

低层楼阁式木结构古建筑抗震性能振动台 试验研究

王 龙^{1,2}, 胡宸瑜^{2,3}, 谢启芳², 郑建国¹, 李俊连¹

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为研究低层楼阁式木结构古建筑的抗震性能, 以西安钟楼为研究对象, 制作了一个缩尺比例为 1:6 的结构模型, 并对其进行地震模拟振动台试验, 试验选取 Kobe 波、兰州波和汶川波作为地震动输入, 考虑了 7 度多遇至 9 度罕遇的烈度水平, 最终分析得到了不同水准地震作用下结构的动力特性、动力响应及耗能的变化规律。试验结果表明: 随着地震加速度峰值的增加, 模型结构自振频率降幅较小, 阻尼比增幅较大; 结构的刚度沿高度分布不均匀, 外金柱斗拱层的刚度最小, 最大的层间位移角也发生在此处; 加速度放大系数基本小于 1, 减震效果明显; 与现代建筑结构相比, 模型结构的塑性变形能占比较小, 有利于减轻结构的损伤。

关键词: 抗震性能; 木结构古建筑; 振动台试验; 西安钟楼

中图分类号: TU352.1; TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)02-0340-12

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.02.013

Shaking table test study on seismic performance of low-rise pavilion type ancient timber structure

WANG Long^{1,2}, HU Chenyu^{2,3}, XIE Qifang², ZHENG Jianguo¹, LI Junlian¹

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To study the seismic performance of low-rise pavilion-type ancient timber structure, shaking table tests were conducted on a 1:6 scaled model of the Xi'an Bell Tower. The Kobe wave, Lanzhou wave and Wenchuan wave with the seismic intensity levels ranging from 7-degree frequently to 9-rarely were considered as input excitations. The dynamic characteristics, dynamic responses and energy consumption of the structure were identified. The test results indicate that, as the peak ground acceleration (PGA) increased, the natural frequency of the model structure decreased marginally, while the damping ratio increased significantly. The stiffness was not uniformly distributed along the height of the structure, with the smallest stiffness found at the Dougong storey on the external gold cylinder, which also experienced the maximum inter-story drift. The acceleration amplification factors of the model were generally less than 1, exhibiting obvious seismic reduction effects. Compared with modern structures, the plastic strain energy of the ancient timber structure was relatively small, which helps reduce structural damage.

Keywords: seismic performance; ancient timber structure; shaking table test; Xi'an Bell Tower

中国古建筑具有极高的历史、文化、艺术和科学价值^[1]。近年来中国地震频发, 大量的地震灾害调查发现古建筑同样会遭受损伤, 但是木结构古建筑的损伤相对较小^[2-4], 引起了众多学者对其抗震性能

研究的兴趣, 相关的研究也大量开展^[5-9]。

地震模拟振动台试验是研究结构抗震性能最直接、最重要的手段。隋龔等^[10]采用振动台对单层殿堂式空间木构架缩尺比例模型进行了抗震性能研

收稿日期: 2023-04-17; **修订日期:** 2023-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277151, 52478143); 陕西省“高层次人才特殊支持计划”科技创新领导人才项目(TZJH001); 国机集团青年科技基金培育项目(2024-PY-19)

究,发现不仅柱脚与础石平置浮搁具有明显的隔震作用,而且柔性连接的榫卯节点和层叠复杂的斗拱也可以通过各部件之间的摩擦及挤压变形消耗地震能量,起到减轻结构震动响应的作用。王海东等^[11]对传统穿斗式木构架结构与轻型木构架结构进行了对比振动台试验研究,发现由于柱脚浮搁及柔性连接榫卯节点的存在,穿斗式木构架结构减震耗能的效果更加明显。高大峰等^[12]对西安城墙永宁门箭楼局部缩尺模型开展了振动台试验研究,发现其对短周期的地震动具有较好的减震、隔震作用。高永林等^[13]对传统穿斗式木结构房屋缩尺模型进行了模拟振动台试验,发现该结构极易发生扭转,且其质量的分布决定着层间剪力分布。薛建阳等^[14]对川西典型两层穿斗式民居进行了振动台试验研究,发现虽然浮搁柱脚的滑移可以衰减传入上部结构的地震能量,但是榫卯节点在振动过程中消耗的能量占主导作用。YEO等^[15]对中国台湾地区传统穿斗式木构缩尺比例模型进行了振动台试验研究,发现对称斗拱的构架更容易产生震害,且斗拱震害主要从坐斗位置开始往上传递。周乾等^[16]对故宫某单檐歇山式古建筑模型进行了振动台试验研究,发现结构榫卯节点的减震性能最好,斗拱次之,浮放柱底与柱顶石之间的摩擦耗能性能最弱。周中一等^[17]以单檐庑殿古建筑为研究对象,总结了地震作用下柱顶石、围护墙与木构架间的相互作用及榫卯节点的变形规律。宋晓滨等^[18]对七层传统楼阁式木塔模型进行了振动台试验研究,发现模型结构即使遭遇了罕遇地震,整体结构基本没有明显损坏迹象,具有优越的抗震性能;FUJITA等^[19]对日本五重塔缩尺比例模型进行了振动台试验,研究发现即使模型最大层间位移角达到了1/37,结构仍然没有发生整体破坏,具有良好的变形能力。

上述研究主要集中在殿堂式结构、传统民居及高层楼阁式木结构古建筑,而对低层楼阁式结构的研究相对较少,这类建筑一般常见于各地的钟鼓楼,如西安钟楼、鼓楼,北京鼓楼以及南京鼓楼等。其中西安钟楼是中国目前现存钟楼中形制最大、保存最完整的一座,是低层楼阁式木结构古建筑中的典型代表。谢启芳等^[20]对西安钟楼缩尺比例简化模型结构进行了地震模拟振动台试验,得到了模型结构在不同地震波、不同峰值加速度下的加速度响应、位移响应和破坏形态,但忽略了非结构构件(包括门、窗)的相互作用,并不能反映真实结构的抗震性能。薛建阳等^[21]和袁建力^[22]的研究也表明这些非结构构件能明显增大结构的抗侧刚度,减小层间位移角,提高结构的抗倒塌能力。

基于上述分析,在文献[20]的基础上制作包含墙体等非结构构件的1:6西安钟楼缩尺比例模型,并进行振动台试验,分析其在地震作用下的破坏形态、动力特性、动力响应及其变化规律,全面了解西安钟楼的震动响应规律,以期为中国低层楼阁式木结构古建筑的修缮保护提供科学依据。

1 试验概况

1.1 模型设计

模型主要结构构件采用樟子松制作,其材性试验结果如表1所示。综合考虑振动台的性能参数,并依据相似理论^[23],确定了模型结构主要相似常数,如表2所示。

表1 樟子松材性试验结果

Tab. 1 Test result of *Pinus sylvestris* material

材料参数	平均值/MPa	变异系数/%
顺纹	抗压强度	48.2
	抗拉强度	86.6
	弹性模量	10870
横纹	抗压强度	4.52
	弹性模量T	663
	弹性模量R	1043

