

## 玻璃纤维加强型胶合木梁柱植筋节点受力性能研究

李凯旋<sup>1</sup>, 李军<sup>1,\*</sup>, 唐秋霞<sup>2</sup>, 王燕<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 宣城市市政园林公用建设管理处, 宣城 242000)

**摘要:**针对胶合木梁柱纯植筋节点的延性及耗能不足问题, 提出采用玻璃纤维增强复合材料(GFRP)的加强型梁柱植筋节点, 以使植筋有效发挥作用, 改善节点受力性能。运用 ABAQUS 软件分析了纤维布粘贴方式、层数对植筋节点受力性能的影响, 确立合理的粘贴方案后, 采用试验与数值模拟相结合的方式, 对比分析有、无加强型胶合木梁柱植筋节点在低周往复荷载作用下的破坏形态及滞回性能。结果表明: 玻璃纤维增强复合材料对节点的加强效果明显, 节点延性和耗能均得到有效改善; 但在保证植筋节点承载力达到预期目标的情况下, 有必要根据设计承载力要求合理控制 GFRP 的粘贴层数, 以避免浪费。

**关键词:** 胶合木结构; 梁柱植筋节点; 玻璃纤维加强; 拟静力试验; 有限元分析

中图分类号: TU366.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2024)03-0011-08

## Research on the mechanical behavior of GFRP reinforced glulam beam-column glued-in rod joints

LI Kaixuan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,\*</sup>, TANG Qiuxia<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Xuancheng Municipal Garden Public Construction Management Office, Xuancheng 242000, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of insufficient ductility and energy dissipation capacity of pure glulam joints with glued-in rods, a reinforced beam-column joint with glass fiber reinforced polymer (GFRP) was proposed to make the steel rods play an effective role and improve the mechanical performance of the joints. Abaqus software was used to analyze the influence of the bonding methods and the number of layers of fiber cloth on the mechanical properties of the reinforced joints. After establishing a reasonable bonding scheme, the failure mode and hysteretic behavior of the reinforced and unreinforced glulam beam-column joints under low cyclic loading were compared and analyzed by means of experiment and numerical simulation. The results show that the GFRP have obvious strengthening effect on the joints, and the ductility and energy dissipation capacity of the joints are effectively improved. However, it is necessary to reasonably control the number of GFRP layers to avoid waste in the case of ensuring that the bearing capacity of the joint reaches the expected goal.

**Key words:** glulam structure; beam-column glued-in rods joint; GFRP reinforced; quasi-static test; finite element analysis

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0703506)

作者简介: 李凯旋(1996—), 女, 山东滨州人。硕士, 研究方向为胶合木梁柱节点研究。E-mail: 1137885419@qq.com。

\* 通信作者: 李军(1966—), 女, 山东淄博人。博士, 教授, 主要从事钢结构、木结构研究。E-mail: kitjun76@qut.edu.cn。

现代木结构建筑在民用和公共建筑得到广泛应用,是最具代表性的绿色建筑,符合我国可持续发展战略。近几年我国相继修订并颁布了《装配式木结构建筑技术标准》(GB/T 51233—2016)、《木结构设计标准》(GB/T 50005—2017)等多个国家标准文件,极大地推动了现代木结构建筑的工业化生产及应用<sup>[1-3]</sup>。

胶合木在形状设计灵活度、材料性能方面比原木锯材均得到改善,适应现代木结构对大跨度构件的需求,其应用日益增多,胶合木结构节点连接形式也一直备受关注。随着木结构建筑在高度上的发展,许多学者开展了框架结构梁柱节点受力性能研究,常见的木结构节点连接形式有螺栓-钢填板连接、齿板连接等<sup>[4]</sup>。螺栓-钢填板连接会削弱木构件截面,初始刚度较低;齿板连接在刚度上具有一定优势,但其受多种因素影响,在实际应用中的使用寿命尚不明确<sup>[5-6]</sup>。胶合木植筋连接节点在外观、连接刚度和强度上具有一定优势,其以环保型胶粘剂将筋材(如螺栓杆)植入预先钻好的木材孔中,节点通过内部植筋承力<sup>[7]</sup>。近些年来,针对植筋连接节点的受力性能研究与应用逐步增多。凌志彬等<sup>[8]</sup>指出相比于传统木结构节点,植筋节点的承载力和初始刚度有明显提升,并针对节点的抗拔性能做出了理论预测。XU等<sup>[9]</sup>分析了影响植筋有效杆数的不同因素,建立了多杆植筋节点的承载力模型。苗生龙等<sup>[10]</sup>指出环境条件是影响植筋节点抗震性能的重要因素,普通水环境相对于盐水环境更加有利。研究表明,纯植筋节点多以植筋拔出或屈服模式发生破坏<sup>[11]</sup>,基本上不具备可恢复性,为了延缓拔出时间,有必要采用加强措施。

