

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.057



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



古建筑槛窗木构架抗震性能及损伤等级评价

郇君虹¹, 郭小东², 马东辉², 管忠正¹

- (1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室; 土木工程学院, 石家庄 050043;
2. 北京工业大学 城市建设学部; 木结构古建筑安全评估与灾害风险控制国家文物局重点科研基地;
北京市历史建筑保护工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要:为了研究木结构古建筑带内部填充木框架的抗震性能和价值损伤规律,选取清式木结构古建筑中广泛应用的槛窗木构架为研究对象,制作了缩尺比例为1:2的试验模型进行低周往复试验,分析了槛窗木构架的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线、刚度退化规律和耗能能力。试验结果表明:槛窗木构架滞回曲线有明显的“捏缩效应”,随着加载位移的增大和加载循环次数的增多,这种效应就越明显;试验过程中墙体首先发生破坏,而后随着加载的进行,墙体逐渐加剧破坏,木构件出现拔榫、根条劈裂等破坏。墙体对木构架的刚度影响较大。结合槛窗木构架可能存在的价值点,提出基于价值的损伤评价指标,为古建筑的修复、加固和价值损伤评估提供参考。

关键词:古建筑;槛窗木构架;低周往复试验;损伤等级评价

中图分类号:TU366.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)02-0129-09

Seismic performance and damage evaluation on Kanchuang frame of ancient architecture

HUAN Junhong¹, GUO Xiaodong², MA Donghui², GUAN Zhongzheng¹

- (1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control; School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China; 2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering; Key Scientific Research Base of Safety Assessment and Disaster Mitigation for Traditional Timber Structure, State Administration for Cultural Heritage; Beijing Engineering Research Center of Historic Buildings Protection, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: In order to study the seismic performance and value damage pattern of timber frame, which are used in ancient timber architecture and infilled with windows and wall, Kanchuang frame is selected as the study object. Kangchuan frames are widely used in Qing official architecture. The 1:2 reduced-scale models were made for low cyclic loading test. The load-displacement hysteretic curves, skeleton curves,

收稿日期:2020-12-31

基金项目:北京市自然科学基金-市教委联合资助项目(KZ202010005012);国家重点研发计划(2019YFC1520803)

作者简介:郇君虹(1989-),女,博士,主要从事木结构抗震性能研究,E-mail:junhonghuan@stdu.edu.cn.

郭小东(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:gxd@bjut.edu.cn.

Received:2020-12-31

Foundation items:Beijing Municipal Commission of Education and Natural Science Foundation (No. KZ202010005012); National Key Research and Development Project(No. 2019YFC1520803)

Author brief:HUAN Junhong (1989-), PhD, main research interest: seismic performance of ancient timber architecture, E-mail: junhonghuan@stdu.edu.cn.

GUO Xiaodong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: gxd@bjut.edu.cn.

stiffness degradation law and energy dissipation capacity of models were analyzed. The research results show that the load-displacement hysteretic curves have obvious pinching effect, and this effect becomes more obvious with increase of loading displacement and loading cycle number. The walls of Kanchuang frame cracked at first, then the cracks increase with the load increase. The wood structure appears to tenon pulling, lattice splintering and other damage. Walls contribute great stiffness to the structure. Combined with the possible value points of sill window frame, a value-based damage evaluation standard for Kanchuang frame is proposed, which provides good reference for the repair, reinforcement, and value loss evaluation of ancient timber architecture.

Keywords: ancient timber architecture; Kanchuang frame; low cyclic loading test; damage grade evaluation

木结构古建筑是中国的文化瑰宝,是历史文明的传承,具有不可再生性和不可替代性。然而,中国是一个地震多发的国家,许多古建筑在历次地震中均遭到了不同程度的损毁^[1]。因此,研究木结构古建筑的抗震性能,并对其开展科学的修复及保护工作刻不容缓。学者们采用模型试验、有限元分析、理论推导等手段对木结构古建筑展开了一系列研究,涵盖了木结构古建筑的榫卯节点、斗拱节点、平面榫卯节点框架、空间木构架等方面。

