

文章编号:1673-9469(2023)01-0049-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.008

隧道掌子面前后方围岩爆破振动及精准控制研究

管晓明¹, 宫哲², 程飞², 辛鲁超³, 吴庆东⁴, 范学臣⁵

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100;
3. 临沂城建建设集团有限公司, 山东 临沂 276005; 4. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;
5. 青岛第一市政工程有限公司, 山东 青岛 266034)

摘要: 依托某大跨高速公路隧道工程,通过监测隧道下台阶爆破过程中围岩振动响应,对比分析了掌子面前后方围岩的振速和频谱特征;采用数值模拟方法,研究了不同围岩级别的掌子面前后方围岩爆破振速衰减规律。结果表明:掌子面前方围岩振速 $V_Z > V_X > V_Y$, 掌子面后方围岩振速 $V_X > V_Y > V_Z$; 掌子面前方 Z 向振速显著大于后方,而后方 X、Y 向振速显著大于前方,前后方振动特征差异的主要原因是爆源与测点的空间距离、传播介质及边界条件的不同所引起。由于掌子面后方已开挖隧洞空气层的减振效应,导致爆破地震波在后方传播过程中发生绕射和折射,使得后方围岩的合成振速要显著小于前方且衰减更加迅速,后方围岩的振动主频要显著低于掌子面前方,且后方频谱带宽窄于前方。拟合得到不同围岩级别的掌子面前后方围岩振速预测公式,并提出考虑空气减振系数的围岩爆破振速预测公式。根据隧道掌子面与下穿的既有管线的前后位置关系,分别运用前后方围岩爆破振速预测公式计算出前后方安全药量,实现了隧道穿越管线前后全过程的精准爆破振动控制,同时又极大提高施工效率。

关键词: 隧道爆破; 爆破监测; 数值模拟; 振动特征; 预测公式; 精准控制

中图分类号: U455.6

文献标识码: A

Study on Blasting Vibration and Precise Control of Surrounding Rock in Front and Rear of Long-Span Railway Tunnel Face

GUAN Xiaoming¹, GONG Zhe², CHENG Fei², XIN Luchao³, WU Qingdong⁴, FAN Xuechen⁵

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;
2. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Co., Ltd, Jinan, Shandong 250100, China;
3. Linyi Urban Construction Group Co., Ltd, Linyi, Shandong 276005, China; 4. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China; 5. Qingdao No. 1 Municipal Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266034, China)

Abstract: Based on a long-span highway tunnel project, the velocity and spectral characteristics of the surrounding rock in the front and rear of the tunnel face were compared and analyzed by monitoring the response during the lower step of the tunnel blasting. The numerical simulation method was used to study the attenuation law of blasting vibration velocity in the front and rear of the surrounding rocks with different surrounding rock levels. The results showed that the velocity of surrounding rock ahead of the tunnel face was $V_Z > V_X > V_Y$, while the velocity of surrounding rock behind the palm face was $V_X > V_Y > V_Z$. The difference of the front and rear vibration characteristics of the tunnel face was due to the spacing distance between the explosion source and the measuring points, the difference of the propagation medium and the boundary conditions. Owing to the vibration reduction effect of the air isolation layer in the excavated tunnel behind the tunnel face, the diffraction and refraction of the blasting seismic wave occurred in the rear propagation process, and thus the resultant vibration velocity of the surrounding rock

收稿日期:2022-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978356,52108371);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME043)

作者简介:管晓明(1985-),男,山东诸城人,博士,副教授,主要从事隧道与地下工程和爆破工程方面研究。

in the rear was significantly smaller than that in the front and decayed more rapidly. The vibration dominant frequency of the rear surrounding rock was significantly lower than that of the front of the tunnel face, and the rear spectrum bandwidth was narrower than that of the front. The prediction formula of vibration velocity of surrounding rock in the front and rear of the tunnel face with different surrounding rock levels was obtained by curve-fitting. The prediction formula of blasting vibration velocity of the surrounding rock was proposed by considering reduction coefficient of the air isolation layer. According to the relationship between the front and rear positions of the tunnel face and the existing pipelines, the safety charges of the front and rear were calculated by using the prediction formula of the blasting velocity of the front and the rear surrounding rock, respectively. The precise blasting vibration control of the whole process before and after the tunnel crossing the pipeline was realized and the construction efficiency was greatly improved.

