doi: 10.11720/wtyht.2024.0091

第48卷第6期

2024年12月

杨浩,邹杰,程丹丹,等.探地雷达在临海市古长城内部结构检测中的应用分析[J].物探与化探,2024,48(6):1741-1746.http://doi.org/10. 11720/wtyht.2024.0091

Yang H, Zou J, Cheng D D, et al. Application of ground-penetrating radar in detecting the internal structures of the ancient Great Wall in Linhai City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6):1741-1746.http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0091

探地雷达在临海市古长城内部结构检测中的应用分析

杨浩1,邹杰2,程丹丹1,于景兰1

(1.中国电波传播研究所,山东 青岛 266000;2.新疆公路桥梁试验检测中心有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:无损监测古建筑内部结构特征是进行文物保护的关键。为确定临海市古长城结构和墙体内部缺陷,本研究 利用 100 MHz 和 270 MHz 天线组合的探地雷达对长城不同方位上墙体结构进行了无损检测。检测结果表明临海 市古长城墙体结构分层情况明显,通过探地雷达信号反射图像发现,墙体内部缺陷反应清晰,存在内部疏松、缝隙、 脱空等内部病害隐患。研究表明探地雷达方法在此类古城墙结构和缺陷检测中结果可靠,研究结果可为古长城结 构保护提供技术支持。

关键词:临海市古长城;探地雷达;结构检测;缺陷检测;图谱分析 中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2024)06-1741-06

0 引言

长城是我国历史上极具代表性的古建筑之一。 多年来,由于种种自然以及人为原因导致古长城墙 体出现鼓包、掉块、沉降等问题。出于保护古建筑的 目的,维护单位需要定期对墙体缺陷情况进行观察 监测^[1],以便及时进行修缮处理。

目前,电法、磁法、地震波法等传统检测手段广 泛应用于结构检测中,但检测效率较低,而人为观察 只能看到表面破损而不能发现墙体内部缺陷^[2]。 古长城历经多朝修筑过程中,城墙内部存在空洞、脱 空、不密实等隐藏病害,对城墙结构安全监测带来了 隐患。但各类隐藏病害与周围墙体介质之间具有不 同程度密度、波速、电阻率、介电常数等差异,这些物 性差异为多种物探方法应用于城墙内部空洞脱空、 不密实等的探测提供了可能性^[3]。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是一 种利用高频无线电磁波来探测地下埋藏物结构和特 征的一种地球物理方法,具有无损、精度高、速度快 的优点,广泛应用于道路^[4-7]和古建筑^[8-10]结构病 害检测。前人研究^[8]表明,探地雷达适合在较为平整的城墙表面进行快速工作,能够对墙体下数米深度区域进行观测,同时也避免了对墙体的破坏。综上,利用探地雷达来对古长城墙体结构进行无损检测,对古长城结构安全隐患探测和文物保护工作具有重要意义。

1 探地雷达检测原理与方法

1.1 临海古长城结构特征

临海古长城^[11]总长 6 000 多米, 后经唐、宋、 元、明、清诸朝不断修筑增扩, 其主体部分一直留存 至今。城墙的主体结构清晰(图1): 唐代为泥夯土 墙,高 3 m 左右; 宋代在唐代夯土墙上加高 1 m, 在 里外边各加砌一砖半厚的包砖, 并在江边段城外前 砌 1 m 高的石砌护墙; 明代又在宋代的基础上加高 2 m, 里外各加砌了一砖半厚的包砖, 并且在结合部 位用条石平放拉结; 清代在明代的基础上又略作修 补加高(图 1b)。由于历史悠久和人为干扰较大, 现 在部分长城墙体呈现明显鼓包, 有砖块破损掉落, 墙 体内部也存在大量病害隐患, 如: 自然沉降、江边墙

收稿日期: 2024-03-19;修回日期: 2024-09-26

第一作者:杨浩(1992-),男,合肥工业大学,主要从事探地雷达技术应用工作。Email:1047219968@qq.com

基金项目:中国电波传播研究院所稳定支持科研经费资助项目(A132303219)

