

# 反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土矩形柱力学性能研究

周 凯, 高佳辉

浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年12月1日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年4月16日

## 摘 要

为了研究锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能, 本文采用了Abaqus软件, 对钢筋混凝土矩形柱进行了数值模拟。本文分析了锈蚀率、轴压比、非加密区箍筋间距、纵筋直径等因素对其抗震性能的影响。研究结果表明, 在反复荷载作用下, 随着锈蚀率和非加密区箍筋间距的增加, RC矩形柱的水平向抗剪承载力明显下降, 其延性也随之降低。增大纵筋直径可以有效提高RC矩形柱的抗剪承载力并增强其延性。然而, 随着轴压比的增加, RC矩形柱的抗剪承载力显著提高, 但其延性却明显降低。随非加密区箍筋间距增大, RC矩形柱的抗剪承载力和延性显著下降。

## 关键词

锈蚀, 钢筋混凝土矩形柱, 力学性能, 数值模拟

# Study on Mechanical Properties of Corroded Reinforced Concrete Rectangular Columns under Repeated Loads

Kai Zhou, Jiahui Gao

School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Dec. 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To conduct a study on the seismic performance of corroded reinforced concrete rectangular columns, this paper utilized Abaqus software to carry out numerical simulations. The research analyzed various factors, including corrosion rate, axial compression ratio, stirrup spacing in non-critical regions, and longitudinal reinforcement diameter, and their impact on the seismic resis-

tance of these columns. The results indicated that under repeated loading conditions, the horizontal shear capacity of RC rectangular columns significantly decreased with an increase in corrosion rate and stirrup spacing in non-critical regions, accompanied by a reduction in ductility. However, enlarging the diameter of longitudinal reinforcement effectively enhanced both the shear capacity and ductility of the RC rectangular columns. On the other hand, as the axial compression ratio increased, the shear capacity of the RC rectangular columns improved notably, but there was a marked decrease in ductility. Additionally, an increase in stirrup spacing in non-critical regions led to a significant decline in both the shear capacity and ductility of the RC rectangular columns.

## Keywords

Corrosion, Reinforced Concrete Rectangular Column, Mechanical Properties, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着钢筋混凝土建筑服役年限的增长,其不可避免地会受到各种环境因素的共同作用,导致出现一定程度的损伤,如钢筋锈蚀、混凝土碳化等,严重的甚至会导致钢筋混凝土建筑的破坏,严重危害了人们的生命安全,其中危害最大的、影响最广泛的当属钢筋锈蚀[1]。钢筋锈蚀在钢筋混凝土结构中具有严重的破坏性影响。它不仅会导致钢筋的有效截面面积大幅减少,进而降低其力学性能,还会因锈蚀产物的膨胀作用而在混凝土保护层上沿着钢筋纵轴方向形成裂缝。这些裂缝的产生会进一步削弱钢筋与混凝土之间的黏结性能[2]。此外,箍筋的锈蚀也会降低其对核心区混凝土的约束作用,进而对整个结构的抗震性能产生不利影响。

已有研究显示:随着钢筋锈蚀率的增加,钢筋混凝土柱的承载力下降、延性变差[3]。蒋连接等发现低锈蚀率试件与未锈蚀试件破坏形式基本相同,高锈蚀率试件滞回曲线饱满程度和滞回环面积均减小[4],[5];陈茗宇等人研究表明,箍筋锈蚀是导致试件承载力下降的一个重要因素,原因是锈蚀使得保护层过早地开裂和剥落,从而使保护层失去其功能[6]。通过构建有限元模型,能够获得试验中难以直接获取的参数信息,从而更全面地了解构件的性能特点。同时,有限元方法还能够有效避免试验结果离散性带来的分析难题,确保后期分析的准确性和可靠性[7]。鉴于实验室制备锈蚀试件的过程既耗时又成本较高,数值模拟方法因其便捷性和经济性在钢筋混凝土结构耐久性研究中得到了广泛应用。这种方法能够更有效地模拟和分析钢筋锈蚀对结构性能的影响,为结构设计和维护提供有力支持,帮助优化设计方案,提高结构抗震性能。

为探究反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土矩形柱的力学性能,本文对一系列钢筋混凝土矩形柱在反复荷载作用下的抗震性能进行数值模拟,分析锈蚀率、轴压比、混凝土强度等级和纵筋直径对其抗震性能的影响,为锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震设计和维护提供理论依据和实践指导。

