

DOI: 10.11779/CJGE2015S2011

基于地质雷达的隧道综合超前预报技术

刘新荣^{1,2}, 刘永权^{1,2*}, 杨忠平^{1,2}, 涂义亮^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘要: 以地质雷达为超前预报的主要手段, 结合 TGP206 地震反射波法和工程地质调查法, 针对某特长隧道开展综合超前地质预报。通过时域有限差分 (FDTD) 法, 得到了掌子面前方典型不良地质体正演模拟合成图, 以此作为地质雷达实际探测图像解译的基础; 采用 TGP206 超前地质预报系统对掌子面前方 100 m 范围内进行长距离预报, 在接近不良地质体时, 用地质雷达对掌子面前方 20~30 m 范围进行更精确的短距离预报; 将该法应用于实际工程断层破碎带和富水带的预报中, 预报结果较为准确, 有效指导了隧道的安全施工, 该综合超前地质预报方法可为同类工程提供借鉴。
关键词: 综合超前地质预报; 地质雷达; 正演模拟; 时域有限差分法

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0051-06

作者简介: 刘新荣(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地下空间与隧道工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuxrong@126.com。

Synthetic advanced geological prediction technology for tunnels based on GPR

LIU Xin-rong^{1,2}, LIU Yong-quan^{1,2}, YANG Zhong-ping^{1,2}, TU Yi-liang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: Combined with the TGP206 seismic reflection method and engineering geological survey, the synthetic geological prediction based on GPR is carried out for a super long tunnel. Using the finite-difference time-domain (FDTD) method, the forward simulation synthesized maps of typical defective geologies in front of the tunnel face are obtained, which are the basis for the interpretation of actual detection images of GPR. Long-distance prediction 100 m ahead of the tunnel face is carried out by means of the TGP206 geological prediction system, when approaching the defective geologies, more accurate short-range prediction 20~30 m ahead of the tunnel face is carried out through the geological radar. The proposed method is applied in the prediction of fault fracture zone and water-rich zone in practical engineering. The predicted results are accurate and can effectively guide the tunnel construction. The synthetic advanced geological prediction method can provide a reference for similar projects.

Key words: synthetic advanced geological prediction; ground penetrating radar; forward simulation; FDTD method

0 引言

为了避免各种塌方、突水突泥等灾害事故的发生并保证隧道施工工期,在国内外长大隧道的施工中,已经将超前地质预报列为必不可少的技术环节。隧道施工中应用的各种超前预报方法具有其局限性和缺陷,单一方法预报的准确性和可靠性还有待提高^[1]。为了提高预报的准确率,在实际探测工作中必须提倡采用综合预报的方法,即洞内观察和洞外勘察相结合、地质分析和物探分析相结合、长距离预报和短距离预报相结合,地震方法与电磁方法相结合,多种方法相互配合,共同解决不良地质构造、含水构造、含瓦斯气构造的超前预报问题,有效指导隧道的安全施工^[2]。

因其具备分辨率高、图像直观、对施工作业干扰

少等优点,地质雷达在隧道超前预报中得以广泛应用。而地质雷达在采集数据时,容易受到隧道内湿度、掌子面平整度以及台车、电缆等机械设备的影 响,从而使得电磁波传播过程非常复杂,采集到的数据杂波较多,剖面图像难以解释^[3-4],而利用正演数值模拟则能为实测雷达图像的解 释提供参考,提高数据解释的准确性和精度。本文结合工程地质调查、地震反射波法,建立以地质雷达为主要手段的隧道综合超前地质预报流程,并采用时域有限差分 (FDTD) 法对隧道中的

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50334060)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

典型不良地质体进行正演数值模拟,得到其图谱特征,为实测地质雷达图像的解析提供参考。

1 综合预报方法及流程

本文开展的综合预报方法采用了工程地质调查、地震反射波(TGP)、地质雷达3种手段。预报过程中,首先采用工程地质调查宏观确定隧道可能存在的不良地质体类型以及可能出现的里程范围,在隧道开挖接近这一里程时,开展地震反射波法进行长距离预报,本文采用的TGP法能预报掌子面前方100~200 m范围内的不良地质体位置,在接近TGP预报的不良地质体时,或掌子面围岩出现变差的迹象时,用地质雷达对掌子面前方进行探测预报,精确判断不良地质体的类型及出现范围。综合采用这3种方法,做到了地质与物探、长距离与短距离、地震方法与电磁方法相结合的原则,可大大提高单一预报方法的准确率。

