

## 基于内聚力模型 FRP 加强型胶合木植筋节点受力性能分析

李胜凯<sup>1</sup>, 李 军<sup>1,\*</sup>, 李凯旋<sup>1</sup>, 于 征<sup>2</sup>, 于广明<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛黄海学院 建筑工程学院, 青岛 266427)

**摘要:** FRP 加强是一种不损坏构件的结构补强方法, 但 FRP 布与木结构界面存在纤维剥离问题, 而忽略该问题的数值计算会产生较大偏差, 故提出采用内聚力模型模拟胶层脱粘滑移现象的有限元分析方法。通过多组单剪试验的设计与实施, 获得 GFRP 和 CFRP 两种材料与木材界面的应力-黏结滑移曲线, 进而建立双线性黏结滑移本构模型。有限元分析中运用该黏结滑移本构关系建立了内聚力模型, 对应单剪试验的有限元分析结果表明, 基于内聚力模型的有限元分析能够准确地反映 FRP-木材界面的黏结滑移性能; FRP 加强型胶合木植筋梁柱节点的有限元分析结果表明, 基于内聚力模型的分析结果较好地揭示了纤维片材的剥离情况。从受力性能、外观和造价等综合来看推荐采用 GFRP 加强木结构。

**关键词:** 胶合木结构; 植筋节点; FRP 加强; 内聚力模型; 受力性能

**中图分类号:** TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0038-09

## Mechanical performance analysis of the FRP-strengthened glued-in rods joint in glued laminated timber based on cohesive model

LI Shengkai<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,\*</sup>, LI Kaixuan<sup>1</sup>, YU Zheng<sup>2</sup>, YU Guangming<sup>1</sup>

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

2. School of Civil Engineering, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

**Abstract:** FRP strengthening is a non-destructive method to strengthen structures. However, there is a problem of fiber delamination at the interface between FRP and wood structure, and moreover, the numerical calculation that ignores this problem will cause a large deviation. Therefore, the finite element analysis method is proposed to simulate the phenomenon of debonding and sliding of adhesive layer by using the cohesive model. The multiple sets of single shear tests were designed and implemented to obtain the stress-bonding slip curves of the interfaces between wood and two other kinds of materials, namely GFRP and CFRP, and a bilinear bonding slip constitutive model was established. The bonding slip constitutive relation is used to establish the cohesive model in the finite element analysis, and the finite element analysis results corresponding to the single shear tests show that the finite element analysis based on the cohesive model can accurately reflect the bond-slip performance of the FRP-wood interface. The finite element analysis results of the FRP-strengthened

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 日本学术振兴会基金 (JSPS 科研费 19K01125); 国家自然科学基金 (52171264)

作者简介: 李胜凯 (2000—), 男, 山东菏泽人。硕士, 研究方向为现代木结构。E-mail: 2538693559@qq.com。

\* 通信作者: 李 军 (1966—), 女, 山东淄博人。博士, 教授, 主要从事钢结构及木结构等方面的研究。

E-mail: kitjun76@qut.edu.cn。

beam-column joints in glued laminated timber show that the analysis results based on the cohesive model can better reveal the delamination of the fiber sheet. Considering comprehensively the mechanical performance, appearance and cost, GFRP is recommended for the strengthened of wood structures.

**Key words:** glued laminated timber structure; glued-in rods joint; FRP strengthening; cohesive model; mechanical performance

现代木结构可采用齿连接、螺栓和钉连接等多种形式。近年借鉴钢筋混凝土连接的做法,即利用钢筋的锚固作用,使植筋技术在木结构中得以应用。研究表明木结构植筋节点具有刚度大且承载力高等优点<sup>[1-2]</sup>。但受胶层破坏影响,植筋节点的延性会有所降低,有必要采取措施加强。木结构加强方法概括起来主要有嵌补加强法、铁件加强法、支顶加强法、化学加强法、纤维增强聚合物(FRP)加强法等<sup>[3]</sup>。与传统的加强方法相比,FRP材料加强法具有轻质高强、操作简便、耐久性好等优点<sup>[4]</sup>。目前采用的FRP加强法一般通过筋、板、布加强,其中布加强是通过胶黏剂把FRP布缠绕在构件上或者粘贴在构件1个或多个表面,这种加强方法的优势在于:能保证在不损坏构件的同时,对结构进行加固补强。

FRP加强可以提高结构的抗剪性能、刚度及承载力,并能抑制木结构劈裂,进而防止木质结构发生脆性破坏<sup>[5-6]</sup>。以往试验研究中多提到FRP纤维片材剥离破坏现象<sup>[7]</sup>,这种剥离破坏机理有必要研究。近年来国内外学者们对FRP布与结构界面的黏结滑移进行了大量试验探究。郭樟根等<sup>[8]</sup>采用修正梁模型对FRP加强混凝土受弯构件的黏结滑移进行了试验研究;ESMAIL等<sup>[9]</sup>开展了FRP与不同质地混凝土之间的黏结滑移研究,并提出与试验数据相吻合的黏结滑移模型;施嘉伟等<sup>[10]</sup>通过试验和有限元模拟的方法分析了FRP-混凝土界面的剥离问题;GAO等<sup>[11]</sup>建立了一种新的FRP-混凝土黏结滑移模型,通过试验验证了其准确性;AL-SAAWANI等<sup>[12]</sup>通过建立有限元内聚力模型对FRP-混凝土之间的脱粘破坏进行研究。目前研究大多针对FRP与混凝土界面,对于FRP与胶合木界面研究较为匮乏,因此,有必要对其展开研究。

