

地铁隧道下穿既有老旧建筑物的爆破振动传播规律

高士亮

(中铁十四局集团第五工程有限公司, 272117, 济宁)

摘要 [目的]国内外对于地铁隧道下穿既有老旧建筑物爆破施工的研究较少。此类工程采用爆破开挖时,可能会影响临近建筑物的安全,需要掌握爆破振动的传播规律,并分析爆破振动对周围建筑物的影响。[方法]以重庆市轨道交通 10 号线二期工程的南坪站—南滨路站区间隧道爆破施工为案例,在隧道爆破开挖过程中对爆破振动进行了监测。通过爆破振动仪得到了爆破振动监测数据,并使用萨道夫斯基公式对实际的爆破振动监测数据进行回归分析,得到了爆破振动的传播衰减规律,讨论了振动速度、最大段装药量、爆心距等各因素对爆破振动的影响。[结果及结论]3 个测振方向的爆破振动速度同爆心距、装药量的回归拟合结果中,计算数据与监测数据的相关性系数均大于 0.800。爆心距从 0 增至 40 m 时,最大段装药量的增幅较小。爆心距为 40~80 m 时,最大段装药量的增幅明显增大。垂直于隧道底板方向随爆心距增加的变化幅度最大,应重点关注该方向爆破振动安全控制速度为 1.0 cm/s 时的最大段装药量取值。

关键词 地铁隧道; 爆破振动; 传播规律; 既有老旧建筑物; 回归分析

中图分类号 U455.6;U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.031

Propagation Law of Blast-induced Vibrations during Metro Tunnel Under-passing Existing Old Buildings

GAO Shiliang

(The Fifth Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Construction Bureau Group, 272117, Jining, China)

Abstract [Objective] There is limited research both in China and abroad on the blasting construction of metro tunnels under-crossing existing old buildings. Projects utilizing blasting excavation may pose safety concerns for nearby structures. It is crucial to understand the propagation law of blast-induced vibrations and analyze their impact on surrounding buildings. [Method] Taking the blasting construction of Nanping Sta. - Nanbin Road Sta. interval on Chongqing Rail Transit Line 10 phase II project as study case, the blast-induced vibrations are monitored during tunnel blasting excavation process. The observed data are obtained using sensors for blast-induced vibration, and regression analysis is performed on the actual blast-

induced vibration monitoring data using the Sadowski's formula, thus the propagation attenuation law of blast-induced vibrations is obtained, the influence of factors such as vibration velocity, maximum charge per delay, and blasthole distance on blast-induced vibrations is discussed. [Result & Conclusion] In the regression fitting results of blast-induced vibration velocity with blasthole distance and charge per delay in three vibration measurement directions, the correlation coefficients between calculated data and monitored data are all greater than 0.800. The increase in the maximum charge per delay is relatively small when the blasthole distance increases from 0 to 40 m. However, the increase in the maximum charge per delay becomes more significant when the blasthole distance ranges from 40 to 80 m. The variation amplitude is most significant in the direction perpendicular to tunnel bottom plate. Attention should be focused on the maximum allowable charge per delay value when the blast-induced vibration safety control velocity is set at 1.0 cm/s.

Key words metro tunnel; blast-induced vibration; propagation law; existing old building; regression analysis

隧道爆破开挖是一种比较传统的隧道掘进方法,因其具有成本低、地质条件适应性强等优点,被广泛应用于地铁隧道建设中^[1-2]。城市地铁隧道的建设通常会下穿许多既有建筑物,而施工过程中的爆破振动可能会对临近建筑物产生影响^[3]。因此,对地铁隧道爆破振动进行监测,分析爆破振动的传播衰减规律尤为重要,可确保隧道和临近建筑物的安全。

