

DOI:10.11918/202005092

复合加固方形木柱偏心受压性能试验

韩笑东,赵 越,杨燕泽,阿斯哈,周长东

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:为解决古建木柱的加固、修复等问题,探究一种经济可行、效果显著的加固方法,将 7 根方形木柱以内嵌钢筋外包碳纤维布复合加固的方法进行加固试验,研究其在偏心受压情况下承载力、延性等力学性能的变化,主要考虑嵌筋的数量和受压偏心距两种因素的影响。试验结果表明:采用间隔包裹一层 CFRP 布同时嵌筋的方法复合加固的木柱破坏主要发生在纤维布之间的间隔段,而且相比于未加固的木柱其破坏时表现出更好的整体性;偏心距为 0 时,木柱的 4 个侧面均发生破坏现象,而随着偏心距的增大,木柱仅在偏压侧发生破坏;在偏心距相同的情况下,采用该复合加固方法加固后的木柱在承载力和延性性能方面均得到明显提升和改善,提升幅度随嵌筋数量的增加而增大;加固方式相同时,偏心距由 0 增加到 50 mm,木柱的承载力降低显著,而延性系数变化不大。

关键词:木柱;内嵌钢筋;碳纤维布;复合加固;偏心受压;承载力;延性

中图分类号: TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)04-0195-06

Experimental study on eccentric compression behavior of hybrid strengthened square timber columns

HAN Xiaodong, ZHAO Yue, YANG Yanze, A Siha, ZHOU Changdong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To tackle the problems of strengthening and repairing ancient timber columns, this paper proposes an economic and feasible method of strengthening. Seven square timber columns were strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips and steel bars to investigate changes in bearing capacity and ductility under eccentric compression, mainly considering the amount of embedded bars and the eccentricity of timber columns. Test results show that the failure of the hybrid strengthened timber column which was wrapped with a layer of CFRP strips at intervals and embedded with steel bars occurred mainly in the interval between the CFRP strips, indicating a better integrity than the unstrengthened timber columns. When the eccentricity was 0, all four sides of the timber column were destroyed; with the eccentricity increased, the timber column was destroyed only on the pressure side. Under the same eccentricity, the bearing capacity and ductility of the hybrid strengthened timber columns were improved obviously, and the extent of improvement increased with the increase of the amount of steel bars. With the same strengthening method, when the eccentricity increased from 0 to 50 mm, the bearing capacity of the timber column decreased significantly, but the ductility coefficient was little affected.

Keywords: timber column; embedded steel bar; CFRP strip; hybrid strengthening; eccentric compression; load bearing capacity; ductility

与钢材、混凝土和石材等常用材料相比,木材是最容易获取的可再生性资源,其在古代和现代建筑中应用广泛。由于木材本身的缺陷、环境腐蚀、震害等会造成木结构的承载力和耐久性降低,需要对木结构进行维修加固。

FRP(fiber reinforced polymer)具有高比强度和良好的耐腐蚀性^[1],近年来在土木工程领域得到了较为广泛的研究和应用。国内外学者 Taheri 等^[2]、

朱雷等^[3]、Fiorelli 等^[4]、邵劲松等^[5]、杨静等^[6]、朱艳梅等^[7]、张大照^[8]、马建勋等^[9]进行了 FRP 加固木结构的试验研究,结果表明 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)满贴加固木柱可使其承载力得到有效提高,同时对其延性性能的提高也有一定帮助,加固后木柱受力性能的提高程度与 CFRP 布的粘贴布置方式以及粘贴层数有较大关系,但该加固方式对提高木柱承载能力效果不大。

木结构嵌筋是用黏结剂将筋材嵌入木构件的加固方法,此过程涉及木材、筋材、黏结剂等 3 种材料,筋材/黏结剂和木材/黏结剂等两个界面^[10-12]。近 20 年来国外学者对木结构嵌筋进行了大量试验研

收稿日期:2020-05-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678039,51478033,51727813)

作者简介:韩笑东(1998—),男,硕士研究生;

