

doi: 10.11720/wtyht.2018.1582

李玉成. 钻孔电磁波技术在水泥浆灌注质量检测中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 640-644. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1582>

Li Y C. Quality test of cement slurry grouting in limestone foundation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 640-644. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1582>

# 钻孔电磁波技术在水泥浆灌注质量检测中的应用

李 玉 成

(江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 在江苏省某滨江工地, 为了对水泥浆灌注质量进行评价, 利用钻孔电磁波开展井间跨孔检测, 获得了水泥浆灌注距离, 土洞、溶洞和疏松体是否被水泥浆充满, 灌注是否密实均匀等信息。检测结果证明该方法可以评价一定面积范围内的水泥浆灌注质量。

**关键词:** 钻孔电磁波; 地基; 水泥浆; 灌注质量

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2018)03-0640-05

## 0 引言

在灰岩地区, 由于地下水径流发达, 地基中土洞、疏松体、溶洞十分发育, 常发生地面塌陷, 从而影响了地面建(构)筑物的安全<sup>[1]</sup>。为了预防地面塌陷, 常规方法是用水泥浆灌注土洞、溶洞和疏松体。为了保证地面建(构)筑物的安全, 需要对水泥浆灌注质量进行检测, 以获取水泥浆灌注距离, 以及土洞、溶洞和疏松体是否被水泥浆充满, 灌注是否密实均匀等信息。常用水泥浆灌注质量评价方法有钻孔取芯目测、钻孔成像检测, 此两种方法只能得到孔壁上水泥浆灌注痕迹, 而不能检测一定面积范围内的水泥浆灌注质量。针对这个问题, 在工地上利用钻孔电磁波开展了井间跨孔检测, 以电磁波井间跨孔检测数据为基础, 对水泥浆灌注质量进行了评价<sup>[2-4]</sup>。

## 1 工作区工程地质条件

### 1.1 地层

工作区位于江苏省濒临长江的某风景区内, 钻探揭示从上至下地层分布特征如下:

素填土: 工作区内普遍分布, 层厚 2.5~6.8 m, 灰褐色, 土体结构松散, 属中等压缩性土。

粉质黏土: 工作区内普遍分布, 层厚 2.2~5.3 m, 棕褐色, 软—可塑状, 土体结构松散, 属中等压缩性土。

粉质黏土夹碎石: 工作区内普遍分布, 层厚 3~7.9 m, 棕褐色, 土体结构稍密, 属中等压缩性土。

粉质黏土: 工作区内普遍分布, 层厚 0~7.6 m, 棕色, 可塑, 部分硬塑, 土体结构稍密, 局部中密, 属中等压缩性土。

碎石土: 分布于工作区内东部, 层厚 0~9.0 m, 棕褐色, 土体结构稍密, 属中等压缩—低压缩性土。

中风化二叠系下统栖霞组灰岩: ZK2、ZK3 勘察孔岩芯呈短柱状, 局部呈碎块状; ZK1、ZK4 勘察孔岩芯较完整, 多呈中柱—长柱状; 岩芯中裂隙发育一般, 被方解石填充, 呈闭合状态。岩石密度 2.48 g/cm<sup>3</sup>, 岩石饱和单轴抗压强度 24.34 MPa。

溶洞: 或无充填物, 或被流塑状淤泥质土充填, 或被粉质黏土充填, 充填物呈棕褐色, 局部受铁质浸染呈黑褐色, 呈可塑—硬塑状态。

### 1.2 水文地质条件

工作区主要包含两类含水层:

1) 第四系内孔隙水: 为第四系土体内的上层滞水, 受大气降水及局部地下水管漏水补给控制, 无固定地下水位。

2) 基岩裂隙水: 主要为二叠系灰岩含水层, 是工作区主要含水层, 但富水性不均匀, 受断层控制。

该含水层水位较深,地下水位面顶埋深大于 40 m。

## 2 水泥浆灌注

由于工作区为降水丰富的南方,加上濒临长江,地下水径流发达,带走了土颗粒,导致第四系中土洞、疏松体发育。另外,在地下水作用下,工作区喀斯特化,导致二叠系下统栖霞组灰岩中溶洞发育,在地层、地面建(构)物荷载作用下,发生地面塌陷(图 1),影响了风景区内地面古建筑物的安全。

