

交通运输

# 后祠隧道爆破振动现场监测与控制技术

张晓波<sup>1</sup> 刘泉声<sup>1,2</sup> 田永超<sup>1</sup> 苏兴矩<sup>3</sup> 钟元庆<sup>3</sup>

(武汉大学土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室<sup>1</sup> 武汉 430072; 中国科学院武汉岩土力学研究所<sup>2</sup> 武汉 430071; 龙岩市漳龙高速扩建工程有限公司<sup>3</sup> 龙岩 364000)

**摘要** 新(扩)建隧道爆破施工不可避免地对既有隧道的通行安全产生影响。依托福建漳龙高速公路后祠隧道扩建工程,对隧道改扩建工程爆破施工的振动监测以及控制技术进行研究。通过现场监测与数值模拟相结合的方法,研究了爆破施工对既有隧道的振动影响,并对现有的爆破施工方案进行优化。研究表明:现有方案下新建隧道爆破施工不会危及左侧老洞的安全,新、扩建隧道爆破施工对既有隧道产生的振动响应存在一定的不同,建议掏槽孔各孔间延时时间定为15 ms,既有右侧隧道原位扩建时应当首先开挖左侧岩体。

**关键词** 新(扩)建隧道 爆破振动 现场监测 数值模拟 爆破方案优化  
**中图分类号** U455.41; **文献标志码** B

随着公路交通工程的大幅度发展,我国越来越多的高速公路因交通量趋于饱和不能满足运输的需求而亟待扩建,作为关键节点的隧道扩建工程必然受到充分的关注。

目前,隧道扩建主要有隧道的新建和原位扩建两种形式<sup>[1]</sup>。对于新建隧道,由于早期既有隧道施工已使得地应力场分布发生改变,因而新建隧道的施工过程实质上是一个在新平衡的基础上对围岩的再次扰动过程<sup>[2]</sup>。隧道原位扩建是在既有隧道的基础上再次施工,首先打破原有隧道结构,然后将既有隧道扩挖至设计轮廓面<sup>[2]</sup>。隧道工程施工过程中,钻爆法是应用最为广泛的方法,这种施工方法施工机械比较简单,工艺成熟可靠,而且炸药价格便宜来源广泛。但是,钻爆法施工会带来一些不利影响,爆破振动会引起岩体内部和地表产生强烈的地震效应,危及周边结构的稳定。隧道改扩建过程中,往往会因为地质条件、路线规划、保护耕地等原因使得新(扩)建隧道与既有老隧道间距较近。这种情况下,掌子面爆破施工时会对既有隧道的稳定性产生很大影响<sup>[3]</sup>。

本文以福建漳龙高速后祠隧道工程为依托,进行爆破振动现场监测与控制技术研究,为指导隧道扩挖施工,确保既有隧道的安全稳定提供理论依据。

2016年7月21日收到 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904)、国家自然科学基金重点基金项目(41130742)资助  
第一作者简介:张晓波(1991—),男,河南郑州人,硕士研究生。研究方向:岩土力学与地下工程稳定性。E-mail: 1647244615@qq.com。

## 1 工程概况

漳龙高速公路后祠隧道位于龙岩市适中镇上郑村与新祠村之间,为双洞四车道普通分离式隧道,于2001年完工并投入运营。由于受到高速公路扩建的需要,该隧道拟扩建为三洞九车道隧道,具体扩建方案为:在既有隧道左侧新建三车道隧道,并且利用原左洞,同时将既有右侧二车道隧道原位扩建为四车道隧道。其扩建施工组织为新建三车道隧道先行施工,施工期间既有左右老洞维持通车,新建隧道通车后,再扩建既有右洞,最终形成独特的三洞九车道大断面隧道群。图1为后祠隧道洞室位置关系图。其中,左线新建三车道隧道净空14.00 m × 5.0 m(宽 × 高),右线净空9.25 m × 5.0 m(宽 × 高)。左侧老洞桩号K130+468 ~ K132+015,全长1547 m;右侧老洞桩号YK130+530 ~ YK131+528,全长998 m。

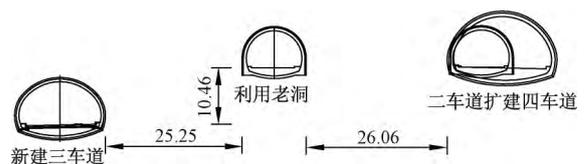


图1 后祠隧道洞室位置关系图(单位:m)

Fig. 1 Relative position of Houci tunnels(unit: m)

后祠隧道采用新奥法施工,遵循“管超前,严注浆、短开挖、弱爆破、强支护、早封闭、勤量测”的施工原则。进出口同时进洞,利用自制式简易开挖作业台架,采用湿钻法,人工手持风钻钻眼,预裂或光面爆破。利用正装侧卸式装载机配合自卸车出渣,

