

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202208172024081982

文章编号: 1674-599X(2024)04-0102-07

引用格式: 曹峰, 王海林, 凌同华, 等. 大跨度四连拱公路隧道的爆破动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(4): 102-108.

Citation: CAO Feng, WANG Hailin, LING Tonghua, et al. Blasting dynamic response analysis of long-span four arch highway tunnel[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 102-108.

大跨度四连拱公路隧道的爆破动力响应分析

曹峰¹, 王海林¹, 凌同华², 万志文¹, 杨雄¹

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 由于大跨度四连拱隧道具有复杂且特殊的受力结构, 爆破荷载作用下的四连拱隧道中隔墙和先行隧道衬砌极易发生损伤甚至产生破坏。以长沙市银星路观音岩四连拱隧道作为实际工程背景, 对先行隧道衬砌的爆破振动速度进行实测, 通过回归分析, 总结先行隧道的振动波传播规律。同时, 采用数值模拟的方法, 分析了爆破荷载作用下先行隧道中隔墙和衬砌的振速和位移响应。研究表明: 在爆破开挖面纵向 30 m 范围内的中隔墙振动速度较快; 中隔墙迎爆侧墙肩的位移值最大, 墙顶的位移值次之, 背爆侧墙脚的位移值最小; 右辅道隧道爆破时, 距离右辅道较近的右主线隧道迎爆侧振动速度较快, 且主要分布在迎爆侧拱腰处; 右主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振速峰值约为左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振速峰值的 16 倍、左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰振速峰值的 40 倍。

关键词: 隧道工程; 四连拱隧道; 爆破; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: U455.6

文献标志码: A

Blasting dynamic response analysis of long-span four arch highway tunnel

CAO Feng¹, WANG Hailin¹, LING Tonghua², WAN Zhiwen¹, YANG Xiong¹

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Company Limited, Changsha 410008, China; 2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Due to the complex and unique stress structure of long-span four-arch tunnels, the mid-partition wall and the lining of the first tunnel are prone to damage or even destruction under blasting loads. Based on the engineering context of the Guanyinyan four-arch tunnel in Yinxing Road, Changsha, the blasting vibration velocity of the advanced tunnel lining has been measured. Through regression analysis, the propagation law of vibration waves in the advanced tunnel has been established. Additionally, numerical simulation methods have been employed to analyze the vibration velocity and displacement response of the mid-partition wall and tunnel lining under blasting loads. The results indicate that the vibration velocity of the mid-partition wall is significant within 30 meters along the longitudinal direction of the blasting excavation face. The maximum displacement occurs at the shoulder on the blasting side of the mid-partition wall, followed by the top, while the least displacement is observed at the foot behind the blasting side. During blasting in the right auxiliary

收稿日期: 2022-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078061); 湖南省科技人才托举工程 (2023TJ-Z02); 湖南省重点领域研发计划 (2020SKC2010)

通信作者: 曹峰 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程等方面的研究工作。E-mail: caofeng130@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

tunnel, the vibration velocity on the blasting side of the right main tunnel, particularly near the right auxiliary tunnel, is higher, with the highest vibration velocity recorded at the haunch of the blasting side. Notably, the peak vibration velocity of the haunch in the right main tunnel lining on the blasting side is approximately 16 times greater than that in the left main tunnel and 40 times greater than that in the left auxiliary tunnel lining.

Key words: tunnel engineering; four arch tunnel; blast; dynamic response; numerical simulation

