

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.269



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



足尺宋式摇摆木构架恢复性拟静力试验研究

曹一凡, 万佳, 师希望, 魏剑伟, 李铁英
(太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024)

摘要: 摇摆木构架是中国传统木结构的主要承载体系。对足尺单跨木构架模型施加3级竖向荷载进行拟静力试验, 观察试验时木构架的位移和变形特点, 得到木构架在低周水平循环加载下的滞回曲线和骨架曲线, 探究其在不同竖向荷载和低周水平循环加载下的结构特性。加载过程中, 木柱刚体转动行为明显、柱架层变形集中, 卸载阶段木构架能自主回到初始位置。试验结果表明: 各级滞回环狭长且重叠, 结构构件呈现出刚体运动的特征, 结构整体具有一定位移恢复能力; 残余位移介于0.28~2.53 mm间, 两组位移恢复系数均大于87.1%, 随控制位移的增加未出现显著降低, 木构架的位移恢复能力良好; 初始刚度在控制位移超过屈服位移后趋于稳定; 柱架层变形是斗拱层变形的2.95~86.47倍, 层间位移集中系数介于1.22~2.03间, 且随控制位移的增加先增后降。
关键词: 传统木结构; 摇摆木构架; 可恢复功能结构; 位移恢复系数; 层间位移集中系数
中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0129-09

Experimental study on loading quasi-static of a full-scale traditional Chinese rocking timber structure

CAO Yifan, WAN Jia, SHI Xiwang, WEI Jianwei, LI Tiewing

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

Abstract: Rocking timber frame is the main bearing system of Chinese traditional timber structure. The pseudo static test was carried out on the full-scale single-span timber frame model under three-level vertical load. The displacement and deformation characteristics of the timber frame during the test were observed. The hysteretic curve and skeleton curve of the timber frame under low cycle horizontal cyclic loading were obtained to explore its structural characteristics under different vertical loads and low cycle horizontal cyclic loading. In the loading process, the column rocks and the deformation of the column frame layer are concentrated, and the test object can return to the initial position independently in the unloading stage. The test result shows that the hysteresis loops of each stage are long, narrow and overlap. The equivalent stiffness degrades significantly, and the equivalent viscous damping coefficient is low; the residual displacement is between 0.28 mm and 2.53 mm, and the two displacement recovery coefficients are greater than 87.1%. The two type of displacement recovery

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51338001、51278324); 中国博士后科学基金(2019M661064)

作者简介: 曹一凡(1997-), 女, 主要从事古建筑木结构抗震性能研究, E-mail: cyf316420@163.com。

李铁英(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, Email: lty680412@163.com。

Received: 2021-09-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51338001, 51278324); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M661064)

Author brief: CAO Yifan (1997-), main research interest: seismic performance of traditional Chinese timber structure, E-mail: cyf316420@163.com.

LI Tiewing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, Email: lty680412@163.com.

coefficient does not decrease significantly with the increase of control displacement, so the displacement recovery ability of timber frame is good; the initial stiffness tends to be stable when the control displacement exceeds the yield displacement; the deformation of column frame layer is 2.95 to 86.47 times that of dougong bucket layer. The concentration coefficient of interlayer displacement is between 1.22 and 2.03, which first increases and then decreases with the increase of control displacement.

Keywords: traditional timber structure; rocking timber frame; recoverable functional structure; displacement recovery coefficient; concentration coefficient of interlayer displacement

木构架是中国传统木结构的主要承载系统,于唐宋时期日趋成熟,其基本构成元素延用至明清^[1],包括台基、屋身和屋顶^[2]。屋顶包括屋架和瓦面,承托屋顶的屋身由木梁、木柱和斗拱构筑而成并直接坐落于台基之上。始建于公元1023年的山西晋祠圣母殿、增建于公元1168年的山西晋祠献殿为典型的宋式木构架,具有丰富的科学研究和历史文化价值。木构遗存随岁月更迭,历经数次地震、洪水、战乱等自然或人为作用,存在诸多结构安全隐患^[3-4],亟待科学干预。尽管如此,木构架结构性能的科学认知尚未得到充分的讨论,也未形成普遍共识^[4]。

木构架结构性能的研究通常具化到各结构构件上。He等^[5]发现受载木柱在水平荷载下绕柱底一侧摇摆抬升;唐丽娜^[6]在柱脚力学模型的基础上进行新型阻尼器性能的验证;Gao等^[7]给出了柱摇摆的拉格朗日量,得到了摇摆滑移的动力方程;薛建阳等^[8]指出斗拱的破坏为枋斗压溃、歪闪斗拱的枋斗破坏更严重;潘毅等^[9]发现斗拱尺度影响构件侧向变形能力,斗拱数量的增加有利于地震动在结构高度方向的衰减;谢启芳等^[10]分析了燕尾榫节点的受力机理,给出了弯矩转角双折线模型。传统木构架各结构元素的结构性能差异较大^[11],各结构元素共同受载时各自所处的状态仍需进一步探究。周乾等^[12]发现缩尺单檐歇山木构古建筑在强震作用下木柱近似同步往复摇摆;宋晓滨等^[13]发现7度多遇和8度罕遇地震后缩尺木塔模型仅在局部散斗和枋斗处出现横纹劈裂、其余构件无明显破坏;Wan等^[14]给出了矩形脉冲下带斗拱宋式木构架的四种初始运动响应;Meng等^[15]发现缩尺木构架柱摇摆抬升,屋盖的重力势能大幅增加;Chen等^[16]、Shi等^[17]发现带斗拱的足尺宋式木构架在水平循环位移荷载下木柱摇摆抬升,柱架层整体平动,能够回到初始位置。上述研究发现,木构架在水平作用下木柱摇摆抬升,结构位移能够自行恢复,具有可恢复功能结构的特征。

