

崔炜奇,常存德,王鹏俊,等.模块化FRP-木组合薄壁中长柱轴压力学性能分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):82-89.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250386

CUI Weiqi, CHANG Cunde, WANG Pengjun, et al. Analysis of axial compressive performance of modular hybrid FRP-timber thin-walled medium-long columns[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(1): 82-89. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250386

模块化FRP-木组合薄壁中长柱轴压力学性能分析

崔炜奇¹, 常存德^{1*}, 王鹏俊¹, 常欣然²

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110166)

摘要: 为探究装配式建筑中新型模块化FRP-木组合(MHFT)薄壁柱的截面构造与设计方法, 对MHFT薄壁中长柱在不同设计参数下的轴压力学性能开展研究。建立MHFT薄壁中长柱的有限元模型, 分析组合柱轴压全过程的受力机理, 研究FRP层数与铺设角度、角模块截面形式及长细比等关键参数对轴压性能的影响。研究表明: 受力全过程中, 板模块与角模块承担主要载荷, FRP起到有效的横向约束作用。当FRP层数由1层增加至2层时, 承载力提升9.5%, 提升幅度最大; 纤维沿 $\pm 45^\circ$ 铺设的构件峰值载荷前更易变形; 角模块开槽未改善构件的承载力和刚度; 长细比增大时, 承载力变化不显著, 但较大长细比易引发局部屈曲, 限制塑性发展。MHFT组合柱在轴压作用下能充分发挥木材的纵向承载能力与FRP的横向约束效应, 实现高效协同受力; 当FRP层数为1~2层、纤维方向沿 $0^\circ/90^\circ$ 、长细比小于18.20且采用完整角模块截面构型时, 构件的轴压性能较优。

关键词: FRP-木组合构件; 薄壁柱; 轴压性能; 截面构型; 长细比

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0082-08

Analysis of axial compressive performance of modular hybrid FRP-timber thin-walled medium-long columns

CUI Weiqi¹, CHANG Cunde^{1*}, WANG Pengjun¹, CHANG Xinran²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Company Limited, Shenyang 110166, China)

Abstract: To investigate the cross-sectional configuration and design method of an innovative modular hybrid FRP-timber (MHFT) thin-walled column for prefabricated buildings, the axial compressive mechanical properties of MHFT thin-walled medium-long columns with different design parameters were studied. A finite element model of MHFT thin-walled medium-long columns was established to analyze the stress mechanism throughout the entire axial compression process. The effects of key parameters, including the number and fiber orientation of FRP layers, the sectional form of corner modules, and the slenderness ratio, on the axial compression performance were studied. The results show that during loading, the plate and corner modules bear the main load, while FRP exerts an effective lateral confinement effect on the composite columns. With the increase in the number of FRP layers from 1 to 2, the bearing capacity increases by 9.5%, representing the maximum improvement amplitude. The components with fibers laid along $\pm 45^\circ$ exhibit more significant deformation prior to peak load. Slotting of the corner modules fails to improve the bearing capacity and stiffness of the components. An increase in slenderness ratio leads to an insignificant change in bearing capacity, yet a relatively large slenderness ratio is prone to induce local buckling and thus restricts the development of plasticity. Under axial compression, MHFT composite columns can fully utilize the longitudinal bearing capacity of timber and the lateral confinement effect of FRP, achieving an efficient synergistic bearing performance. The axial compression performance of the components is optimized when the number of FRP layers is 1-2, the fiber orientation is $0^\circ/90^\circ$, the slenderness ratio is less than 18.20, and un-slotted corner modules are adopted.

收稿日期: 2025-09-12 修回日期: 2025-11-20 接受日期: 2025-11-26 责任编辑: 焦丽

基金项目: 辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金-博士科研启动项目)(2024-BSLH-234)

作者简介: 崔炜奇(1991-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事FRP-木组合结构方面的研究。E-mail: weiqi.cui@sjzu.edu.cn

通信作者: 常存德(2000-), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事FRP-木组合结构方面的研究。E-mail: CCunde_Lum@163.com

Keywords: hybrid FRP-timber sections; thin-walled columns; axial compressive performance; cross-sectional configuration; slenderness ratio

0 引言

木材凭借其自重轻、强度高、易加工和固碳减排的独特生态属性, 在推动建筑行业向绿色、低碳、可持续发展转型中展现出巨大潜力。现代木结构建筑, 通过将木材制成胶合木等工程木制品^[1-2]或与其他材料结合制成钢-木、木-混凝土等组合构件^[3-5], 不仅克服了木材自身横纹强度低、易开裂、截面尺寸受限等局限性, 还能够显著提高木构件的承载力和刚度, 有利于整体结构稳定, 充分发挥结构性能和环境效益^[6-7]。

