

文章编号: 1006-544X(2005)02-0166-03

# 预应力 CFRP 布加固混凝土梁可靠性研究

赵 军

(桂林工学院 土木工程系, 广西 桂林 541004)

**摘要:**为使碳纤维(CFRP)的高强度能充分发挥其作用,通过对5根混凝土梁在反向加载条件下的碳纤维加固试验研究,对在反向加载条件下碳纤维加固前后的梁可靠度进行了分析和比较,反向荷载从14 kN增加到20 kN,结构的可靠度分别比未施加反向荷载时增加0.713,0.838和1.007.因此利用该法加固结构可充分利用高强的CFRP及更好地控制裂缝,从而对提高梁的可靠性有更好的效果.

**关键词:** CFRP; 加固; 混凝土梁; 可靠度; 反向加载

**中图分类号:** TU378.203

**文献标识码:** A<sup>①</sup>

碳纤维(CFRP)加固修补混凝土结构技术具有高强、质轻、耐腐蚀、施工方便等优点,效果明显,已使用于土木工程中的众多领域.在一般情况下的碳纤维加固试验研究及实际加固工程中,由于碳纤维强度太高(通常使用的高强度碳纤维布的抗拉强度约为建筑用钢材的十几倍,而弹性模量大概与钢材相当),因此对混凝土结构进行碳纤维加固时碳纤维的强度往往不能完全发挥.为了更好地利用碳纤维的高强度以及更好地控制结构构件的裂缝<sup>[1]</sup>,本文研究了反向加载条件下加固钢筋混凝土梁的抗弯截面的可靠度,并对结果进行了分析.

粘贴一层碳纤维,加固方案见图2.试验梁采用分配梁两分点加载,加载方案见图3.千斤顶上装有事先标定好的压力传感器,由静态电阻应变仪控制每级加载荷载的大小,在梁跨中的钢筋和混凝土上分别

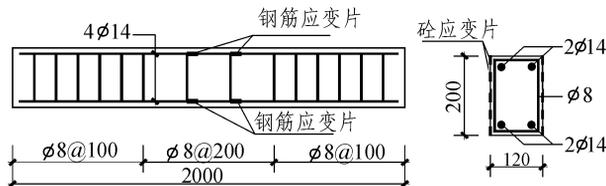


图1 试验梁尺寸及配筋

Fig. 1 Size of the beam and the placing of steel bars

## 1 试验方法

为满足试验 RC 梁设计要求和便于试验,试验 RC 梁尺寸为:长度  $L=2\ 000\text{ mm}$ ,高度  $h=200\text{ mm}$ ,宽度  $b=120\text{ mm}$ ,试验跨度  $l=1\ 800\text{ mm}$ ,三分点加载,混凝土强度等级为 C30,受拉及受压钢筋均采用 HRB335 钢筋,箍筋采用 HPB235 钢筋.试验预制了 5 根钢筋混凝土简支梁,其配筋如图 1 所示.钢筋和碳纤维的材料参数见表 1,2,粘结胶为武汉大学生产的环氧类结构胶.

加固时在梁的底面(受拉面)两侧各 35 mm 宽

表1 钢筋的材料参数

Table 1 Parameters of steels

直径/mm	$f_y$ /MPa	$E_s$ /MPa
8	210	21000
14	300	200000

表2 碳纤维的材料参数

Table 2 Material parameters of the CF

	平均值	标准差
拉伸强度/MPa	$3.60 \times 10^3$	284
拉伸弹性模量/MPa	$2.49 \times 10^5$	$1.69 \times 10^4$
拉伸断裂伸长率/%	1.5	-

注:试验方法采用 GB/T 31354-1999

① 收稿日期: 2004-08-02

基金项目: 广西区教育厅科研资助项目(桂教科研[2004]20)

作者简介: 赵 军(1970-),男,博士研究生,讲师,研究方向:结构的可靠性分析、结构的加固.

贴应变片. 为了便于观察开裂荷载大小、起始开裂点及加固梁的破坏形态, 在开裂前和接近破坏时以每级 2.5 kN 加载(部分阶段以 1 kN 加载), 其它情况以每级 5 kN 或 10 kN 加载.

