

用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤组合梁受弯性能

陈伟宏¹, 马景明², 崔双双³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 国核电力规划设计研究院 电网事业部, 北京 100095; 3. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 目前多采用环氧类有机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土结构构件, 该胶软化点约为 60 ℃, 难以满足耐高温要求. 为此, 制备了一种可以耐 600 ℃ 高温的无机胶. 用该无机胶粘贴碳纤维布对 4 根已经历受弯承载能力极限状态的有粘结预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁进行加固, 并对加固组合梁进行了受弯性能试验. 获得了加固组合梁的正截面受弯承载力和荷载—挠度变形曲线. 基于试验数据, 提出了考虑原组合梁损伤影响的此类加固组合梁的受弯承载力计算方法, 建立了与试验结果吻合良好的刚度计算公式.

关键词: 无机胶; 碳纤维布; 加固; 组合梁; 受弯性能

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.018

0 引言

粘贴 CFRP 布加固混凝土结构技术可以有效提高钢筋混凝土构件的承载力. 加固胶粘剂是该技术的关键因素, 因为胶粘剂良好的性能是保证 CFRP 布与混凝土构件共同工作的基础. 目前加固所用胶粘剂多为环氧类有机胶, 其软化点介于 60~80 ℃, 导致加固后结构构件的耐高温性能较差. 可以采取在 CFRP 布表面涂防火涂料和用耐高温胶取代有机胶来解决该问题^[1-3]. 火灾发生后, 即使在 CFRP 布表面涂防火涂料, CFRP 布与混凝土之间也难免会产生滑移甚至失去粘结, 其耐高温性能提高有限. 无机胶具有无毒、成本低、耐高温性能好等优点, 笔者制备了一种可以耐 600 ℃ 高温的无机胶^[4]. 用该胶在混凝土表面粘贴 CFRP 布的面内剪切强度与有机胶相当^[5].

通过用无机胶粘贴一层 CFRP 布加固 4 根经历受弯承载极限状态的预应力混凝土组合梁, 并进行正截面受弯性能试验, 来研究加固后构件的破坏模式、承载力等.

1 试验简介

1.1 组合梁设计情况^[6]

4 根组合梁截面 $b \times h = 300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 计

算跨度为 3 800 mm. 1 梁混凝土强度等级为 C40, 保护层厚度 25 mm. 预应力筋为 $\phi_p 5$ 低松弛高强钢丝, 其抗拉强度标准值为 $f_{ptk} = 1\,670 \text{ N/mm}^2$, 弹性模量为 $E_p = 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$. 张拉控制应力 $\sigma_{con} = 0.75f_{ptk}$. 分别将 4 根组合梁编号为 B-1、B-2、B-3、B-4, 其主要试验参数如表 1 所示, 钢管力学性能指标如表 2 所示, 组合梁细部构造如图 1 所示.

1.2 试验方案

由于组合梁在进行受弯试验时, 跨中受压区混凝土部分被压碎. 卸载后, 部分主裂缝未闭合. 在对组合梁进行加固前, 先将压碎混凝土用 C45 细石混凝土进行置换, 而对未闭合裂缝采用注入无机胶进行修复.

在梁底粘贴一层厚 0.111 mm 宽 300 mm 的 CFRP 布对组合梁进行加固, 加固方案如图 2 所示. CFRP 布的抗拉强度为 $4\,578 \text{ N/mm}^2$, 伸长率为 1.77%, 弹性模量为 $2.50 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$.

采用两点对称加载进行受弯性能试验. 跨中梁侧混凝土、梁顶混凝土和梁底 CFRP 布应变通过应变片测量, 梁端和跨中位移由位移引伸仪测量.

收稿日期:2014-04-18; 修订日期:2014-06-29
基金项目:国家自然科学基金项目资助(50678050)
作者简介:陈伟宏(1980-), 男, 福州大学助研, 博士, E-mail: chenweihong1980@163.com.

