

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804109

GFRP 筋混凝土梁受弯性能试验

王 洋, 董恒磊, 王震宇

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 为改善 GFRP(glass-fiber reinforced polymer)筋混凝土梁裂缝宽度较大的缺陷,提出一种将 GFRP 筋穿入金属波纹管并灌注水泥基高强灌浆料的新型构造措施,内部高强水泥基灌浆料与 GFRP 筋的黏结性能较好,共同参与受拉,外部金属波纹管可约束内部黏结裂缝的扩展,并增强与混凝土之间的黏结作用,进而减小 GFRP 筋混凝土梁的裂缝宽度. 为验证其可行性,对配置钢筋、拉挤 GFRP 筋以及新型构造措施 GFRP 筋的 6 根简支梁开展了单调加载受弯试验,考察了 GFRP 筋混凝土梁在正常使用极限状态下的裂缝分布、平均裂缝间距以及平均裂缝宽度的发展规律. 试验结果表明:与普通拉挤 GFRP 筋相比,新型构造措施可减小梁在使用阶段的裂缝宽度,延缓顺筋裂缝的出现;新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁可满足各国规范 0.5 mm 最大裂缝宽度的限值规定,普通 GFRP 筋混凝土梁则不能满足要求;当 GFRP 筋配筋率接近或大于界限配筋率时,梁表现为首先混凝土受压破坏、最后 FRP 纵筋受拉断裂的失效模式,其受弯承载力高于钢筋混凝土梁,破坏前有较大的变形能力,平均挠跨比约为 1/56.

关键词: GFRP 筋;混凝土梁;波纹管;受弯性能;裂缝宽度

中图分类号: TU377.9+1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0023-08

Flexural experiment of concrete beams reinforced with GFRP bars

WANG Yang, DONG Henglei, WANG Zhenyu

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To reduce the crack width of concrete beams reinforced with glass-fiber reinforced polymer (GFRP) bars, this paper proposes a new type construction measure for FRP bars which is fabricated by inserting the GFRP bars into the metal corrugated pipe and filling the interspace with high strength cement-base grouting materials. The internal high-strength cement-based grouting material has good bonding performance with GFRP bars and participates in the pulling, while the external metal bellows can restrain the expansion of internal cohesive cracks and strengthen the bonding effect with concrete. Therefore, the crack width of concrete beams reinforced with GFRP bars is reduced. To verify the feasibility, a monotonic loading flexural test was carried out on six beams reinforced with steel bars, extruded GFRP bars, and the new type GFRP bars, respectively. The effects of longitudinal bars on the crack distribution, average crack spacing, and crack width were investigated. The experimental results show that the new type construction measure can reduce the crack width of beams in the serviceability limit state and delay the appearance of the cracks along the bars compared with general extruded GFRP bars. Besides, the beams treated with the new type construction measure met the code requirement of the maximum crack width of 0.5mm, while the ordinary concrete beams reinforced with GFRP bars did not. The failure modes of beams reinforced with GFRP bars began with concrete crush in compressive zone, and the final destruction were the rupture of longitudinal FRP bars. The flexural capacity of beams reinforced with GFRP bars was higher than that of RC beams and expressed the good deformability before final destruction, in which the average deflection span ratio approximately reached 1/56.

Keywords: GFRP bars; concrete beam; corrugated pipes; flexural behavior; crack width

纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋具有轻质高强、耐腐蚀等优点,将 FRP 筋作为增强材料,可有效解决强腐蚀环境下混凝土结构

因钢筋锈蚀导致的耐久性问题^[1-4]. 但 FRP 筋的弹性模量较低,与混凝土的黏结性能也不如传统钢筋,导致 FRP 筋混凝土梁的设计由正常使用极限状态控制,FRP 筋配筋较多,经济成本高.

目前国内外针对 FRP 筋混凝土梁受弯性能的研究大多考察其破坏模式与受弯承载力^[5-8],本文主要关注对裂缝宽度的定量讨论. Elgabbas 等^[9]发现:在相同配筋率下,普通钢筋混凝土(reinforced

收稿日期:2018-04-16

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0703001)

作者简介:王 洋(1995—),女,硕士研究生;

王震宇(1971—),男,教授,博士生导师

通信作者:王震宇, zhenyuwang@hit.edu.cn

concrete, RC)梁的裂缝开展均匀,平均裂缝间距与宽度较小,而 FRP 筋梁的裂缝宽度较大,FRP 筋的轴向刚度是影响裂缝宽度的主要因素;Saikia 等^[10]的研究表明:GFRP(glass-fiber reinforced polymer)筋混凝土梁的最大裂缝宽度控制了构件的配筋设计;EI-Nemr 等^[11]提出表面喷砂可比绕丝加肋方法更有效地提高 FRP 筋与混凝土的黏结性能;李海霞^[12]完成的 AFRP(aramid-fiber reinforced polymer)筋混凝土梁的受弯试验,同样发现 FRP 筋混凝土梁正常使用阶段裂缝宽度过大的问题;郝庆多等^[13]将 GFRP/钢绞线复合筋应用于混凝土梁,研究其抗裂承载力和最大裂缝宽度的计算方法。

文献[14]研究表明,FRP 筋高强混凝土梁的裂缝宽度会明显减小,当混凝土抗压强度由 25 MPa 增加到 70 MPa 时,裂缝宽度减小 80% 左右,主要原因是裂缝间混凝土参与受拉程度的提高. 为改善 GFRP 筋混凝土梁裂缝过宽的问题,本文提出一种新型 GFRP 纵筋构造形式,见图 1. 内部高强水泥基灌浆料与 GFRP 筋共同参与受拉,外部金属波纹管可限制内部黏结裂缝的发展,并增强与混凝土的黏结作用,减小 GFRP 筋混凝土梁的裂缝宽度. 为验证其可行性,对配置钢筋、GFRP 筋以及新型 GFRP 筋的 6 根简支梁开展了单调加载受弯试验,重点考察了不同纵筋对正常使用极限状态下裂缝分布、平均裂缝间距以及平均裂缝宽度的影响规律。

