

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.003

超近距离爆破振动下铁路隧道铁轨振动特性研究

姚悟闻¹, 阳生权^{1, 2}, 孙杰¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 土木施工过程与质量安全控制实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 依托实际铁路隧道工程, 结合铁轨爆破振动测试与能量分析, 对超近距离邻近隧道爆破施工影响下既有铁路隧道铁轨爆破振动效应及其控制进行研究。利用小波包分解及其保范性在 Matlab 里对爆破振动信号进行分解, 并计算出铁轨爆破振动不同频带能量分布情况, 得到不同频率带所占能量百分比, 并拟合出能量衰减公式以更进一步量化铁轨地震波能量变化规律。通过对监测数据进行拟合得到适合琅口隧道场地条件的萨道夫斯基公式, 分析超近距离下铁路隧道铁轨的爆破地震波的衰减规律, 得出琅口隧道场地条件下的安全药量、距离计算公式。

关键词: 爆破地震波; 铁轨振动; 振速监测; 小波分析; 能量谱分析

中图分类号: U455.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0014-07

Research on Rail Vibration Characteristics of Railway Tunnel Under Ultra-Close Blasting Vibration

YAO Wuwen¹, YANG Shengquan^{1, 2}, SUN Jie¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. College Key Laboratory of Construction Process, Quality and Safety of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Based on the actual railway tunnel engineering, combined with the test and energy analysis of rail blasting vibration, a research has been conducted on the blasting vibration effect and its control of existing railway tunnel under the influence of blasting construction of ultra-close adjacent tunnels. Wavelet packet decomposition and its norm preservation in Matlab have been used to decompose the blasting vibration signal, thus working out the track of blasting vibration in different frequency band energy distribution, obtaining the energy percentages of different frequency bands, and fitting the energy attenuation formula to further quantify the wave energy variation of iron rail. By fitting the monitoring data, the Sudowski formula suitable for the site conditions of Langkou Tunnel can be obtained. An analysis has been made of the attenuation law of blasting seismic wave of railway track under ultra-close distance, thus obtaining the formula for the calculation of the safe charge quantity and distance under the condition of Langkou tunnel site.

Keywords: blasting seismic wave; rail vibration; vibration velocity monitoring; wavelet analysis; energy spectrum analysis

收稿日期: 2017-09-25

作者简介: 姚悟闻(1993-), 男, 湖南常宁人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土力学与地下结构爆破振动效应, E-mail: 798579235@qq.com

通信作者: 阳生权(1968-), 男, 湖南耒阳人, 湖南科技大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事地下工程与隧道施工安全方面的研究, E-mail: 984336908@qq.com

0 引言

新建隧道临近既有隧道钻爆施工产生的爆破地震, 会对既有隧道及其结构物造成巨大影响, 而爆破振动中不同频率成分对结构、设备和人员的影响有显著的差别。基于小波变换的频谱分析可以求得爆破振动的各种频率成分及其幅值, 这对于研究被测对象的振动特性、振型和动力响应具有重要理论意义和现实价值^[1]。

国内外已有很多学者基于小波原理对爆破振动下构筑物的振动特性进行了分析, 但在超近距离下隧道钻爆掘进对既有铁路隧道铁轨的振动特性也是一个值得研究的方面。本文依托实际铁路隧道工程, 对超近距离邻近隧道爆破施工影响下既有铁路隧道铁轨爆破振动效应及其控制进行了研究。

1 频谱分析方法

国内外大量研究指出, 合理的爆破安全判据不但取决于地震波的幅值, 而且还与振动频谱、持续时间等相关^[2-4]。傅里叶变换是频谱分析的主要方法, 其本质上是将被监测到的时域信号乘上旋转因子 $e^{-i\omega t}$, 再对全时间域积分, 剔除了时间的影响, 得到一个关于角频率 ω 的函数, 实现了时域到频域的转变, 从而将信号分解成一系列频率分量的线性组合。但信号经傅里叶变换后丢失了在时间域上的信息, 无法同时得到时域、频域的信息, 由此促进了小波变换相关理论的发展。

