

毛筱霏,李献,张艳艳,等.银川海宝塔动力特性测试及抗震性能分析[J].地震工程学报,2020,42(5):1262-1269.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1262

MAO Xiaofei,LI Xian,ZHANG Yanyan,et al.Dynamic Characteristic Test and Seismic Performance Analysis of Haibao Pagoda in Yinchuan City[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(5):1262-1269.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1262

银川海宝塔动力特性测试及抗震性能分析

毛筱霏,李 献,张艳艳,张卫喜

(西安建筑科技大学理学院,陕西 西安 710055)

摘要:为了给银川市海宝塔的修缮保护工作提供参考依据,对其动力特性及结构损伤状况开展测试和数值模拟分析。首先对海宝塔的材料强度进行测试和计算,得出塔砌体的抗压强度及弹性模量;然后对该塔进行环境激励作用下的振动响应测试,得到塔东西和南北方向的1阶频率;最后建立数值模型并分析其模态与抗震性能,得到海宝塔的动力特性与地震作用下塔体各层的层间位移角,并基于砖石古塔破坏状态位移准则以及损伤指标开展损伤分析。结果表明:海宝塔东西方向和南北方向的1阶频率较为接近,但不同楼层的振动频谱曲线差异较大,尤其是峰值点数量;楼层越高,最大位移和层间位移角越大,受损也越严重;结构总体刚度退化较为严重,存在较大安全隐患,需进一步开展深入分析并采取保护措施。

关键词:砖石古塔;动力特性;抗震性能分析;损伤分析

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)05-1262-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1262

Dynamic Characteristic Test and Seismic Performance Analysis of Haibao Pagoda in Yinchuan City

MAO Xiaofei, LI Xian, ZHANG Yanyan, ZHANG Weixi

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To provide a reference for the repair and protection of Haibao Pagoda in Yinchuan, the dynamic characteristics and structural damage condition of the pagoda were tested and analyzed by numerical simulation. The compressive strength and elastic modulus of the masonry of the pagoda were obtained by testing and calculating the strength of the pagoda materials. The pagoda vibration response under environmental excitation was tested, and the first-order frequencies of the pagoda in the east-west and north-south directions were obtained. A numerical model was established to analyze the vibration mode and seismic performance of the pagoda, and the dynamic characteristics and the story drift ratio of the pagoda under earthquake action were obtained. Then

收稿日期: 2020-02-15

基金项目: 陕西省教育厅基金(17JK0436)

第一作者简介: 毛筱霏(1979-),男,陕西西安人,博士,副教授,主要研究方向:古建筑加固保护与抗震性能分析。

E-mail: mao-98@163.com。

通信作者: 李 献(1996-),男,陕西商洛人,硕士,研究方向:古建筑加固保护与抗震性能分析。E-mail: 1119285083@qq.com。

a damage analysis was carried out based on the displacement criterion of the failure state and the damage index of the pagoda. The results showed that the first-order frequencies of the east-west and north-south directions of the pagoda were close, but the vibration spectrum curves of different floors varied greatly, especially in the number of peak points; the higher the floor, the greater the maximum displacement and the story drift ratio, and the more serious the damage; the overall stiffness degradation of the structure was serious and there was a great potential safety hazard, which should be further analyzed and protected.

Keywords: masonry pagoda; dynamic characteristics; seismic performance analysis; damage analysis

0 引言

砖石古塔是我国重要的古建筑类型之一,其分布广泛、历史悠久,是我国历史文明的重要标志,同时也是研究我国历史、文化、宗教的重要素材。然而砖石古塔因其自重重大,易致地基产生不均匀沉降,在地震作用下其结构极易被破坏,所以对现存砖石古塔进行损伤分析是一项重要的工作,而砖石古塔的结构动力特性是损伤分析的重要依据之一。

目前国内外关于砖石古塔的研究有了一定的进展,尤其是在结构动力现场测试和数值模拟分析方面。其中陈太聪等^[1]应用环境随机激振技术测试了金鳌洲塔的动力特性,与有限元分析软件 Strand7 计算分析的结果进行对比,进一步讨论了试验测试与数值模拟之间的异同;袁建力等^[2]针对环境激振法产生的脉动信号弱等缺点,通过比对虎丘塔的动力测试和有限元计算结果,提出了相应的建议与措施;卢俊龙等^[3]采用原位动力测试和有限元分析方法对兴教寺基师塔的结构损伤进行了评定;Byeong 等^[4]对一个五层的砖石古塔进行了模拟地震振动台试验,并与有限元模拟开展了动力特性和破坏模式的对比,得出足尺模型虽能较好地反映原型结构的风貌和结构特点,但试验对象的尺寸太小,无法准确反映砖石古塔的动力特性。

