

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.009

大断面黄土隧道近距离爆破控制效果分析*

赵志刚^① 张文喆^① 王 伟^{①②} 方 俊^① 冯德定^{①③} 杨 林^{①④}

①中交第二航务工程局有限公司(湖北武汉,430040)

②交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心(湖北武汉,430040)

③长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室(湖北武汉,430040)

④中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司(北京,100088)

[摘 要] 为防止超大断面黄土隧道开挖爆破对既有隧道中人、车通行安全的影响,提出合理的爆破施工参数及控制技术。新建二庄科隧道工程,其最大开挖断面达到136.08 m²,存在断面大、周边环境复杂、对爆破施工技术要求高等技术难点。综合考虑现场条件及工程经验,对双侧壁导坑法光面爆破施工技术进行详细设计,通过以大化小、优化施工工序、细化爆破施工参数、加固既有隧道衬砌结构等方法,有效地避免了爆破振动对既有隧道的影响,既有隧道迎爆侧振速峰值仅为4.20 cm/s,远小于规范允许值,且爆破效果也满足光面爆破质量控制要求,从而确保了大断面隧道施工安全及既有隧道的通行安全。因此,该隧道爆破控制技术 & 参数可为类似大断面隧道爆破施工控制提供参考。

[关键词] 爆破设计;黄土隧道;大断面;爆破控制效果;加固技术

[分类号] U455.6

Control Effect of Closed Distance Blasting in Large Section Loess Tunnel

ZHAO Zhigang^①, ZHANG Wenzhe^①, WANG Wei^{①②}, FANG Jun^①, FENG Deding^{①③}, YANG Lin^{①④}

①CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd. (Hubei Wuhan, 430040)

②Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure (Hubei Wuhan, 430040)

③Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology for Transportation Industry (Hubei Wuhan, 430040)

④CCCC Highway Bridges National Engineering Research Center Co., Ltd. (Beijing, 100088)

[ABSTRACT] In order to prevent the impact of excavation blasting on the traffic safety of adjacent existing tunnels in the super-large section loess tunnel, reasonable blasting construction parameters and control technology were proposed. In new Erzhuangke Tunnel, the maximum excavation section reaches 136.08 m², there is a large section and complicated surrounding environment and it requires high technical difficulties for blasting construction. Considering the site conditions and engineering experience, the smooth blasting of two side-wall-pilot construction technology was designed. Through the measures of converting large section to small section, optimizing construction procedure, detailing design of blasting construction parameters and strengthening the lining structure of existing tunnel, the impact of blasting vibration on existing tunnel effectively reduced. The maximum vibration velocity peak of the front side of existing tunnel is only 4.20 cm/s, which is far less than the allowable value of code. The blasting effect also meets the requirements of smooth blasting quality control. So it ensures the safety of super-large section tunnel construction and the traffic of existing tunnels. Therefore, the blasting control technology and parameters of the tunnel can provide reference for the blasting control to similar super-large section tunnels.

[KEYWORDS] blasting design; loess tunnel; large section; blasting control effect; strengthening technology

* 收稿日期:2019-08-16
基金项目:中国交通建设集团有限公司科技研发项目 (HT-A-2018-006)
第一作者:赵志刚(1984 -),男,工程师,主要从事隧道与地下工程方面施工管理工作。E-mail:942611273@qq.com
通信作者:王伟(1991 -),男,硕士,助理工程师,主要从事隧道与地下工程方面设计工作。E-mail:wangw2018@foxmail.com

