

# 地质雷达法探测确定围岩松动圈范围的探究

黄向韬, 陈秋南\*, 衣利伟, 段宁

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 围岩松动圈范围的确定在隧道工程中有很重要的作用。基于地质雷达探测原理, 分析了用地质雷达技术确定隧道围岩松动圈范围的可行性。利用 TLD-2100 地质雷达对张家界永定区老木峪二号隧道进行了实地探测, 通过 IDSP6.0 系统对雷达波形图的分析, 同时结合相应的雷达频谱图, 确定了该隧道围岩松动圈范围。为隧道围岩松动圈范围的确定提供了一种可靠方法, 同时对隧道的开挖、支护等提供技术支持与指导。

**关键词:** 隧道工程; 围岩松动圈; 地质雷达; 探测原理

**中图分类号:** TD15      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2018)04-0056-06

## On the Determination of the Loose Zone of Surrounding Rock by Geological Radar Method

Huang Xiangtao, Chen Qiunan, Yi Liwei, Duan Ning

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Determination of loosened rock circles around the tunnel plays an important role in tunnel engineering. This paper evaluates the feasibility of applying ground-penetrating radar (GPR) to determine loosened rock circles around the tunnel, based on GPR theory. During the experiment, Zhangjiajie Laomuyu 2nd tunnel is probed by GPR (Model Number: TLD-2100). The radar waveforms and frequencies obtained are further analyzed by using IDSP6.0 system, and successfully determines the range of loosened rock circles around the tunnel. This alternative is proven to be reliable, which could provide additional support and guidance for tunnel excavation and protection.

**Keywords:** tunneling engineering; surrounding rock loose zone; ground penetrating radar (GPR); principle of detection

我国经济呈现东部带动中西部的趋势, 又由于我国中西部地区多为山地丘陵地貌, 隧道成为道路基础设施建设中关键的一部分。在隧道的设计与施工中, 需要考虑很多因素, 其中, 隧道围岩的稳定性是十分重要的因素, 它直接影响隧道在开挖、支护施工和以后使用的安全问题。而确定隧道围岩松动圈的范围又是分析隧道稳定性的一个关键因素。隧道在开挖后围岩受应力重分布的影响, 应力由三向应力转为近似二向应力, 若此时岩石强度大于集中应力, 围岩可以自稳, 处于弹塑性状态。若集中应力大于岩石强度, 围岩将会破裂, 并且一直向围岩深部延伸, 直到重新变为三向应力平衡状态, 所以围岩中会形成一个破裂带, 称为围岩松动圈<sup>[1-3]</sup>。影响松动圈范围的因素有很多, 例如: 爆破开挖的药量、开挖的方法、岩体强度、断跨度、地应力等。精确探测围岩松动圈厚度可以准确掌握隧道开挖对围岩的影响范围及程度, 所以松动圈范围的确定可以对隧道的开挖、支护提供技术支持与指导<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2018-07-14

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目 (CX2017B660)

\*通信作者, E-mail: 394339098@qq.com

## 1 地质雷达探测原理

在应用地质雷达系统对深度进行探测预报时,需要了解地质雷达的工作原理以及如何设置参数,这样才能更加清晰准确地勘测地质情况.地质雷达探测是地球物理探测的一部分,它属于地下不同介质发射的宽屏带波不同的电磁的方法<sup>[5]</sup>.

地质雷达法的理论依据为电磁波传播理论,通过地质雷达天线  $T_x$  向被探测目标发射高频电磁波(中心频率  $10 \sim 1\,000$  MHz),经过被测目标体反射之后的电磁波再由接收天线  $R_x$  接收,如图1所示,当高频电磁波在传播过程中遇到2个介电性质差异较大的界面时,电磁波就会发生色散、反射、衰减等在相同介电常数界面传播中不会出现的现象,实际上,电磁波在介质界面产生反射就是因为两侧介质的介电常数不同,差异越大反射信号越强烈,反之反射信号越差.雷达扫描结束后,通过得到的探测结果,根据频谱图中信号的频率、时间及波形图中振幅等一系列因素判断分界面的位置.

