

文章编号:1671-6833(2008)04-0081-05

# 碳纤维布加固完好混凝土框架结构抗震性能试验研究

王新玲, 朱俊涛, 吕林, 姚章堂

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**以某二层钢筋混凝土工业厂房的一榀框架结构为原型,按1:3的缩尺模型,设计了钢筋混凝土框架试件,并对该框架的梁端、柱端及节点进行碳纤维布加固,然后对该框架进行水平低周反复荷载的试验。基于试验结果,主要分析了碳纤维布加固完好钢筋混凝土框架试件的裂缝发展、抗震能力及破坏特点,绘出了试件的滞回曲线、骨架曲线和柱端钢筋及CFRP布的滞回曲线,研究了碳纤维布加固完好混凝土框架结构的抗震性能。试验结果表明,碳纤维布加固完好混凝土框架结构具有良好的抗震性能和滞回耗能能力。

**关键词:**混凝土框架结构;抗震性能研究;水平低周反复荷载;碳纤维布加固

**中图分类号:** TU 375.4 **文献标识码:** A

## 0 引言

目前,碳纤维材料加固混凝土梁、柱、节点等构件的性能研究较多且已比较成熟,但主要是针对单个构件加固后的抗弯、抗剪、抗压、抗震、刚度及延性等方面的研究<sup>[1-4]</sup>,而对碳纤维材料加固混凝土整体框架结构的研究较少,仅有个别学者进行了碳纤维材料加固混凝土框架的试验研究<sup>[5-6]</sup>,但未进行系统的试验研究。笔者针对碳纤维布加固整体完好混凝土框架,进行了模拟地震

作用下的试验,研究其受力机理及抗震性能。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

钢筋混凝土框架原型为一两层工业厂房,框架柱网尺寸为6 m×6 m,层高为5.1 m,用PKPM软件设计了框架的截面和配筋。然后采用1:3缩尺模型,设计、制作了框架试验试件,其截面尺寸及配筋如图1所示,编号为KJ-A。

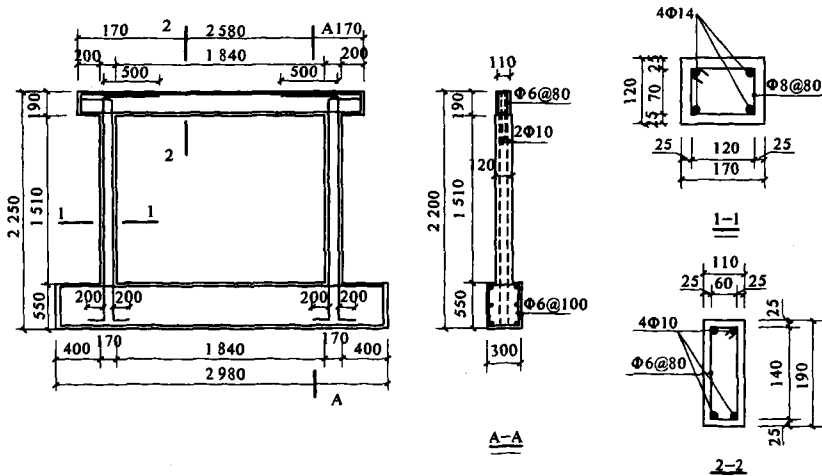


图1 框架试件模型及详图

Fig.1 The details of framework mode

收稿日期:2008-07-13;修订日期:2008-08-13

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(511050400)

作者简介:王新玲(1963-),女,郑州大学教授,博士,主要从事结构工程方向的研究及教学工作。

试件采用的钢筋强度试验结果:Φ14 钢筋,  $f_y = 470$  MPa; Φ10 钢筋,  $f_y = 347.8$  MPa; Φ6 钢筋,  $f_y = 552.5$  MPa. 采用的商品混凝土强度试验结果:  $f_{ik} = 21.3$  MPa, 抗拉强度:  $f_{tk} = 2.1$  MPa, 抗压强度设计值:  $f_c = 15.7$  MPa, 较 C30 混凝土强度稍大.

