

文章编号: 1005-0523(2021)03-0007-08

酸雨环境下掺锂渣钢筋混凝土柱有限元分析

许开成, 易彬, 张立卿, 陈博群

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究掺锂渣钢筋混凝土柱的力学性能,基于ANSYS有限元软件对14个掺锂渣钢筋混凝土柱进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比分析。主要研究构件的破坏形态、材料应力应变云图、极限承载力与荷载-挠度曲线等方面的特性。重点讨论锂渣掺量和偏心距对未腐蚀构件力学性能的影响,以及酸雨腐蚀时间和锂渣掺量对腐蚀后构件力学性能的影响。研究表明:对于未腐蚀构件,不同锂渣掺量对小偏心构件影响更为明显,不同偏心距对构件的承载力与刚度影响十分显著,且在一定范围内,掺入锂渣能提高柱的极限承载力;对于腐蚀构件,锂渣的掺入对腐蚀后柱的承载力和抗侧刚度等性能有一定提升,且柱的极限承载力随腐蚀时间的增加而下降,锂渣的掺入能一定程度上延缓腐蚀时间对承载力的影响。

关键词: 锂渣; 钢筋混凝土柱; 偏心距; 酸雨腐蚀; 有限元分析

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

本文引用格式: 许开成, 易彬, 张立卿, 等. 酸雨环境下掺锂渣钢筋混凝土柱有限元分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(3): 7-14.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20210706.001

Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Column Mixed with Lithium Slag Under Acid Rain

Xu Kaicheng, Yi Bin, Zhang Liqing, Chen Boqun

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of reinforced concrete columns with lithium slag, a numerical simulation of 14 reinforced concrete columns with lithium slag was carried out based on ANSYS finite element software, and the simulation results were compared with the test results. The failure modes, material stress-strain nephogram, ultimate bearing capacity and load-deflection curves were studied. The effects of the content of lithium slag and eccentricity on the mechanical properties of uncorroded components and the effects of acid rain corrosion time and the content of lithium slag on the mechanical properties of corroded components were discussed. The results show that for the non-corroded members, the influence of different lithium slag content on the small eccentric members is more obvious, and the influence of different eccentricity on the bearing capacity and stiffness of members is very significant; and in a certain range, the ultimate bearing capacity of the column can be improved by adding lithium slag. For corroded members, the addition of lithium slag can improve the bearing capacity and lateral stiffness of the corroded column to a certain extent, and the ultimate bearing capacity of the column decreases with the increase of corrosion time. The addition of lithium slag can delay the influence of corrosion time on the bearing capacity to a certain extent.

Key words: lithium slag; reinforced concrete column; eccentricity; acid rain corrosion; finite element analysis

Citation format: XU K C, YI B, ZHANG L Q, et al. Finite element analysis of reinforced concrete column mixed with lithium slag under acid rain[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3): 7-14.

收稿日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968021, 51468017); 江西省自然科学基金项目(20202BAB204031)

作者简介: 许开成(1973—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为工程结构耐久性。E-mail: xkcxj@ecjtu.edu.cn。

锂渣是锂矿生产提炼过程中产生的一种工业废渣。随着锂矿的开采与锂盐产品应用领域的不断扩大,产生的大量锂渣堆存问题亟待解决,如能够将锂渣进行高效再生利用,在减少资源开采的同时也降低了对环境的影响。有研究表明将锂渣作为掺合料加入混凝土中,能够有效改善混凝土的内部结构和耐久性^[1-4]。在实际工程中,混凝土结构受服役环境的影响,可能会由于耐久性不足而发生破坏,其中酸雨对混凝土结构的侵蚀破坏最为常见,并且酸雨已成为我国严重的区域性环境问题^[5]。有必要对酸雨环境下掺锂渣混凝土构件的力学性能进行系统研究。

国内外学者对掺锂渣进行了相关研究。张兰芳^[6]就掺锂渣混凝土的抗压强度和抗碳化能力进行了试验研究;王国强等^[7],秦拥军等^[8],Wen^[9],Li等^[10]学者研究了不同锂渣细度和不同锂渣掺量对混凝土力学性能的影响。在酸雨环境下混凝土力学性能方面,张广泰等^[11]探究了在硫酸盐侵蚀下掺纤维锂渣混凝土的力学性能;王凯等^[12]探究了酸雨侵蚀下钢筋混凝土构件偏心受压力学性能的损伤退化规律。在数值模拟方面,于峰等^[13],李冬等^[14]对钢筋混凝土柱的偏心受压力学性能进行了有限元分析。

综上所述,国内外对掺锂渣混凝土构件的力学性能研究较为成熟,而对于掺锂渣混凝土构件经酸

雨侵蚀后的力学性能研究还不够充分。故在前期试验研究的基础上,基于 ANSYS 有限元软件对构件进行数值模拟,通过对比试验结果,解析不同参数对构件承载力的影响,为掺锂渣混凝土在酸雨地区的推广和使用提供相关理论依据和参考。

