

黄土盾构隧道背后空洞对管片受力和变形特性影响研究

赵 钦¹, 赵 亮¹, 邓国华^{2,3}, 亢佳伟¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;

3. 西安黄土地下工程技术咨询有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要: 针对黄土地区盾构隧道背后空洞会对管片的受力和结构变形造成不利影响而危害地铁的运营安全问题, 本文结合某典型黄土盾构隧道背后空洞扫描和病害调查结果, 并基于传统荷载-结构法, 提出模拟空洞的方法, 分析背后空洞对结构受力和变形的影响。研究表明: 拱肩空洞与无空洞工况相比, 结构上的弯矩和径向变形量增长 6%, 拱腰空洞与无空洞工况相比结构上的弯矩最大增长了 56%, 径向变形量最大增长 46%, 拱肩、拱腰空洞对于轴力的影响稳定在 10% 以内。当空洞位于拱腰时, 伴随着空洞范围的不断扩大, 结构上的弯矩最大增长 69%, 径向变形量最大增长 64%, 结构轴力的变化幅度在 15% 左右。拱腰空洞对结构受力、变形的影响远大于拱肩空洞。空洞位置、范围大小对结构轴力的影响程度较小。土体浸水软化后, 增加了空洞对结构受力和变形的不利影响, 弯矩最大增长 90% 以上, 结构径向变形量最大增长了 65%。

关键词: 盾构隧道; 黄土; 浸水软化; 空洞; 内力; 荷载-结构法

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)03-0001-09

Effects of Behind-liner Cavities in Loess Shield Tunnels on Segment Stress and Deformation Characteristics

ZHAO Qin¹, ZHAO Liang¹, DENG Guohua^{2,3}, KANG Jiawei¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. Xi'an Loess Underground Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: The presence of cavities behind the segments of a shield tunnel affects the stress distribution and structural deformation of the segments, thereby jeopardizing the safety of metro operations. In loess regions, when the surrounding loess becomes saturated and undergoes softening, it further exacerbates the adverse effects of the cavities on the structure. To this end, this work combines the results of scanning and damage investigation of a typical Loess shield tunnel with cavities behind the tunnel lining. Based on the traditional load-structure method, a simulation approach for the cavity and analyzes its impact on structural stress and deformation was proposed. The research results are as follow. To the no-cavity condition, the bending moment and radial deformation for the arch shoulder cavity increase by approximately 6%. For the arch waist cavity, the maximum increase in bending moment is 56%, and the radial deformation increases by 46%. The impact of cavities in both the arch shoulder and arch waist on axial force remains within 10%. When the cavity is located in the arch waist and its size continuously expands, the maximum increase in bending moment is 69%, and the radial deformation increases by 64%. The change in axial force remains around 15%. Comparatively, the impact of the arch waist cavity on structural stress and deformation is greater than that of the arch shoulder

收稿日期: 2025-02-20

修稿日期: 2025-03-18

基金项目: 国家重点自然科学基金(U2368203); 国家自然科学基金(52178355)

作者简介: 赵 钦(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事结构工程方面研究工作。E-mail: zhaoqin6688@xaut.edu.cn

通讯作者: 邓国华(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事黄土力学与城市轨道交通工程方面研究工作。E-mail: gh_deng@163.com

cavity. The location and size of the cavity have a relatively minor effect on axial force. After the surrounding loess becomes saturated and undergoes softening, the adverse effects of the cavities on structural stress and deformation increase significantly. The maximum increase in bending moment exceeds 90%, and the maximum increase in radial deformation reaches 65%.

Keywords: shield tunnel; loess; wetting softening; cavity; internal force; loading-structure method

近几年,全国多个城市的盾构隧道产生了病害,不得不展开加固处理。而空洞作为盾构隧道工程中最常见的病害诱因之一,其形成原因可归结为施工工艺不规范、泵送压力不足或回填注浆料收缩等。空洞的形成,会导致管片与围岩之间原本密实接触的部位产生新的空间,从而使得围岩无法为管片提供抗力,严重影响到管片与围岩之间的相互作用。存在背后空洞的盾构隧道结构,往往极易破损,并引发渗漏水、纵向贯通裂缝及椭圆等一系列影响结构运营安全的病害。

当前,由于研究问题的复杂性,大多数研究者均采用数值模拟的方法,讨论空洞产生后对盾构隧道受力和变形特征的影响。赖金星等^[1]通过结构模型讨论了空洞位置、范围变化对隧道结构所产生的影响,研究表明,当空洞位置位于拱腰两侧时,对结构各方面产生的影响最大,且伴随着空洞向拱顶移动影响逐步减小。石钰峰等^[2]通过建立精细化数值仿真模型,研究了不同空洞深度、位置等多种情况,对管片内力、变形方面产生的影响,研究表明,不同空洞位置对结构所造成的不利影响,按影响程度大小进行排序,其次序分别为:隧腰>隧底>隧顶。而在同一面积下的空洞,伴随着空洞深度的增加,会造成结构上的弯矩呈现出先增大后减小的变化趋势。郑艾辰等^[3]通过模型试验和数值模拟,探究了不同空洞数量、位置对结构产生的影响,研究表明,空洞位于左右拱腰时,对结构的受力更加不利且安全系数下降的更多;同时伴随着空洞数量的增加,结构的受力越不利、安全性越低。

