

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.007

立体交叉铁路隧道爆破振动效应的研究^{*}

高军伟^① 赵岩^{②③} 王奔^①

①中铁隧道集团三处有限公司(重庆,401121)

②河北建筑工程学院土木工程学院(河北张家口,075000)

③河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室(河北张家口,075000)

[摘要] 依托京张高铁某交叉隧道工程,研究既有隧道二次衬砌在下部隧道爆破载荷作用下的动力响应特征。基于萨道夫斯基公式,以隧道交叉断面为界,研究交叉点分别位于掌子面前方及后方时对应的爆破振动峰值速度及振动主频率的衰减规律。为了弥补现有爆破安全规程中分段考虑频率影响方法的不足,通过回归分析的方式得到爆破振动峰值速度与主频率之间的数学关系,定量考虑爆破振动频率对爆破振动响应特征的影响。计算结果表明,综合考虑爆破振动频率与既有隧道自振频率的影响,优化计算得到的爆破振动峰值速度 v_{PPS} 小于实测振动数据 v_{PP} 。针对本交叉隧道爆破工程,下部隧道爆破施工对既有隧道的振动影响在可控范围内。

[关键词] 交叉隧道;爆破振动响应;量纲分析;安全控制;爆破振动频率

[分类号] TD235; O383

Vibration Law in the Blasting of Railway Tunnels with Interchange

GAO Junwei^①, ZHAO Yan^{②③}, WANG Ben^①

①Sanchu Co., Ltd., China Railway Tunnel Group (Chongqing, 401121)

②School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture (Hebei Zhangjiakou, 075000)

③Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance,
Hebei Province (Hebei Zhangjiakou, 075000)

[ABSTRACT] Based on a blasting project of crossed tunnels of Beijing-Zhangjiakou High-Speed Railway, the dynamic response of the secondary lining of an existing tunnel to the blasting loads from the lower tunnel was studied. Based on Sadowski's formula, the attenuation laws of the peak velocity and main frequency of blasting vibration corresponding to the intersection points located in front of and behind the tunnel face were studied with the tunnel intersection section as the boundary. In order to compensate for the shortcomings of the method of segmented frequency influence in existing blasting safety regulations, the mathematical relationship between the peak velocity of blasting vibration and the main frequency was obtained through regression analysis, and the impact of blasting vibration frequency on the response characteristics of blasting vibration was quantitatively analyzed. The calculation results indicate that, taking into account the influence of blasting vibration frequency and existing tunnel natural vibration frequency, the optimized v_{PPS} is smaller than the measured vibration data v_{PP} . In this blasting project of crossed tunnels, the vibration impact of the lower tunnel blasting construction on the existing tunnel is within a controllable range.

[KEYWORDS] crossed tunnels; blasting vibration response; dimensional analysis; safety control; blasting vibration frequency

0 引言

随着国民经济的飞速发展,地下岩土工程的建

设规模日趋扩大。作为岩土基建中的常用施工模式,隧道工程被广泛应用于公路、铁路及市政工程中^[1]。爆破施工具有经济效益好、操作简单及施工进度快等优点,已经成为山岭隧道的主要掘进方

* 收稿日期:2023-01-28

基金项目:国家自然科学基金(51878242);河北省创新能力提升计划项目(21567614H)

第一作者:高军伟(1984-),男,工程师,研究方向为桥梁与隧道工程。E-mail: 762696671@qq.com

通信作者:赵岩(1991-),男,博士,研究方向为隧道爆破振动。E-mail: 304965624@qq.com

式^[2]。然而,爆破施工带来的负面环境影响却不可忽视。爆炸瞬间释放的化学能除用来破碎岩石外,部分能量以波动的形式向外传播。若爆破能量诱发的结构振动超过了既有岩土工程的承受极限,则有可能引起既有结构的屈服破坏。

国内外学者针对爆破引起的振动效应已经进行了大量的相关研究。单仁亮等^[3]通过最小二乘法拟合及小波包分析对山岭隧道爆破信号进行分析,研究表明,隧道爆破信号频率成分较为丰富,随着爆心距的增加,信号主频范围逐渐向低频率带转移。Huo 等^[4]利用非金属声波仪(RSM-SY5)对地下巷道爆破引起的围岩损伤进行了系统研究,并通过优化装药结构形式对围岩爆破损伤进行了有效控制。Yu 等^[5]利用现场实验及数值分析的方法研究了含节理岩体在瞬时爆炸载荷作用下的振动衰减规律,分类讨论了节理角度、节理空间及节理刚度对爆破振动衰减系数的影响。