引言

随着交通量的不断增大,现有设计标准已不能满足交通运输和经济发展的需求;因此,大断面公路隧道日益增多。山岭地区公路隧道的开挖方式主要为钻爆法。然而,采用何种爆破技术提高爆破效率,如何进行爆破设计及控制,直接影响着隧道工程的施工进度、施工质量及施工安全。其中,光面爆破利用合理的炮孔布置及有效的控制爆破技术,达到成型规整、围岩扰动小、成本低、施工进度快等优点,被广泛应用于隧道爆破开挖中。关于隧道爆破方面的研究比较多。熊炎林等^[1]通过数值模拟和现场测试手段研究了水平岩地层隧道周边眼聚能装药结构的爆破成型效果;费鸿禄等^[2]通过理论计算及声波测试法研究爆破载荷作用下隧道围岩裂隙扩展范围;还有学者研究了爆破施工对既有隧道的影响分析^[3-4];文献[5-7]中,通过现场试验对连拱隧道衬砌结构进行了安全评估,并给出了爆破施工工序优化建议;文献[8-10]中,通过光面爆破参数的优化、新工艺的采用等,改善了隧道光面爆破效果。

综上所述,有关大断面爆破参数设计及控制技术相关的研究已经取得了不少成果,但是针对复杂地质环境条件下的单向三车道加人行横道的超大断面近距离爆破施工控制的研究相对较少,对爆破参数设计要求更加严格。鉴于此,依托新建超大断面隧道工程,对爆破参数及施工工序进行设计研究,减小爆破振动强度,进而确保施工及既有隧道的通行安全。

1 工程概况及技术难点

新建二庄科隧道位于陕西省延安市,与既有二庄科隧道近似平行。既有隧道全长 640 m,新建隧道全长 630 m,属于中长隧道,最大埋深 145 m。其中,新建隧道主洞采用承载力较好的单心圆曲墙式衬砌断面,主洞拱圈段断面半径为 8.85 m,内轮廓宽度为16.34 m,高度为 10.45 m,最大开挖断面面积为 136.08 m² (> 100 m²),属于超大断面隧道。新建隧道考虑远期的快速化改造,采用城市主干道单向三车道加人行横通道的标准进行设计,设计行车速度为 50 km/h。隧址出露及钻探揭示的地层由新到老依次为第四系(Q)和侏罗系下统延安组(J1y),详细地层描述如下:上伏第四系马兰黄土和

离石黄土,主要为浅黄色,稍湿,质地疏松,垂直节理及大孔隙发育;下伏强风化泥质砂岩、中风化泥质砂岩,泥质结构,层状构造,隧道洞身围岩主要由强-中风化砂、泥岩组成。围岩级别为 V 级,其中 S-Va 段长 170 m, S-Vb 段长 200 m, S-Vc 段长 180 m, S-Vd 段长 60 m,局部稳定性较差,爆破开挖控制不当或支护不及时可能产生大的坍塌。

该扩建隧道施工过程中的主要技术难点是:隧道进、出口段仰坡坡度较缓,自然坡角 25°~65°,该段仰坡上部发育一小型崩塌体,在连续降雨、爆破施工扰动的情况下可能会再次复活,对隧道进口段洞身稳定性影响大;另外,既有隧道与新建隧道之间净距为 21~38 m,车流量大,约在 500 m 范围内有其他建筑,周边环境复杂,为确保来往行人和车辆的安全,对爆破控制技术提出了严格要求。由于该隧道岩性变化比较大,隧道开挖断面也很大,应根据岩性变化随时调整爆破方案和爆破参数,以达到良好的爆破控制效果。

2 隧道掘进爆破参数设计

2.1 炮孔参数确定

隧道出口进洞采用双侧壁导坑法,左、右导坑掌子面的纵向间距控制在 1~2 倍洞径之间,V 级围岩中采用微振光面爆破技术,尽可能地减少超欠挖以减轻对围岩的扰动和破坏。而隧道掘进爆破效果的影响因素很多,通常应用相关理论计算并结合工程类比法确定各参数的合理范围,然后根据爆破效果加以调整。

2.1.1 循环进尺

开挖循环进尺直接影响隧道施工工期,为保证按期完工,应根据要求的月进度来计算循环进尺,其计算公式为

$$l=\frac{L\times n_1}{24\times n\times \eta\times \eta_1}。$$

(1)

