

玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统(II): 结构形变监测数据的分析

谢丽宇^{1,2} 张睿¹ 卢文胜^{1,2,*} 张凤亮¹

(1. 同济大学结构防灾减灾工程系, 上海 200092; 2. 同济大学建筑物移位技术研究中心, 上海 200092)

摘 要 采用“玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系统(I): 监测系统的设计与实现”中所建立的设计与实现方法, 可以实现大雄宝殿移位过程中的实时监测, 并得到大量的监测数据。首先, 介绍了监测数据的处理原则和处理方法; 其次, 详细分析了数据, 得到了结构整体姿态、木柱、榫卯节点和佛像的变形情况; 最后, 基于监测数据和相关文献分析得到的相关监测参数的限值, 得出了移位施工过程对结构性能的影响并对结构的安全性能进行评价。结果表明, 设计合理的移位监测系统可以真实可靠有效地监测结构的性能状态, 具有一定的研究价值和工程指导意义。

关键词 玉佛禅寺, 大雄宝殿, 移位, 监测系统, 数据分析

DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2020.04.002

Translocation Monitoring System for the Mahavira Hall of Jade Buddha Temple (II): Analysis of Monitoring Data

XIE Liyu^{1,2} ZHANG Rui¹ LU Wensheng^{1,2,*} ZHANG Fengliang¹

(1. Department of Disaster Mitigation for Structures, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Tongji University Building Replacement Technology Research Center, Shanghai 200092, China)

Abstract With the design and implementation method established in ‘Translocation Monitoring System for the Mahavira Hall of Jade Buddha Temple (I): Design and Implementation’, real-time monitoring during the translocation of Mahavira Hall has been realized and a large amount of monitoring data has been obtained. Firstly, the methods and principles of the data analysis were introduced. Then, the deformation of the overall structure, wooden columns, joints and the Buddha statues were obtained by analyzing the monitoring data. Finally, based on the monitoring data and limiting values from related literature, the influence of the translocation on the structural performance was obtained, and the safety performance of the structure was also evaluated. The results show that the performance of a structure can be monitored truly, reliably and effectively by designing a reasonable translocation monitoring system, which has certain research value and guiding significance for similar projects.

Keywords Jade Buddha Temple, the Mahavira Hall, translation, monitoring system, data analysis

0 引 言

采用姊妹篇《玉佛禅寺大雄宝殿移位监测系

统(I): 监测系统的设计与实现》中所建立的设计方法, 建立大雄宝殿移位监测系统, 实现大雄宝殿在移位施工中的实时监测, 以保证移位施工的安全进行。

收稿日期: 2019-03-08

基金项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0127600)

作者简介: 谢丽宇, 副教授, 主要从事结构健康监测、结构抗震与防灾和智能传感器研究。E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn

联系作者: 卢文胜, 男, 教授, 主要从事结构抗震与试验技术研究。E-mail: wally@tongji.edu.cn

玉佛寺移位监测系统由传感器系统、数据采集与无线传输系统、数据管理分析系统和网络终端组成。本工程的传感器系统由静力水准仪、倾角仪、激光位移计和应变计组成。静力水准仪测量主体结构的高程变化,激光位移计测量佛像和梁柱榫卯节点等关键部位的变形,倾角仪用于测量佛台和木柱等关键部位的倾斜变形,应变计测量佛台四周托换钢架的应变变化^[1-3]。

本文基于监测数据,研究结构整体姿态、木柱、榫卯节点和佛像的变形情况,进一步探讨移位施工对结构状态产生的影响并对结构的安全性能进行评价。

1 监测数据分析原则

玉佛寺大雄宝殿于2017年9月2日上午正式启动平移工程,并于9月8日上午平移到位;于2017年9月12日正式启动顶升工程,并于9月14日顶升到位。本次研究采用2017年8月29日至2017年9月9日期间的监测数据进行分析,时间包括移位前、移位中和移位后。为探讨移位施工对结构性能的影响,并对不同传感器的监测数据进行对比分析,本次研究的数据均取相对于初始值的变化值。

