

文章编号:1673-2049(2017)05-0163-08

FRP 筋混凝土梁挠度与裂缝宽度计算模型分析

刘 喜,王 征,吴 涛

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:收集国内外 218 组纤维增强复合材料(FRP)筋混凝土梁受弯性能试验结果,重点研究了正常使用阶段和极限状态下梁挠度和裂缝宽度的发展规律,基于试验数据修正了 FRP 筋应变不均匀系数 ψ 与强度配筋影响系数的关系,建立了该类梁受弯挠度计算模型;深入分析了 FRP 筋混凝土梁受弯截面内力臂系数 η 、构件受力特征系数 α_{cr} 对构件裂缝宽度计算精度的影响,确定 η, α_{cr} 的合理取值,优化计算模型,并与规范 GB 50608—2010 建议模型计算值进行对比分析。结果表明:根据建立的 ψ 与强度配筋影响系数关系,选取 $\eta=0.88, \alpha_{cr}=1.5$ 得到的建议模型能够较好预测 FRP 筋混凝土梁受弯挠度和裂缝宽度,比规范计算结果吻合好,验证了建议模型的准确性和合理性。

关键词:FRP 筋混凝土梁;受弯构件;挠度;裂缝宽度;应变不均匀系数

中图分类号:TU377.9

文献标志码:A

Calculation Model of Deflection and Crack Width of Concrete Beam Reinforced with FRP Bars

LIU Xi, WANG Zheng, WU Tao

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The 218 groups of flexural test results at home and abroad of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) were collected, and the development laws of beam deflection and crack width under serviceability limit state and ultimate limit state were studied emphatically. On the basis of test data, the relationship between the non-uniformity coefficient of FRP strain and influence coefficient of strength reinforcement was corrected, and the deflection calculation model of flexural member was established. The influences of coefficient of internal force arm and force characteristic coefficient of component of the FRP reinforced concrete beam bending section on the calculation accuracy of crack width were deeply analyzed. The reasonable values of η and α_{cr} were determined, and the calculation model was optimized. The calculated values were compared with that of the model proposed by technical code GB 50608—2010 for infrastructure application of FRP composites. The results show that the suggested model by selecting $\eta=0.88, \alpha_{cr}=1.5$ based on the relationship between ψ and influence coefficient of strength reinforcement can predict the deflection and the crack width of concrete beams reinforced with FRP bars better than GB 50608—2010, and the calculation results of modified model are in good agreement with experimental results, the accuracy and rationality of the proposed model is verified.

收稿日期:2017-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51578072);陕西省自然科学基金研究计划项目(2016JM5070,2017JQ5092);

陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-04)

作者简介:刘 喜(1986-),男,陕西吴起人,讲师,工学博士,E-mail:lliuxii@163.com。

通讯作者:吴 涛(1976-),男,安徽霍山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wutao760922@163.com。

Key words: concrete beam reinforced with FRP bar; flexural member; deflection; crack width; non-uniformity coefficient of strain

0 引言

为解决因钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性问题,提高结构使用寿命,纤维增强材料在土木工程领域中应用愈加广泛。纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)筋强度高、抗腐蚀性能优良、抗电磁、质量轻,替代钢筋作为受力筋可满足结构抗腐蚀、减轻自重等要求。与钢筋相比,FRP 筋弹性模量较低,与混凝土黏结性能较差,导致 FRP 筋混凝土梁在开裂后刚度降低明显,产生较大的挠度和裂缝,影响结构正常使用。

自 20 世纪 70 年代,国外陆续开展了对 FRP 筋混凝土梁使用性能方面的研究。Nawy 等^[1]通过 20 根不同配筋率的 FRP 筋混凝土梁受弯试验,对比相同配筋率钢筋混凝土梁,得出 FRP 筋混凝土梁的挠度与裂缝宽度均大于相应钢筋混凝土梁的结论。Alsalloum 等^[2-4]通过试验研究及理论分析得出:FRP 筋的低弹性模量会产生较大挠度和裂缝,影响正常状态下的使用;FRP 筋混凝土梁的设计应由使用荷载下的挠度控制。Toutanji 等^[5]通过 GFRP 筋混凝土梁受弯试验得出:当 FRP 筋单排布置时,ACI 440.1R 计算方法能准确预测试件梁的最大裂缝宽度;当 FRP 筋双排布置时,ACI 440.1R 预测结果偏于保守。El-Nemr 等^[6]通过 GFRP 筋普通混凝土梁与高强混凝土梁对比试验得出:FRP 筋直径对试件梁裂缝宽度有显著影响,对挠度影响可忽略。Yoo 等^[7]进行 4 根不同配筋率的超高性能 FRP 筋纤维混凝土梁受弯试验,得出在相同荷载水平下,试件梁最大裂缝宽度随 FRP 筋配筋率的增大而减小;规范 ACI 440.1R-15 高估了试件在正常使用阶段的挠度值,并提出了相关修正建议。

