

文章编号:1673-2049(2014)03-0038-07

预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁抗裂性能分析

程东辉,张 姝,叶 旭,俞永志

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为开展预应力碳纤维增强复合材料(CFRP)布加固混凝土受弯构件时对正截面裂缝影响的研究,设计制作了配筋率不同的 2 组共计 8 根试验梁。在承受 40% 极限荷载的基础上利用预应力 CFRP 布对试验梁正截面进行加固,并完成其静载试验,获得混凝土受弯构件在前期加载和加固后的二次受力过程中弯曲段裂缝分布、裂缝宽度和高度的试验数据。在试验数据的基础上,通过理论分析,提出了与《混凝土结构设计规范》相协调的预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁弯曲段裂缝平均间距和最大裂缝宽度的计算公式。研究结果表明:二次受力过程中,预应力 CFRP 布能有效抑制裂缝的开展,且随着预拉应力的增加,裂缝平均间距和裂缝宽度均减小。

关键词:预应力 CFRP 布;配筋率;负载混凝土梁;抗裂性能;裂缝宽度

中图分类号:TU398

文献标志码:A

Analysis of Anti-cracking Ability of Loaded Reinforced Concrete Beam Strengthened with Prestressed CFRP Sheet

CHENG Dong-hui, ZHANG Shu, YE Xu, YU Yong-zhi

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to study the effect of reinforced concrete flexural members with prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheet on cross-section cracks, two groups of eight test beams with different reinforcement ratios were designed. Based on bearing 40% ultimate load, the cross-section test beams were strengthened with prestressed CFRP sheet, and the static load test was completed to obtain test data of bending crack distribution, crack width and height of concrete flexural members in the early stage of loading and being strengthened after second loading. Based on the test data, through theoretical analysis, calculation formulae of average crack spacing and maximum crack width of concrete beam strengthened with prestressed CFRP sheet were put forward, which coordinated with *Code for Design of Concrete Structures*. The study results show that in the process of second loading, prestressed CFRP sheet can effectively suppress the development of crack, and with increasing of the prestressed tensile stress, the average crack spacing and crack width decrease.

Key words: prestressed CFRP sheet; reinforcement ratio; loaded reinforced concrete beam; anti-cracking ability; crack width

0 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced

Polymer, CFRP)布是一种高强、耐腐蚀材料,对其施加预拉应力后可应用于混凝土工程的加固,能够有效避免混凝土构件在加固后的受力过程中出现

收稿日期:2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL09CB04)

作者简介:程东辉(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,工学博士, E-mail:chengdonghui2000@126.com。

CFRP 布应力增长滞后于混凝土的应力增长,充分发挥 CFRP 布高强特性。目前各国学者已开展了一些有关预应力 CFRP 布加固混凝土构件的研究工作^[1-9],但是对预应力 CFRP 布加固混凝土构件的研究工作尚主要集中于其承载力、锚固技术等方面,而对预应力技术应用于混凝土结构的另一个重要作用,即“延缓混凝土裂缝的出现和对裂缝宽度的抑制”这一方面的研究开展得较少。针对这一情况,本文中笔者基于前期试验数据^[10],对预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁的裂缝宽度进行了研究,为预应力 CFRP 布加固混凝土构件耐久性的研究提供参考。

1 试验概况

依据配筋率的不同将试验梁分成 2 组,每组 4 根,试验梁为矩形截面,如图 1 所示,截面尺寸为 150 mm×280 mm,净跨为 2.8 m,采用两点加载,加载点如图 1(a)所示,其中, P 为荷载。试验梁中 1 根为普通混凝土对比梁,其余 3 根预加载后在持荷状态下利用预应力 CFRP 布对加载点区段的梁底混凝土进行粘贴加固,然后继续加载直至试件破坏。试验梁相关参数如表 1 所示。

表 1 试验梁参数

Tab. 1 Parameters of Test Beams

| 试验梁编号 | | 配筋率/% | CFRP 布张拉初始应力/MPa |
|--------|---------|-------|------------------|
| 第 I 组 | DBL1 | 0.73 | |
| | YJGL1-A | | 800 |
| | YJGL1-B | | 1 200 |
| | YJGL1-C | | 1 600 |
| 第 II 组 | DBL2 | 1.50 | |
| | YJGL2-A | | 800 |
| | YJGL2-B | | 1 200 |
| | YJGL2-C | | 1 600 |

CFRP 布采用日本东丽公司产品,其厚度为 0.111 mm,弹性模量为 246 GPa,抗拉强度为 3 700 MPa。试验所使用的胶粘剂是由亨斯特先进化工材料有限公司生产的双酚 A 改性环氧树脂和配套的改性胺类固化剂配制而成,二者的比例为 4 : 1(质量比)。