式中: l 为钻孔深度(循环进尺),m; L 为月进尺深度,m,根据工程要求平均进度为 60 m/月; n_1 为每个循环需要的时间,h; n 为每月掘进工作时间,平均每月取 25 d; η 为炮眼利用率,一般取 0.8~0.9; η_1 为循环率,一般取 80%~90%。综合考虑地质条件,经过计算,初步确定 S-Va 和 S-Vb 围岩段开挖循环进尺为 1.3 m。

2.1.2 不耦合装药系数

施工经验表明^[11],装药不耦合系数 λ 由岩体物理力学性质和炸药性能共同决定,一般 $\lambda=1.0\sim$

2.0。根据现场实际情况,最终确定装药不耦合系数为 1.3。因此装药直径为

$$d_c = \frac{d_b}{\lambda} \quad (2)$$

式中: d_b 、 d_c 为炮孔直径和装药直径,mm。采用手持式风钻钻孔,钻孔直径为 42 mm,即装药直径选用规格为 $\varnothing 32$ mm。

2.1.3 周边眼设计

当孔内最大静压力高于岩体极限抗拉强度,而低于岩体的极限抗压强度时,才能在周边炮眼之间形成贯通裂隙,保证开挖面的平整光滑。如图 1 所示,周边眼间距满足式(3):

$$E \leq \left[\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right] d_b = K_i d_b \quad (3)$$

式中: E 为周边眼间距,mm; $[\sigma_c]$ 为岩体的极限抗压强度,Pa; $[\sigma_t]$ 为岩体的极限抗拉强度,Pa; K_i 为孔距系数, $K_i = [\sigma_c]/[\sigma_t]$,与岩体的抗拉、抗压强度有关,一般取 $K_i = 10 \sim 16$ 。

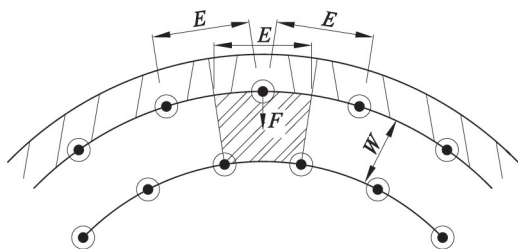


图 1 周边孔设计间距

Fig. 1 Designed spacing of peripheral holes

由式(3)可知,当炮眼直径为 42 mm 时,周边眼间距 $E = 400 \sim 600$ mm;最小抵抗线 $W = E / (0.8 \sim 1.0) = (1.00 \sim 1.25) E$,所以 W 一般应取 $600 \sim 700$ mm。周边孔用线装药密度来计算装药量,线装药密度取 $0.1 \sim 0.2$ kg/m,单孔装药量为 $0.15l = 0.195$ kg,取为 0.2 kg。

2.1.4 辅助孔设计

辅助孔即为扩槽孔。根据工程经验^[11],辅助孔间距取 $0.8 \sim 1.0$ m,辅助孔之间排距取 $0.7 \sim 0.9$ m,单耗一般取 $1.0 \sim 1.5$ kg/m³。由于该隧道岩石比较松软,取线装药密度为 $0.5 \sim 1.0$ kg/m,当隧道围岩比较坚硬时可逐步增大。

2.1.5 掏槽孔设计

隧道掏槽孔的形式有垂直掏槽孔、倾斜掏槽孔、混合掏槽孔 3 种。其中,垂直掏槽孔垂直于工作面布置,方式简单,可同时实现多钻机同时作业,适合于双侧壁导坑法爆破中、小断面。如图 2 所示,以中心炮孔为圆心、 $R = 0.3$ m 为半径画圆。在垂直两条直径上钻 4 个掏槽孔,间距为 0.6 m,掏槽孔需要比

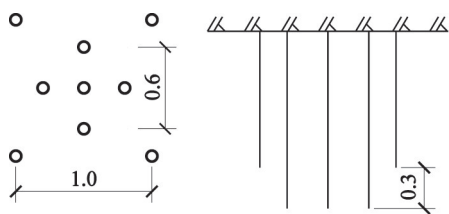


图 2 掏槽孔的布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of cutting holes (unit: m)

