

# 铁路隧道衬砌掉块机制分析及应急抢修研究

高 阳<sup>1,2</sup>, 任 序<sup>3</sup>, 徐伟铭<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所, 石家庄 050043; 2. 燕赵现代交通实验室, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

**摘要:** 由施工塌方导致的隧道衬砌拱部背后空洞, 会引起空洞周围围岩应力重分布, 当空洞处围岩受环境影响出现松动、劣化时, 会引起围岩坍塌击穿衬砌结构, 严重威胁列车运营安全。采用 FLAC 3D 模拟围岩松动、劣化, 得到某铁路隧道衬砌掉块力学机制, 及应采取的加固措施。结果表明: 隧道衬砌上方空洞围岩一定区域内存在拉应力, 当围岩的松动、劣化导致塑性区扩展到空洞上方位置时会导致围岩垮塌; 隧道衬砌上方围岩空洞的存在会改变衬砌的受力结构, 降低衬砌的安全系数; 抢修过程中采用应急锚喷措施, 较同等条件下未采取锚喷措施, 会减小 72.4% 的塑性区, 且随着锚喷参数强度的提高, 塑性区面积逐渐减小。研究成果可为类似隧道衬砌掉块应急抢险工程提供借鉴与参考。

**关键词:** 铁路隧道; 衬砌掉块; 围岩坍塌; 应急抢修

中图分类号: U25

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0112-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.018

## Study on Mechanism Analysis and Emergency Repair of Railway Tunnel Lining Falling Block

GAO Yang<sup>1,2</sup>, REN Xu<sup>3</sup>, XU Weiming<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Structural Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Yanzhao Modern Transportation Laboratory, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Voids behind the tunnel lining arch caused by construction collapse will result in stress redistribution in the surrounding rock. When the surrounding rock in the void area becomes loose and deteriorates due to environmental influences, it may cause rock collapse, penetrating the lining structure and seriously threatening train operation safety. FLAC 3D was used to simulate the loosening and deterioration of the surrounding rock, revealing the mechanical mechanism of lining block falling in a railway tunnel, and the reinforcement measures that should be taken. The results indicate that tensile stress exists in a certain area of the surrounding rock above the tunnel lining void. When the loosening and deterioration of the surrounding rock cause the plastic zone to expand to the area above the void, rock collapse may occur. The presence of voids in the surrounding rock above the tunnel lining alters the stress structure of the lining, reducing its safety factor. During the emergency repair process, the adoption of emergency shotcreting and bolting measures reduced the plastic zone by 72.4% compared to conditions without such measures.

项目来源: 中央引导地方科技发展资金项目 (226Z5405G); 河北省高等学校科学技术研究项目 (JZX2024010)。

作者简介: 高 阳 (1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 隧道与地下工程。

通信作者: 任 序 (1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 隧道与地下工程。

收稿日期: 2024-11-10

Moreover, as the strength of the shotcreting and bolting parameters increases, the area of the plastic zone gradually decreases. The research findings can provide reference for emergency repair projects involving similar tunnel lining block falling incidents.

**Key words:** railway tunnels; falling lining; perimeter rock collapse; emergency repairs

## 0 引言

随着我国经济的快速发展,铁路运营规模持续扩大。截至2023年底,全国铁路运营里程达到15.9万km,其中投入营运的铁路隧道18 573座,总长23 508 km<sup>[1]</sup>。由于施工和环境等因素的影响,隧道结构出现了老化和变形,隧道衬砌出现衬砌掉块等不同程度的病害<sup>[2]</sup>。研究表明,国内外已发生多次运营隧道衬砌掉块事故,造成严重的人员伤亡与经济损失<sup>[3]</sup>。因此探究在围岩空洞条件下的衬砌掉块机理与应急抢修措施效果,对铁路隧道的结构健康以及运营安全具有重要意义。

工程界围绕隧道衬砌掉块原因进行了多方面的研究。既有研究表明,空洞会恶化衬砌的受力状态,导致隧道衬砌出现应力集中现象,致使衬砌结构受力不均,最终会导致衬砌开裂、掉块甚至垮塌<sup>[4-6]</sup>。田甜<sup>[7]</sup>、吕高航<sup>[8]</sup>指出当高速列车通过时,含有空洞拱顶处的衬砌横向加速度响应随空洞宽度(3 m < 宽度 < 5 m)增大而增强,会对衬砌结构造成裂损,甚至还会对无空洞位置造成影响。刘彦民<sup>[9]</sup>通过对比完好衬砌与裂损衬砌的极限承载力,得出裂缝出现在拱顶、左拱肩、左边墙、左墙脚时,相比完好衬砌极限承载力分别下降了4.08%、3.67%、2.62%、3.83%。此外,隧道渗漏水还会腐蚀衬砌结构。在渗漏水长期作用下,会引起衬砌内钢筋的电化学反应,钢筋锈胀会导致衬砌发生开裂和剥落,若未及时整治,恶性循环会加剧衬砌状态劣化<sup>[10]</sup>。在隧道衬砌掉块原因中,围岩的影响是一个不可忽视的因素。蒲扬东<sup>[11]</sup>、言志信等<sup>[12]</sup>指出在隧道开挖时形成的围岩松动区域,随着支护力的增加而减小,其稳定性可通过数值模拟进行评定;张良山<sup>[13]</sup>指出隧道衬砌背后落石冲击荷载会在短时间达到峰值,当落石冲击力大于衬砌承载力时,会对衬砌结构产生冲切破坏;余东洋<sup>[14]</sup>、李玉玺<sup>[15]</sup>指出当空洞回填注浆和施加波纹板套衬加固两种方法,可以降低衬砌拉应力,保证了隧道结构的稳定。

