

DOI:10.11918/202212039

纤维布加固墩接木柱轴压试验

徐杰,姜绍飞

(福州大学 土木工程学院,福州 350108)

摘要:为探究外包纤维增强复合材料(FRP)加固墩接木柱的加固效果和工作机制,考虑不同纤维布和不同墩接方式等因素影响,开展10根墩接木柱的轴压加载试验。对比分析3种FRP布(AFRP,BFRP,CFRP)、4种不同墩接方式(巴掌榫、刻半榫、抄手榫和直榫)下加固柱的破坏模式和力学性能。结果表明:未采用FRP布加固的传统墩接柱表现为拼接缝木材开裂和开裂后的墩接区木材压屈折断,而FRP布加固后,墩接区整体性良好,破坏主要发生在墩接口,表现为木材压溃和纤维布褶皱;传统墩接柱承载力仅恢复至42%~69%,刚度恢复至43%~65%;FRP布加固后,轴压承载力可恢复至完好木柱的75%~100%,刚度可恢复至66%~107%,延性提升24%~96%,加固柱轴压性能和变形能力得到有效的恢复或提高,且刚度退化不明显;此外,有限元仿真得到的荷载位移曲线及力学指标与试验结果吻合良好。FRP加固墩接木柱的轴压力学性能良好,可为传统木结构建筑的修缮和木柱的墩接加固提供借鉴和参考。

关键词:墩接;刚度;延性;纤维布;抄手榫;巴掌榫;直榫

中图分类号: TU366.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0077-09

Experimental study on axial compression characteristics of spliced wood columns strengthened with FRP sheets

XU Jie, JIANG Shaofei

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to explore the reinforcement effect and working mechanism of spliced wood columns strengthened by fiber reinforced polymer, the axial compression tests of 10 reinforced wood columns were carried out considering the influence of different fiber sheets and splicing methods. The failure modes and axial compressive properties of reinforced columns under three kinds of FRP sheets (AFRP, BFRP, CFRP) and four kinds of splicing methods (tenon joint, keban tenon joint, mortise joint, straight tenon joint) were compared and analyzed. The results indicated that the traditional pier jointed columns without FRP reinforcement show the cracking of jointed timber and local buckling fracture after cracking. However, after FRP reinforcement, the integrity of the pier joint area is good, while the failure mainly occurred at the interface between the upper and lower piers, which was manifested as wood crushing and fiber cloth folding. The bearing capacity and stiffness of unconstrained pier joints were only recovered to 42%–69% and 43%–65% respectively. After the FRP reinforced pier was connected to the wooden column, the axial compression capacity can be restored to 75%–100% of the intact wooden column, the stiffness can be restored to 66%–107%, the ductility can be improved by 24%–96%, and the axial compression bearing capacity and deformation capacity of the wooden column can be effectively restored or improved. In addition, the stiffness degradation was not obvious. The load displacement curves and mechanical properties obtained by simulation were in good agreement with the experimental results. In conclusion, the spliced timber columns reinforced by FRP sheets had good mechanical properties, which can provide reference for the repair of traditional timber structures and the splicing of wooden columns.

Keywords: splice; stiffness; ductility; FRP sheets; mortise joint; tenon joint; straight tenon joint

在木构架承重体系中,木柱作为木结构建筑的重要传力构件,支撑着上部结构,承担着由上部梁架传递下来的荷载,是一个结构能否提供生活空间的

关键。由于直接与外界环境接触,长期服役过程中易在柱根出现腐朽、开裂和虫蛀等问题。随着损伤程度的加重,残损木构件的力学性能退化,严重影响

收稿日期: 2022-12-12; 录用日期: 2023-01-10; 网络首发日期: 2023-04-26

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230425.1758.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFD1100403)

作者简介: 徐杰(1997—),男,硕士研究生;姜绍飞(1969—),男,教授,博士生导师

通信作者: 姜绍飞,cejstf@163.com

整体结构的安全性与稳定性^[1-2]。因此,探究适合柱根残损木柱的加固方法对现存传统木结构建筑的保护利用与传承具有重要意义。

近年来,木柱加固的研究方向逐渐由传统加固方法^[2-3]向新材料^[4-5]、新技术^[6-7]层面拓展。纤维增强复合材料(FRP)是一种轻质高强、耐腐蚀性和耐久性好的加固材料,目前已广泛应用于混凝土结构加固工程,并逐渐在木结构加固工程^[8]中崭露头角,有望成为传统铁质加固件的替代品。许清风等^[9-10]对局部受损木柱采用顺纹木块替换并用 CFRP 布包裹进行加固,取得了良好的加固效果。周乾等^[11]开展了 CFRP 布包镶加固柱根糟朽木柱的轴压试验研究,加固后木柱承载力可恢复 81.4%。阿斯哈^[12]和周长东等^[13-14]探究了内嵌钢筋外包 CFRP 布复合加固木柱的力学性能,发现 CFRP 布与内嵌钢筋相互促进、协同工作,能有效提高木柱的承载能力。朱艳梅等^[15-16]对环向粘贴的 AFRP、BFRP 和 CFRP 布加固后的圆木柱力学性能进行了研究,结果表明,加固柱承载力、刚度、延性均能得到提高。可见 FRP 布用于木柱加固能取得较好的加固效果,但以上研究局限于木柱整体加固和局部小修等方面,难以适用于实际工程中高位糟朽木柱的修复。

为尽可能保留原有建筑风貌,实现“修旧如旧,极大程度保留原有现状”的加固理念,常用墩接加固对木柱进行修缮。周乾等^[17-18]研究了铁箍、钢套加固后的巴掌榫墩接柱的轴压性能,由于接触部位应力集中严重,试件破坏时表现出明显的脆性特征。杨健^[19]采用铁箍对刻半榫、抄手榫、燕尾榫墩接方式加固的中长木柱进行了竖向静载试验,相同墩接高度下,抄手榫加固效果优于刻半榫优于燕尾榫。许清风^[20]对比研究了钢箍和 CFRP 布加固巴掌榫和抄手榫墩接短柱的轴压性能,发现抄手榫维修效果好于巴掌榫,CFRP 布加固效果优于钢箍,但这仅针对长细比较小的短柱,与工程中中长柱的受力状态存在差异。周乾等^[21-22]开展了 FRP 加固巴掌榫墩接柱的轴压加载试验,加固后木柱承载力基本可得到恢复。