既有研究通过水平静力或动力荷载,得到研究

对象的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、等效黏滞阻尼系数和加速度放大系数、自振频率、层间位移角等指标,以评估传统木构架的结构性能。木构架的摇摆和恢复性在静力和动力试验中被广泛观测到。然而,基于摇摆特性的木构架结构特征的定量描述尚未得到充分讨论。笔者在课题组已完成的足尺宋式传统摇摆木构架拟静力试验的基础上^[16-17],拟采用位移恢复系数、初始刚度退化和层间位移集中系数,在考虑摇摆特性的基础上讨论其结构特征,探究木构架在水平作用下独特的结构性能。

1 试验概况

1.1 模型材料

试验模型的制作材料为俄罗斯樟子松。含水率为16.255%时,气干密度和全干密度分别为0.466、0.426 g/cm³。顺纹弹性模量为8 081 MPa。顺纹抗压强度为41.19 MPa,顺纹抗拉强度为93.56 MPa^[16]。

1.2 模型设计

图1为足尺宋式摇摆木构架试验模型和装置

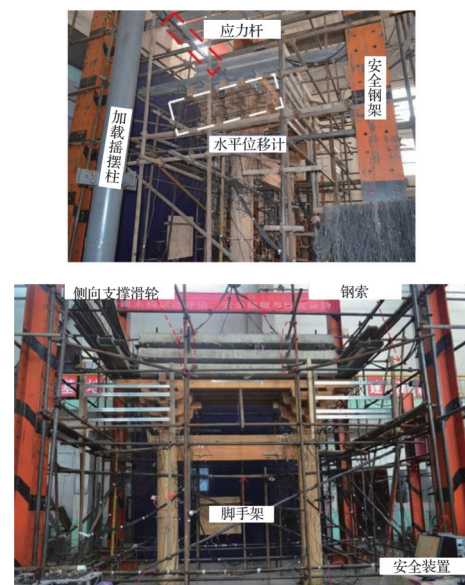


图1 足尺宋式单跨木构架模型^[17]

Fig. 1 Single-span model of Song Dynasty^[17]

图,木构架由斗拱层和柱架层构成,屋面层简化为混凝土配重板。各构件名称沿用《营造法式》中的称谓。主要构件尺寸列于表1中,如图2所示。

表 1 主要构件的尺寸^[17]

Table 1 Sizes of the main elements for test model

构件	截面尺寸	长度/mm	数量
柱	φ389 mm	2 760	2
阑额	324 mm×216 mm	2 595	1
普拍枋	346 mm×162 mm	3 482	1
栌斗	216 mm×346 mm	346	2
泥道拱	162 mm×108 mm	670	2
华拱1	227 mm×108 mm	778	2
柱头枋	162 mm×108 mm	1 318	2

1.3 加载方案

1.3.1 竖向和水平加载

试验模型竖向荷载的数值依屋面类型及工程做法计算得到,同时根据晴天、雨天、雨雪天3种工况调整其数值。根据《古代大木作静力初探》^[18]《古建筑屋面荷载编汇(上)》^[19]确定屋面各构件的尺寸规格及重量,并参考陈金永等^[20]对屋顶荷载计算的描述,得到试验模型的屋盖自重,试验模型在晴天、雨天和雨雪天时屋盖的自重数值分别为74.93、76.76、86.04 kN,取其最大值并调整为90 kN。分30、60、90 kN三级^[16-17]分别加载在木构架上,研究不同竖向荷载下木构架的力学性能。

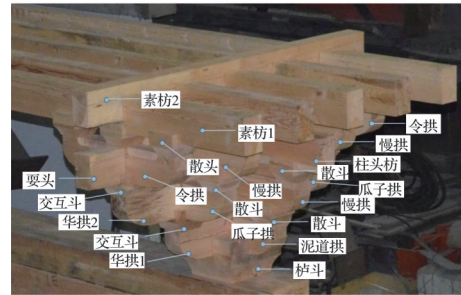


图 2 试验模型概览

Fig. 2 Overview of test model

水平位移利用手拉葫芦通过加载摇摆柱施加,如图3所示。达到目标控制位移后,持荷5 min,结束后再执行后续加载。控制位移分别为10、20、30、40、60、80、120 mm,共7级,如图4所示,顺次加载。第7级控制位移为120 mm时,此时层间位移角达到1/23,落于木构架被认定为严重破坏的警告区间[1/48, 1/16],大于木构架的极限位移角1/30^[21]。

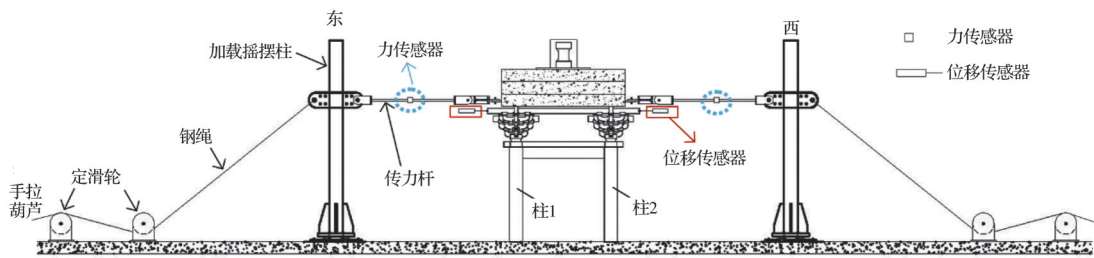


图 3 加载和测量系统

Fig. 3 Loading and displacement measurement system

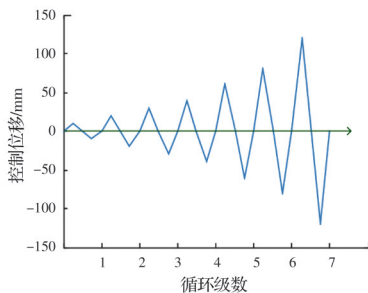


图 4 位移加载制度^[17]