薛伟辰等^[8-9]率先在中国开展 FRP 筋混凝土梁性能研究,进行了 FRP 筋混凝土梁的单调加载试验,研究表明:在带裂缝工作阶段,混凝土梁的刚度随配筋率和混凝土强度的提高而增大;在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)基础上,提出了 FRP 筋混凝土梁最大裂缝宽度与挠度的设计建议。高丹盈等^[10]以 62 根 FRP 筋混凝土梁和钢筋混凝土梁的弯曲试验结果为基础,参照美国 and 加拿大钢筋混凝土梁计算方法,提出 FRP 筋混凝土梁设计建议。曾德光^[11]和李海霞^[12]通过试验研究得出:FRP

筋的弹性模量较低,配筋率较低时,正常使用荷载下 FRP 筋混凝土受弯构件的裂缝宽度与挠度均大于普通钢筋混凝土梁。徐新生^[13]和郑永峰^[14]通过试验研究得出:FRP 筋混凝土梁与普通混凝土梁相比,裂缝开展较快,挠度变化较大,破坏为脆性破坏;截面应变基本符合平截面假定;FRP 筋混凝土梁荷载-挠度曲线模型可采用双折线模型。

为了更好地指导 FRP 筋混凝土结构设计,世界多国相继制定了相应的规范,如美国 ACI 440.1R、加拿大 CSA S806、ISIS 设计手册、日本 JSCE 等。中国在规范 GB 50010—2002 基础上,于 2010 年颁布了《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)^[15],对 FRP 筋增强混凝土受弯构件的挠度、裂缝宽度计算方法进行详细说明,但 GB 50608—2010 计算方法与钢筋混凝土构件计算方法基本相同。本文基于国内外 218 组 FRP 筋混凝土受弯构件试验数据,考虑 FRP 筋与钢筋性能方面的差异,对受弯构件挠度及裂缝宽度计算方法进行分析,并提出相关设计建议。

1 计算模型

在 FRP 筋混凝土梁受弯过程中,由于外加荷载作用,梁发生弯曲变形、底部出现弯曲裂缝。同时由于裂缝的出现,导致混凝土与 FRP 筋的应变分布不均匀(图 1, ϵ_c 为应变, M 为弯矩)。

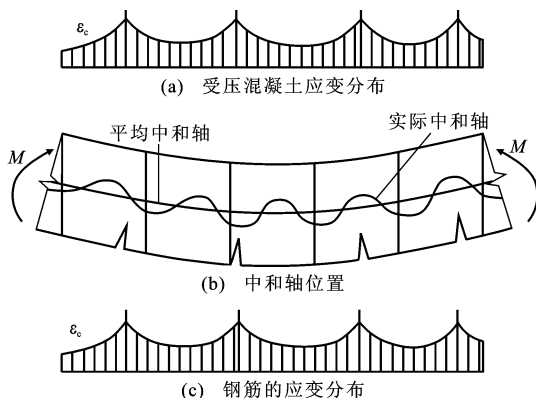


图 1 正常使用阶段梁中混凝土和 FRP 筋的应变分布
Fig. 1 Strain Distributions of Concrete and FRP Bars in Beams During Normal Service Phase

根据裂缝综合理论^[16],FRP 筋与混凝土之间的黏结滑移和混凝土保护层厚度对 FRP 筋混凝土构件裂缝宽度影响显著,基于该理论,参照图 2(σ_{sq} 为

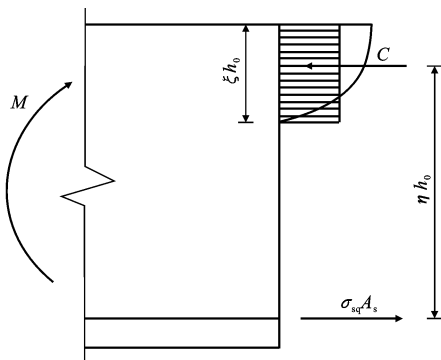


图 2 裂缝截面的应力图

Fig. 2 Stress Diagram of Fracture Cross Section

受拉筋应力, A_s 为受拉区纵向钢筋截面面积, h_0 为截面高度, η 为开裂截面的内力臂系数, C 为混凝土受压合力, ξ 为矩形应力图相对受压区高度) 所示裂缝截面处应力图形, GB 50608—2010 采用半理论半经验分析方法, 建立了荷载效应标准组合下 FRP 筋混凝土受弯构件最大裂缝宽度 ω_{\max} 的计算公式