注:T表示切向;R表示径向。

表2 模型主要相似常数

Tab. 2 The main similarity constants of the model

物理量	相似常数	物理量	相似常数
长度 S_l	1/6	质量 S_m	1/54
弹性模量 S_E	1	刚度 S_F	1/6
应力 S_σ	1	频率 S_f	3
加速度 S_a	3/2	时间 S_t	1/3
质量密度 S_ρ	4	阻尼 S_c	1/12

按照西安钟楼的构造特征制作模型,最大限度地保持了模型的完整性。这种完整性表现在依据原型结构的连接方法制作所有斗拱和榫卯节点的前提下,将柱间墙对结构侧向刚度的贡献基于等效斜压杆理论进行等效,保证模型复合木板与原型结构柱间墙体的抗侧刚度满足刚度动力相似关系^[24-27]。模型局部细节如图1所示。

为满足动力相似要求,需要对模型施加附加质量。原型结构楼面的荷载值为3.6 kN/m²^[28],屋盖自重为4.096 kN/m²^[29]。根据相似理论,缩尺模型每层质量应该为 $M \times S_m = MS_\rho S_l^3$, M 为原型结构每层质量,而实际模型材料密度相似常数为1,所以每层需

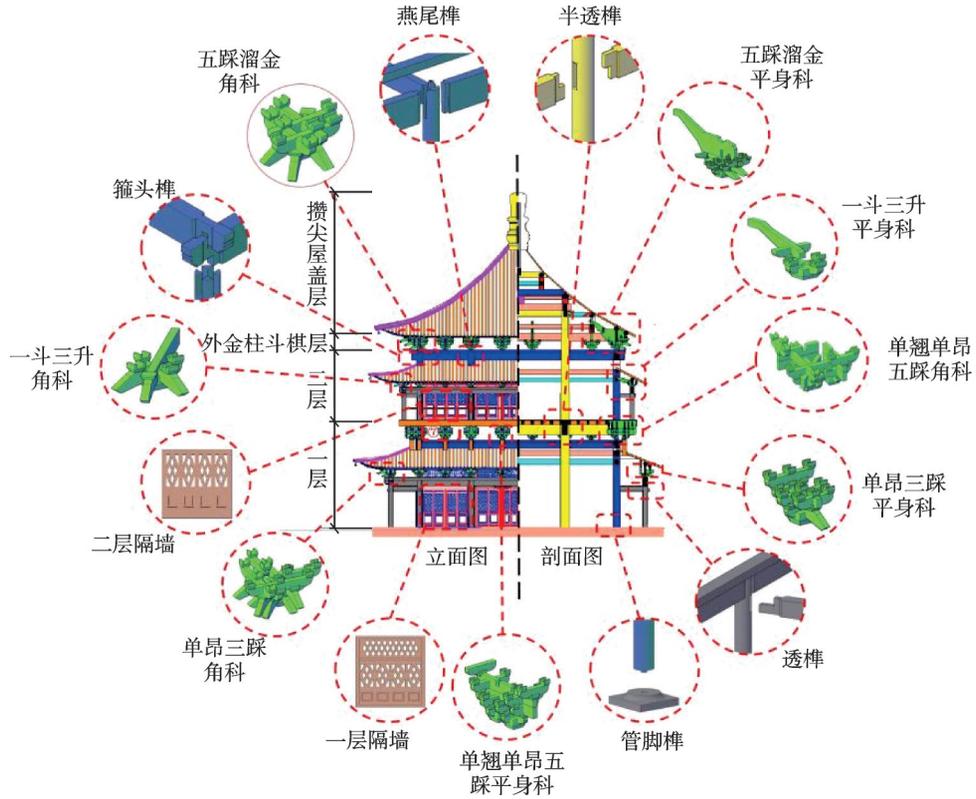


图1 模型局部细节图

Fig. 1 Local detail drawing of the model

要补充的质量应该为 $M_b = MS_p^3(S_p - 1)$ 。由于无法将质量块均匀地布置在构件上, 所以将每层中缺失质量均匀放置于楼板和屋盖上, 各区域的附加质量如表3所示。构(配)件组装完成后的试验模型如图2所示, 原型结构如图3所示。

表3 模型各区域配重质量

Tab. 3 Weight of additional mass in each area

配重区域	配重/kg
一层檐柱屋盖	1584
二层楼面	1740
二层檐柱屋盖	1056
攒尖屋盖	1920

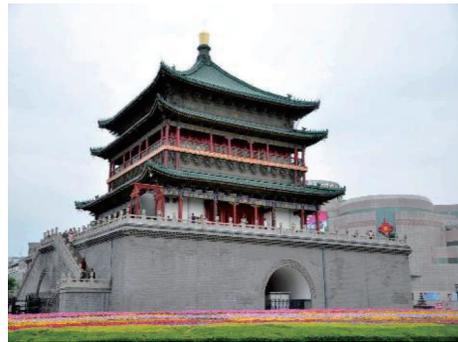


图3 模型结构原型照片(西安钟楼)

Fig. 3 Prototype photo of model structure (Xi'an Bell Tower)

1.2 加载方案

根据西安钟楼所在的场地类型、抗震设防烈度及结构自身动力特性, 最终选定了2条自然波(Kobe波和汶川波)和1条人工波(兰州波)作为地震激励^[30-31]。图4为选取的地震波加速度反应谱与规范谱的对比曲线。试验中考虑了6种不同烈度水准的地震作用, 按加速度峰值从小到大依次单向输入, 地震波的输入顺序依次为Kobe波、兰州波、汶川波。此外, 在试验开始及每级地震波作用后均对模型进行低峰值(0.035g)的白噪声激励, 以获取模型结构自振频率、阻尼比等动力特性参数的变化规律。表4给出了试验的具体加载工况。

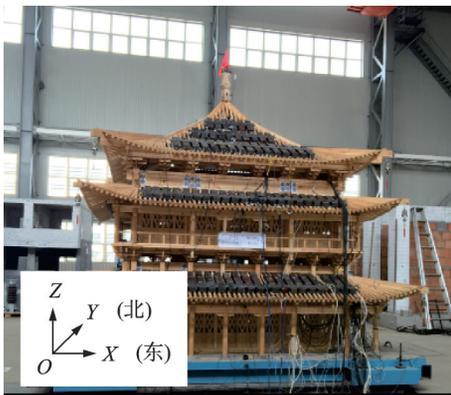


图2 振动台试验模型

Fig. 2 Test model of shaking table

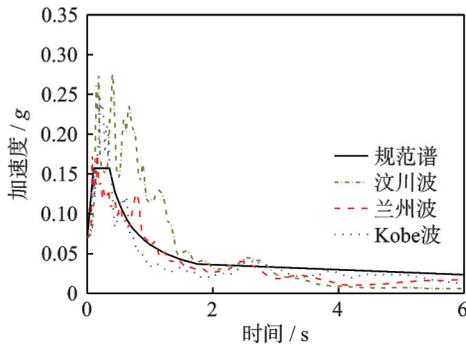


图 4 地震波加速度反应谱对比图

Fig. 4 Comparison of acceleration response spectrum among seismic waves

表 4 试验工况及加载顺序

Tab. 4 Test conditions and loading sequence

阶段	序号	工况	峰值加速度/g	备注
I	1	WN-I	0.0350	白噪声
	2	K-II		
II	3	L-II	0.0525	7度多遇
	4	W-II		
	5	WN-II	0.0350	白噪声
III	6	K-III		
	7	L-III	0.1050	8度多遇
	8	W-III		
IV	9	WN-III	0.0350	白噪声
	10	K-IV		
	11	L-IV	0.2100	9度多遇
V	12	W-IV		
	13	WN-IV	0.0350	白噪声
	14	K-V		
VI	15	L-V	0.3000	8度基本
	16	W-V		
	17	WN-V	0.0350	白噪声
VII	18	K-VI		
	19	L-VI	0.6000	8度罕遇
	20	W-VI		
VIII	21	WN-VI	0.0350	白噪声
	22	K-VII		
	23	L-VII	0.9300	9度罕遇
	24	W-VII		
	25	WN-VII	0.0350	白噪声

