

轴向偏压锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能研究

卢荧良¹ 刘浪¹ 马佳星² 蒋建男¹

1 重庆交通大学土木工程学院，重庆，400074；

2 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院，浙江宁波，315100；

摘要：基于 OpenSees 有限元软件建立了柱底局部锈蚀的钢筋混凝土柱数值模型，研究锈蚀情况下不同轴向偏压对钢筋混凝土柱抗震性能的影响。研究表明：与加载方向垂直的轴向偏心距会使锈蚀柱屈服力和最大水平侧向力减小，骨架曲线下降变快，这种下降趋势随锈蚀率的增大而变得陡峭。随着偏心距的增大，屈服力、最大水平侧向力和极限位移进一步减小，累积耗能减小；与加载方向平行的轴向偏心距会使锈蚀柱骨架曲线明显不对称。其屈服力和最大水平侧向力，一侧大于同锈蚀率未偏心试件，一侧小于同锈蚀率未偏心试件，正负向差值随偏心距增大而增大。

关键词：抗震性能；钢筋混凝土柱；轴向偏心；锈蚀；OpenSees

DOI:10.69979/3029-2727.24.04.023

引言

在沿海地区，氯离子侵蚀会使钢筋锈蚀及混凝土材料性能退化，从而影响钢筋混凝土构件耐久性。钢筋混凝土柱作为钢筋混凝土结构中的主要承重构件和抗侧力构件，其锈蚀可能会导致结构整体抗震能力不足，因此许多学者针对锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能展开研究。

在实际锈蚀钢筋混凝土柱中，箍筋与纵筋的锈蚀程度存在差异。陈玉洁^[1]对不同部位纵筋锈蚀的钢筋混凝土柱抗震性能展开研究，发现与加载方向垂直的单侧纵筋锈蚀率增加，试件各抗震性能指标都有所下降，不对称性更明显。且锈蚀率对试件极限变形能力的影响大于对试件承载力的影响。李强等^[2]研究了箍筋锈蚀柱的抗震性能，发现箍筋锈蚀会对核心混凝土的约束降低，导致钢筋混凝土柱抗震性能出现退化。赵建锋等^[3]通过数值模拟研究了单纵筋锈蚀、单箍筋锈蚀和箍筋纵筋同时锈蚀三种情况对抗震性能的影响。研究表明：箍筋纵筋同时锈蚀比单锈蚀墩柱的抗震性能退化明显。纵筋锈蚀严重影响墩柱抗弯性能，箍筋锈蚀严重影响墩柱延性性能。

不同侵蚀环境对钢筋混凝土柱身出现锈蚀的部位也存在差异，服役间所受的作用也可能不同。Zhou 和 Yuan 等^[4,5]通过局部锈蚀来模拟浪溅潮差区的锈蚀情况。研究表明：局部锈蚀对钢筋混凝土柱截面曲率影响显著，会使塑性铰区从柱底向浪溅潮差区转移。袁文厅^[6]研究不同路径加载局部锈蚀的钢筋混凝土柱。研究表明：双

向加载抗震性能低于单向加载抗震性能，矩形加载耦合作用较强。

根据锈蚀钢筋混凝土柱服役中可能存在的偏心受压，本文在前人研究的基础上通过 OpenSees 建立有限元模型，研究钢筋混凝土柱塑性铰区锈蚀，并承受不同方向的轴向偏压对柱子抗震性能的影响。

