

地质雷达在古墙体无损检测中的应用研究

李悦¹, 孙士辉¹, 朱能发¹, 王浩¹, 刘国辉²

(1. 天津市勘察院, 天津 300191; 2. 石家庄经济学院 研究生学院, 河北 石家庄 050031)

摘要: 为了保护古城墙等重要遗产, 尝试利用探地雷达技术检测古墙体。详细讨论了探地雷达检测古墙体的地球物理前提条件, 就地质雷达在墙体无损检测领域开展了较深入的探讨, 以正常墙体与存在隐患的墙体为对比, 系统分析了墙体密实不均匀、局部脱空、裂隙的原因, 总结了墙体常见缺陷的雷达波相特征, 最后针对不同的异常做了详细的解释, 为墙体检测及治理提供一定的科学依据。

关键词: 地质雷达(GPR); 古墙体; 异常识别; 无损检测

中图分类号: TU36

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)03—0072—03

Application of the GPR in Non-destructive Testing of Ancient Walls

LI Yue¹, SUN Shihui¹, ZHU Nengfa¹, WANG Hao¹, LIU Guohui²

(1. Tianjin Institute of Geotechnical Investigation, Tianjin 300191, China;

2. Graduate School of Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: In order to protect important heritage such as ancient walls, this paper try to use radar technology to conduct non-destructive testing of the walls. The geophysical condition of this technology was discussed first, the testing technology was then introduced in detail, based on the comparison between the normal walls and the ones with hidden troubles, this paper analyzed the reasons which caused hidden troubles such as uneven density, local void, crack etc. The characteristics of radar facies of these hidden troubles were also revealed, and the abnormal phenomena was explained as well. This paper could provide instructions for non-destructive testing of the walls.

Keywords: GPR; ancient wall; abnormally identification; non-destructive testing

古城墙是人类文明发展的重要遗产, 在漫长的岁月里经历风吹日晒的侵蚀和人类活动的破坏作用, 存在着许多隐患, 如土体不均、隐伏断裂、空洞、脱空等^[1]。上述隐患对墙体的安全造成了潜在的危险, 因此查明和消除古墙体的缺陷, 准确获得缺陷信息, 确定其位置范围, 是非常必要的。现有的墙体检测方法多数为表面观察, 对其内部缺陷和隐患则采取钻探取芯分析等有损检测方法, 由于有损检测方法使墙体受到不同程度的破坏, 做出的评价结论很难代表墙体的真实情况。地质雷达技术具有效率高、成像快、高分辨率和异常解译清晰等优点, 得到了广大技术人员的充分认可, 但由于墙体内部材料复杂、需要较高的探测精度, 很有必要对雷达在古墙体检测中的应用进行研究。本文以实际工程应用为基础, 详细论述了墙体隐患的异常特征, 给墙体治理提供科学依据。

1 探地雷达(GPR)基本理论

GPR 主要通过发射高频电磁波, 接收来自目标体的反射波。由波的相关理论可知, 当其在穿过层状介质时, 由于其上下介电性存在差异, 导致电磁波产生反射与折射, 相应的反射波由天线接收, 并对其进行数字信号处理。电磁波在介质传播过程中, 速度与介质的介电常数相关, 当介质上下介电性存在差异时, 电磁波会发生反射, 由天线接收反射波, 完成对目标体的探测(如图1所示)。

通常用 R 来表示反射系数, T 表示折射系数。当电磁波垂直入射时有:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}, \quad T = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

其中: ϵ_1, ϵ_2 分别为上下介质的介电常数。

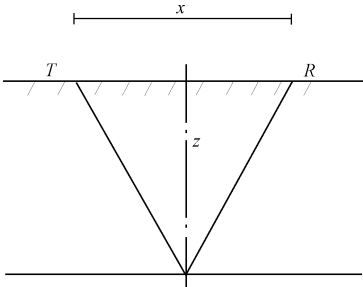


图 1 反射波示意图

如图 2 所示,脉冲波行程需时

$$t = \frac{\sqrt{4z^2 + x^2}}{v}$$

(2)

式中: z 为界面的深度, x 为收发距, v 为速度。

已知介质的波速 v 时,通过记录到的走时 t ,得到目标体的埋深 z 。

理论上探测深度与导电率及频率呈反比关系,分辨率与频率成正比关系,纵向分辨率 Δh 与横向分辨率 Δx 见下式:

$$\Delta h = \lambda/8 \sim \lambda/4$$

(3)

$$\Delta x = \sqrt{\lambda H_0/2 + \lambda^2/16} / 2$$

(4)