Fig. 4 Loading diagram in three different cyclic tests with different vertical loads^[17]

1.3.2 力和位移的测量

水平力的测量采用力传感器,如图3所示,位于

水平加载系统与木构架间的传力杆之上。传力杆直径25 mm、长1 400 mm,于其1/2处布置力传感器。

位移通过固定在试验对象外围的脚手架上的水平位移计测量,布置如图3所示。脚手架与木构架之间无额外连接。

2 试验现象和结果

2.1 试验现象

2.1.1 柱子转动

图5是第3级竖向荷载(90 kN),控制位移为120 mm时,西侧柱2的摇摆过程。向东施加控制

位移 120 mm,柱 2 绕底一侧向东摇摆,卸载后自主回到初始位置,向西施加至 120 mm,柱 2 绕底一侧向西摇摆,卸载后回到初始位置。柱 1 与柱 2 同步。

2.1.2 燕尾榫拔榫

图 6 为 3 级竖向荷载(90 kN)下,处于东、西最大位控制位移 120 mm 时,柱 1 上部燕尾榫节点相对变位。向东控制位移达 120 mm 时,燕尾榫上部拔出下部挤压。卸载后柱、阑额回到初始位置。西侧

亦然。

2.1.3 木构架复位

试验过程中发现,在全部 3 级竖向荷载的所有控制位移卸载阶段,松开手拉葫芦的棘爪限位机构,木构架能够自动向初始位置运动,最终回到初始位置,柱由倾斜状态复归直立,榫卯节点的挤压状态亦恢复原貌。各构件(以肉眼视之)几乎回到了初始位置,即木构架具有一定程度的位移恢复能力,具有可恢复功能结构的特征。

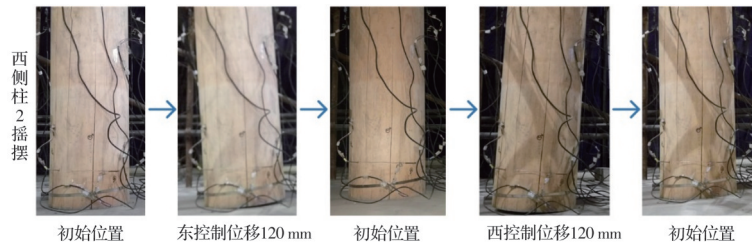


图 5 90 kN 竖向荷载最大控制位移西侧柱摇摆(柱 2)

Fig. 5 West column (column 2) under 3rd levels of vertical load

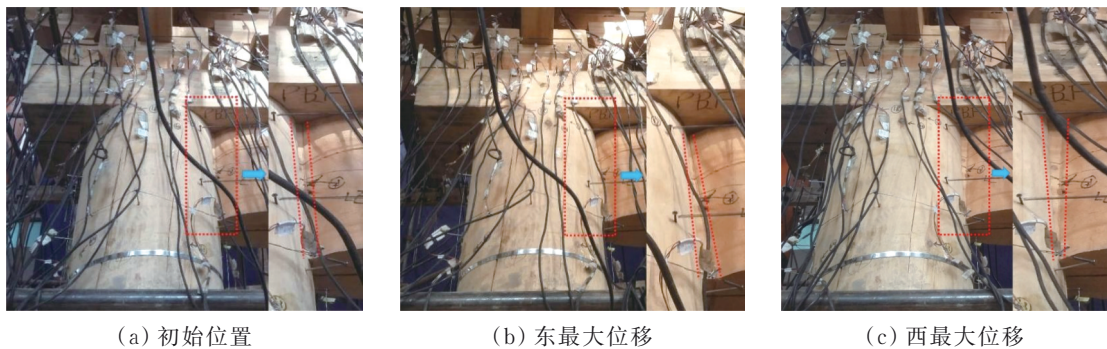


图 6 3 级竖向荷载下燕尾榫的拔榫(柱 1)

Fig. 6 Tenon pulling of dovetail tenon under three levels of vertical load (column 1)

2.1.4 构件局部损伤

全部 3 级加载试验结束后,拆解木构架,观测结构构件。如图 7 所示,卯口正面的原始裂纹较加载前变化不大,而卯口底部的压痕比试验前更深,这是倾斜过程中阑额挤压卯口的证据,如图 6 所示。图 8 为普拍枋底部,与柱头接触的位置,柱子倾斜压入普拍枋后留下压痕。图 9 是布置于阑额和普拍枋之间的暗销,图中标识 1、2、3 为对应暗销的编号,如图所示,在所有竖向加载和水平位移加载结束后暗销在阑额、普拍枋的界面处出现了不可恢复的挤压变形。值得注意的是,木构架的其他结构构件未发现显著的、残留的损伤痕迹和断裂、劈裂。

