

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.009

新苔井山隧道平行近接爆破设计及施工研究

韩高升

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,武汉 430063)

摘要: 福平铁路新苔井山隧道大部分段落与既有隧道平行近接,右线至既有隧道最小净距为8 m,隧道主要为V、IV级围岩。依据现场地质条件采用四步短台阶法光面爆破技术和循环进尺0.8 m的掘进方案,同时对掘进工作面临近既有隧道的前后一定距离进行爆破振动、边墙位移等实时监测。实践证明:对既有隧道工点采用3 cm/s的振动控制标准安全可行,在近接施工造成的既有隧道围岩应力重分布影响下既有隧道位移变形也在安全范围内,若在实时监测条件下振动控制阈值仍有放宽的余地,可以提高掘进速度。

关键词: 平行近接隧道;爆破设计;短台阶法施工;边墙位移监测

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0048-05

Blasting Design and Construction of Adjacent Parallel Blasting in New Taijingshan Tunnel

HAN Gao-sheng

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co Ltd, Wuhan 430063, China)

Abstract: Most part of New Taijingshan tunnel in Fuping Railway is parallel and adjacent to the existing tunnels. The minimum net distance of the right line to the existing tunnel is 8 meters, and the surrounding rock class is V or IV. Smooth blasting with four-step short bench method construction is applied according to the geological conditions, and the cut per round is 0.8 meter. Meanwhile, the real time blasting vibration and side wall displacement in adjacent tunnel are monitored. It is proved that it is safe and feasible when vibration velocity in existing tunnel is less than 3 cm/s. Meanwhile, the tunnel displacement deformation induced by surrounding rock stress redistribution during construction is also within safe range. Tunnel advance speed can be improved when vibration threshold during real time monitoring is relaxed.

Key words: adjacent parallel tunnel; blasting design; short bench method construction; side wall displacement monitoring

新建结构物邻近既有结构物施工,可能对既有结构物产生不利影响的工程称为近接工程,有关近接工程的施工称为近接施工。与隧道及地下工程有关的近接工程施工称为和隧道及地下工程近接施工。

近年来许多学者针对近接隧道工程影响范围以及近接隧道爆破影响分析开展了大量研究。日本在

总结日本地铁实践的基础上,提出了近接隧道施工影响范围分类,将相互影响范围分为无影响范围、要注意的影响范围和必须采取措施的范围三个区域来考虑。

仇文革提出了近接施工的有关定义,并以弹塑性理论为基础,综合运用隧道力学、岩土力学及既有结构健全度理论阐明了地下工程近接施工的力学原理,指出近接施工的影响范围是局部的,新建工程施工引起的围岩应力再次重分布是产生近接施工影响

收稿日期:2020-01-11

作者简介:韩高升(1976-),男,高级工程师,(E-mail)1968549923@qq.com。

的根源^[1]。王明年等建立了能全面反映盾构隧道掘进全过程的三维模拟方法,并采用摩尔-库仑屈服准则对盾构隧道重叠段进行了横向近接分区,同时采用位移变化速率准则对盾构隧道重叠段进行了纵向近接分区。万飞等运用有限元分析软件 MIDAS-GTS 进行三维模型数值分析,对比明挖暗埋法和暗挖法新建隧道施工时既有隧道的变形及内力变化规律,对既有隧道的安全性进行评价。秦辉辉对小曲线叠落式隧道施工的关键技术进行了系统研究^[2]。崔光耀利用反应位移理论的基本原理,建立了隧道洞口浅埋段纵向和断裂粘滑隧道抗震设计计算方法,通过动力时程法对其进行了检验。针对断裂粘滑隧道的震害特点,对采用减震缝或减震层的六种减震方式进行了静力错动模型试验研究^[3]。刘小果、刘康、王璞、吴波、和林立宏等学者利用数值模拟、理论分析和现场实测相结合的方法,研究了接近爆破对邻近构筑物振动效应的影响。钟冬望等结合在建的贵昆线六盘水至沾益段增建Ⅱ线扒挪块隧道开挖工程,采用动力有限元程序建立了三维模型,对贵昆线狮子口隧道混凝土衬砌的质点振动速度以及应力分布情况进行了计算^[4-7]。为分析在建的石长铁路增建二线汪家山隧道爆破施工对邻近既有隧道结构安全的影响,杨光运用 ANSYS 瞬态动力学方法,分析隧道拱顶有裂缝缺陷的衬砌结构在爆破荷载冲击作用下的动态反应,获得存在不同深度裂缝缺陷的衬砌在不同爆破荷载冲击速度下的应力分布规律和容许安全系数。