目前的研究表明^[4-6],空洞的存在对结构的内力产生了较大的影响,且不同空洞位置、范围对结构的影响机理不同。但这些方法受边界条件、本构模型和参数设置的影响,很难与设计状态形成对比,从而在工程上只能参考使用^[7-15]。本文拟选用盾构隧道常规设计所采用的荷载-结构法,基于现场探测结果提出分析方法,研究空洞对盾构隧道内力和变形的影响,并对于西北地区的黄土盾构隧道,土体浸水软化后侧向抗力进行分析,首先研究黄土地层在未浸水状态下,空洞在隧道结构不同部位(拱肩、

拱腰)及不同范围对结构造成的影响,然后再进一步分析,在浸水状态下空洞对结构所造成的影响,并将前后两者进行对比,以期为黄土地区盾构隧道设计、施工及运营提供参考。

1 工况模拟方法

1.1 黄土盾构隧道空洞分布特征

为获取黄土地区盾构隧道背后空洞的分布情况,采用 MALA 公司生产的 ProEx 型、X3M 型地质雷达(GPR)对某段区间隧道全线进行贯通探测,共计完成 11 322 m 测线,有效探测深度为 1.5 m~2.0 m。在隧道左右线内部,共布置拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙、左(右)拱肩布置 6 条测线,如图 1 所示。

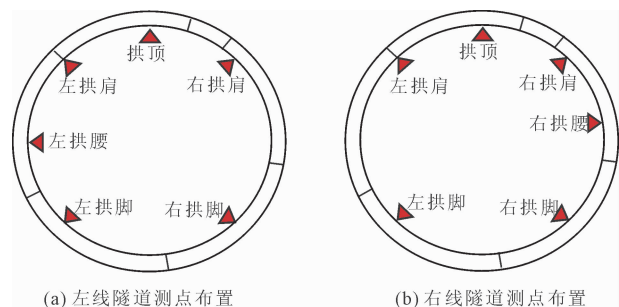


图 1 地质雷达扫描隧道测线布置示意图

为区分拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙、左(右)拱肩等特征位置,对线路沿线的空洞分布长度进行统计,如表 1 所示。

表 1 盾构隧道沿线空洞分布长度汇总表

项目	拱顶	拱肩		拱腰		拱脚	
		左侧	右侧	左侧	右侧	左侧	右侧
长度/m	0	40.5	9	0	12	16.5	24

探测结果表明:盾构管片背后空洞分布位置占比整体呈现出:拱腰>拱肩>拱脚的基本特征。隧道拱顶未探查到空洞分布,空洞主要集中在拱腰和拱肩位置,占到总空洞分布长度的 88% 以上。空洞分布如图 2 所示,其连续分布长度多在 3 m~6 m 以内,最大达到 9 m。

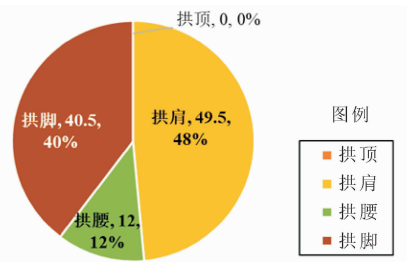


图 2 盾构隧道背后空洞分布

1.2 黄土盾构隧道不同浸水时长下土性参数分布特征

为模拟土体浸水软化后侧向抗力减弱,在与空洞的叠加作用下对隧道结构产生的影响,通过试坑浸水试验^[7],获取西安地区不同浸水时长下的黄土土性参数变化特征。试验场地位于月登阁村八号线中建一局项目驻地,见图 3,试坑设计深度 0.5 m;坑底铺设 10 cm 厚砾石。仪器布置:深标点沉降在试坑范围内,埋深深度 6.0 m、8.7 m、11.5 m、20.0 m;测斜管距坑边 0.5 m 布设,埋设深度 5 m、10 m、15 m;试坑内土压力计水平向埋设;试坑外土压力计垂直向埋设。

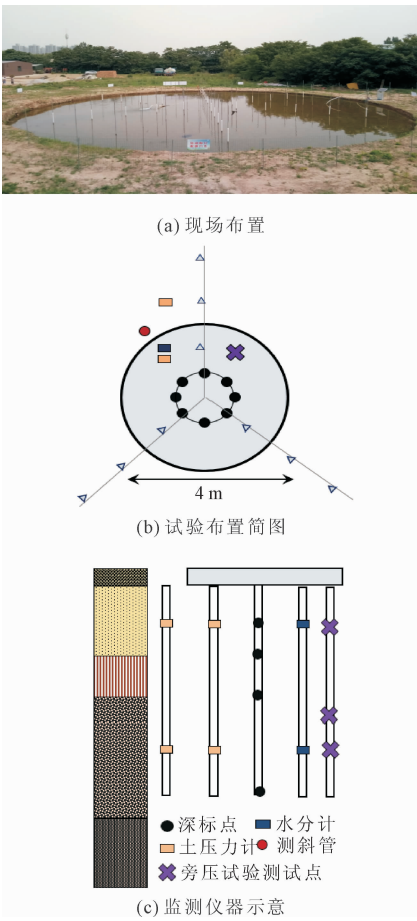


图 3 试验场地及监测仪器布置

在现场长期浸水软化试验阶段,共计进行 24 组原状土试样和 24 组重塑土试样。与此同时室内外强度试验进行了固结不排水剪切试验、饱和快剪试验、室内三轴基床系数试验、室内三轴侧压力系数试验等,最终得出在 10 m 埋深下黄土伴随着浸水时长的增加土体的侧压力系数分别增加 10%、20%、30%等,抗力系数分别衰减 10%、30%、70%等,具体见表 2。

