

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210328001

砖石质不可移动文物本体监测/检测技术 研究进展*

吴宜峰¹, 赵金鑫¹, 乔云飞², 李爱群^{1,3}, 邓扬¹

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 中国文化遗产研究院, 北京 100029;
3. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 砖石质不可移动文物作为历史文化的重要组成部分, 一直受自然灾害、周边环境以及人类活动的影响, 其本体健康状况始终处于风险之中。鉴于此, 首先总结了砖石质不可移动文物本体的主要病害及成因, 包括变形、渗漏水、风化与内部劣化; 然后针对不同病害综述了对应的多种监测/检测技术的原理及特征, 并根据实际工程案例进一步分析了各监测/检测技术的应用方法; 在此基础上对比了各技术的优势与缺陷并给出了实用性的建议。研究发现, 针对砖石质不可移动文物本体上述病害的监测/检测技术已取得了一系列进展, 监测设备种类多、特征不一, 鉴于砖石质不可移动文物的易损性与不可代替性以及各种技术自身的局限性, 在技术选择时, 需要结合监测的多样化需求, 如无损、实时、低成本等, 确定出最优的监测方案。最后, 根据现有的监测/检测技术研究基础, 提出了灵活调整监测策略、提高监测/检测技术的普适性、加强监测/检测内容的针对性、探索多技术的联合应用、注重关键技术与协作模式的创新等若干需要继续探索的问题。

关键词: 砖石质不可移动文物; 监测/检测技术; 监测内容; 技术原理; 技术应用方法

中图分类号: TU196 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0623-15

A Review of Monitoring/Detecting Technology for Immovable Brick and Stone Cultural Relics

WU Yifeng¹, ZHAO Jinxin¹, QIAO Yunfei², LI Aiqun^{1,3}, DENG Yang¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Chinese Academy of Cultural Heritage, Beijing 100029, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The immovable brick and stone cultural relics, as an important part of history and culture, are continuously affected by natural disasters, the surrounding environment, and human activities, so the health state of these relics is always in danger. Therefore, the author first summarizes the main diseases, as well as their causes of the formation, of immovable brick and stone cultural relics, including deformation, leakage, weathering, and inner degradation. The principles and characteristics of various monitoring/detecting technologies for different diseases of the immovable cultural relics are then explored, and the application methods of each technology are further presented according to many en-

* 收稿日期: 2021-03-28; 修回日期: 2021-06-25

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1520804)、国家自然科学基金(51908024, 51978033)、北京建筑大学建大英才(JDYC20200310)资助

作者简介: 吴宜峰(1990—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构防灾减灾方面的研究。E-mail: wuyifeng@bucea.edu.cn

gineering cases. After that, the advantages and disadvantages of each technology are compared and practical suggestions are given. Results show that a series of progress has been made in the monitoring/detecting technology for the above diseases of immovable brick and stone cultural relics. Various types of monitoring devices with different features have been used. However, due to the vulnerability and irreplaceability of these relics, and the limitations of monitoring technology itself, the determination of the optimal scheme for the monitoring technology needs to consider the diversification of demand of monitoring, such as no-destructive, real-time, low cost. Finally, according to the existing studies on monitoring/detecting technology, several issues that need to be explored were put forward, such as flexibly adjusting monitoring strategies, improving the universality of monitoring/detecting technology, strengthening the pertinence of monitoring/detecting content, exploring the joint application of multiple technologies, and focusing on innovation of key technologies and collaboration models.

Keywords: immovable brick and stone cultural relics; monitoring/detecting technology; monitoring contents; technology principle; technology application methods

引 言

随着社会文化的发展,尊重历史文化的理念逐渐深入人心,遗产保护已成为时代的焦点。联合国教科文组织发布了《保护世界文化和自然遗产公约》,我国则颁布了《国家“十三五”文化遗产保护与公共文化服务科技创新规划》。当下,遗产保护得到我国各界人士的一致认可,政府与非政府组织、高校等各界学者都积极投身于这一事业。

砖石质不可移动文物主要是指以砖、石为材料的历史遗物,包括石窟寺及石刻、砖石塔、砖石桥、岩壁、城墙、岩墓等多种类型。我国的砖石质不可移动文物分布相对集中在“七大水系”周边,数量众多。经过数百年的历史演变,文物本体出现了不同程度的变形、渗漏水、风化、内部劣化等问题,且大风、地震、洪涝等自然灾害一旦发生,会进一步加剧上述病害的发展趋势,极端状态下存在永久性损毁的巨大风险。鉴于砖石质不可移动文物的易损性、不可替代性,对其本体状态及病害进行监测/检测保护,是进行此类文物自然灾害风险评估管理的关键环节。

目前,众多监测/检测技术作为文物预防性保护的重要手段,已被广泛应用于砖石质不可移动文物的日常维护中。但由于文物的珍贵性、易损性等特性,监测/检测技术对文物本体及病害的针对性、适宜性等问题仍值得深入探讨。因此,本文从砖石质不可移动文物出发,探析其常见病害及成因,明确各种病害的监测内容,综述监测/检测技术及技

术特征,对比不同技术的优劣,以期对砖石质不可移动文物监测/检测技术的选择提供参考依据。

1 砖石质不可移动文物病害及成因

1.1 变形

砖石质不可移动文物的沉降、倾斜、裂缝、鼓胀等均可归结为本体变形,以下分别对其进行分析。

沉降主要有垂直位移和水平位移两种形式,产生的原因主要包括:(1)古代缺少勘测手段,无法准确判断土质类型,只能依靠经验推断承载力,易产生偏差^[1];(2)人工填土及黄土地区,湿陷性较大,在降雨影响下,土体结构遭受破坏,发生变形^[2];(3)结构周边有工程活动,影响结构基础的土体稳定性^[3]。

倾斜可分为整体倾斜和局部倾斜,产生的原因主要包括:(1)地基的不均匀沉降;(2)大风、地震等致灾因子的动力作用导致文物本体的倾斜程度加剧^[4];(3)人类活动的影响,如过量采取地下水、顶管与盾构施工^[5]等。

裂缝可分为不均匀沉降裂缝、温差裂缝、结构裂缝,产生裂缝的主要原因包括以下三种:(1)地基土体性质不同、承受荷载不均匀、工程活动的影响等导致结构各部分变形存在差异,受力不均产生不均匀裂缝^[6];(2)砖石材料热胀冷缩的特性,温度变化导致结构变形,受外界约束影响,结构本身出现很大的拉应力,形成不同形式的裂缝^[7];(3)结构本身设计不合理,承载力不足导致裂缝产生。

鼓胀包括鼓胀变形、面层空鼓,其原因主要为三点:(1)土压力作用导致墙体外凸^[1];(2)降水、通

风等环境因素的影响,导致面层空鼓^[8]; (3)结构含水率增高,透气性较差,温度增加、降雨产生的水气无法及时挥发,导致面层空鼓^[9]。

1.2 渗漏水

渗漏水对砖石质不可移动文物的影响尤为严重,其主要病害形式有结构面霉点、明显的渗漏险情、冰胀应力裂缝等。渗漏水的主要成因有以下两种:(1)砖、石等原材料规格存在差异,砌筑泥浆流失^[10],形成渗漏孔道;(2)地基基础的不均匀沉降、施工工艺不当导致结构产生裂缝并形成渗水通道^[11]。

1.3 风化

砖石质不可移动文物风化的主要形式有表面粉化侵蚀、泛盐、表面翘起、表面溶蚀、孔洞状剥落等。风化的成因主要有以下4种:(1)砂浆中存在易导致风化的Na、K、Cl、S等元素,在砖石中形成可溶盐^[12]; (2)受光照、温湿度等孕灾环境的影响,使结构失去原有强度,产生酥碎、剥落、粉化^[13]; (3)大风等致灾因子长年累月的对结构侵蚀^[14]; (4)砖石以及砌筑材料本身强度不足^[15]。

