

节理岩体卸荷力学 特性研究

王 飞 齐剑峰 高志娟 著



地质出版社

节理岩体卸荷力学特性研究

王 飞 齐剑峰 高志娟 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径,两者所引起岩体的变形和破坏特性无论在力学机理还是在力学响应上都有本质区别,对于含节理、裂隙等结构面的岩体表现尤为明显。本书以节理裂隙岩体为研究对象,通过模型试验的方法对其在卸荷应力状态下的变形及强度特性进行了深入的分析与探讨,建立了一种考虑岩体损伤的弹塑黏性力学模型,此模型由弹性元件与塑性元件串联形成弹塑性模型,再和黏性元件、损伤元件并联。根据每种元件的受力特性以及它们之间的联结关系,推导了模型的本构方程。

本书可作为岩土工程、地质工程及相关专业的大专院校师生、技术人员和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

节理岩体卸荷力学特性研究 / 王飞等著. —北京:
地质出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-116-10427-3

I. ①节… II. ①王… III. ①节理岩体-岩石力学-
研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 131529 号

Jieli Yanti Xiehe Lixue Texing Yanjiu

责任编辑: 李 莉

责任校对: 王 瑛

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554653 (邮购部); (010) 66554629 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554629

印 刷: 北京地大彩印有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张: 6

字 数: 200 千字

版 次: 2017 年 7 月北京第 1 版

印 次: 2017 年 7 月北京第 1 次印刷

定 价: 24.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-10427-3

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前言

岩体工程根据其结构形态可分为地面工程和地下工程。地面工程又可分为基础工程和边坡工程。不同的结构形式，它们的力学条件各不相同。岩石地基基础工程岩体一般符合加载岩体力学条件，而在岩质边坡开挖工程及地下工程开挖面径向则表现为卸荷条件。

目前，人们通过大量的加载试验及理论分析，已建立起了一系列能反映岩体在加载条件下发生变形破坏的理论，并把这些理论应用到了工程实际之中。然而，由于卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径，两者所引起的岩体变形和破坏特性，无论在力学机理上还是在力学响应上都有本质的区别，对于含节理、裂隙等结构面的岩体表现得尤为明显。因此，开展卸荷岩体变形及强度特性的研究具有重要的理论意义和实用价值。

本书以节理裂隙岩体为研究对象，通过模型试验的方法对其在卸荷应力状态下的变形及强度特性进行了深入的分析与探讨。试验结果表明，卸荷岩体变形破坏特性与加荷时有明显的区别。节理面的物理力学性质对卸荷变形及破坏会产生很大的影响，节理面与卸荷方向夹角越大、节理面强度参数越低，卸荷各阶段变形模量也越低。节理连通率越大，卸荷阶段变形模量下降得越快。但是不论节理岩体处于何种卸荷条件下，其卸荷量与卸荷变形模量的下降量之间都基本呈线性关系。节理面力学参数、节理倾角等对卸荷强度也有一定的影响，通过对节理岩体卸荷强度参数的反演得出，黏聚力对各因素敏感性明显高于摩擦角。本书的另一个主要的成果是在指出现有强度理论不适用于卸荷岩体的破坏分析基础上，提出了适合于卸荷岩体的强度准则表达式，并通过对比分析得到了验证。

岩体本构理论就是研究岩体在力的作用下岩体的力学行为，是计算岩体力学研究的核心问题。其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、流变学理论、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众多非线性本构关系。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，在岩体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、非连续性的认识方面，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，为了较为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。

岩体本构模型是否能准确描述岩体的真实应力应变关系是研究边坡的稳定、变形及其加固措施的根本。没有正确的力学模型，就不能反映岩体的力学特性（应力与应变的关系、应力与时间的关系，应变与时间的关系）。只有掌握研究对象的本构关系，即建立正确的力学模型，才能进一步研究边坡的稳定、变形及其加固措施。在加固后，根据实际工程实测资料来进一步验证并改进所选的力学模型，预测边坡的变形，据此提出合

理的工程改进措施，对变形严重部位进行加固处理，并对重点部位加强监测，跟踪其变形。这样才能达到既经济又安全的目的，节约投资的同时取得最大的经济效益。

本书根据岩体的实际地质条件，岩体非均质性、各向异性的特征选择合适的岩体力学模型。根据岩体的变形不仅表现出弹性和塑性，而且也具有流变性质的特性，建立了岩体卸荷的弹塑黏性损伤本构模型，推导了该力学模型的本构方程，分析了岩体的应力松弛，给出了模型蠕变等效变形模量的计算公式。为进一步研究岩体的应力调整和变形与时间的关系，边坡的变形和稳定问题受时间因素影响提供了依据。

