

锈蚀圆钢管混凝土柱伪静力性能研究

陈梦成^{1,2}, 谢力^{1,2}, 黄宏^{1,2}, 王超¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省建筑过程模拟与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要 目的 研究酸雨对钢管混凝土构件的抗震性能影响. 方法 笔者设计了12根圆钢管混凝土柱进行低周反复加载试验. 分析轴压比和锈蚀程度对试件滞回曲线、骨架曲线和刚度退化曲线的影响规律. 结果 随着锈蚀程度的加深, 滞回曲线不断捏拢, 试件的侧向承载力、刚度、延性都不同程度的减小; 同一锈蚀程度, 随着轴压比的增大, 试件承载力和延性都会增大. 所有试件的延性系数和阻尼黏滞系数随锈蚀程度的增大明显减小, 随轴压比的增大上下波动, 增大趋势并不明显. 结论 利用ABAQUS对钢管混凝土的抗震性能进行数值模拟, 模拟结果与试验结果吻合良好, 证实了有限元模型的有效性和可行性. 锈蚀程度对抗震性能的影响比轴压比的影响要显著.

关键词 圆钢管混凝土; 锈蚀程度; 低周往复荷载; 抗震性能; ABAQUS

中图分类号 TU398 文献标志码 A

Study on Pseudo-static Performance of Corroded Concrete-filled Circular Steel Tubes

CHEN Mengcheng^{1,2}, XIE Li^{1,2}, HUANG Hong^{1,2}, WANG Chao¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Simulation and Control of Building Process, Nanchang, China, 330013)

Abstract: In order to investigate the influence of corrosion environment such as acid rain on seismic behavior of concrete filled circular steel tubular (CFST) members, 12 CFST columns with 114mm diameters and slenderness ratio of 53 subjected to low-cycle load were tested. The impacts of axial compression ratios and corrosion levels on hysteretic curves, skeleton curves and stiffness degradation curves of test specimens were analyzed. It was shown by the test results that the load-displacement hysteretic loops were pinched with the increase of corrosion level, and the lateral bearing capacity, stiffness and ductility reduced. Lateral bearing capacity and ductility presented a tendency to increase with increasing axial compression ratio under the same corrosion level. In addition, the ductility and the viscous damping coefficients were calculated. The results also shown that ductility and viscous damping coefficients both decrease with the increase of corrosion level and raises slightly with the increase of axial compression ratio. Therefore, a conclusion can be drawn that corrosion level has greater impacts on the seismic performance than axial load ratio

收稿日期: 2016-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378206)

作者简介: 陈梦成(1962—), 男, 教授, 主要从事组合结构耐久性研究.

does. Finally, the ABAQUS commercial software was employed to numerically simulate the seismic performances of CFST members under acid rain attack by using the method of reduction in thickness of steel tube and mechanical properties of steel in the way of reducing the wall thickness and material properties of steel. The numerical solutions showed they were good agreement in the test results, indicating that the model proposed were effective and feasible.

Key words: concrete filled steel tube; corrosion level; low cycle load; seismic performance; ABAQUS.

钢管混凝土构件近年来广泛应用在桥梁、塔架等结构中. 国内外学者对钢管混凝土的轴压^[1-2]、偏压^[3-5]、压弯^[6-7]、压扭^[8-9]及抗震^[10-12]性能做了大量研究. 但是对腐蚀环境下的锈蚀钢管混凝土构件的力学性能的研究相对较少. Han 和 Hou 等^[13-14]采用一种氯离子侵蚀和长期荷载作用耦合的试验方法,对钢管混凝土试件的力学性能进行了试验和数值模拟分析;王庆利等^[15]对钢管混凝土短柱在长期荷载-氯盐腐蚀耦合作用下进行了轴压试验研究;韩林海团队^[16]对氯盐腐蚀下钢管混凝土方柱的承载力进行了研究. 已有研究结果均表明恶劣环境引起外钢管锈蚀,会导致钢管混凝土承载力降低,进而极大的影响工程结构的安全性^[17].

目前对于钢管混凝土的力学性能研究成果很多^[18-20],但对腐蚀后的锈蚀钢管混凝土

构件抗震性能研究却几乎没有. 基于此,笔者共设计了12根圆钢管混凝土柱,模拟酸雨腐蚀后进行低周往复加载试验,分析不同参数对圆钢管混凝土柱的抗震性能影响,以期在实际工程中的相关设计提供参考依据.