上述研究表明动力特性的测试和数值模拟分析是砖石古塔损伤分析的重要方法。因此本文以银川海宝塔为对象,以动力特性测试结果为基础建立相应的有限元模型,对其进行结构动力特性与结构损伤分析,以期对砖石古塔的损伤识别及加固保护提供参考。

1 海宝塔概况

海宝塔是中国第一批由国务院批准的全国重点文物保护单位,位于宁夏省银川市兴庆区、丽景街北塔路北塔村的海宝塔寺内(图 1)。其是一座方形 9

层 11 级楼阁式砖塔,由塔基、塔座、塔身、塔刹四部分组成,全部由青砖砌筑,通高 53.9 m,坐落于高 5.4 m、边长 19.2 m 的正方形塔基上。塔座高 4.2 m,边长 15 m,1 层层高 4.24 m,边长 10.52 m,两层及以上层高和边长逐渐递减。塔平面呈正方形,每层四面开券门,塔身内部呈十字形,是由四个对称的砖砌实体通过四个拱券连接而成。整体来看,海宝塔建筑风格独特,方形塔身,四面券门,众多菱角,四角尖顶,为中国古塔所罕见,被视为中国古代高层建筑的杰作,属于全国十六名塔之一^[5-6]。同时海宝塔为砖砌楼阁式建筑,形制独特,外形端庄秀丽、线条明朗,具有很高的艺术价值。

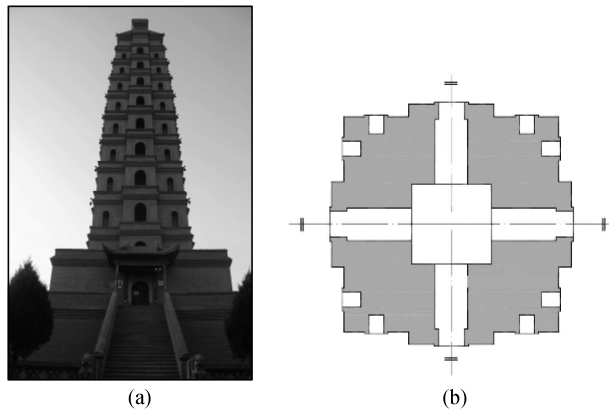


图 1 海宝塔及其平面示意图
Fig.1 Haibao pagoda and its plan sketch

由于海宝塔年代久远,各种结构材料性能慢慢退化,加上地处中国大陆中部南北地震带上,历史上发生的多次地震对其造成了严重破坏。本文通过现场勘察分析,对海宝塔主要破坏形式的总结分析如下:

(1) 塔身底部局压破坏:塔体多见明显的竖向裂缝(图 2),宽度在 2.5~4.3 mm 间,长度为 490~1 180 mm,裂缝宽度和长度在靠近角部处尤为明显。这些裂缝沿竖向发展,因塔体结构整体弯曲产生局部受压所致。



图 2 竖向裂缝
Fig.2 Vertical crack

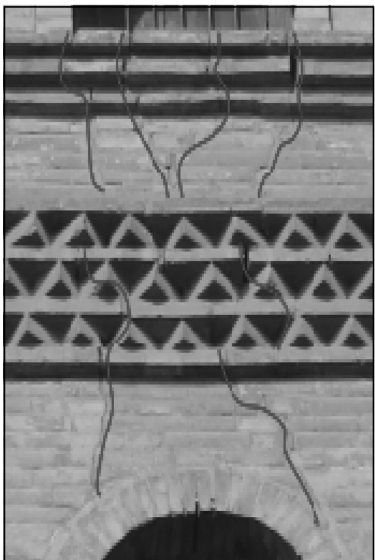


图 3 “X”型裂缝
Fig.3 “X”-type crack

(2) 中轴面剪切破坏:塔体各层内,外拱券上部发生了不同程度的开裂(图 3)。裂缝宽度在 1.6~3.7 mm 间,长度为 350~900 mm,开裂部位及周围砌体发生严重变形,裂缝走向与水平方向大致呈 45°并沿墙面斜向上发展,产生了明显的斜向交叉“X”型裂缝。这些裂缝主要是由于塔体结构沿中轴线四面开洞,受力截面面积减小,从而受地震力等水平力作用下引起的剪切破坏所致。

