

# 梁柱式胶合木结构体系抗侧力性能试验

熊海贝<sup>1</sup>, 刘应扬<sup>1</sup>, 杨春梅<sup>2</sup>, 秦惠纪<sup>3</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 苏州皇家整体住宅系统股份有限公司, 江苏 苏州 215105;  
3. 上海现代建筑设计集团有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 为研究梁柱式胶合木结构体系的抗侧力性能, 对10榀单层单跨梁柱式木框架足尺试件进行了水平荷载试验, 其中2榀为单调加载, 8榀为低周反复加载, 考虑了4种抗侧加强结构体系, 即交叉支撑、人字撑、隅撑以及填充轻木剪力墙。根据试验现象和由试验数据获得的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线、强度退化曲线、耗能曲线等研究了各抗侧力体系的变形能力、耗能能力、破坏模式等抗震性能, 结果表明, 交叉支撑、人字撑结构体系表现出良好的抗侧刚度, 但二者延性较差; 隅撑结构体系抗侧刚度较纯框架结构体系有了一定的提高, 延性好于交叉支撑、人字撑结构体系; 填充轻木剪力墙结构体系表现出良好的抗侧刚度和延性。最后, 分析了各抗侧力结构体系的薄弱部位, 并提出了改善加强措施。

**关键词:** 胶合木; 梁柱式木结构体系; 低周反复加载; 破坏模式; 抗震性能

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

phenomena, hysteresis curves, envelope curves, curves of stiffness degradation, curves of strength degradation and curves of energy dissipation. Results show that frame with X-brace system and frame with K-brace system provide much better in the elastic stiffness, but low ductility. Frame with knee-brace system has increased in the elastic stiffness in comparison with the pure post and beam frame system, and provides higher ductility in comparison with the frame with X-brace system and frame with K-brace system. Meanwhile, frame filled with light wood shear walls system performs desired elastic stiffness and ductility. Finally, improvement measures were presented based on weak parts of each structure system.

**Key words:** glued-laminated timber; timber post and beam systems; cyclic loading test; failure mode; seismic performance

## Experimental Study on Lateral Resistance of Glued-laminated Timber Post and Beam Systems

XIONG Haibei<sup>1</sup>, LIU Yingyang<sup>1</sup>, YANG Chunmei<sup>2</sup>, QIN Huiji<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Suzhou Huangjia Crownhomes Co. Ltd., Suzhou 215105, China; 3. Shanghai Modern Architectural Design Group, Shanghai 200041, China)

**Abstract:** In order to study the lateral resistance of glued-laminated timber post and beam structures, two monotonic tests and eight cyclic tests on full-scale one-storey, one-bay timber post and beam construction specimens were carried out, considering four lateral strengthened structure systems: frame with X-brace, frame with K-brace, frame with knee-brace and frame filled with light wood shear walls. Seismic performances were evaluated according to the experimental

现代梁柱式木结构多采用木材利用率高、产品性能稳定的胶合木材料, 并广泛采用了金属连接件。我国的《木结构设计规范》(GB 50005—2003)以及《胶合木结构技术规范》(GB/T 50708—2012)仅对梁柱式胶合木结构的构件设计、细部构造要求、材料选用等给出了设计建议, 但并没有对整体结构抗侧力性能的设计做出明确规定, 也无梁柱节点的设计方法, 造成实际工程设计时无章可依, 限制了工程木结构的应用和推广。美国规范 NDS for Wood<sup>[1]</sup>、加拿大规范 CSA O86<sup>[2]</sup>以及欧洲规范 Eurocode 5<sup>[3]</sup>等国外木结构规范将主要的篇幅放在梁、柱构件和不同连接件的承载力计算方面, 针对体系的规定, 特别是对体系抗侧力性能的设计鲜有提及。目前我国结构用工程木的研究和应用处于起步阶段, 尚未建立相关规范体系, 可供编制规范的试验和理论研究均缺乏。要推广梁柱式木结构在我国的应用, 首先必须完

收稿日期: 2013-09-27

第一作者: 熊海贝(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构、现代木结构及混合结构的抗震性能。E-mail: xionghaibei@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘应扬(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为现代木结构。E-mail: 12liuyingyang@tongji.edu.cn

善相关规范,为此,笔者开展了梁柱式胶合木结构体系抗侧力性能试验研究,为梁柱式木结构的设计提供理论基础和设计建议。

在梁柱式木结构体系中,由于梁柱、柱脚节点并不能做到完全刚接,导致纯框架结构体系的抗侧能力有限,文献[4-7]对梁柱式木结构节点的转动性能进行了研究。在整体结构试验研究中,文献[8-10]对梁柱式木结构纯框架的抗侧力性能进行了试验研究;文献[11]对日本常见的梁柱式木结构体系进行了试验研究,评价了 8 种结构体系的抗震性能;文献[12]分别对梁柱式木结构纯框架、轻木剪力墙结构和框架填充轻木剪力墙结构进行了试验研究;文献[13]针对梁柱与轻木剪力墙混合结构研究了填充轻木剪力墙为实体和开洞情况对混合结构抗侧力性能的影响。综合国内外的研究现状,在针对梁柱式胶合木结构体系试验研究方面,研究重点较为分散,缺乏系统性和可对比性。我国 90% 的城镇均需进行抗震设计,结构的抗侧力体系是至关重要的,为此,本文针对梁柱式木结构体系开展不同支撑形式和填充轻木剪力墙情况下单跨单榀结构的抗侧力性能试验研究,研究在反复荷载作用下的破坏模式、抗侧刚度、耗能性能等力学性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件分为纯框架结构体系和抗侧加强结构体系(包括交叉支撑、人字撑、隅撑、填充轻木剪力墙)2 类,共设计 10 榀足尺试件,跨度均为 4 110 mm,高度均为 2 740 mm,跨高比 3:2,如表 1 所示。

梁、柱、支撑构件均采用层板胶合木,木材均为加拿大进口的云杉-松-冷杉规格材,材质等级为 II 级,由苏州皇家整体住宅系统股份有限公司进行胶合,胶合后的强度等级为 TC11A。试件材料及截面尺寸见表 2。

