

DOI: 10.7672/sjgs2025220045

岩溶区地下结构施工渗漏问题综合处理技术研究*

农兴中¹,王艳红¹,赖鹏邦¹,咎子卉¹,刘文占^{2,3},周东波²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 中国建筑第二工程局有限公司华中公司, 湖北 武汉 430056)

[摘要] 以广州白云站(棠溪站)综合交通枢纽一体化建设工程为背景,对施工过程中的岩溶处理、基底涌水、结构渗水等问题进行了系统性的调查与分析。从勘察方案设计、处理方法及处理效果等方面总结了岩溶处理技术;针对突发涌水事故的应急处理方案进行总结,对有明水与无明显水情况下的结构开裂渗漏问题进行了分析,形成了综合处理方法,并通过工程应用对处理技术进行验证。

[关键词] 地铁车站;岩溶;基坑;地下水;渗漏;注浆

[中图分类号] TU943

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0045-06

Comprehensive Treatment Technology for Leakage Problems in Underground Structures Construction in Karst Areas

NONG Xingzhong¹, WANG Yanhong¹, LAI Pengbang¹, ZAN Zihui¹,
LIU Wenzhan^{2,3}, ZHOU Dongbo²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China;

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

3. Central China Branch, China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: Against the backdrop of the integrated construction project for the Guangzhou Baiyun Station (Tangxi Station) comprehensive transportation hub, a systematic investigation and analysis were conducted on issues encountered during construction, including karst treatment, groundwater seepage at the foundation level, and structural water leakage. This paper summarizes karst treatment technologies from aspects including investigation plan design, treatment methods, and effectiveness. It also compiles emergency response protocols for sudden water inflow incidents, analyzes structural cracking and leakage issues under both visible and invisible water conditions, and develops comprehensive treatment approaches. The effectiveness of these techniques was validated through practical engineering applications.

Keywords: subway stations; karst; foundation excavation; underground water; leakage; grouting

0 引言

岩溶区地质条件复杂,地下水位高且变化幅度大,岩溶发育复杂,地下结构施工难度大^[1-2]。地下结构施工过程中,往往会出现各种渗漏问题,如底板、侧墙及顶板漏水等^[3-6],这些问题不仅影响了工程质量和安全性,还会导致严重的环境污染和经济

损失^[7]。

针对岩溶区地下结构施工渗漏问题,罗立娜^[8]分析了岩溶区地铁结构渗漏水成因,指出需通过衬砌表面病害检查、地铁沿线岩溶探查和地铁结构长期监测等方法及时掌握地铁衬砌结构的渗漏水情况及周边岩溶发育状况。欧孝夺等^[9]结合某盾构隧道区间的现场施工实际情况,提出了盾构隧道岩溶处治的原则和范围,分别从溶(土)洞处理和岩溶突水、突泥的应急处理进行岩溶处治方案分析,并采用技术手段对处治效果进行了检测分析。洪冬

* 国家自然科学基金(52178302);住房和城乡建设部研究开发项目(2022-K-044)

[作者简介] 农兴中,正高级工程师, E-mail: nongxingzhong@dtjy.com

[收稿日期] 2025-05-05

明等^[10]针对岩溶发育区地铁车站基坑支撑结构的钢立柱在车站结构完工后发生的渗漏水问题,设计出了钢立柱渗水的开孔封堵填充方法。此外,还有许多学者针对岩溶区地下结构施工渗漏问题进行了深入研究和实践,并取得了一定的成果^[11-13]。

目前,针对岩溶区地下结构施工渗漏问题的处理技术主要包括堵漏法、注浆法、排水法等^[14-15]。堵漏法主要是通过封堵漏水点的方式解决渗漏问题。根据漏水点的位置和大小采用不同的堵漏材料和方法。对于小规模渗漏可以采用速凝水泥、堵漏剂等常规堵漏材料;对于大规模的渗漏可以采用化学灌浆、高压注浆等复杂方法。堵漏法具有操作简单、即时效果好的优点,但难以解决根本问题,存在反复漏水的风险。注浆法是向岩溶溶洞及岩溶裂隙注浆^[16-17],可分为水泥注浆、化学注浆、混合注浆等。注浆法能有效提升结构的整体性能和防渗性能,但存在影响周边环境的风险,注浆不当会导致结构破坏等不良后果。排水法是通过设置排水沟、排水管等方式将地下水排出。根据排水方式和位置的不同,可分为明排、暗排、地表排水等。排水法的优点是操作简单、易于维护,但可能会引发新的渗漏问题。