结合实际工程中混凝土梁加固时的负载情况,加固试验梁在试验过程中均预先加载至各自对比梁实测受弯承载力的 40%,在持荷状态下,对 CFRP 布张拉并将其粘贴于试验梁底。试验过程中采用文献^[11]中提出的张拉装置对 CFRP 布进行张拉并按《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)

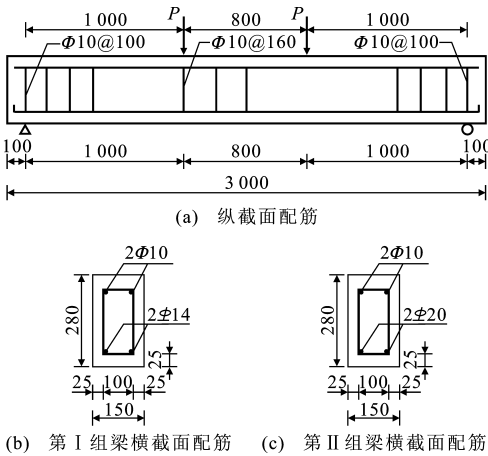


图 1 试验梁截面配筋 (单位:mm)

Fig. 1 Sectional Reinforcements of Test Beams (Unit:mm)
中所规定的要求进行锚固,如图 2 所示。试验梁加载及测试如图 3 所示。

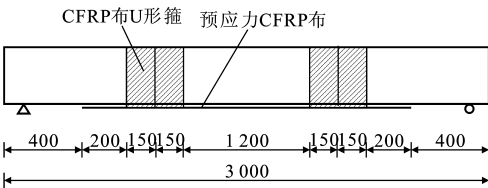


图 2 预应力 CFRP 布粘贴及锚固 (单位:mm)
Fig. 2 Stick and Anchorage of Prestressed CFRP Sheet (Unit:mm)

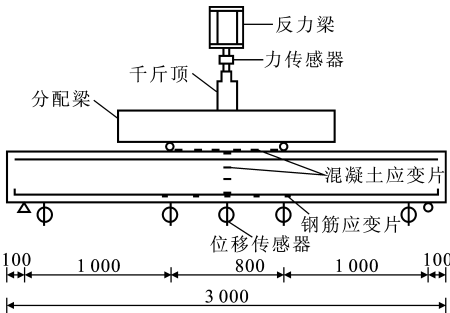


图 3 试验梁加载及测试 (单位:mm)

Fig. 3 Loading and Testing of Test Beams (Unit:mm)

2 试验结果

表 2 中给出了第 I, II 组试验梁各阶段承载力特征值及最大裂缝宽度和最大挠度。由表 2 可知,利用预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁正截面能较大幅度提高混凝土梁的承载力。

表 3 中给出试验梁纵筋屈服前一级荷载时的实测裂缝平均间距 l_{test} 与平均宽度 ω_m ,图 4 为试验梁纯弯区段实测裂缝分布。由图 4 可以看出,2 个加载点间裂缝分布比较均匀,CFRP 布的预拉应力增大,试验梁的裂缝分布变密集,裂缝高度降低,裂缝

表 2 试验结果

Tab. 2 Results of Test

| 试验梁编号 | | P_y/kN | P_u/kN | $w_{\max 1}/\text{mm}$ | $w_{\max 2}/\text{mm}$ | $f_{\max 1}/\text{mm}$ | $f_{\max 2}/\text{mm}$ |
|--------|---------|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 第 I 组 | DBL1 | 20 | 37 | 0.68 | | 19.89 | |
| | YJGL1-A | 45 | 70 | 0.05 | 1.60 | 0.57 | 34.61 |
| | YJGL1-B | 45 | 60 | 0.08 | 0.60 | 0.76 | 24.43 |
| | YJGL1-C | 50 | 60 | 0.07 | 1.00 | 0.90 | 20.58 |
| 第 II 组 | DBL2 | 58 | 87 | 1.00 | | 23.18 | |
| | YJGL2-A | 100 | 110 | 0.14 | 1.00 | 6.63 | 29.56 |
| | YJGL2-B | 105 | 105 | 0.24 | 0.70 | 5.81 | 18.71 |
| | YJGL2-C | 105 | 105 | 0.20 | 0.36 | 5.53 | 17.03 |

