

无机胶粘贴 CFRP 布加固梁火灾后受力性能试验

郑文忠, 万夫雄, 李时光

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, hitwzzheng@163.com)

摘要: 目前粘贴碳纤维(CFRP)布加固混凝土结构多采用环氧类有机胶,但其软化温度过低,多为60~80℃,用环氧类有机胶粘贴CFRP布加固混凝土结构难以满足耐高温要求.为此,研发了600℃时强度不低于常温强度的无机胶,并用其粘贴CFRP布加固混凝土梁.对4根已进行过火灾下耐火性能试验的加固梁进行火灾后受力性能试验,描述加固梁火灾后受力破坏过程,获得了火灾后受弯承载力试验值和荷载-跨中位移变形曲线,进行了受弯承载力分析,提出正截面承载力计算公式和构件刚度计算方法.试验与分析表明,当CFRP布历经的温度高于300℃时,CFRP布的强度不能充分利用,加固性能有所下降.相关公式计算值与试验结果吻合较好,可用于该类加固梁火灾后正截面承载力和构件刚度的计算.

关键词: 无机胶;CFRP布;火灾后;正截面承载力;刚度

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1194-05

Experimental research on mechanical performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic adhesive after fire

ZHENG Wen-zhong, WAN Fu-xiong, LI Shi-guang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, hitwzzheng@163.com)

Abstract: The organic epoxy adhesive usually used in the concrete structures strengthened with CFRP sheets has low softening temperatures of 60–80 °C and it is difficult to meet the requirement of fire endurance, therefore, an inorganic adhesive is developed and used to bond CFRP sheets to strengthen concrete beams, whose strength at 600 °C is not lower than that at normal room temperature. Experiments on mechanical properties of four strengthened beams that experienced fire test were completed. The flexural failure processes of beams were observed. Flexural carrying capacity of these beams and the load–displace curves at the mid–span were obtained. Flexural carrying capacity was analyzed. The calculation formula of flexural carrying capacity and the calculation method of stiffness were presented. The experimental and analysis results show that the strength of CFRP sheets bonded with the inorganic adhesive can not be played fully when the temperature CFRP sheets experienced is above 300 °C in fire. The calculation values of formula are in good agreement with test results. The formula can be used for computing flexural carrying capacity and stiffness of this kind of beam.

Key words: inorganic adhesive; CFRP sheets; after fire; flexural carrying capacity; stiffness

CFRP片材以其高强、高效、质轻、耐久及施工方便等优点受到建筑加固领域的关注,但用环氧类有机胶粘贴CFRP片材加固混凝土构件的防

火问题却困扰着工程界和学术界.研究表明,有机胶软化温度多为60~80℃^[1],即使采取严密的防火措施,在火灾下有机胶依然极易超过其软化温度^[2-4],使得CFRP片材在火灾下和火灾后均不能发挥补强加固的作用.针对上述问题,国内外学者纷纷研制耐高温的无机胶^[5-7],并采用无机胶粘贴CFRP布来加固混凝土构件^[8-10],研究表明常温下加固性能可靠,但其抗火性能尚未研究.本

收稿日期: 2009-10-03.

基金项目: 国家教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37);
国家自然科学基金资助项目(50678050);哈尔滨工业大学创新科学基金项目(HIT 2005C-3).

作者简介: 郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.

课题组研制出 600 °C 时强度不低于常温强度的无机胶^[7],前期已完成的 4 根用其粘贴 CFRP 布加固混凝土梁的抗火性能试验,结果表明,火灾下采用无机胶粘贴的 CFRP 布与混凝土梁能共同工作.为了进一步了解该类加固梁在火灾后的力学性能,对上述经历火灾的 4 根梁进行了火灾后受力性能试验,提出了此类加固梁火灾后受弯承载力计算公式和刚度计算方法,为火灾后此类构件的力学性能评估提供依据.

