

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.10.015

掌子面前方边墙溶洞的地质雷达探测方法研究

温世儒¹, 杨晓华¹, 吴霞², 吴兴娇¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 江西应用技术职业学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 由于电磁衰减和足印的限制, 导致掌子面前方 5 m 范围内的边墙溶洞往往难以被地质雷达所识别, 从而影响地质预报的精度和施工安全。针对目前对其探测方法的研究较为少见的特点, 为了能有效地进行探测, 以广西六寨至宜州高速公路 40 座公路隧道为依托, 进行了大量的现场探测, 总结出探测该范围内边墙溶洞的方法, 现场开挖验证表明: 该方法能较为准确地探测出边墙溶洞, 从而降低施工中的风险。研究成果为提高超前地质预报的探测精度提供了新的方法, 对地质雷达现场探测具有一定的参考意义。

关键词: 隧道工程; 探测方法; 现场试验; 边墙溶洞; 施工安全

中图分类号: U458.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)10-0093-04

Study on Detection Method of GPR for Karst Cave on Tunnel Side Wall Ahead of Excavation Face

WEN Shi-ru¹, YANG Xiao-hua¹, WU Xia², WU Xing-jiao¹

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 2. Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: Due to the limitation of electromagnetic wave attenuation and foot-print, the karst cave on tunnel wall ahead of the excavation face (<5 m) is generally difficult to be detected by ground penetrating radar (GPR) and the forecast precision and construction safety is affected accordingly. As the study on the detection method is less at the present, and in order to detect it effectively, on the basis of 40 highway tunnels of Liuzhai—Yizhou expressway in Guangxi Zhuang Autonomous Region, many spot detection experiments were made to find the detection method for karst cave on tunnel wall within this range. The spot excavation indicates that this method can accurately detect the cave and reduce the construction risk. This research provided a new way to increase the geological forecast precision and offered certain reference for GPR spot detection.

Key words: tunnel engineering; detection method; spot experiment; karst cave on tunnel side wall; construction safety

0 引言

在隧道施工期, 由于复杂地质条件等因素的影响, 往往潜伏着各种不同的风险, 因而如何减少和避免隧道施工期的各种风险成为了亟待解决的问题。超前地质预报能预先较为准确地查明掌子面前方的

围岩情况, 是保障隧道快速施工的最有力手段^[1], 因而引起了人们的广泛关注, 并得到了广泛地应用。

地质雷达法是超前地质预报类别中物探法中的一种, 具有连续、无损、高效和高精度等优点^[2], 因而被大量应用于隧道地质预报中。

由于电磁波本身的传播衰减和足印^[3]的限制,

收稿日期: 2014-03-18

基金项目: 广西壮族自治区科技攻关项目(桂科攻10124006-10)。

作者简介: 温世儒(1985-), 男, 江西赣州人, 博士研究生。(wsrx212@126.com)

导致掌子面前方 5 m 范围内的边墙溶洞往往不易被识别。而且,当前大部分的研究内容,主要集中在对掌子面正前方开挖轮廓内不良地质体的探测,以及对已开挖边墙的探测,如林传年、代高飞等^[4-5]研究了地质雷达对掌子面正前方破碎含水体的探测;刘学东^[6]研究了对掌子面前方断层破碎带和软弱破碎带的探测;由广明^[7]和汪成兵^[8]则对已开挖边墙溶洞的探测提出了要求。相比之下,对掌子面前方边墙溶洞的探测方法研究则显得很不足。

因此,针对这一不足之处,结合广西六寨至宜州高速公路 40 座公路隧道的实际情况,采用 GSSI 公司的 SIR-3000 型地质雷达(100 MHz 天线)进行了大量的现场探测试验。探测方法有效可行,为修正施工方案等提供了指导,取得了较为理想的效果。

1 工程概况

广西六寨至宜州高速公路,位于广西盆地与黔中高原过渡地带,隧址区内四季雨量丰富,构造破碎带发育。隧道岩性主要为灰岩,包括硅质灰岩、白云质灰岩和泥质灰岩,岩体破碎,有众多裂隙、溶隙发育带,是典型的岩溶隧道。