本工程采用的传感器拥有不同的采样周期,为方便数据分析,将监测数据以1 h为单位进行数据分析,类似于平滑处理,即取每1 h的监测数据平均值作为这1 h的监测数据代表值,因此所有监测数据的采样周期调整为1 h。

为验证采样周期调整为1 h的合理性,以一个静力水准仪的监测数据为例进行分析。静力水准仪原始监测数据的采样周期为30 s,分别绘制采样周期为30 s和1 h的时程变化曲线,结果如图1所示。可见采样周期为30 s和1 h的时程曲线几乎重合。因此,采样周期采用1 h可以满足数据分析的要求,本次研究除特殊说明外,采样周期均采用1 h。

2 结构形变分析

2.1 整体结构姿态变化

为监测整体结构的竖向变形,在围墙四个角部和中央佛台上布置了静力水准仪。其中静力水准仪HL2、HL4和HL5的位置是静力水准仪的基

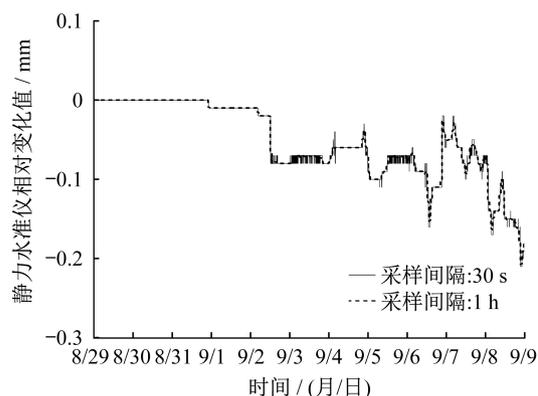


图1 静力水准仪变化值:不同采样间隔

Fig.1 Variation of the hydrostatic leveling: different sample interval

准点。绘制其他静力水准仪相对于基准点的相对变化值的时程曲线,如下图所示。由图中可见,在移位之前静力水准仪数值几乎保持不变。移位开始后,静力水准仪数值开始明显变化,离散性增强。其中,位于结构南侧顶推位置的静力水准仪HL-1、HL-3的变化较为明显,最大的竖向相对变形为2.1 mm;位于佛台的静力水准仪HL-6的变化相对较小,最大的竖向相对变形为0.6 mm。

在移位前后,分别选取A、B、C、D四个时间点,分别代表移位之前、移位开始、移位期间和移位结束(图2)。将静力水准仪按照相同基准点的原则,分成HL-1、HL-2、HL-3、HL-4和HL-5、HL-6三组。假定底盘结构是一个理想变形体,满足均匀连续性、各向同性和小变形假设。即底盘结构是由密实无空隙的连续分布的材料构成,物体上任一部分材料的力学性质都相同,材料沿不同方向都具有相同的力学性质。将每组静力水准仪的位置连成直线,并按照变形协调的原则连接成网格,绘制整体结构的竖向变形图示意图,如图3所示,其中虚线网格代表结构的初始位置。

2.2 木柱倾斜角

整体结构的倾斜会导致木柱倾斜,同理木柱的倾斜变化也反映了整体结构的倾斜情况。某些关键木柱上布置了倾角仪(IC5-IC-12),其中IC5和IC6为双轴倾角仪,测量木柱沿X/Y方向的倾斜角,其中IC7-IC-12为单轴倾角仪,测量木柱沿X方向的倾斜角。每个倾角仪测量的木柱偏移角如图4所示。由图可知,木柱倾斜角的变化范围在 $-0.4^{\circ} \sim 0.4^{\circ}$ 。按照《古建筑木结构维护与加固技术规范》^[4]第4.1.7条的规定,对于抬梁式结构,柱