· 1742 ·





Fig.1 Schematic diagram of the main structure of Linhai Ancient Great Wall

体因发水而浸泡、白蚁筑穴、人为损坏、回填土未夯 实或垃圾回填等。

1.2 探地雷达检测原理

探地雷达是一种利用电磁波技术来探测地下物体的设备,通常由发射天线和接收天线组成。工作时通过发射天线发射高频电磁波,电磁波在地下介质中传播时,遇到具有不同介电属性的层面时,发生

电磁反射,由接收天线接收电磁反射(图2)。最后 通过计算电磁反射波的信号强度、时间和位置等参 数,可分析电磁波在介质中的传播特征和探测目标 体的相关信息^[12]。



图 2 探地雷达检测示意

Fig.2 Schematic diagram of GPR detection

线组成。工作 探地雷达的探测原理主要基于目标体埋深、电 滋波在地下介 磁波衰减系数和介电常数等几个关键因素,具体因 的层面时,发生 素及相关计算公式如表1所示。 表1 探地雷达探测原理的关键因素

Table 1 Key factors of GPR detection principle

因素名称	因素符号	相关公式	符号含义
埋深	h	$h = \frac{1}{2}vt$	<i>v</i> —电磁波波速,m/ns <i>t</i> —双程走时,ns
衰减系数	β	$\beta = 2\pi f \sqrt{\varepsilon \mu} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$	<i>f</i> —电磁频率,Hz μ—介质磁导率 ,H/m σ—介质电导率,mS/m
介电常数	ε _r	$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$	c—光速,3×10 ⁸ m/ns
反射系数	r	$r pprox rac{\sqrt{arepsilon_i} - \sqrt{arepsilon_{i+1}}}{\sqrt{arepsilon_i} + \sqrt{arepsilon_{i+1}}}$	/
水平分辨率	Δx	$\Delta x = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{2} \lambda H_0 + \frac{1}{16} \lambda^2}$	H_0 —垂直测距,m λ —电磁波波长,m
垂直分辨率	Δh	$\Delta h = \frac{1}{4} \lambda$	/

1.3 探地雷达检测技术的可行性

对于探地雷达发射的高频电磁脉冲而言,古长 城墙体介质是以位移电流为主的低损耗介质^[13]。 通过探地雷达原理可知,开展雷达探测技术工作的 前提条件是目标探测体与其周围介质之间必须存在 介电差异。因为不同时期修缮所用的材料和工艺不 同,所以古长城墙体之间的介电常数存在明显差异 (表 2)。墙体中的脱空、松动等缺陷处,会有空气夹 层或含水夹层的出现,同样也会形成明显的介电差 异。因此使用探地雷达对古长城墙体内部结构进行 探测是可行的。

表 2 不同介质相对介电常数

Table 2	Rolativo	normittivity	of	different	madia
Table 2	Relative	Dermittivity	OI I	amerent	meuia

	· · · · · · ·			
	电导率/	相对介	波速/	衰减系数/
开质	$(ms \cdot m^{-1})$	电常数	$(m \cdot ns^{-1})$	$(dB \cdot m^{-1})$
空气	0	1	0.3	0
水	10^{-4}	81	0.033	0.1
砂(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
砂(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	30	0.06	0.03~0.3
黏土(湿)	$10^{-1} \sim 1$	$5 \sim 40$	0.06	1~300
青砖	10^{-4}	7~9	0.1~0.12	0.03
墙体土	10^{-5}	9~14	0.08~0.1	0.03~0.06

1.4 探地雷达测线布置及参数设定

本试验根据古长城的结构特征共设计 3 条 GPR 测线(图 1c):沿墙体外侧墙壁水平方向(测线

1)、沿墙体正上方人行道纵向方向(测线2)、沿墙体 外侧墙壁竖直方向(测线3)。本次检测使用青岛 LTD-2600 系列探地雷达,采用 100 MHz 和 270 MHz 收发一体的屏蔽天线,其中两频率天线对应的参数 设定和探测深度见表3。

