

# 碳纤维布加固燕尾榫柱架恢复力特性研究

张凤亮<sup>1</sup>, 薛建阳<sup>2</sup>, 赵鸿铁<sup>2</sup>, 田鹏刚<sup>1</sup>, 刘祖强<sup>2</sup>, 苟选峰<sup>1</sup>

(1. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 根据碳纤维布加固燕尾榫柱架低周反复荷载试验结果, 提出了往复荷载作用下碳纤维布加固燕尾榫柱架的特征参数计算公式, 研究其二阶效应、卸载刚度变化规律及滞回规则, 建立并提出了能够反映碳纤维布加固燕尾榫柱架地震作用下真实受力状况的荷载-位移恢复力特征曲线, 并与试验结果进行对比, 该曲线拟合效果较好, 表明本文提出的碳纤维布加固燕尾榫柱架恢复力特征曲线具有一定的适用性。

**关键词:** 碳纤维布; 燕尾榫柱架; 恢复力特性; 滞回曲线; 卸载刚度

**中图分类号:** TU366; TU311.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)05-0676-06

对结构进行动力弹塑性分析的两个要素是: 地震作用的输入和计算及合理的结构弹塑性分析模型<sup>[1]</sup>. 其中, 弹塑性分析模型的非线性行为决定了结构分析结果的准确性. 因此, 根据结构本身的特性以及现有的计算条件, 选择恰当的弹塑性分析模型是进行结构弹塑性动力分析的前提. 近年来, 随着计算模型精细化程度的提高, 基于建筑材料本构的纤维模型及弹塑性壳元模型, 成为结构非线性计算的热点方向. 然而, 对古建筑木结构来说, 由于木材力学性能的复杂性(正交各向异性且拉压受力性能截然不同), 且受木材耐久性性能的影响, 古建筑木结构整体结构基于木材真实微观材料本构模型的弹塑性动力时程分析具有相当的难度, 材料性能离散性较大, 同时, 模型精细化的要求以及结构材料的非线性行为分别使得结构建模的工作量和计算量大大增加, 计算效率低, 因此, 对于结构营造和材料性能比较复杂的古建筑木结构来说, 基于试验拟合的宏观分析模型计算结构复杂的受力行为是一个行之有效的方法, 且该方法建模简单, 计算量小, 比较容易实现. 恢复力特征曲线即是基于大量构件或者节点试验拟合的宏观分析模型, 用来描述构件或者节点所受外力荷载与其相应变形之间的函数关系, 能够真实地反映结构构件或者节点在地震作用下的实际受力状况, 是结构进行弹塑性动力时程分析的前提和基础. 文献[2]曾对完好燕尾榫柱架的恢复力特性进行研究, 但对碳纤维布加固燕尾榫柱架的恢复力特性分析尚未见报道. 因此, 本文主要根据碳纤维布加固燕尾榫节点低周反复荷载试验, 研究其骨架曲线及滞回规则, 建立并提出了能够反映碳纤维布加固燕尾榫节点地震作用下真实受力状况的荷载-位移恢复力特征曲线, 并与试验结果进行验证比较.

## 1 基本假定

根据课题组进行的3榀相同的碳纤维布加固燕尾榫柱架拟静力试验<sup>[3]</sup>得出的滞回曲线(如图1所示), 在满足以下基本假定的情况下, 提出了碳纤维布加固燕尾榫柱架的恢复力特征曲线.

(1) 骨架曲线采用两折线形式;

(2) 碳纤维布加固燕尾榫柱架屈服之前, 各控制点的卸载刚度和柱架加载刚度相同; 屈服之后, 碳纤维布加固燕尾榫柱架各控制点的卸载刚度随水平位移的增加而逐渐变化<sup>[4]</sup>;

(3) 结构屈服之前, 加载和卸载总是沿着原弹性加载路径, 指向屈服点; 结构屈服之后, 后一圈的加载总是指向对应前一圈加载位移的最大值.