2.2 滞回曲线和屈服点

如图 10 所示,3 级竖向荷载下的滞回曲线和骨架曲线具有相似的形状和变化趋势,且随着位移增大亦增加。30、60、90 kN 竖向荷载下的峰值力分

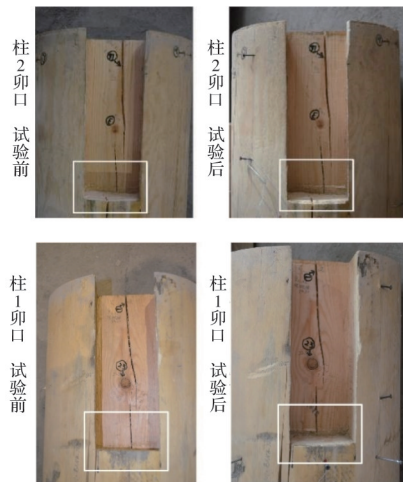


图 7 试验前后柱卯口对比图

Fig. 7 Comparison of the mortise of column before and after the test

别为 6.20、8.89、10.82 kN。滞回环呈 Flag-Shape 样态,随控制位移增加,其包络面积增加,与既有斗

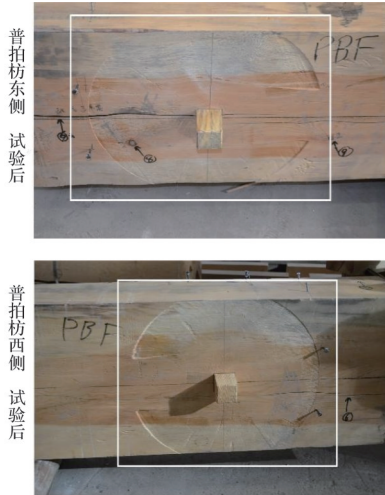


图 8 试验后普拍枋底的压痕

Fig. 8 Indentation at the bottom of the PBF after test

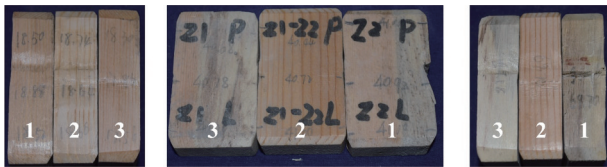
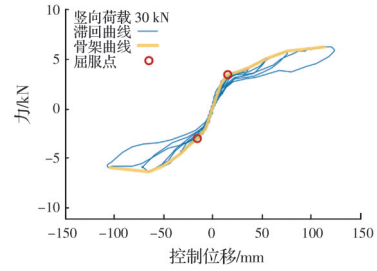


图 9 试验后暗销压痕^[17]

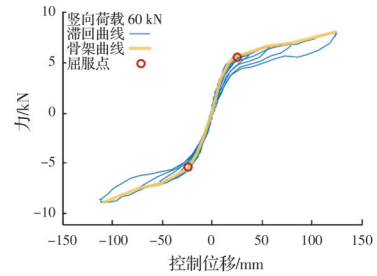
Fig. 9 Indentation of pin after test^[17]

拱试验或梁柱形成的构架试验结果相比,其形状和饱满程度均显著不同。在卸载过程中,解除手拉葫芦的棘轮限位机能后,木构架自行向初始位置运动。即图 10 中,在控制位移的单向加载、卸载过程中,回到初始位置前,水平力符号不发生改变。

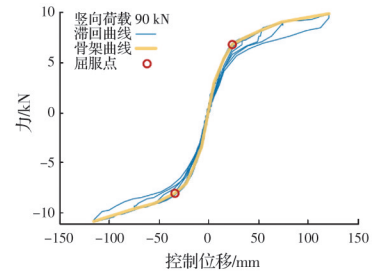
值得注意的是,1级竖向荷载加载前,卯口、普拍枋和暗销等构件尚无塑性变形。而木材横纹承压强度低、有较强变形能力,在1级竖向荷载的往复加载完成后,卯口、普拍枋和暗销等会产生塑性变形。进行2级竖向加载时,卯口、普拍枋和暗销带有1级荷载留下的塑性变形,并在加载过程中继续发展。在进行3级竖向荷载加载时,这一塑性变形将持续累积。全部3级竖向荷载试验完成后,在卯口、普拍枋和暗销处就留下了图 7、图 8 和图 9 的压痕。这一塑性变形的演变历程,能够使得1级竖向荷载



(a) 竖向荷载 30 kN



(b) 竖向荷载 60 kN



(c) 竖向荷载 90 kN

图 10 不同竖向荷载的滞回曲线和骨架曲线^[17]

Fig. 10 Hysteretic curves and skeleton curves under different vertical loading^[17]

下力-位移曲线的形态不同于 2、3 级竖向荷载。

骨架曲线为各滞回环最大力的连线。3级竖向荷载下,正、负向加载具有相似性,但力和位移不具有严格对称性。既有研究表明,正、负向加载是不连续的物理过程^[22],故屈服位移的确定应区分加载方向。骨架曲线具有明显的双折线特征,除1级竖向荷载下的负向加载阶段,未出现下降段,故选用最远点法确定屈服位移^[23],屈服位移 Δ_y 和屈服力 F_y 如表 2 所示。屈服刚度为 $k_y=F_y/\Delta_y$ 。

表 2 3级竖向荷载的 Δ_y 和 F_y
Table 2 Δ_y and F_y of three-level vertical load

加载方向	荷载 1			荷载 2			荷载 3		
	Δ_y /mm	F_y /kN	k_y /(kN/mm)	Δ_y /mm	F_y /kN	k_y /(kN/mm)	Δ_y /mm	F_y /kN	k_y /(kN/mm)
正向	15.15	3.41	0.225	25.41	5.55	0.218	24.53	6.72	0.274
负向	15.33	2.99	0.195	23.98	5.43	0.226	33.28	8.07	0.242