1.1 工程地质调查法

工程地质调查可分为洞外地质调查和洞内掌子面地质记录,本文预报实例主要采用洞内掌子面地质记录法。该方法根据隧道开挖揭露的掌子面地质状况来判断前方可能的地质状况,掌子面地质记录内容具体包括掌子面岩性描述、地质构造面、地下水、围岩稳定状态等。依据掌子面揭露的不良地质体的产状、位置,通过一系列三角函数的运算,计算不良地质体在隧道侧壁和拱顶延伸距离,得出其影响的隧道长度。该方法对结构面向掌子面前方倾斜的断层预报效果较好。

1.2 地震反射波法

地震反射波法是一种长距离的预报方法,其利用人造地震波在掌子面前方(100~200 m)传播产生的反射波的特征来预报隧道前方地质构造的变化,通过探测岩体力学性质的变化,预报围岩的岩性、构造、结构特征等与力学强度有关的地质要素。该方法对掌子面前方与隧道走向垂直的断层、节理、裂隙等不良地质体的预报结果较为准确,而对于界面形状不规则的不良地质体,准确预报的难度较大^[5]。此外,地震波对围岩含水性不太敏感,容易忽视对富水带的预报^[6]。

1.3 地质雷达法

地质雷达法是一种短距离地质超前预报方法,它利用电磁波双程走时的长短差别来确定前方地质体的形态和属性,是一种应用电磁波的探测技术。在进行地质超前预报的探测时,发射天线和接收天线以一定的固定间距沿着测线同步移动,发射天线向掌子面前方围岩连续发射脉冲电磁波,接收天线接收回波信号,如果前方遇到不良地质体界面,电磁波将产生反射,产生相位、振幅和频率的变化。地质雷达法具有分辨

率高、无损伤、探测和数据处理快、机动灵活等优点,但其预报距离较短(10~30 m),频繁测量会影响隧道的施工进度,造成工期的延长,此外,电磁波会受到隧道内施工的干扰,影响探测结果的准确性。

结合以上3种预报方法的特点,本文在开展综合地质超前预报时采用如图1所示的预报流程。

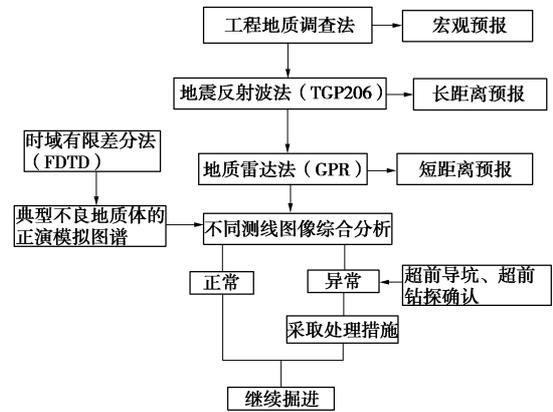


图1 综合超前地质预报流程图

Fig. 1 Flow chart of synthetic advanced geologic prediction

2 不良地质体正演模拟图谱

2.1 FDTD法基本原理

时域有限差分法(FDTD Method)是一种求解电磁问题的数值技术,该方法将麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式用有限差分式代替,使得电磁场连续域内的问题变为离散系统问题,得到关于场分量的差分方程组,然后用具有相同电参量的空间网格来模拟被研究体,通过选取合适的场初始值和计算空间边界条件,即可以逐步推进得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解。FDTD法具有适用广泛、可直接时域计算、计算程序通用、节约存储空间和计算时间等优点,是最为重要和常用的电磁场数值方法之一^[7]。正演模拟的边界条件和激励源的选取是最为基本的问题,在本文的模拟中,选取了UPML吸收边界条件和地质雷达常用的是调制脉冲源。UPML吸收边界能较好应用于有损耗介质和色散介质,在很大的入射角上吸收效果较好,并能吸收凋落波,是目前在地质雷达模拟中比较好的吸收边界条件之一^[8-9]。