尽管上述研究对隧道衬砌掉块的原因进行了探讨,但是针对铁路隧道背后空洞条件下围岩垮塌击穿衬砌结构的机制及应急抢险加固措施的受力特征,研究鲜见报道。基于此,采用有限差分软件FLAC 3D模拟围岩松动、劣化塑性发展过程,分析围岩坍塌前后的应力和塑性区变化,对比应急抢修措施实施的前后效果,可为类似隧道衬砌掉块抢修工程提供指导。

## 1 工程概况及模型建立

### 1.1 工程概况

某铁路隧道位于中低山区,岩层为太古界阜平群变质岩。表层风化严重,岩体为石英二长浅粒岩、斜长角闪岩、条状混合岩等。岩层节理呈碎石状镶嵌结构,间隙有少量水分。施工日志中曾记录隧道衬砌掉块处施工过程中出现超挖及小型塌方,虽进行了回填治理,但回填不彻底留有空洞。后发生空洞上方围岩垮塌击穿衬砌的事故,塌腔高、宽约为3 m,严重影响了线路运行,隧道衬砌掉块如图1所示。

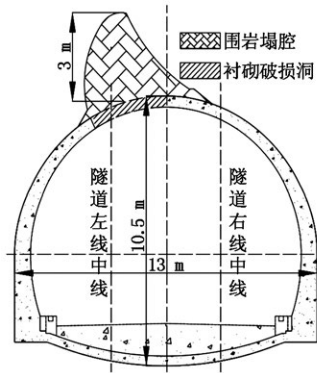
### 1.2 模型建立

该隧道衬砌掉块段围岩等级为IV级,垮塌处围岩松动、劣化评定为V级围岩。采用有限差分软件FLAC 3D建立隧道衬砌掉块模型,模型尺寸(长×宽×高)为140 m×90 m×(74~103 m)如图2所示。设置单独的断层破碎带、二次衬砌、空洞塌腔、衬砌破损洞等分组;应急锚喷结构、支撑钢拱架采用结构单元进行模拟。计算采用摩尔-库伦破坏准



(a) 衬砌掉块图

## 道桥技术



(b) 隧道断面图

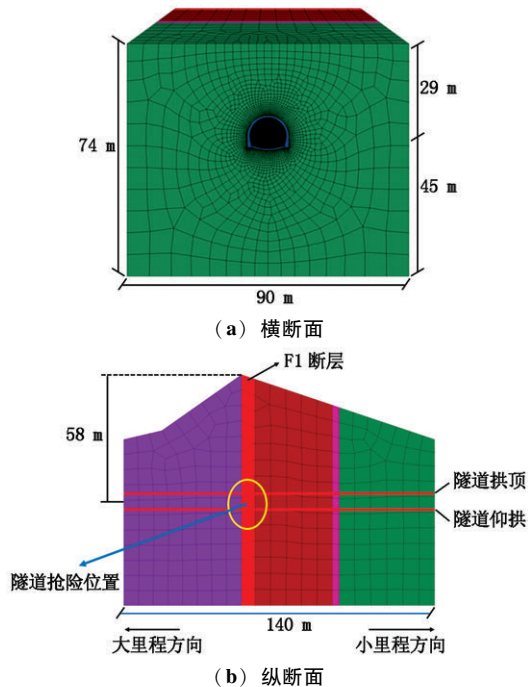
图1 隧道断面及衬砌掉块图

Fig. 1 Tunnel cross-section and lining spalling diagram

则, 围岩、二次衬砌、支护物理力学参数参考 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》见表1、表2, 水平侧压力系数  $\lambda$  设置为:

$$\lambda = \mu / (1 - \mu) \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为泊松比。



(a) 横断面

(b) 纵断面

图2 三维隧道模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a 3D tunnel model

## 2 数值模拟研究

## 2.1 围岩空洞处受力及塑性分析

空洞的存在使得附近的围岩处于二次应力状态, 根据隧道力学<sup>[16]</sup>, 采用摩尔-库仑强度准则作为进入塑性区的判据。此时进入塑性区的判定、塑性区应

