

文章编号: 1672-3961(2009)04-0069-05

综合地质预报在某隧道明洞探测中的应用

孙怀凤¹, 李术才¹, 崔伟², 邱道宏¹, 刘钦¹

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 隧道出洞口附近易出现塌方、冒顶等地质灾害, 为防止这类灾害的发生, 施工前必须对隧道前方地质情况做出准确判断. 文章分别介绍了隧道地震波法(tunnel seismic prediction, TSP)和地质雷达法(ground penetrating radar, GPR)两种常用的地质预报方法, 并综合应用这两种方法对某隧道明洞段进行了探测. 根据超前地质预报的探测结果, 确定地面冲沟所在位置及掌子面前方岩体含水情况, 并做出该区域不会揭露明洞的判断; 同时结合地质雷达对拱顶进行连续跟踪探测, 得到了顶板的厚度. 最后, 探测结果与实际开挖情况进行了对比验证. 通过综合地质预报的手段, 能够较准确的探明掌子面前方的地质情况, 指导工程施工.

关键词: 隧道地震波法; 地质雷达; 明洞, 综合地质预报

中图分类号: P642 文献标志码: A

Application of comprehensive geological prediction in open-cut tunnel detection

SUN Huai-feng¹, LI Shu-cai¹, CUI Wei², QIU Dao-hong², LIU Qin¹

(Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Collapse or roof fall usually occurs at the open-cut part. To solve this problem, comprehensive geological prediction is necessary. The basic principles of two widely used geological prediction methods (TSP and GPR) were introduced. These two methods were applied in detection of an open-cut tunnel. The basic position of the gully and the water cut condition were determined according to advanced geology prediction using TSP203. An opposite conclusion was obtained that open-cut tunnel would not show here. In addition, the thickness of bedrock was tracking detected using GPR and a comparison with the excavation was given.

Key words: TSP; GPR; open-cut tunnel; comprehensive geological prediction

0 引言

我国的隧道建设正在向长距离、大埋深发展, 单纯的依靠勘察设计阶段的工程地质调查、钻孔勘探、遥感航拍等手段不能准确的探明工程施工时可能发生的地质灾害. 隧道施工过程中经常出现突

水、突泥(砂)、塌方等地质灾害, 严重的威胁工作人员的生命安全. 鉴于此, 紧随施工进行超前地质预报已经成为隧道施工过程中非常重要的一部分^[1-4]. 进行超前地质预报的方法有很多, 使用物探方法进行超前地质预报因其快速、无损、高效受到大家的青睐, 物探方法主要有电法、电磁法和地震波法及声波法. TSP是目前最常采用的进行长距离预报的手段,

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家自然科学基金委重点资助项目(50539080)

作者简介: 孙怀凤(1982-), 男, 山东邹平人, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与地质灾害的预测及防治方面的工作. E-mail: sunhuai Feng@gmail.com

地质雷达是进行短距离预报的最常用手段。

1 TSP 系统基本原理

TSP 是基于地震波反射原理的一种物探方法,其基本原理是通过在掘进面后方一定距离的钻孔内施以微型爆破来发射弹性波信号,爆破引发的弹性波在岩体中以球面的形式向四周传播,其中一部分向隧道前方传播,当波在隧道前方遇到异面时,将有一部分波从界面处反射回来.从起爆到发射信号被接收的这段时间是与反射面的距离成比例的,反射信号经过一段时间后到达接受传感器,被转换成电信号并进行放大.通过反射的时间与地震波传播速度的换算就可以将反射界面的位置、与隧道轴线的交角以及与隧道掘进面的距离确定下来^[5].

地震波在岩体中的传播规律与光在介质中的传播类似,惠更斯原理、诺特方程等同样适用于地震波的计算.在进行成果解译的时候,使用纵波波速对岩体进行划分,并进行岩层属性判断.纵波波速的计算公式为

$$V_p = D / T, \quad (1)$$

其中, D 为起爆点到接收器的距离(m); T 为直达波的传播时间(ms).

通过波速和各参量之间的关系求出参量并绘制深度偏移图确定反射面位置,深度偏移是 Lamer 首先提出的,其基本思想是由时间剖面先得到普通的偏移时间剖面,再对偏移后的剖面进行校正,从而得到真正的深度剖面.

