

文章编号: 1001-1986(2008)02-0072-04

# 瑞利波探测公路施工隧道含水断层破碎带

赵存明<sup>1,2</sup>, 沈斐敏<sup>1</sup>, 张燕清<sup>3</sup>, 吴存兴<sup>3</sup>

(1. 福州大学, 福建 福州 350002; 2. 福建交通职业技术学院, 福建 福州 350007;  
3. 三明泉三高速公路有限责任公司, 福建 三明 365001)

**摘要:** 断层破碎带的出现必然使岩体的硬度发生明显改善, 而瑞利波的传播速度恰与介质的物理力学特性有关。利用瑞利波探测技术, 对泉三高速公路某施工隧道含水大断层进行超前探测, 并与地质雷达和钻探探测结果比较, 结果显示, 瑞利波探测的断层破碎带宽度与隧道施工揭露的极其吻合, 瑞利波是超前预报含水断层破碎带的一种简便、高效的技术。

**关键词:** 瑞利波; 含水断层破碎带; 超前探测

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A

## Detecting water-bearing fault belt during highway tunnel construction by Rayleigh wave technique

ZHAO Cun-ming<sup>1,2</sup>, SHEN Fei-min<sup>1</sup>, ZHANG Yan-qing<sup>3</sup>, WU Cun-xing<sup>3</sup>

(1. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China; 2. Fujian Communications Technology College, Fuzhou 350007, China; 3. Sanming Quansan Highway Co. Ltd, Sanming 365001, China)

**Abstract:** The occurrence of fault belt must change the hardness of rock mass. The translation speed of Rayleigh wave is related to physical and mechanical properties of medium. The Rayleigh wave survey technique is used for water-bearing fault belt pre-detection in the process of a tunnel construction of Quansan highway, and the result is compared with the result of ground penetrating radar. It is indicated that the Rayleigh wave technique is a kind of simple, effective technique for pre-detecting water-bearing fault belt in the process of the tunnel construction.

**Key words:** Rayleigh wave; water-bearing fault belt; pre-detection

断层破碎带是公路隧道施工过程中常见的地质灾害之一。断层破碎带通常是良好的导水通道和水富集的场所, 预先查明断层破碎带的位置和分布范围, 采取相应措施防止突泥突水事件的发生, 对于隧道安全施工至关重要。而探索施工简便、快速, 对围岩扰动小、对施工影响小的无损探测技术是开展隧道地质灾害超前预报工作顺利实施的关键<sup>[1]</sup>。

实践证明, 开展隧道地质超前预报工作对于长

大隧道是必需的<sup>[2]</sup>。因为地质条件的复杂性, 在隧道设计与施工前虽然都进行了详细的勘探, 但施工前掌握的地质情况与隧道施工过程中揭露的往往有较大的出入, 有时甚至大相径庭。隧道施工过程中发生的地质灾害事故通常是由于地质情况不明, 对于灾害性地质情况(如: 含水断层破碎带引起的突泥突水事故)没有预先采取相应的防治措施造成的<sup>[3]</sup>。

本文以泉三高速公路某隧道含水断层破碎带的

收稿日期: 2007-07-05

作者简介: 赵存明(1970—), 男, 山东诸城人, 副教授, 博士, 主要从事隧道工程等领域的教学与科研工作。

孜矿区为构造应力场型。

d. 根据 AE 法地应力测量结果可知: 火成岩中原始最大主应力值为 20.64 MPa, 呈水平方向; 砂岩中最大主应力值为 8.98 MPa, 呈水平方向; 最大主应力方位角 94.5~124.8°。

## 参考文献

[1] 李文平. 煤及软岩层中地应力值的初步估算方法[J]. 岩石力学

与工程学报, 2000, 19(2): 234-237.

[2] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 13-16.

[3] 于双忠. “密度平衡椭球体”理论研究的新进展[J]. 中国矿业大学学报, 1989, 18(3): 33-42.

