



卸荷岩体力学

Unloading Rock Mass Mechanics

李建林 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

卸荷岩体力学

李建林 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

卸荷岩体力学/李建林著. - 北京: 中国水利水电出版社, 2003
ISBN 7-5084-1621-X

I. 卸… II. 李… III. 岩体力学 IV. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 064196 号

书 名	卸荷岩体力学
作 者	李建林 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 9.5 印张 225 千字
版 次	2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—3400 册
定 价	28.00 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

出版者的话

改革开放 20 年来，我国的土木建筑业得到了迅猛发展。各种新理论、新技术、新材料、新工艺不断涌现，土木建筑业正面临着跨世纪的大发展。为及时反映国内外土木建筑业的成果，中国水利水电出版社组织编写、出版以反映土木建筑工程“四新”——“新理论、新技术、新材料、新工艺”为主要内容的系列图书。本系列图书力图体现三个特点。

全面性：丛书内容力图反映土木建筑工程各领域最新的实用新成果和发展动态，通过努力，力争涵盖土木建筑工程的所有领域。

权威性：丛书主要以在科研、教学和设计、施工第一线作出显著成绩的中青年专家（高级建筑师、高级工程师、教授、副教授、博士、博士后等）为作者主体，反映我国在土木建筑领域内的创造性学术成果和对工程具有长期指导意义的理论体系。

实用性：丛书特别注重理论与工程实践的有机结合，既有理论和方法论上的指导意义，又有现实的实用和参考价值。

“四新”丛书已作为我社长期的出版系列予以规划和实施，分批出版。我们热切地期盼业内中青年专家、学者，积极参与到“四新”丛书的著译、出版工作中来。让我们携起手来，共同为我国土木建筑业的发展，为繁荣我国土木建筑图书的出版而努力！

中国水利水电出版社

1999 年 4 月

BeG 83/0 |

内 容 提 要

本书系统地阐述了岩体力学研究的现状及卸荷岩体力学的原理与方法,详细地介绍了卸荷岩体力学研究内容,讨论了岩体力学中的系统工程问题,卸荷岩体的工程特点及其研究方法,节理岩体拉剪及压剪断裂的强度理论,卸荷岩体的各向异性特性,卸荷岩体的尺寸效应,岩石流变性质,卸荷岩体宏观力学参数的数值模拟方法及BP神经网络的应用等;根据卸荷岩体三轴强度的试验结果,讨论了其破坏准则,提出了卸荷岩体有限元分析的基本方法,结合卸荷岩体的一些特点,叙述了卸荷岩体加固的基本思路。最后是工程应用的实例。

本书可供水利水电、土木建筑、矿山铁道、交通冶金等专业的教师、工程技术人员、研究生及高年级本科生阅读与参考。

前 言

卸荷岩体力学是岩体力学研究的新领域，它是研究自然界及岩体工程中卸荷岩体在力及其他因素作用下，岩体卸荷力学性质及其工程应用的科学。

卸荷岩体力学概念的提出及体系的建立是作者的导师——中国长江三峡工程开发总公司原总工程师哈秋舫教授首先提出来的，也是哈秋舫教授几十年工程实践经验的总结和理论创新。作者作为哈秋舫教授的学生，在哈秋舫教授的指导下，从1992年开始，从事卸荷岩体力学的研究和工程实践已十余年。通过学习、理解和研究哈秋舫教授的卸荷岩体力学新概念和理论体系，研究和完善了这一新领域的研究成果，通过研究和实践并努力贯彻到整个的研究内容和工程实践中去。

卸荷岩体力学是建立在大量的理论研究和工程实践基础上的岩体力学研究新的方向，起源于水利水电、矿山铁路等工程建设的需要。众多的土木工程建设中所遇到的岩体，一般是开挖岩体。岩体的开挖实质上是岩体的地应力释放的过程。开挖岩体应力的释放导致岩体应力的重新调整，这一应力的调整导致岩体原始应力场变化很大，某些地方可能还产生了拉应力。也就是说，岩体的开挖是一种卸荷的力学过程。卸荷条件下的岩体的力学特性往往与常规加荷条件下岩体力学特性是不同的。因此，在工程建设中，岩体工程必须区别不同的力学条件及其作用的情况，只有研究不同应力条件下的岩体力学性质，才能与工程岩体受力情况一致，只有这样，岩体工程的研究与分析才能落到实处。