为了保证地面古建筑物的安全,采用水泥浆灌注法。水泥浆液是一种悬浊液,能形成强度较高和渗透性较小的结石体,是一种常用的加固地基方法。在塌陷区,先钻孔再进行水泥浆灌注施工,28 d 后,通过勘察孔、检测孔取芯目测和钻孔成像检测。钻孔取芯显示在取芯孔段内都见到了结石体,而钻孔成像检测显示孔壁上有水泥浆灌注痕迹。另外,对取芯所得的水泥浆结石体进行了单轴抗压强度试验,结果为 2.7~4.7 MPa,超过单轴抗压强度 $\geq 0.3$  MPa 的设计要求。

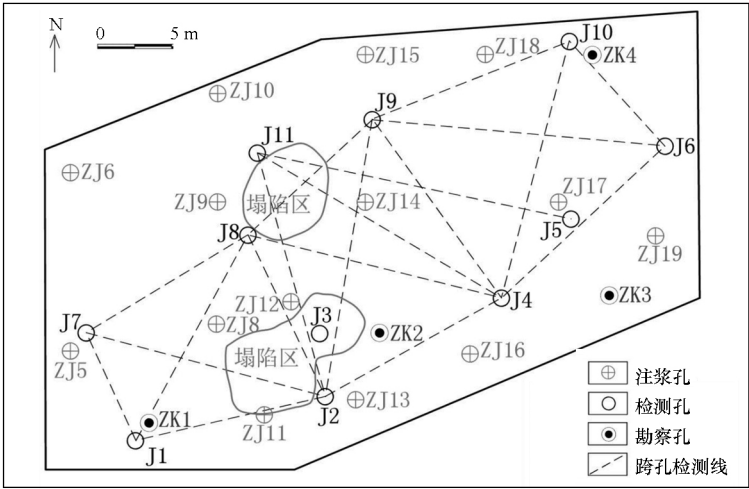


图 1 工作区内勘察孔、注浆孔及检测孔分布

## 3 灌注质量检测

### 3.1 钻孔电磁波原理

尽管用钻孔取芯、钻孔成像进行了水泥浆灌注质量检测,但此两种方法都有其局限性,不能检测到一定面积范围内的水泥浆灌注质量。为此,利用钻孔电磁波开展井间跨孔检测。钻孔电磁波是一种传统的物探方法,早期主要应用于高频测井工作。上世纪 80 年代后期随着 CT(computerized tomography)技术的出现,电磁波作为一种透射波被引用到 CT 观测中。此法较易区别不同电特性的介质,容易实现特定工作频率的发射和接收,野外观测方便,成本低廉,适用于对精细构造和电阻率差异大的目标体的探测,对探测井间地质异常体常有独到之处,国内在许多地基工程中已开始应用电磁波 CT 技术<sup>[5]</sup>。

电磁波在传播过程中如遇导体会被吸收或屏蔽,使发射探头所发射出的电磁波在向接收探头前进过程中受到周围介质的影响,导致接收探头接收到的电磁波强度将发生变化。

探头接收的电磁波强度实际上是波动过程沿射

线路径对介质吸收系数的积分结果。当同一平面内密集的平行射线簇对研究区域进行了全方位扫描后,便可把所有的投影函数依 Radon 反变换的关系组成方程,经反演计算重建出介质吸收系数的二维分布图像,这就是电磁波层析成像的原理<sup>[6-8]</sup>。

电磁波理论表明,有耗介质中半波偶极天线的发射与接收存在以下关系:

$$E = E_0 f_s(\theta_s) f_R(\theta_R) R^{-1} \cdot \exp \left[ - \int_L \beta dl \right], \quad (1)$$

式中: $E$  为相距  $R$  处接收天线的电场强度, $E_0$  是发射天线的初始辐射常数, $f_s(\theta_s)$  和  $f_R(\theta_R)$  分别是发射和接收天线的方向分布函数, $\theta$  为天线的辐射角度, $L$  是射线路径, $dl$  是积分元, $\beta$  为介质的吸收系数。式(1)经变换有

$$\ln A = \ln [E_0 f_s f_R (ER)^{-1}] = \int_L \beta dl. \quad (2)$$

由振幅衰减量  $A$ ,通过式(2)反演出介质的吸收系数值 $\beta$ ,可据此推断出地下的精细构造<sup>[9-12]</sup>。溶洞、土洞或疏松体被充水、充土等,呈现低阻特征,电磁波在传播时能量大量被吸收,吸收系数值表现为高值,在剖面中显示为强吸收区域;而完整的灰岩、