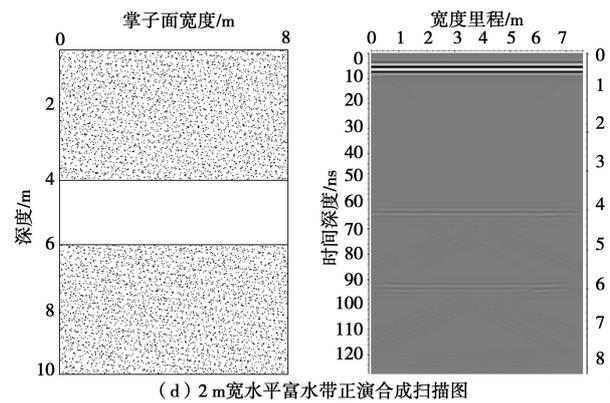
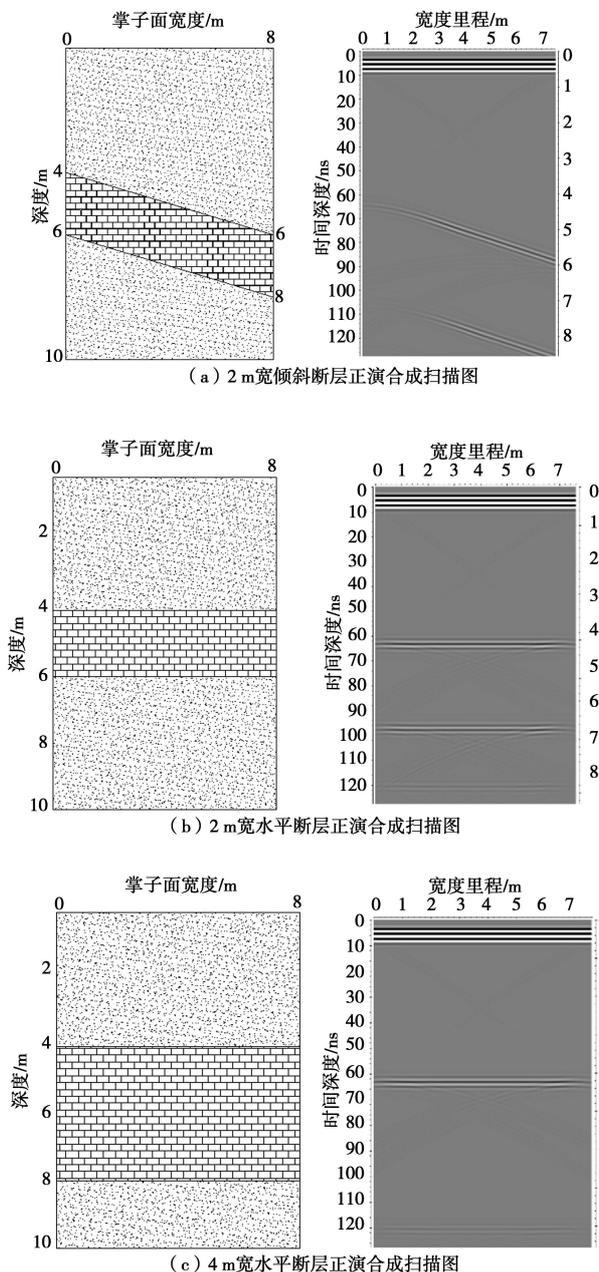
2.2 典型不良地质体的雷达正演合成扫描图

地质雷达正演模拟模型大小为800 cm×1000 cm,模型介质为花岗岩,其干燥状态下相对介电常数为5,电导率取 10^{-7} s/m,湿花岗岩相对介电常数为7,电导率取0.01 s/m。对不良地质体模拟中,断层破碎带取干沙土的介电常数10,电导率取 10^{-3} s/m,富水带取淡水的介电常数81,电导率取 10^{-4} s/m。网格取

