

文章编号: 1009-3443(2007)06-0702-07

# 爆破振动对相邻隧道的影响性分析及控爆措施

姚勇<sup>1,2</sup>, 何川<sup>1</sup>, 周俐俐<sup>2</sup>, 童虎<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 地下工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南科技大学 土木工程学院, 四川 绵阳 621002)

**摘要:** 通过大量二维和三维数值模拟计算, 同时, 结合紫坪铺隧道小净距段现场实测爆破振动数据, 分析了小净距隧道爆破施工中后行隧道爆破对先行隧道的影响因素。研究了不同岩墙加固措施、不同施工方案及不同支护体系等情况下, 小净距隧道中后行隧道爆破开挖对先行隧道的影响。得出先行隧道迎爆侧及开挖掌子面前后1B范围是影响较大部位, 应加强监控量测的结论。提出了岩墙加固宜采用注浆加固、先行隧道初期支护宜及时封闭、掏槽眼宜远离中岩墙以及开挖进尺不宜大于净距的1/3等小净距隧道爆破施工的控爆措施。

**关键词:** 隧道工程; 小净距隧道; 爆破振动; 控爆措施

**中图分类号:** U455.41      **文献标识码:** A

## Effect analysis and controlled measures research about blasting vibration to neighboring tunnel

YAO Yong<sup>1,2</sup>, HE Chuan<sup>1</sup>, ZHOU Li-li<sup>2</sup>, TONG Pang<sup>2</sup>

(1. Department of Tunnel and Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. School of Civil Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)

**Abstract:** According to a large amount of two-dimensional and three-dimensional numerical simulation, together with the observational blasting vibrant data about small clear distance of ZhiPingPu tunnel, the influencing factor applied to the precedence tunnel by the later one during blast construction of small distance tunnels was analysed. Also, the influencing factor applied to the precedence tunnel by the later one during blast excavation of small distance tunnels based on different consolidating measure of rock wall and different construction scheme was studied. A conclusion was reached that the side facing blast and the 1B area in tunnel face of the precedence tunnel are the greater affecting location and the monitoring and gauging should be strengthened. Based on analysis, some suggestions about controlling blasting measures were presented that the rock wall should be consolidated by the way of slip-casting, primary supporting of the precedence tunnel should be sealed in time, cut hole should be set far away from the middle rock wall, and excavation footage shouldn't be greater than one-third of the clear distance.

**Key words:** tunnel engineering; small clear distance tunnel; blasting vibration; blasting controlled measures

小净距隧道是介于普通分离式隧道与连拱隧道的一种新型隧道结构型式, 由于不受地形条件以及

总体路线型的限制, 又较之拱隧道施工工艺简单、易于防水处治和造价易于控制, 采用的工程实例有急速增加之势。在公路、铁路、城市地铁以及水利等工程中都出现了小净距隧道。如内昆线青山隧道、湘黔铁路复线新坪渠隧道、新坪口隧道、新柳潭隧道、宝成复线须家河隧道; 深圳、广州、南京和北京等地

收稿日期: 2007-05-18.

基金项目: 西部交通建设科技基金资助项目(2003-318-780-12).

作者简介: 姚勇(1972-), 男, 副教授; 研究方向: 岩土工程及地下工程; Email: yy001221@163.com.

铁的修建中,均出现了近距离施工和交叉重叠隧道的情形;公路隧道中已建的招宝山隧道、金旗山隧道、里洋隧道、仙岳山隧道以及在建的董家山隧道、丰泽街隧道等均采用小净距隧道结构型式<sup>[1-7]</sup>。

在小净距隧道施工方案的选择中,目前采用较多的仍然是传统的钻爆法施工,尤其是在山岭隧道中。由于小净距隧道中岩墙厚度较小,后行隧道的爆破开挖对先行隧道的影响较大,如何有效地控制后行隧道爆破振动对先行隧道结构的影响就显得至关重要。因此,结合都(江堰)汶(川)高速公路路段紫坪铺隧道小净距段爆破施工,利用数值模拟计算和现场实测的方法,研究围岩类别、埋深、净距、岩墙加固措施、先行隧道支护体系以及后行隧道开挖方法的影响。

### 1 工程概况

紫坪铺隧道位于都(江堰)汶(川)高速公路路段,为分离式双车道双洞,左线长4 111 m,右线长4 081 m,如图1所示。隧道汶川端(出口段)左右线分别位于为3 km和2 km的平曲线上,并与1.5 km长的泯江大桥相接,为小净距隧道段,该小净距段隧道具有“隧道净距变化大、围岩类别全、工程处理措施多”等特点:隧道净距从21.86 m渐变到3.75 m,隧道埋深变化大,从121.8 m渐变至5.4 m在小净距段,地质条件较为复杂,围岩类别较齐全,涵盖了IV~I类常见的主要围岩类别。II类围岩地段,左右

洞间岩柱厚度为3.75~8.53 m,隧道埋深为5.4~45.6 m。III类围岩地段,左右洞间岩柱厚度为8.63 m~12.36 m,隧道埋深为45.6~73.4 m。IV类围岩地段,左右洞间岩柱厚度为12.82m~21.86 m,隧道埋深为73.4~121.8 m。

### 2 数值计算过程及结果分析

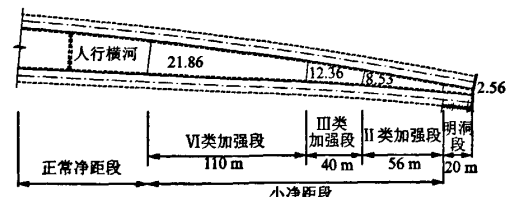
#### 2.1 数值计算模型建立

数值计算采用大型有限元程序 ANSYS 进行。根据理论分析<sup>[8]</sup>,在后行隧道爆破开挖很小一定范围内,爆破产生的冲击波很快衰减为地震波。加之在实际工程施工中,经常采用光面爆破和预裂爆破等控爆措施减小爆破冲击波对围岩的压力。因此,本假定在后行洞开挖爆破荷载作用下,先行洞洞周围岩处于弹性范围内,材料均假定为线弹性。众所周知,材料的动力特性与静力特性存在着差别,根据文献<sup>[9]</sup>,在不考虑岩石破坏后的形态和应变率低于103/s,假定动、静态本构方程可取相同形式,因此,在本文中仍采用材料的静力指标,材料参数如表1所示。