1.4 内部劣化

砖石质不可移动文物内部劣化的主要表现为结构内部产生裂隙。主要原因有两点:(1)温度变化导致结构内外温差过大,产生的温度应力使结构产生劣化^[16]; (2)冻融作用下,形成冻胀应力,导致结构内部劣化。

2 砖石质不可移动文物监测内容与 技术

2.1 变形监测

早期不可移动文物的变形监测主要采用传统工程测量技术,随着科技的发展,传感器、近景摄影、三维激光扫描等新技术在砖石质不可移动文物的预防性保护中得到应用,在提高精度的同时,也大大节省了人力。现对上述监测技术方法综述如下。

2.1.1 传统工程测量

工程测量从早期的钢尺量距到测距仪、水准

仪、全站仪、测量机器人,从常规测量到精密测量,从人工量测到计算机辅助,实现了从点到体、从静态到动态的发展。因其测量规范化、精度高等优势,已被广泛应用于砖石质不可移动文物的变形监测。以下就监测砖石质不可移动文物沉降、位移、鼓胀等的传统工程测量技术与实现方法作进一步阐述。

水准仪通过测量两点之间的高差实现对沉降的监测,本节以应县木塔砖石塔基沉降监测为例^[17]说明水准仪监测方法。首先以9个平面控制点(图1, K1~K9)建立平面控制网,以5个水准点(图1, BM1~BM5)建立独立的高程控制网;依据《建筑变形测量规范》^[18]采用闭合水准方法对塔基的内外圈测点进行测量,定期观测沉降测点。C.Castagnetti等^[19]利用Modena教堂(意大利)周边的24个基准点构建控制网,采用大地水准测量的方式对该结构进行沉降监测。监测结果表明,2013~2016年,结构的沉降速率为1.19 mm/a。

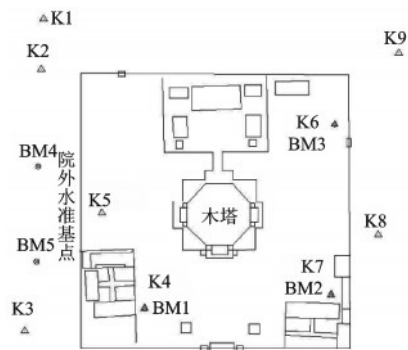


图1 平面、高程控制点分布

Fig.1 Distribution of horizontal and vertical control points

全站仪通过测取观测点的三维坐标实现对结构变形的监测,本节以午门城台^[1]三维变形监测为例说明全站仪监测方法。首先于城墙布置测点(图2),建立平面、高程控制网,然后采用全站仪设站,利用基准点对观测点实施周期监控,获得城墙测点的三维坐标变化,进而确定城墙变形的敏感区域(图2)。M.Ercoli等^[20]采用徕卡TCA2003全站仪对Amelia(意大利中部)古城墙进行局部变形监测,得到墙体表面的变形趋势,并结合三维激光扫描与探地雷达得到的墙体厚度、裂缝、材料等内部信息评估墙体的稳定性。

测量机器人通过自动搜寻目标并识别对准,进行角度、距离、坐标的测量,得到三维坐标或影像信

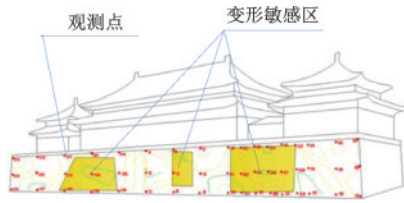


图2 午门台北侧城墙三维变形敏感区域

Fig.2 Sensitive area of three dimensional deformation of north wall of Meridian Gate

息,加以保存和传输。本节以左江花山^[21]岩壁危岩体监测为例,简述测量机器人的监测方法。首先对仪器进行设置,建立平面、高程控制网。然后选择测量方式,测量方式可分为被动式和主动式测量。该项目采用以被测体自身光亮点为标识的主动式测量方法(图3),此外还可采用于被测体安装棱镜的被动式测量方法。测量机器人在马达系统的动力支持下于水平及垂直方向上旋转,影像系统内嵌在镜头中,用于跟踪和寻找目标。测量初期采用人工方式观测,测量机器人根据人工观测结果进行机器学习,然后通过 Survey Controller、APSwIn 等软件控制测量机器人进行全自动监测,所得数据传输至计算机处理系统,得出被观测体的变形结论。本轮观测期间岩体最大水平位移为 1.5 mm、最大竖向位移为 2.0 mm。



图3 测量机器人(左)监测危岩体(右)

Fig.3 Monitoring dangerous rock (right) by surveying robot (left)

从上文传统工程测量技术的阐述可以看出,其在砖石质不可移动文物的变形监测中占有重要地位,但也存在一些缺陷。如采用水准仪、全站仪测量时,对光线、场地要求较高,测量时需要保持光学通视,在对复杂结构的监测测量时常需频繁换站,工作量较大。而且,基于水准仪、全站仪等的传统工程测量方法需人工操作,无法在线实时获取结构变形信息,时效性不足,测量机器人则无此问题。

2.1.2 传感器

传感器技术作为实现自动化监测的重要环节,

其结果精确、灵敏度高、数据实时传输,为砖石质不可移动文物的监测带来了变革,也为完整保存历史遗产提供了先进的技术方法。

传感器主要用于包括裂缝、倾斜、位移、沉降等在内的变形监测。周口店北京人遗址管理处^[22]利用振弦式裂缝传感器对猿人洞南侧壁立面裂缝进行监测,数据显示 2016~2017 年监测期间,南侧壁裂隙发育状况变化量小于 2 mm;R.Ceravolo 等^[23]利用裂缝计对 Regina Montis Regalis 大教堂(意大利)进行了 10 年的静态监测,建立了裂缝开合程度与温度变化、季节更替的演变趋势之间的联系。

本节以意大利罗马竞技场侧翼的裂缝监测^[24]为例呈现传感器的监测方法。传感器的布置如图 4 所示,其安装通常采用锚杆灌浆安装,无法安装灌浆锚杆或需快速安装时可采用膨胀螺栓、普通螺栓安装。灌浆锚杆式安装和螺栓式安装分别如图 5、6 所示。首先根据裂缝的开合程度设置合适的距离并钻孔,孔深约 75(50)mm,孔径约 12.5 mm,钻孔完成后设置锚杆或螺栓,安装完成后固定裂缝传感器。本次监测采用普通螺栓固定裂缝传感器,监测数据经传输系统上传至监测系统。此外,该项目还建立了静态位移同动力响应之间的联系,以探究结构受震(振)动的影响程度。

