

文章编号: 1671-6833(2004)04-0024-05

碳纤维布加固钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究

孔 琴, 刘立新

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为研究碳纤维加固方式对梁性能的影响, 通过对比未加固的钢筋混凝土梁, 设计了开裂与未开裂两种不同状态的钢筋混凝土梁采用碳纤维布加固后的受弯试验. 在初始状态钢筋未屈服的情况下, 无论加固前梁是否开裂, 梁的主要破坏特征均为碳纤维布在跨中断裂; 在保证粘贴良好的情况下, 两种加固梁的屈服荷载、极限荷载均得到相同程度的提高; 梁底粘贴碳纤维布可以有效限制裂缝的发展和延伸, 因而加固后的梁的延性及刚度均得到改善; 钢筋屈服后, 荷载主要由碳纤维布承担, 但其强度只能发挥 60% 左右.

关键词: 碳纤维布; 受弯梁; 加固; 承载力; 刚度; 延性; 裂缝

中图分类号: TU 375.1 **文献标识码:** A

0 引言

由于施工质量、地震、改变使用功能及劣化等方面的原因, 建筑结构的加固日益成为建筑行业的重要领域, 复杂的结构形式与工程情况也对现有的加固手段提出了新的要求, 原先只应用于宇航领域的碳纤维复合材料由于具有强度高、耐腐蚀性好、加工工艺简单、施工方便、施工空间无限制等优点^[1], 在工程结构加固领域里迅速得到广泛的应用. 因此, 碳纤维布加固效果的研究成为当今研究的热点. 大量的试验研究及工程实践表明: 碳纤维布加固方式可以有效提高梁的承载力, 2003年5月推行的《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》也对这种加固方法的施工及计算作了详尽的阐述^[2]. 然而, 粘贴碳纤维布除了补强之外, 对梁的其它性能究竟有多大影响目前还没有完善的理论说明; 并且这种加固方法对梁性能的影响是否会因梁的初始状态不同而发生改变也是工程中需要解决的问题之一^[3]. 作者通过对开裂与未开裂两种不同状态的梁进行加固, 观察梁的承载能力、延性、刚度、裂缝及碳纤维布应变的变化情况, 比较梁在不同初始状态下的加固效果, 分析碳纤维布加固方式对钢筋混凝土梁受弯性能的影响, 以为加固理论的完善提供试验数据和理论依据.

1 试验概况

1.1 试样设计与制作

本试验共设计 3 根梁进行对比试验, 梁 CFBF-1 为对照梁, 梁 CFBF-2 加载至最大裂缝宽度为 0.2 mm 时卸载后进行加固(钢筋未屈服), 梁 CFBF-3 构件尺寸及配筋情况见图 1. 每根梁在浇筑时均预留 2 组 6 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块进行同条件养护, 并在试验前进行抗压试验以测得混凝土的强度指标. 加固前, 梁底须进行打磨露出结构层, 用丙酮擦拭干净后, 用环氧树脂将 200 mm 宽的碳纤维布满贴在梁底, 粘贴两层, 并擀压排出气泡, 再在表面刷一层保护胶, 然后养护 3d 保证胶体固化. 梁体两端均用 100 mm 宽的碳纤维布 U 型箍进行端部锚固. 梁 CFBF-2 在加固时裂缝处不灌浆, 直接进行打磨粘贴.

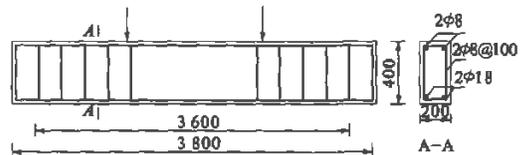


图1 梁的尺寸及配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforced bars of beams

收稿日期: 2004-05-10; 修订日期: 2004-06-20

作者简介: 孔 琴 (1979-), 河南省周口市人, 郑州大学硕士研究生.

1.2 材料性能

构件试验前需要进行材料性能检验, 具体材料性能试验结果见表 1~表 3.

表 1 钢筋材料性能表

Tab. 1 Material behavior of steel bars

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断口伸长率/%	弹性模量/ 10^5 MPa
8	300	465	31	2.0
18	372.5	547.5	32.5	2.0

表 3 碳纤维复合材料性能表

Tab. 3 Material behavior of CFRP

面密度/($g \cdot m^{-2}$)	层数	计算厚度/mm	实测厚度/mm	实测拉伸强度/MPa	实测弹性模量/ 10^5 MPa	极限拉应变 $\times 10^{-6}$
200	一层	0.111	0.184 2	2 899.807	2.51	11 570
	二层	0.222	0.368 4	2 806.705	2.63	10 653

说明: 本试验拉伸强度值按计算厚度计算.

