

考虑墙体影响的青城山灵官殿动力特性及地震响应分析

潘毅^{1,2}, 易督航¹, 陈建¹, 安仁兵¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川成都 610031;

2. 西南交通大学 抗震工程技术四川省重点实验室, 四川成都 610031)

摘要: 中国西南地区的山地古建筑众多, 因其具有柱底不等高约束、抗侧刚度不均匀等结构特征, 与平地上古建筑的抗震性能不同。为研究山地古建筑木结构的动力特性和地震响应规律, 以青城山灵官殿为研究对象, 对结构进行原位动力特性测试, 获得其模态参数, 并建立无墙体和有墙体数值模型, 将有墙体模型的自振频率模拟值与实测值进行对比以验证数值模型的正确性。然后, 分别对两种数值模型输入不同幅值的 7 组地震动, 并将两种数值模型的动力响应进行对比, 分析山地古建筑木结构的抗震性能。结果表明: 灵官殿前二阶频率在 2.90~6.88 Hz 之间; 墙体对灵官殿的抗震刚度有较大贡献, 使层间位移角和楼层扭转角分别减小 11% 和 16%, 而不考虑墙体影响时得到的地震作用结果偏于不安全; 灵官殿的楼层扭转角在第一层至第二层发生突变, 层间扭转角最大值出现在第二层, 且第一层的楼层剪力值最大。因此, 灵官殿上接地层为其薄弱层, 在抗震加固中应重点关注。

关键词: 山地古建筑; 木结构; 墙体; 原位动力测试; 动力特性; 抗震性能

中图分类号: TU366.2 TU311.41 **文献标志码:** A

Analysis on dynamic characteristics and seismic response of Lingguan deity hall in Qingcheng Mountain by considering effects of wall

PAN Yi^{1,2}, YI Duhang¹, CHEN Jian¹, AN Renbing¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: There are numerous Chinese ancient buildings on a slope in southwest China. Because of the structural characteristics of unequal height constraints at the bottom of columns and uneven lateral stiffnesses, the seismic performance of ancient timber structures on a slope is different from that of timber structures on a flat ground. To study the dynamic characteristics and seismic response of ancient timber structures on a slope, in which the Lingguan deity hall was taken as the research object, the in-situ dynamic characteristics of the structure were tested, and the modal parameters were obtained. Then, the numerical models without walls and with the walls were established respectively. The simulated values of the natural frequency of the wall model were compared with the measured values to verify the correctness of the numerical model. Finally, seven groups of ground motions with different amplitudes were input to the two numerical models, and the dynamic responses of the two numerical models were compared to analyse the seismic performance of ancient timber structures on a slope. The results show that the first- and second-order frequencies of the Lingguan deity hall are between 2.90 Hz and 6.88 Hz. The wall has a great contribution to the seismic stiffness of the Lingguan deity hall by reducing the story displacement angle and the floor torsion angle by 11% and 16%, respectively. It is thus not safe to ignore the seismic action value of the wall in the calculation. The torsion angles of the models change abruptly from the first floor to the second floor, the shear force is the largest in the first floor, while the torsion angle is the largest in the second floor. Therefore, the upper embedding story on the Lingguan deity hall is its weak layer, which should be paid more attention in seismic strengthening.

Keywords: ancient buildings on a slope; timber structure; wall; in-situ dynamic test; dynamic characteristic; seismic performance

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878559)。

作者简介: 潘毅, 出生于 1977 年, 男, 工学博士, 教授, 主要从事结构工程抗震与加固研究。email: panyi@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2021 年 1 月

0 引言

我国山地面积约占全国陆地总面积的 1/3。许多古建筑顺应山势建造,这种与山地紧密结合的古建筑称作山地古建筑。山地古建筑具有柱底不等高、抗侧刚度不均匀等特点,导致其抗震性能与平原上的古建筑有所区别^[1]。汶川地震、芦山地震和尼泊尔地震等多次震害调查^[2-4]表明,高烈度区山地古建筑的震害一般较同类平原上的古建筑严重。故有必要研究山地古建筑木结构的抗震性能。

目前,山地古建筑木结构的研究主要集中于建筑构造方面^[5],而对于结构抗震性能方面的研究较少。已有的研究包括:王晓玥^[6]建立了两柱一枋的不等高木柱架数值模型,对比了在水平荷载作用下不等高和等高柱架的骨架曲线,但未进行试验验证。常鹏等^[7]对典型藏式山地砖石结构占堆康进行了基于环境激励的动力测试,但砖石结构与木结构的动力特性有差异。薛建阳等^[8]对西安安定门城楼进行了原位动力测试,考虑了高台基对木结构自振频率和抗震性能的影响;赵守江等^[9]对故宫雨花阁进行了环境微振动测试,获得了结构的主要频率和振型,并进行了罕遇地震响应分析;Fang 等^[10-11]以西安城墙北门前塔楼为研究对象,对其进行了原位动力测试,并通过三维数值模型研究了整体木构架的地震响应;高延安等^[12]对飞云楼进行了动力测试,采用随机减量技术改进了随机子空间识别方法,获得了更为精确的模式参数。而上述的动力测试对象均为平地古建筑木结构。此外,李英民等^[13-14]对山地框架结构抗震性能进行了试验研究,但由于混凝土结构与古建筑木结构的连接方式完全不同,导致两者的抗震性能差异较大。因此,目前还鲜有基于动力特性测试的山地古建筑木结构的地震响应和抗震性能研究的报道。

为了准确掌握山地古建筑木结构的抗震性能,本文中,以青城山灵官殿为研究对象,通过原位动力测试获取其主要动力特性,并考虑墙体对结构抗震性能的影响,建立经动力测试结果验证的数值模型,分析山地古建筑木结构的地震响应规律,以期对山地古建筑木结构的修缮及加固提供理论支持。

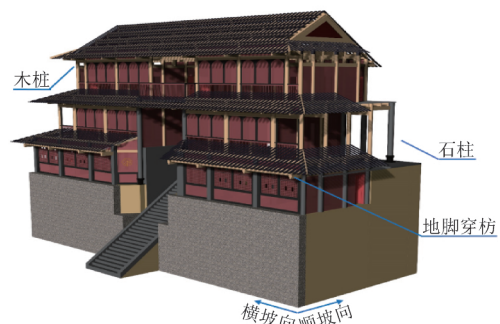
1 青城山灵官殿的结构特点

青城山灵官殿依山而建,隶属于天师洞建筑群,始建于隋朝大业年间,经历代维修和重建,为全国重点文物保护单位,如图 1a 所示。灵官殿总建筑面积约 458.8 m²,屋顶标高为 9.77 m,共 4 层,各层层高不

