

岩石力学与
工程研究著作 丛书

爆破震动信号分析 理论与技术

◎李夕兵 凌同华 张义平 著

Analysis of Blast
Vibration Signals—
Theories and Methods



科学出版社
www.sciencep.com

岩石力学与工程研究著作丛书

爆破震动信号分析理论与技术

Analysis of Blast Vibration
Signals—Theories and Methods

李夕兵 凌同华 张义平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从爆破震动信号的产生与传播、爆破震动监测、爆破震动预测、爆破震动信号分析技术、爆破震动作用下结构体的动态响应特征、爆破震动危害机制与主动控制、爆破震动安全判据等方面,对爆破震动效应进行了较为全面且深入的研究和总结,系统介绍了爆破震动效应分析中的理论和研究方法,特别是应用爆破震动信号分析理论与技术解决实际问题的途径。

本书可作为高等院校矿业工程、土木工程等专业研究生的教材,还可作为相关领域的工程技术人员和科研工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

爆破震动信号分析理论与技术 = Analysis of Blast Vibration Signals—Theories and Methods/李夕兵,凌同华,张义平著. —北京:科学出版社,2009
(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-023031-7

I. 爆… II. ①李… ②凌… ③张… III. 爆破-震动-信号分析
IV. TB41 TU751.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 144037 号

责任编辑:吴凡洁 王向珍 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

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>

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

*

2009年1月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009年1月第一次印刷 印张: 20 1/2

印数: 1—2 000 字数: 380 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副主编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘汉东	刘汉龙	刘宝莉	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多 m;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对上述科学与工程技术的攻克陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很好很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007~2011年,分期分批出版。到2007年底,已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任与重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

前 言

随着爆破技术的广泛应用,人们越来越关注爆破震动对周围环境和建(构)筑物的影响。爆破震动危害已成为工程和学术界越来越关注的重大问题。然而,由于爆破地震波的随机性、模糊性和不确定性,即便像爆破地震波在岩土介质中的传播规律这样简单的问题也尚未得到完整的认识。如何对爆破震动信号进行分析,并在此基础上将爆破震动灾害控制在最低程度,已成为爆破领域内众多国内外专家研究和探索的重大前沿课题。

针对上述问题,本书作者结合近几年来在爆破震动效应及其灾害控制方面所做的一些研究工作和国内外在这方面的大量文献,基于大量爆破现场监测资料和最新数学分析手段,从爆破震动信号的产生与传播、爆破震动监测、爆破震动预测、爆破震动信号分析技术、爆破震动信号不同频带的能量分布特征、爆破震动作用下结构体的动态响应特征、爆破震动危害机制与主动控制、爆破震动安全判据等方面,对爆破震动效应进行了全面而深入的研究和总结。

首先,综述了国内外对爆破地震效应及其灾害控制的研究现状及进展,并指出了爆破地震效应研究中的不足。在此基础上,阐述了爆破地震波的产生、传播及危害机制。

针对爆破震动信号具有短时非平稳的特点,提出了包括傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换、HHT 变换的爆破震动信号分析方法,并分析了各种方法的特点。

从信号能量分析角度,用小波包分析技术对不同爆破条件下的震动信号进行时频分析,分析了爆破震动信号的能量在传播过程中随着爆破条件的改变所显示出来的规律,进一步指出了爆破地震波的传播特征;通过对信号进行 HHT 变换,得到 IMF 分量、瞬时能量、边际谱和能量谱,揭示了硐室大爆破地震波的时频特征、能量分布、传播规律及场地条件对震动波传播的影响规律。

在动力学理论分析的基础上,将爆破震动作为一个动力响应过程。运用三角插值解析公式法对爆破震动进行反应谱分析,重点探讨了爆炸参量对爆破震动反应谱的影响。分析结果表明,在单段与多段微差爆破中,不同结构体对爆破震动的响应显著不同;多段微差爆破在起到干扰降震的同时,使结构体对其震动响应出现选择放大的概率增加,不同结构体对爆破地震波的选择放大作用也不同。

用微差干扰降震法实现爆破震动灾害主动控制的关键在于确定合理的微差延期时间。作者首次用基于小波分析的时能密度法以及时-频域转换技术,从实测微

差爆破震动信号中分离出各分段震波,通过比较各分段震波在不同延期时间下的叠加效果,得到了微差爆破的较优微差延期时间,指出较优微差延期时间往往不是一个具体值,而是多个时间段。

