

岩石力学与
工程研究著作 丛书

加锚断续节理岩体 破坏机理及工程应用

©李术才 李明田 郭彦双 著
李廷春 李树忱



科学出版社

www.sciencep.com

岩石力学与工程研究著作丛书

加锚断续节理岩体破坏机理 及工程应用

李术才 李明田 郭彦双 著
 李廷春 李树忱

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以水电和隧道工程中断续节理岩体为研究背景,利用 CT 扫描和声发射技术对加锚断续节理岩体破坏机理开展了大量的试验研究,在试验的基础上进行系统的理论分析和数值模拟研究。提出了断续节理岩体裂隙扩展的力学本构模型、损伤演化方程和锚固止裂模型;建立了加锚三维裂隙岩体失稳破坏的突变模型和可有效反映锚固效应的三维加锚断续节理岩体断裂损伤本构模型;开发出适合断续节理岩体特点的三维大型有限元程序,为岩体工程稳定性评价和布锚参数优化提供了理论依据。其成果成功应用于国内多个大型水电与隧道工程中,取得显著效果。

本书可供从事土木工程、水电工程、隧道工程、矿山工程等领域的科研人员、工程技术人员和大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

加锚断续节理岩体破坏机理及工程应用/李术才等著. —北京:科学出版社,2010

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-029052-6

I. ①加… II. ①李… III. ①固锚-断续-节理岩体-岩石破坏机理-研究 ②固锚-断续-节理岩体-岩土工程-研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 185690 号

责任编辑:刘宝莉 李菲菲 / 责任校对:刘小梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100747

<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

*

2010 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 10 月第一次印刷 印张: 23 1/2

印数: 1—2 000 字数: 450 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,随着国民经济的飞速发展和城市现代化进程的加快,能源与交通等基础设施的建设显得尤为重要。我国在西部地区正在兴建或即将兴建的大型水电工程,如小湾,龙滩,溪落渡,锦屏一、二级等,这些工程都有规模巨大的地下厂房群。在东部沿海正在规划的深海港口建设工程、海底隧道工程、核电工程及地下战略原油储备基地,这些重大工程的岩体常常存在着形态各异、规模不同的节理面,这些节理面的存在强烈地影响和制约着岩体的力学行为。国内外无数次的岩体工程实践和大量的试验研究表明,岩体工程的失稳破坏是在环境应力作用下,原有节理裂隙面的演化、扩展和贯通造成的。例如法国的弥帕塞大坝的失稳破坏是由于坝基片麻岩中的微裂纹扩展造成的,意大利的瓦依昂边坡滑移及我国长江三峡奉节段某处滑坡等事故都与其自身裂隙扩展有关。

作者在国家杰出青年科学基金项目、国家自然科学基金重点项目和面上项目、国家攻关课题及重大工程建设项目的支持下,利用 CT 扫描、声发射探测等技术进行了大量试验,结合理论分析和数值模拟等手段系统开展了节理岩体渐进破坏和加锚止裂研究。揭示了节理面的破坏过程、模式及其止裂特性,加锚节理岩体共同作用及渐进破坏机理,提出了锚杆控制裂纹失稳扩展的突变模型,建立了加锚三维裂隙岩体渐进破坏的本构模型和可有效反映锚固效应的三维加锚断续节理岩体断裂损伤模型及损伤演化方程,开发出适合断续节理岩体特点的三维大型有限元程序,克服了以往分析中无法有效计算锚杆加固裂隙岩体的力学效应的缺陷,为正确评价裂隙围岩的稳定性和锚固特性提供了有效手段。该项研究成果在三峡工程、溪洛渡电站、龙滩电站、翔安海底隧道及胶州湾海底隧道等多个水电、隧道工程中取得成功应用,产生了巨大的经济效益和社会效益。本书的研究成果由作者及作者所指导下的研究集体多年来共同完成,在此对参加本书研究内容相关工作的杨为民博士、杨磊硕士、张宁硕士、徐帮树博士及薛翌国博士表示感谢。

在撰写本书的过程中,得到了朱维申教授的有益指导和大力支持。本书内容的相关研究工作先后得到国家自然科学基金重点项目和面上项目、国家杰出青年科学基金项目、山东省自然科学基金项目、国家“九五”科技公关项目及有关海底隧道及巨型地下洞室群方面的大量工程建设项目的资助。本书的出版还得到了中国科学院科学出版基金的资助。特在此对上述有关部门和个人表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正!

