

并行小净距隧道楔形掏槽爆破振动效应研究*

石洪超, 张继春

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:以重庆鸭江隧道小净距段爆破掘进施工为背景,采用现场振动监测与数值计算相结合的方法研究了并行小净距隧道后续洞上台阶采用楔形掏槽爆破产生的振动效应,分析了掏槽孔与掌子面之间的布置角度对振动速度场的影响。结果表明:先行洞迎爆侧边墙上的最大振动速度出现在后续洞爆破掌子面的侧后方;掏槽孔的布置角度越大则振动强度的极值越大,极值出现的位置也越靠近爆破掌子面。可以通过减小掏槽孔的布置角度来实现降低隧道掘进爆破振动强度的作用,此外在施工现场布置振动监测点时应考虑掏槽孔布置角度的影响,掏槽孔的布置角度越大则振动监测重点区域与爆破掌子面间的距离越小。

关键词:小净距隧道;楔形掏槽爆破;掏槽孔布置角度;振动效应

中图分类号:TD235.3

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)02-0607-07

Blasting Vibration Effect of Wedge Cut Blasting in Parallel Small-distance Tunnel

Shi Hongchao, Zhang Jichun

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R.China)

Abstract: Based on the blasting excavation of small-distance section in Chongqing Yajiang Tunnel, by using the method of field vibration monitoring and numerical calculation, the vibration effect caused by up bench wedge cut blasting in the subsequent hole of parallel small-distance tunnel was studied, the influence of the layout angle between the cuthole and blasting tunnel face on the vibration velocity field was analyzed. The results indicate the maximum vibration velocity of the first hole side wall facing the blasting appears on the rear blasting tunnel face; The larger the cuthole layout angle is, the greater the extreme value of the vibration intensity is, and the closer the distance of blasting tunnel face is. It could reduce the effect of the tunnel blasting vibration intensity by reducing the cuthole layout angle. The influence of the cuthole layout angle should be taken into consideration when the vibration monitoring points are arranged. The larger the cuthole layout angle is, the distance between the vibration monitoring area and the blasting tunnel face is smaller.

Keywords: small-distance tunnel; wedge cut blasting; cuthole layout angle; vibration effect

0 引言

小净距隧道后续洞爆破引起的振动会对邻洞

的支护结构和中隔岩墙产生不利影响,如果后续洞掘进爆破引起的振动强度过大,则有可能造成已建结构破坏或中隔岩墙失稳^[1-8]。为了确保隧道施

* 收稿日期:2018-09-21(修改稿)

作者简介:石洪超(1980-),男,辽宁葫芦岛人,博士生,主要从事爆破工程、岩石力学与工程方面的研究。

E-mail:727722750@qq.com

通讯作者:张继春(1963-),男,四川大邑人,博士,教授、博士生导师,主要从事爆破工程、岩土工程结构动力特性与防护技术方面的研究。E-mail:Jczhang2004@163.com

基金项目:国家自然科学基金(41272321)

工安全,后续洞掘进爆破引起的振动强度应控制在安全标准以下。对小净距隧道爆破振动强度及其分布规律进行研究,可以指导现场振动监测的测点布置工作,并为选择合理的降震措施提供理论依据。

影响隧道振动效应的因素较多,主要包括爆破参数、隧道围岩性质和隧道布置条件等。目前关于隧道振动效应的研究手段是以现场振动监测为主,数值计算和模型试验为辅。曹孝君等^[9]采用现场监测的方法对人和场浅埋隧道的振动效应进行了研究,发现浅埋隧道在开挖区存在空洞效应,具体表现为在隧道已开挖区域的地表振动强度具有放大现象。仇文革等^[10]采用现场振动监测和数值计算相结合的方法,研究了新建隧道掘进爆破对既有隧道的影响。结果表明,新建隧道爆破引起的振动强度与单段起爆药量和爆源距有关,振动强度的主要方向与爆源和监测点的相对位置有关。王明年等^[11]采用数值计算的方法对该问题进行研究时,发现对于既有隧道的安全控制标准,振动速度指标比较严格,而应力指标相对宽松。刘慧^[12]采用数值计算和光弹模型试验的方法对马蹄形隧道的动态响应进行了分析,提出了马蹄形隧道迎爆侧动应力集中银子的近似确定方法。蔚立元等^[13]以胶州湾海底隧道为工程实例,采用FLAC3D软件对后续洞爆破进行模拟计算,发现爆破掌子面前方的振动强度大于后方,爆破振动速度峰值出现在先行洞迎爆侧的边墙上。