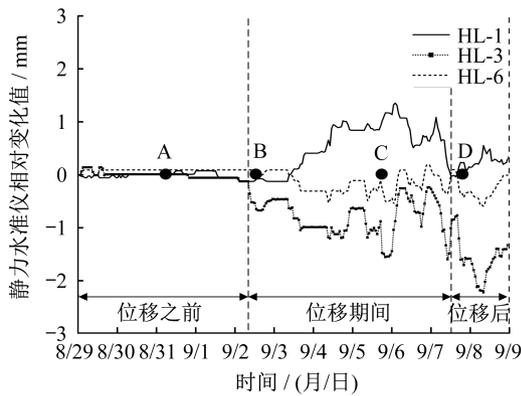


图2 静力水准仪变化值

Fig.2 Variation of the hydrostatic leveling

头与柱脚的相对位移应大于1/90柱高,换算成倾斜角,即倾斜角不应大于 0.637° 。因此,木柱的倾斜角变化满足规范要求。

以倾角仪IC7测量的倾斜角变化量为例,研究其在移位施工前后的数据变化。结果如图5所示,表明在移位施工之前和之后,木柱倾斜角变化不大,离散性较小,异常值较少。而在移位施工期间,木柱倾斜角变化变大,离散性增强,异常值

增多。

2.3 木柱水平方向偏移角

对于安装双轴倾角仪的木柱,可以测得木柱沿X/Y方向的倾斜角,通过数学关系式可求出柱子的水平偏移角,计算原理如图6所示。

以安装双轴倾角仪IC-5的木柱为例,木柱沿X/Y方向的倾斜角如图7所示,木柱水平方向偏移角计算结果如图8所示。由结果可知,木柱沿X/Y方向的倾斜角变化趋势相似。尤其在移位施工之前,木柱沿X/Y方向的倾斜角变化几乎相同,水平偏移角始终在 45° 左右。可见,在移位施工前,该木柱的倾斜角度虽然在不断变化,但木柱的水平偏移方向即倾斜趋势是趋于稳定一致的。但在移位施工以后,木柱倾斜角和水平偏移角开始明显变化,离散性增强。

