

文章编号:1673-9469(2025)06-0056-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.007

泄水洞爆破对邻近既有隧道衬砌结构的振动影响研究

郎军星^{1,2}, 赵晓佳², 高智³, 孙星亮^{2*}

(1. 中建安装集团有限公司, 江苏南京 210046; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北石家庄 050043;
3. 中国交建总承包经营分公司, 北京 100088)

摘要: 为探究泄水洞爆破对邻近既有隧道衬砌结构的振动影响, 以浩吉铁路北山二号隧道泄水洞工程为依托, 采用现场监测和数值模拟方法, 分析了泄水洞爆破作用下隧道衬砌峰值振速和应力变化规律。研究表明: 原爆破方案下, 绝大部分衬砌峰值振速严重超出安全允许振速(5 cm/s), 且最大拉应力已高于衬砌混凝土极限抗拉强度, 导致衬砌表面出现裂缝; 泄水洞爆破对隧道迎振侧边墙影响最大, 最大峰值振速达 17.98 cm/s, 超出安全允许振速。基于现场监测数据拟合所得的萨道夫斯基公式反算出最大单段装药量, 提出了泄水洞优化爆破方案。数值模拟及现场监测表明, 优化爆破方案的峰值振速均未超出安全允许振速。

关键词: 既有隧道; 爆破振动; 允许振速; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

Study on the Vibration Effects of Drainage Tunnel Blasting on Adjacent Existing Tunnel Lining Structure

LANG Junxing^{1,2}, ZHAO Xiaojia², GAO Zhi³, SUN Xingliang^{2*}

(1. China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210046, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
3. China Communications Construction General Contracting and Operation Branch, Beijing 100088, China)

Abstract: To investigate the vibration effect of the drainage tunnel blasting on the lining structure of the adjacent existing tunnel, the drainage tunnel construction of Beishan No. 2 Tunnel in Hao-Ji Railway was considered as the research background. Field monitoring and of dynamic finite element methods were used to analyze the variation laws of peak vibration velocity and stress of the exiting tunnel lining due to the drainage tunnel blasting. The results showed that under the existing blasting scheme, both on-site monitoring and numerical simulation indicated that almost all the peak vibration velocities of tunnel lining were much greater than the allowed vibration velocity of 5 cm/s. The maximum tensile stress was larger than the ultimate tensile strength of the lining concrete, resulting in cracks in the lining; and the blasting of the drainage tunnel has the greatest impact on the side wall of the tunnel facing the vibration source, with a maximum peak vibration velocity of 17.98 cm/s, significantly exceeding the allowed vibration velocity. Based on the Sadovsky's formula fitted from field monitoring data, the maximum charge amount per delay was calculated, and an optimized blasting scheme for the drainage tunnel was proposed. Numerical simulations and on-site monitoring confirmed that the peak vibration velocity of the optimized blasting scheme did not exceed the allowed vibration velocity, thereby ensuring the safety of the tunnel's main lining structure.

Key words: existing tunnel; blasting vibration; allowed vibration velocity; numerical simulation; field monitoring

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52308272)

第一作者: 郎军星(1999—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 从事隧道及地下工程新技术及稳定性理论研究。

* 通信作者: 孙星亮(1970—), 男, 河南郑县人, 博士, 教授, 从事隧道及地下工程新技术及稳定性理论研究。

在工程设计中,新建隧道与既有隧道之间的净距通常较小,甚至出现交叠情形。山岭隧道通常采用新奥法施工,爆破开挖产生的振动易对既有隧道的运营安全构成威胁^[1-3]。研究既有隧道在爆破作用下的振动响应规律,进而优化爆破方案,降低振动影响,已成为隧道设计与施工中备受关注的重要问题。

部分学者采用现场监测方法开展爆破振动研究,韩翔宇^[4]通过现场监测,分析了爆破振动在土层中的衰减规律及峰值振速与震源距离的关系。除现场监测外,还可采用数值模拟软件对爆破振动进行计算分析,常用软件包括 ABAQUS、FLAC3D 和 ANSYS/LS-DYNA 等^[5-7]。曹明星等^[8]采用现场监测及理论计算方法研究了既有铁路隧道在爆破荷载作用下的应力分布和振动传播规律。蒋楠等^[9]基于现场监测与数值模拟结果,讨论了邻近爆破振动引起既有隧道衬砌的动力响应特征。刘拓^[10]利用 LS-DYNA 软件进行模拟,发现爆破对隧道的拱脚影响最大,对拱腰影响最小;鲜一丁^[11]通过改变微差间隔时间,研究了隧道对爆破振动的响应规律;张旭等^[12]通过数值模拟揭示了人防隧道动力响应特征,确定了爆破施工时隧道衬砌结构的最危险断面位置及衬砌结构振速的安全阈值。此外,Takahashi 等^[13]结合现场测试和数值模拟,研究了不同场地及爆破地质条件下振动行为的差异。于建新等^[14]针对上下交叉隧道爆破振动,确定了控制爆破振动的最大掏槽药量,制定了符合要求的爆破方案。袁冉等^[15]研究了既有隧道衬砌的动力响应规律,结果表明,掏槽孔和掌子面的夹角与爆破产生的振动速度、最大主应力存在线性关系。

目前,针对复杂地质条件下的隧道爆破施工研究仍相对缺乏。本文依托浩吉铁路北山二号隧道泄水洞工程,采用现场监测与数值模拟相结合的方法,探究了既有隧道衬砌表面裂缝的成因,以期对泄水洞后期的爆破安全施工提供指导。

