

文章编号: 0451-0712(2005)11-0212-05

中图分类号: U455.41

文献标识码: A

董家山隧道小净距段爆破控制研究

姚 勇^{1,2}, 何 川¹, 晏启祥¹, 李玉文³

(1. 西南交通大学地下工程系 成都市 610031; 2. 西南科技大学土木工程学院 绵阳市 621002;

3. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 成都市 610041)

摘 要: 结合都汶高速公路董家山隧道小净距段的实际情况,应用数值模拟方法,对小净距段在爆破荷载作用下的相互影响问题进行了研究。结果表明:在隧道爆破施工中,应对迎爆侧进行重点监控,采用合理的开挖和加固方式可有效降低爆破施工对先建隧道的不利影响。研究结论为该隧道小净距段的爆破设计、施工及现场监控量测提供指导,同时,为类似小净距段隧道提供参考。

关键词: 隧道; 小净距; 爆破控制; 数值模拟

在公路、铁路、市政以及水利等工程建设中,相邻隧道间距相对较小的小净距隧道结构型式越来越多见。广州、深圳、南京、北京等地铁修建中均遇到小净距隧道情况,广州二号线越秀公园、江南新村车站隧道就遇到 3 孔隧道净距仅为 2.7 m,重庆市轻轨二号线中遇到相邻隧道岩体厚度仅为 4.0 m 的情况。在铁路隧道方面,增建的宝成复线中遇到两隧道之间的中墙厚度仅为 1.902~2.323 m,新建渝怀铁路中板桃隧道进口段 I、II 线两隧道开挖净距仅为 6.14 m。在公路隧道中,深圳梧桐山隧道、宁波招宝山隧道、京福高速金旗山隧道和里洋隧道、厦门仙岳山隧道、泉州市丰泽街隧道以及都汶高速董家山隧道等工程中,均出现小净距情况,金旗山隧道中夹岩柱最小净宽为 5.079 m,招宝山隧道两隧道间净距仅为 2.98~4.20 m。

因此,从上述情况看来,对小净距隧道相互影响问题的研究变得尤为突出。鉴于地质条件的复杂多变、理论解析的数学困难以及现场试验、模型试验的费用昂贵,在众多研究方法中,数值模拟分析不失为一种优选方案。本文结合在建中的董家山隧道,利用数值模拟的方法,对后修建隧道爆破开挖对先行修建隧道的影响进行了分析,研究了先修隧道的初期支护和岩柱加固对爆破的影响,以及后修建的开挖方式选取和控制爆破设计等问题。

1 工程概况

董家山隧道位于都江堰~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。隧道汶川端(出口段)左右线分别位于为 3 000 m 和 2 000 m 的平曲线上,并与 1 500 m 长的混江大桥相接,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~II 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 8.63~12.36 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 12.82~21.86 m,隧道埋深为 73.4~121.8 m。隧道小净距段布置见图 1 所示。

2 有限元模型的建立

2.1 单元及边界条件的选取

本次计算材料采用线弹性材料,围岩采用平面应变单元 Plane42,初期衬砌采用梁单元 Beam3,系统锚杆以及预应力锚索采用 Link1 杆单元模拟,围岩加固注浆以及小导管注浆采用提高围岩类别进行模拟。根据新奥法的施工原理,二次衬砌作为强度储备,在本次计算中未考虑二次衬砌的影响。