$$\omega_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{fk}}{E_f} (1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}) \quad (1)$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_{fk}} \quad (2)$$

$$\sigma_{fk} = \frac{M_k}{\eta A_f h_{of}} \quad (3)$$

在理论推导基础上, 结合相关试验数据, 得到荷载效应标准组合作用下 FRP 筋混凝土受弯构件的短期抗弯刚度 B_s

$$B_s = E_f A_f h_{of}^2 / (1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_{fe}\rho_f}{1+3.5\gamma_f}) \quad (4)$$

式中: 当 $\psi < 0.2$ 时, 取 $\psi = 0.2$, 当 $\psi > 1$, 取 $\psi = 1$; α_{cr} 为构件受力特征系数, GB 50608—2010 中取 $\alpha_{cr} = 2.1$; σ_{fk} 为荷载效应标准组合下 FRP 筋的应力; c 为混凝土保护层厚度; d_{eq} 为受拉区纵向 FRP 筋的等效直径; f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; M_k 为按荷载效应标准组合计算的弯矩; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉筋的配筋率; A_f 为受拉区 FRP 筋的截面面积; h_{of} 为 FRP 筋混凝土构件截面有效高度; α_{fe} 为 FRP 筋与混凝土弹性模量之比; E_f 为 FRP 筋的弹性模量; γ_f 为受压翼缘截面面积与腹板有效截面面积之比; ρ_f 为配筋率。

混凝土较低的抗拉强度导致 FRP 筋混凝土梁正常使用阶段一般为带裂缝工作, 裂缝截面处 FRP 筋承受全部拉力, 应变较大; 裂缝间截面处, FRP 筋与混凝土因黏结作用而共同承受拉力, FRP 筋应变较小。将 FRP 筋平均应变与裂缝截面处 FRP 筋应变的比值定义为裂缝间 FRP 筋应变不均匀系数 ψ ,

该参数反映裂缝间混凝土参与受拉的程度^[16]。

对于 FRP 筋应变不均匀系数, 规范 GB 50608—2010 参照 GB 50010—2010, 采用钢筋应变不均匀系数计算方法。然而钢筋应变不均匀系数是在大量传统钢筋混凝土梁的试验数据基础上分析得出的, 是否适用于 FRP 筋混凝土梁仍需讨论。研究表明^[17]: 钢筋混凝土梁受弯时, 由于钢筋与混凝土之间黏结性能良好, 梁裂缝开展较密, 裂缝间距较小, 但 FRP 筋与混凝土黏结性能较差, 导致该类梁裂缝开展较钢筋混凝土梁更为稀疏。因此, 受弯梁纯弯段内钢筋应变相比 FRP 筋应变更不均匀, FRP 筋应变不均匀系数应大于钢筋应变不均匀系数。

2 应变不均匀系数 ψ 的修正

收集国内外 218 组 FRP 筋混凝土受弯构件试验数据(表 1), 从中选取 75 组正常使用极限状态下挠度试验值。根据挠度试验值计算 FRP 筋应变不均匀系数 ψ 的实际值, 拟合其与变量 $f_t/(\rho_{te} \sigma_{fk})$ (f_t 为混凝土抗拉强度) 的关系(图 3)。应变不均匀系数 ψ 拟合结果为

$$\psi = 0.75 - 0.17 f_{tk} / (\rho_{te} \sigma_{fk}) \quad (5)$$

3 内力臂系数与构件受力特征系数的修正

联立式(4), (5), 可求得 FRP 筋混凝土梁挠度值。计算过程中发现, FRP 筋应力 σ_{fk} 对应变不均匀系数 ψ 值的影响显著。对比规范 GB 50010—2010, FRP 筋混凝土构件受力特征系数 α_{cr} 取值也有所不同。讨论内力臂系数 η 和构件受力特征系数 α_{cr} 对 FRP 筋混凝土受弯构件挠度及裂缝宽度计算的影响。