循环进尺加深 0.3 m,在其外侧多布置 4 个扩槽孔,孔间距为 1.0 m。

2.2 爆破炮孔布置

对双侧壁导坑法施工按照规范要求,通常将其断面分成 7 部分,分别为左侧上部分断面 I、左侧下部分断面 II、右侧上部断面 I'、右侧下部断面 II'、中间上部断面 III、中间中部断面 IV 及中间下部断面 V,其中左、右侧上部和左、右侧下部断面炮孔位置及参数相同。图 3 为每部分断面的炮孔布置情况。为保证初期支护与隧道开挖紧密结合,确定 S-Va 级围岩段上部开挖循环进尺为 1.3 m(即 2 榀拱架间距),周边孔彼此平行,且以小角度向外倾斜 $3^\circ \sim 5^\circ$;掏槽孔孔深为 1.5 m。

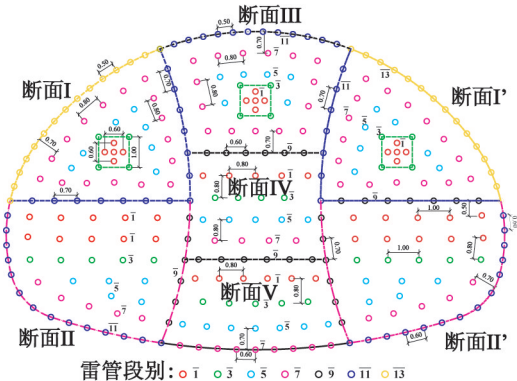


图 3 爆破炮孔的布置

Fig. 3 Arrangement of blasting holes

此外,不同颜色的炮孔各代表不同类型的炮孔,不同类型炮孔之间采用微差延时起爆,相邻雷管段别之间的延时时差为 50 ms;颜色相同的炮孔爆破参数及装药量也相同,采用同段位雷管连接,同时起爆,最大段起爆药量为 12.80 kg。爆破参数及装药量等详细情况如表 1 所示。

3 隧道掘进爆破施工设计

3.1 装药结构

辅助孔和掏槽孔均采用连续不耦合装药结构,光面爆破时周边孔采用间隔不耦合装药结构。由于

表 1 隧道爆破参数
Tab. 1 Blasting parameters of the tunnel

断面	炮孔名称	雷管 段别	孔间距/ m	排距/ m	孔深/ m	线装药密度/ (kg·m ⁻¹)	单孔装药量/ kg	单段装药量/ kg	总药量/ kg
I、I’	掏槽孔	1	0.3	0.3	1.5	0.67	1.00 (5 节)	4.00	37.70
	扩槽孔	3	1.0	1.0	1.3	0.67	0.80 (4 节)	3.20	
	辅助孔 1 [#]	5	0.8	0.8	1.3	0.46	0.60 (3 节)	4.20	
	辅助孔 2 [#]	7	0.8	0.7	1.3	0.67	0.80 (4 节)	12.80	
	底板孔	9	0.7	0.7	1.3	0.38	0.60 (3 节)	3.50	
	周边孔 1 [#]	11	0.5	0.7	1.3	0.15	0.20 (1 节)	3.00	
	周边孔 2 [#]	13	0.7	0.7	1.3	0.67	1.00 (5 节)	7.00	
II、II’	缓冲孔	1	1.0	0.8	1.3	0.67	0.80 (4 节)	8.00	20.10
	辅助孔 1 [#]	3	1.0	0.8	1.3	0.46	0.60 (3 节)	2.50	
	辅助孔 2 [#]	5	1.0	0.7	1.3	0.46	0.60 (3 节)	2.50	
	辅助孔 3 [#]	7	1.0	0.7	1.3	0.46	0.60 (3 节)	2.50	
	周边孔 1 [#]	9	0.6	0.7	1.3	0.15	0.20 (1 节)	2.80	
	周边孔 2 [#]	11	0.7	1.0	1.3	0.23	0.40 (2 节)	1.80	
III	掏槽孔	1	0.3	0.3	1.5	0.67	1.00 (5 节)	4.00	36.00
	扩槽孔	3	1.0	1.0	1.3	0.67	0.80 (4 节)	3.20	
	辅助孔 1 [#]	5	0.8	0.8	1.3	0.67	0.80 (4 节)	10.80	
	辅助孔 2 [#]	7	0.8	0.8	1.3	0.67	0.80 (4 节)	12.00	
	底板孔	9	0.6	0.7	1.3	0.46	0.60 (3 节)	3.60	
	周边孔	11	0.5	0.7	1.3	0.15	0.20 (1 节)	2.40	
IV	辅助孔 1 [#]	1	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	2.00	9.60
	辅助孔 2 [#]	3	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	1.60	
	辅助孔 3 [#]	5	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	2.00	
	辅助孔 4 [#]	7	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	1.60	
	辅助孔 5 [#]	9	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	2.40	
V	缓冲孔	1	0.8	0.8	1.3	0.15	0.20 (1 节)	1.20	7.80
	辅助孔 1 [#]	3	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	2.00	
	辅助孔 2 [#]	5	0.8	0.8	1.3	0.31	0.40 (2 节)	2.80	
	周边孔	7	0.6	0.7	1.3	0.15	0.20 (1 节)	1.80	

