

衬砌背后空洞对浅埋隧道结构稳定性的影响

耿璐莹^{1,2}, 臧万军^{1,2}, 张丙强^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用 Abaqus 有限元软件进行三维弹塑性模拟分析, 研究不同大小、不同位置的空洞对浅埋隧道衬砌结构变形、应力、安全系数以及围岩应力、压力的影响。结果表明: 无论空洞在什么位置, 围岩最大主应力一般随空洞增大而增大, 最大变化幅度为 69.1%; 围岩压力的变化主要集中在空洞及周围, 最大变化率可达 90%, 其他控制点处变化率不超 1.5%; 衬砌位移均随空洞增大而增大, 其变化幅度由大到小依次为“ $X>Y>Z$ ”; 衬砌最大主应力一般随空洞增大先减小后增大, 变化幅度最大可达 57.8%; 衬砌安全系数随空洞增大而减小, 拱脚处空洞出现最小值 2.9。

关键词: 空洞; 隧道; 稳定性; 衬砌

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)06-0511-06

Effect of voids behind lining on structural stability of shallow buried tunnels

GENG Luying^{1,2}, ZANG Wanjun^{1,2}, ZHANG Bingqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Three-dimensional elastoplastic simulation analyses were conducted using Abaqus finite element software to investigate the effects of voids of different sizes and positions on the deformation, stress distribution, safety factor, as well as the stress and pressure in the surrounding rock for shallow-buried tunnel lining structures. Results indicate that, irrespective of the void's location, the maximum principal stress in the surrounding rock generally increases with increasing void size, with a maximum variation of 69.1%. Pressure variations in the surrounding rock are primarily concentrated around the void and its vicinity, with a maximum variation rate of up to 90%, while at other control points, the variation rate does not exceed 1.5%. Lining displacements increase with the increase of voids, with the change magnitude in the order of “ $X>Y>Z$ ”. The maximum principal stress in the lining structure typically decreases and then increases with increasing void size, with a maximum variation of 57.8%. The safety factor of the lining decreases with increasing void size, reaching a minimum value of 2.9 at the void near the arch foot.

Keywords: voids; tunnels; stability; lining

由于地质条件复杂多样、隧道施工不规范, 以及隧道管理及养护不当, 衬砌背后常存在空洞。空洞会引起围岩应力集中, 从而严重影响隧道结构的使用安全, 加速其他病害发展, 如衬砌开裂等^[1]。针对隧道衬砌背后空洞的危害研究主要

分为理论分析、数值分析、模型实验及在以上基础上综合分析评价等。应国刚^[2]通过理论分析得出空洞存在时围岩压力荷载, 并对衬砌结构模型进行修正, 进而对修正后结构模型的有效性进行验证; 杨公标等^[3]建立含空洞底层浅埋圆形隧道

收稿日期: 2023-07-15

第一作者简介: 耿璐莹(2000—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 研究方向: 地下结构施工力学。

通信作者: 臧万军(1975—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士, 研究方向: 地下结构施工力学。

围岩应力和位移解析解模型,分析了应力释放系数、空洞位置及尺寸对地层应力和变形的影响规律;李思等^[4]通过 FLAC^{3D}有限差分软件,针对浅埋隧道偏压角度对背后空洞衬砌安全性的影响进行研究;张素磊等^[5]建立二维和三维有限元模型分析衬砌背后空洞条件下衬砌受力性能和安全性变化规律;He 等^[6]通过缩尺模型实验研究了公路隧道衬砌结构拱部不同角度单空洞的破坏模式;葛思敏等^[7]通过模型实验和扩展有限元法,研究空洞影响下不对称连拱隧道结构破坏演化规律。

以上学者采用不同方法对衬砌后空洞的危害展开探讨,本文则基于 Abaqus 有限元软件,建立三维隧道模型,研究不同大小及位置的空洞缺陷对浅埋隧道围岩及初期支护结构受力的影响,为隧道安全评估提供理论支持。

