

文章编号:1673-9468(2008)04-0010-04

预应力碳纤维加固 RC 梁挠度和裂缝计算

姜新佩,王小燕,刘丽娜

(河北工程大学 水电学院,河北 邯郸 056038)

摘要:提出预应力碳纤维布加固混凝土梁在不同阶段截面刚度及跨中挠度计算方法;利用传统钢筋混凝土理论推导平均裂缝间距及裂缝宽度计算公式。将理论计算结果与试验数据进行比较分析,结果表明,采用文中提出的简化公式计算的结果与试验结果吻合良好。

关键词:预应力;碳纤维布;混凝土梁;挠度;裂缝宽度

中图分类号: TU375

文献标识码: A

Calculation on deflection and crack width of RC beams strengthened with externally bonded prestressed CFRP sheets

JIANG Xin-pei, WANG Xiao-yan, LIU Li-na

(College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The calculation method for section stiffness and mid-span deflection of pre-stressed carbon fiber reinforcement concrete beam in the different stage was proposed; Calculation formula for average cracks distance and crack width were derived from the traditional reinforced concrete theories. The calculated results were compared with the test data, the results show that the value from this simplified calculation formula is in good agreement with the experiment data.

Key words: prestressing; CFRP sheets; RC beam; deflection; crack width

碳纤维(CFRP)加固混凝土结构是一种新型结构加固方法,与传统加固方法相比,有明显技术优势,在实际工程中得到广泛应用。然而,目前大量理论研究和工程实践表明,CFRP加固混凝土受弯构件存在两个问题^[1]:(1)CFRP布不能被充分地利用;(2)使用阶段的加固效果不明显,对构件开裂荷载和屈服荷载的提高程度不大。国内外大量试验资料表明^[1-4]:通过对CFRP布施加预应力然后进行加固,可明显提高构件的开裂荷载与屈服荷载,从而提高受弯构件的抗弯刚度。由于预先施加预应力,使CFRP材料的高强特性得以发挥,改善了构件使用阶段的受力性能。这样就较好地解决了以上CFRP加固构件中存在的两个问题。由于荷载挠度曲线是受弯构件总体性能的重要反映,因此本文对预应力CFRP加固钢筋混凝土结构的刚度和裂缝宽度以及裂缝间距进行了计算分析。

1 试验简介

试验设计梁均为矩形截面简支梁,截面尺寸为150mm×250mm,跨度3200mm,净跨3000mm。两集中荷载间距800mm。分两组,Ⅰ组为不同预应力度度的试验梁,梁编号为YLA1、YLA2、YLA3、YLA4;Ⅱ组为相同预应力度不同锚固方式试验梁,梁编号为YLB1、YLB2、YLB3。附加锚固采用CFRP布U型箍,除YLB3梁外U型箍间距均为100mm。其余资料见文献[3]。

2 梁截面刚度变化规律及分析

根据国内外大量CFRP布加固混凝土梁的抗弯加固试验结果可知,预应力CFRP布直接加固梁的受力过程与普通碳纤维布加固梁类似,其荷载

收稿日期:2008-09-23

基金项目:国家111引智计划(D07050);河北省建工新产品研究计划(2005-104)

作者简介:姜新佩(1962-),男,河北魏县人,教授,博士,从事结构工程的研究。

和挠度曲线大体上也可以看成由三段直线组成。转折点对应于各构件的混凝土开裂点和非预应力受拉钢筋屈服点。这样,荷载挠度全过程曲线的计算过程归结为计算 2 个转折点和一个极限状态点。由此,结构刚度也分为三个阶段:①开裂以前截面刚度;②开裂后到受拉钢筋屈服截面刚度;③钢筋屈服后截面刚度。

2.1 开裂前截面刚度

开裂前截面处于弹性变形阶段,混凝土、钢筋及 CFRP 应变、跨中挠度等均为明显的线性增加。由于预应力的影响,加固梁在开始加载前梁底混凝土处于受压状态,因此预应力加固梁与普通加固梁相比,其开裂荷载较高,弹性变形阶段较长,构件刚度按弹性理论来计算。

$$B_0 = 0.85 E_c I_0 \quad (1)$$

中性轴高度 x_0 及截面惯性矩 I_0 可由以下两式计算求出

$$x_0 = (bh^2 + 2(\alpha_s - 1)A_s h_0 + 2\alpha_f A_f h) / (2bh + 2(\alpha_s - 1)A_s + 2\alpha_f A_f) \quad (2)$$

$$I_0 = [x_0^3 + (h - x_0)^3] b / 3 + (\alpha_s - 1)A_s (h_0 - x_0)^2 + \alpha_f A_f (h - x_0)^2 \quad (3)$$