1 工程概况

北山二号隧道为单洞单线铁路隧道,全长 2 398 m。隧道建成后,在隧道进口右侧开凿一条长 1 007 m 的泄水洞(走向基本与正洞平行,两中线间距 25 m)以排泄隧道外侧溶洞水,并向正洞打设 6 处横通道,横通道与隧道衬砌最小净距 5 m。泄水洞与横通道断面相同(图 1),泄水洞及其横通

道与隧道正洞的平面位置关系见图 2。根据《铁路工程爆破振动安全技术规程》(TB 10313—2019)^[16]及设计文件要求,北山二号隧道衬砌安全振速 v_m 为 5 cm/s。

在泄水洞爆破开挖施工过程中,现场技术人员巡查发现,泄水洞施工影响段的隧道衬砌表面出现多处裂缝(图 3)。为判断裂缝是否由泄水洞爆破振动引起,并采取应对措施,本文对泄水洞原爆破方案下隧道衬砌的振动速度进行监测。

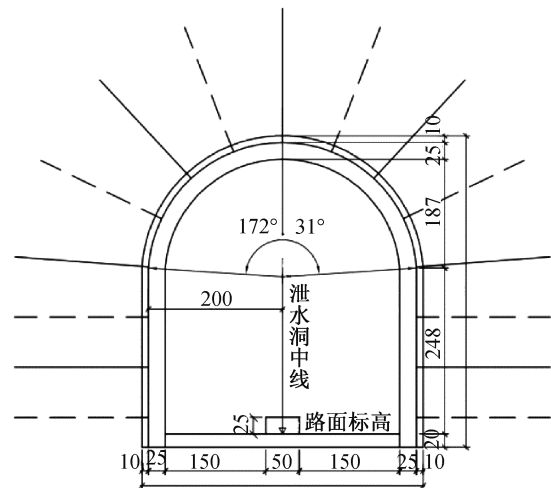


图 1 泄水洞与泄水洞横通道断面图(单位:cm)

Fig. 1 Cross section of drainage tunnel and passage tunnel (unit: cm)

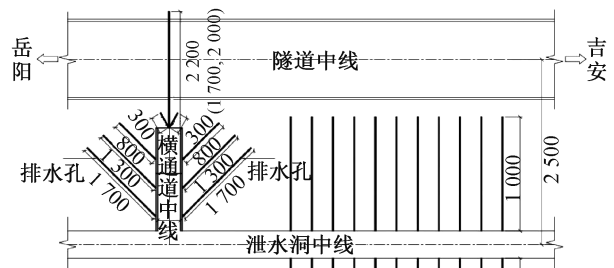


图 2 泄水洞与隧道位置关系平面图(单位:cm)

Fig. 2 Plan position of the existing tunnel and drainage tunnel (unit: cm)

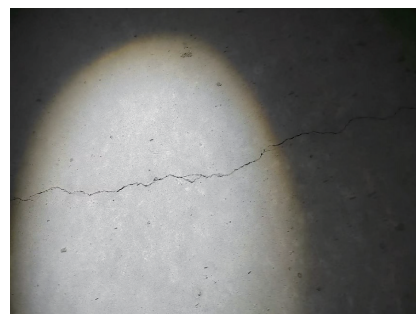
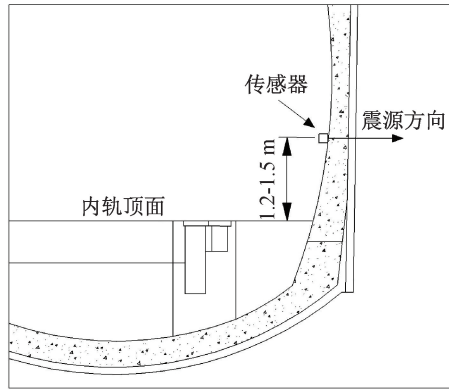


图 3 既有隧道衬砌表面裂缝图

Fig. 3 Diagram of surface cracks on the tunnel lining



(a) 传感器布置示意图



(b) 现场传感器安装照片

图4 传感器安装图

Fig. 4 Sensors installation diagram

2 爆破振动监测

2.1 监测方案

采用 TC-4850 N 无线网络测振仪及 NUBOX 便携式测振仪进行隧道衬砌爆破振动监测。横通道里程 XY0+113、泄水洞里程 XY0+141 分别对应北山二号隧道 DK1674+493 和 DK1674+521。在隧道 DK1674+521 处及前后 10 m 迎爆侧衬砌上布置传感器,测点距地面 1.2~1.5 m,如图 4 所示。

2.2 监测结果与分析

在北山二号隧道 DK1674+493 和 DK1674+521 处进行 7 次监测,泄水洞爆破引起隧道衬砌测点的典型振速时程曲线见图 5。由图 5 可知,衬砌质点最大振速是由掏槽眼爆破引起的。因此,本文重点模拟掏槽眼爆破对隧道衬砌振动的影响规律。

