

文章编号: 1001-1455(2010)01-0021-06

50 t 科学爆破振动的衰减特征及地形效应*

刘爱文¹, 俞言祥¹, 付长华¹, 吕红山¹, 陈 颀¹, 赵纪生², 周正华², 王 伟²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要: 对药量达 50 t 的科学爆破开展了流动强震观测, 包括爆破振动的衰减观测和地形效应观测。在分析此次爆破强震记录的基础上, 利用萨道夫斯基公式分析了垂直向峰值速度和加速度的衰减规律, 爆破地区为中等强度的层状岩石且当地地形沟壑纵横是此次振动能量衰减较快的原因。通过离散小波变换分析 (db8 小波基函数) 得到了此次爆破振动能量的时频分布规律, 随着爆心距的增大, 爆破振动能量集中的频率减小而振动的持续时间则相对增加。根据中国地震烈度表, 在近爆心区振动烈度可以达到Ⅷ度, 然而相对于天然地震的烈度衰减, 爆破振动烈度的衰减较快。通过比较一个高 14 m 山包的不同位置的强震记录, 分析了此次爆破振动的地形效应。由于山包的聚焦效应, 山顶的加速度峰值是山脚的 2.4 倍, 且地形效应对某频率段内的振动有选择的放大, 该频率段与山包的大小和高度有关。振动轨迹图显示, 随着高度的增加, 山体的侧向摆动和转动逐渐增强。

关键词: 爆炸力学; 衰减规律; 时频分析; 爆破振动; 地形效应; 振动烈度

中图分类号: O384

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引言

以地球物理科学研究为目的, 中国地震局地球物理研究所于 2007 年 12 月 12 日在河北怀来县实施了一次人工爆破。不同于一般的工程爆破, 科学爆破主要利用爆破震源的准确位置和激发时间已知这 2 个特点, 通过分析华北盆地和周边的 359 个地震观测台站获得的爆破记录, 探测华北盆地的地下深部结构、华北地区走时表、爆破振动的波场效应。此次科学爆破的单次爆炸药量达到 50 t, 远大于一般工程爆破的单次爆炸药量, 北京地震台网测定的近震震级 M_L 为 2.8。为了研究爆破点附近地区的振动特征以及监测此次科学爆破对周围民房的影响, 同时开展了强震监测。根据爆破周围的场地特点, 爆破振动的衰减观测台站架设, 如图 1 所示。S0 为距离爆破峒口最近的台站, S1~S7 为其他 7 个衰减台站; 同时选择了一个相对独立的山包, 从山脚至山顶布设了 5 个观测地形效应的台站 D1~D5。



图 1 振动衰减观测台站分布示意图

Fig. 1 Distribution of observatories for vibration attenuation

* 收稿日期: 2008-10-18; 修回日期: 2009-02-16

基金项目: 中国地震局地球物理研究所“中央级公益性科研院所基本科研业务费专项”项目 (DQJB06A01, DQJB06A02)

作者简介: 刘爱文 (1973—), 男, 副研究员。

爆破振动波的能量可由质点振动强度衡量,振动强度可以用振动的位移、速度或加速度来表示,进而对爆破采用有效控制。在前苏联和瑞典使用速度判据,在英国使用位移判据,在法国使用加速度判据,美国矿务局标准 RI 8507 采用质点振动的峰值速度和相应的频率联合作为判据^[1-3]。中国国家标准 GB 6722-2003《爆破安全规程》规定:对于地面建筑物采用保护对象所在地的峰值振动速度和主振频率作为爆破振动判据^[4]。目前计算爆破质点振动速度常用萨道夫斯基公式。萨道夫斯基公式描述了爆破地震波强度随传播距离的增加而呈幂函数衰减的基本规律:随着传播距离的增加,能量衰减速度减慢。假如测点非常接近爆心时,上述爆破衰减普适公式存在一定的误差。在爆破近区,波阵面上的压力、密度很大,致使地震波强度(能量)衰减很快。黄永祥等^[5]根据大姚铜矿的大药量爆破振动效应观测,发现在爆心的正上方实测的振动参数值往往比按爆破衰减普适公式的计算值大。因此把临近爆心正方的振动强化现象称为极震效应,极震效应与爆心距的地面投影 r 和爆心深度 h 的比值 r/h 有关^[5]。

