

软岩隧道近距下穿敏感建筑物的光面爆破减振施工方案

王晓辉¹ 王岗² 张稳军³ 郑国和¹ 谢华北¹ 管晓明² 宋祥刚¹

(1. 中铁十八局集团第四工程有限公司, 300222, 天津; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 266033, 青岛;

3. 天津大学建筑工程学院, 300072, 天津//第一作者, 高级工程师)

摘要 依托杭绍台铁路软岩隧道爆破工程, 针对下穿敏感建筑物对隧道爆破振动控制要求极高的特点, 通过试验段振动测试结果, 分析了三台阶法爆破开挖方案面临的高风险。详细阐述了双侧壁导坑法光面爆破减振施工方案, 并重点对左右两侧导坑及中间导坑的掏槽方式、炮眼间距、最小抵抗线、开挖进尺和装药量等参数进行计算取值。现场爆破振动测试结果显示, 双侧壁导坑法光面爆破减振施工方案的实测地面爆破峰值振动速度为 0.21 ~ 1.46 cm/s, 减振效果显著, 既满足了建筑物的振动控制要求, 且光爆效果良好。

关键词 隧道施工; 下穿建筑物; 爆破减振; 软岩地层

中图分类号 U455.41

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.029

Smooth Blasting Vibration Reduction Construction Scheme of Soft Rock Tunnel Under-passing Sensitive Buildings at Close Distance

WANG Xiaohui, WANG Gang, ZHANG Wenjun, ZHENG Guohe, XIE Huabei, GUAN Xiaoming, SONG Xianggang

Abstract Based on the blasting engineering of the soft rock tunnel of Hangzhou-Shaoxing-Taizhou High-speed Railway, targeting the feature that under-passing sensitive buildings has high vibration control requirements on tunnel blasting, from test section vibration test results, the high risks faced with three-step method blasting excavation scheme are analyzed. The construction scheme of vibration reduction of smooth blasting with double sidewall heading method is elaborated. Parameters such as the cutting method, blasting hole spacing, minimum resistance line, excavation footage and charge of the left and right sides and middle drift headings are reasonably and scientifically calculated. Field blasting vibration test results show that double sidewall heading method smooth blasting vibration reduction construction scheme can control the on-site ground blasting peak vibration velocity between 0.21 cm/s and 1.46 cm/s. Vibration reduction result is evident, which not

only meets the vibration control requirements of the building, but also has good smooth explosion effect.

Key words tunnel engineering; under-passing buildings; blasting vibration reduction; soft rock stratum

First-author's address China Railway 18th Bureau Group No. 4 Engineering Co., Ltd., 300222, Tianjin, China

近距下穿建筑物隧道的爆破开挖极易损坏建筑物, 造成巨大的经济损失和社会不良影响。因此, 需要采取有效的措施来降低爆破振动的影响, 以避免引起周边建筑物的损伤, 并保证隧道施工安全、高效地进行。目前, 国内外对隧道爆破振动的控制措施主要分为 2 类:

1) 对爆源采取控制措施以有效降低爆破振动。如: 采取高精度非电雷管或电子雷管延时爆破以降低掏槽段药量或最大段药量, 多级复合式楔形掏槽, 采用 CD(中隔壁)法、CRD(交叉中隔壁)法等分部爆破开挖方法。后来, 爆破减振开始出现多种方法的组合减振。文献[1]提出一种将传统爆破技术与预切割工艺相结合的减振开挖方法; 文献[2]提出了超大断面浅埋隧道爆破的复合楔形掏槽技术 + 外层空间差分爆破技术的爆破减振方案; 文献[3]提出了超前下导坑非爆破开挖 + 预留光爆层控制爆破技术和上台阶非爆破开挖 + 下台阶控制爆破技术; 文献[4]研究电子雷管单孔间隔爆破的延时计算方法, 爆破减振效果相比普通非电雷管可以有效降低 50% 以上。

