

# 玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁正截面抗弯承载力计算

王文炜<sup>1</sup>, 赵国藩<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏南京 210096; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 通过 14 根玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁试验研究, 证明经玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁抗弯承载力提高较多, 加固效果明显。在试验的基础上对玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁正截面抗弯承载力计算方法进行了分析。根据不同的破坏模式提出了不同的极限状态计算公式, 给出了最大和最小玻璃纤维布使用面积的计算方法。同时, 根据试验结果和美国 FRP 加固设计规范提出了玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁的相对界限受压区高度和设计极限拉应变。计算结果表明, 本文建立的计算公式与试验值吻合较好, 误差较小。

**关键词:** 玻璃纤维布; 加固; 钢筋混凝土梁; 抗弯承载力

**中图分类号:** TU377.9 **文献标识码:** A

## Calculation of flexural capacity of RC beams strengthened with GFRP sheets

WANG Wenwei<sup>1</sup>, ZHAO Guofan<sup>2</sup>

(1. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Fourteen RC beams strengthened with glass fiber reinforced polymer (GFRP) sheets were tested. The experimental results showed that the flexural strength of the repaired beams was increased. An analytical study concerning the flexural strengthening of RC beams with externally bonded GFRP sheets was conducted according to the experimental results of fourteen RC beams. Based on their different failure modes, the calculation formulas are given. Also, this paper advances the maximum GFRP area and minimum GFRP area to avoid brittle failure of RC beams strengthened with the externally bonded GFRP sheets. At the same time, the ratio of extreme depth  $x_m$  to the depth  $h_t$  and the designed ultimate strain of GFRP sheets are presented as well. The analytical model is shown to be in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** GFRP sheets; strengthening; RC beams; flexural capacity

## 1 前言

用外贴纤维复合材料 (FRP) 的方法加固钢筋混凝土构件近年来在我国的应用逐渐增多。纤维复合材料具有耐腐蚀、高强、重量低、易于施工等优点。SAADATMANESH 等在早期曾对玻璃纤维 (GFRP) 加固钢筋混凝土梁进行过研究<sup>[1, 2]</sup>, 其后国外对于 FRP 加固钢筋混凝土梁的研究主要集中在碳纤维。国内对

FRP 加固混凝土结构的研究始于 1998 年<sup>[3]</sup>, 多数集中在碳纤维布加固混凝土构件, 对玻璃纤维布加固混凝土构件研究的较少。玻璃纤维布具有造价低、延伸率高等优点, 因此对于玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁的研究具有重要意义。本文根据 14 根玻璃纤维布加固的钢筋混凝土梁试验结果, 对玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁的极限承载力进行了分析。

## 2 试验简介

本试验共浇注了 14 根钢筋混凝土矩形梁, 每根梁

作者简介: 王文炜 (1971 - ), 男, 河南洛阳人, 工学博士, 讲师。  
收稿日期: 2002 年 11 月

的尺寸均为 150mm×250mm×2700mm。14 根梁分为二组,第一组为对比梁,共 3 根(CL20,CL30,CL40),其余的为加固梁(表 2)。钢筋为 I、II 级钢;混凝土设计强度等级为三级:C20、C30、C40。梁简支在试验机上,梁的净跨为 2400mm,纯弯段的尺寸分别为 400mm、800mm、1200mm,试件尺寸见图 1。试验的材料性能见表 1,表中材料力学性能指标均为实测值,GFRP 为耐碱玻璃纤维布。

试验梁发生了受压区混凝土压坏、混凝土剪压破坏、GFRP 断裂三种破坏类型。所有梁的试验结果汇总到表 2。这三种破坏类型中,属于弯曲破坏的有受压区混凝土压坏、GFRP 拉断两种破坏类型。本文针对受弯破坏的形式进行了抗弯承载力分析。