结石体呈现高阻,电磁波在传播时能量很少被吸收,吸收系数值表现为低值,在剖面中显示为弱吸收区域;介于两者之间的诸如粉质黏土、不密实的注浆体等,吸收系数值介于上述两者之间,表现为中值,在剖面中显示为中吸收区域<sup>[13]</sup>。

3.2 工作频率选择

使用 JW-5Q 型电磁波设备,工作中首先应考虑工作频率即“透距”。透距取决于发射功率和接收灵敏度,还取决于于岩石的吸收系数<sup>[8]</sup>。

本次试验在 J1—J2 全频检测,频率包括 4 MHz、5 MHz、6 MHz、7 MHz、8 MHz、9 MHz、10 MHz、11 MHz、12 MHz。实测结果(图 2)显示:频率越高,探测距离越短<sup>[14]</sup>,最低频率 4 MHz 探测距离最远,基本可以探测到孔底,中间频率探测距离随着频率的增加越来越短,最高频率 12 MHz 探测深度甚至不到 12 m。为保证射线对最大覆盖跨孔区域,本次施工选择探测深度最远的 4 MHz 测量数值作为检测结果。

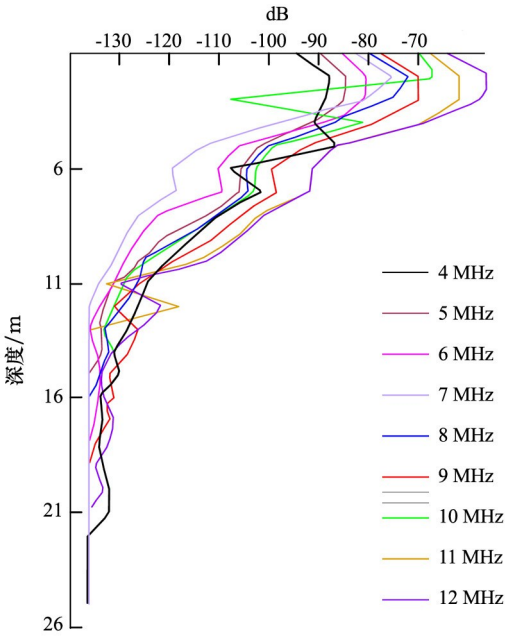


图 2 钻孔电磁波不同工作频率探测深度试验结果

3.3 检测结果

选取有代表意义的 J1-J7、J2-J9、J10-J6 剖面为例进行说明。

J1-J7 剖面长度为 8 m,测量范围为 0~ -44 m,采样间距为 0.5 m,43 个发射点,1 269 个测量点,测量结果见图 3。图中显示:①A 处吸收系数比较低,为水位上部杂填土层和粉质黏土层,含水率较低,电阻高,吸收系数值检测较低;②B、C 为碎石层,孔隙度较大,含水率高,表现为低阻特征,吸收系数检测值偏高,结合勘察孔和检测孔取芯,推测为注浆结石体和碎石分布不均匀所致,空间连续性较好,无突变异

