

GFRP 筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算方法

卢姗姗, 郑文忠

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, lss_hit@163.com)

摘要: 为研究 GFRP 筋活性粉末混凝土梁抗裂性能, 进行 8 根 GFRP 筋活性粉末混凝土梁受弯性能试验, 获得这类梁的开裂荷载试验值. 参照普通钢筋混凝土梁正截面抗裂度计算方法, 结合活性粉末混凝土受拉应力-应变关系, 建立 GFRP 筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算模型, 得到与配筋率成线性关系的截面抵抗矩塑性影响系数的计算公式. 将按此公式计算得到的开裂荷载计算值与试验值进行对比, 结果表明两者吻合良好. 由此得到 GFRP 筋活性粉末混凝土梁正截面抗裂度计算方法.

关键词: GFRP 筋; 活性粉末混凝土; 梁; 抗裂度

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0536-05

Calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars

LU Shan-shan, ZHENG Wen-zhong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, lss_hit@163.com)

Abstract: To study the crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars, the experiments on flexural property of 8 reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars were carried out and cracking loads of this kind of beams were obtained. Referring to calculation method for cross-sectional crack resistance of steel-reinforced concrete beams, combining with tensile stress-strain relationship of reactive powder concrete, the calculation model for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars were established. By the calculation and analysis, formula of plastic influence coefficient of sectional resistance moment was gained which has the linear relationship with reinforcement ratio. The calculation data of cracking loads obtained by the formula and the test data of cracking loads were contrasted and the results show that they are in good agreement. Accordingly, the calculation method for cross-sectional crack resistance of reactive powder concrete beams reinforced with GFRP bars is achieved.

Key words: GFRP bars; reactive powder concrete (RPC); beam; crack resistance

GFRP 筋 (Glass Fiber Reinforced Polymer bars) 活性粉末混凝土 (Reactive Powder Concrete, 简称 RPC) 梁是由 GFRP 筋和 RPC 两种新型复合材料结合在一起形成的新型结构构件. GFRP 筋是以玻璃纤维为增强材料、以合成树脂为基体材料、并掺入适量辅助剂、经拉挤成型和必要的表面

处理形成的一种新型复合材料. 具有容重轻、强度高、抗腐蚀等优良性能, 替代钢筋用于土木工程中可以起到减轻结构自重、提高承载力以及避免钢筋锈蚀等作用^[1-3]. 活性粉末混凝土是一种具有高强度、高韧性、高耐久性等优良性能的水泥基复合材料^[4-5]. 将两者有机结合在一起形成的 GFRP 筋 RPC 梁, 可以使两者优良性能得到充分发挥. 目前, 国内外对这种结构构件正截面抗裂度的研究很少^[6-10]. 为此, 通过 8 根 GFRP 筋 RPC 梁受弯试验结果, 对其正截面抗裂度这一基本力学性能指标进行了研究, 给出了 GFRP 筋 RPC 梁

收稿日期: 2009-03-03.

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划项目 (教司[2005]290).

作者简介: 卢姗姗 (1981—), 女, 博士研究生;

郑文忠 (1965—), 男, 博士生导师, 长江学者特聘教授.

正截面抗裂度计算方法.

1 试验概况

试验梁共 8 根,长度为 2 400 mm,截面尺寸为 $b \times h = 150\text{ mm} \times 280\text{ mm}$,计算跨度为 1 800 mm. 室温下浇筑成型. 蒸汽养护 12 h. 试验梁的变化参数为配筋率. 试验梁用 RPC 配制原材料选用哈尔滨亚泰牌 P. O42. 5 硅酸盐水泥;SiO₂ 质量分数为 85. 72%,比表面积 24 200 m²/kg 的唐山硅灰;鞍山钢铁公司生产的比表面积为 4 200 cm²/g 的 S75 型矿渣粉;哈尔滨晶华水处理材料有限公司生产的 40 ~ 70 目和 70 ~ 140 目石英砂;直径为 0. 22 mm,长径比为 59. 1 的鞍山昌宏钢纤维厂生产的平直钢纤维;山东莱芜汶河化工有限公司生产的 FDN 浓缩型高效减水剂. 试验梁用 RPC 配合比如表 1 所示^[11].

表 1 RPC 配合比选择

水胶比	水泥	硅灰	矿渣粉	石英砂	钢纤维 %	减水剂 %
0. 22	1	0. 3	0. 15	1. 2	2	3

注:钢纤维为体积掺量.