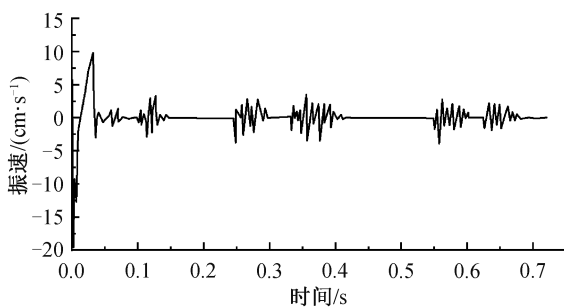


图5 隧道衬砌测点典型振速时程曲线

Fig. 5 Typical vibration velocity time history curve of the tunnel lining measurement points

将泄水洞及横通道爆破引起的北山二号隧道衬砌振动监测结果,绘制峰值振速与测点至爆源距离的关系曲线,见图 6。爆破时泄水洞、横通道

的最大峰值振速分别为 17.23、16.78 cm/s。现有爆破方案的峰值振速多数已严重超出安全允许振速,巡查发现的隧道衬砌表面裂缝很可能是泄水洞及横通道爆破振动造成的。

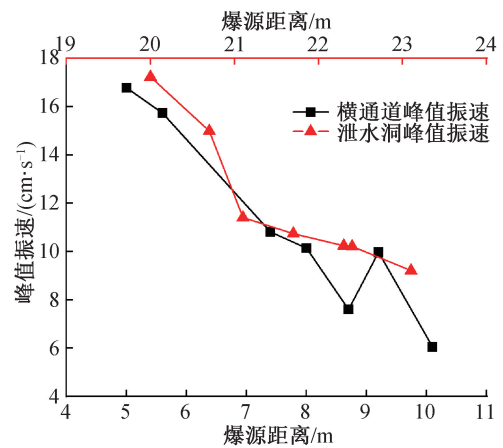


图6 质点峰值振速与爆源距离的关系

Fig. 6 Relationship between the peak vibration velocity of the particle and the distance from the explosion source

2.3 爆破振动数据回归分析

通常用萨道夫斯基公式(式(1))描述爆破引起振速与距离及炸药量的关系,并利用监测的爆破振动数据进行拟合。根据预测质点振速的拟合公式,反推出最大单段装药量。将式(1)两边取自然对数即可得到式(2)。

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{d} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\ln v = \ln K + \alpha \ln \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{d} \right) \quad (2)$$

式中: v 为爆破引起的质点振速,cm/s; Q 为最大单段装药量,kg; d 为测点与爆源的直线距离,m; K 为

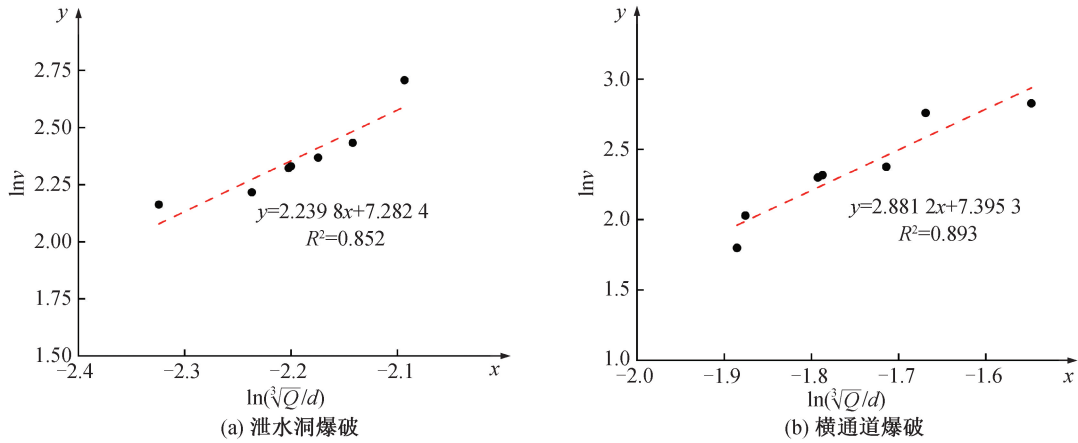


图 7 质点合振速拟合曲线

Fig. 7 Fitted curve of the combined vibration velocity of the mass point

与围岩性质、地质条件相关的系数; α 为爆破衰减系数。

令 $\ln v = y, \ln\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{d}\right) = x$, 则将式(2)转化为一元线性回归方程:

$$y = \alpha x + \ln K \quad (3)$$

泄水洞及其横通道爆破引起隧道正洞衬砌质点峰值振速随距离的拟合曲线见图 7。根据拟合曲线得到爆破振动引起的泄水洞、横通道振速 v_1 、 v_2 计算公式, 见式(4)(5), R^2 分别为 0.852 和 0.893。据此反推最大单段装药量, 进而优化爆破方案。

$$v_1 = 1454 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{d}\right)^{2.2398} \quad (4)$$

$$v_2 = 1628 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{d}\right)^{2.8812} \quad (5)$$

3 数值模拟

3.1 模型建立

利用 ANSYS LS-DYNA 动力有限元软件建立尺寸为 65 m×50 m×60 m 的数值模型, 见图 8。模型中的 X、Y、Z 分别为垂直隧道轴线的水平方向、竖直方向及隧道轴线方向。为减小边界效应的影响, 模型边界均设为无反射边界。模拟时, 采用 SOLID164 单元、cm-g- μ s 单位制。模型中隧道与泄水洞、横通道的位置关系见图 9。

3.2 材料参数选取及工况划分

根据设计资料, 隧道衬砌混凝土强度等级为 C30, 采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC (双线性弹塑性各向同性硬化) 材料模型; 空气采用 MAT_NULL

