

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.011

爆破振动效应预测方法新进展

刘 军^{1,2}, 崔清荷²

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学安全与防灾工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 介绍了爆破振动效应预测研究的目的是意义, 回顾了爆破振动效应预测研究的发展历程, 从基于现场监测数据的统计分析法、动力分析法、数值模拟法到振动历程综合预测法, 系统地分析了当前各方法的优缺点。结合笔者研究成果, 详细介绍了2个先进的预测方法: 修正的 Anderson 模型与基于非线性泛函级数预测模型。对预测结构振动响应的振型分解反应谱法、传递函数法与时程分析法的基本原理、适用条件、预测结果进行了总结。最后指出了爆破振动效应预测研究的发展趋势。

关键词: 爆破振动; 预测方法; 结构响应; 泛函级数; 非线性系统

中图分类号: TD235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)05-0465-07

Advances in methods of predicting blasting-induced vibrations

LIU Jun^{1, 2}, CUI Qinghe²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The purpose and significance of blasting-induced vibration prediction are introduced, and the development courses of the prediction methods and their advantages and disadvantages, including the statistical analysis method, dynamic analysis method, and numerical simulation method based on field measurements and the hybrid vibration course prediction method, are reviewed in detail. Based on the authors' achievements, two advanced prediction methods, the improved Anderson model and the nonlinear functional series model, are introduced. Moreover, the basic principles and applicable conditions of the mode-superposition response spectrum method, the transfer function method, and the time-history analysis method, as well as their predictions of structural vibrations, are summarized. Finally, the development trend of prediction of blasting-induced vibrations is described.

Key words: blasting-induced vibration; prediction method; structural response; functional series; nonlinear system

岩土爆破技术在矿山、交通、水利水电等行业广泛应用。炸药在岩土介质中爆炸时释放的能量主要用于岩土介质的破坏, 还有一部分能量以波动的形式向外传播, 形成爆破地震波, 爆破地震波的传播规律及其对传播介质和周边建筑结构的影响, 称为爆破振动效应^[1]。当爆破产生的冲击荷载能量较大时, 爆区周边建(构)筑物可能会发生损伤, 严重时会导致建(构)筑物的破坏, 从而引起安全事故, 造成人员伤亡和财产损失。

在爆破工程实践中, 主要采用被动与主动防护^[2]2种方式控制爆破振动效应。被动防护方式是针对爆区边需要防护的建(构)筑物采取的振动防护措施, 如结构加固、挖防震沟等; 主动防护方式是对爆源进行控制, 如控制通段药量及总装药量、选择正确的延期时间、调整爆破抛掷方向、采用不同装药方式等。由于主动防护方式具有经济、可操作性强的优点, 目前主要采用主动防护方式。随着火工产品性能的提高与品种的日

收稿日期: 2015-06-25

作者简介: 刘军(1969—), 男, 河北承德人, 教授, 博士, 主要从事爆炸灾害预防与控制、散体力学与离散元法等研究。E-mail: ljun8@263.net

益增多,爆破设计方案的选择空间越来越大,如随着高精度导爆管雷管的应用,逐孔爆破技术已广泛应用于爆破工程领域。

无论采用主动防护还是被动防护方式,实现爆破振动效应的预测一直是爆破工程领域迫切需要解决的难题。对于给定的爆破设计方案,只有准确地预测爆破振动效应,才能采取有针对性的、经济合理的、有效的防护措施。同时,可以根据预测结果修正爆破设计方案,从而有效降低爆破振动效应。然而,爆破振动效应的预测异常复杂,原因在于:(a)岩土介质的地质构造、结构组成千差万别;(b)炸药的爆轰过程异常复杂,理论描述不成熟;(c)爆炸荷载属于典型的高加载率荷载,岩土介质呈现显著的率相关行为。因此,研究爆破振动效应预测方法具有重要的工程应用价值与学术价值。

1 爆破振动效应预测方法

由于爆破地震波在地层中的传播是一个复杂的力学过程,炸药的性能、能量、装药结构、引爆方式、堵塞条件以及爆破的地形地质条件都会影响爆破振动效应,此外,岩土介质的动力学性质也很难用计算方法精确确定。因此,目前爆破振动效应的研究大多数都是建立在统计分析和现场测量基础之上。主要研究方法包括基于现场监测数据统计分析预测法、动力分析法与地震烈度法、数值模拟法与振动历程综合预测法等。

