

文章编号: 1007-2993(2026)03-0393-10

考虑初支混凝土溶蚀与排水系统结晶双重效应的 隧道结构安全与韧性分析

周 瑜^{1,2} 宋恒祥^{1,2} 刘小飞³ 林壮宏³ 王安怀⁴ 戴晓威^{1,2}

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东广州 510420; 2. 广东省隧道工程安全与应急保障技术及装备企业重点实验室, 广东广州 510420; 3. 广东省南粤交通仁新高速公路管理处, 广东韶关 512638; 4. 广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东广州 510623)

【摘要】 为探明初支混凝土溶蚀与排水系统结晶双重效应对隧道结构安全的影响, 开展了碳酸侵蚀环境下水泥基材料的溶蚀试验, 推导了双重效应作用下隧道结构受力的理论分析方法, 以工程案例计算双重效应对隧道结构安全与韧性的影响规律。结果表明: (1) 碳酸侵蚀环境中水泥基材料的强度表现出在一定的区间内波动式衰减的规律, 拟合得到了双指数型强度衰减系数公式; (2) 双重效应引发的隧道二衬结构应力增量与初支混凝土溶蚀衰减系数 β 呈反比, 与溶蚀沉积转换系数 δ 呈正比, 增量的主导地位主要受 δ 控制; (3) 经预测, 工程案例隧道运营 10 年后, 其结构安全系数和韧性指标将分别下降 17.3% 和 15.3%, 趋近安全极限。因此, 初支混凝土溶蚀和排水系统结晶双重效应对隧道结构的长期影响不可忽视, 应在设计阶段予以充分考虑, 并加强养护期的工程措施。

【关键词】 隧道工程; 初支混凝土溶蚀; 排水系统结晶; 结构安全; 韧性分析; 双重效应

【中图分类号】 U451

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0058

Safety and resilience analysis of tunnel structures considering the dual effects of primary support concrete dissolution and crystallization in drainage system

ZHOU Yu^{1,2} SONG Hengxiang^{1,2} LIU Xiaofei³ LIN Zhuanghong³

WANG Anhuai⁴ DAI Xiaowei^{1,2}

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Tunnel Safety Technology and Emergency Support Technology & Equipment, Guangzhou 510420, Guangdong, China; 3. Renxin Expressway Management Office in Guangdong Province Nan Yue Traffic Investment and Construction Co., Ltd., Shaoguan 512638, Guangdong, China; 4. Guangdong Province Nan Yue Traffic Investment and Construction Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China)

【Abstract】 To elucidate the impact of the dual effects of primary support concrete dissolution and crystallization in drainage system on the safety of tunnel structures, a series of dissolution tests on cement-based materials under carbonation conditions were conducted. A theoretical analysis method for the stresses on tunnel structures under the dual effects was derived, and the impact of these effects on the safety and resilience was calculated in a case study. The results indicate the following: (1) Under carbonation environments, the strength of cement-based materials exhibits an oscillatory attenuation pattern within a specific range. A dual-exponential formula was fitted to characterize the strength degradation coefficient. (2) The stress increment in the tunnel lining caused by the dual effects is inversely proportional to the decay coefficient β of the primary support concrete and directly proportional to the dissolution-deposition conversion coefficient δ . The dominance of the stress increment primarily are controlled by δ . (3) Analysis predicts declines of 17.3% in the structural safety factor and 15.3% in the resilience index after 10 years of tunnel operation, which is approaching safe limits. Therefore, the long-term impact of the dual effects of primary support concrete dissolution and crystallization in drainage system on tunnel structures cannot be overlooked. These effects should be given full consideration during the design and construction phases, and engineering measures during the maintenance phase should be strengthened.

基金项目: 广东省交通集团有限公司科技项目 (JT2023YB20, JT2022YB35); 广东省重点领域研发计划资助项目 (2002B0101070001)

作者简介: 周 瑜, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道工程方向研究。E-mail: zhouyu_cug@163.com

【Key words】 tunnel engineering; primary support concrete dissolution; crystallization in drainage systems; structure safety; resilience analysis; dual effect

0 引言

随着我国大量隧道进入运营管养期,隧道排水系统结晶导致堵塞的问题引起越来越多的关注。隧道排水系统一旦堵塞,二次衬砌背后地下水无法消散,在衬砌上就会产生附加水压力。相关统计表明,我国有将近 1/3 的铁路、公路以及城市地铁隧道存在渗漏水病害,而其中约 70% 的渗漏水病害是由隧道排水管堵塞失效引起的^[1]。若排水系统堵塞长时间得不到处置,隧道甚至会发生衬砌开裂、掉块,严重威胁行车安全。

目前,与隧道排水系统结晶堵塞相关的研究大致可以分为以下几类:

一是排水系统结晶堵塞机理研究,主要关注结晶的形成机制、发展过程以及影响因素等。郭小雄^[2]、叶飞等^[3-4]认为,隧道初期支护的喷射混凝土受到环境地下水碳酸氢根、侵蚀性二氧化碳或软水等侵蚀而析出钙离子,即初支混凝土发生溶蚀,是排水系统结晶的重要原因。

二是排水系统堵塞引起附加水压力对结构安全的影响研究。徐金华等^[5]指出衬砌背后水压力随堵塞率增大而非线性增大;高春君等^[6]提出,随着堵塞程度增加,隧道墙脚处最大主应力变化较大,且最大主应力差值随地下水位的升高而增加;李林毅等^[7]的模型试验结果表明,堵管后结构外水压力逐步由“隧底最大,拱顶、拱腰次之,墙脚最小”的扇贝型分布转为“静水压”型分布。上述应力或压力大的部位都需要重点关注。

三是引入结构韧性分析作为结构安全性分析的补充。Tierney 等^[8]、Ayyub^[9]建立了基础设施的韧性结构模型;Huang 等^[10]在考虑灾害发生后扰动阶段和恢复阶段之间还应存在演化阶段的基础上,建立了适用于评价隧道结构韧性的模型;林星涛等^[11]又进一步提出了考虑多次扰动影响的隧道结构韧性评估方法;刘力英等^[12]开展了附加荷载作用下隧道结构的韧性演化特征研究。