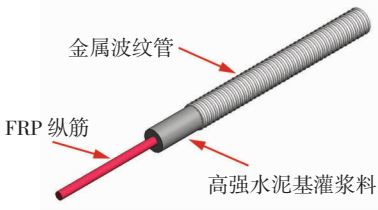


图 1 新型 GFRP 纵筋构造措施示意

Fig. 1 Diagram of the new type construction measure for GFRP bars

1 试验方案

1.1 试验参数

试件编号和配筋参数见表 1,G 代表 GFRP 筋,T 表示部分套管,Q 表示全套管. 部分套管是指仅在梁支座 200 mm 区段和跨中纯弯区段,对 GFRP 筋进行外套波纹管并灌浆处理;全套管则是在 GFRP 筋全长范围内均采取波纹管灌浆的措施。

1.2 试件设计

试验梁全长 4 000 mm,跨度 3 600 mm,截面尺寸 200 mm × 400 mm,详细配筋见图 3. 除梁底受拉筋有区别外,梁顶架立筋与梁侧腰筋均采用 2 φ 10 HPB300 级钢筋. 为防止剪切破坏,弯剪段箍筋为

φ 10@100,混凝土保护层厚度为 25 mm.

表 1 试验梁配筋参数

Tab. 1 Test beam reinforcement parameters		
试件编号	纵筋配筋率/%	抗弯配筋情况
G-12	0.31	2 φ 12 GFRP
GT-12	0.32	2 φ 12 GFRP 部分套管
GQ-12	0.32	2 φ 12 GFRP 全套管
G-16	0.56	2 φ 16 GFRP
GT-16	0.58	2 φ 16 GFRP 部分套管
RC-16	0.56	2 φ 16 HRB400

1.3 试验材料

拉挤 GFRP 筋名义直径为 12 mm 与 16 mm,纤维体积含量为 65%,筋表面采用螺旋绕丝及喷砂处理. 对新型 GFRP 筋,首先将 GFRP 筋定位于波纹管中心,其间填充高强水泥基灌浆料,见图 2. 水泥基灌浆料 70.7 mm 棱柱体试块 28 d 实测单轴抗压强度为 62 MPa;波纹管横向缠绕成型,内径 34 mm,壁厚 0.2 mm. RC 梁采用直径 16 mm 的 HRB400 级纵筋,筋材的力学性能见表 2. 试验梁采用 C30 商品混凝土一次浇筑成型,试验时测得同条件养护圆柱体的轴心抗压强度平均值为 33.1 MPa.

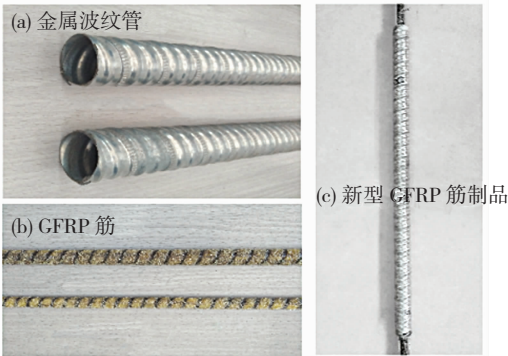


图 2 拉挤 GFRP 纵筋与新型构造措施 GFRP 纵筋

Fig. 2 Extruded GFRP bars and the new type construction measure for GFRP longitudinal bars

表 2 加强筋材性表

Tab. 2 Mechanical properties of reinforced bars				
纵筋类型	d/mm	E_f /GPa	f_{tu} /MPa	ε_{fu} /‰
GFRP 筋	12	49.8	947	2.13
	16	47.2	889	1.94
钢筋	16	$E_s = 201$	$f_y = 457$	$\varepsilon_y = 0.22$

注: d 为加强筋直径, E_f 与 E_s 分别为 GFRP 筋与钢筋的弹性模量, f_{tu} 与 ε_{fu} 分别为 GFRP 筋的极限抗拉强度和极限拉应变, f_y 与 ε_y 分别为钢筋的屈服强度和屈服应变。

1.4 加载与量测

加载与量测装置见图 3,跨中两加载点间距 600 mm,梁跨中纯弯段与支座顶端布置位移计,梁跨中截面沿高度粘贴混凝土应变片. 需要指出,为了不影响波纹管内水泥基灌浆料与 GFRP 筋间的黏结性能,未在 GFRP 筋上粘贴应变片. 梁开裂前每级加载 5 kN,开裂后每级 10 kN.

