

## 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁裂缝试验研究

赵 勇<sup>1</sup>, 王晓锋<sup>2</sup>, 苏小卒<sup>1</sup>, 周建民<sup>1</sup>

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

**摘要:** 为研究配置 500 MPa 纵向热轧带肋钢筋的混凝土梁的裂缝特征及评估相关规范裂缝计算公式的适用性, 进行了 22 根钢筋混凝土梁受弯性能试验, 得到 22 个平均裂缝间距和 92 组裂缝宽度数据, 相应的钢筋应力范围在 201~482 MPa, 这些试验数据可反映钢筋应力较高情况下受弯构件的裂缝开展特点. 试验结果表明, 按规范 GB50010—2002 公式计算的平均裂缝间距、平均裂缝宽度和最大裂缝宽度比试验值普遍偏大, 二者之比的均值分别为 1.127, 1.557 和 1.535. 根据试验结果, 提出配置 500 MPa 带肋钢筋的混凝土梁的裂缝宽度计算公式修正建议, 并给出梁侧面钢筋处和受拉边缘的平均裂缝宽度的换算关系式, 建议公式的计算值和试验值符合较好.

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 高强热轧带肋钢筋; 500 MPa 钢筋; 裂缝形态; 裂缝间距; 裂缝宽度

**中图分类号:** TU 375.1

**文献标识码:** A

### Experimental Research on Crack Spacing and Width of Reinforced Concrete Beams with 500 MPa Steel Bars

ZHAO Yong<sup>1</sup>, WANG Xiaofeng<sup>2</sup>, SU Xiaozu<sup>1</sup>, ZHOU Jianmin<sup>2</sup>

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Academic of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Twenty-two concrete beams reinforced with Grade HRB500 or HRBF500 longitudinal hot ribbed steel bars were tested to investigate their cracking characteristics and evaluate the formulas for crack spacing and crack width specified in the design code GB50010—2002. Twenty-two of average crack spacing dates and ninety-two groups of crack width with the stresses of reinforcement at cracking sections ranging from 201 MPa to 482 MPa were obtained by these tests. The test results show that the values of average crack spacing, average crack width and maximum crack width which

are predicted by the formulas of code GB50010—2002 are greater than the experimental ones in general and the average ratios of them are 1.127, 1.557 and 1.535 respectively. Based on the test results, the modified formulas of crack width are put forward for the beams with 500 MPa hot ribbed steel bars, while the conversion formula of the crack width at the tension edge and the reinforcement center of beam side face is proposed. The proposed calculation formulas agree with the experimental results.

**Key words:** reinforced concrete beam; high-strength hot ribbed steel bar; 500 MPa steel bar; crack pattern; crack spacing; crack width

一般来讲, 用 500 MPa 钢筋替换 335 MPa 钢筋作为混凝土梁的受力纵筋后, 在相同受弯承载力要求下, 钢筋用量可大为减少, 具有很好的经济和社会效益. 但 500 MPa 钢筋工程应用表明, 随着钢筋强度提高, 正常使用状态下钢筋应力不断增加, 按现行规范 GB50010—2002《混凝土结构设计规范》<sup>[1]</sup> (以下简称规范) 计算的裂缝宽度大都超过限值, 需加配钢筋控制裂缝, 500 MPa 钢筋的强度效率未能充分发挥. 然而, 规范的裂缝宽度计算公式主要是基于配 235 MPa 和 335 MPa 钢筋的混凝土构件受弯试验结果建立的<sup>[2-3]</sup>, 是否仍适用于配 500 MPa 带肋钢筋的构件值得商榷. 为此, 同济大学在 2006—2009 年间分 4 批完成了 42 根配置 400 MPa 和 500 MPa 纵向热轧带肋钢筋的混凝土和预应力混凝土梁的受弯性能试验<sup>[4]</sup>, 本文主要以其中 22 根梁的试验结果, 对配置 HRB500 和 HRBF500 钢筋的混凝土梁的裂缝形态以及裂缝间距、裂缝宽度的计算公式展开讨论.