表 1 组合梁基本参数一览表
Tab.1 Information of composite beams

编号	上弦钢管 $d_0 \times t_0/\text{cm}$	下弦钢管 $d'_0 \times t'_0$	竖腹杆 $d_1 \times t_1$	预应力筋	σ_{pe}	σ_{con}	β_s	β_p	β_0	ξ	λ_p
B-1	45×3.5	70×3.5	38×4	10 φ^{p5}	1 252	0.21	0.49	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6
B-2	45×3.5	60×3.5	38×4	12 φ^{p5}	1 252	0.21	0.59	45×3.5	60×3.5	38×4	42×6
B-3	45×3.5	63.5×5.0	38×4	12 φ^{p5}	1 252	0.27	0.49	45×3.5	63.5×5.0	38×4	42×6
B-4	45×3.5	70×3.5	38×4	14 φ^{p5}	1 252	0.26	0.59	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6

注: β_p 为预应力配筋指标, $\beta_p = \frac{\sigma_{pe}A_p}{f_c b h_p}$; β_s 为受拉弦杆类比为受拉钢筋的非预应力配筋指标, $\beta_s = \frac{f_y A_{ss}}{f_c b h_s}$; β_0 为综合配筋指标, $\beta_0 = \beta_p + \beta_s = \frac{\sigma_{pe}A_p + f_y A_{ss}}{f_c b h_0}$; ξ 为混凝土相对受压区高度; λ_p 为预应力度($\lambda_p = \frac{\sigma_{pe}A_p}{\sigma_{pe}A_p + f_y A_{ss}}$).

表 2 钢管力学性能指标
Tab.2 Mechanical properties of steel tube

钢管	$f_y/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$f_u/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	$E_s/$ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)
45×3.5	315	360	1.98×10^5
60×3.5	310	381	1.98×10^5
70×3.5	328	442	1.98
63.5×5.0	330	360	1.98

注: f_y 表示钢管实测屈服强度; f_u 表示钢管实测极限抗拉强度; E_s 表示钢管弹性模量; ν 表示钢管泊松比.

2 试验结果

4 根试验梁均出现继 CFRP 布达到极限拉应变而拉断后,继续加载,受压区边缘混凝土被压碎的破坏模式,如图 3 所示.4 根试验梁荷载—跨中挠度曲线均呈现开裂弹性和塑性发展二个阶段,

如图 4 所示.

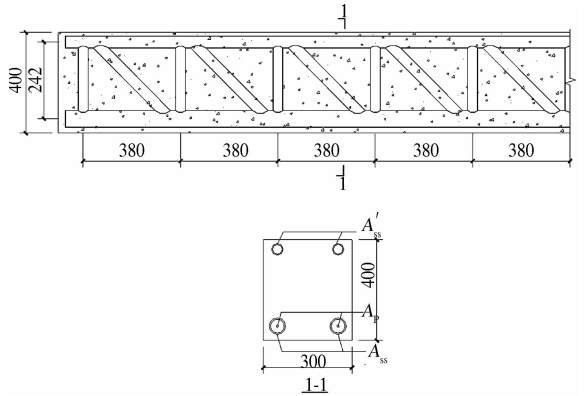


图 1 组合梁钢桁架细部构造
Fig.1 Construction detail of steel truss

通过对试验梁跨中截面从加载到破坏各级荷载作用下的混凝土应变实测值分析,发现试验梁纯弯段基本符合平截面假定,如图 5 所示.

