

文物安全监测技术在明代砖石建筑迁移工程中的应用

朱宇华，张淙洲

北京建筑大学 建筑与城市规划学院，北京 100037

摘要：王安墓遗址位于今北京市房山区常乐寺村，其中心区域的两座砖石宝顶始建于明代。2022年，受房山区京西棚户区改造项目的影响，最终决定以迁移的方式对王安墓两座宝顶实施保护工作。本文以王安墓宝顶迁移工程为例，从宝顶及地表沉降监测、倾斜监测、裂缝监测、振动监测几个方面阐述文物安全监测技术在迁移工程中的具体应用方法，以期对同类型项目提供有益借鉴。

关键词：文物监测；明代砖石建筑；迁移工程

The Application of Cultural Relics Safety Monitoring Technology in the Relocation Project of Ming Dynasty Brick and Stone Buildings

Zhu Yuhua,Zhang Congzhou

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, School of Architecture and Urban Planning, Beijing 100037

Abstract : Wang An's Tomb is located in Changle Temple Village, Fangshan District, Beijing, and the two masonry roofs in the centre of the tomb were built in the Ming Dynasty. 2022, under the influence of the West Beijing Shantytown Renovation Project in Fangshan District, it was finally decided to implement the protection work of the two roofs of Wang An's Tomb in the way of relocation. This paper takes the relocation project of Wang An's tomb as an example, and describes the specific application methods of heritage safety monitoring technology in the relocation project from several aspects, such as settlement monitoring, tilt monitoring, crack monitoring and vibration monitoring of the treasure roof and the surface, in order to provide a useful reference for the same type of project.

Key words : heritage monitoring; Ming Dynasty masonry building; relocation project

一、项目背景

王安墓遗址位于今北京市房山区常乐寺村，背靠千灵山，面朝青龙湖，坐北朝南，占地约150亩。其中心区域现存两座宝顶，墓四周有巨石砌成的高大的卵石墓墙环护，遗址内有河道、神道以及祭祀建筑遗址，整体格局清晰完整，具有较高的历史价值和科学价值。2022年，受房山区京西棚户区改造项目的影响，王安墓遗址本体及保护环境受到威胁，经多方论证，最终决定以迁移的方式对文物实施保护工作。

位于墓园中心的两座宝顶分属于王安墓和王之佐墓，是王安墓文物迁移保护工程的重点保护对象，距今已有三百多年历史。两座宝顶为明代三合土中空窑体结构，下砌砖宝顶和后期保护性混凝土台座。

文物安全检测是此次迁移保护项目中重要的一环，是保证文物安全迁移的重要措施。根据现场勘察和方案批文要求，项目团队确定针对王安墓宝顶的监测内容主要为宝顶及地表沉降监测、宝顶倾斜监测、宝顶裂缝监测、宝顶振动监测几个方面。

二、宝顶及地表沉降监测

(一) 沉降观测精度设计

根据《建筑施工测量技术规程》DB11/T446-2007，本项目

拟采用二等沉降观测精度，即高程中误差为 ± 0.5 ，相邻点高差中误差 ± 0.03 ，往返较差、附合或环线闭合差为 $\pm 0.30n$ 。

(二) 基准点布置及埋设

基准点布设原则是水准基点应埋设在变形区域外，亦可利用变形区外稳固的建筑物、构筑物设立墙角基准点。针对本工程特点，结合现场条件，为便于基准点的长久保存，拟埋设不少于4个墙角水准点，构成基准网，整个建筑使用一套基准系统。基准点采用地面水准点布设基准点，数量不少于3个，基准点在埋设时应选择变形影响区域外基础稳固的地面，以保证沉降基准点的稳定。

(三) 沉降观测点布置及埋设

按照《建筑变形测量规范》JGJ 8-2016的要求，根据结构形式、基础形式及地质特点，为监控拟建建筑物的整体变形和局部变形，布置沉降观测点时应严格根据以下布点原则布设测点：一、建筑物四角或大转角等特征位置；二、基础底板四角处及其中部位置；三、重型设备基础和动力设备基础的四角部位；四、人工地基和天然地基的接壤处或建筑的不同结构的分界处。

(四) 沉降观测与成果计算

1. 观测要求

项目严格按照规范精密几何水准测量的要求进行观测、平差计算、整理成果。基准网观测按《建筑施工测量技术规程》DB11/T446-2007 一等水准测量的技术要求进行基准点各点之间、某

