

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.06.018



# 锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪承载力分析模型

余波, 陈冰, 刘阳

(广西大学 土木建筑工程学院; 工程防灾与结构安全教育部重点实验室;  
广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004)

**摘要:** 锈蚀钢筋混凝土梁的传统抗剪承载力模型大多属于经验模型, 考虑的影响因素不全面且缺乏严密的理论推导, 导致计算精度有限。基于修正压力场理论, 建立了可以综合考虑钢筋锈蚀对临界斜裂缝倾角、梁有效抗剪截面积、配筋率、配箍率等关键因素影响锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪承载力模型, 通过与 85 组试验数据和现有模型的对比分析, 验证了模型的适用性和计算精度。结果表明, 该模型具有严密的理论基础, 考虑的影响因素全面, 计算精度较高、离散性较小。

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 锈蚀; 抗剪承载力; 临界斜裂缝倾角; 剪跨比; 修正压力场理论

**中图分类号:** TU375.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2018)06-0131-08

## Shear strength model of corroded reinforced concrete beams

Yu Bo, Chen Bing, Liu Yang

(School of Civil Engineering and Architecture; Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education; Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

**Abstract:** The accuracy of traditional shear strength models for corroded reinforced concrete (RC) beam are far from satisfactory, since these models generally belong to the empirical methods which are lack of theoretical basis and do not take into account the various influential factors comprehensively. Hence, a shear strength model of corroded RC beam which takes into account the influences of corrosion on key factors including the critical diagonal crack angle, the effective shear cross-sectional area, the reinforcement ratio and the stirrup ratio was established based on the modified compression field theory (MCFT). The accuracy of the proposed model was validated by comparing with 85 sets of experimental data and several existing models. Analysis results show that the proposed model is of good accuracy and small discreteness.

**Keywords:** reinforced concrete beam; corrosion; shear strength; critical crack angle; shear span ratio; modified compression field theory

受混凝土碳化和氯盐侵蚀等腐蚀环境作用的影响, 在役钢筋混凝土(RC)结构的梁往往发生钢筋锈蚀。董卫等<sup>[1]</sup>通过锈蚀 RC 梁的四点受弯加载试

验, 分析了钢筋锈蚀对 RC 梁承载机理的影响, 发现锈蚀 RC 梁的承载机理为梁效应和拱效应的复合体, 钢筋锈损率越高, 梁效应向拱效应转化的程度越

收稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51368006、51678165、51668008)

作者简介: 余波(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性和抗震分析研究, E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn.

Received: 2017-10-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51368006, 51678165, 51668008)

Author brief: Yu Bo (1982-), professor, PhD, research interests: durability and seismic analysis of concrete structures, E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn.

高;张梦光等<sup>[2]</sup>通过外加电流加速箍筋锈蚀,开展了 4 根锈蚀箍筋 RC 梁的抗剪性能试验,发现箍筋锈蚀会降低 RC 梁的抗剪性能和变形能力。由于影响锈蚀 RC 梁抗剪性能的因素较多,导致其抗剪承载力分析较为困难。霍艳华<sup>[3]</sup>在未锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型基础上,分别引入经验影响系数  $\varphi$  和  $\gamma'$  来考虑钢筋锈蚀对混凝土和箍筋的抗剪承载力贡献的影响,建立了锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型;赵羽习等<sup>[4]</sup>引入经验影响系数  $P_v$  来考虑箍筋锈蚀的影响;李士彬等<sup>[5]</sup>考虑钢筋锈蚀对箍筋屈服强度和梁有效抗剪截面积的影响,建立了锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型,但忽略了钢筋锈蚀对配筋率、配箍率、临界斜裂缝倾角等重要因素的影响;余璠璠<sup>[6]</sup>基于试验数据拟合分析,确定了钢筋锈蚀对抗剪承载力的影响系数,但当钢筋未锈蚀或锈蚀率较低时,该影响系数为负值,与实际情况不符;El-Sayed<sup>[7]</sup>考虑钢筋锈蚀引起的梁有效抗剪截面积和箍筋截面积改变对抗剪承载力的影响,但忽略了其他重要因素的影响;卢朝辉等<sup>[8]</sup>基于欧洲规范的抗剪承载力公式,分别引入了钢筋锈蚀对箍筋和混凝土承担剪力的折减系数。综上所述,现有的锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型主要是在未锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型基础上,通过引入经验性的钢筋锈蚀影响系数而建立的,缺乏严密的理论推导,且考虑的影响因素不全面,导致计算精度有限。

为此,笔者基于修正压力场理论,通过理论推导分析,建立了可以综合考虑钢筋锈蚀对临界斜裂缝倾角、梁有效抗剪截面积、配筋率、配箍率等关键因素影响的锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型,并通过与 85 组试验数据和现有模型的对比分析,验证了该模型的计算精度。