综上,铁件加固整体性差,易造成接触部位应力集中,加速木柱破坏,而采用 FRP 布加固不易出现应力集中、便于后期涂装修饰且不存在锈蚀等问题,为木柱加固带来了新的机遇。但是,目前中长墩接柱加固效果受墩接方式和纤维布种类的影响还不明确,高位糟朽木柱采用墩接加固时,墩接方式和纤维布种类的选型还需进行探索。基于此,从 4 种不同墩接方式和 3 种不同 FRP 布入手,开展了 10 根 FRP 墩接加固木柱的轴压试验,研究了墩接木柱加固前

后的承载力、刚度、延性等力学性能,分析并总结了不同加固柱的工作特性和破坏机制。以期为中国传统木结构建筑的保护与修缮提供参考依据和技术支撑。

1 试验

1.1 试件设计与制作

参考闽南民居建造木柱常用长径比 10:1^[23]确定试件尺寸,试验柱柱长与截面直径分别为 1.8、0.18 m。加固柱采用的墩接方式有巴掌榫、刻半榫(带榫头的巴掌榫)、抄手榫、直榫,见图 1。墩接长度和墩接高度分别为 300、750 mm^[24-25],墩接长度(l_d)是指木柱沿顺纹拼接部分的长度,墩接高度(h_d)是上端柱段截断位置至柱底的长度,详见图 1。其中, h_d 大于规范^[24]墩接加固的约定范围 1/4 柱高(450 mm),墩接工艺参考文献^[17,24]。传统墩接柱采用直接拼接的方式进行加固,FRP 加固柱需在拼接面上均匀涂抹环氧树脂进行粘接,待环氧树脂固化后,在墩接区通过纵横双向全包粘贴 FRP 布的方式进行加固,其中,环向粘贴层数为 2,纵向粘贴层数为 1^[25]。环向粘贴的 FRP 布(环箍)均保证 120 mm 的搭接长度,纵向粘贴的 FRP 布(纵带)与杉木之间也需有足够的粘贴长度(l_e), l_e 等参数和试件分组详见表 1。

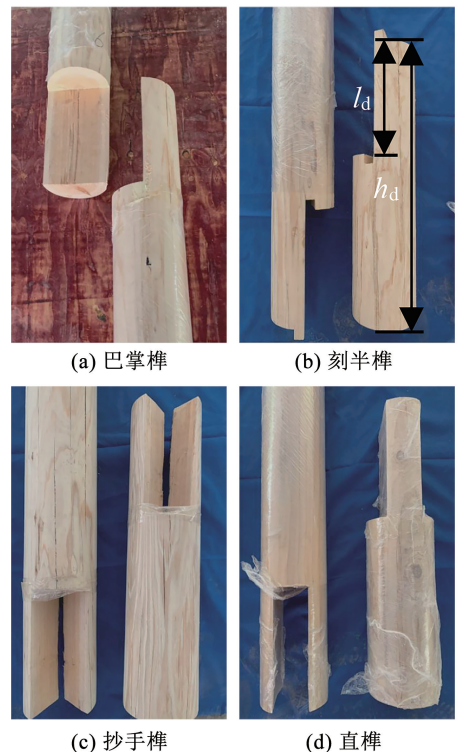


图 1 墩接柱示意

Fig. 1 Spliced column diagram

表 1 试件设计参数

Tab.1 Specimen design parameters

试件组别	试件编号	墩接方式	l_e/mm	加固材料	n_r	n_l
对照	Y0	完好柱	—	—	—	—
I	K01	刻半榫	—	—	—	—
	C01	抄手榫	—	—	—	—
	Z01	直榫	—	—	—	—
II	FK1	刻半榫	100	BFRP	—	—
	FC1	抄手榫	100	BFRP	2	1
	FZ1	直榫	100	BFRP	—	—
III	C21	—	120	CFRP	—	—
	A21	巴掌榫	100	AFRP	2	1
	B21	—	100	BFRP	—	—

注: I 组为传统墩接方式加固柱, II 组为 BFRP 布加固传统墩接柱, III 组为不同 FRP 布加固巴掌榫墩接柱, n_r 为环箍层数, n_l 为纵带层数。

表 2 福杉材性参数

Tab.2 Material properties of Fujian Fir

E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa	G_{xz}/MPa
779	7 646	390	0.21	0.43	0.42	594	475	143

注: x, y, z 分别为木材横纹径向(R)、顺纹纵向(L)、横纹弦向(T); E_n 为对应 n 方向的弹性模量; μ_{ij} 和 G_{ij} 分别为 i 方向和 j 方向所在面内的泊松比和剪切模量。

表 3 福杉塑性参数

Tab.3 Fujian Fir plasticity parameters MPa

方向	受拉屈服应力	受压屈服应力	剪切屈服应力
x (R 向)	2.883 2	3.02	5
y (L 向)	57.120 0	23.85	5
z (T 向)	2.800 0	2.87	5

表 4 FRP 布的材性参数

Tab.4 Material properties of FRP sheets

FRP 种类	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	延伸率/ %	计算厚度/ mm
AFRP	2 280	140.0	2.1	0.193
BFRP	2 650	91.6	2.6	0.107
CFRP	3 483	231.0	1.7	0.167

1.3 试验装置及数据量测方案

1.3.1 试验加载方案

试验在 5 000 kN 电液伺服压力试验机上完成, 试件两端均平摆搁于试验机压板和钢板上, 见图 2。试验采用位移连续加载, 加载速率为 0.8 mm/min。为减少正式加载过程中的试验误差, 加载前进行几何轴线对中和预压。预压过程中观察木柱四周应变值是否接近, 若数值相差较大则需对试件位置进行调整, 预压次数控制在 5 以内。正式