纤维增强聚合物 (fiber-reinforced polymer, FRP) 由玻璃纤维、碳纤维等高性能纤维与聚合物基体复合而成, 具有质量轻、强度高、抗腐蚀性强以及便于裁剪等特点, 近年来被广泛应用于木柱加固^[8]。研究表明, 木柱经 FRP 材料加固约束后, 承载力、延性、刚度等关键力学性能得到提升^[9-16], 且性能受 FRP 粘贴层数^[9-14, 16]、缠绕角度^[11-12]、粘贴尺寸^[14]、粘贴位置^[9, 13-16]等加固方式影响。随着现代木结构的发展, FRP 与木材的结合已从加固修复延伸至新型组合结构的设计与制造。通过将薄壁木材的顺纹方向作为受力方向, 以 FRP 弥补木材横纹强度低、易屈曲等缺陷, 一种新型的 FRP-木组合 (hybrid frp-timber, HFT) 薄壁构件由此应运而生^[17]。HFT 薄壁构件是由薄木板与 FRP 薄层经胶合制成的新型装配式建筑构件, 具有节材、轻质、高承载等优势。目前制造 HFT 薄壁构件的方法主要有模压成型法、折叠法和模块组装法。模压成型法制成的 FRP-木 C 型薄壁柱相较纯木柱在承载力与抗屈曲能力方面更优, 其强重比显著高于类似质量的冷弯薄壁钢柱, 但该工艺受限于模具尺寸且成本较高^[18-21]。折叠法无需模具, 制成的 HFT 薄壁柱在承载力、刚度、延性及强重比方面较纯胶合板构件有显著提升, FRP 的应用有效抑制了纯胶合板构件中, 相邻胶合板之间常见的界面脱黏破坏, 提高了构件的抗屈曲能力, 其强重比可达到类似质量冷弯薄壁钢柱的 80%, 但折叠所引起的 FRP 织布在尖锐“铰接”区域的环向应变连续性较差会导致构件的安全性降低^[22-23]。模块组装法是将板模块与角模块快速钉装成具有预设截面形状的临时木构件, 通过外围紧密缠绕树脂浸渍的连续 FRP 织布, 完全固化后形成模块化 HFT (modular HFT, MHFT) 薄壁构件。

相关研究表明, 增加 FRP 层数能够显著提升构件的强度、刚度并抑制屈曲^[24-25]。相较于模压成型法受模具尺寸限制且成本高的不足, 以及折叠法因“铰接”区域尖锐使 FRP 织布环向应变连续性差的问题, MHFT 构件在强度、强重比、刚度以及 FRP 与木材协同工作性能方面表现出明显优势。

既有研究主要针对 HFT 薄壁轴压短柱的力学行为, 侧重于材料强度破坏和制造方法可行性分析, 但对 HFT 薄壁中长柱构件发生屈曲和失效的机理研究有待深化^[19-20, 22, 24]。基于此, 利用 ABAQUS 软件, 探究 MHFT 薄壁中长柱在轴压下的受力特征, 研究不同参数 (FRP 层数、FRP 方向、截面构型、长细比) 对构件受力性能的影响, 以为该类组合构件的截面构造与设计提供参考。

1 有限元模型设计

1.1 构件设计

受到多种构件设计参数的影响, MHFT 薄壁中长柱相比于短柱更易出现屈曲、偏心弯曲等复杂破坏形式。因此, 设计了不同 FRP 层数、FRP 方向、截面构型、长细比下的 13 个有限元模型, 具体参数见表 1。表 1 中, C1 截面构型^[24]是在截面轮廓的基础上, 由 4 个板模块、4 个角模块、1 个 GFRP 层组成空心薄壁柱构件, 见图 1 (a); C2 截面构型在 C1 截面构型的基础上将角模块开设沟槽, 见图 1 (b)。C2 截面构型增大了板模块与角模块的接触面积, 以探究其是否能增强板模块、角模块、FRP 织布之间的相互作用, 提升构件整体稳定性。

表 1 中, $\lambda = L_0/i_c$, 其中, $L_0 = kL$, k 为长度计算系数, 两端支撑形式为一端固定一端铰支时, k 取 0.8; i_c 为构件截面的回转半径。

$$i_c = \sqrt{\frac{E_c I_c + E_p I_p + E_g I_g}{E_c A_c + E_p A_p + E_g A_g}}$$

式中: E_c 为角模块弹性模量; E_p 为板模块弹性模量; E_g 为 GFRP 弹性模量; I_c 为角模块截面惯性矩; I_p 为板模块截面惯性矩; I_g 为 GFRP 截面惯性矩; A_c 为角模块截面面积; A_p 为板模块截面面积; A_g 为 GFRP 截面面积。

图 1 中, 截面宽度 S 为 170 mm、板厚 t 为 10 mm、C1 截面构型板宽 s 为 120 mm、C2 截面构型板宽 u 为 130 mm、角模块半径 r 为 25 mm。

表 1 模型参数
Tab.1 model parameters

构件编号	构件长度 L/mm	构件长细比 λ	FRP 层数	FRP 纤维编织方向	截面构型	板模块厚度 t/mm
H3-D09-C1-700	700	8.49	3	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H3-D09-C2-700	700	8.55	3	$0^\circ/90^\circ$	C2	10
H1-D09-C1-1100	1 100	13.37	1	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H2-D09-C1-1100	1 100	13.36	2	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H3-D09-C1-1100	1 100	13.35	3	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H4-D09-C1-1100	1 100	13.33	4	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H1-D45-C1-1100	1 100	13.37	1	$\pm 45^\circ$	C1	10
H2-D45-C1-1100	1 100	13.36	2	$\pm 45^\circ$	C1	10
H3-D45-C1-1100	1 100	13.35	3	$\pm 45^\circ$	C1	10
H3-D09-C2-1100	1 100	13.43	3	$0^\circ/90^\circ$	C2	10
H3-D09-C1-1500	1 500	18.20	3	$0^\circ/90^\circ$	C1	10
H3-D09-C2-1500	1 500	18.32	3	$0^\circ/90^\circ$	C2	10
H3-D09-C1-1800	1 800	21.84	3	$0^\circ/90^\circ$	C1	10

