

锈蚀钢筋混凝土柱受剪承载力公式评估*

刘明涛¹, 王沛¹, 马财龙^{1,2†}, 钮祥军^{1,2,3}

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆大学 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 新疆建筑设计研究院股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 本文建立了含 86 组矩形截面和 12 组圆形截面的锈蚀 RC 柱受剪破坏试验数据库, 采用基于均值和标准差的整体分析方法, 并结合分析锈蚀率、剪跨比、轴压比、有效配箍特征值等关键参数, 系统评估现有 12 种半经验-半理论受剪承载力模型的预测能力。结果表明: 从整体性评估角度考虑, 吴然立公式对矩形截面锈蚀 RC 柱的预测精度最优(均值为 0.95, 标准差为 0.35); Ngoc(2016) 公式对圆形截面锈蚀 RC 柱的预测精度最佳(均值为 1.13, 标准差为 0.18)。关键参数分析显示, 各模型的预测效果存在显著差异。当箍筋锈蚀率处于不同区间时, 吴然立和 Ngoc(2016) 的模型分别适用于 $\lambda'_s \leq 0.1$ 和 $\lambda'_s > 0.1$ 时矩形截面锈蚀 RC 柱受剪承载力预测; 当轴压比处于不同区间时, 吴然立的模型可适用于矩形截面锈蚀 RC 柱在所有 $\lambda'_s \leq 0.1$ 和 $\lambda'_s > 0.1$ 情况下的受剪承载力预测。

关键词: 锈蚀钢筋混凝土柱; 受剪承载力; 整体性评估; 关键因素评估

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2025.08.09.0001

中图分类号: TU33+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2026)01-0093-013

引文格式: 刘明涛, 王沛, 马财龙, 钮祥军. 锈蚀钢筋混凝土柱受剪承载力公式评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文), 2026, 43(1): 93-105.

英文引文格式: Liu Mingtao, Wang Pei, Ma Cailong, Niu Xiangjun. Evaluation of shear capacity formulas for corroded reinforced concrete columns[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2026, 43(1): 93-105.

Evaluation of Shear Capacity Formulas for Corroded Reinforced Concrete Columns

Liu Mingtao¹, Wang Pei¹, Ma Cailong^{1,2}, Niu Xiangjun^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Xinjiang Key Lab of Building Structure and Earthquake Resistance, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

3. Xinjiang Architectural Design Institute Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830047, China)

Abstract: This study establishes an experimental database of shear failure for corroded RC columns, including 86 rectangular and 12 circular sections. An overall analysis method based on mean and standard deviation is conducted, and a combined analysis of key parameters (corrosion rate, shear span ratio, axial load ratio, effective stirrup characteristic value) is performed to systematically evaluate the predictive capabilities of 12 existing semi-empirical and semi-theoretical shear bearing capacity models. The results indicate that, from a holistic assessment perspective, for rectangular section corroded RC columns, the prediction accuracy of Wu Ranli's formula is optimal (mean of 0.95, standard deviation of 0.35); For circular section corroded RC columns, Ngoc (2016) formula provides the best prediction (mean of 1.13, standard deviation of 0.18). The analysis of key parameters reveals significant differences in the predictive performance of each model. When the stirrup corrosion rate is in different ranges, Wu Ranli's and Ngoc (2016) models are applicable for predicting the shear bearing capacity of rectangular

* 收稿日期: 2025-08-09; 修回日期: 2025-11-14; 录用日期: 2025-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“硫酸盐-氯盐耦合作用下钢筋混凝土柱侵蚀机理与抗力退化模型”(52478215); 新疆维吾尔自治区天山英才-青年拔尖人才“复杂服役环境下 RC 构件抗剪问题及设计方法研究”(2023TSYCCX0110); 国家自然科学基金重点专项“高层建筑结构抗震韧性提升理论与应用技术”(52438010).

作者简介: 刘明涛(1999—), 男, 硕士生, 从事钢筋混凝土构件抗震性能的研究, E-mail: 107552304710@stu.xju.edu.cn.

通信作者: 马财龙(1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构损伤演化与控制的研究, E-mail: macailong@xju.edu.cn.

section corroded RC columns for $\lambda'_c \leq 0.1$ and $\lambda'_c > 0.1$, respectively. When the axial load ratio is in different ranges, Wu Ranli's model is applicable for predicting the shear bearing capacity of rectangular section corroded RC columns in all cases.

Key words: corroded reinforced concrete columns; shear capacity; overall evaluation; evaluation of key factors

0 引言

盐渍土在我国分布广泛,总面积约为36.3万平方公里^[1],钢筋混凝土构件在此环境内遭受侵蚀破坏程度往往比其他地区严重^[2].实际工程中钢筋混凝土柱(Reinforced Concrete, RC)箍筋锈蚀先于纵筋,导致锈蚀RC柱受剪承载力显著降低,进而发生脆性剪切破坏,影响整个结构的安全性和耐久性.故准确评估现有锈蚀RC柱受剪承载力理论模型、合理选取锈蚀评价参数具有重要理论意义.

现有锈蚀RC柱受剪承载力计算公式多以未锈蚀RC柱相关理论为基础推导得出.基于GB 50010—2010^[3]中RC柱受剪设计公式,王振^[4]认为纵筋处于轻微锈蚀状态($\eta_s \leq 5\%$)的混凝土短柱,无需考虑锈蚀影响;当 $\eta_s > 5\%$ 时,可采用纵筋锈蚀率折减系数考虑受剪承载力的降低.颜桂云^[5]以GBJ 10—89^[6]受剪公式为基础,通过引入含纵筋锈蚀率的折减系数来考虑构件受剪性能的降低;同时,通过分析锈蚀后箍筋有效强度及截面积的变化,进一步体现箍筋受剪贡献的下降. Tran等^[7]基于Pan等^[8]改进的“桁架-拱”模型,提出锈蚀RC柱的受剪承载力公式,涵盖箍筋锈蚀后的有效截面积减少、有效强度降低,以及混凝土保护层面积的折减等关键因素. Choe等^[9]提出锈蚀RC柱概率承载力模型,考虑氯化物接触条件、氧浓度、水灰比和养护条件与钢筋截面损失之间的关系,并通过等效削弱纵筋配筋率和箍筋截面来考虑锈蚀RC柱受剪承载力的降低.在锈蚀RC柱受剪承载力模型预测性能评估方面, Ma等^[10]将3个试件的试验数据代入5个现有计算模型进行验证,发现Park等^[11]提出的公式对锈蚀圆柱受剪承载力的预测效果最优.在此基础上, Ngoc(2016)进一步考虑膨胀裂缝因素,引入软化折减系数分析保护层面积减小的不利影响^[12].由于折减系数的差异, Ngoc认为Park公式仅在锈蚀率低于20%的情况下具有较好的预测能力. Xu等^[13]采用机器学习方法,利用180组试验数据,从锈蚀RC柱失效模式和最大承载力预测两方面,评估6个模型在地震作用下的破坏模式和承载力变化,但环境变量与力学指标的对应关系模糊,难以全面反映模型在不同参数组合下的适用性.

诸多学者借助大量试验研究与理论分析,在锈蚀柱受剪机理及模型评估方法方面取得了显著成效.然而,由于数据库样本的局限性及锈蚀因素选取具有差异性,各公式的预测结果有明显差别.为准确评估现有锈蚀RC柱受剪承载力理论模型、丰富受剪数据库,本文通过构建更为完善的锈蚀RC柱受剪试验数据库,并运用“均值+标准差”统计分析 with 关键参数组合分析相结合的评价方法,综合评估现有12种受剪承载力公式,着重探究不同锈蚀参数组合情形下各公式预测结果的差异.

1 受剪承载力模型及锈蚀柱试验数据库

1.1 锈蚀RC柱受剪承载力模型选取与理论基础

本文收集整理了18个半经验-半理论的锈蚀RC柱受剪承载力计算公式,并对其中12个公式开展整体性分析和关键参数分析.模型大致可分为三类:整体折减系数类模型^[14-15]、修正受剪贡献类模型^[4-5,7,9,12-13,16-20]和概率或数据驱动模型^[11,13],详见表1.整体折减系数类模型通过引入与锈蚀率、混凝土强度及轴压比相关的折减系数,考虑钢筋锈蚀对RC柱抗剪的不利影响.修正受剪贡献类模型重点考虑钢筋截面损失、强度退化、柱身有效面积减小及裂缝扩展等不利因素.概率或数据驱动模型借助概率统计或机器学习方法建立受剪承载力预测模型,预测精度表现突出,但对结构破坏机理的阐释能力有限.