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 引言	1
1.2 概述	1
1.2.1 节理岩体与锚杆加固理论研究现状	1
1.2.2 节理岩体裂隙扩展研究现状	6
1.2.3 CT 技术在岩石力学中的应用研究现状	10
1.2.4 声发射技术在岩石力学中的应用研究现状	11
1.3 本书研究方法和内容	12
1.3.1 本书的研究方法	12
1.3.2 本书研究内容	13
参考文献	13
第 2 章 节理岩体裂隙扩展的 CT 试验	26
2.1 引言	26
2.2 CT 技术原理	27
2.2.1 CT 技术检测原理	28
2.2.2 CT 试验可以解决的岩石力学问题	29
2.3 试验设备	30
2.3.1 本试验的 CT 机配套设备简介	30
2.3.2 CT 图像信息的提取	32
2.4 试件的加工制作	32
2.4.1 试件加工材料的选取	32
2.4.2 含裂隙试件加工示意图	33
2.4.3 试件的测量	36
2.4.4 试验方法	37
2.5 单裂隙试件单轴压缩的裂纹扩展 CT 试验研究	37
2.5.1 单裂隙试件单轴压缩的 CT 试验	37
2.5.2 方案一——同心圆区域 CT 分析	41

2.5.3	方案二——等圆区域 CT 分析	48
2.5.4	方案三——等椭圆区域 CT 分析	54
2.5.5	纵向 CT 扫描图像分析	57
2.5.6	密度应力分析	65
2.5.7	损伤变量分析	68
2.5.8	裂隙扩展宽度的估算方法	70
2.5.9	小结	72
2.6	双裂隙试件单轴压缩的裂纹扩展 CT 试验研究	73
2.6.1	含 44°双裂隙试件单轴压缩的 CT 试验	74
2.6.2	方案一——同心圆区域 CT 分析	76
2.6.3	方案二——等圆区域 CT 分析	81
2.6.4	方案三——等椭圆区域 CT 分析	86
2.6.5	纵向 CT 扫描图像分析	90
2.6.6	小结	92
2.7	单裂隙试件三轴压缩的裂纹扩展 CT 试验研究	93
2.7.1	含 19°单裂隙试件三轴压缩的 CT 试验	93
2.7.2	方案一——同心圆区域 CT 分析	95
2.7.3	方案二——等圆区域 CT 分析	99
2.7.4	方案三——等椭圆区域 CT 分析	103
2.7.5	纵向 CT 扫描图像分析	106
2.7.6	小结	108
2.8	双裂隙试件三轴压缩的裂纹扩展 CT 试验研究	109
2.8.1	含 36°双裂隙试件三轴压缩的 CT 试验	109
2.8.2	方案一——同心圆区域 CT 分析	111
2.8.3	方案二——等圆区域 CT 分析	117
2.8.4	方案三——等椭圆区域 CT 分析	122
2.8.5	纵向 CT 扫描图像分析	126
2.8.6	小结	128
	参考文献	130
第 3 章	节理岩体裂隙断裂声发射试验研究	133
3.1	引言	133
3.2	测试系统	134
3.3	不同材料内置裂隙扩展及贯通规律	135
3.3.1	试验材料及试样制备	135
3.3.2	三维裂隙的制作	139

3.3.3 均质材料中裂隙扩展与贯通	140
3.3.4 非均质材料的扩展特征	145
3.3.5 小结	151
3.4 表面裂隙扩展模式及其断裂机理	152
3.4.1 试验研究	153
3.4.2 试验结果及讨论	155
3.4.3 表面裂隙附近应变分析	159
3.4.4 表面裂隙扩展的声发射试验研究	161
3.4.5 裂隙深度比对断裂模式及强度的影响	163
3.4.6 砂岩中表面裂隙扩展破裂	166
3.4.7 反翼裂纹产生的力学机理	166
3.4.8 小结	167
参考文献	168
第4章 拉伸状态下节理岩体裂隙扩展试验研究	170
4.1 引言	170
4.2 改进的直接拉伸试验技术	171
4.2.1 现有主要直接拉伸试验技术	171
4.2.2 改进的直接拉伸试验技术	173
4.3 拉伸状态下三维内置裂隙扩展试验研究	173
4.3.1 试验材料和含裂隙试件的制备	173
4.3.2 拉伸试验装置和测试系统	176
4.3.3 含裂隙试件拉伸力学和断裂特征	176
4.3.4 裂隙倾角对试件力学性能和断裂特征的影响	179
4.3.5 小结	183
4.4 拉伸状态下三维表面裂隙扩展试验研究	184
4.4.1 试件制作	184
4.4.2 试验结果及分析	184
参考文献	188
第5章 节理岩体中锚杆加固止裂试验研究	190
5.1 引言	190
5.2 试件的加工制作	190
5.2.1 相似材料的研制及其力学参数的测定	190
5.2.2 锚杆材料的选择	195
5.2.3 模具及内置裂隙的制作	196
5.3 表面裂隙不同锚固方式小试件单轴压缩试验研究	198