双线性内聚力模型可用于模拟材料的断裂和破坏行为<sup>[13]</sup>,有限元分析中可以用双线性内聚力模型建立界面单元,实现FRP与基材之间的黏结滑移行为<sup>[14]</sup>。所谓内聚力模型,即一种用于模拟材料黏结和断裂行为的方法,可用于模拟材料间的接触行为,利用内聚力单元描述胶合木与FRP片材的黏结界面,有助于降低数值模拟产生的数据偏差。

本文首先采用试验方法分析FRP布与胶合木之间的黏结滑移本构关系,进而利用内聚力单元有效分析FRP加强型梁柱植筋节点的受力性能,并合理反映FRP布的剥离情况,可为胶合木梁柱植筋节点的设计与加固提供有益参考。

## 1 黏结滑移本构试验方案

对于FRP-木材的界面黏结性能通常以剪切试验为主,目前所采用的剪切试验类型主要有单剪试验<sup>[15]</sup>、双剪试验<sup>[16]</sup>。单剪试验的试件制作简单,只产生1个剥离路径,便于观察整个破坏过程,而双剪试验结果会出现至少2个剥离路径且不同步,会对试验结果造成一定程度的影响<sup>[17]</sup>。本文为了研究FRP加强型胶合木梁柱节点的受力性能,选择单剪试验研究FRP-木材的界面黏结性能,因为节点中的FRP-木材界面的剥离也是1个路径,应用单剪试验更为直接、方便。

为了与胶合木植筋节点的木材相对应,本试验木材选用花旗松。选材时注意选用纹理清晰且通体无裂纹的,避免额外的影响因素。本试验采用的FRP布共两类,碳纤维增强型(CFRP)和玻璃纤维增强型(GFRP),二者具体性能参数由厂家提供,详见表1。胶黏剂采用纤维工程加固补强专用浸渍胶,可在纤维片材与花旗松胶合木之间有效渗透黏结,其力学性能如表2所示。

共设计6个系列的试件,其中包括玻璃纤维(GFRP)粘贴试件和碳纤维(CFRP)粘贴试件。本剪切试验对常规单剪试验进行了改进,试验加载装置如图1(a)所示。改进目的是为了保证加载时FRP片材与力线对齐,具体做法如图1(b)所示,试件由木材基体、FRP布、胶黏剂、夹具组成,上部加持区的木材厚度

为纤维布粘贴部分木材厚度的 2 倍。FRP 的粘贴长度以及宽度如表 3 所示。

加载设备采用 SHT4305 微机控制电液伺服万能试验机,采用位移控制,加载速率为 1 mm/min。

表 1 FRP 力学性能

FRP 材料	质量/(g · m <sup>-2</sup> )	弹性模量/MPa	厚度/mm	抗拉强度/MPa
GFRP	450	7.2 × 10 <sup>5</sup>	0.170	1500
CFRP	200	2.0 × 10 <sup>5</sup>	0.111	3017

表 2 胶黏剂力学性能

抗拉强度/MPa	受拉弹性模量/MPa	伸长率/%	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa
54.4	3.3 × 10 <sup>3</sup>	2.1	76.3	100.7

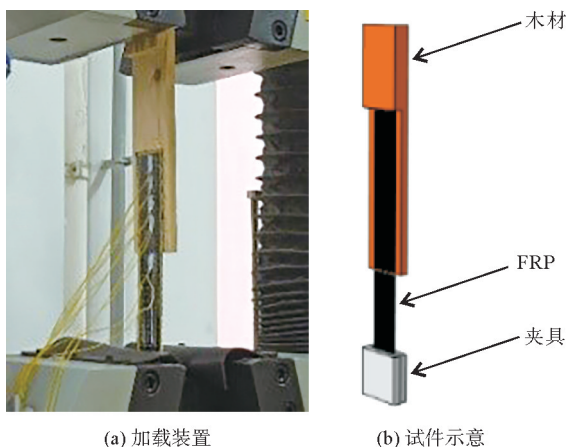


图 1 加载装置与试件示意

表 3 试件编号及参数

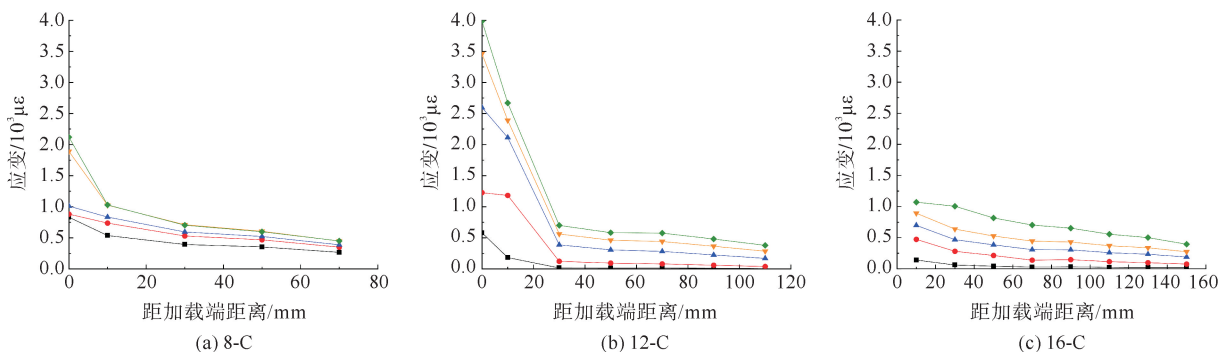
试件编号	粘贴材料类别	粘贴长度/mm	粘贴宽度/mm
8-G	GFRP	80	40
8-C	CFRP		
12-G	GFRP	120	40
12-C	CFRP		
16-G	GFRP	160	40
16-C	CFRP		