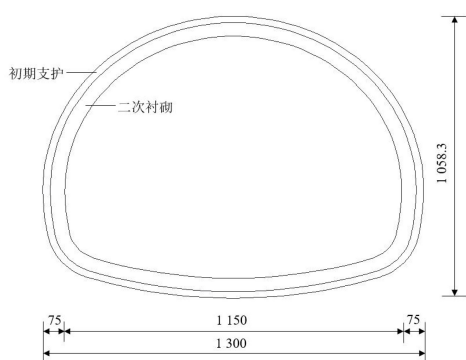
1 隧道工程概况

东南沿海地区某浅埋双线山岭隧道全长 1 022 m,跨度 13 m,洞口高度 10.083 m;根据地质勘察资料可知,隧道所在地区属于构造侵蚀低山地貌区,地形起伏变化较大,上部为第四系残坡积层,下伏基岩为二叠系文笔山组(plw)粉砂岩及风化层,石炭系林地组(cil)粉砂岩及风化层,局部发育林地组石英砂岩及风化层,隧道洞身围岩级别以 V 级为主。隧道衬砌出现滴水、开裂和掉块等可观测病害,经现场检测发现,隧道拱顶至拱底均出现不同程度的脱空及不密实等现象,脱空最大高度可达 1 m,因此,衬砌背后空洞是研究的重中之重。

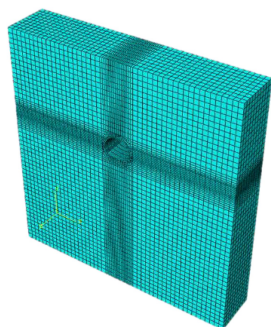
2 隧道计算模型

2.1 几何模型

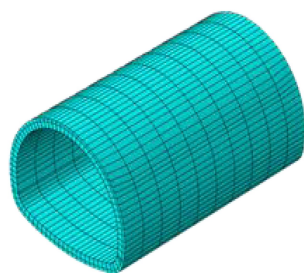
建立含空洞的隧道三维数值模型,采用地层-结构法分析衬砌背后空洞对隧道结构受力影响。空洞位置单元采用生死单元法,隧道模型如图 1 所示。图 1(a)为隧道轮廓图,跨度 1 300 cm,洞口高度 1 058.3 cm,初期支护厚度 25 cm,二次衬砌厚度 50 cm;图 1(b)(c)为隧道三维模型网格划分图,隧道开挖轮廓至左右边界各取 3 倍左右洞径,至下部边界取 5 倍左右洞径,因此模型横截面尺寸 100 m×100 m,纵向截取隧道长度 20 m,隧道埋深均 30 m。



(a)隧道轮廓图(单位: cm)



(b)隧道三维模型



(c)隧道支护结构模型

图 1 有限元分析模型

Fig.1 Finite element analysis model

2.2 材料参数确定

模型的约束条件:在水平方向边界和模型底部分别施加水平及竖向位移约束,模型顶部为自由面,整体受围岩自重应力的影响。浅埋隧道,初始应力为上覆岩土层的自重应力,并进行初始条件下的地应力平衡。

隧道围岩及支护结构为均质弹塑性材料,采用摩尔库伦屈服准则,相关参数根据隧道工程地质勘察报告确定,见表 1。初期支护中刚拱架模拟采用等效的方法,将其强度整合计算到喷射混凝土中综合考虑,具体计算公式为:

$$E = E_0 + \frac{E_g A_g}{A_c} \quad (1)$$

式中: E 为折算后的喷混弹性模量,MPa; E_0 为原喷混弹性模量,MPa; E_g 为刚拱架弹性模量,MPa; A_g 为刚拱架截面积,mm²; A_c 为喷混截面积,mm²。

2.3 工况设置

浅埋隧道拱顶是最容易产生空洞的部位,其次是拱腰和拱脚。将空洞形状取为环绕衬砌结构的半圆形,并且保持空洞径向(轴向)深度与空洞半径相同。为研究衬砌后不同位置及大小空洞对

