

基于小波包分析的建（构）筑物爆破振动安全判据研究

中国生^{1, 2}, 房莹光¹, 徐国元¹, 赵奎²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于现场实测爆破振动数据, 采用小波包分析技术对爆破振动信号进行了时频特征分析。根据小波包变换的分层分解关系, 推导出爆破振动信号不同频带的小波包频带能量, 小波包频带能量能同时反映爆破振动三要素(振动的强度、频率和持续时间)的作用影响。从结构动力响应角度, 探讨了受控建(构)筑物本身的固有特性对爆破振动动态响应的影响, 获得了受控建(构)筑物在爆破振动作用下的频带响应系数。首次建立了能考虑爆破振动的强度、频率和持续时间以及受控建(构)筑物本身的动态响应特性(固有频率和阻尼比)等因素综合的安全判据——响应能量判据, 并用工程实例验证了该判据的可行性和可靠性。

关键词: 爆破振动; 小波包变换; 响应能量; 安全判据

中图分类号: TD235.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)02-0223-06

作者简介: 中国生(1974-), 男, 江西赣州人, 博士后, 副教授, 主要从事岩土工程灾害检测与控制方面的教学与研究。E-mail: zgs1001@163.com。

Safety criterion of blasting vibration for structure based on wavelet packet analysis

ZHONG Guo-sheng^{1, 2}, FANG Ying-guang¹, XU Guo-yuan¹, ZHAO Kui²

(1. School of Civil & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. School of Resources & Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: According to the collected field data of blasting vibration, the time-frequency characteristic analysis for blasting vibration signals is made by use of the wavelet packet analysis technology. According to the multi-resolution decomposition of wavelet packet transform, the wavelet packet frequency band energy is deduced on different bands of blasting vibration signals, and it can reflect the total influence of all the three key elements (the intensity, frequency and duration of vibration) of blasting vibration. Considering the dynamic response of structures, the influence of the inherent characteristics of the controlled structures on the blasting vibration dynamic response is discussed, and the frequency band response coefficients for the controlled structures by blasting vibration are obtained. A safety criterion of multi-factors blasting vibration called response energy criterion is firstly established. The criterion can reflect the total influence of the intensity, frequency and duration of vibration and the characteristics (natural frequency and damping ratio) of dynamic response from the controlled structures themselves. and the feasibility and reliability of the criterion are validated by some practical engineering cases.

Key words: blasting vibration; wavelet packet transform; response energy; safety criterion

0 引言

爆破振动是矿山开采、岩土爆破开挖和城市拆除爆破等爆破工程对周围环境影响无法避免的公害。在评估建(构)筑物爆破振动安全时, 首先必须要有能综合反映爆破振动效应影响因素及其危害实质的安全判据。工程实践表明^[1-2], 以单一的质点振动速度作为衡量爆破地震动强度的唯一指标, 由于没有考虑地震波频率和振动持续时间等因素的影响, 在很多情况下并不能很好地反映建(构)筑物的实际破损情况。研究表明^[3-4], 爆破地震动引起被保护的建(构)筑物的

破坏与结构响应有关的多种因素综合作用的结果, 与爆破地震动引起的质点振动的速度、地震波的频率、持续时间以及建(构)筑物自身的动力响应特性等因素有关。虽然目前国内外都制定了振动速度和频率相结合的爆破振动安全标准, 使安全评价标准更加科学化和合理化。但现行的爆破安全标准仍未将爆破振动的持时和受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20080430836); 江西省教育厅科技项目(GJJ09515)

收稿日期: 2007-12-14

率和阻尼比)考虑在内,因而不可避免地存在一定的缺陷和不足,现行的安全标准仍存在不完善的地方,尽快提出能综合体现爆破振动影响因素的安全判据已提到了各国制订新的爆破安全规程的议事日程,并得到了众多研究者的关注^[5-6]。