1.2 材料力学性能

试验木材为福建杉木, 其材性参数的测定试件均取样于试件制作预留的无初始缺陷部位, 材性和塑性参数见表 2 和 3。3 种 FRP 布材性通过实测确定, 具体材性参数见表 4。粘接木材间的环氧树脂采用流动性较差的 E44 型环氧树脂 AB 胶, 可操作时间为 2 h, 剪切强度可达 12 MPa。FRP 布浸渍树脂参考厂家提供的检测报告, 其抗拉强度为 60.1 MPa, 拉伸弹性模量为 2 913 MPa, 抗压强度为 96.7 MPa。

加载后, 以荷载下降至极限荷载的 70% 或出现不适合继续加载的现象为标准来判断试验是否停止。

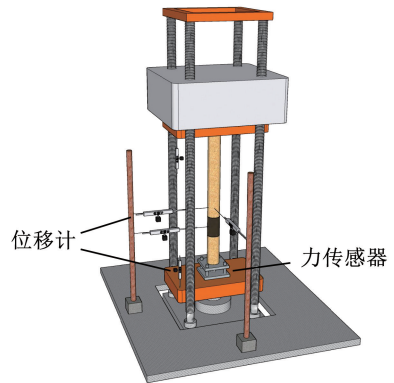


图 2 试验装置示意

Fig.2 Schematic diagram of test device

1.3.2 试验量测方案

试验量测内容包括竖向位移、柱中侧移、竖向荷载以及墩接区应变等。在压力机上下端板布置位移计测量构件竖向位移, 在 1/2 柱高位置布置一对相互垂直的位移计测量柱中水平侧移。柱中位置用 502 胶水粘贴尺寸为 30 mm × 50 mm 的亚克力板, 以防止位移计脱出亚克力板。在柱中沿四周对称粘贴纵向应变片, 在 FRP 布上对称粘贴相互垂直的应变片, 具体应变测点布置如图 3 所示。为更准确地获取试验加载过程中的竖向荷载, 在柱底放置 100 t 力传感器测量。

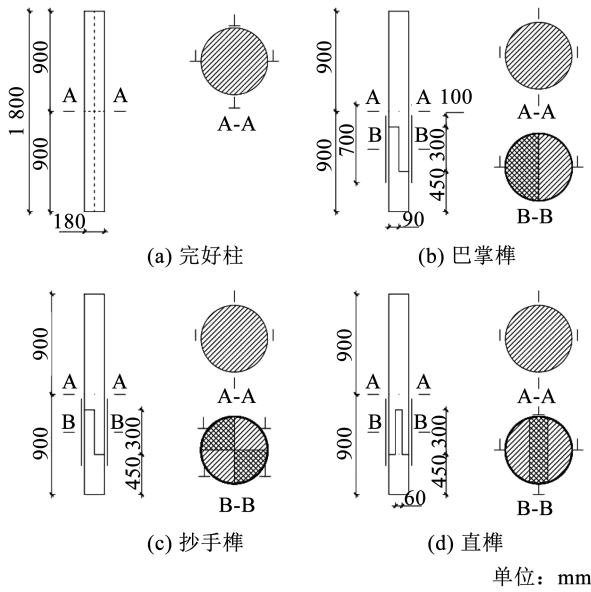


图 3 应变片布设

Fig. 3 Strain gauge layout

2 试验结果分析

2.1 试验现象与破坏形态

2.1.1 完好柱和传统墩接柱

完好柱整体性好,接近峰值荷载时于 1/3 柱高位置发生沿年轮方向的环向压裂,其他部位无明显破坏。I 组试件失效均是由于拼接缝被撑开,形成往两端延伸的受力裂缝,截面抗弯刚度削弱,木材发生压屈和折断。对比 3 种墩接方式加固柱的破坏特征(图 4)可以看出,抄手榫榫头中心对称(C01 试件),整体性好,破坏出现在下墩接口,表现为木材压屈,柱身未严重弯曲。K01 试件墩接区整体性较差,偏压状态下,榫头反而加剧了墩接区破坏,导致墩接区被撑开,承载力削弱。Z01 试件整体性最差,仅达到极限承载力的 50% 左右卯口就严重开裂,卯口裂缝往两端贯通,无法继续承担更大的荷载。事实上,纤维布加固后,卯口同样出现了开裂(如图 5),故在墩接高度较大时,应尽量避免用直榫墩接。

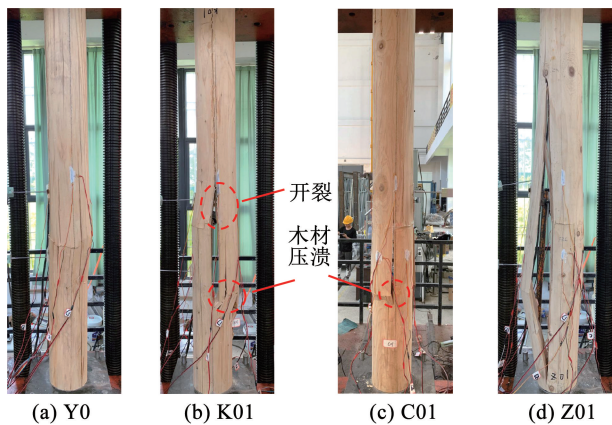


图 4 传统墩接柱

Fig. 4 Traditional spliced wooden columns

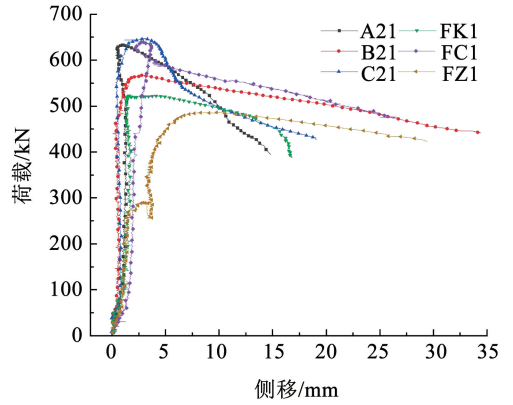


图 5 荷载-侧移曲线

Fig. 5 Load-deflection curve

2.1.2 BFRP 加固传统墩接柱

由图 6 可知,II 组试件破坏都出现在墩接口处,其他区域基本完好,破坏原因是受压侧墩接口木材压屈导致纤维布褶皱和断裂,进而加剧了木柱偏压破坏发生,柱身弯曲并伴随明显失稳特征。不同墩接方式加固柱的区别在于墩接口木材出现压溃破坏的时间次序不同, $FZ1 < FK1 < FC1$ 。FZ1 在 60% 峰值荷载时下墩接口木材发出挤压声,木材压屈,峰值荷载后又转移到上墩接口;FK1 在 76% 峰值荷载时下墩接口木材压屈。相比之下,FC1 试件上墩接口木材压屈出现在峰值荷载附近,木材强度利用率高,且峰值前柱身未出现明显弯曲。