1 有限元模拟与验证

1.1 试验对象选取

为验证有限元模型的准确性，选取文献^[7]中试件 C-5-0.1 和 C-10-0.1 两种不同锈蚀率的钢筋混凝土试件进行模拟验证，试件尺寸配筋见图 1。

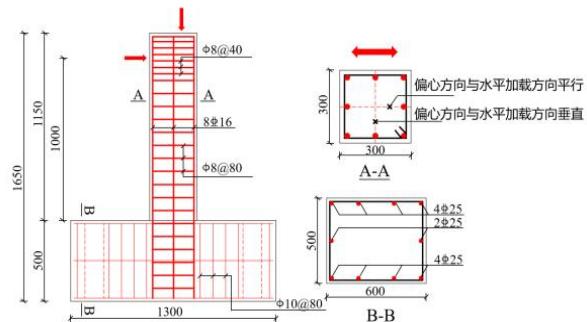


图 1 尺寸配筋图

Fig. 1 Size reinforcement diagram

1.2 锈蚀钢筋混凝土柱有限元模型

1.2.1 锈蚀钢筋退化模型

锈蚀会使钢筋截面面积减小以及力学性能退化。本

文根据张伟平等^[8]的研究成果对钢筋本构模型修正。各修正参数计算公式如下：

$$f_{yc} = \frac{1-1.196\eta_s}{1-\eta_s} f_{y0} \quad (1)$$

$$f_{uc} = \frac{1-1.201\eta_s}{1-\eta_s} f_{u0} \quad (2)$$

$$\epsilon_{suc} = e^{-3.789\eta_s} \epsilon_{su0} \quad (3)$$

锈蚀对钢筋截面损失的影响，本文采用锈蚀钢筋平均截面面积进行研究，即认为钢筋沿四周是均匀锈蚀的。锈蚀钢筋平均截面面积和直径计算公式如下：

$$A_{sc} = (1 - \eta_s) A_s \quad (4)$$

$$d_{sc} = d_s \sqrt{1 - \eta_s} \quad (5)$$

式中： η_s 为钢筋质量锈蚀率； f_{y0} 为未锈蚀钢筋屈服强度； f_{yc} 为锈蚀钢筋屈服强度； f_{u0} 为未锈蚀钢筋极限强度； f_{uc} 为锈蚀钢筋极限强度； ϵ_{su0} 为未锈蚀钢筋极限应变； ϵ_{suc} 为锈蚀钢筋极限应变； A_s 为未锈蚀钢筋截面面积； A_{sc} 为锈蚀钢筋的平均截面面积； d_s 为未锈蚀钢筋直径； d_{sc} 为锈蚀钢筋平均直径。

根据以上计算，可以得到锈蚀钢筋的平均截面面积、屈服强度、极限强度和极限应变，并将这些参数带入模型中的锈蚀段模拟。

1.2.2 混凝土退化模型

锈蚀对混凝土的影响，主要体现在锈蚀箍筋对核心混凝土约束的影响。本文采用经式（1）~（5）修正的钢筋参数带入约束混凝土本构中来考虑锈蚀对核心混凝土的影响。约束混凝土本构模型采用 Mander 等人提出的模型，如图 2 所示。对于矩形截面约束混凝土在主轴 x 和 y 方向产生的有效约束压力计算公式如下：

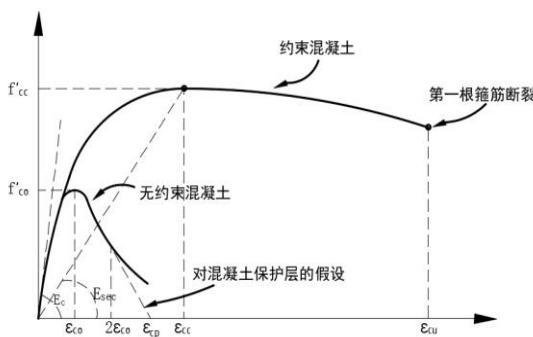


图 2 Mander 混凝土本构模型

Fig. 2 Mander concrete constitutive model

$$f'_{lx} = K_e \rho_x f_{yh} \quad (6)$$

$$f'_{ly} = K_e \rho_y f_{yh} \quad (7)$$

$$K_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i)^2}{1 - \frac{s'}{6b_c d_c}} \left(1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c} \right)} \right] \frac{1}{1 - \rho_{cc}} \quad (8)$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s \cdot d_c} \quad (9)$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{s} \quad (10)$$

