

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.013

莲花山隧道爆破振动效应试验研究*

刘志波

(中铁十四局集团有限公司, 济南 250101)

摘要: 为了降低爆破震动效应,研究关键性因素,确保隧道爆破施工期间围岩的安全稳定性,针对莲花山2号隧道工程,采用信息化手段对现场爆破振动速度进行了多次监测。分析实测爆破振动速度的峰值,并基于LS-DYNA非线性有限元模拟软件,运用拉格朗日算法与完全重启相结合的方法模拟了隧道开挖中爆破振动速度。对比分析实测与模拟结果,得出:山体隧道爆破掘进时,地表掌子面两侧产生了空洞效应现象,且存在区域为掌子面两侧10 m范围内,该范围内空洞效应现象随着与掌子面之间距离的增大,呈先增强后减弱直至消失的趋势,距离掌子面5 m处时空洞效应将达到峰值;同时,实测与模拟曲线显示各段位的振动速度分布较为均匀,峰值相近,表明隧道开挖过程中,装药量与延保时间的控制有效减缓了爆破振动效应的影响。

关键词: 隧道掘进; 爆破作用; 数值模拟; 振动速度; 空洞效应

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0078-07

Experimental Study on Blasting Vibration Effect of Lianhuashan Tunnel

LIU Zhi-bo

(China Railway 14th Bureau Group Co Ltd, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to ensure the safety and stability of the surrounding rock of a tunnel during the blasting construction by reducing the vibration effect, some key factors were analyzed based on the blasting vibration velocity measurements in the Lianhuashan No. 2 tunnel project. The peak particle velocity of blasting vibration was analyzed, and the nonlinear finite element simulation software LS-DYNA was used to simulate the blasting vibration velocity during tunnel excavation by a combined method of the Lagrange algorithm and the complete restart method. Comparative analysis of the measured and simulated results showed that the cavity effect phenomenon occurred on both sides of the working face during the blasting of the mountain tunnel. And the area of the cavity effect was within 10 meters on both sides of the working face. With the distance from the working face, the trend of the cavity effect phenomenon first increased to a peak at 5m from the working face and then decreased until it disappeared. At the same time, the measured and simulated curves showed that the vibration velocity distribution of each section was relatively uniform, and the peaks were similar. These conclusions indicate that the control of the charge amount and the extended warranty time can effectively slow down the impact of the blasting vibration effect during the excavation of the tunnel.

Key words: tunneling; blasting effect; numerical simulation; vibration velocity; cavity effect

近年来,随着国家不断扩大交通基础设施建设

规模,我国隧道工程取得了迅猛发展,已成为世界上隧道工程最多、发展最快的国家。在硬岩隧道的施工中,钻爆法由于其灵活多变、适用范围广等独特的优势,仍是硬岩隧道掘进中重要的施工方法之一。钻

收稿日期:2020-05-12

作者简介:刘志波(1969-),男,山东临朐人,高级工程师,从事公路与水路运输工程研究,(E-mail)710380668@qq.com。

基金项目:山东省重点研发计划(2019JZZY020314)

爆发施工中不可避免的产生爆破振动,不仅影响隧道施工的结构稳定性,还严重危害周围建(构)筑物的安全,因此,在隧道开挖施工时,为了保证施工安全和施工质量以及地面建(构)筑物的安全,必须对隧道开挖爆破引起的爆破振动进行信息化施工监测,以此来指导隧道工程爆破参数的设计和后续施工。

刘光汉等为分析浅埋隧道爆破的“空洞效应”,以贵州某隧道爆破工程为背景,研究爆破区域上方两侧相同距离条件下的地表振动变化规律,并且进行爆破振动试验^[1]。学者闫兵等提出了相应的空洞效应的危害解决措施及建议^[2],随后国内学者郭辉^[3]、李志堂^[4]、吴杨勇和冯阳阳等人对此也进行了相关的研究^[5,6],取得了一定的成果,在爆破减振方面给出了较多中肯的建议^[7-11]。在隧道爆破数值模拟方面,李梓源利用 ANSYS-DYNA 软件分析计算了隧道爆破模型^[12];何忠明基于 FLAC3D 软件得出爆破开挖影响区质点震动速度的衰减规律^[13];李建旺采用完全重启动分析法对浅埋隧道掘进爆破破岩过程进行数值模拟^[14];崔年生通过比较 DEMD 和 EMD 两种爆破振动处理方法^[15],在信号频率筛分方面 DEMD 明显优于 EMD。