新建隧道的开挖是个动态施工过程,必须掌握全过程的变化规律,才能进行好设计与施工。目前的理论分析主要考虑近接施工的空间位置和工法,还应考虑时间效应,并采用理论计算和实时监测来分析邻近既有隧道的受力与变形。另外,对于邻近既有隧道的安全阈值如何给予界定是一值得探讨的课题。

福平铁路新苔井山隧道与既有铁路苔井山隧道近接,为保证新建隧道和既有隧道的施工与运营安全,基于现场地质条件及与隧道近接情况,提出了合理的近接爆破设计、近接施工方案和安全控制阈值,并通过现场试验进行了验证。

1 工程概况

新苔井山左线隧道起讫里程 $XLDK0 + 970 \sim XLDK3 + 213$, 全长 2.243 km。右线隧道起讫里程 $SLDK0 + 967 \sim SLDK3 + 260$, 全长 2.293 km。新建隧道线路与既有沿海铁路联络线并行,左右线隧道

分布在既有线两侧,夹既有苔井山隧道,大部分段落平行近接。右线至既有隧道最小净距为 8 m,左线最小净距为 25.8 m。新苔井山左、右线隧道近接示意图见图 1。

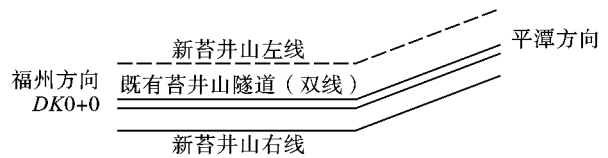


图 1 隧道近接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel proximity

隧道大部分为浅埋隧道,进口段约 500 m 采用矿山法爆破施工,该段隧道处于花岗岩地层中,褐黄色~肉红色,全~强风化,节理裂隙发育;地下水主要为孔隙潜水,较发育。围岩等级为Ⅳ~Ⅴ级。

2 隧道近接掘进工法及爆破参数

2.1 近接隧道施工工法

在兼顾围岩条件及控爆规模的情况下,暗挖施工主要采用短台阶法。

Ⅳ级围岩采用短台阶法光面爆破开挖,循环进尺 0.8 m,挂网支护。Ⅴ级围岩洞口段 30 m 采用短台阶法人工配合机械开挖,循环进尺 0.7 m,其余区段采用小药量松动爆破,循环进尺 0.8 m,Ⅱ8 工字钢拱架,间距 80 cm。

短台阶法施工工序:

- (1) 开挖顶部台阶,施作超前支护及洞身结构的初期支护。
- (2) 上台阶施工至适当距离后(3~5 m),开挖中部台阶,施作洞身结构的初期支护。
- (3) 中台阶施工至适当距离后(10~20 m),开挖下台阶,施作洞身结构的初期支护。
- (4) 开挖仰拱,初期支护后,灌注仰拱。
- (5) 利用衬砌模板台车,一次性灌注二次衬砌(拱墙衬砌一次施作)

2.2 近接隧道爆破参数

新苔井山隧道现场主要为Ⅴ、Ⅳ级围岩,以临近既有隧道振动控制标准 3 cm/s 进行爆破设计。以Ⅴ级围岩为例,设计如下:

Ⅴ级围岩开挖断面 $B \times H = 853 \text{ cm} \times 1061 \text{ cm}$, 采用四级短台阶法光面爆破施工,循环进尺 0.8 m。

第一级断面炮孔数计算

$$N = 3.3 \sqrt[3]{fs^2} \quad (1)$$

式中: N 为炮孔数目,个; F 为岩石坚固性系数,平均取 $f = 10$; s 为巷道掘进断面面积, $s = 9.1 \text{ m}^2$ 。

代入式(1)计算结果 $N=32$ 个,光面爆破增加26%,得 $N=41$ 个,按此布置炮孔。

掏槽孔布置在上半断面正中间偏下,采用倾斜两级掏槽。槽孔共8个,一级掏槽孔4个,孔口距80 cm,孔底距20 cm,孔深为0.55 m,孔长0.63 m,角度均为 62° ;二级掏槽孔4个,孔口距40 cm,孔底距30 cm,孔深1.0 m,孔长1.2 m,角度为 57° 。辅