综上所述,现有处理技术虽具有一定成效,但仍存在局限性。因此,需研究新的综合处理技术解决岩溶区地下结构施工渗漏问题。以广州白云站(棠溪站)综合交通枢纽工程为背景,系统研究了施工中面临的岩溶处理、基底涌水及结构渗水等关键问题,并提出针对岩溶区地下结构施工渗漏问题的解决方案。

1 工程概况

白云站(棠溪站)综合交通枢纽位于广州市中心城区西北部,周边现状以绿地、村庄和居住小区为主。场地下伏基岩为二叠系栖霞组石灰岩,属覆盖型岩溶区。该区域岩溶发育强烈,溶洞空间分布无显著规律,且以表层溶蚀为主要特征,形态与规模各异,多数溶洞为未充填或半充填状态,整体充填率较低(约 35.98%);充填物多为流塑~软塑状黏土,局部夹砂,工程性质软弱,易被水流冲蚀,将对基坑工程的稳定性产生不利影响。为便于施工管理,场地划分为 3 个标段,各标段溶洞情况如表 1 所示。

该场地 1 标段基坑深约 35m,地层条件从上至下依次为填土、淤泥、黏土、中粗砂、全风化灰岩、强风化灰岩、中风化灰岩和微风化灰岩,开挖过程中基底多次出现涌水情况。地铁基坑深 24~35m,地

表 1 溶洞发育情况

Table 1 Karst development				
标段	见洞率/%	平均洞高/m	最高洞高/m	岩溶发育程度
1	50.87	3.90	27.2	强发育
2	11.36	1.90	5.9	中等发育
3	27.72	2.97	10.1	强发育

铁底板主要位于微风化灰岩地层。地铁基坑中部及南端溶洞较发育,岩溶发育程度为强发育,砂层多直接覆盖于基岩以上,场地属于岩溶地面塌陷易发区。此外,该标段约 34%溶洞位于基底以下,基底以下溶洞平均高度约 3.2m,勘察结果揭示该场地有串珠状溶洞。

该标段场地地下水按赋存方式分为第四系松散层潜水、基岩裂隙水及碳酸盐岩裂隙岩溶水。碳酸盐类裂隙岩溶水主要赋存于灰岩中~微风化带、溶洞、基岩裂隙带中,该层水多与上层砂层水连通,以潜水为主,局部为承压水,根据抽水试验资料,溶洞发育部位岩溶水水量丰富,局部上覆软土及黏性土,为微承压水。承压水头高 0.3~3.3m,标高为 3.630~7.370m。

2 岩溶处理技术

岩溶处理范围为地下连续墙内外各 3m 区域及墙底以下 5m 深度,同时基底处理范围为基底以下 5m,具体范围如图 1 中红线所示。施工过程中,采用“一槽两钻”工艺,即结合超前钻孔和探边钻孔,二者均兼作注浆孔和出气孔。超前钻孔深度须达到地下连续墙底或基底以下 5m。注浆与钻孔顺序可根据实际情况灵活调整,遵循总量控制、灵活处理的原则。

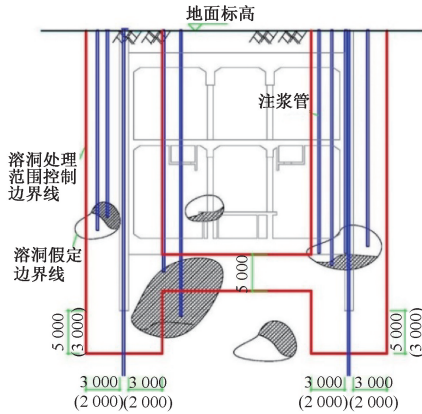


图 1 岩溶处理范围

Fig.1 Extent of karst treatment

超前钻孔具体布置为:临时立柱桩和抗拔桩按“一桩一孔”设置;桩径 1.2m 和 1.5m 承压桩设置 3 个超前钻孔,桩径 1.8m 承压桩设置 4 个。各类工程桩的超前钻孔深度要求为:端承桩(适用于场站