浅埋隧道围岩及初期支护结构稳定性影响,设置 13 种工况,如表 2、图 2 所示。

表 1 隧道围岩及支护结构材料基本物理力学参数
Tab.1 Basic physical and mechanical parameters of tunnel surrounding rock and supporting structure materials

项目	弹性模量/MPa	容重/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
围岩	2 000	21	0.4	30	0.31
初衬	23 000	23	2.0	20	0.30
二衬	31 000	24	3.0	60	0.25

表 2 工况设置
Tab.2 Operation setting

工况编号	空洞位置	空洞半径/m
0-0	无	—
1-1	拱顶	0.25
1-2		0.5
1-3		0.75
1-4		1
2-1	拱腰	0.25
2-2		0.5
2-3		0.75
2-4		1
3-1	拱脚	0.25
3-2		0.5
3-3		0.75
3-4		1

2.4 模型验证

由于黄锋等^[8]所开展的模型试验与本文所选取的三维模型隧道断面形状及衬砌背后空洞形状等相同,故选取试验所涉及的物理力学参数,验证本数值模型和边界条件等的正确性。分别提取围岩不同部位的应力值进行对比,如图 3 所示,图 3(a)为无空洞时,围岩不同部位的应力值,图 3(b)为右拱腰处存在空洞时,围岩不同部位的应力值。通过对比可看出,数值模拟与模型试验围岩应力分布情况相似度较高,最大值位于拱脚处,最小值位于仰拱处,空洞的存在使得围岩应力增

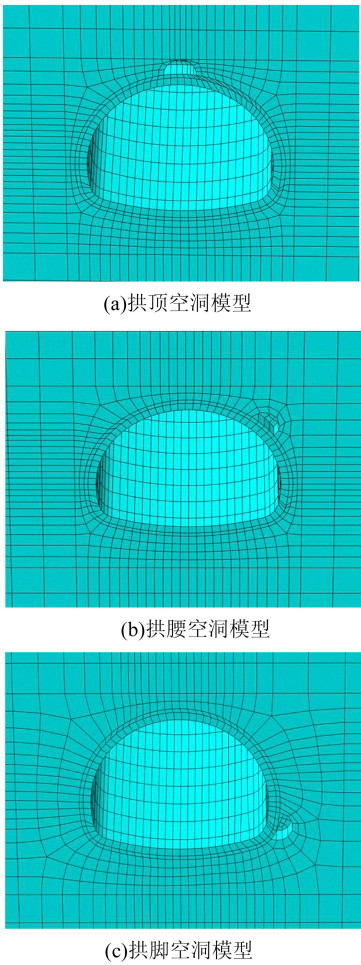


图 2 不同位置空洞示意图

Fig.2 Schematic diagram of voids at different locations
大;两者结果虽有一定的偏差,但变化规律有较好吻合度。因此,该研究具有可行性。

3 计算结果分析

3.1 空洞对围岩应力的影响

隧道衬砌后出现空洞时,围岩最大主应力变化及出现位置如图 4 所示。围岩最大主应力基本位于空洞处,围岩应力与隧道垂直中心线呈对称分布,且最大主应力以压应力为主。可以看出,拱脚处空洞对围岩应力影响最大,呈波浪式变化,最大变化幅度可达 69.1%,其次为拱腰、拱顶处,均随空洞增大而增大,且增幅平缓。当空洞半径为 0.25 m 时,拱腰及拱顶处空洞的围岩最大主应力均出现在仰拱处,为 0.074 MPa;随着空洞增大,拱腰处空洞围岩最大主应力增长幅度较大,平均增幅为 36.3%;拱顶处空洞围岩最大主应力前期增幅较小,为 10%左右,随后增幅上涨,最大增幅

