

FRP 筋混凝土梁正截面受弯承载力模型分析

孙艺嘉, 吴 涛, 王 征, 刘 喜

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 结合国内外 328 组 FRP 筋混凝土梁受弯试验数据, 系统分析了我国规范(GB 50608-2010)、美国规范(ACI 440.1R-15)、加拿大规范(ISIS manual 2007)和意大利规范(CNR-DT 203/2006)的承载力计算模型, 对比了各国规范计算结果的准确性和离散程度. 通过对受压破坏试件参数 ρ_f/ρ_{fb} 和 c_b/x_{exp} 进行回归分析, 建立了等效矩形受压区高度 x 的经验公式, 改进了受压破坏 FRP 筋梁承载力计算公式, 并给出了使计算结果具有 95% 保证率的强度修正系数. 结果表明: 在 $\rho_f < \rho_{fb}$ 和 $\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.5\rho_{fb}$ 两种情况下, 各国规范计算值与试验值吻合良好; 当 $1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$ 时, 各国规范计算值均偏保守. 与以上规范计算公式相比, 该文建议公式的计算值与试验值更为接近.

关键词: 规范对比; FRP 筋; 混凝土梁; 受弯承载力计算公式; 修正系数

中图分类号: TU377.9⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0083-08

Analysis on the flexural capacity model of FRP-reinforced concrete beams

SUN Yijia, WU Tao, WANG Zheng, LIU Xi

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

Abstract: Collected and analyzed are 328 testing results of flexural capacity of FRP-reinforced concrete beams. The results were employed to assess the accuracy and dispersion degree of the current design formulas in GB 50608, ACI 440.1R, ISIS manual and CNR-DT 203. Regression analysis of ρ_f/ρ_{fb} and c_b/x_{exp} for specimens controlled by compression failure was carried out and the formula of depth of equivalent rectangular stress block x was obtained. The equation of flexural capacity of FRP-reinforced concrete beams controlled by compression failure was revised and the strength correction coefficient with 95% guarantee rate was proposed. The results showed that when $\rho_f < 1.5\rho_{fb}$, the calculation results agreed well with the test results; and when $1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$, however, the average predictions by specifications were all higher than test values by more than 20%. Compared with the standards, the proposed formulas yield estimations closer than the test results.

Key words: code comparison; FRP bars; concrete beam; flexural capacity calculation formula; correction factor

纤维增强复合材料(Fiber reinforced polymer, FRP)具有轻质高强、抗电磁、抗腐蚀等优点, 采用 FRP 筋替代钢筋能够解决钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性问题. 自 20 世纪九十年代起, 美国、加拿大、意大利、中国等国家陆续颁布了 FRP 筋混凝土结构设计规范^[1-4]. 目前, 各国规范对 FRP 筋混凝土梁正截面承载力计算的简化模型基本相同, 美、加、意规范的计算公式主要根据受力平衡及应变协调条件进行理论推导得到,

我国规范采用试验数据统计分析与理论模型相结合的方式, 进一步简化了 FRP 筋梁受弯承载力的计算.

本文结合国内外 328 组 FRP 筋梁受弯承载力试验数据对我国规范(GB 50608-2010)、美国规范(ACI 440.1R-15)、加拿大规范(ISIS manual 2007)和意大利规范(CNR-DT 203/2006)的承载力计算模型进行比较. 基于现有模型简化方法及受压破坏试件试验结果, 对参数 ρ_f/ρ_{fb} 和 c_b/x_{exp} 进行

拟合,建立了等效矩形受压区高度 x 的经验公式,改进了受压破坏 FRP 筋梁正截面受弯承载力计算公式,并提出了适用于本文建议公式的强度修正系数。

1 各国规范计算模型简介

1.1 模型简化

各国对于受弯承载力的计算基于以下假设:

(1) 截面应变保持平面;(2) 不考虑混凝土的抗拉强度;(3) FRP 筋被拉断前应力-应变关系为线弹性;(4) FRP 筋与混凝土之间粘结性能良好。混凝土的应力-应变关系参照本国的混凝土规范。

根据以上假定,各国规范对 FRP 筋混凝土梁正截面受力的简化方法基本相同,参照本国混凝土规范对混凝土应力-应变关系的规定,将压区混凝土应力曲线图等效成为矩形应力图,见图 1。