1 试验

1.1 试件设计

改变轴压比和钢管锈蚀程度两个参数,笔者共设计了12根圆钢管混凝土柱,具体参数见表1. 其中试件编号CC表示圆钢管混凝土,数字0、1、2、3分别表示钢管名义锈蚀程度(0%、10%、20%、30%). L、M、H分别表示轴压比为0.2、0.4、0.5. D 为试件直径; t 为实测钢管厚度; n 为轴压比; α 为含钢率, $\alpha = A_s / A_c$; ξ 为套箍系数, $\xi = A_s f_y / (A_c f_{ck})$; λ 为长细比, $\lambda = 4L/D$.

表1 试件基本参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	D/mm	t/mm	n	钢管壁厚损失率/%	α	ξ	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	λ
CC-0L	114	4	0.2	0	0.146	1.26	365	60	52.6
CC-1L	114	4	0.2	9.25	0.131	1.13	365	60	52.6
CC-2L	114	4	0.2	19.3	0.115	0.99	365	60	52.6
CC-3L	114	4	0.2	29.0	0.100	0.86	365	60	52.6
CC-0M	114	4	0.4	0	0.146	1.26	365	60	52.6
CC-1M	114	4	0.4	9.25	0.131	1.13	365	60	52.6
CC-2M	114	4	0.4	19.8	0.110	0.95	365	60	52.6
CC-3M	114	4	0.4	29.8	0.098	0.85	365	60	52.6
CC-0H	114	4	0.5	0	0.146	1.26	365	60	52.6
CC-1H	114	4	0.5	10.0	0.130	1.12	365	60	52.6
CC-2H	114	4	0.5	20.3	0.113	0.98	365	60	52.6
CC-3H	114	4	0.5	30.5	0.097	0.84	365	60	52.6

1.2 锈蚀试验

锈蚀试验采用模拟酸雨溶液浸泡的方法。模拟酸雨溶液的 pH 值保持为 2.3。采用电化学原理,利用直流电进行加速腐蚀,电流强度控制为 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

根据法拉第定律,电化学腐蚀的锈蚀量与自金属中流过的电量成正比,满足:

$$\Delta W = \frac{M}{nF} Q = kI\Delta t. \quad (1)$$

利用式(1)计算出钢管的理论锈蚀质量,继而计算测试周期内钢管厚度的理论应减少量,最后再换算成达到相应锈蚀厚度所需的理论锈蚀时间。

笔者采用钢材的质量损失量来反映钢材的锈蚀程度,用 η_w 表示,满足式(2)。其中 W_0 为钢材锈蚀前的质量; W 为锈蚀后的钢材质量。

$$\eta_w = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\%. \quad (2)$$

模拟酸雨加速锈蚀试验中,外钢管呈表面均匀锈蚀。试件外钢管重量的损失量 η_w 可换算为锈蚀钢管壁厚厚度的损失量 η_s (见式(3)),其中 t 为钢管锈蚀前的厚度; t_e 为试件锈蚀后的钢管厚度。

$$\eta_w = \eta_s = \frac{t - t_e}{t} \times 100\% = \frac{\Delta t}{t} \times 100\%. \quad (3)$$

将名义锈蚀程度 η_w 先后分别代入式(2)和式(1),计算出钢管混凝土试件锈蚀理论所需要的时间。在腐蚀试验进行到相应时间点时测量钢管直径的变化 ΔD ,并计算钢管壁厚损失量。

1.3 低周往复荷载试验

低周往复荷载试验利用 MTS 拟动力系统,进行,试验加载装置如图 1 所示。施加侧向力时采用荷载和位移联合控制的模式,先按力控制分级加载,每级荷载循环 1 次。力控制荷载分级模式为:首级 $1/4P_{uc}$ 、第二级加载至 $1/2 P_{uc}$ 、第三级加载至 $0.7 P_{uc}$,其中 P_{uc} 为侧向力极限荷载。然后按位移控制进行加载。加载模式为:前三级位移

循环各 3 次,此后每级循环各 2 次,每级位移控制增量为 Δy (Δy 为力控制时计算出的侧向屈服时对应的位移量)。直至侧向力下降为峰值荷载的 85%,或试验位移达到最大安全位移时停止加载。