2 GPR 基本原理

地质雷达技术是当前国际上最先进的地球物理勘探手段之一,仪器便携并且具有无损探测的特点,当前主要有美国 SIR 系列、加拿大 Pulse EKKO 系列、日本 GEORADAR 系列、拉脱维亚 Zond 系列以及国产的 LTD 系列.GPR 的基本原理为发射天线将高频短脉冲电磁波定向送入探测目标体,电磁波在传播过程中遇到存在电性差异的地层或目标体就会发生反射和透射,接收天线收到反射波信号并将其数字化,然后由电脑以反射波波形的形式记录下来.对所采集的数据进行相应的处理后,可根据反射波的旅行时间、幅度和波形,判断目标体的空间位置、结构及其分布.

GPR 是在对反射波形特性分析的基础上来判断地下目标体的,所以其探测效果主要取决于地下目

标体与周围介质的电性差异、电磁波的衰减程度、目标体的埋深以及外部干扰的强弱等.其中,目标体与介质间的电性差异越大,二者的界面就越清晰,表现在雷达剖面图上就是同相轴不连续.可以说,目标体与周围介质之间的电性差异是 GPR 探测的基本条件^[6].GPR 探测不良地质体的原理见图 1.

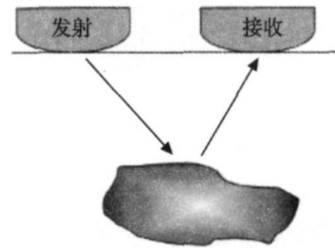


图1 地质雷达探测原理图

Fig. 1 Basic principle of GPR

3 工程实例

3.1 工程概况

江边水电站位于四川省甘孜藏族自治州东南部,地处九龙县境内的雅砻江左岸一级支流九龙河下游河段上,为九龙河“一库五级”开发方案的最后一级电站.电站采用有坝引水式方案,主要建筑物为首部枢纽、引水系统和地下发电厂房等,电站总库容为 133 万 m^3 ,装机容量 330MW,属二等大型水电工程.

调压室交通洞工程位于九龙河口下游雅砻江左岸.调压室交通洞连接上游调压室及引水隧洞下游端,为上游调压室和引水隧洞下游端等工程的主要交通及施工通道.调压室交通洞属雅砻江左岸斜坡区,沿线地表基岩裸露,地形陡峭,自然坡度 $60 \sim 80^\circ$,部分地段为陡崖.坡面冲沟发育,沟谷展布方向受本区主要节理的控制,多为 NNW 向,沟谷两侧壁陡立.切割深度较大的冲沟有 2 条,切割深度分别为 200 m 和 250 m,较大冲沟内多具季节性流水,水量变化较大.隧洞沿线出露的基岩为燕山期侵入岩,岩性为黑云母花岗岩.在雅砻江左岸公路边坡可见较大的二叠系甲黄沟群黑云母石英片岩捕虏体,两者多呈混熔接触,胶结紧密,局部为蚀变带,带宽多小于 50 cm,带内岩体风化较强烈.第四系松散堆积物分布范围小,主要分布在缓坡地段及较大冲沟谷度,主要由块、碎石组成,厚度约 5 ~ 30 m,最大粒径可达 10 m 以上.

洞内长大节理较为发育,节理多呈风化状,且节理多数存在锈蚀,裂隙水不发育.根据施工图纸在 TK1+422 左右会出现长度约 46 m 的明洞段(见图 2),结合本洞工程地质情况,隧道出洞时极易出现塌

方、冒顶等地质灾害, 为了确保施工安全, 在 TK1+400 进行了 TSP 超前地质预报。

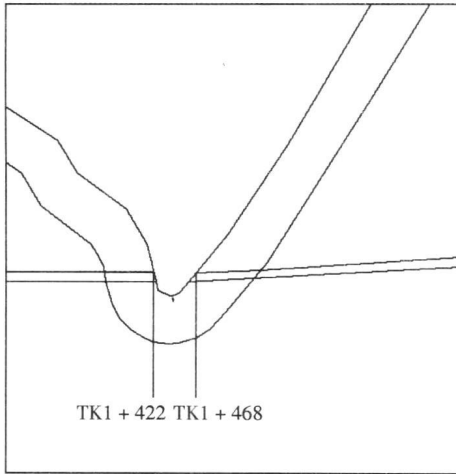


图 2 明洞段设计施工图

Fig. 2 Working drawing of the open-cut part

3.2 TSP 现场数据采集及成果分析

现场数据采集采用瑞士 Amberg 公司生产的 TSP203 系统, 现场布置炮孔 24 个, 炮点间距 1.5 m 左右, 接收器和炮孔均位于右侧边墙内, 掌子面桩号 TK1+400, 接收器桩号 TK1+349. 在掌子面处发育一贯穿性大倾角节理, 倾向洞外, 节理面呈弱风化, 且有锈蚀. 距掌子面后方 3 m 洞顶处局部有滴水.

