

三维激光扫描技术在 北京琉璃河大桥灾后的应用

曹春利 张涛

文化遗产保护已从抢救性保护转向预防性保护。快速发展的数字化技术成为国内外预防性保护的重要手段,常态化监测也推动了其应用日益成熟。构建本体数字化孪生模型是典型应用之一,常采用三维激光扫描技术。该技术通过激光反馈生成点云模型,精确记录结构现状,并借助剖面分析等手段,实现对文化遗产的数字化测量与结构安全评估,具有无损、高效、高精度的优势。

频发的自然气候紧急状况,为文化遗产数字化带来新挑战。2023年7月,北京房山区遭受强暴雨极端天气袭击,引发洪水灾害,导致琉璃河大桥栏杆及周边驳岸损毁,桥体周边发生淤积现象(图1)。

为满足预防性保护需求,发挥日常监测作用并支撑后续抢险修缮设计,作者所在团队对琉璃河大桥进行了结构检测与技术状况评定。借助三维激光扫描技术,建立了桥梁数字孪生模型,获取了关键数据。本文基于扫描数据,对比分析水灾前后关键部位变形情况,评估灾损程度,以期为修缮工作提供依据。

琉璃河大桥位于北京市房山区琉璃河镇,呈南北向横跨琉璃河,始建于1539年(明嘉靖十八年),建成于1546年(嘉靖二十五年),历经5次大修,1999年其西侧一座钢筋混凝土公路桥建成通车,不再承担道路通行任务。后经历史风貌恢复性修缮,大桥于2013年列入第七批全国重点文物保护单位。

琉璃河大桥为十一孔石拱桥,是北京市第二大石拱桥,规模仅次于卢沟桥,桥长189米,跨中宽10.4米;两侧有节间式石栏,各有望柱88根,栏杆87块,两端置抱鼓石;桥堍和桥面上铺砌花岗岩石板,桥面略成正圆弧形,局部凹凸不平;拱券为半圆形纵联式结构,由14道拱圈石和1道龙门礅石构成;侧墙、翼墙由花岗岩和青石板砌筑;桥台为雁翅型,雁翅以外皆有石砌泊岸;有桥墩10座,平面呈平底船形,西侧上游端为船头状分水尖,东侧下游端为船尾状。琉璃河大桥共有11个券洞,由北至南依次编号北1、北2、北3、北4、北5、中券、南5、南4、南3、南2、南1。

大桥数据采集设备为Faro Focus S350三维激光扫描仪,扫描速度为122000pts/s;测距误差可控制在±1毫米;扫描成像为彩色;激光等级为1级安全激光;视野范围为纵向300°、横向360°。

三维激光扫描仪采集桥梁整体数据,覆盖桥面、桥身及拱圈。受现场条件限制,桥面与拱圈结构不视通,需通过点云拼接整合各测站数据。桥面数据可直接设站于桥面获取,桥身及拱圈数据通过将测站设于施工脚手架上获取。为确保拼接所需特征点充足,依据现场实际,现场扫描设站间隔定为5米,共设置121站,其中桥面41站,东西两侧桥身及拱圈各40站。

点云数据经配准、降噪和抽稀处理后,最终点云的平均拼接误差为1.8毫米,最大误差为7.1毫米,符合标准规定的工作精度指标要求,能够满足后期分析需要的精度规格。随后,经纹理映射、模型拼接、修补、光滑及检验等处理,形成最终的三维点云模型。

分析方法采用整体分析与单点分析相结合的方式进行。单点分析方法选取5个特征点(A~E点)的坐标数据,其中A点和B点数据用于判断各拱圈顶部相对下沉变形状况;C点、D点和E点数据用于判断各侧墙歪闪状况(图2)。

拱圈变形的单点分析主要考察指标为拱圈顶部相对沉降量,提取11个拱圈的A点和B点竖向(z)数据进行对比分析。由结果可知,拱圈顶部东西两端高差最大处出现在北5券,高差为0.162米,其次北3券、中券、南4券拱圈高差也相对较大。