收稿日期: 2009-09-07

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA03Z550); “十一五”国家科技支撑计划(2007BAE30B05)

第一作者: 赵 勇(1975—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构. E-mail: yongzhao@tongji.edu.cn

通讯作者: 周建民(1961—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构. E-mail: tjzhou2008@163.com

## 1 试验方案

规范裂缝宽度计算采用的是半经验半理论模式,相关参数根据两点加载的简支梁纯弯段裂缝试验结果经统计分析得出,其中纯弯段内未配置有箍筋<sup>[1-2]</sup>.近几年来,国内多家单位也进行了配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受弯性能试验<sup>[5-7]</sup>,但仍存有

一些问题,例如,钢筋混凝土保护层厚度取值单一,绝大多数为 25 mm;钢筋直径以 16 mm 和 20 mm 为主,缺少大直径钢筋的试验;在纯弯段内配置有箍筋等.为此,课题组以受拉钢筋直径、混凝土保护层厚度以及混凝土强度等级为主要参数,设计制作了 22 根简支试验梁,试验梁的基本参数见表 1. 为方便观察裂缝,采用两点集中反向方式加载.

表 1 试验梁的基本参数

Tab.1 Basic properties of testing specimens

试件编号	$f'_{cu}/\text{MPa}$	$b \times h \times L_0 /$ (mm × mm × mm)	受拉纵筋保护层厚度/mm		受拉纵筋型号
			底面	侧面	
B5F-1	34.0	251 × 403 × 3 600	24	24	3Φ16
B5F-2	34.0	250 × 402 × 3 600	23	23	2Φ25
B5F-3	56.2	253 × 403 × 3 600	25	25	3Φ16
B5F-4	56.2	249 × 401 × 3 600	23	23	2Φ25
CB5-1	34.0	251 × 402 × 3 600	59	59	2Φ25
CB5-2	34.0	303 × 454 × 3 600	56	56	2Φ32
CB5-3	56.2	255 × 406 × 3 600	59	59	3Φ25
CB5-4	56.2	254 × 403 × 3 600	57	57	2Φ32
JL1	28.7	250 × 400 × 4 200	30	25	3Φ20
JL2	28.7	247 × 453 × 4 200	30	25	3Φ20
JL3	28.7	251 × 452 × 4 200	31	30	2Φ25
JL4	28.7	250 × 450 × 4 200	38	40	3Φ25
JL5	28.7	250 × 500 × 4 200	39	25	5Φ20
JL6	44.0	250 × 401 × 4 200	50	25	2Φ25
JL7	44.0	250 × 451 × 4 200	29	50	3Φ20
JL8	44.0	252 × 453 × 4 200	39	25	3Φ25
JL9	44.0	302 × 499 × 4 200	38	25	2Φ32 + 1Φ20
JL10	44.0	302 × 501 × 4 200	51	50	3Φ25
TL11	28.7	250 × 400 × 4 200	31	25	3Φ25
TL12	28.7	250 × 450 × 4 200	38	25	5Φ20
TL13	44.0	250 × 457 × 4 200	39	40	2Φ32
TL14	44.0	301 × 502 × 4 200	49	25	3Φ25

注:1 表中  $b$ ,  $h$  和  $L_0$  分别表示试验梁截面宽度、高度及净跨,对净跨为 3 600 mm 和 4 200 mm 梁的纯弯段长度分别为 1 800 mm 和 2 100 mm;试件 TL11—TL14 为 T 形截面,受压翼缘宽度和高度分别为 550 mm 和 80 mm.

2 表中  $f'_{cu}$  为与试件同条件养护的混凝土立方体抗压强度平均值.

3 表中 Φ, Φ 分别表示 HRB500 和 HRBF500 钢筋;3Φ16 表示配置 3 根直径为 16 mm 的 HRB500 钢筋.