5.3.1	预制裂隙形态及加锚方式	198
5.3.2	应力-应变曲线及试件力学特性分析	198
5.3.3	破坏模式及断裂机理分析	201
5.3.4	小结	204
5.4	表面裂隙不同锚固方式小试件单轴拉伸试验研究	206
5.4.1	锚固角度对锚固效果影响规律研究	206
5.4.2	锚固位置对锚固效果影响规律研究	213
5.5	节理岩体锚固效应大试块试验研究	219
5.5.1	试验总体设计	219
5.5.2	试验结果及分析	224
	参考文献	235
第6章	复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机理研究及其应用	236
6.1	引言	236
6.2	裂纹起裂判据及扩展方向	236
6.2.1	起裂准则	236
6.2.2	裂纹扩展方向	239
6.3	复杂应力状态下加锚节理裂纹扩展长度的确定	240
6.3.1	压剪情况下分支裂纹扩展长度	240
6.3.2	拉剪应力状态下分支裂纹扩展长度	244
6.4	岩体加锚增韧模型试验研究	244
6.5	裂隙岩体大型洞室群施工顺序优化研究	246
6.5.1	洞室群所在围岩地质构造概况及有关参数	247
6.5.2	计算有关参数	247
6.5.3	开挖假定及有限元计算有关问题	248
6.5.4	洞室群施工顺序优化分析	248
6.5.5	小结	251
	参考文献	251
第7章	加锚断续节理岩体复杂应力状态下本构关系、损伤演化 方程及工程应用	253
7.1	引言	253
7.2	加锚节理面抗剪强度与变形特点	253
7.3	节理面附近锚杆形变能及节理面形变能	257
7.3.1	锚杆在节理裂隙面附近的形变能	257
7.3.2	节理裂隙形变能	258
7.4	加锚节理裂隙岩体的本构关系	261

7.4.1 加锚节理岩体等效模型	261
7.4.2 分析构元等效模型中无锚节理裂纹体的等效劲度	262
7.4.3 分析构元等效模型中锚杆轴向力产生的等效劲度	267
7.4.4 分析构元等效模型中锚杆的“销钉”作用及裂纹体残余能量 产生的等效劲度	270
7.5 加锚断续节理岩体拉剪应力状态下本构关系的研究	274
7.5.1 加锚节理岩体节理面及锚杆变形分析	274
7.5.2 锚杆在节理面附近聚积的形变能	276
7.5.3 加锚节理岩体构元等效模型	278
7.6 断续节理岩体拉压剪受力状态下的本构关系	289
7.7 加锚损伤岩体本构方程不同表现形式之间的转换关系	290
7.8 损伤演化方程	294
7.8.1 压剪应力场下损伤演化方程	294
7.8.2 拉剪应力场下损伤演化方程	299
7.9 三峡右岸地下电站厂房节理围岩稳定性断裂损伤分析	300
7.9.1 岩体力学参数和初始地应力	300
7.9.2 计算范围及工况	301
7.9.3 计算结果	301
7.9.4 小结	307
参考文献	307
第 8 章 裂纹扩展稳定性及遇到分界面时穿越条件研究	309
8.1 裂纹扩展失稳的突变模型	309
8.1.1 概述	309
8.1.2 裂纹扩展的突变模型	310
8.1.3 小结	314
8.2 裂纹扩展遇到分界面时穿越条件分析	314
参考文献	318
第 9 章 工程应用	320
9.1 琅玕山抽水蓄能电站地下厂房洞室群稳定性分析	320
9.1.1 工程概况和工程地质条件	320
9.1.2 数值计算分析相关条件	323
9.1.3 施工开挖方案	326
9.1.4 地下厂房支护设计方案	327
9.1.5 断裂损伤有限元分析法的计算结果	328
9.1.6 小结	333

