

文章编号:1671-6833(2010)02-0005-04

# 角钢和碳纤维布复合加固损伤框架抗震试验研究

王新玲, 王 坤, 牛学娇, 闫 超

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为了探讨震后损伤混凝土结构加固方案的优化, 对两榀严重损伤的钢筋混凝土框架用角钢和碳纤维布进行复合加固(JKJ-A、JKJ-B), 并对其进行模拟地震作用下的水平低周反复荷载试验. 试验结果表明, 随着节点角钢肢长的增大, 复合加固框架的耗能能力和承载力增强, 复合加固损伤框架与仅用碳纤维布加固的损伤混凝土框架相比有更好的承载能力. 随着节点加固角钢肢长的增加, 加固框架的抗震能力提高.

**关键词:** 钢筋混凝土框架; 复合加固; 水平低周反复荷载; 抗震性能

**中图分类号:** TU375.3 **文献标识码:** A

## 0 引言

目前, 针对角钢和 CFRP 布复合加固钢筋混凝土构件的研究已有不少, 卢亦焱、刘兰等<sup>[1]</sup>对 7 根外包钢和 CFRP 布复合加固混凝土柱进行抗剪性能研究, 分析复合加固柱在低周反复荷载作用下的抗剪性能. 王步、夏春红等<sup>[2]</sup>对通过两个角钢和 CFRP 布复合加固框节点施加低周反复荷载检验对比其抗震性能. Cornell 大学土木与环境工程系的 Ibrahim Erdem<sup>[3]</sup>通过对两个缩尺比为 1/3 的两层三跨完好钢筋混凝土框架结构模型采用不同的方法加固进行对比, 分析加固框架在静力荷载作用下的承载力、刚度、侧移. 但前期已进行的角钢和 CFRP 布复合加固的研究主要是针对单个梁、柱、框架节点或未损伤框架, 然而实际工程中需加固的往往是损伤的整体框架. 因此, 笔者拟对二榀严重损伤的混凝土框架采用角钢和 CFRP 布复合加固, 并进行抗震试验研究, 这将对震后损伤混凝土加固具有一定的理论和实际意义.

## 1 试件设计

### 1.1 原试件损伤现状

受损的两榀框架是文献[4]中 CFRP 布加固的钢筋混凝土框架达到严重损伤状态的试件. 两

榀损伤框架最终破坏都是框架节点和柱底固定端出现明显的通缝形成塑性铰, 而框架梁和柱的中间部分几乎没有损坏, CFRP 布远未达到极限抗拉强度. 所以对此严重损伤的两榀框架的节点和柱底固定端采用反贴角钢进行加固, 通过锚固螺栓和灌注结构胶保证受损的节点和柱底加固为刚节点, 出现剥离的 CFRP 布重新注胶粘结.

### 1.2 加固材料

角钢采用厚度为 3 mm 的钢板, 强度等级为 HPB235, 屈服强度  $f_y$  和极限抗拉强度  $f_u$  分别为 320 MPa 和 400 MPa, 弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa, 延伸率为 10%; CFRP 布采用 FAW200, 厚度为 0.11 mm, 极限抗拉强度  $f_u$  为 3 200 MPa, 弹性模量为  $2.9 \times 10^5$  MPa; 灌注胶采用郑州市力源结构胶公司生产的建筑结构胶, 抗压强度和抗剪强度分别为 70.3 MPa 和 19.4 MPa.

### 1.3 加固方案设计

加固所用的角钢由 3 mm 厚钢板焊接而成, 为了防止角钢过早屈曲, 在角钢的拐角处加焊一个 70 mm 宽、厚度为 5 mm 的腋, 两榀框架的柱底固定端的加固方式完全相同, 角钢的竖向肢长均为 300 mm, 底座的肢长为 200 mm.

节点加固方法: 梁顶的钢板宽度同梁宽, 长度均为 690 mm, 其中一榀框架节点处钢板宽度同梁

收稿日期: 2009-08-22; 修订日期: 2010-01-10

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(092102310036)

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工作, E-mail: wxl-wzn@126.com.

宽、竖向肢长为 300 mm, 水平肢长与梁顶钢板平齐, 编号为 JKJ-A; 另一榀框架节点角钢竖向肢长为 200 mm, 其他和 JKJ-A 相同, 编号为 JKJ-B. 角钢与构件通过对穿的螺栓锚固连接, 并在二者之间灌注结构胶使两种加固材料可以共同受力. 图 1 为框架 JKJ-A 和 JKJ-B 的加固图.