表1 受剪承载力计算公式

Table 1 Calculation formulas for shear bearing capacity

参考文献	受剪承载力计算公式	矩形柱/圆柱数量
[4]	$V_u = \beta \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + \frac{f_{yvc} A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N; \beta = \begin{cases} 1, & \eta_s \leq 5\% \\ 1 - 0.8(\eta_s - 5\%), & 5\% < \eta_s < 20\% \end{cases}$	86/12
[5]	$V_u = \frac{0.2}{\lambda + 1.5} \beta f_c b h_0 + 1.25 \frac{f_{yvc} A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N; \beta = \begin{cases} 1, & \eta_s \leq 5\% \\ 1 - (\eta_s - 5\%), & 5\% \leq \eta_s \leq 25\% \end{cases}$	86/12

续表1

参考文献	受剪承载力计算公式	矩形柱/圆柱数量
[7]	$V_u = \min \left[V_{\text{truss}} \left(1 + \frac{K_{\text{strut}}}{K_{\text{truss}}} \right); V_{\text{strut}} \left(1 + \frac{K_{\text{strut}}}{K_{\text{truss}}} \right) \right]; V_{\text{truss}} = V_c + V_s;$ $V_c = 0.166 \sqrt{f'_c} \left(1 + \frac{P}{13.8 A_g} \right) 0.8 (A_{\text{core}} + \sqrt{\zeta} A_{\text{cover}}); V_s = \frac{A_{\text{sv}} f_{\text{yvc}} h_0 \cot \theta}{s}$	86/12
[9]	$\hat{v}(x(t, T_{\text{corr}})) = \frac{V_c + \hat{V}_s(t, T_{\text{corr}})}{A_g f'_t} + \gamma_v(x(t, T_{\text{corr}}), \theta_v); V_c = \frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} 0.8 A_g;$ $\hat{V}_s(t, T_{\text{corr}}) = \frac{A_v(t, T_{\text{corr}}) f_{\text{yv}} h_0}{s}; \gamma_v(x(t, T_{\text{corr}}), \theta_v) = \theta_{v1} \rho_1(t, T_{\text{corr}}) + \theta_{v2} \frac{A_v(t, T_{\text{corr}}) f_{\text{yv}} h_0}{A_g f'_t s}$	86/12
[12]	$V_u = \frac{1}{1 + 1.59 \eta_{\text{vx}}} \left(\frac{0.7 A_{\text{sv}} f_{\text{yv}} h_0}{s} + \frac{0.35 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{N}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} 0.8 A_g \right)$	86/12
[13]	$V_u = k \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} 0.8 A_g + \frac{A_{\text{svc}} f_{\text{yvc}} h_0}{s} \right); P(x) = \sum_{m=1}^M J \{ \omega_m h_m(x) \}$	86/12
[14]	$V_u' = f(f_{\text{cu}}, \eta_s) V_u; f(f_{\text{cu}}, \eta_s) = (-0.025 28 f_{\text{cu}}^2 + 2.382 56 f_{\text{cu}} - 56.953 32) \eta_s + 1$	76/4
[15]	$V_u' = f(\eta_s, n) V_u; f(Q, n) = Q, (an^2 + bn + c) + 1;$ $V_u' = [(-106.124n^2 + 41.192n - 3.572) Q_i + 1] V_u (R = 0.99)$	79/8
[16]	$V_u = V_c + V_s + V_N; V_c = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0; V_N = 0.07 N; V_s = \frac{n \pi f_{\text{yv}} h_0}{4s} \left(d - 2 \sqrt{\frac{55.847 I t}{2\pi \times 96 487 \times \rho \times l}} \right)^2$	86/12
[17]	$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} \phi f_t b h_0 + \alpha f_{\text{yv}} \frac{A_{\text{sv}}}{s} h_0 + 0.07 N; \phi = -0.035 4 \eta_s^2 + 0.625 6 \eta_s - 1.234 9; \alpha = 1 - 1.085 \eta_s$	86/12
[18]	$V_u = V_s + V_c; V_s = \frac{A_{\text{svc}} f_{\text{yvc}} h_0}{s}; V_c = \frac{0.4 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{N}{0.5 \sqrt{f'_c} (A_{\text{core}} + \sqrt{\zeta} A_{\text{cover}})}} (A_{\text{core}} + \sqrt{\zeta} A_{\text{cover}})$	86/12
[19]	$V_u = 0.9(k + P/(13.8 A_g')) \sqrt{f'_c} b d + \frac{f_{\text{yvc}} A_{\text{svc}} h_0}{s}$	86/12
[20]	$V_u = \tau_f b h_c; \tau_f = \frac{M}{b h_c a} \geq \tau_i + f_{\text{yvc}} p_{\text{sv}} \cot \theta_c$	86/12
[21]	$V_u = \frac{0.4 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} A_g + \frac{(1 - \eta_{\text{vs}}) A_{\text{sv}} f_{\text{yv}} h_0}{s}$	86/12
[22]	$V_u = V_c + V_s + V_a; V_c = \beta_1 b_c d_v \sqrt{f'_c}; V_s = \frac{A_{\text{svc}} f_{\text{yvc}} d_v}{s} \cot \theta; V_a = \beta_3 (V_c + V_s)$ $V_u = k (V_c + V_N) + V_s; 0.7 \leq k = -0.075 \mu + 1.15 \leq 1;$	86/12
[23]	$V_c = \frac{h_0 (1 - \sqrt{\rho_{\text{lc}}}) - h/2 + a_s}{l} T_{\text{ucc}} + 0.2 b \sqrt{f'_c} \frac{\bar{\tau}_u(x_l)}{\bar{\tau}_u(0)} \left(\frac{h}{2} - a_s \right);$ $V_N = N \frac{h_0 (1 - \sqrt{\rho_{\text{lc}}}) (1 - 0.57n) - h/2 + a_s}{l}; V_s = \rho_{\text{svc}} f_{\text{yvc}} b h_0$	86/12
[24]	$V_u = V_c + V_s + V_a; V_c = \beta_1 b_c d_v \sqrt{f'_c}; V_s = \beta_2 \frac{A_{\text{svc}} f_{\text{yvc}} d_v}{s}; V_a = \beta_3 (V_c + V_s)$	86/12
[25]	$V_u = V_c + V_s; V_c = \frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{a/h_0} \sqrt{1 + \frac{P}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} 0.8 A_g; V_s = \frac{(1 - \eta_{\text{vs}}) (1 - 0.48 \eta_{\text{vs}}) A_{\text{sv}} f_{\text{yv}} h_0}{s}$	86/12

1.2 锈蚀RC柱数据来源与筛选标准

通过检索锈蚀RC柱受剪性能研究的相关文献,建立了含86组矩形柱和12组圆柱的锈蚀RC柱受剪性能试验数据库^[4,7,10,15,18-19,21,26-43],具体参数见表2. 建立标准为:(1)破坏模式为剪切破坏和弯剪破坏;(2)柱截面为矩形柱和圆柱;(3)试件的重要参数完整,加载制度相近. 锈蚀参数分布方面,数据库内纵筋锈蚀率涵盖0%~65%,约85%的样本集中在5%~20%的轻至中度锈损区间;箍筋锈蚀率为0%~29%,92%的样本集中在0%~

17%的微锈区间. 由配筋构型特征统计可知,体积配箍率和面积配箍率分别在0.3%~2.68%和0.1%~1%之间;箍筋配筋率在2%~3%的样本占比为66.3%,在4%~5%的样本占比为18.7%,还有7.57%的极端高配筋率样本.力学指标方面,剪跨比取值范围为1.5~6,符合短柱定义($\lambda \leq 2$)的样本占比为21.4%,数据库涵盖了长柱、中长柱试验数据.轴压比方面,71.4%的样本处于0~0.3低应力区间,超过0.7的高应力工况仅占7.2%.各参数分布如图1所示.