表 2 不同浸水时长下土性参数变化

基床系数 /(MPa·m ⁻¹)	侧压力系数	重度/(kN·m ⁻³)	备注
50	0.35	17.5(非饱和黄土)	未浸水
40	0.40	18.5(饱和黄土)	浸水 60 d
30	0.45	18.5(饱和黄土)	浸水 120 d
20	0.50	18.5(饱和黄土)	浸水 250 d
10	0.55	18.5(饱和黄土)	……

1.3 分析方法与工况

为合理模拟空洞和隧道结构的相互作用,在荷载-结构法计算模型中,采用地层弹簧缺失和外荷载缺失的方式模拟空洞,无弹簧及外荷载施加的位置和范围即空洞所在位置;同时将空洞所在位置上的抗力取消,而土体重度,采用荷载等效传递至结构上其余部位共同承担。以拱肩空洞模拟为例,如图 4 所示。

在计算中,以隧道埋深为 10 m,基床系数 40 MPa/m,侧压力系数 0.3,土体重度 17.5 kN/m³(非饱和黄土)作为基础工况。管片混凝土材料为 0.8C50,弹性模量为 27.6 GPa,泊松比取 0.2,暂不考虑地面超载。分析时引入拱顶、拱腰两个特征点位和四个参考指标:最大弯矩、轴力、拱顶下沉量、拱腰挤出量来进行研究。

在研究过程中,首先分别计算空洞分布位置和范围大小及对隧道径向收敛变形发展形态和内力变化的影响。主要设计两种空洞分布位置(拱肩、拱腰)和 5 个空洞分布范围(15°~30°、15°~45°)和(45°~60°、45°~75°、45°~90°),如图 5 所示。对于空洞位置和范围大小变化,对结构所产生的影响都在基础工况设置下展开。在讨论了未浸水状态下不同空洞位置和范围大小对隧道结构受力、变形所产生的不利影响后,进一步讨论在黄土浸水软化下空洞发生后,对结构受力、变形所产生的影响。

2 管片背后空洞对黄土隧道结构受力变形影响

2.1 空洞位置对黄土盾构隧道受力和变形的影响

假定非饱和黄土无空洞以及拱肩和拱腰位置处 30° 范围内分别出现空洞时,结构弯矩、轴力、变形的形态分布及量值变化如图 6、图 7、图 8 所示。

从图 6(a) 中可以看出,当盾构隧道上出现空洞时,结构整体的弯矩绝对值,相较于无空洞工况都有所增加。当空洞出现在拱腰位置时,隧道拱肩、拱腰部位的弯矩增长更加显著。此外,当盾构隧道上出现空洞时,相较于对弯矩的影响,空洞对轴力的影响幅度较小,见图 6(b)。

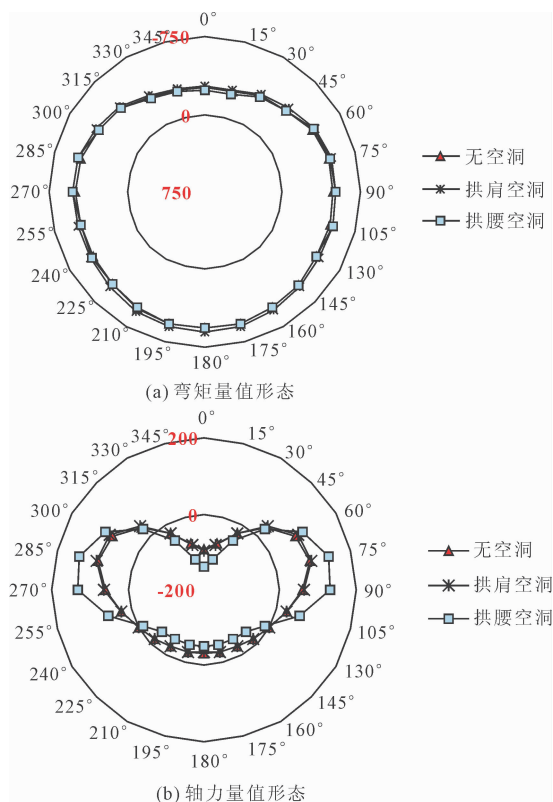
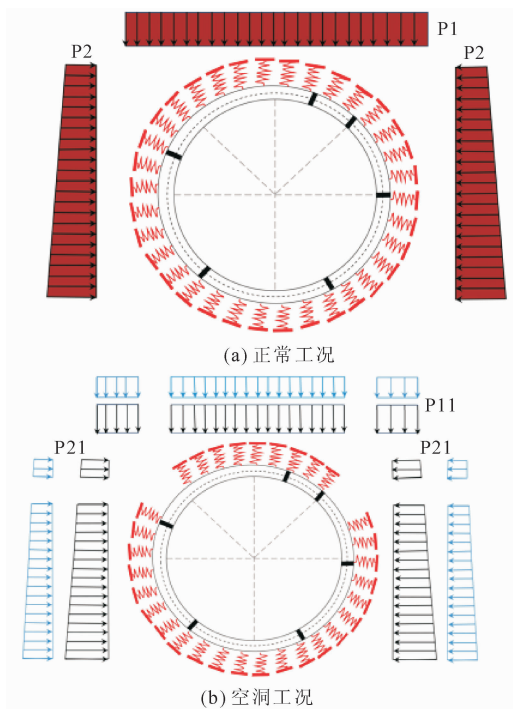


