

裂隙岩体

在冲击载荷下的损伤特征研究

刘 军 王 众 赵明生◎著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金资助项目(51174076)

裂隙岩体在冲击载荷下的 损伤特征研究

刘 军 王 众 赵明生 著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书采用理论模型与实验研究和数值模拟相结合的方法,系统地介绍并总结了冲击载荷下裂隙岩体的损伤特征;在现有模型基础上,提出了一个各向异性的、能够体现冲击载荷高加载率特征的损伤模型,并嵌入 ABAQUS 有限元软件中,模拟了爆炸冲击载荷下水泥砂浆试块及露天矿预留岩体的损伤演化过程;采用空间分布信号的小波变换及实测应变波与预测应变波对比两种手段,对模拟结果进行了验证。作为成果应用,将上述成果应用于台阶爆破中保留岩体的稳定性分析。本书可为从事爆破工程、岩土工程、采矿工程、土木工程、水利工程等行业的专家、学者以及相关专业的研究生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体在冲击载荷下的损伤特征研究 / 刘军等著.

—南京:河海大学出版社,2012.12

ISBN 978-7-5630-3272-3

I. ①裂… II. ①刘… III. ①岩石力学—损伤(力学)

—研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 306022 号

书 名 / 裂隙岩体在冲击载荷下的损伤特征研究

书 号 / ISBN 978-7-5630-3272-3/TU·96

作 者 / 刘 军 王 众 赵明生

责任编辑 / 谢业保 江 娜

封面设计 / 黄 煜

出版发行 / 河海大学出版社

地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)83737852(总编室) (025)83737745(发行部)

网 址 / <http://www.hhup.com>

印 刷 / 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 / 787 毫米×960 毫米 1/16

印 张 / 8.25

字 数 / 139 千字

版 次 / 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 25.00 元

前 言

冲击载荷下裂隙岩体的损伤特征是爆破工程、防灾减灾与防护工程、岩土工程、采矿工程、土木工程与水利工程等领域中的热点问题。裂隙岩体是典型的非均匀各向异性介质,由于节理裂隙分布的随机性,导致了其力学行为的复杂性。在冲击载荷作用下,原有裂隙扩展,新裂隙生成,其损伤特征呈现出高度复杂性,涉及冲击载荷的加载率、裂隙扩展与生成的率效应以及应力波传播规律等诸多方面的问题,尽管国内外许多学者对此进行了大量研究,但由于问题的复杂性,尚未形成完整的理论体系。作者在现有研究的基础上,采用理论模型建立、数值模拟与实验研究相结合的技术路线,对裂隙岩体在冲击载荷下的损伤演化特征进行了分析。

全书共分7章,包括以下6部分:第一部分系统回顾了裂隙岩体在冲击载荷下的损伤特征研究成果及研究方法;第二部分通过实验室实验与现场实验,总结出冲击载荷下裂隙岩体损伤的一般特征;第三部分建立了一个各向异性的、能够体现冲击载荷高加载率特征的损伤模型,并将该模型嵌入 ABAQUS 有限元软件中,模拟出爆炸冲击载荷下水泥砂浆试块及露天矿预留岩体的损伤演化过程;第四部分采用空间分布信号的小波变换及实测应变波与预测应变波的对比两种手段,对模拟结果进行了验证;第五部分将上述研究成果应用于台阶爆破中保留岩体的稳定性分析;第六部分对研究内容进行了总结并提出展望。

由于裂隙岩体在冲击载荷下的损伤演化规律研究尚在探索之中,本书所涵盖的内容是作者近年来部分科研成果的总结,希望它的出版能对这方面的研究有所推动,起到抛砖引玉的作用。由于

作者水平所限,书中难免存在疏漏甚至错误,恳请读者批评指正。

本书部分成果是在“冲击载荷下散体岩石材料动态响应的实验与仿真研究”(国家自然科学基金资助项目-51174076)和“喀斯特地质条件下深孔爆破数值模拟技术研究”(贵州新联爆破工程有限公司委托开发)两项科研项目的支持下完成的,在此向国家自然科学基金委员会和贵州新联爆破工程有限公司致以诚挚的感谢。河海大学安全与防灾工程研究所的周星德教授、张富有副教授、陈育民副教授、杨贵副教授在本书的撰写过程中提出了宝贵的意见,在此表示诚挚的感谢。作者课题组的赵长冰博士、云斌博士以及硕士生郝龙、颜立明、张玉、项笑炎、柳飞、朱俊淦、宋旭亮、李佩宁、孙平玉对成果的出版做出了贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

在本书的撰写过程中,参阅了国内外大量相关文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢,他们的智慧给作者以极大的启迪!

