

文章编号: 1671-6833(2006)04-0014-04

碳纤维布加固混凝土框架在竖向荷载下的试验研究

王新玲, 范建伟, 王 华

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为研究碳纤维布加固方式对框架结构性能的影响, 按 1:3 缩尺模型设计了用碳纤维布加固损伤钢筋混凝土框架结构的试验试件, 进行了竖向荷载作用下的试验研究分析. 试验结果表明, 对损伤混凝土结构较大裂缝进行灌胶密闭和粘贴间距较小的 U 型箍能够有效抑制裂缝开展; 梁底粘贴碳纤维布在粘结锚固满足的情况下, 不仅能够有效延缓钢筋的屈服, 而且可以大幅度提高梁的极限抗弯承载力. 由于碳纤维布的约束作用, 加固后梁的截面抗弯刚度有所提高. 碳纤维布加固后的梁的拉力由钢筋和碳纤维布共同承担, 钢筋屈服后碳纤维布的作用明显增大, 承担其主要拉力, 为防止碳纤维布突然拉断, 需考虑其有效利用率问题.

关键词: 碳纤维布; 框架结构; 加固; 裂缝; 承载力

中图分类号: TU 375

文献标识码: A

0 引言

采用外贴纤维增强聚合物 (Fiber Reinforced Polymer—FRP) 对混凝土结构进行补强加固是 20 世纪 80 年代在发达国家首先研究发展起来的一种高效的加固修复技术. 由于碳纤维布轻质、高强、耐腐蚀性、耐久性能好^[1], 该技术省时省力, 操作方便, 并且不影响正常使用, 尤其对于异形结构、受恶劣环境影响的结构及抗震能力要求较高的结构, 因此, 碳纤维布加固效果的研究成为当今研究的热点. 我国约在 20 世纪 90 年代开始对碳纤维布加固修复土木结构方面进行研究, 其研究内容主要有梁、柱、板、节点、构造连接、耐久性、CFRP 的应用等方面^[2,3]. 但大都仍是从基本性能、验证性试验着手, 从简支梁、柱等单个构件研究着眼, 且大部分试验是在构件开裂前进行碳纤维片材加固, 而对整体框架梁柱的加固研究较少. 在实际加固工程中, 遇到的需要加固的结构很多是框架梁、柱, 而且均是已承受较大荷载, 截面裂缝或承载力不满足要求需要加固, 因此, 整体框架梁柱的加固成为需进一步研究的内容. 作者针对已经受力开裂的钢筋混凝土框架结构进行碳纤维布加固, 观察在竖向荷载作用下梁柱的承载能力、延性、刚度、裂缝及钢筋和碳纤维布应变的变化情

况, 分析碳纤维布对钢筋混凝土框架结构整体受力性能的影响.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验采用 1:3 缩尺模型 (原型梁柱截面 390 mm×390 mm, 跨度 6.3 m, 高度 4.2 m), 梁柱混凝土保护层厚 30 mm. 该框架结构已承受了较大荷载, 梁柱最大裂缝宽度达 1 mm^[4], 卸荷后, 已有裂缝部分闭合, 较宽的裂缝已恢复大部分, 根据检测结果, 最大裂缝宽度为 0.25 mm. 根据《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[5], 首先对混凝土裂缝宽度 ≥ 0.1 mm 的截面进行灌胶密闭, 严格按照施工工艺用配套碳纤维结构胶在梁底通长粘贴两层 100 mm 宽碳纤维布, 在梁顶粘贴两层长 700 mm、宽 100 mm 碳纤维布, 对梁裂缝部位和加载点两边粘贴 U 型箍. 试件设计如图 1 所示.

1.2 材料性能

构件试验前进行材料性能评定. 首先使用回弹法对构件混凝土强度进行评定, 根据《回弹法检测混凝土强度技术规程》^[6] (JGJ/T—23—92) 测强曲线表查到回弹值和碳化深度相对应的测区混凝土强度值. 试验结果表明: 通过回弹法测定混凝土强度评定为 C35, 较文献^[4]混凝土强度设计值高

收稿日期: 2006—07—20; 修订日期: 2006—09—11

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目 (511050400), 河南省教育厅自然科学基金基础研究项目 (200510459055).

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.

