

# 地质雷达在犇溪口隧道超前地质预报中的应用

王 威<sup>1,2</sup>, 代兵权<sup>1,2</sup>

(1. 武汉工程大学国家磷资源开发利用研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**介绍了地质雷达进行超前地质预报的工作原理, 以地质雷达在水绥二级公路犇溪口隧道施工中的应用为例, 通过对地质雷达图像的解析进行了超前地质预报, 实践证明地质雷达是隧道施工超前地质预报的一种快捷有效的方法, 对隧道施工具有较好的指导作用。

**关键词:**地质雷达; 隧道; 围岩; 超前地质预报

**中图分类号:** U456.3

**文献标识码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.12.011

## 0 引 言

随着我国国民经济建设的飞速发展, 特别是西部大开发战略的实施, 各类新建的隧道工程日益增多。我国西部地区地形及地质结构复杂, 在隧道开挖掘进过程中, 如何提前了解和发现隧道前方的岩石等级和异常情况, 为隧道的施工提供准确的地质资料, 以便及时调整和实施施工工艺和异常地质情况的处理, 从而达到减少和预防工程事故的发生。地质雷达作为先进物探方法, 因具有扫描速度快、设备重量轻、图像分辨率高、屏蔽效果好、图像直观、操作简便等优点在隧道超前预报中得到广泛的应用<sup>[1-7]</sup>。但是由于预报距离短而经常结合隧道地震波超前预测系统(Tunnel Seismic Prediction, TSP)资料进行隧道超前预报。本文介绍了地质雷达超前预报的基本原理, 以水绥二级公路犇溪口隧道为工程背景, 介绍了地质雷达在超前地质预报中的应用。

## 1 地质雷达的基本原理

地质雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是近年来兴起的一种新型物探方法, 应用于浅层地质构造、岩性检测以及隧道开挖探测的一项新技术。它利用超高频电磁波探测地下介质分布, 并形成实时影像, 使探测结果能够快速、直观进行判读。地质雷达因其探测精度高、探测对象无损、工作效率高在近几年倍受关注。特别是在施工中预防施工事故的发生有着重要的意义。

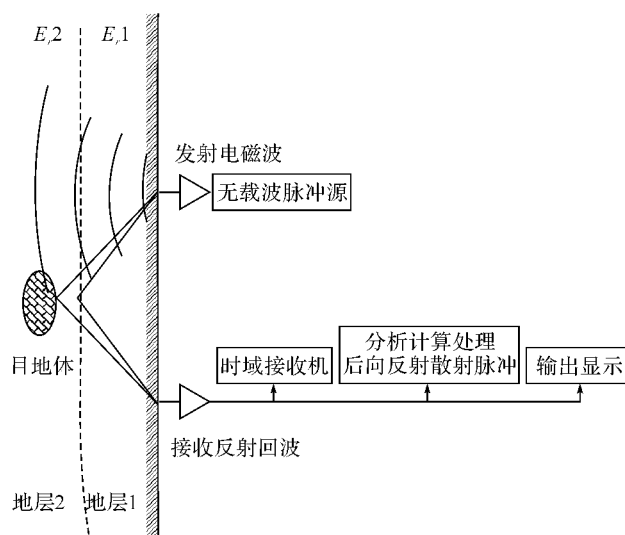


图 1 地质雷达超前预报工作示意图

Fig. 1 Sketch map of ground penetrating radar for geologic prediction

隧道地质雷达超前预报方法是一种用于确定隧道掌子面前方地质情况分布变化的广谱电磁波技术, 如图 1 所示, 其基本原理是: 利用一个天线向掌子面前方发射中心频率为 12.5 M 至 1 200 M、脉冲宽度为 0.1 ns 的脉冲电磁波讯号。当这一讯号在电磁波在岩体介质中传播时, 其传播的路径、电磁场强度与波形与传播的机制的电性质以及几何形体有着明显的相关性。接收机接收到对应的直达讯号和反射讯号, 根据反射讯号到达滞后时间及目标物体的平均反射波速, 可以计算出目标的大致距离, 最后成像形成大体的地质结构剖面。最终达到探测掌子面前方介质的地

层结构与异常地质体。

通过理论与实验室模拟试验发现电磁波在物体或介质中的传播速度  $v$ 、走时  $t$ 、与介质的相对介电常数  $E_r$  满足以下方程<sup>[2]</sup>:

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

$$v = \frac{C}{\sqrt{E_r}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $z$  为反射界面深度,  $C$  为光速常量约每秒 30 万公里,  $v$  为电磁波在不同介质中传播的速度,  $x$  为发射天线到接收天线间的距离,  $E_r$  为传播介质的相对介电常数。对地质雷达来说,采用的是雷达波,所以电磁脉冲的速度  $v$  变成了已知变量。根据公式及通过读取雷达剖面上行程时间计算得到界面深度  $z$  值。