另外,由于爆破振动具有持时短、突变快等特点,是一种典型的非平稳随机信号,需要对爆破振动信号进行时频局域化分析。在众多的时频分析手段中,以小波变换的时频局域化功能最为突出,算法也比较简单。近年来不少学者利用小波变换的方法,将质点振动速度信号在时频域上展开,计算信号在各个频带上的主震相的能量,并尝试采用爆破振动不同频率段所包含的能量作为爆破安全的判据^[6-7]。

本文中,根据 50 t 科学爆破的强震观测数据,探讨此次大当量爆破振动的幅值衰减规律及地形效应,利用中国地震烈度表估计爆炸周围地区的烈度分布,并应用小波分析等方法研究爆破振动主振频率随距离变化的特征。

2 爆破振动衰减规律

表 1 为本次爆破观测的数据, R 为各台站与爆心的距离, a_{ew} 、 a_{sn} 和 a_1 分别为东西向、南北向和垂直向的峰值加速度, v_{ew} 、 v_{sn} 和 v_1 分别为东西向、南北向和垂直向的峰值速度。在爆心附近观察到显著的极震效应,距离爆心 217.7 m 的台站 S0 记录的垂直向峰值加速度达到 1.38g,而在沟口的台站 S1(距离爆心 1 055 m),爆破振动的垂直向峰值加速度则迅速衰减至 0.038g。在爆破近区,振动峰值衰减很快,随着爆心距离的增加衰减速度变慢。

表 1 各台站的峰值加速度和峰值速度

Table 1 Peak ground acceleration and velocity of each observatory

台站	R/m	$a_{ew}/(cm/s^2)$	$a_{sn}/(cm/s^2)$	$a_1/(cm/s^2)$	$v_{ew}/(cm/s)$	$v_{sn}/(cm/s)$	$v_1/(cm/s)$
S0	217.7	483.9	1 258.9	1 376.8	-10.37	-13.85	20.04
D5	395.4	421.6	629.2	512.3	3.83	-7.71	6.57
S1	1 055.0	-47.7	39.5	38.1	-1.57	1.04	0.82
S2	868.3	-103.9	174.7	-103.1	-1.81	2.55	-1.58
S3	900.8	-133.9	-37.9	67.6	1.72	-0.61	-1.13
S4	1 164.2	-45.2	38.2	-37.1	1.49	1.25	0.65
S5	1 500.1	22.8	-29.7	-22.7	0.91	0.67	0.46
S6	1 830.3	13.8	-12.9	11.2	0.77	-0.53	-0.36
S7	2 101.9	8.9	-13.1	-10.7	0.37	-0.40	-0.35

利用萨道夫斯基衰减公式对表 1 中各台站的垂直向峰值速度进行拟合

$$v_1 = k_v(Q^n/R)^\beta \quad (1)$$

式中: Q 为爆破的药量,kg; R 为爆心距,m。本次爆破中, $Q=50$ t,可得 $k_v=200$ cm/s, $\beta=1.6$, $n=1/3$ 。由此可见,这次爆破地区为中等强度的岩石,这与现场所观察层状岩石且裂隙较多是一致的。

峰值加速度的衰减公式通常采取与速度衰减关系类似的形式,令 $k_a=2\pi f k_v$, f 为爆破振动的主振频率。根据此次爆破记录的频谱分析,距离爆心较近的主振频率 f 为约 10 Hz。

如图 2 所示,通过与实测数据的比较,当爆心距较大时,由这种方法得到的峰值加速度衰减理论曲线($f=10$ Hz)与实测数据存在一定的偏差,这是因为爆破振动的高频成分比低频成分衰减更快,随着

