

隧道背后空洞影响下衬砌结构开裂特征及安全性评价

Cracking Characteristics and Safety Evaluation of Lining Structure under the Influence of Voids behind Tunnels

刘 海

(河南交投郑平高速公路有限公司, 郑州 450000)

摘 要: 衬砌结构受力开裂是隧道常见病害现象, 而开裂后隧道衬砌结构安全性如何是值得讨论的问题。针对某公路隧道衬砌裂缝形成原因与类型进行归纳总结, 采用离散元软件建立了衬砌顶部单一空洞、顶部与腰部组合空洞数值模型, 分析了不同工况的衬砌结构开裂特征与安全系数, 评价隧道衬砌结构的安全性。结果表明: 衬砌顶部单一空洞影响下, 产生了垂直裂缝, 结构安全系数最低, 顶部处于不稳定状态, 需进行加固处理; 顶部与左腰双空洞影响下, 顶部产生了垂直裂缝与斜裂缝, 左腰产生横向裂缝, 顶部与左腰安全系数较低, 顶部与左腰不稳定需立即加固处理, 尤其是空洞范围大于 30° 时。该成果可为空洞影响下隧道衬砌结构开裂安全评估及加固提供理论参考。

关键词: 隧道工程; 衬砌空洞; 衬砌开裂; 安全系数; 数值模型

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 06-0048-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.009

LIU Hai

(Henan Jiaotou Zhengping Highway Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Cracking of lining structures under stress is a common disease phenomenon in tunnels, and the stability of tunnel lining structures after cracking is a topic worth discussing. Summarize the causes and types of cracks in the lining of a highway tunnel. A numerical model was established using discrete element software for a single cavity at the top of the lining and a combination of cavities at the top and waist. Analyzed the cracking characteristics and safety factors of lining structures under different working conditions, and evaluated the stability of tunnel lining structures. The research results indicate that under the influence of a single cavity at the top of the lining, vertical cracks are generated, and the structural safety factor is the lowest. The top is in an unstable state, which requires reinforcement treatment; Under the influence of the double cavity at the top and left waist, vertical and diagonal cracks appear at the top, and transverse cracks appear at the left waist. The safety factor of the top and left waist is low, and they are unstable and need to be reinforced immediately, especially when the cavity range is greater than 30° . This achievement can provide theoretical reference for the stability assessment and reinforcement of tunnel lining structure cracking under the influence of voids.

Key words: tunnel engineering; lining cavity; lining cracking; safety factor; numerical model

0 引言

受偏压溶洞及地下水等外部因素影响, 隧道围岩处于复杂多变的应力状态, 其可靠性面临严峻考验。随着运营时间的不断增长, 隧道衬砌结构逐渐出现裂缝、变形等病害, 导致其安全系数逐渐下降。

作者简介: 刘 海 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 路桥施工。

收稿日期: 2023-04-19

当安全系数低于允许限值后，结构将进入不稳定状态，存在坍塌风险。因此，及时开展衬砌结构检测，采取如注浆、增设锚杆等有效加固措施，恢复和提升衬砌结构性能，显得尤为关键^[1]。

现阶段，隧道衬砌结构裂缝的研究主要集中于数值模拟、现场试验和理论研究等领域，旨在深入了解裂缝形成机制、预测其发展并制定有效的防治措施。杨亚新等^[2]、刘学增等^[3]、余晶^[4]采用荷载-结构法构建隧道裂缝数值模型，并与试验数据进行对比验证，综合分析裂缝的位置、深度及宽度等因素，对隧道衬砌结构的稳定性进行全面评价。刘新根等^[5]通过建立公路隧道衬砌力学评价模型，分析衬砌结构在不同病害影响下的力学行为，发现衬砌裂缝和空洞的存在均会显著降低结构的安全系数。黄杰^[6]运用有限元数值模拟方法，构建考虑松散围岩荷载、水压力及形变压力影响的病害结构数值模型，通过分析总结出衬砌裂缝主要因应力集中、拉应力和结构薄弱部位受力所致。田鹏^[7]通过现场监测初支与二衬间接触压力，分析高地应力下软岩隧道二衬受力特征，并得出二次衬砌围岩压力分担比例建议值。杜隆基^[8]采用离散元软件模拟分析带缺口钢筋混凝土梁的裂缝发展，发现缺口位置和倾角显著影响裂缝形态，缺口越靠近跨中裂缝越长而宽，且倾角接近90°时更易产生长宽裂缝。孟芹等^[9]、孙照玉等^[10]、刘威军等^[11]通过对裂缝的分布特征、成因的研究，提出有效的加固或处治措施，可显著降低裂缝对隧道的影响。刘新荣等^[12]通过试验分析了非贯通裂缝注浆对隧道衬砌混凝土在硫酸盐腐蚀时受压特征的影响，发现注浆能提升混凝土的即时强度并减缓二次腐蚀时的强度损失。杨非易等^[13]对比分析数值模拟和实测数据，分析了裂缝深度和环向长度对裂缝宽度和截面应力的影响，发现裂缝深度对结构安全性的影响更显著。刘学增等^[14]综合模型试验和数值分析结果，发现裂缝长度和深度显著影