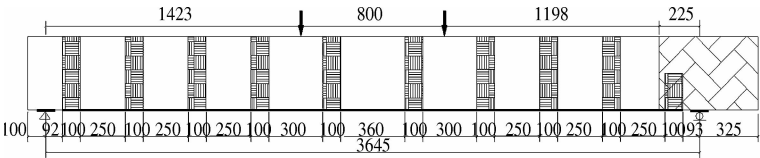


图 2 碳纤维加固图
Fig.2 CFRP layout

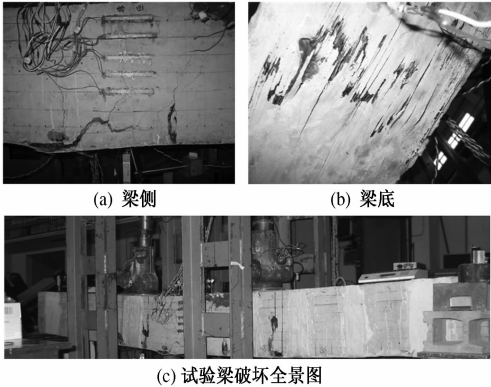


图 3 试验梁破坏特征
Fig.3 Failure characteristic of test beams

3 加固组合梁正截面受弯承载力分析

3.1 受弯承载力的计算方法

组合梁在完成正截面受弯试验后,非预应力筋的最大拉应变仍位于钢筋本构的屈服平台上.对加固后组合梁进行受弯承载力分析时,非预应力钢筋本构关系仍取 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐本构.

原组合梁在完成正截面受弯试验后,若受压区混凝土压应变小于 f_c 对应的应变 ϵ_c ,则分析加固后梁受弯承载力时,混凝土应力—应变关系仍

采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐的本构关系;若混凝土的压应变大于 ε_c , 小于极限压应变 ε_{cu} , 则混凝土应力—应变关系采用图

6 所示的曲线^[7];若受压区混凝土局部被压碎, 则采用 C45 细石混凝土置换压碎混凝土, 使置换处的破坏迟于其他部位.

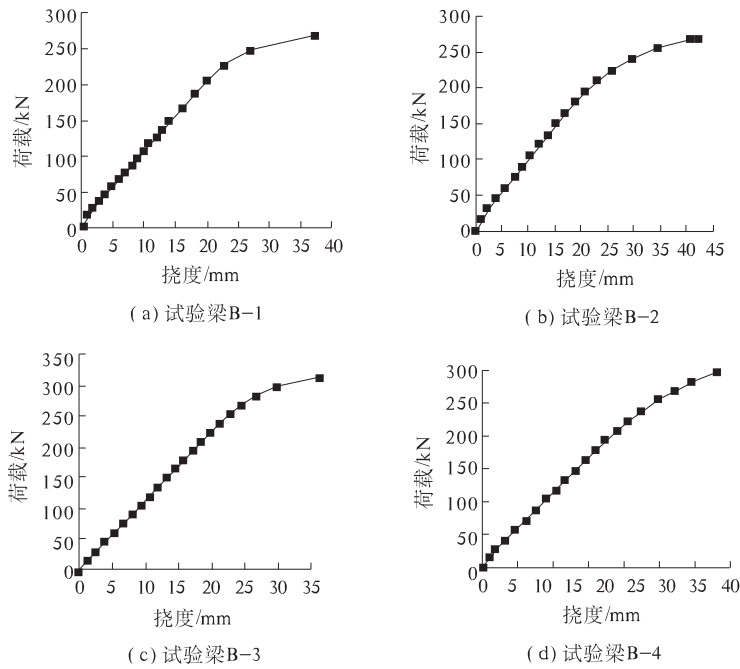


图 4 试验梁弯矩—跨中挠度曲线
Fig.4 Curve of load deflection of test beams

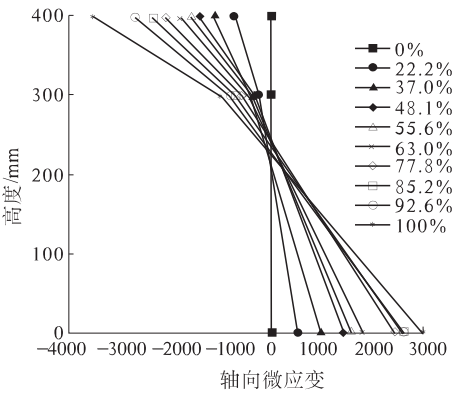


图 5 B-1 控制截面应变分布
Fig.5 Distribution of strain along the critical section of B-1

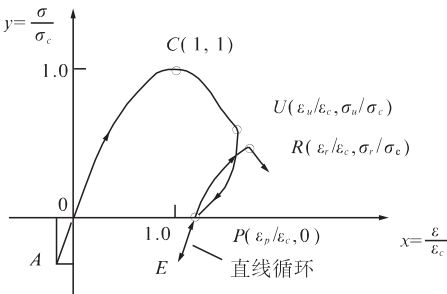


图 6 混凝土二次受荷应力—应变曲线
Fig.6 Relation of stress strain of concrete secondary load

将加固梁在纯弯段沿高度方向分为 n 个条带, 根据平截面假定, 得到钢管和钢筋的应变、受压区边缘和第 i 条混凝土的压应变与 CFRP 布的应变相关关系. 采用相应的钢筋、混凝土本构关系, 由力平衡条件求出混凝土实际受压区高度, 进而可求得试验梁的正截面受弯承载力.

