

中文引用格式:许振玉,张学朋,李宁博,等. 基于 FRP-PCM 加固的既有病害隧道加固性能评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(5):186-194.

英文引用格式:XU Zhenyu, ZHANG Xuepeng, LI Ningbo, et al. Performance assessment of diseased tunnels based on FRP-PCM reinforcement[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(5):186-194.

基于 FRP-PCM 加固的既有病害隧道加固性能评价^{*}

许振玉^{1,2}, 张学朋^{**1,2} 副研究员, 李宁博³, 蒋宇静^{1,4} 教授, 陈红宾⁴, 刘林胜⁵

(1 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590;

2 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 3 水利部水利水电规划

设计总院, 北京 100120; 4 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 8528521;

5 青岛地铁集团有限公司, 山东 青岛 266555)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.05.1523

基金项目:国家自然科学基金资助(52109132);山东省高等学校青年创新团队发展计划(2024KJH065)。

【摘要】 为提高隧道工程安全运维能力,通过截面极限承载力,实现纤维增强聚合物水泥砂浆基复合材料(FRP-PCM)补强加固既有病害隧道性能的量化评价和选型的量化设计。基于有限差分原理建立隧道损伤模型,开展 FRP-PCM 补强病害隧道稳定性分析数值试验,根据相关规范作出截面极限承载力曲线(又称 $M-N$ 曲线)综合评判隧道安全情况,同时,提出 $M-N$ 曲线风险系数 α ,实现加固效果的定量化评价,并与工程规范相结合建立 FRP 型号的设计选型方案。结果表明:衬砌拱顶产生空洞时,通过 $M-N$ 曲线判断拱顶部位和拱肩部位较危险。当围岩质量越差、衬砌混凝土劣化程度越高、松动压力高度越大时,FRP-PCM 方法加固性能越显著;在劣化程度 80%、围岩等级 V 级、松动压力高度 19.2 m(2D)的工况条件下,经过不同型号 FRP 补强后能使衬砌 $M-N$ 曲线风险系数降低 23%~32%,较大提升衬砌的安全性能。基于 $M-N$ 曲线风险系数,可根据围岩等级、松动压力高度、衬砌损伤情况等因素选择最优 FRP 型号进行补强加固。

【关键词】 既有病害隧道; 纤维增强聚合物水泥砂浆基复合材料(FRP-PCM); 加固性能; $M-N$ 曲线; 衬砌病害

Performance assessment of diseased tunnels based on FRP-PCM reinforcement

XU Zhenyu^{1,2}, ZHANG Xuepeng^{1,2}, LI Ningbo³, JIANG Yujing^{1,4},
CHEN Hongbin⁴, LIU Linsheng⁵

(1 State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong, 266590, China;

2 College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao Shandong, 266590, China; 3 General Institute of Water Resources and Hydropower

Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China;

4 School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 8528521, Japan;

5 Qingdao Metro Group Co., Ltd., Qingdao Shandong 266555, China)

* 文章编号:1003-3033(2025)05-0186-09; 收稿日期:2025-01-15; 修稿日期:2025-03-18

** 通信作者:张学朋(1989—),男,山东滨州人,博士,副研究员,主要从事地下工程灾害防控理论与技术方面的研究。E-mail: zhangxuepeng0722@126.com。

Abstract: In order to enhance the safety and operational maintenance capabilities of tunnels, a quantitative evaluation framework and design methodology for FRP-PCM composite reinforcement in diseased tunnels was established through cross-sectional ultimate bearing capacity analysis. Numerical tests were conducted using the finite difference method to analyze the stability of FRP-PCM-reinforced diseased tunnels. Tunnel safety assessment was performed based on the sectional ultimate bearing capacity curve, commonly referred to as the $M-N$ curve. A safety factor α of the $M-N$ curve was proposed to enable a quantitative evaluation of the reinforcement effect. Based on this framework, a design and selection scheme for FRP was established, incorporating tunnel design specifications. The analysis reveals that when cavities exist at the crown of the tunnel, both the crown and shoulders exhibit higher risk levels according to the $M-N$ curve. Furthermore, under conditions of poorer surrounding rock quality, greater lining concrete deterioration, and increased loosening pressure height, the reinforcing effect of the FRP-PCM method becomes more significant. For cases with an 80% degradation degree, Class V surrounding rock, and a loosened pressure height of 2D, the application of different types of FRP reinforcement reduces the safety factor of the $M-N$ curve by 23%-32%, thereby significantly improving the structural safety of the lining. By leveraging the $M-N$ curve's safety coefficient, an appropriate FRP type can be selected for defective lining reinforcement based on factors such as rock quality, loose pressure height, and lining conditions.

