

纤维增强复合材料筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算

彭 飞^{1,2}, 薛伟辰³

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为评估和校准现行规范中纤维增强复合材料(fiber-reinforced polymer, FRP)筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算公式, 系统收集了国内外FRP筋混凝土(FRP-RC)受弯构件裂缝宽度试验数据。基于若干筛选原则, 建立了包含111根FRP-RC受弯构件的数据库。通过对比最大裂缝宽度试验值和计算值, 评估了国内外3部常用规范的适用性。结果表明, 规范GB 50608—2010严重低估了裂缝宽度, 尤其低估了GFRP-RC和BFRP-RC构件的裂缝宽度; 相比之下, 规范CJJ/T 280—2018能较准确地预测裂缝宽度, 而规范ACI 440.1R-15高估了裂缝宽度。基于该数据库, 通过引入弹性模量比 E_t/E_s 修正了规范GB 50608—2010中的裂缝间纵向受拉筋应变不均匀系数 ψ , 并分别校准了3部设计规范中的FRP筋表面形态黏结特性系数。

关键词: 纤维增强复合材料筋; 混凝土受弯构件; 裂缝宽度; 数据库; 校准

中图分类号: TU377.94

文献标志码: A

Crack Width Formulas for Flexural Concrete Members Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars

PENG Fei^{1,2}, XUE Weichen³

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To evaluate and calibrate the maximum crack width formulas for flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars in current design standards, available literature on crack width tests of FRP reinforced concrete (RC) flexural members was extensively surveyed. After applying multiple filtering

criteria, a database including 111 FRP-RC flexural members was developed. Then, the database was used to evaluate the accuracy of the crack width provisions from three design guidelines by comparing the tested widths with predictions. It was determined that GB 50608—2010 highly underestimated the maximum crack width, especially for the GFRP-RC and BFRP-RC members. In contrast, CJJ/T 280—2018 was more predictive than the other guidelines, while ACI 440.1R-15 provided conservative predictions. Based on this database, modifications were made to the non-uniform strain coefficient formula for tensile FRP bars in GB 50608—2010 by introducing an elastic modulus ratio E_t/E_s . Furthermore, the bond-dependent coefficients in the three design guidelines were calibrated to account for the effect of surface treatment.

Key words: fiber-reinforced polymer (FRP) bar; flexural concrete member; crack width; experimental database; calibration

钢筋锈蚀降低混凝土结构的安全性、适用性和耐久性。调研结果表明, 我国年腐蚀成本约占国内生产总值的3.34%, 其中钢筋锈蚀造成的损失占相当大的比例^[1]。2021年美国土木工程师学会发布的调查报告指出, 该国7.5%的桥梁因锈蚀而处于结构损伤状态, 总修复费用预计约1250亿美元^[2]。如何避免混凝土结构中的钢筋锈蚀已成为亟待解决的难题。

国内外科学研究和工程实践表明, 采用纤维增强复合材料(fiber-reinforced polymer, FRP)筋代替钢筋能有效地解决混凝土结构锈蚀问题^[3-4]。总体

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(52008165, 52130806); 湖南省自然科学基金(2021JJ40082)

第一作者: 彭 飞(1990—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为FRP筋混凝土结构和超高性能混凝土结构。
E-mail: pengf@hnu.edu.cn

通信作者: 薛伟辰(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为现代预应力结构、预制混凝土结构、FRP在土木工程的应用。E-mail: xuewc@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

上,FRP筋具有抗腐蚀性能优良、轻质高强、线弹性力学特性以及弹性模量较低等特点。目前工程中常用的FRP筋包括玻璃纤维复合材料(GFRP)筋、玄武岩纤维复合材料(BFRP)筋、碳纤维复合材料(CFRP)筋和芳纶纤维复合材料(AFRP)筋等^[4]。为增强FRP筋与混凝土之间的黏结性能,通常对FRP筋表面进行粗糙处理,常见的表面形态包括黏砂、黏砂附纤维缠绕、螺纹和带肋等^[5],如图1所示。

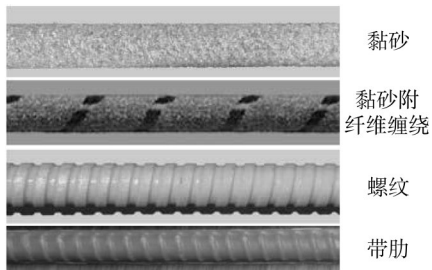


图1 典型的FRP筋表面形态^[5]

Fig.1 Typical surface morphology of FRP bars^[5]