1 有限元模型

1.1 有限元单元选取

基于 ANSYS 有限元软件,对掺锂渣钢筋混凝土柱进行有限元模拟,其中加载钢板和混凝土分别采用 SOLID45 和 SOLID65 单元,钢筋采用 LINK8 单元。

1.2 有限元模型建立

通过对许开成等^[15-16]研究中的掺锂渣钢筋混凝土柱构件进行有限元模拟和模型建立,并与试验结果进行对比来验证其模型的可行性。从腐蚀时间、锂渣掺量、偏心距 3 个因素出发,试验共计 14 个偏压柱,其中包含 8 个未腐蚀组偏压柱,6 个腐蚀组偏压柱。构件尺寸为 250 mm×200 mm×1 400 mm,柱保护层厚度为 30 mm。为保证柱偏心受压时为典型的大偏心受压和小偏心受压,设置构件的偏心距为 40 mm 和 160 mm,同时在构件两端放置钢垫块以防止应力集中和实现偏压,参考试验梁尺寸及配筋见图 1。参考试验梁参数见表 1。

表 1 偏压构件一览表

Tab.1 Eccentric compressive component parameter list

组别	构件编号	锂渣掺量/%	纵向钢筋	偏心距 e_0 /mm	配筋率/%	箍筋	腐蚀时间/d
未腐蚀组	PY-00-40	0	4C16	40	2.01	A6@50/100	0
	PY-00-160	0		160			
	PY-10-40	10		40			
	PY-10-160	10		160			
	PY-15-40	15		40			
	PY-15-160	15		160			
	PY-20-40	20		40			
	PY-20-160	20		160			
腐蚀后组	PSPY-3	0	4C16	160	2.01	A6@50/100	90
	PSPY-4	0		160			120
	PSPY-5	0		160			150
	LSPY-3	15		160			90
	LSPY-4	15		160			120
	LSPY-5	15		160			150

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

注:表中构件编号 PY 表示未腐蚀偏压柱;编号 PSPY 表示未掺锂渣腐蚀偏压柱;LSPY 表示掺锂渣腐蚀偏压柱。

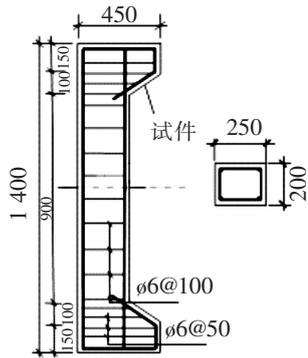


图 1 构件尺寸及配筋示意图(单位:mm)

Fig.1 Component size and reinforcement schemes(unit:mm)

针对试验数据对所有偏压柱构件进行模拟,采用分离式建模。图 2(a)~图 2(h)分别为偏心距 40 mm 和 160 mm 的有限元模型图。从图 2(c)和图 2(g)可知偏心距的不同,钢筋的屈服程度也不同,在大偏心受压构件中受拉钢筋已达到屈服强度,而小偏心受压构件中远离荷载一侧的钢筋在受压状态下没有达到屈服强度;从图 2(d)和图 2(h)可知偏心距的不同对混凝土受力形态也有所影响,且在小偏心构件中混凝土正截面受压区高度更大。