表1 围岩及衬砌力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock and lining

名称	容重 /(kN/m <sup>3</sup> )	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)
III	24	10.7	0.26	1.10	40
IV1	23	5.3	0.31	0.61	36
IV2	21	3.4	0.34	0.36	28
V1	20	2.0	0.39	0.20	22
V2	18	1.2	0.45	0.12	20
衬砌	25	25.5	0.20		

表2 应急抢险支护物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of emergency support

名称	截面面积 /cm <sup>2</sup>	变形模量 /GPa	泊松比	容重 /(kN/m <sup>3</sup> )
Φ25 锚杆	4.91	200	0.3	
I <sub>14</sub>	26	200	0.2	
初期喷砼		25	0.3	25

力公式为:

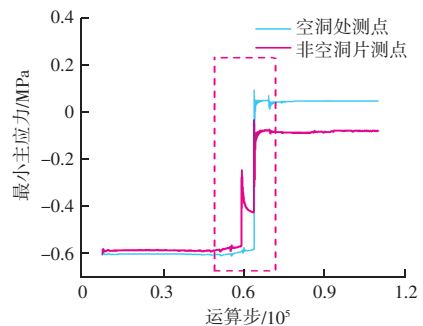
$$\sigma_1 = \sigma_3 \xi + \sigma_c \quad (2)$$

$$\sigma_c = 2cc \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$$

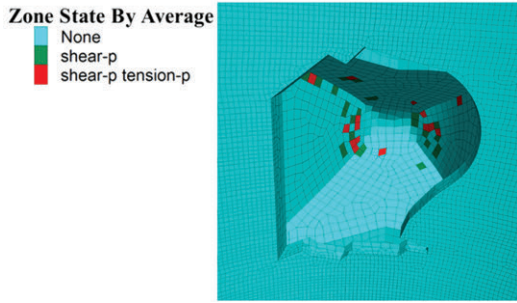
式中:  $\sigma_c$  为单轴抗压强度值;  $\xi$  为强度线斜率;  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力。

由此可知, 当隧道开挖过程中空洞区域得不到有效支护, 空洞壁最小主应力将降低, 空洞周围围岩很容易出现塑性变形。在隧道开挖数值模拟中, 对隧道围岩空洞位置和非空洞位置下缘设置监测点, 对最小主应力进行监测, 两监测点最小主应力对比与空洞处围岩塑性区如图3所示。

隧道开挖过程中, 空洞与非空洞位置的监测点最小主应力均在  $-0.6$  MPa 左右, 当非空洞位置施加二次衬砌时, 由于二衬结构的承载, 非空洞处区域的最小主应力趋于稳定, 约为  $-0.1$  MPa; 而空洞区域继续临空, 最小主应力约为  $0.04$  MPa, 空洞洞壁出现塑性变形, 如图3(b)所示, 开挖过程中空洞洞壁已出现部分塑性变形。



(a) 两监测点最小主应力对比图

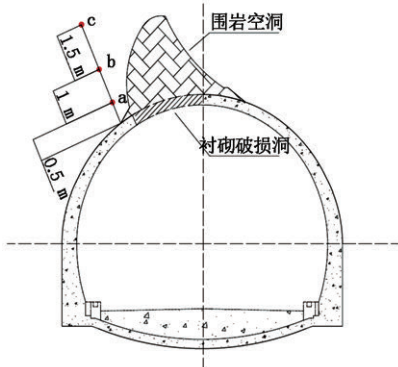


(b) 空洞区域塑性区云图

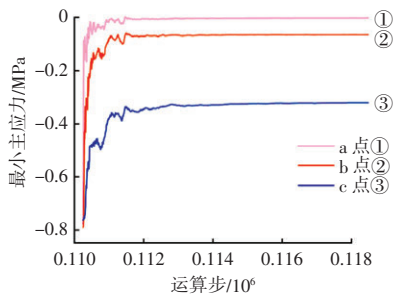
图 3 最小主应力与空洞处围岩塑性区云图

Fig. 3 Cloud maps of minimum principal stress and plastic zone in surrounding rock at the cavity

随着列车动载和环境多变的不利影响，空洞处围岩开始缓慢松动、劣化，引起围岩节理裂隙扩展、黏聚力降低等，空洞区域围岩最小主应力与塑性区开始发生变化。在数值模拟过程中沿空洞径向布置监测点，其最小主应力如图 4 (b) 所示。



