

文章编号:1672-3961(2009)04-0065-04

地质雷达在胶州湾海底隧道 $F_{4.5}$ 含水断层超前预报中的应用

李为腾,李术才,薛翊国,赵岩,丁志海

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250012)

摘要:青岛胶州湾海底隧道地质条件复杂,隧址区含有多组高陡倾角断层,因此隧道在通过海域段涌水断层时的安全便成了工程建设过程中的关键问题.以此为背景,根据在胶州湾海底隧道左线隧道 $F_{4.5}$ 含水断层利用地质雷达对破碎围岩和裂隙水进行超前预报中的应用,针对信号采集和数据处理解析过程中各影响因素,采取相应的处理措施,最大限度地去除干扰,最后得出清晰准确的测线伪彩色成果图及测线波形图等成果,并从成果图中统计了探测范围内的结构面和裂隙发育的具体位置和规模、裂隙水发育位置等参数,为超前预注浆加固提供了参数.对开挖后的地质情况进行地质编录,验证了本次地质雷达预报的准确性与有效性.所采用的方法措施对于海底隧道地质雷达超前地质预报具有一定的借鉴意义.

关键词:胶州湾海底隧道;地质雷达;超前地质预报;含水断层

中图分类号:P642;U45 **文献标志码:**A

Application of ground penetrating radar to the geological forecast for water-bearing faults in the Jiaozhou Bay subsea tunnel construction

LI Wei-teng, LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHAO Yan, DING Zhi-hai

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250012, China)

Abstract: The geological conditions of the Qingdao Jiaozhou Bay subsea tunnel are complex, which include many groups of faults with a large dip angle, and therefore how to ensure the security of the tunnel in fault rich water is a key problem in engineering construction. The application of geological radar was introduced for detecting the fragmented rock and fissure water in $F_{4.5}$ water-bearing faults in the left line of the Jiaozhou Bay subsea tunnel. For the influencing factors during data gathering and data analysis, some measures were used to reduce the interference, and the achievements such as pseudo-color survey line graph and survey line oscillogram were obtained. The achievements depict the growth scale, position and water situation of the $F_{4.5}$ fault. The parameter of the exact location and size of the fracture and the location of fracture and cracks in the fault zone were also provided. At the same time the geological forecast provided parameters for advanced grouting. The later geological compilation after the excavation confirmed the accuracy and validity of this geological radar forecast and the mentioned measures certainly have reference meaning to ground penetrating radar application on subsea tunnels.

Key words: JiaoZhou Bay subsea tunnel; ground penetrating radar; advanced geological forecast; water-bearing fault

0 引言

海底隧道施工区域地质条件一般极为复杂,而

且上覆岩层一般较薄,结构面易与海水联通,由于这种特殊的水文地质情况,在海底隧道挖掘过程中,因掌子面前方地质情况不详,在不良地质地段出现塌方、涌水等现象的风险较高,严重时会造成人身伤亡

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划)资助项目(2007CB209407);港、澳青年学者合作研究基金资助项目(50729904)

作者简介:李为腾(1987-),男,山东金乡人,硕士研究生,主要从事隧道超前地质预报等方面的研究工作. E-mail: lwteng2007@163.com

和设备损坏等重大事故.因此海底隧道超前地质预报工作显得尤为重要.而近年来,随着我国隧道工程的快速发展,地质雷达在隧道工程超前地质预报中的应用也越来越普遍和成熟.地质雷达具有探测速度快、定位准确、轻便灵活、经济方便、可实现连续透视扫描以及二维彩色图像实时显示等优点,非常适合于海底隧道的短期地质预报^[1].在总结地质雷达超前地质预报研究与实践应用的基础上,结合胶州湾海底隧道工程的实际情况,对隧址区的 F₄₅ 含水断层进行探测,并与洞内掌子面地质素描相结合,通过探测结果和已知地质信息对前方地质情况进行分析预测,取得了比较理想的效果,提高了预报的准确率,指导了现场施工,为施工单位及时合理地修正施工方案、安排掘进进度及防护措施、避免险情发生赢得了充足的准备时间,在基本没有影响正常施工进度的前提下有效地保证了隧道的施工安全.

