

2
易顺民 朱珍德 著

裂隙岩体损伤 力学导论



科学出版社
www.sciencep.com

裂隙岩体损伤力学导论

易顺民 朱珍德 著

国家自然科学基金资助研究项目
项目批准号 50479021

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统叙述了裂隙岩体损伤力学理论、方法及应用。全书共分八章：第一章介绍了岩体损伤力学发展现状；第二章阐述了复杂应力状态下裂隙岩体本构关系与损伤演化方程；第三章讨论了裂隙岩体损伤流变断裂机制，建立裂隙岩体损伤流变模型；第四章与第五章通过全应力应变过程数控岩石渗透性试验，分析了脆性岩石断口断裂机理与复杂应力状态与渗透压作用下的裂隙岩体变形，探究了渗流对裂隙岩体损伤断裂的影响，建立等效连续介质渗流模型；第六章讨论了渗流场、应力场、损伤场三者的相关性，探讨了渗流对裂隙岩体损伤演化的贡献与渗透张量随裂隙损伤发展的演化，给出了裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程；第七章介绍了分形几何理论基础，探讨了岩石损伤断裂的分形特征、损伤断裂破坏物的分形特征，研究了岩体结构面的分形模型与结构面的分形统计特征。第八章将上述研究成果应用于三峡工程船闸高边坡稳定性分析与三斗坪坝址工程区岩体断裂的分维描述。

本书可供已有一定数学、力学基础的岩石力学研究工作的技术人员提高理论水平之用，也可作为与岩土工程有关专业的研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体损伤力学导论/易顺民,朱珍德著. —北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-015561-0

I. 裂… I. ①易…②朱… II. 岩石力学-损伤力学 N. TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 049894 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 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>

新 华 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年9月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—2 000 字数:322 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (BA03)

序

裂隙岩体是坝基、边坡、地下硐室等岩体工程中广泛遇到的一类复杂介质,它的强度、变形和地下水渗透性等力学特征将直接影响各类岩体工程的设计与施工,以及工程运营期间的长期稳定性。因此,关于裂隙岩体力学的特性及其岩体与地下渗流相互作用的耦合问题一直被国内外岩石力学与工程界所关注。

随着我国西部大开发战略的逐步实施,特别如三峡水利水电工程的发展,给岩石力学工作者提出了一系列值得深入研究的技术难题。对于一些特大型的水利枢纽工程而言,其库区岩坡的失稳问题主要涉及两个方面:水岩相互作用,即非稳态渗流场、应力场与岩体损伤场间的耦合相互作用;高陡岩坡时效变形与流变失稳的预测和预报。《裂隙岩体损伤力学导论》一书紧密围绕上述两个方面很多重要问题开展了系统深入的研究通过作者们所承担并完成的多项自然科学基金课题,取得了可喜的丰硕成果,并陆续发表了多篇有相当水平的学术论文。该书在此基础上经过修改并补充近十年来的研究成果而撰述成稿,这是十分难能可贵的。

众所周知,节理裂隙岩体损伤力学的研究是促进岩石力学发展的重要方面,岩体损伤理论可以定量描述含初始缺陷,如岩体裂纹、裂隙、空洞和节理等固体介质的应力-应变关系,建立合适的损伤张量,深层次地探讨固体介质由于损伤的积累与演化而衍生的本构关系变化,较好地处理了岩体由实际上的非连续到等效连续的过渡,它克服了弹性和塑性理论所难以解决的困难,丰富了岩体力学本构理论,能更合理而全面地分析岩体工程的应力场和位移场,并有利于日后对岩质边坡、地下硐室等围岩的维护与加固。

统观全书,与同类已出版的论著比较,具有以下特色:

书中系统阐述了复杂应力状态(压剪、拉剪)下裂隙岩体的本构关系及其损伤演化方程,探讨了起裂判据和裂纹走向,建立了渗透水压对裂隙岩体损伤演化的贡献;通过室内相似模型试验,深入研究了裂隙断续扩展与损伤流变断裂机制,建立了蠕变断裂应力强度因子及其断裂判据;利用对岩体应力-应变全过程进行数模其渗透性的试验成果,对脆性岩石断口断裂机理进行了详细分析,从而弄清了渗透水压对岩体强度的定量影响,并将裂纹扩展长度引入岩体渗透张量,给出了等效的连续介质渗流模型,丰富和拓展了现有的渗流模型。书中还探讨了渗流场、应力场、损伤场三者间的相互作用关系,给出了非稳态渗流场与损伤场的耦合方程,这在国内外尚属首次。此外,该书将上述研究成果应用于长江三峡工程永久船闸高边坡的稳定性分析,计算结果与实测变形基本吻合。书中更进一步引入分形理论,探讨了岩

