

城市道路隧道运营阶段支护结构劣化性能分析

王争瑞

(新郑市公路事业发展中心, 新郑 451100)

摘要: 为探究某城市道路隧道运营阶段的支护结构性能, 通过 FLAC 3D 建立数值仿真模型, 考虑流变与蠕变影响, 引入强度折减法设定劣化系数, 对岩体与支护参数进行折减分析。研究不同劣化系数下, 隧道支护结构的位移、拉压应力分布及安全系数变化。结果表明: 随劣化系数增大, 支护结构顶部、底部开裂破坏风险增大, 拱腰受压破坏可能性亦随之增加, 拱腰安全性最低且底部安全性骤降; 建议运营阶段重点监测支护顶部、拱腰和底部, 及时采取加固措施, 以预防支护结构性能劣化速率过快, 进而确保隧道运营安全。

关键词: 城市道路隧道; 运营阶段; 支护结构; 劣化分析; 数值模拟

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0150-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.022

Analysis on Degradation Performance of Supporting Structure in Operation Stage of Urban Road Tunnel

WANG Zhengrui

(Xinzheng City Highway Development Center, Xinzheng 451100, China)

Abstract: To investigate the performance of support structures during the operation of an urban road tunnel, a numerical simulation model was established using FLAC 3D, considering the effects of rheology and creep. Strength reduction methods were introduced to set degradation coefficients, and the rock mass and support parameters were analyzed through reduction. The study examined the displacement, tensile and compressive stress distribution, and safety factor changes of the tunnel support structure under different degradation coefficients. The results indicate that with the increase of the degradation coefficient, the risk of cracking and failure at the top and bottom of the support structure increases, the possibility of compressive failure at the arch waist increases, the safety at the arch waist is the lowest, and the safety at the bottom drops sharply. It is recommended that during the operation phase, the top, arch waist, and bottom of the support structure should be monitored closely, and reinforcement measures should be taken in a timely manner to prevent the rapid degradation of the support structure's performance, thereby ensuring the safety of tunnel operation.

Key words: urban road tunnels; operation stage; supporting structure; degradation analysis; numerical simulation

0 引言

随着我国经济的持续增长，城市道路隧道工程在基础设施建设中的作用日益凸显，其中城市道路隧道和地铁隧道共同构成了城市地下交通网络的核心。然而，城市环境的动态变化以及频繁的工程建设活动，对现有隧道支护结构的稳定性和安全性带来了挑战。由于地下水的影响和周围环境的复杂性，加之岩体的流变与蠕变效应，隧道在运营阶段可能会出现支护结构安全性逐渐下降的现象，这不仅与材料老化有关，还可能受到疲劳效应等因素的影响^[1-2]。

田伟权^[3] 以对隧道支护结构的病害进行了系统分析，并提出了相应的整治措施；刘昌等^[4] 建立了衬砌劣化解析模型，分析流变对运营隧道衬砌劣化影响；王大鹏等^[5] 针对含裂缝隧道衬砌在侵蚀环境下的性能劣化问题，建立了时效可靠性分析模型，用以评估衬砌结构的服役性能；仇文革等^[6] 通过室内试验对隧道二次衬砌荷载、位移及内力变化规律进行分析，得出衬砌结构具有较大安全冗余度；席红兵等^[7] 分析了地铁隧道支护结构在冻融与盐溶液侵蚀工况下的耐久性能变化规律；卢锋^[8] 采用折减系数来评价围岩与衬砌的安全性；王林国^[9] 结合试验与数值模拟，探讨层状千枚岩遇水软化特性对隧道支护结构安全的影响；师凯强等^[10] 得出黄土隧道围岩压力随时间变化受开挖影响显著的结论，二衬拱腰在承载围岩荷载中起关键作用；陈忠波^[11] 利用数值分析方法建立隧道三维热-力耦合模型，得到热-力耦合作用下隧道围岩的位移和应力特征、初支结构安全系数及合理的锚杆支护参数取值；张顶立等^[12] 阐明了隧道支护结构与围岩相互作用机制，提出支护结构的功能分配与协同优化设计方法，以实现围岩稳定性控制的定量化设计；孔超等^[13] 针对深埋软岩铁路隧道大变形问题，通过现场试验与数值模拟，分析支护受力变形特征及失稳机理，采取改进措施并有效控制变形；蔡俊华^[14] 探究石林隧道支护结构的变形破坏机理，主要是因为围岩的低强度、纵向承载力的不足以及塑性流动与膨胀现象。