近年来,伴随着我国公路建设事业的蓬勃发展,公路隧道项目的建设规模呈现出显著增长的态势。鉴于土地资源日益宝贵,连拱隧道因其独特的优势而备受青睐。连拱隧道不仅占地面积相对较小,有效缓解了土地资源紧张的问题,还极大地降低了工程接线的难度,也显著减少了拆迁需求,从而进一步降低了工程造价,促进了城市交通网络的高效构建与和谐发展^[1-3]。然而,连拱隧道虽具备诸多优势,但其结构受力特性却相对复杂,施工工序繁多且相互间干扰较大,这使得其安全性成为衡量整个工程成功与否的重要因素^[4-7]。特别是在采用爆破开挖的隧道施工中,爆破振动对周围岩体、中隔墙以及其他关键受力构件会产生显著影响,可能引发结构开裂,严重时甚至导致整体结构失稳,给施工安全带来巨大挑战^[8-12]。许多专家学者对连拱隧道及其爆破动力进行了研究。和振海等^[13]分析了岩质连拱隧道的爆破振动对隧道围岩及中隔墙的影响。李波等^[14]以云南某隧道为工程背景,采用数值模拟的方法分析了后行洞爆破对先行洞的影响,同时对监测点的爆破振动速度进行了预测。朱正国等^[15]以荣乌高速黄土岭隧道为背景,研究了浅埋偏压连拱隧道穿越古长城施工过程中的变形规律与受力特征。钱正富等^[16]以云南楚姚高速陈家冲隧道为工程实例,开展红层软岩无中导洞连拱隧道的爆破振动控制技术研究。刘树红等^[17]以京张高铁八达岭长城站为例,研究在V级围岩地质条件下,大

跨度深埋三连拱隧道的计算方法及合理施工工序。然而,针对多连拱甚至四连拱隧道爆破动力特性的研究还很少。因此,开展浅埋大跨度四连拱隧道的爆破振动特性的研究显得尤为重要。本文结合长沙市银星路观音岩四连拱隧道的工程特点,采用现场爆破测试和数值模拟的方法,研究后行隧道爆破振动对其他邻近隧道的影响,分析爆破荷载作用下四连拱隧道中隔墙及支护结构的受力特点,以期为类似工程提供借鉴。

1 现场爆破试验

1.1 工程概况

观音岩隧道地处长沙市北部的望城区,隧道采用双向十车道四连拱方案,总开挖宽度约64 m,四洞折合长度约497 m,为银星路道路的控制性工程。银星路作为打通城北出行瓶颈的工程,是一条外接高速路网、内联城市干道的重要道路。洞身设计埋深相对较浅,最大埋深处约为58 m,隧道线路需穿越多处冲沟区域,导致地形对隧道结构产生了较为明显的偏压作用。洞身主体由中风化至强风化的泥质板岩构成,这类岩石属于软质岩范畴,其物理力学性质较差,呈现出较为破碎的状态。岩层倾角为 $40^{\circ} \sim 46^{\circ}$ 。四连拱隧道采用先开挖中导洞,再开挖两个主线隧道,最后开挖左、右外侧辅道隧道的施工顺序。四连拱隧道衬砌结构示意图如图1所示。

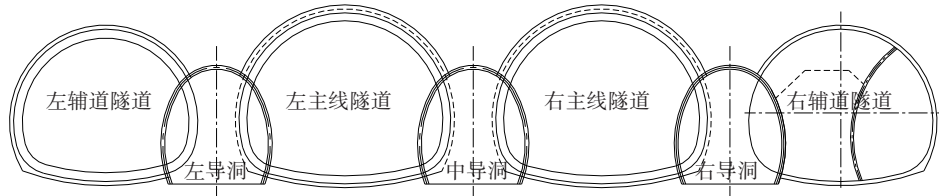


图1 四连拱隧道衬砌结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lining structure of four arch tunnel

本文主要研究了右辅道隧道爆破振动对左主线、右主线和左辅道隧道的影响。右辅道隧道采用侧壁导坑法开挖,上台阶开挖时,掏槽眼采用楔形方式布置,孔底间距为10~20 cm。周边眼采用光面爆破方式,孔间距