本文将运用小波包分析技术,从爆破振动信号小波包频带能量和结构动力响应出发,探讨建立能考虑爆破振动的强度、频率和持续时间,以及受控建(构)筑物动态响应特性等因素综合的安全判据,对准确、合理地评估爆破地震效应具有重要的理论意义和工程实用价值,并用爆破振动实测资料证实了这一方法的可行性。

1 爆破振动信号小波包分析

1.1 小波包分析的特点

小波分析是把信号分解成低频和高频两个部分。在分解中,低频部分失去的信息由高频部分获取,在下一层分解中,又将所分解出的低频部分分解成低频和高频两部分,低频中失去的信息同样由高频部分获取,如此类推下去,可以完成更深层次的分解。从小波分解的结构可以看出,小波变换的频率分辨率随频率升高而降低。小波包分解则不然,它不仅对低频部分进行分解,而且也对高频部分实施分解。小波包分解能根据信号特性和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配,是比小波分解更为精细的一种分解方法。小波包分解是以严密的数学理论和数值计算方法为基础,已有多种著作对此作了详细的论述^[7-8]。为简洁起见,这里不再介绍相关小波包分析的数学原理。

1.2 爆破振动信号小波包分解

将爆破振动信号进行小波包分析时,分解的层数视具体信号及采用的爆破振动分析仪的工作频带而定。本文爆破振动测试采用成都中科动态仪器有限公司研制的 IDTS3850 爆破振动记录仪,最小工作频率

为 1 Hz。由于爆破振动信号的主振频率一般在 200 Hz 以下,根据采样定理^[9],信号的采样频率设为 2000 Hz,则 Nyquist 频率为 1000 Hz。因此,根据小波包分解算法,采用二进尺度变换,可以将分析信号分解到第 9 层,对应的最低频带为 0~1.953125 Hz,爆破振动信号小波包分解后各层重构信号的频带范围见表 1 所示。

1.3 爆破振动信号的小波包频带能量

对爆破振动信号 $s(t)$ 进行小波包分解后,在第 i 分解层可以得到 2^i 个子频带,

$$s(t) = \sum_{j=0}^{2^i-1} f_{i,j}(t_j) = f_{i,0}(t_0) + f_{i,1}(t_1) + \cdots + f_{i,2^i-1}(t_{2^i-1}) \quad (j=0,1,2,\cdots,2^i-1), \quad (1)$$

式中, $f_{i,j}(t_j)$ 为爆破振动信号小波包分解到第 i 层分解节点 (i,j) 上的重构信号。若 $s(t)$ 的最低频率为 0,最高频率为 ω_m , 则在第 i 分解层每个频带的频率宽度为 $\omega_m/2^i$ 。

根据信号谱分析中的 Parseval 定理^[10],由式 (1) 可得爆破振动信号 $s(t)$ 小波包频带能量为

$$E_{i,i}(t_i) = \int_{\mathbb{R}} |f_{i,i}(t_i)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{i,k}|^2, \quad (2)$$

式中, $x_{j,k} (j=0,1,2,\cdots,2^i-1; k=1,2,\cdots,m; m$ 为爆破振动信号离散采样点数)为重构信号 $f_{i,j}(t_j)$ 的离散点幅值。

2 爆破振动安全响应能量判据

2.1 结构体对爆破振动响应分析

爆破地震波可以看成为由一系列正弦波分量叠加合成的,即

$$A(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (3)$$

式中, A_i 为第 i 个正弦波分量的振幅值, ω_i 为第 i 个正弦波分量的频率, φ_i 为第 i 个正弦波分量的初相位。

表 1 爆破振动信号小波包分解系数重构信号各层频带范围

Table 1 The range for frequency band of reconstructed signal of blasting vibration signals by wavelet packet analysis

