



中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

断续节理岩体中弹性波动力效应研究

DUANXU JIELI YANTI ZHONG TANXINGBO DONGLI XIAOYING YANJIU

邵 鹏 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

TU452
2

中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

断续节理岩体中弹性波 动力效应研究

邵 鹏 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

断续节理岩体是工程中最常见的一类复杂岩体,其破坏机制和强度规律独具特色,此类岩体的动力学性质和动力稳定问题是一项涉及复杂动力学过程且少有参考资料的国际性前沿课题。

本书根据工程岩体的赋存特点和应力历史将岩体动力学和静力学相结合,提出动静载叠加作用思想,以此为指导从弹性波散射规律出发,研究弹性波作用下断续节理岩体动力响应特征和断裂破坏规律;从统计学角度考察断续节理岩体疲劳损伤演化规律、疲劳强度衰减和疲劳寿命估算方法;根据协同学理论和随机共振理论探索了弹性波作用下岩体系统失稳机制。本书可作为高等院校岩石动力学课程的教学参考书,对科研部门和岩土工程技术人员也会有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

断续节理岩体中弹性波动力效应研究/邵鹏著.

—徐州:中国矿业大学出版社,2005.6

ISBN 7-81107-105-3

I. 断… II. 邵… III. 岩体动力学—研究

IV. TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 032602 号

书 名 断续节理岩体中弹性波动力效应研究

著 者 邵 鹏

责任编辑 王江涛

责任校对 徐 玮

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 5.5 字数 143 千字

版次印次 2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

节理裂隙岩体的动力学性质和动力稳定性问题是一项涉及复杂动力学过程且少有参考资料的国际前沿性课题,目前对有关岩体动态断裂、动态损伤规律和破坏机理等方面的研究还很不充分,一些基本力学性质问题至今还远未解决。因此,作为岩体动力学领域的热点课题,对弹性波动力效应的研究无疑具有重要的理论和工程意义,是探索动态荷载作用下节理裂隙岩体变形破坏机理及动力稳定机制最基本、最重要的基础。

本书主要研究对象为工程中普遍存在的断续节理岩体。根据工程岩体的赋存特点和应力历史将岩体动力学和静力学相结合,提出动静载叠加作用思想,以此为指导从弹性波散射规律出发,研究弹性波作用下断续节理岩体动力响应特征和断裂破坏规律;从统计学角度考察断续节理岩体疲劳损伤演化规律、疲劳强度衰减和疲劳寿命估算方法;根据协同学理论和随机共振理论研究弹性波作用下岩体系统失稳机制。

本书的主要内容来源于作者的博士论文,因此要特别感谢导师贺永年教授多年来的辛勤指导和谆谆教诲。本书的许多工作还得到了以下先生的指教和帮助,在此表示诚挚的感谢!

冯叔瑜 院 士 (铁道部科学研究院)
周国庆 教 授 (中国矿业大学)
赵 坚 教 授 (新加坡南洋理工大学)
丁 桦 研究员 (中国科学院)
陈 勉 教 授 (中国石油大学)
于亚伦 教 授 (北京科技大学)

王在泉 教授 (青岛理工大学)
茅献彪 教授 (中国矿业大学)
王东权 博士 (中国矿业大学)
张志毅 教授 (中国铁道科学研究院)
乔春生 教授 (北京交通大学)
宋宏伟 教授 (中国矿业大学)
杨成永 教授 (北京交通大学)
傅洪贤 博士后 (北京交通大学)

还要向张勇博士、段晨辉硕士致以特别的感谢,他们在资料整理、试验、数值模拟等方面都给予了作者莫大的帮助。感谢中国矿业大学韩立军博士、周钢老师、张彦峰老师、李仁彬老师、陈先德老师、李玉寿老师的关心与支持。

本书所涉及的研究项目得到了国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”子课题“深部采动覆岩移动规律及巷道稳定性控制研究(编号 50490273)”的资助,本书的出版得到了中国矿业大学研究生院的资助,并得到了中国矿业大学出版社的大力帮助。