近50年来,国内外学者较系统地开展了FRP筋混凝土(FRP-RC)构件在正常使用荷载作用下的受力性能试验研究^[6-13]。研究表明,FRP-RC构件的裂缝宽度大于同等配筋率的钢筋混凝土构件。在正常使用荷载下,钢筋混凝土构件中的受拉钢筋处于弹性阶段,其应变低于屈服应变。由于目前工程中常用的FRP筋的弹性模量通常低于钢筋,正常使用荷载作用下FRP-RC构件中的受拉FRP筋应变通常可超过0.003^[8],远大于钢筋屈服应变。此外,由于筋表面形态的差异,裂缝间的混凝土协助FRP筋受拉的作用低于其协助钢筋受拉的作用^[12]。因此,钢筋混凝土构件的裂缝宽度计算方法不适用于FRP-RC构件。

FRP筋具有优良的防腐蚀性能,裂缝宽度限值通常取决于美学和安全感需求。我国规范GB 50608—2010^[14]和CJJ/T 280—2018^[15]借鉴美国规范ACI 440.1R-15^[16]规定FRP-RC构件的最大裂缝宽度限值为0.5mm,而加拿大规范CSA S806-12^[17]规定其为0.7mm,均远大于钢筋混凝土构件的裂缝宽度限值(通常为0.2mm)。需要提到的是,这些规范中的裂缝宽度计算公式都是基于有限或特定参数构件的试验数据,并考虑FRP筋和钢筋与混凝土之间黏结性能的差异,通过修正钢筋混凝土构件的裂缝宽度计算公式得到的。对于不同纤维类型和表面形态的FRP筋,这些公式的适用性值得进一步研究。因此一个可靠、完备的数据库对评估

和发展FRP-RC受弯构件裂缝宽度计算公式非常重要。

为建立FRP-RC构件裂缝宽度数据库,系统收集并筛选国内外已有试验数据,通过对比试验结果与计算结果,评估国内外3部设计规范中裂缝宽度计算公式的准确性,并分别校准最大裂缝宽度计算公式。本文校准的裂缝宽度计算公式见国家标准《纤维增强复合材料工程应用技术标准》^[18]。

1 已有的裂缝宽度计算公式

1.1 国家标准GB 50608—2010

通过修正规范GB 50010—2002^[19]中的受拉纵筋应力计算公式和相对黏结特性系数,规范GB 50608—2010给出了FRP-RC受弯构件的最大裂缝宽度计算公式^[14]。

$$w = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_f}{E_f} (1.9c_f + 0.08 \frac{d_c}{\rho_{te}}) \quad (1)$$

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

$$d_c = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \quad (3)$$

$$\rho_{te} = \frac{A_f}{A_{te}} \quad (4)$$

$$\sigma_f = \frac{M_q}{0.9A_f h_{of}} \quad (5)$$

式中: w 为最大裂缝宽度; α_{cr} 为构件受力特征系数; σ_f 为FRP筋应力; E_f 为FRP筋弹性模量; c_f 为最外层纵向受拉FRP筋外边缘至受拉区底边的距离; d_c 为FRP筋等效直径; ρ_{te} 为按 A_{te} 计算的纵向受拉FRP筋的配筋率; ψ 为裂缝间纵向受拉FRP筋应变不均匀系数; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值; n_i 为受拉区第 i 种FRP筋的根数; v_i 为受拉区FRP筋的相对黏结特性系数,取0.7; d_i 为受拉区第 i 种FRP筋的公称直径; A_f 为FRP筋截面面积; A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积; M_q 为按准永久组合计算的弯矩值; h_{of} 为截面有效高度。构件受力特征系数 α_{cr} 按式(6)计算:

$$\alpha_{cr} = \alpha_c \tau_l \tau_s \quad (6)$$

式中: α_c 为反映裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度影响的系数,取 $\alpha_c=0.85$; τ_l 为荷载效应长期效应裂缝扩大系数; τ_s 为荷载短期效应裂缝扩大系数,对于受弯构件,取 $\tau_s=1.66$ 。

1.2 行业标准CJJ/T 280—2018

通过修正规范JTG D62—2004^[20]中的钢筋混凝土

土梁裂缝宽度计算公式,规范 CJJ/T 280—2018 规定 FRP-RC 受弯构件的裂缝宽度计算方法为^[15]

$$w = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_f}{E_f} \left(\frac{c_f + d_c}{0.28 + 10\rho} \right) \quad (7)$$

$$\rho = \frac{A_f}{bh_{of} + (b_f - b)h_f} \quad (8)$$

式中: C_1 为 FRP 筋表面形状系数,取 $C_1=1.4$; C_2 为长期效应影响系数; C_3 为与构件受力性质相关的系数,板式受弯构件 $C_3=1.15$,其他受弯构件 $C_3=1.0$; ρ 为纵向受拉 FRP 筋配筋率; b 为构件腹板宽度; b_f 为构件受拉翼缘宽度; h_f 为构件受拉翼缘高度。参照规范 GB 50608—2010,等效直径 d_c 按式(3)计算。