为了减小边界效应的影响,左、右及下边界取到 3~4 倍隧道的开挖直径,上边界取为自由边界,左、

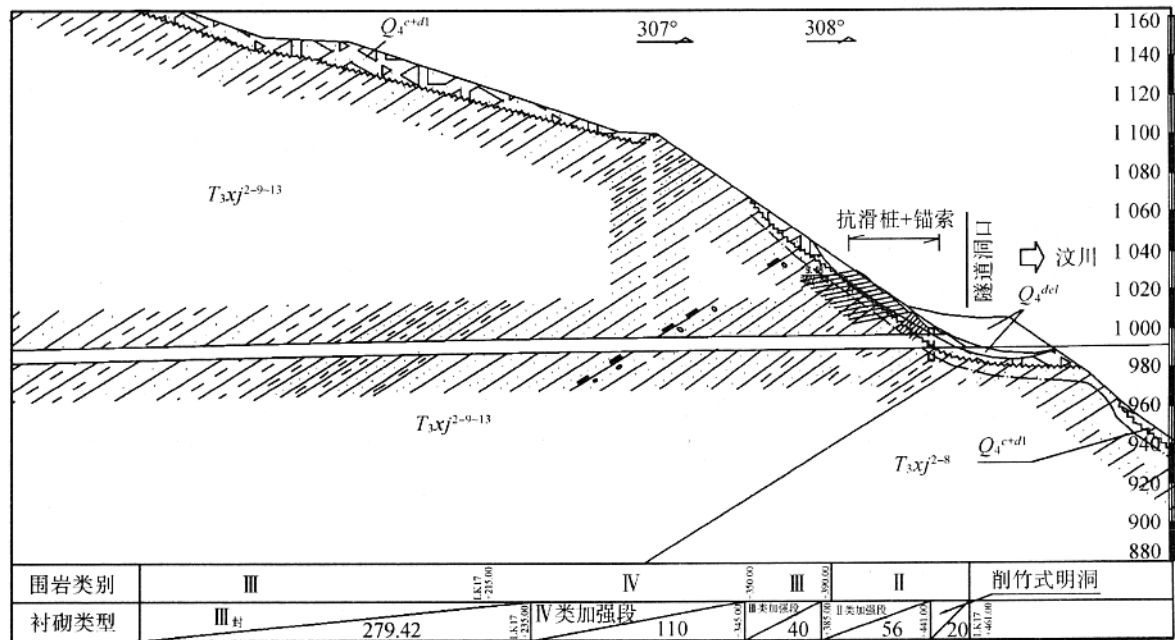
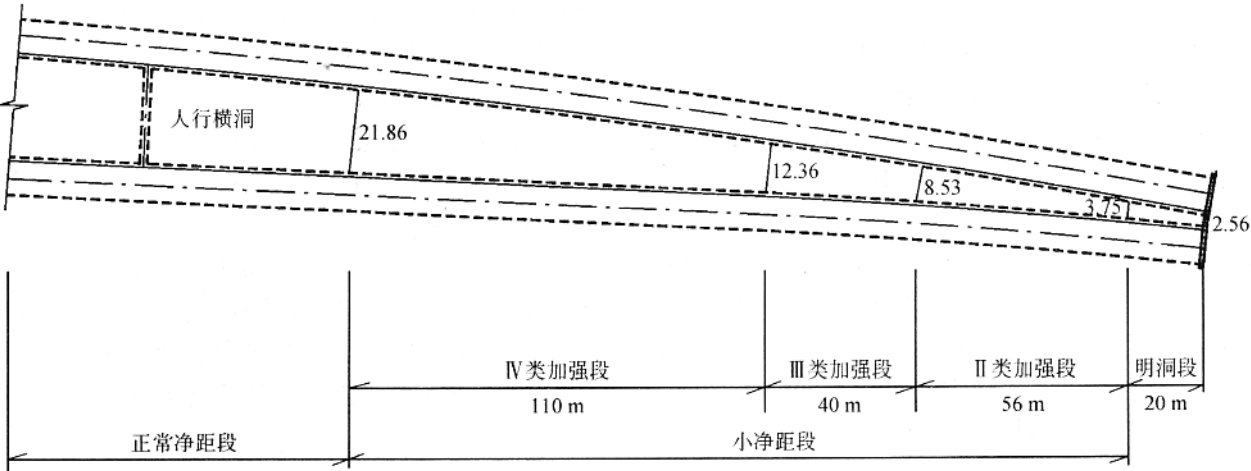
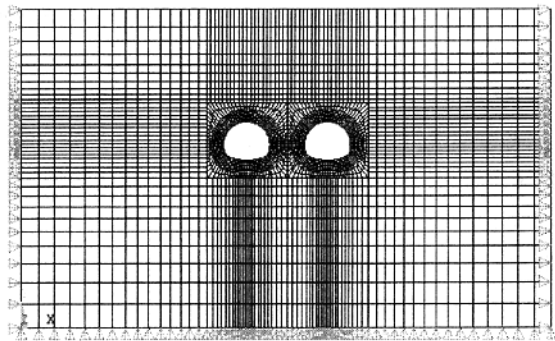
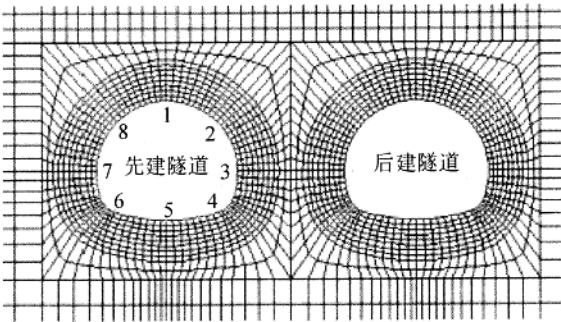