1.1 小波分析

小波变换是时频域结合分析的有力工具, 假设 $L^2(R)$ 为所有平方可积函数组成的空间, 给定小波函数 $\Psi(x) \in L^2(R)$, 当其满足以下两条要求时: 1) 快速衰减, 仅在有限区间非零, 即 $\Psi(x)$ 是连续的且呈现指数衰减 (对于某些常量 $C, M, \Psi(x) < Me^{-C|x|}$);

2) $\Psi(x)$ 的积分为零, 即 $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) dx = 0$ ^[5]。则给定函数 $f(x) \in L^2(R)$ 的小波变换 W_f 为^[6]

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (1)$$

式中: a 为尺度因子, a 越大, 小波函数的时间窗口越宽, 频率窗口越窄;

b 为位移, 随着 b 的变化, 小波变换将对整个信号空间全部分析。

由式(1)可看出, 小波变换与傅里叶变换最大的区别在于小波变换将无限长的三角函数基转换成了有限长、会衰减的小波基, 而地震波信号正是一个

快速衰减、非平稳随机的多峰值信号, 显然小波变换对爆破振动信号分析的能力优于傅里叶变换。小波包变换将原有的一个小波基函数变成一簇小波包函数, 然后对信号进行分解。小波包在分解过程中, 将小波变换未曾分解的高频部分也象低频部分一样分解成两部分, 从而比一般的小波分解更为精细。

1.2 能量谱分析

能量有限信号 $s(t) \in L^2(R)$ 的总能量为

$$E = \int_R s^2(t) dt, \quad (2)$$

式中 t 为实测信号的时间。

实测爆破振动信号都属于能量有限信号, 在小波变换中原始信号 $s(t)$ 在 $L^2(R)$ 的 2 范数定义为

$$\|s(t)\| = \int_R s^2(t) dt. \quad (3)$$

由式(2)(3)可以得到, 信号 2 范数的平方与原始信号在时域上的能量相等, 又因为经小波变换的小波函数基是正交函数基, 由帕塞瓦尔定理^[7]

(Parseval's theorem) 的保范性, 小波变换所得系数矩阵的 2 范数的平方应等于原信号 2 范数的平方。所以小波变换所表示的能量与原始信号的能量之间存在等价关系, 同理可得小波包能量谱。因此, 使用小波包能量谱来表示原始信号中的能量分布是可行的。

使用小波包将信号分解至第 i 层第 j 个节点上的能量^[8]:

$$E_{i,j} = \int |S_{i,j}(t_j)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2, \quad (4)$$

式中: $x_{j,k}$ 为重构信号 $S_{i,j}(t_j)$ 的离散点的幅值 ($j=0, 1, 2, \dots, 2n-1; k=1, 2, \dots, m$);

m 为信号的离散采用点数。

由此可计算各频带的能量占被分析信号总能量的比例为

$$E_j = \frac{E_{i,j}}{E} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: $E_{i,j}$ 为小波包分解第 i 层中第 j 个节点的能量, i, j 均取自然数;

E 为总能量。

2 工程概况

南龙铁路斑竹堑隧道为双线铁路在建隧道, 上穿既有单线铁路隧道琅口隧道(图1), 琅口隧道为单线复合式衬砌结构, 交叉点处琅口隧道里程为 DK3+024, 斑竹堑隧道里程为 DK54+052, 隧道间净距仅为 6.4 m。隧道施工段地质主要为侏罗纪下统梨山组石英砂岩, 灰黄色至青灰色, 全至弱风化, 全风