石损伤断裂的分形特征和岩石损伤断裂断口的分形特征,研究了岩石损伤断裂破坏物的分形特征,提出了岩体结构面的分形模型,进而将研究成果确定出三峡工程区的岩体断裂分形维,为分析计算节理裂隙的岩体强度与变形提供依据。

我深信该书的付梓将为裂隙岩体损伤力学研究奠定更为坚实的理论基础,该书对今后岩石力学的持续发展也将起到很好的推进作用。为此,我乐于写述了以上的一点文字,谨供读者参考、指正。是为序。

孙 钧

2003 年晚秋,于同济园

前 言

人类社会的迅速发展,人类工程活动的日益频繁,涉及岩体边坡的设计、水电工程渗流与控制、有害核废料的储存、矿井的疏干降压排水、石油以及地下水资源的开发利用等方面。人类工程活动的安全性、对地质环境的影响程度以及地质环境对工程活动的反作用等问题,是科学家最关心的问题。如何定量评价和预测人类工程开挖干扰力、初始地应力和地下水渗透力耦合作用对人类工程体和岩质边坡稳定性的影响,一直是国内外岩石力学与工程界所关注的重要研究课题。

岩体是力学性质很复杂的介质。从唯象的观点看,裂隙岩体属非均匀各向异性介质,因此损伤力学、断裂力学、流变力学、分形理论与岩体的变形研究有着特别密切的关系。同时,由于岩体结构的复杂性,导致岩体渗流的非均质性和各向异性;岩体裂隙空间是岩体的主要渗透通道,岩体裂隙显著地受应力环境的影响,因而岩体的变形实质上是渗流场、应力场、损伤场三者相互耦合的结果。为了适应高速发展的工程需要,出版一本论述裂隙岩体损伤力学的专著很有必要。

全书共八章,第一章简单回顾损伤力学、岩体损伤力学的研究历史与现状;第二章阐述裂隙岩体损伤张量的定义,运用贝蒂(Betti)定理和裂纹体应变能守恒定律,给出裂隙岩体压剪、拉剪应力状态下的本构关系,详细探讨裂纹起裂判据及扩展方向、确定压剪应力状态下裂纹扩展长度,建立复杂应力环境下裂隙岩体损伤演化方程;第三章通过相似材料模拟节理裂隙分布室内试验,探讨断续裂隙扩展变形机理,深入分析蠕变断裂应力强度因子及断裂判据,建立应力强度因子与时间因子的相关关系,着重研究压剪应力状态下分支裂纹扩展及其蠕变贯通机制,给出黏弹塑性损伤本构方程与损伤流变耦合模型;第四章通过全应力-应变过程数控岩石渗透性及其断裂断口扫描电镜试验研究,进一步分析脆性岩石裂隙扩展损伤机理,重点探讨渗透水压对岩体强度及其变形的影响,以及渗流使裂纹尖端介质软化的作用;第五章运用弹性理论,建立复杂应力状态与渗透压作用对岩体裂纹张开度的贡献,论述裂隙岩体的渗流规律,基于渗流能量扩散原理,建立包含裂纹张开度、长度及方位在内的渗透张量数学表达式;第六章探讨渗流对裂隙岩体应力场的力学效应,重点推导复杂应力状态下渗流对裂隙损伤演化方程的贡献,建立裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程;第七章介绍裂隙岩体损伤断裂分形研究的现状、研究内容、发展趋势,阐述分形理论的基本概念,重点探讨单轴(三轴)压缩岩石损伤断裂的分形特征及损伤断裂破坏物的分形特征,建立岩体裂隙结构面的分形模型,给出裂隙岩体工程分类的分形方法;第八章将上述研究成果结合三峡工程永久船闸

高边坡变形预测与稳定性分析,以及对三峡工程坝址区裂隙岩体断裂系统进行分形定量描述。

本书在撰写过程中注意学科体系的完备性,强调基本概念描述的准确性,基本理论推理的严密性以及基本理论的实际应用性。本书内容新颖、理论性强,为了便于读者阅读,书中对一些重要的公式进行了较详细的推导。

书中的很多内容为国家自然科学基金、中国博士后基金和国电公司重大科技项目的研究成果,这些项目都是在导师同济大学孙钧教授和中国地质大学唐辉明教授的主持下完成的。他们的严谨治学态度给予著者极大的影响,是他们把我们引入水岩相互耦合和岩体损伤断裂的研究领域。在博士后两年研究中,导师四川大学胡定教授、赵文谦教授经常关心著者的研究进展,并给予指导,在此深表谢意。

