

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.01.002

慈灯寺金刚宝座塔动力特性测试分析

卢俊龙¹, 李嘉恂², 李 凯²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了研究内蒙古呼和浩特市慈灯寺金刚宝座塔的动力特性,应用动态测试系统对该塔在环境激励下的振动响应进行了测试,通过时域及频域分析得到金刚宝座上五座小塔的自振频率及振型;并建立数值模型计算结构的动力特性,通过调整计算参数,使计算结果与测试结果一致,进而对动力特性进行分析。结果表明:角部四塔结构的前2阶自振频率测试结果基本接近,但均略低于中塔的自振频率,各塔前2阶振型曲线形状相似,但振型坐标略有区别;数值计算时设置金刚宝座后,各小塔振动频率计算结果降低,振型坐标增大。因此各小塔结构质量及刚度沿高度的分布规律基本一致,但因各塔结构损伤状况不同,引起局部刚度削弱,各自振型坐标及阻尼略有区别,同时金刚宝座对古塔动力特性的计算结果有一定影响。

关键词: 金刚宝座塔; 砖石古塔; 动力特性; 数值模拟

中图分类号: TU362; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)01-0007-06

Analysis of dynamical test for a masonry vajra throne pagoda in Cideng Temple

LU Junlong¹, LI Jiayun², LI Kai²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To study the dynamic characters of the vajre throne pagoda of Cideng Temple in Hohhot, Inner Mongolia Autonomous Region, the vibration response of the pagoda is test excited by ground random on dynamical test equipments. The vibration frequencies and modes of five towers above the vajre are acquired by analysis in time domain and frequency domain. The numerical model is built for the calculation of the dynamical characters of the structures, with the results being consistent with those of the test by adapting to the parameters and the dynamical characters being analyzed. As results, the first two stage vibration frequencies are nearly among the four pagodas at the corner but they are fewer than those of the middle pagoda. The first two stage vibration mode curves are similar and the vibration mode coordination values appear in a different way. When the vajre is considered to be in simulation calculation, the frequencies of each pagoda are reduced while the mode coordination values are increased. Therefore, the distribution of mass and stiffness of each pagoda is consistent along with height, and however the vibration mode coordinate values and damp are influenced by local weaken stiffness because of the differences in structural damage to each pagoda. Nevertheless the vajre throne is effected to the results of dynamical characters of the pagoda.

Key words: vajra throne pagoda; masonry pagoda; dynamical character; numerical simulation

我国历史悠久,现存古建筑是我国历史文明的重要标志,砖石古塔作为古代高层建筑的杰出代表及历史文化遗产,也是研究我国古代政治、文化、宗教的良好素材。然而,因砖石古塔建造年代久远,并受到自然与人为的破坏,结构残损严重,若长期受到

振动影响或遭受地震作用,结构极易破坏。因而对现存砖石古塔进行振动或抗震评估,是古塔建筑保护的重要工作,而结构的动力特性是进行评估的重要依据之一。

为了对砖石古塔动力特性进行分析,李德

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308455);陕西省自然科学基金资助项目(2015JM5206);住房和城乡建设部科技计划项目(2014-K2-018);陕西省博士后基金资助项目;西安理工大学科学研究计划资助项目(2015CX018)

作者简介: 卢俊龙,男,博士,副教授,研究方向为工程结构抗震、地基与基础相互作用。E-mail: lujunlong@sohu.com

虎^[1-2]、文立华^[3]等建立了底端固定沿高度阶梯形变化的等截面悬臂杆及变截面悬臂杆简化模型,在此基础上,袁建力^[4-6]、樊华^[7]等采用经典理论、测试数据和计算模拟相结合来分析砖石古塔动力特性,给出了古塔周期简化计算公式,并对虎丘塔及中江南塔的动力特性进行了测试分析。陈太聪^[8]等对广东金鳌洲塔进行了动力特性测试及数值计算,且研究了结构的等效弹性模量。蔡辉腾^[9]等对福建泉州东、西塔结构脉动反应进行测试和模态分析,并提出了砖石古塔自振周期的计算公式。

