

拱腰空洞条件下隧道结构损伤机制及演化规律研究*

孙州^{1,2,3}

(1.上海同岩土工程科技股份有限公司, 上海 200092; 2.上海同岩公路养护工程有限公司, 上海 200092; 3.上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 根据浙江白阳山隧道衬砌背后空洞特征, 针对运营隧道衬砌背后空洞影响结构承载性能的问题, 采用数值模拟方法建立三维扩展有限元模型, 从拱顶沉降、边墙收敛、混凝土应力、裂缝等方面分析松动荷载作用下左拱腰脱空结构损伤机制及演化规律。结果表明, 松动荷载作用下, 左拱腰空洞结构整体表现为“拱顶下沉、左拱腰向外扩张”的变形形态, 隧道破坏时拱顶沉降为 49.3 mm, 水平收敛为 14.9 mm; 隧道结构损伤主要分为弹性受力、左拱腰外侧开裂、左拱腰外侧开裂—内侧压屈、左拱腰内侧压屈—破坏 4 个阶段; 隧道裂缝扩展过程分为无裂缝、裂缝快速扩展、裂缝深度不变、钢筋应力快速增加及裂缝张开 4 个阶段, 左拱腰外侧发生受拉破坏时, 裂缝深度为 30 cm, 呈 V 形张开状态。

关键词: 隧道; 拱腰空洞; 结构损伤机制; 裂缝; 松动荷载; 演化规律

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)03-0146-05

衬砌背后空洞是公路隧道常见的一种病害形式, 对隧洞结构承载性能有重要影响。侯小东等对壁后空洞开展模型试验研究, 认为壁后空洞的存在会使空洞附近的衬砌变形由内侧收敛变为外侧扩张, 且变形随着空洞范围的扩大而增大^[1]; 王述红等基于模型试验, 分析了不同位置空洞条件下隧道的破坏形式和破坏顺序^[2]; 黄锋等研究发现衬砌背后空洞对衬砌拱顶安全系数的影响最大, 空洞数量越多, 安全系数降低越明显^[3]; 谭林波分析了衬砌背后空洞对衬砌的影响, 并对衬砌结构进行了健康度分级^[4]; 王培荔研究了拱部空洞条件下衬砌裂损规律, 认为空洞容易导致结构受力不均, 产生应力集中效应^[5]; 张素磊等分析了衬砌背后空洞的分布特征及对衬砌结构的影响^[6]; 程升亮等采用数值模拟方法, 研究了不同空洞深度、不同埋深隧道条件下二次衬砌背后空洞对衬砌结构的影响^[7]; 丁睿等分析了隧道围岩空洞位置变化对隧道结构力学状态的影响, 认为围岩空洞会导致衬砌结构出现损伤^[8]; 王薇等研究了砌石隧道衬砌背后不同规模空洞对隧道结构安全性及力学特性的影响^[9]; 宋磊研究了衬砌背后

空洞对既有隧道受力的影响, 认为拱顶存在空洞时, 拱顶容易出现开裂破坏, 降低其承载能力^[10]; 覃晖等基于支持向量机研究隧道衬砌空洞机器识别方法, 结果表明采用该方法可以准确判断空洞埋深及横向分布范围^[11]; 杨公标等基于解析模型分析应力释放系数、空洞位置及尺寸对地层应力和变形的影响^[12]; 赵文强分析了拱顶空洞对浅埋暗挖隧道的影响^[13]; 闫高明等分析了竖向地震动作用下衬砌拱顶背后空洞对隧道衬砌动力响应的影响^[14]; 郭新新等研究了爆破荷载作用下隧道衬砌裂缝及背后空洞对衬砌结构的动力响应^[15]。上述研究多是研究隧道结构局部空洞对结构承载力的影响, 很少从隧道结构损伤和开裂方面分析拱腰空洞条件下隧道结构的损伤演化特性。本文根据浙江白阳山隧道病害特征, 从拱顶沉降、边墙收敛、混凝土应力、裂缝等方面分析左拱腰脱空条件下隧道结构损伤机制及演化规律。