以上针对隧道爆破开挖区附近的应力场和振动速度场等分布规律的研究,考虑的主要影响因素为围岩性质和隧道布置条件,但是关于爆源参数对其产生的影响考虑较少。本文采用现场振动监测与数值计算(AUTODYN)相结合的方法,研究了并行小净距隧道后续洞上台阶采用楔形掏槽爆破产生的振动效应,并分析了掏槽孔布置角度对振动速度场的影响。

1 工程概况

鸭江隧道属重庆市鸭江镇所辖,在南涪高速公路上。该隧道为双洞隧道,全长1.05 km,进口段(ZK13+979~ZK14+034)受地形条件限制设置为小净距隧道,中隔岩墙厚度约为16~25 m。隧道进口位于马脑壳山南侧,围岩为较完整的Ⅳ级中风化砂岩。

为了保证隧道小净距段的施工安全,在鸭江隧道进口段后续洞掘进爆破时实施了现场振动监测。后续洞采用上下台阶法开挖,其中上台阶为楔形掏槽孔掘进爆破,下台阶为水平拉槽爆破。根据以往研究成果,上台阶掘进爆破产生的振动强度较大,所以监测的主要对象为上台阶爆破。上台阶开挖断面为面积约56 m²的半圆形,单循环进尺3.0 m,均使用2#岩石乳化炸药,4对掏槽孔位于上台阶的中下部,与掌子面间的夹角 $\theta=40^\circ$,上台阶各炮孔平面布置见图1,炮孔剖面布置、装药结构和起爆

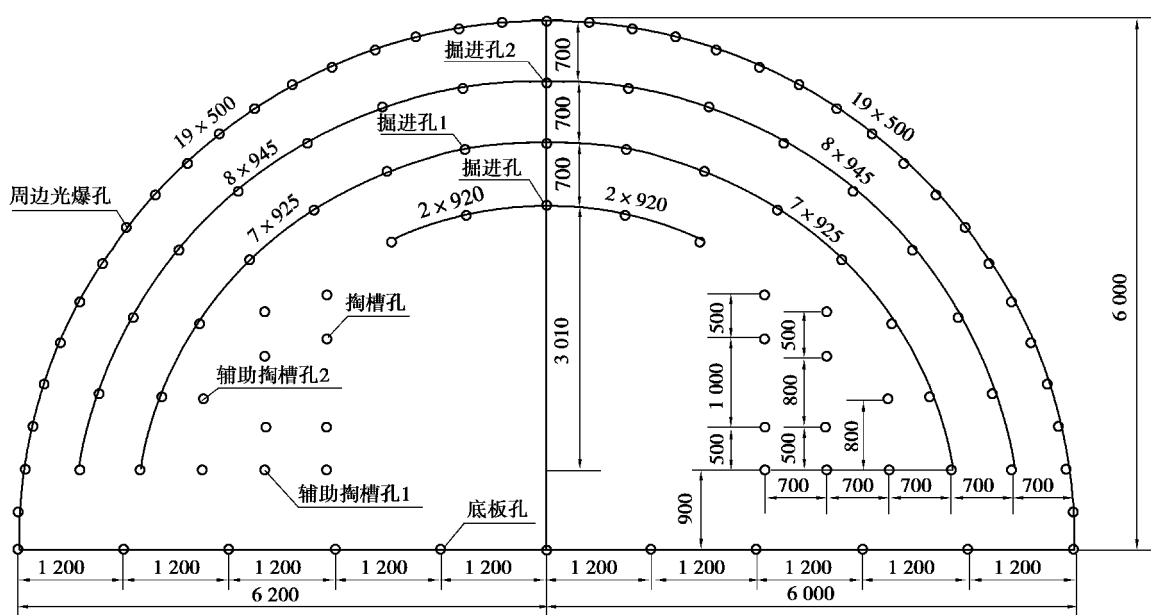


图1 上台阶炮孔平面布置图(单位:mm)

