

文章编号:1674-2974(2016)03-0120-07

CFRP布包镶加固底部糟朽木柱轴压试验*

周乾^{1†}, 闫维明², 慕晨曦², 杨慧²

(1. 故宫博物院, 北京 100009; 2. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要:为探讨适用于糟朽柱根的有效加固方法,提出了采取CFRP布代替铁箍来包镶加固古建木柱柱根的方法.制作了6个模型,其中部分模型考虑柱根糟朽,并采用CFRP布进行包镶加固.采取静力加载试验方法,研究了CFRP布包镶加固前后木柱的轴压受力性能.基于试验结果,获得了木柱的力-变形曲线、力-应变曲线、极限承载力及延性性能,讨论了CFRP布包镶层数对加固效果的影响.结果表明,采用CFRP布包镶加固柱根后,木柱极限承载力可恢复81.4%~92.4%左右,延性性能恢复87.3%~95.8%左右,水平及竖向峰值压应变均有不同程度提高.当CFRP布包镶层数为3层时,木柱柱根加固效果最明显,但加固后的木柱承载性能略低于完好木柱.

关键词:木柱柱根;包镶加固;CFRP布;轴心受压;试验

中图分类号:TU366.2

文献标识码:A

Axial Compression Experiments on Timber Columns Strengthened with CFRP Sheets on Decay Roots by Coating Reinforcing Technique

ZHOU Qian^{1†}, YAN Wei-ming², MU Chen-xi², YANG Hui²

(1. Palace Museum, Beijing 100009, China; 2. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing Univ of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To find out a more effective strengthening method for timber column with decay root, CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic) sheet was employed to replace iron band in coating reinforcement technique. Six specimens were manufactured built, some of which had decay roots and strengthened by CFRP sheets using coating technique. Axial compression experiments were carried out to investigate the response of these six columns. The load-displacement relationships, load-strain relationships, ultimate compressive strength and ductility of the specimens were obtained to evaluate the strengthening effects. The influence of layer numbers of CFRP sheets was also discussed. The results showed that the ultimate compression strength and ductility of the strengthened columns were recovered to about 81.4% to 92.4% and 87.3% to 95.8% of those of the intact column, respectively. The peak compressive strain of the strengthened columns was also improved in both horizontal and vertical directions. The column strengthened by 3 layers of CFRP sheets exhibited better compressive performances than those of other strengthened columns, but still lower than that of the intact one.

Key words: timber column root; coating reinforcement; CFRP sheets; axial compression; experiments

* 收稿日期:2015-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278013), National Natural Science Foundation of China(51278013);北京市博士后工作经费资助项目(2013ZZ-04);故宫博物院科研基金资助项目(KT2012-7)

作者简介:周乾(1975-),男,湖南茶陵人,故宫博物院副研究员,博士后

† 通讯联系人, E-mail: qianzhou627@126.com

中国的古建筑以木结构为主,具有重要的文化和历史价值,保护意义重大.然而,由于木材材性缺陷,古建筑不可避免地会出现残损问题,典型问题之一即为柱根糟朽.坐落于柱顶石之上的柱根,很容易受到雨水侵蚀而产生糟朽,并威胁到结构整体稳定性.包镶是我国传统的用于柱根加固的技术之一,主要用于糟朽深度较小的柱根加固.一般来说,当柱根圆周的一半或一半以上表面糟朽,糟朽深度不超过柱径的 $1/5$ 时,可采取包镶的做法^[1].包镶即用锯、扁铲等工具将糟朽的表皮剔除干净,然后按剔凿深度、长度及柱子周长、制作出包镶料,包在柱心外围,使之与柱子外径一样,平整浑圆,然后用铁箍将包镶部分缠箍结实,见图1.



(a) 包镶前

(b) 包镶后

图1 传统包镶加固底部糟朽木柱照片

Fig.1 Photos of column strengthened by coating technique on root

包镶法虽然在一定程度上提高糟朽木柱的受力性能,但也存在如下3个问题:1)铁箍长时间暴露在空气中,容易产生锈蚀,从而导致加固效果降低甚至失效;2)铁箍包裹木柱时,往往通过铆钉固定铁箍与木柱,而铆钉对木材具有一定破坏作用;3)包镶后的柱根仍暴露潮湿环境中,长时间潮湿环境下仍将产生糟朽问题.

