

DOI: 10.7672/sgjs2026070080

# 特长公路隧道联络通道施工参数及方案优化研究\*

曹卫宾<sup>1</sup>,赵海清<sup>1</sup>,张 潺<sup>1</sup>,张 杰<sup>1</sup>,刘家璇<sup>2</sup>

(1. 中铁十局集团青岛工程有限公司, 山东 青岛 266001; 2. 北京交通大学土木建筑学院, 北京 110044)

**[摘要]** 为探明不同施工参数对公路隧道联络通道开挖过程的影响,依托某公路超深竖井联络通道施工,采用现场监测和数值模拟等方式,分析了不同施工参数的影响规律。研究表明:联络通道开挖后掌子面顶部围岩应力迅速减小,围岩应力减小的极值点位于断面顶部中心;两侧围岩应力则迅速增大,变化呈不均匀分布。对于采用全断面爆破法开挖的Ⅲ级围岩,掌子面开挖沿掘进方向上对地层的最大影响范围约为 $4D$ ( $D$ 为开挖步距),开挖步距越大,掌子面拱顶中心的应力集中现象越明显,开挖步距宜控制在 $2\sim 3\text{m}$ 。爆破动力荷载的影响范围受多种因素影响,当钻孔内炸药采用不耦合装药时,可通过增大钻孔直径与装药直径的比值,同时适当增加最大起爆药量,利用空气间隙以缓冲爆炸产生的能量,以优化爆破方案,提高施工效率。

**[关键词]** 公路;隧道;联络通道;施工参数;爆破;数值模拟

**[中图分类号]** U459

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)07-0080-06

## Research on Construction Parameters and Scheme Optimization of Connecting Channel of Extra-long Highway Tunnel

CAO Weibin<sup>1</sup>, ZHAO Haiqing<sup>1</sup>, ZHANG Chan<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, LIU Jiaxuan<sup>2</sup>

(1. China Railway Tenth Bureau Group Qingdao Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266001, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 110044, China)

**Abstract:** To explore the influence of different construction parameters on the excavation process of a highway tunnel connection channel, based on the construction of an ultra-deep shaft connection channel in a highway, the influence law of various construction parameters is analyzed by means of field monitoring and numerical simulation. The results indicate that the stress of the surrounding rock at the top of the tunnel face decreases rapidly after the excavation of the connecting passage, and the extreme point of the stress reduction of the surrounding rock is located at the center of the top of the section. The stress of surrounding rock on both sides increases rapidly, and the stress changes of surrounding rock on both sides are unevenly distributed. For the Grade-III surrounding rock excavated by using the full-face blasting method, the maximum influence range of the excavation of the tunnel face on the stratum along the excavation direction is about  $4D$  ( $D$  represents the excavation step distance). The larger the excavation step distance, the more obvious the stress concentration in the center of the tunnel face vault. The excavation step distance should be controlled within the range of  $2\sim 3\text{m}$ . The influence range of blasting dynamic load is affected by multiple factors. When the explosive in the borehole adopts uncoupled charges, the blasting scheme can be optimized and the construction efficiency can be improved by increasing the ratio of borehole diameter to charge diameter and appropriately increasing the maximum detonation charge and using air gaps to buffer the energy generated by the explosion.

**Keywords:** highways; tunnels; connection channels; construction parameters; blasting; simulation

### 0 引言

公路隧道通风是公路隧道总体设计的重要组成部分,通过对我国已建和在建的200余座各类特长隧道通风方案进行统计,长度大于5000m的隧道

\* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2024YJS043);中铁十局集团有限公司基金资助项目;首都高速特长隧道超深复杂风井系统安全高效建造关键技术研究(KCL24306530)

[作者简介] 曹卫宾,正高级工程师,E-mail: 863475637@qq.com

[收稿日期] 2025-10-11

(共 40 座)一般采用通风井送排式纵向通风方式。隧道与通风井之间需设置送、排风联络通道进行连接,为了减小联络通道施工对隧道及周围地层的影响,确保施工安全、提高施工效率,相关学者对此进行了大量研究。