Fig. 1 Blast hole plan layout of up bench blasting (unit: mm)

顺序如图 2 所示,图中①~⑦为起爆顺序,其中第 6 响⑥为底板孔起爆,①~⑥各响起爆时差约为 50 ms,第 7 响⑦与第 6 响⑥起爆时差不小于 100 ms,上台阶掘进爆破主要参数见表 1。

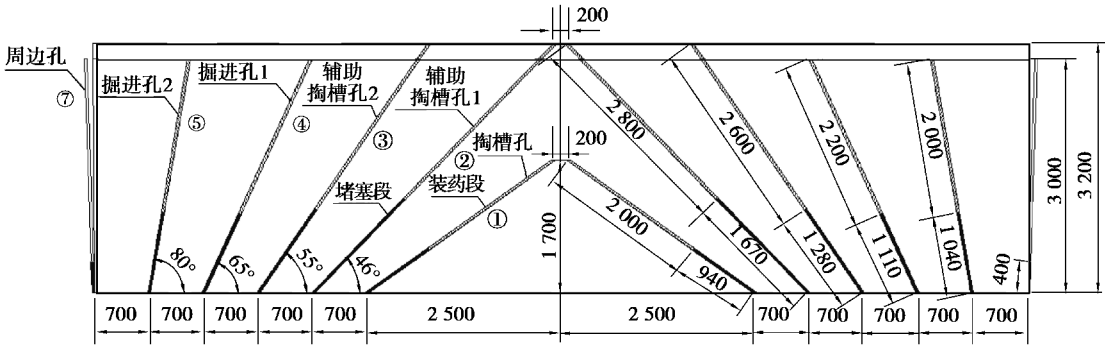


图 2 上台阶炮孔剖面布置、装药结构及起爆顺序图(单位: mm)

Fig. 2 Blast hole section plan layout, charge construction and priming sequence of up bench blasting (unit: mm)

表 1 上台阶掘进爆破参数

Table 1 Parameters of the up bench excavation blasting

炮孔类别	孔数	孔深/m	孔长/m	堵塞长度/m	单孔装药量/kg	总装药量/kg	雷管段别
掏槽孔	8	1.7	2.94	0.94	2.0	16	1
辅助掏槽孔 1	8	3.2	4.47	1.67	2.8	22.4	3
辅助掏槽孔 2	4	3.2	3.88	1.28	2.6	10.4	5
掘进孔	5	3.0	3.31	1.11	2.2	11	5
掘进孔 1	15	3.0	3.31	1.11	2.2	33	7
掘进孔 2	17	3.0	3.04	1.04	2.0	34	8
周边孔	37	3.0	3.0	0.4	1.0	37	9
底板孔	11	3.0	3.0	1.4	1.6	17.6	11

2 振动监测

2.1 测点布置

为了研究后续洞上台阶掘进爆破引起的振动效应,以先行洞对应后续洞爆破掌子面位置的断面为中心,在先行洞迎爆侧的边墙上沿隧道轴线方向布置了 5 个监测点 0、1、2、-1 和-2,测点间距 D 为 3.5~7.0 m,同时在该断面上的迎爆侧和背爆侧也分别布置了监测点 Y 和 B。振动监测点在中隔岩墙上的位置如图 3 所示,先行洞断面上监测点的位置如图 4 所示。每个振动监测点设垂直方向和水平径向振动速度传感器,测点安装和测试现场情况如图 5 所示。