碳纤维增强复合材料(CFRP, Carbon Fibre Reinforced Plastic)是由碳纤维和树脂基体两种不同性能、不同形态的组分材料通过复合而成的一种多相新型复合材料,具有比强度高、自重轻、耐腐蚀性强、易设计、易裁剪等优点.目前,CFRP材料已广泛应用于结构工程加固领域,并不断地显示其优越性.相应地,国内外部分学者开展了CFRP布加固木柱的研究,主要成果包括:许清风等^[2-3]通过对试件不同高度位置的横截面全部切开来模拟局部糟朽柱子,研究了包裹一层CFRP布后,上述柱子受压承载力的恢复情况,认为柱子的受压承载力和延性性能均可恢复;李向民等^[4]研究了CFRP布加固旧

方木柱的受压承载力,认为包裹CFRP布后,旧木柱的受压承载力可提高26.6%,延性系数可提高60.5%;淳庆等^[5]研究了嵌入式CFRP筋加固圆木柱的轴心抗压性能,认为木柱的轴心抗压强度可提高6.2%~47.1%;Taheri等^[6]进行了CFRP加固长细比为16的胶合方木柱试验研究,认为可提高方木柱60%~70%的极限承载力.Jonathan^[7]采用CFRP棒加固局部残损木柱,并提出了加固计算公式.Roberto等^[8-9]提出了采用FRP材料修复码头木柱的思路,并通过试验论证了方案对于提高木柱极限受压承载力的可行性.

本文基于以上成果,采取静力试验手段,开展CFRP布包镶加固底部糟朽木柱轴压受力性能的研究,提出可行性建议,结果可为我国木构古建筑保护和维修提供理论参考.

1 试验概况

试验选用故宫大修常用的红松材料,制作圆形木柱模型(试件).根据中国林业科学研究院木材工业研究所提供的参数,木材顺纹抗压强度为34.6 MPa,弹性模量为9 316 MPa,密度为460 kg/m³,含水率约为13.2%.加固木柱所用的CFRP布材料由北京卡本工程技术研究所有限公司提供,碳布型号为CFS-II-200,公称厚度为0.111 mm,抗拉强度为3 004 MPa,受拉弹性模量为 2.30×10^5 MPa,伸长率1.5%;配套的碳纤维胶型号为CFSR-A/B,抗拉强度为52 MPa.以故宫某古建木柱为对象,制作了1:2缩尺模型.木柱模型截面直径为180 mm,长1 500 mm,数量共6个,包括完好木柱1根,1层CFRP布包镶2根,2层CFRP布包镶2根,3层CFRP布包镶1根,各试件编号及加固方式见表1.

表1 试件编号
Tab.1 Model numbers

编号	试件名称
C0	完好木柱
C1-1	第1根1层CFRP布包镶加固木柱
C1-2	第2根1层CFRP布包镶加固木柱
C2-1	第1根2层CFRP布包镶加固木柱
C2-2	第2根2层CFRP布包镶加固木柱
C3	3层CFRP布包镶加固木柱

本试验中,CFRP布包镶加固底部残损木柱的工艺流程照片及示意图见图2,说明如下:1)制作底部残损木柱,挖去木柱底部周圈厚30 mm、高500

mm 部分,露出柱芯,以模拟柱底部糟朽等残损现状.上述尺寸的选择依据为:500 mm 高的糟朽深度与古建实际工程中木柱柱根糟朽深度相近,而 30 mm 糟朽深度符合包镶加固工艺要求^[1].2)制作包镶料,根据传统工艺做法,包镶料由数块同材料木块叠加而成,总尺寸同木柱被挖去部分,用少量乳胶将包镶料与柱芯粘接,以恢复木柱外表形状.3)用 500 mm 长 CFRP 布包裹包镶部分,以代替传统铁箍包镶加固做法.