为探究内力臂系数对 FRP 筋混凝土受弯构件理论计算值的影响, 依次选取内力臂系数 η 为 0.88, 0.90, 0.92, 0.94。分别拟合应变不均匀系数 ψ 与 $f_t/(\rho_{te} \sigma_{fk})$ 的关系, 结果见表 2。为表达方便, 应变不均匀系数 ψ 表达式中, 依次用字母 A, B 表示其系数取值。

根据表 2 可知: 内力臂系数取值对 FRP 筋混凝土受弯构件挠度计算值影响较小; 采用拟合公式(5) 计算正常使用状态挠度结果较好, 极限使用状态挠度计算结果与规范公式计算结果差异较小。

FRP 筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算中, 内力臂系数 η 、应变不均匀系数 ψ 、构件受力特征系数 α_{cr}

表 1 FRP 钢筋混凝土梁试验数据

Tab. 1 Experimental Data of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars

数据来源	试件数量/个	梁宽度 b/mm	梁有效高度 h_{0f}/mm	混凝土强度 f'_c/MPa	FRP 筋强度 f_{fu}/MPa	FRP 筋弹性 模量 E_f/GPa	正常使用状态		极限使用状态	
							挠度/ mm	裂缝宽度/ mm	挠度/ mm	裂缝宽度/ mm
文献[3]	3	150	126~137	36.5	1 506	50.1			52.7~68.8	
文献[4]	9	120	238~258	19.4~58.8	640	30.0	17.9~29.7		34.6~77.8	
文献[5]	6	180	255~268	36.8	695	40.0		0.50~1.30	59.0~73.0	
文献[6]	12	200	323~344	29.0~73.4	762~1 639	48.7~69.3	9.4~19.9	0.15~1.03	23.7~54.5	0.69~2.38
文献[7]	4	200	210~234	197.3	1182	51.3			31.4~64.3	
文献[9]	9	117~150	180	18.0~47.2	499	40.0		0.33~0.67		
文献[10]	7	200	270	39.0~59.0	641~773	38.0~49.0		0.50~2.50		1.10~5.20
文献[11]	9	150	211~313	31.0	658~1 325	72.0~75.5		0.28~1.62		
文献[12]	10	150	217~317	30.0	650	68.6				1.80~3.00
文献[13]	7	150~180	160~212	24.9	606~1 779	40.0~136.0		0.46~0.75	19.7~50.1	
文献[14]	7	150~180	160~212	24.9	606~1 779	40.0~136.0				0.96~1.80
文献[18]	5	200	236~254	38.2	1 105~1 312	62.6~65.6	8.0~12.3		42.0~54.1	
文献[19]	6	100	125~128	40.0~80.0	732~1 764	37.5~55.6			47.3~60.4	
文献[20]	16	200	338~345	33.8~81.5	666~1 936	46.4~147.0		0.36~0.66		0.54~1.68
文献[21]	14	200	225~228	39.1~40.8	617~1 988	36.0~114.0	7.2~11.3	0.25~0.62		0.37~1.40
文献[22]	6	200	234~257	42.5	1 162~1 189	44.4~48.7	9.7~16.0	0.69~1.44	25.3~68.3	1.27~2.70
文献[23]	4	140	154~156	21.1	1 327~1 424	63.4~64.5			4.6~6.0	
文献[24]	12	140	134~156	30.1~46.9	995~1 353	63.3~64.2			32.5~52.2	
文献[25]	6	230	190~194	75.9~104.4	941~2 130	48.1~146.2			36.6~56.2	
文献[26]	6	178	160~175	30.0~48.0	552~2 069	41.0~124.0		0.41~0.60	23.0~30.0	
文献[27]	3	230	242~244	40.0	1 000	50.0	6.9~36.0			
文献[28]	7	150	116	18.4~53.0	348	32.7	5.7~16.1		27.5~46.0	
文献[29]	9	150	248~280	51.0~60.0	1 100	70.0			40.7~95.8	
文献[30]	2	120	169	33.0~33.6	1 676	135.9	8.4~8.6		35.3~35.5	
文献[31]	5	280	340~346	33.9~42.5	582~603	38.0~40.2			78.4~123.9	
文献[32]	4	200	158~248	31.3~40.7	700~886	35.6~43.4	10.6~14.2			
文献[33]	10	150	248~265	40.7~81.5	1 760	53.0			19.7~39.2	0.82~1.74
文献[34]	11	150	205~313	24.5	353~722	30.8~60.4	8.3~30.1		24.6~52.6	
文献[35]	9	150	105~269	19.9~31.4	520~541	30.8				3.08~3.36
合计	218									

