

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.04.012

隧道掘进爆破振动在地表及上部岩体传播特征^{*}

费鸿禄^① 国志雨^① 杨智广^① 曲广建^② 高 英^③

①辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

②广州中爆数字信息科技股份有限公司(广东广州,510670)

③华南理工大学计算机科学与工程学院(广东广州,510641)

[摘 要] 为了解隧道掘进爆破振动信号在地表及上部岩体内传播的特征,以鹤大高速小沟隧道掘进爆破为工程背景进行研究。对地表部分,现场监测后利用小波包分析对监测数据进行信号去噪重构处理,对得到的纯净信号进行时频分析及能量分布研究,进而得出振动信号沿地表的频率分布规律及能量衰减规律。对上部岩体,利用 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟,提取关键点振速,分析得出开挖与未开挖两侧振动信号在隧道上部岩体内传播过程中的质点振速与能量衰减规律。为隧道爆破掘进动力响应研究、爆破震害评估和爆破设计的改进提供依据。

[关键词] 振动信号;地表及上部岩体;小波包分析;LS-DYNA 数值模拟;传播特征

[分类号] TD235.1;O382+.2

引言

作为爆破信息的载体,振动信号的获取与分析始终是爆破工程的重要研究内容,尤其在当今数字爆破的大趋势下,振动信号数字化处理与研究对爆破震害的控制、爆破施工数字化的实现皆具有重要意义^[1]。

信号去噪是爆破振动信号分析的首要步骤。近年来,小波包变换取得了快速发展。小波包分解对低频部分、高频部分均可分解,克服了小波分解的局限性,比小波分解更为精细。研究证明,小波包及其衍生算法^[2-3]能够更准确地提取爆破地震波中不同频带下的振动分量,更清晰地研究各频带下爆破地震波的时频特征及能量分布特征^[4-5],更清楚地揭示爆炸能量的传播及衰减规律^[6-7],为现行的考虑质点振速和频率等多指标的爆破振动安全综合判据^[8-9]研究提供精确的数据信息,为深入研究隧道掘进爆破地震效应对周围环境的振动响应^[10]提供可靠的依据。

利用现场监测与信号处理手段可准确分析振动信号沿地表的分布规律,但对于地表以下、掌子面以上的岩体内部空间,显然很难进行实地监测,而工程中往往遇到相邻隧道、管沟爆破施工的复杂情况,使研究振动信号在地表以下空间的传播规律变得十分必要。所以,笔者在分析振动信号沿地表衰减规律

的基础上,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件根据工程实际情况进行爆破掘进数值模拟,提取关键点振速,分析开挖与未开挖两侧振动信号在岩体内部的振速与能量衰减规律。

1 现场监测

1.1 工程概况

鹤大高速小沟隧道^[11]位于吉林通化境内。在监测范围内,围岩主要为Ⅳ、Ⅲ级玄武岩。隧道掘进采用光面爆破技术,为避免爆破振动叠加导致振动过大^[12],使用微差间隔不小于 50 ms 的导爆管雷管。根据现场条件,对处于Ⅲ级围岩区段的隧道掘进使用全断面一次爆破成型;对处于Ⅳ、Ⅴ级围岩使用台阶法施工。

1.2 监测方案设计

监测点集中于 K523 + 960 ~ K525 + 110 段。该段围岩主要为强、中风化杏仁状玄武岩,围岩级别为Ⅳ级,岩体饱和抗压强度 $R_c = 6.2$ MPa,岩石完整系数 $K_v = 0.11$,岩体无断层,可基本排除地质因素对试验结果产生的影响。由于研究的是隧道掘进爆破振动在上部地表的响应,因此,主要对上台阶爆破引起的地面振动进行监测。

本次试验共进行 5 组监测(1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]),每组监测分别设置 5 个监测点(A、B、C、D、E),各组测点布设位置相同。如图1所示,其中B点位于掌子

