

文章编号:1006-2106(2008)06-0052-04

CFRP 加固钢筋混凝土梁疲劳刚度的试验研究^{*}

汝海峰^{1**} 张茜² 梁春祥¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610000; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

摘要:研究目的:碳纤维布加固混凝土结构是一种新型结构加固方法。粘贴碳纤维布是提高混凝土梁疲劳性能的有效方法,可用于延长损伤混凝土结构的使用寿命。

研究结果:CFRP 加固混凝土梁在疲劳荷载作用下,正截面平均应变仍符合平截面假定。加固梁在疲劳荷载作用下刚度降低,裂缝宽度增大。得到了 CFRP 加固钢筋混凝土梁在疲劳荷载作用下的疲劳刚度计算方法和计算公式,计算结果与试验结果符合良好。

关键词:碳纤维布;钢筋混凝土梁;疲劳刚度;疲劳试验

中图分类号:U445.7⁺2 **文献标识码:**A

Experimental Research on the Fatigue Rigidity of RC Beams Reinforced by CFRP Sheets

RU Hai - feng, ZHANG Qian, LIANG Chun - xiang

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Sichuan Engineering Professional College, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: Research purposes: Concrete structure reinforced with carbon fiber plastic sheet (CFS) is a new retrofit method in the field of civil engineering. The CFRP - sheet is effective for the improvement of fatigue performance of RC beams, which can prolong the service life of damaged concrete structure.

Research results: Concrete beam's stress - strain under fatigue loading should fit to the assumption of that on the plane and section. Specimens' fatigue flexural rigidity reduces gradually, resulting in enlarging the cracks. The discussion is also made on the calculation methods and formulas for the rigidity of highly strengthened concrete beams under fatigue load and the calculation results conform to the experimental results.

Key words: CFRP; reinforced concrete beam; fatigue test; fatigue rigidity

在实际工程中有许多结构,如海洋平台、高耸结构、公路和铁路桥梁等,经常承受荷载的多次重复作用,但是以前混凝土结构是按容许应力法进行设计的而且采用的容许应力值比较低,使得疲劳问题不是很突出。实际的工程结构由于设计缺陷、施工质量问题、环境不利影响或者使用功能的改变,其疲劳强度可能不满足现行规范要求。当服役结构的疲劳预测寿命小于结构的期望服役年限时,需要对其进行疲劳加固。最近十多年来,由于土建事业的发展,碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer)作为一种轻质、高强、耐疲劳

的新型材料,已经被作为一种理想的疲劳加固材料得到广泛的应用。随着 CFRP 在工程中的应用,一些混凝土结构经常处于高应力状态下工作,CFRP 加固钢筋混凝土结构的疲劳问题成为一个不容忽视的课题。

国内外对普通混凝土结构疲劳问题已进行了大量研究,但对 CFRP 加固混凝土结构的疲劳问题研究较少,为保证工程设计的安全应用,需要深入探讨其疲劳特性。本文以 CFRP 加固钢筋混凝土梁的疲劳试验为基础,同时结合国内外有关研究资料和疲劳设计规范,分析 CFRP 加固混凝土受弯构件在高周重复荷载作用

^{*} 收稿日期:2008-04-10

^{**} 作者简介:汝海峰,1980年出生,男,助理工程师。

下的变形性能,并探讨裂缝宽度和疲劳刚度的计算方法,为 CFRP 加固混凝土梁结构设计提供了参考依据。

1 试件概况

1.1 试件设计

本课题设计制作了 6 根试验梁。试件梁均为矩形截面简支梁,商品混凝土的配合比水泥:水:砂:石:粉煤灰=1:0.46:2.42:3.35:0.18。试验梁钢筋布置如图 1 所示,试件加固情况如表 1 所示。

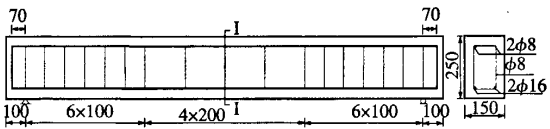


图 1 试验梁配筋图(单位:mm)

表 1 试验梁加固情况表

梁 号	碳纤维布的应用情况				碳纤维布 U 型箍锚固	试验类型
	层数	粘贴 方式	各层 长度 /mm	条带 宽度 /mm	位 置	
JZJ	-	-	-	-	-	-
JZP	-	-	-	-	-	疲劳试验
JGP-1	1	长度 较短	1 200	150	碳纤维 布两端	疲劳试验
JGP-2	1	长度 较长	1 800	150	碳纤维 布两端	疲劳试验
JGP-3	2	外短 内长	外层 1 200 内层 1 800	150	内层碳纤 维布两端	疲劳试验
JGP-4	2	外长 内短	外层 1 800 内层 1 200	150	外层碳纤 维布两端	疲劳试验