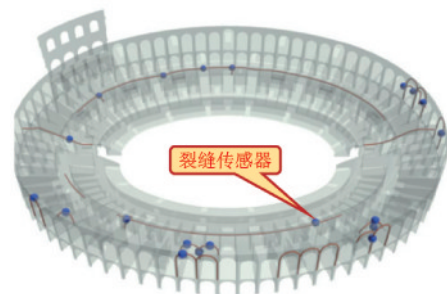


图4 罗马竞技场裂缝传感器布置

Fig.4 Layout of crack sensors in Rome Arena

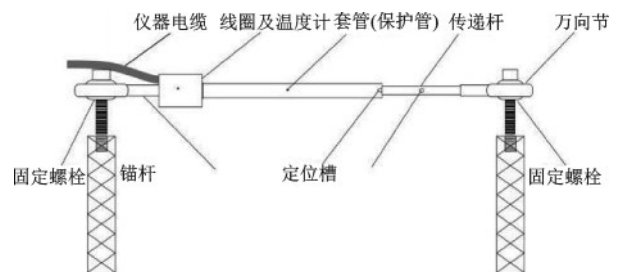


图5 锚杆固定传感器

Fig.5 Sensors fixed by anchors

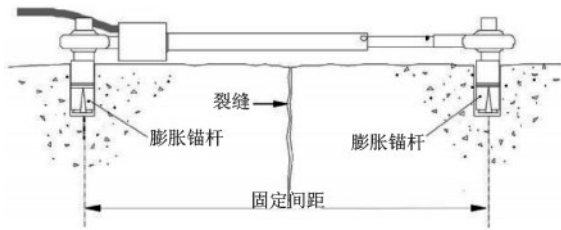


图6 螺栓固定传感器
Fig.6 Sensors fixed by bolts

对于倾斜监测多采用倾斜仪或倾角计。D.Sabia等^[25]利用倾角计对 Ghirlandina 钟楼(意大利)进行了长期监测,建立了倾斜同环境振动之间的联系;此外,比萨斜塔^[26]、Portogruaro 市政钟楼^[27]中均布置了倾角计对其倾斜进行监测,并将获得的数据实时传输至监测中心。明孝陵方城明楼城墙中安装了倾斜仪以监测其倾斜程度,安装方法如图7所示。安装好测斜管后,根据测量方向放入倾斜仪,倾斜仪探头置于测斜管管底的基准点,然后向上逐段测量得到测斜管每段轴线与铅垂线之间的倾角和该段的水平位移值,累加得出测斜管总水平位移,并描绘出测斜管随被测结构变形的曲线。



图7 倾斜仪现场测试
Fig.7 Field testing of the inclinometer

对于位移监测多采用位移传感器或位移计。M.Gioffre等^[28]采用位移传感器对 Ponte delle Torri 塔桥(意大利)4#桥墩位移进行监测,结果表明其位移变化幅值小于0.02 mm,且受日温影响较小。鼓浪屿毓德女校利用位移计监测其结构位移情况,位移计布置如图8所示。当被测点位发生位移时,通过锚头带动测杆,测杆带动位移计拉杆来确定被测体的位移。安装前应根据测量点数确定钻孔的孔径并根据钻孔的材质类型选择合适的锚头,根据需要在钻孔的不同深度处布置锚头。

对于沉降监测可采用静力水准仪,本节以鼓浪屿英国领事公馆旧址沉降监测为例说明其监测方法。首先,选取沉降观测点并布设压力传感器,利

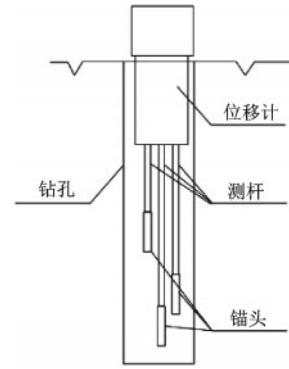


图8 位移计安装示意图
Fig.8 Installation diagram of displacement gauge

用通液管将压力传感器与储液箱连接,形成内压自平衡系统,测量测点处压力,并将之转换为水位,通过水位变化得到测点沉降情况。本次监测于公馆东南角布设沉降监测测点,用以监测结构的沉降变化。

目前,传感器已广泛应用于我国的文保事业,但同样存在部分缺陷。由上述案例可以看出,基于传感器开展的实时监测可能需要在结构本体打孔或通过其他方式固定传感器,此举会对结构本体造成一定的扰动;而且,部分传感器的安装、更换较难,易受环境影响,运营维护成本较高。从传感器本身来说,其量程较小,适合小位移精密测量,较少用于大变形监测。鉴于这些局限性,在砖石质不可移动文物的变形监测中,技术人员应根据实际情况合理选择传感器,切忌生搬硬套。

2.1.3 近景摄影

近景摄影作为一种无损检测技术,从拍摄研究纹理特征,到与计算机结合,基于信息图像应用软件建模分析被测体的三维特征,实现了对结构全方位、无接触式的全景数据采集监测。其以监测范围广、快捷便利、数据密度高、无损等特点,为砖石质不可移动文物的完整保存提供了更多选择。

R.Napolitano等^[29]使用摄影测量监测 San Giovanni 教堂(意大利)墙体的裂缝开合状态,并与离散元建模结合分析结构的损伤状态及其成因;L.Randazzo等^[30]利用近景摄影检测圣多梅尼科教堂的表面损坏和腐烂现象;胡庆武等^[31]利用基于近景摄影的多测量手段对武当山两仪殿三维数据进行采集,得到了两仪殿的平立剖面图,图纸质量满足古建筑测绘的精确度要求。

本节以 Teatro Olympic Theatre^[32](意大利)为例对数字近景摄影的应用方法进行简述。首先对

Teatro Olympic Theatre 进行勘察,确定相机焦距、标靶,选取适宜的摄站点和控制点并建立独立坐标系。通过 PhotoModeler、VirtuoZo、空三、数字摄影工作站 JX4G 等软件将摄站采集的影像进行立体组合;利用标准网格点法、三维时间基线视差法等求得镜头的畸变参数,以减小畸变误差。三维建模前需进行图片拼接,将各图片中同一匹配点进行关联(图9),全部参考点关联完成后,根据参考点三维定位建立模型,利用自动贴图获得表面纹理,并导出三维点云的坐标。

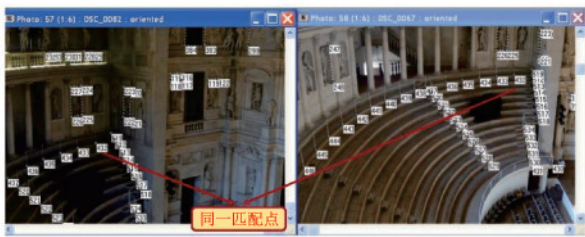


图9 电脑显示提取匹配点示例

Fig.9 Example of extracted match points on the computer

从上文近景摄影技术的阐述可以看出,该技术已经成熟地应用在砖石质不可移动文物的变形监测中。但在实际应用过程中,该技术同样需要良好的地面、光线条件,对通视要求较高;数据处理、建模、成果展示涉及多种技术软件,对技术人员素质有较高的要求;对于复杂的结构,成图细节表现一般,需多次补拍,不同图片拼接的质量决定了结果的精度;且该技术难以实时获得结构的变形信息,时效性一般。从技术本身而言,对相机、计算机后期处理设备要求高,前期投入较大。

2.1.4 三维激光扫描

三维激光扫描兴起于20世纪90年代,目前,该技术的成图精度已满足建筑测量的要求,实现了信息图形的重构。三维激光扫描以其高精度、非接触、范围广、数字化、可视化的优势,极大地推进了不可移动文物无损监测的发展。

A.Pellegrinelli 等^[33]采用三维激光扫描监测圣贝内德托教堂钟楼的倾斜,于2008年扫描建立该教堂的三维模型并确定了其中和轴,观测得教堂的地基沉降速率为0.5 mm/a,其悬挑向西和向北方向变化速率分别为2.7 mm/a和0.8 mm/a; A.Guarnieri 等^[32]采用三维激光扫描得到 Teatro Olympic Theatre 的点云,基于ICP(迭代最近点)方法进行配准并建立了三维模型,其后将其导入 Strauss 软件中建

立有限元模型,实现结构的静力分析和动力分析;高超^[34]采用三维激光扫描结合全站仪的方式监测山西宋塔,获得7期观测数据,数据显示在观测期间塔体最大沉降0.5 mm,塔身最大倾斜0.002 65°。