著者感谢中国科学院武汉岩土力学研究所李术才教授、陈卫忠教授的指导和帮助,还得到了硕士研究生邢福东、王军的支持,谨此致谢。

为了对裂隙岩体损伤力学有全面深入的了解,书中对国内外在此领域取得的相关成果也做了扼要介绍。

还要特别感谢孙钧院士欣然为本书作序,给著者以鼓励和教导。

应该指出,裂隙岩体损伤力学是一门正在发展着的边缘性交叉学科,有许多理论和实际应用问题尚需做进一步研究和完善,由于作者水平及经验有限,书中存在不足之处,恳请前辈及同仁不吝赐教。

著 者

2005年3月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 损伤力学概述	1
1.2 岩体损伤力学的发展	3
第二章 裂隙岩体损伤力学模型	8
2.1 裂隙岩体的损伤张量	8
2.2 裂隙岩体的本构关系	10
2.2.1 压剪应力状态下裂隙岩体的本构关系	10
2.2.2 拉剪应力状态下裂隙岩体的本构关系	15
2.2.3 拉、压剪应力状态下裂隙岩体的本构关系	21
2.2.4 本构方程不同表现形式之间的转换关系	21
2.3 裂隙岩体损伤演化方程研究	24
2.3.1 裂纹起裂判据及扩展方向	25
2.3.2 压剪应力状态下裂纹扩展长度的确定	28
2.3.3 压剪应力状态下裂隙岩体损伤演化方程	32
2.3.4 拉剪应力状态下裂隙岩体损伤演化方程	36
第三章 裂隙岩体损伤流变模型研究	38
3.1 概述	38
3.2 断续裂隙扩展机理的研究	39
3.2.1 裂纹断裂机制的研究	40
3.2.2 岩桥断裂机制分析	43
3.3 裂隙岩体损伤流变断裂机制的研究	47
3.3.1 单裂隙流变断裂理论	48
3.3.2 黏弹性裂纹体的能量释放率	54
3.3.3 蠕变断裂应力强度因子及断裂判据	58
3.4 压剪应力状态下裂隙岩体流变断裂模型研究	61
3.4.1 压剪应力状态下裂纹起裂	61
3.4.2 分支裂纹扩展	63
3.4.3 裂隙蠕变贯通机制	64

3.5 裂隙岩体损伤流变模型研究	64
3.5.1 黏弹塑性损伤本构方程	64
3.5.2 裂隙岩体损伤流变耦合模型研究	67
第四章 渗透压作用时裂隙岩体断裂损伤机理的研究	71
4.1 概述	71
4.2 脆性岩石断口断裂机理的实验分析研究	71
4.2.1 全应力-应变过程数控岩石渗透性试验	71
4.2.2 脆性岩石断口断裂机理分析与实验研究	78
4.3 渗流对裂隙岩体损伤断裂的影响	84
4.3.1 渗透水压作用时裂隙岩体变形研究	84
4.3.2 渗透水压对岩体强度的影响	87
第五章 裂隙岩体渗流模型研究	94
5.1 概述	94
5.1.1 模型与模拟	94
5.1.2 岩体水流系统数学模型	95
5.2 复杂应力状态与渗透压作用下的裂隙岩体变形特征	96
5.2.1 压剪应力状态下裂隙岩体变形研究	96
5.2.2 拉剪应力状态下裂隙岩体变形研究	98
5.2.3 渗透压力作用下裂隙岩体变形研究	101
5.3 裂隙岩体渗流特征的研究	105
5.4 单裂隙渗流规律的研究	107
5.4.1 立方定理及其适用性	107
5.4.2 广义立方定理	108
5.5 等效连续介质渗流模型	111
5.5.1 确定岩体渗透张量的一般方法	112
5.5.2 基于渗流能量泛函的方法	114
5.5.3 代表性单元体积 REV	118
第六章 裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究	120
6.1 概述	120
6.2 渗流对裂隙岩体应力场的力学效应	121
6.3 渗流对裂隙岩体损伤演化的作用	122
6.3.1 压剪应力状态下渗流对裂隙损伤演化的影响	122
6.3.2 拉剪应力状态下渗流对裂隙损伤演化的影响	123
6.4 渗透张量随裂隙损伤的演化特征	124
6.5 裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合方程研究	126
6.5.1 等效连续介质渗流场数学模型	126
6.5.2 等效连续介质岩体的应力场数学模型	128