10.4%，考虑到回弹法测强的误差，混凝土强度仍采用原设计强度，钢筋材料性能见表 1。混凝土等级为 C30，轴心抗压强度设计值 $f=15.13\text{ MPa}$ ， $E=3.03\times10^4\text{ MPa}$ 。

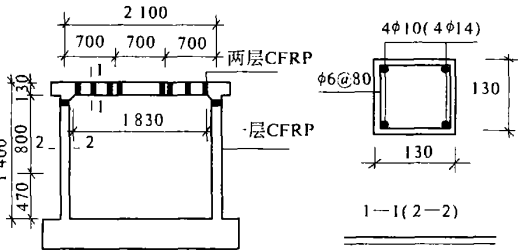


图 1 试件截面、配筋及加固图

Fig.1 The section, reinforced bars and strengthening figure of test member

碳纤维布拉伸性能试验参照《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》^[7](GB/T 3354—1999)，在碳纤维布两面均匀涂抹配套碳纤维结构胶，待结构胶充分硬化后将碳纤维布裁剪成 14 mm 宽、230 mm 长的细条，并在碳纤维布中部粘贴电阻应变片，试验采用连续加载，加载速度为 1 mm/min，当达到预定荷载时，通过与电阻应变片相连的 YD—88 应变仪读取碳纤维布的应变，碳纤维布试件拉伸试验结果见表 2。

表 1 钢筋材料性能表

Tab.1 Material behavior of steel bars

钢筋	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	伸长率 $\delta/\%$
Φ6.5	333	497	31.0
Φ8	352	536	25.0
Φ10	306	451	27.5
Φ14	332	474	35.0

表 2 碳纤维布材料性能表

Tab.2 Material behavior of CFRP

面密度 $/(g\cdot m^{-2})$	理论计算 厚度/mm	抗拉强度 f_d/MPa	弹性模量 $/10^5\text{ MPa}$	极限拉应变 $/(\times 10^{-6})$
200	0.111	3 000	2.9	10 300

1.3 加载方案

本试验采用 3 分点加载方案，竖向荷载加荷装置示意图如图 2 所示。竖向荷载利用压力传感器和 YD—88 应变仪控制加载，通过同步液压千斤顶及反力架施加荷载在柱顶和梁上的 1/3 跨。两边柱顶上部的 2 台同步液压加载器分两次加载至 G1(15kN)后保持不变，模拟顶层屋面传来的荷载。梁上 2 台液压器则根据理论计算的破坏荷载分级加载 G2。构件开裂前，每级荷载取计算开裂荷载的 25%，开裂后，每级荷载取加固前破坏荷

载的 15%，加至破坏，在临近开裂荷载和破坏荷载时，适当减少级差，较精确的测出各级荷载作用下的应变、挠度、裂缝等指标。具体加载制度(G2)为：0, 1, 2, 3, 3.5, 4 kN(梁理论开裂荷载)，4.5, 5, 7, 9, 11, 13, 14 kN(梁加固前理论破坏荷载)，15, 17, 19, 21, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30 kN(梁加固后理论破坏荷载)，31 kN，……至破坏。

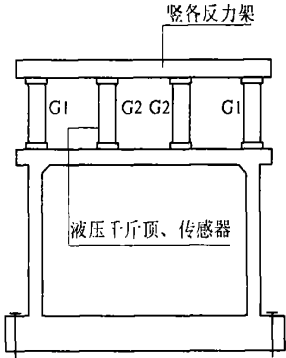


图 2 竖向荷载加载装置图

Fig.2 The test device figure under vertical load

1.4 量测内容

试验主要研究在竖向荷载作用下碳纤维布加固后的钢筋混凝土框架结构梁柱性能，因此重点量测了以下内容：梁跨中、梁支座和柱端的钢筋应变、碳纤维布应变；梁柱碳纤维布 U 型箍应变；各级荷载作用下的挠度及裂缝变化情况等。

2 试验结果分析

2.1 试验现象及破坏形态

当梁上荷载加载至 4.5 kN 时，跨中首先出现垂直裂缝，裂缝宽度和长度均较小；梁上荷载加至 5 kN 时，梁两端支座处同时出现两道垂直裂缝，裂缝宽度均为 0.05 mm；随着荷载的继续增加，又相继在梁跨中和支座原有裂缝周围出现许多细微裂缝，在柱上端外侧亦出现水平裂缝。当梁上荷载达到 26 kN 时，在间距为 30 mm 两 U 型箍之间出现斜裂缝，随着荷载增大，沿梁侧面上下出现间距很小的平行斜裂缝。继续加荷至 28 kN 时，左端支座处加固前已有裂缝周边出现新的斜裂缝，裂缝宽度为 0.1 mm，此后，该裂缝开展速度快于其它裂缝，荷载加到 34 kN 时，裂缝宽度达到 0.3 mm。当梁上荷载加至 38 kN(临近破坏荷载)时，梁最大裂缝宽度为 0.5 mm，柱最大裂缝宽度为 0.15 mm，此时跨中碳纤维布发出噼啪断裂的响声；再稍增加荷载至 40 kN 时，跨中碳纤维布拉断，接着顶部受压区混凝土压碎，梁柱节点处裂缝明显增大，承载力下降。图 3 所示为该试件的破坏图，是