卸荷岩体力学从哈秋舫教授提出到现在已有十余年了。随着研究的深入和工程实践的不断积累和应证，许多问题得到认识和提高，卸荷岩体力学的内容不断丰富。从卸荷岩体工程地质到岩体宏观力学参数的选择、从卸荷岩体的本构关系的确立到数值分析方法的建立、从卸荷岩体物理仿真到数值仿真的实现等，其内容不断充实和完善，并已初步形成了比较完整的学科系统，并且随着工程实践的不断应用正日趋完善。

本书的研究成果是作者在过去一系列研究的基础上的进一步完善和补充。它包括岩体许多力学特性的进一步研究（如各向异性、尺寸效应、破坏准则等）和新方法的进一步应用（如BP神经网络方法等）等。但是，由于卸荷岩

体力学这一领域的研究历史不长，加上各类工程的地质条件和环境条件千差万别，结构形态各异，尚有许多内容有待进一步研究和探讨。作者希望通过本书的出版发行，架起与广大岩土工程工作者一起共同探讨卸荷岩体力学新问题的桥梁，使这门学科日趋完善。

本书的研究成果是作者本人在过去的研究成果及一些合作者的研究成果的基础上，在教育部骨干教师资助项目的资助下完成的。过去的一些研究成果得到了国家“八五”重大科技攻关项目、国家自然科学基金项目、国家电力公司重大项目、中国长江三峡开发总公司项目的资助。其试验研究部分是在三峡大学朱子龙高级工程师、王康平副教授、姜平工程师等合作下完成的。在此期间还得到了三峡大学许多领导及同仁的支持与帮助。由于得到了三峡大学重点学科建设经费的资助，本书才得以尽早出版。作者的研究生熊俊华、王乐华、周济芳、邓华锋等同志也为本书的修改付出了辛勤的劳动，此外，本书中有些研究内容还得到了三峡大学刘国霖教授的指导和杨学堂博士的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

目 录

出版者的话

前言

第1章 绪论	1
1.1 岩体力学研究的现状	1
1.2 卸荷岩体力学的产生和发展阶段	4
1.3 岩体工程的分类	5
1.4 卸荷岩体力学的研究现状	6
1.5 卸荷岩体力学的研究内容	7
第2章 岩体力学中的系统工程问题	9
2.1 引言	9
2.2 系统工程的特点	9
2.3 岩体力学中的学科系统	10
2.4 岩体力学的研究方法	12
2.5 小结	13
第3章 卸荷岩体的工程特点及分析方法	14
3.1 引言	14
3.2 岩体工程的类型及其特点	14
3.3 不同的力学状况有不同的力学特性	18
3.4 不同的力学特性应有不同的分析方法	20
3.5 小结	20
第4章 节理岩体压剪断裂及其强度的研究	22
4.1 引言	22
4.2 几种常用的压剪断裂的判据	22
4.3 复合断裂的等效判据	23
4.4 关于岩石的破坏准则	25
4.5 Hoek-Brown 准则下的等效断裂判据	26
4.6 等效模型的验证	27
4.7 小结	28
第5章 节理岩体拉剪断裂及其强度的研究	30

5.1	引言	30
5.2	岩体拉剪断裂的分析模型	30
5.3	岩体拉剪断裂的等效模型	31
5.4	关于岩石的破坏准则	32
5.5	岩体拉剪断裂的等效判据	33
5.6	岩体拉剪断裂等效判据的验证与强度预测	35
5.7	小结	36
第6章 卸荷岩体各向异性的研究		37
6.1	引言	37
6.2	试验概述	37
6.3	试验结果及其分析	39
6.4	结构面方位对抗压强度的影响	40
6.5	受压变形模量与受拉变形模量的比较	41
6.6	小结	42
第7章 卸荷岩体的尺寸效应研究		43
7.1	引言	43
7.2	试验描述	43
7.3	试验结果及其分析	45
7.4	小结	48
第8章 卸荷岩体流变特性的研究		49
8.1	引言	49
8.2	试验设计	49
8.3	试验结果及其分析	50
8.4	岩石受拉流变的变化规律	53
8.5	岩石流变参数的研究	54
8.6	岩石流变模型参数及岩石长期强度	57
8.7	岩石的等效抗拉强度	57
8.8	小结	59
第9章 卸荷岩体力学参数的数值分析		60
9.1	概述	60
9.2	数值分析单元的形成	61
9.3	模型尺寸及其尺寸效应	62
9.4	节理岩体数值模拟方法及其等效计算	63
9.5	初始地应力的模拟	65
9.6	开挖卸荷的模拟	66
9.7	卸荷岩体力学的模型	68
9.8	计算技术路线	68