为50 cm。炸药选用2#岩石乳化炸药,最大段装药量为4.40 kg,总装药量为14.65 kg,循环进尺为0.50 m。

1.2 振动监测系统

爆破振动监测系统由爆破振动智能监测仪、三

维速度型传感器等仪器组成。

1.3 振动监测方案

考虑到四连拱隧道结构的复杂性,本工程的爆破振动监测点布置在右主线隧道K0+629.8处,具体监测点布置如图2所示。

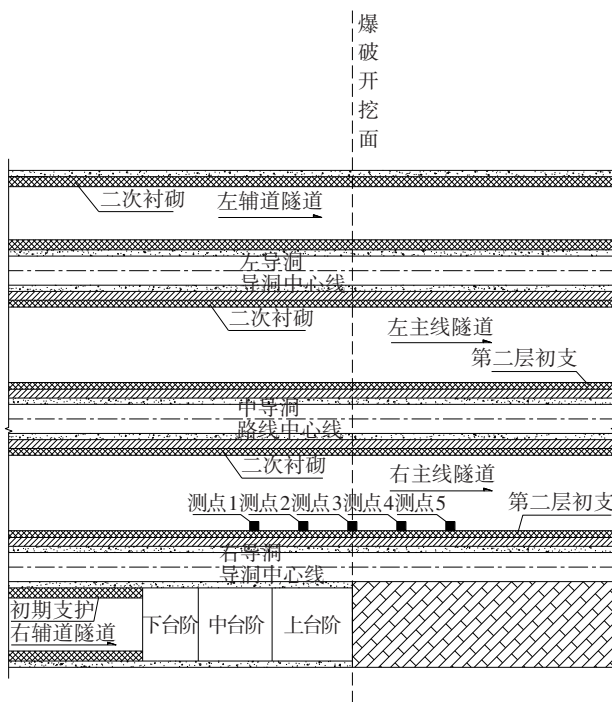
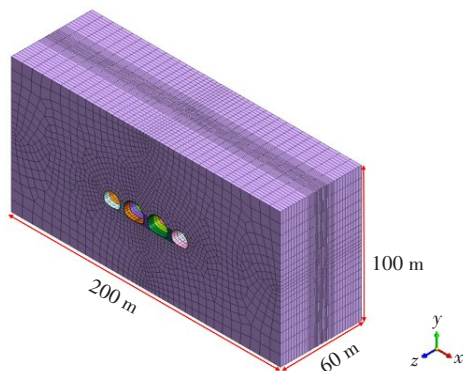


图2 爆破振动监测点布置图
Fig. 2 Layout of blasting vibration measuring points

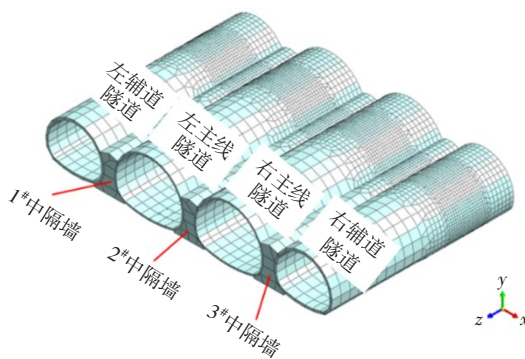
2 数值模拟试验

2.1 数值计算模型

根据观音岩隧道的基本情况,采用Midas GTS NX软件建立三维模型。为了减少边界效应的作用及爆破应力波的折射,模型边界宜为隧道宽度的3~5倍,因此,模型的尺寸定为200 m×60 m×100 m(长×宽×高)。隧道上部为无约束边界。计算模型的本构模型为摩尔-库伦模型,围岩采用实体单元,支护采用板单元。具体计算模型如图3所示。



(a) 四连拱隧道整体计算模型



(b) 衬砌和分隔墙模型

图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 材料参数

计算模型中围岩及支护材料参数见表1。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/ GPa	泊松 比	容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
V级围岩(强 风化板岩)	1.0	0.40	20.0	150	25
主线隧道外层 初支	32.0	0.25	24.0		
主线隧道内层 初支	31.4	0.25	24.0		
辅洞初支	32.0	0.25	24.0		
二衬	32.5	0.20	25.0		
中隔墙	32.5	0.20	25.0		
临时支撑	210.0	0.20	78.5		

爆破荷载采用三角形荷载,计算峰值荷载时使用式(1):

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{215.4}{Z^3} - 0.8034$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (1)$$

式中: Z 为比例距离; P_{\max} 为爆破荷载应力峰值,MPa; R 为炮眼距作用面垂直距离,m; Q 为炮眼装药量,kg。

经过对模型进行分析和计算,取加载时间为10 ms,卸载时间为90 ms。爆破荷载根据隧道开挖时最大段装药量确定,考虑到观音岩隧道的实际情况,装药量取为4.40 kg,则可求得爆破荷载作用下洞壁上的应力峰值为11.98 MPa,爆破荷载作用下应力的时程曲线如图4所示。