邵 鹏

2005 年 6 月

目 录

前言	1
1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 节理裂隙岩体中弹性波传播及其动力效应	
研究现状	3
1.2.1 裂隙岩体中的弹性波传播	3
1.2.2 节理裂隙岩体中弹性波动力效应研究现状	6
1.3 断续节理岩体中弹性波动力效应研究思路	8
1.4 研究内容和技术路线	10
1.4.1 研究内容	10
1.4.2 研究方法和技术路线	11
2 断续节理岩体中的弹性波传播	13
2.1 概述	13
2.2 弹性波传播基本方程	14
2.2.1 弹性动力学控制方程	14
2.2.2 波动方程的势函数形式	14
2.3 非充填断续节理岩体中的弹性波传播	16
2.4 充填断续节理岩体中的弹性波传播	20
2.4.1 弹性波的一次散射	22
2.4.2 弹性波的二次散射	26
2.5 闭合断续节理岩体中的弹性波传播	30
3 断续节理岩体动静载叠加断裂研究	32
3.1 概述	32

3.2	动静载叠加断裂过程分析	33
3.2.1	线弹性叠加原理及其应用	33
3.2.2	断裂过程分析	35
3.3	断续节理岩体对压缩 P 波的动力响应	38
3.3.1	非充填断续节理的动力响应	38
3.3.2	充填节理的动态响应	44
3.4	断续节理岩体对反射拉伸 P 波的动力响应	46
3.4.1	非充填节理	46
3.4.2	充填节理	49
3.5	S 波对扩展裂纹的影响	51
3.6	存在节理相互作用的动力断裂	54
4	断续节理岩体动静载叠加疲劳损伤研究	57
4.1	概述	57
4.2	动静载叠加疲劳损伤分析	58
4.3	逾渗理论与重整化群	61
4.3.1	逾渗理论	61
4.3.2	重整化群	64
4.4	断续节理岩体损伤模型	65
4.4.1	一般损伤的逾渗模型	65
4.4.2	剩余应变强度模型	70
4.5	两类损伤的联系	72
4.6	疲劳损伤累积的分形描述	74
5	弹性波动力效应试验研究	77
5.1	概述	77
5.2	试验方法	78
5.2.1	试验材料及试件制作	78
5.2.2	加载方法及荷载范围确定	80
5.2.3	测试系统和测量方法	82

5.3	声波测试结果及分析	83
5.4	断裂试验结果及分析	86
5.4.1	轴向压力的影响	87
5.4.2	充填介质的影响	90
5.4.3	弹性波强度的影响	94
5.4.4	侧向压力的影响	96
5.4.5	试验结果讨论	99
5.5	疲劳损伤试验结果及分析	104
5.5.1	非充填节理试验结果及分析	104
5.5.2	充填节理试验结果及分析	110
6	断续节理岩体动力响应数值模拟	117
6.1	概述	117
6.2	模拟方法与模型建立	118
6.2.1	动力学有限元原理	118
6.2.2	数值模拟主要技术	120
6.2.3	有限元模型	121
6.3	计算结果及分析	123
6.3.1	位移场	123
6.3.2	速度场和加速度场	127
6.3.3	节理尖端应力场和破裂模式	133
7	弹性波噪声效应探索	139
7.1	概述	139
7.2	岩体力学系统与噪声	140
7.2.1	岩体力学系统	140
7.2.2	系统演化中的噪声	141
7.3	弹性波诱导岩体系统失稳机制	143
7.3.1	协同学理论	143
7.3.2	系统演化方程和势函数	145

7.3.3 弹性波诱导系统失稳	148
7.4 随机共振触发岩体系统失稳机制	150
7.4.1 随机共振理论	150
7.4.2 随机共振触发岩体系统失稳分析	151
参考文献	157