周长东(1971—),男,教授,博士生导师

通信作者:周长东,zhouchangdong@163.com

究,近十几年来国内学者也陆续开展了相关研究,研究范围主要集中在连接部位的黏结锚固和节点的受力性能^[13],对木材的结构性能等方面的研究较少。淳庆等^[14-15]、Kell^[16]对内嵌筋材的木柱进行了试验研究,结果表明,内嵌筋材可以对木柱的轴心抗压性能有较程度的提高,承载力随嵌入钢筋的强度等级、数量、直径等的不同而变化,但同时该加固方法也存在内嵌筋材受压弯曲、筋材稳定性不足、对木柱的横向变形约束作用小等缺点。

木材表面开槽嵌筋同时包裹纤维布作为一种新型的加固方式,相比于仅包裹纤维布的方式理论上能更好地发挥内嵌筋材的承载力及延性性能,同时较仅内嵌筋材的加固方式又可利用纤维布的横向约束能力来增加筋材的稳定性、约束木材的横向变形使其处于三向受压状态以提升木柱的承载能力,因此该复合加固方式具有较大研究价值和应用前景。

目前国内对于嵌筋技术在木结构建筑的建造和加固中的理论和应用研究尚处起步阶段,而 FRP 加固木柱的抗压性能研究也多局限于轴心受压。因此,本文对采用表面内嵌钢筋、外包 CFRP 布复合加

固的木柱进行了偏心受压试验研究,以探究该加固方法的适用性。

1 试件设计

1.1 试件特征

本试验试件尺寸均为 200 mm × 200 mm × 600 mm,共 7 根试件,编号为 TC1 ~ TC7,分别进行偏心受压试验。试件加固详情见表 1,特征见图 1。

表 1 试件详情

Tab. 1 Details of specimens			mm
试件 编号	偏心距/ mm	加固形式	
TC1	50	未加固	
TC2	50	2 侧面中心各嵌 1Φ16 钢筋 + 水平间隔贴 1 层 CFRP 布	
TC3	75	2 侧面中心各嵌 1Φ16 钢筋 + 水平间隔贴 1 层 CFRP 布	
TC4	50	4 侧面中心各嵌 1Φ16 钢筋 + 水平间隔贴 1 层 CFRP 布	
TC5	0	未加固	
TC6	0	2 侧面中心各嵌 1Φ16 钢筋 + 水平间隔贴 1 层 CFRP 布	
TC7	0	4 侧面中心各嵌 1Φ16 钢筋 + 水平间隔贴 1 层 CFRP 布	

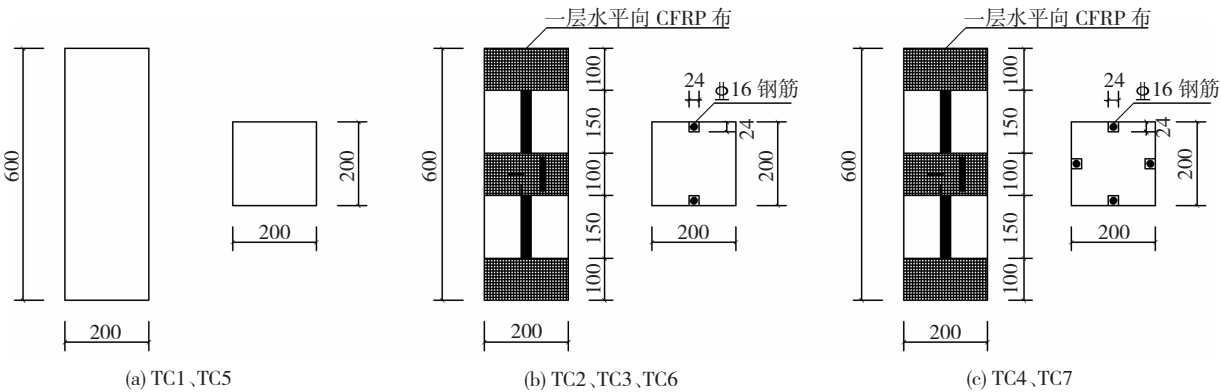


图 1 试件特征 (mm)