图 6 不同空洞位置对结构内力量值形态分布影响

进一步通过结合管片具体部位的內力量值变化可以看出,在管片背后无空洞、拱肩处有空洞、拱腰处有空洞三种工况下,拱顶特征点位处的弯矩绝对值分别为: $93.31 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $98.51 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $138.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与无空洞工况相比,弯矩增长比例分别为 6%、33%。拱腰特征点位处的弯矩绝对值分别为: $59.48 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $62.79 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、 $132.90 \text{ kN} \cdot \text{m}$,与无空洞工况相比,弯矩增长比例分别为 6%、56%。与此同时,结构拱顶处的轴力绝对值分别为: 252.53 kN 、



注:图中 P1、P2 表示正常工况下隧道周围的荷载模式,P11、P21 为空洞发生后隧道周围的荷载模式。在图(b)中,拱肩部位出现的荷载缺失和地层弹簧缺失,示意为该部位产生空洞。黑色荷载为隧道周围的土体压力;蓝色荷载为空洞产生后,分担至结构上共同承担的土体压力。

图 4 拱肩空洞模拟思路示意图

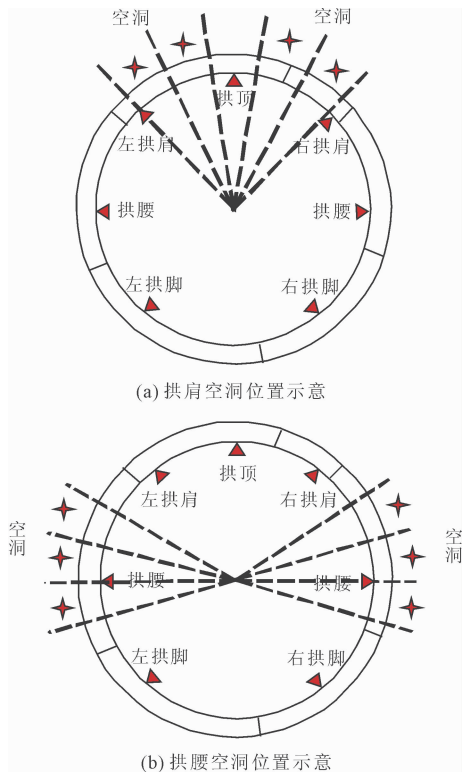


图 5 空洞分布位置及范围模拟示意图

267.14 kN、227.31 kN,拱腰处的轴力绝对值分别为:484.61 kN、511.82 kN、496.44 kN,与无空洞工况相比,结构拱顶、拱腰处的轴力变化基本维持在10%以内,见图7(b)。

结合上述分析可以看出,当管片背后出现空洞时,结构整体上的弯矩绝对值,相较于无空洞发生时都有所增加,弯矩的量值变化主要集中在拱肩和拱腰范围内。特别是当空洞出现在拱腰位置时,盾构隧道拱肩和拱腰部位的弯矩增长更加显著;而相较于对弯矩的影响,空洞对轴力的影响幅度较小。

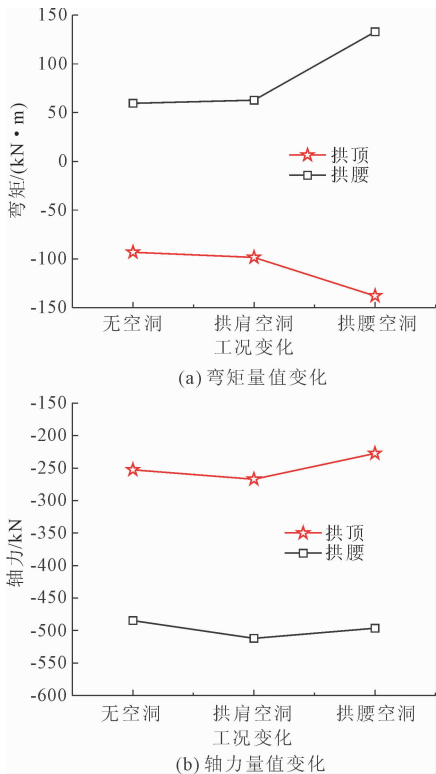


图 7 不同空洞位置对结构内力量值影响

同时结合计算结果不难发现,当空洞位于拱肩时,对于两个特征点位而言,与无空洞工况相比,弯矩的增长比例保持在10%以内。而当空洞位于拱腰时,对于两个特征点位而言,与无空洞工况相比,弯矩的增长比例保持在45%左右。

产生上述计算结果的原因在于,拱肩位置处空洞的出现,使得该位置的自重荷载和抗力均发生改变,自重荷载向两边转移,而抗力无法发挥,从而造成弯矩增加。而当拱腰位置出现空洞时,侧向抗力不能提供,侧向变形加大,从而引起弯矩的显著增加。而计算结果之间的差异是由于,当拱腰位置产生空洞时,结构的侧向支撑失效更为显著,从而加剧了弯矩的增长。同时,当拱腰位置处产生空洞后,结