拱圈变形的整体分析主要考察指标为拱圈形状,对比标准为参照曲面,其是根据拱圈断面点云数据拟合出

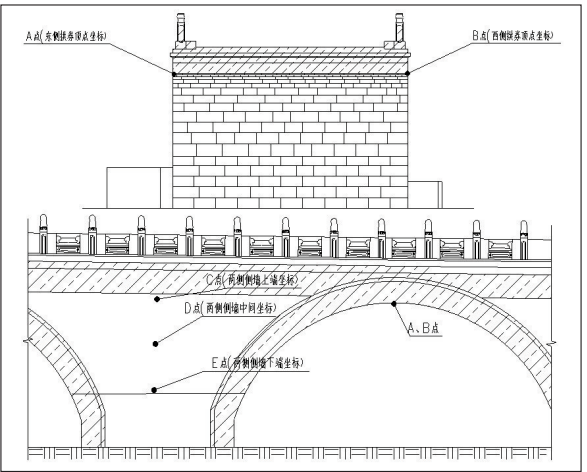


图2 单点分析特征点位置



图1 琉璃河大桥受灾情况

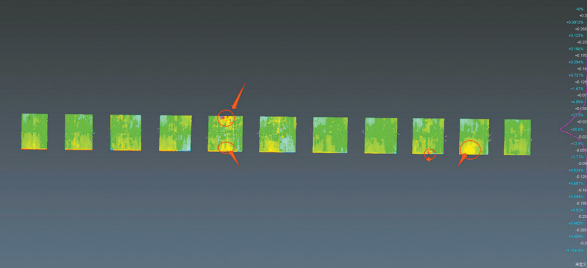


图3 拱圈变形分析图



琉璃河大桥

的标准弧线沿圈洞方向拉伸生成的标准弧面。分割拱圈点云以便于直观分析,与参照曲面进行拱圈3D变形对比分析(图3)。

分析结果显示,拱圈整体变形在±0.3米内,北5券东西两侧、南3券东侧、南2券东侧等局部区域变形超过0.1米。相对于参考面,50.6%的数据偏差在0.02米以内,85.5%的数据偏差在0.055米以内,考虑到拱桥材料及构造偏差,可认为这些区域基本无变形。综合单点及整体分析结果,表明拱券整体结构完整,受力状况良好,未发生较大变形。

桥身变形分为东侧桥身变形和西侧桥身变形。根据桥身实测数据进行点云均化,拟合形成桥身二维平面作为桥身变形的参照基准。分别取桥洞之间的C点、D点和E点进行偏差标注,分析桥身整体变形趋势(图4)。

由结果可知,东侧桥身最大偏差为±0.2米,整体呈中间内凹两侧外凸趋势,其中内凹部分最大为0.192米,外凸部分最大为0.138米;西侧桥身最大偏差为±0.3米,整体呈中间外凸两侧内凹趋势,其中内凹部分最大为0.028米,外凸部分最大为0.237米。综合可知,桥身结构完整,整体变形呈西凸东凹趋势,桥身变形值较小。

根据桥面实测数据进行点云均化,拟合形成桥面空间曲面作为桥面变形的参照基准。分别取桥面均匀分布的点位点进行偏差标注,分析桥面整体变形趋势。

由结果可知,桥面存在较小变形,最大偏差为±0.3米,桥面中部略有凹陷,桥面北部略有凸起;参照弧形桥面分析沉降状况,其表面起伏在+0.2~−0.3米之间,考虑桥面铺设石块起伏误差,桥面本身相对于理论拟合曲面的偏差为±0.1米。

现场脚手架遮挡面积较大,且部分栏杆与望柱处在维修状态,为保证分析的完整性,以桥面俯视为基础,将桥体东西两侧栏杆与望柱区域分别视作一个整体,再以桥头桥尾两端为基准延伸形成参照平面,与两侧栏杆望柱进行对比分析。由于桥体外侧有脚手架,故分析工作选取栏杆与望柱的内侧进行。东西两侧栏杆与望柱分别自南向北对照现状平面图进行分组编号。对现存栏杆与望柱共计进行94次歪闪测试。

由结果可知,对于东侧,栏杆向西(内侧)偏移数量为42块,望柱向西(内侧)偏移数量为47根,栏杆向东(外侧)偏移数量为17块,望柱向东(外侧)偏移数量为13根;对于西侧,栏杆向东(内侧)偏移数量为24块,向西(外侧)偏移数量为23块,望柱向东(内侧)偏移数量为34根,局部向西(外侧)偏移数量为13根。综合分析表明,除局部有消防或建材设施遮挡,东西侧栏杆与望柱均有向内外两侧偏移的趋势,偏移量多集中在0.05米左右,最大偏移量约为0.2米;东侧栏杆与望柱总体偏移量大于西侧;东侧栏杆与望柱多向西(内侧)偏移,西侧栏杆与望柱多向东(内侧)偏移。