化厚 0~3 m，强风化厚 0~2 m，以下为弱风化，岩质坚硬，岩体完整。两隧道中间岩柱级别为 III ~ IV 级围岩，主要为 III 级围岩。

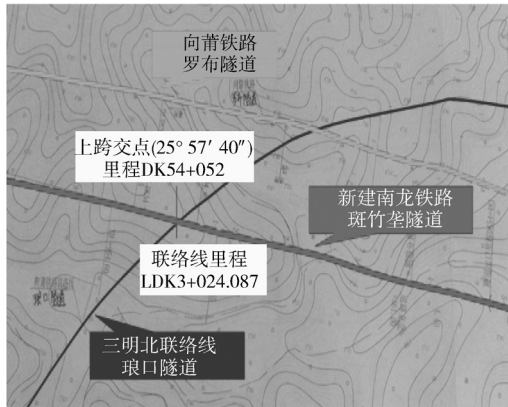


图 1 隧道交叉平面图

Fig. 1 Intersection planary graph of tunnels

斑竹堑隧道上跨影响区段采用微震动爆破法开挖，尽可能地降低爆破振动，采用“短进尺、短开挖、弱爆破”等方式，将每循环进尺控制在 0.5 m 内，同时根据设计要求，对既有的隧道爆破震速不大于 2 cm/s，确保既有隧道安全。III 级围岩段采用三台阶法施工，施工时上台阶断面大，随之带来的爆破振动影响最大，爆破振动监测主要针对第一次上台阶爆破展开，上台阶钻爆炮眼布置图如图 2 所示。

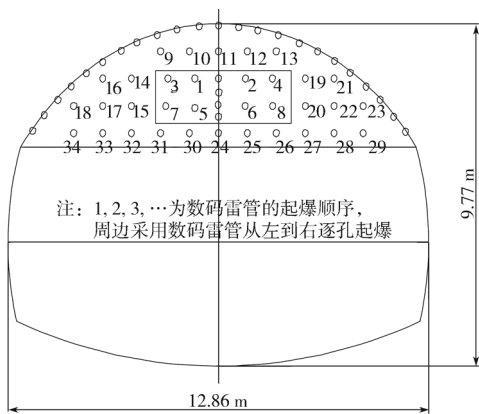


图 2 上台阶爆破炮孔雷管布置图

Fig. 2 Blasting layout of upper bench blasting

选用电子雷管逐孔起爆时，孔间延期时间选择 17 ms。排间延时选择 42 ms，以避免振动波叠加。上台阶装药参数如表 1 所示。

表 1 上台阶装药参数表

Table 1 Drilling and blasting parameters of the step up stage

序号	炮孔名称	孔数 / 个	孔深 / m	装药量 / kg	总药量 / kg	备注
1	掏槽孔	8	0.7	0.15	1.2	孔内装 17 ms 间隔电子雷管
2	辅助孔	28	0.5	0.15	4.2	
3	周边孔	23	0.5	0.10	2.3	
合计		59			7.7	

为了监测上方隧道爆破振动对隧道铁轨的影响，现场采用 TC-4850 爆破测振仪（成都中科测控有限公司生产），每次爆破前在指定断面轨枕中用石膏和水将传感器固定在轨枕上，测量轨枕径向、切向和垂向 3 个方向的振速，测点布置图如图 3。



图 3 轨枕测点布置图

Fig. 3 Layout of measuring points

通过统计多个断面数据，发现每个断面规律相似，因此选取典型断面数据进行爆破地震波传播规律进行研究。图 4 是在琅口隧道 LDK2+850 断面轨枕测点监测到的 25 d 爆破振动数据，图中 X 方向是隧道径向方向，Y 方向是切向方向，Z 方向是垂向方向。

