

隧道衬砌病害对结构安全性影响机理研究

杨朝帅^{1,2,3}, 崔臻⁴, 牛富生^{1,2,3}, 王百泉^{1,2,3}

(1. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458;

2. 广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室, 广东 广州 511458;

3. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 511458;

4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 隧道在建设和运营过程中常遭受衬砌开裂、渗漏水以及背后空洞等多种衬砌病害, 这些病害会对隧道的安全性造成不良影响。为评估隧道衬砌常见病害对隧道安全性的影响, 研究建立了一种基于安全系数法的隧道安全量化方法, 定量评价病害对隧道安全的影响, 并通过数值模拟分析了不同病害类型、不同病害程度、不同病害分布下隧道的安全性。研究结果表明: 衬砌开裂、衬砌渗漏水、衬砌背后空洞对隧道安全性有不利影响, 主要表现为衬砌轴力、弯矩、剪力增加, 安全系数下降; 病害程度越高, 安全系数下降越明显; 衬砌病害出现在拱顶或仰拱时对隧道安全最不利。

关键词: 隧道; 衬砌开裂; 衬砌渗漏水; 衬砌背后空洞

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)04-0180-07

Influence Mechanism on Structural Safety by Tunnel Liner Diseases

YANG Chaoshuai^{1,2,3}, CUI Zhen⁴, NIU Fusheng^{1,2,3}, WANG Baiquan^{1,2,3}

(1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Maintenance of Tunnel Structure, Guangzhou, Guangdong 511458, China;

3. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China;

4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Tunnels are often subject to various lining defects, such as cracking, water leakage and voids behind the lining, during their construction and operation, which may have adverse effects on the safety of tunnels. To assess the impact of common lining defects on the safety of tunnels, a quantitative method for evaluating the safety of tunnels based on the safety factor method was established in this study. The impact of lining defects on tunnel safety was quantitatively evaluated, and the safety of tunnels under different types, degrees and distributions of lining defects was analyzed through numerical simulations. The research results showed that lining defects, such as cracking, water leakage and voids behind the lining, have adverse effects on the safety of tunnels, mainly manifested as an increase in axial force, bending moment, and shear force of the lining, which leads to a decrease in the safety factor. The higher the degree of the defect, the more significant its impact on the safety factor of the tunnel. Lining defects occurring at the top or invert of the tunnel arch have the most unfavorable impact on tunnel safety.

Keywords: tunnel; lining cracks; lining leakage; cavities behind the lining

隧道工程技术发展对完善国家交通体系、发展国民经济有重大作用。截至目前, 随着我国隧道工

程向埋深更深、距离更长、断面更大的方向发展, 面临的地质环境也越来越复杂, 目前的施工技术难度、

收稿日期: 2023-03-04

修稿日期: 2023-04-07

基金项目: 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划“隧道结构病害智能识别与快速修复材料研究”(2021-专项-06); 中铁隧道局集团科技创新计划“铁路隧道衬砌智能检测与应用研究”(隧研合 2019-13)

作者简介: 杨朝帅(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程研究工作。E-mail: 394343652@qq.com

装备与材料的适用性也面临巨大挑战^[1-3]。随着各国隧道建设的迅猛发展,隧道病害问题作为世界性难题日益突出。据统计,已运营隧道普遍存在各种形式的结构病害,如衬砌开裂、渗漏水、大变形、衬砌背后脱空、钢筋锈蚀等,这些病害问题对隧道安全运营是一种潜在的隐患^[4-6]。因此,未来很长一段时间内,我国的隧道工程技术的发展将由以往的大规模建设向今后的病害治理修复转变^[7-8]。因此,对隧道工程结构的开裂、渗漏水、背后脱空等健康状况进行分析和量化评价,具有一定的研究意义。