1 试验概况

1.1 试件情况

4 根用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土梁全长均为 4 400 mm,计算跨度 3 500 mm,截面尺寸 150 mm × 350 mm.纵向受力钢筋均采用 HRB335,直径为 12 mm,钢筋保护层厚度均为 25 mm,箍筋均采用 HPB235,直径为 6 mm,间距为 150 mm.混凝土强度等级均采用 C30,100 mm × 100 mm × 100 mm 混凝土立方体 28 d 实测抗压强度为 32 MPa.所有梁底均粘贴一层碳纤维布,布宽与梁底宽度相同,长度为 3 500 mm.在梁跨范围内共设置 5 道 U 型箍,每道 U 型箍宽度均为 250 mm.加固梁截面情况如图 1 所示.碳纤维布采用日本东丽公司生产的碳纤维布(UT70-20).钢筋和碳纤维布的常温力学性能见表 1,2.采用本课题组研制的无机胶粘贴 CFRP 布,无机胶为碱矿渣胶凝材料,其配方见表 3.选用厚型钢结构防火涂料和厚型隧道防火涂料同时对梁底和梁侧进行防火保护.采用北京城建天宁防火涂料厂生产的 TN-LS 室内厚型钢结构防火涂料,厂家提供的热工参数为:密度 400 kg · m⁻³,比热容 1 000 J · kg⁻¹ · K⁻¹,导热系数 0.10 W · K⁻¹ · m⁻¹.选用北京茂源防火材料厂生产的 SH(JF-204)隧道防火涂料,厂家提供的热工参数为:密度 600 kg · m⁻³,比热容 1 000 J · kg⁻¹ · K⁻¹,导热系数 0.12 W · K⁻¹ · m⁻¹.L1 和 L3 涂厚型钢结构防火涂料,L2 和 L4 涂厚型隧道防火涂料,涂料总厚度均为 25 mm.

1.2 火灾下和火灾后试件基本情况

用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土梁采用防火涂料保护后,在中国建筑科学研究院耐火试验炉上进行了抗火试验.所有梁均在一定荷载作用下按国际标准升温曲线 ISO834 受火 90 min,停火后在炉膛内自然冷却至常温.火灾下尽管炉膛温度很高,但 L1、L2、L3 和 L4 的 CFRP 布在防火涂料保护下所经历的最高温度分别为 400、330、470

和 300 °C,CFRP 布处于绝氧状态;火灾后可看到,L1 和 L3 的无机胶表面已发生轻微龟裂,但 CFRP 依旧完好.火灾下各梁最大跨中位移仅介于计算跨度的 1/1 400 ~ 1/318,停火后,跨中位移小幅减小,火灾后构件残余变形很小.

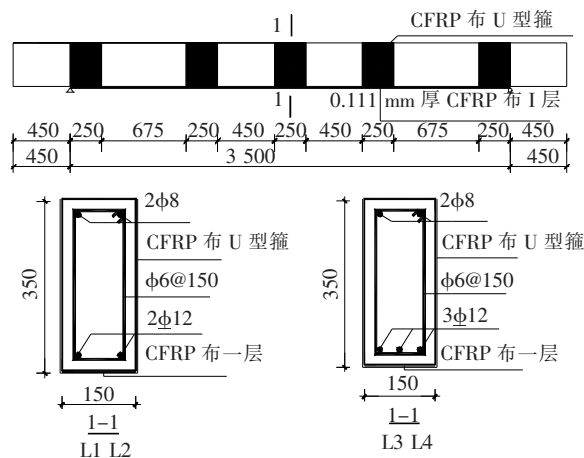


图 1 加固梁截面情况

表 1 钢筋的常温力学性能

直径 mm	屈服强度 MPa	极限强度 MPa	弹性模量 10 ⁵ MPa
12	375	555	2.01
8	301	410	2.00
6	295	420	2.00

表 2 碳纤维布的常温力学性能

厚度 mm	抗拉强度 MPa	弹性模量 MPa
0.111	4 223	2.42 × 10 ⁵

表 3 无机胶配方(质量比)

矿渣粉	水玻璃	氢氧化钠	水
100	18.6	4.6	30.8

注:1.水玻璃和氢氧化钠需在配胶前按质量比 1:0.247 9 搅拌均匀,二者混合的溶液称为复合水玻璃;2.氢氧化钠的纯度级别为分析纯.

1.3 试验方案及现象

试验采用两点对称加载.两支座之间的距离为 3 500 mm,纯弯段长度为 1 400 mm.荷载分级施加,在每一级荷载下测量跨中位移和支座位移.各梁在受荷过程中一般经历混凝土开裂、构件发出响声、构件破坏 3 个阶段.构件破坏时,构件响声突然加剧或突然发出一阵巨响,承载力急剧下降,无法继续持荷.CFRP 布除了发生拉断破坏和撕裂破坏外,还发生了剥离破坏.典型的 CFRP 布破坏状态如图 2 所示.



(a)CFRP 布被拉断 (b)CFRP 布剥离

图2 典型的CFRP布破坏状态

2 试验结果与分析

2.1 荷载-跨中位移曲线

图3给出了各梁的荷载-跨中位移曲线,可以看出:

1)荷载-跨中位移变形曲线只有一个明显的拐点.拐点出现时,纵向受拉钢筋达到屈服状态.此后,梁刚度降低,但仍可继续承载,只是挠度发展加快.这一阶段是碳纤维进一步发挥作用的阶段.CFRP布的协同受力会延缓钢筋屈服和裂缝开展.