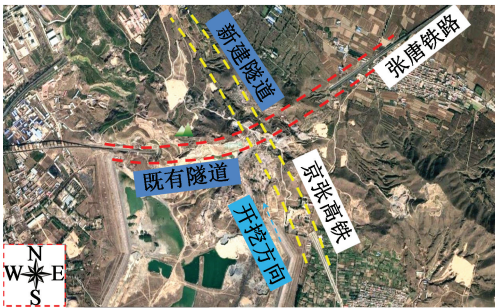
对于爆破振动控制而言,爆破振动频率也应是重点关注的物理量^[6]。为此,各国的爆破振动控制规范也将频率的影响纳入考虑范围之内。Zhong 等^[7]基于小波包分析理论,讨论了装药量、爆心距及起爆雷管段位对爆破信号主频段的影响。Zhao 等^[8]通过改进的 Hilbert-Huang 变换,从能量的角度剖析了爆破振动瞬时能量的分布规律;研究结果发现:随着应力波传播距离的增大,高频能量的衰减速度远大于低频能量,而低频振动能量可能诱发既有结构物产生共振现象,危害结构物的使用安全。中国生等^[9]通过小波包分析的方法考虑不同频带的振动能量对既有建筑的影响,基于结构动力学的理论优化了爆破振动控制标准。李洪涛^[10]基于傅里叶变换的方法探讨了爆破振动能量的频域分布及建筑物动力响应特性,提出了等效峰值能量的控制理论。张立国等^[11]以萨道夫斯基公式为基础,利用量纲分析的方法,推导得到了爆破振动主频率的预测公式,并通过实测数据加以验证。

然而,无论是控制规范抑或相关的研究,均是利用分段考虑的方法定义不同频带对应的爆破振动速度的控制阈值。虽然这种方法操作简便,但缺乏一定的科学性,并未将频率的影响量化地体现出来。综上,依托京张高铁草帽山交叉隧道工程,利用回归分析的方法分别研究爆破振动作用下交叉隧道振动速度及振动频率的分布特征;并辅以量纲分析的方式,理论推导形成一套可以定量考虑频率影响的爆破振动控制体系。以期类似交叉隧道爆破振动控制施工提供一定的理论建议和参考。

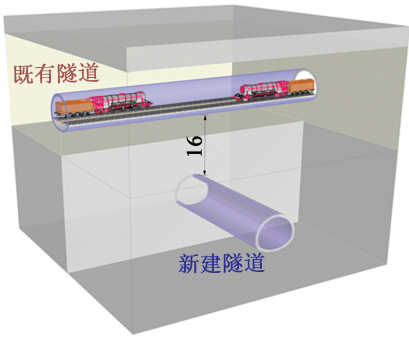
1 工程背景及监测方案

1.1 工程概况

京张高铁草帽山交叉隧道采用单洞双线形式,全长 7 340 m,设计时速 350 km。新建高铁隧道(新建隧道)于 DK173 + 862 ~ DK174 + 057 段下穿既有重载铁路隧道(既有隧道),交接里程为 DK173 + 965,平面交角 76°22'。交叉断面对应的既有隧道实际里程为 IDK25 + 620。新建隧道拱顶距既有隧道最小净距约为 16 m。隧道交叉段围岩等级为 IV,中夹岩层多为中~强风化凝灰岩^[12-13]。交叉隧道平面位置布置如图 1(a)所示;竖直方向位置布置如图 1(b)所示。



(a) 平面位置



(b) 竖直方向(单位:m)

图 1 交叉隧道的位置关系

Fig. 1 Location relationship of the crossed tunnels (Unit: m)

根据隧道围岩等级及地质条件,新建隧道设计采用台阶法掘进,控制循环进尺根据具体施工条件动态调整。爆破施工采用 2#岩石乳化炸药,炮孔直径为 42 mm,药卷直径为 32 mm。隧道爆破采用不耦合间隔装药,非电导爆管雷管起爆,填塞长度不小于 0.3 m。炮孔深度根据循环进尺确定,取值范围为 2.0 ~ 3.0 m。受岩石的夹制作用影响,隧道上台阶爆破所用药量较多,引起的爆破振动较大。隧道上部台阶爆破炮孔布置见图 2,具体装药量及爆破施工参数见表 1。

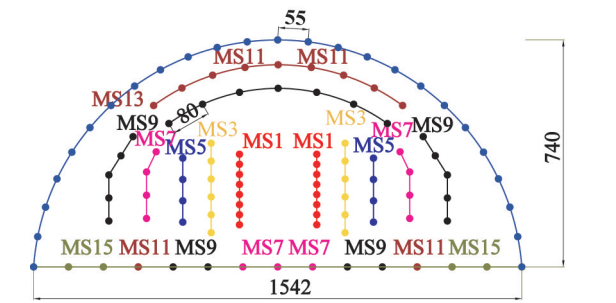


图 2 新建隧道上部台阶炮孔布置图(单位:cm)

Fig.2 Layout of upper bench blast holes of the new tunnel (Unit: cm)

表 1 隧道爆破具体装药量

Tab.1 Charging amount in tunnel blasting

炮孔类型	雷管段位	炮孔个数	单个炮孔装药量/kg	单段装药量/kg
掏槽孔	MS1	16	2.1	33.6
辅助孔	MS3	12	1.5	18.0
辅助孔	MS5	8	1.2	9.6
辅助孔	MS7	11	1.2	13.2
辅助孔	MS9	21	1.2	25.2
辅助孔	MS11	11	1.2	13.2
周边孔	MS13	25	0.6	15.0
底板孔	MS15	4	1.2	4.8
共计		108		132.6