层数	$S_{i,0}$ /Hz	$S_{i,1}$ /Hz	$S_{i,2}$ /Hz	...	$S_{i,j-1}$ /Hz	$S_{i,j}$ /Hz
1	0~500					500~1000
2	0~250	250~500	500~750			750~1000
3	0~125	125~250	250~375	...	750~875	875~1000
4	0~62.5	62.5~125	125~187.5	...	875~937.5	937.5~1000
5	0~31.25	31.25~62.5	62.5~93.75	...	937.5~968.75	968.75~1000
6	0~15.625	15.625~31.25	31.25~46.875	...	968.75~984.375	984.375~1000
7	0~7.8125	7.8125~15.625	15.625~23.4375	...	984.375~992.1875	992.1875~1000
8	0~3.90625	3.90625~7.8125	7.8125~11.71875	...	992.1875~996.09375	996.09375~1000
9	0~1.953125	1.953125~3.90625	3.90625~5.859375	...	996.09375~998.046875	998.046875~1000

注: $S_{i,j}$ 表示爆破振动信号第 i 层第 j 个小波包分解系数重构信号 ($i=1,2,\cdots,9; j=0,1,2,\cdots,2^i-1$)。

为了简化计算,通常将结构体系假设为单自由度系统,根据力的平衡原理可得^[11]

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \frac{F_i}{m}\sin\omega_it, \quad (4)$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 为结构体系的固有频率, $\xi_0 = c/2m\omega_0$ 为结构体系的阻尼比。

由结构动力学理论可知^[11-12],在爆破振动荷载分量 $F_i\sin\omega_it$ 的作用下,结构体系的动力系数为

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\xi_0^2\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)}}, \quad (5)$$

式中, ω 为爆破振动的激励频率, ω_0 为结构体的固有频率, ξ_0 为结构体的阻尼比。

由此可知,动力系数 β 即为结构体在爆破振动作用下的响应系数,是一个无量纲的物理量。由式(5)可知,受控建(构)筑物在爆破振动作用下的响应系数与其本身的固有频率和阻尼比密切相关,爆破振动的激励频率越接近结构体的固有频率以及结构体的阻尼比越小时,振动响应系数就越大,即振动响应就越大;反之,振动响应就越小,见图1所示。

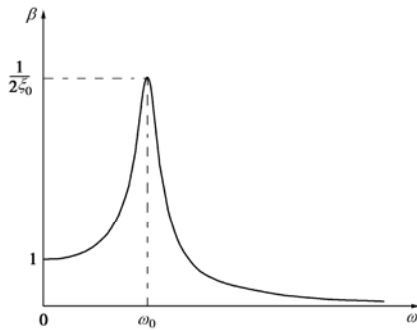


图1 响应系数与固有频率、阻尼比之间的关系

Fig. 1 The relationship among response coefficient, natural frequency and damping ratio

2.2 结构体小波包频带响应系数的确定

假设爆破振动的激励频率为 ω , 受控建(构)筑物的固有频率和阻尼比分别为 ω_0 , ξ_0 , 根据结构体的振动响应系数,可获得建(构)筑物在爆破振动作用下小波包分析的频带响应系数为

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{\omega_m} \int_{\omega_{i,j}^0}^{\omega_{i,j}^1} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\xi_0^2\frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} d\omega, \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_{i,j}$ 为受控建(构)筑物在爆破地震波小波包分解到第 i 层第 j 节点频带作用下的响应系数, ω_m 为爆破地震波的频宽, $\omega_{i,j}^1$ 为爆破地震波小波包分解到第 i 层第 j 节点频带的上限, $\omega_{i,j}^0$ 为爆破地震波小波包分解到第 i 层第 j 节点频带的下限。

由式(6)可知,频带响应系数 $\varepsilon_{i,j}$ 能反映受控建(构)筑物在爆破地震波小波包分解到第 i 层第 j 节点频带作用下的响应程度。

2.3 响应能量判据的提出

爆破引起的地表振动对建(构)筑物破坏的一个重要因素就是地震动输入到结构体中的振动能量。由于爆破振动信号是一种宽带的非平稳随机信号,采用小波包分析技术将爆破振动速度信号在时频域上展开,计算该信号的小波包频带能量,再根据爆破地震波不同频率成分对受控建(构)筑物响应程度的不同,将各个小波包频带的能量乘上相应频带作用下的响应系数后累加,即可获得受控结构体在爆破振动作用下的响应能量:

$$E_R = \sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,i}(t_i) \varepsilon_{i,i}, \quad (7)$$