周边孔比较浅,单孔装药量比较小,也可以采用空气柱装药结构,即把药卷捆绑在导爆索或雷管上,放入炮孔的中部偏下位置,孔口采用炮泥堵塞 20 ~ 40 cm,剩余部分不装填堵塞物,药卷上、下均为空气柱,具体如图 4 所示。

3.2 爆破网路连接

爆破网路连接如图 5 所示。为了提高光面爆破效果,减小爆破振动对周边结构的影响,采用毫秒微差延时导爆管起爆。每部分断面一次爆破时,按照起爆顺序分别装入多段毫秒雷管起爆,起爆顺序为掏槽孔→辅助孔→崩落孔→周边孔,由内向外逐层爆破,分别用于每个分部爆破开挖。将分组炮孔的导爆管各自集中成束捆绑在一起,用一发(或多发)雷管引爆,形成簇连网路。该种连接网路简单方便,多用于较密集深孔爆破或孔间微差延时起爆网路连

接中。

3.3 施工工序

在采用双侧壁导坑法施工时,将一个大大断面转换成几个小断面,分部开挖,合理地优化各部分施工工序,选取靠近既有隧道一侧的导洞(断面 I’)先行开挖,再开挖后行导洞和中间导洞,这样可以自然形成一条减振带,有效地降低爆破振动的有害效应。

4 爆破效果及影响分析

4.1 振动强度

为了验证爆破方案的合理性,控制新建隧道爆破对既有隧道人、车通行安全的影响,采用TC-4850 型爆破测振仪对既有隧道进行爆破振动测试。爆破振动测点布置如图6所示。为不影响正常通车,当