但是,上述多数研究仅考虑了隧道排水系统结晶堵塞引起的附加水压力效应,而未同时考虑作为排水系统结晶诱因的初支混凝土溶蚀所产生的影响。实际上,随着钙离子被不断析出,初支混凝土的力学性能逐渐随之减小^[13-15],同样会导致隧道二次衬砌结构承担的荷载增大、安全性降低。

鉴于此,本文在调研广东省高速公路隧道排水系统结晶分布情况的基础上,开展水泥基材料溶蚀试验并获取了强度衰减规律,推导了双重效应作用下隧道结构受力的理论分析方法,利用工程案例计算双重效应对隧道结构安全与韧性的影响规律,以期为隧道建设、养护及相关研究提供参考。

1 水泥基材料溶蚀衰减规律研究

1.1 隧道初支混凝土溶蚀分布情况

国内对隧道排水系统结晶的报道多见于岩溶区隧道^[16-17],以省域为范围进行统计的数据较少。本文依托广东省交通集团运营管理的 800 多公里高速公路隧道养护管理数据,结合文献查阅,对广东省高速公路沿线隧道排水系统结晶情况进行梳理,发现 32 座隧道存在排水系统结晶现象,具体分布如图 1 所示。夏小明等^[18]通过调研发现广东省内发生排水系统结晶的隧道约 60% 分布在粤北地区,尤其是隧道群较多的京港澳高速、武深高速粤境段等运营线;李云安等^[19]、钟文健等^[20]、马文镇等^[21]围绕大潮高速东溪山隧道开展了大量的研究工作,该隧道为广东省内报道最多的隧道;庞佳玮等^[22]在华陆高速观音坳隧道进行了取样分析;高何杰等^[23]在广连高速公路高峰隧道开展了试验。综上所述,发生排水系统结晶的隧道在广东省全境均有分布,但主要集中在粤北岩溶地区和粤东莲花山脉花岗岩地区。



图 1 广东省高速公路隧道排水系统结晶分布情况

Fig. 1 Crystalline distribution in the drainage system of highways tunnels in Guangdong Province

根据叶飞等^[4,24]的研究,隧道排水系统结晶是初支混凝土发生溶蚀后的产物:隧道的初支混凝土中水泥水化产物氢氧化钙(CH)和 C-S-H 凝胶与地下水中的碳酸(CO_2 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})发生化学反应生成白色 CaCO_3 结晶,进而堵塞隧道排水系统(如图 2 所示),

引起衬砌背后水压力升高、地下水溢流至隧道路面等问题, 直接影响行车安全。

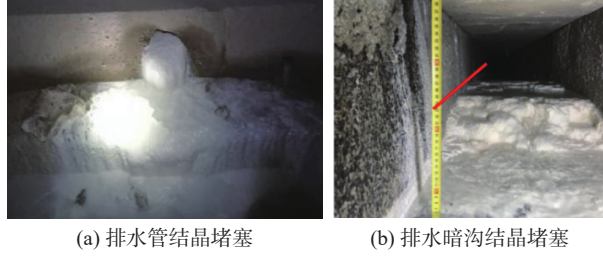


图 2 隧道排水系统典型结晶堵塞情况
Fig. 2 Typical crystalline clogging in tunnel drainage system

1.2 水泥基材料溶蚀试验设计

为研究初支混凝土溶蚀强度衰减规律, 开展了碳酸环境下的溶蚀试验研究。通过上节的分析可知, 初支混凝土发生溶蚀的主要成分氢氧化钙(CH)和 C-S-H 凝胶都是水泥水化的产物, 因此, 为控制影响因素, 室内试验^[25-26] 常采用水泥净浆、水泥砂浆等同类水泥基材料来模拟混凝土的溶蚀反应。

按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020), 制备规格大小为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的标准立方体水泥砂浆试件。水泥砂浆配合比中水泥、集料(砂)、拌合水的用量分别为 500, 790, 191 kg/m³, 水灰质量比约为 0.38。水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。骨料为天然砂, 细度模数为 2.64, 属于中砂, 拌和水为普通自来水。水泥砂浆物理力学性能指标如表 1 所示。

表 1 水泥砂浆物理力学性能指标
Tab. 1 Physical and mechanical properties of cement mortar

项目	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa
			初凝	终凝	
测值	346	25.5	157	201	38.38

待浇筑试件静停 24 h 成型后脱模, 放入 20±2 °C 养护室进行养护, 溶蚀组试样经过 7 d 养护, 浸泡在碳酸氢钠溶液中进行碳酸环境下的溶蚀试验; 基准组试样经过 28 d 养护后, 测试其强度作为基准强度。为加快溶蚀进程, 溶蚀介质选用 1.05 mol/L 的饱和重碳酸氢钠溶液(NaHCO₃), 体积按固液比 1 : 6 设计, 每 7 天更换一次重碳酸氢钠溶液, 保证溶蚀速率。此外, 溶蚀速率受温度的影响, 温度越高, 溶蚀速率越快。初支混凝土处于地下环境中, 地下水温度较为恒定, 多在 10 ~ 25 °C 范围内变化, 因此, 试验温度保持在标准养护温度 22.5 °C, 可以代表多数初支混凝土

的溶蚀环境温度。

在溶蚀 30, 60, 90 d 分别测定水泥砂浆溶蚀后的抗压强度, 抗压强度测试采用 YAW4605 微机控制电液伺服压力试验机, 最大试验力 600 kN, 有效测试范围为(2% ~ 100%)Fs, 试验相对误差±1%, 上下压板间最大距离 300 mm, 具体步骤参照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)。

1.3 试验结果分析

由于试验所需时间较长、耗费成本较高, 碳酸侵蚀环境下水泥基材料的试验数据较少, 收集相关研究^[27-32] 的试验结果与本次试验结果进行对比分析, 如图 3 所示。从图中可以看出, 在碳酸侵蚀环境下水泥基材料的强度总体表现出随溶蚀时间逐渐减小的趋势, 在以张丹曲线^[27] 为上限、董芸曲线^[28] 为下限的区间中变动, 经推测, 这种变动是因水泥基材料的多孔介质不均匀性导致的。