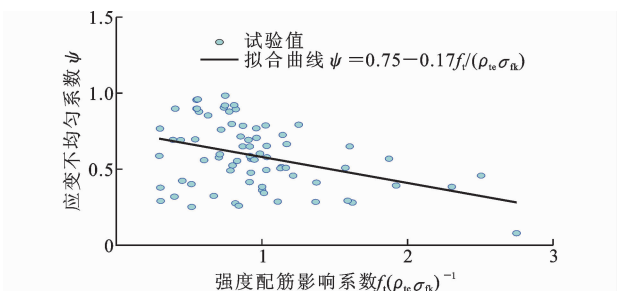


图 3 FRP 筋应变不均匀系数拟合曲线
Fig. 3 Regression Curve of Non-uniformity Coefficient of FRP Strain

对其有直接影响。基于表 2,分析构件受力特征系数对裂缝计算的影响(表 3)。

根据表 3 可知,FRP 筋混凝土受弯构件计算裂缝宽度均值和标准差与内力臂系数 η 值正相关,与构件受力特征系数 α_{cr} 值负相关。出于计算结果均值稳定、离散度较小考虑,选取 $\eta=0.88, \alpha_{cr}=1.5$, 代入公式(1),(2)得修正公式

$$\omega_{\max}=1.5\psi\frac{\sigma_{fk}}{E_f}(1.9c+0.08\frac{d_{eq}}{\rho_{te}})$$

(6)

$$\sigma_{fk}=\frac{M_k}{0.88A_fh_{0f}}$$

(7)

4 计算结果对比

在本文收集 218 组 FRP 筋混凝土受弯构件试验数据基础上,采用规范 GB 50608—2010 与本文

表 2 应变不均匀系数与 FRP 筋混凝土构件挠度关系

Tab. 2 Relationship Between Strain Non-uniformity Coefficients and Deflections of Concrete Components Reinforced with FRP Bars

应变不均匀系数	内力臂系数	$\Delta_{\text{exp}}/\Delta_{\text{th}}$							
		正常使用极限状态挠度				承载能力极限状态挠度			
		样本数量/个	均值	标准差	变异系数/%	样本数量/个	均值	标准差	变异系数/%
$A=1.1, B=0.65$	0.90	75	1.14	0.33	29.33	155	1.03	0.36	35.16
$A=0.75, B=0.17$	0.88, 0.90, 0.92, 0.94	75	1.01	0.23	23.20	155	1.19	0.41	34.57

注: Δ_{exp} 为跨中极限挠度的试验值; Δ_{th} 为跨中极限挠度的计算值。

表 3 构件受力特征系数与 FRP 筋混凝土构件裂缝宽度关系

Tab. 3 Relationship Between Member Stress Characteristic Coefficients and Crack Widths of Concrete Members with FRP Bars