第七章 裂隙岩体损伤断裂的分形研究	130
7.1 概述	130
7.1.1 裂隙岩体损伤断裂分形研究的现状	130
7.1.2 裂隙岩体损伤断裂分形研究的基本问题	135
7.1.3 裂隙岩体损伤断裂分形研究的发展趋势	139
7.2 分形与分维	142
7.2.1 引言	142
7.2.2 分维测定方法	145
7.3 单轴压缩岩石损伤断裂的分形特征	147
7.3.1 单轴压缩时岩石损伤断裂的分维特征	147
7.3.2 岩石损伤断裂分维的物理意义	151
7.3.3 岩石损伤断裂分维的实践意义	152
7.4 三轴压缩岩石损伤断裂的分形特征	153
7.4.1 三轴压缩时岩石损伤断裂的分布特征	153
7.4.2 三轴压缩时岩石损伤断裂的分维特征	153
7.5 岩石损伤断裂断口的分形特征	155
7.5.1 岩石脆性破裂断口分维的测定方法	155
7.5.2 岩石损伤破裂断口的分维特征	157
7.6 岩石损伤断裂破损物的分形特征	162
7.6.1 分维的计算方法	162
7.6.2 岩石破裂破损物粒度分布的分维特征	163
7.7 裂隙岩体结构面的统计分形特征	164
7.7.1 岩体裂隙结构面的分形模型	165
7.7.2 岩体裂隙结构面的分形统计特征	167
7.7.3 岩体裂隙结构面分形的认识与讨论	174
7.8 裂隙岩体工程分类的分形研究	177
7.8.1 岩体工程分类的研究现状	177
7.8.2 岩体工程分类研究的发展趋势	178
7.8.3 岩石 <i>RQD</i> 的分形模型	179
7.8.4 裂隙岩体工程分类的分形方法	179
第八章 工程实例应用研究	186
8.1 三峡工程永久船闸高边坡工程地质概述	186
8.2 三峡工程永久船闸高边坡裂隙岩体损伤流变研究	188
8.2.1 裂隙岩体损伤流变的计算参数	188
8.2.2 计算结果分析	190
8.3 三峡工程永久船闸高边坡裂隙岩体渗流损伤耦合变形研究	192
8.3.1 裂隙岩体渗流损伤耦合变形的计算参数	193

8.3.2 计算结果分析	194
8.4 三峡工程坝址区岩体断裂的分形研究	199
8.4.1 岩体断层空间分布的分形特征	200
8.4.2 断层岩的分形特征	203
8.4.3 岩石裂隙的分形特征	205
8.4.4 岩体裂隙的分维与岩体质量的关系	207
参考文献	209

第一章 绪 论

1.1 损伤力学概述

损伤力学是近 30 年发展起来的一门新学科,它是材料与结构的变形与破坏理论的重要组成部分。自 Kachanov 于 1958 年提出连续度的概念、Rabotnov 于 1963 年提出损伤因子的概念^[1],到 1977 年 Janson 与 Hult^[2]等提出损伤力学(damage mechanics)的新名词至今,几十年的时间内获得了重要的进展。自 Kachanov 的第一本《连续损伤力学导论》^[3]出版以来,国内外陆续出版了一些教材、专著^[4~16]和评论^[17~22]。

在外载、环境的作用下,由于细观结构的缺陷(如微细裂纹、微细孔洞等)引起的材料或结构的劣化过程,称为损伤。损伤力学是研究含损伤介质的材料性质,以及在变形过程中损伤的演化发展直至破坏的力学过程的学科。

损伤力学有两个主要分支:一是连续损伤力学,它利用连续介质热力学与连续介质力学的唯象学方法,研究损伤的力学过程。它着重考察损伤对材料宏观力学性质的影响以及材料和结构损伤演化的过程和规律,而不细察其损伤演化的细观物理与力学过程;只求用连续损伤力学预计的宏观力学行为与变形行为符合实验结果与实际情况。二是细观损伤力学,其对典型损伤基元,如微裂纹、微孔洞、剪切带等以及各种基元的组合,根据损伤基元的变形与演化过程,通过某种力学均一化的方法,获得材料变形损伤过程与细观损伤参量之间的关联。

近年发展起来的基于细观的唯象损伤理论,则是介于上述两者之间的一种损伤力学理论,这些理论主要限定在确定性现象的范围内。上述各个分支构成了损伤力学的主要框架。此外还有随机损伤理论,研究随机损伤力学问题。回顾材料强度与结构强度的历史,便可清楚地看到损伤力学发展到今日所具有的必然性。