图 1 董家山隧道小净距段布置

右边界及下边界取为人工边界(无反射边界)。整个 模型及隧道周边网格如图 2 所示。



(1) 整体模型



(2) 洞周详图

图 2 有限元分析模型

2.2 材料的选取

本次计算围岩主要考虑Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类,其力学参数指标参照《公路隧道设计规范》以及《铁路隧道新奥法指南》选取,见表1。初期支护采用C25 钢钎维混凝土,弹性模量取 2.55×10^4 MPa,泊松比取0.23,系统锚杆采用 $\phi 25$ 中空注浆锚杆,Ⅱ类围岩中夹岩柱注浆加固采用围岩类别从Ⅱ类提高到Ⅲ类。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[9],在不考虑岩石破坏后的形态和应变率低于 $10^3/s$,假定动、静态本构方程可取相同形式,因此,在本次计算中仍采用材料的静力指标。

表1 围岩物理力学指标

围岩类别	弹性模量 E	泊松比 μ	容重 γ	内聚力 c	内摩擦角 φ
	10^4MPa		kN/m^3	MPa	($^\circ$)
Ⅱ	0.06	0.38	19	0.08	27
Ⅲ	0.2	0.34	23	0.2	30
Ⅳ	0.7	0.25	25	1.3	38

2.3 荷载的确定

爆破荷载简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载,见图3所示,假定作用在隧道开挖边界面上。荷载上升段、下降段作用时间可以参考文献利用公式计算,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,为了了解荷载结束后质点情况,计算总持续时间取为0.5 s。

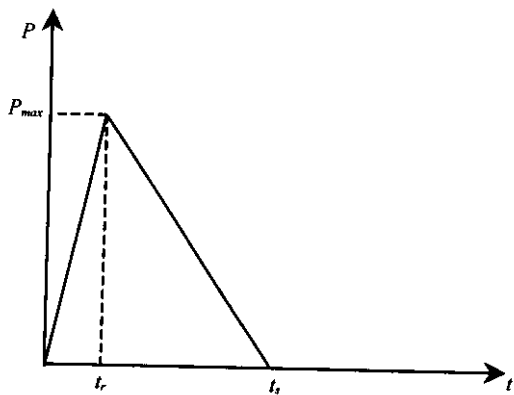


图3 爆破荷载历程

爆破荷载的应力峰值 P_{\max} 采用如下经验公式求解:

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^2} - 0.803 \quad 4 \quad (\text{kPa})$$

$$Z = R^* / Q^{1/3}$$

式中: Z 为比例距离; R^* 为爆心至荷载作用面的距离,m; Q 为炸药量,kg,齐发爆破时取总装药

量,分段起爆时取最大段装药量,最大段装药量可以采用萨道夫斯基公式进行初步估算。

$$Q = R^3 (V_{kp} / K)^{3/\alpha}$$

式中: R 为测点至爆心的距离,m; K 、 α 为与爆破条件、岩石特性等有关的系数; V_{kp} 为介质质点的控制振动速度。

在本次计算中,根据我国《爆破安全规程》(GB6722-86)关于爆破地震不产生破坏的安全震速标准对交通隧道的要求,控制震速为15 cm/s。爆心假定为后修隧道的中心,其计算结果见表2。

表2 计算组合情况

围岩类别	计算工况	埋深 m	净距 m	最大段装 药量/kg	荷载 峰值/kPa	先行隧道 状况	后行隧道 开挖方式
Ⅱ	1	30	4	13.83	628.76	毛洞	全断面
	2						上下台阶
	3					初期支护 + 岩柱注浆	全断面
	4						上下台阶
	5						全断面
	6						上下台阶
Ⅲ	1	50	9	44.97	1 701.78	毛洞	全断面
	2						上下台阶
	3					初期支护	全断面
	4						上下台阶
Ⅳ	1	80	12	100.61	3 401.36	毛洞	全断面
	2						上下台阶
	3					初期支护	全断面
	4						上下台阶

3 数值计算及结果分析

3.1 计算原理

计算利用直接积分的Newmark 方法,积分参数选取 $\alpha=0.25$, $\delta=0.5$,计算是无条件稳定的。结构整体的动力平衡方程如下:

$$[M]\{U_1\} + [C]\{U_2\} + [K]\{U_3\} = \{f\}$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 和 $[K]$ 分别为阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{U_1\}$ 、 $\{U_2\}$ 、 $\{U_3\}$ 分别是加速度、速度和位移向量; $\{f\}$ 是外力向量,其中阻尼采用瑞利阻尼。

3.2 数值计算组合

考虑到董家山隧道小净距段的实际情况,净距取Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩段净距较小值,分别为4 m、9 m、12 m。另外大量的计算分析发现,当隧道埋深远比

岩柱厚度大时,埋深对隧道周边质点震速影响不大,本次计算埋深Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩段分别取为30 m、50 m、80 m。对于后行隧道的开挖方式分别考虑全断面开挖和上、下台阶开挖两种情况。对于先行隧道的状况,Ⅱ类围岩考虑无支护、初期支护、初期支护+岩柱注浆3种情况;Ⅲ、Ⅳ类围岩考虑无支护和有初期支护2种情况。详见表2。

3.3 爆破控制标准

早期爆破地震安全判据,通常以单独的爆破地震强度因子(质点振动位移、速度、加速度)来描述,例如Langfors等(1973年)提出无衬砌隧道内控制岩石下落和新裂缝形成的标准,Edwards和Northwood(1960年)、美国矿物局(1972年)和其他一些人提出以质点速度作为爆破控制标准,英国矿山采用最大振幅作为安全极限。后来,有很多国家提出了多因素综合控制标准,如美国、德国、瑞典等国综合考虑振动速度和频率指标,提出了著名的USBM、OSMRE标准和DIN4150爆破振动安全标准,英国人克伦道尔还引用能量比作为破坏判据;美国人狄克曼提出,在不同的频段,宜用不同的物理量来作为破坏判据,我国顾毅成提出爆破地震烈度表的方法,杨年华等人提出爆破安全判据中应考虑振动幅值、频率、持续时间和次数的影响。

目前,在我国通常仍采用最大质点振动速度作为对爆破控制的标准,根据我国爆破安全规程的规定,本次计算沿先行隧道周边典型位置选取8个点(见图2),以各点的质点峰值振动速度作为计算控制标准。