2) 在爆破地震波传播途中采取减隔振措施。如: 机械开挖减震带和减震层, 双线隧道开挖时在隧道之间设置小导管隔振; 文献[5]得出预设的砂质缓冲层质点振动速度峰值相比未预设砂质缓冲层时降低了 34% 左右; 文献[6]得出有减震带的较无减震带的原点振幅小, 振幅平均降低 84%。

本文以杭绍台(杭州—绍兴—台州)铁路隧道下穿某敏感的文物收藏建筑物的软岩爆破工程为背景,根据隧道围岩的实际情况,结合隧道爆破理论和类似工程实践,通过优化爆破方案和开挖方案,提出了适用于V级围岩的浅埋隧道减振爆破方案,并验证了方案的有效性和合理性。

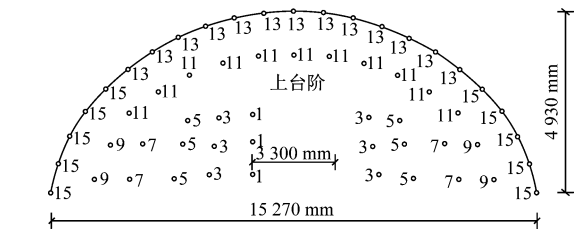
1 隧道的爆破开挖方案设计

杭绍台铁路隧道下穿段里程为NXK2+020~NXK2+110。下穿段隧道长90 m,共计影响6栋建筑物,其中3栋位于隧道正上方,其余3栋距开挖线较近。这些建筑物主要为二层砖砌建筑物,建设年代久远,抗振性能较差。下穿段隧道埋深 H 约为18.5~17.2 m,属于浅埋隧道($H<2B$, B 为隧道跨度)。下穿段围岩级别为V级,属于软岩。V级围岩拱部以中风化岩及微风化岩为主,侧壁主要为中风化岩,岩体完整、较坚硬。中风化岩具一定富水性,地下水埋藏浅。

对于软岩隧道多采用三台阶爆破开发方案,或双侧壁导坑法爆破开挖方案。本文选取一小段隧道作为试验段,对爆破方案进行研究。

1.1 三台阶法爆破开挖方案及振动测试结果

试验段采用上、中、下三台阶法进行爆破施工。上台阶施工跨度和高度分别为15.27 m及4.93 m,采用一级楔形掏槽。本次爆破为1次爆破,采用导爆管非电雷管起爆。上台阶进尺为1.5 m,掏槽孔深度为2.5 m,单孔药量为0.9 kg,辅助眼单孔药量为0.9~0.8 kg,周边孔药量为0.6 kg。由于没有临空面,上台阶施工对建筑物的影响最大,故本文重点研究上台阶爆破。上台阶爆破施工的炮眼布置如图1所示。



注:图中数字表示该炮眼的毫秒雷管段数。

图1 上台阶炮眼布置图

Fig.1 Layout of cross section blast hole

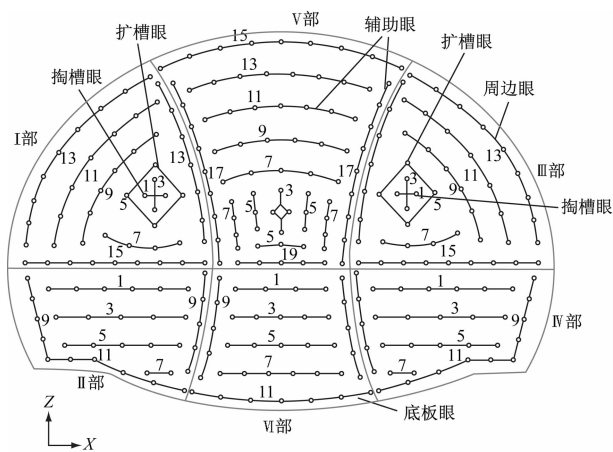
在爆破掌子面正上方的地表布置测点,采用爆破振动测试仪进行地面爆破振动测试。经实测,横向(X 向)、纵向(Y 向)及竖向(Z 向)的峰值振动速