## 2. 有限元模型的建立

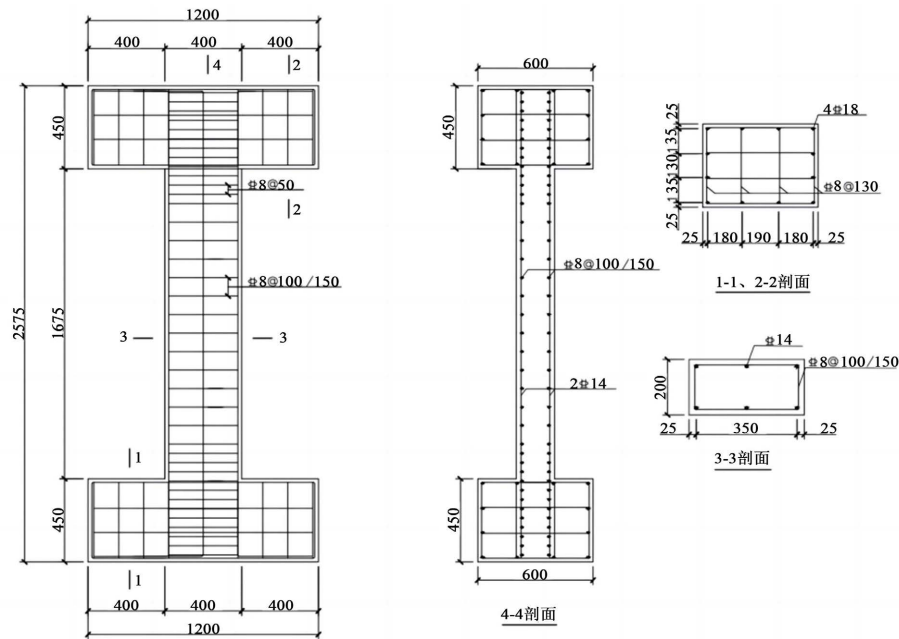
### 2.1. 模型建立

试件简介,试件选自自作试验试件 C2,混凝土为 C30,材料信息如表 1 所示。柱长 1675 mm,底端

固定, 竖向作动器施加 460.64 kN 轴向力, 水平循环往复荷载通过液压作动器施加在加载梁距柱顶 25 mm 高处。柱身截面尺寸 400 mm × 200 mm。基础梁和加载梁截面尺寸 600 mm × 450 mm, 混凝土保护层厚度 25 mm (图 1)。

**Table 1.** Concrete material information  
**表 1.** 混凝土材料信息

混凝土标号	$f_{cu,m}/\text{MPa}$	$f_{ck}/\text{MPa}$
C30	43.5	28.79



**Figure 1.** Specimen dimensions and reinforcement diagram  
**图 1.** 试件尺寸及配筋图

## 2.2. 本构模型

混凝土材料采用 ABAQUS 有限元软件自带的混凝土损伤塑性模型(CDP 模型)。该模型将混凝土的非线性行为以各向同性弹性损伤和受拉、受压塑性来模拟, 同时考虑了拉压塑性应变导致的弹性刚度退化及反复加卸载过程的刚度恢复。这一模型适用于模拟混凝土在循环荷载作用下的受力情况, 并能够准确预测混凝土在复杂应力状态下的响应。混凝土单轴拉压受压的本构关系式则依据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) [8]。混凝土单轴受压本构关系式见公式(1)~(5)。

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{p_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (3)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (4)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (5)$$

式中  $\alpha_c$  ——混凝土单轴受压应力 - 应变曲线下降段参数值。

$f_{c,r}$  ——混凝土单轴抗压强度代表值, 取混凝土轴心抗压强度。

$\varepsilon_{c,r}$  ——与单轴抗压强度  $f_{c,r}$  相应的混凝土峰值压应变。

$d_c$  ——混凝土单轴受压损伤演化参数

混凝土单轴受压本构关系式见公式(6)~(9)

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \quad (6)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^3] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (9)$$

式中  $\alpha_t$  ——混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线下降段参数值。

$f_{t,r}$  ——混凝土的单轴受拉强度代表值。

$\varepsilon_{t,r}$  ——与单轴抗压强度代表值  $f_{t,r}$  对应的混凝土峰值拉应变。

$d_t$  ——混凝土单轴受压损伤演化参数。

此外, CDP 模型中塑性参数还包括膨胀角  $\Psi$ 、偏心率  $\varphi$ 、双轴抗压强度与单轴抗压强度之比  $f_{b0}/f_{c0}$ 、不变应力比和粘性系数, 具体参数取值见表 2。