注： P_y 为纵向钢筋屈服时的荷载； P_u 为混凝土梁达到极限承载力时的荷载； $w_{\max 1}$ 、 $f_{\max 1}$ 分别为加固梁在预加载结束时的最大裂缝宽度和最大挠度； $w_{\max 2}$ 、 $f_{\max 2}$ 分别为加固梁破坏时刻的最大裂缝宽度和最大挠度。

表 3 l_{test} 、 ω_m 试验值

Tab. 3 Test Values of l_{test} and ω_m

| 试验梁编号 | | $l_{\text{test}}/\text{mm}$ | ω_m/mm |
|--------|---------|-----------------------------|----------------------|
| 第 I 组 | DBL1 | 154 | 0.25 |
| | YJGL1-A | 138 | 0.13 |
| | YJGL1-B | 116 | 0.17 |
| | YJGL1-C | 101 | 0.12 |
| 第 II 组 | DBL2 | 128 | 0.28 |
| | YJGL2-A | 111 | 0.32 |
| | YJGL2-B | 104 | 0.28 |
| | YJGL2-C | 97 | 0.26 |

平均宽度变小,表明预应力 CFRP 布能较好地抑制正截面裂缝的开展。

3 试验梁裂缝分析

3.1 裂缝平均间距

设裂缝间距为 l ,取出 2 条裂缝间的隔离体,如图 5 所示,其中, σ_c 为混凝土抗拉强度, A_s 为纵向受力钢筋截面积, A_f 为预应力 CFRP 布截面积, f_t 为混凝土抗拉强度实测值, σ_{s1} 、 σ_{f1} 分别为第 1 条裂缝出现时纵向钢筋和预应力 CFRP 布实测拉应力, σ_{s2} 、 σ_{f2} 分别为第 2 条裂缝出现时纵向钢筋和预应力 CFRP 布实测拉应力, τ_s 为钢筋在长度 l 范围内与混凝土的平均粘结应力, τ_f 为 CFRP 布在长度 l 范围内与混凝土的平均粘结应力。隔离体一端为已出现的第 1 条裂缝位置,如图 5(a)所示的 1-1 截面,另一端为即将出现的第 2 条裂缝位置,如图 5(a)所示的 2-2 截面。已出现裂缝处的 1-1 截面混凝土抗拉强度 $\sigma_c=0$,仅钢筋与 CFRP 布受拉,其拉应力分别为 σ_{s1} 、 σ_{f1} ;即将出现裂缝的 2-2 截面,混凝土抗拉强

