

无粘结 CFRP 筋预应力梁刚度及裂缝的计算

白崇喜, 郑文忠

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, baichongxi241830@163.com)

摘要: 为了推导表达形式统一的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁刚度及裂缝宽度计算公式, 定义了无粘结 CFRP 筋应力增量与有粘结钢筋应力增量的比值为无粘结 CFRP 筋等效折减系数. 在刚度计算公式中用无粘结 CFRP 筋的等效折减面积与普通钢筋面积之和与截面有效面积之比这一等效纵向受拉钢筋配筋率替代现行规范中的纵向受拉钢筋配筋率, 在裂缝宽度计算公式中用无粘结 CFRP 筋的等效折减面积与普通钢筋面积之和这一等效纵向受拉钢筋面积替代现行规范中的纵向受拉钢筋面积. 从而形成了与现行规范相协调的刚度及裂缝宽度计算公式, 公式的计算结果与试验结果吻合良好.

关键词: 无粘结 CFRP 筋; 受弯构件; 刚度; 裂缝

中图分类号: TU377.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)08-1206-05

Calculation for stiffness and crack of beams partially prestressed with unbonded CFRP tendons

BAI Chong-xi, ZHENG Wen-zhong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, baichongxi241830@163.com)

Abstract: In order to deduce unified expressed formulas of stiffness and crack width of concrete beams partially prestressed with unbonded CFRP tendons, the equivalent reduced coefficient of unbonded CFRP tendons is defined as the ratio of the stress increment of unbonded CFRP tendons to that of bonded steel bars. If the ratio of longitudinal tension reinforcement in the stiffness formula in current code is replaced by the ratio of the sum of the equivalent reduced area of unbonded CFRP tendons and the area of steel bars to effective cross-sectional area, and the area of total longitudinal tension reinforcement in the crack width formula in current code is replaced by the sum of the equivalent reduced area of unbonded CFRP tendons and the area of steel bars, the stiffness formula and crack width formula in accordance with current code can be developed. The calculated results by using these two formulas are in good agreement with test results.

Key words: unbonded CFRP tendons; flexural member; stiffness; crack

无粘结碳纤维增强聚合物(Carbon fiber reinforced polymer, 简称 CFRP)筋部分预应力混凝土梁是指以 CFRP 筋做无粘结预应力筋、以环氧涂层钢筋或普通钢筋做非预应力筋的混凝土梁. 因 CFRP 筋具有强度高、耐腐蚀性好等特点, 环氧涂层钢筋的环氧涂层阻断了侵蚀性介质对钢筋的不利作用, 故无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁具有良好耐久性.

国内外对无粘结 FRP 筋预应力混凝土简支梁的受力性能进行了试验研究^[1-6]. 文献[5-6]分别设计制作了 8 根和 4 根无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土简支梁, 并基于各自的试验结果建立了这类梁的刚度及裂缝宽度计算公式, 但计算公式的表达方式存在一定差别. 因此为了统一计算公式的表达方式, 推导这类梁的刚度及裂缝宽度计算公式是必要的.

1 刚度及裂缝宽度计算公式的对比

文献[5]试验梁综合配筋指标 β_0 为 0.102 ~

收稿日期: 2009-03-29.

基金项目: 国家教育部长江学者奖励计划资助项目(2009-37).

作者简介: 白崇喜(1981—), 男, 博士研究生;

郑文忠(1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授.

0.276, CFRP 筋弹性模量 E_f 为 $1.4 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 纵向受拉非预应力筋为环氧涂层钢筋; 文献[6] 试验梁综合配筋指标 β_0 为 0.277 ~ 0.430, CFRP 筋弹性模量 E_f 为 $1.75 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 纵向受拉非预应力筋为普通钢筋. 除以上主要区别外, 这两篇文献的试验梁设计及试验方案相似.