综合相关研究可以发现,砖石古塔动力特性与其结构形式密切相关,金刚宝座塔结构特殊,且金刚座对上部古塔动力特性具有一定影响。为此,以内蒙古呼和浩特市慈灯寺金刚宝座塔为对象,通过进行原位动力测试及数值计算,对比结构动力特性并分析金刚宝座的影响,为砖石古塔动力特性及结构损伤分析提供参考。

1 慈灯寺塔概况

慈灯寺塔(图 1)又名五塔寺金刚宝座舍利塔,始建于清雍正五年(公元 1727 年),后寺宇败落,仅存五塔。该塔由台基、宝座和五塔三部分组成,台基平面为矩形,台基高为 0.68m,宝座平面呈凸字形,至顶面高 6.88m,宝座内主塔室为拱形,东西两侧各一室与主室相通,东室内设有梯道可通宝座顶面。金刚座顶面中央及四隅分布五座密檐式实心方塔,皆由须弥基座、密檐塔身及塔刹组成,中塔自宝座顶面起高为 8.91m,边塔为 6.76 m。宝座及五塔均以夯土筑成,表面以鎏金砖雕装饰。



图 1 慈灯寺金刚宝座塔

Fig. 1 Vajra throne pagoda in Cideng Temple

因建造年代久远,在自然环境与人类活动的影响下,宝座与塔身鎏金饰面及结构内部均存在严重损坏,具体如图 2 所示,主要表现为结构饰面砖雕风化严重,塔体结构局部开裂,顶部破坏及掉落。



图 2 慈灯寺塔破坏状况

Fig. 2 Damage situation of Cideng pagoda

可见,因自然环境作用导致古塔结构局部破坏,引起整体结构刚度降低,对古塔动力特性有一定影响。以下结合原位动力测试试验,对慈灯寺塔体结构动力特性进行分析。

2 古塔原位动力测试

2.1 测试设备

因文物保护要求及测试环境制约,对结构在地面随机激励下的振动信号进行采集,测试系统由中国地震局工程力学研究所研发,主要包括:941B 型超低频拾振器,测试时采用中速度档位,灵敏度为 $2.4\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}$,有效通频带为 $0.25 \sim 100\text{Hz}$,与放大器连接后的分辨率为 $4 \times 10^{-7}\text{m}/\text{s}$;信号放大器,最大放大倍数为 5000,本次测试中放大倍数设置为 100;DA1001 型动态信号采集器、导线、笔记本电脑。

2.2 测点布置

为研究方便起见,将五座小塔按方位分别命名为东北塔、东南塔、西南塔、西北塔、中塔。为了避免扭转振动对塔体水平振动信号的干扰,应将传感器放置于结构的刚度中心处,但因各塔为实心结构,故将传感器放置于各楼层屋檐根部。先将水平毛玻璃板以 502 胶粘贴于测点位置,再将传感器以橡皮泥与玻璃板粘结。测点布置如图 3 所示,中塔测点布置于基座及各层顶,分别记为测点 1 至测点 7;边塔测点布置于基座及塔体各层顶,分别记为测点 1 至测点 6,平面图中 E

表示东向,S表示南向。

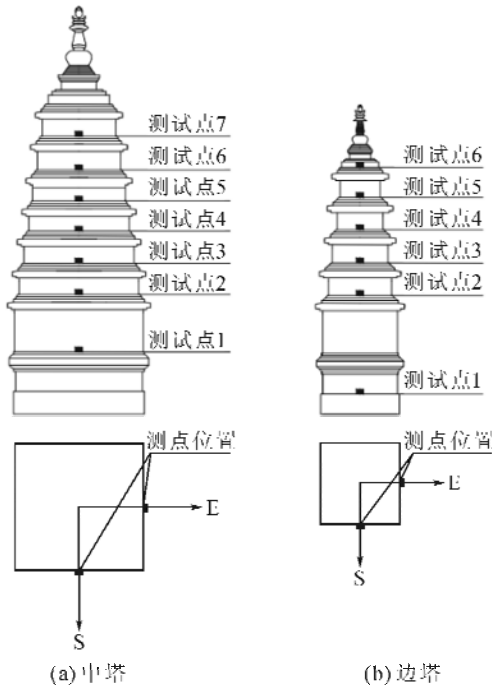


图3 测点布置示意图

Fig. 3 Location to the test points

在文物管理部门协助下,测试时限制参观古塔,以避免其它振动信号的干扰,通过系统自动去直流消除初始电压信号干扰,分别持续采集 30min 东西方向与南北方向的振动信号,各采集 3 次。