在榫卯节点方面,吴洋等^[2]对不同拔榫程度的燕尾榫节点框架进行试验研究,提出了静力作用下梁跨中荷载与挠度的变刚度线弹性力学模型。郭婷等^[3]对西南传统民居穿斗式木结构穿销中节点进行单调加载试验,研究了两类节点的力学性能。郁君虹等^[4]研究了扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫的抗震性能,提出了一种新型的榫卯节点加固方式,以提高结构的抗震性能。在斗拱节点方面,Tsuwa 等^[5]制作了 3 种不同尺寸的斗拱模型,对其进行动力和静力加载试验,分析了斗拱的构件对整体结构力学性能的影响。Yeo 等^[6-9]对两种不同形式的斗拱进行振动台试验,研究了传统结构斗拱在不同竖向荷载作用下和集集地震波激励下的破坏模式。在平面榫卯节点框架方面,Atsuo 等^[10]通过拟静力试验和有限元模拟研究了日本传统结构带斗拱、梁和木质填充墙的平面框架的力学性能。D'Ayala 等^[11]建立了台湾地区传统寺庙 3 种不同框架的有限元模型,计算结果中,结构产生的应力及位移和相关震害资料显示的一致。

近年来,尽管针对木结构古建筑的抗震研究取得了一定的进展和成果,但针对带门、窗、墙体的木结构古建筑木构架的抗震性能方面的研究还存在不足。研究表明^[12-13],木构架内部的墙体门窗等会对木结构古建筑抗震性能产生较大的影响,且木结构古建筑的门、窗、墙体壁画等是古建筑文化价值的重

要组成部分,研究其抗震性能和价值损伤十分必要和迫切。笔者以木结构古建筑中应用广泛的槛窗木构架为研究对象,以清《工程做法则例》^[14]为依据,建立了缩尺比例为 1:2 的模型,采用低周往复试验对其进行抗震性能研究。

1 试验概况

1.1 试验材料模型制作

以中国现存的清式古建筑中带雀替、隔扇、槛窗的木构架为原型,按照清《工程做法则例》^[14]和《中国古建筑知识手册》^[15]中的做法,制作了两楹缩尺比例为 1:2 的木构架模型,两楹木构架的设计参数相同,编号分别为 KC1 和 KC2。选用的木材为樟子松,未考虑材料老化的影响。试验模型和构件的尺寸如图 1~图 3 及表 1 所示。槛窗木构架的构件之