1 地质雷达超前地质预报基本原理

地质雷达(ground penetrating radar, GPR)是用高频电磁波(1 MHz ~ 1 GHz)来确定介质内部物质分布规律的一种地球物理方法.地质雷达超前地质预报的基本原理如图 1 所示,发射天线 T 和接收天线 R 沿掌子面一定高度,从左向右匀速移动,同时发射天线 T 将高频电磁波以宽频带脉冲形式沿掌子面定向送入洞进深方向,电磁波在传播过程中遇到存在电性差异的地层或目标体时,如断层、破碎带、溶洞和含水层等,就会发生反射和透射,接收天线 R 收到反射波信号并将其数字化,然后由电脑以一系列反射波波形的形式记录下来.最后对所采集的数据进行相应的处理,可根据反射波的传播时间、幅度和波形,判断前方目标体的空间位置、结构及其分布^[2].

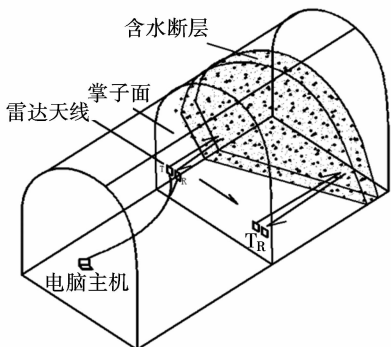


图 1 地质雷达超前地质预报基本原理图

Fig.1 Basic principle of GPR geological forecast

电磁波的传播取决于物体的电性,物体的电性主要有电导率 μ 和介电常数 ϵ .不同的地质体具有不同的电性,电磁波在不同电性的地质体的分界面

上,都会产生反射.

根据电磁波在介质中传播的时间和行程的关系,电磁脉冲波走时

$$t = \sqrt{4z^2 + x^2}/v = 2z/v, \quad (1)$$

式中, z 为勘查目标体的埋深; x 为发射、接收天线的距离(式中因 $z \gg x$, 故 x 可忽略); v 为电磁波在介质中的传播速度.

根据电磁波的波动方程,电磁波的传播速度

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2)$$

式中, c 为电磁波在真空中的传播速度; ϵ_r 为介质的相对介电常数; μ_r 为介质的相对磁导率(一般 $\mu_r \approx 1$).

由以上公式结合地质雷达数字信号处理方式,可推断出地质雷达图像的解释中出现地质异常体的剖面的反射回波特征:

- (1) 雷达反射波同相轴发生明显错动;
- (2) 雷达反射波同相轴局部缺失;
- (3) 雷达反射波波形发生畸变;
- (4) 雷达绕射波明显加强;
- (5) 雷达反射波频率发生变化^[3].

由上述公式同样可以看出,地质雷达在超前地质预报中对于地下水的探测具有较大优势.因为空气的介电常数为 1,岩石的介电常数为 4 ~ 20,水的介电常数为 81,水的电导率远高于灰岩、砂岩、岩浆岩等岩石^[4],因而地质雷达对水有特别的敏感性.雷达探水主要依据以下准则:

- (1) 雷达波对水和含水率高的介质的反射强烈,反射波强度大;
- (2) 雷达波从其它介质到含水层界面的反射波相位与入射波相反;
- (3) 雷达波通过含水层后,高频成分被吸收,反射波的优势频率降低.

这些是含水层反射雷达波的重要正演概念,是分析和解释含水层反射信号的基本原则^[5].

只有深入掌握这些特征和基本原则,才能作出有效的图像解析,得出准确的地质信息,尤其是在对海底隧道含水断层这种高风险区域的预报中,对于含水区域和断层破碎带的预报准确与否,直接关系到隧道施工安全,对于安全顺利地通过各断层破碎带有着至关重要的意义^[6].

