

隧道爆破施工对邻边古迹的影响与控制措施研究

曾祥玉¹, 秦鲜卓², 王东华¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 在高等级公路建设过程中, 因各种因素的制约, 往往存在着选线无法避免的隧道经过文化遗迹的情况。为解决隧道爆破施工对临边古迹及建(构)筑物的影响问题, 以西北地区某改扩建工程越岭隧道为研究背景, 利用爆破振动监测手段来评估隧道爆破产生地震波的强度, 并根据监测数据反馈动态调整优化爆破方案; 同时对危岩与石刻古迹进行专项加固与防护, 并考虑在古庙周边加装保护层, 起到双重保险的作用。研究表明, 控制措施实施效果良好, 成功避免了隧道爆破施工对临边古迹与古建筑物的不利影响。

关键词: 隧道; 邻边古迹; 爆破施工; 爆破振动监测; 控制措施

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0212-05

Study on Influence and Control Measures of Tunnel Blasting Construction on Adjacent Monuments

ZENG Xiangyu¹, QIN Xianzhuo², WANG Donghua¹

(1. Central South Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Guangxi Transportation Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: In the construction process of high-grade highways, due to the constraints of various factors, there are often some unavoidable situations where the tunnel passes through the cultural relics during the route selection. In order to solve the influence of tunnel blasting construction on the adjacent monuments and buildings (structures), taking the crossing-ridge tunnel of a reconstruction and expansion project in Northwest China as the research background, the blasting vibration monitoring method is used to evaluate the intensity of seismic waves generated by tunnel blasting, and the blasting scheme is dynamically adjusted and optimized according to the feedback of monitoring data. At the same time, the special reinforcement and protection of dangerous rocks and stone monuments are carried out. And a protective layer is considered to be installed around the ancient temple to play a double insurance role. The results show that the effect of the control measures is good, and the adverse effects of tunnel blasting construction on adjacent monuments and ancient buildings are avoided successfully.

Keywords: tunnel; adjacent monuments; blasting construction; blasting vibration monitoring; control measures

0 引言

目前, 随着西部地区的大力建设, 山岭地区正修建大量的高等级公路, 不可避免地存在以隧道方式以减小对名胜古迹的影响, 新奥法作为隧道施工的主要方法被越来越广泛地采用^[1-9], 山岭地区进行隧道施工时, 虽然会对周边的既有结构物进行相应的保护, 但通常这些重要的结构物搬迁难度大, 施工时需要保持古迹的原有面貌不被破坏, 因此对隧道施工技术提出更高的新要求; 另外, 山岭地区重要名胜古迹常位于崖壁附近, 在附近岩体中爆破施工时常

对岩体产生较大的影响, 特别在坚硬的岩体中, 爆破地震波衰减较慢, 隧道爆破施工对岩体上的名胜古迹影响较大。

针对隧道爆破施工对临边古迹或敏感建(构)筑物影响的问题, 隧道爆破施工时如附近有重要建筑物, 通常做法是将周边的既有建(构)筑物进行拆迁, 以降低隧道爆破施工对周边环境的影响, 目前研究已针对此问题展开相关大量的研究^[10-21], 但结合目前研究现状来看, 隧道控制爆破施工技术与古迹防护技术发展仍不成熟, 对爆破施工近距离穿越历史古迹此类爆破控制要求严格的情况研究较少, 在特殊环境条件下的隧道施工技术仍不够完善, 同时缺乏对复杂地质条件下, 隧道洞口邻近古迹的系统性研究, 隧道爆破施工将不可避免地对洞口周边环境

收稿日期: 2024-12-13

作者简介: 曾祥玉(1980—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥设计工作。

产生影响,研究合理可靠的微扰动控制方案与加固防护措施等成套关键技术,具有较强的现实意义。

充分借鉴前述文献的方法及理念,同时存在的不足,结合工程实例,以西部地区某改扩建工程越岭隧道为研究背景,针对复杂的隧道洞口周边环境,深入分析隧道爆破振动波传播规律与振动强度变化,并基于爆破振动监测数据与现场时实观测情况,提出了基于监测反馈的动态优化爆破方案,从优化爆破形式、爆破装药参数、临边古迹的加固与防护等方面提出合理有效的安全控制措施,此外,本研究还针对邻边古迹的加固与防护提出了综合性的控制措施,相关经验可为今后类似工程建设提供参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

