

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.010

# 爆破振动作用下单层砖混房屋结构的动态响应\*

马海越<sup>①②</sup> 张云鹏<sup>①②</sup> 刘宏颖<sup>①②</sup> 刘永亮<sup>①②</sup>

①华北理工大学河北省矿业开发与技术重点实验室(河北唐山,063210)

②华北理工大学矿业工程学院(河北唐山,063210)

**[摘要]** 以单层砖混房屋为研究对象,应用有限元软件 ANSYS 建立了单层砖混房屋的数值模型。将实测地震波输入模型,分析了地震波引起的房屋结构的位移特征。根据小波包原理分析了实测房屋框架柱频域能量,构造了3种谐波加载到房屋模型,研究不同频域下房屋结构的速度响应。计算结果表明,单层砖混房屋的底部与顶部位移较大,门窗附近位移较为明显,框架柱顶端位移最大。实测发现,地基和建筑各结构能量大部分集中在7.81~37.50 Hz。构造了5、10、25 Hz 3种频率的地震波,加载到模型后发现,在高频爆破振动下,单层砖混房屋后山墙较前山墙受爆破振动影响较大;门窗与框架柱之间容易产生超越安全允许振速的情况;分析了后山墙左侧窗上带测点的频域分布,发现频带能量主要分布在0~15.63 Hz 区间。

**[关键词]** 爆破振动;砖混结构;结构动态响应

**[分类号]** TD235.1

## Dynamic Response of Single-layer Masonry-concrete Building under Blasting Vibration

MA Haiyue<sup>①②</sup>, ZHANG Yunpeng<sup>①②</sup>, LIU Hongying<sup>①②</sup>, LIU Yongliang<sup>①②</sup>

① Mining Development and Safety Technology Key Lab, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063210)

② College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063210)

**[ABSTRACT]** A numerical model of single-layer masonry-concrete houses was established by using the finite element software ANSYS. The observed seismic wave was input into the model to analyze displacement characteristics of the structure caused by the seismic wave. According to the principle of wavelet packet, the measured frequency domain energy of frame column was analyzed, and three kinds of harmonic loads were constructed to study the speed response of the building structure in different frequency domain. Results show that the displacement of the bottom and the top of the single-layer masonry-concrete house is larger, the displacement near the doors and windows is obvious, and the displacement at the top of the frame column is the largest. It is found that the energy of foundation and building structures is concentrated in 7.81-37.50 Hz. Seismic waves of 5, 10, 25 Hz were constructed. After loading into the model, it is found that under the high frequency blasting vibration, the rear gable of single-layer masonry-concrete house is more affected by the blasting vibration than the front gable. It is easy to exceed the safety allowable vibration speed between doors and windows and frame columns. The frequency domain distribution of measurement points on the window on the left window of the rear gable was analyzed, and it is found that the frequency band energy mainly distributed in the range of 0-15.63 Hz.

**[KEYWORDS]** blasting vibration; brick-concrete structure; structural dynamic response

## 引言

爆破开采具有效率高、成本低的特点,已经成为

了我国矿山主要的采矿方法。而绝大多数矿山周围都有村庄分布,爆破引发的地震波不可避免地会对周边群众的生产、生活造成困扰。与自然地震相比,爆破地震振动频率较高,一般为10~30 Hz,大大超过

\* 收稿日期:2019-07-07

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2016209388);河北省教育厅项目(ZD2015020)