注: $0^\circ/90^\circ$ 表示纤维分别沿 0° 和 90° 两个方向交织排布。

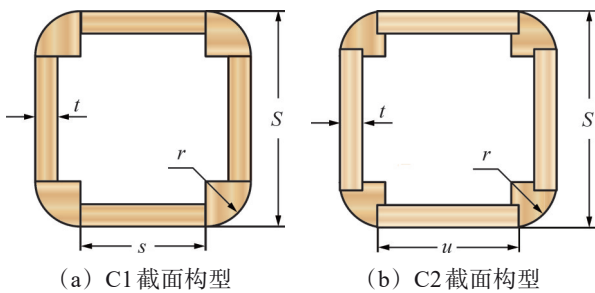


图 1 MHFT 薄壁中长柱截面

Fig.1 section form of MHFT thin-walled medium-long column

1.2 模型建立

充分考虑材料的非线性和几何非线性, 建立 MHFT 薄壁中长柱 ABAQUS 有限元模型。采用线性屈曲分析组合柱在轴压工况下的屈曲模态; 采用 Riks 方法进行非线性位移控制准静态分析组合柱受力的全过程; 根据工程常数 (engineering constants) 定义板模块及角模块, 采用单层板 (lamina) 定义 FRP 层。木材角模块、板模块的材料均选用商用松木, FRP 层选取 GFRP 复合片材 (以双酚 A 型环氧树脂为基体、295 g/m²双向玻璃纤维织布为增强材料)。以上材料的力学参数主要依据已通过试验验证的 MHFT 薄壁短柱研究^[24] 确定, 具体参数见表 2。木材属于正交各向异性材料, 其纵向 (木材纤维的顺纹方向)、径向 (垂直于纤维且沿木材年轮的半径方向)、弦向 (直于纤维且沿木材年轮的切线方向) 的力学性能 (弹性模量、泊松比、剪切模量) 差异极大,

因此设置 3 组参数描述木材不同方向的性能。表 2 中, E_i 为弹性模量 (i 取 1、2、3); ν_{ij} 为不同方向组合的泊松比; G_{ij} 为 $i-j$ 平面内的剪切模量 (j 取 1、2、3, $j \neq i$)。

表 2 材料的力学参数
Tab.2 mechanical parameters of the material

模块	弹性模量/MPa			泊松比			剪切模量/MPa		
	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
板模块	8 092	788	1 060	0.50	0.36	0.36	914	1 003	154
角模块	14 506	595	1 030	0.36	0.28	0.32	653	725	131
GFRP	14 849	14 849		0.24			4 728	4 728	4 728

MHFT 薄壁中长柱的有限元模型见图 2。该模型包括 4 个板模块、4 个角模块和 1 个 GFRP 层, GFRP 与木材表面之间为绑定约束 (tie), 角模块和板模块之间设置为无摩擦硬接触。板模块与角模块均采用实体单元 (C3D8R), GFRP 采用壳单元 (S4R)。

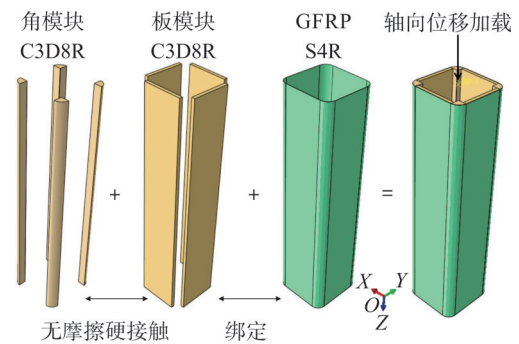


图 2 MHFT 薄壁中长柱有限元模型

Fig.2 finite element model of MHFT thin-walled medium-long column

所有木材模块沿构件长度方向的单元尺寸统一设置为 10 mm。板模块沿宽度和厚度方向的网格尺寸分别为 5 mm 与 1.4 mm。角模块沿圆弧方向的单元尺寸为 3 mm, 沿径向(厚度方向)为 2 mm。GFRP 层沿构件长度方向的单元尺寸为 5 mm, 沿截面环向为 1 mm。在构件有限元模型的顶面中心设置参考点, 且与构件上表面耦合, 约束构件 X 向与 Y 向的平动, 设置其底部完全固定, 沿参考点 Z 轴正向进行位移加载。

相关实验表明, 木材材料的受压性能表现为弹塑性, 因此研究 MHFT 薄壁中长柱轴压力学性能时, 在木材塑性阶段, 采用木材塑性应力-应变数据进行定义。GFRP 的强度参数参照 MHFT 薄壁短柱研究^[24]中的参数设定。采用 Hashin 损伤准则定义 GFRP 的损伤行为, 该准则包含纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸和基体压缩 4 种损伤起始机制^[26], 对应损伤起始判据分别为 F_f^t 、 F_f^c 、 F_m^t 和 F_m^c , 可表示为

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (1)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^C} \right)^2, \quad (2)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (3)$$

