

文章编号: 1000-5013(2011)01-0081-06

小净距隧道爆破山顶石房楼层振动效应

郑强, 林从谋, 林丽群, 黄金山, 杨海书

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 泉州 362021)

摘要: 根据泉厦高速公路扩建工程大坪山隧道爆破山顶房屋的爆破振动数据, 分析振速沿楼层传播的分布规律, 研究小净距隧道爆破地震波在山顶石砌房屋楼层的传播规律及其特性. 同时, 应用小波包理论分析, 得出爆破地震波频谱特性、主振频率及能量分布随楼层变化规律. 研究表明, 楼房 3 层振速出现高程放大效应, 第 1 水平振速与垂向振速的比值大于其上两层的比值; 各楼层主频主要集中在低频段, 其他频率段频率成分不丰富, 并且随着爆源距离和楼层的增加, 频率有逐渐递减的趋势, 但在第 3 层的各分量主频有一定程度的提高; 山顶房屋的振动能量分布较广, 但 3 个方向能量都主要集中在第 1 频带, 且竖向能量最大, 径向能量次之, 切向能量最小.

关键词: 小净距隧道; 地震波; 高程效应; 石砌房屋

中图分类号: U 455.6; O 382⁺.2

文献标识码: A

随着爆破技术的广泛应用, 人们越来越关注爆破的安全问题, 特别是爆破对周围环境和建筑物的影响^[1-2]. 爆破产生的振动可能导致房屋裂缝、门窗损毁及人畜惊恐等危害, 因此, 对爆破振动的研究一直是人们所关注的重要课题. 在国内外, 爆破地震波在岩土等介质的传播规律、危害作用及减震技术已有大量的研究^[3-9], 并建立了爆破地震效应监测和分析系统. 但是, 对于爆破地震波在楼层的传播规律和建(构)筑物的响应情况的研究还远远不够. 本文通过监测各次爆破时, 不同位置闽南特色石砌房屋不同楼层质点振动波形, 分析爆破地震波在石砌房屋楼层中传播规律及其能量衰减等特性.

1 工程背景

福建省泉厦高速公路扩建工程泉州大坪山隧道属于构造剥蚀微丘地貌, 山顶地形波状起伏, 平均高程在 80~100 m. 根据工程地质调查及钻探成果, 隧道场区表层多为残坡积土, 下覆燕山早期侵入花岗岩及其风化层, 其构造条件相对稳定, 未见断裂带通过, 岩体以整体结构为主, 局部为块状砌体结构, 洞身有节理裂隙发育带.

大坪山新建隧道山顶的正上方及其附近分布有大量的居民住房. 现场踏勘表明, 居民住房离爆源最小距离只有 44 m, 山顶住房基本为 2~3 层的小楼, 楼房的结构类型主要有 3 类: (1) 钢筋混凝土框架结构; (2) 砖混结构; (3) 石砌结构. 大部分房屋的结构属于第 1 类型, 只有小部分房屋的结构属第 3 类型. 后者结构类型的抗震性能极差, 在振动控制中应特别引起注意. 因此, 选具有闽南特色的石砌房屋各楼层布置测点, 以研究其各楼层振动效应.

2 爆破振动监测

2.1 测点布置

为减小新建右隧道开挖爆破对山顶房屋的影响, 施工中采用上、下台阶法进行开挖, 并减小隧道开挖进尺, 进行分层、分段、光面、多打眼、少药量控制爆破技术施工, 最大限度减小新建隧道施工对城市隧

收稿日期: 2009-12-19

通信作者: 林从谋(1957-), 男, 教授, 主要从事岩石动力学和地下结构的研究. E-mail: cmlin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2007H0055); 福建省泉州市科技计划项目(2007Z42)

3 监测结果分析

3.1 振动历时波形分析

一楼房屋测点典型实测振动波形图，如图 3 所示。对比同一测点各波形段的振速记录可知，崩落孔爆破引起的地表震动最小，在波形图上几乎难以反映出来。这与崩落孔的药量较小，以及前段别的炮孔爆破给其创造了较好的自由面条件有关；掏槽孔爆破引起的地表震动最强烈，其地表振动速度幅值比其他段别炮孔爆破的 2 倍以上。