注:K表示 Kobe波;L表示兰州波;W表示汶川波;WN表示白噪声。

1.3 测点布置

根据试验目的,在振动台台面、外檐柱柱顶标高、二层楼面、外金柱柱顶标高、斗拱最高点及屋盖等处布置加速度传感器及位移传感器,测定实际输入结构的地震激励及结构各层动力反应。试验中共布置加速度传感器 15 个,位移传感器 10 个,其详细布置方式如图 5 所示。

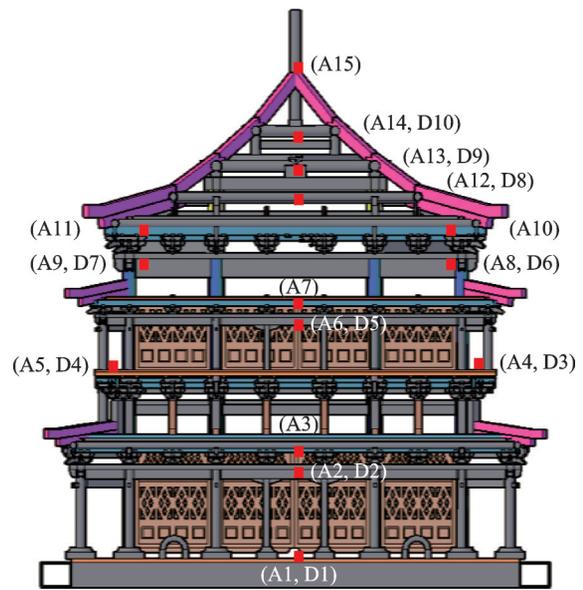


图 5 测点布置示意图

Fig. 5 Layout of measuring points

2 试验现象

当输入的地震波加速度峰值小于 0.105g 时,模型结构仅发生轻微晃动,结构反应较小;随着输入地震波加速度峰值的逐渐增大,模型的晃动幅度明显增大,并伴随有因木材挤压而发出的嘎吱嘎吱的响声;当加速度峰值达到 0.6g 时,模型开始剧烈摇摆,可以明显地观察到结构层间错动现象。在整个试验过程中,汶川波作用下结构的位移响应最强烈,兰州波次之,Kobe 波最小,主要是因为汶川波的频率与模型结构的频率比较接近。

在每个阶段试验结束后,观察模型结构的损伤情况。在 7 度多遇 (0.0525g) 以及 8 度多遇 (0.105g) 地震作用下构件未发现明显损坏;在 9 度多遇 (0.21g) 地震作用下,一层檐柱的额枋出现轻微拔榫;在 8 度基本 (0.3g) 地震作用下,一层檐柱斗拱的枨斗和散斗出现横纹劈裂裂缝,二层外檐柱额枋也出现拔榫现象;在 8 度罕遇 (0.6g) 地震作用下,外金柱和里金柱榫卯节点相继出现拔榫,雀替与额枋的下端完全脱离,外金柱上方部分斗拱的枨斗和散斗也开始出现横纹劈裂裂缝,同时部分横拱被压弯,甚至整个斗拱发生滑移;在 9 度罕遇 (0.93g) 地震作用下,部分木质墙板向平面外倒塌,主要是因为木质墙与柱枋没有设置连接件,仅靠挤压摩擦固定在外金柱之间,在地震作用下,木质墙与相邻的柱及枋挤压逐渐产生了不可恢复的变形,相互之间产生了间隙,接触不再紧密。直至试验结束,柱、枋等主要构件均未发现有明显损伤现象,模型结构主要损伤情况如图 6 所示。

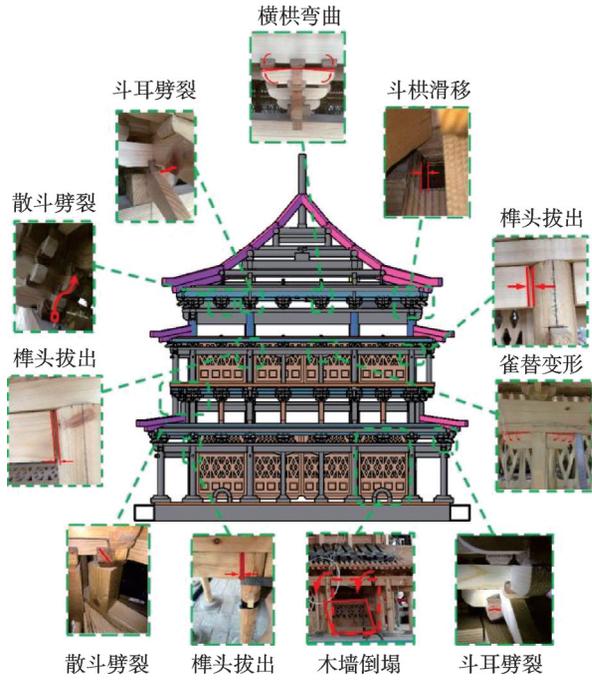


图6 构件主要破坏形态

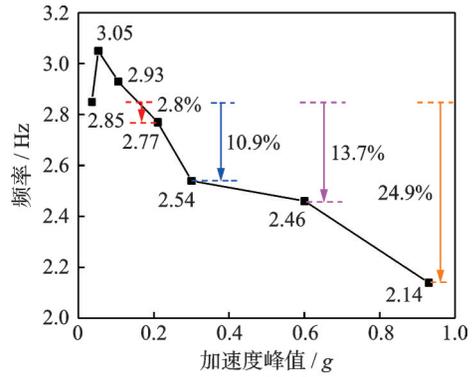
Fig. 6 Failure modes of structural components

3 试验结果及分析

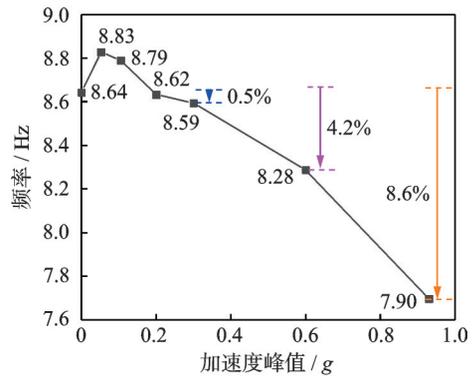
3.1 动力特性

在白噪声激励下,根据测点与激励点的频响函数,可以得到幅频曲线和相频曲线。幅频曲线上第一个峰值点对应的频率即为自振频率,并通过半功率宽带法得到自振频率对应的阻尼比;根据各测点的幅值比,结合相频曲线上的相位,得到对应的振型曲线^[32]。图7、表5及图8分别给出了不同阶段白噪声工况下模型结构的自振频率、阻尼比及振型曲线。