Key words: tunnel blasting; blasting monitoring; numerical simulation; vibration characteristics; prediction formula; precise control

隧道主要有钻爆法、浅埋暗挖法、盾构法及沉管法等施工方法,其中钻爆法以断面和地层适应性强、施工效率高、经济成本低等优点在隧道施工中得到广泛应用。爆破振动作为钻爆法施工作业产生的不利影响,对周边建(构)筑物、管线及隧道围岩、初支、二衬等安全构成较大威胁。因此,开展隧道爆破地震波在围岩中的传播规律研究,对于确保隧道爆破施工安全具有十分重要的意义。

目前,隧道爆破地震波在围岩中传播规律研究较多,但是主要集中在爆破地震波到达地表的传播规律^[1-5],对隧道爆破掌子面后方围岩上的振动特征及传播规律研究较少。傅洪贤等^[6-7]得出了爆破近区后方的爆破振动预测公式,有效补充了萨道夫斯基公式对近区预测的不足;季相臣等^[8]得到了掌子面前后方中夹岩振动速度、场地系数、衰减系数的变化规律。另外,还有部分学者研究了隧道后方地表的“空洞效应”^[9-10]。喻军等^[11]得出成洞区地表的振动速度是非成洞区的1.2~1.5倍;蔡军等^[12]通过能量法和地震波传播规律推导出已开挖区和未开挖区地表振动速度公式,并得出爆破荷载越大,空洞效应影响范围越大。综上,隧道掌子面前后方围岩的爆破地震波衰减规律的对比研究还较少,不同围岩级别条件下掌子面前后方围岩的爆破振速预测公式尚未建立,难以精确指导隧道穿越建(构)筑物前后的爆破振动控制,亟需展开详细研究。

依托某高速公路大跨隧道工程,在下台阶爆破时的掌子面前后方围岩上布置监测点,监测隧道爆破过程中下台阶掌子面后方围岩的爆破振动,分析爆破地震波振速和频谱特征;然后采用数值模拟方法,研究不同围岩级别条件下的掌子面

前后方围岩爆破振速衰减规律,得出掌子面前后方爆破振速预测公式;针对实际工程,分别计算不同围岩条件下穿越既有管线前后的安全药量,以确保隧道爆破后方围岩稳定及管线安全。

1 隧道工程概况及爆破监测

1.1 工程概况及爆破方案

某城市高速公路连接线工程南北主线隧道均为分离式三车道隧道,隧道单洞高度为8.7 m,开挖宽15.85 m,南北两线隧道总长约为3 100 m。隧道由斜井开始掘进施工,在南主线处双向掘进,同时快速开挖横通道进入北主线,南北主线同时双向爆破掘进,本文以北线隧道为研究对象。北线隧道埋深43.9 m,属于深埋隧道。隧道为Ⅲ、Ⅳ级围岩,以中—微风化砂岩为主,岩体较破碎,加之隧道围岩位于水库下游,富水自稳能力差。由于隧道下穿大直径供水管线,净距仅为7.68~19.00 m,爆破振动极易造成管线开裂,施工难度大,安全风险高,需要采取爆破监测及减振技术措施。

北线隧道采取分部多次爆破开挖+孔内外延时结合的微差爆破技术,减少一次起爆装药量,有效降低爆破峰值振速。采用上下台阶法爆破施工,上台阶循环进尺为1 m,当开挖步距达到20 m后开始下台阶爆破施工,下台阶循环进尺为2 m。为了方便上台阶出渣,下台阶掘进利用既有临空面,采用两部左右侧各半幅爆破施工,错位间距10~15 m。上台阶掏槽眼单孔药量1.2 kg,单段最大药量7.2 kg,辅助眼单孔药量0.8~1.0 kg,周边眼单孔药量为0.4 kg,上台阶总装药量48 kg。下台阶