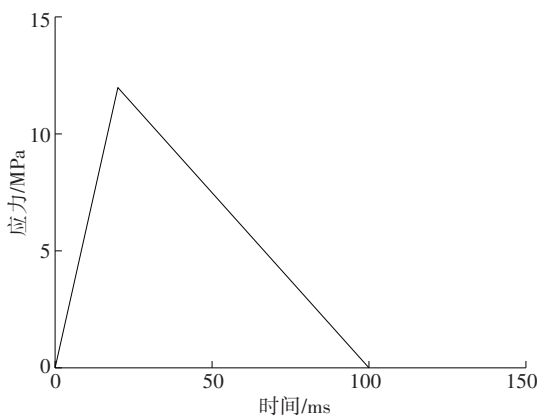


图4 爆破荷载作用下的应力历程曲线

Fig. 4 Stress time history curve under blasting load

3 试验结果及分析

3.1 测试结果分析

本次现场爆破振动测试选取右辅道隧道处上台阶的爆破振动速度,共进行了三次爆破振动测试。测试仪器能分别测出径向、垂向和切向三个方向的振动速度,具体监测数据如表2所示。

表2 爆破振动监测数据

Table 2 Time history curve under blasting load

次数	测点	R_1/m	Q_1/kg	$V/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		
				径向	垂向	切向
第一次	1	12.2	4.4	4.05	3.11	5.01
	2	8.1	4.4	4.48	3.65	6.13
	3	6.2	4.4	6.11	4.01	7.05
	4	8.1	4.4	4.85	3.95	6.43
	5	12.2	4.4	4.11	4.02	5.63
第二次	1	13.2	4.4	3.99	2.95	5.01
	2	8.5	4.4	5.02	3.53	5.50
	3	6.3	4.4	6.06	3.95	6.71
	4	8.0	4.4	5.02	3.83	5.80
	5	11.8	4.4	3.56	2.65	4.65
第三次	1	13.6	4.4	3.56	2.15	3.05
	2	9.0	4.4	4.62	2.38	3.99
	3	6.7	4.4	5.74	3.37	6.75
	4	7.6	4.4	4.38	2.98	3.75
	5	11.3	4.4	3.22	1.68	2.55

目前,爆破振动主要采用萨道夫斯基经验公式进行研究,即:

$$V = K \left(\sqrt[3]{Q_1} / R_1 \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: V 为质点振速; R_1 为测点与爆源距离; K 、 α 分

别为场地因素和衰减系数; Q_1 为最大装药量。

通过对现场拱腰处的横向、垂向和切向实测数据进行回归分析,得到质点振动速度峰值在不同方向的传播规律,即:

$$\begin{cases} V_{\text{径向}} = 14.19 \left(\sqrt[3]{Q_1} / R_1 \right)^{0.66} \\ V_{\text{垂向}} = 7.41 \left(\sqrt[3]{Q_1} / R_1 \right)^{0.49} \\ V_{\text{切向}} = 15.90 \left(\sqrt[3]{Q_1} / R_1 \right)^{0.66} \end{cases} \quad (3)$$

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 计算模拟值与实测值对比

选取爆破振动数值模拟分析数据,与实测数据进行对比分析,得到上台阶爆破时,迎爆侧衬砌拱脚处的峰值质点振动模拟速度为6.20 cm/s,而相同位置的现场实测数据为6.11 cm/s,考虑到数值计算模型中采用均质围岩,与实际情况存在一定的差异,因此数据差值在合理范围内,采用数值模拟计算得到的结果能较好地反映现场的实际情况。