压入式通风。衬砌采用液压衬砌台车一次性拱墙衬砌成型,混凝土采用商砼或拌和站集中拌制,混凝土罐车运输,混凝土泵车泵送入模。喷射混凝土采用湿喷工艺,防水板施工采用无钉铺设。主要采用台阶法施工,根据围岩情况,必要时预留核心土,上下台阶距离控制在 10~15 m,及时初喷混凝土封闭围岩,必要时喷射混凝土封闭掌子面。根据监控量测及施工观测、超前地质预报等反馈信息及时调整支护参数及施工方法,加快仰拱闭合时间,减少其临空时间,确保施工安全并控制地表下沉。图 2 为台阶法炮眼布置图。

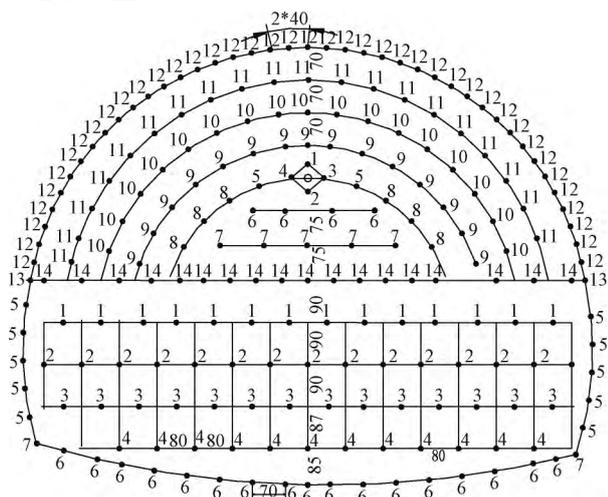


图 2 台阶法炮眼布置图

Fig. 2 Blast-hole-arrangement plan (bench cut method)

## 2 爆破振动监测

### 2.1 监测方法及原理

隧道爆破振动现场监测采用 TC-4850 爆破测振仪,该仪器能对爆破振动和冲击信号进行长时间现场采集、记录和存储,如图 3 所示。图 4 为 TC-4850 爆破测振仪工作原理图,整套仪器由现场速度或加速度传感器、采集记录仪和分析处理软件组成。仪器通过信号接口与传感器直接相连,放置于振动测试点,采集现场振动信号并保存,通过通讯接口与 PC 机连接,分析处理软件读取记录仪内保存数据,并进行显示。



图 3 爆破测振仪

Fig. 3 Blasting vibration monitoring instrument



图 4 爆破测振仪工作示意图

Fig. 4 Working progress of blasting vibration monitoring instrument

### 2.2 测点布置

由于既有右洞的原位扩建工作尚未开展,因此仅对新建隧道爆破施工的振动效应进行监测,测试地点位于左侧老洞,距离洞口 120 m (V)、240 m (IV)、370 m (V)、490 m (IV) 处。爆破振动在掌子面前后的主要影响范围约 20 m,因此掌子面前后布置 5 个测点,各测点间距 10 m<sup>[1-4]</sup>。小净距隧道爆破施工对相邻隧道产生的最大振动速度出现在迎爆侧的边墙和拱部,拱部的最大振动速度稍小于边墙处,爆破振动测试主要在既有左侧隧道迎爆侧边墙部位进行<sup>[5-8]</sup>。图 5 所示为爆破振动测点布置示意图。

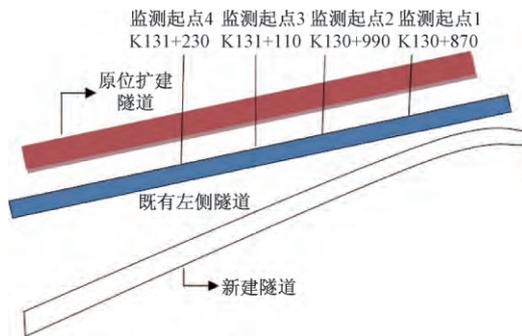


图 5 测点布置示意图

Fig. 5 Arrangement of monitoring points

### 2.3 监测结果分析

现场监测共得到有效振速数据 4 组共 622 段,其中,振速大于 10 cm/s 的数据为 0 段;大于 6.8 cm/s 的数据为 11 段;大于 5 cm/s 的数据为 25 段;大于 3 cm/s 的数据为 64 段;其余数据为 522 段。表 1 为爆破振动安全允许振速。根据表 1,新建隧

表 1 爆破振动安全允许值

Table 1 The allowable vibration velocity

资料来源	安全允许质点振速 $V/(cm \cdot s^{-1})^{-1}$			设防振速 $V_0/(cm \cdot s^{-1})$
	$\leq 10$ Hz	10~50 Hz	$> 50$ Hz	
爆破安全规程	10~12	12~15	15~20	
福建省交规院		$< 10$		
爆破公司		$< 10$		$\leq 6.8$