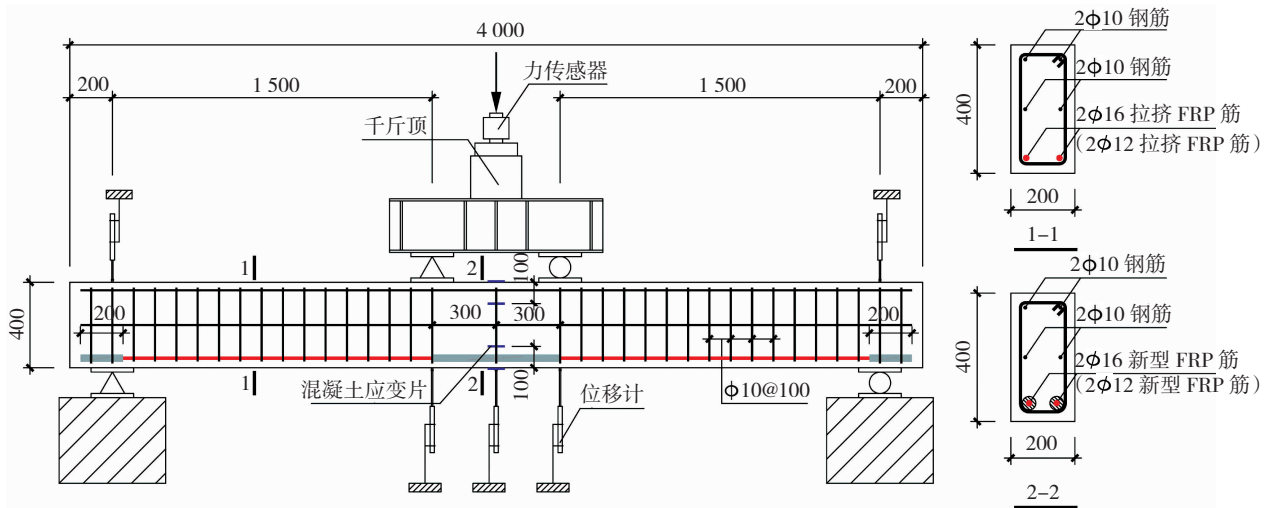


图 3 试件配筋及加载装置 (mm)

Fig. 3 Reinforcement details of specimens and test setup (mm)

2 结果及讨论

2.1 破坏模式

FRP 筋混凝土梁有 3 种弯曲破坏模式:FRP 筋拉断、混凝土压碎和界限破坏。加拿大规范 CSA S806-12^[15]、美国规范 ACI 440.1R-15^[16] 和中国规范 GB 50608—2010^[17] 均规定了界限配筋率 ρ_b , 当 FRP 纵筋配筋率 $\rho_f > \rho_b$ 时,梁发生混凝土压碎破坏;反之则发生 FRP 筋拉断破坏, ρ_b 可由下式确定:

$$\rho_b = \alpha_1 \frac{f_c}{f_{tu}} \frac{\beta_1 E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{tu}}, \tag{1}$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度,CSA^[15] 与 ACI^[16] 采用圆柱体抗压强度,中国 GB/T 50081—2002^[18] 也明确可采用 $\Phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的圆柱体作为混凝土轴心抗压强度的标准试件,故本文计算中均取圆柱体抗压强度为混凝土轴心抗压强度。 ε_{cu} 为混凝土极限压应变, α_1 、 β_1 是与混凝土等效矩形应力图形相关的参数。

本文 GFRP 筋混凝土梁的配筋率与各国规范建议的界限配筋率详见表 3。试验中所有梁均为混

土压碎的模式破坏,说明 CSA 规范^[15] 与中国规范^[17] 对 ρ_b 的计算不够准确,而 ACI 规范^[16] 对破坏模式的预测与试验现象吻合较好。

表 3 GFRP 筋混凝土梁配筋率与界限配筋率对比

Tab. 3 Comparison between GFRP reinforcement ratio and balanced reinforcement ratio of tested beams

梁编号	$\rho_f / \%$	ρ_f / ρ_{fu}		
		CSA ^[15]	ACI ^[16]	GB ^[17]
G-12	0.31	0.88	1.04	0.82
GT-12	0.32	0.91	1.07	0.85
GQ-12	0.32	0.91	1.07	0.85
G-16	0.56	1.38	1.61	1.29
GT-16	0.58	1.41	1.66	1.32

图 4 为试验梁跨中弯矩-挠度曲线。GFRP 筋混凝土梁的变形过程与 RC 梁有明显区别,其荷载-挠度曲线呈明显的双线性特征。混凝土开裂前,GFRP 筋混凝土梁弯矩-挠度曲线与 RC 梁基本重合;混凝土受拉开裂后,由于 GFRP 筋弹性模量较低,GFRP 筋混凝土梁的抗弯刚度大幅下降;随着荷载的继续增加,受压区混凝土开始压碎,而后弯矩-

