

DOI:10.116544/j.cnki.cn43-1494/u.20230403001

文章编号:1674-599X(2023)02-0049-06

引用格式:梁裔举,高山,陈璐.岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治[J].交通科学与工程,2023,39(2):49-54.

Citation: LIANG Yiju, GAO Shan, CHEN Lu. Research on deformation analysis and treatment technology of shallow buried tunnels in karst areas [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 49-54.

## 岩溶地区浅埋隧道变形分析及处治

梁裔举<sup>1</sup>,高山<sup>2</sup>,陈璐<sup>3</sup>

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200;

2. 广西新发展交通集团有限公司, 广西南宁 530001;

3. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**为有效解决岩溶地区浅埋隧道的变形问题,依托贵州省某岩溶地区浅埋隧道工程实例,考虑采用注浆充填和支护加固手段等进行处治,运用MIDAS/GTS有限元软件进行岩溶隧道的围岩变形和支护结构受力分析,并针对该岩溶隧道提出相应的处治措施。研究表明:①超前小导管和超前大管棚支护均能有效减小岩溶地区隧道的应力和变形,但超前大管棚的作用效果更明显;②溶洞充填程度越高,隧道变形控制效果越好,完全充填对于控制隧道变形十分重要,故应保障注浆整体质量,以有效控制隧道变形;③综合考虑数值分析结果和工程条件,提出具体的处治方案。以注浆充填隧道下方的溶洞,并结合超前小导管和超前大管棚方法对隧道进行加固处理。

**关键词:**岩溶隧道;变形分析;处治技术;MIDAS/GTS

中图分类号:U455.6

文献标志码:A

### Research on deformation analysis and treatment technology of shallow buried tunnels in karst areas

LIANG Yiju<sup>1</sup>, GAO Shan<sup>2</sup>, CHEN Lu<sup>3</sup>

(1. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530200, China;

2. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530001, China;

3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the deformation problem of shallow buried tunnels in karst areas, based on the shallow buried tunnel in karst areas in Guizhou province, the slurry filling and support reinforcement are considered to reinforce, the MIDAS/GTS finite element software is used to analyze the deformation of tunnel surrounding rock and the stress of support structure. The corresponding treatment measures are then proposed for the karst tunnel. The outcomes show that: ① The stress and deformation of tunnel in karst area can be reduced by using the advanced support methods of the small conduit and large pipe shed, and the effect of advanced large pipe shed is more obvious than that of advanced small pipe; ② The higher the degree of cavity filling, the better the control effect of tunnel deformation, the complete filling play significant role to control the tunnel deformation, hence the quality of grouting should be guaranteed; ③ Considering the results of numerical analysis and the actual situation of the karst tunnel, the treatment plan is proposed. The cavity below the tunnel is grouted and filled, the advanced small conduit and large pipe shed are use to reinforce the tunnel.

**Key words:** karst tunnel; deformation analysis; treatment technology; MIDAS/GTS

收稿日期:2023-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004036);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40572);广西交通运输行业重点科技项目(2020-24)

作者简介:梁裔举(1978—),广西路桥工程集团有限公司高级工程师。

隧道工程作为交通基础设施建设的重要一环,具有周边环境多变和结构复杂等特点<sup>[1]</sup>。隧道建设过程中会遇到需要穿越地质结构复杂的岩溶地区的情况,因岩溶地区的特殊性,隧道工程极易发生失稳破坏、突水突泥、溶洞坍塌等重大安全事故,极大威胁隧道的施工和运营安全<sup>[2-3]</sup>。因此,需要对岩溶地区的隧道进行变形和受力分析,并制定合适的处治方案,这对指导岩溶地区隧道的设计施工和危害防护及处理十分重要。