Fig. 1 Characteristics of specimens (mm)

1.2 试验材料

本试验选用的是红松,取自在自然条件下储存 7 ~ 8 a 的原木,经加工成试验用短木柱后,在实验室环境中又存放半年。因而木材的物理力学性能基本处于稳定状态。材料性能试验测得其顺纹抗压强度为 44. 0 MPa,弹性模量为 11 890 MPa,密度为 0. 539 g/cm³,含水率(木材中所含水分的质量与绝干后木材质量的百分比)为 14. 2%。

本试验选用的 CFRP 布为单向碳纤维编织而成的宽度为 100 mm 的 MKT - CFC 型碳布,公称厚度为 0. 167 mm,抗拉强度为 3 506 MPa,弹性模量为 235 000 MPa,加固时搭接长度为 100 mm。CFRP 布黏结采用配套的 MKT - CFR/A 型碳纤维浸渍胶,由环氧树脂黏结剂与固化剂两部分按照 2: 1 的比例配制而成,其抗拉强度为 53. 2 MPa,弹性模量为

2 820 MPa。钢筋采用直径 16 mm 的 HRB400 级钢筋,屈服强度为 455 MPa,抗拉强度为 645 MPa,弹性模量为 200 000 MPa。木材与钢筋黏结时采用 JGN805 型双组份环氧树脂嵌筋结构胶,其抗压强度为 83. 5 MPa,弹性模量为 3 500 MPa。

既有研究^[17-18]表明,当木材与其表面内嵌钢筋的锚固长度为 160 mm 时,钢筋接近屈服。试验中木柱高为 600 mm,因而内嵌钢筋的黏结长度满足锚固要求。

本试验采用标准应变片来采集试验时各材料的应变数据,应变测点布置情况见图 2。在木材 4 个侧面中心位置均布置有水平和竖向的应变片,其中开槽嵌筋的侧面在槽两侧各布置一组水平和竖向的应变片,取平均值;每根钢筋中心位置处布置有应变片;在中间位置 CFRP 布的 4 个侧面中心位置各布置一组水平和竖向应变片。

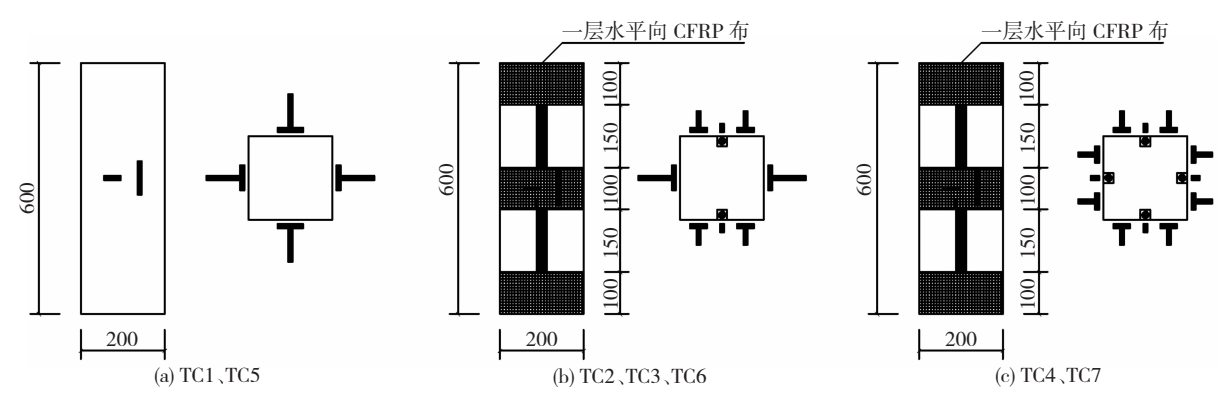


图 2 应变测点布置 (mm)
Fig. 2 Layout of strain measuring points (mm)