**Table 2.** Value parameters in CDP model

**表 2.** CDP 模型中取值参数

参数名称	膨胀角	偏心率	$f_{b0}/f_{c0}$	$K$	粘性洗数
取值大小	$38^\circ$	0.1	1.16	0.667	0.0005

钢筋本构则根据《混凝土结构设计规范》GB50010-2010 (2015 版)中给出的双折线模型, 如图 2 所示, 有限元分析模型如图 3 所示。本构模型中 OAB 和 OCD 分别为钢筋的拉、压包络线; MN 和 KL 为卸载段; LM 和 NK 为重加载段; M 和 K 点为历史最大拉、压应力应变点, 分别用  $\sigma_m^+$  表示最大拉应力、 $\sigma_m^-$  表示最大压应力、 $\varepsilon_m^+$  表示最大拉应变、 $\varepsilon_m^-$  表示最大压应变。拉、压卸载段与应变坐标轴交点的应变分别用  $\varepsilon^+$  和  $\varepsilon^-$  表示;  $\alpha$  称为滞回能耗影响系数;  $E_s$ 、为初始刚度;  $E_{sh}$  为硬化刚度;  $E_{sr}$  为卸载刚度。

$\beta = (\varepsilon_m - \varepsilon_0)/\varepsilon_y$  卸载刚度根据  $\beta$  的大小, 按照下式计算[9]:

$$E_{sr} = \begin{cases} E_s & \beta < 1 \\ (1.05 - 0.05\beta)E_s & 1 \leq \beta \leq 4 \\ 0.85E_s & \beta > 4 \end{cases} \quad (10)$$

本文模型加载路径公式如下:

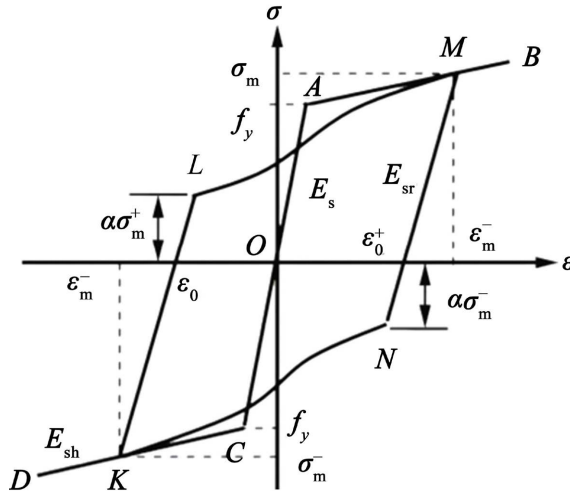


Figure 2. Rebar constitutive model  
图 2. 钢筋本构模型

$$\sigma = \gamma(\bar{\varepsilon}^3 - \bar{\varepsilon}^3) + (1 - \alpha)\sigma_m\bar{\varepsilon} + \alpha\sigma_m \quad (11)$$

式中:  $\gamma = E_{sh}(\varepsilon_m - \varepsilon_L) - (1 - \alpha)\sigma_m$ ;  $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon - \varepsilon_L) / (\varepsilon_m - \varepsilon_L)$ ;  $\varepsilon_L$ 为图 2 的 L 或 N 点应变;  $\alpha$  为滞回耗能影响系数。

钢筋与混凝土之间, 钢筋的应力越大, 粘结能力的损伤越大[10], 故对式(11)中的滞回耗能影响系数  $\alpha$ , 依据下式计算:

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 & \beta \leq 1 \\ (20 - \beta) / 38 & 1 < \beta < 20 \\ 0 & \beta \geq 20 \end{cases} \quad (12)$$

$\alpha$  为滞回耗能影响系数。

现有研究表明[11], 锈蚀对钢筋弹性模量造成影响较小, 而屈服强度、有效截面面积均呈负相关, 故本文在考虑钢筋锈蚀时, 考虑了钢筋有效截面面积的减小及屈服强度的退化。