当地质条件良好时,联络通道多采用钻爆法开挖,钻爆法以其施工简便和适应性强等特点,在井下矿产开采和岩质隧道掘进等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。杨波等<sup>[3]</sup>针对联络通道爆破施工对于隧道结构造成的不良影响,对爆破施工方案进行了优化,并利用数值模拟软件,分析了不同爆破位置对隧道的影响。白松松等<sup>[4]</sup>分别采用 FLAC3D 和 DEM 方法对隧道爆破开挖过程的扰动影响进行了数值模拟,评估了隧道高风险施工段落。田兴朝等<sup>[5]</sup>为分析白竹山隧道爆破超挖严重的根本原因,通过对现场爆破参数采集和爆破钻孔角度精确测量,分析了周边孔布设参数对隧道爆破开挖的影响。周鸣亮等<sup>[6]</sup>广泛调研了文献中钻爆法岩石隧道工作面坍塌事故的统计数据,为岩石隧道施工安全风险分析与管控提供了新的理论基础与技术手段。

此外,隧道及联络通道的钻爆法开挖方式还可以分为全断面法开挖和台阶法开挖。在全断面法研究方面,刘雨萌等<sup>[7]</sup>依托刘元隧道项目,研究了全断面机械施工下围岩的稳定性,并验证了优化后的初支参数。周海孝等<sup>[8]</sup>以全断面钻爆法为例,分析了隧洞全断面开挖中不同炮孔爆破诱发振动特性的差异。Pietro<sup>[9-10]</sup>基于实际工程研究了一种预加固全断面隧道开挖技术,并得到了广泛应用。余小周<sup>[11]</sup>基于现场监测数据结果动态调整支护结构,验证了大断面软弱围岩隧道全断面机械化施工的可行性。在台阶法研究方面,罗涛<sup>[12]</sup>采用 3DEC 离散元分析软件,研究了不同节理间距对开挖后围岩位移的影响。鲁军纪等<sup>[13]</sup>为提高富水隧道台阶法施工效率,通过数值仿真软件模拟了不同台阶法施工过程并分析了对应的施工效果。王建辉等<sup>[14]</sup>为减小台阶法施工时爆破振动对于围岩的扰动影响,提出了适用于极小覆岩厚度条件下的逆台阶开挖工法。

综上所述,现有学者对于联络通道施工参数控制研究内容较为单一,仅考虑某一因素对于联络通道施工的影响,相关研究成果和结论对于实际联络通道施工项目的指导意义有限。基于现有研究基础,本文通过现场监测、数值仿真等方式,分析了不同施工参数对于联络通道施工过程中四周围岩应

力变化的影响,研究了公路隧道联络通道的安全高效施工方式。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

本项目依托某高速公路特长隧道工程,隧道长 6.4km,采用纵向分段式通风设计。为满足隧道通风和火灾工况时的排烟需求,在隧道右洞 K1+362.013 右侧约 95m 处需设置 1 处通风竖井,并设置地下送、排风联络通道与主洞连接。为分析联络通道开挖过程中对地层扰动及隧道主洞的影响,确保施工过程安全,施工前在右线排风联络通道和隧道右洞各选取 1 个断面进行现场监测,测试断面对应桩号为 PYK0+066.03 和 K1+326.013,右线排风联络通道与隧道右洞位置关系如图 1 所示。项目施工区域地层围岩等级为Ⅲ级,围岩稳定性较好,因此右线排风联络通道主要采用全断面钻爆法开挖,设计进尺 2m/次,右线排风联络通道爆破设计如图 2 所示(非加宽过渡段),相关爆破参数如表 1 所示。

