

# 玄武岩纤维与碳纤维加固连续梁抗弯试验研究

欧阳利军<sup>1,2</sup>, 丁 斌<sup>3</sup>, 陆洲导<sup>2</sup>, 余江滔<sup>2</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 温州职业技术学院 建筑工程系, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 为分析玄武岩纤维布与碳纤维布加固混凝土 T 形截面连续梁的抗弯性能和破坏模式, 对 7 根由两种纤维加固的 T 形截面连续梁和 1 根对比梁进行了抗弯试验。试验设计考虑了混凝土连续梁负弯矩区纤维布绕过柱粘贴的情况。试验结果表明, 同等工况下, 玄武岩纤维布对连续梁的抗弯承载力提高程度较小, 但玄武岩纤维布加固梁具有更好的延性。建议国产玄武岩纤维布加固混凝土受弯构件的允许拉应变, 对于重要构件不超过 0.007, 对于一般构件不超过 0.01。实际工程中, 对混凝土受弯构件加固后的承载力提高幅度要求不高且要求较好延性、耐腐蚀性的情况下, 可采用玄武岩纤维复合材料。

**关键词:** 玄武岩纤维; 碳纤维; 混凝土; 连续梁; 抗弯性能; 允许拉应变

**中图分类号:** TU 375.1

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Flexural Performances of Continuous Beams Strengthened with BFRP and CFRP

OUYANG Lijun<sup>1,2</sup>, DING Bin<sup>3</sup>, LU Zhoudao<sup>2</sup>, YU Jiangtao<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** To analyze mechanical performance and failure modes of continuous beams strengthened with basalt fiber reinforced polymer (BFRP) and carbon fiber reinforced polymer (CFRP), flexural tests were conducted on one comparative continuous beam and seven reinforced concrete (RC) continuous beams strengthened with the two types of fibers. The method of externally bonding fiber sheets on slab along sides of column to avoid column in hogging moment area of beam was applied. The results show that bearing capacity of beams strengthened with BFRP is less than beams strengthened with CFRP, except for ductility on the same

condition. Allowable tensile strain of domestic BFRP is proposed as a fixed value of 0.007 for general flexural members, 0.01 for important flexural members. BFRP is a suitable strengthening material for flexural members demanding comparatively low improvement of bearing capacity, better ductility and corrosion resistance in rehabilitation and retrofit projects.

**Key words:** basalt fiber reinforced polymer (BFRP); carbon fiber reinforced polymer (CFRP); concrete; continuous beams; flexural performance; allowable tensile strain

玄武岩纤维复合材料(BFRP)是一种新型无机纤维复合材料。玄武岩纤维与目前使用较为广泛的碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维相比具有较强的综合性能<sup>[1-4]</sup>: ① 抗拉强度较高(国产玄武岩纤维布抗拉强度已达到 2 300 MPa); ② 延性好(约为碳纤维的 1.5 倍); ③ 耐高温和耐腐蚀性能较强; ④ 价格低廉(约为碳纤维的 1/5~1/6); ⑤ 绿色环保(通过玄武岩熔融后物理加工而成)。玄武岩纤维复合材料将在工程结构加固领域具有良好的应用前景<sup>[5]</sup>。

纤维复合材料加固连续梁在既有混凝土框架结构加固工程中的应用非常普遍。混凝土连续梁在荷载作用下会发生内力重分布, 局部会形成塑性铰, 结构的内力按各截面之间的刚度比值分配。当各控制截面出现塑性铰后, 连续梁发生机构破坏而丧失承载力。当连续梁中支座截面先于跨中截面出现塑性铰时, 连续梁的破坏表现出较好的延性<sup>[6]</sup>。

采用纤维复合材料加固混凝土受弯构件是提高构件抗弯承载力的一种行之有效的方法<sup>[7-11]</sup>。本文以实际工程中经常遇到的连续梁负弯矩区纤维布绕过柱粘贴的情况为工程背景, 进行了 7 根玄武岩纤维布与碳纤维布加固的混凝土 T 形截面连续梁和 1 根

对比梁的抗弯试验研究.

1 试验概况

1.1 构件尺寸和配筋

为考虑实际工程中混凝土楼板参与受力,连续

梁试件设计成 T 形截面,试件包括 7 根加固梁和 1 根对比梁.各试件均采用 C30 混凝土和相同的配筋形式,截面尺寸为 150 mm×250 mm,板厚  $h_f=60$  mm,板宽  $b_f=800$  mm.混凝土立方体抗压强度平均试验值为 37.0 MPa.试件尺寸、截面配筋情况如图 1 所示,钢筋、纤维布的材性试验值如表 1,2 所示.