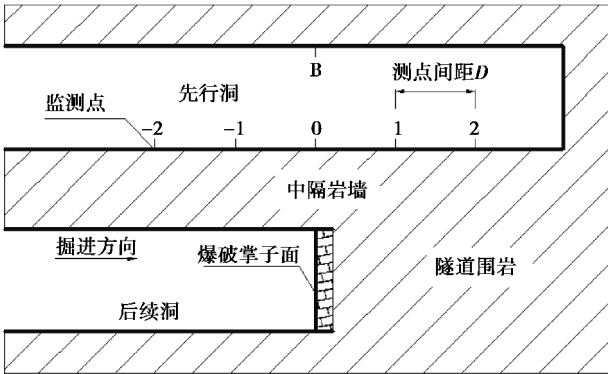


图 3 先行洞边墙上监测点布置示意图

Fig. 3 Arrangement diagram of the monitoring point on first hole side wall

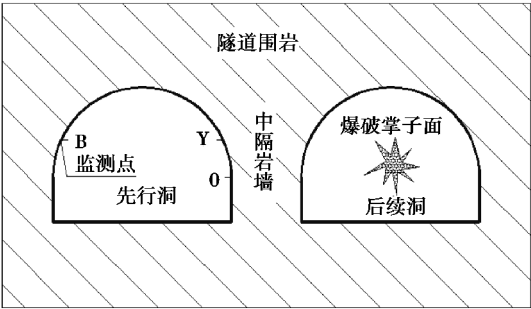


图 4 先行洞断面上监测点布置示意图
Fig. 4 Arrangement diagram of the monitoring point on first hole cross section

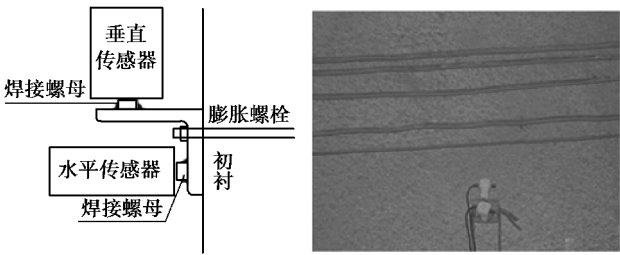


图 5 振速传感器安装示意图
Fig. 5 Schematic diagram of vibration velocity sensor installation

2.2 监测结果与分析

针对鸭江隧道进口段后续洞上台阶爆破共监测 5 次,典型的振动速度波形监测结果如图 6 和

图 7 所示。受现场监测条件限制,部分测点的数据可能会出现失真或无法读取的情况,在表中以“—”表示,选择两组具有代表性的振动速度峰值监测结果列于表 2。

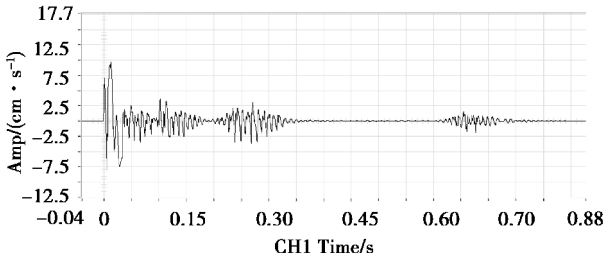


图 6 第 2 组测点 1 径向振动速度波形
Fig. 6 Radial vibration velocity waveform of second group monitoring point 1

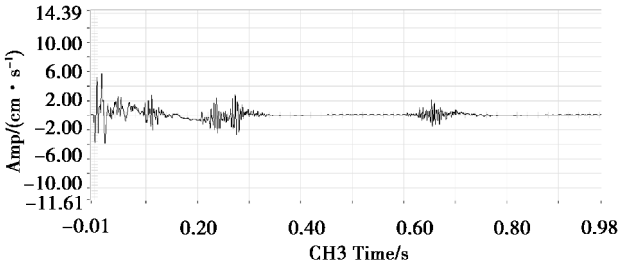


图 7 第 2 组测点 1 垂向振动速度波形
Fig. 7 Vertical vibration velocity of second group monitoring point 1