表 2 锈蚀钢筋混凝土柱试验数据库
Table 2 Experiments database of RC columns

参考文献	数据量	截面类型	箍筋锈蚀率/%	纵筋锈蚀率/%	剪跨比	轴压比	体积配箍率/%
[4]	9	矩形柱	3.2~16.9	4.7~29.9(3)	1.5~2	0.1~0.3	0.619
[7]	3	矩形柱	2.69~2.96	4.2~4.7	2.33	0.2~0.4	0.44~0.59
[10]	6	矩形柱	3.4~7.5	11.4~27.8(2)	1.76	0.1~0.25	2.68
[15]	4	圆柱	6.06~13.73	11.68~19.1	2	0.1~0.2	1.03
[18]	4	圆柱	3.4~10.9	13.6~25(1)	2.84	0.1~0.25	2.68
[19]	9	矩形柱	2.07~15.85	2.52~37.44(3)	3.61	0.42	1.22
[21]	3	矩形柱	0	12.66~21.66(1)	2.89	0.1	1.74
[26]	2	矩形柱	0	15	5.03	0.1~0.15	1.17
[27]	6	矩形柱	0~4.79	15.19~29.15(1)	3.8~3.95	0.4	1.36~1.49
[28]	5	矩形柱	2.53~6.75	5.32~13.17	2.84	0.3	0.7~1.16
[29]	6	矩形柱	3.98~7.89	0	5.08	0.2~0.4	0.87
[30]	4	矩形柱	15.41~28.34(3)	37.83~64.47(4)	3.5	0.3~0.7	0.82
[31]	1	矩形柱	20.29	0	5.91	0.29	0.31
[32]	2	矩形柱	9.1~12.7	24.5~25.5	1.75	0.2	0.58
[33]	6	矩形柱	1.2	13.58~26.07(2)	5.59	0.19	1.14~1.96
[34]	2	矩形柱	16.5~20.5	0	3.87	0.5~0.75	0.35~0.7
[35]	4	矩形柱	0	11.73~35.06(2)	2.7	0	2.25
[36]	6	矩形柱	0	9.23~22.22(2)	5.4	0.14	1.14~1.96
[37]	2	矩形柱	23.7~24.6	20	5.91	0.18	0.31~0.37
[38]	2	矩形柱	0	12.9~22.22(1)	5.88	0.4	1.96
[39]	4	矩形柱	3.4~6.9	9.4~13.4	3.4~5	0	1.23
[40]	1	圆柱	7.3	0	5.68	0.4	1.04
[41]	1	圆柱	16.55	0	4.38	0.3	0.9
[42]	2	圆柱	14.55~15.92	0	5.83	0.3	1.5
[43]	4	矩形柱	11.5~15.1	27.77~35.85(4)	3.15	0.75~0.9	1.09

注:圆柱均为环形箍筋,除文献[4]的箍筋直径为10 mm外,其余圆柱箍筋直径均为8 mm;箍筋锈蚀率、纵筋锈蚀率后括号内数据为锈蚀率大于20%的柱身个数

2 结果与讨论

2.1 整体预测性能评估

将数据库中数据代入各承载力公式,并将预测结果绘制成箱线图(图2)进行整体分析.矩形柱受剪承载力预测中,吴然立和郑溟提出的公式平均预测精度较高,均值分别达到0.95和0.96,表明其预测性能最优;圆柱受剪承载力预测方面,Ngoc(2016)公式预测精度最高,预测稳定性表现最佳.对比图2(a)和图2(b)可知,各公式对矩形柱和圆柱的预测效果存在显著差异.预测圆柱时的平均值(*Mean*值)普遍高于矩形柱,且公式可靠度明显下降,这一现象源于现有研究未充分考虑锈蚀后螺旋箍筋约束效应减弱的影响.进一步分析可知,Ngoc(2016)公式的*Mean*值差异最小(0.27),对不同截面类型锈蚀RC柱的适用性最优;而Dai公式的*Mean*值差异最大(0.66),适用性相对较差.故认为Ngoc(2016)公式对不同截面类型锈蚀RC柱适用性最好,Dai公式适用性较差.图2中出现的个别离散异常点,主要是由试验样本混凝土强度的波动导致,即实测 f_{cu} 低于同组平均值,属于试验误差范畴.

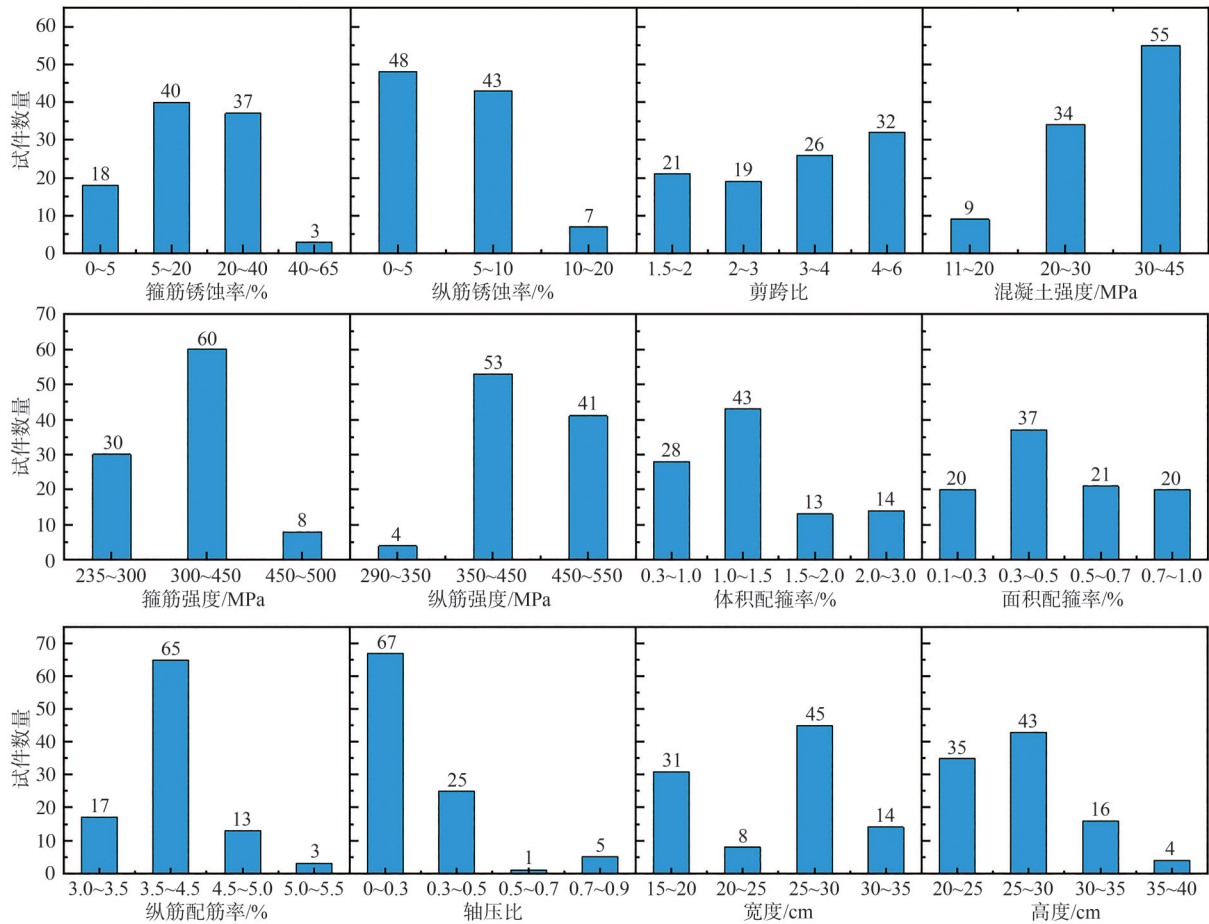


图 1 锈蚀RC柱数据库关键参数分布

Figure 1 Key parameter distribution of the corroded RC column database

2.2 单参数敏感性分析

在整体性评估的基础上,本文进一步从关键劣化参数分区、不同劣化参数组合的角度,分析各公式的合理性. 选取的关键参数包括箍筋锈蚀率(η_v)、剪跨比(λ)、轴压比(n)和有效配箍特征值($\lambda'_v = (1 - \eta_v)\rho_v(1 - 0.5\eta_v)f_{yv}/f_c$),其中有效配箍特征值是本文引入锈蚀RC柱受剪问题讨论的关键. 依据Farrow^[44]的研究,可将箍筋锈蚀率划分为 $[0, 20\%]$ 和 $[20\%, 65\%]$ 两个区间,20%对应中度锈蚀界限,40%为严重锈蚀界限. 但锈蚀率达40%的试验数据仅有3组,代表性不足,故未单独划分区间. 轴压比划分依据GB 50010—2010^[3]关于受剪设计中轴压比的限定,划分为 $n \leq 0.3$ 和 $n > 0.3$ 两个区间. 同时,参考GB 50010—2010^[3]有关一级框架柱箍筋加密区最小配箍特征值的规定,将有效配箍特征值划分为 $\lambda'_v \leq 0.1$ 和 $\lambda'_v > 0.1$ 两个区间. 这些细致的分区,能更深入地探讨各公式在不同参数区间的预测性能及合理性.

