

探地雷达在大佛寺无量桥密实度探测中的应用

叶良^a, 韩熠超^b

(浙江科技学院 a. 土木与建筑工程学院; b. 经济与管理学院, 杭州 310023)

摘要: 探地雷达作为文物建筑检测与修复中一种新型探测技术,具有无损性、便捷性和有效性的优点。通过探地雷达在无量桥底座密实度探测中的应用,得出了无量桥的隐患分布点为:东桥台侧墙、上方经幢及桥拱券,其中安全隐患的根源是渗水和水土流失。探测结果证实了探地雷达在检测不可移动文物方面的可行性和有效性,为不可移动文物的日常保护管理和维护提供了科学的量化数据,也为研究、分析和评估不可移动文物的整体安全性提供了参考。

关键词: 探地雷达;无损检测;文物保护;图谱分析

中图分类号: P631.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2017)06-0409-05

Application of ground penetrating radar in detecting density of Wuliang Bridge

YE Liang^a, HAN Yichao^b

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. School of Economics and Management, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The ground penetrating radar, a new-fashioned type of detection technology in the detection and repair of cultural relics, embodies the advantages of non-destruction, portability and effectiveness. By applying the ground penetrating radar to detect regional density of the Wuliang Bridge foundation, safety hazard distribution points of the Wuliang Bridge are the side wall of the east abutment, the top of the stone pillar, and the bridge arch, for which water seepage and soil erosion are to blame. Thus, detection results have proved feasibility and effectiveness of the ground penetrating radar in detecting immovable cultural relics and provided scientific quantitative data for routine protection management and maintenance, and also offered

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 浙江省文物保护科技项目(2015017);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C33058);浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2016R415015)

通信作者: 叶良(1973—),男,浙江省嘉兴人,副教授,硕士,主要从事古建筑施工技术与管理研究。E-mail: 529212693@qq.com。

references for researching, analyzing and evaluating the overall safety of immovable cultural relics.

Keywords: ground penetrating radar; nondestructive testing; protection of cultural relics; spectrum analysis

随着国家对不可移动文物保护的日益重视,文物的检测修复工作显得更为重要,而常规检测方法存在耗时、成本高、收集样品不全等缺点,对文物本体也常常产生破坏性的影响^[1-2]。近年来,探地雷达以其无损、快速和简便的特点,在地表检测、文物考古和地形勘探等领域中都发挥了独特的作用。

探地雷达通过发射高频电磁波,利用地下不同的介电性质的差异,依据回波等各项物理学特征来分析其结构和物质特征^[3-4]。探地雷达是以脉冲的形式来探测目标体,进而通过仪器成像来分析的有效方法^[5-8]。但如果要获取地下或内部物体的形状、数量,以及分布状况等信息,就可以通过调整振幅建立起目标体的三维模型,而这一般是用多条雷达测线通过拼合的方式进而实现。研究表明,在一定范围内采样间隔越小,分辨率越高^[9]。虽然探地雷达用于不可移动文物保护工作的研究不是很多,但一些学者为我们提供了相关的经验,如方云等^[10]通过探地雷达探测千手观音石像,准确地描绘了岩体内裂隙、破碎带的分布;穆保岗等^[11]通过探地雷达对明孝陵明楼的检测,检测出明楼无不均匀沉降;梅宝等^[12]通过探地雷达技术探测云冈石窟的风化程度,为遗址的修复提供了参考。探地雷达也可以对地下介质的介电性差异进行分析,查明岩体中含水裂隙和岩溶孔洞分布规律,试验结果表明:探地雷达对不可移动文物内隐伏空洞裂缝、基础下原状土体陷落等不良缺陷的勘测是可行的和有效的^[13-16]。

笔者使用探地雷达检测大佛寺无量桥底座厚度、密实度和内部结构,分析雷达测线和雷达图像,寻找无量桥的异常区域,从而找到无量桥的隐患分布点,证明探地雷达在无量桥底座的检测是有效的,同时为后期修复方案的制定奠定基础。

1 探地雷达的应用与分析

1.1 工程概况

大佛寺,又名大佛禅寺,位于浙江省新昌县城南明街道,始建于东晋。全寺石窟造像极具特色,佛像规模宏大,历史悠久,立有 1 600 多年历史的石弥勒佛,是中国南部仅存的早期石窟造像。无量桥(图 1)位于大佛寺景区内部,作为石窟寺的窟檐拱券,背后为石窟寺山体,桥长约 42.3 m,拱顶高约 16.1 m,宽约 8.7 m,略低于石窟洞高,与石窟洞口下端紧密相衔接;拱顶厚约 1 m,拱跨约 13.3 m,约为拱跨的 1/13,拱券用的是连锁分节并列式,为单孔实腹、薄拱、半圆石拱桥。无量桥是全国重点文物保护单位大佛寺石弥勒像和千佛岩像的重要组成部分,无量桥顶部近期发生过碎石掉落的现象,雨季时部分条石表面有雨水痕迹,东桥台侧墙外鼓、开裂、破损严重,存在较为严重的安全隐患,急需进行保护。