尽管屈服荷载随竖向荷载的增加而增加,但是,屈服位移与竖向荷载未呈现出显著的相关性,屈服刚度在 0.195~0.274 kN/mm 之间小幅度波

动。负向加载的屈服刚度随竖向荷载的增加而增加;正向加载时,3级竖向荷载的屈服刚度大于1、2级竖向荷载的屈服刚度,而1、2级竖向荷载屈服刚

度较接近,且 1 级竖向荷载大于 2 级的,这可能是由于 1 级竖向荷载正向加载时,全部构件除初始缺陷外无加载历程产生的塑性变形。

既有试验结果的分析^[15-17]将骨架曲线、刚度退化曲线和等效黏滞阻尼系数作为评价指标,木构架在水平位移加载下与钢结构相比呈现出:滞回曲线狭窄包络面积小,屈服刚度低,刚度退化显著,等效黏滞阻尼系数较低的特征。以上指标揭示的木构架结构特征,与其在地震中的良好表现不相容。且试验中观测到的柱摇摆、卸载后自行恢复到初始位置等试验现象无法采用上述指标进行评估。故回归试验本体,将位移恢复系数、层间位移集中系数和初始刚度作为木构架结构特征评价指标的补充。

3 恢复性的定量评估

3.1 位移恢复系数

3 级竖向荷载下,各级控制位移卸载后木构架都能够自行恢复到初始位置,且肉眼无法分辨出是否存在残余位移 Δ_r 。图 10 中 x 轴与滞回曲线有多个零交点,即存在残余位移。30 kN 竖向荷载正向加载的 Δ_r 落在(0.280 mm, 1.820 mm)之间,负向 Δ_r 落在(0.770 mm, 1.890 mm)间;60 kN 正向 Δ_r 落在(0.490 mm, 2.520 mm)间,负向 Δ_r 落在(0.700 mm, 2.520 mm)间;90 kN 正向 Δ_r 落在(0.420 mm, 1.970 mm)间,负向 Δ_r 落在(0.980 mm, 2.040 mm)间。残余位移的分布未呈现出一致性的规律。

以式(1)、式(2)计算得到的 R 和 $R_{\Delta y}$ 作为木构架位移恢复能力的量化指标,式中 R 为位移恢复系数, Δ_y 为屈服位移, Δ_{MAX} 为控制位移。式(1)中 Δ_{MAX} 作为分母能够评价木构架整体的位移恢复能力。式(2)的分母在 Δ_{MAX} 大于 Δ_y 时以 Δ_y 替代 Δ_{MAX} ,能够衡量随 Δ_{MAX} 的改变木构架位移恢复能力的变化,这里的 Δ_y 取值以表 2 为准。式(1)、式(2)计算得到的正、负向的 R 和 $R_{\Delta y}$ 绘于图 11 中。

$$R = 1 - \Delta_r / \Delta_{MAX} \quad (1)$$

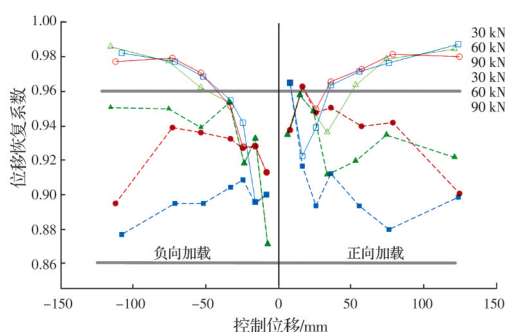


图 11 位移恢复系数

Fig. 11 Displacement recovery coefficient

$$R_{\Delta y} = \begin{cases} 1 - \Delta_r / \Delta_{MAX}, \Delta_{MAX} \leq \Delta_y \\ 1 - \Delta_r / \Delta_y, \Delta_{MAX} > \Delta_y \end{cases} \quad (2)$$

无论 R 还是 $R_{\Delta y}$ 全部大于 86% 小于 1,木构架具有较强的位移恢复性能,与试验中木构架自行回复到初始位置的现象一致。随着 Δ_{MAX} 的增加, R 的增加趋势变缓,最大值为 98.8%,最小值为 87.1%。对于 Δ_{MAX} 而言, Δ_r 的数量级要低 1~2 个,木构架整体位移恢复能力强。 $R_{\Delta y}$ 介于 87.1% 和 96.5% 之间,随 Δ_{MAX} 的增加其数值降低或不变,但未表现出一致相关性。30 kN 竖向荷载的 $R_{\Delta y}$ 要小于 60 kN 和 90 kN 相近控制位移的 $R_{\Delta y}$,而 60 kN 和 90 kN 的 $R_{\Delta y}$ 则未呈现出明确的相对关系。

$R_{\Delta y}$ 与 R 相比,并未随 Δ_{MAX} 的增加而增加并趋近于 1,这意味着,尽管试验中任意 Δ_{MAX} 下的木构架都能够在卸载时自主回到初始位置,但随着 Δ_{MAX} 的增加,木构架位移恢复能力的增加有限。试验对象平面外有滑动支撑阻止木构架平面外变形,但随着 Δ_{MAX} 的增加平面外不稳定性加剧,此时 R 增加趋势放缓, $R_{\Delta y}$ 亦未有显著增加甚至出现降低。据此推测若平面外支撑不足或不存在,则木构架在自主回到初始位置前,出现平面外变形的概率会大幅增加。