$$\eta = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \quad (13)$$

$$f_{yc} = \frac{1 - 1.231\eta}{1 - \eta} f_{y0} \quad (14)$$

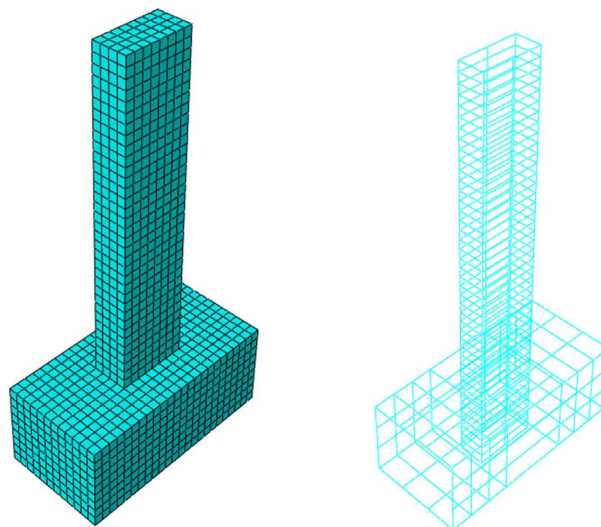
式中:  $\eta$  为钢筋锈蚀率(%)。

$d_0$ 、 $d$  分别为修饰前、后钢筋直径(mm)。

$f_{y0}$ 、 $f_{yc}$  分别为钢筋锈蚀前、后钢筋的屈服强度。

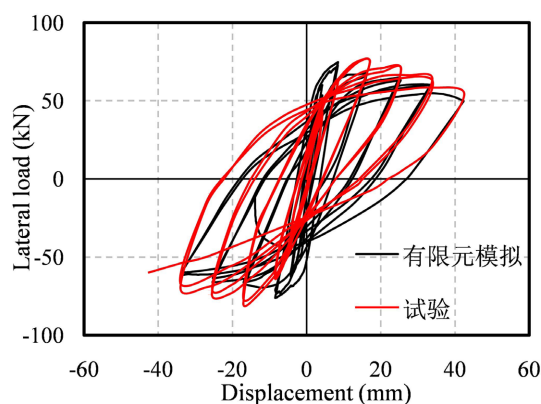
### 2.3. 模型有效性验证

试件 C2 的试验与有限元模拟得出的滞回曲线对比如图 4 所示, 试验得到的峰值荷载为 77.45 KN、极限荷载 65.83 KN、极限位移 24.26 mm; 有限元模拟得到的峰值荷载为 75.53 KN、极限荷载 62.69 KN、极限位移 25.91 mm。峰值荷载误差为 2.48%, 极限荷载误差为 2.48%, 极限位移误差为 6.34%, 误差均在 10% 以内。综上该模型能够较为准确的模拟锈蚀钢筋混凝土矩形柱的抗震性能。



**Figure 3.** Finite element analysis model of reinforced concrete rectangular column

**图 3.** 钢筋混凝土矩形柱有限元分析模型



**Figure 4.** Comparison between specimen test and simulation

**图 4.** 试件试验与模拟对比

### 3. 锈蚀钢筋混凝土矩形柱力学性能数值分析

#### 3.1. 设计工况及计算参数

本文研究内容为反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土矩形柱力学性能, 故选取锈蚀率、轴压比、非加密区箍筋间距和纵筋直径等对柱抗震性能有较大影响的因素作为变量进行建模分析, 研究其对框架柱力学性能的影响。

##### 3.1.1. 钢筋锈蚀率对抗剪承载力的影响

钢筋锈蚀会导致其有效截面面积减小, 从而降低其力学性能, 且会致使钢筋与混凝土之间粘结力下降使得钢筋无法将拉伸强度有效的传递给混凝土。图 5 为不同钢筋锈蚀率下 RC 矩形柱在 50 mm 非加密区箍筋间距下的骨架曲线。各骨架曲线处于弹性阶段时较为相似, 随曲线进入塑性阶段, 曲线出现不同程度的差异。在 50 mm 间距下, 锈蚀率从 0% 提升至 20% 时, 其抗剪承载力峰值从 97.23 kN 下降至 75.02 kN, 下降 6.19%~22.85%, 延性从 5.88 下降至 4.45, 下降 9.71%~23.96%。

### 3.1.2. 轴压比对抗剪承载力的影响

图 6 为不同轴压比下 RC 矩形柱的骨架曲线。如图 6 所示随轴压比的提高, RC 矩形柱的抗剪承载力均有所提高。当轴压比从 0.2 提高至 0.4 时, 在箍筋间距 50 mm、0%~20% 锈蚀率试件抗剪承载力从 75.02 KN~97.23 KN 提高至 91.47 KN~120.32 KN, 提高 31.1%~38.2%。但随着轴压比的提高, 试件底部塑性铰区混凝土较低轴压比试件更早破坏, 在锈蚀率较低时延性降低 20%~29%, 当锈蚀率达到 20% 时延性下降 40.63%。