近期,国内以纤维增强复合材料(FRP)加固木结构的研究愈发增多。FRP具有比模量高、耐腐蚀等特点,可有效抑制木结构的裂缝开展,其种类较多,尤以碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)应用较为广泛<sup>[12-13]</sup>。CFRP、GFRP首先用于混凝土结构加固,研究发现两种材料对于结构抗震性能的提升效果较为接近<sup>[14]</sup>。由于GFRP相比于CFRP成本更低,且整体呈半透明状,从造价和外观上更具有适用性。因此,本文提出GFRP加强胶合木梁柱植筋节点,通过试验与数值模拟方法研究其在循环往复荷载作用下的受力性能,为胶合木梁柱节点设计和应用提供参考。

## 1 加强型植筋节点试件

### 1.1 节点的构成

植筋连接的破坏形式主要是拉拔破坏,框架结构中的边柱受弯矩作用影响较大,可能会导致植筋拔出,所以本文选用T形梁柱节点作为研究对象。胶合木植筋节点包含胶合木梁柱构件、植筋杆、胶粘剂。参照既有研究节点<sup>[15]</sup>及《木结构设计标准》(GB 50005—2017)、《胶合木结构技术规范》(GB/T 50708—2012)等相关标准<sup>[16-17]</sup>,选用几何参数为表1所示的梁柱植筋节点进行研究,其中胶合木梁、柱的截面尺寸分别为200 mm×300 mm、200 mm×320 mm。植筋节点的几何尺寸如图1(a)所示。GFRP加强型节点即在纯植筋节点的基础上外包玻璃纤维片材,其具体粘贴方式如图1(b)所示:①在节点的核心区域横向粘贴U形纤维片材,并延伸至胶合木梁400 mm处,以提升节点的抗剪承载力<sup>[18]</sup>;②对梁柱交接处上下两侧粘贴L形纤维片材,以提升节点的抗弯承载力;③在梁柱端部加以锚固。

表1 节点几何参数

					mm
胶合木梁构件尺寸	胶合木柱构件尺寸	胶层厚度	植筋杆直径	注胶孔直径	锚固长度
200×300×1300	200×320×1500	4	12	20	250

### 1.2 材料性能参数

胶合木梁柱均选用花旗松胶合木,密度为0.471 g/cm<sup>3</sup>,其余性能参数来自材料性能试验,如表2所示<sup>[19]</sup>。胶合植筋选用M8.8级螺栓杆,抗拉强度为800 MPa,屈服强度为640 MPa。植筋所用胶粘剂选用改性环氧树脂胶,黏结强度为13.7 MPa。加强纤维选用建筑加固用450 g E玻璃纤维布,弹性模量为7.2×10<sup>4</sup> MPa,抗拉强度为1500 MPa。纤维浸渍胶采用纤维工程加固补强专用胶,弹性模量为3.3×10<sup>3</sup> MPa,抗拉强度为54.4 MPa。

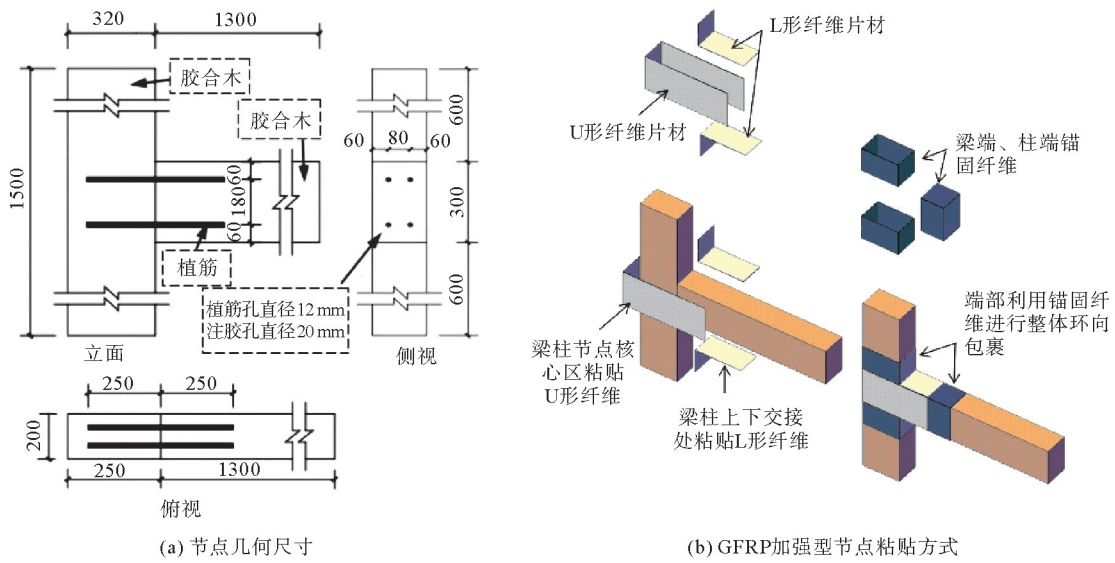


图 1 梁柱植筋节点示意(单位:mm)