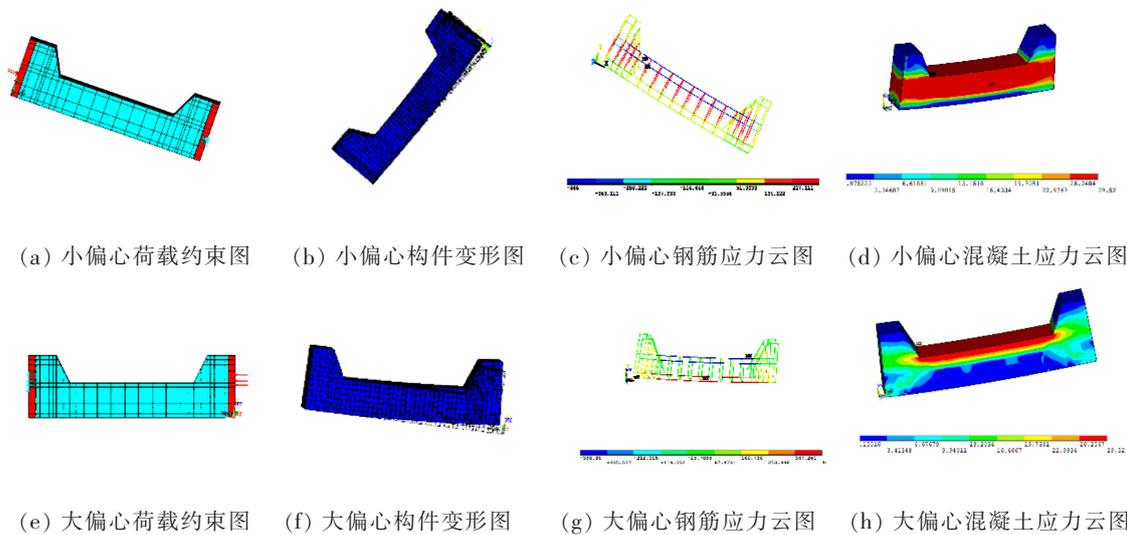


图 2 有限元模型图

Fig.2 Finite element model drawing

2 有限元结果与分析

2.1 未腐蚀组偏心受压柱有限元模拟结果分析

图 3 为未腐蚀组不同偏心距下偏压柱模拟破坏形态图, $F:F_{cu}$ 为构件承受的荷载与其极限承载力的比值,其中图 3(a)~图 3(f)为偏心距为 40 mm 的柱模拟破坏形态图,图 3(g)~图 3(h)为偏心距为 160 mm 的柱模拟破坏形态图。对于偏心距为 40 mm 的偏压柱,构件在加载初期处于弹性阶段,其挠度增长缓慢,当荷载子步增加到 160 时近轴力侧端的混凝土开始出现微裂缝,如图 3(a)所示,继续加载至图 3(b)所示时近轴力侧受压区混凝土出现裂纹且部分混凝土被压碎,远轴力侧混凝土在随荷载增加至图 3(e)所示时开始出现裂缝,当加载至近轴力

侧混凝土被压碎,且远轴力侧混凝土出现大量裂缝时,宣告构件破坏,如图 3(f)所示,此时远轴力侧钢筋并未达到屈服,如图 2(b)所示;对于偏心距为 160 mm 的偏压柱,在加载初期,荷载增加到如图 3(c)所示时首先在混凝土受拉区出现横向裂缝,且混凝土受拉区主裂缝随荷载增加而更加明显,如图 3(d)和图 3(g)所示,此时受拉钢筋达到屈服强度,如图 2(h)所示,进入流幅阶段,荷载继续增加导致构件中和轴上升,受压区边缘混凝土被压碎,进而宣告构件破坏,如图 3(h)所示。图 3(i)和图 3(j)为偏心距 40 mm 和 160 mm 的试验柱裂缝发展图,对照模拟裂缝发展图和实际裂缝发展图可知,两种偏心距下模拟裂缝发展情况与实际情况均较为吻合。

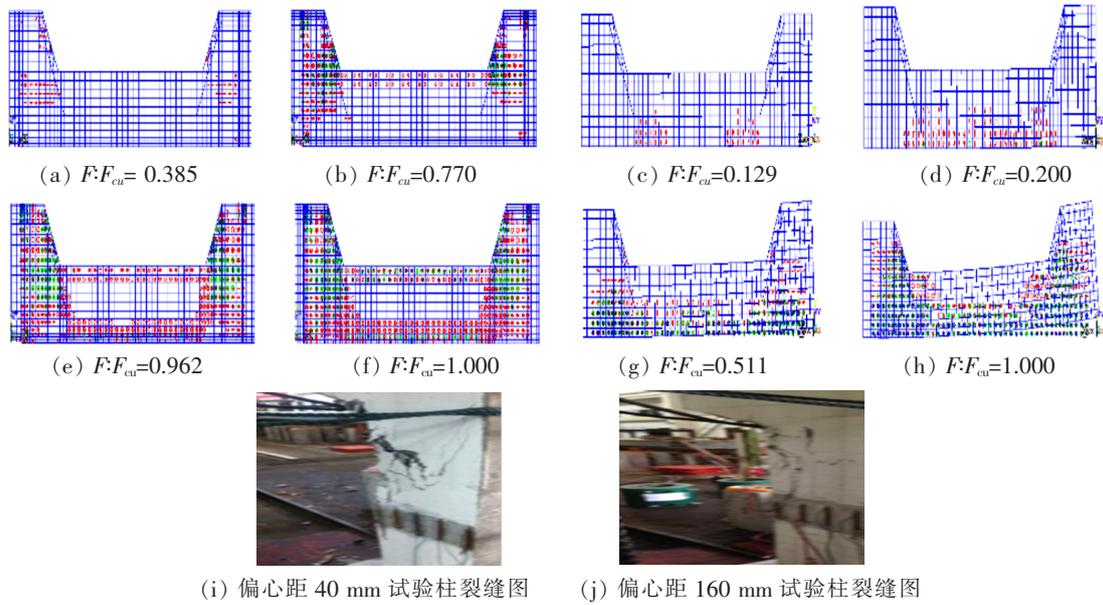


图 3 未腐蚀组偏压柱模拟破坏形态图

Fig.3 Failure pattern diagram of uncorroded bias column simulation

图 4 为未腐蚀组偏压柱荷载-侧向变形模拟值与试验值的对比曲线,分析曲线结果,发现多数构件试验承载力比模拟值偏大,最大挠度较模拟值偏小。分析其原因:① 由于试验过程中存在一定的误