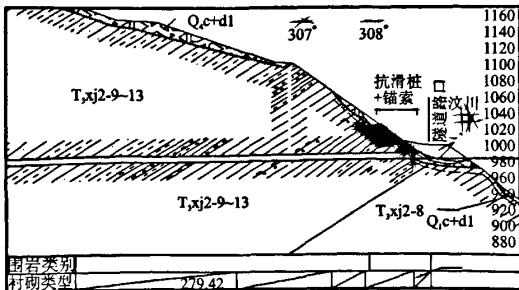
表1 计算物理力学指标

Tab.1 Mechanical parameters of solution

围岩级别	E/ GPa	$\mu$	$\gamma$ KN·m <sup>-3</sup>	C/ MPa	$\Phi$ / (°)
II	7	0.25	25	1.30	38
IV	2	0.34	23	0.20	30
V		0.38	19	0.08	27
IV级围岩加固区	2	0.34	23	0.25	34
V级围岩加固区	0.6	0.38	19	0.20	30
喷射混凝土	30	0.22	25	—	—
锚杆/预应力锚杆	210	0.30	79	—	—



(a) 平面图



(b) 纵断面图

图1 紫坪铺隧道小净距段布置图

Fig.1 Layout of little clear distance section in Zhipingpu tunnel

对于截断边界条件,由于本次计算主要考察后行洞爆破开挖对先行洞及其洞周围岩影响,主要与地震效应(位移、速度、加速度、应力、应变等)的峰值有关,通过取不同边界进行计算,当边界取得一定远(大于隧道开挖洞径的3倍)以及两隧道净距较小时,边界的反射效应对隧道周围地震效应的峰值影响可以忽略。因此,在本次计算分析中,仍采用扩大边界范围的方式减小边界效应的影响,左、右及下边界取到三四倍隧道的开挖直径,上边界取为自由边界,隧道纵向长度取50 m,左、右边界约束x向位移,下边界约束y向位移,前、后边界约束z向位移。二维、三维有限元分析模型,如图2所示。

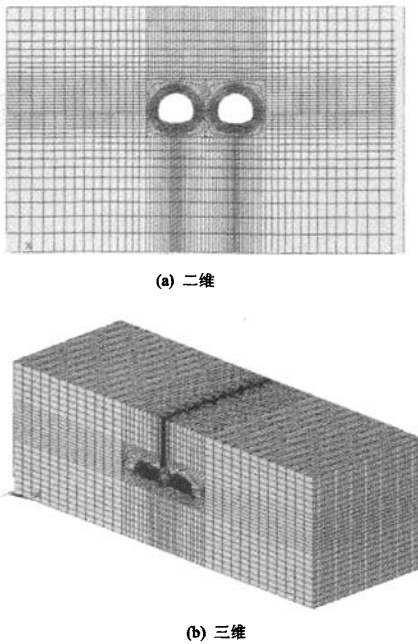


图2 二维、三维有限元计算模型及网格划分  
Fig. 2 Two and three finite element analysis model

根据爆破振动理论分析,爆破荷载可简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载,同时假定作用在隧道开挖边界面上。爆破荷载的应力峰值 $P_{max}$ 可以根据文献[10、11]采用经验公式计算,荷载上升段、下降段作用时间可以参考文献[10、11]利用公式计算。但根据大量实测经验,本次计算上升段时间取0.012 s,下降段结束时间取0.112 s,为了解爆破荷载结束后质点的情况,计算总持续时间取为0.5 s。计算最大峰值爆破荷载取为1.7 MPa。

## 2.2 数值计算的方案

由于三维计算单元数较多,计算工作量较大,不适合大量的计算。虽然爆破开挖仅是隧道局部一小段作用有爆破荷载,并不是真正意义上的平面应变问题,其计算结果数值的绝对大小是无意义的,但是,采用二维平面数值计算来模拟爆破开挖,探讨其基本规律性,指导三维数值计算和减小三维数值模拟计算的工作量仍然是有现实意义的。为了减小计算工作量,探求围岩级别,隧道埋深,隧道净距等对小净距隧道围岩稳定性影响的规律以及小净距隧道支护体系、中岩墙加固措施、后行洞爆破开挖方式等的合理选取规律,首先采用了平面有限元进行规律探讨,然后,在平面有限元计算分析的基础上进行三

维计算分析。

在平面有限元分析中,重点分析了在爆破荷载作用下,不同围岩级别、隧道埋深及隧道净距对小净距隧道的影响;后行洞采用不同开挖方式的影响;不同支护体系状态及中岩墙加固措施的影响等。在三维数值分析中,重点分析以下几方面的问题:

(1)支护施作时机的问题,研究初期支护在爆破中的作用以及二次衬砌的浇筑时机;

(2)研究相邻隧道爆破振动影响的纵向距离,研究两隧道开挖的合理掌字面距离

(3)后行洞爆破开挖对先行洞引起的振动峰值速度与峰值拉应力之间的关系,从而探求控制爆破振动的速度判据。目前,爆破振动控制标准并未统一,但普遍倾向于以质点振动最大速度作为控制标准,同时考虑到岩体抗拉能力较弱,因此,本次研究以爆破荷载作用下质点振动速度和岩体产生的附加拉应力作为研究的重点进行讨论。

## 2.3 数值计算结果分析

### 2.3.1 围岩级别、埋深及净距对小净距隧道爆破振动的影响

图3、4分别为先行洞洞周峰值速度、峰值附加拉应力随隧道埋深变化的典型曲线。

通过类比分析可以得出,小净距隧道的开挖进尺不应大于中岩墙的厚度,为了安全起见,从减小爆破振动对中岩墙的影响出发,建议小净距隧道爆破施工开挖进尺不宜大于中岩墙厚度(净距)的1/3。