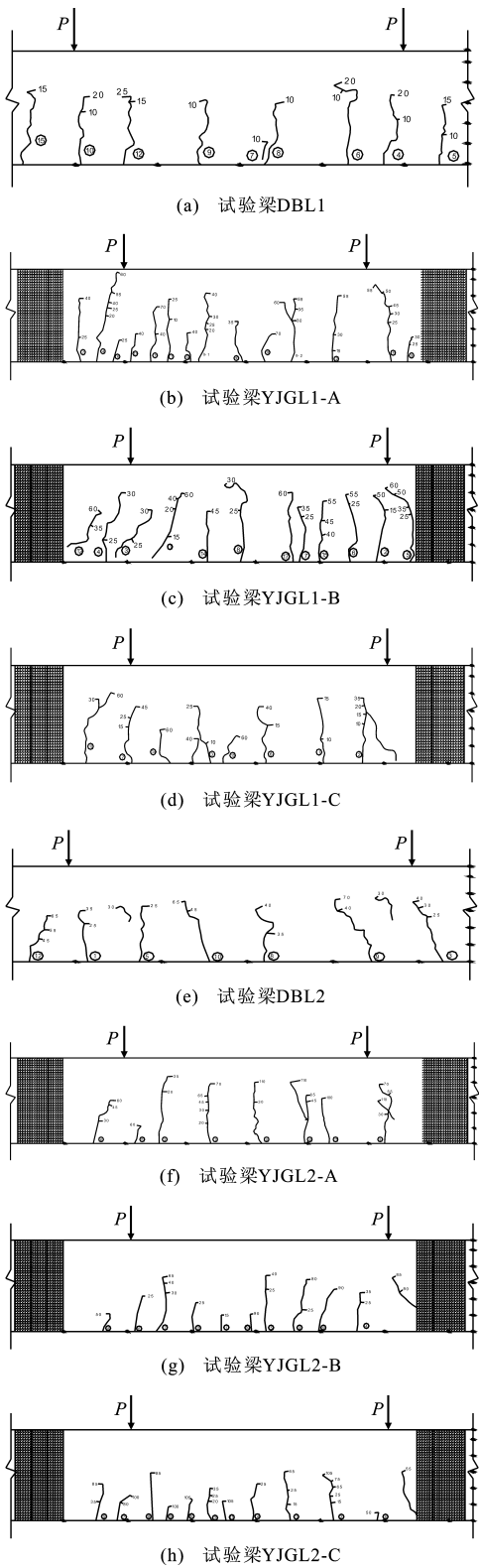


图 4 试验梁裂缝分布

Fig. 4 Crack Distributions of Test Beams

度 $\sigma_c=f_t$,钢筋与 CFRP 布的拉应力分别为 σ_{s2} 、 σ_{f2} 。

由隔离体的平衡条件得

$$\sigma_{s1}A_s+\sigma_{f1}A_f=\sigma_{s2}A_s+\sigma_{f2}A_f+f_tA_c \tag{1}$$

式中： A_c 为混凝土截面积。

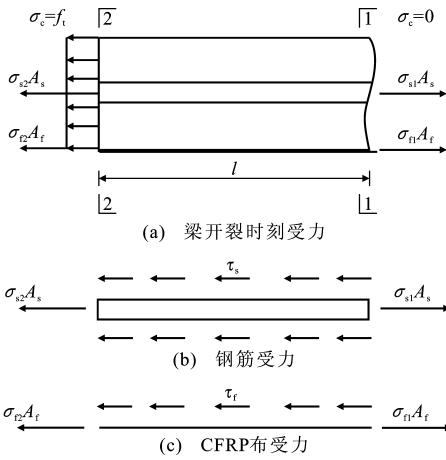


图 5 裂缝间距

Fig. 5 Crack Spacing

本文中分别取出钢筋和 CFRP 布的隔离体 [图 5(b), (c)], 根据隔离体的平衡条件得

$$\sigma_{s1} A_s - \sigma_{s2} A_s = \tau_s u l \quad (2)$$

$$\sigma_{f1} A_f - \sigma_{f2} A_f = \tau_f b_f l \quad (3)$$

式中: u 为纵向受力钢筋的周长, $u = \pi d$, d 为钢筋直径; b_f 为 CFRP 布的粘贴宽度。

由式(1)~(3)可得

$$\frac{\tau_f}{\tau_s} = \frac{(\sigma_{f1} - \sigma_{f2}) A_f u}{(\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) A_s b_f} = \frac{E_f \Delta \epsilon_f A_f u}{E_s \Delta \epsilon_s A_s b_f} \quad (4)$$

$$f_t A_c = 4 \tau_s \frac{A_s + A_f}{d} \left[1 + \frac{A_f}{A_s + A_f} \cdot \frac{\tau_f d / (4 t_f) - \tau_s}{\tau_s} \right] l \quad (5)$$

式中: $\Delta \epsilon_f$, $\Delta \epsilon_s$ 分别为 CFRP 布和钢筋的应变增量; t_f 为 CFRP 布的厚度; E_f , E_s 分别为 CFRP 布和纵向受力钢筋弹性模量。

设裂缝平均间距 l_m 为

$$l_m = \left[1 + \frac{A_f}{A_s + A_f} \frac{\tau_f d / (4 t_f) - \tau_s}{\tau_s} \right] l \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$l_m = \frac{f_t d}{4 \tau_s \rho} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{A_s + A_f}{A_c} \quad (8)$$

由于式(7)与未加固混凝土梁的裂缝平均间距计算公式 $l = \frac{f_t d}{4 \tau_s \rho_{te}}$ 相似^[12], ρ_{te} 为受拉钢筋有效配筋率, $\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}}$, A_{te} 为受拉钢筋有效截面面积, 将式(8)

中 CFRP 布的面积 A_f 转换为钢筋面积 $\alpha_{Ef} A_f$, α_{Ef} 为 CFRP 布弹性模量 E_f 与钢筋弹性模量 E_s 的比值, 可以看出变换后的式(8)在物理意义上与未加固梁

中的 ρ_{te} 是相同的, 为受拉区钢筋面积与梁截面有效受拉面积的比值。因此裂缝平均间距 l_m 可按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010, 以下简称规范)中受弯构件的裂缝间距计算, 即

$$l_m = 1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \quad (9)$$

$$\rho_{te} = (A_s + \alpha_{Ef} A_f) / (0.5bh)$$

式中: c 为受拉钢筋保护层厚度。

采用文献[13]中的计算方法, 引入影响系数 γ , 则有

$$\gamma = \frac{A_f}{A_s + A_f} \frac{\tau_f d / (4 t_f) - \tau_s}{\tau_s} = \frac{A_f}{A_s + A_f} (\kappa \frac{d}{t_f} - 1) \quad (10)$$