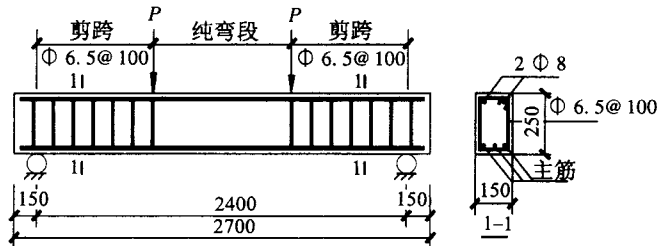


图 1 试件尺寸图  
Fig. 1 Details of test beam

3 抗弯承载力分析

3.1 基本假定

- (1)根据试验结果,加固后的梁符合平截面假定。
- (2)混凝土梁开裂后不考虑受拉混凝土的作用。
- (3)钢筋应力 - 应变关系为:屈服前,应力 - 应变关系为线弹性关系。屈服后,钢筋的应力取屈服强度。
- (4)混凝土应力 - 应变关系按《混凝土结构设计规

表 1 材料性能表

Table 1 Material properties					
材料	屈服强度	极限强度	屈服应变	极限应变	弹性模量
	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$\varepsilon_y(\times 10^{-6})$	$\varepsilon_u(\times 10^{-6})$	$E/\text{GPa}$
钢筋	Φ 6.5	361.6	497.2	1721.9	210
	Φ 8	352.1	523.9	1676.7	210
	Φ 12	381.7	579.1	1908.5	200
	Φ 14	365.9	535.9	1829.5	200
	Φ 22	366.5	541.9	1832.5	200
混凝土	C20	32.6			30.7
	C30	40.3			32.7
	C40	48.9			34.3
GFRP		542		24600	22.4

范》(GB 50010—2002)<sup>[4]</sup>(以下简称规范)取用。

(5)玻璃纤维布的应力 - 应变关系为线弹性关系,即应力等于应变乘以玻璃纤维布的弹性模量。

3.2 第 1 种破坏模式:受拉钢筋屈服后,GFRP 拉断

GFRP 被拉断的情况是由于 GFRP 加固量过低所致,此种情况受压区混凝土未压坏,而 GFRP 的拉应变达到极限拉应变(图 2),这样就不能采用等效矩形应力图来计算。由水平方向平衡可得

$$C_c = f_y A_s + f_{fu}^* A_f \tag{1}$$

式中,  $C_c$  为受压混凝土合力,  $A_s$  为受拉钢筋面积,  $A_f$  为 GFRP 面积,  $f_y$  为受拉钢筋屈服强度,  $f_{fu}^*$  为 GFRP 极限抗拉强度。

由于受压区混凝土未达极限状态,因此,不能按规范规定的等效矩形应力图形计算。根据混凝土材料的非线性特性,要计算  $C_c$  就得按规范给定的混凝土本构关系进行积分运算,这就给计算带来了麻烦。本文基于规范给定的本构关系,将未达到极限应力状态非线性的混凝土应力图形转化成了等效矩形应力图形,并给出了等效矩形应力图形计算系数  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 。

如图 3 所示,混凝土的合力  $C_c$  经过积分运算得

表 2 纤维布应变统计

Table 2 Statistical values of GFRP strains				
梁号	纤维布应变 ( $\times 10^{-6}$ )	破坏类型	梁号	纤维布应变 ( $\times 10^{-6}$ )
BL20 - 1A	11628	混凝土压碎,之后纤维布拉断	BL20 - 3	2094
BL30 - 1A	11211	纤维布拉断	BL30 - 3A	5320
BL40 - 1	18357	纤维布拉断	BL40 - 3A	1705
BL20 - 2	8105	混凝土压碎	BL30 - 3B	5042
BL30 - 2	10626	混凝土压碎	BL40 - 3B	5501
BL40 - 2	8825	混凝土压碎	CL30	
CL20		钢筋屈服,混凝土压碎	CL40	

