

# 碳纤维布加固梁柱式胶合木结构抗侧性能试验

熊海贝, 刘应扬, 姚 亚, 李冰阳

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究震损梁柱式胶合木结构在节点外包碳纤维布加固后的抗侧力性能, 对 3 榀单层单跨梁柱式木框架足尺试件进行了低周反复加载试验. 试验首先通过低周反复加载模拟框架结构的地震损伤, 其后用碳纤维布进行节点加固, 并进行与前期相同的低周反复加载试验. 结果表明, 碳纤维布加固方法可以有效抑制裂缝开展, 恢复受损结构的强度、刚度、延性等抗侧力性能, 改善耗能能力.

**关键词:** 抗震加固; 梁柱式木结构; 碳纤维布; 低周反复加载

**中图分类号:** TU366.2

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Lateral Resistance of Timber Post and Beam Structures Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer

XIONG Haibei, LIU Yingyang, YAO Ya, LI Bingyang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the lateral resistance of glued-laminated timber post and beam structures strengthened with carbon fiber reinforced polymer, cyclic tests on three full-scale one-storey, one-bay timber post and beam construction specimens were carried out. The experimental program includes cyclic test, retrofitted by carbon fiber reinforced polymer (CFRP) at the end of post and beam and retest of using the same protocol of cyclic loading. The test result shows that the CFRP retrofitting approach can restrain the development of crack, recover the lateral resistance such as strength, stiffness and ductility of the damaged structures and improve energy dissipation capacity.

**Key words:** seismic strengthening; timber post and beam structures; carbon fiber reinforced polymer; cyclic test

用梁架支撑屋顶的结构形式. 现代梁柱式木结构多采用胶合木柱、胶合木梁, 节点多采用螺栓-钢插板连接, 应用于住宅、办公、商业、体育等建筑中. 在地震作用下, 木结构梁柱节点及柱脚节点木材易发生劈裂<sup>[1]</sup>, 导致承载力下降, 因此有必要对其加固方法和受力特性进行研究.

对于木结构加固方法的研究, 主要有碳纤维布(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)加固、玻璃纤维布(glass fiber reinforced polymer, GFRP)加固、设斜撑法、加钉法、嵌缝加箍法<sup>[2]</sup>、自攻螺丝加固<sup>[3]</sup>等方法, 这些方法中又以纤维布加固的研究居多. Brunner<sup>[4]</sup>和杨会峰<sup>[5]</sup>等进行了 CFRP 布加固胶合木梁的试验, 试验表明加固后梁的抗弯刚度和承载力均有所提高; 姬卓等<sup>[6]</sup>研究了 CFRP 布不同粘贴方式和层数对木梁的加固效果; César Echavarría 等<sup>[7]</sup>采用 CFRP, GFRP, 金属板, 竹纤维等加固胶合木梁, 比较了不同材料加固木梁对于强度和刚度的提高程度; Taheri<sup>[8]</sup>进行了 CFRP 加固胶合木柱的试验, 试验表明加固后构件极限承载力提高了 60%~70%; 郑涌林等<sup>[9]</sup>对 21 根 GFRP 加固的木柱构件进行了轴心受压试验, 改变纵横向加固方式、加固量、构件长细比、截面形式等因素, 考察其对加固效果影响. 综合国内外的研究现状, 在针对纤维布加固木结构研究方面, 研究重点多集中在木柱、木梁等构件加固层面; 而对于梁柱式胶合木结构体系, 其在低周反复加载下梁柱及柱脚节点木材易横纹受拉, 导致劈裂破坏, 这与木柱顺纹受压破坏及木梁顺纹受拉破坏有所不同. 为此, 本文针对震损梁柱式胶合木结构, 开展在碳纤维布加固下单跨单榀结构的抗侧力性能试验研究, 通过对比分析, 研究震损结构加固后在反复荷载作用下的破坏模式、抗侧刚度、耗能能力等力学性能.

