

文章编号: 1000-5013(2010)04-0443-05

玄武岩纤维布加固混凝土梁的 抗弯疲劳性能试验

杨勇新¹, 陈绪军^{1,2}, 邢建英¹, 汪健根¹, 胡玲¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 九江学院 土木工程与城市建设学院, 江西 九江 332005)

摘要: 通过 2 根玄武岩纤维布加固的钢筋混凝土梁和 1 根普通钢筋混凝土梁的弯曲疲劳性能试验研究, 分析玄武岩纤维布对加固梁抗弯疲劳性能的影响. 试验结果表明, 采用玄武岩纤维布进行加固后, 梁的抗疲劳性能得到极大改善: 粘贴 1 层和 2 层玄武岩纤维布后, 钢筋混凝土梁的疲劳寿命分别提高了 66% 和 235%, 50 万次时, 其疲劳变形分别减小了 26.04% 和 35.40%. 在纤维布与混凝土粘结可靠的情况下, 若梁的配筋率不超过 2.5%, 加固梁发生钢筋疲劳断裂破坏的可能性极大.

关键词: 玄武岩纤维增强复合材料; 钢筋混凝土梁; 疲劳性能; 抗弯; 断裂破坏

中图分类号: TU 377.9⁺ 40.2

文献标识码: A

目前, 国内外关于纤维布加固钢筋混凝土结构的试验和理论研究, 主要集中在纤维布加固混凝土梁的静力性能方面. 有关纤维布加固钢筋混凝土梁的疲劳性能研究较少, 并且主要是针对碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维开展的^[1-3]. 关于玄武岩纤维布加固混凝土结构的试验研究几乎是空白的^[4-6], 更未见玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁的疲劳性能试验的相关报道. 玄武岩纤维增强复合材料(BFRP), 是我国自主开发的一种无机能自然降解的新型环保复合材料, 它具有良好的热绝缘性、隔声性、抗腐蚀性、无毒性、不燃性和力学性能^[7-8]. 研究表明^[8], 由连续玄武岩纤维制成的细棒, 在长期(超过 9 a)的交变载荷作用下几乎没有疲劳破坏的痕迹, 可见其抗疲劳性能相当优越. 鉴于此, 本文采用玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁进行疲劳试验, 探讨玄武岩纤维布对加固梁疲劳性能的影响.

1 试验部分

1.1 试件设计

试验梁均为矩形截面简支梁, 共 3 根, 其中未加固梁 1 根, 加固梁 2 根. 每根梁的设计尺寸($b \times h \times L$)均为 100 mm \times 200 mm \times 1 300 mm, 计算跨度 1 200 mm, 剪跨为 200 mm. 混凝土设计强度等级为 C40, 实测立方体抗压强度 56.52 MPa. 梁中受拉钢筋为(HPB235) 2 Φ 8 mm, 设计配筋率为 0.612%, 架立筋为 2 Φ 8 mm, 箍筋为 Φ 8@100/200 mm, 钢筋实测屈服强度为 507.45 MPa, 极限强度为 597.00 MPa, 弹性模量为 206.67 GPa.

1.2 加固方案

加固梁的纵向纤维布均粘贴在梁的受拉面, 宽为 80 mm; U 型箍的宽为 120 mm、长为 450 mm, 设置在纵向纤维布的两端, 各一道. 纤维布的实测力学性能指标: 计算厚度 t_f 为 0.111 mm, 抗拉强度 f_t 为 1 859 MPa, 弹性模量 E_f 为 97.8 GPa, 极限伸长率为 1.9%. 梁编号、具体加固方案, 如表 1 所示. 表 1 中: L 为纤维布长度; f_c 为混凝土强度.

收稿日期: 2009-07-25

通信作者: 杨勇新(1963-), 男, 教授级高级工程师, 博士后, 主要从事结构基本理论及高性能复合材料的研究. E-mail: yangyongxin@tsinghua.org.cn

基金项目: 国家科技攻关(国际合作)项目(2005DFBA0002)

1.3 加载制度与测量内容

试验梁采用工字型分配梁进行两点对称加载,加载装置如图 1 所示,加载制度如表 2 所示. 疲劳荷载上限(P_{\max})和疲劳荷载下限(P_{\min})按照 GB 50010-2002《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)及静载试验梁极限荷载 P_u 值^[4]确定. 试验加载程序包括静载试验、疲劳试验两个阶段.