1.5 探地雷达数据处理与解释

1.5.1 探地雷达数据处理

探地雷达数据处理的一般过程:调节零点→去 支流漂移→数字滤波→去背景→滑动平均→增益调 节^[14],具体效果见图3。

			1 5			8	2	
测线	天线频率/MHz	时窗/ns	采样频率/(sa	$mples \cdot s^{-1}$)	采样间隔/cm	叠加次数	触发方式	探测深度/m
1	270	80	12	8	1	16	距离触发	2~3
2	100	200	12	8	1	16	距离触发	5
3	270	80	12	8	1	16	距离触发	2~3
		(a) $0\frac{20}{20}$	2 24 26 28	距离 30 32	5/m 34 36 38	40 42 44	46_0	
		20-		-	1 30		-1	
		su 40-		- marking			-2 E	
		更 至 60-					-3 账	
		80-					-4	
		100					-5	
		(b) 0^{20} 22	2 24 26 28	距离 30 32	5/m 34 36 38	40 42 44	46 0	
		1			#	1000		

表 3 不同测线天线频率和探地雷达参数设定 Table 3 Antenna frequency and GPR parameter settings for different survey lines

图 3 探地雷达数据处理前(a)后(b)对比示意

Fig.3 GPR data processing before(a) and after(b) comparison diagram

1.5.2 探地雷达数据解释

根据获得的探地雷达图像,利用反射波振幅、频 率、相位、同相轴连续性和多次反射等异常特征可对 墙内不良隐患进行科学的解释^[9,13]。其中,振幅能 够体现电磁波反射的强度:频率可以表示不同频段 的衰减情况;相位能判断两种介质间的介电属性差 异;同相轴连续性则可以表征异常点分布的特征;而 多次反射则能够反应底部介质反射能力的情况。

20

60

80

100

时间/ns 40

2 结果与分析

2.1 长城墙体结构层检测与分析

选择临海古长城一典型处,进行外侧墙体结构 层的探测。其中,测线沿外侧墙体水平方向进行,探 测天线采用 270 MHz, 探测结果如图 4 所示。由图 可知, 雷达数据经处理后, 图像中能够清晰地看到2

条高亮,同相轴连续且呈条带状的强反射信号,这是 典型的结构分层特征。根据以上2条层位分界线, 可将探测结果分为3个结构层,分别为层位1、层位 2 和层位 3。结合古长城结构特征和钻心取样可知, 层位1为明、清时期修筑的砖墙层,厚度约为100 cm; 层位 2 为宋代修筑的砖墙层, 厚度约为 100 cm; 层位3为唐代泥夯土墙层,因探测深度限制,层位3 的厚度无法定量估算。2条层位分界线虽然整体特 征相似,但局部也存在一些差异,显然层位1对应的 分界线,其同相轴存在部分不连续的现象。这主要 是由于层位1的砖墙相比层位2的砖墙更容易受到 外界环境的侵蚀和破坏,而受环境侵蚀及破坏后部 分砖墙易发生变形和鼓包,变形和鼓包使整个砖墙 的连续性减弱,所以层位1对应的分界线,其同相轴 存在部分不连续的现象。

深度/m 3



图 4 外侧墙体结构层探测结果

Fig.4 Detection results of outer wall structural layer

2.2 长城墙体内部病害检测与分析

长城墙体内部病害通常不易发现,而发现表观 缺陷时,墙体内部通常已形成较大的缺陷。根据图 1c所示的测线布置对墙体结构进行了3个方向的 立体检测,其中测线1、测线2和测线3的检测结果 如图 5~7所示,根据3条不同方向测线的检测结 果,全方位对长城墙体内部病害进行分析。 图 5 为 270 MHz 天线按照测线 1 在外侧墙体水 平方向的检测结果。由图可知,在水平方向 94~98 m 范围内墙体存在明显结构层错断和缺失, 雷达图 像上具体表现为反射信号明显减弱, 同相轴不连续。 相比左右两侧层位曲线的完整连续, 分析该处存在 结构扰动, 而造成墙体结构层扰动主要是由于结构 沉降或存在翻修。