### 1 锈蚀 RC 梁的抗剪承载力模型

根据修正压力场理论(MCFT)<sup>[9-11]</sup>可知,RC 梁的抗剪承载力  $V$  主要由混凝土和箍筋的抗剪承载力贡献(分别记为  $V_c$  和  $V_s$ )组成。

$$V = V_c + V_s \tag{1}$$

由于钢筋的空间锈蚀分布具有非均匀性,导致其薄弱截面在受力状态下往往会产生应力集中,从而降低钢筋的强度。其中,根据钢筋的截面锈损率  $\eta_{sv}$  可以确定锈蚀箍筋的名义屈服强度  $f_{vyc}$ <sup>[12]</sup>。

$$f_{vyc} = \frac{0.985 - 1.028\eta_{sv}}{1 - \eta_{sv}} f_{vy} \tag{2}$$

式中:  $\eta_{sv} = (A_v - A_{vc})/A_v$ ,  $A_v$  和  $A_{vc}$  分别为箍筋锈

蚀前后的截面积;  $f_{vy}$  为箍筋锈蚀前的屈服强度。

钢筋锈蚀会减小纵筋和箍筋的截面积,从而降低配筋率和配箍率。其中,纵筋和箍筋发生锈蚀后,对应的配筋率  $\rho_{sc}$  和配箍率  $\rho_{vc}$  分别为

$$\begin{aligned} \rho_{sc} &= A_{sc}/(bh_0) \\ \rho_{vc} &= A_{vc}/(bs) \end{aligned} \tag{3}$$

式中:  $b$  为梁的截面宽度;  $h_0$  为梁的截面有效高度;  $s$  为箍筋间距;  $A_{sc}$  为纵筋锈蚀后的截面积。

此外,钢筋锈蚀往往会造成混凝土锈胀开裂或剥落,所以锈蚀 RC 梁的有效截面宽度  $b_c$  需要根据  $\eta_{sv}$  进行修正<sup>[13]</sup>。

$$b_c = \begin{cases} b, & \eta_{sv} \leq 30\% \\ b - 2(c + d_{sv}) + \frac{s}{5.5}, & \eta_{sv} > 30\%, s \leq 5.5c \\ b - \frac{5.5}{s}(c + d_{sv})^2, & \eta_{sv} > 30\%, s > 5.5c \end{cases} \tag{4}$$

式中:  $c$  为混凝土保护层厚度;  $d_{sv}$  为箍筋的直径。

对于外荷载  $P$  作用下发生剪切破坏的 RC 梁,其斜裂缝分布如图 1 所示,从中选取的微元体  $\Omega$  的应力平衡条件和应力莫尔圆<sup>[11]</sup>如图 2 所示。根据微元体  $\Omega$  的应力平衡条件可得

$$f_x = \rho_{sc} f_{sx} - v \cot \theta + f_1 \tag{5}$$

$$f_y = \rho_{vc} f_{sy} - v \tan \theta + f_1 \tag{6}$$

$$f_2 = v(\tan \theta + \cot \theta) - f_1 \tag{7}$$

式中:  $f_x$  和  $f_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向上的总应力;  $f_1$  和  $f_2$  分别为垂直于和平行于混凝土裂缝方向的平均主拉应力和平均主压应力;  $v = \frac{V}{(b_c h_v)}$  为剪应力,  $h_v$  为截面的有效抗剪高度,通常近似取  $h_v = \max(0.9h_0, 0.72h)$ ,  $h$  为 RC 梁的截面高度;  $f_{sx}$  和

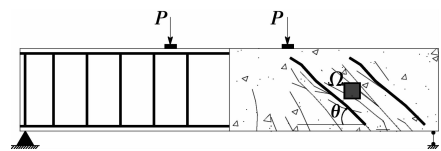


图 1 RC 梁的斜裂缝分布

Fig. 1 Distribution of diagonal crack of RC beam

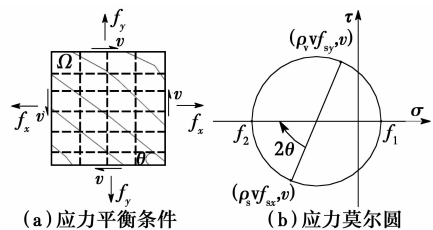


图 2 微元体的应力平衡条件与应力莫尔圆  
Fig. 2 Stress balance condition and stress mohr circle of microelement

$f_{sy}$ 分别为纵向钢筋和横向钢筋的拉应力; $\theta$ 为临界斜裂缝倾角,其计算模型为<sup>[14]</sup>

$$\theta = k_\lambda \arctan \sqrt{\frac{-\alpha_1 k_{nsc} + \sqrt{\alpha_1^2 k_{nsc}^2 + 4(1-\alpha_1)k_{nsc}k_{nvc}}}{2(1-\alpha_1)k_{nvc}}} \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为剪跨比; $k_\lambda = -0.04\lambda + 1.11$ ,为剪跨比修正系数; $k_{nsc} = 1 + (\eta\rho_{sc})^{-1}$ ; $k_{nvc} = 1 + (\eta\rho_{vc})^{-1}$ ; $n = E_s/E_c$ 为钢筋和混凝土之间的弹性模量比, $E_s$ 和 $E_c$ 分别为钢筋和混凝土的弹性模量; $\alpha_1 = v_c/v = V_c/V$ ,建议值为0.38<sup>[14]</sup>; $v_c$ 为与混凝土抗剪承载力贡献值 $V_c$ 对应的剪应力。由于剪应力 $v = V/(b_c h_v)$ ,所以可以将式(7)变换为

$$f_1 + f_2 = v(\tan \theta + \cot \theta) = \frac{V}{b_c h_v}(\tan \theta + \cot \theta) \quad (9)$$

由式(9)可知,截面剪应力 $v$ 由斜拉应力 $f_1$ 和斜压应力 $f_2$ 抵抗。其中, $f_1$ 满足应力-应变关系<sup>[9]</sup>

$$f_1 = \begin{cases} E_c \varepsilon_1 & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \\ \frac{0.33\sqrt{f'_c}}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} & \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{cr}$ 为混凝土的开裂应变,通常取 $0.5 \times 10^{-3}$ <sup>[9]</sup>; $f'_c$ 为混凝土的抗压强度; $\varepsilon_1$ 为主拉应变。

