

罗山寺塔动力特性及地震响应分析*

员作义^{1,2}, 卢俊龙², 李 贞³, 陈一凡⁴

(1.陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2.西安理工大学土木工程学院 陕西 西安 710048; 3.中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018; 4.陕西普宁工程结构特种技术有限公司, 陕西 西安 710055)

[摘要] 为研究罗山寺塔的动力特性及地震响应, 通过原位动力测试获得了罗山寺塔的各方向自振频率, 并采用有限元分析软件对结构进行地震响应分析。研究表明: 通过经验公式和有限元分析得到的结构特性与原位动力测试结果基本一致; 各烈度地震作用下的塔身底部楼层位移角较大, 塔身顶部的鞭梢效应较明显; 结构的楼层水平位移随加载时程增加而增大, 基底剪力与地震波加速度响应一致; 塔身底部及各层拱券洞口位置的砖砌体损伤较严重。

[关键词] 砖塔; 动力特性; 数值模拟; 地震损伤; 地震响应

[中图分类号] TU311.3

[文献标识码]

A

[文章编号]

Dynamic Characteristics and Seismic Response

Analysis of Luoshan Temple Pagoda

YUAN Zuoyi^{1,2}, LU Junlong², LI Zhen³, CHEN Yifan⁴

(Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2.School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3.China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4.Shaanxi Puning Engineering Structure & Special Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics and seismic response of Luoshan Temple Pagoda under earthquake action, the seismic frequency of Luoshan Temple Pagoda in all directions was obtained by in-situ dynamic testing, and the seismic response of the pagoda structure was analyzed by finite element analysis model. The results show that the structural properties obtained by empirical formula and finite element analysis are basically consistent with the test results of in-situ dynamics; The displacement angle of the bottom floor of the pagoda structure under the earthquake intensity is larger, and the whipping effect at the top of the pagoda is obvious; The horizontal displacement of the structure increases with the increase of loading time, and the response of the base shear is consistent with the acceleration of seismic waves; The damage of the masonry masonry at the bottom of the pagoda body and the openings of each layer of arch coupons is relatively serious.

Keywords: masonry pagoda; dynamic characteristics; simulation; earthquake damage; seismic response

0 引言

砖塔是我国传承久远的文化遗产建筑, 在我国分布广泛、样式众多, 具有代表性的

如西安大雁塔、小雁塔等, 但这类砖塔因其自重大、高度较高及历史上曾遭遇多次震害, 且现存的部分砖塔年久失修, 缺乏较科学的保护。因此, 针对现存古砖塔的修缮保护和抗震性能评估显得尤为重要。卢俊龙等^[1]采

*陕西省建筑科学研究院科研课题 (2015-01-247)

[作者简介] 员作义, 高级工程师,

E-mail: 760078726@qq.com

[收稿日期] 2023-08-29

用数值模拟和试验验证对西安兴教寺玄奘塔的损伤机制和动力特性进行了研究,结果表明塔身破坏形式为底部砌筑缝开裂,可采用连续化损伤参数的方式确定古塔砌体的开裂范围;钱春宇等^[2]对小雁塔的缩尺模型进行了振动台试验,对比了模型和实际震害的破坏形态,结果表明,在8度多遇地震下小雁塔破坏严重;韩鑫等^[3]采用经验公式估计了西安八云塔的动力特性,利用有限元软件分析了结构的层间位移角、损伤位置及损伤发展规律;Valente等^[4]采用数值模拟的方式对意大利东北部的8座砖塔进行了拟静力分析,采用地震安全系数对塔的地震损伤情况进行了评估;杨涛等^[5]研究了无损加固技术的利用对历史建筑的保护。目前有关砖塔类的动力特性及抗震性能研究较少,现有文献主要为关于缩尺模型及数值模拟的研究方式,较少有通过现场原位动力测试的方式获取砖塔的动力特性,并基于所获得测试数据进行数值分析。