2)达到承载能力极限状态时,L1、L2、L3和L4跨中挠度分别为21.75,39.1,33和36.9 mm,约为跨度的1/161,1/90,1/106和1/95.L1、L2、L3和L4的延性系数分别为1.98,3.7,2.5和2.8.L2和L4的挠度和延性系数分别大于L1和L3,表明随着CFRP布历经的温度升高,挠度和延性均有不同程度的降低.

3)L3和L4的承载力和刚度均大于L1和L2,这是由于前者配筋量较后者大的缘故.L2和L4的极限承载力分别大于L1和L3,表明随着CFRP布历经的温度升高,极限承载力均有不同程度的降低.

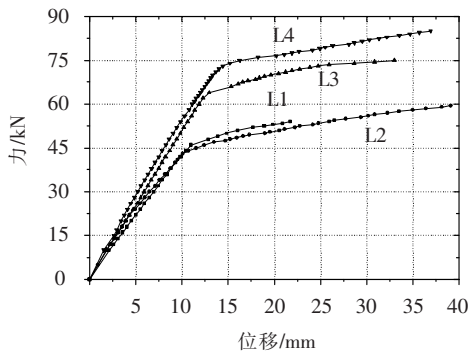


图3 各梁的荷载-跨中位移曲线

2.2 正截面承载力数值分析

基于平截面假定采用数值迭代的方法进行正截面承载力分析,计算基本假定为

- 1)截面应变分布符合平截面假定;
- 2)钢筋和混凝土火灾后材料力学性能选用

文献[11]给出的公式;火灾对采用无机胶浸润并处于绝氧状态下的CFRP布力学性能没有影响,火灾后其弹性模量取为常温值;

3)构件达到极限承载力前,碳纤维布与混凝土之间粘结可靠.

受火后梁截面不同区域的混凝土抗压强度与弹性模量沿梁高和梁宽方向是不均匀的.本文将梁截面沿宽度方向和高度方向分为若干区域(见图4).用ANSYS模拟梁从受火开始到停火后截面温度降至常温的全过程温度场,并使部分位置计算温度和试验测得温度基本一致.先取温度场计算的各区域角点温度最大值作为相应各点所经历的温度,再取每一区域各角点经历温度的平均值作为该区域平均温度,然后利用该温度求出该区域混凝土的抗压强度与弹性模量.

利用弯矩和曲率的对应关系,采用双重循环数值迭代方法求解正截面承载力:外层循环变量为曲率,假定初始值和增量进行循环迭代,内层循环变量为受压边缘混凝土的应变,假定初始值和增量进行子循环迭代.计算结果见表4.可以看出,所有加固梁的计算值偏低,表明CFRP布并未达到常温下的极限拉应变,这是由于火灾后碳纤维布与混凝土之间的粘结性能退化造成的.为此,引入火灾后CFRP布名义极限拉应变 ε_{cfu}^T 这一概念.CFRP布历经的温度越高,计算值偏低越多,说明 ε_{cfu}^T 随CFRP布历经的温度升高而降低.经过试算得到与试验结果吻合较好的 ε_{cfu}^T 取值,见式(1),其中 T 为CFRP布历经的最高温度.

$$\begin{cases} \varepsilon_{cfu}^T = 0.008 & 300\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 400\text{ }^\circ\text{C}, \\ \varepsilon_{cfu}^T = 0.006 & 400\text{ }^\circ\text{C} \leq T < 500\text{ }^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (1)$$

引入CFRP布名义极限拉应变 ε_{cfu}^T 后,利用数值迭代方法计算的正截面承载力见表4.可以看出,计算值与试验值吻合较好.

表4 正截面承载力计算值与试验值对比

编号	$M_{u,t}^T /$ (kN·m)	$M_{u,c}^T /$ (kN·m)			$M_{u,t}^T / M_{u,c}^T$		
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
L1	30	35.8	30.2	32.6	0.84	0.99	0.92
L2	33.2	36.2	33.3	34.1	0.92	0.99	0.97
L3	41.4	47.0	42.0	43.4	0.88	0.98	0.94
L4	46.6	47.6	46.0	46.0	0.98	1.01	1.01
		平均值			0.91	0.99	0.96
		标准差			0.06	0.01	0.04

注:1. $M_{u,t}^T$ 为火灾后正截面承载力试验值; $M_{u,c}^T$ 为火灾后正截面承载力计算值;2.(1)、(2)分别表示引入CFRP布名义极限拉应变 ε_{cfu}^T 前后采用数值迭代方法计算的结果;(3)表示采用正截面承载力公式计算的结果.