同。其中,负一层为掉层;第一层为大殿厅堂,平面呈长方形,面阔五间 19.28 m,两侧廊深 2.05 m;第二层为起居室;第三层为屋盖层。第一层无内部隔墙,其余墙体均采用 150 mm 厚木板。负一层外围立柱与第一层走廊两侧立柱均采用石柱,其直径为 350 mm;其余各层均为木柱,直径为 260 mm,所有立柱均平摆浮搁于础石之上。



(a) 实景图



(b) 三维模型示意

图 1 青城山灵官殿

Fig. 1 Lingguan deity hall in the Qingcheng Mountain

灵官殿为穿斗式木构架,柱间用穿枋贯穿形成一榀构架。每榀木构架由檩、斗枋连接组成,沿顺坡向第一层处,由地脚穿枋联系和拉着上接地端柱底与同层非接地柱,如图 1b 所示。在建筑立面上,灵官殿为柱底不等高约束,即上、下接地端高度不同,由于结构负一层柱的减少,使得负一层和其余楼层的抗侧刚度有所差异,存在竖向不规则。在建筑平面上,由于受地形制约和结构布置影响,灵官殿各层的质心和刚心不重合,且不在同一竖轴上,地震作用下结构存在扭转效应。

2 原位动力测试

2.1 动力测试方案

根据 GB/T 50452—2008《古建筑防工业振动技术规范》原位动力测试的测点选取规定,加速度传感器总体布置原则为:1) 平面上,布置在各层平面刚度中心;2) 立面上,布置在各个不等高木通柱底、屋顶层以及木柱上每层楼板对应的位置。

按照 JGJ/T 101—2015《建筑抗震试验规程》中结构脉动法测试要求,并考虑仪器数量和现场条件的限制,本次动力特性测试分为 3 个工况,将第三层的测点 s1 作为每个工况下的共同参考点,在每个测点沿横坡向与顺坡向各布置 1 个传感器,进行振动信号采集。工况 1 及剖面 1-1 次间的测点布置见图 2。3 个工况的测点布置具体如下:

- 1) 工况 1。除测点 s1 外,在第二层共布置 4 个测点,编号为 s2~s5。
- 2) 工况 2。除测点 s1 外,在第一层共布置 4 个测点,编号为 s6~s9。
- 3) 工况 3。除测点 s1 外,在负一层共布置 2 个测点,编号为 s10、s11。

每个测点处布置 2 个水平加速度传感器以测量横坡向和顺坡向振动响应。采样频率为 120 Hz,采集时间为 30 min。通过 INV3062S 动态信号采集系统将传感器采集数据传入数据采集计算机。

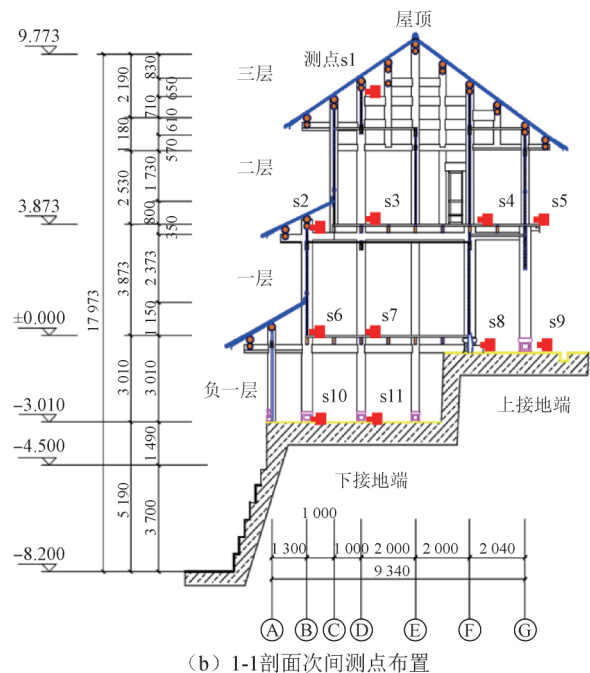
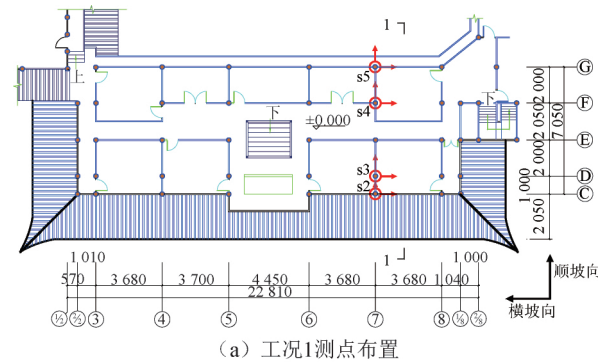


图 2 加速度传感器布置

Fig. 2 Layout of acceleration sensors

2.2 测试结果

2.2.1 自振频率

测点 s1 处横坡向加速度传感器的采集信号波形见图 3,对其进行自谱分析和平滑化处理,得到功率谱密度(PSD)曲线,如图 4 所示。

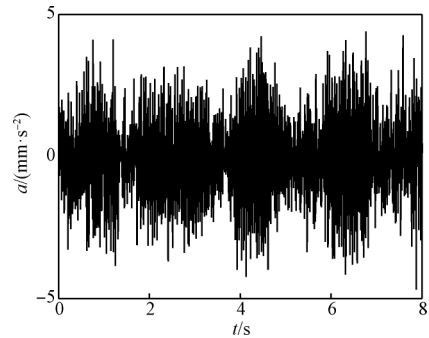


图 3 测点 s1 横坡向加速度信号波形

Fig. 3 Acceleration waveform of signal of point s1 in transverse slope orientation

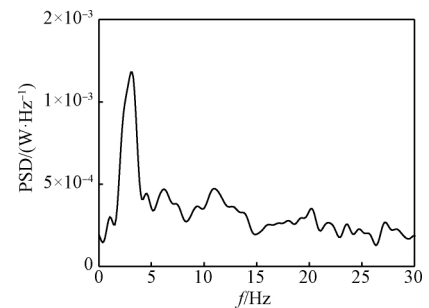


图 4 测点 s1 横坡向的功率谱密度曲线

Fig. 4 PSD of point s1 in transverse slope orientation

通过快速傅里叶变换进行模态参数识别,得到结构横坡向和顺坡向的前二阶自振频率和阻尼比,见表 1。由表 1 可知,灵官殿前二阶自振频率处于 2.90~6.88 Hz 之间,其中横坡向与顺坡向的一阶频率之比为 1.11,二阶频率之比为 1.07。这说明结构沿横坡向的抗侧刚度大于顺坡向的抗侧刚度。

