

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0537-05

近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响

叶培旭, 杨新安, 凌保林, 张业炜

(同济大学 城市轨道交通与铁道工程系, 上海 200092)

摘 要: 结合南山下隧洞下穿温福客运专线钱仓山隧道工程, 实时监测近距离交叉隧洞爆破施工对既有隧道的振动影响。实测结果表明, (1) 迎爆面位置影响既有隧道断面的爆破振动速度分布; 震源距离测点大于 30 m 时, 距离是爆破振动的主要因素; 震源距离测点小于 30 m 时, 主要影响因素则为装药量与距离。(2) 岩体越坚硬完整, 爆破振动波传播衰减越慢。采用导洞先行预留光面爆破、导洞爆破掏槽眼和周边眼及底板眼分开起爆、控制最大段装药量等措施, 可有效地降低爆破振动影响, 控制其对钱仓山隧道的影响, 对类似工程有借鉴作用。

关 键 词: 铁路隧道; 交叉隧道; 爆破振动; 振动速度; 监测

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Vibration effects on existing tunnel induced by blasting of an adjacent cross tunnel

YE Pei-xu, YANG Xin-an, LING Bao-lin, ZHANG Ye-wei

(Department of Urban Track and Railway Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the engineering that Nanshanxia Tunnel down-traversing Qiancangshan Tunnel of Wen-Fu Passenger Dedicated Line, the vibration effects on the existing tunnel caused by blasting of an adjacent cross tunnel have been monitored. The results of the tests show that: the position of blasting surface affects velocity distribution of the cross-section of existing tunnel; when the distance between vibration source and measuring points is more than 30 m, the main influence factor of vibration is distance; while it is less than 30 m, the main factors are the amount of dynamite and distance; the harder and more complete the rock is, the slower the attenuation of the propagation of blasting vibration wave is. Measures such as pilot tunnel blasting in advance of smooth blasting; pilot tunnel blasting that the initiation of cutting holes, periphery holes and bottom holes are separated; and controlling maximum explosive volume for single segment can weaken the impact of blasting vibration effectively and control the vibration effects on Qiancangshan Tunnel; it can be a reference for similar projects.

Key words: railway tunnel; cross tunnel; blasting vibration; vibration velocity; monitoring

1 前 言

近年来, 随着交通与其他基础设施建设的发展, 平行、交叉小间距隧道工程增多, 当两隧道距离较近时, 由于爆破振动影响和开挖引起围岩应力重分布, 新建隧道在施工时可能导致既有隧道围岩与衬砌结构的变形甚至损坏。可见, 监测隧道爆破引起的振动对保证顺利施工和既有隧道的安全而言十分必要。

本文结合南山下隧洞下穿温福客运专线钱仓山隧道工程, 实时监测近距离交叉隧洞爆破施工对既有隧道的振动影响。根据爆破振动监测结果, 指

导隧道钻爆设计, 采用导洞先行预留光面爆破等技术措施有效地降低了爆破振动影响, 实现信息化与安全施工, 对类似工程有一定借鉴作用。

2 工程概况

南山下隧洞是温州市珊溪水利枢纽平苍引水工程的隧道之一, 下穿温福铁路钱仓山隧道, 平面上接近垂直交叉, 夹角约为 83.4° , 如图 1 所示。两隧道围岩最小厚度为 14.4 m。钱仓山隧道与南山下隧洞轴线交点前后 40 m 段围岩级别为 II、III 级, 且山体完整性较好^[1]。

收稿日期: 2009-11-17

第一作者简介: 叶培旭, 男, 1985 年生, 硕士研究生, 主要从事轨道交通安全工程研究。E-mail: 2010ypx@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨新安, 男, 1964 年生, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事轨道交通安全工程方面的研究。E-mail: xyang@tongji.edu.cn