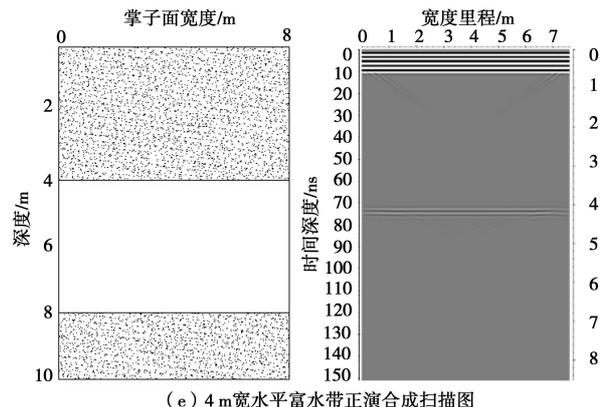
等距网格, 网格步长 $\Delta x = \Delta y = 0.01$ m, 时窗长度为 130 ns, 天线的中心频率为 100 MHz, 采用自激自收的收发方式, 使用调制脉冲子波, 采样从左边 0.1 m 位置处每隔 0.01 m 采集一道数据, 共采集了 761 道数据, 吸收边界的层数为 8 个网格层。通过上述模型得到的典型不良地质体的正演模拟图谱如图 2 所示。

通过以上 5 种地质情况的正演模拟图, 可得到典型不良地质体在地质雷达图像上具有如下特征:

(1) 当掌子面前方遇到断层破碎带、富水带时, 会在不良地质体的两个界面产生强反射信号, 其与掌子面所成角度与实际情况一致 (见图 2 (a))。第一个界面的出现位置较为准确, 第二个界面的位置准确度难以保证, 当断层破碎带和富水带较宽时, 往往只会在第一个界面产生反射信号 (见图 2 (c)、(e))。



(d) 2 m宽水平富水带正演合成扫描图



(e) 4 m宽水平富水带正演合成扫描图

图 2 典型不良地质体的正演模拟图谱

Fig. 2 Forward simulation maps of typical defective geologies

(2) 由于模型本身的局限性, 正演模拟中断层破碎带与富水带的地质雷达特征图像具有很大的相似性, 较难区分 (如图 2 (b)、(d))。实际工程中, 断层破碎带往往是不均匀的, 因而在两个界面之间的地质雷达图像一般比较杂乱, 实际中富水带中多含有泥沙等杂质, 导致电磁波信号在传播时一边严重衰减, 一边产生多次反射, 容易形成震荡信号。

3 预报实例

采用本文所述综合超前地质预报方法, 在山西忻保 (忻州至保德) 高速公路云中山特长隧道中展开实践, 多次成功预报掌子面前方的断层破碎带和富水带, 有效预防了施工过程中可能发生的塌方、突水事故。

3.1 工程地质调查

云中山地表分布的大量圆形孤石以及各种褶皱地层 (图 3), 推断隧道沿线可能存在断层破碎带。此外, 场地地表风化严重, 土层较薄, 利于地表水下渗, 而岩石裂隙发育, 为地下水富集提供了条件, 推断在隧道沿线可能存在较多富水带。当隧道左线开挖至 ZK42+758 断面时, 掌子面地质状况开始显著变差, 掌子面地质观察记录表如表 1 所示。

3.2 地震反射波探测

采用 TGP206 地震反射波预报法对 ZK42+758 断

面前方 100 m 范围进行探测。预报检测时，在距离掌子面 82 m 处的 ZK42+676 钻孔布置接收检波器。采集的 TGP 数据，通过 TGPwin 软件进行处理，得到 P 波、SH 波、SV 波同侧及对侧相关偏移综合图（如图 4）、构造面反射成果图（如图 5）等预报图示。



图 3 地表圆形孤石和褶皱地层

Fig. 3 Round isolated boulders on surface and fold strata

表 1 掌子面地质观察记录表

Table 1 Geological observation records of tunnel face

隧道名称	云中山	里程	ZK42+758	时间	2010-08-22
掌子面岩性	强风化—全风化红褐色花岗岩，围岩较破碎，正面掉块				
描述					
地质构造面	拱顶以下出现一组压性节理，节理产状 $130^\circ \angle 82^\circ$ ，节理裂隙发育，张开间距大于 1 mm，充填黏土				
情况	节理裂隙渗水，掌子面滴水				
出水状况	其他异常				
其他异常	钻孔钻进速度变快，岩壁局部蚀变				