1.2 监测方案

使用成都中科测控公司研发的网络版 TC-4850N 爆破测振仪。采样频率为 1~50 kHz,可以保存 0~35 cm/s 的爆破振动数据,记录长度在 1~160 s 范围内可自动调整,记录精度为 0.01 cm/s,满足监测精度要求。每个爆破测振仪均配套一组 TCS-B3 三轴向振动速度传感器,可以同时采集 x 、 y 、 z 3 个相互垂直方向的爆破振动速度及振动主频率。此外,测振仪内置 4G 和 WiFi 模块,网络正常连接的状态下,可以瞬间将系统采集到的数据上传至云平台。监测人员可在服务器内实时下载和查看现场监测数据。

新建隧道未进入交叉区域时,利用既有铁路隧道运营天窗时间,布置监测仪器,组建自动化振动监测系统。根据 TB 10313—2019《铁路工程爆破振动安全技术规程》,爆破振动测点布置于既有隧道二次衬砌迎爆侧边墙侧壁表面。共对称布置 5 个测点,具体布置如图 3 所示。

根据 TB 10313—2019《铁路工程爆破振动安全技术规程》,铁路隧道爆破振动速度安全允许范围为 5~8 cm/s,保守起见,考虑到运营中的重载列车

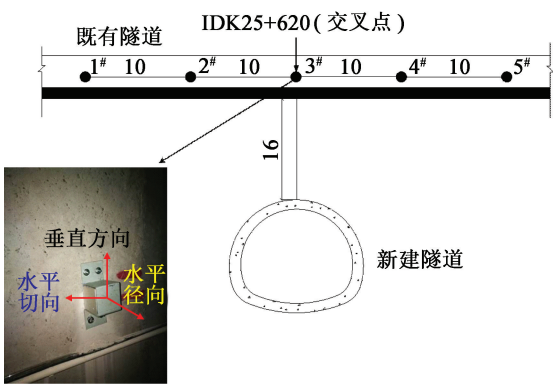


图 3 爆破振动测点布置(单位:m)

Fig.3 Layout of monitoring points for blasting vibration (Unit: m)

载荷对交叉隧道的不利影响,初步确定振动速度控制标准为 5 cm/s。从安全角度出发,在控制标准的基础上乘以一个安全系数 0.8 作为报警值,在控制标准的基础上乘以 0.6 作为预警值。故针对本隧道工程,爆破振动速度控制的报警值及预警值分别为 4 cm/s 和 3 cm/s。

2 爆破振动响应研究

2.1 爆破振动速度分析

2.1.1 实测数据分析

测点 3# 位于既有隧道交叉点的位置,对应的爆心距最小,爆破振动响应最大。因此,以测点 3# 对应的爆破振动实测数据为例展开分析。

对于只含有一种波动形式的爆破振动波,引起结构体的极限应力大小与传播振动速度存在某种正比例关系。根据岩石动力学可知,爆破振动波是多个不同频率的振动形式叠加的结果。随着爆破振动波的传播,必然存在振动加强区及振动衰减区,处于振动加强区的结构体更容易达到极限应力状态,发生破坏。而在实际爆破施工过程中,爆破振动波的传播方向千变万化,振动加强区及振动衰减区难以清晰界定。因此,将某一特定方向的振动峰值速度作为衡量结构体是否发生破坏的唯一标准不是很恰当。相关爆破安全规程^[14]将爆破振动响应最大的方向作为研究对象,但在实际工程中,每个方向的爆破振动能量的传递均会对周边构筑物的运营安全产生影响。因此,需要综合考虑 3 个垂直方向的爆破振动速度,即爆破振动合速度对实际工程的影响。

$$v_{pp}=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}.$$
 (1)

式中: v_x 、 v_y 及 v_z 分别表示 3 个垂直方向的爆破振动

峰值速度; v_{pp} 则表示矢量合成的质点的振动峰值速度。

图 4 为典型爆破振动合速度时程曲线。

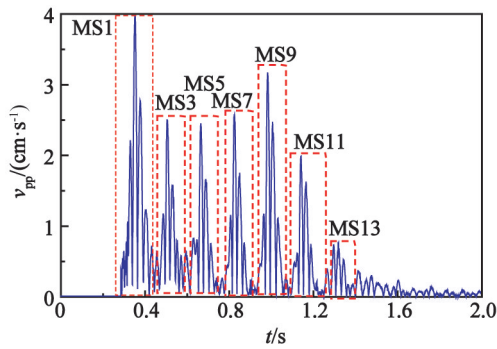


图 4 典型爆破振动合速度时程曲线

Fig.4 Time history curve of the resultant velocity of typical blasting vibration

图 4 中,可以清晰地辨别出多个波峰。其中,MS1 对应的振动峰值速度最大。产生这个现象的主要原因是,MS1 段位对应的掏槽段装药量最大,且掏槽爆破只对应一个自由面,受岩石的夹制作用最大,导致对应的振动响应也最大。