式中 b —梁宽; h —梁高; x_0 —受压区理论高度; A_s —受拉钢筋截面面积; A_f —碳纤维布截面面积; E_c —混凝土弹性模量; E_s —钢筋弹性模量; E_f —CFRP 布弹性模量; $\alpha_s = E_s / E_c$, $\alpha_f = E_f / E_c$ 。

对于预应力 CFRP 布加固混凝土梁,梁的开裂荷载由非预应力 CFRP 加固梁的开裂荷载 M'_c 和消压荷载 M_k 两部分组成,即

$$M_c = M'_c + M_k \quad (4)$$

$$M'_c = r'_m f_t I_0 / (h - x_0) \quad (5)$$

$$M_k = F(h - x_0) \quad (6)$$

式中 r'_m —截面抵抗矩塑性系数; f_t —混凝土轴心抗压强度; F —对 CFRP 布施加的有效拉力。

2.2 梁开裂至受拉钢筋屈服

加固梁开裂后进入带裂缝工作阶段。此时,裂缝截面受拉区混凝土退出工作,只有钢筋和 CFRP 布承担拉力。受到 CFRP 布的约束作用,梁的刚度较普通梁有所增加。相对于直接加固梁,预应力的存在会使 CFRP 布存在超前应变。由截面力的平衡关系和应变几何关系有

$$M = E_s \epsilon_s A_s \eta h_0 + E_f (\epsilon_f + \epsilon') A_f (\eta h_0 + a_s) \quad (7)$$

式中 η —截面内力臂系数; a_s —纵向受拉钢筋合力点至截面边缘的距离; ϵ' —施加预应力产生的 CFRP 布超前应变; ϵ_f —CFRP 布名义拉应变。

根据截面几何关系有

$$\epsilon_s / \epsilon_f = (h_0 - x_n) / (h - x_n) \quad (8)$$

将 CFRP 布的面积换算成等效钢筋面积^[2]

$$A'_f = (E_f \cdot (h - x_n) \cdot (\eta h_0 + a_s) \cdot A_f) / (E_s \cdot (h_0 - x_n) \cdot \eta h_0) \quad (9)$$

按照普通钢筋混凝土梁刚度计算公式,对加固梁开裂至屈服阶段的刚度进行计算

$$B_s = E_s \cdot (A_s + A'_f) h_0^2 / (1.15 \Psi + 0.2 + 6\alpha_f \rho) \quad (10)$$

$$\rho_m = (A_s + A'_f) / A_m \quad (11)$$

$$\sigma_s = (M - E_f \epsilon' A_f (\eta h_0 + a_s)) / ((A_s + A'_f) \eta h_0) \quad (12)$$

其中 Ψ , A_m 计算方法与普通钢筋混凝土梁的计算方法相同,当 $\Psi < 0.2$ 时取 $\Psi = 0.2$; $\Psi > 1$ 时取 $\Psi = 1$; 当 $\rho_m \leq 0.01$ 时取 $\rho_m = 0.01$; 加固梁在此受力阶段末期,钢筋应力达到 f_y , 取 $\sigma_s = f_y$ 按(14)式计算加固梁屈服弯矩 M_y , 则对应的截面曲率 φ_y 就等于 M_y / B 。

2.3 钢筋屈服至极限状态

试验梁达到极限状态通常发生 3 种破坏形式:受压区混凝土压碎; CFRP 布达到极限拉应变被拉断; 局部粘结破坏。当破坏形式为 CFRP 拉断时, CFRP 达到极限拉应变, 而受压区混凝土还未达到极限应变, 根据截面应变几何关系及力的平衡关系有

$$x = h \epsilon_c / (\epsilon_c + ([\epsilon_f] - \epsilon')) \quad (13)$$

$$\alpha_1 \beta_1 f_c b x = f_y A_s + E_f [\epsilon_f] A_f \quad (14)$$

$$M_u = f_y A_s (h_0 - \beta_1 x / 2) + E_f [\epsilon_f] A_f (h - \beta_1 x / 2) \quad (15)$$

其中 α_1, β_1 按《混凝土结构设计规范》^[5] 中的等效矩形应力图形为基础, 按照合力大小不变, 作用点位置不变的原则, 求出在不同受压区边缘混凝土应变 ϵ_c 下等效矩形应力图形高度系数 β_1 及应力系数 α_1 , 见文献[4], 对应极限曲率 $\varphi_u = (\epsilon_c + ([\epsilon_f] - \epsilon')) / h_0$ 。

当破坏形式为受压区混凝土压碎破坏时, 由平衡方程可知

$$\alpha_1 \beta_1 f_c b x = f_y A_s + E_f (\epsilon_f + \epsilon') A_f \quad (16)$$

其中 $\epsilon_f = \epsilon_{cu} \cdot (h - x) / x$, ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变。

