

GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁开裂性能试验

郝庆多¹,王 川¹,王 勃¹,欧进萍^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨, haoqingduo@163.com;

2. 大连理工大学 土木工程学院, 116024 辽宁 大连)

摘 要: 为了研究 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的开裂性能, 设计了 5 根 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁试件, 并对混凝土梁试件进行三分点静载试验研究, 试验变量为混凝土梁截面尺寸和混凝土保护层厚度. 在系统分析试验数据的基础上, 提出 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁抗裂承载力与最大裂缝宽度的计算方法, 并给出使用荷载作用下的裂缝宽度限值.

关键词: GFRP/钢绞线复合筋; 混凝土梁; 开裂性能; 试验研究

中图分类号: TU599; TB332; TU377.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0007-04

Experimental study on cracking behavior of concrete beams reinforced with GFRP/steel wire composite rebar

HAO Qing-duo¹, WANG Chuan¹, WANG Bo¹, OU Jin-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, haoqingduo@163.com;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To study the cracking behavior of concrete beams reinforced with GFRP/steel wire composite rebar, five simply-supported beams were tested under three-point static load. The test variables were beam section size and concrete cover depth. Based on analysis on the test results, the calculation methods of cracking capacity and maximum crack width were proposed, and the limit value of crack width was suggested.

Key words: GFRP/steel wire composite rebar; concrete beam; cracking behavior; experimental study

GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的开裂机理为, 当受拉区混凝土的应力达到混凝土的抗拉强度后, 构件开裂, 开裂截面的混凝土应力得到释放而逐减为零, 随荷载的继续增加, 在裂缝之间不断出现新裂缝, 裂缝宽度与开裂深度不断增大^[1]. 但是, 由于 GFRP/钢绞线复合筋与钢筋在材料性能等方面的差异, 一方面, GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的裂缝发展规律与钢筋混凝土梁不同; 另一方面, 在混凝土梁屈服以前, GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的裂缝宽度比钢筋混凝土梁裂缝宽度大. 因此, 钢筋混凝土结构设计规范规定的裂缝

宽度的计算公式等方法不能直接应用于 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁^[2], 必结合 GFRP/钢绞线复合筋的材料性能以及粘结特性开展开裂性能的研究工作.

本文对 5 根不同截面尺寸、不同保护层厚度 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的开裂性能进行试验研究, 提出 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁抗裂承载力及最大裂缝宽度的计算方法, 并给出使用荷载作用下的裂缝宽度限值, 为 GFRP/钢绞线复合筋混凝土结构的工程应用提供参考.

1 试 验

1.1 试验材料

本次试验采用的 GFRP/钢绞线复合筋的直径为 10 mm, GFRP/钢绞线复合筋的组分含量、肋参数和力学性能见表 1, GFRP/钢绞线复合筋

收稿日期: 2010-12-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008091); 中国博士后科学基金资助项目(20090460913).

作者简介: 郝庆多(1983—), 男, 博士;

欧进萍(1959—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士.

的典型应力 - 应变关系曲线见图 1.

本次试验采用的混凝土拟配强度等级为 C30. 混凝土立方体试块抗压试验的结果见表 2.

1.2 试件设计

本次试验的试验变量为梁的横截面尺寸以及混凝土保护层厚度. 混凝土梁的保护层厚度有两种, 分别为 20 mm 和 30 mm^[3]. 试件梁截面为矩形, 共 4 种, 分别为 100 mm × 200 mm、150 mm × 250 mm、150 mm × 300 mm、200 mm × 350 mm. 梁跨度为 $L = 3\,000$ mm, 梁采用三分点加载, 混凝土梁的尺寸和配筋见图 2.

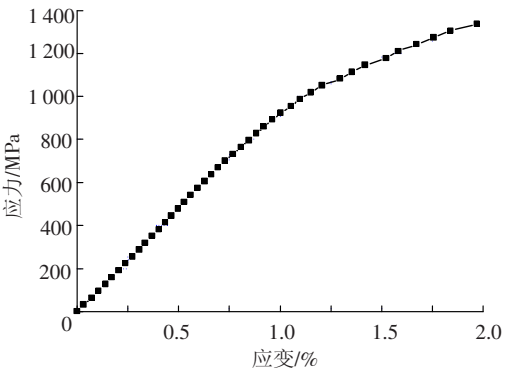


图 1 典型 GFRP/钢绞线复合筋应力 - 应变曲线

表 1 GFRP/钢绞线复合筋的组分含量、肋参数及力学性能

复合筋直径/mm	组分含量/%			肋参数			力学性能	
	纤维束	钢绞线	树脂	间距/mm	高度/mm	倾角/(°)	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
10	42.33	31.24	27.43	10	0.49	44	1 239	90.72