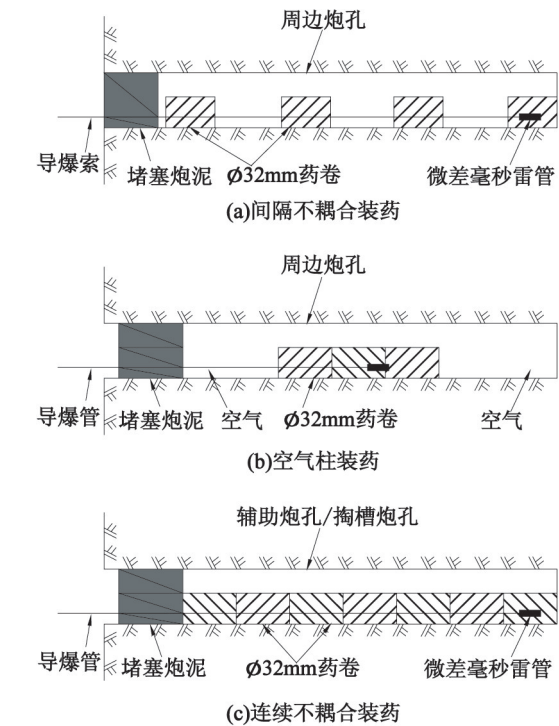


图 4 装药结构
Fig. 4 Charge structure

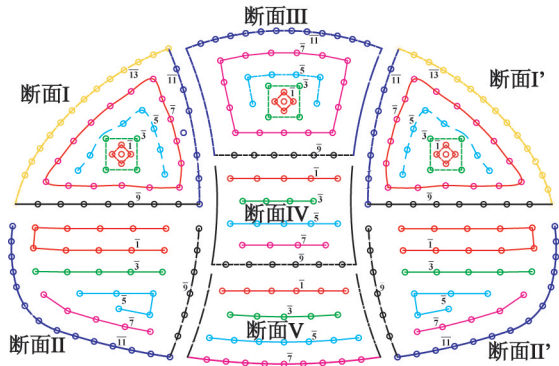


图 5 爆破网路连接
Fig. 5 Blasting network connection

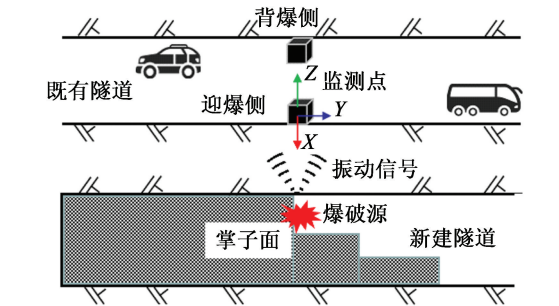


图 6 爆破振动监测点的布置
Fig. 6 Layout of blasting vibration monitoring points

感器,测试点距离爆心距离约为 $1.2D \sim 2.5D$ (D 为开挖断面宽度),其中传感器水平径向 X 对准爆破中心, Y 为水平切向, Z 为垂向。由于每部分断面爆破时产生的爆破振动存在较大差异,因此选取了 5 个断面,共进行 35 次现场测试。

4.1.1 振速整体分布

由图 7 可知,新建隧道掘进爆破对既有隧道迎爆侧振动的影响明显大于背爆侧,约为背爆侧振速峰值的 3~6 倍,说明既有隧道中空气对应力波具有衰减作用;因此,只需选取其中迎爆侧振速峰值的最大监测结果进行分析。在炮孔布置、装药量及爆破方式相同的条件下,爆破开挖导洞断面 I、II 部分时,右侧导洞断面 I'、II' 部分已经开挖完成,形成良好的隔振空间且爆心距增大;因此,应力波的衰减较快,导致左侧导洞断面爆破振速普遍比右侧导洞断面的小。而在中导洞断面 III、IV、V 爆破时,由于左、右导洞爆破时创造良好的临空面,减少爆破时岩石的夹制作用,有效地降低了爆破振动效应;因此,相同爆破条件下,中导洞下部的施工安全度大于其他导洞的施工安全度,新建隧道爆破中导洞下部断面施工中,可适度地增大装药量及开挖进深,提高施工进度。

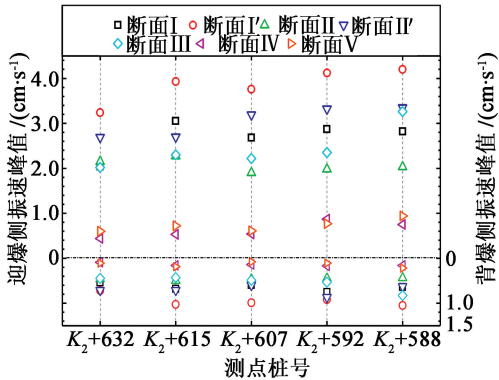


图 7 爆破振速峰值分布
Fig. 7 Peak distribution of blasting vibration velocity

4.1.2 典型振速

由图 8 可知,监测点的各向振速时程曲线具有很好的一致性,均由不同变化区段组成,分别代表了不同时间段微差延时起爆的振动特征。其中,最大值为水平径向振动速度 4.20 cm/s (X 方向);垂向振速次之,为 2.40 cm/s (Z 方向);水平切向振速最小,为 0.96 cm/s (Y 方向)。说明既有隧道迎爆侧主要受到爆炸应力波的垂直入射作用;隧道主要受到爆炸压应力和反射拉应力作用。而振速峰值均发生在 $0.221 \sim 0.270 \text{ s}$ 之间,即出现在辅助孔同段雷管起爆时,也说明了辅助孔单段装药量最大,引起的