1 绪 论

1.1 概 述

结构面广泛存在于自然界、工程结构及复合材料中,作为传输运动和变形的中介,其性质直接影响到材料或结构的宏观力学行为和稳定性,因而对结构面的研究已逐渐成为力学研究中的重要课题。结构面与弹性波相互作用问题很早就引起了人们的广泛重视。一方面结构面对弹性波的散射将引起复杂的次生应力场,并导致弹性波衰减和波形转换,影响弹性波的传播射线和幅值;另一方面弹性波的动力效应可能引起结构面的开裂、滑移和贯通,造成结构等失稳破坏。前者因弹性波的波动特性能够反映固体结构特征而逐渐成为弹性波反演的理论基础,后者对于研究动态荷载作用下的材料及结构破坏性能及动力响应特性有着非常重要意义。

岩体是长期地质年代的产物,由于地质的形成而赋存应力,后经多次构造运动,使其中应力场复杂化,破坏了岩体的完整性和连续性,产生许多裂隙、节理和断层等结构面,使岩体成为一种由结构面和岩石组成的复合地质材料。所以,岩体的力学性质在本质上是岩体结构力学性质的综合反映,岩体结构决定着岩体的变形破坏机制和力学介质类型,影响着岩体的工程力学性质,从而控制着岩体的稳定性。

随着我国现代化建设事业的迅速发展,各类跨流域调水工程、大型水电工程、深部采矿工程、城市地下工程、边坡工程、海峡隧道

工程、公路、铁路等大量工程项目正在或即将开工建设。同时,随着世界能源工业战略的演化,国家战略性能源储备、核废料永久性处置、固体废弃物储存、地热及沿海海岸工程的开发与利用也将列入国家总体规划。这些工程开发建设将会遇到各种复杂岩体,特别是作为开发重点的西南、西北地区,多半是高山峡谷,地形地质条件极其复杂,而且大部分地区位于高强震区,其施工建设将会遇到许多前所未有、难度很大的岩体力学课题,许多重大工程均要面临岩体动力学特性与动力稳定性问题。它们在弹性波(地震波、爆炸波)等动态荷载作用下的强度、变形及稳定特性,将直接关系到工程建设的成败与安全,会对整个工程的可行性、安全性及经济性等起着重要的制约作用,并在很大程度上影响着工程建设的投资及效益。

断续节理岩体是工程中最常见的一类复杂岩体,其破坏机制和强度规律独具特色。近年来,三峡、二滩等大型水电站枢纽工程相继遇到含断续节理的脆性岩体,使工程界对这类岩体的破坏特征和强度分析方法非常关注。目前,国内外学者已对这类岩体的结构特征、变形和强度性质等进行了大量的研究,揭示了节理的扩展规律和破坏机理,建立了相应的断裂准则,提出了描述节理岩体损伤规律的损伤模型,然而这些研究大都是在静载条件下进行的。地下爆炸试验、工程爆破、地震研究、结构防护工程、国防和水利水电等工程实践表明,岩体工程的失稳破坏往往与动态荷载有关,如边坡失稳、冲击地压等在很多情况下是由地震或爆破振动引发的。弹性波动态效应不仅直接损害了岩体的完整性、触发失稳过程,而且在重复动载作用下岩体可能产生疲劳破坏,从而加速岩体的破坏过程^[1]。所以,对断续节理岩体在弹性波等动载作用下的基本特性研究应当给予高度重视。

节理裂隙岩体的动力学性质和动力稳定性问题是一项涉及复杂动力学过程且少有参考资料的国际前沿性课题,目前对有关岩

体动态断裂、动态损伤规律和破坏机理等方面的研究还很不充分,一些基本力学性质问题至今还远未解决。因此,作为岩体动力学领域的热点课题,对弹性波动力效应的研究无疑具有重要的理论和工程意义,是探索动态荷载作用下节理裂隙岩体变形破坏机理及动力稳定机制最基本、最重要的基础。

本书根据工程岩体的赋存特点和应力历史将岩体动力学和静力学相结合,提出动静载叠加作用思想,以此为指导从弹性波散射规律出发,研究弹性波作用下断续节理岩体动力响应特征和断裂破坏规律;从统计学角度考察断续节理岩体疲劳损伤演化规律、疲劳强度衰减和疲劳寿命估算方法;根据协同学理论和随机共振理论研究弹性波作用下岩体系统失稳机制。