表2为测点3#对应的合成的爆破振动峰值速度。表2中, D 表示新建隧道掌子面与交叉点的水

表 2 既有隧道测点 3#爆破振动峰值速度

Tab.2 Peak vibration velocity of the existing tunnel in blasting of No. 3			
D/m	r/m	Q/kg	$v_{pp}/(cm \cdot s^{-1})$
-25.0	29.68	33.6	0.842
-22.8	27.85	33.3	0.984
-19.5	25.22	32.8	1.027
-17.1	23.42	30.9	1.165
-12.5	20.30	32.4	1.833
-9.1	18.41	32.7	2.108
-7.4	17.63	33.0	2.565
-4.9	16.73	33.6	3.189
-2.8	16.24	33.3	3.408
0	16.00	33.6	3.981
3.8	16.44	33.6	3.365
5.2	16.82	33.3	2.866
7.2	17.55	32.8	2.262
9.3	18.51	30.9	1.935
12.8	20.49	32.4	1.638
16.5	22.98	32.7	1.021
19.3	25.07	33.0	0.871
21.5	26.80	33.6	0.734
24.2	29.01	33.3	0.764

平距离。 $D = -25.0\text{ m}$,指测点 3#位于掌子面前方 25.0 m。 $D = +24.2\text{ m}$,指测点 3#位于掌子面后方 24.2 m。也就是说, $D < 0$ 表示新建隧道断面未到达交叉断面; $D > 0$ 表示新建隧道断面已超过交叉断面。 r 表示爆心距,主要通过正弦定理计算得到。

由表 2 可知,随着新建隧道的掘进, r 逐渐减小,爆破振动强度逐渐增大,当掌子面到达交叉点时,爆破振动速度最大;随着掌子面远离交叉点,爆破振动速度呈逐渐减小的趋势。

为清晰反映下部爆破载荷作用下既有隧道爆破振动峰值速度的分布情况,将表 2 中的相关数据绘制于图 5 中。由图 5 可知,在总药量及单响药量基本保持不变的条件下,测点 3#位于掌子面前方的质点振动峰值速度大于掌子面后方的质点。产生这种差异的原因可能是,下部隧道掌子面未到达交叉断面时,爆破振动传播至既有隧道过程中,爆炸应力波从波阻抗大的围岩介质传递至波阻抗小的空气介质,爆破振动得到放大。而当隧道掌子面超过交叉断面后,新建隧道已开挖部分相当于形成一个减(隔)振空腔,为爆破振动能量耗散提供了自由面。爆破应力波传递至既有隧道时需要绕过已开挖部分,产生波的衍射,传播距离变大,消耗了部分爆破振动能量。

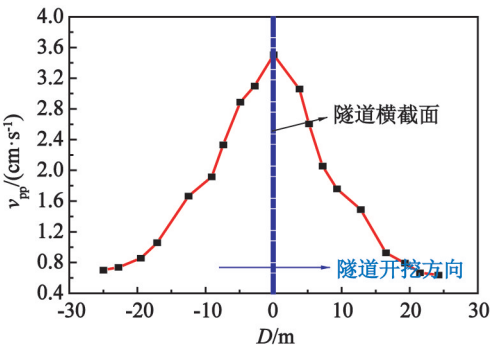


图 5 交叉隧道质点振动峰值速度分布

Fig.5 Distribution of peak vibration velocity in blasting of the crossed tunnels

2.1.2 回归计算

为进一步研究测点位于掌子面前、后时既有隧道二次衬砌结构的爆破振动衰减规律,利用回归分析的方法对表 2 中的数据进行研究。目前,针对岩土工程爆破振动速度的预测模型主要包括萨道夫斯基公式、USBM 模型及 L-K 模型。其中,萨道夫斯基公式^[14-15]通过量纲分析的方法得到,常常被研究人员使用,展示出较强的自适应性。为此,采用萨道夫斯基公式进行拟合计算。

$$v_{pp}=K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r}\right)^{\alpha} \tag{2}$$

式中: Q 表示最大单响药量; r 表示爆心距; K 、 α 分别为与爆破振动传播有关的场地系数及衰减系数。

利用式(2)分别对 $D < 0$ 及 $D > 0$ 时对应的爆破振动峰值速度进行拟合分析。特别指出, $D < 0$ 表示测点 3[#] 位于掌子面前方;相反, $D > 0$ 表示测点 3[#] 位于掌子面后方。拟合的计算结果如下:

$$D < 0, v_{pp} = 210.61 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{2.62}; \tag{3}$$

$$D > 0, v_{pp} = 343.78 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{2.93}. \tag{4}$$

式(3)及式(4)对质点峰值速度的拟合效果良好,相关系数的平方(R^2)均大于 0.95,可以较准确地反映测点位于掌子面前、后时对应的爆破振动速度的变化规律。如图 6 所示, $D < 0$ 时对应的衰减系数 α 小于 $D > 0$ 时的 α 。这说明,测点位于掌子面前、后时对应的爆破振动衰减规律不同。当测点位于掌子面后方时,新建隧道已开挖部分形成的空腔为爆破振动应力波的传递创造了更多的自由面,有利于爆破振动能量的衰减。

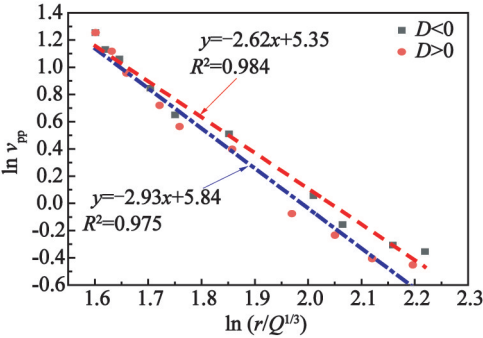


图 6 爆破振动峰值速度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of peak vibration velocity in blasting