2 海宝塔砌体弹性模量的确定

为了避免测试过程对文物本体造成破坏,本文采用 ZC4 型测砖回弹仪对砖体的强度进行测试,以计算海宝塔的弹性模量,并为后续构建数值模型提供依据。

2.1 测试方案

由于海宝塔基座四面底部区域砖体表面酥碱严重,且基座中、上部和塔身 2 层以上离地面高度较高,不便进行现场检测,故在塔座及塔身 1 层选取测区对砖体进行回弹。在塔体墙面底部以上 1 m 范围内共选择 8 个测区,先清除每个测区内的饰面层及粉刷层,对砖的条面进行干燥、清洁和平整处理,必要时可用砂轮除掉表面的杂物,磨平侧面,并用毛刷去掉表面粉尘。每个测区选择 10 块外观质量合格的砖块,在每块砖的侧面上取 5 个回弹点,相邻两个回弹点的间距应不小于 30 mm,回弹点距砖体边缘应不小于 10 mm,每个回弹点只能弹击一次,不能重复回弹。回弹数据如表 1 所列。

表 1 海宝塔砖体抗压强度回弹数据

Table 1 Rebound data of compressive strength of brick in the Haibao pagoda

测区编号		单块砖体的平均回弹值									
测区 1	25.0	25.4	25.0	25.8	27.8	29.4	27.2	27.4	26.6	22.8	
测区 2	22.8	24.4	19.6	23.4	22.0	24.0	22.8	23.8	25.8	24.0	
测区 3	25.8	24.6	28.6	30.2	29.8	31.6	26.4	27.8	27.0	29.2	
测区 4	26.6	24.0	24.6	25.8	26.6	27.2	35.0	29.8	30.8	30.4	
测区 5	28.6	29.2	24.0	29.0	26.8	27.4	23.2	32.4	29	26.6	
测区 6	28.2	27.6	24.0	27.8	27.0	27.0	26.4	26.4	26.4	28.6	
测区 7	24.6	23.6	22.6	21.0	22.4	24.2	22.0	21.6	23.8	23.6	
测区 8	24.8	27.5	27.0	26.0	24.2	27.0	25.7	24.2	27.2	24.5	

2.2 强度平均值与弹性模量的计算

根据《回弹仪评定烧结普通砖强度等级的方法》(JC/T796-2013)^[7],每个测区选择 10 块质量较好的砖体进行回弹,则这 10 块砖体平均回弹值的标准

值 S_f 按下式计算:

$$S_f = \sqrt{\frac{1}{9} \sum_{j=1}^{10} (\bar{N}_j - \bar{N})^2}$$

(1)

式中: $\bar{N}$ 为 10 块砖体的平均回弹值,精确值为 0.1;

$\bar{N}_j$ 为第 j 块砖体的平均回弹值, ($j = 1, 2, \dots, 10$), 精确度为 0.1。

采用式(1)计算得出 $S_f = 5.84$, 经文献[7]换算后推定海宝塔砖体的强度等级为 MU10, 故取其抗压强度 $f_1 = 10$ MPa。

根据现有古塔资料的统计分析, 砂浆的强度等级一般在 M2.5~M1.0 间。依据现场对砂浆的勘察情况, 考虑到海宝塔建于清朝时期, 黏结材料为石灰砂浆, 且材料强度存在时效效应, 综合考虑取砂浆抗压强度平均值 $f_2 = 1.5$ MPa。

文献[8]分析了 176 个砌体的弹性模量试验结果, 得出常用的砖砌体弹性模量 E 与其轴心抗压强度平均值 f_m 的关系为:

$$E = 370 f_m^{1.5} \tag{2}$$

而《砌体结构设计规范》(GB50003—2011)中关于砌体轴心抗压强度平均值的计算公式为:

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2 \tag{3}$$

式中: k 、 α 为与块体类别和砌体砌筑方法有关的参数, 对于普通砖 k_1 取 0.78, α 取 0.5; k_2 为砌体抗压强度修正系数, 当 $f_2 \geq 1$ 时, $k_2 = 1$ 。

经式(3)计算得出海宝塔砌体的轴心抗压强度平均值为 2.726 MPa, 再经式(2)计算得到海宝塔砌体的弹性模量为 1 665 MPa。

3 海宝塔动力特性测试

本文采用北京东方噪声与振动研究所研制的 DASP 振动测试分析系统及中国地震局工程力学研究所研发的 891-2 型拾振器, 利用由地壳运动等引起的微小振动, 通过环境脉动法对海宝塔的动力特性进行测试。

3.1 测试方案

根据塔体结构的实际情况及现场试验条件, 本文在塔基及各层均布置了测点, 并安装振动测试传感器, 各层测点拾振器均布置在东边券门处的水平面上。为避免干扰信号对测试结果的影响, 在文物局及寺院管理部门协助下, 测试时临时关闭了寺院。

3.2 测试结果分析

对南北方向及东西方向动力特性测试信号进行滤波处理后截取约 10 min 振动记录信号进行加窗自谱分析。由于海宝塔层数较多, 本文选取塔座、5 层及 9 层(即塔体底部、中部和顶部)的振动频谱曲线进行分析, 其东西、南北方向各测点的振动频谱曲线如图 4、5 所示。在地脉动激励下, 东西和南北方向各楼层测点的振动频谱曲线峰值相对应的频率基