由图7(a)可知,结构模型在较小的地震(0.0525g)作用后,其自振频率(1阶频率)比震前略高,主要原因是部分构件连接区域间存在的微弱间隙由于结构的轻微摆动而减小,一定程度上提高了模型各节点的转动刚度及木构架的抗侧刚度。随着地震烈度的增加(0.105g~0.21g),模型自振频率逐渐减小,此时虽没有观察到结构主要构件的开裂或破坏,但结构刚度在不断降低,主要是因为各构件连接区域内部在地震的反复作用下会产生挤压塑性变形,导致构件间空隙增大,节点的转动刚度也随之降低。经历了加速度峰值为0.3g的地震波作用后,结构频率降为初始频率的90%,降低幅度突然增大,说明部分结构构件出现了一定的损伤。至9度罕遇地震作用后,模型的自振频率仅比初始值降低了约25%,说明整体结构损伤较小。整个结构自振频率



(a) First order frequency



(b) Second order frequency

图7 模型频率变化曲线

Fig. 7 Frequency variation curve of the model

表5 模型阻尼比

Tab. 5 Damping ratios of the model

工况	对应状态	阻尼比/%	
		1阶	2阶
WN-I	震前	7.1	3.2
WN-II	0.0525g后	7.2	3.2
WN-III	0.105g后	7.4	3.1
WN-IV	0.21g后	7.6	3.2
WN-V	0.3g后	8.2	3.4
WN-VI	0.6g后	11.2	4.3
WN-VII	0.93g后	14.1	4.9

的变化过程与观察到的模型损伤情况基本保持一致。由图7(b)可知,模型结构的2阶频率变化趋势与自振频率基本保持一致,在输入加速度峰值为0.0525g的地震波后先升高,随后逐渐降低,但2阶频率的下降幅度较1阶频率更小,最终相较于震前仅降低了8.6%。

由表5可以发现,模型结构1阶阻尼比的变化范围在7.1%~14.1%之间,具有较强的耗能能力。在小震(0.0525g~0.21g)作用下,由于结构几乎没有出现明显损伤,1阶阻尼比增幅相对缓慢;在9度多遇(0.21g)地震作用后,1阶阻尼比相较于起始阶段只增加了0.5%左右;随着强震的施加(0.3g~0.6g),

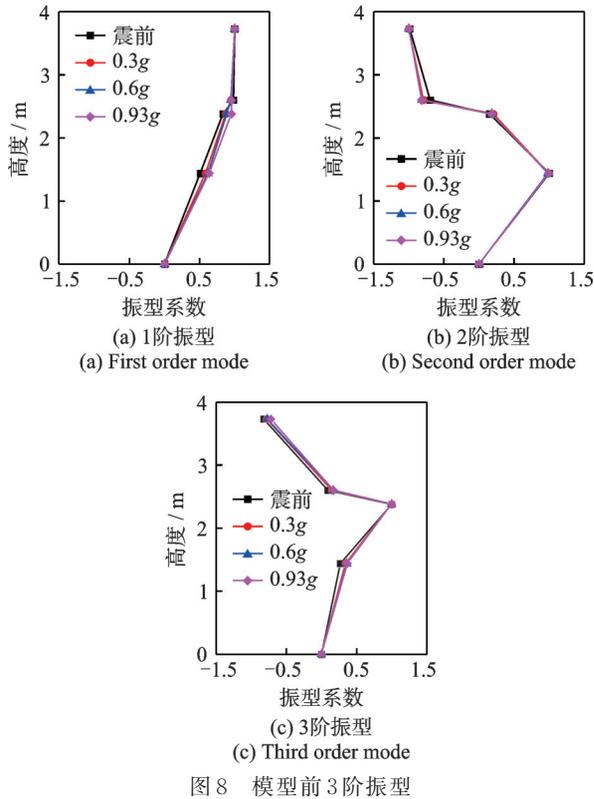


图 8 模型前 3 阶振型

模型的 1 阶阻尼比开始迅速增加;至试验结束 (0.93g 地震作用后), 1 阶阻尼比增加了将近一倍, 主要是因为整个结构随着强震的作用开始进入非线性状态, 结构的非线性变形不仅会增加体系的耗能, 更会引起木构件连接处的摩擦耗能迅速增加, 两者综合引起了结构 1 阶阻尼比的快速增长。而 2 阶阻尼比远小于 1 阶阻尼比, 变化范围在 3.2%~4.9% 之间, 整体也呈上升趋势。

根据传递函数的分析结果, 确定地震作用前后结构前 3 阶振型变化, 如图 8 所示。1 阶振型呈倒三角形分布, 在攒尖屋盖处幅值最大; 2、3 阶振型结构分别在 一层、二层处幅值最大。

3.2 动力抗侧刚度

图 9 给出了白噪声 WN-VI 试验工况下得到的滞回曲线。从图中可以看出, 白噪声工况下的层间滞回曲线形状比较狭窄, 基于这种形状特点, 可以用线性回归拟合等效抗侧刚度, 其物理意义为将每层结构视为单自由度体系^[33-34], 将质量等效集中于端部的抗侧刚度。虽然此刚度不是结构的真实刚度, 但它可以在一定程度上反映结构的抗侧能力。

表 6 给出了各工况下结构的动力抗侧刚度, 从表中可以看出: 模型结构的刚度沿高度分布不均匀, 攒尖屋盖的刚度最大, 一层、二层次之, 外金柱斗拱层的刚度最小。主要是因为一、二层柱架结构的柱

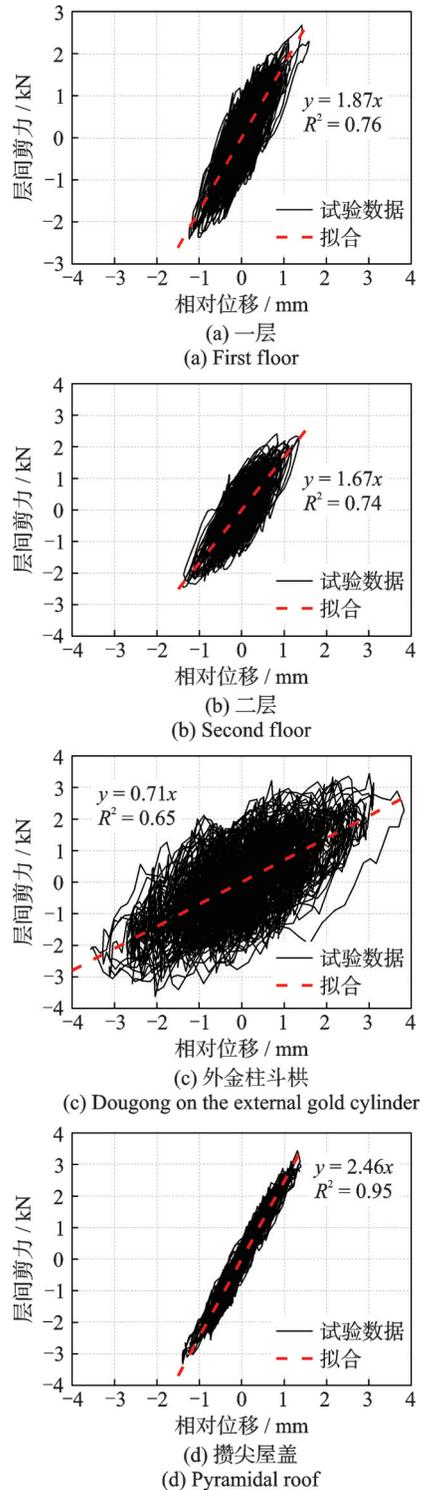


图 9 WN-VI 工况下模型层间滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of the model under WN-VI condition