考虑流变与蠕变对耐久性的影响，引入岩体与支护结构折减系数概念，建立劣化系数评价体系，分析对支护结构位移与拉压应力分布规律，利用容许应力法计算支护安全系数，综合支护结构的位移、应力及安全系数，对运营隧道支护结构性能裂化程度进行评

价，为相似工程运营安全稳定性提供指导意见。

1 运营工程概况

某城市道路运营隧道位于市区交通量较大区域，隧道上部区域为回填土，下部岩体为强风化灰岩，隧道平均埋深、跨度和高度分别为 30、11.3 和 8.6 m，选取存在裂缝的断面作为监控量测特定断面，将初期支护与二次支护作为复合支护结构进行统一换算，岩体与复合式支护材料参数初始取值见表 1。

表 1 岩体与复合式支护材料参数初始取值
Table 1 Initial values of rock mass and composite support material parameters

结构类型	弹性模量 /GPa	泊松比	容重 γ / (kN/m ³)	黏聚力 /MPa	内摩擦角 / (°)
外部岩体	1.98	0.35	18.6	0.24	25
支护结构	27.60	0.20	26.5		
2.5 m 劣化 岩体	2.01	0.34	20.3	0.25	26

运营隧道周边岩体力学参数与支护结构性能会随时间推移（流变、蠕变与疲劳）产生劣化效应，将岩体与支护结构视为共同体，引入强度折减系数 ω_i 假定劣化系数 t_i ，对支护结构弹性模量 E' 、劣化岩体弹性模量 E 、劣化岩体黏聚力 c 与劣化岩体内摩擦角 φ 进行折减，计算见式（1），计算得出 6 种工况见表 2。

$$\begin{cases} E_i = E \cdot (1 - t_i) \\ c_i = c \cdot (1 - t_i) \\ \tan\varphi_i = \tan[\varphi_i \cdot (1 - t_i)] \\ E'_i = E' \cdot (1 - t_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中： E_i 为折减后岩体弹性模量，GPa； c_i 为折减后岩体黏聚力，MPa； φ_i 为折减后岩体内摩擦角，(°)； E'_i 为折减后支护弹性模量，GPa； $t_i = 1 - 1/\omega_i$ ， ω_i 为强度折减系数。

表 2 支护结构劣化参数工况表
Table 2 Support structure cracking parameter conditions

劣化系数 t_i	劣化岩体			支护结构
	弹性模量 E_i /GPa	黏聚力 c_i /MPa	内摩擦角 φ_i / (°)	弹性模量 E'_i /GPa
0	2.01	0.25	26.0	27.60
5%	1.91	0.24	24.7	26.22
10%	1.81	0.23	23.4	24.84
15%	1.71	0.21	22.1	23.46
20%	1.61	0.20	20.8	22.08
25%	1.51	0.20	19.5	20.70

道桥技术

2 仿真模型与监测点布设

隧洞力学影响区域约 3 倍洞径建立 70 m (x) ×

70 m (y) × 1 m (z)，岩体采用 MC 本构模型，支护结构采用弹性模型，力学边界条件：上边界自由，其余边界施加法向约束，模型及断面监测点如图 1 所示。

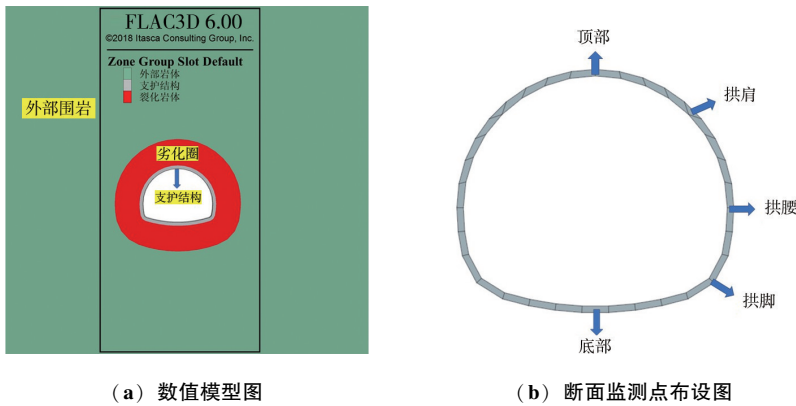


图 1 城市道路隧道模型与监测点设置

Fig. 1 Model and monitoring point layout of the urban road tunnel

3 数值结果分析

由于隧道呈中心线对称，计算时仅需考虑半边模型^[15]。提取顶部、右拱肩、右拱腰、右拱脚和底部支护结构的变形位移、拉压应力及安全系数等数据对隧道支护结构的安全性进行评价，综合判断支