9.2 青岛胶州湾隧道最小岩石覆盖厚度的断裂损伤分析	333
9.2.1 引言	333
9.2.2 计算模型	334
9.2.3 计算参数	335
9.2.4 计算结果	336
9.2.5 小结	343
9.3 象山港海底隧道最小顶板厚度的三维断裂损伤分析	344
9.3.1 引言	344
9.3.2 计算目的和任务	344
9.3.3 计算模型	344
9.3.4 计算参数	345
9.3.5 计算结果	346
9.3.6 小结	357

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

节理岩体是我国各种岩体工程和环境工程中经常遇到的一种复杂岩体。裂隙岩体作为地质体的一部分,经历过漫长的成岩与各种构造运动,赋存在一定的地质和应力环境中。岩体内存在大量的大小断层、节理、裂隙等规模不同的结构面。这些节理裂隙的尺度不等,小到几厘米,大至几米。如国内二滩电站、小浪底枢纽工程、三峡船闸高边坡和右岸电站、溪洛渡电站地下厂房所在围岩都可观察到断续节理裂隙发育。

国内外无数次的岩体工程实践和大量的试验研究表明,岩体稳定性取决于岩性、岩体结构面和地应力状况。岩体工程的失稳破坏是在环境应力(包括地应力、地下水、地震、开挖卸荷及其耦合相互作用)作用下,原有节理裂隙面的演化、扩展和贯通造成的。例如法国弥帕塞大坝的失稳破坏是由于坝基片麻岩中的微裂纹扩展造成的,意大利的瓦依昂边坡滑移及我国长江三峡奉节段某处滑坡等事故都与其自身裂隙扩展有关。岩体的节理裂隙面形态及其分布方式和受力特征直接制约与控制着岩体的强度、变形和破坏方式,为限制岩体的变形破坏,岩体工程中常用系统锚杆或锚索进行加固。因此,关于裂隙岩体力学特性和锚固效应的研究一直为岩石力学与工程界所重视^[1,2]。

由此可见,对裂隙岩体力学特性和锚固效应的研究,必须在查清各种节理裂隙地质力学成因规律及其空间几何分布规律的基础上,着重探明岩体在各种荷载条件下,节理裂隙的存在和演化扩展对其变形与强度所产生的力学效应以及锚杆限制裂隙扩展和控制岩体变形的机理,并建立相应的计算模型。

1.2 概 述

1.2.1 节理岩体与锚杆加固理论 research 现状

节理岩体力学性质的研究大致有两种方法。一是把节理岩体视为不连续介质,看成是由地质结构面和结构体所组成,分别研究岩石和节理面的力学性质及岩石和节理共同作用时的耦合原理。如 Goodman 提出的节理单元法^[3]、Cundall 提

出的离散元法^[4]、Goodman 和 Shi 提出的关键块理论^[5]等都属于这个分支。Goodman 提出的节理单元法,仅适合于孤立或少量的断层或节理面,当节理裂隙发育时,我们就不可能用节理单元逐一模拟如此众多的节理裂隙。后两种方法通过对岩体结构进行几何上的简化,以便能按块体作为独立计算单元来进行总体分析,对于结构面已将岩体完全切割成块体状的情况,采用这一理论是合适的,但大多数岩体中的节理裂隙是非贯通的,从而大大降低了不连续岩体力学对裂隙岩体的适用性。

研究节理岩体的另一方法是把节理岩体视为宏观上的连续整体,由此建立节理岩体的等效本构模型,这种方法的代表有当量体法、断裂力学方法和损伤力学方法^[1]。

当量体法又分为变形等效法、强度等效法、能量等效法和材料参数等效法等。变形等效法认为等效连续体与多裂隙岩体之间在相同荷载作用下变形相等,由此推出等效连续体的本构关系;强度等效法认为等效连续体的强度与裂隙岩体的强度相等,由此推算出等效连续体与裂隙岩体之间材料常数的关系;能量等效法认为等效连续体与多裂隙岩体两种材料所储存的应变能相等,从而建立起等效体的应力-应变关系;材料参数等效法视裂隙岩体为弱化了均质连续体。其中最为常用的是变形等效法。Salamon^[6]、Horri 等^[7]、Cai 等^[8]、孙建生和永井哲夫^[9]、张武等^[10]和朱维申等^[11]都采用该方法从弹性和弹塑性应变等效出发系统地研究了节理岩体的力学性质。虽然当量体法能较完善地从材料参数、变形及强度方面考虑节理裂隙的存在对岩体的影响效应,但它实际上是将断续的节理裂隙,一概近似为连续的结构面,使得对材料渐近破坏过程和强度难以描述。这就促使人们从其他方面寻求出路。