目前,很多国家都建立了隧道健康状态评价体系,但这些评价体系更多是定性判断,定量化健康评价较少^[9-10]。另外,在隧道健康状态方面,对很多工程进行了病害数据的现场测试,但数据的离散性较大,应用范围较窄,同时与实测数据对应的隧道病害安全影响机理不明确,因此当前的隧道健康状态评价体系具有一定的局限性。为了评价隧道病害对结构安全的影响机制,杨惠林^[11]结合祁家大山隧道病害检测数据,建立了数值计算模型,分析了衬砌结构承载力的损失程度,并提出了合理的病害治理方案;王勇^[12]利用有限元计算软件,研究了平面状态隧道开挖支护过程中不同衬砌厚度工况下的围岩荷载,并对二次衬砌混凝土结构的承载力进行了校核。聂智平等^[13]根据某隧道漏水和裂缝的调查结果,基于荷载-结构方法建立隧道衬砌的数值模型,并对最薄弱段的承载力进行力学分析。刘庭金等^[14]采用荷载-结构法,通过监测隧道衬砌压力校核衬砌压力,确定了衬砌结构的稳定性。刘永华^[15]采用荷载-结构法建立隧道拱部衬砌背后空洞、衬砌截面厚度、衬砌开裂等病害模型,并结合实测数据验证了模型的准确性。对于隧道衬砌结构开裂病害,张玉军等^[16]认为裂缝深度因素对结构稳定性影响较大,而裂缝宽度对结构的稳定性影响较小。

综上所述,对隧道病害相关研究主要是集中在结构稳定性安全方面,包括数值模拟和病害检测监测等,但以往的研究模型未考虑病害的影响机理,因此模型的可靠性不高,计算误差也较大。因此,如何建立包含病害影响机理的数值模型,对研究成果可靠性至关重要。本文建立地层-结构计算模型,引入了复合衬砌隧道安全系数的计算方法,在此基础上分别讨论衬砌背后空洞、衬砌开裂、渗水这三种典型病害的作用机理及影响规律,对结构安全系数与病害特征指标的敏感性进行分析,以期研究隧道衬砌开裂、渗水、衬砌背后空洞三种典型病害的作用机

理与影响规律,剖析病害对结构安全的影响程度和影响范围。

1 隧道衬砌病害的模拟原理

1.1 分析模型

本研究中采用国标《工程岩体分类标准》(GB/T 50218—2014)推荐的岩体力学参数,分别见表 1、表 2。

表 1 分析用的岩体力学参数

密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	渗透系数 /(m·s ⁻¹)
2600	4.12	0.28	0.91	44.56	1.5×10 ⁻⁷

表 2 复合衬砌支护设计参数

初期支护 喷混凝土厚度/cm		初期支护锚杆			二衬/cm
顶拱侧墙	仰拱	位置	长度/m	间距/m	顶拱侧墙
15	15	拱、墙	2.5	1.0	40

当考虑二维分析计算时,在 Phase2 V8.0 软件中分别建立Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩中双线隧道的典型模型,其中数值模型尺寸取大于三倍洞径,竖直向与水平向尺寸均为 100 m,模型四周均取为三向约束边界。见图 1。分别考虑Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩条件下的典型喷锚复合衬砌支护,支护结构的支护时机考虑为围岩荷载释放率为 80% 时。模拟过程具体如下:

- (1) 确定整个模型的区域和边界;
- (2) 设置围岩地层参数;
- (3) 根据隧道开挖影响范围细分有限元网格,并定义初始地应力;
- (4) 添加初期支护结构单元,同时释放部分围岩应力;
- (5) 添加二次衬砌结构单元;
- (6) 计算至收敛。