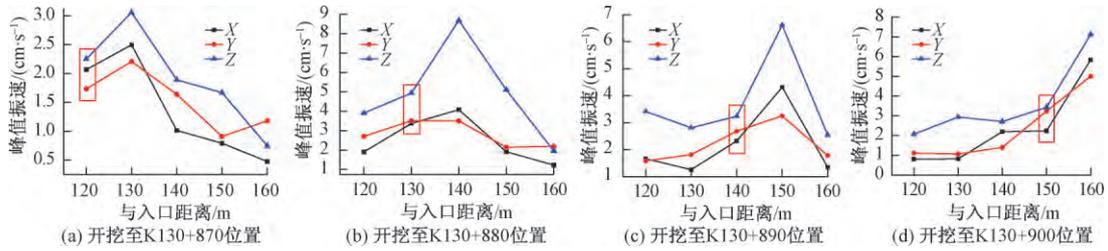


图6 既有隧道轴向振速曲线

Fig. 6 Curves of vibration velocity along the existing tunnel axis

道爆破施工对左侧老洞的振动影响没有超出《爆破安全规程》和爆破公司的允许峰值振速;此外,共计11段数据(占比1.768%)超出爆破公司的设防振速。综上所述,新建隧道爆破施工不会对左侧老洞的安全造成重大威胁,而部分监测结果偏大的原因在于:①炮孔布置未严格按照设计要求;②部分区域单循环开挖进尺较大;③现场地质条件与《工程地质勘察报告》不完全吻合。

第一组监测结果振动效应较显著,现选取该组数据探讨爆破振动沿掌子面前后的衰减规律。桩号分别为:K130+870、K130+880、K130+890、K130+900、K130+910,图6为监测结果(其中红色框选位置为爆破掌子面对应位置)。由图6可知,新建隧道爆破施工时,左侧老洞的振动响应在掌子面前方先增后减,掌子面后方一直衰减,振速最大值出现在掌子面前方10m左右位置处。

### 3 隧道爆破控制技术研究

由2.3节可知,新建隧道爆破施工不会对左侧老洞安全产生重大影响,但是仍有部分区域振动响应较为强烈,后续施工过程中将出现构造破碎带等不良地质作用;与此同时,既有右洞原位扩建时围岩质量较差且中夹岩厚度普遍较小,国内关于原位扩建隧道的工程经验还不够丰富。因此,有必要对爆破方案及参数展开优化研究,进一步降低爆破振动效应(尤其是原位扩建隧道应采取较为保守的爆破方案),笔者针对爆破施工步序、掏槽爆破延时时间展开讨论。

本文基于ANSYS/LS-DYNA软件,建立实际隧道工程模型,模拟新(扩)建隧道爆破施工过程,开展隧道爆破施工步序及延时时间优化研究。

针对隧道爆破施工步序优化问题,计算模型左右侧边界取60m,上侧取至山顶,下侧边界取60m,掌子面前后各取50m,最终形成165m×128m×100m的立方体模型,如图7所示为已建立的三维数值模型。根据前期地质勘察报告,后祠隧道洞身围岩以中-微风化花岗岩为主,总体围

岩以IV级为主,地表层为V级围岩。本文采用材料模型MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC来模拟岩体的非均质、非连续、各向异性等特性,并使用Drucker-Prager屈服准则来判断塑性屈服,同时将岩体简化为三种材料(微风化花岗岩、中风化花岗岩和全风化花岗岩),表2为其物理力学参数。模拟过程中,将爆破荷载简化为三角形荷载直接施加在等效弹性边界上<sup>[9]</sup>。

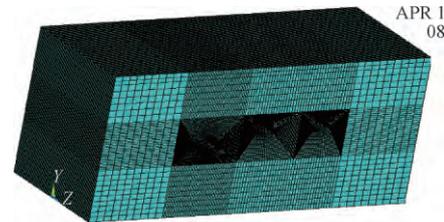


图7 隧道三维数值模型

Fig. 7 Sketch of numerical model

表2 岩体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩石类别	微风化花岗岩	中风化花岗岩	强风化花岗岩
重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	24	21	18
变形模量 $E / \text{GPa}$	11	3.3	1.2
泊松比 $\mu$	0.27	0.32	0.38
内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	43	33	21
黏聚力 $c / \text{MPa}$	1.2	0.45	0.1

针对隧道爆破延时时间问题,计算模型左右侧边界取60m,上侧取至山顶,下侧边界取60m,建立二维数值模型,并将爆破荷载直接施加在炮孔壁上,图8所示为掏槽孔布置示意图。

#### 3.1 隧道爆破施工步序优化

图9为原位扩建隧道爆破开挖程序示意图。首先在开挖断面轮廓线上进行预裂爆破,即图示中的工序①;然后采用上下台阶法开挖,依次开展工序②、③、④、⑤,其中开挖步②将产生较大的振动响应<sup>[4]</sup>。该方案的优点是掏槽爆破位置与左侧老洞距离较远,缺点是爆破时的炮孔夹制作用较强。

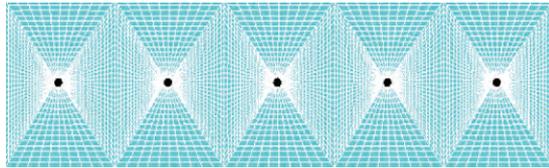


图 8 掏槽孔布置示意图

Fig. 8 Arrangement of cut hole

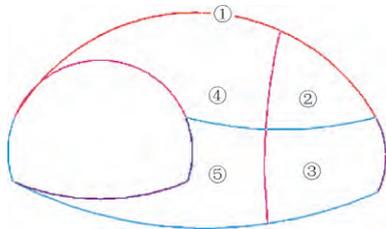


图 9 原位扩建隧道爆破开挖程序示意图(原)