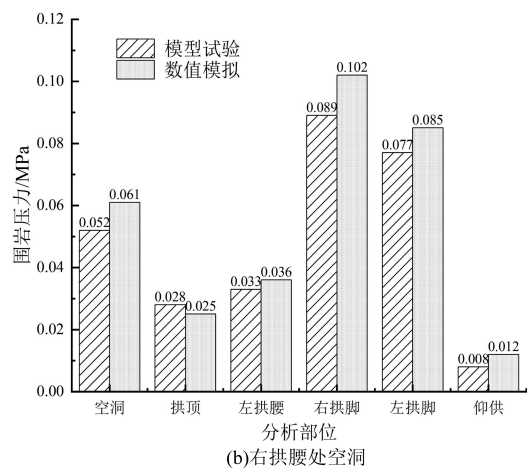
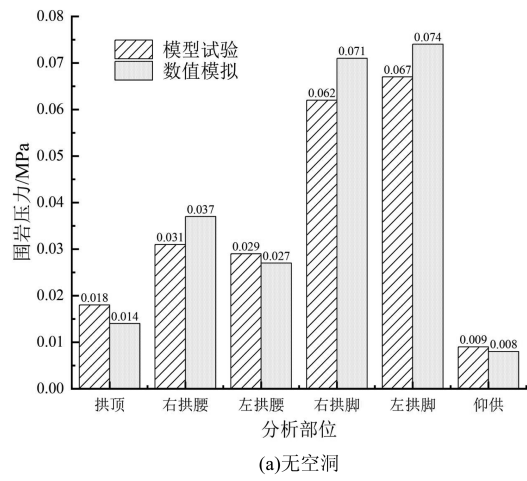


图 3 围岩压力对比图

Fig.3 Comparison chart of surrounding rock pressure

围岩最大主应力随空洞的增大,变化幅度较大的原因:空洞周围围岩承受拱脚衬砌施加的约束力,空洞形成初期,围岩开始弹性调整,使约束力减小,围岩应力向空洞周围移动,导致围岩主应力减小;随着空洞继续扩大,围岩进一步受到约束,主应力出现增大;但当空洞半径从 0.75 增大至 1 m 时,围岩受到的应力集中在空洞边缘附近,围岩可能出现裂缝甚至坍塌等现象,强度降低,同时衬砌和围岩间的接触应力重新分布,从而导致围岩的主应力再次减小;此外,围岩的主应力也可能受到周边地质构造和地应力的影响,导致围岩的主应力呈现复杂的变化趋势。

3.2 空洞对围岩压力的影响

在空洞及空洞右侧和上部各选取 1 个控制点,再选取除空洞外的另外 3 个控制点,当拱顶空洞时选取拱腰、拱脚及仰供;当拱腰空洞时选取拱

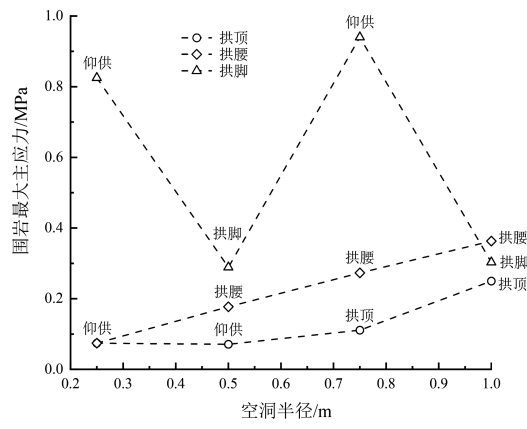


图 4 围岩最大主应力变化图

Fig.4 Graph of maximum principal stress variation in surrounding rock

顶、拱脚及仰供;当拱脚空洞时选取拱顶、拱腰及仰供,以对比空洞大小对围岩压力的影响。图 5 为围岩不同部位压力变化图,可以看出,围岩压力变化主要集中在空洞及空洞周围,最大变化幅度可达 90%,而其他控制点围岩压力变化较小,不超过 1.5%;相比于拱顶及仰拱处,拱腰及拱脚处围岩压力变化较明显,当空洞半径大于 0.5 m 时,增长幅度较大。