Keywords: diseased tunnel; fiber-reinforced polymer cement mortar (FRP-PCM); reinforcement; $M-N$ curve; lining diseases

0 引 言

随着经济和民生需求,我国隧道建设飞速发展。截至 2023 年底,全国公路隧道共 27 297 处,总长 30 231 km^[1];铁路隧道 18 573 座,总长 23 508 km^[2]。随着隧道运营时间的延长,加以隧道设计、施工、管理等方面的影响,衬砌病害呈现出多种类型,如衬砌裂缝、空洞、渗漏水、混凝土强度低、厚度不足等^[3-5],导致隧道后期维护运营困难,安全性受到影响。2019 年 7 月 23 日,马家坡隧道发生拱顶衬砌混凝土掉落,导致隧道内行驶车辆追尾碰撞,造成 2 人受伤,威胁人身财产安全。进行隧道衬砌加固补强,增加隧道运营年限已成为研究的重点方向。

注浆加固和衬砌内表面加固是隧道工程中常用的加固方法。注浆加固可有效改善隧道横向变形,治理隧道管片渗漏水。但注浆法较为复杂,注浆参数依据实际经验选取,需要一定的理论指导^[6]。衬砌内表面加固比较简便,加固性能主要受到加固材料影响。目前,主要加固材料包括钢环^[7]、钢-混凝土组合结构^[8]、纤维编织网增强混凝土^[9]、超高性能混凝土^[10]、纤维增强聚合物水泥砂浆基复合材料(Fiber-Reinforced Polymer Cement Mortar, FRP-PCM)^[11]等。FRP 具有施工简单迅速、不增加结构重量、适应性强、补强效果明显、耐久性高等优点;PCM 对无机材料有良好的附着力,可对混凝土表面

起到良好的维护作用。结合使用 2 种材料形成 FRP-PCM 补强方法,能够充分发挥出材料各自的优点。目前,关于 FRP 加固的研究从基本性、验证性和试验着手^[12],如刘德军等^[13]研究隧道衬砌张拉裂缝开裂机制,证明 FRP 加固可有效改善裂缝分布形式,抑制张拉裂缝的发展;LIU Xuezheng 等^[14]探究了隧道衬砌经过 FRP 加固后的补强效果;王静^[15]基于有限元数值模拟方法建立模型,分析了 FRP 加固含空洞隧道的补强效果;JIANG Yujing^[16]、HAN Wei^[17]等基于有限差分数值模拟方法构建了隧道衬砌背后存在空洞缺陷模型,分析了 FRP-PCM 补强方法对运营隧道衬砌的加固效果。上述研究多采用单一指标(位移、轴力、弯矩等)安全评价损伤后及补强后的隧道衬砌,在量化设计等基础理论方面还存在不足。

鉴于此,笔者拟通过有限差分软件 FLAC_{3D},综合考虑衬砌截面内力判断衬砌安全性,以衬砌背后含空洞、衬砌劣化程度、松动压力、围岩等级及 FRP 规格为影响因素,建立隧道衬砌病害模型开展数值模拟试验。使用衬砌截面的极限承载力曲线(又称 $M-N$ 曲线),比较轴力评价与 $M-N$ 曲线评价效果,提出 $M-N$ 曲线风险系数,分析加固效果,并使用 $M-N$ 曲线风险系数评价补强后安全程度,作出相应的衬砌设计选型,以期能够根据实际条件选取适合规格 FRP 补强维护衬砌。

1 截面的极限承载力曲线及评价系数

在试验模拟中,由于尺寸因素的限制常会使用未加筋的素混凝土来表征衬砌,因此,选择参照规范^[18]中对于素混凝土截面的安全演算公式进行判断。根据弯矩 M 与轴力 N 的比值得偏心距 e_0 (单位为 m),判断截面的破坏形式。

当 $e_0 \leq 0.2h$ 时,衬砌截面安全由混凝土抗压极限强度主导,如下式:

$$KN \leq \varphi \left[1.0 + \frac{0.648M}{Nh} - 12.569 \left(\frac{M}{Nh} \right)^2 + 15.444 \left(\frac{M}{Nh} \right)^3 \right] R_a b h \quad (1)$$

式中: K 为截面安全系数; N 为截面轴力, kN; M 为截面弯矩, kN·m; φ 为混凝土构件的纵向弯曲系数,可取 $\varphi = 1.0$; h 为截面的高度, m; R_a 为混凝土的抗压极限强度, MPa; b 为截面的宽度, m。

当偏心距 $e_0 > 0.2h$ 时,衬砌截面安全由混凝土抗拉极限强度主导,如下式:

$$M \leq \frac{h}{6} \cdot N + \frac{1.75\varphi R_l b h^2}{6K} \quad (2)$$

式中 R_l 为混凝土的抗拉极限强度, MPa。

根据 M 与 N 的关系,令截面安全系数 K 使用规范^[18]规定取值,可得到衬砌截面有关 M 与 N 的包络曲线,即衬砌截面极限承载力曲线,也就是 $M-N$ 曲线。若已知衬砌截面内力,以 M 为横坐标、 N 为纵坐标组合成为内力点,根据其所处位置判断截面安全与否。

衬砌截面的 $M-N$ 曲线如图 1 所示,其中, A 点为抗拉极限强度主导段曲线与弯矩轴的交点, C 点为抗压极限强度段曲线与轴力轴的交点, B 点为 2 段曲线的交点; AB 段图像呈直线状态分布,由混凝土抗拉极限强度主导,截面抗弯性能随轴力的增加而增加; BC 段图像为曲线,由混凝土抗压极限强度主导,截面抗弯性能随轴力的增加而降低。通过图像比较衬砌截面内力点与 $M-N$ 曲线的关系,就可直观的看出该位置的安全状态,当衬砌内力点处在包络线内时,处于安全状态;当衬砌内力点处在包络线外时,处于危险状态。

图 1 可直观地表现出衬砌截面的安全与否,但并不能定量判断其安全程度,需要指标定量体现出其安全程度,为此引入 $M-N$ 曲线风险系数 α , 图 1 中, O 为坐标轴原点, D 和 D' 为衬砌某截面内力点, E 为曲线与 OD' 连线或 OD 者延长线的交点, d 为