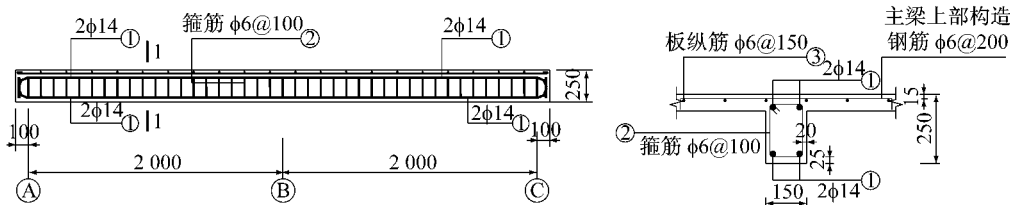


图 1 试件配筋图(单位:mm)

Fig.1 Specimen and reinforcement arrangement (unit: mm)

1.2 加固方案及加载制度

工程中经常遇到梁柱节点处无法在梁支座负弯矩段内粘贴纤维的情况,因而采取在柱两侧板的有效宽度范围内粘贴纤维的方法<sup>[12]</sup>.各加固梁板面均粘贴一层纤维布,其中 4 根加固梁梁底分别粘贴 1~4 层玄武岩纤维布,3 根加固梁梁底分别粘贴 1~3 层碳纤维布,加固方案如图 2 所示.连续梁跨内全段均粘贴 U 型箍以加强锚固并避免试件发生剪切破坏.对比梁和加固梁编号及加固方式见表 3.

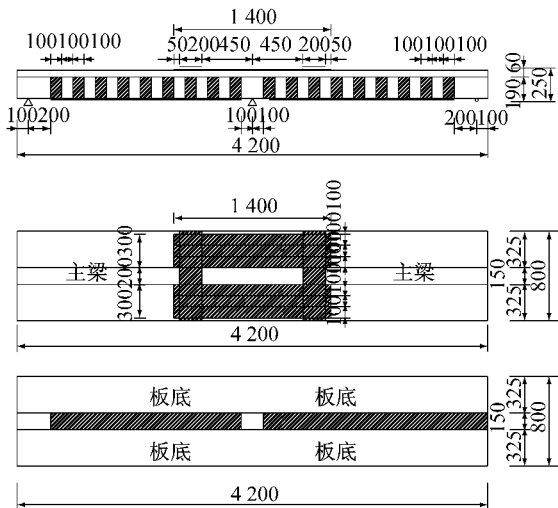


图 2 加固设计示意图(单位:mm)

Fig.2 Design of strengthened specimens (unit: mm)

表 1 钢筋的力学性能指标

Tab.1 Mechanics properties of reinforcement

材料	直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa
HPB235	6	315	530	$1.8 \times 10^5$
HRB335	14	377	540	$1.8 \times 10^5$

表 2 纤维布物理力学性能指标

Tab.2 Properties of fiber reinforced polymer(FRP)

型号	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %	厚度/ mm
BFRP(BUF7-300)	2 100	91	2.6	0.170
CFRP(XEC-300)	3 500	210	1.5	0.167

表 3 试件概况

Tab.3 Details of test specimens

编号	加固方案	
	梁底	中支座负弯矩段板面
B-0	未加固	未加固
B-B1	1 层 BFRP	1 层 BFRP
B-B2	2 层 BFRP	1 层 BFRP
B-B3	3 层 BFRP	1 层 BFRP
B-B4	4 层 BFRP	1 层 BFRP
B-C1	1 层 CFRP	1 层 CFRP
B-C2	2 层 CFRP	1 层 CFRP
B-C3	3 层 CFRP	1 层 CFRP

试验过程中所有构件均采用手动控制千斤顶进行加载,并由压力传感器控制分级荷载.千斤顶以相同荷载同步加载,正式加载前进行预载,预加载完成并卸载到初始状态后,采用分级加载制度,以 5 kN 的步长对构件进行加载,直到构件破坏.试验装置如图 3 所示.