2.3 正截面承载力公式

将梁截面沿宽度方向分为 m 块,沿高度方向分为 n 层.取各层各区域混凝土的抗压强度 f_c^T 与常温下抗压强度 f_c 的比值叠加作为各层条带的面积折减系数,并将其乘以梁宽 b 后即得等效截面各层的宽度 $b_j (1 \leq j \leq n)$. 截面等效过程见图 4.

正截面承载力公式如下

$$\alpha_1 f_c \left(\sum_{i=1}^k b_i \Delta h + b_{k+1} h_\Delta \right) = f_y^T A_s + \varphi_{cf} f_{cfu}^T A_{cf} - f_y'^T A'_s, \quad (2)$$

$$M_u^T = \alpha_1 f_c \left(\sum_{i=1}^k b_i \Delta h + b_{k+1} h_\Delta \right) (h - x/2) + f_y'^T A'_s (h - \alpha'_s) - f_y^T A_s (h - h_0), \quad (3)$$

$$x \geq \alpha'_s, \quad (4)$$

$$\varphi_{cf} = \frac{(0.8 \varepsilon_{cu}^T h/x) - \varepsilon_{cu}^T}{\varepsilon_{cfu}^T}. \quad (5)$$

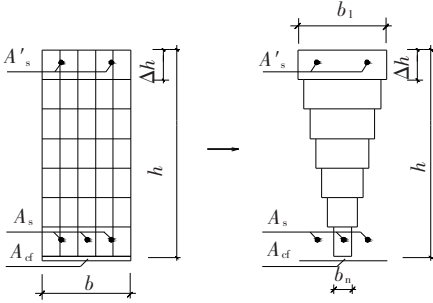


图4 截面等效示意图

式中: α_1 为系数,当混凝土强度等级不超过 C50 时,取为 1.0; f_c 为混凝土的常温抗压强度; b_i 为等效截面第 i 层宽度; Δh 为等效截面每层高度, $\Delta h = h/n$; h_Δ 为等效截面第 $k+1$ 层受压混凝土高度; f_y^T 为火灾后受拉钢筋的屈服强度; A_s 为受拉钢筋的截面面积; $f_y'^T$ 为火灾后受压钢筋的屈服强度; A'_s 为受压钢筋的截面面积; φ_{cf} 为 CFRP 布强度利用系数,当 $\varphi_{cf} > 1$ 时, $\varphi_{cf} = 1$; f_{cfu}^T 为火灾后 CFRP 布的极限强度, $f_{cfu}^T = E_{cf}^T \varepsilon_{cfu}^T$, E_{cf}^T 为火灾后 CFRP 布弹性模量,取常温时的值; A_{cf} 为 CFRP 布的截面面积; x 为混凝土受压区高度, $x = k\Delta h + h_\Delta$; h, h_0 分别为截面高度和截面有效高度; α'_s 为受压钢筋合力点至受压边缘的距离; ε_{cfu}^T 为火灾后 CFRP 布名义极限拉应变,按式(1)确定; ε_{cu}^T 为火灾后混凝土极限压应变,按文献[11]选用; ε_{cu} 为混凝土常温极限压应变, $\varepsilon_{cu} = 0.0033$.

采用正截面承载力公式计算的结果列于表 4.可以看出,计算值与试验值吻合较好,计算具有良好的精度.

2.4 刚度计算

采用换算截面进行刚度计算.混凝土截面换

算方式同 2.3,但条带的面积折减系数取各层混凝土的弹性模量 E_c^T 与常温下弹性模量 E_c 的比值.钢筋和 CFRP 布的截面面积按其火灾后弹性模量与常温下混凝土弹性模量的比值进行换算.

本文采用公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62-2004)中的短期刚度公式(6)进行计算.

$$B = \frac{B_0}{(M_{cr}/M_s)^2 + [1 - (M_{cr}/M_s)^2] B_0/B_{cr}}, \quad (6)$$

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0. \quad (7)$$

式中: B 为开裂构件换算截面的抗弯刚度; B_0 为换算截面开裂前的抗弯刚度; B_{cr} 为换算截面开裂后裂缝处的抗弯刚度,计算时假定裂缝截面处拉区混凝土完全退出工作; M_{cr} 为换算截面的开裂弯矩,按式(7)计算; M_s 为在使用荷载作用下构件中的最大弯矩; γ 为混凝土受拉区塑性发展系数,取为 1.52; f_{tk} 为混凝土常温下抗拉强度标准值; W_0 为按混凝土抗拉强度换算的截面受拉边缘弹性抵抗矩.