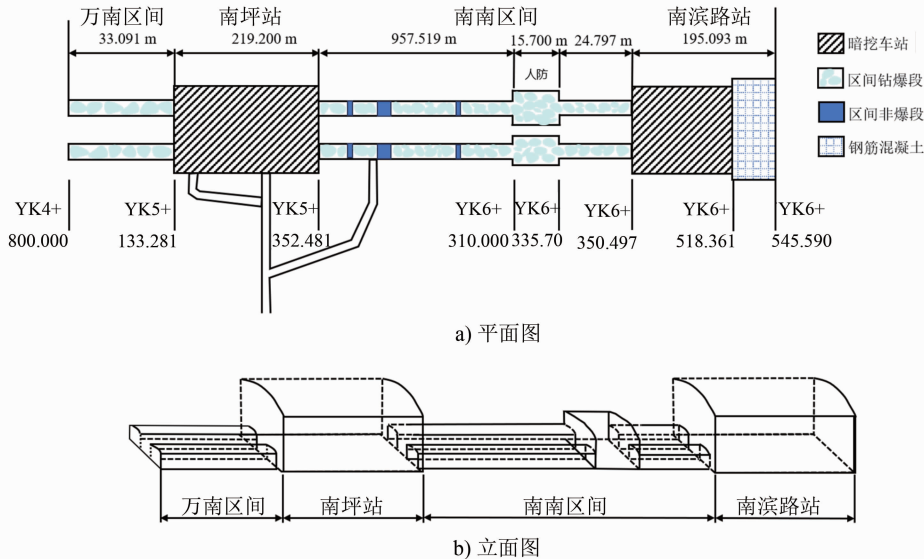
目前,国内外学者对爆破振动控制相关领域进行了大量研究^[4-6],但对于地铁隧道下穿既有老旧建筑物爆破施工的研究较少。因此,本文以重庆市轨道交通 10 号线二期工程的南坪站—南滨路站区间(以下简称“南南区间”)隧道爆破施工为研究案例,通过爆破振动仪得到了爆破振动监测数据,并使用萨道夫斯基公式对爆破振动速度进行回归分析,得到了爆破振动的传播衰减规律。通过采用本文的技术路线,验证了本文所述的爆破施工方法能够保

证临近建筑物的安全这一结论,该方法可为爆破振动的安全控制研究提供参考。

1 工程背景

南南区间隧道为重庆市轨道交通 10 号线二期工程的重点项目,其起点里程为 YK5+353.179,终点里程为 YK6+350.497,区间长度为 997.3 m,隧道拱顶埋深为 25~54 m(属深埋隧道)。该区间线路

自南坪站出发后向北布设,下穿洋河南滨花园小区、金鸣公司后,接入南滨路站。该区间隧道拱顶埋深所处位置的地面建筑物、地下建筑物较多,这些建筑大多为重庆市南岸区 20 世纪 80 年代至 90 年代砖结构的居民老建筑或新建高层住宅楼。该区间隧道拱顶穿越的岩层主要有砂岩和砂质泥岩,围岩级别为Ⅳ级。该区间以单洞单线形式分别与两端车站连接,其工程范围如图 1 所示。



注:万南区间为万寿路站—南坪站区间。

图 1 南南区间工程范围的平面图及立面图

Fig. 1 Plan and elevation diagram of Nan-Nan interval project scope

2 隧道爆破方案

为提高工作效率,在隧道断面较小处及部分稳定性较好的Ⅳ级围岩处采用全断面爆破法施工^[7]。隧道爆破施工在确保得到高质量隧道开挖断面和隧道进尺的同时,须将爆破振动控制在尽可能小的范围内,以保证邻近地面及建筑物的安全,减少扰民。因此,须严格按照“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的原则组织施工。该工程采用台阶法爆破,炮眼利用率高,无需过大超挖和欠挖,其炮孔布置如图 2 所示。

经综合对比,本文优先选择目前已成熟且已被成功应用的高精度导爆管雷管。进行爆破设计时,由于导爆管雷管 MS5 以下段位的延时均太短,为避免爆破振动叠加,舍弃了 MS2、MS4 两个段位,而采用较低成本的普通导爆管雷管,以实现不串段的 18 个微差爆破间隔时间。

