doi: 10.11720/wtyht.2020.0015

韩佳明,仲鑫,景帅,等.探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1476-1481.http://doi.org/10.11720/ wtyht.2020.0015

Han J M,Zhong X,Jing S, et al. The application of geological radar to urban geological pipeline detection in the loess area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020,44(6):1476-1481.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0015

探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用

韩佳明,仲鑫,景帅,刘平

(西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西西安 710054)

摘要:使用探地雷达对黄土地区城市多个拟建地铁出站口区域进行地质和地下管线探测,着重研究了黄土区的土 层分布情况。结合现场实际情况分析了黄土层中存在的空洞、渗水、土体塌落等情况以及 PVC 管线和金属管线的 探地雷达图像,归纳了在黄土地区地下管线各自的探地雷达扫描图像的特点,总结出在黄土地区应用探地雷达探 测城市地质分层和管线的一般性方法和规律,应用"黑—白—黑"与"白—黑—白"的图像规律进行探地雷达图像 解析,很好地指导了后续的工程施工。

关键词: 探地雷达;黄土地区;管线探测;城市地质勘察

中图分类号: TN951 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2020)06-1476-06

0 引言

近年来,随着"一带一路"建设的日趋壮大,地 处西北黄土地区的西安市加大了地铁、立交桥等市 政工程的建设。西安市所处的黄土地区属于湿陷性 黄土,当在一定压力下受水浸湿,土体结构会迅速破 坏,产生较大的沉降,强度迅速降低^[1-3]。西安的湿 陷性黄土使得在城市基础建设的施工中,经常会出 现各种因为土体土质带来的工程问题,同时,市区地 下管线的布置错综复杂,有的因为地质问题和年代 久远早已和施工设计图发生了偏差^[4]。基于以上 两点原因,在黄土地区(尤其是在地下管线复杂的 市区)进行工程施工时,提前进行地质及管线探测 尤为重要。

探地雷达从 20 世纪前半叶出现后,由于其操作 简单,方便携带且探测结果对于工程有很好的指导 意义,很快就被应用到多种领域^[5-8]。城市的信号 干扰大,地下管线布置交错复杂^[9],加上黄土本身 的土质特性使得雷达图像有多解性^[10]。本文结合 西安所在黄土区的土质特点,阐述黄土区城市地下 管线探测雷达扫描图像的分析要点,总结了不同管 线的雷达扫描图像的规律,提出了黄土区探地雷达 扫描图像分析的一般性方法,最后结合工程实例验 证了方法和规律的正确性与实用性。

1 探地雷达探测方法

1.1 探测原理

探地雷达是一种工作于高频、超高频微波频段 的探测技术,其工作原理是发射天线将电信号转变 成电磁波向地下发射,电磁波在传播过程中,遇到地 下介质不均匀、介电常数有差异时便会产生反射、衍 射和折射的电磁波,接收天线接收到反射后的电磁 波,将其转变为电信号在主机屏幕上显示出来,根据 雷达扫描图像、电磁场强度、介质的反射系数和电磁 波的发射接收时间间隔等参数便可大致推断地下的 地质构造^[11-13]。相对介电常数的变化是雷达信号 发生变化的根本原因,常见介质的相对介电常数见 表1。

探地雷达工作时,发射天线发射电磁波后,位于 地面上的接收天线在接收到地下回波后,直接传输 到接收机,信号在接收机经过整形和放大等处理后, 经电缆传输到探地雷达主机,在主机中对信号依照

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51808444)

作者简介:韩王两教扬7-),男,副教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为岩土工程监测与监控技术。Email:jiaminghan@163.com

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-06-07

表 1 常见介质相对介电常数 Table 1 Relative dielectric constants of common dielectrics

介质	相对介电常数	介质	相对介电常数
空气	1	水	81
黄土	6	石灰岩	7~9
干砂	3~5	花岗岩	5~8
湿砂	20~30	砂岩	6
金属	300	页岩	5~15
PVC	3	淤泥	5~30
混凝土	5~8	沥青	3~5