梁柱节点、柱脚节点均采用螺栓-钢插板做法,梁柱接触处、柱与基础接触处不设置预留缝。

### 1.2 试验装置和仪器布置

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行,采用申克加载系统进行单调和低周反复加载,如图 1 所示。

申克机施加推力时,通过左侧钢板直接传力到试件;施加拉力时,先通过钢拉杆传力至右侧钢板,再由右侧钢板传力到试件,从而避免试件节点的局

表 1 试件类型

Tab.1 Specimen types

| 试件编号                 | 抗侧力体系 | 模型示意 |
|----------------------|-------|------|
| MF1<br>CF1<br>CF2    | 纯框架   |      |
| MXB1<br>CXB1<br>CXB2 | 交叉支撑  |      |
| CKB1<br>CKB2         | 人字撑   |      |
| CHB1                 | 隅撑    |      |
| CFW1                 | 轻木剪力墙 |      |

注:M表示单调加载;C表示低周反复加载;F表示梁柱式木框架;XB表示交叉支撑;KB表示人字撑;HB表示隅撑;W表示轻木剪力墙。

表 2 试件尺寸与材料

Tab.2 Materials of the specimens

| 构件                     | 截面尺寸                                       | 材料名称   |
|------------------------|--|--------|
| 梁                      | 长 280 mm、宽 180 mm                          | 层板胶合木  |
| 柱                      | 长 280 mm、宽 230 mm                          | 层板胶合木  |
| 支撑                     | 长 135 mm、宽 105 mm                          | 层板胶合木  |
| 墙面板                    | 长 3 830.0 mm、<br>宽 2 460.0 mm、<br>高 9.5 mm | 定向刨花板  |
| 墙立柱、顶梁板、<br>地梁板        | 长 38 mm、宽 89 mm                            | 规格材    |
| 梁柱、柱脚节点连接              | 6.8 级普通螺栓,<br>直径 14 mm                     | 45 号钢  |
| 支撑节点连接                 | 6.8 级普通螺栓,<br>直径 12 mm                     | 45 号钢  |
| 交叉支撑交汇节点、<br>钢插板交汇节点连接 | 8.8 级普通螺栓,<br>直径 30 mm                     | 45 号钢  |
| 钢插板                    | 厚度 10 mm                                   | Q235 钢 |

部拉坏。安装在龙门架上的钢滚轴用于限制试件平面外的变形。柱底钢板与地梁采用 8 个 M22 螺栓连接,地梁与实验室水泥台座牢固固定(CFW1 试件加载时,地梁板与下部地梁采用螺栓连接,以传递剪力)。

试验仪器布置如图 2 所示,试验测试及观察项目主要包括:①加载点的作用力,由申克机直接输出;②柱顶的水平位移,由拉线式位移计测量;③节点的相对转角,由节点处成对的位移计测量;④柱底

的拔起,由顶针式位移计测量;⑤柱底的水平滑移,由顶针式位移计测量。

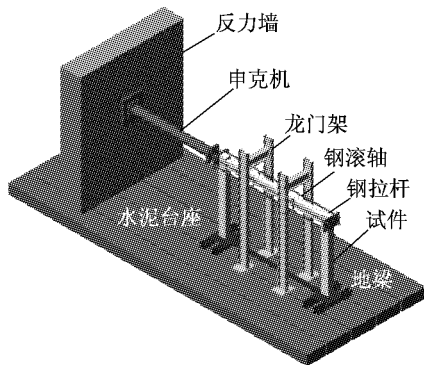


图 1 试验加载装置示意  
Fig.1 Test setup

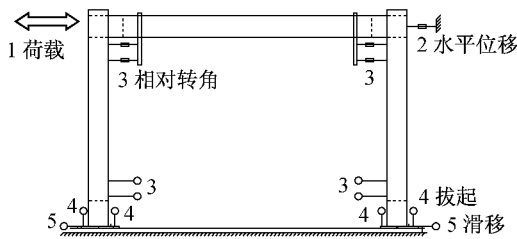


图 2 试验仪器布置示意  
Fig.2 Test instruments

### 1.3 加载制度

本文试验参考美国材料与试验协会 ASTM E2126-11 标准<sup>[14]</sup>以及其他学者研究梁柱式木结构抗侧力性能的试验方法<sup>[8-13]</sup>,不考虑竖向荷载。

低周反复试验采用位移加载,参考 ASTM E2126-11 标准中的方法 B(ISO16670 标准)所建议的位移控制加载制度实施,如图 3 所示。

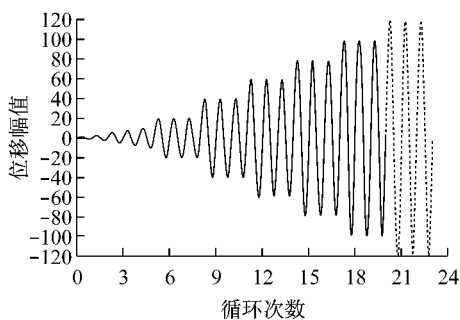


图 3 低周反复试验加载制度  
Fig.3 Cyclic test protocol

图 3 中位移幅值表示加载先采用极限位移值  $\Delta_m$  的 1.25%,2.50%,5.00%,7.50%和 10.00%依次进行 1 个循环加载,再采用极限位移值  $\Delta_m$  的 20%,40%,60%,80%,100%和 120%依次进行 3 个循环加载至结构破坏。

低周反复加载的  $\Delta_m$  根据单调加载试验<sup>[15]</sup>确定。为此,对纯框架试件 MF1 和交叉支撑框架试件 MXB1 分别进行单调加载,力-位移曲线如图 4 所示。以 MF1 的极限位移确定纯框架结构体系的极限位移值  $\Delta_{m,p}=250.0\text{ mm}$ ,以 MXB1 的极限位移确定抗侧加强结构体系的极限位移值  $\Delta_{m,s}=40.0\text{ mm}$ 。