1.3 美国规范 ACI 440.1R-15

通过引入受拉 FRP 筋黏结系数 k_b ,美国规范 ACI 440.1R-15^[16]修正了 Frosch 提出的钢筋混凝土裂缝宽度计算公式^[21],并给出了短期荷载作用下 FRP-RC 受弯构件的裂缝宽度计算公式为

$$w = 2 \frac{\sigma_f}{E_f} \frac{h_2}{h_1} k_b \sqrt{c_f^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (9)$$

式中: k_b 为黏结系数,取 $k_b=1.4$; s 为纵筋间距; h_1 为中和轴至纵向受拉 FRP 筋重心的距离; h_2 为中和轴至构件受拉区边缘的距离。在进行 FRP-RC 受弯构件设计时,规范 ACI 440.1R-15 基于式(9)通过限定纵筋间距 s 和正常使用极限状态下纵向受拉 FRP 筋

的应力 σ_f 来控制裂缝宽度。

2 FRP-RC 受弯构件裂缝宽度数据库

从已有文献中系统收集了 FRP-RC 受弯构件的试验数据。为建立可靠的裂缝宽度数据库,采用了如下原则对数据进行了筛选:①仅考虑矩形、T 形和 I 形截面构件;②由于现行规范规定的 FRP-RC 构件最大裂缝宽度在 0.5~0.7 mm 之间,若一根构件有多个裂缝宽度数据,则选择宽度在 0.5~0.7 mm 之间的数据;③剔除同时配置钢筋和 FRP 筋的试件;④剔除关键参数(如实测材性、筋表面形态)缺失的试件。

基于上述筛选原则,建立了包含 111 根 FRP-RC 受弯构件的裂缝宽度数据库。表 1 列出了每根试件的若干关键参数。其中,GFRP-RC、BFRP-RC、CFRP-RC 和 AFRP-RC 构件分别为 76 根、19 根、14 根和 2 根;FRP 筋表面形态为黏砂、带肋和螺纹的试件数量分别为 70 根、36 根和 5 根。图 2 表示实测裂缝宽度与相应的正常使用阶段的弯矩值 M_s 与极限抗弯承载力 M_u 的比值之间的关系。在筛选得到的 111 根梁中,共 86 根梁(占 77.5%)的 M_s 不超过 $0.3M_u$,其中 71 根梁的 M_s 为 $0.3M_u$ 。

表 1 裂缝宽度数据库

Tab.1 Database of experimental crack width

文献	试件编号	截面尺寸		f_c /MPa	受拉 FRP 筋			w	
		b /mm	h /mm		类型	表面形态	ρ_f /%	实测 w /mm	测量位置
文献[8]	N2#13G2	200	400	33.5	G	SC	0.38	1.03	侧面
	N3#13G1	200	400	33.5	G	SC	0.56	0.78	侧面
	H2#13G2	200	400	59.1	G	SC	0.38	0.83	侧面
	H3#13G1	200	400	59.1	G	SC	0.56	0.55	侧面
	N5#15G2	200	400	29.0	G	SC	1.55	0.31	侧面
	N6#15G1	200	400	33.5	G	SC	1.87	0.18	侧面
	H5#15G2	200	400	73.4	G	SC	1.55	0.26	侧面
	H6#15G1	200	400	73.4	G	SC	1.87	0.45	侧面
	N5#15G3	200	400	33.8	G	GR	1.55	0.40	侧面
	N2#25G3	200	400	33.8	G	GR	1.51	0.45	侧面
	H5#15G3	200	400	73.4	G	GR	1.55	0.62	侧面
	H2#25G3	200	400	73.4	G	GR	1.51	0.54	侧面
文献[22]	N2#15G1	200	400	38.9	G	SC	0.58	0.50	侧面
	N3#10C1	200	400	44.7	C	SC	0.31	0.62	侧面
	N3#13C1	200	400	44.7	C	SC	0.56	0.45	侧面
	H3#20G2	200	400	81.5	G	SC	1.25	0.51	侧面
	H2#25G1	200	400	81.5	G	SC	1.51	0.46	侧面
	H2#25G2	200	400	81.5	G	SC	1.51	0.37	侧面
文献[23]	H3#10C1	200	400	76.5	C	SC	0.31	0.56	侧面
	H3#13C1	200	400	76.5	C	SC	0.56	0.46	侧面
	5#13G1	200	400	39.0	G	SC	0.94	0.46	侧面
	3#15G1	200	400	39.0	G	SC	0.87	0.85	侧面