图 5 测线 1 探地雷达检测结果 Fig.5 Map of GPR detection results for survey line 1

图 6 为 100 MHz 天线按照测线 2 沿城台上方人 行道纵向检测的结果, 雷达结果采用彩色显示方式, 低幅反射为浅黄绿色, 高幅反射为深蓝、紫红色。由 图 6 可知 0.5~2 m 深度范围内存在明显的反射信 号, 且根据反射信号振幅的强弱, 可将整个雷达检测 结果划分为2个区域,分别为区域1和区域2。区域1振幅相对较低,仅有小部分呈高幅反射,且在测线水平距离18m处有明显的脱空病害,其雷达图像主要表现为振幅较强,同相轴连续,且具有多次反射特征;区域2呈大面积高幅反射,其中测线水平距离



Fig.6 Map of GPR detection results for survey line 2

6期

32~42 m 处存在典型的疏松特征, 雷达图像上主要 表现为振幅大, 反射信号强, 波形中断、杂乱, 且相位 不连续; 区域2 右侧下方标记处存在双曲线强反射, 两端有类似边界的斜向长条状反应, 且具有多次反 射特征, 结合现场实际检测情况, 该处为城门洞。

图 7 为 270 MHz 天线按照测线 3 沿外侧墙体自 下而上检测的雷达图像, 雷达图像整体表现为低幅 反射, 期间夹杂少量同相轴错断的条带状反射, 反射 振幅较小。根据雷达图像特征可知该测线墙体结构 整体性较好,但通过振幅反应的强弱可以发现雷达 图像中同样存在部分病害。深度 1.5 m 处与周围信 号对比明显,此处振幅反映强烈,反射信号较强,波 形呈条带状,具有明显结构疏松的特征,分析墙体内 部结构疏松主要由于墙体沉降挤压内部石块所致; 深度 0.8 m 处存在一条夹空的缝隙,该处显著区别 于周围的高亮区域,但相比脱空,高亮较浅。



图 7 测线 3 探地雷达检测结果 Fig.7 Map of GPR detection results for survey line 3

3 讨论与结论

探地雷达探测深度和精度与天线频率有关,通 常表现为天线频率越高,探测深度越浅,但分辨率越 高:反之,天线频率越低,探测深度越深,但分辨率越 低^[10]。针对古长城的无损检测,国内学者^[3]采用 400 MHz 和 100 MHz 天线对城墙和城台进行结构检 测,并对典型病害的分布进行了描述,但未进一步解 释各病害在雷达图像中的特征。本文采用中、低频 天线(100 MHz 和 270 MHz)结合,获取了临海市古 长城墙体不同位置下介质的相关参数,并根据3条 不同方向的测线对临海市古长城墙体内部结构病害 隐患进行了全面检测,检测结果证实了临海市古长 城城墙结构为3层。根据雷达图像中的不同反射特 征,有效地识别了古长城内部的典型病害,并结合取 心结果进一步分析和验证了典型病害的成因,基于 雷达图现象分析表明墙体主要病害为结构疏松、空 洞和缝隙。本文不仅为检测古长城内部陷提供了参 考,还丰富了探地雷达技术的应用场景。

参考文献(References):

 [1] 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):93-96.

Wang Y Q, Wu Y, Zha E L. The application of GPR to the detec-

tion of defects of the Shanhaiguan wall[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2010,7(1):93-96.

- [2] 宗鑫,王心源,刘传胜,等.探地雷达在地下考古遗存探测中的 实验与应用[J].地球信息科学学报,2016,18(2):272-281.
 Zong X, Wang X Y, Liu C S, et al. Experiments and applications of ground penetrating radar in the investigation of subsurface archaeological interest [J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18 (2):272-281.
- [3] 刘国辉,董茂干,张建南.探地雷达技术在长城墙体检测中的应用[J].工程勘察,2006,34(6):63-66.
 Liu G H, Dong M G, Zhang J N. Application of ground penetrating rader to wall-body inspecting of the great wall [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying,2006,34(6):63-66.
- [4] 刘岩.探地雷达在水工建筑地基病害检测中的运用[J].黑龙江 水利科技,2018,46(11):130-131.