1.2 CFRP 布加固 KJ-A 设计

因为要研究碳纤维布加固完好混凝土框架的抗震性能,所以在 KJ-A 受力前,先对其梁端、柱端及节点处进行 CFRP 布加固. 严格按照施工工艺<sup>[7]</sup>用配套碳纤维结构胶对框架 KJ-A 进行加固,如图 2 所示,具体加固如下:

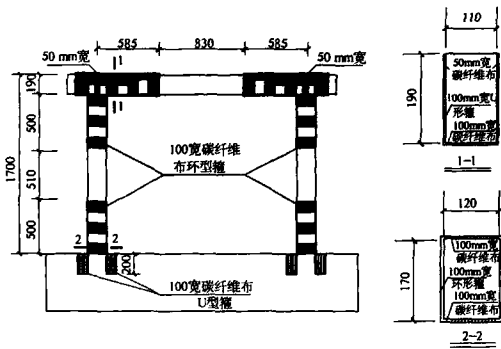


图 2 框架试件加固图

Fig. 2 The picture of reinforce framework

- (1) 在梁顶侧面粘贴一层长 800 mm、宽 50 mm 碳纤维布,以提高梁端的抗弯承载力;
- (2) 梁端粘贴宽为 100 mm 的 U 型箍,以提高梁端的抗剪承载力,并为梁侧面粘贴的碳纤维布提供锚固作用;
- (3) 在节点上、下柱端环包一层宽为 100 mm 的碳纤维布,以提高柱子的抗剪承载力和延性.
- (4) 在梁端底部 (1/3 跨度)、柱端两侧面 (1/3 层高) 粘贴一层 100 mm 宽的纵向碳纤维布,以提高梁和柱的抗弯承载力.

碳纤维布采用 FAW200, 厚度 0.11 mm/层; 结构胶采用环氧树脂,按厂家提供的资料剪切模量 1.45 GPa, 抗拉强度 37.9 MPa, 抗剪强度 10 GPa, 抗弯强度 56 MPa.

1.3 加载装置与加载制度

试验采用水平低周反复加载方案<sup>[8-9]</sup>, 加载装置如图 3 所示. 框架竖向荷载分两部分施加, 梁上部分通过悬挂配重块来模拟本楼层传来的竖向均布荷载, 每块配重 20 kg, 共放置 48 块, 分两次施加后保持不变; 柱上荷载部分由 2 台同步液压加载器组成, 直接对柱顶施加压力, 每台施加

11.85 kN, 模拟上部传来的集中荷载. 水平低周反复荷载由液压伺服系统提供. 先以荷载控制, 每级荷载循环 2 次, 每级荷载增幅以计算所得地震等效荷载控制, 逐级加载至构件钢筋屈服. 此后转为位移控制, 以屈服位移  $\Delta$  作为控制参数, 实施等位移加载, 每级加载使试件位移达到  $\Delta$  的整数倍, 每一级荷载下反复 3 次, 直至试件破坏或水平荷载大幅度下降至最大荷载的 85% 时, 即认为达到破坏荷载.

根据《建筑结构抗震设计规范》的底部剪力法计算出试件在 6~9 度多遇和罕遇水平地震时试件受到的水平地震作用. 计算的各级水平地震力, 作为试验加载制度的依据. 如表 1 所示.

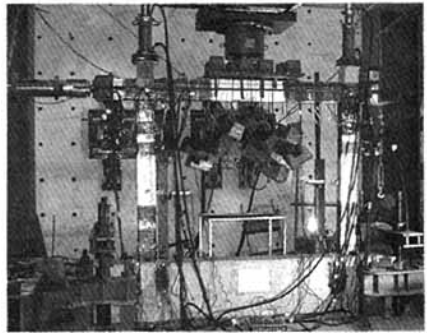


图 3 加载装置图

Fig. 3 The picture of loading equipment

表 1 试件在多遇、罕遇时承受的水平地震作用

Tab. 1 The horizontal seismic effect of test specimen under the more case, rare case when earthquake happened kN

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	1.3	2.7(4)	5.4(8.0)	10.7
罕遇地震	-	16.7(24.1)	30.1(40.2)	46.8

注: 括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15 g 和 0.30 g 的地区所对应的水平地震作用.