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 岩体力学发展简史	1
1.2 岩体力学的研究内容	2
1.3 卸荷岩体力学概述	4
1.4 卸荷岩体变形及强度特性的研究现状	6
1.5 岩体本构模型研究现状	10
1.6 小节	15
2 卸荷岩体的工程特点及分析方法	16
2.1 引言	16
2.2 岩体工程的类型及其特点	16
2.3 不同的力学状况有不同的力学特性	19
2.4 不同的力学特性应有不同的分析方法	20
2.5 小结	21
3 节理岩体卸荷特性的模型试验设计	22
3.1 引言	22
3.2 试验目的及流程	22
3.3 试验方案	23
3.4 试验设备	24
3.5 模型材料	25
3.6 模型制作技术	25
3.7 试验与测试方法	26
3.8 小结	27
4 节理岩体卸荷变形特性研究	28
4.1 前言	28
4.2 卸荷曲线特点分析	28
4.3 初始应力的影响	30
4.4 卸荷速率的影响	34
4.5 节理倾角的影响	36

4.6	节理参数的影响·····	38
4.7	节理连通率的影响·····	39
4.8	节理岩体的循环加卸荷特性·····	41
4.9	小结·····	42
5	节理岩体卸荷强度特性研究·····	43
5.1	引言·····	43
5.2	几个常用的破坏准则·····	43
5.3	岩体强度参数的反演方法·····	45
5.4	模型破坏试验结果分析·····	46
5.5	卸荷岩体强度准则的提出·····	51
5.6	小结·····	53
6	卸荷岩体本构模型研究·····	54
6.1	岩体加卸荷准则·····	54
6.2	岩体弹塑黏性损伤本构关系·····	65
6.3	小结·····	82
7	结论·····	83
	参考文献·····	85

1 绪 论

1.1 岩体力学发展简史

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。纵观国际岩体力学发展过程,大致经历了以下三个阶段。

1.1.1 岩体力学发展初期

在研究岩体力学问题时,基本上采用了以材料力学和简单的均质弹性理论为基础的土力学的原理和方法。土质边坡稳定性的计算分析方法被应用于岩质边坡稳定性问题的研究。1773 年的库仑 (Coulomb) 理论,1820 年法兰西斯 (Fransais) 和 1866 年库尔曼 (Cullman) 的平面滑动面的分析方法,1916 年彼得森 (Petterson) 只考虑摩擦力不考虑黏聚力的圆柱滑动面的分析方法,1922 年瑞典国家委员会发表的并在以后为费勒纽斯 (Fellenius) 和太沙基 (Teizaghi) 等人发展了近似圆弧滑动面的分析方法,1926 年费勒纽斯的以同时考虑摩擦力和黏聚力及边坡土体条件为基本内容的著名的瑞典圆弧稳定分析法,以及费勒纽斯和泰勒 (Taylor) 等人以摩擦圆法为代表的图表解析法,等等,均为当时各国所普遍采用。这些土质边坡稳定性计算分析方法,在力学原理上是粗浅的,同时,以一种极其简单的概念做出的基本假定也是脱离土体物理力学过程实际情况的。显然,在当时土质边坡工程因此而失事者屡见不鲜。虽然如此,由于当时科学水平发展的限制和人类工程活动规模较小,这些计算分析方法,仍然普遍应用于岩质边坡稳定性问题的研究中。

1.1.2 岩体力学的重要发展阶段

岩体力学在 20 世纪 40 年代开始进入重要的发展阶段,由于第二次世界大战后世界各国水利、交通和建筑物的大量新建,以及 50 年代采矿事业的迅速发展,提出了大量的岩石力学研究课题。在这个阶段中,斯体尼 (Stini)、米勒 (Muller)、罗卡 (Rocha)、杰格尔 (Jaeger)、塔洛布尔 (Taloher)、萨乌斯多维奇 (Salustowicz) 等人开展了许多岩石力学研究工作。

1.1.3 岩石力学学科的形成与应用阶段

法国塔罗布尔于 1957 年、1958 年先后编著的《岩石力学》和《岩石力学在土木工程中的应用》两书正式出版,较系统地阐述了岩石力学研究的理论、方法和重要意义。为了解决工程实践中出现的岩石力学问题和促进岩石力学的进一步发展,全面地、深入地开展了将岩体视为黏弹性、弹塑性或具有裂缝的脆性介质等方面的研究。岩体的非均匀性、各向异性和非连续性的研究,岩体的流变特性及其他时间效应的研究,岩体的应力应变关系和破坏机