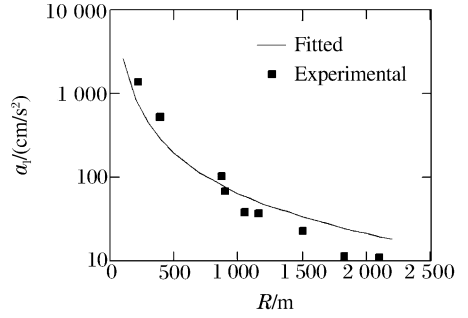
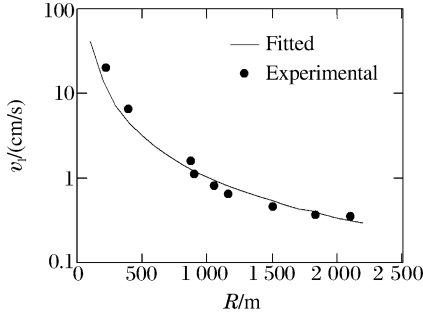


图 2 垂直方向峰值速度和峰值加速度的衰减规律

Fig. 2 Attenuations of peak velocity and peak acceleration

爆心距的增大主振频率减小。如图 3 所示(阻尼比 $\xi=5\%$),爆心距为 376 和 900 m 的主振频率均为约 10 Hz(0.1 s),而爆心距为 2 101 m 时主振频率为约 1.67 Hz(0.6 s)。

在工程地震学中,通常采用地震烈度评价地震引起的地面震动及其影响的强弱程度。评定地震烈度大小的依据包括 2 类:1 类是宏观震害描述,如人的感觉、建筑物的破坏程度、物体的反应以及自然状态的变化;另 1 类则是物理标准,如仪器记录到的水平向峰值速度、峰值加速度,根据这些仪器记录得到的地震烈度又称为振动烈度^[8]。根据中国地震烈度表,由各个台站得到的水平向速度峰值和加速度峰值的大小可以评价出各点的振动烈度。此次爆破的近爆心区振动烈度可以达到Ⅶ度,距离此次爆心最近的村庄龙宝山旧村(约 1 000 m)位于Ⅴ度区。由此可见,相对于天然地震的烈度衰减,爆破振动烈度的衰减较快。

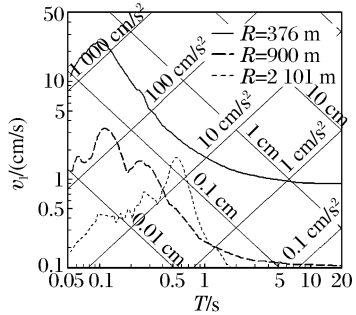


图 3 不同爆心距的速度反应谱

Fig. 3 Velocity response spectra for different distances from the explosion center

3 爆破振动的小波分析

爆破振动信号属于强非平稳过程,具有持时短、突变快等特点,需要采用小波变换进行时频分析。目前,爆破振动信号的离散小波变换通常采用 db8 小波基函数。爆破振动信号分解的层数视具体信号及采用的爆破振动记录仪的工作频带而定。本次爆破采用强震记录仪的频带范围为 0~200 Hz,采样间隔为 0.05 s。根据采样定理,此次爆破记录的 Nyquist 频率为 100 Hz。利用 db8 小波基函数对此次爆破记录进行 9 个层次 10 个频率带的离散小波分解。

如图 4,距离爆心 217.7 m 的台站 S0 的能量主要集中在 1.56~25 Hz 的频率范围,3.13~6.25 Hz 频段所包含的能量占总能量的 72%,持续时长仅约 0.4 s;而距离爆心 2 101 m 的台站 S7 的能量则主要集中在 0.4~12.5 Hz 的频率范围,78%的能量集中在 1.56~3.13 Hz 更低的频段,持续时长长达约 5 s。由此可见,在近爆心处,爆破振动的能量主要集中在频率较高的频段范围内;而在远处主要集中在频率较低的频段内,振动的持续时间相对增加。