基于三维激光扫描技术对琉璃河大桥的灾后评估表明,本次洪水灾害虽对桥体局部构件造成损毁,但主体结构整体保持稳定。拱券变形可控、桥身位移量值有限、桥面沉降处于安全阈值内,大桥仍具备良好的结构完整性。栏杆与望柱的偏移现象虽较显著,但属可修复范畴。本研究通过高精度数字化手段,不仅精准量化了灾损程度,为针对性修缮提供了科学依据,更验证了三维激光扫描技术在文化遗产应急评估与预防性监测中的关键价值——无损、高效、高精度。

数字化技术不仅能有效支撑灾后评估与修复,更能通过积累历史数据构建文物健康档案,为应对未来气候风险提供预警基础。建议进一步推广三维扫描等数字技术在文博领域的系统化应用,将单次灾损评估转化为持续性的结构状态追踪,最终形成“监测-预警-评估-干预”的闭环保护机制,全面提升文化遗产在气候变化背景下的韧性。

(作者单位:北京市考古研究院)

长沙风篷岭汉墓 出土琉璃片的保护修复

蒋成光 黄昭瑜 傅晨星 唐小红 王英

长沙风篷岭汉墓于2006年进行考古发掘,是一座带墓道的大型竖穴岩坑木椁墓,墓主为西汉长沙国刺王刘建至缪王刘鲁间某位长沙王的王后,其姓张。墓中出土了大量漆木器、铜器和金饼等文物,其中在中列后室西北部出土了一批带孔玉片,部分孔中残留金缕。由于以往考古报告中多将带有穿孔的玉片认定为玉衣片,故该考古发掘简报中也将其定名为“玉衣片”。从以往考古出土的情况来看,玉衣片的质料,除玉质外,有石质的,也有用琉璃片作代用品的。随着江西南昌海昏侯墓、青岛土山屯汉墓M147、尹湾汉墓M9等考古发掘资料的公布,这些墓葬都出土了大量相似文物,经过科学检测,属于琉璃材质。那么该批玉衣片究竟是玉石制成还是琉璃制成?是衣片、席片还是温明片?我们选取样品,开展了科学检测,经检测其材质为铅钡玻璃体系,该批“玉衣片”应称为琉璃片,并对其进行了保护修复,最大限度还原文物原貌。

考古现场提取

由于墓葬坍塌及两次被盗,琉璃片出土时大量无序堆积在一起,无完整器型,断裂、风化和酥粉等病害严重。为减少保存环境骤变给文物带来的影响,考古人员在快速清理琉璃片上部泥土,露出上层残片,开展拍照、绘图等资料采集后,分别将零散或归属清晰的琉璃残片单独提取编号;成堆难以区分归属的残片,连同周边泥土进行整体提取。室内保护提取残片共计编号31组,残片数量六百余块,并清理出近四百张金箔片和少量金缕、云母薄片。

科学检测分析

显微结构分析:利用超景深三维立体数码显微系统(Hi-rox,KH-1300M)对样品表面进行显微观察。样品表面反光明显,有镜面感,存在大量气泡,这是琉璃制品的特征。气泡的形成是铸造工艺引起的,常见于压模法,结合琉璃片有纹饰的一面及四边光滑、另一面暗淡无光的现象,可以看出采用的是单面压模法的工艺。随后我们采用EDAX扫描电镜能谱仪(TEM,Octane SDD)观察样品形貌,样品表面在电镜下显示为无规则结晶结构,是均质的连续相,无明确晶界,这符合玻璃结构。这与玉石有很大区别,玉石的结晶在电镜下可见纤维状交织结构,晶体呈细长纤维状紧密排列,晶界清晰。

物相分析:将选取的3件样品采用X射线衍射仪(Rigaku,TTR-Ⅲ)检测,显示物相均为玻璃,且有白铅矿、石英和重晶石等物相。其中白铅矿的成分是碳酸铅,属于风化产物,石英和重晶石是琉璃中含的未完全熔融的原料或析出的物质。