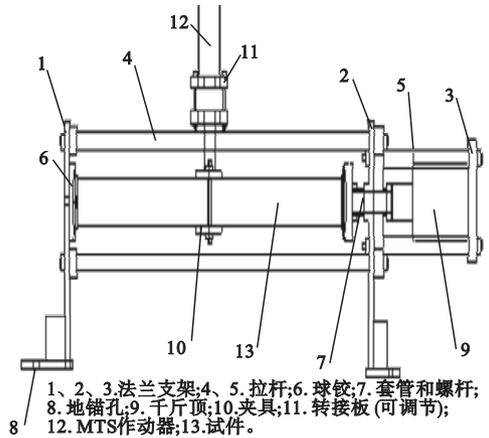


图 1 加载装置图

Fig. 1 Loading device

2 试验结果

试件处于力控制加载循环过程中时,会沿加载方向发生轻微弯曲。试件最终破坏现象为与夹具相连一侧的灯笼状鼓曲的边缘出现撕裂裂隙,继续位移加载,钢管被撕开的裂隙进一步扩大,试件侧向承载力迅速下降。随着锈蚀程度的增大,试件的 Δy 减小,试件受循环次数减少。

2.1 钢管混凝土滞回曲线

圆钢管混凝土柱的实测侧向荷载 - 位移 ($P - \Delta$) 滞回曲线如图 2 所示。在轴压比相同的情况下,随着锈蚀程度的加深,滞回环圈数减少,滞回环的面积减小,饱满度下降。锈蚀程度最大的试件滞回曲线捏拢程度严重,类似梭型,代表其耗能能力最小,抗震能力最差。在锈蚀程度保持相同的情况下,随着轴压比的增大,加载循环的次数增多,滞回环圈数增加,滞回曲线的饱满度增大。在锈蚀程度保持相同的情况下,随着轴压比的增大,加载循环的次数增多,滞回环圈数增加,滞回曲线的饱满度增大。