式中： f_{yh} 为约束箍筋屈服强度； ρ_x 为 x 方向的体积配箍率； ρ_y 为 y 方向的体积配箍率； ρ_{cc} 为纵筋配筋率； A_{sx} 为箍筋 x 方向的总面积； A_{sy} 为箍筋 y 方向的总面积； b_c 为约束混凝土的宽度； d_c 为约束混凝土的长度； w_i 为相邻纵筋之间的净距； s 为箍筋间距； s' 为箍筋净距。

约束混凝土峰值应力对应的应变和极限应变按以下式计算：

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \quad (12)$$

式中： f'_{co} 为圆柱体混凝土试块抗压强度； f'_{cc} 为约束混凝土峰值压应力； ϵ_{co} 为无约束混凝土峰值应力对应的应变； ϵ_{cc} 为约束混凝土峰值应力对应的应变； ϵ_{cu} 为约束混凝土极限应变； ϵ_{su} 为箍筋极限拉应变； ρ_s 为配箍率。

1.2.3 有限元建模与验证

有限元模型将柱子沿高度方向划分为 7 个单元，如图 3 所示。其中单元 2~7 采用基于位移的非线性梁柱单元，柱底单元 1 为零长度单元以模拟柱底钢筋滑移。柱截面划分为若干份钢筋纤维、保护层混凝土纤维和核心混凝土纤维，并赋予相应的本构关系。保护层混凝土采用 Concrete01 材料；核心混凝土采用 Concrete04 材料；柱底滑移钢筋采用 Bond_SP01 材料，其他钢筋均采用 Steel102 材料进行模拟。

图 4 是锈蚀率分别为 5%、10% 的柱子有限元模拟与试验滞回曲线对比图。由图可见，模拟结果与试验吻合较好，但由于实际试验材料分布不均匀，锈蚀不均匀等因素导致实际滞回曲线正负向最大水平侧向力和捏缩程度等出现不对称，因此本文比较正负向最大水平侧向力的平均值进行验证。锈蚀率 5% 的柱子正负向最大水平侧向力的平均值误差为 7.09%。锈蚀率 10% 的柱子正负向最大水平侧向力的平均值误差为 2.89%，由此验证了

模型合理性。

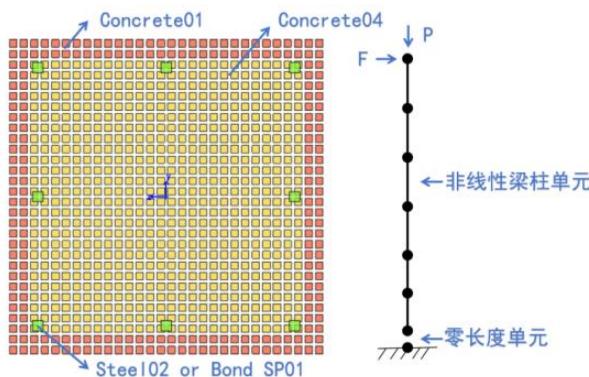
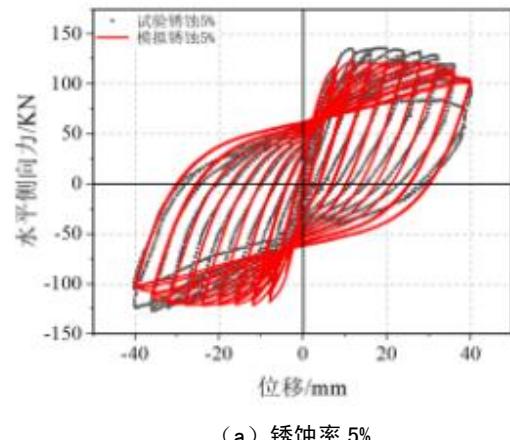
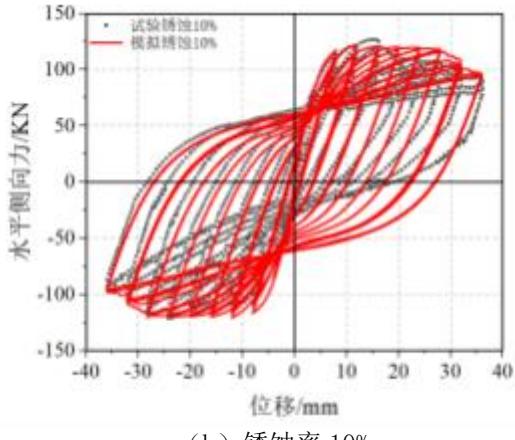