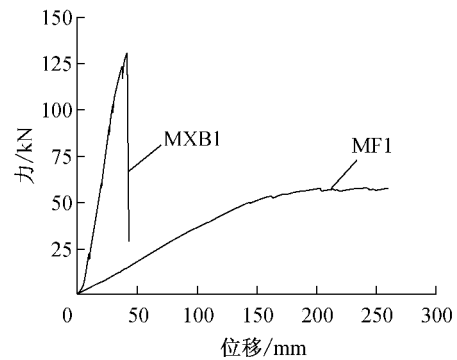


图 4 单调加载力-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of monotonic tests

规定推力为正、拉力为负。试验终止条件为:①力控制,承载力下降至极限荷载的 80%(参考 ASTM E2126-11 标准);②位移控制,结构侧向位移达到 250.0 mm(层间位移角约为 1/11,结构已不宜继续承载)。

## 2 试验现象及破坏模式

### 2.1 纯框架结构体系

2 个纯框架试件 CF1,CF2 采用相同的试件设计和材料,以 CF1 说明纯框架结构体系的试验现象及破坏模式。在低周反复荷载作用下,当侧向位移达到 25.0 mm 左右,梁柱节点、柱脚节点出现转动时的局部顶紧,位移达到 50.0 mm,柱脚节点首先出现劈裂现象,这是因为节点处螺栓与木材紧密接触,在木材横纹方向产生了拉应力,同时局部顶紧限制了柱脚转动趋势,促使了木材横纹受拉开裂;位移在 100.0~150.0 mm 时,梁端木材也发生劈裂。随着侧向位移的增大,梁端、柱脚的裂缝开展(图 5),但承载力没有明显下降,直至加载到 250.0 mm,试验终止。

### 2.2 交叉支撑结构体系

2 个交叉支撑框架试件 CXB1,CXB2 采用相同的试件设计和材料,以 CXB1 说明交叉支撑框架结构体系的试验现象及破坏模式。在加载的初期,侧向位移小于 16.0 mm 时,无明显的破坏现象,但梁柱、柱脚、支撑连接节点处木材与螺栓顶紧,发出明显的咯咯声。位移为 16.0~24.0mm 时,受压支撑出现

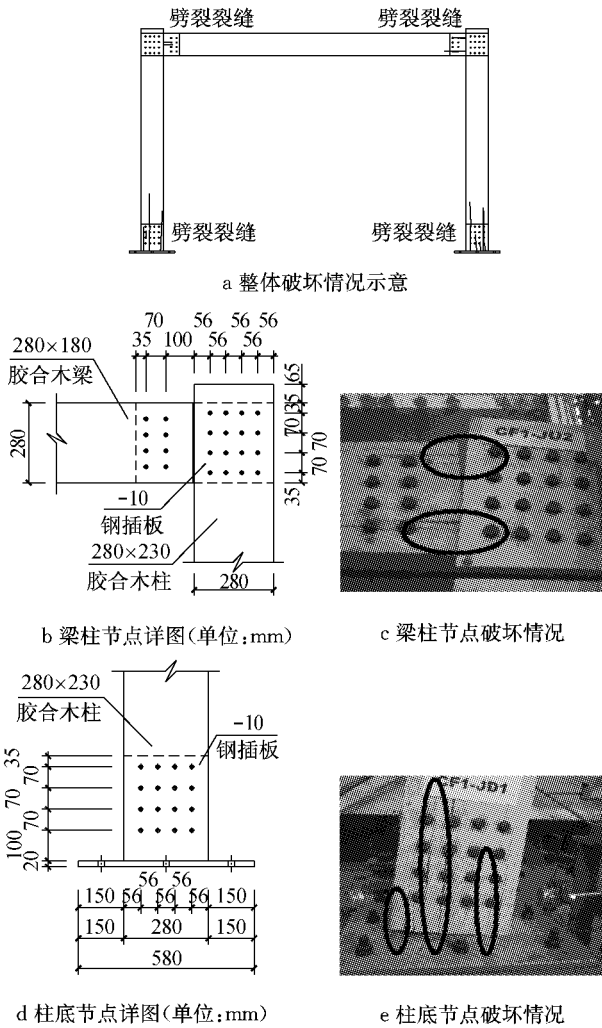


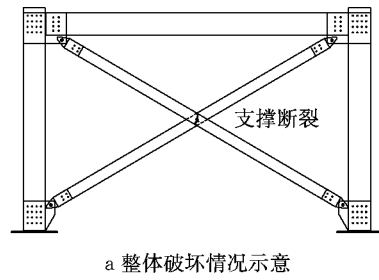
图 5 纯框架结构体系破坏模式

Fig.5 Failure modes of pure post and beam frame system

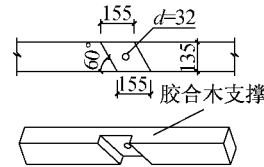
平面外变形. 加载位移幅值达到 32.0 mm 时, 在第 2 圈推力加载至 31.6 mm 时, 受拉支撑发生断裂(图 6), 承载力由 105.4 kN 变为 23.5 kN, 反向加载时另一支撑也发生了断裂, 结构已成为纯框架体系, 承载力由 -65.9 kN 变为 -34.4 kN. 第 3 圈加载, 推力峰值为 22.3 kN, 拉力峰值为 -32.8 kN, 承载力大幅度下降, 试验终止.