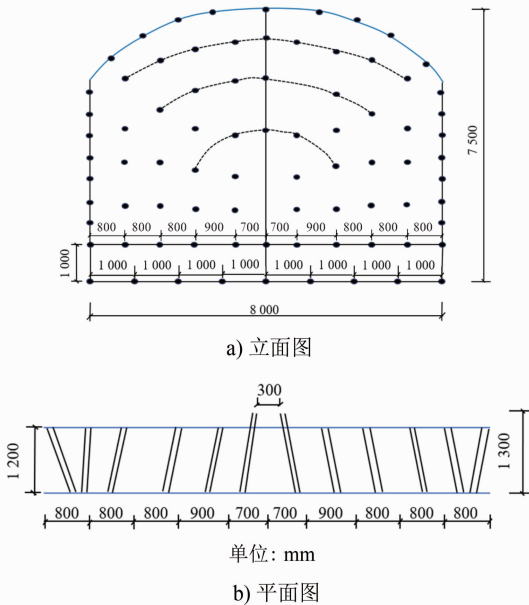


图 2 台阶法爆破炮孔布置图

Fig. 2 Layout diagram of blast holes by bench blasting method

在爆破施工过程中,设置合理的最大段装药量是控制爆破振动的主要途径。单孔装药量 Q 的计算式为:

$$Q = kdwL\lambda \tag{1}$$

式中:

- k ——爆破单位体积岩石所需消耗的炸药量;
- d ——炮眼间距;
- w ——炮眼爆破方向的抵抗线;
- L ——炮孔深度;
- λ ——炮眼部位系数。

本工程涉及的主要爆破参数设定如下:

1) 为满足施工进度要求,本工程取循环进尺为 1.0~2.0 m, 其中: IV 级围岩的循环进尺为 2.0 m, V 级围岩的循环进尺为 1.0~1.8 m。基于此, L 取 2.0 m。

表 1 各炮孔部位的爆破装药参数

Tab. 1 Blast charge parameters at each blast hole position

炮孔部位	炮孔深度/m	炮孔个数/个	雷管段位	单孔装药量/kg	所在部位的总装药量/kg	钻孔堵塞长度/m
掏槽孔	1.8	6	1	1.0	6.0	0.7
扩槽孔	1.7	10	3	0.7	7.0	0.7
掘进孔 1	1.7	15	5	0.8	12.0	0.6
掘进孔 2	1.7	17	7	0.8	13.6	0.6
底板孔	1.8	9	11	1.0	9.0	0.6
周边孔	1.8	24	9	0.7	14.4	0.8

3 爆破振动监测

3.1 监测仪器

本工程选用 TC-4850 爆破振动监测仪器及配套传感器进行爆破振动监测。爆破监测的原理为:传感器先接收爆破振动信号,然后使用数据线缆将爆破振动数据传输到爆破振动仪中,最后通过电脑对数据进行处理,并对爆破方案进行安全评估。这其中,传感器的正确安装决定了数据传输的可靠性。在监测过程中,使用石膏将传感器与被监测物粘结在一起,采用三向拾振传感器进行测试,使得每个测点部位均可测试 3 个方向的振动速度。具体而言, x 向朝着掌子面, y 向垂直于隧道内壁, z 向垂直于隧道底板。测点的位置分别位于距离掌子面 50 m、54 m、61 m、67 m、72 m、75 m、78 m、81 m。实际测量时,将三向拾振传感器布置在垂直和平行主轴线的位置,3 个测振方向以隧道轴线开挖方向为正,得到的爆破振动速度监测结果如表 2 所示。

2) 根据漏斗联合作用原理,漏斗联合作用点位于 1/3 孔深处(即炮眼直径在 35~42 mm 范围内)时,掌子面比较平整,本文取 $w = (0.3 \sim 0.6)L$ 。

