

# 盾构施工区段浅层空洞探测及处治技术研究

刘魁刚<sup>1</sup>, 沈宇鹏<sup>2,3</sup>

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100037; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

3. 北京交通大学 轨道工程北京市重点实验室, 北京 100044)

**摘要:**利用地质雷达对北京地铁昌平线区间盾构段进行地下浅层空洞探测定位, 并采用 WSS 施工方法处治该空洞, 最后再用地质雷达进行二次探测其处理效果。结果表明, 地质雷达能够准确地探测浅层地下空洞, WSS 工法能够有效快速地完成浅层空洞处理; 提出的 WSS 法处理地下空洞的施工工法和参数, 可为今后的类似工程提供借鉴。

**关键词:**地铁; 工程物探; 空洞; WSS 工法

中图分类号: U 213.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7767(2015)05-0089-05

## Study of Shallow Cavity Detection and Treatment Technology in Shield Construction Section

Liu Kuigang, Shen Yupeng

地铁施工中, 当地下存在空洞等不良地质隐患时, 对其进行勘察并采取有效措施是保障地铁施工安全的重要手段。因此, 尽可能探明浅层空洞的空间分布、填充物类型、规模, 有针对性、重点地处理空洞具有重要意义。

目前, 一些地下空洞的探测及其处治方法的介绍中, 虽然详细分析了物探方法对空洞存在的影响, 但并没有针对空洞治理过后的效果提出相应的评价。因此, 笔者对北京地铁昌平线某区间盾构段进行了地质雷达探测, 提出了先用 WSS 注浆, 然后二次雷达探测, 再根据探测结果评价浅层空洞处治效果的办法以供同行参考。

### 1 工程概况

北京地铁昌平线二期工程水库路站—昌平新区站区间盾构段总长度为 1 443.6 m, 区间整体呈东西走向, 与东沙河桥侧穿。该区间沿线地面较为空旷, 盾构覆土厚度为 6.4~17.3 m; 地下土层依次为杂填土、粉土、卵石、粉质黏土和粉土, 盾构区间隧道穿越地层以卵石土层为主。

### 2 地下空洞探测

#### 2.1 探测方法的选择

工程物探的方法主要分为声波勘探和电磁波勘探。声波勘探分为地震反射波勘探、地震折射波勘探和面波勘探。对于城市工程而言, 由于声波勘探具有成

本高、施工难度大以及精度低等缺陷, 故难以在城市中展开<sup>[1]</sup>。电磁波勘探方法主要包括激发极化法和电阻率法。激发极化法主要是接受激发后二次场数据, 但其存在易受干扰、精确度低等问题而没有在工程上得到广泛使用。电阻率法包括最为常用的高密度电法和探地雷达方法。高密度电法在城市勘探中施工难度大, 效率不高, 而探地雷达主要通过发射天线非常密集快速地向地下介质发射脉冲电磁波, 从而获取地下介质界面信息。由于探地雷达对路面和环境的影响小、精度高, 且高效无损, 在城市地下管线探测、道路路基检测、地下空洞探测和建筑物内部检测等领域已被广泛使用, 因此该工程选择其来探测地下空洞。

#### 2.2 探测原理与正演模拟

探地雷达采用高频电磁波进行探测, 其在介质中传播服从麦克斯韦方程组和传播介质的本构关系<sup>[2-3]</sup>。

式(1)和式(2)为电磁波的亥姆霍兹方程, 表示了电磁波的传播方式。

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla \times \nabla \times H + \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

式中: 电场  $E$  和磁场  $H$  是以波动形式运动的, 它们共同构成电磁波。将式(1)和式(2)的波动方程与数学物理方程中的标准波动方程比较, 可以得到电磁波的传播速度  $v^{[4]}$ 。在满足分辨率要求且场地条件许可时, 应尽

量使用中心频率较低的天线。如果要求的空间分辨率为  $x$ , 则天线中心频率便可初步确定<sup>[5]</sup>。探地雷达系统的时窗选择主要取决于最大探测深度与地层电磁波速<sup>[6]</sup>。

根据探地雷达电磁波传播特点, 可设计空洞正演模型进行模拟, 模型参数接近实际底层参数。图 1 中白色部分表示了空洞的存在; 图 2 为探地雷达波对地下空洞的模拟成像。