### 2.3 人字撑结构体系

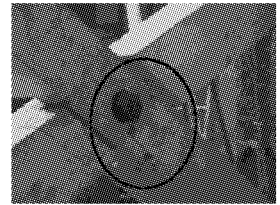
2 个人字撑框架试件 CKB1, CKB2 采用相同的试件设计和材料, 以 CKB1 说明人字撑框架结构体系的试验现象及破坏模式. 在加载的初期, 侧向位移小于 16.0 mm 时, 无明显的破坏现象, 但梁柱、柱脚、支撑连接节点处木材与螺栓顶紧, 发出明显的咯咯声. 随着侧向位移的增加, 支撑连接钢板处有轻微错动, 随后柱脚、梁端依次产生裂缝. 当位移在 56.0~64.0 mm 时, 支撑两端连接螺栓被剪断(图 7), 承载力由 128.3 kN(推力)、-130.6 kN(拉力), 分别变为 73.5 kN, -66.7 kN, 试验终止.



a 整体破坏情况示意

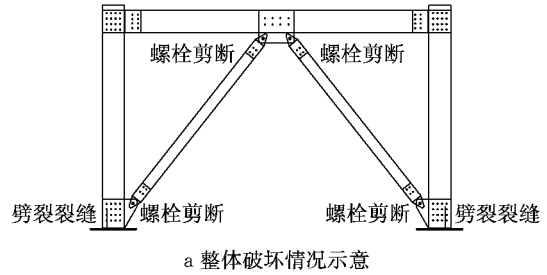


b 支撑交汇详图(单位:mm)

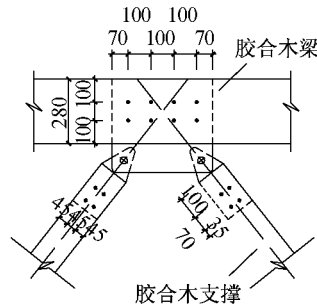


c 支撑破坏情况

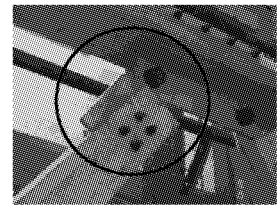
图 6 交叉支撑结构体系破坏模式  
Fig.6 Failure mode of frame with X-brace system



a 整体破坏情况示意



b 支撑与梁交汇详图(单位:mm)



c 支撑破坏情况

图 7 人字撑结构体系破坏模式  
Fig.7 Failure mode of frame with K-brace system

### 2.4 隅撑结构体系

隅撑框架试件 CHB1 的破坏模式与 CKB1 类似, 不同的是, 支撑连接螺栓在剪断后, 钢插板并未脱离木框架, 通过顶紧作用, 受压支撑仍在传力(图 8), 结构的承载力缓慢下降, 相比于 CKB1, 表现出了一定的延性.

### 2.5 填充轻木剪力墙结构体系

填充轻木剪力墙框架试件 CFW1 在反复荷载作用下, 随着侧向位移的增加, 钉连接破坏; 钉节点退出工作的同时, 面板与墙骨柱有剥离现象, 面板间产生相互错动(图 9). 在后续的加载过程中, 剪力墙与框架协同工作, 维持了结构的承载力, 表现出较好的

延性.

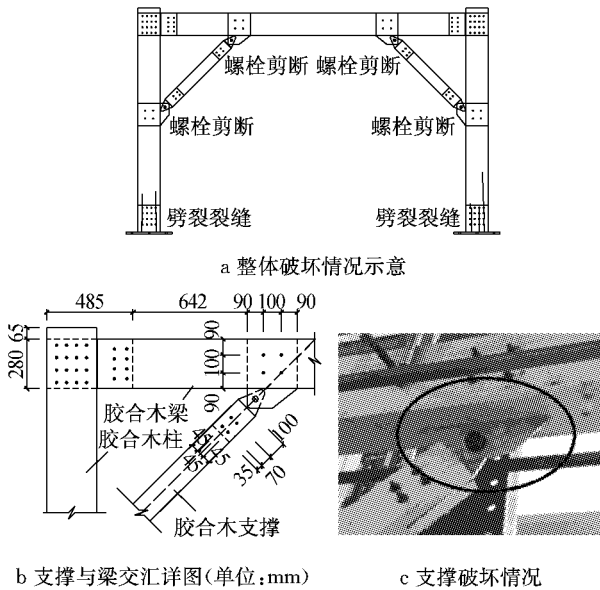


图 8 隅撑结构体系破坏模式

Fig.8 Failure mode of frame with knee-brace system

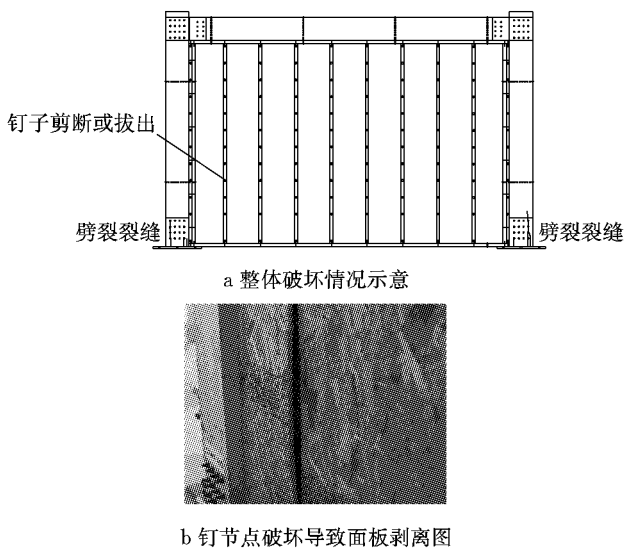


图 9 填充轻木剪力墙结构体系破坏模式

Fig.9 Failure mode of frame filled with light wood shear walls system

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 滞回曲线

框架在反复荷载作用下的滞回曲线可以反映结构的整体抗震性能,各试件的滞回曲线如图 10 所示.从图中可以看出:

(1) 各试件的滞回曲线都表现出捏拢现象,这是因为在反复荷载作用下,螺栓与木材相互挤压使木材出现顺纹、横纹方向的永久变形,导致节点连接

在受力时发生滑移.

(2) 纯框架结构体系在整个试验过程中表现出较低的抗侧刚度和承载力,不宜单独作为抗侧力结构体系.

(3) 交叉支撑、人字撑结构体系的抗侧刚度和承载力相比纯框架结构体系有了明显的提升,但是结构的延性较差.

