

文章编号:1671-6833(2009)02-0061-05

## 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁抗弯试验研究

陈绪军, 杨勇新, 邢建英, 胡 玲, 汪健根

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘 要:** 为对BFRP加固梁提供试验数据和理论依据,进行了8根玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)加固梁和3根对比梁的抗弯性能试验研究,分析了BFRP粘贴层数、混凝土强度等级、剪跨等对加固梁的抗弯性能的影响。试验结果表明,梁的抗弯承载力和抗弯刚度随BFRP粘贴层数、混凝土强度等级增加和剪跨的减小而提高,但不成线性比例;随粘贴层数增加,U型箍加宽或增加可有效防止端部的早期破坏。根据试验分析,提出了梁抗弯承载力计算公式,计算结果和试验数据吻合较好,且优于《规程》(CECS 146:2003)公式计算值。

**关键词:** 玄武岩纤维;钢筋混凝土梁;抗弯性能

**中图分类号:** TU 528

**文献标识码:** A

### 0 引言

玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)是我国自主开发的一种能自然降解的新型环保复合材料。其具有良好的热绝缘性、隔声性、抗腐蚀性、无毒性和不燃性以及良好的力学性能<sup>[1-2]</sup>。在湿热老化环境下,玄武岩纤维增强复合材料抗拉强度的稳定性明显优于玻璃纤维增强复合材料(GFRP)和芳纶纤维增强复合材料(AFRP),延伸率也更好<sup>[1]</sup>;由连续玄武岩纤维制成的细棒在长期(超过9年)的交变载荷作用下也几乎没有疲劳破坏的痕迹<sup>[2]</sup>。由于玄武岩纤维布价格低廉,物理、化学和力学性能良好,使其在土木工程中的应用前景非常广阔。但目前国内针对玄武岩纤维布加固构件的相关研究还只涉及板、柱<sup>[3-4]</sup>,且极少,国外还未见到相关报道。笔者通过对玄武岩纤维布加固梁的试验研究,分析了玄武岩纤维布对钢筋混凝土梁受弯性能的影响,以期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 试件设计及加固方案

本次试验梁共11根,设计尺寸均为 $b \times h \times L$   
 $= 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1\,300 \text{ mm}$ ,跨度 $1\,200 \text{ mm}$ 。

第一组I系列梁共有9根,剪跨均为 $400 \text{ mm}$ ,混凝土设计强度等级分为三级:C20、C30、C40,梁中受拉钢筋为 $2\Phi 8$ ,设计配筋率为 $0.612\%$ ,架立筋为 $2\Phi 6$ ,箍筋为 $\Phi 6@100/200$ ;第二组J系列梁共有2根,剪跨均为 $200 \text{ mm}$ ,混凝土设计强度等级为C40,梁中受拉钢筋为 $2\Phi 8$ ,设计配筋率为 $0.612\%$ ,架立筋为 $2\Phi 8$ ,箍筋为 $\Phi 8@100/200$ 。

所有加固梁的纵向玄武岩纤维布均粘贴在梁受拉面,宽 $80 \text{ mm}$ ,长 $1\,100 \text{ mm}$ 。在纵向纤维布的两端各设置一道宽 $120 \text{ mm}$ 、长 $450 \text{ mm}$ 的U型箍。加固方案见表1。

#### 1.2 材料性能

各强度等级的混凝土实测立方体抗压强度见表1。其它材料的实测力学性能指标见表2和表3。

#### 1.3 加载方案及量测内容

试验梁均为简支,加载方式为两点加载,由分配梁来实现,纯弯段 $400 \text{ mm}$ (J系列梁为 $800 \text{ mm}$ ),采用分级加载制度,加载初期荷载按 $10\% p_u$ 逐级增加( $p_u$ 为极限荷载,按材料实测力学性能指标计算所得),临近开裂荷载时按 $5\% p_u$ 逐级增加;开裂后恢复到 $10\% p_u$ 逐级增加;当荷载加到 $90\% p_u$ 后,按 $5\% p_u$ 逐级增加。根据实验目的,本试验主要量测以下内容:跨中位置混凝土

收稿日期:2008-11-09;修订日期:2008-12-27

基金项目:国家科技攻关(国际合作)项目(2005DFBA0002)