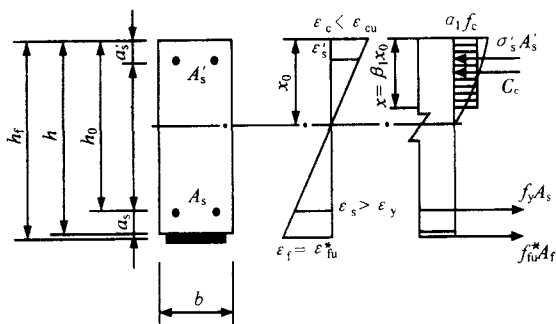


图2 第1种破坏模式

Fig. 2 The first failure mode

$$C_c = k_1 f_c b x_0 = \begin{cases} \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_0 - 3\epsilon_0^2} \right) f_c b x_0 & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ \left( 1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) f_c b x_0 & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_c$  为混凝土受压边缘压应变,  $\epsilon_0$  为混凝土应力峰值对应的压应变, 按规范<sup>[4]</sup>规定取值,  $\epsilon_{cu}$  为混凝土极限压应变,  $f_c$  为混凝土立方体抗压强度,  $b$  为梁宽,  $x_0$  为受压区理论高度。

合力作用点到受压区边缘的距离  $y_c$  为

$$y_c = \begin{cases} \frac{4\epsilon_0 - \epsilon_c}{12\epsilon_0 - 4\epsilon_c} x_0 & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ 1 - \frac{3 - \frac{\epsilon_0^2}{2\epsilon_c^2}}{6 - 2\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}} x_0 & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (3)$$

按规范<sup>[4]</sup>规定的第二个转化条件(即合力作用点的位置相同)可得

$$\frac{\beta_1 x_0}{2} = y_c \quad (4)$$

故

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{4\epsilon_0 - \epsilon_c}{6\epsilon_0 - 2\epsilon_c} & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0 \\ 2 - \frac{6 - \frac{\epsilon_0^2}{\epsilon_c^2}}{6 - 2\frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}} & \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (5)$$

按规范<sup>[4]</sup>规定的第一个转化条件(即合力大小相等)可得

$$C_c = \alpha_1 f_c b \beta_1 x_0 \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \frac{k_1}{\beta_1} \quad (7)$$

本文经过计算给出了相应于不同受压区边缘混凝土压应变的  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  值, 见表3。

式(1)中实质含有两个未知量  $x_0$ 、 $\beta_1$ , 故求解  $x_0$  可按下述方法求出。

由式(1)可得

$$\alpha_1 \beta_1 x_0 = \frac{f_y A_s + f_{fu}^* A_f}{b f_c} \quad (8)$$

假定混凝土压应变初始值  $\epsilon_c$ , 可由表3查出相应的  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  值。根据应变关系, 由下式求出  $x_0$

$$x_0 = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{fu}^*} h_f \quad (9)$$

式中,  $\epsilon_{fu}^*$  为 GFRP 极限拉应变。

将  $\alpha_1 \beta_1 x_0$  值与式(8)的计算值比较, 如不相等, 调整  $\epsilon_c$  值, 直到两者近似相等。这样就可求出  $x_0$ 、 $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  值。求出  $x$  值后可按下式确定抗弯承载力

$$M = f_y A_s \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_{fu}^* A_f \left( h_f - \frac{x}{2} \right) \quad (10)$$

式中,  $h_0$  为受拉钢筋合力作用点到梁受压边缘距离,  $h_f$  为 GFRP 合力作用点到梁受压边缘距离。上式即为第1种破坏模式的极限抗弯承载力计算公式。

表3 不同受压区边缘混凝土压应变  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  的值

Table 3 Values of  $\alpha_1$  and  $\beta_1$  for concrete compressive edge strains in different compression regions