(a) 监测点布置图



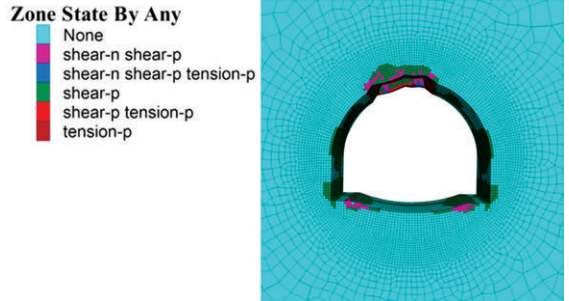
(b) 监测点最小主应力变化图

图 4 围岩监测点布置及最小主应力变化图

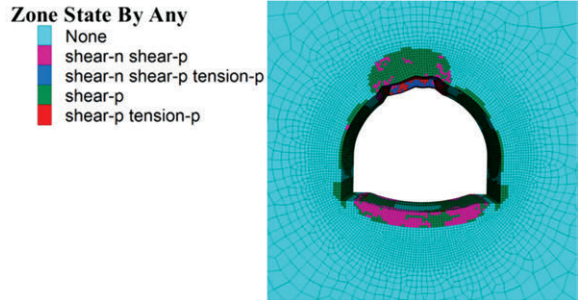
Fig. 4 Layout surrounding rock monitoring points and plot of minimum principal stress variation

由图 4 (b) 可知，随着列车动载和环境多变的不利影响，空洞处围岩开始缓慢松动、劣化，使其由 IV 级降低为 V<sub>1</sub> 级时，a、b、c 三点最小主应力趋于稳定后，分别约为 0、-0.07、-0.32 MPa。

在隧道开挖过程中，轮廓周边会因开挖扰动等原因出现部分塑性区，塑性区的范围在不同埋深、围岩级别下会呈现不同的发展趋势。在后续围岩受到影响而松动劣化时，塑性区会进一步扩展，最终当塑性区叠加扩展到整个空洞区域时，围岩向空洞内挤出，最终出现垮塌。当空洞处围岩开始缓慢松动、劣化使其由 IV 级降低为 V 级时，如图 5 所示。



(a) 空洞围岩塑性初期云图



(b) 空洞围岩塑性发展后期云图

图 5 空洞处围岩塑性区发展过程图

Fig. 5 Evolution process diagram of the plastic zone in surrounding rock at the cavity

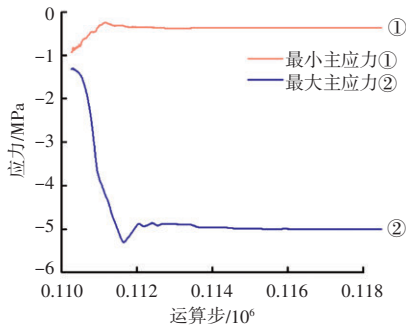
当空洞处围岩松动、劣化由 IV 级至 V<sub>1</sub> 级时，隧道空洞处围岩塑性区发展如图 5 (a) 所示。空洞处围岩塑性区面积约为 4.8 m<sup>2</sup>，隧道开挖轮廓其他部位塑性区面积约为 3.6 m<sup>2</sup>，基底围岩开始出现塑性区。当围岩继续松动、劣化至 V<sub>2</sub> 级时，空洞处围岩塑性区发展如图 5 (b) 所示，空洞处围岩塑性区面积约为 13 m<sup>2</sup>，隧道基底塑性区面积约为 10.8 m<sup>2</sup>。当塑性区扩展到空洞区域位置时，空洞上方围岩受扰动发生垮塌，导致二次衬砌结构被击穿，塌方体所造成的塌方空洞会进一步加剧围岩塑性圈向外扩展，增加二次塌方风险。

## 2.2 隧道衬砌结构受力分析

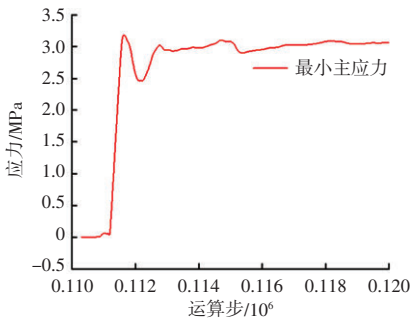
隧道衬砌作为结构安全储备，常在隧道初期支护稳定后施作，基本不承载。但围岩的松动劣化会增大衬砌的荷载，而空洞的存在又会改变衬砌结构

## 道桥技术

的受力体系, 在空洞位置处的衬砌以及同里程衬砌边墙处布置应力监测点, 结果如图 6 所示。当隧道周边断层破碎带围岩松动、劣化由 IV 级降低至 V<sub>1</sub> 级时, 非空洞处衬砌结构的最小主应力基本稳定于 -0.36 MPa, 最大主应力增大到 -5.02 MPa, 如图 6 (a) 所示。而空洞处衬砌结构出现应力集中现象, 其最小主应力逐渐增大, 由约为 0 增大到 3.07 MPa, 如图 6 (b) 所示, 衬砌结构的安全系数降低。



