5	有限元计算结果及其分析	480
14.4	本章小结	495
	参考文献	495
第 15 章	卸荷岩体力学的工程应用	496
15.1	引言	496
15.2	边坡工程——小湾水电站 2 [#] 山梁引水沟堆积体	507
15.2.1	工程概况	507
15.2.2	技术路线	509
15.2.3	堆积体破坏现象	510
15.2.4	力学参数反演	512

15.2.5	三维有限元计算分析	522
15.2.6	2-2'剖面有限元计算结果分析	523
15.2.7	地震变形趋势预测	540
15.2.8	结论	540
15.3	地下洞室——锦屏二级水电站地下厂房	542
15.3.1	工程概况	542
15.3.2	计算模型	542
15.3.3	计算工况	543
15.3.4	力学参数	543
15.3.5	监测点数据选取	544
15.3.6	监测成果与计算成果比较	547
15.3.7	计算过程中塑性区演化过程	549
15.3.8	三维数值模型分析小结	554
15.3.9	结论	555
15.4	坝基——白鹤滩水电站坝基	556
15.4.1	工程概况	556
15.4.2	技术路线	559
15.4.3	岩体质量评价	559
15.4.4	计算分析条件	564
15.4.5	开挖卸荷有限元分析	567
15.5	坝坡相互作用——小湾水电站坝坡	579
15.5.1	工程概况	579
15.5.2	技术路线	579
15.5.3	有限元模型	580
15.5.4	拱坝坝肩推力计算	582
15.5.5	大坝推力对边坡变形的影响	584
15.5.6	结论	588
15.6	本章小结	589
第 16 章	结语	590