响结构的破坏模式、极限承载力和延性脆性特征，其中裂缝纵向长度是关键评价指标。刘拼等^[15]、张武宗等^[16]针对大体积混凝土施工早期开裂问题，通过掺入抗裂剂降低混凝土开裂风险，其中开裂主要影响因素为温度。

为明确隧道支护背后单一和组合空洞影响下衬砌结构的开裂特征和安全性，结合一个隧道工程案例，采用离散元软件建立了衬砌顶部单一空洞、顶部与腰部组合空洞的数值模型，分析了衬砌结构的开裂特征，并通过计算结构安全系数评价了隧道背后空洞情况下衬砌结构的安全性。研究旨在为隧道背后空洞条件下衬砌结构开裂评估及加固提供数据支撑。

1 工程概况

某隧道工程位于峰丛谷地区，地形起伏大，标高在1 826.6~2 174.9 m间，最高海拔在2 238 m，区域围岩岩性主要为泥岩、灰岩等，软弱围岩（V级）区段占比为30%，区间最大埋深为63 m。衬砌结构采取复合式，其中初期支护采取23 cm的C20，二次衬砌采取50 cm的C25。复合式衬砌参数见表1。

表1 复合式衬砌参数					
Table 1 Composite support parameters					
初支					
注浆小导管（φ45）	钢拱架	砂浆锚杆		钢筋网片（φ10 mm）	二衬厚度/cm
环向间距/cm	规格	长度/m	间距/m	间距/cm	
35	I20b	3.5	0.8×1.0	25×25	50（钢筋砼）

2 数值模型与参数

结合实际计算能力确定30 m×30 m离散元边界模型，围岩为接触粘结，采用平行粘结模型赋予初支、二衬宏观与细观参数，见表2。经现场检测结果确定二衬荷载分担比例为56%，荷载-结构法有限元数值模型与离散元数值模型如图1所示，首先进行有限元电算，完成后再将计算数据导入离散元软件进行模拟计算，其中不同部位空洞范围为30°。

表2 材料数值模拟力学参数									
Table 2 Numerical simulation mechanical parameters of materials									
材料	宏观参数			细观参数					
	容重 γ / (kN/m³)	泊松比	弹模 E / GPa	颗粒半径 R / m	颗粒密度 ρ / (kg/m³)	孔隙率 n	摩擦系数 μ	内聚力 c / MPa	摩擦角 φ / (°)
围岩	21	0.3	2.2	0.040	21	0.10	0.4	8	20
初支	26	0.2	28.0	0.012	26	0.06	0.4	12	52
二衬	29	0.2	30.0	0.015	29	0.06	0.4	12	64