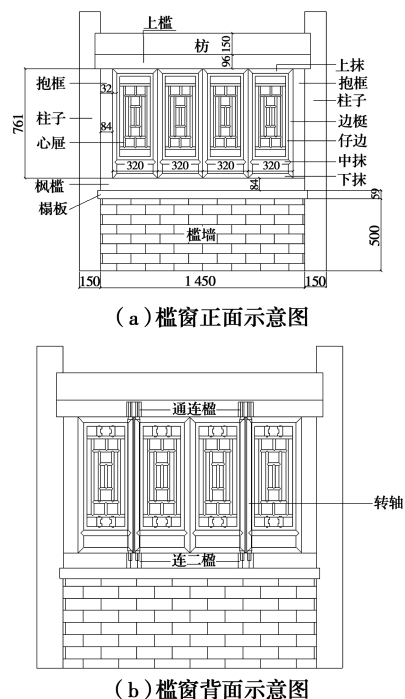


图 1 槛窗木构架试验模型构造及尺寸示意图

Fig. 1 Construction and dimensions of the test model

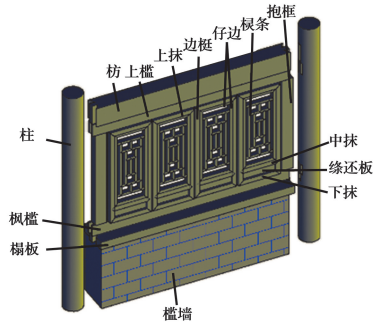


图 2 槛窗木构架三维示意图

Fig. 2 Three-dimensional sketch of Kanchuang frame

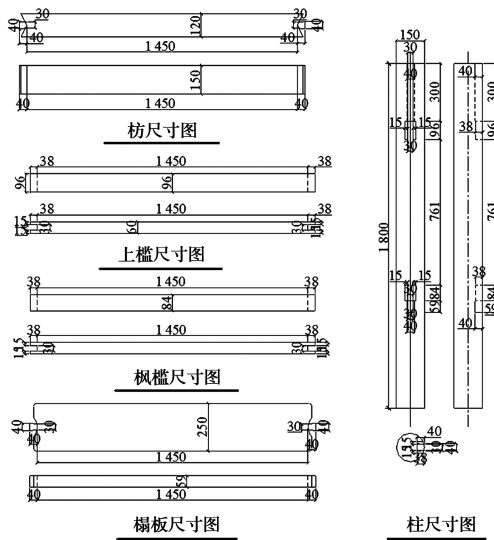


图 3 槛窗木构架构件尺寸图

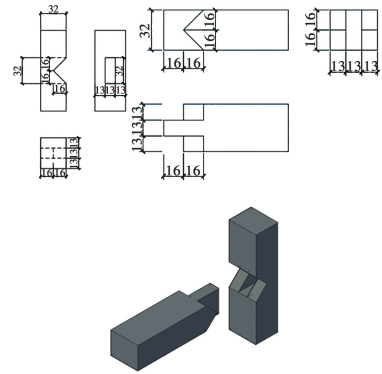
Fig. 3 Dimensions of Kanchuang frame's components

间连接根据传统清式建筑的做法,采用榫卯连接,具体构件和榫卯节点的尺寸如图 4 和图 5 所示。由于构件和墙体均为人工砌筑,并且需要提前预留安装空隙,因此存在一定的缝隙差异。经过测量,两槛木构架的缝隙差异在 3~5 mm 左右。两槛槛窗木构架的砖墙均由同一工人砌筑。

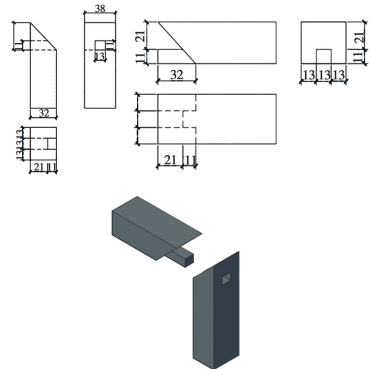
表 1 槛窗木构架模型构件尺寸

Table 1 Dimensions of Kanchuang frame's components

构件	高/mm	宽/mm	厚(进深)/mm
上槛	96	1 525	60
枫槛	84	1 525	60
榻板	59	1 525	250
边挺	761	32	39
抱框	821	85	60
连二槛	42	84	42
通连槛	42	84	42
缘环板	64	273	17
仔边		21	35
根条		15	25
槛窗	760	320(单扇)	
槛墙	500	1 450	250



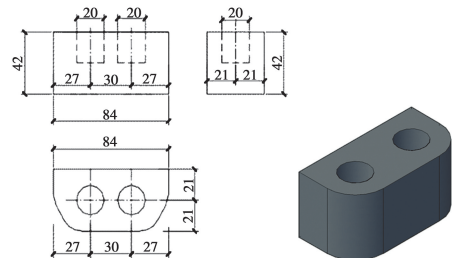
(a) 中抹与边挺连接榫卯节点示意图及尺寸图



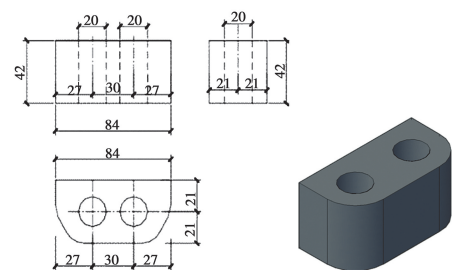
(b) 上抹及下抹与边挺连接榫卯节点示意图及尺寸图

图 4 窗扇榫卯节点示意图

Fig. 4 Dimensions of timber windows' mortise and tenon joints



(a) 连二槛尺寸图及三维示意图



(b) 通连槛尺寸图及三维示意图

图 5 连二槛、通连槛尺寸图

Fig. 5 Dimensions of Lianerying and Tonglianying

1.2 材性参数

根据相关试验标准^[16-24]制作试块,对试验所用的木材、砌筑砂浆、砖砌体进行材性试验,获得相应参数,如表 2、表 3 所示。

表 2 木材材性参数

Table 2 Material parameters of wood MPa

f_{cL}	f_{cR}	f_{cT}	E_{cL}	E_{cR}	E_{cT}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
46.213	5.493	3.387	8907	1620	771	468	699	542

注: f_{cL} 、 f_{cR} 、 f_{cT} 分别为木材顺纹、横纹径向、横纹弦向抗压强度; E_{cL} 、 E_{cR} 、 E_{cT} 分别为木材顺纹、横纹径向、横纹弦向抗压弹性模量; G_{LR} 、 G_{LT} 、 G_{RT} 分别为木材径切面、弦切面、横切面上的剪切模量。