掏槽孔爆破的震动效应控制是降低或消除浅埋隧道爆破震害的关键。同时，该爆破采用微差爆破技术，各段炮孔爆破形成的地震波基本没有产生叠加。因此，判断出不同作用的炮孔爆破所对应的地表振动速度幅值，而各主波峰都有一个明显的衰减过程，最大振动速度能得到有效的控制。

3.2 振动速度峰值分析

3 次爆破试验的振速(v)及水平和竖直振速比值(γ)随楼层(n)分布曲线，如图 4、5 所示。从图 4 可以看出，振动速度峰值都发生在离爆源最近的一楼测点处，但各楼层测点合矢量幅值并不单纯地随震源距离的增加而衰减。第 2 楼层的振速小于第 1 层的振速，第 3 层的振速大于第 2 层的振速并出现高程放大效应现象，即存在鞭梢效应。经统计，其放大系数在 1.11~1.78 范围内。

从图 5 可以看出，在房屋第 1 层的水平振速与垂向振速的比值明显大于其上两层的水平振速和垂向振速的比值，发生在离爆源水平距离最近的一层，其最大值为 7.8。而且随着爆心水平距离的增大，一层的水平振速和垂向振速的比值迅速减小。一般建筑的竖向具有足够的抗震能力，而水平抗震能力较弱。因此，在评价建筑振动破坏时，不仅要考虑振速合矢量大小，更要考虑水平分量对建筑的影响，这就要特别注意离爆源较近的建筑的水平抗震能力

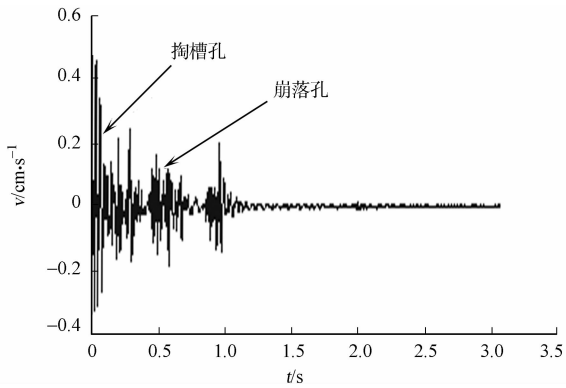


图 3 典型的隧道爆破引起的振动波形图

Fig. 3 Typical tunnel blasting-induced vibration waveform

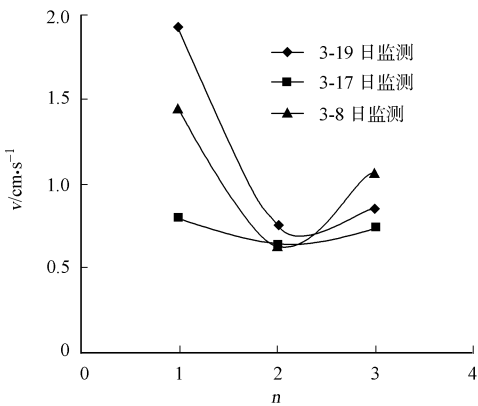


图 4 振速合矢量随楼层分布图

Fig. 4 Distribution of vibration velocity resultant vector along floors

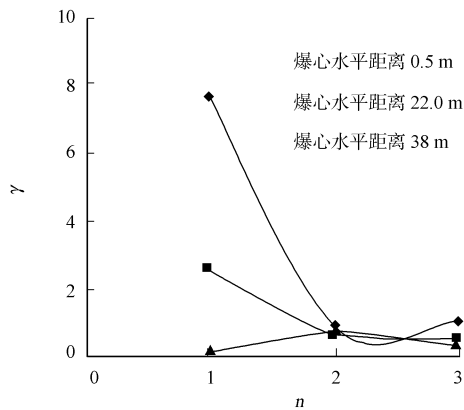


图 5 水平和竖直振速比值随楼层分布图

Fig. 5 Distribution of the ratio of horizontal vibration velocity to vertical velocity along floors