3.4 计算结果及分析

Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩计算控制点的速度峰值计算结果分别见表3、表4、表5。

(1)在小净距隧道的施工中,后行修建隧道爆破开挖对先修隧道将产生极大的影响,影响最大的部位是先修隧道的迎爆侧。在本次计算中,迎爆侧峰值速度是远离爆破侧峰值速度的几倍到几十倍。另一方面,水平方向的峰值振动速度远大于竖向峰值速度,这种趋势与现场测试结果基本相符。说明采用该种数值方法进行模拟是可行的,也说明在施工过程中,迎爆侧是爆破开挖控制的薄弱部位,应重点对迎爆侧水平方向速度进行监控。

(2)通过计算分析,在小净距隧道后建隧道的开挖中,采用上下台阶开挖与采用全断面开挖相比对降低爆破振动峰值速度较为有利,从计算结果来看,

表 3 Ⅱ类围岩计算结果汇总										cm/s
状态	开挖方式	监控点	1	2	3	4	5	6	7	8
毛洞	全断面	V_x	5.42	17.81	28.52	11.89	4.84	1.81	1.45	1.46
		V_y	3.91	4.91	1.57	4.32	3.46	2.22	0.47	2.66
	上下台阶	V_x	4.68	14.13	14.03	10.34	4.45	1.70	1.29	1.12
		V_y	2.52	3.27	6.20	3.71	3.11	1.83	0.70	1.88
初期支护	全断面	V_x	6.71	12.58	24.32	8.13	6.07	4.34	2.11	3.44
		V_y	3.28	2.74	1.40	5.10	2.35	0.86	1.39	1.39
	上下台阶	V_x	5.10	10.35	12.17	6.82	4.91	3.56	1.35	2.67
		V_y	1.94	4.33	4.31	3.21	2.05	0.81	0.93	1.10
岩柱加固	全断面	V_x	5.97	12.33	14.11	7.86	5.66	4.05	1.94	3.02
		V_y	2.73	1.23	1.32	2.86	1.43	0.77	0.46	1.07
	上下台阶	V_x	4.69	10.12	7.68	6.35	4.63	3.34	1.29	2.42
		V_y	1.79	2.58	3.04	2.65	1.92	0.87	0.94	0.92

表 4 Ⅲ类围岩计算结果汇总										cm/s
状态	开挖方式	监控点	1	2	3	4	5	6	7	8
毛洞	全断面	V_x	5.67	12.61	18.47	10.09	4.97	1.92	2.01	2.11
		V_y	3.17	2.91	1.34	2.92	3.05	1.77	0.68	2.15
	上下台阶	V_x	4.40	8.03	9.43	7.46	4.17	1.77	1.83	1.79
		V_y	2.36	3.96	6.28	4.41	3.29	1.38	1.02	2.05
初期支护	全断面	V_x	6.25	8.17	15.61	8.22	5.37	3.19	2.20	3.79
		V_y	3.64	2.23	1.82	3.26	2.46	0.78	1.27	2.31
	上下台阶	V_x	4.23	5.78	8.00	5.93	4.06	2.35	1.80	2.67
		V_y	3.00	5.09	4.22	3.72	2.65	1.44	1.67	1.56

表 5 Ⅳ类围岩计算结果汇总										cm/s
状态	开挖方式	监控点	1	2	3	4	5	6	7	8
毛洞	全断面	V_x	7.12	14.81	18.00	10.63	5.63	2.86	3.21	3.57
		V_y	3.76	3.29	2.69	3.67	3.90	2.67	1.81	2.75
	上下台阶	V_x	6.97	12.68	12.57	9.24	6.54	3.96	3.05	3.18
		V_y	4.49	7.38	9.24	6.46	4.42	2.60	2.18	2.85
初期支护	全断面	V_x	7.24	13.79	10.06	17.32	5.84	3.24	3.28	3.83
		V_y	3.39	2.60	2.63	3.00	3.50	2.36	1.72	2.41
	上下台阶	V_x	6.78	11.78	12.03	8.44	6.12	3.98	3.06	3.36
		V_y	4.67	7.42	8.41	6.60	4.35	2.44	2.17	2.81