式中, $E_{i,i}(t_i)$ 为爆破振动信号小波包分解到第 i 层的第 j 节点的频带能量, $\varepsilon_{i,i}$ 为受控建(构)筑物在爆破地震波小波包分解到第 i 层第 j 节点频带作用下的频带响应系数。

文献[13]研究表明,小波包频带能量能同时反映爆破振动的强度、频率和持续时间的作用影响,而频带响应系数又能反映受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频率和阻尼比)对爆破振动的响应程度。因此,在此基础上建立的响应能量判据,必将能考虑振动的强度、频率和持续时间以及受控建(构)筑物的动态响应特性等综合因素,能准确和全面地描述爆破振动对受控建(构)筑物的影响程度。

3 工程实例分析

3.1 爆破振动测试

为了验证爆破振动响应能量判据的准确性和实用性,笔者在某露天金属矿进行了爆破振动现场测试。为了使监测结果更有针对性,特地选取了同一结构类型的建筑物作为爆破振动的监测对象,爆破振动前,受控建筑物的状况均为完好无损。大量实测资料表明^[13-14],采用质点振动速度作为衡量和描述爆破振动强度的标准,比采用位移和加速度更有利于排除土壤因素的影响,且与受控建(构)筑物的破坏特征的相关性更好。文献[13]研究表明,在高差不大和近距离范围的情况下,一般是垂直质点振动速度对爆破振动起控制作用,在实地测试中水平振速仅为垂直振速的50%左右。因此,本文的爆破振动测试,选择垂直方向的质点振动速度作为监测的物理量。因此,本次爆破振动测试选择垂直方向的质点振动速度作为监测的物理量。爆破振动监测时,各测点的拾振器均布置在受控建筑物的基岩上,爆破振动测试的结果见图2和表2。

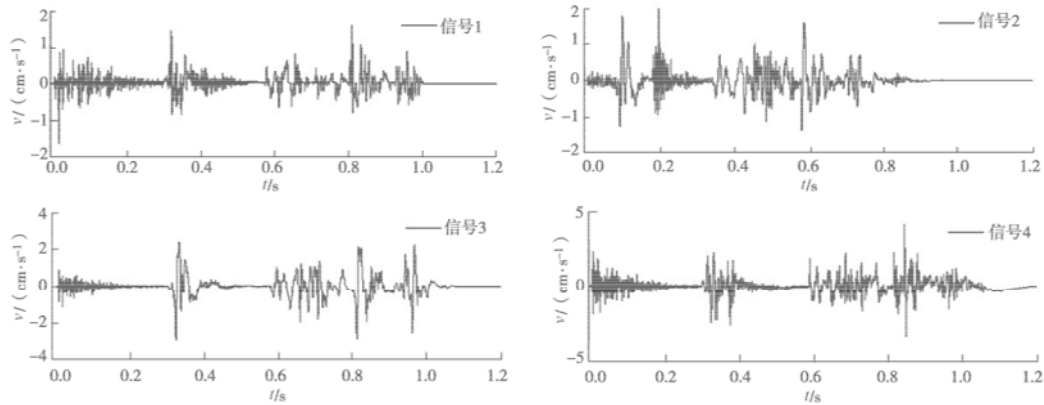


图 2 实测爆破振动速度时程曲线

Fig. 2 The monitoring velocity history curves of blasting vibration

表 2 爆破振动监测结果

Table 2 The monitoring results of blasting vibration

测点 编号	受 控 建筑物	结构 类型	PPV /(cm·s ⁻¹)	主频 /Hz	爆破后状况
1	民房A	砖石	1.6392	6.8359	墙体出现细微裂缝
2	民房B	砖石	1.988	21.4844	没发现任何破坏
3	民房C	砖石	2.8948	30.2734	没发现任何破坏
4	公房	砖石	4.1504	47.8516	没发现任何破坏