表 3 砂浆及砖砌体材性参数

Table 3 Material parameters of mortar and masonry MPa

$f_{c,c}$	$f_{c,u}$	$f_{c,i}$	$f_{v,i}$	$E_{c,i}$	μ
2.0	9.338	3.425	0.041	1259	0.183

注: $f_{c,c}$ 为砌筑砂浆抗压强度; $f_{c,u}$ 为砖块抗压强度; $f_{c,i}$ 为砖砌体抗压强度; $f_{v,i}$ 为砖砌体抗剪强度; $E_{c,i}$ 为砖砌体弹性模量; μ 为砖砌体的泊松比。

1.3 加载方案

在柱顶端放置柱帽,柱帽上放置分载梁。通过分载梁两端吊配重的方法施加经过屋面荷载折算的柱端荷载,共 12 kN。加载装置如图 6 所示。为了防止试验过程中构件产生平面外倾斜,在试验构件后方搭建脚手架进行支撑。

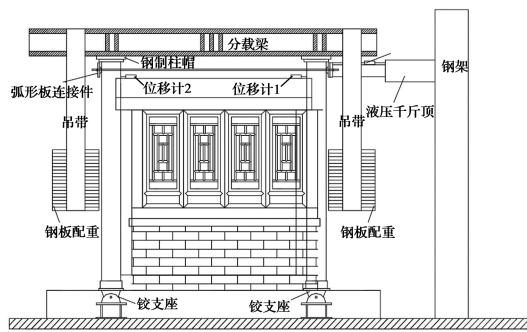


图 6 加载装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading equipment

通常木结构在承受较小荷载的时候就发生较大变形。因此,参考《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)中的建议,水平方向采用位移控制加载。加载初始值为 ± 3 mm; 加载位移在 5~70 mm 时,每级加载位移增加 5 mm; 加载位移在 70~110 mm 时,每级加载位移增加 10 mm; 加载位移大于 110 mm 时,每级加载位移增加 20 mm,每级位移循环加载 3 次,直至加载到千斤顶最大量程 150 mm 为止。加载位移曲线如图 7 所示。

在千斤顶顶端设置力传感器和位移计,用来测量加载过程中木构架的受力和千斤顶推出位移。采用位移计 2 和位移计 3 测量枋端的脱榫量。试验现场布置图如图 8 所示。

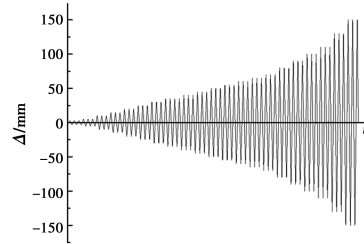


图 7 加载位移示意图

Fig. 7 Loading scheme by displacement



图 8 试验现场布置

Fig. 8 The test site

2 试验现象分析

KC1 和 KC2 的试验现象基本相同。试验加载初期,控制位移较小,木构架没有明显变化。当加载位移增加到 10 mm 时,木构架发出木材挤压的“吱吱”声,墙体边缘部位沿灰缝产生裂缝。随着加载位移的增大,裂缝逐渐发展,加载位移为 35 mm 时,在边缘部位形成贯通裂缝,而后由边缘部位向中部发展。加载位移为 50 mm 时,在墙体中部形成人字形贯通裂缝,窗扇的榫卯节点产生轻微拔榫。随着加载位移的增加,墙体裂缝不断发展,窗扇的榫卯节点拔榫逐渐增加,加载结束时;榫卯节点的最大拔榫量达到 3 mm,约为榫头长度的 1/10,仔边、椽条劈裂。加载结束后,结构的破坏形式如图 9 所示。

3 试验结果分析

3.1 荷载-位移滞回曲线

图 10 为 KC1 和 KC2 的荷载-位移滞回曲线,可以看出:

1) 两榭窗木构架的荷载-位移曲线形状及变化趋势基本一致,榭窗木构架的滞回曲线均呈“Z”字形。

2) 滞回曲线的中部扁平,有明显的“捏缩效应”。也就是说,在一定的加载位移范围内,加载位移不断增加,而结构的受力增加速率相对缓慢,造成滞回曲线中部呈捏拢状。这是由于榭窗木框架构件之间存