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^C} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^L}, \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: σ_{11} 为纵向正应力; σ_{12} 为剪切应力; σ_{22} 为横向正应力; X^T 和 X^C 分别为纤维方向(纵向)的拉伸强度和压缩强度; Y^T 和 Y^C 分别为基体方向(横向)拉伸强度和压缩强度; S^L 和 S^T 分别为纵向和横向的剪切强度; α 为剪切应力在纤维拉伸判据中的贡献系数, 忽略纵向受拉对主导损伤的影响, α 取 0。

模拟过程中未对 GFRP 材料的纤维和基体进行分离建模, 以 F_f^t 、 F_f^c 、 F_m^t 和 F_m^c 表征 GFRP 层在纵向受拉、纵向受压、横向受拉和横向受压时的损伤起始判据, 当任一判据大于等于 1 时, 判定损伤起始。

为量化 GFRP 的损伤状态, 采用 ABAQUS 中的渐进损伤变量表征其损伤进程。定义 d_f 、 d_m 和 d_s 分别对应纤维、基体和剪切损伤模式下的损伤程度, 取值范围为 0~1 (0 表示无损伤, 1 表示完全损伤)。每种损伤模式均设置 4 个断裂能参数, 参考现有研究^[27-28], 将 GFRP 层在纵向与横向的拉伸和压缩断裂能设为 3 N/mm。

在已有 MHFT 薄壁短柱有限元模型^[24]基础上,

沿用其几何构造、材料本构参数、边界条件与加载方式, 确保建模方法的可靠性与结果的可比性。

2 轴压性能分析

2.1 中长柱受力全过程分析

选取构件 H2-D09-C1-1100 为典型构件, 对其进行受力全过程分析, 该构件的载荷-位移曲线见图 3。

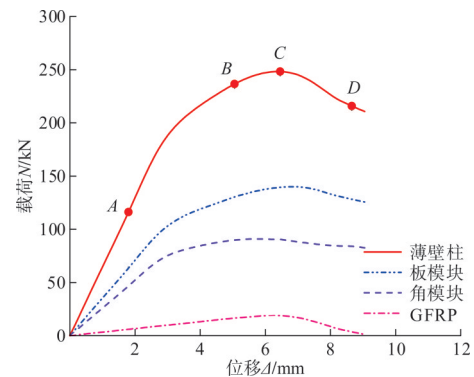


图 3 构件 H2-D09-C1-1100 的载荷与位移关系
Fig.3 relationship between load and displacement of component H2-D09-C1-1100

图 3 中, 定义 5 个特征点 (O、A、B、C、D), 确定 3 个阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段、下降阶段, 对构件 H2-D09-C1-1100 全过程分析如下。

弹性阶段 (OA 段): 该阶段加载初期, 板模块、角模块与 GFRP 均处于弹性工作阶段, 各模块与 GFRP 均单独受力。GFRP 纤维与木材界面粘结完好, 无明显变形。至 A 点时, 板模块与角模块内部应力达到屈服强度极限, 弹性阶段结束。此时板模块、角模块、GFRP 承受的载荷比为 54.7%: 40.2%: 5.1%。

弹塑性阶段 (AC 段): 该阶段初始, 载荷-位移曲线近似线性增长, GFRP 层通过界面粘结产生横向约束效应, 有效抑制了板模块与角模块的塑性变形, 延缓刚度衰减。随着载荷持续增加, 板模块与角模块变形增大, 局部区域出现轻微屈曲变形, 曲线斜率缓慢降低。至 B 点时, 角模块最大应力达到极限抗压强度, 开始发生破坏, 同时 GFRP 发生起始损伤。由于板模块最大应力未达到极限抗压强度, 且 GFRP 产生的横向约束作用抑制了角模块的破坏发展, 使构件承载力继续提升。至 C 点时, 板模块最大应力达到极限抗压强度, 开始发生破坏, 构件达到峰值载荷, 弹塑性阶段结束。此时, 板模块、角模块、GFRP 承受的载荷比为 56.2%: 36.2%: 7.6%。

下降阶段 (CD 段): 该阶段载荷-位移曲线呈

下降趋势, GFRP 所产生的横向约束作用减弱, 构件出现局部屈曲, 刚度进一步降低。至 *D* 点时, 载荷下降至极限载荷的 85%, 构件的轴向位移为峰值载荷时轴向位移的 1.34 倍。此时, 板模块、角模块、GFRP 承受的载荷比为 59.4% : 38.9% : 1.7%。

2.2 应力分析

各特征点处的角模块应力分布见图 4。*A* 点之前, 角模块处于弹性变形阶段。*A* 点时, 角模块两端

及上下 1/4 高度处与板模块接触面应力较大, 该区域最大应力达到屈服强度 (38.20 MPa), 进入弹塑性阶段。*B* 点时, 角模块应力最大为 46.70 MPa, 高应力范围显著增加, 低应力为 38.40 MPa, 此时角模块开始发生破坏。*C* 点时, 角模块应力分布相对均匀, 应力均大于 35.60 MPa, 说明角模块在发生破坏后仍具备较高的承载能力。*D* 点时, 角模块低应力范围占比增加, 应力分布不均匀, 角模块在下部 1/4 高度处发生局部屈曲失稳, 侧向屈曲变形达 7.87 mm。