3.2 我国现行的爆破振动速度-频率安全判据分析

根据《爆破安全规程》^[15] (以下简称《规程》), 见表 3 所示, 可以得出以下 3 点结论。

表 3 2003 年我国制定的爆破振动安全标准

Table 3 Safety criterion of blasting vibration established in China in 2003

保护对象类别	安全允许振速/(cm·s ⁻¹)		
	<10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
土窑洞、土坯房和毛石房屋	0.5~1.0	0.7~1.2	1.1~1.5
一般砖房、非抗震的大型砌块	2.0~2.5	2.3~2.8	2.7~3.0
钢筋混凝土结构房屋	3.0~4.0	3.5~4.5	4.2~5.0
一般古建筑与古迹	0.1~0.3	0.2~0.4	0.3~0.5
水工隧道		7~15	
交通隧道		10~20	
矿山巷道		15~30	

(1) 在本次爆破振动中, 第 2 和第 3 测点的监测结果均在《规程》规定的范围之内, 这 2 个测点处的建筑物没有受到爆破振动的破坏, 这是因为《规程》是建立在大量建(构)筑物爆破振害的调查统计基础上, 具有重要的参考价值。

(2) 第 1 测点的监测结果尽管符合《规程》的规定, 但该处的民房 A 仍然受到了破坏, 第 4 测点的监测结果虽然超过《规程》的规定, 但该处的公房并没有受到破坏。因此,《规程》在工程应用方面还存在一定的局限和不足。

(3)《规程》虽然充分考虑了爆破振动频率对受控建筑物的影响, 但它忽视了振动持时和受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频率和阻尼比)对爆破振动效应的影响。因此, 不可避免会出现上述情况。

3.3 爆破振动安全响应能量判据评价

(1) 计算受控建筑物的响应能量

采用响应能量判据进行分析, 首先必须获得上述 4 幢受控建筑物在爆破振动作用下的响应能量, 可按下列步骤计算求得: ①应用脉冲法和振动分析, 可求得 4 幢受控建筑物的动态响应特性参数, 见表 4 所示; ②由图 1 可知, 爆破地震波在受控建筑物固有频率附近的频带, 对受控建筑物的作用影响最大, 因此, 使用小波包技术只需提取爆破振动信号接近于表 4 中受控建筑物固有频率的 6 个频带为 0~1.953125 Hz、1.953125~3.90625 Hz、3.90625~5.859375 Hz、5.859375~7.8125 Hz、7.8125~9.765625 Hz、9.765625~11.71875 Hz; ③按式(2)分别计算图 2 中的爆破振动信号上述 6 个频带的小波包能量; 根据表 4 中的受控建筑物动态响应特性参数, 再按式(6)分别计算受控建筑物相应的频带响应系数, 最后按式(7)计算受控建筑物在爆破振动作用下的响应能量, 见表 5 所示。

表 4 受控建筑物的动态响应特性参数

Table 4 Parameters of dynamic response for the controlled structures

受控建筑物	结构类型	层数	固有频率 ω_0 /Hz	阻尼比 ξ_0
民房A	砖石	一层	6.6	0.041
民房B	砖石	一层	5.6	0.044
民房C	砖石	二层	4.5	0.043
公房	砖石	一层	5.2	0.045

表 5 受控建筑物在爆破振动作用下的响应能量
Table 5 The response energy for the controlled structures by blasting vibration