表 1 试验梁加固方案

Tab. 1 Strengthening scheme of beams

试件编号	f_c /MPa	加固方式	L /mm	U 型箍设置
P0	56.52	—	—	—
PB1	56.52	底贴 1 层	1 100	有
PB2	56.52	底贴 2 层	1 100	有



图 1 加载装置

Fig. 1 Loading device

1.3.1 静载试验阶段 在正式试验前先预加载,预加载值不超试验梁疲劳荷载上限的 30%,以消除加载系统各部分的间隙,并检查加载系统及数据采集系统是否正常.预载后,进行静载加载,量测钢筋、纤维布、混凝土的应变和梁的挠度,相关测点布置如图 2 所示.

1.3.2 疲劳试验阶段 初次静载后,将加载频率调至 5 Hz;然后,将荷载加至疲劳荷载下限,调节脉动量增按钮,将荷载加至疲劳荷载上限,使梁在频率 5 Hz 的正弦波下进行疲劳试验.表 2 为具体加载制

表 2 疲劳试验加载制度

Tab. 2 Loading system of fatigue test

n /万次	P_{\max} /kN	P_{\min} /kN
≤ 200	60	18
≤ 250	75	18
≤ 280	80	18

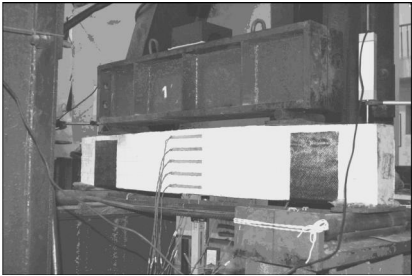


图 2 梁测点布置

Fig. 2 Test positions of beams

度.当疲劳循环次数 n 达到预定次数时,停机卸载至零,观测裂缝,量测钢筋、纤维布、混凝土的残余应变和梁的残余挠度;然后,再加静载至疲劳荷载上限,加载期间量测钢筋、纤维布、混凝土的应变和梁的挠度.当疲劳循环次数 n 达到 200 万次而梁还未破坏时,改变疲劳荷载上限值,重复以上试验步骤.

2 试验现象

试验梁初次静力试验荷载加至疲劳荷载上限 60 kN 后,最大裂缝均出现在梁加载点附近;疲劳荷载循环 2 万次后,各梁裂缝宽度均剧增,且新出现裂缝明显有所增加.10 万次(未加固梁 30 万次)以后,裂缝产生,发展趋于稳定,新裂缝基本上不再产生,加固梁的裂缝与静载试验加固梁^[4]一样,呈现“根须状”,且数量多,间距密,宽度小.

当疲劳荷载循环在 78.335 万次时,未加固梁加载点下的一纵筋突然断裂,梁破坏前没有任何明显征兆;加固梁与未加固梁一样,破坏亦无明显征兆而突然发生,发出巨大爆裂声,且纵向纤维布均剥离、断裂.其中:PB1 梁两纵筋在跨中处突然断裂;PB2 梁在加载点内侧处两纵筋突然断裂.

3 试验结果及分析

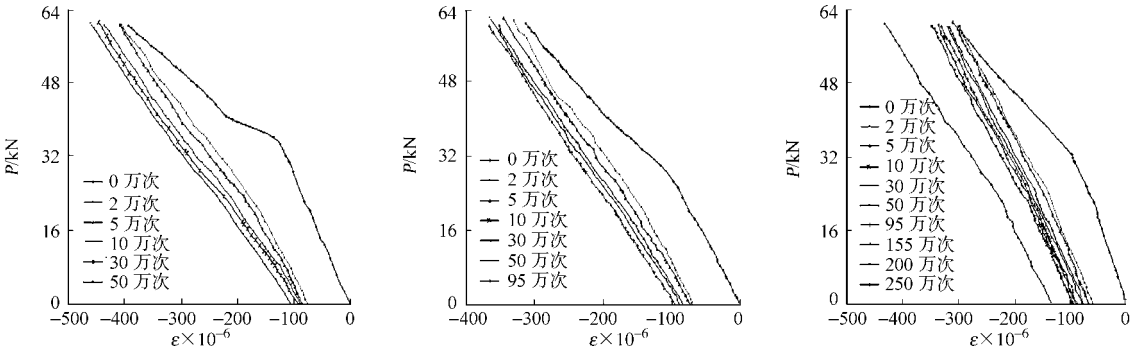
3.1 混凝土应变分析

试验梁在特定循环次数后静载下测得的混凝土受压区应变,如图 3 所示.由图 3(a)~图 3(c)可见,随着疲劳荷载循环次数的增加,试验梁混凝土应变亦增加;无论是加固梁还是非加固梁,其混凝土应变在疲劳荷载作用后均呈线性分布.这说明初次静载后,试验梁的损伤趋于缓和.