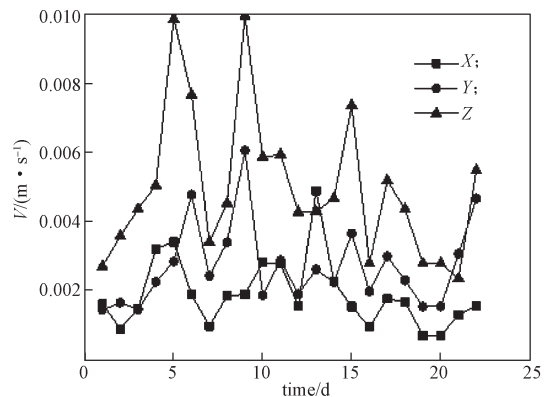


图 4 LDK2+850 断面测点振速时程曲线

Fig. 4 Curves of vibration velocity of LDK2+850

由图 4 所示典型断面不同日期测得的 3 个方向振速时程曲线可看到，轨枕的振动响应特点与一般结构物振动响应特点有所不同，由于铁轨道床是用道碴铺设而成，有碴道床结构阻尼很大，地震波大部分被道床结构吸收，且近乎于无限长的铁轨整体刚度十分大，振速相比其他结构物而言较小，因此铁轨测点平均振速数值偏小。铁轨轨枕 3 个方向上振速大小依次为纵向、竖向、横向。3 个方向中 Z 方向（纵向）的振速最大，这是由于铁轨的结构特点所致，轨枕面上的铁轨测点在隧道围岩及道床结构之上，地震波所产生的 X 方向（隧道横向方向）与 Y 方向（竖向方向）

的振动较小, 近乎于无限长的铁轨纵向方向整体刚度十分大, 在隧道轴向方向产生振动将大于另外两个方向, 故而使得监测数据中铁轨的振动速度最大的在 Z 方向 (纵向方向)。故而选取监测到的 Z 方向的数据对爆破施工下铁轨振动特性进行分析。

3 铁轨爆破振动能量分析

为了得到铁轨在近距离爆破震动下的能量在不同频带上的分布特征, 选取了相同药量条件下不同距离断面数据, 使用小波时频分析及小波包能量分析法二者结合来分析铁轨振动的能量 - 频带关系。图 5 是其中一个断面测得的铁轨振动信号图。

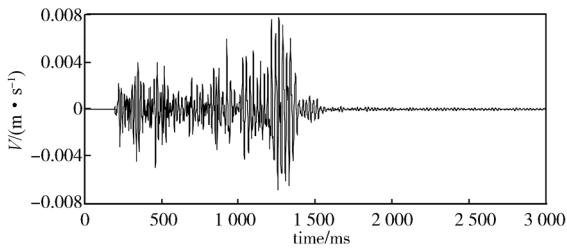
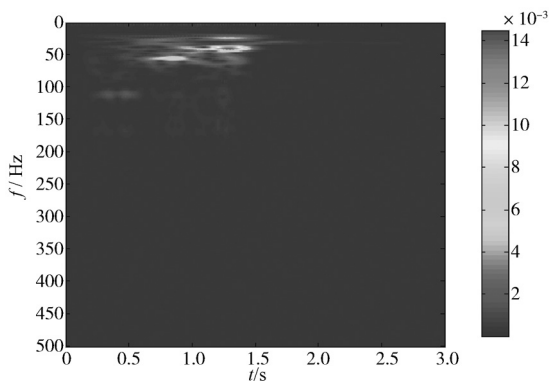


图 5 LDK2+850 断面测点振速 - 时间曲线

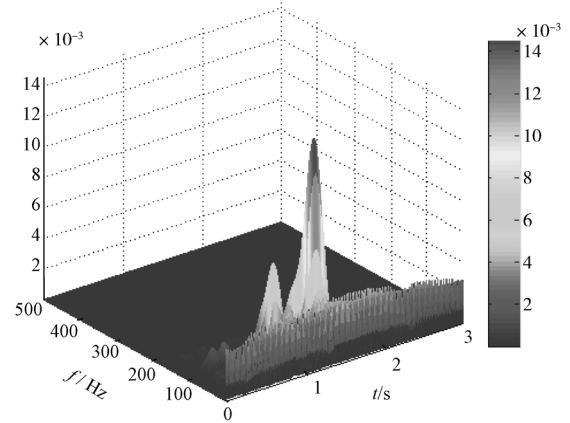
Fig. 5 Vibration velocity time diagram of LDK2+850 measuring points

对铁轨测得的爆破振动信号利用 Matlab 编制程序进行小波变换, 爆破地震信号的采样频率 $f_s=1$ kHz, 选取小波基函数为 db8, 总分解尺度为 256, 分解得到如图 6 所示时频图。