1.3 加载方案及量测内容

本试验采用三分点加载方案, 通过同步千斤顶及反力梁施加压力, 利用压力传感器配合 YD-88 应变仪控制加载. 本试验采用分级加载制度, 在邻近开裂荷载及破坏荷载时, 可适当减小级差, 以保证测量数据的准确性.

根据研究需要, 本试验重点量测以下内容: 跨中钢筋应变、跨中位置混凝土应变、碳纤维布应变、各级荷载下挠度及裂缝变化等. 具体加载装置及仪表布置见图 2.

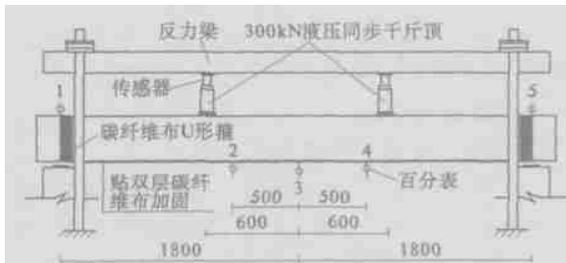


图 2 加载装置及仪表布置图

Fig. 2 Loading fixture and instruments collocation

表 2 混凝土材料性能表

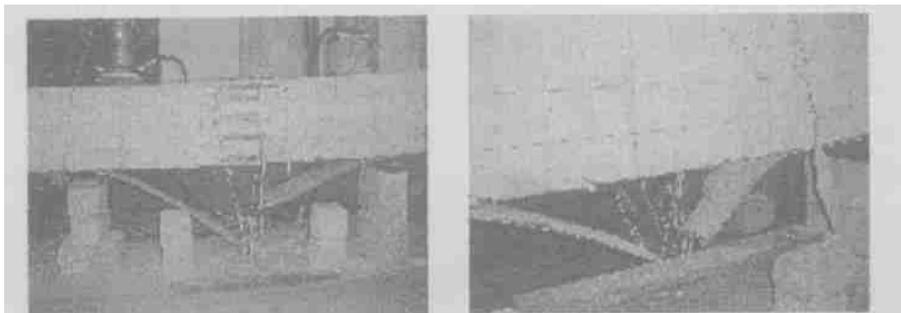
Tab. 2 Material behavior of concrete

构件名称	立方体抗压强度 度 f_{cu} /MPa	轴心抗压强度 f_c /MPa	抗拉强度 f_t /MPa
CFBF-1	41.42	31.48	3.06
CFBF-2	41.23	31.33	3.05
CFBF-3	40.66	30.90	3.03

说明 $f_c = 0.76f_{cu}$, $f_t = 0.39f_{cu}^{0.55}$.

1.4 试验现象

梁CFBF-1 破坏时, 受压区混凝土未压碎, 所有主裂缝均已形成, 且十分明显; 裂缝一直向上延伸至距梁顶 35 mm 的位置处. 梁CFBF-2、CFBF-3 的破坏形态相似; 当加载至破坏荷载的 70% 左右时, 构件发出细碎的时断时续噼噼啪啪的响声; 邻近破坏荷载时, 响声明显, 最后发出一声巨响, 碳纤维布在梁跨中位置断裂; 破坏时受压区混凝土均未压碎; 碳纤维布发生剥离, 剥离位置均集中在跨中纯弯段内; 两端部未发生剥离现象, 且碳纤维布之间未发生分层现象. 梁CFBF-3 的剥离面较为平整, 碳纤维布从混凝土表层剥落, 碳纤维布表面粘有少量混凝土细颗粒, 梁体混凝土保护层完好. 梁CFBF-2 在距跨中 370 mm 的一段范围内剥离情况较严重, 混凝土保护层随碳纤维布剥掉, 梁底露出钢筋, 碳纤维布表面粘有大量混凝土块; 但相对的另一段剥离面则较为平整. 两根梁均破坏突然, 碳纤维布断裂前没有明显的前兆. 具体破坏形态见图 3.



(a) 梁 CFBF-3 破坏形态 (b) 梁 CFBF-2 破坏形态

图 3 构件破坏形态

Fig. 3 Failure modes of members

2 试验结果及分析

2.1 承载力

承载力试验结果见表4。

表4 承载力试验结果

Tab. 4 The experimental results of bearing capacity

构件名称	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
CFBF-1	48	60
CFBF-2	65	88
CFBF-3	60	86

由表4可知,相对于对照梁CFBF-1而言,梁CFBF-2的屈服荷载提高了35.4%,梁CFBF-3则提高了25%;梁CFBF-2的极限荷载提高了47%,梁CFBF-3则提高了43%。由此可见,梁底贴碳纤维布加固的方式不仅可以延缓钢筋屈服,尤其对提高梁体的极限承载力效果明显;即便是开裂的梁,经过加固后,其承载力的提高程度也是可观的,也就是说,在初始状态钢筋未屈服的情况下,已开裂的梁经过加固后,其承载力可以提高到梁在未开裂情况下直接进行加固的程度。由于构件制作良好,端部U形箍几乎未发生作用,碳纤维布剥离位置集中在跨中纯弯段,可见,良好的粘贴情况是保证承载力有效提高的关键。