与传统墩接柱相比,FRP 布加固后,墩接柱整体性提高,破坏形态得到明显改善。FRP 纵带和环箍的相互促进作用还能提高墩接柱的工作性能。

2.1.3 不同 FRP 加固巴掌榫墩接柱

如图 7 所示,试件 A21 和 C21 的最终破坏位置均转移至墩接区域以外且纤维布褶皱主要出现在下墩接口受压侧。其中,A21 破坏出现在靠近柱脚的受压侧,C21 破坏出现在半柱身往上的木材质地突变部位。试件 B21 破坏发生在墩接口受压侧,纤维布褶皱主要出现于上墩接口受压侧。对比其最终失效时的柱身形态可知,B21 试件在上墩接口位置弯曲十分明显,柱身呈“弓形”。C21 试件弯曲集中在柱身上端,但在荷载上升阶段,下墩接口木纤维逐渐压屈,柱身呈“S”形态。A21 试件破坏发生在靠近柱脚处,但在峰值荷载前未出现其他损伤,柱身并未明显呈现弯曲形态。

如图 5 所示,FRP 加固试件中,除直榫墩接柱外,其他试件在达到峰值荷载前柱中侧移很小,柱身挠曲不明显,但超过峰值荷载后挠曲变形迅速增加,呈现明显的弯曲失稳特征。FRP 环箍纵带弹性模量大的试件,侧向挠曲更小,墩接区弯曲不明显。传统墩接柱由于木材开裂外张,柱中测点受到影响,测量数据不能作为参考,予以舍去。

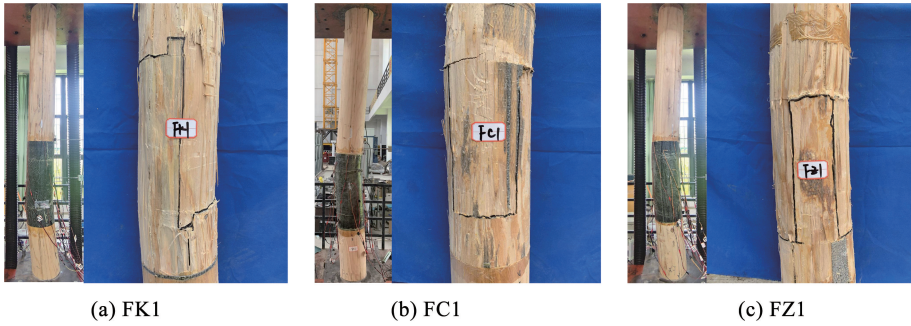


图 6 BFRP 加固传统墩接柱

Fig. 6 BFRP reinforced conventional spliced columns

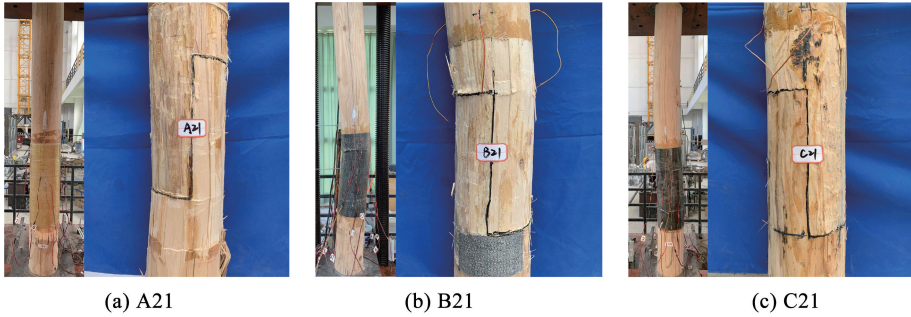


图 7 不同 FRP 墩接加固柱破坏形态

Fig. 7 Splice columns reinforced with different FRP sheets

2.2 承载力分析

各试件荷载 - 位移曲线见图 8, 为便于对比不同试验参数下试件极限承载力的差异, 考虑了制作误差造成的截面面积差异的影响, 分类对比见图 9。未采用 FRP 布加固的传统墩接试件 K01、C01、Z01, 极限抗压强度分别恢复至完好柱的 48%、69%、42%, 采用 BFRP 布加固的试件 FK1、FC1、FZ1, 抗压强度分别恢复至完好柱的 80%、99%、75%。即采用不同墩接方式加固柱具有以下特征: 无论是否采用纤维布加固, 抄手榫墩接方式对轴压承载力的恢复最为有利, 其次是刻半榫墩接方式, 这是因为抄手榫中心对称, 偏心受压状态下柱身整体性较好; 经过 BFRP 加固后的传统墩接柱极限承载力相对未加固墩接柱有较大提升(44% ~ 78%), 这是由于 FRP 布提供了环向约束, 墩接区木材处于三向受压状态且整体性更好, 承载性能提升明显; 经过 BFRP 布加固的抄手榫墩接柱 FC1 可恢复至完整柱承载力水平。

当采用相同层数 FRP 布加固且均采用无榫头巴掌榫墩接时, AFRP、BFRP、CFRP 布加固的试件抗压强度可分别恢复至完好柱的 97%、87%、100%。这是因为纤维布提供的纵向和环向约束为被动约束, 纤维布弹性模量越大, 变形越小, 墩接区木材受力更均匀, 变形更协调, 强度恢复率更高。