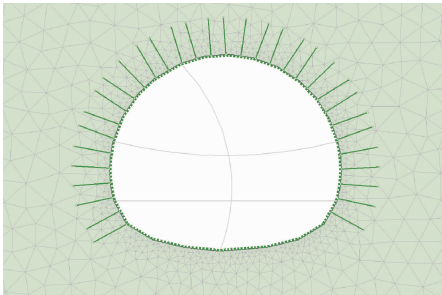


图 1 Ⅳ类围岩双线隧道计算模型

1.2 隧道开挖响应

图 2 给出了在当前围岩力学参数条件下,隧道开挖完成后变形云图,可见,隧道最大开挖变形为 0.005 m,发生在隧道仰拱部位;隧道顶拱的沉降变

形约为 0.004 m。图 3 给出了 III 类围岩条件下,隧道开挖完成后衬砌结构的轴力、弯矩、剪力图,可见衬砌结构内力以轴力为主,弯矩与剪力量值均较小,最大轴力量值约为 1.28 MN,发生在左右边墙拱脚部位。

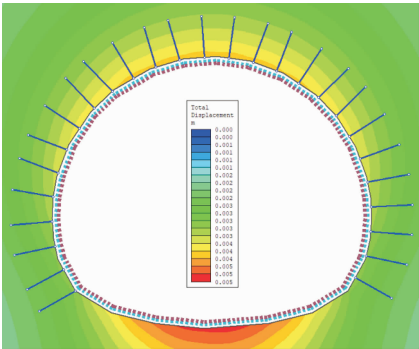


图 2 隧道开挖支护完成后变形云图

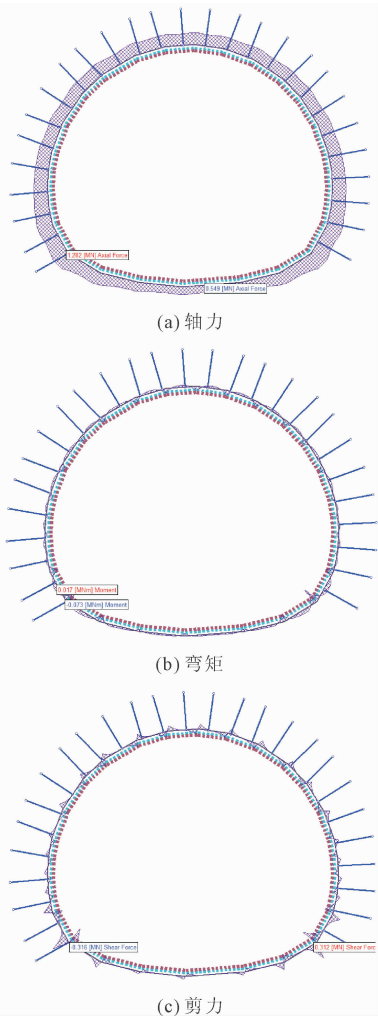


图 3 隧道开挖支护完成后衬砌内力图

1.3 隧道安全系数计算方法

如上节所示,在计算衬砌结构时,获取的结果为

衬砌上的弯矩、剪力和轴力这三种内力成果。当需要用这三种内力成果对衬砌进行承载力校核时,比较方便和直观的办法是利用承载力包络线图^[17]。当衬砌材料受力状态点位于承载力包络线以内,认为衬砌结构是安全的;一旦衬砌材料受力状态点位于承载力包络线以外,则认为衬砌结构开裂破坏。

(1) 弯矩-轴力($M - N$) 安全系数

根据弹性梁理论,有弯矩、轴力与衬砌材料极限正应力关系如下:

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I}t/2 \tag{1}$$

同时约定安全系数定义:

$$F_s = \frac{\sigma_c}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\min}} \tag{2}$$

则通过以上二式可以得到压缩破坏时的轴力:

$$N = -\frac{|M|}{2I}At + \frac{\sigma_c A}{F_s} \tag{3}$$

拉伸破坏时的轴力:

$$N = -\frac{|M|}{2I}At + \frac{\sigma_t A}{F_s} \tag{4}$$

极限弯矩:

$$M_{cr} = \pm \frac{I}{t} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{F_s} \tag{5}$$