成分分析:将选取的5个样品采用X射线荧光光谱仪进行成分分析,结果显示琉璃片中不同点测的各物质的数据较为稳定,符合铅钡玻璃体系。成分中SiO₂含量最高,为82.25%~91.96%之间,PbO和BaO的含量都很低,BaO为1.55%~6.55%,PbO为3.20%~8.47%,属于低铅玻璃。且BaO和SO₃含量的比值符合重晶石的特征,结合物相分析,重晶石是铅钡玻璃的主要助熔剂,所含BaO可以形成钡的硅酸盐析晶,还能使玻璃出现乳浊达到玉质的乳白色。

金缕工艺分析

与琉璃片一起出土了散落的金缕,且部分琉璃片穿孔中还有金缕残留。古代金缕的加工使用掐丝工艺,是将黄金锤锻成薄片,再切割成细丝,通过反复拉丝、搓捻等工艺制成均匀的金线。随后根据需求,将金线分段裁剪为“金缕”,截面形状有圆形、扁圆形和多根组合体。但风篷岭汉墓出土金缕与此不同,金缕为长条圆形,粗0.95毫米,金缕上存在一条纵向断面,且平直,沿断面将金缕平展开,发现金缕非拉丝或搓捻而成,而是由一片长条形宽4.5毫米的金箔片卷成,金箔片厚5.3~7.4微米。金缕中间残留有细长型黑色物质残留,残留已糟朽,但质轻、颜色较纯,应属有机物的腐蚀物,结合金缕捆绑琉璃片的作用和古代金线制作工艺,该金缕中的物质应为线绳。由此可推断该金缕的制作工艺为:首先将黄金锤锻成薄片,再切割成长条形,最后将金箔片包裹于线绳之上,形成圆形金缕。

保护修复

该批琉璃片病害主要有残缺、断裂、风化、泥垢附着、变色、金箔片脱落与变形等。其中残碎严重,共有残片六百余块,每组编号包含有数块至百余块不等残片;表面严重风化,多有酥粉,残片强度较低。金箔片未腐蚀,多数呈金黄色,仍保留有较好的韧性,可进行清洗和整形。文物保护人员先后进行了三次保护修复,其技术路线为:

编号内拼接:将同组编号的碎片平铺,纹饰面朝上。依据厚度和颜色对碎片进行分类拼接。拼接的顺序首先是识别边缘和四角的碎片,依据残留的纹饰确定碎片的相对位置,逐片进行茬口的比对。

粘接:采用手术刀、竹刀等工具仔细清除茬口处的泥土、硬结物等杂质,以降低粘接后可能产生的缝隙。泥土及硬结物粘附牢固,颜色与琉璃片的米黄色相近,茬口风化程度较高,强度较低,因此在清除过程中需谨慎辨别,必要时借助放大镜进行精确剔除。随后调配环氧树脂胶粘接。

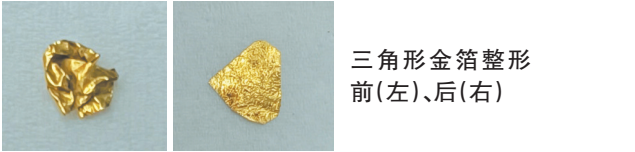
跨编号拼接:打破编号的限制,将墓葬出土的所有琉璃残片进行了广泛而系统的跨编号拼接。首先,依据纹饰、边缘、中心等特征对琉璃残片进行分类整理,并统一摆放。随后,依据茬口、颜色、厚度及色泽等特征,逐一进行细致的拼对。在拼对过程中,发现部分残片虽源自同一琉璃片,但颜色和风化程度存在显著差异。因此,在后续拼对过程中,色泽特征被排除在拼对判断要素之外。经过数月,261块琉璃残片得以成功拼对,绝大多数残片是跨越不同编号拼对成功的。

表面清理:琉璃片遭受严重风化,孔隙丰富且强度较低,表现出较高的渗透性。应避免使用水洗或化学试剂软化,以防止污染物渗透至文物内部,从而引发二次污染。遵循最小干预原则,使用蘸水潮湿的棉签,擦拭表面不牢固的泥土及污染物;对于粘接牢固的污染物,则使用竹刀小心剔除,尽可能呈现出琉璃片的原貌。