2.3 测试结果

因慈灯寺塔平面为正方形,沿东西方向水平振动与沿南北方向水平振动的动力特性测试结果接近,故以中塔东西方向测试结果为例进行分析。

数据采集完成后,截取东西方向 10min 的振动信号进行数字滤波,而后做时域及频域分析。图 4 及图 5 为各楼层滤波后持时为 60s 的一个振动信号样本。

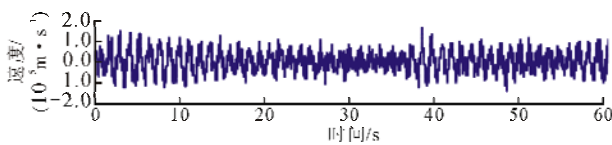


图4 中塔楼层时域信号

Fig. 4 Vibration signal at middle pagoda

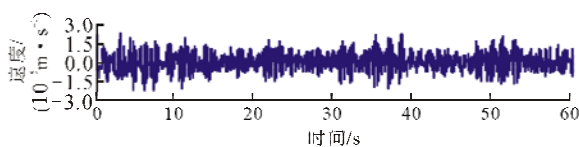


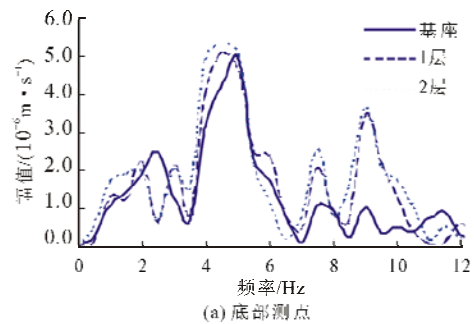
图5 边塔楼层时域信号

Fig. 5 Vibration signal at side pagoda

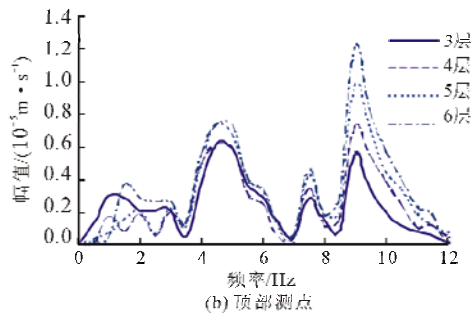
2.4 自振频率

由图 4 及图 5 可见,各测点振动信号相对平稳,无明显干扰信号,故对各楼层振动信号进行积分变换得到其频域响应曲线,如图 6 所示。

由图 6 可见,除地面测点外,其余各测点频域响应曲线中峰值所对应的频率值较为接近,该值即为古塔结构各阶自振频率,将各测点所对应的同阶频率取平均值后,即可得到中塔的前 2 阶自振频率。采用同样的方法对测试结果进行处理,得到其它各塔的前 2 阶自振频率,将结果汇总整理,如表 1 所示。



(a) 底部测点



(b) 顶部测点

图6 中塔各楼层频域响应

Fig. 6 Response in frequency domain at each floor

表 1 东西方向振动频率测试结果

Tab. 1 Test results of the vibration frequencies along EW

| 塔名 | 第 1 阶频率/Hz | 第 2 阶频率/Hz |
|-----|------------|------------|
| 东北塔 | 5.68 | 8.78 |
| 东南塔 | 5.68 | 8.78 |
| 西北塔 | 6.20 | 8.78 |
| 西南塔 | 5.16 | 8.78 |
| 中塔 | 4.95 | 9.29 |

由表 1 可见,除中塔外,其余各塔的前 2 阶自振频率值均较为接近。因中塔结构高宽比较大,各阶频率均小于其余各塔。

2.5 振型分析

依据地面随机激励下的动力测试结果,将古塔等效为一多自由度体系,对应于第 i 阶频率处的振型坐标之比满足^[10]:

$$\frac{\varphi_{1i}}{\varphi_{2i}} = \frac{S_{12}(\omega_i)}{S_{22}(\omega_i)} \quad (1)$$