构拱顶位置上的轴力有所降低,轴力的降低致使由六块管片拼装的隧道结构,整体性刚度降低,变形更易发展。

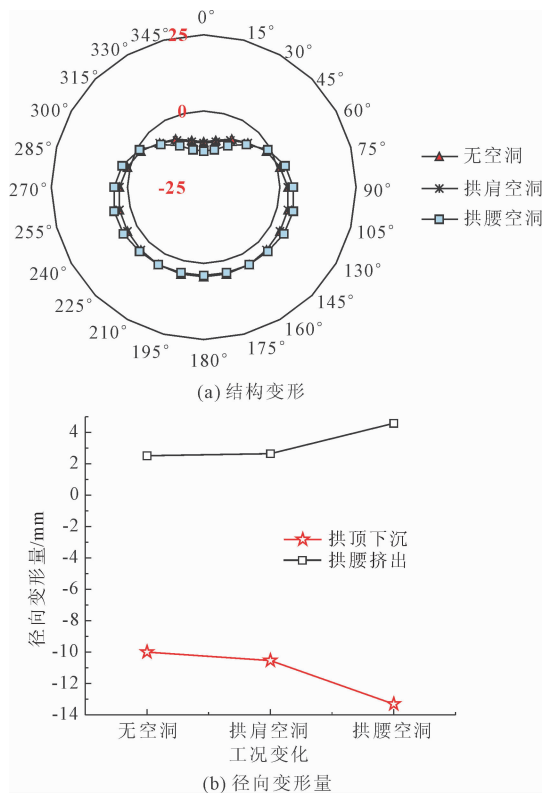


图 8 不同空洞位置对结构变形及径向变形量影响

继续对结构的整体形态变化进行关注,图8为无空洞和拱肩处有空洞、拱腰处有空洞时,盾构隧道结构的整体形态变化和两个特征点位的径向变形量曲线图。空洞的发生,导致结构变形增大,尤其是拱腰空洞,对结构变形的影响更大。三种工况下,隧道结构所展现出的整体结构变形较为接近,结构整体呈现出椭圆形变化,隧道拱顶均发生了下沉,下沉量分别为9.99 mm、10.53 mm和13.31 mm,与无空洞工况相比,变形增长比例分别为6%和25%。同时,结构拱腰处持续向外挤出,挤出量分别为2.51 mm、2.65 mm和4.57 mm,与无空洞工况相比,变形增长比例分别为6%和46%,见图8(b)。

2.2 空洞范围对黄土盾构隧道受力和变形的影响

空洞对结构所产生的影响除与所在位置有关外,还与其范围变化相关。结合2.1所展开的不同空洞位置对结构受力、变形所产生的影响和前期勘察结果,选取对结构受力、变形影响更为显著,分布占比也较高的拱腰处空洞;探究空洞范围变化,对结构受力、变形特征的影响。

为了明确后续图表中,不同空洞范围变化对管

片结构所产生的影响,将拱腰位置处不同范围的三种空洞分别定义为 A、B、C,其对应的空洞范围分别为 15°、30°、45°,具体见表 3。

表 3 空洞位置-范围对应表

空洞位置	A	B	C
空洞范围/(°)	15	30	45

将拱腰位置处不同空洞范围变化,对结构弯矩、轴力形态分布及结构整体变形所产生的影响,绘制成雷达图,如图 9、图 11(a) 所示。同时,进一步选取结构拱顶、拱腰位置处的内力、径向变形量,绘制成曲线图,如图 10、图 11(b) 所示。

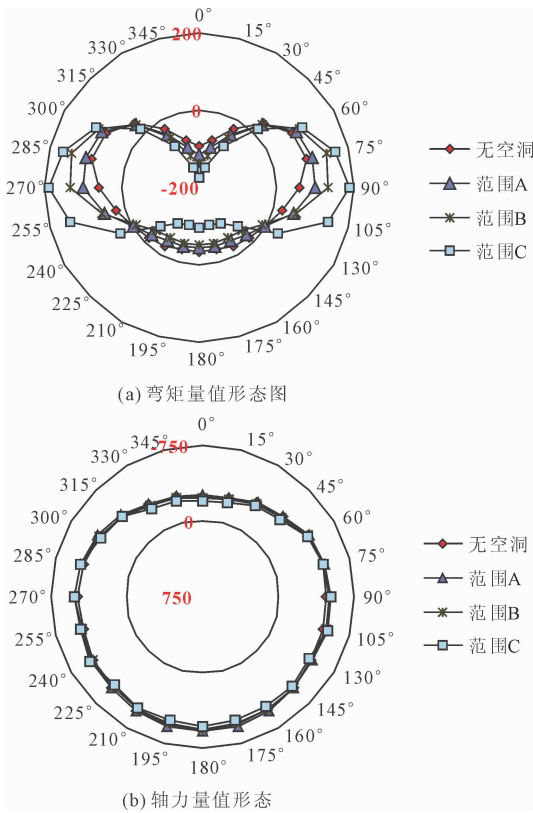


图 9 不同范围空洞对结构内力量值形态分布影响

由上述计算结果可以看出,无空洞及有空洞 A、B、C 四种工况下,拱腰位置处的弯矩绝对值分别为: 59.48 kN · m、98.31 kN · m、132.90 kN · m、188.98 kN · m,与无空洞工况相比,弯矩的增长比例保持在 60% 左右。拱顶位置处(远离空洞范围)的弯矩绝对值分别为:93.31 kN · m、114.29 kN · m、138.19 kN · m、173.87 kN · m,与无空洞工况相比,弯矩的增长比例保持在 45% 左右。进一步结合轴力变化,在四种不同工况下,拱顶位置处的轴力绝对值分别为:252.53 kN、253.8 kN、227.31 kN、199.63 kN,拱

腰位置处的轴力绝对值分别为:484.61 kN、506.67 kN、496.44 kN、485.76 kN,与无空洞工况相比,轴力的变化幅度保持在 15% 左右,见图 10(b)。