度分别为1.64 cm/s、1.81 cm/s及3.79 cm/s,主振频率分别为7.0 Hz、9.7 Hz及5.8 Hz。根据GB 6722—2014《爆破安全规程》,对于一般的民用建筑物,当主振频率小于10.0 Hz时,爆破振动速度的控制值为1.5~2.0 cm/s。根据建筑物质量和新旧程度,可确定本项目的安全标准为1.5 cm/s。从本试验段爆破振动测试结果来看, X 向、 Y 向及 Z 向的主振频率均小于10.0 Hz,而峰值振动速度均超过1.5 cm/s,且 Z 向振动速度超过3.0 cm/s,如果采用三台阶法爆破开挖方案,则爆破地震波很有可能会造成建筑物的振动开裂,因此,需选择爆破影响更小的爆破开挖方案。

1.2 双侧壁导坑法爆破开挖方案

为将拱顶变形、地表沉降及爆破振动速度均控制在设计要求限值内,确保敏感建筑的房屋结构安全,本项目计划采用双侧壁导坑法爆破开挖方案施工,将整个断面分成三大部分六小部分进行减跨开挖支护,以最大限度地抑制拱部变形及地表沉降。

双侧壁导坑法爆破开挖方案的开挖断面及炮眼布置如图2所示。该方案具体施工方法为:首先,左侧导坑分上下台阶开挖,步距为4.0~6.0 m;左侧导坑进尺达到8.0~12.0 m后,右侧导坑开始分上下台阶开挖,步距为4.0~6.0 m;每个台阶循环进尺1榀钢架间距;软岩下穿段采取微差控制爆破技术,循环进尺不大于1.0 m;右侧导坑进尺达到12.0~18.0 m后,中部导坑开始分上下台阶开挖,步距为4.0~6.0 m。



注:图中数字表示毫秒雷管段数。

图2 开挖断面分部及炮孔布置图

Fig.2 Blast holes layout at excavation section

2 隧道光爆减振的参数设计

2.1 炮眼数量

炮眼数量 N 为

$$N = qS/ar \quad (1)$$

式中:

q ——炸药设计单耗,取决于炸药性能、岩石性质、断面面积、炮眼直径和炮眼深度等因素; q 取 1.20 kg/m^3 ;

S ——开挖断面面积;图 3 中 I 部面积为 24.8 m^2 , V 部面积为 40.7 m^2 ;

a ——装药平均系数;当药包直径为 32 mm 时,取 $0.6 \sim 0.65$,本文取 $0.60^{[8]}$;

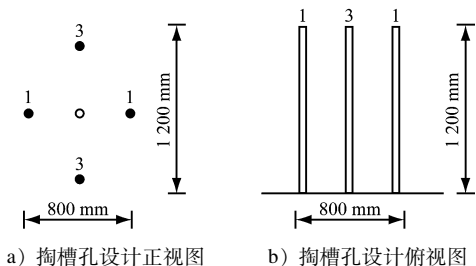
r ——每米药卷的炸药质量;现场采用 2 号岩石防水乳化炸药,药卷长度为 200 mm ,质量为 200 g ,因此 r 取 1.0 kg/m 。

根据式(1)可得:图 3 中 I 部 $N=49.6$ 个,取 50 个;V 部 $N=81.4$ 个,取 82 个。

2.2 炮眼布置

2.2.1 掏槽眼布置

隧道掏槽一般有斜眼掏槽和直眼掏槽两种方式。采用斜眼掏槽方式时,炮眼深度受井巷断面的限制,尤其在小断面井巷中更为突出。采用直眼掏槽方式时,炮眼深度不受井巷断面限制,可以实现中深孔爆破;当掏槽深度改变时,掏槽布置可不变,只需调整药量。由于双侧壁导坑法分部开挖的断面较小,故采用直眼掏槽方式。掏槽眼布置在分部开挖面中间,平行空孔直眼角柱状掏槽,孔距为 $400 \sim 500 \text{ mm}$,超深 0.2 m ,孔深 1.2 m 。掏槽眼周围布置扩槽眼。掏槽眼纵断面布置如图 3 所示。