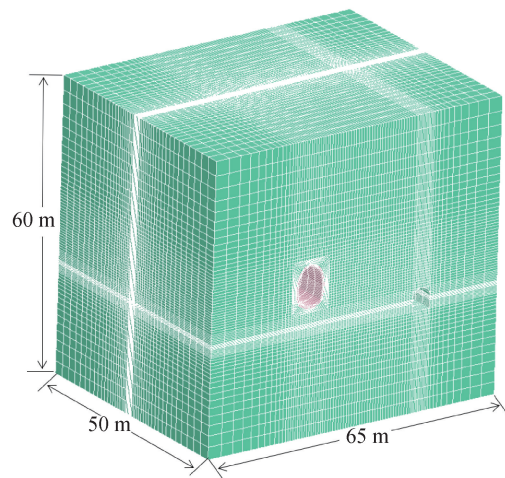
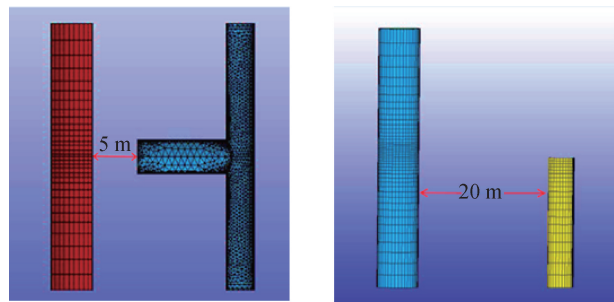


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model



(a) 隧道与泄水洞位置关系图 (b) 隧道与横通道位置关系图

图 9 典型位置关系图

Fig. 9 Typical position relationship

材料模型, 搭配 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程; 炸药选用高性能炸药材料 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 采用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程描述其爆轰特性; 岩石在爆破荷载作用下的本构关系, 通过 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 双线性弹塑性各向同性硬化模型进行模拟。材料参数与模拟工况划分根据《铁路隧道设计规范》

(TB 10003—2016)^[17]及勘察报告确定,具体见表1、表2。

表1 材料参数表

Tab. 1 Material parameters

材料类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	弹性模量/ GPa
Ⅲ级围岩	2 500	0.26	11
隧道衬砌	2 600	0.20	30

表2 模拟工况划分

Tab. 2 Division of simulated working conditions

工况	测点与爆源 距离/m	进尺/ m	围岩 级别	掏槽眼药量/ kg
1	20(泄水洞)	2.0	Ⅲ	15.0
2	5(横通道)	0.6	Ⅲ	1.2
3	7(横通道)	0.8	Ⅲ	2.4
4	9(横通道)	0.8	Ⅲ	2.4

4 模拟结果分析

为验证模型的可靠性,现对工况1进行数值模拟,并分析泄水洞爆破对隧道衬砌的振动影响。北山二号隧道的泄水洞与隧道近似平行,将距泄水洞掌子面爆源最近的断面设定为0断面,并规定沿泄水洞爆破开挖方向,掌子面前方为正,后方为负。在此基础上,每隔5m设置1个断面,共计5个,断面位置见图10。断面内重点关注迎爆侧衬砌振速,典型测点位置见图11,在每个断面拱顶、拱底、拱腰等位置设置测点,共计10个。迎爆侧及背爆侧的测点名称后分别缀以字母A和B。

4.1 模拟可靠性分析

将北山二号隧道衬砌迎爆侧±10m范围内3个测点的实测与数值模拟的峰值振速进行对比(表3),测点实测峰值振速略小于模拟值,相对误差范围为2.6%~10.5%。二者吻合较好,验证了数值模拟方法的可行性。

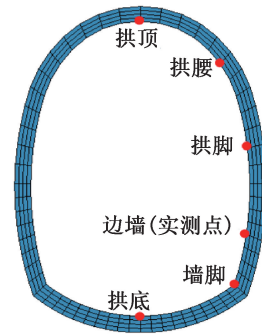


图11 测点位置示意图

Fig. 11 Position diagram of the measuring point

表3 实测与数值模拟结果对比

Tab. 3 Comparison between measured and numerical simulation results

测点位置	实测峰值振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟峰值振速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对 误差/%
-10断面边墙	8.26	9.23	10.5
0断面边墙	17.23	16.80	2.6
+10断面边墙	9.21	9.82	6.0