辅助眼单孔药量 0.8~1.2 kg,周边眼单孔药量为 0.4 kg。炮孔布置及爆破网路如图 1 所示。

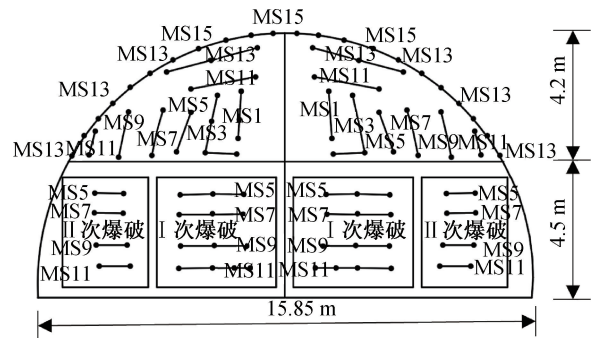


图 1 台阶法炮孔布置
Fig. 1 Holes layout of bench cut method

1.2 隧道掌子面前后方爆破振动监测

针对隧道近距下穿大直径供水管线,提出在掌子面后方围岩进行爆破振动监测以获取前方管线振速的方法^[13],需要研究掌子面前后方围岩的爆破振动特征。在隧道下台阶顶部布置 1 号点,掌子面后方布置 2 号点进行爆破振动监测,以对比分析下台阶爆破时掌子面前后方围岩爆破振动衰减规律,如图 2 所示。爆破振动监测采用 UBOX-8016 测振仪采集爆破振速、频率和持续时间。

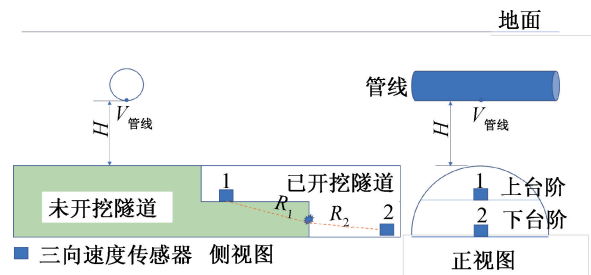


图 2 隧道爆破测点布置
Fig. 2 Layout of measuring points of tunnel blasting

2 掌子面前后方振速及频谱特征

2.1 掌子面前后方实测数据

通过现场爆破测试,获取下台阶 I、II 部爆破时掌子面前后方围岩爆破数据,前后测点的爆心距均约为 15 m。选取典型的 1 次爆破数据如表 1 所示,并选取 I 部爆破数据分析振速和频谱。

从表 1 中可以看出,相同爆心距和药量条件下,可以得出以下结论:

无论 I 部还是 II 部爆破,掌子面前方围岩 1 号点振速大小排序是: $V_z > V_x > V_y$,以竖向振动为主,竖向振速显著大于水平振速;而掌子面后方围岩 2 号点振速大小排序是: $V_x > V_y > V_z$,以水平振动

表 1 掌子面前后方振速及频率
Tab. 1 Velocity and frequency of the front and rear of palm surface

部位	测点	药量/ kg	监测 方向	振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	合成振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主振频 率/Hz
I	1	2.4	X	0.605	3.167	151.2
			Y	0.439		46.9
			Z	3.078		195.3
	2	2.4	X	1.466	2.130	56.5
			Y	1.166		58.6
			Z	1.014		75.6
II	1	2.0	X	0.590	3.187	167.4
			Y	0.470		58.6
			Z	3.097		360.6
	2	2.0	X	1.762	2.598	44.2
			Y	1.489		80.8
			Z	1.196		82.2

为主,水平振速大于竖向振速。水平方向振速由于 X 向指向爆源中心,Y 向为切向,故 $V_x > V_y$ 。

对于前后方振速来说,I、II 部爆破时掌子面前方围岩的 Z 向振速约为后方 Z 向振速的 3.04 和 2.59 倍,前方竖向振速显著大于后方竖向振速。而对于 X、Y 向振速,I、II 部爆破时后方围岩振速分别是前方围岩振速的 2.42、2.99 倍和 2.66、3.17 倍,后方水平振速显著大于前方水平振速。

产生上述振动特征的主要原因是爆源与测点的空间距离及传播介质的不同所引起,详述如下:

1 号点位于下台阶掌子面正前方,在空间位置上高于爆源中心一定高度,故 1 号点传过来的爆破地震波以竖向振动为主,竖向振动显著大于水平振动;而 2 号点位于下台阶的后方,在空间位置上与爆源基本处于同一高度处,故 2 号点传过来的爆破地震波以水平径向和切向振动为主,水平振动稍大于竖向振动。

对于前后方围岩振速来说,传播介质的不同引起前后方围岩振动特征存在显著不同。下台阶爆破时,爆破地震波通过岩体直接传播到 1 号点,岩体为传播介质;而爆破地震波传播到 2 号点,由于掌子面后方存在已开挖隧洞,导致爆破地震波往后方传播时会受到已开挖洞室空气层的减振效应影响,爆破地震波发生绕射和折射,导致后方的合成振速要显著小于前方。这是掌子面后方爆破振动的典型特征,需要考虑已开挖隧道空气层减振效应。

2.2 隧道前后方振动波形图对比分析

以 I 部爆破为例,掌子面前后方测点振速波形图对比如图 3 所示。

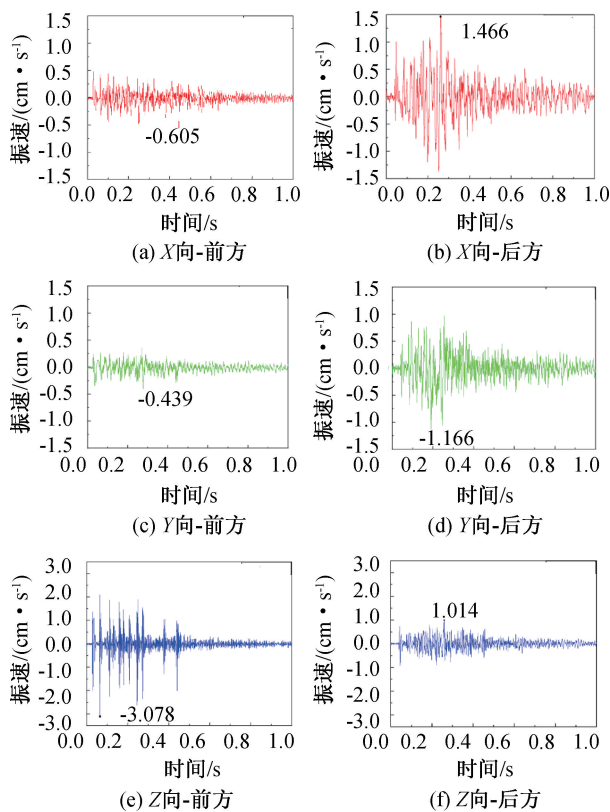


图 3 掌子面前后方测点振速对比

Fig. 3 Comparison of velocity of measuring points in the front and rear of palm surface

从图 3 可以看出,对于前方 X、Y、Z 向振速波形图,可以看出明显的爆破分段情况,表明爆破地震波传播过程中衰减较小,能很好地保留各个爆破分段的爆破振动特征;而对于掌子面后方 X、Y、Z 向振速波形图,则振速分段不明显,已难以区分不同段位爆破特征,主要是受到掌子面后方已开挖隧洞的空气层减振效应导致爆破地震波衰减显著引起。表明在爆心距及药量相同条件下,由于传播介质及边界条件不同,掌子面前后方围岩的爆破振速特征存在显著不同。

2.3 隧道前后方频谱对比分析

以 I 部爆破为例,掌子面前后方测点频谱对比如图 4 所示。

从图 4 可以看出,爆破地震波向掌子面后方传播过程中,高频成分衰减更加显著,导致掌子面后方围岩的振动波频率要显著低于掌子面前方围岩振动波频率。主要原因是,在掌子面后方,由于已开挖洞室存在空气减振层,当爆破振动波在传播