岩溶地区隧道稳定和病害治理一直是学者研究的热门话题<sup>[4-5]</sup>。吴梦军等<sup>[6]</sup>针对某岩溶地区公路隧道进行模型试验,并结合有限元数值分析手段,研究该岩溶地区公路隧道的力学响应规律,探讨不同岩溶发育程度及位置对隧道受力和变形的影响。韩惊伟<sup>[7]</sup>结合岩溶地区隧道工程实例,运用ABAQUS有限元软件模拟了隧道开挖施工全过程,探究岩溶地层对隧道受力和变形的影响。刘成虎<sup>[8]</sup>依托贵阳市某岩溶地区的地铁隧道工程实例,运用MIDAS有限元软件模拟隧道开挖过程中的围岩变形及应力变化情况,并对岩溶特殊地质条件下的隧道采用交叉中隔壁法(center cross diagram, CRD)进行优化。王伟清<sup>[9]</sup>针对山东某岩溶地区隧道工程实例,进行岩溶探测技术和处治技术研究,从溶洞、岩溶水和填充物等多方面提出了有针对性的处治措施。周权峰等<sup>[10]</sup>查阅大量文献,深入研究了各种岩溶形态对隧道围岩稳定的影响,分析了不同溶洞形状、间距及填充物条件下隧道的受力和变形规律。代永文等<sup>[11]</sup>针对南京某强岩溶地区盾构隧道进行数值模拟,确定岩溶处理范围,并制定有针对性的注浆处理方案。本研究以某岩溶地区浅埋隧道为工程背景,采用CRD法进行隧道开挖,考虑采用注浆充填和支护加固等手段进行岩溶隧道处治,运用MIDAS/GTS有限元软件模拟不同注浆充填程度及支护方式下隧道的受力及变形规律,并针对该岩溶隧道提出有效的处治措施,可为类似岩溶地区隧道的施工与设计提供参考。

## 1 模型建立及参数设置

依托贵州省某岩溶地区浅埋隧道为工程实例,运用MIDAS/GTS有限元软件建立岩溶隧道三维计算模型,如图1所示。该隧道采用CRD法进行隧道

开挖,将大断面隧道分成4个相对独立的小洞室,分部施工,循环进尺取1.0 m,各开挖台阶相差4个开挖步,该断面所有部分开挖完成后进行初期支护。充分考虑隧道施工及溶洞的影响范围,计算模型整体宽120.00 m、高70.00 m、纵向深60.00 m。隧道埋深18.20 m,为浅埋隧道,跨度13.30 m,结构高度11.59 m,溶洞布置在隧道轴向方向中部区域底部3.00 m处,跨度8.00 m,溶洞与隧道的位置关系如图2所示。考虑模型的精度和计算量,加密隧道开挖区及超前加固区网格,最终划分为45 320个单元,生成33 880个节点。

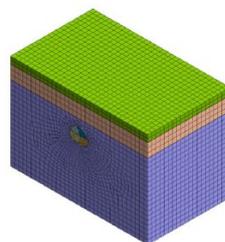


图1 隧道三维计算模型

Fig. 1 Tunnel 3D calculation model

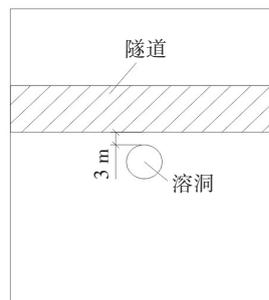


图2 溶洞与隧道的位置关系

Fig. 2 The position relationship between the cave and the tunnel

模型选用位移边界条件,采用Mohr-Coulomb破坏准则。模型顶部设置为自由边界,左右边界采用横向约束,前后边界采用纵向约束,模型底部采用竖向约束。土体选用实体单元,作为初期支护的混凝土与钢筋,选用板单元模拟;作为临时支撑的钢支撑,也选用板单元模拟;超前小导管和大管棚加固等措施,通过调整土体局部参数模拟。该隧道临近的溶洞为无充填型溶洞,采用球形溶洞进行模拟。隧道土体及支护结构的物理力学参数见表1。

考虑不同充填程度和支护加固方式对隧道变形及受力的影响,提出合理有效的处治措施。分别将溶洞注浆充填设置为25%、50%、75%、100%四种充填方案,围岩加固设置无超前加固、超前小导管加固和超前大管棚3种支护加固方式,并对隧道进行位移和应力分析。

