

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.004

# 探地雷达在地下顶管脱空检测中的应用效果分析

杨天春<sup>1,2</sup>, 许德根<sup>1</sup>, 王齐仁<sup>1</sup>, 张正发<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为了对顶管周围的脱空和密实情况进行探测, 结合工程实例, 采用探地雷达对水泥顶管和钢制顶管开展实践探测工作和试验性探测研究; 同时, 从理论上建立了水泥顶管和钢管顶管的脱空模型, 开展探地雷达二维有限单元法正演模拟。研究表明: 探地雷达对水泥顶管周围的脱空情况进行探测时, 能取得很好的效果; 探地雷达对钢制顶管周围的脱空情况进行探测时, 由于雷达天线与管壁之间的多次反射信号强烈, 对脱空的探测效果很差。因此, 探地雷达对于水泥制的顶管脱空检测是可行的, 而对于钢制顶管的脱空检测需要研究新的无损检测方法、研制新的设备, 以便取得好的应用效果。

**关键词:** 地下顶管脱空监测; 探地雷达; 有限单元法; 正演模拟; 无损检测

**中图分类号:** TU992.4; TH878      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2016)04-0304-05

## Analysis of application effect of ground penetrating radar in detection of voids around underground jacked pipes

YANG Tianchun<sup>1,2</sup>, XU Degen<sup>1</sup>, WANG Qiren<sup>1</sup>, ZHANG Zhengfa<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Safety Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to detect the voids and compactness around jacked pipes, a field survey and experiments were carried out to detect the voids around cement and steel pipes in an engineering case with a ground penetrating radar (GPR). A theoretical model for simulating the voids around the cement and steel pipes was established, and forward modeling of the GPR was conducted with the two-dimensional finite element method. The results show that the GPR is effective in detecting the voids around the cement pipes. However, it is not effective in detecting the voids around the steel pipes, because the multiply reflected signals between the radar antenna and pipe wall are strong. It is determined that it is feasible to use GPR to detect the voids around cement pipes. Meanwhile, for the detection of voids around cement pipes, new nondestructive examination methods and new types of equipment have to be developed in order to obtain better application effects.

**Key words:** detection of voids around underground jacked pipes; ground penetrating radar (GPR); finite element method; forward modeling; nondestructive examination

随着社会的发展、人民生活水平的提高以及城市化进程的不断推进, 地下空间的开发和利用越来越普遍。特别是在目前的城市建设中, 市政管道工程和地下通道工程明显日益增多。过去的城市道路地下管道一般设计深度较浅, 大多采用明挖法施工, 不仅阻碍交通, 而且还会对近地表管线和构筑物的安全造成危害。顶管法施工不需要开挖, 对地表结构物无破坏, 可大幅度减小对道路交通和周围环境的影响, 近年来在城市

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 湖南省自然科学基金(12JJ6035)

作者简介: 杨天春(1968—), 男, 湖南津市人, 教授, 博士, 主要从事地球物理与岩土工程教学及研究。E-mail: ytc6803@163.com

电力电缆隧道、市政管道、通讯管道、发电厂循环水冷却系统等管道施工工程中得到越来越多的应用<sup>[1-6]</sup>。

地下顶管施工技术是一种非开挖技术,它是利用液压油缸将顶管机和待铺设的管节从顶管工作井在地下逐渐顶进至接收井的地下管道铺设工艺。尽管顶管施工对周围环境的影响较小,但它在施工中会对周围土体产生扰动,引起土体及管道本身产生变形,如浅层顶管穿越路基引起的地层变形会对公路路面构成一定的风险<sup>[7-8]</sup>。为避免因地下施工超挖和扰动管外圍土,顶管施工之后一般需在管外注浆加固。如果不注浆或注浆充填不密实,则管顶围土会逐渐沉降,逐渐波及至地面,从而导致道路路面沉降、塌陷或路面混凝土层龟裂等。

在对顶管周围进行注浆前,需要对顶管周围的脱空和密实状况进行探测。目前,国内外对沉井后背土体扰动分析的理论研究文献较多<sup>[9-15]</sup>,但探讨顶管周围脱空和密实方面检测的文献甚少。为此,笔者以湖南省湘潭市目前施工中的地下顶管工程为例,对探地雷达技术在顶管脱空检测中的相关问题开展分析研究。