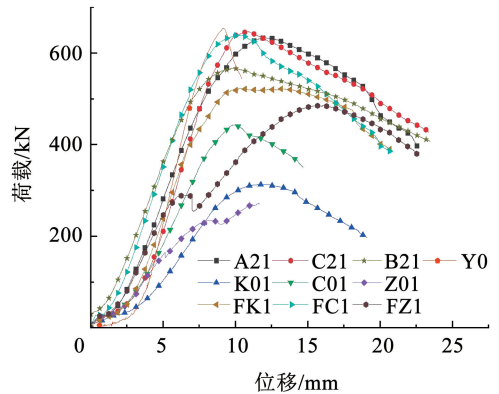


图 8 荷载 - 位移曲线

Fig. 8 Load displacement curve

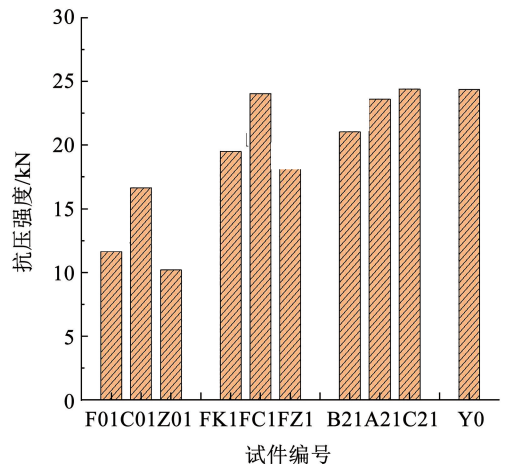


图 9 抗压强度对比

Fig. 9 Compressive strength comparison

2.3 延性分析

由图 8 荷载 - 位移曲线可知,试件上升段和下降段均为近似的斜直线,墩接柱下降段相对完好柱较为平缓,说明墩接柱变形能力比完好柱要好。为便于定量评价试件的变形能力,采用位移延性系数($u = \Delta_u / \Delta_y$)表征各试件延性,试件各特征位移及延性系数见表 5。可以看出,除 Z01 试件外(未获取到试验曲线下降段),其他墩接柱延性均相对完好柱有明显提升,可见该类柱构件的变形能力优于完好柱。其中,传统墩接柱 K01 和 C01 延性较完整柱延

性均提高了 21%,BFRP 加固的传统墩接柱 FK1、FC1、FZ1 延性分别提高了 73%、43%、24%,虽然未能获取到试件 Z01 试验曲线下降段,但从 BFRP 加固的传统墩接柱变形能力可推断,试件 Z01 延性必定小于试件 K01 和 C01。传统墩接柱粘贴 BFRP 布加固后,不仅承载力和刚度能得到提升,变形能力也能得到大幅度提高。对于不同纤维布加固的巴掌榫墩接柱 A21、B21、C21,较完好柱延性分别提高了 58%、96%、47%,BFRP 加固柱的变形能力明显比 AFRP 和 CFRP 加固柱好。

表 5 关键力学性能指标分析

Tab. 5 Analysis of key mechanical property indicators

试件编号	直径/mm	极限荷载/kN	极限抗压强度/MPa	强度恢复率/%	$k_1 / (kN \cdot mm^{-1})$	$k_i / (kN \cdot mm^{-3})$	刚度恢复率/%	Δ_u / mm	Δ_y / mm	延性系数
Y0	186.37	664.3	24.35	—	105.20	3.86	—	10.28	7.61	1.35
B21	184.51	567.0	21.04	87	84.23	3.15	82	18.63	7.03	2.65
A21	184.94	633.2	23.57	97	88.58	3.22	83	18.31	8.61	2.13
C21	183.66	646.6	24.41	100	109.11	4.12	107	17.01	8.60	1.98
K01	184.94	312.8	11.64	48	44.82	1.67	43	15.44	12.01	1.64
C01	183.98	442.6	16.65	69	67.12	2.52	65	13.77	10.81	1.63
Z01	184.30	272.2	10.20	42	44.95	1.68	44	—	—	—
FK1	184.62	522.4	19.51	80	92.02	3.44	89	18.46	7.89	2.34
FC1	183.98	639.2	24.04	99	92.62	3.48	90	14.85	7.68	1.93
FZ1	184.30	485.6	18.20	75	67.73	2.54	66	21.16	12.59	1.68

注:屈服位移 Δ_y 按课题组提出的 ESEP 法确定^[25]; Δ_u 为荷载下降至 0.85 倍峰值荷载时的位移; $k_i = k_1 / A$, A 为柱截面积。Z01 构件在达到极限荷载前已经呈现明显的破坏特征,为保护仪器,当出现明显下降趋势时停止试验,因此,未获取到下降段曲线和相关数据。强度或刚度恢复率是指墩接柱相对完好柱的强度或刚度的恢复程度,即(完好柱指标 - 某墩接柱指标)/完好柱指标。

2.4 刚度分析

考虑到在加载前期存在一段虚位移且试件面积差异不便于刚度对比,取弹性线刚度(k_i)作为墩接柱刚度的评价指标, k_1 参考文献[25]确定。如表 5 所示,传统墩接柱刚度仅恢复至完整柱刚度的 43% ~ 65%,BFRP 墩接柱则可恢复至 66% ~ 90%。其中,抄手榫墩接柱刚度恢复率最大,其次是刻半榫墩接柱,但经 BFRP 加固后,刻半墩接柱 FK1 与抄手榫墩接柱 FC1 刚度恢复水平相当,并略大于试件 B21(无榫头巴掌榫墩接柱)。对比 3 种不同 FRP 布加固巴掌榫墩接柱刚度可知,CFRP 布加固试件刚度可恢复至完好柱刚度的 107%,刚度提升略微偏大,而 AFRP 布与 BFRP 布加固后,刚度能恢复至 82% ~ 83%,略低于完好柱,这是因为当墩接区轴压刚度不远大于柱体其他区域刚度时,纤维布弹性模量越大,墩接区约束越大,墩接柱刚度也越大。

