

浅埋岩溶地层溶腔与地铁隧道不同位置关系下的施工力学特性*

陈俊¹ 何绪虎² 王祥¹ 谷文军³ 陈兵² 王士民²

(1. 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 550081, 贵阳;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都; 3. 中铁开发投资集团有限公司, 650500, 昆明)

摘要 [目的] 溶腔与新建隧道位置关系复杂。地铁隧道围岩中的溶腔会影响隧道洞内施工及地面环境安全。对此有必要探明溶腔与隧道不同位置关系下对地铁隧道施工的力学特性。[方法] 采用 ANSYS 有限元软件建立数值模型, 对隧道洞周位移、初期支护受力、溶腔位移、溶腔应力及地面沉降进行分析。[结果及结论] 溶腔的形成会使原地层应力场发生改变, 溶腔周边一定范围地层应力得到释放。不同溶腔位置下隧道开挖后初期支护结构受力规律基本相同, 溶腔的存在不明显改变初期支护结构的最终受力。对于溶腔顶部最大位移差, 拱底溶腔工况最大, 拱顶溶腔工况次之, 拱腰溶腔工况最小。无溶腔工况、拱顶溶腔工况、拱腰溶腔工况及拱底溶腔工况下, 地面沉降最大值分别为 5.37 mm、4.24 mm、4.84 mm、4.42 mm。不同位置溶腔不影响地面沉降变化的总体趋势。

关键词 地铁; 隧道; 施工力学特性; 浅埋岩溶地层; 溶腔位置; 隐伏溶洞

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.023

Construction Mechanical Characteristics of Shallow Karst Stratum Cavity and Subway Tunnel under Different Position Relationships

CHEN Jun¹, HE Xuhu², WANG Xiang¹, GU Wenjun³, CHEN Bing², WANG Shimin²

(1. Guiyang Public Transport Investment and Operation Group Co., Ltd., 550081, Guiyang, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. China Railway Development and Investment Group Co., Ltd., 650500, Kunming, China)

Abstract [Objective] The relationship between the cavity and the newly built tunnel is complex, and the cavity in the surrounding rock of the subway tunnel can affect the construc-

tion inside the tunnel and the safety of the ground environment. Therefore, it is necessary to explore the influence of different positional relationships between the cavity and the tunnel on mechanical characteristics of the subway tunnel construction. [Method] A numerical model is established using ANSYS finite element software to analyze tunnel peripheral displacement, initial support stress, cavity displacement, cavity stress, and land subsidence. [Result & Conclusion] The formation of a cavity may change the original stratum stress field, and the stratum stress in a certain range around the cavity will be released. The stress law of the initial support structure after tunnel excavation is basically the same at different cavity locations, and the existence of the cavity does not significantly change the final stress of the initial support structure. In terms of the maximum displacement difference from cavity top to bottom, the largest one occurs in the arch bottom cavity condition, followed by the vault cavity condition, and the smallest occurs in arch waist cavity condition. Under the no cavity, vault cavity, arch waist cavity, and arch bottom cavity conditions, the maximum land subsidence are 5.37 mm, 4.24 mm, 4.84 mm, and 4.42 mm, respectively. Cavities at different locations will not affect the overall trend of land subsidence changes.

Key words subway; tunnel; construction mechanical characteristics; shallow karst stratum; cavity location; concealed karst cave

岩溶地区溶腔及空洞等星罗棋布。受选线限制及现有勘探手段的局限性影响, 地铁隧道设计阶段无法准确探明溶洞位置及规模, 故实际施工常常近接或直接揭露隐伏溶洞, 存在极大的施工困难和风险^[1-3]。

对于隐伏岩溶对隧道施工的影响, 我国众多学

* 国家自然科学基金项目(51991394)

者通过理论分析、数值模拟和模型试验等方法展开了相关研究。文献[4]基于突变理论,推导了岩溶隧道顶板安全厚度公式,认为溶洞跨度、围岩弹性模量和溶腔压力对安全厚度影响较大。文献[5]以隧道结构和围岩稳定性为研究对象,采用 Abaqus 软件,分析了在隧道施工过程中隧道结构的受力情形和隧道围岩产生的位移。文献[6]采用 FLAC3D 软件进行数值模拟,分析了溶洞对围岩稳定性的影响规律,并对溶洞地层采取的充填与注浆加固方案进行了比较分析。文献[7]将隧道与溶洞间隔水岩层视作平整弹性梁,推导出两者间的临界安全距离公式,并设计正交试验,通过 FLAC3D 软件模拟探究了各因素对临界安全距离的影响。文献[8]使用数值模拟分析隧道变形情况,反算出沙漏型岩溶地面坍塌的塌陷角,并与模型试验测试出的塌陷角作对比,得到塌陷角与砂土内摩擦角相似的结论。文献[9]提出了一种计算溶洞扰动对既有隧道影响的数值分析方法,研究了溶洞诱发上覆砂层塌陷对既有盾构隧道的影响规律。文献[10]探究了管道型岩溶分布位置、水头高度对隧道衬砌内力的影响,结果表明当溶腔位于边墙中部或边墙脚处时,衬砌受力偏压严重。文献[11]使用圆柱形气囊模拟地层空洞,通过模型试验研究了隧道开挖过程中的地层变形及应力变化情况,发现当刀盘位于空洞前后 $1D$ (D 为隧道直径) 范围内时,地层沉降与围岩压力变化较大,且两者存在较强联系。文献[12]通过模型试验再现了隐伏溶洞突水灾变演化过程,并将其分为群裂隙的萌生扩展、优势导水通道的形成与隔水岩体破裂失稳三个阶段。