在相同药量、相同净距、相同支护条件下,上下台阶开挖最大振动速度比全断面开挖减小约50%左右。

(3)先行修建隧道初期支护的施设,对隧道控爆

有一定的效果,尤其对低类别围岩效果较为明显;在后建隧道爆破开挖前,先建隧道应进行支护,形成封闭结构,有利于减小爆破振动的影响。

(4)从对Ⅱ类围岩岩柱进行注浆加固的计算结果(表3)来看,当围岩类别较低,岩柱厚度较小时,采用对岩柱进行注浆加固,提高围岩的参数,对减小质点爆破峰值速度效果十分显著。当围岩类别较低,岩柱净距较小,宜对中夹岩柱进行注浆,同时,可以扩大岩柱加固范围。

4 结语

(1)通过本次计算发现,先修隧道迎爆侧质点水平振动速度最大,是爆破控制的薄弱部位,在施工过程中应加强该部位的监控量测。

(2)对于低类别围岩,岩柱厚度较薄时,对岩柱进行注浆,提高围岩参数,可以较大幅度降低先修隧道峰值振速,对爆破控制较为有利。因此,建议在董家山隧道小净距Ⅱ类围岩段,尤其是挂洞门施工时,宜采用机械开挖,配以微量爆破,同时,宜对岩柱进行注浆加固。

(3)对于小净距隧道后行修建隧道,宜采用上下台阶法进行施工,同时要求先修隧道初期支护及时跟上,当围岩类别较高岩柱较厚时,在有有效的施工措施和丰富的经验保证条件下,也可以考虑采用全断面开挖。

(4)通过本次计算,董家山隧道小净距段原爆破设计方案中的Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩最大段药量15.4 kg、30.8 kg、64.8 kg,对于Ⅲ、Ⅳ类围岩是安全的;对于Ⅱ类围岩对岩柱应加强加固,适当减少药量。

(5)采用数值计算来模拟爆破荷载的相互影响,本文采用的方法是可行的,但在材料动力参数的取

值、爆破荷载峰值选取、荷载作用时间以及边界效应影响等方面应进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈卫军,等. 近距离交叠隧道研究现状及评析[J]. 铁道建筑技术,2002,(2).
- [2] 陈宝林. 宝成复线新须家河隧道控爆施工[J]. 世界隧道,1999,(12).
- [3] 原郭兵. 板桃隧道洞口段两超小净距隧道的施工[J]. 现代隧道技术,2002,(2).
- [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).
- [5] 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).
- [6] 胡元芳. 小线间距城市双线隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,(9).
- [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).
- [8] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. ASCE, Eng. Mech. Div. 95, 1969, (4).
- [9] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京:水力电力出版社,1991.
- [10] 杨永琦. 矿山爆破技术与安全[M]. 北京:煤炭工业出版社,1991.
- [11] 齐景岳,刘正雄,等. 隧道爆破现代技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [12] Hsin Y L, Hong H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading[J]. Structural safety,2001,(23).
- [13] 张志毅,王中黔. 交通土建工程爆破工程师手册[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [14] 熊代余,顾毅成. 岩石爆破理论与技术新进展[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.

A Study on Blasting Control of Section with Small Clear Spacing of Dongjiashan Twin Tunnel

YAO Yong^{1,2}, HE Chuan¹, YAN Qi-xiang¹, LI Yu-wen³

(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;

3. Highway Planning, Survey and Design Institute, Department of Communications of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: On the basis of the practical situation of the section with small clear spacing of the Dongjiashan Twin Tunnel on the Du-Wen Expressway, the mutual influence resulted from the blasting construction of the section with small clear spacing of the twin tunnel is studied by means of numerical

文章编号: 0451-0712(2005)11-0217-08

中图分类号: U455.2

文献标识码: B

桐油山连拱隧道施工技术

李长德

(中铁五局五公司 柳州市 545006)