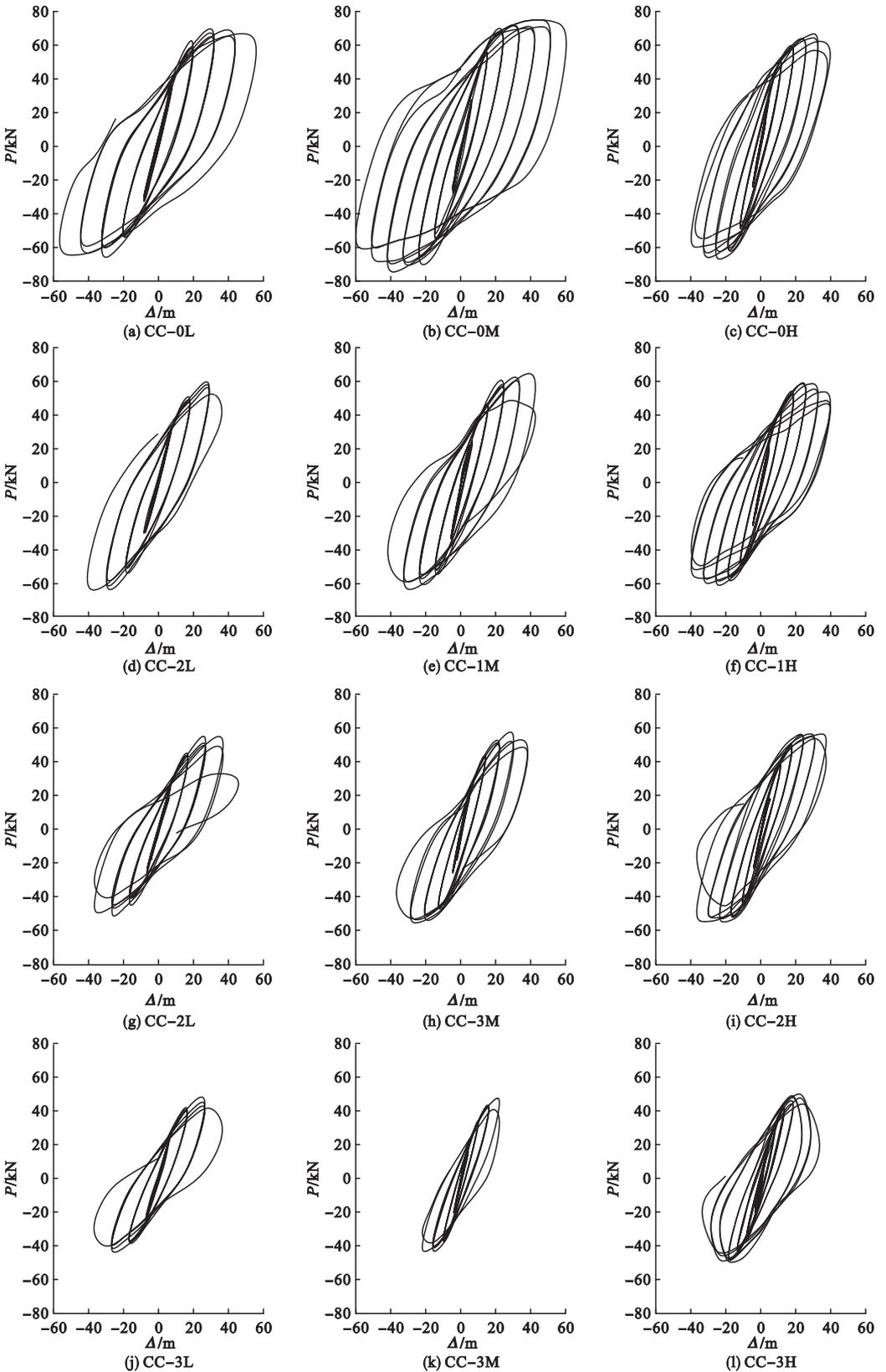


图2 试件滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic loops

试验过程中,随着位移加载量的增大,试件的刚性逐渐减小,当位移加载量回到零点时,仍有残余荷载,此时试件产生了塑性变形.每一级位移加载后的峰值荷载都有小幅度下降,说明随着低周往复荷载的施加,试件的损伤也在增加,且随着位移加载的增大,荷载-位移曲线的割线刚度逐渐降低,表明试件的损伤累积增加.

2.2 骨架曲线

图3为试件的荷载-位移骨架曲线.从图中可以看出,随着锈蚀程度的加深,试件的

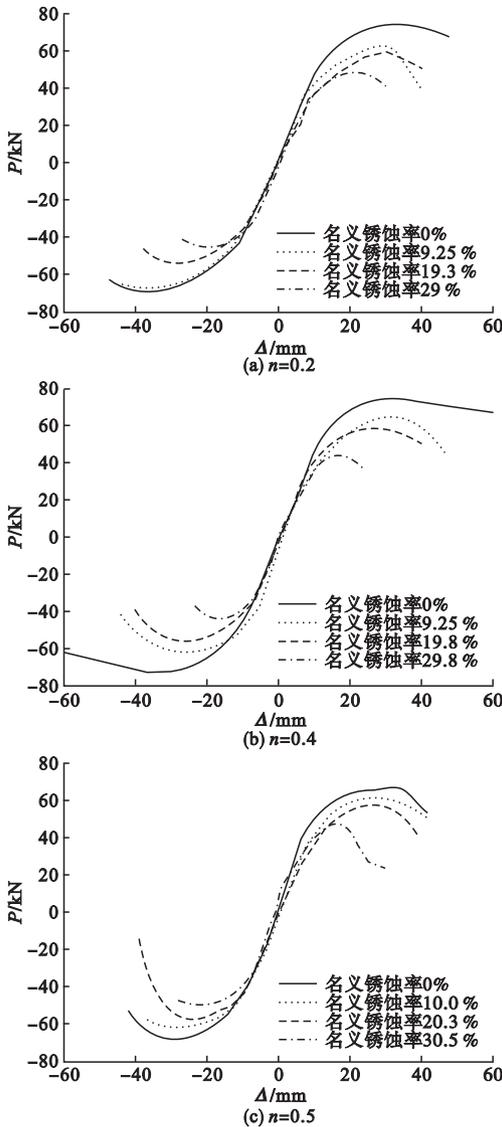


图3 试件骨架曲线

Fig. 3 Skeleton curves

最大侧向承载力下降,钢管表面锈蚀,钢管的有效厚度减小,所以钢管壁对核心混凝土的约束减小.整体上看,试件的延性降低,抗侧向承载能力减小.轴压比 $n = 0.2$ 、钢管壁厚锈蚀率为 9.25% 的试件和轴压比 $n = 0.5$ 、钢管壁厚锈蚀率为 30.5% 的试件相比,在其正方向加载达到最大侧向承载力后,侧向承载力迅速下降,这是因为正方向施力时受力处的钢管被撕裂,能量被释放.