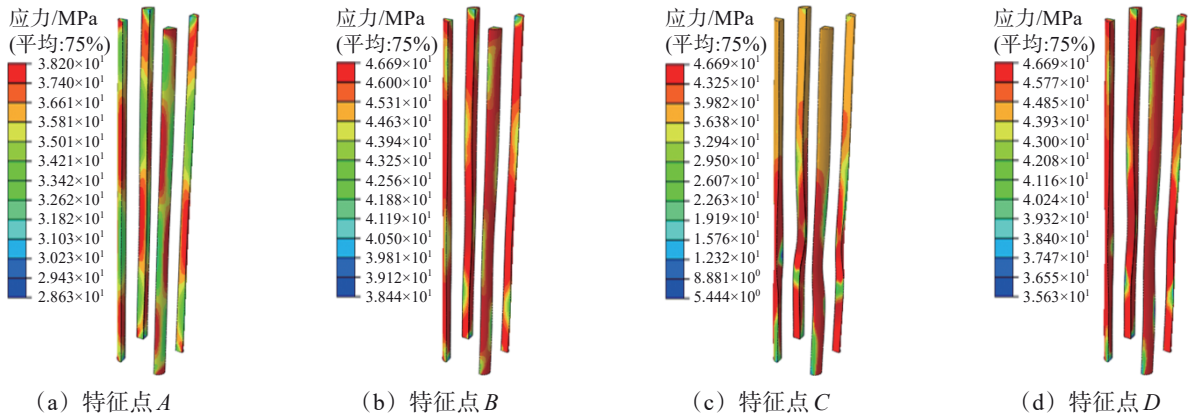


图 4 角模块的应力分布

Fig.4 stress distribution of the corners

各特征点处的板模块应力分布见图 5。*A* 点之前, 板模块处于弹性变形阶段。*A* 点时, 板模块在上下 1/4 高度处应力较大, 该区域最大应力达到屈服强度 (22.40 MPa), 进入弹塑性阶段。*B* 点时, 板模块应力最大为 31.35 MPa, 高应力范围增加, 上下 1/4 高度处及下端应力显著提高。*C* 点时, 板模块最大应力为 33.80 MPa, 达到极

限抗压强度, 开始发生破坏, 最小应力为 9.68 MPa, 低应力范围增加, 发生明显屈曲变形, 同时构件达到峰值载荷。*D* 点时, 板模块最大应力为 33.80 MPa, 最小应力为 1.45 MPa, 低应力区占比持续增大, 板模块在下部 1/4 高度处发生局部屈曲失稳, 侧向屈曲变形达到 13.21 mm, 承载能力逐渐降低。

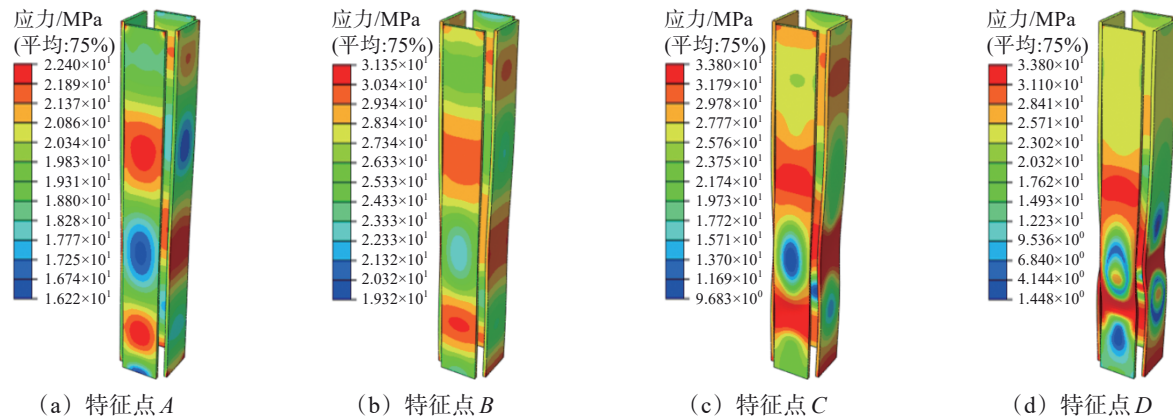


图 5 板模块的应力分布

Fig.5 stress distribution of the panels

各特征点处 GFRP 的损伤发展见图 6。*A* 点时, 角模块与板模块达到屈服强度, GFRP 开始对角模块与板模块起约束作用, 限制角模块与板模块的塑性变形, 基体压缩损伤值较低, 未发生

损伤。*B* 点时, 基体压缩损伤值达到 1, 根据 Hashin 损伤准则, 说明此位置的 GFRP 开始发生纤维损伤。*C* 点时, GFRP 沿纤维方向形成剪切损伤带, GFRP 的横向约束作用减弱, 载荷传递

路径逐步向未损伤区域转移, 构件呈现明显的非线性受力特征。D 点时, 剪切损伤值接近 1, GFRP 形成明显的剪切损伤带, 发生剪切破坏, 其约束作用在下部 1/4 高度处失效。MHFT 薄壁