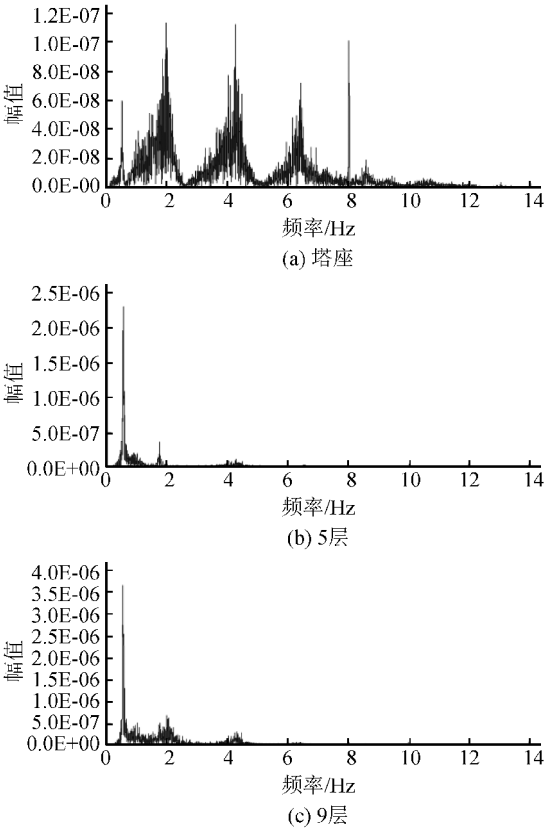


图 4 东西方向振动频谱曲线

Fig.4 Vibration spectrum curve in the EW direction

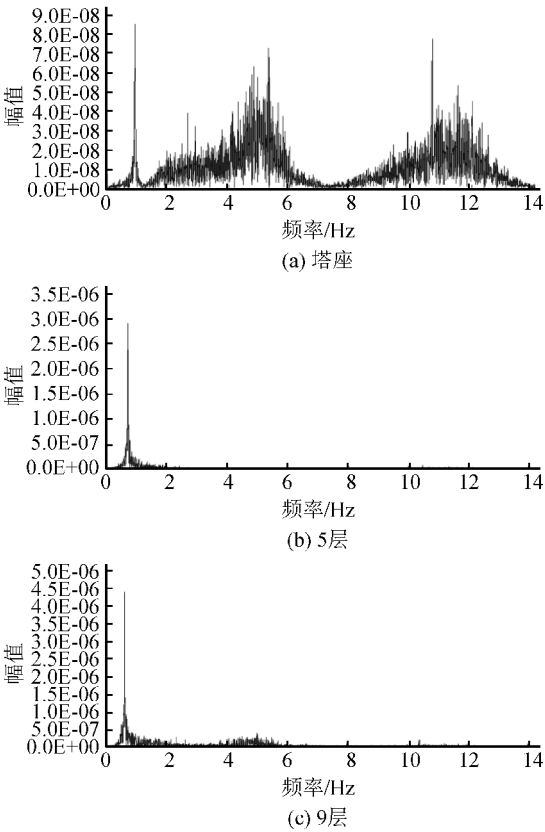


图 5 南北方向振动频谱曲线

Fig.5 Vibration spectrum curve in the NS direction

本一致,其中基座各方向测点均有5个较为明显的峰值点,其他各楼层在南北方向都只有1个较明显的峰值点,东西方向则有2个。所以得出海宝塔的第1阶频率如表2所列。

表 2 海宝塔自振频率测试结果(单位:Hz)

Table 2 Test results of natural vibration frequency (Unit:Hz)

方向	塔座	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层	8 层	9 层	平均值
东西	0.67	0.65	0.65	0.63	0.62	0.62	0.61	0.62	0.60	0.59	0.63
南北	0.76	0.73	0.73	0.70	0.65	0.63	0.64	0.63	0.61	0.60	0.67

可以看出,海宝塔东西方向和南北方向的1阶频率很接近,这和海宝塔平面为正方形、结构对称、形体规则有直接关系。

4 海宝塔有限元分析

4.1 有限元模型

采用 ANSYS 软件建立海宝塔连续体计算模型如图6所示。计算单元选取三维10节点四面体单元,砌体弹性模量取 $E=1\,665\text{ MPa}$,泊松比取0.17,密度为 $1\,800\text{ kg/m}^3$ 。依据海宝塔台基内填土勘探报告^[9],判断台基青砖墙体的平均厚度约在80~100 cm间。结合银川市海宝塔修缮工程的岩土勘察报告^[10]及参考文献^[11]对夯土材料的取值,本文取台基内夯土的弹性模量 $E=100\text{ MPa}$,泊松比为0.33,密度 $1\,800\text{ kg/m}^3$ 。考虑海宝塔塔体结构上部质量巨大而重心低,故边界条件处理时假定塔体底面与地面固接。网格划分后共生成804 798个单元。



图 6 海宝塔有限元模型图

Fig.6 Finite element model of Haibao pagoda

4.2 模态分析

数值模态分析得到塔体结构东西方向的1阶频率为0.76 Hz,南北方向1阶频率为0.81 Hz,均大于动力测试结果。其原因在于模态分析是基于弹性

假定进行的,而海宝塔距今已有1 600多年的历史,其结构材料性能的退化及塔体开裂等多种因素导致结构损伤,加上期间多次修缮,所以造成动力测试的结果小于数值计算结果^[3]。

4.3 振型分析

从图7中海宝塔前8阶的振型形态来看,结构的主要振动形态分为三种:(1)沿X、Y方向的平动及转动;(2)沿Z轴上下振动;(3)绕Z轴扭转。其中1~4阶、7~8阶振型为第一种形态,6阶振型为第二种形态,说明在考虑近震时结构的竖向地震作用不可忽略;5阶振型为第三种形态,最大位移出现在塔体上部的塔檐角部。从前8阶振型可以看出,除绕Z轴扭转外,最大位移均出现在塔体顶部,说明塔体顶部易出现平动变形,反映了塔体结构顶部刚度突变处所产生的鞭梢效应。

4.4 海宝塔抗震性能分析

根据文献^[10]中的地勘数据,该场区平均土层等效剪切波速为 194.35 m/s (在 $150\sim250\text{ m/s}$ 间),场区覆盖层厚度 $\leq 31.41\text{ m}$ (在 $3\sim50\text{ m}$ 范围内),可判定场地土类型为中软土,故建筑场地类别为Ⅱ类。本文分析时输入 Hector Mine 观测站的 NGA_1842 号地震波,该波的最大加速度峰值为 388.6 cm/s^2 ,特征周期为0.4 s。此次分析截取该波的15~35 s,时间间隔取0.02 s。银川市抗震设防烈度为Ⅷ度,场地基本地震加速度为 $0.2g$,故将该波的峰值加速度调整为 200 gal (中震)对海宝塔进行地震时程分析,得到各层最大位移和层间位移角如表3所列。