裂隙发育带，结合沿线地质情况，裂隙中可能集水形成富水带，建议围岩等级为 IV 级偏弱，在 ZK42+758—ZK42+855 全段施工时，需做好防突水和塌方。

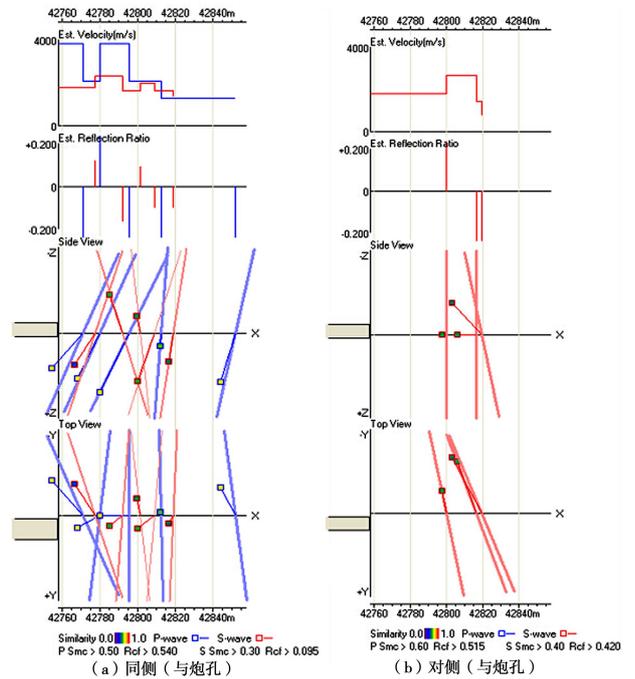


图 5 构造面反射波成果图

Fig. 5 Reflected wave graph of structural surface

3.3 地质雷达探测

通过 TGP206 长距离预报，得出 ZK42+770—ZK42+785、ZK42+795—ZK42+820 段岩体存在异常，推断可能为断层破碎带或富水带，为进一步确认，在隧道开挖接近该段里程时，采用地质雷达进行短距离精确预报。采用了在工程中应用较多的瑞典 MALA 公司生产的 RAMAC 系列地质雷达，为保证探测深度和屏蔽干扰，地质超前预报选择 100MHz 的屏蔽天线。

(1) 断层破碎带的预报

根据隧道开挖围岩变化情况，在桩号 ZK42+794 的掌子面进行地质雷达超前预报，在掌子面中部布置一条测线，测试深度 24 m。探测图像如图 6 (a) 所示。

由雷达图像推断，掌子面前方 0~14 m 内图像电磁波反射信号同相轴断续，频率较低，振幅较强，结合掌子面地质素描和岩性，判断桩号 ZK42+794—ZK42+808 范围内围岩节理裂隙很发育，整体性差，岩层含水量较小，推断该段范围存在宽 8 m 左右的断层破碎带。

(2) 富水带的预报

由于云中山富集的地下水主要靠地表渗水补给，因而富水带的围岩一般也较为破碎。对于 TGP 预报结果中构造面集中的区域，有较大可能是地下水富集地带。在断面开挖至 ZK42+764 时，掌子面地质观察表