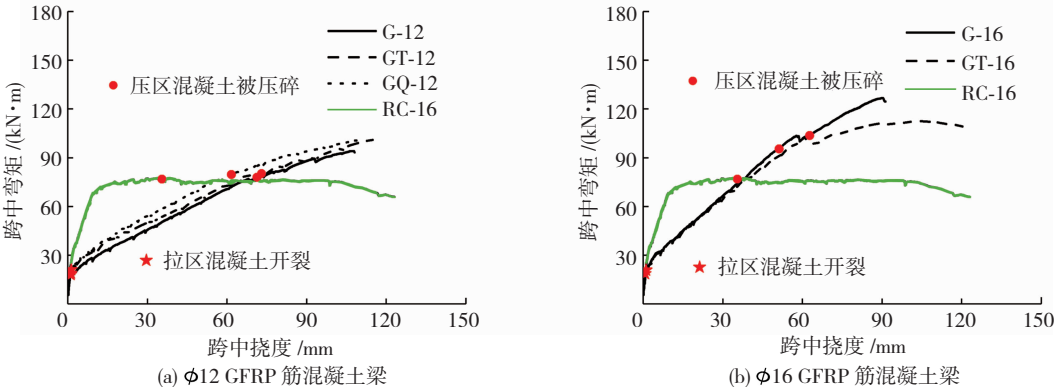


图 4 各试件的弯矩-跨中挠度曲线

Fig. 4 Moment-midspan deflection curves of specimens

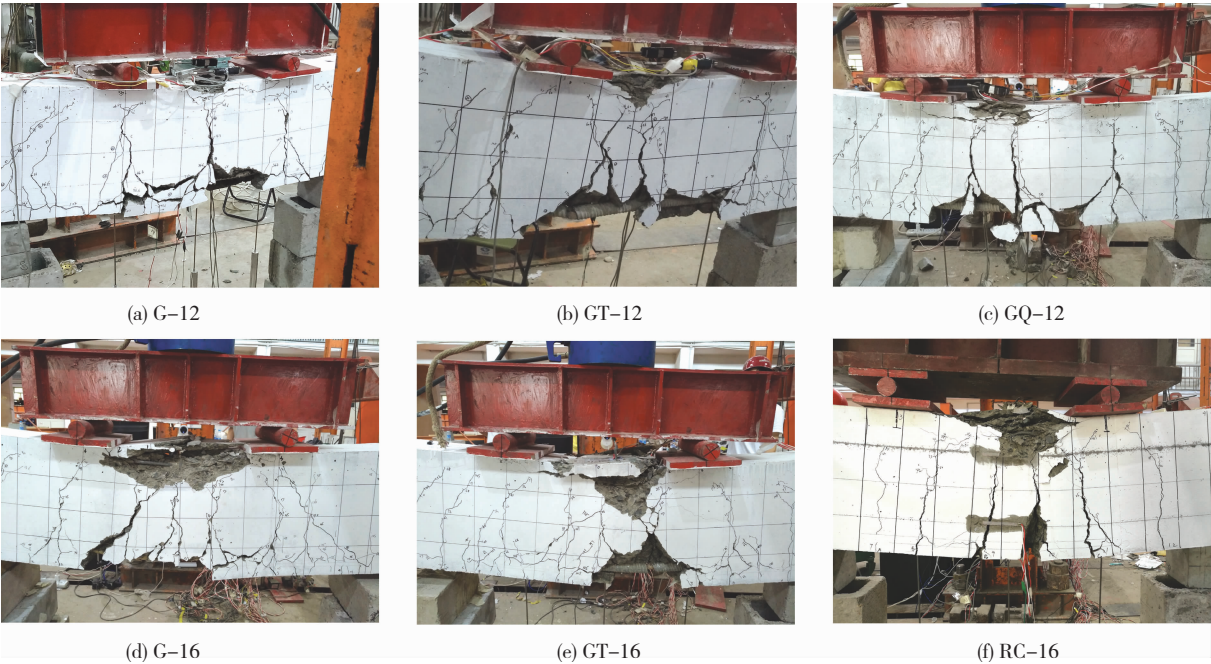


图 5 各试件的破坏形态
Fig. 5 Failure modes of specimens

挠度曲线继续上升,直至 GFRP 筋被拉断,各梁的最终破坏形态见图 5。

2.2 受弯承载力与变形性能

GFRP 筋矩形截面梁的正截面受弯承载力 M_n 可根据截面内力分析计算,当 $\rho_f > \rho_b$ 时,计算公式可统一为

$$M_n = \rho f_f (1 - \frac{\rho f_f}{2 \alpha_1 f_c}) b h_{or}^2, \tag{2}$$

式中: b 为梁截面宽度, h_{or} 为梁截面有效高度, f_f 为混凝土压碎时 FRP 筋的应力,可按 CSA^[15] 与 ACI^[16] (式 3a) 和中国规范^[17] (式 3b) 计算。

$$f_f = \left[\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \beta_1 \frac{\alpha_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right] \leq f_{fu}, \tag{3a}$$

$$f_f = f_{fu} \left[1 - 0.211 \left(\frac{\rho_f}{\rho_b} - 1 \right)^{0.2} \right] \leq f_{fu}. \tag{3b}$$

当 $\rho_f < \rho_b$ 时, CSA^[15] 与 ACI^[16] (式 4a) 与中国规范^[17] (式 4b) 的 M_n 计算公式分别为:

$$M_n = A f_{fu} (h_{or} - \frac{\beta_1 c_b}{2}), \tag{4a}$$

$$M_n = 0.9 A f_{fu} h_{or}. \tag{4b}$$

式中 c_b 为平衡状态下截面受压边缘到中性轴的距离,按式(5)计算。

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) h_{or}. \tag{5}$$

表 4 列出了各梁受弯承载力试验值与规范预测

值的对比,其中 $M_{n,Exp}$ 为压区混凝土开始被压碎时的跨中弯矩值,根据试验观察确定,各 FRP 筋混凝土梁的压区边缘混凝土的压应变相近,平均值为 $3\,217 \times 10^{-6}$ 。由表 4 可知,各规范 M_n 预测值略偏保守,整体上与普通 GFRP 筋混凝土梁试验结果吻合较好,而低于新型 GFRP 筋梁,证明波纹管灌浆的措施对梁受弯承载力略有提高;相同配筋率下 GFRP 筋混凝土梁的受弯承载力高于 RC 梁,将各梁 GFRP 筋最终拉断时的跨中极限弯矩 $M_{u,Exp}$ 列于表 4,可知 GFRP 筋混凝土梁的极限弯矩比相应于混凝土初始压碎时梁的受弯承载力还可再提高约 1.2 倍左右。

由图 4 可知,当 GFRP 筋配筋率接近界限配筋率时,本文构造措施可提高 GFRP 筋混凝土梁的开裂后刚度;混凝土压碎后, G-16 梁的受弯承载力与刚度均略高于 GT-16 梁,可能是由于此时波纹管与 GFRP 筋的间隙较小, GFRP 筋在接近拉断时与灌浆料间出现了滑移。

将各试验梁在开裂、压区混凝土开始压碎和极限状态(GFRP 筋最终拉断或 RC 梁承载力下降到 85%)下的跨中挠度 Δ_{cr} 、 Δ_n 和 Δ_u 列于表 4,可以看出:混凝土受拉开裂时,新型 GFRP 筋梁的开裂弯矩略高于普通 GFRP 筋梁,但各 GFRP 筋混凝土梁的跨中挠度相近,略大于 RC 梁;当混凝土开始压碎时, RC 梁的挠度小于 GFRP 筋混凝土梁。由图 4 与表 4 可知,若以压区混凝土开始被压碎作为破坏状态的标志,则 GFRP 筋混凝土梁比 RC 梁发生更大的变形,平均挠跨比约为 1/56。