表 2 振动速度峰值监测结果
Table 2 Monitoring results of vibration velocity peak

	第 1 组							第 2 组						
测点编号	-2	-1	0	1	2	Y	B	-2	-1	0	1	2	Y	B
距掌子面 距离/m	10.5	7	0	3.5	7	0	0	10.5	7	0	3.5	7	0	0
径向振速 峰值/ (cm·s ⁻¹)	2.94	4.12	8.09	10.01	8.78	8.22	1.03	2.83	3.82	7.41	11.15	8.49	8.02	0.97
径向主频 /Hz	123.1	90.9	145.8	101.2	90.9	135.6	145.9	104.1	110.3	130.4	120.9	103.4	129.3	139.0
垂向振速 峰值 /(cm·s ⁻¹)	1.83	2.04	3.85	6.03	3.90	4.01	—	1.03	1.86	2.56	5.76	4.12	3.88	0.04
垂向主频/Hz	95.8	122.1	136.2	95.6	110.5	120.4	—	96.7	90.7	120.8	110.2	98.7	110.5	90.1

从现场振动速度波形监测结果中可以看出,各类炮孔爆破产生的振动速度波形间没有出现明显

的叠加现象,说明各炮孔间起爆间隔时长设置合理,其中掏槽孔爆破引起的振动速度最大。振动速

度峰值测试结果显示,单测点的水平径向振动速度峰值约为垂向的 2 倍左右,水平径向是振动的主要方向。单个测点的主频为 100 Hz 左右,与隧道结构的固有频率相差较大,不会发生共振。

3 数值计算

现场振动速度波形监测结果和以往的研究成果均表明,上台阶爆破过程中掏槽孔产生的振动强度最大,因此数值计算中的动荷载主要源自掏槽孔爆破。多数研究成果是根据掏槽孔装药量将爆破动荷载简化后加载至数值模型上进行计算得出的,这种加载方式对爆源参数考虑的不够全面。隧道楔形掏槽爆破主要包括装药量、装药结构和炮孔布置角度等参数,由于对装药量的研究成果很多,而现场掏槽孔的装药结构又多采用连续装药,所以主要研究掏槽孔炮孔布置角度对振动效应的影响。在数值计算的过程中,将掏槽孔建立在模型内部,根据不同的掏槽孔布置角度 θ 制定了计算工况 ($\theta = 80^\circ$ 、 $\theta = 60^\circ$ 、 $\theta = 40^\circ$ 和 $\theta = 20^\circ$)。由于掏槽孔的直径 (32 mm) 远小于研究范围 (30 m×90 m),建立三维数值模型需要的单元数量过多,计算时间过长,因此要将三维模型简化为平面模型。在研究范围内选择 2 个关键平面 A 和 B,其中平面 A 和 B 的作用分别是研究隧道中隔岩墙和先行洞断面的振动速度场。平面 A 为过 0 号测点的水平面,据此建立的数值模型共包含 353 075 个矩形单元,炸药近区单元边长为 1 cm,远区为 10 cm。平面 B 为过爆破掌子面的铅垂面,据此建立的数值模型共包含 153 754 个矩形单元,炸药近区单元边长为 1 cm,远区为 10 cm。关键平面选择方法示意如图 8,根据平面 A 和平面 B 确定的计算简图和数值模型如图 9 和 10。

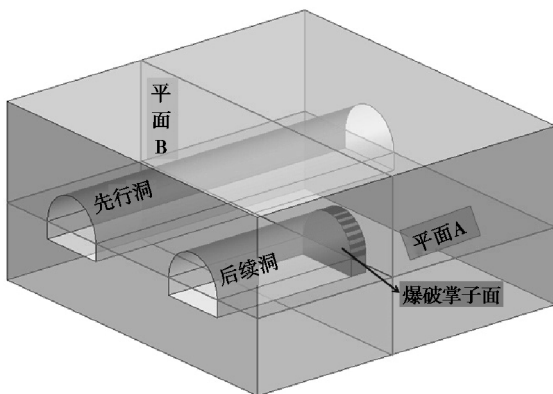


图 8 关键平面选择方法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of key plane selection method