典型的梁破坏机制.从裂缝开展和破坏形态可以看出,通过粘贴 U 型箍和良好的粘贴工艺能够有效抑制裂缝的开展并可避免剥离破坏.

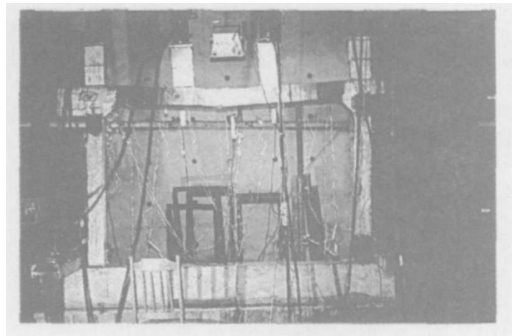


图 3 试件破坏图

Fig.3 The failure figure of test member

2.2 裂缝形态分析

试验得出的开裂荷载与理论计算值基本吻合,说明碳纤维布对开裂荷载影响较小.试验中发现,跨中和支座竖向裂缝出现后,随着荷载的增大,竖向裂缝长度和宽度开展均非常缓慢,裂缝间距小数量相对密集,说明在梁底和梁顶粘贴纤维布对垂直裂缝的开展有明显的约束效果;碳纤维布可以和混凝土梁共同工作,即整体工作性能好.同时,梁斜裂缝开展情况随 U 型箍间距的不同差别较大,间距为 100 mm 的两 U 型箍间的斜裂缝随着荷载的增大裂缝长度和宽度开展很快,而间距为 30 mm 的两 U 型箍间斜裂缝宽度小、数量多,且随着荷载增大裂缝宽度增加缓慢,说明通过粘贴 U 型箍对损伤混凝土结构斜裂缝开展有明显约束效果,其间距越小,效果越好.试验过程中对原有裂缝周边观察发现,对已进行灌胶密闭的裂缝周边,在荷载作用下更容易出现裂缝,且所粘贴的 U 型箍间距越大,对裂缝的抑制作用愈小,因此对于损伤的钢筋混凝土结构裂缝处理时灌胶密闭的同时宜粘贴间距较小的 U 型箍.

2.3 梁抗弯刚度分析

图 4 绘出了该试件荷载—梁跨中挠度曲线图.曲线表明,在裂缝出现前接近直线,裂缝出现后,跨中荷载—挠度曲线斜率稍有减小,说明截面抗弯刚度有所降低;当荷载达到 24 kN 时,曲线出现明显转折点,根据所测应变,此时梁钢筋屈服,截面抗弯刚度有较大降低;当接近破坏荷载时,挠度激增,截面抗弯刚度急剧降低.通过以上现象说明,碳纤维布加固后截面抗弯刚度随荷载的变化趋势与加固前基本相同,但钢筋屈服时的抗弯刚度明显高于未加固梁的刚度,说明碳纤维布加固可较大提高梁屈服后的刚度.