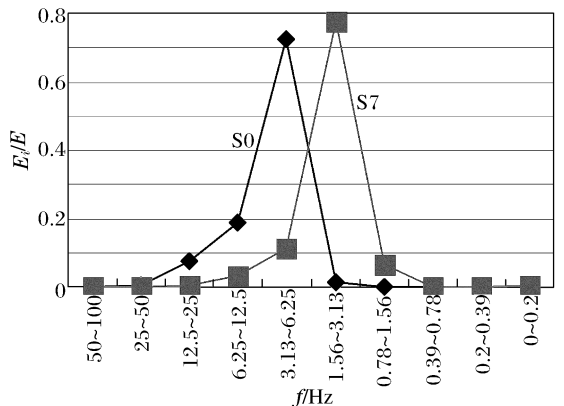


图 4 垂直向速度记录各频段能量分布

Fig. 4 Energy distributions of frequency band for the vertical velocity records

4 爆破振动的地形效应

山区地形对震害的影响比较普遍,许多地震的震害都证实了这一点^[9-10]。为了研究局部地形对地震动的影响,在此次爆破中布设了由5台强震仪组成的地形效应台站(如图5所示),研究由于地形差异引起的地面运动参数放大和地面运动频谱特征的变化。

这里主要讨论山顶 D1、山腰 D3 和山脚 D5 等3个观测点(相对高度分别为 14、9 和 0 m)的记录分析结果。这3个观测点的垂直向加速度、速度、位移以及 5% 阻尼比的反应谱如图6所示。沿山包作垂直剖面,可以看到此次爆破振动在山顶 D1 有明显的放大作用,垂直向加速度峰值达 1.2g,是山脚 D5

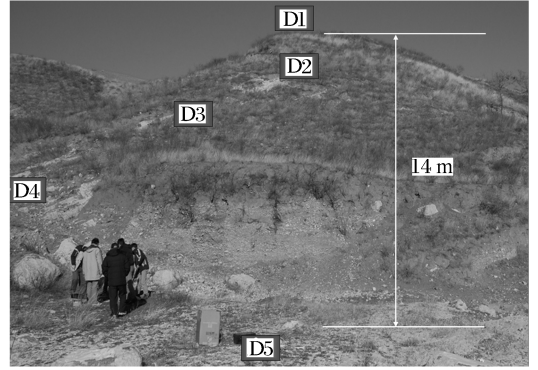


图5 地形效应观测台阵的布设示意图

Fig. 5 Instrument layout for the observations

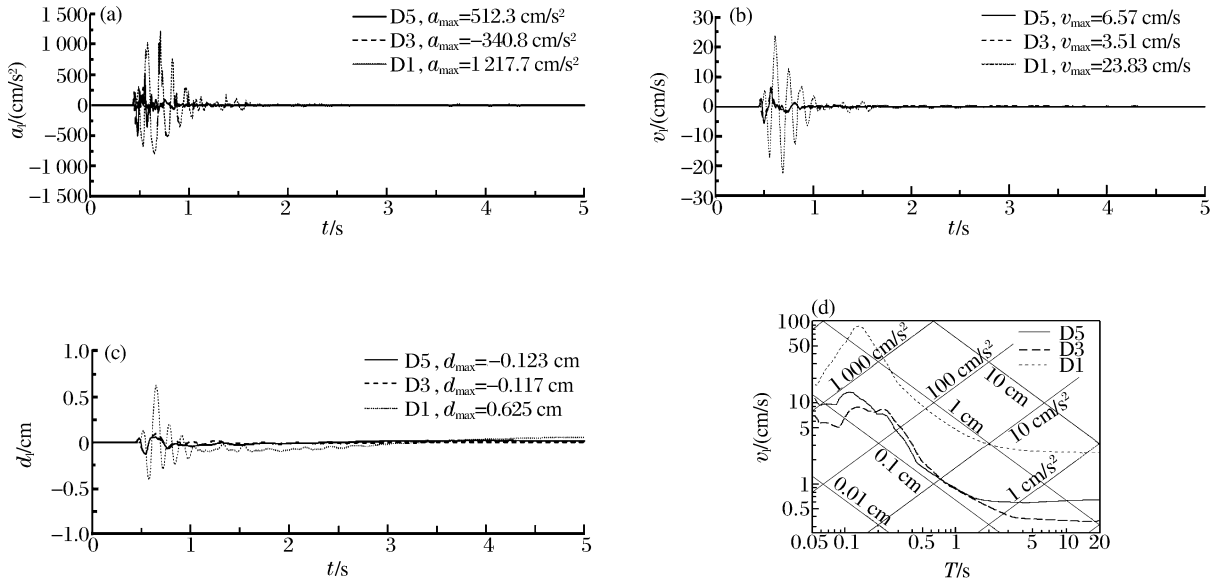


图6 地形效应台站的垂直向加速度、速度、位移时程及速度反应谱

Fig. 6 Vertical acceleration, velocity, displacement record and velocity response spectrum at the observatories for topographic effect

