

文章编号: 1674-9057(2018)03-0469-04

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2018.03.014

CFRP板嵌入加固钢筋混凝土梁延性计算方法

邓朗妮, 马晋超, 马骏, 罗日生, 黄晓霞

(广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要: 为了使 CFRP 板加固后的构件在提高承载力的同时, 也能保证构件在破坏前具有足够的延性, 在对 5 根 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的抗弯延性试验的基础上, 通过平截面假定以及材料应力应变本构关系进行推导, 提出根据确定的目标延性系数反算 CFRP 板加固面积的计算方法。计算结果与试验结果比较证明计算方法具有良好的适用性。

关键词: CFRP 板; 混凝土梁; 嵌入式加固; 曲率延性

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

混凝土构件用纤维增强复合材料(FRP)以其轻质高强、低松弛及不锈蚀等优点被广泛应用于加固工程中, 并且在改善混凝土结构抗震性能方面效果十分明显^[1-7]。碳纤维(CFRP)板是一种采用拉挤成型工艺制成的复合材料。与碳纤维布相比, 碳纤维板具有匀质性及整体性好、截面面积大、施工更为方便等优点^[8]。

CFRP 嵌入式加固混凝土结构是在混凝土保护层上顺着梁的长度方向切出凹槽, 注入环氧树脂, 而后再将 CFRP 板条或者 CFRP 筋嵌入槽中, 最后再灌入树脂填平凹槽, 使得 CFRP 与混凝土形成整体, 共同受力, 以提高结构承载力。和 CFRP 外贴加固法相比, 可以加强 CFRP 板条与混凝土的粘结、CFRP 板条能够得到有效的保护, 改善了其耐久性能和防止外部环境对 CFRP 材料的破坏等^[9]。CFRP 嵌入式加固法加固混凝土结构可以提高其抗弯、抗剪承载力。目前国内外已有学者对 CFRP 板加固钢筋混凝土结构的理论计算方法以及抗裂度与裂缝特性进行了研究^[10-11], 对延性性能的研究也有了较多的成果: 方志等对不锈钢和 CFRP 混合配筋的部分粘结部分预应力混凝土梁变形及延性研究, 提出了基于能量耗散的延性指标^[12]; 张鹏

等在完成 CFRP-PCPS 复合筋混凝土梁在低周反复荷载作用下的抗弯试验的基础上, 得出了曲率延性系数计算公式, 运用此公式计算结果与实测结果相比较误差较小, 具有良好的适用性^[13]; 杨剑在完成对不同参数 CFRP 配筋活性粉末混凝土梁受弯性能试验的基础上, 对 CFRP 配筋活性粉末混凝土梁的延性和变形能力进行了研究, 结果表明 CFRP 配筋活性粉末混凝土梁较之 CFRP 配筋普通混凝土梁具有较好的延性和变形能力, 并且提出了荷载挠度曲线下降段斜率公式, 该公式能较好地反映出结构实际受力情形, 由此计算的基于能量定义的延性指标与试验值吻合较好^[14]。

本文通过完成 5 根 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的抗弯延性试验, 并且在平截面假定以及材料应力应变本构关系基础上进行推导, 提出根据确定的目标延性系数反算 CFRP 板加固面积的计算方法。

1 基本假定及定义

1.1 基本假定

为了简化计算, 作如下假定: 1) 截面保持平截面; 2) 钢筋应力-应变关系曲线采用简化的理想弹塑性应力-应变关系曲线; 3) CFRP 应力应变关

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568008); 广西自然科学基金青年基金项目(2013GXNSFBA019261); 广西高校中青年教师基础能力提升项目(KY2016YB248)

作者简介: 邓朗妮(1977—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 新型混凝土结构及修复加固技术、结构健康监测, langni666@126.com。

引文格式: 邓朗妮, 马晋超, 马骏, 等. CFRP 板嵌入加固钢筋混凝土梁延性计算方法 [J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 469-472.