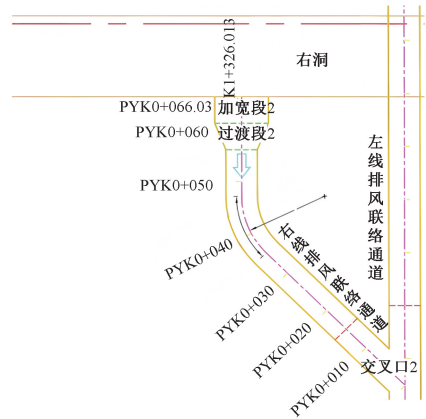


图 1 隧道主洞及联络通道平面位置

Fig. 1 The plane location of the main tunnel and the connection channel

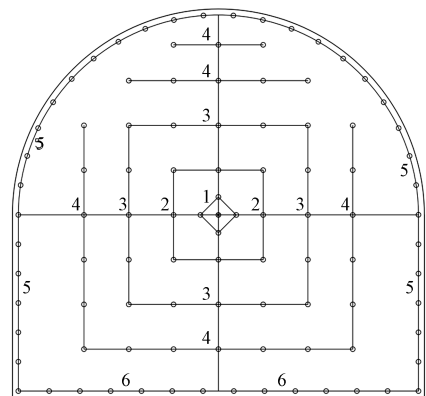


图 2 右线排风联络通道炮孔布置

Fig. 2 Layout of the blast hole of the exhaust air connection channel on the right line

表1 右线排风联络通道单断面爆破参数

Table 1 Single-section blasting parameters of the right line exhaust air connection channel

炮孔名称	圈号	炮孔深度/m	孔数/个	单孔药量/kg
挖槽孔	1	0.8	4	1.5
扩槽孔	2	1.6	8	1.2
辅助孔	3	1.6	16	1.2
辅助孔	4	1.6	25	1.2
周边孔	5	1.6	32	0.4
底孔	6	1.4	14	1.5

## 1.2 工程地质条件

右线排风联络通道里程桩号范围为 PYK0+066.03—PYK0+000, 全长 66.03m, 其与隧道右洞相交位置设置了加宽过渡段, 全长 6.03m。根据工程地质勘测和钻探结果可知, 隧道右洞与右线排风联络通道所处地层的岩性主要为燕山期花岗闪长岩, 该岩层呈中粗粒结构, 块状构造, 节理裂隙较发育, 主要成分为长石、石英和角闪石, 岩芯呈柱状、长柱状, 节长 15~30cm, 最长约 50cm, 局部为碎块状。地层承载力特征值  $f_{a0} = 1800\text{kPa}$ , 地层围岩等级为 III 级, 围岩稳定性较好。相关区域地下水类型主要为赋存于花岗闪长岩裂隙中的基岩裂隙水, 地质勘测期间未见地下水。

## 1.3 现场监测布设

右线排风联络通道测试断面如图 3a 所示, 该断面共选取 7 个测点, 每个测点布设 1 个土压力盒、2 个钢筋计和 2 个混凝土应变计, 分别监测联络通道围岩应力变化、初支钢拱架内外形变和初衬混凝土水平应变(其中混凝土应变计呈十字状布设)。所用土压力盒量程为 1.5MPa, 钢筋计拉应力量程为 80kN、压应力量程为 40kN, 混凝土应变计拉应变变量程为 1200 $\mu\epsilon$ 、压应变变量程为 800 $\mu\epsilon$ 。右线排风联络通道口对应隧道右洞测试断面如图 3b 所示, 该断面总共选取 14 个测点, 每个测点均在二衬混凝土内布设 1 个混凝土应变计, 所用混凝土应变计规格与前述混凝土应变计相同。