表 1 灵官殿动力特性测试结果

Table 1 Test results of dynamic characteristics of Lingguan deity hall

阶次	频率 f/Hz		阻尼比	
	横坡向	顺坡向	横坡向	顺坡向
一阶	3.23	2.90	0.052	0.078
二阶	6.88	6.46	0.061	0.052

2.2.2 结构振型

采用随机子空间法进行求解,计算得到灵官殿在横坡向和顺坡向的一阶和二阶振型,如图 5 所示。图中 i 为楼层号(其中,将屋顶定义为第 4 层), X 为相对振幅。由相对振幅坐标可见,结构沿

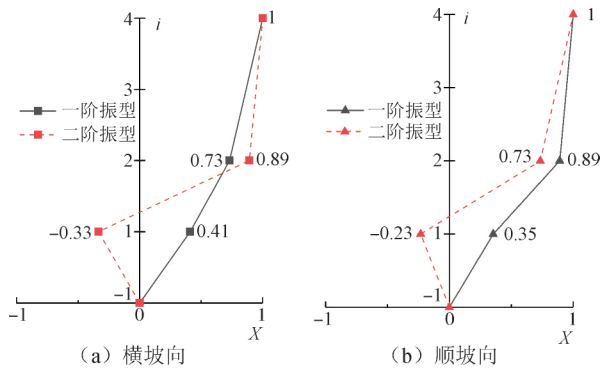


图5 灵官殿前二阶振型

Fig. 5 The first two order vibration modes of Lingguan deity hall

横坡向和顺坡向一阶振型均成剪切型,二阶振型均呈弯剪型。

3 模态分析

3.1 模型的建立

木墙体作为围护构件,嵌固于木构架之中,虽不承受上部荷载,但由于其自身较大的抗侧刚度,将与木构架共同承受地震作用。为了考虑墙体对灵官殿动力特性的影响,采用 SAP2000 软件分别建立无、有墙体的灵官殿数值模型。灵官殿主要采用云杉作为建筑材料,密度为 416 kg/m^3 。由于灵官殿年代久远,按照折减系数 0.9 确定木材的强度和弹性模量^[15],力学参数见表 2。建筑负一层和第一层处的石柱为花岗岩,密度为 3000 kg/m^3 ,弹性模量为 $15 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

表 2 木材力学参数

Table 2 Mechanical parameters of wood

$\sigma_{Lc}/$	$\sigma_{Lm}/$	$\sigma_{Lt}/$	$E_L/$	τ_L/MPa		σ_c/MPa	
MPa	MPa	MPa	GPa	R	T	R	T
36	68.4	83.1	10.56	6	5.9	2.3	2.6

注: E 为弹性模量; σ 为抗压、抗拉或抗弯强度; τ 为抗剪强度; 下标 c、t 和 m 分别表示抗压、抗拉和抗弯强度; L、R 和 T 分别表示木材顺纹、横纹径向和弦向。

建立数值模型时,榫卯节点、木柱柱脚节点采用弹簧单元模拟。其中,直榫节点采用文献[16]中的计算模型,透榫节点采用文献[17]中的计算模型,瓜柱柱脚节点采用文献[18]中的计算模型,落地木柱柱脚节点采用文献[19]中的计算模型。榫卯节点与柱脚节点参数见表 3。根据现场实测,直榫、通榫与柱缝隙取 1 mm 。根据实际的震害情况^[2],汶川地震时石柱以转动为主,并未发生明显的位移,因此石柱的柱脚节点简化为铰接。

表 3 榫卯节点和柱脚节点参数
Table 3 Real constants of tenon joints and column base joints

节点类型	$\theta_1/$ rad	$M_1/$ (kN·m)	$\theta_2/$ rad	$M_2/$ (kN·m)	$\theta_3/$ rad	$M_3/$ (kN·m)	$\theta_4/$ rad	$M_4/$ (kN·m)
直榫	0.019	0.206	0.059	3.490	0.180	6.080	—	—
透榫	0.019	0	0.026	2.300	0.110	8.600	—	—
瓜柱	0.004	2.492	0.112	0	—	—	—	—
落地柱	0.001	0.263	0.002	0.620	0.011	0.840	0.070	1.050

注: (θ_k, M_k) 为一个特征点,表示节点在转角 θ_k 下具有受弯承载力 M_k 。

为了考虑木墙体对结构整体抗震性能的影响,根据木墙体实际分布情况与嵌固约束程度,在 SAP2000 中采用壳单元来模拟木墙体,并对木墙体各边进行弯矩释放。木构架中的梁、柱通过杆单元模拟。按质量等效原则,屋顶与楼板的质量分别均布在各檩、枋上。椽条进行梁端刚度释放^[20]。无、有墙体的灵官殿数值模型分别见图 6a 和图 6b。

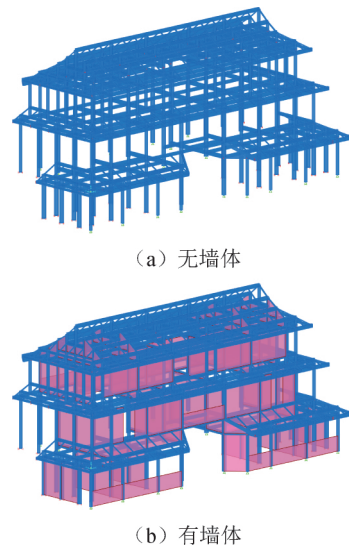


图 6 灵官殿数值模型

Fig. 6 Numerical model of Lingguan deity hall

3.2 模态计算结果及对比

采用 Ritz 向量法进行求解,得到无、有墙体灵官殿整体模型的前两阶自振频率及振型,并与原位动力测试结果进行对比。结构自振频率见表 4,一阶振型见图 7。

由表 4 可知,无墙体的数值模型一阶和二阶自振频率均小于实测值,其中一阶顺坡向的计算值与实测值相比,误差达到 50.68%。有墙体的数值模型计算值与实测值较为接近,横坡向与顺坡向的前两阶自振频率误差均在 10% 以内。因此,考虑墙体的模型更接近灵官殿的动力特性实测结果,其主要原

表 4 自振频率的模拟值与实测值对比

Table 4 Comparison of natural frequency between simulated values and measured values