2.2 弯曲裂缝

从试验中可以观察到,梁CFBF-3的裂缝出现较晚,且密度大、数量多、间距小,并在主筋附近位置出现大量粘结裂缝;相同荷载作用下,其裂缝长度比梁CFBF-1的短,裂缝宽度在钢筋位置以下较小;在距梁底50mm左右的位置处,裂缝宽度较大,呈现中间宽两边窄的形状。主筋位置处,梁CFBF-1最大裂缝宽度为2.1mm,梁CFBF-3的最大裂缝宽度为0.8mm。由此可见,碳纤维布对梁体的约束作用是十分显著的,不仅可以有效地限制裂缝的向上延伸和裂缝宽度的发展,而且在梁出现较多裂缝的情况下仍能使其正常工作,从而增强了梁的整体性,提高了梁的承载能力。

2.3 延性及刚度

由图4可知,梁CFBF-1、CFBF-3的 $M \sim f$ 曲线在开裂前接近直线;开裂后,曲线发生转折,挠度增加较快,刚度有明显的降低;钢筋屈服后,曲线出现第二个转折点, M 增加很少,而 f 激增,刚度急剧降低。梁CFBF-2的 $M \sim f$ 曲线在钢筋屈服前几乎接近直线;钢筋屈服后,曲线出现转折点。在相同弯矩作用下,梁CFBF-3的挠度始终比梁CFBF-1的小,即梁CFBF-3的刚度始终比梁CFBF-1的大。由于梁CFBF-2初始处于开裂

状态,在梁CFBF-1开裂前,其截面刚度较梁CFBF-1的小,挠度较大;但在梁CFBF-1开裂后,梁CFBF-2的刚度很快超过CFBF-1,甚至与梁CFBF-3的刚度相接近。由此可见,粘贴在梁底的碳纤维布虽然本身抗弯刚度不大,但却可以增大梁的截面抗弯刚度;即使是开裂的梁,经过加固,其刚度也可得到有效的提高。这是因为碳纤维布可以限制拉区裂缝的向上扩展和裂缝宽度的发展,使梁的刚度沿梁全长分布较为均匀,从而改善了梁的整体性,增强了梁的截面抗弯刚度。

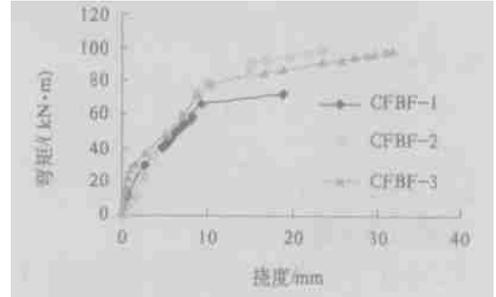


图4 弯矩—挠度曲线

Fig. 4 Moment—deflection curves

虽然碳纤维布是脆性材料,破坏前没有明显预兆,但加固梁在钢筋屈服后,随着荷载的增加,挠度仍有较大发展。由图4可以看出,虽然钢筋屈服时,三者的挠度相差不大,但在梁破坏时,CFBF-2、CFBF-3的挠度均远大于CFBF-1,即加固后梁的位移延性比较大,延性较好。也就是说,即使梁初始处于开裂状态,经过加固,其延性仍可以得到改善,仍有较大的变形空间。虽然CFRP破坏突然,但这种较大的变形仍可在一定程度上给出受弯梁的破坏征兆。

2.4 荷载—碳纤维应变曲线

由图5可知,对于CFBF-3,在梁开裂前,碳纤维布的应变很小;梁开裂后,应变增加较多,曲线出现转折点;钢筋屈服后,应变激增,曲线再次转折接近水平;梁破坏时,碳纤维布的最大应变达到 7.101×10^{-6} 。梁CFBF-2在钢筋屈服前碳纤维应变曲线接近直线;钢筋屈服后,应变有较大发展;梁破坏时,碳纤维布的最大应变达到 6.043×10^{-6} 。在相同荷载作用下,梁CFBF-2的碳纤维应变值远比CFBF-3大,直至钢筋屈服后情况才有所改善。由此可见,碳纤维布的补强作用主要在梁开裂后才得到有效的发挥;钢筋屈服后,碳纤维布成为荷载的主要承载体,所以应变急剧增加,直至纤维脆断。从所测数据来看,虽然梁CFBF-3与CFBF-2的破坏形态均为纤维断裂,但碳纤维布的最大应变值并未达到其极限拉应变,这说明

碳纤维布在发挥作用时存在着一个有效利用率. 当碳纤维布应变达到其极限拉应变的 60%左右时,我们可以认为碳纤维布补强作用失效;换句话说,无论加固前梁的初始状态如何,碳纤维布都不能充分地发挥其强度.