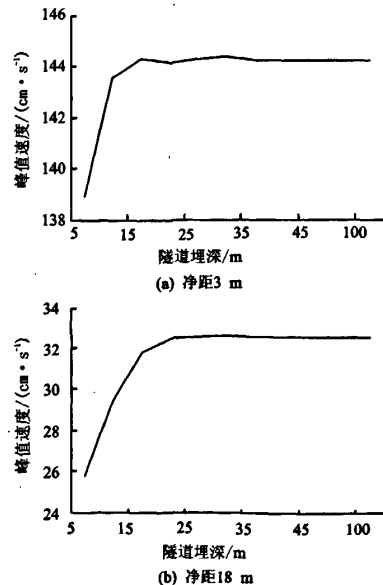


图3 峰值速度随埋深变化关系典型曲线  
Fig. 3 Typical curve of peak speed with different depth

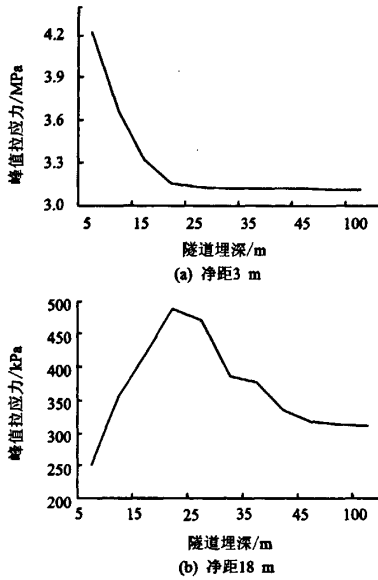


图4 峰值拉应力随隧道埋深变化典型曲线

Fig. 4 Typical curve of peak tensile stress with different depth

图5为先行洞洞周峰值速度、峰值附加拉应力与净距的典型关系曲线,从图可以看出,围岩级别越好,峰值速度越小,而对峰值附加拉应力影响不大;净距越小,爆破振动越强。这说明对于低级别围岩宜采用机械开挖或辅以弱爆破,净距较小的条件下采用爆破开挖应严格控制开挖进尺和最大段药量。

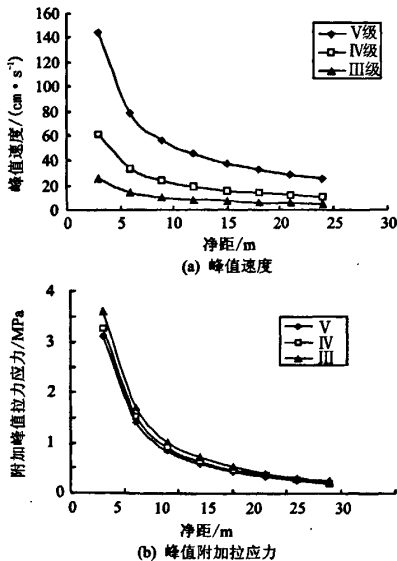
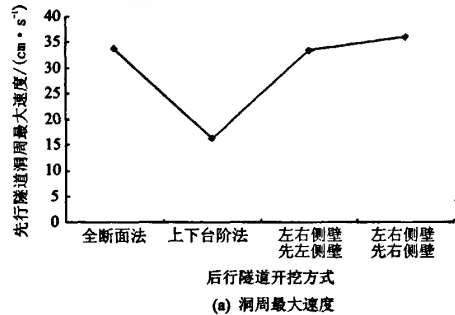


图5 各级围岩下峰值速度、附加拉应力与净距关系的典型曲线

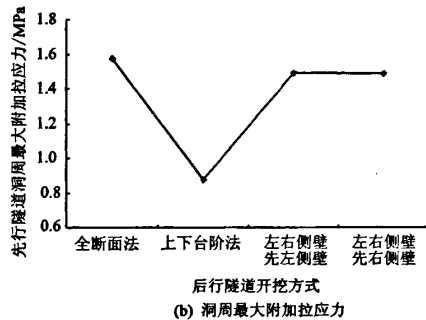
Fig. 5 Typical curve of peak speed and additional stress with different clear distance in various rock

2.3.2 后行洞不同爆破开挖方式的影响

图6为后行洞不同开挖方式下先行洞洞周最大速度、附加拉应力比较。从图中可以看出,采用上下台阶法对降低爆破振动具有较大作用。对于侧壁导坑法,由于数值模拟计算中未能考虑增加临空面对降低爆破振动的有利影响,因此,从计算的结果来看,效果并不好。但考虑到先开挖远离中岩墙侧时,使得掏槽爆破远离中岩墙,同时为靠中岩墙侧的后续爆破增加了临空面,从理论分析可知对降低爆破振动十分有利。因此,采用侧壁导坑法开挖时,宜先开挖远离中岩墙侧。



(a) 洞周最大速度



(b) 洞周最大附加拉应力

图6 不同开挖方式下先行洞洞周最大速度、附加拉应力比较

Fig. 6 Comparison curve of maximal speed and additional stress in the earlier tunnel with various excavation to latter tunnel

2.3.3 不同支护体系状态及中岩墙加固措施的影响

图7为不同支护状态及中岩墙加固措施下先行洞洞周最大速度、最大附加拉应力比较。从图可看出:

- (1)初期支护的及时跟进和封闭,对降低爆破振动影响具有较大作用;
- (2)中岩墙采用注浆加固,提高围岩参数,能明显降低爆破振动速度,但围岩应力有所增加,需注意此时围岩的强度也有所提高;
- (3)中岩墙采用锚杆加固或预应力锚杆加固对降低爆破振动效果并不明显;
- (4)二次衬砌的施作,能降低爆破振动速度,但

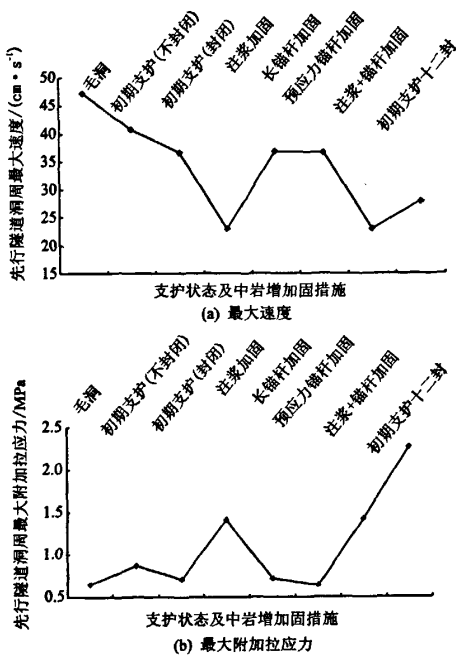


图7 不同支护状态下先行洞洞周最大速度、附加拉应力比较图

Fig. 7 Comparison curve of maximal speed and additional stress in earlier tunnel with various support