1.1 基于现场监测数据的统计分析预测法

1.1.1 单一参数法

单一参数法是通过大量的现场试验和振动监测分析不同爆破参数下爆破地震动强度,确定某个单一的地震强度参数作为评价爆破地震安全的控制参量,识别建(构)筑物的振动响应与反映爆破振动强度参数间的关系,并给出相应控制指标。国内外学者先后采用地面最大加速度、最大振动速度以及能量比等作为控制指标。近年来大量的测试资料和工程实践表明,地面最大振动速度与建筑结构破坏的相关性最好,所以各国都逐渐采用最大振动速度作为评定标准^[3]。Nateghi^[4]通过对伊朗 Gotvand 坝台阶爆破开挖过程中的振动效应进行测试,建立了最大振动速度随距离变化的预测模型。著名的萨道夫斯基公式(式1)就是通过预测地震动质点的最大振动速度作为评价结构安全衡量指标的^[5]。

$$V = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

式中: V ——地震动质点的最大振动速度,cm/s; Q ——炸药量,kg; K 、 α ——与介质特性有关的参数; R ——爆心距,m。

在爆破设计方案确定后,可根据式(1)预测离爆源一定距离处的 V ,然后根据相关标准,评定爆破振动效应。缺点是:(a) K 与 α 需要经过多次爆破试验结果拟合确定,且不同场地取值不同。(b)没有考虑爆破振动主频与振动持续时间对结构振动响应的影响。结构在爆破振动下的响应不仅与 V 有关,还与爆破振动的主频及振动的持续时间有关。(c)单一参数法不能体现爆源性质和场区地形地质条件的影响,也无法具体考虑建(构)筑物结构的动力特性和材料性能,因而用单一参数作为评价指标不能反映结构在爆破振动作用下的损伤与破坏,并且对不同场地和不同结构类型适应性差。

1.1.2 时间序列模型

Otuonye^[6]在大量爆破试验基础上,对大量振动测试数据进行了分析,利用时间序列模型预测爆破可能产生的振动效应^[1],即通过实测数据来预测给定爆破设计的振动波形。该方法思路简单,但是必须通过大量的现场振动测试才能应用,同时对场地与结构类型的适用性差。

1.1.3 神经网络模型

Chakraborty等^[7]在露天矿进行了大量爆破试验,综合分析炮孔直径、抵抗线、单孔装药量、炸药单耗、同段最大药量、测点距离以及振动波形记录等参数,比较分析了不同经验公式的预报结果,在此基础上,建立了神经网络预报模型。神经网络模型^[8-12]与时间序列模型存在相似之处,需要大量振动测试,预测结果为单一物理量,场地适用性较差。

1.1.4 振动叠加法

Hinzen^[13]利用在时域内单孔爆破振动信号叠加的优点,综合分析了叠加信号的谱值与相位的变化规

律,并据此优化了多孔爆破的延期时间。Ghosh 等^[14]认为在离冲击源一定距离处 Rayleigh 波携带的能量占主导地位,因而提出了叠加 Rayleigh 波预测振动效应的方法。此外,Aldas 等^[15]和 Svinkin 等^[16]利用类似的波形叠加方法预测了爆炸冲击荷载引发的振动效应。为了克服线性叠加方法的局限性,Blair^[17]提出了 2 种非线性模型,一种基于装药量,一种基于岩体损伤程度,但是难以反映不同装药量下振动效应的差异,此外需要数值计算。振动叠加法^[18]应用简便,但是由于以经验公式为叠加依据,所以精度较差,并且只能预报描述爆破振动效应的单一物理量。

1.2 动力分析法

由于天然地震作用下结构振动效应分析方法相对成熟,因此爆破工程中开始沿用地震工程学中反应谱理论和动力分析法^[19-20]对爆破地震进行频谱和反应谱分析,计算爆破地震作用时结构的动力反应和结构中产生的应力和应变^[21]。动力分析法能比较准确地进行震害分析并指导抗震设计。用动力分析法和反应谱理论预测结构反应时,应首先建立抗震设计反应谱,抗震设计反应谱是对大量爆破试验结果进行统计分析得到的^[22-23],且不同场地需要分别构建抗震设计反应谱,因而不便于工程应用。