Fig. 9 Sketch of prior blasting construction scheme

国内外的研究工作充分表明炮孔夹制作用对爆破振动效应的影响更显著<sup>[4,10]</sup>,因此笔者提出新的开挖步序,如图 10 所示。与原方案相比,该方案将开挖步②、④调换。新的开挖方案在上台阶爆破施工时增加一个临空面,炮孔夹制作用减弱,缺点是掏槽爆破位置与左侧老洞距离较近。

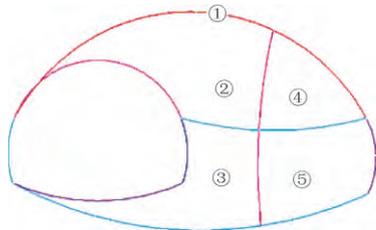


图 10 原位扩建隧道爆破开挖程序示意图(新)

Fig. 10 Sketch of new blasting construction scheme

本文选取典型监测断面 K131 + 120、K131 + 130、K130 + 990、K131 + 030 进行分析,图 11 所示为新旧开挖方案下左侧老洞轴向的振速对比情况,表 3 所示为新旧开挖方案下左侧老洞横断面的振速对比情况。

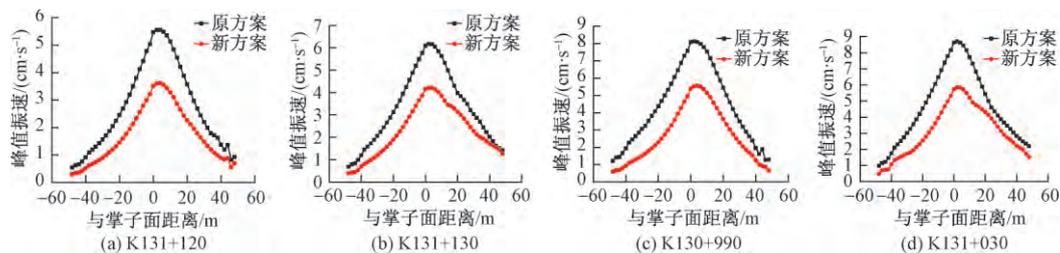


图 11 不同开挖方案下既有隧道轴向振动速度

Fig. 11 Vibration velocity along the existing tunnel axis under different tunnelling schemes

表 3 不同开挖方案下既有隧道横断面振动速度  
Table 3 Vibration velocity of the existing tunnel's cross-section under different tunnelling schemes

监测位置	原方案峰值振速/(cm·s <sup>-1</sup> )	新方案峰值振速/(cm·s <sup>-1</sup> )	优化率/%	
K131 + 120	左侧边墙	0.414	0.229	44.686
	右侧边墙	5.470	3.513	35.777
	拱顶	3.636	2.464	32.233
	拱底	1.618	1.048	35.229
K131 + 130	左侧边墙	0.486	0.329	32.305
	右侧边墙	6.095	4.154	31.846
	拱顶	4.414	3.046	30.992
	拱底	2.31	1.566	32.208
K130 + 990	左侧边墙	0.67	0.326	51.343
	右侧边墙	8.073	5.390	33.234
	拱顶	6.404	4.478	30.075
	拱底	2.422	1.631	32.659
K131 + 030	左侧边墙	0.777	0.524	32.561
	右侧边墙	8.632	5.730	33.619
	拱顶	5.825	4.014	31.091
	拱底	3.397	2.309	32.028

由图 11、表 3 可知:①右侧老洞原位扩建爆破施工时,既有左洞横断面动力响应规律为:迎爆侧边墙 > 拱顶 > 拱底 > 背爆侧边墙;既有左洞轴向动力响应规律为:轴向振速最大值位置紧邻掌子面且基本等于掌子面处的振动速度,掌子面前后振动速度随距离逐渐递减,主要影响范围为掌子面前后 20 m。②新方案下,左侧老洞横断面各位置处的振动速度得到显著降低,优化率普遍大于 30%,轴向各控制点的振动速度也得到明显降低。③由于左侧老洞迎爆侧边墙动力响应最为显著,轴向振速最大值基本等于掌子面处的振动速度,笔者将原位扩建隧道爆破施工时左侧老洞掌子面位置迎爆侧边墙振速作为评判指标,新方案下爆破振动效应降低 30% 以上。