2 试验现象及分析

2.1 破坏现象

B-0首先在跨中梁底出现微裂缝,宽度约为0.03 mm,开裂荷载为 20 kN.随着荷载增加,跨中梁侧裂缝数量、宽度增加,走向与梁轴线垂直,裂缝间距与箍筋间距相近.随后新增裂缝陆续远离加载点,向两边支座扩散.加载初期,跨中处以受弯裂缝为

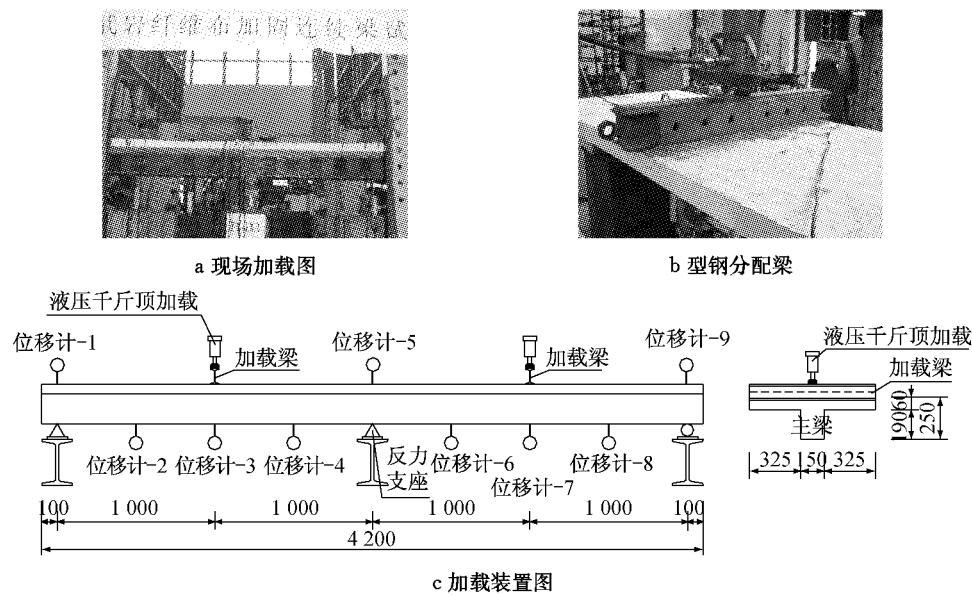


图3 试验装置及挠度测点布置图(单位:mm)

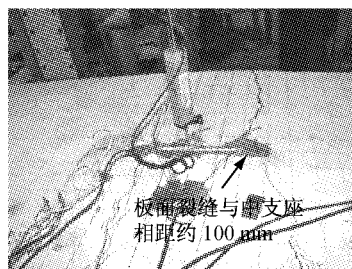
Fig.3 Test set-up and linear variable differential transformer arrangement (unit: mm)

主. 荷载继续增加时, 支座负弯矩段出现横向裂缝, 此时的开裂荷载为 41 kN. 随后, 中支座处梁侧出现弯剪裂缝, 裂缝走向由上至下. 荷载达到 85 kN 时, 跨中纵筋屈服. 接近破坏时, 中支座处翼缘裂缝与弯剪裂缝连通, 如图 4b 所示. 荷载继续增加时, 加载点处翼缘也出现裂缝, 并向梁肋靠近. 此时, 中支座处与跨内竖向裂缝均向加载点延伸. 荷载达到 120 kN 时, 跨中挠度达到 40.2 mm, 试件发生受弯破坏, 破坏形态如图 4a, 4b 所示.

各加固梁首先在跨中梁底出现微裂缝, 开裂荷载与 B-0 相近, 约为 20 kN. 荷载增大直到纵筋屈服, B-B1, B-B2, B-B3 的破坏形态均与 B-0 相似, 但相比之下, 跨中和支座处的裂缝均得到了明显抑制, 中支座板面开裂稍许延迟, 开裂荷载约 45 kN. B-B1 荷载达到 90 kN 时, 跨中纵筋屈服. 加载到 129 kN 时, 右跨挠度达到 40 mm, 跨中纤维布拉断, 试件破坏, 板面破坏形态如图 5 所示. B-B2 荷载达到 94 kN 时, 跨中纵筋屈服. 加载到 140 kN 时, 跨中纤维布拉

断, 达到极限承载状态, 跨中最大挠度为 22.5 mm, 破坏形态如图 6 所示. 荷载达到 98 kN 时, B-B3 跨中纵筋屈服, 加载到 135 kN 时, 局部 U 形箍翘曲剥离, 150 kN 时挠度迅速增加进而试件破坏. 荷载达到 100 kN 时, B-B4 跨中纵筋屈服. 荷载增加到 152 kN 时, 纤维布拉裂, 同时跨中处发生 U 形箍与混凝土的剥落破坏, 箍筋与纵筋外露, 混凝土压坏, B-B4 跨中梁底破坏形态如图 7 所示.