在实际的外业施工过程中,因为掌子面前方介质变化较为复杂,建议事先在不同隧道,不同围岩情况下做多次实验,测算出不同地段的围岩介质波速,利用公式求得每次所测段的围岩平均波速情况,再根据速度来推断异常对象的埋深情况。

由于电磁脉冲反射信号的强度与地质界面的反射系数以及传播介质的波吸收程度有关,一般情况下,传播介质的电磁参数(电性)差别大,则反射系数大,因而反射波的能量也大,这就是地质雷达探测的前提条件。

$$P_R = \frac{P_T G^2 \lambda_0^3 R S L}{(4\pi^3) H^4} R S L e^{-4\alpha R} \quad (3)$$

式(3)中: $P_T$ ,  $P_R$  分别为发射和接收功率; $G$  为天线增益; $\lambda_0$  为介质中雷达波的波长,  $R$ 、 $S$ 、 $H$  分别为地下目标体的反射率、散射面截面和深度; $\alpha$  为岩土衰减率; $L$  为雷达波从发射到接收过程的散射损耗。

通过公式可以看出,雷达接收的信号强弱与很多东西相关,主要包括雷达天线的功率和特性、地层对电磁介质的衰减、地层对电介质的反射能力。对天线频率、探测深度以及分辨率的关系描述主要为:天线频率越高,则对地层探测的深度越浅,得到的图像分辨率越高;反之,天线频率越低,则对地层探测深度越深,得到的图像分辨率越低。因此,在对隧道进行地质雷达超前预报时,先需要对地质雷达的天线进行选择,天线的选择决定了探测深度和分辨率。这就存在探测深度与分辨率的取舍或优选问题。

## 2 隧道工程概况

云南省水富至绥江(水绥)二级公路是连接向家坝水电站与溪洛渡水电站的便捷通道,也是向家坝水电站淹没区水绥公路的还建工程。水绥二级公路的建成,对攀西—六盘水开发区的建设,特别是沿线地区的资源开发,具有重要意义。位于三项目部第九工区的中城镇彝溪口隧道是水绥二级公路新增隧道之一,全长 1 170 m,是水绥二级公路最长的一个隧道,也是地质最复杂、环境最恶劣、施工难度最大的一个隧道。

彝溪口隧道出口地层为紫灰、紫红色粉砂岩、泥岩,呈弱风化碎石状,岩性质软,受结构影响较严重,节理裂隙很发育,岩体破碎,岩层产状  $200^\circ \angle 12^\circ$ ,产状对围岩稳定不利,如图 2 所示,该段地下水埋藏较深,但处于基岩侵入接触带,地下水富水性中等,施工中将有中等水量的渗水。为了保证施工安全进行,我们采用地质雷达对彝溪口隧道进行了超前地质预报,取得了较好的效果。