本节以 Bellmanpark Limekilns 古遗址^[35](英国)为例说明三维激光扫描的应用方法。首先,在同一坐标系下建立控制网,选取结构的稳定点作为观测点和配准参照;然后,根据观测点设置扫描站,扫描站的布设需满足各扫描站的互补性、通视性、覆盖性,于扫描站布设激光扫描仪进行扫描,扫描完成后通过配准点进行点云拼接。为实现精准拼接可通过工程测量的方式得到配准点准确的三维坐标。由于扫描系统硬件、被测体表面粗糙度、材质、纹理等因素以及一些突发因素的影响,致使模型出现重构曲线、不光滑等问题,降低了建模精度。项目中采用ICP方法将离群点、噪声点去除。此外还可通过 RiscanPro、GeomagicStudio 等软件依据双边滤波算法、拉普拉斯滤波、平均曲率法等对点云模型进行滤波、平滑处理。扫描完成后根据 CloudCompare software 软件计算结构各点的位移情况,如图10所示,SE面部分区域位移显著大于0.020 m。

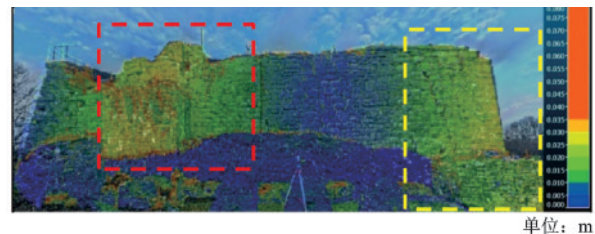


图10 SE面位移

Fig.10 Displacements for the SE face

三维激光扫描为不可移动文物的仿真保存做出了重大贡献,得到的数据模型也可用于后期的遗产管理和维修,但其在砖石质不可移动文物变形监测中的应用中还存在部分局限性。据上述案例所述,该技术对位置高、高大、细节多、模型复杂的结构扫描困难,需大量换站,工作效率低,大量的模型拼接也会影响效率以及成图精度;对于小构件扫描的精度、点云密度不足,严重影响后期的建模。就技术本身而言,需技术人员掌握多种软件,对成果图的解译较大程度地依靠技术人员的经验;其次,获取的点云不均匀、不规则会直接影响点云的精度,进而影响整个结构的成图精度;目前,三维激光扫描无法直接成图,只能作为测绘成果使用,需通

过数据处理、建模分析才可得到进一步的结论。

总结以上几种监测/检测技术,传统工程测量主要用于沉降、位移、鼓胀等变形的监测;传感器主要用于文物的微小局部变形(如裂缝)、节点变形的监测以及受通视条件影响的区域变形的实时在线监测;近景摄影测量更加适用于表面特征明显的文物;三维激光扫描主要用于结构表面损伤、几何变形的监测,可提供精细的结构表面点云数据,但其缺少足够的信息来构建准确的表面轮廓,常需技术人员凭借经验确定,这一劣势可通过近景摄影或其他监测方法弥补。

除上述外,随着高精尖技术的发展,利用微波遥感^[36]对整个遗产地区域进行沉降等变形监测,具有获取数据范围广、连续、快速的特点,精度可达毫米级;利用GPS^[37]对遗产区进行土地沉降评价,其具有获取数据范围广、时效性强、结果精确的特点;采用无人机摄影,获取结构的表面信息,并与手机APP互联,可快速获取遗产地大范围信息。此外,大数据技术^[38]的发展为砖石质不可移动文物信息保存、智慧监测注入了新鲜的血液。此类高精尖技术可与传统技术协同,如利用无人机搭载拍摄、扫描设备进行低空扫描,摆脱了近景摄影、三维激光扫描受地面限制的局限性;利用大数据与5G结合,实现监测信息的开源共享,最终实现对砖石质不可移动文物的有效监测保护。

2.2 渗漏水监测

早期的渗漏水监测主要通过人工巡查确定渗漏点,利用钢尺、数码相机等确定渗漏面积,通过量筒收集的渗漏水量确定渗漏程度。随着技术的进展,滴漏水收集仪、红外热成像、高密度电法等自动化技术在砖石质不可移动文物的保护中得到应用,极大地推动了自动化监测的进展。

2.2.1 量筒

量筒作为一种原始监测手段,因其结构简单、操作方便而广泛应用于砖石质不可移动文物的渗漏水监测中。通常是量筒置于漏水点下,通过量筒的水位变化反映出结构渗漏水的情况。也可采用雨量计代替量筒,通过设置时间间隔自动读取雨量计内水位变化(图11),提高精度的同时节约了人力。基于雨量计的原理,形成滴漏水收集仪,自动记录液位变化,极大地促进了渗漏水自动化监测的进展。此种方式主要用于有明确渗漏水的地点,对

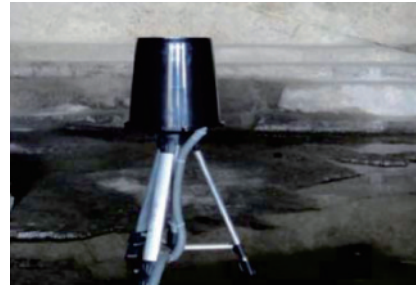


图11 雨量计监测渗漏水

Fig.11 Monitoring the water leakage by the rain gauge

于险情的预测作用较小。

2.2.2 红外热成像

红外热成像技术通过监测/检测被测物体表面的热辐射能,将温度场转化为直观图像。当结构表面温度不同时辐射能不同,在成像上则会以不同的颜色显示,当被测物体内部存在缺陷时,表面温度分布与其周边会出现明显差异。该技术因监测范围广、无损伤的优势,使之非常适合应用在珍贵的砖石质不可移动文物的自动化监测中。

L.R.Valero等^[39]利用红外热成像技术对Santa Barbara教堂(多美尼加共和国)的壁面温湿度情况进行了检测,并探究了气候条件、材料性能、结构表面粗糙度对其的影响规律;F.Bisegna等^[40]借助红外热成像技术对San Silvestro教堂的缺陷检测,以温湿度的变化揭示了壁面下的裂缝、劣化、水分等缺陷情况;张慧慧^[41]利用红外热成像技术开展了岩石渗漏水程度检测的模拟实验,说明可通过监测渗水区域的最低温度来确定岩体的渗漏水程度。

本节以比利时阿伦堡城堡正门区域^[42]红外探测为例简述该技术的应用方法。本次探测采用FLIR Therma CAM B4红外热成像仪,对被测结构的正门区域拍摄,获取其可见光图像与红外热成像图像,将获取的图像经Matlab进行预处理。首先,通过铅锤标定的方法推导可见光与红外相机的内部定向参数,进而确定镜头的径向畸变参数;其次,需将热红外图像与高分辨率的可见光图像进行地理坐标的匹配,具体包括几何纠正、投影变换、统一比例尺等配准处理,以此来减少因采集位置接近而产生的不透明几何形状、平面透视等失真现象,预处理后如图12(a)所示。本次采用图像差异算法对预处理后的图像进行处理,获得的红外热成像如图12(b)所示。黑色、紫色区域为水分较重区域(渗漏水区域),红色为潜在的风化区域。

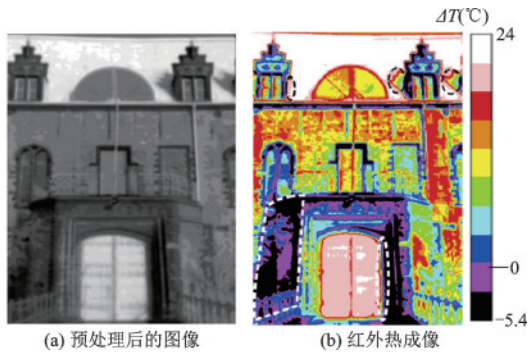


图 12 图像差异计算法处理图像

Fig.12 Image processing by calculating image differences

此外,还可布设红外摄像头对病害区域实时监测,获取的数据通过 3G/4G 信号、网络光纤实时传输至监测系统。此种监测方式已应用到良渚古城老虎岭、明孝陵城墙、左江花山岩壁(图 13)的渗水监测中,图中左侧为待观测岩壁,右侧为观测成果图像,深蓝色区域即渗水区域。