制的研究，等等。这一切都标志着岩体力学进入了全面、深入的崭新的发展阶段。这些岩体力学问题的研究和测试技术的应用，促进了岩质边坡稳定性以及其他岩体力学问题等得到更有效的解决。自 20 世纪 60 年代以后，岩质边坡稳定性问题的研究基础理论和方法途径等均取得较大进展。在岩质边坡稳定性的计算分析方面，基本上沿着两种途径进行：一种是以极限平衡理论为基础，考虑岩体中断裂结构面控制因素，利用图解法或数学计算分析法，最后求得“安全系数”或类似于“安全系数”的概念；另一种是以有限单元法近似地分析计算边坡岩体的变形特征与应力状态。

近 30 年来，岩体力学作为当今研究相当活跃的岩土工程三大基础学科（岩体力学、土力学、基础工程学）之一，获得了长足的进展。部分世纪型的大型或特大型工程，例如，英吉利海底隧道、日本青函海底隧道、美国赫尔姆斯水电站地下厂房、加拿大亚当贝克水电站地下压力管道、美国鲍尔德水库重力大坝、日本关门铁路隧道、巴西伊泰普水电站、尼亚加拉水电站以及我国葛洲坝水利工程、新丰江水库、二滩水电站、青海关角铁路隧道、三峡水利工程和小浪底水利工程等的兴建遇到了许多岩体力学方面的棘手问题，尤其是在工程设计和施工中，这些岩体力学问题往往具有决定性的作用。正因为工程实践的需要为岩体力学的发展赋予了巨大的动力。

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的。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，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、工程措施、岩体的长期强度与稳定、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。

1.2 岩体力学的研究内容

1.2.1 岩体的基本力学性能研究

包括岩石、岩体及岩体结构面的基本力学性质的研究，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黏结力、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 10 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过程曲线的研究、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。

1.2.2 岩块的稳定性研究

一般的岩体都不是连续的介质体，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，该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。

1.2.3 岩体变形及本构关系研究

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。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。

1.2.4 数值分析及计算机应用研究

岩体的稳定性通过其变形来判定。由于岩体的力学条件、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。

1.2.5 岩体的流变特性研究

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，岩块和节理均产生流变变形，岩体的长期强度一般取决于两者的流变特性，在一些情况下，节理面的流变更为重要。岩体的长期强度与稳定性研究包含两个方面：一方面是节理的流变特性

研究；另一方面是岩体长期强度的预报理论研究，两者既有联系又有区别。前者许多学者在微观流变力学研究和宏观流变实验研究的基础上建立了许多岩石节理流变理论模型；后者的研究中，许多学者已建立了一些判断岩体失稳的力学准则，并试图研究识别系统发生突变的前兆信息的方法和测量手段，包括失稳的空间预报和时间预报，这些问题的研究随着新的测试技术（如光纤传感技术）的不断发展正在逐步得以实现。

1.2.6 岩体加固治理措施研究

岩石力学问题的研究是一个工程问题，岩石力学的基本原则是充分利用岩体。只有有效地保护岩体，才能充分利用岩体。因此，岩体保护及加固措施的研究，是一项十分有价值的工作。岩体的加固治理措施通常有锚喷技术。除了通常的锚杆（索）、预应力锚杆（索）外，近几年，人们积极研究大吨位、长距离的预应力锚索、无黏结预应力锚索、预锚预应力锚索、可调节预应力锚索等，并应用于工程实践中，为岩体加固提供了新手段。

1.2.7 岩体渗流与排水问题研究

岩体是固相、液相、气相并存的三相介质。在许多情况下，必须考虑水在多裂隙岩体中的流动规律以及给岩体本身的变形和强度造成的影响，也就是岩体与渗流的耦合问题。这类问题除了岩体的渗流特性及规律研究外，重要的一点是水在裂隙中流动和相互作用问题，已形成了岩体力学研究的一个重要领域。

1.2.8 岩石损伤、断裂力学研究

岩石材料是一种自然地质体，其内部各种节理、裂隙和微缺陷的存在是不可避免的。损伤力学的发展为合理考虑岩石材料内各种分布缺陷的研究提供了有力的手段。20 世纪 80 年代末，损伤力学在岩石力学的应用在国内受到了极大关注。岩石损伤的 CT 识别，定量地与岩石损伤变量和损伤扩展联系起来，为建立岩石损伤扩展本构关系奠定了基础。