西部地区某改扩建工程在既有隧道的基础上采用新建隧道设计方案由东向西穿越山脊,新建隧道设计为分离式形式,隧道右线起讫桩号为 K34+690 ~ K35+200,全长 510 m;左线起讫桩号为 ZK34+695 ~ ZK35+220,全长 525 m。隧道洞口周边环境较为复杂,洞口周边分布有较多(建)构筑物。隧道洞口周边环境与(建)构筑物分布情况见图 1。



图 1 隧道洞口周边环境及(建)构筑物分布情况

1.2 工程地质条件

隧址区地层岩性主要为第四系全新统、下元古界东岔沟组强风化、中风化混合岩化片麻岩,强~中分化混合岩化片麻岩为镶嵌碎裂结构,节理裂隙发育,岩体较破碎,岩土体波速 $V_p=1.0\sim2.2$ km/s。根据详勘地质报告,本隧道各级围岩的主要物理力学参数见表 1。

表 1 围岩物理力学参数

围岩级别	变形模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角 /(°)	单轴抗压 强度/ MPa
Ⅲ	12	0.26	1.3	45	60
Ⅳ	9	0.32	0.7	36	35
Ⅴ	6	0.36	0.06	10	20

1.3 隧道施工难点

隧道洞口周边分布有佛尔崖地圣祖寺庙、石刻名胜古迹、水力发电站供水干渠等既有敏感建(构)筑物,隧道开挖爆破会对山体产生较大扰动,使得岩体节理裂隙往外扩张与增多,可能导致出现落石等问题,严重威胁周边敏感建筑物的结构安全。隧道洞口附近寺庙与邻边石刻古迹情况见图 2。



(a) 寺庙情况



(b) “佛”石刻情况

图 2 隧道洞口附近寺庙与“佛”石刻情况

隧道洞口正上方分布有危岩,岩体风化严重,裂隙极其发育,危岩自稳能力较差。在隧道出洞施工过程中,既要控制隧道出洞周边岩土体掉落情况,同时也要保证隧道洞口上方孤石的稳定性,以防落石下坠影响古迹及过往车辆的安全,这给隧道出洞施工技术和施工方案带来较大挑战。隧道洞口上方孤石情况见图 3。



图 3 隧道洞口上方孤石情况

2 隧道爆破振动监测方案

当隧道开挖面越靠近寺庙、“佛”字古迹等敏感建筑物时,爆破振动控制显得愈发关键。为避免爆

破振动对临边古迹造成损害,需对隧道爆破地震波实行动态监测,并反馈优化调整隧道爆破参数,严格控制隧道洞口段的爆破振动强度,制定合理可行的隧道洞口段爆破施工方案,减弱隧道爆破施工对周边环境的影响,以防山体岩石块掉落。考虑到爆破地震波是通过隧道周边岩体进行传播,结合隧道出洞口周边建(构)造物的分布情况,选取ZK35+070开挖断面开始进行爆破振动监测,监测控制点设置于寺内平整场地上。该断面距离寺庙约100 m,能够较好地反映爆破振动在传播过程中的衰减规律,同时为后续的爆破参数优化提供可靠依据。”

2.1 确定爆破振动安全控制标准

隧道爆破振动监测前,首先调查、收集隧道周边重要(建)构筑物的材料、结构、建造年代等基本资料,然后根据(建)构筑物的重要性等级,参照《爆破安全规程》(GB 6722—2014)等国家及地方规程或标准,本文选取古建筑安全允许质点振动速度分别为 $0.1\sim 0.2\text{ cm/s}$ ($f\leq 10\text{ Hz}$), $0.2\sim 0.3\text{ cm/s}$ ($10\text{ Hz}\leq f\leq 50\text{ Hz}$), $0.3\sim 0.5\text{ cm/s}$ ($f> 50\text{ Hz}$)。

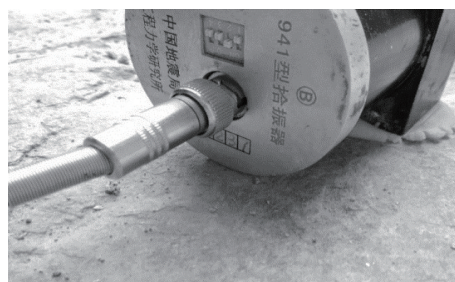
2.2 监测系统安装

考虑到爆破地震波是通过隧道周边岩体进行传播,根据隧道与(建)构筑物的位置关系,在监测点位置的平整场地上布设高精度拾震器,来实时监测隧道爆破地震波的变化规律,监测系统安装情况见图4。监测系统组装完成后,提前测试拾震器对爆破振动的敏感性,将拾震器与地面连接牢固,并检测监测系统连接是否正确,保证每次均可准确测到爆破地震波数据,确保监测数据的可靠性和准确性。