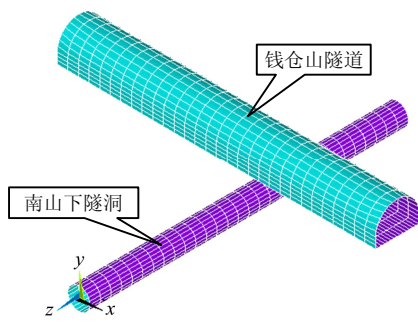


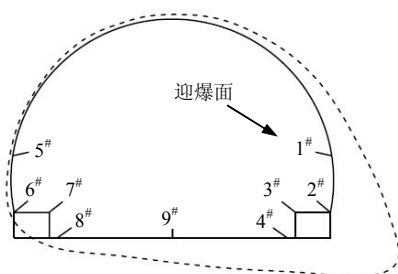
图1 钱仓山隧道与南山下隧洞空间关系

Fig.1 Spatial relationship between Qiancangshan tunnel and Nanshanxia tunnel

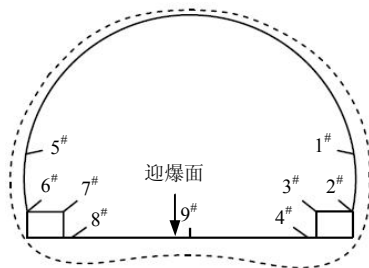
南山下隧洞爆破施工期间,温福铁路进入铺轨与电气化设备安装调试等通车前的施工阶段。为保证钱仓山隧道结构安全和南山下隧洞出口段山体稳定,对爆破振动进行监测,控制爆破危害效应的破坏影响。

3 爆破振动效应影响因素分析

爆破多采用质点峰值振速进行控制,即以实测质点振动速度小于或等于允许质点振动速度为依据。监测布置图如图2所示。在迎爆面的预测点布设传感器,并根据实测情况,随时调整监测断面和监测点^[2]。



(a) 隧道右侧为迎爆面



(b) 隧道底板为迎爆面

图2 钱仓山隧道爆破振动速度分布图

Fig.2 Blasting vibration velocity distribution of Qiancangshan Tunnel

振动速度实测数据分析结果表明,影响爆破振动强度的主要因素有爆破条件(装药量和爆破介质临空面的夹制条件等)、爆心距、地质条件和迎爆面。

3.1 迎爆面

实测数据表明,隧道右侧为迎爆面时,2#测点振动速度值很大且易出现最大值;隧道左侧为迎爆面时,6#测点振动速度值很大且易出现最大值;隧道底板为迎爆面时,8#和4#测点振动速度值较9#测点大,可以达到2~3倍,即使是震源位于9#位置的正下方(震源与9#测点距离最近),9#测点的振速还是较小。

综合其他测点振动速度的分析可以得到隧道断面振动速度分布图,见图2(左侧迎爆时的振动速度分布图大致与图2(a)成镜像关系)。由此可知,随着迎爆面位置的变化,隧道断面振动速度分布也随之变化。

3.2 爆心距、装药量

2月20日监测时震源在2#测点的正下方,2月24日到达两隧道轴线交叉处。

如图3所示,12~19日,随着爆心距的减小,最大振速呈逐步增大的趋势,总装药量及最大装药量变化对振速变化趋势影响不大;21~23日,随着爆心距的增加,振动速度呈逐步减小的趋势;13日与14日(第1炮次,爆心距约36 m)2 d监测炮次的总装药量及最大装药量差不多,爆心距相差约1.8 m,最大振动速度差不多。而类似情况下,20日(第1炮次,爆心距约25 m)的最大振动速度接近19日的2倍,说明震源与测点的较近时爆心距对振动速度影响明显,20日第2炮次的总装药量较前几炮次明显增加,最大装药量也增加,振动速度增幅将近1倍,说明此时装药量对振动速度影响较大^[3]。

综合其他监测数据得到,震源距离测点大于30 m时,振动主要影响因素是爆心距,距离越小,振动速度越大,装药量影响不明显;震源距离测点小于30 m时,振动主要影响因素是装药量和爆心距,装药量越多,距离越小,振动速度越大。