### 3.2 隧道爆破延时时间优化

原方案 5 个掏槽孔爆破时同时起爆,而已有研究表明毫秒微差爆破可以显著降低爆破振动效应<sup>[11-13]</sup>,因此笔者拟提出合适的爆破延时时间。

李存国等<sup>[14]</sup>概括总结了国内外关于微差爆破作用机理的几种假说:①新自由面假说:自由面越大越多,爆破振动对邻近结构物的影响越小,微差爆破产生了更多的自由面,爆破振动效应因此得到控制;②残余应力假说:先爆炸的药包产生爆生气体,这就使得介质处于准静压状态,建立了残余应力场,而且对裂隙起着楔子和膨胀作用,其后爆炸的药包就是利用这种残余应力来改善爆破质量;③应力波干涉假说:土岩被抛出去之前,因为应力波和爆生气体共同作用,周围介质都处于准静压状态,生成裂隙并且不断扩展,如果延时时间间隔选取恰当,那么后爆炸的药包将在残余应力场消失之前产生新的应力场,新产生的应力场与先前产生的应力场叠加在一起,增大对介质的作用,显著提高土岩破碎效果,并减小土岩块度;④地震效应假说:合适的微差间隔时间能够使先后爆破的两药包所产生的能量在空间和时间上相互错开,尤其是地震波的两个主震相,这样才能显著降低地震效应,与此同时地震波之间的相互干扰同样会降低地震强度;此外,微差爆破使得爆区总药量分散开来,可以控制单段最大装药量所产生的爆炸能,因此可以降低爆破地震效应。

现阶段国内外学者主要从两个角度来研究最佳爆破延时时间:①设置足够大的爆破延时时间,使各个炮孔炸药爆炸时产生的振动波形完全分离,最终的振动效应类似于单孔起爆;②设置适当的延时时间,使得前后爆破引发的两个波形正好是波峰、波谷相遇,这样就最大程度地降低了振动效应,理想情况下该方案引起的振动效应会低于单孔起爆<sup>[11]</sup>。

苏波等<sup>[3]</sup>认为第2种方案建立在地震波是非常理想的正弦波的基础之上,然而事实上地震波复杂多变,振动周期并不固定,降振的效果很难达到预期;第一种方案较为可靠,但是需要注意延时时间过大时会造成不良影响。

因此,本文以新建隧道开挖断面 ZK130+880 为例进行分析,拟提出合适的延时时间使各个炮孔炸药爆炸产生的振动波形完全分离。笔者设计了7种延时时间方案:0、1、3、5、10、15、20 ms,如图12所示为不同延时时间条件下振动速度时程曲线(其中A表示左侧边墙、B表示右侧边墙、C表示拱顶、D表示拱底)。

(1)如图12(a)所示为掏槽孔单孔起爆振动速度时程曲线,最大振动速度为2.393 cm/s,进行该项模拟以与多孔起爆不同延时时间的振动效果做对比。

(2)如图12(b)所示为掏槽孔同时起爆振动速度时程曲线,最大振动速度为8.682 cm/s,波形出现

一对主要的波峰、波谷,表明五个掏槽孔的振动效应几乎全部叠加在一起,振动速度较大。

(3)如图12(c)所示为掏槽孔各孔间延时1 ms振动速度时程曲线,最大振动速度为7.363 cm/s,与同时起爆相比振动速度已经有所降低,但是波形依然出现一对主要的波峰、波谷,表明五个掏槽孔的振动效应依然明显地叠加在一起,振动速度较大。

(4)如图12(d)所示为掏槽孔各孔间延时3 ms振动速度时程曲线,最大振动速度为2.56 cm/s,与同时起爆相比振动速度下降明显,波形中出现两对主要的波峰、波谷,表明5个掏槽孔的振动叠加已经明显减弱,振动速度较小。

(5)如图12(e)所示为掏槽孔各孔间延时5 ms振动速度时程曲线,最大振动速度为2.384 cm/s,与图12(d)相比振动速度再次小幅度减小,波形中出现3对主要的波峰、波谷,表明五个掏槽孔的振动叠加效应进一步减弱,振动速度进一步减小。该振速小于单孔起爆振动速度,表明波形存在反向叠加,降低了爆破振动效应。笔者认为这样降振效果是不可控的,应当进一步设置延时时间使得振动波形完全分离。

(6)如图12(f)所示为掏槽孔各孔间延时10 ms振动速度时程曲线,最大振动速度为2.391 cm/s,小于单孔起爆振动速度,表明波形也存在反向叠加,降低了爆破振动效应,波形中出现五对主要的波峰、波谷,但是前一个波尾与后一个波头粘连在一起,应当继续加大延时时间使得爆破波形完全分离。

(7)如图12(g)所示为掏槽孔各孔间延时15 ms振动速度时程曲线,图中最大振动速度为2.393 cm/s,波形中出现五对主要的波峰、波谷,并且前一个波尾与后一个波头分离,表明五个掏槽孔的振动效应在该时刻基本分离,爆破振动效应类似于单孔起爆。

(8)如图12(h)所示为掏槽孔各孔间延时20 ms振动速度时程曲线,最大振动速度同样为2.393 cm/s,与图12(g)相比,振动波形进一步分离。

为了进一步分析不同延时时间的差异,本文将各延时时间振动速度峰值列表显示,同时列出不同延时时间条件下的优化率,详细情况如表4所示。由表4可知:①延时时间 $\geq 15$  ms时,爆破振动效果相当于单孔起爆,振速曲线基本完全脱离,不再产生波形叠加;②延时时间为5 ms时,爆破振动曲线存在反向叠加,振动效应得以减弱,低于单孔起爆振速,国内外学者认为这种降振效果是不可控、不稳定的,不适用于具体施工过程<sup>[11]</sup>;③延时时间 $\leq 3$  ms时优化效果对延时时间非常敏感,延时时间 $> 3$  ms时优化效果对延时时间的敏感度减弱。