表 2 胶合木材性能参数

MPa

抗弯强度	顺纹抗拉强度	顺纹抗压强度	横纹径向抗剪强度	横纹弦向抗剪强度	横纹径向抗压强度	横纹弦向抗压强度
63.52	24.8	50	6.58	5.09	10.2	4.43

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元模型

运用 ABAQUS 对有、无加强型梁柱植筋节点进行受力性能分析。木材受压时本构关系设为理想弹性,受拉时设为线弹性,弹性阶段为正交各向异性,塑性阶段为各向同性<sup>[20-21]</sup>。螺栓杆、胶粘剂设定为理想弹塑性,GFRP 的材料模型设定为理想线弹性。

纯植筋梁柱节点的各部件模型均采用线性六面体减缩积分单元(Hex-C3D8R),为提升计算效率,于节点塑性变形较大区域进行网格细化,即梁柱交接处网格设为 20 mm,远离核心区设为 100 mm。假定各部件之间黏结性能良好,植筋杆与胶粘剂、胶粘剂与梁柱植筋孔之间均采用共节点连接方式,施加绑定(Tie)约束,并于胶合木柱的上下两端设置完全固定的边界约束条件。对于 GFRP 加强型梁柱植筋节点,选用实体-壳模型建模:纤维

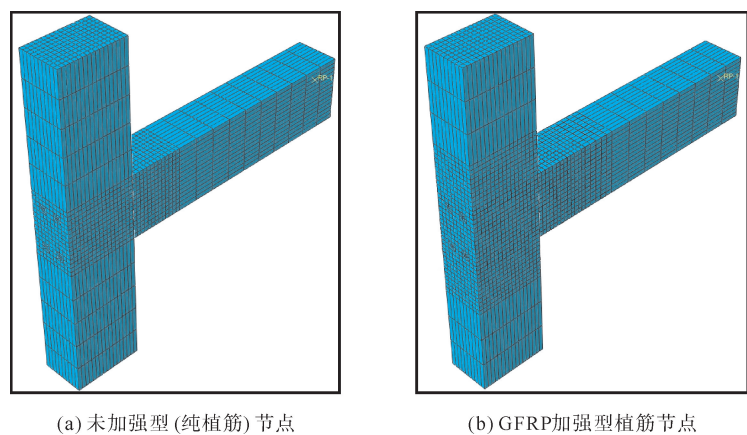


图 2 有、无加强型梁柱植筋节点有限元模型

片材选用壳单元 S4R,其余各部件设定与纯植筋模型一致,忽略基材与纤维片材之间的黏结滑移影响,二者通过绑定(Tie)约束,考虑到 GFRP 与胶合木构件采用共节点连接,因此其单元尺寸设为 20 mm(与胶合木构件核心区保持一致)。通过控制竖向位移进行加载,并以耦合方式施加于胶合木梁端。2 种有限元分析模型如图 2 所示。

## 2.2 有限元结果分析

### 2.2.1 荷载-位移曲线分析

图3为纯植筋节点(简称FJ-1)、采用U形粘贴方式的加强型节点(简称FJ-2)、L形粘贴节点(简称FJ-3)、U+L形粘贴节点(简称FJ-M)的荷载-位移曲线。对比分析可知:①位移达到 $\pm 12$  mm时,FJ-1节点的曲线斜率明显降低,植筋屈服破坏;②位移达到 $\pm 18$  mm时,FJ-2、FJ-3、FJ-M 3种GFRP加强型节点的曲线斜率出现下降趋势,表明玻璃纤维片材切实发挥了作用,延缓了植筋屈服时间。节点极限承载力提高情况如下:FJ-M提升幅度最大,约68.34%,其次为FJ-2;FJ-3试件中的L形纤维布处于梁柱交接处上下两侧,接缝处应力均已达到屈服状态,表明此处应力集中现象突出,使得L形纤维片材在荷载作用下先失效,承载力提升效果较其他2种不甚明显,因此后续试验将采用U+L形粘贴方式进行分析。