阶次	实测值 f_i /Hz		模拟值 f_c /Hz			
	横坡向	顺坡向	无墙体		有墙体	
			横坡向(Δ_r /%)	顺坡向(Δ_a /%)	横坡向(Δ'_r /%)	顺坡向(Δ'_a /%)
一阶	3.23	2.90	1.75(45.82)	1.43(50.68)	3.33(3.09)	2.83(3.34)
二阶	6.88	6.46	5.92(13.95)	3.52(45.51)	7.40(7.56)	5.97(7.58)

注: Δ 、 Δ' 分别为无墙体和有墙体模型前两阶自振频率模拟值与实测值的误差; 下标 r 、 a 分别表示横坡向和顺坡向。

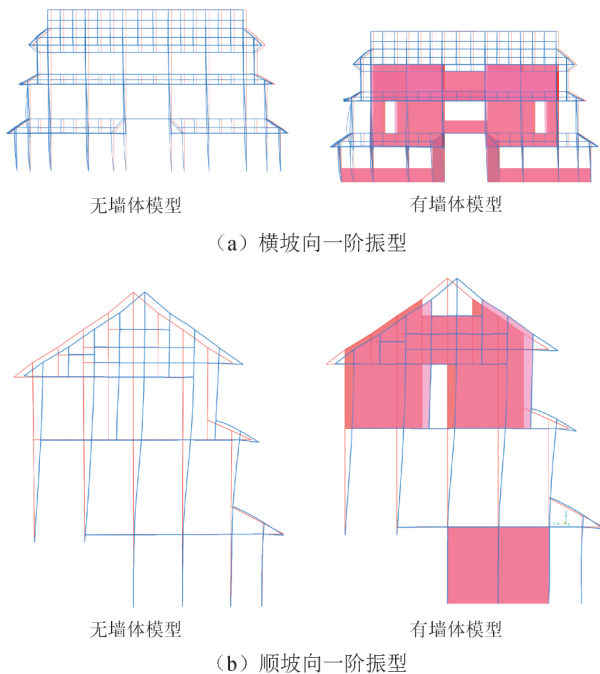


图 7 灵官殿模拟振型

Fig. 7 Simulated vibration modes of Lingguan deity hall

因是墙体增强了结构的侧向刚度,提高了结构的自振频率。由表 7 可见,有无墙体模型在横坡向和顺坡向的一阶振型均为剪切型,与实测结果保持一致,进一步验证了数值模型的准确性。通过对比无、有墙体模型的计算模态分析结果和灵官殿试验模态分析结果可知,木墙体虽未改变结构的模态振型,但对其模态频率具有较大的影响,因此在进行灵官殿抗震性能分析时,墙体的影响不可忽略。

4 地震响应分析

4.1 地震动选取和数据提取点确定

灵官殿位于 8 度抗震设防区,基本地震加速度 $0.2g$, II 类场地,地震分组为二组。根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》中有关地震动选取的要求,从太平洋地震工程研究中心地震波数据库中选取了 6 条地震波,从中国地震台网中心选取汶川波,并将各地震动峰值加速度 a_{pg} 分别调幅至 70、200、400 gal。地震动基本信息见表 5。各地震动的动力放

表 5 地震动基本信息

Table 5 Basic information of ground motion

编号	地震名称	震级	台站	持时/s	a_{pg}/g
GM1	Imperial Valley-02	7.0	El Centro Array #9	53.72	0.28
GM2	Kern County	7.4	Taft Lincoln School	54.35	0.16
GM3	Parkfield	6.2	Cholame-Shandon Array #12	44.30	0.06
GM4	San Fernando	6.6	Wrightwood	19.96	0.05
GM5	Borrego	6.5	El Centro Array #9	50.00	0.07
GM6	San Fernando	6.6	Hemet Fire Station	53.50	0.04
GM7	Wenchuan	8.0	Wolong	180.00	0.98

大系数谱如图 8 所示。模型结构的阻尼比按实测值进行输入。

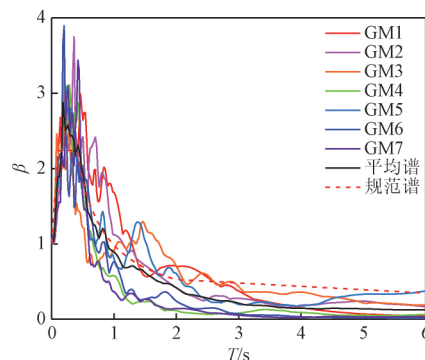


图 8 地震动力放大系数谱与规范谱对比

Fig. 8 Comparison of seismic amplification factor spectrum between ground motions and seismic code

选取原位动力测试位置的次间一榀木构架为分析对象,数据提取点及其对应节点编号见图 9。进行弹塑性时程分析时,考虑到计算成本和时间,截取地震动记录较大频段进行计算,所选 7 条地震动加速度最大值均在前 20 s 出现,因此选取 7 条地震动的前 20 s 时程记录,分别沿结构的横坡向、顺坡向输入。模型的计算结果取 7 条地震动计算结果的平均值。

4.2 地脚穿枋内力

地脚穿枋是联系和拉结顺坡向上接地层各柱脚的穿枋,类似于山地掉层框架结构中的接地拉梁。为了研究地震作用下地脚穿枋对灵官殿抗震性能的影响,提取其在地震作用下的最大轴力 F_{max} 、最大剪力 V_{max} 和最大弯矩 M_{max} ,结果列于表 6 中。

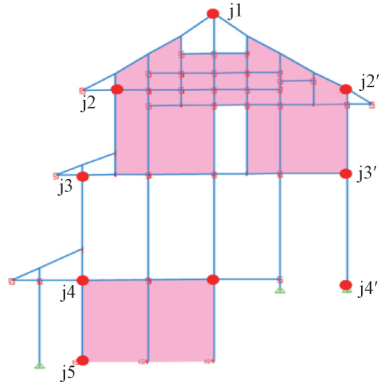


图9 数值模型的提取点

Fig. 9 Extraction points of numerical model

表6 地脚穿枋内力平均值

Table 6 Mean values of internal forces of anchor beam

方向	a_{pg} / gal	无墙体			有墙体		
		F_{max} / kN	V_{max} / kN	$M_{max} / (kN \cdot m)$	F_{max} / kN	V_{max} / kN	$M_{max} / (kN \cdot m)$
横坡向	70	7.04	0.95	0.97	4.62	0.99	1.09
	200	12.36	2.58	2.63	9.97	2.69	3.08
	400	19.13	5.38	5.10	18.33	5.42	5.88
顺坡向	70	11.99	0.19	0.21	10.19	0.18	0.21
	200	26.05	0.28	0.33	25.97	0.29	0.33
	400	52.92	0.42	0.52	48.45	0.45	0.52