表 2 混凝土立方体试块抗压试验结果

拟配强度等级	试验极限压力/kN						$f_{cu,100,m}$ /MPa	$f_{cu,150,m}$ /MPa	f_{cu} /MPa	E_c /GPa	f_t /MPa
C30	328	326	373	331	356	334	34.13	32.42	24.95	27.85	2.32

已有研究表明,GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的实际配筋率均应满足安全配筋率的要求,才能得到安全的破坏形式,安全配筋率的计算方法为

$$\rho_f^* = 1.45\rho_{fb}, \tag{1}$$

式中: ρ_f^* 为 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的安全配筋率; ρ_{fb} 为 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的界限配筋率.

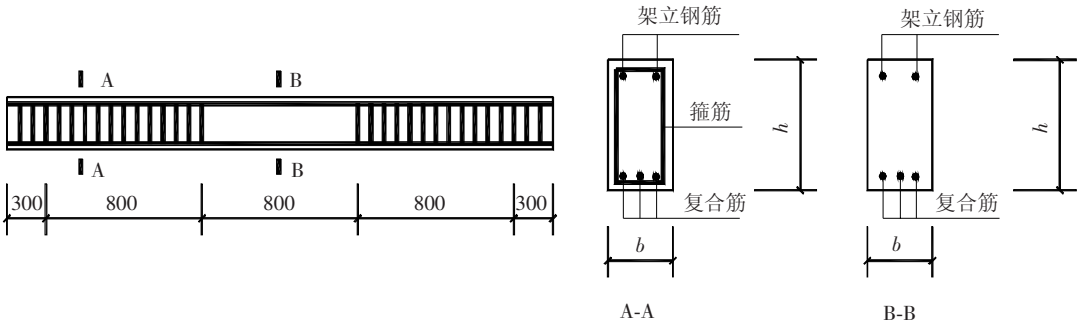


图 2 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁构造

梁试件共 5 根, 试件编号由 3 部分组成, 即 X - Y - Z; 其中 X 表示筋材: GS 代表 GFRP/钢绞线复合筋; Y 表示梁截面: 1 代表 100 mm × 200 mm, 2 代表 150 mm × 250 mm, 3 代表

150 mm × 300 mm, 4 代表 200 mm × 350 mm; Z 表示保护层厚度: 2 表示混凝土保护层厚度是 20 mm, 3 表示混凝土保护层厚度是 30 mm. 混凝土梁的详细构造见表 3.

表 3 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁详细构造

试件编号	截面尺寸/mm × mm	纵筋种类	纵筋数量	安全配筋率/%	实际配筋率/%	预计破坏
GS - 1 - 2	100 × 200	GFRP/钢绞线复合筋	2 ϕ 10	0.707	0.950	压坏
GS - 2 - 2	150 × 250		3 ϕ 10		0.732	压坏
GS - 3 - 2	150 × 300		4 ϕ 10		0.792	压坏
GS - 3 - 3	150 × 300		4 ϕ 10		0.792	压坏
GS - 4 - 2	200 × 350		6 ϕ 10		0.748	压坏

1.3 加载制度

试验过程中,通过荷载传感器控制螺旋千斤顶进行分级加载,由分配梁传递的两个集中荷载使试件的跨中区段形成纯弯段,试验加载装置见图 3.

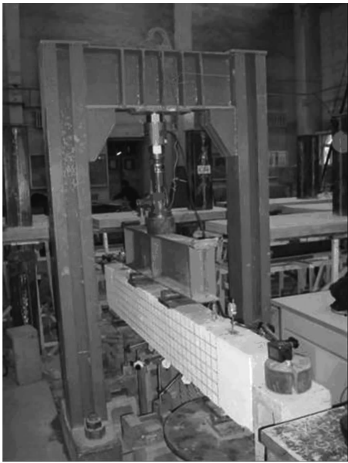


图 3 混凝土梁试验装置

2 试验结果分析

2.1 开裂形态

以试件 GS-3-2 为例, GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁试件在较低荷载($M_a = 25\% M_u$)、中等荷载($M_a = 50\% M_u$)、较高荷载($M_a = 90\% M_u$)下的开裂形态见图 4. 在加载过程中,首先在纯弯段出现垂直裂缝,裂缝基本垂直于主应力方向. 随荷载增加,裂缝逐渐加宽,向上传递,同时开始出现弯曲裂缝. 随着剪应力增大,斜裂缝开始出现.