作 者
2012年9月于南京

目 录

1 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 岩体在冲击载荷下损伤研究的主要方法及不足	2
1.3 冲击载荷下裂隙岩体损伤模型的研究现状	3
1.3.1 概述	3
1.3.2 脆性材料在冲击载荷下的力学特性	5
1.3.3 冲击载荷下脆性材料的损伤模型	6
1.3.4 冲击载荷下损伤模型的发展趋势	20
1.3.5 小结	21
1.4 本书研究的内容及方法	22
2 裂隙岩体在冲击载荷作用下的损伤特征及其规律	23
2.1 描述损伤特征的参数	24
2.1.1 超声波检测	24
2.1.2 接收波的频谱分析	25
2.2 实验室实验	27
2.2.1 实验设计	27
2.2.2 实验步骤	28
2.2.3 实验设备简介	30
2.2.4 实验结果	30
2.2.5 爆炸冲击载荷下水泥砂浆试块的损伤特征	32
2.3 现场实验	34
2.3.1 实验设计	34
2.3.2 实验结果及分析	36

2.4	小结	43
3	裂隙岩体在冲击载荷作用下的各向异性损伤模型	44
3.1	概述	44
3.2	Swoboda-Yang 损伤模型	45
3.2.1	损伤变量	45
3.2.2	等价状态的建立	46
3.2.3	依赖于损伤的弹性模量	49
3.2.4	损伤演化方程	51
3.3	高加载率下损伤模型的修正	62
3.4	模型参数识别	63
3.5	损伤模型小结	63
4	数值计算	65
4.1	ABAQUS 有限元软件的主要特点	65
4.2	ABAQUS 有限元软件分析计算的步骤	68
4.3	损伤模型的算法	69
4.3.1	模型的差分格式	69
4.3.2	算法	69
4.4	计算结果及分析	71
4.4.1	输入参数	71
4.4.2	计算结果	72
4.4.3	损伤上限值的确定	77
4.4.4	损伤轮廓分析	77
4.4.5	损伤范围的确定	79
4.4.6	损伤的时程分析	79
4.4.7	填塞与不填塞计算结果比较	80
4.5	小结	80
5	损伤模型计算结果的验证	82
5.1	空间分布信号的小波变换	82
5.1.1	小波与小波变换	83

5.1.2 空间分布信号的小波变换	84
5.1.3 可行性验证	85
5.1.4 数值模拟结果的验证	86
5.2 实测应变波与模型模拟结果对比	90
5.2.1 动态应变测试	90
5.2.2 实测应变波与模型计算结果的对比	92
5.3 小结	94
6 损伤模型在实践中的应用	95
6.1 近北庄铁矿简介	95
6.2 初始损伤张量的计算	96
6.2.1 岩体节理裂隙的统计方法	96
6.2.2 损伤张量的计算	99
6.3 单孔台阶爆破预留岩体损伤的数值模拟	100
6.3.1 输入参数	100
6.3.2 模拟结果及分析	101
6.3.3 模拟结果与现有研究成果的比较	106
6.4 损伤岩体的稳定分析及解决对策	108
6.4.1 损伤岩体的稳定分析	108
6.4.2 解决对策	109
6.5 小结	112
7 结论	113
7.1 结论	113
7.2 展望	115
参考文献	116

1 绪论

1.1 问题的提出

经历过冲击载荷作用的围岩的稳定性问题几乎是任何岩土工程都不容回避的问题。如露天矿边坡稳定、地下开采及隧道工程、筑路工程、深基坑工程、水利水电工程等等,都涉及边坡或围岩的稳定性问题。传统的稳定性分析及支护工程习惯上都把围岩作为原生岩体对待,事实上,在岩体的开挖过程中,总会对后部预留岩体造成一定范围、一定程度的扰动(损伤),从而使得围岩的力学性质有别于原生岩体,承载能力下降。