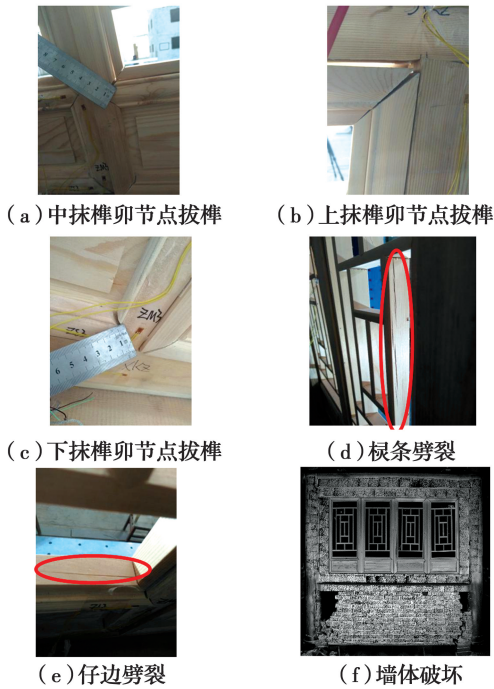


图 9 试件破坏形态

Fig. 9 Failure modes of the components

在缝隙,加载初期构件之间产生滑移造成的,随着加载位移的增大,构件之间相互挤紧,结构受力不断增加。

3)随着加载位移和荷载循环的次数增加,这种“捏缩效应”逐渐显著。这是由于反复加载后,一方面墙体破坏,降低结构刚度;另一方面,构件产生了塑性变形,加大了构件之间的空隙,致使加载初期构件之间的滑移加剧。

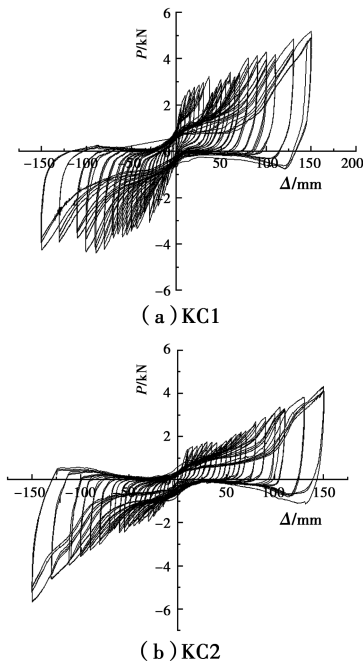


图 10 槛窗木构架荷载-位移滞回曲线

Fig. 10 Load-displacement hysteresis curves of the test model

3.2 荷载-位移骨架曲线

荷载-位移骨架曲线是试验槛窗木构架的荷载-位移滞回曲线峰值点的连线。试验中每一级加载位移循环 3 次。KC1 和 KC2 的荷载-位移骨架曲线如图 11 所示,可以看出:

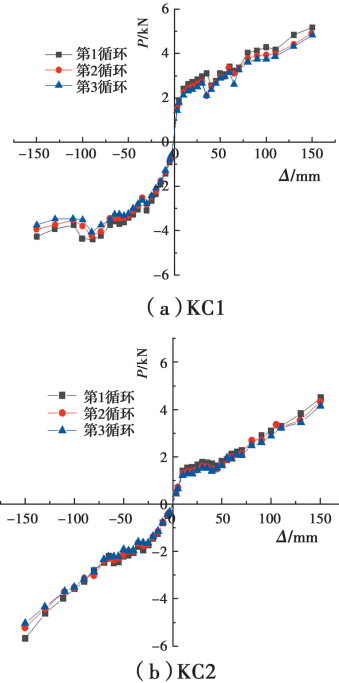


图 11 槛窗木构架荷载-位移骨架曲线

Fig. 11 Load-displacement skeleton curves of the test model

1)每级加载位移下,第 2、3 次循环的荷载小于第 1 次循环的荷载,说明累积循环加载会造成结构力学性能退化。力学性能退化的原因包括墙体裂缝的开展、木构件榫卯节点的松动、木材的塑性变形、墙体倒塌等。

2)当加载位移为 35 mm 以下时,两楹木构架的曲线基本呈直线,此时槛窗木构架的木构件部分还未出现明显破坏,而墙体也未形成贯通裂缝,可以认为该阶段为轻微损伤的弹性阶段。

3)当加载位移在 30~65 mm 时,骨架曲线的斜率变小。这是因为随着加载的进行,墙体形成多条贯通裂缝,力学性能退化,可以认为该阶段为墙体破坏的塑性阶段。

4)当加载位移大于 65 mm 时,两楹槛窗木构架的骨架曲线再次呈直线状态,刚度有所增加。这是因为随着加载次数的增多和增大,墙体损伤累积,裂缝充分发展,砖块掉落,墙体酥碱,墙体和木柱之间空隙增大,缺乏有效连接,基本不再受力。此时的荷载主要由木构件承担,该阶段木构架进入了新的塑性阶段。