1.1 文献[5-6]短期刚度计算公式的比较

文献[5]建立的短期刚度计算公式:

$$B_s = \frac{0.80E_c I_0}{k_{cr} + (1 - k_{cr})\omega}, \quad (1)$$

$$\omega = 2.157 - 2.344\lambda + \frac{0.133}{\alpha_E \rho}, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_{te} A_f}{\sigma_{fe} A_f + f_y A_s}, \quad (3)$$

$$\alpha_E \rho = \frac{E_f A_f + E_s A_s}{E_c b h_s}. \quad (4)$$

文献[6]建立的短期刚度计算公式:

$$B_s = \frac{0.85E_c I_0}{k_{cr} + (1 - k_{cr})\omega}, \quad (5)$$

$$\omega = 1.326 + 0.656\lambda + \frac{0.102}{\alpha_E \rho}, \quad (6)$$

$$\alpha_E \rho = \frac{E_f (A_f + A_s)}{E_c b h}. \quad (7)$$

式(6)中, λ 的计算同式(3), σ_{te} 为 CFRP 筋的有效预应力; A_f 为 CFRP 筋的面积; 式(1) ~ (7) 中其余符号意义同文献[7].

从式(1) ~ (7) 可以看出, 文献[5-6] 中梁刚度计算公式表达不统一之处主要是:

- 1) 梁的开裂刚度取值有差别;
- 2) 计算反映构件配筋及截面特征的综合指标 ω 时对预应力度 λ 的影响考虑不同;
- 3) 对换算配筋率 $\alpha_E \rho$ 的认识不同.

1.2 文献[5-6]裂缝宽度计算公式的比较

文献[5]建立的短期裂缝宽度平均值的计算公式:

$$w_m = \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.16 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right), \quad (8)$$

$$\psi = 1.062 \times \left(1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}} \right), \quad (9)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k - N_{p0}(z - e_p)}{\left(0.37 \frac{E_f}{E_s} A_f + A_s \right) z}, \quad (10)$$

$$z = \left[1.0 - 0.4(\alpha_E \rho)^{1/2} - 0.12 \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] \cdot h_0, \quad (11)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}}. \quad (12)$$

式中, d_{eq} 为受拉区纵向受拉非预应力钢筋的等效直径; N_{p0} 为混凝土法向预应力等于零时无粘结 CFRP 筋及非预应力钢筋的合力; $\alpha_E \rho$ 按式(4) 计算; A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积, 按 1990CEB - FIP 模式规范(混凝土结构), 取 $A_{te} = 2.5 b (h - h_0)$; 其余符号意义同文献[8].

文献[6]建立的短期裂缝宽度平均值的计算公式:

$$w_m = \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right), \quad (13)$$

$$\alpha_c = 0.81, \quad (14)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{sk}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k - M_0}{0.87h_0 \left(0.35 \frac{E_f}{E_s} A_f + A_s \right)}. \quad (16)$$

式中, M_0 为混凝土法向应力为零时的作用弯矩; 其余符号意义同文献[7].

从式(8) ~ (16) 可以看出, 文献[5-6] 中梁短期裂缝宽度平均值的计算公式表达不统一之处主要是:

1) 在计算平均裂缝间距时用到的有效受拉混凝土截面面积 A_{te} 的计算方法不同, 导致了平均裂缝间距公式不同;

2) 纵向受拉钢筋的等效应力 σ_{sk} 计算公式中内力臂取值方式不同, 并且文献[6] 没有说明 M_0 的计算方法, 而文献[5] 也没有给出 N_{p0} 的取值方法;

3) 尽管形式上式(9) 比式(15) 大了 6.2%, 但实际上文献[5] 在计算裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数 ψ 时按 1990CEB - FIP 模式规范(混凝土结构) 计算 A_{te} , 而文献[6] 则是按我国规范^[7-8] 计算 A_{te} 的;

4) 文献[6] 考虑了裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度影响的系数 α_c , 而文献[5] 没有考虑.

2 无粘结 CFRP 筋等效折减系数

在计算无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期裂缝宽度平均值时, 文献[5-6] 均基于各自的试验结果给出了无粘结 CFRP 筋等效折减系数, 但在无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期刚度计算公式中并没有引入无粘结 CFRP 筋等效折减系数.