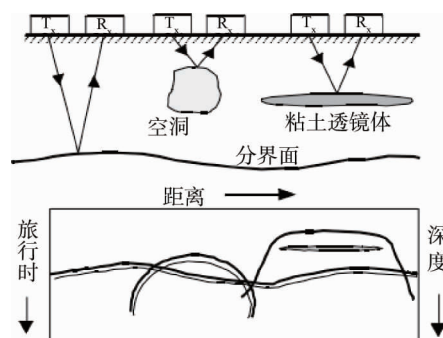


图1 雷达探测原理

在本次现场实验当中,隧道围岩属于高阻抗体.在探测过程中,高频电磁波在向目标岩体发射时,遇到介电性质不同的界面高频电磁波会发生反射和折射.反射系数  $R$  如式(1),反射系数  $R$  决定反射波的大小.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为相对介电常数.由式(1)可知,2个介电常数差异程度越大的界面其反射系数也越大,2种介质的分界面越易于分辨<sup>[6]</sup>.而松动圈是以隧道围岩是否存在较多裂隙为分界面,在围岩松动圈内岩石大多为破碎不稳定的状态,并且在裂隙中有很多杂质如水、淤泥、空气等,松动圈之外围岩完整裂隙不大,所以,围岩松动圈内外相对介电常数存在较大的差异,见表1,雷达发射的电磁波经过松动圈与非破坏区的分界面时必然发生强烈反射,且在其中呈杂乱无章状态传播,于是从收集处理的雷达探测剖面图上即可确定围岩松动范围,得到松动圈厚度值,因此地质雷达探测围岩松动圈的厚度在理论上是科学可行的<sup>[7,8]</sup>.

表1 常见物质相对介电常数

介质名称	电导率/(S/m)	相对介电常数
空气	0	1
水	4	81
石灰岩(干燥)	$10^{-9}$	7
花岗岩(干燥)	$10^{-8}$	5
饱水淤泥	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	10
玄武岩(湿)	$10^{-2}$	8
页岩(湿)	$10^{-1}$	7
沥青(潮湿)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	2~4
混凝土(潮湿)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20
混凝土(干燥)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	4~10

## 2 工程实例分析

### 2.1 隧道工程概况

老木峪二号隧道位于张家界市永定区新桥镇杨家湾村及张家界市武陵源区协合乡插旗峪村,位于已修建的S306省道西侧,为单洞隧道.隧道起于ZK8+896.00,终于ZK10+956.00,全长2 060.00 m,隧道底高

程为 489.04~528.24 m,全长 2 060.00 m.隧道总体走向为 37°.最大埋深约 304.95 m(ZK9+440),隧道埋深大于 100 m,隧道长度  $300\text{ m} \leq L < 1\ 000\text{ m}$ ,按公路隧道长度分类,属长隧道.该隧道地段的岩石主要为中-微风化页岩,夹泥质粉砂岩或互层,为软岩-较软岩,岩石抗风化能力较弱.老木峪二号隧道岩性单一,主要为页岩,隧道附近无区域性构造通过,节理裂隙稍发育,地质构造变动较小.该隧道中风化页岩围岩分级为Ⅳ级,微风化页岩围岩分级为Ⅲ级,粉质黏土、强风化页岩围岩分级为Ⅴ级.该隧道详细围岩分级如下:ZK8+896~ZK9+050段、ZK10+880~ZK10+956段为Ⅴ级;ZK9+050~ZK9+180段、ZK9+340~ZK9+660段、ZK9+960~ZK10+340段、ZK10+600~ZK10+880段为Ⅳ级;ZK9+180~ZK9+340段、ZK9+660~ZK9+960段、ZK10+340~ZK10+600段为Ⅲ级.老木峪二号隧道立面图如图 2 所示.



图 2 老木峪二号隧道

## 2.2 探测仪器与探测方案

### 2.2.1 探测仪器

本次现场实验选取 LTD-2100 探地雷达,如图 3.所需探测的深度为围岩松动圈的理论厚度(受断跨度、隧道埋深、开挖方式、围岩等级、爆破药量等影响)减去隧道的半径,一般为 0~3 m.LTD-2100 探地雷达有许多天线可供选择.根据所需探测深度与天线极限探测深度综合考虑,选取 400 MHz 天线.LTD-2100 探地雷达挂接天线简介,见表 2.