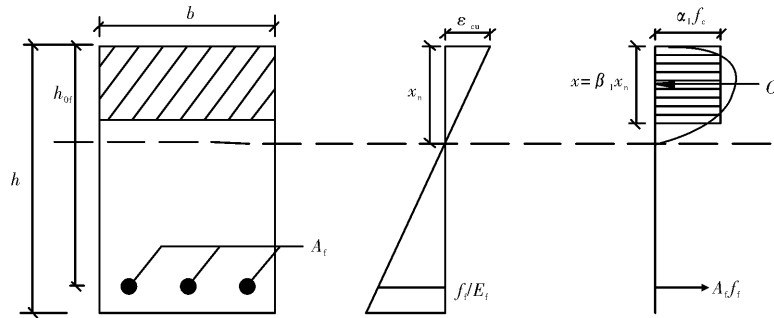


图 1 FRP 筋混凝土梁正截面应力-应变分布

Fig. 1 Stress and strain distribution of FRP-RC beams

1.2 计算公式

按照配筋率对 FRP 筋受弯构件的破坏模式进行分类,定义纵向受拉 FRP 筋达到设计强度与受压区混凝土破坏同时发生的配筋率为平衡配筋率 ρ_{fb} ,计算公式见表 1。认为当 $\rho_f > \rho_{fb}$,试件发生混凝土压碎破坏,简称受压破坏,而 $\rho_f < \rho_{fb}$ 时,试件发生 FRP 筋拉断破坏,简称受拉破坏。然而,大量试验研究表明,当 ρ_f 高于 ρ_{fb} 一定范围内,构件仍有可能发生受拉破坏,因此 GB 50608 将 $\rho_f = 1.5\rho_{fb}$ 作为 FRP 筋有效设计应力计算公式的分段点,而 ACI 440.1R 规定 $\rho_f > 1.4\rho_{fb}$ 时采用受压破坏承载力公式进行设计。

ACI 440.1R、ISIS 和 CNR-DT 203 给出的 FRP 筋混凝土梁受拉、受压破坏正截面承载力计算公式基本相同,均根据受力平衡及应变协调条件进行理论推导得到。其中 ACI 440.1R 受拉破坏计算公式采用界限受压区高度代替计算受压区高度,使计算简化且结果偏安全。GB 50608 结合理论模型及对试验数据的统计分析,当 $\rho_f \leq \rho_{fb}$ 时,将 FRP 筋受弯构件内力臂系数 γ_f 修正为 0.9;当 $\rho_f > \rho_{fb}$ 时,以 $\rho_f = 1.5\rho_{fb}$ 为分界点分段拟合试验设计参

数,建立了 FRP 筋有效设计应力值 f_{fe} 的经验表达式。

2 试验值与规范计算值比较

2.1 试验数据统计

本文统计了 328 组 FRP 筋混凝土梁正截面受弯承载力试验数据,考虑构件截面宽度 b ,有效高度 h_{0f} ,混凝土强度 f'_c 、FRP 筋抗拉强度 f_{fu} 、弹性模量 E_f 及纵筋配筋率 ρ_f 、配筋率与平衡配筋率之比 ρ_f/ρ_{fb} 等影响因素,对其进行统一整理,见表 2。

2.2 对比结果分析

根据我国《混凝土结构设计规范》和欧洲模式规范^[47]对混凝土强度进行统一换算,各规范设计公式中的材料分项系数均不予考虑。综合各国规范对 FRP 筋梁受弯破坏模式的分类方法,将规范计算值分为 $\rho_f < \rho_{fb}$ 、 $\rho_{fb} \leq \rho_f$ 、 $\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.5\rho_{fb}$ 和 $1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$ 四组并分别与试验值进行对比,结果见表 3。图 2 为试验值与各国规范计算值比值的分布情况, μ 和 σ 分别表示均值和标准差, $\mu \pm \sigma$ 表示偏差范围。

表 1 FRP 钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算模型

Tab. 1 Normal section flexural bearing capacity calculation model of FRP reinforced concrete beams