作者简介:陈绪军(1979-),男,湖北黄石人,华侨大学硕士研究生,助教,主要从事结构加固与耐久性研究。通讯作者:杨勇新,男,教授级高级工程师,博士后。

应变、玄武岩纤维布应变、各级荷载下挠度及裂缝变化等。

表 1 试验梁加固方案

Tab.1 Strengthening scheme of beams				
试件 编号	砼强度 $f_{cu}/\text{MPa}$	纤维布 粘贴层数	纤维布长度 /mm	端部 锚固
L2-0	20.15	—	—	—
L2B1	20.15	一层	1 100	有
L2B2	20.15	二层	1 100	有
L2B3	20.15	三层	1 100	有
L3-0	44.24	—	—	—
L3B1	44.24	一层	1 100	有
L3B2	44.24	二层	1 100	有
L4-0	63.47	—	—	—
L4B1	63.47	一层	1 100	有
J0	56.62	—	—	—
JB1	56.62	一层	1 100	—

表 2 钢筋材料性能

Tab.2 Material behavior of stell bars				
试件 组别	钢筋直径 $d/\text{mm}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$	弹性模量 $E_s/\text{MPa}$
第一组	6	318.99	455.31	208.20
	8	340.79	456.82	207.40
第二组	8	507.45	597.00	206.67

表 3 玄武岩纤维增强复合材料性能

Tab.3 Material behavior of BFRP				
面密度 $g/\text{m}^2$	计算厚度 $t_f/\text{mm}$	抗拉强度 $f_f/\text{MPa}$	弹性模量 $E_f/\text{GPa}$	极限伸长率 /%
300	0.111	1 859.1	97.8	1.90

2 试验结果及分析

试验梁均加载至极限破坏状态,试验结果见表 4。

2.1 裂缝及破坏形态

试验中,所有试验梁均出现弯曲裂缝,裂缝多集中在纯弯段,剪跨区的裂缝开展较少。与未加固梁相比,加固梁的裂缝出现较晚、发展缓慢,但这种差别并不十分明显。加固梁裂缝的特点是数量较多、宽度较小、间距小于未加固梁,呈现“细而密”的根须状。这说明玄武岩纤维布对加固梁裂缝的开展起到了很好的制约作用。

加固梁均发生了混凝土压碎和纵向纤维布断裂或 U 型箍断裂的复合破坏。试验中,绝大部分加固梁的玄武岩纤维布被拉断,部分破坏表现为 U 型箍在倒圆角处断裂。这主要是由于加载点附近主裂缝过宽挠度过大导致梁底玄武岩纤维剥

离,U 型箍受力过大所致。

表 4 试验结果

Tab.4 Summary of test results				
试件 编号	极限荷载 /kN	提高幅度 /%	跨中挠度 /mm	破坏 形式
L2-0	36.27	—	16.25	1
L2B1	45.73	26.09	15.26	2+3
L2B2	59.03	62.75	18.28	2+3
L2B3	61.20	68.74	19.59	2+4
L3-0	44.07	—	33.70	2
L3B1	51.66	17.23	21.39	2+3
L3B2	65.17	47.88	17.55	2+4
L4-0	39.94	—	25.97	2
L4B1	53.07	32.88	23.10	2+3
J0	90.83	—	35.60	2
JB1	114.65	26.22	23.14	2+3

注:破坏形式 1 为裂缝过宽;2 为混凝土压碎;3 为纤维断裂;4 为 U 型箍断裂。

混凝土强度等级和本试验剪跨对加固梁的破坏形态影响不大,而 BFRP 粘贴层数达到两层或两层以上时,往往发生 U 型箍断裂而纵向纤维布不断裂。因此随着 BFRP 粘贴层数的增加,U 型箍亦应增加或加宽。

2.2 受弯承载力

从表 4 可以看出,剪跨的减小、混凝土强度的提高和 BFRP 粘贴层数的增加对加固梁极限承载力有同样的影响趋势,但以剪跨的影响最为显著。

加固梁极限承载力随混凝土强度等级的增加而逐渐提高,但粘贴 2 层玄武岩纤维布的梁极限荷载受混凝土强度等级的影响不如粘贴 1 层玄武岩纤维布的梁受影响明显。这可能是前者发生了 U 型箍断裂导致材料(混凝土、纵向纤维)强度没有得到充分发挥的缘故。