3.2.2 中隔墙的振速响应

中隔墙作为观音岩四连拱隧道的主要受力构件,不仅距离爆源较近,同时在多次爆破荷载的作用下,受力构件极易产生破坏。

采用数值模拟得到了爆破荷载作用下中隔墙的合矢量振动速度云图,如图5所示。

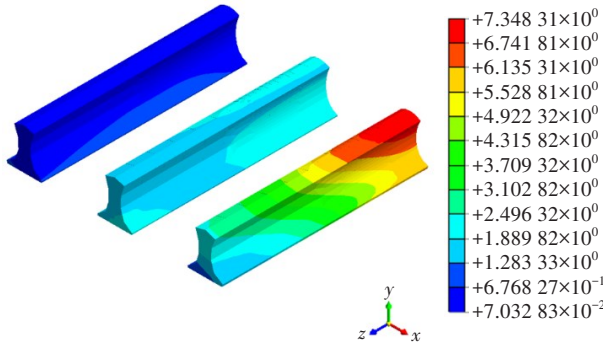


图5 中隔墙合矢量振动速度云图

Fig. 5 Cloud diagram of vector vibration velocity of middle partition wall

由图5可知,右辅道隧道爆破时,振动速度较快值主要分布在中隔墙迎爆侧的拱顶及拱腰位置。同时,距离爆源较近的中隔墙振动速度显著增大。为进一步研究右辅道隧道爆破开挖对中隔墙的影响,沿隧道纵向提取中隔墙拱顶处的振动速度,如图6所示。

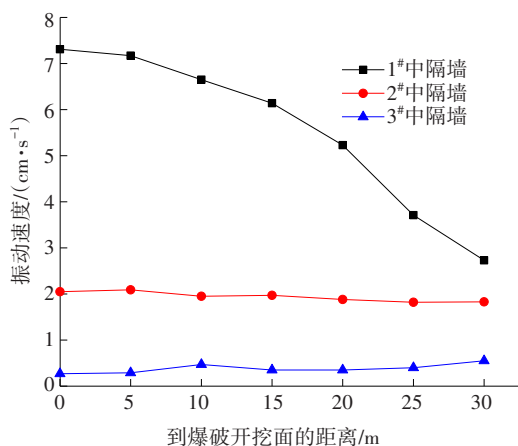


图6 沿隧道纵向中隔墙拱顶处振动速度

Fig. 6 Vibration velocity at the crown of middle partition wall along the longitudinal direction of tunnel

由图6可以看出,距离爆破开挖面较近的1#中隔墙振动速度明显较快,最大值达7.31 cm/s,随后逐渐衰减。2#中隔墙和3#中隔墙的振动速度衰减较为平缓,这是由于距离爆源较远。

3.2.3 中隔墙的位移响应

选择距离爆破开挖面较近的1#中隔墙作为研究对象,提取爆破开挖面附近1#中隔墙的墙顶,迎爆侧墙肩、墙腰和墙脚,以及背爆侧墙肩、墙腰和墙脚处的位移值,得到位移值柱状图如图7所示。

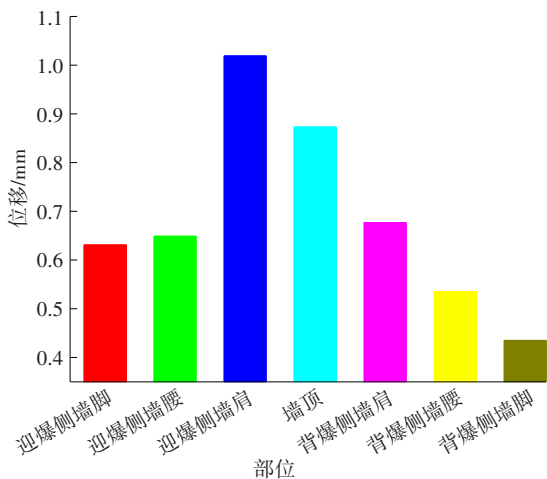


图7 中隔墙不同部位的位移值

Fig. 7 Displacement value of different parts of middle partition wall

由图7可知,迎爆侧墙肩的位移值最大,为1.02 mm,1#中隔墙墙顶的位移值次之,背爆侧墙脚的位移值最小,为0.44 mm。迎爆侧墙肩及墙顶的位移值较大,约为其他部位位移值的2倍,施工时应特别关注中隔墙墙顶和迎爆侧墙肩的位移值,确保中隔墙的施工质量。