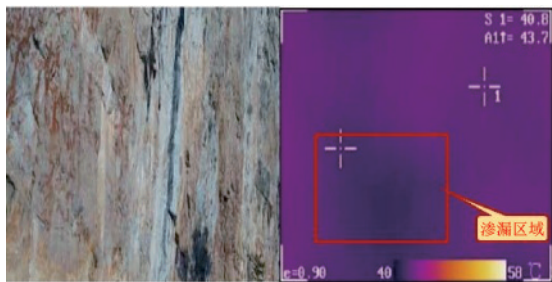


图 13 左江花山岩壁渗水监测

Fig.13 Monitoring seepage of Huashan rock wall in Zuojiang

从上文红外热成像技术的阐述中可以看出,该技术对砖石质不可移动文物的渗漏水、风化监测/检测具有良好的效果。但在实际工程应用中该技术仍存在部分局限性,如多用于监测/检测结果的定性表达,定量表达能力一般。近年来,国内研究人员通过最低温度来确定结构的渗漏水程度,但该技术的成果图细节表现一般,结果对比度较低。此外,手持式检测仪难以获取结构实时监测信息,需经后期相关处理才可成图,对技术人员素质要求高。为实现实时监测,可布设红外摄像头,但准确度一般,前期投入也较大。从技术自身而言,受障碍物遮挡影响较大,探测也需要保持通视。

2.2.3 高密度电法

高密度电法属于阵列式勘探方法的范畴,其基本原理是以介质电阻率差异为基础,通过人工施加电场,得出被测结构因电阻率不同引起的电流分布

差异情况,进而推出被测结构的渗水、裂缝、风化等问题。高密度电法因其自动化程度高、效率高、成果直观在砖石质不可移动文物无损检测中占有重要地位。

O.Sass 等^[43]利用高密度电法探究石墙中水的运动与分布,以牛津历史墙进行实验,结果表明,该技术是完全无损的,可应用性较强;Y.Coulibaly 等^[44]利用高密度电法对一坝体进行探测,得到的坝体内部含水及裂缝分布,为其风险防控提供了充足依据;李兵等^[45]利用高密度电法对紫禁城城墙探测,因城墙顶砖面电极无法插入,采用盐水毛巾包裹接地的方法,得到电阻率反演剖面,据反演剖面推断出裂隙孔洞区域,且与实际情况相符;肖宽怀等^[46]利用高密度电法探测云冈石窟围岩的渗水情况,根据探测结果推断风险区域,且与考察结果相符,证明了高密度电法在岩壁探测中的可靠性。

本节以牛津历史边界墙^[47]的渗水监测为例说明高密度电法的应用方法。首先,需明确围岩性质,通过查阅相关资料确定其电阻率范围,分析温度、含水率、自身颗粒电阻对介质电阻的影响。操作时,需均匀布设电极,选取合理的电极间距,确定探测深度及测线的长度。在采集数据时应派专人看护仪器,减少人员触电的可能。测得的数据经 Res2dinv、EarthImager、AGI 等软件进行反演,再利用 Suffer 等软件成图,得到高密度电法的反演剖面。所测数据反演结果如图 14 所示,图中深蓝色区域湿度较大,即为潜在的渗水区域,需重点关注。

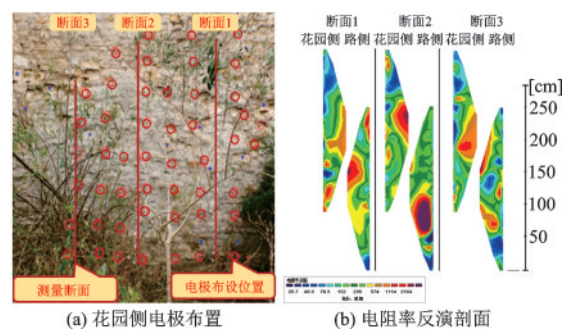


图 14 花园侧电极布置和反演剖面

Fig.14 Electrodes layout and the inversion profile of resistivity in the garden

高密度电法在砖石质不可移动文物的渗漏水检测中具有良好的适应性,但也存在一些问题。由于结构的文物属性,在布设电极时应减小对本体的损伤,这就要求技术人员具有较高的技术水平;成

图需熟练操作多种技术软件,对技术人员素质要求高。从技术本身来看,其对于成流的渗漏水情况应用较差。

总结以上几种监测/检测技术,量筒、滴漏水收集仪、雨量计通常用于出现明显渗漏水现象的区域,即出现成流的渗漏水,通过每个周期内渗漏水量的变化来评价砖石质不可移动文物的渗漏水程度;红外热成像通常用于无障碍物影响区域的结构渗水、孔洞、裂隙的定性评价,也可通过被测体最低温度定量评价其渗水程度;高密度电法主要起预测风险的作用,其受微电极收缩限制的影响,适合起伏不大的结构表面或岩层的渗漏水、风化、裂隙、空洞检测,且主要用于结构内部毛细水的检测。

2.3 风化监测

风化监测早期主要通过人工巡查确定风化点位,并辅以钢尺、相机测得风化面积。随着技术的进步,粗糙度仪、近景摄影(见 2.1.3 节)、高密度电法(见 2.2.3 节)、超声波等高新技术逐渐得到应用,极大地推动了砖石质不可移动文物自动化监测的进展。

2.3.1 粗糙度仪

粗糙度仪兴起于 20 世纪 30 年代,随着电子信息与计算机技术的发展,粗糙度仪朝小型化、便捷化、计算机辅助测量的方向发展。砖石质不可移动文物的风化监测多采用探针式粗糙度仪,其利用触头探针感受被测体表面位移变化,通过传感器将表面的位移变化转化为电信号(图 15)输出。探针式粗糙度仪以结果稳定、分辨率高的优势在风化监测中占有较大比重,但探针价格昂贵,时效性差等局限性限制了其应用,检测过程具有一定的微损性,使之不适合在珍贵文物上进行检测;为减小对被测体的损伤,需限制探针划过的速度,导致检测效率偏低。

2.3.2 超声波

超声波检测的基本原理在于超声波在不同介质中传播速度不同,可根据波速比确定风化程度,当被检测物体内部存在裂缝、空洞等缺陷时,被测物体波速分布会出现差异。超声波以其可量化、高分辨率、微损性的特点在砖石质不可移动文物的检测中得到应用。

A. Tavukcuoğlu 等^[48]利用超声波技术对 Cenabi



图 15 粗糙度仪导出数据

Fig.15 Export data using surface roughness tester

Ahmet Pasa Camii 清真寺表面裂缝深度进行监测,并与红外热成像技术结合发现了与深度和水分含量有关的裂纹的热行为和超声特征;J.Menningen 等^[49]利用超声波技术对德国大理石方尖碑进行了现场测量,获得了其含水量、风化特征的数据,揭示了方尖碑不同区域的风化趋势;孟田华^[50]利用超声波技术对云冈石窟围岩的风化情况进行探测,以胶水为耦合剂,采用网格测试方法获得波速比 K ,依据《岩土工程勘察规范》^[51]获得测区风化程度。