## 2 数值模拟合理性验证

### 2.1 模型建立

现采用 MIDAS GTS NX 软件建立 1:1 的数值仿真模型, 为最大限度还原现场开挖施工, 避免地层边界效应的影响, 计算模型包括隧道、竖井和联络通道, 模型长 $\times$ 宽 $\times$ 高=210m $\times$ 140m $\times$ 400m。如图 4 所示, 以隧道纵向设为  $x$  轴, 以垂直于隧道纵向设为  $y$  轴, 重力方向设为  $z$  轴。在对实体单元进行网格控制时, 隧道、竖井和联络通道的播种数为 1.5,

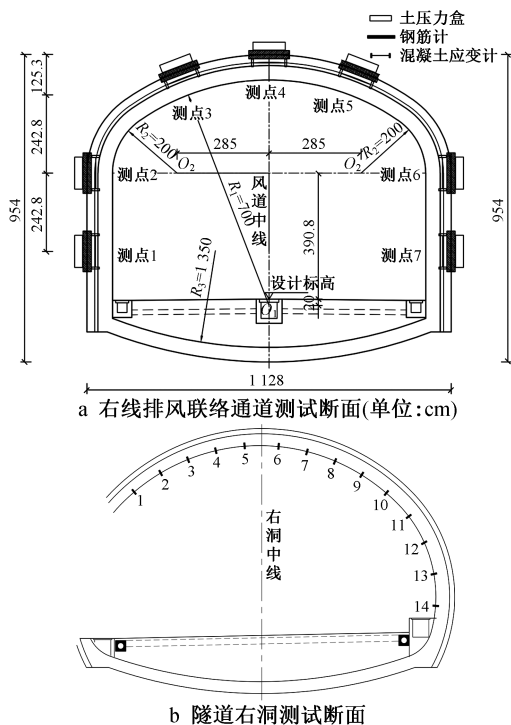


图3 测试断面内各测试元件布设情况

Fig. 3 The layout of each test element in the test section

即每隔 1.5m 有 1 个节点, 地层的播种数为 4, 即每隔 4m 有 1 个节点。已建隧道各类数值模型参数按现场施工图确定, 右线排风联络通道模型相关计算参数依据现场地质勘察报告和 JTG/T D70—2010《公路隧道设计细则》选取确定, 地层及联络通道各类材料属性如表 2 所示。

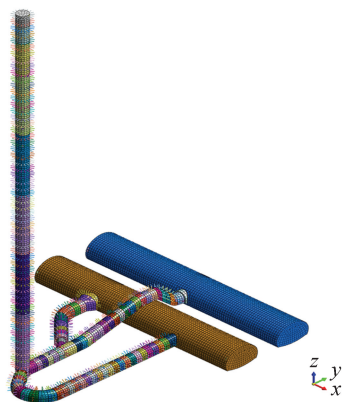


图4 计算模型网格化划分

Fig. 4 Calculate model meshing

### 2.2 模型结果合理性验证

以现场第 1 次监测时的围岩应力为初始值(相同工况下的围岩应力数值仿真结果如图 5 所示), 选取右线排风联络通道测试断面上部分测点的围岩应力变化值和对应数值模拟结果进行对比分析。待现场监测数据变化规律较为稳定后, 提取 9 个不

表2 模型材料属性

Table 2 Properties of model material

材料	黏聚力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性 模量/ MPa	泊松比
全风化岩	160	35.0	18.2	3 250	0.33
强风化岩	690	39.3	22.8	8 680	0.30
中风化岩	1 620	51.5	26.2	29 130	0.26
喷射混凝土	—	—	24.0	15 000	0.20
锚杆	—	—	78.5	210 000	0.30

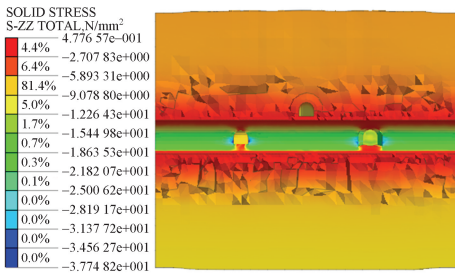


图5 相同工况下联络通道四周围岩应力分布

Fig. 5 Stress distribution of the surrounding rocks of the connection channel under the same working conditions