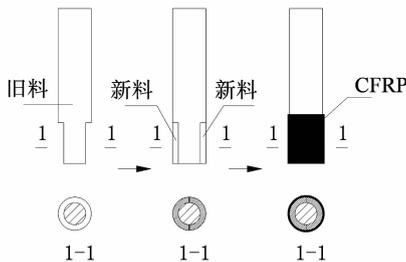
(a) 加固前



(b) 包镶料



(c) CFRP 布包裹加固位置



(d) 加固示意图

图2 CFRP 布包镶加固木柱模型工艺

Fig. 2 Process of column models strengthened by CFRP sheets of coating technique

为了解试件受力过程中的变形情况,采用 SZ120-100AA 型号应变片对称粘贴在加固区中部,水平、竖向各布置 1 个,合计 4 个;另在木柱底部两

侧各布置百分表(量程 50 mm)1 个,合计 2 个,以测定木柱竖向变形.将试件固定在 2 000 kN 万能试验机上进行加载,装置示意图如图 3 所示.正式进行试验前对试件进行预压,以减少试验产生的系统误差.试验时,采用 DH3815 静态数据采集仪进行数据采集.试验采取连续加载方式,加载速度控制在 0.04 mm/s 左右,加载至试件破坏,然后卸载至极限荷载的 80% 左右时,试验结束.

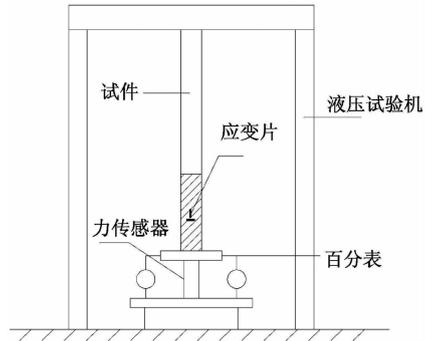
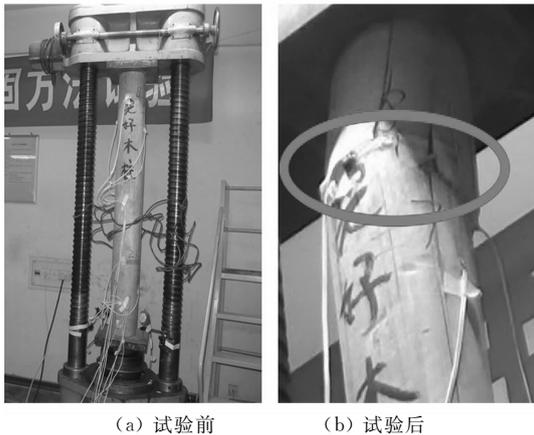


图3 试验加载装置示意图

Fig. 3 Sketch of experimental installation

2 试验现象

1) 完好试件:木柱上端原有宽 1.5 mm、长约 200 mm 的纵向裂缝.刚加载时,木柱发出“嘭”的响声,应该是木柱底部与加载装置挤紧时发出的声音.荷载加载过程中,无明显试验现象.当外力为极限荷载的 20% 左右时,木柱上部传来间断劈裂声,随后在加载过程中,百分表读数加快,可反映柱竖向变形比开始要加速.当加载继续进行,木柱中上部劈裂声变得明显,柱头位置开始产生局部倾斜.当荷载进一步增加时,劈裂声越来越明显并带有劈啪声,且集中在木柱上部.当外力达到极限荷载的 70% 左右时,劈裂声开始由上往下传递,但仍在木柱中上部位置,且次数比以前增多,声音明显、清脆,上部变形也明显,但木柱承载力尚好.随后,木柱上部劈裂声越来越明显,但木柱表面未见明显裂缝.当接近极限荷载时,木柱上部传来巨大的“啪”声,并冒出白烟,可认为木柱接近破坏,此时劈裂声变频繁,但尚能加载.当外力达到极限荷载时,木柱上部的倾斜突然变大,柱头产生弯折,并产生持续劈啪声,荷载无法继续增大,预示木柱产生破坏.由于木柱破坏前无明显征兆,可认为是脆性破坏.经观察,木柱破坏主要出现在中上部,表现为开裂并折断,其他位置完好,初始裂缝未产生扩展.木柱试验前后照片见图 4,破坏位置见图 4 中圆圈标记.