由表6可见,地脚穿枋的内力值随着地震动强度的增大而增大。在不同地震动强度下,沿横坡向地脚穿枋的剪力和弯矩值大于顺坡向,且顺坡向的剪力和弯矩始终处于较低水平。这表明当地震动沿横坡向作用时,上接地层柱产生了沿顺坡向的位移,导致地脚穿枋受剪,而剪力的出现导致弯矩的存在。对于顺坡向,剪力和弯矩趋近于0,表明结构只产生此平面内的位移。对比轴力值可以发现,顺坡向的轴力值远大于横坡向,如罕遇地震时,沿顺坡向无墙体模型的轴力值是横坡向的2.76倍,表明地脚穿枋对顺坡向各柱间有较强的拉结作用。因此,从受力角度看,地脚穿枋的存在有利于地震水平力的传递。同时,提高了沿顺坡向上接地层柱间的整体性能。

通过对比不同地震动强度下有无墙体模型的内力值可以发现,无墙体模型的剪力和弯矩略大于有墙体模型,而轴力值差距较为明显。表明在地震作用下,墙体分担了地脚穿枋中的部分地震作用力,且主要承担水平轴力。

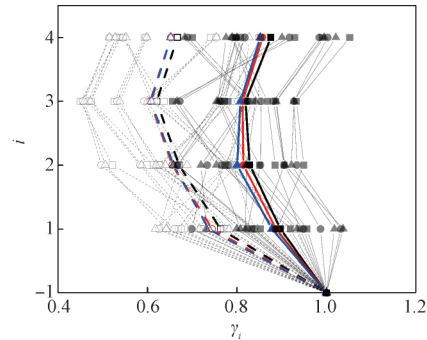
4.3 加速度反应

采用加速度衰减系数 γ_i [21] 分析灵官殿各层最大加速度响应的变化规律,其计算式为

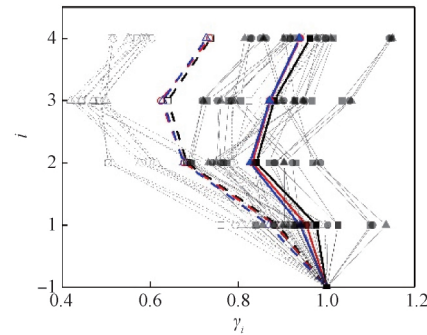
$$\gamma_i = \frac{a_{\max i}}{a_{\max \text{柱脚}}} \quad (1)$$

其中, i 表示楼层号, $a_{\max i}$ 为第 i 层最大加速度, $a_{\max \text{柱脚}}$ 为负一层柱脚最大加速度。例如, γ_1 表示负一层柱底(节点 j_4) 的最大加速度与负一层柱脚(节点 j_5) 的最大加速度之比。

当 $\gamma_i < 1$ 时,说明结构对加速度有衰减作用, γ_i 值越小,衰减效应越明显; $\gamma_i \geq 1$ 表示结构对加速度有放大效应, γ_i 值越大放大效应越强。在不同地震强度下,数值模型沿横坡向和顺坡向 γ_i 的变化规律见图10。



(a) 横坡向



(b) 顺坡向



图10 不同地震强度下结构加速度衰减系数

Fig. 10 Attenuation coefficients of structural acceleration under different earthquake intensities

由图10可见,对于横坡向, γ_i 在 0.60 ~ 0.90 之间变化,均小于1,表明灵官殿各楼层对地震加速度具有一定的衰减作用,这是由于结构各楼层的半刚性榫卯节点具有一定的减震能力。同时, γ_i 都随着输入地震动强度的增加而减小,说明木构架减震耗能的能力随着地震动强度的增加而逐渐增强。在同一地震强度下,无墙体模型的加速度衰减系数远小于有墙体模型的,因此,对山地古建筑进行地震响应分析时,不考虑墙体会高估木构架对地震加速度的衰减能力。

对于顺坡向, γ_i 在 0.62 ~ 0.98 之间变化,均小于1。这与横坡向基本一致。但不同的是,结构第一

层由于在顺坡向受地脚穿枋的拉结作用,在一定程度上削弱了该层对地震加速度衰减的能力。当地震作用传递至上接地层楼盖时,结构第二层的榫卯节点充分发挥减震耗能作用, γ_2 迅速减小,这种现象在无墙体模型中更为突出。例如,在地震动峰值加速度为400 gal时, γ_1 、 γ_2 分别为0.87、0.67,结构第二层对地震加速度衰减作用更为显著。

此外,沿结构两个方向的 γ_4 均大于 γ_3 ,说明屋顶处的加速度反应有一定的放大。这是由于灵官殿大质量屋盖存在鞭梢效应。

4.4 层间位移角

由于灵官殿上、下接地端两侧层数不同,将会导致结构两侧的位移有所差异,因此定义上、下接地端两侧结构的层间位移角 α_i 为

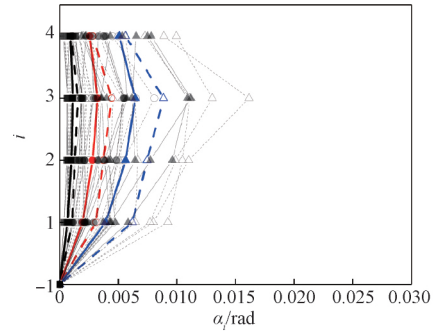
$$\alpha_i = \frac{\delta_{\max i}}{h_i} \quad (2)$$

其中, i 表示楼层号, $\delta_{\max i}$ 为楼层最大层间位移, h_i 为该层的层高。

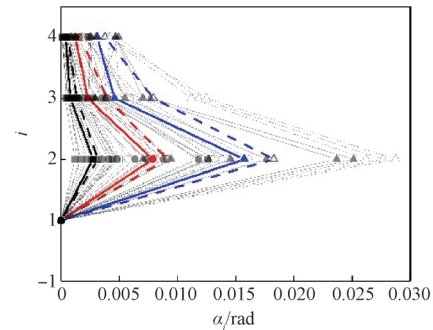
图11为不同地震强度下横坡向的层间位移角。由图11可见,对于横坡向,下接地端的 α_i 变化趋势较为缓和, α_3 最大, α_2 与 α_3 较为接近。对于上接地端,层间位移角在第一层至第二层间发生突变,并在第二层达到最大,且随着层数的增加而减小。在地震动峰值加速度为400 gal时,无墙体模型下接地端 α_3 值为0.009 rad,上接地端 α_2 值为0.018 rad,有墙体模型下接地端 α_3 值为0.006 rad,上接地端 α_2 值为0.016 rad,均未超过GB/T 50165—2020《古建筑木结构维护与加固技术规范标准》中最大位移角0.033 rad的规定限值。这说明灵官殿在罕遇地震下仍具有良好的变形和抗倒塌能力。对比下、上接地端的层间位移角可以发现,在相同地震动强度下,上接地端的 α_2 远大于下接地端,而其余各楼层的层间位移角差距较小。这表明灵官殿在第二层出现了较为明显的扭转。