从开始加载到跨中纵筋屈服, B-C1, B-C2 破坏形态与 B-B1 相似, 中支座板面开裂荷载分别为 54 kN 和 55 kN. 破坏时纤维布突然断裂, 试件变形较小, 跨中加载点最大挠度均小于跨度的 1/100 倍, 中支座处混凝土仅出现微裂纹, 裂缝宽度约为 0.08 mm, 跨中裂缝约为 0.3 mm. B-C3 破坏时, 板面及跨中混凝土开裂均不明显, 跨中处纤维布未拉裂, 支座和跨中处受拉纵筋均未屈服, 中支座处混凝土压坏导致 U 形箍、端部纤维布与混凝土大块剥离, 钢筋外露. 破坏形态如图 8 所示.



a B-0 中支座板面裂缝



b B-0 中支座处梁侧裂缝

图4 B-0 破坏形态

Fig.4 Pictures of B-0 at failure

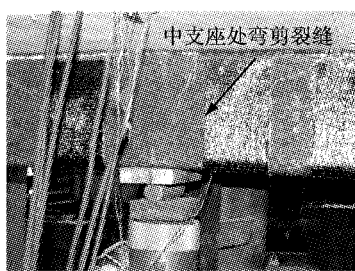


图5 B-B1 破坏形态

Fig.5 Pictures of B-B1 at failure



a 跨中处纤维拉断



b 中支座处弯剪裂缝

图 6 B-B2 破坏形态

Fig.6 Pictures of B-B2 at failure

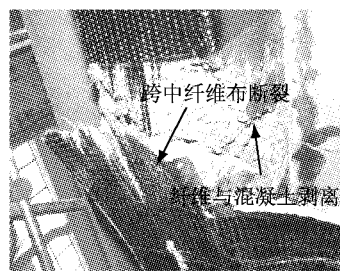


图 7 B-B4 破坏形态

Fig.7 Pictures of B-B4 at failure

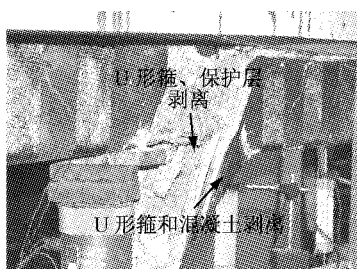


图 8 B-C3 破坏形态

Fig.8 Pictures of B-C3 at failure

## 2.2 破坏模式

### 2.2.1 纤维布拉断

B-B1, B-B2, B-B3, B-C1, B-C2 均以跨中纵筋屈服后,中支座处梁顶纵筋屈服继而混凝土压坏,跨中纤维布断裂为破坏模式。这种破坏模式具有明显征兆:当连续梁跨中纵筋屈服后,梁侧及中支座处板面可见明显裂缝,梁相对中支座转角明显增加,此后中支座处梁顶纵筋屈服、混凝土压坏,并形成塑性铰,随后跨中截面形成塑性铰,加固梁发生机构破坏。

### 2.2.2 混凝土受压破坏

B-B4, B-C3 均发生混凝土受压破坏。U 型箍、梁底纤维布、混凝土一起发生剥离破坏,纵筋和箍筋外露。B-B4 中支座处梁顶纵筋屈服后,跨中截面混凝土压坏,纤维布拉裂,可判断为跨中处混凝土发生受压破坏;B-C3 受载过程中,中支座处梁顶纵筋始终

未达到屈服,未形成塑性铰,直到中支座截面混凝土发生受压破坏导致加固梁发生破坏,脆性破坏特征明显。

## 2.3 承载力

由表 4 可知,各加固梁的屈服荷载、极限荷载均有不同程度的提高,BFRP 布加固梁跨中截面屈服荷载最大提高幅度为 17.6%,极限荷载最大提高幅度为 26.7%。CFRP 布加固梁跨中截面屈服荷载最大提高幅度为 38.8%,极限荷载最大提高幅度为 37.5%。CFRP 布对梁的抗弯承载力提高贡献较大;各加固梁跨中截面开裂荷载均在 20 kN 左右,纤维布加固量的变化对跨中截面开裂荷载无明显影响。BFRP 布加固梁中支座截面开裂荷载为 45~47 kN,而 CFRP 布加固梁中支座截面开裂荷载为 52~54 kN,跨中截面开裂后,加固梁刚度对中支座截面开裂荷载影响较大。