配套承压桩、地铁基坑临时立柱桩),桩底以下钻孔深度 $H\geq 3d$ (d 为桩径)且 $\geq 5\text{m}$;摩擦端承桩(适用于场站配套基坑临时立柱桩), $H\geq 2.5d$ 且 $\geq 4\text{m}$;纯摩擦桩(适用于全部抗拔桩), $H\geq 1.5d$ 且 $\geq 2\text{m}$ 。项目岩溶处理方案中,锚索岩溶处理范围为锚索区域平面范围两侧各 3m 和锚固段端头外侧 5m 的平面范围,深度至锚索以下 5m,并以探边钻孔处该锚索的实际深度确定。

3 基底涌水应急控制技术

基坑在开挖过程中共出现 4 个涌水点,均出现在地铁基坑 35m 深处,涌水点位如图 2 所示,现场基底涌水如图 3 所示。各点位具体涌水情况为:涌水点 1 在开挖至距离基底约 6m 时基底出现突水,涌水点 2 在开挖至距离基底约 8m 时基底出现突水,涌水点 3 在开挖至距离基底约 10m 时基底出现突水,出水量约 $20\text{m}^3/\text{h}$,涌水点 4 在开挖至基底后,清底过程中,在地下连续墙边发生涌水涌砂,出水量约 $20\text{m}^3/\text{h}$ 。



图 2 涌水点位
Fig. 2 Locations of water inrush points

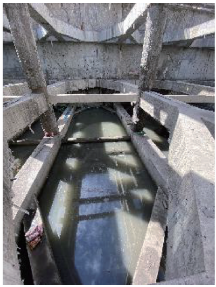


图 3 涌水点 2 基底涌水情况
Fig. 3 Basal water inrush condition at point 2

基底涌水应急处理方案如下:①及时采取围堰封堵+浇筑混凝土反压的措施,堵住出水点;②墙外采用跨孔 CT 扫描解析地质情况,锁定地质溶洞范围,再针对溶洞进行处理;③针对地质解析锁定后的溶洞位置及埋深,采用地质钻机进行地质探查,为溶洞注浆提供依据;④针对地质钻孔情况对溶洞进行注浆处理。本项目注浆材料主要采用双液浆(水泥浆和水玻璃)、聚氨酯与砂浆。

4 结构渗漏综合治理关键技术

4.1 渗漏类型

基坑区域划分如图 4 所示,立柱桩与底板存在

预留后浇洞口,存在渗水情况。结构施工阶段,预留套筒及钢筋为后期接驳提供条件,并留设止水钢板,洞口尺寸为 $2.7\text{m}\times 2.7\text{m}$ 。洞口数量总计为 536 个,各分区洞口数量及底板底标高如表 2 所示。由表 2 可知,底板洞口在空间分布上极不均衡,且底板标高差异显著,导致不同区域承受的水压及渗漏风险等级迥异。因此,本项目必须根据洞口所处位置及渗水程度,采取差异化的分级封堵策略。1 标段侧墙及顶板总计渗水 496 处。

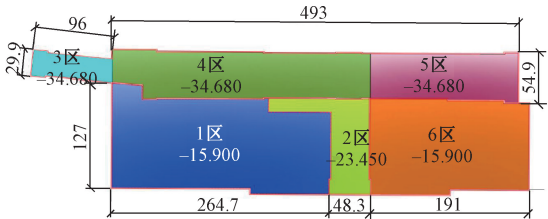


图 4 1 标段基坑区域划分(单位:m)
Fig. 4 Zoning of the foundation excavation in contract section 1(unit :m)

表 2 各分区洞口数量及底板底标高				
Table 2 Number of openings per section and bottom slab elevation				
分区	1 区	2 区	3 区	4,5 区
洞口数量/个	270	70	24	172
底板底标高/m	-19.100	-26.400	-38.786	-38.786

4.2 渗漏成因分析

- 1)底板洞口渗水主要原因为基底未进行溶洞处理,水流直接沿立柱桩与岩层的缝隙渗出。
- 2)侧墙渗水主要原因为本工程侧墙墙体厚度大,墙体自下而上厚度分别为 1 200,1 000,800mm,且地铁较长,浇筑完成后极易诱发温度裂缝。此外,由于支撑体系密集,侧墙均位于腰梁下方,浇筑难度大,施工过程中也可能存在缺陷。
- 3)水泥水化热引起的温度应力和变形。
- 4)内外约束条件的影响。
- 5)外界气温变化的影响。