1.2.9 岩体力学研究的新领域

随着现代数学、力学和计算机科学的迅速发展，以及岩土工程实践的需要，许多学科渗透到岩体力学研究领域，如：分形几何、分叉、混沌、突变理论和协同论等，不断开创出岩体力学新的研究领域，这些新的研究领域的出现，极大地丰富了岩体力学的研究内容。

1.3 卸荷岩体力学概述

土木建筑、水利水电、铁路交通、冶金矿山等众多的工程建筑中，常常会遇到大量的岩体工程问题，且事故频繁，水利水电工程尤为如此，如大坝基础、电站进出口边坡、人工边坡、地下洞室、库岸坝肩等，其变形和稳定问题往往是工程建设中的关键问题之一。1963 年意大利瓦依昂拱坝左岸的岩质边坡发生破坏，约有 $200 \times 10^6 \sim 300 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩石沿斜坡滑动，造成 3000 多人死亡的重大事故；漫湾水电站左岸坝肩高 120m 的岩体边坡于 1989 年发生滑坡，工程被迫中断，并改变原枢纽布置，工期延误一年；隔河崖水电站左岸导流隧洞出口高边坡失稳，使近 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 岸坡发生解体，延误工期三个月；龙羊峡水电站下游虎山坡在 1989 年 7 月山体滑坡，总塌滑量 $81 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，对电站安全运行带来严重威胁。在我国水利

水电建设中，有些岩体工程问题已成为制约工程建设成败的关键，严重地影响到整个工程的建设进程与造价，也威胁着人民生命财产的安全。因此，对岩体工程进行研究，是工程建设的前提条件。

总体上讲，岩体工程根据其结构形态可分为地面工程和地下工程。地面工程又可分为基础工程和边坡工程。不同的结构形式，它们的力学条件各不相同。岩石地基基础工程岩体一般符合加载岩体力学条件，而在岩质边坡开挖工程及地下工程开挖面径向则表现为卸荷条件。当前边坡工程岩体力学的分析与计算中，采用常规加载试验参数和常规的本构模型与方法，与实际物理模型很不吻合，导致研究成果与实际监测资料不符，甚至出现数量级的差别。另一方面，卸荷岩体对于岩体的各向异性特征和抗拉强度较加荷岩体更为敏感，在卸荷条件下，特别是出现拉应力后，结构面的力学条件将发生本质的变化，导致岩体力学参数急剧下降，卸荷变形剧增。因此，传统研究方法只适用于加载力学条件，卸载条件下岩体力学特性与加载条件下是有区别的，其对应的变形破坏特征与力学参数有所不同，所以在实际工程中才会出现较大差异。

目前，人们通过大量的加载试验及理论分析，已建立起了一系列能反映岩体在加载条件下发生破坏的理论，如 Mohr – Coulomb 准则、Drucker – Prager 准则等，并把这些理论应用到了工程实际之中。然而，由于卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径，两者所引起的岩体的变形和破坏特性，无论在力学机理上还是在力学响应上都有很大差异（表 1.1），故此沿用连续加载强度理论来预测工程岩体在开挖卸荷作用下的力学特性及其稳定性，显然是不切实际的。由工程卸荷引发的灾难性事故，其工程实例比比皆是：如基坑开挖后底部的隆起，洞室开挖引起围岩的底鼓、冒顶、掉块、坍塌，由开挖或爆破导致岩体的滑坡、崩塌，岩爆及岩心饼化等。因此，无论从理论上还是从工程实际来看，都很有必要开展工程岩体卸荷变形及强度特性的研究。

表 1.1 加载岩体力学与卸荷岩体力学的区别

内容	卸荷岩体力学	加载岩体力学
地质调查	强调岩体中结构面卸荷时物理力学的变化	不考虑结构面在卸荷与加荷时物理力学的变化
力学动态	开挖为卸荷状态	卸荷（同左）
力学参数	参数变化不相似于岩石加载参数变化规律	与岩石加载力学参数变化规律相似
强度	岩体强度动态变化	岩体强度不变
计算力学	各向异性卸荷非线性岩体力学	岩石力学
成果验证	与实际工程观测资料吻合	不吻合
结论	力学模型与物理模型一致	不一致

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，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龄教授提出发展到现在已有 10 余年了。随着研究的深入和工程实践的不断积累和印证,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,且随着工程实践的不断应用正日趋完善。目前,卸荷岩体力学的研究内容主要有如下几个方面:

1) 岩体的工程地质研究。工程地质是卸荷岩体力学研究的基础。其内容主要包括地质构造特征、岩体结构、结构面状况与工程的相互影响、地应力、工程岩体分类等,尤其是结构面的状况及工程优势结构面是影响岩体卸荷力学特征中很重要的内容之一。