论文以潮(州)惠(州)高速公路莲花山 2 号隧道为工程背景,采用信息化监测设备,现场采集了隧道中轴线正上方地表的爆破振动数据,深入挖掘爆破振动监测数据,研究隧道地表振动的“空洞效应”现象,分析地表爆破振动速度的变化规律,同时结合通用显式非线性 ANSYS/LS-DYNA 软件建立隧道的有限元模型,模拟爆炸荷载作用下爆破振动效应,并与实际监测结果相对比,研究隧道爆破振动下的空洞效应,控制钻爆法开挖对周边构筑物的影响。

1 隧道爆破振动监测

1.1 工程背景

莲花山 2 号隧道设计为双向六车道特长隧道,左右线分离布置,在莲花山 2 号隧道左洞 ZK205 + 360 ~ ZK205 + 515 围岩主要为粉质黏土、强风化熔结凝灰岩及中风化熔结凝灰岩,以 V 级围岩为主,该区段隧道采用钻爆法施工,隧道内岩体呈碎裂结构,岩质较软,岩体破碎,自稳能力差,无支护时拱部易坍塌,侧壁易失稳,对爆破振动的预测和控制提出了更高的要求,需采集现场爆破振动数据,进行数据分析,其中监测点位置布设在隧道左洞段距隧道拱顶 8 ~ 10 m 处。

1.2 爆破方案设计

隧道均按双向 6 车道高速公路、设计速度

100 km/h 技术标准进行设计,单洞建筑限界净宽 14.75 m,其中隧道行车道宽度为 3.75 m × 3 m,路缘带宽度为 0.50 m (左侧)、1.00 m (右侧),余宽 0.25 m × 2 m,检修道宽 0.75 m (左侧)、1.0 m (右侧,包含余宽 0.25 m),限高 5.0 m。根据岩层节理裂隙发育、岩性软硬情况,采用上下台阶两次爆破进行隧道施工,并及时修正爆破参数,提高爆破效果,改善技术经济指标。钻孔按功能分为掏槽孔、辅助孔、周边孔等等,掏槽孔深 2.0 ~ 3.2 m、其他孔深约为 3.0 m。上台阶循环进尺为 2.6 m,爆破断面积 98.1 m²、药圈直径 32 mm、炮孔孔径 44 mm、循环耗药量 204.3 kg、平均单位耗药量 1.0 kg/m³。

上半部分围岩稳定性较差,常规爆破作用下易失稳并发生坍塌,为避免上半部分爆破的影响,下半部炮孔布置的层数和间距将根据情况进行适当调整,实际的炮孔将减少。爆破断面积 69.2 m²、药圈直径 32 mm、炮孔孔径 44 mm、循环耗药量 123.2 kg、平均单位耗药量 0.8 kg/m³。围岩炮眼布置及爆破网路图如图 1 所示。

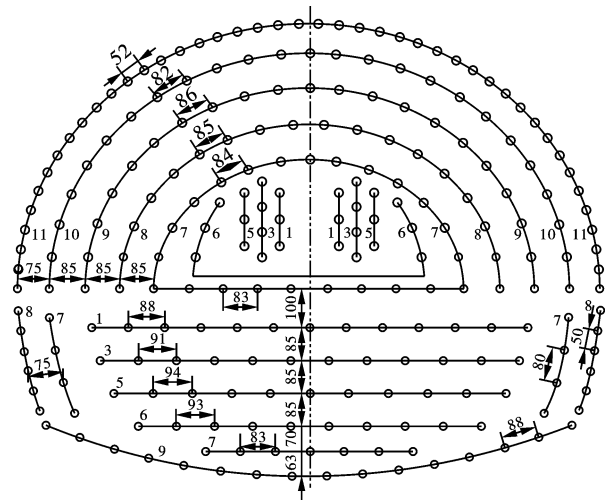


图 1 围岩炮眼布置及爆破网路示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic diagram of blasthole layout and blasting network of surrounding rock (unit: cm)

1.3 爆破振动监测方案及测点布置

基于莲花山隧道特殊的爆破施工振动效应,通过进行 6 次现场实验,研究测点的爆破振动速度和频率。在现场实验中,以莲花山隧道掘进掌子面为中心,并沿隧道走向在上部地表中心线布置了 9 个测点,9 个测点以掌子面为中心线呈对称分布,莲花山隧道掌子面正上方测点编号为 0,莲花山隧道未成洞区上方测点编号往掘进方向依次为 1,2,3,4,莲花山隧道已成洞区上方测点编号往掘进反方向依次为 5,6,7,8。测点布置如图 2 所示。