## 2.4 挠度

由图 9 可知,相对 CFRP 布加固梁,同等工况下的 BFRP 布加固梁延性较好,从试件屈服到破坏的征兆更明显。各加固梁从加载初期至中支座截面混凝土开裂前,荷载-挠度曲线基本重合。加固梁中支座截面混凝土开裂至纵筋屈服前,荷载-挠度曲线斜率随着纤维布加固量的增加有明显增大趋势。加固梁跨中纵筋屈服后,由于 CFRP 布具有较高的弹性

表 4 试验结果和破坏模式

Tab.4 Test results and failure modes

编号	加固方案		$F_{cr}/\text{kN}$		$F_y/\text{kN}$		$F_u/\text{kN}$	破坏形态
	负弯矩区	正弯矩区	支座	跨中	支座	跨中		
B-0	未加固	未加固	41	19	80	85	120	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏
B-B1	一层 BFRP	一层 BFRP	45	20	104	90	129	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏,纤维布拉断
B-B2	一层 BFRP	二层 BFRP	45	20	115	94	145	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏,纤维布拉断
B-B3	一层 BFRP	三层 BFRP	46	20	117	98	150	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏,纤维布拉断
B-B4	一层 BFRP	四层 BFRP	47	20	120	100	152	跨中纵筋未屈服, U 型箍、混凝土保护层大面积剥离,混凝土压坏,纤维布拉断
B-C1	一层 CFRP	一层 CFRP	54	20	120	95	150	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏,纤维布拉断
B-C2	一层 CFRP	二层 CFRP	55	20	125	104	160	跨中纵筋屈服后,中支座处混凝土压坏,纤维布拉断
B-C3	一层 CFRP	三层 CFRP	52	20	—	118	165	中支座处 U 型箍、混凝土保护层大面积剥离,混凝土压坏

注:  $F_{cr}$  为开裂荷载;  $F_y$  为屈服荷载;  $F_u$  为极限荷载。

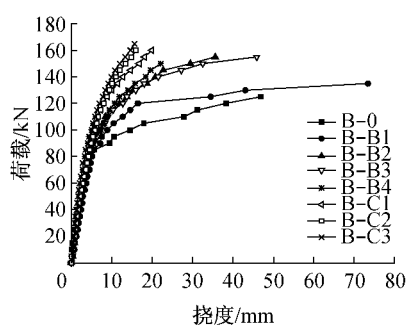


图9 各试件荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-displacement curve at mid-span

模量,CFRP布加固梁荷载-挠度曲线的斜率增长明显,且直到破坏时的跨中挠度也远小于BFRP布加固梁。

## 2.5 混凝土和纤维应变

图10,11为各试件跨中,中支座截面受压区混凝土压应变-荷载关系曲线。中支座截面混凝土压应变均大于跨中板面混凝土压应变,跨中板面混凝土压应变均不超过 $1\,000 \times 10^{-6}$ ,楼板参与了受压。混凝土压应变-荷载关系曲线趋势表明:因中支座处混凝土受压区面积较小,梁顶纵筋屈服后,受压区高度随着荷载增加迅速,受压区混凝土较快达到了极限应变。当跨中截面加固量较大时,梁整体刚度较大,限制了中支座和跨中截面的转动,中支座处混凝土板面纤维布、梁顶钢筋及板钢筋共同参与受拉,因而中支座截面受压区混凝土保持相对较大的应变值。