2) 岩体的卸荷力学特性及其参数研究。岩体的卸荷力学特性及其参数是岩体力学的重要内容,其包括卸荷岩体卸荷的应力应变关系、卸荷岩体的宏观力学参数研究与选择方法、卸荷岩体的尺寸效应、各向异性及流变特性等。

3) 岩体的卸荷本构关系及其分析方法研究。岩体的卸荷本构关系及其分析方法是卸荷岩体力学的核心内容之一。它包括选择比较确切地描述岩体力学行为的本构关系,如正交异性非线性本构关系,既能考虑卸荷岩体的各向异性性质,又能考虑卸荷岩体的非线性特性。

4) 卸荷岩体加固的理论与方法研究。岩体工程研究的基本原则是认识岩体、保护岩体、加固岩体和监测岩体。受扰动后的岩体为维持其稳定性,有时必须进行加固。卸荷岩体的加固必须有一套与其相适应的理论与方法。包括加固作用机理、合理的加固区域、合适的加固时间、预应力损失等,尤其是加固措施的优化对工程建设来讲是十分重要的。

5) 卸荷岩体的破坏准则研究。卸荷岩体的破坏不同于加荷状态下的破坏,卸荷岩体的破坏准则研究也是其研究的重要内容。包括对常用破坏准则的进一步研究与应用、新型破坏准则的建立等,这也是准确判别卸荷岩体破坏准则的重要内容。

由于卸荷岩体特殊的力学条件,对卸荷岩体采用卸荷岩体力学理论,应用卸荷本构关系、分析方法及其参数对开挖卸荷岩体进行分析,从理论上应更加符合工程实际。但是,卸荷岩体力学理论作为一种新的理论和方法尚在进一步的研究中。目前,国内外从事这方面研究的科研技术人员还为数不多。主要集中在原中国长江三峡工程开发总公司总工程师哈秋龄教授、三峡大学李建林教授、刘国霖教授及重庆大学张永兴教授等为数不多的几位研究者,这些单位和研究者结合工程实际,对卸荷岩体的工程地质基础、卸荷岩体的力学特性、卸荷岩体的力学参数、卸荷岩体的物理仿真及数值仿真、卸荷岩体应力应变关系及计算方法、工程整体稳定分析、卸荷岩体加固的原理及方法已有了深入的研究,形成了卸荷岩体力学理论的基本框架。

1.4 卸荷岩体变形及强度特性的研究现状

1.4.1 常用的岩石(岩体)强度理论评述

强度理论是研究结构或材料在受力过程中产生的物理现象和引起结构或材料破坏、断裂的

原因,从而建立相应的应力(或应变)判别式(即强度标准或准则),提供理论计算的方法和依据。对岩石材料来说,岩体强度理论,不仅要能解释岩体破坏的原因、破坏的形态,而且要能确定岩体破坏时的应力或应变状态。岩体的强度理论问题,是岩石力学的基本问题之一。

岩体强度理论可分为两类:经典强度理论和经验强度理论(或准则)。经典强度理论大多源于金属或其他人工材料的强度理论。这些理论一般是从某物理假定出发,基于一定的力学理论推导得出的。它们中有的对岩石(体)比较有用,有的应用于岩石(体)则是值得怀疑的。如:最大线应变理论,该理论认为:使材料发生拉伸破坏的决定因素是拉伸应变,不论单元体处在什么样的应力状态下,当其拉伸线应变达到单向拉伸破坏瞬间的极限应变值时,岩石就会发生断裂。其形式简单,使用方便。但它与岩石破坏的物理过程相抵触,因张破裂势必涉及局部拉应力作用导致物理结合键的破坏,试验观测表明,岩石破坏时,并不单纯是在最小主应力方向发生拉伸的变形作用。Griffith 脆性材料破坏理论及其修正理论,虽能说明裂隙发生开始时的应力,但因裂隙发生开始时的应力低于破坏时的应力,故它不能作为岩石的破坏条件。Mohr 强度理论能很好地说明岩体的剪切破坏,它在裂隙不发育的完整性好的均质岩石中,能给以满意的解释;但在为断裂切割破坏的岩体中,破坏面的位置同 Mohr 理论所确定的差别很大。Coulomb - Navier 理论能反映岩石材料的抗压强度不同的 $S - D$ 效应(即单轴抗压强度必大于单轴抗拉强度)与对静水压力的敏感性,而且简单实用,但它把两个不同时发生的内摩擦力和内聚力加在一起,而内聚力产生于破坏之前,摩擦力则产生于破坏之后。大量试验资料表明,坚硬岩石的内摩擦力随正应力增大到一定程度后要降低,而内聚力也与正应力有关。对于大多数岩石来说,正应力较大时,岩石的强度曲线不是直线。因此, Coulomb 理论仅适用于内聚力不大或松散的摩擦材料,而对脆性坚固材料却存在许多问题。岩石(体)的经验强度准则是根据岩石工程的实践经验或实验室试验结果而得出的,它具有鲜明的经验性和工程实用性。它们常常可以克服经典强度理论的不足而与实际结果有较满意的一致性。其中以 Hoke 和 Brown (1980) 提出的准则最具代表性,它已成为目前岩石工程界和工程地质界最乐于采用的裂隙岩体强度准则。