差,导致试验结果有时离散性较大,造成试验数据并不能反映其真实规律;② 在有限元模型建立中钢筋本构选取的是双直线模型,未考虑纵筋的强化作用,也未考虑横向箍筋对混凝土构件的环箍作用。

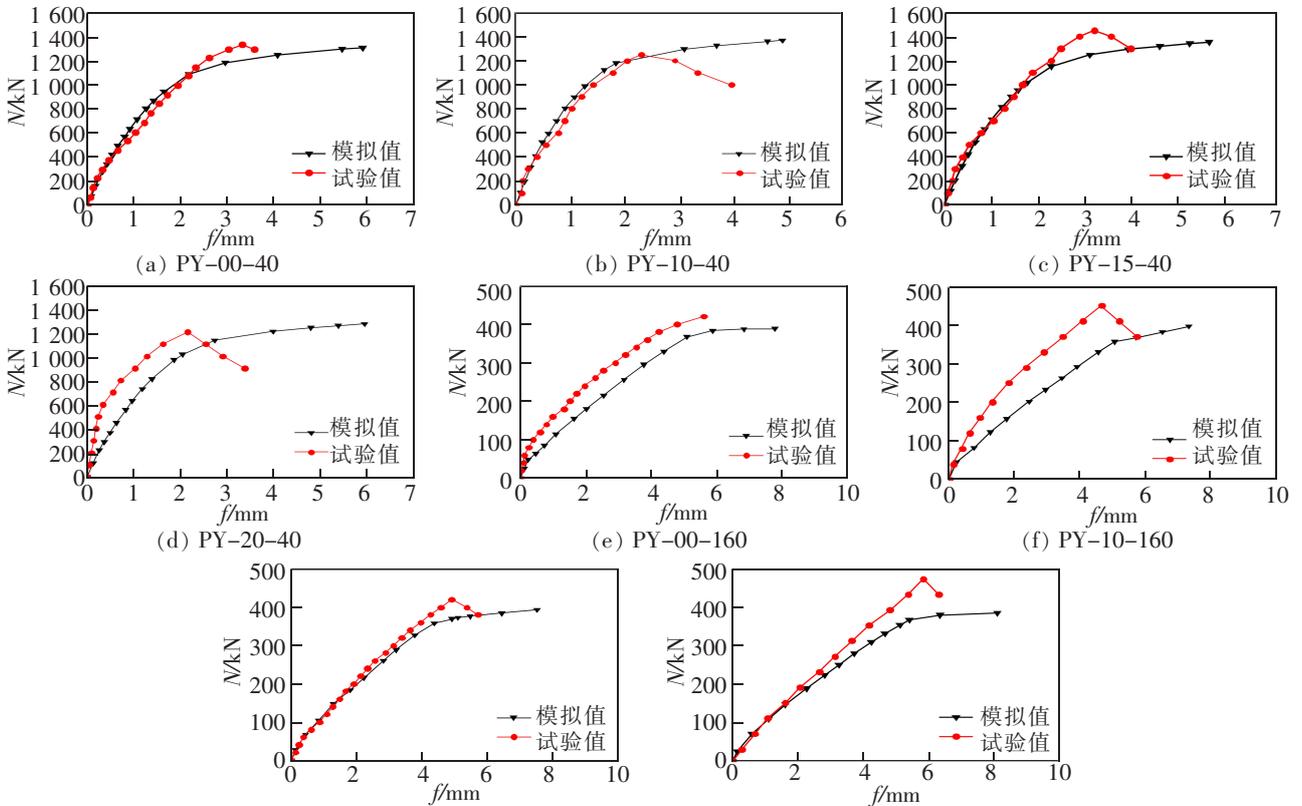


图 4 未腐蚀组偏压柱荷载-侧向变形对比曲线

Fig.4 Load-lateral deformation curve of uncorroded bias column

表 2 为未腐蚀组偏压柱承载力试验值、计算值和模拟值的对比结果,由表 2 可知,对于偏心距为 40 mm 的偏压柱,其承载力试验值与模拟值相对最大和最小误差分别为 10%和 2%,说明其实际情况与模拟情况吻合较好,对比承载力计算值与模拟值,发现相对误差在 29%以内;对于偏心距为 160 mm

的偏压柱,其承载力试验值均高于模拟值,相对最大误差为 19%,相对最小误差为 6%,对比承载力计算值与模拟值,发现相对误差在 5%以内,数据吻合较好。说明采用 ANSYS 有限元软件模拟两种不同偏心距下偏压柱的承载力均能达到现行规范的安全要求。