混凝土压应变 $\epsilon_c$	$\alpha_1$	$\beta_1$	混凝土压应变 $\epsilon_c$	$\alpha_1$	$\beta_1$	混凝土压应变 $\epsilon_c$	$\alpha_1$	$\beta_1$
0.0005	0.336	0.682	0.0015	0.779	0.722	0.0025	0.938	0.782
0.0006	0.394	0.685	0.0016	0.807	0.727	0.0026	0.944	0.788
0.0007	0.449	0.689	0.0017	0.832	0.733	0.0027	0.949	0.794
0.0008	0.501	0.692	0.0018	0.854	0.738	0.0028	0.953	0.799
0.0009	0.550	0.696	0.0019	0.873	0.744	0.0029	0.957	0.804
0.0010	0.595	0.700	0.0020	0.889	0.750	0.0030	0.961	0.810
0.0011	0.638	0.704	0.0021	0.902	0.756	0.0031	0.964	0.814
0.0012	0.678	0.708	0.0022	0.914	0.763	0.0032	0.967	0.819
0.0013	0.714	0.713	0.0023	0.923	0.769	0.0033	0.969	0.824
0.0014	0.748	0.717	0.0024	0.931	0.776			

对于双筋矩形截面,将式(1)改写为

$$C_c + \sigma'_s A'_s = f_y A_s + f_{fu} A_f \quad (11)$$

$$\sigma'_s = \varepsilon_{fu}^* E_s \frac{x_0 - a'_s}{h_t - x_0} \quad (12)$$

将  $\sigma'_s$  求出后代入式(11)求出  $\alpha_1 \beta_1 x_0$ , 之后按单筋矩形截面的方法计算。

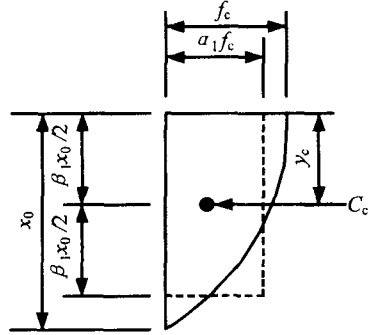


图3 混凝土应力图形转化

Fig. 3 Rectangular stress block of concrete

### 3.3 第2种破坏模式: 受拉钢筋屈服后, 受压区混凝土压坏

此种情况相当于加固配筋率合适的梁。截面配筋及应力应变图见图4。对于单筋矩形截面梁, 对 GFRP 合力作用点取矩得

$$M_n = \alpha_1 f_c b x \left( h_t - \frac{x}{2} \right) - f_y A_s (h_t - h_0) \quad (13)$$

式中,  $M_n$  为外荷载作用下产生的弯矩。

解式(13)关于  $x$  的一元二次方程可得混凝土受压区高度  $x$ 。由水平方向力的平衡可得

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_s + f_t A_f \quad (14a)$$

或

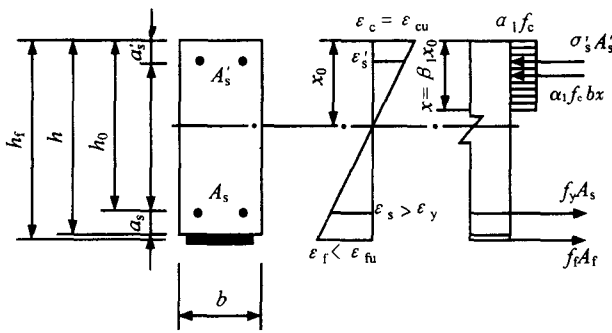


图4 第2种破坏模式

Fig. 4 The second failure mode

$$A_f = \frac{\alpha_1 f_c b x - f_y A_s}{f_t} \quad (14b)$$

GFRP 的拉应力  $f_t$ , 可按下式计算

$$f_t = E_f \left[ \left( \frac{\beta_1 h_t}{x} - 1 \right) \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu}^* \quad (15)$$

对于双筋矩形截面梁, 将式(13)改为

$$M_n = \alpha_1 f_c b x \left( h_t - \frac{x}{2} \right) - f_y A_s (h_t - h_0) + \sigma'_s A'_s (h_t - a'_s) \quad (16)$$

式(14b)改写为

$$A_f = \frac{\alpha_1 f_c b x - A_s f_y + \sigma'_s A'_s}{f_t} \quad (17)$$

式(16)中的  $\sigma'_s$  可按下式计算

$$\sigma'_s = E_s \varepsilon_{cu} \left( 1 - \frac{\beta_1 a'_s}{x} \right) \leq f_y \quad (18)$$

