

隧道溶洞的地质雷达探测及处理

樊浩博¹, 汪珂¹, 郭而东²

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 南平高速建设有限公司, 福建 南平 353000)

摘要: 岩溶工程地质问题的存在对工程的安全稳定性有较大影响。霍永高速某隧道岩溶发育, 无充填物溶洞很多, 给隧道的施工带来了极大的困难。为了保证施工的安全, 采用地质雷达探测手段, 结合工程实际特点选取合理的探测参数, 对该隧道拱顶及底部溶洞进行了探测。通过对典型波形图的分析, 结合雷达在不同介质中波形振幅的差异及传播特点, 对溶洞的位置及范围进行了预测。隧底实际开挖情况与雷达预测结果相吻合, 验证了地质雷达在隧道溶洞探测中的准确性与可靠性。通过对比几种常用的溶洞处理方案, 综合考虑安全性、经济性、施工方便性等因素, 给出了该隧道相应的溶洞处理措施建议。

关键词: 岩溶隧道; 地质雷达; 隧道溶洞; 处理方案

中图分类号: U452 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)01-0181-04

Ground penetrating radar detection and governance of tunnel karst cave

FAN Haobo¹, WANG Ke¹, GUO Erdong²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Nanping Highway Construction Company, Nanping 353000, China)

Abstract: The existence of geologic problems in karst engineering has great influence on the stability of the project. Karst develops well in a tunnel of the Huoyong highway and there are a lot of unfilled caves, which brings great difficulties to the tunnel construction. In order to ensure the construction safety, ground penetrating radar detection method and the engineering practice were used to select the reasonable detection parameters and to detect tunnel vault and bottom cave. According to the analysis of typical waveform figures, and the difference of radar waveform amplitude in different medium and transmission characteristics, the location and range of karst cave were estimated. The radar detection results were in line with the actual excavation, which suggested that the ground penetrating radar detection is accurate and reliable in the detection of tunnel cave. Through the comparison of several common cave governance programs, the corresponding treatment measures for the karst cave tunnel were proposed in consideration of the safety, economy, and ease of construction.

Key words: karst tunnel; ground penetrating radar; tunnel cave; governance program

岩溶地质问题是工程建设中的一大地质难题。在隧道工程的建设中, 岩溶洞穴的危害显得更为突出。隧道穿过可溶性岩层时, 有的溶洞位于隧道底部, 充填物松软, 隧道基底很难处理; 有的溶洞位于隧道拱顶, 岩质破碎, 容易发生坍塌, 甚至引起地表开裂下沉, 山体压力剧增。因此, 准确探测溶洞所在的位置及规模对隧道的施工安全来说至关重要^[1-2]。

地质雷达(GPR)作为近期发展起来的一种新的地球物理勘探手段, 与其他物探方法相比, 具有分辨率高, 勘探成本低, 速度快等优点, 已广泛应用于岩土勘察、工程质量无损检

测、水文地质调查等众多领域。本文以霍永高速某岩溶隧道为例, 采用地质雷达对隧道溶洞进行探测, 以实际开挖隧底来验证雷达探测的准确性, 并针对性地提出适用于该隧道的治理建议^[3-8]。

1 工程概况

该隧道位于汾西县仁马庄和槐树疙瘩之间, 进口段里程桩号为YK0+410。洞体主要位于杨木山河右河畔山体, 最大埋深170 m。由于河水作用, 隧底小规模溶洞较发育, 近年随着水位下降溶洞干涸。区内地形起伏明显, 地貌单元属

收稿日期: 2014-02-25 修回日期: 2014-10-27 网络出版时间: 2014-12-03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1412.035.html>
基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(200731800018)
作者简介: 樊浩博(1989-), 男, 河南漯河人, 博士, 主要从事隧道工程方面的研究。E-mail: 739512276@qq.com

溶蚀侵蚀中山区,围岩以白云质泥灰岩、纯灰岩为主。

隧址区地下水类型主要有第四系松散层孔隙水及奥陶系岩溶裂隙水。该区大面积的碳酸盐岩裸露,大气降水一部分直接深入补给岩溶水,一部分形成地表径流汇入沟谷,经杨木河流入汾河,沟谷切割很深。