	ACI 440.1R-15	ISIS manual 2007	GB 50608-2010	CNR-DT 203/2006
计算公式	$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{tu}} \frac{E_t \epsilon_{cu}}{E_t \epsilon_{cu} + f_{tu}}$	$\rho_{trpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{trpu}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{trpu}} \right)$	$\rho_{fb} = \frac{\alpha_1 f'_c}{f_{td}} \frac{\beta_1 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_{td}/E_t}$	$\rho_{fb} = \frac{\eta f'_{cd}}{f_{fd}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fd}} \right)$
	$f_t = \left[\sqrt{A+B} - C \right] \leq f_{tu}$	$f_{trp} = A \left[\sqrt{1+B} - 1 \right] \leq f_{trpu}$	$f_{fe} = f_{fd} \left[1 - 0.211 \left(\rho_t / \rho_{fb} - 1 \right)^{0.2} \right] \left(\rho_{fb} < \rho < 1.5 \rho_{fb} \right)$	$f_t = \left[\sqrt{A+B} - C \right] \leq f_{fd}$
	$A = \frac{(E_t \epsilon_{cu})^2}{4}$	$A = 0.5 E_{trp} \epsilon_{cu}$	$f_{fe} = f_{fd} \left(\rho_t / \rho_{fb} \right)^{-0.30}$	$A = \frac{(E_t \epsilon_{cu})^2}{4}$
	$B = \frac{0.85 \beta_1 f'_c E_t \epsilon_{cu}}{\rho_t}$	$B = \frac{4 \alpha_1 \beta_1 f'_c}{\rho_{trp} E_{trp} \epsilon_{cu}}$	$f_{fe} = f_{fd} \left(\rho_t / \rho_{fb} \right)^{-0.30}$	$B = \frac{\eta f'_{cd} E_t \epsilon_{cu}}{\rho_t}$
	$C = 0.5 E_t \epsilon_{cu}$	$\alpha_1 \beta_1 f'_c d = A_{trp} \epsilon_{trp} E_{trp}$	$f_{fe} = f_{fd} \left(\rho_t / \rho_{fb} \right)^{-0.30}$	$C = 0.5 E_t \epsilon_{cu} x_{eff} = \frac{A_t f_t}{\eta f'_{cd} b}$
	当 $\rho_t \geq \rho_{fb}$ 时,	当 $\rho_{trp} \geq \rho_{trpb}$ 时,	当 $\rho_{fb} < \rho_t < \rho_{fb}$ 时, $M \leq 0.9 f_{fe} A_t h_{of}$	当 $\rho_{min} < \rho_t < \rho_{fb}$ 时,
	$M_n = \rho_t f_t \left(1 - 0.59 \frac{\rho_t f_t}{f'_c} \right) b d^2$	$M_t = \alpha_1 \beta_1 f'_c b \left(d - \frac{\beta_1}{2} \right)$	当 $\rho_{fb} < \rho_t$ 时, $M \leq f_{fe} A_t (h_{of} - f_{fe} A_t / 2 f'_c b)$	$M_{Rd} = \eta x_{eff} f'_{cd} b \left(d - \frac{x_{eff}}{2} \right)$
	当 $\rho_t < \rho_{fb}$ 时,	当 $\rho_{trp} < \rho_{trpb}$ 时,		当 $\rho_{fb} < \rho_t$ 时,
	$M_n = A_t f_{tu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)$	$M_t = A_{trp} \epsilon_{trp} E_{trp} \left(d - \frac{\beta_1}{2} \right)$		$M_{Rd} = \eta x f'_{cd} b \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right)$
混凝土矩形 应力图系数 及极限压应 变取值	$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'_c - 28)}{7}$ 且不小于 0.65; $\epsilon_{cu} = 0.003$	$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c$, 且不小于 0.67; $\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c$, 且不小于 0.67; $\epsilon_{cu} = 0.0033$	α_1 -当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取为 1.0, 当混凝土强度等级为 C80 时, 取为 0.94, 其间线性插值; 混凝土强度等级不超过 C50 时, 取为 0.80, 当混凝土强度等级为 C80 时, 取为 0.74, 其间线性插值;	$\lambda = 0.8$ $\eta = 1$ $\lambda = 0.8 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{400} \right)$ $\eta = 1 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{200} \right)$ 当 50MPa < $f_{ck} \leq 90$ MPa $\epsilon_{cu} = 0.0035$