试验中所使用的 RPC 材料力学性能指标及受拉应力 - 应变关系,用预留的棱柱体试件通过轴压和轴拉力学性能试验分析得到. 轴拉试件尺寸为 60 mm × 60 mm × 400 mm,两端分别配有 ϕ 14 钢筋. 锚固长度取为 120 mm. 轴拉试验在普通液压拉伸试验机上进行. 轴压试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 300 mm. 轴压试验在 MTS 试验机上进行. RPC 力学性能指标分别如表 2,3 所示.

表 2 RPC 抗压力学性能指标

试件 编号	f_c /MPa	峰值压应力 对应压应变	弹性模量 $E_c/\times 10^4\text{ MPa}$
Y-1	102. 80	0. 004 09	4. 12
Y-2	110. 20	0. 004 12	3. 29
Y-3	98. 60	0. 005 85	3. 37
Y-4	105. 00	0. 005 80	3. 80
Y-5	99. 30	0. 003 90	5. 74
Y-6	97. 80	0. 003 60	4. 42
平均值	102. 28	0. 004 56	4. 12

注: f_c 为 100 mm × 100 mm × 300 mm 棱柱体试块的抗压强度.

由 RPC 轴拉试件的破坏过程和受拉应力 - 应变关系实测数据,拟合得到 RPC 的受拉应力 - 应变关系方程如下:

$$\begin{cases} y = 1. 17x + 0. 65x^2 - 0. 83x^3, 0 \leq x < 1, \\ y = \frac{x}{5. 5(x - 1)^{2. 2} + x}, x \geq 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t0}}$, $y = \frac{\sigma}{f_t}$. σ, ε 分别为 RPC 的拉应力和拉应变; f_t, ε_{t0} 分别为 RPC 的抗拉强度和峰值拉应力对应的拉应变.

表 3 RPC 抗拉力学性能指标

试件 编号	f_t /MPa	峰值拉应力 对应拉应变	弹性模量 $E_t/\times 10^4\text{ MPa}$
Z-1	11. 17	0. 000 262	4. 38
Z-2	9. 94	0. 000 237	5. 00
Z-3	10. 68	0. 000 245	4. 43
Z-4	10. 03	0. 000 260	4. 82
Z-5	9. 53	0. 000 224	6. 10
Z-6	9. 77	0. 000 265	4. 17
平均值	10. 19	0. 000 249	4. 81

注: f_t 为 60 mm × 60 mm × 400 mm 棱柱体试块的抗拉强度.

试验曲线和拟合曲线如图 1 所示,可以看出,两者符合程度较好.

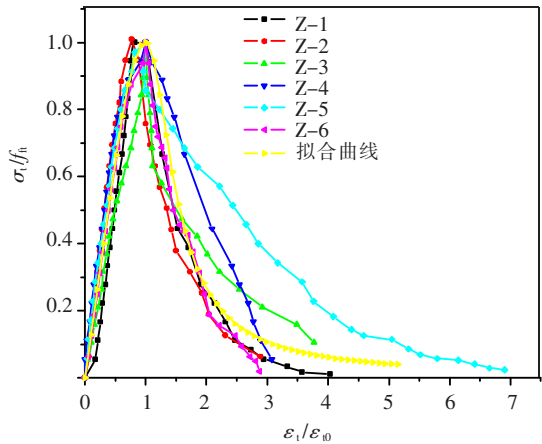


图 1 RPC 受拉应力 - 应变关系曲线

梁底部受拉筋选用表面螺旋绕筋 GFRP 筋, GFRP 筋的力学性能指标如表 4 所示. GFRP 筋受拉应力 - 应变关系一直保持线弹性直到破坏.

表 4 GFRP 筋力学性能指标

GFRP 筋	极限强度 f_{tu} /MPa	弹性模量 $E_f/\times 10^4\text{ MPa}$
ϕ_f 5. 5	1 159	4. 94
ϕ_f 12	990	4. 76
ϕ_f 14	836	5. 00

各试验梁的配筋率和开裂弯矩试验值见表 5 所示.

表 5 梁开裂弯矩试验值

梁编号	底部纵筋 配筋率/%	底部纵筋 $M_{cr}^t/$ (kN · m)
L-1	2 ϕ_f 5. 5 0. 13	21. 0
L-2	4 ϕ_f 5. 5 0. 25	21. 0
L-3	2 ϕ_f 12 0. 61	24. 0
L-4	4 ϕ_f 12 1. 31	24. 0
L-5	5 ϕ_f 12 1. 61	24. 0
L-6	6 ϕ_f 12 1. 97	27. 0
L-7	5 ϕ_f 14 2. 21	27. 0
L-8	6 ϕ_f 14 2. 69	27. 0

2 正截面抗裂度计算模型

由于 RPC 匀质性的提高以及钢纤维的加入,使得 RPC 的抗拉强度和开裂时的极限拉应变都得到了提高.

