

文章编号:1671-6833(2009)03-0013-05

CFRP布加固破坏混凝土框架的拟静力试验研究

王新玲, 吕林, 朱俊涛, 王征

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:按1:3比例缩尺模型设计了1榀混凝土框架模型,进行了拟静力试验,分析比较了混凝土框架结构及该框架破坏后经碳纤维布加固后的框架结构受力性能、裂缝发展、破坏形态、滞回曲线、骨架曲线及位移延性,研究碳纤维加固已严重损伤的混凝土框架结构的抗震性能.试验结果表明,碳纤维加固震后严重损伤框架结构后,其极限承载能力、耗能能力及延性等抗震性能有明显提高.

关键词:损伤框架结构;抗震性能研究;拟静力试验;碳纤维布加固

中图分类号: TG 457

文献标识码: A

0 引言

目前,已进行的CFRP加固研究主要是针对CFRP加固简支梁、柱等单个构件及节点的受力性能^[1-3],并已得出了抗弯、抗剪的理论计算公式,而对CFRP加固整体混凝土框架的抗震性能研究则较少,仅有个别研究者进行了少量的碳纤维材料加固混凝土框架的试验^[4],探讨了碳纤维布对柱的约束效应、试件的延性等.笔者针对一榀钢筋混凝土框架,分别研究了其抗震性能及该框架破坏后经CFRP布加固后框架的抗震性能,为震后严重损伤框架加固的抗震性能提供理论依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

采用1:3缩尺模型,设计、制作了框架试验试件,编号为KJ-1,试件模型及配筋图如图1所示.试件采用的钢筋强度试验结果: $\phi 14$ 钢筋, $f_{yk}=470$ MPa; $\phi 10$ 钢筋, $f_{yk}=350.8$ MPa; $\phi 6$ 钢筋, $f_{yk}=552.5$ MPa.采用的商品混凝土强度试验结果:立方体抗压强度 $f_k=37.3$ MPa;轴心抗压强度 $f_{ck}=24.3$ MPa;轴心抗拉强度 $f_{tk}=2.56$ MPa;轴心抗压强度设计值 $f_c=18$ MPa;轴心抗拉强度 $f_t=1.9$ MPa;较C35混凝土强度稍大.

1.2 加载方案设计

试验采用液压伺服装置,结构模型通过卧梁用地槽螺栓固定在台座上.水平荷载由水平加载

伺服作动器,通过水平反力墙提供.柱上的竖向荷载由液压千斤顶产生,为减小竖向荷载所产生的水平摩阻力,在竖向反力架和垫板之间设置滚动支座;梁上竖向荷载由配重块提供(配重块模拟楼面均布荷载).在试件梁支座及柱上下端均贴有钢筋应变片,以测各级荷载下试件的应力状态;在梁端、柱上下端及卧梁处均布置位移计,以测结构的水平位移.

试验加载制度采用力一位移混合控制加载方法^[5],首先是以力控制进行加载,当试件达到屈服后改用位移控制.试验时分别以梁或柱首先开裂、钢筋屈服来确定试件的开裂荷载和屈服点.正式试验前,先进行预加反复荷载2次,取值为计算开裂荷载(不考虑竖向荷载)的40%.试验过程中,始终保持反复加载的连续性和均匀性,加载或卸载的速度保持一致.

采用底部剪力法计算各级多遇和罕遇水平地震作用,作为试验加载制度的依据.各级地震作用的等效荷载如表1所示.

1.3 加固方案设计

先将KJ-1进行模拟地震作用的水平低周反复荷载的试验,达到极限荷载后,对该KJ-1进行加固(加固后为KJ-1A),严格按照施工工艺^[6],在梁顶粘贴一层长800 mm,宽50 mm碳纤维布,在弯剪区粘贴100 mm宽,间距100 mm U型箍,在裂缝处粘贴U型箍,并在加载点两边粘贴2个100 mm宽U型箍.柱的上下两端各粘贴100 mm

收稿日期:2009-02-01;修订日期:2009-04-05

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,河南新乡人,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.