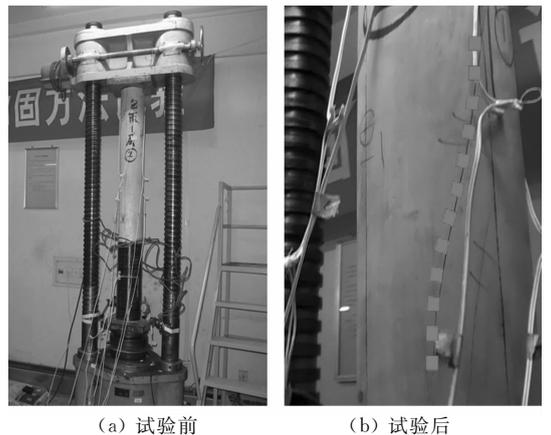
(a) 试验前 (b) 试验后
图4 无加固木柱试验照片

Fig. 4 Photos of experiments on intact column

2) 1层CFRP布包镶加固:木柱上部原来有长为150 mm,宽2 mm的纵向细小裂缝.一开始加载,木柱周边有轻微劈啪声,应该是木柱与加载装置挤紧的声音.当外力为极限荷载的20%左右时,CFRP布加固位置传来轻微劈裂声,应该是CFRP布参与受力时部分木柱受挤压声音,此时木柱整体较完好.当外力为极限荷载的40%左右时,木柱上部传来轻微爆裂声和间断劈啪声,是木柱上部产生裂纹的声音.随着荷载增大,上部劈啪声频率增大,并传来局部的木柱剥裂声,但加固区尚完好.依此可初步判断在木柱上部可能会产生受力破坏,而加固区由于刚度和强度较大,不会产生破坏.当荷载进一步增大时,上部的劈啪声变得越来越频繁,表明木柱上部开始产生受力破坏.当外力达到极限荷载时,木柱上部传来“嘭”的一声巨响,加载已无法继续进行,说明木柱已产生受力破坏.经仔细观察,发现木柱破坏是由原有裂缝向下并向后扩展产生,并导致木柱上部局部弯折破坏.木柱试验前后照片见图5,为便于观察,试验后木柱的裂纹已用加粗的虚线加粗.木柱破坏过程为脆性破坏.需要说明的是,木柱原有受损位置在底部.采取CFRP布加固后,当木柱受到轴压力作用时,其破坏位置并非发生在加固区,而是在木柱上部,这说明底部加固区得到了补强.

3) 2层CFRP布包镶加固:一开始,木柱顶部传来轻微劈裂声,应该是木柱与加载装置挤紧声音.荷载增大,木柱上部间断传来劈啪声,应该是该位置受力要比其他位置大.需要说明的是,木柱上部原有细小纵向、斜向裂缝,宽度约为1.5 mm,长度约为150 mm.当外力为极限荷载的20%左右时,木柱上部的轻微劈啪声不断,应该是原有裂缝受挤压时发出的声音.随着荷载增大,上部劈裂声不断传来,但木柱尚未破坏.初步分析认为:因为木柱上部原有裂缝,且上部受力较大,因而不断传来劈啪声.当外力

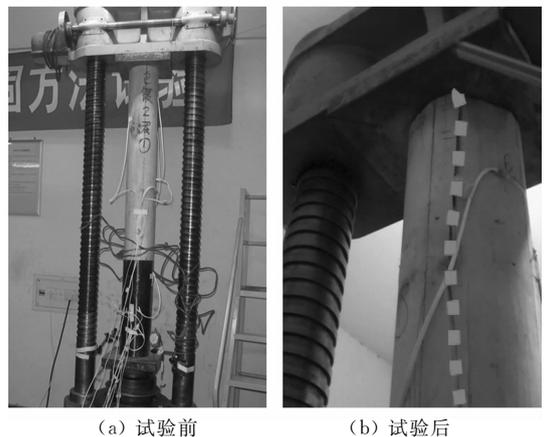
达到极限荷载的50%左右时,木柱顶部偶尔传来爆裂声,反映该位置木柱裂纹的扩展.当外力达到极限荷载时,木柱上部劈啪声开始急剧增大,随后“嘭”的一声,上部产生局部向后折断(图6(b),已用加粗的虚线标记),原有裂缝均已扩展.尽管木柱最终破坏位置并非原有裂缝的扩展直接产生,但与之有着非常密切的关系.这是因为木柱上部原有裂缝很小,外力作用下裂缝宽度增大,造成木柱顶部偏心受压,且有效受压面积减小,使得木柱上部产生新的破坏形式(局部弯折爆裂),并导致木柱最终破坏.另外,木柱底部加固区完好,无明显破坏迹象.试验前后照片如图6所示.