有些城市地铁隧道不可避免地要穿越岩溶地层。此类隧道埋深通常较浅,其隧道施工对地面环境影响较大,在地层中赋存岩溶时会呈现新的特点,导致其施工过程存在不可预期的风险与潜在危害^[13]。目前,针对公路及铁路的隧道隐伏岩溶的研究已大量存在,而对于此类城市地铁隧道的研究较少。鉴于此,为了降低地铁隧道穿越岩溶地层施工风险,减小对地面环境的影响,本文以贵阳市轨道交通 3 号线一期工程黔灵山公园站—北京路站区间(以下简称“黔北区间”)隧道为研究对象,建立三维数值模型,模拟溶腔与隧道不同位置关系下隧道穿越岩溶地层时隧道洞周位移、地面沉降和初期支护受力的变化规律,以期以后同类型工程结构设计

及施工提供经验。

1 工程概况

黔北区间起点位于北京路与枣山路交叉口,下穿黔灵山小区及黔灵山后,沿北京路下行,终点位于北京路山水大酒店门口。单洞截面宽度为 6.52 m。黔北区间部分平面示意图如图 1 所示。根据地质勘察资料,区间地层主要为 $\langle 1-1 \rangle$ 杂填土、 $\langle 4-1-3 \rangle$ 可塑红黏土和 $\langle 14-2-3 \rangle$ 中风化白云岩。

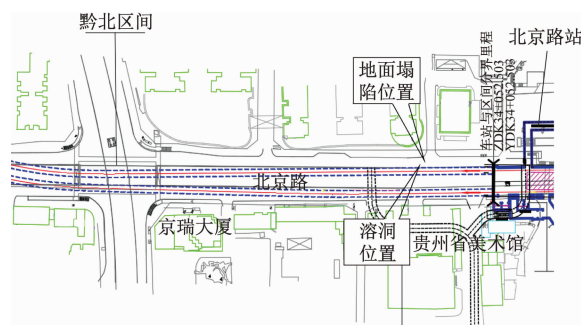


图 1 黔北区间部分平面示意图

Fig. 1 Partial plan map of Qian-Bei section

2 数值模型建立

2.1 模型参数选取

2.1.1 围岩参数

根据地质勘察资料和公路隧道设计规范,选取典型区域地质条件,地层参数取值如表 1 所示。

表 1 地层参数取值

Tab. 1 Strata parameter values

地层	弹性模量 E/MPa	重度 γ / (kN/m^3)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	泊松比 ν
$\langle 1-1 \rangle$ 杂填土	15.6	20.0	32.0	8.2	0.31
$\langle 4-1-3 \rangle$ 可塑 红黏土	5.5	16.9	40.3	6.6	0.35
$\langle 14-2-3 \rangle$ 中风 化白云岩	36.8	26.4	550.0	42.0	0.27

2.1.2 初期支护参数

本隧道初期支护由喷射混凝土、锚杆、钢拱架和钢筋网等组成。运用刚度等效的原则将钢拱架和钢筋网折算成混凝土强度,进而求得等效初期支护弹性模量;根据质量相等、体积不变的原则可得初期支护等效密度。隧道衬砌初期支护参数取值如表 2 所示。

2.2 建立模型及监控量测

根据圣维南原理,隧道开挖的主要影响范围为

表2 隧道衬砌初期支护参数取值

Tab.2 Initial support parameter values for tunnel lining

衬砌支护部件	重度 γ / (kN/m^3)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
喷射混凝土(C25)	22.0	28	0.2
锚杆 $\phi 22 \text{ mm}$, 间距 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$	78.5	210	
钢拱架(I18 工字钢, 间距 1.0 m)	78.0	210	
等效初期支护	25.5	31	0.2

3D~5D。经综合考虑,各工况的数值模型尺寸均为50.0 m(长)×30.0 m(宽)×47.5 m(高),隧道埋深为20 m。坐标原点设在球形溶腔中心,数值模型左右对称。根据 Drucker-Prager 屈服准则,模型中土体及初期支护单元均采用实体单元 SOLID45 模拟^[14],砂浆锚杆采用杆单元 LINK180 模拟^[15]。模型边界条件为:左右及前后侧采用水平约束,模型底部为竖向约束,顶部为自由边界。