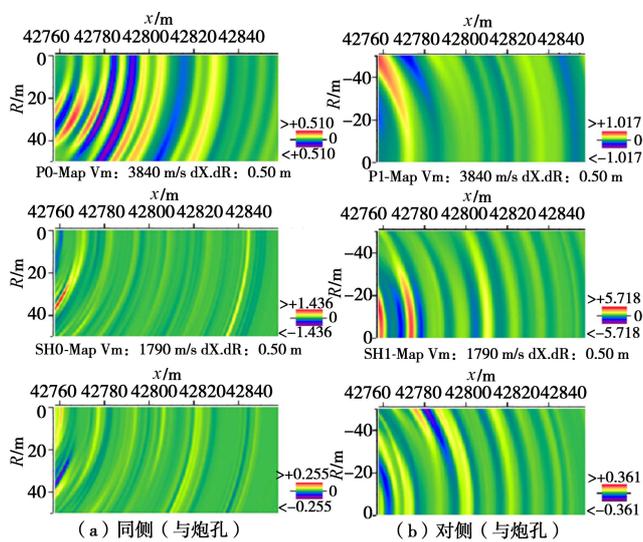


图 4 P 波、SH 波、SV 波偏移图

Fig. 4 Migration graph of P, SH, SV waveforms

结果分析以 P 波图像为主，参考横波反射图像，图像解释时以正反射振幅表明硬岩层，负反射振幅表明软岩层，如果 S 波反射较 P 波强，则表明岩层饱含水。综合分析隧道左右壁的 P 波、SH 波、SV 波的相关偏移归位剖面图可知：ZK42+770—ZK42+785，ZK42+795—ZK42+820 段岩体有异常，推测为构造与

明, 掌子面节理裂隙发育, 围岩很破碎, 大部分裂隙渗水, 水量较大。借助施工现场开挖台车, 在掌子面平行布置两条测线, 探测前方 30 m 范围内是否存在富水带, 雷达探测图像如图 6 (b) 所示。

综合两条测线的雷达图像, 判断掌子面前方 10~26 m 范围内 (ZK42+774—ZK42+790), 电磁波反射信号同相轴错断, 存在弧形同相轴, 频率低, 振幅较强, 判断掌子面前方该区域内, 节理裂隙发育, 围岩非常破碎, 岩层含水量很大, 存在富水软弱夹层或富含水洞。

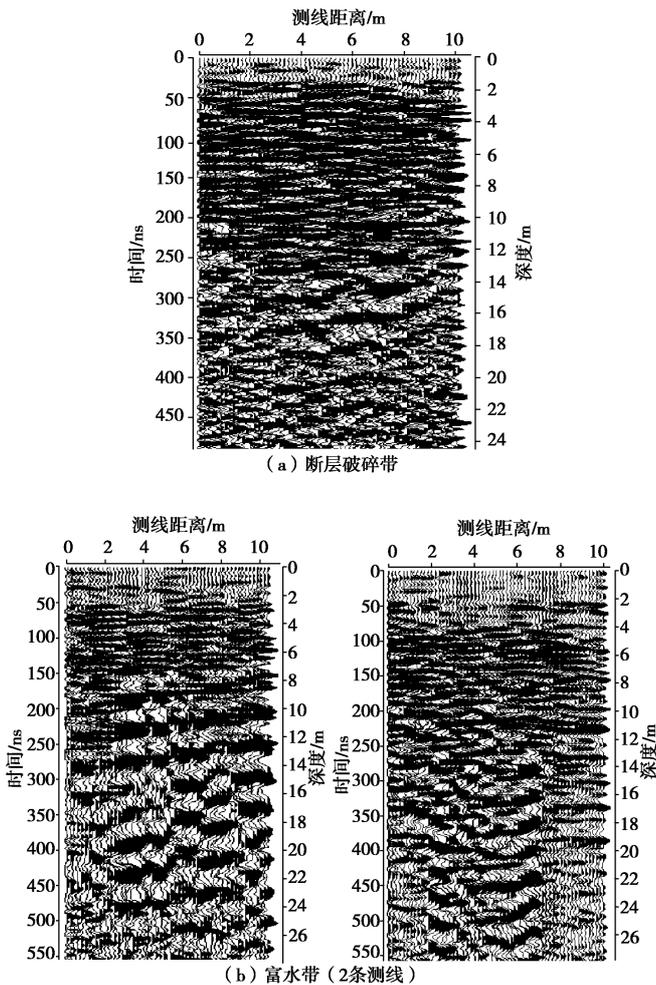


图 6 雷达探测图像

Fig. 6 Detection images by GPR

3.4 实际开挖和预报结果对比

通过上述 3 种方法对隧道左线 ZK42+758—ZK42+858 范围开展地质超前预报, 准确预报了该 100 m 范围出现的断层破碎带和富水带, 预报结果和实际开挖揭露的地质状况对比见表 2。从表中对比可以看出, 预报的不良地质体类型和出现范围基本准确, 但在不良地质体出现的准确桩号和规模上, 预报结果与实际开挖状况存在一定差异。