同施工阶段下的实测与模拟结果绘制成曲线,如图6所示。

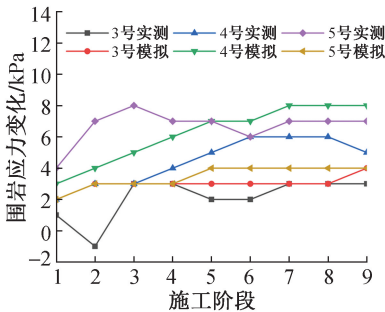


图6 右线排风联络通道各测点围岩应力变化

Fig. 6 Stress changes of surrounding rock at each measurement point of the exhaust air connection channel on the right line

根据图6可知,测点3和测点4的数值模拟结

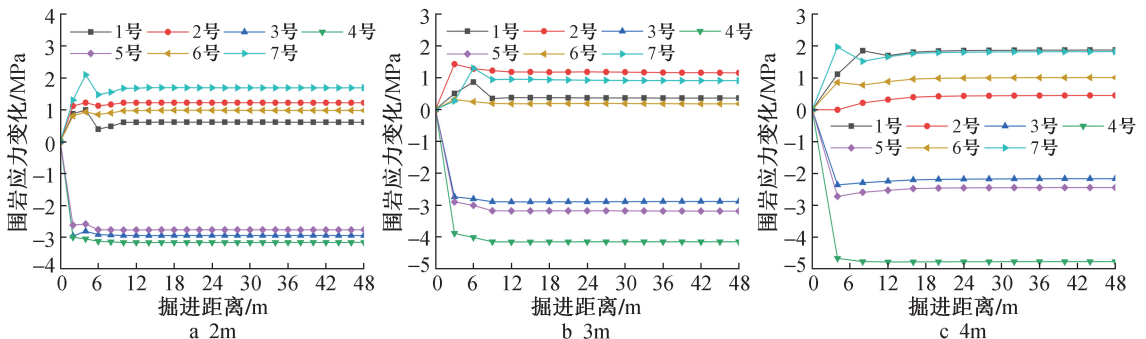


图7 不同施工步距下联络通道四周围岩应力变化

Fig. 7 Variation of rock stress around the connection channel with different construction steps

果整体略大于现场实测结果,实测与模拟数据曲线拟合度较高且变化规律相似,除个别测点外,测点误差基本控制在15%以内;测点5的实测结果整体大于模拟结果,其中实测结果曲线在施工初始阶段的变化波动较大,实测与模拟结果存在一定偏差,但最终变化趋势相同。综合以上数据结果分析,可充分验证本次数值模拟的准确性。

### 3 施工步序参数优化分析

#### 3.1 断面开挖施工步距优化

为探究施工过程中的最优开挖步距,基于现场施工设计共设置了2,3,4m 3个开挖步距进行数值模拟分析,模拟开挖顺序均与实际施工一致。选取右线排风联络通道测试断面为代表性断面,不同施工步距下该断面各测点的围岩应力变化结果如图7所示。可以看出,联络通道开挖后测试断面顶部围岩应力迅速减小,围岩应力减小的极值点位于断面顶部中心;两侧围岩应力则迅速增大,且两侧围岩应力变化呈不均匀分布。当开挖步距为2m时,断面顶部围岩应力变化分布较为均匀,随着开挖步距的增大,断面顶部中心位置出现应力集中现象,开挖步距越大,顶部中心位置围岩应力变化极值越大。对于所设3种开挖步距的模拟施工开挖,开挖4次后围岩应力基本保持不变,因此对于Ⅲ级围岩,联络通道断面开挖时沿掘进方向上对地层的最大影响范围约为4D(D代表开挖步距)。