频带/Hz	信号 1, 民房 A		信号 2, 民房 B		信号 3, 民房 C		信号 4, 公房	
	$E_{9,j}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	$\varepsilon_{9,j}$	$E_{9,j}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	$\varepsilon_{9,j}$	$E_{9,j}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	$\varepsilon_{9,j}$	$E_{9,j}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	$\varepsilon_{9,j}$
0~1.953125	0.001816	1.030712	0.000921	1.043593	0.000945	1.070673	0.000268	1.051206
1.953125~3.90625	0.001989	1.267176	0.001315	1.425136	0.001835	1.958017	0.000358	1.539557
3.90625~5.859375	0.0022482	2.425217	0.001184	5.291727	0.0017233	5.085784	0.001490	5.650733
5.859375~7.8125	0.0025943	6.600689	0.000965	2.596737	0.001056	0.821632	0.000864	1.576126
7.8125~9.765625	0.000804	1.387471	0.003457	0.708562	0.004765	0.363630	0.008099	0.554893
9.765625~11.71875	0.001072	0.619260	0.002469	0.378874	0.004318	0.215403	0.005785	0.310257
$E_R/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	0.028746		0.014992		0.016899		0.016906	

(2) 爆破振动响应能量判据分析

对表 5 中的 4 幢受控建筑物响应能量进行分析, 可以得出以下结论: ①根据现行的速度-频率安全标准可知, 民房 A 应该没有被爆破振动破坏, 而公房应该被爆破振动破坏, 按响应能量判据分析可知, 民房 A 的响应能量 (0.028746) 大于公房的响应能量 (0.016906), 因而民房 A 受到爆破振动的影响比公房大, 民房 A 更易受到爆破振动的破坏, 因此, 响应能量判据比速度-频率判据更准确、更全面地描述爆破振动对受控建(构)筑物的影响程度; ②由表 5 可知, 民房 A 的响应能量 (0.028746) 最大, 远大于民房 B (0.014992)、民房 C (0.016899) 和公房 (0.016906) 的响应能量, 且 4 幢建筑物均为砖石结构, 由于民房 A 的响应能量大于砖石结构类型响应能量的破坏阈值, 而民房 B、民房 C 和公房的响应能量均小于其破坏阈值, 因而, 只有民房 A 受到了爆破振动的破坏, 其余 3 幢建筑物则完好无损, 因此, 响应能量判据的分析结果与实际爆破振动的监测结果是完全相符合的。

4 结 论

基于爆破振动信号小波包频带能量以及受控结构体对爆破振动动态响应特征, 探索建立了能考虑振动的强度、频率和持续时间以及受控建 (构) 筑物动态响应特性等多因素综合的安全判据——响应能量判据。并通过工程实例对响应能量判据进行了验证, 得出的主要 3 点结论。

(1) 我国现行的《爆破安全规程》虽然充分考虑了振动频率对受控建 (构) 筑物的影响, 但它也忽视了振动持时以及受控建 (构) 筑物本身的固有特性 (固有频率和阻尼比) 对爆破地震效应的影响。因而, 现行的速度-频率判据存在不完善的地方。

(2) 响应能量判据能同时反映爆破振动的强度、

频率和持续时间以及受控建 (构) 筑物动态响应特性等因素的综合影响, 因而能准确、全面地描述爆破振动对建 (构) 筑物的影响程度, 比现行的速度-频率安全判据更加科学和合理。但各种结构类型建 (构) 筑物响应能量的破坏阈值, 尚需通过大量爆破振动实测数据加以确定。

(3) 爆破振动安全响应能量判据的建立需要大量的、各行业爆破振动实测资料支持。本文所做的研究工作为最终构建完整的、科学的爆破振动多因素综合安全判据奠定了理论和技术基础。

参考文献:

[1] 阳生权, 廖先葵, 刘宝琛. 爆破地震安全判据的缺陷与改进[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(3): 223 - 228. (YANG Sheng-quan, LIAO Xian-kui, LIU Bao-chen. Default of the judging standard of blasting vibration safety abastract[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 223 - 228. (in Chinese))

[2] 汪旭光, 于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题[J]. 工程爆破, 2001, 7(2): 88 - 92. (WANG Xu-guang, YU Ya-lun. On several problems of safety criterion for blasting vibration[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(2): 88 - 92. (in Chinese))

[3] 李仲奎, 王爱民, 李送成. 某地下厂房施工过程中突发性破坏的分析及对策[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 74 - 79. (LI Zhong-kui, WANG Ai-min, LI Song-cheng. Analysis for a triggered collapse in construction of a underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 74 - 79. (in Chinese))