近 30 年来,断裂力学引入到岩石力学中,它将岩体中的断续节理裂隙模拟为裂纹,岩体不再被看成完全连续均匀体,而是看成含有众多裂纹的裂纹体。运用断裂力学方法,可以追踪岩体中节理裂隙的起裂、扩展到相互贯通和岩体局部破坏的过程,从而揭示出岩体失稳的渐近破坏机理。国内外对岩石断裂研究已经获得一些进展,岩石断裂试验也在广泛进行^[1]。但是断裂力学的研究还存在某些局限性,由于裂隙岩体含有众多裂纹,如果要深入到具体考察每一条节理裂纹的应力-应变状态和过程且逐一描述是不现实的,这就需要采用某种方法加以综合,考虑其总体宏观效果。

自 1958 年苏联学者 Kachanov 首先引入损伤概念,后经法国学者 Lemaitre 与 Chaboche、美国学者 Krajcinovic 等利用连续介质力学方法,根据不可逆热力学原理,建立“损伤力学”这门新学科。近年来,Kyoya、Ichikawa 等及国内的一些学者如周维垣、朱维申、陶振宇、谢和平、凌建明、陈卫忠、叶黔元又将其应用于裂隙岩体^[12~21]。将损伤力学应用于裂隙岩体的优点在于:①可以得到成组节理裂隙的各

向异性力学关系,这是以往所不易办到的。②借助于节理裂隙面构造的损伤张量描述,可以将岩体的几何特性与力学特性联系起来,这为岩体强度的预测打下了理论基础。③由岩体的损伤预测岩体的强度,无需进行大规模试验,只需知道节理裂隙的特性和完整岩块的力学特性,即可预测岩体的强度。这为解决岩体力学中的尺寸效应问题提供了可能。④可以描述材料宏观力学性能的演变直到破坏的全过程。

裂隙岩体损伤力学是连续介质损伤力学理论与岩体力学、工程地质学之间的交叉分支学科,其提出和发展的时间不长,尚有不少问题有待深入研究。例如节理裂隙损伤张量的合理定义,损伤演化机理及演化方程的建立等,都还没有得到深入系统的研究。而断裂力学与损伤力学的结合是研究裂隙岩体力学特性的必然途径。

岩体锚固是指采用锚索或锚杆加固岩体工程结构,使其稳定性得到保证,从而安全可靠地发挥其工程作用。自1911年美国首次采用岩石锚杆支护矿山巷道起,锚固技术便迅速发展,现已普及到世界各国的露天矿边坡加固、地下开采洞室支护、铁路隧道支护、水利水电工程中的坝基加固、高边坡稳定加固、土木建筑工程中的深基坑加固等各个领域。据不完全统计^[22],国外各类岩石锚杆已达600余种,锚杆年使用量超过2.5亿根。从20世纪50年代后期起,我国开始在矿山巷道中使用锚杆支护,到60年代末,仅十年时间锚固技术已在我国的矿山、冶金、水电、交通、土木建筑等领域内广为采用。应用范围由坚硬稳定岩石发展到松软破碎岩石,由小巷道发展到大跨度洞室,由静荷条件发展到动荷条件,由基建工程发展到工程抢险和结构补强^[23]。1969年我国海军某仓库大跨度地下工程首先采用锚杆加固了高40m的岩墙,比原计划的钢筋混凝土边墙支护节约投资250万元,并缩短了工期,继后跨度为40m的海军某地下机库等工程采用了预应力长锚索,取得了显著的经济效益。水电系统中,早在1964年,就对使用中出现偏斜和裂缝的梅山水库右岸坝基采用长30~47m的预应力锚索加固,取得了良好的效果。

近一二十年来,由于我国的大型水电工程相继建成或破土动工,锚固工程量大大增加,锚固技术也得到了更广泛地采用和进一步地发展,如镜泊湖水电站、洪门水电站、天生桥二级工程、葛洲坝等水电工程中都对坝基、坝体、闸室、导流洞等有隐患的部位进行了预应力锚索加固。另外还有象漫湾电站,它的左岸边坡进行了大范围的锚索加固,李家峡电站对坝肩边坡普遍采用了预应力锚索加固。至于布置大量的系统锚杆、锚索进行岩体加固,几乎无一电站不采用。

已建成的三峡工程,其设计锚固工程量是非常大的。仅就其双线船闸边坡而言,全长共五级,共1600m长,其坡最高处达170m,坡角自上而下分为45°、75°、90°,其高陡及工程规模之大为世界所罕见。尤其在坡底船闸闸室部位,南、北坡各形成一个高50m左右的直立闸墙,双线闸室之间还有宽60m、高50m的直立中隔