中长柱轴压下的破坏过程主要表现出 5 个特征: 角模块与板模块发生屈服、角模块发生破坏、GFRP 发生损伤、板模块发生破坏、GFRP 完全损坏。

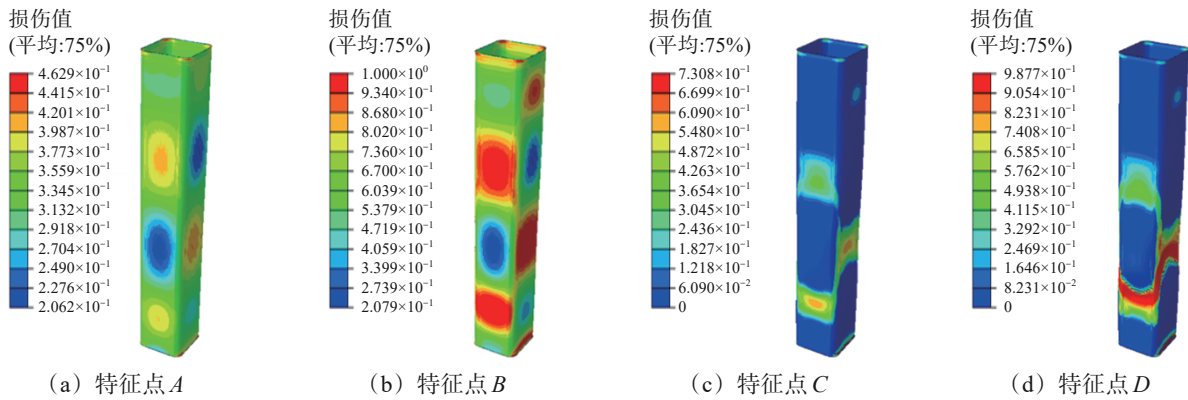


图 6 GFRP 的损伤起始及损伤演化分布

Fig.6 damage initiation and evolution in GFRP

3 影响因素分析

3.1 FRP 层数的影响

FRP 层数对构件载荷-位移的影响见图 7。当 FRP 层数从 1 层依次增加至 2、3、4 层时, 峰值载荷分别提升 9.5%、5.9%、7.3%, 峰值位移依次提升 16.0%、9.4%、3.8%。由此可知, 增加 FRP 层数能够显著提升构件的刚度及抗压承载能力, 增强构件的整体稳定性、提升延性, 从而延缓失效过程。

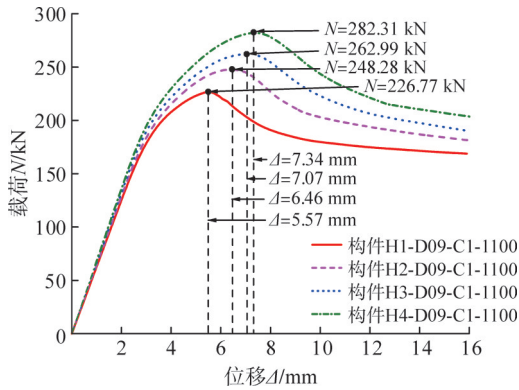


图 7 FRP 层数对载荷-位移的影响

Fig.7 effect of FRP layers on load-displacement

3.2 FRP 纤维方向的影响

FRP 纤维方向对构件载荷-位移的影响见图 8。FRP 纤维方向对构件峰值载荷及弹性段刚度的影响程度较小。当 FRP 层数分别为 1、2、3 层时, 与 FRP 沿 0°/90° 方向相比, FRP 沿 ±45° 方向的构件峰值载荷依次提升 1.0%、2.3%、4.8%, 峰值位移依次增大 12.6%、23.1%、22.3%。这表明, FRP 沿 ±45° 方向布置的构件, 在达到峰值载荷前的刚度降低更多,

变形倾向显著增强, 更易发生弹塑性失稳破坏。

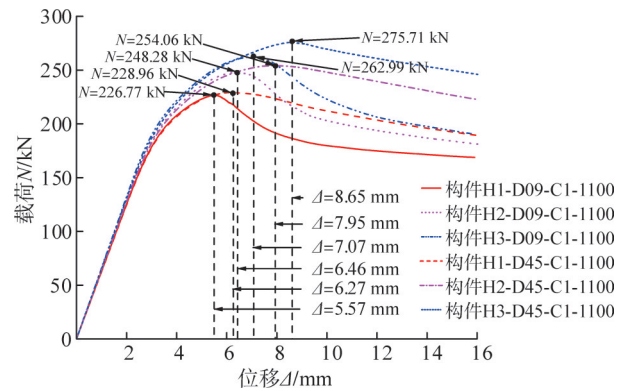


图 8 FRP 纤维方向对载荷-位移的影响

Fig.8 effect of FRP fiber orientation on load-displacement

3.3 截面构型的影响

截面构型对构件载荷-位移的影响见图 9。

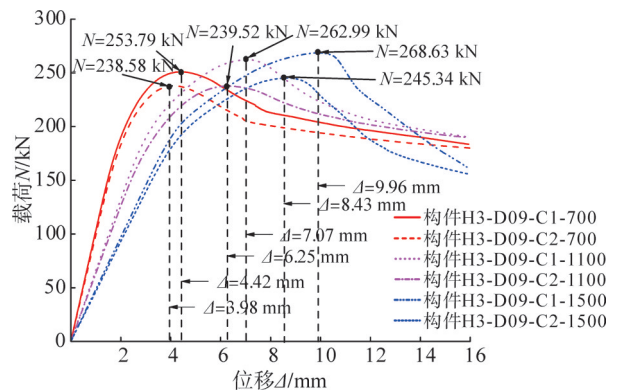


图 9 截面构型对载荷-位移的影响

Fig.9 effect of cross-section configuration on load-displacement

构件长度分别为 700 mm、1 100 mm、1 500 mm 时,与 C2 截面构件相比,C1 截面构件的峰值载荷分别提高 6.4%、9.8%、9.5%,刚度分别提高 3.7%、4.3%、4.5%,表明 C1 截面构件承载能力更强、刚度更大。其原因在于:C2 截面构型中,角模块开槽设计使局部刚度削弱且强度降低,导致载荷传递效率下降,构件更容易发生屈曲;C1 截面构型中,角模块结构完整,整体性较好,轴压下的力学性能更优。