每部分断面开挖到测试断面时,在爆破源同断面的迎爆侧和背爆侧既有隧道人行道上安装 2 个振速传

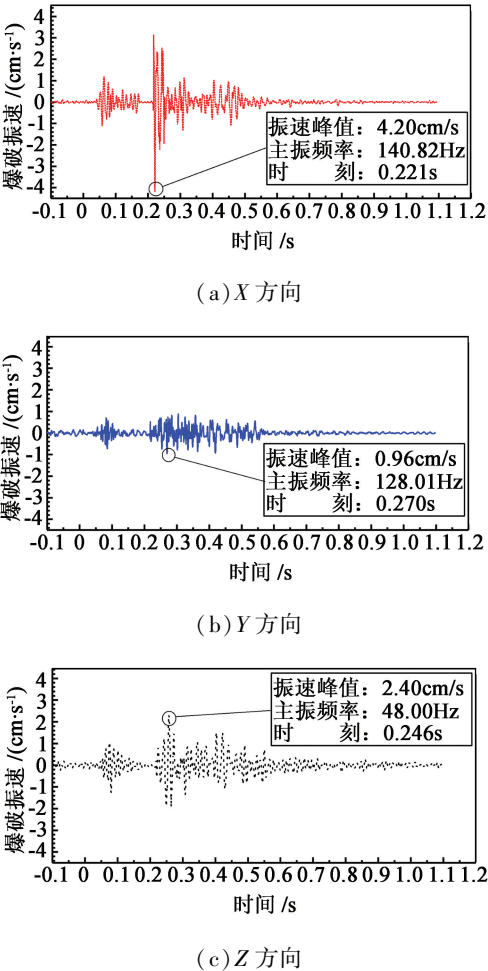


图 8 爆破振速时程曲线

图 8 Time history curves of blasting vibration velocity

爆破振动强度也最大。此外,既有隧道内的爆破主振频率比较大,主要分布在 100 ~ 200 Hz 之间;因此,爆破振动不会引起邻近隧道结构的共振,结构的损伤主要受振动速度的影响。采用该爆破方案时,爆破最大振速峰值满足《爆破安全规程》^[12]中规定的爆破振动速度控制在 12 ~ 15 cm/s 之间的要求;因此,该爆破方案不会对既有隧道造成损坏或影响。

4.2 爆破效果

如图 9 所示,隧道爆破后,围岩稳定性好,未出现掉块或坍塌现象;炮孔利用率高,残留炮孔半孔率达到 93.5%;隧道开挖轮廓光滑圆顺,无需二次凿除或修整;爆破石渣块度小,且较均匀,完全符合装渣要求;大大地缩减了额外施工工作量,保证了施工进度。

4.3 预加固效果

由于新建二庄科隧道与既有隧道的间距过小,为了防止新建隧道在施工时对既有隧道产生影响,确保既有隧道的通行安全,在新建隧道施工前对既有隧道采取了临时加固措施。既有隧道二次衬砌采



(a) 周边眼半孔痕 (b) 石渣块度均匀

图 9 爆破效果

Fig. 9 Blasting outcome

用背拱加固,钢支撑由 I18 型工字钢组成,钢支撑的间距为 2.0 m,每个单元之间采用螺栓连接,钢拱架与既有隧道二次衬砌表面紧贴,纵向连接筋环向间距为 1.0 m,与钢支撑之间采用焊接牢固,确保整体的稳定性良好,加固效果如图 10 所示。既有隧道衬砌表面无明显开裂现象,隧道开挖爆破时不影响正常通行。