图3 有限元模型示意图

Fig. 3 Diagram of finite element model



(a) 锈蚀率 5%



(b) 锈蚀率 10%

图4 有限元模拟与试验滞回曲线对比

Fig. 4 Comparison of finite element simulation and experimental hysteresis curve

2 轴向偏心受压锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能分析

本文以文献^[7]的钢筋混凝土柱为基础,研究柱底局部锈蚀的钢筋混凝土在轴向偏心受压下的抗震性能,各试件参数见表1。试件编号中,“C”和紧跟的数字代表

锈蚀率为10%、20%、30%;“-0.2”和“-0.4”代表偏心距分别为0.2b、0.4b,b为柱截面宽度;“H”代表加载方向与柱截面轴向偏心受压方向平行;“V”代表加载方向与柱截面轴向偏心受压方向垂直。例如:“C10-0.2-H”表示为锈蚀率为10%的柱子,其轴向偏心受压方向与加载方向水平,偏心距大小为0.2b。

表1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	锈蚀率	偏心距	加载方向与偏心方向关系
C10	10%	0	—
C10-0.2-H	10%	0.2b	水平
C10-0.2-V	10%	0.2b	垂直
C20	20%	0	—
C20-0.2-H	20%	0.2b	水平
C20-0.2-V	20%	0.2b	垂直
C30	30%	0	—
C30-0.2-H	30%	0.2b	水平
C30-0.2-V	30%	0.2b	垂直
C30-0.4-H	30%	0.4b	水平
C30-0.4-V	30%	0.4b	垂直

2.1 骨架曲线及延性分析

由图5(a)可知,与加载方向垂直的偏心距会使试件的屈服力和最大水平侧向力减小。在达到最大水平侧向力后骨架曲线相对同锈蚀率未偏心试件下降较快,这种下降趋势并随锈蚀率的增大而变得陡峭。在同锈蚀率情况下,随着偏心距的增大,屈服力和最大水平侧向力进一步减小,极限位移也变小。C30-0.4-V最大平均水平侧向力相对C30-0.2-V减小了6.1%,相对C30减小了8.4%;C30-0.4-V平均极限位移相对C30-0.2-V减小了24.7%。

由图5(b)可知,与加载方向平行的偏心距会使试件的骨架曲线明显的不对称。与偏心方向相同侧的屈服力和最大水平侧向力较大,且大于同锈蚀率未偏心试件;与偏心方向相反侧的屈服力和最大水平侧向力较小,且小于同锈蚀率未偏心试件。同偏心距试件,随着锈蚀率的增大,正负向最大水平侧向力均减小,正负向间最大水平侧向力差值在34KN左右,这个差值随偏心距增大到0.4b变为67.4KN。

位移延性系数 μ 可以反映构件的变形能力,延性系数越大,变形能力越好。由表3可知,随着锈蚀率增大,

延性系数减小；与加载方向垂直的轴向偏心会使延性系数减小，并随偏心距的增大进一步减小；与加载方向平行的轴向偏心会使正负向延性系数出现相对较大的差值。与偏心方向相同侧的延性系数较大，且大于同锈蚀率未偏心试件；与偏心方向相反侧的延性系数较小，且小于同锈蚀率未偏心试件。这个差值随偏心距增大而增大。