图 10 为刚度 - 位移曲线,可以看出,在加载前期,传统墩接柱刚度增长速度小于完好柱,经过 FRP

加固后的墩接柱刚度增长速度与完好柱相差不大。而进入屈服阶段后,与完好柱相比刚度退化不明显。

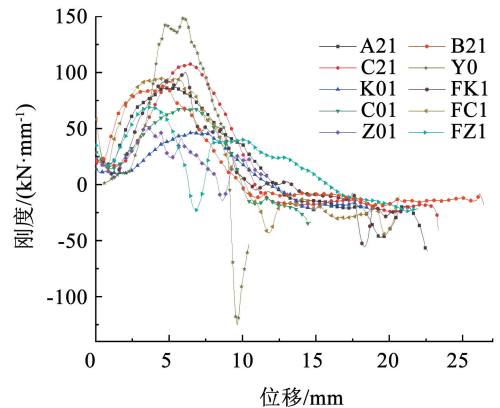


图 10 刚度 - 位移曲线

Fig. 10 Stiffness-displacement curve

2.5 应变分析

木材柱中应力 - 应变变化可表征柱体的受力状态。由图 11 可知,FC1、A21、C21 试件达到了木材

屈服强度, 极限强度接近木材极限抗压强度。B21、FK1、FZ1 试件接近木材屈服强度, 结合试验现象可知, 其失效是由木柱墩接口木材压缩所致, 材料强度利用率低于前述试件。相比之下, C01、K01、Z01 试件的极限强度均远低于木材实际屈服强度, 说明在缺乏 FRP 布的约束作用时, 木材强度无法得到充分发挥, 在达到材料抗压强度之前, 墩接区域木材易出现开裂而提前破坏。

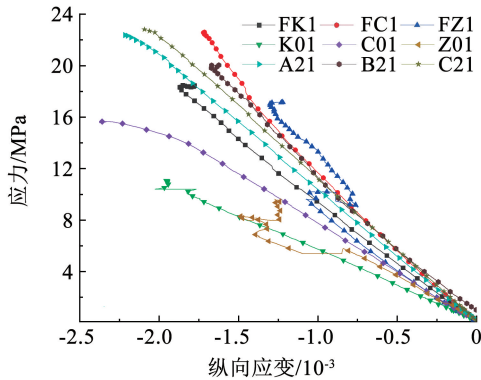


图 11 柱中木材应力 - 应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curve in the middle of the wooden column

由图 12 墩接区荷载应变曲线趋势可知, 巴掌榫墩接柱, 位于对称位置的 FRP 横向应变发展规律差异较小, 纵向应变发展规律差异较大, 说明墩接区随着荷载增加偏压状态越明显, 进入屈服阶段后最为明显。抄手榫和直榫墩接柱在屈服前, 墩接区纵向应变和横向应变增长规律大致相同, 说明对称的墩接方式更加接近轴压状态, 但随着荷载的增加, 直榫墩接柱出现榫头开裂, 荷载突降, 纵向和环向应变前期均大于其他试件, 但后期又逐渐恢复原有状态。对比不同纤维布加固的墩接柱可知, 纤维布的环向约束效率为 AFRP 布 > CFRP 布 > BFRP 布, 纵向约束效率为 CFRP 布 > AFRP 布 > BFRP 布。

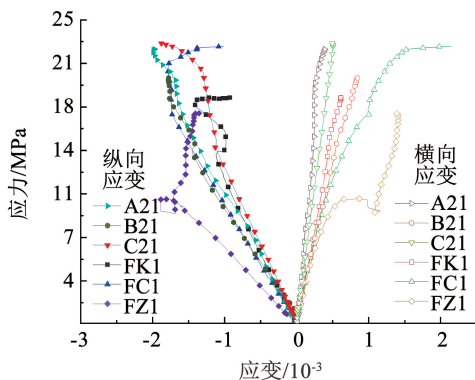


图 12 墩接区域 FRP 应力 - 应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curve of the FRP shell in the pier connection area

2.6 有限元仿真实验

2.6.1 模型建立

FRP 墩接加固柱采用 ANSYS19.2 有限元软件进行数值模拟, 木柱采用 SOLID45 单元模拟, FRP 环箍和纵带分别采用 SHELL181 和 SHELL41 单元模拟。不考虑木节、裂缝等缺陷的影响, 将木材视作正交各向异性的均匀材料, 采用 ANSYS 广义 Hill 屈服准则模拟木材正交各向异性^[26], 塑性参数见表 3。纤维布则按线弹性材料建模, 材料参数见表 4。

建模思路如下: 根据墩接方式分别建立墩接柱原柱上段和墩接下段 (图 13); 通过 CONTA174 单元和 TARGE170 单元模拟墩接区接触面和目标面 (摩擦因数、接触刚度等通过试算确定), 并设置 0.001 mm 的接触间隙, 以模拟墩接区难以避免的微小间隙和非线性接触行为; 建立 FRP 壳的有限元模型, 并通过 CPIN 命令耦合墩接柱模型与 FRP 壳模型之间的自由度 (如图 14), 即不考虑木材与 FRP 布之间的黏结滑移。边界条件为与试验保持一致, 分别在模型两端约束横截面内的节点位移, 同时约束一端顺纹方向自由度, 另一端施加顺纹方向的结点位移, 并耦合节点自由度。

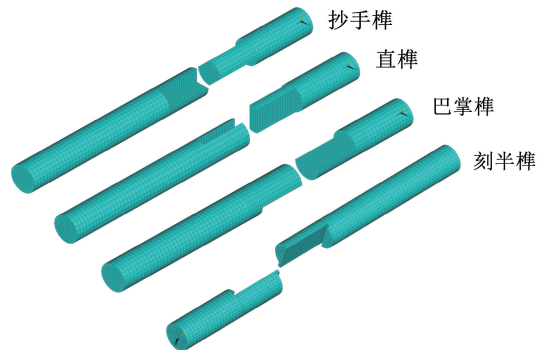


图 13 墩接柱有限元模型

Fig. 13 Finite element model of pier joint columns

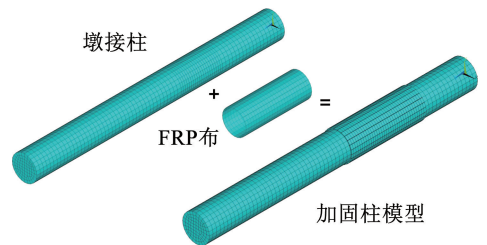


图 14 有限元模型组成

Fig. 14 Composition of the finite element model

2.6.2 模型验证

对柱端耦合节点施加斜坡位移, 获取仿真荷载 - 位移曲线 (图 15), 可见与试验曲线规律基本一致。为能更有代表性地对比两者差异, 获取其峰值荷载与刚度进行对比, 试验与仿真力学指标对比见表 6, 荷载误差范围为 1.4% ~ 6.9%, 刚度误差范围为