以开挖步距2m时的工况为例,数值模拟开挖时初衬混凝土变形情况如图8所示,结合围岩应力变化结果,联络通道开挖后的初衬混凝土变形可分为3个阶段:①第1阶段,初衬混凝土还未完全凝固形成有效强度,混凝土形变量较大,衬砌顶部受压后,竖向内径减小,水平内径增大,因此断面开挖初始阶段,衬砌顶部测点的应力减小,两侧测点应力增大;②第2阶段,初衬混凝土开始固结收缩,衬砌顶部受压继续发生沉降变形,衬砌两侧混凝土向内

收缩变形,两侧测点应力减小;③第 3 阶段,初衬混凝土完全凝固后不再发生形变,开挖断面四周围岩应力变化也逐渐趋于稳定。基于以上分析可知,联络通道开挖后初衬主要受到来自顶部中心向下的土体应力,开挖步距越大,拱顶中心的应力集中现象越为明显,为保证联络通道开挖施工安全、提高施工效率,开挖步距宜控制在 2~3m 范围内。

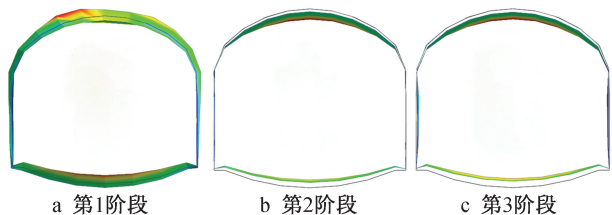


图 8 不同施工阶段的初衬混凝土变形

Fig. 8 Deformation of the primary lining concrete at different stages of construction

### 3.2 爆破开挖施工参数优化

选取里程桩号 PYK0+060 断面,通过数值仿真软件在该断面上设置爆破动力荷载模拟爆破影响,共设置 3 个不同工况的爆破动力荷载。为确保施工安全,《爆破安全规程》中规定联络通道施工爆破引发主洞二次衬砌质点振动波速  $\leq 5\text{cm/s}$ ,规程中的爆破振动安全距离计算公式为:

$$R = (K/V)^\alpha \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: $R$  为爆破振动安全允许距离(m); $Q$  为炸药量,齐发爆破为总药量,延时爆破为最大单段药量(kg); $V$  为保护对象所在地安全允许质点振速( $\text{cm/s}$ ); $K, \alpha$  为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,应通过现场试验确定。

通过爆破振动安全距离计算公式可确定断面爆破方式及炸药最大起爆药量,现采用数值模拟软件模拟不同最大装药数的爆破动力荷载,分析不同工况下爆破动力荷载对于隧道主洞的影响,不同工况的爆破参数如表 3 所示。

表 3 不同工况的爆破参数

Table 3 Blasting parameters for different operating conditions

工况	爆破速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	炸药密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	装药直径/mm	钻孔直径/mm	最大装药量/kg
1	2 500	0.4	40	60	1.5
2	2 500	0.4	60	80	3.0
3	2 500	0.4	80	100	4.5

不同工况下隧道主洞二衬质点振动波速的数值模拟结果如图 9 所示,其中工况 1 与工况 2 的隧道主洞二衬质点最大振动波速分别为  $2.9\text{cm/s}$  和  $4.3\text{cm/s}$ ,满足相关规程要求,工况 3 的质点最大振动波速则超出了规程要求的限值;此外,工况 2 的爆破动力荷载影响范围明显小于工况 1,因此联络通道爆破开挖对于主洞的影响范围不仅与最大装药数有关,还受到装药直径和钻孔直径的影响。当钻孔内炸药采用不耦合装药时,可通过增大钻孔直径与装药直径的比值,利用空气间隙以缓冲爆炸产生的能量。结合前文中断面开挖步距优化分析结果,现对右线排风联络通道断面爆破施工方案进行优化,优化后的爆破参数如表 4 所示。优化后的爆破方案采用单段单孔起爆方式,单孔最大装药量增加至  $3\text{kg}$ ,开挖步距增加至  $3.0\text{m}$ 。