2.3 刚度

随着加载循环次数的增加,试件刚度退化,随加载位移的增大而减小.图4给出了在

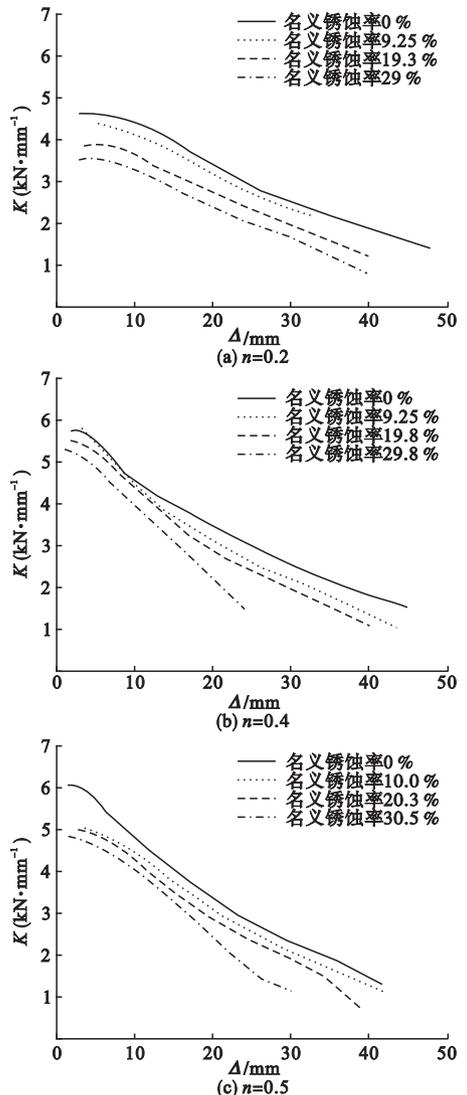


图4 刚度退化曲线

Fig. 4 Stiffness degradation curves

3种轴压比下锈蚀程度不同的试件刚度退化规律.从图中可以看出,试件的锈蚀程度越严重,其初始刚度越低;随位移增加,试件刚度退化明显.

2.4 延性系数和黏滞阻尼系数

假定 Δu 为峰值荷载 P_m 下降到 85% 时对应的位移值, Δy 是试件屈服时的位移值,则延性系数 μ 定义如下:

$$\mu = \Delta u / \Delta y. \quad (4)$$

表2给出了不同轴压比和不同锈蚀程度的情况下试件受低周循环荷载作用时的延性系数 μ 和等效黏滞阻尼系数 h_e .其中试件 CC-0L 数据异常,因为试验装置允许的最大位移量程不够,试验加载至装置所允许的最大位移时,尚未达到设计的停止加载标准,故无法准确计算其延性系数.

表2 试件延性系数和等效黏滞阻尼系数

Table 2 Ductility factor and equivalent viscous damping coefficient

构件序号	n	μ	h_e
CC-0L	0.2	>3.00	0.219
CC-1L	0.2	2.80	0.213
CC-2L	0.2	2.39	0.207
CC-3L	0.2	2.29	0.200
CC-0M	0.4	4.77	0.277
CC-1M	0.4	3.30	0.244
CC-2M	0.4	3.22	0.225
CC-3M	0.4	2.48	0.205
CC-0H	0.5	3.47	0.260
CC-1H	0.5	3.20	0.251
CC-2H	0.5	3.08	0.236
CC-3H	0.5	2.45	0.211

在轴压比一定的情况下,试件的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均随试件锈蚀程度的加深而降低,对应的屈服位移、峰值位移、极限位移均减小,延性系数也随着减小,抗震性能降低.在锈蚀程度一定的情况下,延性系数随着轴压比的变化表现出来的规律性不明显,总体呈增大趋势.

等效黏滞阻尼系数对试件抗震性能的影响与延性系数的影响相类似.在轴压比一定的情况下, h_e 随着试件的锈蚀程度加深而减小,表明试件的抗震性能减弱;在锈蚀程度一定的情况下, h_e 随着轴压比的变化总体上表现为增大趋势,增大规律不明显.

综合以上分析认为,锈蚀程度对抗震性能的影响比轴压比的影响要显著.而所有试件的 h_e 都大于 0.2,优于相应的钢筋混凝土柱的黏滞阻尼系数,说明锈蚀后的钢管混凝土柱也具有较好的抗震性能.

3 有限元模拟

3.1 有限元模型的建立

(1)荷载施加条件:低周循环荷载作用下的钢管混凝土压弯柱构件两端铰支,构件中部为低周循环荷载的施力点.

(2)单元类型的选取与网格划分:采用半结构模型进行计算,一端固定,一端自由.外钢管采用的是壳单元(S4R),混凝土和盖板采用的是三维实体减缩积分单元(C3D8R),采用结构化网格划分技术.

(3)边界约束条件:模型一端固定,另一端截面中心点作为受力参考点,施加轴力和横向往复位移.固定端约束 x 、 y 、 z 三个方向自由度($U1 = U2 = U3 = 0$);外钢管采用对称约束($U3 = UR1 = UR2 = 0$).