1.5% ~ 14.4% ,承载力和刚度的仿真分析与试验结果相近,即试验与仿真结果对应良好。

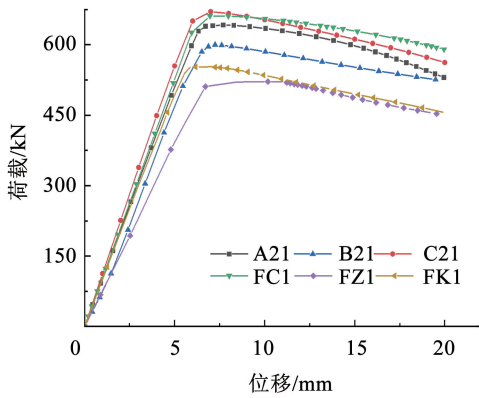


图 15 仿真荷载 - 位移曲线

Fig. 15 Simulate load-displacement curves

2.7 工作机制分析

如图 16 所示,FRP 墩接加固轴压木柱大致存在

表 6 试验与仿真结果对比

Tab. 6 Comparison of test and simulation results

试件编号	N_u /kN	N_{us} /kN	荷载误差/%	$k_1/(kN \cdot mm^{-1})$	$k_{1s}/(kN \cdot mm^{-1})$	刚度误差/%
FC1	639.2	661.3	3.3	92.62	105.4	12.1
FZ1	485.6	521.3	6.9	67.73	79.0	14.3
FK1	522.4	553.3	5.6	92.00	98.1	6.2
B21	567.0	595.9	4.9	84.20	98.4	14.4
C21	646.6	670.5	3.6	109.10	110.7	1.5
A21	633.2	642.1	1.4	88.60	101.8	13.0

注: N_u 、 k_1 为试验所得极限荷载与刚度, N_{us} 、 k_{1s} 为仿真承载力与刚度代表值。

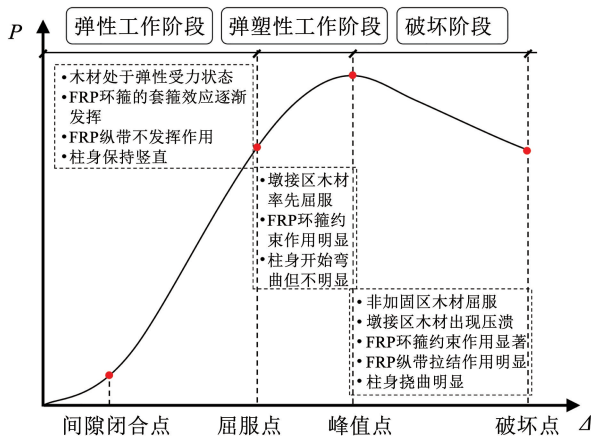


图 16 轴压墩接木柱工作机制分析

Fig. 16 Working mechanism analysis of axial compression spliced wood column

综上,FRP 环向约束作用抑制了加固区木材的横向变形和裂缝的发展,使加固区木材处于三向受压状态,从而提高了墩接柱的承载能力;纵向约束作用对加固区起到一定的拉结作用,延缓了侧向挠曲的发生,增强了墩接柱的稳定性。在 FRP 环箍纵带

3 个受力阶段:弹性工作阶段、弹塑性工作阶段、破坏阶段。加载初期,墩接区水平拼接面处的木材逐渐被压紧,单侧承压转变为全截面承压,截面刚度将近增大一倍。弹性工作阶段时,FRP 环箍会逐渐约束墩接区木材的横向变形,木材虽处于三向受压状态,但由于纤维布提供的是被动约束,“套箍效应”并不显著,木材与 FRP 布始终处于弹性受力状态,柱身保持竖直。直到墩接口木材出现局部压屈,墩接柱进入弹塑性工作阶段,FRP 环箍对墩接加固区产生明显的环向约束,墩接区木材出现压屈,压屈侧墩接口处的 FRP 布出现褶皱。达到峰值荷载后,墩接柱进入破坏阶段,FRP 纵带纵向约束作用不明显的墩接柱,墩接口木材出现压溃,柱身侧向挠曲明显,受拉侧 FRP 纵带拉结作用明显。此外,从表观上看,木柱裸漏部分的非 FRP 加固区表现出轻微的体积膨胀和鼓起。

的共同约束作用下,墩接柱整体性显著提升,承载力、刚度得到有效恢复,木柱表现出一定程度的塑性破坏特征。

3 结论

1) 无约束墩接柱发生卯口开裂破坏,FRP 墩接柱破坏模式随墩接方式的不同而不同。巴掌榫墩接柱破坏为墩接口压溃,刻半榫墩接柱为榫头折断,抄手榫和直榫表现为卯口开裂折断。综合对比承载力等力学指标知,FRP 墩接加固柱墩接方式优选顺序为抄手榫、巴掌榫、刻半榫、直榫。

2) 长径比为 10:1、墩接高度为 750 mm (> 1/4 柱高)的墩接柱,未经 FRP 布加固的墩接柱承载力仅恢复至 42% ~ 69%,刚度恢复至 43% ~ 65%;FRP 加固墩接木柱可恢复至原柱承载力的 75% ~ 100%,刚度恢复至 66% ~ 107%,延性提升 24% ~ 96%,能基本恢复其原有承载性能,突破了墩接高度的限制。