1.4.2 岩体变形破坏特性研究

岩体在不同的应力状态下,具有完全不同的变形破坏特性。因此,探究岩体在复杂应力状态下的破坏机理,是岩石力学中一项十分重要、复杂而艰巨的研究工作。Griffith (1920, 1924) 指出脆性材料的破坏是由于材料内部存在裂纹,在荷载作用下,裂纹端部产生应力集中现象。当端部应力超过某一临界应力时,将导致材料断裂破坏,由此建立了 Griffith 强度准则。Griffith 破坏理论能够反映岩石发生的脆性破坏的起始状况,但不能反映岩石破坏的整个过程。

Brace 等 (1966) 提出裂纹滑动模型,认为滑动裂纹端部生成的拐折张性裂纹是在压剪型荷载作用下新裂纹生成的主要机制,并根据该模型对岩石破坏前的扩容现象进行了微观解释。但该模型没有考虑裂纹间的相互作用,因而也只适用于裂纹密度较小和裂纹扩展前期的情况。Brady (1970, 1973) 对脆性岩石直到强度破坏点(破坏前区)的力学行为进行了理论和试验研究,导出了脆性岩石破坏前区的力学状态方程(本构关系),并将这些方程用来求解脆性岩体中开挖的圆形隧道附近的应力分布。Lajtai (1977) 假定岩石的节理是拉张断裂,运用断裂力学中 Griffith 微裂纹概念,提出在低围压的压应力场中大多数节理的形成是由于 Griffith 裂纹的拉应力集中的结果。岩体卸荷可导致节理裂隙的形成,由此得出岩石

(体)的卸荷破坏机理为与其残余应力相关的拉张破坏机理。

蒋爵光等(1991)通过对非贯通裂隙岩体模型的破坏试验,将非贯通裂隙岩体在各种应力状态下的破坏机理概括为:张应力集中是造成非贯通裂隙岩体裂纹扩展及破坏的内在力学机制;不稳定扩展是导致非贯通裂隙岩体破坏的直接原因;裂纹扩展具有逾渗行为特征;分形效应是导致非贯通裂隙岩体初裂后随荷载增加应力仍继续增大的原因;应力分布的调整变化是裂纹产生分级现象的原因;贯通性破裂面的形成是非贯通裂隙岩体破坏的宏观标志;边界条件将对破坏过程起控制作用。Myer等(1992)研究了多孔岩石在不同压缩应力下的变形破坏特征,指出张性微裂纹的扩展是引起岩石产生非线性变形的重要原因。采用扫描电镜观测了石灰岩和砂岩的张性裂纹扩展情况,得到多孔岩石在不同压应力作用下拉张裂纹的扩展规律。Wong等(1992)通过室内试验,利用声发射和扫描电镜研究了多孔岩石从脆性断裂到整体碎裂流动的转变过程。研究表明,这种转变明显依赖于应力状态及孔隙。

1.4.3 岩体卸荷变形及强度特性研究

关于岩石(体)的卸荷变形及破坏试验研究,只是在 Von Karman 型岩石常规三轴仪问世以后才得以实现。20 世纪 70 年代以来,真三轴试验机的使用,为岩石(体)的卸荷破坏试验提供了有效的工具。

1) Jaeger 在 1967 年指出,岩石的强度与应力路径是否有关,是一个尚待研究的问题。

2) Swanson 等(1971), Crouch (1972) 利用常规三轴仪分别研究了卸围压对岩石强度的影响。他们的结论是:应力路径对岩石强度没有影响。

3) 陈颢等(1979)也利用常规三轴仪进行了三种应力路径下岩石的破坏试验,其结果表明,岩石强度与体积膨胀及应力路径有关。

4) 陈旦熹等(1982)和吴玉山等(1984)分别研究了卸围压的应力路径对岩石强度和变形特征的影响。他们都认为,应力路径虽然对强度的影响不明显,但对岩石的变形特征却有较明显的影响。