第一作者:马海越(1994-),男,硕士,主要从事安全管理与评价等领域研究。E-mail:1309132@163.com

普通建筑物的自振频率。单层砖混作为一种古老的建筑结构,仍被我国农村地区广泛采用。因此,有必要研究爆破振动作用下单层砖混房屋结构的动态响应,为其抗震设计提供参考。

相关学者对此开展了科学研究。赵学龙等<sup>[1]</sup>利用线性回归分析了矿区建筑物附近的测震数据,再利用萨道夫斯基(萨氏)公式预测了垂直振动速度。张梦雅等<sup>[2]</sup>监测了磷矿爆破现场附近一所小学的振动,提出了修正后的萨氏公式,以反映爆破振动波传播规律,用于指导矿山施工。操鹏等<sup>[3]</sup>监测了矿山爆破附近的多层建筑物的振动发现,垂直方向振动速度随楼层的增加而变大,水平方向振动速度随楼层高度的增加而变小。谢承煜等<sup>[4]</sup>由爆破振动监测得出振动波传播衰减规律后,结合动力有限元数值分析进行验证发现,加速度与动力响应的变化规律与趋势基本相似。林键等<sup>[5]</sup>使用小波包等方法分析了现场实测爆破地震波与 3~4 层房屋的结构振动响应发现,随着楼层的增加,质点峰值振速放大,持续时间减小。但是,房屋建筑结构在爆破地震下的动态响应亟待深入研究。现有的安全规程对建筑结构振动响应的特征分析和安全评估也存在一定的局限<sup>[6-10]</sup>。

为了模拟单层砖混房屋在爆破振动作用下的动态响应,需先分析单层砖混房屋的固有特性<sup>[11]</sup>。叶海旺等<sup>[12]</sup>对一栋 4 层砌体房屋进行实测与 ANSYS/LS-DYNA 仿真模拟发现,垂直方向振速与实测数据一样,呈现先降低后增大的规律。陈士海等<sup>[13]</sup>在 ANSYS 中建立了 3 层砌体房屋模型,将位于房屋靠近爆源侧 1 层楼面测点的实测 3 方向振速时程曲线加载到有限元模型中,数值模拟结果与实测的 3 点对比后发现,大部分峰值振速结果相近。

本文中,采用有限元动力分析方法 ANSYS 对单层砖混房屋建模,将现场实测房屋地基处的地震波施加到模型中,获取房屋的位移分布,根据小波包原理分析频域能量,构建 3 种不同的频域谐波加载到模型,分析探讨单层砖混房屋各结构峰值振速的变化规律。

## 1 房屋概况及爆破振动测试

### 1.1 监测点概况

位于唐山某铁矿露天采场北侧约 200 m 处有 20 多间砖混结构民房,受爆破振动影响较大,有部分民房墙体可见细微裂纹。选定一处附近地势较为平缓的单层砖混民房进行爆破振动监测。

所测房屋外墙体裂纹主要集中在墙与房顶连接处(如图 1 所示);同时,房屋的门、窗上部裂纹也比较多。



图 1 墙-顶连接处裂纹

Fig. 1 Crack in wall-top joint

房屋邻近的露天铁矿采用逐孔起爆方式爆破开采,炮孔内、外分别采用高、低段位延时。露天采场台阶高 14.0~15.5 m,炮孔直径为 310 mm,孔深为 16.0~17.5 m,填塞长度为 7.0~7.5 m,炸药为铵油、乳化炸药,孔内间隔装药,监测期间最大起爆装药量为 120 kg。

监测点布置如图 2 所示。传感器布置在房屋正面左侧处, $X$ 轴均指向爆源,3 个测点沿框架柱直线排列,从上到下依次为  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ ,测点间距 80 cm,距左侧墙角 20 cm,用速凝石膏将三轴传感器黏合在墙体上,确保其不发生晃动;地基处测点  $B_0$  距房屋外墙 2 m,与房屋测点保持同一直线,传感器固定在配套的铁制底托上,将铁钎插入地面,确保其稳固后与底托拧紧。测振设备采集极限频率为  $1.6 \times 10^4$  Hz,触发电频 0.02 m/s,记录时长 2 s。



图 2 监测点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monitoring points

### 1.2 现场监测结果

如图 3 所示,在  $Y$  方向(墙体切线方向),随着高度的增加, $B_4$  测点在 0.626 6 s 达到峰值振速 0.175 7 cm/s, $B_3$  测点在 0.627 3 s 达到峰值振速 0.271 5 cm/s, $B_2$  测点在 0.628 3 s 达到峰值振速 0.390 1 cm/s。