注:粘贴长度为试件上的实际粘贴长度;8-G 和 8-C 分别表示粘贴长度为 80 mm 的玻璃和碳纤维试件,其他试件编号以此类推。

## 2 试验结果分析

### 2.1 应变分布及发展趋势

图 2 为各级荷载下,不同粘贴长度的 GFRP 和 CFRP 的应变分布规律,从图中可以看到,各试件的应变分布规律比较相似,在荷载一定的情况下,离下部加载端越近,应变越大;离 FRP 未被加持端(以下称作自由端)越近,应变越小。对比 CFRP 试件和 GFRP 试件,可以看出在距离加载端相同位置处,GFRP 试件的应变均高于 CFRP 试件。当 FRP 粘贴长度为 120 mm 且荷载为 1.0 P<sub>u</sub> 时,荷载传到距离加载端 110 mm 左右时,CFRP 自由端应变值为 378.14 με,此时应变接近最大应变的 9.25%;而 GFRP 自由端应变值为 1112.24 με,应变值为最大应变的 16.78%。说明 GFRP 的应力传递区域更大。



(a) 8-C

(b) 12-C

(c) 16-C

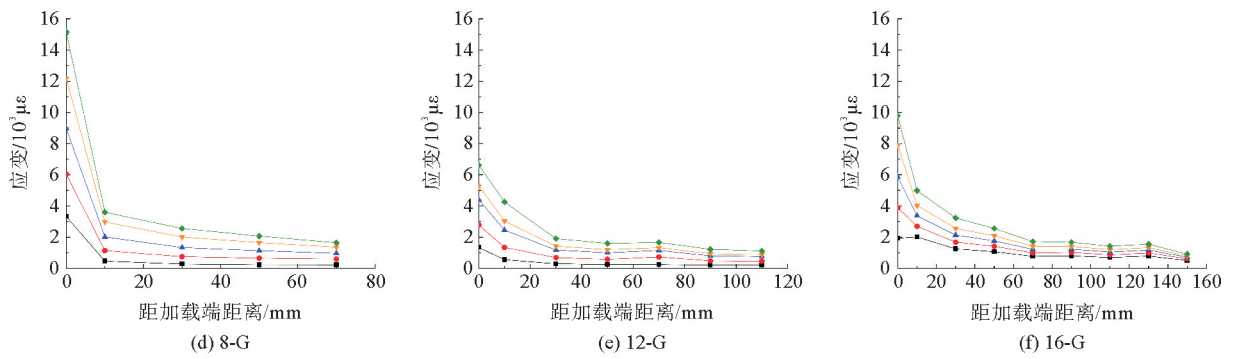


图 2 各级荷载下FRP应变分布( $P_u$ 为极限荷载)

—■—  $0.2P_u$ ; —●—  $0.4P_u$ ; —▲—  $0.6P_u$ ; —◆—  $0.8P_u$ ; —★—  $1.0P_u$

### 2.2 黏结应力-滑移曲线

FRP-木材界面的黏结剪应力可由单剪试验中 FRP 表面的应变值计算得到,如式(1)所示:

$$\tau(x) = E_f t_f \frac{d\epsilon(x)}{dx} \tag{1}$$

式中: $\tau(x)$ 为黏结剪应力; $E_f$ 为 FRP 材料的弹性模量; $t_f$ 为 FRP 材料厚度; $d\epsilon(x)$ 为 FRP 材料的应变增量。

在单剪试验中,胶合木端部设置为不动铰,因此 FRP-木材界面的滑移量可通过对 FRP 的应变从自由端积分所得,如式(2)所示:

$$s(x) = \int \epsilon(x) dx \tag{2}$$

式中: $s(x)$ 为滑移量; $\epsilon(x)$ 为 FRP 的应变。

联立式(1)和(2)即可得到 FRP 与木材界面黏结滑移曲线,参考文献[18]确定 FRP-木材界面有效黏结长度的测量方法,即:有效黏结长度取 FRP-胶合木单剪试验中测得的最大黏结剪应变变点与 3%最大黏结剪应变变点之间的距离。经计算得出 GFRP 试件的有效黏结长度为 128~161 mm,CFRP 试件的有效黏结长度为 117 mm 左右。图 3 为 GFRP 试件和 CFRP 试件有效黏结长度范围内的黏结滑移曲线。