一般对于梁而言,极限承载力的 45% 和 70% 分别与荷载效应的标准组合值和荷载效应的基本组合值大致相当.因此,刚度试验值取作用荷载为极限承载力的 45% 和 70% 时的刚度值.刚度计算值和试验值见表 5.可以看出,试验梁刚度计算值与试验值吻合较好,计算具有良好的精度.

表5 刚度计算值与试验值比较

梁编号	荷载水平	B_t $\times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$	B_c $\times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$	B_c/B_t
L1	0.45	3.45	3.62	1.05
	0.70	3.19	3.28	1.03
L2	0.45	3.75	3.99	1.06
	0.70	3.16	3.45	1.09
L3	0.45	3.80	4.51	1.19
	0.70	3.67	4.23	1.15
L4	0.45	4.21	4.74	1.13
	0.70	3.84	4.47	1.16
		平均值		1.11
		标准差		0.05

注: B_c 为计算值, B_t 为试验值.

3 结论

1) 用无机胶粘贴的 CFRP 布与混凝土梁火灾后在一定程度上共同工作.当 CFRP 布历经的温度高于 300 °C 时,CFRP 布的强度不能充分利用,

加固性能有所下降.

2) 提出了考虑火灾影响的用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土梁的受弯承载力计算公式和刚度计算方法, 计算结果和试验数据吻合较好.

参考文献:

[1] GAMAGE J C P H, AI - MAHAIDI R, WONG M B. Bond characteristics of CFRP plated concrete member under elevated temperatures [J]. *Composite Structures*, 2006, 75(1/4): 199 - 205.

[2] KODUR V K R, BISBY L A, GREEN M F. Experimental evaluation of the fire behaviour of insulated fibre - reinforced - polymer - strengthened reinforced concrete columns [J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(7): 547 - 557.

[3] WILLIAMS B K, BISBY L A, KODUR V K R, *et al.* Fire insulation schemes for FRP - strengthened concrete slabs [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(8): 1151 - 1160.

[4] BARNES R, FIDEL J. Performance in fire of small - scale cfrp strengthened concrete beams [J]. *ASCE, Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(6): 503 - 508.

[5] FERNANDO P T, JOAO C G, JALALI S. Alkali - activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7):

1305 - 1314.

[6] FERNANDO P T, JOAO C G, JALALI S. Alkali - activated binders: A review Part 2. About materials and binders manufacture [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1315 - 1322.

[7] 郑文忠, 陈伟宏, 徐威, 等. 用碱激发矿渣耐高温无机胶在混凝土表面粘贴碳纤维布试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(4): 138 - 157.

[8] TOUTANJI H, ZHAO L, ZHANG Y. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(4): 557 - 566.

[9] TOUTANJI H, ZHAO Liangying, DENG Yong, *et al.* Cyclic behavior of RC beams strengthened with carbon fiber sheets bonded by inorganic matrix [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(1): 28 - 35.

[10] 郑文忠, 陈伟宏, 王明敏. 用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土梁受弯试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(4): 37 - 45.

[11] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 30 - 62.

[12] BISBY L A. Fire Behavior of Fiber - Reinforced Polymer (FRP) Reinforced or Confined Concrete [D]. Canada: Queen's University, 2003.

(编辑 刘 彤)

(上接第 1193 页)

[4] TOKIMATSU K, SUZUKI H, SATO M. Pore water pressure response around pile and its effects on p-y behavior during soil liquefaction [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(6): 101 - 110.

[5] BOULANGER R W, CURRAS C J, KUTTER B L, *et al.* Seismic soil - pile - structure interaction experiments and analyses [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1999, 125(9): 750 - 759.

[6] IMAMURA S T, HAGIWARA Y, TSUKAMOTO, *et al.* Response of pile groups against seismically induced lateral flow in centrifuge model tests [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(3): 39 - 55.

[7] 凌贤长, 王东升, 王志强, 等. 液化场地桩 - 土 - 桥梁结构动力相互作用大型振动台模型试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2004, 37(11): 67 - 72.

[8] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩 - 土 - 桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 450 - 456.

[9] 伍小平, 孙利民, 胡世德, 等. 振动台试验用层状剪切变形土箱的研制 [J]. *同济大学学报*, 2002, 30(7): 781 - 785.

[10] 凌贤长, 王丽霞, 王东升, 等. 非自由液化场地基动力性能大型振动台模型试验研究 [J]. *中国公路学报*, 2005, 18(2): 34 - 39.

(编辑 赵丽莹)