

文章编号: 1001-1749(2023)05-0619-06

贵阳城市轨道交通工程勘察的岩溶问题 及其探察方案探讨

李法滨^{1,2}, 王祥³, 冉军³, 龙斌⁴, 曾耀⁴

(1. 贵州省山区高速公路智慧运维工程研究中心, 贵阳 550000;

2. 贵州黔通工程技术有限公司, 贵阳 550014;

3. 贵阳市公共交通投资运营集团有限公司, 贵阳 550081;

4. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵阳 550081)

摘要: 贵阳市是西南地区典型的岩溶山地城市, 岩溶问题严重困扰着该市轨道交通建设。这里以贵阳城市轨道交通建设中矿山法、盾构法和明挖法施工遇到的岩溶问题为例, 剖析总结了在初勘、详勘以及施工各阶段针对具体岩溶问题的探查技术方案。综合大量岩溶探查成果, 提出针对岩溶风险应遵循“早发现, 精勘探, 适当超前处置”的技术思路, 具体探查方案的科学实施应遵循“先地面物探探测岩溶的位置、范围、埋深等, 后钻探验证和补充, 最后跨孔 CT 精细刻画形态”的工作原则。

关键词: 城市轨道交通工程; 岩溶探测; 矿山法; 盾构法; 明挖法

中图分类号: P 624 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.08

0 引言

贵阳属岩溶地貌典型发育, 碳酸盐类岩石分布面积约占全市的 72%。地处黔中山原丘陵中部, 地势西南高、东北低, 具有低纬度、高海拔、地形多样的显著特征, 全市地形起伏大, 山地、丘陵约占全市土地面积的 88%。其中观山湖区与老城区高差达 220 m^[1]。受地形地貌和地质构造等影响, 贵阳城市空间结构的特点是“双核多组团”: 以老城区、观山湖区为核心, 形成若干个产城互动、规模合理、适宜居民生活就业的城市组团^[2]。

贵阳市位于扬子准地台的黔北台隆和黔南台陷

的过渡带, 其地质背景的典型特点是: ①岩溶发育, 形态多样, 地表以溶沟、溶槽、岩溶洼地为主, 隐伏岩溶多为溶洞、溶隙、溶沟、溶槽等; ②构造复杂, 其中城市轨道交通 1 号线穿越 19 条断层, 2 号线穿越 21 条断层, 3 号线穿越 11 条断层; ③水文条件复杂, 线路靠近或穿越地表径流花溪河、南明河、市西河、贯城河等, 同时岩溶和构造的复杂性使得局部地区的地表水和地下水通过溶洞、裂隙、断层等贯通, 造成了水文条件复杂多变的现状。

1 需要解决的岩溶工程地质问题

在贵阳城市轨道交通工程勘察中, 面临的首要

收稿日期: 2022-05-26

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2023-122-016)、交通部西部交通建设科技项目(2021-ZD1-021)、自立课题(23RD-002, 2020-122-025, 0702935)

第一作者: 李法滨(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 要从事岩溶物探、公路养护检测、地质勘察、工程物探、防路面塌陷等研究, E-mail: 187236591@qq.com。

问题就是岩溶。根据贵阳轨道交通线网规划,贵阳城市轨道交通工程穿越可溶岩地层长度占总线网长度的90%以上。贵阳市轨道交通1号线、2号线一期和二期工程地下区间主要采用矿山法施工,贵阳市轨道交通3号线一期工程开始引入盾构法施工工艺,采用盾构法施工区间超过区间长度的1/2,施工过程中常遇突泥、突水、大型溶洞、地面塌陷等岩土工程问题。

根据统计,贵阳城市轨道交通1号线一期工程898个钻孔中,发现溶洞229个,见洞率为25.5%,施工中揭露溶洞约3000余个。2号线一期工程654个钻孔中发现溶洞199个,见洞率为20.3%。3号线一期工程693个钻孔中发现溶洞134个(部分串状溶洞),见洞率为19.3%。

岩溶对城市轨道交通工程造成的危害主要集中在两个方面:①对轨道交通工程本身造成的危害,主要是突泥涌水^[3]、结构变形^[4]、掌子面溜塌等;②对周围环境造成的危害,主要是地表塌陷^[5]、地表沉降、周边构筑物变形等。