由试验结果可知,疲劳荷载循环 50 万次后,在 60 kN 荷载作用下,粘贴 1 层玄武岩纤维布的加固梁混凝土压应变比未加固梁减小了 22.6%,粘贴 2 层玄武岩纤维布的加固梁混凝土压应变比未加固梁减

小了 30.6%。说明, 粘贴玄武岩纤维布能够很好地抑制混凝土裂缝的开展, 改善混凝土的疲劳性能。

从 50 万次时各梁混凝土应变曲线的斜率可知, 在相同次数的疲劳荷载作用后, 未加固梁混凝土损伤最大, 而加固梁混凝土损伤则随纤维布粘贴层数的增加而减小。这表明, 粘贴玄武岩纤维布对延缓混凝土的损伤有积极的作用。



(a) P0 梁[KG10] (b) PB1 梁[KG10] (c) PB2 梁

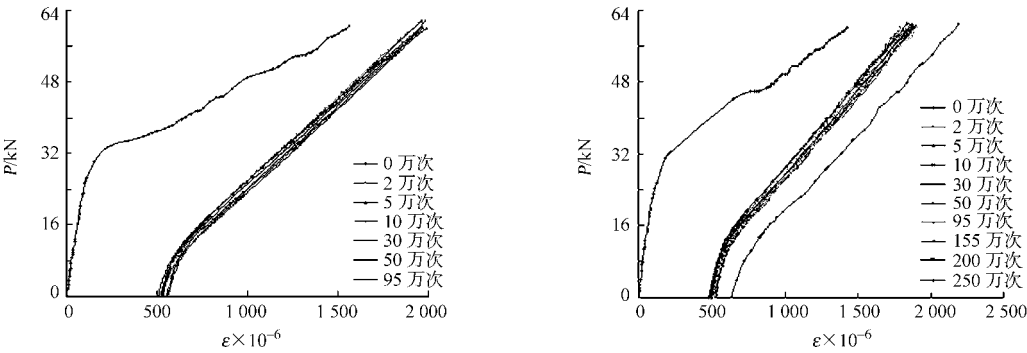
图 3 特定循环次数时荷载-混凝土应变曲线

Fig. 3 Load-concrete strain curves for specific cycles

3.2 钢筋应变分析

钢筋应变随疲劳荷载循环次数的变化关系, 如图 4 所示。由图 4(a) ~ (b) 可知, 加固梁钢筋应变随疲劳荷载循环次数的增加而增长。试验开始时, 纵筋应变曲线变化较显著, 残余应变发展很快; 随着疲劳荷载重循环次数的增加, 残余应变趋于稳定, 曲线靠得较近且接近平行。PB1(PB2) 梁在疲劳荷载作用 2 万次之后, 95(250) 万次之前, 钢筋应变发展缓慢, 而 200 万次之后, 其应变剧增, 这表明疲劳荷载上限的提高, 对钢筋疲劳性能的影响十分显著。

从 PB1, PB2 梁的 5 万次和 95 万次的应变曲线可知, 经过相同次数疲劳荷载作用后, 粘贴 2 层玄武岩纤维布的加固梁钢筋应变, 比粘贴 1 层玄武岩纤维布的加固梁钢筋应变平均减少了 5.6%。由此可见, 要达到相同的钢筋应变, 粘贴 2 层玄武岩纤维布的加固梁能够承受的疲劳荷载次数大于粘贴 1 层玄武岩纤维布的加固梁能够承受的疲劳荷载次数。