(4)钢管与混凝土的界面:钢管和核心混凝土法向采用硬接触,切向采用库仑摩擦模型,摩擦系数 $\mu = 0.25$.

(5)材料的本构关系:对于混凝土的受压应力-应变关系模型采用文献[7]提出的本构关系模型,受拉应力-应变关系采用断裂能-开裂位移的关系模型来描述.钢材本构模型采用 ABAQUS 自带双线性随动强化模型.

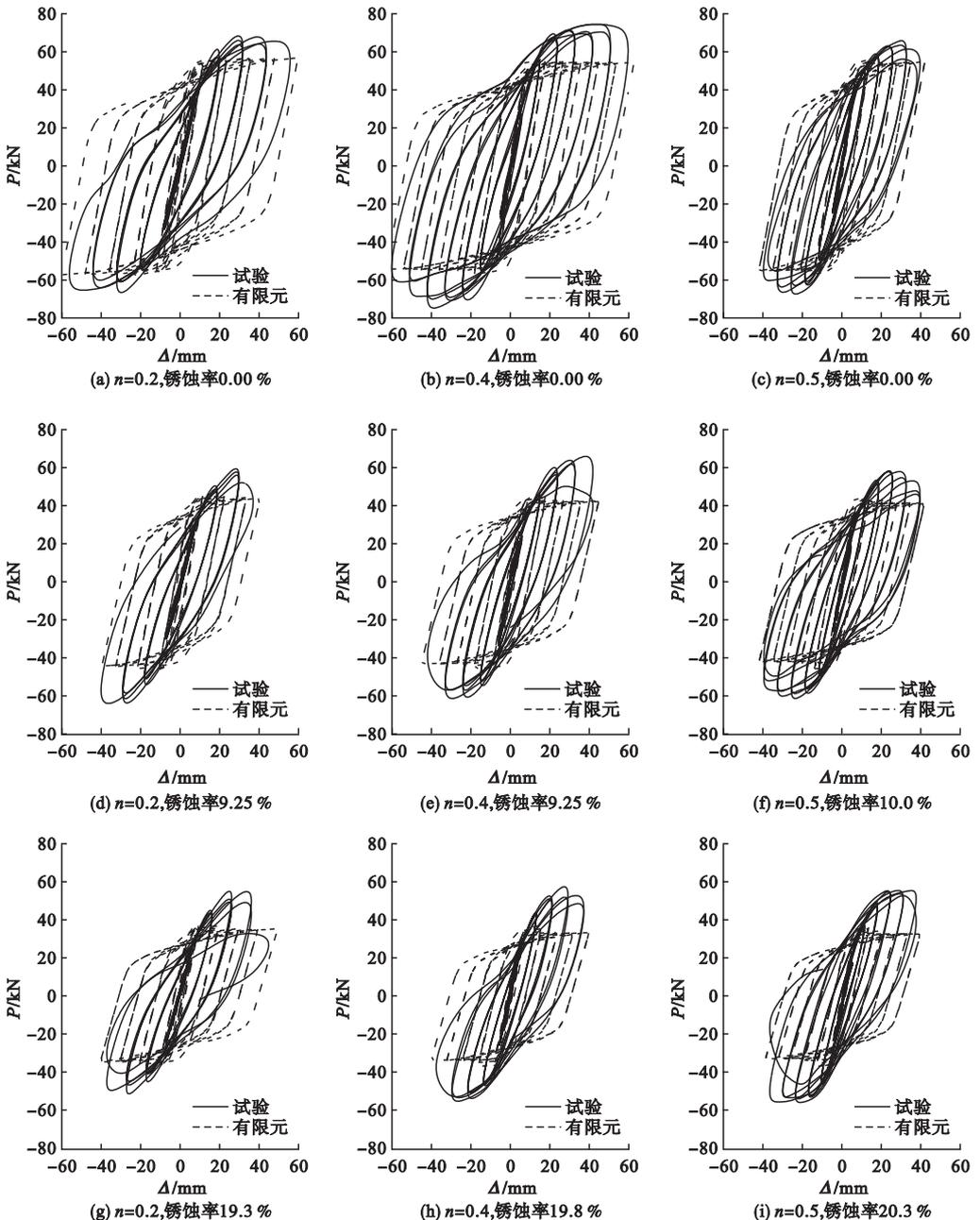
对锈蚀后的低碳钢标准试件进行拉伸试验,线性回归分析试验数据,分别得到屈服强

度退化公式和弹性模量退化公式,即 $f_y = (1 - 1.007 \cdot \eta_s) \cdot f_{y0}$, 其中 η_s 为钢管损失率, f_y 为低碳钢锈蚀后的屈服强度, f_{y0} 为低碳钢锈蚀前的屈服强度; $E_s = (1 - 0.955 \cdot \eta_s) \cdot E_0$, 其中 E_s 为低碳钢锈蚀后的弹性模量, E_0 为低碳钢锈蚀前的弹性模量. 将公式代入钢管应力 - 应变本构关系, 并考虑因锈蚀引起的钢管壁厚损失, 建立低周往复荷载作用下圆钢管混凝土的锈蚀损伤有限元滞回

模型.