3.2 抗弯承载力计算值与试验值比较

对用无机胶粘贴 CFRP 布加固后的损伤有粘结预应力混凝土组合梁的受弯弯承载力进行计算, 结果如表 3 所示, 其中 M_t^u 为试验梁的极限承载力实测值, M_c^u 为试验梁的极限承载力计算值.

表 3 极限承载力计算值与试验值比较

Tab.3 Test between the calculated and test values of ultimate bearing capacity kN · m				
试验梁	B-1	B-2	B-3	B-4
M_t^u	397.0	394.2	475.3	444.0
M_c^u	395.3	414.9	441.5	425.6
M_c^u/M_t^u	1.00	1.05	0.93	0.96

由表 3 可以得出, 加固梁正截面抗弯承载力计算值与试验值的比值 X 的平均值为 $\bar{X} = 0.99$, 标准差为 $\sigma = 0.05$, 变异系数 $\delta = 0.05$, 计算值与试验值吻合较好.

4 加固组合梁刚度分析

一般受弯构件承载力的 45% 与荷载效应标准组合值在数值上基本相等,承载力的 70% 与荷载效应基本组合值大致相当^[8].

表 4 试验梁受弯刚度平均值比较

Tab.4 Measured bending rigidity of strengthened beams

梁号	挠度/mm		弯矩/(kN·m)		刚度×10 ¹³ / (N·mm ²)		$\frac{B_{0.45}}{B_{0.70}}$
	$f_{0.45}$	$f_{0.70}$	$M_{0.45}$	$M_{0.70}$	$B_{0.45}$	$B_{0.70}$	
B-1	11.77	18.31	178.66	277.54	2.01	2.01	1.00
B-2	12.69	19.61	177.38	275.55	1.85	1.86	1.01
B-3	13.29	18.97	213.88	332.34	2.30	2.32	1.01
B-4	12.34	17.69	199.79	310.40	2.14	2.04	0.95

由表 4 可知,加固梁的刚度值 $B_{0.45}$ 和 $B_{0.70}$ 相差不大,可认为荷载小于极限荷载的 70% 时,该类加固梁的受弯刚度为定值.且考虑极限荷载的 45% 与荷载效应标准组合值大致相当,笔者认为 $f_{0.45}$ 和 $B_{0.45}$ 分别与荷载效应标准组合作用下的挠曲变形 f_k 和短期刚度 B_s 在数值上近似相等.

参考文献[9]构建该类加固组合梁在荷载效应标准组合作用下的短期刚度表达式(1). E_c 为混凝土弹性模量; I_0 为梁换算截面惯性矩; α_E 为钢管弹性模量与混凝土弹性模量的比值; a 、 b 为实常数; ρ 为纵向受拉钢筋综合配筋率,

$$B_s = \frac{0.85E_cI_0}{a + \frac{b}{\alpha_E\rho}} \tag{1}$$

在荷载效应标准组合作用下此类加固梁的跨中挠度 $f_k \approx f_{0.45}$, 由图乘法得到第 i 根试验梁在荷载效应标准组合作用下的跨中挠度计算值 $f_{k,i}$ 和实测挠度值 $f_{0.45,i}$, 令 $\prod = \sum_{i=1}^4 (f_{k,i} - f_{0.45,i})^2$, 建立变分方程组 $\frac{\partial \prod}{\partial a} = 0$ 和 $\frac{\partial \prod}{\partial b} = 0$, 得到 $a = 0.53$, $b = 0.34$. 考虑受弯破坏及粘贴 CFRP 布对加固梁刚度的影响后, 此类加固梁在荷载效应标准组合作用下的短期刚度公式可表示为

$$B_s = \frac{0.85E_cI_0}{0.53 + \frac{0.34}{\alpha_E\rho}} \tag{2}$$

由于受弯构件承载力的 45% 与荷载效应标准组合值基本相等,故在荷载效应标准组合作用下加固组合梁实测刚度取为极限承载力的 45% 时的刚度值. 将相关物理量代入式(2), 即得到加固组合梁的刚度计算值, 则刚度计算值 B_s^c 与实测