木构架位移恢复性定量评估指标 R 和 $R_{\Delta y}$ 共同指出:木构架滞回加载过程中残余位移至多占控制位移的 14%,具有较强的位移恢复能力,且正、负向加载下位移恢复能力不对称。值得注意的是,尽管竖向荷载的增加能够显著提高水平力和割线刚度,但对正、负向加载时两类位移恢复系数的影响则未表现出一致的规律性。

3.2 屈服刚度

尽管图 12 的割线刚度随 Δ_{MAX} 增加快速降低,但是,试验中仍能够观测到木构架卸载后自行回到初始位置,且在屈服位移内各级滞回环重叠,水平力亦未大幅降低。因此,将 Δ_y 所对应的刚度作为每个滞回环的屈服刚度 $k_{y,i}$,其中 i 为荷载级数。按式(3)计算 $k_{y,i}$,其中 Δ_y 为屈服位移,来自表 2, $F_{\Delta y}$ 为各级滞回环 Δ_y 对应的力, Δ_{MAX} 为控制位移, F_{MAX} 为控制位移对应的力。

$$k_{y,i} = \begin{cases} F_{MAX} / \Delta_{MAX}, \Delta_{MAX} \leq \Delta_y \\ F_{\Delta y} / \Delta_y, \Delta_{MAX} > \Delta_y \end{cases} \quad (3)$$

图 12 中 $k_{y,i}$ 的最小值为 0.184 kN/mm,来自 30 kN 竖向荷载正向加载第 6 级控制位移,最大值为 0.449 kN/mm,来自 90 kN 竖向荷载正向加载第 1 级控制位移。 Δ_{MAX} 小于 Δ_y 时初始刚度随 Δ_{MAX} 增加快速降低,在 Δ_{MAX} 大于 Δ_y 后初始刚度曲线出现平折线趋于稳定。

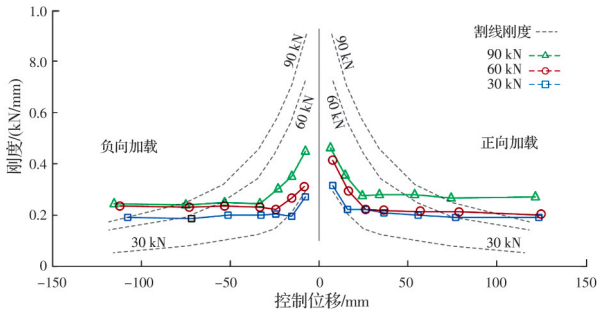


图 12 各滞回环屈服刚度曲线

Fig. 12 Initial stiffness curve

如图 10 所示,尽管 Δ_{MAX} 小于 Δ_y 时滞回环重叠,滞回环整体样态具有一定对称性,且如图 12 所示, $k_{y,i}$ 具有相似变化趋势。但以初始刚度的数值而论,木构架呈现出显著不对称性。正、负向加载当 Δ_{MAX}

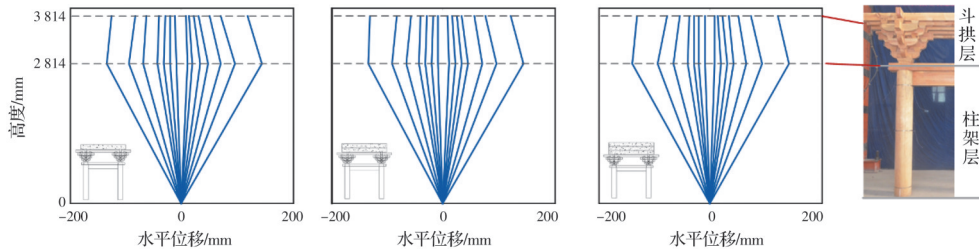


图 13 位移沿高度的分布

Fig. 13 Distribution of displacement along height

3 级竖向荷载的正向加载柱架层相对变形占木构架整体变形比率随控制位移的增加先增加后减小,最大值为 1.51,最小值为 1.03。斗拱层相对变形亦先增后减,最大值为 0.51,最小值为 0.035。负向加载,柱架层相对变形占比随控制位移增加先增加后减小,最大值为 1.20,最小值为 0.91。斗拱层也有相似的规律,最大值为 0.20,最小值为 0.012。柱架层变形占比是斗拱层变形占比的 2.95 倍至 86.47 倍,柱架层变形远大于斗拱层,其刚度要远低于斗拱层。

层间位移分布不均匀的特征能够由层间位移集中系数(DCF)评估^[25]。式(4)中 δ_{total} 为木构架整体位移; δ_1 为柱架层相对位移; δ_2 为斗拱层与柱架层的相对位移,如图 14 所示。

$$DCF = \frac{\max\left(\frac{\delta_1}{h_1}, \frac{\delta_2}{h_2}\right)}{\frac{\delta_{total}}{h_{total}}} \quad (4)$$

层间位移集中系数越趋近于 1,水平位移沿高度的分布越均匀。而图 15 中正、负向加载层间位移集中系数均大于 1,式(4)分子的数值全部来自柱架层,层间位移系数能够评估木构架水平位移沿高度分布不均匀的特征。这一特征与施加控制位移的