解决岩溶地质问题的3个核心要素:①岩溶的发育位置、规模、形态和充填情况等自身存在状态;②岩溶所处的地表环境、围岩环境和地下水环境等周围环境情况;③岩溶所处的工程类别、工程部位和施工工法等施工方案。

2 不同施工背景下的岩溶探查方案

2.1 矿山法岩溶问题

岩溶是矿山法掌子面溜塌、突泥涌水、冒顶、地面塌陷等灾害的主要风险源。城市轨道交通工程埋深较浅,其顶板大多位于岩土界面附近,或者位于溶沟、溶槽和表层溶蚀裂隙等浅层岩溶发育区附近。当掌子面顶部揭露岩溶时,极易引起溜塌、冒顶和地面塌陷等;当掌子面中部或底部揭露岩溶时,极易引起突泥、涌水、支护变形、隧底塌陷等。

1) 初勘阶段,针对矿山法岩溶问题,应根据地面现状和地质情况等合理选择物探方法,沿隧道中线布置1条连贯的地面物探测线,或平行车站轮廓线布置不少于3条地面物探测线。物探方法应优选具有点测深功能的方法,可选用天然源面波法、大深度探地雷达法、直流电测深法和瞬变电磁法等,有条件的情况下或重大岩溶异常应选取两种甚至两种以上物探方法进行综合解释。针对物探解释异常,开展钻探验证和单孔物探,并适当开展跨孔CT工作。

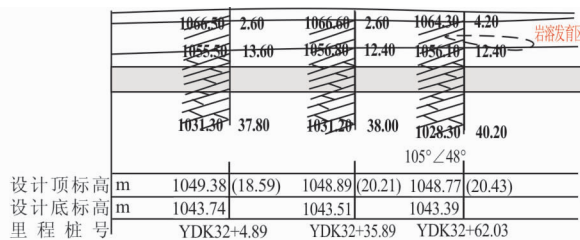


图1 工程地质剖面图(详勘阶段)

Fig. 1 Engineering geological section (Detailed survey stage)

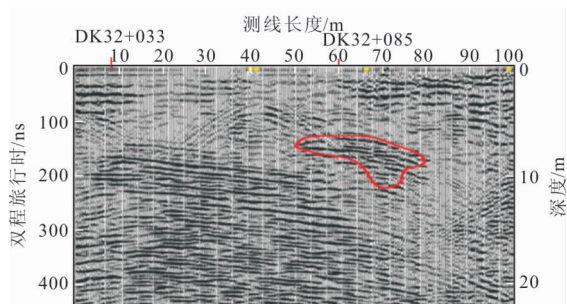


图2 大探深探地雷达法成果解释图

Fig. 2 Result interpretation diagram of deep GPR

2) 详勘阶段。针对初勘揭露的岩溶情况加密地面物探测线,形成一定密度的物探测网,具备条件时应开展跨孔CT工作,以准确查明岩溶水平位置、埋深、形态、充填状态等基本情况。

3) 施工阶段。开展探地雷达、TSP、瞬变电磁法、超前水平钻和加深炮孔等超前地质预报工作,以降低施工风险,避免重大安全事故发生。

贵阳城市轨道交通3号线一期工程松浣区间隧道为矿山法施工,双洞单线型式,单洞截面宽度为6.52 m。ZDK31+005~ZDK31+100段揭露岩土组成为第四系人工回填土、红粘土,下伏基岩为三叠系大冶组(T1d)石灰岩。

详勘阶段设计钻孔间距为30 m,实际钻孔间距为25 m~35 m,钻探未揭露岩溶。沿线路布置1条地震映像法测线,于ZDK32+077~ZDK32+107段发现1处裂隙发育带(ZDK31+087处布置钻孔M3Z2-37-1)。详勘阶段成果见图1。

2021年4月3日,左线掌子面里程ZDK32+010、右线开挖掌子面里程YDK32+037.4于洞顶位置均揭露溶洞。其中,左线溶洞内填充物溜塌约70 m³。4月3日~4月6日开始注浆,共完成注浆199 m³。