1.3 数值模拟法

数值模拟方法^[18,24]主要采用商业软件或研究者自行开发的程序模拟岩土介质在爆炸载荷下应力波的传播规律及力学响应特征。Torano 等^[25]在进行大量现场测试的基础上,利用有限元法预测爆破振动效应,考虑了岩土介质的各向异性、延期时间及每段装药爆炸对振动效应的贡献,并分析了振动效应的随机性。Wu 等^[26-27]采用非线性动力有限元软件 LS-DYNA 模拟了大规模地下爆破的应力波传播规律。Chen 等^[28]、Liu 等^[29]用离散元商业软件 UDEC 模拟了爆炸应力波在节理岩体中的传播过程及露天矿边坡在爆炸载荷下的动力响应。但是,数值模拟方法计算量大,需要技术人员具备一定的数值模拟经验,不便于工程应用。

1.4 振动历程综合预测法

鉴于 1.1~1.3 节所述方法的不足,针对给定爆破设计方案,预测给定测点位置完整振动历程的预测方法应运而生。根据测点位置的完整预测波形,可以充分体现最大振动速度、振动主频与振动持续时间等信息,从而对爆破振动效应进行正确评价。

1.4.1 Anderson 模型

为了预测给定位置处的爆破振动波形,Anderson 等^[30]、Blair^[31]提出了一个通过叠加实测单孔爆破波形预测多排多孔毫秒延期爆破振动波形的预测方法。该模型以叠加单孔爆破振动波形为基础,假定单孔爆破振动波形在给定测点位置能够复现,假设多排多孔爆破的振动波形是由单个炮孔的振动波形组合而成,假设其中的每个炮孔产生的振动具有相同的时间源函数。如果爆区的空间分布范围相对波的传播路径来说很小,则认为爆区的空间分布范围可以忽略^[30]。

Anderson 模型的具体预测步骤为:爆破参数设计确定后,在爆源位置进行单孔爆破试验,在测点位置分别布置振动监测传感器,从而得到测点位置在简单震源下的振动波形记录。这个波形记录了爆源至测点间岩土介质的诸多复杂信息。然后,根据爆破设计方案中各个炮孔的起爆顺序,构造脉冲函数,即通过各段药量与延期时间构造脉冲函数。最后,通过单孔爆破振动波形与脉冲函数的卷积预测测点在多排多孔台阶爆破条件下的振动波形。

1.4.2 修正的 Anderson 模型

为了反映岩土介质在爆炸荷载下的非线性特征,刘军等^[32]将 Anderson 模型中的地震比例系数进行了修正。具体步骤为:(a)进行多次单孔爆破试验,至少为 3 次,每次爆破试验的药量不同;(b)在每次试验中,针对需要防护位置布置振动监测仪,假设进行了 n 次单孔爆破试验, n 次试验的装药量分别为 $q_1, q_2, \dots, q_n$,与之对应的 n 个实测波形记录的最大幅值分别为 $P_1, P_2, \dots, P_n$,选择 n 次单孔爆破试验中的任何一次作为预测多孔爆破振动效应的单孔爆破振动波形,假设选取药量为 q_1 的单孔爆破,则第 i 次单孔爆破归一化药量、最大幅值的脉冲函数幅值可分别表示^[33]为

$$x_i = \frac{q_i}{q_1} \quad y_i = \frac{P_i}{P_1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

用最小二乘法拟合单孔爆破试验中最大振动值(脉冲序列的幅值 Y)与最大装药量(实测脉冲幅值 X)之间的关系,即根据已知 n 次单孔爆破的脉冲函数幅值构建任意药量单孔爆破脉冲函数幅值的函数关系,采用