岩土工程施工中广泛采用爆破技术,而爆破作用在破碎需要开挖的目标岩体的同时,也对其后部或周边需要保留的岩体造成损伤。无论何种控制爆破方式,炸药爆炸的冲击载荷都会在破坏确定范围的目标岩土介质的同时,也对邻近需要保护的岩体产生强烈扰动(损伤),受损的邻近岩体在上覆岩层的压力作用下,其损伤会进一步加剧,从而导致该岩层的承载力以及稳定性降低。因此,围岩稳定性的评价一定要考虑爆破等冲击载荷引起的损伤,该问题已成为矿山采掘工程以及边坡工程中迫切需要解决的问题。有关爆炸的强冲击扰动对围岩产生何种程度的损伤,不同位置 and 不同性质的岩体受损伤后的承载性能有何变化,这些问题的研究对于爆破参数的合理设计、围岩的有效加固和高边坡工程的稳定支护设计都具有十分重要的理论和实际指导意义,这也是本书研究的主要目的以及所要解决的核心问题。

本书中,作者采用理论模型、实验研究和数值模拟相结合的研究途径,研究爆破等冲击载荷下围岩的损伤特征及其规律,并定性地分析了损伤岩体的稳定性,为确定损伤岩体的合理加固范围和支护方式提供理论依据。

1.2 岩体在冲击载荷下损伤研究的主要方法及不足

岩体在冲击载荷下的损伤是一个非常复杂的问题,涉及冲击载荷的加载率、岩体的破裂及移动方式、地震波的传播规律等诸多方面的问题,尽管国内外的许多学者对此进行了大量研究,但由于问题的复杂性,因而研究并不深入。这些研究大体可分为两类:建立在现场调查基础上的统计方法与建立在力学模型基础上的数值计算方法。

L. L. Oriard(1981)通过对现场爆破的大量调查,得出爆破后区距爆源不同距离处的震动速度与岩体损伤程度的关系^[1],并由此划分出不同的损伤带;Holmberg 与 Kenneth Maki(1981)通过对几个矿山的现场实验,对露天深孔爆破对后部保留岩体的损伤进行了评估,他采用震速、位移、应变、爆破前后岩芯的可见裂纹数等多个与损伤相关的物理量在爆破前后及距爆源不同距离处的变化规律,归纳出爆炸冲击载荷下岩体损伤的特点,并提出可通过减小露天矿的最终边坡角来弥补由于爆破引起的损伤对边坡的稳定产生的影响^[2];Charles E. Glass(1981)则应用振动学理论对天然地震作用下露天边坡的损伤及稳定性进行了研究,他通过对矿区的震级、常见地震的振幅、频率、震动的持续时间以及岩体的力学参数的综合分析,得出地震强度与岩体损伤程度的关系及对边坡稳定的影响^[3];Holmberg 与 Persson(1979)采用适用于集中装药的经验公式预测爆破过程中保留岩体内距爆源一定距离处的最大震动速度,对于柱状装药,把经验公式在整个装药长度上进行积分,预测台阶爆破中距爆源不同距离处的震动速度,并通过实验给出用震速描述的损伤评价指标,由此判断爆区后距爆源不同距离处岩体的损伤程度^[4](详见 6.3.3 节)。这些研究都是以现场调查或经验公式为基础,因此属于统计方法。

统计方法比较直观,便于应用,但由于缺乏理论基础及在不同的条件下具有较大的离散性,所以难以令人信服。

建立在力学模型基础上的数值方法考虑了冲击载荷下裂隙岩体的动态本构关系及强度准则,从理论上分析裂隙岩体在冲击载荷下的损伤特征,但由于力学模型的复杂性以及模型参数难以识别,因而在工程应用中有一定难度。随着损伤力学

的发展,用损伤模型模拟岩体的力学行为受到了国内外学者的青睐,各种损伤模型相继推出。但是由于冲击载荷作用下岩体力学行为的复杂性,与静载下的损伤模型比较而言,用于描述冲击载荷的损伤模型发展较慢,目前还主要停留在用唯象的方法采用一个标量的损伤变量来描述损伤的各向同性特征的阶段。