4.3 底板洞口封堵总体流程

面对总数达 536 个的底板洞口,为避免集中封堵导致基底水压急剧上升、引发新的渗漏风险,必须制定科学的封堵顺序与间隔。项目底板洞口封堵拟根据现场渗水量大小进行专项处理,总体施工流向根据立柱桩拆除进度自北向南封堵,佛八线自西向东封堵,分 2 条施工线路按整体封堵顺序推进,相邻施工线路邻近洞口施工间隔 $\geq 7\text{d}$,如图 5 所示(右向为北)。

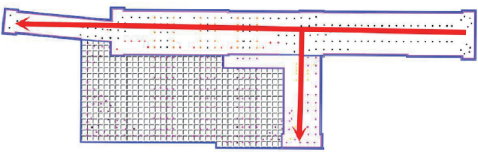


图 5 底板洞口封堵总体施工流向

Fig. 5 Overall construction workflow for sealing base-slab openings

4.4 基于渗水程度的底板洞口分级封堵技术

4.4.1 无渗水及较小渗水洞口封堵

封堵作业前,先在桩头外侧超挖 300mm 深集水坑,用于排水以创造干作业条件。随后绑扎钢筋并预埋 DN50 注浆管(管底采用胶带或单向阀临时封闭,管顶高出板面 150mm)。完成后即浇筑混凝土,一次浇筑至止水钢板上方约 800mm 处。浇筑后若底板无渗水,则待混凝土养护 7d 达到强度后完成封堵。为分散水压,需间隔 1 跨预留注浆管。若出现渗水流,则预埋梅花形花管进行引流,待后期统一注浆封堵,如图 6 所示。