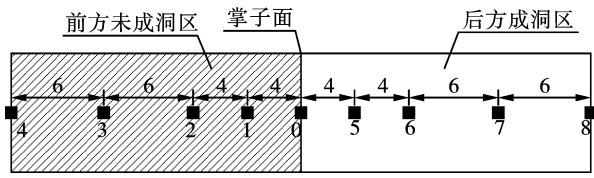


图2 爆破振动监测点布置图(单位:m)

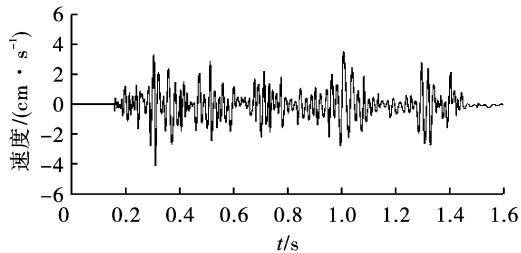
Fig. 2 Blasting vibration monitoring point layout(unit:m)

1.4 爆破振动监测结果分析

准确预测爆破引起的质点振动速度是有效控制爆破震动危害的前提,振动速度是判断爆破振动安全的安全判据指标之一,振动速度表示方法多是从统计分析出发,以大量的爆破工程实测数据为基础归纳总结得到的,其中最常用的是萨道夫斯基公式。本实验中的地表测点在爆破点上面,地表质点的水平振动速度一般小于其垂直向振动速度。所以,本

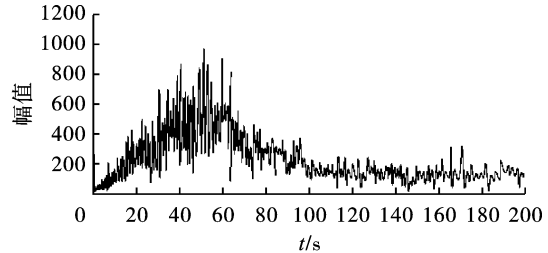
次现场实验重点监测地表质点的垂直向振动速度波形。

在首次爆破振动监测试验中,0号测点、2号测点、6号测点的振动速度波形图和频谱图如图3、图4、图5所示。从0号测点、2号测点、6号测点的振动速度波形图可以看到,由爆破引起的地表各个测点的振动速度波形分布较均匀的为1~15段爆破,说明1~15段爆破药量分布比较均匀适宜。为了降低爆破振动的影响,将掏槽孔的起爆划分为1,3,5共3个段位,他们各自的起爆装药量为12 kg,从试验结果来看,通过划分掏槽孔的起爆段位并减低装药量,其产生的爆破振动波动效果降低了不少,爆破振动得到了有效地控制。0号测点、2号测点、6号测点的振动频谱图可以看出,爆破能量主要分布在0~120 Hz 范围之内,主频振率分布在10~80 Hz 之间。