的 2.4 倍。根据振动能量时频分布(如图7所示),山顶的放大效应也很明显,而且反应了山顶对地震动的放大是有频率选择的,主要集中在中低频率段内。但是,山腰 D3 的峰值加速度、速度和位移均比山脚 D5 小,从速度反应谱也可以看到,在周期小于 0.2 s 时 D3 的谱值小于 D5。这与 2008 年 5·12 汶川大地震震

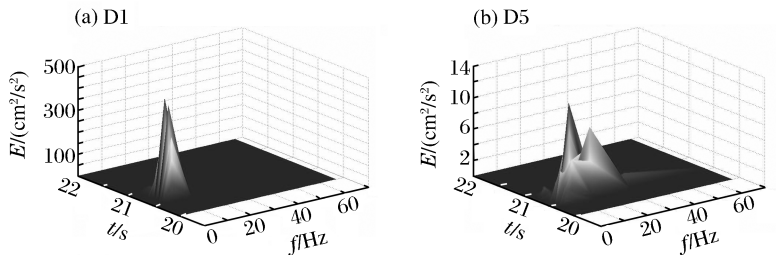


图7 垂直向速度记录能量的时频分布图

Fig. 7 Distributions of energy in time and frequency domains

害调查过程中发现有些地方山腰房屋震害比山脚震害轻的现象是一致的。

图 8 为各个地形效应台站的水平向振动轨迹图。位于山脚 D5 的记录显示,地面运动主要沿爆心方向的往返振动为主。随着高度的增加,侧向摆动和转动逐渐增强。

由此可见,入射波经山体坡形表面反射后能量向坡顶汇集,呈现聚焦效应,因而地形放大效应在山顶最显著。根据山体大小和高度,地形效应是对某频率段内的振动有选择的放大。在爆破振动作用下,山体还将出现摆动,呈现摆动效应。