墩。这些部位必须确保长期高度稳定,万无一失,才能保证过往船只的安全和整个三峡工程的安全进行。而要使之稳定,应大量使用锚杆、锚索对整个边坡进行加固及局部再加强。仅永久船闸工程将施作 10 万根左右的系统锚杆和超过 1 万根的预应力锚索,其锚固工程将耗资达数亿元。

锚固技术已成为一种无可替代的岩土工程安全加固措施。尽管锚固如此重要,其应用日益广泛,但是岩土锚固理论还没有完全搞清楚。其设计理论和计算方法都不够完善,还不能在设计阶段采取合理的、科学的设计方法和锚固效果评价方法。大多数锚固工程的设计仍采用工程类比法或半理论、半经验的方法,而且更注重传统经验的应用。即便采取了一定的设计理论和计算方法,这种理论和方法也都存在着某些缺陷和不足之处。事实上,岩土锚固理论方面的研究已经远远落后于工程实践。锚固理论落后于工程实践的现状,直接影响到锚杆技术的合理应用和发展,甚至还会造成严重的工程事故。出现这种状况的根本原因在于,一是岩土介质本身的复杂性和多样性,其真实的本构关系是随着其形成的地质年代、分布区域、构造特性及其在具体工程中的空间位置、环境因素等多种条件而变化的。尤其是节理岩体,还未能找到准确描述其力学行为的计算方法,这是客观性的一面。另外,主要是由于人们对锚固理论方面的研究还不够深入,还有许多相关的作用原理没有完全搞清。只有在搞清了这些基本原理之后,才能进行合理的设计,使理论指导实践,实践和理论相结合,相互促进,共同发展。

近年来国内外运用断裂损伤力学原理建立节理岩体的本构关系和损伤演化方程在实际应用中取得了较好的效果^[1],但多数未考虑节理裂隙在拉剪和压剪情况下不同的力学特性及锚杆的加固作用。基于这点认识,本书欲在现有理论的基础上去探讨加锚断续节理岩体的力学特性、损伤演化方程及其本构关系。

国内外许多学者或技术人员对粘结型锚杆做过大量的试验研究^[24~41],粘结型锚杆是节理岩体极其有效的支护手段的事实早被工程师们所认识。但是,其锚固机理及支护效果的评价方法并不简单。葛修润、刘建武^[24]通过室内模拟试验和理论分析,探讨了锚杆对节理面抗剪性能的影响,以及杆体阻止节理面发生相对错动的“销钉”作用机理,提出了改进的估算加锚节理面抗剪强度公式,并指出了改进有限元计算中考虑锚杆作用模型的方向;张玉军^[25]对全长粘结型锚杆锚固试件进行了流变研究,初步得到了锚固体的流变特性;邹志辉、汪志林^[26]通过模型试验,研究了锚杆在不同岩体中的工作机理及力学效应,得到了锚杆对岩体力学指标 E 、 C 和 φ 影响规律的拟合式;叶金汉^[27]用水泥砂浆和大理石来模拟锚固岩体,通过室内三轴压缩试验,研究了锚固岩体的应力-应变曲线、强度和破坏形状;朱维申等^[28,29]以大型水电工程和矿山等大型隧道为背景,通过大型模型试验及理论分析研究了节理岩体的锚固机理,提出了计算锚固效应的等效公式。与此同时,国外许多学者^[30~41]对非连续岩体中岩石锚杆加固作用进行了试验研究,得出许多有益的