梁柱式木结构是以木构柱架为承重骨架, 并采

收稿日期: 2014-10-04

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

图 1 节点加固详图(单位:mm)  
Fig.1 Details of joint retrofit (unit: mm)

度.值得说明的是本试验中结构胶的作用主要是闭合裂缝,恢复梁、柱构件节点的劈裂变形.加固后力学性能的恢复主要依靠外包碳纤维布实现.③将碳纤维布裁成相应尺寸,避开螺栓孔,在节点处刷胶粘剂,外包碳纤维布,养护直到胶起强度.图 2 为柱脚

节点加固前后的对比图.

本试验应用的碳纤维布是由上海怡昌碳纤维材料有限公司提供的同固牌碳纤维布,该碳纤维布的材料参数见表 3.

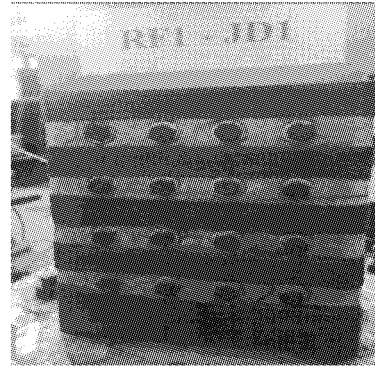
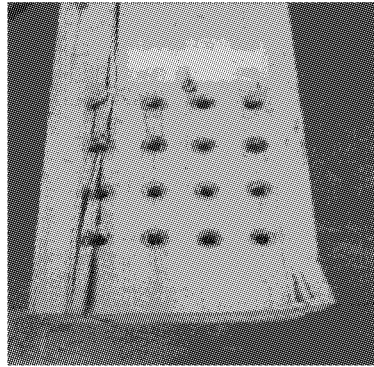


图 2 柱脚节点加固前后效果图

Fig.2 Pictures of joint of column bases before and after retrofit

表 3 碳纤维布材料参数

Tab.3 Details of carbon fiber reinforced polymer

材料名称	单位面积质量/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	抗拉强度标准 值/MPa	受拉弹性模 量/MPa	弯曲强度/ MPa	层间剪切强 度/MPa	伸长率/%
碳纤维布	298	3 910	$2.44 \times 10^5$	765	49	1.7

### 1.3 试验装置及加载制度

试验采用申克牌液压伺服加载设备对框架模型进行低周反复加载,申克机的设计推力为 $\pm 630 \text{ kN}$ ,位移量程为 $\pm 250 \text{ mm}$ .试验加载装置如图 3 所示.预加载和再加载制度均采用位移控制加载,即先采用极限位移值  $\Delta_m$  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,如图 4 所示.

极限位移值  $\Delta_m$  根据单调加载试验<sup>[1]</sup>确定.纯框架结构体系  $\Delta_m = 250.0 \text{ mm}$ , 隅撑结构体系  $\Delta_m = 40.0 \text{ mm}$ .