式中: κ 为粘结系数, $\kappa = \tau_f / (4 \tau_s)$ 。

将式(10)代入式(6), 可得预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁裂缝平均间距 l_{cal} 的计算公式为

$$l_{cal} = \frac{l_m}{1 + \gamma} \quad (11)$$

由式(4)可知, 粘结系数 κ 与 CFRP 布和钢筋的应变增量、截面面积有关。试验实测 CFRP 布和钢筋的应变增量见表 4。由表 4 可以看出, CFRP 布的应变增量与钢筋的应变增量协同增长, 且增量比接近一个常数, 本文中依据试验实测数据取极差不超过 30% 的数据平均值, 即 $\Delta \epsilon_f / \Delta \epsilon_s = 1.19$ 。

利用试验实测裂缝平均间距 l_{test} 和式(9)~(11), 可计算得 γ , κ 值, 结果见表 5。由表 5 可知, 加固梁的实测裂缝平均间距 l_{test} 随 CFRP 布的张拉控制应力 σ_{con} 的提高而减小, 同时 CFRP 布的预应力施加程度也会对粘结系数 κ 产生影响。

采用非线性拟合工具软件 1stOpt 对表 5 中的粘结系数 κ 进行拟合, 结果如图 6 所示。由此得出以 $\alpha_{Ef} A_f u / (A_s b_f)$ 和 λ 为自变量的粘结系数 κ 的计算公式, 即

$$\kappa = -0.643 \frac{\alpha_{Ef} A_f u}{A_s b_f} + 0.666 \lambda - 0.06 \quad (12)$$

利用式(9)~(12)可计算出裂缝平均间距 l_{cal} , 结果见表 6。由表 6 可知, 裂缝平均间距计算值与实测值吻合良好。

3.2 裂缝宽度计算

3.2.1 钢筋应力分析

正常使用阶段, 预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁裂缝截面处的钢筋应力如图 7 所示, 其中, η 为内力臂系数, h_0 为截面有效高度, a_s 为钢筋合力点至 CFRP 布距离, M 为加固后梁的弯矩, σ_s , σ_f 分别为梁加固后二次受力时钢筋应力和 CFRP 布应力。

分析前做如下假定: ①预应力 CFRP 布加固负

表 4 应变增量
Tab. 4 Strain Increments

| 加固荷载/kN | YJGL1-A | | | YJGL1-B | | | YJGL1-C | | |
|---------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|---|
| | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ |
| 15 | 82 | 103 | 1.26 | 116 | 118 | 1.02 | 240 | 351 | 1.46 |
| 20 | 309 | 330 | 1.07 | 267 | 259 | 0.97 | 404 | 632 | 1.56 |
| 25 | 620 | 736 | 1.19 | 490 | 526 | 1.07 | 578 | 896 | 1.55 |
| 30 | 882 | 1 053 | 1.19 | 709 | 761 | 1.07 | 691 | 1 126 | 1.63 |
| 35 | 1 139 | 1 349 | 1.18 | 980 | 1 031 | 1.05 | 920 | 1 431 | 1.56 |
| 40 | 1 398 | 1 617 | 1.16 | 1 247 | 1 285 | 1.03 | 1 101 | 1 504 | 1.37 |
| 45 | | | | | | | 1 335 | 1 783 | 1.34 |

| 加固荷载/kN | YJGL2-A | | | YJGL2-B | | | YJGL2-C | | |
|---------|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|---|
| | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ | $\Delta\epsilon_s$ | $\Delta\epsilon_f$ | $\Delta\epsilon_f\Delta\epsilon_s^{-1}$ |
| 45 | 142 | 132 | 0.93 | 85 | 70 | 0.82 | 108 | 91 | 0.84 |
| 50 | 247 | 227 | 0.92 | 193 | 141 | 0.73 | 242 | 162 | 0.67 |
| 55 | 282 | 347 | 1.23 | 284 | 205 | 0.72 | 251 | 253 | 1.01 |
| 60 | 327 | 445 | 1.36 | 353 | 267 | 0.76 | 368 | 333 | 0.90 |
| 65 | 417 | 585 | 1.40 | 456 | 348 | 0.76 | 533 | 408 | 0.77 |
| 70 | 483 | 665 | 1.38 | 558 | 438 | 0.78 | 648 | 473 | 0.73 |
| 75 | 577 | 794 | 1.38 | 666 | 560 | 0.84 | 672 | 574 | 0.85 |
| 80 | 650 | 910 | 1.40 | 760 | 737 | 0.97 | 744 | 641 | 0.86 |
| 85 | 741 | 1 108 | 1.49 | 871 | 892 | 1.02 | 887 | 747 | 0.84 |
| 90 | 838 | 1 226 | 1.46 | 955 | 1 028 | 1.08 | 971 | 825 | 0.85 |
| 95 | 966 | 1 398 | 1.45 | 1 073 | 1 198 | 1.12 | 1 053 | 951 | 0.90 |
| 100 | | | | 1 146 | 1 319 | 1.15 | 1 150 | 1 103 | 0.96 |