应变不均匀系数	内力臂系数	统计参数	$\omega_{\text{exp}}/\omega_{\text{th}}$									
			$\alpha_{\text{cr}}=2.3$		$\alpha_{\text{cr}}=2.1$		$\alpha_{\text{cr}}=1.9$		$\alpha_{\text{cr}}=1.7$		$\alpha_{\text{cr}}=1.5$	
			使用裂缝	极限裂缝	使用裂缝	极限裂缝	使用裂缝	极限裂缝	使用裂缝	极限裂缝	使用裂缝	极限裂缝
$A=1.1, B=0.65$	0.90	样本数量/个	73	95	73	95	73	95	73	95	73	95
		均值	0.84	0.66	0.92	0.72	1.02	0.79	1.14	0.89	1.29	1.01
		标准差	0.43	0.64	0.47	0.70	0.52	0.77	0.58	0.87	0.65	0.98
		变异系数/%	50.74	97.61	50.74	97.61	50.74	97.61	50.74	97.61	50.74	97.61
$A=0.75, B=0.17$	0.88	样本数量/个	73	95	73	95	73	95	73	95	73	95
		均值	0.56	0.65	0.61	0.71	0.68	0.79	0.76	0.88	0.86	1.00
		标准差	0.17	0.57	0.18	0.63	0.20	0.70	0.22	0.78	0.25	0.88
		变异系数/%	29.47	88.36	29.47	88.36	29.47	88.36	29.47	88.36	29.47	88.36
	0.90	样本数量/个	73	95	73	95	73	95	73	95	73	95
		均值	0.58	0.67	0.63	0.73	0.70	0.81	0.78	0.90	0.88	1.02
		标准差	0.17	0.59	0.19	0.65	0.21	0.71	0.23	0.80	0.26	0.90
		变异系数/%	29.50	88.35	29.50	88.35	29.50	88.35	29.50	88.35	29.50	88.35
	0.92	样本数量/个	73	95	73	95	73	95	73	95	73	95
		均值	0.59	0.69	0.65	0.75	0.72	0.83	0.80	0.93	0.91	1.05
		标准差	0.18	0.61	0.19	0.66	0.21	0.73	0.24	0.82	0.27	0.93
		变异系数/%	29.54	88.34	29.54	88.34	29.54	88.34	29.54	88.34	29.54	88.34
	0.94	样本数量/个	73	95	73	95	73	95	73	95	73	95
		均值	0.60	0.70	0.66	0.76	0.73	0.84	0.81	0.94	0.92	1.07
		标准差	0.18	0.61	0.19	0.67	0.21	0.74	0.24	0.83	0.27	0.94
		变异系数/%	29.48	88.36	29.48	88.36	29.48	88.36	29.48	88.36	29.48	88.36

注: ω_{exp} 为裂缝宽度试验值; ω_{th} 为裂缝宽度计算值。

修正公式,分别计算试件梁挠度与裂缝宽度,计算结果见表 4 与图 4,其中 ρ_{th} 为平均配筋率。

表 4 规范公式与修正公式计算结果对比

Tab. 4 Comparison of Calculation Results Between Standard Formula and Revised Formula

计算方法	统计参数	$\Delta_{\text{exp}}/\Delta_{\text{th}}$		$\omega_{\text{exp}}/\omega_{\text{th}}$	
		正常使用极限状态挠度	承载能力极限状态挠度	正常使用极限状态裂缝	承载能力极限状态裂缝
规范公式	样本数量/个	75	155	73	95
	均值	1.14	1.03	0.92	0.72
	标准差	0.33	0.36	0.47	0.70
	变异系数/%	29.33	35.16	50.74	97.61
修正公式	样本数量/个	75	155	73	95
	均值	1.01	1.19	0.86	1.00
	标准差	0.23	0.41	0.25	0.88
	变异系数/%	23.20	34.57	29.47	88.36