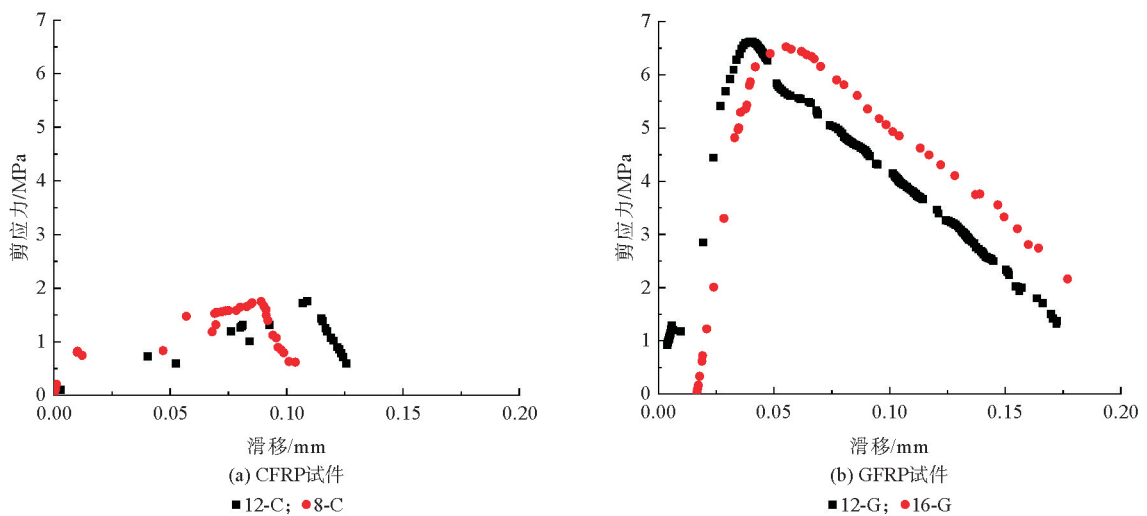


图 3 试件黏结滑移曲线

观察图 3 可以发现,CFRP 试件和 GFRP 试件的黏结滑移曲线整体形状相似,GFRP 试件的最大剪应力远高于 CFRP 试件。曲线均由上升段和下降段两部分组成,上升段时,FRP-木材界面未发生明显剥离

破坏,曲线近似表现出线性特征,随着滑移量的增大,剪应力上升;进入下降段时,FRP-木材界面开始发生局部剥离破坏,随着滑移量的增加,剪应力逐渐降低,直至到达极限滑移量,此时FRP-木材界面会发生明显脱粘现象。

### 2.3 黏结滑移本构模型

构建准确有效的黏结滑移模型本构关系,是进行有限元计算的前提。现阶段关于FRP-木材界面黏结滑移本构模型的具体选取与应用准则尚缺乏统一的规范标准,试验得到的数据离散性较大,无法直接应用到有限元模型中,因此需要确立适用于有限元分析的黏结滑移本构模型。

本文采用适用于混凝土或木材黏结界面的双线性模型,图4为双线性模型拟合曲线<sup>[8]</sup>。剪应力 $\tau$ 和滑移量 $s$ 的关系曲线采用式(3)和式(4)表示,图4中曲线反映了黏结长度为120 mm的2种粘贴材料试件的试验结果与拟合计算结果的对比情况。

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \eta \quad (s \leq s_0) \quad (3)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = 1 - \frac{\eta - 1}{\eta_u - 1} \quad (s > s_0) \quad (4)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为最大剪应力; $\eta = s/s_0$ , $\eta_u = s_u/s_0$ , $s_0$ 为最大剪应力对应的位移, $s_u$ 为界面极限滑移量。

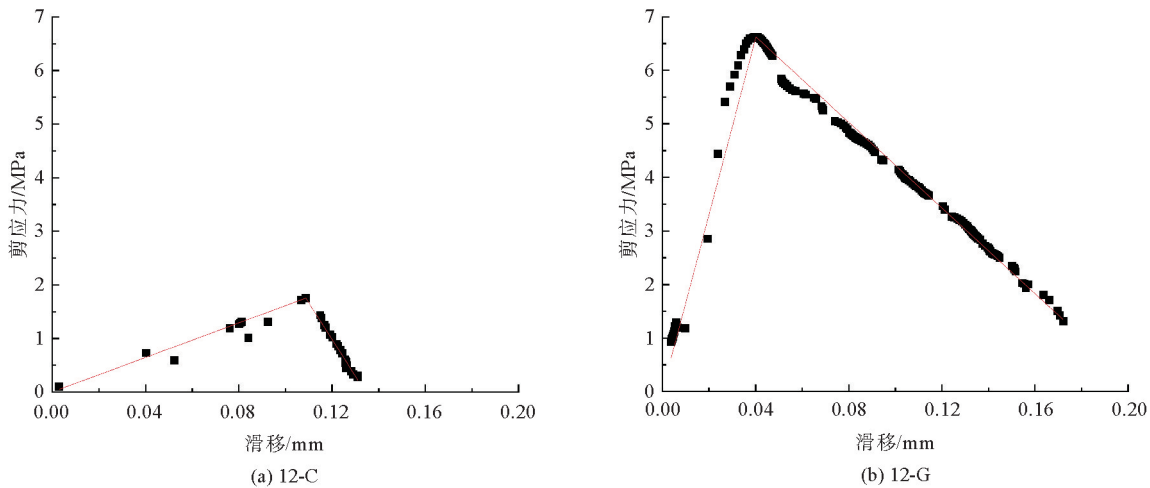


图4 双线性模型拟合曲线

■单剪试验; —双线性模型拟合

通过观察发现双线性模型与试验数据吻合度较高,拟合得到的CFRP试件和GFRP试件的界面极限滑移量 $s_u$ 分别为:0.135、0.176 mm。为了基于有限元方法对FRP加强型胶合木梁柱节点的黏结滑移影响进行分析,提取双线性模型曲线的各项参数,如表4所示。