本文拟对陕西省罗阳县的罗山寺塔进行现场原位动力测试及地震响应分析,研究其动力特性和地震损伤情况,为类似砖塔类建筑的抗震性能评估及加固修缮等工作提供一定的科学依据。

1 罗山寺概况

罗山寺塔始建于唐代,又名岱堡塔,距今已一千多年,属于全国重点保护文物^[6]。现残存古塔1座,形制为方形空心密檐式砖塔,如图1所示。该塔原为9层,现只残存7层半多,残高约32.11m。塔底部边长为7.15m,逐层收缩,顶层边长为4.30m,除底层、3层和5层外,每层4个方向均设有拱形窗,底层仅南向开设有门洞。罗山寺塔历经一千多年,塔体自身向东北方向倾斜,塔刹及塔檐损毁较严重,部分砖砌松动,塔身底部存在向上贯通的竖向裂缝。

2 动力测试

2.1 测试方案

为更加科学地保护罗山寺塔及为后续研究分析提供可靠依据,现对罗山寺塔进行原位动力测试以获得结构特性。采用941B型超低频测振仪提供并拾取加速度,测试期

间保证无其他振源扰动。罗山寺塔平面较规则,故将传感器布置于各楼层顶部券洞中心部位,1~7层的各层顶部券洞布置1个,共7个,传感器测点布置如图2所示。



a 罗山寺塔 b 塔檐残损

图1 罗山寺塔现状

Fig.1 Status of Luoshan Temple Pagoda

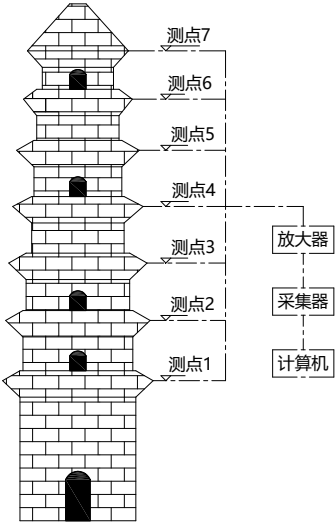
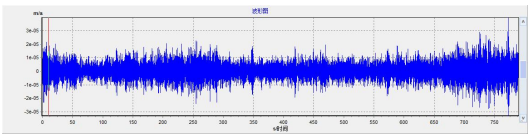


图2 测点布置

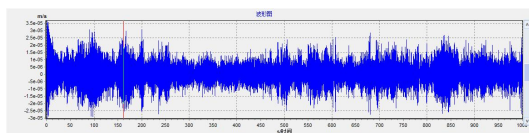
Fig.2 Measuring point arrangement

2.2 测试方案

各测点的南北方向速度振动信号记录(部分)如图3所示,通过自谱分析得到自谱曲线(部分)如图4所示。由频谱曲线可明显看出,罗山寺塔的前两阶频率为主频率,频率大概为1Hz和5Hz;随着塔的层数增加,加速度激励后产生的幅值有一定下降,但主频率保持一致。



a 东西方向



b 南北方向
图 3 测点振动速度信号

Fig.3 Vibration velocity signal of measuring points

原位动力测试得到的东西、南北 2 个方向前两阶自振频率值如表 1, 2 所示, 各测点测得的频率值差异较小。东西和南北 2 个方向的第一、第二阶频率相近, 表明罗山寺塔在 2 个方向的动力特性相仿。

表 1 各测点东西方向振动峰值对应频率值

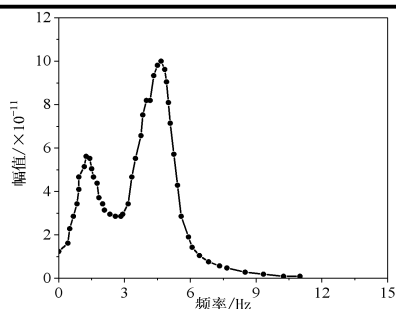
Table 1 The frequency value corresponding to the vibration peak in the east-west direction of each measuring point Hz