表 2 未腐蚀组偏压柱承载力结果比值
Tab.2 Ratio of bearing capacity of uncorroded bias column

构件编号	承载力试验值 N_{uc}/kN	承载力计算值 N_{uc}/kN	承载力模拟值 N/kN	N/N_{uc}	N/N_{uc}
PY-00-40	1 340	1 024.9	1 313.25	0.98	1.28
PY-10-40	1 250	1 076.4	1 369.30	1.10	1.27
PY-15-40	1 450	1 055.2	1 352.39	0.93	1.28
PY-20-40	1 200	983.9	1 268.13	1.06	1.29
PY-00-160	420	371.9	388.34	0.92	1.04
PY-10-160	450	377.4	396.14	0.88	1.05
PY-15-160	420	375.2	393.76	0.94	1.05
PY-20-160	470	367.5	381.95	0.81	1.04

2.2 未腐蚀组偏心受压柱参数影响分析

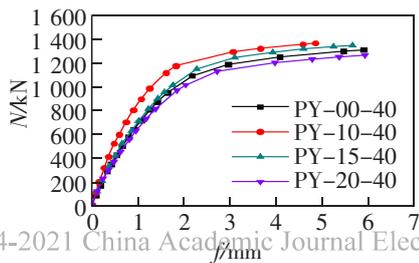
2.2.1 锂渣掺量的影响

图 5 为不同锂渣掺量对未腐蚀组偏压柱力学性能的影响。图 5(a)和图 5(c)分别为偏心距 40 mm 下不同锂渣掺量对偏压柱荷载-位移曲线和极限承载力的影响。在初期阶段,锂渣掺量对构件初始刚度影响不大,其中 10%锂渣掺量构件相较于其它锂渣掺量构件初始刚度更高,随荷载增加至极限荷载时,锂渣掺量的改变对构件的极限承载力和最大挠度有一定影响,其中相较于无锂渣掺入的构件,其它 3 种掺量对构件极限承载力分别有 4.3%,3.0%和 -3.4%的提升;图 5(b)和图 5(d)分别为偏心距 160 mm 下不同锂渣掺量对偏压柱荷载-位移曲线

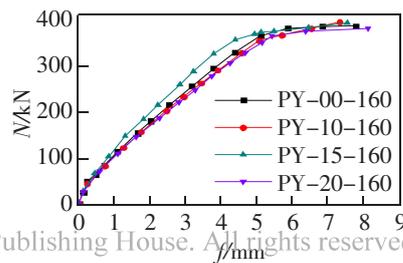
和极限承载力的影响,可知不同锂渣掺量对偏压柱荷载-位移曲线的影响较小,其中相较于无锂渣掺入的构件,其它 3 种掺量对构件极限承载力分别有 2.0%,1.4%和 -1.6%的提升。说明不同锂渣掺量对小偏心极限承载力比大偏心的影响更明显,且在一定范围内,锂渣的掺入能提高偏压柱的极限承载力。

2.2.2 偏心距的影响

图 6 为不同偏心距对未腐蚀组偏压柱的荷载-挠度曲线的影响。由图 6 可得,在相同锂渣掺量的情况下,构件承载力与初始刚度随偏心距的增大而逐渐下降,最大挠度随偏心距的增大而有一定提高,说明偏心距的改变对构件极限承载力和刚度影响显著。



(a) 偏心距 40 mm 下不同锂渣掺量对偏压柱荷载-位移曲线的影响



(b) 偏心距 160 mm 下不同锂渣掺量对偏压柱荷载-位移曲线的影响

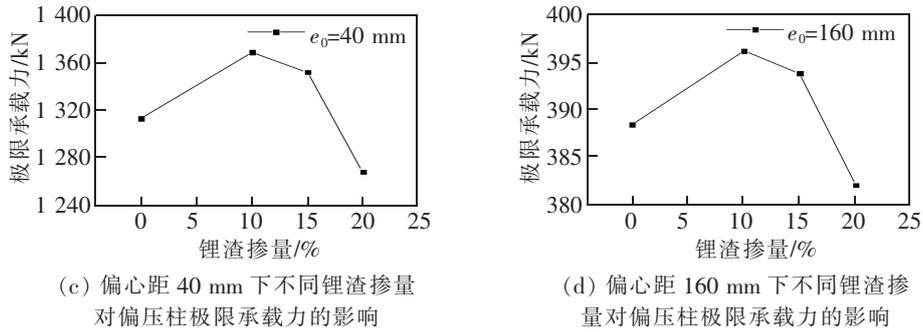


图5 不同锂渣掺量对未腐蚀组偏压柱力学性能的影响

Fig.5 Influence of different lithium slag content on mechanical properties of uncorroded bias column