加载至 $M_a = 50\% M_u$ 左右,裂缝基本出齐,斜裂缝向上延展进入受压区,裂缝间距不再变化,但是垂直裂缝宽度明显增大.

加载至 $M_a = 90\% M_u$ 左右,跨中主裂缝开始延展到受压区范围,而且受压区开始出现横向裂缝并不断分层出现,逐渐连通成圆弧状,直至受压区混凝土被压碎,致使混凝土梁试件最终失效破坏.

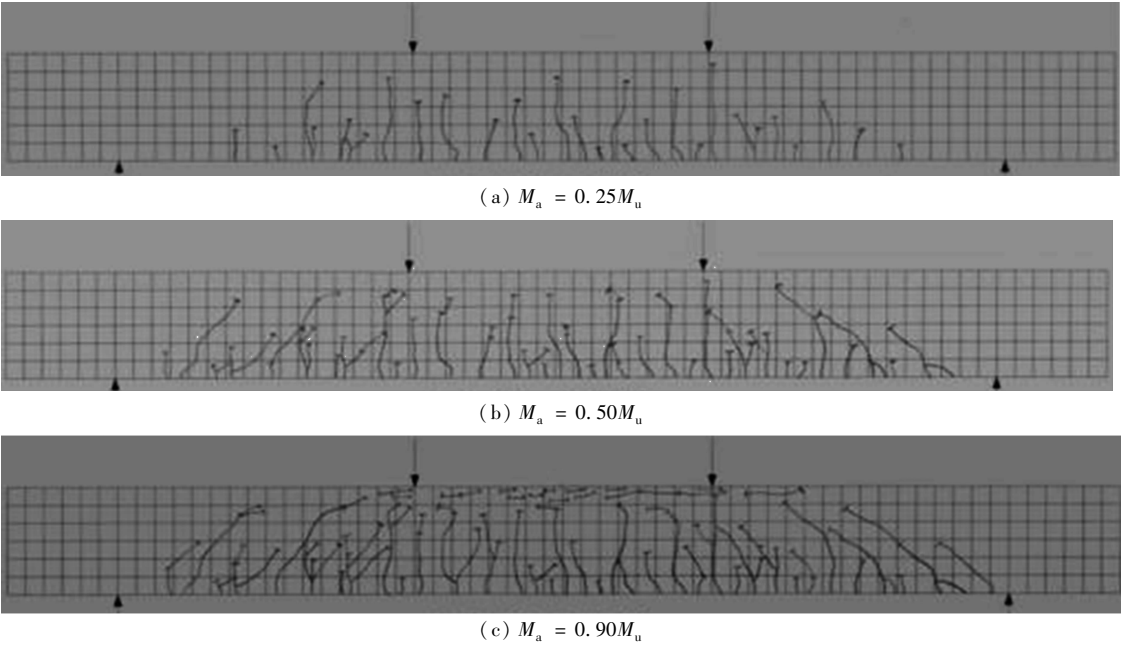


图 4 试件 GS-3-2 裂缝开裂特征

2.2 抗裂承载力计算方法

GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁正截面即将开裂时承担的弯矩为抗裂承载力,结合美国 ACI440-06 规范相关规定^[4-6],GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁正截面开裂弯矩的计算公式为

$$M_{cr} = \gamma \cdot M'_{cr} = \gamma \cdot f_t \cdot \frac{1}{6}bh^2. \quad (2)$$

式中: γ 为混凝土截面抵抗矩塑性影响系数; M'_{cr} 为待修正开裂弯矩; f_t 为混凝土的抗拉强度; b 、 h 为截面的宽度、高度.

此次试验与课题组已有试验数据^[7]表明,正截面抗裂弯矩的塑性影响系数均值为 1.09,与试

验结果吻合较好. 因此,建议混凝土截面抵抗矩塑性影响系数 $\gamma = 1.1$,由式(2)即可计算 GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁的抗裂承载力.