险情发生后,开展浅层探地雷达扫描和深层综合物探。浅层雷达扫描的目的是探测是否发生路面

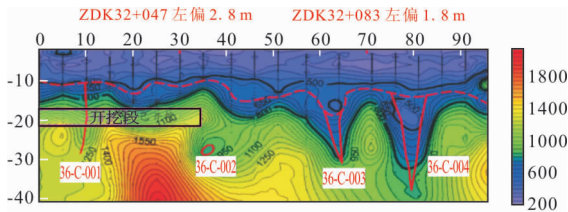


图3 微动勘探法成果解释图

Fig. 3 Result interpretation diagram of microseismic exploration

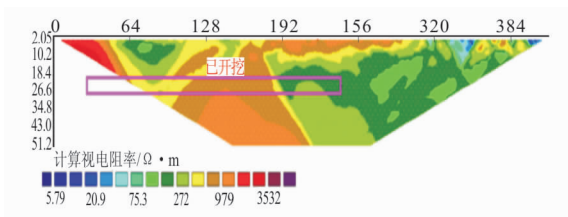


图4 高密度电法成果解释图

Fig. 4 Result interpretation diagram of high density electrical method

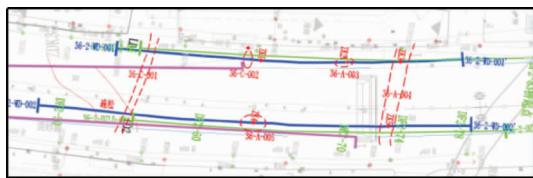


图5 岩溶平面图(施工阶段)

Fig. 5 Karst plan figure(Construction stage)

脱空,深层综合物探的目的是探测岩溶发育情况、形成的空腔大小和土体疏松范围,采用大探深探地雷达(成果见图2)、微动勘探法(成果见图3)、高密度电法(成果见图4)三种物探方法的综合。

综合物探发现掌子面前方存在3处岩溶异常(成果平面图见图5),其中1处异常位于详勘地震映像法推断的裂隙发育带内;掌子面后方存在1处异常(施工开挖已揭露为裂隙)。针对掌子面前方的岩溶异常设计3个钻孔实施2个,2个钻孔均揭露岩溶。针对揭露的2处岩溶,提前进行了注浆加固处理,施工通过时未发生险情。

ZDK31+005~ZDK31+100段,详勘阶段依靠钻探揭露1处岩溶,施工阶段依靠“综合物探普查+钻探验证”的办法揭露4处岩溶。由此可见,利用“综合物探普查+钻探验证”的办法,保证了洞内施工安全,预防了地面塌陷风险。

此处大冶组(T1d)石灰岩节理裂隙较发育,浅表层多溶孔、溶隙、溶槽和溶洞等岩溶形态。此类岩溶多向上与覆土层连通,因此地质异常体在雷达剖

面上多表现为杂乱反射,并常具绕射弧,在微动剖面上多表现为高速背景内的锥状低速体,高密度电法剖面上多表现为高阻背景内的低阻体。

2.2 盾构法岩溶问题

在贵州地区隧道施工中,贵阳市轨道交通3号线一期工程首次引入盾构法施工,盾构区间13个,盾构隧道内径为5.5 m,外径为6.2 m,管片环宽为1.5 m,管片厚度为0.35 m。盾构法施工穿越岩溶时,易引发盾构机陷落、隧道偏线、突泥涌水、仓内失压、地面塌陷、浆液涌出地地面等风险。因此,在盾构掘进前需对隧道周边溶洞作加固处理。据研究,隧道上部溶洞应全部填充处理;隧道侧部及底部,溶洞处理范围可定为与隧道净距6 m以内^[6]。

岩溶区盾构机施工,在工序管理上应做到施工前阶段的岩溶精细勘探,务必查清隧道洞身及两侧6 m范围内的溶洞;掘进前,首先地面加固处理洞径不小于6 m的溶洞;掘进过程中,做好掌子面前方的超前地质预报和注浆加固处理。

针对施工前阶段的岩溶精细勘探,初勘阶段,应根据地表现状环境和地质情况合理选择有效的物探技术手段,于隧道中线和两侧布置连贯的物探测线,然后针对物探异常进行钻探验证和钻孔物探工作,有条件的情况下适量开展CT工作。详勘阶段,针对初勘异常开展地面综合物探工作,布置网状测线或平行测线以查清溶洞边界,然后开展跨孔CT工作,以精细探测地下溶洞范围。地面物探工作,应优选具备点测深功能的物探方法。