(a) 振动速度波形图

(a) Oscillogram of vibration velocity

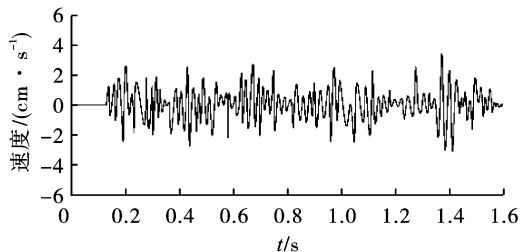


(b) 振动速度频谱图

(b) Spectrum of vibration velocity

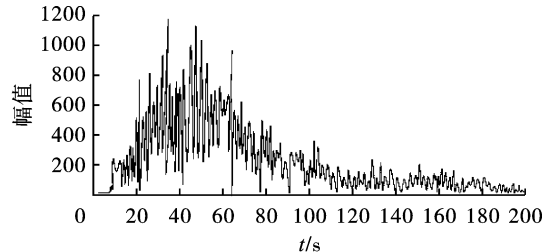
图3 0号测点处爆破振动波形图与频谱图

Fig. 3 Blasting vibration waveform and frequency spectrum at measuring point 0



(a) 振动速度波形图

(a) Oscillogram of vibration velocity

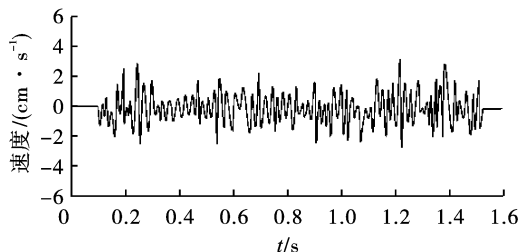


(b) 振动速度频谱图

(b) Spectrum of vibration velocity

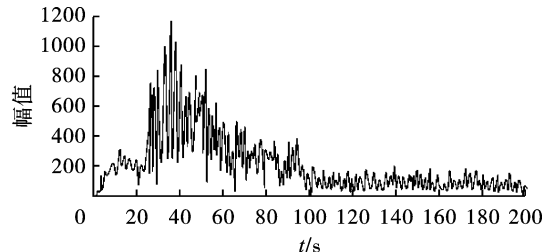
图4 2号测点处爆破振动波形图与频谱图

Fig. 4 Blasting vibration waveform and frequency spectrum at measuring point 2



(a) 振动速度波形图

(a) Oscillogram of vibration velocity



(b) 振动速度频谱图

(b) Spectrum of vibration velocity

图5 6号测点处爆破振动波形图与频谱图

Fig. 5 Blasting vibration waveform and frequency spectrum at measuring point 6

在爆破振动监测试验中,由爆破引起的地表各个测点的垂直振动速度峰值图如图 6 和图 7 所示,从图中可以看出,每个测点都有不同的振动速度峰值,很明显可以看出掌子面中的 0 号测点的振动速度峰值最高,振动速度峰值以掌子面为中心向已成洞区和未成洞区两边整体呈逐渐减小趋势,其中已成洞区有个别监测点的爆破速度峰值呈上升趋势。

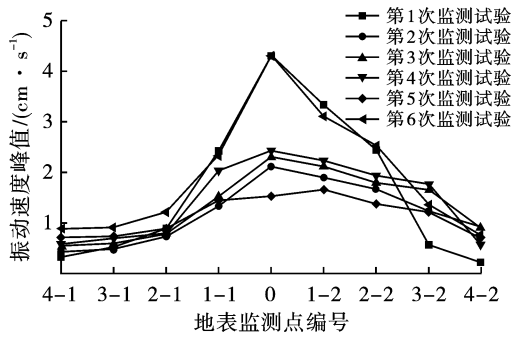


图 6 各测点爆破振动速度峰值

Fig. 6 Peak blasting vibration velocity at each measuring point

已成洞区上方测点的振动峰值比未成洞区的振动峰值较大,以 K 作为衡量空洞效应显著程度的指标,其定义为掌子面前后距离掌子面相同距离的两侧点振动速度峰值的比值。即 $K_1 = v_5/v_1, K_2 = v_6/v_2, K_3 = v_7/v_3, K_4 = v_8/v_4$,地表空洞效应显著性指标 K 值变化如图 7 所示, K 值随着和掌子面距离逐渐增大呈现先增大后减小的趋势,距离掌子面 20 m 测点处,空洞效应现象消失。

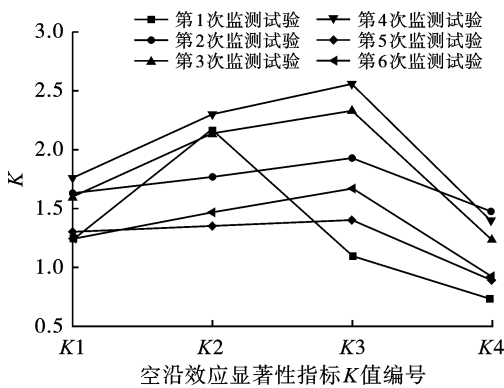


图 7 爆破振动空洞效应显著性指标 K 值变化曲线

Fig. 7 Curve of K value change of significant index of blasting vibration cavity effect

2 数值模拟

2.1 数值模拟方法

ANSYS/LS-DYNA 是通用显式非线性动力分析程序,含有丰富的材料库及适合于研究碰撞、爆炸等动力学问题的接触算法,具备强大的复杂几何非线性、材料非线性和接触非线性运算能力,适用于求解