2.3 监测结果分析

隧道爆破振动对周边建(构)筑物的损伤主要取决于爆破振动速度,本文选取振动速度峰值与古建筑安全允许质点振动速度的对比情况来动态指导现场爆破施工。考虑到ZK35+070开挖断面距离寺庙位置(对应ZK35+170断面)还较远,最初爆破方案暂不进行大调整,仍采用常规爆破控制方案,仅考虑减低每循环装药量与每循环开挖长度,ZK35+070开挖断面爆破振动监测点信号采集结果见图5。

分析数据可知,隧道爆破产生的振动信号在传播过程中其振幅逐渐衰减,但爆破振动信号的主频维持在较为稳定的范围内(50~100 Hz)。随着时间的推移,在ZK35+070断面,初始振动速度峰值为 0.42 cm/s ;而在ZK35+156断面,振动速度峰值达到 0.55 cm/s ,接近安全允许值。通过优化爆破方案后,

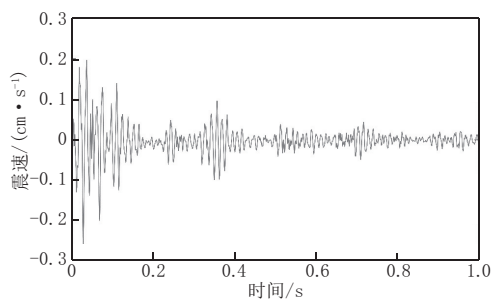


(a) 拾震器

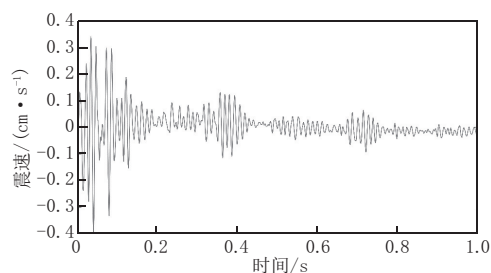


(b) 信号采集系统

图4 拾震器安装及信号采集系统



(a) 横波 V_H 振动影响变化规律



(b) 纵波 V_R 振动影响变化规律

图5 ZK35+070断面爆破振动影响变化规律

振动速度峰值显著降低:(1)在ZK35+120~156段,采用中空孔直眼掏槽控制爆破,振动速度峰值降低到 0.35 cm/s ;(2)在ZK35+156~165段,振动速度峰值进一步降低到 0.28 cm/s ;(3)在ZK35+165~173段,采用斜眼掏槽控制爆破,振动速度峰值仅为 0.22 cm/s 。在该测点的主震频率基本保持不变,但主震频率的范围逐渐减小,高频部分逐渐衰减。爆破振动速度(纵波)最大值达到 0.42 cm/s ,已接近隧道爆破安全允许质点振动速度。

由此可见,当隧道开挖面越来越接近寺庙,原常

规爆破方案已无法保证爆破振动影响始终可控,需对爆破参数与爆破进行优化。

隧道爆破地震波纵波监测信号的强度明显高于横波,说明隧道爆破地震波纵波在传播过程中的能量损失小于横波,因此在分析结构物对爆破地震波的反应时,应重点考虑爆破地震波纵波对结构的影响。隧道爆破地震波纵波对结构物产生的影响主要是沿水平方向的,是建(构)筑物受力的不利方面。

3 隧道施工控制措施研究

3.1 基于监测反馈的爆破方案优化

隧道爆破施工中,影响爆破振动强度的因素主要包括装药量、炮眼间距、循环进尺、掏槽方式等^[2],根据现场精准振动监测系统,可实时收集控制点振动速度峰值信息,并将监测结果实时反馈给现场,动态调整上述爆破参数,降低爆破地震波对结构的影响,从而达到保护临边古迹的目的。

通过对比分析不同爆破方案(如常规爆破、中空孔直眼掏槽爆破、斜眼掏槽爆破等),发现优化后的爆破方案能够显著降低振动速度。具体优化措施如下:(1)在 ZK35+120~156 段,采用中空孔直眼掏槽控制爆破,循环进尺从 3 m 调整为 2 m,装药量从 50 kg 降低到 44 kg;(2)在 ZK35+156~165 段,进一步减小循环进尺至 1.5 m,装药量降低到 30 kg;(3)在 ZK35+165~173 段,采用斜眼掏槽控制爆破,循环进尺仅为 1.0 m,装药量降低到 16 kg。通过上述优化措施,振动速度峰值显著降低,有效保护了临边古迹。”特别是采用中空深空直眼掏槽控制爆破技术,爆破控制效果很明显。各开挖区间所采用的施工爆破方案如图 6 所示,具体爆破参数见表 2。