表4 双线性模型曲线的关键参数

试件类型	应力峰值/MPa	斜率/(N·mm <sup>-1</sup> )	断裂能/(N·mm <sup>-1</sup> )
GFRP试件	6.624	165.000	0.583
CFRP试件	1.752	15.165	0.118

### 2.4 FRP-木材界面有限元模拟

内聚力模型可以通过定义材料之间的黏结特性如黏结滑移曲线的应力峰值、斜率、临界断裂能,来描述材料之间的黏结滑移行为。本文借助FRP-木材界面单剪试验,基于内聚力单元建立与双线性模型相对应的单剪试件有限元模型(以12-C为例),并将试验结果与其进行对比分析,为后续研究提供依据。分析中的木材材料性能参照花旗松胶合木材料性能试验设置,各参数如表5所示。

表 5 木材力学性能参数

MPa

顺纹抗压强度	顺纹抗剪强度	横纹径向抗压强度	横纹径向抗剪强度	横纹弦向抗压强度	横纹弦向抗剪强度
50.0	24.8	10.2	6.58	4.43	5.09

木材顺纹受拉、受压,横纹受拉屈服时会发生应变软化现象,横纹受压达到屈服强度后则会发生二次硬化现象,因此将木材受压本构简化为双折线模型,受拉本构简化为单折线模型。木材采用 Abaqus 有限元分析软件中八节点线性六面体单元(C3D8R),FRP 采用壳单元(S4R),浸渍胶采用内聚力单元(COH3D8)。单剪试验和模拟的荷载-位移曲线如图 5 所示。

对比模拟、试验二者曲线可发现发展趋势基本一致,极限荷载误差为 3.44%。由此可见,基于内聚力单元的单剪试件有限元模型与单剪试验所得结果吻合较好,以此验证了基于内聚力单元的 FRP-木材界面有限元模拟的有效性。后续节点受力分析中可以采用内聚力单元考虑黏结滑移影响。

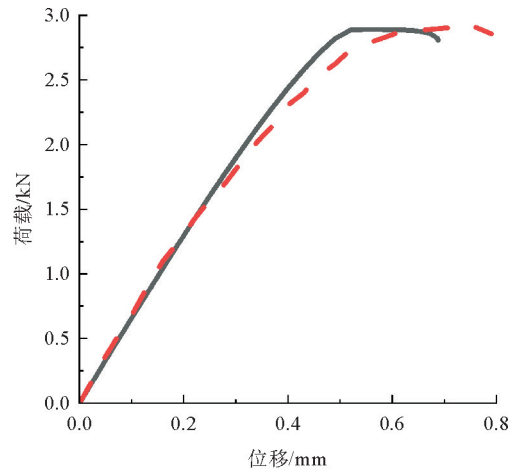


图 5 荷载-位移曲线  
— 模拟; - - 试验

### 3 加强型梁柱节点设计及受力分析

#### 3.1 加强型梁柱节点设计及加载

本课题组在既有研究中提出了 GFRP 与 CFRP 加强型胶合木梁柱植筋节点,其几何模型和 FRP 粘贴方式如图 6 和图 7 所示。FRP 加强型节点是在纯植筋节点的基础上外包纤维片材。在梁的核心区粘贴 U 型纤维片材以提高构件的抗剪承载力;在梁柱交接处的梁上下两侧粘贴 L 型纤维片材以提高抗弯承载力;增加环向包裹纤维对 U 型和 L 型纤维片材起到延缓脱粘作用。

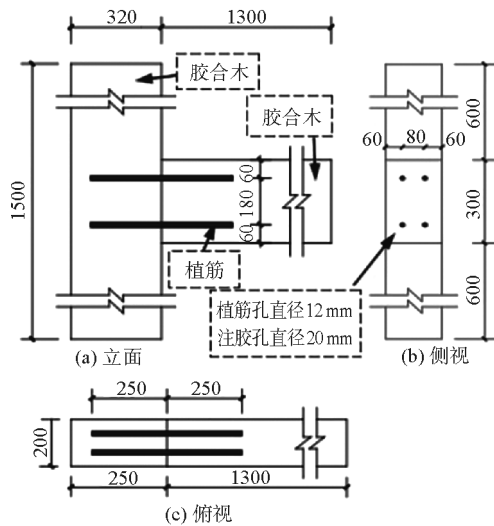


图 6 几何模型(单位:mm)