扫描线幅度大小进行编码,并以伪彩色电平图、灰色 电平图或波形堆积图的方式显示出来,将测得的结 果通过 RADAN7 专业软件进行焦点迁移、扫描调 整、曲面调节、区域增益和波形的反卷积处理,可以 获得更清晰、更具有参考价值的图像。

1.2 图像一般分析方法

分析雷达扫描图像时需要将相对应的波形图一 起对照分析,波形图内波峰、频率的变化反映的是土 层内介质相对介电常数的变化;波形图可以更好地 辅助确定土层内的情况。在分析图像的过程中,总 结了两条具体规律。

第一条,黑色线条对应负波,白色线条对应正 波。如图1所示,在形成的雷达扫描图右侧会有相 对应的扫描线,扫描线的中轴线是竖直方向,在中轴 线的左侧是对应的负波,右侧是对应的正波,图中黑 色的线条对应着负波,且黑色线条的中间对应着负 波的波峰。图2中白色线条对应着扫描线中的正 波,白色线条的中间对应着正波的波峰。而黑白线 条的交界处则是对应着扫描线的中轴线。



图 1 探地雷达扫描图像示例一 Fig.1 Geological radar scanning image 1

第二条,电磁波穿过的不同介质的相对介电常数相差越大,波峰峰值越高。在探测的过程中,因为电磁波穿过了不同介质,相对介电常数发生改变,在雷达扫描图上才会有强反射区,当两种或者多种介质的相对**不**危端数相差比较小时,在图像上的反映







Fig.3 Geological radar scanning image 3

就不是很明显,对应的扫描线的振幅就很小;而当相 对介电常数相差很大时,图像就会出现强反射区,对 应的扫描线的峰值就会很高。如图 3 所示,当相对 介电常数相差足够大时,扫描线的峰值会超出扫描 线的扫描区域。扫描线的波形特性(频率,振幅)是 用来判断地层内部有无异常的重要依据。

2 黄土区地质探测图像分析

在黄土地区进行工程施工时,尤其是在地下管 线复杂的市区,提前的地质探测是极其重要的。使 用 GSSI 美国劳雷探地雷达,对西安市区多个拟建地 铁出站口的区域进行了探测,结合各自区域的现场 情况,设置不同的测量模式、发射率、记录长度、增益 点数、采样点数、数据位等探地雷达探测的参数。

2.1 地质分层

探地雷达的扫描曲线产生变化的根本原因在于 介质的变化,对于西安市区黄土条件下的地质探测, 在电磁波穿过不同类型土层的时候,接收到的反射 信号会发生改变,在探地雷达所显示的图像上,同一 类型的土层(不考虑管线和空洞断层等地质问题) 图像所展现出来的规律和样式是一致的,而在不同 类型的土层的分界处有明显的线性或是条状的分界 线,这对于地质分层的解释是很好的参考作用。

如图4所示,在深度0~0.3 m处,图像是黑白交 替有规律的条状,并且都是直线型,结合现场情况和 相关介电常数可以推测出这一段是混凝土或者沥青 层,在不同的工程区域,也可以是地砖与砂浆层;在 深度0.3~0.8 m处,图像也是呈现黑白交替的条状, 但不是直线型,而是呈无规律小幅度的弯曲,这说明 在这一土层里面有不同的介质存在,但有经过压实 和填埋等处理,所以这一层是属于杂填土;在深度 0.8~2.6 m处,图像没有明显的条状呈光滑带状,相 较于杂填土它的均匀性更好,属于天然土层;在 2.6 m以下,因为西安属于黄土地区,黄土本身结构疏 松,空隙发育良好,而前期相关的工程施工对于这一 深度的土层也没有破坏,所以该层属于最原始的状 态,整个图像显示出粗糙的质感,都是均质土。



图 4 土层分层扫描图像示例 Fig.4 Soil layering scanning image

通过扫描图像也可以大致推测出土层的密实情况:混凝土、杂填土和天然土层的扫描曲线的频率不高,扫描曲线不太紧密,较疏松;均质土的扫描曲线 呈现出高频率、紧密的样式,这和土层之前是否受到 过工程破坏有关。在西安多个地铁工程区域进行探测,测得雷达扫描图像与图4基本一致,仅仅在具体 深度上有差别。