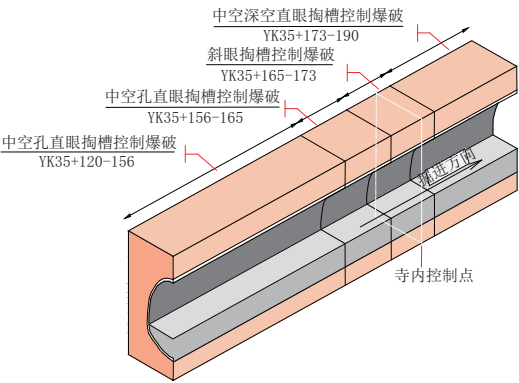


图6 不同开挖区间的控制爆破方案示意图

3.2 延时分区爆破减震方案

利用高精度孔外延时雷管,将炸药分组以毫秒级时差依次起爆,隧道爆破开挖时首先起爆掏槽眼,

表 2 优化后的爆破方案相关参数

开挖段落	爆破方式	循环进尺/m	装药量/kg	沿隧道轴线方向与寺庙距离/m	备注
ZK35+120~156	中空孔直眼掏槽控制爆破	2.0	44	14~50	先引爆内层炸药,增加炮孔自由面,再引爆外层炸药,减轻爆破振动的影响
ZK35+156~165	中空孔直眼掏槽控制爆破	1.5	30	5~14	
ZK35+165~173	斜眼掏槽控制爆破	1.0	16	3~5	该段处于寺庙的正上方,隧道开挖边线距庙宇仅 2 m,大幅减少每循环进尺与装药量
ZK35+173~190	中空深孔直眼掏槽控制爆破	2.0	44	3~20	该段靠近崖面石刻古迹“佛”及供水干渠,中空孔钻孔深度 10 m

在开挖面形成空间较大的临空导洞,为后起爆炸药提供临空面,然后再按顺序依次起爆辅助眼、周边眼等,同时根据监测数据动态调整辅助眼、周边眼的装药量。延时分区爆破方案上台阶炮眼的布置情况见图 7。

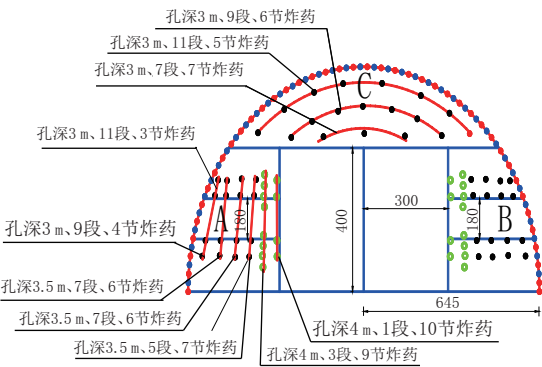


图7 延时分区爆破方案上台阶炮眼布置

实践效果表明,采用该延时分区爆破减震方案的先后爆破振动峰值会明显错开,可实现对爆破振动更好的控制效果。该爆破方案的减震效果与各分段炸药间的延时时间、各分段炸药的数量、掏槽眼的尺寸与数量等密切相关,各分段炸药间的延时时间最佳值为 10 ms 左右。

3.3 加固与防护措施

为防止隧道爆破施工过程中,由于施工不当引起的岩体掉落问题,需提前对洞口岩体进行加固,从而保证洞口(建)构筑物、临边古迹与过往车辆的安全。除了对岩体进行专项支护措施和加固防护外,还根据实际情况在古庙周边加装了保护层,设置相应的防护措施,以提高古建筑结构的安全可靠性,起到双重保险的作用。

3.2.1 危岩加固与防护

对危岩岩体裂缝采用 M30 水泥砂浆进行灌注,以提高孤石整体性,并进行喷锚防护;对孤石采用高强预应力锚索进行加固,锚索锚固在稳定的基岩上,为达到预期锚固效果,灌注采用水泥砂浆浆液,灌注材料的配比经试验确定,灌注浆液的流动度控制在 120~170 mm,并在浆液中掺入适量膨胀剂与早强剂;采用 GA2 型 SNS 柔性防护系统对洞顶危石进行整体防护,将危石体紧密包裹起来,防止出现局部掉块。