1 工程概况

白阳山隧道为双洞分离式隧道, 2005 年建成通车。该隧道采用单洞双向行驶模式穿过白阳山, 长

* 基金项目: 浙江省交通运输厅科技项目(2018011); 贵州省科学技术厅重大科技专项(黔科合重大专项字[2018]3011); 上海市人才发展基金资助项目(2021051)

480 m,埋深 0~110 m。隧道穿越全~强风化凝灰质砂岩,受地质构造及风化作用影响较严重,节理裂隙发育,围岩稳定性一般~较差;地下水以第四系松散岩类孔隙潜水和基岩网状裂隙水为主,接受大气降水补给,水量随季节变化,水量丰富。V 级围岩段隧道净空断面宽 1 341 cm,高 934 cm,厚 45 cm。二次衬砌采用模筑 C30 钢筋混凝土,钢筋为 HRB335,主筋配置为 $\phi 22\text{ mm}@250\text{ mm}$ 。衬砌断面形式见图 1。

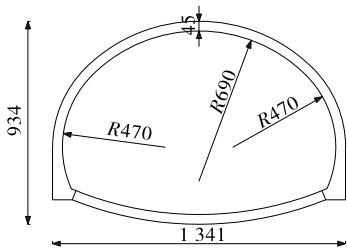


图 1 白阳山隧道衬砌断面形式(单位:cm)

2 隧道病害检测及成因分析

2.1 隧道结构病害特征

该隧道运营 15 年后,对其洞口、洞门、衬砌等部位进行检测,结果显示主要病害为裂缝与渗水,其中纵向裂缝 216 处、环向裂缝 68 处、斜向裂缝 36 处、衬砌渗水 23 处,同时存在衬砌背后脱空、二次衬砌厚度不足等现象(见图 2)。

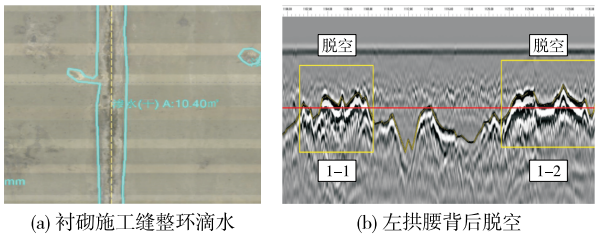


图 2 白阳山隧道的结构病害

2.2 病害成因分析

渗漏水的主要原因是隧道运营 15 年后,衬砌背后防水材料(背贴式止水带)老化而失效,水从施工缝流入。左拱腰背后脱空的主要原因,一是施工过程中开挖面不平整,混凝土填充不密实;二是常年水流导致衬砌背后围岩劣化(见图 3)。

3 计算模型与模拟方法

3.1 计算工况

根据白阳山隧道空洞特征(K15+307—323),

分析 V 级围岩段上部松动荷载作用下衬砌左拱腰空洞结构承载特性及损伤开裂变形规律,计算工况见表 1。

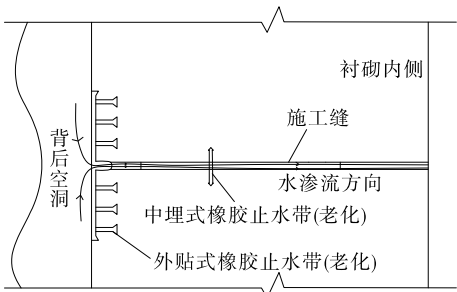


图 3 白阳山隧道病害成因分析

表 1 空洞计算工况

围岩级别	病害类型	病害特征
V 级	左拱腰空洞	脱空长 16 m,环向 1 m

3.2 计算模型及参数

建立 V 级围岩段隧道三维有限元模型,隧道埋深 12.3 m,围岩抗力系数为 150 MPa/m。在隧道左拱腰位置环向 1 m 范围内不设置弹簧、不施加荷载模拟隧道背后脱空,衬砌轴向取 1 m。钢筋嵌入混凝土模型,不考虑钢筋和混凝土之间的黏结滑移。地层抗力通过只受压、不受拉的非线性弹簧模拟,按照刚度等效的原则计算单个弹簧的刚度,研究左拱腰存在空洞条件下上部松动荷载作用下隧道结构开裂损伤演化规律。衬砌结构计算模型见图 4。