[4] 中国生, 徐国元, 熊正明. 基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 222 - 227. (ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, XIONG

- Zheng-ming. Application research of the energy analysis method for blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 222 - 227. (in Chinese))
- [5] 李宏男, 王丙乾, 林 皋. 爆破地震效应若干问题的研究[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 61 - 67. (LI Hong-nan, WANG Bing-qian, LIN Gao. Studies on some problems on explosion earthquake responses[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(1): 61 - 67. (in Chinese))
- [6] 陈 明, 卢文波, 易长平, 等. 大型地下厂房岩锚梁爆破安全控制标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 499 - 504. (CHEN Ming, LU Wen-bo, YI Chang-ping, et al. Research on safety standard for rock anchor beam under blasting vibration in large underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 499 - 504. (in Chinese))
- [7] MALLAT S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions Pattern Anal Machine Intell, 1989, 11(7): 674 - 693.
- [8] 胡昌华, 张军波, 夏 军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. (HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, XIA Jun, et al. System analysis and design based on MATLAB wavelet analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999. (in Chinese))
- [9] 邹云屏, 李 潇. 信号变换与处理[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. (ZOU Yun-ping, LI Xiao. Signals transform and processing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [10] 周德廉, 邵国友. 现代测试技术与信号分析[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005. (ZHOU De-lian, SHAO Guo-you. Modern testing technique and signal analysis[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [11] 俞载道. 结构动力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. (YU Zai-dao. Structural dynamics foundation[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987. (in Chinese))
- [12] DOWDING C H. Construction vibration[M]. Trenton: Prentice Hall Press, 1996.
- [13] 中国生. 基于小波变换爆破振动的应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006. (ZHONG Guo-sheng. Applied fundamental research of blasting vibration analysis based on wavelet transform[D]. Changsha: Central South University, 2006. (in Chinese))
- [14] 吴 立, 陈建平, 舒家华. 论爆破地震效应[J]. 爆破器材, 1999, 28(5): 24 - 27. (WU Li, CHEN Jian-ping, SHU Jia-hua. Seismic effect by blasting[J]. Explosive Materials, 1999, 28(5): 24 - 27. (in Chinese))
- [15] GB6722—2003 爆破安全规程[S]. 2003. (GB6722—2003 Blasting safety rules [S]. 2003. (in Chinese))

中国土木工程学会西部特殊土与工程会议（征文通知）

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会拟定于 2009 年 12 月在陕西西安召开中国“西部特殊土与工程”学会会议。

主办单位: 中国土木工程学会土力学与岩土工程分会。

承办单位: 西安理工大学, 陕西省黄土力学与工程重点实验室。

协办单位: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 长安大学, 中国公路交通第一勘察设计院, 机械工业勘察研究院, 西北农林科技大学, 西安科技大学, 西安建筑科技大学。

会议主题: 西部特殊土研究与工程应用。本次会议将围绕西部一般土、黄土、冻土、膨胀土、盐渍土、软土、沙漠土、砂卵石覆盖层及高地应力岩体力学等, 针对土的力学特性、测试技术、地基处理技术、边坡与滑坡、地下工程和高地应力岩

体力学特性等进行广泛的学术交流。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿与参加会议。

征文内容: ①一般土的工程性质; ②特殊土的力学特性; ③土的测试技术; ④特殊土地基处理技术; ⑤岩土边坡与滑坡; ⑥岩土工程抗震; ⑦岩土分析理论及数值计算方法; ⑧岩土地下工程; ⑨高地应力岩体力学特性与工程。

重要日期: 2009 年 5 月 30 日论文投稿截止, 2009 年 6 月 30 日论文修稿通知, 2009 年 7 月 30 日论文修改稿截止。

联系方式: 刘奉银 (西安理工大学水电学院岩土工程研究所, 西安市金花南路 5 号 710048); 电话: (029)82312209, 13891849006; 投稿 E-mail: geoxaut@gmail.com。

(大会组委会 供稿)