5) 许东俊等(1986)在真三轴应力状态下进行了不同应力路径的岩石变形和破坏实验。实验结果表明,三个主应力的变化都能引起岩石变形和破坏;而且岩石的强度、延性和脆性、体积变化和破坏前兆都与应力路径有关。

6) 尹光志等(1987)根据矿山生产中出现的三种应力变化,利用真三轴压力装置对砂岩和石灰岩的强度特性进行了研究,其结论是:岩石的强度特性是与应力变化有关的。

7) Lingjianming (1993)对节理岩体模型在卸荷过程中的损伤断裂及破坏特性进行了试验研究。结果表明,节理岩体的卸荷损伤非常显著,损伤累积速率较加载情形更快,卸荷损伤破坏的形式仍表现为原生裂隙不稳定扩展导致脆性断裂,但破坏性态更具有突发性。

8) 李天斌和王兰生(1993)对玄武岩在卸荷状态下的变形和破坏特性进行了研究,其主要结论是:在卸荷状态下,随着破坏时围压的增大,试样破坏形式逐渐由张性破坏过渡到张剪性破坏,且张剪破裂角也随之增大;卸荷较加荷岩石的破坏程度更为强烈;沿卸荷方向(围压方向)的扩容也更强烈。沈军辉等(2003)在卸荷试验的基础上,得到岩体卸荷除具有上述变形破裂特征外,其变形破裂程度及方式受岩体结构的控制,比岩石更易发生变形与破坏。

9) 吴刚(1995, 1997, 1998)采用与工程实际相对应的卸荷方式,在真三轴应力状态下分别对红砂岩和(完整及裂隙)岩体模型试样进行了卸荷破坏试验,研究了其在卸荷条件下的变形和破坏特性,比较了不同卸荷破坏方式下试样的变形和强度特征,以及加卸荷历

史对变形、强度、破坏形态和声发射等的影响。主要结论为：卸荷方式不同，导致岩体的变形破坏特征也不相同。在一定的应力强度下，双向卸荷比单向卸荷岩体产生更大的变形。在一般情况下，单向卸荷比双向卸荷岩体的破坏强度更高。

10) 周维垣等(1997)对岩石边坡的卸荷和流变作了非连续变形分析。提出了开裂卸荷条件下岩石的本构关系和计算方法，并应用于工程。

11) 哈秋龄(1997)提出卸荷非线性岩石力学的概念及其主要内容，指出用加载岩石力学方法不能反映边坡岩体的实际力学状态。采用卸荷非线性岩石力学方法对自然边坡及人工边坡的分析实例表明，计算成果与实际情况吻合。

12) 尤明庆等(1998)对大理岩块进行了三轴卸围压试验，考察了岩石强度与试样弱化破坏间的关系，以塑性变形量和本征强度统一研究了三轴压缩和卸围压两种力学过程，提出以材料弱化模量来描述岩样的本征强度降低，指出循环加卸围压会造成本征强度降低。

13) 李仲奎等(1998)通过岩体的真三维试验，模拟了节理面与主应力方向不同夹角、节理面的不同间距及不同连通率以及不同的卸荷过程对节理岩体性质的影响，得出了一些有意义的结论。如：主卸载面与节理面的走向平行时，试件可承受的压剪破坏的能力最低，节理倾角的变化明显影响试件的破坏形态，等等。

14) 任建喜，葛修润(2000)利用作者已研制成功的与CT机配套的专用三轴加载试验设备，在国内外首次完成了岩石卸荷损伤断裂破坏全过程的实时CT试验。得到了岩石卸荷损伤演化过程中从裂纹发育、扩展、贯通到断裂破坏全过程的CT图像。通过与岩石连续加载破坏过程细观试验结果的比较发现，岩石卸荷破坏比连续加载情形下岩石破坏更具突发性。由静态连续加载岩石细观损伤机理出发，将静态岩石全过程曲线划分为5个阶段。得到了卸荷条件下岩石损伤扩展的初步规律。代革联等(2003)用岩石三轴CT专用加载设备对加、卸荷状况下岩石的破坏机理进行研究也得到了类似的结论。

15) 李建林等(2001, 2003)以三峡工程永久船闸高边坡卸荷岩体为条件对岩体进行了卸荷试验，研究了岩体卸荷的应力应变关系及其力学特性，主要结论为：在不同卸荷阶段，其变形模量是逐步变化的，且随着卸荷量的加大塑性变形降低而逐渐降低。岩体的应力应变关系、抗压强度、抗拉强度、变形模量、泊松比以及岩体的各向异性等均随着岩体的尺寸变化而变化，也即随着尺寸的加大而降低。