3.2.4 隧道衬砌的振速响应

观音岩四连拱隧道为双向十车道公路隧道,爆破开挖引起的振动极易对隧道衬砌产生影响,严重时衬砌发生破坏。为了研究右辅道隧道爆破对其他三个连拱隧道衬砌的影响,通过数值模拟计算得到其他三个连拱隧道衬砌的合矢量振动速度云图,如图8所示。

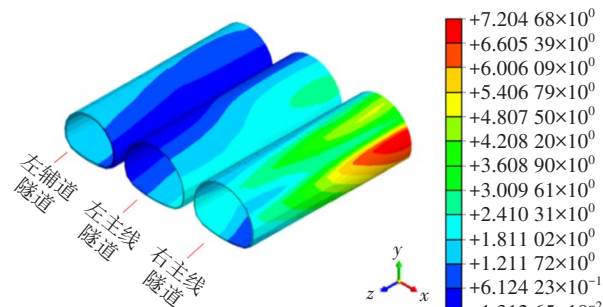


图8 四连拱隧道衬砌合矢量振动速度云图

Fig. 8 Cloud diagram of combined vector vibration velocity of four arch tunnel lining

由图8可以看出,右辅道隧道爆破时,距离右辅道较近的右主线隧道迎爆侧振动速度较快,振动速度最大值分布在右主线隧道迎爆侧拱腰处,为7.2 cm/s。振动速度次大值发生在右主线隧道拱顶的位置,而背爆侧振动速度则相对较小。从左主线隧道的振动速度分布来看,其振动速度较大值仍发生在迎爆侧的拱肩和拱腰,背爆侧振动速度较小。从左辅道隧道的振动速度分布来看,振动速度较大值发生在背爆侧。针对爆破振动速度的分布情况,选取左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰、左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰和右主线隧道衬砌迎爆侧拱腰合矢量振动速度进行分析,结果如图9所示。

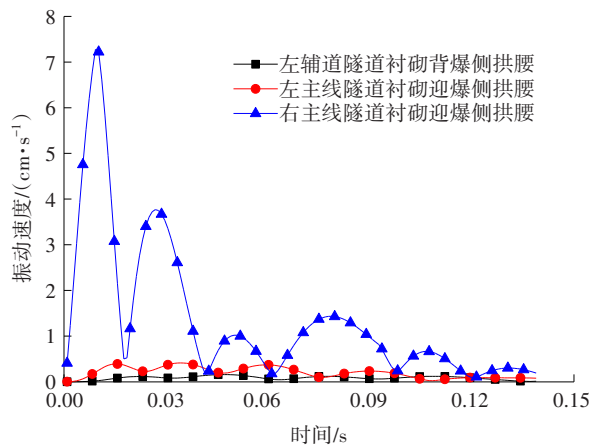


图9 四连拱隧道衬砌合矢量振动速度

Fig. 9 Time history curve of combined vector vibration velocity of four arch tunnel lining

由图9可以看出,右主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振动速度在0.010 s时率先达到峰值,左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振动速度在0.035 s时达到峰值,左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰振动速度在0.046 s时达到峰值。由振速峰值可知,右主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振动速度峰值远大于左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰和左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰的振动速度,约为左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰振速峰值的16倍,为左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰振速峰值的40倍。因此,施工过程中应重点监测右主线隧道衬砌迎爆侧拱腰,从而有效控制爆破振动对先行洞衬砌的影响。

3.2.5 隧道衬砌的位移响应

选择距离爆破开挖面较近的右主线隧道作为研究对象,提取拱顶、迎爆侧拱肩、拱腰和拱脚,以及背爆侧拱肩、拱腰和拱脚处的位移值,得到隧道衬砌的位移值柱状图,如图10所示。由图10可知,拱顶的位移值最大,为0.189 mm,迎爆侧拱肩的位移值次之,背爆侧拱脚的位移值最小,为0.050 mm。拱顶和迎爆侧拱肩的位移值较大,约为其他部位位移值的1.5~2.5倍,施工过程中应重点监测右主线隧道拱顶和迎爆侧拱肩的振动速度,确保后行隧道的安全。