2 电磁能量衰减与足印限制

地质雷达通过向目标地层发射宽频电磁波,电磁波在传播中遇到存在电性差异的目标体将产生反射,通过分析反射波的旅行时间、波相等来判断目标体。介质间的性质差异越大,二者间的界面越易于分辨^[9]。地质雷达能否探测到目标体,与是否具有足够的反射能量以及是否在可见范围内(足印内)具有重要关系。

在传播过程中,电场的瞬时变化是衰减系数、相位系数、角频率、传播距离的多元函数,电场分量的瞬时波动方程^[10-11]可以描述如式(1)所示:

$$E_x(r, t) = E_0 e^{-\beta r} \cos(\omega t - \alpha r), \quad (1)$$

式中, r 和 t 分别为传播距离和时间; E_0 为 $r=0, t=0$ 时的电场强度; α 为相位系数; β 为衰减系数; ω 为电磁波的角频率。

可以看到,随着场源距离 r 的不断增大,电场强度将不断减弱。在图 1 中,处于相同某界面位置的 a, b 两点, a 点位于掌子面正前方开挖轮廓范围内, b 点位于边墙位置。 $r_1 > r_2$, 即:在 b 点的电磁能量衰减大于 a 点。显然,相对于开挖轮廓内的目标体,边墙中的目标体更加难以被识别。

探测时,电磁波以一定的外角向前辐射,从而形成一近小远大的锥形足印区域,只有位于该足印区域内的目标体,才能被识别。足印的形状如图 1 所示。 L 为足印区域的半径,其计算公式如下:

$$L = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K+1}}, \quad (2)$$

式中, λ 为电磁波波长; D 为深度; K 为深度范围内平均介电常数。

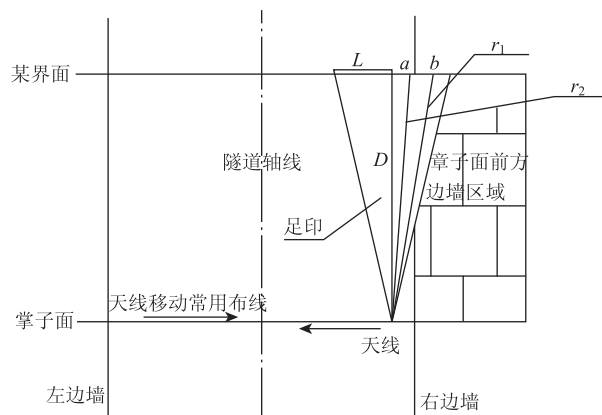


图 1 足印示意图

Fig. 1 Schematic diagram of foot print

研究表明^[12],在岩溶区, λ 的取值一般为 1.2 m, K 的取值一般为 7.0~8.0,显然 L 是 D 的递增函数。当 $D < 5$ m 时, $L < 2$ m,该深度范围内的边墙溶洞不易被识别。

3 探测方法

3.1 技术路线

常用的地质雷达测线布置往往是天线沿着掌子面上的水平测线左右来回往复移动(图 1),或者是沿着井格型测线进行移动,此时,相对于掌子面开挖轮廓内的目标体而言,边墙中目标体的场源距离变得更大,而且由于足印的限制,导致边墙中的目标体难以被识别。

针对以上探测缺陷,采用缩短传播场源距离和两次叠加探测的方法进行探测,其技术路线如图 2 所示。

3.2 具体方案

通过改变测线布置来实现缩短传播场源距离和两次叠加探测,将线测与点测模式同时使用,同时调整部分采集参数。现场试验表明,这种方案可以准确地探测到掌子面前方 5 m 范围内的边墙溶洞,具体如下:

(1) 测线布置。理论上,测线的布置数目以及

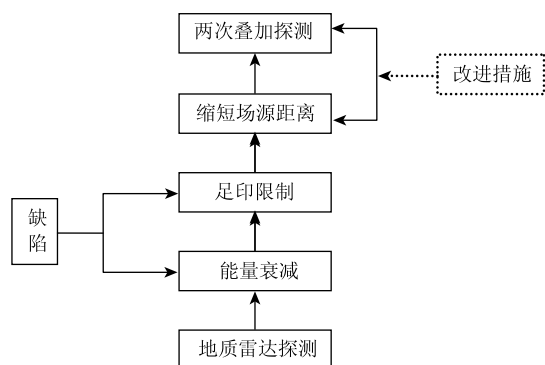


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical route

测线的走向不受限制, 可以水平向布置, 也可以垂直向布置或者斜向布置, 而且测线数目越多越有利于探测。

但是, 经过大量的现场探测表明, 宜布置两条测线 (图 3), Z 为测线到掌子面与边墙相交线的距离, Z 的取值不得大于 1.5 m, 否则由于足印范围无法映射到目标体, 将导致地质雷达无法识别前方边墙中的溶洞, 且测线与该相交线必须大致平行; 同时, 天线在每条测线上至少来回上下移动 2 次, 一共至少移动 4 次。通过布置在不同面上的两条测线, 可以从两个相互垂直的方向提供足印范围, 对目标体进行叠加扫描识别。

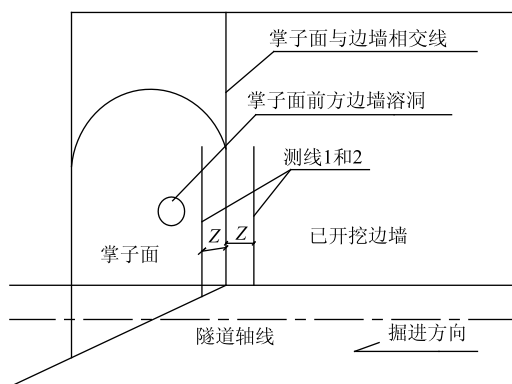


图 3 测线布置

Fig. 3 Arrangement of survey lines

(2) 测点间距。测点间距的选择将直接导致地质雷达能否探测到目标体。在测线上采用点测模式时, 测点的间距应该遵循奈奎斯特定律, 即: 测点间距为子波波长的 $1/4$, 近似取 30 cm。

就目前而言, 测点间距的确定主要取决于现场操作人员的个人经验, 因而间距的取值分布具有极大的离散性, 这导致地质雷达对目标体的识别具有不确定性。现场试验表明, 测点间距宜为 40 ~

60 cm。

(3) 天线移动速度。当采用线测时, 天线最大移动速度的理论值取决于扫描率、天线宽度以及目标体的尺寸。若天线移动速度过快, 将导致无法拾取到足够的反射信号; 若移动速度过慢, 又将导致同一界面的重复反射, 使得在雷达剖面上出现许多相同的反射信号。

无论天线移动速度过快或过慢, 都将影响反射信号的准确拾取以及后续的解译。现场试验表明, 天线移动速度不宜超过 20 cm/s。

(4) 采集参数。采集参数的调整包括时窗和采样点数。通常情况下, 时窗的取值为 400 ~ 600 ns (可探测到 20 ~ 30 m)。根据地质雷达探测距离与分辨率的关系可知, 分辨率是探测距离的递减函数, 因此, 为了提高探测分辨率以及提高探测的集中靶向性 (5 m 范围内), 将时窗调整为 300 ns。

由于探测距离的缩短, 根据采样定律, 为了防止出现采样过于密集的现象, 将采样点数由 1 024 调整为 512, 叠加次数选为 7。其他参数可以根据相关参考值进行设定, 如: 天线的发射率选为 100 kHz。

(5) 滤波参数。滤波参数的选取关系到真、假反射信号的拾取与去除。理论上, 高通滤波参数为天线中心频率的 $1/3 \sim 1/4$, 低通滤波参数为中心频率的 3 ~ 4 倍。现场试验表明, 高通滤波参数设置为 30 ~ 45 MHz, 低通滤波参数设置为 350 ~ 410 MHz。

另外, 需要清除放置在边墙位置的金属物 (如: 钢筋、锚杆、钻杆等), 停止钻孔作业, 同时将台车搬离掌子面至少 5 m。

将以上探测调整方案汇总如表 1 所示。

表 1 探测调整方案

Tab. 1 Adjusted detection scheme

序号	内容	具体方案
1	测线布置	测线到掌子面与边墙相交线的距离不大于 1.5 m, 测线与该相交线大致平行; 天线在每条测线上至少来回上下移动 2 次
2	测点间距	理论上近似取 30 cm, 宜调整为 40 ~ 60 cm
3	天线移动速度	天线移动速度不宜超过 20 cm/s
4	采集参数	时窗由 400 ~ 600 ns 调整为 300 ns, 采样点数由 1 024 调整为 512, 叠加次数选为 7, 其他参数可以根据相关参考值进行设定
5	滤波参数	高通滤波参数设置为 30 ~ 45 MHz, 低通滤波参数设置为 350 ~ 410 MHz