3.2 模拟结果与试验结果对比

应用所建立的锈蚀损伤有限元模型, 分析锈蚀圆钢管混凝土结构的滞回性能, 并与试验结果进行对比. 图5给出了不同轴压比下侧向力 - 位移滞回曲线试验结果与ABAQUS有限元数值模拟对比曲线. 可以看出试验结果与有限元计算结果基本吻合.



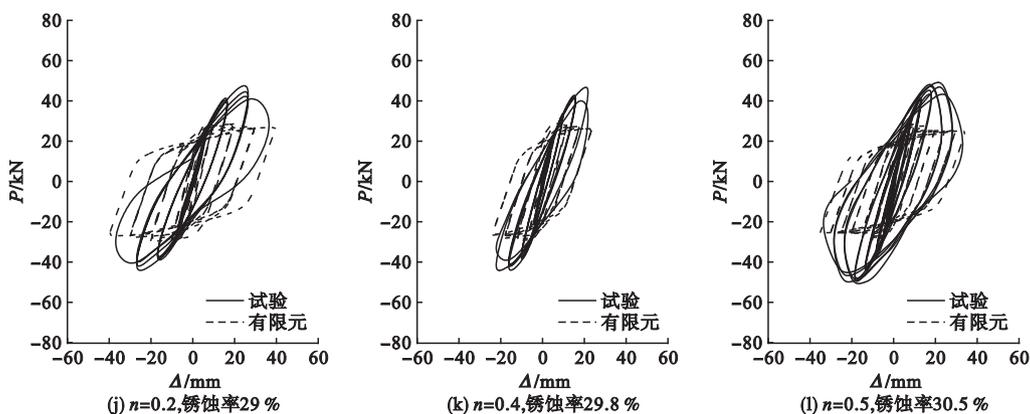


图5 试验结果与有限元数值模拟对比

Fig. 5 Comparison of test results with FE numerical solutions

4 结论

(1) 在相同的轴压比下,试件的加载循环次数随着圆钢管混凝土柱试件锈蚀程度的加深而减少,滞回环的面积也随之减小,饱满度下降. 锈蚀程度最大的试件其耗能能力最小、抗震能力最差. 试件的屈服荷载(位移),峰值荷载(位移)以及极限荷载(位移)均随锈蚀程度的加深减小,延性系数也随之减小,抗震性能降低.

(2) 在锈蚀程度保持相同的情况下,随着轴压比的增大,试件承载力和延性都会提升. 所有试件的延性系数和阻尼黏滞系数随锈蚀程度的增大明显减小,随轴压比的增大上下波动,增大趋势并不明显,抗震性能略有加强.

(3) 锈蚀程度对抗震性能的影响比轴压比的影响要显著.

参考文献

[1] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等. 钢管再生混凝土轴压长柱试验研究及力学性能分析[J]. 建筑结构学报,2012,33(9):12-20.
(ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Experimental study and mechanical behavior analysis of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns under axial compression[J]. Journal of building structures,2012,33(9):12-20.)

[2] 黄宏,张安哥,李毅,等. 带肋方钢管混凝土轴

压短柱试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):12-20.

(HUANG Hong, ZHANG Ange, LI Yi, et al. Experimental research and finite element analysis on mechanical performance of concrete-filled stiffened square steel tubular stub columns subjected to axial compression[J]. Journal of building structures,2011,32(2):75-82.)

[3] KIM C S, PARK H G, CHUNG K S, et al. Eccentric axial load testing for concrete-encased steel columns using 800MPa steel and 100MPa concrete[J]. Journal of structural engineering,2012,138(8):1019-1031.

[4] 张向冈,陈宗平,王讲美,等. 钢管再生混凝土长柱偏压性能研究[J]. 工程力学,2013,30(3):331-340.

(ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, WANG Jiangmei, et al. Study on eccentric compression behaviors of recycled aggregate concrete filled steel tubular long columns[J]. Engineering mechanics,2013,30(3):331-340.)