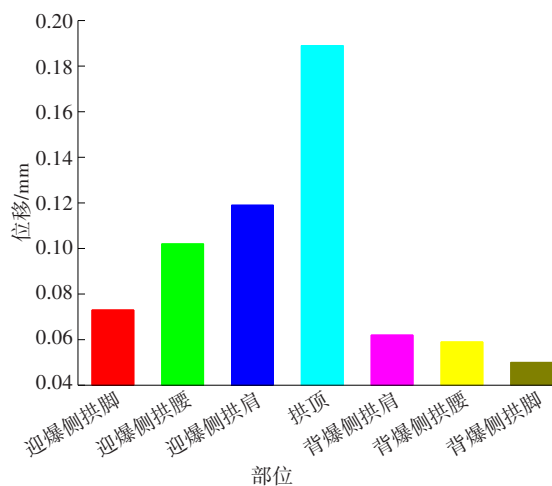


图10 右主线隧道不同部位的位移值

Fig. 10 Displacement value of different parts of the right main tunnel

4 结论

本文通过采用现场实测和数值模拟的分析手段,得出如下结论:

1) 通过现场实测手段,获得了四连拱的爆破振动测试数据,并对现场拱腰处的径向、切向、垂向实测数据进行回归分析,得到质点振动速度峰值在不

同方向的传播规律,可为类似工程项目提供借鉴。

2) 探讨了四连拱隧道中隔墙的振速和位移响应。从振速响应来看,爆破开挖面30 m范围内的1#中隔墙振动速度较大,而2#和3#中隔墙振动速度衰减较为平缓。从位移响应来看,迎爆侧墙肩的位移值最大,墙顶的位移值次之,背爆侧墙脚的位移值最小。整体而言,迎爆侧和墙顶的位移值约为其他部位位移值的2倍。

3) 分析了四连拱隧道先行洞衬砌的振速和位移响应。从振速响应来看,右辅道隧道爆破时,右主线隧道迎爆侧振动速度较快,振动速度较大值分布在迎爆侧拱腰处,右主侧隧道衬砌迎爆侧拱腰的振动速度峰值远大于左主线隧道衬砌迎爆侧拱腰和左辅道隧道衬砌背爆侧拱腰,约为左主线隧道振速峰值的16倍,左辅道隧道衬砌振速峰值的40倍。

参考文献(References):

- [1] 王婷, 赵继, 魏盼. 京张高铁八达岭长城站大跨深埋三连拱围岩压力计算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 57-62. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201908160004.
WANG Ting, ZHAO Ji, WEI Pan. Study on calculation method for surrounding rock pressure of large-span deep buried three-arch based on the Badaling Great Wall Station on Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 57-62. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201908160004.
- [2] 孟伟, 叶铭. 人工填土层中四连拱暗挖隧道设计[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 250-256.
MENG Wei, YE Ming. Case study on design of mined 4-arched tunnel in artificially-filled soil strata [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(3): 250-256.
- [3] 王刚, 朱得华, 于少辉, 等. 不等高三连拱隧道衬砌变形分析及控制措施[J]. 隧道建设, 2012, 32(2): 160-163.
WANG Gang, ZHU Dehua, YU Shaohui, et al. Analysis on deformation of lining of triple-arch tunnel at different altitudes and its control technologies [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(2): 160-163.
- [4] 郑甲佳, 范俊玲. 黄土地铁三连拱隧道中隔墙受力体系转换研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(2): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6833.2011.02.017.
ZHENG Jiajia, FAN Junling. Study of midboard stress transformation in subway three-arch tunnel around loess area [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2011, 32(2): 66-70. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6833.2011.02.017.
- [5] 贾大鹏. 地铁区间三联拱隧道施工工况分析研究[J]. 铁道建筑技术, 2010(8): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2010.08.007.