(a) 试验前 (b) 试验后

图5 1层CFRP布包镶加固木柱照片

Fig. 5 Photos of experiment of 1-layer CFRP strengthened column by coating technique



(a) 试验前 (b) 试验后

图6 2层CFRP布包镶加固木柱照片

Fig. 6 Photos of experiment of 2-layer CFRP strengthened column by coating technique

4) 3层CFRP布包镶加固:木柱右侧有一较大初始裂纹,由顶部向下延伸500 mm,宽8 mm,属于干缩裂缝.开始加载阶段,木柱无明显试验现象.当外力为极限荷载的20%左右时,木柱上部传来轻微劈裂声,应该是原有裂缝扩展.随着荷载增大,劈裂声持续进行,但尚不明显;下部加固区无明显试验现

象. 当外力达到极限荷载的 60% 左右时, 劈裂声由中上部传来, 声音不明显, 可认为裂缝朝下扩展, 劈啪声持续. 加载过程中百分表转速较慢, 可反映构件变形不明显. 荷载增长过程中, 裂缝一直不太明显, 表现为轻微劈啪声. 当外力为极限荷载的 80% 左右时, 在木柱上部不仅有劈裂声, 还传来剥落声, 应该是该位置裂缝扩展声音. 随后, 该位置传来一声清脆的爆裂声, 可反映木柱在该位置有较明显的破坏. 随着荷载继续增大, 木柱传来的爆裂声增大、次数增多. 当外力达到极限荷载时, 爆裂声不断增大, 荷载已无法继续增加, 木柱变形明显增加. 随后荷载开始减小, 木柱上部爆裂声持续进行, 木柱上部变形明显, 可以发现明显的水平折断裂纹, 加载停止. 整个过程, 木柱破坏非突发性, 而是持续进行, 一直发生在中上部. 另外, 原有纵向裂纹已扩展, 但木柱最终破坏形式并非源于原有裂缝, 而是产生局部弯折破坏. 分析认为是木柱开始受到轴压作用, 裂缝扩展后, 木柱偏压作用比轴压作用更明显. 加载过程中木柱上部产生侧向弯曲, 并导致上部产生弯折破坏. 试验照片见图 7, 纵向裂缝为原有, 横向裂缝为破坏时产生.



(a) 试验前 (b) 试验后

图 7 3 层 CFRP 布包镶加固木柱照片

Fig. 7 Photos of experiment of 3-layer CFRP strengthened column by coating technique

从以上试验现象可以看出, CFRP 布对木柱底部进行整体包裹, 并在底部形成刚性区. 在轴压作用下, 木柱底部承载力及刚度大于其他位置, 因而不会产生破坏. 但这对木柱整体受力性能有一定的影响, 因为加固后的木柱整体刚度不均, 在外力作用下, 破坏位置往往发生在初始裂纹位置(几乎任何木柱均存在初始干缩裂纹), 并导致原有裂纹的扩展, 木柱的承载力很难恢复到破坏前状态. 理想的加固状态是木柱的承载力能够基本恢复甚至提高, 木柱受力破坏并非初始裂纹扩展, 而是木柱和加固材料作为一个整体在轴力作用下产生整体破坏. 因而改善

CFRP 布的加固方式(如仅在开裂位置局部粘接 CFRP 布条, 或对整个木柱进行包裹), 有利于提高木柱的整体承载性能.