护结构的劣化程度。

3.1 支护结构变形位移

6 种工况变形位移数据如图 2 所示，位移峰值位于腰部与顶底，说明此支护结构可能最先发生劣化。对顶部下沉、拱腰水平收敛与底部鼓起三个特征量进行分析，其变化规律如图 3 所示。

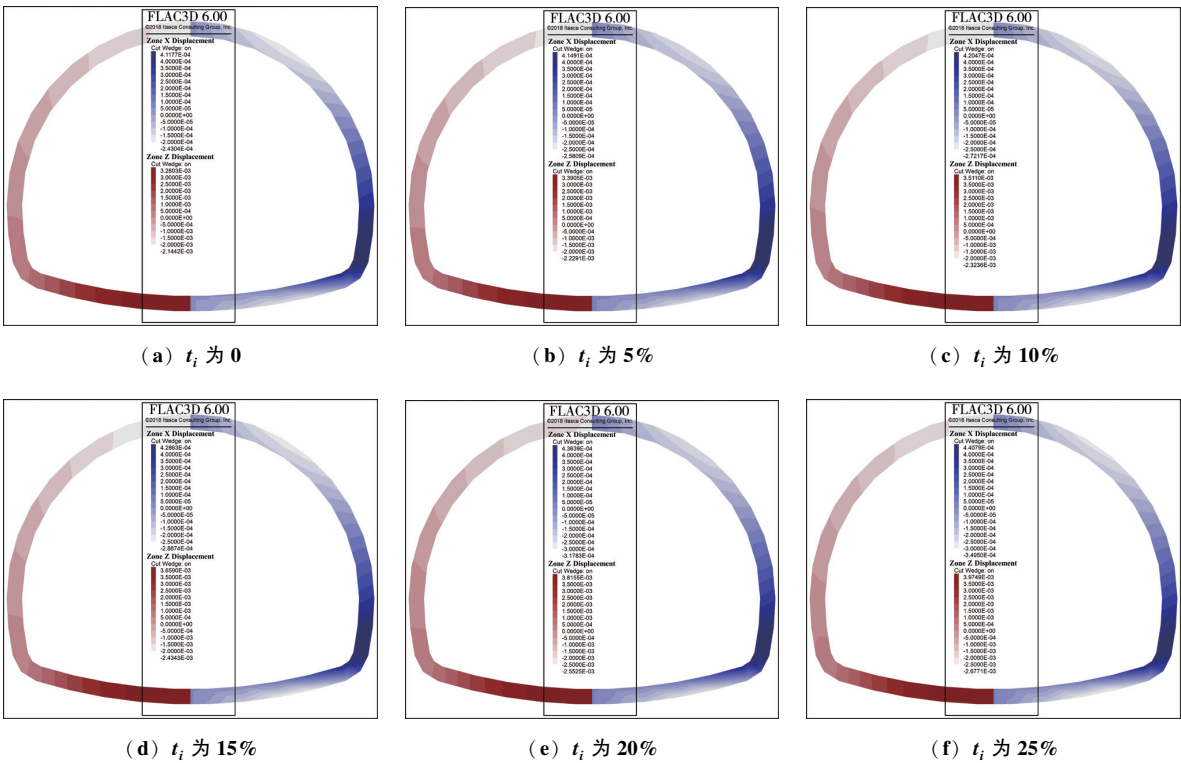


图 2 隧道支护结构变形位移云图

Fig. 2 Deformation displacement cloud diagram of tunnel support structure

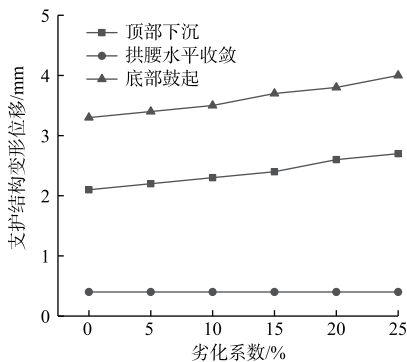


图3 不同工况下支护结构位移规律

Fig. 3 Displacement law of supporting structure under different working conditions