(a) PB1 梁[KG20] (b) PB2 梁

图 4 特定循环次数时荷载-钢筋应变曲线

Fig. 4 Load-steel bar strain curves for specific cycles

3.3 梁挠度分析

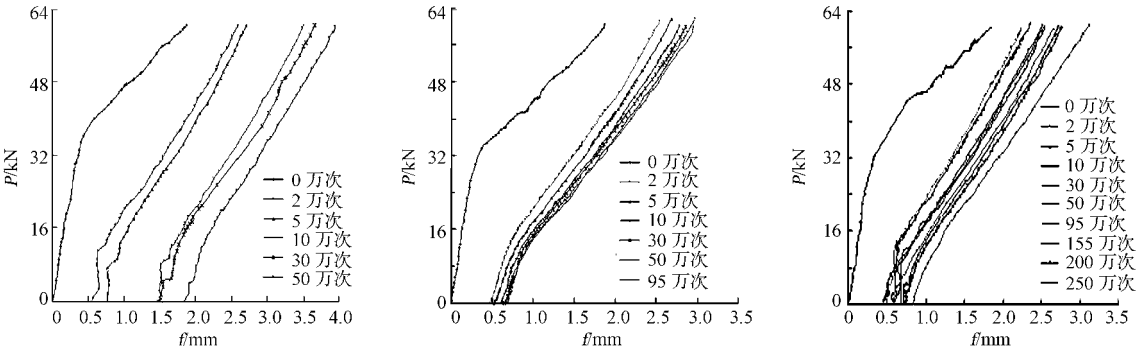
不同疲劳次数下试验梁的荷载-挠度曲线表明, 在疲劳初期, 试件梁的跨中挠度(f) 有较大的增加, 曲线变化较显著, 残余挠度发展很快。随着荷载循环次数的增加, 加固梁的挠度较未加固梁更趋于稳定, 残余挠度增加非常缓慢, 曲线基本上为一簇平行线。

表明, 加固梁的耗能效果更理想, 从而减缓了内部损伤的积累。这是因为加固梁的弹性性能更好, 其较未加固梁裂缝多而密, 外力对其做功所积蓄的变形能以卸载时可恢复的弹性应变能耗散, 以及被更多的裂缝和微裂纹“吸收”, 并转化为表面能而释放出来。

相同循环次数下各梁的荷载-跨中挠度曲线比较, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 经过相同次数的疲

劳荷载作用后, 未加固梁的挠度最大, 粘贴 1 层玄武岩纤维布的加固梁的挠度大于粘贴 2 层玄武岩纤维布的加固梁的挠度, 并且随着荷载的增加, 未加固梁挠度的增长速率大于加固梁挠度的增长速率.

在经过疲劳荷载循环 50 万次, 以及 60 kN 的荷载作用下, PB1、PB2 梁的挠度比 P0 梁挠度分别减小了 26. 04%, 35. 40%. 由此可见, 粘贴 2 层玄武岩纤维布比粘贴 1 层玄武岩纤维布更能改善钢筋混凝土梁的抗疲劳性能. 因此, 对工程上变形有很高要求且承受动载的结构来说, 粘贴纤维布加固可以显著减小结构的变形.



(a) P0 梁[KG10] (b) PB1 梁[KG10] (c) PB2 梁

图 5 特定循环次数时梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 5 Load-mid span deflection curves for specific cycles

试验梁经过疲劳荷载循环 50 万次的试验结果, 如表 3 所示. 表 3 中: f 为挠度; N 为疲劳寿命. 从表 3 可知, 粘贴玄武岩纤维布能极大地提高钢筋混凝土梁的疲劳寿命, 因此, 用玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁完全能满足正常使用状态下结构耐疲劳性能要求. 由于玄武岩纤维布重量轻、耐腐蚀、抗疲劳等良好的物理力学性能, 使得其用于承受动荷载的结构加固具有很大优势.

表 3 疲劳荷载循环 50 万次的试验结果

Tab. 3 Results for 500 000 fatigue loading cycles

试件编号	P_{\max}/kN	$\varepsilon\times 10^{-6}$	f/mm	$N/\text{万次}$	$\delta_s/\%$	破坏形态
P0	60	—	3. 942	78. 335	—	加载点内侧纵筋断裂
PB1	60	1 946	2. 744	130. 213	66. 23	加载点内侧纵筋断裂
PB2	80	1 867	2. 545	263. 035	235. 78	跨中纵筋断裂

4 试验梁疲劳寿命分析

国内外的研究表明, 影响钢筋混凝土梁疲劳寿命的主要因素是材料的性能和应力幅度. 一般而言, 材料的极限强度越高, 外加的应力水平越低, 试件的疲劳寿命就越长; 反之, 疲劳寿命就越短. 文[9]对国内外 178 根钢筋混凝土梁的疲劳试验结果进行分析, 结果表明, 只有 5 根配筋率满足 $\rho>\rho_{\max}$ 的试验梁发生了混凝土的压碎破坏. 这表明, 绝大多数的钢筋混凝土受弯构件的疲劳破坏是由纵筋的疲劳断裂所控制, 只有极少数配筋率很高, 截面形状特殊(如倒 T 形)的构件, 才会发生受压区混凝土疲劳压碎破坏^[10]. 最大配筋率的计算式为

$$\rho_{\max}=0.5\xi_yf_{c,t}^f/f_y^f.$$

式中: ξ_y 为相对界限受压区高度, $f_{c,t}^f$ 为混凝土弯曲受压疲劳强度, f_y^f 为受拉钢筋疲劳抗拉强度. 由此可知, ρ_{\max} 随着混凝土强度等级、疲劳应力比的提高而提高, 随着钢筋强度等级的降低而提高.