围岩空洞处出现压力卸载,且随空洞的增大围岩压力变化大体呈增大趋势。从压力变化浮动幅度来看,从大到小依次为“空洞>空洞上侧>空洞右侧”,可能是由于空洞内部的约束较小,围岩应力分布不稳定,导致压力变化浮动幅度较大;而空洞上侧受到较大的约束,围岩应力分布相对稳定,浮动幅度较小;空洞右侧可能存在应力传递差异,使得压力变化浮动幅度较小。

空洞内部围岩压力变化百分比为负值即围岩压力减小,相反空洞上侧及右侧围岩压力变化百分比为正值即围岩压力增大。这是由于隧道衬砌施工对围岩施加约束力,形成三次应力场,空洞形成后约束力部分释放,导致空洞内部压力减小;隧道衬砌改变了围岩应力的分布状态,当空洞形成后,周围围岩的应力重新调整,部分应力向空洞周围转移,导致空洞周围压力增大;应力通过围岩的传递达到再平衡,在空洞内部,由于没有围岩约束,应力传递的路径中断,导致空洞内部压力减小,而在空洞周围,应力能够通过围岩传递和分布,导致空洞周围压力增大。

3.3 空洞对衬砌变形的影响

当隧道衬砌后有空洞时,衬砌 X、Y 和 Z 方

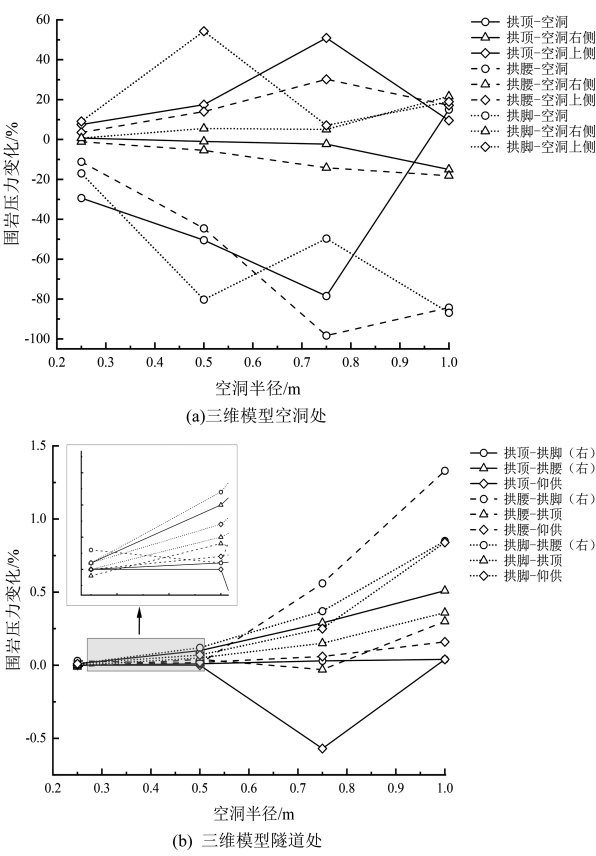


图 5 围岩压力变化图

Fig.5 Graph of pressure variation in surrounding rock

向(横向、纵向和轴向)的位移如图 6 所示。隧道衬砌位移变化不大, X 、 Y 和 Z 方向最大位移均随空洞增大而增大,但增幅很小,可能由于刚性约束减小、围岩应力重分布、岩体变形和失稳以及弯曲和挠曲效应等因素综合作用导致,这些因素使得衬砌位移在空洞附近的区域受到的影响更大。