图 3 LTD-2100 天线和主机

表 2 LTD-2100 探地雷达挂接天线简介

设备名称	尺寸/cm	重量/kg	探测深度/m
LTD-2100	31×26×6	2.5	
GC1500 MHz	22×1 213.5	1.1	0.03~0.50
GC900 MHz	30×186	2.0	0.05~1.00
GC400 MHz	32×32×21	3.8	0.10~3.00
GC270 MHz	45×45×24	8.5	0.15~5.00
GC100 MHz	90×12	9.0	0.15~15.00

### 2.2.2 探测方案

选择 400 MHz 天线进行探测,布置 7 条测线,分别在 ZK9+441~ZK9+446 处,车行横洞掌子面 3 条(离地高度分别为 2.0,3.5,5.0 m)放置在 ZK9+448~ZK9+463 处,左右墙角以及左右墙(离地 1.5 m)处各 2 条测线,探测线布置如图 4 所示(测线布置处围岩等级为Ⅳ级).

进行现场实验时,地质雷达探测天线必须紧贴车行横洞掌子面、初支墙面,且要尽可能匀速、平稳地移动天线,使得天线与探测面耦合.

在对张家界老木二号隧道进行围岩松动圈测试过程中,我们每 1~2 m 做一个测量标记,对于特殊段(天线和掌子面耦合不佳段)采取多次标记,便于以后数据处理时剔除废道;如果探测面表面出现大量裂隙、凹陷或着脱空等情况,应重新挑选探测面;如因人为操作不当等可避免的原因引起探测效果不佳时应重新探测,为保证探测效果,我们对每个探测面进行 2 次探测,保留效果较好的一组.

为了让地质雷达的测试结果更加贴合现实情况,所以在实验中需要采取一系列更加有效的方法.

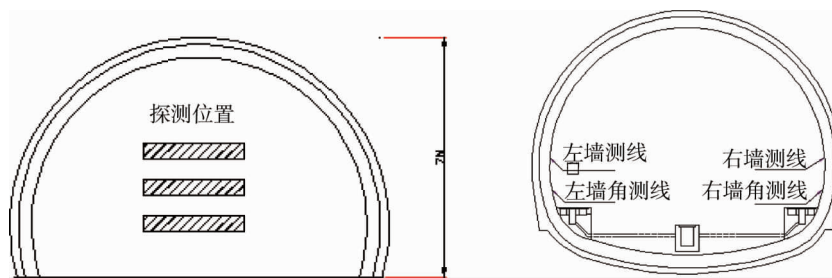


图4 雷达探测测线布置位置

### 2.3 探测结果的处理与分析

#### 2.3.1 探测结果处理

本次现场实验选取国产 LTD-2100 地质雷达对老木峪二号隧道部分区域进行探测扫描并采集数据,对采集到的数据用配套的 IDSP6.0 软件进行处理,运用数据合并、剔除废道、零点归位、增益处理、数字滤波、反褶积、偏移处理等手段使得结果更加清晰明了,便于分析.处理过程见图 5.

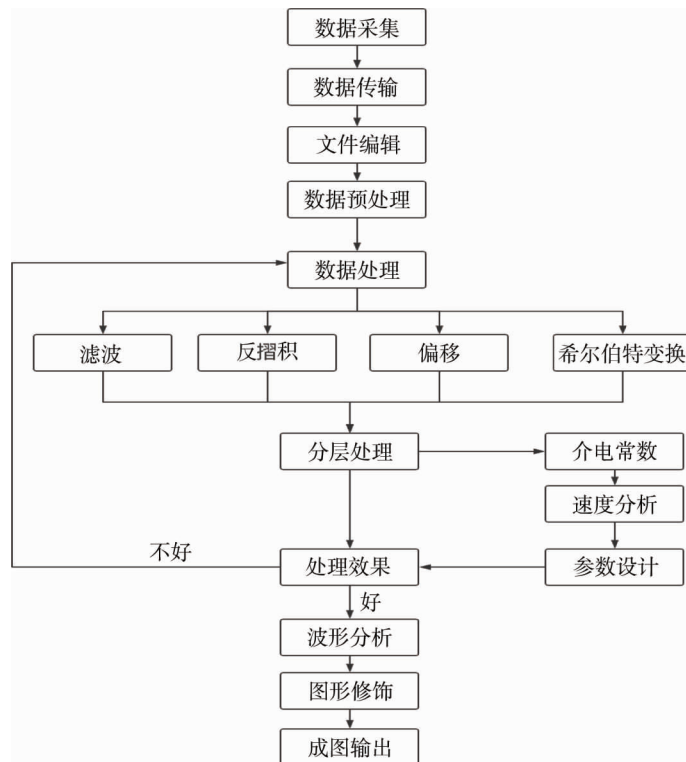


图5 数据处理流程

#### 2.3.2 探测结果分析

ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面)探测结果如图 6~图 8 所示.