1.3 试件制作

- 1)加工木柱试件,对嵌筋试件开槽;
- 2)进行测量标记,确定粘贴应变片、包布等的位置,并在木柱侧面相应位置粘贴应变片,放置一周;
- 3)充分清洗孔槽,配制嵌筋胶,将粘贴好应变片的钢筋植入孔槽中;
- 4)配制包布所用的浸渍胶,并在相应位置粘贴 CFRP 布,放置 1~2 d;
- 5)待 CFRP 布充分固定之后在相应位置粘贴应变片,试件即制作完成。

1.4 加载制度

本试验在 600 t 电液伺服压力试验机上进行,偏心受压试验加载装置见图 3(以 TC4 为例)。

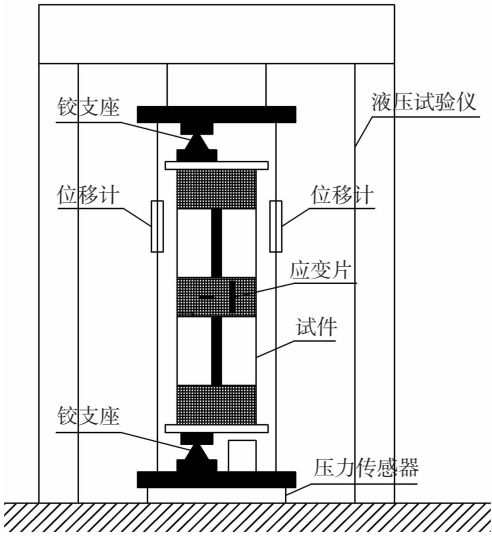


图 3 偏心加载示意
Fig. 3 Eccentric loading test device

首先将试验机施压位置与试件标记的偏心受压位置对正,然后进行预加载。采用加载速度为 0.5 mm/min 的连续均匀加载方式,同时采用德国 IMC 动态应变测量系统对荷载和应变数据进行采集。当荷载下降到极限荷载的 70% 时,试验结束。

2 试验现象

TC1、TC2、TC4、TC5 和 TC6 均在加载至峰值荷载的 40% 左右时开始发出劈裂声,TC3 和 TC7 则分别出现在加载至峰值荷载的 45% 和 30% 左右时。TC2、TC3、TC4 和 TC6 均在加载至峰值荷载的 90% 左右时产生持续的劈裂声并出现明显的裂缝,并且 TC2、TC3 和 TC4 出现略微倾斜;TC1 和 TC5 则分别在加载至峰值荷载的 70% 和 65% 左右时出现持续的劈裂声;而 TC7 则是从劈裂声产生时开始,随着荷载的增加,劈裂持续加剧,直至加载至试件破坏。

试验结束后 TC1 和 TC5 主要发生木材的褶皱破坏,TC2、TC3 和 TC4 主要表现为木材的褶皱及局部压溃,TC6 和 TC7 主要在纤维布之间发生木材的斜剪褶皱以及钢筋的外凸。各试件的破坏形态见图 4。

3 试验结果及分析

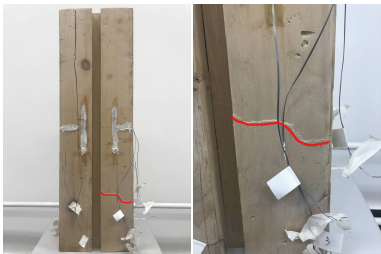
3.1 破坏形式的对比

通过 TC1 和 TC5 的对比,TC2、TC3 和 TC6 的对比,TC4 和 TC7 的对比可知:相同加固状态下的木柱,偏心距越大,其破坏发生的位置越集中,偏心距越小,整体破坏状态越明显;偏心距较大的木柱,破坏主要发生在偏心侧,且集中在纤维布包裹间隔处;而偏心距为 0 时,木柱在 4 个侧面均发生明显破坏现象,且破坏分布均匀,表现出更好的整体性。