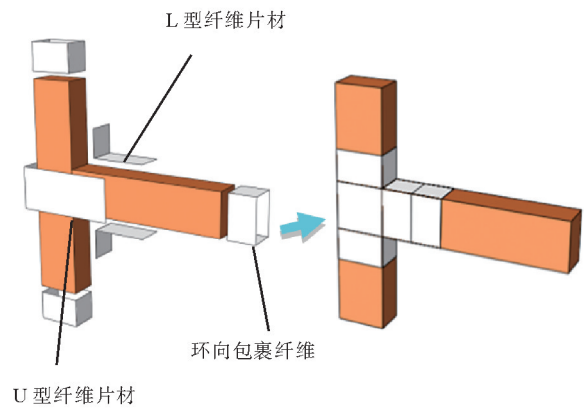


图 7 FRP 粘贴方式

胶合木柱上下两端完全固定,并在梁末端施加循环往复荷载,如图 8 所示。节点试验研究发现,FRP 与木材的黏结界面有明显的黏结滑移现象(图 9),U 型纤维片材梁柱交接处发生了剥离和脱粘破坏。但是未考虑黏结滑移的 Abaqus 节点有限元分析发现,结果与试验分析存在误差,因此有必要引入黏结滑移模型减小误差。



图 8 梁柱节点加载

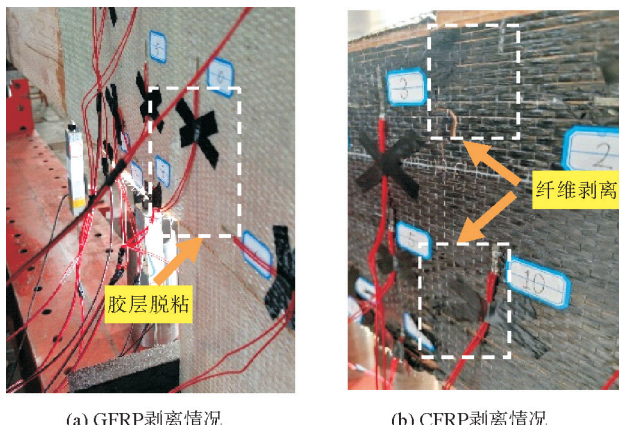


图 9 纤维布脱粘剥离情况

### 3.2 加强型节点骨架曲线对比分析

图 10 中共有 6 组试件,图例中 GFRP 加强试件用 G 表示,CFRP 加强试件用 C 表示;T 表示试验数据、Tie 表示未考虑黏结滑移而采用 Tie 约束时的模拟数据、Co 表示考虑黏结滑移采用内聚力单元的模拟数据。根据图 10 可知,考虑黏结滑移的模型与未考虑黏结滑移的模型在初期加载时没有明显差异。但在荷载达到一定程度后,考虑黏结滑移的模型出现明显下降段,荷载随着位移增加而降低,而未考虑黏结滑移的模型则仍然持续上升。相较于未考虑黏结滑移 Tie 模型,基于内聚力单元的有限元模型分析结果更能反映极限承载力的大小以及达到极限后的承载力下降趋势。但是,试验和有限元分析的初期刚度存在差异,误差来源应该是:试验中植筋胶层未必均匀饱满,但有限元分析未考虑胶层等缺陷;有限元分析中的 Tie 约束和内聚力单元设置也会导致初始刚度增加。

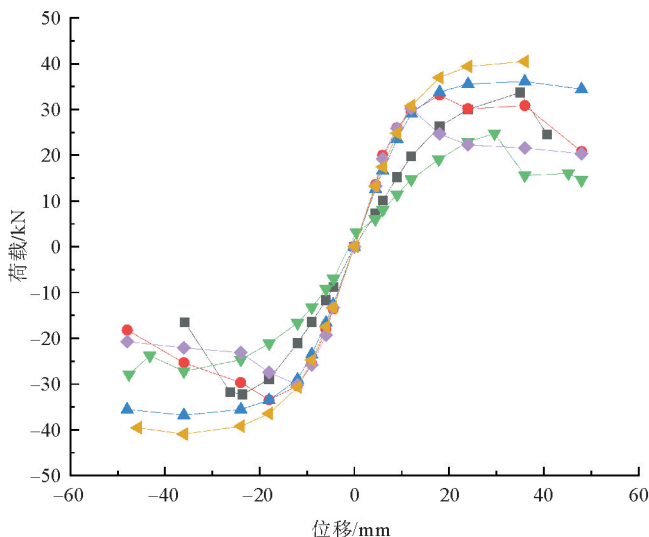


图 10 骨架曲线对比

—■— G-T; —●— G-Co; —▲— G-Tie; —▼— C-T; —◆— C-Co; —▲— C-Tie

根据表 6 中的试验数据和有限元模拟结果来看,在 GFRP 试件的极限荷载中 Tie 约束与试验结果相差 7.14%,Co 模型与试验数据相差降低至 1.72%,屈服荷载误差从原来的 9.03%减小至 0.45%;在 CFRP 试件的极限荷载中,Tie 约束与试验结果相差 36.92%,Co 模型与试验数据相差降低至 2.09%,屈服荷载误差从原来的 70.11%减小至 30.00%。由此可见,通过内聚力模型,有限元模拟与试验结果之间的误差得到了显著地缩减,使得模拟结果更加接近实际试验数据。这表明内聚力模型在有限元中发挥了重要作用,能够提高模拟结果的准确性,从而准确地预测试验数据。

表 6 试验及模拟荷载值

荷载类型	G-T	G-Co	G-Tie	C-T	C-Co	C-Tie
极限荷载/kN	33.73	33.15	36.14	29.60	30.22	40.53
屈服荷载/kN	29.12	28.99	31.75	20.61	26.38	35.06