2.2.1 箍筋锈蚀率

图3反映了各公式预测结果随箍筋锈蚀率增大的变化规律,横轴为箍筋锈蚀率,纵轴为 V_{cal}/V_{test} ,黄色方块和红色圆圈分别代表矩形柱与圆柱. 矩形柱预测方面,Ngoc(2016)、Tran和Li公式在不同区间 $Mean$ 值差值不超过0.04,稳定性表现较好;Ding、吴然立、郑淦及Ngoc(2016)公式 s 差值不超过0.11,离散性小. 其中Ding和郑淦公式的 $Mean$ 值接近1,且Ding公式的 s 值更小,故更适合锈蚀RC矩形柱受剪承载力预测,这与整体性评估结果不一致. 圆柱预测方面,Ngoc(2016)和Xu公式的 $Mean$ 值差值分别为0.04和0.19,稳定性高;Ding和吴然立公式的 s 差值分别为0.07和0.05,离散性小. 综合 $Mean$ 值和 s 值,Ngoc(2016)公式最适合锈蚀RC圆柱承载力预测,与整体性评估结论一致. 同时可以观察到,红色圆圈普遍高于黄色方块,且多数散落于1以上,意味着各公式对圆柱预测结果较矩形柱偏高且不够保守.

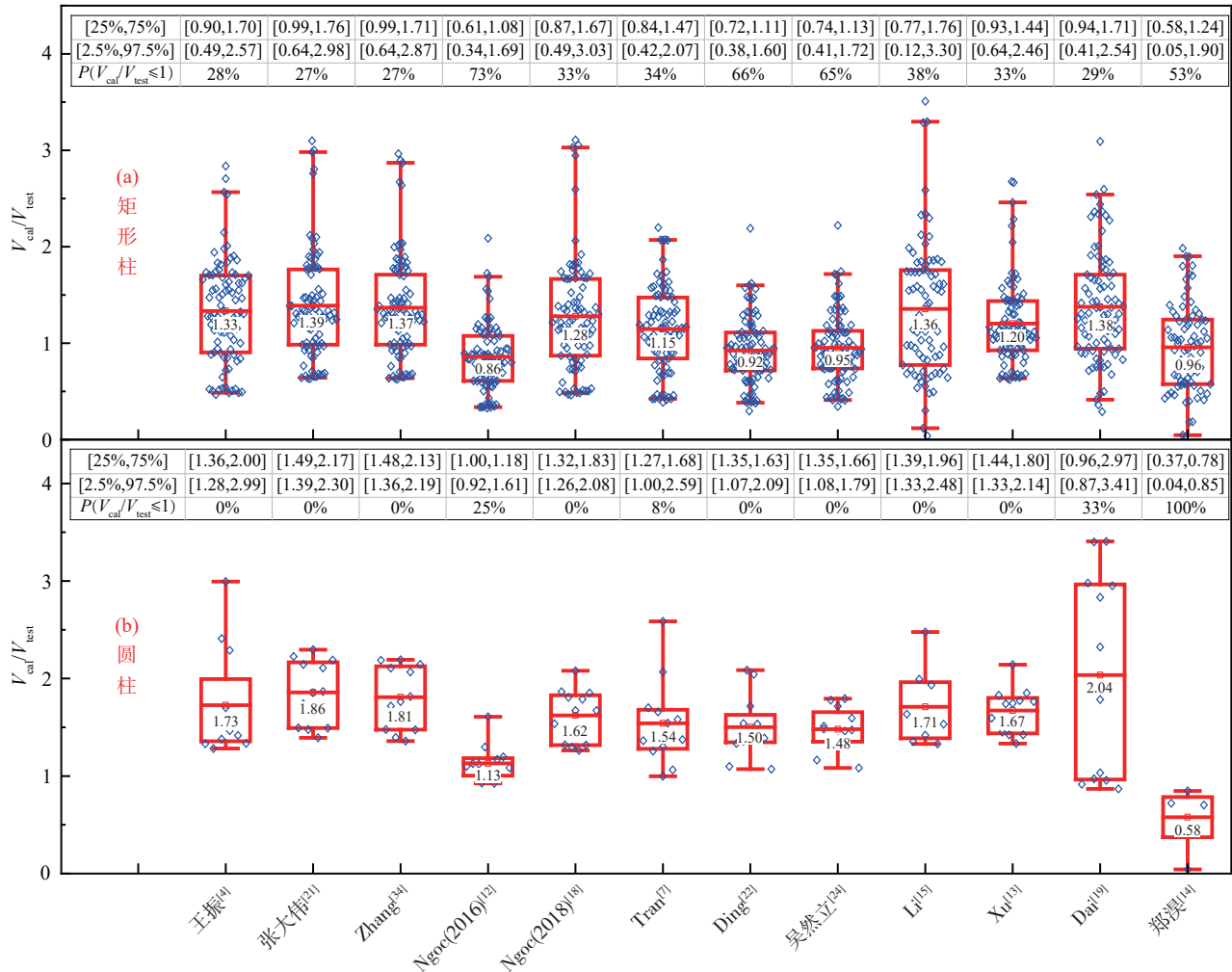


图 2 公式预测结果对比

Figure 2 Comparison of formula prediction results

注:郑湔^[14]的公式预测圆柱时适用数据较少,不参与讨论

2.2.2 有效配箍特征值

图 4 呈现了各公式预测结果随有效配箍特征值($\lambda'_v = (1 - \eta_v) \rho_v (1 - 0.5\eta_v) f_{yv}/f$)的变化规律,横轴为有效配箍特征值,纵轴及图例含义同图 3. 矩形柱预测方面,Ding 和 Li 公式在不同区间的 Mean 值差值均为 0.23,稳定性较好;Ding 和吴然立公式的 s 差值分别为 0.02 和 0.01,离散性控制较为理想. 其中 Ding 公式的 Mean 值更接近 1 且 s 值较小,故最适合矩形柱受剪承载力预测. 圆柱预测方面,当有效配箍特征值处于不同区间时,Mean 值差值较为接近的是 Ding 和吴然立公式,分别为 0.03 和 0.01; s 值较为接近的是张大伟、Zhang 和吴然立公式,差值分别为 0.07、0.06 和 0.09. 但上述公式在进行圆柱承载力预测时精度都较差,预测性能不好,而整体性评估中较优的 Ngoc(2016)在分区间讨论时预测结果差异较大. 矩形柱有效配箍特征值处于不同区间时,Mean 值差异较大的公式是 Ngoc(2018)和郑湔,差值分别为 0.49 和 0.66; s 值差异较大的是王振和 Ngoc(2018)公式,差值分别为 0.2 和 0.14. 圆柱有效配箍特征值处于不同区间时,Mean 值差异较大的是王振和 Tran 公式,差值分别为 0.93 和 0.63; s 值差异较大的是王振和 Xu 公式,差值分别为 0.45 和 0.51. 经上述分析可知,有效配箍特征值处于不同区间时,Ngoc(2018)和王振公式的预测结果差异较大.

综上,Ding 公式在不同有效配箍特征值区间下最适合矩形柱受剪承载力预测,而所有公式对圆柱的预测表现普遍较差. 此外,当有效配箍特征值较大时,矩形柱的 Mean 值普遍较高,表明多数公式的精度和可靠度降低,可能是由于计算中过度考虑了箍筋的有利作用.