贵阳市轨道交通3号线一期工程花明区间采用盾构法施工。详勘阶段采用“全线地震映像法和钻探,局部跨孔CT法”;施工阶段,盾构机入场前开展了岩溶专项补充勘察,采用“全线跨孔CT+单孔物探”。地震映像法显示该段存在反射异常,推断存在岩溶;钻孔揭露该段岩溶,跨孔CT查明该段岩溶的发育范围和基本形态。成果资料见图6~图11。

此处基岩为三叠系下统安顺组(T1a2)白云岩,局部相变为白云质灰岩、泥质白云岩,节理较发育~发育,节理面多呈微张型,岩溶多沿基岩面发育于表层节理发育区。此类地质异常在地震映像剖面上多表现为较连续反射背景下的同相轴错断和低频特征,在电磁波CT剖面上多表现为低吸收系数背景下的高吸收特征,高吸收体多向上与表现为强吸收特征的覆盖层相连通。

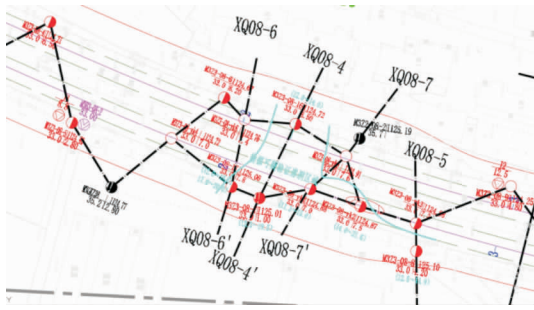


图 6 工作布置及成果平面图

Fig. 6 Work layout and achievement plan figure

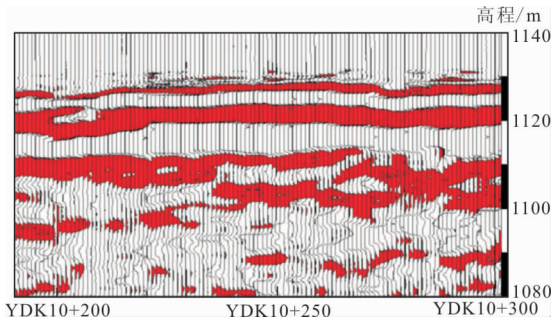


图 7 地震映像法成果图

Fig. 7 Results of seismic imaging method



图 10 M3Z3-8-YK2 孔岩芯照片

Fig. 10 Core photo of M3Z3-8-YK2

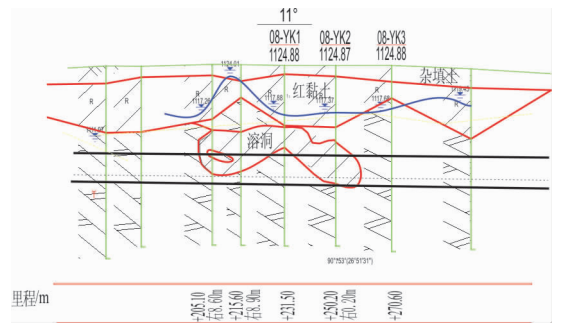


图 11 工程地质剖面图

Fig. 11 Engineering geological section

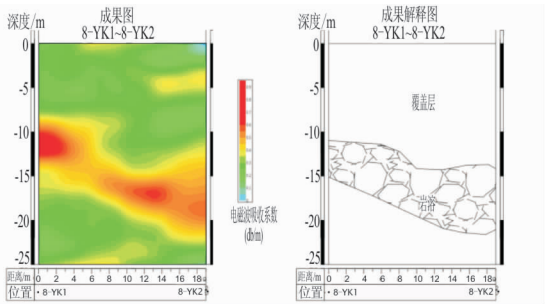


图 8 电磁波 CT 成果及地质解释图(1)

Fig. 8 Electromagnetic wave CT results and geological interpretation (1)

2.3 基坑岩溶问题

岩溶是诱发基坑突泥涌水等灾害的主要风险源。岩溶的不均匀性和随机性是岩溶地下水的控制性因素,所以岩溶涌水常常是突发的,基坑开挖未揭露地下水前,又难以确定具体的涌水部位。因此,施工前,应精确查明基坑范围内的岩溶发育情况,掌握地下水规律(图 12);施工中,应开展物探和超前钻等超前地质预报工作。