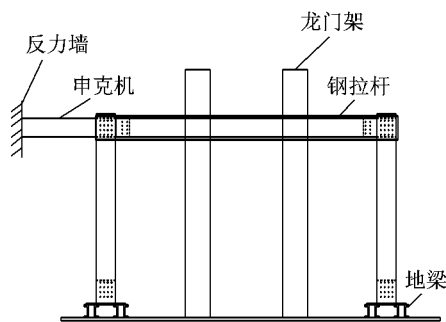


图 3 试验加载装置示意图

Fig.3 Test setup

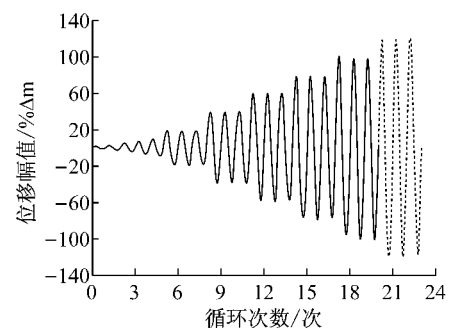


图 4 低周反复试验加载制度

Fig.4 Test protocol

## 2 试验现象

### 2.1 纯框架加固前后对比

CF1 在位移加载到 52 mm 时,柱脚即出现顺纹

裂缝,此后柱脚裂缝不断发展,梁端也出现裂缝;而经过加固后的 RF1 直到加载至极限位移,也只有柱脚最下端和梁的最末端约 10 mm 未被碳纤维布覆盖到的部分出现了木材劈裂,这些细小的劈裂裂缝发展到最下一层碳纤维布处即停止.图 5 为加固前

后纯框架试件柱脚节点裂缝开展图,可见节点区域外包碳纤维布可以有效抑制裂缝开展。

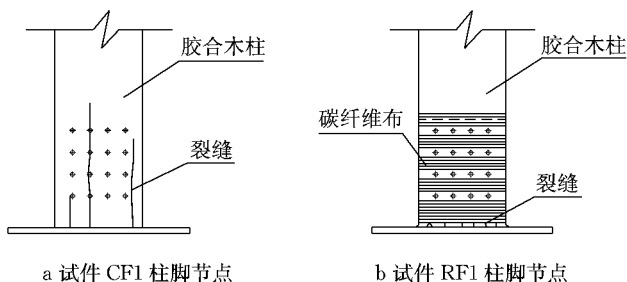


图 5 加固前后试件裂缝开展

Fig. 5 Development of crack before and after retrofit

## 2.2 框架-隅撑体系加固前后对比

CHB1 和 RHB2 梁柱及柱脚节点损坏情况与上

述纯框架试件基本一致,即 CHB1 梁柱及柱脚节点开裂严重,RHB2 由于外包碳纤维布节点区域裂缝没有开展.这 2 榀框架支撑的破坏模式右侧相似,均是支撑与梁连接处钢板平面外屈曲(图 6a),支撑劈裂,支撑上螺栓被剪断,导致右侧支撑退出工作.左侧略有不同,CHB1 柱脚的一条裂缝发展成为贯通柱身的大裂缝(图 6b),支撑未破坏,而 RHB2 则是梁与支撑连接节点处梁沿横纹方向出现裂缝(图 6c).由此可见,柱脚裂缝得到抑制后有利于支撑更好的发挥作用.此外,对于隅撑体系,当柱脚及梁柱节点得到加固后,若是支撑强于框架与支撑连接节点,框架与支撑连接节点反而会成为新的薄弱点,设计时应留意这一点,考虑适当加固框架与支撑连接节点或者控制支撑强度。

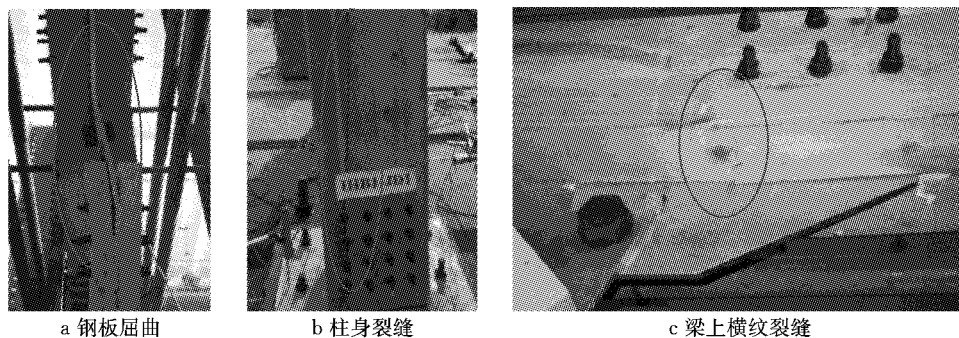


图 6 隅撑体系试件破坏模式

Fig. 6 Failure mode of frame with knee-brace system

## 2.3 增设隅撑效果对比

设隅撑的 RHB1 和 RHB2 这两榀试件的试验现象基本相同,抗侧性能相当,远好于未设隅撑的纯框架加固试件 RF1.在实际工程中,对于纯框架结构体系,可以考虑碳纤维布加固后,在梁柱中部开槽增设隅撑加强(图 7),从而进一步提高结构的抗侧承载能力。