3.3 地震波小波包分析

应用 Matlab 6.5 的 Wavelet Toolbox 中内置 dbN 序列的小波包分解与分解系数重构相对应的函数及其算法，编程实现对信号的小波包分析。根据爆破地震波衰减相对较快的特点，选用“db4”小波基函数进行隧道开挖爆破震动信号的频谱分析。

以典型波形图垂向方向的原始信号为例进行小波包分析。爆破信号的取样采用分解尺度 3，对原始信号进行小波包变换，将信号分解到 8 个子频带上。然后，对小波分解系数重构，得到重构波形的主频以及最大速度；同时，对各频带的频谱进行傅里叶变换，此频带上能量分布百分比及其主频，如表 2 所

示. 表 2 中: d 为爆心水平距离; n 为楼层.

表 2 爆破震动信号的频带能量分布百分比统计

Tab. 2 Percentages of band energy distribution of blasting vibration signals

%

日期	d/m	n	方向	频带							
				0~ 25 Hz	25~ 50 Hz	50~ 75 Hz	75~ 100 Hz	100~ 125 Hz	125~ 150 Hz	150~ 175 Hz	175~ 200 Hz
2009-03-08	38	1 层	切向	99.973 4	0.004 7	0.006 2	0.007 0	0.003 4	0.002 3	0.001 7	0.001 4
			径向	99.985 6	0.003 3	0.003 3	0.003 5	0.001 8	0.001 1	0.000 8	0.000 6
			垂直	99.988 5	0.002 1	0.002 6	0.002 8	0.001 5	0.001 1	0.000 7	0.000 7
		2 层	切向	99.019 1	0.839 2	0.101 3	0.015 4	0.007 4	0.006 5	0.005 9	0.005 2
			径向	99.381 7	0.564 6	0.027 6	0.010 5	0.005 2	0.003 9	0.003 5	0.003 1
			垂直	97.278 9	2.516 7	0.117 0	0.041 1	0.014 7	0.011 8	0.010 4	0.009 5
		3 层	切向	99.466 8	0.502 0	0.013 1	0.008 7	0.002 8	0.002 5	0.002 1	0.002 0
			径向	99.970 0	0.002 8	0.001 9	0.011 8	0.011 0	0.001 1	0.000 7	0.000 7
			垂直	99.984 8	0.003 5	0.003 5	0.003 9	0.001 8	0.001 0	0.000 8	0.000 7
2009-03-17	22	1 层	切向	98.499 1	1.444 8	0.019 9	0.019 1	0.006 2	0.007 7	0.001 4	0.001 7
			径向	83.738 6	3.549 6	8.003 2	1.186 0	1.429 2	0.895 5	0.694 6	0.503 3
			垂直	99.555 7	0.383 9	0.044 4	0.007 8	0.002 2	0.002 2	0.002 2	0.001 5
		2 层	切向	97.136 4	2.741 9	0.079 6	0.026 2	0.004 6	0.003 8	0.004 2	0.003 3
			径向	99.310 3	0.576 9	0.057 2	0.018 9	0.010 7	0.009 6	0.008 3	0.008 0
			垂直	98.160 5	1.614 9	0.109 8	0.039 8	0.023 0	0.019 1	0.017 3	0.015 6
		3 层	切向	99.544 9	0.440 4	0.007 4	0.004 7	0.000 8	0.000 7	0.000 6	0.000 6
			径向	98.062 0	1.778 3	0.068 7	0.038 0	0.015 9	0.013 6	0.012 1	0.011 4
			垂直	99.278 9	0.516 7	0.117 0	0.041 1	0.014 7	0.011 6	0.010 6	0.009 4
2009-03-19	0.5	1 层	切向	96.621 5	3.266 5	0.065 7	0.033 0	0.003 6	0.003 4	0.003 3	0.003 0
			径向	95.677 1	4.116 0	0.155 1	0.037 1	0.004 0	0.003 6	0.003 9	0.003 1
			垂直	96.657 9	3.236 5	0.065 0	0.028 3	0.003 6	0.003 1	0.002 9	0.002 7
		2 层	切向	94.959 6	4.637 6	0.300 1	0.060 7	0.011 9	0.010 2	0.011 7	0.008 4
			径向	96.017 7	3.417 6	0.477 6	0.037 6	0.011 8	0.014 0	0.015 5	0.008 3
			垂直	94.879 9	4.469 9	0.563 6	0.033 0	0.015 0	0.014 2	0.014 7	0.009 7
		3 层	切向	94.959 6	4.637 6	0.300 1	0.060 7	0.011 9	0.010 2	0.011 7	0.008 4
			径向	96.160 5	3.614 9	0.109 8	0.039 8	0.023 0	0.019 1	0.017 3	0.015 6
			垂直	92.721 5	6.778 7	0.416 6	0.055 9	0.006 8	0.005 7	0.009 4	0.005 4