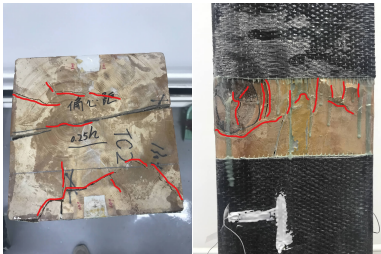
通过 TC1、TC2 和 TC4 的对比,TC5、TC6 和 TC7 的对比可知:在相同偏心距受压情况下,复合加固后的木柱相较于未加固的木柱发生破坏的位置除了偏压侧出现褶皱外,还有顶部受压处出现的局部压溃,而且加固后的木柱破坏位置主要发生在纤维布间隔处。

3.2 试验结果汇总

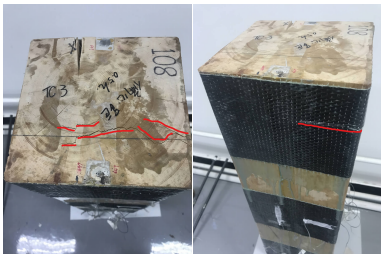
柱的试验结果汇总于表 2。表中 P_u 为极限荷载, Δ_m 为极限荷载对应的相对位移(偏心受压情况下只取偏压侧位移值, Δ_y 、 Δ_u 同), Δ_y 为名义屈服位移,



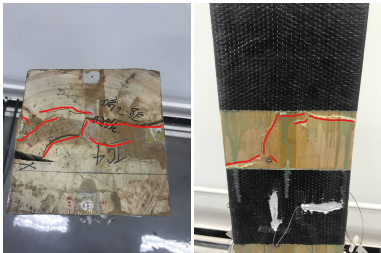
(a) TC1



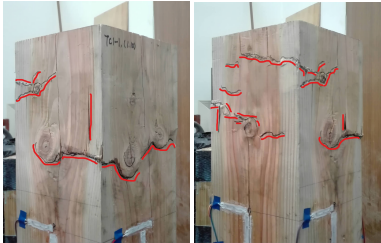
(b) TC2



(c) TC3



(d) TC4



(e) TC5



(f) TC6

(g) TC7

图 4 TC1 ~ TC7 破坏形态

Fig. 4 Failure modes of TC1 – TC7

Δ_u 为荷载下降至 $0.85 P_u$ 时的极限位移, μ_Δ 为延性系数。本文采用位移延性系数 $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$ 来表征试件的轴向变形能力, 其中名义屈服位移 Δ_y 采用能量等效面积法进行计算。在 P_u 和 μ_Δ 提高幅度计算中, TC2 和 TC4 的对比试件为 TC1, TC6 和 TC7 的对比试件为 TC5, 由于 TC3 偏心距不同, 主要与 TC2 相对比, 不进行 P_u 和 μ_Δ 提高幅度值的计算。

表 2 主要试验结果

Tab. 2 Main experimental results

试件	P_u /kN	P_u 提高/%	Δ_m /mm	Δ_y /mm	Δ_u /mm	μ_Δ	μ_Δ 提高/%
TC1	472.89	—	3.38	2.42	3.45	1.43	—
TC2	580.74	22.8	3.82	2.76	6.09	2.21	54.5
TC3	483.85	—	4.67	3.39	7.92	2.34	—
TC4	874.38	84.9	5.33	3.73	10.07	2.70	88.8
TC5	853.32	—	2.85	2.67	4.58	1.72	—
TC6	1 244.80	45.9	3.42	3.16	7.23	2.29	33.1
TC7	1 377.79	61.5	4.05	3.41	8.81	2.58	50.0

3.3 试验数据分析

试件 TC1、TC2、TC3 和 TC4 的荷载 – 位移曲线见图 5, TC1、TC2 和 TC4 的荷载 – 应变曲线见图 6; 试件 TC5、TC6 和 TC7 的荷载 – 位移曲线、荷载 – 应变曲线分别见图 7、8。由表 2、图 5 ~ 8 可知:

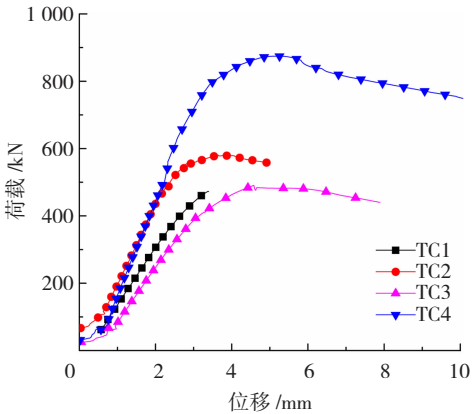


图 5 TC1、TC2、TC3 和 TC4 荷载 – 位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of TC1, TC2, TC3, and TC4

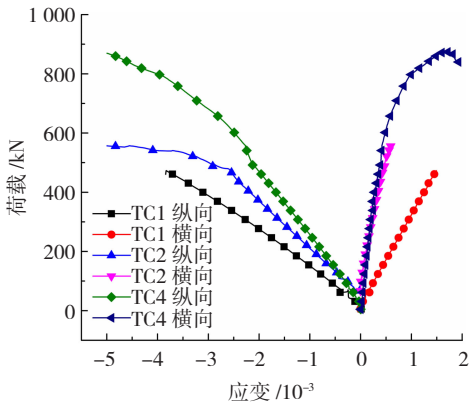


图 6 TC1、TC2、TC4 荷载 – 应变曲线

Fig. 6 Load-strain curves of TC1, TC2, and TC4

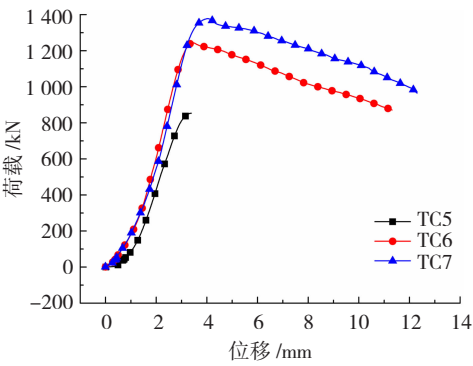


图7 TC5、TC6、TC7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of TC5, TC6, and TC7

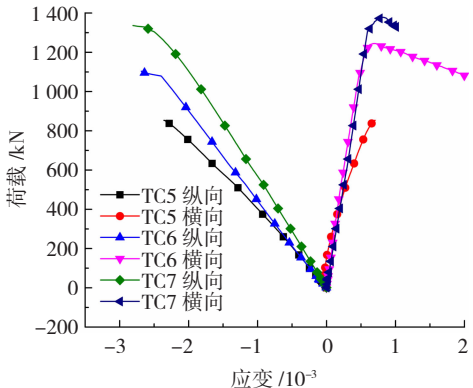


图8 TC5、TC6、TC7 荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of TC5, TC6, and TC7

1) 偏心距对木柱承载能力影响显著,偏心距越大,木柱的承载能力越弱:偏心距为 50 mm 的未加固木柱比偏心距为 0 状态下承载能力降低 51.3%;侧面中心嵌入 2Φ16 并用一层 CFRP 布间隔包裹的木柱,偏心距为 50 mm 和 75 mm 的试件承载能力分别比偏心距为 0 时降低 53.3% 和 61.2%。

2) 偏心距为 0 时,在木柱侧面中心嵌入 2Φ16 或 4Φ16 并用一层 CFRP 布间隔包裹后,试件承载力分别提高 45.9% 和 61.5%,而在偏心距为 50 mm 时,其承载能力可分别提高 22.8% 和 84.9%。由此可见,CFRP 条带间隔包裹时,四面嵌筋试件的偏心受压承载力明显高于两侧嵌筋试件。