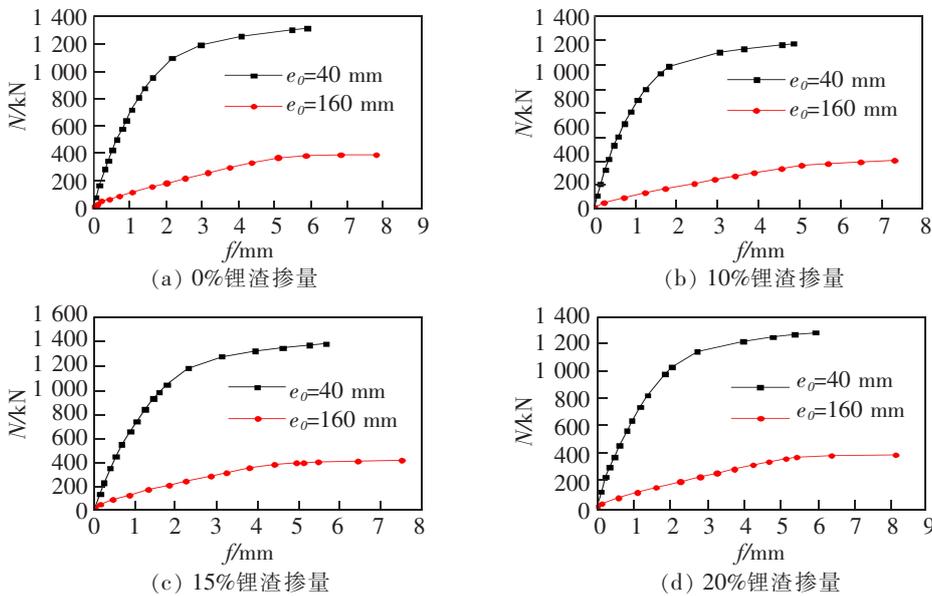


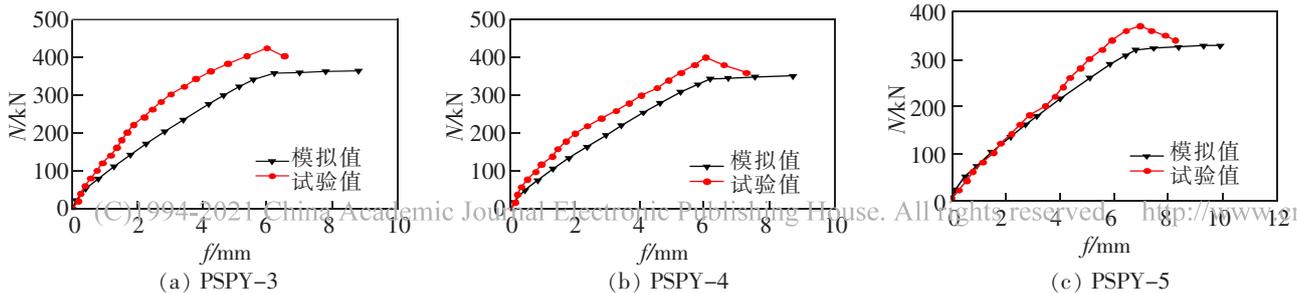
图6 不同偏心距对未腐蚀组偏压柱荷载-挠度曲线的影响

Fig.6 Influence of different eccentricities on load-deflection curves of uncorroded bias column

2.3 腐蚀后偏心受压柱有限元模拟结果分析

图7为腐蚀后偏压柱荷载-侧向变形模拟值与试验值的对比曲线,分析曲线结果,发现二者初始刚度大部分吻合良好,试验承载力均比模拟值偏大,最大挠度比模拟值偏小。分析其原因:①由于酸雨腐蚀后的构件表面蚀坑密集,对采集试验数据有相应的影响;②由于构件在模拟酸雨环境下腐蚀不均匀,导致材料具有更大的离散性。

表3为腐蚀后偏压柱承载力试验值、计算值和模拟值的对比结果,由表3可得,所有构件承载力试验值均高于其模拟值,相对最大误差为18%,相对最小误差为8%,而其计算值与模拟值的相对误差均在2%以内,证明二者吻合良好。说明基于ANSYS有限元软件模拟酸雨腐蚀后偏压柱的承载力均能满足目前现行规范,且有足够的安全系数,能较好地满足实际情况。