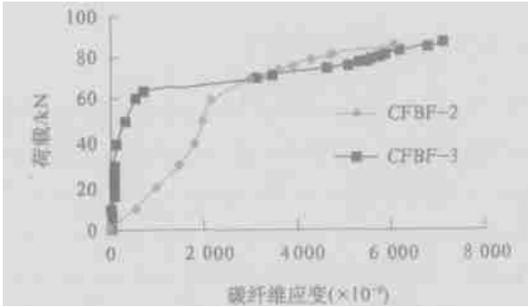


图 5 荷载-碳纤维应变曲线

Fig. 5 Load strain of CFRP curves

2.5 钢筋-碳纤维应变对比

由图 6 可知,对于梁CFBF-3,开裂前,碳纤维应变与钢筋应变相差不大;开裂后,两曲线均发生转折,且碳纤维应变比钢筋应变小;钢筋屈服后,两曲线发生第二次转折,两应变值相差不大,但碳纤维应变值仍比钢筋的小.由此可见,虽然在试验过程中没有明显征兆,但碳纤维布已发生剥离;其应变值比钢筋的小也正体现了碳纤维布对梁体的约束作用,从而增强了梁的整体性,改善了截面刚度.对于梁CFBF-2,由于加固前梁已开裂,碳纤维布的承载作用发挥显著,其应变值远大于钢筋应变,符合平截面假定,碳纤维布粘贴状况良好,与梁体协同作用效果明显.



图 6 钢筋-碳纤维应变对比

Fig. 6 Strain of CFRP in comparison with steel reinforcement

3 结论

(1) 在保证粘贴良好的情况下,加固梁的屈服荷载、极限荷载均得到有效提高.在初始状态钢筋未屈服的情况下,梁是否开裂并不影响加固效果,即已开裂的梁经过加固后,其承载能力相当于直接加固的梁.

(2) 梁底粘贴碳纤维布可以有效限制裂缝的发展和延伸,改善裂缝的分布,增强梁工作时的整体性.

(3) 加固后的梁的延性及刚度均有很大改善.即使加固前梁已开裂,经过加固,其刚度、延性等性能仍未受到影响.

(4) 加固梁的承载能力由钢筋与碳纤维布共同承担,但碳纤维布的承载作用在梁开裂后才有较明显的发挥;尤其在钢筋屈服后,承载力的提高主要依赖碳纤维布.

(5) 梁底贴碳纤维布虽可以补强,但其提高

程度有限.当达到碳纤维布的有效利用率时,可以认为补强作用失效.

(6) 虽然CFRP属于脆性材料,破坏突然,但加固梁变形性能较好,因此建议以挠度来作为判断破坏的参照因素.

参考文献:

[1] 滕智明.钢筋混凝土结构[M].北京:清华大学出版社,1987.
 [2] CECS 146:2003,碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].
 [3] 周仕刚,高永飞.CFRP 加固初始受载钢筋混凝土梁弯曲性能的试验研究[J].玻璃钢/复合材料,2003 (1):21~23.
 [4] 夏春红.碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D].同济大学,2002.
 [5] 李美云,管品武,刘立新,等.HRB 400 级钢筋混凝土连续梁的试验分析[J].郑州大学学报(工学版),2003,24(4):67~71.

Experimental Investigation of RC Beam Strengthened with CFRP

KONG Qn, LIU Li-xin

(College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : In contrast with normal beam the test in bedding of cracked beam and sound beam strengthened with CFRP is designed in order to study how the strengthening method affects the performance of the beams. If the steel bars in initial state do not yield, whether the beam is cracked or not, CFRP cracking in the middle of the beam is the main failure mode. Bearing capacity can be increased because of better fracture and ductility and stiffness can be better because CFRP can limit the development of cracks. The load is taken on mainly by CFRP after the steel bars yield, but only 60 percent of the strength of CFRP can be fulfilled.

Key words : carbon fiber reinforced polymer laminate (CFRP); beams under flexure; strengthen; bearing capacity; stiffness; ductility; fracture

(上接第 23 页)

Application of SAP 2000 in Nonlinear Static Analysis

JIANG Rui^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract : This paper presents the principle and calculation procedures of the method in SAP 2000, while modifying some coefficients according to China Code for Seismic Design. A frame structure is then analyzed and the result proves that the push over method is effective in Performance Based Design since it can not only give a general assessment of the structure with regard to many points such as the plastic hinge distribution, the inelastic displacement of stories, but also reveal the weak points of the structure under the action of earthquakes that seldomly occur.

Key words : static nonlinear analysis; capacity spectrum; demand spectrum