* 收稿日期:2016-01-28

作者简介:费鸿禄(1963 -),男,教授,博导,从事工程爆破、地下工程教学和科研工作。E-mail:feihonglu@163.com

通信作者:国志雨(1992 -),男,硕士,主要从事地下工程方面的研究。E-mail:970222803@qq.com

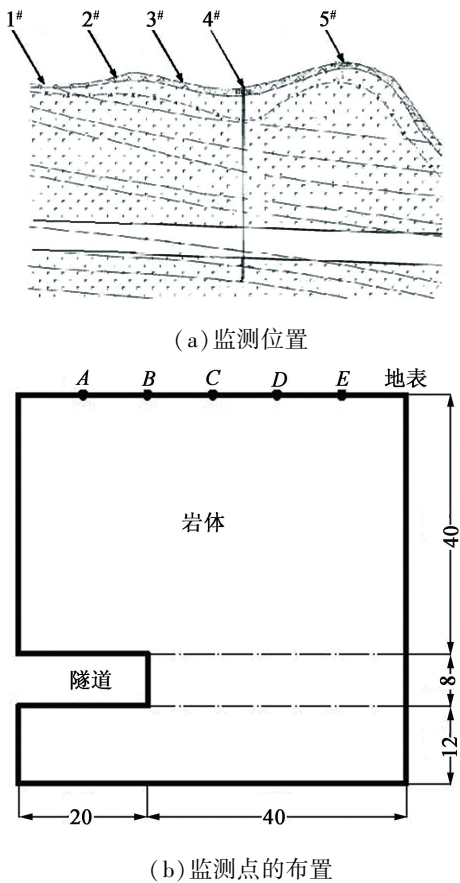


图1 监测位置及监测点的布置(单位:m)
Fig.1 Monitoring positions and points(unit:m)

面正上方,相邻各点水平间距均为 10 m。

1.3 监测结果

监测共获取 5 组爆破振动数据,以第 4 组为例进行分析(表 1)。该次爆破掘进共使用炸药 108.0 kg,最大一段起爆药量为 23.1 kg。将 D 点 y 方向振动信号简记为 $D(y)$,以 $D(y)$ 为研究对象进行小波包去噪重构处理及时频、能量谱分析。

2 振动信号的小波包分析

2.1 小波包去噪

本次爆破振动监测仪器采用 TC-4850 爆破测振仪,信号的记录时长为 2 s,采集频率为 2 000 Hz,其

奈奎斯特频率为 1 000 Hz。
用小波包分解法对监测数据进行 3 层小波包分解,其二叉树如图 2 所示。小波包分解与重构算法^[13]不再赘余。

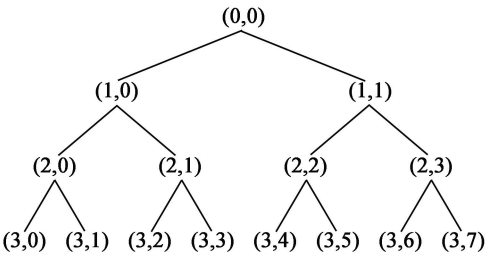


图2 3层小波包分解树
Fig.2 Three layer wavelet packet decomposition tree

采用 db8 作为基函数,应用 Matlab 平台对信号进行小波包分析。将 $D(y)$ 信号进行小波包去噪,得到的重构信号与原信号进行对比,如图 3 所示。

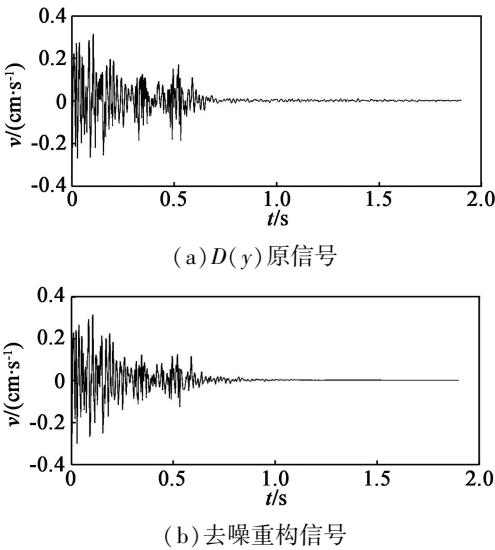


图3 $D(y)$ 原信号及去噪重构信号
Fig.3 Original signal and denoising reconstruction signal of $D(y)$