表 4 试验梁受弯承载力与变形性能

Tab.4 Flexural capacity and deformation capacity of tested beams

梁编号	$M_{n,Exp}/$ (kN·m)	$\varepsilon_{n,Exp}/$ 10^{-6}	$M_{n,Exp}/M_{n,Pre}$			$M_{cr,Exp}/$ (kN·m)	$M_{u,Exp}/$ (kN·m)	Δ_{cr}/mm	Δ_n/mm	Δ_u/mm
			CSA ^[15]	ACI ^[16]	GB ^[17]					
G-12	78.3	3 212	1.09	1.05	1.14	17.8	94.1	1.04	71.3	107.8
GT-12	79.8	2 840	1.14	1.12	1.19	18.7	100.9	0.96	73.0	115.0
GQ-12	80.1	3 178	1.15	1.12	1.19	20.8	100.6	0.99	61.7	108.9
G-16	95.5	3 214	0.96	1.03	0.95	20.1	126.8	1.05	51.2	90.2
GT-16	103.8	3 639	1.09	1.18	1.06	20.5	111.9	1.05	62.7	120.9
RC-16	76.9	2 168				18.0	77.4	0.70	35.5	123.1

注: $M_{cr,Exp}$ 为试验梁开裂弯矩试验值; 对 RC 梁 $M_{u,Exp}$ 代表峰值弯矩, 表中弯矩均已考虑梁自重; 下角标中 Exp 表示试验值, Pre 表示公式预测值.

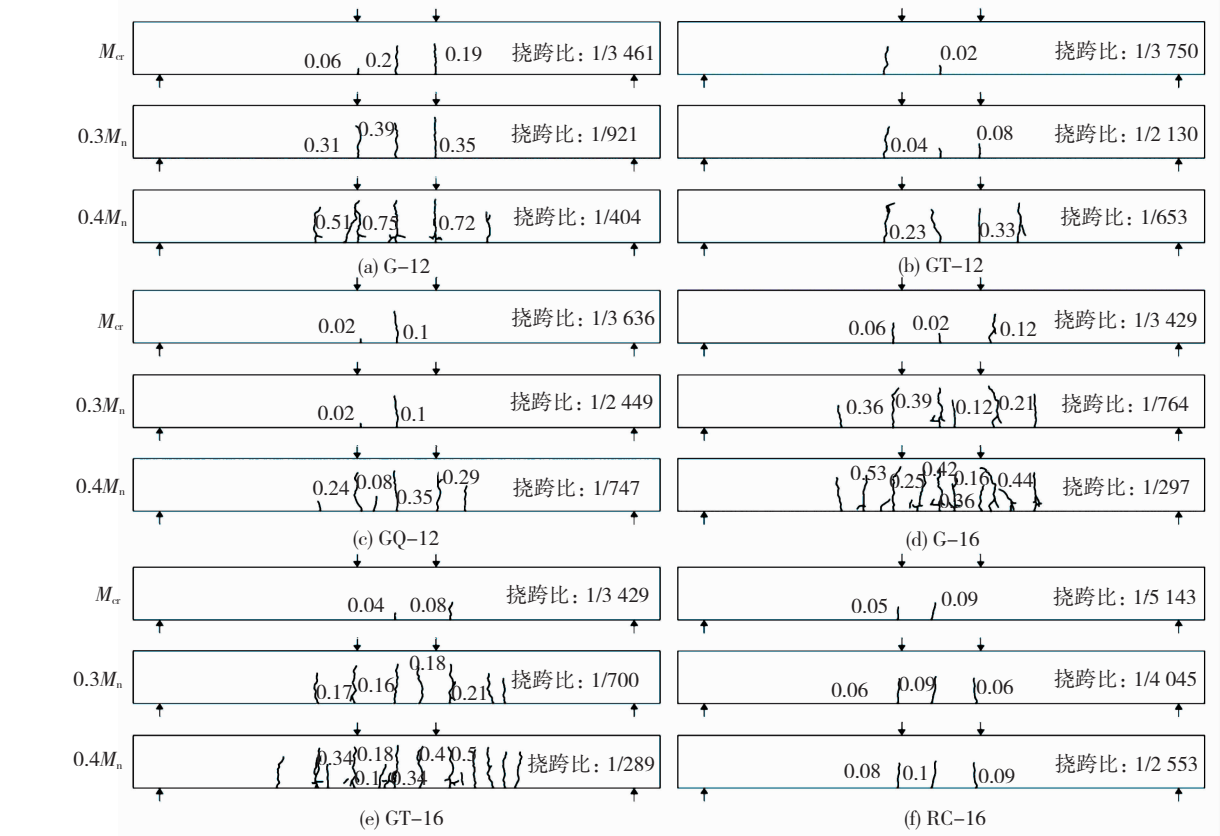
2.3 裂缝分布与宽度

FRP 筋混凝土梁的配筋率往往由最大裂缝宽度控制, 各国规范均提出了相应的设计方法来限制使用阶段的裂缝宽度. CSA S806-12^[15] 对正常使用极限状态下 GFRP 筋的应力水平和最大拉应变加以限制, ACI 440.1R-15^[16] 通过限制 GFRP 筋最大间距控制梁的裂缝宽度, 中国 GB 50608—2010^[17] 则直接规定了正常使用极限状态下最大裂缝宽度的计算公式与限值.

本文在研究 GFRP 筋混凝土梁裂缝开展规律

时, 参考国内外学者^[5,9,19] 建议, 取 $0.3M_n$ 与 $0.4M_n$ (M_n 取 ACI^[16] 计算值) 两个状态来考察. 图 6 是试验梁分别在其开裂弯矩、 $0.3M_n$ 和 $0.4M_n$ 状态下的裂缝开展与分布图, 图 7 为各梁跨中弯矩-平均裂缝宽度曲线, 其中平均裂缝宽度为纯弯区段内各裂缝宽度的平均值.