采集的数据采用 TSPWin 软件进行处理, 在进行处理时结合采集的数据, 选取相对低频的信号作为有用信号, 而高频的成分认为是干扰, 进行合适的滤波.

从处理完成的数据深度偏移图和反射界面提取图上可以清楚的看到在 TK1+449 附近存在一条非常强烈的负反射界面(见图 3、图 4). 从岩性图上可以看出该段区域波速存在明显的震荡变化, 泊松比突然升高, 密度突然下降(见图 5), 再结合设计施工图纸初步判定此处为设计的明洞段区域位置^[7].

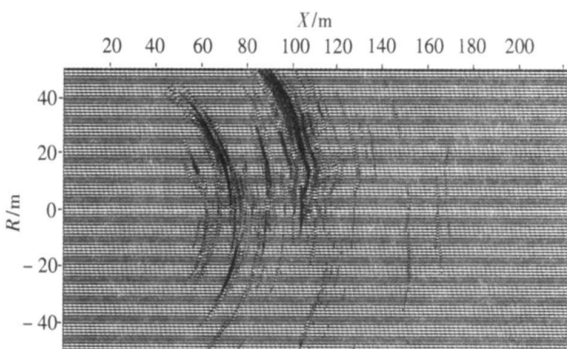


图 3 P 波深度偏移图

Fig. 3 Depth migration of primary wave

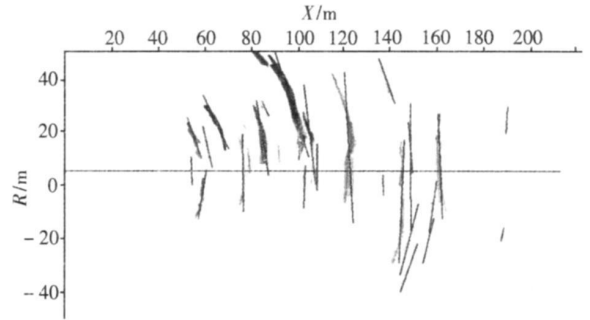


图 4 反射界面提取图

Fig. 4 Reflection interface graph

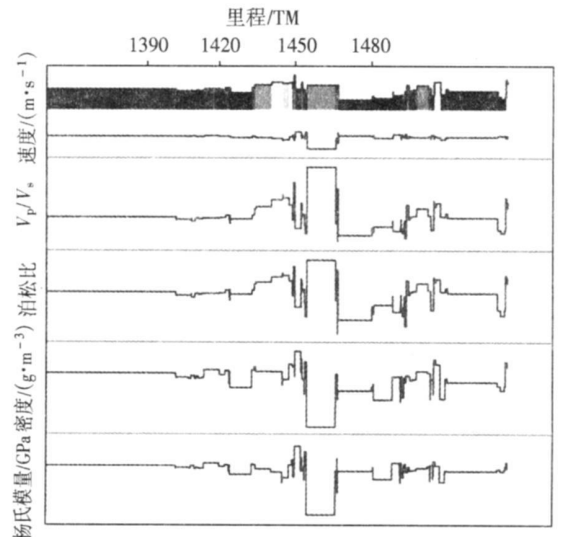


图 5 预报结果 2D 视图

Fig. 5 2D graph of the result

下面进行进一步的分析:

① 根据施工图纸进行正演分析, 隧道穿越冲沟时出现明洞区域, 并且隧道底板高程大于沟底高程, 那么在 TSP 深度偏移图上面看到的应该是贯穿隧道剖面的一条反射界面, 但是实际情况是只在上部出现了强反射截面, 且反射界面距隧道轴线距离大于 20 m, 而隧道轴线下方几乎没有反射界面. 这一点与施工图不一致.