RC梁的受力情况如图3所示,由竖向力平衡条件可得

$$A_v f_{vyc} = (f_2 \sin^2 \theta - f_1 \cos^2 \theta) b_c s \quad (11)$$

式中: $f_{vyc}$ 为锈蚀箍筋的名义屈服强度。

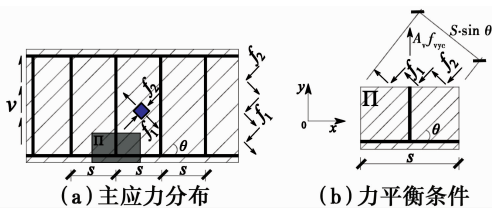


图3 RC梁的主应力和力平衡示意图

Fig. 3 Principal stress and force balance of RC beam

根据式(9)的第1和第2个等式分别可得 $v = \frac{f_1 + f_2}{\tan \theta + \cot \theta}$ 和 $V = v b h_v$ ,将 $v$ 代入 $V = v b h_v$ 可得

$$V = \frac{f_1 + f_2}{\tan \theta + \cot \theta} b h_v. \text{根据式(11)可得 } f_2 = \frac{A_v f_{vyc}}{b s \sin^2 \theta} +$$

$$\frac{f_1 \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta}, \text{将 } f_2 \text{ 代入 } V = \frac{f_1 + f_2}{\tan \theta + \cot \theta} b h_v \text{ 可得}$$

$$V = \frac{f_1 b_c h_v}{\tan \theta + \cot \theta} + \frac{f_2 b_c h_v}{\tan \theta + \cot \theta} =$$

$$\frac{f_1 b_c h_v}{\tan \theta + \cot \theta} + \frac{b_c h_v}{\tan \theta + \cot \theta} \left( \frac{A_v f_{vyc}}{b s} + f_1 \cos^2 \theta \right) \frac{1}{\sin^2 \theta} =$$

$$\frac{f_1 b_c h_v}{\tan \theta + \cot \theta} (1 + \cot^2 \theta) + \frac{A_v f_{vyc} b_c h_v}{b_c s (\tan \theta + \cot \theta)} \times \frac{\sin^2 \theta + \cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} = f_1 b_c h_v \cot \theta + \frac{A_v f_{vyc} h_v}{s} \cot \theta \quad (12)$$

结合式(12)和式(10)可知:抗剪承载力 $V$ 与 $f_1$ 有关,而 $f_1$ 又与 $\varepsilon_1$ 有关。根据MCFT<sup>[9-11]</sup>进一步分析可知, $\varepsilon_1$ 与斜裂缝间距和 $\theta$ 有关,而 $\theta$ 又与待求的 $V$ 有关。所以,式(12)通常需要通过迭代分析才能求解。为了避免迭代分析,通过引入 $\varepsilon_1$ 与箍筋屈服应变 $\varepsilon_y$ 的关系来简化计算<sup>[15]</sup>。

$$\varepsilon_1 = 1.2 \varepsilon_y = 1.2 \frac{f_{vyc}}{E_s} \quad (13)$$

式中: $\varepsilon_y = \frac{f_{vyc}}{E_s}$ 为箍筋的屈服应变。

结合式(1)、式(10)、式(12)和式(13),可以建立锈蚀RC梁的抗剪承载力分析模型

$$V_n = V_c + V_s = f_1 b_c h_v \cot \theta + \frac{A_v f_{vyc} h_v}{s} \cot \theta = \frac{0.33 b_c h_v \sqrt{f'_c}}{1 + \sqrt{600 \frac{f_{vyc}}{E_s}}} \cot \theta + f_{vyc} \frac{A_{sv} h_v \cot \theta}{s} \quad (14)$$

式中: $V_c = f_1 b_c h_v \cot \theta$ 和 $V_s = \frac{A_v f_{vyc} h_v \cot \theta}{s}$ 分别为混凝土和箍筋的抗剪承载力贡献。在实际工程中,可以先根据现场测试<sup>[16-17]</sup>或分析模型<sup>[18]</sup>确定混凝土中的钢筋锈蚀率,然后根据文献<sup>[16,19]</sup>确定钢筋的平均锈蚀深度或最大锈蚀深度,进而根据文献<sup>[20]</sup>来确定钢筋的截面锈损率 $\eta_{sv}$ ,最后结合式(2)、式(4)和式(14)可以计算锈蚀RC梁的抗剪承载力。

## 2 对比分析与验证

选取文献<sup>[4,21-29]</sup>中的85组试验数据来验证模型的计算精度和适用性,见表1。其中,锈蚀RC梁的抗剪承载力实测值 $V_i$ 的范围为41.90~155.80 kN, $h_0$ 的范围为150~265 mm, $b$ 的范围为100~200 mm,实测 $f'_c$ 的范围为14.76~89.40 MPa, $\lambda$ 的范围为1.5~3.5, $n$ 的范围为5.98~9.63, $\rho_s$ 的范围为1.92%~2.79%, $s$ 的范围为150~254 mm, $\rho_v$ 的范围为0.19%~0.56%,实测 $f_{vy}$ 的范围为275.00~524.00 MPa; $\eta_{ss}$ 的范围为0.00%~26.84%, $\eta_{sv}$ 的范围为0.60%~60.10%。基于上述85组试验数据,选取文献<sup>[3-5,7]</sup>中的4种锈蚀RC梁的抗剪承载力分析模型对比验证模型的计算精度。其中,文献<sup>[3]</sup>的锈蚀RC梁的抗剪承载力分析模型为

$$V_{n1} = \varphi \left( \frac{0.08}{\lambda - 0.3} + \frac{100\rho_s}{\lambda f'_c} \right) f'_c b h_0 + \gamma' (0.4 + 0.3\lambda) \frac{A_{sv} f_{vy} h_0}{s} \quad (15)$$