4.2 泄水洞爆破对隧道衬砌影响的振动分析

4.2.1 振速分析

根据模拟结果提取各断面不同部位的峰值振速,绘制了隧道径向峰值振速分布图(图12)。

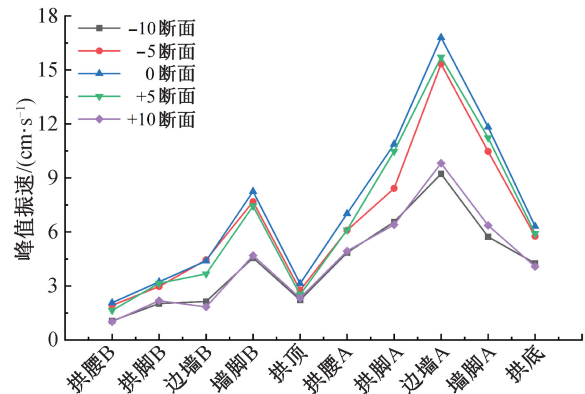


图12 隧道断面峰值振速分布

Fig. 12 Peak vibration velocity distribution of tunnel cross-section

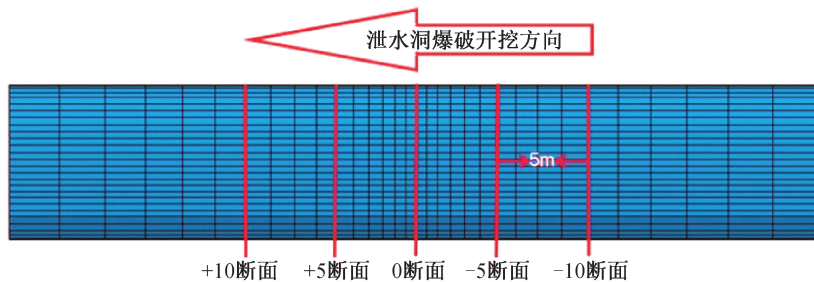


图10 数值模拟监测断面位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of monitoring section positions in numerical simulation

由图 12 可知,迎爆侧测点的峰值振速均大于对应的背爆侧测点。峰值振速随爆源距离的增加而减小,0 断面各测点峰值振速最大,±10 断面各测点峰值振速最小。0 断面边墙处的峰值振速最大,为 16.8 cm/s,拱顶部位的峰值振速最小,为 3.13 cm/s。既有爆破方案对隧道衬砌迎爆侧的峰值振速影响由大到小依次为边墙、墙脚、拱脚、拱腰、拱顶。

为进一步探究隧道轴向峰值振速分布规律,从-10 断面至+10 断面,以 1 m 为间隔提取了共 21 个断面的峰值振速,并绘制成曲线,如图 13 所示。

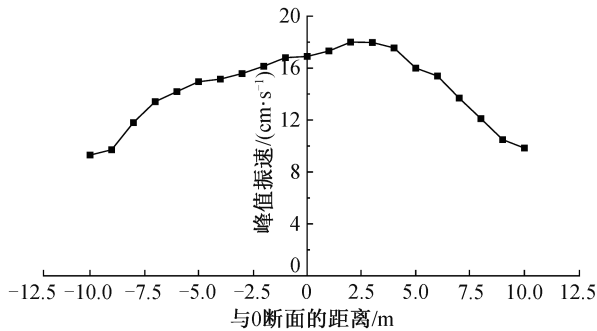


图 13 与 0 断面不同距离断面的峰值振速分布

Fig. 13 Peak vibration velocity of sections at different distances from section 0

由图 13 可知,峰值振速最大值位于+2 断面,为 17.98 cm/s,正断面(泄水洞掌子面开挖方向)的峰值振速略大于负断面。这可能是因为正断面爆炸应力波的传播介质为围岩,而负断面的传播介质为空气和围岩。应力波在空气中传播时能量散耗较大,因此,最大峰值振速出现在+2 断面。

隧道衬砌+2 断面位于迎爆侧边墙处的峰值振速最大(17.98 cm/s),0 断面次之(16.8 cm/s),均与实测值相近,且大于安全允许振速。表明原有的泄水洞爆破方案极不合理,会对既有隧道衬砌结构造成破坏。下文将分析泄水洞爆破引起既有隧道衬砌峰值动应力,说明裂缝产生的原因。

4.2.2 衬砌拉应力分析

提取隧道迎爆侧衬砌断面各测点的拉应力时程曲线,见图 14。随着时间的推移,各测点的拉应力迅速达到峰值后急剧下降。边墙处的峰值拉应力达到 2.36 MPa,大于 C30 混凝土的极限抗拉强度 2.2 MPa,导致隧道衬砌表面产生拉裂缝。

4.3 横通道爆破对隧道衬砌影响分析

4.3.1 振速分析

在不同爆源距离条件下,迎爆侧衬砌峰值振

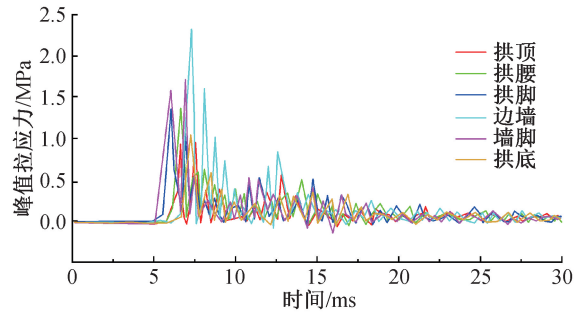


图 14 断面各测点峰值拉应力时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of peak tensile stress at each measurement point of cross-section

速分布见图 15。由图 15 可知,在相同爆破方案、不同爆源距离条件下,隧道迎爆侧衬砌测点的峰值振速分布状况基本一致。隧道拱顶衬砌峰值振速最小,其他测点峰值振速均大于安全允许振速。边墙处峰值振速最大,分别为 19.20、15.25、11.89 cm/s。

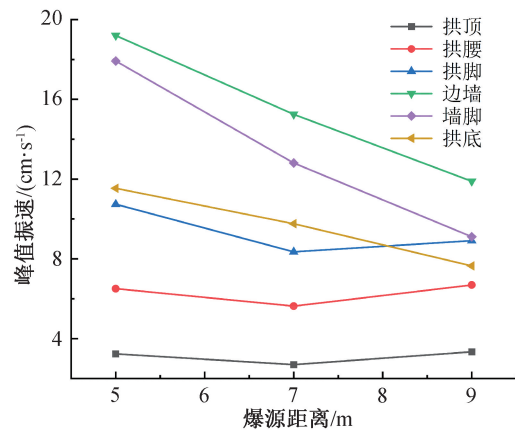


图 15 隧道迎爆侧衬砌测点峰值振速与爆源距离的关系

Fig. 15 Relationship between the peak vibration velocity of the measurement points on the side lining of the tunnel at the impact point and the net distance