一基准点至建筑物上工作基点的往返观测，如有条件亦应构成附合或闭合几何图形；建筑物观测点按《建筑施工测量技术规程》DB11/T446-2007二等水准测量的技术要求施测，对于整栋楼应作为独立的变形体分别构成闭合水准路线进行观测后再进行联测，联测时关联点间应往返测量。每次观测时，必须按附合水准路线至少联测三个水准基点，以保证沉降观测工作时所必须的检核条件，减少测量误差的发生。

2. 成果检验和处理

观测完成后形成原始电子观测文件，通过数据传输处理软件传输至计算机，检查合格后使用专用水准网平差软件进行严密平差，得出各点高程值。

平差计算要求如下：一是应使用稳定的基准点为起算，并检核独立闭合差及与1个以上的基准点相互附合差；二是使用专业平差软件按严密平差的方法进行计算；三是平差后数据取位应精确到0.1mm。

通过观测点高程值计算阶段沉降量、累计沉降量等数据。每次观测应记载施工进度、增加荷载量、建筑物变形、地面沉降及其它有关异常情况。

三、宝顶倾斜监测

(一) 监测方法

由于迁移施工对于建筑结构稳定性影响较大，稍有不慎就会导致结构的变形乃至坍塌。因此在宝顶平移过程中，为便于指导施工，及时预警，采用远程自动化监测方法。

倾斜智能监测系统同样采用三级架构模式，包括现场监测设备、采集单元、中心系统和监控终端。根据项目要求，现场监测设备拟采用双轴数显倾角仪进行动态实时监测，其专业用于测量物体相对水平位置的倾斜角度。

在运输途中，除了倾斜外，裂缝也需要远程实时监控量测，且两套系统均为三级架构模式，因此二者可以统一采用同一数据采集箱进行安置发送数据。

(二) 仪器监测频率

宝顶平移施工时人员难以靠近，施工处于动态过程，采用常规监测手段难以达到有效监测的目的，监测周期也无法起到指导施工的作用。故宝顶倾斜监测拟采用无线智能化监测手段。在每个宝顶侧壁布设一个高精度倾斜测量智能传感器，传感器可进行双轴倾角测量。平移施工前设置自动监测频率为5分钟/次，平移施工期间监测频率设为2秒/次，在施工过程中实时进行监测。

(三) 仪器固定方法

固定监测仪器的位置需牢固平整，与宝顶整体密接良好，不得松动脱落。为减少对结构物的损伤，固定监测仪器前用软布或绵柔纸清洁粘贴面，不得在结构表面钉膨胀螺丝或水泥钉等可能引起结构破坏的固定行为，而应选用对结构无损的中性胶进行仪器固定。

(四) 数据采集及报警设置

数据采集采用自动化监测，传输采用4G模块进行传输。无线

倾角仪自动获取平移施工前宝顶倾斜、平移施工过程中和施工后宝顶倾斜的监测数据、实时上传至监管平台，通过平台进行数据分析、预警以及管理。施工期间振动速度达到设计给的倾斜度限值（4‰）的50%时进行提醒。当达到振动限值80%时停止施工并分析原因，找到解决措施后继续施工。

四、宝顶裂缝监测

(一) 监测方法

在迁移施工前检测出的结构裂缝数据结果的基础上，对已存在的非受力裂缝，在迁移过程中，应保证其裂缝变形宽度小于5mm。

考虑到在搬迁过程中，采用人工采集方法，裂缝已不具备实时监测的现实条件，故在施工过程中，采用相应无线传感器进行实时监测。裂缝传感器选用回弹式位移传感器对已有结构裂缝进行实时监测，一旦达到预警值及时发出安全预警，以通知相关人员采取处置措施来保证结构的安全性。

(二) 仪器监测频率

宝顶平移施工时人员难以靠近，施工处于动态过程，采用常规监测手段难以达到有效监测的目的，监测周期也无法起到指导施工的作用。故宝顶裂缝监测拟采用无线智能化监测手段。明显裂缝处布设一个高精度裂缝测量智能传感器。平移施工前设置自动监测频率为5分钟/次，平移施工期间监测频率设为1分钟/次，在施工过程中实施进行监测。