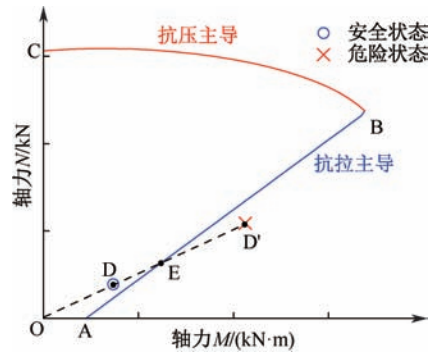


图 1 $M-N$ 曲线

Fig. 1 $M-N$ curve

OD 或 OD' 连线的距离, d_0 为 OE 连线的距离。

$$\alpha = \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

根据该点的 α 值判断该点安全状态。由定义可以得出, $\alpha < 1$ 时,该点位于曲线内部,处于安全状态;当 $\alpha = 1$ 时,该点处于临界安全状态;当 $\alpha > 1$ 时,该点处于危险状态, α 值越大,该点越危险。

2 FRP-PCM 加固既有病害隧道工程模型

2.1 既有病害隧道工程模型建立

为降低数值模型复杂程度,加快计算速度,准确模拟初期支护需要详细的材料参数、施工工艺参数,不适当的参数可能会导致误差^[4,15],因此,文中主要考虑对二衬的补强效果研究。为还原隧道掘进过程,建模过程如下:建立完整围岩模型,在施加边界条件后进行地应力平衡;将开挖区域本构模型设置为空模型后进行地应力平衡,再进行应力释放;将衬砌部位施加衬砌所对应的力学参数。

模型总长度为 48 m,高度为 15.6 m,隧道延伸方向,即 y 方向深度为 0.5 m。模型侧面施加 x 方向约束,模型底面施加 x 与 z 方向约束。隧道模型如图 2 所示,隧道衬砌截面为多心圆形状,衬砌厚度为 0.3 m。松动压力加载在模型上表面,距离中心 10 m 范围内。空洞位于衬砌拱顶处,呈 90° 对称分布,空洞最大处深度为 0.15 m。衬砌补强材料选用 FRP-PCM,在衬砌拱顶内表面呈 120° 对称分布,补强范围如图 2 右侧所示。围岩、衬砌及充填材料均使用实体单元建模,选用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构关系。衬砌补强材料 FRP-PCM 选用 Liner 结构单元进行建模。

围岩、衬砌、填充材料根据文献[16,18]选取参

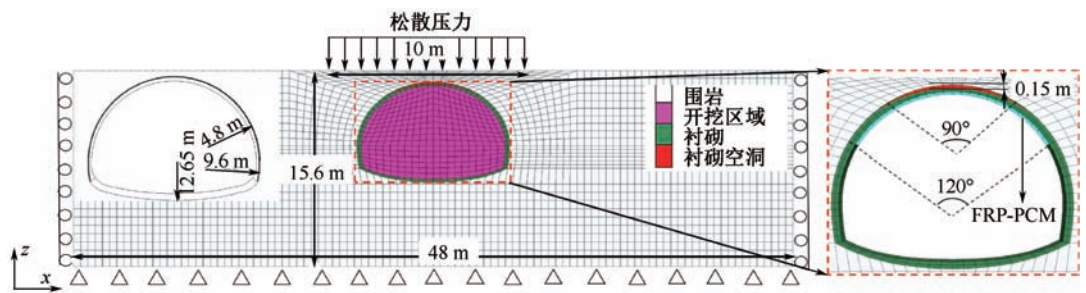


图 2 隧道衬砌模型

Fig. 2 Numerical model of tunnel lining

数,见表 1。衬砌混凝土劣化体现为弹性模量 E_0 、抗拉强度 σ_t 、抗压强度 σ_c 的折减,假定泊松比 ν 和内摩擦角 φ 不折减,黏聚力 c 根据理论^[19]单轴抗压强度计算获得,劣化后的混凝土参数见表 2。FRP-PCM 方法与补强结构界面的相关力学参数通过文献[16]中直剪试验结果获取,FRP-PCM 规格型号^[16]及各项参数见表 3。以衬砌背后空洞、衬砌劣化、松动压力、围岩等级和 FRP 型号为设计因素,采用单一因素分析方法,考虑 5 种设计因素条件,详细方案设计见表 4。

表 1 围岩-衬砌-填充材料参数

Table 1 Mechanical parameters for surrounding rock mass, lining and filling material								
项目		密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_0/GPa	ν	$\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa	σ_c/MPa	σ_t/MPa
围岩 等级	III 级	2 400	13. 500	0. 275	44. 5	1. 10	3. 28	0. 33
	IV 级	2 150	4. 000	0. 325	33	0. 45	1. 22	0. 12
	V 级	1 900	1. 500	0. 400	23. 5	0. 16	0. 39	0. 04
衬砌		2 400	24. 500	0. 200	40	6. 99	30. 00	2. 00
空洞填充材料		980	0. 012	0. 130	10	0. 50	1. 09	0. 20

表 2 劣化后衬砌参数

Table 2 Mechanical parameters of lining after deterioration					
劣化状态/%	E_0/GPa	ν	$\varphi/(^{\circ})$	c/MPa	σ_t/MPa
0	24. 5	0. 2	40	6. 99	3
33	16. 3	0. 2		4. 66	2
80	4. 9	0. 2		1. 40	0. 6