续表

文献	试件编号	截面尺寸		f_c /MPa	受拉FRP筋			w	
		b /mm	h /mm		类型	表面形态	ρ_t /%	实测 w /mm	测量位置
	4#15G1	200	400	39.0	G	SC	1.16	0.41	侧面
	2#15G2	200	400	29.0	G	SC	0.58	1.18	侧面
	2#15G3	200	400	33.8	G	GR	0.58	0.63	侧面
	2#20G1	200	400	39.0	G	SC	0.84	0.73	侧面
	3#20G1	200	400	43.1	G	SC	1.25	0.51	侧面
	2#22G1	200	400	39.0	G	SC	1.14	0.51	侧面
	3#20G2	200	400	48.1	G	SC	1.25	0.66	侧面
	2#25G1	200	400	48.1	G	SC	1.51	0.55	侧面
	2#25G2	200	400	48.1	G	SC	1.51	0.36	侧面
文献[24]	B-2#10 mm	200	300	42.5	B	SC	0.31	1.44	侧面
	B-4#10 mm	200	300	42.5	B	SC	0.66	1.20	侧面
	B-2#12 mm	200	300	42.5	B	SC	0.44	1.36	侧面
	B-4#12 mm	200	300	42.5	B	SC	0.95	0.78	侧面
	B-2#16 mm	200	300	42.5	B	SC	0.79	0.81	侧面
	B-4#16 mm	200	300	42.5	B	SC	1.72	0.69	侧面
文献[25]	B-3#8 mm	200	300	52.7	B	RI	0.29	0.62	侧面
	B-5#8 mm	200	300	52.7	B	RI	0.41	0.63	侧面
	B-2#12 mm	200	300	44.7	B	RI	0.44	0.50	侧面
	B-3#12 mm	200	300	44.7	B	RI	0.66	0.47	侧面
	B-2#16 mm	200	300	50.8	B	RI	0.79	0.44	侧面
	B-3#16 mm	200	300	50.8	B	RI	1.19	0.37	侧面
文献[26]	C1-4	200	300	40.4	C	SC	0.60	0.56	侧面
	C1-6	200	300	39.3	C	SC	0.90	0.37	侧面
	C1-8	200	300	39.3	C	SC	1.21	0.27	侧面
	C2-4	200	300	39.9	C	SC	0.54	0.57	侧面
	C2-6	200	300	40.8	C	SC	0.81	0.31	侧面
	C2-8	200	300	40.8	C	SC	1.08	0.25	侧面
	G1-6	200	300	39.1	G	SC	1.67	0.47	侧面
	G1-8	200	300	39.1	G	SC	2.22	0.38	侧面
	G2-6	200	300	39.1	G	SC	1.45	0.51	侧面
	G2-8	200	300	39.1	G	SC	1.94	0.42	侧面
	AR-6	200	300	39.1	A	SC	0.90	0.62	侧面
	AR-8	200	300	39.1	A	SC	1.21	0.53	侧面
文献[27]	N_L1_G12a	140	190	27.7	G	RI	0.99	0.20	侧面
	N_L1_G12b	140	190	27.7	G	RI	0.99	0.20	侧面
	N_L2_G12a	140	190	27.7	G	RI	0.99	0.25	侧面
	N_L2_G12b	140	190	27.7	G	RI	0.99	0.20	侧面
	N_L1_G16a	140	190	27.7	G	RI	1.77	0.15	侧面
	N_L1_G16b	140	190	27.7	G	RI	1.77	0.10	侧面
	N_L2_G16a	140	190	27.7	G	RI	1.77	0.15	侧面
	N_L2_G16b	140	190	27.7	G	RI	1.77	0.10	侧面
文献[10]	B1-35-12	200	300	35.0	G	RI	0.53	0.50	侧面
	B2-35-16	200	300	35.0	G	RI	0.94	0.50	侧面
	B3-35-20	200	300	35.0	G	RI	1.46	0.50	侧面
	B4-35-25	200	300	35.0	G	RI	2.27	0.50	侧面
	B5-65-12	200	300	65.0	G	RI	0.52	0.50	侧面
	B6-65-16	200	300	65.0	G	RI	0.92	0.50	侧面
	B7-65-20	200	300	65.0	G	RI	1.43	0.50	侧面
	B8-65-25	200	300	65.0	G	RI	2.05	0.50	侧面
文献[28]	G1-216-25-150	180	240	33.1	G	RI	1.08	0.30	侧面
	G1-216-25-250	180	240	33.1	G	RI	1.08	0.33	侧面
	G1-216-25-000	180	240	33.1	G	RI	1.08	0.29	侧面
	G1-212-40-150	180	240	33.1	G	RI	0.65	0.71	侧面
	G1-212-55-150	180	240	33.1	G	RI	0.70	0.68	侧面
	G2-213-25-150	180	240	34.3	G	SC-HW	0.71	0.67	侧面
	G2-213-25-000	180	240	34.3	G	SC-HW	0.71	0.70	侧面
	G2-310-25-000	180	240	34.3	G	SC-HW	0.62	0.62	侧面