4 工程实例

该探测方法在六寨至宜州高速公路得到了良好地应用,有效地探测出了掌子面前方边墙处的溶洞,其整体检出率达85%,如按照该探测方法,在瑶寨隧道YK47+438, YK47+403里程均探测到了边墙溶洞。YK47+438属于当前开挖掌子面前方3.7 m处,溶洞位于右边墙墙角,沿水平方向以大约15°外角向下延伸,溶洞沿隧道纵向宽2.2 m,如图4(a)所示。YK47+403属于当前开挖掌子面前方4.6 m处,溶洞在竖向几乎占据了整个左边墙的高度,高约为2.5 m,沿隧道纵向宽约3 m,如图4(b)所示。

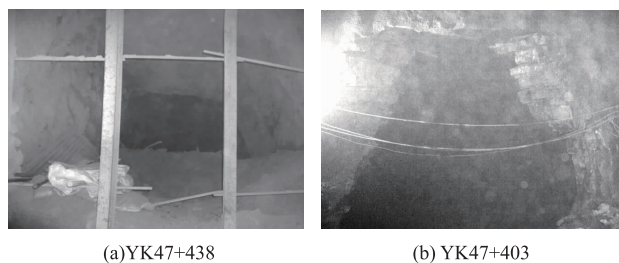


图4 YK47+438和YK47+403边墙溶洞

Fig.4 Karst caves on tunnel side wall of YK47+438 and YK47+403

5 结论

针对掌子面前方5 m范围内的边墙溶洞不易被识别的问题,本文基于大量的现场实际探测,得出较为有效的探测方法。

(1) 分别在掌子面和已开挖边墙上布置两条竖向测线,可以从两个不同的方向提供足印范围对目标体进行扫描识别,且测线到掌子面与边墙相交线的距离不得大于1.5 m,测线大致平行于相交线,天线至少往复移动4次。

(2) 天线最大移动速度和测点间距的确定不同于理论值,试验表明:天线移动速度不宜超过20 cm/s,当采用点测模式时,测点间距宜取40~60 cm。

(3) 采集时需要时窗、采样点数进行调整,时窗由400~600 ns调整为300 ns,采样点数由1 024调整为512。同时,探测时应消除周围干扰物。

(4) 滤波参数在理论值的范围之内,但现场试验表明:高通滤波参数宜设置为30~45 MHz,低通滤波参数宜设置为350~410 MHz。

参考文献:

References:

- [1] 王锦山,王力,曹志刚,等. 厦门海底隧道综合超前地质预报实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2309-2317.
WANG Jin-shan, WANG Li, CAO Zhi-gang, et al. Practice on Synthetic Geological Predication Ahead of Construction of Xiamen Subsea Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2309-2317.
- [2] 康富中,江波,贺少辉,等. 地质雷达在风火山隧道病害检测中的应用与结果分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 963-970.
KANG Fu-zhong, JIANG Bo, HE Shao-hui, et al. Detection and Analysis of Tunnel Defects with Geological Penetrating Radar at Fenghuo Mountain [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 963-970.
- [3] 杨耀,羊春华,曾国. 探地雷达在隧道岩溶普查中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(3): 410-414.
YANG Yao, YANG Chun-hua, ZENG Guo. The Application of the Ground-Penetrating Radar to the Tunnel Karst Survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(3): 410-414.
- [4] 林传年. 岩溶隧道综合超前地质预报技术应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1086-1090.
LIN Chuan-nian. Research on Application of Comprehensive Advanced Prediction for Karst Tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1086-1090.
- [5] 代高飞,夏才初,毛海河. 地质雷达在隧道超前预报中的应用[J]. 西部探矿工程, 2004(9): 116-118.
DAI Gao-fei, XIA Cai-chu, Mao Hai-he. Application of Ground Penetrating Radar in Tunnel Geological Predication [J]. West-China Exploration Engineering, 2004(9): 116-118.
- [6] 刘学东. 探地雷达技术在中条山隧道施工中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 72-76.
LIU Xue-dong. Application of Ground Penetrating Radar in Construction of Zhongtiaoshan Tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(1): 72-76.
- [7] 由广明,刘学增,汪成兵. 地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8): 92-95.