GFRP 筋 RPC 梁即将开裂时,受拉区边缘达到极限拉应变,受拉区的应力分布呈曲线形.同时梁受压区 RPC 应变值相对较小,处于弹性状态,应力分布图形呈直线形.由此得到 GFRP 筋 RPC 梁的正截面抗裂度模型如图 2 所示.

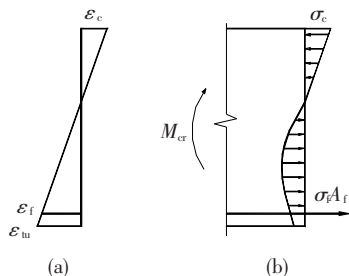


图2 正截面抗裂度计算模型

根据力矩平衡条件,将 GFRP 筋和 RPC 所承担的弯矩分开计算,可求得截面开裂弯矩的计算公式为

$$M_{cr} = M'_c + M'_f = f_t W_s. \quad (1)$$

式中: M'_c 为由 RPC 承担的弯矩; M'_f 为由 GFRP 筋承担的弯矩; f_t 为 RPC 的抗拉强度; W_s 为 RPC 梁截面对受拉边缘弹性抵抗矩.

由于受拉区应力分布为曲线形,按此模型计算开裂弯矩比较复杂.为了简便起见,参照普通钢筋混凝土构件的处理方法,采用等效原则^[12],在保持开裂弯矩不变的前提下,将受拉区曲线分布的应力图形折算成直线分布的弹性应力图形,如图 3 所示.受拉区边缘拉应力被折算成 $\gamma_m f_t$, γ_m 称为 RPC 梁截面抵抗矩塑性影响系数.将纵向 GFRP 筋面积折算成具有相同弹性模量的 RPC 面积,这样就可将 RPC 视为匀质弹性体,从而用弹性应力图形代替塑性应力图形建立开裂弯矩计算公式.

$$M_{cr} = \gamma_m f_t W_0. \quad (2)$$

式中: γ_m 为 RPC 梁截面抵抗矩塑性影响系数; f_t 为 RPC 的抗拉强度; W_0 为 RPC 梁截面对受拉边缘弹性抵抗矩.

比较式(1), (2)得

$$\gamma_m = W_s / W_0. \quad (3)$$

根据以上分析可以看出,对 GFRP 筋 RPC 梁开裂荷载的计算问题关键在于对截面抵抗矩塑性影响系数 γ_m 的计算上.

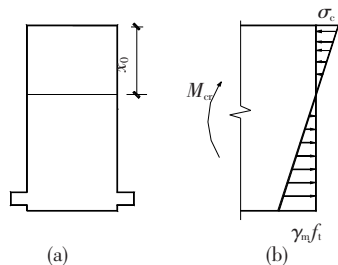


图3 换算截面及应力分布

3 γ_m 值的计算

3.1 弹性抵抗矩

按照等效换算的原则,如图 3(a)所示,将 GFRP 筋换算成 RPC 面积,换算后的截面面积为

$$A_0 = bh + (\alpha_E - 1)A_f, \alpha_E = E_f / E_c.$$

截面重心距受压区边缘的距离为

$$x_0 = \frac{\frac{1}{2}bh^2 + (\alpha_E - 1)A_f h_0}{bh + (\alpha_E - 1)A_f}.$$

换算截面对形心主轴的惯性矩为

$$I_0 = \frac{1}{12}bh^3 + bh\left(x_0 - \frac{h}{2}\right)^2 + (\alpha_E - 1)A_f(h_0 - x_0)^2.$$

由此得到截面弹性抵抗矩为

$$W_0 = \frac{I_0}{h - x_0} = \frac{bh^3 + 3bh(2x_0 - h)^2 + 12A_f(\alpha_E - 1)(h_0 - x_0)^2}{12(h - x_0)}. \quad (4)$$

3.2 弹塑性抵抗矩

为了计算截面对受拉边缘弹塑性抵抗矩,将图 2 模型简化成图 4 所示模型. x_c 为受压区高度, x_1 为受拉区弹性部分高度, x_2 为受拉区塑性部分高度.

根据 RPC 受拉应力 - 应变关系中峰值拉应力对应的应变 ε_{t0} 为 0.000 249, 试验梁纯弯曲段 RPC 受拉边缘开裂应变实测值 ε_{tu} 为 0.000 750, 两者的比值即受拉区弹性部分与塑性部分的比值为 $\varepsilon_{t0} / \varepsilon_{tu} = 1/3$, 再由比例关系得到 $x_1 = 1/2x_2 = 1/3(h - x_c)$.