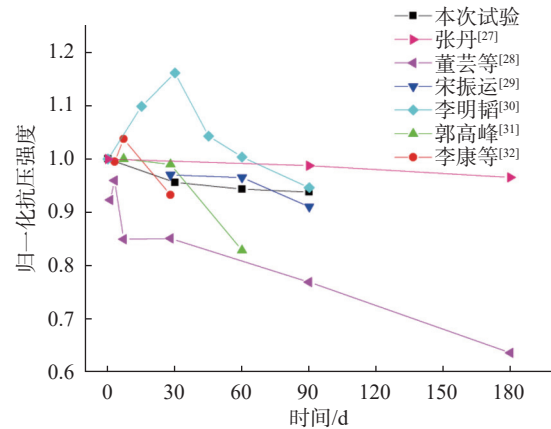


图 3 水泥砂浆抗压强度随溶蚀时间的变化规律曲线
Fig. 3 Variation of cement mortar compressive strength with erosion time

本次试验的水泥砂浆抗压强度在溶蚀初期衰减较快, 后期衰减速度减缓, 但总体衰减曲线较为平缓, 与宋振运^[29] 结果较为接近。相较于水泥砂浆基准强度, 在溶蚀 30, 60, 90 d 后水泥砂浆抗压强度分别衰减了 4.4%, 5.7%, 6.2%。

假设水泥基材料仅受碳酸环境侵蚀且不考虑侵蚀水流速的影响, 将本次试验的水泥砂浆的抗压强度与溶蚀时间进行归一化处理, 采用最小二乘法(式(1))^[33] 进行拟合, 得到双指数型衰减系数公式(式(2)), SSE=3.615×10⁻²⁵, R²=1.00, 在缺少数据时, 可以据此式估算碳酸侵蚀环境下水泥基材料的强度。

$$f(x_i) = \min \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

式中: x_i 为自变量, Y_i 为观测值, \hat{Y}_i 为估计值。

$$\beta = 0.054 \times \exp(-0.04737t) + 0.9455 \exp(-9.971 \times 10^{-5}t) \quad (2)$$

式中: β 为强度衰减系数; t 为溶蚀时间, d。

需要说明的是, 实际隧道工程中喷射混凝土的性能还与现场配合比、速凝剂掺量、喷射施工工艺以及现场养护条件等密切相关。实际喷射混凝土的早期强度会显著高于本试验结果, 而在后期逐渐接近。另一方面, 实际喷射混凝土由于喷射施工工艺的影响, 整体孔隙率要大于浇筑试样, 因此, 现场喷射混凝土抵抗溶蚀的能力要小于浇筑试样, 理论上, 其抗压强度曲线要低于图3中本次试验曲线。各影响因素对实际喷射混凝土溶蚀性能的影响有待后续进一步研究。

2 双重效应的理论分析

2.1 理论分析方法

采用弹性力学经典的三层厚壁圆筒模型进行“二衬-初支混凝土-围岩”体系的受力分析, 如图4所示。整个体系受到外边界的原岩应力作用, 产生径向应力和环向应力。当排水系统正常运行时, 二次衬砌不考虑附加水压力, 但当初支混凝土发生溶蚀后, 可溶性钙物质的流失导致其强度和刚度发生下降, 同时在排水系统中沉淀结晶, 堵塞排水系统, 导致二衬承受附加水压力 P_w , 相关计算如式(3)~式(5)所示。

$$\sigma_{r1w}(r) = -\frac{r_1^2(r^2 - r_0^2)}{r^2(r_1^2 - r_0^2)} P_w \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta1w}(r) = -\frac{r_1^2(r^2 + r_0^2)}{r^2(r_1^2 - r_0^2)} P_w \quad (4)$$

$$P_w = \frac{V_s}{V} \gamma H = \frac{\delta(1-\beta)m_2}{\rho_s V} \gamma H \quad (5)$$

式中: r 为计算半径; r_0 为二次衬砌内径; r_1 为初期支护的内径; $\sigma_{r1w}(r)$ 为附加水压力引起二衬的径向应力; $\sigma_{\theta1w}(r)$ 为附加水压力引起二衬的环向应力; β 为初支混凝土强度衰减系数; δ 为排水系统溶蚀沉积转换系数; γ 为水的重度; H 为环境地下水的水头高度; V_s 为结晶物体积; V 为排水管体积; m_2 为初支混凝土质量; ρ_s 为结晶物 (CaCO_3) 密度。

附加水压力 P_w 与排水系统的结晶堵塞程度有关, 本文采用结晶物体积 V_s 和纵向排水管体积 V 之比来表征排水系统的结晶堵塞程度。假设初支混凝土的质量损失与强度损失的程度相同, 则结晶物体积 V_s 仅是初支混凝土流失物质体积 $((1-\beta)m_2/\rho_s)$ 的一部分, 这里引入溶蚀沉积转换系数 δ 表示初支混凝土溶蚀损失的质量转换为排水系统沉淀结晶物质量的比例, 则附加水压力 P_w 可以通过式(5)计算。式中

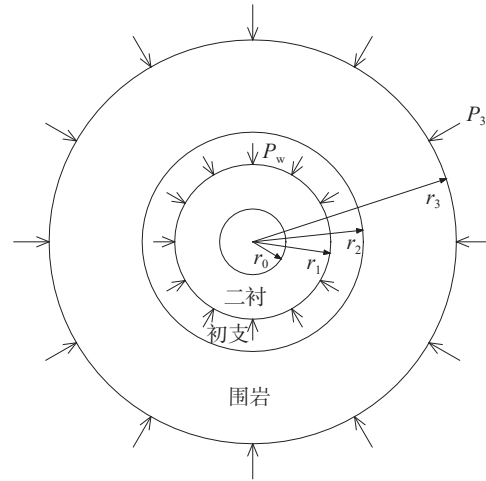


图4 三层厚壁圆筒理论分析模型

Fig. 4 Three-layer thick-walled cylinder theoretical analysis model

的溶蚀沉积转换系数 δ 可以通过2种方式进行确定:

①根据现场检测的排水管结晶堵塞情况进行确定, 当排水管完全结晶堵塞时, 取 $V\rho_s/(1-\beta)m_2$; ②根据监测的隧道衬砌的地下水压力 P_{wc} 和环境地下水水位 H_c 的比值进行确定, 当排水管完全结晶堵塞时, 取 $\frac{P_{wc}}{\gamma H_c} \times \frac{\rho_s V}{(1-\beta)m_2}$ 。

2.2 双重效应的基本作用机制分析

选取公路隧道常规参数(见表2)进行计算, 研究初支混凝土溶蚀效应和排水系统结晶效应的影响。

表2 理论分析的参数

Tab. 2 Parameters for theoretical analysis

序号	参数	取值	单位	备注
1	r_0	5	m	
2	r_1	5.3	m	
3	r_2	5.5	m	围岩内径
4	r_3	25	m	5倍洞径
5	P_3	2.7	MPa	100 m埋深
6	H	50	m	50 m地下水头
7	γ	10	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	
8	V	0.019	m^3	$\phi 110$ mm纵向排水管
9	m_2	1.493×10^4	kg	
10	ρ_s	2.93	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
11	E_1	28	GPa	二衬弹性模量
12	E_2	28	GPa	初支弹性模量
13	E_3	35	GPa	围岩弹性模量
14	μ_1	0.2		二衬泊松比
15	μ_2	0.2		初支泊松比
16	μ_3	0.3		围岩泊松比

不同溶蚀沉积转换系数 δ 条件下二次衬砌环向应力变化情况见图5, 可以看出, 环向应力随着 δ 的

增大而增大, 并且环向应力增量中附加水压力的占比越来越大, 当 δ 大于 6.5×10^{-5} 后附加水压力占比超过 50%, 说明排水系统结晶效应占主导地位。图 6 是不同初支混凝土强度衰减系数 β 条件下二次衬砌环向应力变化情况, 可以看出, 二次衬砌的环向应力随 β 的减小而增大, 但环向应力增量中原岩应力部分和附加水压力部分的比例几乎保持不变。综上, 二次衬砌的受力与 δ 呈正比、与 β 呈反比, 双重效应的主导地位受 δ 控制。

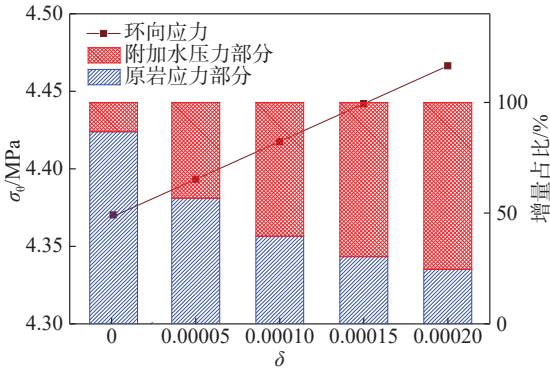


图 5 不同溶蚀沉积转换系数 δ 条件下二次衬砌环向应力 ($r=r_0, \beta=0.8$)

Fig. 5 Circumferential stresses in concrete lining under different dissolution-deposition conversion coefficient δ conditions ($r=r_0, \beta=0.8$)

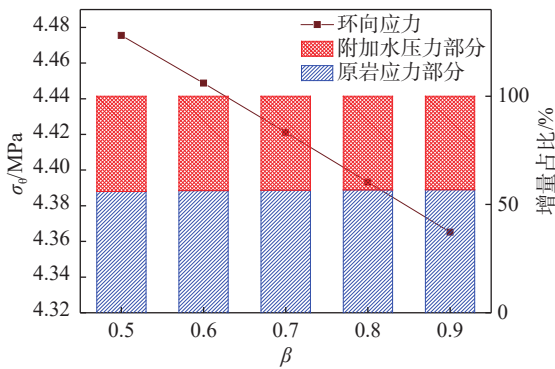


图 6 不同初支混凝土强度衰减系数 β 条件下二次衬砌环向应力 ($r=r_0, \delta=5 \times 10^{-5}$)

Fig. 6 Circumferential stresses in concrete lining under different decay coefficients of primary support β ($r=r_0, \delta=5 \times 10^{-5}$)

上述分析厘清了双重效应的基本作用机制, 但实际情况更为复杂。双重效应与二衬、初支和围岩的刚度比、原岩应力、地下水水头、强度衰减系数、溶蚀沉积转换系数等参数都密切相关, 其中, 原岩应力与地下水水头决定了初支混凝土溶蚀效应和排水系统结晶效应的最根本比例, 二衬、初支和围岩的刚度以及强度衰减系数影响分担的原岩应力的比例, 强度衰减系数、溶蚀沉积转换系数影响承担附加水压力的比例。此外, 隧道结构的几何条件也有一定影响。

理论分析方法尚无法全面地反映上述因素的影响, 因此, 针对具体工程还需要采用有限元数值方法进行具体分析。

3 工程案例

3.1 工程概况

某山岭隧道为标准双向四车道分离式公路隧道, 全长 1800 m, 最大埋深 162 m, 位于粤东北沟谷斜坡-丘陵地貌区, 洞身围岩以凝灰岩和花岗岩为主。隧道采用复合式衬砌, 由初期支护与二次衬砌组成。该隧道自建设期起就发生了较严重的结晶堵塞, 结晶堵塞段落约占隧道全长 40%, 经处治后隧道于 2019 年正常运营。运营 3 年之后, 初支混凝土溶蚀仍在发展, 排水系统结晶又逐渐复现, 造成结晶堵塞段落二次衬砌附加水压力高于正常段落 (见图 7), 隧道结构的安全性和韧性亟待评价。