② 因地表勘察比较困难, 从侧面进行观察可见该区域有小瀑布从沟中流出, 推测沟中可能存在积水(见图 6), 而已经揭露的地质资料显示该段区域节理发育, 并存在贯通性节理, 因而判断 TSP 应该能够探测到隧道轴线穿过富水带, 根据 TSP 判水准则^[7-8]对比 P 波、S 波偏移图(见图 3、图 7), 发现 TK1+449 左右不存在大的水体, 隧道轴线上方存在部分裂隙水.

③ 若出现明洞, 则强反射截面后应该是空气或者是大面积的水体, 根据以上分析首先排除大面积水体存在的可能, 在空气中, P 波波速应该明显降低, 但是结合岩性图进行分析, 并没有看到这种现

象,该桩号附近的P波波速震荡应该视为围岩节理发育的表现^{[9]10}.



图6 地表情况
Fig. 6 Surface condition

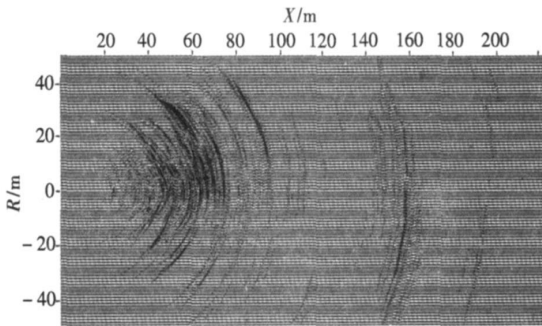


图7 S波深度偏移图
Fig. 7 Depth migration of shear wave

综合以上分析判断,在TK1+449附近隧道通过冲沟,并且隧道不会出现明洞段,但鉴于该段区域节理较发育,围岩完整性较差,存在塌方冒顶的可能.

3.3 地质雷达探测拱顶及分析

鉴于节3.2的分析,在TK1+430附近开始对拱顶增加对拱顶的连续探测.探测时使用美国SIR-3000型地质雷达及配套的100 MHz屏蔽天线,在台车顶部对拱顶上部进行探测,TK1+445左右的探测结果处理图见图8.可见在拱顶上方12m左右存在一条非常强烈的反射界面,并且反射界面同向轴连续,在12m以内的范围内可以看到存在部分水体,12m强烈反射界面之后则看不到明显的反射,推测为进入空气层,初步推测该位置为覆盖层表面^[9].结合TSP203探测结果以及GPR连续跟踪探测结果,综合地质资料和前期的勘察资料绘制了该区域探测结果示意图见图9.

3.4 施工建议实际开挖验证

根据以上分析和推测,在掌子面接近TK1+430附近时开始实施短进尺爆破,每炮进尺不超过1.5 m,并使用超前锚杆支护,系统支护紧跟掌子面.

为确保施工安全,在掌子面到达TK1+440时,采用超前导洞爆破,首先在掌子面中部开挖尺寸约3 m×3 m的小导洞,导洞掌子面超前约3 m.