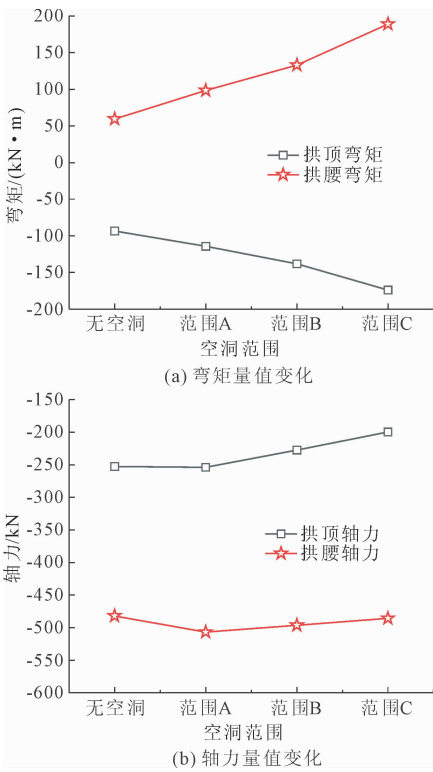


图 10 不同空洞范围对结构内力量值影响

结合上述计算结果不难发现,不同空洞范围下,结构上的弯矩形态呈现出对称性分布,弯矩变化主要集中在拱肩至拱腰范围内,该范围内的弯矩量值有着明显的增长。并且空洞范围越大,拱肩和拱腰处的弯矩增加越明显,尤其是当空洞范围超过 30° 后,结构上弯矩显著增加。同时,伴随着空洞范围的扩大,土体侧向抗力损失逐渐增多,土体上部承受的荷载更多由结构内力抵抗,从而易导致拼装结构受力不均匀,进而产生病害^[16-18]。

进一步结合结构变形展开分析,四种工况下盾构隧道的整体变形如图 11 所示。由图 11 可知,伴随着空洞范围的不断扩大,结构拱顶下沉量、腰部挤出量持续增长;三种不同空洞范围下,结构的径向变形量主要集中在拱顶、拱腰范围内,结构基底处的变形幅度较小,结构整体呈现出“横鸭蛋”状;此时结构的拱顶下沉量分别为:9.99 mm、11.95 mm、13.31 mm、17.43 mm,拱腰挤出量分别为:2.51 mm、3.60 mm、4.57 mm、6.95 mm,与无空洞工况相比,拱顶下沉量、拱腰挤出量的增长比例均保持在 50% 左右。

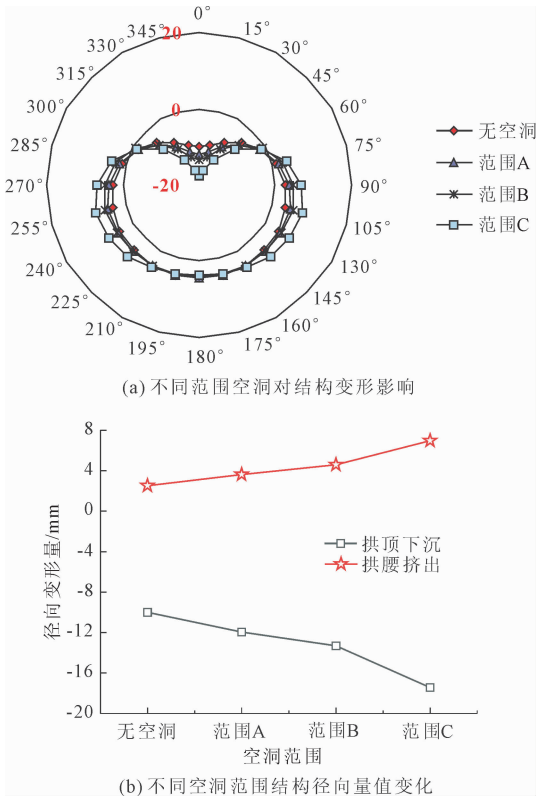


图 11 不同范围空洞对结构变形及径向变形量影响

3 黄土浸水软化条件下空洞对盾构隧道结构受力变形的影响

黄土浸水后有两种可能,湿陷或软化。对于城市轨道交通地下工程而言,由于无附加荷载,非自重湿陷性黄土浸水后不会发生湿陷,但这类土大孔隙依旧存在,浸水使其强度迅速降低,表现出软弱特征。对于隧道结构来说,围岩浸水,使其抗力急剧降低,从而影响结构的稳定,这是当前黄土地区盾构隧道产生病害的主要原因^[19-22]。

进一步,从荷载-结构法角度进行分析,在黄土围岩浸水过程中三种因素对结构造成危害:一是重度不断增加;二是侧压力系数不断增大;三是基床系数不断降低。为探究上述因素对结构所产生的综合影响,根据既有隧道病害勘察结果,选取拱腰位置处空洞,并设置以下工况:①拱腰位置内 30°范围空洞,不考虑浸水条件;拱腰位置内 30°范围空洞,考虑浸水条件。②拱腰位置内 45°范围空洞,不考虑浸水条件;拱腰位置内 45°范围空洞,考虑浸水条件。分析空洞和浸水软化共同作用对盾构隧道受力和变形的影响,具体工况参数设置见表 4。

表 4 工况参数设置				
工况参数	空洞范围 /(°)	基床系数 /(MPa·m ⁻¹)	侧压力 系数	土体重量 /(kN·m ⁻³)
工况一空洞	30	40	0.30	17.5
工况一空洞+浸水	30	20	0.50	18.5
工况二空洞	45	40	0.30	17.5
工况二空洞+浸水	45	10	0.55	18.5