古典的材料力学所描述的材料强度理论,是在假设材料为均匀连续的基础上进行研究的。材料强度设计经历三个步骤:一是分析在外载作用下材料或结构的应力状态 σ ;二是测量表征材料强度的性能指标 σ_s (屈服极限)、 σ_b (强度极限);三是应用复杂应力状态下的材料强度理论: $f(\sigma, \tau) \leq [\sigma]$,其中 $[\sigma] = \sigma_s/n_s$ 或 σ_b/n_b , n_s 、 n_b 分别为相应于屈服和破坏的安全系数,以此来判断材料和构件是否满足强度的要求。这种由伽利略开始萌发的、基于材料均匀连续假设的起点-终点式的强度观,属于古典的强度理论范围。

但实际的材料与结构是存在缺陷的。20 世纪 50 年代开始发展的断裂力学,是材料强度理论的重大发展。断裂力学考虑裂纹型的缺陷,引入表征缺陷尺度新的几

何物理量 a (即缺陷长度或缺陷平均半径)。假设在裂纹型缺陷边界面上,存在位移和构形几何的间断。但在基体介质中,仍然认为是均匀连续的。基于此建立的断裂力学新的强度分析理论,大体上可分三步:①分析含缺陷材料与构件的力学响应,如线弹性断裂力学的应力强度因子 K 或弹塑性断裂力学的 J 积分或裂纹张开位移 δ 等;②测量表征材料抵抗裂纹扩展的能力的指标,即平面应变断裂韧性 K_{Ic} 、临界 J 积分值 J_{Ic} 或裂纹张开位移临界值 δ_c ;③根据裂纹扩展的条件——裂纹扩展准则, $f(K, \dots) \leq K_{Ic}$ 或 $g(J) \leq J_{Ic}$ 或 $f_2(\delta) \leq \delta_c$,判断裂纹是否会发生失稳扩展或发生稳定扩展(利用裂纹扩展的阻力曲线方法)。

然而,材料和构件的实际情况是存在初始损伤的,从开始变形直至破坏,是一个逐渐劣化的过程。随着外载的增加或环境的作用,其损伤存在一个量变直至破坏的质变过程。在这个演化过程中,损伤基元的存在和发展演化,使实际的材料与结构既非均质,也不连续。因此,人们必须摒弃古典的材料是均匀连续的假设。例如微裂纹、微孔洞本身就存在几何的不连续;而剪切带内变形存在巨大的梯度变化更非均质,并且这种非均匀和不连续还随着变形过程在演化发展。损伤力学的基本特点就在于研究这种演化,同时又要采用一些新的平均化的方法,使之便于力学的处理。损伤力学的内容与方法,既联系和发源于古典的材料力学和断裂力学,又是它们的必然发展和重要补充。

损伤力学研究的难点和重点在于含损伤材料的本构理论和演化方程。目前有三种研究途径:①唯象的宏观本构理论;②细观的本构理论;③基于统计的考虑非局部效应的本构理论。唯象的模型注重研究损伤的宏观后果;细观的本构理论易于描述过程的物理与力学的本质。因为不同材料和不同的损伤过程其细观机制十分复杂,且常常有多种机制交互并存,人们难以在力学模型上穷尽对其机制的力学描述。但是抓住其主要细观损伤机制的力学模型,在一定类别材料损伤的描述上,已获得相当的成功。至今人们仍然在寻求新的损伤理论,如基于细观过程的唯象损伤理论,以及基于非平衡不可逆热力学的损伤统计理论和随机损伤理论等。

损伤力学发展至今,不过50多年的历史。目前涌现出了各种各样的损伤力学理论,但尚未出现比较公认的具有普遍意义的理论。其情形与20世纪50年代塑性理论大发展的状况很相似。时至今日,经典的塑性本构理论已逐渐汇流成为大家比较常用的增量理论与形变理论。相信过不了很久,工程界将会筛选出一些适用的损伤理论来。至于损伤力学的发展趋势,当前已现出其端倪:一方面在工程应用的基础上,进一步发展适用的损伤理论,其中以基于细观的考虑结构参数模型的损伤理论和随机损伤理论正以强劲的势头吸引研究者;发展新的平均化方法和基于统计的损伤力学,将不断丰富损伤力学的方法论;发展宏观-细观-微观多层嵌套连接的损伤理论已是大势所趋;但直到目前为止,我们所研究的损伤都是不可逆的。研究与生长过程相联系的可自修复的损伤理论,是生物力学与生物工程的一个重要组成部分。然而,所有的宏-细-微观各种层次的损伤理论的发展,都离不开损伤的宏、

