

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.021

混凝土徐变对碳纤维片材加固混凝土梁抗弯承载力的影响

吴相豪

(上海海事大学海洋环境与工程学院,上海 200135)

摘要:基于钢筋混凝土梁在持续荷载作用下混凝土的应力-应变本构关系,研究混凝土徐变对碳纤维片材加固混凝土梁抗弯承载力的影响规律.根据算例分析,得出随着持续荷载水平的提高,加固混凝土梁的抗弯承载力逐渐减小,抗弯承载力的增加值降低系数逐渐增大.混凝土徐变变形使碳纤维片材加固混凝土梁的抗弯承载力增加值降低 2.6% 左右的结果.该结果可为碳纤维片材加固混凝土结构设计提供参考.

关键词:混凝土梁;抗弯承载力;混凝土徐变;碳纤维片材;加固

中图分类号:TU375.1 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2008)05-0679-04

碳纤维片材加固修补混凝土结构技术具有高强高效、抗蚀性好和施工便捷等优点,被广泛应用于桥梁、民用建筑、海洋、地下工程等结构中.目前,国内外学者对碳纤维片材加固混凝土梁抗弯承载力的研究比较多,取得了许多有价值的研究成果^[1-7],为碳纤维片材加固混凝土结构提供了科学依据.一般来说,碳纤维片材加固对象大部分是一些已建成、并使用了一定时间的混凝土结构.这些结构在持续荷载作用下已经产生了徐变变形,而现有的相关研究成果并未考虑混凝土徐变变形对加固混凝土梁抗弯承载力的影响.混凝土徐变变形对碳纤维片材加固混凝土梁抗弯承载力的影响有多大,尚未见文献报道.

本文基于钢筋混凝土梁在持续荷载作用下混凝土的应力-应变本构关系,探讨混凝土徐变变形对碳纤维片材加固混凝土梁抗弯承载力的影响规律.

1 抗弯承载力计算公式

碳纤维片材加固混凝土梁的极限抗弯承载力 M_u 的计算公式^[7]如下.

a. 当混凝土受压区高度 $x > \xi_{fcb}h$ 时,

$$M_u = f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' \left(h_0 - a_s' \right) + E_{fc} \epsilon_{fc} A_{fc} \left(h - h_0 \right) \tag{1}$$

混凝土受压区高度 x 和受拉侧碳纤维片材拉应变 ϵ_{fc} 按式(2)(3)计算:

$$f_c b x = f_y A_s - f_y' A_s' + E_{fc} \epsilon_{fc} A_{fc} \tag{2}$$

$$x = \frac{0.8 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fc} + \epsilon_{fc0}} h \tag{3}$$

式中 f_c 为混凝土轴心抗压强度.

b. 混凝土受压区高度 $x \leq \xi_{fcb}h$ 时,

$$M_u = f_y A_s \left(h_0 - 0.5 \xi_{fcb} h \right) + E_{fc} [\epsilon_{fc}] A_{fc} h \left(1 - 0.5 \xi_{fcb} \right) \tag{4}$$

式中 ϵ_{fc0} ——考虑 2 次受力影响时,碳纤维片材的滞后应变; E_{fc} ——碳纤维片材的弹性模量; A_{fc} ——碳纤维片材的截面面积; ξ_{fcb} ——碳纤维片材加固混凝土梁的临界相对受压区高度系数; $[\epsilon_{fc}]$ ——碳纤维片材的允许拉应变; ϵ_{cu} ——混凝土极限压应变.

2 考虑徐变变形的滞后应变计算

持续荷载作用下混凝土的徐变变形将导致受压区混凝土与钢筋发生应力重分布,受压区混凝土最大压应力减小,边缘至中性轴的距离增大(如图 1 所示),而受拉钢筋拉力的变化很小.为简化计算,可假定受拉钢筋的拉力大小不变^[8].碳纤维片材加固混凝土梁在持续荷载作用下,混凝土徐变前、后截面应变分布情况如图 1 所示.