表 3 FRP 及 PCM 参数

Table 3 Mechanical parameters of FRP and PCM						
材料	E_0/GPa	σ_t/MPa	黏聚力 c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	刚度系数 $k_s/(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	厚度/ mm
CR4	100	1 400	2. 217	40	5. 298	2
CR6		4. 6			6. 394	4
CR8					13. 369	5
PCM	26				—	10

2. 2 Liner 单元模拟 FRP-PCM 可行性验证

岩土工程领域中常使用有限差分法进行数值模拟试验,该法可同时体现岩土体的线性和非线性材料特征,目前有效性已经得到验证^[20]。采用 Liner 结构单元模拟表征 FRP-PCM,其有效性有待进一步的验证。因此,参照文献[16]开展 4 点弯曲梁数值

表 4 试验方案设计

Table 4 Test design	
设计因素	工况值
衬砌空洞	含空洞、不含空洞模型
混凝土劣化程度/%	0、33、80
松动压力/m	3、6、9. 6 (1D)、19. 2 (2D)
围岩等级	III、IV、V
FRP 型号	无补强、CR4、CR6、CR8

模拟试验,验证 Liner 单元表征 FRP-PCM 的有效性。图 3 为数值模拟试验模型,模型长 2 m、宽 0. 2 m、高 0. 3 m,按照试验模型配筋图进行模拟加筋,材料参数参照文献[16]选取,设计无补强和 CR6 型号 FRP 补强 2 组模拟试验,将 FRP-PCM 等效为 Liner 结构单元。对比数值模拟结果与试验数据,如图 4 所示,其中,试验部分的数据源自文献[16]中所开展的模型试验。由图 4 可知:试验结果与模拟结果极限载荷大致相同,无补强情况下极限载荷约为 20 kN,CR6 补强后极限载荷有较大提升,约为 30 kN;相比较模型试验,曲线大致趋势相似,但模拟所得位移-载荷曲线较为平滑,原因是数值模拟未考虑混凝土梁受弯后裂损导致的复杂应力变化。数值模拟与实际试验数较吻合,验证了数值模拟 FRP-PCM 补强

的有效性和选用 Liner 结构单元表征 FRP-PCM 结构的可行性。

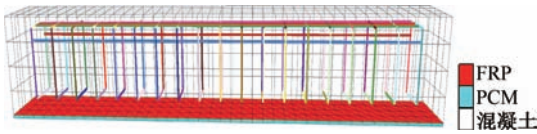


图3 4点弯曲试验模型

Fig. 3 Numerical model for the four-point bending test

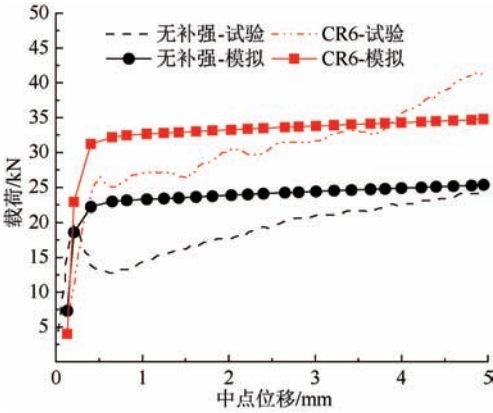


图4 位移-载荷曲线

Fig. 4 Displacement-load curves

3 既有病害隧道的损伤评价

隧道衬砌由于空洞、材料劣化等衬砌病害的存在,导致衬砌某些部位处于应力集中状态,使衬砌达到屈服极限,严重威胁隧道衬砌安全。由图 5 可知:衬砌拱顶含空洞时,相比较于完整衬砌,其轴向应力变大。如在围岩等级 V 级、松动压力 19.2 m(2D),衬砌劣化程度为 0% 时,拱顶处轴向应力值由 2.28 MPa 增加至 4.68 MPa。劣化后衬砌相比较于完整衬砌,其轴向应力值减小。如在围岩等级 V 级、松动压力 19.2 m(2D) 情况下,随着混凝土由健全劣化到 80% 时,衬砌拱顶轴向应力由 2.28 MPa 降低至 1.96 MPa。

仅凭轴力评价隧道安全程度略有偏颇,其未考虑弯矩对衬砌截面安全性的影响,因此选用 $M-N$ 曲线评价隧道安全程度。由于空洞的存在使得衬砌拱顶厚度由 0.3 m 变为 0.15 m,衬砌拱顶截面的 $M-N$ 曲线发生变化。如图 6 所示,衬砌拱顶对应图中含空洞部位 $M-N$ 曲线,其余部位则对应图中完整部位 $M-N$ 曲线。衬砌极限轴力由 1 531 kN 降低至 937 kN,极限弯矩由 89 kN·m 降低至 22 kN·m, $M-N$ 曲线的包络线面积减小,拱顶部位的安全度显著降低。由图 6 可知:产生衬砌空洞后各部位的轴力值减小,弯矩值变大。在劣化 0%,松动压力 9.6 m(1D),围岩等级 V 级情况下,无衬砌拱顶空