## 2 试验主要结果

### 2.1 裂缝开展过程

试验梁裂缝的出现及发展可分为以下几个阶段:①加载至  $0.1P_u$  ( $P_u$  为试件极限荷载计算值)时,截面未开裂,构件表现为弹性变形特征;②荷载加至  $(0.2 \sim 0.3)P_u$  时,在跨中纯弯段出现一条或多条垂直裂缝,高度一般可达梁高  $1/4$ ,但裂缝宽度很小;③随着荷载增加,纯弯段裂缝逐渐增多,并向上发展,宽度逐渐加大,斜裂缝也出现,当荷载加至  $0.5P_u$  左

右时,裂缝基本出齐;④裂缝宽度随荷载增加而增大,局部会出现次生裂缝,一般次生裂缝长度较短且宽度较小;⑤构件临近破坏时,跨中一条裂缝宽度迅速增加,最终混凝土被压碎.

### 2.2 裂缝试验结果

试验过程中,量取了  $(0.3 \sim 0.8)P_u$  多级荷载下梁侧面纵筋处和受拉边缘处的裂缝宽度.试验结果见表 2,其中每根试验梁记录了 3—5 个工况的数据,共有 92 组裂缝宽度数据,相应的钢筋应力范围在 201~482 MPa,平均 352 MPa,这些试验数据可反映出钢筋应力较高情况下受弯构件的裂缝开展特点,

也可今后更高强度钢筋的应用提供试验依据。

表2 裂缝间距和宽度试验结果  
Tab.2 Test results of crack spacing and width

试件编号	$l_{cr}/mm$	$\sigma_s/MPa$	$w_m^i/mm$	$w_{max}^i/mm$	试件编号	$l_{cr}/mm$	$\sigma_s/MPa$	$w_m^i/mm$	$w_{max}^i/mm$
B5F-1	134.3	362	0.110	0.226	JL4	145.5	205	0.076	0.121
		422	0.123	0.240			256	0.100	0.147
		482	0.151	0.290			308	0.132	0.192
B5F-2	121.4	313	0.094	0.205	JL5	105.4	268	0.081	0.128
		365	0.112	0.228			359	0.148	0.215
		417	0.126	0.245			410	0.176	0.259
		470	0.157	0.265			321	0.105	0.162
B5F-3	124.3	361	0.107	0.210	JL6	184.0	233	0.087	0.148
		421	0.127	0.280			291	0.121	0.221
		482	0.142	0.295			350	0.141	0.238
B5F-4	141.8	313	0.081	0.200	JL7	134.3	297	0.125	0.221
		365	0.090	0.260			356	0.175	0.302
		417	0.121	0.285			415	0.206	0.369
		469	0.135	0.320			474	0.241	0.430
CB5-1	179.1	302	0.165	0.275	JL8	143.8	222	0.074	0.121
		352	0.188	0.325			278	0.109	0.174
		403	0.235	0.350			333	0.118	0.188
		453	0.275	0.410			389	0.136	0.217
CB5-2	168.4	263	0.140	0.215	JL9	129.7	201	0.078	0.130
		314	0.173	0.285			251	0.081	0.153
		366	0.213	0.395			302	0.103	0.186
		419	0.240	0.415			352	0.126	0.216
		471	0.273	0.445			412	0.152	0.258
CB5-3	153.6	252	0.096	0.190	JL10	174.0	233	0.110	0.186
		302	0.129	0.190			291	0.156	0.246
		353	0.152	0.245			349	0.188	0.303
		403	0.184	0.295			407	0.236	0.385
		454	0.215	0.380			239	0.076	0.139
CB5-4	148.8	316	0.144	0.240	TL11	127.8	299	0.094	0.164
		369	0.172	0.280			359	0.129	0.215
		422	0.196	0.300			418	0.148	0.246
		474	0.215	0.350			284	0.085	0.133
		214	0.062	0.108			341	0.105	0.164
JL1	121.4	267	0.086	0.161	TL12	133.9	398	0.129	0.202
		321	0.104	0.181			228	0.081	0.135
		374	0.123	0.202			285	0.123	0.182
		428	0.145	0.243			342	0.146	0.212
		282	0.096	0.154			399	0.182	0.260
JL2	141.0	338	0.127	0.190	TL13	156.3	247	0.111	0.167
		394	0.148	0.209			308	0.153	0.223
		451	0.172	0.247			370	0.175	0.251
		257	0.087	0.145			432	0.210	0.291
JL3	160.4	308	0.113	0.183	TL14	187.8	247	0.111	0.167
		360	0.127	0.208			308	0.153	0.223
		411	0.165	0.263			370	0.175	0.251
		438	0.177	0.289			432	0.210	0.291
		257	0.087	0.145			308	0.153	0.223

