

预应力碳纤维布加固混凝土梁的抗弯承载力计算

赵新铭, 欧日强, 吴 瑾

(南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016)

摘要 在碳纤维布和预应力碳纤维布加固混凝土梁试验研究成果的基础上, 对预应力碳纤维布加固混凝土梁的破坏形式进行了分析. 利用等效转化原则将混凝土的非线性应力图形转化为等效矩形应力图形计算, 在此基础上提出抗弯承载力计算公式. 对二次受力情况进行了分析, 提出了滞后应变的计算公式. 经与试验结果比较, 公式计算值与试验值吻合良好.

关键词 预应力 碳纤维布 混凝土梁 抗弯承载力 非线性

中图分类号 :TU528.043

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2007)06-0673-04

目前, 我国有大量建筑因为已达到或超过使用寿命, 或因为使用功能发生改变等原因需要对建筑结构进行加固. 碳纤维增强塑料(CFRP)作为一种新材料在加固领域中得到推广并广泛应用. 但是 CFRP 作为高强度的材料, 强度通常都达到 3 000 MPa 以上, 而其弹性模量相对强度来说却低得多, 常用的一般为 230 GPa. 从目前大量的试验研究来看, CFRP 发挥较大的强度, 需要相当的变形; 当与钢筋共同工作, 钢筋完全发挥强度时, CFRP 才发挥出不到 20% 的强度, 难以抑制结构的变形与裂缝的发展^[1]. 为了更充分合理地发挥 CFRP 的高强特性, 一些学者和科研单位提出预应力碳纤维加固的方法, 这样 CFRP 在与构件共同工作前已经发挥了相当的强度, 既充分发挥 CFRP 的高强特性, 又能抑制构件的变形和裂缝的发展, 改善构件使用阶段的受力性能, 避免了碳纤维强度模量比值过高的矛盾.

1 破坏形式

根据试验研究, 普通碳纤维布受弯加固构件有以下几种破坏形式^[2]: (a) 超筋破坏, 即在受拉钢筋达到屈服前受压混凝土被压坏. 这种破坏的碳纤维布未被充分利用, 且为脆性破坏, 应予避免. (b) 受拉钢筋屈服后, 受压区混凝土压坏, 而碳纤维布未达到极限拉应变, 为适筋破坏 I. (c) 受拉钢筋屈服后, 碳纤维布达到极限拉应变拉断, 而此时受压区混凝土尚未压坏, 为适筋破坏 II. (d) 黏结破坏, 碳纤维布与混凝土基层间的黏结层剥离破坏, 为脆性破坏. (e) 保护层混凝土剪切受拉剥离破坏, 为脆性破坏. 由于碳纤维布与结构胶之间、结构胶与混凝土之间的黏结强度, 在保证粘贴质量的情况下, 都大于混凝土(或表层混凝土)的抗拉强度, 所以绝大多数的剥离破坏都发生在构件混凝土保护层区域内, 通常通过构造措施、规定最小混凝土强度来控制^[3]. 采用预应力碳纤维布加固时, 可以降低梁的竖向相对变形, 减小剥离剪应力, 避免了黏结剥离破坏, 相对地提高了极限承载力^[4]. 对于施加预应力的碳纤维布加固梁, 当所加预应力过大时, 可能会出现第 6 种破坏形式. 在钢筋屈服前, 碳纤维布达到极限拉应变拉断. 由于这种破坏形式也是脆性破坏, 在工程中可以通过合理控制预张拉量来避免. 本文分析预应力碳纤维布加固混凝土梁的抗弯承载力主要针对前 2 种破坏形式.

2 极限承载力计算

2.1 基本假定

(a) 平截面假定, 试验研究^[1]表明, 预应力碳纤维布加固混凝土梁的截面变形仍然符合平截面假定; (b) 混凝土梁开裂后不考虑受拉混凝土的作用; (c) 钢筋的应力-应变关系为理想弹塑性模型, 不考虑应力强化; (d) 混凝土的应力-应变关系采用 E. Hognestad 建议^[5]; (e) 预应力碳纤维布的应力-应变关系为线弹性关系.

收稿日期 2007-04-05

基金项目 江苏省自然科学基金资助项目(BK2006193) 江苏省 2006 年水利科技重点基金资助项目(苏水科[2006]5 号)

作者简介 赵新铭(1962—), 男, 河南巩义人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程和工程力学研究.

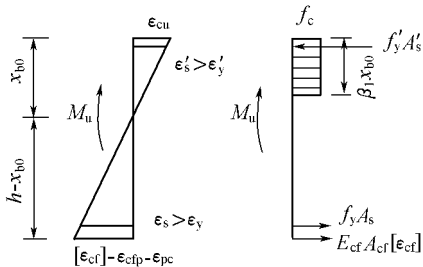


图 1 界限破坏时截面应变、应力分布

Fig.1 Strain-stress distribution in cross-section at balanced failure

2.2 界限破坏

图 1 为界限破坏状态,即受压区混凝土达到极限压应变的同时,碳纤维布达到极限拉伸应变而被拉断. $\epsilon_{cu} = 0.0038$,混凝土受压区的应力可以用等效矩形应力图表示^[5].