下沉变形位移峰值均位于支护结构顶部，变形过大造成开裂，形成垂直裂缝；鼓起变形位移峰值发生于支护结构底部，运营阶段应定期检查，发现问题及时采取措施进行加固，降低路面隆起破坏风险；支护结构水平收敛峰值存在于拱腰位置，但变形较小，说明拱腰位置劣化程度较小。随着劣化系数的增加，顶部下沉与底部鼓起变形数值逐渐提高，拱腰位置水平收敛基本稳定。顶部下沉由 2.1 mm 上升至 2.7 mm，基本保持线性上升趋势；底部鼓起由 3.3 mm 增加到 4.0 mm，上升趋势与顶部下沉保持一致；拱腰水平收敛从 0.41 mm 缓慢增加至 0.44 mm，基本呈现水平直线趋势，且前后无明显变化。通过支护结构变形位移分析得出，支护结构为钢筋混凝土构件，受力类似于梁体，危险截面位于跨中与支座处，反映出支护结构顶底部位的劣化程度较为明显。

3.2 支护结构应力分析

在围岩流变与蠕变等作用影响下，支护结构内侧易受拉破坏并产生裂缝，伴随劣化的进一步发展，支护结构安全性将急速降低，通过分析隧道支护结构应力分布规律，得出以下结论：

(1) 除拱肩与底部最大主应力为拉应力外，其余部位最大与最小主应力基本为压应力；虽拱肩与底部存在拉应力，但量级较小达不到支护结构混凝土的抗拉强度，支护结构抗压强度较好，压应力峰值均未达到抗压强度。

(2) 最大与最小主应力均存在拉、压应力等两种形式。拉应力集中部位为拱肩，拱肩部位为拉应力峰

值，压应力集中位于拱腰，拱腰部位为压应力峰值。

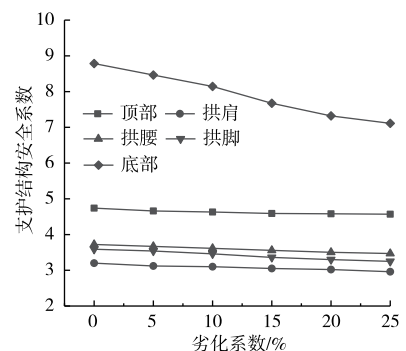
(3) 拱肩拉应力峰值随劣化系数增大而增大，从 88 kPa 增加为 102 kPa，远小于抗拉强度允许值 2.01 MPa；拱腰压应力峰值随劣化系数增大而增大，从 6.86 MPa 增加为 7.45 MPa，未达到抗压强度允许值 20.1 MPa。说明结构尚未发生整体破坏，但拱腰随运营时间的增长可能进一步劣化。

3.3 支护结构安全系数

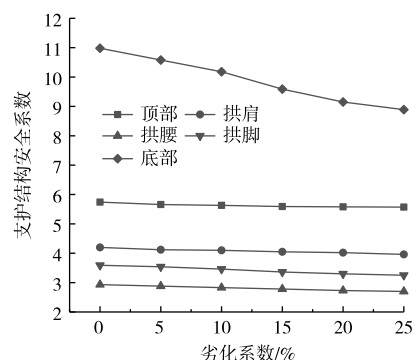
梁单元内、外侧应变分别为 $\varepsilon_{\text{内}}$ 、 $\varepsilon_{\text{外}}$ ，按 (2) 计算出轴力 N 与弯矩 M ，分别按材料容许应力法与 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》（简称“规范法”）相关公式对支护结构安全系数进行计算，支护结构安全系数以 2 作为耐久性安全储备，得出不同劣化系数下各特征部位支护结构安全系数如图 4 所示。

$$\begin{cases} N = E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh/2 \\ M = E(\varepsilon_{\text{内}} - \varepsilon_{\text{外}})bh^2/12 \end{cases} \quad (2)$$

式中： b 、 h 分别为梁单元的宽度、高度。



(a) 规范法



(b) 容许应力法

图4 不同劣化系数下支护结构安全系数变化

Fig. 4 Change of safety factor of supporting structure under different degradation coefficients