注:表中  $l_{cr}$ ,  $w_m^i$  分别为试件平均裂缝间距以及梁侧面纵筋处的平均裂缝宽度;  $\sigma_s$  为根据实测荷载按规范公式计算的开裂截面处钢筋应力;  $w_{max}^i$  为按正态分布确定的具有 95% 保证率的裂缝宽度值。

### 2.3 短期裂缝扩大系数

以裂缝出齐后试验梁两个侧面钢筋位置处的裂缝宽度与其平均值之比作为统计值,对统计量以 0.2 为间隔划分,样本容量为 2 585 个。经假设检验可知,裂缝宽度分布服从正态分布,其中裂缝宽度与其平均值之比的均值为  $\mu = 1.000$ ,均方差为  $\sigma = 0.383$ ,因

此,当取 95% 的保证率时,本文试验梁的短期裂缝扩大系数为  $\tau_s = 1.63$ ,与规范取值  $\tau_s = 1.66$  相差不大。

## 3 不同位置裂缝宽度的关系分析

我国规范要求对梁侧面钢筋位置处的裂缝宽度

进行控制,而美国规范 ACI318—08<sup>[8]</sup>则要求控制构件受拉边缘裂缝宽度.美国学者 Frosch 认为:受弯构件侧面不同水平位置处的裂缝宽度基本上与其所在位置至中和轴的距离成正比<sup>[9]</sup>.本次试验也对一些裂缝沿梁高的宽度变化进行了量测,结果表明,离中和轴越远,裂缝宽度越大,但二者并不成正比,而且对于大保护层厚度的试件,钢筋中心处到受拉边缘的裂缝宽度也不呈线性分布.若令梁侧面受拉边缘和钢筋处的平均裂缝宽度比值  $k = w_{s,m}/w_m$ ,则按 Frosch 模式<sup>[9]</sup>计算的  $k$  值一般在 1.2 左右,但由试验数据分析可知,试验值  $k^t = w_{s,m}^t/w_m^t$  的均值为 1.464,变异系数为 0.114,而  $w_{s,max}^t/w_{max}^t$  的均值为 1.370,变异系数为 0.154,Frosch 模式计算值明显偏低.根据本次试验结果,综合考虑受压区高度和保护层厚度的影响,可得到

$$k = 0.6 \left[ \frac{h-x}{h_0-x} + \frac{\sqrt{c_1^2 + c_2^2}}{c_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中: $h$  为梁高; $h_0$  为截面有效高度; $x$  为截面受压区高度; $c_1$  和  $c_2$  分别为最外层钢筋的底面和侧面混凝土保护层厚度; $c_{\min}$  为  $c_1, c_2$  中的较小值.

对于平均裂缝宽度,根据式(1)计算的  $k$  值和试验值  $k^t$  之比平均为 1.015,变异系数为 0.142,而对于最大裂缝宽度,该比值的平均值为 1.092,变异系数为 0.163,计算结果与试验结果符合较好.

## 4 裂缝计算模式

### 4.1 规范的裂缝计算模式

在规范的裂缝计算模式中,平均裂缝间距  $l_{cr}$  计算公式是综合了滑移理论和无滑移理论建立的,并考虑了钢筋保护层厚度  $c$ 、钢筋直径  $d_{eq}$  和配筋率  $\rho_{te}$  的影响,相关系数根据试验结果回归分析得到;平均裂缝宽度  $w_m$  的计算公式中,裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数  $\psi$  是根据试验规律经简化后得到的