多项式形式的目标函数,即

$$Y = \sum_{j=0}^{n-1} b_j X^j \quad (3)$$

其中 $X = \frac{q}{q_1}$

式中: b_j ——多项式系数; q ——多孔爆破中任意孔药量。

根据式(3)可确定多孔爆破中第 i 个炮孔的脉冲函数幅值 a'_i 可表示为

$$a'_i = \sum_{j=0}^{n-1} b_j \left(\frac{q'_i}{q_1} \right)^j \quad (4)$$

式中: q'_i ——多孔爆破中第 i 个炮孔的装药量。

综上所述,修正的 Anderson 模型可表示为

$$U = U_s \sum_{i=1}^n a'_i \delta(t - t_i) \quad (5)$$

式中: U_s ——单孔爆破试验中测点 x 处的波形。

1.4.3 基于非线性泛函级数的爆破振动效应预测方法

研究表明,在爆源位置与测点位置一定的情况下,测点位置的实测波形与爆炸冲击能量在时域、频域内都不存在比例关系。原因是爆炸荷载施加后,各频率成分传递的能量各不相同,由于岩土介质的不连续性,不同频率在岩土介质中的衰减与耗散的规律完全不同。把爆源至测点间的岩土介质作为一个非线性系统^[34](图1),采用 Volterra 泛函级数描述爆源至测点间岩土介质的非线性系统^[35],即

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \cdot \prod_{i=1}^n [x_i(t - \tau_i) d\tau_i] \quad (6)$$

式中: $y(t)$ ——系统输出,即预测位置的振动波形; $x(t)$ ——输入波形; h ——Volterra 非线性泛函级数的核函数; τ ——积分变量。

为了预测测点处的振动波形,首先要识别 Volterra 非线性系统参数,然后根据标识后的 Volterra 非线性泛函级数预测多孔爆破的测点振动响应^[36]。

为了识别 Volterra 泛函级数的 n 阶核,在爆源位置进行 n 次独立的单孔爆破试验,所谓的独立是指各次爆破试验导致的振动互不影响,即 2 次爆破试验的时间间隔足够长。得到时域核后,系统标识完成。然后,构建多孔爆破的脉冲序列函数作为非线性系统的输入,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^n q'_i \delta(t - t_i) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),以卷积形式表示为

$$y(t) = h_1(t)x(t) + h_2(t,t)x(t)x(t) + \cdots + h_n(t,t,\cdots,t)x(t)x(t)\cdots x(t) \quad (8)$$

式(8)即为利用 Volterra 非线性系统预测测点振动波形的表达式^[34]。

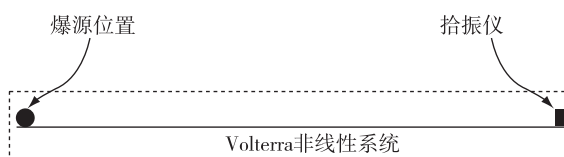


图1 爆源至测点间的 Volterra 非线性系统
Fig. 1 Nonlinear volterra system between blasting sources and measurement points

2 结构对爆破振动响应的分析方法

按照传播路径,爆破振动效应可分为震源至结构地基与结构地基至结构内部 2 个阶段。结构地基振动可采用 1.4 节所述方法预测,得到结构地基的预测波形后,即可预测结构对地基振动的响应。可采用振型分解反应谱法^[37-39](图2)、传递函数法^[40](图3)与时程分析法^[41-43](图4)预报结构的振动响应。

3 评述与展望

由于岩土介质力学特性的复杂性,加之爆炸荷载的瞬态性,爆破振动效应预测是一项非常复杂的工作,现有的方法都存在不同程度的局限性,如基于现场监测数据的统计分析法只采用单一物理量预测,且场地适用性差;动力