常区域,推测无明显土洞;③D 处为原来土洞被水泥浆液充满,吸收系数检测值略高于周边,说明灌浆密实均匀;④E 处为灰岩层,电阻值相对高,吸收系数检测值比较低。

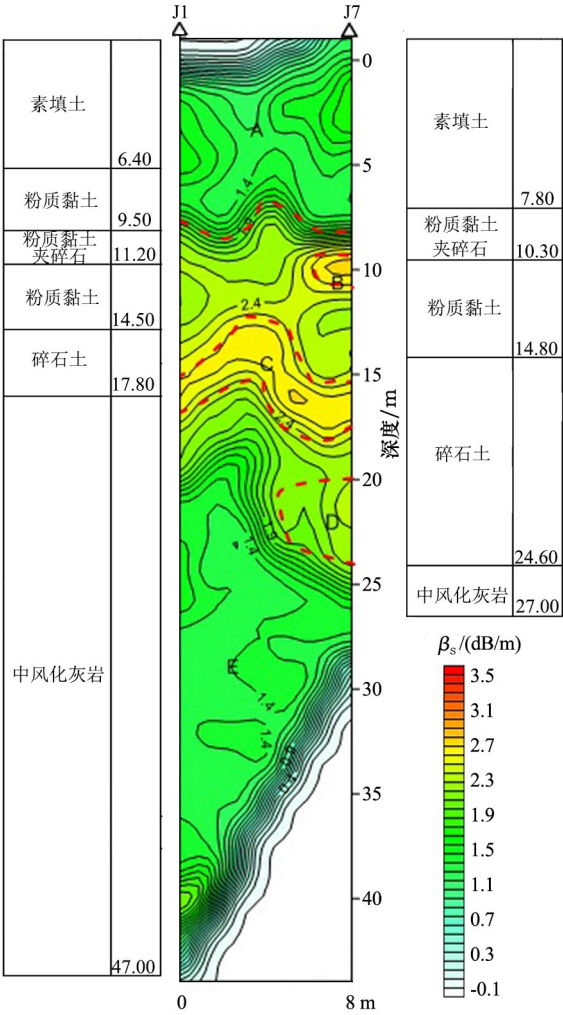


图 3 检测孔 J1-J7 电磁波间井跨孔检测成果

J2-J9 剖面长度为 18.94 m,测量范围为 0~ -40 m,采样间距为 0.5 m,45 个发射点,924 个测量点,测量结果见图 4。图 4 显示:①A 处原有土洞,通过灌浆治理,土洞被水泥浆充填,密实程度明显加强,电阻率值增加,吸收系数检测值略高于周边无土洞区域,但差异较小,土洞范围大幅缩小;②B 处原有土洞,通过灌浆治理,吸收系数检测值与周边地层无明显差异,说明整层灌浆效果良好,与灰岩基岩接合良好;③C 处原有溶洞,钻孔取芯为水泥浆液填充,跨孔检测仍表现为比较高的吸收系数值,说明这一区域仍然表现为低阻特征,需进一步治理。

J10-J6 剖面长度为 9.58 m,测量范围为 0~ -24 m,采样间距为 0.5 m,25 个发射点,500 个测量点。测量结果(图 5)显示:①通孔吸收系数比较低,通孔