(三) 仪器固定方法

固定监测仪器的位置需牢固平整，与宝顶整体密接良好，不得松动脱落。为减少对结构物的损伤，固定监测仪器前用软布或绵柔纸清洁粘贴面，不得在结构表面钉膨胀螺丝或水泥钉等可能引起结构破坏的固定行为，而应选用对结构无损的中性胶进行仪器固定。

(四) 数据采集及报警设置

数据采集采用自动化监测，传输采用4G模块进行传输。裂缝测量仪自动获取宝顶已有裂缝的监测数据、实时上传至监管平台，通过平台进行数据分析、预警以及管理。当裂缝监测数据大于设计给定裂缝宽度值（小于5mm）的50%时进行提醒。当裂缝达到限值80%时停止施工并分析原因，找到解决措施后继续施工。

五、宝顶振动监测

(一) 监测方法

宝顶振动监测采用基于4G通信技术的无线智能振动监测系统，具有免布线、快速安装、数据采集、多参数集成及智能预警等特点的自动化监测系统。采用锂电池供电，具备低功耗优化机制，配接外部电源实现长期在线监测。

(二) 仪器监测频率

宝顶平移施工前和施工后采用低频振动传感器进行动力特性

测试，确定宝顶的自振频率。宝顶平移施工时人员难以靠近，施工处于动态过程，采用常规监测手段难以达到有效监测的目的，监测周期也无法起到指导施工的作用。故宝顶振动监测拟采用无线智能化监测手段。宝顶结构最高处布设一个高精度振动传感器监测宝顶平移过程中的振动速度。平移施工前后各测试 1 次，平移施工期间监测频率设为 1 分钟 / 次，在施工过程中实时进行监测。

(三) 仪器固定方法

固定监测仪器的位置需牢固平整，与宝顶整体密接良好，不得松动脱落。固定监测仪器前用软布或绵柔纸清洁粘贴面，不得在结构表面使用可能引起结构破坏的固定行为，而应选用对结构无损手段进行仪器固定。

(四) 数据采集及报警设置

数据采集采用自动化监测，振动传感器自动获取宝顶振动的监测数据、实时上传至监管平台，通过平台进行数据分析、预警以及管理。施工期间振动速度达到设计给的振动限值 (0.6m/s) 50% 时进行提醒。当振动速度达到振动限值 80% 时停止施工并分析原因，找到解决措施后继续施工。

六、智能化监测平台

智能化监测平台是基于互联网、云计算、大数据的大型软件

服务平台，是将物联网和基云计算技术有机集合的一个平台，由一系列服务器承载，以大数据智能分析、流媒体自适应处理为核心算法，能够完成大数据存储、计算分析、分发、认证、安全、备份等功能，是各类物联网应用的核心平台，此平台完全能够呈现物联网的整体架构，最上层以云计算技术实现整体的管理和控制。

本项目将宝顶平移施工期间对宝顶的倾斜监测、既有裂缝监测和振动监测纳入平台整体监测。搭建由智能化健康监测仪（包括倾角传感器、裂缝监测仪和振动传感器等）、云服务器平台系统、BS 客户端远程管理、手机 APP 及短信报警、监测指挥中心组成的智能化监测平台系统。

七、结语

综上所述，本文以王安墓迁移保护工程为例，提出文物监测技术在明代砖石建筑迁移工程中的应用方式。迁移施工本就对建筑结构稳定性影响较大，也是文物保护项目施工中难度较大的一种方式，因此文物安全监测技术就显得尤为重要，本文旨在就文物保护迁移项目中的文物安全问题提出可能的参考方案。

需要提到的是，虽然现代监测技术具有一定的泛用性，但每一个文物保护项目都是不可复制的，在制定监测方案时还需具体问题具体分析，从文物安全的角度出发，制定适宜的保护策略。

参考文献：

- [1] 曹吉昌, 李美华, 张风亮, 等. 革命文物窑洞建筑智能化远程监测系统设计与应用 [J]. 住宅产业, 2023(06):40-42.
- [2] 朱宇华, 徐睦, 乜小珂. 基于三维激光扫描技术的古代城台及城楼的结构变形监测与分析方法研究 [J]. 北京建筑大学学报, 2022, 38(02):68-73.
- [3] 王天文, 尹吉丽, 张琪, 等. 南京城墙监测方法初探 [J]. 中国文化遗产, 2023(02):95-100.
- [4] 胡永森, 周朝阳, 王力. 遥感在文物保护中的应用研究 [J]. 工业安全与环保, 2023, 49(07):32-34.