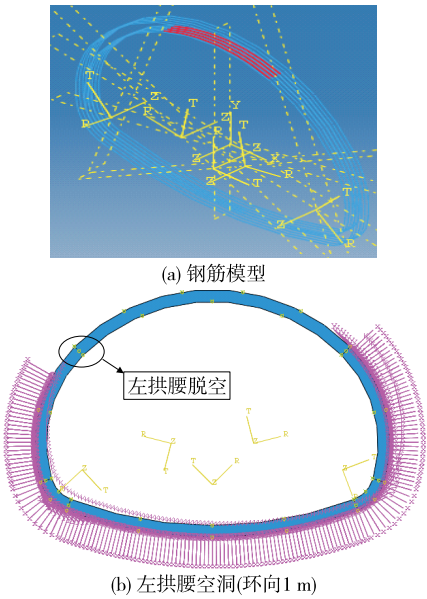


图 4 衬砌结构计算模型

隧道衬砌采用混凝土损伤塑性模型,裂缝扩展

采用最大周向拉应力准则,衬砌最大周向拉应力 $\sigma_{\max}=2\text{ MPa}$,断裂能取 $G_I^I=G_I^{\text{II}}=G_I^{\text{III}}=120\text{ N/m}$ 。钢筋采用理想弹塑性模型模拟。混凝土、钢筋的物理力学参数见表2。

表2 混凝土和钢筋的物理力学参数

材料	型号	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	膨胀角/(°)
衬砌	C30	30	0.2	2.03(受拉) 20.10(受压)	15
钢筋	HRB335	210	0.3	335.00	—

复合式衬砌一般由初期支护和二次衬砌共同承担围岩压力,由于隧道模拟过程中未考虑初期支护,按隧道围岩压力的70%施加在二次衬砌上。围岩压力参数依据JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》取值(见表3)。

表3 围岩压力参数

埋深/m	顶部压力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	水平侧压力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)			
		左上	左下	右上	右下
12.3	233.7	73.0	73.0	73.0	73.0

4 左拱腰空洞条件下隧道结构损伤机制及演化规律

4.1 结构变形特征

随着上部荷载的施加,左拱腰空洞结构整体表现为“拱顶下沉、左拱腰向外扩张”的变形形态,左拱腰空洞部位外扩显著(见图5),荷载—变形关系见图6、图7。从图6、图7可看出隧道变形总体划分为弹性受力、左拱腰外侧开裂、左拱腰外侧开裂—内侧压屈、左拱腰内侧压屈—破坏4个阶段。

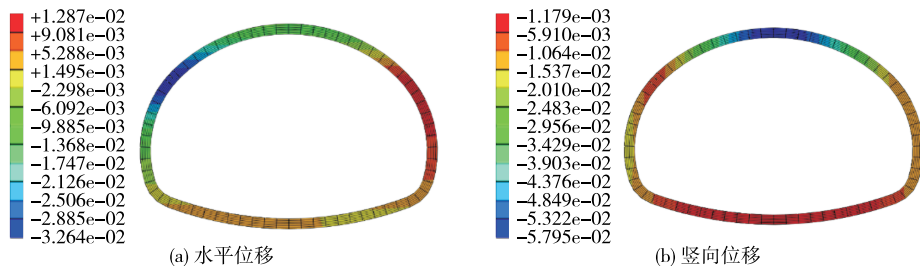


图5 左拱腰空洞条件下隧道结构变形(单位:m)

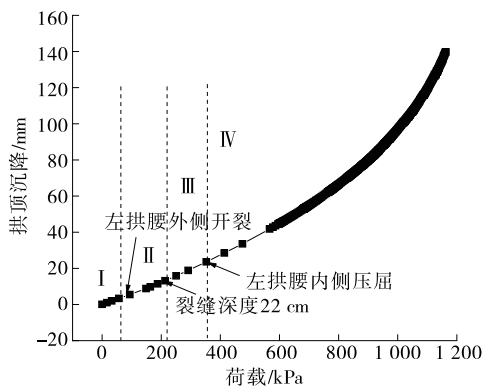


图6 荷载与拱顶沉降关系曲线

第I阶段:弹性受力阶段。荷载较小时,衬砌内力较小,未出现裂缝;荷载达到94 kPa时,左拱腰空洞外表面率先出现一条沿衬砌轴向贯通的裂缝,隧道拱顶沉降5.4 mm,水平收敛1.8 mm。