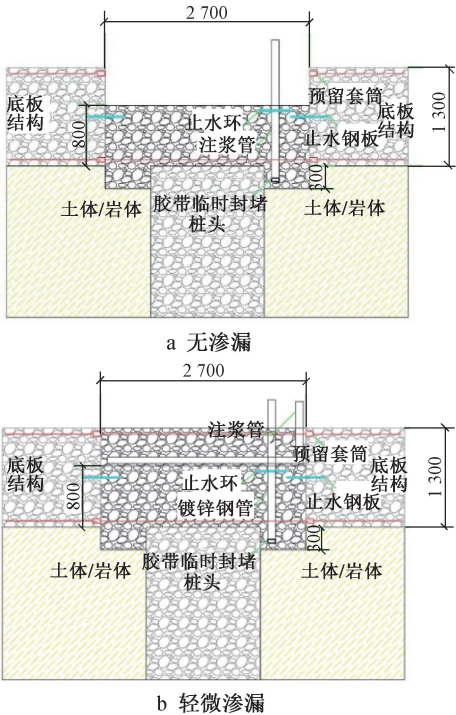


图 6 无渗漏与轻微渗漏洞口封堵方法

Fig. 6 Sealing method for openings with no leakage or slight seepage

4.4.2 较大渗水洞口封堵

针对渗水量较大的底板洞口,采用“分层浇筑、引流降压、逐级封闭”的综合封堵方案,具体工艺流程如下。分层封堵流程如图 7 所示。

1) 在桩头外侧开挖 300mm 深集水坑,用于持续排水,确保钢筋绑扎作业面处于干场条件。钢筋安

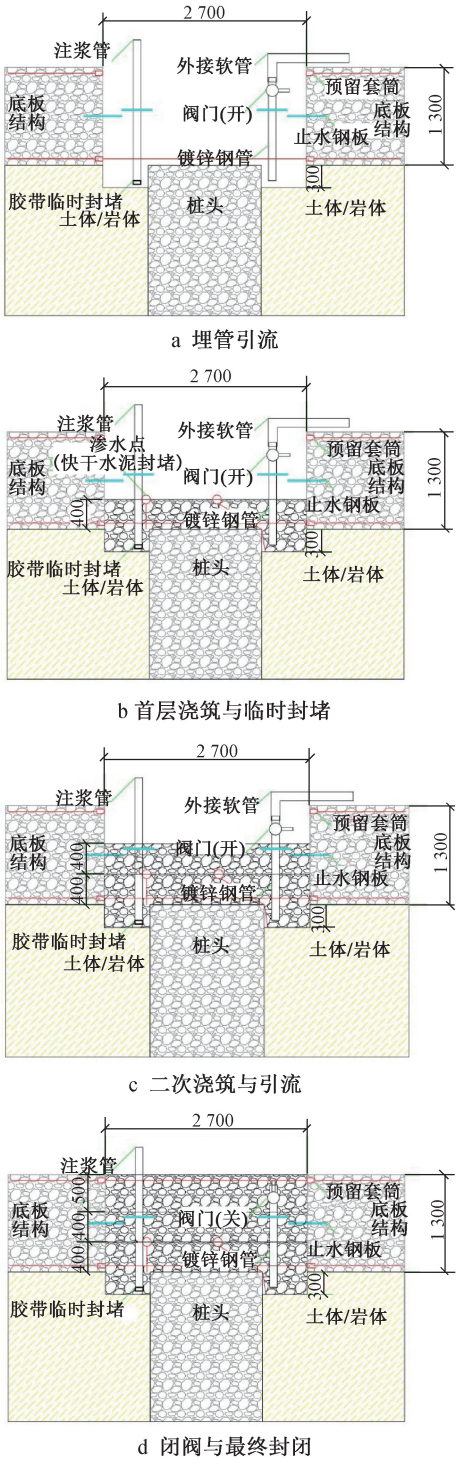


图 7 严重渗漏洞口分层封堵流程

Fig. 7 Step-by-step sealing procedure for severely leaking openings

装完成后,在集水坑内预埋 DN50 镀锌注浆钢管(外焊止水环,管底临时封闭),用于后期注浆;同时在其另一侧设置带阀门的 DN50 引流镀锌钢管,外接软管将水流有序导出。

2) 浇筑首层 400mm 厚混凝土,由于水压较大,浇筑后可能在混凝土内部形成渗流通道。此时采

用快硬型防水材料(如“水不漏”)对明显渗漏点进行临时封堵,使水流集中至预设的引流管排出。

3)首层封堵见效后,继续浇筑第2层400mm厚混凝土,浇筑面控制在止水钢板上方、引流阀门下方。该层浇筑后结构基本稳定,可实现有效引流,随后进行 $\geq 7\text{d}$ 的养护。

4)混凝土强度达到设计要求后,关闭引流阀门,观察无渗漏后浇筑最后1层混凝土,完成洞口整体封闭。

4.5 有明水条件下系统注浆技术

4.5.1 注浆治理原则

1)渗漏水治理方式应遵循“先排后堵、由面到点”的顺序,通过疏导将大面积渗漏逐步集中为点状渗漏,最后进行精准封堵。

2)渗漏水治理顺序为先处理大漏后处理小漏,从结构底板开始,依次向上进行墙身、顶板的治理,以有效控制水压路径。

3)对存在混凝土裂缝的区域,应先进行结构强度评估。若存在安全隐患,须先进行补强加固,再进行防水密封处理。

4)根据缺陷类型选择相应方案:施工缝采取“水泥浆+聚合物防水砂浆”复合注浆;面渗漏在评估结构安全性后决定是否补强加固;点渗漏直接进行防水堵漏。出于耐久性考虑,不建议使用聚氨酯材料。

4.5.2 注浆材料选择

1)单液水泥浆采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,水灰比为1:1,可根据现场注浆情况动态调整。

2)化学浆液选用低黏度环氧树脂灌浆料,其固化物性能需满足JC/T 1041—2007《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》中Ⅱ级要求,环氧树脂与固化剂配比为3:1。

3)超细水泥浆适用于细微裂缝,常规水料比为1:1,可根据现场注浆情况调整配合比。

4.5.3 注浆工艺参数与控制

1)底板注浆

对底板预留注浆管(洞口封堵及施工缝处)进行系统注浆,注浆材料采用超细水泥,注浆起压为0.2~0.3MPa,终压控制在0.4MPa左右。注浆过程需实时监测压力和流量变化,当压力逐渐上升至终压并持压30min,且浆液无法继续注入时,即可结束本次注浆。