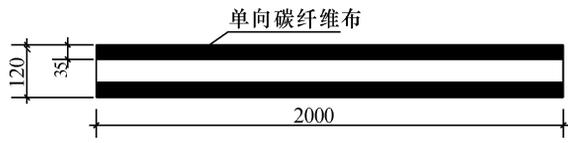


图 2 加固梁底面

Fig. 2 Underside of the strengthened beams

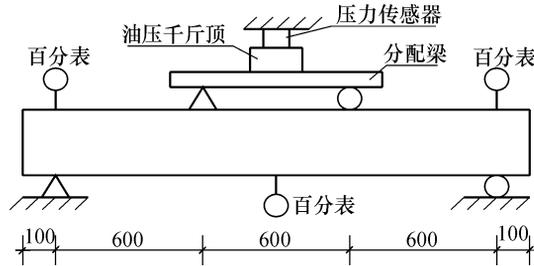


图 3 梁加载方案及测点

Fig. 3 Loading scheme and surveying point of beams

## 2 试验结果及可靠度分析

### 2.1 反向荷载数值的确定

为了保证在反向加载条件下的混凝土梁 CFRP 加固效果, 在实施反向荷载时, 以不让原受压区混凝土在反向荷载的作用下发生裂缝为原则, 对钢筋混凝土梁实施反向荷载, 其后再对梁进行 CFRP 加固. 计算原受压区混凝土临界开裂荷载的方法为: 把钢筋面积转换为等效混凝土面积, 再依据该等效面积计算出梁的抵抗弯矩, 求出原受压区混凝土临近开裂时极限荷载值, 从而确定适合的反向荷载值. 本文分别对 L2、L3、L4 梁施加的反向荷载取为 14、17、20 kN.

### 2.2 试验结果分析

试验梁 L0 是普通的钢筋混凝土对比梁, 一次加载直到破坏, L0 梁在加载过程中其破坏形式为典型的正截面受弯破坏, 其钢筋屈服时荷载值为 63.5 kN. L1 梁为未采用反向加载条件下的碳纤维加固梁, 加载至出现宽度约为 0.5 ~ 0.7 mm 宽的裂缝, 用读数显微镜读取裂缝宽度后卸载并在梁的受拉区粘贴碳纤维, 待结构胶达到强度后, 再继续加载至破坏. L2、L3、L4 为采用反向加载条件下的碳纤维加固梁, 同样加载至出现宽度约为 0.5 ~ 0.7 mm 宽的裂缝后, 读取裂缝宽度并卸载, 然后将梁反向

加载并保持荷载稳定, 在梁的受压面(原受拉面)粘贴碳纤维待结构胶达到强度后, 反向荷载卸载并继续施加荷载至构件破坏, 试验结果见表 3、表 4. 在施加反向荷载后进行 CFRP 加固的梁挠度在相同的荷载下要小于未施加反向荷载就进行 CFRP 加固的梁. 许多文献<sup>[2-4]</sup>均提出碳纤维加固梁抗弯极限承载力的计算. 根据平截面假设, 碳纤维的应变应略大于钢筋应变, 为简化计算, 可以近似认为两者的应变相等, 这种简化是偏于安全的. 按照受力相等原则, 本文将碳纤维布横截面的面积转化为等效的钢筋面积. 由试验可知碳纤维布对梁的开裂荷载影响不大, 用碳纤维加固后的梁开裂荷载为 66.5 kN, 而未加固梁的开裂荷载为 63.5 kN, 仅提高 4.7%, 与采用反向加载条件下的碳纤维加固梁相比, 其开裂荷载几乎相同, 没有明显提高. 但加固梁的极限承载力却有较大幅度提高, 且碳纤维布在加载初期发挥的作用较小; 而在加载后期, 特别是在钢筋屈服后, 其高强度的特性得以充分发挥.

### 2.3 结构可靠度分析

结构的可靠性是指结构在规定的时间内, 在规

表 3 加固梁的钢筋、碳纤维的应变值

Table 3 Strain value of steels and CF in the strengthened beams

梁号	施加反向荷载值/kN	碳纤维初始应变	钢筋屈服时荷载值/kN	钢筋屈服时碳纤维应变
L1	0	0	66.5	0.004 365
L2	14	0.000 316	69.0	0.005 113
L3	17	0.000 361	70.0	0.005 422
L4	20	0.000 405	71.5	0.006 321

表 4 加固梁的荷载及挠度

Table 4 Deflection and load in the strengthened beams

荷载值/kN	跨中挠度			
	L1	L2	L3	L4
第 1 次加载卸载后残余挠度	2.39	2.23	2.19	2.34
施加反向荷载值/kN	0	14	17	20
引起的反向挠度	0	-1.21	-1.375	-1.51
0	2.39	1.02	0.815	0.83
10	3.36	2.13	1.725	1.86
20	4.39	3.2	2.78	2.87
第 2 次加载	30	5.46	4.195	3.935
	40	6.55	5.225	4.985
	45	6.97	5.82	5.5
	50	7.495	6.365	6.055
第 3 次加载	55	7.96	6.955	6.6
	60	8.44	7.495	7.16
	65	9.015	8.015	7.81
	70	11.94	8.885	8.71
第 4 次加载	72.5	14.27	10.788	10.43
	75	17.01	12.958	12.54
	77.5	19.165	14.898	14.46
	80	22.065	16.858	16.4

的条件下,完成预定功能的能力<sup>[5]</sup>.为了保证结构正常使用,结构构件设计时采用的可靠指标,可参考承载能力极限状态设计时采用的可靠指标,其 $\beta$ 值参见文献<sup>[5]</sup>.