第II阶段:左拱腰外侧开裂阶段。随着荷载的继续增加,左拱腰外侧裂缝不断向深度方向扩展,拱顶荷载达到213 kPa时,裂缝深度延伸至22.5 cm,隧道拱顶沉降13.1 mm,水平收敛4.4 mm。

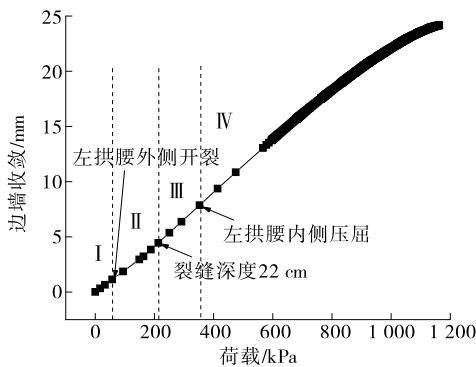


图7 荷载与边墙收敛关系曲线

第III阶段:左拱腰外侧开裂—内侧压屈阶段。拱顶荷载达到352 kPa时,左拱腰内侧受压开始屈服,隧道拱顶沉降23.4 mm,水平收敛7.8 mm。

第IV阶段:左拱腰内侧压屈—破坏阶段。拱顶荷载达到595 kPa时,右边墙外侧受压开始屈服;拱顶荷载达到645.7 kPa时,钢筋开始屈服,拱顶沉降49.3 mm,水平收敛14.9 mm,结构变形加速,进而产生破坏。

4.2 结构损伤过程分析

上部松动荷载作用下,左拱腰空洞结构表现为“拱顶内侧受拉、左拱腰外侧受拉开裂、右拱腰外侧受拉”的受力形态。由于左拱腰存在空洞,上部荷载作用下,隧道结构受力模式发生变化,在左拱腰处产生应力集中,左拱腰外侧产生裂缝。结构应力分布见图8,拉应力为正,压应力为负。

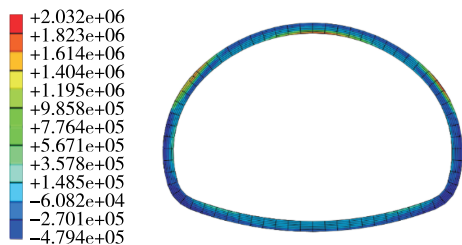


图8 左拱腰空洞条件下隧道结构拉应力分布状态(单位:Pa)

拱腰出现裂纹后,开裂部分混凝土强度衰减,截面刚度降低,截面应力发生重分布,应力峰值向两侧转移。随着荷载的增加,拱顶内侧和拱腰外侧混凝土拉应力逐渐降低至一定水平,其他部位压应力保持增长趋势(见图9)。