## 1 探地雷达有限单元法

探地雷达(简称 GPR)又称为地质雷达,是一种无损探测新技术,具有连续、无损、高效和高精度等优点。探地雷达以宽频带、短脉冲的形式向介质内发射高频电磁波( $n \times 10 \text{ MHz} \sim 2.5 \text{ GHz}$ ),当电磁波遇到介质分界面时会发生反射现象,其反射系数由分界面两边介质的相对介电常数决定,通过对雷达反射信号的处理和图像解译,可达到识别介质内部结构的目的。探地雷达现已被广泛应用于道路与隧道工程的质量验收<sup>[7]</sup>,因此在顶管工程的脱空检测中,探地雷达技术也理所当然地被引用过来。但顶管工程与隧道工程有很大的不同,如隧道的初衬、二衬是水泥砂浆以及水泥混凝土等材质,而顶管有水泥顶管、钢顶管等,笔者将针对相应情况探究探地雷达技术的适用性。在此,首先介绍探地雷达的有限单元法(简称 FEM)正演。

在均匀各向同性、线性且与时间无关的媒质中,将激励源代入 Helmholtz(赫姆霍兹)方程可表示为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu \varepsilon} \nabla^2 E + \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial E}{\partial t} = S_E \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu \varepsilon} \nabla^2 H + \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial H}{\partial t} = S_H \quad (2)$$

式中: $E$ ——电场强度, V/m;  $H$ ——磁场强度, A/m;  $\mu$ ——磁导率, H/m;  $\varepsilon$ ——介电常数, F/m;  $\sigma$ ——电导率, S/m;  $S_E$ ——电场源;  $S_H$ ——磁场源。

## 2 应用与模拟分析

### 2.1 实践应用

湘潭市城市建设投资经营有限责任公司在湘潭市东二环与迅达大道交叉处埋设雨水和污水管道,采用顶管方式施工。顶管的具体位置范围在迅达大道的 A0+222~A0+260、东二环线(东西两侧)的 Z11+200~Z11+480 及辅道 L0+040~L0+300。其中污水管道内径为 1 m 水泥管,雨水管道内径为 1 m 或 1.8 m 的水泥管,并且 1 m 内径顶管的壁厚为 0.1 m,整个工程顶管的埋藏深度在 7~9 m 不等。

施工区高程为 57.01~65.94 m,原始地貌属丘陵低山。根据该工程前期的岩土工程勘察报告可知,在勘察范围及勘探深度内,组成地层自上而下依次为人工填积的杂填土、残积而成的粉质黏土及下伏强风化和中等风化泥质灰岩。勘察过程中未见明显的熔岩发育情况。

为确保顶管的施工质量,采用 LTD-2100 型探地雷达及 900 MHz 天线对顶管周围的脱空情况进行探测,特别是需要了解清楚顶管上部的脱空情况,以便为注浆施工提供科学依据。图 1 为在管道内对钢管顶部进行探测的雷达图像,具体位置位于污水井 W3 与 W4 之间的一部分,探测方式与隧道顶部脱空检测方法相同,将天线与顶管壁耦合好,测距轮控制距离,采样点距为 2 cm,天线沿管道方向移动。由图 1 可知,管壁的厚度、管节连接处的位置信号清晰可见,特别是预制水泥混凝土顶管内的双层钢筋网的同相轴连续,单根钢筋的点状反射信号较清晰;同时,在雷达图像尾部、管壁的外侧出现同相轴不连续,判断为脱空区,经过后期注浆钻孔验证,该脱空区的高度约为 18 cm。图 1 所对应顶管顶部的地质解译成果见图 2。根据地质雷达的探测结果可以快速推断出顶管周围的脱空和不密实状况。