初勘阶段,应根据地面现状和地质情况等合理选择物探方法,沿结构物轮廓线布置地面物探测线,基坑范围内适当布置少量地面物探测线。针对物探解释异常,开展钻探验证和单孔物探。详勘阶段,针对初勘揭露的岩溶情况加密地面物探测线,形成一定密度的物探测网,并适当开展跨孔 CT 工作,以精确掌握基坑范围内的岩溶发育情况。

施工阶段,开展超前地质预报工作,主要是地质雷达、面波等物探方法结合超前水平钻等钻探方法。

贵阳轨道交通 2 号线一期工程延安西路站设计开挖深度 24 m~28 m,2014 年 2 月开始施工,2015 年 11 月开始基坑明挖。基坑挖至 17 m 时突发涌水,最大出水量 8 000 m³/d~10 000 m³/d,严重影响

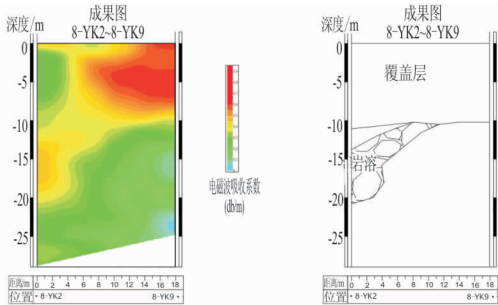


图 9 电磁波 CT 成果及地质解释图(2)

Fig. 9 Electromagnetic wave CT results and geological interpretation (2)



图 12 基坑涌水情况^[7]

Fig. 12 Photo of water gushing in foundation pit

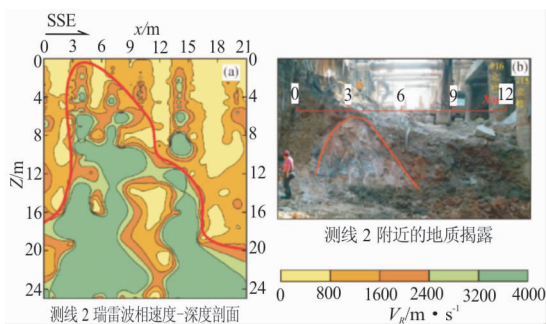


图 13 瑞雷波相速度—深度剖面与开挖揭露验证^[7]

Fig. 13 Rayleigh wave phase velocity—depth profile and excavation exposure photo

响施工和工期。

延安西路站基坑地层为上覆第四系覆盖层,下伏三叠系中统松子坎组一段(T2sz1)中厚层状泥质白云岩和泥质石灰岩互层,三叠系下统安顺组二段和三段(T1a2+3)中厚层~厚层状白云岩。照壁山断层(F15)穿过基坑,断层北盘富水性较好,南盘富水性较差。受构造影响,基岩面起伏大,岩体节理裂隙发育、岩溶强发育。岩溶发育形式为溶蚀裂隙和岩溶管道。

为准确查明基坑内的破碎带、溶蚀裂隙和岩溶管道的发育情况,揭示导水通道,为注浆止水方案设计提供基础资料,采用了考虑道间时差相位的多道瞬态瑞雷波探测方法,在基坑开挖面及基坑外围地表均布置了测线^[7]。结果表明,无覆盖层条件下,受富水断层控制的溶蚀裂隙和岩溶管道在瑞雷波相速度剖面上,表现为高速度背景中的较连续低速体。

根据探测成果对岩溶富水区进行帷幕注浆堵水

设计^[8]。注浆堵水施工完成后,基坑继续开挖,揭露的地质断面以及注浆形成的结石体与瑞雷波相速度成像结果(图 13)所指示的岩溶发育情况十分吻合。

3 结论及讨论

1)重大岩溶风险,如果在勘察设计阶段没有被发现,其风险就会传递到施工阶段;如果在施工阶段没有被消弭,其风险就会传递到运营阶段。岩溶风险的每一次传递,都是安全风险的积累,严重者最终会转化为安全事故。因此,针对岩溶风险,所应持的原则应是“早发现,精勘探,适当超前处置”。