表 5 γ, κ 计算值
Tab. 5 Calculated Values of γ and κ

| 试验梁编号 | λ | $l_{\text{test}}/\text{mm}$ | γ | κ |
|---------|-----------|-----------------------------|----------|----------|
| YJGL1-A | 0.09 | 138 | -0.137 | -0.013 |
| YJGL1-B | 0.13 | 116 | 0.027 | 0.012 |
| YJGL1-C | 0.16 | 101 | 0.179 | 0.036 |
| YJGL2-A | 0.03 | 111 | -0.245 | -0.047 |
| YJGL2-B | 0.05 | 104 | -0.195 | -0.036 |
| YJGL2-C | 0.07 | 97 | -0.136 | -0.024 |

注: λ 为预应力度, $\lambda = \sigma_{\text{pe}} A_f / (\sigma_{\text{pe}} A_f + A_s f_y)$, f_y 为受拉纵向钢筋屈服强度, σ_{pe} 为 CFRP 布的有效预拉应力, $\sigma_{\text{pe}} = 0.6 \sigma_{\text{con}}$ 。

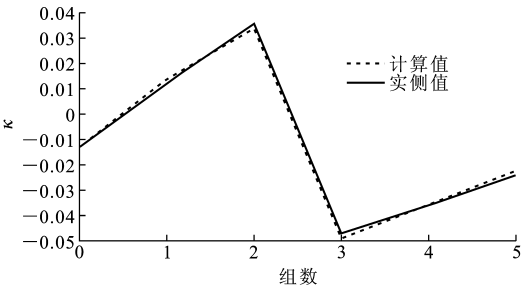


图 6 粘结系数拟合曲线

Fig. 6 Fitting Curves of Bonding Coefficients

载混凝土梁在二次受力过程中截面沿高度方向保持平面;②钢筋、混凝土本构模型按规范采用;③CFRP

表 6 裂缝平均间距计算值
Tab. 6 Calculated Values of Average Crack Spacing

| 试验梁编号 | l_{cal}/mm | $l_{\text{test}}/\text{mm}$ | $l_{\text{cal}}l_{\text{test}}^{-1}$ |
|---------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| YJGL1-A | 137.5 | 138 | 0.996 |
| YJGL1-B | 114.7 | 116 | 0.989 |
| YJGL1-C | 102.0 | 101 | 1.010 |
| YJGL2-A | 112.0 | 111 | 1.011 |
| YJGL2-B | 103.7 | 104 | 0.997 |
| YJGL2-C | 96.3 | 97 | 0.992 |

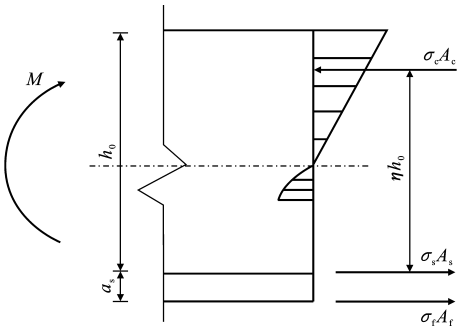


图 7 钢筋应力

Fig. 7 Steel Stress

布采用线弹性应力-应变关系;④不考虑混凝土的抗拉强度;⑤在正常使用状态下,CFRP 布与梁粘结可

靠,纵向钢筋未屈服。

由图 7 可得加固后梁的弯矩 M 为

$$M=\sigma_s A_s \eta h_0+\sigma_f A_f(\eta h_0+a_s) \quad (13)$$

混凝土梁是在负载状态下进行加固,式(13)可变换为

$$M=(\sigma_{s0}+\Delta \sigma_s) A_s \eta h_0+(\sigma_{pe}+\Delta \sigma_f) A_f \cdot(\eta h_0+a_s)=M_0+M_{fp}+\Delta \sigma_s A_s \eta h_0+\Delta \sigma_f A_f(\eta h_0+a_s)=M_0+M_{fp}+\Delta \sigma_s A_s \eta h_0 \cdot\left[1+\frac{\Delta \sigma_f A_f(\eta h_0+a_s)}{\Delta \sigma_s A_s \eta h_0}\right]=M_0+M_{fp}+\Delta \sigma_s A_s \eta h_0\left[1+\frac{E_f \Delta \epsilon_f A_f(\eta h_0+a_s)}{E_s \Delta \epsilon_s A_s \eta h_0}\right] \quad (14)$$