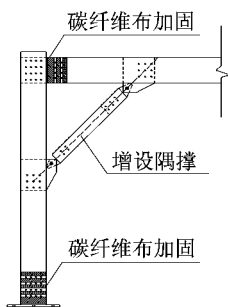


图 7 纯框架改为隅撑体系加固示意图

Fig. 7 Diagram of retrofit from pure frame system to frame with knee-brace system

## 3 试验结果与分析

### 3.1 荷载位移曲线

框架在水平荷载下的滞回曲线形状是其抗震性能的一个综合表现.图 8 为 3 榀试件加固前后低周反复试验的滞回特性。

通过滞回曲线的外包络线绘制得到其骨架曲线,骨架曲线能够较明确地反映结构的强度、变形等性能.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(承载力下降至峰值荷载的 80%)的极限位移  $\Delta_u$  及相应的极限荷载  $P_u$ 。

图 9 为上述三个试件在预损试验和加固后二次加载试验中的平均骨架曲线对比,表 4 列出了加固前后试件峰值及对应位移,从图 9 及表 4 可以看出:

(1) 纯框架结构体系原试件(CF1)的极限承载力(即峰值荷载)为 55.5 kN,加固后(RF1)为

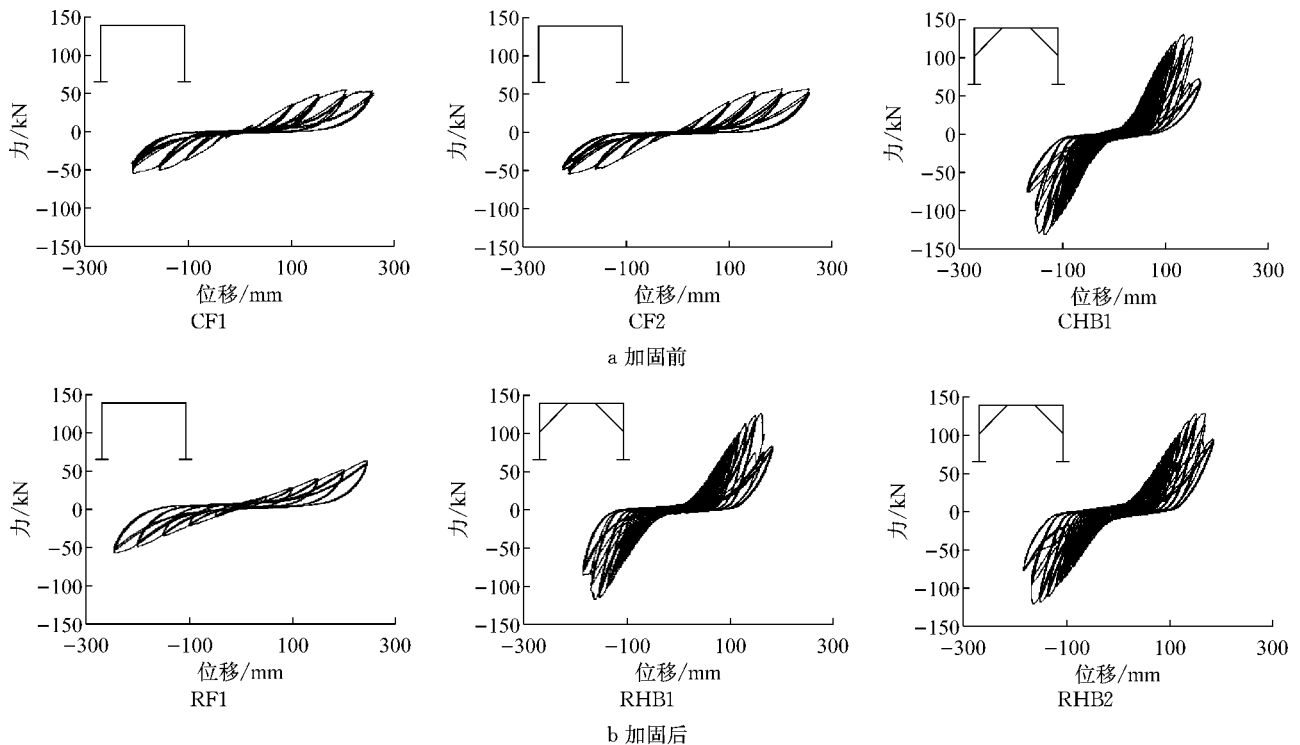


图 8 滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves

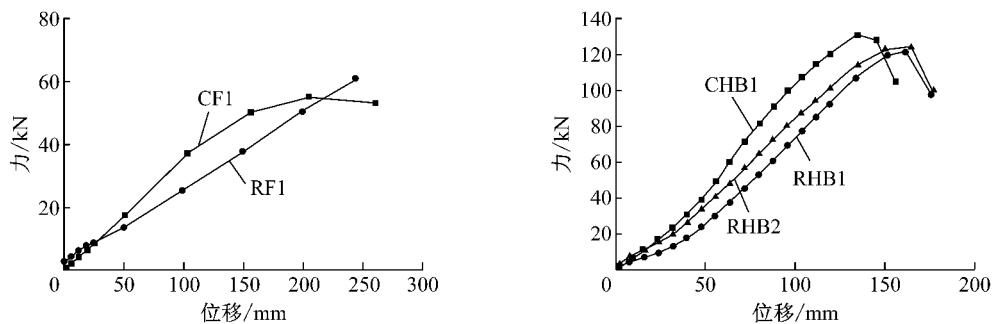


图 9 加固前后试件的平均骨架曲线

Fig.9 Average skeleton curves of specimens before and after retrofit