2.4 榫卯节点变形

激光位移计分别安装在梁的上下表面,测得其与木柱的相对距离,可求得榫相对于木柱的位

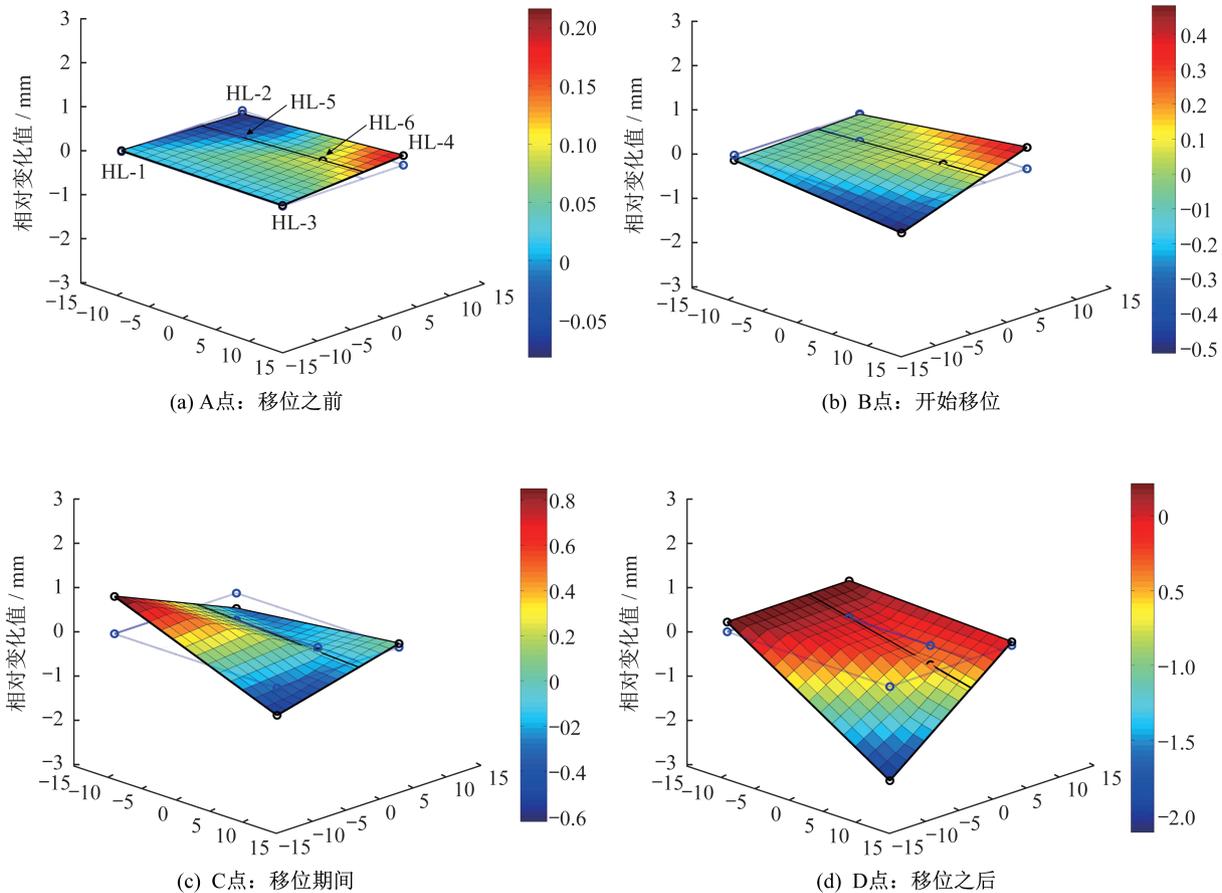


图3 整体结构竖向变形示意图(单位:mm)

Fig.3 Overall structural settlement deformation (Unit:mm)