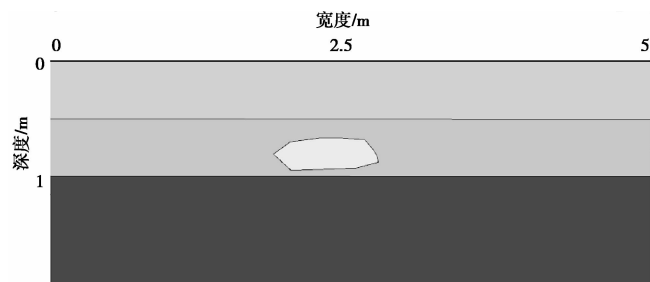


图 1 空洞模型

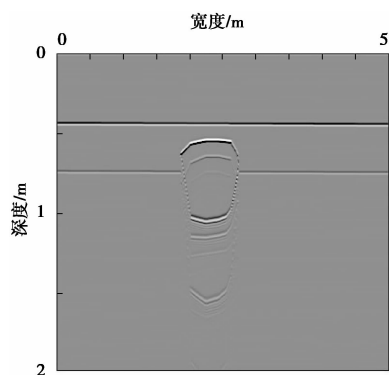


图 2 探地雷达波模拟成像

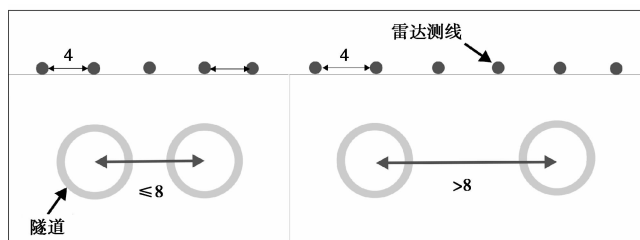
在进行探地雷达数据解释时, 笔者引进了加权瞬时频率属性参数, 以作为对传统同向轴解释的数值补充。加权平均频率属性很少受到短波长的影响。地下地层和介电常数可以改变电磁波长的子波特征, 这些特征都可以从加权瞬时频率中很好地显示出来<sup>[7]</sup>。

### 2.3 布线方式及技术要求

根据场地和工程地质条件, 在规定的探测区域范围内, 该工程区间共布置 6 条雷达测线, 并且采用连续探测模式。测线布置见图 3。

此外, 为了更精确地了解地下空洞以及前期异常点的位置和展布情况, 可采用纵横向探测方式进行加密探测, 以提高对工后异常点的探测精度。异常点探测网布置方式见图 4。

在实际探测时, 测线布置根据实际工程需要, 还应符合下列要求:



a) 中心线间距  $\leq 8$       b) 中心线间距  $> 8$

图 3 盾构法区间测线布置示意图(m)

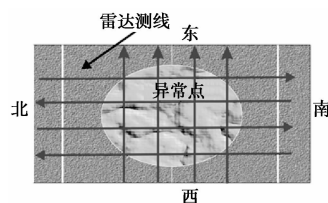


图 4 异常点测网布置示意图

1) 测线布置应结合前期异常点勘探的成果, 着重加密布置异常点区域;

2) 测线方向主要沿平行隧道走向布置, 局部加密区域可布置交叉测线, 当测区边界附近发现重要异常时, 应把测线适当扩展到测区外以便追踪异常现象;

3) 在地质结构复杂地区和路面展布不规则区域, 在主要测线之间可布置辅助测线。

根据该地区特点, 空洞主要发生在 5 m 范围内, 因此采用的探地雷达天线频率为 200 MHz 和 80 MHz。

### 2.4 数据处理和空洞识别

该工程主要探测目的是对工后存在的地下空洞进行检测, 并对空洞处理后的效果进行检测评估。根据雷达数据的构造和属性特征, 结合地质工程资料, 需要除去由于井盖、地下管线、地下构筑物和地面电磁干扰引起的异常, 最后根据异常程度对地下介质情况进行划分。异常缺陷等级划分见表 1。

对已探测出的异常区域, 需检测空洞处理效果, 再根据数据异常情况, 对异常区域评估等级进行划分, 见表 2。

### 2.5 前期空洞探测

经过对探测成果的细致分析, 探测区域共发现土层疏松引起的异常现象有 3 处, 土质严重疏松引起的异常现象有 5 处, 其中绝大部分探测区域异常现象的位置均在地面以下 1~4 m。此外, 对部分异常现象采取了复测、加密测线等辅助手段, 并根据复测、加密结果对异常现象进行了定性解释。雷达显示的异常图像见图 5。