以钢筋应力为主要参数的计算式,且裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度的影响系数  $\alpha_c$  也是根据试验结果分析后确定的, $\alpha_c$  取值为 0.85;短期平均裂缝宽度乘以短期裂缝扩大系数  $\tau_s$  即得短期最大裂缝宽度  $w_{max}$ ,其中  $\tau_s$  取为 1.66<sup>[1-3]</sup>.根据规范公式,裂缝计算值和试验值的比较结果见表 3.可以看出,按规范公式计算的平均裂缝间距、平均裂缝宽度及最大裂缝宽度比试验值有所偏大,计算值和试验值之比的平均值分别为 1.127,1.557 和 1.535,有必要根据试验结果对规范的计算模式进行修正.考虑到不均匀系数  $\psi$  在试验中较难确定,而且  $\psi$  的修正也可以包含到  $\alpha_c$  的调整中,对规范裂缝计算公式的调整可从  $l_{cr}$  和  $\alpha_c$  两方面考虑.

表 3 裂缝计算值和试验值比较

Tab.3 Comparison of testing and predicted crack results

比较内容	规范计算值 试验值		本文修正计算值 试验值	
	均值	变异系数	均值	变异系数
平均裂缝间距	1.127	0.093	1.021	0.086
平均裂缝宽度	1.557	0.182	1.033	0.140
最大裂缝宽度	1.535	0.218	1.018	0.152

### 4.2 平均裂缝间距

图 1 给出了钢筋保护层厚度  $c$  及配筋参数  $d_{eq}/\rho_{te}$  与平均裂缝间距的关系.可以看出,与以往的试验结果相似,随  $c$  和  $d_{eq}/\rho_{te}$  的增大, $l_{cr}^t$  有增大的趋势,但  $l_{cr}^t$  与  $c$  呈线性变化更为明显,说明规范的平均裂缝间距计算模式对配置 500 MPa 钢筋的试件仍是适用的,只需对公式中相关的系数进行修正.根据本次试验数据进行参数回归,平均裂缝间距公式可修正为

$$l_{cr}^t = 1.5c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \quad (2)$$

平均裂缝间距计算值和试验值的比较结果见图 2,可以看出,修正后的计算值和试验值符合较好,其比值平均为 1.021,变异系数为 0.086.

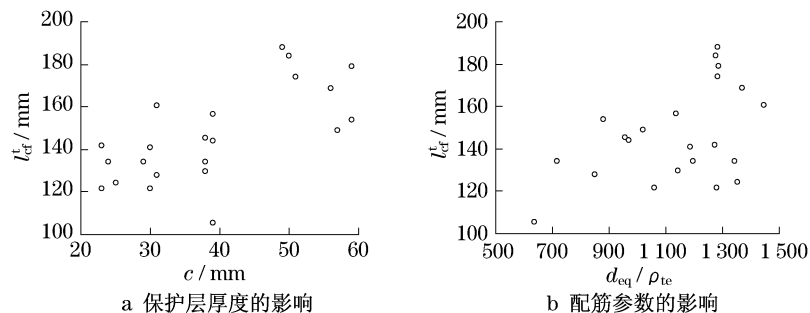


图 1 保护层厚度、配筋参数与平均裂缝间距的关系

Fig.1 Two parameters and the average crack spacing

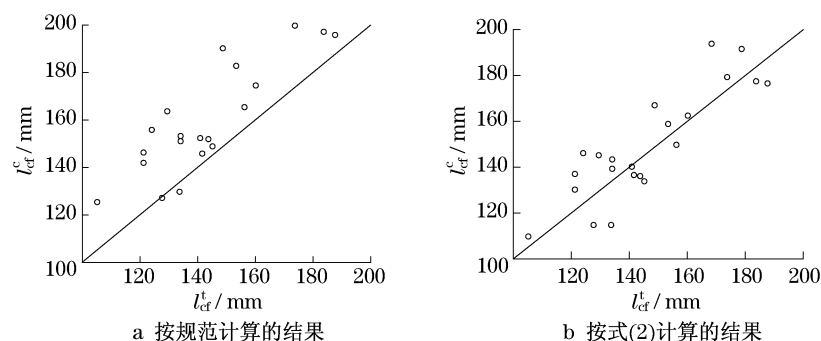


图2 平均裂缝间距的计算值和试验值比较

Fig.2 Comparison of predicted and testing values of average crack spacing

#### 4.3 平均裂缝宽度

图3给出了平均裂缝间距试验值和规范计算值的比值  $l_{cr}^t/l_{cr}^c$ 、钢筋应力  $\sigma_s$  与平均裂缝宽度试验值和规范计算值比值  $w_m^t/w_m^c$  的关系,可以看出,  $w_m^t/w_m^c$  比值比较平均,因此,对平均裂缝宽度可仅考虑直接乘以一个常数来加以修正.综合考虑平均裂缝宽度和最大裂缝宽度试验数据,在按式(2)调整平均

