

文章编号: 1674—8247(2024)04—0082—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.015

不同地质雷达设备在铁路工程隐伏岩溶探测中的应用与对比

刘伟¹ 周超² 金俊俊²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要: 隐伏岩溶因其隐蔽性强和发育无规律性等特点, 给岩溶地区的铁路建设和运营带来极大的安全隐患, 寻求高效精准的探测方法是隐伏岩溶勘察的重难点。利用岩溶与其周围岩体之间的物性差异, 物探方法对隐伏岩溶有较好的探测效果。地质雷达法因其高效、无损、低成本等优点, 近年来被广泛应用于铁路、公路和城市等地下隐伏岩溶的探测工作。本文以在建贵南高速铁路为背景, 应用两种地质雷达设备对某岩质边坡隐伏岩溶进行探测, 详细对比了两种不同地质雷达仪器的探测成果, 并将探测成果进行了开挖验证。结果表明: 两种地质雷达设备在隐伏岩溶地质体勘察中均能得到较好的探测效果。研究成果可为类似隐伏岩溶探测工作的设备选择提供参考。

关键词: 地质雷达; 岩质边坡; 隐伏岩溶; 铁路工程

中图分类号: U452.1 **文献标志码:** A

82

Application and Comparison of Different Ground Penetrating Radar Systems in the Detection of Concealed Karst in Railway Engineering

LIU Wei¹ ZHOU Chao² JIN Junjun²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Concealed karst poses significant safety hazards to railway construction and operation in karst regions due to its strong concealment and irregular development. Seeking efficient and precise detection methods is a crucial challenge in concealed karst exploration. Geophysical methods, leveraging the physical property differences between karst and surrounding rock masses, exhibit excellent detection capabilities for concealed karst. Among these methods, the ground penetrating radar (GPR) technique has been widely applied in recent years for detecting concealed karst beneath railways, highways, and urban areas due to its high efficiency, non-destructive nature, and low cost. This paper takes the ongoing construction of the Guiyang-Nanning High-speed Railway as a case study, utilizing two types of GPR equipment to detect concealed karst within a rocky slope. A detailed comparison of the detection results obtained from the two GPR systems is presented, and the results are further validated through excavation. The findings indicate that both GPR systems achieve satisfactory detection outcomes in the exploration of concealed karst geological bodies. This research provides valuable insights for equipment selection in similar concealed karst detection tasks.

Key words: ground penetrating radar (GPR); rocky slope; concealed karst; railway engineering

收稿日期: 2024-07-06

作者简介: 刘伟(1981-), 男, 高级工程师。

引文格式: 刘伟, 周超, 金俊俊. 不同地质雷达设备在铁路工程隐伏岩溶探测中的应用与对比[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 82-86.

LIU Wei, ZHOU Chao, JIN Junjun. Application and Comparison of Different Ground Penetrating Radar Systems in the Detection of Concealed Karst in Railway Engineering[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 82-86.

岩溶是因地表水和地下水对可溶性岩石的化学溶解和机械侵蚀作用而产生的地貌现象,在我国西南地区分布广泛。隐伏岩溶对铁路建设和后期运营都会产生巨大危害,如发生洞穴或漏斗周期性冒水,淹没路基基底,引起沉陷、翻浆或崩塌;更严重时将引发地下涌水,冲毁铁路设施。因此,查清铁路工程范围内隐伏岩溶地质体的分布是非常有必要的,岩溶探测也是铁路工程地质勘察中的重要组成部分。

隐伏岩溶具有隐蔽性强、发育无规律可循等特点,难以通过钻探、坑探等方式大面积探测^[1]。20世纪50年代,中铁二院工程集团有限责任公司在黎湛铁路的路基岩溶勘探中首次使用直流电测深法进行探测。随着新技术新方法的发展,可用于隐伏岩溶探测中的物探技术手段也越来越多^[2]。目前铁路工程隐伏岩溶探测的主要物探手段有:直流电测深法^[3]、地震映像法^[4]、瞬态面波法^[5]、地质雷达法^[6]和瞬变电磁法^[7]。地质雷达法具有高效率、无损耗、高精度、结果直观和对场地要求低等优点,且对岩体中的富水或干燥洞穴均较敏感^[8-11],成为岩质路基段落探明隐伏岩溶的主要手段之一。然而,地质雷达法也存在局限性,包括探测深度和探测分辨率难以兼顾、探测结果具多解性和复杂性、多尺度介质解译存在难度。