续表

文献	试件编号	截面尺寸		f_c /MPa	受拉FRP筋			w	
		b /mm	h /mm		类型	表面形态	ρ_t /%	实测 w /mm	测量位置
	G2-213-25-150G	180	240	34.3	G	SC-HW	0.71	0.63	侧面
	G2-213-25-250G	180	240	34.3	G	SC-HW	0.71	0.63	侧面
	G2-216-25-150	180	240	34.3	G	SC-HW	1.08	0.48	侧面
	G2-313-25-150	180	240	34.3	G	SC-HW	1.06	0.39	侧面
文献[29]	C4-G8-P000	250	500	64.7	G	SC	2.30	0.44	侧面
	B6	152	152	45.9	C	SC	0.33	0.73	
文献[30]	B9	152	152	53.3	C	SC	0.53	0.61	
	B12	152	152	43.9	C	SC	0.76	0.48	
	P4C	178	229	48.0	C	SC-HW	0.67	0.60	侧面
文献[31]	P4G	178	229	48.0	G	SC-HW	2.28	0.49	侧面
	P8G	178	229	48.0	G	SC-HW	3.39	0.45	侧面
	G1	600	300	40.8	G	SC	0.77	0.50	底部
文献[32]	G1-ST	600	300	45.9	G	SC	0.77	0.50	底部
	G2	600	300	40.8	G	SC	1.53	0.31	底部
	G2-ST	600	300	45.9	G	SC	1.53	0.31	底部
	B1V5	200	300	29.0	G	SC	0.76	0.95	侧面
	B2V5	200	300	29.0	G	SC	0.76	0.77	侧面
	B3V5	200	300	29.0	G	SC	0.76	0.89	侧面
	B4V5	200	300	29.0	G	SC	0.76	0.98	侧面
	B5V5	200	300	29.0	G	SC	0.76	0.90	侧面
文献[33]	BA5	200	300	32.0	G	SC-HW	0.76	1.20	侧面
	BV6	200	300	32.0	G	SC	1.15	0.99	侧面
	BA6	200	300	32.0	G	SC-HW	1.15	1.02	侧面
	B38	200	300	35.0	G	SC	0.76	0.69	侧面
	B50	200	300	35.0	G	SC	0.79	1.10	侧面
	SA-B10-2	125	200	41.4	B	SC	0.72	0.37	侧面
	R-B10-1	125	200	41.4	B	RI	0.72	0.39	侧面
	R-B10-2	125	200	41.4	B	RI	0.72	0.46	侧面
文献[9]	SA-S6-1	300	75	38.6	B	SC	0.57	0.40	侧面
	SA-S10-1	300	75	34.6	B	SC	1.57	0.18	侧面
	R-S10-1	300	75	38.1	B	RI	1.57	0.16	侧面
	R-S12-1	300	75	38.1	B	RI	2.26	0.16	侧面

注:G指GFRP; B指BFRP; C指CFRP; A指AFRP; SC指黏砂; SC-HW指黏砂附纤维缠绕; RI指带肋; GR指螺纹; ρ_t 为FRP筋配筋率。

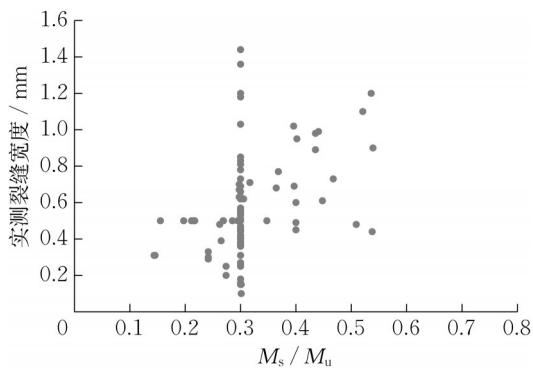


图2 裂缝宽度与荷载水平

Fig. 2 Crack width versus load level

需提到的是,FRP-RC构件的裂缝宽度限值通常取决于美学和安全感的要求,现行规范规定的限值通常是指构件受拉边缘处的裂缝宽度^[16-17]。假定

裂缝宽度沿截面高度线性分布,得到受拉边缘处和受拉纵筋合力点处裂缝宽度之间的关系^[13]为

$$w_{bot} = w_{side} \left(\frac{h - x_0}{h_t - x_0} \right) \quad (10)$$

式中: w_{bot} 为受拉边缘处的裂缝宽度; w_{side} 为受拉纵筋合力点处的裂缝宽度; h 为截面高度; h_t 为受拉纵筋到构件受压边缘的距离; x_0 为中和轴到受压边缘的距离。