2 试验结果分析

2.1 试验现象及分析

当水平荷载小于 8 度多遇地震作用时, 框架试件上没有出现裂缝, 基本处于弹性工作阶段. 水平荷载加至 8 kN 时, 在框架一侧柱底部出现第一条裂缝, 编号为①号, 如图 4 所示, 裂缝宽度为 0.05 mm, 随后又出现②~④号裂缝. 当水平荷载加至 11 kN、相当于 9 度多遇地震作用时, 在正面右柱节点出现裂缝, 宽 0.05 mm, 编号为⑤, 其最大裂缝(①号)宽度为 0.08 mm. 继续加至 13 kN 时, 裂缝②稍微向节点区发展. 当水平荷载加至 17 kN、相当于 7 度罕遇地震作用, 在正面左柱节点出现新裂

缝⑥,裂缝②长度和宽度均有所发展,最大宽度达到0.1 mm,即CFRP布加固完好混凝土框架,在相当于7度罕遇地震作用下,仍满足正常使用状态下裂缝宽度0.3 mm的要求,且梁和柱钢筋均未屈服.继续加载,当水平荷载达到18 kN时,数据采集仪上显示右柱上端钢筋应变达到屈服应变.此时,构件所对应的屈服位移 $\Delta_y$ 为6.6 mm.

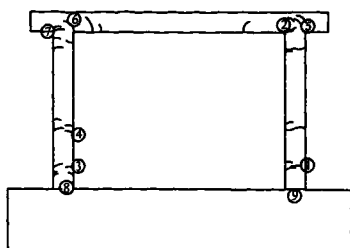


图4 裂缝分布图

Fig.4 Distribution of crack

加载进入第二阶段——位移控制加载.当位移控制为 $\Delta_y$ 时,左柱端部出现数条细小裂缝,裂缝⑥发展至0.15 mm.位移控制为 $-\Delta_y$ (规定推为正,拉为负)时,裂缝②发展至0.15 mm,左柱节点出现裂缝⑦.继续增加位移至 $\pm 2\Delta_y$ 时,荷载达到35.4 kN,达到了8度罕遇地震作用,柱底部和柱节点处出现多条细微裂缝,此时原有裂缝发展成绕柱的通缝,裂缝②宽度发展至0.5 mm,梁右侧出现斜裂缝.当位移控制为 $\pm 3\Delta_y$ 时,荷载达到44.7 kN,此时荷载已接近9度罕遇地震,裂缝②宽度发展至1 mm,节点裂缝⑦宽度开展至0.7 mm.继续增加位移至 $\pm 5\Delta_y$ 时,荷载达到54 kN,荷载已大于9度罕遇地震作用,裂缝⑥开裂至2 mm,柱底部裂缝⑧开裂至1.5 mm,裂缝②开裂至2.2 mm,但KJ-A并未完全破坏,还可以继续增加荷载和位移.当位移达到 $7\Delta_y$ 时,荷载为57 kN,左柱节点竖向纤维布剥离.继续增加位移,荷载开始下降,加至 $9\Delta_y$ 时,左柱柱根侧面纤维布压条剥离、右柱节点竖向纤维布剥离,荷载下降至48.5 kN,结构破坏.图4为KJ-A的裂缝分布图,图5为KJ-A节点和柱底部破坏图.

## 2.2 CFRP布加固完好混凝土框架(KJ-A)的抗震性能研究

### 2.2.1 KJ-A 滞回曲线

图6为KJ-A的滞回曲线,曲线表明,KJ-A在加载循环初期,试件处于弹性阶段,荷载-位移曲线基本上为直线,此时卸载进行得较充分,混凝土中的黏性物质对弹性恢复的影响较小,变形恢复也较充分.试件屈服前,滞回环面积较小.试件达到

屈服后,随着加载幅值的增大,试件的滞回环面积明显增大,趋于丰满,呈现为梭形,滞回曲线越来越倒向横轴,相应的位移增长速率明显大于荷载的增长,说明KJ-A具有较好的抗震耗能能力.