由于雷达技术在顶管脱空检测中应用效果很好,并得到了业主及施工单位认可,近 3 年来湘潭市潭下

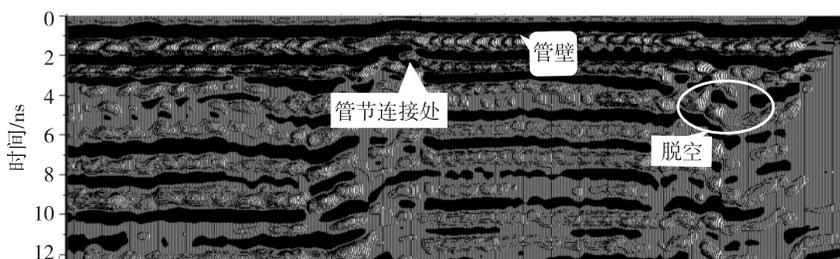


图1 探地雷达探测成果示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GPR detection results

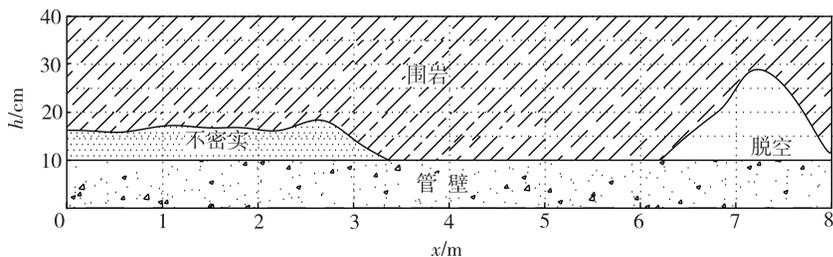


图2 雷达图像解译后的成果图

Fig. 2 Schematic diagram of interpretation results of radar images

路、宝塔路、东泗路、下摄司路、岚霞路等路段的污水管网和雨水管网工程均采用探地雷达技术进行检测,查明了管道周围的脱空区和不密实区,为灌浆处理提供了依据,防止了管道上部地层出现崩塌现象。

上述顶管工程所用的顶管材质均为水泥混凝土预制管,采用探地雷达技术检测其外侧脱空区与隧道衬砌的脱空检测方法相同,是一种较成熟的技术,已经得到广大科技工作者的认可。但在顶管工程中,除了采用水泥混凝土预制管外,还经常采用钢管材料。图3为湘潭钢铁集团有限公司家属区附近正在施工的污水顶管,顶管为内径1.2 m、厚度14 mm的钢管。由图3可见,由于超挖等原因,在竖井中钢管顶部附近存在明显脱空。为了解整个工程的脱空情况,业主与施工单位希望快速准确地查明顶管周围脱空区的范围及大小,为此开展了探地雷达的试验探测工作。

与图1中的探测方式、仪器设备、采集参数一样,在图3所示的钢制顶管内部,对顶管顶部的脱空进行雷达探测,雷达天线顺着管道的延伸方向移动,图4为钢管内部向上探测的雷达图像。由该探测结果可知,信号反射强烈,多条强反射信号轴平行,反射信号旅行时的间隔具有等间距特征,实际上是雷达天线与钢管表面之间的来回多次反射所致。可以说雷达信号没有穿透顶管,无法对顶管周边的脱空情况进行探测。特别是在图3中钢管入洞口附近明显的脱空区位置,雷达信号也没有变化。



图3 顶管现场施工状况

Fig. 3 Photo of pipe jacking construction

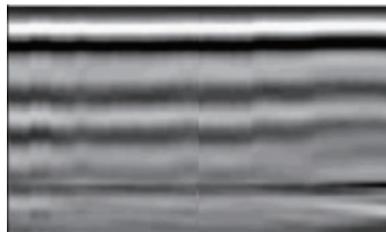


图4 钢顶管上的探地雷达探测图像

Fig. 4 GPR image for jacked steel pipe

## 2.2 模拟分析

为了解探地雷达在钢顶管与水泥混凝土顶管上的理论探测图像,采用有限单元法对不同的模型开展模拟分析。

如图5(a)所示的二维模型,模拟时模型大小为1.8 m×1.0 m。假定围岩是土,其相对介电常数 $\epsilon_r$ 为20,电导率为0.0125 S/m,围岩中存在一个长度0.4 m、高度0.2 m的矩形脱空区域。脱空区域内充满空气,其相