### 2.2.2 应力云图分析

FJ-1纯植筋节点在位移达到9 mm时植筋单元最大应力达到屈服强度640 MPa,而除纯植筋外的其他节点,最大应力均未达到640 MPa。同时比较各节点在同一级位移荷载时的植筋应力云图(图4)发现,未加强型节点植筋塑性区范围覆盖了将近3个网格,而GFRP加强型节点则覆盖了不到2个网格,由此可见GFRP加强型节点的植筋应力塑性区范围均要小于未加强节点FJ-1。

虽然3种粘贴方式均具有一定加强作用,但纤维布的破坏情况不同,从FJ-M节点中的GFRP的应力分布情况看(图5),U+L节点使2种粘贴方式分别发挥了作用,U形纤维片材在折角处(即梁柱交接点)达到最大拉应力,应力集中明显;U形纤维片材在梁柱拼接点处应力最大,起到较明显的抗剪作用。

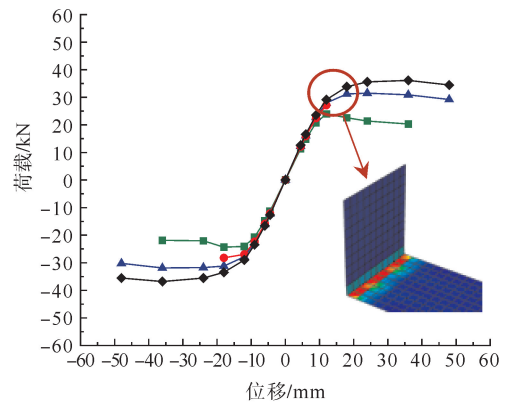


图3 不同粘贴方式的各节点骨架曲线

—■— FJ-1; —▲— FJ-2; —●— FJ-3; —◆— FJ-M

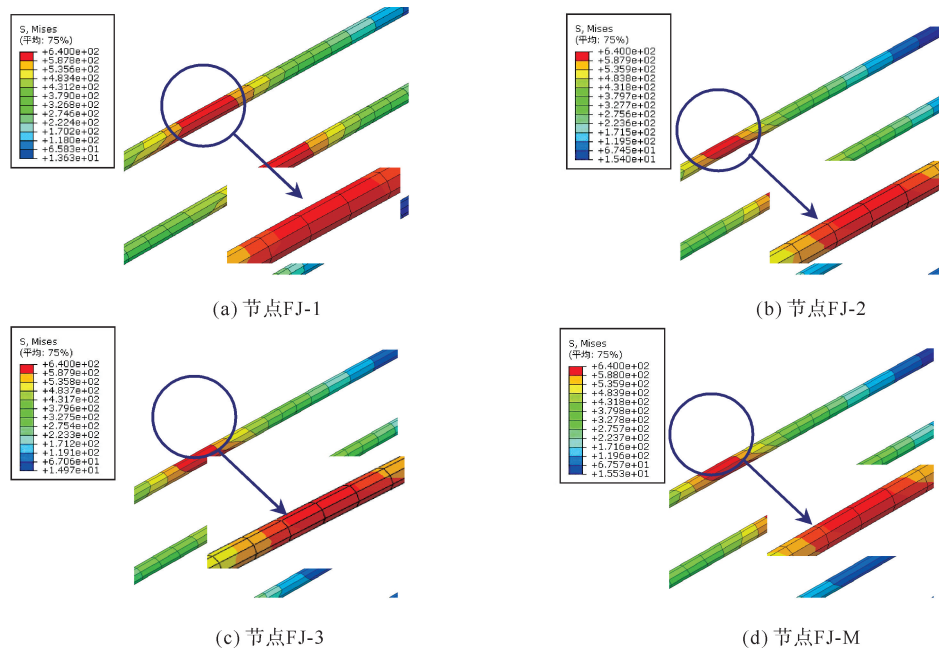


图4 节点植筋应力云图

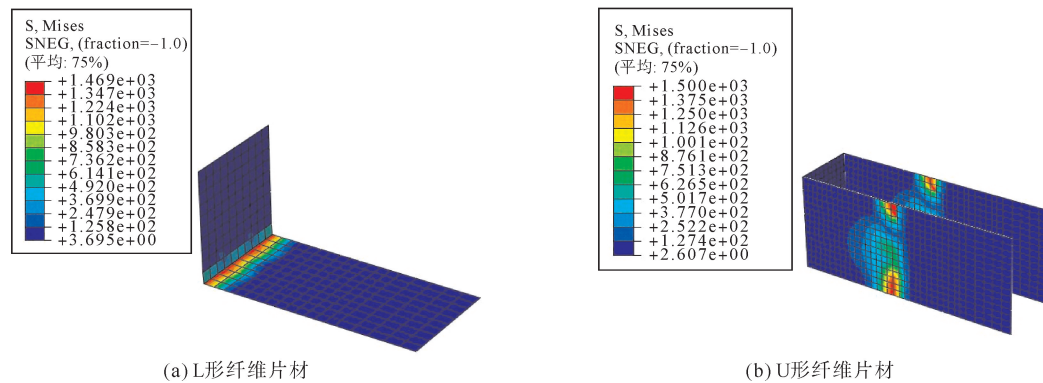


图 5 FJ-M 节点中的 GFRP 应力云图

### 3 节点受力性能试验

#### 3.1 试件加载方案

本次试验共制作 2 个 T 型梁柱植筋节点试件。由上文 2.2 可知,采用“U+L”形粘贴方式的节点 FJ-M 承载力较单独采用 U 形或 L 形粘贴的节点更高、加强效果更好。因此,GFRP 加强型梁柱植筋节点采用 U+L 形粘贴方式(FJ-M)。另设未加强梁柱植筋节点(FJ-1)作为对照组。

图 6 为试验加载装置。胶合木柱上下两端通过锚固螺栓与钢板完全固定,同时在柱顶设置液压千斤顶以施加恒定的轴向压力;将胶合木梁端部与 MTS 液压伺服作动器相连,于梁端施加循环往复荷载。植筋在木构件内部,试验过程中难以确定试件的屈服荷载和屈服位移,故采用位移控制方法进行加载。由于本文考虑的植筋节点用于木框架结构,故参考美国抗震规范 AISC 的做法,即将最大位移作为控制参数。采用有限元初步校核时发现,位移加载至 24 mm 时,受拉钢筋开始屈服,故先以 24 mm 作为控制标准,超过 24 mm 后若是未破坏,再按比例增加。