1.2 桥拱腹填土密实度探测

根据工作目的和现场的工作条件,检测工作采用的仪器为北京东立环宇电子科技有限公司生产的瑞典探地雷(RAMAC/GPR),如图 2 所示,以及配套的中心频率为 100、250 MHz 的 2 种天线。仪器参数见表 1。

本次探地雷达探测采用剖面法,即地质雷达发射天线和接收天线沿测线同步移动的测量方法。依当地环境和探测目的选



图 1 无量桥拱券局部详图

Fig. 1 Partial details of Wuliang bridge arch

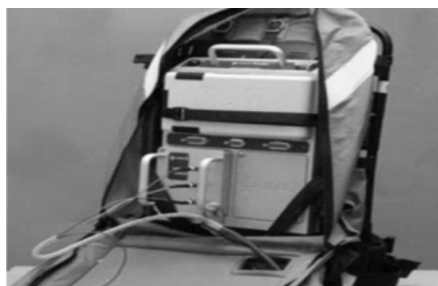


图 2 探地雷达主机

Fig. 2 Ground penetrating radar host

用100、250 MHz天线进行探测,探测结合现场具体情况,确定了试验探测的工作参数。采用100 MHz天线探测时,采样间距0.05 m,采样间隔0.25 ns,时窗400 ns、叠加次数64次;采用250 MHz天线探测,采样间距0.05 m,采样间隔0.2 ns,时窗200 ns、叠加次数64次。物探测线的布设,即把探测范围分为桥面东西桥台布置雷达测线。这种方式能准确描述测线下方各反射界面的形态。采用多次叠加、连续扫描方式进行野外实测,并对有怀疑的位置进行复测,以确保资料完整、可靠。

表1 探地雷达的仪器参数

Table 1 Instrument parameters of GPR

参数	配置	参数	配置
脉冲重复频/kHz	10~200(标准100)	A/D转换	16
样点数/道	128~8192	迭加次数	1~32 768(自动叠加)
采样频率/GHz	0.4~100	信号稳定性/ps	<100
通讯方式	ECP	通信速度/(KB·s ⁻¹)	>700
数据传输率/(KB·s ⁻¹)	40~400	触发方式	手动
内置计算机	摩托罗拉683xx	功耗/W	25
工作温度/℃	-20~50	环境标准	IP67
供电电压/V	8		

1.3 探地雷达数据处理

数据处理软件系统流程为:雷达数据采集—预处理—反演计算,如图3所示。

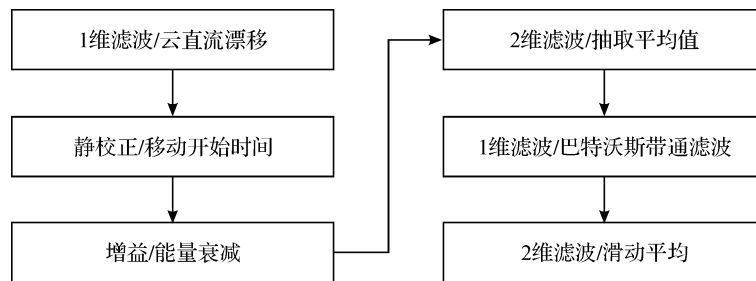


图3 数据处理流程图

Fig. 3 Data processing flow chart

该处理软件的主要处理功能为:

- 1)分低频和高频来处理突出主频的有效信号;
- 2)通过对邻近道的不同位置的平均值,减少杂乱回波,改善成像的背景;
- 3)自动时变为增益用来补偿物体的吸收或者抑制杂波的产生;
- 4)带通滤波可以有效地过滤低频振荡和高频噪声等不利成分,水平滤波则用来减少背景噪声的产生;
- 5)反褶积是一种特殊的滤波方法,主要用于减少探地雷达反射次数,以提高数据的垂直分辨能力。

2 探测方法与数据分析

基于探地雷达的工作原理,笔者分析其数据采集、图像处理与分析的方法,并结合大佛寺无量桥的实例,开展探地雷达在文物古迹无损探测中的应用研究,主要工作如下:

系统地说明探地雷达在文物古迹应用中理论基础和相关原理,并重点对探地雷达的数据采集、图像处理和分析进行较为深入的研究,并进行时间剖面上反射波波形特征的比对,找出雷达数据剖面上相应的隐患位置,以脉冲反射波的波形形式记录,采用波形或灰度显示探测雷达剖面图,但也不可避免地接收到各种干扰信号。而干扰波一般都有特殊形状,易于辨别和确认。常见的波场特征也有埋藏物的波场特征、松散带波场特征、脱空区波场特征,为数据与图像的处理提供了依据。

对原始采集数据进行处理、分析与计算(时深转换,采用经验数值0.1 m/ns),根据采集信号的波形、

振幅、频率,推测出桥腹填土的密实情况并把异常位置作总结。以东平台雷达探测图像(如图 4),雷达图像及异常解释如下:

从地质雷达图像上分析判断,260 ns 左右有一组强反射层,推断为后期浇筑混凝土与早期桥台分界所产生的强反射。300 ns 左右有一组强反射层,推断为桥腹填土的界面反射,桥腹填土层位近似为水平分布,可连续追踪;测线水平方向 4.0~5.5 m

段,反射时间在 260~300 ns,对应深度 2.8~4.5 m 范围内有强反射层,在此反射层内,波组明显存在错断,反射较杂乱,反射层位增多,推断该范围土层存在不密实松散区域。对各条测线综合分析,发现 8 条测线共有 9 处不密实松散区域,各测线不同位置的不密实情况统计如表 2 所示。东桥台松散不密实区域分布如图 5 所示,西桥台松散不密实区域分布如图 6 所示。

表 2 各测线不同位置的不密实情况统计

Table 2 Non-dense situation statistics of the survey lines at different locations

m

测线编号	不密实区域(按测线里程统计)	影响深度范围	备注
DP101	4.0~4.9	2.6~4.5	东侧平台
DP102	4.0~5.5	2.8~4.6	
DP107	2.1~3.6	2.5~4.4	
DP111	4.3~5.7	3.5~5.5	
DP112	1.3~2.3、4.4~5.5	3.0~4.6、3.4~5.2	
DP115	0.8~6.2	3.0~5.5	
DLY1	8.2~10.0	1.0~2.5	东侧立面腰线位置
XP115	3.6~5.2	3.5~5.8	西侧平台

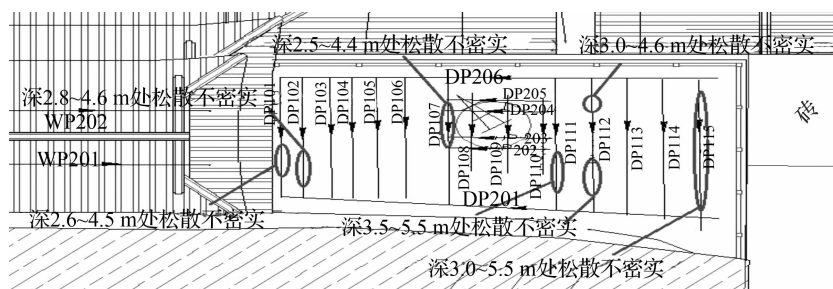


图 5 东桥台松散不密实区域分布

Fig. 5 Distribution of loose and non-dense area in east bridge abutment

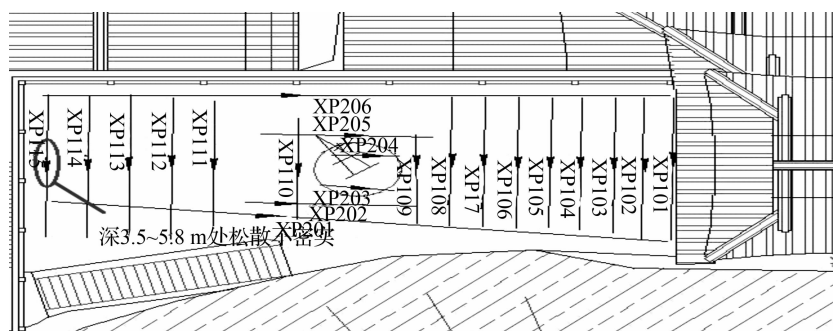


图 6 西桥台松散不密实区域分布

Fig. 6 Distribution of loose and non-dense area in west bridge abutment

通过本次探地雷达探测,发现:

1) 所探测测线中,在测线控制范围内,土层为填土,填料较杂,反射杂乱,无连续追踪层位,属于非基岩层。所探测测线中,有 8 条测线共发现 9 处异常区域,主要分布在东侧桥面,其中塔两侧各有 1 条测