项目	测点号							均值
	1	2	3	4	5	6	7	
第 1 阶频率	1.24	1.20	1.11	1.11	1.14	1.10	1.10	1.14
第 2 阶频率	4.35	4.63	4.17	4.83	4.20	4.31	4.30	4.40

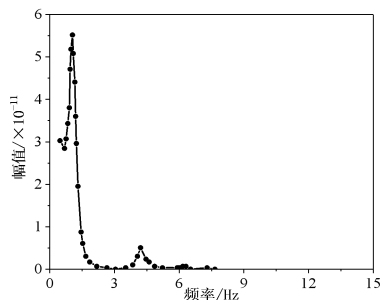
表 2 各测点南北方向振动峰值对应频率值

Table 2 The frequency value corresponding to the vibration peak in the north-south direction of each measuring point Hz

项目	测点号							均值
	1	2	3	4	5	6	7	
第 1 阶频率	1.07	1.03	1.08	1.06	1.07	1.07	1.07	1.06
第 2 阶频率	4.79	4.18	4.19	4.19	4.17	4.19	4.74	4.35

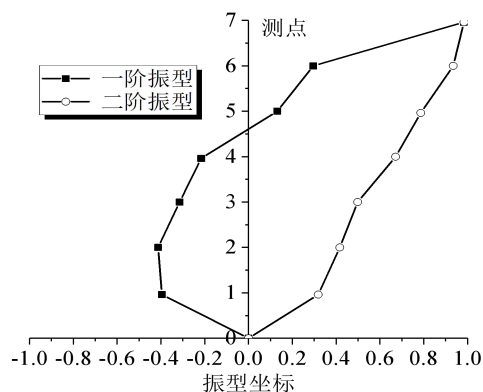


a 东西方向

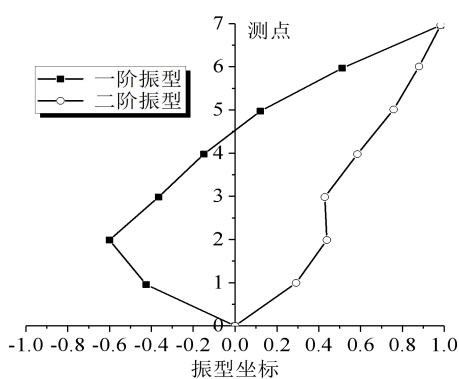


b 南北方向

图 4 2 层东西、南北方向频谱曲线
Fig.4 East-west, north-south direction spectrum curves of layer 2



a 南北方向



b 东西方向

图 5 振型

Fig.5 Modes of vibration

罗山寺塔 2 个正交方向的振型如图 5 所示, 由图可知, 一阶和二阶振型叠加后的位移在 3 层开始快速增加 (3 测点), 塔变形快速增加, 最大位移位置为塔顶。

3 有限元分析

3.1 模型建立

采用 ABAQUS 软件对罗山寺塔进行动力特性分析, 研究其破坏薄弱位置。砖塔模型本构采用整体连续模型, 即忽略砖和砂浆间的黏结滑移, 将其耦合在一起作为整体研究^[7]。砖与砂浆整体本构模型采用杨卫忠^[8]提出的基于混凝土本构^[9]的砌体单轴受压应力-应变曲线, 如式 (1)~式 (3) 所示, 其中 f_p 为砌体轴心受压峰值应力, ε_{p0} 为峰值应力对应的应变, η 取 1.633, f_1 和 f_2 分别为砌体和砂浆抗压强度平均值。砌体破坏大多发生在砖与砖间的砂浆灰缝处, 本文采用吕伟荣等^[10]对混凝土受拉应力-应变本构改进得到的本构, 如图 6 所示, 其中 f_{pt} 和 ε_{pt0} 分别