粘贴玄武岩纤维布后,试验梁的极限荷载有显著的提高,如 L2B1、L2B2、L2B3 相对于 L2-0,其极限荷载分别提高了 26.09%、62.75% 和 68.74%。这说明在试件破坏时,玄武岩纤维布发挥了很好的作用,起到了良好的加固效果,且构件受弯承载力随玄武岩纤维布用量的增加而提高,但受弯承载力的增加并非与玄武岩纤维布粘贴层数成正比,这说明当粘贴层数较多时,玄武岩纤维布强度的利用程度比粘贴层数较少时有所下降,尤其当粘贴层数超过 2 层时。

2.3 纤维应变

由图 1 可知, L3B1、L3B2 梁在开裂前,纤维应变很小,两者曲线几乎重合;梁开裂后,曲线均

转折,但 L3B1 梁的纤维应变值远大于 L3B2 梁。钢筋屈服后,纤维应变均激增,曲线再次转折且接近水平。由此可见,纤维布的加固补强作用在梁开裂后才能得到有效的发挥;粘贴层数多的梁其纤维应变速度随荷载的增加而变慢。

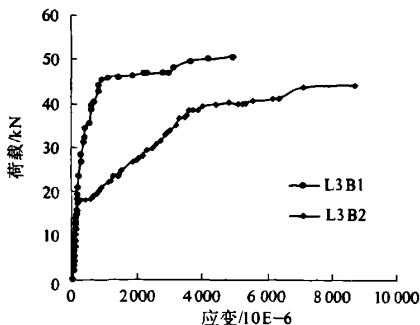


图1 L3梁BFRP荷载-应变曲线

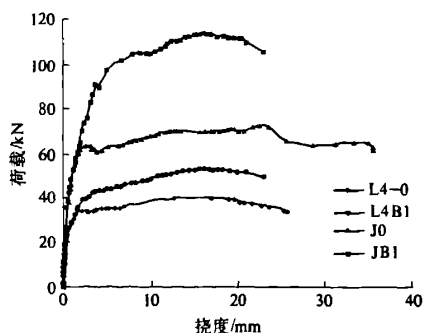
Fig.1 Load-strain curves of BFRP for the beams L3

#### 2.4 跨中挠度

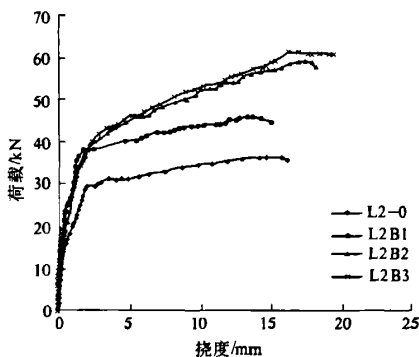
试验梁跨中挠度与荷载之间的关系曲线见图2。可以看出,各试件荷载挠度曲线具有相似的特征,在加载初期,同一系列的各梁挠度基本相同,加固梁略大于未加固梁,这表明在混凝土开裂前,加固梁刚度与未加固的刚度相差不大,此时纤维未发挥明显作用;随着荷载增加,受拉区混凝土开裂(尤其在受拉钢筋屈服)后,未加固梁的挠度急剧增长,而加固梁的挠度增长缓慢,且玄武岩纤维布粘贴层数越多,增长越缓慢。这是因为玄武岩纤维布厚度小,自身抗弯刚度不大,粘贴层数少,所以,在混凝土开裂前对梁刚度提高的贡献小;在梁开裂后,由于玄武岩纤维布能有效限制受拉区裂缝向上扩展和裂缝宽度的发展,使梁的刚度沿梁全长分布较为均匀,从而改善了梁的整体性,增强了梁的截面抗弯刚度。

图2(a)表明,在加载初期剪跨对梁挠度基本没什么影响,而随着荷载的增大梁开裂后,相同荷载作用下小剪跨的梁其挠度远远小于大剪跨的梁,这种影响比BFRP粘贴层数和混凝土强度影响更甚。但由图也可以看出,剪跨减小后,梁的延性有所降低,且破坏的脆性也增大。

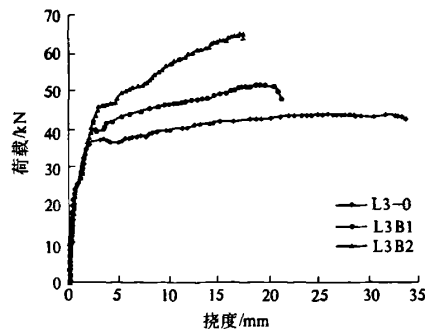
在钢筋屈服前,加固梁挠度增长随混凝土强度等级的提高而明显减小(见图2(d)),剪跨和BFRP粘贴层数的影响却不显著;而在钢筋屈服后,剪跨和粘贴层数对加固梁挠度增长的影响增大,混凝土强度的影响却有所减弱。这是因为钢筋屈服后,梁裂缝开展已较宽,中和轴明显上移,截面抗弯刚度有所减弱所致。