大于 Δ_y 时, $k_{y,i}$ 的变化与刚度退化曲线迥异,不再随 Δ_{MAX} 的增加大幅降低。除正向 30 kN 和 60 kN 竖向荷载的初始刚度,其余曲线在 Δ_{MAX} 超过 Δ_y 后, $k_{y,i}$ 都在骨架曲线确定的屈服刚度 k_y 附近。初始刚度在 Δ_{MAX} 超过 Δ_y 后表现出一定稳定性,即木构架未发生严重的构件弹塑性损伤,与拆解后构件大多数无显著损伤这一现象吻合。

3.3 层间位移集中系数

控制位移加载过程中,柱摇摆、斗拱层未出现显著的层间变形,水平位移集中在柱架层。如图 13 所示,柱架层和斗拱层相对水平位移沿高度分布不均匀,柱架层的相对位移来自柱的摇摆,斗拱层水平相对位移来自斗拱的层间变形和相对转动^[24]。

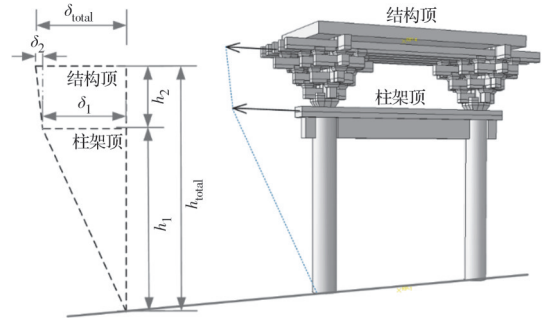


图 14 结构变形和层间位移集中系数

Fig. 14 Structural deformation and inter story displacement concentration factor

过程中,柱摇摆抬升,变形集中在柱架层,斗拱层相对水平变形小于柱架层的试验现象吻合。

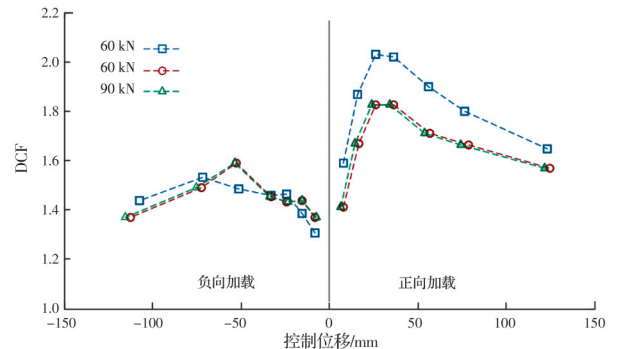


图 15 层间位移集中系数

Fig. 15 Displacement concentration factor

层间位移集中系数与柱架层和斗拱层位移占比具有相同的变化趋势,随控制位移的增加,先增加后减小。正向加载第1~3级控制位移下层间位移分布的不均匀性,随着控制位移增加而增加,第4~7级随控制位移增加而降低。负向加载第1~5级控制位移下层间位移分布的不均匀性,随控制位移增加而增加,之后则降低。与试验中柱脚抬升在较低控制位移水平不显著,较高控制位移时显著这一现象吻合。

假定斗拱层刚度相对于柱架层刚度为无穷大且斗拱的转动可忽略,则 δ_2 趋于零且远小于 δ_1 , δ_1 和 δ_2 分别远小于 h_1 (2 841 mm)和 h_2 (973 mm),可得此时层间位移集中系数为1.87。据试验可知, δ_1 的绝对值介于2.95~86.47倍 δ_2 绝对值间,则层间位移系数介于1.40~1.87间。而图15中的DCF介于1.22~2.03之间,数值大于1,木构架存在位移集中且柱架层刚度远大于斗拱层。据图13可知,在较高控制位移阶段,斗拱的转动使得 δ_1 和 δ_2 异号, δ_{total} 小于两者的绝对值之和,故DCF的上限能够大于1.87。在较低控制位移阶段, δ_1 和 δ_2 同号,且位移分布较均匀,此时DCF能够小于1.4且靠近1。

4 结论

围绕足尺宋式摇摆木构架的拟静力试验,分析了滞回曲线、等效刚度和屈服点等评价指标。同时,回归试验本体,以位移恢复系数、初始刚度和层间位移集中系数评估木构架在试验中表现出的位移恢复性、滞回曲线重叠,以及水平位移沿高度分布不均匀等现象,得到以下主要结论:

1)在不同竖向荷载足尺宋式摇摆木构架拟静力试验中,结构构件均表现出刚体运动的特征,结构整体则呈现出一定的位移恢复能力。然而,将滞回曲线、等效刚度退化和等效黏滞阻尼系数作为木构架结构性能的评估,则与木构架在试验和地震中呈现出的良好表现不相容。

2)木构架整体具有良好的位移恢复能力,3级竖向荷载的各级控制位移下木构架卸载后都能够自主回复到初始位置。残余位移在0.280~2.525 mm之间,第1组位移恢复系数 R 介于0.871~0.988之间,且随控制位移的增加 R 的增加趋势变缓。第2组位移恢复系数 $R_{\Delta y}$ 介于0.871~0.965之间,在控制位移小于屈服位移时随控制位移增加而增加,当控制位移大于屈服位移时则无明确相关性甚至出现了降低。尽管控制位移的增加不影响整体位移恢复能力 R ,但 $R_{\Delta y}$ 并未随控制位移增加而持续增加,木构架残余位移恢复能力受控制位移增加的

影响。

3)割线刚度随控制位移增加而大幅降低。初始刚度在控制位移超过屈服位移后,趋于稳定。除竖向荷载30 kN和60 kN正向加载,其余4组曲线在稳定阶段其数值均趋于屈服刚度。这一趋势与滞回环的重叠性以及试验对象拆解后各构件均未出现广泛分布的弹塑性损伤相一致。