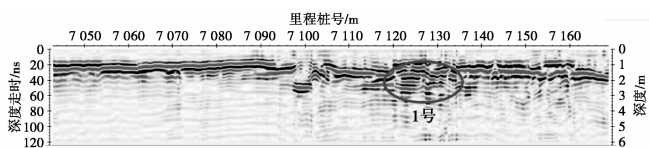
表 1 地质雷达检测异常缺陷等级表

异常缺陷等级	异常状况描述	引起异常主要原因	处理意见
轻微	土层轻度疏松	管线施工、建筑物施工、重车振动及其他人为因素	加强巡视
中等	土层疏松	管线施工、管线渗漏、重车振动及其他人为因素	加强巡视,定期检测
严重	土层严重疏松,含有饱和水	大型管线施工、管线渗漏严重、重车振动及其他人为因素	打钻验证,注浆处理
非常严重	土层脱空	大型管线施工回填不密实、高层建筑物施工、重车振动、上水管线爆管、雨污水管线泄露及其他人为因素	打钻验证,注浆处理

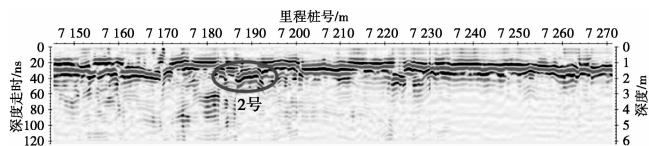
注:土层轻度松散在雷达图上表现为反射波同相轴横向基本连续,部分区域出现波浪状;土层疏松为疏松介质存在,土层有破碎,雷达图上表现为反射波同相轴横向不连续,振幅变化,纵向上波速与介电常数变化较大;土层严重疏松为土层非常松散、破碎,雷达图上一一般表现为反射波同相轴横向、纵向均不连续,振幅出现阶段性无规律强反射;土层脱空为地下介质出现空洞,雷达图上表现为反射波同相轴出现抛物线现象,抛物线下方振幅空白或信号变弱。

表 2 异常区域评估等级表

异常缺陷等级	处理状况	引起异常主要原因	处理意见
无	未见异常	无	无
轻微	有局部小异常	注浆未全面覆盖边缘和深部	加强巡视,定期检测
严重	效果未达到要求	注浆不成功	打钻验证,重新注浆



a) 1号图像



b) 2号图像

图 5 雷达显示的异常图像

### 3 空洞处治

处治道路下隐伏空洞的常用措施<sup>[1]</sup>有:开挖回填法、干砌法、浆砌法、桥跨法和灌浆法。

灌浆法主要是利用配套的机械设备,采取合理的灌浆工艺,将适宜的灌装材料注入工程对象,以达到填充、加固、堵水、抬升以及纠偏等目的。按注浆工艺可分为单液和双液注浆。双液注浆由于浆液混合方式和方向性可随时调节,配比比较灵活,能够实现定向、定量、定压施工,故在路基下隐伏空洞塌陷处治工程中得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 空洞注浆工艺

二重管无收缩双液 WSS 工法能将不同地质情况的土体填充密实,改变原土体形状和物理性质,增加土体的密度,提高其抗压强度,而且注浆材料属于环

保型,对河流及地下水无污染,适合于城市地下空洞的处理<sup>[7]</sup>。由于该工程位于昌平城区的昌崔路,车流量大,为了不影响车辆通行,要求注浆完成后第 2 天正常通行,工程最终决定使用二重管 A.B(C)无收缩双液 WSS 工法处理空洞。施工工艺流程见图 6。

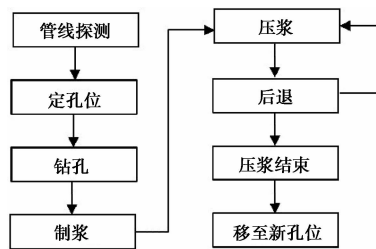


图 6 二重管钻机注浆工艺流程图

#### 3.2 注浆孔位布设

根据雷达探测到的空洞面积,确定在实测空洞面积向外扩大 2 m 的范围布孔,注浆深度比探测值深 2 m。注浆孔按照 1 m×1 m 间距布置。在管线位置处适当调整间距,使注浆孔距管线净距不小于 0.5 m。