表 4 优化后的单断面爆破参数

Table 4 Optimized single-section blasting parameters

炮孔名称	圈号	炮孔深度/m	孔数/个	单孔药量/kg
挖槽孔	1	3.8	4	3.0
扩槽孔	2	3.6	8	2.6
辅助孔	3	3.6	16	2.6
辅助孔	4	3.6	25	2.6
周边孔	5	3.6	32	0.8
底孔	6	3.8	14	3.0

## 4 结语

1) 联络通道开挖后掌子面顶部围岩应力迅速

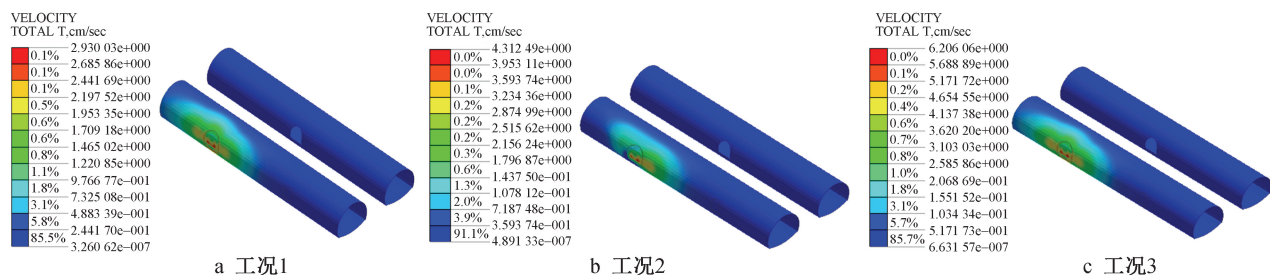


图 9 不同工况下隧道主洞二衬质点振动波速

Fig. 9 The vibration wave velocity of the second lining point of the main tunnel under different working conditions

减小,围岩应力减小的极值点位于断面顶部中心;两侧围岩应力则迅速增大,两侧围岩应力变化呈不均匀分布,开挖步距越大,顶部中心位置围岩应力变化极值越大。

2)对于采用全断面爆破法开挖的Ⅲ级围岩,掌子面开挖沿掘进方向上对地层的最大影响范围约为 $4D$ ( $D$ 代表开挖步距),同时开挖步距越大,掌子面拱顶中心的应力集中现象越明显,开挖步距宜控制在 $2\sim 3\text{m}$ 范围内。

3)联络通道开挖后的初衬混凝土变形大致可分为3个阶段:①第1阶段,初衬混凝土还未凝固,混凝土形变量较大,四周围岩应力变化明显;②第2阶段,初衬混凝土开始固结收缩,衬砌顶部受压发生沉降变形,两侧向内收缩变形;③第3阶段,衬砌与围岩状态基本趋于稳定。

4)爆破动力荷载的影响范围受多种因素影响,当钻孔内炸药采用不耦合装药时,可通过增大钻孔直径与装药直径的比值,利用空气间隙以缓冲爆炸产生的能量。通过调整钻孔直径与装药直径的不耦合系数,同时适当增加最大起爆药量,优化爆破方案以提高施工效率。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李金龙,丁聰. 基于 BIM 的公路钻爆法隧道动态设计应用研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(5):20-24.  
LI J L, DING C. Research on application of dynamic design of highway tunneling by drilling and blasting method based on BIM [J]. Construction technology, 2025, 54(5): 20-24.
- [ 2 ] 金庆雨,岳中文,任猛,等. 智能炮孔检测与路径规划系统设计与应用[J]. 煤炭科学技术,2024,52(11):186-196.  
JIN Q Y, YUE Z W, REN M, et al. Design and application of intelligent blasthole detection and path planning system[J]. Coal science and technology, 2024, 52(11): 186-196.
- [ 3 ] 杨波,王海亮,褚蛟蛟,等. 盾构隧道联络道爆破施工优化[J]. 科学技术与工程,2021,21(20):8663-8669.  
YANG B, WANG H L, CHU F J, et al. Optimization of blasting construction for connecting passage of shield tunnel[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(20): 8663-8669.
- [ 4 ] 白松松,周宗青,高成路,等. 钻爆法海底隧道穿越断层破碎带围岩稳定性综合分析与控制方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2025,44(3):691-704.  
BAI S S, ZHOU Z Q, GAO C L, et al. Research on comprehensive analysis and control method of surrounding rock stability in submarine tunnel crossing fault fracture zone by drilling and blasting method [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2025, 44(3): 691-704.
- [ 5 ] 田兴朝,陶铁军,娄乾星,等. 白竹山隧道爆破超挖原因分析与控制研究[J]. 工程爆破,2022,28(5):60-66.  
TIAN X C, TAO T J, LOU Q X, et al. Cause analysis and control