典型波形小波包分解重构波形及其各频带的傅立叶变换,如图 6 所示. 由图 6 可知,爆破振动信号的能量分布很不均匀,在其频域中除了有一个主振频率外,还存在多个子频带,且各子频带中又有其各

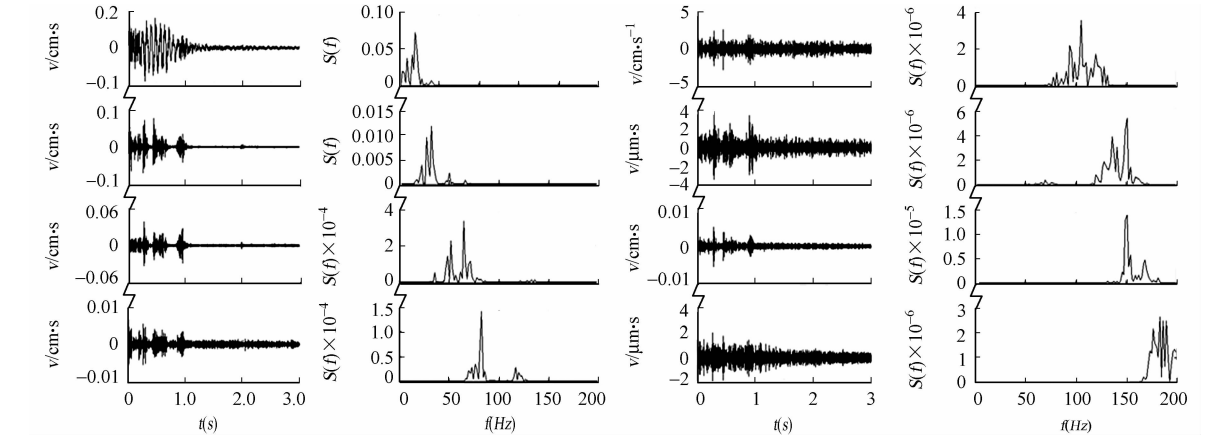


图 6 小波包系数重构波形及其各频带的傅立叶变换

Fig. 6 Reconfiguration waveform by wavelet packet coefficient and Fourier transformation of every frequency band

自的主频,各频带的能量大小也不相同,这样爆破振动中就出现了多个峰值.由此可知,在爆破振动安全判据中,只采用单个主振频率来代替整个频域,有欠准确,而应将多主频的影响因素考虑进去.

3.4 振动主频分析

各频率(f)分量与楼层(n)关系,如图 7 所示.由图 7 可知,各分量主频大部分集中在 40 Hz 以下.这说明山顶房屋的各楼层测点主频主要集中在低频段,其他频率段频率成分不丰富,并且随着爆源距离和楼层的增加,频率大小有逐渐递减的趋势.但是,在第 3 层的各分量主频有一定程度的提高(图 6).