式中: F_s 为安全系数,在本报告中采用 $F_s = 1$; t 为二次衬砌厚度; A 为衬砌结构的截面面积; I 为衬砌结构惯性矩; σ_c 和 σ_t 分别为衬砌结构混凝土的抗拉强度和抗压强度。

(2) 剪力-轴力($Q - N$) 安全系数

在深梁理论中,剪力 Q 作用下,梁中最大剪应力出现在中性轴部位,且量值约如下:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Q}{A} \tag{6}$$

假定在最大剪应力和最大正应力条件下,梁中平面上应力状态如下式:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{\max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\max}}{2}\right)^2 + \tau_{\max}^2} \tag{7}$$

同时约定安全系数定义:

$$F_s = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \tag{8}$$

则通过以上三式可以得到压缩破坏时的轴力:

$$N = \frac{\sigma_c A}{F_s} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 F_s}{\sigma_c A} \tag{9}$$

拉伸破坏时的轴力:

$$N = \frac{\sigma_t A}{F_s} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 F_s}{\sigma_t A} \tag{10}$$

极限剪力:

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{F_s} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t}$$

(11)

根据以上公式,即可分别求得混凝土衬砌的 $M-N$ 图与 $Q-N$ 图,根据两图即可得到衬砌结构的安全系数,隧道的最小安全系数取两图中的较小值即可。

1.4 隧道衬砌结构病害的模拟

1.4.1 隧道衬砌开裂的模拟

在本研究中,为了考虑隧道结构不同部位开裂对结构安全的影响机理,分别考虑了顶拱、边墙、仰拱三个部位的开裂情况。

在对裂缝进行模拟时,为了简化起见,将裂缝简化为圆弧形,如图 4。即假设开裂部位产生一个半径为 R 的凹坑,进一步将该开裂部位简化为一个宽度为 $2R$,深度为 R 的矩形缺陷,如此实现衬砌开裂在数值软件中的模拟。

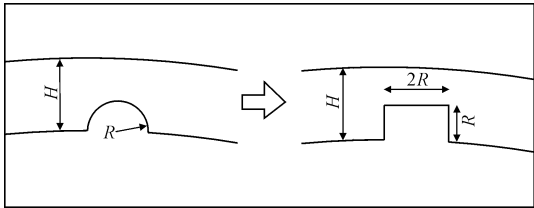


图 4 衬砌结构开裂部位的模拟原理

1.4.2 隧道衬砌渗水的模拟

当需要模拟隧道衬砌隧道渗水的危害时,将基于水-力耦合数值模拟,采用无渗流模式模拟静水压作用下隧道衬砌的渗水,在这种模式下,可在节点上设置孔隙水压力,只是孔隙水压是保持不变的,岩土体的屈服判断由有效应力决定。

在设置渗水裂缝时,采用了与上一段中相同的裂缝模拟方法与设置部位。

1.4.3 隧道衬砌后空洞的模拟

在对裂缝进行模拟时,为了简化起见,将裂缝简化为岩体中的圆弧形空洞,如图 5,并直接在数值软件中对空洞进行模拟。对于空洞的部位,也采取与上一段中相同的设置部位。

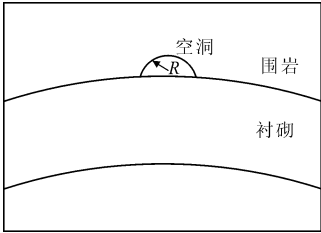


图 5 衬砌后空洞的模拟

2 衬砌开裂对隧道安全性的影响

图 6(a)、图 6(b)给出了Ⅲ类围岩条件下,顶拱位置开裂,开裂深度 $R/H=0.5$ 的条件下,衬砌的 $M-N$ 安全系数、 $Q-N$ 安全系数,可见衬砌开裂对衬砌安全系数具有不利影响。进一步,图 6(c)为Ⅲ类围岩条件下,开裂深度 $R/H=0.5$ 的条件下,顶拱位置下衬砌的最小安全系数。当考虑衬砌开裂之后,顶拱部位安全系数为最低,约 4.6 左右,仍满足最小为 2 的规范要求。