(a) 左节点破坏图



(b) 右节点破坏图



(c) 左柱根破坏图



(d) 右柱根破坏图

图5 KJ-A节点和柱底部破坏图

Fig.5 The damage situation in the bottom of cylindrical and nodes

### 2.2.2 KJ-A 骨架曲线

第一次加载曲线与滞回曲线各次滞回顶点的连线即为骨架曲线,将 KJ-A 滞回曲线中各环的峰值列出,绘得骨架曲线如图 7 所示。从图中可以看出,试件的骨架曲线包括三个明显阶段。试件开裂前,骨架曲线比较陡,即初始刚度较大,  $F-\Delta$  关系大致呈线性,此时试件处于弹性工作状态。开裂后试件骨架曲线斜率减小,出现不明显转折点,随着荷载的增大,曲线斜率逐渐变缓。当荷载超过屈服点时,曲线的斜率进一步减小,出现第二个转折点,即位移增加幅度增大,而荷载增长率减小,反映出一定的刚度退化。但试件在达到极限荷载后,荷载并未急剧下降,  $F-\Delta$  骨架曲线的平滑段较长,说明试件达到最大荷载后,仍具有一定的变形能力,显示试件具有很好的延性。从曲线的转折点可看出,试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别为 8 kN、18 kN、57 kN,基本反映了单调加载曲线的性能,即试件的开裂、屈服和极限荷载及相应位移。

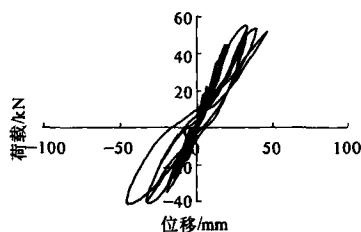


图 6 KJ-A 滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curve of the KJ-A

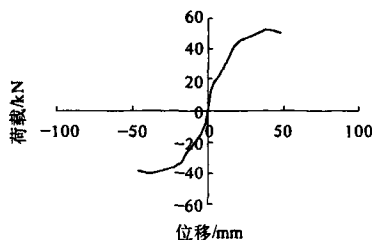


图 7 KJ-A 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve of the KJ-A

### 2.2.3 柱顶端钢筋滞回曲线

图 8 为根据试验值绘制的柱顶端钢筋的滞回曲线。从图中可看出,当荷载不超过屈服荷载时,滞回曲线接近直线,钢筋残余变形较小;荷载超过屈服荷载后,随着荷载增大,滞回环明显增大,在反向拉力作用下钢筋应变仍处于受拉状态,而且受拉残余变形愈来愈大,分析其原因:柱顶钢筋受拉屈服后,试件正向加载时,出现较大的塑性变

形,裂缝开展较宽,塑性铰区域的受拉纵筋和混凝土的粘结作用不断退化甚至滑移破坏。卸载后,虽然有竖向荷载(定值)作用,但残余变形很大,裂缝未能完全闭合,根据所测结果,钢筋应变仍处于很大受拉状态。反向加载时,原来受拉的纵筋和混凝土转向受压,但必须克服原有的受拉残余应变,而原有的受拉残余应变很大,因此,导致钢筋一直处于受拉状态。当位移加至  $\pm 4\Delta$  时,钢筋拉应变突然增大,表现出较好的耗能能力。

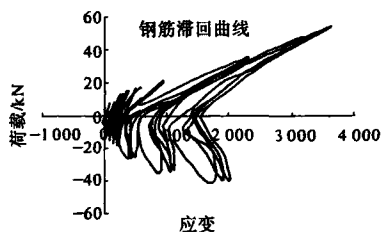


图 8 柱端钢筋滞回曲线

Fig. 8 Reinforce hysteresis curve of the end of cylindrical

### 2.2.4 柱顶 CFRP 布滞回曲线

从图 9 柱顶端碳纤维布的滞回曲线可以看出,在钢筋屈服后,滞回环明显增大,说明碳纤维布粘接性能良好,整体工作抗震性能较好。但由于结构接近破坏时,柱端 CFRP 布出现剥离现象,从而导致 CFRP 布未达到极限拉应变。柱端碳纤维布应变与钢筋应变滞回曲线相比,由于碳纤维布是完全的弹性材料,其滞回环面积较小,残余变形小。