4)在控制位移加载过程中,柱摇摆、斗拱层未出现显著转动或平动。水平变形集中于柱架层,柱架层变形为斗拱层变形的2.95~86.47倍,柱架层刚度远小于斗拱层。层间位移集中系数介于1.22~2.03间,且随控制位移的增加先增后降,即木构架层间位移分布的不均匀性先增后减。

5)足尺宋式摇摆木构架拟静力试验的探究,回归试验现象本体,通过位移恢复系数、初始刚度和层间位移集中系数等指标,评估木构架恢复能力。

参考文献

- [1] 梁思成. 图像中国建筑史[M]. 北京: 三联书店, 2011.
LIANG S C. A pictorial history of Chinese architecture [M]. Beijing: SDX Joint Publishing Company, 2011. (in Chinese)
- [2] XUE J Y, XU D. Shake table tests on the traditional column-and-tie timber structures [J]. Engineering Structures, 2018, 175: 847-860.
- [3] MI X C, MENG X J, YANG Q S, et al. Analysis of the residual deformation of Yingxian wood pagoda [J]. Advances in Civil Engineering, 2020(2): 1-12.
- [4] 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. (in Chinese)
YANG Q S. Load-bearing and aseismic mechanism of traditional wooden structures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2):1-9.
- [5] HE J X, WANG J. Theoretical model and finite element analysis for restoring moment at column foot during rocking [J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(2): 97-111.
- [6] 唐丽娜. 古建筑木结构柱础连接力学模型与减震加固的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
TANG L N. Study of mechanical model of column base connection and vibration strengthening in ancient timber structures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [7] GAO C, WANG J, YANG Q S, et al. Analysis of rocking behavior of Tang-song timber frames under pulse-type excitations [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(1): 2050002.
- [8] 薛建阳, 路鹏, 董晓阳. 古建筑木结构歪闪斗拱竖向受

- 力性能的ABAQUS有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 8-13.
- XUE J Y, LU P, DONG X Y. Finite element analysis on the vertically mechanical behavior of the skewed Dou-Gong in ancient timber buildings by ABAQUS program [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 8-13. (in Chinese)
- [9] 潘毅, 袁双, 郭瑞, 等. 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 Y, YUAN S, GUO R, et al. Effects of Tou-Kung layer layout on seismic performance of ancient timber structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3): 29-40. (in Chinese)
- [10] 谢启芳, 杜彬, 张凤亮, 等. 古建筑木结构燕尾榫节点弯矩-转角关系理论分析[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 140-146.
- XIE Q F, DU B, ZHANG F L, et al. Theoretical analysis on moment-rotation relationship of dovetail joints for Chinese ancient timber structure buildings [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(12): 140-146. (in Chinese)
- [11] 陈志勇, 祝恩淳, 潘景龙. 中国古建筑木结构力学研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 644-654.
- CHEN Z Y, ZHU E C, PAN J L. A review on structural mechanics of Chinese ancient wood structures [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 644-654. (in Chinese)
- [12] 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 Q, YAN W M, JI J B, 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. (in Chinese)
- [13] 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 X B, WU Y J, LUO L, et al. Shaking table test on a traditional pavilion-style wooden pagoda [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 10-19. (in Chinese)
- [14] WAN J, YANG Q S, WEI J W, et al. Initial motion analysis of traditional Chinese rocking timber frame subjected to horizontal ground motion: theoretical and numerical investigations [J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109898.
- [15] MENG X J, LI T Y, YANG Q S, et al. Seismic mechanism analysis of a traditional Chinese timber structure based on quasi-static tests [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(10): e2245.
- [16] CHEN J Y, LI T Y, YANG Q S, et al. Degradation laws of hysteretic behaviour for historical timber buildings based on pseudo-static tests [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 480-489.
- [17] SHI X W, LI T Y, CHEN Y F, et al. Full-scale tests on the horizontal hysteretic behavior of a single-span timber frame [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2020, 14(3): 398-414.
- [18] 王天. 古代大木作静力初探[M]. 北京: 文物出版社, 1992.
- WANG T. A preliminary reserach on the static mechanism of traditional Chinese timber structure [M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [19] 刘大可. 古建筑屋面荷载编汇(上)[J]. 古建园林技术, 2001(3): 58-64.
- LIU D K. Roof load of traditional Chinese timber structure [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 2001(3): 58-64. (in Chinese)
- [20] 陈金永, 师希望, 牛庆芳, 等. 宋式木构屋盖自重及材份制相似关系[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 27-33.
- CHEN J Y, SHI X W, NIU Q F, et al. Analysis of similar CaiFen modular system based on the weight of the roof of Song dynasty [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(5): 27-33. (in Chinese)
- [21] 古建筑木结构维护与加固技术规范: GB 50165—92 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
- Technical code for maintenance and strengthening of ancient timber building: GB 50165—92 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993. (in Chinese)
- [22] DAR A, KONSTANTINIDIS D, EL-DAKHAKHNI W. Seismic response of rocking frames with top support eccentricity [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(1): 2496-2518.
- [23] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.
- FENG P, QIANG H L, YE L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese)
- [24] KYUKE H, KUSUNOKI T, YAMAMOTO M, et al. Shaking table tests of 'masugumi' used in traditional wooden architectures [J]. AIJ Journal of Technology and Design, 2007, 13(26): 535-538.
- [25] MACRAE G A, KIMURA Y, ROEDER C. Effect of column stiffness on braced frame seismic behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 381-391.