3 试验分析

3.1 荷载-位移曲线

基于试验相关数据, 获得木柱加固前后荷载-位移($F-u$)曲线, 见图 8. 易知: 1) 从曲线形状看, 各曲线均表现为木柱达到极限荷载前, 其竖向位移 u 与荷载 F 成近似线性关系; 木柱达到极限荷载后, 随着 u 值增大, F 值有不同程度降低, 但下降段曲率较为平缓, 可反映木柱破坏后仍有较好的变形能力. 2) 从峰值来看, 完整木柱极限荷载值最大, 不同层数 CFRP 布包裹加固残损木柱后极限荷载值有不同程度减小; 木柱加固前后的极限位移大小顺序: 完整木柱(11.38 mm) > 3 层 CFRP 布包镶加固(8.93 mm) > 2 层 CFRP 布包镶加固(均值 8.43 mm) > 1 层 CFRP 布包镶加固(均值 7.9 mm).

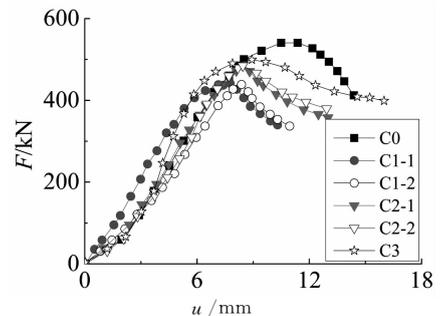


图 8 $F-u$ 曲线
Fig. 8 $F-u$ curves

图 9 为不同工况条件下模型的极限荷载对比图. 易知: 1) 完好木柱(C0)极限承载力最大, 为 540.6 kN. CFRP 布包镶加固柱底后, 木柱极限承载力有不同程度的恢复. 其中, 包镶 1 层 CFRP 布时(C1-1, C1-2)的平均极限承载力为 440.2 kN, 恢复到完好木柱极限承载力的 81.4%; 包镶 2 层 CFRP 布时(C2-1, C2-2)的平均极限承载力为 486.1 kN, 恢复到完好木柱极限承载力的 89.9%; 包镶 3 层 CFRP 布时(C3)的极限承载力为 499.4 kN, 恢复到完好木柱极限承载力的 92.4%. 2) 本试验采用 CFRP 布包镶加固底部糟朽木柱后, 并不能使木柱的承载力完全恢复, 加固后木柱的承载力为完好木柱承载力的 84%~92%. 3) 随着 CFRP 布包镶层数增多, 加固柱的极限承载力逐渐提高, 增长率约分别为 10.4%(包镶 2 层相对于包镶 1 层)及 2.8%(包镶 3 层相对于包镶 2 层).

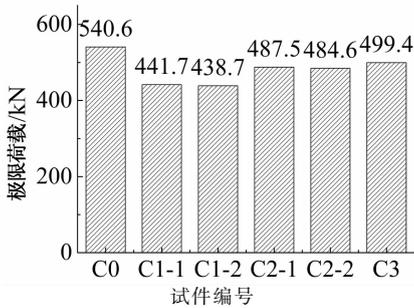


图 9 模型极限荷载对比图

Fig. 9 Ultimate compression strength of models

3.2 延性系数

构件的延性是指在初始强度没有明显退化情况下的非弹性变形能力,其量化指标一般为延性系数^[10].木柱的延性系数可反映其在外力作用下,产生屈服后的继续承载能力.木柱延性系数越大,则承载力越强.木柱的延性系数为:

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中: μ_{Δ} 为延性系数; Δ_u 为相对于极限状态时构件的力作用方向的位移; Δ_y 为屈服状态时构件在力作用方向上的位移.当构件屈服点不明显时,可采取图 10 所示方法取值^[11],即在图 10 中过力的最大值点 S 作平行于 x 轴的直线;过坐标原点作 F-u 曲线的切线,该切线与以上直线相交于 A 点;过 A 点作垂直于 x 轴的直线,并与 F-u 曲线相交于 B 点;连接 O 点与 B 点,线段 OB 的延长线与 AS 线交于 C 点,过 C 点作垂直于 x 轴的直线,并与 F-u 曲线相交于 Y 点,则 Y 点即为近似屈服点.