表 1 数值仿真计算参数

Table 1 Numerical simulation calculation parameters

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ MPa	摩擦角/ (°)
沙土	30	0.35	18.0	20	28
风化土	40	0.31	20.0	25	30
风化岩	300	0.25	23.0	100	35
超前小导管	1 680	0.21	25.0	80	35
超前大管棚	5 500	0.20	20.0	55	42
工字钢	20 000	0.20	23.8		
初期全环形钢架支护	33 957	0.20	24.0		
锚杆	210 000	0.30	78.5		

## 2 结果分析

### 2.1 围岩加固

隧道纵向 30 m 处(即中部)的位移和应力较大,故考虑将隧道纵向 30 m 处的断面作为监测断面,研究各支护加固方式对隧道变形和受力的影响。

#### 1) 位移分析

不同支护加固方式的监测断面拱顶沉降变形曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出,各支护方式的隧道拱顶沉降趋势基本一致,随着开挖的深入,拱顶沉降先缓慢增加,再迅速增大,然后缓慢增加,最后趋于平稳。开挖前期,开挖面离监测断面较远且有支撑,隧道拱顶沉降变化平稳;开挖中期,隧道开挖进行到拱顶位置,拱顶沉降明显增大,变化幅度较大;开挖后期,开挖距离拱顶位置越来越远,拱顶沉降逐渐平缓,最终达到稳定。不同支护方式对拱顶下沉有一定的控制作用,均能有效减少拱顶在隧道开挖过程中的沉降量和突变情况,但超前大管棚支护对拱顶沉降的控制效果最好。

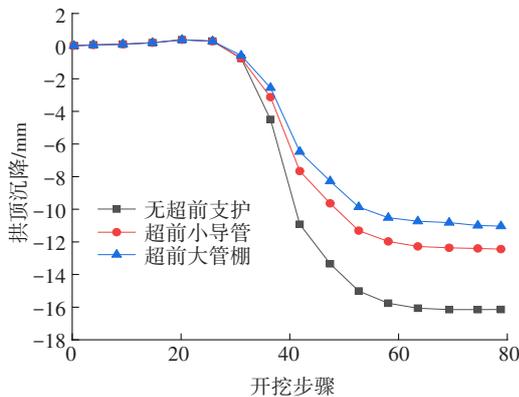


图 3 监测断面拱顶沉降曲线

Fig. 3 The vault settlement curve of the monitoring section

不同支护方式的地表沉降位移曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,不同支护方式对拱顶下沉均有一定的控制作用,且超前大管棚的控制作用大于超前小导管支护的。距离监测断面 20 m 范围内,地表沉降大于 2 mm,隧道开挖对地表沉降的影响较小;超过 20 m 范围,地表沉降小于 2 mm,隧道开挖对地表沉降的影响较小。距离监测断面越近,地表位移越大,说明隧道开挖对地表的影响主要集中在隧道中部。

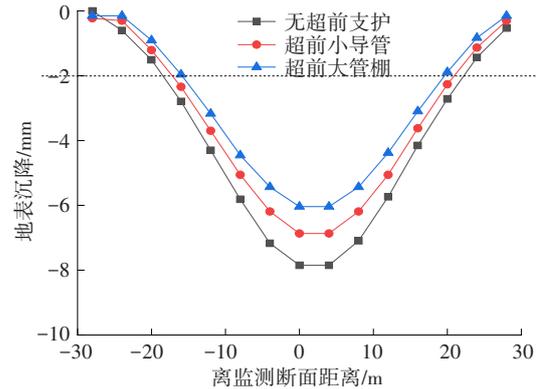


图 4 监测断面地表沉降曲线

Fig. 4 Surface settlement curve of the monitoring section

不同支护方式的监测断面拱腰水平收敛曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,与拱顶竖向位移类似,开挖前期,拱腰水平位移缓慢增加;开挖中期,拱腰水平位移迅速增加,发生突变;开挖后期,拱腰水平位移缓慢增加,最后趋于稳定。从图 4 还可以看出,超前大管棚对隧道水平收敛的控制作用较好,无超前支护、超前小导管、超前大管棚 3 种支护方式的监测断面水平收敛最终值分别为 10.8、10.6、8.9 m,超前小导管支护与无超前支护情况下的隧道水平收敛差距较小,对隧道水平变形的控制作用不明显,而超前大管棚减小了约 18% 的隧道水平收敛,是超前小导管控制效果的 5 倍。