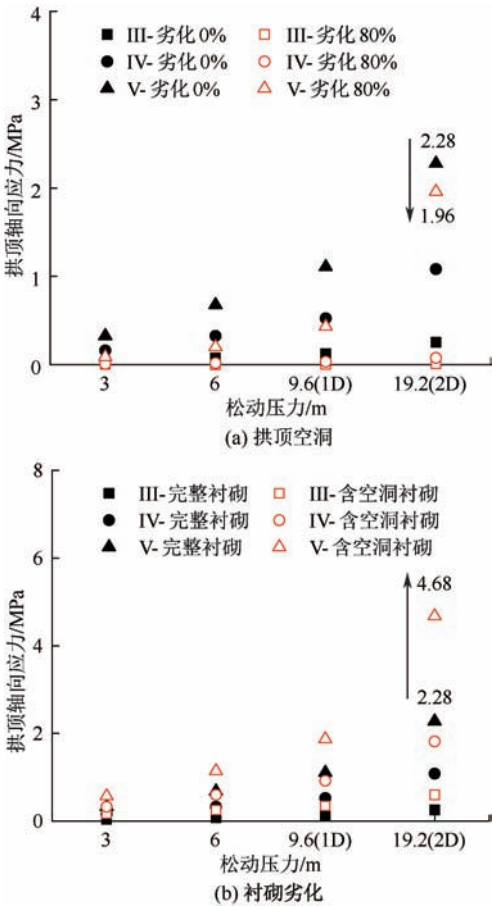


图5 隧道衬砌病害时拱顶轴向应力的变化

Fig. 5 Variation of axial stress in the vault during tunnel lining disease

洞时,各位置内力点均在 $M-N$ 曲线内部,处于安全状态。相同工况下,衬砌拱顶存在空洞时,拱顶内力点落在 $M-N$ 曲线外,处于危险状态;拱肩轴力较小、弯矩较大,内力点也落在 $M-N$ 曲线外,处于危险状态;剩余部位内力点落在 $M-N$ 曲线内,处于安全状态,但相较于无空洞时,内力点向曲线外扩展,衬砌整体的安全性降低。

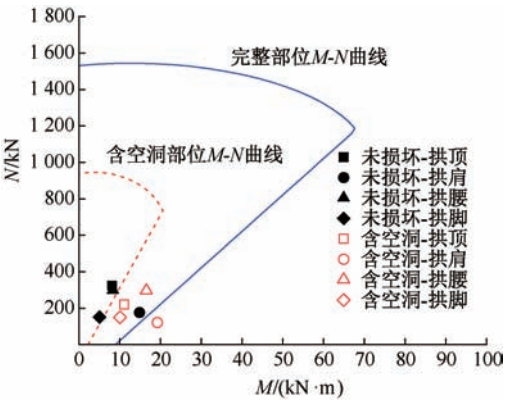


图6 损伤前后 $M-N$ 曲线比较

Fig. 6 Comparison of $M-N$ curves before and after damage

由图 7 可知:衬砌拱顶劣化后轴力减小,弯矩略微变大。劣化后内力点明显向曲线外偏移,衬砌安全性降低。衬砌劣化后轴力降低、弯矩变大,按照轴力评判,劣化后衬砌偏安全,但实际上劣化使得内力点向曲线外偏移,衬砌偏危险。 $M-N$ 曲线可结合衬砌轴力弯矩共同判断衬砌安全性,对衬砌安全程度评判具有一定的优势性。

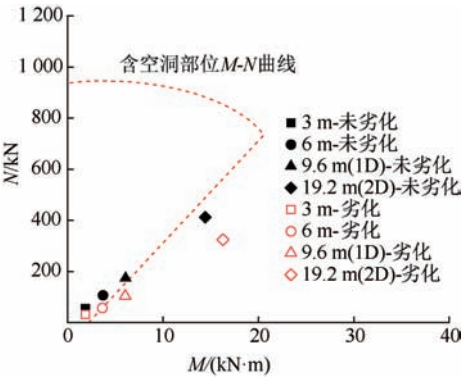


图 7 拱顶部位劣化前后 $M-N$ 曲线比较
Fig. 7 Comparison of $M-N$ curves before and after deterioration of vault

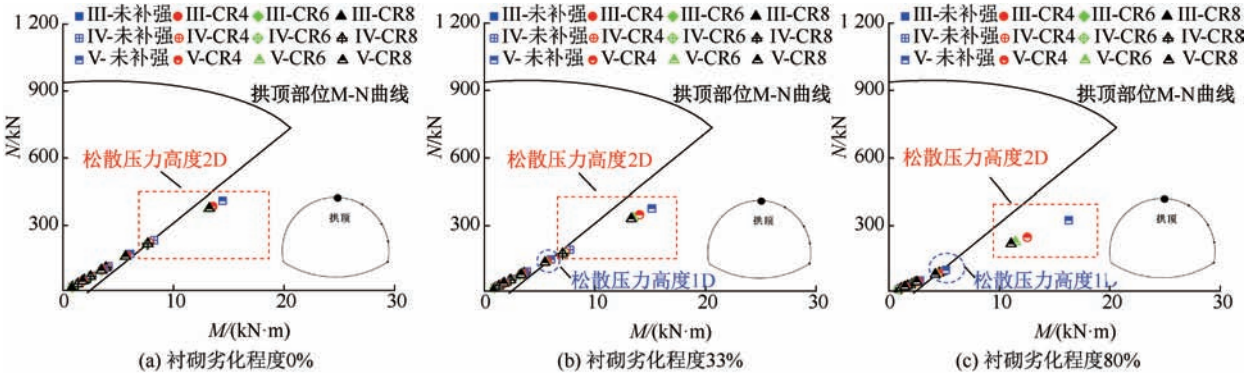


图 8 衬砌拱顶部位 $M-N$ 曲线
Fig. 8 $M-N$ curve of lining vault area

4.2 基于 $M-N$ 风险系数 α 的加固性能量化评价

对比图 9a 与图 9b,劣化程度增加会使得 α 增大,衬砌安全性降低。在劣化程度 0%、IV 级围岩、松动压力 19.2 m(2 D)时,使用低规格 FRP(CR4)补强后,拱顶部位变为安全状态;在劣化程度 80%,其他工况相同时,需要使用大规格 FRP(CR8)补强才可使拱顶部位变为安全状态。随着围岩等级的增加和松动压力的增加, α 呈上升趋势。在围岩情况较好、松动压力较低时,拱顶部位 α 小于 1,基本处于安全状态,此时使用 FRP-PCM 补强对拱顶安全程度影响较小;随着围岩等级的增加,补强效果愈加明显,当在劣化程度 80%、围岩等级 V 级、松动压力