本文以岩溶强烈发育的贵南高速铁路某路基三级岩质边坡为背景,将两种不同天线原理的地质雷达设备应用到同测线、同测点的隐伏岩溶探测工作中,并以边坡实际开挖揭示情况对得到的探测结果进行对比分析。研究成果可为路基隐伏岩溶探测工作提供较为可靠的方法仪器选择。

1 方法原理及仪器设备

1.1 方法原理及特点

地质雷达法(Ground Penetrating Radar, GPR)是一种利用高频电磁波技术探测地下物体的方法。装置作用于时间域,基本原理是:发射机通过发射天线产生中心频率为12.5~1200 MHz、脉冲宽度为0.1 ns的脉冲电磁波讯号。当这一讯号在岩层中遇到探测目标时,会产生一个反射讯号。直达讯号和反射讯号通过接收天线输入到接收机,放大后由示波器显示出来。根据示波器有无反射讯号,可以判断有无被测目标;根据反射讯号到达滞后时间及目标物体平均反射波速,可以大致计算出探测目标的距离。

地质雷达的探测成果与地震勘探极为相似,都可以详细刻画地下地质体的产状、地层接触关系等信息。不同的是地质雷达使用电磁波作为勘探媒介,而

地震勘探使用的是体波。由于电磁波的中心频率远高于体波,故地质雷达勘探空间分辨率较高,一般可达0.2 m。地质雷达缺点是无法穿透金属物、水等高介电常数物质,且更高频率的电磁波也会造成勘探深度的降低。

需要注意的是,通常地质雷达系统中的发射机装置产生的电磁波是双向发射的,既向地下发射也向空中反向发射。然而,频率小于100 MHz的电磁波发射机很难屏蔽,故当发射装置放置于地面的半空间环境中时,只有向下发射的电磁波会返回被接收装置检测到,而射向空中的电磁波会逐步衰减,无法返回地表。因此,在半空间环境中,接收装置所接收到的电磁脉冲信息均由于地下地质体的介电常数不同而反射产生。在隧道等近似全空间环境中使用非屏蔽低频天线时,发射装置激发的双向电磁波均会产生反射信号,从而无法判明反射信号的来源。这也是地质雷达的低频非屏蔽天线在隧道中无法取得良好探测成果的原因。

地质雷达系统工作在时间域,记录的纵坐标是时间,将时间转化成深度可直接反应目标体的深度信息。

电磁波在介质中的传播速度 v 表达为:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right)}} \quad (1)$$

而在高阻介质中, v 可近似为:

$$v = \frac{C}{(\epsilon_r)^{\frac{1}{2}}} = \frac{0.3}{(\epsilon_r)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$h = v \frac{t}{2} \quad (3)$$

故

$$h = \left(\frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_r}} \right) \quad (4)$$

式中: v ——电磁波在介质中的传播速度(m/ns);

μ ——磁导率(H/m);

ϵ ——介电常数(F/m);

σ ——电导率(S/m);

ω ——频率(Hz);

h ——电磁波在介质中的传播深度(m);

t ——电磁波在介质中的传播时间(ns);

c ——光速(m/s)。

1.2 仪器设备

本次进行对比测试的两种地质雷达设备为:GSSI SIR-4000型和SSI pulseEKKO型。两种装置的理论基础均在传统地质雷达理论上进行了不同程度的改进。

GSSI SIR-4000 型使用了针对提升探测效果而改进的收发一体蝶形线圈屏蔽天线,SSI pulseEKKO 型使用收发分离的多匝重叠回线非屏蔽天线。一般而言,屏蔽天线属于高频天线,体积较小,主要用于中浅部目标体探测,非屏蔽天线属于低频天线,体积较大,主要用于深部目标体探测,中心频率较低。两种设备天线的技术指标如表 1 所示。

表 1 两种地质雷达装置技术指标表

型号	装置原理	是否屏蔽	发射频率 /MHz	最大叠加次数/(次/s)
GSSI SIR-4000	收发一体蝶形线圈	使用屏蔽线屏蔽	100	120
SSI pulseEKKO	收发分离的多匝重叠回线	非屏蔽	100	8 192