助孔8个,光面孔15个,底孔10个,共41个,孔深均为0.9 m,单耗按 1.5 kg/m^3 ,孔间距0.5 m,在靠近营业线侧设置减震孔(空孔),周边 $\phi 50$ 减震孔6个,掏槽 $\phi 110$ 减震孔3个。

光面孔线装药密度取 $0.25 \sim 0.28 \text{ kg/m}$,单孔药量0.2 kg。爆破参数见第一台阶开挖爆破参数表1。

表1 第一台阶爆破参数表

Table 1 Parameters of the first step blasting

孔称	孔数/个	孔深/m	单孔药量/kg	孔距/m	药量/kg
一级掏槽孔	4	0.55	0.50	0.8	2.00
二级掏槽孔	4	1.00	0.80	1.6	3.20
辅助孔	4	0.90	0.48	0.8	1.92
辅助孔	4	0.90	0.48	0.8	1.92
光面孔	15	0.90	0.20	0.5	3.00
底孔	10	0.90	0.50	0.7	5.00
$\phi 50$ 周边减震孔	6	5.00	/	0.3	/
$\phi 110$ 周边减震孔	3	10.00	/	/	/
合计	50				17.04

第一断面开挖后,按设计要求进行及时支护。在第一断面开挖、支护完成推进3~5 m后进行第二台阶开挖。形成正台阶开挖,其参数为孔径 $D=40 \sim 42 \text{ mm}$,孔深 $L=0.8 \text{ m}$,第二台阶开挖比第一断面增加了一个自由面,因此,炮孔数及单耗均可减少,按台阶布孔,排距取0.65 m,孔距0.8 m,单耗取 $q=0.4 \text{ kg/m}^3$;光面孔距取0.5 m,光面孔14个,线装药密度: $\rho=0.25 \sim 0.28 \text{ kg/m}$ 。在靠近营业线侧设置减震孔(空孔),周边 $\phi 50$ 减震孔7个。

第二台阶开挖后,按设计要求进行及时支护。在第二台阶开挖、支护完成推进10~20 m后进行第三台阶开挖,其参数为孔径 $D=40 \sim 42 \text{ mm}$,孔深 $L=0.8 \text{ m}$,按台阶布孔排距取0.6 m,孔距0.8 m,单耗取 $q=0.4 \text{ kg/m}^3$;光面孔距取0.5 m,光面孔12个,线装药密度: $\rho=0.25 \sim 0.28 \text{ kg/m}$ 。在靠近营业线侧设置建减震孔(空孔),周边 $\phi 50$ 减震孔6个。

第三台阶开挖后,按设计要求进行及时支护。在第三台阶开挖、支护完成推进3~5 m后进行仰拱开挖。其参数为孔径 $D=40 \sim 42 \text{ mm}$,孔深 $L=0.8 \text{ m}$,按台阶布孔,排距取0.6 m,孔距0.8 m,单耗取 $q=0.6 \text{ kg/m}^3$;在靠近营业线侧设置减震孔(空孔),周边 $\phi 50$ 减震孔2个。总体爆破炮孔布置图见图2。

2.3 装药结构及起爆网路

隧道掏槽孔、辅助孔和周边光面孔按设计装入不同段别非电毫秒雷管进行网路联接装药,除周边

光面孔外都采用连续装药结构。

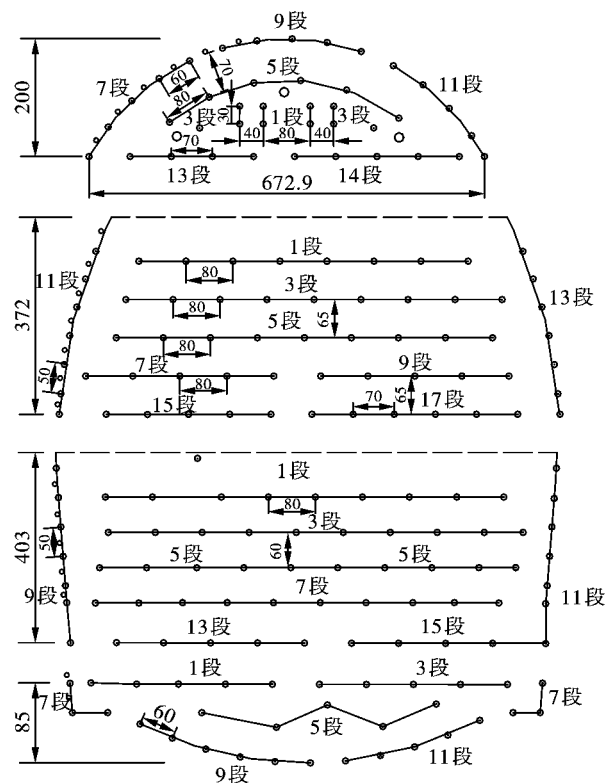


图2 V级围岩炮孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Layout diagram of borehole for the V class surrounding rock (unit: cm)