小波变换的时频图克服了傅立叶变换的缺点, 从中可以清晰地看到各个频率成分随着时间的变化。从图 6 中发现, 铁轨振动频率成分主要分布在 0~100 Hz 之间, 大部分是低频的振动, 图中有两个尖峰, 这是测得爆破振动的 2 个主频, 其中第一主频为 47 Hz, 第二主频为 75 Hz, 持续时间都接近 0.5 s, 其中第二主频主要分布在时域的 0.5~1.0 s, 第一主频主要分布在 1.0~1.5 s。



a) 2-Dimension



b) 3-Dimension

图 6 小波变换时频图

Fig. 6 Wavelet transform time-frequency map

为了得到不同频带具体能量百分比, 课题组利用 Matlab 小波包继续对铁轨测得的爆破振动信号分解, 爆破地震信号的采样频率 $f_s=1$ kHz, 选取小波包基函数为 db8, 将其进行四层分解得到 16 个频带, 由小波包变换的规范性编程序得到各个频带能量百分比, 如表 2 所示。

表 2 小波包四层分解能量百分比表

Table 2 Energy ratio table of four-layer decomposition of wavelet packet

频带	频率范围 /Hz	能量百分比 /%	频带	频率范围 /Hz	能量百分比 /%
4-1	0.00~31.25	4.534	4-9	>250.00~281.25	0.063
4-2	>31.25~62.50	72.341	4-10	>281.25~312.50	0.017
4-3	>62.50~93.75	14.341	4-11	>312.50~343.75	0.005
4-4	>93.75~125.00	6.343	4-12	>343.75~375.00	0.001
4-5	>125.00~156.25	1.822	4-13	>375.00~406.25	0.000
4-6	>156.25~187.50	0.404	4-14	>406.25~437.50	0.000
4-7	>187.50~218.75	0.074	4-15	>437.50~468.75	0.000
4-8	>218.75~250.00	0.090	4-16	>468.75~500.00	0.000

经过四层分解后各频带能量百分比柱状图如图 7 所示。

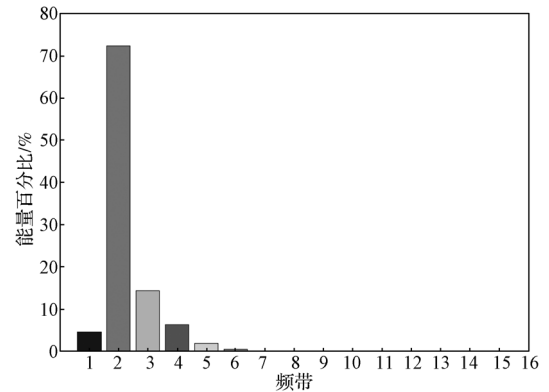


图 7 四层分解下各频带能量百分比柱状图

Fig. 7 Energy percentage histogram of frequency bands under four-layer decomposition

铁轨在爆破地震波影响下能量分布广泛, 0~500 Hz 都有分布, 125~500 Hz 的中高频段能量百分比不超过 2.30%, 主要能量集中频率段为 31.0~62.5 Hz, 能量百分比超过 70%, 而该频段恰为信号爆破振动第一主频 (47 Hz) 所在的频段, 第二主频 (75 Hz) 所在频带所占能量百分比为 14.34%, 所占比率同样较大。这说明了振动信号的能量分布范围很广, 虽然能量主要集中在主频及附近波段, 但是其能量分布极不均匀, 有时在频域内出现几个子中心, 这些子中心构成了爆破震动信号不同的主震频带。由此可得主频所处的频带段能量占据爆破振动总能量的绝大部分, 此结果说明地震波的频带能量分析与主频同样可以作为安全判据反映爆破振动的强度。