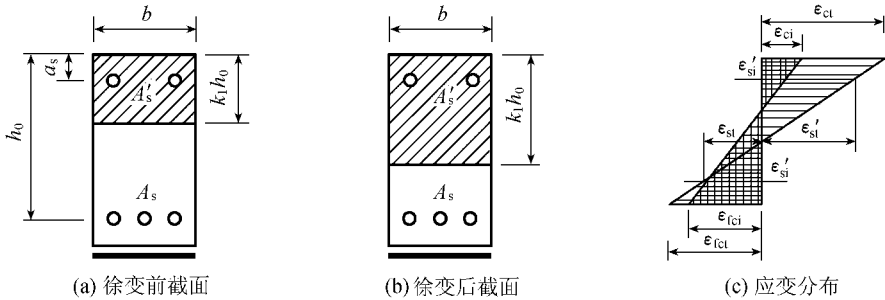


图 1 混凝土梁徐变前后的截面受力情况

Fig.1 Strain distribution of cross-section before and after concrete creep

钢筋混凝土梁在持续荷载作用下混凝土的应力-应变本构关系^[9]可表示为

$$\epsilon_{ct} = \frac{\sigma_{ci}}{E_c}(1 - 0.8)\varphi_t + \frac{\sigma_{ci}}{E_c}(1 + 0.8\varphi_t)$$
 (5)

式中: σ_{ci} 、 σ_{ct} —— t_0 、 t 时刻混凝土压应力; φ_t —— t 时刻混凝土徐变系数,按式(6)^[10]计算:

$$\varphi(t, \tau) = \frac{(t - \tau)^d}{B + (t - \tau)^d} \varphi_\infty$$
 (6)

式中: φ_∞ ——徐变系数终极值; B 、 d ——根据受压柱体试验数据确定的常数,分别取 10 和 0.6; τ ——加载龄期.

在粘贴碳纤维片材之前,由力的平衡可得

$$\frac{1}{2} \sigma_{ct} k_t b h_0 + \rho'_s b h_0 E_s \epsilon'_{st} - \rho_s b h_0 E_s \epsilon_{st} = 0$$
 (7)

式中: ρ'_s 、 ρ_s ——受压钢筋和受拉钢筋的配筋率; k_t —— t 时刻截面中性轴高度系数; E_s ——钢筋的弹性模量.

ϵ'_{st} 、 ϵ_{st} 分别按式(8)(9)计算:

$$\epsilon'_{st} = \epsilon_{ct} \frac{k_t h_0 - a'_s}{k_t h_0}$$
 (8)

$$\epsilon_{st} = \epsilon_{ct} \frac{h_0 - k_t h_0}{k_t h_0}$$
 (9)

将式(8)(9)代入式(7)得

$$k_t^2 + 2 \frac{\epsilon_{ct}}{\sigma_{ct}} (\rho'_s + \rho_s) E_s k_t - 2 \frac{\epsilon_{ct}}{\sigma_{ct}} \left(\rho'_s \frac{a'_s}{h_0} + \rho_s \right) E_s = 0$$
 (10)

令

$$\beta_1 = 2 \frac{\epsilon_{ct}}{\sigma_{ct}} (\rho'_s + \rho_s) E_s \quad \beta_2 = 2 \frac{\epsilon_{ct}}{\sigma_{ct}} \left(\rho'_s \frac{a'_s}{h_0} + \rho_s \right) E_s$$
$$k_t = \frac{-\beta_1 + \sqrt{\beta_1^2 + 4\beta_2}}{2}$$
 (11)

在粘贴碳纤维片材之前,图 1 中各力对受拉钢筋合力作用点取矩得

$$M_c = \frac{\sigma_{ct}}{2} b k_t h_0 \left(h_0 - \frac{k_t h_0}{3} \right) + \sigma'_{st} A'_s (h_0 - a'_s)$$
 (12)

由式(5)(8)(10)和(12)可以求出任意时刻 t 的中性轴高度系数 k_t 和受压区混凝土的应变值 ϵ_{ct} .
由图 1(c)所示的几何关系,得碳纤维片材加固混凝土梁的滞后应变 ϵ_{fct} 为

$$\epsilon_{fct} = \left(\frac{h}{k_t h_0} - 1 \right) \epsilon_{ct}$$
 (13)