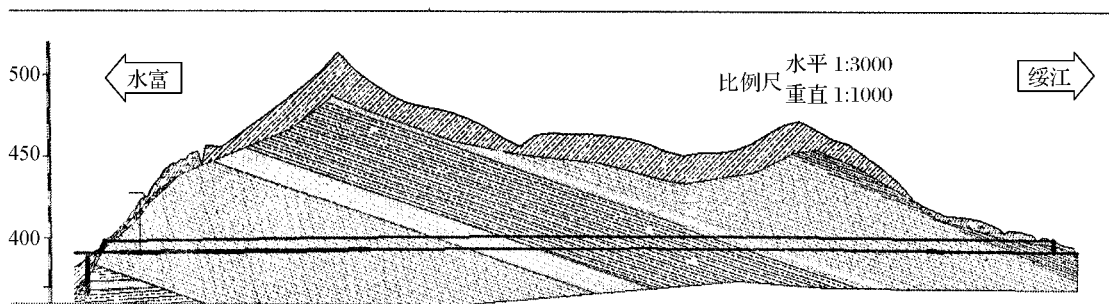


图 2 彝溪口隧道地质结构图

Fig. 2 Tunnel geological structure of Benxikou

## 3 仪器设备及技术参数

地质雷达系统包括硬件(主机、天线、传输电

缆等)和软件(现场数据采集、预处理、后处理等)两大部分。本次投入的设备为美国产 SIR 系列地质雷达系统(图 3)。

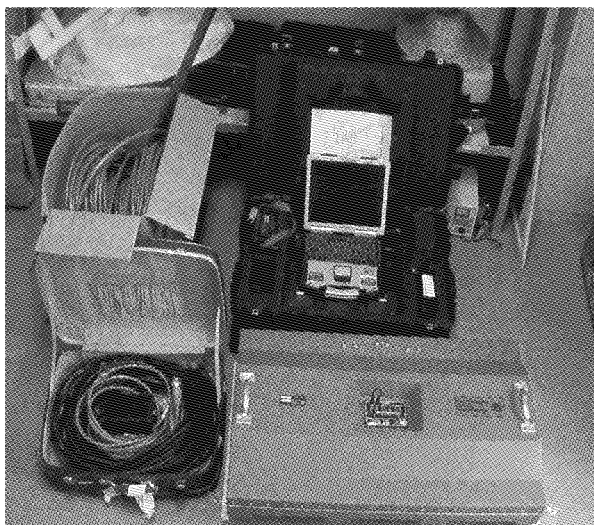


图 3 地质雷达系统

Fig. 3 Ground penetrating radar system

在获取到地质雷达影像的处理上,配备了 RADAN6.5 系列雷达软件,特别针对各种地质异常情况可以进行多道平均,同相轴追踪,信号偏移,希尔伯特变换,褶积与反褶积的滤波变换,傅立叶变换,强制增益变化等等一系列的手段,可以最大程度的保证资料处理的可辨读性。

SIR 系列地质雷达属工程现场非破坏性的高频电脉冲全数字化地面探测系统,其主要技术参数如下:

- a. 扫描速率:每秒 2~800 次扫描可选,具有 DSP 数据快速采集系统;
- b. 分辨率:5 ps;
- c. 主机可适配所有高中低频的各类雷达天线,频率范围从 16 MHz 到 2.2 GHz,本次预报工作主要选用 100 MHz,400 MHz 频率的天线;
- d. 量程增益: -20~100 dB,自动或用户可选;增益曲线分段可以从 1~8 进行选择;
- e. 具有位置自动伺服系统,便于信号的准确接收。

#### 4 地质雷达探测及结果分析

根据彝溪口隧道掌子面现场情况,沿水平方向布置了 2 条测线,测线  $A_1$  距离上台阶 1.5 m,测线  $A_2$  距离上台阶 4.5 m,具体测线位置如图 4。由于掌子面的不平整,为提高测试的准确性,测试时根据情况对某些测试剖面进行了重复测试。为提高预报精度,本次预报采用 400 M 屏蔽天线(仅向掌子面前方发射电磁波和仅接收掌子面前方的反射波)进行探测,并沿测线进行连续测量。限于篇幅,本文仅介绍 K72+443 掌子面的地质雷达探测结果。

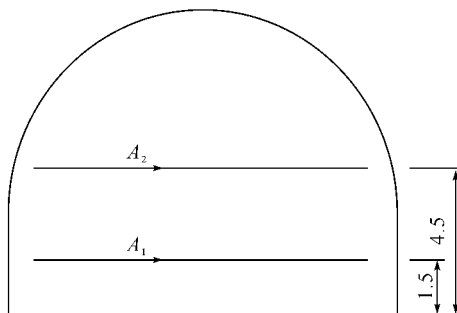


图 4 掌子面雷达测线位置示意图

Fig. 4 Sketch map of survey line location in the tunnel

地质雷达探测是基于电磁波遇到不同反射界面其反射振幅和相位不同来判断前方传播介质的变化。介质介电常数的差异决定了电磁波反射的强弱程度和其相位的正负。岩性、构造、风化程度及其含水量的变化将影响其介电常数。

雷达测试资料的解释是根据现场测试的雷达图像,先进行数据处理,对可以解读的图像进行异常分析;根据异常的形态、特征及电磁波的衰减情况,判断波阻抗界面的地质成因,从而可以对测试范围内的地质情况进行解释。

纵观本次地质雷达图像,图像显示较为清晰,在剖面探测深度内基本未见电磁波反射异常,在 K72+443 竖直测线  $A_2$  剖面深度为 10 m 的位置发现电磁波强反射等异常。

K72+443 处  $A_1$  和  $A_2$  测线的地质雷达探测剖面波列图如图 5(a)、4(b)所示,由图中可以看出,探测剖面无明显反应异常区,表明该段围岩情况与掌子面围岩相比变化不大,从掌子面的岩体情况可以对掌子面前方的岩体情况进行推断,节理裂隙发育、岩体比较破碎,推断为溶蚀破碎带,裂隙夹泥及小块石,含少量水,层间及节理裂隙粘土充填,围岩完整性一般,推断围岩等级为 IV 级,而在 K72+443 竖直测线  $A_2$  剖面深度为 10 m 的位置发现电磁波强反射等异常区域可以推断在此区域的围岩较其他区域的围岩更加破碎,从而对该破碎区域推断为 V 级。当隧道进尺到该区域时,应格外注意支护。以避免掉块和塌方情况发生。