由图 6 可知,在所探测深度区域内存在明显的地质分层,分析地质雷达探测扫描图,垂向 0.00~0.95 m 处出现了比较清晰的 2 种差异较大的分界面,在测程为 0.00~0.90 m,0.00~1.00 m 之下范围大部分是完整围岩.通过分析波形图,在 0.00~0.90 m,0.00~1.00 m 处反射波突然变化,并且此处波形的极性为负,由图可知反射波的速度逐渐降低,从高速变为低速,且能量(振幅)较强,推测此区域内可能存在软弱结构面,根据以上结果,可推测出处于该深度范围内的围岩整体较为破碎.据此,确定此处隧道围岩的松动圈范围是 0.00~0.95 m.

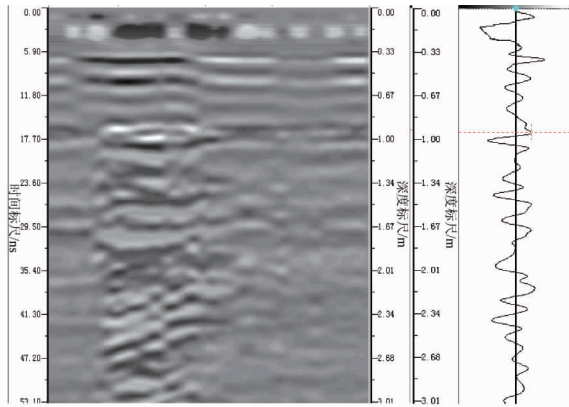


图6 ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地2 m处)地质雷达探测扫描与波形对比

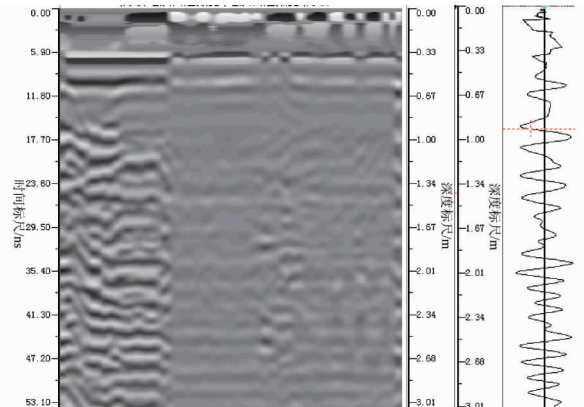


图7 ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地4 m处)地质雷达探测扫描与波形对比

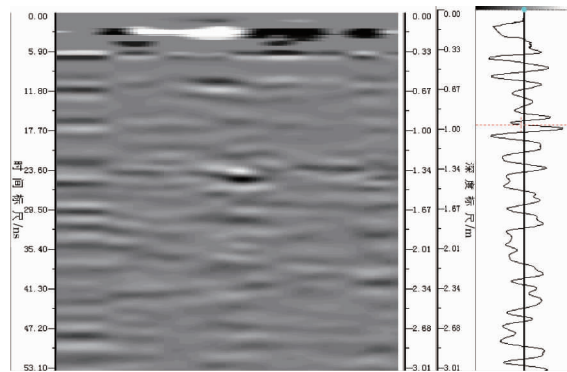


图8 ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地6 m处)地质雷达探测扫描与波形对比

在垂向0.95~3.00 m区间内反射波表现为均匀整齐,能量(振幅)变化不大,能量(振幅)总体呈现趋于平稳的趋势,所以认为此处为弹性区。

同理,分析图7和图8,在所探测深度区域内皆存在明显的地质分层,分析地质雷达探测扫描图,垂向0.00~0.90 m,0.00~1.00 m出现比较清晰的两种差异较大的分界面,在测程0.00~0.90 m,0.00~1.00 m之下范围大部分是完整围岩.通过分析波形图,在0.00~0.90 m,0.00~1.00 m处反射波突然变化,并且此处波形的极性为负,由图可知反射波的速度逐渐降低,从高速变为低速,且能量(振幅)较强,推测此区域内可能存在软弱结构面,根据以上结果,可推测出处于该深度范围内的围岩整体较为破碎.据此,确定此处隧道围岩的松动圈范围是0.00~0.90 m,0.00~1.00 m

在垂向0.90~3.00 m,1.00~3.00 m区间内反射波表现为均匀整齐,能量(振幅)变化不大,能量(振幅)总体呈现趋于平稳的趋势,所以认为此处为弹性区。

根据同样的方法我们可以得出其他几个测点的松动圈范围,测点分析结果如表3.