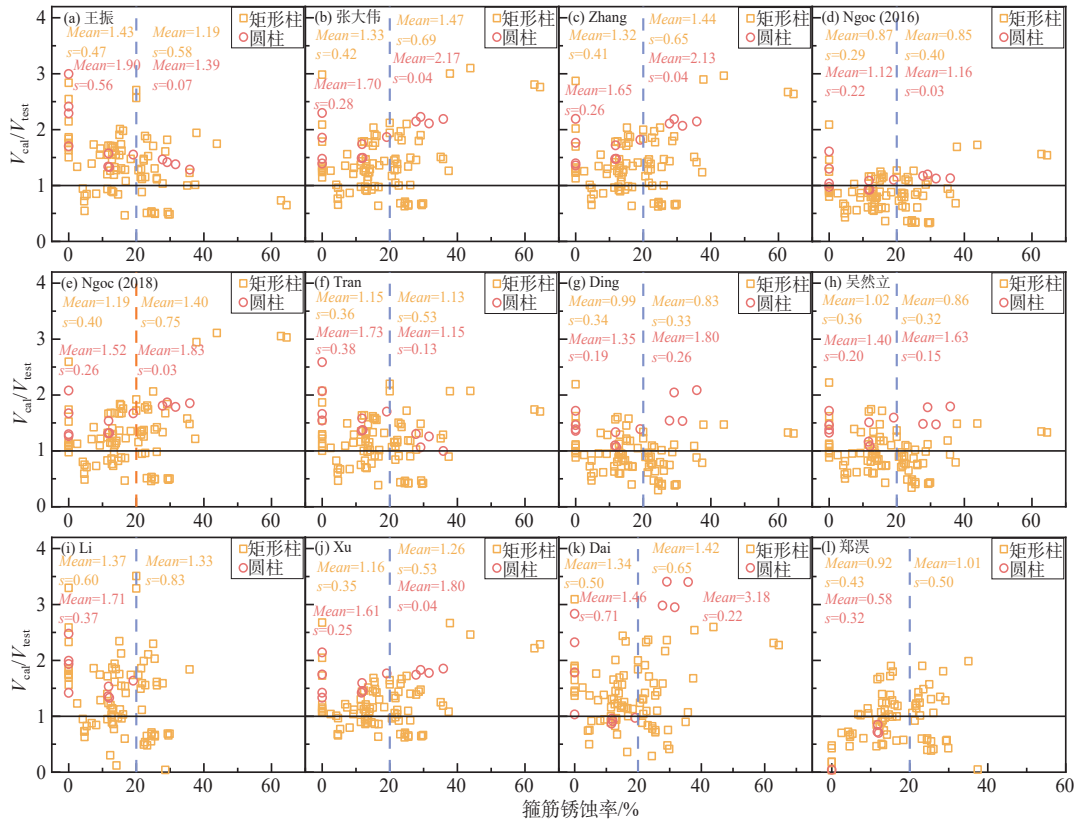


图 3 各公式预测结果随箍筋锈蚀率的变化

Figure 3 Prediction results of each formula versus stirrup corrosion rate

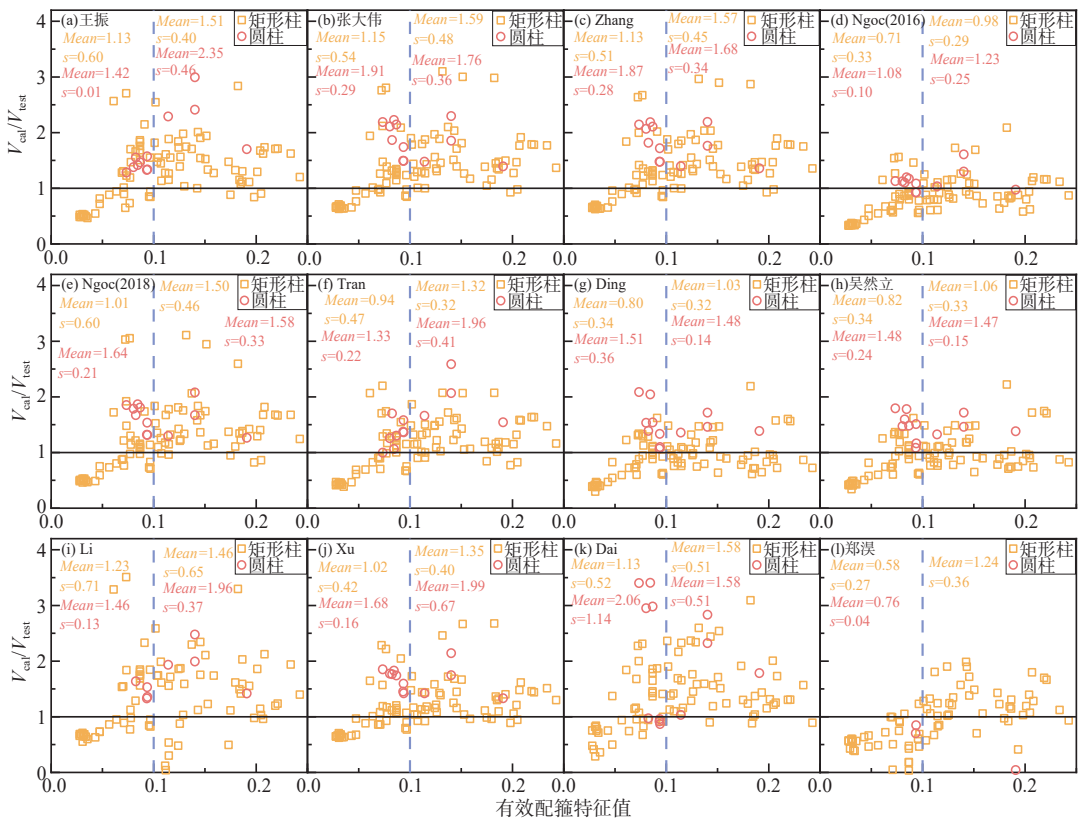


图 4 各公式预测结果随有效配箍特征值的变化

Figure 4 Prediction results of each formula versus effective stirrup ratio characteristic value

2.3 双参数敏感性分析

由上述分析可知,有效配箍特征值分区讨论时,多数公式预测结果差异较大且呈先上升后平缓的趋势.为突出其余参数处于不同区间时公式预测性能的变化,依据 λ'_v 将数据分为两类,分析各公式预测性能随锈蚀率、轴压比和剪跨比的变化规律.由于整体性评估和单参数分区讨论时圆柱部分所得结论趋于一致,且在双参数分区后数据很少,故在后续分析时仅讨论矩形柱公式的预测性能.

2.3.1 锈蚀率与有效配箍特征值

各公式预测结果随箍筋锈蚀率的变化规律如图5所示,横轴和纵轴分别为箍筋锈蚀率和 V_{cal}/V_{test} ,黄色方块与红色圆圈分别代表 $\lambda'_v \leq 0.1$ 和 $\lambda'_v > 0.1$ 的情况. $\lambda'_v \leq 0.1$ 且箍筋锈蚀率处于不同区间时,Mean值较为接近的是Zhang、Ngoc(2016)和Li公式,差值分别为0.09、0.05和0.03;s值较为接近的是Ngoc(2016)、Ding和吴然立公式,差值分别为0.24、0.1和0.09.其中吴然立公式的Mean值较为接近且小于1,故认为其在 $\lambda'_v \leq 0.1$ 时最适合锈蚀RC柱受剪承载力的预测. $\lambda'_v > 0.1$ 且箍筋锈蚀率处于不同区间时,Mean值和s值较为接近的是Ngoc(2016)、Tran和郑淞公式,Mean差值分别为0.03、0.05和0.04,s差值分别为0.01、0.02和0.01.其中Ngoc(2016)公式的Mean值最接近1且s值最小,故认为其在 $\lambda'_v > 0.1$ 时最适合锈蚀RC柱受剪承载力预测. $\lambda'_v \leq 0.1$ 且箍筋锈蚀率处于不同区间时Mean值差异较大的是王振、Ngoc(2018)和郑淞公式,差值分别为0.37、0.19和0.41;s值差异较大的是张大伟、Li和Ngoc(2018)公式,差值分别为0.48、0.55和0.61. $\lambda'_v > 0.1$ 时Mean值差异较大的是Ding和吴然立公式,差值分别为0.2和0.21;s值差异较大的是张大伟、Ngoc(2018)和吴然立公式,差值分别为0.15、0.19和0.14.由上述分析可知,Dai在 $\lambda'_v \leq 0.1$ 且箍筋锈蚀率处于不同区间时预测结果差异较大,吴然立在 $\lambda'_v > 0.1$ 时预测结果差异较大.