3.2.2 “佛”字石刻古迹防护

为保证该石刻古迹及其周边岩体的稳定,特对古迹岩体进行局部加强防护。设计采用长 6 m 的 $\phi 35$ 钢筋锚杆对“佛”字附近岩层进行加固,并在“佛”字石刻古迹周边采用长 3 m 的 $\phi 70$ 锚索对岩层进行加固。通过锚索将 PD_1 050 主动型防护网固定在古迹表面,作为二级防护措施。PD_1 050 主动型防护网的网格尺寸为 2 m $\times$ 2 m、网孔尺寸为 30 cm $\times$ 30 cm。

3.2.3 古寺庙建筑防护

为避免隧道爆破施工对古寺庙建筑的影响,对寺庙周边爆破地震波的强度进行监测,并根据监测结果实时调整施工爆破与支护参数;并对寺庙采取棚架结构进行防护,防止落石损坏寺庙古建筑,棚架整体防护结构效果见图 8。棚架采用 $\phi 500$ mm $\times$ 12 mm 钢管,每 2 根钢管立柱之间设置斜撑,纵向间隔布置为 3 m,内外立柱高差为 30 cm,斜撑、水平杆与钢管立柱连接成整体。横梁采用 I32b 工字钢,次纵梁采用 [10 槽钢,每 2 根横梁与连接钢筋、次纵梁、面板等材料连接为整体,主纵梁采用 25a 工字钢,与横梁焊接成整体。



图 8 棚架整体防护结构图施工效果

4 结 语

本文以西部地区某改扩建工程越岭隧道为研究背景,针对隧道复杂洞口周边环境,深入分析隧道爆破振动波传播规律与振动强度变化,并基于爆破振动监测数据与现场时实观测情况,从优化爆破形式、

爆破装药参数、临边古迹的加固与防护等方面提出合理有效的安全控制措施。主要结论如下。

(1)隧道爆破产生的振动信号在传播过程中其振幅逐渐衰减,但爆破振动信号的主频维持在较为稳定的范围内(50~100 Hz)。隧道爆破地震波纵波监测信号的强度明显高于横波,分析结构对爆破地震波的反应时,应重点考虑爆破地震波纵波对结构的影响。

(2)根据隧道开挖面与寺庙的距离不同,通过采用中空孔直眼掏槽控制爆破、斜眼掏槽控制爆破及中空深空直眼掏槽控制爆破等优化方案,能有效避免传统爆破方式爆破振动强度高的问题,大大削弱爆破地震波往外传播的振动幅度。

(3)采用延时分区爆破方案可降低每循环爆破振动地震波的强度,实现对爆破振动更好的控制效果;其减震效果与各分段炸药间的延时时间、各分段炸药的数量、掏槽眼的尺寸与数量等密切相关,各分段炸药间的延时时间最佳值为 10 ms 左右。

(4)通过对岩体进行专项支护和加固,以及在寺庙周边加装保护层,可提高古建筑结构的安全可靠性,起到双重保险的作用。

(5)在类似工程中,本项目经验可供邻近敏感结构物的隧道施工、复杂地质条件下的隧道施工、浅埋隧道和下穿工程借鉴,建议根据具体地质条件和周边环境,灵活调整掏槽深度和装药量,以达到最佳的减震效果。

参考文献:

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设,2015,35(2):95-107.
- [2] 叶飞,冯浩岚,曹凯,等.近距离穿越古迹隧道爆破施工爆源参数优化[J].地下空间与工程学报,2022,18(4):1292-1304;1316.
- [3] 韩鑫,王军,王延雨,等.基于振动监测的隧道爆破爆源减震措施研究[J].公路交通科技,2019(4):235-237.
- [4] 姚立秋.临边古迹控制爆破在隧道中的应用探讨[J].安徽建筑,2018,24(3):171-172.
- [5] 王延雨.邻近重要建筑物隧道破碎围岩“临空”出洞技术研究[J].产业创新研究,2018(6):114-115;118.
- [6] 郭新新.密集居民区城市隧道爆破施工对周边构筑物的振动响应规律及安全控制技术研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [7] 袁良远,唐春海,朱加雄,等.高速公路隧道下穿既有铁路隧道控制爆破技术[J].工程爆破,2016(1):64-67.
- [8] 蒋美军.隧道穿越岩性交界区失稳变形机理与控制措施研究[J].西部交通科技,2022(5):147-150.
- [9] 卢超波,杨庭伟,姜洪亮,等.浅埋土岩复合段隧道冒顶分析与防治[J].科学技术与工程,2023,23(35):15228-15238.
- [10] 林明才,蒋雅君,杨其新,等.基于隧道断面相对变形率判定围岩稳定性的研究[J].地下空间与工程学报,2021(3):878-882;952.