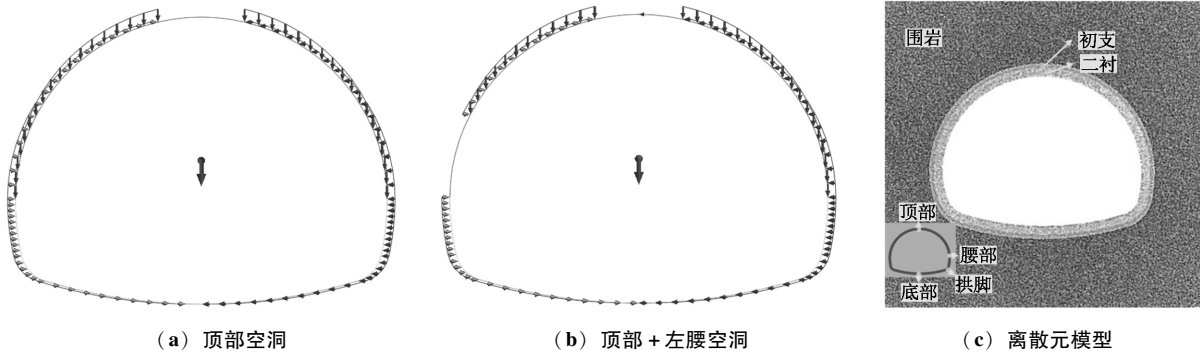


图 1 数值模型图
Fig. 1 Numerical model diagram

3 衬砌结构开裂特征分析

在离散颗粒当中，当颗粒间的粘结接触强度超过界限值后，会逐渐形成微小裂纹并且累积发展为贯穿裂缝。在正常情况下，混凝土结构仅产生微小裂纹且达到平衡状态，不会持续发展成为裂缝，离散颗粒间表现为压应力，从总体宏观角度可以看出衬砌结构（初支与二衬）承受围岩压力。若遇病害，

其衬砌结构受力特征将发生显著变化。

3.1 单一空洞（顶部）

衬砌背后存在空洞是隧道常见病害，是导致隧道衬砌结构开裂重要原因之一。空洞位置、范围（长度、宽度与深度）均会造成衬砌结构与围岩压力分布规律发生变化。单一顶部空洞工况下隧道衬砌裂缝发展历程如图 2 所示。

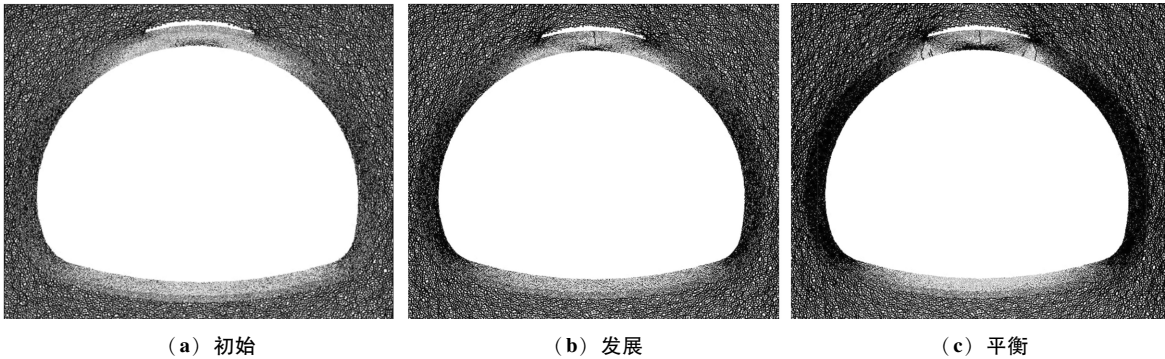


图 2 顶部空洞衬砌开裂过程
Fig. 2 Cracking process of the lining of the top cavity

由图 2 分析可知，隧道衬砌结构裂缝随时间累积而逐渐发展。初始状态下的隧道衬砌结构无明显裂缝产生，但顶部存在着较多且尚未形成连接的裂纹，在运营阶段外部因素的影响下，裂纹会进一步发展，较多裂纹贯通将会形成贯通裂缝。开裂首先发生于初支外侧（空洞最大深度处），并且向衬砌结构内部垂直侵入，形成一条已贯穿初支且侵入 1/2 二衬处的中间裂缝，裂缝在围岩应力与时间效应的双重作用下会进一步发展，裂缝本身亦使衬砌结构性质降低从而导致裂缝更易产生。最终空洞与衬砌接触部位出现 5 条明显裂缝，接触部位两端各形成 2 条垂直裂缝并已延伸至 1/2 初支处，中间裂缝垂直于衬砌并向