由图 6(f) 可知, RC 梁纯弯段裂缝初始宽度较小且发展缓慢, 裂缝分布细而密. 由图 6(a)~(e) 可知, GFRP 筋梁的弯曲裂缝首先出现在跨中纯弯段, G-12 梁的配筋率较低, 裂缝一出现就具有较大的



注: M_{cr} 代表试验梁各自的开裂弯矩, 数值取表 4 中 $M_{cr,Exp}$

图 6 裂缝分布与宽度示意 (mm)

Fig. 6 Diagram of crack distribution and width (mm)

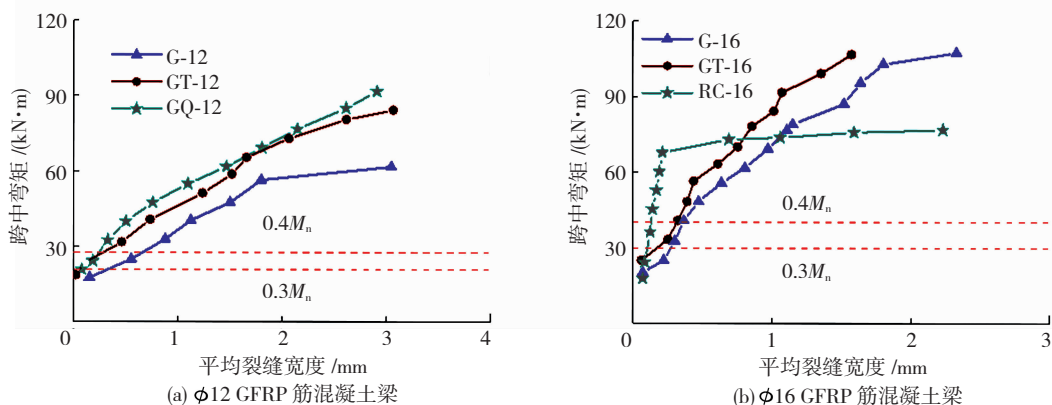


图 7 弯矩-平均裂缝宽度曲线

Fig. 7 Moment-average crack width curve

宽度,且随荷载增加裂缝迅速变宽;裂缝沿竖向扩展高度达到 320 mm ($0.3M_n$),随后出现沿 GFRP 筋的水平顺筋裂缝.与 G-12 梁相比,G-16 梁的配筋率较高,初始裂缝宽度较小,与 RC 梁裂缝宽度相近;随着荷载的增加,呈现出细而密的裂缝分布特征,裂缝宽度约为 G-12 梁的一半,说明提高 GFRP 筋配筋率可明显减小梁的裂缝宽度.

当纵筋配筋率接近界限配筋率时,GT-12 和 GQ-12 梁在相同弯矩下的平均裂缝宽度明显小于 G-12 梁,顺筋裂缝几乎未出现,验证了新型构造措施减小梁裂缝宽度的有效性;当 GFRP 纵筋配筋率明显大于界限配筋率时,由 GT-16 梁与 G-16 梁相比可知,两者裂缝分布相似,GT-16 梁的裂缝宽度稍小,说明随着 GFRP 筋配筋率的增大,新型构造措施减小裂缝宽度的效果逐渐减弱.

2.4 试验结果与设计规范对比

1) 开裂弯矩

CSA S806-12^[15]与 ACI 400.1R-15^[16]均给出了 FRP 筋混凝土梁开裂荷载 M_{cr} 的预测公式,试验结果与预测值的对比分别见表 4、5.可知规范预测与试验结果整体吻合较好,采用新型 GFRP 纵筋构造措施梁的开裂弯矩略高于普通 GFRP 筋混凝土梁.

2) 平均裂缝间距与平均裂缝宽度

中国 GB 50608—2010^[17]中 FRP 筋混凝土梁平均裂缝间距 l_m 与平均裂缝宽度 ω_m 的计算公式与钢筋混凝土梁相同,分别见式(6)、(7).

$$l_m = 1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}, \quad (6)$$

式中: c 为纵向受拉 FRP 筋外边缘至受拉区边缘的距离, ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的 FRP 纵向受拉筋的配筋率, d_{eq} 为加强筋的等效直径,计算 d_{eq} 时相对黏结特性系数对带肋钢筋取为 1.0,而 FRP 筋则取为 0.7.

由平均裂缝间距可进一步得到平均裂缝宽度:

$$\omega_m = \alpha_c \psi \frac{\sigma_f l_m}{E_f}, \quad (7)$$

式中: α_c 为裂缝间混凝土伸长对裂缝开展宽度的影响系数,规范^[17]建议取 0.85; σ_f 为 FRP 筋在裂缝处应力; ψ 为裂缝间 FRP 筋应力不均匀系数,按式(8)计算,当 $\psi \leq 0.2$ 时,取 $\psi = 0.2$.

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_t}{\rho_{te} \sigma_f}, \quad (8)$$

式中 f_t 为混凝土轴心受拉强度.

为考察 GFRP 筋的应力水平,本文试验中实测得梁顶部混凝土压应变 $\varepsilon_{c,Exp}$ (见表 5),由此可得梁顶混凝土压应力,因此时混凝土应力较小,近似取压区混凝土应力为线性分布,根据平截面假定对截面进行内力分析,由平衡方程可计算得 GFRP 筋应力 $\sigma_{f,Exp}$,分析方法如图 8 所示.将计算结果列于表 5,对于新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁,因外设波纹管,截面有效高度减小,导致计算的 GFRP 筋应力水平略高于普通 GFRP 筋混凝土梁. $0.3M_n$ 时,仅梁 G-16 与 GT-16 可满足 CSA^[15] 建议的“使用阶段 GFRP 筋应力水平不大于 $0.25\sigma_{fu}$ ”的要求,其他梁均不满足; $0.4M_n$ 时所有梁均不满足.