(4) 隅撑结构体系的抗侧刚度和承载力相比纯框架结构体系有了一定的提升,延性相比交叉支撑、人字撑结构体系有了一定的改善.

(5) 填充轻木剪力墙结构体系的承载力与隅撑结构体系大致相同,表现出良好的延性,初始刚度和耗能能力较隅撑结构体系有了明显的提高.

#### 3.2 各试件主要力学性能参数

各试件反复加载的骨架曲线如图 11 所示.通过平均骨架曲线(正骨架曲线与负骨架曲线的绝对值取平均值)确定各结构的峰值荷载  $P_{peak}$  及相应峰值位移  $\Delta_{peak}$ 、结构破坏时的极限位移  $\Delta_u$  及相应的极限荷载  $P_u$ .通过基于能量等效的理想弹塑性(EEEP)方法<sup>[14]</sup>,定义结构的屈服荷载  $P_{yield}$ 、屈服位移  $\Delta_{yield}$ ,如图 12 所示.各试件主要力学性能参数如表 3 所示,定义结构的弹性阶段刚度  $K_e = P_{yield} \cdot (\Delta_{yield})^{-1}$ ,最大弹性位移角  $\theta_e = \Delta_{yield} \cdot h^{-1}$  ( $h = 2\ 740\text{ mm}$ ),延性系数  $D = \Delta_u \cdot (\Delta_{yield})^{-1}$ .

表 3 中纯框架、交叉支撑、人字撑结构体系的力学性能参数分别取 2 个试件的平均值进行评价,从表中可以看出:

(1) 极限承载力.纯框架结构体系为 55.0 kN;人字撑结构体系的极限承载力最大,为纯框架结构体系的 2.3 倍;交叉支撑、隅撑和填充轻木剪力墙结构体系次之,分别为纯框架结构体系的 1.8 倍、1.5 倍和 1.4 倍.

(2) 弹性阶段刚度.纯框架结构体系为  $0.4\text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;交叉支撑结构体系的弹性阶段刚度最大,为纯框架结构体系的 9.0 倍;人字撑、填充轻木剪力墙和隅撑结构体系分别为纯框架结构体系的 6.8 倍、6.4 倍和 1.8 倍.

(3) 最大弹性层间位移角.交叉支撑、人字撑和填充轻木剪力墙结构体系分别为 1/91、1/51 和 1/87.国内《门式钢架轻型房屋钢结构技术规范 CECS 102:2002》中规定单层门式刚架的柱顶位移角的限值在“无吊车、当采用轻型钢墙板时”取 1/60,在“无吊车、当采用砌体墙时”取 1/100;北美地区关于对轻型木结构的层间位移角限值,在小震时取 1/100、中