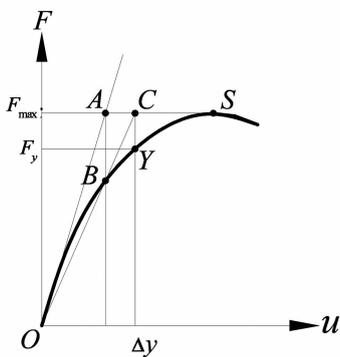


图 10 屈服点确定方法

Fig. 10 Determination of yielding point

采取上述方法可获得不同模型 Δ_y 值,综合图 8 中各 F-u 曲线中的 Δ_u 值,可求得各模型的 μ_{Δ} 值,见表 2. 易知:1) 完好木柱的延性系数最大,其值为 1.18. 1~3 层 CFRP 布包裹加固柱底后的(平均)延性系数分别为 1.03, 1.05, 1.13, 相对于完整木柱而言,其恢复率分别为 87.3%, 88.9%, 95.8%. 2) 本试验采取不同 CFRP 布包裹加固底部槽朽木柱后,

加固后的木柱延性系数均相对于完好木柱略有降低,但相差不大,可近似认为 CFRP 布包裹加固底部槽朽木柱后仍有较好延性性能. 3) 随着 CFRP 布包裹加固木柱层数增加,加固柱的延性系数逐渐增大,增长率分别为 1.94%(包裹 2 层相对于包裹 1 层)及 7.62%(包裹 3 层相对于包裹 2 层).

表 2 试验模型的 μ_{Δ} 值
Tab. 2 μ_{Δ} values of models

工况	Δ_u /mm	Δ_y /mm	μ_{Δ}
C0	11.38	9.61	1.18
C1-1	7.42	7.21	1.03
C1-2	8.38	8.12	1.03
C2-1	8.40	8.05	1.04
C2-2	8.45	7.99	1.06
C3	8.93	7.87	1.13

3.3 应变分析

基于试验数据,绘制各模型的水平及竖向平均应变(s)-承载力(F)曲线,见图 11. 易知:1) 无论是水平应变曲线还是竖向应变曲线,各模型的曲线比较接近,可反映 CFRP 布包裹加固底部槽朽柱根后,加固柱的受力性能与完好柱相近,其承载力和延性性能均可近似得到恢复. 2) 与完好木柱相比,CFRP 布包裹加固木柱后,加固部位的水平平均峰值应变恢复比例分别为 67.4%(包裹加固 1 层), 82.2%(包裹加固 2 层), 119%(包裹加固 3 层); 竖向平均峰值应变恢复比例分别为 60.5%(包裹加固 1 层), 77.6%(包裹加固 2 层), 113%(包裹加固 3 层). 由此可知,随着 CFRP 布包裹层数增加,木柱加固区峰值压应变增大. 3) 木柱轴心受压时,其荷载-应变曲线基本为直线形状,且加固区竖向应变普遍大于水平应变.

3.4 加固机理分析

由以上试验结果可以看出,CFRP 布包裹加固底部残损木柱的轴压受力机理表现为:1) CFRP 布使得加固柱轴压受力性能得以改善. 尽管加固木柱底部由包裹料和芯料组成,但 CFRP 布的抗拉强度远大于木材强度,CFRP 布包裹加固外皮后,可提供较大的侧向约束力,使得包裹料与柱芯紧密连接,且抑制了竖向荷载作用下加固区侧向变形及裂缝扩展. 当 CFRP 布层数增多时,其提供的侧向约束力增强. 轴压作用下,CFRP 布与木柱共同作用,可增大残损木柱轴压承载力. 2) CFRP 布并不能使底部残损木柱的承载性能完全恢复. 由于 CFRP 仅仅包裹加固木柱底部,因而在木柱底部形成刚性区. 相对

而言,木柱上部的刚度相对较小,在竖向荷载作用下易首先产生变形及开裂破坏,因而每个加固件的破坏始终发生在木柱上端.尽管这种破坏形式与完整木柱破坏形式相近,但由于加固木柱整体性能相对完好木柱略差,在轴压作用下,加固柱未能整体发挥承载作用,却因上部位置提前破坏而导致整体破坏,因而承载能力略低于完整木柱.类似地,由于加固柱上下部位刚度差别较大,因而构件延性要略低于完整木柱.