式中: M_0 为加固前受弯构件上原作用的弯矩; M_{fp} 为 CFRP 布的有效预拉应力 σ_{pe} 产生的弯矩, $M_{fp}=\sigma_{pe} A_f(\eta h_0+a_s), \sigma_{pe}=0.6 \sigma_{con} ; \sigma_{s0}$ 为弯矩 M_0 作用下的钢筋应力, $\sigma_{s0}=M_0 /\left(A_s \eta h_0\right) ; \Delta \sigma_s$ 为梁加固后二次受力时钢筋应力增量; $\Delta \sigma_f$ 为梁加固后二次受力时 CFRP 布应力增量。

本文中取 $\Delta \epsilon_f / \Delta \epsilon_s=1.19, \eta$ 按规范取 0.87,代入式(14)得到钢筋应力增量 $\Delta \sigma_s$

$$\Delta \sigma_s=\frac{M-M_0-M_{fp}}{0.87 A_s h_0 \nu} \quad (15)$$

$$\nu=1+1.37 \frac{\alpha_{EF} A_f(0.87 h_0+a_s)}{A_s h_0} \quad (16)$$

3.2.2 钢筋应力不均匀系数

钢筋应力不均匀系数 ψ 是反映裂缝间混凝土参加受拉工作程度的影响系数,可按规范计算,即

$$\psi=1.1\left(1-\frac{M_c}{M}\right) \quad (17)$$

式中: M_c 为混凝土梁开裂时截面混凝土部分所承担的弯矩。

本次试验对象为矩形截面梁,可取

$$M_c=0.8(0.5 b h) f_{tk} \eta_c h \quad (18)$$

式中: η_c 为受拉区混凝土合力作用点至受压区压力作用点距离。

将式(15),(16),(18)代入式(17),取 $\eta_c / \eta=0.67, h / h_0=1.1$,可得

$$\psi=1.1-0.968 f_{tk} /\left\{0.67 \rho_{tes}\left(\sigma_{s0}+\nu \Delta \sigma_s\right)+\rho_{tef} \sigma_{pe}\left[0.67+a_s /\left(0.87 h_0\right)\right]\right\} \quad (19)$$

式中: $\rho_{tes}=A_s /\left(0.5 b h\right) ; \rho_{tef}=A_f /\left(0.5 b h\right) 。$

3.2.3 最大裂缝宽度

由于本次试验是在短期荷载作用下完成的,所以裂缝宽度计算不考虑长期荷载的影响,即

$$\omega_{\max }=\tau \omega_m=0.85 \tau \psi \frac{\sigma_s}{E_s} l \quad (20)$$

式中: $\omega_{\max }$ 为最大裂缝宽度; τ 为裂缝扩大系数,取 $\tau=1.66$ 。

将式(9),(11)代入式(20)得

$$\omega_{\max }=1.41 \psi \frac{\sigma_s(1.9 c+0.08 d / \rho_{te})}{E_s(1+\gamma)} \quad (21)$$

利用式(10),(12),(15),(16),(19),(21)可计算出最大裂缝宽度 ω_{\max} ,结果见表 7。由表 7 可知,最大裂缝宽度计算值与实测值吻合良好。

4 结 语

(1)利用预应力 CFRP 布加固负载混凝土梁正截面能较大幅度提高混凝土梁的承载力,在二次受力过程中,CFRP 布与钢筋协同工作良好,在钢筋屈服前二者的应变增量基本一致。

(2)预应力 CFRP 布能有效抑制混凝土梁裂缝开展,且随着预拉应力的增加,裂缝平均间距和裂缝

表 7 最大裂缝宽度计算值

Tab. 7 Calculated Values of Maximum Crack Width

| 加固负载/kN | YJGL1-A | | | YJGL1-B | | | YJGL1-C | | |
|---------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ |
| 20 | 0.08 | 0.06 | 1.35 | 0.04 | 0.08 | 0.90 | 0.06 | 0.07 | 0.89 |
| 30 | 0.15 | 0.12 | 1.26 | 0.14 | 0.12 | 1.17 | 0.13 | 0.11 | 1.18 |
| 40 | 0.22 | 0.16 | 1.40 | 0.21 | 0.20 | 1.06 | 0.20 | 0.15 | 1.33 |