表 4 加固前后试件强度表

Tab.4 Strength of specimens before and after retrofit

结构体系	编号	$P_{peak}/kN$	$\Delta_{peak}/mm$
纯框架	CF1	55.5	207.5
	CF2	54.5	204.7
	RF1	60.3	243.8
隅撑	CHB1	130.8	134.9
	RHB1	121.7	161.7
	RHB2	123.9	164.7

60.3 kN, 加固后试件直到加载至极限位移仍然未出现屈服, 其极限承载力仍有一定的提升空间。

(2) 隅撑结构体系原试件 CHB1 的极限承载力为 130.8 kN, 加固后试件 RHB1 为 122.8 kN, RHB2 为 123.9 kN, 加固后承载力恢复到原试件承载力的 95%, 基本得到恢复。隅撑结构体系加固后试件极限承载力略低于原试件, 这是因为隅撑结构体

系试件的极限承载力主要由支撑强度决定。加固试件与原试件的支撑构件相同, 但支撑与柱、梁连接处的槽、孔有差异。原试件为工厂预制, 机器开槽开孔, 而加固试件 RHB1 为现场人工开槽开孔, 误差较大, 加固试件 RHB2 的槽和孔在预加载试验中挤压变形, 这些误差及变形导致加固后试件的支撑强度低于原试件, 故隅撑结构体系加固后试件极限承载力也略低于原试件。

### 3.2 变形能力

延性是指材料、截面、构件或整个结构的变形超过其弹性范围以后在承载能力没有显著下降情况下承受变形的能力。本试验中纯框架结构体系加固后试件直到加载至极限位移仍处于弹性阶段, 未出现明显屈服段, 因此纯框架体系试件的延性不做比较。