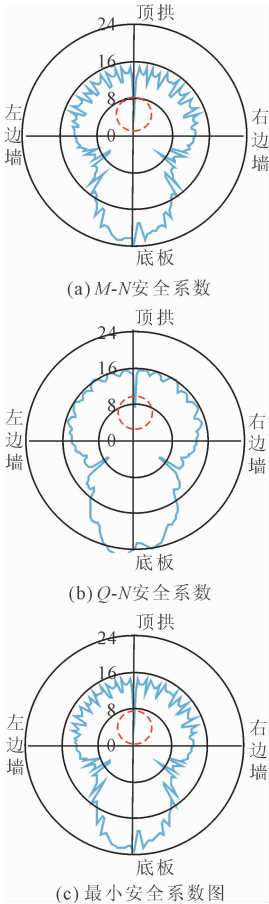


图 6 顶拱部位开裂后衬砌安全系数图

图 7 给出了Ⅲ类围岩下,衬砌无裂缝与顶拱出现裂缝时,衬砌的最小安全系数对比。可见,裂缝仅影响局部衬砌的安全系数,对衬砌整体安全程度影响不大。因此,当考虑衬砌开裂之后,顶拱部位安全系数为最低,约 4.6 左右,仍满足最小为 2 的规范要求。

图 8 给出了Ⅲ类围岩条件下裂缝位置对衬砌安全系数的影响。可见,仰拱部位安全系数降低最多,但由于顶拱部位安全系数原本量值较小,因此最终顶拱部位安全系数最低,约为 4.6 左右。

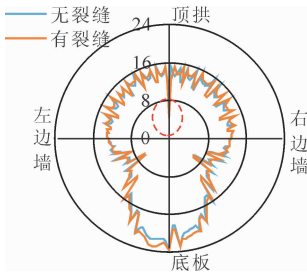


图 7 顶拱有/无开裂时衬砌最小安全系数图

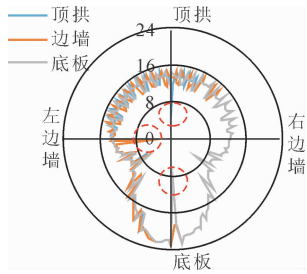


图 8 裂缝位置对衬砌最小安全系数的影响

图 9 给出了Ⅲ类围岩条件下,开裂深度 $R/H = 0.3$ 、 0.5 、 0.7 条件下,顶拱部位开裂后衬砌的安全系数。可见,随着开裂深度的增加,安全系数逐渐减小。为了更加表达清楚,进一步的,图 10 为衬砌顶拱最小安全系数。当开裂深度从 0.3 增加到 0.7 倍衬砌厚度时,最小安全系数由 7.3 降低到 2.24 。

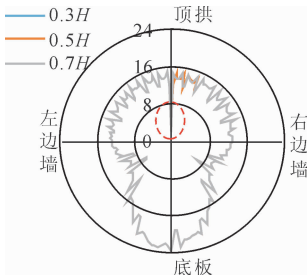


图 9 裂缝深度对衬砌最小安全系数的影响

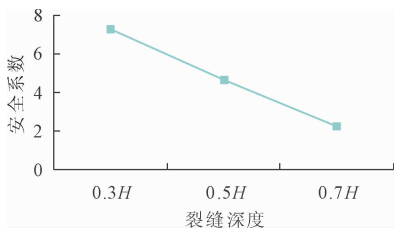


图 10 裂缝深度对衬砌顶拱最小安全系数的影响

图 11 给出了在Ⅲ类围岩条件下,不同的裂缝数量对衬砌安全系数的影响。可见,裂缝仅影响局部衬砌的安全系数,对衬砌整体安全程度影响不大。因此,当考虑衬砌开裂之后,顶拱部位安全系数为最