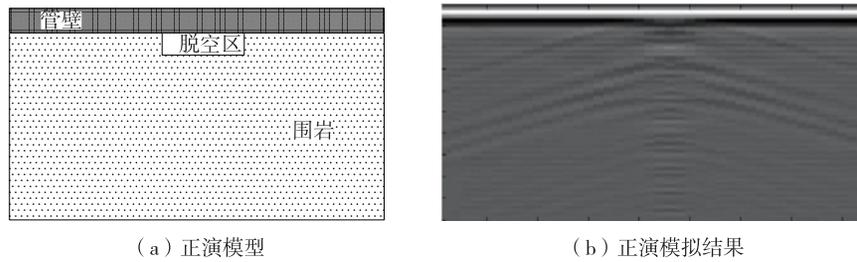


图5 水泥顶管脱空模型与探地雷达正演模拟结果

Fig. 5 Model for voids around jacked cement pipe and GPR forward modeling results

对介电常数为1、电导率为 $10^{-9}$  S/m,水泥管的相对介电常数为6、电导率为 $0.0002$  S/m,水泥管的壁厚为12 cm。采样时间间隔为0.5 ns,采样点总数为1024,雷达天线的中心频率为900 MHz,时窗的大小为12 ns。在模拟结果成图时,道间距为1 cm,模拟结果见图5(b)。从模拟图像上可知,探地雷达的反射信号整体较强,脱空区反射信号的双曲线型弧较清晰显现。在双曲线的顶部发生了多次反射。

图6为钢管顶管脱空的探地雷达正演模拟示意图,计算模型大小及相关参数与图5相同;但钢管壁厚为14 mm,其相对介电常数 $\epsilon_r$ 为300,电导率为 $0.1$  S/m,采样时间间隔为0.5 ns。绘制雷达模拟成果图像时,道间距也为1 cm。

从图6所示的探地雷达正演模拟图像可知:图像中存在多条水平同相轴,这是天线与钢管表面的多次反射信号;即使在脱空处,多次反射信号同相轴振幅也没有在图6中看到明显的反射弧。探地雷达在水泥顶管顶部的脱空区域探测中能够取得较好的效果,但对钢管顶管的顶部脱空情况进行探测时,效果不明显,这一点从图4的实际采集结果也可以看到。

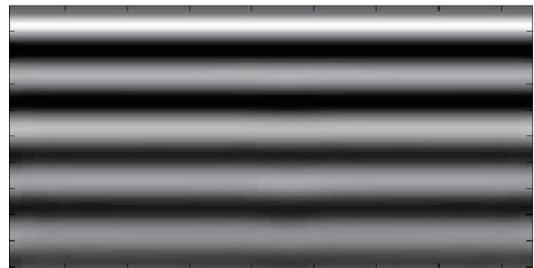


图6 钢管顶管脱空模型探地雷达正演示意图

Fig. 6 Schematic diagram of GPR forward modeling for voids around jacked steel pipes

当地下顶管为钢制材料时,地质雷达的采集信号很差,这从理论上是可以理解的。当顶管为钢制材料时,由于其为良导体,电阻率很小(约 $10\ \Omega \cdot m$ 或更小),电磁信号在其中传播时,衰减很快,且其介质的相对介电常数 $\epsilon_r$ 很大(一般为 $n \times 10^2$ ),前面正演模拟中取值为300;而空气的相对介电常数为1。当电磁信号从空气向钢管管传播时,在钢顶管表面雷达信号的反射系数约为 $-0.9$ ,由此可知钢表面的反射系数接近于 $-1$ ,也就是说雷达的反射信号几乎被全部反射回来,从而在雷达天线与钢顶管之间形成来回的多次反射。可以明显看出,模拟结果与实际探测结果相吻合。

### 3 结 语

研究探地雷达在地下顶管脱空探测中的应用情况,并进行了理论探讨,结果表明:(a)探地雷达对水泥制顶管的脱空检测是可行的,这也逐渐在实践中得到推广应用;(b)探地雷达对钢制顶管的检测受到限制,实际试验中来回多次反射信号很强,很难对钢管背后的脱空进行检测;(c)通过探地雷达信号的有限单元法模拟,从理论上证明了探地雷达应用于钢制顶管的局限性。笔者认为,在今后的实践应用中,应该研究新的无损检测方法、研制新的设备,以便应用于不同材质的地下顶管脱空检测。