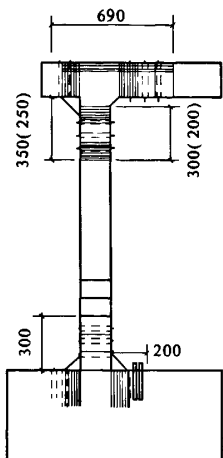


图 1 框架 JKJ-A (JKJ-B) 加固图

Fig.1 The figure of reinforced framework  
JKJ-A (JKJ-B)

## 2 试验装置及方案设计

### 2.1 试验加载装置

试验采用液压伺服加载装置, JKJ-A 和 JKJ-B 通过压梁用地槽螺栓固定在台座上, 如图 2 所示. 其中, 柱上竖向荷载采用同步液压装置, 通过竖向反力架施加, 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, 梁上竖向均布荷载等效为跨中集中荷载, 采用液压千斤顶施加; 水平荷载由水平伺服作动器, 通过水平反力墙提供. 水平伺服作动器通过在框架梁上设置的拉杆和压梁与框架连接.

### 2.2 试验加载制度

本次试验按实际工程背景, 结构上的地震作用按静力等效, 按底部剪力法计算的等效底部剪力作为试验加载的依据<sup>[4]</sup>. 采用力-位移混合控制加载方法, 水平荷载逐级加至开裂、节点或柱底角钢屈服, 每级荷载下反复 2 次. 在角钢屈服后, 按屈服位移的倍数控制, 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% 以下, 停止试验.

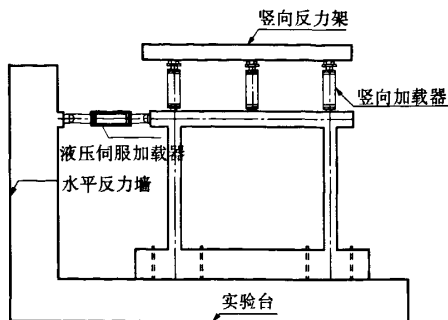


图 2 JKJ-A 和 JKJ-B 加载装置图

Fig.2 The figure of loading equipment of  
JKJ-A and JKJ-B

## 3 复合加固损伤框架的试验分析

### 3.1 JKJ-A 的试验现象分析

首先在柱上施加 12 kN 的集中力, 梁上施加 9.6 kN 的等效集中荷载, 保持竖向荷载不变, 水平低周反复荷载  $F$  从 0 增至 2 kN, 试件表面完好, 加至 3 kN, 仍未开裂,  $F$  增至 7 kN, 右节点出现第一条裂缝, 缝宽 0.05 mm, 开裂荷载  $F_{cr}$  为 7 kN.  $F$  加至 27 kN, 左柱最大缝宽达到 0.3 mm, 右节点最大缝宽 0.8 mm, 节点裂缝迅速发展, 节点角钢和 CFRP 布剥离, 右节点钢板屈曲, 此时框架位移 19.5 mm 定义为屈服位移  $\Delta_y$ . 加载制度转为位移控制, 进行  $2\Delta_y$  循环, 裂缝不断出现, 节点角钢与试件剥离严重, 左节点缝宽增至 0.8 mm, 左柱直线倾斜, 右柱倾斜呈 S 型. 进行  $3\Delta_y$  循环, 右节点和右柱底钢板明显屈曲, 两柱底 CFRP 布箍发生严重剥离, 柱底两侧钢板严重剥离, 右节点北侧 CFRP 布发生严重剥离.  $4\Delta_y$  循环时试件变形过大, 节点处混凝土压碎, 试件破坏. 图 3 为裂缝位置示意图.

### 3.2 JKJ-B 的试验现象分析

类似于框架 JKJ-A,  $F$  加至 7 kN, 左右节点出现裂缝,  $F_{cr}$  为 7 kN, 缝宽 0.05 mm;  $F$  增至 23 kN, 节点和柱底现多条新裂缝,  $\Delta_y = 19.3$  mm, 左节点角钢屈曲, 转为位移控制. 进行  $2\Delta_y$  循环加载, 新裂缝不断出现, 左节点缝宽增至 0.8 mm, 右节点缝宽增至 0.5 mm.  $3\Delta_y$  循环加载下, 柱底角钢严重剥离, 左节点角钢螺栓弹出, 左柱节点缝宽 1.5 mm, 右柱节点缝宽 0.9 mm.  $4\Delta_y$  循环下, 节点处角钢剥离, 严重压屈且柱底 CFRP 布剥离, 缝宽 1.5 mm, 框架变形过大, 试件破坏. 图 4 为试件破坏图.