本节以韩国蔚山岩雕风化监测^[52]为例说明超声波技术的应用方法。首先,于遗址现场取样,判别岩石的特性。然后,利用 STEINKAMP 超声波测试仪以网格测试法现场对岩雕进行探测,探测频率 50 kHz,采用折射模式进行。根据上述测试结果,对水平、垂直、对角线测量的超声波速度做等值线图,如图 16 所示,图中超声波波速较低的位置即为风化较为严重的区域。

超声波技术已经应用到砖石质不可移动文物的监测中,但其还处于探索阶段,数据具有一定随机性。该技术对裂缝深度值的探测尚不精确,只能确定大概范围,表明对超声波于裂缝中的传播机理研究不够充分;该技术对某些粗颗粒易产生杂乱的反射波,影响结果的准确性;此外,超声波探测需配合耦合剂使用,耦合剂置于结构表面,清理时对结构本体会造成一定的扰动。

总结以上几种监测/检测技术,早期砖石质不可移动文物的风化监测主要通过人工观察、照相对比的方式确定风化区域,利用钢尺确定风化面积,根据面积对风化程度进行评定,但此种方式往往是

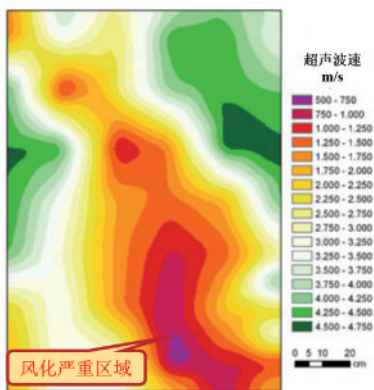


图 16 超声波速度水平测试结果

Fig.16 Results of ultrasonic velocities from horizontal measurements

在风化出现后才可进行。随着技术的进步,可通过粗糙度仪、超声波检测、近景摄影、高密度电法等手段定性定量、直观地描述结构面的风化程度以及对险情的预测,但粗糙度仪对珍贵文物应用有限,对技术人员要求较高;超声波技术对风化的检测还处于探索阶段,检测结果具有一定随机性;近景摄影测量操作流程较为规范,可识别结构表面纹理特征,也可通过建模分析其损伤特征,其应用较为广泛;高密度电法受微电极收缩限制的影响,适合起伏不大的结构表面或岩层的风化检测。

2.4 内部劣化监测

砖石质不可移动文物的内部劣化监测早期主要利用回弹仪确定当前的无侧限抗压强度和完好材料强度之间的比值来评价其劣化程度。随着技术的进展,红外热成像(见 2.2.2 节)、超声波检测(见 2.3.3 节)、探地雷达等高新技术逐渐应用到砖石质不可移动文物的劣化监测中,推动了不可移动文物自动化监测的发展。

2.4.1 回弹仪

回弹检测即利用回弹仪(图 17)测取被测体回弹值,根据回弹值对结构的劣化进行评价。国内外专家学者于 20 世纪 60 年代起探索回弹仪应用于砖石结构的可行性^[53],得到岩石无侧限抗压强度与回弹值的关系曲线并证明了其可行性,并进一步讨论了岩石内部颗粒、风化程度、内部劣化、含水量等影响回弹的因素。该技术以操作简便、性能稳定在砖石质不可移动文物的劣化监测中应用广泛。



图 17 回弹仪

Fig.17 Rebound instrument

2.4.2 探地雷达

探地雷达(GPR)于 20 世纪 70 年代应用于文保工作中,最早用于地下墓室的探测,随着技术的进展,探测数据由二维上升到三维。其利用高频电磁波在传播介质特性不连续时产生的反射、折射来确定被测体内部的劣化情况,可通过剖面分析,确定结构的内部情况。具有无损性、抗干扰性强、分辨率高、探测结果直观等特点,在砖石质不可移动文物内部劣化检测中具有巨大的发展前景。

L.J.Sánchez 等^[54]利用探地雷达、三维激光扫描联合检测阿达加河上的罗马桥,三维激光扫描确定罗马桥外部参数,探地雷达确定结构的内部材质;K.Labropoulos 等^[55]利用探地雷达探测圣墓教堂内部结构,评估该教堂的裂缝状态和发展趋势;林致铭^[56]利用探地雷达对奎光塔进行探测,通过数据分析,塔体楼面、走廊楼板出现脱空,塔身的墙体出现裂缝,且与实际相符。

本节以西班牙恶魔岛历史防御工事^[57]监测为例说明探地雷达的应用方法。采用探地雷达进行砖石质不可移动文物的劣化探测主要分为布置测线与设置仪器参数。根据探测区域和内容选取三维布线方式,计 63 条测线,测线间距为 0.5 m。设置仪器参数则需根据被测体材质、所处环境、探测深度、仪器本身性能进行选择^[58],本次设置时窗宽度为 100 ns、采样频率为 200 ps、采样频率为 500 Hz、采集样本数为 500。经上述操作获得观测数据,由于数据中含有干扰波的影响,采用 Ekko Project 软件清除雷达轨迹,也可采用 RADAN 6.0、Ground Vision 2、Reflex 2D 等软件。采用探地雷达获得的某测线剖面图,如图 18 所示,图中局部波形散乱,振幅能量变化明显,推测该区域为劣化区域。

探地雷达在砖石质不可移动文物的劣化监测中具有很好的应用前景,但还存在一些应用性问

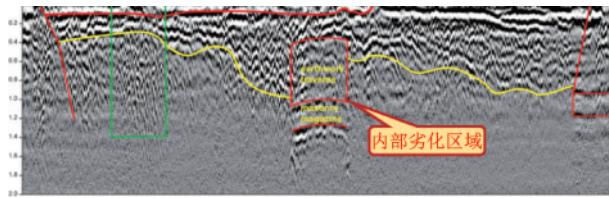


图 18 某测线剖面探地雷达

Fig.18 Profile observed from GPR along a measuring line

题。根据上述案例所述,为实现结构的三维探测,布线较为复杂,对于高大、复杂的结构工作量大;相关参数的设置依赖技术人员工程经验,观测数据的预处理、剖面图的制作需掌握多种技术软件,对人员素质要求高;此外,数据成果的解译严重依靠技术人员经验,技术难度高。从技术本身来讲,探测设备价格较高,且后期数据处理对计算机性能要求较高,导致前期投入高。

总结以上几种监测/检测技术,回弹仪适用于较为致密的结构表面,不适于表面酥化、胶结性差的结构,在进行测试时应避开性质较差的结构表面;超声波检测法对砖石质不可移动文物劣化的监测目前还处于探索阶段,检测结果具有一定随机性,影响因素较多,对于探测内部劣化区域、裂缝的深度与开展情况尚不精确,只能确定大概范围;探地雷达适合小范围的精确探测,对于大范围探测费时费力,技术难度较高;红外热成像适用于温差明显、且遮挡较小的区域,该技术结合红外摄像头可实现对被测区域的实时监测。

3 结论与展望

主要讨论了砖石质不可移动文物的无损与微损监测/检测技术方法,总结了相关技术的原理、特征与发展趋势,并结合实际案例阐述了各种监测/检测技术的应用方法及其在实际应用中的局限性,以期为之后砖石质不可移动文物本体的监测/检测技术的选用提供参考。总体而言,砖石质不可移动文物监测/检测技术的研究已取得了一系列进展,但也存在需持续探索解决的问题:

(1) 砖石质不可移动文物作为历史的瑰宝,具有不可代替性,各种技术的应用须尊重其文物本身的特点,不可将现代建筑的相关监测/检测技术生搬硬套过去,相关的工程人员须熟知各种技术的利