墙体的存在减小了结构的层间位移角,随着地震动强度的增加,墙体对木构架的约束作用更为明显。例如,在地震动峰值加速度为400 gal时,考虑墙体的影响时, α_2 减小了11%。

图12为不同地震强度下顺坡向的层间位移角。对于顺坡向,有无墙体模型 α_i 的变化规律基本一致,均在第二层达到最大,主要因为上接地端柱脚无水平位移,导致结构第一层和第二层的位移差最大。从图12中还可以看出,上、下接地端两侧 α_i 大小处于同一水平,表明结构在沿顺坡向地震作用下两侧变形协调。由于结构第一层地脚穿枋的拉结作用,限制了下接地端一侧柱的水平位移,使 α_1 很小,且 α_1 随着地震动强度的增加变化不大。



(a) 下接地端



(b) 上接地端

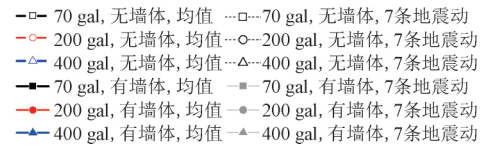


图11 不同地震强度下横坡向的层间位移角

Fig. 11 Inter-story drift ratios in transverse slope orientation under different earthquake intensities

4.5 扭转效应

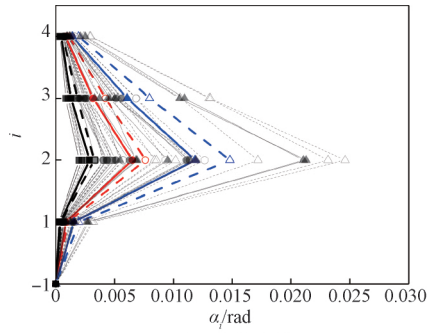
由于上接地端接地柱与同层非接地柱的刚度、质量差异,造成灵官殿在顺坡向的刚心和质心不重合,在横坡向地震作用下结构会发生明显的扭转效应。为描述结构的扭转效应,定义楼层扭转角 ϕ_i 和层间扭转角 $\Delta\phi_i$,其计算式如下:

$$\phi_i = \frac{\Delta x_{\max i}}{l_i} \quad (3)$$

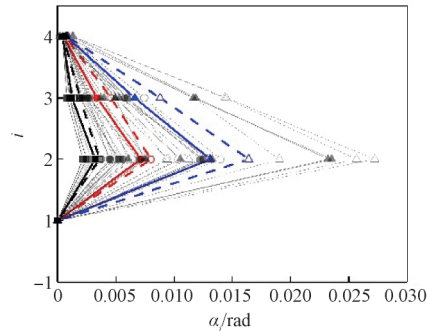
$$\Delta\phi_i = \phi_i - \phi_{i-1} \quad (4)$$

其中: i 表示楼层号; $\Delta x_{\max i}$ 代表上、下接地端两侧观测点沿横坡向的最大位移差; l_i 为上、下接地端同层两观测点的水平距离,如当 $i=1$ 时, l_1 表示第一层节点 j_4 与节点 j_4' 之间的水平距离。

图13为不同地震强度下各楼层扭转角。从图13可见,随着地震动强度的增大,灵官殿模型的 ϕ_i 逐渐增大,且在同一地震强度下,扭转角在第一层至第二层发生突变,而其余楼层的增大趋势不明显,表明上接地端楼层的扭转效应强于上部结构。由于缺少墙体的约束作用,无墙体模型的 ϕ_i 值均大于有墙体模型。在地震动峰值加速度为400 gal时,无墙体模型的 ϕ_2 值是有墙体模型的1.16倍。



(a) 下接地端

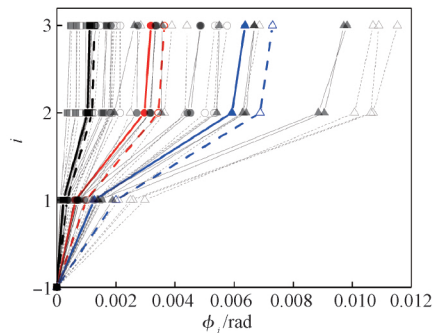


(b) 上接地端

-□- 70 gal, 无墙体, 均值 -□- 70 gal, 无墙体, 7条地震动
 -○- 200 gal, 无墙体, 均值 -○- 200 gal, 无墙体, 7条地震动
 -△- 400 gal, 无墙体, 均值 -△- 400 gal, 无墙体, 7条地震动
 -■- 70 gal, 有墙体, 均值 -■- 70 gal, 有墙体, 7条地震动
 -●- 200 gal, 有墙体, 均值 -●- 200 gal, 有墙体, 7条地震动
 -▲- 400 gal, 有墙体, 均值 -▲- 400 gal, 有墙体, 7条地震动

图 12 不同地震强度下顺坡向的层间位移角

Fig. 12 Inter-story drift ratios along slope orientation under different earthquake intensities



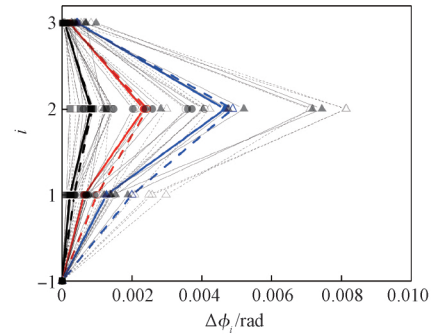
-□- 70 gal, 无墙体, 均值 -□- 70 gal, 无墙体, 7条地震动
 -○- 200 gal, 无墙体, 均值 -○- 200 gal, 无墙体, 7条地震动
 -△- 400 gal, 无墙体, 均值 -△- 400 gal, 无墙体, 7条地震动
 -■- 70 gal, 有墙体, 均值 -■- 70 gal, 有墙体, 7条地震动
 -●- 200 gal, 有墙体, 均值 -●- 200 gal, 有墙体, 7条地震动
 -▲- 400 gal, 有墙体, 均值 -▲- 400 gal, 有墙体, 7条地震动

图 13 不同地震强度下各楼层扭转角

Fig. 13 Torsional angles of each floor under different earthquake intensities

图 14 为不同地震强度下各层层间扭转角。从图 14 可见, 灵官殿模型在第一层和第二层均出现了扭转, 但 $\Delta\phi_2 > \Delta\phi_1$ 。这主要是因为上接地端柱与同层非