4 既有病害隧道的加固性能评价

4.1 基于 $M-N$ 曲线的加固性能分析

为分析使用 FRP-PCM 方法补强后效果,提取补强前后衬砌拱顶部位的轴力弯矩,组合成内力点,放入对应的 $M-N$ 曲线中,观察其落点位置与趋势。随着松动压力的增加,落在曲线外的点随之增加,并且落在曲线外的点与曲线的距离也增加。比较图 8a 和图 8c,在同一部位中,劣化程度越大,内力点越偏向于弯矩轴,趋向于弯曲破坏。由图 8 可知:随着松动压力增加和 FRP 规格增大,补强效果变好(内力点距离 $M-N$ 曲线变近),松动压力越大,这个趋势越明显。松动压力较小时,内力点都落在曲线内,此时补强效果不明显;随着松动压力增加,开始有内力点落在曲线外,经过补强后内力点明显向曲线靠拢,具有较明显的补强效果,可降低补强部位的弯矩,提高隧道衬砌抗弯性能,使衬砌安全性增加。

2 D 的情况下,虽然补强后未变为安全状态,但使用 CR4 型号 FRP 补强就可使 α 由 3.66 变为 2.82,降低 23%,而使用 CR8 型号 FRP 补强后 α 可降低 32%,具有明显的补强效果。

4.3 基于 $M-N$ 风险系数 α 的 FRP 选型设计

由图 10 可知:劣化程度不变时(劣化程度 80%),在 III 级围岩情况下,较高松动压力时,衬砌仍处于安全状态;IV 级围岩情况下,补强措施在未补强、CR4 补强、CR6 补强、CR8 补强时,松动压力分别小于 17.27、17.88、18.31、18.55 m,处于安全状态;V 级围岩情况下,补强措施在未补强、CR4 补强、CR6 补强、CR8 补强时,松动压力分别小于

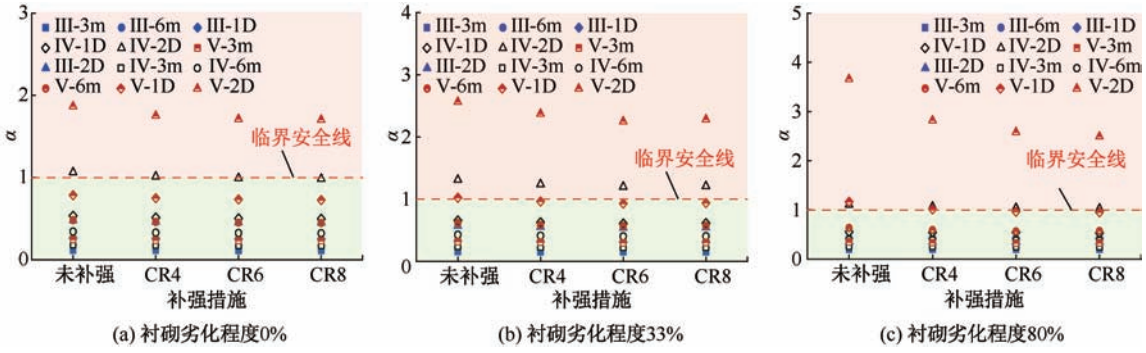


图9 衬砌拱顶部位 α 值
Fig. 9 α of lining vault areas

8.78、9.68、10.16、10.29 m,处于安全状态。确定围岩等级下(V级围岩),在混凝土劣化程度为0%,补强措施为未补强、CR4补强、CR6补强、CR8补强时,松动压力分别小于11.83、12.41、13.02、13.33 m,处于安全状态;在混凝土劣化程度为