交叉隧道施工过程中,以水平距离 D 作为控制变量,可以直观形象地反映爆破振动的分布特征,有利于交叉隧道爆破振动控制的实施。为揭示爆破振动峰值速度与水平距离 D 的关系,绘制 $v_{pp} \sim D$ 散点图(图 7)。

由图 7 可知,并未有数据点超过报警值 4 cm/s。但是从图 7 中曲线趋势可以看出,随着爆破距离的减小,部分爆破振动峰值速度超过预警值 3 cm/s。为了达到精准控制爆破的目的,有必要确定交叉隧道的爆破振动影响范围。

当 $D < 0$ 及 $D > 0$ 时,对图 7 进行拟合分析,得到回归方程:

$$D < 0, v_{pp} = 0.003D^2 + 0.20D + 3.62; \tag{5}$$

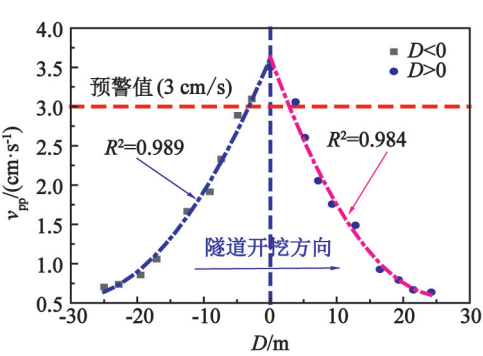


图 7 隧道爆破振动峰值速度与水平距离的关系
Fig. 7 Relationship between peak vibration velocity and horizontal distance

$$D > 0, v_{pp} = 0.004D^2 - 0.23D + 3.63. \tag{6}$$

令 $v_{pp} = 3$ cm/s,得到测点位于掌子面前方及后方对应的 D 的预警临界值分别为 3.26 m 和 2.88 m。即, $-3.26 \text{ m} \leq D \leq 2.88 \text{ m}$ 时,爆破振动峰值速度会等于或超过预警值 3 cm/s,此范围可以视为交叉隧道爆破振动的影响范围。从计算结果可以看出,新建隧道掌子面未到达交叉断面时对应的预警临界值 3.26 m 大于掌子面超过交叉断面的情况 2.88 m。安全起见,隧道未达到交叉断面前 6 m 时应采取严格的控制爆破措施。

2.2 爆破振动频率分析

2.2.1 实测数据分析

研究表明,爆破响应不仅与爆破振动速度有关,也受爆破振动频率的影响^[16-18],有必要对爆破振动频率的变化进行系统研究。实际操作中,可以通过快速傅里叶变换得到各个实测爆破信号频域的分布特征。图 8 为典型爆破信号的功率谱曲线。如图 8 所示,爆破振动的优势频带主要分布在低频率范围。

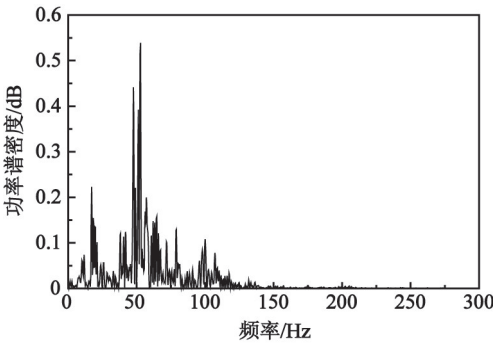


图 8 典型爆破信号的功率谱

Fig. 8 Power spectrum of typical blasting signals

涉及到的质点振动峰值速度均是由掏槽爆破引起的。为此,针对爆破振动频率的影响,将掏槽爆破对应的主频率 f_m 作为对象展开研究。如表 3 所示。

表 3 交叉隧道爆破振动主频率
Tab.3 Dominant frequency of the crossed tunnels
in blasting

D/m	r/m	Q/kg	f_m/Hz
-25.0	29.68	33.6	20.9
-22.8	27.85	33.3	22.9
-19.5	25.22	32.8	37.9
-17.1	23.42	30.9	47.2
-12.5	20.30	32.4	53.2
-9.1	18.41	32.7	67.6
-7.4	17.63	33.0	69.4
-4.9	16.73	33.6	81.6
-2.8	16.24	33.3	96.9
0	16.00	33.6	102.2
3.8	16.44	33.6	98.8
5.2	16.82	33.3	89.3
7.2	17.55	32.8	78.1
9.3	18.51	30.9	71.4
12.8	20.49	32.4	66.8
16.5	22.98	32.7	58.1
19.3	25.07	33.0	49.2
21.5	26.80	33.6	43.1
24.2	29.01	33.3	33.5

图 9 为爆破振动主频率随 D 的分布规律。由图 9 可知,无论测点位于掌子面前或掌子面后,振动主频率均随着 D 的增大而减小。以交叉断面为界,掌子面位于交叉断面前时的爆破振动主频率小于隧道掌子面超过交叉断面的对应值。