2 溶洞位置探测

对于不同深度、不同岩性的探测目的层与目的物,在应用地质雷达检测时,需选择相应频率的天线和适当的仪器参数。深度较大时,需选用相对较低频率的天线。

2.1 检测设备、原理、方法及测线布置

本次探测所用的地质雷达为美国劳雷公司的 SIR-3000 型地质雷达;天线频率为 100 MHz。雷达由主机、天线和配套软件等几部分组成。根据电磁波在有耗介质中的传播特性,发射天线向被测介质发射高频脉冲电磁波,当其遇到不均匀体(界面)时会反射一部分电磁波,其反射系数主要取决于被测介质的介电常数,雷达主机通过对此部分的反射波进行适时接收和处理,达到探测识别目标物体的目的。其探测原理见图 1。

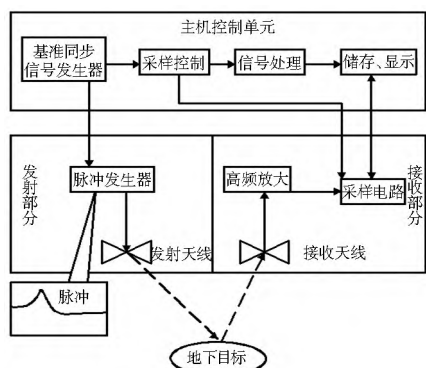


图 1 地质雷达基本原理

Fig. 1 Basic principle of geological radar

电磁波在特定介质中的传播速度是不变的,因此根据地质雷达记录的电磁波传播时间 ΔT ,即可据下式算出异常介质的埋藏深度 H 。

$$H = V \cdot \Delta T / 2 \quad (1)$$

其中, V 的大小由下式确定:

$$V = C \sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

式中: V 为电磁波在介质中的传播速度; C 为电磁波在大气中的传播速度,约为 3.0×10^8 m/s; ϵ 为相对介电常数。不同的介质其介电常数亦不同,该检测地段主要以白云质泥灰岩、纯灰岩为主,灰岩的介电常数为 7~9,泥岩的介电常数为 7,本次检测中 ϵ 选为 7。

根据隧道现场实际情况,在隧道底部确定 3 条检测线,隧道拱顶确定 5 条检测线(图 2、图 3)。

检测方法 & 参数选择如下所述。

(1) 选择 100 MHz 的雷达天线进行连续扫描,采集地质雷达图像数据,其有限探测深度在 25 m 左右,能够满足探测精度。

(2) 雷达的测量模式分为三种: Time, Point 和 Distance,在地面比较平整连续的情况下通常选择 Time 测量模式。

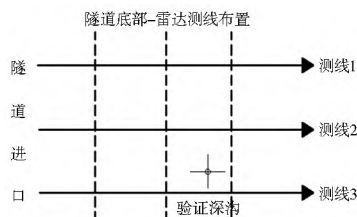


图 2 隧底测线布置

Fig. 2 Line layout of tunnel bottom

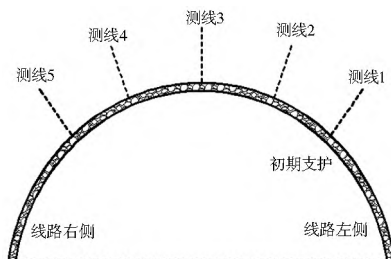


图 3 隧道拱顶测线布置

Fig. 3 Line layout of tunnel vault

(3) 雷达的每条扫描曲线是由许多单独的数据点组成, Samples(采样)越多,扫描曲线就越光滑,垂直分辨率就越好。但随着样品数增加,扫描速率下降,文件尺寸增大。为提高检测精度,本次采样数选为 1 024。

(4) Range(范围)是纳秒级(ns)的时间窗,其范围与探测深度有直接关系。本次检测采集时窗选用为 350 ns,有效探测深度为 25 m。

(5) Rate(扫描速度)是指系统每秒保存的扫描数,扫面速度越大,采集数据也越快,但是精度相对也会降低,为了提高探测精度,此次探测扫描速度选用 16 m/s。

2.2 地质雷达数据处理

数据处理的步骤包括预处理、增强处理、几何校正处理及标记处理等。用专用数据处理软件对探测数据进行处理,着重进行振幅恢复、滤波、F-K 滤波、反褶积处理,获得信噪比较高的时间剖面,以提高对有用信号的识别。雷达时间剖面可以真实、全面地反映地下介质的变化情况,保证资料的质量^[9]。