注: ρ_{fb} 、 ρ_{trpb} 为 FRP 筋梁平衡配筋率; α_1 、 η 、 β_1 、 λ 为混凝土矩形应力图系数; f'_c 为混凝土抗压强度设计值; f_{ck} 为混凝土圆柱体抗压强度特征值; ϵ_{cu} 为混凝土极限应变; f_{trpu} 为 FRP 筋抗拉强度保证值; f_{tu} 、 f_{td} 为 FRP 筋抗拉强度设计值; ϵ_{tu} 、 ϵ_{td} 为 FRP 筋设计极限拉应变; f_t 、 f_{trp} 为 FRP 筋应力; f_{fe} 为 FRP 筋的有效设计应力值; E_t 、 E_{trp} 为 FRP 筋弹性模量; ρ_t 为 FRP 筋纵向配筋率; ρ_{min} 为 FRP 筋混凝土梁的最小配筋率; b 为截面宽度; d 为截面有效高度; M_n 、 M_t 、 M 、 M_{Rd} 为设计承载力; A_t 、 A_{trp} 为受拉区 FRP 筋的截面面积; c 、 x_{eff} 为混凝土界限受压区高度; h_{of} 为受拉区 FRP 筋合力点距混凝土受压区边缘的距离。

表2 FRP 筋混凝土受弯构件试验数据概况

Tab. 2 Database of concrete flexural members reinforced with FRP

文献	试件数	宽度 b/mm	有效高度 h_{eff}/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	配筋率 $\rho/\%$	ρ/ρ_{ho}	受弯承载力 $M_u/\text{kN} \cdot \text{m}$
Kara and Ashour ^[5]	12	191~381	124~192	27.6	830	41.4	0.12~1.35	0.36~4.05	11.49~16.65
Rafiet 等 ^[6]	2	169	120	32.9~32.6	1676	135.9	0.7	2.43~2.47	29.19~30
Jakubovskiset 等 ^[7]	3	276	243~272	41.3~47.6	1 000	64.4	0.6~0.67	1.23~1.40	82.5~113.4
Maranan 等 ^[8]	5	200	251~254.1	38.2	1 105~1 184	62.6~65.6	1.00~2.10	3.11~6.68	91.4~104.8
Goldstonet 等 ^[9]	6	100	124.7~127.8	40~80	732~1764	37.5~55.6	0.50~2.03	0.96~12.19	4.6~16.6
El-Nemr 等 ^[10]	12	200	322.5~343.5	29~73.4	762~1639	48.7~63	0.38~1.64	0.97~5.92	82.78~189.1
El-Nemr 等 ^[11]	16	200	337.5~345	33.8~81.5	666~1 470	46.4~147	0.34~1.45	0.64~3.70	64.04~201.4
Kassem 等 ^[12]	14	200	224.5~228.5	39.1~40.8	617~1 988	36~122	0.62~2.25	1.80~10.11	70.85~90.39
Adamet 等 ^[13]	9	120	237.5~258	19.4~58.8	640	30	0.32~2.38	1.06~3.85	22.39~79.81
Elgabbas 等 ^[14]	6	200	233.5~257	42.5	1 162~1 189	44.4~48.7	0.31~1.72	1.24~6.30	52.84~82.06
Mias 等 ^[15]	4	140	154~156	21.1	1 327~1 424	63.4~64.5	1.04~1.87	7.23~11.63	9.8~11.2
Barris 等 ^[16]	12	140~160	134~156	30.1~46.9	995~1 353	63.3~64.2	1.04~2.81	2.66~10.70	31.15~55.55
Yanget 等 ^[17]	6	230	189.5~193.5	75.9~104	941~2 130	48.1~146.2	0.57~1.83	2.21~4.57	82.8~103.6
曾德光 ^[18]	9	150	209.4~312.5	31	658~1 325	72~75.5	0.14~1.76	0.29~3.24	21~50.75
Wang and Belarbi ^[19]	6	178	160.1~175.1	30~48	552~2 069	41~124	0.81~2.22	3.35~4.87	40~51
Refaiet 等 ^[20]	3	230	242~244	40	1 000	50	0.40~1.08	1.10~2.96	49.03~69.55