对于隅撑结构体系,延性采用美国材料与试验协会 ASTM E2126-11 标准进行分析,延性系数定义为  $D=\Delta_u/\Delta_{yield}$ . 由于隅撑结构的平均骨架曲线在  $0.4P_{peak}$  处的斜率均小于  $P_{peak}$  处的斜率,为此屈服点取其试件结构性能出现明显变化的点,即试件刚度下降 5% 或者更多的点<sup>[10]</sup>. 经计算,CHB1, RHB1, RHB2 在其峰值荷载点之后刚度才发生明显变化,因此 CHB1, RHB1, RHB2 的屈服点与其峰值点一致,即  $P_{yield}=P_{peak}$ ,  $\Delta_{yield}=\Delta_{peak}$ . 由表 5 可见,隅撑结构体系加固前试件 CHB1 延性系数为 1.15,加固后试件 RHB1 为 1.09, RHB2 为 1.07,延性基本得到恢复.

表 5 隅撑体系试件延性系数表

Tab. 5 Ductility ratio of frame with X-brace system specimens

结构体系	编号	$P_u/kN$	$\Delta_u/mm$	$P_{yield}/kN$	$\Delta_{yield}/mm$	$D$
隅撑	CHB1	104.6	155.4	130.8	134.9	1.15
	RHB1	97.3	176.0	121.7	161.7	1.09
	RHB2	99.1	176.9	123.9	164.7	1.07

### 3.3 刚度退化

为反映结构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>[11]</sup>,第  $i$  次循环有效刚度定义为正负加载的峰值之和与位移之和的比值.

反复荷载下的有效刚度曲线如图 10 所示.

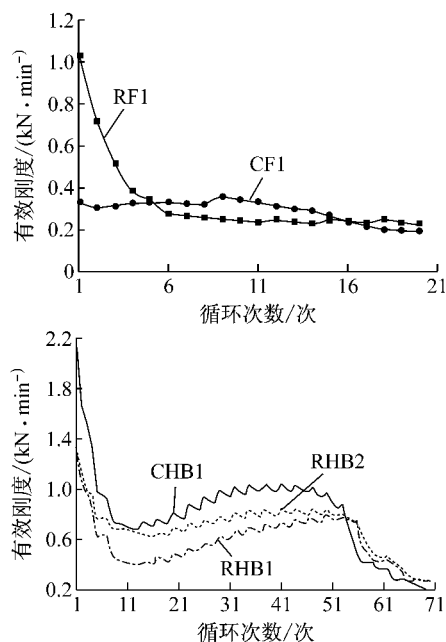


图 10 加固前后试件的有效刚度曲线

Fig. 10 Secant stiffness curves of specimens before and after retrofit

由图 10 可以看出:

(1) 加固后试件初始刚度高于原试件,但加固后试件刚度在试验初期很快又降至原试件刚度以下. 这是因为碳纤维布加固时,需要先在节点四周刷上胶粘剂,然后外包碳纤维布,涂刷过程中部分胶粘剂填充螺孔及钢板缝隙,胶粘剂起强度后对节点刚度起到增强作用. 试验初期,随着侧向位移的增加,硬化的胶粘剂不断碎裂,胶粘剂所起的刚度增强作用迅速消失.

(2) 加固后试件加载中期刚度略低于原试件. 这是因为碳纤维布作为一种被动约束,当侧向位移小时,节点变形小,其约束效果也相对较小,又加固试件节点本身存在一定结构损伤,所以加固后的 3 榀框架的加载中期刚度略小于原试件.

(3) 加载至后期,原试件刚度退化比加固后试件快,原试件刚度逐渐低于加固后试件. 就纯框架试件而言,纯框架试件的抗侧刚度主要由梁柱节点及柱脚节点的刚度决定. 原试件随着侧向位移的增加,节点损坏,其刚度逐渐下降. 而加固后的试件节点受到碳纤维布的约束,随着侧向位移的增加,节点变形,碳纤维布约束也逐渐增强,弥补了节点损伤所造成的刚度损失,其刚度基本不变;就隅撑体系试件而言,在支撑破坏前,其抗侧刚度主要由支撑和纯框架两部分提供,支撑退出工作后,抗侧刚度主要由梁柱节点及柱脚节点的刚度决定. 而原试件节点劈裂严重,加固后试件节点基本完好,所以原隅撑体系试件刚度退化比加固后试件快.