9.9 卸荷岩体三维有限元计算及分析	69
9.10 卸荷量、卸荷岩体力学参数及卸荷区域的变化关系	77
9.11 数值模拟与物理模拟的力学特性的比较	78
9.12 小结	79
第 10 章 卸荷岩体三轴强度及破坏准则	80
10.1 引言	80
10.2 几个常用的破坏准则	80
10.3 岩体三轴强度的实验结果	83
10.4 Hoek-Brown 准则中的 m , s 值	83
10.5 卸荷岩体参数的分析与确定	84
10.6 小结	86
第 11 章 BP 神经网络及其应用	87
11.1 神经网络简介	87
11.2 神经元的一般模型	88
11.3 神经网络的特点	88
11.4 神经网络的自学方法	89
11.5 BP 神经网络	90
11.6 卸荷岩体力学参数的反演	91
11.7 小结	95
第 12 章 卸荷岩体有限元分析的基本方法	96
12.1 引言	96
12.2 岩体卸荷分析的本构关系	96
12.3 岩体卸荷实验应力应变关系及其分析	99
12.4 卸荷岩体分析的基本方法	100
12.5 工程实例	101
12.6 小结	105
第 13 章 卸荷岩体加固的基本原理	106
13.1 概述	106
13.2 预应力锚索研究与应用中的几个问题	106
13.3 预应力锚索加固的基本方法	111
13.4 小结	113
第 14 章 工程应用	114
14.1 三峡工程地下电站进水口边坡的概况	114
14.2 计算条件	115
14.3 计算结果及其分析	119
14.4 小结	122

第 15 章 工程岩体 RMR 的分类及其应用 124

15.1 概述 124

15.2 RMR 的分类系统 124

15.3 RMR 与岩体力学参数的关系 126

15.4 关于 RMR 的几点补充 128

15.5 三峡工程永久船闸区岩体 RMR 的评分 129

15.6 由 RMR (SMR) 确定岩体力学参数 130

15.7 小结 132

结语 133

参考文献及参考资料 135

Table of Contents

Preface

1	General Introduction	1
1.1	Present Study Situation of Rock Mass Mechanics	1
1.2	Development Stages of Unloading Rock Mass Mechanics	4
1.3	Classification of Rock Mass Engineering	5
1.4	Present Study Situation of Unloading Rock Mass Mechanics	6
1.5	Study Contexts of Unloading Rock Mass Mechanics	7
2	Problems of System Engineering in Rock Mass Mechanics	9
2.1	Introduction	9
2.2	Characteristics of System Engineering	9
2.3	Subject System of Rock Mass Mechanics	10
2.4	Study Method of Rock Mass Mechanic	12
2.5	Conclusions	13
3	Project Features and Its Analysis Method of Unloading Rock Mass	14
3.1	Introduction	14
3.2	Structure Shape and Its Mechanics State of Rock Mass Project	14
3.3	Different Mechanics Characteristics Under Different Mechanics State	18
3.4	Different Analysis Method Correspond to Different Mechanics Character	20
3.5	Conclusions	20
4	Compression-Shear Crack and Its Strength Related to Joint Rock Mass	22
4.1	Introduction	22
4.2	Several Common Compression-Shear Crack Criterion	22
4.3	Equivalent Crack Criterion of Complex Crack	23
4.4	Failure Criterion Related to Rock	25
4.5	Equivalent Crack Criterion Under Hork-Brown Criterion	26
4.6	Test Examination of The Equivalent Model	27
4.7	Conclusion	28
5	Tension-Shear Crack and Its Strength Related to Joint Rock Mass	30
5.1	Introduction	30
5.2	Crack Model of Rock Mass Under Tension-Shear Stresses	30