4.3.2 衬砌拉应力分析

在不同爆源距离条件下隧道迎爆侧测点的衬砌峰值拉应力分布见图 16。由图 16 可以看出,在相同爆破方案下,各测点的最大拉应力与峰值振速的变化规律基本一致。迎爆侧衬砌边墙处峰值拉应力达到了 2.69 MPa,超过了隧道衬砌混凝土的极限抗拉强度,拱顶处拉应力最小。拱腰处的最大拉应力随爆源距离增大呈小幅上升趋势。这可能是爆炸应力波传播时间的差异,导致应力波出现叠加。

泄水洞及其横通道爆破均导致隧道迎爆侧衬砌边墙处的振速大于安全允许振速,拉应力超过了混凝土的极限抗拉强度。由此可见,隧道衬砌

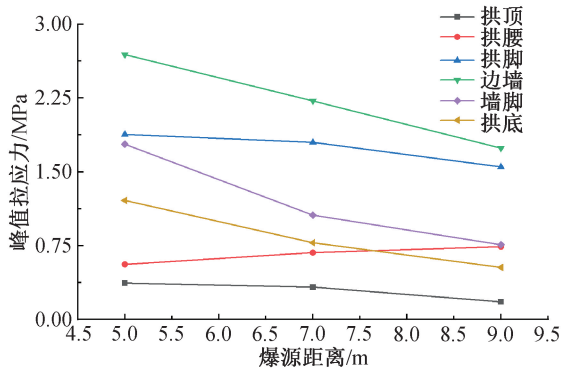


图 16 隧道迎爆侧衬砌测点峰值拉应力与爆源距离的关系

Fig. 16 Relationship between peak tensile stress and the distance from the explosion source

边墙出现的裂缝正是泄水洞及其横通道爆破振动导致的。

5 爆破方案优化及效果

5.1 爆破方案优化设计

针对北山二号隧道的工程特点,结合现场监测及数值模拟结果,泄水洞及其横通道的爆破振动控制措施主要从挖槽孔减振设计入手。与其他掏槽方式相比,楔形掏槽产生的振动效应更低,因此,优化爆破方案采用楔形掏槽设计^[18]。

将安全允许振速 $v_m = 5 \text{ cm/s}$ 及不同测点与爆源的距离 d 代入拟合的式(4)(5),得到最大单段装药量 Q ,见表 4。泄水洞爆破最大单段装药量不超过 4 kg,对于仅有一个临空面的掏槽眼爆破,最大药量按 $Q=4 \text{ kg}$ 确定。在设计横通道爆破方案时,由于横通道所处围岩级别为Ⅲ级和Ⅳ级,且相同条件下Ⅳ级围岩受爆破影响较大,因此选用处于Ⅳ级围岩条件下的横通道进行爆破方案的优

化。经计算,当测点与爆源距离 d 大于 12 m 时,横通道最大单段装药量大于 4.1 kg,且横通道断面形状、尺寸与泄水洞相同。因此,对于 d 为 12.0~18.4 m 区段的横通道,采用与泄水洞相同的爆破方案实施爆破。

表 4 不同测点与爆源距离对应的最大单段装药量

Tab. 4 Maximum single-segment charge corresponding to different distances from measuring points to blasting source

序号	测点与爆源距离 d/m	最大单段装药量 Q/kg	备注
1	20	4.0	泄水洞爆破
2	5	0.3	横通道爆破
3	6	0.5	横通道爆破
4	7	0.8	横通道爆破
5	8	1.2	横通道爆破
6	9	1.7	横通道爆破
7	10	2.4	横通道爆破
8	11	3.2	横通道爆破
9	12	4.1	横通道爆破

5.2 优化方案爆破振动效果数值模拟

基于优化后的爆破方案,设置如表 5 所示的工况 5 和工况 6 进行数值模拟。提取两种工况下隧道迎爆侧 0 断面衬砌各测点的峰值振速时程曲线及最大拉应力时刻衬砌拉应力云图,分别见图 17、18。