子间嵌入了木质墙板, 形成了有效的柱间支撑, 相较于裸木构架, 抗侧刚度得到了显著提高^[35]; 对于攒尖屋盖结构, 由于其檩和椽子的纵横交错, 整体性相对较好, 再加上附加质量的约束, 进一步提高了屋盖结构的刚度; 而外金柱斗拱层制作时未考虑各斗拱之间的风拱板, 相当于移除了拱间支撑, 一定程度上削弱了原结构的抗侧刚度。除此之外, 随着地震动强度的不断增加, 各层的刚度都逐渐变小, 说明随着地

表6 各层结构的动力抗侧刚度

Tab.6 Dynamic lateral stiffness of structures on each floor

工况	对应状态	动力抗侧刚度/(kN·mm ⁻¹)			
		一层	二层	外金柱斗拱层	攒尖屋盖层
WN-I	震前	2.70	2.31	1.42	3.47
WN-II	0.0525g后	2.47	2.26	1.29	3.38
WN-III	0.105g后	2.32	2.20	1.23	3.24
WN-IV	0.21g后	2.06	1.95	0.97	3.20
WN-V	0.3g后	1.91	1.72	0.85	2.84
WN-VI	0.6g后	1.87	1.67	0.71	2.46
WN-VII	0.93g后	1.73	1.52	0.66	2.31

震动强度的增加,结构的损伤在不断累积,其中斗拱层刚度下降得最严重,下降幅度接近54%,与试验中能明显观察到斗拱层的损伤相一致。因此在后续的研究中需要考虑风拱板等非结构构件对整体结构的影响。

3.3 加速度响应

为了能够定量评价结构的减震能力,以台面实测最大加速度绝对值为参考标准,将结构模型在同一工况下的一层测点(A4)、二层测点(A8)、外金柱斗拱测点(A10)、攒尖屋盖测点(A10)的加速度峰值与台面测点(A1)的实测峰值相除,可以得到同一工况下模型各测点动力响应的加速度放大系数,如图10所示。

从图中可以看出,不同地震波引起的结构加速度放大系数沿高度分布的规律基本一致:结构一层加速度放大系数(β_1)急剧减小,主要是柱底隔震以及榫卯节点减震共同作用的结果;加速度放大系数在结构二层最小,结构的榫卯节点减震起到了关键性作用;外金柱上部斗拱层的加速度放大系数(β_3)大于结构二层的加速度放大系数(β_2),说明与斗拱同一高度的核心木构架及桁架影响了斗拱的减震作用;攒尖屋盖上部加速度放大系数(β_4)最大,与较大的屋盖质量和刚度有关。整个结构的加速度放大系数最大值在1左右,表明整体结构具有较好的减震能力。

除此之外,随着地震激励强度的增加,模型结构各层的加速度放大系数均呈现出减小的趋势,但减小的幅度明显降低。在Kobe波的作用下,输入加速度峰值由0.0525g升至0.3g时,模型结构各层的加速度放大系数分别下降了31.8%(一层)、35.7%(二层)、47.4%(外金柱斗拱层)和40.6%(攒尖屋盖层);而输入加速度峰值由0.3g升至0.93g时,模型

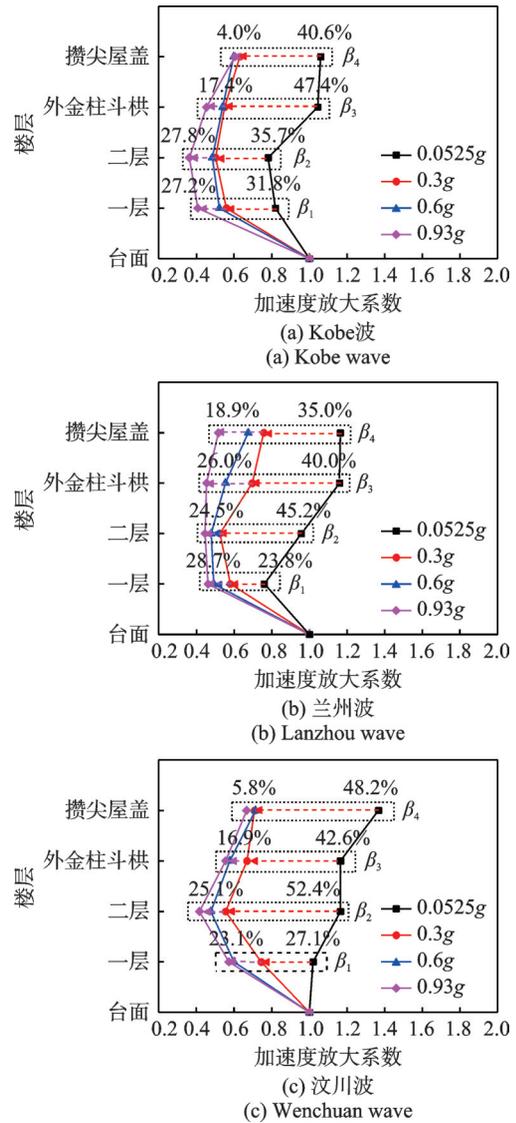


图10 不同水准地震作用下模型加速度放大系数分布
Fig. 10 Distribution of acceleration magnification factors under different seismic waves

结构各层的加速度放大系数仅分别下降了27.2%(一层)、27.8%(二层)、17.4%(外金柱斗拱层)和4.0%(攒尖屋盖层),相似的规律也出现在兰州波和汶川波作用的情况下,如图10(b)和(c)所示。这与结构的损伤累积有关,虽然地震作用下构件间的挤压不断发生,但是在前期地震作用下部分木材不可恢复的塑性变形已经形成,后续这部分变形将不再消耗地震能量,因此整体的减震能力减弱。

3.4 位移响应

图11为不同地震工况下模型结构相对于台面的最大位移,可以发现不同地震波作用下,模型结构位移反应曲线的形状基本一致,呈倒三角分布,类似1阶振型,且模型各层最大位移随着地震强度的增加而增大。汶川波位移反应最大,Kobe波最小,与试验中观察到的现象一致;在加速度峰值不超过