根据砖石古塔破坏状态的位移判断准则^[12]并结合表3的数据可知,当地震加速度峰值为 200 gal 时,塔体的最大层间位移角和最大层间位移均出现在塔顶,分别为 $1/207$ 和 161.290 mm ;7层至塔顶的层间位移角均超过极限值($1/260$),塔体结构丧失承载能力,发生严重破坏甚至可能倒塌;4~6层的层间位移角都在 $1/360\sim1/260$ 间,塔体结构处于由屈服阶段进入刚度退化阶段状态,结构破坏程度为中等;2、3层的层间位移角在 $1/565\sim1/360$ 间,结

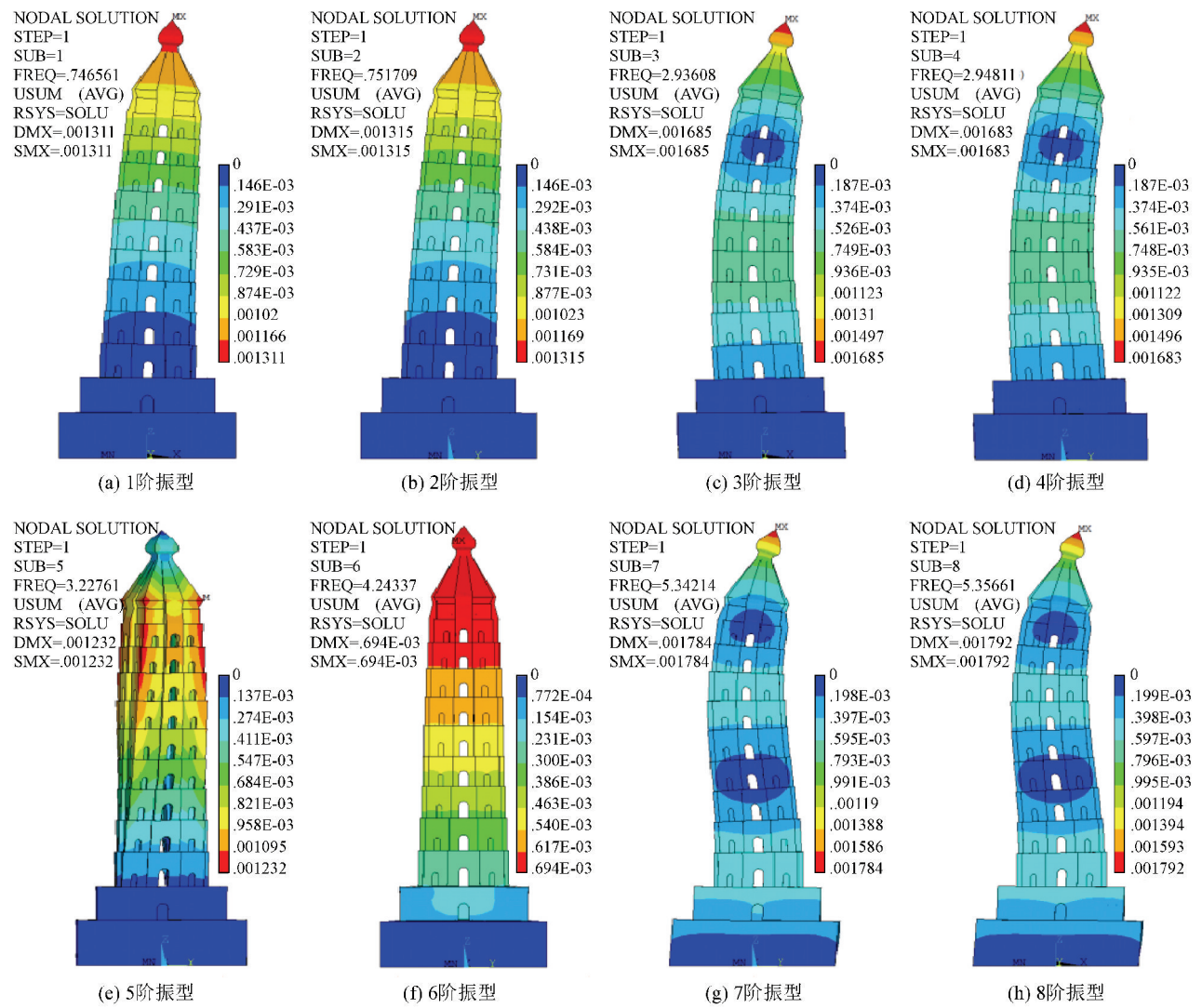


图 7 海宝塔前 8 阶振型

Fig.7 First eight vibration modes

表 3 地震作用下海宝塔各层的最大位移及层间位移角
Table 3 Maximum displacement and story drift ratio of each layer of Haibao pagoda under earthquake action