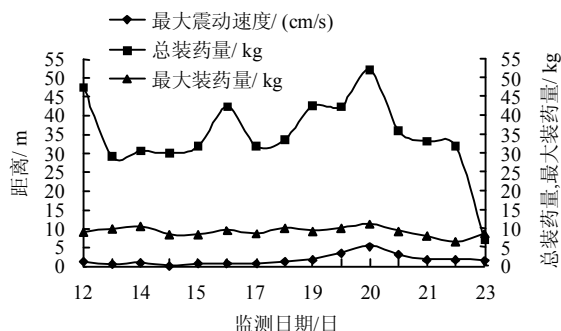


图3 DK+861断面2#测点

Fig.3 The measuring point No.2 of DK+861 cross-section

3.3 介质夹制作用

实测振速波形图（图 4）表明，爆破振速最大峰值多数出现在导洞爆破阶段，光爆层爆破振速峰值相对较小。

导洞爆破是在一个自由面的情况下爆破，岩石夹制作用较大^[4]，爆破时总能量转化为地震波的能量较大，导洞爆破时质点振动速度较非导洞爆破时振动速度大。

光爆层爆破时，其质点振动速度较导洞爆破时明显减小，监测数据表明，一般都小于 2 cm/s，这主要是由于光爆层爆破是在导洞爆破后进行，增加了 1 个自由面，即在 2 个自由面的情况下爆破，岩石夹制作用比导洞爆破时明显减小，爆破时岩石的能量主要朝 2 个自由面方向作用，爆破振动速度明显降低。

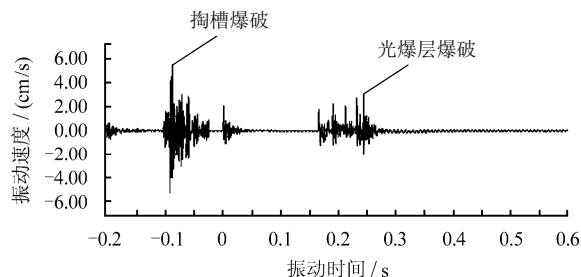


图 4 2[#]测点监测振动波形

Fig.4 Waveform graph of measuring point No.2

3.4 地质条件影响

表 1 列出了不同断面 2[#]测点部分振动速度。期间震源离 DK49+863/862 断面较近，但同一次振动爆破下，DK49+861/860 断面（坚硬岩层）振动速度要比 DK49+863/862 断面（风化岩层）振动速度值大，可见爆破振动与震源所在地质条件有关。

表 1 不同断面 2[#]测点振动速度
Table.1 Vibration velocity of measuring point No.2 of different sections

监测时 / 日-时	不同断面里程振动速度/(cm/s)			
	DK49+863	DK49+862	DK49+861	DK49+860
20-06:00		1.967	3.665	2.478
20-20:00	2.936	2.590	5.451	5.482
21-11:00	3.069	0.084	3.153	3.815
21-18:00	2.330	1.688	2.115	3.578
22-16:00	1.668		2.095	2.399

4 爆破振动速度数据拟合

《爆破安全规程》^[10]规定的爆破振动速度经验公式为

$$V = K(Q^{1/3} / R)^{\alpha} \quad (1)$$

式中： V 为振动峰值速度（cm/s）； R 为爆心距（m）； Q 为炸药量（kg）； α 为衰减系数； K 为地质、爆破方式有关的回归系数。

即使是在同一类岩石条件下， K 、 α 的取值范围也有很大差异。按部分实测资料回归拟合求得适用于钱仓山隧道监测区的爆破振动速度公式，结合其他隧道爆破的监测资料^[5-8]，表 2 列出了不同地质条件下隧道监测区的爆破振动速度公式。

对比表 2 中不同地质条件下爆破振动速度公式中的 α 值可知，围岩越坚硬完整， α 值趋于减小；风化破碎岩体的 α 值较大。

表 2 不同地质条件下爆破振动速度公式
Table 2 Blasting vibration velocity formula of different geological conditions