(a) 衬砌非空洞处应力变化图



(b) 衬砌空洞处应力变化图

图 6 衬砌非空洞及空洞处应力变化图

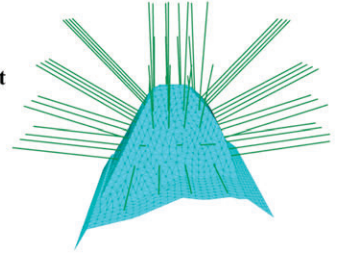
Fig. 6 Stress variation diagram of lining at non-cavity and cavity locations

### 2.3 抢修锚喷支护分析

在应急抢修过程中, 采取锚喷支护, 限制塌腔内围岩继续变形, 快速稳定塌腔, 并对塌腔完成混凝土回填, 是抢险过程中重要的部分。为研究锚喷支护的效果, 采用 FLAC 3D 内置 shell 和 cable 结构单元模拟在塌腔内施作, 如图 7 所示。

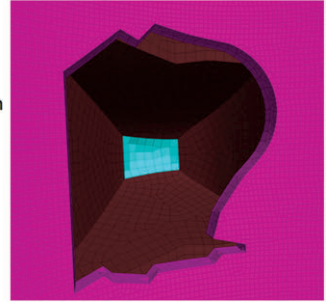
由图 7 (c) 可知, 施加锚喷支护后, 塌腔壁处由二次应力状态变为三次应力状态, 应急锚喷支护限制了空洞处围岩的继续塑性变形。未施加锚喷支护时, 随着空洞区域围岩松动、劣化, 空洞区域塑性区面积扩展约为 29 m<sup>2</sup>, 如图 7 (d) 所示。当采

Shell Group of Element  
Default=Shell 1  
Cable Group of Element  
Geometry=maogan3



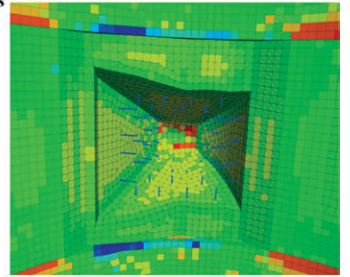
(a) 锚喷结构模型图

Zone Group  
Default=duanceng1  
Default=duanceng2  
Default=erchen  
Default=songdongquan  
Default=tuti1  
Default=tuti2  
Default=tuti3



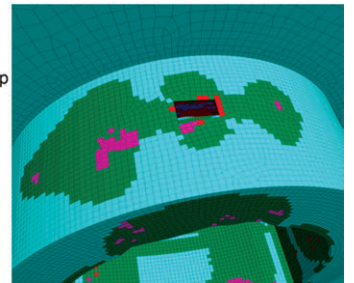
(b) 塌腔结构模型图

Zone Maximum Principal Stress  
Calculated by: Constant  
6.9879E+05  
6.0000E+05  
4.0000E+05  
2.0000E+05  
0.0000E+00  
-2.0000E+05  
-4.0000E+05  
-6.0000E+05  
-8.0000E+05  
-1.0000E+06  
-1.2000E+06  
-1.3676E+06



(c) 有锚喷支护塌腔壁最小主应力云图

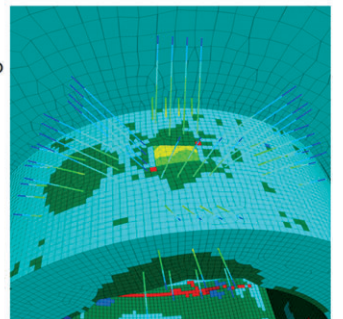
Zone State By Average  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p  
tension-p



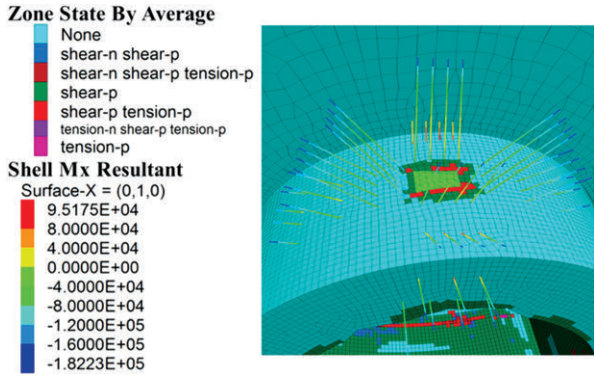
(d) 无锚喷支护塑性区云图

Zone State By Average  
None  
shear-n shear-p  
shear-n shear-p tension-p  
shear-p  
shear-p tension-p

Shell Mx Resultant  
Surface-X = (0,1,0)  
2.6238E+04  
2.0000E+04  
1.0000E+04  
0.0000E+00  
-1.0000E+04  
-2.0000E+04  
-3.0000E+04  
-4.0000E+04  
-4.4760E+04