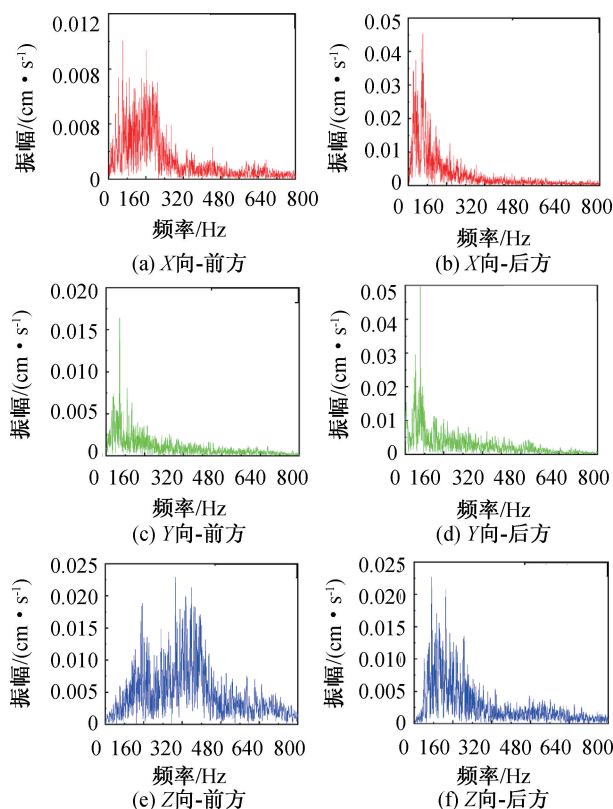


图 4 掌子面前后方测点频谱对比

Fig. 4 Comparison of frequency of measuring points in the front and rear of palm surface

过程中遇到空气层发生绕射和折射,引起振动波能量消耗,在空气层边缘产生衍射并继续以体波和面波的形式向后方传播,较高频成分被过滤,爆破地震波以较低频成分为主。以 Z 向振动为例,爆破掌子面前方围岩振动频率主要在 160~400 Hz,而掌子面后方围岩振动频率主要在 80~240 Hz。

另外,后方围岩振动频谱为窄带频谱,前方围岩振动频谱为宽带频谱,后方围岩频谱带宽相比前方频谱带宽要窄。主频带宽度较窄时,地震波的能量主要集中在主频率,特点是主频率能量大,谐波成分能量小。主频带宽度较大时,高频谐波能量增加,相对而言,主频率的能量降低,特点是主频率能量不突出,或有多个频率相差较大而能量相差不大的频率存在。由于宽带频谱在比较宽的范围内,各谐波频率的能量都比较大,不应忽略。

3 掌子面前后方围岩振动响应模拟

3.1 隧道三维数值模型建立及测点布置

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立隧道前后方围岩振动特性数值模型,为节约计算成本和简化

计算模型,建立以 YOZ 面为对称面建立如图 5 所示的 1/2 对称模型,模型尺寸为 100 m(长)×10 m(宽)×15 m(高),单元尺寸控制在 20 cm 左右。在模型对称面添加对称约束,其余面定义为无反射边界。采用单个炮孔模拟起爆,单次爆破药量 8 kg。通过改变材料模型参数来模拟硬岩、中硬岩和软岩不同围岩级别,具体参数如表 2 所示。

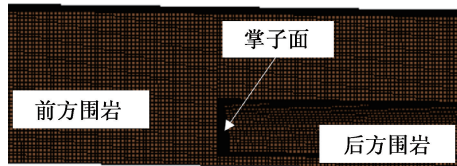


图5 隧道数值模型

Fig. 5 Numerical model of tunnel

掌子面前后方围岩测点布置情况:隧道前后方距离掌子面 10 m,每 1 m 选取一个测点,10~30 m 之间每隔 5 m 选取一个测点,30~50 m 之间每隔 10 m 选取一个测点,前后方各 16 个测点。

表2 各级围岩材料参数

Tab. 2 Material parameters of surrounding rock at each level

类别	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	F_y/MPa	$E_{\text{tan}}/\text{GPa}$	β
硬岩	2 700	55	0.21	60	25	0.5
中硬岩	2 400	20	0.25	30	8	0.5
软岩	2 100	5	0.35	10	2	0.5