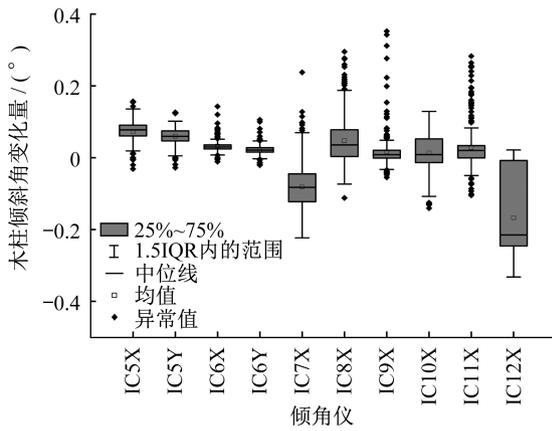


图 4 木柱倾斜角变化值

Fig.4 Angle of inclination variation of wooden columns

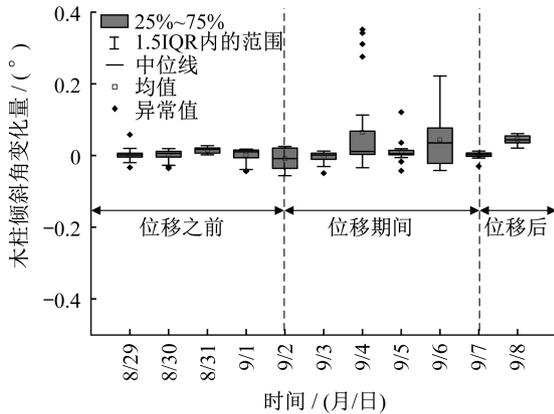


图 5 某一木柱倾斜角变化值

Fig.5 Angle of inclination variation of a wooden column

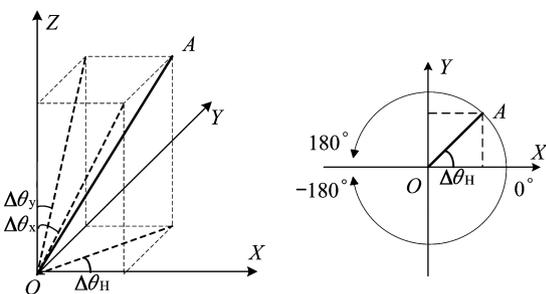


图 6 水平偏移角计算原理

Fig.6 Calculation principle of horizontal offset angle

移,且在已知梁高的情况下,可以得出梁相对于木柱的转角。计算原理如图 9 所示。通过数据分析,在移位前后,大梁与木柱交界的榫卯节点部位没有发生明显的变形。

2.5 佛台托换钢架应变

在佛台的托换底盘钢结构的四周表面布置应变计 SG1-SG4。钢结构应变在平移顶升过程中的数据变化幅度小于 45 微应变,设计规定的钢结

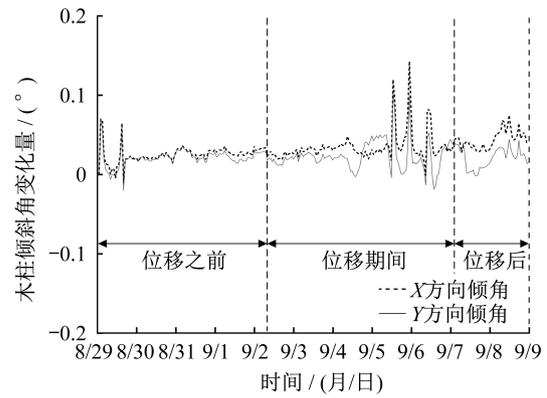


图 7 木柱倾斜角

Fig.7 Angle of inclination of wooden columns

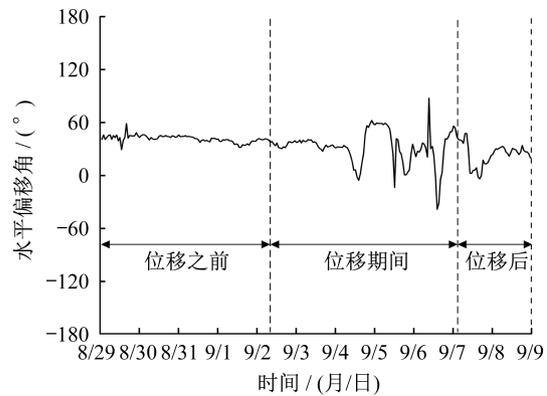


图 8 木柱水平偏移角

Fig.8 Horizontal offset angle of wooden columns

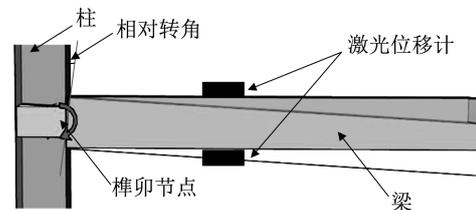


图 9 节点变形计算原理

Fig.9 Calculation principle of joint deformation

构微应变在 -100~100 微应变范围内(按钢材设计强度的 1/10 取值)^[5],满足要求(图 10)。

2.6 佛像倾斜

佛像的支撑框架上布置了 6 个激光位移计 LR5-LR10,其中 3 个安装在支撑框架的高位,另外 3 个安装在支撑框架的低位。激光位移计测得相应位置的距离变化量,在已知支撑框架高位与低位高度差的情况下,可以得出佛像沿 Y 方向的倾斜角(图 11)。