## 2 骨架曲线模型

将图1力-位移滞回曲线每一循环的峰值点连接起来, 得到碳纤维布加固燕尾榫柱架的骨架曲线如图2所示. 通过图2可以得出, 由于半刚性节点的限位转动和柱脚的特殊约束使得柱架在正反受力方向具有明显不同的骨架曲线, 燕尾榫柱架的恢复力骨架模型采用两折线模型比较合理, 如图3所示. 图4为根据课题组进行的三个碳纤维布加固燕尾榫柱架拟静力试验拟合出的骨架曲线数值点, 图中A点、B点、C点、

**收稿日期:** 2014-01-13

**修改稿日期:** 2014-09-25

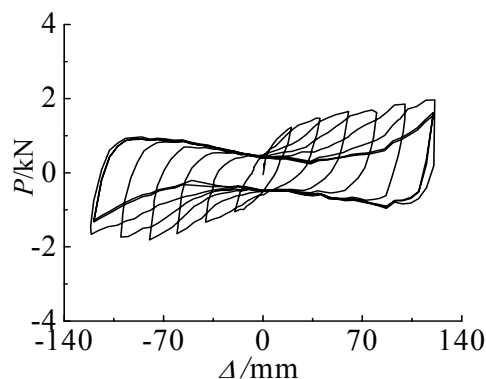
**基金项目:** 国家科技支撑计划资助课题(2013BAK01B03-02); 陕西省科学技术研究发展计划国际合作项目(2013KW23-01); 陕西省重点科技创新团队发展计划(2014KCT-31)

**作者简介:** 张凤亮(1985-), 男, 工程师, 工学博士, 主要从事建(构)筑物检测与鉴定、古建筑木结构及砖石结构抗震加固及智能控制研究. E-mail: Zhangfengliang2004@126.com

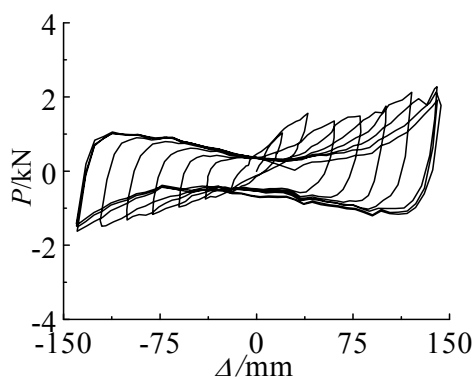
D点的坐标均由表1三个碳纤维布加固燕尾榫柱架的力-位移 $P-\Delta$ 骨架曲线特征点的平均值给出,定义碳纤维布加固榫卯节点位移明显加大而力增长较为平缓时为柱架的屈服状态,碳纤维布完全断裂时为柱架的极限状态<sup>[5]</sup>.同时由表1可以得出碳纤维布加固燕尾榫柱架骨架模型在正反两方向的两折线段的线性方程式分别如式(1)、(2)和(3)、(4)所示.



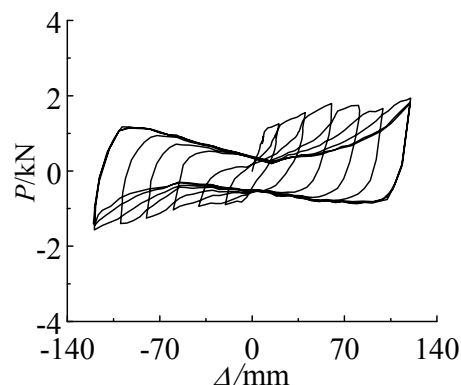
(a) 试验加载



(b) 燕尾榫加固柱架一



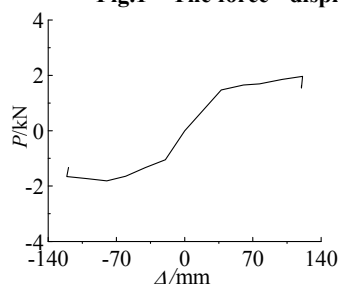
(c) 燕尾榫加固柱架二



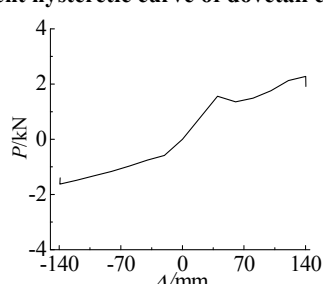
(d) 燕尾榫加固柱架三

图1 碳纤维布加固燕尾榫柱架试验及力-位移滞回曲线

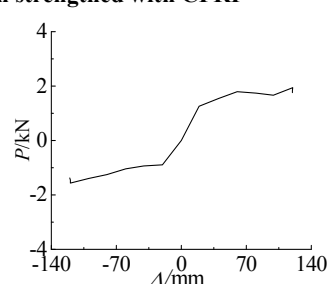
Fig.1 The force - displacement hysteretic curve of dovetail column strengthened with CFRP