3.2 掌子面前后方围岩振动特性

提取各测点峰值振速进行数值拟合,得到各测点峰值振速与距爆心距的拟合关系。硬岩、中硬岩、软岩前后方围岩振动曲线如图 6—图 8 所示。

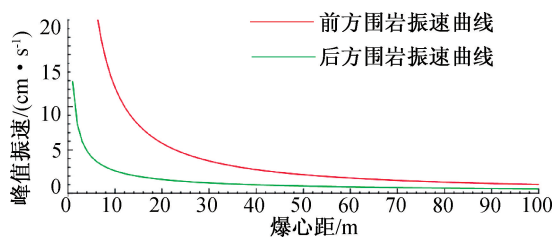


图6 硬岩测点峰值振速拟合

Fig. 6 Fitting of peak vibration velocities of hard rock measurement points

从图 6—图 8 中可以得出以下结论:

(1) 无论是掌子面前方还是后方围岩,其振速衰减都经历了由快到慢的指数型变化。且硬岩振速衰减最慢,其次是中硬岩,软岩振速衰减最快。

(2) 对于掌子面前后方来说,无论是硬岩、中

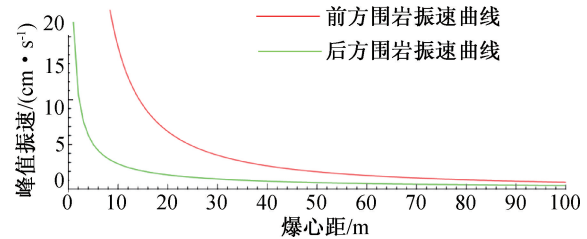


图7 中硬岩测点峰值振速拟合

Fig. 7 Fitting of Peak vibration velocity of medium hard rock measurement points

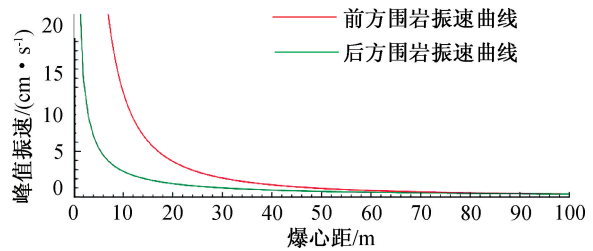


图8 软岩测点峰值振速拟合

Fig. 8 Fitting of peak vibration velocity of soft rock measuring point

硬岩还是软岩,掌子面前方围岩的振速要大于后方围岩振速,并随着距离的变化,表现出不同的振动特征。

(3) 根据爆心距的不同,可以将前后方振速的大小关系分成 3 个区段。当硬岩、中硬岩在 0~40 m、软岩在 0~30 m 内,前方围岩振速要显著大于后方围岩振速,主要是已开挖洞室的空气层对后方围岩起到减振作用;当硬岩、中硬岩在 40~80 m、软岩在 30~50 m 内,前方围岩振速稍大于后方围岩振速;当硬岩、中硬岩超过 80 m、软岩超过 50 m 时,前方围岩振速与后方围岩振速基本相等,以后方围岩振速预测前方围岩振速是可行的。

采用萨道夫斯基公式拟合得到不同围岩级别的掌子面前方围岩振速预测公式如下:

$$V_{\text{硬岩前方}} = 69.5 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.08} \quad (1)$$

$$V_{\text{中硬岩前方}} = 102.1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.30} \quad (2)$$

$$V_{\text{软岩前方}} = 142.1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.56} \quad (3)$$

采用萨道夫斯基公式拟合得到不同围岩级别的掌子面后方围岩振速预测公式如下:

$$V_{\text{硬岩后方}} = 13.0 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.65} \quad (4)$$

$$V_{\text{中硬岩后方}} = 18.8 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.84} \quad (5)$$

$$V_{\text{软岩后方}} = 25.1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.04} \quad (6)$$

从掌子面前后方的预测公式也可以看出,掌子面前后方的 k 、 α 存在较大不同,故应区分对待。隧道穿越既有建(构)筑物过程中,根据建(构)筑物与掌子面前后位置关系,分别运用掌子面前后方围岩振速预测公式计算安全药量,实现穿越建(构)筑物前后过程中的精准爆破振动控制。