佛台上也安装了 2 个双轴倾角仪 IC1 和 IC2,可以测得佛台沿 Y 方向的倾斜角(图 12)。对比图

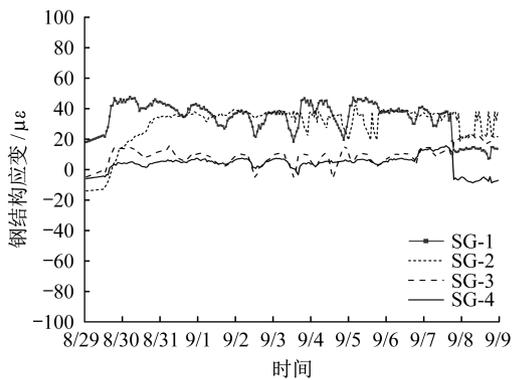


图10 钢结构应变

Fig.10 The strain of steel structure

11和图12的结果可以发现,在移位施工前,佛台和佛台上的佛像几乎没有发生倾斜。移位施工以后,佛台和佛像的倾斜角变化量增加,并且离散性增强。同时,佛台和佛像整体倾斜方向一致。

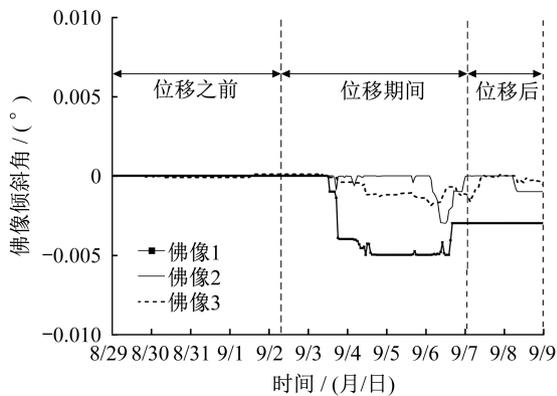


图11 佛像倾斜角

Fig.11 Angle of inclination of buddha statue

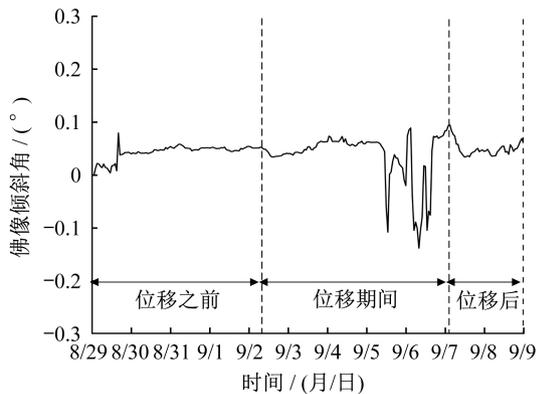


图12 佛台倾斜角

Fig.12 Angle of inclination of pedestal

3 结论

基于监测数据,并依据以往文献资料总结和

实际工程经验^[6-9],可以得出移位施工过程中,主体结构各个监测项目的实际变化值,进而得到移位施工对结构产生的影响。将结论总结如下,并对结构的安全性能进行评价。

(1) 在结构移位施工期间,安装在墙面、佛台和木柱上的静力水准仪和倾角仪测量数据变化量增加,离散性增强,说明玉佛寺大雄宝殿在移位施工过程中,整体结构产生了竖向不均匀变形。且由于移位的顶推装置布置在主体结构的南侧,结构南侧的沉降变化量和离散性都比结构其他部位更大。但整体变化量不大,可知整体结构在平移顶升施工过程并未发生显著的偏移、下沉或旋转。

(2) 在结构移位施工期间,木柱倾斜角和水平偏移角变化量增加,离散性增强。但整体变化量不大,且在移位施工之后,木柱的倾斜角和水平偏移角变化量减小,离散性减弱。表明移位施工过程中,木柱并未发生显著的倾斜或下沉。

(3) 安装在大殿顶部横向、纵向梁上的激光测距仪的测量数据在移位施工前后几乎保持不变,可知柱子在平移过程并未发生显著的倾斜或下沉,且大梁与木柱交界的卯榫节点部位没有发生明显的变形。