(e) 有锚喷支护塑性区云图



(f) 锚喷支护 2 倍强度塑性区云图

图 7 锚喷支护效果云图

Fig. 7 Cloud diagram of rock bolt and shotcrete support effectiveness

取支护后,随着空洞区域松动、劣化,塌腔区域围岩塑性区面积扩展约为  $8 \text{ m}^2$ 。如图 7 (e) 所示,减小约  $21 \text{ m}^2$ ,锚喷结构沿隧道轴的最大弯曲拉应力  $M_x$  约为  $0.026 \text{ MPa}$ ,最大弯曲压应力约为  $-0.045 \text{ MPa}$ ,限制了塑性区域围岩的收缩变形。当锚喷支护提高 2 倍强度参数时,塌腔区域围岩塑性区面积扩展约为  $3 \text{ m}^2$ ,如图 7 (f) 所示,锚喷结构沿隧道轴的最大弯曲拉应力  $M_x$  约为  $0.095 \text{ MPa}$ ,最大弯曲压应力约为  $-0.182 \text{ MPa}$ 。由此可知采取应急锚喷支护对塌腔处围岩进行加固,可限制塌腔处围岩继续松动劣化塑性变形,防止二次垮塌。

### 3 应急抢修加固分析

#### 3.1 应急加固措施

该隧道衬砌掉块后,对塌腔采取锚喷支护稳定围岩。钢筋网采用  $\Phi 8$  HPB300 钢筋制作,间距  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ;喷射混凝土采用 C30 早强混凝土;锚杆采用 R25N 自进式中空注浆锚杆。同时,采用间距  $50 \text{ cm}$  的  $I_{14}$  型钢拱架对衬砌掉块位置前后  $20 \text{ m}$  的范围进行内支撑加固,施作 R32 锁脚锚杆,深度不小于  $3.0 \text{ m}$ 。塌腔锚喷支护完成后,衬砌背后空洞采用密度  $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的轻质泡沫混凝土进行回填。 $I_{14}$  型钢拱架覆波纹板套衬,采用 R32N 自进式中空注浆锚杆将波纹板与衬砌进行连接,沿线路方向锚杆间距  $1.0 \text{ m}$ ,锚杆深度  $3.5 \text{ m}$ ,波纹板与钢拱架间间隙采用微膨胀混凝土进行填充。

#### 3.2 隧道监测

为监测应急抢修过程中围岩应力与衬砌变形,保证抢修过程安全可控,采取衬砌收敛、围岩与钢拱架应力监测等措施。

(1) 衬砌收敛监测:采用全站仪进行监测,测点在围岩垮落前后每隔  $3 \text{ m}$  设置一个断面。每个断面设置 5 个监测点,共设置 4 个断面。选取离垮塌段最近的小里程监测断面测点进行分析,收敛监测点布置与监测结果如图 8、图 9 所示。截至应急抢修结束 7 d 后,衬砌拱顶 A 点收敛位移值约为  $-0.28 \text{ mm}$ ,拱腰 B 点的收敛位移值约为  $-0.2 \text{ mm}$ ,边墙的 C 点收敛位移值约为  $-0.15 \text{ mm}$ 。位移指向隧道方向为负值,背离隧道方向为正值。

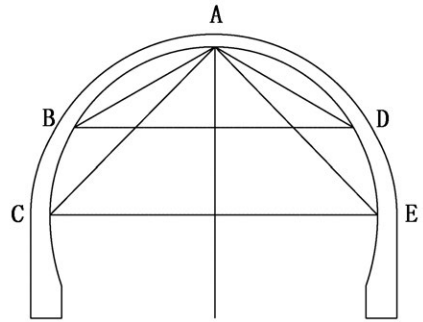


图 8 隧道衬砌收敛监测点布置图

Fig. 8 Tunnel lining convergence monitoring point layout diagram

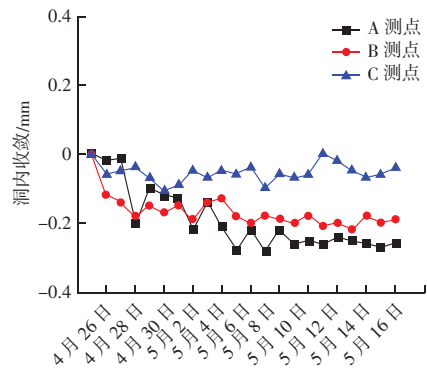


图 9 衬砌收敛位移图

Fig. 9 Convergence displacement diagram of tunnel lining

(2) 隧道应急抢修期间采用轮辐式应力传感器对围岩的应力状态进行监测。应力传感器沿坍塌洞口周边布置,在碎石掉块区将应力传感器嵌入于碎石缝隙中并固定牢固,共布置 5 个应力传感器,完成应力传感器布置后使用速凝混凝土进行封堵。由图 10 可知,截至应急抢修结束 7 d 后塌腔内未施加锚喷支护时,测点 4、5 的围岩压力增大到约为  $-0.02 \text{ MPa}$ ,测点 2、3 的围岩压力增大到约为  $-0.03 \text{ MPa}$ ,施加锚喷支护后围岩压力趋于稳定。