产生这种现象主要是因为:隧道断面未穿过交叉断面时,爆破振动地震波主要通过岩体介质传递至既有隧道,在传递过程中,会耗散爆破信号中大量的高频能量;隧道掌子面超过交叉点后,新建隧道已开挖部分为后续的爆破振动传递提供了自由面,爆

炸应力波传播受岩体高频滤波的影响较小。既有隧道二次衬砌结构的自振频率较小,低频率的爆破振动更容易诱发既有结构产生共振。因此,隧道断面未穿过交叉断面时引起的爆破振动对既有隧道衬砌结构的不利影响更大。

2.2.2 回归计算

为进一步研究既有隧道爆破振动频率的响应特征,利用回归计算分析爆破振动主频率的衰减规律。

爆破振动主频率的影响因素主要包括爆破载荷特性、围岩特性及既有结构的动力响应特性。在众多影响因素中,选取最大单响药量 Q 、爆心距 r 、岩体纵波波速 c_p 、岩体密度 ρ 作为影响爆破振动主频率的主要物理量。选取 Q 、 c_p 、 ρ 、 r 作为独立量纲,主频率可以表示为

$$f_m = \varphi(\rho, c_p, r, Q)。$$
 (7)

根据 π 定理,式(7)可以由 2 个无量纲数表示:

$$\pi_1 = \frac{c_p}{rf_m};$$
 (8)

$$\pi_2 = \frac{\rho r^3}{Q}。$$
 (9)

根据量纲和谐定理^[19],式(7)可以表示为

$$\frac{c_p}{f_m r} = \varphi \left(\frac{\rho r^3}{Q} \right)。$$
 (10)

对于特定的隧道工程,围岩岩体的密度 ρ 基本保持不变。依据萨道夫斯基公式的表达形式,可以得到

$$\frac{f_m r}{c_p} = \eta \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\beta。$$
 (11)

由式(11)得到

$$f_m = \eta \frac{c_p}{r} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\beta。$$
 (12)

式中: η 为与实际工程有关的爆破振动频率相关参数; β 为爆破振动频率衰减系数。值得说明的是,这里 c_p 代表的是围岩原岩的纵波速度。

声波实际测试结果表明: c_p 的取值范围很小,为 4 150 ~ 4 070 m/s。这是由于该隧道工程段内围岩组成较为稳定,并未遇到较大的节理或结构弱面。

利用式(12)分别对 $D < 0$ 及 $D > 0$ 时对应的爆破振动主频率进行回归分析:

$$D < 0, f_m = 0.979 \frac{c_p}{r} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{0.50};$$
 (13)

$$D > 0, f_m = 1.766 \frac{c_p}{r} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{0.90}。$$
 (14)

拟合结果如图 10 所示。

式(12)对交叉隧道爆破振动主频率的拟合效

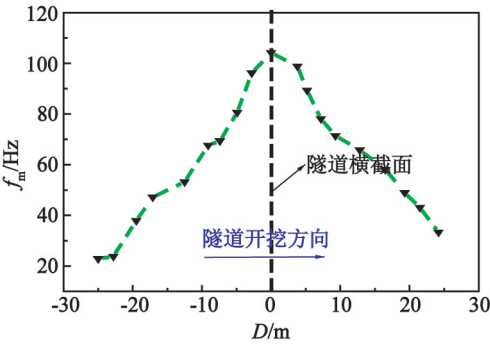


图 9 爆破振动主频率随水平距离的分布
Fig.9 Distribution of the dominant frequency of
blasting vibration as a function of horizontal distance

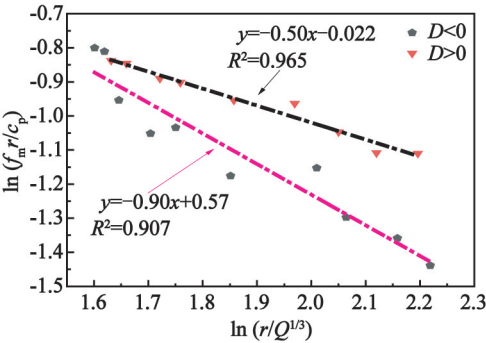


图 10 交叉隧道爆破振动主频率拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of dominant frequency of blasting vibration for the crossed tunnels

果良好,掌子面前、后对应的主频率的决定系数的平方(R^2)均大于 0.90。分析结果证明,通过量纲分析得到的频率拟合模型是合理的。

由式(13)~式(14)可知, $D < 0$ 时对应的主频率衰减系数 β 小于 $D > 0$ 的对应值。测点位于新建隧道掌子面后,对应的爆破振动主频率的衰减速度更快。

3 定量考虑频率影响的爆破振动控制方法

众所周知,爆破振动响应规律受多种因素的影响。其中,振动速度和振动频率是两个最重要的影响因素^[20-21]。世界各国在制定爆破振动控制规范的过程中,也将这两个因素统一考虑。大多采用分段考虑频率影响的方法规定不同频段对应的爆破振动速度的控制阈值^[22-24]。然而,这种方法只能定性确定各段频率范围内的质点振动峰值速度限值,未形成定量的评判标准,并不能真正达到精准控制爆破振动的目的。针对这一问题,基于 2.1 和 2.2 小节的研究成果,寻求一种可以定量体现频率影响的爆破振动评价体系。