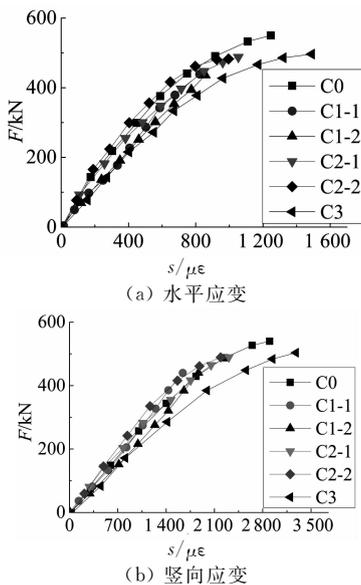


图 11 模型平均应变对比

Fig. 11 Average strain of models

4 结论

1) CFRP 布包镶加固底部残损木柱前后的破坏形式均表现为木柱上部局部弯折破坏,且木柱底部加固区在整个加载过程中完好,体现了 CFRP 布包镶加固的有效性.

2) CFRP 布加固木柱后,木柱极限承载力可恢复到完好木柱的 81.4%~92.4%左右,延性性能可恢复到完好木柱的 87.3%~95.8%,水平峰值压应变可恢复到完好木柱的 67.4%~119%,竖向峰值应变可恢复到完好木柱的 60.5%~113%,且 CFRP 布包裹 3 层时的加固效果更好.

3) 由于 CFRP 布仅包裹木柱底部,在底部形成较大的刚性区,使得加固木柱整体性能略低于完好木柱,因而其承载性能略低于完好木柱.

参考文献

- [1] 马炳坚. 中国古建筑木作营造技术[M]. 北京: 科学出版社, 1991:322-323.
MA Bing-jian. Building techniques of Chinese ancient timber works [M]. Beijing: Science Press, 1991:322-323. (In Chinese)
- [2] 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, 40(8): 41-46.
XU Qing-feng, ZHU Lei. An experimental study on partially-damaged wood columns repaired and strengthened with CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 41-46. (In Chinese)
- [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): 101-103.
ZHU Lei, XU Qing-feng, DAI Guang-hai, et al. Experimental research on short cracked timber columns strengthened with CFRP [J]. Building Structure, 2009, 39(11): 101-103. (In Chinese)
- [4] 李向民, 许清风, 朱雷, 等. CFRP 加固旧木柱性能的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(4): 55-59.
LI Xiang-min, XU Qing-feng, ZHU Lei, et al. Experimental research on CFRP-strengthened old timber columns [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(4): 55-59. (In Chinese)
- [5] 淳庆, 张洋, 潘建伍. 嵌入式 CFRP 筋加固圆柱轴心抗压性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3): 20-24.
CHUN Qing, ZHANG Yang, PAN Jian-wu. 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): 20-24. (In Chinese)
- [6] TAHERI F, NAGARAJ M, CHERAGHI N. FRP reinforced glue laminated column [J]. FRP International, 2005, 2(3): 10-12.
- [7] JONATHAN A K. Repair of wooden utility poles using Fibre-Reinforced Polymers [D]. Manitoba, Canada; University of Manitoba, 2001: 17-22.
- [8] ROBERTO L A, ANTONIS P, MICHAEL T C. Experimental characterization of FRP composite-wood pile structural response by bending tests [J]. Marine Structures, 2003, 16: 257-274.
- [9] ROBERTO L A, ANTONIS P, MICHAEL T C, et al. Repair of wood piles using prefabricated fiber-reinforced polymer composite shells [J]. J Perf Constr Fac, 2005, 19(1): 78-87.
- [10] 高大峰, 李飞, 刘静, 等. 木结构古建筑斗拱结构层抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 31(1): 131-139.
GAO Da-feng, LI Fei, LIU Jing, et al. Experimental study on the seismic performance of the structural layer with corbel bracket set of ancient Chinese timber structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 31(1): 131-139. (In Chinese)
- [11] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 81-85.
FAN Li-chu, ZHUO Wei-dong. Ductile aseismic design of bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 81-85. (In Chinese)