将地基处监测到的振速时程曲线定义到 ANSYS 软件中,如图 4 所示,作为数据输入到建立好的模型地基处。

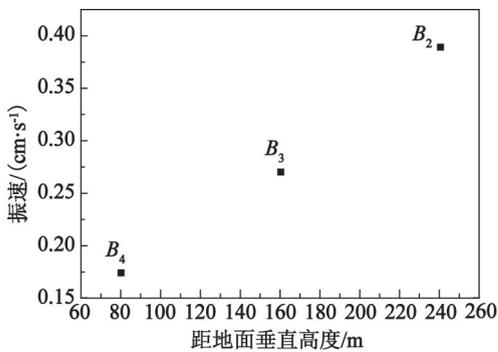


图3 Y方向各测点振速随高度的变化

Fig. 3 Vibration velocity variation with height at each measuring points in Y direction

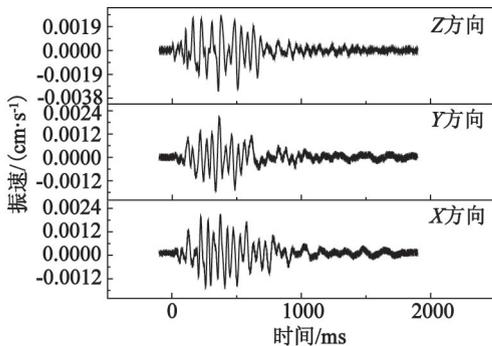


图4 地基处测点的三向振速时程曲线

Fig. 4 Time history curve of three-way vibration velocity of ground-based measuring points

## 2 建筑结构模型的建立

在 ANSYS 中建立以房屋底面为中心,分为地基、混凝土梁(柱)、砖砌体 3 部分的简化房屋三维模型。单位采用  $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ ,选择 Solid164 单元。地基长 8.9 m、宽 7.7 m、高 10.0 m;房屋长 6.9 m、宽 5.7 cm、高 3.9 m,顶底部圈梁和框架柱截面  $36.5 \text{ cm} \times 36.5 \text{ cm}$ ;房屋正面门宽 1.0 m、高 2.0 m;正面窗宽 1.2 m、高 1.5 m、距地面 0.5 m;室内门高 2.0 m、宽 1.0 m;后墙开窗均为宽 1.0 m、高 0.5 m、距地基 2.4 m。

相对于墙体刚度,单层砖混结构房屋屋面刚度很小,屋面可以近似认为具有保温、维护及传递上部屋面载荷的作用<sup>[14]</sup>,所以建立的简化房屋三维模型没有屋面。

砖砌体结构和地基部分定义为 \* Mat\_Plastic\_Kinematic,对应变率采用 Cowper-Symonds 模型<sup>[15]</sup>。模型顶底圈梁和框架柱为混凝土材质,定义为 \* Mat\_Soil\_And\_Foam。模型的主要参数见表 1。

## 3 计算结果分析

分析有限元模型在爆破振动作用下引起的位移特征,选取位移较大的位置进行谐响应分析,进而确定能量分布较为集中的频带,构建该频带下的不同谐波加载,研究该房屋模型在爆破振动作用下的振速响应规律。

由于竖向振动对结构的影响较大<sup>[16-17]</sup>,因此以竖直方向(Y方向)为例进行分析。

### 3.1 爆破振动引起的结构位移特征

图 5 是由房屋地基处测点输入模型后的房屋竖直方向的位移(峰值振速  $1.5 \text{ m/s}$ )。可以看出,位移主要集中在底部与顶部,门窗周围位移较为明显。最大位移为  $10.75 \text{ cm}$ ,发生在房屋 4 个顶角,即框架柱顶端;墙体位移发生在窗下带与框架柱连接处;窗下带和窗间墙处的最大位移达到了  $3.75 \text{ cm}$ 。