式中, φ_{1i} 、 φ_{2i} 分别为测点 1 和测点 2 的第 i 阶振型坐标; $S_{12}(\omega_i)$ 为测点 1 与测点 2 的互功率谱峰值; $S_{22}(\omega_i)$ 为测点 2 的自功率谱峰值。

通过各测点信号的功率谱分析, 由式(1)得到各塔的前 2 阶振型坐标后, 绘制振型图, 如图 7 所示。

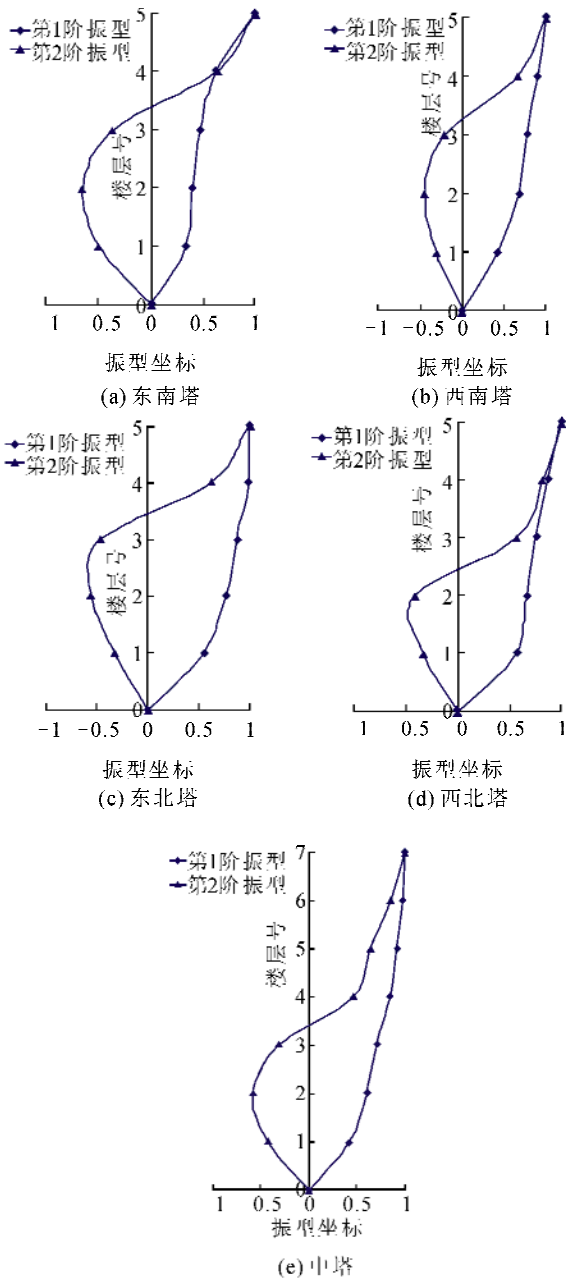


图 7 沿东西方向振型图

Fig. 7 Mode shapes of the pagoda along EW direction

由图 7 可见, 各塔的前 2 阶振型曲线形状相似, 但中间楼层的振型坐标略有区别。这说明各塔结构质量及刚度沿高度的分布规律基本一致, 但因各塔结构损伤状况并不相同, 引起局部刚度变化, 所以对振型坐标略有影响。

2.6 阻尼分析

通过计算中塔各测点的功率谱, 依据功率谱曲线按式(2)功率谱半带宽法^[11], 计算得到各阶振型的模态阻尼比, 如表 2 所示:

$$\zeta_i = \frac{\Delta\omega}{2\omega_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中, ζ_i 为第 i 阶振型阻尼比; $\Delta\omega$ 为半功率点幅值所对应的频率带宽; ω_i 为第 i 阶自振频率。

表 2 各测点的阻尼比

Tab. 2 Damping ratios in each test point

| 测点 | 一阶振型/% | 二阶振型/% |
|----|--------|--------|
| 2 | 2.62 | 0.12 |
| 3 | 3.28 | 0.63 |
| 4 | 2.13 | 0.66 |
| 5 | 2.11 | 0.63 |
| 6 | 1.71 | 0.74 |
| 7 | 3.65 | 0.42 |
| 平均 | 2.58 | 0.59 |