3) 对比不同 FRP 布加固的巴掌榫墩接柱力学性

能可知,承载力和刚度顺序为 CFRP 布 > AFRP 布 > BFRP 布,且采用 AFRP 和 CFRP 加固时,承载力十分接近;变形能力顺序为 BFRP 布 > AFRP 布 > CFRP 布。

参考文献

- [1] 谢启芳, 张保壮, 李胜英, 等. 残损木柱受力性能退化试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 117
XIE Qifang, ZHANG Baozhuang, LI Shengying, et al. Experimental study and finite element analysis on degradation of mechanical properties of damaged timber columns [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 117. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0804
- [2] 张风亮. 中国古建筑木结构加固及其性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013
ZHANG Fengliang. Research on strengthening and its performance of Chinese ancient timber structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013
- [3] SHI B L. Reinforcement maintenance method about Chinese ancient architectural structure [J]. Advanced Materials Research, 2011, 1270: 2206
- [4] FRANKE S, FRANKE B, HARTE A M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams-state of the art [J]. Construction & Building Materials, 2015, 97: 2. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021
- [5] LEE J K, PARK S M. A study on axial load capacity of damaged wooden column reinforced with synthetic resin [J]. Architectural Institute of Korea, 2009, 29(1): 311
- [6] TANJA M. Nanostructured materials for protection and reinforcement of timber structures: a review and future challenges [J]. Construction and Building Materials, 2015, 97: 119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016
- [7] 曹静. 古建筑木构件原位防腐与加固研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015
CAO Jing. In-situ anticorrosion and restoration of wooden components in historic buildings [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015
- [8] 淳庆, 许清风. FRP 加固木结构技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 174
- [9] 许清风, 朱雷. CFRP 维修加固局部受损木柱的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007(8): 41
XU Qingfeng, ZHU Lei. An experimental study on partially-damaged wood columns repaired and strengthened with CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2007(8): 41
- [10] 许清风. 局部损伤圆木柱维修加固方法的试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1506
XU Qingfeng. In-situ consolidation and restoration of wooden components in historic buildings [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1506
- [11] 周乾, 闫维明, 慕晨曦, 等. CFRP 布包镶加固底部槽朽木柱轴压试验 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 120
ZHOU Qian, YAN Weiming, MU Chenxi, et al. Axial compression experiments on timber columns strengthened with CFRP sheets on decay roots by coating reinforcing technique [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3): 120. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2016.03.016
- [12] 阿斯哈, 周长东, 杨礼赣. 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
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. DOI:10.15951/j.tmgxb.2021.02.001
- [13] 周长东, 梁立灿, 阿斯哈, 等. 内嵌钢筋外包 CFRP 布复合加固矩形截面木柱轴压性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 173
ZHOU Changdong, LIANG Lican, A Siha, et al. Experimental study on axial compression performance of rectangular timber columns strengthened with CFRP sheet and near surface mounted steel bar [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 173. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0517
- [14] 韩笑东, 赵越, 杨燕泽, 等. 复合加固方形木柱偏心受压性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 195
HAN Xiaodong, ZHAO Yue, YANG Yanze, et al. Experimental study on eccentric compression behavior of hybrid strengthened square timber columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 195
- [15] 朱艳梅, 王清远, 董江峰, 等. FRP 加固圆木柱轴压性能的试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2): 52
ZHU Yanmei, WANG Qingyuan, DONG Jiangfeng, et al. Experimental study on axial compression performance of FRP reinforcement round poles [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(Sup. 2): 52. DOI:10.15961/j.jsuese.2012.s2.059
- [16] 王静辉, 王广部, 张良, 等. 玄武岩纤维间隔加固新疆杨木方形截面长柱轴心受压力学性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50(4): 44
WANG Jinghui, WANG Guangbu, ZHANG Liang, et al. Experimental research on the mechanical properties of Xinjiang long rectangular-section poplar column strengthened by basalt fiber alternately under axial compression [J]. Industrial Construction, 2020, 50(4): 44. DOI:10.13204/j.gyjz202004008
- [17] 周乾, 杨娜, 闫维明, 等. 传统铁箍墩接法加固底部槽朽木柱轴压试验 [J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(5): 33
ZHOU Qian, YANG Na, YAN Weiming, et al. Axial experiments on timber columns strengthened on decay bases by iron band wrapping of traditional Dunjie method [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(5): 33. DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2017.05.005
- [18] 李宏敏, 邱洪兴, 赵哲, 等. 钢套加固墩接木柱的试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 192
LI Hongmin, QIU Hongxing, ZHAO Zhe, et al. Experimental study on splice-jointed timber columns reinforced with steel jackets [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 192
- [19] 杨健. 徽派古建筑墩接加固木柱的力学性能研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2021
YANG Jian. Research on mechanical performance of reinforced wooden columns in Huipai ancient architecture [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2021
- [20] 许清风. 巴掌榫和抄手榫维修圆木柱的试验研究 [J]. 建筑结构, 2012, 42(2): 170
XU Qingfeng. Experimental study of circular wood column repairing with tenon and mortise joint [J]. Building Structure, 2012, 42(2): 170
- [21] 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(增刊1): 314
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(Sup. 1): 314. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.S1.044
- [22] 朱毅. 纤维布加固巴掌榫墩接木柱轴心受压试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016
ZHU Yi. Experimental study of wooden posts strengthening with slap tenon joint by FRP [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016
- [23] 杨莽华, 马全宝, 姚洪峰. 闽南民居传统营造技艺 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2013: 410
- [24] 四川省建筑科学研究院有限公司. 古建筑木结构维护与加固技术标准: GB/T 50165—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020
- [25] 徐杰, 姜绍飞, 葛子毅. BFRP 布加固巴掌榫墩接木柱轴压性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45(3)
XU Jie, JIANG Shaofei, GE Ziyi. Study on axial compression performance of palm-tenon spliced timber columns reinforced with BFRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(3). DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0347
- [26] 姜绍飞, 吴铭昊, 唐伟杰, 等. 古建筑木结构多尺度建模方法及抗震性能分析 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10): 44
JIANG Shaofei, WU Minghao, TANG Weijie, et al. Multi-scale modeling method and seismic behavior analysis for ancient timber structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10): 44. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.10.006