系为线弹性,即CFRP的应力等于其应变乘以弹性模量;4)不考虑受拉区混凝土的抗拉强度;5)混凝土的应力应变关系采用德国Rusch模型,上升段为曲线,下降段采用水平直线。

当 $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ 时,

$$\sigma = f_c [2\varepsilon/\varepsilon_0 - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2]; \quad (1)$$

当 $\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}$ 时,

$$\sigma = f_{c0} \quad (2)$$

1.2 混凝土受压区合力求取

计算混凝土受压区合力的公式为

$$F_c = \int_0^{x_c} \sigma_c b dx = b \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon_c x_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 x_c}{3\varepsilon_0^2} \right) \varepsilon_c, \quad \varepsilon_c < \varepsilon_0, \quad (3)$$

$$F_c = \int_0^{x_c} \sigma_c b dx = b \sigma_0 \left(h_c - \frac{\varepsilon_0 h_c}{3\varepsilon_c} \right), \quad \varepsilon_c > \varepsilon_0. \quad (4)$$

式中: b —梁宽; σ_0 —混凝土最大压应力; ε_0 —混凝土最大压应力对应压应变; ε_c —任一阶段的受压混凝土边缘压应变; h_c —受压区高度。

2 延性设计方法

2.1 受拉钢筋屈服时的截面曲率

梁屈服和极限状态下的应变如图1所示,截面曲率 φ_y 可以表示为

$$\varphi_y = \frac{f_y/E_s}{h_0 - x_c}; \quad (5)$$

由应变协调可得

$$\varepsilon_b = \frac{h_f - x_c}{x_c} \varepsilon_c; \quad (6)$$

由屈服截面的应力平衡

$$F_c + \sigma_s' A_s' = f_y A_s + \sigma_f A_f, \quad (7)$$

将式(3)带入式(7)得

$$b \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon_c x_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2 x_c}{3\varepsilon_0^2} \right) + \varepsilon_c E_s A_s' = f_y A_s + \varepsilon_b E_f A_f, \quad (8)$$

$$x_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} h_0. \quad (9)$$

将式(9)带入式(5)得

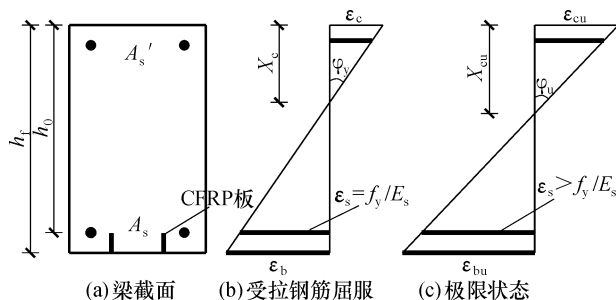


图1 梁在屈服和极限状态下的应变图

Fig. 1 Yield and limit strain diagrams of the beam

$$\varphi_y = \frac{f_y/E_s}{h_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \right)}, \quad (10)$$

将式(5)、(9)带入式(8)得

$$A_f = \frac{-b \sigma_0 h_0 \varepsilon_c^3 + 3 \varepsilon_0 \varepsilon_c^2 (b \sigma_0 h_0 + \varepsilon_0 E_s A_s') + 3 \varepsilon_0^2 \varepsilon_c f_y (A_s' - A_s) - 3 \varepsilon_0^2 \frac{f_y^2}{E_s} A_s}{3 \varepsilon_0^2 E_f \left[\left(\frac{h_f}{h_0} - 1 \right) \varepsilon_c^2 + \left(\frac{2 h_f f_y}{h_0 E_f} - \frac{f_y}{E_s} \right) \varepsilon_c + \frac{f_y^2}{E_s h_0} \right]}. \quad (11)$$

2.2 极限状态时截面曲率

极限状态截面曲率公式为

$$\varphi_u = \varepsilon_{cu}/x_{cu}, \quad (12)$$

式中: ε_{cu} 为混凝土极限压应变; x_{cu} 为混凝土压碎时受压区高度。

由内力平衡可得

$$F_c + \varepsilon_{cu} E_s A_s' = f_y A_s + \sigma_f A_f. \quad (13)$$

将式(4)代入式(13)得

$$b \sigma_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{3 \varepsilon_{cu}} \right) x_{cu} + f_y' A_s' = f_y A_s + \frac{h_f - x_{cu}}{x_{cu}} \varepsilon_{cu} E_f A_f. \quad (14)$$