3) 相比于未加固试件,加固后木柱的刚度大幅提升;而嵌筋数量越多,试件的刚度提升越大。

4) 加固方式相同时,随着偏心距的增大,木柱破坏时的横向和纵向极限应变值都有所提高;偏心距相同时,纤维布可限制木材的横向应变;纤维布约束木柱横向应变的能力与嵌筋数量关系不大。

3.4 延性系数分析

由表 2 可知:

1) 加固方式相同,偏心距变化时:未加固的木柱,偏心距为 50 mm 的试件延性系数比偏心距为 0 时降低 16.9%;对于加固后的木柱,偏心距的变化对延性系数有影响,但影响程度不明显。

2) 偏心距相同,加固方式变化时:偏心距为 0 时,在木柱侧面中心嵌入 2Φ16 或 4Φ16 并用一层 CFRP 布间隔包裹后,延性系数可分别提高 33.1% 和 50.0%;而偏心距为 50 mm 时,可分别提高 54.5% 和 88.8%;增加嵌筋数可有效提升木柱的延性。

3.5 应变分析

由图 6、8 可知:

1) 由于木材内裂缝、木节等的存在,各试件的应变存在一定的离散,但整体趋势较为一致。

2) 加固方式相同时增大偏心距,木柱破坏时的横向和纵向极限应变值有所提高,但承载力降低。

3) 对于未加固的试件,偏心距的变化对其塑性无影响,均表现为脆性破坏;对于加固的试件,偏心距变化对其塑性有影响,偏心距越小,其塑性越明显,呈现出的屈服段越显著;偏心距相同时,相比于未加固试件,加固后的木柱呈现出较明显的屈服段,表现出良好的塑性,且嵌筋数越多,其塑性也越明显。

4) 相比于原木柱,加固试件的纵向峰值应变有所提高,横向则变化不大,嵌筋数对应变影响不大。

4 复合加固偏压木柱的工作机理

对于未加固的木柱,由于木材为脆性材料,因此在偏心距较大时仅有偏压侧部分木材参与承压,从而很快发生褶曲破坏。对于相同加固方式的木柱,偏心距越小,其受压整体性越明显,因而其承载力也越高;随着偏心距的增加,木柱的偏压侧承受大部分荷载,难以发挥出整体性,因此其承载力大幅降低。对于复合加固后的木柱,偏心距较大时,纤维布的约束作用不明显,且仅有部分钢筋参与承压,因而其承载力较低;而偏心距较小时,纤维布有效地限制了木材的横向变形,使其处于三向受压状态,受压整体性更好,同时嵌入的钢筋受到嵌筋胶和纤维布的约束,稳定性增强,使得钢筋的抗压能力得以发挥,从而提高木柱的承载力和延性性能。嵌筋数量越多,承压钢筋的面积越大,钢筋承担的荷载也越多,从而提高木柱的承载力。

需要说明的是,本文中仅采用了间隔包裹 CFRP 布的形式,如果增加 CFRP 布的加固量,则有可能进一步提升木柱的受压性能。试验木柱的破坏往往发生于木材初始缺陷较为集中的区域,而 CFRP 布加固量的增加会改善木材初始缺陷的影响。