起爆网路采用非电导爆管毫秒雷管,每台阶炮孔起爆顺序与雷管段别如图2所示,用一把抓的方

式,孔外用 1 段雷管联网。采用 LS-2 型脉冲高压起爆器起爆。

3 近接隧道施工监测

3.1 爆破振动监测

在新建隧道爆破施工期间,在既有隧道内临近开挖断面里程前后 100 m 的隧道两侧侧壁布置爆破振动监测仪共计 10 台,对振动进行监测。施工期间,每炮均测,在隧道外爆破振动监测室内接收数据。

3.2 边墙位移监测

在隧道施工过程中,监控量测新建隧道施工对既有隧道的影响是其中重要的一部分,而既有隧道周边位移是监控量测中的必测项目。通常情况下,周边位移的量测采用收敛计进行水平收敛量测。由于收敛点都布置在拱顶、拱腰位置,量测时需架设平台或梯子进行工作,实际操作既不安全也不方便,有时甚至不能进行工作。采用全站仪免棱镜测距技术能很好地解决这些问题,但由于进出既有有线作业时间全部在夜间,要在很有限的时间段内进行全站仪的测量作业是比较困难的,综合考虑,边墙位移监测工作采用激光测距仪完成,激光测距仪一经安装,通电条件下即可在很短的时间内完成测量作业。

测量仪器选用 Insight-60 激光测距传感器,传感器布设断面如图 3 所示,安装位置如图 4 所示。

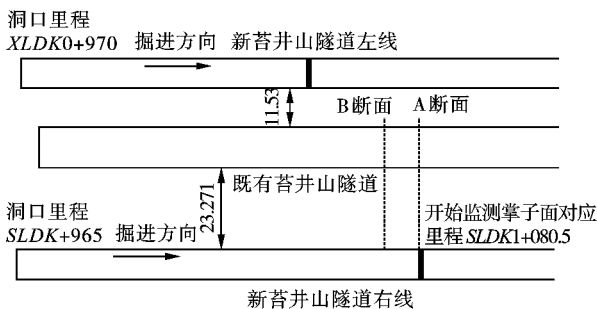


图 3 激光测距仪布设断面(单位:m)

Fig. 3 The setting section of the laser rangefinder(unit:m)

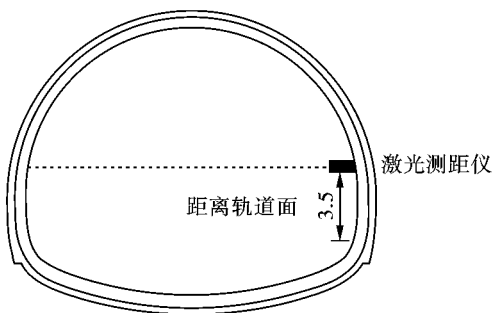


图 4 激光测距仪布设位置(单位:m)

Fig. 4 Location of laser rangefinder(unit:m)