结论。而在锚杆锚固效果评价方法方面,目前在有限元计算中,锚杆往往采用杆单元计算,这种轴力杆式的锚杆单元主要有两个缺点:一是只计及杆体的轴力而未计及杆体本身的抗剪作用;二是杆体各区段间(即各杆单元交接处)转角不能协调。这些缺点在模拟穿过节理面的锚杆时就更突出^[1]。日本学者大久保的数值计算结果和室内模型试验的结果对比证实了这一结论的正确性。针对这些问题,许多研究者^[42~48]提出了新的锚杆单元模型,例如 Aydan^[42]提出了一种 8 节点三维锚杆单元;罗先启^[43]在有限元计算中提出了反映锚杆销钉机理的弹簧支承模型以及附加刚度和附加强度的概念,并研究了附加刚度和附加强度以及锚杆长度、直径、预应力等因素对支护的影响;肖明^[44]提出了锚杆作用的柱单元分析法;陈胜宏等^[48]提出了三维复合单元等。在计算方法上,除了用特定的适宜的锚杆模型来模拟锚杆作用外(这种方法当节理发育,锚杆数量多时,计算工作量很大),还可采用等效方法^[49~59],锚杆加固后的节理岩体近似地作为等价连续体,提出表现其力学特性的一个新的本构方程。例如对于加锚节理面的 C 值及岩体的 C 、 φ 值可以在考虑到锚杆的密度、杆材性质、胶结情况后予以适当的提高^[49],但加锚后岩体力学参数选取却是该法的难点。永井哲夫^[50]通过室内节理岩体的锚固试验,提出一个能够反映节理与锚杆相互作用的等价连续模型,该模型节理与锚杆的相互作用是通过加锚后,节理面的剪切刚度 K_s^* 和垂直刚度 K_n^* 的提高来考虑的。该模型在考虑锚杆加固作用的有限元计算中简便易用,但该模型的正确性有待检验,而且该模型不易与断裂损伤联系起来;杨延毅等^[51,52]从损伤加筋体的自一致理论出发,运用脆性类材料的损伤增韧止裂理论,根据加锚节理裂纹的断裂扩展过程建立了损伤演化方程,并给出了此类加锚岩体的本构关系。该研究未能区分拉、压不同应力状态,但为推求加锚节理岩体的本构及损伤演化方程提供了新思路;杨松林等^[53]推导了一种新的可考虑节理剪胀扩容现象的加锚层状岩体的本构模型;张玉军等^[54]考虑了锚固岩体的正交各向异性,根据等效材料的概念,建立了锚固岩体的本构方程和破坏准则;刘宁等^[55]采用等效抹平的处理方法,从损伤加筋体的自一致理论出发,推导出了加锚岩体的本构关系;刘保国^[56]结合全长型锚杆加固效果评价,推导出节理岩体本构方程;陈洪凯等^[57]从节理岩体最基本的法向、切向强度系数及强度指标 c 、 f 等出发,进行了锚固岩体的等效连续体研究,推导出了节理岩体等效连续体的等效强度参数的表达式;程东幸等^[58]通过数值模拟方法研究了加锚节理岩体的力学特性,推导了边坡加锚节理岩体的等效力学参数。至此,综观锚固计算的发展史,目前还没有适用岩体工程特点的简便易行的计算模型,因此研究加锚节理岩体的等效连续模型和提出适于二维、三维分析的锚固体模型就成为当前的重要课题。本书的目的即为提出裂隙岩体的力学本构模型、损伤演化方程、锚固模型,并将其应用到岩体工程稳定性分析中。

1.2.2 节理岩体裂隙扩展研究现状

1. 二维裂隙研究现状

脆性材料的受压破坏模式取决于荷载的类型、材料的结构和其内部损伤的程度。裂隙起裂、扩展直至最后的贯通是脆性材料破坏的主要表现形式。Griffith^[59,60]最早揭示了裂纹的存在对于脆性材料的破坏起着至关重要的作用,他在1920年、1924年相继发表的两篇论文建立了脆性断裂力学的基本框架。通过分析受压裂纹扩展与应力大小的关系,提出了裂纹扩展导致材料破坏的条件,并且从能量的角度出发得出了物体强度与材料性质及裂纹长度之间的表达式。Griffith破坏理论能够反映岩石发生脆性破坏的起始状况。到20世纪60年代,Brace、Salamon、Mc Clintock、Cook、Fairhurst、Hoek等学者^[61~66]开始研究在受压情况下板内预制裂隙的初始扩展以及次生裂纹的扩展状况,得到了裂纹向大主应力方向稳定扩展的结论。1966年,Brace等^[67]提出裂隙滑动模型,认为滑动裂隙端部生成的弯折张性裂纹是压剪型荷载作用下新裂纹生成的主要机理,并根据该模型对岩石破坏前的扩容现象进行了微观解释。同时他还指出,在准静态方式下裂隙的进一步扩展,要求压力连续增长以维持这个过程,而次生裂纹最初是以突跃方式出现的(动态的)。相反,试件在受拉状态下,裂纹的增长是不稳定的。但该模型没有考虑裂隙间的相互作用,因而也只适用于裂隙密度较小和裂隙扩展前期的情况。20世纪70年代,许多平面条件下的试验研究开始兴起,这些试验大部分用含预制倾斜裂隙(pre-existing inclining flaws)的模拟材料来研究裂纹的萌生、演化和试件破坏过程。如Nolen-Hoeksema等^[68]、Wong^[69]用光学显微镜观测了受荷大理岩、花岗岩预制裂隙尖端的扩展和试件的破裂模式,发现裂隙的扩展具有非对称性,他们检测了试样表面与内部裂隙的分布特征,指出表面裂隙的发育能够很好地代表内部的情况。通过大量观测试件破坏前裂隙的扩展状况,在不同加载条件下,得到了裂隙的扩展规律(如Peng和Johnson^[70]、Sangha等^[71])。试验表明裂隙不断扩展,长度明显增加。随着施加荷载的增大,原生裂隙开始产生次生裂纹。在体积膨胀阶段,即在达到近一半的抗压强度之后,声发射的数量显著增加,说明有新裂纹产生。Brady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^[72]假定岩石的节理为拉张断裂,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)的卸荷破坏机理与其残余应力相关的张拉破坏机理。这个时候Priest和Hudson^[73,74]也用计算机对节理缺陷岩体进行了几何统计