求解爆炸冲击荷载或高速碰撞作用下材料和结构的动态响应分析^[16]。考虑到爆破振动影响下隧道稳定性分析,多结合现场测试与数值模拟的方法开展研究,因此,为了更好的分析莲花山 2 号隧道钻爆法爆破振动效应,采用 LS-DYNA 模拟软件进行隧道开挖数值模拟研究。

2.2 模型建立

为了提高网格的划分质量及模型计算效率,且考虑岩层厚度与宽度足够大时产生的应力及应变较小,需对模型进行简化处理,故隧道的三维有限元模型计算范围取 73 600 mm × 15 440 mm × 36 500 mm,模型上表面为地表,取为自由边界,其余面都采用无反射边界,模型如图 8 所示。

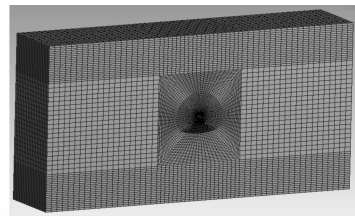


图 8 数值模拟三维模型图

Fig. 8 Numerical simulation 3D model diagram

该模型中掏槽眼采用自由网格划分,炸药采用映射网格划分,其余部分采用渐变网格划分技术,模型中越靠近炸药部分围岩网格密集,远离炸药围岩网格渐渐稀疏,围岩网格最小尺寸为 120 mm,网格数量大约为 40 万,计算采用 g-mm-ms 单位制。

根据工程资料,岩体主要为微风化花岗斑岩,采用双线性弹塑性模型进行描述,岩石的容重为 26.7 kN/m³,岩石抗压强度 55.2/66.4 MPa,压力梯度为 850 MPa/m,弹性模量为 11.0 MPa,泊松比为 0.26,内摩擦角为 44°,粘聚力为 1.1 MPa。

2.3 炸药模型和状态方程

炸药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURE 材料模型来模拟炸药爆炸过程^[17]

$$f = \max(f_1, f_2)$$

$$f_1 = \begin{cases} \frac{2(t - t_e)D}{3V_e/A_{\max}}, & t > t_e \\ 0, & t \leq t_e \end{cases} \quad (1)$$

$$f_2 = \frac{1 - V}{1 - v_{cJ}}$$

式中: f, f_1, f_2 为燃烧系数,若 $f > 1$,则取 $f = 1$; t, t_e 分别为爆炸应力波传至当前单元形心处所需时间和最短时间; D 为爆炸应力波传播速度, m/s; A_{\max} 为炸药爆炸时对单元形心处的最大压强; V 为爆轰产物的相对体积,等于爆破产物体积与初始体积之比; V_e 为爆炸应力波在 t_e 时,爆破产物体积与初始

体积之比; v_{cJ} 为炸药爆速常数; 通常乳化炸药密度为 $0.95 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$, 爆速为 $3500 \sim 5000 \text{ m/s}$ 。

采用JWL状态方程模拟爆炸过程中压力

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中: V 为爆轰产物的相对体积; E_0 为初始比

内能; ω 为格林爱森参数, 表示定容条件下压力相对于内能的变化率; A 、 B 均为常数; R_1 、 R_2 均为无量纲常数。

炸药采用岩石乳化炸药 (* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN), 并定义状态方程 (* EOS_JWL), 材料参数见表1。

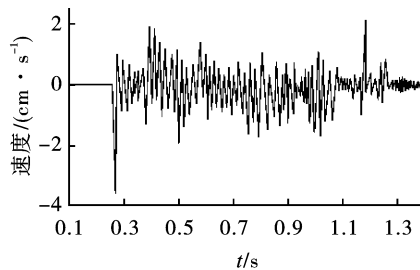
表2 炸药参数

Table 2 Explosive parameters

炸药密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆速 ($\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$)	爆压 P_{c-j}/GPa	参数 A/GPa	参数 B/GPa	参数 R_1	参数 R_2	参数 ω	参数 E/GPa	参数 V_1
1.25	0.36	3.4	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192	0

2.4 模拟结果分析

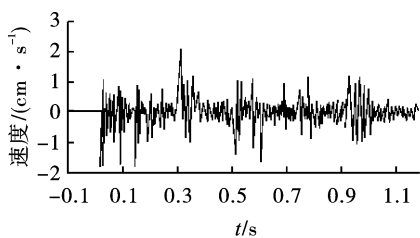
通过数值模拟计算后, 0号测点、2-1号测点与2-2号测点的爆破振动速度波形图如图9、图10和图11所示, 其中0号测点位于隧道开挖掌子面正上方, 2-1号测点位于未成洞区上方, 2-2号测点位于成洞区上方, 通过对比同点现场实测爆破振动速度波形图, 可以得出实测爆破振动速度峰值较为接近数值模拟爆破振动峰值。