试验梁混凝土强度等级 C30 ,受拉钢筋为 2φ16 的Ⅱ级钢筋,箍筋和架立钢筋为 φ8 的Ⅰ级钢筋,碳纤维布采用上海混凝土碳纤维布有限公司生产的 200 g CFS-3.55-220-012-150 碳纤维布;胶粘材料采用上海混凝土碳纤维布有限公司 HCJ 碳纤维粘贴专用结构胶。试验前试件自然养护 28 d。混凝土、钢筋、碳纤维布的力学性能如表 2~表 4 所示。

表 2 混凝土力学性能

混凝土 等级	轴心抗压强度 /(N·mm ⁻²)	弹性模量/ (×10 ⁴ N·mm ⁻²)	轴心抗拉强度 /(N·mm ⁻²)
C30	37.95	3.00	3.78

表 3 钢筋力学性能

钢筋种类	钢筋直径 D/mm	疲劳应力幅限值 /(N·mm ⁻²)	实测弹性 模量/GPa
HRB335	16	135(0.3≤ρ _s <0.4)	204
HPB235	8	-	200

表 4 碳纤维布力学性能

厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
0.12	3 885	216	2.04

1.2 试验方法

疲劳实验在 PME-50 型脉冲液压疲劳试验机上进行。加固类型均为完好加固。静载试验中确定了梁的极限弯矩 $M_u=24\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。取疲劳荷载上限 $M_{\max}=18\text{ kN}\cdot\text{m}$,疲劳荷载下限 $M_{\min}=5.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。疲劳试验加载装置如图 2 所示。

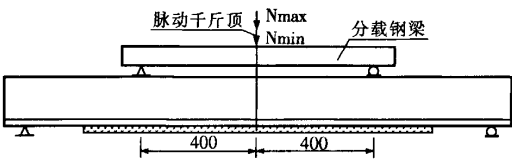


图 2 疲劳试验加载装置示意图(单位:mm)

2 CFRP 加固钢筋混凝土梁受弯构件在等幅疲劳荷载作用下的使用性能

2.1 正截面疲劳性能

众所周知,静载作用下,平截面假定是钢筋混凝土构件正截面计算的基础,而且已被国内外很多试验所证实:对于采用 CFRP 加固钢筋混凝土构件正截面强度时,其仍然复合平截面假定,本次静载试验也非常好地证实了这一假设。

试验分别在静载和多次疲劳荷载作用后量测试不同高度处混凝土、钢筋和 CFRP 的应变,经分析可以看出各加固梁跨中截面混凝土应变、钢筋应变和 CFRP 应变在疲劳荷载上限和疲劳荷载下限都比较好地满足了平截面假定。因此对于 CFRP 加固梁正截面疲劳验算仍然可以采用平截面假定。

2.2 弯曲受压的变形模量和疲劳变形模量

混凝土弯曲受压的变形模量受许多因素的影响而变动,如受压区的边缘应力、纵向钢筋配筋率、混凝土等级等。根据钢筋应力、CFRP 应力和平截面假定可以计算出混凝土受压边缘纤维的应力,从而可以求得混凝土受压边缘纤维的静载弯曲变形模量和弯曲受压疲劳弹性模量。考虑到疲劳试验的变异性比较大,仅根据五根梁对这些数据进行回归分析是没有太大意义的,所以并未列出这些计算结果。文献[6]中给出的回归方程为:

$$\gamma^f = \frac{E^f_w}{E_w}$$
(1)

$$\gamma^f = 1.019 - 0.071 \lg \frac{N}{10^4}$$
(2)

参照本次试验结果和文献[2],取 $E_w = 0.66E_c$ 。采用式(1)和式(2)可以有如下关系式:

$$E_w^f = \gamma^f E_w = 0.66(1.019 - 0.071 \lg \frac{N}{10^4}) E_c \quad (3)$$

2.3 试件挠度随循环次数的增加变化情况

试件在 P_{\max} 作用下跨中挠度随循环次数 N 的增加而变化的趋势如图3所示。从图3中可以看出挠度随着 N 的增加而增加,但是各试件的增长幅度不一样。JZP 没有 CFRP,其在疲劳的全阶段挠度都在增长;JGP-1虽然在疲劳的全阶段也稳定增长,但增长幅度比 JZP 小,从图上看就是前者的曲线比较平缓,这是由于 CFRP 的存在,对梁的刚度退化起着积极的作用,从应力图中可以看出 JGP-1 中跨中钢筋应力比 JZP 小,而且裂缝发展也没有 JZP 大。JGP-2、JGP-3 和 JGP-4 也存在同样的规律。