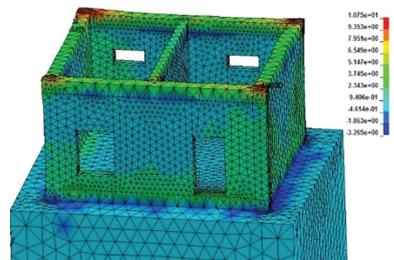


图5 房屋结构垂直方向的位移云图

Fig. 5 Displacement distribution in vertical direction

为了进一步研究在爆破振动时门窗开洞对房屋结构的影响,需构造相同峰值振速时不同频率的波形,通过谐响应分析研究破坏程度和破坏形式。

### 3.2 谐响应分析

#### 3.2.1 基于小波包分解的频域能量分析

爆破地震波是一种典型的非平稳信号,适合能够给出时-频分布的小波包分析方法。通过分析地震波信号的能量分布特征,可以得出不同频带上能

表1 模型的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the model

材料	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/MPa	硬化系数
黏土砖	2.60	40.00	0.30	0.001 0	0.040	0.50
杂填土	2.65	0.40	0.30	0.000 1	0.004	0.50

量的分布<sup>[18-19]</sup>,从中提取能量较为集中的频带,构造对应的激励分量,由此确定爆破地震对单层砖混房屋结构的影响。

用 db8 小波基分析方法对现场 4 个测点 Y 方向振速数据降噪<sup>[12]</sup>,得到不同频域内的能量分布,分析同一次爆破振动时房屋不同测点能量分布特征。

因为爆破地震的特性频率小于 200 Hz,经远距离传播后大部分集中在中、低频,所以做 10 尺度的分解,得到对应频带宽度 7.812 5 Hz,前 100 个频段谱图如图 6。分析 4 个测点的能量比例后发现,能量响应频率大部分位于前 20 个频段,对其进行归一化处理后如图 7 所示。

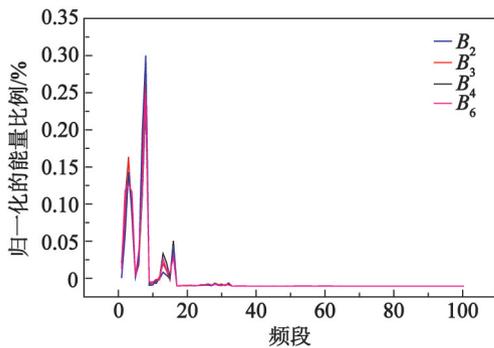


图 6 Y 方向各测点在频域的能量分布

Fig. 6 Energy distribution of four measuring points in Y direction in the frequency domain

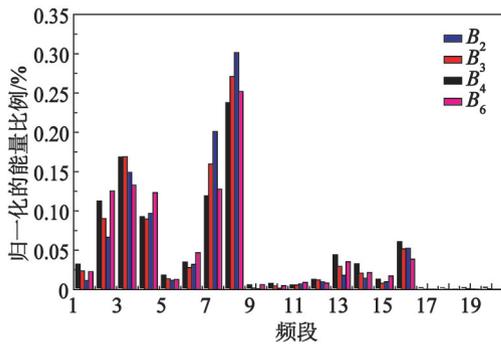


图 7 0~93.75 Hz 各测点的归一化能量分布

Fig. 7 Normalized energy distribution of four measuring points from 0 to 93.75 Hz

分析后发现,能量大部分集中在 7.81~37.50 Hz。图 8 中,5、10、25 Hz 单一频率成分正弦波,振幅均为 1.5 cm/s,输入到数值模型地基处,研究相同振幅、不同频率下房屋各结构响应规律。

数值模型地基处,在 ANSYS 软件中利用 GUI 操作 Parameters > Array Parameters > Define/Edit 建立持续时间为半周期的垂直方向振动谐波,计算步长均为 100 μs,5 Hz 正弦波加载计算时间为 100 000 μs,10 Hz 正弦波加载计算时间为 50 000 μs,25 Hz