2.2 空洞与土体塌落

空气的相对介电常数值是1,黄土的相对介电 常数是6,两者相对介电常数相差较大,所以,在探 地雷达探测的过程中,电磁波信号如果在土层中遇 到空洞的存在,最终得到的图像中就会有强反射区。 而土体塌落往往和空洞是同时出现的,在土层中,由 于渗水或者黄土本身的土体结构问题,时间一长在 土层内部就有可能出现土体的塌落情况,在其旁边 就会形成空和处理雷达图像上就会出现强反射,表现 为杂乱的条纹。

空洞与土体塌落绝大部分会出现在杂填土土层 和天然土层。杂填土层因为本身组成构造的复杂性 很容易出现空洞、断层等地质问题;在天然土层中, 虽然是以天然的黄土为主,但因为深度不够,还是会 受到上层施工所带来的影响,在前期的管线埋设或 是地基建设中,对上层土的开挖、加固、回填、夯实都 会对这一土层造成影响,黄土原有的结构遭到破坏, 就会留下隐患,易出现空洞、土体塌落等地质问题。

如图 5 所示,图中矩形区域出现了不规则强反 射的雷达图像,异常区域明显区别于其他区域,空洞 中的空气的相对介电常数比周围土壤要低,电磁波 穿过介质的顺序是黄土—空气—黄土,相对介电常 数经历了"高—低—高"的变化过程,所以在异常图 像区域呈现出"黑—白—黑"的交替异常条纹。扫 描线在异常图像区有较大振幅,从上往下对应的是 黑色的负波先出现异常,负波正波交替出现异常,说 明此处存在与黄土相对介电常数相差较大的介质, 结合条纹的形状,推测图中矩形区域内疑似有空洞 与土体塌落存在,施工开挖的时候要留意这一区域。



Fig.5 Hollow radar scanning image

2.3 渗水

在市区的地下土层,由于城市排水系统的设施 和管道多在地下,并且地下土层的状况经常会有复 杂的变化出现,时间一长,就会出现管道里的水渗到 土层里的情况,在土层的一块区域形成富水区,当富 水区足够大或是在一块土层有多个富水区时,土层 的结构就会受到破坏,这对于后期的工程施工和土 层开挖都有很大的安全隐患。当土壤的含水率增 加,土壤对电磁波的吸收增加,接收的电磁波信号就 不同于周围非富水区的土层。

水的相对介电常数是 81,与土壤的 6 相差很 大,但实际情况中水通常是和土壤混合在一起,不是 单独存在于土壤中,所以土壤中富水区形成的雷达 扫描图像杂乱无章, 似絮状堆积在一起。如图 6 所示, 图中矩形区域出现了杂乱无规律的波形, 并且是 聚集在一块, 同时相对应的扫描线有着频率高, 正负 摆动的一段波形, 符合土层中富水区存在的规律, 推 测是土层渗水。



图 6 渗水区的描述扫描图像 Fig.6 Seepage radar scanning image

2.4 PVC 管与金属管

PVC 管的相对介电常数是 3, 与黄土的相对介 电常数相差较大。当土层中存在 PVC 管线时,电磁 波信号在通过 PVC 和黄土的分界面时,其顺序是黄 土—PVC 管—黄土, 相对介电常数经历了"高— 低—高"的变化过程, 所以在雷达扫描图上出现了 "黑—白—黑"的弧状强反射区(图 7)。同样, 在相 对应的扫描线上有较大振幅, 并且扫描线的波峰已 经超过了扫描区域, 结合反射区弧状的样式, 推测为 PVC 管。



图 7 PVC 管线的雷达扫描图像 Fig.7 PVC pipeline radar scanning image

金属的相对介电常数为 300^[14],和 PVC 管线一样,在雷达图像上会有强反射区,如图 8 所示,电磁 波在穿过金属时,介质的相对介电常数经历了 "低—高—低"的变化过程,所以在雷达扫描图像上 就会出现"白—黑—白"的弧状图形,异常区域的扫 描线有对户户象的正波出现。地下的金属管线多为 生活中的给水管线,需要在施工前大致确定位置走 向和埋深,小心开挖。