低,约 4.6 左右,仍满足最小为 2 的规范要求。

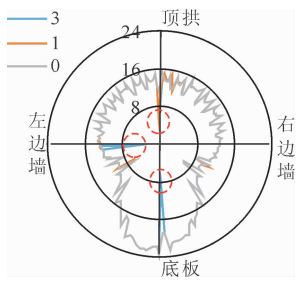


图 11 裂缝数量对衬砌最小安全系数的影响

3 隧道渗水对隧道安全性的影响

图 12 给出了Ⅲ类围岩条件下,开裂深度 $R/H = 0.5$ 、水头 40 m 的条件下,隧道顶拱开裂渗水与否对衬砌最小安全系数的影响。可见,考虑水压时,隧道衬砌整体安全系数均不同程度减小,顶拱部位减小程度最大,由不考虑渗水时的 4.6 左右,降低到 3.96 左右。

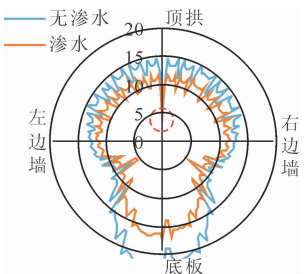


图 12 衬砌顶拱渗水与否对衬砌最小安全系数的影响

图 13 给出了Ⅲ类围岩条件下开裂渗水位置对衬砌安全系数的影响。可见,不同部位开裂渗水对衬砌安全系数的影响均局限在较小的范围内,其中的仰拱部位安全系数降低最多,但由于顶拱部位安全系数原本量值较小,因此最终顶拱部位安全系数最低,约为 3.96 左右。

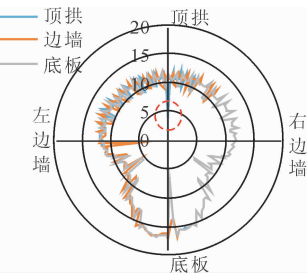


图 13 衬砌渗水部位对衬砌最小安全系数的影响

图 14 给出了Ⅲ类围岩条件下不同水头时衬砌最小安全系数分布情况,考虑的开裂渗水部位为顶

拱,可见水压对衬砌安全系数整体都有降低,当水头从 30 m 增加到 50 m 的时候,最小安全系数减小了 0.6 左右。

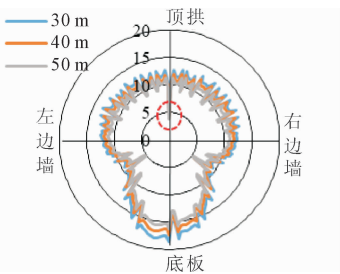


图 14 衬砌渗水水头对衬砌最小安全系数的影响

4 衬砌后空洞对隧道安全性的影响

图 15 给出了Ⅲ类围岩条件,空洞半径 0.5 m 条件下隧道有无衬砌后空洞对衬砌最小安全系数的影响。可见衬砌后空洞对衬砌安全状态影响范围较大,在空洞范围内的衬砌安全系数受到不利影响,在空洞范围外的衬砌安全系数有所提高。当考虑空洞后,顶拱衬砌安全系数从 11.0 降低到 3.9 左右。

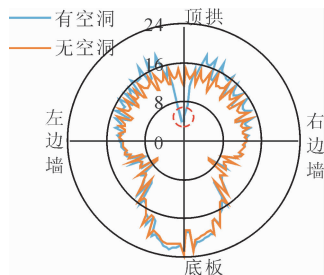


图 15 衬砌后有无空洞对衬砌最小安全系数的影响

图 16 给出了Ⅲ类围岩条件下,空洞半径 0.5 m 条件下,不同空洞位置下衬砌最小安全系数,可见不同部位的衬砌开裂均对衬砌安全系数具有不利影响。其中,顶拱、仰拱部位安全系数降低最为明显。由于顶拱部位总体安全系数比仰拱部位小,因此,当考虑衬砌开裂之后,顶拱部位安全系数为最低,约 3.9 左右,仍满足最小为 2 的规范要求。