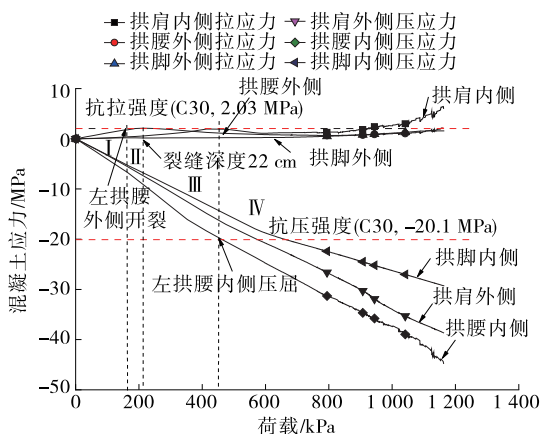


图9 关键部位混凝土应力发展轨迹

随着上部松动荷载的继续增加,左拱腰内侧、右拱腰内侧、拱顶外侧、右边墙外侧相继达到屈服强度,结构发生破坏(见图10)。

4.3 裂缝扩展及演化过程分析

隧道裂缝扩展特征见图11。从图11可看出隧道裂缝扩展分为4个阶段。

第I阶段:无裂缝阶段。荷载为0~93.7 kPa时,隧道结构内部应力水平较低,混凝土没有达到抗拉强度,结构整体处于弹性状态。

第II阶段:左拱腰外侧裂缝快速扩展阶段。荷

载达到93.7 kPa时,左拱腰空洞外表面混凝土达到抗拉强度,出现一条裂缝,裂缝深7.5 cm,结构内表面应力水平降低;随着荷载的增加,混凝土拉应力由外部向内部逐渐转移,裂缝向深部快速扩展。

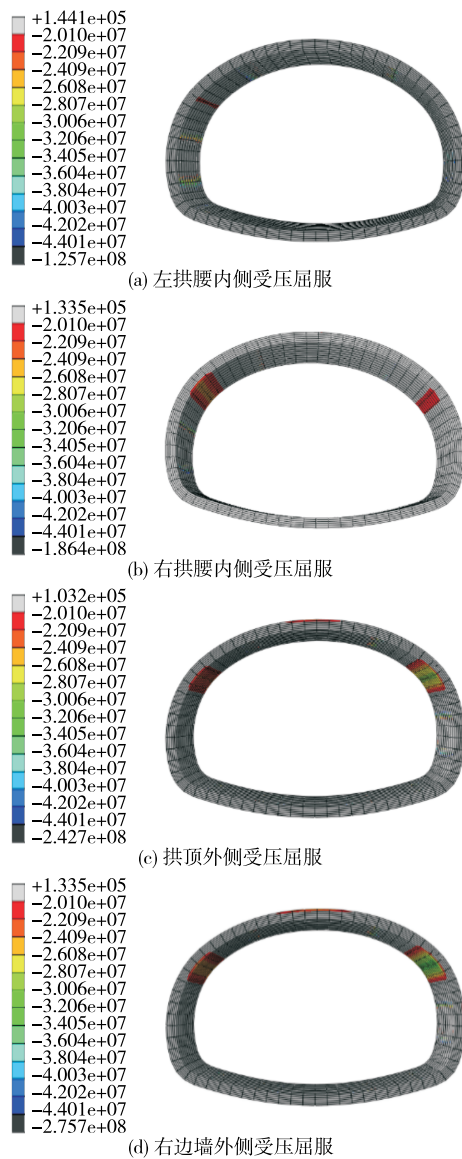


图10 混凝土压应力(单位:Pa)

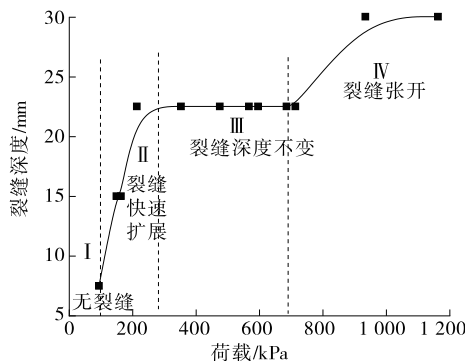


图11 荷载与裂缝深度关系曲线

第Ⅲ阶段:裂缝深度不变,钢筋应力快速增加阶段。随着荷载的继续增加,裂缝深度不变,维持在22.5 cm左右,钢筋应力快速增加(见图12),随后左拱腰内侧、左拱脚内侧相继出现受压屈服,左拱腰外侧钢筋受拉屈服。