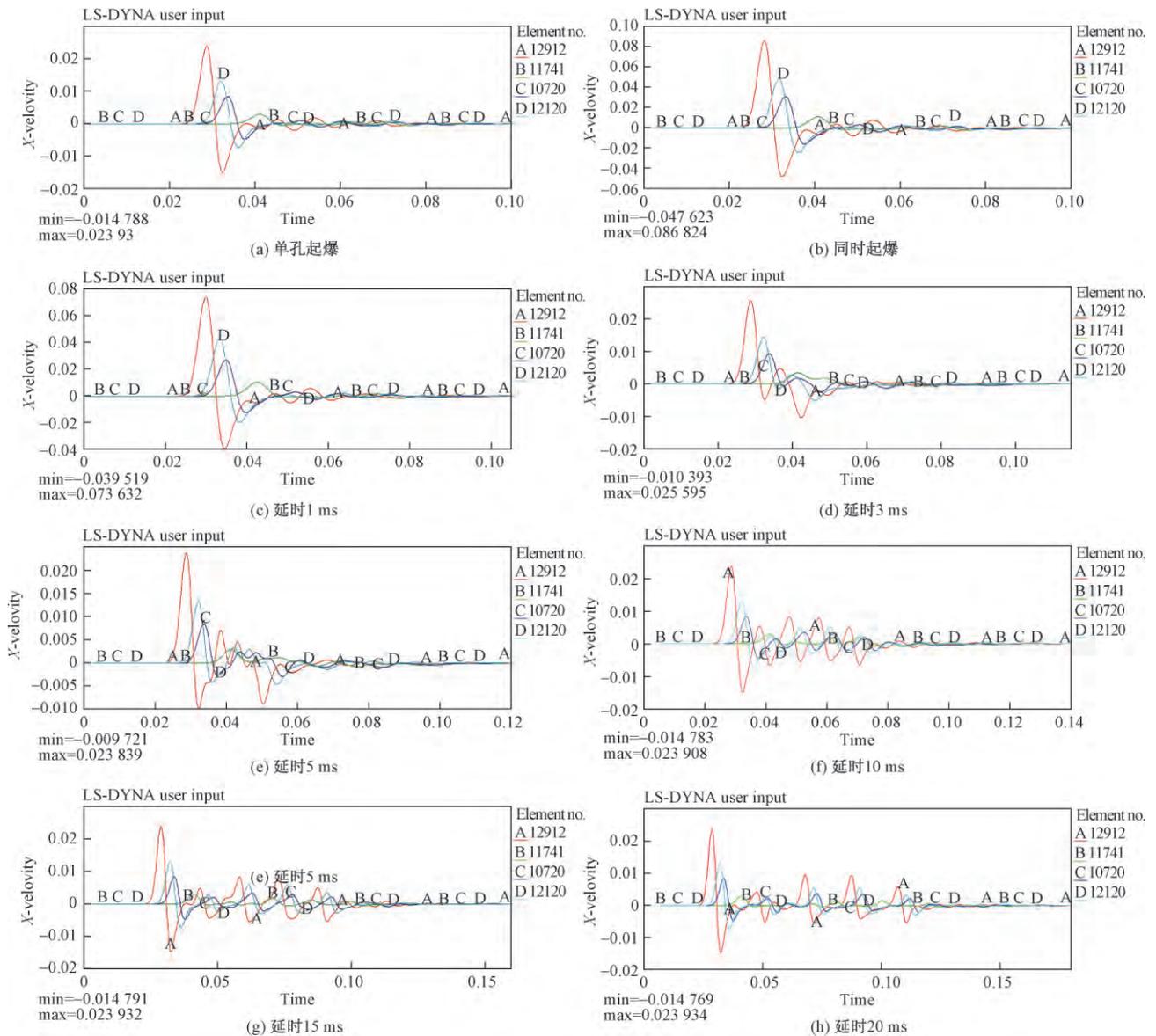


图 12 不同延时时间条件下振动速度时程曲线

Fig. 12 Velocity time-history curves under different millisecond-delay time

表 4 不同延时时间的振速峰值

Table 4 Maximum vibration velocity under different millisecond-delay time

延时时间/ms	振速峰值/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	优化率/%
0(单孔)	2.393	72.44
0(多孔)	8.682	0
1	7.363	15.19
3	2.56	70.51
5	2.384	72.54
10	2.391	72.46
15	2.393	72.44
20	2.393	72.44