弊,尽量减少对结构的扰动性,做到真正的无损保护。

(2) 砖石质不可移动文物监测/检测技术得到了快速发展,但各种技术在实际应用过程中都存在一定的局限性,技术的选择应结合具体的指标、成本、环境条件来确定。灵活调整监测策略,适当安排自动化监测和人工检测、连续监测和定期检测相协调的模式,注重监测/检测技术的适用性改造,并在监测/检测过程中持续地评估和改进。

(3) 随着砖石质不可移动文物监测/检测领域的需求不断改变,专业化、数字化、信息化数据采集技术的不断进步。工程测量、量筒、粗糙度仪等传统监测技术在文物的监测中出现一些局限性与不足。此外,近景摄影、三维激光扫描、高密度电法、超声波检测法、探地雷达等技术难以快速直接成图,结果输出涉及多种软件,对设备性能、技术人员素质要求较高,且成果图解译需依靠技术人员的相关经验。鉴于此,应继续加强相关技术的研究,减少数据处理、制图、识图的难度,使各种监测/检测技术更具有普适性。

(4) 对于实际工程而言,纯粹使用一种监测/检测技术基本不能完全满足监测的多样性需求,经常需要联合采用多种技术,充分利用各监测/检测的优势,以便更好地获取需要的数据。诸如三维激光扫描对细节点云构建能力较差,为提高其精度可采用工程测量的方式,定点定量地获取细节处的三维坐标;为克服近景摄影、三维激光扫描难以获取高处结构数据的困难,可采用无人机搭载设备,形成 UAV 航测的数据获取模式;此外利用三维激光扫描取得结构表面点云,构建其表面轮廓,探地雷达获取结构的内部信息,二者结合可完整获得历史建筑的数据信息。因此,我们仍需继续探索多种技术监测/检测成果的联合表达模式以满足现今砖石质不可移动文物数字化、智能化保护的需求。通过多技术的联合应用,提供更准确、真实、全面的文物信息,更好地满足砖石质不可移动文物监测、管理、保护、展示等多重需求,让技术更好地为砖石质不可移动文物服务。

(5) 通过国内外对砖石质不可移动文物监测技术的对比发现:国外监测指标的选取针对性较强,国内由于起步阶段的认识误区和技术差异,部分遗

址区的监测指标与文物价值脱离,难以发挥各监测技术的优势,导致了过度监测;国外将监测数据与结构的岩土建模、有限元分析结合,通过监测数据构建有限元模型,利用有限元的动力分析(震/振动、风振等)反推结构的易损位置进行对应的监测,二者相互促进,更好地服务于砖石质不可移动文物的保护,国内这方面的研究则较少。总体而言,我国的砖石质不可移动文物保护取得了较大的进展,但由于起步较晚,与国外的先进理念、技术还存有一定的差距。

(6)注重关键技术与协作模式的创新,探索监测技术的适宜性。可借鉴现有监测项目的相关经验,探索建立砖石质不可移动文物典型病害和监测/检测技术的数据库。针对文物病害标识、技术选用、仿真展示等实际工作需求,利用机器学习技术提供病害辅助标识系统。基于层次分析法、数学模糊逻辑、人工神经网络等算法建立监测/检测技术适宜性评价流程,研究评价指标的分级标准与指标权重,形成砖石质不可移动文物监测/检测技术的综合评价方法。

参考文献:

- [1] 杨琛. 中国古代建筑遗产本体监测指标体系及其适用性技术初探[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Yang C. Study of indicator system and adaptive technology for monitoring on attributes of domestic ancient architectural heritage [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [2] 谢云龙. 湿陷性黄土地区砖石古塔地基稳定性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
Xie Y L. Research on foundation stability of masonry pagodas in collapsible loess regions[D]. Xi'an: University of Xi'an Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 张登雨, 张子新, 吴昌将. 盾构侧穿邻近古建筑地表长期沉降预测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2143-2150.
Zhang D Y, Zhang Z X, Wu C J. Prediction and analysis of long-term surface settlement caused by shield tunneling side-crossing adjacent Ancient Buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2143-2150. (in Chinese)
- [4] Chen B, Yang Q S, Wang K, et al. Full-scale measurements of wind effects and modal parameter identification of Yingxian wooden tower [J]. Wind and Structure, 2013, 17 (6): 609-627. (in Chinese)
- [5] 徐泽民, 韩庆华, 郑刚, 等. 地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (2): 364-374.
Xu Z M, Han Q H, Zheng G, et al. Field monitoring and analysis of effects of metro tunnels under historic buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 364-374. (in Chinese)
- [6] Zhang G J, Yu Ch X, Ding X H. Analyzing crack development pattern of masonry structure in seismic oscillation by digital photography [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 108(3): 032062.
- [7] 朱才辉, 刘钦佩, 周远强. 古建筑砖-土结构力学性能及裂缝成因分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 175-186.
Zhu C H, Liu Q P, Zhou Y Q. Mechanical properties and cracking analysis of brick-clay structure of ancient building [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (9): 175-186. (in Chinese)
- [8] 汪万福, 赵林毅, 杨涛, 等. 西藏古建筑空鼓病害壁画灌浆加固效果初步检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3776-3781.
Wang W F, Zhao L Y, Yang T, et al. Preliminary detection of grouting effect on delaminated wall paintings in tibet architecture [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 28 (Sup2): 3776-3781. (in Chinese)
- [9] 吴超英, 李乐, 王峥嵘, 等. 古城墙变形破坏模式分类及识别[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1132-1140.
Wu C Y, Li L, Wang Z R, et al. Classification and Identification of failure modes of ancient city walls [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25 (4): 1132-1140. (in Chinese)
- [10] 朱才辉, 周远强. 某在役明城墙病害调研及评估方法[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(2): 60-73.
Zhu C H, Zhou Y Q. Pathologies investigation and assessment method of an ancient City Wall in Ming Dynasty [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28 (2): 60-73. (in Chinese)
- [11] 周长东, 李艺敏. 降雨入渗对故宫城墙稳定性的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增1): 286-296.