层数	最大位移/mm	层间位移角
塔顶	161.290	1/207
9	107.123	1/227
8	94.616	1/238
7	80.664	1/256
6	67.348	1/278
5	54.581	1/303
4	42.308	1/338
3	31.162	1/393
2	21.448	1/487
1	13.168	1/668
塔座	6.821	1/1754
台基	4.427	1/1287

构进入屈服阶段,产生轻微破坏;塔基至 1 层结构完好。可见塔体结构最大层间位移角和最大层间位移

均出现在塔顶,底部几层尤其是台基和塔座则很小,这与塔体结构高宽比较大($H/B=4.2$,不含台基及塔座)和台基、塔座截面较塔身侧移刚度大有关。由此可见,在经历了历史上数次地震后,海宝塔塔体结构已严重受损,存在倒塌的危险,应该立即进行加固与修复。

5 海宝塔的损伤分析

对于砖石古塔的损伤分析,已有相关研究证明结构固有频率的变化趋势与结构曲率模态、应变模态振型随损伤降低的变化趋势相近^[13],即通过频率的变化是可以进行损伤分析的。海宝塔塔体结构产生损伤破坏的主要表现为局部风化和塔体裂缝。假定结构损伤破坏不引起塔的质量变化,仅引起结构刚度降低,根据文献[3]中损伤定义及损伤判别指标

有：

$$\Delta_i=\frac{\omega_i^2-\omega_{di}^2}{\omega_i^2}\tag{4}$$

式中： ω_i^2 为古塔模态分析中的第 i 阶圆频率； ω_{di}^2 为

古塔原位动力测试结果的第 i 阶圆频率； ω_i^2 的变化率 Δ_i 即为刚度损伤率。将原位动力测试结果与模态分析结果代入式(4)，得出海宝塔的损伤识别结果如表 4 所列。

表 4 损伤识别结果
Table 4 Damage identification results

方向	塔座	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层	8 层	9 层	平均值
东西	0.22	0.27	0.27	0.31	0.33	0.33	0.36	0.33	0.38	0.38	0.32
南北	0.12	0.19	0.19	0.25	0.36	0.40	0.38	0.40	0.43	0.45	0.33

由此可见，海宝塔的刚度退化较为严重，对塔体结构采取相应的加固保护措施势在必行。

6 海宝塔的加固保护措施

针对前述分析结论及海宝塔现状，对塔体加固保护给出如下四个方面的建议：

(1) 对塔座和基座表面及周边做好防排水，沿塔座和基座立面设置排水管，与现有的排水孔衔接，使塔座和基座顶面雨水有组织地排入地面雨水管网；基座周边增加排水暗沟，雨水通过基座散水及排水管排入基座周边排水暗沟。

(2) 表面风化砌体处理，对于塔体外部砌体局部风化、剥蚀严重的部位，剔除局部砌体，采用置换法进行局部修缮，置换时遵循原材料、原工艺原则。

(3) 对塔体产生的裂缝进行注浆处理，裂缝很大程度上影响结构的整体性，造成结构抗震能力降低，采用压力注浆技术进行粘合，可增强塔体结构的整体性。

(4) 型钢环箍加固，为了确保在未来地震作用下整体的安全性和稳定性，主要考虑以控制塔体结构中轴面剪切破坏为核心，采用由型钢及拉杆组合形成的箍体对海宝塔进行抗震加固，同时为保证箍体与塔外观颜色相同，对型钢表面进行做旧处理。