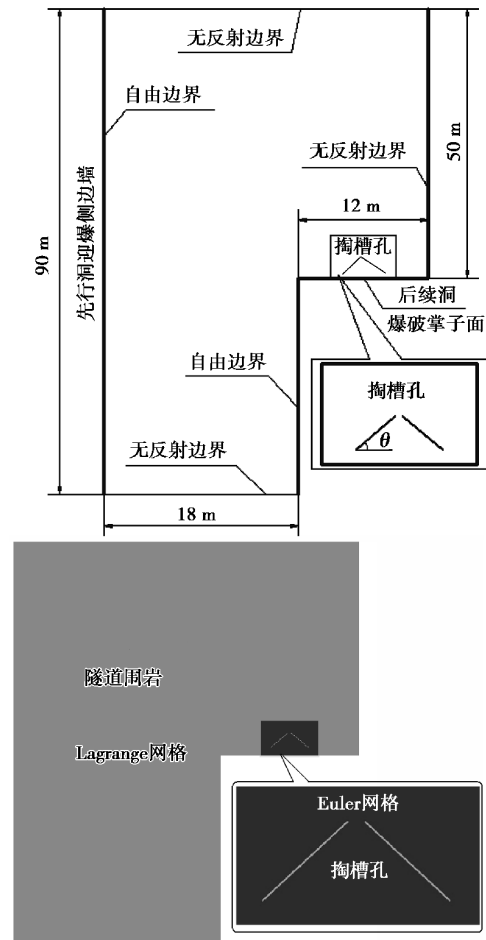


图 9 平面 A 对应的计算简图及数值模型

Fig. 9 Calculation diagram and numerical model of planar A

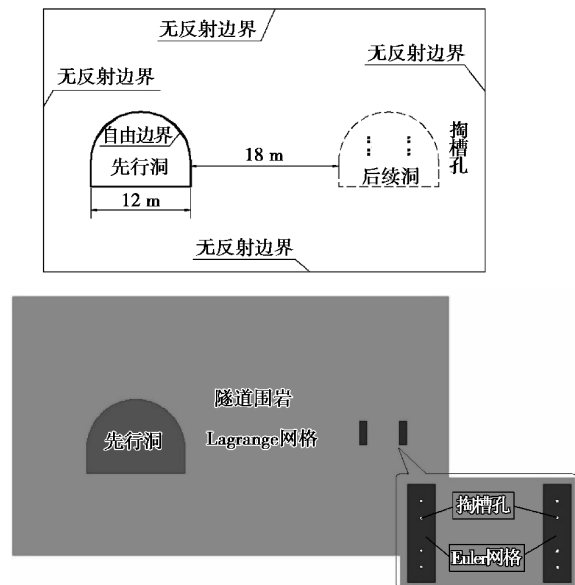


图 10 平面 B 对应的计算简图及数值模型

Fig. 10 Calculation diagram and numerical model of planar B

由于初期支护结构厚度较小且刚度较大,传播爆破地震波的能力远优于围岩,所以在计算时不考虑其对振动强度的影响。这时数值模型中主要包括围岩和乳化炸药两种主要材料,围岩物理力学参数主要依据工程地质报告和试算结果选取,围岩物理力学参数见表 3。炸药爆炸后单元的压力 P 以 JWL 状态方程来描述,其表达式见式(1)。

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V}$$

(1)

式中: V 为相对体积; E 为内能参数; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为特征参数,对于指定炸药来讲为常数。各参数根据 2#岩石乳化炸药选取,具体数值见表 4。数值模型采用 Euler-Lagrange 耦合法计算,为避免炸药近区计算时网格发生畸变,掏槽孔近区选择 Euler 网格,远区采用 Lagrange 网格。

表 3 岩体物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of rock mass

重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	粘聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
25	0.7	38	9.1	0.23	0.79

表 4 乳化炸药状态方程参数

Table 4 State equation parameters of emulsion explosive

密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	爆速 $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	爆压 P_{c-j}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa
1.2	3 500	3.6	214.4	18.2	4.2	0.9	0.15	4.192