接地柱的约束不一致, 导致上接地层的质心和刚心偏差较其他楼层更为严重, 从而使灵官殿第二层扭转效应最为显著。由于扭转效应会造成结构变形加大并使结构抗震性能退化, 进而出现榫卯节点拔榫现象甚至倒塌。因此, 在抗震加固中应该着重关注山地古建筑木结构的上接地层。



-□- 70 gal, 无墙体, 均值 -□- 70 gal, 无墙体, 7条地震动
 -○- 200 gal, 无墙体, 均值 -○- 200 gal, 无墙体, 7条地震动
 -△- 400 gal, 无墙体, 均值 -△- 400 gal, 无墙体, 7条地震动
 -■- 70 gal, 有墙体, 均值 -■- 70 gal, 有墙体, 7条地震动
 -●- 200 gal, 有墙体, 均值 -●- 200 gal, 有墙体, 7条地震动
 -▲- 400 gal, 有墙体, 均值 -▲- 400 gal, 有墙体, 7条地震动

图 14 不同地震强度下各层层间扭转角

Fig. 14 Inter-story torsional angles under different earthquake intensities

此外, 无墙体模型中各楼层的 $\Delta\phi_i$ 均大于有墙体模型的。因此, 墙体对木构架的约束作用能在一定程度上减弱结构的扭转效应。从图 13 和图 14 中还可以看出, 有无墙体模型的 ϕ_i 和 $\Delta\phi_i$ 曲线变化规律基本一致, 表明墙体的存在只能在一定程度上减弱扭转, 而不能改变出现最大扭转效应所在的楼层。

4.6 楼层剪力

对灵官殿各层所有柱底的剪力最大值求和, 得到楼层剪力。不同地震动强度下楼层剪力见表 7。由表 7 可见, 随着地震动强度的增大, 结构沿横、顺坡向的楼层剪力值逐渐增大。同时, 地震作用沿顺坡向时, 结构的楼层剪力远大于其作用于横坡向时的层间剪力。例如, 在地震动加速度峰值为 400 gal 时, 无墙体模型沿顺坡向第一层楼层剪力值为 50.18 kN, 横坡向第一层剪力值为 22.68 kN。有墙体模型沿顺坡向第一层楼层剪力值为 59.44 kN, 横坡向第一层剪力值为 25.09 kN, 沿顺坡向第一层楼层剪力值均为横坡向第一层的 2 倍, 表明当地震作用沿顺坡向时, 更易使灵官殿第一层处于不利受力状态。当山地古建筑木结构上接地端第一层的柱脚承担的剪力大于柱脚与础石之间摩擦力时, 柱脚会发生滑移, 过大的滑移可能会使得结构整体发生较大的倾斜, 继而引起结构的倒塌。

表7 不同地震强度下楼层剪力
Table 7 Floor shear forces under different earthquake intensities

方向	a_{pg}/gal	楼层剪力 V'/kN					
		无墙体			有墙体		
		负一层	一层	二层	负一层	一层	二层
横坡向	70	4.22	9.24	1.01	5.03	11.15	1.55
	200	6.23	14.86	2.65	6.63	16.29	3.98
	400	8.71	22.68	5.21	9.72	25.09	7.87
顺坡向	70	6.43	14.59	1.76	7.20	16.17	3.30
	200	11.88	28.52	4.78	13.67	32.68	9.05
	400	20.16	50.18	9.36	23.93	59.44	17.78

图15为不同地震强度下灵官殿层间剪力分布。由图15可见,沿横坡向的楼层剪力变化趋势较为缓和,在第一层最大。对于顺坡向,楼层剪力在第一层发生了明显的突变。这是因为负一层柱的减少,且上接地端柱脚的约束作用造成上接地端楼层的抗侧刚度大于其余各楼层,使上接地端第一层柱承担了更多的剪力。此外,由于墙体对结构抗侧刚度的贡献,导致有墙体模型的层间剪力大于无墙体模型的层间剪力。

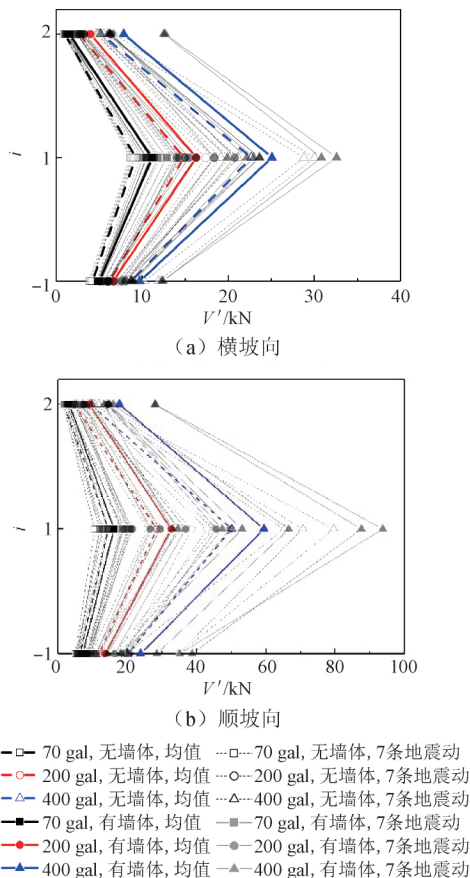


图15 不同地震强度下灵官殿层间剪力分布
Fig. 15 Story shear force distribution of Lingguan deity hall under different earthquake intensities

5 结论

1) 灵官殿的原位动力测试结果表明,结构沿横坡向一、二阶自振频率分别为3.23、6.88 Hz,顺坡向一、二阶自振频率分别为2.90、6.46 Hz。结构沿横坡向和顺坡向一阶振型均为剪切型,二阶振型均呈弯剪型。

2) 与无墙体模型相比,有墙体模型的前两阶自振频率明显增大。无墙体模型频率模拟值与实测值最大误差为50.68%,对于有墙体模型,误差均在10%以内。因此,考虑墙体影响的数值模型更能准确反映灵官殿的实际动力特性。

3) 有无墙体模型地震加速度衰减系数在0.60~0.98之间变化,灵官殿具有良好的减震性能。由于灵官殿上接地端柱脚和地脚穿枋的约束,削弱了结构第一层减震耗能的作用。考虑墙体的影响,会降低木构架对地震加速度的衰减能力。