由图 4(a), 根据平截面假定得

$$\varepsilon_c = \frac{x_c}{h - x_c} \varepsilon_{tu} = \frac{x_c}{h - x_c} 3\varepsilon_{t0},$$

$$\varepsilon_f = \frac{h_0 - x_c}{h - x_c} \varepsilon_{tu} = \frac{h_0 - x_c}{h - x_c} 3\varepsilon_{t0}.$$

图 4(b)中, 受压区部分的合力

$$D = \frac{1}{2}\sigma_c b x_c = \frac{1}{2}E_c \varepsilon_c b x_c = \frac{3}{2}E_c b \frac{x_c^2}{h - x_c} \varepsilon_{t0}. \quad (5)$$

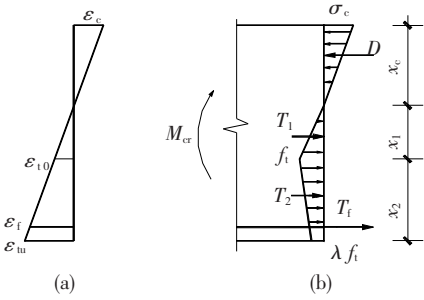


图4 正截面抗裂简化计算模型

受压区部分的合力对中和轴的弯矩

$$M_c = D \cdot \frac{2}{3}x_c. \tag{6}$$

受拉区弹性部分合力

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot f_t b x_1 = \frac{1}{6} \cdot f_t b (h - x_c). \tag{7}$$

受拉区弹性部分合力对中和轴的弯矩

$$M_1 = T_1 \cdot \frac{2}{3}x_1 = T_1 \cdot \frac{2}{9}(h - x_c). \tag{8}$$

受拉区塑性部分合力

$$T_2 = \frac{1}{2}(1 + \lambda)f_t b x_2 = \frac{1}{3}(1 + \lambda)f_t b (h - x_c). \tag{9}$$

受拉区塑性部分合力对中和轴的弯矩

$$M_2 = T_2 \cdot \left(\frac{(2\lambda + 1)}{3(\lambda + 1)}x_2 + x_1 \right) = T_2 \cdot \frac{7\lambda + 5}{9(\lambda + 1)}(h - x_c). \tag{10}$$

GFRP 筋的合力

$$T_f = \sigma_f A_f = E_f \varepsilon_f A_f = E_f A_f \cdot \frac{h_0 - x_c}{h - x_c} \cdot 3\varepsilon_{f0}. \tag{11}$$

GFRP 筋合力对中和轴的弯矩

$$M_f = T_f (h_0 - x_c). \tag{12}$$

由静力平衡条件,得

$$D = T_1 + T_2 + T_f. \tag{13}$$

将式(5)、(7)、(9)、(11)代入式(13)得

$$\frac{3}{2}E_c b \varepsilon_{f0} \frac{x_c^2}{h - x_c} = \frac{3 + 2\lambda}{6}f_t b (h - x_c) + 3E_f A_f \varepsilon_{f0} \frac{h_0 - x_c}{h - x_c}.$$

化简得

$$(9E_c b \varepsilon_{f0} - (3 + 2\lambda)f_t b)x_c^2 + ((6 + 4\lambda)f_t b h + 18E_f A_f \varepsilon_{f0})x_c - (3 + 2\lambda)f_t b h^2 - 18E_f A_f \varepsilon_{f0} h_0 = 0. \tag{14}$$

由式(14)可求得受压区高度 x_c 的值.

再由截面力矩平衡得

$$M_{cr} = M_c + M_1 + M_2 + M_f. \tag{15}$$

将式(6)、(8)、(10)、(12)代入式(15),可求得 M_{cr} 的值. 通过分析,当 λ 的取值为 0.1 时,由式(15)得到的开裂弯矩的计算值与试验值吻合较好. 将开裂弯矩的计算值代入式(1)就可求得 W_s 的值. 由式(4)可求得 W_0 的值,再由式(3) $\gamma_m = W_s / W_0$ 求得 γ_m 的值. 各梁 γ_m 的计算值如表 6 所示.