内侧发展。空洞与衬砌接触部位由于应力集中效应，使得该处衬砌结构局部区域的拉应力逐渐增加并超过材料的抗拉强度极限，导致初期支护外侧首先出现拉伸裂缝，这些裂缝随着时间的延长和荷载的作用不断扩展，最终引发衬砌结构的受拉破坏，因此顶部空洞易造成衬砌结构受拉破坏。

3.2 组合空洞（顶部 + 左腰）

组合空洞作用下衬砌结构应力集中部位增多将导致衬砌弯矩反号，衬砌结构将有可能受到拉应力作用，考虑到混凝土抗拉性能较差，裂纹与裂缝将迅速发展。顶部与左腰组合空洞工况下隧道衬砌裂缝发展历程如图 3 所示。

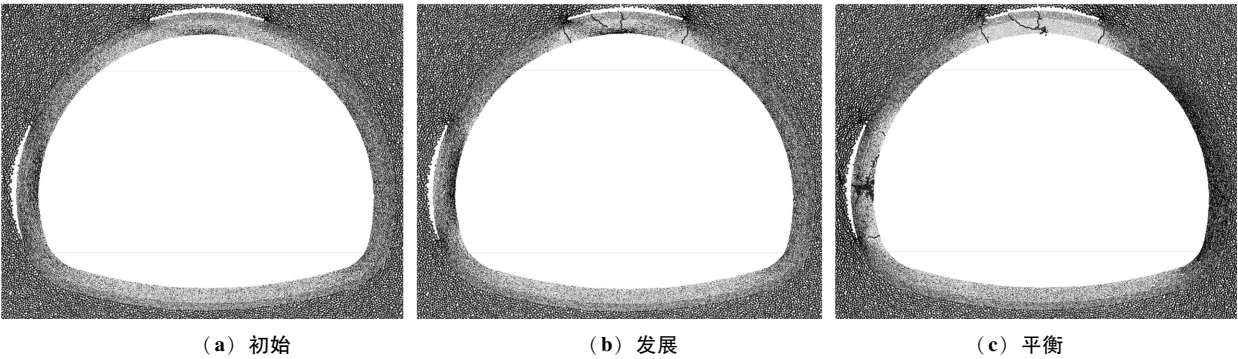


图3 组合空洞衬砌开裂过程
Fig. 3 Cracking process of the lining of the combined cavity

由图3分析可知，隧道衬砌结构裂缝随时间累积而逐渐发展。在初始状态下，隧道顶部与左腰的衬砌内侧观察到存在较多细小裂纹，且裂纹有进一步扩展成裂缝的趋势。随着运营时间的增长，这些裂纹逐渐演变成裂缝，并首先在顶部显现，共计4条裂缝，其中包括3条垂直裂缝与1条45°方向斜向裂缝，3条垂直裂缝已贯通而斜裂缝即将贯通；在隧道的左腰位置，最终形成了3条横向贯穿衬砌结构的裂缝，这些裂缝最初表现为内侧表面的细小裂纹，随后逐步扩展并穿透至外侧，形成了完整的裂缝路径，裂缝发展模式及受力特征表明这些裂缝为压缩裂缝，表明该区域所承受的压应力已经达到了甚至超出了材料的抗压强度极限。以上分析表明组合空洞工况下衬砌结构出现了拉伸裂缝、剪切裂缝以及压缩裂缝，而当裂缝一旦贯穿整个结构时，隧道局部将面临掉块甚至塌方的风险，应根据裂缝类型适当选择加固处理措施。

4 衬砌结构安全系数

结合有限元（GTS NX）与离散元（PFC）数据结果进行联合分析，其中有限元提取内力结果（轴力与弯矩）进行计算，而离散元提取相应数据换算成内力结果进行计算，换算见式（1）^[17]，安全系数临界数值见表3^[17-18]。

$$\begin{cases} N = E(\varepsilon_{\text{内}} + \varepsilon_{\text{外}})bh/2 \\ M = E(\varepsilon_{\text{内}} - \varepsilon_{\text{外}})hb^2/12 \end{cases} \quad (1)$$