1.3 冲击载荷下裂隙岩体损伤模型的研究现状

1.3.1 概述

损伤力学是近年发展起来并逐步形成的固体力学的新分支,也是固体力学研究的一个前沿^[5]。

早在1958年,前苏联力学家Kachanov在研究蠕变断裂时,首先提出了“连续性因子”与“有效应力”的概念^[6],1969年前苏联学者Rabotnov又在此基础上引进了“损伤因子”的概念^[7],1971年法国的Lemaitre等人采用连续介质力学的方法^[8],根据不可逆热力学原理研究材料的损伤及劣化过程,瑞典的Hult和Broberg(1975)^[9]、英国的Hayhurst(1975)^[10]与Leckie(1980)^[11]、日本的Murakami与Ohno(1981)^[12]、美国的Krajcinovic与Lemaitre(1987)^[13]等采用唯象的方法,把损伤因子推广为一种场变量,他们都做了大量的实验与研究工作。此外,1980年IUTAM(国际理论与应用力学联合会)在美国Cincinnati举办了“连续介质力学方法对损伤和寿命预测”的讨论班,1981年9月欧洲力学委员会委托巴黎第六大学在巴黎的Cachan举办的第147次欧洲力学讨论会被定名为“损伤力学”会议,同年前西德航空航天实验室(DFVLR)又在西德举办了“复合材料损伤力学会议”。ASTM出版了有关复合材料损伤力学的文集ASTM STP 775,近年来许多重要的国际会议如ICF-6,ICM-6,SMIRT-11,ICTAM-17等都把损伤力学作为会议的主要内容之一。1987年由Springer公司出版的《连续损伤力学:理论及应用》专著^[13],对损伤力学的研究成果作了全面总结,是至今为止损伤力学方面最权威的著作之一。

随着实验水平及计算技术的提高,损伤理论得到了进一步地发展,应用范围进

一步扩大,几乎已渗透到固体力学的所有研究对象中。其研究方法已超越了以“净应力”、“应变等价”、“各向同性”假设为基础的理论框架,开始寻求以材料的微细观结构为基点,充分反映材料微观特性的、各向异性的损伤模型,并已取得了丰硕的成果。

Ortiz(1985)、Lubarda 与 Krajcinovic(1995)提出了一个形式复杂,充分考虑了一般情况的模型^[14,15],认为在压力作用下材料产生非弹性变形的主要原因是摩擦型裂纹的摩擦滑动与卸载过程中裂纹的闭合,因此,一个在压力作用下的试件的合理的损伤模型必须是非局部的与非关联的,以用来体现裂纹相互作用的影响以及闭合裂纹的摩擦变形;Chaboche(1988)^[16]、Chaboche(1993)^[17]、Lubarda 与 Krajcinovic(1995)^[15]、Voyiadjis 与 Park(1996)^[18]以及其他一些作者提出的模型,阐述了塑性与损伤的耦合问题及弹塑性损伤理论;Bazant 与 Pijaudier-Cabot(1988)提出了非局部的连续损伤模型^[19],Gudmundson(2000)与 Voyiadjis(2000)研究了压层材料中损伤的演化^[20,21],Lemaitre 与 Plumtree(1979)^[22]、Dvorak 等(1994)^[23]研究了疲劳损伤,而 Ju(1989)^[24]与 Ladeveze(1995)^[25]则对损伤模型的计算方法进行了研究。

基于微观的损伤模型研究也取得了很大进展,Kachanov(1994)等研究了不同形状的微缺陷对材料宏观力学特性的影响^[26];Horii 与 Nemat-Nasser(1985)对微缺陷的各向异性进行了研究^[27];Kachanov(1993)研究了微裂纹的相互作用及其对材料的损伤和有效性质的影响^[28];Krajcinovic(1997)对在一定缺陷密度下的有效柔度进行了研究^[29];Fu(1998)提出了考虑微缺陷相互作用的算法^[30];Fish 等(1996)在研究复合材料的损伤时,提出了一个多层次的有限元算法^[31]。

损伤模型研究的难点和重点在于含损伤材料的本构理论与演化方程。目前针对损伤模型有三种研究途径:唯象的宏观本构理论,细观的本构理论,基于统计的考虑非局部效应的本构理论^[32]。唯象的模型注重研究损伤的宏观后果;细观的本构理论更易于描述过程的物理与力学的本质。但因为不同的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,所以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,在一定类别的材料损伤的描述上已获得相当的成功。至今人们仍然在寻找新的损伤理论,例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统计损伤理论