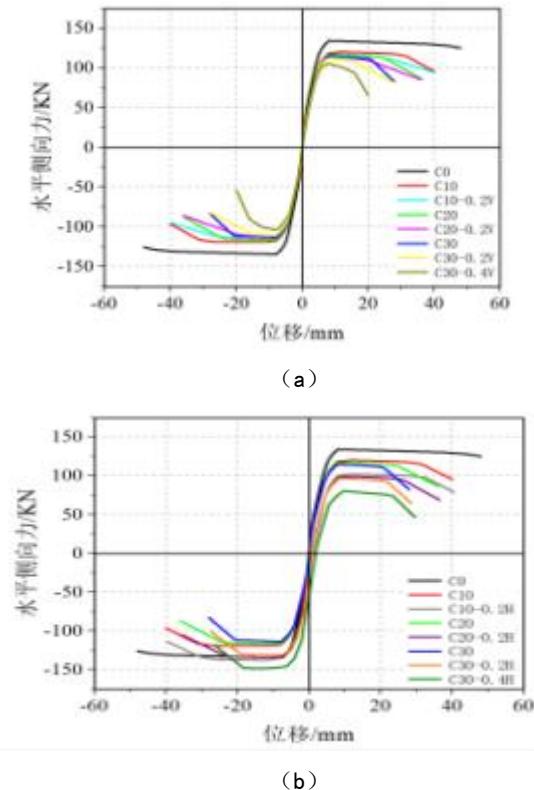


图 5 骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curve

表 2 特征点数值

Table 2 Characteristic point values

试件编号	Δ_y /mm	Δ_{max} /mm	Δ_u /mm	F_y /KN	F_{max} /KN	μ
C10	+5.38 /-5.19	+12/-1 2	+37.08 /-37.86	+105.25/ -103.53	+120.57/ -118.82	+6.90 /-7.30
C10-0.2-H	+6.88 /-4.76	+12.47 /-11.53	+37.24 /-38.28	+94.06/ 121.83	+102.42/ -137.06	+5.42 /-8.04
C10-0.2-V	+5.23 /-5.11	+8/-12	+35.91 /-36.74	+102.82/ -100.98	+117.45/ -115.85	+6.86 /-7.20
C20	+5.20 /-5.04	+12/-1 2	+30.39 /-31.09	+102.94/ -101.43	+117.66/ -115.97	+5.84 /-6.16
C20-0.2-H	+6.96 /-4.76	+12.52 /-11.48	+30.35 /-31.43	+93.08/ 119.58	+99.55/ 134.11	+4.36 /-6.61
C20-0.2-V	+5.16 /-5.05	+8/-8	+27.81 /-28.71	+101.44/ -99.04	+115.33/ -113.43	+5.39 /-5.69
C30	+5.07 /-4.95	+8/-8	24.16/- 24.49	+100.52/ -99.21	+115.12/ -113.58	+4.77 /-4.94
C30-0.2-H	+6.71 /-3.85	+8.57/- 11.43	+24.26 /-24.42	+89.99/ 110.10	+97.33/ 130.79	+3.61 /-6.35

C30-0.2-V	+5.00 /-4.94	+8/-8	+21.44 /-22.05	+98.94/- 96.04	+112.54/ -110.57	+4.29 /-4.46
C30-0.4-H	+8.54 /-3.55	+9.59/- 14.41	+24.74 /-24.36	+77.26/- 129.06	+80.60/- 147.96	+2.90 /-6.87
C30-0.4-V	+4.92 /-4.87	+8/-8	+16.52 /-16.24	+94.25/- 89.68	+105.87/- -103.55	+3.36 /-3.33

注： F_y 、 F_{max} 分别为屈服力和最大水平侧向力， Δ_y 、 Δ_{max} 为对应的位移； Δ_u 为极限位移（最大侧向力下降到 85%时的位移）； μ 为延性系数。