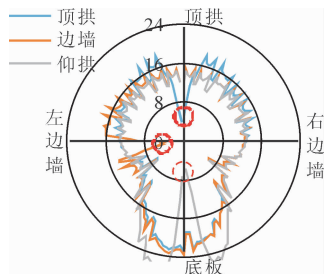


图 16 衬砌后空洞位置对衬砌最小安全系数的影响

图 17 给出了Ⅲ类围岩条件下,空洞半径 $R = 0.25\text{ m}$ 、 0.5 m 、 1 m 条件下,顶拱部位开裂后下衬砌的最小安全系数。可见,随着空洞深度的增加,安全系数逐渐减小。如图 18 可见,当空洞半径从 0.25 m 增加到 1 m 的时候,衬砌顶拱最小安全系数由 6.3 降低到 2.2。

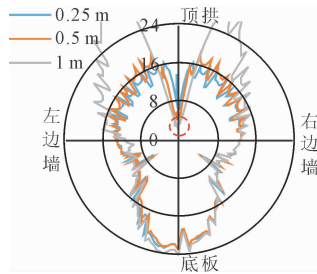


图 17 衬砌后空洞尺寸对衬砌最小安全系数的影响

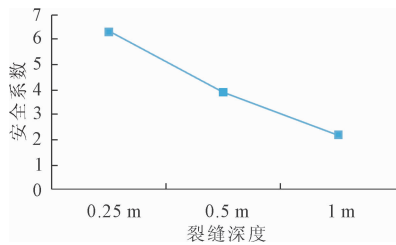


图 18 衬砌后空洞尺寸对衬砌顶拱最小安全系数的影响

5 结 论

(1) 衬砌开裂时仰拱部位安全系数降低最多,但由于顶拱部位安全系数原本量值较小,因此最终顶拱部位安全系数最低,约为 4.6 左右;当开裂深度从 0.3 增加到 0.7 倍衬砌厚度的时候,最小安全系数由 7.3 降低到 2.24;对于不同的裂缝数量对衬砌安全系数的影响而言,裂缝仅影响局部衬砌的安全系数,对衬砌整体安全程度影响不大。

(2) 考虑渗水时,仰拱部位安全系数降低仍然最多,但由于顶拱部位安全系数原本量值较小,因此最终顶拱部位安全系数最低,约为 3.96 左右,小于不考虑渗水时的 4.6 左右;当水头从 30 m 增加到 50 m 的时候,最小安全系数减小了 0.6 左右。

(3) 考虑衬砌后空洞时,顶拱、仰拱部位安全系数降低最为明显,仰拱部位安全系数降低最多,但由于顶拱部位安全系数原本量值较小,因此最终顶拱部位安全系数最低,约为 3.9 左右;空洞尺寸对衬砌安全系数影响显著,当空洞半径从 0.25 m 增加到 1 m 的时候,最小安全系数由 6.3 降低到 2.2。

本研究尚存在的不足:由于隧道病害特征形式复杂、不确定性较强,因此通过数据模拟对病害进行

规则化建模,有一定的误差,但不影响对计算结果规律的分析,不同病害之间的相互影响还需要今后更深入的研究。

参考文献:

- [1] 孙智慧,唐 勇,刘 涛. 盾构隧道局部渗漏水对其力学特性的影响[J]. 现代隧道技术,2021,58(4):141-149.
- [2] 张 蕊. 富水地层公路隧道衬砌结构运营期健康评价研究[D]. 成都:西华大学,2021.
- [3] 钟宏武. 二衬开裂公路隧道结构安全性分析及裂缝治理对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报,2015,28(5):1-65.
- [5] 曾晓东. 运营隧道衬砌裂缝及渗漏水病害整治技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):201-205,252.
- [6] 刘海京,夏才初,朱合华,等. 隧道病害研究现状与进展[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(5):947-953.
- [7] 黄红元. 富水环境下水工隧洞渗流计算及结构外水压力研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [8] 薛晓辉. 富水黄土隧道服役性能劣化机理及处治技术研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [9] 齐 军. 既有铁路隧道二衬开裂对结构性能影响及防治措施研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2021.
- [10] 王军辉. 直墙式铁路隧道衬砌病害机理分析及处治对策研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2021.
- [11] 杨惠林. 祁家大山隧道病害原因分析及加固方案[J]. 公路,2004(8):187-190.
- [12] 王 勇. 隧道施工数值模拟及衬砌强度安全系数分析[J]. 岩土工程技术,2004(5):258-262.
- [13] 聂智平,朱少华,赵文光,等. 关于某隧道群病害原因分析及结构安全性评估[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2003,20(3):42-45.
- [14] 刘庭金,朱合华,丁文其. 某高速公路隧道二次衬砌安全性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):75-78.
- [15] 刘永华. 高速公路隧道安全性评价研究[D]. 成都:西南交通大学,2004.
- [16] 张玉军,李治国. 带裂纹隧道二次衬砌承载能力的平面有限元计算分析[J]. 岩土力学,2005,26(8):1201-1206.
- [17] 崔 臻,吴基昌,盛 谦,等. 大岗山水电站主厂房顶拱坍塌体复合支护结构稳定性分析[J]. 岩土力学,2013,34(4):1068-1074.
- [7] Yu Shuisheng, Zhu Wancheng, Niu Leilei. Experimental and numerical evaluation on debonding of fully grouted rockbolt under pull-out loading[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022,9(8). <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00482-4>.
- [8] 康红普,崔千里,胡 滨,等. 树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J]. 煤炭学报,2014,39(1):1-10.
- [9] 刘 波,李东阳,段艳芳,等. 锚杆-砂浆界面黏结滑移关系的试验研究与破坏过程解析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2790-2797.
- [10] Ma Shuqi, Zhu Xing, Qin Weiwei, et al. Determination of the bond-slip relationship of fully grouted rockbolts[J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(9):1-12.
- [11] 董双勇. 围压作用下锚杆锚固性能及其影响因素研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2021.
- [12] Ho-Jong Kim, Kang-Hyun Kim, Hong-Moon Kim, et al. Anchorage mechanism and pullout resistance of rock bolt in water-bearing rocks[J]. Geomechanics and Engineering, 2018,15(3):841-849.
- [13] Fang Shuai, Yan Zhanghai, Quan Jiangxia. Anchorage performance of geopolymer-grouted rock bolts[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022,34(4):04022029.
- [14] 任 祥,汪班桥,李 楠. 地震作用下锚固滑坡的动力响应特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(5):676-681.
- [15] 王国锋. 填土中锚杆承载性状试验研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2018.
- [16] 胡翱翔,梁兴文,史庆轩,等. 高强钢筋与超高性能混凝土黏结性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(4):534-544,610.
- [17] Zhang Weili, Huang Lei, Juang C H. An analytical model for estimating the force and displacement of fully grouted rock bolts[J]. Computers and Geotechnics, 2020,117:103222.
- [18] Chen Jianhang, He Fulian, Zhang Shoubao. A study of the load transfer behavior of fully grouted rock bolts with analytical modelling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020,30:105-109.
- [19] 张景科,单婷婷,王玉超,等. 土遗址锚固土体-浆体(CGN+C)界面力学性能[J]. 岩土力学,2019,40(3):903-912.
- [20] 董 捷,孙京华,陶春晨. 锚-土界面拉拔试验与剪应力分布规律研究[J]. 公路工程,2022,47(5):176-182.

(上接第 58 页)