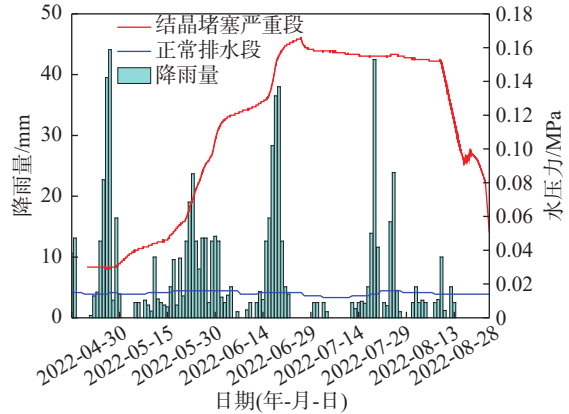


图 7 二次衬砌附加水压力变化曲线

Fig. 7 Variation of water pressure behind tunnel lining

3.2 考虑双重效应的隧道衬砌结构承载安全分析

3.2.1 计算方法与参数

采用荷载-结构有限元法验算隧道衬砌结构受力, 选取结晶堵塞严重区段的断面为计算断面, 围岩级别为 V 级, 隧道埋深 113.62 m, 附加水压力取监测最大值 0.166 MPa, 计算参数见表 3。根据刘 昌等^[34-35]的研究, 初期支护劣化后其承载能力削弱, 其荷载分担比不断减小, 而二次衬砌的荷载分担比不断增加。参照规范《公路隧道设计规范》^[36]的要求并结合工程经验, 假设初期支护和二次衬砌的初始分担比为 0.4 : 0.6, 并且初期支护的荷载分担比按照式(2)衰减。

3.2.2 结果分析

图 8 为不同初支混凝土溶蚀和附加水压条件下隧道二次衬砌结构安全系数的变化曲线。可以看到, 随着运营时间的增加, 隧道结构安全系数总体呈下降

表3 计算参数
Tab. 3 Parameters for model calculation

参数	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性抗力系数 $K/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
V级围岩	19.5	16	0.38	45	150
二次衬砌	23	30	0.2		

的趋势。隧道实际运营3年后,仅考虑初支混凝土溶蚀时,安全系数降至3.31,考虑双重效应作用后,安全系数进一步下降至2.81。

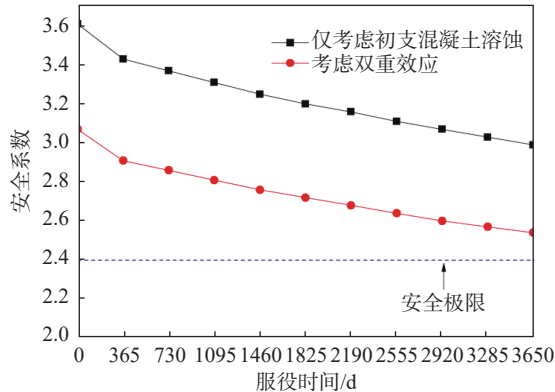


图8 隧道结构安全系数与运营时间变化曲线
Fig. 8 Variation of safety factor of tunnel lining with operating time

将运营时间延长进行预测,隧道运营10年后,仅考虑初支混凝土溶蚀时,安全系数降至2.99,考虑双重效应作用后,安全系数甚至降低至2.54,趋近安全系数极限2.4。综上所述,虽然当前阶段隧道结构安全仍然满足规范要求,但长期发展趋势需要引起重视。

3.3 考虑双重效应的隧道结构韧性分析

3.3.1 韧性分析理论

隧道结构的韧性与安全性密切相关,而结构韧性中结构的抗冲击性能和恢复性能尤为重要。林星涛等^[11]认为外界扰动过程可以分为扰动阶段、演化阶段和恢复阶段,据此构造考虑双重效应作用下隧道结构的结构性能曲线,如图9所示,并定义隧道结构韧性指标 Re 和隧道结构性能指标 $Q(t)$,如式(6)、式(7)所示。

$$Re = \frac{\sum_{n=1,2} F_n + \sum_{n=1,2} S_n + R}{Q_0 \Delta T} \quad (6)$$

$$Q(t) = \frac{A(t)}{A_0} \quad (7)$$

式中: Q_0 为隧道结构的初始性能; ΔT 为影响阶段的持续时间; F_n, S_n, R 分别为扰动阶段 $f(t)$ 、演化阶段

$s(t)$ 以及恢复阶段 $r(t)$ 的隧道结构性能曲线与坐标轴包围的面积; $A(t), A_0$ 分别为 t 时刻和初始状态的隧道结构性能分析指标,本文选取3.2节中有限元计算得到的二衬结构安全系数作为隧道结构性能分析指标。

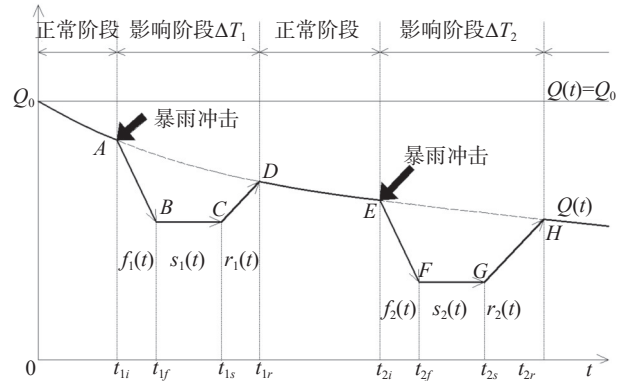


图9 双重效应下隧道结构性能曲线示意图
Fig. 9 Schematic diagram of tunnel structure performance under the dual effect

在初支混凝土溶蚀效应作用下,隧道结构性能随着时间持续下降;排水系统结晶效应体现为:雨季期间在暴雨冲击下隧道二次衬砌所受附加水压力剧烈增加,致使结构性能曲线剧烈下降,附加水压力消散后,结构性能曲线回升,并具有明显季节性的特点。