表3 衬砌结构安全系数临界值^[17-18]

数值类型	初支（混凝土）	二衬（钢筋混凝土）
有限元（未考虑裂缝）	2.2	2.0
离散元（考虑裂缝）	1.0（裂缝尖端）	1.0（裂缝尖端）

4.1 单一空洞（顶部）隧道衬砌安全系数

提取有限元与离散元相应数据进行转化计算，得出相应初支与二衬安全系数，利用安全系数临界数值评价单一空洞工况下隧道衬砌结构安全性，计算结果如图4所示。

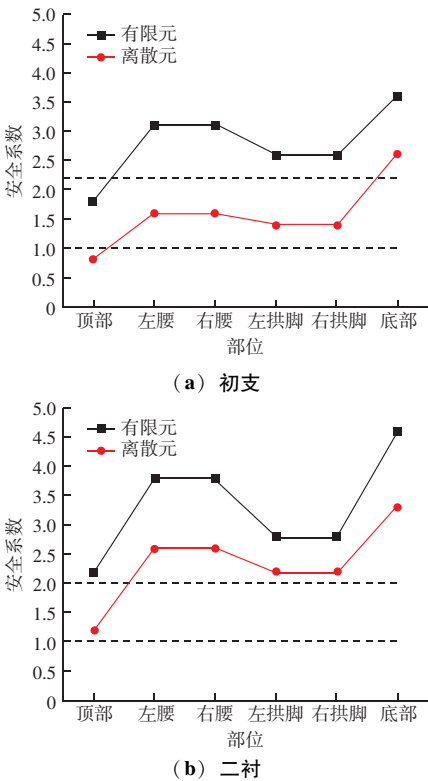


图4 单一空洞隧道衬砌安全系数
Fig. 4 Safety factor of single hollow tunnel support

单一顶部空洞隧道衬砌安全系数有限元与离散元计算结果有所差异。有限元计算所得初支安全系数相较于离散元高，两者初支安全系数峰值均位于底部。由于受到顶部空洞的影响使得顶部初支安全系数最低，分别为1.8与0.8，均低于临界值2.2与

岩土力学

1.0, 表明顶部初支裂缝开展明显, 局部初支处于不稳定状态; 腰部、拱脚与底部初支处于安全范围, 裂纹未进一步发展。离散元计算所得二衬安全系数相较于有限元低, 两者二衬安全系数峰值均位于底部。由于受顶部空洞影响使得顶部二衬安全系数最低, 分别为 2.2 与 1.2, 均高于临界值 2.0 与 1.0, 表明顶部二衬还处于稳定状态, 但安全储备已不多, 需进行加固处理增加其安全性; 腰部、拱脚与底部二衬安全系数均高于临界值, 安全储备富余。

4.2 组合空洞 (顶部 + 左腰) 隧道衬砌安全系数

提取组合空洞工况下有限元与离散元数据进行计算, 得出安全系数评价组合空洞下隧道衬砌结构安全性, 计算结果如图 5 所示。

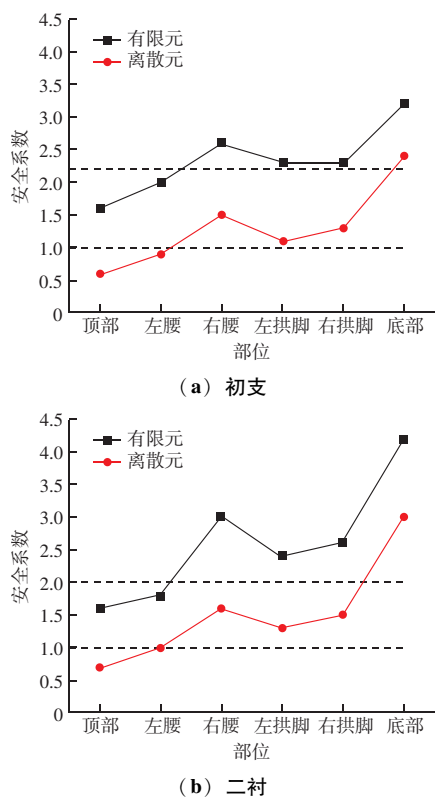


图 5 组合空洞隧道衬砌安全系数

Fig. 5 Safety factor of support for combined hollow tunnel

组合空洞隧道衬砌结构安全系数差异性, 有限元计算数据高于离散元。在顶部与左腰空洞影响下, 顶部与左腰初支安全系数下降显著, 顶部初支安全系数分别为 1.6 与 0.6, 均低于临界值 2.2 与 1.0, 表明顶部初支裂缝发展趋势明显, 顶部初支处于不稳定状态; 左腰初支安全系数分别为 2.0 与 0.9, 均低于临界值 2.2 与 1.0, 表明左腰初支裂缝也发展明