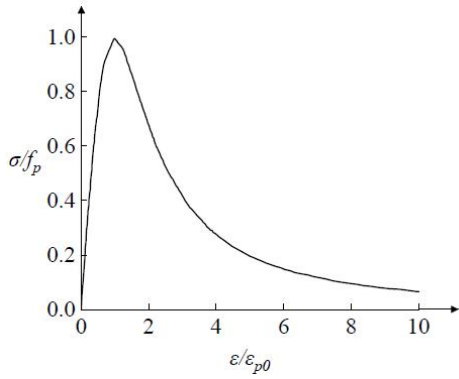
表示砌体的峰值抗拉强度及其对应的应变。本文中砌体抗压和抗拉强度分别取值为 3.2, 0.26MPa, 弹性模量为 1485MPa, 泊松比为 0.15。砖砌体的损伤在软件中采用混凝土塑性损伤模型模拟, 其中破裂角取 31°, 黏性系数取 0.005, 其余参数取值同普通混凝土。

有限元模型采用 C3D8R 实体单元模拟, 塔底的边界条件为固结, 每层塔模型部件间采用 Tie 连接, 网格划分后的模型如图 7 所示。

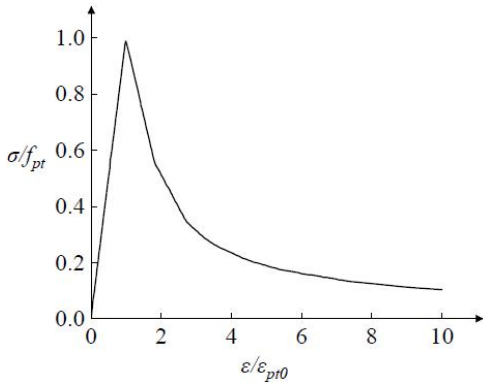
$$\frac{\sigma}{f_p} = \frac{\eta}{1 + (\eta + 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p0}} \right)^{\eta(\eta+1)}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p0}} \quad (1)$$

$$f_p = 0.78 f_1^{0.5} (1 + 0.07 f_2) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{p0} = \frac{0.005}{\sqrt{f_p}} \quad (3)$$



a 受压本构曲线



b 受拉本构曲线

图 6 砌体受压与受拉本构曲线

Fig.6 Constitutive curves of the masonry under compression and tension

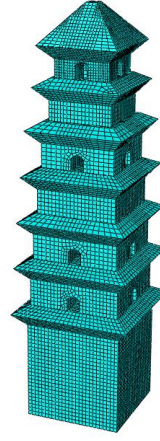


图 7 有限元模型

Fig.7 Finite element model

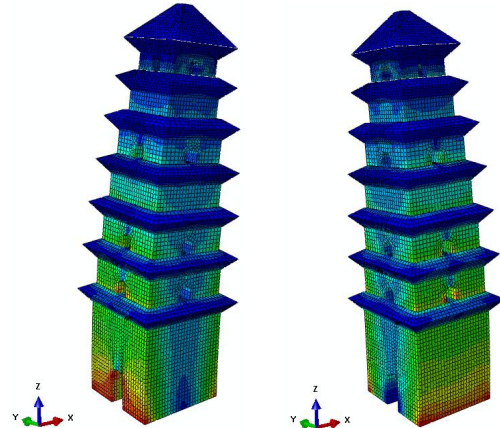
3.1 频谱分析

ABAQUS 中采用线性摄动的方式测试加载历程的频率, 选用 Lanczos 的求解方法, 设置振型阶数为 9。软件求得的前三阶振型形状及频率值如图 8 所示, 第一、二阶振型为平动, 第三阶振型为扭转。原位动力测试和有限元模拟得到的频率结果对比如表 3 所示, 两者误差范围在约 10%, 原因如下。

1) 罗山寺塔年久失修, 原砖砌体破损严重, 砖块间黏结较差, 与有限元模型中将砖与砂浆合为一体的假定不同。

2) 砖塔制作时存在施工误差及砌筑材料不能保证同批次, 有限元模型则是均质材料, 几何上也对称。

3) 有限元模型的网格划分与实际模型的整体连续也存在一定误差。



a 一阶 ($f=1.19\text{Hz}$)

b 二阶 ($f=5.02\text{Hz}$)