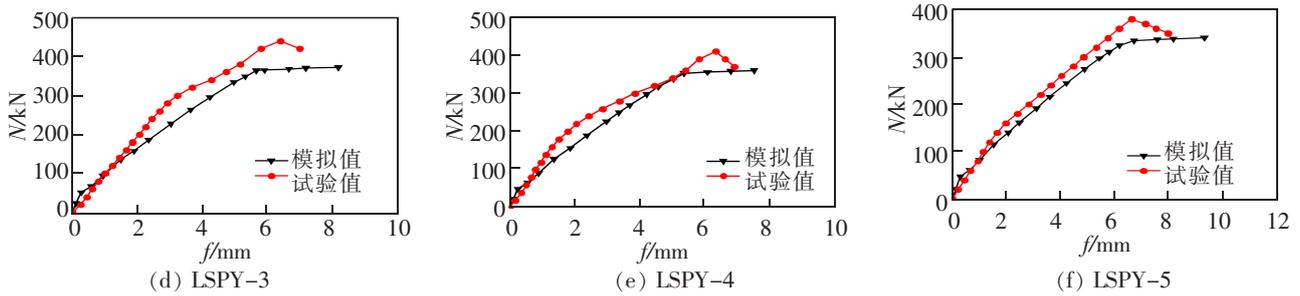


图 7 腐蚀后偏压柱荷载-侧向变形对比曲线

Fig.7 Load – lateral deformation curve of biased column after corrosion

表 3 腐蚀后偏压柱承载力结果比值

Tab.3 Ratio of bearing capacity of biased column after corrosion

构件编号	承载力试验值 N_{uc}/kN	承载力计算值 N_{uc}/kN	承载力模拟值 N/kN	N/N_{uc}	N/N_{uc}
PSPY-3	440	357.69	360.93	0.82	1.01
LSPY-3	410	364.16	371.90	0.91	1.02
PSPY-4	400	347.32	351.40	0.88	1.01
LSPY-4	390	355.14	360.15	0.92	1.01
PSPY-5	370	335.31	328.13	0.89	0.98
LSPY-5	380	343.42	340.13	0.90	0.99

2.4 腐蚀后偏心受压柱参数影响分析

2.4.1 酸雨腐蚀时间的影响

图 8 为酸雨腐蚀时间对腐蚀后偏压柱力学性能的影响。图 8(a)和图 8(b)分别为无锂渣和 15% 锂渣掺量下不同酸雨腐蚀时间对偏压柱荷载-位移的影响,随着腐蚀时间的增加,无锂渣和 15% 锂渣掺入下的偏压柱其刚度和极限承载力都存在不同程度的下降;图 8(c)为酸雨腐蚀时间对不同锂渣掺量下偏压柱极限承载力的影响,随着腐蚀时间由 90 d 到 120 d 再到 150 d,无锂渣掺入的偏压柱极限承载力分别降低了 2.6%和 9.1%,对于锂渣掺量 15%的偏压柱极限承载力分别降低了 3.2%和 8.5%。分析说明偏压柱极限承载力随酸雨腐蚀时间

的延长而减小,通过锂渣的掺入能一定程度上延缓酸雨腐蚀时间对承载力的影响。

2.4.2 锂渣掺量的影响

图 9 为不同锂渣掺量对腐蚀后偏压柱荷载-挠度曲线的影响。由图 9 可得,锂渣的掺入对构件的初始刚度、延性指标和极限承载力均有一定影响,在出现裂缝前,锂渣掺量对构件刚度影响甚微,加载至出现裂缝后,有锂渣掺入的构件能有效降低偏压柱刚度的退化,继续加载至构件破坏,锂渣的掺入对不同酸雨腐蚀时间下的偏压柱极限承载力都有一定的提高,且最大挠度低于未掺锂渣的构件。由此说明,锂渣的掺入对酸雨腐蚀下偏压柱的承载力和抗侧刚度等性能有一定提升。

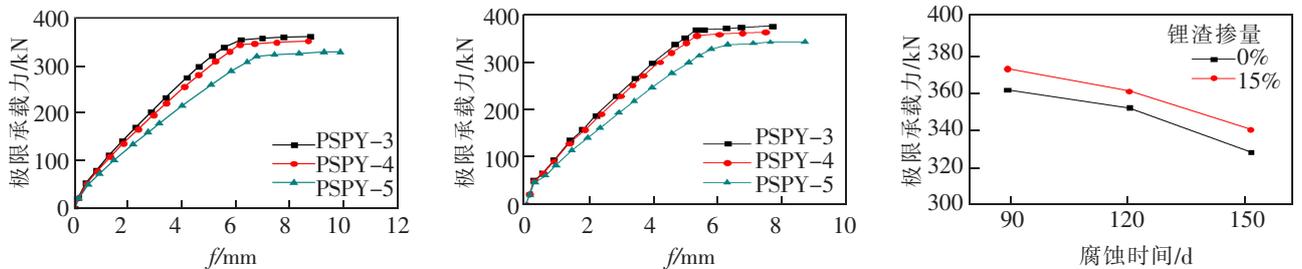


图 8 不同锂渣掺量对腐蚀后偏压柱荷载-挠度曲线的影响

Fig.8 Influence of different lithium slag content on load-deflection curve of biased column after corrosion

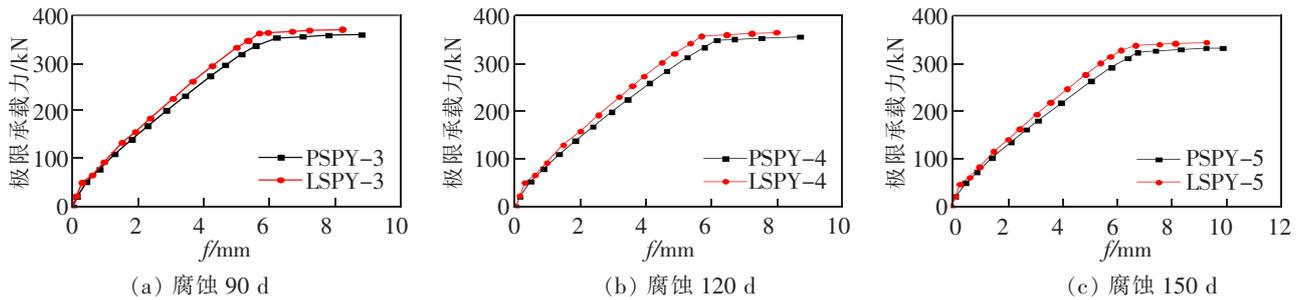


图9 酸雨腐蚀时间对腐蚀后偏压柱力学性能的影响

Fig.9 Effect of acid rain corrosion time on mechanical properties of biased column after corrosion