由于在加固前对碳纤维布施加预应力,预应力碳纤维布存在预拉应变 ϵ_{cfp} ,混凝土受拉区边缘也由于张拉在共同变形前产生了压应变 ϵ_{pc} ^[6]. 界限破坏时,碳纤维布的实际应变达到极限拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,即:

$$[\epsilon_{cf}] = \epsilon_{cfp} + \epsilon_{pc} + \epsilon_{cfn}$$

(1)

式中 ϵ_{cfn} 为碳纤维布名义拉应变.

设界限破坏时受压区高度为 x_{b0} ,由平截面假定有

$$\frac{x_{b0}}{h} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{cfn}} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{cfp} - \epsilon_{pc}}$$

(2)

等效矩形受压区高度 $x_b = \beta_1 x_{b0}$,混凝土强度等级小于或等于 C50 时, $\beta_1 = 0.8$.

$$f_c b x_b = f_y A_s + E_{cf} A_{cf} [\epsilon_{cf}] - f'_y A'_s$$

(3)

联立式(1)~(3)即可求得 x_b . 如果以 x 表示混凝土受压区边缘压应变为 ϵ_{cu} 时的受压区高度,则可以将 x 与 x_{b0} 进行比较判断构件的破坏状态.

2.3 适筋破坏 I

当 $x > x_{b0}$ 时,受拉钢筋达到屈服状态,混凝土边缘压应变达到极限压应变 ϵ_{cu} ,预应力碳纤维布拉应变 $\epsilon_{cfp} + \epsilon_{pc} + \epsilon_{cfn} < [\epsilon_{cf}]$. 受压区混凝土合力可采用等效矩形图计算,由平截面假定和力、力矩的平衡方程,对受拉钢筋取矩,求出极限弯矩:

$$M_u = f_c b \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a') + E_{cf} (\epsilon_{cfp} + \epsilon_{pc} + \epsilon_{cfn}) A_{cf} a$$

(4)

2.4 适筋破坏 II

当 $x < x_{b0}$ 时,受拉钢筋达到屈服状态,预应力碳纤维布达到其允许拉应变 $\epsilon_{cfp} + \epsilon_{pc} + \epsilon_{cfn} = [\epsilon_{cf}]$,混凝土边缘压应变 $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$,受压区混凝土应力不能按 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》中的等效矩形图计算. 本文基于 E. Hognestad 建议的本构关系,按 GB 50010—2002 规定的等效条件(混凝土压应力的合力相等;两图形中受压区合力的作用点不变)将实际应力图转换成等效矩形应力图. 等效矩形应力分析简图见图 2. 混凝土受压区边缘压应变 ϵ_c 对应的等效矩形应力图形系数 α_1 和 β_1 见表 1.

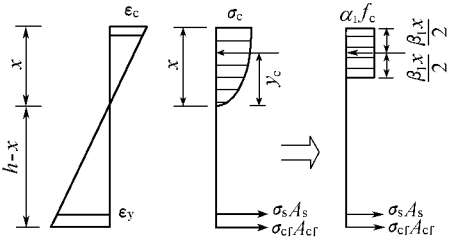


图 2 等效矩形应力分析简图

Fig.2 Equivalent rectangle for stress analysis

表 1 α_1, β_1 值

Table 1 Values of α_1 and β_1

ϵ_c	α_1	β_1	ϵ_c	α_1	β_1	ϵ_c	α_1	β_1	ϵ_c	α_1	β_1	ϵ_c	α_1	β_1
0.0010	0.5952	0.7000	0.0016	0.8067	0.7273	0.0022	0.9114	0.7638	0.0028	0.9284	0.8084	0.0034	0.9136	0.8484
0.0011	0.6379	0.7041	0.0017	0.8316	0.7326	0.0023	0.9183	0.7712	0.0029	0.9273	0.8155	0.0035	0.9097	0.8545
0.0012	0.6776	0.7083	0.0018	0.8535	0.7381	0.0024	0.9232	0.7787	0.0030	0.9255	0.8224	0.0036	0.9056	0.8605
0.0013	0.7144	0.7128	0.0019	0.8727	0.7439	0.0025	0.9263	0.7863	0.0031	0.9232	0.8291	0.0037	0.9013	0.8663
0.0014	0.7481	0.7174	0.0020	0.8889	0.7500	0.0026	0.9281	0.7938	0.0032	0.9204	0.8357	0.0038	0.8967	0.8720
0.0015	0.7788	0.7222	0.0021	0.9018	0.7566	0.0027	0.9287	0.8011	0.0033	0.9171	0.8421			