research on over excavation of Baizhushan tunnel by blasting[J]. Engineering blasting, 2022, 28(5): 60-66.

- [ 6 ] 周鸣亮,李泽豫,黄宏伟,等. 考虑施工时序的隧道工作面坍塌风险分析方法与验证[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(3):579-595.  
ZHOU M L, LI Z Y, HUANG H W, et al. Method and validation for tunnel face collapse risk analysis considering construction sequence [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2024, 44(3): 579-595.
- [ 7 ] 刘雨萌,张俊儒,何冠男,等. 基于强度折减法的高铁隧道全断面机械化作业围岩稳定性分析及支护优化研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(3):451-462.  
LIU Y M, ZHANG J R, HE G N, et al. Stability analysis and support optimization of surrounding rock of high-speed railway tunnel full-face mechanical operation based on strength reduction method[J]. Tunnel construction, 2022, 42(3): 451-462.
- [ 8 ] 周海孝,高启栋,王亚琼,等. 隧洞全断面开挖中不同爆破孔作用边界及其诱发振动特性的比较分析[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(4):785-797.  
ZHOU H X, GAO Q D, WANG Y Q, et al. Comparative analysis of vibration characteristics induced by different kinds of boreholes and their blasting boundaries during full-face tunnel blasting excavation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2022, 41(4): 785-797.
- [ 9 ] PIETRO LUNARDI. The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils[J]. Tunnels & tunneling international ADECO-ORS approach, 2000(5): 3-30.
- [ 10 ] PIETRO LUNARDI. Design and construction of tunnels [M]. Springer, 2008.
- [ 11 ] 余小周. 软弱围岩隧道机械化全断面成套工法研究[J]. 施工技术,2020,49(13):47-50.  
YU X Z. Study on mechanized full section complete construction method of weak surrounding rock tunnel [J]. Construction technology, 2020, 49(13): 47-50.
- [ 12 ] 罗涛. 节理岩体隧道台阶法施工围岩稳定性分析研究[J]. 公路,2024,69(12):493-498.  
LUO T. Analysis and study on stability of surrounding rock during bench construction of jointed rock tunnel [J]. Highway, 2024, 69(12): 493-498.
- [ 13 ] 鲁军纪,程鑫,闫小兵,等. 台阶法施工时台阶长度对富水隧道稳定性影响研究[J]. 矿冶工程,2023,43(6):29-33,40.  
LU J J, CHENG X, YAN X B, et al. Influence of bench length in benching excavation on stability of tunnels in water-rich ground [J]. Mining and metallurgical engineering, 2023, 43(6): 29-33, 40.
- [ 14 ] 王建辉,高萌,王润生,等. 极小覆岩厚度条件下地铁隧道逆台阶法开挖稳定性分析[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(4):690-697.  
WANG J H, GAO M, WANG R S, et al. Stability analysis of surrounding rock of inverse bench excavation of metro tunnel with minimal overburden thickness [J]. Tunnel construction, 2023, 43(4): 690-697.