和随机损伤理论。

表 1.1^[33] 延性材料与脆性材料的力学性质对比

反 应 类 型	延 性 材 料	脆 性 材 料
微观结构的变化模式	滑动、弥散流动	微观裂纹的集结、扩展
反应位置	滑动面	集结面
驱动力	剪应力	拉应力与剪应力
断裂模式	局部产生剪力带, 颈裂	局部产生宏观裂纹或缺陷
弹性模量的变化	很小	较大
残余应变	较大	很小
记录历史的参数	非弹性应变	材料完整性的降低(损伤)

针对脆性材料的损伤理论也得到了广泛的研究,因其与金属、复合材料等延性材料的力学性质有很大的差别,见表 1.1^[33],所以在研究方法上也有很大的区别。例如,延性材料通常考虑因基质材料的塑性变形与微缺陷的演化形成的损伤的耦合,并且通常采用与塑性屈服条件相同的形式构造损伤面作为损伤准则;对于脆性材料,因在破坏前基质材料的塑性变形很小,一般忽略塑性变形,而认为其非线性变形主要是由损伤产生,同时因其强度的不对称性(即抗拉强度与抗压强度不同),通常采用最大拉应变作为损伤的控制变量。

1.3.2 脆性材料在冲击载荷下的力学特性

冲击载荷的特点是:加载速率高,大量不同振幅、不同周期的载荷循环。在实际情况中,加载率、振幅、周期在很大的范围内变化,在这种载荷条件下,材料的行为与静载荷条件下相比有显著的区别。然而,材料在动载荷下的实验数据非常少,并且所有可利用的数据几乎都来自于混凝土或裂隙岩体的单轴实验。

在 Suaris 和 Shah(1983,1984,1985)^[34~36]、Suaris 等(1990)的研究中^[37],通过对混凝土试件施加动载荷的实验,表明混凝土材料对应变率具有敏感性。与准静态实验比较而言,动载荷下混凝土的峰值强度提高,并且应力-应变的非线性降低。因此,在脉动载荷作用时,例如,冲击与爆炸载荷,材料的这种显著的动态特性是不能忽视的。混凝土材料在地震载荷作用下的力学行为已经得到了广泛的研究,其研究结果具有重要的指导意义,例如,地震载荷的应变率范围一般为 $10^{-6} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$,应变率在这个范围内时,混凝土的抗拉强度将提高 80%,抗压强度将提

高 25%。

Hatano 与 Watanabe(1971)对单轴压力加载下加载率的影响进行了研究^[38], 并从结果中总结了素混凝土在震动载荷下力学行为的主要特点:

- (1) 混凝土的强度依赖于应变(加载)率;
- (2) 初始弹性模量依赖于应变(加载)率;
- (3) 任何加载率下, 对一个特定的混凝土试件, 极限应变为常数;
- (4) 循环压力加载在应力-应变曲线中产生滞后现象;
- (5) 在压力加载过程中, 应力-应变曲线存在一个包络线, 并且该包络线是唯一的, 在常应变率下, 包络线与应力-应变曲线相同。

但是, 这些结论在多轴加载情况下的有效性有待进一步验证。

与压力比较而言, 材料在拉力作用下具有更高的应变率敏感性。在脆性材料, 例如岩石、混凝土中可观察到微裂纹沿垂直于拉应变的方向扩展。回顾有关混凝土的一些实验结果表明, 在高应变率下, 材料的力学行为很大程度上是因为在某一应变下大量微裂纹扩展趋势的降低而导致的^[36]。这种现象从 Takeda 与 Tachikawa(1971)的对裂隙岩体 Poisson 比的实验结果中也得到了体现^[39], 他们观察到在压力下, Poisson 比随着应变率的增加而降低, 而在拉力下, Poisson 比随应变率的增加而增加。Shah 与 Chandra(1981)认为, 既然在压力下 Poisson 比的增加归因于微裂纹的扩展, 那么这个实验结果与假设是一致的, 即微裂纹的扩展在高应变率下滞后^[40]。Heard(1982)对大理石的实验表明, 随着应变率的增加, 应力-应变曲线的非线性降低, 因此应力-应变曲线的非线性与微观裂纹的扩展密切相关, 并且随着应变率的增加微裂纹的扩展有下降的趋势^[41]。

通过上述分析, 脆性材料在冲击载荷下产生不同于静载荷下的力学特性的主要原因是: 内部微观裂纹的生长在高应变率下的滞后降低了材料的非线性, 也就是说损伤在高应变率下产生“粘性”性质^[41]。