作者通过对爆破震动信号时能密度曲线的积分值 TEDI(integral of the time-energy density)与爆破震动三要素进行关联分析,提出了用 TEDI 作为评估爆破震动效应强弱的定量指标。采用模糊神经网络对爆破震动实测数据进行预测,初步建立了用 TEDI 作为考核指标的爆破震动损伤统一安全判据。当 $TEDI \geq 15$ 时,爆破震动对结构体将造成危害,并用实例验证了该判据的可行性和可靠性。该判据较之以前的“独立阈值理论”以及结合震动主频的峰值强度判据来说,更能全面地反映爆破震动危害的本质。

全书共分 13 章,内容包括绪论、爆破地震波的产生与传播、爆破震动信号的傅里叶变换、爆破震动信号的小波变换、爆破震动信号的 HHT 变换、爆破震动信号小波变换与 HHT 变换的比较、爆破震动监测、爆破震动预测、爆破震动信号在不同频带的能量分布特征、硐室大爆破震动特征分析、结构体对爆破震动的动态响应特征、爆破震动危害机制与安全评判、爆破震动灾害主动控制等内容。

本书包含了作者多年的研究成果,研究工作得到了国家自然科学基金项目(No. 50490274、50678028、50674107、10472134)、973 计划(No. 2002CB412703)等的资助,同时也引用了众多文献的观点和方法,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中某些内容和观点难免存在疏漏,欢迎广大读者指正。作者由衷希望本书能够成为一本实用的参考书,能够对从事相关专业的工程技术人员、科研工作者及高等院校的相关专业研究生有所帮助。

作 者

2008 年 6 月于长沙

Foreword

With extensive application of blasting technology, the damage caused by blasting vibration on surrounding environment and structures attracts lots of attention. The blasting vibration hazard has become an important issue in both engineering application and academic studies. However, due to the strong randomness, fuzziness and uncertainty of blast seismic wave, even a simple problem such as its propagation laws of blast seismic wave in rock and soil has not been completely understood. Such issues as how to analyze the signals of blasting vibration, how to control and eliminate the blasting vibration hazard, etc., have been the frontier and hard topics in blasting engineering.

Based on huge in-situ monitoring data and the newest mathematical analysis method, the book summarizes some domestic and overseas research work on blasting vibration effect and its damage control in recent years, and makes a systematic study on the following topics: generation and propagation of blast seismic wave, the monitoring and forecast of blasting vibration, the analytic technique of blasting vibration signals, the energetic distribution of signals with different frequency bands, dynamic response of structures under blasting vibration, blasting vibration hazard control and construction of safety criterion of blasting vibration.

The book reviews the research status in blasting seismic effect and hazard control and the insufficiencies. Fourier transform, short-time Fourier transform, wavelet transform and HHT transform are used to analyze the short-time and non-stationary characteristics of blasting vibration signals.

Through HHT transform, IMF component, momentary input energy, marginal spectrum and energy spectrum of signal were obtained. With these indexes, the time-frequency characteristics, energy distribution, transmission law and the influences of working condition in chamber blasting were revealed.

The blasting vibration is considered as a course of dynamic response. Its response spectrum was originally calculated with analytical expression of trigonometric interpolation. The influence of explosion parameters on response spectrum was elaborately investigated. The results showed that the response characteristics of structures to blasting vibration are clearly different in single decked charge

and in multi-decked charge blast. Multi-decked charge blast technique not only takes on good effects on wave interference, but also increases the probability of selective magnification in the structural response on blast vibration. The effect of selective magnification to blasting vibration wave varies from each structure.

The key to achieve initiative control of vibration hazard by means of wave interference is the selection of reasonable interval of delay time. In this work, the reasonable interval of delay time was obtained by separating every sub-signal from measured millisecond blasting vibration signal with time-energy density analysis and time-frequency transform technique from wavelet theory. It is concluded that the reasonable interval of delay time isn't a special value, but several time segments.

The book consists of 13 chapters altogether: introduction, generation and propagation of blasting vibration, Fourier transform of blasting vibration signals, wavelet transform of blasting vibration signals, HHT transform of blasting vibration, comparison of wavelet transformation with HHT of blasting vibration signal, blasting vibration monitoring, blasting vibration forecast, energy distribution characteristics of blasting vibration signal in different frequency bands, vibration characteristic analysis of chamber blasting, dynamic response characteristics of structure under blasting vibration, blasting vibration damage mechanism and safety judgment, and initiative control of blasting vibration hazard, etc.

The book is a comprehensive summary of the authors' research work for many years, which was supported by the National Science Foundation of China (Grant No. 50490274, 50678028, 50674107, 10472134), and the China National Program on Key Basic Research Project (Grant No. 2002CB412703). At the same time, lots of references in the field are cited in the book. We would like to gratefully acknowledge all the authors and the organizations. The book can be a practical reference to engineers, technicians and researchers. Any corrections and suggestions are warmly welcomed.