是其附加应力却显著增加,这对于抗拉能力较弱的混凝土材料较为不利,容易出现裂纹和剥落,影响使用和长期安全。

2.3.4 三维数值计算结果分析

图8为有初期支护和无支护情况下,先行洞中岩墙拱腰峰值速度、附加拉应力典型分布情况。

从图及计算结果可以看出:

(1)初期支护的施作对围岩条件较差的低级别围岩振动速度有降低作用,但引起的附加应力也较大,对于高级别围岩,降低振速作用有限,附加应力有一定增加,但不大。分析原因,主要与围岩与初期支护的相对刚度有关,当初期支护相对于围岩刚度较大时,对振速有一定降低,但引起的附加应力明显增加;但围岩与初期支护的刚度不大时,初期支护的减振作用就不明显了,此时,初期支护对于保证施工安全仍有重要作用。考虑到二次衬砌刚度较大,为了避免爆破中二次衬砌内出现较大的附加拉应力产生裂缝,二次衬砌宜在后行洞爆破影响区通过后浇筑。

(2)爆破振动对开挖掌子面前后1B范围内影响较大,因此,宜加强该部位的重点监控量测。

图9为先行、后行洞开挖掌子面不同距离情况下,先行洞中岩墙拱腰峰值速度、附加拉应力分布情况。从中可以看出:

图9为先行、后行洞开挖掌子面不同距离情况下,先行洞中岩墙拱腰峰值速度、附加拉应力分布情况。从中可以看出:

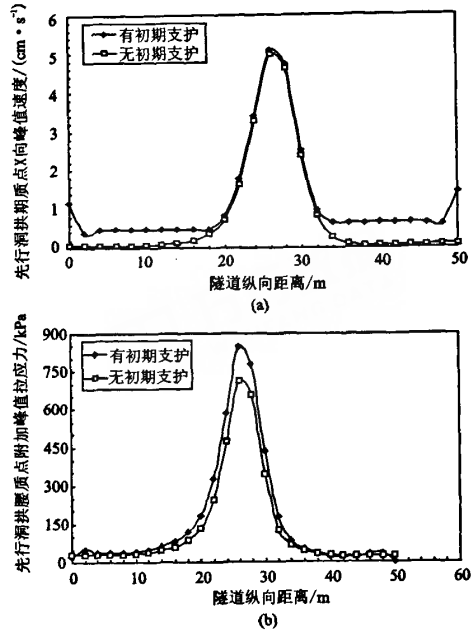


图8 有(无)初期支护情况下先行洞拱腰峰值速度、附加拉应力变化图

Fig. 8 Peak speed and additional stress distribution of earlier constructed tunnel hance with or without initial support

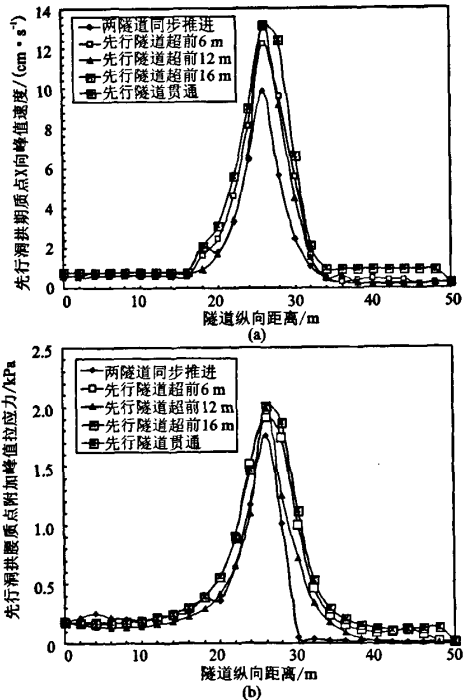


图9 掌子面不同距离先行洞中岩墙拱腰峰值速度、附加拉应力分布图

Fig. 9 Peak speed and additional stress distribution of earlier constructed tunnel hance with various distance of working face

(1)两隧道同步推进时,振动速度和引起的附加应力均较小,但是,现实工程施工中完全同步推进施工是难以实现的。

(2)对于两掌子面相距6、12、18 m以及先行洞贯通的情况,对计算结果影响不大,因此,为了避免相邻隧道爆破开挖的相互影响,两掌子面之间的距离宜保持在爆破开挖影响范围以外,即大于1 B。

### 3 现场测试过程及结果分析

#### 3.1 测点的布置及测试内容

为了研究爆破振动对先行隧道横断面的影响,在与后行隧道开挖掌子面相对应的先行隧道横断面拱顶、拱肩、拱腰以及拱脚等部位分别安设测点进行测试,见图3、4所示。为了研究爆破振动对先行隧道纵向的影响及衰减规律,在与后行隧道开挖掌子面相对应的先行隧道拱腰前后一定距离(5 m或10 m)安设测试元件进行测试,见图5、6所示。根据后行隧道围岩情况和爆破开挖的实际进程,共进行了13组计72个测点测试,每个测点分别监测了x向(隧道径向)和y向(隧道纵向)振动速度。

测试采用北京波谱世纪科技发展有限公司研制的PS-10B型速度传感器、WPS-1600型数据采集系统、以及Vib'SYS振动信号采集、处理、分析程序。

#### 3.2 现场测试结果及分析

在紫坪铺隧道小净距段现场施工中,先行隧道和后行隧道均主要采用上、下台阶法施工,对于后行隧道局部侧壁导坑法施工,目前,该小净距段已经安全、顺利通过。由于在小净距段采用了微爆破技术,在V级围岩段以机械开挖为主,配以少量的弱爆破,因此该段未能测得试验数据。对于IV级、III级围岩小净距段,爆破施工中严格控制最大段装药量和开挖进尺,最大段药量仅为24 kg,后行隧道爆破开挖进尺在IV级围岩段控制在1 m以内,III级围岩段控制在2 m以内,现场测得的最大振动速度仅为9.34 cm/s,未出现由于爆破开挖引起的围岩掉块、初期支护开裂等情况。