1.3.3 冲击载荷下脆性材料的损伤模型

裂隙岩体在冲击载荷作用下的响应问题可分为流体动力学的、有限塑性的及线弹性的三个类型。当压力比裂隙岩体的屈服应力高很多倍时, 就可忽略强度效应, 而把岩体介质作为非粘性可压缩介质处理。这时, 控制方程组为非线性的, 并

且可以用把三个状态变量联系起来的一个状态方程来描述本构关系。当裂隙岩体中的应力低于屈服应力时,线性虎克定律是适用的,而且所有的控制方程都是线性的。鉴于方程的线性性质,问题便可用各种数学解法来处理。在中等应力范围内,所有的方程都是非线性的,并且必须考虑有限应变张量,故问题非常复杂^[42]。

脆性材料在冲击、碰撞作用下,材料将承受各种应力状态,这些不同的应力状态将产生不同的断裂模式。在冲击点附近,应变率较高(在爆炸加载的情况下可达 $10^0 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$),可观察到强烈的静水压力,在此应力状态下,材料将产生不可逆的压缩变形;随着距冲击点距离的增加,应力下降至中等应力范围,应变率也略有下降,材料承受三轴应力,在这种载荷下的力学分析要求其本构关系应考虑塑性变形,并体现以下特点:拉应力下的裂纹扩展;压应力下的碎裂,侧向限制应力的影响,材料剪切与弹性模量及波速的增加以及界面处因压力波的反射而产生拉力波,拉力波与压力波叠加而在局部产生较大拉力并致使材料断裂等^[43]。

对一个损伤模型而言,损伤变量的定义是至关重要的,因为损伤变量直接体现了损伤机理,所以,在本节的论述中,根据所采用的损伤变量的不同对现有的损伤模型进行分类总结。在目前发表的文献中,冲击载荷下脆性材料的损伤模型按所采用的损伤变量的不同可分为以下几种类型:(1)基于“净应力”与“应变等价”假设基础上的各向同性的损伤模型,这一类模型又可分为单标量损伤模型、双标量损伤模型两类,分别对应于不同的力学机理;(2)用矢量描述微观裂纹演化的正交各向异性的矢量损伤模型;(3)用二阶或高阶张量描述材料内微观裂纹动态扩展的各向异性损伤模型。

1.3.3.1 标量损伤模型

(1) 单标量损伤模型

单标量的损伤模型以Kachanov“有效应力”的概念为基础^[6],认为材料的损伤从宏观上表现为材料弹性模量的降低。

Grady与Kipp^[44](1980)应用率敏感的损伤理论,采用标量损伤变量,建立了一个连续的损伤模型,对油母页岩的爆破断裂进行了预测。Grady与Kipp认为原岩中大量原生裂纹的长度和方位在空间上随机分布,当承受外部载荷时,一些裂纹被激活并扩展,并且假设被激活的裂纹服从指数分布。模型的研究并不是针对每一条裂纹,而是用一个描述群体裂纹生长与相互作用的内部状态变量来反映材料

内的损伤积累。损伤变量定义为裂纹扩展引起的岩体强度的降低。其本构方程为

$$\sigma_{ij} = K(1-D)\epsilon\delta_{ij} + 2G(1-D)\left(\epsilon_{ij} - \frac{1}{3}\epsilon\delta_{ij}\right) \quad (1.1)$$

其中 $0 \leq D \leq 1$, ϵ 为体积应变, σ_{ij} , ϵ_{ij} 为应力与应变张量, K 为体积模量, G 为剪切模量, δ_{ij} 为 Kronecker 符号 (Delta)。损伤随时间的变化关系为

$$D(t) = \frac{4}{3}\pi C_g^3 k m \int_0^t \epsilon^{m-1} \dot{\epsilon} (1-D) (t-\tau)^3 d\tau \quad (1.2)$$

式中, k, m 为材料常数, C_g 为裂纹扩展的极限速度, 为一常数。

这个理论预测断裂应力应与应变率的对数成比例。但是模型假设被激活的裂纹以极限速度扩展, 所以只有在应变率 $\dot{\epsilon} > 1 \text{ s}^{-1}$ 时模型的结果才是有效的。