显, 左腰初支处于不稳定状态; 右腰、拱脚与底部初支处于安全范围, 但相较于单一顶部空洞安全系数下降显著。受顶部与左腰双空洞影响下, 顶部与左腰二衬安全系数明显降低, 两者有限元与离散元安全系数均低于临界值 2.0 与 1.0, 表明顶部与左腰二衬还处于不稳定状态, 相较于单一顶部空洞的局部安全储备已不足, 需立即采取加固措施控制裂缝进一步发展, 避免塌方与掉块等事故; 右腰、拱脚与底部二衬安全系数均高于临界值, 但相较于单一顶部空洞的安全储备有所下降。

4.3 最不利部位衬砌安全性分析

空洞对隧道衬砌结构安全产生不利影响, 其中顶部受影响最为严重。基于此, 针对单一顶部空洞的情况, 分别考虑了 0°、15°、30°、45°、60° 等不同空洞范围, 分析顶部空洞范围对隧道衬砌结构安全的影响。顶部不同空洞范围下隧道衬砌结构安全系数变化规律如图 6 所示。

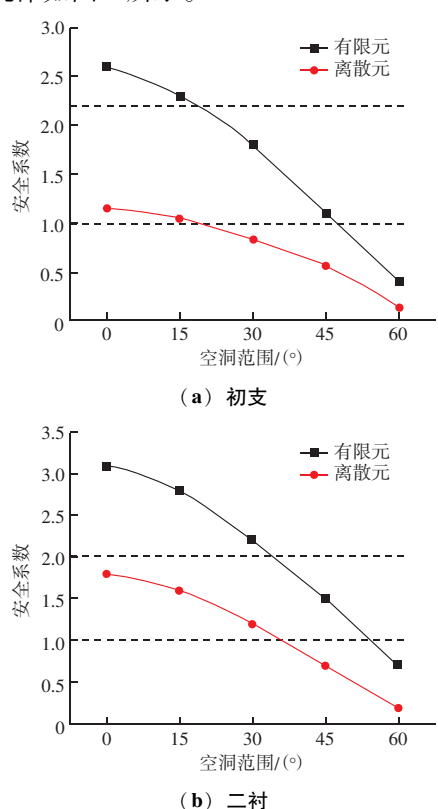


图 6 顶部不同空洞范围下隧道衬砌安全系数

Fig. 6 Safety factor of tunnel support under different top hole ranges

由图 6 分析可知, 随着顶部空洞范围的扩大, 无论是采用有限元还是离散元方法, 衬砌结构安全系

数都呈现出下降的趋势，并且下降速度逐渐加快。有限元方法得到的安全系数始终高于离散元方法，表明有限元方法在预测衬砌结构的安全性方面更为粗略。实际应用中需根据隧道具体地质条件，特别是周边围岩的连续性或破碎程度来选择合适的模拟方案。当顶部空洞范围超过 15° 时，初期衬砌安全性已经不能完全保证；而当空洞范围超过 30° 时，二衬安全性亦变得不可靠。因此，对于顶部空洞范围超过 30° 的部位，须立即采取注浆加固等有效措施来进行处治，以确保整体结构的安全性。

5 结论

以某软弱围岩高速公路隧道工程为背景，结合有限元与离散元针对顶部单一空洞、顶部与腰部组合空洞工况建立隧道衬砌结构数值模型，探究不同工况下裂缝发展规律，通过分析衬砌结构安全系数，评价隧道结构的安全性，得到以下主要结论：