表 2 预报结果与实际开挖对比

预报桩号	综合预报结果	实际开挖状况
ZK42+770—ZK42+785	节理裂隙发育, 围岩非常破碎, 岩层含水量很大, 存在富水软弱夹层或富含水洞。	ZK42+766 围岩十分破碎, 裂隙处出现股状涌水, 出现掉块, 掌子面处积水严重, 需两台水泵同时抽水, 在 ZK42+790 涌水明显减少
ZK42+795—ZK42+820	构造裂隙发育带, 岩体破碎, 弱—强风化, 多呈裂隙块状结构, 易塌方, 围岩等级为 IV 级偏弱。	ZK42+800 掌子面围岩风化严重, 左侧拱腰出现泥夹石滚落, 继续掘进掌子面全部风化为泥夹石难以自稳, 改为预留核心土环状开挖, 在 ZK42+825 处围岩开始变好

4 结论与建议

(1) 运用 FDTD 法, 对不同规模、不同角度的断层破碎带和富水带进了地质雷达正演模拟, 得到了典型不良地质体的雷达特征图像, 从理论上提高了地质雷达探测图谱解释的准确性。

(2) 通过工程地质调查宏观推断需加强物探预报的范围, 进而开展 TGP206 地震反射波法长距离预报, 在接近不良地质体时, 采用地质雷达短距离精确预报。综合几种方法, 大大提高了超前地质预报的准确性。

(3) TGP206 及其类似的地震反射波法对地下水的预报难以准确, 而以地质雷达为代表的电磁法则对地下水较为敏感。而在实际工程中, 地下水往往富集于断层破碎带, 基于此, 通过组合 TGP206 和地质雷达两种方法, 对富水带的预报可取得十分满意的效果。

(4) 通过本文的综合超前地质预报流程, 对掌子面前方是否存在不良地质体 (断层破碎带、富水带) 的预报十分准确, 但对于其存在的规模和位置的判断存在一定差异, 因此在预测不良地质体出现位置的一定范围内, 需特别留意对掌子面的地质调查, 提前做好围岩可能变差的施工准备。

参考文献:

[1] 王振宇, 程国锋, 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(增刊 2): 3549 - 3557. (WANG Zhen-yu, CHENG Wei-feng, LIU Yue, et al. Synthetic advanced forecast technique based on geological logging for tunnel face and ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3549 - 3557. (in Chinese))

[2] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J].

- 铁道勘察, 2004, **1**: 7 - 9, 18. (WANG Meng-shu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. Railroad Survey, 2004, **1**: 7 - 9, 18. (in Chinese))
- [3] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1241 - 1251. (QU Hai-feng, LIU Zhi-gang, ZHU He-hua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(6): 1241 - 1251. (in Chinese))
- [4] CREMER F, JONG de W. Fusion of Polari metric infrared features and GPR features for landmine detection[C]// The 2nd International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. Delft, 2003: 1 - 6.
- [5] CHRISTIAN D. Close fuzzy rule-based expert system for short-range seismic prediction[J]. Computers and Geosciences, 2002, **28**(3): 377 - 386.
- [6] 赵永贵. 国内外隧道超前预报技术评析与推介[J]. 地球物理学进展, 2007, **22**(4): 1344 - 1352. (ZHAO Yong-gui. Analysis and recommendation of tunnel prediction techniques at home and abroad[J]. Progress in Geophysics, 2007, **22**(4): 1344 - 1352. (in Chinese))
- [7] 薛桂霞, 王 鹏. 探地雷达时域有限差分法正演模拟[J]. 物探与化探, 2006, **30**(3): 244 - 246. (XUE Gui-xia, WANG Peng. The application of the FDTD method to GPR simulation[J]. Geophysical and Geo-chemical Exploration, 2006, **30**(3): 244 - 246. (in Chinese))
- [8] SACKS Z S, KINGSLAND D M, LEE R, et al. A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition[J]. IFFF Transactions on Antennas and Propagation, 1995, **43**(8): 1460 - 1463.
- [9] 李 静, 曾昭发, 黄 玲, 等. 三维探地雷达数值模拟中 UPML 边界研究[J]. 物探化探计算技术, 2010, **32**(1): 6 - 12. (LI Jing, ZENG Zhao-fa, HUANG Ling, et al. Study of UPML boundary for three dimensional GPR simulation[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, **32**(1): 6 - 12. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)