细、微观的观察与测量,因此发展各种层次的损伤量测方法,并用于研究各种损伤过程是发展损伤理论基础性的工作,也是一切损伤理论赖以建立力学模型的源头。审视与改进非平衡不可逆的连续介质力学与热力学的框架,是损伤理论发展正确性的前提。正在发展的非线性科学的理论,如分形、分岔与混沌、自组织理论、逾渗过程、非线性增殖理论等^[1~22],可能为研究损伤提供丰富的思想库,其发展有赖从事损伤力学的研究者辛勤耕耘开拓。

1.2 岩体损伤力学的发展

细观损伤力学,从颗粒、晶体、孔洞等细观结构层次研究各类损伤的形态、分布及其演化特征,从而预测物体的宏观力学特征。20世纪80年代中后期,细观损伤力学得到了发展。Krajcinovic、Hult、Atkinson 和杨光松等对细观损伤力学的发展做出了贡献^[23~28]。

目前,细观损伤力学的发展面临两个难题:其一是材料的细观结构(各种组构的形态、方向和分布)和细观损伤的数学描述;其二是细观结构演变及损伤演化的运动学与力学之间的定量联系。只有克服了这两大难题,细观力学才有可能直接用于工程实践。

宏观损伤力学[即通常所说的连续介质损伤力学(CDM)],基于连续介质与不可逆热力学理论,认为包含各类缺陷的材料、结构和介质是一种连续体;损伤作为一种均变量在其中连续分布;损伤状态由损伤变量进行描述;然后在满足力学、热力学基本公式和定理的条件下,唯象地推求损伤体的本构方程和损伤演化方程^[10,18]。

从Kachanov于1958年提出损伤力学思想,经过近50年的不断发展,一些理论已日趋成熟并在各学科和工程技术领域得以应用。连续介质损伤力学CDM的共同点就是引入损伤变量作本构关系的内变量。目前,CDM理论基本上都用张量形成的损伤变量进行表述。理论上讲,损伤张量阶次的增加可以更多地考虑损伤的影响因素,损伤分析自然也就越来越细。但损伤本构模型中的损伤变量的阶次不具任意性,最高为八阶,另外还可以是四阶、二阶或零阶^[29]。

CDM中引入损伤张量的最大优点是可以方便地处理各向同性或各向异性材料的各向异性损伤。近年来,各向异性损伤理论及各类模型的建立已成为CDM的核心和发展前沿。

Murakami^[30]讨论了微结构变化和宏观断裂过程所引起的损伤各向异性机理,之后他又在CDM框架中引入一个力学上与真实损伤构造相等价的虚拟无损构造,使经典的蠕变损伤理论可以推广到材料损伤的一般三维状态,从而发展了各向异性损伤理论,并与有效应力张量的定义相一致,其中还考虑了裂隙的闭合效应对损伤的影响。

Shen 等^[32]在不可逆热力学理论的基础上,提出用“损伤能耗散率”的概念表征各向异性损伤材料的力学响应,并由广义弹性损伤理论推导了损伤能耗散率张量。这些张量的主值和主方向可以解释材料的损伤过程。同时,还建立了一个描述抵抗损伤演化能力的损伤能释放率准则。

Chen 等^[33]应用自由能等效假定,建立了各向异性损伤的内时塑性理论,该理论不仅可以精确地描述各向异性材料的力学性能,而且可以给出各向异性损伤的物理本质。Tzou 等^[34]指出,损伤张量的方法能更有效地跟踪整个损伤历史过程中内变量的变化,但是,由于应变历史中各向异性损伤演化的复杂性,使得预测与实验结果的比较仍不太理想。

损伤力学的发展大大扩展了其在岩体力学中的应用范围,因为岩体中的各类缺陷可以认为是其损伤的实质表现,并可归结为下面三种类型层次,如图 1.2.1(a)~(d)所示。

奇异损伤主要是指在岩体工程范围内所含有的一条或若干条较大的断裂带,且内部常有充填物,如图 1.2.1(a)所示。对于贯穿节理也可认为是奇异损伤,如图 1.2.1(b)所示。虽然断裂带数目较少,但其力学性质和没有断裂部位的岩体相比差异较明显,所以断裂带的力学性质对工程岩体具有决定性的作用,应重点分析。著名的 Goodman 单元可以用来分析这种问题。对于图 1.2.1(b)所示的岩体,采用离散单元法更有效。