5.3	Equivalent Model of Rock Mass Under Tension-Shear Stresses	31
5.4	Failure Criterion of Rock	32
5.5	Equivalent Crack Criterion of Rock Mass	33
5.6	Test Examination and Strength Prediction of the Equivalent Crack Criterion	35
5.7	Conclusions	36
6	Anisotropy Study of Unloading Rock Mass	37
6.1	Introduction	37
6.2	Test Describe	37
6.3	Test Results and Its Analysis	39
6.4	Affect of Compressed Joint on Compression Strength	40
6.5	Test Comparating of Compression Modulous with Tensile Modulus	41
6.6	Conclusions	42
7	Effect of Size of Unloading Rock Mass	43
7.1	Introduction	43
7.2	Test Describe	43
7.3	Test Result and Its Analysis	45
7.4	Conclusions	48
8	Creep Study of Unloading Rock Mass	49
8.1	Introduction	49
8.2	Test Describe	49
8.3	Test Results and Its Analysis	50
8.4	Changing Rule of Tension Creep	53
8.5	Creep Parameter of Rock	54
8.6	Model Parameters and Long Term Strength	57
8.7	Equivalent Tension Strength of Rock	57
8.8	Conclusions	59
9	Numerical Analysis of Mechanics Parameters Related to Unloading Rock Mass	60
9.1	Introduction	60
9.2	Form of Numerical Analysis Elements	61
9.3	Model Size and Its Effect of Size	62
9.4	Numerical Simulation Method and Its Equivalent Calculation	63
9.5	Simulation of Initial Stress	65
9.6	Unloading Simulation of Excavation Rock Mass	66
9.7	Model Related to Unloading Rock Mass	68
9.8	Route of Calculating Analysis	68
9.9	3D-finite Element Calculations	69
9.10	Relation Between Parameters and Unloading Scope Related to Unloading Rock Mass	77

9.11	Compression Results of Numerical Simulation to that of Physical Simulation	78
9.12	Conclusions	79
10	Tri-axial Strength and Its Failure Criterion Related to Unloading Rock Mass	80
10.1	Introduction	80
10.2	Several Common Failure Criterion	80
10.3	Test Results of Rock Mass Strength Under Tri-axial Stress	83
10.4	m and s Values in Hork-Brown Failure Criterion	83
10.5	Analysis and Determination of Parameters Related to Unloading Rock Mass	84
10.6	Conclusions	86
11	BP Neuron-net and Its Application in the Stability Analysis Related to Unloading Rock Mass	87
11.1	Introduction to BP Neuron-net	87
11.2	General Model	88
11.3	Characteristics of BP Neuron-net	88
11.4	Self Study Method of BP Neuron-net	89
11.5	BP Neuron-net	90
11.6	Anti-analysis of Mechanical Parameters Related to Unloading Rock Mass	91
11.7	Conclusions	95
12	Basical Method of Unloading Rock Mass Calculation	96
12.1	Introduction	96
12.2	Constitutive Model of Unloading Rock Mass Analysis	96
12.3	Test Stress-strain Relation and Its Analysis Related to Unloading Rock Mass	99
12.4	Basical Method of Unloading Rock Mass Analysis	100
12.5	Project Example	101
12.6	Conclusions	105
13	Basical Theory of Unloading Rock Mass Anchor	106
13.1	Introduction	106
13.2	Several Problems of Investigation and Application Related to Pre-stress Cable	106
13.3	Basical Method of Pre-stress Cable Anchor	111
13.4	Conclusions	113
14	Project Application	114
14.1	Introduction to the Import Tunnel Slope of Underground Power Station Related to Three Gorges Project	114
14.2	Calculation conditions	115
14.3	Calculatio Results and analysis	119
14.4	Conclusions	122

15 Rock Mass RMR Classification and Its Application 124

15.1 Introduction 124

15.2 RMR Classification system 124

15.3 The Relation Between RMR and Mechanic Parameters of Rock Mass 126

15.4 Some Supplements Related to RMR 128

15.5 The RMR Values of Shiplock Rock Mass Related to Three Gorges Project 129

15.6 Determination of Rock Mass Mechanics Parameters by RMR Method 130

15.7 Conclusions 132

Conclusions 133

References 135

第1章 绪 论

1.1 岩体力学研究的现状

岩体力学是研究自然界中岩体在各种作用下,其力学行为与工程应用的科学。

岩体力学是伴随着工程建设的需要以及对岩体物理力学性质认识的逐渐深入而不断发展起来的一门新的学科。所有的理论及方法都始终围绕着如何正确反映和预测岩体力学性质和行为、岩体的变形与稳定。岩体力学研究的进步,也极大地促进了岩土工程建设的发展、技术的进步与方法的变革。

基础设施的大量兴建,为岩体力学的研究开辟了广阔的领域,包括岩体的基本力学性能、岩体的本构关系理论、数值分析方法、工程施工方法及加固措施、岩体的流变及长期强度与稳定、渗流对岩体变形与稳定的影响、多种因素的耦合分析等,这些领域形成了岩体力学研究的基本内容,它们相互交叉、相互制约,形成了不可分割的整体。岩体力学概括起来可分为以下几个方面。