具体加载制度如下:首先逐级施加 4.5、6.0、9.0 mm 的较小位移,分别循环 6 次;然后施加 12 mm 的强制位移,循环 4 次;接下来按顺序分别施加 18、24 mm,之后每级位移递增 12 mm,每级循环 2 次。试验的加载速率为 0.2 mm/s,直至加载到试件极限承载力的 85%,或当试件出现严重破坏时停止加载。

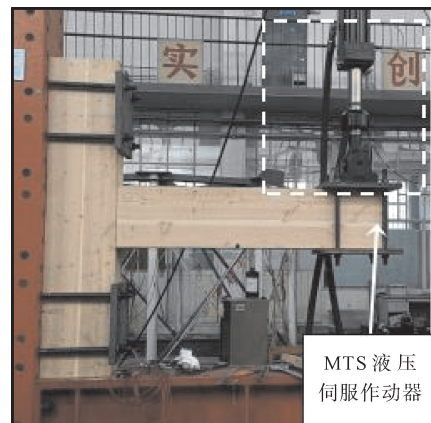


图 6 试验加载装置

#### 3.2 量测方案

在胶合木梁下侧距柱端水平距离 300 mm 处布置位移计  $D_1$ 、 $D_2$ ,用于测量胶合木梁在荷载作用下产生的位移变形;利用 MTS 液压伺服作动器内置传感器获取梁端的竖向荷载,另外采用 XT DIC 三维全场应变测量分析系统实现对试件表面的应变、位移检测。

#### 3.3 试验结果分析

##### 3.3.1 试验现象

各试件的试验现象如表 3 所示。位移加载超过 36 mm 之后,试件承载力均呈下降趋势,此时继续加载至极限承载力的 85%后停止。最终 FJ-1 与 FJ-M 试件的破坏现象如图 7 所示。

表 3 各节点试件试验现象

试件	4.5~9.0 mm	12~18 mm	24 mm	36 mm	> 36 mm
FJ-1 试件	有轻微声响	清脆的胶层开裂声	较清晰的木材劈裂声	木材表面出现开裂	发出“砰”的巨响,承载力下降,内部植筋轻微拔出
FJ-M 试件	无明显变化,后期有“噼啪”的胶层开裂声响	节点处的纤维出现轻微剥离现象	U形纤维布在节点拼接处开裂,发出木材劈裂声	纤维布出现明显破坏、剥离范围增大	巨大响声,上下侧纤维布明显剥离破坏,承载力有明显下降段

3.3.2 滞回曲线和骨架曲线

图 8 中的实曲线为 FJ-1 试件与 FJ-M 试件在拟静力试验中测得的滞回曲线,其中 FJ-1 试件的滞回曲线呈现较明显的反 S 形,具有较明显的捏缩现象;比较各级加载位移下的滞回曲线发现,曲线斜率随着位移的增加而逐渐降低,同时观察同级加载位移下的滞回环曲线,随着循环次数增加,曲线的斜率及其峰值位移逐渐减小,可见节点刚度在位移荷载作用下逐渐退化。