随空洞的增大, X 和 Y 方向衬砌位移变化较为明显,而 Z 方向衬砌位移变化较小。通常情况下,地层对衬砌的约束在横向和纵向(横断面平面)上较大,而在轴向(纵断面方向)上较小;当空洞形成后,地层对衬砌的约束作用会发生变化,在横向和纵向上,地层约束力的减少会导致衬砌在这两个方向上的位移较大,而在轴向上,地层约束力的变化相对较小,因此衬砌在轴向上的位移变化较小。从 X 和 Y 方向衬砌位移变化可以看出,拱脚处空洞 X 方向衬砌变形较为显著,增长幅度大约为 80%;拱腰及拱脚处空洞 Y 方向衬砌变形相比于 X 方向较大,最大值分别相差 41.7%及 83.3%。

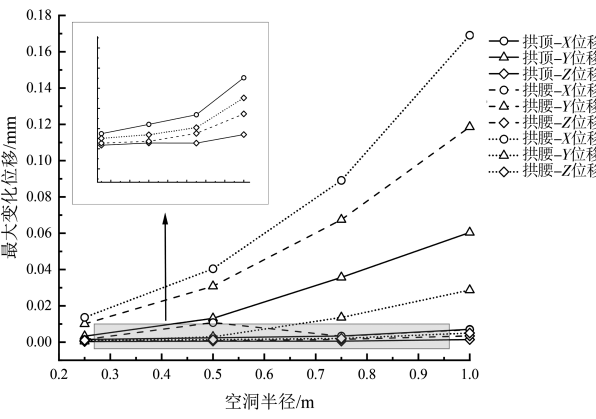


图 6 衬砌最大位移走势图

Fig.6 Graph of maximum displacement trend in lining

3.4 空洞对衬砌应力的影响

隧道衬砌后出现空洞时,衬砌最大主应力变化及出现位置如图 7 所示。衬砌最大主应力以压应力为主,最大值出现的位置大体在空洞出现的位置,但当空洞在拱腰处时,衬砌最大主应力多集中在拱脚处,可能是由于拱脚处是衬砌与围岩接触的主要区域,应力集中;同时,拱脚处地层的约束相对较大,导致衬砌受到较大的主应力作用。从图中可以看出,拱脚处空洞对衬砌最大主应力影响较大,最大值可达 2.72 MPa;其次为拱顶及拱腰处空洞,衬砌最大主应力均值分别为 1.37 和 1.07 MPa。随着空洞半径增大,衬砌最大主应力出现先减小后增大的趋势,以空洞半径 0.75 m 为界,当空洞半径小于 0.75 m 时,衬砌最大主应力随空洞增大而减小,当空洞位于拱脚时,变化最为显著,可达 57.8%,当空洞位于拱顶及拱腰时,减小幅度较平缓大约为 30%;当空洞半径大于 0.75 m 时,衬砌最大主应力随空洞增大出现增大的趋势,通过对比拱脚及拱腰处空洞,衬砌最大主应力增幅较缓,为 5%左右,当空洞位于拱顶处时,增幅较大,可达 54.7%。

当空洞半径为 0.75 m 时,衬砌最大主应力均为最小值,随着空洞的形成,衬砌对围岩的刚性约束减小,在空洞初始阶段,由于刚性约束减小,衬砌受到的主应力较小;同时,最初周围围岩向空洞区域传递一部分应力,衬砌受力减小导致衬砌最大主应力呈减小趋势,但空洞的形成会引起周围围岩的变形;随着空洞的扩大,围岩的变形程度逐渐加剧,导致衬砌受到更大的主应力作用。