## 道桥技术

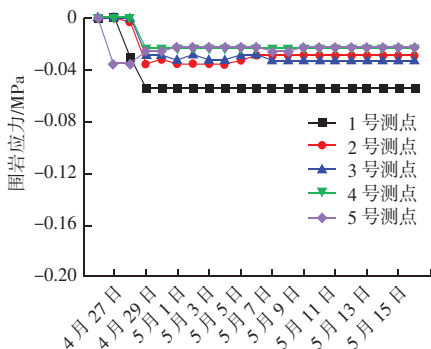


图 10 围岩应力变化图

Fig. 10 Variation diagram of surrounding rock stress

(3) 隧道二次衬砌对支撑钢拱架的压力变化, 直观的显示了衬砌的变形状态。将应力传感器布置于坍塌洞口周边的支撑拱架与衬砌之间, 共布置 3 个轮辐式应力传感器进行自动化监测。由图 11 可知, 钢拱架在安装时传感器受挤压, 钢拱架压力开始时最大约为  $-0.0084$  MPa, 抢险期间钢拱架测点拱顶压力最大约为  $-0.015$  MPa, 抢险措施实施后趋于稳定。

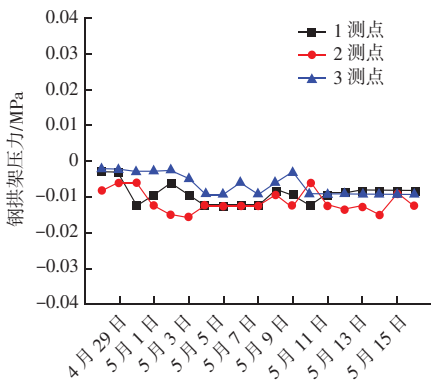


图 11 钢拱架应力变化图

Fig. 11 Stress variation diagram of steel arch support

### 3.3 监控安全预警指标及效果

(1) 隧道衬砌掉块应急抢险监控量测控制标准, 参考 Q/CR 9218—2015 《铁路隧道监控量测技术规程》、JGJ8—2016 《建筑变形测量规范》等规范要求设置, 衬砌收敛控制值设置为  $2$  mm, 预警值如下所示: 当实测值  $< 0.7 \times$  [控制值], 判定安全; 当实测值  $= 0.7 \times$  [控制值], 判定警戒; 当实测值  $> 0.7 \times$  [控制值], 判定危险;

(2) 空洞围岩垮塌段上方隧道衬砌收敛变形监控量测、空洞塌腔内围岩压力监控量测、钢拱架压力监控量测数据在整个抢险过程期间以及应急抢险

完成后的 7 d 内均处于稳定状态, 个别数据因环境影响、人工操作仪器等原因在微小的区间内进行波动, 均未超出预警值。通过监控量测数据, 可以有效验证应急抢险措施的效果, 能够根据监控量测数据动态的调整应急抢险措施参数, 保障应急抢险过程中的安全稳定。

## 4 结论

通过具体的隧道衬砌掉块抢修加固工程实例, 并依托数值模拟和实测数据, 探究了围岩空洞条件下的衬砌掉块机理与应急抢修措施效果, 得到以下结论:

(1) 隧道衬砌背后围岩空洞的存在会使空洞处围岩处于二向应力状态, 一定区域内已经出现拉应力甚至是塑性区。随着列车动载、隧道失修以及其他环境因素的影响, 空洞处的围岩会逐渐产生松动、劣化, 会使围岩的塑性区不断的扩展, 最终围岩发生崩塌并压溃或者击穿二次衬砌。

(2) 隧道衬砌周边围岩的松动、劣化, 会导致其最小主应力降低。接近围岩空洞临空面位置的围岩最小主应力数值接近为 0, 相对远离空洞临空面位置的围岩最小主应力呈增大的趋势。空洞处的衬砌结构的最小主应力明显增大, 指向背离洞径方向。空洞改变了衬砌结构的受力结构, 降低了结构的安全系数。

(3) 在衬砌掉块应急抢险过程中, 对塌腔采取的应急锚喷支护能显著抑制空洞围岩的继续塑性变形, 在 FLAC 3D 数值模拟中, 施加锚喷措施后, 随着空洞区域围岩的松动劣化, 塌腔区域围岩塑性区面积较未施加锚喷措施降低 72.4%, 当提高锚喷结构 2 倍强度参数时, 塌腔区域围岩塑性区面积则降低 89.7%。

(4) 在抢修加固过程中开展实时动态监控预警, 开展衬砌收敛、围岩内力、支护结构应力等监测, 是保障抢修加固过程顺利完成与人员安全的必要保障。

## 参考文献

- [1] 巩江峰, 王伟, 黎旭, 等. 截至 2022 年底中国铁路隧道情况统计及 2022 年新开通项目重点隧道概况 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43 (4): 721-738. (下转第 140 页)