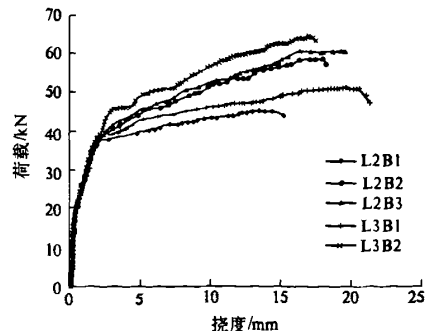
(a) L4、J系列梁荷载-挠度曲线



(b) L2系列梁荷载-挠度曲线



(c) L3系列梁荷载-挠度曲线



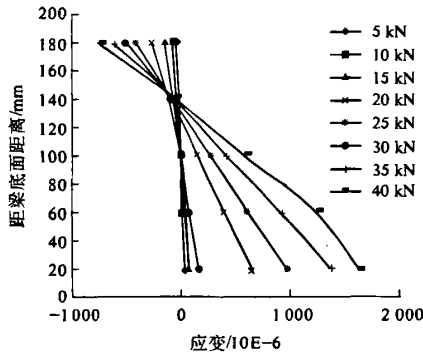
(d) L2、L3系列加固梁荷载-挠度曲线

图2 梁荷载-跨中挠度曲线

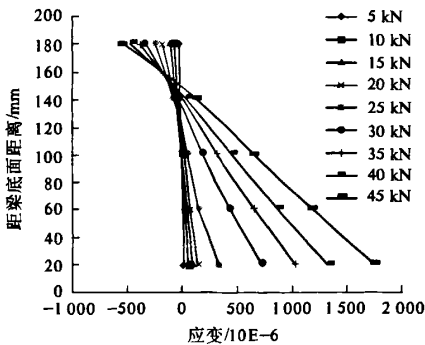
Fig.2 Load-middle deflection curves of the beams

2.5 跨中截面应变分布

图 3 给出了不同混凝土级别、不同 BFRP 粘贴层数的 L2B3、L3B2 梁跨中纯弯段截面各个测点在不同荷载条件下的平均应变分布。加固梁与普通梁一样,当荷载较小时,梁的中和轴在截面中部附近;而随着荷载的增大,中和轴逐步向受压区移动。可以看出:在一定标距范围内,在各受力阶段跨中截面上的平均应变分布是相当令人满意的,其它加固梁亦如此。因此,加固梁在计算和分析的过程中可以采用平截面假定。



(a) L2B3梁跨中截面应变分布



(b) L3B2梁跨中截面应变分布

图 3 梁 L2B3、L3B2 截面应变分布

Fig. 3 Strains distribution of the beams L2B3 and L3B2

3 极限承载力计算

基于上文 2.5 的分析及《规范》<sup>[5]</sup>的假定,在考虑纤维复合材料承载力修正系数的情况下,笔者推导了 BFRP 加固梁的正截面受弯承载力计算公式。

根据图 4 所示加固梁破坏时的截面应变和应力分布,由力的平衡条件,得混凝土受压区理论高度计算式。

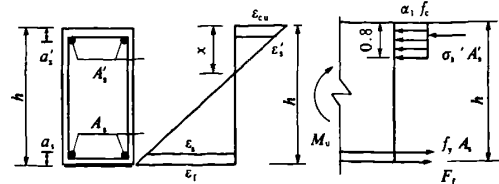


图 4 截面应变与应力分布

Fig. 4 Strain and stress distribution on specimen's section

$$0.8f_cbx^2 + (E'_s\varepsilon_{cu}A'_s + \eta E_s\varepsilon_{cu}A_s - f_sA_s)x - (E'_s\varepsilon_{cu}A'_sa' + \eta E_s\varepsilon_{cu}A_sh) = 0 \quad (1)$$

若  $\varepsilon'_s \geq \frac{f_y}{E_s}$ , 则按式(2)重新计算混凝土受压区理论高度:

$$0.8f_cbx^2 + (f'_yA'_s - f_sA_s + \eta E_s\varepsilon_{cu}A_s)x - \eta E_s\varepsilon_{cu}A_sh = 0 \quad (2)$$