3.5 空洞对衬砌安全系数的影响

针对不同工况,分别对衬砌结构拱顶、拱腰及

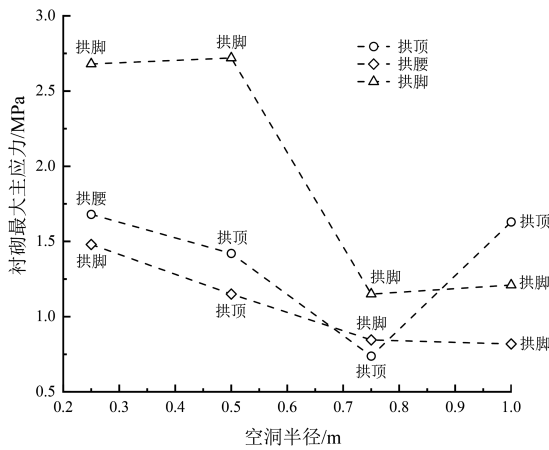


图 7 衬砌最大主应力变化图

Fig.7 Graph of maximum principal stress variation in lining

拱脚处安全系数进行计算并对比。JTG 3370.1-2018《公路隧道设计规范》^[9]给出两种混凝土矩形截面轴心及偏压构建的安全系数计算公式。当初偏心距 $e_0 = M/N \leq 0.2h$ 时,安全性系数 K 按式(2)计算:

$$K = \frac{\varphi \alpha R_a b h}{N} \quad (2)$$

当初偏心距 $e_0 = M/N > 0.2h$ 时,安全性系数 K 按式(3)计算:

$$K = \varphi \frac{1.75 R_l b h}{\frac{6M}{h} - N} \quad (3)$$

式中: N 为衬砌轴向力, kN; φ 为纵向弯曲系数, 对于隧道衬砌取 $\varphi = 1$; R_a 为混凝土抗压极限强度, MPa; R_l 为混凝土抗拉极限强度, MPa; α 为轴向力的偏心影响系数, 由经验公式 $\alpha = 1 - 1.5e/h$ 来确定; b 为截面宽度, $b = 1$ m; h 为截面厚度, m。

图 8 为不同工况下衬砌结构不同位置处安全系数变化趋势图, 可以看出, 衬砌结构安全系数均随空洞半径增大而减小, 当空洞半径从 0.75 m 增至 1 m, 安全系数下降较明显, 最大变化率可达 30% 左右; 此外, 当空洞半径不变时, 安全系数最小值出现在空洞所在位置处; 当空洞位于拱脚处时, 衬砌结构安全系数普遍较低, 且拱脚处出现最小值 2.9, 所以拱脚处空洞对隧道结构安全性影响最大。

查规范可知, 隧道衬砌结构强度安全系数为

2.0。经计算可得衬砌结构安全系数最小值为 2.9, 大于 2.0, 满足规范要求, 但从变化趋势可以看出, 随着空洞半径增大, 安全系数不断减小, 因此, 当空洞继续增大将会对隧道结构整体的安全性产生影响。

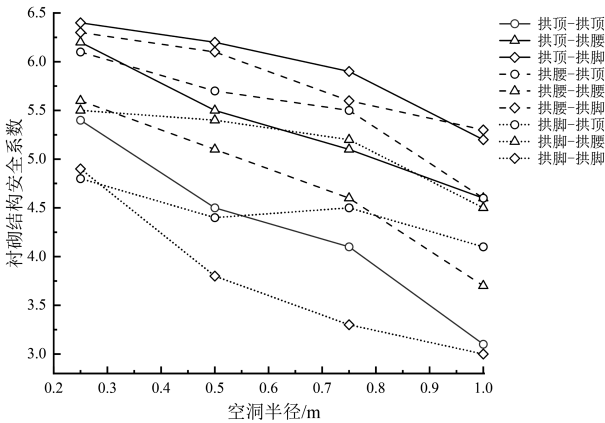


图 8 衬砌结构安全系数变化图

Fig.8 Graph of safety factor variation in lining structure

4 结论

1) 衬砌后空洞对围岩应力影响: 对于拱顶、拱腰及拱脚处空洞, 围岩最大主应力(压应力为主)的最大值一般随空洞增大而增大, 最大值出现的位置主要在空洞出现的位置; 但拱脚处空洞, 围岩最大主应力随空洞的增大呈波浪式变化, 最大变化幅度为 69.1%。

2) 衬砌后空洞对围岩压力影响: 对于拱顶、拱腰及拱脚处空洞, 围岩压力的变化主要集中在空洞及空洞周围, 最大变化率可达 90%; 而其他控制点处围岩压力变化较小, 相比于拱顶及仰拱处, 拱腰及拱脚处围岩压力变化较为明显, 但变化幅度不超 1.5%; 围岩空洞处出现压力卸载, 且随空洞的增大围岩各控制点压力变化值大体呈增大趋势。