裂缝间距后,该常数可取为 0.74,即裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度的影响系数  $\alpha_c$  可调整为

$$\alpha_c^r = 0.85 \times 0.74 = 0.63 \quad (3)$$

平均裂缝宽度计算值和试验值的比较结果见图4,可以看出,修正后的计算值和试验值符合较好,其比值平均为 1.033,变异系数为 0.140.

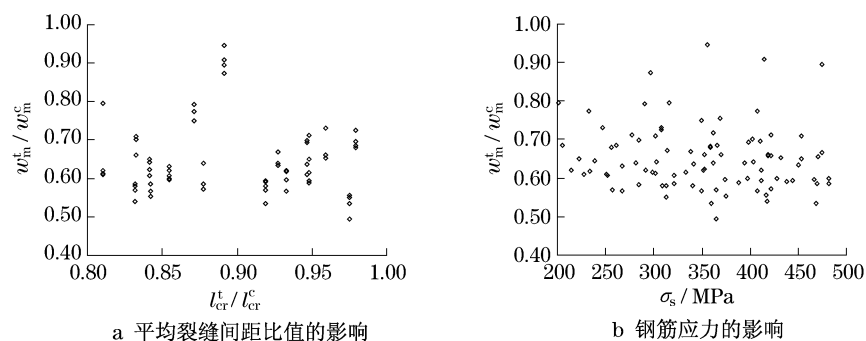


图3 平均裂缝宽度、平均裂缝间距与钢筋应力的关系

Fig.3 Two parameters and the average crack width

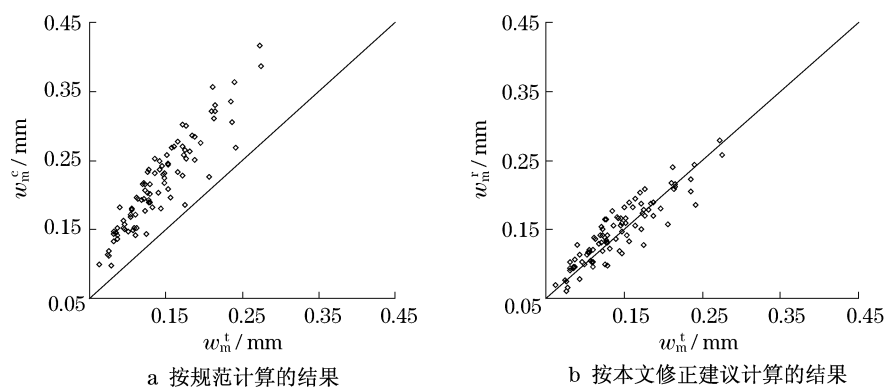


图4 平均裂缝宽度的计算值和试验值比较

Fig.4 Comparison of predicted and testing values of average crack width

#### 4.4 最大裂缝宽度

由前面的分析结果可知,短期裂缝扩大系数  $\tau_s$  仍可取为 1.66.最大裂缝宽度公式的计算值和试验

值的比较结果见图5,可以看出,修正后的计算值和试验值符合较好,其比值平均为 1.018,变异系数为 0.152.