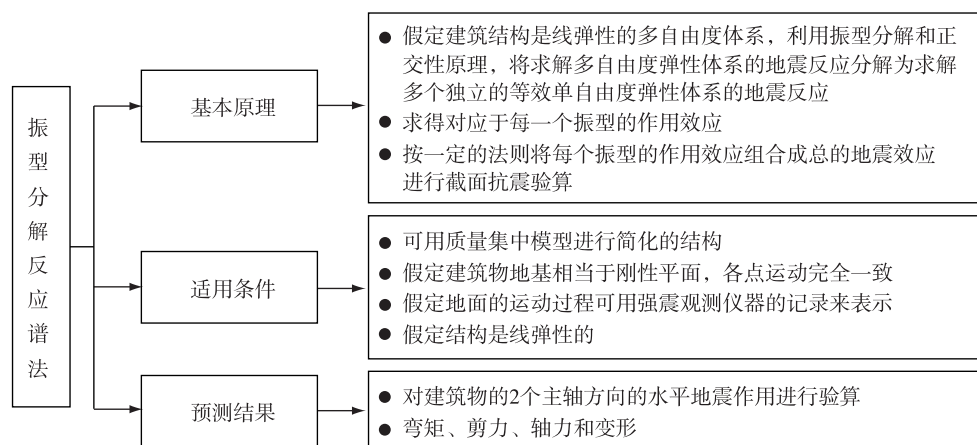


图2 振型分解反应谱法的基本原理、适用条件与预测结果

Fig. 2 Principle, applicable conditions, and predicted results of mode-superposition response spectrum method

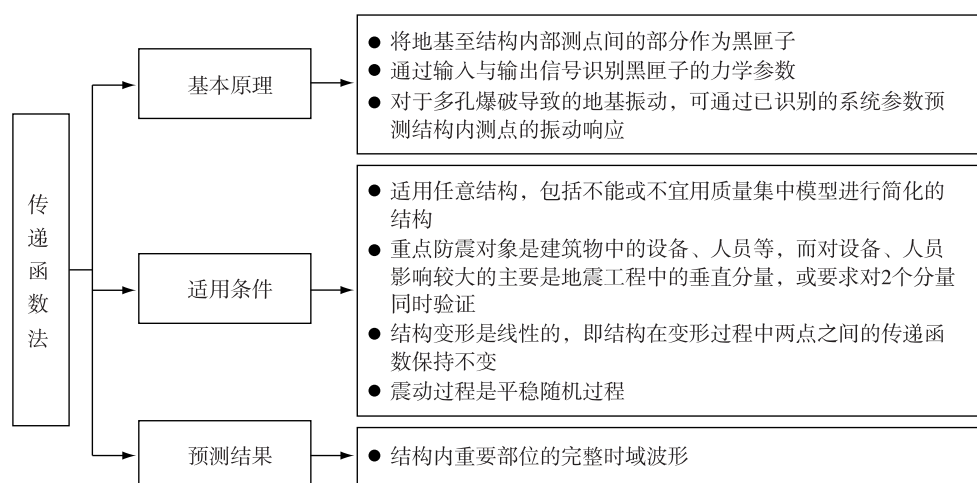


图3 传递函数法的基本原理、适用条件与预测结果

Fig. 3 Principle, applicable conditions, and predicted results of transfer function method

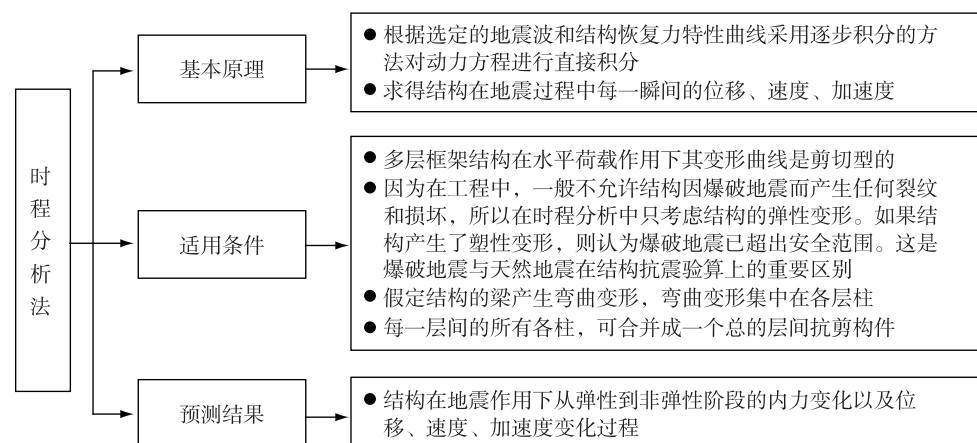


图4 时程分析法的基本原理、适用条件与预测结果

Fig. 4 Principle, applicable conditions, and predicted results of time-history analysis method