2)侧墙注浆

侧墙注浆首先处理施工缝预留注浆管。对于渗水裂缝,需钻孔埋设注浆管,孔位宜在侧墙净高

1/3范围内、水平间距15~20m交错布置,并根据渗漏情况适当调整。注浆管需垂直于结构面埋设,注浆终压应控制在0.3MPa左右,具体埋设方式如图8所示。

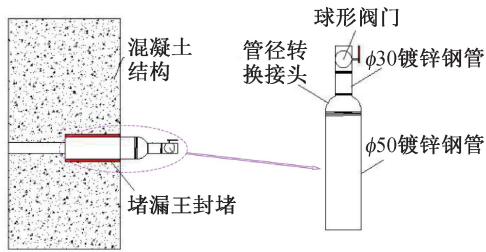


图8 侧墙系统注浆管埋设布置
Fig. 8 Grouting pipe installation layout for side wall system

4.6 无明水条件下裂缝环氧树脂灌浆技术

无明水条件下环氧树脂灌浆处理按流程如下。

1)裂缝清理与标记:对可见裂缝进行直接标识;若基面潮湿,需先清除积水或采用酒精喷灯烘干,再使用彩色笔进行准确定位。

2)钻孔布设:灌浆孔距应根据裂缝宽度确定,裂缝宽0.4~0.5mm时,孔距宜为40cm;宽0.3~0.4mm时,孔距宜为30cm;宽 $< 0.3\text{mm}$ 时,孔距宜为20cm。裂缝越细,越易堵塞,故应适当加密孔距。裂缝分岔或断开处也需加强布孔。孔位一般按间距20~30cm沿裂缝两侧梅花形交错布置。钻孔角度宜与裂缝断面呈 $45^\circ \sim 75^\circ$ 交叉,并确保钻穿裂缝,以提升注浆效果;未与裂缝相交的钻孔视为无效。

3)止水针头埋设:埋设前须清除孔内杂物,之后安装止水针头。针头埋深应适中,过浅易导致浆液外溢或残留,过深则可能阻碍浆液进入裂缝。安装后应紧固针头,防止注浆过程中漏浆。

4)注浆操作:注浆应自下而上进行,待浆液从裂缝溢出时即可停止当前孔注浆,并依次向前推进。若相邻注浆孔已出浆,可跳过该孔;注浆后如发现裂缝延伸或交叉,应在该位置补孔,重新注浆。为保障填充密实,宜在浆液初凝前进行二次注浆。

5)机具清洗:注浆结束后应及时清洗注浆设备,防止树脂固化堵塞。

5 结语

以广州白云(棠溪)站综合交通枢纽一体化建设工程为例,对施工过程中的岩溶处理、基底涌水、结构渗水等问题进行了深入的调查和分析。系统总结了该项目岩溶处理技术的处理原则、处理方法以及处理效果,以及针对突发涌水事故的应急处理方案;并对有明水与无明水情况下的结构开裂渗漏

问题进行了综合分析,形成了有效的处理方法。工程应用结果表明,本研究提出的综合处理技术能有效控制岩溶区地下结构的渗漏风险,为类似工程提供了可借鉴的解决方案。

参考文献:

- [1] 段海澎,陈发根,姚春江,等.岩溶区隧道结晶堵管现象及其诱发的风险问题浅析[J].土木工程学报,2020,53(S1):332-335.
DUAN H P, CHEN F G, YAO C J, et al. Analysis on the phenomenon of tunnel crystal blocking in karst area and its induced risk problems[J]. China civil engineering journal, 2020, 53(S1):332-335.
- [2] 李术才,薛翊国,张庆松,等.高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1297-1307.
LI S C, XUE Y G, ZHANG Q S, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(7):1297-1307.
- [3] 林传年,李利平,韩行瑞.复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(7):1469-1476.
LIN C N, LI L P, HAN X R. Research on forecast method of tunnel water inrush in complex karst areas[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(7):1469-1476.
- [4] 彭涛,李彭,文泉霖.浅析富水岩溶区山岭隧道渗漏病害治理措施[J].四川建材,2023,49(2):102-104.
PENG T, LI P, WEN Q L. Analysis on treatment measures of leakage disease of mountain tunnel in water-rich karst area[J]. Sichuan building materials, 2023, 49(2):102-104.
- [5] 罗资清,吴春伟,周睿,等.广西中西部岩溶区营运公路隧道土建结构病害特征及其影响因素分析[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):565-575.
LUO Z Q, WU C W, ZHOU R, et al. Characteristics and influencing factors of civil structure diseases of operating highway tunnels in karst areas of central and western Guangxi[J]. Tunnel construction, 2023, 43(S1):565-575.
- [6] 李利平,李术才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1345-1355.
LI L P, LI S C, CHEN J, et al. Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(7):1345-1355.
- [7] 何少雯.岩溶地质对地铁车站结构运营期风险评估——以广州地铁九号线工程为例[D].广州:华南理工大学,2017.
HE S W. Risk assessment of subway station structure operation in karst geological—taking Guangzhou metro line nine as an example[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [8] 罗立娜.岩溶区地铁结构渗漏水病害分析与整治技术[J].现代城市轨道交通,2020(7):62-65.
LUO L N. Analysis and treatment technology of subway structure leakage in Karst area[J]. Modern urban transit, 2020(7):62-65.
- [9] 欧孝奇,罗炳雄,江杰,等.南宁地铁2号线盾构隧道岩溶处治方案分析[J].施工技术,2018,47(21):36-41.
OU X D, LUO B X, JIANG J, et al. Analysis of karst treatment scheme in shield tunnel of Nanning subway line 2[J]. Construction technology, 2018, 47(21):36-41.
- [10] 洪冬明,赖德基.岩溶发育区地铁车站道床板下钢立柱渗水的封堵技术[J].建筑施工,2018,40(7):1065-1066,1083.
HONG D M, LAI D J. Blocking technology for water seepage of steel columns under metro station track bed slabs in karst development area[J]. Building construction, 2018, 40(7):1065-1066, 1083.
- [11] 邹育麟,何川,何聪,等.重庆岩溶地区季节性富水营运隧道渗漏水病害特征及其成因机制分析[J].现代隧道技术,2014,51(4):18-27,45.
ZOU Y L, HE C, HE C, et al. Analysis of water seepage characteristics and formation mechanisms in seasonal water-rich tunnels in a karst area of Chongqing[J]. Modern tunnelling technology, 2014, 51(4):18-27, 45.
- [12] 陈伟.复杂富水地层地铁深大基坑渗漏治理技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(13):109-114.
CHEN W. Research on leakage treatment technology for deep and large foundation excavation of subway in complex and water rich strata[J]. Construction technology, 2024, 53(13):109-114.
- [13] 刘俊城,谭勇.富水砂层深基坑墙体渗漏灾害与对策分析[J].施工技术(中英文),2023,52(21):63-69.
LIU J C, TAN Y. Analysis and countermeasures of deep foundation excavation walls leaking hazard in water-rich sandy strata[J]. Construction technology, 2023, 52(21):63-69.
- [14] 李慎奎,陶岚.武汉地区岩溶发育特征及地铁工程中岩溶处理[J].隧道建设,2015,35(5):449-454.
LI S K, TAO L. Features of karst development in Wuhan area and treatment of karsts encountered in construction of Wuhan metro[J]. Tunnel construction, 2015, 35(5):449-454.
- [15] 钱庄,许焯霜,沈水龙,等.砂土覆盖型岩溶地层盾构隧道施工地面注浆加固实例分析[J].隧道建设,2016,36(4):479-484.
QIAN Z, XU Y S, SHEN S L, et al. A case study of ground surface grouting reinforcement of shield tunnel in karst strata with sandy soil cover[J]. Tunnel construction, 2016, 36(4):479-484.
- [16] 周中,邓卓湘,鄢海涛,等.岩溶区隧道新型绿色注浆材料试验研究[J].铁道工程学报,2023,40(7):63-68.
ZHOU Z, DENG Z X, YAN H T, et al. Experimental study on new green grouting material of karst area tunnel[J]. Journal of railway engineering society, 2023, 40(7):63-68.
- [17] 刘永超,袁振宇,程雪松,等.不同注浆材料对隧道漏水漏砂封堵效果试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):249-252.
LIU Y C, YUAN Z Y, CHENG X S, et al. Experimental study on the plugging effect of SAP combined with double-liquid slurry on water and sand leakage[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S2):249-252.