Liu Y.Ground penetrating radar application in defect detection of hydraulic structure foundation [J].Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2018, 46(11); 130–131.

- [5] 李长生,杜翠,刘杰,等.基于探地雷达的路桥过渡段病害检测 识别方法[J].铁道建筑,2022,62(8):19-22.
 Li C S, Du C, Liu J, et al. Detection and identification method of subgrade-bridge transition section diseases based on ground penetrating radar[J].Railway Engineering,2022,62(8):19-22.
- [6] 陈裕权.探地雷达法在公路隐性病害检测中的应用[J].大众标准化,2022(17):170-172.
 Chen Y Q.Application of ground penetrating radar method in high-

way hidden disease detection [J]. Popular Standardization, 2022 (17):170–172.

[7] 杨美群,邹友泉,刘静.探地雷达在高速公路路面隐性病害检测的应用[J].公路,2022,67(8):86-91.

Yang M Q,Zou Y Q,Liu J.Application of ground penetrating radar in detection of hidden diseases on expressway pavement[J].Highway,2022,67(8):86-91.

[8] 朱楠男,李家存,叶培盛.探地雷达在古墓遗址探测中的应 用——以北京市通州区古墓群探测为例[J].物探与化探, 2017,41(3):577-582.

Zhu N N, Li J C, Ye P S. The application of the ground penetrating radar(GPR) to the detection of Ruins of ancient tombs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(3):577-582.

- [9] 王亮,王绪本,李正文.探地雷达在金沙遗址考古探测中的应用研究[J].物探与化探,2008,32(4):401-403.
 Wang L, Wang X B, Li Z W.The application of ground penetrating radar to the archeological exploration of Jinsha Ruins[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2008,32(4):401-403.
- [10] 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.

[11] 鹿金秒.临海古长城江南八达岭[J].浙江国土资源,2007(8): 58-59.

Lu J M.Linhai ancient great wall Jiangnan Badaling [J].Zhejiang Land & Resources ,2007(8):58-59.

[12] 曾昭发,刘四新,冯晅,等.探地雷达原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2010.

Zeng Z F, Liu S X, Feng X, et al. Principle and application of ground penetrating radar [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[13] 赵文轲.探地雷达属性技术及其在考古调查中的应用研究 [D].杭州:浙江大学,2013.

Zhao W K.The study of ground penetrating radar attribute technology for archaeological prospection [D].Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[14] 张春城.浅地层探地雷达中的信号处理技术研究[D].成都:电子科技大学,2005.

Zhang C C. Research on signal processing technology of shallow subsurface ground penetrating radar[D].Chengdu;University of Electronic Science and Technology of China,2005.

Application of ground-penetrating radar in detecting the internal structures of the ancient Great Wall in Linhai City

YANG Hao¹, ZOU Jie², CHENG Dan-Dan¹, YU Jing-Lan¹

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266000, China; 2. Xinjiang Highway and Bridge Test and Testing Center Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: Non-destructive testing of the internal structural characteristics of ancient buildings is the key to preserving cultural relics. To determine the structures and internal defects of the ancient Great Wall in Linhai City, this study performed non-destructive testing of the wall structures in different orientations using a ground-penetrating radar (GPR) combining 100 MHz and 270 MHz antennas. The testing results show significant structural stratification in the ancient Great Wall. The GPR signal-reflected images reveal clear internal wall defects like pores, cracks, voids, and other hidden dangers. This study demonstrates the reliability of the GPR in detecting structures and defects of ancient walls, there by providing technical support for the structural protection of the ancient Great Wall.

Key words: ancient Great Wall in Linhai City; ground-penetrating radar; structural testing; defect detection; atlas analysis

(本文编辑:叶佩)