1 号异常区布设 494 个钻孔,钻孔深度均为 6 m,注浆深度>6.0 m;2 号异常区布设 432 个钻孔,钻孔深度均为 5 m(见图 7)。

#### 4 空洞处治效果评价

经过对比处理前后 2 次的地质雷达图,未发现新的异常区域,已有异常区域的处理取得了很好的效果。

工后 1 号异常区域:通过注浆,雷达反射界面清

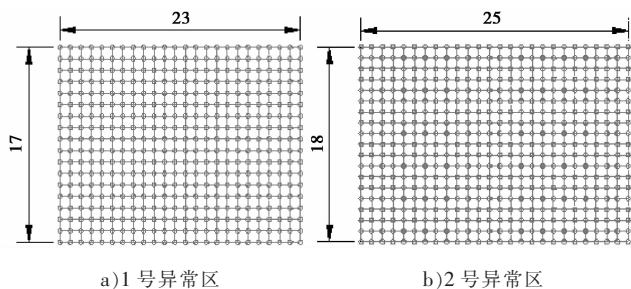


图7 异常区注浆孔布置图(m)

晰连续,地下介质分布均匀。可以看到较为明显的注浆渗流,加权瞬时频率属性显示地层介电常数均匀恢复,异常点治理效果较好(见图8)。

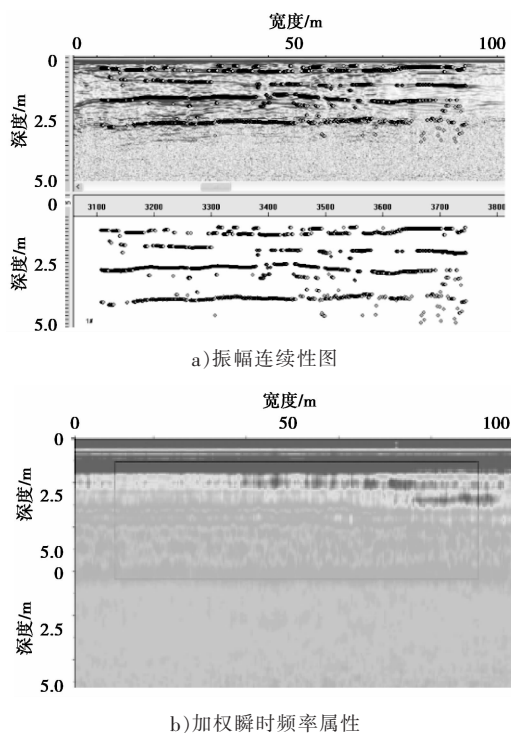
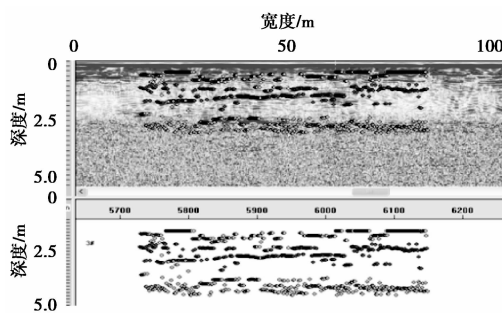


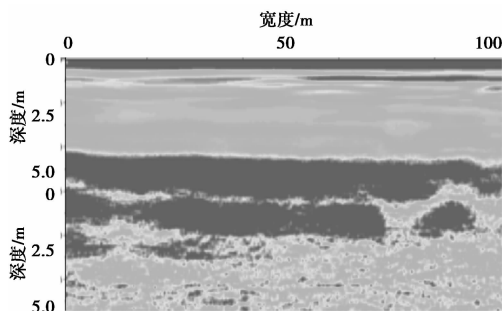
图8 工后1号异常区域雷达横向(西东)图像和加权瞬时频率属性

工后2号异常区域:横向上雷达界面反射均匀连续,地层较为密实。其中在纵向上可以看到,地下介质分布相当均匀,具有良好的连续性,加权瞬时频率属性显示地层介电常数均匀恢复,未发现异常(见图9)。

结合已有的工程、地质、钻孔和物探信息,采用地质雷达对地铁昌平线二期水库路站—昌平新区站区间工后地下空洞进行精细探测、处理和分析,针对原有异常区域进行工后二次探测和评估解释后发现:在横向上,注浆填充了原有的疏松和空洞区域;在纵向上,无论同相轴连续性、振幅一致性还是介质分布情况



a)振幅连续性图



b)加权瞬时频率属性

图9 工后2号异常雷达横向(西东)图像加权瞬时频率属性

都显示出良好的治理效果,深部注浆渗流也较为明显;原有异常区域异常情况消失,治理效果良好;其他区域未发现异常现象。

## 5 结论

1)通过分析地下空洞发育情况及对比地质雷达的探测结果和数值分析,验证了地质雷达探测的可靠性。

2)利用二重管 A.B(C)无收缩双液 WSS 工法注浆,对底层下方的空洞区进行了充分的填实,并通过探地雷达进行了二次探测,发现空洞区域消失,表明注浆效果较好。施工中地表沉降、管线变形均控制在允许范围内,验证了 WSS 法处理空洞的合理性。