由于掌子面后方振速受到已开挖隧洞的空气减振层效应的影响,其振速衰减更快,通过将爆心距增加一个指数 β ,对掌子面后方振速拟合曲线进行修正,以体现已开挖洞室空气减振层的影响, β 称为空气层减振系数,修正后的爆破振速预测公式如式(7)所示。

$$V_{\text{后方}} = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R^\beta} \right)^\alpha \quad (7)$$

根据式(7)拟合得到不同围岩级别的掌子面后方振速预测公式如下:

$$V_{\text{硬岩后方}} = 6.1 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R^{1.56}} \right)^{1.08} \quad (8)$$

$$V_{\text{中硬岩后方}} = 7.6 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R^{1.58}} \right)^{1.30} \quad (9)$$

$$V_{\text{软岩后方}} = 8.5 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R^{1.64}} \right)^{1.56} \quad (10)$$

4 工程应用

该高速公路连接线工程南北两条主线隧道共计下穿主要管道 17 处,隧道拱顶距离管道底部 7.68~19.00 m。根据工程实际状况以及相关研究,将地下管线的安全控制标准确定为 3 cm/s。根据不同级别围岩前后方振动预测公式的基础上,可以得到掌子面前后方装药量与距离的关系公式:

$$Q_{\text{前后方}} = (R \times \sqrt[3]{V/k})^3 \quad (11)$$

图 9 给出了深圳市东部过境高速公路连接线工程下穿供水管道时掌子面前后方不同围岩级别下振动响应不大于 3 cm/s 时的装药量与距离的关系。

依据图 9 的结果,对该高速公路连接线工程近距下穿大量供水管道钻爆法施工进行指导。举例:当地下管线位于掌子面前方且距离为 18 m 时,依据图 9 可以得出硬岩、中硬岩和软岩下分别对应的临界装药量为 0.94、1.00、3.50 kg,当地下管线

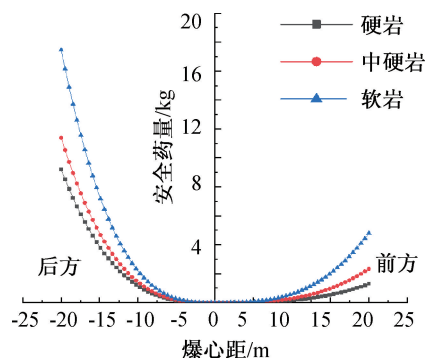


图 9 安全药量

Fig. 9 Safety charge quantity

处于掌子面后方且距离也为 18 m 时,依据图 9 可以得出硬岩、中硬岩和软岩下分别对应的临界装药量为 6.70、8.30、12.72 kg。

基于上述分析结果,现场爆破减振施工时,在穿越管线之前应严格控制爆破装药量和进尺,而穿越管线后,可适当增大爆破装药量和进尺,既保证了管线安全,又极大地提高了施工效率,克服了常规穿越建筑物前后时采用相同药量和进尺的弊端,实现精准化爆破安全控制。现场通过采集穿越管线前后的爆破振动数据,实测振速均在管线允许的安全标准范围之内,未对地下供水管线造成损伤,验证了该精准化安全控制方法的优越性。

5 结论

通过采用现场试验爆破监测、数值模拟和理论分析方法,研究了隧道爆破掌子面前后方围岩的振动特性和精准控制方法,得出以下结论:

1) 掌子面前方围岩振速 $V_Z > V_X > V_Y$, 掌子面后方围岩振速 $V_X > V_Y > V_Z$ 。对于前后方振速来说, I、II 部爆破时,掌子面前方 Z 向竖向振速显著大于后方 Z 向竖向振速,而对于后方 X、Y 向水平振速显著大于前方水平振速。

2) 掌子面前后方振动特征差异的主要原因是爆源与测点的空间距离及传播介质的不同所引起。掌子面后方已开挖洞室空气层的显著减振效应,导致后方的合成振速要显著小于前方合成振速,后方围岩主频率要显著低于前方围岩主频率。

3) 随着传播距离的变化,掌子面前后方围岩合成振速发生不同的衰减特征,掌子面后方振速显著小于掌子面前方振速并衰减较快,拟合得到不同围岩级别的掌子面前后方围岩振速预测公式,并提出考虑空气减振系数的围岩爆破振速预测公式。