(1) 开裂由初支外侧垂直侵入形成贯穿裂缝。单一顶部空洞影响下，顶部产生 5 条垂直裂缝，顶部衬砌结构不稳定；顶部与左腰双空洞影响下，顶部形成 3 条垂直裂缝与 1 条斜向裂缝，左腰产生 3 条横向裂缝，顶部与左腰衬砌结构不稳定。

(2) 有限元计算结果高于离散元。单一顶部空洞影响下，衬砌结构安全系数最低值位于顶部，初支安全系数低于临界值而二衬安全系数高于临界值，顶部衬砌安全储备不足需加固；腰部、拱脚与底部初支处于安全状态。顶部与左腰双空洞影响下，衬砌安全系数最低值位于顶部，左腰衬砌安全系数下降明显，顶部与左腰衬砌安全系数低于临界值，顶部与左腰衬砌不稳定，需立即加固；右腰、拱脚与底部初支处于安全状态，但安全储备下降。

(3) 随着顶部空洞范围增大，衬砌结构安全系数降低，应根据隧道周边围岩类型选择合适的模拟方案，建议在空洞范围超过 30° 时采取注浆加固措施，以确保运营安全。

参 考 文 献

- [1] 董飞. 地铁隧道衬砌结构破坏机理与安全性评价 [D]. 北京：北京交通大学，2018.
- [2] 杨亚新，任志华，张森. 纵向裂缝对山岭隧道衬砌结构安全性的影响分析 [J]. 公路交通科技（应用技术版），2017，13（6）：282–284.
- [3] 刘学增，包浩杉，周敏. 纵向裂缝对隧道钢筋混凝土衬砌结构影响的试验 [J]. 上海交通大学学报，2012，46（3）：441–445.
- [4] 余晶. 公路隧道衬砌裂缝对结构受力分布影响规律研究 [J]. 土木工程学报，2017，50（增刊1）：70–75.
- [5] 刘新根，刘学增，齐磊，等. 公路隧道衬砌病害力学模拟研究 [J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2015，34（3）：26–31.
- [6] 黄杰. 高速公路隧道衬砌纵向裂缝成因分析 [J]. 兰州理工大学学报，2017，43（6）：144–148.
- [7] 田鹏. 高地应力软岩隧道围岩压力及二衬受力特征研究 [J]. 铁道设计标准，2016，60（8）：108–112.
- [8] 杜隆基. 基于 PFC 的钢筋混凝土梁极限承载力研究 [D]. 西安：长安大学，2018.
- [9] 孟芹，孙祺华. 某高速公路隧道二衬开裂成因分析及处治研究 [J]. 土工基础，2024，38（4）：587–591.
- [10] 孙照玉，左鲁. 黄土隧道仰拱裂缝成因分析及加固处治措施 [J]. 兰州工业学院学报，2024，31（4）：31–36，82.
- [11] 刘威军，李天斌，任洋，等. 基于数值评价的隧道衬砌裂缝成因分析与维修设计 [J]. 地下空间与工程学报，2022，18（4）：1355–1362.
- [12] 刘新荣，庄场，周小涵，等. 硫酸盐环境下含非贯通裂缝隧道衬砌注浆及二次腐蚀试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2024，43（11）：2627–2638.
- [13] 杨非易，蒋凯. 衬砌裂缝对隧道结构影响的数值模拟研究 [J]. 土工基础，2024，38（3）：473–478，529.
- [14] 刘学增，李振，杨芝璐，等. 隧道衬砌裂缝特征对承载力的影响分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报，2024，56（7）：37–45.
- [15] 刘拼，郭城瑶，秦哲焕，等. 大体积混凝土足尺模型裂缝控制应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用，2023，37（3）：66–71，133.
- [16] 张武宗，唐吉尧，兰聪，等. 地铁超长侧墙结构混凝土裂缝控制及工程应用 [J]. 粉煤灰综合利用，2022，36（6）：60–65.
- [17] 王自伟. 公路隧道衬砌裂缝发展规律及结构安全性评价 [D]. 重庆：重庆交通大学，2021.
- [18] 刘杰. 考虑流固耦合的隧道岩溶段支护结构安全性研究 [J]. 市政技术，2023，41（2）：84–90.