式中： $\varphi$  和  $\gamma'$  分别为考虑钢筋锈蚀对混凝土和箍筋抗剪承载力贡献影响的经验系数； $\rho_s$  为未锈蚀纵筋的配筋率。

文献[4]的锈蚀 RC 梁抗剪承载力分析模型为

$$V_{n2} = P_v \left[ \frac{b h_0}{a/h_0} \frac{C_s}{h_0} \left( 1 - 0.5 \frac{C_s}{h_0} \right) f'_c + 0.5 \rho_v f_{vy} \left( 1 - \frac{C_s}{h_0} \right)^2 \left( \frac{a}{h_0} \right) \right] \quad (16)$$

式中： $P_v$  为考虑箍筋锈蚀影响的经验修正系数； $C_s$  为混凝土的剪压区高度； $a$  为剪跨； $\rho_v$  为未锈蚀箍筋的配箍率。

文献[5]的锈蚀 RC 梁抗剪承载力分析模型为

$$V_{n3} = \frac{1.75}{1 + \lambda} f_t b_c h_{0c} + f_{vy} \frac{A_{sv} h_{0c}}{s} \quad (17)$$

式中： $f_t$  为混凝土的抗拉强度； $h_{0c}$  为 RC 梁锈蚀后的有效截面高度。

文献[7]的锈蚀 RC 梁抗剪承载力分析模型为

$$V_{n4} = 0.17\lambda \sqrt{f'_c} b_c h_0 + \frac{A_{vc} f_{vy} h_0}{s} \quad (18)$$

文献[3-5,7]中的 4 种模型与本文模型的计算值(记为  $V_d$ ) 的对比分析见表 1 和图 4。此外,利用式(19)计算各模型的均方根误差  $\delta_c$ 。

$$\delta_c = \sqrt{\frac{1}{85} \sum_{i=1}^{85} (V_{ti} - V_{pi})^2} \quad (18)$$

式中： $V_{ti}$  和  $V_{pi}$  分别为第  $i$  根锈蚀 RC 梁的抗剪承载力测试值和模型计算值。根据计算结果可知,  $V_{n1}$ 、 $V_{n2}$ 、 $V_{n3}$ 、 $V_{n4}$  和  $V_d$  的  $\delta_c$  分别为 18.77、30.09、45.10、35.63 和 18.21 kN。由此可见,本文模型的  $\delta_c$  最小,说明模型的计算精度更高。

表 1 85 组试验数据的设计参数和抗剪承载力测试值

Table 1 Design parameters and tested shear strength of 85 sets of experimental data

编号	文献	年份	n	$\lambda$	b/mm	h <sub>0</sub> /mm	$\rho_s$ /%	$\rho_v$ /%	s/mm	f <sub>vy</sub> /MPa	f' <sub>c</sub> /MPa	$\eta_{ss}$ /%	$\eta_{sv}$ /%	V <sub>t</sub> /kN	抗剪承载力的模型计算值/kN				
															V <sub>d</sub>	V <sub>n1</sub>	V <sub>n2</sub>	V <sub>n3</sub>	V <sub>n4</sub>
1	[25]	2007	8.71	1.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	23.58	19.98	30.81	43.20	39.29	49.71	52.87	23.68	27.07
2	[25]	2007	8.16	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	26.82	10.48	17.58	42.10	55.70	50.71	48.93	21.47	38.00
3	[25]	2007	9.63	1.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	19.29	0.00	28.60	48.70	50.10	59.92	50.16	22.78	26.69
4	[28]	2010	9.47	2.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	8.25	41.90	52.40	52.44	48.96	20.21	37.92
5	[25]	2007	8.92	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	22.45	0.00	8.25	41.90	53.69	54.05	51.79	20.75	38.84
6	[28]	2010	9.47	1.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	23.03	48.70	49.77	61.91	58.13	22.99	28.22
7	[25]	2007	8.52	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	24.65	9.41	7.05	43.90	53.70	53.28	54.07	21.05	39.91
8	[25]	2007	9.37	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	20.37	5.44	5.78	46.80	51.90	53.25	49.48	20.22	38.70
9	[28]	2010	9.47	2.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	7.10	47.30	52.29	52.79	48.96	20.21	38.21
10	[25]	2007	9.17	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	21.27	0.00	7.10	47.30	52.98	53.65	50.50	20.50	38.70
11	[25]	2007	9.66	1.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	19.17	0.00	15.83	52.10	48.61	62.65	65.86	22.74	29.84
12	[28]	2010	9.47	1.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	15.82	52.10	48.99	63.53	67.28	22.99	30.02
13	[28]	2010	9.47	1.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	7.98	53.00	48.23	65.29	74.67	22.99	31.97
14	[28]	2010	9.47	2.50	100	175	1.94	0.44	200.00	324.00	19.92	0.00	4.01	50.80	52.47	53.73	48.96	20.21	38.98
15	[25]	2007	9.32	1.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	20.59	0.00	7.98	53.00	48.55	66.06	76.02	23.19	32.12
16	[25]	2007	9.12	1.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	21.51	6.30	4.24	52.90	48.51	66.76	77.86	23.36	33.26
17	[24]	2004	7.34	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	33.16	0.00	34.75	47.65	49.13	73.84	52.86	30.01	39.34
18	[25]	2007	8.16	2.50	100	175	1.94	0.44	150.00	324.00	26.84	0.00	4.01	50.80	55.80	58.13	56.18	21.66	41.39
19	[25]	2007	9.15	1.50	100	175	1.94	0.44	100.00	324.00	21.33	3.71	2.99	54.30	48.54	68.06	77.52	23.36	33.53
20	[24]	2004	7.23	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	34.16	0.00	22.37	50.20	63.68	77.74	73.12	30.32	42.34
21	[24]	2004	7.23	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	34.16	0.00	31.88	53.50	49.05	75.61	58.15	30.32	40.33
22	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	26.00	9.20	62.00	59.10	42.27	70.50	22.85	43.18
23	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	1.50	0.80	60.00	61.43	63.50	70.50	23.23	44.40
24	[28]	2011	6.15	3.00	150	150	2.68	0.19	200.00	441.50	47.33	26.20	32.30	53.69	71.82	46.33	48.29	27.40	67.39