(a) 柱架一



(b) 柱架二



(c) 柱架三

图2 CFRP加固燕尾榫节点柱架 $P-\Delta$ 骨架曲线

Fig.2 The skeleton curve of dovetail column strengthened with CFRP

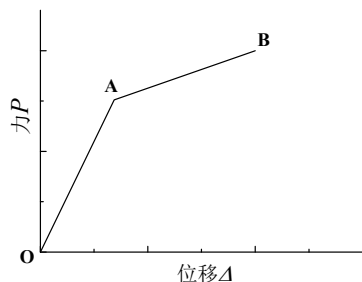


图3 CFRP加固柱架两折线骨架模型曲线

Fig.3 The two polyline curve skeleton model of dovetail column strengthened with CFRP

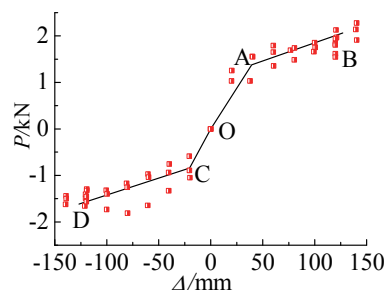


图4 试验拟合骨架模型曲线

Fig.4 Test fitting curve skeleton model

表 1 碳纤维布加固燕尾榫柱架骨架曲线特征点试验测量值  
Tab.1 Frame curves point test measurements of dovetail column strengthened with CFRP

试件	加载方向	屈服点		峰值点	
		位移 $\Delta/\text{mm}$	荷载 $P/\text{kN}$	位移 $\Delta/\text{mm}$	荷载 $P/\text{kN}$
柱架一	正向	40.105	1.469	120.995	1.966
	负向	-19.880	-1.049	-121.020	-1.657
柱架二	正向	39.965	1.557	140.310	2.276
	负向	-20.565	-0.586	-139.425	-1.623
柱架三	正向	40.320	1.550	120.040	1.939
	负向	-20.385	-0.894	-119.565	-1.565
平均值	正向	40.130	1.525	127.115	2.060
	负向	-20.276	-0.843	-126.670	-1.615

OA 段:
$$P=0.0380\Delta, 0\leq\Delta\leq40.130\text{ mm}$$
(1)

AB 段:
$$P=1.525+0.0062\Delta, 40.130\text{ mm}<\Delta\leq127.115\text{ mm}$$
(2)

OC 段:
$$P=0.0416\Delta, -20.276\text{ mm}\leq\Delta\leq0$$
(3)

CD 段:
$$P=-0.843+0.0073\Delta, -126.670\text{ mm}\leq\Delta<-20.276\text{ mm}$$
(4)