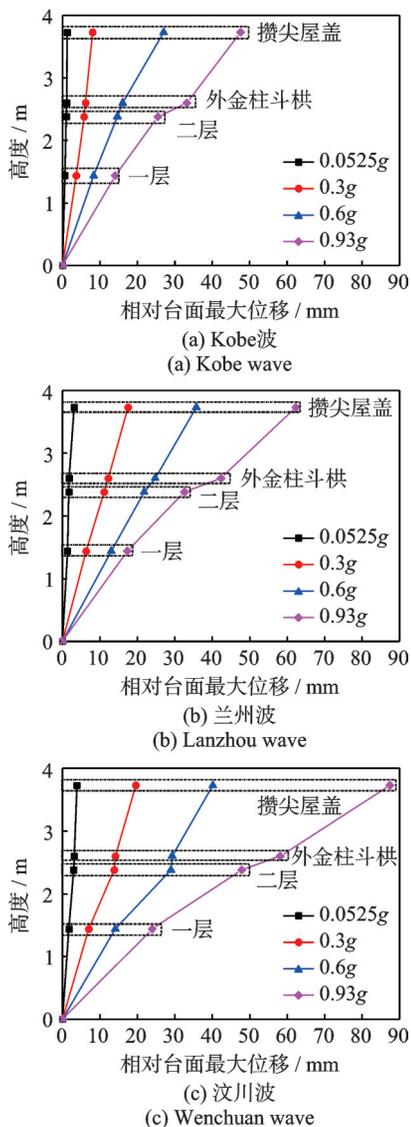


图 11 不同水准地震作用下模型最大位移

Fig. 11 Maximum displacements of the model under different seismic waves

0.3g 前, 整个模型最大相对位移分别为 19.59 mm (汶川波)、17.52 mm (兰州波) 和 8.04 mm (Kobe 波), 整体偏小, 相差不大; 当加速度峰值达到 0.6g 后, 模型相对位移曲线外倾趋势突然增大, 在 0.93g 时最大相对位移达到了 87.43 mm (汶川波)、62.27 mm (兰州波) 和 47.52 mm (Kobe 波), 但试验结束仍能恢复原位, 几乎不存在残余变形, 结构整体性仍良好, 说明结构具有良好的变形能力和复位能力。

结构在地震作用下的层间位移角是评价结构破坏程度的重要标志, 层间位移角过大可能会引起结构的倒塌。表 7 为模型结构在不同地震波作用下各结构层的最大层间位移角。由表 7 可知, 模型结构各层的层间位移角存在如下关系: 外金柱斗拱层 > 二层 > 一层 > 攒尖屋盖层, 与等效抗侧刚度的分布规律相反。

表 7 地震作用下模型结构最大层间位移角

Tab. 7 Maximum inter-story drift ratios of the model structure under earthquakes

地震波	PGA/g	最大层间位移角			
		一层	二层	外金柱斗拱层	攒尖屋盖层
Kobe 波	0.0525	1/2311	1/1794	1/500	1/1138
	0.1050	1/1194	1/1259	1/385	1/863
	0.2100	1/699	1/542	1/203	1/744
	0.3000	1/436	1/345	1/110	1/303
	0.6000	1/177	1/143	1/75	1/114
兰州波	0.9300	1/102	1/82	1/24	1/100
	0.0525	1/1816	1/1913	1/318	1/833
	0.1050	1/829	1/846	1/167	1/385
	0.2100	1/419	1/400	1/89	1/278
	0.3000	1/284	1/213	1/58	1/148
汶川波	0.6000	1/125	1/124	1/41	1/91
	0.9300	1/83	1/61	1/19	1/72
	0.0525	1/814	1/991	1/195	1/828
	0.1050	1/437	1/617	1/102	1/433
	0.2100	1/271	1/240	1/75	1/209
汶川波	0.3000	1/204	1/144	1/50	1/119
	0.6000	1/101	1/63	1/30	1/74
	0.9300	1/60	1/39	1/18	1/49

在汶川波作用下, 当输入加速度峰值达到 0.93g 时, 模型结构构架层的最大层间位移角为 1/39, 已经接近《古建筑木结构维护与加固技术标准》^[36] 中对木结构古建筑残损点限值的规定 (1/30), 但木构架无明显损坏, 更没有出现可能发生倒塌的迹象。外金柱斗拱层的层间位移角最大更是达到了 1/18, 此时也仅仅是枋斗和散斗出现裂缝, 斗拱并没有发生歪闪。隋龔等^[37] 和周乾等^[38] 的研究也发现即使斗拱层的最大层间位移角达到了 1/16 和 1/14, 斗拱仍然具有较强的承载力, 没有完全发生破坏。说明楼阁式木结构古建筑强大的变形能力是其具有较强抗震性能的重要因素, 但是如何能够合理地确定木构架和斗拱在地震作用下的最大层间位移角限值有待于进一步的研究。

除此之外, 在 0.3g 地震波的作用下攒尖屋盖层的层间最大层间位移角达到了 1/119, 已经远超现代建筑结构弹性层间位移角限值 (钢筋混凝土框架结构为 1/550, 多层钢结构为 1/250^[39])。由于这类结构屋盖层的瓦面、脊件等块体之间黏结性能较差, 所以在强烈的地震作用后往往会发现这些薄弱部位发生破坏^[2-4]。

3.5 耗能分析

地震作用下,结构的破坏与地震输入能量及结构自身的耗能能力有关。地震输入结构的能量(E_1)主要由三部分构成:结构动能(E_K)、结构阻尼能(E_ξ)以及结构变形能,且结构变形能又包含弹性变形能(E_E)以及塑性变形能(E_P)^[40],如下式所示:

$$E_1 = E_K + E_\xi + E_E + E_P \quad (1)$$

将振动台模型简化为4质点模型,分别代表一层、二层、外金柱斗拱层以及攒尖屋盖,按Rayleigh阻尼方法计算结构的阻尼耗能以及塑性变形能^[41-42],图12给出了结构地震能量反应历程,发现结构总的输入能近似等于结构的阻尼和塑性变形耗散的能量,如下式所示:

$$E_1 \cong E_\xi + E_P \quad (2)$$

主要是因为结构在地震能量反应历程中,结构弹性变形能和结构动能只参与能量的转换,几乎不

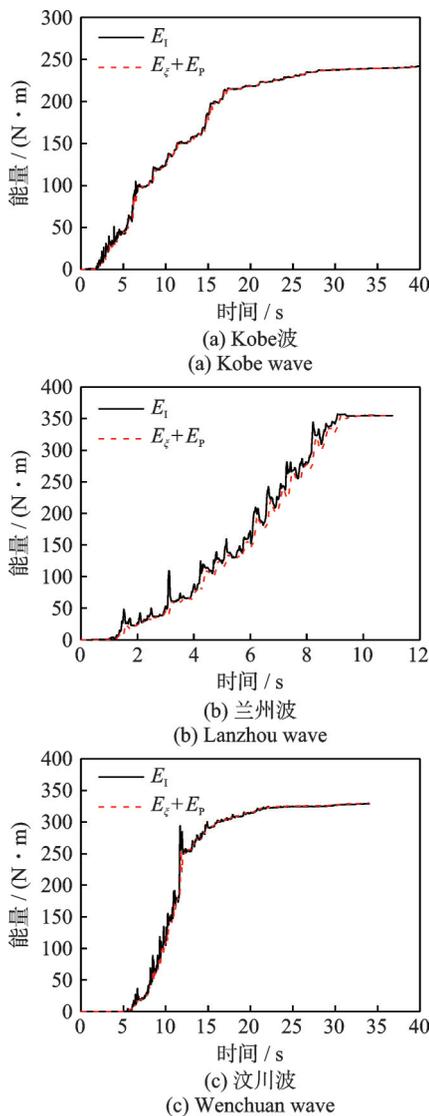


图12 0.3g地震作用下结构能量反应历程

Fig. 12 Structural energy response history under 0.3g earthquake

消耗能量,而结构的塑性变性能以及阻尼耗能是随时间推移逐渐累积的变量。

图13给出了模型结构在三种地震波作用下塑性变形能与输入能之比(E_P/E_1)的均值变化趋势,由图可知,在初始阶段,结构的塑性变形能占比接近0,随着地震加速度峰值的增加,结构的塑性变形能所占的比例逐渐增加。因为结构的塑性变形能与结构的损伤密切相关,说明结构的损伤也在不断累积。除此之外,与现代建筑结构^[41,43]相比,其塑性变性能增幅相对较慢,在地震加速度峰值位于0.25g~0.35g时,现代结构的塑性变形能所占的比例已经开始超过阻尼耗能,而对于本模型这种情况要推迟到地震加速度峰值超过0.6g之后,一定程度上从耗能的角度揭示了木结构古建筑在地震作用下损伤较小、抗震能力较强的原因。