由于一般建筑结构的频率较低,在地震波经过一定距离传播后,虽然远距离振动幅值减弱,但更趋向于低主频,容易使结构产生共振现象,加强了结构响应程度.这和现场勘察房屋破坏的一个现象一致.即某些同样结构的房屋距爆源距离较远,质点振动速度小,房屋反而出现裂缝,而离爆源较近的房屋没有破坏

3.5 能量分布

切向、径向和垂直 3 个方向爆破振动信号的 k -频带能量分布,如图 8 所示.从表 2 和图 8 中都可以看出,在小净距隧道微差爆破中,虽然爆破引起山顶房屋的振动能量分布较广,但 3 个方向能量都主要集中在 0~25 Hz 的第 1 频带.

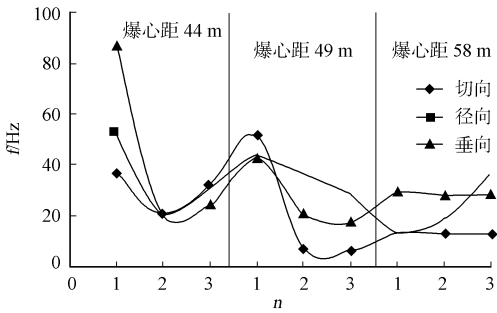


图 7 各频率分量与楼层关系
Fig. 7 Relationship between the frequency component and floor

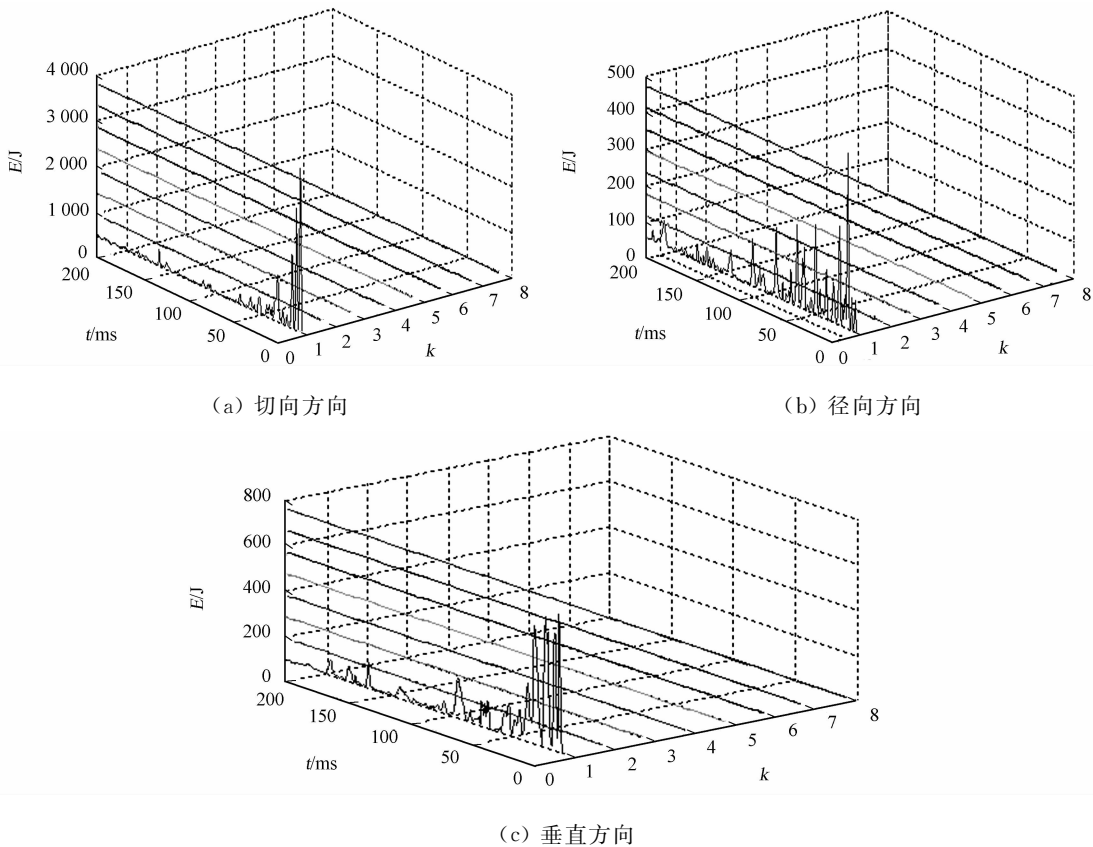


图 8 爆破振动信号的频带能量分布
Fig. 8 Energy distribution of blasting vibration signals

此外,在低频段的能量分布也不均匀,出现了为数不少的“子中心”.这些“子中心”构成了爆破震动信号不同的主震频带,表明爆破震动信号的主震频带比较宽,主震频带又可以分成多个子震频带.同时也表明,工程结构是一个包含众多子结构的系统,各子结构的固有特性各不相同,因而其爆破震动具有多模态、多震型的特点.

从纵坐标可以定性地看出,爆破振动信号切向、竖向和径向 3 个方向能量的一般近似规律是,竖向能量最大,径向能量次之,切向能量最小.

4 结 论

(1) 由以上观测成果分析可知,掏槽孔爆破引起的地表震动最强烈,分段爆破要延长微差爆破时间,使各段振动不会相互叠加.

(2) 地震波在楼层传播时,楼房 3 层振速出现高程放大效应,第 1 层的水平振速与垂向振速的比值大于其上两层的比值.

(3) 各楼层主频主要集中在低频段,其他频率段频率成分不丰富,并且随着爆源距离和楼层的增加,频率大小有逐渐递减的趋势,但在第 3 层的各分量主频有一定程度的提高.

(4) 山顶房屋的振动能量分布较广,但 3 个方向能量都主要集中在第 1 频带,且竖向能量最大,径向能量次之,切向能量最小.

参考文献:

[1] 刘小春,谷新建,李方. 城市控制爆破工程的爆破事故和爆破公害研究[J]. 中国安全科学学报,2002,12(6):44-47.
[2] 付天光,李永靖,段代刚. 控制爆破中的安全问题[J]. 中国矿业,2003,12(8):51-53.
[3] 魏晓林,郑炳旭. 爆破震动对邻近建筑物危害[J]. 工程爆破,2000,3(6):81-88.
[4] 何军,于亚伦,梁文基. 爆破振动信号的小波分析[J]. 岩土工程学报,1998,20(1):47-50.
[5] 李洪涛,舒大强. 爆破震动衰减规律的影响因素[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(1):79-82.
[6] 林从谋,杨林德,崔积弘. 浅埋隧道掘进爆破振动特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(2):276-279.
[7] 余永强,杨小林,王伟. 矿山爆破开采对周围建筑物的影响[J]. 金属矿山,2004(10):69-72.
[8] 何鹤,顾月兵. 爆破震动对附近民房影响情况的分析[J]. 西部探矿工程,2008(1):136-138.