表3 测点分析结果汇总

位置	松动圈/m
ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地2 m处)	0.95
ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地4 m处)	0.90
ZK9+441~ZK9+446(车行横洞掌子面离地6 m处)	1.00
ZK9+448~ZK9+463(左墙)	0.95
ZK9+448~ZK9+463(左墙脚)	1.00
ZK9+448~ZK9+463(右墙)	1.00
ZK9+448~ZK9+463(右墙脚)	1.05

### 3 结论

1)老木峪二号隧道围岩松动圈范围为 1.0 m.

2)通过地质雷达可以探测松动圈范围,而松动圈范围的确定又可以对隧道的开挖、支护提供技术支持与指导.

3)在隧道中进行现场实验时,实验现场条件错综复杂,影响探测精度,所以需要采取移除地面干扰物、使用屏蔽天线屏蔽信号、加大叠加次数等方法提地质高雷达探测精度.

#### 参考文献:

- [1] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994(1):21-32.
- [2] 赵国彦,梁伟章,王少锋,等.基于量纲分析的巷道围岩松动圈预测模型[J].岩土力学,2016(s2):273-278.
- [3] 赵宾,梁宁宁,王方田,等.浅埋高强度采动巷道围岩松动圈演化规律研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):33-39.
- [4] 黄小城.大跨度扁平隧道围岩松动圈影响因素及理论计算研究[D].湘潭:湖南科技大学,2014.
- [5] 秦超.地质雷达探测技术在强底鼓巷道松动圈测试中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2018(5):155-156.
- [6] 蔡雅芬.复杂围岩条件下巷道超前预测预报与支护技术研究[D].淮南:安徽理工大学,2016.
- [7] 郭亮,李俊才,张志铖,等.地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2011(s1):3009-3015.
- [8] 宋宏伟,王闯,贾颖绚.用地质雷达测试围岩松动圈的原理与实践[J].中国矿业大学学报,2002,31(4):370-373.

\*\*\*\*\*

(上接第6页)

- [2] 黄杰安.层状岩体力学特性及其工程应用研究[D].长沙:中南大学,2006.
- [3] 蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] 张波,李术才,杨学英,等.裂隙充填对岩体单轴压缩力学性能及锚固效应的影响[J].煤炭学报,2012,37(10):1671-1676.
- [5] 何忠明,彭振斌,曹平,等.层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1906-1912.
- [6] 罗金泽,高敏,龚俊,等.单一层状岩体和软硬复合岩体单轴压缩破坏特征试验研究[J].长江大学学报(自科版),2014,11(4):75-78.
- [7] 李银平,刘江,杨春和.泥岩夹层对盐岩变形和破坏特征的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(12):2461-2466.
- [8] 朱泽奇,曾亚武.层状岩体单轴压缩强度及剪切破坏面研究[J].矿产勘查,2005(4):27-29.
- [9] 殷鹏飞.层状复合岩石试样力学特性单轴压缩试验与颗粒流模拟研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- [10] 罗世林,万文,赵延林,等.层状岩体单轴压缩破坏数值研究[J].矿业工程研究,2016,31(2):50-56.
- [11] 李剑光.含倾斜软弱夹层复合岩体强度及蠕变特性研究[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [12] 宋彦琦,李名,刘江,等.含不同倾角天然软弱夹层的大理岩破坏试验[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):623-629.
- [13] 蒋昱州,徐卫亚,朱杰兵,等.含断续软弱夹层岩石流变力学特性研究[J].长江科学院院报,2009,26(12):71-75.
- [14] 赵延林,彭青阳,万文,等.直剪作用下不共面断续节理岩桥断试验与数值研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(1):59-67.
- [15] 张耀平,曹平,赵延林,等.双重介质固气耦合模型及含夹层盐穴储气库渗漏研究[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(1):217-224.
- [16] 尤明庆.岩石的力学性质[M].北京:地质出版社,2007.
- [17] 尤明庆,华安增.岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J].岩石力学与工程学报,1998,17(3):292-296.