平均裂缝宽度与平均裂缝间距的试验值与规范^[17] 预测值均列于表 5,对采用新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁,各公式计算时,筋直径仍按其名义直径取值,各系数取值同普通 GFRP 筋混凝土梁.由于配筋率 $\rho_{te} \leq 1\%$ 时,平均裂缝宽度预测结果与试验值相差较大,本文参考文献[22-23]的建议,当 $\rho_{te} \leq 1\%$ 时,取 $\rho_{te} = 1\%$.对新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁, ω_m 的预测值均远大于试验值,这是由于波纹管内填充的高强水泥基灌浆料与 GFRP 筋间黏结性能较好,提高了裂缝间混凝土参与受拉的程度,显著减小了裂缝间 GFRP 筋应力不均匀系数 ψ ,进而减小了梁的平均裂缝宽度.将试验实测的 $\omega_{m,Exp}$ 、 $l_{m,Exp}$ 与 $\sigma_{f,Exp}$ 带入式(7),可得到相应于试验

结果的 ψ_{Exp} 值,列于表 5. 可以看出,新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁的 ψ_{Exp} 值较低,在 $0.3M_n$ 时均低于 0.2. 因此,建议在计算新型构造措施 GFRP 筋混凝土梁平均裂缝宽度时,可将 ψ 值的下限值范围适当下调.

表 5 平均裂缝间距与平均裂缝宽度试验值与规范值比较
Tab. 5 Comparison between test results and prediction of average crack spacing and average crack width

对比项	分类	G-12	GT-12	GQ-12	G-16	GT-16
$M_{cr,Exp}$	CSA ^[15]	0.97	1.02	1.13	1.09	1.11
$M_{cr,Pre}$	ACI ^[16]	0.94	0.98	1.09	1.05	1.08
$\varepsilon_{c,Exp}/10^{-6}$	0.3M _n	531.00	273.00	327.00	715.00	777.00
	0.4M _n	930.00	458.00	668.00	1292.00	1111.00
$\sigma_{f,Exp}/MPa$	0.3M _n	314.30	346.70	344.90	218.10	224.30
	0.4M _n	411.20	428.90	426.00	305.00	311.60
$\sigma_{f,Exp}/f_{fu}$	0.3M _n	0.33	0.36	0.36	0.25	0.25
	0.4M _n	0.43	0.45	0.45	0.34	0.30
$l_{m,Exp}/mm$	0.3M _n	293.00	296.00	278.00	250.00	249.00
	0.4M _n	293.00	296.00	199.00	188.00	150.00
$l_{m,Pre}/mm$	GB ^[17]	205.00	225.00	225.00	249.00	266.00
$l_{m,Exp}/l_{m,Pre}$	0.3M _n	1.43	1.32	1.24	1.01	0.94
	0.4M _n	1.43	1.32	0.88	0.76	0.56
$\omega_{m,Exp}/mm$	0.3M _n	0.35	0.06	0.08	0.27	0.18
	0.4M _n	0.66	0.28	0.24	0.36	0.31
$\omega_{m,Pre}/mm$	0.3M _n	0.34	0.42	0.42	0.21	0.23
	0.4M _n	0.71	0.83	0.83	0.57	0.65
$\omega_{m,Exp}/\omega_{m,Pre}$	0.3M _n	1.02	0.14	0.19	1.30	0.78
	0.4M _n	0.93	0.34	0.29	0.63	0.48
ψ_{Pre}	0.3M _n	0.35	0.37	0.37	0.20	0.20
	0.4M _n	0.53	0.55	0.55	0.41	0.43
ψ_{Exp}	0.3M _n	0.22	0.03	0.05	0.27	0.18
	0.4M _n	0.32	0.13	0.17	0.35	0.37

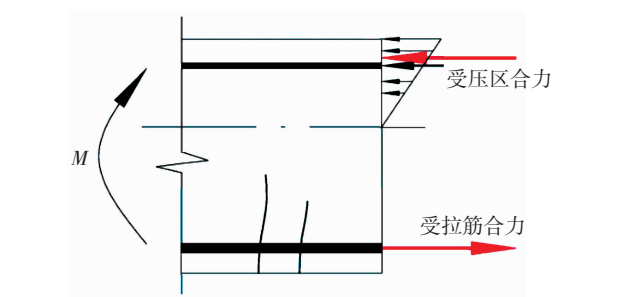


图 8 截面内力分析示意

Fig. 8 Diagram of cross section internal force analysis

3) 最大裂缝宽度

关于正常使用极限状态下裂缝宽度限值,日本土木学会^[20]基于美观要求,建议 FRP 筋混凝土梁裂缝限值取 0.5 mm;加拿大高速公路桥梁设计规

范^[21]规定,一般环境下 FRP 筋混凝土梁裂缝宽度不应超过0.7 mm,侵蚀性环境中不应超过0.5 mm;我国规范^[17]要求 FRP 筋受弯构件按荷载效应标准组合,并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度限值同样为 0.5mm.

中国规范^[17]建议最大裂缝宽度可按下式计算:

$$\omega_{max} = \tau_1 \tau_s \omega_m, \tag{9}$$

式中: τ_1 为长期荷载作用下裂缝宽度扩展系数,取 1.5; τ_s 为短期荷载作用下最大裂缝宽度与平均裂缝宽度比值系数,参考文献[23]根据大量试验数据的修正取 1.398. 各试件在 M_{cr} 、 $0.3M_n$ 、 $0.4M_n$ 状态下的最大裂缝宽度与裂缝竖向分布高度见表 6.