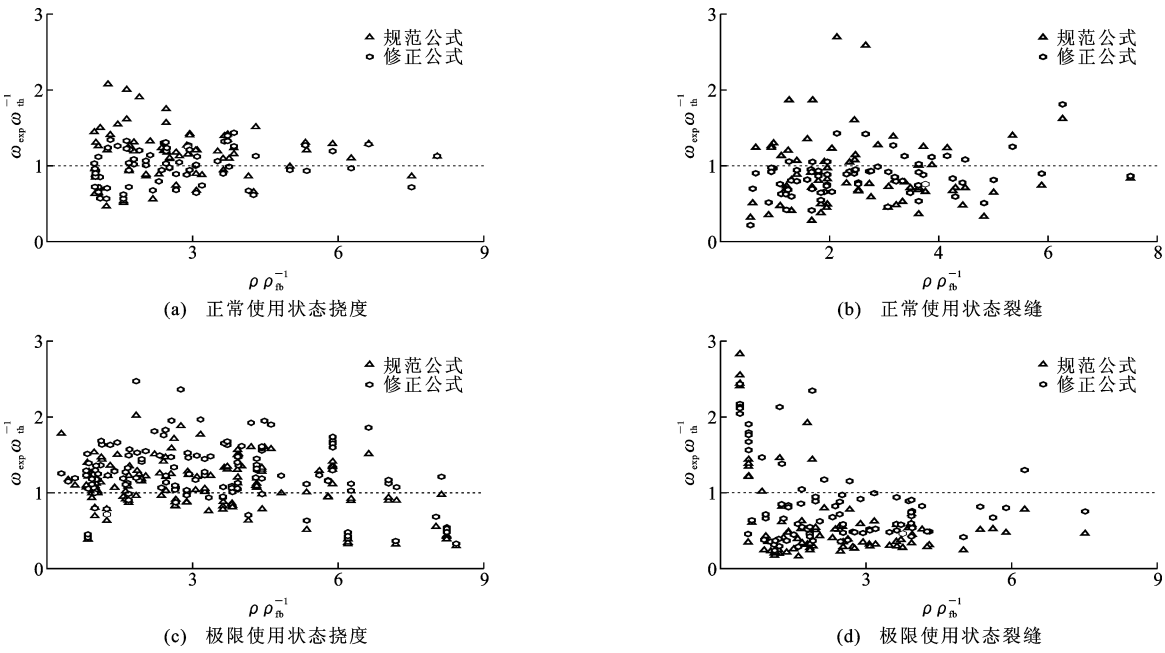


图 4 规范公式与修正公式计算结果

Fig. 4 Calculation Results of Standard Formula and Correction Formula

通过对比可知:修正公式在保证计算结果精度的基础上,有效降低了正常使用极限状态下挠度与裂缝宽度计算值的离散度;进行承载能力极限状态计算时,修正公式能提高裂缝宽度计算均值,降低变异系数;挠度计算结果与规范结果接近。

5 结 语

(1)基于 75 组 FRP 筋混凝土受弯构件正常使用状态下挠度试验数据,修正了 FRP 筋应变不均匀系数 ψ 与 $f_t/(\rho_{te}\sigma_{fk})$ 的关系,建立了该类梁受弯挠度计算模型。

(2)分析 FRP 筋混凝土梁受弯截面内力臂系数 η 、构件受力特征系数 α_{cr} 对构件裂缝宽度计算精度的影响。对比分析得出:裂缝宽度计算均值与内力臂系数 η 呈正相关、与构件受力特征系数 α_{cr} 呈负相关。确定 η, α_{cr} 的合理取值,优化了计算模型。

(3)基于 218 组 FRP 筋混凝土受弯构件试验数据,对比规范 GB 50608—2010 与本文修正公式可知:修正公式能较好地预测 FRP 筋混凝土梁受弯挠度和裂缝宽度,比规范计算结果吻合好,验证了建议模型的准确性和合理性。

参考文献:

References:

[1] NAWY E G, NEUWERTH G E, PHILLIPS C J. Behavior of Fiber Glass-reinforced Concrete Beams[J].

Journal of the Structural Division, 1971, 97(9): 2203-2215.

[2] ALSALLOUM Y A, ALSAYED S H, ALMUSALLAM T H. Some Design Considerations for Concrete Beams Reinforced by GFRP Bars[C]//SAADAT-MANESH H, EHSANI M R. Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure. Tucson: ICCI, 1996: 318-331.

[3] AIELLO M A, OMBRES L. Load-deflection Analysis of FRP Reinforced Concrete Flexural Members[J]. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(4): 164-171.

[4] 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 and Building Materials, 2015, 84: 354-366.

[5] TOUTANJI H, DENG Y. Deflection and Crack-width Prediction of Concrete Beams Reinforced with Glass FRP Rods[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(1): 69-74.

[6] EL-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): 1077-1087.

[7] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Predicting Service Deflection of Ultra-high-performance Fiber-