4 结果与分析

4.1 隧道振动效应分析

在隧道工程中,通常是以单方向的振动速度峰值来表征振动强度的。对比水平径向振速峰值计算结果与实测结果发现,振动速度峰值的分布特征及变化趋势基本一致,因此应用本方法研究振动强度的分布规律是可行的。先行洞边墙上测点的振强度分布如图 11 所示,先行洞断面上测点的振动强度分布如图 12 所示。

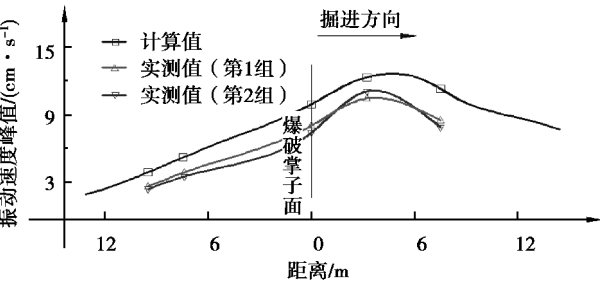


图 11 先行洞边墙上振速峰值分布图

Fig. 11 Distribution of the vibration velocity peak on the side wall of the first hole

从先行洞边墙和断面上测点的振动强度分布图中可以看出,振动强度最大的测点位于后续洞爆

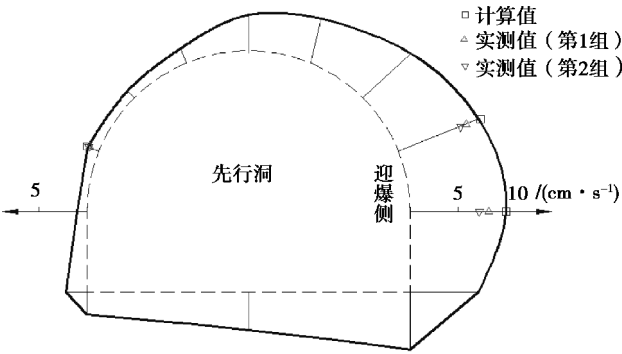


图 12 先行洞断面上振速峰值分布图

Fig. 12 Distribution of the vibration velocity peak on the cross section of the first hole

破掌子面的侧后方,先行洞迎爆的侧边墙上,迎爆侧的振动强度约为背爆侧的 8~10 倍。以爆破掌子面为界,掘进方向边墙上测点的振动强度比反方向的大,且其衰减速度较掘进反方向慢。

4.2 掏槽角度对振动效应的影响分析

根据不同掏槽角度的计算结果,先行洞迎爆侧边墙上的振速峰值分布情况如图 13 所示,计算结果表明掏槽角度对先行洞断面上的振速峰值分布特征影响不大,所以不再赘述。从图 13 中可以看出,掏槽孔布置角度对振动速度峰值的衰减规律影响不大,但是对其最大值出现的位置和大小均有影

响,最大振动速度峰值随着掏槽角度的增大而越来越靠近爆破掌子面,其值也随之增大。产生这种现象的主要原因可以根据柱状药包爆炸后能量的传播规律进行解释^[14-15],掏槽孔内炸药爆炸后能量在隧道围岩内的传播情况如图14所示。从图中可以看出,掏槽孔内炸药爆炸后能量的主要传播方向垂直于炮孔,炮孔轴线方向是次要传播方向,其中传向掌子面的能量主要作用是破岩形成槽腔,传向隧道围岩内部的能量则以爆破地震波的形式在围岩内传播而形成振动。由于楔形掏槽,掏槽孔与掌子面之间存在夹角 θ ,楔形掏槽爆破地震波的主要传播方向为掌子面侧后方,所以振动强度的最大值出现在掌子面后方。随着掏槽角度 θ 的增大,地震波传播至中隔岩墙的距离变小,因此振动强度的最大值会随之增大。因为后续洞未开挖岩体的刚度较大,能够起到良好的传振作用,所以掌子面掘进方向上振速峰值的衰减速度较慢。