3)该工程还提出了 WSS 工法处理浅层空洞的施工流程,也为日后类似工程的施工提供了参考。MET

## 参考文献:

[1] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司,北京城建设计研究总院有限责任公司,广州地铁设计研究院有限公司,等.城市轨道交通岩土工程勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2012.  
[2] Huisman J A, Sperl C, Bouten W, et al. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar[J]. Journal of Hydrology, 2001, 245(1):48-58.  
[3] 谭捍东,余钦范,Booker J,等.大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟[J].地球物理学报,2003(5):32-35.

(下转第 100 页)

表3 普通穹顶结构安全系数

验算位置	弯矩/(kN·m)	对应轴力/kN	偏心距/m	大偏心	小偏心	大偏心安全系数	小偏心安全系数
1	110.5	123.8	1.491	是	否	6.04	
2	57.0	440.1	0.129	否	是		2.66
3	58.3	486.3	0.120	否	是		2.58
4	49.6	63.5	0.780	是	否	11.07	
5	74.6	295.1	0.250	是	否	2.97	

表4 改进的穹顶结构安全系数

验算位置	弯矩/(kN·m)	对应轴力/kN	偏心距/m	大偏心	小偏心	大偏心安全系数	小偏心安全系数
1	47.1	290.5	0.162	否	是		2.96
2	0.7	322.8	0.002	否	是		7.79
3	34.9	834.3	0.041	否	是		2.71
4	86.4	464.2	0.186	是	否	2.19	
5	42.2	215.0	0.196	否	是		3.94

#### 4 结论

笔者针对某电缆隧道平交段的具体情况,设计了3种结构形式,运用荷载结构法对其安全系数进行了验算。得出以下结论:

1)柱状结构开挖高度最高,占用空间较大,其安全系数较穹顶结构大。如3种结构均采用暗挖法施工,柱状结构施工难度较普通穹顶结构和改进的穹顶结构都小。

2)普通穹顶结构开挖空间较柱状结构和改进的穹顶结构大很多,但安全系数满足要求,采用暗挖法施工难度较大,所以普通穹顶结构更适合埋深较浅的明挖法施工,不适用该工程。

3)改进的穹顶结构安全系数满足规范要求,受力合理,工程量比柱状结构和普通穹顶结构小,适合明挖法或暗挖法施工。所以从受力和工程量的角度考虑,建议该电缆隧道使用改进的穹顶结构。MET

#### 参考文献:

- [1] 葛荣良.从电缆隧道建设看城市地下空间的利用[J].上海电力,2006(3):243-245.
- [2] 刘益平,任亚群.城市电力电缆隧道建设前景分析[C]//薛一如.江苏省电机工程学会输配电及电力系统专委会2009年学术年会论文集.南京:江苏省电机工程学会,2009:101-103.

收稿日期:2015-03-07

作者简介:田德旺,男,助教,硕士,主要从事地下工程教学研究。

(上接第92页)

- [4] Laurens S, Balayssac J P, Rhazi J, et al. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling[J]. Materials and Structures, 2005, 38(9):827-832.
- [5] Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4):476-491.
- [6] 田涛, 阎宗岭, 杨静, 等. 注浆技术处治路基下隐伏孔洞的浆

液配合比试验研究[J]. 公路与汽运, 2013(2):118-120.

- [7] 杨睿. 二重管无收缩 WSS 注浆工法在西安地铁施工的应用[J]. 科技资讯, 2012(25):41-42.

收稿日期:2015-04-08

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2014JBZ012)

作者简介:刘魁刚,男,高级工程师,硕士,主要从事工程建设方面的管理工作。

(上接第96页)

#### 参考文献:

- [1] 成词峰,陈建平.地铁隧道穿越浅基础建筑的沉降预测及应用[J].铁道建筑,2011(3):56-60.
- [2] 高超,路平.盾构隧道穿越建筑实测及有限元分析[J].低温建筑技术,2004(2):108-110.
- [3] 杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等.地铁隧道近距穿越施工对桩基承载

力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004,26(6):1290-1295.

- [4] 李静.无水砂卵石地层中浅埋暗挖法隧道下穿条形基础的沉降控制[J].市政技术,2013,31(S1):102-106.
- [5] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:300-302.

收稿日期:2015-03-04

作者简介:闫须行,男,工程师,学士,主要从事施工技术及管理工作。