由表 2 及图 7 中不同频带能量百分比可以看出, 铁轨振动能量主要集中在低频段 (0~100 Hz), 能量百分比超过总能量的 90%。这是岩土介质的阻尼效应造成的能量衰减, 地震波的能量在阻尼较大的岩土介质中大幅度耗散, 高频衰减较快, 因此可得铁轨振动能量集中于低频段。

图 8 为不同爆心距下 0~62 Hz 的能量百分比。

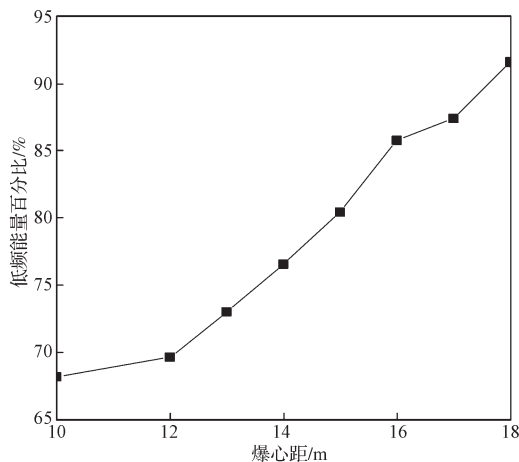


图 8 不同爆心距下 0~62 Hz 能量百分比

Fig. 8 0~62 Hz energy ratio at different detonation center distances

由图 8 可看到, 随着爆心距的增加, 能量更加集中在低频成分段, 这是由于距离的增加, 高频能量都在传播过程中耗散。这一结果表明了在药量一致的情况下, 随着爆心距的增加振动频率将会越来越低, 低频段能量所占百分比越来越大, 这与爆破地震波传播特点相同, 对信号的能量分析方法很好地解释了地震波的传播规律。而经过统计, 琅口隧道在近距离爆破震动下隧道铁轨振动超过 50% 的能量集中在 0~60 Hz 以内。

为了进一步得到铁轨爆破振动能量变换规律, 计算并统计出了不同爆心距下断面的爆破振动总能量, 如表 3 所示。

表 3 不同爆心距下断面振动总能量 E
Table 3 Total vibration energy under different blasting center distances cm^2/s

断面	爆心距/m	日期					
		8-25	8-30	9-05	9-06	9-07	9-08
LDK2+850	10.0~20.0	1.979	2.185	4.887	1.144	1.972	0.853
LDK2+840	15.0~25.0	0.651	0.431	0.879	0.551	0.639	0.304

在同一场次的爆破中, 由于各段药量一定, 爆破能量的衰减满足^[9]:

$$E_T = K_E R^{-\alpha_E} \quad (6)$$

式中: E_T 为衰减后的振动总能量;

K_E 为爆破地震波初始总能量;

R 为爆心距;

α_E 为爆破地震能量随距离的衰减系数。

根据琅口隧道测得的相同日期 (药量条件相同) 下不同断面 (距离) 计算出的总能量利用 Matlab 曲线拟合工具得到 $K_E=387.5$, $\alpha_E=2.124$, 该场地条件下爆破振动能量的衰减公式为

$$E_T = 387.5 R^{-2.124} \quad (7)$$

从拟合出来的能量衰减公式可以看出, 随着爆心距的增加, 能量的衰减变得越来越慢; 越靠近爆源, 能量衰减越快, 与爆破地震波的传播规律相同。对能量衰减公式的拟合很好地解释了铁轨振动能量的衰减规律。

4 铁轨爆破振速分析

课题组对爆破振动频率谱及能量谱的分析, 得到了近距离交叉隧道铁轨爆破振动效、应铁轨振动能量在不同频带上分布特点, 以及其在空间域上的衰减规律。为了得到铁轨振动在不同爆破施工参数影响下的特点, 使用萨道夫斯基公式对不同爆破施工参数条件得到的振速进行了拟合。

爆破振动效应影响因素包括钻爆参数和地质条件以及爆心距, 以萨道夫斯基公式为代表的质点振动速度经验公式, 是对爆破地震波的传播规律分析的有力工具^[10]:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (8)$$

式中: V 为质点振动速度值, cm/s ;