| 加固负载/kN | YJGL2-A | | | YJGL2-B | | | YJGL2-C | | |
|---------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ | ω_{\max} | ω'_{\max} | $\omega_{\max} \omega'_{\max}^{-1}$ |
| 50 | 0.23 | 0.14 | 1.61 | 0.22 | 0.24 | 0.92 | 0.22 | 0.20 | 1.08 |
| 60 | 0.26 | 0.24 | 1.07 | 0.25 | 0.26 | 0.96 | 0.25 | 0.20 | 1.23 |
| 70 | 0.29 | 0.24 | 1.19 | 0.28 | 0.26 | 1.08 | 0.28 | 0.24 | 1.15 |
| 80 | 0.32 | 0.30 | 1.06 | 0.31 | 0.28 | 1.11 | 0.31 | 0.28 | 1.09 |
| 90 | 0.34 | 0.34 | 1.02 | 0.34 | 0.35 | 0.98 | 0.34 | 0.30 | 1.12 |

注: ω'_{\max} 为最大裂缝宽度实测值。

宽度均减小。

(3) 基于试验数据结果,建立了预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁最大裂缝宽度的设计计算公式,利用该计算公式对试验梁的裂缝宽度进行计算,最大裂缝宽度计算值与实测值吻合良好。

参考文献:

References:

- [1] 程东辉,王 丽,于雁南. 预应力碳纤维布加固混凝土方形截面短柱轴心受压试验[J]. 工业建筑,2013,43(1):49-54.
CHENG Dong-hui, WANG Li, YU Yan-nan. Experiment of Axial Compression of Reinforced Concrete Short Square-columns Strengthened with Prestressed CFRP Sheets[J]. Industrial Construction, 2013, 43(1):49-54.
- [2] 程东辉,荣 威,周 威. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁受剪性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(12):143-148.
CHENG Dong-hui, RONG Wei, ZHOU Wei. Experimental Research of Shear Resistance Performance on Loaded Concrete Beam Reinforced with Prestressed CFRP Sheet in Diagonal Section[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12):143-148.
- [3] 叶列平,庄江波,曾 攀,等. 预应力碳纤维布加固钢筋混凝土 T 形梁的试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(8):7-12.
YE Lie-ping, ZHUANG Jiang-bo, ZENG Pan, et al. Experimental Study on Reinforced Concrete T-beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets[J]. Industrial Construction, 2005, 35(8):7-12.
- [4] 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.
SHANG Shou-ping, PENG Hui, TONG Hua, et al. Study of Strengthening Reinforced Concrete Beam Using Prestressed Carbon Fiber Sheet[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):24-30.
- [5] EI-HACHA R, WIGHT R G, GREEN M F. Innovative System for Prestressing Fiber-reinforced Polymer Sheets[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(3):305-313.
- [6] WIGHT R G, GREEN M F, ERKI M A. Post-strengthening Concrete Beams with Prestressed FRP Sheets[C]//TAERWE L. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2). London: E & FN Spon, 1995:568-575.
- [7] WU Z, IWASHITA K, ISHIKAWA T, et al. Fatigue Performance of RC Beams Strengthened with Externally Prestressed PBO Fiber Sheets[C]//TAN K H. Proceedings of Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6). Singapore: World Scientific Publishing Company, 2003:885-894.
- [8] 梁炯丰,熊志斌,邓志平,等. 预应力碳纤维布加固 RC 梁的受弯性能研究[J]. 工程抗震与加固改造,2010,32(4):105-109.
LIANG Jiong-feng, XIONG Zhi-bin, DENG Zhi-ping, et al. Study on RC Beams Strengthened with Prestressed Carbon Fiber Sheet[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4):105-109.
- [9] LEES J M, WINISTORFER A U, MEIER U. External Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Straps for Shear Enhancement of Concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(4):249-256.
- [10] 程东辉,袁 佳,张 鹏. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2012,28(6):997-1003.
CHENG Dong-hui, YUAN Jia, ZHANG Peng. Experimental Research of Loaded Concrete Beams Reinforced with Prestressed CFRP Sheets[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2012, 28(6):997-1003.
- [11] 程东辉. 预应力碳纤维布张拉装置:中国,201020240641.1[P]. 2011-01-05.
CHENG Dong-hui. Prestressed Carbon Fiber Sheet Tensioning Device: China, 201020240641.1[P]. 2011-01-05.
- [12] 叶列平. 混凝土结构:上册[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2005.
YE Lie-ping. Concrete Structures: The First Volume [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [13] 庄江波,叶列平,鲍轶洲,等. CFRP 布加固混凝土梁的裂缝分析与计算[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(1):86-91.
ZHUANG Jiang-bo, YE Lie-ping, BAO Yi-zhou, et al. Crack Width of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Sheets[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(1):86-91.