隧道名称	地质条件	爆破振动速度公式	隧道空间位置
南山下隧洞	弱风化~未风化花岗岩，属较坚硬岩~坚硬岩，岩体较完整	$V = 57(Q^{1/3} / R)^{1.352}$	接近垂直交叉，爆心距为 14.4~42.5 m
秦岭隧洞	坚硬完整的花岗片麻岩	$V = 276(Q^{1/3} / R)^{1.550}$	平行相邻隧道，间距为 30 m
八达岭隧洞	风化石和回填土	$V = 89.5(Q^{1/3} / R)^{1.700}$	十字交叉隧道，爆心距为 10~30 m，有可比性
梧桐山隧洞	风化花岗岩	$V = 280(Q^{1/3} / R)^{2.080}$	平行相邻隧道，中间隔墙厚 13 m

5 爆破振动监测与信息化施工

南山下隧洞爆破施工期间，对钱仓山隧道的影响进行了全面、系统地监测，监测结果及时反馈给施工单位，指导施工单位调整隧洞开挖方案、施工工艺和钻爆设计，实现了信息化施工，取得了良好的工程效果。

5.1 控制爆破方案及效果

南山下隧洞施工采用导洞先行预留光爆层的光面爆破的钻爆方法，起爆顺序^[9]：①导洞：掏槽眼→辅助眼→周边眼→底板眼。②预留光爆层：辅助眼→周边眼。

图 5、6 分别为断面 DK+861 的 2[#]测点前后连续 2 次爆破的波形图，爆破段位均为 6 段。19 日总装药量为 42.6 kg，20 日为 42.4 kg，但 20 日最大振速接近 19 日最大振速的 2 倍，除了爆心距有关，导洞与预留光面层是否同时爆破也是重要因素。监测数据表明，在交叉点前后 40 m 采用导洞先行预留光爆层的光面爆破方案，降低爆破振动效果显著。

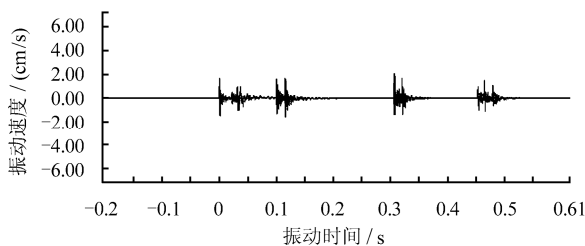


图5 导洞先行爆破(2月19日)

Fig.5 Pilot tunnel blasts in advance(Feb. 19th)

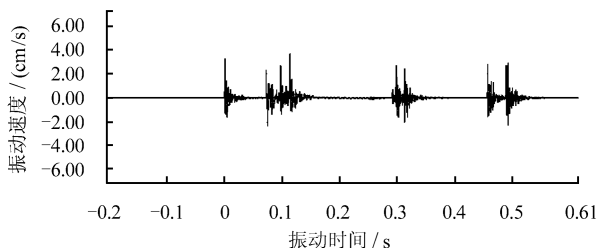


图6 导洞与预留光面层同时爆破(2月20日)

Fig.6 Pilot tunnel and smooth surface blast at the same time(Feb. 20th)

5.2 控制爆破措施

5.2.1 控制装药量

参照《爆破安全规程》^[10],既有隧道允许的振动速度为小于 10 cm/s,选取隧道安全允许振速时,应综合考虑构筑物的重要性、围岩状况、断面大小、深埋大小、爆源方向、地震振动频率等因素。由于距离较近,为保证爆破开挖不影响钱仓山隧道结构稳定,降低爆破危害效应,确定钱仓山隧道的质点振动速度应小于 5 cm/s。再根据振动安全距离 14.4 m, K 、 α 取经验值,由式(1)反算得到最大允许一次起爆药量为 12.2 kg。

施工初期,监测多个断面不同测点,采用式(1)对测出的数据进行回归分析,得出 K 、 α ,用来指导爆破参数的优化。当围岩条件变化时,及时调整 K 、 α 数值。根据爆心距不变、装药量变化时质点振动速度与装药量的关系,预测振动速度。通过炸药量的调整及限制一次爆破的单段最大用药量,控制爆破振动速度。