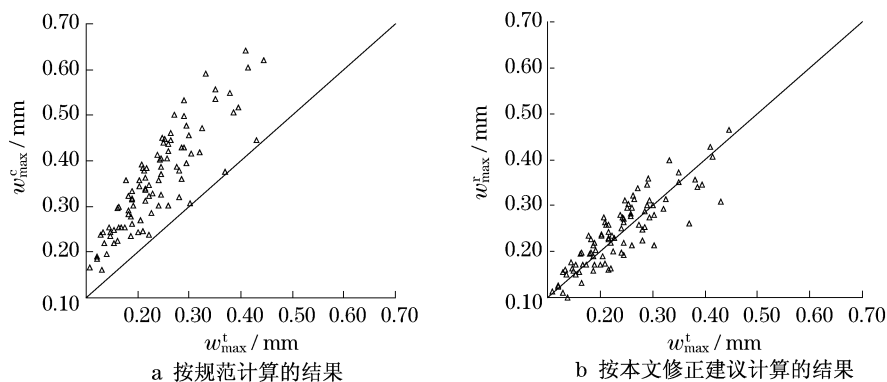


图 5 最大裂缝宽度的试验值和计算值比较

Fig.5 Comparison of predicted and testing values of maximum crack width

## 5 结论和建议

(1) 按规范公式计算的平均裂缝间距、平均裂缝宽度及最大裂缝宽度比试验值普遍偏大,计算值和试验值之比的平均值分别为 1.127, 1.557 和 1.535,有必要根据试验结果进行修正。

(2) 给出平均裂缝间距的计算修正建议公式,并建议将裂缝间混凝土伸长对裂缝宽度的影响系数  $\alpha_c$  调整为 0.63,短期裂缝扩大系数  $\tau_s$  仍取为 1.66,修正后的平均裂缝间距、平均裂缝宽度及最大裂缝宽度计算值与本文试验值符合较好,计算值和试验值之比的平均值分别为 1.021, 1.033 和 1.018。

(3) 梁侧面受拉边缘和钢筋中心处平均裂缝宽度及最大裂缝宽度之比的均值分别为 1.464 和 1.370,综合考虑受压区高度和保护层厚度的影响,给出了这两个位置裂缝宽度的关系式。

(4) 建议广泛收集整理国内外配高强钢筋试验梁的数据,以进一步修正和完善相关规范的裂缝计算模式。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.  
Ministry of Construction of People's Republic China. GB50010—2002 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [2] 白生翔,黄成若. 钢筋混凝土构件试验数据:85 年设计规范背景资料续编[R]. 北京:中国建筑科学研究院,1985.  
BAI Shengxiang, HUANG Chengruo. Test data of reinforced

concrete members(sequel background information for the design code)[R]. Beijing:China Academic of Building Research,1985.

- [3] 丁大钧,蒋永生,蓝宗建. 钢筋混凝土构件抗裂度、裂缝和刚度[M]. 南京:南京工学院出版社,1986.  
DING Dajun, JIANG Yongsheng, LAN Zongjian. Crack resistance strength, crack and stiffness of reinforced concrete members [M]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1986.
- [4] 赵勇,苏小卒,周建民. 配置高强钢筋混凝土梁受弯性能研究[R]. 上海:同济大学土木工程学院,2008.  
ZHAO Yong, SU Xiaozu, ZHOU Jianmin. Research on bending behavior of reinforced concrete beam with high-strength steel bars [R]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2010.
- [5] 张艇. HRB500 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2004.  
ZHANG Ting. Experimental research on bending behavior of reinforced concrete beam with HRB500 steel bars [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University. College of Civil Engineering, 2004.
- [6] 徐风波. HRB500 级钢筋混凝土梁正截面受力性能试验及理论研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2007.  
XU Fengbo. Experimental and theory research on bending behavior of reinforced concrete beam with HRB500 steel bars [D]. Changsha: Hunan University. College of Civil Engineering, 2004.
- [7] 王铁成,李艳艳,戎贤. 配置 500 MPa 钢筋的混凝土梁受弯性能试验[J]. 天津大学学报,2007,40(5):507.  
WANG Tiecheng, Li Yanyan, Rong Xian. Test for bending behavior of reinforced concrete beam with 500 MPa steel bar [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(5): 507.
- [8] ACI Committee 318. Building code requirement for structural concrete (ACI 318-08) and commentary (ACI 318R-08) [S]. Detroit: American Concrete Institute, 2008.
- [9] Frosch R J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3):437.