通过数值模型模拟开挖过程,并监测不同溶腔位置下的洞周位移、初期支护结构受力、溶腔位移及应力和地面沉降,进而研究隧道周边围岩赋存岩溶情况下的隧道施工力学规律及地面沉降规律。数值模型及监测点布置如图2所示。其中:在拱顶、拱腰及拱底布设监测点,监测洞周位移,包括隧道拱顶、拱底的竖向位移,以及左右拱腰的水平位移;拱顶溶腔中心处对应断面为监测断面,监测地面沉降及隧道初期支护结构受力。

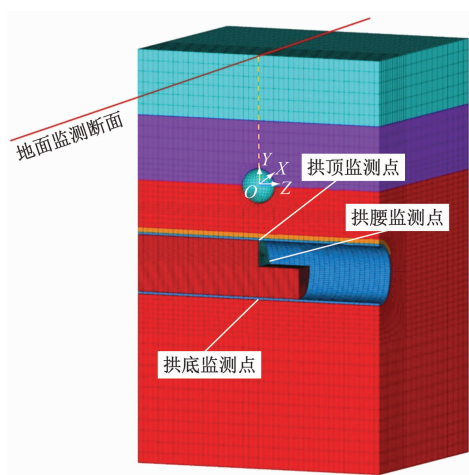


图2 数值模型及监测点布置

Fig.2 Numerical model and monitoring points layout

2.3 典型开挖步骤

为了模拟隧道施工过程,采用 ANSYS 软件中的生死单元法来模拟隧道核心土的开挖。隧道施工采用超短台阶法,上下台阶间距为5.0 m,数值模

型中每一步模拟开挖2.5 m,隧道贯通长度为30.0 m,共12个开挖步,开挖模拟过程如表3所示。

表3 台阶法开挖过程

Tab.3 Process of step excavation method

模拟内容	开挖步	模拟内容简述
初始应力平衡		修改地层参数,施加自重应力,得到初始应力场
溶腔生成		杀死溶腔部分的土体单元
第1次开挖	1	上台阶核心土开挖5.0 m,应力释放30%;上台阶施作初期支护,应力释放70%
第2—11次开挖	2—11	上下台阶同时开挖2.5 m,应力释放30%;激活上一步初期支护结构,应力释放70%
第12次开挖	12	下台阶核心土开挖5.0 m,应力释放30%;下台阶施作初期支护,应力释放70%(贯通)

2.4 模拟工况

按溶腔情况,模拟工况为无溶腔工况(工况一)、拱顶溶腔工况(工况二)、左拱腰溶腔工况(工况三)、拱底溶腔工况(工况四)。各工况溶腔与隧道相对位置关系如图3所示。溶腔为直径4.0 m的球体,溶腔与隧道净距为4.0 m。各工况中,围岩条件均相同,溶腔大小、形状及与隧道初期支护结构净距均一致。按4种工况,对上下台阶法施工过程进行模拟计算。

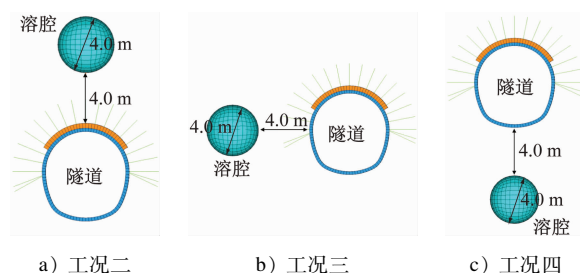


图3 各工况溶腔与隧道相对位置关系

Fig.3 Relative position relationship between the cavity and the tunnel under each working condition

3 模拟计算结果

3.1 隧道洞周位移

模拟计算可得,各工况下的洞周位移-开挖步曲线如图4所示。

由图4可知:随着隧道掌子面的推进,监测断面拱顶围岩监测点发生沉降,拱腰处监测点出现收敛

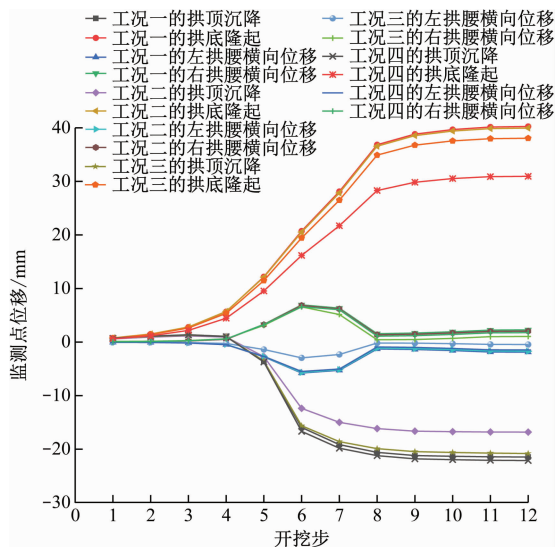


图4 各工况下的洞周位移-开挖步曲线

Fig. 4 Peripheral displacement-excavation step curves under each working condition