对比可知,由于低频部分所含噪声信号很少,所以去噪后变化微小;大部分的高频噪声信号被过滤

表1 质点振动监测结果
Tab.1 Monitoring results of particle vibration

监测点	径向(x)振动分量 $v_x/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	切向(y)振动分量 $v_y/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	垂向(z)振动分量 $v_z/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	径向(x)主频 f_x/Hz	切向(y)主频 f_y/Hz	垂向(z)主频 f_z/Hz
A	1.02	0.89	1.07	43.5	47.0	71.4
B	1.29	1.30	1.64	80.0	88.3	56.9
C	1.14	1.30	1.28	67.6	66.7	83.3
D	0.66	0.39	0.55	56.7	57.6	65.5
E	0.40	0.42	0.49	56.3	58.0	60.0

掉,使高频部分变得相对顺滑。

2.2 振动信号时频分析

为更加直观地反映振动信号去噪效果,利用 Matlab 绘制振动信号 $D(y)$ 去噪前、后的三维小波包时频图,图 4 中, C 为主振频带能量百分比。

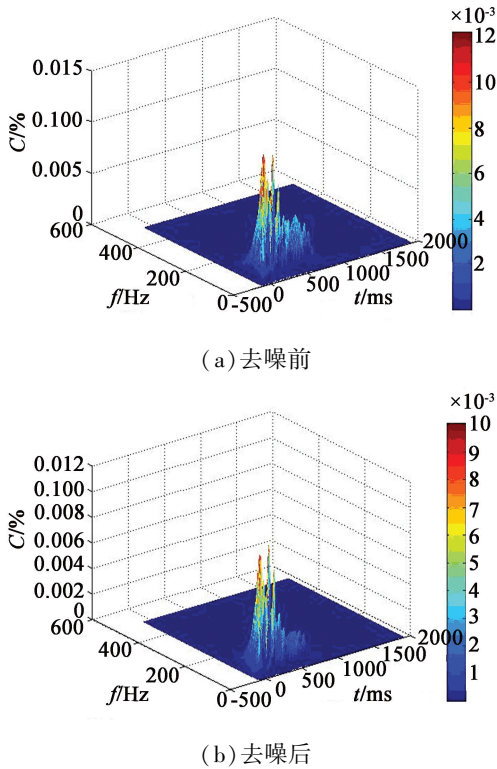


图 4 $D(y)$ 信号去噪声前、后的三维时频图
Fig.4 Three dimensional time-frequency map of original signal and denoising signal of $D(y)$

在去噪后的时频图中,中、高频部分以及 0.5 s 之后区域的信号能量大幅削减,干扰成分明显减少,爆破振动信号的能量分布更加集中于低频区域,可以认为得到了基本纯净的爆破振动信号。

2.3 振动信号能量谱分析

根据 Parseval 定理^[14],可得爆破振动信号的能量谱为:

$$P_{i,j} = \int |f_{i,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{j,k}|^2 \quad (1)$$

式中: $x_{j,k}$ ($j=0,1,2,\cdots,2i-1;k=1,2,\cdots,n$) 为 $f_{i,j}$ (t_j) 离散点的幅值; n 为爆破振动信号采集点数。

爆破振动信号 $S(t)$ 的总能量 P 为:

$$P = \sum_{j=0}^{2i-1} P_{i,j} \quad (2)$$

爆破振动信号 $S(t)$ 小波包分解到第 i 层时,各频带能量占信号总能量的比例 C 为:

$$C(n) = \frac{P_{i,j}}{P} \times 100\% \quad (3)$$

利用 Matlab 编程求得并绘制振动信号 $D(y)$ 去

噪前、后各频带能量分布规律,如图 5 所示。

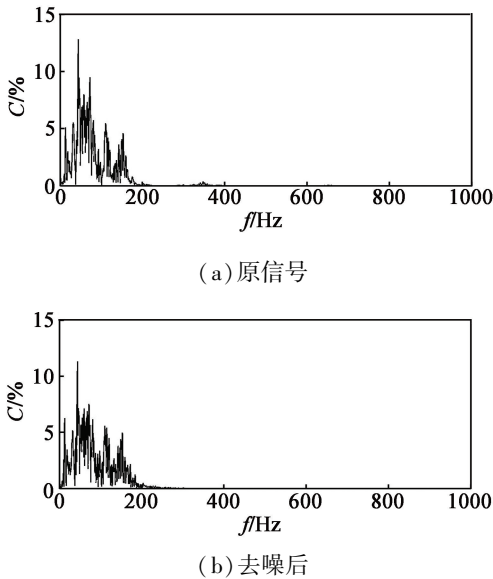


图 5 $D(y)$ 信号去噪声前、后的能量分布
Fig.5 Energy distribution of original signal and denoising signal of $D(y)$

由图 5 可知,信号 $D(y)$ 去噪后,高频部分能量显著减少,基本为零,能量分布更加向低频区域集中,表明振动信号能量主要集中于 200 Hz 以内的低频部分。

2.4 振动信号沿地表衰减规律分析

对各测点振动分量进行小波包去噪重构,并进行能量谱分析,得到各振动分量的主频带、总能量及主频带能量比,如表 2 所示。

表 2 质点能量谱分析结果

Tab.2 Analysis results of particle energy spectrum			
监测点	主频带 $f/(Hz)$	总能量 $P/$ $(cm \cdot s^{-1})^2$	主振频带能 量百分比 $C/\%$
$A(x)$	7.8 ~ 105.5	93.696	61.968
$A(y)$	0 ~ 121.1	92.451	69.230
$A(z)$	23.4 ~ 144.5	70.217	60.337
$B(x)$	7.8 ~ 125.0	117.492	67.396
$B(y)$	7.8 ~ 121.1	120.756	63.740
$B(z)$	0 ~ 117.2	112.898	61.884
$C(x)$	15.6 ~ 121.1	74.969	70.953
$C(y)$	0 ~ 58.6	71.264	68.374
$C(z)$	0 ~ 121.1	60.818	79.265
$D(x)$	7.8 ~ 125.0	40.958	71.735
$D(y)$	0 ~ 125.0	41.828	88.419
$D(z)$	15.6 ~ 121.1	24.121	81.937
$E(x)$	15.6 ~ 121.1	31.370	86.939
$E(y)$	3.9 ~ 121.1	28.431	90.759
$E(z)$	0 ~ 121.1	32.180	89.206

由表 2 可知,各信号分量的主频带都集中于0 ~ 200 Hz 之间,主频带能量占总能量的比例达 60% ~ 91%。证明虽然爆破振动信号的能量在频域上广泛分布,但绝大部分能量主要集中在低频部分。

以隧道轴线方向为坐标轴,隧道掘进方向为正方向,则各点在坐标轴上的坐标可表示为: $A(-10)$ 、 $B(0)$ 、 $C(10)$ 、 $D(20)$ 、 $E(30)$ 。由此绘制各测点不同方向主频率及总能量随距离的变化曲线如图 6、图 7 所示。

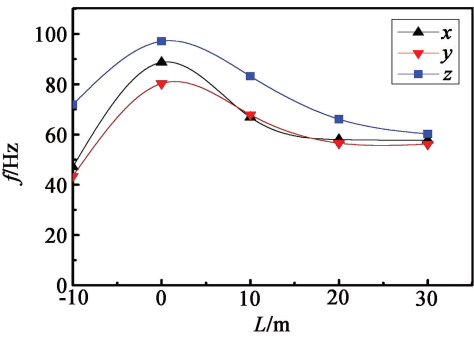


图 6 监测点主频与距离的关系

Fig. 6 Relationship between frequency and distance of monitoring points

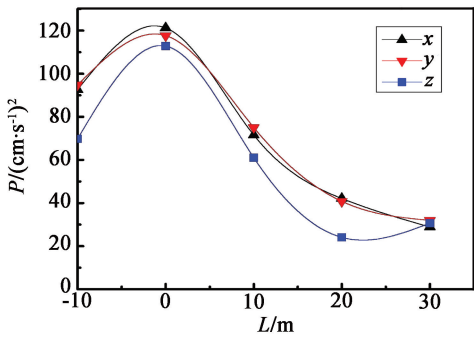


图 7 监测点总能量与距离的关系

Fig. 7 Relationship between energy and distance of monitoring points

通过对各监测点主频带与能量的衰减规律分析,可得出以下结论:

- 1) 各监测点主频均处于 200 Hz 以内的低频区, 掌心面正上方监测点主频最高, 在地表沿隧道向两侧逐渐衰减, 且随着距离的增大, 主频衰减逐渐变缓; 各振动分量中, 垂向(z)分量主频最大。
- 2) 掌心面正上方地表的监测点总能量最高, 在地表沿隧道向两侧具有与主频相似的衰减规律。
- 3) 随着爆心距的增大, 振动频率具有衰减特性, 若周围有建(构)筑物存在, 当频率衰减到与建(构)筑物的固有频率接近时, 建(构)筑物便可能会发生破坏。
- 4) 在监测点振动波的 3 个分量中, 垂向(z)主

频均大于径向(x)与切向(y)主频, 而振动波垂向(z)分量所含能量均小于径向(x)与切向(y)分量所含能量。由此可知, 在爆破振动波的传播过程中, 径向(x)与切向(y)分量频率低、衰减慢、携带能量较多, 是造成振动破坏的主要原因。

3 隧道掘进爆破振动数值模拟

利用现场监测与信号处理手段获得了振动信号沿地表的衰减规律, 但是对于地表以下、掌心面以上的内部空间无法进行实地监测。因工程中往往遇到相邻隧道、管沟爆破施工的复杂情况, 为研究地表以下岩体空间爆破振动规律, 利用软件 ANSYS/LS-DYNA 进行爆破掘进数值模拟。

3.1 模型建立与参数选取

根据现场实际施工情况, 忽略地表起伏影响, 建立大小为 60 m × 40 m × 60 m 的立方体模型, 如图 8 (a) 所示。在隧道轴线所在垂直平面内, 掌心面两侧 10 m 处选取若干关键点, 其位置及编号如图 8 (b) 所示, 竖直方向各点间距皆为 10 m。

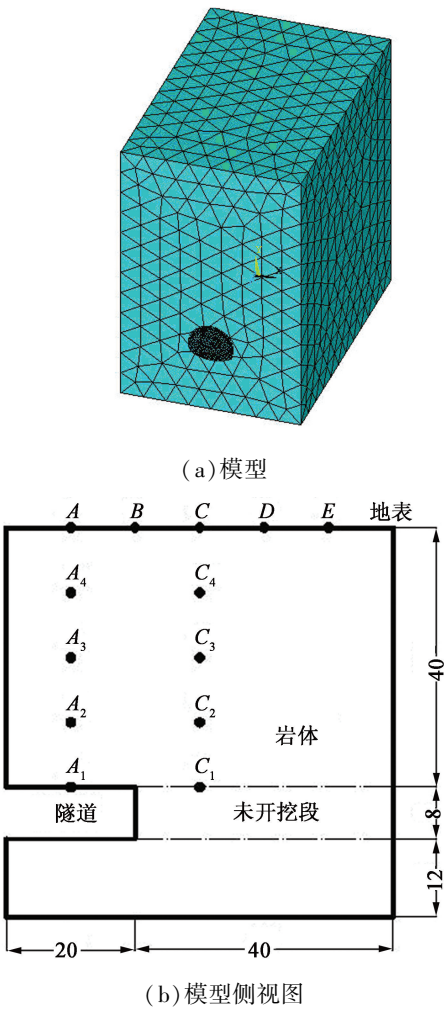


图 8 隧道掘进模型及其侧视图(单位:m)

Fig. 8 Tunnel excavation model and its side view(unit:m)

为防止地震波在模型界面处发生反射,将周边四面及下底面设置为无反射边界条件,上表面设置为自由边界。岩体与炸药皆选择 Solid164 单元,因炸药单元体积非常小,为提高计算精度,采用由外向内尺寸逐渐收缩的自由网格划分方式,共划分为 133 344 个单元。