图 8 金属管线的雷达扫描图像 Fig.8 Metal pipeline radar scanning image

2.5 混凝土管

混凝土的相对介电常数与黄土相差不大,这增加了图像分析难度。如图9所示,矩形框内出现了 "黑—白—黑"的交替异常条纹,和上文论述到的空 洞的异常图像相类似,但实际开挖后是管径1m左 右的混凝土管。混凝土管在生活中多用来做排污 管,管径较大,内部有空气和水,所以判断难度大;同 时现场探测时还有很多干扰信号以及要面对复杂的 地下状况,所以在黄土区混凝土管道的判断需要结 合现场实际情况,单单凭借雷达扫描图像并不能准 确判断此处管道就是混凝土管道。



图 9 花蕨工目的面应扫描图际 Fig.9 Concrete pipe radar scanning image

3 探测实例

对西安市区某拟建地铁出站口区域进行黄土区 地质管线探测。本次地下管线探测工作主要采用了 GSSI美国劳雷探地雷达,使用 3207A 型探测天线, 天线的频率分别采用 100 MHz 和 400 MHz。测区范 围为154.8 m²,东西长12.9 m,布设4条测线;南北长 12 m,布设5条测线,2个方向的测线垂直布置。选 取东西向最南边的1号测线进行说明。

图 10 是 1 号测线的雷达扫描图像,结合上文提

到的土层分析原理与分析方法,得到土层大致的分 层情况;再利用上文提出的图像分析的一般性规律 以及对于 PVC 线以及金属管线的图像分析方法,对 1 号测线的雷达扫描图像进行分析。



图 10 1 号测线探地雷达扫描图像 Fig.10 Soil scanning image of line 1

1 号线土层情况:第一层土,0~0.3 m,混凝土或 沥青地层;第二层土,0.3~0.8 m,杂填土层;第三层 土,0.8~1.3 m,天然土层;第四层土,1.3 m 以下,均 质土。

图中1号框内为不规则的强反射区,说明有管 线存在,并且图像不是较规律的弧状,推测还有一些 地质问题,后期现场施工发现除了有 PVC 管线还有 土质疏松的问题。2号框内有小块的强反射区,推 测为管径较小的管线,3号框内有易识别的弧状图 形,根据"白—黑—白"的图像规律,推测为金属管 道;后期现场施工证实推测正确。

4 结论与建议

1) 在管线探测的过程中,空气、水、PVC 管和金 属管因为本身材质的相对介电常数和黄土的相差很 大,所以在雷达图像上会呈现出明显的,有着各自特 点的雷达图像。介质相对介电常数经历"高—低— 高"的变化过程,雷达图像对应"黑—白—黑"的弧 状曲线;经历"低—高—低"的变化过程,雷达图像 对应"白—黑—白"的弧状曲线。

2)城市地下管线的布置具有重叠性,往往不同 材质的管线为考虑施工方便等多种因素会紧挨着布 置,这对于雷达图像的分析有着很大的干扰;同时探 地雷达的图像教母就具有多解性,再加上工程现场 的各种杂波信号,不同管线不同地质情况会有相类 似的雷达图像出现,这就需要后期的工程施工来进 行辅助判断。

3) 探地雷达在地质管线探测中所得到的雷达 图像对于地质情况的分析和管线的大致推测有很好 的指导作用,但其所受到的干扰也很多,目前的探测 精度并不高,如何去除干扰、提高精度将是以后探地 雷达探测研究的主攻点。

参考文献(References):