(下转第118页)

- load Vehicles [J]. Communications Standardization, 2007, 170 (10): 68-69.
- [9] 陈锋锋, 黄晓明, 单景松. 重载下不同基层沥青路面的力学分析 [J]. 上海公路, 2008 (2): 11-15.
CHEN Feng-feng, HUANG Xiao-ming, SHAN Jing-song. Mechanics Analysis of Different Asphalt Pavements under Heavy Load [J]. Shanghai Highways, 2008 (2): 11-15.
- [10] 乔英娟. 重载交通柔性基层沥青路面结构力学响应及设计指标 [J]. 中国市政工程, 2013 (2): 91-95.
QIAO Ying-juan. On Mechanical Response & Design Index of Flexible Base Asphalt Pavement Structure of Heavy Traffic [J]. China Municipal Engineering, 2013 (2): 91-95.
- [11] BLAB R, HARVEY J T. Modeling Measured 3D Tire Contact Stresses in a Viscoelastic FE Pavement Model [J]. International Journal of Geomechanics, 2002, 2 (3): 271-290.
- [12] GROENENDIJK J, VOGELZANG C H, MOLENAAR A A A, et al. Linear Tracking Response Measurements: Determining Effects of Wheel-load Configurations [J]. Journal of Transport Research Board, 1997, 1570: 1-9.

(上接第96页)

- YOU Guang-ming, LIU Xue-zeng, WANG Cheng-bing. Application of Ground Penetration Radar to Geological Forecast for Expressway Tunnel Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (8): 92-95.
- [8] 汪成兵, 卞其, 由广明. 隧道超前地质预报技术及应用 [J]. 水文地质工程地质, 2007 (1): 120-122.
WANG Cheng-bing, BIAN Qi, YOU Guang-ming. Technology and Application of Tunnel Geological Predication [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007 (1): 120-122.
- [9] 王振宇, 程围峰, 刘越, 等. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增2): 3549-3557.
WANG Zhen-yu, CHENG Wei-feng, LIU Yue, et al. Synthetic Advanced Forecast Technology Based on Geological Logging for Tunnel Face and Ground Penetrating Radar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 3549-3557.
- [10] 高阳, 张庆松, 原小帅, 等. 地质雷达在岩溶隧道超前预报中的应用 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39 (4): 82-86.
GAO Yang, ZHANG Qing-song, YUAN Xiao-shuai, et al. Application of Geological Radar to Geological Forecast in Karst Tunnel [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2009, 39 (4): 82-86.
- [11] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LI Da-xin. Method and Application of Ground Penetrating Radar [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [12] 曾昭发, 刘四新, 冯晖, 等. 探地雷达原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, FENG Xuan, et al. Theory and Application of Ground Penetrating Radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

(上接第103页)

- [11] 王晶, 苏光大. 确定区域的人脸彩色传递 [J]. 光子·激光, 2010, 21 (1): 116-119.
WANG Jing, SU Guang-da. Face Color Transfer for Specified Image Region [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21 (1): 116-119.
- [12] CHAVES-GONZÁLEZ J M, VEGA-RODRÍGUEZ M A, GÓMEZ-PULIDO J A, et al. Detecting Skin in Face Recognition Systems: A Colour Spaces Study [J]. Digital Signal Processing, 2010, 20 (3): 806-823.
- [13] 符拯, 王书满, 刘丙杰. 自适应卡尔曼滤波的最新进展 [J]. 战术导弹技术, 2009 (6): 62-66.
FU Zheng, WANG Shu-man, LIU Bing-jie. An Overview of the Development of Adaptive Kalman Filtering [J]. Tactical Missile Technology, 2009 (6): 62-66.
- [14] VENKATARAMAN V, FAN Guo-liang, HAVLICEK J P, et al. Adaptive Kalman Filtering for Histogram based Appearance Learning in Infrared Imagery [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (11): 4622-4635.
- [15] 李文光, 韩萍, 吴仁彪. 一种改进的卡尔曼滤波背景减除方法 [J]. 信号处理, 2009, 25 (8A): 274-279.
LI Wen-guang, HAN Ping, WU Ren-biao. An Improved Background Subtraction Algorithm Based on Kalman Filtering [J]. Signal Processing, 2009, 25 (8A): 274-279.