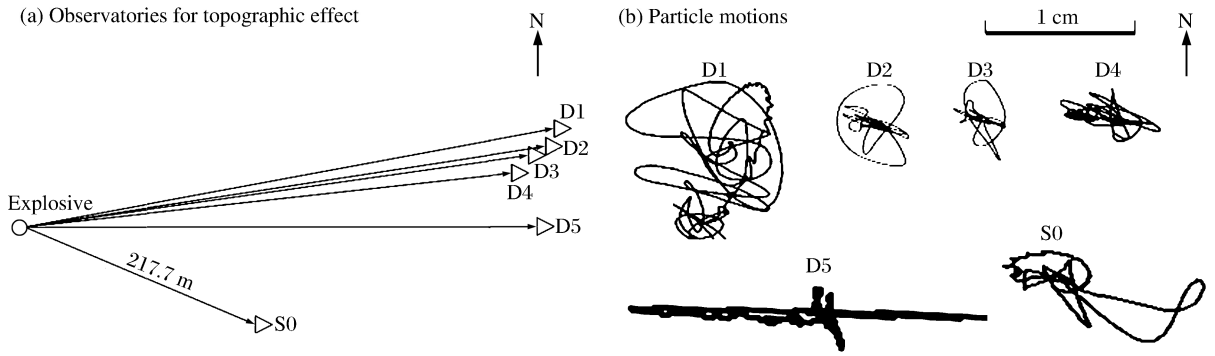


图 8 地形效应台站的水平运动轨迹图

Fig. 8 Particle motions produced at the observatories for topographic effect

5 结论

通过分析 50 t 爆破的强震记录基础,垂直向速度峰值随爆心距的衰减规律显示此次爆破振动衰减较快,爆破地区为中等强度的层状岩石且当地地形沟壑纵横是此次振动能量衰减较快的原因。虽然此次在距离爆心 217.7 m 处有加速度达 $1.38g$ 的强震记录,但是持续时间短,振动烈度(Ⅶ度)并不是特别高。利用离散小波变换分析爆破振动能量的时频分布规律显示,在爆源近处爆破振动的能量主要集中在频率较高的频带范围内;在远处则主要集中在频率较低的频带内,振动的持续时间则相对增加。在山顶,爆破振动的地形效应特别显著,由于聚焦效应山顶的加速度峰值是山脚的 2.4 倍,且地形效应是对某频率段内的振动有选择的放大,该频率段与山体大小和高度有关。

参考文献:

- [1] 吴德伦,叶晓明. 工程爆破安全振动速度综合研究[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(3):266-273.
WU De-lun, YE Xiao-ming. A comprehensive review and commendation of blast vibration safety velocity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997,16(3):266-273.
- [2] 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 abstract[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(3):223-228.
- [3] 于海英,于双久. 工程爆破场地地震动强度预测研究[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(1):122-129.
YU Hai-ying, YU Shuang-jiu. Study on forecasting intensity of ground motion induced by engineering explosion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004,24(1):122-129.
- [4] GB 6722-2003, 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社,2003:45-46.
- [5] 黄永祥,黄浩雄,李雄,等. 建筑物下爆破地震效应的研究[J]. 地震研究,2002,25(3):82-89.
HUANG Yong-xiang, HUANG Hao-xiong, LI Xiong, et al. Study on explosion vibration effect under buildings [J]. Journal of Seismological Research, 2002,25(3):82-89.
- [6] 黄文华,徐全军,沈蔚,等. 小波变换在判断爆破地震危害中的应用[J]. 工程爆破,2001,7(1):24-27.
HUANG Wen-hua, XU Quan-jun, SHEN Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage[J]. Engineering Blasting, 2001,7(1):24-27.

- [7] 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.
- [8] GB/T 17742-1999, 中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 1-2.
- [9] 王海云, 谢礼立. 近断层地震动模拟现状[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1043-1049.
WANG Hai-yun, XIE Li-li. A review on near fault ground motion simulation[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1043-1049.
- [10] Spudich P, Hellweg M, Lee W H K. Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake; Implications for mainshock motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86: S193-S208.

Attenuation characteristics and topographic effect of a scientific explosion with 50 t explosive *

LIU Ai-wen¹, YU Yan-xiang¹, FU Chang-hua¹, LÜ Hong-shan¹,
CHEN Kun¹, ZHAO Ji-sheng², ZHOU Zheng-hua², WANG Wei²

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;*
2. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration,*
Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract: Vibration attenuation and topographic effect were monitored near the explosion place of 50 t explosive. Based on the recorded vibration signals, the attenuations of vertical velocity and acceleration were analyzed with the Sadauskas formula. The rapid attenuation of vibration was related with the layered moderate-hardness rocks and the local terrain and gully. The time-frequency distribution of the vibration was obtained by the discrete wavelet transform (db8 wavelet). The frequency of vibration energy concentration was reduced and the duration of the vibration was prolonged with the increase of the distance from the explosion center. According to the Chinese Seismic Intensity Scale, the vibration intensity close to the explosion center is up to Ⅷ, however, the blasting vibration intensity decay faster than the attenuation of earthquake intensity. The topographic effect was discussed by comparing the vibration records at different locations of a 14-m-high hill. Due to the focusing vibration energy of the hill, the peak acceleration on the top of the hill is 2.4 times larger than that at the foot of the hill, and the special frequency bands with the enlarged amplitude is related with the size and the height of the hill. The figure of particle motions indicates that the lateral swing and rotational motion gradually increase from the foot to the top of the hill.

Key words: mechanics of explosion; attenuation characteristics; time-frequency analysis; blasting vibration; topographic effect; vibration intensity

* Received 18 October 2008; Revised 16 February 2009

Corresponding author: LIU Ai-wen, law73@163.com