部位不同的炮眼对施工的要求各不相同:掏槽眼要求抛掷;掘进眼只要求松动;掏槽部位两侧的炮眼要求松动,两侧上部的炮眼要求弱松动,两侧下部的炮眼要求加强松动;周边眼要求光面爆破;底板眼要求用抛掷爆破的药量,否则可能导致底板爆破失败。为此,各部位炮眼应选取不同的装药量。

本工程爆破开挖用新奥法理论指导施工,采用光面爆破的方法。爆破器材采用 2# 岩石乳化炸药,周边眼采用直径为 25 mm 的光爆小药卷。共设置了 81 个炮孔,总装药量为 62 kg。具体爆破参数如表 1 所示。

表 2 爆破振动速度监测结果

Tab. 2 Monitoring results of blast-induced vibration velocity

监测点 编号	最大段 装药量/kg	爆心 距/m	爆破振动速度/(cm/s)		
			x 向	y 向	z 向
1	14.4	50	0.651	0.451	0.836
2	14.4	54	0.638	0.332	0.708
3	14.4	61	0.427	0.303	0.632
4	14.4	67	0.493	0.231	0.551
5	14.4	72	0.341	0.279	0.571
6	14.4	75	0.378	0.167	0.435
7	14.4	78	0.295	0.189	0.338
8	14.4	81	0.264	0.141	0.409

注:爆心距为爆源中心到测点的距离。

3.2 爆破振动速度衰减分析

影响爆破振动的主要因素有爆源、爆心距及地形条件等。爆破的能量从爆源处产生,爆破的能量大小主要受装药量影响;爆破振动在传播的过程中会随爆心距的增加而不断减小;不同的地质条件和场地条件会影响爆破振动的传播,应分别对应不同的场地系数和衰减系数^[8]。因此,在爆破振动传播过程的分析计算过程中,应主要关注最大段装药量、

爆心距、场地系数及衰减系数 4 个变量。

通过使用爆破振动监测仪可以得到 3 个测振方向振动速度及振动频率的变化情况,而工程中最为关心的是爆破振动时各个方向的最大振动速度。为了探究爆破振动的传播衰减规律,本文使用萨道夫斯基公式对其进行回归分析:

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{最大段}}}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中:

V ——监测点的最大振动速度;

K ——爆源和监测点之间与地质、地形条件有关的场地系数;

$Q_{\text{最大段}}$ ——最大段的单孔装药量;

α ——爆源和监测点之间与地质、地形条件有关的衰减指数;

R ——爆心距。

为了简化计算,将式(2)左右两边都进行自然对数函数变换,可得:

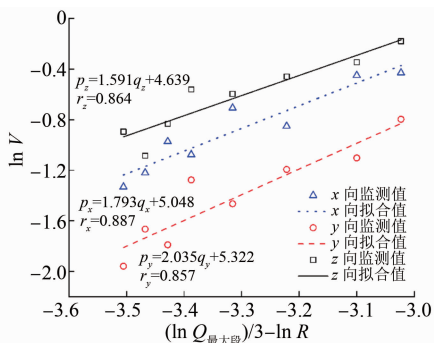
$$\ln V = \ln K + \alpha \left(\frac{1}{3} \ln Q_{\text{最大段}} - \ln R \right) \quad (3)$$

$$\text{令 } p = \ln V, q = \frac{1}{3} \ln Q_{\text{最大段}} - \ln R, A = \ln K, B = \alpha,$$

则可将式(3)转化为爆破振动传播衰减回归方程:

$$p = A + Bq \quad (4)$$

利用爆破振动仪得到的监测数据及最小二乘法对式(4)进行拟合,最终通过回归方程的截距和斜率确定 K 和 α 的值,进而得到南南区间隧道的爆破振动传播规律。图 3 为 3 个方向爆破振动速度拟合结果,由此可看出 V 、 $Q_{\text{最大段}}$ 、 R 三者的函数关系。