Chen(1999)^[45]把 G-K 模型进一步发展, 假设材料内随机分布的裂纹在拉力载荷下生长并相互作用, 其基本方程的推导建立在 Budiansky 与 O'Connell (1976)^[46]对在各向同性的弹性介质中随机分布的币状裂纹的研究基础上, 其基本方程如下

$$\frac{\bar{K}}{K} = 1 - \frac{16}{9} \left(\frac{1-\bar{\nu}^2}{1-2\bar{\nu}} \right) C_d \quad (1.3)$$

$$\frac{\bar{G}}{G} = 1 - \frac{32}{45} \frac{(1-\bar{\nu})(5-\bar{\nu})}{(2-\bar{\nu})} C_d \quad (1.4)$$

$$\frac{\bar{E}}{E} = 1 - \frac{16}{45} \frac{(1-\bar{\nu}^2)(10-3\bar{\nu})}{(2-\bar{\nu})} C_d \quad (1.5)$$

式中, K, G, E 与 ν 分别为材料的体积模量、剪切模量、弹性模量与 Poisson 比, $\bar{K}, \bar{G}, \bar{E}$ 与 $\bar{\nu}$ 分别为材料经历损伤后的有效体积模量、有效剪切模量、有效弹性模量及有效 Poisson 比, C_d 为裂纹密度。

$$C_d = \frac{45}{16} \frac{(v-\bar{\nu})(2-\bar{\nu})}{(1-\bar{\nu}^2)[10v-\bar{\nu}(1+3v)]} \quad (1.6)$$

损伤变量定义为

$$D = \frac{16}{9} \left(\frac{1-\bar{\nu}^2}{1-2\bar{\nu}} \right) C_d \quad (1.7)$$

Chen 在他的模型中考虑了塑性变形与损伤变形的耦合。

(2) 双标量损伤模型

上述损伤模型适用于材料在冲击载荷下其中一个主应变为正时的情况, 对于

双轴加载更为贴切。但是,这类模型描述材料在强冲击载荷下的力学行为时会遇到两个困难:(1) 流体静应力状态下的塑性应变及材料的硬化;(2) 如何阻止损伤的降低,以及如何体现弹性模量的增加。从不可逆热力学的观点看,在一个封闭系统中,如果没有一个导致正的全局耗散率机理的话(否则,应该为负),损伤不能降低。

为了解决以上问题,Burlion 等(2000)建立了一个损伤模型^[43],与塑性力学中的“帽子”模型相比,该模型描述了弹性模量的变化。Burlion 认为材料弹性模量的降低有两个原因,第一个原因就是因为在裂纹的扩展,拉力下的塑性应变与压力相比非常小,所以,材料的非线性变形几乎完全来自于微裂纹的生长,因此,拉力损伤可由导致微裂纹张开与生长的正应变控制;第二个原因就是因为在压力下,应力的制约作用将阻止微裂纹的张开,所以另一个损伤机理就是基质材料(例如,混凝土中水泥与砂浆等)的压碎,它将导致材料孔隙比的变化,因而可以认为这种损伤机理为塑性应变所控制。

弹性模量的降低用两个损伤标量描述:拉力损伤变量与压力损伤变量。Burlion 采用小应变假设,所以应变增量可分解为弹性与塑性两部分

$$d\epsilon_{ij}(x,t) = d\epsilon_{ij}^e(x,t) + d\epsilon_{ij}^p(x,t) \quad (1.8)$$

式中, $\epsilon_{ij}(x,t)$ 为总应变分量, $\epsilon_{ij}^e(x,t)$ 为弹性应变, $\epsilon_{ij}^p(x,t)$ 为塑性应变, x,t 为空间坐标与时间。

进一步假设影响弹性模量的两个机理是互相独立的,并采用全局变量 D 来描述材料弹性模量的总变化

$$\dot{D} = \dot{d} + \dot{\delta} \quad (1.9)$$

式中,变量符号上面一点表示该变量对时间的导数。

应该指出的是,拉力与压力损伤变量来自于不同的力学机理, D 只不过是材料弹性模量降低效应的总反映,因此,在热力学的意义上, D 并不是一个内变量,而 d 与 δ 为两个互相独立的内变量。与单标量的损伤模型相同, $0 \leq D \leq 1$, $D=0$ 时对应材料内微裂纹等微观缺陷无变化, $D=1$ 时则表明材料的弹性模量为 0,即材料已完全破坏。

假设体积模量与剪切模量以同样的比率降低,本构方程为