Issaet 等 ^[21]	7	150	116	18.4~53.0	347.5	32.67	1.95	0.99~2.05	10.24~16.54
徐新生 ^[22]	7	180	160.3~208.3	24.9	993~1 779	40~136	0.37~0.59	0.71~2.79	8.3~60.8
Aiello and Ombres ^[23]	3	150	125.5~137.2	36.5	1 506	50.1	0.86~1.88	5.40~11.79	22.84~28.13
Yooet 等 ^[24]	4	200	209.8~233.7	197.3	1 182	51.3	0.54~1.81	2.81~9.40	110.8~144
Wang and Belarbi ^[25]	24	178	104.7~174.5	30~48	551~2 069	41~124	0.99~4.13	3.26~8.32	37~51.9
Lau and Pam ^[26]	5	280	339.5~346	33.9~42.5	582~603	38~40.2	0.35~2.07	0.44~2.95	80.4~236.8
The ? Riault ^[27]	6	130	129.2~147.9	46.2~97.4	773	38	1.24~2.83	2.33~5.69	19.7~28.4
Ohet 等 ^[28]	9	180	170.5~277.9	27.17	841~1 200	42.1~42.8	0.28~0.92	1.30~5.45	18.48~26.37
Alsayedet 等 ^[29]	4	200	157.5~247.5	31.3~40.7	700~886	35.6~43.4	1.15~2.87	2.14~8.12	34.19~59.19
Rashidet et al. ^[30]	10	150	247.5~265	40.7~80.3	1 760	53	0.40~0.59	2.61~5.60	44.17~62.77
Mousavi 等 ^[31]	9	150	164~167	20~64	700	41	0.63~2.77	0.91~8.01	11.52~39.24
Duranovicet 等 ^[32]	5	150	216.15	23.7~34.3	1 000	45	0.88~1.32	2.95~5.96	34.75~40.31
Ashour ^[33]	6	150	167~267	25.5~44.3	650	38	0.175~0.28	0.26~0.49	5.89~16.75
Saikia 等 ^[34]	9	180	202~219.5	29.9~53.5	464~972	49	0.80~1.57	1.12~2.53	34.00~49.25
Faza ^[35]	6	152.4	256.9~264.4	28.9~51.7	551~896	45.5~50.6	0.97~2.51	1.51~3.13	42.49~81.9
田盼盼等 ^[36]	3	150	166~169	12.9~13.8	1 048	70	0.62~0.93	3.56~5.06	20.8~24
袁竞峰 ^[37]	11	150	204.9~261.3	24.49	353~722	30.8~60.4	0.21~1.84	0.19~2.68	14.4~74
刘华杰 ^[38]	9	117~150	168.8	18~47.2	500	41	0.70~1.40	0.57~1.85	9.3~21.1
Toutanji 等 ^[39]	6	180	255~268	36.75	695	40	0.52~1.10	0.94~1.97	59~71
Benmokrane 等 ^[40]	3	200	254.4~504.4	43	690	45	0.57~1.12	0.83~1.64	80.4~181.7
郑永峰 ^[41]	7	150~180	160.3~212.3	24.885	606~1 779	40~136	0.37~0.88	0.71~2.79	8.3~60.8
李海霞 ^[42]	10	150	217~317	30.03	650	68.6	0.33~0.48	0.40~0.58/	14.7~21.6
唐协 ^[43]	9	150	105~269	19.9~31.4	520.1~540.9	30.8~33	0.58~2.49	0.86~4.48	10.8~55.3
薛伟辰 ^[44]	6	117~150	168.75	17.8~19.1	504.2	41	0.56~1.07	0.93~1.90	7.9~12.9
祁皓, 翁春光 ^[45]	3	180	160	34.8	1 083	47.3	0.55~0.82	2.00~3.00	19.83~26.52
高丹盈, B. Brahimi ^[46]	22	200	230.1~253.7	39~52	513~618	38~49	0.50~2.27	0.41~3.54	38.5~85.4