33%,补强措施为未补强、CR4补强、CR6补强、CR8补强时,松动压力分别小于10.92、11.51、11.87、12.13 m,处于安全状态。

根据不同劣化程度下,衬砌单轴抗压强度与松动压力之间关系,可作出相应的衬砌设计选型。由

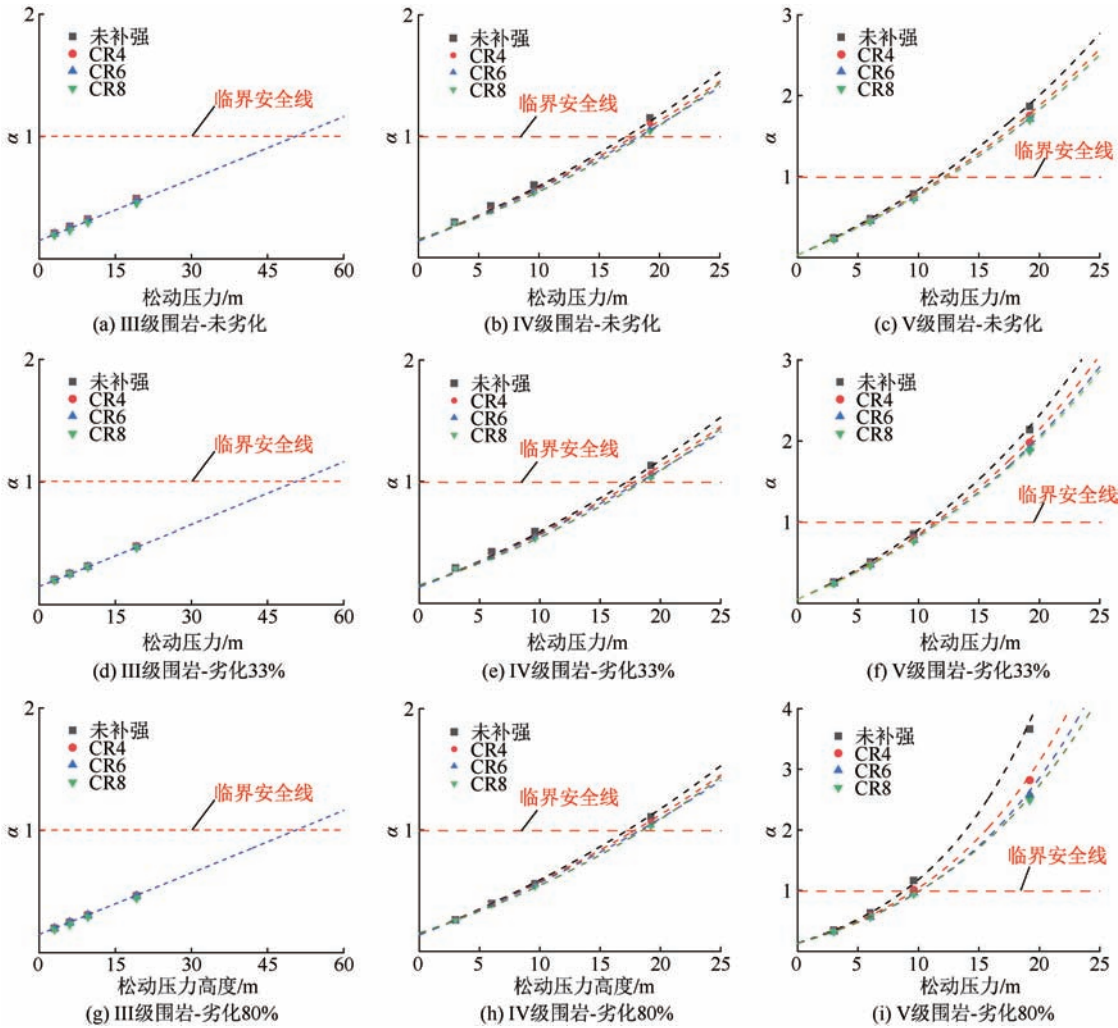


图10 松动压力- α 关系
Fig. 10 Relationship between loose pressure and α

图 11a 可知:围岩等级为 III 级时,衬砌可承受较高的松动压力,进行低强度补强即可达到预期补强效果。由图 11b 可知:在围岩等级为 IV 级、衬砌压缩强度为 24.5 MPa 时,未补强、CR4 补强、CR6 补强、CR8 补强后其松动压力小于 17.8、18.8、19.1、

19.3 m 时,处在安全状态。由图 11c 可知:在衬砌压缩强度为 15 MPa 时、松动压力 10.6 m 左右时,需要使用 CR4 型号 FRP 补强,在松动压力约 11.8 m 时,需要使用 CR8 型号 FRP 补强。

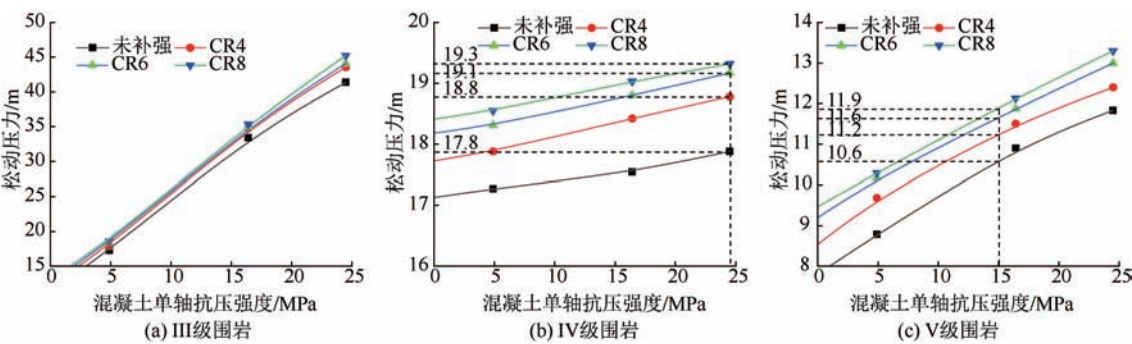


图 11 衬砌设计选型
Fig. 11 Lining design selection

5 结 论

1) 衬砌产生拱顶空洞时,拱顶部位轴向应力值增大,衬砌安全性降低;衬砌劣化时,轴向应力值略微减小,并不代表衬砌安全性增加,因为衬砌劣化会导致衬砌强度下降,所能承受的内力也降低。通过 M - N 曲线判断,劣化后衬砌轴力减小的同时,弯矩略微变大,使得内力点偏向于 M - N 曲线外,衬砌安全性降低。