2 工程应用

2.1 工区概况

在建贵南高速铁路某路基超高岩质边坡位于广西自治区境内,基岩为灰岩,弱风化为主。为保证铁路路基安全和边坡稳定性,采用 4 级边坡设计,每级 8 m。在边坡开挖过程中,发现该边坡基岩溶蚀发育,共发现 35 处溶槽或溶蚀裂隙发育区,是验证地质雷达法探测隐伏岩溶的合适场所,边坡开挖全貌如图 1 所示。

2.2 测线布置及数据采集

地质雷达法探测工作布置:沿 3 级边坡平台和 4 级边坡平台各布置 1 条地质雷达扫描测线,编号



图 1 边坡开挖全貌图

WT3 及 WT4。采用点测方式,测点间距 0.2 m,发射主频 100 MHz,记录时长 800 ns,每条测线 450 个物理点。采集参数如表 2 所示。

表 2 两种地质雷达装置采集参数表

型号	测量方式	测点点距/m	发射主频/MHz	采样率	记录时长/ns	1s内叠加次数/次
GSSI SIR-4000	点测	0.2	100	2 048	800	120
SSI pulseEKKO	点测	0.2	100	4 096	800	8 192

3 探测结果解译及开挖对比分析

GSSI SIR-4000 型地质雷达的自带处理软件为 Radan,SSI pulseEKKO 型地质雷达的自带处理软件为 EKKO Project。不同的处理软件在处理原始数据过程中会由于算法的差异,造成成果存在精度上的差异。因此,为保证同精度对比分析两种设备的成果,将两种地质雷达装置采集到的数据均转换成 SEG Y 格式,再统一运用 REFLEX 处理软件进行处理成图。数据处理流程为:置道头-道编辑-去噪-滤波-能量补

偿。为体现溶洞在地质雷达成果图中的“双曲线”特征,数据处理中未进行反褶积计算。

3.1 WT3 测线

WT3 测线的 GSSI SIR-4000 型和 SSI pulseEKKO 型地质雷达探测成果如图 2、图 3 所示。由图 2、图 3 可知,两种设备的成果波形形态基本一致,但存在细微差别;纵向上,SSI pulseEKKO 型在时间 700 ns 处仍有反射信号,而 GSSI SIR-4000 型在时间大于 350 ns 后没有有效反射信号;横向上,GSSI SIR-4000 型的反射波同相轴分辨率更高,这归因于其发射天线中心频率较高。

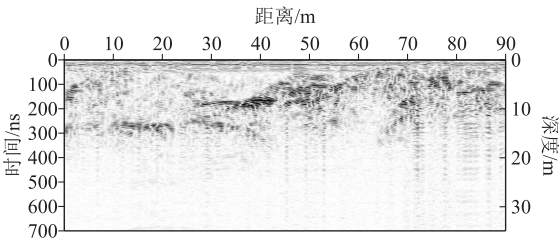


图 2 WT3 测线 GSSI SIR-4000 型探测成果图

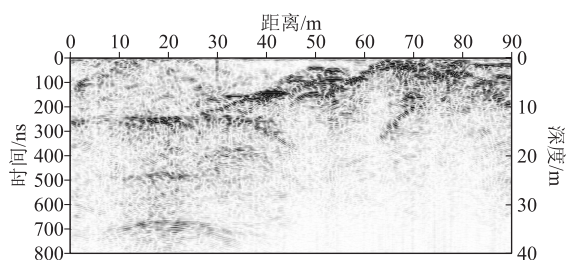


图3 WT3测线SSI pulseEKKO型探测成果图

由图2可知,49号、65号、78号桩的中心位置存在强烈双曲线形态反射波,对应了图1中22号、21号和20号溶洞,该段岩溶强烈发育。小里程段12号桩中心位置附件也存在双曲线形态反射波,对应了图1中第25号溶槽。24号和23号溶槽反应不明显。

由图3可知,除图2中所对应的溶洞、溶槽位置一致,SSI pulseEKKO型地质雷达成果图中,21号桩的中心位置附近存在双曲线形态反射波,对应了24号溶槽,24号溶槽的双曲线形态反射波出现的时间晚于25号溶槽的双曲线形态反射波,说明其埋深较25号溶槽稍大,该特征与图1中24号和25号溶槽的开挖形态对照一致。