由前述分析可知,最大爆破震速所对应的时刻多数为掏槽时刻,故爆破时应严格控制掏槽眼一次起爆的最大药量。

5.2.2 调整爆破参数

减小最大段装药量的方式有:减小循环进尺、增加起爆段别、减少同时起爆的炮眼数等。

南山下隧洞施工时炸药段数基本为 6~8 段,循环进尺控制在 2 m(实际进尺约为 1.8 m),炮孔

数目 55 个(表 3)。振动速度过大时,调整上述爆破参数,控制效果比较理想。

表3 各种炮眼孔个数

Table 3 The numbers of various holes

炮眼种类/种	掏槽眼	中空眼	辅助眼	周边眼	底板眼
炮眼数量/个	4	1	14	28	8

5.2.3 适时调整爆破工艺

施工初期,导洞只起爆一次。当震源离测点较近时,多次出现振动速度超过设计要求的 5 cm/s,见表 4。由前文分析可知,此时装药量对振动速度影响明显。而将爆破顺序调整为导洞掏槽单独起爆,导洞的周边眼和预留光爆层再同时起爆,可减少一次起爆的装药量,实测数据表明调整后振动速度未曾超过 5 cm/s,说明将导洞的掏槽与周边眼、底板眼分开起爆,可以降低导洞爆破振动强度。

表4 振动速度大于 5 cm/s(2#测点)统计

Table 4 Statistics that vibration velocity greater than 5 cm/s

时间 /月-日-时	断面 里程	振速最大值 /(cm/s)	总装药量 /kg	最大段 装药量 /kg	距离 /m
02-20-20	DK49+860	5.482 2	52.2	11.3	19.50
02-23-09	DK49+864	5.482 2	35.6	8.63	17.81
02-23-18	DK49+860	6.147 7	50.0	6.51	19.00

注:3次均是导洞爆破振速最大值,前两次是掏槽眼爆破出现最大值。

6 结 论

(1) 监测过程中,出现了 3 次超过 5 cm/s 的安全允许振速,但超值量小、次数少。监测结果、理论分析及现场观察表明,南山下隧洞的开挖爆破未对钱仓山隧道造成影响。

(2) 迎爆面变化影响隧道断面振速分布。震源距离测点大于 30 m 时,振动的主要影响因素是距离;而震源离测点小于 30 m 时,振动的主要影响因素是装药量和爆心距。

(3) 线性回归分析振动速度,得到适用于钱仓山隧道监测区的爆破振动速度公式(表 1 中南山下隧洞爆破振动速度公式);岩体越坚硬完整,爆破振动波传播衰减越慢。

(4) 控制最大段装药量(减小循环进尺、增加起爆段别、减少同时起爆的炮眼数)可有效控制爆破振动;导洞先行预留光爆层的光面爆破方案可降低爆破振动;导洞爆破时将掏槽与周边眼、底板眼分开起爆,可降低导洞爆破产生的振动。

参 考 文 献

- [1] 孙永义. 南山下隧洞设计方案报告[R]. 温州: 温州市水利电力勘测设计院, 2008.
- [2] 杨新安. 钱仓山隧道监测方案[R]. 上海: 上海天佑咨询工程有限公司、同济大学, 2008.
- [3] 杨新安. 钱仓山隧道监测成果报告[R]. 上海: 上海天佑咨询工程有限公司、同济大学, 2009.
- [4] 杜菊红, 黄宏伟. 偏压、错台小间距隧道施工位移场动态模拟分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1102—1108.
DU Ju-hong, HUANG Hong-wei. Dynamic simulation analysis of displacement field of bias closely spaced tunnel with altitude difference[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 1102—1108.
- [5] 彭道富, 李献忠, 杨年华. 近距离爆破对既有隧道的影响[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(4): 73—76.
PENG Dao-fu, LI Xian-zhong, YANG Nian-hua. Vibration effect on the working tunnel induced by an adjacent blasting[J]. **China Railway Science**, 2005, 26(4): 73—76.
- [6] 高晓初, 吴子俊. 运营隧道小间距平行隧道开挖爆破安全控制[C]//工程爆破文集(第六集). 深圳: 海天出版社, 1997.
- [7] 林学义, 王兰民. 隧洞的爆破地震动效应问题[C]//工程爆破文集(第六集). 深圳: 海天出版社, 1997.
- [8] GOGIO BERTA. Blasting-induced vibration in tunnel[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1994, 9(2): 175—187.
- [9] 南山下隧洞交叉段爆破设计方案[R]. 湖州: 核工业井巷建设公司, 2008.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