Author
June 2008

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 国内外研究现状及进展	2
1.2.1 爆破地震波的危害机制	2
1.2.2 爆破震动监测	5
1.2.3 爆破震动信号分析技术	6
1.2.4 爆破地震波的传播规律	11
1.2.5 爆破震动峰值强度预测	12
1.2.6 爆破震动安全判据	14
1.2.7 爆破震动危害控制	15
第 2 章 爆破地震波的产生与传播	17
2.1 爆破地震波的产生与爆破地震效应	17
2.1.1 爆破地震波的产生	17
2.1.2 爆破地震效应	22
2.2 爆破地震效应的研究方法	25
2.3 爆破地震波与天然地震波的差异	26
2.4 爆破地震波的类型及传播方式	27
2.4.1 爆破地震波的类型	27
2.4.2 爆破地震波的传播方式	30
2.5 爆破地震波对建(构)筑物的危害效应	36
2.5.1 建(构)筑物受爆破震动破坏的形式和影响因素	37
2.5.2 能量破坏机理	38
2.5.3 爆破震动特性对建(构)筑物破坏的影响	41
2.6 场地对爆破地震波传播的影响	48
2.6.1 场地土层的动力特性	48
2.6.2 场地覆盖土层对爆破地震波的影响	49

第 3 章 爆破震动信号的傅里叶变换	51
3.1 信号的描述、分类与处理	51
3.1.1 信号的描述与分类	51
3.1.2 信号的分析与处理	54
3.2 傅里叶变换	55
3.2.1 离散傅里叶级数	55
3.2.2 傅里叶谱	56
3.2.3 傅里叶变换的原理	56
3.2.4 傅里叶变换的几个重要的性质	57
3.2.5 信号数字滤波	59
3.2.6 信号的短时傅里叶变换	60
3.3 傅里叶变换在爆破震动信号中的应用	64
3.3.1 获取爆破震动信号的功率谱	64
3.3.2 获取爆破震动信号的优势频率	65
第 4 章 爆破震动信号的小波变换	66
4.1 小波分析理论	66
4.2 小波分析中小波函数(基函数)的选取	68
4.3 小波包分析	70
4.3.1 小波包分析理论	70
4.3.2 小波及小波包分析算法的实现	73
4.4 爆破震动信号的小波及小波包分析技术	73
4.4.1 爆破震动信号小波分析技术	73
4.4.2 爆破震动信号小波包分析技术	77
4.4.3 本分析方法的有效性检验	80
第 5 章 爆破震动信号的 HHT 法	82
5.1 HHT 方法	82
5.1.1 EMD 原理与算法	82
5.1.2 Hilbert 变换与 Hilbert 谱	84
5.1.3 HHT 法的优越性	92
5.2 HHT 法的仿真实例	93
5.3 基于 HHT 的爆破震动信号分析	94
5.4 HHT 法研究的有关问题	99
5.4.1 分解方法	99
5.4.2 信号的物理解释	100
5.4.3 端点效应	100

5.4.4 信号长度的选取	100
5.5 HHT 法的完备性与正交性	100
5.5.1 完备性的验证	100
5.5.2 正交性	104
第 6 章 爆破震动信号小波变换与 HHT 法的比较	106
6.1 信号的分解过程及信息重构	106
6.2 信号的频谱分析	114
6.3 信号突变检测	116
6.4 信号的分辨率对比	119
6.5 消噪与滤波	120
第 7 章 爆破震动监测	129
7.1 爆破震动测试内容与原理	129
7.1.1 爆破震动测试内容	129
7.1.2 测试的基本原理	130
7.1.3 测试系统的构成	130
7.1.4 震动测试的几个重要概念	132
7.2 爆破震动记录仪	135
7.2.1 爆破震动记录仪的基本要求	135
7.2.2 国内外爆破震动记录仪介绍	137
7.3 爆破震动传感器	140
7.3.1 非电量电测法和传感器	141
7.3.2 传感器的组成	141
7.3.3 传感器的特性	142
7.3.4 传感器的一般要求	147
7.3.5 传感器频率要求	147
7.3.6 传感器的安装和定位	147
7.3.7 爆破中常用传感器的种类	148
7.4 爆破震动监测实施的原则与方法	152
7.4.1 测点布置的原则	152
7.4.2 测震系统的标定	153
7.4.3 爆破震动测试的抗干扰措施	154
7.4.4 震动记录仪的设置	155
第 8 章 爆破震动预测	157
8.1 爆破震动波形的预测	157
8.1.1 线性叠加预测模型	157