3.3 耗能分析

通常情况下,采用能量耗散系数 h_e 来衡量结构的耗能能力。一般来说,能量耗散系数越大,结构的耗能能力就越强。KC1 和 KC2 的能量耗散系数如图 12 所示。

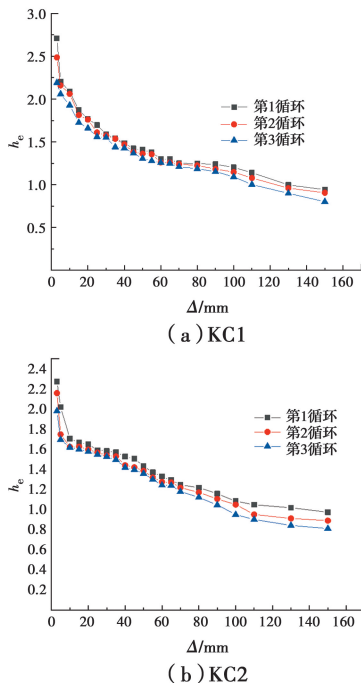


图 12 槛窗木构架耗能曲线

Fig. 12 Energy-absorbed curves of the test model

从图 12 中可以看出,随着加载位移的增大和循环次数的增加,槛窗木构架的耗能能力逐渐降低。在加载位移为 30 mm 前,墙体裂缝从边缘部位开始发展,加载位移为 35 mm 时,出现第一条竖向贯通裂缝,在该区间段内试件的耗能能力下降较快,此后下降速率变小。说明在槛窗木构架墙体竖向贯通裂缝出现以前,裂缝的发展对结构的耗能能力产生影响较大。

3.4 刚度退化分析

随着位移荷载的增大和加载循环次数的增加,结构的刚度会出现降低的现象,称为刚度退化。一般采用第 1 次加载循环中的割线刚度 K_i 来衡量。计算所得的 KC1 和 KC2 刚度退化曲线如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,两槛槛窗木构架的刚度退化具有一致性的规律,即随着加载位移的增大,刚度逐渐减小,最后趋于直线状态。在加载位移为 35 mm 前,刚度退化较快,之后刚度退化趋于平缓。说明墙体对结构的刚度影响较大。

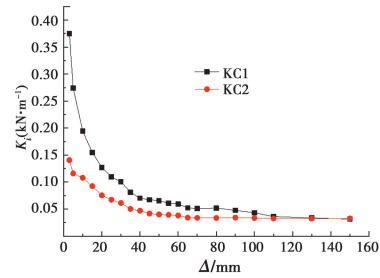


图 13 槛窗木构架刚度退化曲线

Fig. 13 Rigidity degradation curves of the test model

4 槛窗木构架损伤等级分析

4.1 墙体裂缝长度发展规律分析

试验和震害资料^[1]表明,对于槛窗木构架来说,墙体部分首先且更容易遭到损害,也就意味着在墙体上附带的文物价值部分更容易损伤。为了充分反映墙体上可能会附带的文物的损伤情况,综合试验现象和历史震害资料,选取墙体裂缝作为槛窗木构架的价值损伤指标,对槛窗木构架的墙体裂缝长度进行了分析,图 14 为槛窗木构架墙体裂缝长度随加载位移的变化情况。为了便于统计规律,将裂缝长度进行归一化,记作

$$l_e = l_f / l_z \quad (1)$$

式中: l_f 为槛墙的总裂缝长度; l_z 为槛墙的周长。对加载位移进行归一化。

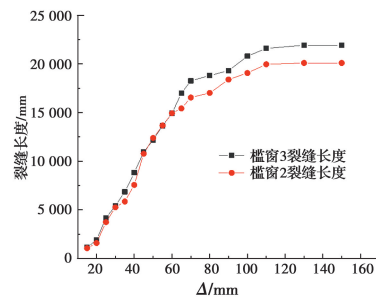


图 14 槛窗木构架墙体裂缝长度变化曲线

Fig. 14 Variation curve of masonry crack length

$$\bar{\Delta} = \Delta / 65 \quad (2)$$

归一化中采用 65 mm 位移为槛窗木构架墙体裂缝充分发展,边缘砖块第 1 次掉落时的加载位移。对根据试验所得的裂缝长度随加载位移变化规律曲线进行拟合,拟合公式如式(3)所示,拟合曲线如图 15 所示。

$$l_e = \begin{cases} 1.382\bar{\Delta} & 0 \leq \bar{\Delta} < 0.281 \\ -1.877\bar{\Delta}^2 + 7.137\bar{\Delta} - 1.469 & 0.281 \leq \bar{\Delta} < 1.901 \\ 5.315 & \bar{\Delta} > 1.901 \end{cases} \quad (3)$$