由平截面假定得

$$\frac{x}{h-x} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cfn}} \quad \epsilon'_s = \frac{x-a'}{x} \epsilon_c$$

(5)

水平力的平衡方程:

$$\begin{cases} \alpha_1 \beta_1 f_c b x + E_s A'_s \epsilon'_s = f_y A_s + E_{cf} A_{cf} [\epsilon_{cf}] & \epsilon'_s = \frac{x-a'}{x} \epsilon_c < \epsilon'_y \\ \alpha_1 \beta_1 f_c b x + A'_s f'_y = f_y A_s + E_{cf} A_{cf} [\epsilon_{cf}] & \epsilon'_s = \frac{x-a'}{x} \epsilon_c \geq \epsilon'_y \end{cases}$$

(6)

先假设 ϵ_c , 代入式(5) 求出 x 和 ϵ'_s , 并将查表 1 得到的 α_1 和 β_1 代入式(6). 通过试算可以得到使等式成立的 ϵ_c , 此 ϵ_c 即为适筋破坏 II 状态下的混凝土受压区边缘压应变.

对受压钢筋合力点取矩, 由弯矩平衡方程, 求出极限弯矩:

$$M_u = E_{cf} A_{cf} [\epsilon_{cf}] (h - a') + f_y A_s (h_0 - a') - \alpha_1 \beta_1 f_c b x \left(\frac{\beta_1 x}{2} - a' \right) \tag{7}$$

3 考虑二次受力情况下的承载力计算

一般加固结构为二次受力体系, 即在加固前结构已经承受荷载产生变形. 考虑二次受力时, 极限承载力状态下预应力碳纤维布实际应变:

$$\epsilon_{cf} = \epsilon_{cfp} + \epsilon_{pc} + \epsilon_{cfn} - \epsilon_{cf0} \tag{8}$$

式中 ϵ_{cf0} 为初始荷载下混凝土受拉边缘拉应变, 即预应力碳纤维布的滞后应变. 因此, 预应力碳纤维布加固二次受力构件的承载力计算关键是预应力碳纤维布滞后应变的计算.

文献[7-8]认为, 在初始弯矩作用下, 由于荷载一般比较小, 此时受压区混凝土的应力-应变关系可以认为是线弹性的, 由于混凝土抗拉承载力较低, 不考虑受拉区混凝土的作用.

但实际工程中, 混凝土梁在加固前, 截面可能处于以下 2 个受力阶段^[8]: (a) 梁未开裂阶段; (b) 梁已开裂阶段. 本文分别按这 2 个阶段计算梁在初始弯矩作用下的滞后应变 ϵ_{cf0} .

3.1 梁未开裂阶段

由于梁处于未开裂阶段, 因此可以将梁截面转换为单一材料组成的换算截面. 截面受压区高度:

$$x_0 = \frac{bh^2 + 2(\alpha_E - 1)(A_s h_0 + A'_s a')}{2bh + 2(\alpha_E - 1)(A_s + A'_s)} \tag{9}$$

其中

$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$$

未开裂截面惯性矩:

$$I_0 = \frac{1}{3} b x_0^3 + \frac{1}{3} b (h - x_0)^3 + A_s (\alpha_E - 1) (h - x_0)^2 + A'_s (\alpha_E - 1) (x_0 - a')^2 \tag{10}$$

受拉区混凝土边缘拉应变, 即预应力碳纤维布的滞后应变^[5]:

$$\epsilon_{cf0} = \frac{M_0 (h - x_0)}{0.85 E_c I_0} \tag{11}$$

3.2 梁已开裂阶段

在初始荷载作用下, 受拉区混凝土开裂, 不考虑混凝土受拉作用, 受压区混凝土可能承受较大压应力, 应力-应变关系不能简单地按线弹性计算. 本文基于前面的计算成果和分析方法, 把非线性应力图形转化成等效应力图形计算(图 3).

由平截面假定得

$$\epsilon_s = \frac{h_0 - x}{x} \epsilon_c \quad \epsilon'_s = \frac{x - a'}{x} \epsilon_c \tag{12}$$

水平力的平衡方程:

$$\alpha_1 \beta_1 f_c b x + E_s \epsilon'_s A'_s = E_s \epsilon_s A_s \tag{13}$$

对受拉钢筋合力点取矩, 弯矩的平衡方程:

$$M_0 = \alpha_1 \beta_1 f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{3} \right) + E_s \epsilon'_s A'_s (h_0 - a') \tag{14}$$