表 5 优化爆破方案工况

Tab. 5 Optimized blasting schemes

工况	测点与爆源距离/m	进尺/m	围岩级别	掏槽眼药量/kg
5	20(泄水洞)	0.8	V	3.6
6	5(横通道)	0.5	IV	0.3

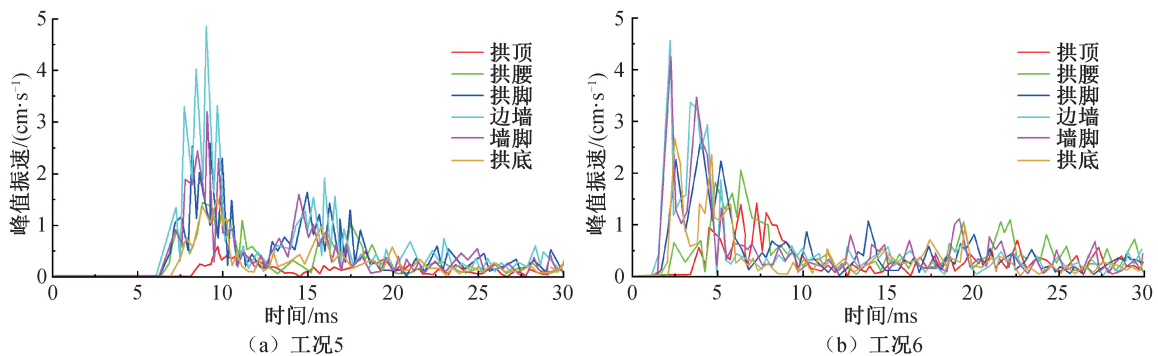


图 17 隧道迎爆侧断面测点峰值振速时程曲线

Fig. 17 Time-history curves of peak vibration velocities at measuring points of section

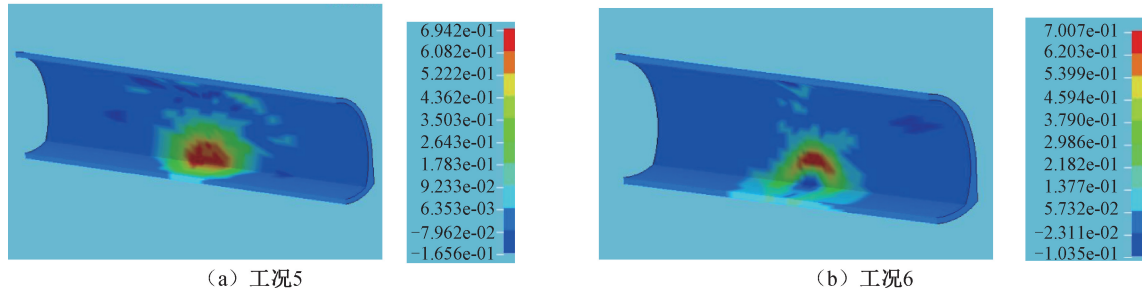


图 18 最大拉应力时刻衬砌拉应力云图(单位:MPa)

Fig. 18 Contour map of lining tensile stress at the moment of maximum tensile stress (unit:MPa)

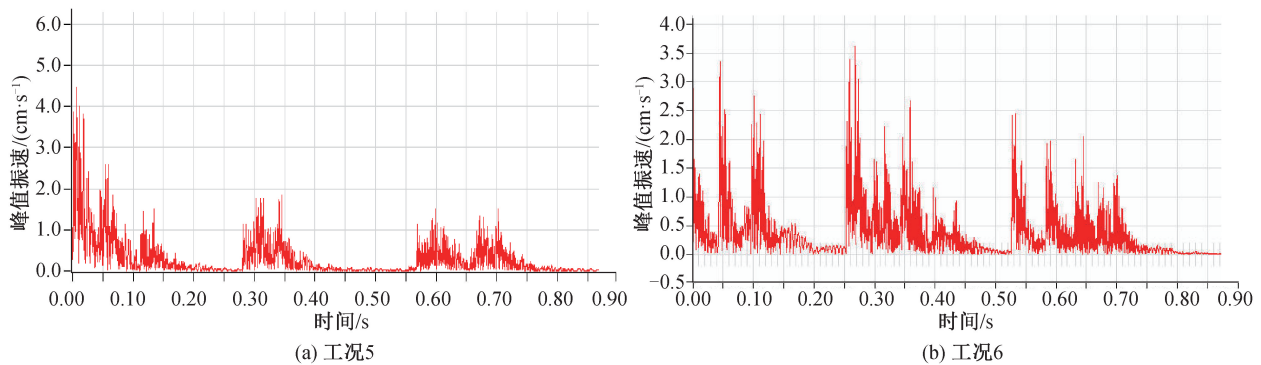


图 19 衬砌质点峰值振速时程曲线

Fig. 19 Time-history curves of peak particle vibration velocities of lining

由表 5 可以看出,工况 5 和工况 6 均在隧道断面迎爆侧衬砌边墙测点的峰值振速最大,分别为 4.92、4.73 cm/s,小于安全允许振速,满足施工要求;两种工况均在隧道断面迎爆侧衬砌边墙处的拉应力最大,分别为 0.69、0.70 MPa,低于隧道衬砌混凝土的极限抗拉强度。因此,优化后的爆破方案可满足施工要求。

5.3 优化方案实施效果

基于优化爆破方案,在北山二号隧道内开展现场监测,获得的部分衬砌质点峰值振速时程曲线如图 19 所示。在工况 5 条件下,监测里程 DK1764+440 和 DK1764+446 处的衬砌质点峰值振速分别为 4.56、4.85 cm/s,均小于模拟的峰值振速(4.92 cm/s);在工况 6 条件下,监测里程 DK1764+518 和 DK1764+493 处的衬砌质点峰值振速分别为 3.91、4.21 cm/s,均小于模拟的峰值振速(4.73 cm/s)。这主要是因为数值模拟将岩体视为均质体,未考虑裂隙、节理等对爆破振动的影响。现场监测所得峰值振速均未超过安全允许振速,且衬砌未出现新裂缝,表明本次优化爆破方案是合理的。