- Zhou C D, Li Y M. Influence of rainfall infiltration on stability of Forbidden City wall[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 286-296. (in Chinese)
- [12] Cultrone G, Sebastián E. Laboratory simulation showing the influence of salt efflorescence on the weathering of composite building materials[J]. *Environmental Geology*, 2008, 56(3): 729-740.
- [13] 张中俭, 杨志法, 卞丙磊, 等. 平遥古城墙基外侧砂岩的风化速度研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(10): 1628-1632.
- Zhang Z J, Yang Z F, Bian B L, et al. Weathering rates of sandstone in lower walls of Ancient City of Pingyao[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(10): 1628-1632. (in Chinese)
- [14] 孙满利, 王菲, 王旭东, 等. 敦煌寿昌城墙体表面风化特征研究[J]. *敦煌研究*, 2009 (6): 81-86.
- Sun M L, Wang F, Wang X D, et al. Study on the surface weathering characteristics of Shouchang Wall in Dun Huang[J]. *Dunhuang Research*, 2009 (6): 81-86. (in Chinese)
- [15] 孙亚丽, 曹冬梅, 方建平, 等. 衢州古城墙通仙门不同岩性岩石砌块相对风化速度研究[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1279-1286.
- Sun Y L, Cao D M, Fang J P, et al. Relative weathering rates of six different lithological rocks in tongxian gate of quzhou ancient city wall[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1279-1286. (in Chinese)
- [16] 李永辉, 谢华荣, 王建国, 等. 历史建筑中传统青砖等温吸湿性能比较研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1092-1095.
- Li Y H, Xie H R, Wang J G, et al. Comparative study of isothermal sorption properties of traditional blue bricks in historic buildings[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(6): 1092-1095. (in Chinese)
- [17] 苏超威. 应县木塔安全监测及数据分析方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- Su C W. Study on safe monitoring and data analysis method of yingxian wood pagoda[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017. (in Chinese)
- [18] 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [19] Castagnetti C, Cosentini R M, Lancellotta R, et al. Geodetic monitoring and geotechnical analyses of subsidence induced settlements of historic structures [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(12): e2030.
- [20] Ercoli M, Brigante B, Radicioni F, et al. Inside the polygonal walls of Amelia (Central Italy): A multidisciplinary data integration, encompassing geodetic monitoring and geophysical prospections[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 127: 31-44.
- [21] 崇左市监测总中心. 左江花山岩画文化景观监测工作报告[R]. 北京: 中国文化遗产研究院, 2017.
- [22] 李俨. 周口店遗址监测预警体系建设汇报—周口店北京人遗址第1地点(猿人洞)保护建筑工程监测项目汇报[R]. 北京: 中国文化遗产研究院, 2017.
- [23] Ceravolo R, Marinis A D, Marica L, et al. Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world's largest oval dome[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(10): e1988.
- [24] Lorenzoni F, Casarin F, Modena C, et al. Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2013, 3(4): 227-246.
- [25] Sabia D, Aoki T, Cosentini R M, et al. Model updating to forecast the dynamic behavior of the Ghirlandina Tower in Modena, Italy[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015, 19(1):1-24 .
- [26] Bentivoglio S. Role of monitoring in historical building restoration: the case of leaning tower of pisa[J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2015, 9(1): 38-47.
- [27] Stefano A D, Matta E, Clemente P. Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2016, 6(1): 83-106.
- [28] Giofrè M, Gusella V, Cluni F. Performance evaluation of monumental bridges: testing and monitoring 'Ponte delle Torri' in Spoleto[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2008, 4(2): 95-106.
- [29] Napolitano R, Glisic B. Methodology for diagnosing crack patterns in masonry structures using photogrammetry and distinct element modeling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 519-528.
- [30] Randazzo L, Collina M, Ricca M, et al. Damage indices and photogrammetry for decay assessment of stone-built cultural heritage: The case study of the San Domenico Church main entrance portal (South Calabria,

- Italy)[J]. *Sustainability*, 2020, 12(12): 5198.
- [31] 胡庆武, 王少华, 刘建明, 等. 多测量手段集成古建筑物精细测绘方法——以武当山两仪殿为例[J]. *文物保护与考古科学*, 2013, 25(2): 39-44.
- Hu Q W, Wang S H, Liu J M, et al. A detailed and precise survey method for ancient architecture through multiple sensor integration -A case study of Liangyi Dian of Wudang mountain [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2013, 25(2): 39-44. (in Chinese)
- [32] Guarnieri A, Milan N, Vettore A. Monitoring of complex structure for structural control using terrestrial laser scanning (Tls) and photogrammetry [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2013, 7(1): 54-67.
- [33] Pellegri-nelli A, Furini A, Russo P. Earthquakes and ancient leaning towers: Geodetic monitoring of the bell tower of San Benedetto Church in Ferrara (Italy) [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(6): 687-691.
- [34] 高超. 塔类建筑几何形变数字化监测方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
- Gao C. Research on digital monitoring method for geometric deformation of tower buildings[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)
- [35] Abdulhussein J H, Meng X L, Andrew S, et al. New approach for monitoring historic and heritage buildings: using terrestrial laser scanning and generalised procrustes analysis[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(11): e1987.
- [36] Tarchi D, Rudolf H, Pieraccini M, et al. Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: application to cultural heritage survey[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3545-3551.
- [37] Nadia A A, Mahmoud H, Mostafa R, et al. Land deformation monitoring by GNSS in the Nile Delta and the measurements analysis[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(3): 150.
- [38] 李爱群, 侯妙乐, 董友强, 等. 建筑遗产大数据的构建探索[J]. *自然与文化遗产研究*, 2020, 5(4): 27-36.
- Li A Q, Hou M L, Dong Y Q, et al. The construction of architectural heritage big data [J]. *Study on Natural and Cultural Heritage*, 2020, 5(4): 27-36. (in Chinese)
- [39] Valero L R, Sasso V L, Vicioso E P. In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 10: e00228.
- [40] Bisegna F, Ambrosini D, Paoletti D, et al. A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography - A case study[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(2): 199-202.
- [41] 张慧慧. 红外热成像法检测岩石渗水病害的实验研究[J]. *齐齐哈尔大学学报(自然科学版)*, 2014, 30(1): 71-74.
- Zhang H H. The experimental study of infrared imaging detection on water-permeation of rock [J]. *Journal of Qiqihar University(Natural Science Edition)*, 2014, 30(1): 71-74. (in Chinese)
- [42] Lerma J L, Cabrelles M, Portales C. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building faade [J]. *Construction & Building Materials*, 2011, 25(5): 2190-2197.
- [43] Sass O, Viles H A. Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 70(1): 72-83.
- [44] Coulibaly Y, Belem T, Cheng L Z. Numerical analysis and geophysical monitoring for stability assessment of the Northwest tailings dam at westwood mine [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(4): 701.
- [45] 李兵, 张兵峰, 旺久. 紫禁城城墙无损检测方法的应用研究[J]. *中国文化遗产*, 2019(4): 87-90.
- Li B, Zhang B F, Wang J. Research on nondestructive testing method of forbidden city wall[J]. *China Cultural Heritage*, 2019(4): 87-90. (in Chinese)
- [46] 肖宽怀, 王绪本. 微电极高密度电法探测在文物保护中的应用研究[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(1): 10-17,5.
- Xiao K H, Wang X B. The research about the application of relic protection with the method of microelectrode detection of high-density electrical[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(1): 10-17,5. (in Chinese)
- [47] Egarter I S O, Viles H, et al. A multi proxy investigation of moisture, salt, and weathering dynamics on a historic urban boundary wall in Oxford, UK[J]. *Studies in Conservation*, 2020, 65(3): 172-188.
- [48] Tavukcuoğlu A, Akevren S, Grinzato E. In situ examination of structural cracks at historic masonry structures

- by quantitative infrared thermography and ultrasonic testing[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(18): 1779-1798.
- [49] Menningen J, Siegesmund S, Tweeton D, et al. Ultrasonic tomography: non-destructive evaluation of the weathering state on a marble obelisk, considering the effects of structural properties [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(17): 1-25.
- [50] 孟田华. 云冈石窟风化的综合分析研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Meng T H. Comprehensive research analysis on weathering of Yungang grottoes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. (in Chinese)
- [51] 岩土工程勘察规范(2009版): GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [52] Heinrichs K, Fitzner B. Assessment of weathering damage on the Petroglyphs of Cheonjeonri, Ulsan, Republic of Korea[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(7-8): 1741-1761.
- [53] 李宏松. 文物岩石材料劣化特征及评价方法[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
Li H S. Character and evaluation method of historical rock deterioration [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011. (in Chinese)
- [54] Sanchez-Aparicio L J, Castro Á B D, Conde B, et al. Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges[J]. *Automation in Construction*, 2019, 104: 360-382.
- [55] Labropoulos K, Moropoulou A. Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the holy sepulchre [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47:689-700.
- [56] 林致铭. 探地雷达对古塔特征参数的识别研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
Lin Z M. Research on the application of radar technology to the identification of characteristic parameter of masonry pagoda [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [57] Smet T S, Everett M E, Warden R R, et al. The fate of the historic fortifications at Alcatraz island based on terrestrial laser scans and ground-penetrating radar interpretations from the recreation yard [J]. *Near Surface Geophysics*, 2019, 17(2): 151-168.
- [58] Rucka M, Lachowicz J, Zielińska M. GPR investigation of the strengthening system of a historic masonry tower[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 131: 94-102.

(本文责编:赵霞)