2 应用实例

2.1 工程概况

青岛胶州湾海底隧道工程是连接青岛市主城区与

辅城的重要通道,位于团岛和薛家岛之间,下穿胶州湾湾口海域,该海域平均水深 7 m 左右,最大水深 65 m,其中湾口最大水深 42 m,主隧道长度约 6.17 km,跨越海域总长度约 3.95 km.海域段主隧道理埋深一般为 20~35 m,隧道全程采用新奥法施工.据地质报告提供资料显示,海底大部分无覆盖层,地形起伏较大,隧址处存在几处断裂构造,所发现 18 条断裂大部分为高角度、中新代脆性断裂构造,以压扭性为主,其宽度在数米至数十米不等.其中隧道海域段穿越 4 组 14 条断裂带.断层内以压碎岩、碎裂岩、糜棱岩为主.部分断裂具有张性,断层两侧有数米宽的影响带.而且多处断层区内结构面与海水贯通,裂隙含水,突水、涌水风险较高.

根据地勘资料,本次雷达探测区域(ZK7+046~021)海水深 22 m,上覆岩层厚度 25~30 m,区域内有辉绿岩侵入,其全风化到弱风化带厚度可能超过 20 m;辉绿岩附近约 0.5 m 范围内的岩体较破碎,破碎带以外的岩体虽较完整,但发育微张型裂隙,裂隙面浸染迹象明显.断层带内断层泥,断层角砾发育,整体强度低,自稳能力差,强风化到全风化,含多条泥质夹层,含压扭弧形结构面,水解快,绿泥石化,原岩矿物成分不清楚.

2.2 探测成果及图像解释

本次地质雷达对胶州湾海底隧道出口端左线隧道 ZK7+046 掌子面进行探测,采用美国地球物理探测设备公司(GSSI)生产的 SIR-3000 系列雷达,连接主频为 80 MHz 的分离式天线,采样点数 1 024.探测掌子面为上台阶施工掌子面,横向 14 m,高度 6.5 m,采用地质雷达连续测量方式,测线布置如图 1,雷达天线距地面 1 m,由左向右贴掌子面由左向右匀速平移.

针对各种对地质雷达数据采集有较明显影响的因素,如掌子面平整程度、渗水、掌子面附近的台架和施工机械等.在地质雷达信号采集前期准备阶段,联系施工方将掌子面尽量平整,封堵掌子面渗水,将施工台架和施工机械尽量远离探测掌子面,以尽量减少各种干扰.同时,数据采集过程中尽量使天线保持匀速平移并且不要发生跳动现象,同时避免天线触水,这些因素都会造成较大干扰.

采集的信号经过增益处理、IIR 滤波、FIR 滤波静态校正、希尔伯特变换等处理步骤,同时对数据分析和数据处理进行多次调试对比,经过数据处理和数据分析干扰信号得到压制,有效信号得以突出,提高了信噪比,最终得到地质雷达测线波形图(图 2).

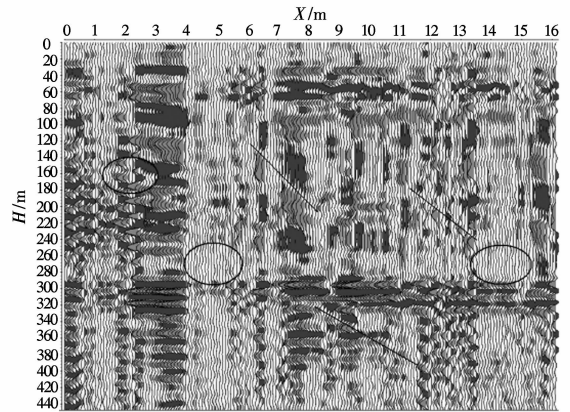


图 2 测线波形图

Fig.2 Survey line oscillogram

由图 2 可知,掌子面前方 25 m 围岩回波波形凌乱,同向轴连续性差,多处反射波被围岩吸收强烈,结合探测掌子面围岩地质素描情况,得出如下预报结论:ZK7+046 掌子面前方 25 m 围岩强度总体较低,结构面较发育,且多为北东向(图 2 直线所示),围岩弱风化到强风化,局部全风化,部分结构面发育有软弱夹层,围岩完整性差,且部分裂隙含水现象明显(图 2 椭圆标识处).其中,面向掌子面左前方 7~9 m 处、13~16 m 处、右前方 9~12 m 处发育有裂隙水存在;左前方 9~13 m 处充填有泥质夹层;掌子面前方 6~15 m 整体较前 6 m 破碎.判定围岩等级为 IV 级.