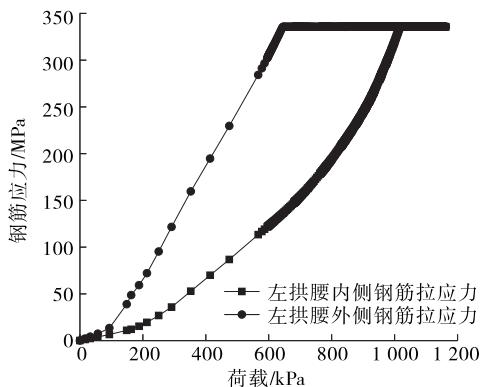


图12 荷载与钢筋应力关系曲线

第Ⅳ阶段:裂缝张开,结构破坏阶段。随着荷载的增加,左拱腰裂缝逐渐张开,呈V形状态,裂缝深度继续增加至30 cm,左拱腰外侧发生受拉破坏(见图13)。

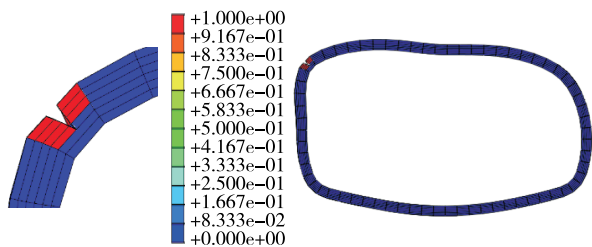


图13 结构破坏形态

5 结论

本文依托白阳山隧道病害特征建立三维扩展有限元模型,分析松动荷载作用下左拱腰空洞结构的受力变形规律,结合结构应力特征分析隧道结构的破坏过程与破坏形态、裂缝扩展特征与结构损伤演化规律。结论如下:1) 松动荷载作用下,左拱腰空洞结构整体表现为“拱顶内侧受拉、左拱腰外侧受拉开裂、右拱腰外侧受拉”的受力形态,“拱顶下沉、左拱腰向外扩张”的变形形态,且左拱腰外侧由于空洞的存在,结构应力集中,空洞部位外扩显著。2) 隧道结构损伤分为弹性受力、左拱腰外侧开裂、左拱腰外侧开裂—内侧压屈、左拱腰内侧压屈—破坏4个阶段。

本文分析左拱腰空洞条件下隧道结构损伤演化

机制,未考虑隧道空洞位置和范围对隧道结构的影响,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 缙小东,高翔,关振长.壁后空洞对衬砌结构力学性能影响的试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):117-125.
- [2] 王述红,王鹏宇,刘宇,等.不同位置空洞条件下隧道的破坏模式试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(6):863-869.
- [3] 黄锋,刘星辰,金成昊,等.衬砌背后空洞对隧道结构安全影响的模型试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(3):69-77.
- [4] 谭林波.衬砌背后空洞对隧道结构的影响分析及综合评价方法[J].特种结构,2021,38(1):11-14.
- [5] 王培荔.拱部空洞条件下衬砌裂损规律研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(5):251-253.
- [6] 张素磊,齐晓强,刘昌,等.公路隧道衬砌背后空洞分布特征及其对衬砌结构的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):62-70.
- [7] 程升亮,钟明键,赵东游,等.二衬背后空洞对衬砌结构影响的数值模拟研究[J].公路,2019,64(3):331-336.
- [8] 丁睿,刘伯成,莫振泽,等.围岩空洞分布对隧道衬砌结构力学性能影响研究[J].南京工程学院学报(自然科学版),2019,17(2):25-28.
- [9] 王薇,高棱韬,张恒文,等.砌石衬砌背后双空洞对隧道结构安全性影响[J].公路交通科技,2018,35(5):82-90.
- [10] 宋磊.衬砌背后空洞对既有隧道受力影响研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):134-137+156.
- [11] 覃晖,唐玉,谢雄耀,等.基于支持向量机的隧道衬砌空洞机器识别方法[J].现代隧道技术,2020,57(2):13-19.
- [12] 杨公标,张成平,蔡义,等.考虑重力影响的含空洞地层浅埋隧道围岩应力及位移解析解[J].中国公路学报,2020,33(3):119-131.
- [13] 赵文强.拱顶空洞对浅埋暗挖隧道的影响及其防治[J].铁道工程学报,2020,37(2):63-68.
- [14] 闫高明,申玉生,信春雷,等.衬砌背后空洞对隧道地震响应影响的振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(12):2491-2501.
- [15] 郭新新,汪波,王振宇,等.爆破施工对既有裂缝、空洞隧道的动力影响[J].地下空间与工程学报,2021,17(2):590-600.

收稿日期:2022-02-19