由表 2 可见, 按各测点测试结果计算所得的第 1 阶振型对应的阻尼比相差较大, 而各测点第 2 阶振型的阻尼比计算值则较为接近。

3 数值计算

采用有限元软件 Abaqus 计算该塔动力特性。结构材料计算参数参考相关文献取值, 塔体密度为 1800 kg/m^3 , 弹性模量按具体参数条件取值, 泊松比为 0.15。

因表面鎏金砖雕厚度较小, 其质量与刚度有限, 在计算时不考虑表面砖雕的影响。采用空间四面体单元, 按慈灯寺塔结构尺寸, 建立该塔的数值计算模型, 如图 8 所示, 通过模态分析计算各阶自振频率及振型。因各塔建于金刚座之上, 宝座对结构动力特性的计算结果有较大影响, 故分别按有宝座与无宝座两个工况进行分析。

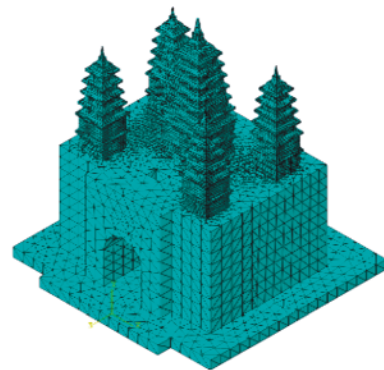


图 8 有限元模型

Fig. 8 FEM model

3.1 考虑金刚座影响

因塔体损伤严重, 且结构内部为夯填土, 结构整体的力学计算参数不宜按普通砌体取值, 参照普通

砌体弹性模量值,对该塔整体弹性模量进行调整后试算多次,得到结构的动力特性。选取其中3个典型参数取值条件下中塔及东北塔结构动力特性的计算结果(表3、表4)与测试结果进行比较。参数取值条件为:①全结构弹性模量取800MPa;②全结构弹性模量取900MPa;③全结构弹性模量取1000MPa。同时,给出包含基座时中塔及东南塔沿东西方向的前2阶振型计算结果,如图9所示。

表3 中塔自振频率计算结果比较

Tab.3 Contrast of vibration frequencies of the middle pagoda

| 参数 条件 | 测试结果 | | | |
|----------|----------|--------|----------|------|
| | 第1阶频率/Hz | | 第2阶频率/Hz | |
| | 4.95 | | 9.29 | |
| | 计算结果 | | | |
| 第1阶频率 | | 第2阶频率 | | |
| 计算值/Hz | 偏差/% | 计算值/Hz | 偏差/% | |
| 条件1 | 5.56 | 12.3 | 9.13 | -2.0 |
| 条件2 | 6.02 | 21.6 | 10.02 | 6.1 |
| 条件3 | 6.46 | 30.5 | 10.58 | 13.8 |

表4 东北塔自振频率计算结果比较

Tab.4 Contrast of vibration frequencies of the northeast pagoda

| 参数 条件 | 测试结果 | | | |
|----------|----------|--------|----------|------|
| | 第1阶频率/Hz | | 第2阶频率/Hz | |
| | 5.68 | | 8.78 | |
| | 计算结果 | | | |
| 第1阶频率 | | 第2阶频率 | | |
| 计算值/Hz | 偏差/% | 计算值/Hz | 偏差/% | |
| 条件1 | 5.60 | 1.3 | 8.99 | 2.4 |
| 条件2 | 5.94 | 4.7 | 9.36 | 6.7 |
| 条件3 | 6.26 | 10.3 | 10.94 | 24.7 |

由表3及表4可见,随着弹性模量的增加,古塔频率计算值随之增大,与测试结果相比偏差增大,高阶频率的偏差更大。通过对比分析可知,按条件①计算所得的各阶频率值与测试结果相差均小于3%,故可将该塔的等效弹性模量值确定为800MPa。