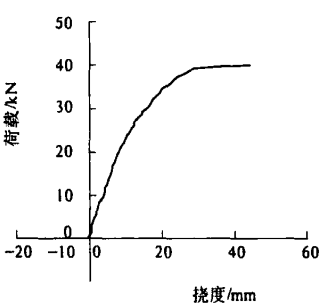


图 4 梁荷载—挠度曲线

Fig.4 Load—deflection curve of the beam

2.4 荷载—梁跨中钢筋应变及碳纤维布应变曲线分析

研究碳纤维布加固损伤钢筋混凝土结构的受力性能,分析钢筋应变和碳纤维布应变随荷载的变化趋势是必不可少的.由图 5 跨中钢筋应变和碳纤维布应变对比曲线可以看出,混凝土开裂前,碳纤维布应变与钢筋应变相差不大;开裂后,两曲线均发生微小的转折,碳纤维布应变稍大于钢筋应变.受拉钢筋屈服时,微应变为 1 630 $\mu\epsilon$,碳纤维布的微应变大约在 2 000 $\mu\epsilon$.继续增加荷载,两曲线发生明显的转折点,碳纤维布应变增量远大于钢筋应变增量;说明碳纤维布的作用明显发挥,成为主要受力材料.当荷载接近破坏荷载达到 39 kN 时,碳纤维布微应变为 6 548 $\mu\epsilon$;再稍增加荷载至 40 kN 时,碳纤维布微应变剧增至 10 675 $\mu\epsilon$,达到其极限拉应变,碳纤维布拉断.说明碳纤维布在受拉时,具有非均匀性,碳纤维布不能充分发挥其强度,导致碳纤维布发挥作用时需要考虑有效利用率问题.

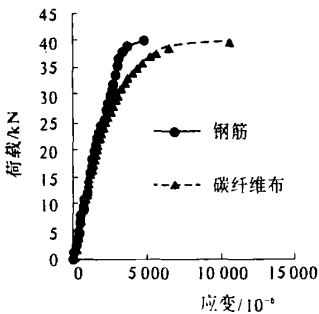


图 5 钢筋和碳纤维布应变曲线

Fig.5 Strains curve of CFRP and steel reinforcement in the beam

2.5 试件的受力状态分析

在梁上施加荷载为 24 kN 时,跨中钢筋达到受拉屈服.实测的最大裂缝宽度为 0.1 mm,满足正常使用极限状态的裂缝宽度 0.3 mm 限值的要

求;梁跨中挠度为 10 mm, 挠度和跨度比为 1/210, 仍然满足正常使用极限状态混凝土规范中挠度限值 $[f/L]=1/200$ 的要求. 由此进一步说明, 碳纤维布加固的钢筋混凝土梁能有效的限制裂缝的开展, 同时还可较大的提高梁的抗弯刚度. 与未加固前框架结构的理论计算值相比, 加固后框架结构屈服荷载提高了 70%, 而极限荷载提高了 94.4%, 即梁底粘贴碳纤维布既能够有效延缓钢筋的屈服, 还可显著提高梁的极限抗弯承载力.

3 结论

- (1)通过粘贴 U 型箍和良好的粘贴施工工艺能够有效避免剥离破坏.
- (2)对损伤混凝土结构较大裂缝进行灌胶密闭和粘贴间距较小的 U 型箍能够有效抑制裂缝开展.
- (3)梁底粘贴碳纤维布能够有效限制裂缝的开展、延缓钢筋的屈服、提高梁的抗弯刚度及极限抗弯承载力.
- (4)碳纤维布加固后的梁的承载能力由钢筋和碳纤维布共同承担, 钢筋屈服后碳纤维作用明

显, 尤其是钢筋达到临近极限强度时, 拉力主要由碳纤维布承担.

(5)碳纤维布加固补强效果显著, 但需考虑其有效利用率问题, 以免发生脆性破坏.

参考文献:

[1] 贺 福. 碳纤维及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 18~23.

[2] 岳清瑞. 我国碳纤维加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23~26.

[3] 孔 琴, 刘立新. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(4): 24~28.

[4] 王新玲, 张海东. 多层住宅新型复合结构在竖向荷载作用下的试验分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(4): 5~8.

[5] CECS146: 2003, 碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].

[6] JGJ/T23-92, 回弹法检测混凝土强度技术规范[S].

[7] GB/T 3354-1999, 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法[S].

Experimental Investigation of Damaged RC Frame Structure Strengthened with CFRP under the Vertical Load

WANG Xin—ling, FAN Jian—wei, WANG Hua

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

Abstract: The test model of damaged RC frame structure strengthened at CFRP was designed at the scale 1:3 in order to study how the performance of the RC frame structure will be affected by the strengthening method. The experiment under the vertical loads was carried out. The test results indicate that the cracks are restrained because the damaged cracks were filled into the structural adhesion and plastered the close—spaced “U” shape CFRP stirrup. At same time, the yielding load and ultimate flexural capacity of the damaged RC frame structure strengthened with CFRP are increased greatly, and the flexural rigidity was better. Under the vertical loads, the tension is taken on both CFRP and steel bar. The tension is taken on mainly by CFRP after the steel bar is drawn on ultimate strength, but the whole strength of CFRP cannot be fulfilled.

Key words: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); frame structure; strengthen; crack; bearing capacity