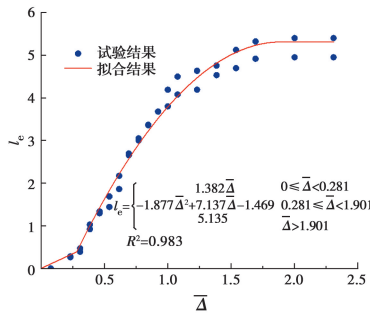


图 15 试验曲线拟合结果

Fig. 15 Fitting results of tests curves

4.2 槛窗木构架整体损伤评价

目前,中国还没有专门针对木结构古建筑、槛窗木构架等文化遗产建筑组成部分而设定的损伤评价指标体系和评价标准。建立评价指标时先从墙体可能会附带的文物价值出发,一般来说,墙体主要的附属文物表现形式为雕刻和壁画。基于此,结合槛窗的试验现象及结构的破坏过程,提出槛窗木构架基于价值的损伤等级评价指标,如表 4 所示。

表 4 槛窗木构架整体损伤评价标准

Table 4 Global damage evaluation standard of Kanchuang frame

损伤等级	破坏特征	量化指标 I_e	修复需求
基本完好	墙体及木构件无明显损伤。	<0.026	无需修复
轻微损伤	墙体左右边缘部位出现少量裂缝,墙体中部无裂缝,对于附属的雕刻及壁画部分的损伤较小,可能造成壁画轻微裂缝;木构件无明显损伤。	$[0.026, 0.260)$	轻微修复
中等损伤	墙体左右边缘部位裂缝较多,并向墙体中部蔓延发展,最大裂缝宽度达到 5 mm,墙体中部有少量细小裂缝,对于附属的雕刻及壁画部分损伤加剧,可能造成壁画裂缝增加,砖块本身未出现损坏;木构件无明显损伤。	$[0.260, 1.293)$	中等修复
严重损伤	墙体左右边缘部位基本全部沿灰缝开裂,中部出现贯通裂缝,最大裂缝可达 16 mm,个别砖块翻身开裂,对砖体雕刻造成损伤,壁画可能会产生大面积开裂及空鼓;木构件轻微拔榫。	$[1.293, 2.653)$	需大量专业修复
完全毁坏	墙体严重开裂,裂缝覆盖整面墙体,墙体酥碱、塌落,壁画及砖雕部分大量受损;木构件拔榫量加大,心屉椽条等构件出现开裂现象。	≥ 2.653	修复工作量 大且难以修复

5 结论

通过对槛窗木构架进行试验研究和分析,得到以下结论:

1)加载过程中,槛窗木构架的墙体首先发生破坏,墙体贯通裂缝充分发展后,窗扇开始出现轻微拔榫,随着加载的进行,拔榫不断加剧。最终的破坏形式为墙体倒塌,榫卯节点拔榫变形,椽条开裂。

2)槛窗木构架滞回曲线呈 Z 型,有明显的“捏缩效应”。随着加载位移的增大和循环次数的增加,这种效应越明显。

3)在墙体贯通裂缝出现之前,槛窗木构架的刚度较大,且刚度退化速度较快,后期刚度退化速度较为平稳。构件和榫卯节点之间的紧密程度、墙体的砌筑水平、墙体和木框架之间的间隙都会影响结构的刚度耗能能力。构件之间越紧密,刚度越大,耗能能力越强。

4)采用三段式曲线对槛窗木构架墙体裂缝进行

规律分析,在考虑槛窗木构架可能附带的文物及其价值的基础上建议了基于价值的损伤等级评价指标,为文物的保护和研究提供参考依据。

参考文献:

[1] 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 Q, YAN W M, YANG X S, et al. Damage of ancient Chinese architecture caused by the Wenchuan Earthquake [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2010, 22(1): 37-45. (in Chinese)