变形;开挖掌子面远离监测断面后,各监测点位移逐渐趋于平稳。从隧道开挖洞周位移整体趋势来看,地层中隐伏溶洞的存在不会影响洞周各监测点位移的整体变化趋势,溶腔位于不同位置时,其拱顶沉降、拱底隆起及拱腰水平收敛等基本位移规律保持一致。各工况下,洞周各项位移在隧道开挖至监测断面第3个开挖步(约1倍洞径)时开始发生较明显位移,在监测断面后3个开挖步各项变形基本完成。

为分析各监测点位移量与溶腔位置关系,将各工况开挖完成后洞周位移最大值汇总,如表4所示。表4中水平收敛位移为左右拱腰横向位移绝对值之和。

表4 不同工况下的洞周位移最大值

Tab. 4 Maximum peripheral displacement under different working conditions

工况	拱顶沉降量/mm	水平收敛位移/mm	拱底隆起量/mm
工况一	21.47	4.16	40.26
工况二	16.83	3.74	39.98
工况三	20.81	1.50	38.06
工况四	22.12	3.23	30.96

由表4可知:溶腔的存在会影响与之相邻隧道开挖后的地层位移,溶腔位于拱顶(工况二)时其拱顶沉降最小;溶腔位于拱腰(工况三)时其水平收敛位移最小;溶腔位于拱底(工况四)时的拱底隆起最小等现象。究其原因,溶腔会使原地层应力场发生改变,溶腔周边一定范围内的地层应力得到释放。

3.2 隧道工后初期支护受力分析

受岩溶的影响,各工况初期支护结构受力有所不同。经模拟,得到各工况下隧道贯通后的初期支护结构应力云图,如图5所示。统计各工况下隧道贯通后的初期支护结构第一主应力 σ_1 和第三主应力 σ_3 最值,如表5所示。

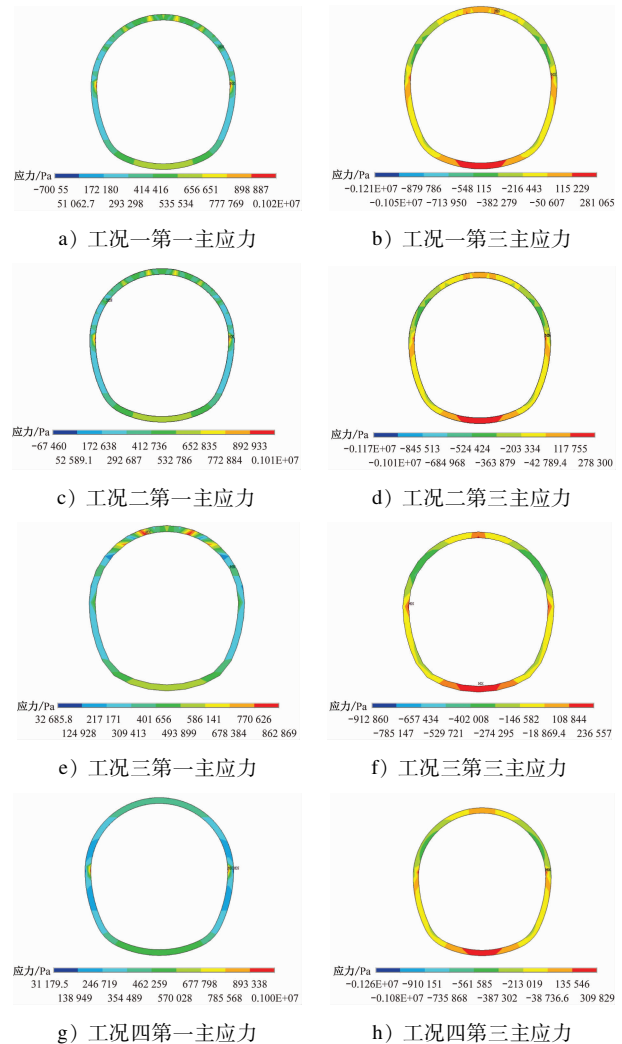


图5 各工况下隧道贯通后的初期支护结构应力云图

Fig. 5 Initial support structure stress nephogram after tunnel penetration under each working condition

由图5可知:不同溶腔位置下隧道开挖后初期支护结构受力规律基本相同,溶腔的存在不明显改变初期支护结构的最终受力。由表5可知:工况二—工况四的第一主应力分别为无溶腔(工况一)时第一主应力的99.0%、84.6%、98.0%,工况二—工况四的第三主应力分别为无溶腔时第三主应力的96.7%、75.5%、104.1%。与无溶腔工况相比:拱顶溶腔及拱腰溶腔的存在使隧道开挖后的初期

表5 各工况隧道贯通后的初期支护结构应力最值

Tab.5 Maximum value of initial support structure stress after tunnel penetration under each working condition

工况	σ_1/MPa	σ_3/MPa
工况一	1.020	-1.210
工况二	1.010	-1.170
工况三	0.863	-0.913
工况四	1.000	-1.260