式(17)中的  $f_t$  可按式(15)计算。

以上各式中, 式(13)和式(14)是已知外荷载作用下产生的弯矩来求所需 GFRP 的面积。若已知 GFRP 的面积, 可由式(14a)、式(15)或式(17)、式(18)、式(15)联立求得受压区高度  $x$ , 进而可由式(13)、式(16)求得极限抗弯承载力。

### 3.4 第3种破坏模式: 受拉钢筋屈服前, 受压区混凝土已被压坏

此种情况相当于受拉钢筋配置较多致使受压区混凝土过早破坏。截面配筋及应力应变图见图5。对于单筋矩形截面梁对受拉钢筋合力作用点取矩得

$$M_n = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_t A_f (h_t - h_0) \quad (19)$$

式中  $f_t$  可由式(15)求出。将式(15)代入式(19)可得关于  $x$  的一元三次方程, 解方程可得受压区高度  $x$ 。

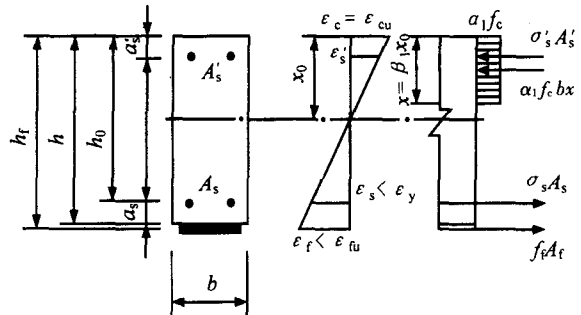


图5 第3种破坏模式

Fig. 5 The third failure mode

沿水平方向平衡得

$$\alpha_1 f_c b x = \sigma_s A_s + f_t A_t \quad (20a)$$

或

$$A_t = \frac{\alpha_1 f_c b x - \sigma_s A_s}{f_t} \quad (20b)$$

受拉钢筋应力  $\sigma_s$  可由下式求出

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_{cu} \left( \frac{\beta_1 h_0}{x} - 1 \right) \quad (21)$$

对于双筋矩形截面梁,将式(19)改为

$$M_n = \alpha_1 f_c b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_t A_t (h_t - h_0) + \sigma'_s A'_s (h_0 - a'_s) \quad (22)$$

式(22)中的  $\sigma'_s$  可按式(18)计算。将式(15)、式(18)代入式(22)可得关于  $x$  的一元三次方程,解方程可得受压区高度  $x$ 。将(20b)式改写为

$$A_t = \frac{\alpha_1 f_c b x + \sigma'_s A'_s - \sigma_s A_s}{f_t} \quad (23)$$

式(20b)、式(23)即为所需 GFRP 的面积计算公式。

式(20b)和式(23)是已知外荷载作用下产生的弯矩来求所需 GFRP 的面积。若已知 GFRP 的面积,可由式(20a)、式(15)和式(21)或式(23)、式(15)、式(18)和式(21)联立求得受压区高度  $x$ ,进而可由式(19)、式(22)求得极限抗弯承载力。

按照本文给出的计算公式,对试验梁及其他参考文献的试验梁进行了计算及对比(见表5)。从表5中可以看出,本文给出的计算公式和试验结果比较吻合,误差较小,计算精度较高。

## 4 工程实用设计公式

实际工程中, GFRP 加固的梁多为适筋梁,即第2种破坏模式居多,可按3.3节求所需 GFRP 面积。将式(16)改写为

$$\gamma_0 M = \alpha_1 f_c b x \left( h_t - \frac{x}{2} \right) - f_y A_s (h_t - h_0) + \sigma'_s A'_s (h_t - a'_s) \quad (24)$$

将式(15)改写为

$$f_t = E_t \left[ \left( \frac{\beta_1 h_t}{x} - 1 \right) \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{tu} \quad (25)$$