图10为现场实测的先行隧道洞周质点典型爆破振动速度时间历程曲线,由爆破振动速度时间历程曲线可知,爆破振动强度与最大段装药量密切相关,同时,只要合理选择每段时间间隔,一般大于100 ms,各段爆破振动将基本不产生叠加。

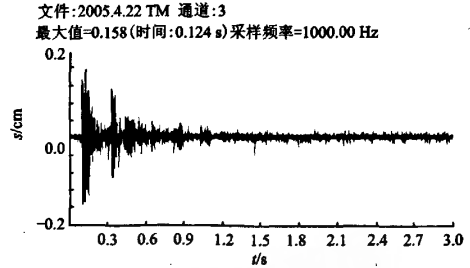
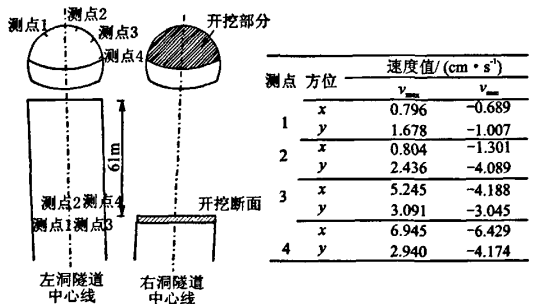


图10 爆破振动典型时间历程曲线

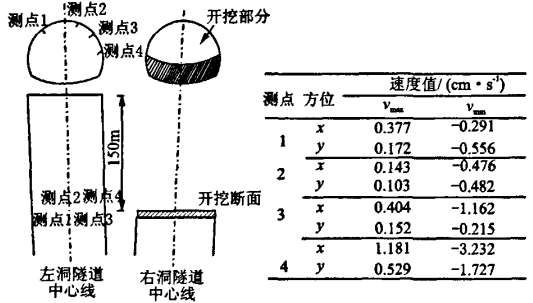
Fig. 10 Typical time course curves of blasting vibration

#### 3.3 爆破振动对隧道横断面影响分析

图11为后行隧道上、下台阶爆破开挖时,典型的先行隧道洞周测点布置图及各测点最大、最小峰值速度测试结果汇总。从测试结果可以看出,无论上台阶、下台阶开挖时,迎爆侧爆破振动影响较大,尤其是拱腰处X向速度最大。因此,迎爆侧应作为现场监控量测的重点,拱腰质点X向速度可以作为爆破设计的控制点。



(a) 上台阶开挖(测试里程K17+362,净距11.4 m)

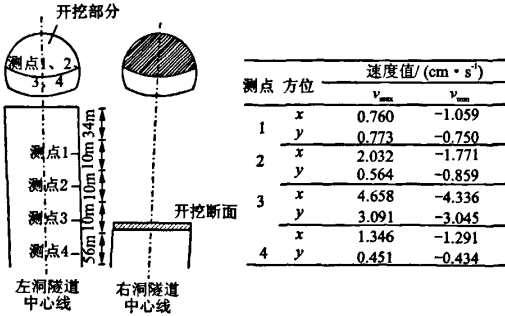


(b) 下台阶开挖(测试里程K17+340,净距12.5 m)

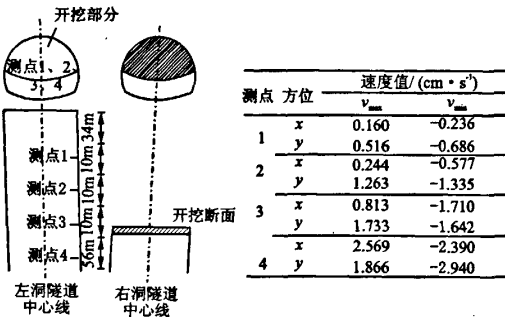
图11 后行隧道上、下台阶爆破开挖的测试典型结果  
Fig. 11 Typical blasting results of up-and-down stepped excavation to latter tunnel

### 3.4 爆破振动在隧道纵向分布情况

图12为掌子面前后10.5 m间隔的测点布置及测试结果。通过测试数据分析可知:



(a) 10 m 间隔(爆破里程K17+379,净距8.95 m)



(b) 间隔5 m(爆破里程K17+337,净距10.95 m)

图12 掌子面前后10.5 m间隔的测点布置及测试结果  
Fig. 12 Test results and measure points around tunnel working face (Interval 10, 5 m)

后行隧道爆破开挖对先行隧道与后行隧道掌子面相对断面的影响最大;先行隧道纵向影响较大的范围为开挖掌子面前后10 m(约1B, B为隧道开挖跨度)范围;爆破开挖对掌子面前方的影响较掌子面后方的影响程度大。

## 4 结论

通过以上的分析,得到以下重要结论,用以指导小净距隧道爆破施工:

(1)先行隧道初期支护及时封闭对降低爆破振动效果明显,因此,先行隧道初期支护宜及时封闭,后行隧道应在先行隧道初期支护完成后通过。二次衬砌宜在后行洞爆破影响区通过后浇筑;

(2)中岩墙岩墙加固宜采用注浆进行加固,改善围岩的物理力学特性;采用锚杆或预应力锚杆加固对降低爆破振动效果不明显;

(3)从控制小净距隧道爆破振动影响来讲,后行洞爆破开挖宜采用上、下台阶法。当采用侧壁导坑法开挖,考虑到增加临空面对减振的有利影响,宜先开挖远离中岩墙侧。

(4)对于低级别围岩(如V级围岩)宜采用机械开挖为主,辅以弱爆破;对于高级别围岩(如III级围岩)采用爆破施工,应严格控制后行洞的最大装药量和开挖进尺,必要时需采取减震措施,以减小爆破振动的影响。

(5)小净距隧道爆破开挖施工中,后行洞爆破开挖进尺不宜大于隧道净距的1/3,同时,掏槽眼布置宜远离中岩墙,使中岩墙处于应力波作用范围以外(120~150倍药包半径)。为了减小小净距隧道爆破开挖的相互影响,两隧道开挖掌子面之间的距离宜保持在1B以上。