3 裂缝宽度计算公式评估与校准

3.1 裂缝宽度计算公式评估

对比上述3部规范的裂缝宽度计算值与试验值。所有的安全系数取为1.0,且不考虑长期荷载效应的影响。表2列出了最大裂缝宽度试验值与计算值之比(w_{exp}/w_{pre})的均值和标准差。此外,图3对比

了3种方法的计算值和试验值,结果表明:

(1)总体上,规范GB 50608—2010低估了FRP-RC构件的裂缝宽度,且计算结果离散性较大。根据该规范得到的 $w_{\text{exp}}/w_{\text{pre}}$ 的均值为1.55,标准差为0.68。对于CFRP-RC构件,计算值与试验值吻合良好;对于GFRP-RC和BFRP-RC构件,根据该规范得到的 $w_{\text{exp}}/w_{\text{pre}}$ 的均值分别为1.61和1.72。

(2)规范CJJ/T 280—2018能偏安全地预测

FRP-RC构件的裂缝宽度,其 $w_{\text{exp}}/w_{\text{pre}}$ 的均值和标准差分别为0.94和0.24。除AFRP筋(仅2根试件)外,对于不同类型的FRP筋,该规范的计算结果相差不大。

(3)规范ACI 440.1R-15严重高估了FRP-RC构件的裂缝宽度,根据该规范得到的 $w_{\text{exp}}/w_{\text{pre}}$ 的均值和标准差分别为0.83和0.20。此外,对于不同类型的FRP筋,该规范的计算结果相差不大。

表2 裂缝宽度计算结果与试验结果对比

Tab.2 Comparison of crack width with experimental results

规范	GFRP-RC(76根)		BFRP-RC(19根)		CFRP-RC(14根)		AFRP-RC(2根)		总计	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
GB 50608—2010	1.61	0.74	1.72	0.49	1.00	0.23	1.48	0.26	1.55	0.68
CJJ/T 280—2018	0.94	0.23	0.95	0.28	0.94	0.18	1.11	0.13	0.94	0.24
ACI 440.1R-15	0.83	0.20	0.81	0.24	0.85	0.13	1.06	0.15	0.83	0.20

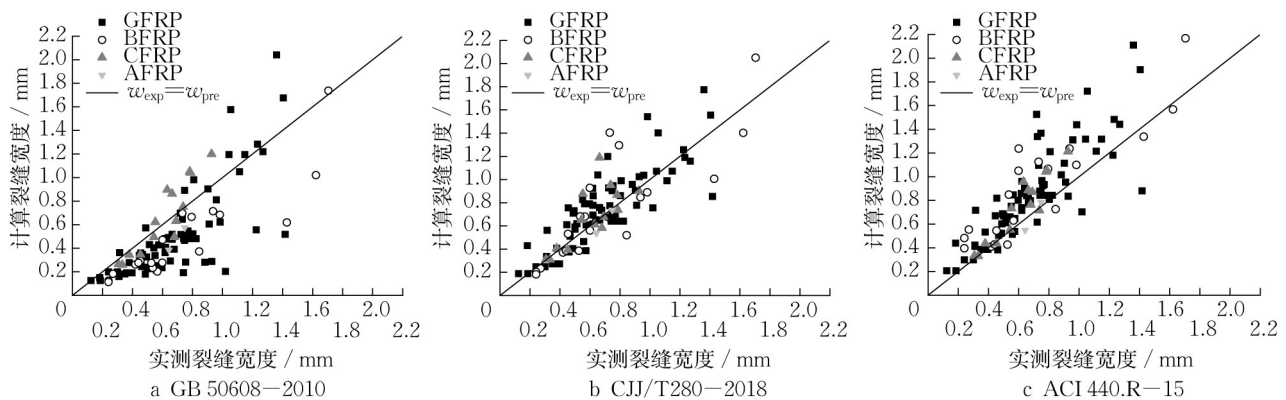


图3 计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of predicted crack width and experimental result