7 结论

本文以海宝塔为研究对象，结合现场勘察资料、动力特性测试和数值模拟，对海宝塔进行了抗震性能分析及损伤识别，得到以下主要结论：

(1) 根据海宝塔砌体材料强度检测结果，换算得到海宝塔砖体的强度等级为 MU10，进一步计算得出海宝塔砌体材料的弹性模量为 1 665 MPa。

(2) 动力测试结果显示海宝塔东西方向和南北方向的自振频率较为接近，但不同楼层的振动频谱曲线差异较大，尤其是峰值点数量。

(3) 数值模态分析因弹性假定导致自振频率大于实测值。地震时程反应分析显示台基、塔座和 1 层处于弹性阶段，结构完好；4 层至 6 层处于刚度退化阶段，会有较为明显的破坏；7 层以上将会发生严重破坏甚至倒塌。结果表明塔体结构目前存在较大安全风险。

(4) 海宝塔的刚度损伤率平均值在 0.3 左右，刚度退化较为严重，对塔体结构采取相应的加固保护措施势在必行。

参考文献(References)

[1] 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 Characteristics Analysis and Test for Jinaozhou Pagoda[J].Journal of Vibration and Shock,2010,29(4):193-196.

[2] 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.

[3] 卢俊龙,司建辉,田鹏刚等.兴教寺基师塔动力特性测试分析[J].建筑结构,2017,47(21):105-108.
LU Junlong,SI Jianhui,Tian Penggang,et al.Dynamic Characteristic Test Analysis of Jishi Pagoda of Xingjiao Temple[J].Building Structure,2017,47(21):105-108.

[4] CHAE Yun Byeong,KIM Jae Kwan.Implementation of Configuration Dependent Stiffness Proportional Damping for the Dynamics of Rigid Multi-block Systems[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2003,2(1):87-97.

[5] 程娟,景涛.海宝塔始建年代探析[J].山西建筑,2012,38(34):1-3.
CHENG Juan,JING Tao.On Exploration for the Year of Initial Construction of Haibao Pagoda[J].Shanxi Architecture,2012,38(34):1-3.

[6] 牛达生.海宝塔[J].文物,1978(8):95-96.

[7] JC/T796-2013 回弹仪评定烧结普通砖强度等级的方法[S].北

京:中国建筑工业出版社,2013.

JC/T796-2013 The Method of Evaluating the Fired Common Brick Strength Grading by Rebound Hammer[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2013.

[8] 施楚贤.砌体结构理论与设计(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[9] 银川市文物管理处.海宝塔台基内填土勘探报告[R].2015.

[10] 宁夏工程物探勘察研究院.银川市海宝塔修缮工程的岩土勘察报告[R].2015.

[11] 卢俊龙.砖石古塔土-结构相互作用理论与应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.

[12] 赵祥,尚天伟,谢启芳,等.基于 ECC 的小雁塔抗震加固性能分析[J].地震工程学报,2017,39(5):829-835.

ZHAO Xiang, SHANG Tianwei, XIE Qifang, et al. Performance Analysis of Small Wild Goose Pagoda Seismic Reinforcement Based on Engineered Cementitious Composite[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(5):829-835.

[13] 刘文峰,柳春图,应怀樵.通过频率改变率进行损伤定位的方法研究[J].振动与冲击,2004,23(2):28-30,17.

LIU Wenfeng, LIU Chuntu, YING Huaqiao. Research on Damage Orientation by Change of Eigenfrequency[J].Journal of Vibration and Shock,2004,23(2):28-30,17.



(上接第 1235 页)

LI Feng, MI Xiaonan, LIU Jun, et al. Spatialization of GDP in Beijing Using NPP-VIIRS Data[J].Remote Sensing for Land & Resources,2016,28(3):19-24.

[10] 潘竞虎,胡艳兴.基于夜间灯光数据的中国多维贫困空间识别[J].经济地理,2016,36(11):124-131.

PAN Jinghu, HU Yanxing. Spatial Identification of Multidimensional Poverty in China Based on Nighttime Light Remote Sensing Data[J].Economic Geography,2016,36(11):124-131.

[11] 李钢.GIS 支持下的浙江省台风灾害直接经济损失评估[D].南京:南京信息工程大学,2014.

[12] 马小平,孙艳萍,陈文凯,等.甘肃夏河 $M_s5.7$ 地震烈度评定及震害特征分析[J].地震工程学报,2020,42(3):777-783.

MA Xiaoping, SUN Yanping, CHEN Wenkai, et al. Seismic Intensity Evaluation and Damage Characteristics of Xiahe, Gansu $M_s5.7$ Earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):777-783.