3 柱架的  $P-\Delta$  效应及卸载（拉回）刚度变化规律

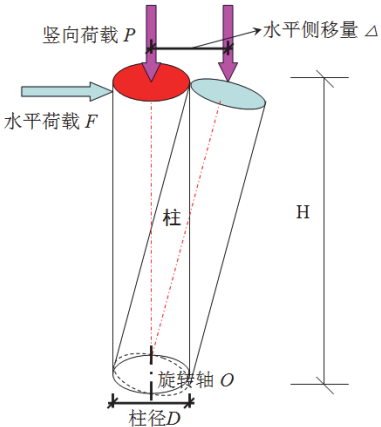


图 5 柱架  $P-\Delta$  效应  
Fig.5 Second-order effects of dovetail column

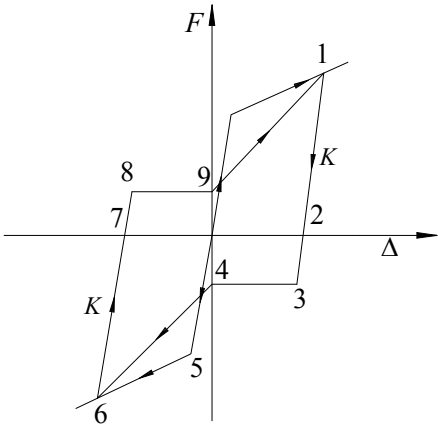


图 6 柱架卸载刚度图示  
Fig.6 Column rack unloading stiffness icon

对于碳纤维布加固燕尾榫柱架拟静力试验（图 1a 所示），在低周反复荷载作用下，柱架绕柱脚旋转轴 O 轴发生转动侧移（图 5 所示），随着水平荷载的增加，水平位移也逐渐加大，此时，由于竖向荷载作用对柱架产生了能够加速柱架转动的二阶弯矩，且随水平侧移量的增加而增加，二阶弯矩对柱架提供不利的水平推力（ $|F_{\text{作动器}}|=|P\Delta/H|$ ），在没有外界约束的前提下，将加速柱架的倒塌。当加载完毕开始卸载时，和下部固接的钢筋混凝土柱完全不同的是，柱架自身内部并不能提供水平恢复力<sup>[6]</sup>，可近似为 0，而柱架在竖向荷载作用下之所以能够复位，主要是作动器反向的拉力所为，因此，卸载过程时间很短，当荷载卸为 0 时，发生的位移也相当小，即图 6 中 1 点到 2 点的过程时间很短，且位移较小。之后柱架变为反向加载，加载之初，水平拉力小于二阶弯矩产生的水平推力，随着反向加载过程的推进，水平侧移量  $\Delta$  逐渐变小，同时产生的二阶弯矩也逐渐变小，由二阶弯矩产生的水平推力也逐渐减小，当作动器拉力等于水平推力时，水平侧移量继续减小，水平推力也继续变小，此时需要的拉力也慢慢减小，从而导致滞回曲线出现捏拢现象（即近似水平段，见图 1），曲线呈 Z 形<sup>[2]</sup>，图 6 中 3 点表示作动器拉力等于二阶弯矩产生的水平推力，即满足：

$$|F_{\text{作动器}}|=\left|\frac{P\Delta}{H}\right| \tag{5}$$

反向加载到原位时（4 点），根据试验的加载位移增量，每步为 10 mm，因此，按照理论计算，4 点的

荷载大小可按位移加载到原位时的前一步位移荷载, 即水平侧移量为 10 mm 时的水平推力的大小, 由 (5) 式得出的水平拉力为 0.14 kN, 但由试验得出的三组数据可以看出, 作动器拉力要稍大于二阶效应产生的水平力, 因此, 取 4 点的坐标为 (0, 0.4), 之后柱架将继续加载, 加载循环跟前面类似, 不再赘述。

对于柱架的卸载刚度, 严格意义上应该是柱架的拉回刚度, 根据前面的分析可知, 当水平侧移量  $\Delta$  越大, 其二阶弯矩产生的水平力就越大, 柱架就越不容易恢复, 需要的拉力就越大, 因此, 可以分析得出, 柱架的卸载 (拉回) 刚度随着柱架水平侧移量的增加而逐渐增加<sup>[7]</sup>。表 2 给出了由试验得出的碳纤维布加固燕尾榫柱架的卸载 (拉回) 刚度值, 卸载 (拉回) 刚度值的变化规律如图 7 所示。

表 2 碳纤维布加固燕尾榫柱架屈服后各阶段卸载刚度值  $K/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$   
Tab.2 Various stages of unloading stiffness values after yielding of dovetail column strengthened with CFRP

加载阶段	柱架一		柱架二		柱架三	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
屈服后第一圈	0.093	0.150	0.049	0.071	0.119	0.061
屈服后第二圈	0.132	0.171	0.182	0.189	0.120	0.056
屈服后第三圈	0.188	0.181	0.196	0.247	0.180	0.155
屈服后第四圈	0.217	0.229	0.224	0.226	0.175	0.184
屈服后第五圈	0.294	0.235	0.235	0.242	0.198	0.320
屈服后第六圈	0.296	0.207	0.219	0.321	0.272	0.348
屈服后第七圈	0.245	0.204	0.308	0.226	0.272	0.325
屈服后第八圈	\	\	0.236	0.231	0.274	0.269

根据表 2 得出的碳纤维布加固燕尾榫柱架屈服后各阶段的正、负向卸载刚度值, 通过指数拟合分别得到正、负向卸载刚度  $K_{\text{正}}$ 、 $K_{\text{负}}$  和加载位移之间的关系曲线如图 7 所示, 从图中可以得出碳纤维布加固燕尾榫柱架的卸载刚度变化规律公式:

$$\begin{cases} K_{\text{正}} = 0.52264 - 0.49861e^{-\frac{\Delta}{196.343}} \\ K_{\text{负}} = 0.287 - 0.343e^{\frac{\Delta}{48.82}} \end{cases} \quad (6)$$