注:图中数字表示毫秒雷管段数。

图 3 掏槽眼纵断面布置图

Fig. 3 Vertical section layout of cut hole

2.2.2 周边眼布置

在周边眼布置中,选择合理的最小抵抗线尤为重要。光面爆破最小抵抗线长为:

$$W_{\min} = bd \quad (2)$$

式中:

W_{\min} ——光面爆破最小抵抗线长;

b ——光面爆破抵抗线的计算系数,取 $10 \sim 20$;

d ——炮孔直径。

由于试验段围岩级别为 V 级,地质条件较差, $d=4.0 \text{ cm}$ 时 $W_{\min}=15d$,即 60 cm 。

炮眼密集系数 m 取 $0.6 \sim 1.0$ 。围岩条件越好, m 越大。考虑到试验段围岩条件较差,故本试验中 m 取 0.7 。

一般光面爆破的周边眼间距为:

$$L = mW_{\min} \quad (3)$$

由此可得 $L=420 \text{ mm}$,实际取 $L=400 \text{ mm}$ 。

周边眼装药结构采用不耦合间隔装药。现场爆破采用 2# 岩石乳化炸药,炮眼直径为 42 mm ,全部装 32 mm 直径药卷,不耦合系数仅为 1.25 。为减小周边眼爆破对围岩的破坏,每个周边眼底部集中装 1.5 卷炸药,其余段分 3 个间隔装 $1/3$ 卷炸药。

2.2.3 辅助眼布置

在掏槽眼与周边眼之间设辅助眼。辅助眼均匀布置即可,可采用线性布置形式,也可采用环形布置形式。一般情况下,辅助眼抵抗线长应小于同排(同一环形)炮孔间距,常为炮孔间距的 $80\% \sim 100\%$ 。辅助眼孔深 1.2 m ,孔间距为 800 mm ,最小抵抗线长 600 mm 。

2.2.4 底板眼布置

底板眼设计长度为 100 cm ,相邻底板眼间距为 800 mm 。

2.3 炮眼装药量计算

各分部总装药量按炮眼个数和单孔装药量计算。图 3 中,掏槽眼单孔装药量为 0.6 kg ,扩槽眼和辅助眼单孔装药量为 0.4 kg ,周边眼单孔装药量为 0.3 kg 。计算可得, I 部、III 部总装药量 $Q_1 = Q_3 = 18.3 \text{ kg}$, II 部、IV 部总装药量 $Q_2 = Q_4 = 11.7 \text{ kg}$, V 部总装药量 $Q_5 = 30.4 \text{ kg}$, VI 部总装药量 $Q_6 = 13.1 \text{ kg}$ 。由此,每循环进尺总装药量 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 103.5 \text{ kg}$ 。

3 实测结果分析

本项目采用双侧壁导坑法进行隧道爆破施工,爆破振动速度要求严格控制在 1.50 cm/s 之内。当隧道开挖到建筑物正下方时,爆破对建筑物的影响最大,爆破振动速度也最大,为最不利工况。最不

利工况下,I 部及 V 部爆破时产生的振动最大,故重点测试 I 部及 V 部爆破时建筑物的振动情况。10 次典型监测结果如表 1 所示。

表 1 最不利工况下 I 部及 V 部爆破时建筑物的
10 次典型振动监测数据

Tab.1 Monitoring data of building 10 typical vibration
with part I and part V blasting under the most
unfavored working condition

数据序号	装药量/kg	爆破振动速度/(cm/s)		
		X 向	Y 向	Z 向
1	16.0	0.51	0.42	0.71
2	18.0	0.37	0.44	1.46
3	14.0	0.41	0.50	0.99
4	14.0	0.21	0.23	0.65
5	16.0	0.34	0.23	0.63
6	16.0	0.28	0.43	0.74
7	17.0	0.72	0.47	0.75
8	16.0	0.71	0.52	0.97
9	16.0	0.57	0.33	0.75
10	16.0	0.38	0.61	0.60