### 3.3 内聚力损伤对比及应力分析

图 11 为在位移 18 mm 情况下梁柱节点核心区粘贴的 U 型纤维片材正面的内聚力单元损伤图。对

比图 11(a)(b)所示的内聚力单元损伤情况可以看出,G-Co 模型的脱粘剥离范围小于 C-Co 模型,在 C-Co 模型中,靠近柱侧的梁柱连接处粘贴部分几乎完全剥离。

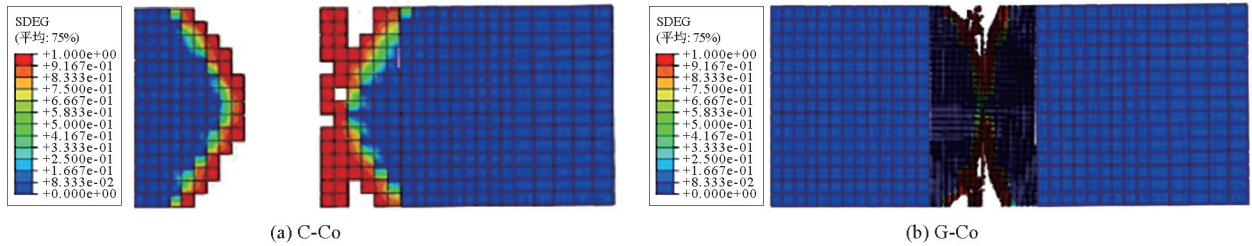


图 11 内聚力模型损伤

图 12(a)(b)为采用内聚力模型时纤维片材的应力云图,二者的较大应力发生位置不同,G-Co 纤维片材的应力主要集中在梁柱交接处,而 C-Co 纤维片材的较大应力分布于靠近柱端附近。可以看出,这里的应力分布规律与上述内聚力损伤情况相对应;图 12(c)(d)为采用 Tie 约束时的应力云图,特别是 CFRP 片材,其应力分布情况根本无法与实际内聚力损伤情况相对应,按照 Tie 约束进行分析将会产生误判。虽然 CFRP 材料强度高于 GFRP 材料,从图 10 所示两种材料的试验骨架曲线看,CFRP 加强型胶合木梁柱植筋节点的承载力较低,试验中也发现 CFRP 片材剥离程度严重,这也说明采用内聚力模型的分析结果具有可参考性。

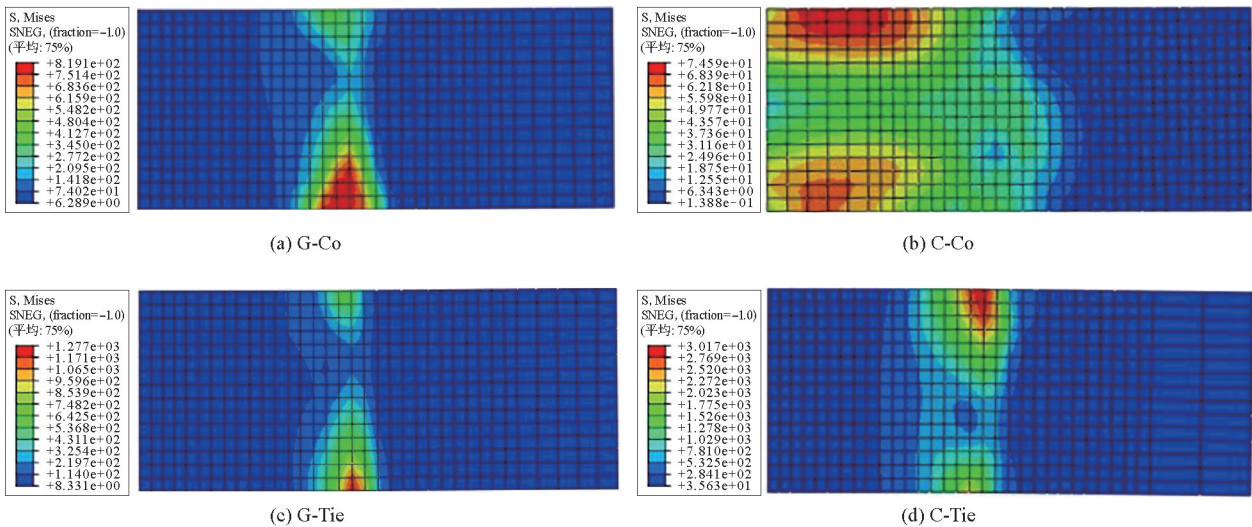


图 12 FRP 片材应力云图

### 4 结束语

本文针对 FRP 加强型胶合木梁柱植筋节点中纤维片材剥离问题,通过设计并实施单剪试验获得黏结滑移本构关系,进而基于内聚力模型对涉及到的植筋节点受力性能进行分析,得到以下结论:

- 1) 单剪试验及其相应的有限元分析结果表明,基于内聚力模型的有限元分析能够准确地反映 FRP-木材界面的黏结滑移性能。
- 2) 单剪试验适用于 FRP 加强型胶合木梁柱植筋节点中的 FRP-木材界面的黏结滑移问题研究。
- 3) FRP 加强型胶合木梁柱植筋节点骨架曲线、纤维片材损伤以及应力分布等分析结果表明,基于内聚力模型的分析结果较好地揭示了纤维片材的剥离情况,但是 Tie 约束下的分析结果容易造成误判。针对有限元分析的初期刚度偏大问题,今后有必要调查统计纤维片材以及植筋胶层的真实黏结状态,以改进有限元模型。