[4] 尹贤刚. 用岩石声发射凯塞效应量测地应力研究[J]. 采矿技术, 2006, 6(3): 278-280.

[5] 薛亚东. 声发射地应力测量中凯塞点的确定[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(5): 1-4.

探测为例, 比较分析钻探、地质雷达、瑞利波 3 种勘探方法的探测效果, 论述瑞利波在隧道施工中超前预报含水断裂带的优势。

## 1 瑞利波探测的基本原理

瑞利波探测技术是近年来岩土工程领域兴起的一种新方法, 具有现场原位测试简单、测试速度快、费用低以及对原结构物无损坏等优点, 因此越来越受到工程界重视。瑞利波探测方法分为稳态和瞬态, 稳态瑞利波是每次激发一种频率, 在一个测点通过多次激发和接收完成不同深度的探测; 瞬态瑞利波采用瞬态冲击震源, 一次激发和接收, 可以获得宽频带的瑞利波振动信号, 这相当于稳态成百上千次激发的信息。如图 1 所示, 仪器记录同一瑞利波列在传播方向上的不同位置的两个时间域的信号, 经离散傅里叶变换(DFT), 转换为一系列不同频率的正弦分量。由此可以得到信号的频谱分布、相应频率的相关程度和相位移大小  $\Delta f(f)$ , 进而可以计算出相邻不同频率成分的滞后时间  $\Delta t(f)$  和平均速度  $\overline{v_R}(f)$ :

$$\Delta t(f) = \Delta f(f) / 2\pi f ; \quad (1)$$

$$\overline{v_R}(f) = \Delta x / \Delta t(f) 。 \quad (2)$$

根据速度( $\overline{v_R}(f)$ )、频率( $f$ )、波长( $I$ )关系:

$$I_R = \overline{v_R} / f , \quad (3)$$

可以绘制  $\overline{v_R} - I_R$  关系曲线。同一波长的瑞利波的传播特性反映了地质条件在水平方向的变化情况, 不同波长的瑞利波传播特性则反映了不同深度的地质情况<sup>[4-5]</sup>。

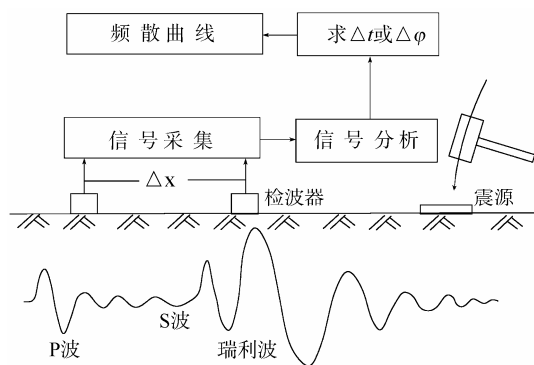


图 1 瑞利波探测原理示意图

Fig. 1 Sketch map of Rayleigh wave detection theory

如果探测的对象是非均匀介质, 不同频率的振动按不同的速度传播, 一定的频率对应一定的波长, 即一定的地层深度, 这就是瑞利波的频率(深度)—速度分散特性。通过对频散曲线进行反演, 即可得到某一深度范围内的地质构造情况, 和不同深度的

瑞利波传播速度  $v_R$  值。 $v_R$  值的大小与介质的物理力学特性有关, 据此可对探测对象(围岩)的物理力学性质做出评价。

## 2 含水断层破碎带物理力学性质

断层是构造运动的产物, 在强大的构造应力作用下, 岩体的完整性受到破坏, 岩体断裂后两侧岩块产生相对位移的称为断层。对于一定规模的断层, 其断层面通常不是以单一岩层断面的形式出现, 而是以断层破碎带的方式出现, 特别是张性或张扭性断层, 这种现象尤为明显。断层破碎带的出现必然使岩体的硬度(波速)发生明显改变, 这就为瑞利波探测奠定了物质基础。