将激光测距传感器固定在支架上,照准测点,避免移动。随着施工的进行,定时记录传感器读数。

3.3 监测结果及分析

爆破振动方面,在按控制爆破设计进行爆破开挖施工中,既有隧道的振动均未超过 3 cm/s 的控制值,大部分在 2 cm/s 以内。

通过为期 1 个月的监测,得到近接隧道开挖过程中既有隧道边墙净空随时间的位移变化量,整理如图 5。

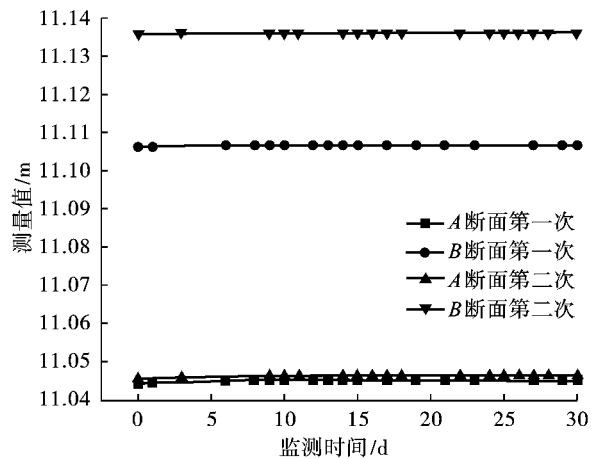


图 5 边墙位移监测随时间变化趋势图

Fig. 5 The trend of displacement monitoring of side wall with time

位移监测数据反映,在近接隧道施工 1~3 d 后既有隧道出现一个较小的位移量(0.1~0.4 mm),随着时间的发展位移量逐渐增大,但位移的增长的趋势逐渐放缓,一般一周后位移量基本不再变化。综合整体监测结果来看,新建隧道施工对既有隧道边墙位移量的影响较小,且位移量发展较快的时间段为新建隧道施工的初期。第二次测量结果同第一次测量结果基本相同,既有隧道隧道边墙几乎没有位移或有一个很小的位移量。

通过对既有苔井山隧道的监测分析可得,在按控制爆破设计的施工爆破开挖中,既有隧道爆破振动值均未达到 3 cm/s,在此条件下,近接隧道施工对既有隧道的影响较小;边墙位移量发展较快的时间段为新建隧道施工的初期,均小于阈值。综合监测数据可以推断既有隧道受新建隧道的开挖影响很小,未对其安全造成影响。

4 结语

隧道近接设计及施工中,科学合理确定爆破的振动控制标准,是保证近接施工中临近构筑物安全的关键。在以往多条铁路工程实践中,采用 5~

2 cm/s 的标准。爆破振动在结构上一方面是对围岩及结构即时的不利影响,另一方面是对既有结构已有或潜在缺陷进一步激发劣化发展的影响。对于前者,目前工程实践控制标准是可行的,参照《爆破安全规程》中的参数还有进一步放宽的空间;对于后者,则应进一步结合近接影响建筑物的具体情况考虑,同时对既有铁路隧道,还应考虑运营设备的抗振能力。在福平铁路隧道施工中,多个临近既有隧道工点均采用 3 cm/s 的振动控制标准,实践证明是安全可行的,尚留有较大的安全空间。

在既定爆破控制振动标准条件下,研究控制爆破技术,针对性进行爆破施工设计是实现控制近接隧道施工不利影响的关键。

近接爆破施工中,对新建及近接隧道布置施工监测体系,对施工安全控制及指导调整施工是必须且有效的。

近接施工条件下,结合铁路管理特点,合理安排爆破开挖施工组织,加大关键控制工序的资源配置,提高天窗时间隧道的爆破施工效率是提高整个临近施工效率的关键。

参考文献 (References)

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究 [D]. 成都:西南交通大学,2003.
- [1] QIU Wen-ge. The study on mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- [2] 秦辉辉. 小曲线叠落式隧道近接影响分区及变形控制技术 [D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [2] QIN Hui-hui. The adjacent influenced partition and deformation control technology of overlapping tunnel with small radius curve [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [3] 崔光耀. 隧道洞口浅埋段和断裂粘滑段抗震设计计算方法及试验研究 [D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [3] CUI Guang-yao. The seismic design calculation method and test study of tunnel shallow-buried portal and rupture stick-slipping section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [4] 刘小果. 邻近爆破对洞室稳定性影响数值模拟研究 [J]. 爆破, 2020, 37(1): 81-86.
- [4] LIU Xiao-guo. Numerical research on effect of blasting for stability of chamber [J]. Blasting, 2020, 37(1): 81-86. (in Chinese)
- [5] 王 璞,周卫华,欧阳光,等. 紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除 [J]. 爆破, 2020, 37(1): 107-112.
- [5] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. Explosive demolition of large reinforced concrete arch bridge adjacent to existing bridges [J]. Blasting, 2020, 37(1): 107-112. (in Chinese)
- [6] 林立宏,倪 迪,朱爱山,等. 小近距隧道扩挖爆破作用下邻洞振动响应研究 [J]. 爆破, 2020, 37(1): 141-146.
- [6] LIN Li-hong, NI Di, ZHU Ai-shan, et al. Study on vibration response of adjacent tunnel induced by expansion excavation blasting of closely-spaced tunnels [J]. Blasting, 2020, 37(1): 141-146. (in Chinese)
- [7] 杨 光. 隧道爆破施工对邻近既有隧道结构安全的影响分析与控制研究 [D]. 长沙:中南大学,2011.
- [7] YANG Guang. Control and analysis of an existing tunnel vibration induced by blasting construction of nearby tunnel [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)

英文编辑:柯 波

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。