设想给出一个无粘结 CFRP 筋等效折减系数 λ_f , 通过用无粘结 CFRP 筋预应力混凝土梁等效纵向受拉钢筋配筋率 ρ_e 代替总配筋率 ρ 来考虑无

粘结 CFRP 筋对构件刚度的贡献较相同数量的有粘结筋小的影响. 无粘结 CFRP 筋预应力混凝土梁等效纵向受拉钢筋配筋率 ρ_e 为

$$\rho_e = \frac{\lambda_f A_f + A_s}{bh_0} \quad (17)$$

式中: λ_f 为在使用荷载作用下无粘结 CFRP 筋应力增量与有粘结筋应力增量的比值, λ_f 综合反映了预应力度 λ 及 CFRP 筋弹性模量 E_f 的影响.

基于试验结果,文献[5]取 $\lambda_f = 0.37 (E_f/E_s)$, 文献[6]取 $\lambda_f = 0.35 (E_f/E_s)$, 本文基于他们所做的 12 根试验梁的试验数据,取 $\lambda_f = 0.36 (E_f/E_s)$.

对无粘结 CFRP 筋等效折减系数 λ_f 的变化规律有待深入研究.

3 无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁刚度计算方法

3.1 计算公式的建立

CFRP 筋预应力混凝土梁短期刚度计算方法有双直线法^[7-8]和有效惯性矩法^[9-10], 为与我国规范^[7-8]衔接, 本文采用双直线法.

文献[6]依据混凝土结构设计规范(GB50010-2002)中的规定将试验梁开裂前短期刚度取为 $B_s = 0.85 E_c I_0$, 但是试验结果表明试验梁开裂前短期刚度更接近于 $B_s = 0.8 E_c I_0$.

综合考虑之后, 无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁开裂前短期刚度为

$$B_s = 0.8 E_c I_0 \quad (18)$$

根据双折直线理论, 无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁开裂状态下的短期刚度计算公式为

$$B_s = \frac{E_c I_0}{\frac{1}{\beta_\alpha} + \left(\frac{1}{\beta_{cr}} - \frac{1}{\beta_\alpha} \right) \frac{M_{cr}/M_k - \alpha}{1 - \alpha}} \quad (19)$$

式中, β_{cr} 为试验梁达到开裂弯矩时梁刚度降低系数, 取为 0.8; M_k 为按荷载标准组合计算的弯矩值; M_{cr} 为受弯构件正截面开裂弯矩值; α 为开裂弯矩与刚度计算终点所对应弯矩的比值; β_α 为试验梁开裂后刚度计算终点的刚度降低系数, 根据下文可表示为 $\beta_{0.5}$.

统计试验梁混凝土开裂时及非预应力筋屈服时所对应的荷载可以算得文献[5]的 M_{cr}/M_y 为 0.28~0.48, 文献[6]的 M_{cr}/M_y 为 0.29~0.37, 因此刚度计算终点. 可统一取为 0.5. 12 根试验梁实测的 $1/\beta_{0.5}$ 与 $1/\alpha_E \rho_e$ 的关系如图 1 所示, 对图中数据点拟合得式(20), 式中 $\alpha_E = E_s/E_c$.