#### 5 结 语

从彝溪口隧道现场地质调查情况看,掌子面围岩为紫灰、紫红色粉砂岩,岩体比较破碎,夹少量泥,水量小,围岩强度较低,围岩级别为 IV 级。根据雷达探测结果结合地质调查分析,推测预报段 K72+443~K72+423 整段围岩质量一般,围岩节理裂隙较发育、岩体较破碎,溶蚀发育,形成的小块石较多。从  $A_1$  测线来推测围岩的围岩进尺



1.5 m左右和10 m左右有少量的强反射信号,从 $A_2$ 测线可以观察到同样的结果,推测此位置的围岩等级为V级,建议施工方在此段区域加强防护,

避免掉块和塌方情况发生.实践证明地质雷达是隧道施工超前地质预报的一种快捷有效的方法,对隧道施工具有较好的指导作用.

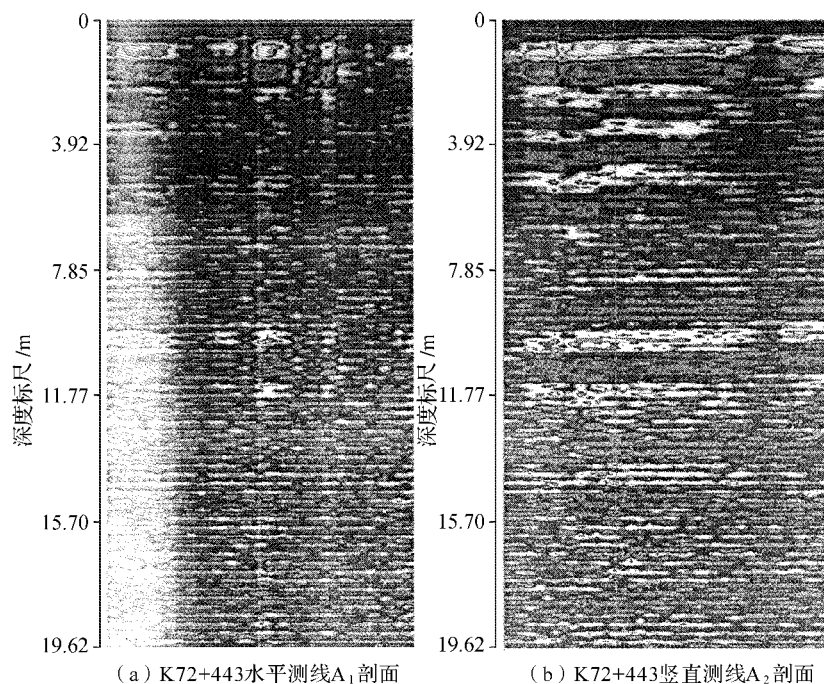


图 5 地质雷达探测剖面

Fig. 5 Profile images by ground penetrating radar

#### 参考文献:

- [1] 苏贵玉. 地质雷达在云台山隧道超前预报中的应用[J]. 山西交通科技, 2011(2): 44-46.
- [2] 李盼, 黄仁东, 杨光, 等. 地质雷达在隧道施工超前地质预报中的应用[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(4): 140-142, 145.
- [3] 张海东, 徐周. 地质雷达技术在隧道施工地质超前预报中的应用[J]. 江苏交通科技, 2011(1): 34-35, 40.

- [4] 崔芳, 高永涛, 吴顺川. 基于地质雷达的隧道掌子面前方地质预报研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(3): 115-118.
- [5] 宋波, 张文居, 曾知法. 地质雷达在隧道施工中的应用[J]. 工程建设与设计, 2011(1): 101-104.
- [6] 李镐, 仲晓杰, 韩煜. 地质雷达在隧道富水区超前预报中的应用[J]. 土工基础, 2010(4): 88-90.
- [7] 董栋, 陈光荣. 地质雷达在大西客专Ⅱ标隧道工程施工超前地质预报中的运用[J]. 水电施工技术, 2010(3): 108-110.

## Application of ground penetrating radar in Benxikou tunnel geological prediction

WANG Wei, DAI Bing-quan

(1. Phosphoric Resources Centre, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The working principle of ground penetrating radar (GPR) for geological forecast was introduced. In the case of the application of GPR in Benxikou tunnel of Shui-Sui secondary road, a geological forecast was conducted according to the geological radar image. It shows that geological radar is a quick and efficient way for geological forecast during the construction of the tunnel, and can provide a good guide for tunnel construction.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); tunnel; surrounding rock; geological prediction

本文编辑: 龚晓宁