[5] KIM C, PARK H, CHUNG K, et al. Eccentric axial load capacity of high-strength steel-concrete composite columns of various sectional shapes[J]. Journal of structural engineering,2013,140(4):1-12.

[6] YANG Y F, HAN L H, ZHU L T. Experimental performance of recycled aggregate concrete-filled circular steel tubular columns subjected to cyclic flexural loadings[J]. Advance in structural engineering,2009,12(2):183-194

[7] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.

(LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University,

2005.)
- [8] LEE E, YUN B H, SHIM H J, et al. Torsional behavior of concrete-filled circular steel tube columns[J]. Journal of structural engineering, 2009, 135(10): 1250 - 1258.
- [9] HUANG Hong, HAN Linhai, ZHAO Xiaolin. Investigation on concrete filled double skin steel tube (CFDSTs) under pure torsion [J]. Journal of structural steel research, 2013, 90: 221 - 234.
- [10] 王铁成, 张磊, 赵海龙, 等. 钢管混凝土柱抗震性能参数影响分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊): 339 - 344.
(WANG Tiecheng, ZHANG Lei, ZHAO Hailong, et al. Analysis of parameter influence on seismic behavior of concrete filled square steel tubular columns [J]. Journal of building structures, 2013, 34(S): 339 - 344.)
- [11] HAN Linhai, LI Wei. Seismic performance of CFST column to steel beam joint with RC slab; experiments[J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(11): 1374 - 1386.
- [12] XIAO J Z, HUANG Y J, SUN Z H. Seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel and glass fiber reinforced plastic tube columns[J]. Advances in structural engineering, 2014, 17(5): 693 - 707.
- [13] HAN L H, HOU C, WANG Q L. Square concrete filled steel tubular (CFST) members under loading and chloride corrosion; experiments [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 71(1): 11 - 25.
- [14] HOU C, HAN L H, ZHAO X L. Full-range analysis on square CFST stub columns and beams under loading and chloride corrosion [J]. Thin-walled structures, 2013, 68(1): 50 - 64.
- [15] 王庆利, 冯立明, 屈绍娥. 圆钢管混凝土轴压短柱在长期荷载 - 氯盐腐蚀耦合作用下的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015(增刊 1): 48 - 52.
(WANG Qingli, FENG Liming, QU Shaoe. Experimental study on axially compressed circular concrete-filled steel tubular stub columns under long-term coupling effects of loading and chloride corrosion[J]. China civil engineering journal, 2015(S1): 48 - 52.)
- [16] 花幼星, 侯超, 韩林海. 氯离子腐蚀环境下钢管混凝土轴拉构件受力性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(增刊 1): 149 - 152, 158.
(HUA Youxing, HOU Chao, HAN Linhai. Behavior of CFST Tensile members subjected to chloride corrosion[J]. Engineering mechanics, 2015, 32(S1): 149 - 152, 158.)
- [17] 王国业, 王亮, 杨永生, 等. 钢筋锈蚀对混凝土梁抗弯性能影响试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(3): 454 - 460.
(WANG Guoye, WANG Liang, YANG Yongsheng, et al. Study on Effect of the corrosion of reinforcement on concrete beam bending[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013, 29(3): 454 - 460.)
- [18] 林博洋, 陈梦成, 黄宏. 酸雨腐蚀后圆钢管混凝土柱抗震性能有限元分析[C]. 第 25 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册). 北京: 工程力学杂志社, 2016.
(LIN Boyang, CHEN Mengcheng, HUANG Hong. Finite element analysis of seismic performance for circular concrete filled steel tubular column under acid rain attack[C]. The 25th national conference on structure engineering proceedings (II). Beijing: Engineering Mechanics Press, 2016.)
- [19] 徐亚丰, 赵敬义, 刘娜. 低周反复荷载下钢管 - 钢管混凝土柱的延性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(4): 689 - 693.
(XU Yafeng, ZHAO Jingyi, LIU Na. The ductility analysis of circular steel tube compile column filled with steel reinforced concrete on cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25 (4): 689 - 693.)
- [20] 黄宏, 林博洋, 陈梦成. 钢管混凝土抗震性能 ABAQUS 数值模拟中损伤因子比较研究 [J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(6): 61 - 66.
(HUANG Hong, LIN Boyang, CHEN Mengcheng. Comparison study on damage factor in ABAQUS for seismic simulation of concrete filled steel tube [J]. Journal of East China jiaotong university, 2015, 32(6): 61 - 66.)