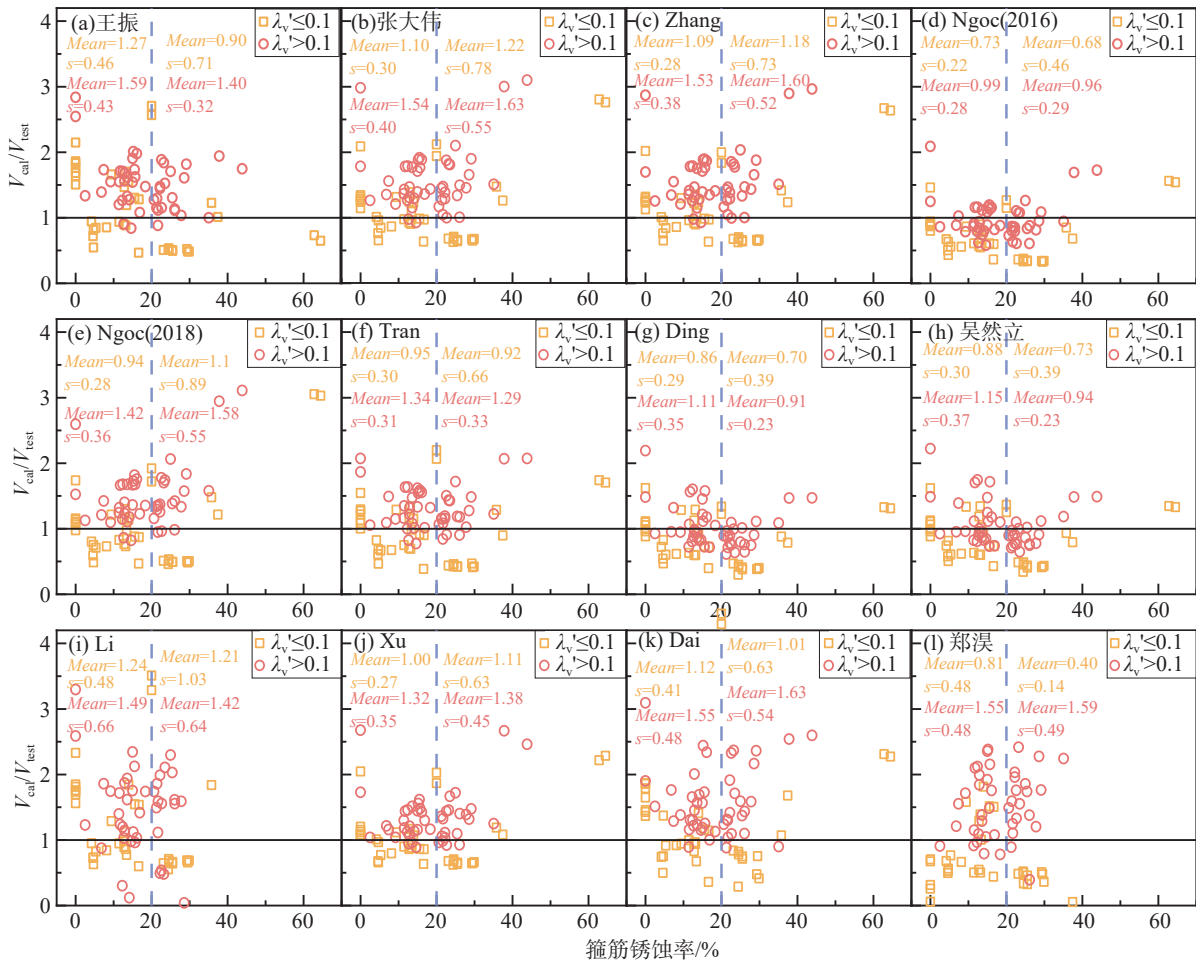


图5 公式预测性能随箍筋锈蚀率的变化

Figure 5 Formula to predict performance variation with stirrup corrosion rate

2.3.2 轴压比与有效配箍特征值

各公式预测结果随轴压比的变化规律如图6所示,横轴和纵轴分别为轴压比和 V_{cal}/V_{test} ,黄色方块和红色圆圈分别代表 $\lambda'_v \leq 0.1$ 和 $\lambda'_v > 0.1$ 的情况. $\lambda'_v \leq 0.1$ 且轴压比处于不同区间时, *Mean* 值较为接近的是王振、吴然立和郑湔公式,差值分别为0.18、0.34和0.33; *s* 值较为接近的是Tran、吴然立和Dai公式,差值分别为0.01、0.04和0.01. 其中吴然立公式的 *Mean* 值最为接近1且 *s* 值较小,故认为其在 $\lambda'_v \leq 0.1$ 时最适合锈蚀RC柱受剪承载力的预测. $\lambda'_v > 0.1$ 且轴压比处于不同区间时, *Mean* 值较为接近的是Tran、吴然立和郑湔公式,差值分别为0.19、0.1和0.21; *s* 值较为接近的是王振、Ding和吴然立公式,差值分别为0.04、0.06、0.05. 其中吴然立公式的 *Mean* 值最为接近1且 *s* 值较小,故认为其在 $\lambda'_v > 0.1$ 时最适合锈蚀RC柱受剪承载力的预测. $\lambda'_v \leq 0.1$ 且轴压比处于不同区间时, *Mean* 值差异较大的是Ngoc(2018)和Dai公式,差值分别为0.76和0.98; *s* 值差异较大的是张大伟和Ngoc(2018)公式,差值分别为0.32和0.5. $\lambda'_v > 0.1$ 时 *Mean* 值差异较大的是Li和Dai公式,差值分别为0.79和0.88; *s* 值差异较大的是张大伟和Li公式,差值分别为0.33和0.42. 由上述分析可知,Ngoc(2018)公式在 $\lambda'_v \leq 0.1$ 且轴压比处于不同区间时预测结果差异较大, Li公式在 $\lambda'_v > 0.1$ 时预测结果差异较大. 轴压比大于0.3时多数公式的 *Mean* 值都较大且大于1,表明在此区间公式的安全性不足,主要是未考虑高轴压比对受剪承载力的不利影响所致.