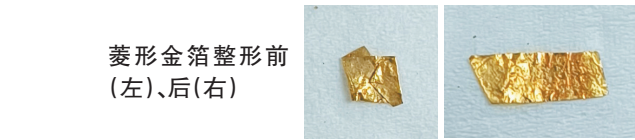
金箔片清洗和整形:琉璃片曾贴有大量金箔片,但目前大多数已经脱落或残缺。脱落的金箔片数量多,质地轻薄,沾满泥土且严重变形,边角卷曲、褶皱,甚至扭成麻花状,需要对其进行清洗和整形。在放大镜下,利用水粉笔对卷曲的金箔片进行按压固定,用小竹刀轻柔地拨开褶皱或卷曲部分,适度施加压力或借助小镊子进行轻微拉伸。通过整形,将严重变形的金箔片整形至基本展平状态,随后进行清洗,金箔片恢复了其金黄



琉璃片出土时



三角形金箔整形前(左)、后(右)

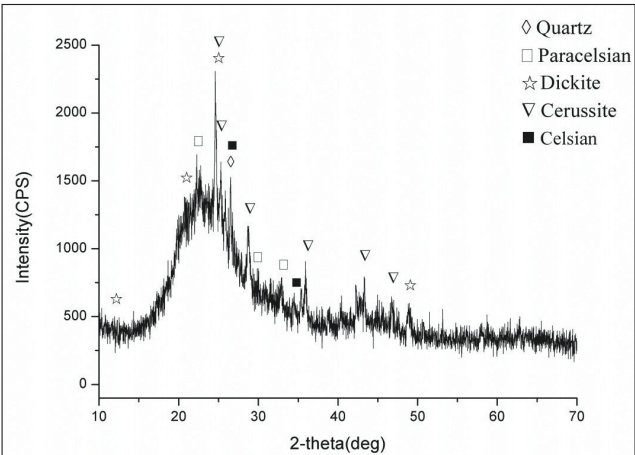


菱形金箔整形前(左)、后(右)



找出80-23残片

80-23保护修复后



80-13的X射线衍射图



80-9保护修复后

色的光泽和原始外观。据统计,完成整形清洗的金箔片共四百余片,其形状多样,包括三角形、菱形、长条形和梯形等。

金箔片回贴:研究琉璃片凹槽中残留的金箔片,发现金箔片的形状和尺寸与凹槽并不完全匹配,是由多个简单形状的金箔片通过组合拼接而成,如多个凹槽中由2~3张几何形金箔片组合而成,“瓜子”形状凹槽仅粘贴了一张长方形金箔片,金箔片未根据凹槽的形状进行裁剪,且留有较大空白区域未被覆盖。基于这些特征,我们对金箔片进行了分类,按照组合规律逐一进行回贴。在金箔片背面涂覆胶粘剂(丙烯酸乳胶Primal SF016)后,使用镊子将其精确地贴合于凹槽内,并通过适度施压,利用胶粘剂的固有黏性,实现对轻微变形金箔片的平整粘贴。在保护修复过程中,全程佩戴防护口罩,以避免呼吸气流导致金箔片位移。鉴于金箔片残缺较多且数量有限,仅对四种类型中较为完整的七件琉璃片进行了金箔片的回贴,共计回贴金箔片约两百张。

通过科学检测,确定了“玉衣片”的材质为琉璃,且采用单面压模法制作,助熔剂是重晶石,风化产物为碳酸铅。新发现金缕由长条形金箔片包卷线绳而成。经保护修复,成功拼对残片261块,回贴金箔片近两百张,最大限度再现了琉璃片的原状。经分类整理,共有琉璃片7种类型38件,其形制多样,有方形、菱形等。无孔琉璃片10件,其余为有孔,数量最多的一类米黄色长方形琉璃片,长5.7、宽4.5、厚0.3cm,一面平整,另一面有纹饰,四角单面钻喇叭状穿孔,孔壁向内收敛。琉璃片凹槽中镶嵌了金箔片和云母片装饰,纹饰精美,制作工艺精湛。该保护修复工作不仅为该批文物的分类和价值评估增加了科学依据,同时也为汉代玉文化、金缕制作工艺以及汉长沙国相关研究领域提供了新的实物资料,还可为考古发掘出土散落分布、严重残碎的文物提供保护修复技术参考。

(作者单位:长沙市文物考古研究所)