续表 1

编号	文献	年份	$n$	$\lambda$	$b/mm$	$h_0/mm$	$\rho_s/\%$	$\rho_v/\%$	$s/mm$	$f_{vy}/MPa$	$f'_c/MPa$	$\eta_{ss}/\%$	$\eta_{sv}/\%$	$V_t/kN$	抗剪承载力的模型计算值/kN				
															$V_d$	$V_{n1}$	$V_{n2}$	$V_{n3}$	$V_{n4}$
25	[24]	2004	7.34	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	33.16	0.00	35.26	61.05	49.20	73.72	52.06	30.01	39.23
26	[28]	2011	6.23	3.00	150	150	2.68	0.19	200.00	441.50	46.12	24.80	32.70	55.43	71.64	47.15	47.21	27.19	66.61
27	[24]	2004	7.34	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	33.16	0.00	24.56	60.00	63.50	76.12	68.66	30.01	41.49
28	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	19.00	8.30	67.00	60.00	49.03	70.50	22.98	43.31
29	[24]	2004	7.52	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	31.65	0.00	18.79	60.15	61.80	75.70	75.87	29.53	42.12
30	[28]	2011	6.83	3.00	150	150	2.68	0.19	200.00	441.50	38.29	5.72	21.50	55.20	84.83	63.93	56.93	26.00	63.94
31	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	2.80	1.70	65.00	61.40	63.35	70.50	23.21	44.27
32	[24]	2004	7.23	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	34.16	0.00	30.77	63.05	48.91	75.86	59.90	30.32	40.56
33	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	8.60	5.10	68.00	60.94	59.39	70.50	23.14	43.78
34	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	4.20	2.70	68.00	61.37	63.19	70.50	23.19	44.12
35	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	14.00	7.20	70.00	60.53	53.94	70.50	23.06	43.47
36	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	6.60	4.00	69.00	61.26	61.47	70.50	23.16	43.94
37	[4]	2008	8.47	2.20	150	155	2.26	0.19	150.00	331.52	24.91	11.60	6.30	72.00	60.72	56.36	70.50	23.10	43.60
38	[24]	2004	7.52	2.00	120	200	1.92	0.32	170.00	275.00	31.65	0.00	19.53	67.30	61.90	75.54	74.74	29.53	41.97
39	[28]	2011	5.97	2.00	150	150	2.68	0.25	150.00	441.50	50.24	24.80	25.30	71.69	87.20	69.40	91.11	37.36	53.21
40	[28]	2011	6.44	2.00	150	150	2.68	0.25	150.00	441.50	43.10	15.80	32.10	78.01	69.20	76.33	71.30	35.71	48.96
41	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.25	150.00	331.52	24.91	0.00	1.80	80.00	72.66	62.61	59.15	23.23	57.76
42	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.25	150.00	331.52	24.91	0.00	0.60	80.00	72.47	62.94	59.15	23.23	58.00
43	[28]	2011	6.36	2.00	150	150	2.68	0.25	150.00	441.50	44.21	6.30	29.50	76.35	88.66	92.28	77.31	36.23	50.03
44	[23]	2010	6.87	2.00	150	175	2.30	0.25	100.00	275.00	37.89	3.17	2.71	75.90	73.35	94.73	111.52	34.07	52.66
45	[22]	2011	8.11	1.50	120	200	2.62	0.48	150.00	321.80	27.15	0.00	54.15	85.20	65.44	98.66	34.03	40.36	31.75
46	[23]	2010	6.87	2.00	150	175	2.30	0.25	100.00	275.00	37.89	2.44	2.61	77.80	73.44	94.75	111.52	34.08	52.68
47	[23]	2010	6.87	2.20	150	175	2.30	0.25	150.00	275.00	37.89	3.14	2.75	79.00	74.52	88.12	99.89	32.68	56.14
48	[28]	2011	6.21	2.00	150	150	2.68	0.25	150.00	441.50	46.32	7.70	21.30	78.17	87.65	94.47	95.60	36.77	52.85
49	[23]	2010	6.87	2.20	150	175	2.30	0.25	100.00	275.00	37.89	3.12	2.71	82.50	74.52	88.12	99.89	32.68	56.15
50	[23]	2010	6.87	2.00	150	175	2.30	0.25	100.00	275.00	37.89	2.04	1.85	83.00	73.37	94.90	111.52	34.09	52.82
51	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.25	150.00	331.52	24.91	0.00	4.00	92.00	73.00	62.02	59.15	23.23	57.34
52	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.38	254.00	331.52	24.91	0.00	0.70	80.00	81.69	76.14	67.50	29.63	64.22
53	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.45	150.00	331.52	24.91	0.00	0.80	76.00	86.91	83.21	72.01	33.07	73.25
54	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.38	150.00	331.52	24.91	0.00	3.50	84.00	82.16	74.98	67.50	29.63	63.40
55	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.38	203.00	331.52	24.91	0.00	0.40	84.00	81.64	76.26	67.50	29.63	64.31
56	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.25	150.00	331.52	24.91	0.00	2.40	96.00	72.75	62.45	59.15	23.23	57.65
57	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.45	150.00	331.52	24.91	0.00	3.80	80.00	87.43	81.75	72.01	33.07	72.21
58	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.38	254.00	331.52	24.91	0.00	2.20	88.00	81.94	75.52	67.50	29.63	63.78
59	[23]	2010	6.87	1.80	150	175	2.30	0.25	100.00	275.00	37.89	3.41	2.77	96.00	72.19	103.25	127.11	35.66	49.16
60	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.45	150.00	331.52	24.91	0.00	3.80	92.00	87.43	81.75	72.01	33.07	72.21
61	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.45	150.00	331.52	24.91	0.00	3.70	92.00	87.41	81.80	72.01	33.07	72.24
62	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.45	150.00	331.52	24.91	0.00	2.00	96.00	87.11	82.63	72.01	33.07	72.83
63	[4]	2008	8.47	3.10	150	155	2.79	0.38	150.00	331.52	24.91	0.00	4.90	104.00	82.40	74.41	67.50	29.63	62.99
64	[22]	2011	8.11	1.50	120	200	2.62	0.56	150.00	463.90	27.15	0.00	25.74	131.50	102.74	123.98	105.72	55.83	63.73
65	[22]	2011	8.11	1.50	120	200	2.62	0.56	150.00	463.90	27.15	0.00	19.54	128.10	101.38	127.46	120.93	55.83	67.60
66	[22]	2011	8.11	1.50	120	200	2.62	0.56	150.00	463.90	27.15	0.00	11.73	129.00	99.82	131.86	140.09	55.83	72.48
67	[29]	2013	6.62	3.00	200	265	2.15	0.20	150.00	433.00	40.80	12.10	60.10	115.40	147.01	109.54	24.04	73.49	159.04
68	[29]	2013	6.62	3.50	200	265	2.15	0.25	150.00	373.00	40.80	8.10	44.30	109.80	143.48	119.40	64.32	71.81	182.40
69	[29]	2013	6.62	3.00	200	265	2.15	0.20	150.00	373.00	40.80	8.60	46.50	119.80	131.89	120.94	59.05	69.02	161.88
70	[29]	2013	6.62	2.50	200	265	2.15	0.14	200.00	476.00	40.80	2.20	17.60	111.80	129.70	157.26	154.37	71.89	139.72