- JIA Dapeng. Study on the construction of tri-arch tunnel in metro section[J]. Railway Construction Technology, 2010 (8): 23-26. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2010.08.007.
- [6] 吴波, 李静, 高波. 地铁渡线隧道施工性态的三维数值模拟与分析[J]. 地下空间, 2003(4): 347-351, 453.
- WU Bo, LI Jing, GAO Bo. 3-D numerical simulation and analysis of construction performance of tunnel for metro transition line [J]. Underground Space, 2003 (4) : 347-351, 453.
- [7] 王小鹤. 浅埋暗挖法修建三连拱排水隧道试验研究[J]. 市政技术, 1993, 11(增刊1): 2-14, 24.
- WANG Xiaohu. Experimental study on the construction of three-arch drainage tunnel by shallow buried excavation method[J]. Municipal Engineering Technology, 1993, 11 (sup 1): 2-14, 24.
- [8] 宋战平, 张艺多, 郭德赛, 等. 邻近既有建(构)筑物隧道爆破方案评价及优化方法[J]. 土木与环境工程学报, 2023(1): 14-24.
- SONG Zhanping, ZHANG Yiduo, GUO Desai, et al. Evaluation and optimization method of tunnel blasting scheme for adjacent existing structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023(1): 14-24.
- [9] 凌同华, 欧阳雄志, 刘建伟, 等. 爆破振动下双洞隧道衬砌动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 20-27. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.004.
- LING Tonghua, OUYANG Xiongzhong, LIU Jianwei, et al. Dynamic response analysis of double tunnel lining under blasting vibration [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 20-27. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.004.
- [10] 杨平, 叶丹勇, 赵任旭, 等. 连拱隧道最佳装药量计算与爆破振动监测分析[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(1): 104-106.
- YANG Ping, YE Danyong, ZHAO Renxu, et al. Calculation of optimal charge and monitoring analysis of blasting vibration in multi-arch tunnel [J]. China Water Transport, 2021, 21(1): 104-106.
- [11] 魏雯. 引水隧道爆破施工对临近公路边坡影响浅析[J]. 江西建材, 2020 (11): 135-136, 138. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2020.11.080.
- WEI Wen. Analysis of the influence of the construction blasting of the diversion tunnel on the adjacent slope[J]. Jiangxi Building Materials, 2020 (11): 135-136, 138. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2020.11.080.
- [12] 乔青青, 雷胜友, 杨瑞, 等. 分岔隧道过渡段爆破对分隔墙振动响应的数值分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45 (1): 171-176. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2021.01.033.
- QIAO Qingqing, LEI Shengyou, YANG Rui, et al. Numerical analysis of vibration response of mid-partition by blasting in transition section of branching-out tunnel [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45 (1): 171-176. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2021.01.033.
- [13] 和振海, 孙印国, 罗忠荣, 等. 连拱隧道爆破振动响应与减振技术研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(4): 677-681. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2022.04.021.
- HE Zhenhai, SUN Yinguo, LUO Zhongrong, et al. Study on the blasting vibration response and control technology in multi-arch tunnels [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46 (4) : 677-681. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2022.04.021.
- [14] 李波, 赵亮, 姜成业. 无中墙连拱隧道后行洞施工工法及爆破振速预测研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(1): 136-140. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2022.01.027.
- LI Bo, ZHAO Liang, JIANG Chengye. Research on construction method and blasting vibration velocity prediction of backward tunnel of double arch tunnel without middle wall [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022, 46 (1) : 136-140. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2022.01.027.
- [15] 朱正国, 方智淳, 马超义, 等. 浅埋偏压连拱隧道穿越古建筑施工控制研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5): 71-76, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2021.05.013.
- ZHU Zhengguo, FANG Zhichun, MA Chaoyi, et al. Research on the construction control of shallow-buried unsymmetrical pressure double-arch tunnel crossing ancient buildings [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38 (5) : 71-76, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2021.05.013.
- [16] 钱正富, 徐金峰, 周应新, 等. 红层软岩无中导洞连拱隧道爆破振动控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (3): 167-174, 188. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.03.024.
- QIAN Zhengfu, XU Jinfeng, ZHOU Yingxin, et al. Monitoring and control technology for blasting vibration of the double-arch tunnel without middle drift in red-bed soft rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (3) : 167-174, 188. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.03.024.
- [17] 刘树红, 王婷, 吕刚, 等. 京张高铁八达岭长城站大跨度深埋三连拱隧道设计及施工方法研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (1) : 63-68. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201908230002.
- LIU Shuhong, WANG Ting, LYU Gang, et al. Research on design and construction method of large span deep buried three-arch tunnel on Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2020, 64 (1) : 63-68. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201908230002.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:刘治军)