注: r_x 是回归方程与监测数据之间的相关性系数; $p_x = 1.793q_x + 5.048$ 是 x 向的爆破振动传播衰减回归方程,余类推。

图 3 3 个方向爆破振动速度拟合结果

Fig. 3 Fitting results of blasting vibration velocity in three directions

设 V_x 为 x 向的爆破振动速度, V_y 为 y 向的爆破振动速度, V_z 为 z 向的爆破振动速度。分别将图 3 中 x 向、 y 向、 z 向的爆破振动回归方程转换为萨道夫斯基公式,可得:

$$V_x = 155.711 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{最大段}}}}{R} \right)^{1.793} \quad (5)$$

$$V_y = 204.793 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{最大段}}}}{R} \right)^{2.035} \quad (6)$$

$$V_z = 103.441 \left(\frac{\sqrt[3]{Q_{\text{最大段}}}}{R} \right)^{1.591} \quad (7)$$

从式(5)一式(7)可看出, x 向、 y 向和 z 向的爆破振动传播衰减回归方程与监测数据的相关性系数均大于 0.800,但这 3 个方向的 K 和 α 均不相同,这表明不同方向上的爆破振动传播规律是不同的。在隧道爆破开挖时,岩石会受到爆破的扰动,从而改变了岩石的性质,并使其各项异性加大,这是爆破振动传播规律在空间方位上出现差别的主要原因。虽然这 3 个方向爆破振动传播衰减回归方程结果不一致,但总体来说与实际情况相符,可以用于下文的爆破振动安全控制计算。

4 爆破振动安全控制

施工时,应将爆破引起的振动、噪声控制在爆破安全规程要求内,并对爆破断面周边建筑物和构筑物进行一定的保护。为此,根据爆破区域内建筑物的建造年代和结构现状,将建筑物分为 20 世纪 80 年代至 90 年代的民用老建筑、钢筋混凝土结构的高层建筑物两类。对于钢筋混凝土结构的高层建筑,其爆破安全允许振动速度取 1.5 cm/s;对于 20 世纪 80 年代至 90 年代的居民老建筑,其爆破安全允许振动速度取 1.0 cm/s。

上文已经计算拟合得出了萨道夫斯基公式中的场地系数 K 和衰减指数 α 。根据爆破区域周围需要保护建筑物爆破振动的控制值,通过分析爆破振动的传播规律,可以计算出爆破的最大段装药量,其计算式为:

$$Q_{\text{最大段}} = R^3 \left(\frac{V_{\text{允许}}}{K} \right)^{\frac{3}{\alpha}} \quad (8)$$

式中:

$V_{\text{允许}}$ ——允许的最大安全振动速度。

隧道爆破施工过程中,为了避免隧道周围建筑物受到影响,将 R 和 $V_{\text{允许}}$ 代入式(2)进行验算,可计

算出符合工程需要的 $Q_{\text{最大段}}$ 。不同爆破振动速度下 $Q_{\text{最大段}}$ 与 R 之间关系如图 4 所示。

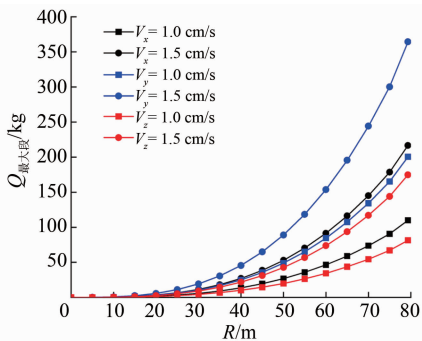


图 4 不同爆破振动速度下爆心距与最大段装药量的关系

Fig. 4 Relationship between explosion center distance and maximum charge per delay under different blast-induced vibration velocities

由图 4 可知:① $R=0\sim 40$ m 时, $Q_{\text{最大段}}$ 的增幅较小;② $R=40\sim 80$ m 时, $Q_{\text{最大段}}$ 的增幅明显增大;③3 个方向 $Q_{\text{最大段}}$ 随着 R 增加的变化幅度排序为 y 向 $> x$ 向 $> z$ 向, 因此, 在隧道爆破开挖的过程中需要着重关注 $V_z=1.0$ cm/s 时的 $Q_{\text{最大段}}$ 取值。