摘 要: 柳州市南二环路桐油山隧道采用双连拱结构,具有大跨度、浅埋偏压、溶洞发育等特点,浅、深埋地段分别采用双侧壁-中导洞、中导洞-正台阶法分部开挖,提出了受浅埋偏压及断层影响时确定左、右隧施工顺序的原则。在大型粘土充填溶洞地段采用左、中、右钢筋混凝土地基梁跨越处理,针对双连拱隧道易出现渗水的通病,总结了一套实用的防水施工方法。介绍了简易自制的钢拱架冷弯设备,并对中墙顶部回填施工、受力体系转换进行了介绍。

关键词: 双连拱隧道; 施工; 浅埋偏压; 工字钢支撑; 地基梁; 溶洞处理

按照《公路隧道设计规范》(JTJ 026-90)第2.6.3条,高速公路一般应设计为上、下行分离的两座独立隧道,隧道之间的最小净距应保证相邻隧道分别处于对方围岩压力影响和施工影响范围之外。最小净距根据围岩类别、断面尺寸等因素确定为 $1.5B\sim5.0B$ (B 为隧道开挖断面宽度),一般达30 m以上。如图1所示,两座独立隧道相互靠拢,内侧两混凝土边墙合并成为混凝土中墙,独立双洞之间所夹的岩柱被混凝土取代,就形成了“m”形连拱隧道结构。连拱隧道宽度基本与整体式路基一致,可轻而易举地实现与洞外线路的顺畅连接,减少占地。节约土地是我国的基本国策。为避免与民争地,避免深挖路堑、保护环境,20世纪90年代以来,双连拱隧道得到较大发展,各地均有应用,预计今后还会增加。我国单洞隧道技术已十分成熟,连拱隧道作为一种新型结构形式,相对单洞隧道,其结构复杂,可供借鉴的设计和施工经验都不多,对其认识尚在摸索之中,目前设计、施工规范均未有连拱隧道的规定,双连拱隧道施工技术有待于隧道工程技术人员不断总结积累,使双连拱隧道这一新型结构在公路建设中发挥更大的作用。

收稿日期: 2005-04-29

1 工程概况

桐油山隧道为广西柳州市南二环路新建的1座双连拱隧道,隧道全长465 m,开挖断面宽27.66~28.56 m,高8.22~8.92 m。内轮廓采用直中(边)墙、三心圆拱圈形式,上下行单向分离式交通。

隧道地处碳酸盐岩地区,岩溶地貌特征明显。进口端180 m隧道轴线基本与山体等高线平行,沿山体坡脚线延伸,该地段原为低凹的槽谷,目前地表为开山废渣堆积而成,覆盖层由上至下分为堆积层(厚约5~10 m)、强(弱)风化岩层(厚约3~10 m)。隧道左侧有条F2断层破碎带。破碎带走向与隧道轴线呈 $50^{\circ}\sim60^{\circ}$ 夹角,东端距隧道最近,至隧道轴线约为30 m。该断层上窄下宽,宽约为4~14 m,倾角约为 80° ,倾向北。破碎带内为粘土、石块填充。受该破碎带影响,围岩节理裂隙比较发育,该段属典型的浅埋偏压隧道。出口端285 m隧道,斜向穿越桐油山主峰,岩层走向为北东 $5^{\circ}\sim20^{\circ}$,倾角 $10^{\circ}\sim16^{\circ}$,为稳定的单斜岩层构造。该段地层岩性为白云岩、灰岩、白云质灰岩,岩层完整,结构致密,质硬且脆,围岩地质条件较好,见图2所示。

桐油山及两侧地势较高,地表未见有地下水出

simulation. The results show that reasonable excavation and reinforcement can effectively reduce disadvantageous influence caused by blasting excavation on the pre-constructed tunnel, and the in-site monitor should be focused on the near blast side. Conclusions can offer helpful reference to blasting control design, blasting excavation and in-site monitor of similar twin tunnel with small spacing.

Key words: tunnel; small clear spacing; blasting control; numerical simulation