2.2 滞回耗能分析

累积耗能为各级加载所有滞回环的面积之和，最终累积的面积越大，表明耗能能力越强。各试件最终的累积耗能见图 6。由图可知，随着锈蚀率的增大，试件的总耗能不断减小；同锈蚀率同较小偏心距下，不同偏心方向对总耗能能力有较小的影响，两者间与加载方向垂直的偏心距影响相对较大；随着偏心距的增大，与加载方向垂直的偏心距对耗能产生了较大影响，C30-0.4-V 总耗能相对 C30 下降了 56%。

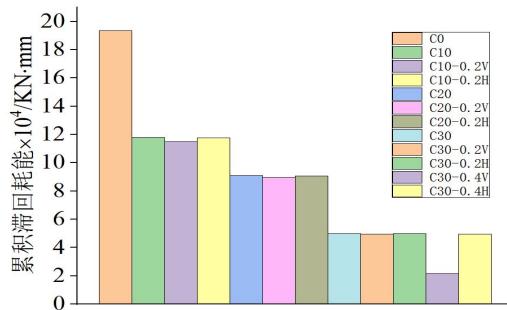


图 6 累积滞回耗能

Fig. 6 Cumulative hysteretic energy dissipation

3 结论

本文采用 OpenSees 有限元软件建立了柱底局部锈蚀的钢筋混凝土柱数值模型，通过拟静力加载，研究了锈蚀钢筋混凝土柱不同锈蚀率和不同轴向偏压情况对钢筋混凝土柱抗震性能的影响。结论如下：

(1) 相对未锈蚀试件，轴向偏压锈蚀钢筋混凝土柱的屈服力、最大水平侧向力、极限位移、延性系数和累积耗能均出现了明显下降。随着锈蚀率的增大，抗震性能继续退化。

(2) 与加载方向垂直的偏心距会使试件的屈服力和最大水平侧向力减小。在达到最大水平侧向力后骨架曲线下降变快，这种下降趋势随锈蚀率的增大而变得陡

峭。随着偏心距的增大，屈服力、最大水平侧向力和极限位移进一步减小，累积耗能能力变弱。

(3) 与加载方向平行的偏心距会使试件的滞回曲线明显的不对称。其屈服力和最大水平侧向力，一侧大于同锈蚀率未偏心试件，一侧小于同锈蚀率未偏心试件。随着锈蚀率的增大，正负向最大水平侧向力均减小，正负向差值在 34KN 左右，这个差值随偏心距增大而增大。

参考文献

- [1] 陈玉洁. 纵筋锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 华侨大学, 2020.
- [2] 李强, 牛荻涛, 张成中, 等. 锈蚀箍筋约束混凝土柱低周往复试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(05): 671-679.
- [3] 赵建锋, 李洪一, 刘苏文. 基于钢筋锈蚀的 RC 桥墩抗震性能[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(03): 112-118.
- [4] Zhou H J, Xu Y N, Peng Y R, et al. Partially corroded reinforced concrete piers under axial compression and cyclic loading: An experimental study[J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109880.
- [5] Yuan W, Guo A X, Li H. Experimental investigation on the cyclic behaviors of corroded coastal bridge piers with transfer of plastic hinge due to non-uniform corrosion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 102: 112-123.
- [6] 袁文厅. 双向地震作用下非均匀腐蚀近海桥墩的抗震性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [7] DAI, Kuang-Yu; LU, Da-Gang; YU, Xiao-Hui. Experimental investigation on the seismic performance of corroded reinforced concrete columns designed with low and high axial load ratios. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102615.
- [8] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, (05): 586-592.
- [9] Mander J B, Priestley M J N, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of structural engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.

作者简介：卢荧良，2000.2，男，汉族，籍贯：重庆，硕士，研究方向：桥梁抗震。