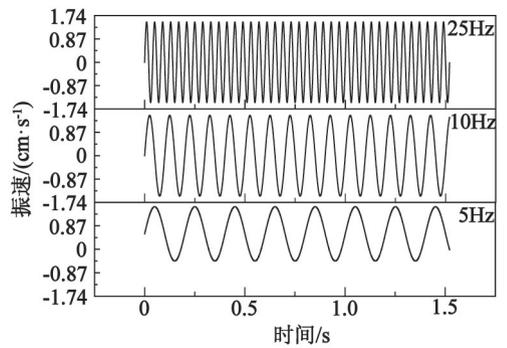


图 8 构造 3 阶频率的正弦振速数组

Fig. 8 Construct a sinusoidal array of the third-order frequency

正弦波加载计算时间为 20 000 μs。随后,再通过 Parameters > Array Parameters > Read From File 分别读取建立的 3 组不同频率的正弦波文件。

### 3.2.2 不同谐波振动加载结构速度响应特征

在前山墙窗、门上方设 2 个监测点 1# 和 2#,后山墙两间窗上方各设 2 个监测点 3# 和 4#,对模型加载地基处测点所测原始波形与构造的 5、10、25 Hz 的正弦波形,研究各测点的速度响应规律,见图 9。

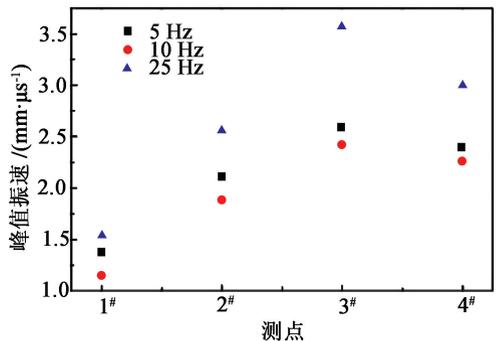


图 9 测点峰值振速

Fig. 9 Measured peak velocities

在不同谐波振动加载下,后山墙左侧窗上方峰值振速最大,且后山墙左侧顶部振速较为显著。房屋前山墙振速大部分小于房屋后山墙振速,并且振速放大的部位大部分集中在房屋框架柱位置。

将 GB6722—2014《爆破安全规程》作为质点峰值振速和主振频率的判据,对该单层砖混结构建筑进行振速分析。

由图 10 可以看出,原始振动信号输入后,房屋峰值振速为 0.63 cm/s,远远小于房屋爆破振动允许标准,房屋结构不会发生破坏。在 5 Hz 谐波加载下,房屋门右侧、后山墙左侧窗左上侧与右侧窗右上侧均存在不同程度的超越安全允许的振速,节点最大峰值振速出现在房屋后山墙左侧墙根处,为 3.037 cm/s;在 10 Hz 谐波加载下,房屋前山墙左侧、门右