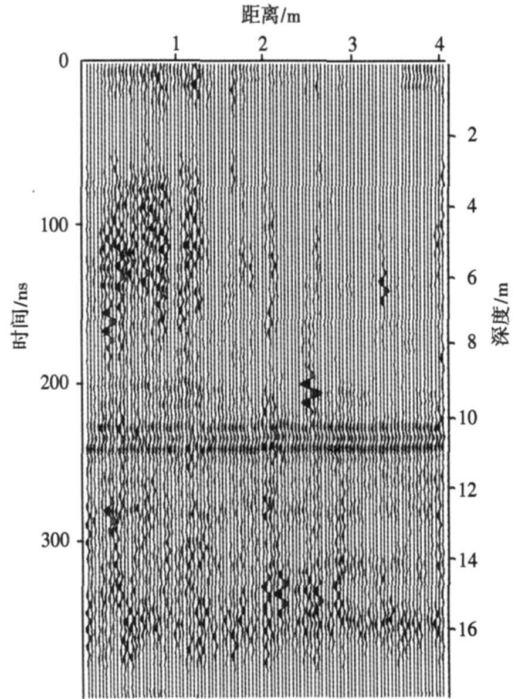


图8 TK1+445地质雷达探测处理结果
Fig. 8 GPR data processing results in TK1+445

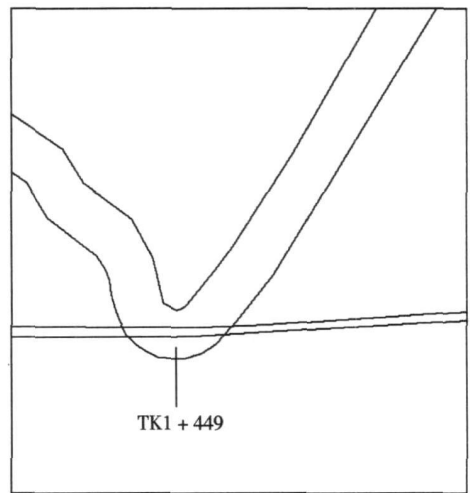


图9 探测结果示意图
Fig. 9 Results of the comprehensive prediction

在TK1+440至TK1+460附近区域出现线状滴水,总体水量不大,该区域围岩完整性较差,并且发育多组大节理,有锈蚀,TK1+460后水量逐渐变小并消失,判定为已经通过设计明洞段区域,开挖结果未出现明洞,未出现塌方、冒顶等地质灾害.

4 结论

(1) TSP203超前地质预报系统能够较准确的反

应掌子面前方的地质情况特别是较大的结构面等,在地质资料相对较少的情况下,综合分析深度偏移、波速变化、反射层图、纵横波速和岩体物性参数结果等,能够得到较好的超前地质预报效果。

(2) 总结 TSP 超前地质预报明洞与断层破碎带的主要区别为明洞只出现强烈的反射界面而没有明显的反射带,断层破碎带则会出现明显的反射带。

(3) GPR 探测,能够较准确的探明掌子面前方以及拱顶的情况,有利于施工过程中采取相应的措施,确保安全。

(4) 在进行超前地质预报的过程中要注意结合已经掌握的工程地质相关知识,进行综合判断,以期达到较准确的预报结果。

参考文献:

- [1] 李术才,李树忱,张庆松,等.岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):217-225.
LI Shucai, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-225.
- [2] 张庆松,李术才,孙克国,等.公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J].地下空间与工程学报,2008,4(4):766-771.
ZHANG Qingsong, LI Shucai, SUN Keguo, et al. Analysis and present state of advanced geological forecast technology of highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 766-771.
- [3] 林传年.岩溶隧道综合超前地质预报应用研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(6):1086-1090.
LIN Chuannian. Research on application of comprehensive advanced prediction for karst tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1086-1090.
- [4] 孙克国,李术才,张庆松,等.TSP在岩溶区山岭隧道预报中的应用研究[J].山东大学学报:工学版,2008,38(1):74-79.
SUN Keguo, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Application of the TSP geological forecast method of a mountain tunnel in a karst zone [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(1): 74-79.
- [5] 周黎明,尹健民,侯炳坤,等.弹性波反射法在地质超前预报中的应用分析[J].长江科学院院报,2008,25(1):61-64.
ZHOU Liming, YIN Jianmin, HOU Bingshen, et al. Application of elastic wave reflection method in geologic advanced prediction [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(1): 61-64.
- [6] 李大心.地质雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
LI Daxin. GPR and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [7] 许振浩,李术才,张庆松,等.TSP超前地质预报地震波反射特性研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(4):640-644.
XU Zhenhao, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Reflection characteristic of seismic wave in TSP advance geological prediction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 640-644.
- [8] 薛诒国,李术才,张庆松,等.TSP203超前预报系统探测岩溶隧道的应用研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(7):1187-1191.
XUE Yiguo, LI shucai, ZHANG qingsong, et al. Application of TSP203 advanced prediction to tunnel in karst areas [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(7): 1187-1191.
- [9] 刘传孝.地质雷达空洞探测机理研究及应用实例分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):238-241.
LIU Chuanxiao. Research on the mechanism of probing cavity with ground penetrating radar and analysis on application examples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 238-241.
- [9] 曲海锋,刘志刚,朱合华.隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1246-1251.
QU Haifeng, LIU Zhigang, ZHU Hehua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1246-1251.
- [10] 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 Jinshan, WANG Li, CAO Zhigang, et al. Practice on synthetic geological prediction ahead of construction of Xiamen subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2309-2317.

(编辑:陈燕)