式中: λ 为波长,m; H_0 为垂直测距,m^[2]。

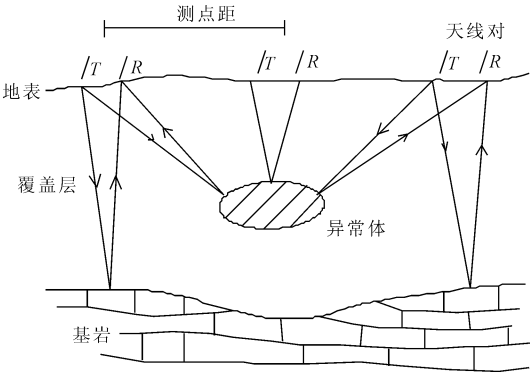


图 2 地质雷达工作示意图

GPR 图像以脉冲波的形式记录,波形的正负峰分别以黑白色表示,这样通过同相轴即可将介质的分布情况表示出来,便可将物体内部的结构信息反映出来^[3]。

2 开展地质雷达技术的地球物理前提

古墙体外侧多为砌砖、砌石介电常数相对较小;内部多为夯土介电常数相对较大;缺陷异常体相对周围介质孔隙度将变大,含水率也明显不同。基于不同材料之间,松散土和密实土之间,完整砌砖与风化破损砌砖之间,以及各类隐患与周围介质之间,含水率不同的土体之间均存在着一定程度的介电性差异(见表 1),因此电磁波会在界面处发生反射,在探

地雷达的记录剖面上呈现一定形态雷达波同相的异常特征,从而揭示墙体内不同属性介质的分布和墙内隐患的部位,形态和大小^[4-5]。

表 1 各种材料的相对介电常数

材料	ϵ_r
空气	1
淡水	81
黏土	6~40
粉土	5~30
干砂	3~18
砌砖体	6~8
墙体土	8~15

3 古墙体隐患及识别

判定古墙体隐患的依据有:(1) 反射波的同相性。当介质各向同性时同一反射体相对应的同相轴大致平行^[6-7]。(2) 反射波形的相似性。同一反射波组的波形特征在相邻记录道上是大致相似的。(3) 不同异常体的反射波组的差异性。异常体反射波组的波相具有一定的规律性和分布特征,因此异常体与围岩反射波组存在一定的差异,往往将其作为墙体内存在局部密实不均体的判别标志^[8-9]。(4) 地下介质的介电性及其形态决定波组的形态特征^[10-11]。

3.1 正常墙体的标准雷达异常图像

沿正常完整砌砖墙体的侧表面剖面进行探地雷达检测,剖面的时深反演转换结果见图 3,由图 3 可看出,雷达反射波同相轴呈水平条带状,并有一明显的反射波波分界面,其浅部波长短,深部波长变长而均一;上述探地雷达水平反射波异常组合分布特征无疑是正常完整砌砖墙体与内包土结构的必然结果,而浅部反射波形分界面异常则是砌砖与内包土的分界面,波长随深度增加而增大,是电磁波进入导电土体中高频成分的衰减所致是判别正常完整墙体存在的标准^[11]。

3.2 墙体隐伏裂隙

当墙体内出现断裂时,裂隙与土体的介电性已经不同,电磁波在此处会产生强反射,具体特征为:同向轴被错动、同向轴断断续续,如图 4 所示为墙体内土体滑动产生的裂隙的反映。

3.3 墙体局部脱空

墙体内土体出现空洞时,洞内空气与土体间存在着明显的介电性差异,因此在其边界形成较强的反射界面。在雷达反射波剖面图像上的波组呈现出具有一定规模的上凸弧形分布特征。如图 5 所示,为某墙体的雷达剖面图像,可以明显的反映出墙体空洞的位置和大小^[12-13]。