(6)先行洞迎爆侧应是现场监控量测的重点部位,宜对先行洞相应断面前后1B范围内进行重点监控量测。

### 参考文献:

- [1] 原郭兵,孟庆明.板桥隧道洞口两超小净距隧道的施工[J].现代隧道技术,2002,39(1):54-57.
- [2] 王明年,刘智成等.软弱围岩3孔小净距平行浅埋隧道施工力学研究[J].铁道建筑技术,2002(4):11-14.
- [3] 王暖堂,陈瑞阳等.城市地铁复杂洞群浅埋暗挖法施工技术[J].岩土力学,2002,23(2):208-212.
- [4] 仇文革,张志强.深圳地铁重叠隧道近接施工影响的数值模拟分析[J].铁道标准设计,2000(6):41-42.
- [5] 陈宝林.宝成复线新须家河隧道控爆施工[J].世界隧道,1999(12):56-58.
- [6] 阳生权.小间距平行隧道爆破振动加速度测试[J].爆破器材,1999(12):1-4.
- [7] 刘慧,史雅语.招宝山超小净间距双线隧道控制爆破监测[J].爆破,1997(12):25-28.
- [8] 李夕兵,古德生.岩石冲击动力学[M].长沙:中南工业大学出版社,1994.
- [9] 周维垣.高等岩石力学[M].北京:水力水电出版社,1989.
- [10] 刘国华,王振宇.爆破荷载作用下隧道的动态相应与抗暴分析[J].浙江大学学报:工学版,2004(2):204-208.
- [11] HSIN Yulow, HONG Hao. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading[J]. Structural Safety,2001,23:157-178.

(责任编辑:徐金龙)

# 爆破振动对相邻隧道的影响性分析及控爆措施

作者: [姚勇](#), [何川](#), [周俐俐](#), [童庞](#), [YAO Yong](#), [HE Chuan](#), [ZHOU Li-li](#), [TONG Pang](#)  
 作者单位: [姚勇, YAO Yong \(西南交通大学, 地下工程系, 四川, 成都, 610031; 西南科技大学, 土木工程学院, 四川, 绵阳, 621002\)](#), [何川, HE Chuan \(西南交通大学, 地下工程系, 四川, 成都, 610031\)](#), [周俐俐, 童庞, ZHOU Li-li, TONG Pang \(西南科技大学, 土木工程学院, 四川, 绵阳, 621002\)](#)  
 刊名: [解放军理工大学学报 \(自然科学版\)](#) **ISTIC EI PKU**  
 英文刊名: [JOURNAL OF PLA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)  
 年, 卷(期): 2007, 8(6)  
 被引用次数: 3次

## 参考文献(11条)

1. 郭原兵, 孟庆明 [板桃隧道洞口两超小净距隧道的施工](#) [期刊论文]-[现代隧道技术](#) 2002(01)
2. 王明年, 刘智成 [软弱围岩3孔小净距平行浅埋隧道施工力学研究](#) [期刊论文]-[铁道建筑技术](#) 2002(04)
3. 王暖堂, 陈瑞阳 [城市地铁复叠洞群浅埋暗挖法施工技术](#) [期刊论文]-[岩土力学](#) 2002(02)
4. 仇文革, 张志强 [深圳地铁重叠隧道近接施工影响的数值模拟分析](#) [期刊论文]-[铁道标准设计](#) 2000(06)
5. 陈宝林 [宝成复线新须家河隧道控爆施工](#) 1999(12)
6. 阳生权 [小间距平行隧道爆破振动加速度测试](#) [期刊论文]-[爆破器材](#) 1999(12)
7. 刘慧, 史雅语 [招宝山超小净间距双线隧道控制爆破监测](#) 1997(12)
8. 李夕兵, 古德生 [岩石冲击动力学](#) 1994
9. 周维垣 [高等岩石力学](#) 1989
10. 刘国华, 王振宇 [爆破荷载作用下隧道的动态相应与抗暴分析](#) [期刊论文]-[浙江大学学报 \(工学版\)](#) 2004(02)
11. [HSIN Yulow, HONG Hao Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading](#) 2001

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [林从谋, 陈礼彪, 蒋丽丽, 郑宏利, LIN Congmou, CHEN Libiao, JIANG Lili, ZHENG Hongli 高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术研究 -岩石力学与工程学报2010, 29\(7\)](#)

以国内罕见的大帽山隧道为工程背景, 结合国内现有研究成果和规范, 研究新建隧道爆破施工时确保既有运营隧道安全稳定的控制技术, 以现代信息化施工理论为依据, 充分运用现场监控量测, 将既有隧道质点振动速度的临界值确定为20 cm/s, 对既有隧道爆破质点振动速度进行监测、回归分析和爆破参数的优化; 最终现场监测结果表明, 优化后的最大装药量等爆破参数设计合理, 该爆破设计在现阶段未对既有隧道安全产生较大影响; 同时, 运用数值模拟的方法, 得到中夹岩和既有隧道壁面的质点振动速度随时间的变化规律, 所得最大振速符合规范要求, 验证该次爆破设计是合理的。通过分析得出隧道肩部的振动速度是隧道底部的1.19~3.99倍, 隧道腰部的振动速度为隧道底部的1.10~3.11倍, 迎爆侧振动速度为背爆侧的5~10倍。该研究成果为今后类似隧道工程的爆破掘进工程在理论上和施工方法上提供参考借鉴。

2. 期刊论文 [龚建伍, 夏才初, 雷学文, GONG Jianwu, XIA Caichu, LEI Xuewen 浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析 -岩石力学与工程学报2010, 29\(z2\)](#)

以《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)为基础, 结合小净距隧道的特点, 对浅埋小净距隧道的围岩压力进行理论分析和探讨, 提出考虑隧道双洞先后施工过程的围岩压力分析模型和计算方法。通过算例分析围岩压力分布规律及其影响因素, 指出浅埋小净距隧道围岩压力分布的偏压特征, 即隧道内侧垂直压力大于外侧, 内侧侧压力小于外侧。最后通过工程监测实例对理论计算结果进行对比分析和验证, 表明理论计算公式和分析模型的合理性, 并提出以相对最不利的先行洞偏压状态围岩压力值进行支护参数设计的建议。研究工作可为今后围岩压力分析计算和隧道结构设计提供有益的借鉴和参考。