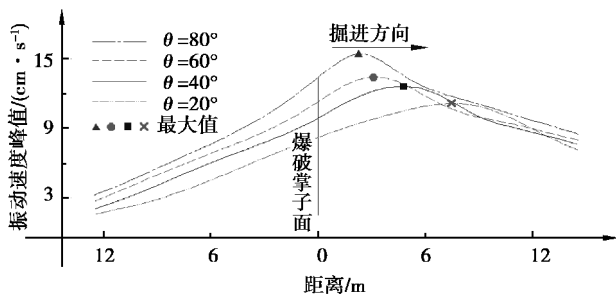


图13 不同掏槽角度条件下先行洞边墙上振速峰值分布图

Fig. 13 Distribution of the vibration velocity peak on the side wall of the first hole under different cutting angle condition

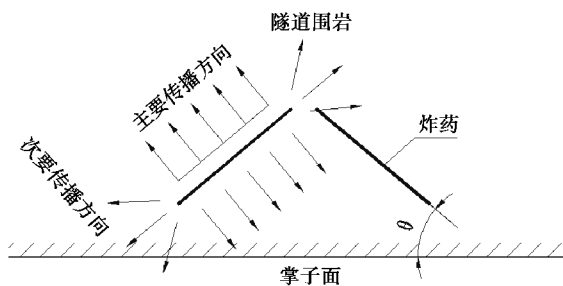


图14 楔形掏槽孔爆破能量传播示意图

Fig. 14 Schematic diagram of energy transfer in wedge cut blasting

综上所述,并行小净距隧道采用楔形掏槽孔爆破时,振动强度的大小不仅与掏槽装药量、隧道净距和围岩条件有关,还与掏槽孔布置角度有关,掏槽角度越大,则振动强度越大。此外,掏槽角度还影响振动强度最大值出现的位置,掏槽角度越大,

则振动强度极值越靠近爆破掌子面。因此,可以通过减小掏槽孔的布置角度来实现降低隧道掘进爆破振动强度的目的。此外,在施工现场振动监测时,随着掏槽角度的增大,重点监测区域应越靠近爆破掌子面。

5 结论

根据重庆鸭江隧道工程实际,采用现场振动监测和数值计算相结合的方法,研究了并行小净距隧道楔形掏槽爆破的振动效应,对现场监测结果和计算结果进行分析得到以下主要结论:

(1)并行小净距隧道后续洞采用楔形掏槽爆破时,先行洞的振动特征表现为:单侧点的振动强度主要方向为水平径向;先行洞断面上迎爆侧的振动强度约为背爆侧的8~10倍;最大振动强度出现在后续洞爆破掌子面的侧后方;以爆破掌子面为界,掘进方向边墙上的振动强度比反方向的大,且其衰减速度较掘进反方向慢。

(2)并行小净距隧道后续洞采用楔形掏槽爆破时,先行洞迎爆侧边墙上振动强度的极值和出现位置均与掏槽孔布置角度有关,掏槽角度越大,则振动强度的极值越大,出现的位置越靠近爆破掌子面。

(3)并行小净距隧道后续洞采用楔形掏槽爆破时,可以通过减小掏槽孔的布置角度来实现降低隧道掘进爆破振动强度的目的。此外,在施工现场布置振动监测点时应考虑掏槽孔布置角度的影响,掏槽孔的布置角度越大,则振动监测重点区域与爆破掌子面间的距离越小。

参考文献(References)

- [1] 赵东平,王明年.小净距交叉隧道爆破振动响应研究[J].岩土工程学报,2007,29(1):116-119. (Zhao Dongping, Wang Mingnian. Study on influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1):116-119. (in Chinese))
- [2] 周佳媚,袁松,高波.小净距隧道地震动力响应下的围岩应力场[J].公路交通科技,2012,29(2):96-101. (Zhou Jiamei, Yuan Song, Gao Bo. Surrounding rock stress field under earthquake-induced dynamic response of tunnels with small spacing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(2): 96-101. (in Chinese))

(下转第621页)