### 3.4 耗能能力

耗能作为衡量结构抗震性能的重要指标,常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. 图 11 为纯框架体系加固前后每个加载循环的耗能对比.

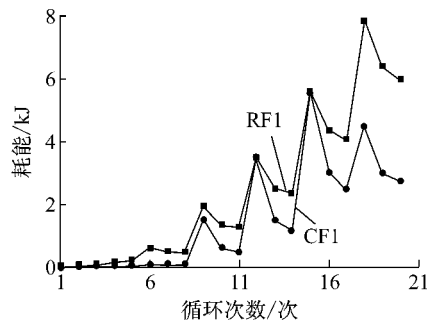
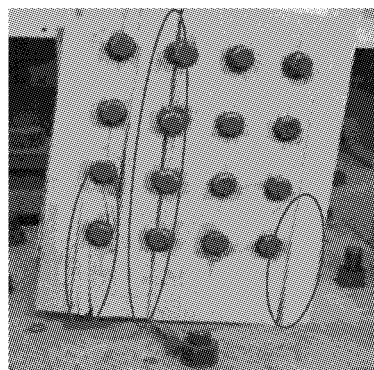


图 11 纯框架体系试件耗能对比

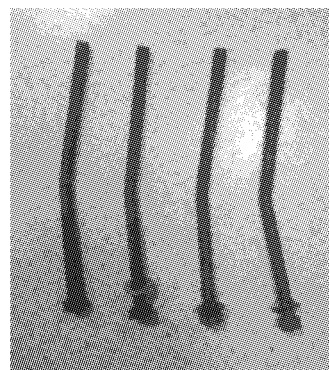
Fig. 11 Energy dissipation comparison of pure frame system

由图 11 可见,加固后试件(RF1)耗能能力强于原试件(CF1);同一位移幅值的第 1 次循环原试件与加固后试件耗能相当,但第 2 次、第 3 次循环加固后试件耗能能力强于原试件;加固后试件加载到极限位移依旧保持良好的耗能能力,而原试件在加载后期耗能能力已经出现明显的下降趋势。这是因为原试件与加固后试件耗能机制有明显的区别,试件的耗能来源于构件之间的摩擦、螺栓的变形、木材的变形和劈裂。对于原试件,梁柱及柱脚节点木材的劈裂(图 12a)是其耗能的主要来源。而加固后试件由

于节点被碳纤维布包裹,木材的劈裂受到限制,其结构耗能主要来源于螺栓变形、螺孔处木材变形以及螺栓与木材的摩擦(图 12b)。对于原试件,大位移时节点木材发生劈裂,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。而对于加固后试件,螺栓的弹性变形在循环结束后是可以恢复的,而塑性变形是一个逐步累加的过程,试件在同一位移幅值的第 2 次、第 3 次循环,依靠螺栓的塑性变形仍能消耗一定能量(图 12b)。



a 木材劈裂



b 螺栓弯曲变形

图 12 纯框架体系试件耗能源

Fig.12 Sources of energy dissipation of pure frame

图 13 为隅撑结构加固前后每个加载循环的耗能对比。如图 13 所示,隅撑结构比纯框架结构的中耗能性能有明显的提高;原试件与加固后试件在到达耗能峰值前的耗能能力相当;加载后期,支撑退出工作,隅撑结构体系原试件由于节点劈裂严重,耗能能力弱于加固后试件。这是因为隅撑结构体系主要依靠支撑与柱连接处的螺栓变形及支撑构件劈裂耗能,梁柱节点及柱脚节点耗能相对较少。