支护结构应力最值更小;拱腰溶腔的存在对初期支

护结构受力影响最大;拱底溶腔的存在使得第一主应力最值偏小,第三主应力最值偏大。

3.3 溶腔位移及工后应力分析

3.3.1 溶腔位移分析

隧道的开挖造成地层内土体的流失,从而使得隧道周围围岩发生变形及位移。在围岩中赋存的空腔将影响隧道开挖后的地层变形。为评价隧道开挖对围岩中不同空间位置赋存溶腔的影响,取空腔处位移云图及关键测点的位移曲线分析。不同工况的溶腔位移云图如图6—图8所示。

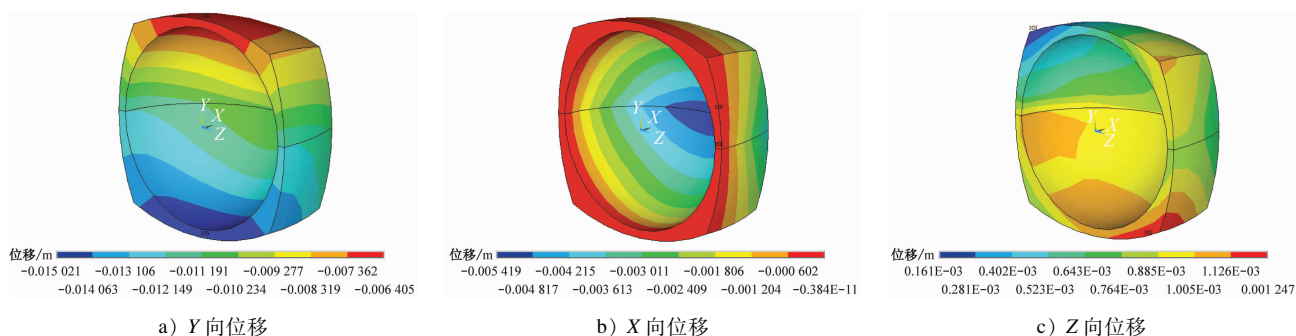


图6 工况二溶腔位移云图

Fig.6 Cavity displacement nephogram under working condition II

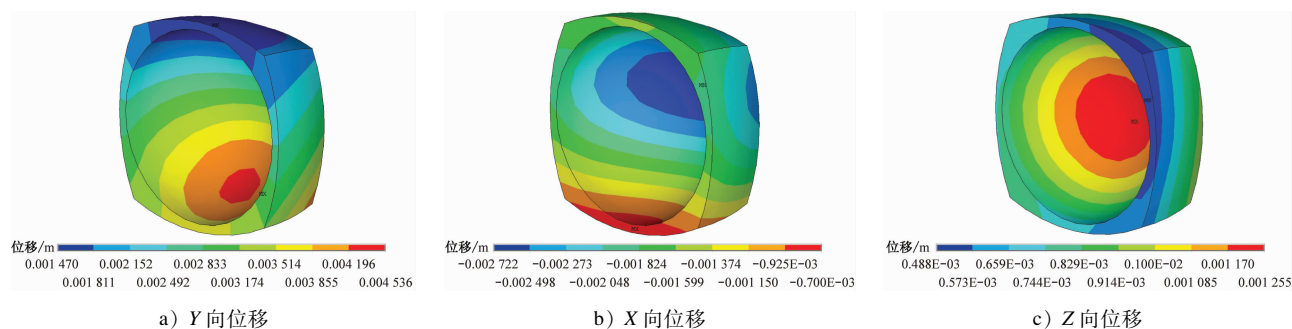


图7 工况三溶腔位移云图

Fig.7 Cavity displacement nephogram under working condition III

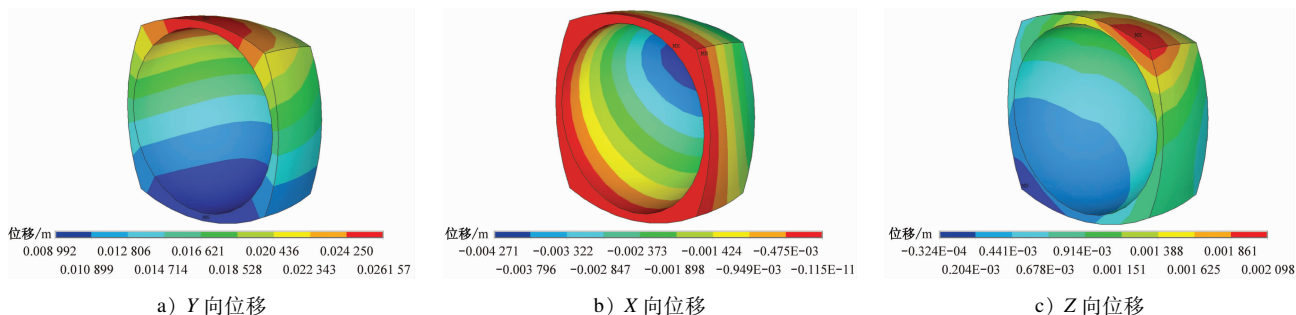


图8 工况四溶腔位移云图

Fig.8 Cavity displacement nephogram under working condition IV

由图6可知,隧道开挖贯通后,工况二中位于隧道拱顶上方的溶腔周边围岩发生较大的沉降,溶腔

顶部最大沉降量为6.41 mm,溶腔底部最大沉降量为15.02 mm,顶底部最大差异变形量高达8.61

mm,对围岩的稳定性不利。

由图 7 可知,工况三中,溶腔顶部最大沉降量为 1.47 mm,溶腔底部发生隆起变形,最大隆起量为 4.54 mm,顶底部最大差异变形量为 3.07 mm。

由图 8 可知,工况四中,溶腔顶部隆起量达 26.16 mm,底部隆起量为 8.99 mm,顶底部最大差

异变形量达 17.17 mm。