实际工程中的岩体往往存在大量的不连续节理和裂隙,如图 1.2.1(c)所示,这样的节理也称为宏观损伤。由于其数量较多,对岩体的切割程度较高,从而改变了岩体的力学性质,使岩体的变形模量及强度降低,并呈现出明显的各向异性。这种节理裂隙数量较多,分布随机性强,企图研究每一条裂隙及裂隙之间的相互作用对岩体力学效应也是不现实的,并且对工程岩体起作用的并非一条或几条节理裂隙,而是岩体中所有节理裂隙的存在及相互作用所产生的总体力学响应。因此,对于工程岩体,将其中分布的节理裂隙视为损伤,从损伤力学的观点研究其力学特征将更为确切,更具有工程实用意义。

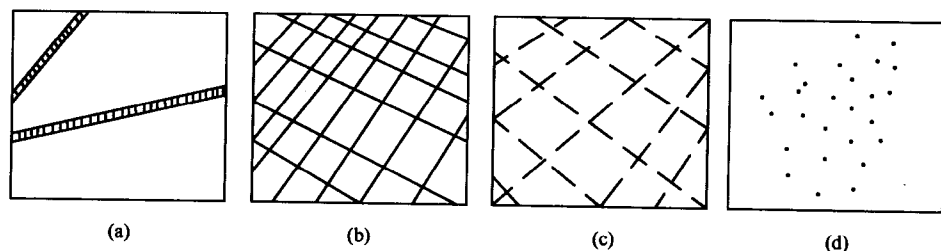


图 1.2.1 岩体损伤分析示意图

对于不含宏观裂纹的岩石材料而言,其内部主要是空洞、孔隙、颗粒界面和微

细裂纹等各种细观尺度的分布缺陷。这种损伤称为细观损伤。由于岩石材料细观缺陷的形态、大小、方向和分布都具有强烈的随机性,因而试图通过每一个细观缺陷以及彼此间相互作用的力学分析来评价岩石材料的总体力学效应几乎是不可能的。但将其内部种种缺陷视为损伤,从损伤力学的思想出发,研究岩石材料中细观分布缺陷对总体的力学响应是比较合理的。

目前,奇异损伤的研究比较成熟,而其他两种损伤的研究比较年轻,问题较多。鉴于我们研究的对象为节理裂隙岩体(三峡工程花岗岩),而且考虑到工程特点,所以本书的主要任务是以连续介质力学为基础,着重探讨裂隙岩体宏观损伤。

Dougill^[35]最早把损伤力学应用于岩石和混凝土材料。Dragon 和 Mroz 于 1979 年根据断裂面的概念研究岩石的脆塑性损伤行为,并建立了相应的连续介质模型。Costin^[36]探讨了岩石及其他材料破坏后的损伤特征及其力学描述。Krajcionovic、Dragon、Kachanov、Lemaitre、Chaboche、Griggs 和 Ofoegbu 等著名的损伤力学专家从岩石材料本身的结构特征出发研究其损伤机理,建立了相应的模型与理论,从而使岩石损伤力学研究进一步丰富与完善。在国内,谢和平基于岩石微观断裂机理、岩石蠕变损伤理论方面的研究,将损伤和岩石蠕变大变形有限元分析结合起来,研究了岩石损伤的有关问题,而且首次在联系岩石微损伤与宏观断裂方面引入了分形几何,更合理地定量描述了岩石的损伤特征^[37~39]。凌建明和孙钧^[40]利用电子显微镜对不同类型的岩石材料进行即时加载观测,建立了脆性岩石细观损伤模型;叶黔元^[41]将岩石材料分为损伤与未损伤两个部分讨论其自由能特征,在损伤理论中引入内蕴时概念,提出了一种岩石内时损伤模型;李广平和陶振宇^[42]提出真三轴条件下的岩石细观损伤力学模型,建立了岩石的损伤演化方程,给出了损伤柔度的求解公式。卢应发和葛修润于 1990 年在 Gersoon 本构理论的基础上,引入了微观应变向宏观应变的转化因子,推导了岩石的损伤本构理论。有关岩石损伤的众多文献反映了岩石损伤力学的迅速发展,但由于岩体工程的特点,必须在岩石损伤力学的基础上,大力发展岩体损伤力学,只有这样,才能直接服务于工程实践。