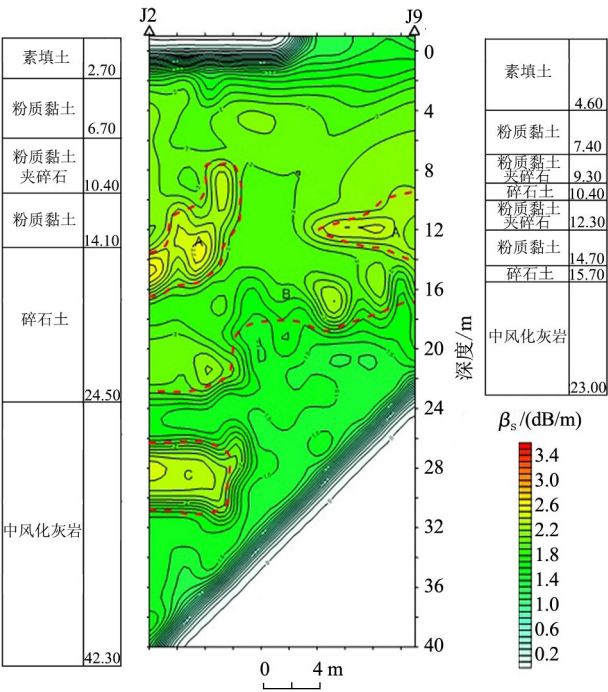


图 4 检测孔 J2-J9 电磁波井间跨孔检测成果

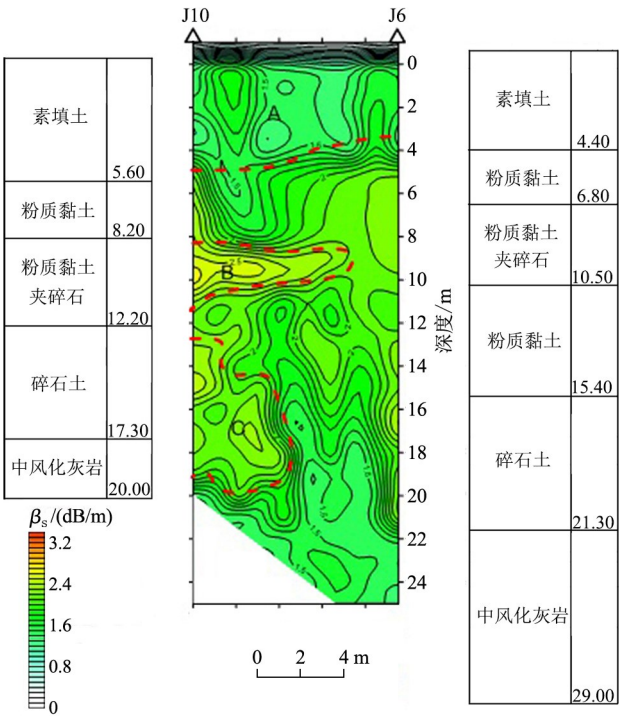


图 5 检测孔 J10-J6 电磁波井间跨孔检测成果

完整无明显土洞;②A 层位表面杂填土,土质疏松含水较少,电阻率较高,吸收系数检测值较低;③B、C 处原为土洞,通过灌浆处理,吸收系数与周边差异性不明显,不过 B 区域检测最高值达到 2.5 dB/s,说明这一区域电阻率较低,虽取芯检测结实体强度值达到设计要求,治理效果还需要进一步观测。

4 结语

1) 利用井间跨孔电磁波检测技术,可以获得检测范围内被检测物质的吸收系数,而吸收系数与电阻率成反比。通过电阻率大小,可以获得被检测物质的物理性质。

2)判断灰岩地基中水泥浆灌浆质量时,溶洞、土洞或疏松体由于被水充满,呈现低阻特征;灰岩、结石体,呈现高阻特征;而不密实结石体,电阻率位于低阻与高阻之间。

3)由于电磁波传播距离随频率的增加而减小,在实践跨孔检测时,使用低频为好。

参考文献:

[1] 记万斌.塌陷与灾害[M].北京:地震出版社,1996.

[2] 吴以仁,邢凤桐.钻孔电磁波法[M].北京:地质出版社,1982.

[3] 甘伏平,黎华清,卢呈杰,等.跨孔电磁波透视法在探测和储油罐岩溶病害地基中的应用[J].工程地球物理学报,2010,7(1):84-88.

[4] 郭洪喜,赵仲辉,张亚灿.水泥固化淤泥非饱和和渗透特性试验研究[J].河南科学,2017,35(1):111-115.

[5] 朱希安,尹尚先,苑守成.无线电波透视法及其应用[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(5):563.

[6] 张明,张兆田.几种CT图像重建算法的研究和比较[J].CT理论与应用研究,2001,10(4):4.

[7] 吴有林,陈贻祥,贾士诚.跨孔电磁波透视法在荷叶塘高架桥岩溶探测中的应用[J].物探和化探,2009,33(1):102-104.

[8] 甘伏平,李金铭,黎华清,等.跨孔电磁波透视法在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2006,30(4):303-307.

[9] 李才明,王良书,钟锴.电磁波层析成像在钻孔灌注桩质量检测中的应用[J].高校地质学报,2003,7(3):467-473.

[10] 刘昌铨,孙振国,李长法.层析成像技术在核反应堆地基勘察中的应用[J].物探与化探,2000,24(1):69-75.

[11] 冯锐,程家庚,郭强绪,等.电磁波井间层析技术在城建工程中的应用[J].地球物理学报,1992,35(s):348-357.

[12] 赵超,樊敬亮,周忠民,等.钢筋笼长度检测技术现状及展望[J].地球物理学进展,2009,24(3):1128-1135.

[13] 何禹,李永涛,朱亚军.钻孔电磁波CT技术在深部岩溶勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2010,7(04):451-455.

[14] 冯锐,马奎样,郭鸿,等.电磁波层析成像一图像的一致性及地下水探测[J].地震学报,1997,19(5):524-534.

Quality test of cement slurry grouting in limestone foundation

LI Yu-Cheng

(East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In limestone area, groundwater runoff, soil cave, loose body and well-developed karst caves often result in ground collapse so as to influence the safety of ground building. Cement slurry grouting in limestone foundation is an economical, reasonable and effective method to prevent ground collapse. In order to get various kinds of information, such as the distance of cement slurry grouting, and the conditions as to whether soil cave, loose body and karst cave are filled with cement slurry and whether grouting is dense and uniform, researchers can use borehole electromagnetic wave to carry out cross-hole inspection for grouting quality of cement slurry.

**Key words:** borehole electromagnetic wave; foundation; cement paste; grouting quality

(本文编辑:沈效群)