(下转第 74 页)

- Mountain, Shanxi Province, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1): 263-274.
- [8] 朱麟晨,廖余.祥和隧道平导软弱围岩变形控制探讨[J].现代隧道技术,2016,53(2):196-201.
- [9] 刘学增,唐精,桑运龙,等.逆断层黏滑错动对跨断层隧道影响机制的模型试验研究[J].隧道建设:中英文,2020,40(4):481-489.
- [10] 焦鹏飞,来弘鹏.不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析[J].土木工程学报,2019,52(2):110-121.
- [11] 刘凯,孔超,唐凌哲,等.高地应力断层破碎带衬砌力学特性对比与分析[J].铁道标准设计,2014(12): 105-109+114.
- [12] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- [13] 赵文财,范飞飞,李子琦,等.基于大管棚支护的大断面黄土隧道穿越冲沟地貌控制效果分析[J].公路,2020,65(8):380-385.
- [14] 邵珠山,赵鑫.基于隧道施工诱发地表沉降随机介质理论预测模型的拓展[J].长安大学学报:自然科学版,2021,41(6):73-81.
- [15] 郭宏博,仇文革,牛晓宇,等.新建通道密贴下穿地铁车站施工影响范围研究[J].土木工程学报,2021,54(S1):113-120.
- [16] 龚林金,任锐,王亚琼,等.隧道斜穿不同倾角断层破碎带围岩变形特征分析[J].公路,2021,66(7): 313-319.
- [17] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等.跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):433-445.
- [18] 蔡元成,王强,张强,等.浅埋偏压隧道边坡稳定性分析[J].河北工程大学学报:自然科学版,2022,39(3):56-64.
- [19] 李志强.深长隧道穿越艰险山区断层破碎带施工稳定性分析[D].青岛:山东科技大学,2020.

(责任编辑 王利君)

(上接第54页)

4)根据建(构)筑物与掌子面前后位置关系,分别运用掌子面前后方围岩振速预测公式计算安全药量,实现穿越建(构)筑物前后过程中的精准爆破振动控制,既能保证建(构)筑物安全,又能极大地提高施工效率。

参考文献:

- [1] 肖文涛,肖文芳,房泽法,等.地铁隧道掘进爆破地表震动效应研究[J].武汉理工大学学报,2011,33(10):113-117.
- [2] 高文学,颜鹏程,李志星,等.浅埋隧道爆破开挖及其振动效应研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S2):4153-4157.
- [3] 张震,周传波,路世伟,等.超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J].中南大学学报:自然科学版,2017,48(8):2119-2125.
- [4] 王超,周传波,路世伟,等.城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J].科学技术与工程,2017,17(6): 158-162.
- [5] 任永华.隧道穿越既有建筑物爆破施工影响及方案优化[J].铁道建筑,2018,58(4):61-65.
- [6] 傅洪贤,赵勇,谢晋水,等.隧道爆破近区爆破振动测试研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2): 335-340.
- [7] 高宇璠,傅洪贤,季相臣,等.小净距隧道钻爆施工中夹岩振动规律研究及应用[J].岩石力学与工程学报,39(S2):3440-3449.
- [8] 季相臣,傅洪贤,孔恒,等.大跨小间距隧道微振钻爆施工及中夹岩振动特性研究[J].中国公路学报,2021,34(4):220-230.
- [9] 张继春,曹孝君,郑爽英,等.浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(22):4158-4163.
- [10] 肖文芳,李宇坤,方凯明,等.地铁隧道钻爆施工地表振动速度特征研究[J].工程爆破,2018,24(1): 72-77.
- [11] 喻军,刘松玉,童立元.浅埋隧道爆破振动空洞效应[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(1): 176-179.
- [12] 蔡军,苏莹,邱秀丽.爆破荷载作用下空洞效应对围岩振动速度的影响[J].矿冶工程,2021,41(5): 10-13+17.
- [13] 管晓明,余志伟,宋景东,等.隧道超小净距下穿深埋供水管线爆破监测及减振技术研究[J].土木工程学报,2017,50(S2):160-166.

(责任编辑 王利君)