图 12—图 14 给出了空洞和浸水软化共同作用下结构弯矩、轴力、整体形态的变化规律。由图可知,在黄土浸水软化条件下,工况一和工况二中,隧道拱腰处的弯矩变化增长幅度分别为 52%、65%。在工况一条件下,弯矩最大增长幅度出现在拱脚 120°位置处,增长幅度达到 90%;其余位置处的弯矩增长幅度保持在 28% 至 72% 之间。同时在工况二条件下,结构上的最大弯矩增长点也出现在拱脚 120°位置处,增长幅度达到 97%,其余部位处弯矩的增长幅度保持在 38% 至 81% 之间,见图 12;工况一、工况二下,结构上的轴力增长比例在 25% 左右。与非浸水状态相比,隧道围岩浸水后,结构弯矩显著增大,且弯矩分布形态也发生了变化。隧道周边土体浸水软化后,一是增加了荷重;二是抗力衰减;三是空洞位置处应力转移,都使得结构表现出的弯矩增大。

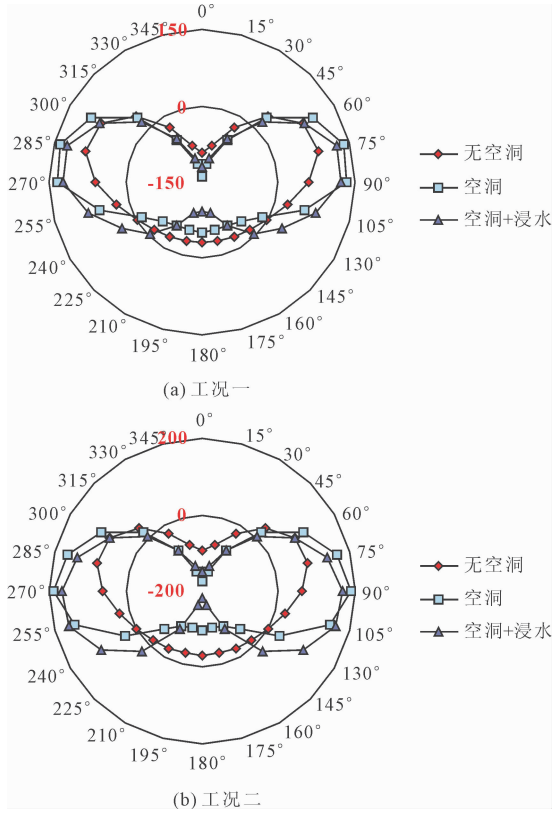


图 12 不同土体软化程度下结构弯矩形态分布对比变化

无空洞、工况一下空洞加浸水工况、工况二下空洞加浸水工况,拱顶下沉量分别为:9.99 mm、15.16 mm、20.66 mm;拱腰挤出量分别为:2.51 mm、4.64 mm、7.01 mm。此时拱顶处的径向变形量,与无空洞工况相比,增长比例分别为:35%、52%;拱腰处的径向变形量,与无空洞工况相比,增长比例分别为:46%、65%,见图 14。这种变形对拼装结构是极其不利的,可能使得管片接缝处发生破损或渗漏水。

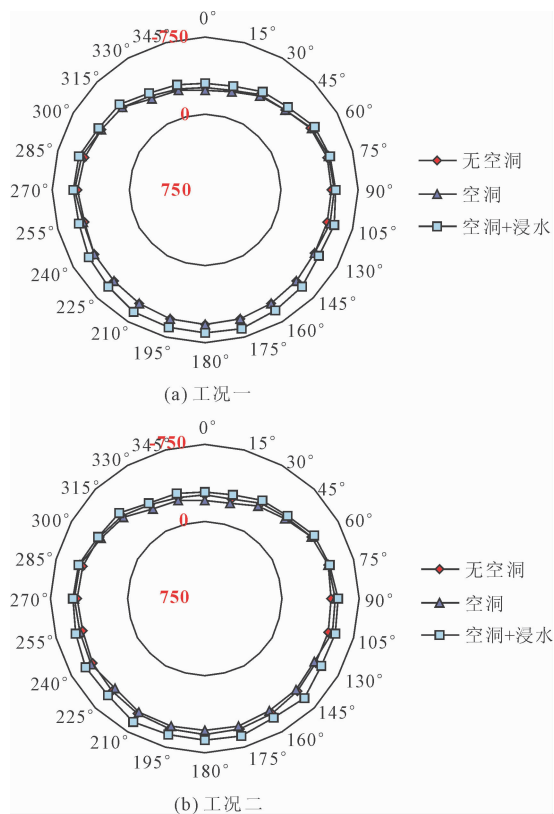


图 13 不同土体软化程度下结构轴力形态分布对比变化

结合上述分析不难看出,在空洞加浸水工况下,结构上的弯矩和径向变形量均发生了较大幅度的变化,而结构上的轴力变化幅度却较小。不论是在空洞工况下,还在空洞加浸水工况下,拱腰位置处的弯矩增长和变形都更加显著,这就容易导致该部位产生破坏,进而对结构整体的受力产生影响。因此在盾构隧道工程前期设计阶段和后期维护过程中,对于结构拱腰部位的关注应加强,对于该部位出现的病害也应及时进行修复,以防止产生连锁反应,进而危害到隧道结构整体的安全性。