3.3.2 结果分析

利用图7中二次衬砌的附加水压力监测数据(取月度平均值,非雨季取0 MPa),并考虑初支混凝土溶蚀效应,计算得到考虑双重效应时一个完整年度隧道结构性能指标 $Q(t)$ 的变化情况,如图10所示。按照时间序列分析理论^[37],隧道结构性能指标属于非平稳序列,由趋势项、季节项和随机项组成,如式(8)所示。

$$Q(t) = T(t) + S(t) + I(t) \quad (8)$$

式中: $T(t)$ 为趋势项; $S(t)$ 为季节项; $I(t)$ 为随机项。

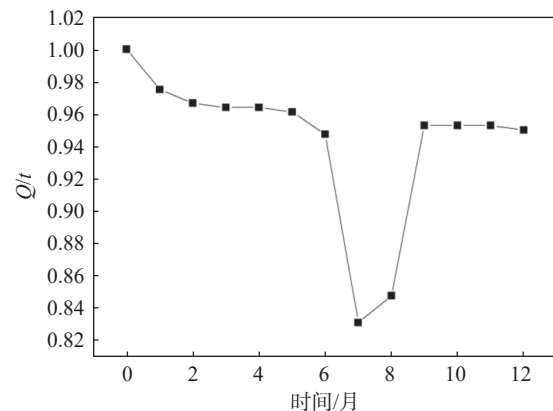


图10 隧道结构性能指标整年变化
Fig. 10 Variations of tunnel structure performance indicator during a whole year

趋势项 $T(t)$ 可以根据初支混凝土溶蚀的衰减公式进行计算得到, 其随时间变化分布情况如图 11 所示。由此便可分解出包含随机项的季节项 $S(t)+I(t)$, 如图 12 所示。将趋势项和季节项进行叠加, 可预测案例隧道运营 10 年隧道结构性能指标的变化情况, 如图 13 所示, 隧道结构性能指标呈周期性下降的趋势。

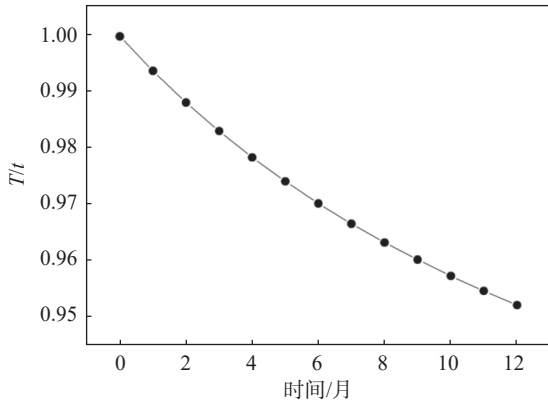


图 11 隧道结构性能指标趋势项 $T(t)$

Fig. 11 The trend term of tunnel structure performance indicator

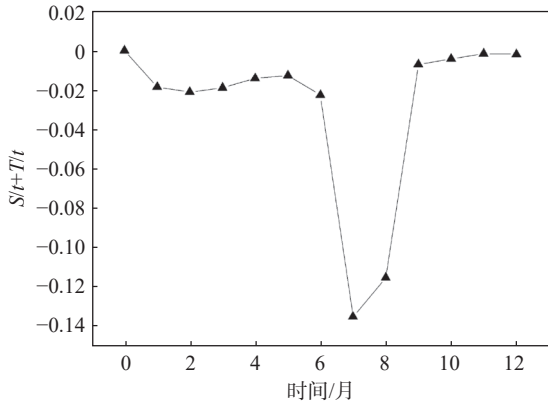


图 12 隧道结构性能指标季节项 $S(t)+I(t)$

Fig. 12 The seasonal term and random term of tunnel structural performance indicator during a whole year

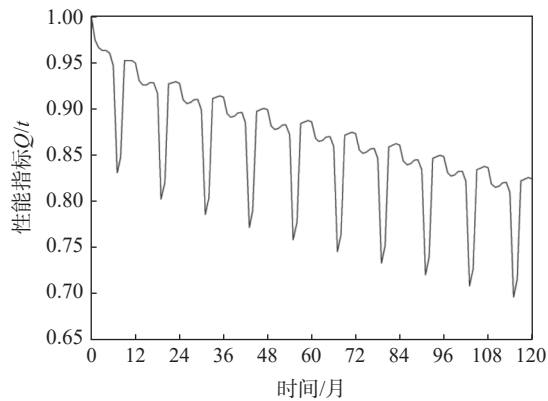


图 13 隧道结构性能指标 10 年变化

Fig. 13 Variations of tunnel structure performance indicator during 10 years

根据式(6)、式(7)计算出隧道结构韧性指标 Re , 如图 14 所示, Re 整体呈逐年减小的趋势。与仅考虑初支混凝土溶蚀时相比, 考虑双重效应时 Re 下降约 10%。在双重效应作用下, 预计运营时间超过 5 年后, 隧道结构韧性将从中韧性降低为低韧性^[38], 隧道结构抵抗冲击的性能进一步下降, 结构恢复能力较差, 威胁隧道结构的正常使用。

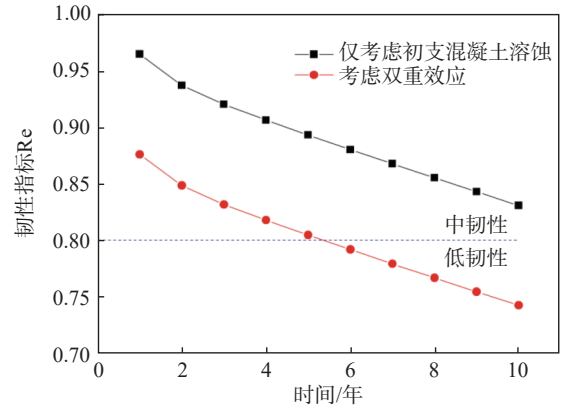


图 14 隧道韧性指标变化情况

Fig. 14 Variations of tunnel resilience indicators

4 结论

本文在水泥基材料溶蚀试验研究的基础上, 推导了理论分析方法, 在此基础上研究了初支混凝土溶蚀与排水系统结晶双重效应的作用机制; 以粤东北某山岭隧道为例, 研究了双重效应下隧道结构的安全性和韧性变化。主要结论如下:

(1) 隧道排水系统结晶现象具有普遍性, 以广东省为例, 在省内全境均有分布, 在粤北岩溶地区和粤东莲花山脉花岗岩地区较为集中。

(2) 初支混凝土溶蚀和排水系统结晶均会增加隧道二次衬砌的受力, 应力增量与初支混凝土溶蚀衰减系数 β 呈反比, 与溶蚀沉积转换系数 δ 呈正比, 两种效应中溶蚀沉积转换系数 δ 处于起控制作用的主导地位。

(3) 碳酸侵蚀环境中水泥基材料表现出强度不断衰减的规律, 但强度波动比较大, 以张丹曲线^[27] 为上限、董芸曲线^[28] 为下限。根据试验数据拟合得到了双指数型衰减系数公式, 可为估算碳酸侵蚀环境下水泥基材料的强度衰减提供参考。

(4) 在初支混凝土溶蚀衰减和排水系统结晶堵塞的双重效应作用下, 隧道结构安全系数与韧性指标均呈逐年下降的趋势。经预测, 工程案例隧道运营 5 年后, 隧道结构韧性将从中韧性降低至低韧性; 运营 10 年后, 二次衬砌安全系数将降低至 2.54, 趋近安全系数极限。因此, 双重效应造成的长期影响不可忽视,

应在设计阶段予以充分考虑,并加强养护期的工程措施。

参 考 文 献

- [1] 林春金. 运营隧道衬砌渗漏水机理及注浆治理研究[D]. 济南: 山东大学, 2017. (LIN C J. Studies on lining water leaking mechanism and grouting governing in operational tunnels[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017. (in Chinese))
- [2] 郭小雄. 铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 71-77. (GUO X X. Crystallization mechanism and countermeasures of drainage system for railway tunnel[J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 71-77. (in Chinese))
- [3] 叶飞, 王坚, 田崇明, 等. 隧道排水管结晶堵塞病害研究现状与防治技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 13-22. (YE F, WANG J, TIAN C M, et al. Research progress and control techniques of crystal blockage disease of tunnel drainpipe[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 13-22. (in Chinese))
- [4] 叶飞, 田崇明, 何彪, 等. 在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 159-170. (YE F, TIAN C M, HE B, et al. Experimental study on scaling and clogging in drainage system of tunnels under construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 159-170. (in Chinese))
- [5] 徐金华, 周华求, 熊文威, 等. 岩溶隧道排水系统不同堵塞条件下衬砌结构力学特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 91-104. (XU J H, ZHOU H Q, XIONG W W, et al. Mechanical characteristics of lining structure under different blocking conditions of drainage system of Karst tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 91-104. (in Chinese))
- [6] 高春君, 向立辉, 张学富, 等. 不同水位下隧道排水管结晶堵塞引起的衬砌应力分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 45-51. (GAO C J, XIANG L H, ZHANG X F, et al. Lining stress caused by crystal lization clogging of tunnel drainage pipe at different water levels[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(5): 45-51. (in Chinese))
- [7] 李林毅, 阳军生, 高超, 等. 排水管堵塞引起的高铁隧道结构变形与渗流场特征模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 715-724. (LI L Y, YANG J S, GAO C, et al. Simulation tests on structural deformation and seepage field of high-speed railway tunnels under drainage clogging[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(4): 715-724. (in Chinese))
- [8] TIERNEY K, BRUNEAU M. Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction[J]. TR News, 2007(250): 14-17.
- [9] AYYUB B M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making[J]. Risk Analysis, 2014, 34(2): 340-355.
- [10] HUANG H W, ZHANG D M. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301-312.
- [11] 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 等. 考虑多次扰动影响的盾构隧道结构韧性评估方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 591-601. (LIN X T, CHEN X S, SU D, et al. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 591-601. (in Chinese))
- [12] 刘力英, 杨春山, 喻志远, 等. 附加荷载作用下隧道结构力学响应与韧性演化特征[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(5): 167-173, 233. (LIU L Y, YANG C S, YU Z Y, et al. Mechanical response and resilience evolution characteristics of tunnel structures under additional loads[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(5): 167-173, 233. (in Chinese))
- [13] 李正士. 化学侵蚀条件下隧道衬砌混凝土和排水病害的防治措施[J]. 铁道建筑技术, 2012(7): 90-93. (LI Z S. Chemical erosion under the conditions of tunnel lining concrete and drainage measures of defects prevention and treatment[J]. Railway Construction Technology, 2012(7): 90-93. (in Chinese))
- [14] 郑楠. 环境侵蚀下水泥砂浆力学性能的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008. (ZHENG N. Experimental study for cement mortar's mechanical capability under environmental erosion[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [15] 王少伟, 徐应莉, 徐丛. 基于钙离子溶蚀量的水泥基材料耐久性试验[J]. 混凝土, 2021(11): 98-103. (WANG S W, XU Y L, XU C. Cement-based materials durability experiments based on calcium ion dissolution[J]. Concrete, 2021(11): 98-103. (in Chinese))
- [16] 刘禹阳, 沈安虎, 来弘鹏, 等. 不同区域环境公路隧道排水系统设计特征统计研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(2): 28-37. (LIU Y Y, SHEN A H, LAI H P, et al. A statistical study on the design characteristics of highway tunnel drainage systems in different regional environments[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023,