表 6 最大裂缝宽度与竖向分布高度
Tab. 6 Maximum crack width and crack vertical distribution height

梁编号	最大裂缝宽度/mm(考虑 τ_1)				裂缝竖向分布高度/mm		
	试验值		预测值 ^[17]		M_{cr}	0.3M _n	0.4M _n
	0.3M _n	0.4M _n	0.3M _n	0.4M _n			
G-12	0.59	1.13	0.86	1.76	217	309	328
GT-12	0.12	0.50	1.04	2.06	68	110	257
GQ-12	0.15	0.53	1.04	2.06	219	239	306
G-16	0.59	0.80	0.52	1.42	218	313	327
GT-16	0.32	0.75	0.58	1.62	132	298	323
RC-16	0.09	0.10	0.06	0.07	129	204	204

由表 6 可知,若考虑荷载长期作用,当荷载效应为 $0.3M_n$ 时,普通 GFRP 筋混凝土梁的最大裂缝宽度均不满足0.5 mm的限值要求,而采用新型构造措施 FRP 筋的混凝土梁可满足最大裂缝宽度的要求; $0.4M_n$ 时,所有 FRP 筋混凝土梁的最大裂缝宽度均大于 0.5 mm,不满足规范要求.

3 结 论

1) 与普通 GFRP 筋相比,当 GFRP 纵筋配筋率接近界限配筋率时,由于波纹管内填充的高强水泥基灌浆料与 GFRP 筋间黏结性能较好,提高了裂缝间混凝土参与受拉的程度,显著减小了裂缝间 GFRP 筋应力不均匀系数,GFRP 纵筋波纹管灌浆措施可明显减小梁在使用阶段的裂缝宽度,延缓顺筋裂缝的出现;随着 GFRP 纵筋配筋率增大,新型构造措施对裂缝宽度的改善效果降低,说明其适用于低 GFRP 配筋率的混凝土梁.

2) 波纹管灌浆措施对 GFRP 筋混凝土梁的受弯承载力和变形能力略有提高. 相同配筋率下 GFRP 筋混凝土梁的受弯承载力高于 RC 梁,以压区混凝土开始被压碎作为破坏状态的标志,GFRP 筋混凝土梁比 RC 梁发生更大的变形.

3) 现有规范可较好地预测 GFRP 筋混凝土梁的开裂弯矩与受弯承载力, 中国规范^[17] 中平均裂缝宽度与平均裂缝间距的计算公式, 尚需积累更多试验数据来进行修正。

参考文献

- [1] 滕锦光, 陈建飞. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005
TENG Jinguang, CHEN Jianfei. FRP strengthened RC structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005
- [2] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24
YE Lieping, FENG Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24
- [3] MUFTI A, ONOFREI M, BENMOKRANE B, et al. Durability of GFRP reinforced concrete in field structures [C]// SHIELD C K. 7th International symposium on fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for reinforced concrete structures. Kansas City: American Concrete Institute, 2005: 1361
- [4] 祁德庆, 钱文军, 薛伟辰. 土木工程用 FRP 筋的耐久性研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(2): 47
QI Deqing, QIAN Wenjun, XUE Weichen. Progress of studies on durability of FRP bars used in civil engineering [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(2): 47
- [5] KASSEM C, FARGHALY A, BENMOKRANE B. Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP bars [J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(5): 682
- [6] 薛伟辰, 郑乔文, 杨雨. FRP 筋混凝土梁正截面抗弯承载力设计研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 79
XUE Weichen, ZHENG Qiaowen, YANG Yu. Design recommendations on flexural capacity of FRP-reinforced concrete beams [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 79
- [7] 袁竞峰. 新型 FRP 筋混凝土梁受弯性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2006
YUAN Jingfeng. Analysis on flexural behavior of concrete beam reinforced with FRP bars [D]. Nanjing: Southeast University, 2006
- [8] 徐新生. FRP 筋力学性能及其混凝土梁受弯性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2007
XU Xinsheng. Research on mechanical property of FRP bars and flexural property of concrete beams with FRP bars [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007
- [9] ELGABBAS F, AHMED E A, BENMOKRANE B. Flexural behavior of concrete beams reinforced with ribbed basalt-FRP bars under static loads [J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(3): 4016098. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000752
- [10] SAIKIA B, KUMAR P, THOMAS J, et al. Strength and serviceability performance of beams reinforced with GFRP bars in flexure [J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(8): 1709. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.021
- [11] EI-NEMR A, AHMED E A, BENMOKRANE B. Flexural behavior and serviceability of normal- and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars [J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(6): 1077
- [12] 李海霞. FRP 配筋混凝土梁试验研究及理论分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
LI Haixia. Theory analytical and experimental studies on concrete beam reinforced with FRP bars [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2007
- [13] 郝庆多, 王川, 王勃, 等. GFRP/钢绞线复合钢筋混凝土梁开裂性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2): 7
HAO Qingduo, WANG Chuan, WANG Bo, et al. Experimental study on cracking behavior of concrete beams reinforced with GFRP/steel wire composite rebar [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 7
- [14] ADAM M A, SAID M, MAHMOUD A A, et al. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars [J]. Construction & Building Materials, 2015, 84(2): 354
- [15] Canadian Standards Association (CSA). Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers: CSA S806-12 [S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2012
- [16] American Concrete Institute (ACI) Committee 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1R-15 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015
- [17] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011
Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011
- [18] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003
- [19] 朱虹, 董志强, 吴刚, 等. FRP 筋混凝土梁的刚度试验研究和理论计算[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 44
ZHU Hong, DONG Zhiqiang, WU Gang, et al. Experimental study and theoretical calculation on the flexural stiffness of concrete beams reinforced with FRP bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 44
- [20] MACHIDA A, UOMOTO T, AKIMOTO T, et al. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials (design) [J]. Concrete Library International, 1997, 49(498): 47
- [21] Canadian Standards Association (CSA). Canadian highway bridge design code: CAN/CSA-S6-06 [S]. Toronto: Design of Highway Bridges, 2006
- [22] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [23] 董志强, 吴刚. 基于试验数据分析的 FRP 筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度计算方法[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 1
DONG Zhiqiang, WU Gang. Calculation method for the maximum crack width of FRP bar reinforced concrete flexural member based on experimental data analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 1

(编辑 赵丽莹)