1.2 节理裂隙岩体中弹性波传播及其动力效应研究现状

节理裂隙岩体由岩石和节理裂隙组成,弹性波在其中传播时将与节理裂隙发生复杂的相互作用,两者相互影响,又在一定程度上互为因果。

1.2.1 裂隙岩体中的弹性波传播

对裂隙岩体中弹性波传播规律的研究已有很长的历史,大多数研究集中于岩体中微裂纹、微孔洞等细观尺度缺陷对弹性波散射和衰减的影响,如 Hudson^[2](1990)、Angle 等^[3,4](1985)、Crampin^[5](1981)、Achenbach^[6](1982)、Kitsunozaki^[7](1983)、Capuani^[8](1997)等所进行的裂纹体对弹性波散射和传播规律影响的研究,以及 Hudson^[9](1988)、Chatterjee 等^[10](1980)对部分饱和及饱和含裂纹岩体中弹性波衰减规律的研究。

近年来,随着岩体动力学的发展和对结构面控制作用认识的深入,宏观尺度节理裂隙中弹性波的传播规律越来越受到重视。张

奇^[11](1986)通过对应力波垂直入射节理时的传递过程的解析分析,认为应力波垂直于节理传播时,其应力衰减与节理和两侧介质的物理力学性质的匹配有关。Schoenberg 等^[12](1988)研究了多个平行节理和雁行排列裂纹体中弹性波传播问题。Hopkins^[13](1988)通过对地震波衰减规律的研究,认为通过多个平行节理的地震波衰减系数可以表示为节理刚度和节理间距的函数;Sadovskiy 等^[14](1988)根据爆破试验资料,得出爆破地震波衰减与炸药类型和岩石性质有关的结论。他们的资料显示,在爆破近区地震波衰减指数变化范围较小,而在爆破远区变化范围较大,这时地震波衰减主要受到节理组和岩体缺陷类型影响。Myer 等^[15](1990)、Pyrak-Nolte 等^[16](1990)分别研究了地震波通过单节理面的传播特征和节理面对地震波传播的影响。李夕兵^[17](1993)通过研究压缩应力波与摩尔库仑强度控制的岩石界面间的相互作用,给出了波势、应力和能流的透反射关系。del Valle 等^[18](1994)基于逾渗理论和分形生长的概念,建立了由格点和弹簧组成的岩石模型,采用数值方法模拟了节理岩石中弹性波的传播。Gutierrez-Claverol 等^[19](1994)讨论了节理密度与 P 波波速间的关系。Chakraborty 等^[20](1994)通过模拟试验和现场调查,发现节理面可以部分地阻止爆炸冲击波的传播,不同的节理方位对爆破效果有显著影响;Myer^[21](1995)在他以往研究的基础上,对多节理岩体中地震波的传播进行了进一步研究。王明洋等^[22](1995)结合实际的地质特点,根据断层与节理带的几何关系,在考虑界面处应力连续等边界条件基础上,探讨了应力波通过节理裂隙带的衰减规律、波的走时和上升时间。Wu 等^[23](1998)通过对节理岩体中爆炸冲击波传播特征的研究,得到了爆炸冲击波峰值和主频随比例距离和入射角变化的衰减特征,证明了岩体节理对冲击波传播具有显著影响。Chen 等^[24](1998)采用离散元程序研究了爆炸波在含节理岩体中的传播规律。Heymsfield 等^[25](1999)研究了不连续岩

床对界面内体波的二维散射问题。Zhao 等^[26](2001)采用 UDEC 离散元程序研究了具有非线性变形行为的单节理中 P 波的传播特征。Li Ning^[27](1993)采用节理单元法模拟了应力波在节理处的传递过程,推导了动态约束节理单元的有限元方程和数值分析公式,并对应力波在单条节理处的传播进行了数值模拟。李小凡^[28,29](2002)应用 Born 近似和等效源原理,推出了来自连续横向无界非均匀层的弹性波散射的通解,得到了弹性波能量传输表达式,发展了相应的弹性动力学能量传递理论。