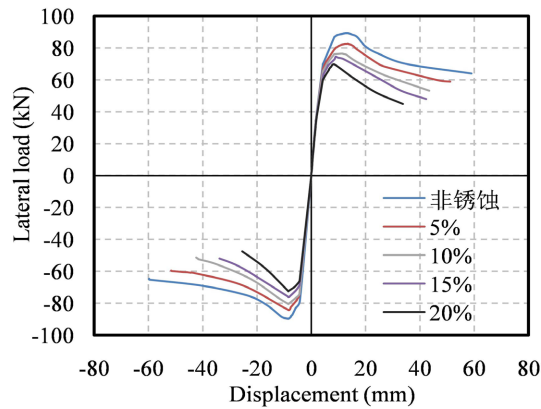
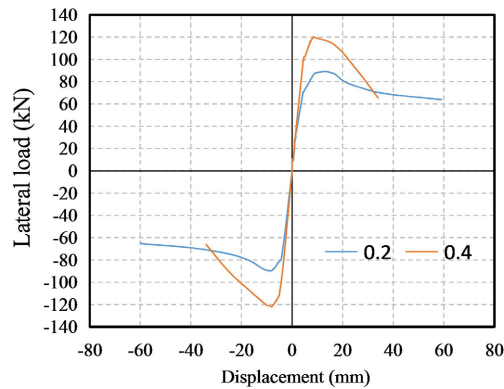
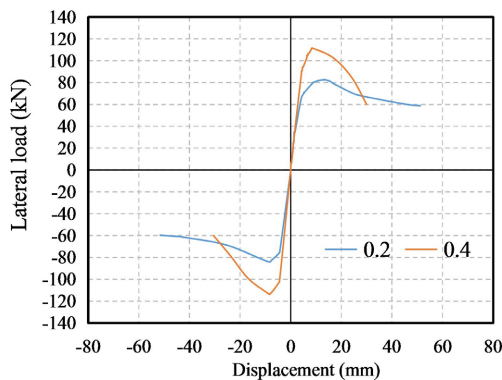


Figure 5. Skeleton curves of specimens with different corrosion rates