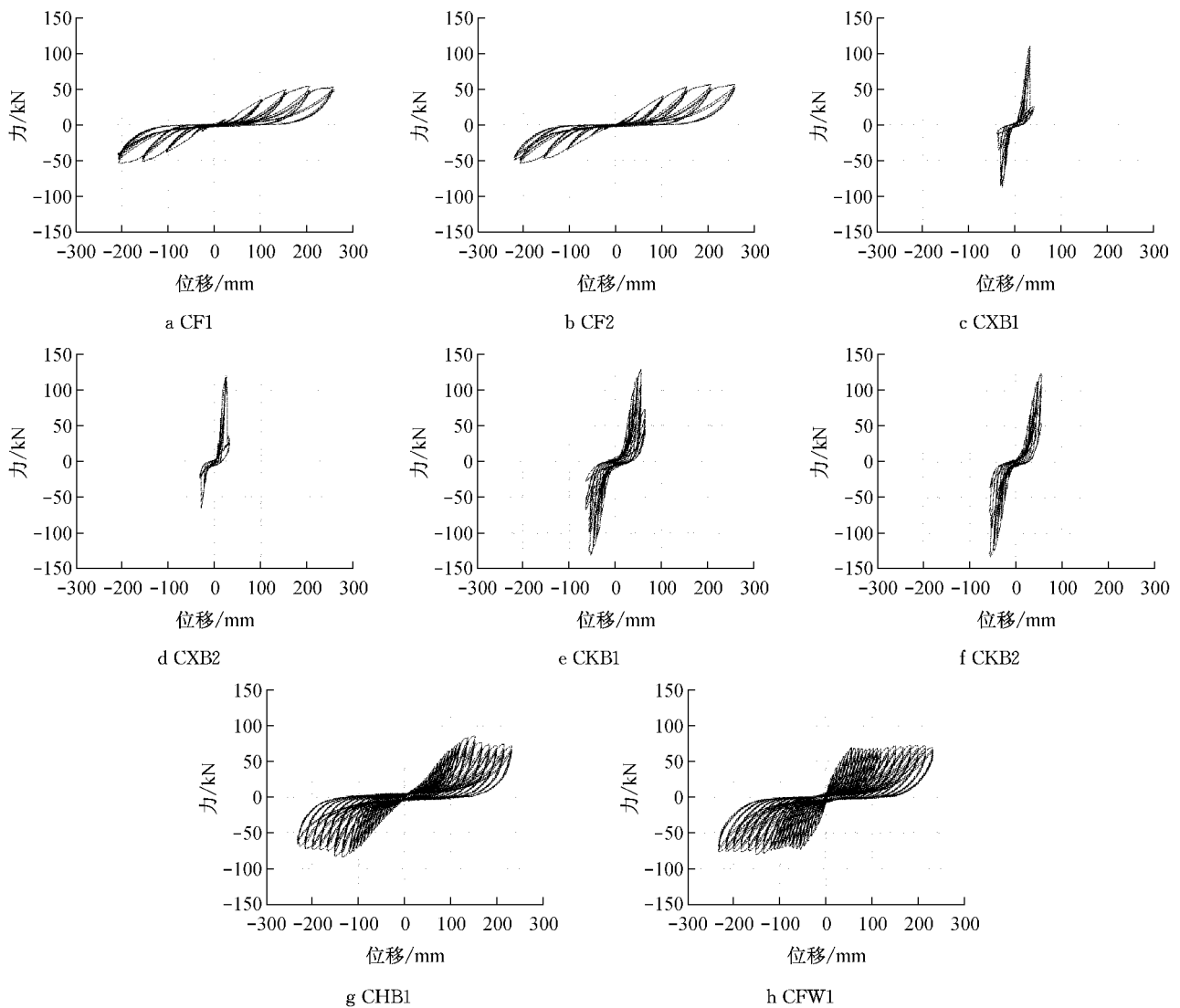


图 10 滞回曲线

Fig.10 Hysteresis curves

表 3 试件主要力学性能参数

Tab.3 Mechanical performance parameters

| 结构体系  | 编号   | $P_{peak}/kN$ | $\Delta_{peak}/mm$ | $P_u/kN$ | $\Delta_u/mm$ | $P_{yield}/kN$ | $\Delta_{yield}/mm$ | $K_e/(kN \cdot mm^{-1})$ | $\theta_e$ | $D$ |
|-------|------|---------------|--------------------|----------|---------------|----------------|---------------------|--------------------------|------------|-----|
| 纯框架   | CF1  | 54.5          | 204.7              | 53.1     | 260.0         | 52.8           | 155.0               | 0.3                      | 1/18       | 1.7 |
|       | CF2  | 55.5          | 207.5              | 55.3     | 258.9         | 53.7           | 154.1               | 0.4                      | 1/18       | 1.7 |
| 交叉支撑  | CXB1 | 98.9          | 31.4               | 27.6     | 31.9          | 98.9           | 31.4                | 3.2                      | 1/87       | 1.0 |
|       | CXB2 | 92.8          | 29.3               | 25.2     | 31.5          | 92.8           | 29.3                | 3.2                      | 1/94       | 1.1 |
| 人字撑   | CKB1 | 129.5         | 54.8               | 70.1     | 63.6          | 129.4          | 53.9                | 2.4                      | 1/51       | 1.2 |
|       | CKB2 | 128.1         | 54.9               | 45.0     | 55.8          | 128.1          | 54.8                | 2.3                      | 1/50       | 1.0 |
| 隅撑    | CHB1 | 84.9          | 142.7              | 70.3     | 228.4         | 78.6           | 123.6               | 0.6                      | 1/22       | 1.9 |
| 轻木剪力墙 | CFW1 | 76.9          | 167.4              | 73.1     | 231.5         | 70.8           | 31.6                | 2.2                      | 1/87       | 7.3 |

震时取 2/100、大震时取 3/100<sup>[16-18]</sup>。综合上述规范，可以认为交叉支撑、人字撑、填充轻木剪力墙的结构体系可满足一般建筑正常使用状态的要求。

(4) 纯框架结构体系的最大弹性层间位移角为 1/18，在弹性阶段变形过大。若在设计中考虑位移控制，在层间位移角为 1/100 和 1/50 时，承载力为 8.9 kN 和 18.5 kN，承载能力较弱，故纯框架结构体系

不适宜单独作为抗侧力结构体系，应辅以抗侧加强措施。

(5) 隅撑结构体系相比纯框架结构体系，在弹性阶段刚度提高了 83%，屈服位移减小了 20%，在抗侧能力方面有了一定的改善，但最大弹性层间位移角为 1/22，在弹性阶段的变形仍较大；在层间位移角为 1/100 和 1/50 时，承载力为 18.5 kN 和 35.0

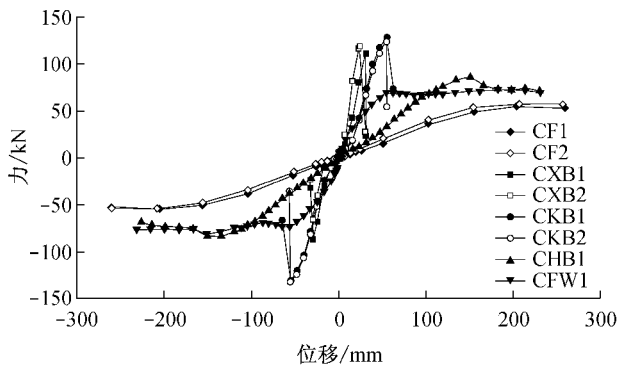


图 11 骨架曲线

Fig.11 Envelope curves of specimens

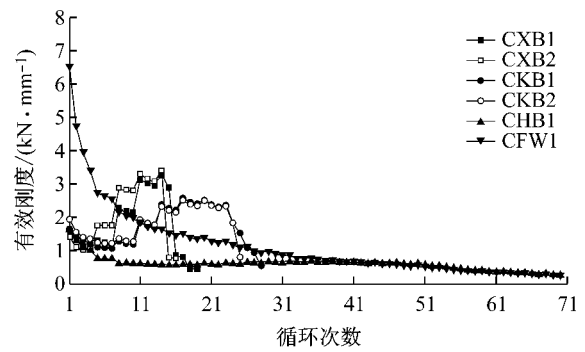


图 13 有效刚度曲线

Fig.13 Secant stiffness curves

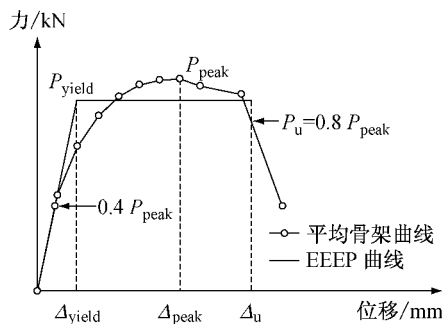


图 12 基于能量等效的理想弹塑性曲线

Fig.12 Equivalent energy elastic-plastic curves

kN,建议采用位移控制设计。

(6) 延性系数. 交叉支撑、人字撑结构体系延性最差,延性系数约为 1.0;纯框架结构体系弹性阶段变形过大,导致延性系数较小,为 1.7;隅撑结构体系相比纯框架结构体系,在抗侧刚度提升的基础上延性也有所改善,延性系数为 1.9;填充轻木剪力墙结构的延性系数为 7.3,为纯框架结构体系的 4.4 倍。