取疲劳应力比为 $0.1\leq\rho<0.2$ 、混凝土强度等级为 C30、钢筋为 HRB400 级, 此时, $\rho_{\max}=2.966\%$. 根据《规范》中第 11. 3. 1 条规定, 梁端纵向受拉钢筋的配筋率不应大于 2. 5%. 综上所述, 在配筋率不大于 2. 5% 时, 梁发生的将是钢筋的疲劳性断裂.

对于玄武岩纤维布加固的钢筋混凝土梁, 在配筋率相同、纤维布粘结可靠的情况下, 若将纤维布换算成钢筋, 则配筋率将增大, 钢筋的疲劳应力将减小, 寿命也必然延长. 从表 3 可以看出, 粘贴玄武岩纤维布对试验梁的疲劳寿命有显著影响.

5 结论

- (1) 承受疲劳荷载的钢筋混凝土梁采用玄武岩纤维布加固后, 其疲劳抗裂性能得到了较大的改善, 裂缝与静载加固梁相似, 亦呈现“根须状”, 数量多, 间距密, 宽度小. 这对于提高腐蚀环境下混凝土结构的疲劳性能具有十分重要的意义.
- (2) 粘贴 1 层和 2 层玄武岩纤维布后, 钢筋混凝土梁的疲劳寿命分别提高了 66% 和 235%, 在循环加载 50 万次时, 其疲劳变形分别减小了 26.04% 和 35.40%.
- (3) 粘贴纤维布对改善钢筋混凝土梁的抗疲劳性具有十分重要的意义, 采用玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁完全能满足正常使用状态下结构的耐疲劳性能要求.
- (4) 在纤维布与混凝土粘结可靠的情况下, 若梁的配筋率不超过 2.5%, 加固梁发生钢筋疲劳断裂破坏的可能性极大.

参考文献:

[1] HEFFERNAN P J, ERKIM A. Fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced plastic laminates[J]. J Compos Constr, 2004, 4(3): 132-140

[2] 张慎伟, 王有志, 张其林. 芳纶纤维布层数对加固梁疲劳性的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 302-306

[3] 曾宪桃. 粘贴玻璃钢板加固混凝土梁动静载行为研究及其徐变特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 1998

[4] 陈绪军, 杨勇新, 邢建英, 等. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯试验研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2009, 30(2): 61-65.

[5] 龚斌文, 赵晶晶, 金文鑫. 玄武岩与碳纤维片材加固混凝土双向板的性能比较[J]. 建筑施工, 2007, 29(6): 440-442

[6] 吴刚, 魏洋, 吴智深, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 8-10

[7] 杨勇新, 杨萌, 赵颜, 等. 玄武岩纤维布的耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 11-13.

[8] 谢尔盖, 李中郢. 玄武岩纤维材料的应用前景[J]. 纤维布料, 2003, 20(3): 17-20.

[9] 田种德, 李慧民, 顾传霖. 钢筋混凝土受弯构件正截面疲劳强度验算方法的研究[C] // 中国建筑科学研究院. 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: 235-254.

[10] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003

Study on Fatigue Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with BFRP Sheet

YANG Yong-xin¹, CHEN Xu-jun^{1,2}, XING Jian-ying¹,
WANG Jian-gen¹, HU Ling¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. College of Civil Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

Abstract: The bending fatigue test on one ordinary reinforced concrete beam and two reinforced concrete beams strengthened with basalt fiber polymer sheets(BFRP) is carried out, and the flexural fatigue performance of the reinforced concrete beams strengthened with BFRP is analyzed. The experimental results show that BFRP improves greatly the anti-fatigue performance of the beam. Pasting one layer or two layers of BFRP, the fatigue life of reinforced concrete beams increases by 66% and 235%; the fatigue deformation decreases by 26.04% and 35.40% for 500 thousand cycles. On condition of reliable bound between BFRP and concrete, if, the fatigue fracture of steel bars will occur greatly possibly for the reinforcement ratio less than 2.5%.

Keywords: basalt fiber polymer sheets; reinforced concrete beam; fatigue behavior; bending; fracture

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)