由于混凝土应变已经达到极限,对于系数 α_1, β_1 ,可按钢筋混凝土受弯承载力计算基本理论取为 1.0 和 0.8。并假定 CFRP 布极限拉应变足够大,则试验梁极限弯矩可由(16)式计算:

$$M_u = f_y A_s (h_0 - 0.8x/2) + E_f (\epsilon_f + \epsilon') A_f (h - 0.8x/2) \quad (17)$$

则极限曲率 $\varphi_u = (\epsilon_{cu} + \epsilon_f) / h$, 截面刚度 $B = M_u / \varphi_u$ 。

根据求得的开裂荷载,屈服荷载,极限荷载及对应曲率,对梁在承受二、三阶段内任意外荷载作用产生弯矩时的曲率,可以由这两阶段的弯矩—曲率图形内插得到,即

$$\varphi = (M - M_c) \cdot \varphi_y / (M_y - M_c) \quad M_c < M < M_y \quad (18)$$

$$\varphi = \varphi_y + (M - M_y) \cdot (\varphi_u - \varphi_y) / (M_u - M_y) \quad M_y < M < M_u \quad (19)$$

3 梁挠度计算与比较

依照部分预应力混凝土梁挠度计算原则,预应力 CFRP 布加固梁的挠度主要由三部分组成:恒载作用下的挠度 f_{gmax} ; 预应力引起的上拱度 f_{ymax} ; 预应力损失引起的挠度 f_{lmax} ; 目前预应力损失通常只考虑张拉和放张过程对梁的反拱作用,即 $f = f_{gmax} - f_{ymax}$ 。

在求得截面刚度后,构件的挠度可按结构力学方法进行计算,由于沿梁长各截面平均刚度是变值,这给挠度计算带来了一定的复杂性。为了简便,采用最小刚度原则进行计算,则荷载作用下挠度为 $f_{gmax} = s \cdot M l_0^2 / B$ (20)

s 为挠度系数,与荷载种类和支撑条件有关,对于

对称加载四点弯曲梁取 $s = 23/216$ 。混凝土梁在张拉构件的预加力作用下,由于偏心受力产生反拱,其值可按结构力学公式计算,即

$$f_{ymax} = N_p e_p l_0^2 / 8 / B \quad (21)$$

式中 N_p 为碳纤维布在撤移张拉机具、放张完毕后的总拉力, e_p 为换算截面中性轴至碳纤维布间的距离, l_0 受弯梁的计算跨度。

根据本文建立的加固梁跨中位移计算方法,计算试验梁在 12.5kN, 22.5kN, 25kN, 27.5kN 时的挠度及极限挠度。由表看出计算结果与试验值较吻合,随着预应力的增加,相同加固情况下梁的极限挠度越来越小,说明对碳纤维施加预应力后,梁的刚度有所提高。由试验结果可知,预应力碳纤维加固梁除了 YLA2, YLB1 外均发生碳纤维拉断破坏,碳纤维达到极限拉应变,材料得到充分利用,而普通碳纤维直接加固梁通常发生受压区混凝土压碎的破坏形式。其中混凝土抗压强度和抗拉强度按实际值取用。

4 平均裂缝间距

裂缝之间的间距即是混凝土拉应力由裂缝处为零到 f_t 所需要的距离。设已出现裂缝截面 a 的钢筋应变和 CFRP 应变分别为 $\epsilon_{s1}, \epsilon_{c1} + \epsilon'$, 另一条即将出现裂缝截面 b 的混凝土拉应力、钢筋应变和 CFRP 应变分别为 $f_t, \epsilon_{s2}, \epsilon_{c2} + \epsilon'$, 混凝土与钢筋、混凝土与 CFRP 粘结应力分别为 τ_s, τ_f , 平均裂缝间距为 l_w 。在 a b 区段内,由力的平衡得到:

$$\epsilon_{s1} A_s + (\epsilon_{c1} + \epsilon') A_f = \epsilon_{s2} A_s + (\epsilon_{c2} + \epsilon') A_f + f_t A_c \quad (22)$$

$$\text{对钢筋取隔离体: } E_s (\epsilon_{s1} - \epsilon_{s2}) A_s = \tau_s l_w A_c \quad (23)$$

表 1 试验梁跨中挠度比较 单位(mm)

Tab.1 Comparison for the test beam deflection in the cross unit(mm)

梁号	预应力 (kN)	荷载为 12.5kN		荷载为 22.5kN		荷载为 25kN		荷载为 27.5kN		极限挠度 计算值
		试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	试验值	计算值	
YLA1	8	1.5	1.34	7	6.60	8.5	8.68	11.0	14.9	38.25
YLA2	12	2.0	1.34	8	8.31	10.0	12.83	19.0	17.3	33.78
YLA3	16	2.0	1.34	8	7.08	11.5	9.63	14.5	15.4	29.00
YLA4	18	1.5	1.35	6	6.75	10.0	10.42	12.0	14.0	26.20
YLB1	10	2.0	1.34	8	6.33	9.5	8.13	13.0	13.4	36.00
YLB2	10	3.0	1.34	7	6.17	8.0	7.90	9.0	9.6	36.07
YLB3	10	1.5	1.34	7	6.13	8.5	6.79	11.5	12.9	35.65