### 3.3 刚度退化

为反映在反复荷载作用下结构的刚度,以割线刚度来表示结构的有效刚度<sup>[19]</sup>,第  $i$  次有效刚度定义如下:

$$k_i = \frac{|F_i^+| + |F_i^-|}{|X_i^+| + |X_i^-|} \quad (1)$$

式中: $F_i^+$ ,  $F_i^-$  分别为第  $i$  次循环的正、负方向峰值荷载; $X_i^+$ ,  $X_i^-$  分别为第  $i$  次循环的正、负方向峰值位移。

各试件在反复荷载下的有效刚度曲线如图 13 所示。从图 13 中可以看出:

(1) 对比各结构体系的初始刚度,交叉支撑、人字撑、隅撑结构体系大致相同,约为  $1.6 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;填充轻木剪力墙结构体系最高,为  $6.5 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

(2) 填充轻木剪力墙结构体系的初始刚度由轻

木剪力墙提供,随着加载的进行,钉节点相继退出工作,轻木剪力墙的刚度迅速下降,故结构的刚度在试验初期下降较快;在试验后期,刚度由木框架提供,梁、柱构件的劈裂是刚度下降的主要原因,而木材局部劈裂对整体刚度的削减相对较弱,故结构的刚度在试验后期缓慢下降。

(3) 交叉支撑、人字撑结构体系的刚度随位移的增加有上升现象. 这是由于木材与螺杆在初期的接触时会有一定的横纹方向压缩,随后木材被顶紧后,下一级的加载时刚度会有一定的上升,由于结构在线性阶段即发生破坏,故未出现刚度下降的现象。

### 3.4 强度退化

强度退化是指在位移幅值不变的条件下,结构构件承载力随着反复加载次数的增加而降低的特性. 当框架结构受到一定的地震作用后,其强度有退化现象,若在震后发生余震或者小震,可能使结构发生破坏. 以同级荷载强度退化系数来表示<sup>[19]</sup>,同级荷载强度退化系数定义如下:

$$\lambda = F_{\min}/F_{\max} \quad (2)$$

式中: $F_{\min}$  为同级位移幅值下最后一次循环的峰值荷载; $F_{\max}$  为同级位移幅值下第 1 次循环的峰值荷载。

各级位移幅值下强度退化系数构成的曲线可以反映结构总体的强度退化趋势,各试件强度退化曲线如图 14 所示. 从图 14 中可以看出:

(1) 各组试件均表现出强度退化现象,这是由于前一级加载时节点处木材产生了不可恢复的横纹变形和劈裂;隅撑结构体系强度退化趋势明显;交叉支撑、人字撑结构体系在弹性阶段即发生了破坏,强度退化趋势不明显;填充轻木剪力墙结构体系在加载初期强度退化趋势明显。

(2) 各组试件在发生破坏之前强度退化均小于 20%,表明了梁柱式木结构在大震作用后若结构未发生破坏,在随后的余震或者小震中可以提供可靠的承载力。

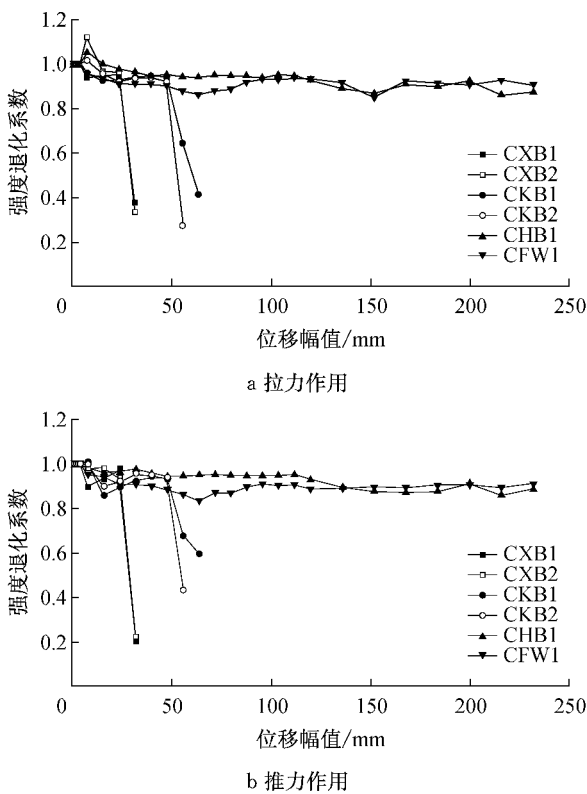


图 14 强度退化曲线

Fig. 14 Strength degradation curves

### 3.5 耗能能力

耗能作为衡量结构抗震性能的重要指标,可以用滞回曲线所包围面积的总和来衡量,其综合反映了结构刚度、延性等因素.梁柱式木结构框架的耗能主要来源于构件之间的摩擦、螺栓的变形、木材的变形和劈裂.

各试件耗能与柱顶总位移之间的关系如图 15.从图 15 中可以看出,填充轻木剪力墙和隔撑结构体系的耗能好于其他结构体系;交叉支撑、人字撑结构体系在小位移时即发生破坏,耗能能力差.

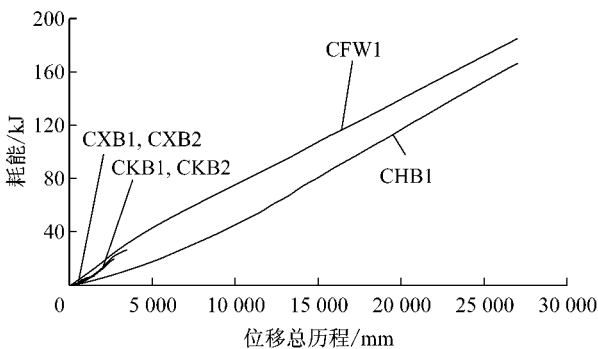


图 15 试件累计耗能

Fig. 15 Cumulative energy dissipation of specimens

每个加载循环的耗能情况如图 16,由图可见:

(1) 在整个加载过程中,交叉支撑、人字撑结构

体系的耗能峰值出现得较早,这与结构破坏发生在小位移有关.