6 结论

1) 现场监测表明,现有爆破方案下,北山二号隧道衬砌大部分峰值振速已严重超出安全允许振速(5 cm/s),其中掏槽眼爆破对振动影响最大。

2) 泄水洞爆破对隧道衬砌+2 断面边墙影响最大,最大峰值振速为 17.98 cm/s,与实测值(17.23 cm/s)较为接近,且均大于安全允许振速;最大拉应力为 2.45 MPa,超过衬砌混凝土的极限抗拉强度,严重威胁隧道安全运营。

3) 采取楔形掏槽设计优化爆破方案,利用萨道夫斯基经验公式反算出最大单段装药量,数值模拟及现场监测得到的峰值振速均未超过安全允许振速,且衬砌并未出现新的裂缝,表明优化爆破方案是合理的。

参考文献:

- [1] 管晓明, 宫哲, 程飞, 等. 隧道掌子面前后方围岩爆破振动及精准控制研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 49-54+74.
GUAN X M, GONG Z, CHEGN F, et al. Study on blasting vibration and precise control of surrounding rock in front and rear of long-span railway tunnel face[J]. Journal

- of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(1): 49-54+74.
- [2] 汪波, 郭新新, 王志伟, 等. 新建隧道爆破施工对既有裂缝病害隧道的动力响应分析[J]. 爆破, 2019, 36(1): 90-96.
WANG B, GUO X X, WANG Z W, et al. Caused dynamic response of existing tunnel with cracks to blasting excavation of newly-built tunnel[J]. *Blasting*, 2019, 36(1): 90-96.
- [3] 邹宝平, 杨建辉, 王建秀, 等. 基于灰色理论与BP神经网络的特长瓦斯隧道爆破参数优选[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 131-136.
ZOU B P, YANG J H, WANG J X, et al. Optimal prediction of blasting parameters for extra-long gas tunnel based on grey theory and BP neural network[J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(8): 131-136.
- [4] 韩翔宇. 新建隧道施工爆破对既有隧道振动响应规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HAN X Y. Research on dynamic response law of the blasting construction on the existing tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 李松达. 大断面隧道爆破围岩累积损伤规律及围岩稳定性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
LI S D. Study on cumulative damage law by blasting and stability of surrounding rock of large cross section tunnel [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [6] 何峰, 杨松, 王富强, 等. 爆破影响下巷道振速及位移变化规律分析[J]. 工程爆破, 2023, 29(5): 132-139.
HE F, YANG S, WANG F Q, et al. Analysis of vibration velocity and displacement variation of roadway under the influence of blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(5): 132-139.
- [7] 郑晓卿, 徐凯, 张雨帆, 等. 增建隧道爆破施工对既有隧道动力扰动影响研究[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(5): 1789-1796.
ZHENG X Q, XU K, ZHANG Y F, et al. Investigating the impact of blasting operations on dynamic disturbances in existing tunnels during additional tunnel construction [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2025, 25(5): 1789-1796.
- [8] 曹明星, 严松宏, 郑永强, 等. 邻近隧道爆破振动响应分析[J]. 工程爆破, 2025, 31(1): 130-138.
CAO M X, YAN S H, ZHENG Y Q, et al. Analysis of blasting vibration response of adjacent tunnel [J]. *Engineering Blasting*, 2025, 31(1): 130-138.
- [9] 蒋楠, 周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6): 63-68.
JIANG N, ZHOU C B. Dynamic response characteristics of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration [J]. *China Railway Science*, 2011, 32(6): 63-68.
- [10] 刘拓. 公路隧道爆破对邻近引水隧洞振动响应的分析与实测研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1126-1130.
LIU T. Analysis and monitoring of influence of blasting vibration of highway tunnel on adjacent water conveyance tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(12): 1126-1130.
- [11] 鲜一丁. 新建隧道爆破施工引起既有隧道动力响应及控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XIAN Y D. Dynamic response of existing tunnel induced by blasting from adjacent newly-built tunnel and the controlling techniques [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [12] 张旭, 周传波, 蒋楠, 等. 下穿地铁隧道爆破作用下人防隧道的动力效应[J]. 爆破, 2021, 38(3): 10-18.
ZHANG X, ZHOU C B, JIANG N, et al. Dynamic effect of civil air-defense tunnel induced by blasting of undercrossing subway tunnel [J]. *Blasting*, 2021, 38(3): 10-18.
- [13] TAKAHASHI Y, SASAOKA T, SUGENG W, et al. Study on prediction of ground vibration in consideration of damping effect by fragment in the rock mass [J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2018, 6(6): 1-11.
- [14] 于建新, 陈卫忠, 杨建平, 等. 上下交叉隧道爆破振动控制技术研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 445-452.
YU J X, CHEN W Z, YANG J P, et al. Study of blasting vibration control technology of up and down cross tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 445-452.
- [15] 袁冉, 李俊晖, 楚泽元, 等. 小净距交叠隧道掏槽爆破动力响应研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 146-155.
YUAN R, LI J H, CHU Z Y, et al. Study on dynamic response in cut blasting in closely-spaced overlapping tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(3): 146-155.
- [16] 国家铁路局. 铁路工程爆破振动安全技术规程: TB 10313—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for safety technology of blasting vibration in railway engineering; TB 10313—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [17] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnel; TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [18] 满轲, 刘晓丽. 不同爆破掏槽形式的反应频谱综合分析[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 52-63.
MAN K, LIU X L. Spectrum comprehensive analysis on blasting signals under different cutting methods [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(7): 52-63.

(责任编辑 张爱丽)