- [1] 戴天,厉隽.瑞利波法检验客运专线湿陷性黄土地基处理效果
 [J].物探与化探,2009,33(5):603-607.
 Dai T, Li J. Rayleigh wave method to test the treatment effect of collapsible loess foundation of passenger dedicated line [J]. Geo-physical and Geochemical Exploration, 2009, 33(5): 603-607.
- [2] 王永鑫, 邵生俊, 韩常领, 等. 湿陷性黄土砂井浸水试验的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S1): 159-164,7.
 Wang Y X, Shao S J, Han C L, et al. Applied research of sand well immersion test in collapsible loess [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 159-164,7.
- [3] 邓乐娟.结构性黄土的本构模型[D].西安:长安大学,2018.
 Deng L J. Constitutive model of structural loess [D]. Xi´an: Chang'an University, 2018.
- [4] 梁枥文.城市小区复杂地下管线探测试验研究[D].兰州:西 北大学, 2018.
 Liang L W. Experimental study on detection of complex under-

ground pipelines in urban districts [D]. Lanzhou: Northwest University, 2018.

- [5] 刘宗辉, 刘毛毛,周东,等. 基于探地雷达属性分析的典型岩 溶不良地质识别方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(8):1-9.
 Liu Z H, Liu M M, Zhou D, et al. Typical karst geology identification method based on ground penetrating radar attribute analysis
 [J]. Geotechnical Mechanics, 2019, 40(8):1-9.
- [6] 覃谭,赵永辉,林国聪,等,探地雷达在上林湖越窑遗址水下考 古中的应用[J].物探与化探,2018,42(3):624-630.
 Qin T, Zhao Y H, Lin G C, et al. The application of GPR to underwater archaeological investigation of Shanglinhu Yue kiln relics
 [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018,42(3): 624-630.
- [7] Catarina P, Frabcisco J A, Jorge M C, et al. Current uses of ground penetrating radar in groundwater-dependent ecosystems research [J]. Science of the Total Environment, 2017(595): 868 - 885.
- [8] Yuan X, Yan S, Shun D, et al. Ground experiments of Chang'e-5 lunar regolith penetrating radar[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(10).
- [9] 王健, 江怡芳, 朱能发, 等. 综合管线探测技术在城市管线探测中的应用[J].测绘通报,2015(S2):52-56.
 Wang J, Jiang Y F, Zhu N F, et al. Application of integrated pipeline detection technology in urban pipeline detection [J]. Sur-

veying and Mapping Bulletin, 2015(S2): 52-56.

- [10] 鲁建邦. 探地雷达探测过程中干扰物的图像识别[J]. 隧道建设, 2011, 31(6): 686-689.
 Lu J B. Image recognition of jammers in geological radar detection
 [J]. Tunnel Construction, 2011, 31(6): 686-689.
- [11] Wallace W L, Xavier D, Peter A. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30 - year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis [J]. NDT and E International, 2018(96):58-78.
- [12] 郭小凤. 探地雷达应用技术及雷达图像处理方法研究[D].太原:中北大学, 2012.
 Guo X F. Research on application technology of geological radar and radar image processing method [D]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [13] Olga L L T, Bart S. Ground penetrating radar for close in mine detection [M/OL].IntechOpen:2017-08-30.
- [14] 周陈婴. 隧道衬砌检测探地雷达图像分析与工程应用[J]. 山东大学学报:工学版, 2018, 48(4): 61-68.
 Zhou C Y. Image analysis and engineering application of ground penetrating radar in tunnel lining detection [J]. Journal of Shandong University:Engineering Science, 2018, 48(4): 61-68.

The application of geological radar to urban geological pipeline detection in the loess area

HAN Jia-Ming, ZHONG Xin, JING Shuai, LIU Ping

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Geological and underground pipeline detection was carried out in several urban metro exit areas in the loess area by using ground penetrating radar (GPR). The distribution of soil layer in the loess area was emphatically studied. The GPR images of PVC pipelines and metal pipelines in the loess area under the conditions of holes, seepage and soil collapse were analyzed, and the respective GPR scans of underground pipelines in the loess area were summarized. By describing the characteristics of the images, the authors summarized the general analysis methods and rules of applying GPR to detecting urban geological stratification and pipeline radar images in the loess area, and used the image laws of "black-white-black" and "white-black-white" to analyze the GPR images, which provides a good guidance for subsequent engineering construction.

Key words: geological radar; loess area; underground pipeline detection; urban geological exploration

(本文编辑:沈效群)