进一步分析隧道开挖后溶腔向空腔内侧的挤出变形可知,溶腔沿隧道截面横向变形较沿隧道轴向的横向变形大,且工况二横向变形最大,工况四横向变形次之,工况三横向变形最小。不同工况的溶腔监测点位移随开挖变化曲线如图 9 所示。

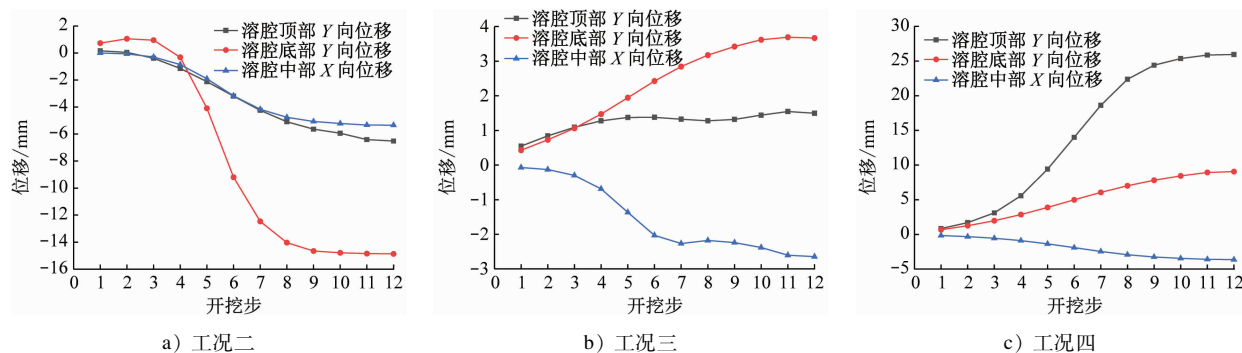


图 9 不同工况下溶腔监测点位移随开挖变化曲线

Fig.9 Variation curves of cavity monitoring points displacement with excavation under different working conditions

图 9 中各监测点位移结果与溶腔位移云图一致:拱顶溶腔的顶部和底部有较大 Y 向位移;拱底溶腔的顶部和底部有较大隆起变形;拱腰溶腔的顶部发生 Y 向位移,底部发生隆起变形。监测点在第 3—9 开挖步(开挖至岩溶空腔前后 15 m 范围内)发生绝大部分变形,实际施工中应注意在此区段加强隧道内的实时监测,做好相应的应急处理方案,防止围岩内由溶腔失稳诱导的隧道塌方事故。

3.3.2 溶腔应力分析

隧道开挖贯通后,不同工况下的溶腔 Mises 应

力分布云图如图 10 所示。溶腔位于拱顶时其刚好处于岩土分界面上。

从图 10 中可以看到,隧道开挖对周边围岩应力场影响较大,虽然 3 种工况溶腔处于不同位置,但溶腔应力变化有相似规律——在溶腔中部产生的应力最大,而溶腔顶部及底部的应力相对较小。工况二—工况四下溶腔中部最大 Mises 应力分别为 0.19 MPa、0.06 MPa、0.27 MPa。隧道开挖时,工况三下的溶腔围岩应力场所受影响较小,其他工况下的溶腔围岩应力场所受影响都比较大。

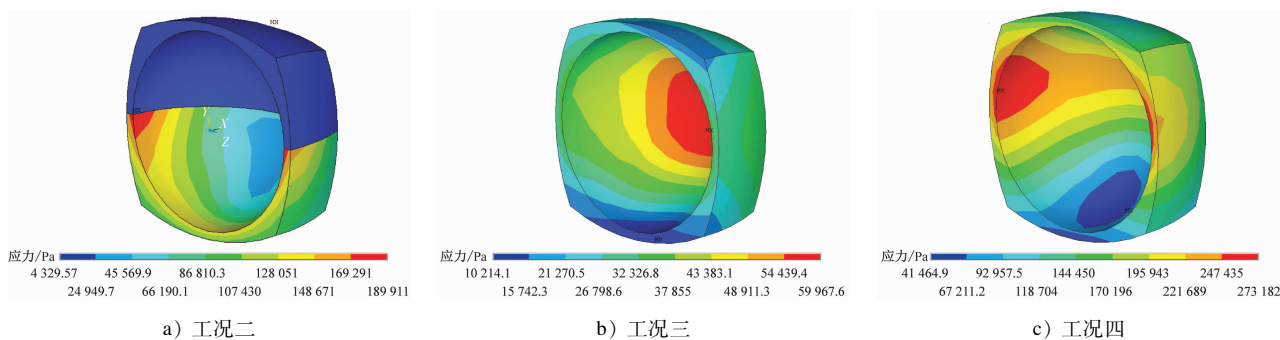


图 10 不同工况下的溶腔 Mises 应力分布云图

Fig.10 Cavity Mises stress distribution nephogram under different working conditions