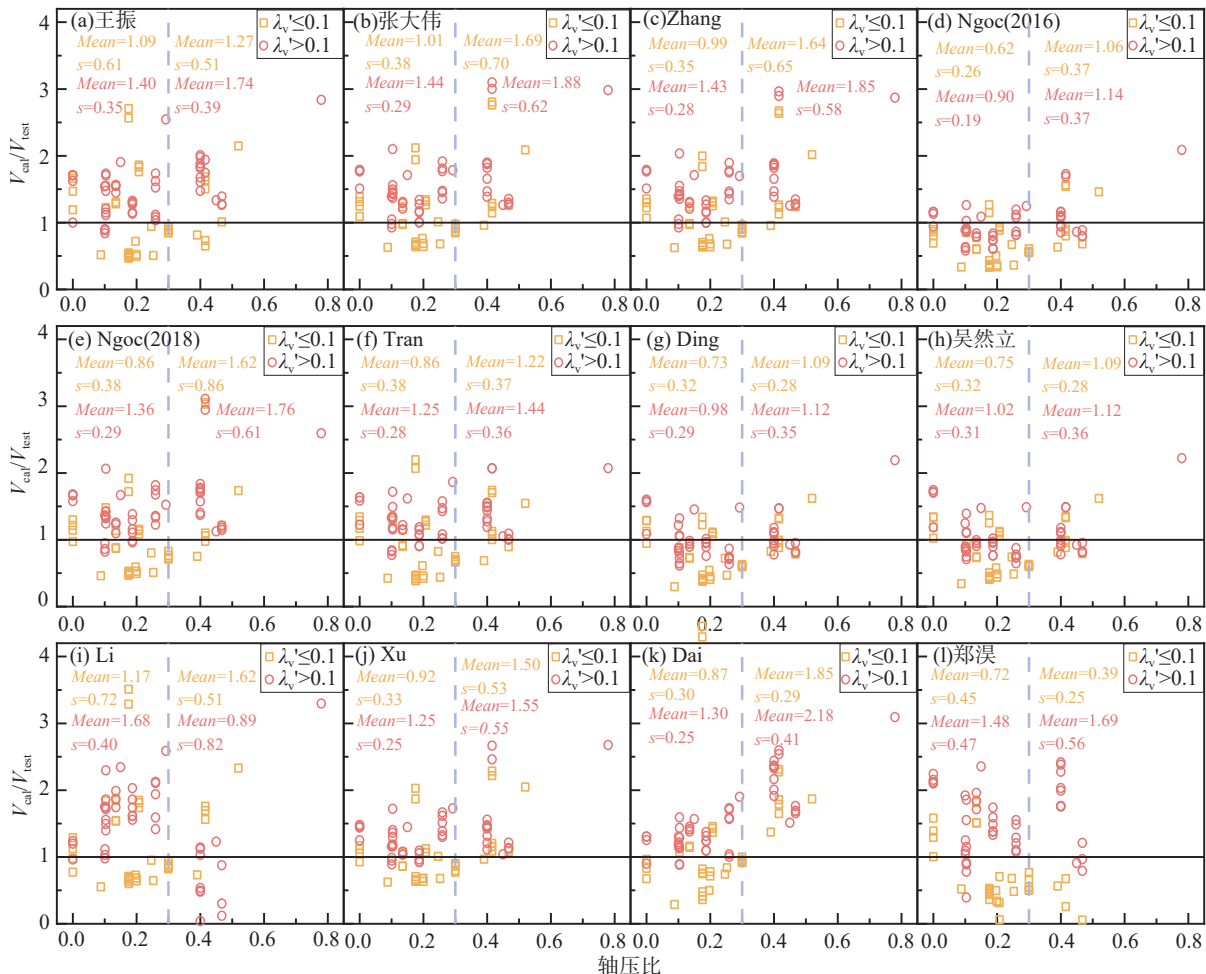


图6 公式预测性能随轴压比的变化

Figure 6 Formula to predict performance variation with axial compression ratio

2.3.3 剪跨比与有效配箍特征值

各公式预测结果随剪跨比的变化规律如图7所示,横轴和纵轴分别为剪跨比和 V_{cal}/V_{test} ,黄色方块和红色圆圈分别代表 $\lambda'_v \leq 0.1$ 和 $\lambda'_v > 0.1$ 的情况. 由于数据库中矩形柱 $\lambda \leq 2$ 的数据较少,且 λ'_v 分类后数据更少,故不再进

行剪跨比的分区讨论. $\lambda_v \leq 0.1$ 时,各公式预测结果基本呈先上升后平缓的趋势; $\lambda_v > 0.1$ 时,Ngoc(2016)、Ding和吴然立公式基本呈先上升后平缓的趋势, Li公式的预测结果离散、无明显趋势,其余公式基本呈较为平缓的趋势. 剪跨比较大时,多数公式预测结果偏大且不保守,建议限定区间使用或在剪跨比较大时进行调整.

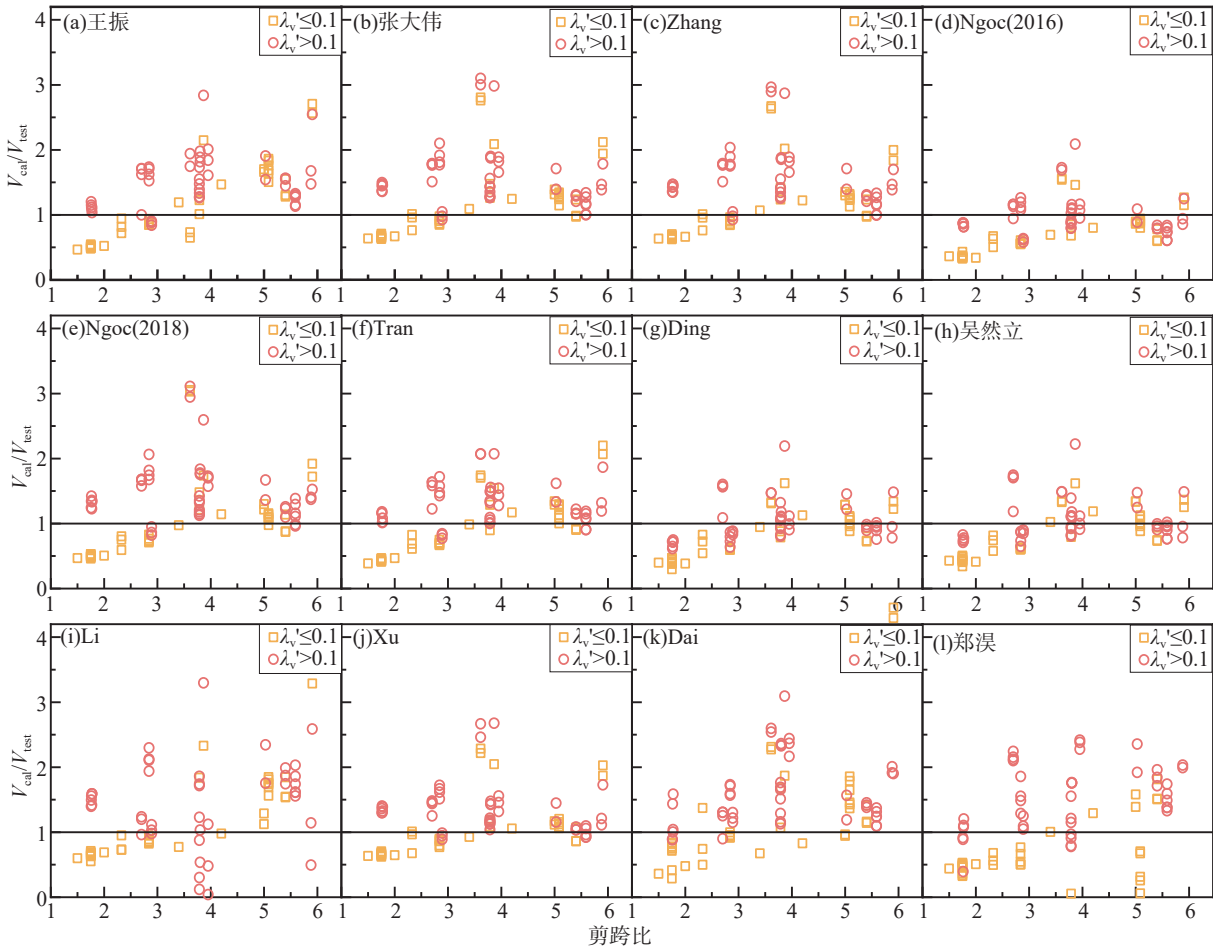


图 7 公式预测性能随剪跨比的变化

Figure 7 Formula to predict performance variation with shear-span ratio

3 结论

本文基于收集的 98 组锈蚀 RC 柱受剪性能试验数据,对 12 个受剪承载力计算公式进行整体性评估与关键参数评估,分析其预测精度及稳定性. 重点讨论了各公式在不同箍筋锈蚀率、有效配箍特征值、剪跨比和轴压比时的预测结果,并与整体性评估所得结论进行对比,针对各公式的使用给出以下建议.

(1) 整体折减系数类模型考虑锈蚀因素较少,高锈蚀率、高轴压比时折减系数小于 0. 修正受剪贡献类模型考虑锈蚀因素较为全面,但在受剪理论、关键劣化参数选取方面有待统一. 概率或数据驱动模型预测精度较高,但其与受力机制的对应性并不明确.

(2) 整体性评估时,吴然立提出的受剪设计公式最适合矩形截面锈蚀 RC 柱的受剪承载力预测,Ngoc(2016)公式对圆形截面锈蚀 RC 柱预测性能最好. 进行圆柱预测时,所有公式对圆形截面锈蚀 RC 柱整体性评估结果均低于矩形柱,后续工作中需关注此问题.

(3) 根据单参数影响分析,当箍筋锈蚀率处于不同区间时,Ding和Ngoc(2016)公式分别最适合矩形柱和圆柱的受剪承载力预测;当有效配箍特征值处于不同区间时,Ding公式最适合矩形柱的受剪承载力预测;王振、Ding和吴然立公式等考虑钢筋锈蚀给混凝土直接或间接带来的不利影响值得借鉴.