岩石采用非线性塑性模型 Plastic_Kinematic 材料模型,该模型是具有应变率效应的各向同性塑性随动强化材料,可模拟爆炸荷载作用下岩体应变率,明显提高的力学特性。

炸药采用 High_Explosive_Burn 模型及 JWL 状态方程加以描述。炸药类型为 2[#]岩石乳化炸药,按实际施工起爆顺序起爆。

岩体及炸药参数选取如表 3、表 4 所示。

表 3 岩石力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of rock				
密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/Pa	泊松 比 ν	屈服强度 σ_y/Pa	切线模量 E_t/Pa
2 880	7.8×10^{10}	0.23	2.1×10^8	3.2×10^8

表 4 炸药力学参数

Tab. 4 Mechanical parameters of explosive		
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆压 p/Pa
1 000	4 200	3.24×10^9

炸药单元材料常数取值如下: $A = 214 \text{ Pa}$, $B = 1.82 \times 10^8 \text{ Pa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.95$, $\omega = 0.3$ 。

3.2 模拟结果分析

提取关键点振动速度分量,其中 x 向为隧道轴(径)向, y 向为隧道水平切向, z 向为垂直方向。将关键点距隧道顶面的垂直距离定义为 L 。

据此分析在开挖与未开挖两侧,上部岩体不同位置处质点振速(v)与质点能量(P)^[15]的变化规律。分别如图 9、图 10 所示。

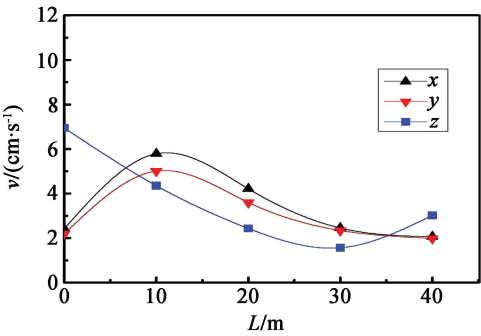
3.3 地表处实测数据与模拟结果对比分析

为验证数值模拟和合理性,提取地表监测数据,绘制地表质点振速实测曲线如图 11(a)所示;提取数值模拟在地表相应位置处质点振速,绘制地表质点振速模拟曲线如图 11(b)所示。

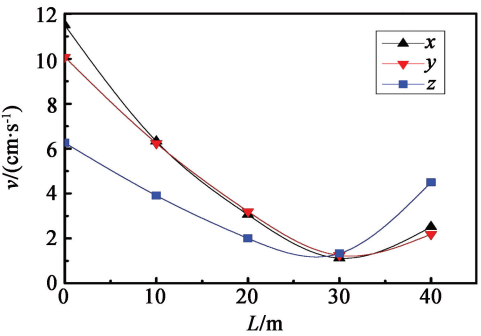
由图 11 可知,两质点振速曲线具有相同的变化规律,在掌子面正上方质点振速最大,向两侧呈逐渐衰减趋势。由此可知,该模拟符合工程实际,具有可靠性。

根据数值模拟可得出如下结论:

1)在靠近隧道顶面位置,两侧关键点水平分量



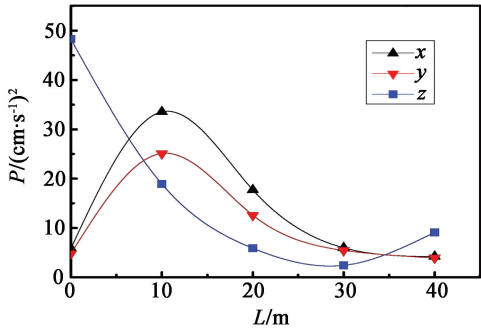
(a) 开挖侧



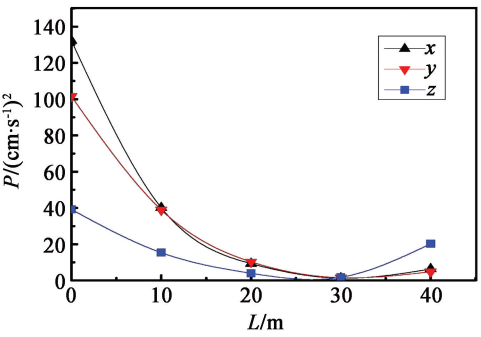
(b) 未开挖侧

图 9 振速衰减曲线

Fig. 9 Attenuation curves of vibration velocity



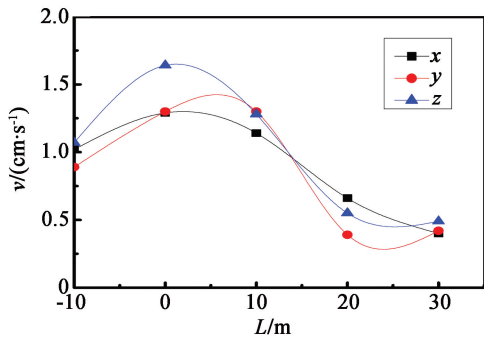
(a) 开挖侧



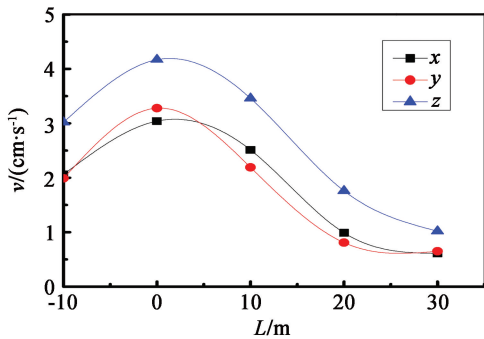
(b) 未开挖侧

图 10 能量衰减曲线

Fig. 10 Attenuation curves of energy



(a) 实测地表



(b) 模拟地表

图 11 振速变化曲线

Fig. 11 Curves of vibration velocity

相差很大,这是由于开挖隧道的存在使开挖侧水平振动迅速衰减;而垂直分量相差不大,这可能是由于已开挖侧隧道为垂直振动提供了临空面,使开挖侧垂直振速有所增大。

2)在接近地表位置,两侧关键点径向及切向分量相差不大,而未开挖侧垂向振速明显大于开挖侧,说明炸药将岩石抛出的同时消耗很多能量,使开挖侧振动能量较低。

3)在开挖侧,水平方向振速沿隧道顶面到地表先增大后逐渐衰减,可能是由于地震波入射角度的不同,加之各种波之间的相互叠加,致使水平方向振动峰值发生在该区域内部;垂直方向振速则逐渐衰减,到地表处由于自由面的存在又略有升高。

4)在未开挖侧,水平和垂直方向的速度分量都是随着高程的增加而逐渐减少,在地面处同时略有增加。

5)在地表处,模拟得到的振速比实测振速偏大,可能是由于实际岩体存在大量节理裂隙,使地震波能量大幅衰减;而模拟将岩体设为理想化弹塑性模型,所以模拟数据偏大。

4 结论

1)利用小波包分析方法,分别对各监测点振动分量进行处理,建立了沿隧道方向振动信号在地表处主频及总能量衰减规律,为减小和避免爆破震害

提供方法依据。

2)在爆破振动的传播过程中,水平分量频率低、衰减慢、携带能量较多;垂直分量传播至地表时由于自由面的存在,使振速有所增大。

3)通过 ANSYS/LS-DYNA 软件进行隧道爆破掘进数值模拟,提取关键点振动速度,研究得出了开挖与未开挖两侧质点振速及能量在岩体内部的衰减规律,为相邻隧道、管沟等爆破掘进提供指导。

参 考 文 献

[1] 费鸿禄,郭连军. 爆破施工的数字化[J]. 爆破,2015, 32(3):31-39.
FEI H L, GUO L J. Digitization of blasting construction [J]. Blasting,2015,32(3):31-39.

[2] 路亮,龙源,谢全民,等. 爆破振动信号的提升小波包分解及能量分布特征[J]. 爆炸与冲击,2013,33(2): 140-147.
LU L, LONG Y, XIE Q M, et al. Decomposition and energy distribution of blasting vibration signal based on second generation wavelet packet (SGWP) [J]. Explosion and Shock Waves,2013,33(2):140-147.