表 2 22.5kN 时裂缝宽度和平均裂缝间距对比表 单位(mm)

试验梁	YLA1	YLA2	YLA3	YLA4	YLB1	YLB2	YLB3
裂缝宽度计算值	0.218	0.188	0.134	0.115	0.204	0.205	0.202
平均裂缝间距计算值	166.7	166.8	153.5	165.2	166.8	170.0	166.4
平均裂缝间距试验值	175.0	175.0	147.0	115.0	162.0	147.0	153.0

对 CFRP 取隔离体: $E_f(\varepsilon_{q1} - \varepsilon_{q2})A_f = \tau_f b_f l_\sigma$ (24)
 联立(22)式~24式得

$$f_i A_c = \tau_f u l_\sigma + \tau_f b_f l_\sigma = 4\tau_f \left(\frac{A_s + A_f}{d} \right) l_\sigma$$

$$\left[1 + \frac{A_f}{A_s + A_f} \left(\frac{\tau_f \cdot d}{4\tau_s \cdot l_f} - 1 \right) \right] \quad (25)$$

$$\text{令 } \theta = A_f \cdot (\tau_f \cdot d / (4\tau_s \cdot l_f) - 1) / (A_s + A_f)$$

$$l_\sigma = f_i A_c d / (4\tau_s (A_s + A_f) (1 + \theta)) = f_i d / (4\tau_s \rho_w) / (1 + \theta) \quad (26)$$

其中 ρ_w 为配筋特征值,对于矩形截面受弯构件 $\rho_w = (A_s + A_f) / bh_0$; τ_s 按文献[6]取 $0.04f_{tm}$; τ_f 按文献[4]介绍的粘结滑移理论计算。

由以上分析可知预应力碳纤维布加固钢筋混凝土梁平均裂缝宽度计算公式与普通钢筋混凝土梁按粘结理论推导的计算公式形式基本相同。由于试验梁的纤维布面积、钢筋面积及混凝土设计强度相同,所以,计算所得平均裂缝间距基本相同,与表 2 试验所得平均裂缝间距结果相吻合。

5 裂缝宽度计算

裂缝宽度主要取决于裂缝截面处钢筋应力,裂缝间距和裂缝间纵向钢筋应变不均匀系数。对于预应力 CFRP 加固钢筋混凝土梁可用钢筋混凝土梁在短期荷载下的最大裂缝宽度计算公式计算^[7],即 $\omega_{max} = \tau \cdot \alpha_c \Psi l_\sigma \sigma_s / E_s$ (27)

其中 τ 为短期荷载作用下裂缝宽度的不均匀性系数,对受弯钢筋混凝土梁取值为 1.66; α_c 为裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度的影响系数,取 0.85; 由于 CFRP 布中预拉应力的存在降低了相同荷载情况下钢筋的应力,因此,在计算预应力碳纤维加固梁

的裂缝宽度时,应当考虑 CFRP 布中预拉应力的影响,由此钢筋应力 σ_s 按式(11)计算。当荷载为 22.5kN 时梁 YLA3 和 YLB2 的裂缝宽度分别为 0.1 mm, 0.38mm。

6 结论

1) 与未施加预应力 CFRP 加固钢筋混凝土梁相比,施加预应力后,梁的刚度增大,挠度减小;且在相同加固条件下,挠度随预应力的增大而减小。

2) 预应力 CFRP 加固钢筋混凝土梁平均裂缝间距计算公式与普通钢筋混凝土梁计算公式形式基本相同,大小与 CFRP 面积成反比,与混凝土抗拉强度成正比,与预应力的大小无关。

3) 同一强度混凝土裂缝宽度随 CFRP 面积和预应力的增大而减小。

参考文献:

- [1] 彭飞飞, 江世永, 飞渭. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的抗弯承载力[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 60-63.
- [2] 钱伟. 预应力碳纤维布加固损伤混凝土梁的受力性能[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- [3] 邓子辰, 姜新佩. 预应力碳纤维加固混凝土梁技术问题探讨[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(4): 15-18.
- [4] 韩燕. CFRP 布加固钢筋混凝土梁变形及刚度分析[D]. 无锡: 江苏大学, 2006.
- [5] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [6] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] 庄江波, 叶列平. CFRP 布加固钢筋混凝土梁的裂缝研究[J]. 工业建筑, 2004, (1): 72-78.

(责任编辑 闫纯有)