0号测点爆破振动速度数值模拟波形图

图9 0号测点爆破振动速度模拟波形图

Fig. 9 Simulated waveform of blasting vibration speed at measuring point 0



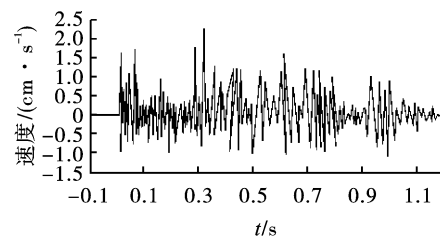
2-1号测点爆破振动速度数值模拟波形图

图10 2-1号测点爆破振动速度模拟波形图

Fig. 10 Simulated waveform of blasting vibration speed at measuring point 2-1

分析图9中各测点处振动速度数值模拟波形图可知, 各个段位钻孔爆破后数值模拟爆破振动速度峰值为 $3.83, 1.27, 1.92, 1.82, 0.77, 0.93, 1.47, 2.21 \text{ cm/s}$, 而爆破后实测爆破振动速度的峰值为

$3.77, 2.13, 2.11, 1.78, 1.83, 1.64, 2.32 \text{ cm/s}$, 对比数值模拟结果和实测结果的峰值, 两者较为接近, 表明模拟结果正确可靠, 同理2-1号测点与2-2号测点的数值模拟结果与实测结果较为相近, 也印证了数值模拟方案的可行性。



2-2号测点爆破振动速度数值模拟波形图

图11 2-2号测点爆破振动速度模拟波形图

Fig. 11 Simulated waveform of blasting vibration speed at measuring point 2-2

通过钻孔爆破的数值模拟, 得到掏槽孔爆破下各测点振动速度峰值的对比图12, 其中0号测点处的振动速度峰值最大, 达到 $v_0 = 2.91 \text{ cm/s}$, 并由0号测点向两侧振动速度峰值逐渐减小, 两侧各测点的振动速度峰值分别为 $v_{1-1} = 2.62 \text{ cm/s}, v_{1-2} = 2.74 \text{ cm/s}, v_{2-1} = 1.92 \text{ cm/s}, v_{2-2} = 2.33 \text{ cm/s}, v_{3-1} = 1.51 \text{ cm/s}, v_{3-2} = 1.47 \text{ cm/s}, v_{4-1} = 1.05 \text{ cm/s}, v_{4-2} = 0.96 \text{ cm/s}$, 0号测点两侧的振动速度峰值大小顺序为 $v_{1-2} > v_{1-1}, v_{2-2} > v_{2-1}, v_{3-2} > v_{3-1}, v_{4-2} > v_{4-1}$, 分析两侧对比的结果可知, 掌子面两侧较近的几个测点处未成洞区的爆破振动速度峰值大于已成洞区测点爆破振动速度峰值, 形成了空洞效应, 而距离较远的两组测点未形成空洞效应, 表明空洞效应出现于掌子面邻近处。

为了深入分析隧道爆破开挖下空洞效应的显著特点和作用范围, 基于数值模拟的结果, 在掌子面上方地表两侧 16 m 范围内呈对称布置32组监测点, 每个测点间隔 0.5 m , 爆破作用下掌子面两侧对称

点爆破振动模拟速度峰值曲线图如图 13 所示,爆破振动“空洞效应”显著性指标 K 值模拟值如图 14 所示,分析两图的曲线变化,可得掌子面两侧 10 m 范围内的 K 值均大于 1,表示未成洞区测点爆破振动峰值速度小于成洞区测点振动速度峰值,且在该范围内,显著程度指标 K 值呈先增大后减小的趋势,并在距离掌子面 5 m 处时达到最大值,此时 K 值为,空洞效应显著程度最高,此外,掌子面两侧边缘 5 m 范围内,未成洞区测点爆破振动峰值速度大于成洞区测点振动速度峰值,无空洞效应。