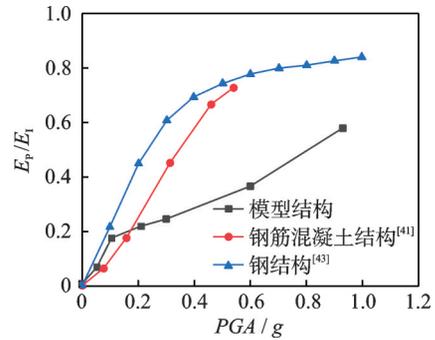


图13 不同结构塑性变形能占比

Fig. 13 Plastic strain energy of different structures

4 结 论

通过对西安钟楼1:6缩尺模型进行地震模拟振动台试验研究,得出如下结论:

(1)西安钟楼具有优越的抗震性能。模型结构在经历了强烈的地震作用后损伤较小,除局部榫卯节点发生拔榫,部分斗拱的栌斗和散斗发生横纹劈裂外,主体结构仍然完好;模型结构中结构与损伤密切相关的塑性变形能占比也远远小于现代建筑。除此之外,非结构构件的墙体与木构架间连接较弱,在地震作用下会逐渐损伤,甚至倒塌退出工作,因此有必要采取适当的加固措施加强非结构构件与木构架间的联系,提升整体结构的稳定性。

(2)模型结构频率变化小,耗能能力强。结构在经历加速度峰值为0.93g(9度罕遇)地震用后,自振频率仅下降了25%,总体衰减幅度较小,再次表明了结构的损伤较轻。但整体结构阻尼比大幅度增加,在地震加速度峰值达到0.6g(9度罕遇)后,阻尼

比可达到10%以上,有效地增加了结构的阻尼耗能,提高了结构的抗震性能。

(3)模型结构刚度沿高度分布不均匀。攒尖屋盖由于其特殊构造刚度较大,对地震力有明显放大作用,屋盖上附的琉璃瓦、金顶等可能会存在一定的安全隐患;由于忽略了风拱板的侧向支撑作用,使得外金柱斗拱层刚度最小,层间位移角较大,损伤也相对较大,成为整个结构的薄弱层。

(4)模型结构的减震作用明显,加速度放大系数介于0.4~1.4之间。各层加速度放大系数最小值位于二层,说明非结构构件的墙体并没有限制榫卯节点耗能减震作用的发挥。此外,外金柱斗拱层由于核心木构架及桁架的影响,加速度放大系数较二层稍大,其减震作用没有得到充分发挥。

参考文献:

- [1] 郑建国,徐建,钱春宇,等.古建筑抗震与振动控制若干关键技术研究[J].土木工程学报,2023,56(1):1-17.
ZHENG Jianguo, XU Jian, QIAN Chunyu, et al. Research on several key technologies of earthquake resistance and vibration control of ancient buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(1): 1-17.
- [2] 周乾,闫维明,杨小森,等.汶川地震导致的古建筑震害[J].文物保护与考古科学,2010,22(1):37-45.
ZHOU Qian, YAN Weiming, YANG Xiaosen, et al. Damage of ancient Chinese architecture caused by the Wenchuan earthquake[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2010, 22(1): 37-45.
- [3] 潘毅,唐丽娜,王慧琴,等.芦山7.0级地震古建筑震害调查分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):140-146.
PAN Yi, TANG Li'na, WANG Huiqin, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms 7.0 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146.
- [4] 安仁兵,游文龙,潘毅,等.泸县6.0级地震文化遗产震害调查与分析[J].土木工程学报,2022,55(12):13-24.
AN Renbing, YOU Wenlong, PAN Yi, et al. Seismic damage investigation and analysis of cultural heritages in Ms 6.0 Luxian earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(12): 13-24.
- [5] 潘毅,安仁兵,陈建,等.基于摇摆柱的古建筑木结构柱脚节点力学模型研究[J].建筑结构学报,2022,43(6):196-206.
PAN Yi, AN Renbing, CHEN Jian, et al. Study on mechanical model of column footing in ancient timber structure based on rocking column[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 196-206.
- [6] 淳庆,吕伟,王建国,等.江浙地区抬梁和穿斗木构体系典型榫卯节点受力性能[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(1):151-158.
CHUN Qing, LYU Wei, WANG Jianguo, et al. Mechanical properties of typical mortise-tenon joints of post and lintel construction and column and tie construction of timber buildings in Jiangsu Province and Zhejiang Province[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 151-158.
- [7] 袁建力,陈韦,王珏,等.应县木塔斗拱模型试验研究[J].建筑结构学报,2011,32(7):66-72.
YUAN Jianli, CHEN Wei, WANG Jue, et al. Experimental research on bracket set models of Yingxian Timber Pagoda[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7): 66-72.
- [8] 张锡成,韩乙楠,吴晨伟,等.殿堂式古建筑木结构的离散元模拟与倒塌易损性分析[J].振动工程学报,2020,33(6):1150-1161.
ZHANG Xicheng, HAN Yinan, WU Chenwei, et al. Discrete element simulation and collapse vulnerability analysis of Chinese ancient timber-frame structure[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1150-1161.
- [9] 杨庆山.古建筑木结构的承载及抗震机理[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):1-9.
YANG Qingshan. Load-bearing and aseismic mechanism of traditional wooden structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 1-9.
- [10] 隋龔,赵鸿铁,薛建阳,等.古代殿堂式木结构建筑模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(2):35-40.
SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. A study on Chinese ancient timber structures by shaking table test[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 35-40.
- [11] 王海东,尚守平,何放龙,等.穿斗式木构架结构与轻型木结构抗震性能振动台试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(6):138-143.
WANG Haidong, SHANG Shouping, HE Fanglong, et al. Shaking table tests of Chinese traditional wood building and light wood framed building[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(6): 138-143.
- [12] 高大峰,刘静,李飞,等.西安城墙永宁门箭楼振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(5):140-149.
GAO Dafeng, LIU Jing, LI Fei, et al. The researches on shaking table test of Yongning Gate embrasure watch-tower of Xi'an City Wall[J]. Earthquake Engi-