3.2 WT4测线

WT4测线GSSI SIR-4000型和SSI pulseEKKO型地质雷达探测成果如图4、图5所示,波形形态基本一致,两者差别和WT3测线一样,仍然表现为SSI pulseEKKO型的有效信号更深,GSSI SIR-4000型的横向分辨率更高。

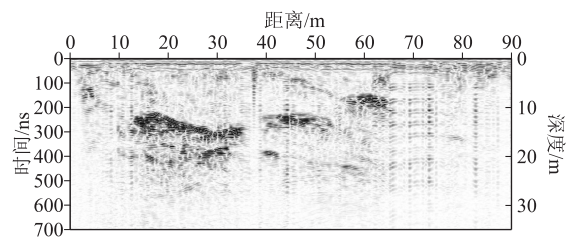


图4 WT4测线GSSI SIR-4000型探测成果图

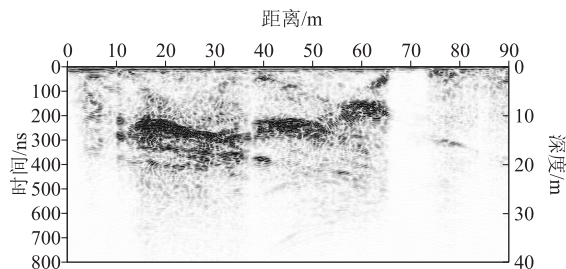


图5 WT4测线SSI pulseEKKO型探测成果图

由图4可知,10~30号桩存在连续强反射区域,

是33-1号溶洞、33-2号溶洞、34号溶洞以及29号溶槽的集中反应,该区域岩溶强烈发育。45号桩中心位置附近的双曲线形态反射同像轴,对应了图1中已开挖验证的28号溶槽,60号桩中心位置附近的双曲线形态反射同像轴,对应了27号裂隙发育区的反应。而GSSI SIR-4000型的探测中,对26号裂隙发育区无明显反应。

由图5可知,SSI pulseEKKO型和GSSI SIR-4000型的探测成果基本一致。但65~74号桩的区域,GSSI SIR-4000的探测成果中表现为来回振荡的强电磁信号,说明测线附近有金属物影响。究其原因是施工单位为保障安全,在31号溶洞洞口附近布置金属网,故GSSI SIR-4000型的探测效果不佳。而SSI pulseEKKO型的同测线探测成果中65~74号桩的区域表现为电磁波能量较弱,但仍可见反射同相轴存在,说明在同样金属网影响的情况下,SSI pulseEKKO型发射的电磁波能量并未在金属物之间来回振荡。同样,在WT4测线38号桩附近,SSI pulseEKKO型几乎未受金属物影响,而GSSI SIR-4000型则来回振荡。

3.3 探测结果验证

为验证两种设备对于隐伏岩溶的探测效果,分别在20号溶洞和21号溶洞以及21号溶洞和22号溶洞之间进行钻探验证。钻探结果表明,在20号和21号溶洞之间以及21号和22号溶洞之间均发育溶洞,也对应了图2和图3的40~80号桩之间的雷达反射波异常区域,SSI pulseEKKO型和GSSI SIR-4000型对于隐伏岩溶的连通性有较好的探测效果。同时,在33-1号和33-2号溶洞洞口完成了钎探以及测量,发现该处存在相互连通的竖向发育溶洞,洞深约21m。由图4、图5可知,两种雷达设备均较好地探测到了溶洞底板位置。

4 结论

(1)两种地质雷达设备对于隐伏岩溶地质体都具有较好的探测效果,但探测精度和深度略有差别。

(2)得益于其高叠加次数和较低的中心频率,SSI pulseEKKO型设备可实现更深的探测深度,但同相轴因此较为宽大,进而影响了勘探的精度。

(3)GSSI SIR-4000型设备所采用的收发一体蝶形线圈天线,受测线附近金属物的干扰较大,电磁波能量在天线与金属物之间来回振荡,在探测成果上形成强烈的多次信号,从而淹没了有效信号。

(4)对比两种地质雷达设备,SSI pulseEKKO型设备的勘探深度和抗干扰能力方面超越GSSI SIR-4000

型设备,但在勘探精度上,GSSI SIR-4000 型设备则略胜一筹。

参考文献:

[1] 易勇进,宋章,张广泽,等. 高速铁路岩溶勘察技术研究现状及展望[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 23 – 26, 89.
YI Yongjin, SONG Zhang, ZHANG Guangze, et al. Research Status and Prospect of Karst Reconnaissance Technology for High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 23 – 26, 89.