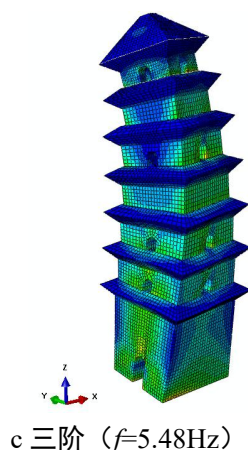


图 8 模态
Fig.8 The modal

表 3 原位动力测试与有限元及经验公式结果对比

Table 3 Comparison of in-situ dynamic test results with finite element and empirical formulas Hz

阶数	动力测试			模拟	公式
	东西	南北	均值		
1	1.14	1.06	1.10	1.19	1.06
2	4.40	4.35	4.38	5.02	—

本文还采用经验公式^[1]对罗山寺塔的第一基本周期进行了估算，如式（4）所示，其中 η_1 ， η_2 ， η_3 ， η_4 分别为塔身厚度、截面、材料及开洞影响系数，本文分别取值为 0.94，1.0，1.0，1.1；塔的计算高度 H 为 31m，塔底部外径为 7.2m。采用此经验公式最终得到的第一周期为 1.06s，与原位动力测试间的误差仅为 3.8%，表明动力测试结果与有限元结果具有一定的可靠性。

$$T_1 = 0.0065\eta_1\eta_2\eta_3\eta_4H^2 / D \quad (4)$$

3.2 地震响应分析

罗山寺塔位于陕西省渭南市，属于 8 度抗震设防区，场地类型为 II 类，设计地震分组为第 2 组。时程分析时选用按我国规范反应谱调整后满足要求的 El Centro 地震波，按 8 度多遇（小震， 70cm/s^2 ）、8 度设防（中震， 200cm/s^2 ）及 8 度罕遇（大震， 400cm/s^2 ）从塔身主要倾斜方向（东西方向）加载，地震波输入时间间隔为 0.02s，持续时间为 15s，输出时选用的数据点布置在各层同方向小

拱券内部的楼面处。

3.2.1 位移响应

砖塔结构在地震波作用下的位移时程（东西方向）曲线如图 9 所示，由于砖塔本身是向东北倾斜，地震波作用下塔的水平变形持续加大。随着地震烈度增加，塔的水平位移也持续加大，中震、大震下塔的最大水平位移约是小震的 1.9 倍、3.1 倍。

各层的层间位移角如图 10 所示，小震、中震和大震下的最大层间位移角分别为 1/622（3 层）、1/203（4 层）和 1/63（2 层）。塔体的层间位移角突变的位置在 2 层，而 2 层以上位移角变化缓慢，表明在地震中底部楼层是结构的薄弱位置。小震下塔顶部的鞭梢效应较明显，中震和大震结构的损伤较严重，鞭梢效应较弱。

各烈度地震作用下塔结构的基底剪力如图 11 所示，基底剪力的变化趋势与地震波基本保持一致，结构在 3，12s 左右的地震响应较明显，随着地震烈度增加，塔结构的基底剪力也随之增加。大震、中震下的基底剪力约为小震的 2.2 倍、1.6 倍。