2) 从 FRP-PCM 方法的补强效果来看,衬砌劣化程度愈大、围岩质量越差、松动压力高度越大、FRP 规格越高,拱顶部位轴力和弯矩越小,内力点

越靠近 M - N 曲线内侧,补强效果越明显。

3) 为寻求量化指标,建立 M - N 曲线风险系数 α ,在围岩条件较好时,补强后可使拱顶部位 α 降低至安全值以内。在条件较差,如劣化程度 80%、围岩等级 V 级、松动压力高度 19.2 m (2 D) 时,使用 FRP-PCM 补强后,能使 M - N 曲线风险系数降低 23%~32%,较大提升衬砌的安全性能。

4) 根据不同劣化程度下,松动压力与衬砌单轴抗压强度关系,作出相应的衬砌设计选型,围岩情况较好时,低强度补强即可达到预期补强效果。当围岩情况较差,衬砌损伤较大时,可根据实际条件选取适合规格 FRP 补强维护衬砌。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2023 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2024(8): 31-35.

[2] 巩江峰, 王伟, 黎旭, 等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 377-392.

GONG Jiangfeng, WANG Wei, LI Xu, et al. Statistics of railway tunnels in China by the end of 2023 and overview of key tunnels of projects newly put into operation in 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377-392.

[3] 方林, 龚晟, 王桂林, 等. 动静荷载下岩溶突水隧道安全厚度计算方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 76-83.

FANG Lin, GONG Sheng, WANG Guilin, et al. Research on safe thickness calculation method for karst burst tunnel under dynamic and static loading[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 76-83.

[4] 郑艾辰, 向晋扬, 黄锋, 等. 空洞对隧道结构安全影响试验与模拟[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 119-126.

ZHENG Aichen, XIANG Jinyang, HUANG Feng, et al. Test and simulation of influence of voids on tunnel structure[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 119-126.

[5] ZHANG Xuepeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Ambient vibration-based quantitative assessment on tunnel lining defect using laser doppler vibrometer[J]. Measurement, 2025, 239: DOI: 10.1016/J. MEASUREMENT. 2024. 115481.

- [6] QIAO Jinli, SUN Yongtao, HU Jianbang, et al. Mechanical behavior of secondary lining vault void and mold grouting repair considering contact effect[J]. Structures, 2023, 47: 385–395.
- [7] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究: 整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2 300–2 306.
LIU Xian, TANG Min, LU Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2 300–2 306.
- [8] 任天宇, 刘树亚, 柳献. 波纹钢板加固盾构隧道衬砌管片抗弯性能试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 317–323.
REN Tianyu, LIU Shuya, LIU Xian. Experimental study of bending capacity of shield tunnel lining segment strengthened by corrugated steel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 317–323.
- [9] 刘德军, 黄宏伟, 左建平, 等. 盾构管片横向大变形 TRC 控制方法及作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1 889–1 898.
LIU Dejun, HUANG Hongwei, ZUO Jianping, et al. Control method and mechanism of large transverse deformation of shield segment using TRC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1 889–1 898.
- [10] 柳献, 张姣龙, 蒋子捷, 等. UHPC 加固盾构隧道衬砌结构试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 181–190.
LIU Xian, ZHANG Jiaolong, JIANG Zijie, et al. Experimental investigations of a segmental tunnel ring strengthened by using UHPC[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 181–190.
- [11] GUO Rui, PAN Yi, CAI Lianheng, et al. Bonding behavior of CFRP grid-concrete with PCM shotcrete[J]. Engineering Structures, 2018, 168: 333–345.
- [12] AMIRUDDIN A A. Shear behavior of concrete beams strengthened with CFRP grid and PCM shotcrete[J]. EPI International Journal of Engineering, 2019, 2(1): 5–8.
- [13] 刘德军, 黄宏伟, 岳清瑞, 等. 隧道衬砌张拉裂缝开裂机制及快速修复方法初探[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增 1): 236–243.
LIU Dejun, HUANG Hongwei, YUE Qingrui, et al. Study on cracking mechanism and rapid repair method for tensile cracks of tunnel lining[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 236–243.
- [14] LIU Xuezheng, SANG Yunlong, DING Shuang, et al. Experimental study on the mechanics characteristics of CFRP strengthening of highway tunnels at different damage states[J]. Geofluids, 2020(1): DOI:10.3390/app9152984.
- [15] 王静. 围岩空洞对衬砌的影响及 FRP 材料加固效果的数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
WANG Jing. Research on the effect of surrounding rock cavity on lining and numerical simulation of reinforcement effect of FRP material[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [16] JIANG Yujing, WANG Xiaoshan, LI Bo, et al. Estimation of reinforcing effects of FRP-PCM method on degraded tunnel linings[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(3): 327–340.
- [17] HAN Wei, JIANG Yujing, LI Ningbo, et al. Failure behavior and reinforcing design of degraded tunnel linings based on the three-dimensional numerical evaluation [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105677.
- [18] TB 10003—2016, 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003—2016, Code for design of railway tunnel[S].
- [19] 吴顺川. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021: 174–175.
- [20] Itasca Consulting Group Inc. FLAC_{3D} 7.0 documentation[Z]. 2024-02-25.

作者简介: 许振玉 (2000—), 男, 山东汶上人, 硕士研究生, 主要研究方向为地下工程灾害防治技术。E-mail: 1042327894@qq.com。