[2] 吴洋, 郭小东, 宋晓胜, 等. 拔榫状态下古建筑燕尾榫节点性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 43-47.
 WU Y, GUO X D, SONG X S, et al. Experimental study on mechanical behavior of dovetail joint in historic buildings out of mortise [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2014, 39(1): 43-47. (in Chinese)

- [3] 郭婷, 杨娜, 周海滨, 等. 穿斗式木结构中节点的抗弯性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 83-90.
GUO T, YANG N, ZHOU H B, et al. Experimental study on the moment-resisting performance of interior joints with wooden peg [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 83-90. (in Chinese)
- [4] 郇君虹, 马东辉, 郭小东, 等. 扁钢加固半榫、透榫及燕尾榫抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(8): 763-771.
HUAN J H, MA D H, GUO X D, et al. Experimental study of aseismic behaviors of flexural tenon joint, through tenon joint and dovetail joint reinforced with flat steel devices [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8): 763-771. (in Chinese)
- [5] TSUWA I, KOSHIHARA M, FUJITA K, et al. A study on the size effect of bracket complexes used in traditional timber structures on the vibration characteristics [C]//10th World Conference on Timber Engineering 2008, June 2-5, 2008, Engineered Wood Products Association, Miyazaki, Japan, 2008, 1344-1351.
- [6] YEO S Y, KOMATSU K, HSU M F, et al. Mechanical model for complex brackets system of the Taiwanese traditional Dieh-Dou timber structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(1): 65-85.
- [7] YEO S Y, HSU M F, KOMATSU K, et al. Dynamic characteristics of Taiwanese traditional Dieh-Dou timber structures [J]. Transactions on the Built Environment, 2013, 131: 481-490.
- [8] YEO S Y, HSU M F, KOMATSU K, et al. Damage behaviour of Taiwanese traditional Dieh-Dou timber frame [C]//Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE), 2014.
- [9] YEO S Y, HSU M F, KOMATSU K, et al. Shaking table test of the Taiwanese traditional Dieh-Dou timber frame [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2016, 10(5): 539-557.
- [10] ATSUO T, ATSUSHI K, YUJI M. Analytical and experimental study on structural behavior of traditional wooden frame including Kumimono [C]//15th World Conference of Earthquake Engineering, 2012.
- [11] D'AYALA D F, TSAI P H. Seismic vulnerability of historic Dieh-Dou timber structures in Taiwan [J]. Engineering Structures, 2008, 30(8): 2101-2113.
- [12] XIE Q F, TONG Y Y, ZHANG L P, et al. Seismic behavior of Chinese traditional timber frames with masonry infill wall: Experimental tests and hysteretic model [J]. International Journal of Architectural Heritage, 2019, 13: 1-15.
- [13] VIEUX-CHAMPAGNE F, SIEFFERT Y, GRANGE S, et al. Experimental analysis of seismic resistance of timber-framed structures with stones and earth infill [J]. Engineering Structures, 2014, 69: 102-115.
- [14] 梁思成. 清工部《工程做法则例》图解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 36-41.
LIANG S C. Qing ministry of works: Examples of Engineering Practices [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 36-41. (in Chinese)
- [15] 田永复. 中国古建筑知识手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
TIAN Y F. Knowledge manual of Chinese ancient architecture [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [16] 木材横纹抗压弹性模量测定方法: GB/T 1943—1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Test method for the anticompressive elastic module of transverse fiber of wood: GB/T 1943-1991 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992. (in Chinese)
- [17] 木材顺纹抗压弹性模量测定方法: GB/T 15777—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Method for determination of the modulus of elasticity in compressive parallel to grain of wood: GB/T 15777-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [18] 木材横纹抗压强度试验方法: GB 1939—1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Method of testing in tensile strength parallel to grain of wood: GB 1939-1991 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992. (in Chinese)
- [19] 木材顺纹抗压强度试验方法: GB/T 1935—1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
Test method for the compressive strength of longitudinal fiber of wood: GB/T 1935-1991 [S].

- Beijing: Standards Press of China, 1992. (in Chinese)
- [20] 木材密度测定方法: GB/T 1933—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Method for determination of the density of wood: GB/T 1933-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [21] 木材物理力学试材锯解及试样截取方法: GB/T 1929—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Method of sample logs sawing and test specimens selection for physical and mechanical tests of wood: GB/T 1929-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [22] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70-2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [23] 砌墙砖试验方法: GB/T 2542—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- Test methods for wall bricks: GB/T 2542-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [24] 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T 50129—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129-2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)

(编辑 胡玲)