表 3 规范计算值与试验值对比

Tab. 3 Comparisons between calculated and experimental values

统计结果	模型	$M_{\text{exp}}/M_{\text{pred}}$				总体
		$\rho_f < \rho_{fb}$	$\rho_{fb} \leq \rho_f$	$\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.5\rho_{fb}$	$1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$	
均值 μ	ACI 440.1R	1.01	1.29	1.08	1.34	1.24
	ISIS	1.05	1.21	1.03	1.25	1.17
	GB 50608	1.05	1.22	1.06	1.26	1.19
	CNR-DT 203	0.99	1.16	0.99	1.20	1.11
标准差 σ	ACI 440.1R	0.30	0.40	0.31	0.41	0.40
	ISIS	0.32	0.39	0.23	0.41	0.38
	GB 50608	0.32	0.54	0.30	0.57	0.40
	CNR-DT 203	0.27	0.39	0.26	0.41	0.37
变异系数 CV	ACI 440.1R	0.30	0.31	0.29	0.31	0.32
	ISIS	0.30	0.32	0.22	0.33	0.32
	GB 50608	0.30	0.44	0.28	0.45	0.34
	CNR-DT 203	0.27	0.34	0.26	0.34	0.33
高估承载力试件数量百分比	ACI 440.1R	47%	17%	44%	11%	22%
	ISIS	46%	28%	46%	23%	32%
	GB 50608	43%	25%	46%	21%	28%
	CNR-DT 203	53%	41%	63%	35%	44%
数据量	ACI 440.1R	56	272	49	223	328
	ISIS	78	250	47	203	328
	GB 50608	59	269	47	222	328
	CNR-DT 203	85	243	50	193	328

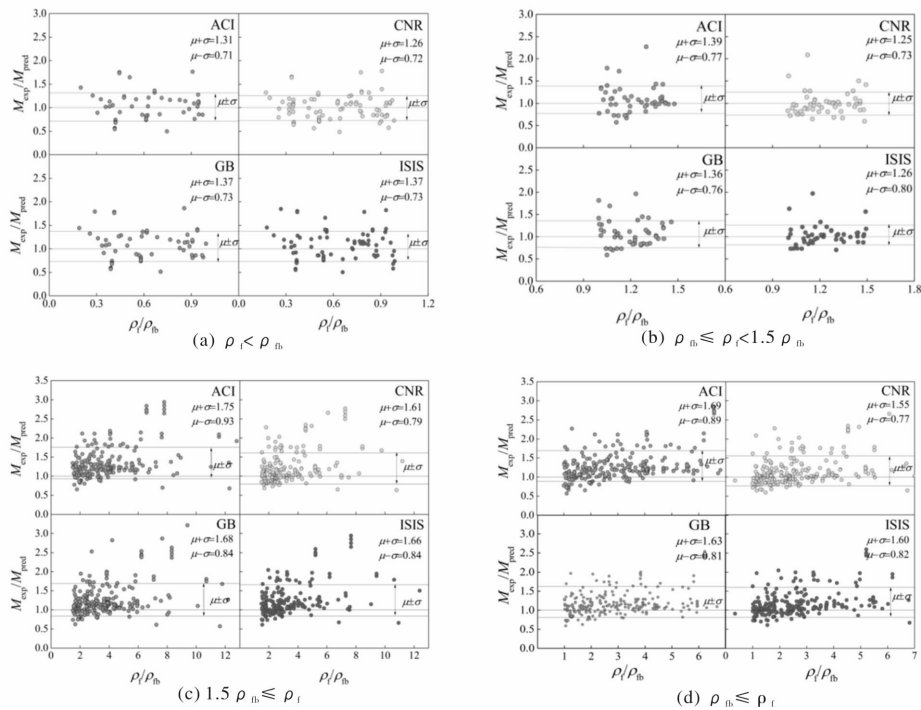


图 2 规范模型计算对比分析

Fig. 2 Comparisons to code provisions

结果表明,在 $\rho_f < \rho_{fb}$ 和 $\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.5\rho_{fb}$ 两种情况下,规范计算值与试验值均吻合良好,离散程度均较小;当 $1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$ 时,试验值均超过规范计算值 20% 以上,这是由于受压破坏由混凝土极限压应变控制,而其实际值一般大于规范规定值. ACI 440.1R 混凝土极限压应变取值为 0.003, GB 50608 为 0.003 3, ISIS 和 CNR-DT 203 为

0.003 5,对于 FRP 筋梁受弯承载力, ACI 440.1R 的计算方法最为保守, GB 50608 和 ISIS 规范次之, CNR-DT 203 计算值最接近试验值. 可以看出,混凝土极限压应变的取值是影响受压破坏试件承载力计算值准确程度的重要因素.