(4) 佛台托换钢结构在结构移位施工过程中的应变变化幅度在设计规定的钢结构微应变范围内,满足要求。表明移位施工过程中,佛台及佛台托换结构并未发生显著的变形。

(5) 安装在佛台上的静力水准仪和倾角仪,以及正对佛像的激光测距仪的测量数据在平移期间变化量增加,离散性增强。但变化量不大,前后几乎保持不变,可知佛像在平移过程与整体结构几乎保持相对静止,并未发生显著的相对移动、倾斜或旋转。且不同传感器的监测数据可以相互印证,证明监测方案合理可靠。

(6) 移位监测系统可以真实反映移位施工过程对结构性能的影响。不仅可以得到结构整体姿态的变化,也可以得到关键部位的变形位移情况,包括木柱、榫卯节点和佛像等。通过设定合理的监测方案,移位监测系统可以实时监控并反馈监测情况,保证施工的安全进行。对移位工程和木结构的监测系统设计和数据分析有一定的工程指导意义。

参考文献

- [1] 王建永, 卢文胜, 李伟, 等. 木结构庙宇建筑整体平移前的加固技术[J]. 建筑施工, 2018(3):302-305.
Wang Jianyong, Lu Wensheng, Li Wei, et al. Reinforcement technology before integral translation of wood structure temple building [J]. Building Construction, 2018(3):302-305.(in Chinese)
- [2] 王建永, 袁苗苗, 卢文胜, 等. 木结构庙宇建筑整体平移与托换技术[J]. 建筑施工, 2018(3):306-309.
Wang Jianyong, Yuan Miaomiao, Lu Wensheng, et al. Monolithic moving and underpinning technology for wood structure temple building [J]. Building Construction, 2018(3):306-309.(in Chinese)
- [3] 卢文胜, 李轩. 上海玉佛寺大雄宝殿隔震就位连接关键技术[J]. 建筑施工, 2018(3):310-311.
Lu Wensheng, Li Xuan. Key technology of seismic isolation connected in place for main hall of Shanghai Jade Buddha Temple [J]. Building Construction, 2018(3):310-311.(in Chinese)
- [4] 四川省建筑科学研究院. GB 50165—92 古建筑木结构维护与加固技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
Sichuan Institute of Building Research. GB 50165—92 Technical code for maintenance and strengthening of ancient timber buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993.(in Chinese)
- [5] 中华人民共和国建设部. GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50017—2017 Standard for design of steel structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.(in Chinese)
- [6] 林冬勇. 木结构变形监测与节点损伤识别研究[D]. 福州: 福州大学, 2014.
Lin Dongyong. Study on deformation monitoring and damage detection of joints in ancient timber buildings [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.(in Chinese)
- [7] 吴二军, 李爱群. 建筑物整体平移工程施工监控指标及其限值确定[J]. 建筑结构, 2006(7):57-59.
Wu Erjun, Li Aiqun. Construction monitoring indexes and determination of the limit value for building monolithic moving engineering [J]. Building Structure, 2006, 36(7):57-60.(in Chinese)
- [8] 周广东, 李爱群, 李杏平, 等. 高层建筑结构平移施工全过程实时监测分析[J]. 建筑结构, 2012(4):139-143.
Zhou Guangdong, Li Aiqun, Li Xingping, et al. Analysis of real-time whole process monitoring for high-rise structural relocation moving [J]. Building Structure, 2012, 42(4):139-143.(in Chinese)
- [9] 杜永峰, 杨巧红, 张太亮. 建筑物带基础整体移位模拟及结构受力状态监测参数[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(6).
Du Yongfeng, Yang Qiaohong, Zhang Tailiang. Simulation of unitary shifting of buildings with foundation and parameters of loading condition monitoring [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(6).(in Chinese)