(2) 隔撑、填充轻木剪力墙结构体系随着位移的增加,每个加载循环的耗能有上升的趋势,侧向位移越大,能量耗散随之提高,在地震中可以表现出较好的耗能能力.

(3) 填充轻木剪力墙结构体系在加载初期,耗能能力好于隔撑结构体系,这是由于钉节点作为耗能元件提供了结构的能量消耗;在加载后期,结构的主要能量消耗由梁、柱构件开裂提供,与隔撑结构体系类似,故后期耗能能力与隔撑结构体系大致相同.

(4) 大位移时结构的耗能显著增加,这是由于梁、柱构件发生了劈裂,释放了大量的弹性应变能,而在同一位移幅值的第 2 次、第 3 次循环时,因为没有新的裂缝产生,所以耗能下降明显.由此可见,大位移时梁、柱构件的劈裂是结构耗能的主要来源.

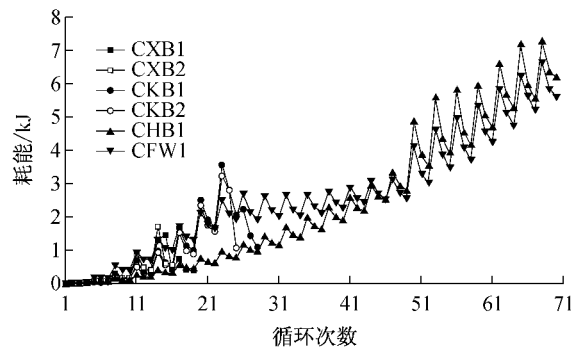


图 16 试件各加载循环耗能

Fig. 16 Energy dissipation characteristics within each cycle group of specimens

## 4 结论

基于对试验现象的观察以及对试验数据的分析,可以得到以下结论:

(1) 纯框架结构体系的弹性阶段刚度过小,不适宜单独作为抗侧力结构体系,应辅以抗侧加强措施.

(2) 交叉支撑结构体系抗侧刚度大,但是支撑构件过长,易屈曲,且支撑相交处不易处理,可以考虑以钢拉杆等替代木支撑;人字撑结构体系抗侧刚度大,并且有效地减小了支撑的长度,支撑连接也较易处理,但是与交叉支撑相类似,结构的延性较差.

(3) 隔撑结构体系相比纯框架结构体系抗侧刚度提高,有效地控制了结构的侧向位移,但在弹性阶段的变形仍较大,建议采用位移控制设计;填充轻木



剪力墙框架结构体系初始的刚度主要由轻木剪力墙提供,弹性阶段抗侧刚度较大,并且表现出良好的延性。

(4) 各组试件在发生破坏之前,强度退化均小于 20%,表明了梁柱式木结构在大震作用后若结构未发生破坏,在随后的余震或者小震中可以提供可靠的承载力。

(5) 填充轻木剪力墙结构体系在加载初期,钉节点作为耗能元件提供了结构的能量消耗,在加载后期,墙板之间、墙板与框架之间的摩擦以及梁、柱构件的开裂提供了能量耗散,耗能能力好于其他结构体系。

#### 参考文献:

- [ 1 ] American Wood Council. National design specification for wood construction[S]. Washington D C: American Wood Council, 2005.
- [ 2 ] Canadian Standards Association. CSA O86 Engineering design in wood[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2001.
- [ 3 ] European Committee for Standardisation. Eurocode 5 Design of timber structures [S]. Brussels: European Committee for Standardisation, 2004.
- [ 4 ] Andreolli M, Piazza M, Tomasi R, *et al.* Ductile moment-resistant steel-timber connections [J]. Structures and Buildings, 2011, 164(2): 65.
- [ 5 ] Lam F, Gehloff M, Cloßen M. Moment-resisting bolted timber connections [J]. Structures and Buildings, 2010, 163(4): 267.
- [ 6 ] Gattesco N, Toffolo I. Experimental study on multiple-bolt steel-to-timber tension joints [J]. Material and Structures, 2004, 37(2): 129.
- [ 7 ] Moses D M, Prion H G L. A three-dimensional model for bolted connections in wood [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, 30(3): 555.
- [ 8 ] Kohara K. A study on experiment and structural design for timber rigid frame [C]//Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Portland: WCTE, 2006: 295-302.
- [ 9 ] Komatsu K, Hosokawa K, Hattori S. Development of ductile and high-strength semi-rigid portal frame composed of mixed-species glulams and h-shaped steel gusset joints [C]//Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Portland: WCTE, 2006: 303-310.
- [10] Noguchi M, Komatsu K, Komatsu K. Development of wooden portal frame structures with improved columns [C]//Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Portland: WCTE, 2006: 311-318.
- [11] Li M, Lam F. Seismic reliability analysis of diagonal-braced and structural-panel-sheathed wood shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(5): 587.
- [12] HE Minjuan, LU Tao. Research on lateral performance of hybrid structure based on post-beam construction and light wood frame construction [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Multimedia Technology (ICMT). Hangzhou: ICMT, 2011: 4523-4527.
- [13] Shim K B, Hwang K H, Park J S. Lateral load resistance of hybrid wall[C]//Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Trentino: WCTE, 2010: 3166-3169.
- [14] ASTM International. ASTM E2126-11 Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of vertical elements of the lateral force resisting systems for buildings [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [15] ASTM International. ASTM E564-06 Standard practice for static load test for shear resistance of framed walls for buildings [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [16] Structural Engineers Association of California. Recommended lateral force requirements and commentary[S]. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1996.
- [17] American Society of Civil Engineering. Seismic rehabilitation standard [S]. New York: American Society of Civil Engineering, 2006.
- [18] Federal Emergency Management Agency. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington D C: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [19] 中华人民共和国建设部. JGJ101—1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ101—1996 Specifying of testing methods for earthquake resistant building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.