宽,间距 100 mm 的环形箍三道,以承担柱两端的剪力并约束混凝土的横向变形;柱端的两侧在竖直方向粘贴长 600 mm,宽 120 mm 的碳纤维布,以承担拉力作用;在柱脚两侧基座上分别粘贴 100 mm 宽的 U 型箍各一道,起到压条作用,防止柱侧竖向碳纤维布在柱底剥离.对节点的加固是

在节点处粘贴十字形碳纤维布,水平方向粘贴长 400 mm,宽 50 mm 的碳纤维布,竖直方向粘贴长 300 mm,宽 50 mm 的碳纤维布加固.梁两端外伸部分各加 100 mm 宽 U 型箍,也起到压条作用,防止水平碳纤维布与梁剥离.试件加固如图 2 所示.

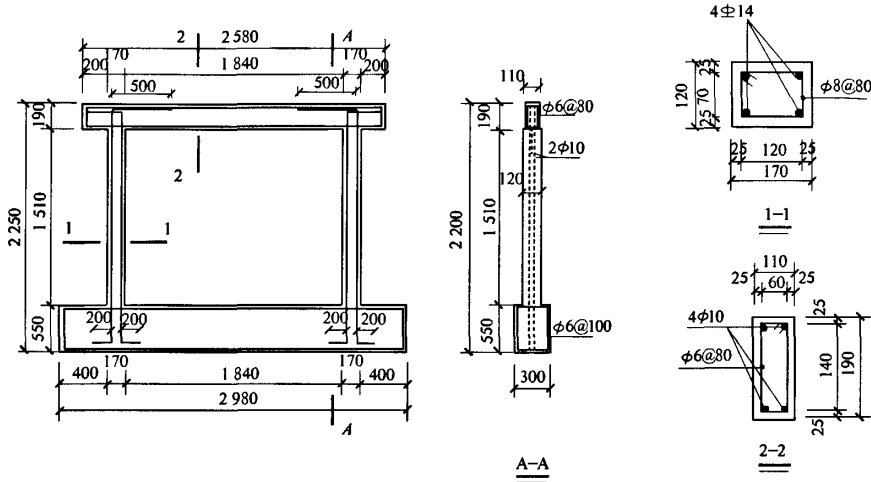


图 1 KJ-1 试件模型及详图

Fig.1 Details of the KJ-1

表 1 各级地震作用等效荷载
Tab.1 The equivalent load under every level earthquake 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 试验结果及分析

2.1 试验现象

2.1.1 KJ-1 试验现象

首先施加柱上竖向荷载和梁上配重,保持不变,KJ-1 未开裂,然后施加水平反复荷载.当水平荷载加至 7 度多遇地震时,框架仍处于弹性阶段.继续加至 5.6 kN 时,梁端上部出现首条垂直裂缝,宽 0.05 mm,即开裂荷载为 5.6 kN,此时荷载相当于 8 度多遇地震作用.继续加载,陆续出现新的裂缝,随着推拉反复荷载的作用,当荷载达到 -14 kN 时,右柱下端的钢筋已经达到理论屈服点,即屈服荷载为 14 kN,此时已大于 9 度多遇地震