断层破碎带通常是良好的导水通道和裂隙水富集的场所, 隧道施工穿过断层破碎带如果不预先采取措施, 可能引发突泥突水, 轻则停工延误工期, 重则可能引起机毁人亡。

对于含水断层其通常表现为地震波速降低, 瑞利波发生速度频率分散; 而对于电法勘探则表现为低电阻率, 对雷达波表现为高吸收性。

## 3 探测实例

以泉三高速公路某隧道含水大断层探测为例, 对比瑞利波、地质雷达、钻探 3 种方法的探测效果, 说明瑞利波探测含水断裂带的优点。

### 3.1 泉三高速公路某含水断层简况

该含水断层穿越隧道左右两洞, 原设计施工地质条件良好(硅质粉砂岩, III级, 无断层等不良地质构造), 在出水断层揭露前一直顺利施工。右洞: 2006 年 10 月 5 日隧道掘进至 YK148+575 处, 打炮眼出水, 水量 4 160 m<sup>3</sup>/d。左洞: 在开挖至 ZK148+551 时, 掌子面前方出现空洞和涌水、涌泥砂现象。

因为隧道施工一直顺利进行, 导致了对地质预报工作的忽视。表现为 2 个方面: **a.** 施工队对地质预报数据采集工作支持力度不够。瑞利波探测作为地震勘探的一种, 现场数据采集需要施工队停工最多 30 min, 会对施工造成一定影响。隧道地质超前预报原计划对隧道施工过程进行超前 40 m 的全程跟踪预报, 在隧道左洞掘进至 ZK148+524 位置时, 瑞利波探测人员到达施工现场采集数据, 未能进入掌子面, 造成没有及时提交预报成果。**b.** 施工技术人员对超前预报成果重视程度不够。2006 年 9 月 27 日对入口右洞进行了瑞利波探测, 如图 2, 对断层破碎带位置提前 51.8 m 作出了预报, 提交预测报告时给出的结论是, 掘进前方 4.3 m 存在异常, 13.1 m、22.1 m、35.2 m 处存在微小异常, 51.8 ~ 74.1 m 处存

在明显异常。前 4 处异常按照当前施工方式正常推进, 在 51.8~74.1 m 明显异常区, 需采取探、防水措施, 加强支护防止围岩坍塌。10 月 5 日掘进至 50 m 处, 打炮眼出水, 由于未提前采取相应措施, 导致施工被动, 停工近 1 个月。

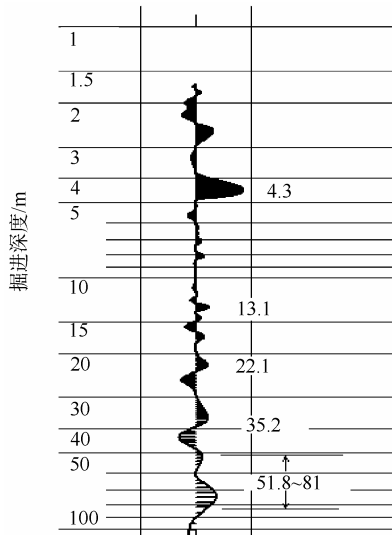


图 2 隧道入口右洞瑞利波探测成果图

Fig. 2 Rayleigh wave detect result map of the tunnel entrance right hole

### 3.2 瑞利波探测及成果分析

2006 年 10 月 5 日隧道入口右洞掘进至 YK148+575 处, 打炮眼出水, 水量 4 160 m<sup>3</sup>/d, 10 月 9 日于 YK148+580 处采用瑞利波进行了超前探测, 如图 3, 认为前方 1.6~23.4 m 处围岩极其不稳定, 特别是 23.4~32.2 m 处存在明显异常。鉴于目前隧道涌水量较大, 建议采取诸如注浆堵水等措施, 防止水害发生, 同时加强支护防止围岩坍塌。异常带的范围为 30.6 m (32.2~1.6 m), 与第一次探测 (图 3) 的异常带范围 29.2 m (81.0~51.8 m) 非常吻合。