不论  $\varepsilon'_s \leq \frac{f_y}{E_s}$  还是  $\varepsilon'_s \geq \frac{f_y}{E_s}$ , 加固梁抵抗弯矩均按式(3)计算:

$$M_u = f_yA_s(h_0 - a'_s) - 0.8f_cbx(0.4x - a'_s) + \eta E_s\varepsilon_{cu}A_s(h - a'_s) \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为纤维复合材料承载力修正系数;  $b_t = b$  时, 取  $\eta = 0.9$ ; 当  $b_t \leq b - 2R$  时,  $\eta = 1$ ; 其它各参数意义同《规范》<sup>[5]</sup>.  $R$  为构件转角处外表面的曲率半径;  $\varepsilon_{cu} = \min[0.01, \frac{h-x}{x}\varepsilon_{cu}]$ .

表 5 极限荷载的对比

Tab. 5 The comparison of ultimate loads

试件编号	试验值 /kN	本文计算值 /kN	规程计算值 /kN	本文误差 /%	规程误差 /%
L2B1	45.73	44.12	40.51	3.52	11.41
L2B2	59.03	52.93	54.12	10.33	8.32
L2B3	61.20	60.06	67.73	1.86	10.67
L3B1	51.66	51.21	40.51	0.87	21.58
L3B2	65.17	65.54	54.12	0.57	16.96
L4B1	53.07	54.17	40.51	2.07	23.67
JB1	114.65	119.03	88.79	3.82	22.56

按照本文和《规程》<sup>[6]</sup>给出的计算公式,对各加固梁的极限承载力进行了计算,计算值与试验值的对比见表 5。从表 5 可以看出,按本文公式所求得的计算值和试验值吻合较好,精度较高,而规程公式精度稍差。这是因为本试验梁受压区高度  $x$  均小于  $2a'_s$ , 而《规程》公式对于受压区高度不满足“ $\xi_b h_0 > x > \xi_{cu} h$ ”条件的受弯构件采用近似公式计算。

#### 4 结论

(1)使用玄武岩纤维布补强加固钢筋混凝土梁的方法是有效的.梁受拉面粘贴玄武岩纤维布可以有效限制裂缝的延伸和发展,改善裂缝的分布,从而刚度有一定程度的提高,特别是屈服后刚度有明显提高,且提高的幅度随着碳纤维层数的增加而增加,但延性有一定程度降低.

(2)粘贴玄武岩纤维布后,梁的受弯承载力(屈服荷载、极限荷载)明显提高,其中极限荷载的提高更为显著.梁受弯承载力随着纤维加固层数的增加而增大,但不成线性比例.

(3)在支座端部设置U型箍的锚固构造方式是合理有效的,且对加固效果有很大影响,特别是当粘贴层数增加时,U型箍亦应加宽或增加,否则,在玄武岩纤维尚未充分发挥作用前,可能发生U型箍断裂的早期破坏.

(4)加固梁在各受力阶段截面上的应变分布较好的符合平截面假定,因此,在进行正截面承载

力计算时,可以应用该假定.

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢尔盖,李中鄂.玄武岩纤维材料的应用前景[J].纤维布料,2003(3):17-20.
- [3] 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,2007,2(6):440-442.
- [4] 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.
- [5] 中华人民共和国国家标准. GB 50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [6] 中国工程建设标准化协会标准. CECS 146:2003 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程(2007年版)[S]. 北京:中国计划出版社.

### Experimental Study on Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Basalt Fiber Sheet

CHEN Xu-jun, YANG Yong-xin, XING Jian-ying, HU Ling, WANG Jian-gen

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021 Quanzhou, China)

**Abstract:** In order to provide test data and theoretical basis for strengthening beams with basalt fiber reinforced polymer, bending tests for eight beams strengthened with BFRP and three contrast beams were made in the paper. The influences of BFRP layers, concrete strength and shear span on bending performance of strengthened beams were analyzed. Finally, the test results indicated that the bearing capacity and bending rigidity of beams increase with the increase of BFRP layers, concrete strength and the reduction of shear span, but in a nonlinear ratio. With the increase of BFRP layers, the U-hoop width increase can effectively prevent the early damage of the end. According to the analysis of the test, the bearing capacity formula of beam is proposed, the calculated result agrees with the experimental data well, and is superior to the calculated result of specification(CECS 146:2003).

**Key words:** basalt fiber; reinforced concrete beam; flexural performance