续表 1

编号	文献	年份	n	λ	b/mm	h <sub>0</sub> /mm	ρ <sub>s</sub> /%	ρ <sub>v</sub> /%	s/mm	f <sub>vy</sub> /MPa	f <sub>c</sub> /MPa	η <sub>ss</sub> /%	η <sub>sv</sub> /%	V <sub>t</sub> /kN	抗剪承载力的模型计算值/kN				
															V <sub>d</sub>	V <sub>n1</sub>	V <sub>n2</sub>	V <sub>n3</sub>	V <sub>n4</sub>
71	[29]	2013	6.62	3.50	200	265	2.15	0.25	200.00	433.00	40.80	7.60	40.80	111.20	153.59	129.45	78.10	77.66	188.83
72	[29]	2013	5.98	2.50	200	265	2.15	0.14	150.00	339.00	49.95	1.60	13.30	119.80	125.52	166.69	175.61	70.15	144.20
73	[29]	2013	5.98	3.00	200	265	2.15	0.20	150.00	433.00	49.95	8.30	44.10	115.80	146.32	140.69	74.22	78.71	181.36
74	[29]	2013	5.98	3.00	200	265	2.15	0.20	150.00	524.00	49.95	5.40	32.40	109.80	155.37	162.94	115.72	85.93	193.25
75	[29]	2013	5.98	2.00	200	265	2.15	0.19	100.00	476.00	49.95	7.10	51.10	129.20	136.06	196.07	77.94	95.31	115.94
76	[29]	2013	6.62	2.50	200	265	2.15	0.14	150.00	339.00	40.80	0.90	7.60	137.80	115.91	150.81	168.92	64.42	133.86
77	[29]	2013	5.98	3.00	200	265	2.15	0.20	150.00	373.00	49.95	5.30	30.50	125.70	133.02	150.53	110.64	74.18	183.18
78	[29]	2013	5.98	2.50	200	265	2.15	0.14	150.00	458.00	49.95	7.30	51.40	133.50	129.79	153.25	57.36	76.48	138.91
79	[21]	1997	6.62	2.00	200	265	2.15	0.19	150.00	339.00	40.80	7.50	54.20	147.70	113.25	165.50	56.15	78.48	99.24
80	[29]	2013	5.98	3.50	200	265	2.15	0.25	150.00	373.00	49.95	5.20	29.90	121.60	163.24	147.32	110.42	76.43	206.00
81	[29]	2013	6.62	3.50	200	265	2.15	0.25	200.00	524.00	40.80	7.00	40.80	121.30	171.74	140.40	85.09	86.53	195.97
82	[26]	2006	5.98	3.50	200	265	2.15	0.25	150.00	433.00	49.95	7.10	38.90	121.70	159.09	143.59	90.02	82.16	206.41
83	[29]	2013	6.62	2.00	200	265	2.15	0.19	150.00	458.00	40.80	8.10	55.60	151.60	129.80	168.05	52.45	87.22	104.08
84	[29]	2013	5.98	3.50	200	265	2.15	0.25	150.00	524.00	49.95	5.60	33.20	121.70	174.57	162.85	116.42	91.10	217.73
85	[29]	2013	5.98	2.50	200	265	2.15	0.14	150.00	476.00	49.95	5.40	40.70	155.80	127.08	163.84	93.14	77.53	143.34