考虑到延时时间过大会对爆破进程产生不利影响,笔者建议将掏槽孔各孔间延时时间定为 15 ms。苏波等<sup>[3]</sup>认为对于某一固定的延时时间,爆破

近区波形分离,随着爆心距的增大波形逐渐叠加在一起。上述研究内容选取的隧道断面是 ZK130 + 880,其中夹岩厚度是 26 m,而后祠隧道中夹岩厚度为 22 ~ 120 m,有必要进一步探讨不同中夹岩厚度条件下延时 15 ms 的降振效果。由于中夹岩厚度很大时爆破振动效应较弱,本文只需在拟定的延时时间 15 ms 下确保中夹岩厚度为 22 ~ 40 m 位置振动波形完全分离。因此,分别对中夹岩厚度为 22、26、30、40 m 的开挖断面进行验证,如图 13 所示为不同中夹岩厚度条件下振动速度时程曲线。

由图 13 可知:各振速时程曲线基本不发生明显叠加,都出现五对主要的波峰、波谷,表明掏槽孔各孔间延时时间 15 ms 是合理的,可以应用于整个施工过程。

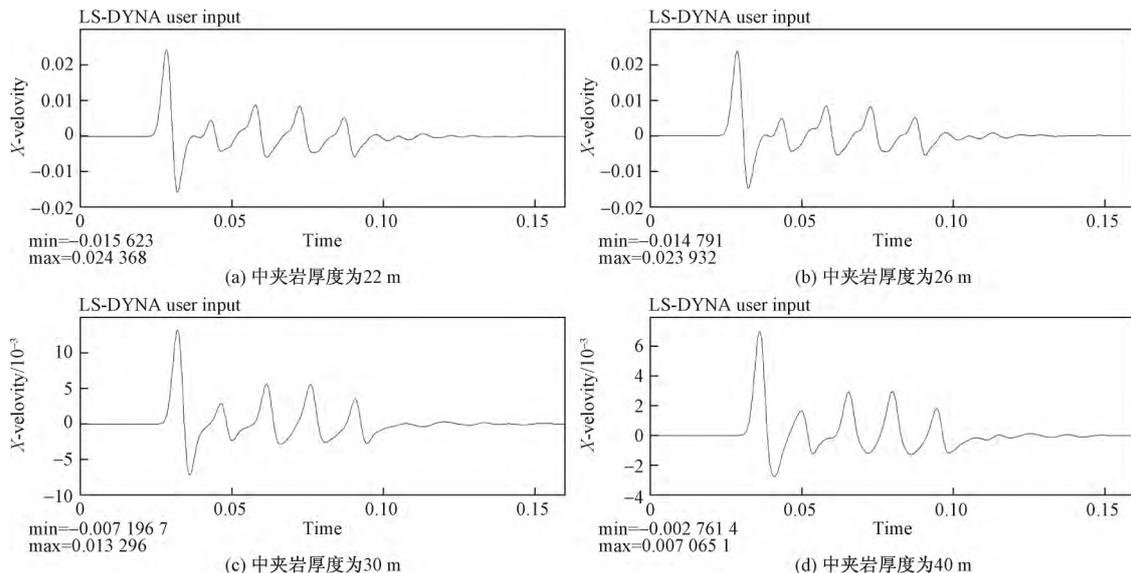


图 13 不同中夹岩厚度条件下振动速度时程曲线

Fig. 13 Velocity time-history curves under different thickness of mid-adjacent rock

## 4 结论

(1) 现阶段新建隧道爆破施工不会危及既有左洞的安全稳定,掌子面前方振动速度先增后减,掌子面后方一直衰减,振速最大值出现在前方 10 m 左右位置处。

(2) 右侧老洞原位扩建爆破施工时,既有左洞横断面动力响应规律为:迎爆侧边墙 > 拱顶 > 拱底 > 背爆侧边墙;轴向动力响应规律为:振速最大值位置紧邻掌子面且基本等于掌子面处的振动速度,掌子面前后振动速度随距离逐渐递减,主要影响范围为掌子面前后 20 m。

(3) 既有右洞原位扩建时应当首先开挖左侧岩体,初始起爆的炮孔夹制作用明显减弱,爆破振动效应较原方案降低 30% 以上。

(4) 延时时间  $\leq 3$  ms 时优化效果对延时时间非常敏感,延时时间  $> 3$  ms 时优化效果对延时时间的敏感度减弱,延时时间  $\geq 15$  ms 时爆破振动效果等同于单孔起爆,可将爆破延时时间定为 15 ms。

## 参 考 文 献

- 孟凡兵. 隧道 2 扩 4 扩挖爆破振动效应及安全判据研究. 厦门: 华侨大学, 2012  
Meng Fanbing. Tunnel 2 extended 4 expanding excavation blasting vibration effect and safety criterion. Xiamen: Huaqiao university, 2012
- 陈陆军. 典型高速公路隧道扩建方案及施工力学行为研究. 成都: 西南交通大学, 2013  
Chen Lujun. Study on mechanical behavior of reconstruction and extension for typical highway tunnel. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013
- 苏波,高可帅,宋瑞富. 毫秒延时爆破振动叠加作用的数值模