Q 为最大段齐爆药量, kg ;

K 、 α 为与地形、地质条件相关的系数。

本文利用 Matlab 中 SFTool 工具箱的 Custom

Equation 工具进行拟合, 得到的结果如图 9 所示。

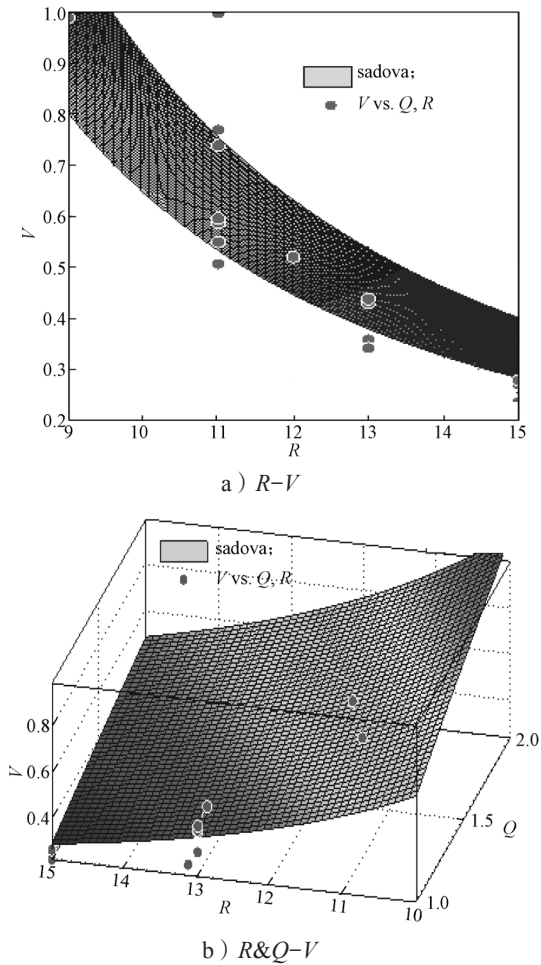


图 9 萨道夫斯基公式拟合曲线
Fig. 9 Sadova formula fitting curves

拟合得到 $K=37.2$, $\alpha=1.757$, 方程的确定系数 $R^2=0.967$, 由此得到在极近距离下中间岩柱为弱风化石英砂岩时交叉隧道掏槽爆破振动铁轨的萨道夫斯基经验公式:

$$V=37.2 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.757} \quad (9)$$

根据式 (9) 导出琅口隧道一定药量 Q 下的安全距离计算公式:

$$R_{\min} = \frac{Q^{1/3}}{\left(\frac{V}{K} \right)^{1/\alpha}} = \frac{Q^{1/3}}{\left(\frac{V}{37.2} \right)^{1/1.757}} \quad (10)$$

同样可根据上式导出琅口隧道一定距离 R 下的安全药量 Q 计算公式:

$$Q_{\max} = R^3 \left(\frac{V}{K} \right)^{3/\alpha} = R^3 \left(\frac{V}{37.2} \right)^{3/1.757} \quad (11)$$

本工程两隧道最小净距为 6.4 m, 铁路隧道监控量测技术规程 (TB 10121—2007) 中对于交通隧道

爆破振动安全允许的速度为 10~20 cm/s。但规范中的振速安全范围并没有具体到隧道各组成部位, 该值对于轨枕来说是不太合理的。美国北美空防联合司令部对既有隧道在受旁边隧道爆破施工时测得的引发隧道结构破坏的振动速度值为 5.6 cm/s^[11-12], 在此若设铁轨振速需控制在 6.0 cm/s 以内, 由上文中拟合得到的琅口隧道的萨道夫经验公式可知掏槽最大段齐爆药量应为

$$Q_{\max} = R^3 \left(\frac{V}{K} \right)^{3/\alpha} = 11.63 \text{ kg}。$$

5 结论

1) 铁轨质点振动监测数据表明, 爆破地震影响下铁轨纵向振速最大, 而该方向上的振动又会对铁轨稳定性产生影响 (造成螺栓松动等), 类似工程应密切关注轨枕纵向方向的爆破振动影响;