1.1.1 岩体的基本力学性能研究

它包括岩石、岩体及岩体结构面的基本力学性质的研究,它是岩体力学研究的最初内容。近几年来,随着工程建设的开展和岩体力学研究的不断深入,对岩体力学性质的认识有了新的提高,这一领域又焕发出新的活力。早期岩体基本力学性质的研究主要集中在测定岩石在应力作用下的强度和变形性能,如抗压强度、抗剪强度以及反映岩体力学性质的粘结力、内摩擦力和变形模量等,即测定岩体的力学参数,用于估计工程岩体的变形与稳定性。

近十多年来,计算技术的飞速发展,促进了数值模拟技术的不断进步。数值模拟技术的发展依赖于岩体本构模型的建立及其相应参数的正确确定。对岩石基本力学性能的研究又蓬勃地开展起来。这些研究已形成室内岩块实验、现场原位实验、室内模拟实验等一套完整的实验体系和实验技术。不过,这些实验主要集中在岩石,按岩基的试验规程进行并依赖于一定的测试技术。岩石基本力学性质的研究,除包括岩体强度和变形参数的测定外,还包括岩体的应力应变全过程曲线的研究、岩体的各向异性研究、岩体尺寸效应的研究、岩体结构面力学特性的研究、岩体的动力特性研究、岩体断裂力学特性研究和岩体破坏准则的研究等。

上述研究内容从方法上可分成两个方面:一方面是物理模拟实验研究,包括室内岩块实验、室外现场实验和室内模拟实验;另一方面是数值模拟实验研究,通过计算机来模拟岩体实验的全过程,得到相应的应力应变关系曲线及其相应的力学参数。但成果的实用

性, 取决于对工程地质环境及其动态特性的认识与把握。

1.1.2 岩块的稳定性研究

一般的岩体不是连续的介质体, 而是由不同力学性质和空间条件的结构面切割成的多裂隙介质体。根据结构面的不同组合, 岩体被切割成不同力学条件的块体, 块体的稳定就是我们通常所说的岩体局部稳定问题。块体的稳定性研究一般采用刚体极限平衡方法, 将岩块视为刚体进行稳定分析, 不考虑岩体地质构造应力条件。这类问题, 力学概念比较明确, 一般是从力学平衡的角度来研究, 其稳定性可用安全系数来明确表示, 这方面的研究已经比较成熟。目前, 有些学者在研究岩块的稳定性问题时考虑如何分析岩块自身的变形, 使该研究不断完善。

1.1.3 岩体变形及本构关系的研究

岩块的稳定问题可用安全系数来表示, 而岩体的稳定问题, 在地质构造应力条件下, 由于结构及力学条件复杂, 则难以用安全系数来描述。实际上, 岩体的稳定性从某种意义上讲应由变形来控制, 因此, 为了研究岩体的变形问题、岩体的变形机制, 岩体本构关系的研究就显得尤为重要。

岩体本构理论就是研究岩体在力及其他因素的作用下岩体的力学行为。它是进行岩体力学分析、数值模拟研究的基本点和出发点, 是进行岩体力学研究的核心问题之一。它的准确与否直接影响到数值分析的结果。岩体的本构理论由最早建立在弹性理论基础上的一般理论, 发展到了建立在弹塑性理论、流变理论、损伤力学理论、断裂力学理论、复合材料力学理论等理论基础上的非线性本构关系理论。

同时, 由于岩体力学性质的不确定性和复杂性, 传统的力学理论在岩土工程中的应用遇到了极大的困难。这些困难在于岩体的非均匀性、非线性、非连续性、数据的有限性等, 其本构理论包括屈服条件等许多问题, 目前与实际情况有很大的出入, 使得这些本构模型的应用也存在极大的困难。因此, 为了较准确地预测岩体的力学行为, 岩体本构理论的研究就成为人们力求探索的主要问题之一。

1.1.4 数值分析及计算机应用的研究

岩体的稳定性通过其变形来判定。由于岩体的地质条件、力学条件、结构条件复杂, 一般的人工计算难以进行, 人们通常选择合适的本构关系和数值方法, 借助计算机对岩体的变形进行计算。

计算机技术的迅猛发展, 带来了岩体计算技术的突破, 出现了有限元、边界元、离散元、刚体元、无限元、有限差分、微分流形元等数值模拟技术, 极大地丰富了岩体力学学科的内容。在岩土工程非线性分析中。这些新的计算技术呈现出极大的优势, 能够处理许多传统理论无能为力的工程问题, 已成为方便、经济的分析工具和手段。

1.1.5 岩体流变特性的研究

岩体的流变性质是岩体的重要特性之一。岩体由岩块和节理组成, 在力的作用下,