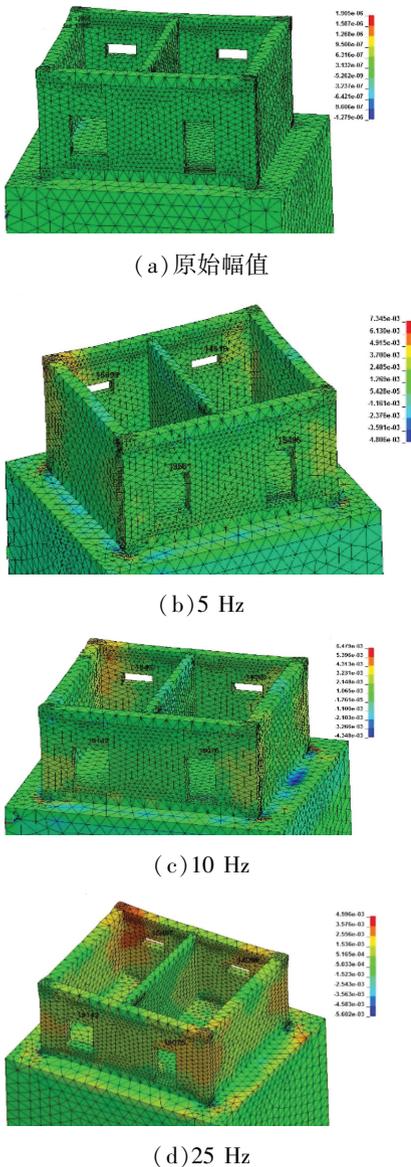


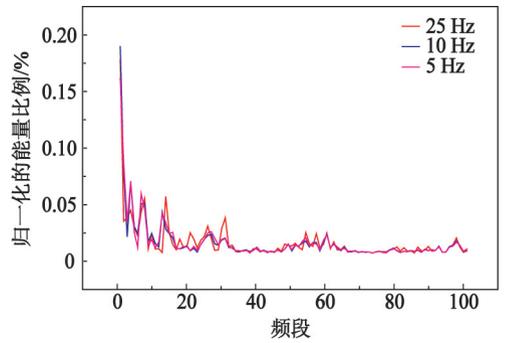
图10 不同谐波振动加载的房屋振速响应

Fig. 10 Vibration velocity response under different harmonic vibration loads

侧、后山墙左侧窗左侧与上侧、右侧窗右侧产生超越安全允许的振速,其中后山墙左侧窗框架柱附近峰值振速较大,为 $3.647 \text{ cm/s}$ ;在 $25 \text{ Hz}$ 谐波加载下,房屋4个转角周围均产生超越安全的振速,其中后山墙左侧顶部较为显著,最大值为 $4.590 \text{ cm/s}$ 。

### 3.3 结构响应频域特征分析

3.2节中,后山墙左侧窗上带(3#测点)加载不同频率的正弦波后,振速较其他3个测点大。由此,对3#测点的垂直方向振速做频域能量谱分析。经10层小波包分解后,将前100频段能量归一化,如图11所示。可以看出,3#测点垂直方向受不同频率激励,各频带能量大部分集中在 $0 \sim 15.63 \text{ Hz}$ ,即第一频带,其他频段幅值随激励频率增加变化不显著。

图11 不同频率激励下3#测点的频域能量分布  
Fig. 11 Energy distribution of Point 3# in frequency domain under different frequency excitations

## 4 结论

1)将实测地基地震波输入到数值模型后发现,房屋位移集中在底部与顶部,门窗开洞对位移分布影响较为明显,最大位移发生在框架柱顶端。

2)经现场实测发现,地基和框架柱能量大部分集中在 $7.81 \sim 37.50 \text{ Hz}$ ,在高频爆破振动下,单层砖混房屋后山墙较前山墙受爆破振动影响较大,门窗与框架柱之间容易产生超越安全允许的振速,矿区附近的类似结构建筑应当经常检查、加固这些部位,避免房屋结构产生破坏。

3)由后山墙左侧窗上带测点的频域分布发现,频带能量主要分布在 $0 \sim 15.63 \text{ Hz}$ ,在爆破作业时应当避免该频域范围内的地震波作用于此类建筑。

## 参考文献

- [1] 赵学龙,郝家旺.某矿区爆破振动对邻近建筑稳定性影响研究[J].矿业研究与开发,2018,38(7):48-51. ZHAO X L, HAO J W. The influence of blasting vibration on adjacent buildings stability in a mining area[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(7):48-51.
- [2] 张梦雅,龙祖根,唐志鹏,等.露天矿爆破震动对周边建筑物的影响研究[J].矿业研究与开发,2017,37(4):17-19. ZHANG M Y, LONG Z G, TANG Z P, et al. Influence of blasting vibration in open-pit mine on the surrounding buildings [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(4):17-19.
- [3] 操鹏,钟冬望,何理,等.露天矿微差爆破振动对多层建筑的影响[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2015,38(2):122-124,151. CAO P, ZHONG D W, HE L, et al. Effect of millisecond blasting vibration in open-pit mine on the multi-