[2] 冯义林. 物探技术在隧底隐伏岩溶探测中的运用[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(S1): 192 – 197.
FENG Yilin. Application of Geophysical Prospecting Techniques in Detection of Concealed Karst below Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(S1): 192 – 197.

[3] 贺桂有,王永刚. 高密度电阻率成像与联合剖面法在输电线路隐伏岩溶探测中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 53 – 60.
HE Guiyou, WANG Yonggang. Combined Application of High-density Electrical Resistivity Tomography and Combined Profiles Method for Hidden Karst Investigation in Transmission Line Engineering [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(1): 53 – 60.

[4] 魏栋华. 地震映像高精度时频分析方法在铁路隧底隐伏岩溶识别中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(1): 46 – 52.
WEI Donghua. Application of Seismic Image High-precision Time-frequency Analysis Method in Identification of Hidden Karst at the Bottom of Railway Tunnel[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(1): 46 – 52.

[5] 王先龙. 二维瞬态面波在隧底隐伏岩溶探测中的应用[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 46 – 50.
WANG Xianlong. Application of 2D Transient Surface Wave in the Detection of Hidden Karst at the Bottom of the Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 46 – 50.

[6] 宁刚. 综合物探方法在贵南高铁隧道基底隐伏岩溶探测中的应

用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(2): 196 – 204.
NING Gang. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Basement Hidden Karst Detection of Guinan's High-speed Railway Tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(2): 196 – 204.

[7] 赵虎,王玲辉,程强,等. 等值反磁通瞬变电磁成像技术及工程应用[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2244 – 2250.
ZHAO Hu, WANG Linghui, CHENG Qiang, et al. Opposing Coils Transient Electromagnetics Imaging Technology and Engineering Application [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2244 – 2250.

[8] 宋劲,吴燕清,胡运兵,等. 探地雷达探测隐伏岩溶的可行性与实例分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2005, 24(55): 355 – 360.
SONG Jin, WU Yanqing, Hu Yunbing, et al. Feasibility of GRP to Penetrate Hidden Cave and Case Analysis [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2005, 24(05): 355 – 360.

[9] 李光旭,顾汉明,詹凤林,等. 地质雷达结合地震映像法在铁路隧道底部隐伏岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 783 – 786.
LI Guangxu, GU Hanming, ZHAN Fenglin, et al. Application of Ground Penetrating Radar Combination with Seismic Imaging Method in the Detection of Hidden Karst in Railway Tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(6): 783 – 786.

[10] 伊小娟,罗威,李伟,等. 基于 Mask R-CNN 的地质雷达岩溶预报图像识别研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(2): 50 – 55.
YI Xiaojuan, LUO Wei, LI Wei, et al. Study on Karst Forecast Image Recognition with Geological Radar Based on Mask R-CNN [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(2): 50 – 55.

[11] 杨峰,彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
YANG Feng, PENG Suping. Study on Detection Principle and Method of Geological Radar [M]. Beijing: Science Press, 2010.

(上接第 49 页)

[13] 方志,周建超,谭星宇. 基于高性能材料的超大跨混合梁斜拉桥结构性能研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6): 76 – 84.
FANG Zhi, ZHOU Jianchao, TAN Xingyu. Study of Structural Performance of Super-long-span and Hybrid Girder Cable-stayed Bridge Based on High Performance Materials [J]. Bridge

Construction, 2021, 51(6): 76 – 84.

[14] 方志,任亮,凡凤红. CFRP 拉索预应力超高性能混凝土斜拉桥力学性能分析[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7): 53 – 59.
FANG Zhi, REN Liang, FAN Fenghong. Behaviors of Super-long Span Prestressed Cable-stayed Bridge with CFRP Cables and UHPC Girder [J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(7): 53 – 59.