- reinforced Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 99: 381-397.
- [8] 薛伟辰,郑乔文,杨雨.纤维塑料筋混凝土梁挠度的计算方法[J].水利学报,2008,39(7):883-888,894.
XUE Wei-chen, ZHENG Qiao-wen, YANG Yu. Calculation Method for Deflection of Concrete Beams Reinforced with FRP Rebars[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 883-888, 894.
- [9] 杨雨,薛伟辰,郑乔文. FRP 筋混凝土梁裂缝宽度的计算方法[J].水力发电学报,2008,27(6):79-83.
YANG Yu, XUE Wei-chen, ZHENG Qiao-wen. Calculation of Crack Widths of FRP-reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 79-83.
- [10] 高丹盈,赵广田, BRAHIM B. 纤维聚合物筋混凝土梁正截面性能的试验研究[J].工业建筑,2001,31(9): 41-44.
GAO Dan-ying, ZHAO Guang-tian, BRAHIM B. Experimental Study of Flexural Properties of FRP-reinforced Concrete Beam[J]. Industrial Construction, 2001, 31(9): 41-44.
- [11] 曾德光. FRP 筋混凝土梁的受弯性能试验研究和理论分析[D].南京:东南大学,2005.
ZENG De-guang. Experimental Study and Theoretical Analysis on Flexural Behavior of Concrete Beam Reinforced with FRP Tendons[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [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 Hai-xia. Theoretical and Experimental Studies on Concrete Beam Reinforced with FRP Bars[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [13] 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 Xin-sheng. Research on Mechanical Property of FRP Bars and Flexural Property of Concrete Beams with FRP Bars[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [14] 郑永峰. FRP 筋混凝土梁受力性能的试验研究及有限元分析[D].济南:济南大学,2008.
ZHENG Yong-feng. Experimental Studies and FEM Analysis of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars[D]. Jinan: University of Jinan, 2008.
- [15] GB 50608—2010, 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范[S].
GB 50608—2010, Technical Code for Infrastructure Application of FRP Composites[S].
- [16] 邵永健,翁晓红,劳裕华.混凝土结构设计原理[M].2版.北京:北京大学出版社,2013.
SHAO Yong-jian, WENG Xiao-hong, LAO Yu-hua. Principle of Concrete Structure[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [17] 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):44-53.
ZHU Hong, DONG Zhi-qiang, 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): 44-53.
- [18] MARANAN G B, MANALO A C, BENMOKRANE B, et al. Evaluation of the Flexural Strength and Serviceability of Geopolymer Concrete Beams Reinforced with Glass-fibre-reinforced Polymer (GFRP) Bars[J]. Engineering Structures, 2015, 101: 529-541.
- [19] GOLDSTON M, REMENNIKOV A, SHEIKH M N. Experimental Investigation of the Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Under Static and Impact Loading [J]. Engineering Structures, 2016, 113: 220-232.
- [20] EL-NEMR A, AHMED E A, BARRIS C, et al. Bond-dependent Coefficient of Glass- and Carbon-FRP Bars in Normal- and High-strength Concretes [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 77-89.
- [21] KASSEM C, FARGHALY A S, 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): 682-695.
- [22] ELGABBAS F, VINCENT P, AHMED E A, et al. Experimental Testing of Basalt-fiber-reinforced Polymer Bars in Concrete Beams [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 91: 205-218.
- [23] MIAS C, TORRES L, TURON A, et al. Experimental Study of Immediate and Time-dependent Deflections of GFRP Reinforced Concrete Beams [J]. Composite Structures, 2013, 96(4): 279-285.
- [24] BARRIS C, TORRES L, TURON A, et al. An Experimental Study of the Flexural Behaviour of GFRP RC Beams and Comparison with Prediction Models [J]. Composite Structures, 2009, 91(3): 286-295.
- [25] YANG J M, MIN K H, SHIN H O, et al. Effect of Steel and Synthetic Fibers on Flexural Behavior of High-strength Concrete Beams Reinforced with FRP Bars [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43

- (3):1077-1086.
- [26] WANG H, BELARBI A. Flexural Behavior of Fiber-reinforced-concrete Beams Reinforced with FRP Rebars[J]. ACI Special Publication, 2005, 166: 1797-1800.
- [27] REFAI A E, ABED F, AL-RAHMANI A. Structural Performance and Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 518-529.
- [28] ISSA M S, METWALLY I M, ELZEINY S M. Influence of Fibers on Flexural Behavior and Ductility of Concrete Beams Reinforced with GFRP Rebars[J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1754-1763.
- [29] TOMLINSON D, FAM A. Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(2): 04014036.
- [30] RAFI M M, NADJAI A, ALI F, et al. Aspects of Behaviour of CFRP Reinforced Concrete Beams in Bending[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(3): 277-285.
- [31] LAU D, PAM H J. Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams[J]. Engineering Structures, 2010, 32(12): 3857-3865.
- [32] ALSAYED S H, AL-SALLOUM Y A, ALMUSALLAM T H. Performance of Glass Fiber Reinforced Plastic Bars as a Reinforcing Material for Concrete Structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2000, 31(6/7): 555-567.
- [33] RASHID M A, MANSUR M A, PARAMASIVAM P. Behaviour of Aramid Fiber-reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams Under Bending[J]. Journal of Composites for Construction, 2005, 9(9): 117-127.
- [34] 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 Jing-feng. Analysis on Flexural Behavior of Concrete Beam Reinforced with FRP Bars[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [35] 唐 协. 玻璃纤维(GFRP)筋混凝土构件正截面承载力设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- TANG Xie. Design Method Research on Head-on Cross-section Capacities of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.