8.1.2 多频带小波系数预测模型	159
8.2 爆破震动强度的预测	160
8.2.1 爆破震动峰值速度预测模型	161
8.2.2 现有预测模型存在的问题	163
8.3 峰值质点震速预测的人工神经网络模型	163
8.3.1 人工神经网络原理	163
8.3.2 人工神经网络的特点	164
8.3.3 人工神经网络设计	165
8.3.4 峰值质点震速预测的模糊神经网络模型	168
8.4 爆破震动峰值质点震速预测	169
第9章 爆破震动信号在不同频带的能量分布特征	174
9.1 爆破震动监测试验	174
9.1.1 爆破震动测试系统	174
9.1.2 爆破震动现场测试	175
9.2 信号频带能量分布规律的小波包分析	175
9.2.1 小波包分解深度与小波包基的确定	176
9.2.2 爆破震动信号的频带能量分布特征分析	176
9.3 爆破条件对信号频带能量分布的影响	183
9.3.1 最大段药量的影响	183
9.3.2 总药量对爆破震动信号频带能量分布的影响	186
9.3.3 爆心距对爆破震动信号频带能量分布的影响	189
9.4 爆破信号能量分布特征的几点认识	191
第10章 硐室大爆破震动特征分析	193
10.1 爆破震动信号分析	193
10.1.1 工程背景	193
10.1.2 大爆破震动监测	194
10.2 基于 HHT 方法的震动特征分析方法	197
10.3 质点震动速度峰值与瞬时能量变化特征	200
10.4 爆破震动频率变化特征	205
第11章 结构体对爆破震动的动态响应特征	211
11.1 反应谱理论	211
11.2 反应谱的数值计算	215
11.3 反应谱计算的实现	217
11.4 单段爆破震动反应谱的特征分析	218
11.5 多段微差爆破震动反应谱的特征分析	220

第 12 章 爆破震动危害机制与安全评判	226
12.1 爆破震动强度特性及其危害机制	226
12.1.1 震动幅值强度特性及其在震动危害中的作用	226
12.1.2 震动频谱特性及其在震动危害中的作用	228
12.1.3 震动持时特性及其在震动危害中的作用	230
12.1.4 爆破震动危害机制	231
12.2 爆破震动安全判据	231
12.2.1 单一质点震速安全判据	231
12.2.2 速度-频率相关安全判据	232
12.2.3 爆破破坏指数安全判据	233
12.2.4 多因素综合安全判据	235
12.3 基于时-能密度法的爆破震动安全判据	235
12.3.1 时-能密度曲线与爆破震动三要素的关系	236
12.3.2 爆破震动损伤统一安全判据的依据	238
12.3.3 爆破震动 TEDI 值预测	239
12.4 爆破震动损伤统一安全判据计算与评判	239
第 13 章 爆破震动灾害主动控制	244
13.1 爆破震动灾害控制常用的手段与方法	244
13.1.1 干扰降震法	244
13.1.2 改变爆炸参数	246
13.2 基于实测爆破震动资料分析的干扰降震法	248
13.2.1 普通微差干扰降震法的原理	248
13.2.2 普通干扰降震法的局限性	249
13.2.3 基于实测爆破震动信号分析的干扰降震法	251
13.3 最优微差延期时间的确定	253
13.3.1 微差延期时间的识别	253
13.3.2 微差爆破震动信号的分离	255
13.4 爆破震动灾害主动控制	258
13.4.1 微差延期时间对爆破震动强度的影响	258
13.4.2 基于微差干扰降震的爆破震动灾害主动控制	259
参考文献	262
附录 A 爆破震动安全判据计算结果	272
附录 B 爆破震动分析有关源程序	278

CATALOGUE

Preface of Rock Mechanics and Engineering Works Series

From the Editor

Foreword

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Foreword	1
1.2 The domestic and international research state and progress	2
1.2.1 Damage mechanism of blast vibration waves	2
1.2.2 Blast vibration monitoring	5
1.2.3 Analysis technology of blast vibration signal	6
1.2.4 Propagation laws of blast vibration waves	11
1.2.5 Prediction of blast vibration peak intensity	12
1.2.6 The safe criterion for damage induced by blast vibration	14
1.2.7 Blast vibration damage control	15
Chapter 2 Production and propagation of blast vibration waves	17
2.1 Blast vibration waves production and blast vibration effect	17
2.1.1 Blast vibration waves production	17
2.1.2 Blast vibration effect	22
2.2 Study method of blast vibration effect	25
2.3 The differences between blast vibration waves and natural seismic wave	26
2.4 The type of blast vibration waves and propagating way	27
2.4.1 The type of blast vibration waves	27
2.4.2 Propagating way of blast vibration waves	30
2.5 The damage effect of blast vibration waves to the building (structure)	36
2.5.1 Damage in the form of blasting vibration and influencing factors	37
2.5.2 The energy damage mechanism	38
2.5.3 Influence of blast vibration characteristics on the building (structure)	41
2.6 Influence of the location condition on blast vibration waves	