3 算例分析

设有一截面尺寸为 150 mm×250 mm 的钢筋混凝土简支梁,梁长 2700 mm,混凝土强度等级 C20,梁的受拉侧配置 2 根直径为 16 mm 的Ⅱ级纵向钢筋,受压侧配置 2 根直径为 8 mm 的Ⅱ级纵向钢筋,箍筋采用 6@100 的Ⅰ级钢筋,混凝土保护层厚度为 10 mm。梁浇筑 28 d 后承受持续荷载作用,荷载作用时间为 5 d。现在梁底部粘贴 2 层碳纤维片材加固钢筋混凝土梁,碳纤维片材单层厚度 0.111 mm,各材料性能参数见表 1。

3.1 滞后应变计算

用钢筋混凝土结构设计理论,求出该钢筋混凝土梁在加固前的极限抗弯承载力 $M_{u0}=28.26\text{ kN}\cdot\text{m}$,根据本文提出的钢筋混凝土梁滞后应变的计算方法,编制了相应的分析程序,求得不同持续荷载水平作用下,考虑混凝土徐变变形的钢筋混凝土梁的滞后应变(见表 2)。

根据钢筋混凝土梁的滞后应变(表 2),用文献[7]提出的碳纤维片材加固钢筋混凝土梁抗弯承载力计算公式,可以求出考虑滞后应变的钢筋混凝土梁抗弯承载力。因各级持续荷载水平作用下的混凝土受压区高度 x 均大于 $\xi_{\text{fcb}}h=49.6\text{ mm}$,故采用式(1)进行求解。经计算,不考虑滞后应变的加固钢筋混凝土梁抗弯承载力为 $36.32\text{ kN}\cdot\text{m}$,考虑滞后变形的加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力计算结果见表 3。

表 2 钢筋混凝土梁的滞后应变

Table 2 Lagging strain of reinforced concrete beam

持续 荷载水平	滞后应变 $\varepsilon_{\text{fcb}}/10^{-4}$	
	未考虑混凝土徐变变形	考虑混凝土徐变变形
$20\% \times M_{u0}$	1.791	4.242
$25\% \times M_{u0}$	2.823	5.302
$30\% \times M_{u0}$	3.854	6.234
$35\% \times M_{u0}$	4.885	7.273
$40\% \times M_{u0}$	5.916	8.312
$45\% \times M_{u0}$	6.948	9.351
$50\% \times M_{u0}$	7.989	10.46

注:持续荷载作用 5 d,混凝土徐变系数终极值取 3.0。

3.2 承载力增加值降低系数

为了便于比较,引入加固钢筋混凝土梁抗弯承载力增加值降低系数 β 的概念,即

$$\beta = \frac{\Delta M_{u0} - \Delta M_u}{\Delta M_{u0}}$$

$$\Delta M_{u0} = 36.32 - 28.26 = 8.06\text{ kN}\cdot\text{m}$$

式中 ΔM_{u0} ——不考虑滞后应变的加固钢筋混凝土梁抗弯承载力增加值; ΔM_u ——考虑滞后应变的加固钢筋混凝土梁抗弯承载力增加值。加固钢筋混凝土梁抗弯承载力增加值降低系数 β 的计算结果见表 4。

从表 2~4 可以看出:随着持续荷载水平的提高,混凝土梁的滞后应变逐渐增大,考虑混凝土徐变的滞后应变增幅更大,为前者的 1.31~2.37 倍。随着持续荷载水平的提高,加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力逐渐减小,也就是加固钢筋混凝土梁抗弯承载力的增加值减小,加固钢筋混凝土梁抗弯承载力的增加值降低系数逐渐增大。其中,未考虑混凝土徐变变形的承载力增加值降低系数由 1.86% 增加至 8.44%,考虑徐变变

表 1 材料性能参数

Table 1 Performance parameters of materials

材料	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	极限 应变/ 10^{-6}	弹性模量 E/GPa
混凝土		13.5	0.003 3	22.5
钢筋	335			210
碳纤维布		3 350	15 802	212

表 3 考虑滞后应变的抗弯承载力计算值 M_u

Table 3 Calculated value of flexural bearing capacity taking into account lagging strain