2.3 雷达图像分析

地质雷达主要是根据反射波组的波形与强度特征,通过追踪同相轴,进而推断地下介质的分布,识别反射波组的标志为同相轴、相似形、反射波特征等。

(1) 隧道顶部波形图分析。典型图样见图 4。

岩溶发育时,反射波振幅和反射波组将随溶洞形态的变化横向上呈现一定的变化。一般来说,溶洞雷达图像的特征是被溶洞侧壁的强大反射所包围的弱反射空间,即界面反射式强反射,且常伴有弧形绕射现象,溶洞内的反射波则为弱反射,低幅、高频、波形细密,但当溶洞中充填风化碎石或有水时,局部雷达反射波可变得强^[10]。

本次探测里程段落为 K0+440 至 K0+460(衬砌上方)。从 K0+440 开始到 K0+450.5 出现同相轴不连续图样,由于空气与土体的电性相差较大,因而可以形成能量较强的反射波。图 4 中显示异常出现在测线 K0+450.5 至 K0+453.5 左右的位置,宽度约为 3 m,为强振幅的双曲线形异常,

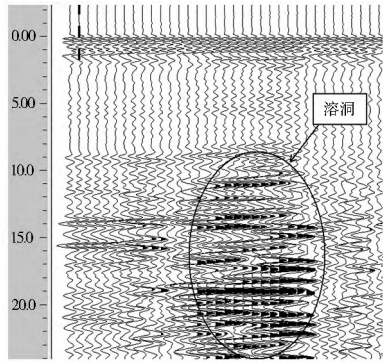


图4 隧道拱顶雷达波形

Fig. 4 Radar waveform of tunnel vault

推断为溶洞。由式(2)可计算得出,电磁波在风化岩体中的传播速度约为 0.11 m/ns ,同时根据雷达波形图左侧对应显示的时间窗可以得出,溶洞埋深约为 10 m 。

(2) 隧道底部波形图分析。典型图样见图5。

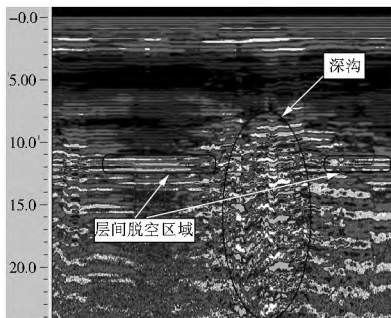


图5 隧道底部雷达波形

Fig. 5 Radar waveform of tunnel bottom

在探地雷达剖面上,完整基岩上反射波同相轴呈水平状条纹分布,反射波振幅与反射波相位稳定,而在有溶洞的位置,反射信号呈双曲线形,反射波振幅变大,反射波相位不稳定,多次波发育。而电磁波反射能量的强弱与分界面两侧相对介电常数的大小有关:当两个介质的介电常数相同时,反射系数为0,仅有透射;当遇到不同介质时,波形出现强反射,反射界面两侧的电性差异越大,雷达反射图像就越清晰^[1-12]。

探测从入口段开始到K428开始出现强反射波形,K428至K431段以及K433至K434.5段表现为地层不连续性(图5),可以推断此处为破碎夹层组成的层间脱空区,由溶洞发育所致。K431至K433地层反射波组的波形、波幅、周期及其包络线形态等没有规律。可以推断此处为溶洞发育形成的深沟宽度约为 2 m ,在隧底埋深大约 5 m 。

2.4 探测结果验证

为了验证地质雷达的探测效果,对隧底道床部分强反射区域进行了下挖,揭示了一条横向约 2 m ,纵向 0.6 m ,可见深度约 10 m 的深沟(图6)。然后采用目测、尺量、地质素描绘图等手段对溶洞进行描述,发现溶洞实际情况与探测结果基本吻合。说明此次雷达探测的结果是比较准确、可靠,可见通过合理选择雷达参数、合理布置测线、在保证探测深度的前提下提高采样数、选用较低的扫描速度等手段可以有效地提高雷达探测的精度。