2.3 裂缝宽度计算方法

计算钢筋混凝土梁裂缝宽度的 Gergely-Lutz 公式为^[8-11]

$$w = k_g f_s \frac{h_2}{h_1} \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-6}. \quad (3)$$

式中: w 为最大裂缝宽度; A 为与受拉钢筋有相同中心的周围混凝土的有效受拉面积. A_c 与钢筋根数 m 的比值,即 A_c/m ; d_c 为混凝土保护层厚度; f_s 为纵向钢筋受拉应力; h_1 为纵向受拉钢筋中心到

中性轴距; h_2 为混凝土受拉边缘到中性轴距; k_g 为系数。

式(3)表明受弯构件裂缝宽度与纵筋的材料特性等因素有关。单筋矩形截面的纵向受拉钢筋应力 f_s 为

$$f_s = \frac{M}{A_s(1 - k/3)h_0}. \quad (4)$$

式中: M 为使用荷载下梁跨中的弯矩; h_0 为梁的有效高度; k 为混凝土受压区高度系数; A_s 为梁的配筋面积。

为简化计算, GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁裂缝宽度的计算公式为

$$w = 2 \frac{f_t}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

式中: f_t 为 GFRP/钢绞线复合筋的应力; E_f 为 GFRP/钢绞线复合筋的弹性模量; $\beta = h_2/h_1$; s 为 GFRP/钢绞线复合筋的间距; k_b 为 GFRP/钢绞线复合筋的粘结系数, 可按试验研究结果进行计算。

以本次试验与已有试验^[7]的 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁为例, 综合考虑混凝土强度、混凝土保护层厚度、截面尺寸、配筋率等因素的影响, 粘结系数 k_b 的建议值为 1.16。由此, 建议 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁最大裂缝宽度的计算公式为

$$w = 2.32 \frac{f_t}{E_f} \beta \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}. \quad (6)$$

2.4 裂缝宽度限值

由于 GFRP/钢绞线复合筋具有较好的耐腐蚀性能, 其抗剪强度也明显增强, 使梁的刚度增大, 因此, 建议适当放宽 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的裂缝宽度要求。

美国 ACI440-06 规范、加拿大 CSA-2008 规范和日本 JSCE 规范等国外规范对 GFRP 筋混凝土梁最大允许裂缝宽度限值为钢筋混凝土梁的 1.5 倍左右^[12~15]。因此, 结合 GFRP/钢绞线复合筋的产品性能, 建议 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁最大裂缝宽度限值为 0.5 mm。

3 结 论

1) 基于试验结果, GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的抗裂承载力可按式(2)计算, 计算方法与试验数据吻合较好。

2) 基于试验结果, GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的最大裂缝宽度可按式(6)计算, 计算方法与试验数据吻合较好。

3) 结合 GFRP/钢绞线复合筋的材料性能, 建议 GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁的最大裂缝宽度限值为 0.5 mm。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] GB50010—2002 中国标准书号[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] 郝庆多, 王言磊, 欧进萍. GFRP/钢绞线复合筋保混凝土梁保护层厚度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 67–73.
- [4] 李趁趁. 纤维增强塑料筋混凝土梁正截面受力性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [5] 郑乔文. FRP 筋混凝土梁设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [6] ACI 440 Committee. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars[R]. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 2006.
- [7] 郝庆多. GFRP/钢绞线复合筋混凝土梁受力性能及设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [8] CSA S806-02. Design and construction of building components with fiber reinforced polymers[R]. Toronto: Canadian Standards Association, 2002.
- [9] NEMHOOK J, GHALI A, TADROS G. Cracking and deformability of concrete flexural sections with fiber reinforced polymer[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(9): 1195–1201.
- [10] VIJAY P V. Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars[D]. New York: West Virginia University, 1999: 105–118.
- [11] VIJAY P V, GANGARAO H V S. Bending behavior and deformability of glass fiber-reinforced polymer reinforced concrete members[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(6): 834–842.
- [12] 张鹏. FRP 筋混凝土梁受力性能的试验研究及理论分析[D]. 南宁: 广西大学, 2006: 15–26.
- [13] ACI 318-02. Building code requirements for structural concrete[R]. Concrete: American Concrete Institute, 2002.
- [14] NEMHOOK J, GHALI A, TADROS G. Concrete flexural members reinforced with fiber reinforced polymer: design for cracking and deformability[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29: 125–134.
- [15] ABDELRAHMAN A A, RIZKLLA S H. Deflection control of concrete beams pretensioned by CFRP reinforcements[J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 3(2): 55–62.

(编辑 赵丽莹)