将式(14)整理得到

$$b \sigma_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{3 \varepsilon_{cu}} \right) x_{cu}^2 + (f_y' A_s' + \varepsilon_{cu} E_f A_f f_y A_s) x_{cu} \varepsilon_{cu} h_f E_f A_f = 0,$$

解得

$$x_{cu} = (-B + \sqrt{B^2 - 4AC})/2A, \quad (15)$$

式中: $A = b \sigma_0 (1 - \varepsilon_0/3 \varepsilon_{cu})$; $B = f_y' A_s' + \varepsilon_{cu} E_f A_f - f_y A_s$; $C = -\varepsilon_{cu} h_f E_f A_f$ 。

将式(15)代入式(12)可得

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}} = \frac{2A \varepsilon_{cu}}{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}. \quad (16)$$

因此,构件曲率延性系数可表示为

$$\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{2A \varepsilon_{cu} E_s h_0 \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + f_y/E_s} \right)}{f_y (\sqrt{B^2 - 4AC} - B)}. \quad (17)$$

2.3 延性系数计算

国内外已有试验表明,CFRP板加固钢筋混凝土梁的破坏模式有两种形式:一种是CFRP板拉断破坏,即破坏时CFRP板达到极限拉应变,而混凝土未被压碎;另一种是混凝土压碎破坏,此时CFRP板未达极限拉应变。CFRP片材拉断引起的弯曲破坏模式发生在加固梁配筋率很小且配纤维率亦很小时,延性较差,故在加固设计中应予以避免,措施是增加CFRP用量,使 $\rho_f > \rho_{fb}$ [15]。

根据曲率延性系数进行CFRP板嵌入式加固设

计的步骤如下：

①将式(15)代入式(17),并联立式(12),取定曲率延性系数 μ_φ ,即可求得受拉钢筋屈服时混凝土受压区边缘压应变 ε_c 。

②将 ε_c 带入式(11),即可求得满足延性设计要求的 CFRP 板加固面积 A_f 。

③校核 CFRP 板应变:当求出截面钢筋屈服时,受压区混凝土边缘压应变 ε_0 时,根据式(11)和式(14) 验算破坏时 CFRP 板的应变。

④如果超过 CFRP 板的极限拉应变,说明此时 CFRP 板拉断,则需要重新计算 ε_{cu} 和 x_{cu} ,式(14)可以修改为

$$b\sigma_0\left(1-\frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_{cu}}\right)x_{cu}+f_y'A_s'=f_yA_s+f_uA_f。$$
 (18)

式中： f_u —CFRP 板极限拉伸强度。

根据应变协调得

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x_{cu}}=\frac{\varepsilon_{fu}}{h_f-x_{cu}}，$$
 (19)

将式(18)代入式(19) 得

$$\varepsilon_{cu}=\frac{b\sigma_0h_f\varepsilon_0+3(f_yA_s+f_uA_f-f_y'A_s')\varepsilon_{fu}}{3(b\sigma_0h_f+f_y'A_s'-f_yA_s-f_uA_f)}。$$
 (20)

将式(20)代入式(12),求出 φ_u ,将 φ_u 代入式(17) 求出 φ_y ,再将 φ_y 代入式(5) 并根据式(9),求出新的 ε_c ,将新的 ε_c 代入式(11),即可求得目标 CFRP 板加固量。

3 试验研究及算例分析

本次试验共设计 5 根矩形截面简支梁，截面尺寸均为 150 mm × 250 mm，跨度 $L=2\ 600\text{ mm}$ ，计算跨度 2 400 mm。混凝土的强度设计等级为 $\Phi 30$ ，受压钢筋均为 2 $\Phi 6$ ，其中 3 根梁纵向受拉钢筋为 2 $\Phi 8$ ，配筋率为 0.32%；另外两根梁的纵向受拉钢筋为 2 $\Phi 12$ ，配筋率为 0.72%。本次试验荷载通过分配钢梁传递进行两点加载，试验梁