[9] 魏荣丰,郭子雄,黄群贤. 闽南地区农村石结构房屋的爆破振动损伤特点[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(5):568-571.

Effect of Small-Distance Tunnel Blasting on Hilltop Stone Building Vibration

ZHENG Qiang, LIN Cong-mou, LIN Li-qun,
HUANG Jin-shan, YANG Hai-shu

((Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China))

Abstract: According to the hilltop building vibration data in Da Ping mountain tunnel blasting, the distribution of vibration velocity spreading along the different floors is analyzed, the spectral characteristic, main vibration frequency and energy distribution along floor are obtained by wavelet package theory. It's found: on the third floor, vibration velocity appears elevation amplification effect, the ratio of the horizontal vibration velocity to vertical velocity on the ground floor is greater than the one on upper two floors; the main frequency on every floor is dominantly in the low frequency, the frequency components in other frequency-band is small, and with the increases of explosive distance and the floor number, the frequency has the trend to decrease gradually, but every component main frequency on the third floor increases to a certain degree; the vibration energy distributes widely in the hilltop building, however, the energy in three directions are mainly concentrated in the first frequency band, the rank of energy from large to small is: vertical energy, radial energy, tangential energy.

Keywords: small-distance tunnel; seismic wave; elevation amplification effect; stone building

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)