[3] 饶运章,王柳,饶睿,等. 基于 EMD 与小波阈值的爆破震动信号去噪方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015,43(2): 271-277.
RAO Y Z, WANG L, RAO R, et al. A method for blasting vibration signal denoising based on empirical mode decomposition and wavelet threshold [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43 (2):271-277.

[4] ZHAO M S, ZHANG J H, YI C P. Time-frequency characteristics of blasting vibration signals measured in milliseconds[J]. Mining Science and Technology (China), 2011(3): 349-352.

[5] 凌同华,李夕兵. 地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.
LING T H, LI X B. The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.

[6] 龙源,娄建武,徐全军. 小波分析在结构物对爆破振动响应的能量分析法中的应用[J]. 爆破器材,2001,30 (3):1-5.
LONG Y, LOU J W, XU Q J. Application of wavelet analysis to the energy method of the structure response caused by explosion vibration [J]. Explosive Materials, 2001,30(3):1-5.

[7] 中国生,敖丽萍,赵奎. 基于小波包能量谱爆炸参量对爆破振动信号能量分布的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009,29(3):300-305.

- ZHONG G S, AO L P, ZHAO K. Influence of explosion parameters on energy distribution of blasting vibration signal based on wavelet packet energy spectrum [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(3): 300-305.
- [8] 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 X G, YU Y L. On several problems of safety criterion for blasting vibration [J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(2): 88-92.
- [9] 陈士海, 魏海霞, 张安康, 等. 基于小波包技术的爆破地震效应计算模型及安全判据研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 377-382.
- CHEN S H, WEI H X, ZHANG A K, et al. Computational model and safety criterion of blasting vibration effect based on wavelet packet techniques [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 377-382.
- [10] JOHANSSON D, OUCHTERLONY F. Shock wave interactions in rock blasting: the use of short delays to improve fragmentation in model-scale [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(1): 1-18.
- [11] 曾翔宇. 隧道掘进爆破对地表影响的小波包分析 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- ZENG X Y. Influence on surface by tunnel excavation blasting vibration based on wavelet packet analysis [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2015.
- [12] 凌同华, 李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析 [J]. *岩石力学与工程报*, 2005, 24(7): 1117-1122.
- LING T H, LI X B. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 1117-1122.
- [13] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 292-295.
- [14] 周德廉, 邵国友. 现代测试技术与信号处理 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005: 13-17.
- [15] 李洪涛, 卢文波, 舒大强, 等. 爆破地震波的能量衰减规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 3364-3369.
- LI H T, LU W B, SHU D Q, et al. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup. 1): 3364-3369.

Propagation Characteristics of Tunnel Excavation Blasting Vibration on Surface and in Upper Rock Mass

FEI Honglu^①, GUO Zhiyu^①, YANG Zhiguang^①, QU Guangjian^②, GAO Ying^③

①Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

②Guangzhou China-blasting Digital Information Technology Co., Ltd. (Guangdong Guangzhou, 510670)

③South China University of Technology, School of Computer Science and Engineering (Guangdong Guangzhou, 510641)

[ABSTRACT] In order to know the propagation characteristics of tunnel excavation blasting vibration on surface and in upper rock mass, blasting excavation of Xiaogou Tunnel at Heda Express Way was studied. For the earth's surface, conduct, using wavelet packet analysis method was used after site monitoring in signal denoising and reconstruction process. And time frequency analysis and energy distribution of the pure vibration signal were obtained. Then, frequency distribution law of vibration signal and energy attenuation law were got. For the upper rock mass, ANSYS/LS-DYNA software was used to simulate blasting excavation and extract vibration velocity at key points. And vibration signal particle velocity and energy attenuation law from both sides of the excavation and excavation in upper rock mass were analyzed. It provides the basis for the research on dynamic response of tunnel blasting excavation, improvement of blasting damage assessment and blasting design.

[KEYWORDS] vibration signal; surface and upper rock mass; wavelet packet analysis; LS-DYNA numerical simulation; propagation characteristics