纯弯段长度为 600 mm，剪弯段长度为 900 mm，为了防止加载过程中剪弯段发生剪切破坏，对剪弯段箍筋加密为 $\Phi 6@100$ ，纯弯段箍筋为 $\Phi 6@200$ 。混凝土保护层为 30 mm(保护层厚度取箍筋外边缘至混凝土表面的距离)。试验梁配筋设计及加载示意图如图 2 所示，试验梁的相关参数、破坏模式如表 1 所示，各试验梁的曲率延性试验数据如表 2 所示，各试件跨中挠度试验数据如图 3 所示。

应用本文建议的计算方法，对试验梁 JGL3、JGL5 进行计算并且与试验数据进行对比，其结果见表 3。可见，计算方法所求得加固面积同试验加固面积误差较小，说明该延性控制方法能够有效控制被加固构件的延性性能，可以在加固设计时直接应用。

表 1 试验梁设计参数及破坏形态

Table 1 Design parameters and failure patterns of the experimental beams

试件编号	配筋率 /%	CFRP 板条宽度/mm	嵌贴长 /mm	破坏形态
L1	0.32	—	—	弯曲破坏
L2	0.72	—	—	弯曲破坏
JGL3	0.32	15	2 200	受压区混凝土压碎
JGL4	0.32	20	1 600	胶层 - 混凝土界面剥离
JGL5	0.72	20	2 200	受压区混凝土压碎

表 2 试验梁的曲率延性

Table 2 Curvature ductility factor for experiment beams

	L1	L2	JGL3	JGL4	JGL5
屈服曲率 $\varphi_y/10^{-6}\text{ mm}^{-1}$	9.5	11.9	11.5	11.9	13.2
极限曲率 $\varphi_u/10^{-6}\text{ mm}^{-1}$	99.1	95.2	88.6	30	75.7
延性系数 μ_φ	10.4	8	7.70	2.5	5.7

表 3 CFRP 板加固面积的计算值与试验值对比

Table 3 Comparison between calculated value and experimental value of reinforced area of CFRP

试件编号	A_h/mm^2	A_{fr}/mm^2	误差/%
JGL3	39.4	42	6.2
JGL5	58.6	56	4.6

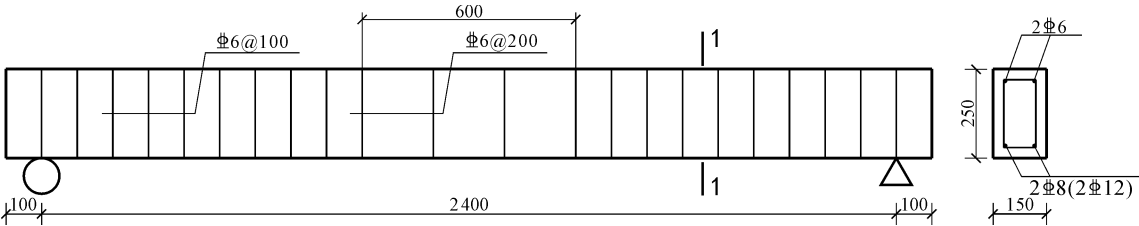


图 2 试验梁设计及加载示意图

Fig. 2 Test beam design and loading schemes

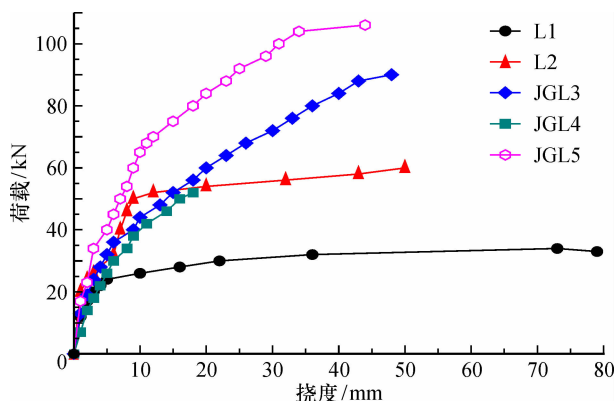


图3 各试件跨中挠度

Fig. 3 Deflection at mid span of the experimental beams

4 延性设计方法

根据《建筑抗震设计规范》6.3.3 条文说明:梁的变形能力主要取决于梁端的塑性转动量,而梁的塑性转动量与截面混凝土相对受压区高度有关。当相对受压区的高度在 0.25 ~ 0.35 时,梁的位移延性系数可达到 3 ~ 4。如果结构破坏预兆不明显,会造成严重的后果,所以在设计中要求较高的延性指标。基于以上规范要求,取定 $\mu_e = 3.5$,由式(11)、(12)、(15)和(17)可计算得到 CFRP 板加固量 $A_f = 91.8 \text{ mm}^2$ 。