3. 期刊论文 [姚勇, 何川, YAO Yong, HE Chuan 并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究 -岩土力学](#) 2009, 30(9)

通过大量二维、三维数值模拟计算, 分析了围岩、净距、埋深等条件对小净距隧道爆破振动特性的影响, 研究了先行隧道不同支护体系、不同中岩墙加固措施及后行隧道不同施工方案等情况下, 小净距隧道中后行隧道爆破开挖对先行隧道的影响。根据研究结果, 提出了中岩墙加固采用注浆加固、先行隧道初期支护宜及时跟进并封闭、掏槽眼宜远离中岩墙以及开挖进尺不宜大于净距的1/3等小净距隧道爆破施工的控爆措施, 以供小净距隧道爆破开挖设计、施工借鉴。

4. 学位论文 [张冰 大跨度小净距隧道施工力学行为研究](#) 2008

隧道工程是一个经验性极强的学科, 长期以来都是凭经验设计施工。但对于大跨度小净距隧道, 可借鉴的设计与施工经验较少, 隧道的设计和施工遇到一些技术上的问题。本文以在建的二广高速公路西岸隧道为依托, 较为全面地介绍了监控量测的作用及实用方法, 并对监测到的支护结构位移和内力数据进行整理分析, 判断大跨度小净距隧道支护结构的稳定性。同时, 较为系统地介绍了位移反分析方法研究的历史与现状, 叙述了弹塑性问题的位移反分析理论, 研究了位移反分析在隧道工程中的应用。

(1)对现场监测的方法手段以及注意事项作了分析和总结, 并将量测的数据绘成曲线。通过对V级围岩监测曲线的分析表明, 在开挖过程中, 仰拱开挖会造成较大的围岩变形, 因此应尽量缩短仰拱的开挖封闭时间。当洞内出水较多时, 为防止拱脚岩层的软化造成拱架坍塌事故, 必要时应在导坑内加设



横向支撑。

(2)介绍了同济曙光反分析软件在隧道工程位移反分析中的运用及操作流程,并以围岩及支护体的已知参数和拱顶下沉实测数据为基础,对围岩进行反分析。结合各个施工步的监测数据,排除异常的监测数据。每次反分析都基于对应的施工步进行,并对其它施工步的位移进行预测,与实测的位移进行对比。通过多次的反演分析获取反演参数,反演参数取各次反分析结果的平均值。并用ANSYS建立大跨度小净距隧道的平面开挖模型,将反演得到的围岩弹性模量值E1和围岩加固弹性模量E2,运用反演正算法检验反分析结果,及应用反分析结果进行正分析。本文得出的最终反演参数正分析的结果基本符合后续施工步的实测位移,较好的验证了本文的反分析模型,位移反分析方法。

(3)对IV~V级对围岩变形及应力的分析。在IV级围岩的开挖过程中,围岩总的变形趋势为拱顶下沉,两侧边墙张开,而仰拱向上移动。最终在隧道上方形成一个U字槽,而两隧道间形成拱形。对于V级围岩,在导坑开挖时,由于临时钢架的与上部核心土的共同作用,有效的减小隧道上部围岩的变形。上部核心土开挖时,围岩变形很大,必要时,应在隧道拱顶处加设锚杆,以避免塌方事故的发生。

## 5. 期刊论文 [龚建伍,夏才初,郑志东,唐颖,GONG Jianwu,XIA Caichu,ZHENG Zhidong,TANG Ying 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)

结合福州国际机场高速公路鹤上三车道小净距隧道工程实践,对小净距隧道中间岩柱在爆破荷载作用下的振动响应进行相关监测,分析振动波在不同级别围岩、不同监测位置的传播及分布规律。研究结果表明:隧道中间岩柱边墙部位振动速度大于拱脚部位,且随着围岩质量提高,振动速度差别逐渐减小;最大振动速度出现在迎爆侧边墙测点的径向方向,可将其作为爆破振动的控制速度;当隧道净距为6 m左右(约0.35B)时,爆破振动对中间岩柱的影响范围为爆破面前后10~20 m,且随围岩质量提高,影响范围相应减小;爆破面前方中间岩柱受爆破振动影响要大于爆破面后方岩体,施工中宜加强该部位监测;同时,宜严格控制爆破总药量和单段最大药量,且分段爆破时,爆破段差应不小于100 ms。该研究结论可为类似条件下小净距隧道的爆破控制和现场监测提供借鉴与参考。

## 6. 学位论文 [谭坤 公路小净距隧道安全控制关键技术研究](#) 2010

我国地形、地质条件复杂,山岭区所占比重极大,高等级公路建设中遇到大量的隧道工程,由于特殊地质及地形条件的限制,隧道间距一般难以满足普通技术规范要求,因此需要采用小净距隧道及连拱隧道等特殊结构型式。但连拱隧道施工工艺相当复杂,工期长,也存在防水困难、投资较大等不足,而小净距隧道在这些方面较连拱隧道有较大的优势,因而被大量地采用,而且其设计和施工中的关键技术也逐渐成为研究的热点项目。<br>

本文以黄衢南高速公路小净距隧道工程为依托,以数值模拟计算为主要研究手段,以室内模型试验为辅助,两者相互比较、印证,主要对以下几个方面进行了研究。<br>

(1)通过模拟开挖不同围岩、不同净距、不同支护状态下的小净距隧道,确定了III~V级围岩下的小净距隧道最小合理净距范围。<br>

(2)对小净距隧道中岩墙及其上下附近的围岩进行了区域划分,并进行了定义。在此基础上,通过数值计算确定了中夹岩柱的力学特性,以及各级围岩不同净距下不同加固方式的效果,以此确定了小净距隧道的合理加固方式。<br>