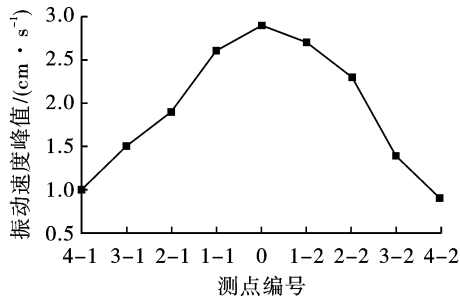


图 12 掏槽眼爆破后地表测点爆破振动模拟速度峰值曲线图

Fig. 12 Peak velocity curve diagram of blasting vibration imulation at ground surface measurement points after blasting

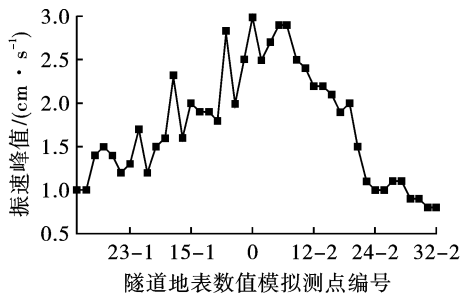


图 13 掌子面两侧对称点爆破振动模拟速度峰值曲线图

Fig. 13 Peak velocity curve of simulated point blasting vibration on both sides of the palm face

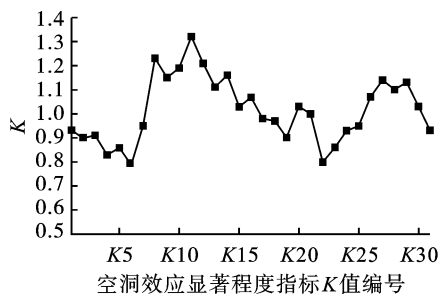


图 14 爆破振动“空洞效应”显著性指标 K 值模拟值

Fig. 14 The simulated value of K value of the significant index of “hole effect” of blasting vibration

3 结语

通过对莲花山 2 号隧道爆破振动采用软件 LS-DYNA 进行数值模拟和现场实测对比分析,得到如下结论:

设定掌子面两侧相同距离的监测点爆破振动速度峰值的比值 K 为衡量空洞效应的指标,分析实测爆破振动速度数据,得到测点距离掌子面的距离越远,爆破振动速度峰值的比值 K 呈先增大后减小的趋势。

莲花山 2 号隧道爆破掘进的过程中,以隧道掌子面为对称轴,两侧 10 m 范围内存在空洞效应”,两侧 5 m 范围内空洞效应最为显著,而在 10 m 范围之外,则不存在空洞效应,未成洞区上方地表测点处爆破振动速度峰值要大于已成洞区上方地表测点处爆破振动速度峰值。

现场实测的爆破振动数据与数值模拟的结果表明各段位的振动速度分布较为均匀,峰值相近,主要原因是隧道开挖的过程中,严格控制了多段微差延时起爆时间和炸药装药量,使得爆破振动的速度得到有效的控制。

参考文献 (References)

[1] 程跃辉,江 鸿,陈 伟.隧道下穿匝道爆破振动控制技术 & 效果分析[J].爆破,2017,34(3):63-67.
 [1] CHENG Yue-hui,JIANG Hong,CHEN Wei. Blasting vibration control technology and effect analysis of tunnel underpass ramp[J]. Blasting,2017,34(3):63-67. (in Chinese)
 [2] 闫 兵,黄华东,刘 云,等.不同弹模工况下隧道爆破震动空洞效应的数值模拟研究[J].公路,2016,61(5):226-231.
 [2] YAN Bing,HUANG Hua-dong,LIU Yun,et al. Numerical simulation of tunnel blasting vibration cavity effect under different elastic modulus conditions [J]. Highway,2016,61(5):226-231. (in Chinese)
 [3] 石连松,高文学,王林台.地铁浅埋隧道爆破振动效应试验与数值模拟研究[J].北京理工大学学报,2018,38(12):1237-1243.
 [3] SHI Lian-song,GAO Wen-wen,WANG Lin-tai. Experimental and numerical simulation study on blasting vibration effect of Metro shallow tunnel[J]. Journal of Beijing University of technology,2018,38(12):1237-1243. (in Chinese)
 [4] 李志堂,尹荣申,孟亚锋,等.土岩交错地层隧道爆破施工的振动响应及空洞效应分析[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):588-593.