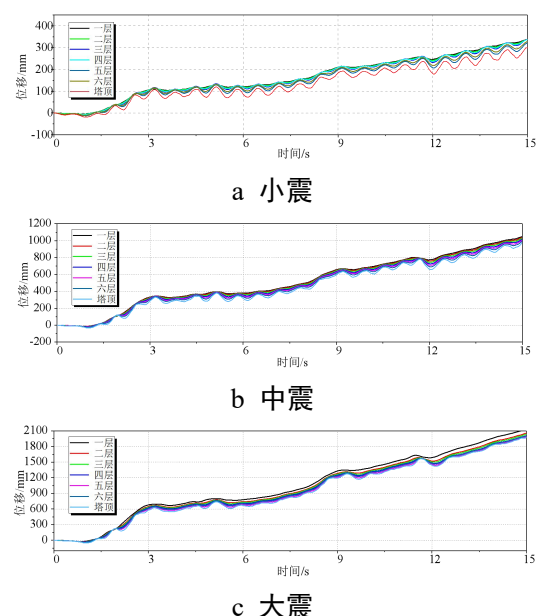


图 9 位移时程曲线

Fig.9 Displacement time-history curves

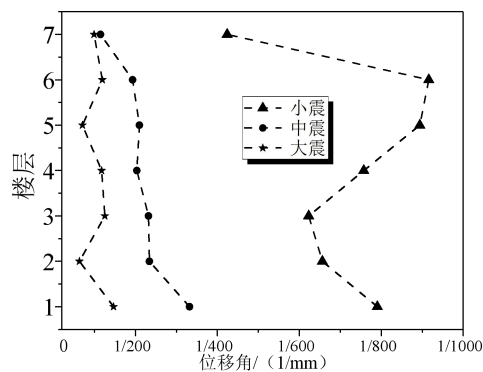
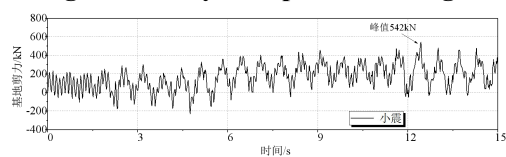
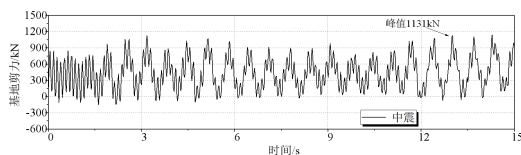


图 10 层间位移角

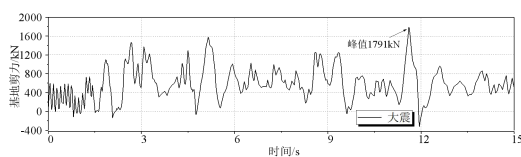
Fig.10 Interlayer displacement angle



a 小震



b 中震



c 大震

图 11 基底剪力

Fig.11 Base shear

3.2.2 结构损伤

不同地震烈度下塔结构的受拉及受压损伤结果如图 12 所示，砖塔的破坏与其材料特性密切相关，砖砌体的抗压能力较好，抗拉及抗剪能力较差。从损伤结果来看，塔结构的受压损伤在小震下较轻微，在中震和大震下，塔身主要损伤位于加载方向的塔身两侧，表明砖塔的损伤主要是由于砖砌体发生剪压破坏。随着地震烈度增加，塔结构的损伤逐渐加剧，受压损伤范围从塔身底部向上发展直至连接每层的拱券洞口。

砌体结构的受拉及抗剪能力较差，各地震烈度下塔结构的受拉损伤如图 13 所示。各地震烈度下的各层交界位置及拱券洞口损伤较严重，且随着烈度增加损伤范围发展至整个塔身侧面。