将影响结构可靠性的因素归纳为2个基本变量<sup>[5]</sup>,即结构抗力 $R$ 和作用效应 $S$ .则结构的功能函数 $Z$ 应符合下列要求

$$Z = R - S \geq 0, \quad (1)$$

式中: $R, S$ 均为随机变量.功能函数可用于反映结果所处的状态:当 $Z < 0$ 时,结构处于失效状态;当 $Z > 0$ 时,结构处于可靠状态;当 $Z = 0$ 时,结构处于极限状态.对于本试验梁,其功能函数为

$$Z = R - S = Pl/6 - S = 300P - S. \quad (2)$$

式中: $P$ —作用于梁上的荷载值; $l$ —梁的净跨,本试验中 $l = 1800$  mm.

结构构件抗力 $R$ 是构件材料的力学性能和几何关系的函数,本文取 $R$ 服从对数正态分布<sup>[5]</sup>.可根据文献<sup>[6]</sup>求出 $R$ 的均值和方差.

荷载效应 $S$ 指的是荷载作用下结构中的内力、应力、位移、变形,其可由恒载或活载产生,也可由恒载和活载共同产生,它们可由力学方法求解.本试验 $b \times h = 120 \times 200$  mm,  $A_s = 308$  mm<sup>2</sup>,根据有关计算图表知,当配筋率 $\rho = A_s/bh = 308/(120 \times 200) = 1.28\%$ 时,梁承受的极限弯矩 $M = 13.56$  kN·m,即可确定荷载效应 $S$ 的均值为13.56 kN·m,变异系数为0.07.

确定结构可靠度的方法很多<sup>[7]</sup>,其中JC法适用于随机变量为任意分布下结构可靠指标的求解,已为国际安全度联合委员会(JCSS)所采用.该方法简单易懂,计算精度又能满足工程实际需要.因此本文根据公式(1)、(2)及试验所得相关数据,采用JC法,利用FORTRAN语言编程计算5根梁的可靠度,结果见表5.

表5 梁的可靠度

Table 5 Reliability of beams

梁号	L0	L1	L2	L3	L4
可靠度	2.795	3.189	3.508	3.633	3.802
与L0的差值	-	0.394	0.713	0.838	1.007

### 3 结 论

(1)碳纤维加固梁后,由于碳纤维与钢筋混凝土结构梁共同参与工作,提高了梁的承载能力,从而大大提高了结构的安全性.施加反向荷载充分利用了碳纤维的高强度,说明使用本方法加固梁的效果更好.

(2)在同样的碳纤维用量下,在反向加载条件下,碳纤维加固后梁的可靠指标将进一步提高,且随着反向荷载的加大,其结构可靠度越大,结构越安全.如加大碳纤维的用量,将会使反向加载的效果更明显,但是过多的用量可能会改变原结构的受力状态.因此,不同的碳纤维用量、不同的反向荷载值的作用将会对结构的可靠性产生较大的影响.

### 参考文献

- [1]王磊,朱墩,赵军,等.反向加载条件下CFRP加固混凝土受弯构件的试验研究[J].建筑技术开发,2003,(7):18-23.
- [2]王文炜,赵国藩.纤维复合物加固钢筋混凝土梁抗弯承载力及参数分析[J].工业建筑,2003,(9):16-19.
- [3]王荣国,代成琴,刘文博,等.CFRP加固混凝土梁抗弯承载力的计算分析[J].哈尔滨工业大学学报,2002,(3):312-314.
- [4]Ahawy M, Saman M. Strength and ductility of hybrid FRP-concrete beam-columns [J]. J. Struct. Engrg. ASCE, 1999, 125 (10): 1085-1093.
- [5]GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
- [6]李国强,黄宏伟,郑步全,等.工程结构荷载与可靠度设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2001:125-135.
- [7]赵国藩,金伟良,贡金鑫,等.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:21-52.

## Reliability Analysis of the Prestressing Force CFRP Strengthening RC Beams

ZHAO Jun

(Department of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to make use of the high strength of CFRP, an analysis is based on the experimental study on the reliability of five beams with opposite loading, before and after being strengthened by the CFRP. Then a new way of strengthening and repairing the concrete structure is put forward. The result shows that the structural reliability will increase to 0.713, 0.838 and 1.007 when the opposite loading is added from 14 kN to 20 kN. Therefore the new way to strengthen the beams can make good use of the high-strength of CFRP and well control the rack of structural members, and can greatly increase the security.

**Key words:** CFRP; strengthen; RC beams; reliability; opposite loading