3.4 地面沉降

为探明溶腔的存在对隧道施工地面沉降的影响规律,绘制各工况下隧道贯通后监测断面的地面沉降曲线图如图 11 所示。

由图 11 知:溶腔的存在不会影响沉降曲线总体

趋势;各工况下,隧道开挖完成后地面监测断面沉降曲线均呈 U 形,其最大地面沉降为隧道拱顶正上方地面;工况一—工况四的最大地面沉降分别为 5.37 mm、4.24 mm、4.84 mm、4.42 mm。由此可见,溶腔使得隧道开挖引起的地面沉降变小,且拱

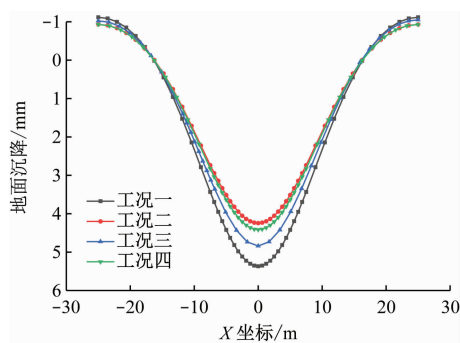


图11 各工况下地面监测断面的地面沉降曲线

Fig. 11 Land monitoring section settlement curves under each working condition

顶处的溶腔对监测断面最终地面沉降的影响最大。

4 结语

针对浅埋岩溶地段地铁施工常见的隐伏溶洞情况,本文采用数值模拟的方法,建立溶腔与隧道不同位置关系的数值模型,分析溶腔与隧道不同位置关系下,隧道开挖对隧道结构和溶腔的力学特性及对地面沉降响应,主要得到以下结论:

1) 地层中发育有隐伏溶洞时对邻近侧隧道围岩工后变形有较大影响。溶腔位于隧道拱顶上方时,拱顶沉降量明显最小,为无溶腔时拱顶沉降量的78.4%;溶腔位于拱腰侧时,水平收敛位移最小,为无溶腔时的36.1%;溶腔位于拱底时,仰拱隆起最小,为无溶腔时的76.9%。

2) 不同溶腔位置下隧道开挖后初期支护结构受力规律基本相同,溶腔的存在不明显改变初期支护结构的最终受力。

3) 工况二—工况四下溶腔顶部最大沉降量分别为6.41 mm、1.47 mm、26.16 mm,溶腔底部最大隆起量分别为15.02 mm、4.54 mm、8.99 mm。顶底部最大差异变形量分别为8.61 mm、3.07 mm、17.17 mm。溶腔位于隧道拱底时其顶底部产生最大位移差异变形。由隧道开挖后溶腔向空腔内侧的挤出变形可知,溶腔沿隧道截面横向变形较沿隧道轴向的横向变形大,且溶腔位于隧道顶部时其横向变形最大,拱底次之,拱腰最小。工况二—工况四下溶腔中部最大Mises应力分别为0.19 MPa、0.06 MPa、0.27 MPa,溶腔位于拱腰时隧道开挖对其应力场影响较小,而溶腔位于拱顶、拱底时应力场所受影响都较大。

4) 溶腔的存在不影响地面沉降曲线总体趋势。

工况二—工况四下地面沉降最大值分别为工况一地面沉降最大值的79.0%、90.1%、82.3%。

参考文献

- [1] 李坚. 在建铁路隧道和路基基底岩溶物探技术探讨[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12): 9.
LI Jian. Exploration on the Karst geophysical exploration technology of the railway tunnel and subgrade base under construction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(12): 9.
- [2] 聂信辉. 高速铁路岩溶隧道大型溶洞综合勘察及处理技术研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(1): 121.
NIE Xinhui. Study on comprehensive investigation and treatment scheme of large cave in high-speed railway Karst tunnel [J]. Railway Standard Design, 2022, 66(1): 121.
- [3] 李辉, 刘凯, 陈兵, 等. 地铁矿山法隧道揭露岩溶施工处理技术研究[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(5): 169.
LI Hui, LIU Kai, CHEN Bing, et al. Research on construction and treatment technology for exposure of Karst in metro tunnel by mine method [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2022, 18(5): 169.
- [4] 邹洋, 彭立敏, 张智勇, 等. 基于突变理论的岩溶隧道拱顶安全厚度分析与失稳预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(10): 2651.
ZOU Yang, PENG Limin, ZHANG Zhiyong, et al. Safety thickness analysis and stability prediction of tunnel roof in Karst region based on catastrophe theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2651.
- [5] 李红卫. 溶洞对贵阳轨道交通工程隧道影响的数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(4): 24.
LI Hongwei. Numerical simulation of the influence of cave on Guiyang railway tunnel [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(4): 24.
- [6] 李元海, 杨苏, 喻军, 等. 大型溶洞对隧道开挖稳定性的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 52.
LI Yuanhai, YANG Su, YU Jun, et al. Influence of a large Karst cave on rock mass stability during tunnelling [J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(4): 52.
- [7] 王万锋, 杨永泰, 陆钰铨, 等. 喀斯特地貌区隧道与隐伏充填溶洞临界安全距离分析[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1282.
WANG Wanfeng, YANG Yongtai, LU Yuquan, et al. Analysis of critical safety distance between tunnel and concealing filled Karst cave in the Karst area [J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(6): 1282.
- [8] 李慎奎. 武汉地区沙漏型岩溶塌陷数值分析与模型试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 981.
LI Shenkui. Numerical analysis and model test of hourglass-shaped Karst collapse in Wuhan area [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 981.