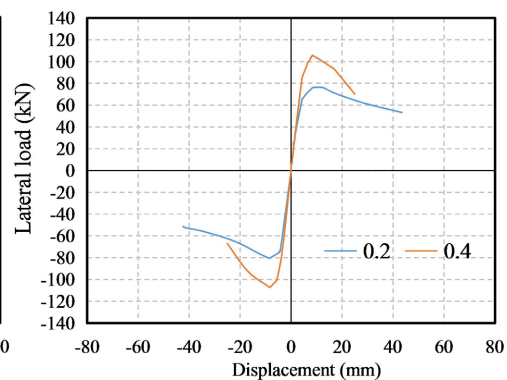
图 5. 不同锈蚀率试件骨架曲线



(a) 非锈蚀



(b) 5% 锈蚀率



(c) 10% 锈蚀率



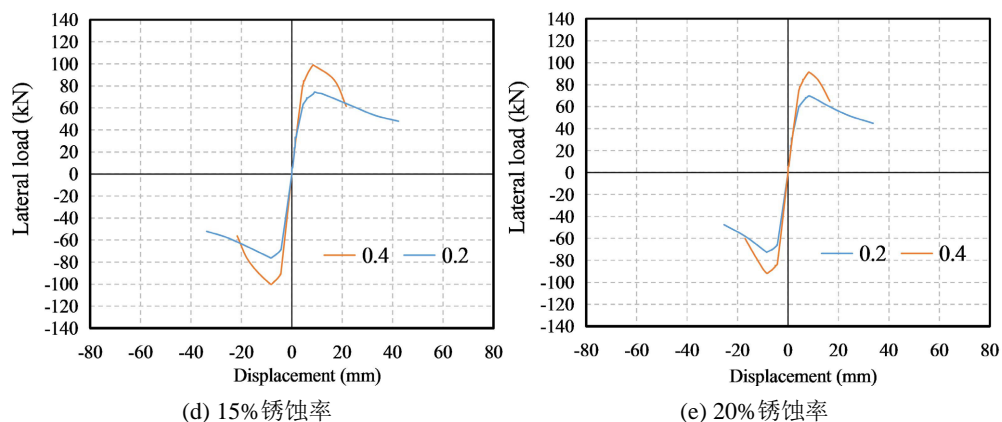
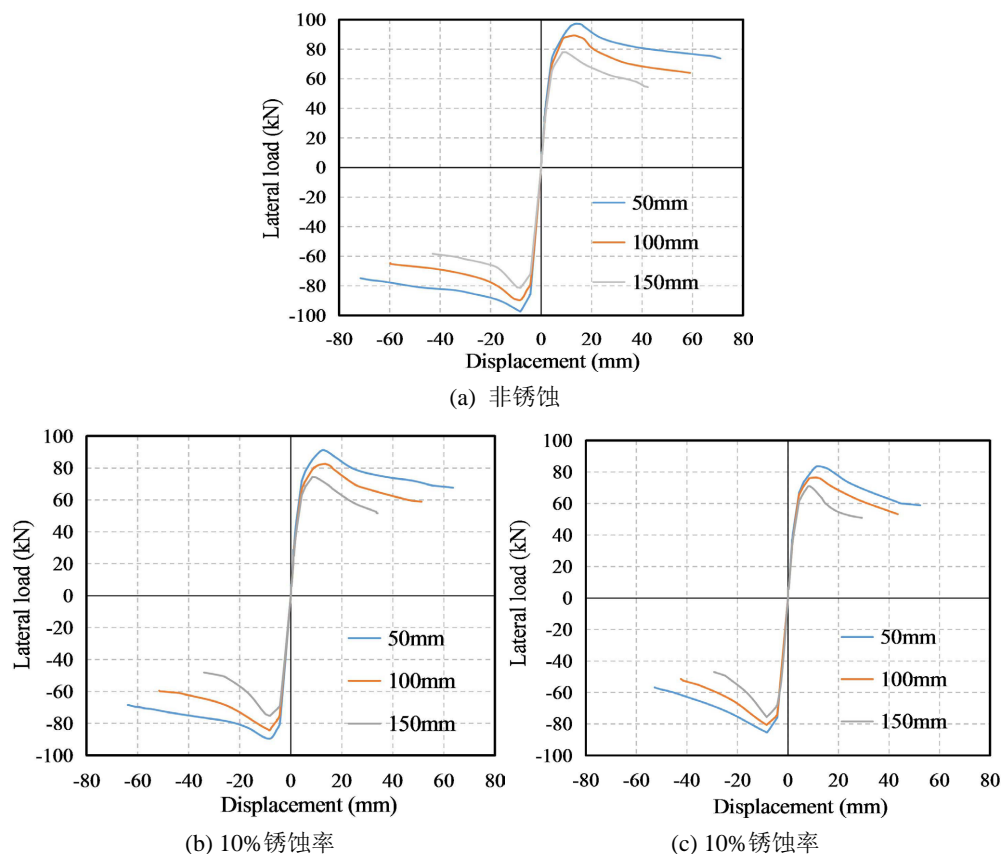