2) 得出铁轨振动能量分布特点, 计算发现铁轨主频所在频带段与主要能量所在频带段相同, 说明能量分析法同样可以很好地反映爆破振动的特点并作为安全判据, 而铁轨振动低频段 (0~100 Hz) 的能量占据了总能量 90% 以上;

3) 对不同测点数据进行不同频带能量百分比分解并进行统计分析, 然后尝试拟合出适合该场地条件下的爆破振动能量的衰减公式, 分析了铁轨爆破振动能量随距离的变化规律;

4) 通过对爆破振动数据利用 Matlab 自定义函数箱进行拟合, 得到了近距离交叉隧道在该工程地质条件下铁轨爆破振动效应的萨道夫斯基公式, 得出了该地场条件下的安全药量为小于 11.631 kg、距离计算公式。

参考文献:

[1] 应怀樵. 振动测试和分析 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981: 1-5.
YING Huaijiao. Vibration Measurement and Analysis[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1981: 1-5.
[2] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
LI Hongtao. Study on Effect of Blast-Induced Seismic Based on Energy Theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007.
[3] 言志信, 王后裕. 爆破地震效应及安全 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 3-10.
YAN Zhixin, WANG Houyu. Blasting Seismic Effect and Safety[M]. Beijing: Science Press, 2011: 3-10.

- [4] 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 Shengquan, LIAO Xiankui, LIU Baochen. Default of the Judging Standard of Blasting Vibration Safety Abstract[J]. Journal of Explosion and Shock Waves, 2001, 21(3): 223-228.
- [5] BOGGESS A, NARCOWICH F J. 小波与傅里叶分析基础 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 82-100.
BOGGESS A, NARCOWICH F J. A First Course in Wavelets with Fourier Analysis[M]. 2nd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 82-100.
- [6] 凌同华, 李夕兵. 用小波变换识别微差爆破中的实际延迟时间 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2004, 19(2): 21-23.
LING Tonghua, LI Xibing. Using Wavelet Transform to Identify Practical Time of Delay in Millisecond Blasting[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2004, 19(2): 21-23.
- [7] 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: 43-48.
ZHOU Delian, SHAO Guoyou. Modern Test Technology and Signal Analysis[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005: 43-48.
- [8] 徐学勇. 爆破震动信号的小波分析方法研究 [D]. 武汉理工大学, 2006.
XU Xueyong. Study on Wavelet Analysis Method for Blasting Seismic Signals[D]. Wuhan University of Technology, 2006.
- [9] 宁瑞峰, 张世平. 小波包分析在爆破震动信号能量衰减规律中的应用 [J]. 爆破, 2014, 31(1): 1-4.
NING Ruifeng, ZHANG Shiping. Application of Wavelet Packet Analysis in Blasting Vibration Signal Energy Attenuation Law[J]. Blasting, 2014, 31(1): 1-4.
- [10] 林大能, 陈寿如, 刘优平. 某露天采场爆破震动特性及减震技术研究 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(6): 73-77.
LIN Daneng, CHEN Shouru, LIU Youping. Characteristic and Shock Damping of Blast Vibration in a Certain Open Pit[J]. Engineering Science, 2006, 8(6): 73-77.
- [11] 张程红. 邻近隧道爆破施工引起的既有隧道衬砌振动速度阈值分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2009.
ZHANG Chenghong. Analysis of Vibration Velocity Maximum of the Lining of Existing Tunnel by the Blasting of the Tunnel Near-by[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2009.
- [12] 曹峰, 凌同华, 刘家澍, 等. 分岔隧道浅埋连拱段的爆破振动效应分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 86-94.
CAO Feng, LING Tonghua, LIU Jiashu, et al. Analysis on Blasting Vibration Effect of Shallow Multi-Arch Section of Bifurcated Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(2): 86-94.

(责任编辑: 申 剑)