(3)对小净距隧道施工安全控制关键技术、以及处于偏压及软硬不均地层中的小净距隧道进行了力学分析。<br>

(4)利用物理模型试验,对数值计算成果进行比较、印证。

## 7. 期刊论文 [刘明贵,张国华,刘绍波,李祺,LIU Minggui,ZHANG Guohua,LIU Shaobo,LI Qi 大帽山小净距隧道群中夹岩累计损伤效应研究-岩石力学与工程学报](#)2009,28(7)

小净距隧道的爆破施工不可避免地造成围岩累计损伤,岩体力学性能劣化。结合大帽山小净距隧道群的监控量测实践,基于动力损伤变量和围岩内部位移,研究小净距隧道群中夹岩的累计损伤效应。声波波速和围岩内部位移的监测结果表明,新建大帽山隧道的爆破施工已经导致中夹岩产生一定程度的损伤、破坏和推移,但围岩位移并没有持续变化失稳,岩体仍具有一定的强度;通过对新建隧道和原有隧道损伤范围的比较发现,双侧壁导坑法施工造成围岩的累计损伤范围比全断面法施工大近3倍,且循环爆破施工造成围岩的累计损伤更显著,所以围岩累计损伤效应是小净距隧道施工过程中必须高度重视的;上述面爆破施工一般使岩体内的裂纹被激活,声波波速显著下降,下断面爆破致中夹岩墙产生类墙体的振动,使岩体变松散滑动,围岩内部位移显著增大;并且围岩的滑动都是爆破时发生的,爆破停止滑动也就停止;在判断围岩的累计损伤程度和范围时,应充分考虑声波波速变化率和位移量,仅通过声波波速变化率可能做出误判;与爆源越近,围岩的损伤度和位移量越大,越远越小,且累计损伤效应呈现明显的非线性特征。

## 8. 学位论文 [何巍 小净距隧道围岩稳定性及中夹层力学行为研究](#) 2007

我国地形、地质条件复杂,山岭区所占比重极大,高等级公路建设中大量地遇到隧道工程,由于特殊地质及地形条件的限制,隧道间距一般难以满足普通技术规范要求,因此需要采用小净距隧道及连拱隧道等特殊结构型式。

本文采用平面和三维有限元数值分析方法针对小净距隧道设计、施工中围岩稳定性及中夹层力学行为等问题展开了研究。本文首先建立了九岭隧道的平面模型,模拟计算中首先简单介绍了所采用的DP屈服准则及隧道开挖卸载的方法-反转应力释放法,系统地介绍了隧道平面分析的基本步骤。通过计算,了解了毛洞开挖对围岩位移场与应力场的影响,确定对监测监控工作十分关键的危险点的位置,并得到了一些有用的结论,为隧道主洞的开挖提供了资料准备。

本文通过对平面小净距隧道无支护洞室进行计算分析得出了影响小净距隧道围岩稳定性的重要因素、隧道周边围岩应力分布状态和规律以及小净距隧道中夹层的受力变形特征。然后通过平面的开挖模拟计算了依托工程九岭小净距隧道三个有代表意义的围岩断面,得出了其开挖过程中的位移及应力场,支护结构的受力状况,以及隧道开挖完成后的最终塑性区。为九岭隧道的设计和施工提供了一定的指导。

本文通过结合小净距隧道三维开挖的模拟计算重点研究两隧道掌子面间距离的变化对小净距隧道结构特别是中夹层稳定性的影响,得出了小净距隧道空间相互影响效应以及小净距隧道两隧道掌子面间的合理距离。

本文以九岭隧道施工过程中的量测设计及实施为基础,由实际施工监控现场所获得的数据,依照已有经验,以及有限元稳定分析结果进行了反馈,得到了隧道在全断面开挖时围岩的变形和受力规律。通过对断面传感器数据的综合分析,与有限元结果比较,验证了有限元分析结果。

最后,本文总结了有限元计算和各种经验方法在隧道施工建设中的可行性及意义。结合九岭隧道工程与有限元模拟分析数据结果,指出了本文分析中存在的几个问题。本论文的研究成果为九岭隧道工程的现场施工建设提供了有效指导。

## 9. 期刊论文 [郑尚峰,杨其新,ZHENG Shang-feng,YANG Qi-xin 小净距隧道洞周变形特征数值分析-广东公路交通](#)2008(4)

采用二维弹塑性数值计算方法,对小净距隧道拱顶位移、水平收敛进行数值模拟计算,研究围岩级别、净距、开挖方法对隧道变形的影响,揭示小净距隧道洞周变形特征。研究结论可为小净距隧道的设计、施工提供一定的指导。

## 10. 学位论文 [刘明高 小净距隧道合理净距及其施工方法研究](#) 2007

本文选题依托京承三期高速公路实际隧道工程,通过理论分析及数值模拟方法,探讨了具体工程条件下小净距隧道的合理施工方法,研究了在合理施工方法下的小净距隧道净距优化等问题。

通过建立隧道施工有限元力学模型,对小净距隧道在三种开挖方法下的力学特性进行数值模拟。通过对隧道围岩应力、应变特征、围岩位移特征及支护结构受力情况等进行分析,给出了IV级围岩段、一定埋深条件下小净距隧道的合理施工方法。

结合小净距隧道合理施工方法的分析结果,对采用合理施工方法时,一定埋深的小净距隧道在不同净距下的力学特性进行数值模拟,给出了IV级围岩条件下小净距隧道的合理净距值。

## 引证文献(2条)

1. 禹海涛,柳献,袁勇,王庆国,程国荣,吴晓峰 [地下墙施工爆破对既有隧道的振动测试与分析](#)[期刊论文]-爆炸与冲

击 2009(6)

2. [YU Guangxi](#), [YU Haitao](#), [LIU Xian](#), [YUAN Yong](#), [WANG Qingguo](#), [CHENG Guorong](#), [WU Xiaofeng](#) [Test and Analysis of an Existing Tunnel Vibration Induced by Blasting Construction of Diaphragm Wall](#)[期刊论文]-[天津大学学报（英文版）](#) 2008(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jfjlgdxxb200706026.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jfjlgdxxb200706026.aspx)

授权使用: 武汉理工大学(whlgdx), 授权号: e51b69d7-1c36-4899-ab67-9e920144fa46

下载时间: 2011年2月22日