图 10 既有隧道衬砌加固

Fig. 10 Reinforcement of existing tunnel lining

5 结论

- 1) 将大断面转化成小断面爆破,优化施工工序,靠近既有隧道侧导洞先行,形成隔振临空面,可有效降低爆破振动对既有衬砌的影响,既有隧道迎爆侧振速峰值明显大于背爆侧,约为背爆侧的 3 ~ 6 倍;因此,施工中应加强对迎爆侧的振动监测。
- 2) 采用控制开挖循环进尺、提出合理的爆破施工参数及掏槽结构形式、微差延时爆破等技术措施,合理减小单段装药量,使得爆破振速控制在规范允许范围内,且爆破效果满足光面爆破质量控制要求,极大地提高了施工效率,可为类似近距隧道爆破施工参数计算提供参考。
- 3) 对既有隧道采取主动防护加固技术,增加临时背拱,不仅提高了隧道整体稳定性,而且增加了行人和车辆通行的安全感。

参 考 文 献

- [1] 熊炎林, 种玉配, 齐燕军, 等. 聚能爆破在隧道开挖成型控制中的仿真试验研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(4): 54-59.
XIONG Y L, ZHONG Y P, QI Y J, et al. Simulation test of shaped charge blasting in shaping control of tunnel excavation[J]. Explosive Materials, 2019, 48(4): 54-59.
- [2] 费鸿禄, 苏强, 蒋安俊, 等. 爆破荷载下隧道围岩破坏裂隙范围研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(2): 51-56.
FEI H L, SU Q, JIANG A J, et al. Damage fracture range of tunnel surrounding rock under blasting load[J]. Explosive Materials, 2019, 48(2): 51-56.
- [3] 任永华. 隧道穿越既有建筑物爆破施工影响及方案优化[J]. 铁道建筑, 2018, 58(4): 61-65.
REN Y H. Impact of blast construction on tunnel passing under buildings and its scheme optimization[J]. Railway Engineering, 2018, 58(4): 61-65.
- [4] 王超, 周传波, 路世伟, 等. 城市暗挖隧道爆破地震波传播规律研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 158-162.
WANG C, ZHOU C B, LU S W, et al. Propagation pattern of blasting vibration in the surrounding rock of metro tunnel[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 158-162.
- [5] 李立功, 张亮亮, 刘星. 小净距双洞隧道下穿建筑物爆破振速控制技术研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(5): 592-599.
LI L G, ZHANG L L, LIU X. Study of technology of blasting vibration velocity control of small clear spacing twin-tube tunnel crossing underneath buildings[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(5): 592-599.
- [6] 傅洪贤, 孔恒, 吴进科. 复杂环境下隧道爆破施工控制技术[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 286-291.
FU H X, KONG H, WU J K. Controlled technology of tunnel blasting in complex environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Suppl. 2): 286-291.
- [7] 刘伟. 连拱隧道下穿既有建筑物爆破分析研究[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 176-181.
LIU W. Research on the blasting vibration in continuous-double-arch tunnel through the builds[J]. Highway Engineering, 2017, 42(6): 176-181.
- [8] 罗敏. 山岭隧道光面爆破施工关键技术分析[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊 1): 783-786.
LUO M. Key techniques analysis of smooth blasting construction controlling in mountain ridge tunnel[J]. Construction Technology, 2018, 47(Suppl. 1): 783-786.
- [9] 杨玉银, 左祥, 张健鹏, 等. 精细化管理在隧洞光面爆破施工中的作用[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 55-60.
YANG Y Y, ZUO X, ZHANG J P, et al. The function of precise management in smooth blasting construction of tunnel[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3): 55-60.
- [10] 王伟. 芋家垭隧道原位扩挖光面爆破参数优化与测试研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [11] 袁红所, 张家铭, 贺立新, 等. 复杂地质条件下隧道爆破方案优化设计[J]. 爆破, 2016, 33(1): 50-54, 67.
YUAN H S, ZHANG J M, HE L X, et al. Optimization of tunnel's blasting scheme under complicated geological conditions[J]. Blasting, 2016, 33(1): 50-54, 67.
- [12] 国家安全生产监督管理局. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.