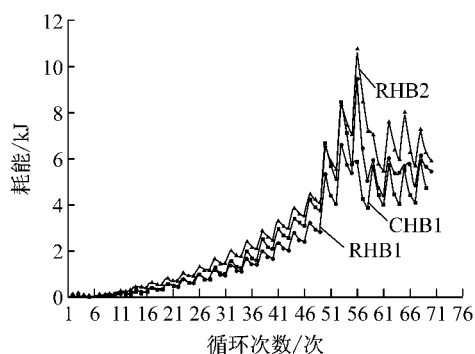


图 13 隅撑结构体系试件耗能对比

Fig.13 Energy dissipation comparison of frame with knee-braced system 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) 外包碳纤维布加固受损梁柱及柱脚节点可以有效抑制节点裂缝开展. 对于原纯框架结构加固,可采用节点外包碳纤维布并增设隅撑的方式以充分提高梁柱结构的力学性能.

(2) 加固后试件的极限承载力、刚度、延性等力学性能基本得到恢复. 纯框架体系试件加固后极限承载力略有提高,隅撑体系试件极限承载力相当;加固后试件加载中期刚度略低于原试件,但加载至后期,加固后试件刚度退化要比原试件慢;隅撑结构体系加固前后延性系数基本一致,延性得到恢复.

(3) 对于纯框架结构体系,原试件主要依靠梁柱及柱脚节点木材的劈裂耗能,加固后试件耗能主要来源于螺栓变形、螺孔处木材变形以及螺栓与木材的摩擦. 隅撑结构体系主要依靠支撑上螺栓变形及支撑木构件劈裂耗能,支撑破坏前梁柱节点及柱脚节点耗能相对较少.

## 参考文献:

- [1] 熊海贝,刘应扬,杨春梅,等. 梁柱式胶合木结构体系抗侧力性能试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,42(8): 1167.  
XIONG Haibei, LIU Yingyang, YANG Chunmei, *et al.* Experimental study on lateral resistance of glued-laminated timber post and beam systems [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(8): 1167.
- [2] 罗才松,黄奕辉. 古建筑木结构的加固维修方法评述[J]. 福建建筑,2005,5(6):196.  
LUO Caisong, HUANG Yihui. The analyses on the traditional reinforced methods of ancient timber building and the discussing on the application of frp in the field [J]. Fujian Architecture & Construction, 2005, 5(6): 196.
- [3] Lam F, Gehloff M, Cloßen M. Moment-resisting bolted timber connections [J]. Structures and Buildings, 2010, 163(4): 267.
- [4] Brunner M, Schnueriger M. Timber beams strengthened by attaching prestressed carbon FRP laminates with a gradiented anchoring device [C] // Proceedings of the International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (RRF 2005). Hong Kong: International Institute for FRP in Constructions, 2005: 465-471.
- [5] 杨会峰,刘伟庆. FRP增强胶合木梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(1):64.  
YANG Huifeng, LIU Weiqing. Study on flexural behavior of FRP reinforced glulam beams [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 64.
- [6] 姬卓. CFRP 材料加固木梁性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.  
JI Zhuo. Research on reinforcement of timber structures with CFRP materials [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] César Echavarría, Beatriz Echavarría, Hernán Cañola. Bamboo reinforced glulam beams: an alternative to punched metal plate, GFRP and CFRP reinforced glulam beams [C] // Proceedings of the 13th World Conference on Timber Engineering (WCTE). Quebec City: WCTE, 2014: 1-6.
- [8] Taheri F, Nagaraj M, Cheraghi N. FRP-reinforced glulam columns [J]. FRP International, 2005, 2(3): 10.
- [9] 郑涌林. GFRP 加固木柱的轴心受压试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2010.  
ZHENG Yonglin. Experimental study on axial compressive behaviors of timber column strengthened with GFRP [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2010.
- [10] 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]. Pennsylvania: ASTM International, 2012.
- [11] 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 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.