式中,  $\gamma_0$  为结构重要性系数,按规范<sup>[4]</sup>取用,  $f_{tu}$  为 GFRP 设计抗拉强度。

关于 GFRP 的设计抗拉强度  $f_{tu}$ , 美国 440 委员会取具有 99.87% 保证率的抗拉强度作为设计抗拉强度<sup>[5]</sup>,即

$$f_{tu} = \bar{f}_{tu} - 3\sigma \quad (26)$$

式中,  $\bar{f}_{tu}$  为 GFRP 极限抗拉强度平均值。

为了与规范衔接,本文定义受压区混凝土达极限压应变同时受拉钢筋达屈服强度时的受压区混凝土高度为最大受压区高度(图6),则根据定义

$$x_b = \beta_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} h_0 \quad (27)$$

式中  $x_b$  为最大受压区高度。

由水平方向力的平衡得

$$\alpha_1 f_c b x_b + \sigma'_s A'_s = f_y A_s + f_t A_{t, \max} \quad (28a)$$

或

$$A_{t, \max} = \frac{\alpha_1 f_c b x_b + \sigma'_s A'_s - f_y A_s}{f_t} \quad (28b)$$

式(28a)中的  $\sigma'_s$  和  $f_t$  可由式(18)、式(25)求出。式(28b)即为最大 GFRP 使用面积的计算公式。

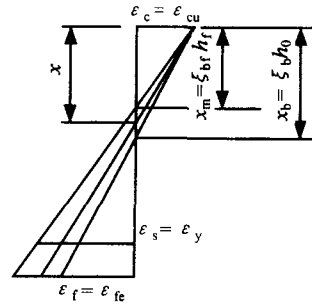


图6 最大和最小受压区高度的确定

Fig. 6 Maximal and minimal depths of the compression zone

为避免 GFRP 的使用量过低而造成 GFRP 的拉断,因此就要确定 GFRP 的最小使用量。本文对试验梁破坏时的纤维布拉应变进行了统计(表2)。由表2可以看出,属于弯曲破坏的梁,纤维布的拉应变在极限拉应变的 33% ~ 75% 之间。美国 440 委员会对玻璃纤维布拉应变的限制为<sup>[5]</sup>

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_m C_E \psi \varepsilon_{tu} \quad (29)$$

式中,  $C_E$  为环境折减系数,  $\psi$  为强度折减系数,  $\psi =$

$0.85, \kappa_m = 1 - \frac{n E_f t_f}{420000}$ ,  $\varepsilon_{fe}$  为设计极限拉应变。对于环境折减系数  $C_E$  取值见表4。

常用玻璃纤维复合物的弹性模量为 20000MPa 左右,厚度为 1.5mm,故  $\kappa_m \approx 1.0$ 。综合以上系数得出,对

表 4 环境折减系数  $C_E$  的取值<sup>[5]</sup>

Table 4 Environmental reduction factors for GFRP		
环境条件	纤维种类	$C_E$
室内环境	GFRP	0.75
室外环境	GFRP	0.65
腐蚀环境	GFRP	0.50

于室内环境  $\varepsilon_{fe} = 0.6375 \varepsilon_{fu}$ ; 对于室外环境  $\varepsilon_{fe} = 0.5525 \varepsilon_{fu}$ ; 对于腐蚀环境  $\varepsilon_{fe} = 0.42 \varepsilon_{fu}$ 。

结合试验结果, 本文建议玻璃纤维布的设计极限拉应变为

$$\varepsilon_{fe} = 0.4 \varepsilon_{fu} \quad (30)$$

式中, GFRP 极限拉应变  $\varepsilon_{fu}$  按下式计算

$$\varepsilon_{fu} = \bar{\varepsilon}_{fu} - 3\sigma \quad (31)$$

式中,  $\bar{\varepsilon}_{fu}$  为 GFRP 极限拉应变平均值。

则受压区高度为

$$x_m = \beta_1 x_{0m} = \beta_1 h_f \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fe}} \right) \quad (32)$$

式中,  $x_{0m}$  为最小受压区理论高度,  $x_m$  为最小受压区高度。

由式 (32) 可得玻璃纤维布相对界限受压区高度

$$\xi_{bf} = \frac{x_m}{h_f} = \frac{\beta_1 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fe}} \quad (33)$$