$$\frac{1}{\beta_{0.5}} = 1.49 + \frac{0.07}{\alpha_E \rho_e} \quad (20)$$

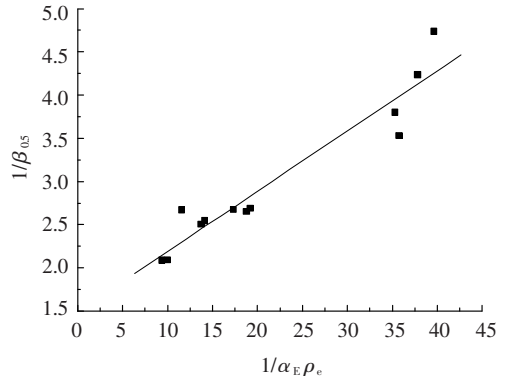


图 1 $1/\beta_{0.5}$ 与 $1/\alpha_E \rho_e$ 之间的关系

将式(20)及 $\beta_{cr} = 0.8$ 代入到式(19)中, 得出试验梁短期刚度计算公式

$$B_s = \frac{0.8 E_c I_0}{k_{cr} + (1 - k_{cr}) \omega} \quad (21)$$

式中: $k_{cr} = \frac{M_{cr}}{M_k}$.

$$\omega = 1.386 + \frac{0.112}{\alpha_E \rho_e} \quad (22)$$

考虑荷载长期效应组合的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁的刚度计算公式为^[7-8]

$$B = \frac{M_k}{M_q (\theta - 1) + M_k} B_s \quad (23)$$

式中: M_q 为按荷载效应的准永久组合计算的弯矩值; θ 为考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数, 可取 $\theta = 2$ ^[7-8].

这里需要指出, 式(21)及式(23)的适用范围为综合配筋指标 $\beta_0 \leq 0.4$, 预应力度 $\lambda \leq 0.6$.

3.2 本文公式与文献[5-6]公式的比较

应用本文建立的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期刚度计算公式和文献[5-6]给出的短期刚度计算公式, 分别对文献[5-6]中的试验梁 $K_{cr} = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 时挠度的计算值与试验值之比进行了统计分析, 如表 1 所示.

由表 1 可以看出, 应用本文推导的计算公式的计算结果与这 2 篇文献试验数据均有良好的吻合, 与这 2 篇文献提出的计算公式的吻合程度相比, 前者不比后者差, 说明本文所推导的表达方式统一的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期刚度计算公式可应用于工程设计.

4 无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁裂缝宽度计算方法

4.1 计算公式的建立

裂缝宽度计算方法主要有两种^[5], 第一种方法是以裂缝处钢筋应力增量为基础的裂缝计算公

式,第二种方法是通过建立起与容许最大裂缝宽度相对应的容许名义拉应力来计算裂缝宽度,为与我国规范^[7-8]衔接,采取上述第一种方法计算裂缝宽度。

文献[5]在计算试验梁平均裂缝间距时取有效受拉混凝土截面面积 $A_{te} = 2.5b(h - h_0)$, 但 d_{eq}/ρ_{te} 项前的系数取 0.16; 文献[6]平均裂缝间

距公式与无粘结预应力混凝土结构技术规程 (JGJ92 - 2004)^[7] 及混凝土结构设计规范 (GB50010 - 2002)^[8] 相同. 为使平均裂缝间距公式表达统一, 取式(24)作为无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁平均裂缝间距的公式^[7-8]:

$$l_{cr} = 1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (24)$$

表1 挠度计算值与试验值之比的统计分析

受力阶段	本文建议公式		文献[5]公式		文献[6]公式		
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
文献 [5]	$K_{cr}=0.5$	1.088	0.108	1.005	0.050	0.924	0.095
	$K_{cr}=0.6$	1.068	0.092	0.994	0.053	0.914	0.081
	$K_{cr}=0.7$	1.048	0.081	0.986	0.065	0.908	0.078
	$K_{cr}=0.8$	1.009	0.070	0.963	0.065	0.890	0.071
文献 [6]	$K_{cr}=0.5$	1.053	0.004	1.055	0.045	0.956	0.009
	$K_{cr}=0.6$	1.054	0.037	1.057	0.072	0.961	0.035
	$K_{cr}=0.7$	1.0006	0.062	1.009	0.091	0.922	0.055
	$K_{cr}=0.8$	0.948	0.051	0.950	0.066	0.875	0.048

式中符号意义及 ρ_{te} 的计算方法见文献[7].