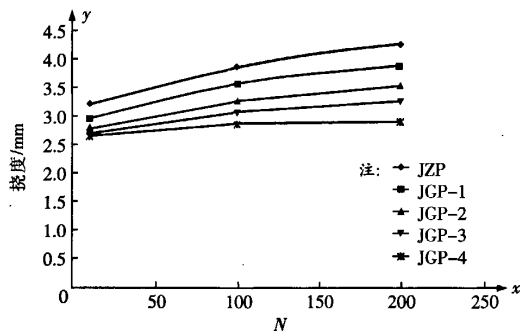


图3 50 kN 荷载作用下跨中挠度—疲劳次数曲线

3 CFRP 加固钢筋混凝土梁的正截面疲劳刚度计算方法

在疲劳荷载作用下,加固梁混凝土微裂缝逐渐发展,混凝土的变形模量也会慢慢变小,同时钢筋和混凝土之间的粘结,加固层与本体梁之间的粘结也会减弱,表现在宏观上就是截面刚度降低,在同样荷载作用下挠度增大。

3.1 疲劳刚度与静载刚度的比较

对 JGP1、JGP2、JGP3、JGP4 在 50kN 作用下与其静载时的挠度进行对比。对比时定义多次重复荷载作用下的刚度降低系数为:

$$\theta^f = \frac{f_d}{f^f} \quad (4)$$

式中 θ^f ——刚度降低系数;

f_d ——静载作用下的挠度;

f^f ——多次重复荷载作用下的挠度。

对 JGP1、JGP2、JGP3、JGP4 与静载作用下的挠度对比,并进行回归分析得出图4和式(5)。

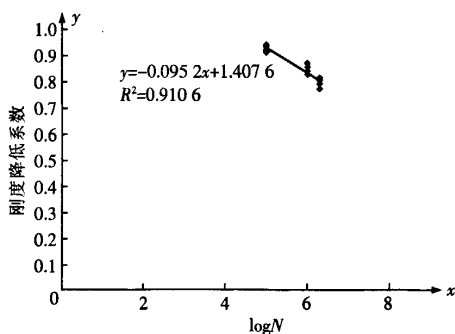


图4 刚度降低系数变化回归线

回归方程为:

$$\theta^f = 1.4076 - 0.0952 \lg N \quad (5)$$

文献[6]通过12根钢筋混凝土梁的疲劳试验,认为刚度折减系数与疲劳荷载循环次数 N 有以下关系:

$$\theta^f = 1.422 - 0.11 \lg N \quad (6)$$

方程(5)比方程(6)略小,但是相差不大。

3.2 加固梁疲劳刚度计算方法

3.2.1 对于钢筋混凝土受弯构件

钢筋混凝土受弯构件在荷载作用下,受拉区存在裂缝。因此沿构件跨度各截面钢筋的应力和应变,混凝土的应力和应变,以及截面的曲率、截面的刚度 B 都不相同。如图5(a)所示,两点加载的简支梁,靠近支座截面的弯矩 M 较小,塑性变形小且无裂缝,相应截面刚度较大。AB为纯弯段,各截面弯矩相等,但截面刚度因有无裂缝而不同。研究构件的刚度及挠度,要涉及梁整个跨度各截面的应力及应变的综合效应。简化计算取同一符号弯矩区段内的最大弯矩 M_{\max} 处的截面刚度(即最小刚度 B_{\min})计算构件的挠度,如图5(b)所示。