## 参 考 文 献 (References):

- [1] 凌志彬,杨会峰,刘伟庆,等. 胶合木植筋黏结锚固性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(9):132-141.  
LING Zhibin, YANG Huifeng, LIU Weiqing, et al. Experimental study on bond and anchorage behavior of glued-in rebar in glulam[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(9):132-141.
- [2] DIEGO F, CHRISTIAN D, PIERRE B. Characterizing the performance of adhesive used in glued-in rod timber connections at elevated temperatures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(4):38-43.
- [3] 金昱成,苏何先,潘文,等. 木结构榫卯节点抗震性能及加固对比试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):138-147.  
JIN Yucheng, SU Hexian, PAN Wen, et al. Experimental research on seismic performance and strengthening of timber mortise and tenon joints in timber structures[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2):138-147.
- [4] TAN N N, KIEN T N, HIEU D D, et al. Nonlinear finite element analysis of FRP-strengthened full-size reinforced concrete beams[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2023, 8(5):139-143.
- [5] BISCAIA H C, CHASTRE C, BORBA I S, et al. Experimental evaluation of bonding between CFRP laminates and different structural materials[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(3):04015070.
- [6] 雷云霄,刘生纬,赵建昌,等. CFRP-木材界面黏结剪应力-滑移关系试验研究[J]. 复合材料科学与工程,2022(11):15-19.  
LEI Yunxiao, LIU Shengwei, ZHAO Jianchang, et al. Experimental study on the bond shear stress-slip relationship at CFRP-wood interface[J]. Journal of Composite Materials Science and Engineering, 2022(11):15-19.
- [7] 潘毅,刘茜,任宇,等. 基于不同黏结材的 CFRP 链-混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 土木工程学报,2021,54(1):26-37.  
PAN Yi, LIU Qian, REN Yu, et al. Experimental study on the bond behavior of CFRP strand sheet-concrete with different types of bond agents[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1):26-37.
- [8] 郭樟根,孙伟民,曹双寅. FRP 与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究[J]. 土木工程学报,2007(3):1-5.  
GUO Zhanggen, SUN Weimin, CAO Shuangyin. Experimental study on bond-slip behavior between FRP and concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(3):1-5.
- [9] ESMAIL A A, ABDULKADIR Ç. Behavior of bond-slip relationship of lightweight and normal weight geopolymer with various FRP sheets using end-groove anchorage[J]. Construction and Building Materials, 2022, 343:128060.
- [10] 施嘉伟,徐冰雷. 复合受力模式下 FRP 片材-混凝土界面的受力行为及承载力预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):489-496.  
SHI Jiawei, XU Binglei. Bond behavior and capacity prediction of FRP laminate-to-concrete interface under mixed-mode loading[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2022, 52(3):489-496.
- [11] GAO X H, GAO L, ZHANG F. A new bond-slip model of hybrid bonded FRP-to-concrete joints[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(1):270.
- [12] AL-SAAWANI M A, AL-NEGHEIMISH A I, EL-SAYED A K, et al. Finite element modeling of debonding failures in FRP-strengthened concrete beams using cohesive zone model[J]. Polymers, 2022, 14(9):1889.
- [13] 郭鹏成,姚波,李木子. 环氧树脂混合料断裂特性与数值模拟[J]. 建筑材料学报,2020,23(5):1160-1166.  
GUO Pengcheng, YAO Bo, LI Muzi. Fracture characteristics and numerical simulation of epoxy resin mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1160-1166.
- [14] 陈朝晖,魏超,罗绮雯,等. 基于内聚力模型的 FRP 布加固混凝土梁柱子结构受力性能分析[J]. 建筑结构学报,2019,40(9):122-130.  
CHEN Zhaohui, WEI Chao, LUO Qiwen, et al. Analysis on mechanical properties of FRP retrofitted concrete beam-column structure using cohesive model[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9):122-130.
- [15] 姜绍飞,臧荣彬,宋华霖,等. 表面开槽碳纤维布-混凝土界面抗剪性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(6):52-60.  
JIANG Shaofei, ZANG Rongbin, SONG Hualin, et al. Experimental study on interfacial shear behavior of CFRP-concrete with surface groove[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6):52-60.
- [16] 姜德文,黄海林,刘光伟,等. 基于双剪试验的铝合金板-混凝土界面黏结滑移性能研究[J]. 工程力学,2020,37(S1):287-295.  
JIANG Dewen, HUANG Hailin, LIU Guangwei, et al. Study on bond slip performance of aluminum alloy-concrete interface based on double shear test[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(S1):287-295.
- [17] 庞育阳. 极端服役环境下 CFRP-钢界面粘结性能研究[D]. 南京:东南大学,2019.  
PANG Yuyang. Study on the bond behavior of CFRP-steel interfaces under extreme service environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [18] LI A B, WANG H, LI H, et al. Estimation of bond strength and effective bond length for the double strap joint between carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plate and corroded steel plate[J]. Polymers, 2022, 14(15):3069.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)