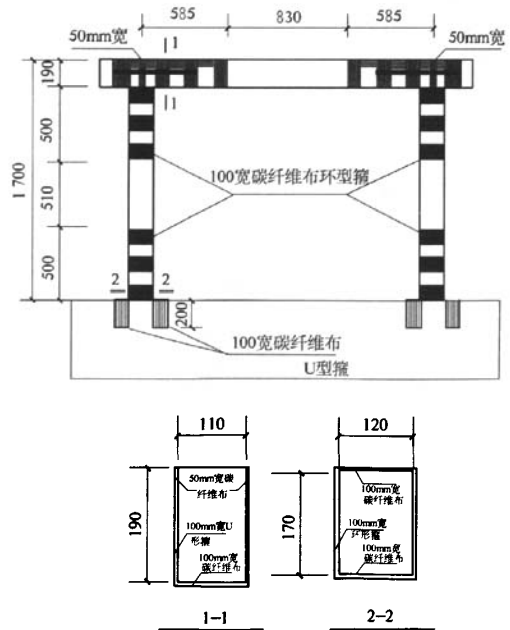


图 2 KJ-1 加固图

Fig.2 The picture of reinforced framework

作用.转为位移控制加载,右柱上端裂缝宽度已达到 0.15 mm,最大水平位移 4 mm,以此位移为

Δy , 分别以 Δy 、 $2\Delta y$ 、 $3\Delta y$ 、 $4\Delta y$ 、 $5\Delta y$ 、 $6\Delta y$ ……为控制位移进行三个反复推拉加载。当位移控制为 $6\Delta y$ 时, 最大荷载分别为 45.38 kN 和 -40.30 kN, 此时荷载稍小于 9 度罕遇地震作用, 柱端裂缝最大宽度达 3 mm。继续施加 $8\Delta y$ 位移控制, 最大荷载分别降至 39.33 kN 和 -40.06 kN, 相比于上一级荷载, 框架承载力下降了 15% 以上, 框架已经达到极限状态。破坏时 KJ-1 如图 3 所示。

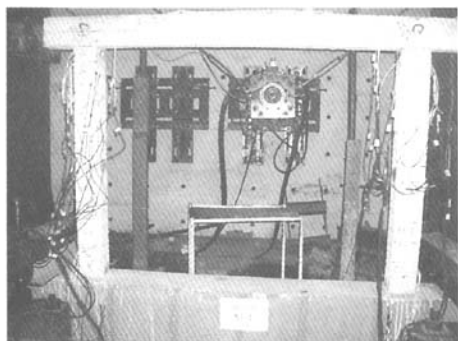


图 3 KJ-1 裂缝图

Fig. 3 The cracks of the KJ-1

2.1.2 KJ-1A 试验现象

将破坏后的 KJ-1 按 1.3 方法进行 CFRP 布加固, 编号为 KJ-1A, 然后再进行水平低周反复荷载的试验。加载由 2 kN 的水平荷载开始, 加载到 6 kN 时左柱下端一条原裂缝开裂, 宽度为 0.05 mm, 即 6 kN 为 CFRP 加固后的开裂荷载。继续加载, 水平荷载加至 16 kN 时, 右柱节点处裂缝宽度最大, 达到 0.3 mm, 此处钢筋屈服, 柱顶最大位移 8.2 mm。以此作为 Δy 开始进行位移控制加载, 当位移加至 $6\Delta y$ 时, 构件达到极限状态, 对应极限荷载为 55.2 kN, 已大于 9 度罕遇地震作用, 左柱底裂缝宽度已经扩展至 3 mm, 右柱底裂缝宽度扩展至 2.5 mm。加反向的 $-6\Delta y$ 控制, 左柱顶裂缝宽度扩展至 2.5 mm, 右柱顶裂缝宽度扩展至 3 mm, 此时, 柱底部 CFRP 布起鼓, 试件达到最大承载力, 荷载开始下降。局部裂缝图如图 4 所示。

2.2 抗震性能分析

2.2.1 KJ-1 抗震性能分析

(1) KJ-1 滞回曲线

KJ-1 的滞回曲线如图 5 所示。试件开裂前滞回曲线基本成直线, 变形恢复较充分, 混凝土中的黏性物质对弹性恢复的影响较小, 即处于弹性变形阶段。试件开裂后, 滞回环向位移轴方向倾倒, 位移增加幅度变大, 而荷载增长率减小。钢筋