拟研究. 工程爆破, 2012; 18(3): 12—16

- Su Bo, Gao Keshuai, Song Ruifu. Numerical simulation research on vibration superposition effects in the millisecond delay blasting. Engineering Blasting 2012; 18(3): 12—16
- 石洪超. 小净距隧道掘进爆破振动效应的研究及应用. 成都: 西南交通大学, 2008  
Shi Hongchao. Study on vibration effects of small clear distance tunnel driving blasting and its application. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008
- 龚建伍,夏才初,郑志东,等. 鹤上三车道小净距隧道爆破振动测试与分析. 岩石力学与工程学报, 2007; 26(9): 1882—1887  
Gong Jianwu, Xia Caichu, Zheng Zhidong, et al. Measurement and analysis of blasting vibration in heshang three-lane tunnels with small clear space. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007; 26(9): 1882—1887
- 杨转运,刘会,吴汉辉. 小净距隧道施工中减振技术研究. 现代交通技术, 2006; 3(4): 37—41  
Yang Zhuanyun, Liu Hui, Wu Hanhui. Study on the technology of blasting vibration control in construction of small clear distance tunnel. Modern Transportation Technology, 2006; 3(4): 37—41
- 邹新宽. 爆破动力作用下锚碇隧道围岩振动效应分析研究. 成都: 西南交通大学, 2012  
Zou Xinkuan. Analyze and study of anchorage tunnel surrounding rock vibration effects caused by excavation blasting. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012
- 言志信,吴德伦,王漪,等. 地震效应及安全研究. 岩土力学, 2002; 23(2): 201—203  
Yan Zhixin, Wu Delun, Wang Yi, et al. The study of blast vibration effect and safety. Rock and Soil Mechanics, 2002; 23(2): 201—203
- 杨建华,卢文波,陈明,等. 岩石爆破开挖诱发振动的等效模拟方法. 爆炸与冲击, 2012; 32(2): 157—163  
Yang Jianhua, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. An equivalent simulation method for blasting vibration of surrounding rock. Explosion and Shock Waves, 2012; 32(2): 157—163

- 10 段宝福,朱应磊,吴圣智. 复杂环境下浅埋隧道的爆破震动监测与控制技术. 现代隧道技术,2013; 50(3): 142—146  
Duan Baofu, Zhu Yinglei, Wu Shengzhi. Monitoring and controlling technology for blasting vibration induced by a shallow-buried tunnel in a complex environment. Modern Tunnelling Technology, 2013; 50(3): 142—146
- 11 娄建武,龙源,卢云. 毫秒延时爆破段延时间隔效果研究. 爆破器材,2006; 35(1): 26—29  
Lou Jianwu, Long Yuan, Lu Yun. Study on the intervals of millisecond delay blasting. Explosive Materials, 2006; 35(1): 26—29
- 12 张光雄,杨军,卢红卫. 毫秒延时爆破干扰降振作用研究. 工程爆破,2009; 15(3): 17—21  
Zhang Guangxiong, Yang Jun, Lu Hongwei. Research on seismic wave interference effect of millisecond blasting. Engineering Blasting, 2009; 15(3): 17—21
- 13 徐全军,龙源,张庆明,等. 微差爆破震动叠加起始位置数值模拟. 力学与实践,2000; 22(5): 45—48  
Xu Qianjun, Long Yuan, Zhang Qingming, et al. Numerical simulation of the starting position of ground vibration in short delay blasts. Mechanics in Engineering, 2000; 22(5): 45—48
- 14 李存国,张云鹏. 关于微差爆破合理间隔时间的实践研究. 云南冶金,2010; 39(2): 22—24  
Li Cunguo, Zhang Yunpeng. Practical study on logical delay time of millisecond blasting. Yunnan Metallurgy, 2010; 39(2): 22—24

## Monitoring and Controlling Technology for Blasting Vibration of Houci Tunnel

ZHANG Xiao-bo<sup>1</sup>, LIU Quan-sheng<sup>1,2</sup>, TIAN Yong-chao<sup>1</sup>, SU Xing-ju<sup>3</sup>, ZHONG Yuan-qing<sup>3</sup>

(The Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, School of Civil Engineering, Wuhan University<sup>1</sup>, Wuhan 430072, P. R. China; Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences<sup>2</sup>, Wuhan 430071, P. R. China; Longyan Reconstruction Project of Zhanglong Highway co., LTD<sup>3</sup>, Longyan 364000, P. R. China)

**[Abstract]** The blasting construction of newly constructed (in-situ enlarged) tunnel inevitably influences the existing tunnel's safety. Based on the extension project of Houci tunnel in Zhangzhou—longyan highway of Fujian Province, the technology for monitoring and controlling blasting-induced vibration during tunnel construction is addressed. Combined field monitoring with numerical simulation, the influence law of blasting vibration on the existing tunnel is studied. Ultimately, the optimizing suggestions are put forward. The results show that the process of the newly constructed tunnel construction cannot endanger the stability of the existing tunnels; there are significant differences about the impact on the existing tunnel influenced by the blasting process of the newly constructed (in-situ enlarged) tunnel; reasonable millisecond-delay time should be 15 ms, the left surrounding rock should be excavated preferentially in the process of *in-situ* enlarged tunnel construction.

**[Key words]** newly constructed (in-situ enlarged) tunnel    blasting vibration    field monitoring    numerical simulation    the optimization of blasting scheme