采用高估承载力试件数量百分比作为计算公式可靠程度的评价指标,通过表 3 可以发现:当 ρ

$\leq 1.5\rho_{fb}$ 时,承载力被高估的试件数量均超过 40%,表明受拉破坏试件的计算方法一定程度上高估了 FRP 筋的极限应力,使计算结果偏于不安全;当 $1.5\rho_{fb} \leq \rho_f$ 时,ACI 440.1R 计算方法最可靠,CNR-DT 203 安全可靠度相对最低,GB 50608 和 ISIS 居于两者之间。

3 受压破坏试件承载力计算

3.1 计算公式

受压破坏 FRP 筋混凝土梁的正截面承载力计算模型应力-应变分布如图 1 所示,根据受力平衡及应变协调条件可得:

$$A_f f_f = \alpha_1 f_c x b \quad (1)$$

$$f_f = E_f \epsilon_{cu} \frac{\beta_1 h_{0f} - x}{x} \quad (2)$$

式中, x 为混凝土界限受压区高度。

联合式(1)、式(2)可得:

$$x = \frac{\sqrt{(E_f \epsilon_{cu} A_f)^2 + 4\alpha_1 f_c b E_f \epsilon_{cu} A_f \beta_1 h_{0f}} - E_f \epsilon_{cu} A_f}{2\alpha_1 f_c b} \quad (3)$$

$$M_n = \alpha_1 f_c b x (h_{0f} - \frac{x}{2}) \quad (4)$$

为简化式(3),将发生受压破坏且 $\rho_f > 1.5\rho_{fb}$ 试件的承载力试验值 M_{exp} 带入式(4),得到等效矩形受压区混凝土高度试验值 x_{exp} :

$$x_{exp} = h_{0f} \pm \sqrt{h_{0f}^2 - \frac{2M_{exp}}{\alpha_1 f_c b}} \quad (5)$$

利用 SPSS 软件将参数 ρ_f/ρ_{fb} 和 c_b/x_{exp} 进行拟合,见图 3。其中 c_b 为界限受压区高度,计算公

式为:

$$c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_{fd}/E_f} \right) h_{0f} \quad (6)$$

则式(3)可简化为

$$x = \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right)^{0.422} \times \frac{c_b}{1.191} \quad (7)$$

结合式(4)、式(7),当 $\rho_f \geq 1.5\rho_{fb}$ 时,FRP 筋混凝土梁正截面受弯承载力可按式(8)进行计算。

$$M_n = \alpha_1 f_c b \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right)^{0.422} \times \frac{c_b}{1.191} \left[h_{0f} - \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right)^{0.422} \times \frac{c_b}{2.382} \right] \quad (8)$$

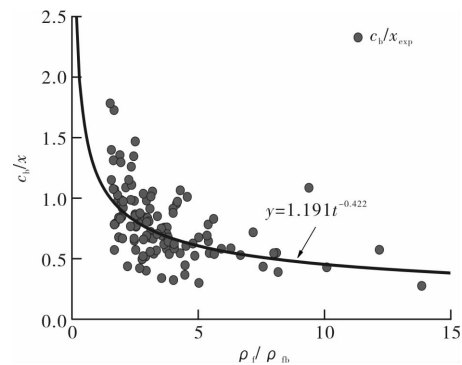


图3 $\rho_f > 1.5\rho_{fb}$ 时 c_b/x 与 ρ_f/ρ_{fb} 关系

Fig. 3 Relationship between w/c and k_c when $\rho_f > 1.5\rho_{fb}$

3.2 修正系数

采用各国规范及本文建议公式对受压破坏 FRP 筋混凝土梁承载力进行计算,结果见表 4。从表中可以看出,与各国规范的计算模型相比,本文建议公式的计算值与试验值的吻合程度最高,离散程度与各国规范相近,但高估承载力试件数量百分比为 51.2%,表明本文建议公式偏于不保守。