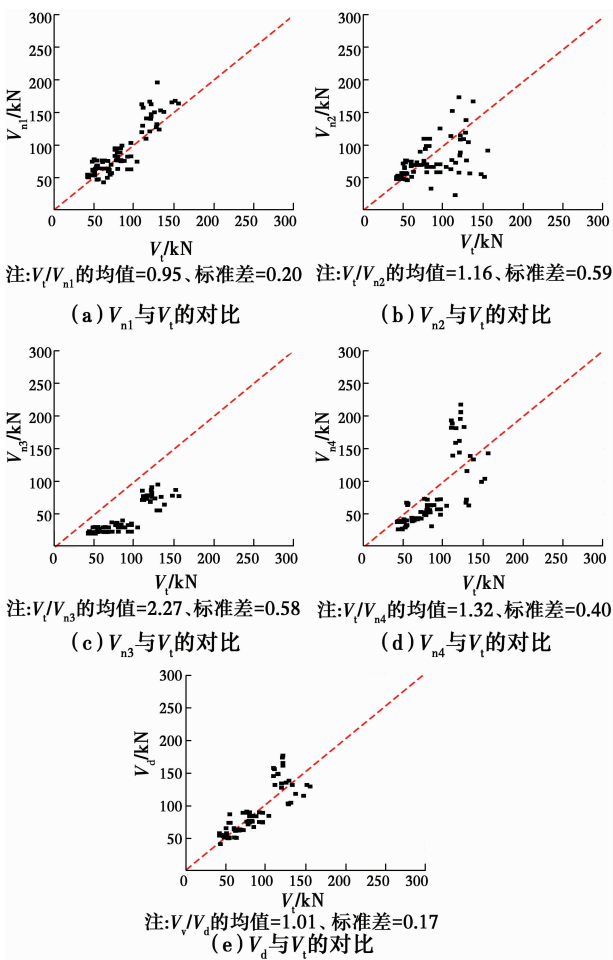


图 4 抗剪承载力的模型计算值与试验值的对比

Fig. 4 Comparison between tested and calculated shear strength

结合图 4 和表 1 可知,  $V_t$  与  $V_{n1}$  的比值的均值(标准差)为 0.95(0.20),说明  $V_{n1}$  具有一定的计算精度,但是该模型无法揭示锈蚀 RC 梁的抗剪机理; $V_t$  与  $V_{n2}$ 、 $V_{n3}$  和  $V_{n4}$  的比值的均值(标准差)分别为 1.16(0.59)、2.27(0.58)和 1.32(0.40),说明这 3 个模型的计算值总体偏小,且离散性较大,原因在于,上述模型考虑的影响因素不全面且缺乏严密的理论基础; $V_t$  与  $V_d$  的比值的均值(标准差)为 1.01(0.17),说明模型的离散性较小,且计算精度较高,主要原因在于该模型是基于修正压力场理论推导建立的,具有较为严密的理论基础,而且综合考虑了多种重要因素的影响。

### 3 结论

基于修正压力场理论,建立了锈蚀 RC 梁的抗剪承载力分析模型,并利用 85 组试验数据开展了对比验证分析。分析结果表明:

1)该模型的计算值与试验值的比值的均值与 1.0 比较接近,且标准差较小,说明模型的计算精度高、离散性小。

2)锈蚀 RC 梁的传统抗剪承载力模型大多属于经验模型,考虑的影响因素不全面且缺乏严密的理论推导,导致计算精度有限。

### 参考文献:

[1] 董卫, 苏志敏, 杨华舒, 等. 箍筋锈蚀对钢筋混凝土梁

- 承载机理影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(6): 86-90.
- DONG W, SU Z M, YANG H S, et al Experimental study on stirrup corrosion effect on the bearing mechanism of reinforced concrete beams [J]. Building Structure, 2016, 46(6): 86-90. (in Chinese)
- [2] 张梦光, 陈月顺, 曾妮, 等. 锈蚀箍筋混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 湖北工业大学学报, 2016, 31(5): 101-103.
- ZHANG M G, CHEN Y S, ZENG N, et al. Test study on shearing capacity of concrete beams with corroded stirrups [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2016, 31(5): 101-103. (in Chinese)
- [3] 霍艳华. 锈蚀钢筋混凝土简支梁受剪承载力研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(Sup1): 910-912.
- HUO Y H. Research on shear capacity of simply supported concrete beam with corroded reinforcement [J]. Industrial Construction, 2006, 36(Sup1): 910-912. (in Chinese)
- [4] 赵羽习, 金伟良. 锈蚀箍筋混凝土梁的抗剪承载力分析[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(1): 19-24.
- ZHAO Y X, JIN W L. Analysis on shearing capacity of concrete beams with corroded stirrups [J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(1): 19-24. (in Chinese)
- [5] 李士彬, 张鑫, 贾留东, 等. 箍筋锈蚀钢筋混凝土梁的抗剪承载力分析[J]. 工程力学, 2011, 28(Sup1): 60-63.
- LI S B, ZHANG X, JIA L D, et al. Analysis for shear capacity of reinforced concrete beams with corrosion stirrups [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(Sup1): 60-63. (in Chinese)
- [6] 余璠璟. 锈蚀钢筋混凝土梁斜截面性能试验研究和分析[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- YU F J. Experiment study and analysis on the diagonal shear property of corroded reinforced concrete beam [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [7] EL-SAYED A K. Shear capacity assessment of reinforced concrete beams with corroded stirrups [J]. Construction & Building Materials, 2017, 134: 176-184.
- [8] 卢朝辉, 李海, 赵衍刚, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪承载力预测经验模型[J]. 工程力学, 2015, 32(Sup1): 261-270.
- LU Z H, LI H, ZHAO Y G, et al. An empirical model for shear strength prediction of corroded RC beams [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Sup1): 261-270. (in Chinese)
- [9] COLLINS M P, MITCHELL D. Prestressed concrete structures [M]. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [10] BENTZ E C, COLLINS M P. Development of the 2004 Canadian Standards Association (CSA) A23.3 Shear provisions for reinforced concrete [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(5): 521-534.
- [11] BENTZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(4): 614-624.
- [12] 惠云玲, 林志伸. 锈蚀钢筋性能试验研究分析 [J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 10-13.
- HUI Y L, LIN Z S, LI R. Experimental study and analysis on the property of corroded rebar [J]. Industrial Construction, 1997, 27(6): 10-13. (in Chinese)
- [13] DE SILVA S, MUTSUYOSHI H, WITCHUKREANGKRAI E. Evaluation of shear crack width in I-shaped prestressed reinforced concrete beams [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(3): 443-458.
- [14] 余波, 陈冰, 唐睿楷, 等. 钢筋混凝土梁临界斜裂缝倾角计算的概率模型[J]. 计算力学学报, 2018, 35(1): 98-104.
- YU B, CHEN B, TANG R K, et al. Probabilistic model for critical crack angle of reinforced concrete beams [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(1): 98-104. (in Chinese)
- [15] HIGGINS W C, FARROW W C. Shear capacity assessment of corrosion-damaged reinforced concrete beams, Final Report SPR 326 [R]. Washington, DC, 2003.
- [16] ANDRADE C, ALONSO C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15: 141-145.
- [17] ANDRADE C, ALONSO C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method [J]. Materials & Structures, 2004, 37: 623-643.
- [18] YU B, YANG L F, WU M, et al. Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54(1): 385-401.
- [19] GONZALEZ J A, ANDRADE C, ALONSO C, et al. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25: 257-264.

- [20] VAL D V. Deterioration of strength of RC beams due to corrosion and its influence on beam reliability [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(9): 1297-1306.
- [21] RODRIGUEZ J, ORTEGAL M, CASAL J. Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement [J]. *Construction & Building Materials*, 1997, 11(4): 239-248.
- [22] XIA J, JIN W L, LI L Y. Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(5): 1794-1805.
- [23] 李学田, 殷惠光. 锈蚀钢筋混凝土梁抗剪能力退化机理和预计模型[J]. *徐州工程学院学报*, 2010, 25(4): 58-63.  
LI X T, YIN H G. Degradation mechanism and predicting models of shearing capacity for corroded reinforced concrete beams [J]. *Journal of Xuzhou Institute of Technology*, 2010, 25(4): 58-63. (in Chinese)
- [24] 徐善华, 牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土简支梁斜截面抗剪性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2004, 25(5): 98-104.  
XU S H, NIU D T. The shear behavior of corroded simply supported reinforced concrete beam [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(5): 98-104. (in Chinese)
- [25] 霍艳华. 锈蚀钢筋混凝土简支梁受剪承载力研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- HUO Y H. Research on shear capacity of simply supported concrete beam with corroded reinforcement [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. (in Chinese)
- [26] FARROW W C. Tests of reinforced concrete beams with corrosion-damaged stirrups [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(1): 133-141.
- [27] 赵冰, 曾凡振. 锈蚀箍筋混凝土简支梁抗剪承载力模型及有限元分析[J]. *中国农村水利水电*, 2010(10): 88-91.  
ZHAO B, ZENG F Z. The model and finite element analysis of shear capacity of simply supported concrete beam with corroded stirrup [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(10): 88-91. (in Chinese)
- [28] 李冰. 局部区段锈蚀的钢筋混凝土梁抗剪承载力试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.  
LI B. Experimental study on the sheara capacity of reinforced concrete beam with partial length corrosion [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [29] 柳世涛. 受腐蚀钢筋混凝土抗剪性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.  
LIU S T. Research on shear behavior of corroded RC beams [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)