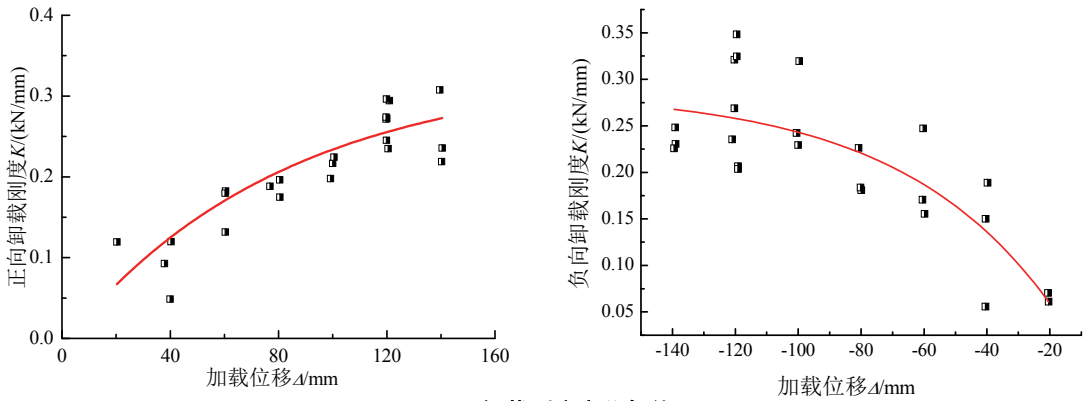


图 7 卸载刚度变化规律  
Fig.7 Unloading stiffness variation

4 恢复力特征曲线的建立

结合碳纤维布加固燕尾榫柱架拟静力试验, 将试验得出的骨架曲线模型和其卸载刚度的变化规律以及捏拢水平段进行组合, 得出了图 8 所示的碳纤维布加固燕尾榫柱架的两折线形恢复力特征曲线。作如下说明:

- (1) 该恢复力特征曲线是基于试验实测的骨架曲线特征点 (屈服点和峰值点) 以及滞回曲线的形状所建立; 图中 B 点和 B' 点为柱架的屈服点, F 点和 F' 点为柱架的峰值点。
- (2) 对碳纤维布加固燕尾榫柱架进行正向加载时, 路径沿 ABG 折线进行。正向加载之后卸载时, 当柱架尚未屈服时 (即荷载尚未超过 B 点), 那么卸载路径将沿直线 BA 进行, 与加载路径重合, 其卸载刚度的大小与柱架的初始弹性刚度值相同<sup>[8]</sup>; 若卸载发生在柱架屈服之后 (即荷载已经超过 B 点), 那么卸载路径将沿直线 CD 进行, 此时, 柱架卸载刚度值的大小通过式 (6) 计算得出; 卸载至点 1 后沿负向继续加

载,直至反向加载值达到式(5)时,作动器的拉力大于二阶弯矩产生的水平力,柱架的加载路径沿DE进行,当柱架恢复到平衡位置时,柱架将受到作动器的负向加载,如果柱架在负向也已经达到屈服状态,那么加载路径将指向上一次加载对应的最大负向位移点C',即负向加载沿EC'F'折线进行;负向的卸载刚度值仍按式(6)计算得出,负向卸载路径沿直线C'D'进行,和正向卸载一样,负向卸载后也存在一段无限制侧移D'E';一个循环加卸载完成后,将再沿正向继续第二循环的加卸载,此时,加载路径将指向上一次加载对应的最大正向位移点C,加载路径沿E'CF折线进行;当卸载发生在峰值点F时,卸载路径沿FG进行,卸载刚度值的大小仍按式(6)计算得出;正向卸载至点3后继续沿负向进行加载至G,G点的坐标仍按式(5)计算得出,达到G点后沿着GE发生一段侧移,然后反向继续加载沿路径EC'F',再沿路径F'4进行负向卸载,其它情况依次类推。