分析法与数值模拟方法不便于工程应用;振动历程综合预测法虽然可以预测振动的完整时间历程,可以体现主频、最大峰值质点振动速度等各种信息,但是非线性系统的识别还存在困难。爆破振动效应的预测是否准确关系到爆破工程的施工安全。从当前国内外学者的研究成果看,爆破振动效应预测研究的发展趋势如下:

a. 基于非线性科学理论,建立适合于岩土介质的非线性系统,并提出简便、可行的非线性系统识别方法。

b. 充分利用先进、成熟的数据库与信息技术,建立岩土介质力学特性与爆破振动效应的大型数据库,该数据库不仅具备查询等常规功能,还应具备统计分析、智能预测功能;对于给定爆破设计方案,可根据爆破区地质条件、岩土介质力学特性以及爆破设计预测关心位置的潜在振动效应。

c. 综合采用解析、数值与试验研究等手段,研究爆炸应力波在岩土介质中的传播规律与衰减规律。

d. 充分利用信号处理领域的新成果,采用先进的波形记录分析方法,识别不同介质条件下爆破振动效应的差异,从而为爆破振动效应预测奠定基础。

参考文献:

- [1] 张雪亮, 黄树堂. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [2] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [3] 霍永基. 爆破地震效应及安全评定方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- [4] NATEGHI R. Evaluation of blast induced ground vibration for minimizing negative effects on surrounding structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 43: 133-138.
- [5] YAN Zhixin, YAN Li, JIANG Ping, et al. Prediction methods for blasting-induced ground vibration velocity[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 179-182.
- [6] OTUONYE F O. Response of grouted roof bolts to blast loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1988, 25(5): 345-349.
- [7] CHAKRABORTY A K, GUHA P, CHATTOPADHYAY B, et al. Das a fusion neural network for estimation of blasting vibration[M]. Heidelberg: Springer, 2004.
- [8] KHANDELWAL M, SINGH T N. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine-a neural network approach[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 289: 711-725.
- [9] KHANDELWAL M, SINGH T N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2009, 46: 1214-1222.
- [10] MOSTAFA M T. Artificial neural network for prediction and control of blasting vibrations in Assiut (Egypt) limestone quarry[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, 46: 426-431.
- [11] AMNIEH H B, MOZDIANFARD M R, SIAMAKI A. Predicting of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine by neural network[J]. *Safety Science*, 2010, 48: 319-325.
- [12] ARMAGHANI J D, HAJIHASSANI M, MOHAMAD E T, et al. Blasting-induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12): 5383-5396.
- [13] HINZEN K G. Modelling of blast vibrations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstract*, 1988, 25(6): 439-445.
- [14] GHOSH A, DAEMEN J K. A simple new blast vibration predictor[J]. *US Symposium on Rock Mechanics*, 1983, 7: 151-161.
- [15] ALDAS G G U, ECEVITOGLU B. Waveform analysis in mitigation of blast-induced vibrations[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 66: 25-30.
- [16] SVINKIN M R, ASCE M. Predicting soil and structure vibrations from impact machines[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128: 602-612.
- [17] BLAIR D P. Non-linear superposition models of blast vibration[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2008, 45: 235-247.
- [18] AZIZABADI H R M, MANSOURI H, FOUCHE O. Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 61(7): 42-49.
- [19] HUANG Bo, GAO Quanchen, WANG Jianguo, et al. Dynamic analysis of pile-soil-structure interaction system under blasting load[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 638-640: 433-436.
- [20] FUJIKURA S, BRUNEAU M. Dynamic analysis of multihazard-resistant bridge piers having concrete-filled steel tube under blast loading[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(9): 249-258.
- [21] 陈士海, 魏海霞, 曹孝君, 等. 爆破地震波频率对多自由度弹性体系动力响应的影响分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(11): 150-154. (CHEN Shihai, WEI Haixia, CAO Xiaojun, et al. Effect analysis of blasting seismic wave frequency on dynamic response of a multi degrees of freedom elastic system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(11): 150-154. (in Chinese))
- [22] VAMVATSIKOS D. Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis[D]. Stanford: Stanford University, 2002.