对于节理间有软弱夹层的情况,Murty^[30](1975)采用“剪切弹簧—阻尼模型”研究了波透过松散结合界面的传播问题;Fourney 等^[31](1995)采用拉格朗日有限差分程序对爆炸应力波通过软弱夹层的传播规律进行了数值模拟。

在多相节理岩体方面,张建华等^[32](2000)根据饱和节理岩体特性,通过一定的等效过程建立了饱和节理岩体的参数等效连续分析模型,并由饱和孔隙介质的 Boit 理论和 Navier 方程导出了其数值分析的有限元列式;Boadu 等^[33](1997)基于修正的位移不连续节理模型研究了节理岩体参数与地震性质(波速和质量因子)之间的关系。

对于各向异性问题,汪和杰等^[34](1994)通过坐标变换推导出了 EDA 介质弹性张量在一般坐标下的表达式,并从 Christoffel 方程和弹性波理论出发,讨论了平面波在 EDA 介质传播时的慢度面特征,利用有限差分数值计算的结果展示了弹性波在 EDA 介质中的传播规律,揭示了横波分裂现象和几种弹性常数的地质意义;Pyrak-Nolte^[35]等(1997)采用有效模量理论和位移不连续理论研究了单节理处的地震波各向异性性质。

考虑到节理界面可能的接触形式以及可能出现的摩擦滑动对弹性波传播的影响,Miller 等^[36,37](1977,1978)研究了边界摩擦效应对弹性波传播的影响,并提出了弹性波通过摩擦边界的近似处

理方法;Schoenberg^[38](1983)讨论了具有可滑移界面的周期分层介质对弹性波的阻碍作用;Kendall等^[39](1971)对稳定和滑动接触界面进行了超声波研究;Myer等^[40](1985)研究了界面接触区对声波传播的影响。

此外,Pyrak-Nolte等^[41,42](1987,1992),Roy等^[43,44](1995,1997),Gu等^[45](1996)还从多个方面对节理岩体中面波的传播问题进行了研究。

1.2.2 节理裂隙岩体中弹性波动力效应研究现状

与弹性波传播问题类似,从现有的资料来看,裂隙岩体中弹性波动力效应研究同样以针对细观缺陷为主,而有关宏观节理裂隙中弹性波动力效应的研究不多。

在节理面动态剪切问题方面,Gerasimova等^[46](1992)在研究了节理粗糙度与节理岩体稳定性关系后认为,在动态荷载作用下,节理接触面强度将在特定位移变形后丧失,这一特定的位移值由节理表面粗糙度决定;Kana等^[47](1996)采用自锁/摩擦模型研究了天然节理的动态剪切响应;Barbero^[48](1996)等也进行了类似的工作;Chen等^[49](2000)采用 UDEC 程序模拟了循环荷载下节理面粗糙度对节理强度的影响,并提出了动载下节理剪切强度模型。

对于界面滑动问题,卢文波^[50](1996)研究了应力波与线性滑移岩石界面间的相互作用,给出了其透、反射波幅的一般表达式,通过应力波垂直入射时的分析,反映出岩石界面的节理刚度对应力波传播的重要影响,并揭示了岩石界面对应力波的高频滤波作用;Murty^[30](1975)模拟了应力波与松散粘结界面间的相互作用,认为界面上允许有位移的间断,但面力是连续的;对于界面充填有粘性物质情况,Myer^[15](1990)认为在两弹性固体的界面上存在位移间断的同时还存在速度的不连续;Rossmann^[51](1995)研究了应力波对岩体节理面的影响,将连续介质破坏发展法则与粘弹性