## 5 恢复力特征曲线与试验结果比较

图9将碳纤维布加固燕尾樯柱架拟静力试验得出的滞回曲线与按照本文提出的恢复力特征曲线得出的滞回曲线进行对比,可以得出,试验滞回曲线与理论模型吻合较好,说明本文提出的恢复力特征曲线能够较好地反映碳纤维布加固燕尾樯柱架在往复荷载作用下的荷载-位移关系,为对碳纤维布加固整体结构进行动力弹塑性时程分析打下理论基础。

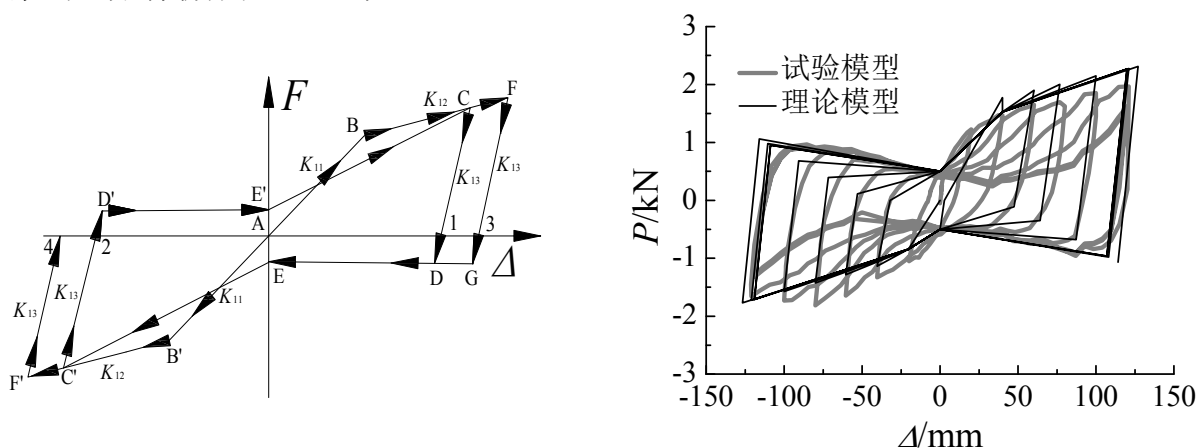


图8 CFRP加固燕尾樯柱架恢复力特征曲线

Fig.8 Restoring force characteristic curve of dovetail column strengthened with CFRP

(a) 柱架一

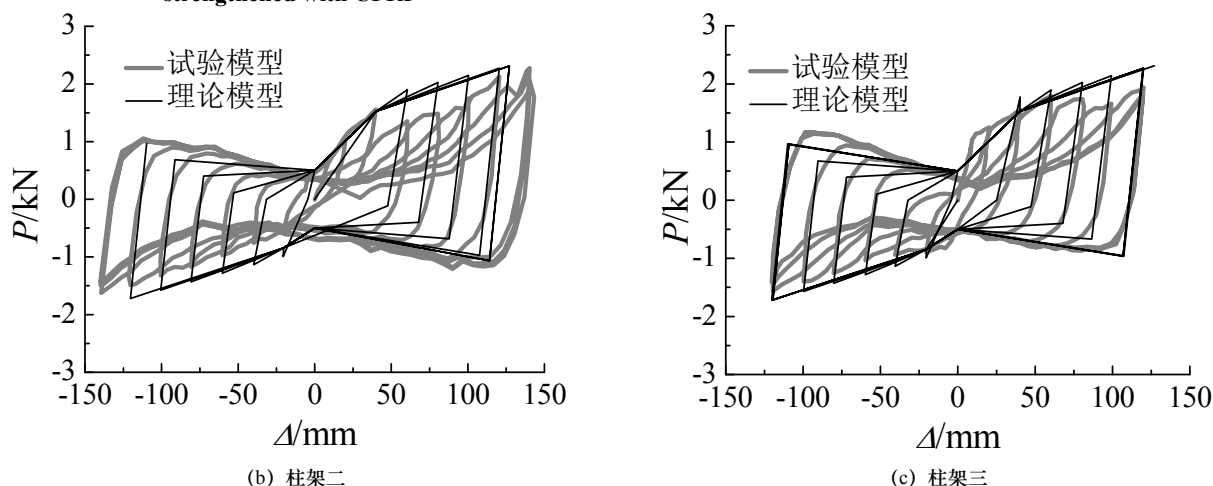


图9 碳纤维布加固燕尾樯柱架理论恢复力特征曲线与实测滞回曲线的对比

Fig.9 Comparison of the measured restoring force characteristic curve with theory of column strengthened with CFRP