3.4 长细比的影响

长细比对构件载荷-位移的影响见图 10,对构件抗压刚度和延性系数的影响见图 11。

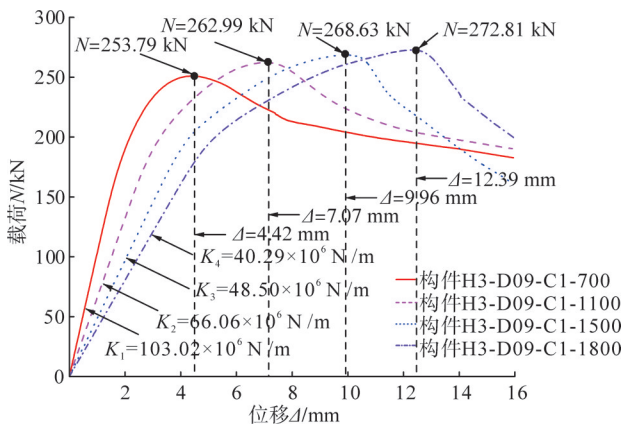


图 10 长细比对载荷-位移的影响

Fig.10 effect of slenderness ratio on load-displacement

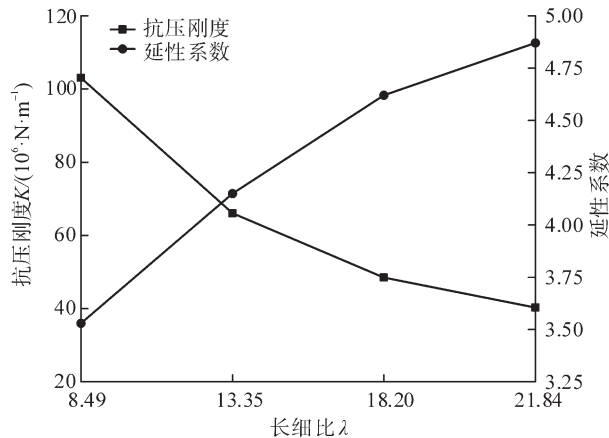


图 11 长细比对抗压刚度及延性变化的影响

Fig.11 effect of slenderness ratio on compressive stiffness and ductility change

由图 10 和图 11 可知,随长细比的增加,构件峰值载荷变化不明显,刚度降低明显,依次降低 35.9%、26.6%、16.9%。构件延性系数与长细比呈正相关,长细比从 8.49 增至 21.84,延性系数依次提升 17.8%、11.3%、5.4%。构件长细比达到 18.20 之后,延性的提升减小,主要原因是随着长细比

的增加,构件更容易发生局部屈曲,从而限制其塑性变形发展。

4 结论

(1) MHFT 薄壁中长柱的轴压破坏过程揭示了木材与 FRP 的协同工作机制:板、角模块的塑性发展促使 FRP 横向约束效应充分发挥,而 FRP 的最终剪切破坏则直接导致了构件的屈曲失稳。

(2) FRP 层数的增加对构件性能的提升呈非线性特征,其中由 1 层增至 2 层时的提升效果最显著。 $\pm 45^\circ$ 纤维方向对构件承载力的提升作用有限,但会使构件在峰值载荷前发生更明显的刚度退化与剪切变形。角模块开槽降低了构件刚度和承载能力。

(3) MHFT 薄壁中长柱的设计关键在于角模块的完整性、FRP 约束的有效性,以及对木材屈曲的抑制作用。采用无开槽角模块、配置 1 至 2 层 $0^\circ/90^\circ$ 纤维布,并将长细比控制在 18.20 以内,可有效协调木材的轴向承载与 FRP 的环向约束效应。

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] 何敏娟,陶铎,李征.多高层木及木混合结构研究进展[J].建筑结构学报,2016,37(10):1-9.
 HE Minjuan, TAO Duo, LI Zheng. State-of-the-art of research advances on multi-story timber and timber-hybrid structures[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 1-9.
 [3] 李帼昌,夏秀斌,邱增美,等.方钢管-木-混凝土中长柱轴压性能有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(6):961-969.
 LI Guochang, XIA Xiubin, QIU Zengmei, et al. Finite element analysis of axial compression performance on square steel tube-timber-concrete medium long column[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(6): 961-969.
 [4] PASTORI S, SERGIO MAZZUCHELLI E, WALLHAGEN M. Hybrid timber-based structures: a state of the art review[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129505.
 [5] 刘伟庆,方海,方园.纤维增强复合材料及其结构研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(4):1-16.
 LIU Weiqing, FANG Hai, FANG Yuan. Research progress of fiber-reinforced composites and structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 1-16.
 [6] BELARBI A, DAWOOD M, ACUN B. Sustainability of fiber-reinforced polymers (FRPs) as a construction material[M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2016: 521-538.
 [7] 张富宾,刘伟庆,方海,等.GFRP 面板-冷弯薄壁型钢组合梁受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(9):104-111.