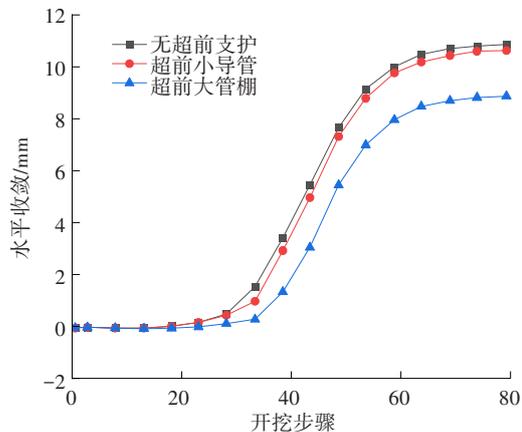


图 5 监测断面拱腰水平收敛曲线

Fig. 5 Horizontal convergence curve of the monitoring section

## 2) 应力分析

在无超前支护条件下,隧道初期支护最大主应力达到 3.14 MPa,大于 C30 喷射混凝土的轴心抗拉强度,不能满足施工安全要求。采用超前大管棚支护的隧道的最大主应力最小,表明超前大管棚支护对隧道的支护效果最好,能有效减小围岩应力。超前小导管能有效减小 70.1% 的拱顶应力和 2.3% 的拱腰应力,超前大管棚能有效减小 82.3% 的拱顶应力和 4.6% 的拱腰应力。这两种支护对隧道应力的作用效果差距不大,对隧道拱顶应力的作用效果均较好,但对拱腰的作用效果不明显。在对隧道进行超前支护时,可以综合考虑这两种加固方法。

### 2.2 注浆填充

合理的注浆充填参数对隧道设计和施工十分重要。注浆量不足可能导致隧道、溶洞等出现塌陷,注浆过量则增大了开挖难度与施工成本。

#### 1) 位移分析。

不同充填程度下隧道的竖向及水平位移见表 2。由表 2 可知,隧道竖向及水平位移均随充填程度的增大而减小,但水平位移的变化幅度较小,表明溶洞注浆充填能有效控制隧道变形,且对隧道竖向变形的控制效果更加显著,注浆填充对围岩水平位移有一定的控制作用,但控制作用有限。整体上看,隧底隆起量大于拱顶沉降量,围岩竖向位移主要集中在隧道底部。分析不同填充程度的隧底隆起可以看出,充填程度由 25% 增加到 75%,隆起量减少 0.95 mm,充填程度由 25% 增加到 100%,隆起量减少 2.72 mm,即充填程度达到 75% 的隧底隆起控制效果仅占充填程度达到 100% 的 35%。即相比于部分充填,完全充填能大幅提高隧底隆起控制效果,这充分说明了完全注浆的重要性。因此,在注浆充填过程中,应该注重改良注浆技术,提高注浆的整体质量,有效减小隧道的变形。

表 2 不同充填程度下隧道竖向及水平位移

Table 2 Vertical and horizontal displacements of the tunnel under different filling levels

充填程度/ %	拱顶沉降/mm	隧底隆起/mm	水平位移/mm
25	-11.32	18.93	4.03
50	-11.13	18.61	4.00
75	-10.97	17.98	3.99
100	-10.86	16.21	3.88

## 2) 应力分析。

注浆充填对隧道支护结构应力的影响较小,不同充填程度下隧道支护结构的受力情况基本一致,最大主应力均为 4.30 MPa。因此,需要针对该岩溶隧道采取支护加固措施,来保障隧道安全。

## 3 处治技术

针对该岩溶地区浅埋隧道变形的问题,采用溶洞注浆充填结合支护加固的方式进行处治,并加强岩溶地段的施工监测。

### 3.1 注浆填充

根据工程探测结果,隧道下方存在跨度约 8 m 的溶洞,溶洞距离隧道较近,故舍弃群钢管桩或托梁+钢筋混凝土板的处治方案,考虑对溶洞进行注浆充填,工作量小且有利于保持围岩原始状态。岩溶注浆施工工艺流程如图 6(a)所示。