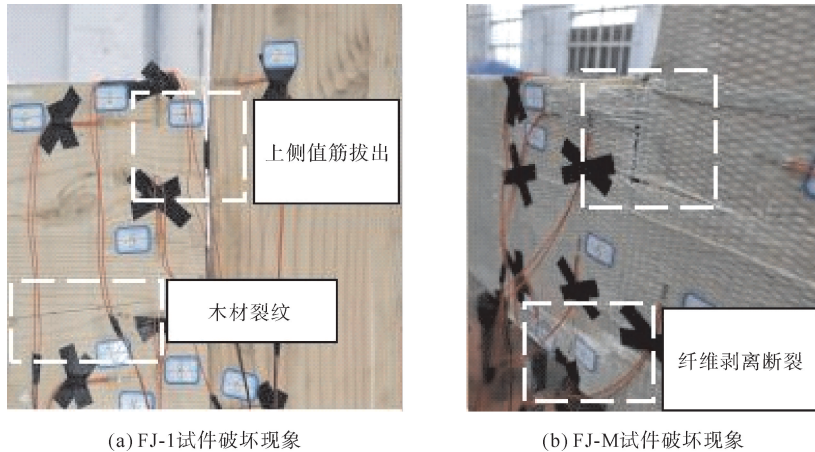


图 7 试件破坏现象

FJ-M 试件的滞回环与 FJ-1 试件相比变得更加大而饱满,滞回环中部表现为纺锤状或倒 S 状,表明加强型节点的耗能能力有所提升;比较同一级加载位移下,FJ-M 试件相比于 FJ-1 试件的节点承载力有明显提升,且初期试件 FJ-M 的曲线斜率高于 FJ-1;随着循环次数的增加,试件 FJ-M 与 FJ-1 的曲线斜率均有所下降,表明二者都呈现出刚度退化现象,然而试件 FJ-M 的刚度退化速度低于试件 FJ-1。

图 9 中的实曲线为 FJ-1 试件与 FJ-M 试件试验所得骨架曲线。由图 9 可知,两试件的骨架曲线形状基本相似,在加载初期,节点处于弹性阶段范围内,二者相差较为接近,此时荷载随着位移增加而持续上升;在循环位移达到±18 mm 时,FJ-M 试件曲线相较于 FJ-1 变得更加陡峭。分析二者的极限荷载与位移:FJ-M 的正向极限荷载较 FJ-1 提升约 24%,负向极限荷载提升约 32%;FJ-M 的极限位移较 FJ-1 提升约 8.7%,这表明 GFRP 加固对试件的承载力及变形能力提升效果明显。

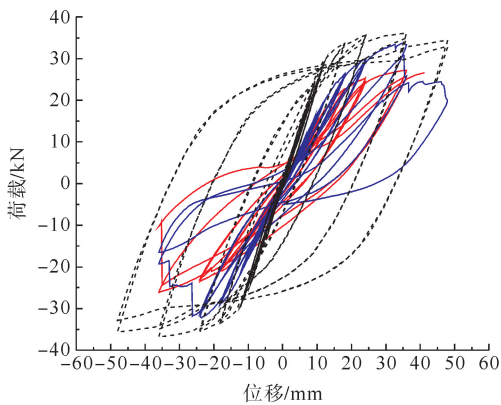


图 8 FJ-1、FJ-M试件滞回曲线

— FJ-1; — FJ-M; - - - FJ-M(模拟)

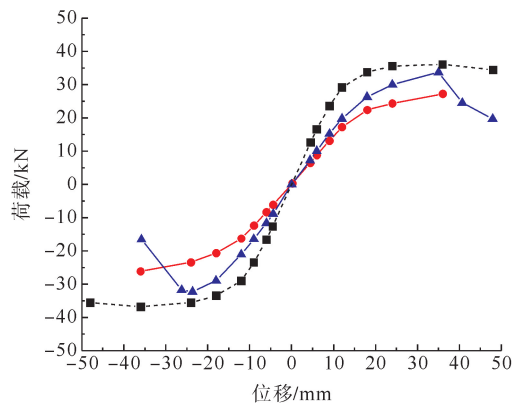


图 9 FJ-1、FJ-M试件骨架曲线

● FJ-1; ▲ FJ-M; ■ FJ-M(模拟)