- ZHANG Fubin, LIU Weiqing, FANG Hai, et al. Experimental study on flexural behavior of GFRP composite laminates-cold formed steel composite sandwich beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9): 104-111.
- [8] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(12): 1-11.
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(12): 1-11.
- [9] 塞尔江·哈力克, 刘清, 韩凤霞, 等. BFRP加固新疆杨木柱的抗压试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2015, 37(3): 108-112.
SAIERJIANG Halike, LIU Qing, HAN Fengxia, et al. Experimental study of compression reinforcement Xinjiang Yang poplar columns of BFRP[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2015, 37(3): 108-112.
- [10] 周乾, 杨娜, 闫维明. CFRP布墩接加固木柱轴压试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(S1): 314-320.
ZHOU Qian, YANG Na, YAN Weiming. Experimental study on axial compression of timber columns strengthened by CFRP-Dunjie method on decay bottoms [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(S1): 314-320.
- [11] 霍瑞丽, 刘伟庆, 童忆南, 等. 碳纤维增强复合材料约束短木柱轴压性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(4): 536-540.
HUO Ruili, LIU Weiqing, TONG Yinan, et al. Axial compression experiment on CFRP strengthened short wood column[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2019, 37(4): 536-540.
- [12] 黄俊杰, 余艳华, 张鹤凡, 等. CFRP加固木柱的轴压损伤性能试验研究[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 5110-5124.
HUANG Junjie, SHE Yanhua, ZHANG Hefan, et al. Experimental study on axial compressive damage performance of CFRP-reinforced wood columns[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 5110-5124.
- [13] 王静辉, 刘清, 韩凤霞, 等. 外粘贴 BFRP加固新疆杨木矩形截面柱轴心受压力学性能试验研究[J]. *工程抗震与加固改造*, 2017, 39(5): 118-123.
WANG Jinghui, LIU Qing, HAN Fengxia, et al. Experimental study on the axial compression performance of the rectangular section columns strengthened by externally bonded BFRP in Xinjiang poplar[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(5): 118-123.
- [14] 左宏亮, 李昂, 贾茗睿. 外贴 CFRP 板对胶合木柱轴压性能的影响[J]. *森林工程*, 2023, 39(3): 191-198.
ZUO Hongliang, LI Ang, JIA Mingrui. Effect of CFRP board on axial compression performance reinforced glulam column[J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(3): 191-198.
- [15] 阿斯哈, 周长东, 杨礼贇. 复合加固木柱轴压特性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(2): 1-9.
A Siha, ZHOU Changdong, YANG Ligan. Experimental investigation on axial compression behavior of timber columns strengthened with composite reinforcement method[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(2): 1-9.
- [16] 徐杰, 姜绍飞. 纤维布加固墩接木柱轴压试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(2): 77-85.
XU Jie, JIANG Shaofei. Experimental study on axial compression characteristics of spliced wood columns strengthened with FRP sheets[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(2): 77-85.
- [17] GILBERT B P, HANCOCK S B, BAILLERES H, et al. Thin-walled timber structures: an investigation[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 311-319.
- [18] FERNANDO D, TENG J G, GATTAS J, et al. Hybrid fibre-reinforced polymer-timber thin-walled structural members[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(9): 1409-1417.
- [19] MAINEY A J, GILBERT B P, FERNANDO D, et al. Thin-walled timber and FRP-timber veneer composite CEE-sections[C]// *International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering*, 2015, University of Queensland, Brisbane, Australia. Brisbane: School of Civil Engineering, The University of Queensland, 2015: 1443-1452.
- [20] MIN L, FERNANDO D, GILBERT B P. Experimental study on the behaviour of hybrid fibre reinforced polymer-timber thin-walled Cee section columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 163: 107723.
- [21] MIN L, FERNANDO D, HEITZMANN M, et al. Mechanical properties of hybrid fibre reinforced polymer-timber veneer laminates[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124316.
- [22] GATTAS J M, O'DWYER M L, HEITZMANN M T, et al. Folded hybrid FRP-timber sections: concept, geometric design and experimental behaviour[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 122: 182-192.
- [23] CUI W Q, GFELLER T, FERNANDO D, et al. Folding fabrication of curved-crease origami spindle beams[C]// *The Proceedings from the 7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education (Volume Four: Engineering Two)*. United Kingdom: Tarquin, 2018: 1329-1344.
- [24] CUI W Q, FERNANDO D, HEITZMANN M, et al. Manufacture and structural performance of modular hybrid FRP-timber thin-walled columns[J]. *Composite Structures*, 2021, 260: 113506.
- [25] CUI W Q, GATTAS J M, HEITZMANN M T. Manufacture and structural performance of modular hybrid FRP-timber thin-walled beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 435: 136705.
- [26] BARBERO E J, COSSO F A, ROMAN R, et al. Determination of material parameters for Abaqus progressive damage analysis of E-glass epoxy laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 46: 211-220.
- [27] ALFRED FRANKLIN V, CHRISTOPHER T. Fracture energy estimation of DCB specimens made of glass/epoxy: an experimental study[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 2013: 412601.
- [28] RAKSHIT D, CHAKRABORTY S. Determination of fracture parameters of FRP composites: a combined experimental and numerical investigation[J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(2): 231-241.