4 结 论

本文基于荷载-结构法分析了不同空洞位置和空洞范围变化对盾构隧道内力、变形产生的影响。

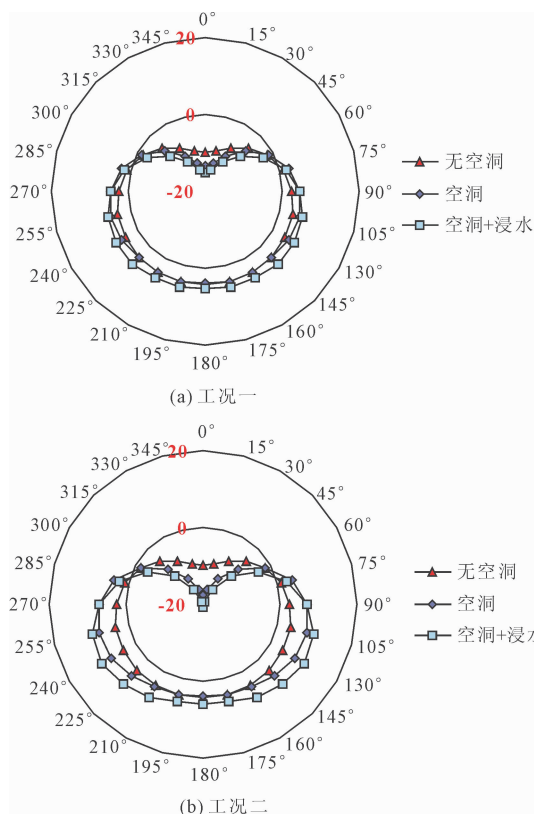


图 14 不同土体软化程度下结构形态变化对比

并在此基础上,进一步分析了黄土浸水软化后,管片背后空洞对结构产生的不利影响,从而得出以下结论:

(1) 管片背后空洞对结构内力和变形的影响较大。与无空洞状态相比,拱肩空洞和拱腰空洞条件下,结构弯矩最大分别增加了 6% 和 56%,变形最大分别增加了 6% 和 46%。轴力变化相对较小,在 10% 以内。由此可见,拱腰空洞比拱肩空洞对管片结构的内力和变形影响更大。

(2) 相同位置条件下,空洞范围越大,对结构受力和变形的影响越不利。与无空洞相比,15°、30°、45°范围空洞可使得结构上弯矩最大分别增长:40%、56%、69%,变形最大分别增长:31%、46%、64%。轴力变化相对较小,在 15% 左右。

(3) 当空洞所在位置、范围大小相同时,在浸水条件下空洞对结构的影响与未浸水条件下相比,结构上的弯矩和整体变形形态都发生了改变,此时弯矩的增长幅度最大可达 90% 以上,结构的径向变形量最大增幅可达 65%。

参考文献:

- [1] 赖金星,刘 炽,胡 昭,等.盾构隧道衬砌背后空洞对结构影响规律数值分析[J].现代隧道技术,2017,54(3):126-134.

- [2] 石钰锋,胡梦豪,周宇航,等. 含壁后空洞盾构隧道管片安全分析[J]. 都市轨道交通,2024,37(2):107-115.
- [3] 郑艾辰,向晋扬,黄 锋,等. 空洞对隧道结构安全影响试验与模拟[J]. 中国安全科学学报,2022,32(5):119-126.
- [4] 郭海鹏,王永红,安业成,等. 铁路隧道衬砌空洞成因分析及整治[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(S1):444-453.
- [5] 凌同华,张 亮,谷淡平,等. 背后存在空洞时盾构隧道管片的开裂机理及承载能力分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(9):2293-2300.
- [6] 邱军领,赖金星,刘 炽,等. 盾构隧道壁后空洞注浆对管片受力特性的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2016,17(4):364-370.
- [7] 于文龙. 黄土地区水环境变化轨道工程防控技术研究[R]. 广州:广州地铁设计研究院股份有限公司,2022.
- [8] 柳 献,张浩立,鲁 亮,等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下工程与隧道,2013(4):10-15,59.
- [9] 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.
- [10] 莫键豪,唐欣薇,严振瑞. 盾构输水隧洞单层衬砌结构承载变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(7):1365-1373.
- [11] 陈伟杰,苏 栋,陈湘生,等. 基床系数和侧压力系数对盾构隧道变形的影响研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(5):110-115.
- [12] 梁荣柱,曹世安,向黎明,等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(3):736-747.
- [13] 张 勇. 地面堆载对既有盾构隧道的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [14] 魏 纲,洪文强,魏新江,等. 偏心堆载引起的盾构隧道横向受力理论计算[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(7):1645-1654.
- [15] 邵 华,黄宏伟,张东明,等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [16] 王如路,张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(6):1092-1101.
- [17] 赖金星,汪 珂,刘 炽,等. 黄土地层盾构隧道衬背空洞注浆过程变形规律[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2015,16(3):231-238.
- [18] 王其炎,杨建辉,薛永利,等. 盾构在软土地层掘进过程中的管片上浮研究[J]. 现代隧道技术,2014,51(1):144-152.
- [19] Gao Xiang, Wang Huaning, Jiang Mingjing. Analytical solutions for the displacement and stress of lined circular tunnel subjected to surcharge loadings in semi-infinite ground[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021,89:771-791.
- [20] 陈伟杰,苏 栋,陈湘生,等. 基床系数和侧压力系数对盾构隧道变形的影响研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(5):110-115.
- [21] 梁 东,金 浩,肖军华,等. 软土地区侧压损失对盾构隧道受力及变形的影响[J]. 工程力学,2019,36(5):148-156,175.
- [22] 苏宗贤,何 川. 盾构隧道纵向变形附加内力的壳-弹簧-接触模型数值分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(6):70-76.