- [23] 周颖, 吕西林, 卜一. 增量动力分析法在高层混合结构性能评估中的应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 183-187, 193. (ZHOU Ying, LYU Xilin, BU Yi. Application of incremental dynamic analysis to seismic evaluation of hybrid structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 183-187, 193. (in Chinese))
- [24] MA Guowei, HAO Hong, ZHOU Yingxin. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions[J]. Engineering Structures, 2000, 22(10): 1378-1389.
- [25] TORANO J, RODRIGUEZ R, DIEGO I, et al. FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33: 15-28.
- [26] WU Chengqing, LU Yong, HAO Hong. Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(1): 93-109.
- [27] WU Chengqing, HAO Hong. Numerical study of characteristics of underground blast induced surface ground motion and their effect on above-ground structures, part I: ground motion characteristics[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(1): 27-38.
- [28] CHEN S G, ZHAO Jian. A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 35(1): 93-99.
- [29] LIU Yaqun, LI Haibo, ZHAO Jian, et al. UDEC simulation for dynamic response of a rock slope subject to explosions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41(3): 599-604.
- [30] ANDERSON D A, RITTER A P, WINZER S R, et al. A method for site-specific prediction and control of ground vibration from blasting[C]//International Society of Explosive Engineers. Proceeding 11th Annual Conference Explosives and Blast Technique, New Orleans: Academic Press, 1985: 94-104.
- [31] BLAIR D P. Blast vibration control in the presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1993, 17(2): 95-118.
- [32] 刘军, 吴敏, 云斌, 等. 环境激励下结构振动效应预测方法研究[J]. 固体力学学报, 2010, 31(增刊1): 143-151. (LIU Jun, WU Min, YUN Bin, et al. Prediction of structure vibration induced by potential ambient excitation[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(Sup1): 143-151. (in Chinese))
- [33] 刘军, 刘汉龙. 建筑结构爆破震动效应的预测方法[C]//中国岩石力学与工程学会. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 798-802.
- [34] SCHETZEN M. The volterra and wiener theories of nonlinear systems [M]. Wiley: Krieger Publishing Company, 1980.
- [35] LIU Jun, ZHANG Yu, YUN Bin. A new method for predicting nonlinear structural vibrations induced by ground impact loading[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331: 2129-2140.
- [36] 孙玉平, 刘军. 结构倒塌触地振动效应非线性预测方法研究[J]. 地下空间与工程报, 2013, 9(5): 1155-1160. (SUN Pingyu, LIU Jun. Research on nonlinear prediction method for touchdown vibration effect induced by structural collapse[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1155-1160. (in Chinese))
- [37] 刘军, 吴从师, 高全臣. 建筑结构对爆破震动的响应预测[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 333-337. (LIU Jun, WU Congshi, GAO Quanchen. A research on predicting structural responses to blasting vibration[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 333-337. (in Chinese))
- [38] 李德林, 方向, 齐世福, 等. 爆破震动效应对建筑物的影响[J]. 工程爆破, 2004, 10(2): 66-69. (LI Delin, FANG Xiang, QI Shifu, et al. Effect of blasting vibration on structures[J]. Engineering Blasting, 2004, 10(2): 66-69. (in Chinese))
- [39] 曹凌飞. 环境激励下结构震动效应预测方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [40] 刘军, 吴从师. 用传递函数预测建筑结构的爆破震动效应[J]. 矿冶工程, 1998, 18(4): 1-4. (LIU Jun, WU Congshi. Predicting blasting vibration effect of buildings using transfer functions[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 1998, 18(4): 1-4. (in Chinese))
- [41] 刘军, 吴从师, 郭子庭. 建筑结构爆破震动荷载的时程分析[J]. 矿业研究与开发, 1999, 19(增刊3): 4-6. (LIU Jun, WU Congshi, GUO Ziting. Structure of blasting vibration load time history analysis [J]. Mining Research and Development, 1999, 19(Sup3): 4-6. (in Chinese))
- [42] 魏文晖, 王勇. 爆破地震波作用下框架结构的非线性动力分析[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2004, 21(1): 10-14. (WEI Wenhui, WANG Yong. Dynamic analysis of frame structures under the blasting seismic wave[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: City Science, 2004, 21(1): 10-14. (in Chinese))
- [43] 刘军, 吴从师. 建筑结构爆破振动响应的时程预测[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 20-22. (LIU Jun, WU Congshi. Predicting time-courses of structural responses to blasting vibration[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2000, 20(4): 20-22. (in Chinese))