由图9可见,当以第1阶振型振动时,各塔变形均较为显著,当以第2阶振型振动时,中塔振型坐标较周边各塔略小。

金刚座作为各小塔的共同基座,将各小塔连接成为一个整体结构,考虑金刚座时的计算结果即为整体结构的动力特性。

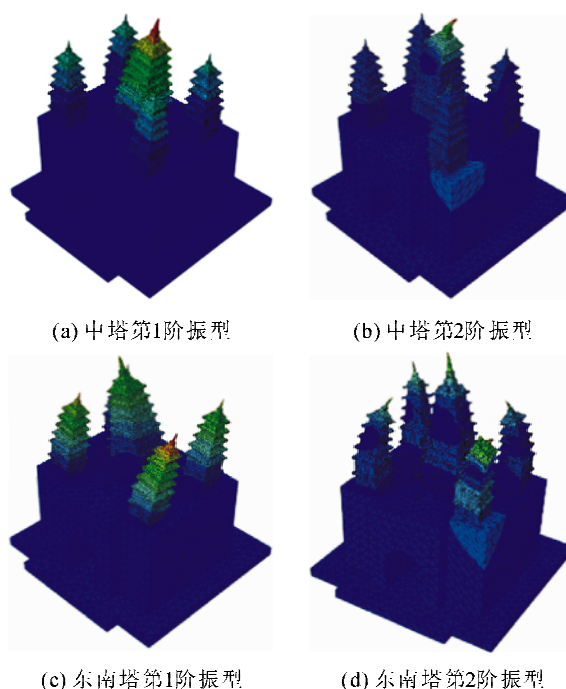


图9 包含基座时东西方向振型计算结果

Fig.9 Vibration mode along EW direction when throne included

3.2 不考虑金刚座影响

若不考虑金刚座的影响,将古塔直接固定于地表,计算各塔沿东西方向前2阶振型,如图10所示,并将计算结果与设置金刚座时进行对比,如表5所示。

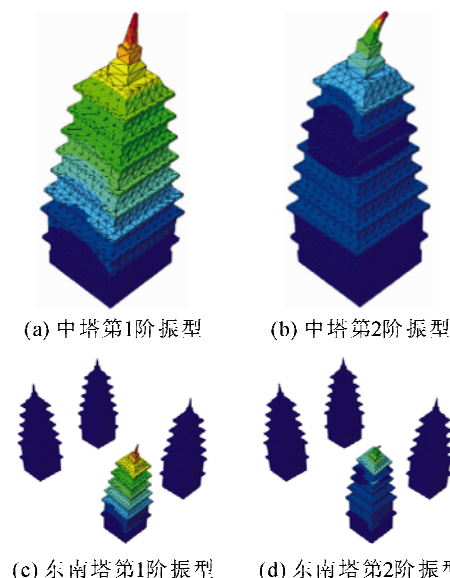


图10 不包含基座时东西方向振型计算结果

Fig.10 Vibration mode along EW direction when throne excluded

由图10可见,各塔前2阶振型图与考虑基座时基本相同,但第1阶振型的变形不够显著,其原因在于基座对结构振动的放大效应。

表5 有无宝座时古塔自振频率计算结果比较

Tab.5 Contrast of vibration frequencies influenced by throne

| 模型类别 | | 东北塔 | 东南塔 | 西北塔 | 西南塔 | 中塔 |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 有宝座 | 第1阶频率/Hz | 5.60 | 5.60 | 5.57 | 5.23 | 5.56 |
| | 第2阶频率/Hz | 8.98 | 8.88 | 8.86 | 8.93 | 9.11 |
| 无宝座 | 第1阶频率/Hz | 6.19 | 6.18 | 6.18 | 6.17 | 7.31 |
| | 第2阶频率/Hz | 12.07 | 11.97 | 11.94 | 12.01 | 10.86 |

由表5可以看出,考虑基座影响时,各塔自振频率的计算值均小于无基座时的结果。金刚座对各塔自振频率的影响系数如图11所示,可以看出,基座对四座边塔自振频率的影响规律基本一致,而对中塔频率的影响与边塔不同;同时,边塔第2阶频率计算结果较第1阶频率受基座的影响显著。其原因在于,考虑基座时,基座对古塔结构底部的约束作用较刚性地基弱,导致计算模型整体刚度降低,使自振频率计算结果减小,振型坐标增大,因此,金刚座对古塔振动位移具有放大效应。