该预报段围岩质量差,裂隙发育密集且含水,建议开挖之前采取适当预处理措施,并准备足够的突水涌水应急物资.同时开挖之后及时支护,尤其是在预报破碎段应加强支护,增加监控量测频率.

2.3 超前预报结果与实际开挖情况对比

该雷达预报报告结果提交后,各方高度重视,由施工方对 ZK7+046 掌子面进行超前探孔,探孔数 3 个,孔深均为 30 m,三孔均有出水:左部探孔水量 25 L/min,主要出水点位于孔深 10 m 处;拱顶渗水;右部拱肩探孔水量 6 L/min,主要出水点位于孔深 11 m 处(见图 3).三孔总瞬时出水量以达到海底隧道周边帷幕注浆要求,后经各方商议,对出水掌子面进行周边帷幕注浆,注浆孔数 82 个,注浆材料为水灰比 1:1 超细水泥浆液,总注浆量 724 m³.注浆结束开挖后揭露的该预报段 25 m 围岩情况大致为:围岩强度较低,结构面较发育,裂隙发育密集,结构面弱风化到强风化,整体稳定性差,围岩等级判定为 IV 级.其中,在探测掌子面前方 12 m、15 m 处揭露 2 个明显结构面(241°∠66°),雷达预报裂隙水发育处经开挖发现多处较宽的(3~10 mm)超细水泥浆脉,推断为注浆前主要输水裂隙.

本次预报结果经开挖验证,围岩级别判断准确,结构面、裂隙发育情况判断与实际揭露情况基本一致,尤其是对前方裂隙水的准确预报,使得施工方有了充分的时间进行准备工作,并制定了正确的应对措施,对前方围岩采取了上半断面超前预注浆加固的措施,在开挖前有效地充填了含水裂隙,较好地封堵了地下水,保证施工安全.

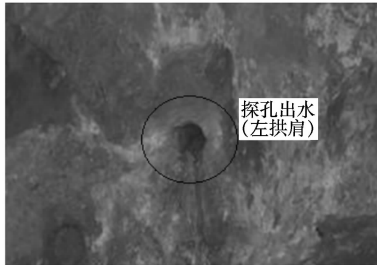


图3 掌子面围岩及探孔出水照片

Fig.3 Rock and drilling hole water in the tunnel face

3 结论

地质雷达是探测海底隧道掌子面前方含水断层的有效手段,在海底隧道的实际探测过程中,影响地质雷达探测结果的因素比较多.经过在青岛胶州湾海底隧道地质预报中的工程实践证明,在信号采集和数据处理解析过程中对不同的影响因素采用相应的去除干扰的方法,同时对不良地质条件下各种地质雷达波形图的典型特征进行反复地研究,可以有效提高对地质雷达波形图的解释和识别的准确性和精度,取得较为理想的效果.

致谢:本文研究工作得到了青岛国信胶州湾交通有限公司以及中铁十八局、中铁隧道局胶州湾海底隧道项目部的大力支持与配合,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 何发亮,李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3):12-16.
HE Faliang, LI Cangsong. The development of geological forecast in tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2001, 38(3):12-16.
- [2] 夏才初,潘国荣. 土木工程监测技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
XIA Caichu, PAN Guorong. Monitor technology of civil engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [3] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
ZENG Zhaofa, LIU Sixin, WANG Zhejiang, et al. Ground penetrating radar methodology, principle, and application[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] 栗毅,黄春琳,雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
SU Yi, HUANG Chunlin, LEI Wentai. Theory and application of GPR[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [5] 李术才,薛翊国,张庆松,等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7):1297-1307.
LI Shucai, XUE Yiguo, ZHANG Qingsong, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7):1297-1307.
- [6] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社, 1994.
LI Daxin. Ground penetrating radar method and its application [M]. Beijing: Geology Press, 1994.

(编辑:孙培芹)