特征的分析研究。

进入 20 世纪 80 年代,试验技术和理论水平得到较大提高,在进行更加深入试验研究裂隙扩展的同时,开始将试验结果与理论相结合。在试验方面,开始关注二维状态下两个甚至是多裂隙的扩展,发现多裂隙的扩展会促进裂隙间的相互作用,甚至发生裂隙的贯通。Sano^[75]的研究发现,裂隙的数目越多,剪胀现象越明显,更加容易观测到裂隙的扩展和裂隙间的贯通影响破坏模式,如果裂隙的密度低,裂隙之间的平均距离大,在裂纹扩展的早期阶段,相互影响几乎没有。只有扩展到一定程度,相互作用才变得明显。因此,裂隙之间的相互作用就会促进裂纹的扩展,从而导致试件劈裂或裂纹的扩展向更大规模过渡。如果同时扩展的裂隙密度很高,裂隙的相互作用以及由此产生的应力场的干扰会导致沿单轴压力方向发生新的裂纹扩展。尽管试件处于单向加载,而且应力分布均匀,也会在试件中产生裂隙的剪切扩展^[76,77]。通过施加侧向压力能有效阻止裂隙受拉扩展,也同样会在试件中产生裂隙的剪切扩展。对裂隙缺陷进行试验研究的同时,更注重理论与试验相结合,建立了几种理论模型。比较有代表性的研究有:Nemat-Nasser 和 Horii、Ashby、Sammis 和 Sih 等用线弹性断裂力学不但研究了单个、多个和多组雁行排列预制张开裂隙的起裂、扩展和贯通机理,还研究了这些裂隙与自由面的相互作用引起的应力集中,并建立了分析相互作用的理论模型,给出了相互作用因子,进行了强度的分析^[78~86]。他们指出宏观的破坏主要同裂隙分布、侧压及参与贯通的裂隙有关,但也没有充分的试验数据去全面验证他们的理论结果。Kachanov^[87,88]在考虑岩石非弹性基础上建立了适合滑动摩擦特性的预制裂隙的扩展模型。另外文献^{[89]~[102]}也用连续或非连续模型研究了裂隙缺陷的扩展机理,并建立了相应的理论模型。

90 年代至今,随着试验手段和理论水平的进一步提高,关于裂隙扩展的试验和理论研究进入一个繁荣的时代。可喜的是国内的研究也跟了上来,出现了大量的研究工作者从事岩石裂隙扩展或断裂的研究,得到了很多成果。国外,Reyes、Shen、Bobet 和 Einstein 等^[103~107]用石膏试样研究了单轴加载下单裂隙的扩展和双裂隙的岩桥贯通机理及试样失稳模式,裂隙贯通全过程通过被连接的显微录像机拍摄记录。正如所预料的那样,贯通机制被平行的初始预制裂隙缺陷的几何分布控制。他们发现,如果预制裂隙缺陷部分重叠分布(overlapping),则翼型裂纹(wing crack)发展并且穿过试样的完整部分而贯通。如果预制裂隙缺陷不重叠分布(non-overlapping),贯通将穿过次生裂纹(剪坏),或者出现拉张和剪切共同作用。尽管这些学者研究了岩桥贯通机理及失稳模式,但他们没有对一些影响裂隙贯通机理的因素做系统研究,包括裂隙长度与倾角、岩桥的距离以及裂隙所在的相对位置、裂隙间的摩擦系数和围压等。Wong、Chau、黄凯珠等^[108~116]在这些研究的基础上做了进一步的研究,包括用含不同程度微裂纹的真实岩石及类砂岩模拟