图 8、图 9 中的虚曲线为有限元分析所得 FJ-M 节点滞回曲线与骨架曲线,与试验所得极限荷载值与屈服荷载值的误差均在 15%之内,说明利用有限元分析结果做的预判有一定的合理性。二者出现误差的原因可能为:①试验中梁柱交接处纤维内部出现连续空鼓与轻微剥离现象,且下侧纤维布翘起,继续加载可观察到纤维布有断裂迹象,然而有限元模拟中未考虑黏结滑移剥离的影响,且忽略了后期加载时纤维布出现的剥离破损现象,计算结果表现出伪延性;②观察纤维片材发现,纤维织物丝束间隙不一致,以至于外包纤维加固时浸渍胶涂刷不均匀,影响节点强度与加固效果,同时试验采用的材料离散性较大,而有限元模拟中材料本构偏于理想化,造成试验值与模拟值有所偏差。下一步研究可以通过引入 FRP-木界面的黏结滑移模型进一步提高有限元分析精度。

#### 4 加强型植筋节点受力性能参数化数值模拟

以上文中建立的 GFRP 加强型节点有限元模型为基础,对纤维片材的层数等影响参数进行分析研究。虽然模拟结果与试验相差 15%,但若以承载力增长幅度作为目标指数,可以沿用上述有限元建模方法。《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)规定:当粘贴纤维片材达 4 层以上时,建议使用板式 FRP。因此,本文设定纤维粘贴层数为 0、1、2、3 层,分别研究节点承载力变化,如图 10 所示,其中 L-0 代表未粘贴纤维片材,L-1 代表粘贴层数为 1 层,以此类推。分析图 10 曲线可知:梁柱植筋节点的承载力随着粘贴层数的增加有较明显增长趋势,但并非线性增长。L-1 节点相比 L-0 节点,正负向极限荷载平均提升约 51%;L-2 节点相比 L-0 节点,正负向极限荷载平均提升约 77%;L-3 节点相比 L-0 节点,正负向极限荷载平均提升约 88%。建议实际应用时采用式(1)设计所需粘贴层数  $i$ ,但不宜超过 3 层:

$$i = 0.5 \left( \frac{1}{1 - \Delta} \right) \quad (1)$$

式中:  $\Delta$  为目标承载力增长率,即  $\Delta = \frac{\Delta F}{F_0} \times 100\%$ ;  $\Delta F$  为未粘贴纤维片材时承载力增量;  $F_0$  为未粘贴纤维片材时的节点承载力。

#### 5 结论

针对胶合木纯植筋节点的耗能及延性不足等问题,提出采用 GFRP 的加强型梁柱植筋节点,并通过有限元分析与试验的方法对二者的破坏现象、极限承载力及变形能力进行了系统性分析,同时研究了不同的粘贴方式与粘贴层数对 GFRP 加强型梁柱植筋节点加强效果的影响。主要研究结论如下:

1) 有、无加强梁柱植筋节点的拟静力性能分析结果表明,外包粘贴玻璃纤维增强复合材料可有效改善节点在低周往复荷载作用下的极限承载力、耗能能力和延性。

2) U+L 形粘贴方式值得推荐,相较于纯植筋节点,该方式下节点承载能力有明显提高;纤维布的剥离提示承载力可能要下降,但最终可避免植筋被拔出。

3) 加强型节点的承载力随着粘贴层数的增加有明显增长,但二者并不呈线性关系。实际应用时应根据目标承载力增长率设计粘贴层数,建议利用式(1)进行预估。

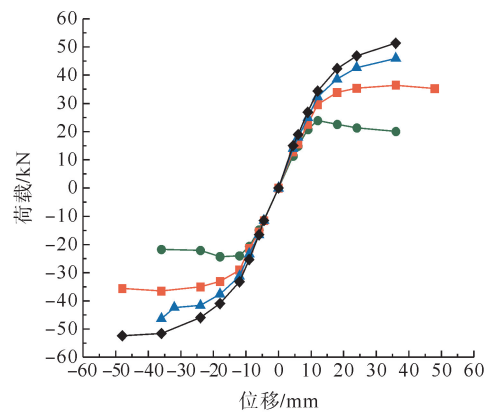


图 10 基于不同粘贴层数的各节点骨架曲线  
—●— L-0; —■— L-1; —▲— L-2; —◆— L-3

## 参考文献(References):

- [1] 刘伟庆,杨会峰. 现代木结构研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(2):16-43.  
LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures,2019,40(2):16-43.
- [2] 杨学兵. 中国《木结构设计标准》发展历程及木结构建筑发展趋势[J]. 建筑结构,2018,48(10):1-6.  
YANG Xuebing. Development of *Standard for design of timber structures* and development trend of timber structure in China[J]. Building Structure,2018,48(10):1-6.
- [3] 何敏娟,孙晓峰,李征. 多高层木结构抗震性能研究与设计方法综述[J]. 建筑结构,2020,50(5):1-6.  
HE Minjuan, SUN Xiaofeng, LI Zheng. Seismic performance study and design method summary for multi-storey timber structures[J]. Building Structure,2020,50(5):1-6.
- [4] 韩俊良,郁有升,王燕,等. 木结构装配式节点研究现状[J]. 青岛理工大学学报,2019,40(1):28-33.  
HAN Junliang, YU Yousheng, WANG Yan, et al. Research atatus in fabricated joint of timber structure[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2019,40(1):28-33.
- [5] 谢启芳,张毅,闫玲竹,等. 木质摩擦转动节点连接胶合木框架抗震性能试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报,2023,56(7):34-44.  
XIE Qifang, ZHANG Yi, YAN Zhuling, et al. Seismic performance of glulam timber frame with wooden frictional rotational connections: Experimental study and theoretical analysis[J]. China Civil Engineering Journal,2023,56(7):34-44.
- [6] 郁有升,周其霖,韩俊良. 带齿夹板钢木连接节点受力机理[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):60-68.  
YU Yousheng, ZHOU Qilin, HAN Junliang. Mechanical mechanism of steel-glulam connections with teeth on splints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2020,37(4):60-68.
- [7] 郭峰旭,房梦,李军,等. 胶合木结构植筋连接性能研究现状[J]. 青岛理工大学学报,2021,42(6):1-6.  
GUO Fengxu, FANG Meng, LI Jun, et al. A review of research on performance of glulam connection with glued-in rods[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2021,42(6):1-6.
- [8] 凌志彬,陆帆,杨会峰. 胶合木植筋节点抗拔性能理论预测[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(5):654-662.  
LING Zhibin, LU Fan, YANG Huifeng. Theoretical prediction of withdrawal behaviour of glue laminated timber joints with glued-in rod[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition),2021,43(5):654-662.
- [9] XU Bohan, LI Dongfeng, ZHAO Yanhua, et al. Load-carrying capacity of timber joints with multiple glued-in steel rods loaded parallel to grain[J]. Engineering Structures,2020,225:111302.
- [10] 苗生龙,张翔,袁广林. 普通水环境和盐水环境中 RC 植筋节点的抗震性能[J]. 混凝土,2020(10):55-58.  
MIAO Shenglong, ZHANG Yi, YUAN Guanglin. Seismic performance of bonded rebar joints of RC under water immersion and salt water immersion[J]. Concrete,2020(10):55-58.
- [11] 房梦,李军,王燕. 侧面注胶式胶合木植筋抗拉拔性能试验研究[J]. 青岛理工大学学报,2020,41(2):20-25.  
FANG Meng, LI Jun, WANG Yan. Experimental study on pull-out resistance of glued-in rod with side-injection glulam[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2020,41(2):20-25.
- [12] 熊海贝,刘应扬,姚亚,等. 梁柱式木结构加固方法及抗侧力性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(5):695-702.  
XIONG Haibei, LIU Yingyang, YAO Ya, et al. Experimental study of reinforcement methods and lateral resistance of glued-laminated timber post and beam structures[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2016,44(5):695-702.
- [13] 闫清峰,张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程,2021,21(36):15314-15322.  
YAN Qingfeng, ZHANG Jigang. Applications and development of fiber reinforced polymer in civil engineering[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(36):15314-15322.
- [14] 郭晓云,陈杰,唐永明. 不同纤维增强复合材料加固混凝土短柱轴心受压承载力试验研究[J]. 复合材料科学与工程,2021(8):66-72.  
GUO Xiaoyun, CHEN Jie, TANG Yongming. Experimental study on axial compression bearing capacity of concrete short column strengthened with different fiber reinforced composites[J]. Composites Science and Engineering,2021(8):66-72.
- [15] 唐秋霞,李军,郭峰旭,等. 安装偏差对胶合木梁柱植筋节点受弯承载力的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2024,46(2):138-145.  
TANG Qiuxia, LI Jun, GUO Fengxu, et al. The influence of installation deviation on the mechanical performance of glulam beam-column glued-in rods joints[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2024,46(2):138-145.
- [16] 樊承谋,张盛东,陈松来,等. 木结构基本原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
FAN Chengmou, ZHANG Shengdong, CHEN Songlai, et al. Basic principles of timber structure[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2008.
- [17] 何敏娟, LAM Frank, 杨军, 等. 木结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.  
HE Minjuan, LAM Frank, YANG Jun, et al. Timber engineering[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2008.