5 结语

为了确保爆破施工的安全, 本工程对爆破振动进行了监测, 并根据实际监测数据进行了振动传播衰减规律研究, 主要结论如下:

1) 确定了爆区周围的钢筋混凝土结构高层建筑的 $V_{\text{允许}}=1.5$ cm/s, 20 世纪 80 年代至 90 年代居民老建筑的 $V_{\text{允许}}=1.0$ cm/s。

2) 爆破振动随着装药量的增加和爆心距的减小而增大, 使用萨道夫斯基公式对 x 向、 y 向、 z 向的爆破振动速度进行拟合。拟合结果表明: 爆破振动传播衰减回归方程计算数据与监测数据具有良好的相关性, 且不同方向上的爆破振动传播规律不同。

3) 爆心距从 0 增至 40 m 时, $Q_{\text{最大段}}$ 的增幅较小; 当爆心距为 40~80 m 时, $Q_{\text{最大段}}$ 的增幅明显增大。

参考文献

- [1] 郭伟平. 爆破振动对邻近既有隧道的影响[J]. 施工技术, 2020, 49(21): 81.
GUO Weiping. Influence of blasting vibration on adjacent existing tunnel[J]. Construction Technology, 2020, 49(21): 81.

- [2] 李育, 孙鹏昌, 罗建斌, 等. 深圳赤湾停车场石方开挖爆破振动安全控制研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 63.
LI Yu, SUN Pengchang, LUO Jianbin, et al. Research on blasting vibration control during rock excavation of Chiwan Metro Parking Lot, Shenzhen[J]. Blasting, 2020, 37(3): 63.
- [3] 陈至昊, 杜建伟. 城市轨道钻爆开挖引起下穿高层建筑的振动响应规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(增刊 1): 111.
CHEN Zhihao, DU Jianwei. Study on vibration response law of high-rise buildings under construction caused by urban rail blasting excavation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(S1): 111.
- [4] 顾云, 孙飞, 李广洲, 等. 核电厂基础开挖爆破振动监测与数据分析[J]. 爆破器材, 2020, 49(5): 47.
GU Yun, SUN Fei, LI Guangzhou, et al. Blasting vibration detection and data analysis of a nuclear power foundation excavation[J]. Explosive Materials, 2020, 49(5): 47.
- [5] 姚梧闻, 阳生权, 孙杰. 超近距离爆破振动下铁路隧道铁轨振动特性研究[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(6): 14.
YAO Wuwen, YANG Shengquan, SUN Jie. Research on rail vibration characteristics of railway tunnel under ultra-close blasting vibration[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(6): 14.
- [6] 原凯, 岳中文, 付晓强, 等. 爆破震动信号在不同掏槽形式下的 HHT 分析[J]. 煤炭工程, 2018, 50(5): 100.
YUAN Kai, YUE Zhongwen, FU Xiaoqiang, et al. HHT analysis on blasting vibration signal of different cut method[J]. Coal Engineering, 2018, 50(5): 100.
- [7] 马海越, 张云鹏, 刘宏颖. 基于 BP 神经网络的地下采场爆破振速预测[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 55.
MA Haiyue, ZHANG Yunpeng, LIU Hongying. Prediction of blasting vibration velocity in underground stope based on BP neural network[J]. Explosive Materials, 2019, 48(6): 55.
- [8] 付晓强, 崔秀琴, 杨立云, 等. 变分模态分解算法在煤矿井筒爆破信号趋势项消除中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 248.
FU Xiaoqiang, CUI Xiuqin, YANG Liyun, et al. Application of variational mode decomposition algorithm in elimination of trend term of coal mine shaft blasting signal[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 248.

· 收稿日期:2021-10-06 修回日期:2021-12-22 出版日期:2024-04-10
Received:2021-10-06 Revised:2021-12-22 Published:2024-04-10
· 作者:高士亮, 高级工程师, 191467620@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license