用式(24)计算文献[5]试验梁的裂缝间距, 计算值与实测值比值的平均值为 $\bar{x} = 0.961$, 标准差为 $\sigma_x = 0.024$, 变异系数为 $\delta_x = 0.025$. 应用文献[5]的平均裂缝间距公式的计算结果与实测值比值的平均值为 $\bar{x} = 0.994$, 标准差为 $\sigma_x = 0.130$, 变异系数为 $\delta_x = 0.131$. 对比表明由式(24)计算平均裂缝间距是可行的。

按式(25)计算梁的短期裂缝宽度平均值^[8]:

$$\omega_m = \alpha_c \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_{cr} \quad (25)$$

式(25)中 α_c 、 ψ 、 σ_{sk} 的计算方法:

1) 裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响系数 α_c . 文献[6]根据平均裂缝宽度公式反算出 $\alpha_c = 0.81$, 文献[5]没有考虑 α_c 的影响, 本文统一取混凝土结构设计规范 (GB50010 - 2002)^[8] 给出的 $\alpha_c = 0.85$.

2) 裂缝间非预应力筋应变不均匀系数 ψ .

不考虑纵向非预应力筋类别对 ψ 的影响, 即按式(15)取用。

3) 将无粘结 CFRP 筋等效为有粘结钢筋, 利用有粘结构钢筋的等效应力计算公式来计算 σ_{sk} :

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k - N_{f0}(z - e_f)}{(\lambda_f A_f + A_s)z} \quad (26)$$

式中: N_{f0} 是混凝土法向预应力等于零时无粘结 CFRP 筋及非预应力钢筋的合力; e_f 为 N_{f0} 的作用点至受拉区纵向无粘结 CFRP 筋和非预应力钢筋合力点的距离。

众所周知, 有粘结 CFRP 筋预应力混凝土受弯构件中, 预应力 CFRP 筋与其周围混凝土有良好的粘结, 其混凝土法向预应力等于零时预应力 CFRP 筋及非预应力钢筋的合力 N_{f0} 可方便地求出; 但无粘结 CFRP 筋预应力混凝土受弯构件中的无粘结筋相对于其周围混凝土可发生纵向相对滑动, 难以准确地求出 N_{f0} 的大小. 为此, 以一批按直线布置无粘结 CFRP 筋的预应力混凝土简支梁为分析对象, 按照无粘结 CFRP 筋的伸长与其周边混凝土的总伸长相等的原则, 得出 N_{f0} 的平均值大致为 $N_{f0} = 1.02 N_{fe}$ (N_{fe} 为预应力筋的有效预加力, 即 $N_{fe} = \sigma_{fe} \cdot A_f$), 统一取混凝土法向预应力等于零时无粘结 CFRP 筋及非预应力钢筋的合力为

$$N_{f0} = 1.02 N_{fe} \quad (27)$$

无粘结 CFRP 筋等效折减系数 λ_f 取前文提出的建议值 $\lambda_f = 0.36 (E_f/E_s)$.

内力臂 z 按式(28)计算^[8], 计算 e 时用 N_{f0} 代替 N_{p0} .

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] \cdot h_0 \quad (28)$$

因此, 无粘结 CFRP 筋及非预应力钢筋的等效应力 σ_{sk} 按式(29)计算

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k - 1.02 N_{fe}(z - e_f)}{\left(0.36 \frac{E_f}{E_s} A_f + A_s \right) z} \quad (29)$$

通过以上分析, 得到无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期裂缝宽度平均值的计算公式

$$w_m = 0.85\psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right). \quad (30)$$

式中 ψ 、 σ_{sk} 分别由式(15)、(29)计算得到。

这里需要指出,式(30)的适用范围为综合配筋指标 $\beta_0 \leq 0.4$, 预应力度 $\lambda \leq 0.6$ 。

本文所建立的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁裂缝宽度计算公式未考虑短期裂缝宽度的扩大系数 τ_s , 也未考虑长期作用影响的扩大系数 τ_l 。文献[6]通过对4根简支试验梁的实测裂缝宽度统计分析得到 $\tau_s = 1.31$, 而没有给出 τ_l 的取值, 文献[5]对 τ_s 和 τ_l 都没有给出取值。综合考虑之后, 在将本文建立的短期裂缝宽度平均值计算公式用于工程设计时, 应同时考虑短期裂缝宽度的扩大系数 $\tau_s = 1.66$ 和长期作用影响的扩大系数 $\tau_l = 1.5^{[8]}$ 。