图6 隧底溶洞开挖

Fig. 6 Cave excavation diagram of tunnel bottom

3 隧道溶洞处理方案

3.1 隧道溶洞常用的处理方案

(1) 换填封堵。主要针对溶洞规模已探明且规模不大和无排水要求的溶洞,将承载力不高的岩溶充填物挖除,并用混凝土或浆砌片石予以回填。

(2) 喷锚、浆砌回填、拱护加固处理。拱顶以上的溶洞,可以根据溶洞围岩的破碎程度,采用喷锚支护,同时加设护拱及拱顶浆砌回填处理^[1]。

(3) 注浆加固。主要根据隧道岩溶充填物的不同性质,采用劈裂注浆、高压旋喷注浆等方法加固岩溶充填物,提高其承载能力。

(4) 桩基处理。主要采用桩基础来承受上部围岩及衬砌结构的荷载,桩基础包括旋喷桩、钻孔桩、钢管桩等。

(5) 复合地基。最常用的复合地基是桩基础和其他地基组成的复合地基。

(6) 筑梁或拱结构跨越。采用筑拱或梁结构跨越溶洞,将上部荷载转移到拱梁结构上。

3.2 处理方案的选择

选择合理的处理方案通常要考虑以下几个方面的因素:确保施工的安全以及施工的质量,保证衬砌完工后隧道不渗不漏;充分考虑现场机械设备状况和操作人员的技能水平,并尽可能降低施工难度;根据溶洞的形状和尺寸,因地制宜地选择施工方案;在保证安全、施工质量的前提下还要考虑经济性,以节约成本。综合考虑以上因素,并根据此岩溶隧道的工程实际情况,最终选用以下方案对隧道拱顶和隧底的溶洞进行处理。

(1) 隧道拱顶溶洞处理。经探测,该隧道拱顶围岩以白云质泥灰岩为主,岩体干燥,拱部溶洞经过长期的地质作用,溶洞空腔也基本干涸。又由于溶洞位于拱顶 10 m 位置处,埋深相对较大,对拱顶产生的威胁也相对降低。但是,为了保证隧道的安全,防止溶洞经过长期风化发生坍塌,此处采用注浆加固的方法对溶洞空腔内泵送C25混凝土,注浆压力不超过 0.5 MPa ,水泥浆中加入 $10\% \sim 15\%$ 微膨胀剂,保证加固效果。同时适当加强此处的初期支护,防止围岩压力过大造成支护变形过大。此方案操作简单,施工方便、造价低且能保证加固效果,可用于隧道拱顶小型溶洞的处理中。

(2) 隧底溶洞处理。该岩溶范围较小,洞底无地下水,采用换填法处理,土方量不大。该方案施工简单,造价低且能够保证处理效果。根据地质勘察资料,深沟内局部块石之间存在架空现象,较下层结构松散,不能直接作为持力层,基底

存在不同厚度的强风化碎石层,地基承载力低。针对隧道各段具体地质条件,采取不同的基底处理措施:对于 K428 至 K431 段以及 K433 至 K434.5 段的层间脱空区,先清理承载力较低的碎石,再采用 C25 混凝土注浆,直至完全封堵脱空区为止;对于 K431 至 K433 段的深沟,为了提高地基承载力,改善其变形,减少地基的不均匀沉降,先将深沟内的风化碎石层全部挖除,再用 M7.5 浆砌片石回填,换填深度为 12 m,处理范围超出基础边缘 1 m 以上^[13]。隧道溶洞处理示意图见图 7。

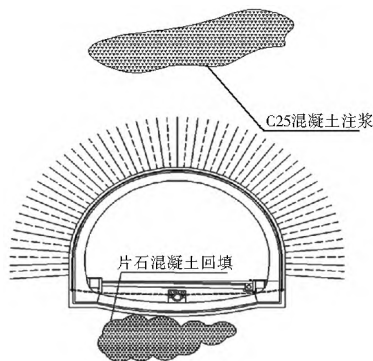


图 7 隧道溶洞处理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of tunnel karst cave treatment

3.3 处理效果

溶洞处理之后对隧道的变形及内力进行了连续监测,结果显示,拱顶部分围岩压力比其他地质良好地段稍大,拱顶沉降及变形较小,这与加强了此处的初期支护有关,隧道基底也无明显沉降^[14+16]。由此可见,采用上述方法处理后的溶洞,处理效果明显,能够满足工程安全性的要求。

4 结语

岩溶不良地质现象的存在给隧道开挖和运营安全造成了严重的威胁。隧道开挖后拱顶和拱底最易破坏,因此,准确预测隧道拱顶和底部溶洞的位置和规模,对保障隧道的施工安全尤为重要。本文采用地质雷达预测了霍永高速某岩溶隧道溶洞的位置,结果表明,通过合理选择雷达参数、合理布置测线、提高采样数和选用较低的扫描速度等手段可以有效地提高雷达探测的精度,快速准确地查明溶洞的发育位置和埋深。该雷达探测方法可为其他隧道溶洞位置的探测提供借鉴。

参考文献(References):

[1] 吴晓波. 隧道小型溶洞处理方法探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2009, 16(11): 26-28. (WU Xiaobo. Discussion on treatment for small karst caves in tunnel. modern urban transit. 2009, 16(11): 26-28. (in Chinese))