屈服后, 滞回环面积逐渐增大, 反映了一定的耗能能力。

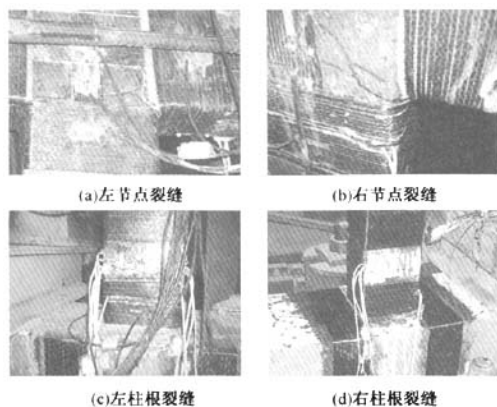


图 4 KJ-1A 破坏后局部裂缝

Fig. 4 The partial cracks of the damaged KJ-1A

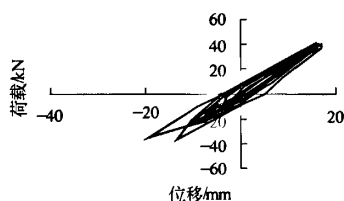


图 5 KJ-1 滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve of the KJ-1

(2) KJ-1 骨架曲线

由 KJ-1 滞回曲线各环的峰值得到骨架曲线如图 6 所示。试件开裂前, 骨架曲线开始阶段比较陡, 大致呈线性, 即初始刚度比较大, 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, 出现一不明显转折点。随着荷载的增大至屈服点后, 曲线的斜率明显减小, 即位移增加幅度大于荷载增长率, 反映出较大的刚度退化。从曲线的转折点上可看出, 试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载分别为 5.6、14、45 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。

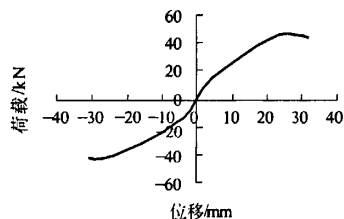


图 6 KJ-1 骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curve of the KJ-1

2.2.2 KJ-1A 抗震性能分析

(1) KJ-1A 滞回曲线. KJ-1A 的滞回曲线如图 7 所示. 加载循环初期, 荷载-位移曲线亦接近直线, 钢筋屈服前, 滞回环面积较小. 图 7 显示在稳定反复荷载作用下滞回环也是稳定的.

钢筋屈服后, 随着反复加载位移幅值的增大及循环次数的增多, 试件的滞回环面积明显增大, 呈现为梭形, 滞回曲线越来越倒向位移轴, 位移增长速率明显大于荷载增长速率, 说明碳纤维布加固严重损伤的钢筋混凝土框架, 仍具有较好的耗能能力.

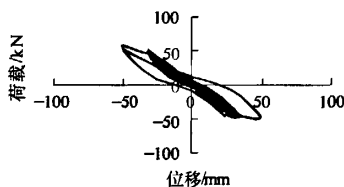


图 7 KJ-1A 滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curve of the KJ-1A

(2) KJ-1A 骨架曲线. 同样由 KJ-1A 滞回曲线中各环峰值, 得骨架曲线, 如图 8 所示. 试件的骨架曲线包括上升段和平缓段. 试件开裂前, 骨架曲线开始阶段比较陡, 同图 6, 大致呈线性. 开裂后试件骨架曲线斜率减小, 曲线出现第一个转折点. 当荷载超过屈服点时, 曲线的斜率进一步减小, 即位移增加幅度增大, 而荷载增长率减小, 曲线出现第二个转折点, 反映出一定的刚度退化. 达到极限荷载后, 曲线开始下降, 承载力出现退化现象, 刚度退化更加明显; 但试件在达到极限荷载后, 荷载并未急剧下降, 在荷载下降到极限荷载的 85% 时, 试件仍具有一定的变形能力, 显示试件具有很好的延性.

(3) 碳纤维布的滞回曲线. 由试验数据, 绘出右柱柱底碳纤维布的滞回曲线如图 9 所示. 框架节点处竖向碳纤维布的滞回曲线如图 10 所示.

由图 9, 加载初期, 柱底纵向碳纤维布应变较小, 钢筋屈服后, 由位移控制加载, 随着位移增加, 碳纤维布应变增加加快, 说明碳纤维布粘接性能良好, 整体工作抗震性能较好. 碳纤维布为弹性材料, 所以在其被拉到极限拉应变前, 卸载后应变几乎可以全部恢复; 试件破坏时, 碳纤维布出现剥离, 所以未达到极限拉应变. 图 10 表明, 节点处的碳纤维布在推和拉荷载作用下, 均处于受拉状态, 而且, 钢筋屈服后, 滞回环面积明显增大、趋于饱满, 说明节点处碳纤维布起到了明显的抵抗地震反复作用, 并具有较好的耗能能力.