- 60(2): 28-37. (in Chinese))
- [17] 翟 明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. (ZHAI M. Study on the Regularity of crystallization and blocking of tunnel drainage system in limestone area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [18] 夏小明, 刘夏冰, 区国钊, 等. 广东高速公路隧道排水系统结晶堵塞分布及防治 [J]. *广东交通职业技术学院学报*, 2024, 23(2): 4-10. (XIA X M, LIU X B, OU G Z, et al. Crystallization clogging distribution and its prevention in drainage pipes of highway tunnels in Guangdong Province[J]. *Journal of Guangdong Communication Polytechnic*, 2024, 23(2): 4-10. (in Chinese))
- [19] 李云安, 朱敦铭, 田 然, 等. 广东某高速公路隧道衬砌混凝土腐蚀成因与规律研究 [J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(5): 38-50. (LI Y A, ZHU D M, TIAN R, et al. Study on the origins and laws of the concrete corrosion in a highway tunnel lining in Guangdong[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(5): 38-50. (in Chinese))
- [20] 钟文健, 蔡有信, 周 瑜, 等. 公路隧道排水系统防结晶养护策略 [J]. *广东公路交通*, 2023, 49(2): 49-54. (ZHONG W J, CAI Y X, ZHOU Y, et al. Study on anti-crystallization maintenance strategy of highway tunnel drainage system[J]. *Guangdong Highway Communications*, 2023, 49(2): 49-54. (in Chinese))
- [21] 马文镇, 张 豹, 张彦龙. 公路隧道排水系统结晶堵塞机理及处治措施 [J]. *广东公路交通*, 2021, 47(5): 52-56. (MA W Z, ZHANG B, ZHANG Y L. Study on crystallization blockage mechanism and treatment measures of highway tunnel drainage system[J]. *Guangdong Highway Communications*, 2021, 47(5): 52-56. (in Chinese))
- [22] 庞佳玮, 周 莹, 穆 松, 等. 隧道表面结晶和排水管堵塞原因分析及防治措施 [J]. *混凝土*, 2024(1): 186-192. (PANG J W, ZHOU Y, MU S, et al. Cause analysis and prevention measures of tunnel surface crystallization and drainage pipe blockage[J]. *Concrete*, 2024(1): 186-192. (in Chinese))
- [23] 高何杰, 陈 胜, 吕建兵, 等. 灰岩隧道防化学结晶淤堵及新型可更换排水管研究 [J]. *公路*, 2022, 67(12): 403-406. (GAO H J, CHEN S, LYU J B, et al. Research on anti-chemical crystallization clogging and novel replaceable drainage pipes in limestone tunnels[J]. *Highway*, 2022, 67(12): 403-406. (in Chinese))
- [24] 叶 飞, 田崇明, 赵 猛, 等. 云南某在建隧道排水管结晶堵塞病害初步探析 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1): 336-341. (YE F, TIAN C M, ZHAO M, et al. The disease of scaling and clogging in the drainage pipes of a tunnel under construction in Yunnan[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(S1): 336-341. (in Chinese))
- [25] 刘娟红, 邹 敏, 李 康, 等. 碳酸盐环境下水泥基材料性能劣化与腐蚀破坏的研究进展 [J]. *材料导报*, 2023, 37(19): 88-96. (LIU J H, ZOU M, LI K, et al. Research progress on performance degradation and corrosion failure of cement-based materials in carbonate environment[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(19): 88-96. (in Chinese))
- [26] 胡欢欢, 左晓宝, 李向南, 等. 低速水流作用下水泥砂浆溶蚀特性研究 [J]. *水利水电工程学报*, 2019(1): 50-59. (HU H H, ZUO X B, LI X N, et al. Study on leaching characteristics of cement mortar under flowing water with low velocity[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(1): 50-59. (in Chinese))
- [27] 张 丹. 侵蚀性二氧化碳作用下粉煤灰混凝土的力学与耐久性性能分析 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2021, 35(5): 88-92. (ZHANG D. Analysis for mechanics and durability of fly ash concrete under the action of corrosive carbon dioxide[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 2021, 35(5): 88-92. (in Chinese))
- [28] 董 芸, 杨华全, 王 磊. 碳酸侵蚀条件下水泥基材料性能劣化试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(5): 868-874. (DONG Y, YANG H Q, WANG L. Experimental study on property deterioration of cement-based materials under carbonic acid erosion[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(5): 868-874. (in Chinese))
- [29] 宋振运. 混凝土析钙侵蚀机理试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020. (SONG Z Y. Experimental study on erosion mechanism of concrete calcium evolution[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020. (in Chinese))
- [30] 李明韬. 偏高岭土-蔗渣灰-硅酸盐水泥三元体系设计及抗碳酸水研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2023. (LI M T. Study on hydration and carbonate water corrosion resistance of metakaolin-sugarcane bagasse ash-Portland cement ternary system[D]. Nanning: Guangxi University, 2023. (in Chinese))
- [31] 郭高峰. 侵蚀性 CO₂ 对水泥基材料的腐蚀特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (GUO G F. Study on corrosion characters of cement-based materials in aggressive CO₂ environment[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [32] 李 康, 邹 敏, 王 希, 等. 碳酸水环境下隧道水泥基材料的抗侵蚀特性 [J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(5): 408-417. (LI K, ZOU M, WANG X, et al. Erosion

- characteristics of tunnel cement-based materials in carbonated water[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(5): 408-417. (in Chinese))
- [33] 陈鸿雁. 统计学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021. (CHEN H Y. Statistics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021. (in Chinese))
- [34] 刘 昌. 隧道衬砌结构服役力学性能演化机理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2023. (LIU C. Study on the evolution mechanism of service mechanical performance of tunnel lining structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [35] 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. (LIU C, ZHANG D L, ZHANG S L, et al. Analytical solution of the long-term service performance of tunnel considering surrounding rock rheology and lining deterioration characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2795-2807. (in Chinese))
- [36] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程: JTG 3370.1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway tunnels section 1 civil engineering: JTG 3370.1—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in Chinese))
- [37] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学 [M]. 7 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018. (JIA J P, HE X Q, JIN Y J. Statistics[M]. 7th ed. Beijing: Renmin University of China Press, 2018. (in Chinese))
- [38] 朱 旻, 陈湘生, 夏长青, 等. 地面堆载下盾构隧道结构韧性演化规律研究 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1): 35-44. (ZHU M, CHEN X S, XIA C Q, et al. Resilience evolution of shield tunnel structures under ground surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(1): 35-44. (in Chinese))

收稿日期: 2025-02-12