表 4 模型计算值与试验值对比

Tab. 4 Theoretical values compared with the test results

模型	M_{exp}/M_{pred}			高估承载力试件 数量百分比/%
	均值	标准差	变异系数	
ACI 440.1R	1.29	0.25	0.19	7.2
ISIS Mannal	1.18	0.24	0.20	18.4
GB 50608	1.19	0.29	0.25	20
CNR-DT 203	1.12	0.27	0.24	36
本文建议公式	1.02	0.26	0.25	51.2

为了使计算值具有一定的安全储备,对本文建议公式提出一强度修正系数 ϕ ,使 $M_{exp}/\phi M_{pred} > 1$ 的保证率不小于 95%, ϕ 的取值可按下式计算:

$$\phi = \mu_r + 1.645\sigma_r \quad (9)$$

式中 μ_r , σ_r 分别为 M_{exp}/M_{pred} 的均值和方差。通过

对受压破坏 FRP 筋梁进行统计分析,得 $\phi = 1.45$ 。

4 结论

(1) 在 $\rho_f < \rho_{fb}$ 和 $\rho_{fb} \leq \rho_f < 1.5\rho_{fb}$ 两种情况下,各国规范的计算值与试验值吻合良好;当 $1.5\rho_{fb} \leq$

ρ_f 时,试验值均高于规范计算值 20% 以上,其中 ACI 440.1R 最为保守,GB50608 与 ISIS 次之,CNR-DT 203 最接近试验值。

(2) 对于受压破坏的情况,建立了等效矩形受压区高度 x 的经验公式,改进了 FRP 钢筋混凝土梁承载力计算公式。与各国规范计算公式相比,该公式的计算结果与试验值更为接近。

(3) 针对本文建议公式,给出了使计算结果具有 95% 保证率的强度修正系数。

参考文献 References

- [1] ACI. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars; ACI 440.1R-15[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
- [2] ISIS Canada Research Network, Reinforced Concrete Structures with Fibre-Reinforced Polymers[S]. ISIS Manual No. 3, University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 2007.
- [3] ACTRC. Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars; CNR-DT 203/2006 [S]. Rome: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2006.
- [4] 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, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites; GB 50608-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [5] KARA I F, ASHOUR A. F. Flexural performance of FRP reinforced concrete beams[J]. Composite Structures, 2012, 94(5), 1616-1625.
- [6] RAFI M M, NADJAI A, ALI F, et al. Aspects of behavior of CFRP reinforced concrete beams in bending [J]. Construction & Building Materials, 2008, 22 (3):277-285.
- [7] JAKUBOVSKIS R, KAKLAUSKAS G, GRIBNIAK V, et al. Serviceability analysis of concrete beams with different arrangements of GFRP bars in the tensile zone[J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(5):1-10.
- [8] MARANAN G B, MANALO A C, BENMOKRANE B, 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.
- [9] GOLDSTON M, REMENNIKOV A, SHEIKH M N. Experimental investigation of the behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading [J]. Engineering Structures, 2016, 113: 220-232.
- [10] 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.
- [11] 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 & Building Materials, 2016, 113:77-89.
- [12] 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.
- [13] 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):354-366.
- [14] ELGABBAS F, VINCENT P, AHMED E A, et al. Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams [J]. Composites Engineering (Part B), 2016, 91:205-218.
- [15] 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.
- [16] BARRIS C, TORRES L, TURON A, et al. An experimental study of the flexural behavior of GFRP RC beams and comparison with prediction models [J]. Composite Structures, 2009, 91(3):286-295.
- [17] 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 Engineering (Part B), 2012, 43 (3): 1077-1086.
- [18] 曾德光. FRP 钢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 Deguang. Experimental study and theoretical analysis on flexural behavior of concrete beam reinforced with FRP tendons [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [19] WANG H, BELARBI A. Flexural behavior of fiber-reinforced-concrete beams reinforced with FRP rebars [J]. ACI Special Publication, 2005, 166:1797-1800.
- [20] REFAI A E, ABED F, AL-RAHMANI A. Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars [J]. Construction & Building Materials, 2015, 96:518-529.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] YOO D Y, BANTHIA N, YOON Y S. Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars [J]. Engineering Structures, 2016, 111:246-262.