#### 参考文献:

- [1] 郑全兴,岳兵,徐英武.钢管顶管在扬州第一水厂浑水管道工程中的应用[J].中国给水排水,2014,30(10):100-102. (ZHENG Quanxing, YUE Bing, Xu Yingwu. Application of pipe jacking pipe in Yangzhou first water pipeline project in muddy water[J]. Water Supply and Drainage in China, 2014, 30(10):100-102. (in Chinese))
- [2] 袁森林,丁文其,沈英婷.世博会电力隧道顶管穿越防汛墙扰动影响分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):130-134. (YUAN Senlin, DING Wenqi, SHEN Yingting. The World Expo is power tunnel pipe jacking through flood wall disturbance analysis [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1):130-134. (in Chinese))
- [3] SUN Yang, SHEN Shuilong, XU Zhengliang, et al. Prediction of lateral displacement of soil behind the reaction wall caused by

- pipe jacking operation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40(2):210-217.
- [4] 汤渊. 地铁车站曲线顶管暗挖新方法数值模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(3):650-655. (TANG Yuan. The subway station excavation of curved pipe jacking is a new method for numerical simulation research [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(3):650-655. (in Chinese))
- [5] 黎永索, 阳军生, 张可能, 等. 弧形密排大直径管群顶管地表沉降分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(11):4687-4693. (LI Yongsuo, YANG Junsheng, ZHANG Keneng, et al. Arc dense row of large diameter pipe jacking surface settlement analysis group [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2013, 44(11):4687-4693. (in Chinese))
- [6] 詹红梅. 顶管施工引起地面沉降分析和计算[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(3):583-585. (ZHANG Hongmei. Analysis and calculation of ground subsidence caused by pipe jacking construction [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(3):583-585. (in Chinese))
- [7] 杨天春, 张辉, 李好. 探地雷达信号的 KL 变换处理分析[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(2):66-69. (YANG Tianchun, ZHANG Hui, LI Hao. Analysis of ground penetrating radar signal processing with KL transform [J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 28(2):66-69. (in Chinese))
- [8] 陈承申, 冯德山. 探地雷达有限元数值模拟及衰减特性探讨[J]. *物探化探计算技术*, 2014, 31(3):152-157. (CHENG Chenshen, FENG Deshan. Finite element numerical simulation and attenuation characteristics of ground penetrating radar [J]. *Geophysical Geochemical Exploration*, 2014, 31(3):152-157. (in Chinese))
- [9] 王元君, 施泽进, 杨轮凯, 等. 地质雷达在顶管施工隐患检测中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1):70-75. (WANG Yuanjun, SHI Zejin, YANG Lunkai, et al. Application of GPR in the detection of hidden danger in pipe jacking construction [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 33(1):70-75. (in Chinese))
- [10] 丁文其, 袁森林, 高小庆, 等. 电力隧道超大直径顶管施工扰动特性研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9):2901-2906. (DING Wenqi, YUAN Senlin, GAO Xiaoqing, et al. Study on characteristics of super large diameter pipe jacking construction disturbance power tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9):2901-2906 (in Chinese))
- [11] 魏纲, 徐日庆, 肖俊, 等. 顶管施工引起的地面变形分析[J]. *中国市政工程*, 2002(4):27-29. (WEI Gang, XU Riqing, XIAO Jun, et al. Analysis of ground deformation caused by pipe-jacking construction [J]. *China Municipal Engineering*, 2002(4):27-29. (in Chinese))
- [12] 陈卫明. 特殊地段顶管施工沉降控制技术[J]. *中国市政工程*, 2003(6):35-38. (CHEN Weiming. Settlement control technology for pipe-jacking construction in special areas [J]. *China Municipal Engineering*, 2003(6):35-38. (in Chinese))
- [13] CHI Suye, CHEN Jincheng, LIN Cun. Optimized back-analysis for tunnelling-induced ground movement using equivalent ground loss model [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3):159-165.
- [14] 王芳. 软土地基中顶管施工的关键问题[J]. *施工技术*, 2006, 35(增刊2):25-26. (WANG Fang. The key problems during pipe jacking construction in soft soil [J]. *Construction Technology*, 2006, 35(Sup2):25-26. (in Chinese))
- [15] 余彬泉, 陈传灿. 顶管施工技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2000.