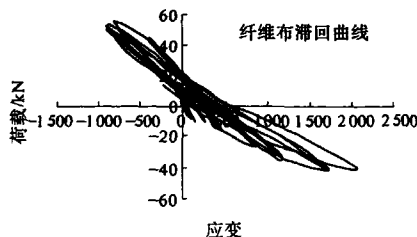


图 9 柱端 CFRP 布滞回曲线

Fig. 9 CFRP hysteresis curve of the end of cylindrical

### 2.2.5 节点 CFRP 布滞回曲线

节点核心区粘贴的碳纤维布是一种被动受力单元,只有在被加固构件混凝土的横向变形达到一定值之后,纤维布的优越性能才能得到发挥。在加载初期,由于核心区混凝土变形较小,外贴碳纤维布的应变发展也极为缓慢,直到试件屈服后,随着混凝土横向变形的不断增大,碳纤维布的应变增长加快,其高强高效的作用才逐渐发挥出来。从图 10 节点核心区碳纤维布的滞回曲线可以看出,核心区混凝土开裂前,纤维布应变较小;开裂后,

纤维布应变增长变快;钢筋屈服后,纤维布滞回面积明显增大;尤其是在加载后期( $\pm 3\Delta$ ,以后),碳纤维布的应变增长迅速加快、滞回环更趋饱满,表现出良好的抗震耗能能力。

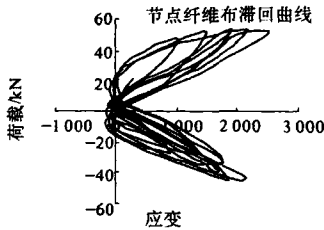


图10 节点CFRP布滞回曲线

Fig. 10 hysteresis curve of CFRP in the node area

综上所述,碳纤维布加固完好混凝土框架结构,具有高抗震能力、高延性(延性系数达9)、高耗能能力等良好的抗震性能。

### 3 结论

(1)纤维布加固完好框架结构滞回曲线表明,钢筋屈服后,滞回环面积饱满、呈梭形,延性系数达9,说明试件具有良好的延性和耗能能力。结构的骨架曲线,基本反映了单调加载曲线的性能,即试件的开裂、屈服和极限荷载及相应位移。

(2)柱端钢筋滞回曲线表明,荷载超过屈服荷载后,滞回环明显增大,在正反两向拉力作用下钢筋应变均处于受拉状态,即钢筋的残余变形增加很快,表现出较好的耗能能力。

(3)与柱端钢筋的滞回曲线相比,柱端碳纤维布滞回环面积较钢筋应变滞回环小,残余变形

小,且均未达到抗拉极限强度。

(4)节点碳纤维布滞回曲线表明,在水平反复荷载作用下,节点的CFRP布起到非常好的抗震作用,且具有较好的耗能能力。

(5)碳纤维布加固完好混凝土框架结构,具有良好的抗震性能。

### 参考文献:

- [1] 孙正强,李政,苏启斌. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能的研究[J]. 山西建筑,2007,33(08):63-64.
- [2] 崔倩. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗剪全过程的试验研究[D]. 内蒙古工业大学,2005.
- [3] 张柯,岳清端,叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱滞回耗能分析及目标延性系数确定[J]. 工业建筑,2001,31(06):5-8.
- [4] 陆洲导,洪涛,谢莉萍. 碳纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能的初步研究[J]. 工业建筑,2003,33(02):9-12.
- [5] 王新玲,范建伟,王华. 碳纤维布加固混凝土框架在竖向荷载下的试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2006,27(04):14-17.
- [6] 熊耀清,姚谦峰. CFRP加固RC框架结构振动台试验及损伤机理分析研究[J]. 北京交通大学学报,2006,30(01):26-29.
- [7] CECS 146:2003-2007. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [8] 姚振纲,刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海:同济大学出版社,2004.
- [9] JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

## Experiment Study on Seismic Behavior of Perfect RC Frames Strengthened by CFRP Sheets

WANG Xin-ling, ZHU Jun-tao, LV Lin, YAO Zhang-tang

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, china)

**Abstract:** Based on two layers of industry workshops as project background, a R. C frame test model was designed with the scale 1:3. The end of beam and column and nodes of the framework were reinforced by CFRP. The experiments under low-cycle and repeated load are carried out. Based on the test under low-cycle and repeated loads, the curves such as load-displacement hysteresis curve, load-skeleton curve, hysteresis curves of the steel bar and CFRP of column end are drawn out and seismic properties of the perfect R. C frame strengthen with CFRP are studied. The results show that the perfect R. C frame strengthen with CFRP with a good Seismic performance and hysteretic energy capacity.

**Key words:** RC frames; seismic behavior study; low-cycle and repeated load; strengthen with CFRP