界面材料本构方程相结合,建立了两岩层界面的破坏发展模型。在这类研究中,岩体界面强度描述通常采用库仑摩擦定律和节理刚度两种方法之一。

对于弹性波作用下节理工程岩体整体稳定性问题,Gerasimova 等^[52](1992)通过模型试验研究了露天矿大型节理岩质边坡在脉冲波作用下的动态响应和稳定性,分析了岩体水平位移和垂直位移的特点,并对冲击作用下岩体的弹性变形能进行了计算;陶连金等^[53](1998)采用动力离散元法对大断面地下洞室在地震荷载作用下的动力响应及围岩稳定性进行了分析,并模拟了围岩失稳和破坏过程;田洁等^[54](1998)建立了能够反映空间层状岩石的正交各向异性及主要地质构造的三维动力有限元分析模型,较好地反映了复杂岩体的主要性状,按照工程中常用的库仑—摩尔准则及最大拉应变准则分析了岩坡的破坏性态,给出了破坏单元的时空分布及瞬时安全系数场,并对含有结构软弱层的岩体进行了模拟计算;Ling^[55](1997)提出了估计节理面地震稳定性的伪静态计算程序,讨论了岩体在地震作用下的稳定问题;Viktorov 等^[56](1997)认为单次弱冲击波不会引起岩体扰动,但多次弱冲击波的作用却能引起岩体状态的变化,通过树脂试件的微型爆破试验,研究了爆破后介质性质随距装药距离变化的变化情况。

此外,Barker 等从破碎角度研究了节理岩体中应力波的作用效果^[57],认为节理面处在 P 波或 S 波的作用下将产生新鲜破裂面,而 P 波尾部的拉应力派生的剪应力使岩体沿节理面破裂。

总之,节理裂隙岩体动力效应问题是岩体动力学的前沿课题,上述卓有成效的工作对弹性波传播和作用机制以及节理裂隙岩体动力稳定机制的深入研究具有重要意义。同时注意到,岩体动力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩体动力学的研究内容也必然是广泛而复杂的。仅从节理面分类来看,根据岩体节理面贯通情况,可将节理面分为非贯通性节理、半贯通性节理及贯

通性节理三种类型,以上研究基本上都是针对后者进行的。而在大多情况下,工程岩体中的结构面往往是非贯通性的,呈断续分布形态,即所谓的断续节理。在这一意义下,断续节理岩体中弹性波传播及其动力效应研究将更具一般性、更具有工程意义。因此,本书将断续节理岩体作为主要研究对象,并根据实际工程特点提出动静载叠加作用、疲劳破坏等研究思路,重点研究动静载叠加条件下断续节理岩体在弹性波作用下的断裂特征和重复弹性波作用下的疲劳损伤问题。

1.3 断续节理岩体中弹性波动力效应研究思路

早在 1965 年,Muller 和 Pacher^[58]就利用石膏模型成功地探讨了含多排单向断续节理的强度特征,表明了断续节理和贯穿节理在破坏机制上的差异。此后,Brown^[59]在 1970 年首次引入“岩桥”的概念,发现了断续节理岩体独特的破坏机理和特征。近年来,国内外研究者采用不同的模型材料对断续节理岩体力学特性和规律进行了研究^[60~64]。从分析含定向闭合断续节理脆性岩体的强度特性和破坏机理,到揭示裂纹扩展规律和破坏机理,进而到建立表征初裂强度的新的断裂准则;从研究裂隙倾角、裂隙密度对岩体变形和强度性质的影响,到提出非贯通裂隙岩体介质的损伤模型等等,进行了大量的模型试验研究。

与静力学研究相比,有关断续节理岩体动力学特性研究的基础资料明显缺乏,在基础理论、模拟技术和试验方法等方面也面临较大困难。动力学问题的困难性还在于加载条件的复杂性,以波动形式输入的应力历程不仅是时间的函数也是空间的函数,而弹性波在界面的散射又会导致波动过程复杂化,从而加剧力学过程的复杂性。因此,结合动力学特点,借鉴静力学较成功的试验技术、模拟方法和研究成果是研究断续节理岩体弹性波动力效应的必由之