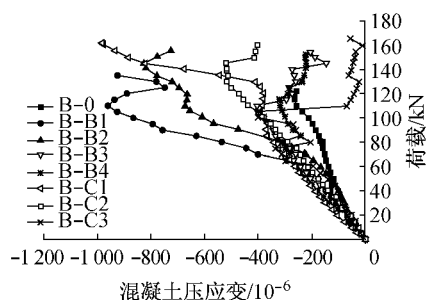


图10 跨中截面混凝土压应变-荷载曲线

Fig. 10 Load-concrete strain curve at mid-span

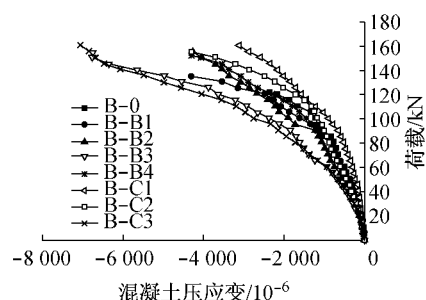


图11 中支座截面混凝土压应变-荷载曲线

Fig. 11 Load-concrete strain curve at middle-support

图12,13给出了各试件跨中和中支座截面纤维布拉应变-荷载曲线。跨中纵筋屈服前,主要由混凝土和钢筋共同受弯,当纵筋屈服后,纤维布较大程度地参与承担弯矩,中支座转动幅度增大,因而跨中截面达到屈服荷载时,跨中截面和中支座截面纤维布拉应变增长速率也呈增加趋势。

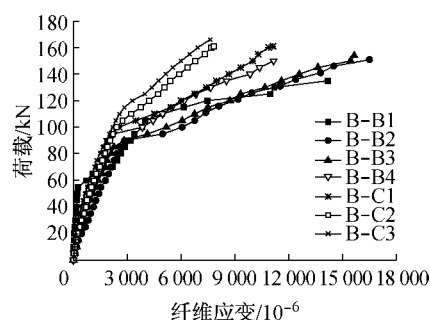


图12 跨中截面纤维拉应变-荷载曲线

Fig. 12 Load-FRP strain curve at mid-span

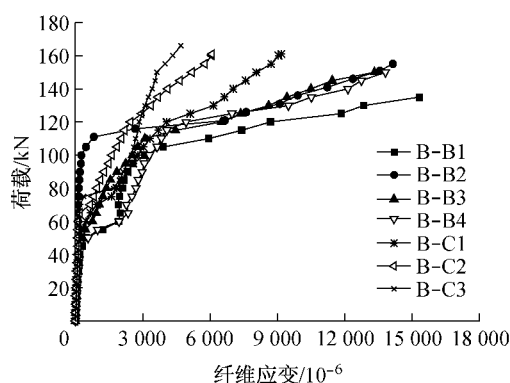


图13 中支座板面纤维拉应变-荷载曲线

Fig. 13 Load-FRP strain curve at middle-support

中支座板面纤维拉应变-荷载曲线总体趋势表明:随着跨中截面纤维加固量的增加,加固梁整体刚度增大,中支座相对转动幅度较小,纤维拉应变随荷载增长速率减小。试验观察发现,中支座板面开裂后易发生纤维与混凝土面层剥离现象,实际工程中,应加强此处纤维布的锚固措施。

## 2.6 BFRP布抗弯加固允许拉应变

BFRP布加固混凝土梁时,应保证BFRP布具有一定的安全储备,BFRP布的允许拉应变值对加固设计尤为重要。国内外颁布的加固规范、规程<sup>[12-15]</sup>中都有关于如何确定纤维布允许拉应变限值的规定。文献<sup>[15]</sup>中对纤维布允许拉应变 $[\epsilon_f]$ 的取值做了较详细的规定:

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \quad (1)$$

$$[\epsilon_f] = \phi \Psi_f \kappa_m \epsilon_{fu} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{fu}$ 为极限拉应变设计值; $\epsilon_{fu}^*$ 为厂商提供的极限

拉应变;  $C_E$  为环境折减系数;  $\phi$  为设计公式中的延性折减系数;  $\Psi_f$  为强度折减系数;  $\kappa_m$  为受弯构件考虑粘结的折减系数, 即纤维片材厚度折减系数。

常用的碳纤维片材的弹性模量在 120~250 GPa 之间<sup>[15-16]</sup>, 粘贴 1~4 层, 单层厚度为 0.111~0.167 mm, 根据美国混凝土学会对碳纤维布允许拉应变的限值公式经过计算得到

$$[\epsilon_d] = \begin{cases} 0.60\epsilon_{fu}^* & \text{室内环境} \\ 0.54\epsilon_{fu}^* & \text{室外环境} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $[\epsilon_d]$  为碳纤维布允许拉应变。