通过联立式(1)及式(12),得到质点振动峰值速度 v_{pp} 和主频率 f_m 之间的关系如下:

$$\frac{v_{pp}}{f_m} = \frac{Kr}{\eta c_p} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{\alpha - \beta} \quad (15)$$

令 $K_1 = K/\eta$, $\varphi = \alpha - \beta$, 则式(15)化简为

$$\frac{v_{pp}}{f_m} = K_1 \frac{r}{c_p} \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\varphi \quad (16)$$

式(16)两侧取自然对数,基于表 3 中的相关数据,通过线性拟合,分别得到 $D < 0$ 和 $D > 0$ 对应的质点峰值速度与主频率之间的关系:

$$D < 0, v_{pp} = \frac{45.63}{c_p} f_m r \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1.07}; \quad (17)$$

$$D > 0, v_{pp} = \frac{221.45}{c_p} f_m r \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{2.12} \quad (18)$$

拟合结果见图 11。

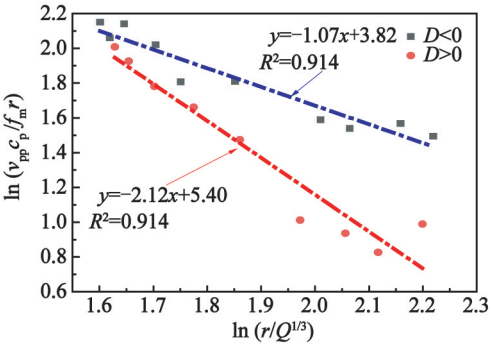


图 11 质点振动峰值速度与主频率的拟合关系

Fig. 11 Fitting relationship between peak vibration velocity and dominant frequency

从图 11 可知,式(17)~式(18)对应的 R^2 均大于 0.95,拟合效果较好,证明测点位于掌子面前方及后方时对应的质点振动峰值速度与振动主频率之间满足式(16)中的数学关系。

基于以上分析,首先,可以通过相关计算参数得到 f_m , 进而通过 f_m 反求 v_{pp} 。这样便可以定量考虑爆破振动主频率对爆破振动峰值速度的影响。这种计算思路弥补了现有规范中将频率分段考虑的不足。

以 $D < 0$ 为例,即测点位于新建隧道掌子面前时,根据工程实际将 Q 和 r 带入式(13),计算得到 f_m ,然后将计算得到的 f_m 带入式(18),计算得到优化后的爆破振动峰值速度 v_{pps} 。同理, $D > 0$ 时,也可以计算得到相应的 v_{pps} 。通过这种方式可以达到定量考虑频率影响的目的,一定程度上克服了规范中分段考虑频率影响的方法的不足。

绘制 $R \sim v_{pps}$ 散点图,并添加拟合曲线,如图 12 所示。

从图 12 可以发现,考虑频率影响后的 v_{pps} 均未超过预警值 3 cm/s。产生这种现象的原因是,交叉隧道爆破振动频率较大,最小值仍为 20.9 Hz。文献[9,11]指出,一般地下岩土工程的自振频率大多小于 10 Hz,爆破振动频率与既有结构的自振频率差距越大,对既有结构的影响越小。因此,经过定量考虑频率影响的 v_{pps} 较实测数据 v_{pp} 有了一定幅度的减小。针对本交叉隧道工程,定量考虑频率影响后的结果表明,下部隧道爆破施工对既有隧道的振动影响在可控范围内。

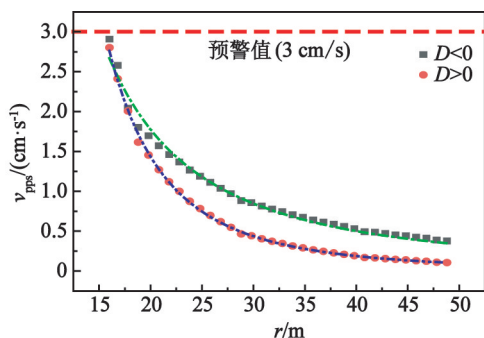


图12 考虑频率影响的质点振动峰值速度

Fig. 12 Peak vibration velocity considering the influence of frequency

4 结论

依托京张高铁草帽山交叉隧道工程,基于现场爆破振动监测结果,理论分析并研究既有隧道爆破振动峰值速度及爆破振动主频率的衰减规律。通过理论推导,引入一套可以定量考虑频率影响的爆破振动安全评价方法,并得到如下结论:

1)交叉点位于新建隧道掌子面前的爆破振动峰值速度大于交叉点位于掌子面对应的对应值。且交叉点位于掌子面前方对应的爆破振动速度衰减系数 α 小于掌子面对应的对应值。基于萨道夫斯基公式的拟合结果,以质点振动峰值速度 v_{pp} 作为评价指标,得到爆破振动预警的水平距离的临界范围为 $-3.26\text{ m} \leq D \leq 2.88\text{ m}$ 。

2)交叉点位于新建隧道掌子面前对应的爆破振动主频率小于掌子面超过交叉点的情况。实验数据表明,通过量纲分析建立的爆破振动主频率的预测模型具有较好的预测精度,得到的决定系数均大于0.90。

3)利用回归分析建立爆破振动主频率与质点振动峰值速度的数学关系。通过爆破主频率估计爆破振动峰值速度,构建一套可以定量考虑振动主频率影响的爆破振动评价方法。定量考虑主频率影响的 v_{pps} 较实测振动速度 v_{pp} 有一定幅度的减小。针对本交叉隧道工程,综合考虑爆破振动主频率及既有隧道自振频率的影响可以得到,下部隧道爆破施工对上部既有隧道的爆破振动影响在可控范围内。

参考文献

[1] 朱正国,孙明路,朱永全,等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J]. 岩土力学,

2012, 33(12): 3747-3752, 3759.