4) 灵官殿各层质心与刚心不重合,导致结构在横坡向地震作用下发生扭转。其中,在上接地端一层发生了明显的扭转,楼层扭转角在第一层至第二层产生突变,层间扭转角在第二层达到最大。考虑墙体会使层间位移角和楼层扭转角分别减小11%和16%。

5) 由于灵官殿上接地端柱脚的约束作用,使第一层抗侧刚度大于其余楼层,地震作用更多地分配至第一层,导致该层的水平剪力最大。因此,抗震加固应重点关注山地古建筑的上接地层。

参考文献

- [1] 潘毅,陈建,安仁兵,等. 山地古建筑木结构抗震性能研究评述[J]. 土木与环境工程学报(中英文). DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.107. (PAN Yi, CHEN Jian, AN Renbing, et al. A review on seismic performance of ancient timber structures on a slope [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.107. (in Chinese))
- [2] 潘毅,王超,季晨龙,等. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学,2012,28(7): 103-106. (PAN Yi, WANG Chao, JI Chenlong, et al. Investigation and analysis of seismic damage for Chinese ancient timber buildings in Wenchuan earthquake [J]. Building Science, 2012, 28(7): 103-106. (in Chinese))
- [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 Lina, WANG Huiqin, et al. Investigation and analysis of damage to ancient buildings in Lushan Ms7.0 earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 140-146. (in Chinese))
- [4] 潘毅,谢丹,袁双,等. 尼泊尔8.1级地震文化遗产建筑震害调查与分析[J]. 西南交通大学学报,

- 2015, 50 (6): 1039-1046. (PAN Yi, XIE Dan, YUAN Shuang, et al. Investigation and analysis of seismic damage to cultural heritage buildings induced by Gorkha Earthquake, Nepal [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50 (6): 1039-1046. (in Chinese))
- [5] 郭璇. 巴蜀摩崖佛殿空间类型及营建手法初探[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26 (4): 5-11. (GUO Xuan. Space type and construction methods of the cliff-side buddhist hall in Ba-Shu area [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26 (4): 5-11. (in Chinese))
- [6] 王晓玥. 山地古建筑木结构榫卯节点力学模型与受力机理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019. (WANG Xiaoyue. Mechanical model and force mechanism analysis of mortise-tenon joints of mountain ancient timber structures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [7] 常鹏, 吴楠楠, 王钊. 藏式山地结构有限元模型修正及动力可靠度分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 13-20. (CHANG Peng, WU Nannan, WANG Zhao, et al. Finite element model updating and dynamic reliability analysis of Tibetan structure on the slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53 (6): 13-20. (in Chinese))
- [8] 薛建阳, 吴晨伟, 周姝琴. 考虑高台基影响的西安安定门城楼动力特性及地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9): 12-21. (XUE Jianyang, WU Chenwei, ZHOU Shuqin, et al. Analysis on dynamic characteristics and seismic response of Xi'an Anding Gate Tower by considering high stylobate [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9): 12-21. (in Chinese))
- [9] 赵守江, 杨永强, 戴君武. 故宫雨花阁动力特性及地震响应分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 103-106. (ZHAO Shoujiang, YANG Yongqiang, DAI Junwu. Study on dynamic characteristics and seismic response of Yuhua Pavilion in the Forbidden City [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36 (1): 103-106. (in Chinese))
- [10] FANG Dongping, IWASAKI S, YU M H, et al. Ancient Chinese timber architecture: I: experimental study [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1348-1357.
- [11] FANG Dongping, IWASAKI S, YU M H, et al. Ancient Chinese timber architecture: II: dynamic characteristics [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1358-1364.
- [12] 高延安, 杨庆山, 王娟. 环境激励下古建筑飞云楼动力性能分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 144-148. (GAO Yan'an, YANG Qingshan, WANG Juan, et al. Dynamic performance of the ancient architecture of Feiyun pavilion under the condition of environmental excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 144-148. (in Chinese))
- [13] 李英民, 唐洋洋, 姜宝龙. 山地掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41 (8): 68-78. (LI Yingmin, TANG Yangyang, JIANG Baolong, et al. Dynamic analysis model of monolayer hall-style ancient timber structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (8): 68-78. (in Chinese))
- [14] 唐洋洋, 李英民, 姜宝龙. 设置水平接地构件的掉层 RC 框架结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53 (3): 28-37. (TANG Yangyang, LI Yingmin, JIANG Baolong, et al. Shaking table test of RC frame structures supported by different elevation grounds with horizontal embedding members [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 28-37. (in Chinese))
- [15] 秦术杰, 杨娜, 胡浩然. 残损明清古建筑木结构动力特性研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 130-137. (QIN Shujie, YANG Na, HU Haoran, et al. Study on dynamic characteristics of a damaged ancient timber structure of Ming-Qing Dynasty [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (10): 130-137. (in Chinese))
- [16] 潘毅, 王超, 唐丽娜. 古建筑木结构直榫节点力学模型的研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 82-89. (PAN Yi, WANG Chao, TANG Lina, et al. Study on mechanical model of straight-tenon joints in ancient timber structures [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 82-89. (in Chinese))
- [17] 潘毅, 安仁兵, 王晓玥. 古建筑木结构透榫节点力学模型研究[J]. 土木工程学报, 2020, 43(4): 61-70. (PAN Yi, AN Renbing, WANG Xiaoyue, et al. Study on mechanical model of through-tenon joints in ancient timber structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 43(4): 61-70. (in Chinese))
- [18] 陈春超. 古建筑木结构整体力学性能分析和安全性评价[D]. 南京: 东南大学, 2016: 74-76. (CHEN Chunchao. Integral mechanics property analysis and safety evaluation of ancient timber structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 74-76. (in Chinese))
- [19] 潘毅, 安仁兵, 陈建. 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0737. (PAN Yi, AN Renbing, CHEN Jian, et al. Study on mechanical model of column footing joint in ancient timber structure based on rocking column [J]. Journal of Building Structures. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0737. (in Chinese))
- [20] 方东平, 俞茂镛, 宫本裕. 木结构古建筑结构特性的计算研究[J]. 工程力学, 2001, 28(1): 137-144. (FANG Dongping, YU Maohong, MIYAMOTO Y, et al. Numerical analysis on structural characteristics of ancient timber architecture [J]. Engineering Mechanics, 2001, 28(1): 137-144. (in Chinese))
- [21] 潘毅, 袁双, 郭瑞. 铺作层布置对古建筑木结构抗震性能的影响[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 29-40. (PAN Yi, YUAN Shuang, GUO Rui, et al. Effects of tou-kung layer layout on seismic performance of ancient timber structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 52 (3): 29-40. (in Chinese))