Figure 6. Skeleton curves of specimens with different axial compression ratios under various corrosion rates  
图 6. 不同轴压比试件各锈蚀率下骨架曲线

### 3.1.3. 非加密区箍筋间距对抗剪承载力的影响

为提高柱的抗震性能, 通常会在混凝土柱的两端进行钢筋的加密设计, 而在柱中部对承载力和抗震性能的要求相对较低, 故在柱中部设置非加密区。图 7 为不同非加密区箍筋间距下 RC 矩形柱在 0%~20% 锈蚀率下的骨架曲线。从图中可以看出, 在各锈蚀率下, 100 mm 箍筋间距试件较 50 mm 间距试件峰值承载力从 69.77 kN~89.22 kN 上升至 75.02 kN~97.23 kN, 上升 6.81%~8.09%, 延性从 4.33~4.60 上升至 4.45~5.87, 上升 8.85%~15.13%, 150mm 箍筋间距试件较 50 mm 间距试件峰值承载力从 65.92 kN~77.90 kN 上升至 75.02 kN~97.23 kN, 上升 14.5%~18.4%, 延性从 3.09~4.25 上升至 4.45~5.87, 上升 23.70%~30.72%。





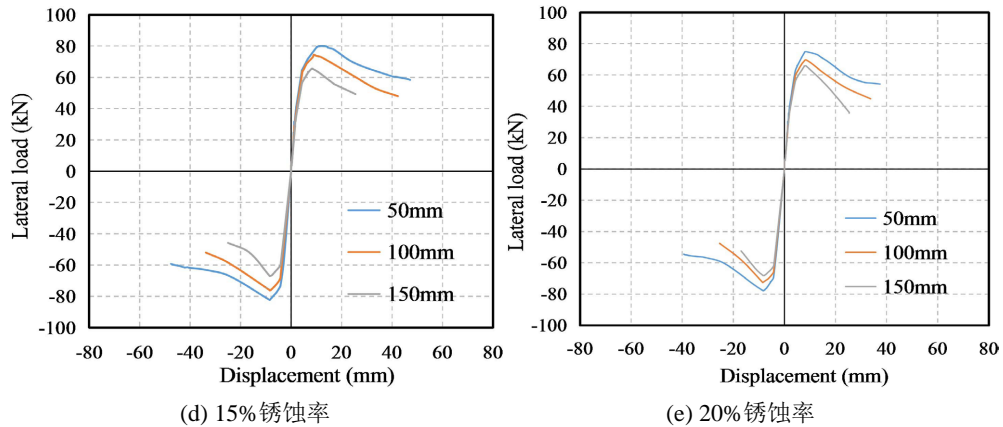
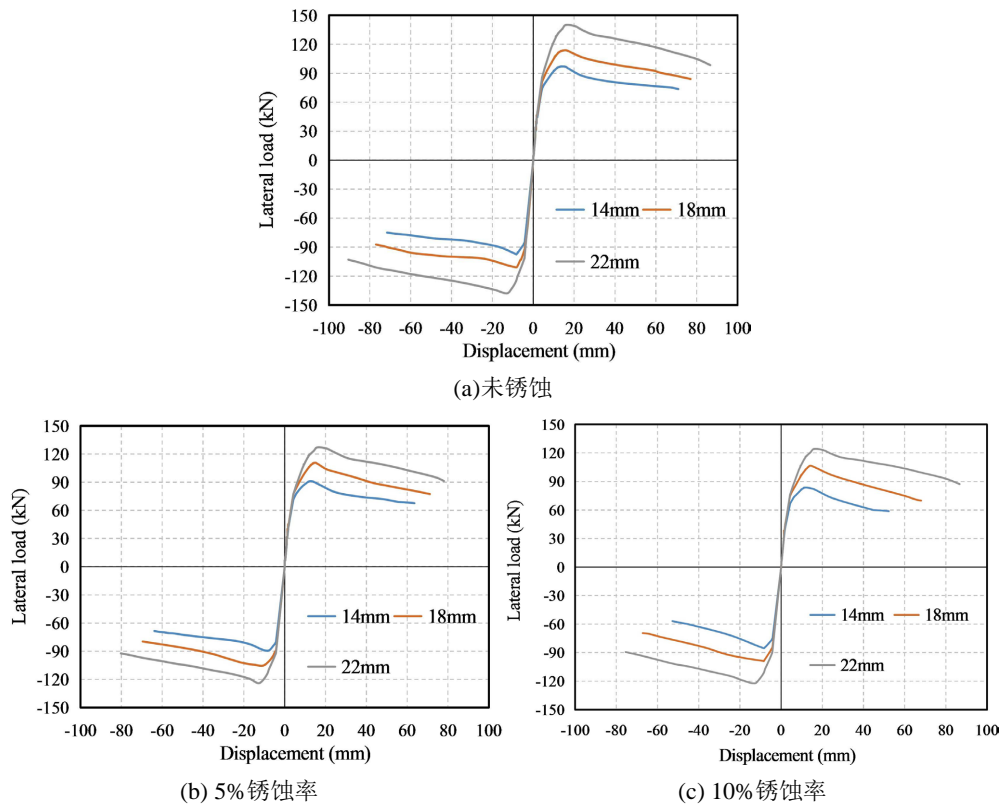


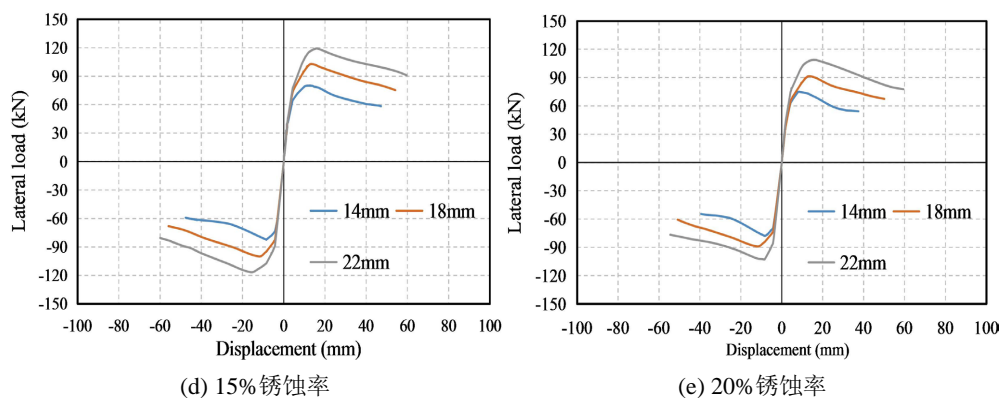
Figure 7. Skeleton curve of specimens with different stirrup spacing in non-densified areas and various corrosion rates