假设 ϵ_c 值, 查表 1 得相应的 α_1 和 β_1 值, 联立式(12)和式(13) 求出 x , 再代入式(14) 计算, 若等式成立, 则 ϵ_c 即为初始弯矩作用下混凝土受压区边缘的压应变, 则预应力碳纤维布的滞后应变:

$$\epsilon_{cf0} = \frac{h - x}{x} \epsilon_c \tag{15}$$

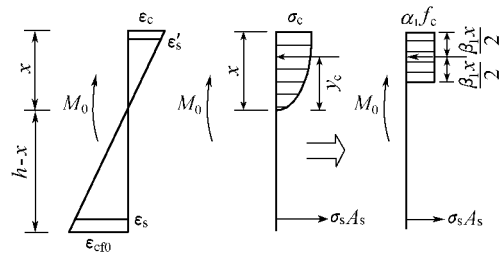


图 3 初始弯矩作用下滞后应变分析简图

Fig.3 Sketch of strain lag analysis under action of initial bending moment

4 算 例

利用本文提出的计算方法和计算公式,计算文献[6,9]的构件,混凝土梁截面均为150 mm×300 mm,截面配筋也相同,受拉钢筋2Ø12,受压钢筋2Ø6.5,计算结果与试验结果的对比见表2.

从表2中可以看出,计算值与试验值吻合较好,且偏安全.梁Lb-2,Lb-3虽然发生剥离破坏,但由于锚固和预应力的原因,使得构件剥离出现较晚,其承载也接近计算承载力.

5 结 论

- a. 在试验研究和理论计算的基础上,对预应力碳纤维布加固混凝土梁的极限承载力进行了分析,提出了充分考虑混凝土非线性及加固构件二次受力情况的计算方法和计算公式,计算结果与试验结果相吻合.
- b. 初始弯矩和施加预应力的对大小对预应力碳纤维布加固混凝土梁的极限承载力影响均不大.预应力碳纤维布加固较非预应力碳纤维布加固而言,其主要优点是可以提高梁的开裂荷载、屈服荷载,抑制裂缝发展[6].
- c. 为保证碳纤维布能够充分发挥作用,避免剥离破坏的发生,可采取加强锚固、提高黏结质量、限制最低混凝土强度等措施.黏结剥离问题是目前研究碳纤维加固的重点和难点问题.

参考文献:

[1] 尚守平,彭晖,童桦,等.预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J].建筑结构学报,2003,24(5):24-30.
[2] 叶列平,崔卫,岳清瑞,等.碳纤维布加固混凝土构件正截面受弯承载力分析[J].建筑结构,2001,31(3):3-5.
[3] 王巧平,吴胜兴,唐杰峰.碳纤维布在锈蚀钢筋混凝土结构加固中的应用研究[J].混凝土,2002(6):49-51.
[4] WIGHT R G, GREEN M F, ERKI M A. Prestressed frp sheets for poststrengthening reinforced concrete beams [J]. Journal of Composites For Construction, ASCE, 2001(11):214-220.
[5] 东南大学,天津大学,同济大学,等.混凝土结构:上册[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
[6] 飞渭,江世永,彭飞飞,等.预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J].四川建筑科学研究,2003,29(2):36-60.
[7] 王慧,吴志平,王萱.外贴碳纤维增强塑料加固混凝土梁的抗弯设计方法[J].合肥工业大学学报,2003,26(3):416-421.
[8] 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.
[9] 彭飞飞,江世永,谢孝,等.预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的受弯性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2003,29(2):39-45.

Calculation of flexural capacity for concrete beams reinforced with prestressed CFRP sheets

ZHAO Xin-ming, OU Ri-qiang, WU Jin

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on experimental research on concrete beams reinforced with CFRP sheets and prestressed CFRP sheets, a preliminary study was performed on the flexural performance and failure modes of concrete beams reinforced with prestressed CFRP sheets. In the study, the nonlinear stress distribution on the cross-section was transformed to the equivalent rectangle for calculation, and a formula for calculation of flexural capacity was deduced. Furthermore, a calculation formula for strain lag was worked out according to stress analysis of concrete beams under secondary loading. The calculated result of the present method agrees well with measured data.

Key words: prestress; CFRP sheet; concrete beam; flexural capacity; nonlinearity

表2 极限弯矩试验值与计算值

Table 2 Comparison of test result and measured data of ultimate bending moment

构件	碳纤维布型号	初始弯矩/ (kN·m)	预拉 力/kN	极限弯矩/(kN·m)		破坏 形式
				试验值	计算值	
Lb-2 ^[6]	FTS-C1-30	0.00	0.00	35.00	37.90	剥离
Lb-3 ^[6]	FTS-C1-30	0.00	15.00	35.00	37.81	剥离
La-4 ^[9]	FTS-C1-30	3.54	15.00	35.65	37.83	拉断
Lb-1 ^[9]	FTS-C1-20	3.90	9.75	30.30	32.47	拉断
Lb-2 ^[9]	FTS-C1-20	5.90	9.75	30.50	32.47	拉断