ZHU Z G, SUN M L, ZHU Y Q, et al. Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3747-3752, 3759.

[2] 孙远,杨峰,郑晶,等. 基于变分模态分解和小波能量熵的微震信号降噪[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 469-479.

SUN Y, YANG F, ZHENG J, et al. Research on micro-seismic signal denoising based on variational mode decomposition and wavelet energy entropy [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 469-479.

[3] 单仁亮,宋永威,白瑶,等. 基于小波包变换的爆破信号能量衰减特征研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(2): 119-128.

SHAN R L, SONG Y W, BAI Y, et al. Research on the energy attenuation characteristics of blasting vibration signals based on wavelet packet transformation [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(2): 119-128.

[4] HUO X F, SHI X Z, QIU X Y, et al. Rock damage control for large-diameter-hole lateral blasting excavation based on charge structure optimization [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103569.

[5] YU C, YUE H Z, LI H B, et al. Scale model test study of influence of joints on blasting vibration attenuation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1): 533-550.

[6] 王海龙,赵岩,王永佳,等. 新建京张高铁立体交叉隧道爆破振动控制研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 130-134.

WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Study on blasting vibration control of three-dimensional cross tunnel on Beijing to Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(7): 130-134.

[7] ZHONG G S, AO L P, ZHAO K. Influence of explosion parameters on wavelet packet frequency band energy distribution of blast vibration [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2674-2680.

[8] ZHAO Y, SHAN R L, WANG H L. Research on vibration effect of tunnel blasting based on an improved Hilbert-Huang transform [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(5): 206.

[9] 中国生,房营光,徐国元,等. 基于小波包分析的建(构)筑物爆破振动安全判据研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 223-228.

ZHONG G S, FANG Y G, XU G Y, et al. Safety criterion of blasting vibration for structure based on wavelet

packet analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 223-228.

[10] 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 H T. Study on effect of blast-induced seismic based on energy theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007.

[11] 张立国, 龚敏, 于亚伦. 爆破振动频率预测及其回归分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2005, 24(2): 187-189.

ZHANG L G, GONG M, YU Y L. Forecast and regression analysis of blasting vibration frequency [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2005, 24(2): 187-189.

[12] 王海龙, 赵岩, 王海军, 等. 基于 CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5): 125-134.

WANG H L, ZHAO Y, WANG H J, et al. De-noising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5): 125-134.

[13] 单仁亮, 赵岩, 王海龙, 等. 下穿铁路隧道爆破振动衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 143-157.

SHAN R L, ZHAO Y, WANG H L, et al. Attenuation of blasting vibration in a railway tunnel [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(8): 143-157.

[14] 国家安全生产监督管理局. 爆破安全规程: GB 6722—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.

[15] TIAN X X, SONG Z P, WANG J B. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105813.

[16] DENG X H, WANG J Y, WANG R, et al. Influence of blasting vibrations generated by tunnel construction on an existing road [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(12): 1381-1393.

[17] YANG J H, CAI J Y, YAO C, et al. Comparative study of tunnel blast-induced vibration on tunnel surfaces and inside surrounding rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4747-4761.

[18] LU W B, LENG Z D, HU H R, et al. Experimental and numerical investigation of the effect of blast-generated free surfaces on blasting vibration [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2018, 22(11): 1374-1398.

[19] 朱传统, 刘宏根, 梅锦煜. 地震波参数沿边坡坡面传播规律公式的选择[J]. 爆破, 1988(2): 30-34.

ZHU C T, LIU H G, MEI J Y. Selection of the formula for the propagation law of seismic wave parameters along the slope surface [J]. Blasting, 1988(2): 30-34.

[20] HU Y G, YANG Z W, HUANG S L, et al. A new safety control method of blasting excavation in high rock slope with joints [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(2): 3015-3029.

[21] 宋光明, 陈寿如, 史秀志, 等. 露天矿边坡爆破振动监测与评价方法的研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2000(4): 24-27.

[22] ZHAO Y, SHAN R L, WANG H L, et al. Vibration response and evaluation system of cross-tunnel blasting [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(10): 417.

[23] 贾海鹏, 刘殿书, 陈斌, 等. 相邻隧道爆破振速分布规律研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(6): 506-514.

JIA H P, LIU D S, CHEN B, et al. Study on the vibration velocity distribution law of adjacent tunnel blasting [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(6): 506-514.

[24] 孙中博, 赵毅鑫, 王海亮, 等. 临近地铁车站爆破振动效应对高层建筑的影响[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(1): 83-92.

SUN Z B, ZHAO Y X, WANG H L, et al. Research on the influence of blasting vibration on high-rise building near subway station [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(1): 83-92.