## 道桥技术

料在累计荷载作用 10 000 次后车辙深度仅 2.8 mm, 比 PG64-22 降低 77.6%, 初始抗力达到 3 809.5 次/mm, 是 PG64-22 的 3.72 倍。

(3) 提出“上强下稳”的复合结构设计方案, 实施后该优化结构在同等条件下较传统结构降低 70.5%, 结构抗力均值提高至传统方案的 2.42 倍, 证明了材料和结构协同优化的有效性。

## 参 考 文 献

- [1] 郑全成, 张启志. 盐冻融与干湿作用下沥青混凝土的高低温力学性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 77-80, 135.
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024 [J]. 中国公路学报, 2024, 37 (3): 1-81.
- [3] 张驰. 抗车辙剂在 AC-20F 沥青混合料中的应用研究 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2021, 20 (4): 11-15.
- [4] 方昊, JAVILLA B, 磨炼同. 基于车辙试验的沥青混合料车辙评价指标分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2018, 42 (1): 17-20.
- [5] 贾丽晓, 刘永梅. 不同级配排水沥青混合料路用性能与透水性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 144-150.
- [6] 王旭东, 张蕾, 周兴业. 沥青路面的双向疲劳损伤 [J]. 中国公路学报, 2023, 36 (5): 21-37.

- [7] 刘刚, 陈磊磊, 钱振东, 等. 车辙深度对沥青路面结构性能影响性分析 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (24): 36-40.
- [8] 郭晨晨, 丁婷婷, 吕鑫, 等. 长大纵坡沥青路面车辙发展规律与轴载换算修正系数研究 [J]. 中外公路, 2024, 44 (1): 30-39.
- [9] 李骏, 何超, 刘震, 等. 基于多尺度加载试验的沥青路面结构参数设计方法 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (1): 31-38.
- [10] 芮润华, 王静怡, 付东雷. 基于 GBM 的沥青路面车辙深度预测 [J]. 重庆大学学报, 2025, 48 (11): 67-75.
- [11] 赵碧全, 冉武平, 王亚强. 基层层间接触状态对沥青路面车辙影响的室内试验分析 [J]. 公路工程, 2023, 48 (4): 64-69, 133.
- [12] 王英帅, 万超. 基于 SMA-13 级配的重载交通沥青路面设计及性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 70-75.
- [13] 戚亮, 李飞. 车辙变形对长大纵坡路段沥青路面排水性能的影响 [J]. 公路, 2025, 70 (6): 77-82.
- [14] 李倩, 王旭东, 周兴业, 等. 沥青混合料高温性能转变特征及抗车辙指标构建 [J]. 西南交通大学学报, 2025, 60 (5): 1203-1212, 1219.
- [15] 王强, 卢晓锦, 孙宝生, 等. 基于离散元的再生沥青混合料车辙演化规律研究 [J]. 公路, 2024, 69 (9): 16-21.
- [16] 赵春生. 高速公路温度变化下沥青路面变形因素与预估 [J]. 铁道建筑技术, 2023, (1): 191-195.

(上接第 118 页)

- [2] 王希云. 重载铁路隧道病害调研与整治技术研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (增刊 2): 988-994.
- [3] 王勇. 铁路隧道状态综合评价方法及检修周期策略研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.
- [4] YASUDA N, TSUKADA K, ASAKURA T. Three-dimensional seismic response of a cylindrical tunnel with voids behind the lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 84399-412.
- [5] WANG J, HUANG H, XIE X, et al. Void-induced liner deformation and stress redistribution [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 263-276.
- [6] GAO Y, JIANG Y, LI B. Voids delineation behind tunnel lining based on the vibration intensity of microtremors [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 338-345.
- [7] 田甜. 含空洞缺陷高铁隧道在列车荷载作用下动力学响应规律研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- [8] 吕高航. 公路隧道背后空洞致衬砌结构破坏机理及稳定性定量评价 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [9] 刘彦民. 朔黄铁路隧道衬砌承载性能及安全性评价 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [10] CAMPIONE G, CANNELLA F. Engineering failure analysis of corroded RC beams in flexure and shear. Engineering Failure Analysis, 2018, 86: 100-114.
- [11] 蒲扬东. 考虑岩体参数劣化的洞室围岩稳定性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [12] 言志信, 郭斌, 樊姝芳, 等. 隧道施工中围岩应力和变形探讨 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35 (2): 108.
- [13] 张良山. 隧道衬砌背后空洞上方落石对衬砌结构的破坏机理及整治措施 [J]. 铁道建筑, 2017 (6): 63-67.
- [14] 余东洋. 铁路隧道衬砌背后空洞缺陷安全性评价及处治对策研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- [15] 李玉玺. 铁路隧道衬砌背后脱空及厚度不足整治方案探究 [J]. 现代隧道技术, 2023, 60 (增刊 1): 122-127.
- [16] 李文江, 朱永全. 隧道力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013, 8.