持续荷载	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	
	未考虑混凝土徐变变形	考虑混凝土徐变变形
$20\% \times M_{u0}$	36.17	35.96
$25\% \times M_{u0}$	36.08	35.87
$30\% \times M_{u0}$	35.99	35.79
$35\% \times M_{u0}$	35.90	35.70
$40\% \times M_{u0}$	35.81	35.61
$45\% \times M_{u0}$	35.73	35.52
$50\% \times M_{u0}$	35.64	35.42

表 4 加固梁抗弯承载力增加值降低系数 β

Table 4 Reduction coefficient of the added value of flexural bearing capacity of reinforcement beam

持续荷载	抗弯承载力增加值 $\Delta M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$		抗弯承载力增加值 降低系数 $\beta/\%$	
	未考虑 徐变变形	考虑 徐变变形	未考虑 徐变变形	考虑 徐变变形
$20\% \times M_{u0}$	7.91	7.70	1.86	4.47
$25\% \times M_{u0}$	7.82	7.61	2.98	5.58
$30\% \times M_{u0}$	7.73	7.53	4.09	6.58
$35\% \times M_{u0}$	7.64	7.44	5.21	7.69
$40\% \times M_{u0}$	7.55	7.35	6.33	8.81
$45\% \times M_{u0}$	7.47	7.26	7.32	9.93
$50\% \times M_{u0}$	7.38	7.16	8.44	11.17

形的承载力增加值降低系数由 4.47% 增加至 11.17% ,普遍比前者大 2.6% 左右.

4 结 语

混凝土徐变变形对碳纤维片材加固钢筋混凝土梁的抗弯承载力有一定的影响,可使加固钢筋混凝土梁抗弯承载力增加值降低 2.6% 左右.因此,对比较重要的混凝土结构进行碳纤维片材加固设计时,应考虑混凝土徐变变形的影响,确保加固结构的安全.

参考文献:

- [1] ERKI M A , RIZKALLA S H. FRP reinforcement for concrete structures[J]. Concrete International ,1997 4 :48-54.
- [2] ACI COMMITTEE 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures[R]. Detroit :American Concrete Institute ,2000.
- [3] 胡孔国,陈小兵,岳清瑞,等.考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J].建筑结构,2001(7):63-64.
- [4] 王荣国,代成琴,刘文博,等.CFRP 加固混凝土梁抗弯极限承载力的计算分析[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(3):312-314.
- [5] 王文伟,赵国藩,黄承逵,等.碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J].工程力学,2004,21(4):172-178.
- [6] 于清,韩林海,陶忠.FRP 约束混凝土构件抗弯承载力研究[J].土木工程学报,2004,37(11):33-40.
- [7] CECS 146 :2003,碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S].
- [8] SAMRA R M. Time-dependent deflection of reinforced concrete beam revisited[J]. Journal of Structural Engineering ,ASCE ,1997 ,123 (6):823-830.
- [9] SAMRA R M. New analysis for creep behavior in concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering ,ASCE ,1995 ,121(3):399-407.
- [10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE(ACI). Prediction of creep ,shrinkage ,and temperature effects in concrete structures[R]. Farmington Hills :Manual of Concrete Practice ,ACI 209R-92 ,1992.

Effect of concrete creep on flexural bearing capacity of concrete beams strengthened with CFRP laminates

WU Xiang-hao

(College of Ocean Environment & Engineering , Shanghai Maritime University , Shanghai 200135 , China)

Abstract : Based on the stress-strain model of reinforced concrete beams under sustained loads , the influence of concrete creep on flexural bearing capacity of concrete beams strengthened with CFRP laminates was studied . The results show that the flexural bearing capacity of concrete beams decreases and the reduction coefficient of the added value of flexural bearing capacity increases with the increase of the sustained load , and the added value of the flexural bearing capacity of concrete beams strengthened with CFRP laminates decreases by about 2.6% . These results can provide a reference for the design of concrete structures strengthened with CFRP laminates .

Key words : concrete beam ; flexural bearing capacity ; concrete creep ; carbon fiber reinforced plastic laminates ; reinforcement