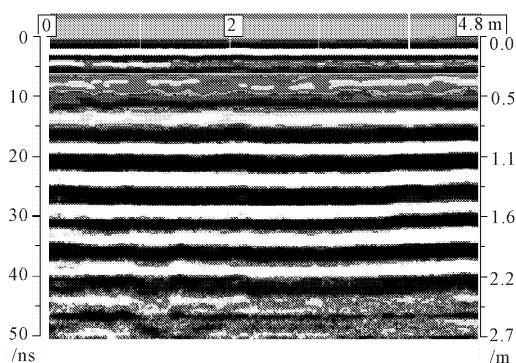


图 3 正常完整砌砖墙体雷达图像

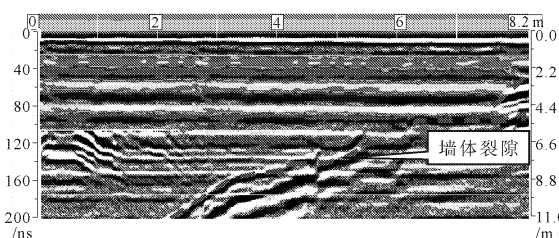


图 4 墙体内裂隙雷达剖面图像

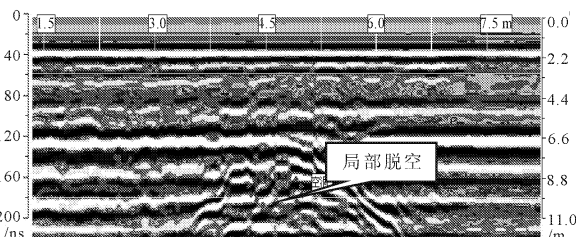


图 5 局部脱空雷达剖面图像

3.4 墙体内土体不均

墙体由于曾多次修复,墙心夹土可能在有些地段进行过不同时期和不同回填工艺,导致土体密实不均,或不同含水率等现象的存在。从而导致该类土体之间存在介电性的差异。在雷达反射波剖面图像上呈现与之对应的波组、波幅、波长不同的明显分区,其分布范围基本上反映了不均土体的分布。如图 6 所示,为某墙体的雷达剖面图像,明显具有相对起伏 2 m 的不同土质分界面,为墙体内土体不均的反映^[14-15]。

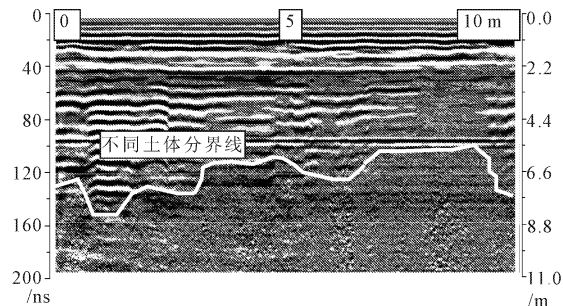


图 6 墙体内土体不均雷达图像

4 结 论

(1) 地质雷达可以兼顾探测深度和空间分辨率,并且具有无损、高精度、探测成果彩色直观、现场检测快速、便捷等优点,在古墙体无损检测方面具有一定的应用价值。

(2) 任何一种物探方法都有其应用条件与不足。地质雷达在含水率高的地区应用效果仍然欠佳,此外对利用雷达图像的异常解释还停留在定性阶段。

(3) 在对古墙体进行检测时,单一物探方法难免存在不足,必要时可以考虑采用综合物探技术对墙体进行检测,以达到相互验证、取长补短的目的。

参考文献:

- [1] 崔洪庆,冯文丽,刘国光,等.探地雷达技术在古城墙修缮中的应用[J].工程地质学报,2007,15(5):708-711.
- [2] 朱能发,孙士辉,陈 坚.地质雷达在公路路面无损检测中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(4):522-527.
- [3] 郭增强,刘尧军,赵玉成.SIR-20 地质雷达在公路质量检测中的应用[J].石家庄铁道学院学报,2003,16(4):47-49.
- [4] 曾昭发,刘四新.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2006:234-23.
- [5] 茹瑞典,张金才,戚筱俊.地质雷达探测技术的应用研究[J].工程地质学报,1996,4(2):51-56.
- [6] 钟世航.地球物理技术在我国考古和文物保护工作中的应用[J].地球物理学进展,2002,17(3):498-506.
- [7] 徐升才,刘 峰.探地雷达在城市道路厚度检测中的应用[J].华东交通大学学报,2000,17(4):24-28.
- [8] 孔令讲,周正欧.浅地层探地雷达波速测量方法的研究[J].电子学报,2002,30(9):1330-1332.
- [9] 杨建广,吕绍林.地球物理信号处理技术的研究及进展[J].地球物理学进展,2002,17(1):171-175.
- [10] 王建民,刘 财,杨宝俊,等.地质雷达技术在巴彦查干地区地震勘探中的应用[J].地球物理学进展,2002,17(4):745-752.
- [11] 底青云,王妙月.雷达波有限元仿真模拟[J].地球物理学报,1999,42(6):818-825.
- [12] 肖明顺,吕彦君,曹中林,等.探地雷达数值模拟的吸收边界条件研究[J].工程地球物理学报,2008,5(3):315-320.
- [13] 石 明,冯德山,戴前伟.综合物探方法在堤防质量检测中的应用[J].地球物理学进展,2006,21(4):1328-1331.
- [14] 景 胜.地质雷达在铁路隧道检测中的应用及典型图像分析[J].西部探矿工程,2015,27(4):188-191.
- [15] 肖宏跃,雷 苑,杨 威.地质雷达特征图像与典型地质现象的对应关系[J].煤田地质与勘探,2008,36(4):57-61.