- neering and Engineering Dynamics, 2014, 34 (5) : 140-149.
- [13] 高永林,陶忠,叶燎原,等.带有黏弹性阻尼器穿斗木结构振动台试验研究[J].振动与冲击,2017,36(1):240-247.
- GAO Yonglin, TAO Zhong, YE Liaoyuan, et al. Shaking table tests for a Chuan-Dou timber building with viscoelastic dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(1): 240-247.
- [14] 薛建阳,许丹,任国旗,等.传统民居穿斗式木构架抗震性能振动台试验研究[J].土木工程学报,2019,52(12):1-10.
- XUE Jianyang, XU Dan, REN Guoqi, et al. Shake table test on seismic performance of column and tie wooden structure in traditional residence[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(12): 1-10.
- [15] YEO S K, HSU M F, KOMATSU K, et al. Shaking table test of the Taiwanese traditional Dieh-Dou timber frame[J]. International Journal of Cultural Heritage, 2016, 10(5): 539-557.
- [16] 周乾,闫维明,纪金豹,等.单檐歇山式古建筑抗震性能振动台试验[J].文物保护与考古科学,2018,30(2):37-53.
- ZHOU Qian, YAN Weiming, JI Jinbao, et al. Shaking table tests of an ancient Chinese building with a single layer gable and a hip roof[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2018, 30(2): 37-53.
- [17] 周中一,徐智凌,王涛,等.单檐庑殿古建筑模拟地震振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2021,41(3):64-74.
- ZHOU Zhongyi, XU Zhiling, WANG Tao, et al. Shaking table test of single eaves hipped roof ancient building[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 64-74.
- [18] 宋晓滨,吴亚杰,罗烈,等.传统楼阁式木结构塔振动台试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(2):10-19.
- SONG Xiaobin, WU Yajie, LUO Lie, et al. Shaking table test on a traditional pavilion-style wooden pagoda [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (2) : 10-19.
- [19] FUJITA K, KAWAI N, MINOWA C, et al. Shaking table test and earthquake response monitoring traditional Japanese timber pagoda[C]//9th World Conference on Timber Engineering, Portland. 2006: 1527-1534.
- [20] 谢启芳,王龙,张利朋,等.西安钟楼木结构模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(12):128-138.
- XIE Qifang, WANG Long, ZHANG Lipeng, et al. Shaking table tests on wooden structure model of Xi'an Bell Tower[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 128-138.
- [21] 薛建阳,许丹,郭锐.有无填充墙板的穿斗式木结构房屋振动台试验及对比分析[J].振动与冲击,2020,39(13):184-192.
- XUE Jianyang, XU Dan, GUO Rui. Shaking table tests and contrastive analysis for column-and-tie wooden buildings with and without infills[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 184-192.
- [22] 袁建力.墙体参与工作的木构架古建筑抗震分析方法[J].建筑结构学报,2018,39(9):45-52.
- YUAN Jianli. Seismic analysis method considering wall participation for ancient timber frame buildings[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 45-52.
- [23] 刘祖强,杨筱,薛建阳,等.型钢混凝土异形柱框架地震模拟振动台试验及数值模拟[J].振动工程学报,2019,32(1):17-28.
- LIU Zuqiang, YANG Xiao, XUE Jianyang, et al. Shaking table test and numerical simulation for steel reinforced concrete frame with special-shaped columns[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 17-28.
- [24] 乔墩,敬登虎.带砌体填充墙框架弹性抗侧刚度计算方法对比分析[J].建筑结构学报,2020,41(增刊1):188-195.
- QIAO Dun, JING Denghu. Comparative study on calculation methods of elastic lateral stiffness in masonry-infilled frames[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 188-195.
- [25] RIAHI Z, ELWOOD K J, ALCOCER S M. Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(6): 644-654.
- [26] TSUWA I, KOSHIHARA M. A study on the effect of wall stiffness on the vibration characteristics of traditional timber frames including Kumimono[J]. Bulletin of Earthquake Resistant Structure, 2012, 45: 169-180.
- [27] CASAGRANDE D, ROSSI S, SARTORI T, et al. Analytical and numerical analysis of timber framed shear walls[C]//Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand. 2012: 497-503.
- [28] 谢启芳.中国木结构古建筑加固的试验研究及理论分析[D].西安:西安建筑科技大学,2007.
- XIE Qifang. Experimental study and theoretical analysis on strengthening for Chinese ancient timber buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007
- [29] 孟昭博.西安钟楼的交通振动响应分析及评估[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- MENG Zhaobo. Analysis and assessment of the vibration responds traffic-induced of Xi'an Bell Tower[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.

- [30] XIE Q F, WANG L, ZHANG L P, et al. Seismic behaviour of a traditional timber structure: shaking table tests, energy dissipation mechanism and damage assessment model[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17: 1689-1714.
- [31] 李涛, 王社良, 杨涛. 砖石古塔结构振动台试验模型设计与试验验证[J]. 振动工程学报, 2018, 31(2): 314-322.
LI Tao, WANG Sheliang, YANG Tao. Design and experimental verification of shaking table test model of brick masonry structure in ancient pagoda[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(2): 314-322.
- [32] 陆伟东. 基于MATLAB的地震模拟振动台试验的数据处理[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2011, 33(6): 1-4.
LU Weidong. MATLAB-based data processing of shaking table test[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(6): 1-4.
- [33] LIN Y Y, MIRANDA E. Noniterative equivalent linear method for evaluation of existing structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(11): 1685-1695.
- [34] WU Y J, SONG X B, GU X L, et al. Dynamic performance of a multi-story traditional timber pagoda[J]. Engineering Structures, 2018, 159: 277-285.
- [35] XIE Q F, WANG L, LI S Y, et al. Influence of wood infill walls on the seismic performance of Chinese traditional timber structure by shaking table tests[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18: 5009-5029.
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 古建筑木结构维护与加固技术标准: GB/T 50165—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
MOHURD, SAMR. Technical standard for maintenance and strengthening of historical timber building: GB/T 50165—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.
- [37] 隋龔, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建木构铺作层侧向刚度的试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 74-78.
SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental study on lateral stiffness of Dougong layer in Chinese historic buildings[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 74-78.
- [38] 周乾, 杨娜, 淳庆. 故宫太和殿二层斗拱水平抗震性能试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 150-158.
ZHOU Qian, YANG Na, CHUN Qing. Experiments on seismic performance of bracket sets of second eave of Taihe Palace in the Forbidden City[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(1): 150-158.
- [39] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
MOHURD, SAMR. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [40] UANG C M, BERTERO V V. Evaluation of seismic energy in structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(1): 77-90.
- [41] BENAVENT-CLIMENT A, MORILLAS L, ESCOLANO-MARGARIT D. Seismic performance and damage evaluation of a reinforced concrete frame with hysteretic dampers through shake-table tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(15): 2399-2417.
- [42] 刘文光, 李金乐, 许浩, 等. 三维隔震结构摇摆动力模型及振动台试验验证[J]. 振动工程学报, 2022, 35(5): 1200-1210.
LIU Wenguang, LI Jinle, XU Hao, et al. Rocking dynamic model of three-dimensional isolation structure and validation of shaking table tests[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(5): 1200-1210.
- [43] SHEN J, AKBA B. Seismic energy demand in steel moment frames[J]. Journal of Earthquake Engineering, 1999, 3(4): 519-559.

第一作者: 王 龙(1988—),男,博士,高级工程师。

E-mail:wangyglg@163.com

通信作者: 谢启芳(1978—),男,博士,教授。

E-mail:nacy.xie@163.com