16) 谢红强等(2003)通过加载和卸载两种力学状态的全过程应力应变试验，揭示了岩体在加卸载时变形特性的差异，并结合试验结果，引入损伤力学概念，推导不同岩性岩石的损伤演化方程。主要结论为：卸载时，岩体主要发生拉裂损伤破坏和剪切损伤破坏两种形式，体积应变从压缩变形转为扩容；岩体处于卸载状态时，在卸载方向出现较大的侧向变形，除弹性回弹变形外，还存在裂缝变形；不同岩性的岩体，卸荷损伤演化规律不同。

17) 高春玉等(2005)利用锦屏一级水电站坝址区边坡的大理岩试件进行了加载和卸载条件下的系列三轴试验。主要结论为，大理岩在不同试验路径下的参数变化明显，同加载条件比较，卸载条件下的变形模量减小，相同围压条件下抗压强度减小，而抗剪断强度参数中 C 值大幅度减小、 ψ 值略有增加；在破坏过程中表现为卸载条件下侧向应变值较同等围压加载条件时增大，塑性特征减弱而脆性特征增强。

1.4.4 岩体卸荷变形及强度特性研究存在的问题

卸荷岩体力学研究 with 加载岩体力学研究一样，是一大的系统工程。卸荷岩体力学作为一

新的研究领域, 尽管在过去的研究中做了一定数量的物理和数值模拟研究, 已经取得了重大的科研成果, 在一些重大的技术问题上取得了较大的突破, 并且在工程界岩体卸荷特性已逐步得到认识, 但过去的研究都存在工程局限性和岩石类型的单一性, 对卸荷力学特性仍然只是停留在初步认识上, 关于岩体的卸荷力学特性在很多方面远没有达到成熟的地步, 作者认为在此领域尚存在一些问题有待进一步的研究。

首先在试验研究方面:

1) 现有的研究多局限于某种岩石和仿真岩体力学的试验方面, 不仅试验数量有限, 而且不同的试验者获得的规律差异较大, 所得到的成果还不能真实反映自然界非贯通裂隙岩体在开挖卸荷下的一般变形破坏机制。

2) 在实验方法及试验材料仿真方面还存在很多不足, 如目前岩体的准三轴试验和少量真三轴试验如何真实反映岩体应力的卸荷路径、模拟材料与真实岩体材料力学性质的相互关系、岩体力学显著的尺寸效应方面等都没有达到真正的模拟。

3) 试验的控制方法通常多是以应力控制, 而采用应变控制的岩体材料卸荷破坏试验比较少见。这与现场监测的资料不相适应。

4) 缺乏对不同施工方式对应的工程岩体不同卸荷方式状态下岩体的试验研究。

5) 研究卸荷速率, 卸荷程度对岩体变形破裂特征的影响的试验还不多见。

6) 结构面的物理力学特征 (包括结构面的方位、力学参数、连通率、组合方式等) 对岩体卸荷力学状态下的变形破坏特征的影响还缺乏深入系统的研究。

其次在理论研究方面:

1) 目前, 卸荷力学特性在力学理论上仍然没有完整的力学分析方法, 对岩体的卸荷力学特性大多还停留在定性的认识, 对岩体卸荷力学上的定义、岩体的卸荷全过程本构理论、破坏准则、岩体的损伤流变特性、岩体动态力学参数、卸荷岩体加固方法等方面仍然没有达到完善的理论高度。

2) 缺乏对不同施工方式引起岩体卸荷破坏的理论分析, 包括对应的本构关系、破坏进程的描述等。

3) 对工程岩体卸荷破坏力学机理的揭示还不够明了。这不仅要应用常规的应力分析方法, 而且还要运用新兴的科学技术方法进行研究。

4) 在岩体卸荷物理仿真、数值计算方法等技术问题仍然没有完备。

再次在工程应用方面:

现已建立的理论和方法离工程应用还有相当的距离。在理论上缺乏对一些大型开挖工程岩体进行跟踪监测以及对监测结果的系统分析。因此, 此方面的工程应用, 在很大程度上还取决于深入、透彻的理论和试验研究。

1.5 岩体本构模型研究现状

1.5.1 岩体的两类力学模型

回顾历史, 岩体力学的形成可以追溯到 20 世纪 20 年代。岩体力学几乎与土力学同时诞生; 但与土力学相比, 岩体力学的发展显得比较缓慢, 特别是在 50 年代以前, 几乎是停滞不前。其主要原因在于, 早期的岩体力学视岩体为连续介质, 采用材料力学或弹性力学的方法