由水平方向平衡得

$$\alpha_1 f_c b x_m + \sigma_s' A_s' = f_y A_s + f_{fu} A_{f, \min} \quad (34a)$$

或

$$A_{f, \min} = \frac{\alpha_1 f_c b x_m + \sigma_s' A_s' - f_y A_s}{f_{fu}} \quad (34b)$$

式(34a)中的  $\sigma_s'$  可由式(18)求出。式(34b)即为最小 GFRP 使用面积的计算公式。

所需 GFRP 面积应符合下式

$$A_{f, \min} \leq A_f \leq A_{f, \max} \quad (35)$$

或

$$\xi_{bf} \leq \xi_f = x/h_f \leq \xi_b \quad (36)$$

## 5 设计步骤

应用 GFRP 加固钢筋混凝土梁, 一般有如下几个步骤:

(1) 按式(26)确定 GFRP 抗拉设计强度  $f_{fu}$ , 式(31)确定 GFRP 极限拉应变, 式(29)确定设计极限拉应变。

(2) 应用式(24)计算受压区高度  $x$ , 并使用式(14b)或式(17)计算 GFRP 使用面积。

(3) 应用式(27)计算最大受压区高度  $x_b$ , 并应用式(28b)计算最大 GFRP 使用面积。

(4) 应用式(32)计算最小受压区高度  $x_m$ , 并应用式(34b)计算最小 GFRP 使用面积。

(5) 检验 GFRP 使用面积是否满足式(35)或式(36)。

## 6 结语

本文在试验研究的基础上, 分析建立了 3 种玻璃

表 5 计算结果的对比

Table 5 Comparison between experimental and calculated ultimate loads									
梁编号	BL20-1A	BL20-2	BL30-1A	BL30-2	BL40-1	BL40-2	B2 <sup>[6]</sup>	6B <sup>[7]</sup>	5B <sup>[7]</sup>
$b/\text{mm}$	150	150	150	150	150	150	300	200	200
$h/\text{mm}$	250	250	250	250	250	250	400	200	200
$A_s/\text{mm}^2$	2 $\Phi$ 12, 226	3 $\Phi$ 14, 461	2 $\Phi$ 12, 226	3 $\Phi$ 14, 461	2 $\Phi$ 12, 226	3 $\Phi$ 14, 461	398	1019	774
$A_s'/\text{mm}^2$	100.6	100.6	100.6	100.6	100.6	100.6	266	142	142
$A_f/\text{mm}^2$	165.0	330.0	165.0	330.0	165.0	330.0	51.0	90.3	90.3
$E_s/\text{GPa}$	200	200	200	200	200	200	200	200	200
$E_f/\text{GPa}$	22	22	22	22	22	22	400	138	138
$f_y/\text{MPa}$	381.7	365.9	381.7	365.9	381.7	365.9	340.0	410.0	410.0
$f_{fu}/\text{MPa}$	542	542	542	542	542	542	3000	2206	2206
$f_c/\text{MPa}$	32.6	32.6	40.3	40.3	48.9	48.9	38.0	54.8	54.8
破坏模式	GFRP 拉断	混凝土压坏	GFRP 拉断	混凝土压坏	GFRP 拉断	混凝土压坏	FRP 拉断	混凝土压坏	混凝土压坏
极限荷载试验值 $P_u^o/\text{kN}$	57.0	120.0	58.0	140.0	60.0	133.0	81.2	169.1	146.8
极限荷载计算值 $P_u^c/\text{kN}$	62.7	132.3	64.7	144.5	65.2	153.0	94.6	157.4	150.8
相对误差(%)	10	10.3	11.6	3.2	8.7	15.0	16.4	-6.9	2.7

纤维布加固钢筋混凝土抗弯承载力的计算模型, 计算结果与试验值比较吻合。根据第 2 种破坏模式, 建立了抗弯承载力的实用公式, 并提出了最大和最小 GFRP 加固面积。根据试验结果, 结合美国 FRP 加固规范, 提出了玻璃纤维布的设计极限拉应变  $\varepsilon_{fe}$  与玻璃纤维布加固钢筋混凝土梁的相对界限受压区高度  $\xi_{fb}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] SAADATMANESH H. RC beams strengthened with GFRP plates[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991, 117(11): 3417 - 3455.
- [2] ARDUINI M, NANNI A. Parametric study of beams with externally bonded FRP reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(5): 493 - 551.