## 6 结论

根据碳纤维布加固燕尾樯节点低周反复荷载试验,研究其骨架曲线及滞回规则,建立并提出了能够反映碳纤维布加固燕尾樯节点地震作用下真实受力状况的荷载-位移恢复力特征曲线,并与试验结果进行验证比较。主要得出了以下结论:

(1) 利用Origin软件对试验数据进行拟合分析,提出了无量纲化的两折线骨架曲线模型,并通过指数拟合,分析提出了卸载刚度退化规律及再加载刚度退化规律。

(2) 对竖向荷载作用下柱架的二阶效应进行理论分析,得出了考虑二阶效应的燕尾榫柱架恢复力机制。

(3) 结合骨架曲线模型及滞回特性,提出了考虑刚度退化的恢复力模型特征曲线。为碳纤维布加固燕尾榫柱架的弹塑性地震反应分析奠定了基础。

## 参考文献 References

- [1] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
LU Xinzhen, YE Lieping, MIU Zhiwei. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [2] 隋葵, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 中国古建筑木结构铺作层与柱架抗震试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 50-57.  
SUI Yan, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang, et al. Experimental study of the seismicity of dougong and wooden frame in Chinese historic buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 50-57.
- [3] 隋葵. 中国古代木构耗能减震机理与动力特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009: 17-20, 22-27, 39-41, 52-57, 74-97.  
SUI Yan. Analysis on energy dissipation mechanism and dynamic characteristic for Chinese ancient timber buildings[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2009: 17-20, 22-27, 39-41, 52-57, 74-97.
- [4] 李铁英, 魏剑伟, 张善元, 等. 木结构双参数地震损坏准则及应县木塔地震反应评价[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 91-98.  
LI Tiejing, WEI Jianwei, ZHANG Shanyuan, et al. Double-parameters seismic damage criterion on wooden structure and seismic reaction appraisal of Ying-xian wooden tower[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 91-98.
- [5] 姚侃. 木结构古建筑的结构特性及抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006: 127-139.  
YAO Kan. Study on the structural properties and seismic performance of Chinese historical timber buildings[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2006: 127-139.
- [6] 张风亮, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木构架长周期地震响应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11): 70-73.  
ZHANG Fengliang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang. The analysis of long-period seismic response to ancient timber buildings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(11): 70-73.
- [7] 张风亮, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 基于摇摆柱原理的古建筑木结构柱架抗侧分析及试验验证[J]. 工业建筑, 2013, 43(10): 55-60.  
ZHANG Fengliang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang. Resistant-lateral analysis and experimental verification based on swing-columns principle of ancient timber column-frame[J]. Industrial Construction, 2013, 43(10): 55-60.
- [8] 张风亮, 赵鸿铁, 薛建阳, 等. 古建筑木结构屋盖梁架体系动力性能分析[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 184-188, 201.  
ZHANG Fengliang, ZHAO Hongtie, XUE Jianyang. The analysis of dynamic properties on the roof-beam system in ancient timber buildings[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 184-188, 201.

## Study on restoring force characteristics of dovetail column-frame strengthened with CFRP

ZHANG Fengliang<sup>1</sup>, XUE Jianyang<sup>2</sup>, ZHAO Hongtie<sup>2</sup>, TIAN Penggang<sup>1</sup>, LIU Zuqiang<sup>1</sup>, GOU Xuanfeng<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, China;

2. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on the results derived from low cyclic reversed loading of dovetail column-frame strengthened with CFRP, the formula of the characteristic coefficient was proposed, second order effect, regularity of unloading stiffness degeneration, hysteresis rules were especially investigated, and the load-displacement restoring force characteristic curve of dovetail column-frame strengthened with CFRP which indicated its real stress state under the action of earthquake have been set up. Compared with experiments results, the load-displacement restoring force characteristic curve fits better and it is found that the restoring force characteristic curve is of certain degree of adaptability.

**Key words:** CFRP; dovetail column-frame; restoring force characteristics; hysteresis loop; unloading stiffness

(本文编辑 桂智刚)