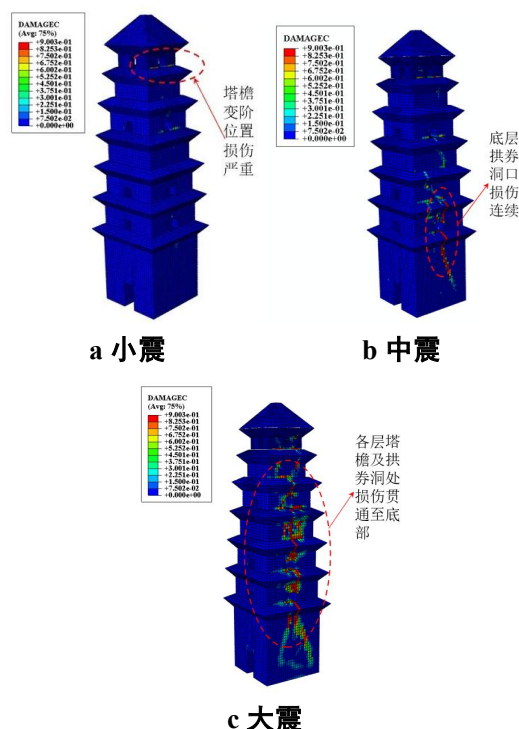


图 12 受压损伤

Fig.12 Compression damage

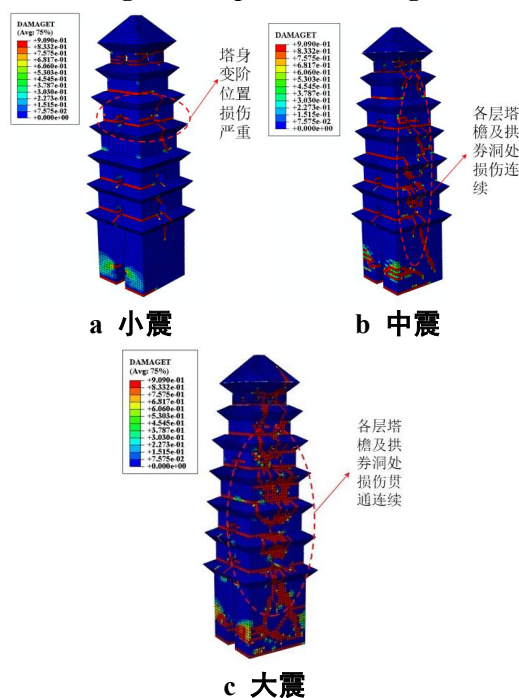


图 13 受拉损伤

Fig.13 Tensile damage

塔底部砖砌体的第一主应力时程曲线及其值分布如图 14, 15 所示，底部砌体主应力加载前期变化较快，各地震烈度下的变化规律类似，且很快达到抗剪强度破坏，最大主应力约为 0.2MPa，已达到砌体材料的受拉破坏强度，表明底部砖砌体在地震作用

前期很快破坏。各烈度下各层的拱券洞口位置应力集中较严重,并向外延伸至塔檐。综合以上对塔身损伤的分析,塔底部及各层拱券洞口位置是后期该塔结构加固修缮的重要部位。

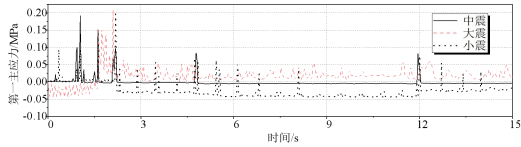


图 14 塔底部砌体主应力时程曲线
Fig.14 Time-history curves of principal stress of the masonry at pagoda bottom