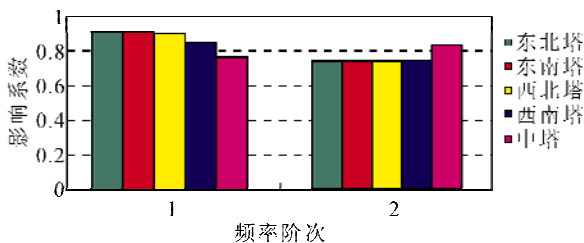


图11 金刚座对各塔振动频率影响系数对比

Fig. 11 Contrast of influence coefficient of vibration frequencies by throne for each pagoda

4 结论

通过对慈灯寺金刚宝座塔进行原位动力测试及数值计算,就该塔动力特性及影响因素进行分析,主要有以下几点结论:

1) 因角部四塔结构尺寸基本相同,故其前2阶自振频率的测试结果基本接近,但中塔因高度较大,自振频率较低;

2) 各塔结构质量及刚度沿高度的分布规律基本一致,但其结构局部损伤分布不同,引起部分楼层刚度突变,故各塔前2阶振型曲线形式接近,但振型坐标值有所变化,且各结构振型阻尼也略有不同;

3) 通过调整参数并经多次试算,使古塔各阶频率计算结果与测试结果一致,可确定古塔结构的等效弹性模量;

4) 考虑金刚宝座后,各小塔振动频率的计算值降低,振型坐标增大,因而金刚座对古塔动力特性有一定影响。

参考文献:

- [1] 李德虎,何江. 砖石古塔动力特性的试验研究[J]. 工程抗震,1990,12(3):34-36.
LI Dehu, HE Jiang. Test study on the dynamic behaviors of masonry pagodas[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1990, 12(3):34-36.
- [2] 李德虎,魏琰. 砖石古塔的历史震害与抗震机制[J]. 建筑科学,1990,6(1):13-18.
LI Dehu, Wei Lian. The study on seismic properties of Chinese ancient masonry pagodas [J]. Building Science, 1990,6(1):13-18.
- [3] 文立华,王尚文. 一种建立古旧建筑物动力分析模型的方法[J]. 建筑结构,1998,28(5):52-55.
WEN Lihua, WANG Shangwen. A method to found the model for dynamical analysis of ancient buildings [J]. Building Structure,1998,28(5):52-55.
- [4] 袁建力,樊华,陈汉斌,等. 虎丘塔动力特性的试验研究[J]. 工程力学,2005,22(5):158-164.
YUAN Jianli, FAN Hua, CHEN Hanbin, et al. Experimental study of dynamic behavior of Huqiu pagoda[J]. Engineering Mechanics, 2005,22(5):158-164.
- [5] 袁建力,李胜才,陆启玉,等. 砖石古塔动力特性建模方法的研究[J]. 工程抗震,1998,20(1):22-25.
YUAN Jianli, LI Shengcai, LU Qiyu, et al. Research on method to modeling for dynamic behaviors of masonry pagodas [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1998, 20(1):22-25.
- [6] 袁建力. 砖石古塔基本周期的简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动,2015,35(2):151-156.
YUAN Jianli. A simplified method for calculating the fundamental period of ancient masonry pagodas [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015,35(2):151-156.
- [7] 樊华,胡跃祥,袁建力. 中江南塔结构动力特性测试研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2013,16(3):57-60.
FAN hua, HU Yuexiang, YUAN Jianli. The structure of the south tower of Zhongjiang in dynamic test research[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2013,16(3):57-60.
- [8] 陈太聪,邓晖,罗小虎. 金鳌洲塔动力测试与特性的研究[J]. 振动与冲击,2010,29(4):193-196.
CHEN Taicong, DENG Hui, LUO Xiaohu. Dynamic characteristic analysis and test for Jinaozhou Pagoda [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4): 193-196.
- [9] 蔡辉腾,李强. 福建泉州古石塔结构动力特性测试与分析[J]. 地震研究,2009,32(1): 51-55.
CAI Huiteng, LI Qiang. Measurement and analysis for structure dynamic properties of ancient masonry pagodas in Quanzhou, Fujian[J]. Journal of Scismological Research, 2009, 32(1): 51-55.
- [10] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 李杰,陈建兵. 随机振动理论与应用新进展[M]. 上海:同济大学出版社,2009.

(责任编辑 周 蓓)