表 6 各试验梁 γ_m 计算值

梁编号	底部纵筋 配筋率 ρ_f / %	W_0 / mm ³	W_s / mm ³	γ_m
L-1	0.13	1 961 196	2 150 436	1.096
L-2	0.25	1 962 392	2 178 720	1.110
L-3	0.61	1 964 229	2 246 886	1.144
L-4	1.31	1 966 129	2 316 452	1.178
L-5	1.61	1 968 236	2 378 114	1.208
L-6	1.97	1 969 191	2 412 344	1.225
L-7	2.21	1 974 881	2 476 612	1.254
L-8	2.69	1 976 895	2 528 914	1.279

3.3 γ_m 公式推导

由以上方法推导可得到各试验梁截面抵抗矩塑性影响系数的值. 由表 6 分析可知,截面抵抗矩塑性影响系数与梁的纵向配筋率存在线性关系,随着配筋率的增大,截面抵抗矩塑性影响系数的值逐渐增大,进行线性拟合,可得到如下公式:

$$\gamma_m = 1.1 + 6\rho_f. \tag{16}$$

将 γ_m 计算值与按拟合式(16)得到的曲线对比如图 5 所示. 由图可知,两者吻合较好.

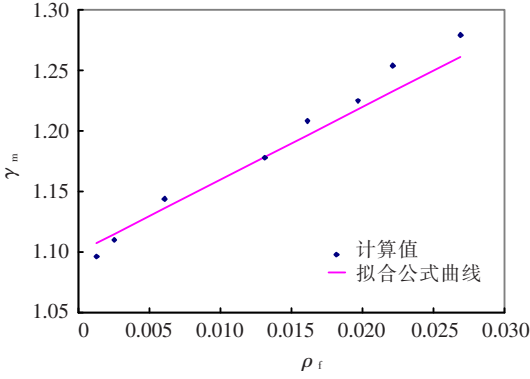


图5 式(16)曲线与计算值对比

4 试验验证

得到 γ_m 的值后,就可利用式(2)对开裂荷载进行计算. 将按式(2)计算得到的开裂荷载计算值与试验值进行对比,结果如表 7 所示.

由表 7 数据可知,梁开裂弯矩试验值与计算值比值的平均值为 1.03,均方差为 0.06,变异系数为 0.06. 由此可见,由以上推导得到的计算值

与试验值吻合良好.

表 7 梁开裂弯矩计算值与试验值对比

梁编号	$M_{cr}^t/(kN \cdot m)$	$M_{cr}^c/(kN \cdot m)$	M_{cr}^t/M_{cr}^c
L-1	21.0	22.1	0.95
L-2	21.0	22.3	0.94
L-3	24.0	22.7	1.06
L-4	24.0	23.6	1.02
L-5	24.0	24.0	1.00
L-6	27.0	24.4	1.10
L-7	27.0	24.8	1.09
L-8	27.0	25.4	1.06

注:表中 M_{cr}^t 为开裂弯矩试验值, M_{cr}^c 为按式(2)计算的开裂弯矩计算值.

5 结 论

1) 由于 RPC 匀质性的提高和钢纤维的加入, 使得其抗拉强度和极限拉应变提高, 从而使极限拉应变与峰值拉应变的比值提高.

2) 通过对计算结果的分析对比, 给出与配筋率有关的梁截面抵抗矩塑性影响系数计算公式.

3) 通过建立 GFRP 筋 RPC 梁正截面抗裂度的计算模型, 得到其正截面开裂弯矩的计算方法.

参考文献:

[1] ACI Committee 440. ACI440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced With FRP Bars[S]. American Concrete Institute, 2006.

[2] KOCAOZ S, SAMARANAYAKE V A, NANNI A. Tensile characterization of glass FRP bars[J]. Composites, Part B, 2005, 36(2):127-134.

[3] SHIN S, SEO D, HAN B. Performance of concrete

beams reinforced with GFRP bars [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2009, 8(1):197-204.

[4] FUJIKAKE K, SENGAT, UEDAN, *et al.* Effects of strain rate on tensile behavior of reactive powder concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006, 4(1):79-84.

[5] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1501-1511.

[6] 高丹盈, 朱海堂, 李趁趁. 纤维增强塑料筋混凝土梁正截面抗裂性能的研究[J]. 水利发电学报, 2003, 83(4):54-59.

[7] 王文雷. RPC 预应力梁相关设计参数研究[D]. 北京:北京交通大学, 2006.

[8] CAPOZUCCA R. Analysis of the experimental flexural behaviour of a concrete beam grid reinforced with C-FRP bars [J]. Composite Structures, 2007, 79(4):517-526.

[9] LOK T S, PEI J S. Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete [J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2):86-97.

[10] SAIKIA B, KUMAR P, THOMAS J, *et al.* Strength and serviceability performance of beams reinforced with GFRP bars in flexure [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(8):1709-1719.

[11] 郑文忠, 李莉. 活性粉末混凝土配制及其配合比计算方法[J]. 湖南大学学报, 2009, 36(2):13-17.

[12] 丁大钧. 钢筋混凝土结构学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1982.

(编辑 刘 彤)