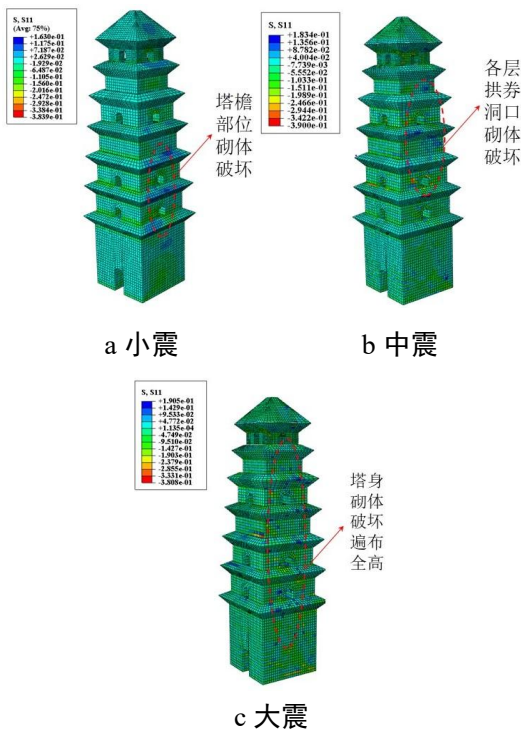


图 15 第一主应力分布

Fig.15 The first principal stress distribution
4 结语

本文通过现场原位动力测试及有限元分析对罗山寺塔的动力特性及地震响应进行了研究,结论如下。

1) 通过原位动力测试获得了罗山寺塔的东西、南北 2 个方向的振动频率及振型结果,罗山寺塔 2 个方向的动力特性较接近,三层及以上的层位移较底部各层增速较快。

2) 采用有限元分析得到各阶频率,与原位测试结果误差在 20%以内,在考虑材料、施工误差及残损的情况下表明该模型可靠。

3) 各烈度地震作用下塔结构的底部楼层位移角较大,塔顶部由于鞭梢效应变形较大。

4) 罗山寺塔的砖砌体在塔底部及各层拱券洞口位置损伤较集中,是后期加固修缮的主要部位。

参考文献:

[1] 卢俊龙, 李传立, 韩鑫, 等. 实心结构砖塔地震损伤数值模拟与试验验证[J]. 振动工程学报, 2020, 33(2): 364-371.

LU Junlong, LI Chuanli, HAN Xin, et al. Numerical simulation and test verification of seismic damage for a brick masonry pagoda[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(2): 364-371.

[2] 钱春宇, 徐敦峰, 浩文明, 等. 西安小雁塔结构模型振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(22): 67-75.

QIAN Chunyu, XU Dunfeng, HAO Wenming, et al. Shaking table test on a model of Xi'an Xiaoyan pagoda[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 67-75.

[3] 韩鑫, 卢俊龙, 韦俊, 等. 西安八云塔动力性能与地震损伤机制[J]. 应用力学学报, 2020, 37(3): 1305-1313, 1408.

HAN Xin, LU Junlong, Wei Jun, et al. Dynamic performance and seismic damage mechanism of Xi'an Bayun pagoda[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(3): 1305-1313, 1408.

[4] VALENTE M, MILANI G. Seismic assessment of historical masonry pagodas by means of simplified approaches and standard FEM[J]. Construction and building materials, 2016, 108:74-104.

[5] 杨涛, 赵浩, 李燕伟, 等. 历史建筑砌体结构无损加固技术及抗震性能试验研究[J]. 施工技术, 2020, 49(10): 59-62.

YANG Tao, ZHAO Hao, LI Yanwei, et al. Experimental study on undamaged

- reinforcement technology and seismic performance of masonry structure of historical buildings[J]. Construction technology, 2020, 49(10): 59-62.
- [6] 徐进. 陕西古塔全编[M]. 西安: 西北大学出版社, 2018.
- XU JIN. Summary of ancient pagodas in Shaanxi[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 2018.
- [7] 丁瑞彬, 张文芳, 牛力军. 剪-压复合作用下砌体抗剪能力的数值模拟验证[J]. 施工技术, 2015, 44(S2): 588-592.
- DING Ruibing, ZHANG Wenfang, NIU Lijun. Numerical Simulation of Masonry Shear Bearing Capacity in Compression-shear[J]. Construction Technology, 2015, 44(S2): 588-592.
- [8] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008(10): 80-82.
- YANG Weizhong. Constitutive relationship model for masonry materials in compression[J]. Building Structure, 2008(10): 80-82.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010 (2015 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for design of concrete structures : GB 50010-2010[S]. 2015 ed. Beijing: China Architecture & Building Press , 2010.
- [10] 吕伟荣, 施楚贤. 普通砖砌体受压本构模型[J]. 建筑结构, 2006(11): 77-78, 53.
- LU Weirong, SHI Chuxian. Constitutive relationship of brick masonry[J]. Building Structure, 2006(11): 77-78, 53.
- [11] 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]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(2): 151-156.