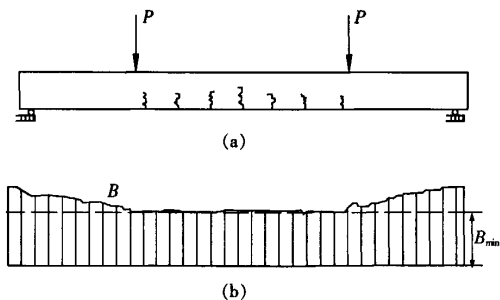


图5 两点加载钢筋混凝土梁和刚度分布示意图

实际计算将构件简化为等刚度梁,采用最小刚度 B_{\min} 。计算构件挠度,曲率为:

$$\phi_c = \frac{1}{r_c} = \frac{M_s}{B_{\min}} \quad (7)$$

得到 CFRP 加固梁在疲劳荷载作用下的刚度退化公式(5)后,承受疲劳荷载的加固梁的截面刚度可由下式计算(95%保证概率):

$$B^f = \theta' B_s = (1.407\ 6 - 0.095\ 2lgN) B_s \tag{8}$$

式中 B_s 为加固梁的短期刚度,由下式计算:

$$B_s = \frac{E_s A_s' h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + \frac{\partial_E \rho}{\zeta}} = \frac{E_s A_s' h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}}$$
$$= \frac{E_s A_s' h_0^2}{1.15(1.1 - \frac{0.65f_{tk}}{\rho_{te}\sigma_{sk}}) + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f}} \tag{9}$$

式中 A_s' ——受拉区主筋总面积,CFRP 面积按刚度等效原则进行换算,即 $A_s' = A_s + A_{CF} = A_s +$

$\frac{E_F}{E_s} A_{CF}$;
 h_0 ——截面有效高度;
 E_s ——钢筋弹性模量;
 ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数;

f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值;
 ρ_{te} ——按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向钢筋配筋率,即 $\rho_{te} = A_s'/(0.5bh')$, h' 为加固后截面高度;
 σ_{sk} ——按荷载效应的标准组合计算的钢筋混凝土梁纵向受拉钢筋的应力,即 $\sigma_{sk} = M_k/0.87h_0A_s'$;
 α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值: $\alpha_E = E_s/E_c$;
 ρ ——纵向受拉钢筋配筋率,即 $\rho = A_s'/(bh_0)$;
 γ_f' ——受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积的比值,对于矩形截面 $\gamma_f' = 0$ 。

其余符号含义同《混凝土结构设计规范》^[7] 规定的符号含义。
本次试验的 5 根疲劳试验梁,按式(9)所计算刚度与试验值的比较列于表 5,由表 5 可见,根据式(9)所得计算结果与试验结果符合良好。

表 5 疲劳荷载作用下刚度计算值与试验值的比较

梁号	循环次数/万次						
	2	5	10	50	100	200	
JZP	试验值	0.938	0.921	0.908	0.896	0.848	0.794
	计算值	0.975	0.934	0.906	0.845	0.821	0.798
JGP-1	试验值	0.955	0.936	0.919	0.886	0.859	0.838
	计算值	0.999	0.957	0.928	0.865	0.841	0.817
JGP-2	试验值	0.929	0.924	0.907	0.878	0.85	0.816
	计算值	0.999	0.957	0.928	0.865	0.841	0.817
JGP-3	试验值	1.431	1.422	1.413	1.177	1.092	0.997
	计算值	1.409	1.35	1.308	1.22	1.186	1.045
JGP-4	试验值	1.465	1.432	1.424	1.281	1.187	1.039
	计算值	1.409	1.35	1.308	1.22	1.186	1.045

4 结论

- (1) CFRP 加固混凝土梁在疲劳荷载作用下,正截面平均应变仍符合平截面假定。压区混凝土的应变分布可采用三角形分布。
- (2) 加固梁在疲劳荷载作用下刚度降低,裂缝宽度增大。与普通混凝土梁比较,加固梁裂缝发展在初期的发展速度明显大于普通混凝土梁,但在裂缝进入稳定发展阶段后,其裂缝发展的速度小于普通混凝土梁。
- (3) 试验统计和采用换算截面法得到的 CFRP 加固钢筋混凝土梁的疲劳刚度计算公式,其结果与试验数据吻合良好。

参考文献:

[1] 胡新舒. 高强钢绞线加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能的

试验研究[D]. 北京:清华大学,2004.

[2] 陈永秀. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁动静载性能实验研究[D]. 上海:同济大学,2003.

[3] Kumar S V, GangaRao H V S. Fatigue response of concrete desks reinforced with FRP rebar[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124 (1) : 11 - 16.


[4] P. J. Heffernan , M. A. Erki. Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates[D]. ASCE, 2004, 268(8) : 132 - 140.

[5] 胡新舒. 高强钢绞线加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能的试验研究[D]. 北京:清华大学,2004.

[6] 太原工学院土木系. 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳强度验算方法的研究[C]//钢筋混凝土结构研究报告选集 2. 北京:中国建筑工业出版社,1981:170 - 182.