具体岩溶注浆充填技术为:注浆钻孔孔径为 0.108 m,单孔有效扩散半径为 2.000 m。注浆设计终压为 1.5~2.0 MPa,注浆压力达到设计终压且保持 10 min 以上,直到注浆饱满、完全充填后结束注浆。为保证注浆效果,需检查分析每个钻孔的注浆记录,对潜在注浆盲区进行钻孔取芯检查和补浆处理。一般选用普通硅酸盐水泥和波美度 40 度的水玻璃,按照水泥浆水灰比为 0.8~1.0,水泥浆与水玻璃浆液比为 1.0:0.8 配置注浆材料。

### 3.2 超前小导管

超前小导管能有效加固围岩,与钢架一起共同支撑围岩。超前小导管施工工艺流程如图 6(b)所示。超前小导管采用热轧无缝钢花管,外径 42.00 mm,内径 35.00 mm,壁厚 3.50 mm,环向间距 400.00 mm,倾角 10°~15°,导管沿隧道拱部 144° 范围布置,注浆材料选用 M20 水泥浆或水泥砂浆。

### 3.3 超前大管棚

超前大管棚加固能支撑自稳能力极低的软弱围岩,防止围岩下沉、坍塌。超前大管棚施工工艺流程如图 6(c)所示。超前大管棚采用热轧无缝钢花管,长 50 m,外径 108 mm,内径 96 mm,壁厚 6 mm,环向间距 400 mm,倾角 1°~3°(根据实际情况进行调整),导管沿隧道拱部 144° 范围布置,注浆材料选用 1:1 水泥砂浆。

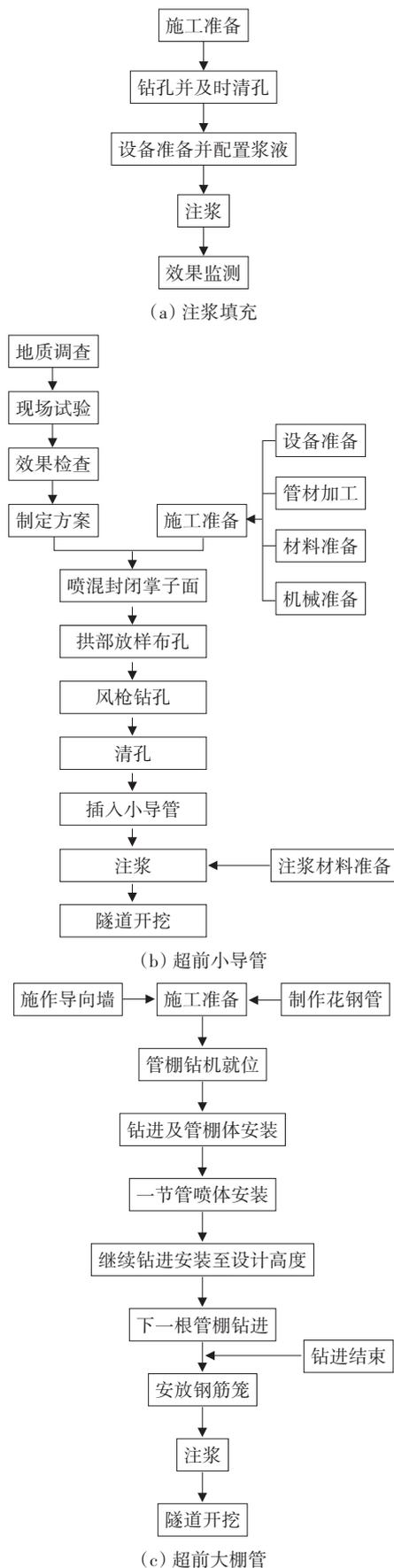


图6 具体施工工艺流程

Fig. 6 Specific construction process

## 4 结论

本研究依托贵州省某岩溶地区浅埋隧道工程,运用MIDAS/GTS有限元软件,模拟不同注浆充填程度和支护方式对隧道围岩变形及支护结构受力的影响,并针对该岩溶隧道提出相应的处治措施。得到结论为:

1) 采用超前小导管和超前大管棚支护加固法均能有效减小岩溶地区隧道的变形和应力,其中超前大管棚的作用效果更明显。在对隧道进行超前支护时,应综合考虑这两种支护加固方法。

2) 隧道下的溶洞采用注浆充填,可有效减小隧道变形,但该方案对隧道受力的影响较小。溶洞充填程度越高,隧道的变形控制效果越好,尤其是完全填充对控制隧道变形十分重要。因此,在注浆充填过程中,应考虑改良注浆技术,保障注浆整体质量,以有效减小隧道变形。

3) 针对该浅埋岩溶隧道的变形问题,结合数值模拟分析结果,给出具体的处治方案:对隧道下方溶洞进行注浆充填,保证注浆质量,并综合采用超前小导管和超前大管棚加固这两种措施对隧道围岩进行超前支护加固。

## 参考文献(References):

- [1] 陈赞,李倩. 基于复杂网络的隧道施工塌方风险演化研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(2): 129-137.  
CHEN Yun, LI Qian. Research on evolution of collapse risk in tunnel construction based on complex network[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 129-137.
- [2] 李术才,王康,李利平,等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报,2017,49(1):22-30.  
LI Shucai, WANG Kang, LI Liping, et al. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in Karst tunnels [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 22-30.
- [3] LI L P, LEI T, LI S C, et al. Risk assessment of water inrush in Karst tunnels and software development [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1843-1854.
- [4] 凌同华,刘芳,何文超,等. 含水空洞的探地雷达正演模拟与试验研究[J]. 交通科学与工程,2022,38(3):40-47.

- LING Tonghua, LIU Fang, HE Wenchao, et al. Forward simulation and experimental study of ground penetrating radar with water-bearing cavity[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3):40-47.
- [5] 柴宝红, 史红英, 梅坤, 等. 岩溶地区高速公路隧道绿色注浆试验研究[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3):107-112.
- CHAI Baohong, SHI Hongying, MEI Kun, et al. Experimental study on green grouting of expressway tunnel in Karst area[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3):107-112.
- [6] 吴梦军, 许锡宾, 赵明阶, 等. 岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9):1525-1529.
- WU Mengjun, XU Xibin, ZHAO Mingjie, et al. Construction mechanics response study of highway tunnel in Karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9):1525-1529.
- [7] 韩惊伟. 岩溶地区隧道衬砌受力及变形特征的有限元分析[J]. 路基工程, 2017(5):129-131.
- HAN Jingwei. Finite element analysis of stress and deformation characteristics of tunnel lining in the Karst area[J]. Subgrade Engineering, 2017(5):129-131.
- [8] 刘成虎. 岩溶地区大断面浅埋暗挖隧道CRD工法优化研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(2):174-177.
- LIU Chenghu. Study on optimization of CRD construction method for large cross-section shallow-buried tunnel in Karst area[J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(2):174-177.
- [9] 王伟清. 隧道岩溶探测及处治技术研究[J]. 山东交通科技, 2018(4):128-129, 133.
- WANG Weiqing. Research on tunnel Karst detection and treatment technology[J]. Shandong Jiaotong Keji, 2018(4):128-129, 133.
- [10] 周权峰, 张仁坤, 周靖尧. 溶洞形态对隧道围岩稳定性影响研究进展[J]. 福建建材, 2022(1):116-120.
- ZHOU Quanfeng, ZHANG Renkun, ZHOU Jingyao. Research progress on the influence of Karst cave shape on the stability of tunnel surrounding rock[J]. Fujian Building Materials, 2022(1):116-120.
- [11] 代永文, 李建强, 林恩, 等. 强岩溶地区盾构隧道注浆处理方案设计[J]. 钻探工程, 2021, 48(6):118-125.
- DAI Yongwen, LI Jianqiang, LIN En, et al. Design of grouting treatment scheme for shield tunnel in strong Karst area[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6):118-125.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:陈璐)