[2] 王亮, 李正文, 王绪本. 地质雷达探测岩溶洞穴物理模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 280-283. (WANG Liang, LI Zhengwen, WANG Xuben. A study of geological radar to cavern detection and physical analogue[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 280-283. (in Chinese))

[3] 赵明阶, 刘绪华, 敖建华, 等. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445-449. (ZHAO Mingjie, LIU Xuhua, AO Jianhua, et al. Numerical analysis of influence of karst caves in top of tunnel on stability of surrounding rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 445-449. (in Chinese))

[4] 曾提, 徐兴新, 李富才, 等. 地质雷达在探测南方岩溶地区堤坝隐患中的应用[J]. 地质与勘探, 1998, 34(3): 43-46. (ZENG Ti, XU Xingxin, LI Fucai, et al. Detection of dam hidden dangers by ground penetrating radar in karst area [J]. Geology and Prospecting, 1998, 34(3): 43-46. (in Chinese))

[5] 王传雷, 祁明松. 地下岩溶的地质雷达探测[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2): 58-60. (WANG Chuanlei, QI Mingsong. Prospecting for subterranean karst by geological radar [J]. Geology and Prospecting, 1994, 30(2): 58-60. (in Chinese))

[6] 程晔, 赵明华, 曹文贵, 等. 高速公路地质雷达探测溶洞成果精度提高方法的探讨[J]. 公路, 2004(2): 64-68. (CHENG Ye, ZHAO Minghua, CAO Wengui, et al. Discussion on improving detect precision of GPR method in detecting karst cave under highway roadbed [J]. Highway, 2004(2): 64-68. (in Chinese))

[7] 王俊茹, 吕继东. 地下障碍物雷达定位探测的技术应用[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 84-86. (WANG Junru, LYU Jidong. Technical application of applying ground penetrating radar to the detection of obstruction [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(3): 84-86. (in Chinese))

[8] 姬继法, 潘纪顺. 应用地质雷达探测小型不良地质体[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 80-82. (JI Jifa, PAN Jishun. Detection of diminutive ill geological bodies using ground penetrating radar [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(1): 80-82. (in Chinese))

[9] 曹震峰, 杨世福, 宋世荣, 等. 探地雷达数据处理方法及其应用[J]. 地质与勘探, 1996, 32(1): 34-42. (CAO Zhenfeng, YANG Shifu, SONG Shirong, et al. Ground penetrating radar data processing method and its application [J]. Geology and Prospecting, 1996, 32(1): 34-42. (in Chinese))

[10] 张先锋. 隧道超前地质预报技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 10F-102. (ZHANG Xianfeng. Tunnel geological prediction technology guide [M]. Beijing: People's Traffic Press, 2013: 10F-102. (in Chinese))

[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: 153-154. (YANG Feng, PENG Suping. Research of geological radar detection principle and method [M]. Beijing: Science Press, 2010: 153-154. (in Chinese))

[12] 曾昭发, 刘四新, 冯晖. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 245-246. (ZENG Zhaofa, LIU Sixin, FENG Xuan. Principle and application of GPR [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 245-246. (in Chinese))

[13] 刘齐军, 丁永全, 邓少军. 龙塘坪隧道大型溶洞处理技术研究[J]. 公路, 2012(9): 259-261. (LIU Qijun, DING Yongquan, DENG Shaojun. Long Tang Ping tunnel large water eroded cave treatment technology research [J]. Highway, 2012(9): 259-261. (in Chinese))

[14] 福建省第一公路工程公司. 霍永高速公路岩溶隧道监测报告[R]. 2012: 20-56. (First Highway Engineering Company of Fujian Province. Huoyong karst tunnel monitoring report [R]. 2012: 20-56. (in Chinese))

[15] 刘辉, 彭川, 陈永贵, 等. 公路隧道穿越特大溶洞的施工监测研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 128-131. (LIU Hui, PENG Chuan, CHEN Yonggui, et al. Study of construction monitoring for highway tunnel crossing a big cave [J]. Geology and Prospecting, 2010, 40(8): 128-131. (in Chinese))

[16] 刘辉, 彭川, 吴从师, 等. 岩溶隧道外治结构物稳定性监测分析[J]. 地质与勘探, 2009, 45(3): 330-333. (LIU Hui, PENG Chuan, WU Congshi, et al. Stability inspection analysis on treatment structure of karst tunnel [J]. Geology and Prospecting, 2009, 45(3): 330-333. (in Chinese))