[7] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范[S].

(编辑 赵立兰)

作者: [汝海峰](#), [张茜](#), [梁春祥](#), [RU Hai-feng](#), [ZHANG Qian](#), [LIANG Chun-xiang](#)
作者单位: [汝海峰, 梁春祥, RU Hai-feng, LIANG Chun-xiang\(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都, 610000\)](#), [张茜, ZHANG Qian\(四川建筑职业技术学院, 四川德阳, 618000\)](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2008(6)
被引用次数: 2次

参考文献(7条)

1. [胡新舒](#) 高强钢绞线加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能的试验研究 2004
2. [陈永秀](#) 碳纤维布加固钢筋混凝土梁动静载性能实验研究[学位论文] 2003
3. [Kumar S V;GangaRao H V S](#) Fatigue response of concrete desks reinforced with FRP rebar[外文期刊] 1998(01)
4. [P. J. Heffernan;M. A. Erki](#) Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates[外文期刊] 2004(08)
5. [胡新舒](#) 高强钢绞线加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能的试验研究 2004
6. [太原工学院土木系](#) 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳强度验算方法的研究 1981
7. GB 50010-2002. 混凝土结构设计规范

本文读者也读过(10条)

1. [张兴虎](#), [林明强](#), [姜维山](#), [俞磊](#) 疲劳荷载作用下外包碳素纤维布钢筋混凝土梁的试验研究[会议论文]-2006
2. [汝海峰](#), [刘炎海](#), [Ru Haifeng](#), [Liu Yanhai](#) CFRP加固钢筋混凝土梁的正截面疲劳验算方法的试验研究[期刊论文]-[建筑施工](#)2007, 29(1)
3. [陈永秀](#), [陆洲导](#), [CHEN Yongxiu](#), [LU Zhoudao](#) 碳纤维布加固钢筋混凝土梁正截面的疲劳性能试验研究[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#)2006, 32(6)
4. [张同猛](#), [刘炎海](#), [邹力](#), [汝海峰](#), [ZHANG Tong-meng](#), [LIU Yan-hai](#), [ZOU Li](#), [RU Hai-feng](#) CFRP加固钢筋混凝土梁的正截面疲劳性能的理论分析[期刊论文]-[兰州交通大学学报](#)2009, 28(3)
5. [张慎伟](#), [张其林](#), [王有志](#), [ZHANG Shen-wei](#), [ZHANG Qi-lin](#), [WANG You-zhi](#) 芳纶纤维加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能试验研究[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#)2005(6)
6. [赵琛](#), [黄培彦](#), [ZHAO Chen](#), [HUANG Pei-yan](#) 疲劳荷载下碳纤维薄板加固RC梁变形计算[期刊论文]-[公路交通科技](#) 2008, 25(1)
7. [石启印](#), [李爱群](#), [惠卓](#), [Shi Qiyin](#), [Li Aiqun](#), [Hui Zhuo](#) 碳纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能试验[期刊论文]-[东南大学学报\(英文版\)](#) 2007, 23(4)
8. [李子奇](#), [薛兆锋](#), [樊燕燕](#), [Li Ziqi](#), [Xue Zhaofeng](#), [Fan Yanyan](#) 碳纤维布加固钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[期刊论文]-[公路交通技术](#)2006(6)
9. [邓宗才](#), [DENG Zong-cai](#) CFRP加固RC梁的抗疲劳与防腐蚀效用[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#)2008(6)
10. [潘芬芬](#), [武汉长江建筑工程技术有限公司\(武汉\)](#), [徐德新](#), [武汉长江建筑工程技术有限公司\(武汉\)](#), [刘小明](#), [武汉长江建筑工程技术有限公司\(武汉\)](#) 碳纤维复合材料疲劳试验研究[会议论文]-2002

引证文献(2条)

1. [江德保](#), [顾晓静](#) CFRP加固预应力砼梁在低周反复荷载作用下的试验研究[期刊论文]-[工程抗震与加固改造](#) 2011(2)

2. [张娟秀](#), [叶见曙](#), [姚伟发](#) [冻融循环作用下CFRP加固混凝土梁疲劳性能试验研究](#)[期刊论文]-[东南大学学报（自然科学版）](#) 2010(5)

引用本文格式: [汝海峰](#), [张茜](#), [梁春祥](#), [RU Hai-feng](#), [ZHANG Qian](#), [LIANG Chun-xiang](#) [CFRP加固钢筋混凝土梁疲劳刚度的试验研究](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008(6)