2)岩溶探测方案应“先地面探测岩溶的位置、范围、埋深等,后钻探验证和补充,最后跨孔 CT 精细刻画形态”。工勘阶段应有针对性地开展地面物探;初勘阶段应以地面物探为主,钻探为辅,地面物探应保持剖面连贯性;详勘阶段应针对初勘阶段成果,有针对性地开展地面物探加密和跨孔 CT 工作,目的在精细刻画岩溶形态,为设计岩溶处置方案提供资料支撑。地面物探方法应优选天然源面波法、人工源面波法等弹性波法,大探深探地雷达法、直流电法、小回线瞬变电磁法等电法或电磁法。不同的物探方法在探测深度、分辨率和工作效率上具有明显的差异性,岩溶探测应根据具体的场地条件、地质条件、施工工法和探测要求等灵活确定综合物探方法的组合和流程设计。

参考文献:

- [1] 陈发达. 贵阳市轨道交通工程安全建设和智慧运维技术[J]. 现代城市轨道交通, 2021(11):101-108.
CHEN F D. Safety construction and intelligent operation and maintenance technology of Guiyang rail transit [J]. Modern Urban Transit, 2021(11):101-108. (In Chinese)
- [2] 陈静. 贵阳市空间发展战略研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(7):4-5.
CHEN J. Research on Guiyang's urban spatial development strategy [J]. Engineering and Technology Research, 2020, 5(7): 4-5. (In Chinese)
- [3] 张可能, 张岳, 廖阳, 等. 贵阳某地铁车站岩溶发育特征及突水模式分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2):300-306.
ZHANG K N, ZHANG Y, LIAO Y, et al. Analysis on karst development and water burst in a subway station [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(2):300-306.

(In Chinese)

- [4] 莫伟平. 岩溶地区涌水对地铁隧道轨道结构的影响及防治[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 115—119.
- MO W P. Impact and prevention of environmental water gushing on metro tunnel track structure in karst areas[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 115—119. (In Chinese)
- [5] 杨进, 武炜, 刘兆平. 城市地质勘察中地球物理方法的应用效果[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(3): 233—236.
- YANG J, WU W, LIU Z P. Application effect of geophysical methods in urban geological survey[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 27(3): 233—236. (In Chinese)
- [6] 齐明山, 郭振坤, 王春凯, 等. 溶洞分布对城轨交通盾构隧道影响规律研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(1): 30—37.
- QI M S, GUO Z K, WANG C K, et al. Study on influence of karst cave distribution on urban rail transit shield tunnel[J]. Modern Urban Transit, 2020(1): 30—37. (In Chinese)
- [7] 王均, 刘磊, 张岳, 等. 贵阳地铁车站基坑岩溶多道瞬态瑞雷波探测及工程验证[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2588—2596.
- WANG J, LIU L, ZHANG Y, et al. Application effect of multichannel transient Rayleigh wave probing technique in detection of Karst gaps in foundation pit of metro station in Guiyang[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(6): 2588—2596. (In Chinese)
- [8] 王群. 大跨暗挖地铁车站隧道岩溶富水区帷幕动态注浆研究[J]. 交通世界, 2019(25): 86—87, 168.
- WANG Q. Research on dynamic grouting of curtains in karst water-rich area of long-span underground excavated subway station tunnels[J]. Transpo World, 2019(25): 86—87, 168. (In Chinese)

Discussion on karst problems and detection scheme in Guiyang urban rail transit investigation

LI Fabin^{1 2}, WANG Xiang³, RAN Jun³, LONG Bin⁴, ZENG Yao⁴

(1. Guizhou Engineering Research Center for Mountain—Area Expressway Intelligence Operation and Maintenance, Guiyang 550000, China;

2. Guizhou Qiantong Engineering Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China;

3. Guiyang Public Transport Investment and Operation Group Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

4. Guizhou Transportation Planning Survey&Design Academe Co., Ltd., Guiyang, 550081, China)

Abstract: Guiyang is a typical karst mountain city in southwest China. Karst is a serious problem for Guiyang urban rail transit construction. Taking the karst problems encountered by mining shield, and open—cut methods in Guiyang urban rail transit construction as examples, this paper analyzes and summarizes the exploration technology scheme for specific karst problems in preliminary surveys, detailed surveys, and construction stages. A large number of practical exploration results of karst are integrated. Then it is concluded that the technical thinking of "early discovery, fine exploration, and appropriate advanced disposal" should be followed for karst risk, and the scientific implementation of a specific exploration plan should follow the working principle of "first ground geophysical exploration of karst location, range, buried depth, etc., then drilling verification and supplement, and finally cross hole CT fine characterization of the shape".

Keywords: urban rail transit; karst detection; mine method; shield method; open—cut method