3) 衬砌后空洞对衬砌变形影响: 对于拱顶、拱腰及拱脚处空洞, 衬砌 X 、 Y 、 Z 方向最大横向、纵向、轴向位移随空洞增大逐渐增大, 其变化幅度由大到小依次为“ $X > Y > Z$ ”。

4) 衬砌后空洞对衬砌应力影响: 对于拱顶、拱腰及拱脚处空洞, 衬砌最大主应力(压应力为主)的最大值一般随空洞增大先减小后增大, 最

(下转第 550 页)

- [2] 王玉新,祝毓琥,石则昌. 全折叠式六瓦轮胎成型鼓优化设计[J]. 天津大学学报,1990,23(1):57-67.
- [3] 孙树嵩,吴玩汉,吴声峰,等. 一种旋转式径向伸缩工程胎成型鼓;CN211165426U[P]. 2020-08-04.
- [4] 邓双丰. 具有间隙补偿功能的子午线轮胎成型鼓研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [5] 吴贤开,吴贤标,张首冠,等. 新型轴向伸缩式汽车轮胎成型模结构设计[J]. 模具工业,2021,47(6):56-58.
- [6] 时文欣,高浩,罗高翔,等. 空间伸缩式轮胎成型鼓的设计及分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2023,44(2):89-95.
- [7] 李彦海. 轮胎成型鼓的动力学分析[J]. 中国科技纵横,2014(16):45-46.
- [8] 李小满,王一辉,王伟,等. 地铁车辆牵引电机定子模态分析与试验验证[J]. 电力机车与城轨车辆,2023,46(3):38-42.
- [9] FRIIS T,TARPØ M,KATSANOS E I,et al. Best linear approximation of nonlinear and nonstationary systems using Operational Modal Analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2021,152:107395.
- [10] 郭宗和,王克杰,亓洪亮. 一类变拓扑并联机构轮胎成型鼓研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(11):1429-1434.
- [11] 谢柯强,李阁强,彭建军,等. 双圆弧斜齿齿轮泵转子系统模态分析[J]. 机械设计与制造,2022(11):158-163.

(责任编辑:方素华)

(上接第 516 页)

大值出现的位置大体在空洞出现的位置,但拱腰处空洞衬砌最大主应力出现在拱脚;当空洞半径为 0.75 m 时,衬砌最大主应力均最小,且变化幅度最大可达 57.8%。

5) 衬砌后空洞对衬砌安全系数影响:对于拱

顶、拱腰及拱脚处空洞,衬砌结构安全系数随空洞半径增大而减小;安全系数最小值出现在空洞所在位置处;拱脚处空洞对隧道结构安全性影响最大且出现最小值 2.9,即使满足规范要求,但仍存在较大安全隐患,应予以重视。

参考文献:

- [1] 乐绍林,杨曦,曹华彰,等. 衬砌空洞影响下公路隧道衬砌力学行为研究[J/OL]. 施工技术(中英文). <http://kns.cnki.net/kcms2/detail/10.1768.TU.20230529.1315.006.html>.
- [2] 应国刚. 衬砌背后空洞对隧道结构体系安全性的影响机理研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [3] 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.
- [4] 李思,卢锋,史锴然. 浅埋隧道偏压角度对背后空洞衬砌安全性的影响研究[J]. 公路,2019,64(3):310-314.
- [5] 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.
- [6] HE B G,LIU E R,ZHANG Z Q,et al. Failure modes of highway tunnel with voids behind the lining roof[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,117:104147.
- [7] 葛思敏,张旭. 衬砌背后空洞对不对称连拱隧道结构安全性影响分析[J]. 现代隧道技术,2022,59(S1):90-99.
- [8] 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.
- [9] 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.

(责任编辑:陈雯)