3 结论

1) 选取合适的有限元单元,通过 ANSYS 有限元软件进行模型的网格区域划分,经加载求解后进行数值分析,模拟偏压柱的破坏形态、极限荷载和荷载-挠度曲线,以验证有限元模型的正确性和可行性,对比实际试验结果发现二者吻合良好。

2) 通过模拟偏压柱的破坏形态,可以直观地看出偏心距对偏压柱裂缝发展情况和破坏模式的影响,得出材料发生破坏是偏压柱失效的根本原因,且大偏心构件破坏主要受拉钢筋屈服,小偏心构件破坏主要受压区边缘混凝土压碎,二者共同之处是受压区边缘混凝土率先达到极限压应变而被破坏。

3) 通过分析未腐蚀组偏压柱的模拟结果可知,基于 ANSYS 有限元软件对不同偏心距下偏压柱的极限承载力进行模拟均能满足我国现行工程设计规范的安全要求。在相同锂渣掺量的情况下,构件承载力与刚度随偏心距的增大而减小,且偏心距的改变对其影响更为显著,当锂渣掺量发生改变,小偏心构件极限承载力比大偏心构件更易受锂渣掺量的影响,而锂渣的掺入在一定条件下能提高偏压柱的极限承载力。

4) 通过分析腐蚀后偏压柱的模拟结果可知,基于 ANSYS 有限元软件对酸雨环境下有无锂渣掺量的偏压柱极限承载力进行模拟均能满足目前现行规范,且有足够的安全系数,能较好地满足实际情况。锂渣的掺入对酸雨腐蚀下偏压柱的承载力和抗侧刚度等性能有一定提升,且偏压柱极限承载力随酸雨腐蚀时间的延长而减小,通过锂渣的掺入能一定程度上延缓酸雨腐蚀时间对承载力的影响。

参考文献: [1] LUO Q, HUANG S W, ZHOU Y X, et al. Influence of lithium slag from lepidolite on the durability of concrete[J]. IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 61(1): 012151.

[2] 翟梦怡, 赵计辉, 王栋民. 锂渣粉作为辅助胶凝材料在水泥基材料中的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 139-144.

[3] 费文斌. 利用锂渣代替黏土烧制水泥熟料的试验[J]. 水泥, 1999(1): 4-6.

[4] 吴福飞, 王国强, 侍克斌, 等. 锂渣的综合利用[J]. 粉煤灰综合利用, 2012(3): 46-50.

[5] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.

[6] 张兰芳. 锂渣混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2008(4): 44-46.

[7] 王国强, 努尔开力·依孜特罗甫, 侍克斌, 等. 锂渣细度对锂渣混凝土早期抗裂性能影响及分形评价[J]. 粉煤灰综合利用, 2010(5): 23-25.

[8] 秦拥军, 严文龙, 于江. 掺锂渣再生混凝土弹性模量及应力-应变曲线试验[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 254-262.

[9] WEN H. Property research of green concrete mixed with lithium slag and limestone flour[J]. Advanced Materials Research, 2013(765/767): 3120-3124.

[10] LI H, GUO L, XIA Y. Mechanical properties of concretes containing super-fine mineral admixtures[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(174/177): 1406-1409.

[11] 张广泰, 陈勇, 鲁海波, 等. 硫酸盐侵蚀作用下纤维锂渣混凝土裂缝的分形特征[J/OL]. 工程科学学报, (2020-12-31)[2021-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1297.TF.2020/231.0858.001.html>.

[12] 王凯, 李启发, 余洛凝, 等. 钢筋混凝土偏心受压柱承载力酸雨侵蚀的损伤退化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 591-597.

[13] 于峰, 程安春, 黎德光, 等. 聚氯乙烯-纤维增强材料管钢筋混凝土短柱的偏压有限元分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(4): 83-87.

[14] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 钢筋混凝土柱偏心受压力学性能的细观数值研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 65-72.

[15] 许开成, 陈博群, 陈梦成, 等. 模拟酸雨腐蚀环境下掺锂渣钢筋混凝土偏心受压柱试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4): 641-648.

[16] 许开成, 阳翌舒, 陈梦成, 等. 锂渣钢筋混凝土偏心受压试件力学性能研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(6): 17-20.

All rights reserved. <http://www.cnki.net>