图 7. 不同非加密区箍筋间距试件各锈蚀率下骨架曲线

### 3.1.4. 纵筋直径对抗剪承载力的影响

纵筋在钢筋混凝土柱抗震中具有重要作用。在地震发生时，纵筋作为主要的受力构件，能够有效地传递和分散地震能量，减少柱的破坏。同时，纵筋的存在能够增加柱的承载能力和延性，使得柱在受到强烈的外力作用时不易发生脆性破坏，而是能够通过变形来吸收能量，从而减少对柱的破坏。此外，纵筋还可以改善柱的传力机制，使得柱在受到外力作用时能够更好地传递和分散力量，从而避免因局部受力过大而导致的破坏。因此，纵筋在钢筋混凝土柱抗震中起着至关重要的作用，能够有效地提高柱的承载能力和抗震能力，从而保证建筑物的安全性和稳定性。如图 8 所示，纵筋直径 14 mm 较 18 mm 在不同





**Figure 8.** Skeleton curves of specimens with different longitudinal bar diameters under various corrosion rates  
**图 8.** 不同纵筋直径试件各锈蚀率下骨架曲线

锈蚀率下 RC 矩形柱的峰值抗剪承载力从 75.02 KN~97.23 KN 提高至 91.53 KN~113.98 KN, 提高 17.22%~27.44%; 延性从 4.98~5.88 提高至 6.125~6.285, 提高 6.4%~16.8%。纵筋直径 14 mm 较 22 mm, 不同锈蚀率下 RC 矩形柱的峰值抗剪承载力分别从 75.02 KN~97.23 KN 提高至 108.81 KN~140.01 KN 提高 39.23%~48.85%; 延性从 4.98~5.88 提高至 5.35~7.21, 提高 15.63%~29.52%。

#### 4. 结论

本研究通过模拟不同参数下的矩形柱性能, 得到如下结论:

- 1) 利用有限元软件 ABAQUS 建立了反复荷载作用下的钢筋混凝土矩形柱的模型, 并将模拟结果与实验结果进行对比, 得出模拟结果与实验结果峰值承载力、极限承载力与极限位移误差均在 10%之内, 表明模拟结果较可靠。
- 2) 不同锈蚀率试件在加载初期混凝土开裂之前, 锈蚀构件的受力性能与未锈蚀构件基本相同; 试件加载中后期, 混凝土开裂后试件抗剪承载力随锈蚀率增大明显降低。
- 3) 当 RC 矩形柱轴压比从 0.2 提升至 0.4 时, 因轴向力增大, 致使柱抗剪承载力峰值提升 28%~36%, 但因轴压力增大增加了柱子的压缩应力, 导致混凝土提前破坏, 降低 RC 矩形柱的延性。
- 4) 纵筋是提供柱体抗剪承载力的重要组成部分, 提高纵筋直径可使柱在受外力作用时更好地传递和分散能量, 且更大的钢筋直径还可以提供更好的锚固和粘结条件。
- 5) 箍筋的主要作用是增加混凝土的约束, 提高混凝土的抗压强度和延性, 从而增强柱子的抗剪承载能力。当非加密区箍筋间距过大时, 箍筋对混凝土的约束作用减弱, 可能导致混凝土的抗剪强度降低。
- 6) 本文主要关注了锈蚀钢筋混凝土矩形柱在短期反复荷载作用下的性能表现。在实际工程中, 结构往往需要承受长期的荷载作用。因此, 未来研究可以进一步探讨锈蚀钢筋混凝土结构在长期荷载作用下的性能退化规律和维护策略。

#### 参考文献

- [1] Mehta, P.K. (1991) Durability of Concrete—Fifty Years of Progress? *Special Publication*, **126**, 1-32.
- [2] Chung, L., Kim, J.H.J. and Yi, S.T. (2008) Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members with Highly Corroded Reinforcing Bars. *Cement and Concrete Composites*, **30**, 603-611.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.03.006>
- [3] Parulekar, Y.M., Dutta, D., Thodetti, N., et al. (2020) Performance Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structure Considering Bond Deterioration. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **34**, No. 2.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001411](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001411)

- [4] 蒋连接, 袁迎曙. 反复荷载下锈蚀钢筋混凝土压弯构件刚度退化的试验研究[J]. 混凝土, 2011(5): 3-6.
- [5] 蒋连接, 袁迎曙. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件的恢复力模型[J]. 混凝土, 2011(6): 29-32+40.
- [6] 陈茗宇, 牛荻涛, 李强. 锈蚀箍筋约束混凝土柱低周反复荷载试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(6): 12-15.
- [7] 阎红霞, 杨庆山, 张丽英. ABAQUS 在超高层结构动力弹塑性分析中的应用[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(1): 108-115.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [9] Vecchio, F.J. (1999) Towards Cyclic Load Modeling of Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, **96**, 193-202. <https://doi.org/10.14359/610>
- [10] 方自虎, 甄翌, 李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(7): 613-619.
- [11] 龙渝川, 李正良. 模拟混凝土滞回行为的各向异性损伤模型[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 62-69.