对 4 根加固梁的弯矩与挠度实测值进行整理, 由挠度公式 $f = s \frac{Ml_0^2}{B}$, 得到其刚度值 $B_{0.45}$ 和 $B_{0.70}$, 如表 4 所示.

值 B_s^t 如表 5 所示.

表 5 刚度计算值与实测值比较

Tab.5 Comparison between the calculated and test values of bending rigidity

梁号	$B_s^t /$ (10 ¹³ N·mm ²)	$B_s^c /$ (10 ¹³ N·mm ²)	B_s^c / B_s^t
B-1	2.01	1.89	0.94
B-2	1.85	1.75	0.95
B-3	2.30	2.41	1.05
B-4	2.14	2.16	1.01

由表 5 可知, 由公式(2) 计算得到的加固组合梁刚度值与实测值吻合较好.

5 结论

- (1) 用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤组合梁进行受弯试验时, 发生了继 CFRP 布被拉断后混凝土被压碎的破坏模式.
- (2) 试验结果表明, 用无机胶粘贴 CFRP 布加固经历承载能力极限状态的组合梁是可行的.
- (3) 基于试验结果, 建立了考虑原梁受荷历程影响的用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土梁的正截面受弯承载力计算方法, 提出了与试验结果吻合良好的刚度计算公式.

参考文献:

[1] 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.

[2] WILLIAMS B, BISBY L A, KODUR V K R, et al.

Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs[J]. Composites: Part A , 2006, 37(8):1151 – 1160.

[3] LEES J M, WINISTORFER A U, MEIER U. External prestressed carbon fiber-reinforced polymer straps for shear enhancement of concrete[J]. Journal of Composites for Construction,2002,6(4):249 – 256.

[4] CHEN Wei-hong, QIU Hong-xing, CUI Shuang-shuang. High-temperature resistance performance of an inorganic adhesive for concrete structures strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of WUHAN University of Technology materials Science, ,2013,28(5):950 – 954.

[5] 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 – 145.

[6] 张博一,郑文忠,苑忠国. 预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的受力性能[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(3):636 – 641.

[7] 郑文忠,谭军,曾凡峰. CFRP 布加固无粘结预应力连续梁受力性能试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2008,35(6):11 – 17.

[8] 谭军. 碳纤维布加固预应力混凝土梁抗弯性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院, 2008:77 – 94.

[9] 陶学康,王逸,杜拱辰. 无粘结部分预应力混凝土的变形计算[J]. 建筑结构学报, 1989(1):20 – 27.

Flexural Behavior of Damaged Composite Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with Inorganic Adhesive

CHEN Wei-hong¹, MA Jing-ming², CUI Shuang-shuang³

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Power Grid Department, State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095, China; 3. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Organic epoxy adhesives are usually used in strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. However, due to the low softening points of organic adhesives which are about 60 ℃, concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with organic epoxy adhesives can not meet the heat resisting requirements. In this paper, an inorganic adhesive, which can resist at least 600 ℃ high temperature, was prepared to paste CFRP sheets to strengthen four simply supported bonded prestressed composite beams encased circular steel tube truss after ultimate limit state, and test on flexural behavior of these four beams was also performed. Moreover, normal section load-bearing capacity of these beams and the curve load-deflection at mid-span were obtained. Experimental results show that it is feasible to strengthen concrete members with CFRP sheets bonded with inorganic adhesive. Based on the experimental results and theoretical study, computational method of stiffness is proposed for calculating bending rigidity and normal section load-bearing capacity of concrete simply supported beams strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic adhesive. The formula of bending rigidity calculation was also set up, whose results are in good agreement with testing data.

Key words: inorganic adhesive; CFRP sheets; strengthen; composite beam; flexural behavior