- [3] 岳清瑞. 碳纤维材料(碳纤维)加固修补混凝土结构新技术[R]. 全国建筑物鉴定与加固第四届学术交流会, 北京, 1998.
- [4] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].
- [5] Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures[S]. ACI Committee 440, 2000.
- [6] ARDUINI M, TOMMASO A D, NANNI A. Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(4): 363 - 370.
- [7] ROSS C A, JEROME D M, TEDESCO J W, HUGHES M L. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(2): 212 - 220.

(上接第 84 页)

的情形类似, 其破坏形态主要有洞口上下剪切破坏型和弯剪破坏联合型二种。

(2) 随跨高比、剪跨比的增大, 开洞短梁的剪切破坏面由斜压破坏向剪压破坏过渡。

(3) 跨高比、剪跨比、洞口大小和位置、配筋等是影响开洞短梁受剪特性及抗剪承载力的主要因素。

(4) 洞口配斜向钢筋可以改善力流的传递, 抑制斜裂缝的发展, 提高抗剪承载力。

(5) 连续开洞短梁的支座反力在加载过程中的重分布程度, 与其跨高比、剪跨比、洞口大小和位置、荷载形式有密切关系。

### 参 考 文 献

- [1] 开洞深梁专题组. 钢筋混凝土开洞深梁的试验研究[A].

混凝土结构研究报告集 3[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 59 - 71.

- [2] HOTTMANN H U. Bemessen von Stahlbetonbalken und Wandscheiben mit Öffnungen [D]. Stuttgart Uni., Stuttgart, 1995.
- [3] 刘晓春. 钢筋混凝土简支开洞短梁的试验及其传力模式的研究[D]. 青岛: 青岛建筑工程学院, 1998.
- [4] 李彬. 钢筋混凝土连续开洞短梁的试验研究[D]. 青岛: 青岛建筑工程学院, 2000.
- [5] 王命平, 刘晓春, 李彬. 钢筋混凝土开洞梁的试验分析及传力模型[J]. 建筑结构, 2001, 31(5): 23 - 25.
- [6] 刘立新, 龚绍熙. 连续深梁和短梁支座反力的分析及计算[J]. 郑州工学院学报, 1989, 10(4): 1 - 9.

(上接第 91 页)

- [4] ERIK L Nelson, RAMON L Carrasquillo. Behavior and failure of high-strength concrete subjected to biaxial-cyclic compression Loading[J]. ACI Materials Journal, 1988, 85(3): 248 - 253.
- [5] YIN Weisu, HSU Thomas T C. Fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete in uniaxial and biaxial compression[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(1): 71 - 81.
- [6] TALIERCIO A, GOBBI E. Experimental investigation on the triaxial fatigue behavior of plain concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48(176): 157 - 172.
- [7] TALIERCIO A, GOBBI E. Fatigue life and change in mechanical properties of plain concrete under triaxial

deviatoric cyclic stresses[J]. Magazine of Concrete Research, 1998, 50(3): 247 - 255.

- [8] 吕培印. 混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D]. 大连理工大学, 2001.
- [9] 林燕清. 混凝土疲劳累积损伤与力学性能劣化研究[D]. 哈尔滨建筑大学, 1998.
- [10] 杜云, 张春明, 尾崎認. 混凝土疲劳试验的 AE 特性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(1): 46 - 49.
- [11] SPARKS P R, MENZIES J B. The effect of rate of loading upon the static and fatigue strength in compression[J]. Magazine of Concrete Research, 1973, 25(83): 73 - 80.