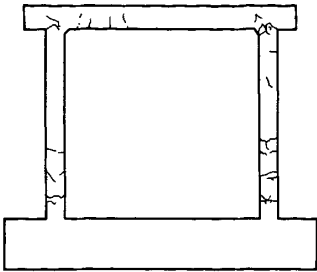


图3 JKJ-A 裂缝位置图  
Fig.3 Location of crack for JKJ-A

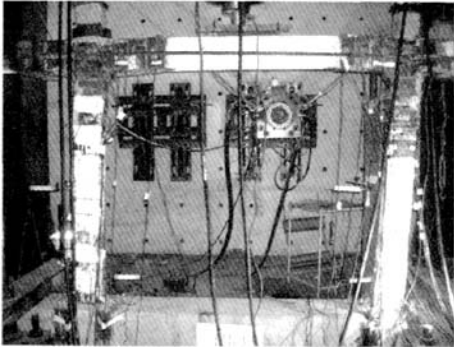


图4 JKJ-B 破坏图  
Fig.4 Location of failure for JKJ-B

4 复合加固损伤混凝土框架抗震性能研究

4.1 承载力对比分析

表 1 列出了本文与文献[5]中仅用 CFRP 布加固严重损伤框架 KJ-4A 的试验结果. 数据表明:三榀加固框架的开裂荷载基本相当,说明角钢肢长的变化、复合加固与仅用 CFRP 布加固对加固构件的开裂荷载影响不明显;JKJ-A 的极限荷载大于 JKJ-B,表明随着角钢的肢长的增加,加固框架的极限承载力也相应提高. 而 JKJ-A 和 JKJ-B 的极限荷载均大于 KJ-4A,说明复合加固严重损伤的混凝土框架结构,与仅用 CFRP 布加固的严重损伤框架相比,具有更高的承载能力.

4.2 位移及延性对比分析

表 2 中列出了 JKJ-A、JKJ-B 屈服及破坏时对应的位移及延性系数. 分析表中的数据可知,框架 JKJ-A 和 JKJ-B 屈服、破坏时对应的位移及构件的延性系数相差不大,这说明加固角钢肢长的变化对构件的屈服及极限位移影响不大. 延性系数均大于 4,表明复合加固的严重损伤框架具有良好的延性.

表 1 承载力试验结果

Tab.1 The capacity of specimens from the test kN		
试件编号	开裂荷载	极限荷载
JKJ-A	7	63.5
JKJ-B	7	56.2
KJ-4A <sup>[5]</sup>	7	54.0

表 2 位移(延性)试验结果

Tab.2 The displacement(ductility) of specimens from the test			
试件编号	屈服位移 $\Delta_y/\text{mm}$	极限位移 $\Delta_u/\text{mm}$	延性系数 $\mu_\Delta$
JKJ-A	19.50	80.41	4.1
JKJ-B	19.56	81.56	4.2

4.3 滞回耗能分析

混凝土框架在低周反复荷载作用下的滞回曲线充分反映了结构的承载力、刚度、延性、耗能能力等力学性能,是分析结构抗震性能的重要依据. JKJ-A 和 JKJ-B 的滞回曲线如图 5,6 所示.

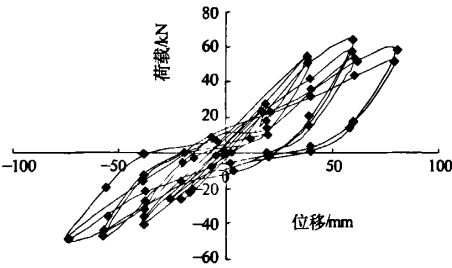


图5 框架 JKJ-A 滞回曲线  
Fig.5 Hysteresis curve of the framework JKJ-A

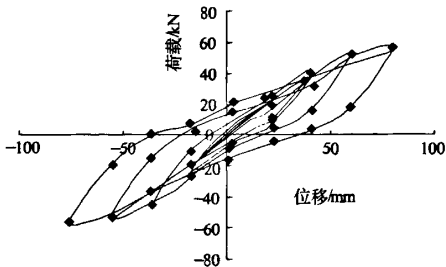


图6 框架 JKJ-B 滞回曲线  
Fig.6 Hysteresis curve of the framework JKJ-B

试件的滞回曲线可以看出,加载循环初期,滞回环面积很小,随着反复荷载及位移幅值的增大和循环次数的增多,试件的滞回环面积明显增大,滞回曲线为梭形,表现出较好的抗震能力. 到加载后期,由于在反向加载时受拉区裂缝未完全闭合,滞回曲线越来越倒向位移轴,呈现为弓形. 从较饱满的曲线可以看出,严重损伤的混凝土框架经角

钢和 CFRP 布复合加固后,仍具有较好的耗能能力.并且 JKJ - A 的滞回曲线面积较 JKJ - B 饱满,说明增加节点加固角钢的肢长,可增强框架的滞回耗能能力.

## 5 结论

(1)角钢和 CFRP 布复合加固严重损伤的混凝土框架滞回曲线表明,复合加固后框架仍具有较好的耗能能力,且角钢肢长越长,耗能能力越强.

(2)节点加固角钢肢长的变化对框架抗裂性

## 参考文献:

- [1] 卢亦焱,刘兰,张华,等.外包钢与碳纤维布复合加固钢筋混凝土柱抗剪承载力的计算方法[J].工程力学,2008,25(2):157-161.
- [2] 王步,夏春红,王涛,等.碳纤维布角钢组合加固混凝土框架节点抗震性能试验研究[J].施工技术,2006,35(4):77-78.
- [3] ERDEM I, AKYUZ U, ERSOY U, et al. An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames[J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1812-1821.