道桥技术

支护结构各部位安全系数均大于 2, 表明支护结构在发生一定程度劣化情况下仍满足安全储备要求; 规范法与容许应力法计算得出的安全系数大小存在差异, 但安全系数变化趋势大约一致, 均随劣化系数增大而减小。从支护结构安全系数数值大小分析, 安全系数峰值位于底部位置, 除底部位置外其余部位安全系数分布在 3~6 的区间, 规范法安全系数最低数值出现于拱肩, 容许应力法安全系数最低数值位于拱腰, 所以从安全系数大小分析, 危险点位于拱腰附近, 是因为支护结构在运营过程中受围岩流变与蠕变影响, 拱腰易出现纵向裂缝, 从而加快支护结构性能劣化速度。从支护结构安全系数变化速率进行分析, 安全系数变化速率峰值位于底部, 虽底部安全系数处于优势地位, 但随支护结构劣化程度进一步发展, 底部安全系数可能骤降, 造成隧道路面隆起, 降低了隧道运营安全性能; 除底部外, 其余部位安全系数随劣化系数增大呈现缓慢下降趋势, 但速率并不明显, 说明顶部、拱腰、拱脚与拱肩的支护结构参数劣化程度不明显。

4 结论

以某城市道路运营隧道工程为研究背景, 通过 FLAC 3D 软件建立数值仿真模型, 系统探究了隧道运营阶段支护结构的劣化性能, 得出以下结论:

(1) 支护结构顶部下沉与底部鼓起较为显著, 且随劣化系数增加呈线性上升趋势, 支护结构顶部、底部存在开裂风险, 表明顶部与底部为支护结构的主要危险点, 劣化程度较为明显。

(2) 支护结构以压应力为主, 压应力集中于拱腰, 且压应力峰值均随劣化系数增大而增大。虽未达到材料强度极限, 但随运营时间增长, 拱腰部位发生受压劣化破坏的风险增大。

(3) 虽支护结构安全系数均满足设计要求, 但安全系数随劣化系数增大而减小, 其中拱腰安全系数最低, 底部安全系数可能骤降。建议于运营阶段重点监测拱腰和底部, 并及时采取加固措施, 预防

支护结构性能进一步劣化, 确保隧道运营安全。

参 考 文 献

- [1] 蒋雅君, 曾耀懿, 曹丹阳, 等. 基于岩溶地下水运动的运营隧道渗漏水概念模型 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, 45 (增刊 2): 390-399.
- [2] 许召强, 王立川, 吴剑, 等. 隧道高压富水段地下水全封堵处置技术研究 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62 (增刊 1): 262-273.
- [3] 田伟权. 秀宁隧道衬砌劣化病害整治施工技术研究 [J]. 浙江建筑, 2020, 37 (2): 46-49, 52.
- [4] 刘昌, 张顶立, 张素磊, 等. 考虑围岩流变及衬砌劣化特性的隧道长期服役性能解析 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (10): 2795-2807.
- [5] 王大鹏, 王景春, 孙丽娟, 等. 衬砌-围岩时效劣化影响下开裂衬砌服役可靠性分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (6): 2535-2546.
- [6] 仇文革, 冯冀蒙, 陈雪峰, 等. 深埋硬岩隧道初期支护劣化过程衬砌力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (1): 72-77.
- [7] 席红兵, 李柏生. 硫酸盐-冻融共同作用下隧道衬砌支护喷射混凝土劣化性能研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (7): 1219-1226.
- [8] 卢锋. 基于强度折减法的既有隧道安全度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] 王林国. 缓倾层状千枚岩围岩遇水软化后隧道结构的力学特征 [J]. 公路, 2024, 69 (6): 361-369.
- [10] 师凯强, 夏琼, 黄志军, 等. 华家岭黄土隧道实测的围岩变形规律及二衬安全性分析 [J]. 兰州交通大学学报, 2022, 41 (5): 13-22.
- [11] 陈忠波. 基于热-力耦合隧道围岩稳定性分析及锚杆支护参数优化 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [12] 张顶立, 孙振宇, 侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用 [J]. 力学学报, 2019, 51 (2): 577-593.
- [13] 孔超, 张俊儒, 王海彦, 等. 深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究 [J]. 中国铁道科学, 2021, 42 (6): 103-111.
- [14] 蔡俊华. 石林隧道支护结构破坏特征及其机理分析 [J]. 公路工程, 2017, 42 (2): 126-130.
- [15] 刘广坤. 地铁隧道原位扩建施工方案比选优化分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 116-120.