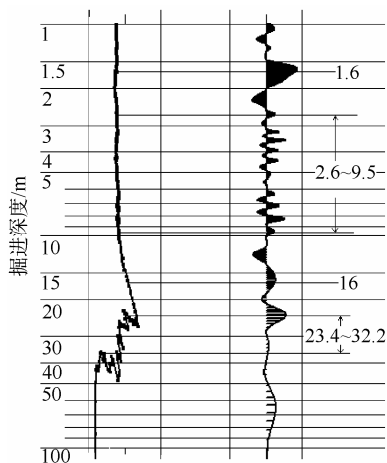


图 3 隧道入口右洞瑞利波探测成果图

Fig. 3 Rayleigh wave detect result map of the tunnel entrance right hole

2006 年 10 月 10 日隧道入口左洞掘进至 ZK148+555 处, 掌子面左上角有断层泥及断层角砾流出, 10 月 12 日于 ZK148+555 处采用瑞利波进行超前探测, 如图 4, 探测结果显示, 探测位置前方 50 m 范围内, 7.2~11.5 m (ZK148+562.2~ZK148+566.5), 围岩不稳定; 23.8 m (ZK148+578.8)、35.4 m (ZK148+590.4) 处存在明显异常, 建议采取防水措施, 加强支护防止围岩坍塌。

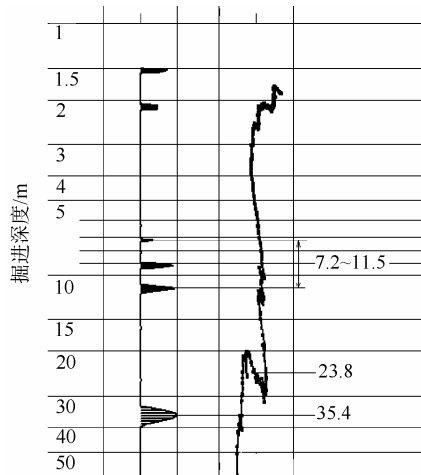


图 4 隧道入口左洞瑞利波探测成果图

Fig. 4 Rayleigh wave detect result map of the tunnel entrance left hole

对出水异常带作进一步分析, 根据探测成果、掌子面揭露情况及综合地质分析, 得出如下结论:

a. 断层破碎带出水。断层性质为张扭性断层, NW30°走向, 与隧道掘进方向呈 58°夹角。根据探测成果, 断层破碎带宽度: 右洞至 YK148+612.2, 宽度 32.2 m, 扭性破碎带; 左洞至 ZK148+590, 宽度 35.4 m, 张性破碎带。

b. 根据出水量判定, 没有与地面现有水源连通, 在没有地表降水的前提下, 水量将趋于稳定。

c. 建议对断层破碎带采取预注浆措施, 同时加强支护。

### 3.3 地质雷达探测及成果分析

鉴于地质情况的严重程度, 加之设计院地质专家的认识与瑞利波探测综合解释的结论不一致, 为慎重起见, 10 月 15 日, 泉三高速公路指挥部邀请重庆交通科研设计院采用地质雷达 (加拿大 A-CUBED 公司的 EKKO 100 型地质雷达) 对突水、突泥严重的左洞进行了复测, 根据掌子面左侧侧测线 100 MHz 雷达回波图 (图 5), 认为: 掌子面上斜前方 (仰角 20°~40°) 约 0~2.5 m 范围内为较完整围岩, 2.5~18 m 段为断层破碎带。由于雷达信号受含水断层破碎带影响衰减较大, 此探测地段远处 (18 m 以外) 无回波信号, 故推断该破碎带的范围应大于 18 m。