5 结论

CFRP 板嵌入式加固钢筋混凝土梁抗弯试验表明,在保证足够嵌贴长度的情况下,加固后梁的承载能力有了明显的提高,且随着加固量和受拉钢筋配筋率的提高,构件的承载能力逐渐增强,并且具有良好的延性能力。在 CFRP 板加固长度不足的情况下,会发生胶层和混凝土之间的剥离破坏,构件的承载能力提升不大,并且延性较差。

本文利用平截面假定以及材料应力应变本构

关系推导的 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的延性设计方法,经试验验证计算结果与试验结果对比,吻合较好,可应用于指导实际加固工程。

参考文献:

- [1] Binici B, Mosalam K M. Analysis of reinforced concrete columns retrofitted with fiber reinforced polymer lamina [J]. Composites: Part B, 2007, 38 (2): 265 - 276.
- [2] Anggawidjaja D, Ueda T, Dai J G, et al. Deformation capacity of RC piers wrapped by new fiber-reinforced polymer with large fracture strain [J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28 (10): 914 - 927.
- [3] Wu G, Lü Z T, Wu Z S. Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20 (3): 134 - 148.
- [4] 王吉忠,王苏岩,黄承逵. CFRP 加固高强混凝土柱抗震性能和延性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2008, 48 (5): 708 - 714.
- [5] 王苏岩,韩克双,曲秀华. CFRP 加固高强混凝土柱改善延性的试验研究 [J]. 世界地震工程, 2005, 21 (3): 7 - 10.
- [6] Seible F, Priestley M J N, Hegemier G A, et al. Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets [J]. Journal of Composite for Construction, 1997, 1 (2): 52 - 62.
- [7] Xiao Y, Ma R. Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123 (10): 1357 - 1364.
- [8] 邓朗妮,杨帆,康侃,等. 夹片式碳纤维板锚具的有限元分析及设计 [J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32 (1): 72 - 76.
- [9] 李荣,滕锦光,岳清瑞. 嵌入式 CFRP 板条—混凝土界面粘结性能的试验研究 [J]. 工业建筑, 2005, 35 (8): 31 - 34.
- [10] 陈华,邓朗妮,张鹏. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁挠度计算方法 [J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30 (2): 236 - 239.
- [11] 陈华,邓朗妮,康侃,等. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁的抗裂性能 [J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33 (1): 65 - 68.
- [12] 方志, Campbell T I. 不锈钢和 CFRP 混合配筋预应力混凝土梁的延性和变形性能 [J]. 工程力学, 2005, 22 (3): 190 - 197.
- [13] 张鹏,钟卿瑜,邓宇,等. CFRP-PCPs 复合钢筋混凝土梁延性分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2015, 40 (1): 37 - 42.
- [14] 杨剑,方志. CFRP 配筋活性粉末混凝土梁延性和变形性能 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2015, 42 (3): 14 - 22.
- [15] 邓朗妮,陈华,张鹏. 预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁正截面受弯承载力的计算方法研究 [J]. 建筑科学, 2009, 25 (3): 74 - 77.

Calculation on ductility of RC beams with near-surface mounted CFRP plate reinforcement

DENG Lang-ni, MA Jin-chao, MA Jun, LUO Ri-sheng, HUANG Xiao-xia

(Department of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to improve the flexural capacity of RC beams strengthened with CFRP plate, and to ensure enough ductility, based on the experiment of 4 reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates, an analytical method is derived for determining the allowable plate area to achieve a targeted value of ductility using the plan section assumption and material constitutive relation. Results of calculation are compared with the experimental data. Result shows that the calculation formulas features good applicability, providing a reference for engineering application of strengthening design.

Key words: CFRP plate; concrete beams; NSM reinforcement; curvature ductility