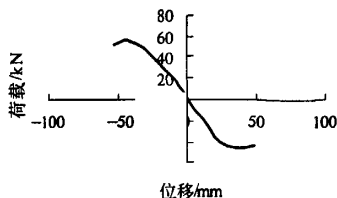


图 8 KJ-1A 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curve of the KJ-1A

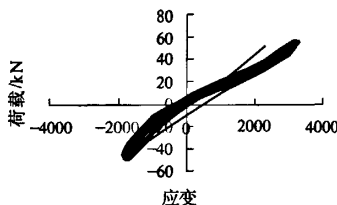


图 9 右柱柱底纵向 CFRP 滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of the longitudinal CFRP in the bottom of right cylindrical

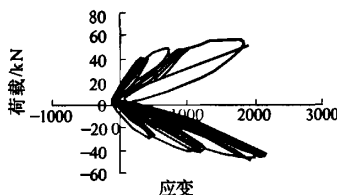


图 10 框架节点竖向 CFRP 滞回曲线

Fig. 10 Hysteresis curve of the vertical CFRP in the node area

2.2.3 KJ-1A 与 KJ-1 的抗震性能的比较

(1) 破坏荷载. 加固前构件的极限荷载为 45 kN, 加固后极限荷载提高到 55 kN, 极限荷载提高了 21.6%. 可以看出 CFRP 加固破损后的混凝土框架, 不仅可以起到补强作用, 还提高了框架结构的抗震能力.

(2) 耗能能力. 由 KJ-1 和 KJ-1A 的滞回曲线可以看出, KJ-1 的滞回环较为扁平, KJ-1A 的滞回环相对饱满, 呈梭形, 说明 KJ-1A 的耗能能力较 KJ-1 好.

(3) 变形能力. 由试验结果, KJ-1 最大极限位移和屈服位移分别为 32 mm、4 mm, KJ-1A 的最大极限位移和屈服时位移分别为 65.9 mm、8.2 mm, 均远远大于 KJ-1, 说明 KJ-1A 较 KJ-1 有更好的变形能力.

3 结论

通过对碳纤维布加固破坏后钢筋混凝土框架结构的拟静力试验研究, 得出以下结论:

(1) KJ-1 及 KJ-1A 滞回曲线表明, 钢筋屈

服后,滞回环面积明显增大,但 KJ-1A 滞回环较 KJ-1 丰满,说明碳纤维布加固破坏钢筋混凝土框架具有更好的耗能能力。

(2) 节点处的碳纤维布发挥作用比较明显,在推和拉荷载作用下,均处于受拉状态,充分发挥了该材料的抗拉性能,且具有较好的耗能能力。

(3) CFRP 布加固震后破坏混凝土框架,其极限承载力、耗能能力及延性等抗震性能均有较大提高。

参考文献:

- [1] 余琼,陆洲导. 碳纤维加固未受损与受损框架节点的分析[J]. 结构工程师,2005,21(1):41-45.
- [2] 刘沐宇,刘其卓,骆志红,等. CFRP 加固不同损伤度钢筋混凝土梁的抗弯试验[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2005,33(3):13-16.
- [3] 张轲,叶列平,岳清瑞,等. 混凝土柱破坏后碳纤维布加固试验研究[J]. 工业建筑,2001,31(12):76-78.
- [4] 范建伟. 碳纤维布加固损伤混凝土框架的试验研究[D]. 郑州大学硕士学位论文. 2007.
- [5] 中华人民共和国行业标准 JGJ101-96《建筑抗震试验方法规程》[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] CECS164:2003-2007. 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.

Experiment Study under Quasi-static of Damage RC Frame Strengthened by CFRP Sheets

WANG Xin-lin, LV Lin, ZHU Jun-tao, WANG Zheng

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

Abstract: The tests under quasi-static cycle load are carried to a R. C frame designed 1:3 scale model and the damage R. C frame strengthened by CFRP sheets. Based on experiments, the force performance, the development of cracks, failure modes, hysteretic curves, the skeleton curves and displacement ductility are analyzed. The seismic performances of damage RC frame strengthened by CFRP sheets are studied. The results show that the CFRP can improve the seismic performances of damage RC frame significantly.

Key words: damage frames; seismic property study; quasi-static test; CFRP sheets strengthening