3.2 裂缝宽度计算公式校准

规范GB 50608—2010总体上低估了FRP-RC构件的裂缝宽度,且当纵筋为弹性模量降低的GFRP筋或BFRP筋时,规范GB 50608—2010的计算结果尤其偏于不安全。这主要是由于GFRP和BFRP的弹性模量通常较低(约为钢筋弹性模量的1/5~1/3),在相同应力水平下,GFRP和BFRP筋的应变远大于钢筋的应变。因此,基于钢筋混凝土构件试验结果得到的裂缝间纵向受拉筋应变不均匀系数 ψ ,即式(2),高估了GFRP-RC和BFRP-RC构件

中裂缝间的混凝土协助纵筋受拉的作用。因此,通过引入弹性模量比 E_f/E_s 对式(2)进行了修正,为

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_f} \frac{E_f}{E_s} \quad (11)$$

式中: E_s 为钢筋的弹性模量,取200 GPa。

当黏结特性系数 v_i 在0.7~1.0之间变化时,表3列出了不同FRP筋表面形态下的裂缝宽度试验值与式(11)计算值之比 $w_{\text{exp}}/w_{\text{pre}}$ 的均值与标准差。对于黏砂或带肋的FRP筋,建议式(3)中的相对黏结特性系数 v_i 取1.0;对于螺纹的FRP筋,由于相关试

表3 FRP筋相对黏结特性系数校准(规范GB 50608—2010)

Tab.3 Calibration of relative bond-dependent coefficient of FRP bars(GB 50608—2010)

表面形态	$v_i = 0.7$		$v_i = 0.8$		$v_i = 0.9$		$v_i = 1.0$	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
黏砂(70根)	0.78	0.18	0.84	0.19	0.89	0.20	0.94	0.21
带肋(36根)	0.81	0.18	0.87	0.19	0.93	0.20	0.98	0.21
螺纹(5根)	0.96	0.23	1.03	0.24	1.09	0.24	1.13	0.25

验数据较少,建议 v_i 取0.70。图4给出了根据校准前公式和校准后公式得到的 w_{exp}/w_{pre} 的柱状图,可知校准后的公式能准确预测FRP-RC受弯构件的裂

缝宽度, w_{exp}/w_{pre} 的均值和标准差分别为0.96和0.21。

对规范CJJ/T 280—2018中FRP筋相对黏结特

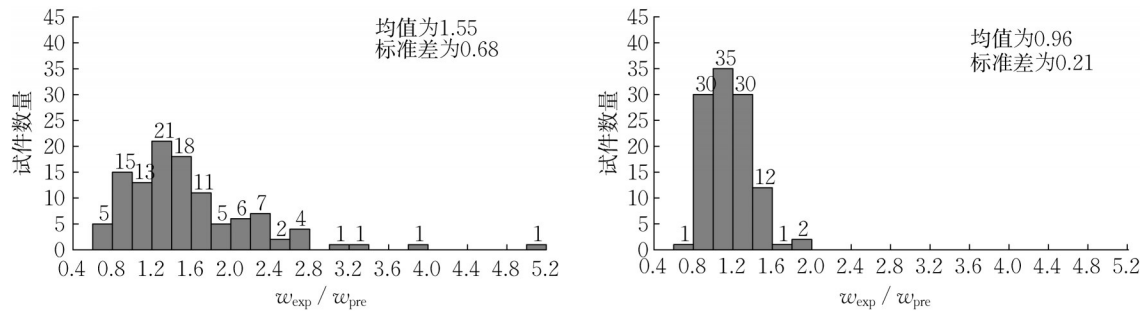


图 4 裂缝宽度试验值与计算值之比分布情况

Fig. 4 Distribution of experimental-to-predicted crack width ratio

性系数 v_i 和规范ACI 440.1R-15中的黏结系数 k_b 进行校准。表4和表5分别列出了校准后的系数 v_i 和 k_b 。

表 4 校准后的FRP筋相对黏结系数(规范CJJ/T 280—2018)

Tab.4 Calibrated relative bond-dependent coefficient of FRP bar (CJJ/T 280—2018)

黏砂	带肋	螺纹
0.9	0.9	0.7

表 5 校准后的FRP筋黏结系数(规范ACI 440)

Tab.5 Calibrated bond-dependent coefficient of FRP bars—ACI 440

黏砂	带肋	螺纹
1.2	1.2	1.4

4 结论

系统收集了FRP-RC受弯构件的裂缝宽度试验数据,经筛选建立了相应的数据库。在此基础上,评估和校准了规范GB 50608—2010、CJJ/T 280—2018和ACI 440.1R-15中的裂缝宽度计算公式。基于以上研究得到如下结论:

(1)规范GB 50608—2010低估了FRP-RC受弯构件的裂缝宽度,尤其低估了GFRP-RC和BFRP-RC构件的裂缝宽度。总体上,根据该规范得到的 w_{exp}/w_{pre} 的均值和标准差分别为1.55和0.68。

(2)规范ACI 440.1R-15高估了FRP-RC构件的裂缝宽度,相比之下规范CJJ/T 280—2018能较准确地预测裂缝宽度。根据规范ACI 440.1R-15的 w_{exp}/w_{pre} 的均值和标准差分别为0.83和0.20,而根

据规范CJJ/T 280—2018得到的 w_{exp}/w_{pre} 的均值和标准差分别为0.94和0.24。

(3)通过引入弹性模量比 E_i/E_s 修正了GB 50608—2010中的裂缝间纵向受拉筋应变不均匀系数 ψ ,并建议表面形态为黏砂或带肋的FRP筋,相对黏结特性系数 v_i 取1.0,表面形态为螺纹的FRP筋, v_i 取0.7。

(4)对于规范CJJ/T 280—2018,当FRP筋的表面形态为黏砂或带肋时,建议相对黏结特性系数 v_i 取0.9;当FRP筋的表面形态为螺纹时,建议 v_i 取0.7。

(5)对于规范ACI 440.1R-15,当FRP筋的表面形态为黏砂或带肋时,建议黏结系数 k_b 取1.2;当FRP筋的表面形态为螺纹时,建议 k_b 取1.4。

作者贡献声明:

彭 飞:数据整理、图表编辑与论文撰写。
薛伟辰:总体方案设计。

参考文献:

- [1] HOU B, LI X, MA X, *et al.* The cost of corrosion in China[J]. NPJ Materials Degradation, 2017, 1(1):1.
- [2] American Society of Civil Engineers. Report card for America's infrastructure[R]. Reston: ASCE, 2021.
- [3] 彭飞, 薛伟辰. FRP筋混凝土T形和矩形截面梁抗弯承载力计算方法[J]. 工程力学, 2022, 39(2): 76.
PENG Fei, XUE Weichen. Method of Calculating the flexural strength of FRP reinforced concrete T-shaped and rectangular beams [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(2): 76.
- [4] 彭飞, 薛伟辰. FRP筋混凝土偏压柱承载力计算方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10):147.
PENG Fei, XUE Weichen. Calculation approach of ultimate

- capacity of FRP reinforced concrete columns under eccentric compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10):147.
- [5] NIEWELS J. Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung [D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2008.
- [6] 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.
- [7] 薛伟辰, 康清梁. 纤维塑料筋混凝土梁受力性能的试验研究 [J]. *工业建筑*, 1999, 29(12):8.
XUE Weichen, KANG Qingliang. Experimental study on behaviors of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastics bars[J]. *Industrial Construction*, 1999, 29(12):8.
- [8] 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.
- [9] SHAMASS R, CASHELL K A. Experimental investigation into the flexural behaviour of basalt FRP reinforced concrete members[J]. *Engineering Structures*, 2020, 220:110950.
- [10] ABDELKARIM O I, AHMED E A, MOHAMED H M, *et al.* Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars [J]. *Engineering Structures*, 2019, 186: 282.
- [11] 杨剑, 方志. CFRP 配筋活性粉末混凝土梁延性和变形性能 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015(42): 14.
YANG Jian, FANG Zhi. Ductility and deformability of RPC beams prestressed with CFRP tendons [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015(42): 14.
- [12] 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*, 2017, 50(10): 1.
- [13] SHIELD C, BROWN V, BAKIS C E, *et al.* A Recalibration of the crack width bond-dependent coefficient for GFRP-reinforced concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(4): 04019020.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites:GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Plan Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料钢筋混凝土桥梁技术规程:CJJ/T 280—2018 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for concrete bridge with FRP reinforcements: CJJ/T 280—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [16] ACI Committee 440. ACI 440.1R-15 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [S]. Farmington Hills, : American Concrete Institute, 2015.
- [17] Canadian Standards Association. CSA S806-12 Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers[S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2012.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准: GB 50608—2020 [S]. 北京:中国计划出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for fiber reinforced polymer (FRP) in construction: GB 50608—2020 [S]. Beijing: China Plan Press, 2020.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D62—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [21] FROSCHE R J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(3): 437.
- [22] 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.
- [23] EL-NEMR A, AHMED E A, EL-SAFETY A, *et al.* Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 606.
- [24] ELGABBAS F, VINCENT P, AHMED E A, *et al.* Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams[J]. *Composites*, 2016, 91: 205.
- [25] 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): 04016098.
- [26] 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.