(下转第132页)

- [4] QIAN W, QI T, ZHAO Y, et al. Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(1): 88.
- [5] 朱正国, 陈信宇, 陈自飞, 等. 盾构隧道下穿既有车站变形控制研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 6.
ZHU Zhengguo, CHEN Xinyu, CHEN Zifei, et al. Research on deformation control of shield tunneling under subway station[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 6.
- [6] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学: 下册[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI Wanning. Vehicle-track coupled dynamics: Volume 2 [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] XU L, YU Z, SHI C. A matrix coupled model for vehicle-slab track-subgrade interactions at 3D space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 128: 105894.
- [8] 梅慧浩, 冷伍明, 聂如松, 等. 重载铁路路基面动应力峰值随机分布特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1603.
MEI Huihao, LENG Wuming, NIE Rusong, et al. Random distribution characteristics of peak dynamic stress on subgrade surface of heavy haul railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1603.
- [9] 蔡小培, 蔡向辉, 谭诗宇, 等. 盾构下穿施工对高速铁路轨道结构的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 11.
- CAI Xiaopei, CAI Xianghui, TAN Shiyu, et al. Research on the influence of under-passing shield tunnel construction on the track structures of high-speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 11.
- [10] 赵闻强, 高亮, 肖宏, 等. 地铁线路隧道沉降对车辆-轨道系统力学特性的影响[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(增刊 1): 107.
ZHAO Wenqiang, GAO Liang, XIAO Hong, et al. Influence of subway tunnel settlement on mechanical characteristics of vehicle-track system[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S1): 107.
- [11] CHEN Z, BI L, ZHAO J. Comparison of single-pier settlement model and multi-pier settlement model in solving train-track-bridge interaction[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10): 1484.
- 收稿日期:2023-02-14 修回日期:2023-04-13 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-14 Revised:2023-04-13 Published:2025-04-10
• 第一作者:汤新辉, 高级工程师, 425662161@qq.com
通信作者:刘维正, 副教授, liuwz2011@csu.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 125 页)

- [9] 王士民, 林志宇, 王先明, 等. 溶洞诱发上覆砂层塌陷对既有盾构隧道的扰动分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊 2): 75.
WANG Shimin, LIN Zhiyu, WANG Xianming, et al. Disturbance analysis on existing shield tunnel under collapse of overlying sand layer induced by Karst cave[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 75.
- [10] 樊浩博, 周定坤, 刘勇, 等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1884.
FAN Haobo, ZHOU Dingkun, LIU Yong, et al. Mechanical response characteristics of lining structure of pipeline Karst tunnels in water-rich areas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1884.
- [11] 杨公标. 浅埋隧道与邻近地层空洞相互作用机理及其对地层变形的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
YANG Gongbiao. Interaction mechanism between shallow tunnel and adjacent stratum cavity and its influence on stratum deformation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [12] 李术才, 潘东东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3164.
LI Shucai, PAN Dongdong, XU Zhenhao, et al. A model test on catastrophic evolution process of water inrush of a concealed Karst cave filled with confined water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(9): 3164.
- [13] 莫伟平. 贵阳喀斯特地区地铁盾构施工风险及防范措施[J]. 铁道建筑, 2021, 61(4): 67.
MO Weiping. Construction risk and preventive measures for subway shield in Guiyang's Karst area[J]. Railway Engineering, 2021, 61(4): 67.
- [14] 何祥凡, 申兴柱, 王帆, 等. 盾构隧道穿越上软下硬地层施工力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 89.
HE Xiangfan, SHEN Xingzhu, WANG Fan, et al. Construction mechanical property analysis of shield tunnel through upper-soft and lower-hard stratum[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 89.
- [15] 宋晓军. 涂山轨道停车段施工对内环快速路安全影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
SONG Xiaojun. Study on the influence of Tu Shan rail parking section construction on the safety of inner ring expressway[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- 收稿日期:2023-02-17 修回日期:2024-10-28 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-17 Revised:2024-10-28 Published:2025-04-10
• 第一作者:陈俊, 高级工程师, 287728006@qq.com
通信作者:王士民, 教授, wangshimin@swjtu.edu.cn
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license