(4) 依据 λ_v 分类后的双参数影响分析,当箍筋锈蚀率处于不同区间时,吴然立和Ngoc(2016)公式分别最

适合 $\lambda_v \leq 0.1$ 和 $\lambda_v > 0.1$ 时矩形柱的受剪承载力预测;当轴压比处于不同区间时,吴然立公式均适合 $\lambda_v \leq 0.1$ 和 $\lambda_v > 0.1$ 时矩形柱的受剪承载力预测;需更合理考虑侵蚀环境下高轴压比和剪跨比带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845. (in Chinese)
- [2] 冷发光, 马孝轩, 丁威, 等. 滨海盐渍土环境中暴露 17 年的钢筋混凝土桩耐久性分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 148-151+144.
Leng F G, Ma X X, Ding W, et al. Durability analysis of RC piles exposed naturally in coastal saline soil environment for 17 years[J]. Building Structure, 2011, 41(11): 148-151+144. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范(2015年版): GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures (2015 Edition): GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 王振. 锈蚀钢筋混凝土短柱抗震性能及加固的试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2014.
Wang Z. Experimental study on seismic performance and strengthening of corroded RC short columns[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [5] 颜桂云. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究与承载力的理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001.
Yan G Y. Experimental research on hysteretic characteristics and theoretical analysis of bearing capacity of corroded RC members with flexural and compressive axial loads [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GBJ 10—89[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GBJ 10—89[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989. (in Chinese)
- [7] Tran C T N, Nguyen X H, Nguyen H C, et al. Strut-and-tie model for shear capacity of corroded reinforced concrete columns[J]. Advances in Concrete Construction, 2020, 10(3): 185-193.
- [8] Pan Z F, Li B. Truss-arch model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(4): 548-560.
- [9] Choe D E, Gardoni P, Rosowsky D, et al. Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 383-393.
- [10] Ma G, Li H, Hwang H J. Seismic behavior of low-corroded reinforced concrete short columns in an over 20-year building structure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106: 90-100.
- [11] Park H G, Yu E J, Choi K K. Shear-strength degradation model for RC columns subjected to cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2012, 34: 187-197.
- [12] Vu N S, Yu B, Li B. Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 304-318.
- [13] Xu J G, Hong W, Zhang J, et al. Seismic performance assessment of corroded RC columns based on data-driven machine-learning approach[J]. Engineering Structures, 2022, 255: 113936.
- [14] 郑溟, 郑山锁, 贺金川, 等. 酸雨环境下 RC 短柱抗震性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(2): 171-178.
Zheng H, Zheng S S, He J C, et al. Experimental study of seismic behavior of RC short columns under acid rain environment[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(2): 171-178. (in Chinese)
- [15] Li Y L, Zheng S S, Shang Z G, et al. Experimental study on the seismic behavior of ECE corroded reinforced concrete short pier columns[J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128681.
- [16] 陈少杰, 任建喜, 李强, 等. 箍筋加速锈蚀试验方法及适用性研究[J]. 混凝土, 2017(11): 40-43+49.

- Chen S J, Ren J X, Li Q, et al. Stirrup accelerate corrosion test method and applicability[J]. *Concrete*, 2017(11):40-43+49. (in Chinese)
- [17] 吴晓帆, 赵斌, 倪雨林, 等. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件受剪承载力计算[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2007, 24(4): 59-61+75.
- Wu X F, Zhao B, Ji Y L, et al. Shear capacity calculation method of corroded reinforced concrete beam[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Urban Science Edition)*, 2007, 24(4): 59-61+75. (in Chinese)
- [18] Vu N S, Li B. Seismic performance assessment of corroded reinforced concrete short columns[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(4):04018018.
- [19] Dai K Y, Lu D G, Yu X H. Experimental investigation on the seismic performance of corroded reinforced concrete columns designed with low and high axial load ratios[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 102615.
- [20] 邢国华, 杨成雨, 常召群, 等. 锈蚀钢筋混凝土柱的修正压-剪-弯分析模型研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(8):87-95.
- Xing G H, Yang C Y, Chang Z Q, et al. Study on modified axial-shear-flexure interaction model for corroded reinforced concrete columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(8):87-95. (in Chinese)
- [21] Zhang D W, Zhao Y X, Jin W L, et al. Shear strengthening of corroded reinforced concrete columns using pet fiber based composites[J]. *Engineering Structures*, 2017, 153: 757-765.
- [22] Ding Z H, Zheng S X, Yu B. Probabilistic prediction and calibration for residual shear strength of corroded reinforced concrete columns[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 48: 103901.
- [23] Yang S Y, Liu X L. Seismic analytical model of shear strength for corroded RC column[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(8):2671-2684.
- [24] 吴然立. 锈蚀钢筋混凝土柱的抗剪机理及概率抗剪承载力研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- Wu R L. Study on shear mechanism and probabilistic shear strength of corroded reinforced concrete columns[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [25] Zhang Y J, Desroches R, Tien I. Impact of corrosion on risk assessment of shear-critical and short lap-spliced bridges[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189:260-271.
- [26] 陈光, 陈俊成, 周彤, 等. 锈蚀钢筋混凝土墩柱抗震性能试验和数值分析[J]. *公路工程*, 2021, 46(5):15-23.
- Chen G, Chen J C, Zhou T, et al. Analysis of seismic performance of corroded RC pier[J]. *Highway Engineering*, 2021, 46(5):15-23. (in Chinese)
- [27] Luo X Y, Cheng J F, Xiang P, et al. Seismic behavior of corroded reinforced concrete column joints under low-cyclic repeated loading[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, 20:40.
- [28] Zheng H, Zheng S S, Zhang Y X, et al. Experimental investigation on seismic behaviours of reinforced concrete columns under simulated acid rain environment[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020:3826062.
- [29] Chang Z Q, Xing G H, Luo D M, et al. Seismic behaviour and strength prediction of corroded RC columns subjected to cyclic loading[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2020, 72(17/18):900-918.
- [30] Celik A, Yalciner H, Kumbasaroglu A, et al. An experimental study on seismic performance levels of highly corroded reinforced concrete columns[J]. *Structural Concrete*, 2022, 23(1):32-50.
- [31] Meda A, Mostosi S, Rinaldi Z, et al. Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns[J]. *Engineering Structures*, 2014, 76: 112-123.
- [32] Xu Y Y, Huang J Q. Cyclic performance of corroded reinforced concrete short columns strengthened using carbon fiber-reinforced polymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118548.
- [33] 杨光. 锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能退化规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- Yang G. Research on the deterioration of the seismic performance of corroded reinforced concrete columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [34] Zhang W P, Liu Y, Hu F, et al. Experimental and numerical investigation on seismic performance of corroded RC columns of low-strength concrete[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2023, 21: 2103-2140.
- [35] Ou Y C, Chen H H. Cyclic behavior of reinforced concrete beams with corroded transverse steel reinforcement[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 140(9):04014050.
- [36] Li Q, Niu D T, Xiao Q H, et al. Experimental study on seismic behaviors of concrete columns confined by corroded stirrups and lateral strength prediction[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 704-713.

- [37] Rinaldi Z, Di-Carlo F, Spagnuolo S, et al. Influence of localised corrosion on the cyclic response of reinforced concrete columns[J]. *Engineering Structures*, 2022, 256: 114037.
- [38] 陈茗宇. 锈蚀箍筋混凝土压弯构件抗震性能试验与恢复力模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
Chen M Y. Research of seismic performance and hysteresis model of corroded stirrups confined concrete members with flexure and compression[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)
- [39] 郑山锁, 张艺欣, 黄鹰歌, 等. 酸雨环境下钢筋混凝土框架梁抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9): 20-27.
Zheng S S, Zhang Y X, Huang Y G, et al. Experimental study on seismic behaviors of reinforced concrete frame beams in simulated acid environment[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(9): 20-27. (in Chinese)
- [40] Zhou Y W, Chen X, Wang X H, et al. Seismic performance of large rupture strain FRP retrofitted RC columns with corroded steel reinforcement[J]. *Engineering Structures*, 2020, 216: 110744.
- [41] Li Y, Liu J L, Wang Z G, et al. Investigation of seismic performance of RC column with electrochemical chloride extraction-strengthening by MPC-CFRP[J]. *Engineering Structures*, 2021, 247: 113228.
- [42] Liu X F, Li Y. Experimental study of seismic behavior of partially corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened with FRP composites with large deformability[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 1071-1081.
- [43] Ma Y, Che Y, Gong J X. Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 548-556.
- [44] Farrow W C. Shear capacity assessment of corrosion-damaged reinforced concrete beams[D]. Corvallis: Oregon State University, 2003.

责任编辑: 刘 敏