现场实际监测结果表明:采用双侧壁导坑法方案有效地控制了爆破产生的振动强度,爆破峰值振动速度为 0.21~1.46 cm/s。当采用台阶法爆破方案时,地表质点最大的振动速度峰值为 3.79 cm/s;采用双侧壁导坑法,地表质点最大振动速度峰值仅为 1.46 cm/s,小于振动速度控制限值 1.5 cm/s,其振动强度比台阶法爆破方案振动强度降低了约 60%。此外,双侧壁导坑法方案各炮孔起爆顺序更合理,不同起爆段的药量分布也更合理,振动强度在时间上分布比较均衡。

本工程由于采用了周边炮孔光面爆破技术,实现了爆破后无明显超欠挖现象,爆破轮廓面光滑,有效减少了爆破对周边围岩的损伤,取得了较好的爆破效果和减振效果。

4 结语

本文依托杭绍台铁路软岩隧道爆破工程为背景,提出适用于隧道下穿建筑物时 V 级围岩双侧壁导坑法开挖方案,并通过现场试验验证了方案的合理性,可得到以下结论:

1) 隧道下穿敏感文物建筑物时,爆破参数的选择应根据现场地质条件以及施工方式合理选择。

在试验段选用三台阶方法爆破开挖时峰值振动速度达到 3.79 cm/s,远超建筑物的控制标准,故需采取更减振的双侧壁导坑法爆破开挖方案。

2) 当爆破掌子面面积较小且围岩等级较低时,可采用直眼掏槽双侧壁导坑法光面爆破开挖方案来代替斜眼掏槽的多台阶爆破开挖形式。

3) 采用双侧壁导坑法光爆减振方案后,实测地面的爆破峰值振动速度为 0.21~1.46 cm/s,不仅满足了建筑物的振动控制要求,且爆破峰值振动速度明显较低,爆破减振效果显著。

参考文献

[1] SONG K I, OH T M, CHO G C. Precutting of tunnel perimeter for reducing blasting-induced vibration and damaged zone-numerical analysis[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(4):1165.

[2] TIAN X, SONG Z, WANG J. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126:105813.

[3] 黄明利,孟小伟,谭忠盛,等. 浅埋隧道下穿密集房屋爆破减震技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2012(2):423.

HUANG Mingli, MENG Xiaowei, TAN Zhongsheng, et al. Research on the blasting shock absorption technology for shallow-buried tunnel under-traversing the dense houses[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012(2):423.

[4] 管晓明,余志伟,宋景东,等. 隧道超小净距下穿深埋供水管线爆破监测及减振技术研究[J]. 土木工程学报,2017(增刊2):160.

GUAN Xiaoming, YU Zhiwei, SONG Jingdong, et al. Blasting monitoring and vibration reduction technology of tunnel underpass deep buried water supply pipeline with ultra-small clear distance[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(S2):160.

[5] 杜小刚,程玉泉,林从谋. 超小净距下穿高铁隧道减振爆破技术[J]. 工程爆破,2017(2):44.

DU Xiaogang, CHENG Yuquan, LIN Congmou. Blasting vibration reduction technology for high-speed railway tunnel under ultra-small distance[J]. Engineering Blasting, 2017(2):44.

[6] 张树伟,胡树军,董秀艳. 减震带对台阶爆破地震效应的影响[J]. 河北冶金,2019(10):16.

ZHANG Shuwei, HU Shujun, DONG Xiuyan. Effect of shock absorption zone on seismic effect of bench blasting[J]. Hebei Metallurgy, 2019(10):16.

[7] 刘赶平. 大断面隧道光面爆破设计[J]. 爆破,2019(2):65.

LIU Ganping. Smooth blasting design for large cross-section tunnel excavation[J]. Blasting,2019(2):65.

(收稿日期:2021-10-20)