- [4] LI Zhi-tang, YIN Rong-shen, MENG Ya-feng, et al. Vibration response and void effect analysis of tunnel blasting in soil rock cross strata [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2018, 38(4): 588-593. (in Chinese)
- [5] 王旭春, 管晓明, 于云龙, 等. 隧道爆破下建筑结构局部应力响应及损伤研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 125-133.
- [5] WANG Xu-chun, GUAN Xiao-ming, YU Yun-long, et al. Study on local stress response and damage of building structure under tunnel blasting [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1): 125-133. (in Chinese)
- [6] 李胜林, 方真刚, 杨 瑞, 等. 浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析 [J]. 爆破, 2019, 36(2): 111-116, 130.
- [6] LI Sheng-lin, FANG Zhen-gang, YANG Rui, et al. Analysis of surface vibration caused by blasting construction of shallow buried subway tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(2): 111-116, 130. (in Chinese)
- [7] TIAN Xiao-xu, SONG Zhan-ping, WANG Jun-bao. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 1-12.
- [8] 汪 平, 孟海利. 基于 HHT 方法对紧邻既有隧道爆破振动信号的分析 [J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 70-74.
- [8] WANG Ping, MENG Hai-li. Analysis of blasting vibration signal close to existing tunnel based on HHT method [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 70-74. (in Chinese)
- [9] 管晓明, 聂庆科, 李华伟, 等. 隧道爆破振动下既有建筑结构动力响应及损伤研究综述 [J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 151-158.
- [9] GUAN Xiao-ming, NIE Qing-ke, LI Hua-wei, et al. Review on dynamic response and damage of existing building structures under tunnel blasting vibration [J]. Acta Civil Engineering, 2019, 52(S1): 151-158. (in Chinese)
- [10] XUE Fei, XIA Cai-chu, LI Guo-liang, et al. Safety threshold determination for blasting vibration of the lining in existing tunnels under adjacent tunnel blasting [J]. Advances in Civil Engineering, 2019(3): 1-10.
- [11] 刘赶平. 大断面隧道爆破振动速度预测 [J]. 爆破, 2019, 36(3): 129-136.
- [11] LIU Gan-ping. Prediction of blasting vibration velocity of large section tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(3): 129-136. (in Chinese)
- [12] 李梓源, 王海亮. 基于钻爆法下的爆破振动对围岩稳定性的数值模拟研究 [J]. 公路, 2017, 62(12): 288-291.
- [12] LI Zi-yuan, WANG Hai-liang. Numerical simulation of surrounding rock stability based on blasting vibration under drilling and blasting method [J]. Highway, 2017, 62(12): 288-291. (in Chinese)
- [13] 徐 亮, 孟益平, 祝金龙, 等. 硬岩浅埋中等断面隧道爆破的数值模拟与安全性分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 422-426.
- [13] XU Liang, MENG Yi-ping, ZHU Jin-long, et al. Numerical simulation and safety analysis of shallow buried medium section tunnel blasting in hard rock [J]. Journal of Hefei University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2019, 42(3): 422-426. (in Chinese)
- [14] 李建旺. 浅埋隧道掘进爆破及其振动效应数值模拟研究 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(7): 262-265.
- [14] LI Jian-wang. Numerical simulation of blasting and vibration effect of shallow tunnel excavation [J]. Highway Transportation Technology (Application Technology Edition), 2019, 15(7): 262-265. (in Chinese)
- [15] 崔年生, 郭连军, 董英健. 爆破振动信号微分经验模态分解与经验模态分解对比分析 [J]. 中国矿业, 2020, 29(4): 120-125.
- [15] CUI Nian-sheng, GUO Lian-jun, DONG Ying-jian. Comparative analysis of differential empirical mode decomposition and empirical mode decomposition of blasting vibration signal [J]. China Mining, 2020, 29(4): 120-125. (in Chinese)
- [16] 康永全, 孟海利, 薛 里, 等. 浅埋隧道爆破施工电子雷管降振延时的分析 [J]. 铁道建筑, 2016(1): 38-42.
- [16] KANG Yong-quan, MENG Hai-li, XUE Li, et al. Analysis of vibration reduction delay time of electronic detonator in shallow tunnel blasting construction [J]. Railway Construction, 2016(1): 38-42. (in Chinese)
- [17] 李 凤, 吴 亮, 许 锋, 等. 片岩隧道爆破对本洞和邻洞围岩的扰动分析 [J]. 爆破, 2015, 32(3): 123-127, 145.
- [17] LI Feng, WU Liang, XU Feng, et al. Analysis of disturbance of schist tunnel blasting on surrounding rock of this tunnel and adjacent tunnel [J]. Blasting, 2015, 32(3): 123-127, 145. (in Chinese)