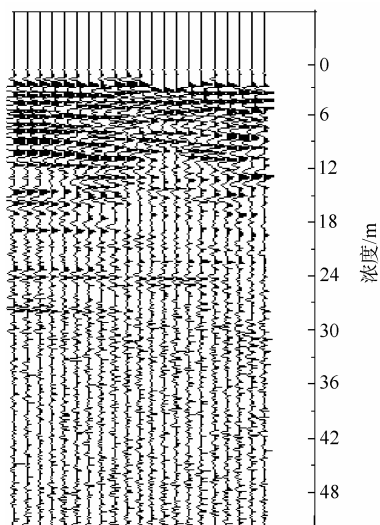


图5 ZK148+551掌子面左部测线100 MHz雷达回波图  
Fig. 5 The 100 MHz radar echo map of the ZK148+551 work face left detecting line

### 3.4 钻探及实际揭露成果分析

通过2种物探手段的探测,对于突水异常带的性质各方取得一致认识。为进一步确证探测结果,为隧道顺利通过该含水断层破碎带提供准确依据,10月16日开始,中铁十六局集团SMA4项目部在隧道右洞掌子面经近10 h的钻探,钻进至33 m左右钻机速度开始减慢,岩石变硬,水量减小,水中的黄泥沙减少,涌水变清,钻进36 m时,岩石变硬,涌水中无泥沙,即跨过断层破碎带。

隧道施工实际揭露:左洞断层破碎带宽度35 m,右洞断层破碎带宽度31 m,与瑞利波预报成果:左洞破碎带宽度35.4 m,右洞破碎带宽度32.2 m极其吻合。

### 3.5 不同探测技术对比

a. 钻探成果直观,但与物探方法比较,钻探成本高、周期长。

b. 瑞利波探测属地震探测范畴,采用锤击震源,施工方便快捷,资料处理成果直观,探测精度高,是一种无损原位测试的理想方法,且不存在探测“盲区”。其探测优势在本次含水断层破碎带的探测中得到明显体现。

缺点:目前技术对于地质异常可精确定位,但对地质异常的性质判别仍需要通过地质综合分析完成<sup>[6]</sup>。

c. 地质雷达探测技术具有如下优点:利用电磁波的反射进行探测,工作轻便、快速,数据处理自动化程度高<sup>[5]</sup>。

缺点:在含水断层破碎带内,雷达信号衰减较大,对于较大的断层破碎带难以穿透,本次探测对于宽度超过30 m的断层破碎带,雷达波只在18 m内有回波,以远处未能进行有效探测。另外,同所有反射波法一样,地质雷达探测存在探测“盲区”<sup>[7-9]</sup>。

## 4 结语

目前瑞利波探测的技术水平可对地质异常进行较准确的定位,对于地质异常的性质判断需要结合地质资料进行综合解释。探索地质异常的定性解释方法,是瑞利波探测技术亟待解决的主要技术难题之一<sup>[10]</sup>。

## 致谢

本文得到重庆交通科研设计院陈少华博士、中铁十六局集团SMA4项目部刘笛工程师的热心帮助,在此表示真诚的感谢!

## 参考文献

- [1] 李勇,孙喜峰,李廷. 隧道施工地质超前预报方法[J]. 地质与资源, 2004, 13(2): 119-122.
- [2] 刘志刚,赵勇. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001: 185-200.
- [3] 陈炳祥. 长大隧道施工地质超前预报技术应用研究[J]. 铁道工程学报, 2004, 2: 57-62.
- [4] 杨成林. 瑞雷波勘探[M]. 北京:地质出版社, 1993: 176-187.
- [5] 戴新钰,赵存明. 浅析MRD-II型瑞利波探测仪使用中的几个问题[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 25(5): 27-30.
- [6] 赵存明,沈斐敏. 瑞利波探测公路施工隧道地质灾害的可行性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2): 39-42.
- [7] 陈建峰. 隧道施工地质超前预报技术比较[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 5-8.
- [8] 刘传孝,蒋金全,杨永杰,等. 国内外探地雷达技术的比较与分析[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 123-127.
- [9] 杨国林,杨立伟. 隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 627-630.
- [10] 赵存明,沈斐敏. 长隧道地质灾害超前综合探测技术的探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(4): 38-42.