线,中间段有3处,最左端有1处,经综合分析,均为不密实区域。

2)所探测测线中,经幢下局部测线显示无连续追踪层位,说明土层不均匀,填料不均匀,局部松散不密实。

3)所探测测线中,在测线控制范围内,未探测到明显的孔洞区域及基岩层(推测基岩尚在探测深底范围之外)。

4)在立面测线中,由于砌石中空隙较多,使层间反射增强,影响了砌石后面密实度的判断,但是在有效探测深度范围内(约2~3.5 m)并无大面积空鼓存在,而在逍遥楼内,无量桥桥面上2条测线中,未发现异常。

3 结 论

在大佛寺无量桥底座应用探地雷达对其密实度进行探测,同时结合现场勘察,发现东桥台东端为自由散水,排水系统不够完善;东桥台侧墙条石开裂、剥落等风化严重;拱底有贯通拉脱缝,局部券石断裂;内券石表面粉刷层剥落。根据安全评估得出,无量桥现主要安全隐患点为东桥台侧墙、东桥台上方经幢、桥拱券,其中桥拱券的安全程度相对较轻。无量桥安全隐患的根源为渗水和水土流失。虽然探地雷达在地表检测、文物考古和地形勘探等领域中都发挥着作用,但其真正优势并没有完全发挥出来。首先,探测的深度和自身的分辨率之间的矛盾愈来愈明显;其次,介质内部不同的均匀差异性导致了数据资料获得的速度不理想;最后,单发单收的数据采集方式提供的信息量也十分有限。

上述问题的解决方法将会是今后探地雷达在文物古迹保护应用的重点研究方向。随着科技的进步和人们认识水平的提高,探地雷达的设备及技术会越来越完善,在文物古迹中的应用将会进一步发展,成为文物古迹无损探测的重要手段,从而为文物古迹的保护工作提供科学依据。相信探地雷达的发展也会为不可移动文物保护与城市建设的共赢之路带来更大的帮助^[17]。

参考文献:

- [1] 孙跃杰,刘丰军,冯柯.历史名城洛阳的地下空间开发与文物保护研究[J].四川建筑科学研究,2014,40(2):287.
- [2] 彭志贵.文物古建筑群消防安全及火灾扑救准备工作[J].四川建筑科学研究,2015,41(2):326.
- [3] 陈义群,肖柏勋.论探地雷达现状与发展[J].工程地球物理学报,2005,2(2):149.
- [4] 黄志义,方云,张新鹏,等.基于探地雷达/红外热成像的地下墓室渗水机理及应用研究[J].科学技术与工程,2014,14(10):140.
- [5] 汪春香.探地雷达在古建无损探测中的应用研究[D].北京:中国地质大学,2010.
- [6] 杨涛.探地雷达和红外热像仪在西藏寺院和敦煌石窟空鼓壁画保护中的应用[D].兰州:兰州大学,2009.
- [7] 刘澜波,钱荣毅.探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具[J].地球物理学报,2015,58(8):2606.
- [8] 付世虎.基于探地雷达的砖石类结构灌浆修复质量研究[D].扬州:扬州大学,2013.
- [9] ZOUBIR A M, CHANT I J, Brown C L, et al. Signal processing techniques for landmine detection using impulse ground penetrating radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(1):41.
- [10] 方云,翟国林,乔梁.探地雷达探测技术在奉先寺保护工程中的应用[J].物探与化探,2014,38(4):815.
- [11] 穆保岗,别倩,刘东华,等.多种无损检测技术在文物保护中的综合应用研究[J].特种结构,2012,29(5):116.
- [12] 梅宝,邓世坤,胡朝彬.探地雷达技术在云冈石窟维护中的应用[J].工程地球物理学报,2006,3(6):448.
- [13] 王亚清,武毅,查恩来.探地雷达技术在山海关古城墙隐伏缺陷探测中的应用研究[J].工程地球物理学报,2010,7(1):93.
- [14] 郭士礼,闫飞,朱培民,等.裂缝宽度探地雷达波场响应的数值研究[J].地球物理学进展,2016,31(4):1803.
- [15] 尹小波,张彬,邓继平,等.介电参数数值实验在探地雷达试验检测中的应用[J].重庆大学学报,2016,39(4):32.
- [16] 刘成禹,余世为.基于探地雷达单道信号处理的岩溶分析方法[J].岩土力学,2016,37(12):3618.
- [17] 陈伟,陈伟刚.探索城市建设与文物保护的共赢之路:广州光明广场设计反思[J].四川建筑科学研究,2012,38(4):249.