20 世纪 80 年代后期,Kyoya^[43,44]最先把损伤力学应用于地下洞室岩体的稳定性分析。Kawamoto^[45]利用二阶对称张量,将各向异性损伤理论引入非连续岩体的力学研究中,用有限元法实现了对损伤岩体变形量的预测。Zhang 和 Valliappan^[46]在 Kawamoto 理论的基础上,提出岩体裂隙长度、方向和密度遵循一定的概率分布规律,基于岩体表面随机分布裂隙的量测结果,用 Monte-Carlo 统计模拟方法给出了岩体损伤变量作为 β 分布的概率分布特征,并用 Rosenblueth 点估计法评价随机损伤状态及其特征,从而对岩体随机各向异性损伤力学问题进行分析。吴澎^[47]在节理岩体损伤方面进行了较早的研究,建立了节理岩体损伤模型,并将其和非线性有限元分析结合起来。孙卫军和周维垣^[48]提出裂隙岩体弹塑性损伤本构模型的一般形式,在有限元虚功方程中引入损伤附加力以体现岩体损伤的力学效

应;杨延毅^[49]采用 Krajcinovic 的思想,按照宏观损伤的力学效应表现为损伤体柔度变化的思想,从自治理论和即时模量概念推求岩体的等效柔度张量,并将其定义为节理岩体的损伤张量;朱维申和李新平^[50]通过对裂隙岩体内的应力、应变的体积平均,运用损伤力学以及断裂力学理论,建立了多裂隙岩体的损伤演化方程和本构关系,并对工程实例进行了有限元分析;Cai 和 Horii^[51]也是通过体积平均应力、应变的方法,建立了节理岩体的等效连续模型,该模型可以反映节理裂隙大小、密度、方位、连通率及力学特征;徐靖南与朱维申等^[52,53]从功的互等定理出发,推导出多裂隙岩体的本构关系,并由此建立了多裂隙岩体的损伤演化方程及强度准则,Swoboda 和 Yand^[54]采用内时理论结合自由能函数得到了节理裂隙岩体的损伤演化方程和本构关系。上述研究有力地推动了岩石损伤力学的发展,而且有的损伤模型在实际应用中取得了较好的效果。

人们通常认为,损伤力学着重研究宏观裂纹形成前细微观缺陷的演化发展及其力学效应;断裂力学则研究宏观裂纹的扩展过程。虽然两者都属于破坏力学的范畴,但是对于岩体,特别是节理裂隙岩体,其损伤与断裂的范畴与此有很大的差异。因此,岩体中的损伤包括分布节理和裂隙,这些缺陷本身是宏观的,只有相对更大的工程尺度而言,才可以认为这种分布缺陷是“细观”的;断裂力学用于节理岩体,通常是从节理尺度(宏观断裂力学)或更小尺度(细观断裂力学)进行的。所以,岩体的损伤与断裂概念不仅与缺陷尺度有关,而且还取决于问题研究的尺度,因而是相对的。工程实践和试验研究表明,岩体的破坏过程是损伤的累积和断裂扩展的过程。因此,有必要将损伤与断裂统一起来,建立岩体损伤断裂相统一的理论及模型,应用于岩体的损伤、断裂和渐进破坏分析。

Hult 和 Janson^[55]最早提出把损伤力学和断裂力学结合起来解决混凝土破坏问题的理论,提出根据能量条件来计算混凝土的极限抗拉强度。Loland 于 1980 年把 Hillerborg、Modeer 和 Petersson 后 FCM(虚拟裂纹模型)理论与 CDM(连续损伤力学)理论结合起来,用于描述单轴受拉混凝土的破坏机理,Mazars 和 Leglindre 给出了损伤力学和断裂力学联合应用于混凝土的方法^[56]。他们将断裂力学中的临界应变能释放率 G_c 假定为:在裂纹扩展过程中为一常数;开裂前,采用 Mazars 于 1982 年和 1984 年所建立的损伤模型处理;开裂后,裂纹的扩展过程则用断裂力学进行研究。

邢修三^[57,58]用非平衡统计的概念和方法,建立了非平衡统计断裂力学理论。该理论的实质是从微观机理推导出宏观力学物理量。它以微裂纹演化方程为核心,结合从微观机理求得的微裂纹长大速率和成核率以及最小强度原理,统一导出微裂纹分布函数、断裂概率、可靠性、失效性、损伤断裂动力学方程,强度、韧度和寿命等各种与断裂有关的力学量的统计分析函数,统计平均值和统计涨落。它使损伤、断裂、统计、微观机理及宏观特征五者有机地结合起来,从而有可能形成一个统一的损伤断裂理论。但是,由于断裂过程很复杂,该理论只是初步的,其中不少近似都