第五届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会 (第一号通知)

The 5th Cross-strait Conference on Structural and Geotechnical Engineering (SGE-5)

Call for Papers July 13—15, 2011 Hong Kong, China (First Announcement)

会议背景: 继 1994 年杭州第一届会议、1997 年香港第二届会议、2003 年台北第三届会议和 2007 年杭州第四届会议之后, 第五届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会将于 2011 年 7 月 13—15 日在香港理工大学举行。本次会议由香港理工大学建设及地政学院主办, 浙江大学及台湾大学协办, 旨在促进和推动两岸结构和岩土工程界的学术交流与合作, 共同探讨学科发展和工程实践之趋势。

主办: 香港理工大学 **协办:** 浙江大学 台湾大学

会议议题: (1) 高层结构 (2) 空间结构 (3) 桥梁结构 (4) 混凝土结构 (5) 钢结构及组合结构 (6) 新型结构材料及体系 (7) 结构抗风、抗震及控制 (8) 结构耐久性及其可靠性 (9) 结构健康监测、评估及加固 (10) 复杂荷载作用下的岩土力学 (11) 环境土工 (12) 边坡稳定 (13) 隧道工程 (14) 地基处理 (15) 基础设计 (16) 桩基工程 (17) 地震工程 (18) 其他相关领域

语言: 论文撰写语言和会议期间的报告语言采用汉语或英语。

论文集出版: 会议论文摘要将以印刷版形式出版; 全文将以光盘形式出版。

论文注册: 作者请在论文摘要提交截止日期前向各地区秘书处提交论文摘要 (中文 600~1000 字或英文 200~300 单词) 及论文注册回执各 1 份。会议代表注册费为每位 2000 元港币, 缴纳方法将另行通知。

重要日期: 摘要提交截止: 2010.12.31; 摘要接受通知: 2011.2.1; 论文提交截止: 2011.4.1; 论文接受通知: 2011.5.1; 会议注册截止: 2011.5.31.

电子文件格式 论文摘要和正文的电子文件请采用 Microsoft Word 编排, 并以 .doc 格式通过 E-mail 提交给秘书处。

秘书处: 香港和澳门作者联系方式: 通信地址: 香港 九龙 红磡 香港理工大学 土木及结构工程学系 电话: +852-2766 4473 或 +852-2766 4812 传真: +852-2334 6389 电子邮件: cexwye@polyu.edu.hk 联系人: 周华飞、叶肖伟、余涛 大陆作者联系方式: 通信地址: 浙江杭州余杭塘路 338 号 浙江大学紫金港校区建筑工程学院 空间结构研究中心 邮政编码: 310058 电话: +86-571-88208696 或 +86-571-88208753 传真: +86-571-88208753 电子邮件: suliang@zju.edu.cn 联系人: 邓华、苏亮、段元锋

台湾作者联系方式: 通信地址: 106 台北市罗斯福路 4 段 1 号台湾大学土木工程学系 电话: +886-2-2369 0411 传真: +886-2-2363 1558 电子邮件: ljleu@ntu.edu.tw 联系人: 吕良正

会议网页: <http://www.polyu.edu.hk/fclu/SGE5/>

(信息来源: 河海岩土网)