4.2 本文公式与文献[5-6]公式的比较

在纵向受拉钢筋的等效应力 σ_{sk} 计算公式中, 假定文献[6]计算混凝土法向应力为零时的作用弯矩 M_0 的方法与本文相同, 即 $M_0 = 1.02 N_{fe}(z - e_f)$, 那么本文所建议的短期裂缝宽度平均值的计算公式与文献[6]给出的计算公式因裂缝间混凝土自身伸长对裂缝宽度的影响系数 α_c 的不同, 使得本文公式的计算结果偏大, 大约多出 $(0.85 \sim 0.81)/0.81 = 4.9\%$ 。

应用本文推导的短期裂缝宽度平均值的计算公式和文献[5]给出的计算公式, 对文献[5]中的8根试验梁 $M_k = 1.5 M_{cr}$ 、 $1.75 M_{cr}$ 、 $2 M_{cr}$ 时短期裂缝宽度平均值的计算值与试验值之比进行了统计分析, 如表2所示。

表2 短期裂缝宽度平均值的计算值与试验值之比的统计分析

受力阶段	本文建议公式		文献[5]公式	
	平均值	标准值	平均值	标准差
$M_k = 1.5 M_{cr}$	0.871	0.308	1.023	0.238
$M_k = 1.75 M_{cr}$	0.989	0.278	1.138	0.207
$M_k = 2.0 M_{cr}$	1.043	0.254	1.193	0.215

由表2可以看出, 应用本文建议的计算公式得出的计算结果与试验数据^[5]有良好的吻合, 与文献[5]的计算公式的吻合程度相比, 前者不比后者差, 说明本文所推导的表达方式统一的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁短期裂缝宽度平均值的计算公式可应用于工程设计。

5 结 论

1) 引入了无粘结 CFRP 筋等效折减系数的概念, 基于相关试验结果给出了其建议取值, 即 $\lambda_f = 0.36(E_f/E_s)$ 。

2) 推导了表达形式统一的无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土梁刚度及裂缝宽度计算公式, 公式计算结果与试验结果吻合良好, 可用于工程设计。

参考文献:

- [1] ZHENG W Z, BAI C X, CHENG D H. Experimental study on behaviors of unbonded prestressed concrete beams reinforced with CFRP tendons [J]. Key Engineering Materials, 2009, 400-402: 567-573.
- [2] 薛伟辰. 新型 FRP 筋预应力混凝土梁试验研究与有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 25(5): 103-108.
- [3] TOUTANJI H, SAAFI M. Performance of concrete beams prestressed with aramid fiber-reinforced polymer tendons [J]. Composite Structures, 1999, 44(1): 63-70.
- [4] SAAFI M, TOUTANJI H. Flexural capacity of prestressed concrete beams reinforced with aramid fiber reinforced polymer (AFRP) rectangular tendons [J]. Construction and Building Materials, 1998, 12(5): 245-249.
- [5] 孟履祥. 纤维塑料筋部分预应力混凝土梁受弯性能研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2005.
- [6] 程东辉, 郑文忠. 无粘结 CFRP 筋部分预应力混凝土简支梁试验与分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 59-66.
- [7] 中华人民共和国建设部. JGJ 92-2004 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] American Concrete Institute ACI 440.4R-04 Prestressing concrete structures with FRP tendons[R]. Detroit: American Concrete Institute, 2004.
- [10] ABDELRAHMAN A A, RIZKALLA S H. Deflection control of concrete beams prestressed by CFRP reinforcements [J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(2): 55-62.

(编辑 赵丽莹)