5 结 论

1) 相同偏心距时,对木柱复合加固之后,木柱的承载力和延性均得到提高,提高幅度随着嵌筋数量增加而增大,并且在破坏时表现出更好的整体性。

2)在采用双侧面嵌筋加间隔包裹一层 CFRP 布的方式加固后,增大偏心距将降低木柱的承载力,但同时木柱的延性性能有所提高。

3)在偏压状况下通常为受压一侧材料率先失效。在实际项目应用中,应充分考虑构件实际受力情况,调整钢筋直径,再进行加固作业。

参考文献

- [1] 朱雷,许清风. CFRP 加固木柱性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(12): 113
ZHU Lei, XU Qingfeng. Experimental research on behavior of CFRP-reinforced timber columns [J]. Industrial Construction, 2008, 38(12): 113
- [2] TAHERI F, KHOSRAVI P, NAGARAJ M. Buckling response of glue-laminated columns reinforced with fiber-reinforced plastic sheets[J]. Composite Structures, 2009, 88(3): 481. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.05.013
- [3] 朱雷,许清风,戴广海,等. CFRP 加固开裂短木柱性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 101
ZHU Lei, XU Qingfeng, DAI Guanghai, et al. Experimental research on short cracked timber columns strengthened with CFRP [J]. Building Structure, 2009, 39(11): 101. DOI: 10.19701/j.jzjg.2009.11.027
- [4] FIORELLI J, DIAS A A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation [J]. Materials And Structures, 2011, 44(8): 1431. DOI: 10.1617/s11527-011-9708-y
- [5] 邵劲松,刘伟庆,王国民,等. FRP 环向加固木柱轴心受压性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(2): 52
SHAO Jinsong, LIU Weiqing, WANG Guomin, et al. Experimental study on axial compressive behavior of timber column laterally strengthened with FRP [J]. FRP/CM, 2012(2): 52. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2012.02.012
- [6] 杨静,刘清,韩风霞,等. 纤维增强复合材料满贴加固新疆杨木短柱轴心抗压试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 24
YANG Jing, LIU Qing, HAN Fengxia, et al. Experimental study of axial compressive behavior of populus bolleana short columns reinforced with full pasting of FRP sheets [J]. Industrial Construction, 2016, 46(3): 24. DOI: 10.13204/j.gyjz201603006
- [7] 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(S2): 52. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s2.059
- [8] 张大照. CFRP 布加固修复木柱梁性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2003
ZHANG Dazhao. Study on performance of timber columns and beams strengthened with CFRP sheets [J]. Shanghai: Tongji University, 2003
- [9] 马建勋,蒋湘闽,胡平,等. 碳纤维布加固木梁抗弯性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 35
MA Jianxun, JIANG Xiangmin, HU Ping, et al. Experimental study on bending behaviour of timber beams reinforced with CFRP sheets[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2005.08.008
- [10] 张洋. 嵌入式 CFRP 板(筋)材加固木构件试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2013
ZHANG Yang. Experimental study on timber frame members strengthened with NSM CFRP materials [D]. Nanjing: Southeast University, 2013
- [11] RAFTERY G M, KELLY F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 9. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.10.036
- [12] 凌志彬,刘伟庆,杨会峰,等. 考虑位置函数的胶合木植筋粘结-滑移关系研究[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 95
LING Zhibin, LIU Weiqing, YANG Huifeng, et al. Study on bond-slip law of glulam connection with glued-in rebar with consideration of location function[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 95
- [13] 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
LIU Weiqing, YANG Huifeng. Research progress on modern timber structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 16. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.02.002
- [14] 淳庆,张洋,潘建伍. 内嵌碳纤维板加固圆木柱轴心抗压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(7): 91
CHUN Qing, ZHANG Yang, PAN Jianwu. Experimental study on mechanical properties of circular timber columns strengthened with near-surface mounted CFRP sheets under axial compression [J]. Industrial Construction, 2013, 43(7): 91
- [15] 淳庆,张洋,潘建伍. 嵌入式 CFRP 筋加固圆木柱轴心抗压性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 20
CHUN Qing, ZHANG Yang, PAN Jianwu. Experiment on axial compression properties of circular timber columns strengthened with near-surface mounted CFRP rods [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3): 20. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2013.03.004
- [16] KELL J A. Repair of wooden utility poles using fibre-reinforced polymers[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 2001: 17
- [17] 阿斯哈,周长东,邱意坤,等. 考虑位置函数的木材表面嵌筋粘结滑移本构关系[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 134
A Siha, ZHOU Changdong, QIU Yikun, et al. Bond-slip law between timber and near surface mounted rebar considering location function [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 134. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.10.0546
- [18] 阿斯哈,周长东,邱意坤,等. 木材表面嵌筋黏结锚固性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 191
A Siha, ZHOU Changdong, QIU Yikun, et al. Experimental study on bond behavior between timber and mounted steel bar [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 191. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0541

(编辑 赵丽莹)