本试验采用的 BFRP 布厂商提供的极限拉应力为 2 100 MPa, 极限拉应变约为  $23\,000 \times 10^{-6}$ 。而试验时, BFRP 布断裂时平均拉应变约为  $16\,500 \times 10^{-6}$ , 因而对极限拉应变进行折减, 得到 BFRP 布允许拉应变

$$[\epsilon_{bf}] = \kappa_b \epsilon_{bf}^* \quad (4)$$

式中:  $[\epsilon_{bf}]$  为 BFRP 布允许拉应变;  $\epsilon_{bf}^*$  为厂商提供的 BFRP 布极限拉应变;  $\kappa_b$  为 BFRP 布极限拉应变折减系数。

## 2.7 加固梁跨中截面抗弯承载力计算

文中试验梁均为一般混凝土受弯构件, 对粘贴 1~3 层 BFRP 布的加固梁(破坏模式为钢筋屈服后, 纤维布拉断)的跨中截面抗弯承载力进行简化计算。由表 5 中的数据可知, 跨中截面计算值与实测值较接近, 且计算值有一定的安全储备。结合上述计算结果、已有试验数据并参考各规范、规程中关于纤维复合材料允许拉应变限值的规定, BFRP 布在一般环境中抗弯加固的极限拉应变折减系数  $\kappa_b$  可取 0.50, 并建议国产 BFRP 布加固混凝土受弯构件, 对于重要构件的允许拉应变  $[\epsilon_{bf}]$  不超过 0.007, 对于一般构件不超过 0.01。

表 5 跨中截面抗弯承载力计算值和试验值  
Tab.5 Calculated values and test values of  
flexural capacity at mid-span

试件	跨中截面承载力/(kN·m)		安全系数
	计算值	实测值	
B-B1	25.28	35.37	1.40
B-B2	29.92	37.63	1.26
B-B3	34.56	44.97	1.30

## 3 结论

对 7 根采用 BFRP 布与 CFRP 布分别加固的 T 形截面混凝土连续梁和 1 根对比梁进行抗弯试验研究, 并对 BFRP 布加固梁跨中截面抗弯承载力进行

计算分析后, 得到以下结论:

(1) 对发生弯曲破坏的加固梁, 跨中纵筋屈服后, 中支座处梁顶纵筋屈服继而混凝土压坏, 形成塑性铰。随后, 跨中截面纤维布断裂, 破坏过程具有明显征兆。对于发生混凝土受压破坏的梁, U 型箍、梁底纤维布、混凝土保护层一起发生剥离, 纵筋和箍筋外露, 脆性破坏特征明显。

(2) BFRP 布加固混凝土梁的屈服荷载、极限荷载均有不同程度的提高: 中支座截面屈服荷载提高幅度为 30.0%~50.0%, 跨中截面屈服荷载提高幅度为 5.9%~17.6%, 极限承载力最大提高幅度为 26.7%; 而 CFRP 布加固梁的提高幅度分别为 50.0%~56.3%, 11.8%~38.8% 和 37.5%。相比之下, CFRP 布加固能更大程度地提高连续梁的抗弯承载力。

(3) 参考现有规范、规程及本文试验数据, 建议国产 BFRP 布加固混凝土受弯构件的允许拉应变取厂商提供的极限拉应变值的 0.5 倍, 且对于重要构件不超过 0.007, 对于一般构件不超过 0.01。以此为依据, 对本试验中 BFRP 布加固梁跨中截面承载力进行计算, 得到的承载力设计值具有一定的安全储备。

(4) 实际工程中, 对混凝土构件抗弯承载力提高幅度要求不高且要求较好延性、耐腐蚀性的情况下, 玄武岩纤维复合材料可混杂或替代玻璃纤维和碳纤维复合材料使用。

## 参考文献:

- [1] 欧阳利军, 丁斌, 陆洲导. 玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(3): 84.  
OUYANG Lijun, DING Bin, LU Zhoudao. BFRP and its application review in structural strengthening [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(3): 84.
- [2] Sim J, Park C, Moon DY. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites, Part B, 2005, 36(6/7): 504.
- [3] WEI Bin, CAO Hailin, SONG Shenhua. Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers [J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527(18/19): 4708.
- [4] Lopresto V, Leone C, De Iorio I. Mechanical characterisation of basalt fiber reinforced plastic [J]. Composites, Part B, 2011, 42(4): 717.
- [5] 蔺建廷. BFRP 加固钢筋混凝土梁抗弯性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2009.  
LIN Jianting. Experimental research of reinforced concrete beams strengthened with basalt fiber polymer [D]. Dalian: College of Civil Engineering of Dalian University of Technology, 2009.

(下转第 1410 页)