- storey building [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2015,38(2):122-124,151.
- [4] 谢承煜,罗周全,贾楠,等. 露天爆破振动对临近建筑的动力响应及降振措施研究[J]. 振动与冲击,2013,32(13):187-193.  
XIE C Y, LUO Z Q, JIA N, et al. Dynamic effect of open blasting vibration on adjacent buildings and measures for vibration reduction [J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(13):187-193.
- [5] 林键,林从谋,林丽群. 爆破振动荷载作用下 3~4 层房屋结构响应测试研究[J]. 振动与冲击,2010,29(3):48-51,66.  
LIN J, LIN C M, LIN L Q. Research on response characteristics of structure under dynamic blasting load [J]. Journal of Vibration and Shock,2010,29(3):48-51,66.
- [6] 刘满堂,陈庆寿. 建筑结构对爆破地震的动力响应特性研究[J]. 爆破,2005,22(4):23-28.  
LIU M T, CHEN Q S. Characteristics of building structure dynamic response to blasting earthquake [J]. Blasting, 2005,22(4):23-28.
- [7] BASU B, GUPTA V K. Stochastic seismic response of single-degree-of-freedom systems through wavelets [J]. Engineering Structures, 2000,22(12):1714-1722.
- [8] 林大超,施惠基,白春华,等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):31-36.  
LIN D C, SHI H J, BAI C H, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects [J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(1):31-36.
- [9] 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 S Q, LIAO X K, LIU B C. Default of the judging standard of blasting vibration safety abstract [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 223-228.
- [10] ONGEN T, KARAKUS D, KONAK G, et al. Assessment of blast-induced vibration using various estimation models[J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, 145:267-273.
- [11] 冉成. 爆破地震波作用下房屋结构动力响应研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.  
RAN C. Dynamic response research of building structure under blasting seismic wave [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [12] 叶海旺,冉成,雷涛,等. 爆破振动作用下砌体房屋结构动态响应与损伤分析[J]. 爆破,2018,35(1):161-166,174.  
YE H W, RAN C, LEI T, et al. Dynamic response and damage analysis of masonry structures under blasting vibration [J]. Blasting, 2008,35(1):161-166,174.
- [13] 魏海霞,陈士海,张安康. 基于动力有限元方法的典型砌体结构爆破振动安全标准的探讨[J]. 振动与冲击,2011,30(5):49-53.  
WEI H X, CHEN S H, ZHANG A K. Safety standards discussion for blasting vibration of typical masonry buildings with dynamic finite element method [J]. Journal of Vibration and Shock,2011,30(5):49-53.
- [14] 周燕. 砖木结构 1/4 模型振动台试验与理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.  
ZHOU Y. The shaking table test theory investigation for 1/4 scale half-timbered model [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2007.
- [15] 孔大庆,管晓明,傅洪贤. 隧道竖向爆破振动下二层砌体房屋动力反应[J]. 土木工程学报,2015,48(增刊1):326-330.  
KONG D Q, GUAN X M, FU H X. Dynamic response characteristics analysis of a two-story masonry structure to tunnel vertical blast ground motion [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Suppl. 1):326-330.
- [16] 冯丽丽. 地震作用下砖混砌体结构房屋损伤顺序与破坏模式研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
FENG L L. Research on damage orders and failure modes of brick masonry structure under seismic action [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.
- [17] 陈士海,魏海霞,张安康,等. 多维爆破地震动作用下框架结构动态响应有限元时程分析[J]. 振动与冲击,2010,29(9):134-137.  
CHEN S H, WEI H X, ZHANG A K, et al. Finite-element time-history analysis of dynamic response of frame structure under multi-dimensional blasting vibration [J]. Journal of Vibration and Shock,2010,29(9):134-137.
- [18] 林大超,施惠基,白春华,等. 基于小波变换的爆破振动时频特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):101-106.  
LIN D C, SHI H J, BAI C H, et al. Time-frequency characteristics analysis of blasting vibration based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(1):101-106.
- [19] 黄高磊. 露天矿场爆破震动对周边建筑物危害性研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2012.  
HUANG G L. Research of harmfulness on blasting vibration in open coal mine [D]. Baotou:Inner Mongolia University of Science and Technology,2012.