

锈蚀箍筋约束混凝土柱低周往复试验研究

李 强¹, 牛荻涛², 张成中², 杨 光¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了解锈蚀箍筋约束混凝土柱的抗震性能, 通过加速锈蚀试验得到 8 根锈蚀混凝土柱, 并对其进行低周反复荷载试验, 研究箍筋锈蚀后混凝土柱的受力特点和破坏机制, 对比分析箍筋直径、箍筋间距等参数变化对锈蚀箍筋约束混凝土柱的承载能力、延性、滞回特性、刚度退化、强度退化和耗能等抗震性能指标的影响。结果表明: 箍筋锈蚀后, 混凝土受到的约束作用降低, 导致混凝土柱抗震性能退化; 随着箍筋锈蚀量增大, 柱破坏时的极限位移减小, 滞回曲线出现捏拢现象且逐渐明显, 强度降低程度和刚度衰减程度均增大, 延性和耗能能力降低, 相同控制位移下的累计耗能量增大。

关键词: 锈蚀箍筋; 约束混凝土柱; 低周反复荷载; 关键参数; 抗震性能

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0671-09

The low reversed cyclic loading tests of concrete column confined by corroded stirrups

LI Qiang¹, NIU Ditao², ZHANG Chengzhong², YANG Guang¹

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an 710054, China; 2. Department of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: To understand the seismic behaviors of concrete column confined by the corroded stirrups, the low reversed cyclic loading tests have been carried out for eight pillars of corroded reinforced concrete columns. The mechanical characteristics and failure mechanism of concrete column confined by the corroded stirrups, and the influence on the seismic performance indicators such as bearing capacity, ductility, hysteretic characteristics, stiffness degradation and the strength degradation and energy dissipation were also analyzed comparatively by the parameters such as stirrup diameter, stirrup spacing changes. The experimental results showed that the restraint of concrete provided by corroded stirrups is reduced, which leads to aseismic performance degradation of concrete column. As the stirrups' corrosion quantity increases, the failure limit displacement of column decreases, and the pinch phenomenon of hysteresis curve is gradually obvious, and the attenuation degree of strength and stiffness is increased. The ductility and energy dissipation capacity is reduced, and the accumulated energy is increased under the same control displacement meanwhile.

Key words: corroded stirrup; confined concrete column; low reversed cyclic loading; the key parameter; aseismic performance

传统的设计理念和建管体制只关注建筑结构的建设阶段, 忽略了使用过程中的监管和维护, 导致大量服役建筑结构出现病害严重、使用性能差、耐久性低、服务寿命短等问题。随着全寿命周期设计理念^[1-4]的深化, 结构耐久性评估及剩余寿命预测已经成为国内外结构工程学科的重要研究领域^[5-7]。

在碳化、冻融、氯盐侵蚀、干湿交替等因素

的长期作用下, 服役钢筋混凝土结构构件的耐久性逐渐退化, 尤其处于腐蚀环境下的工业建筑甚为严重, 混凝土构件内钢筋锈蚀明显。钢筋锈蚀不仅导致自身性能降低, 且对核心区混凝土的约束能力降低, 导致混凝土构件承载能力降低、抗震性能退化, 直接威胁结构的安全性。因此, 钢筋锈蚀引起的混凝土结构性能退化的现象不容忽视。钢筋锈蚀混凝土压弯构件的抗震性能退化研究已取

得进展^[8-12],虽然试验中已发现箍筋锈蚀,尤其在
与纵筋的交接部位锈蚀严重,但研究分析中未考
虑箍筋锈蚀的影响,也未分析箍筋锈蚀对抗震性
能退化的影响机理.箍筋锈蚀后,截面减小和力学
性能退化,对核心区混凝土和纵筋的约束力减小,
导致压弯构件承载能力降低、刚度退化、破坏形
态由延性破坏向脆性破坏发展,甚至发生突然破
坏,因此,箍筋锈蚀导致的后果相对纵筋锈蚀更
甚.箍筋锈蚀对混凝土压弯构件力学性能影响规律
研究刚刚起步,对锈蚀箍筋约束混凝土压弯构件
的抗震性能退化研究几乎空白.

为研究锈蚀箍筋约束混凝土柱的抗震性能退
化,完成了8根锈蚀箍筋约束混凝土柱的低周反复
试验,描述了锈蚀混凝土柱的破坏过程和破坏形
态,分析了锈蚀程度不同构件的受力特点和破坏
机制,对比分析箍筋直径、箍筋间距等参数变化
对锈蚀箍筋约束混凝土柱的承载能力、延性、滞
回特性、刚度退化、强度退化和耗能等抗震性能
指标的影响.

1 试验概况

1.1 模型设计与制作

试验共设计混凝土柱试件8个,各试件截面尺
寸、混凝土强度和混凝土保护层厚度均相同,分
别为200 mm×200 mm、C25、15 mm;纵筋采用
HRB335级钢筋,箍筋采用HPB235级钢筋;箍筋
锈蚀试件7个,未锈蚀对比试件1个.试件主要设
计参数见表1.

表1 试件主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of the specimens

试件编号	尺寸/mm	纵筋/mm	箍筋/mm
RC-1	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@70
RC-2	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@70
RC-3	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@70
RC-4	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@70
RC-5	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@90
RC-6	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@90
RC-7	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@120
RC-8	200×200	6 ϕ 14	ϕ 8@120

试件采用木模板浇筑成型,为避免试件内纵
筋锈蚀,采用绝缘胶布隔离箍筋、纵筋,并用直
径4 mm的铁丝与通电锈蚀箍筋连接;为保证混

凝土试件材料均匀,试件均沿竖向浇筑.

1.2 材料基本物理、力学性能

混凝土配合比及试块抗压强度、钢筋基本力
学性能指标分别见表2、表3.

表2 混凝土配合比及强度

Tab. 2 Concrete materials and Concrete mix

水泥/ kg· m ⁻³	水/ kg· m ⁻³	砂 /kg· m ⁻³	石 /kg· m ⁻³	NaCl /kg· m ⁻³	28 d 强度 /MPa	270 d 强度 /MPa
385	185	690	1170	3.85	33.5	51.83

表3 钢筋性能指标

Tab. 3 performance index of reinforcement

级别	直径 /mm	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	弹性模 量/MPa	伸长率 /%
HPB235	8	292	515	2.19×10^5	25.6
HRB335	14	359	552	1.97×10^5	18.8

1.3 各试件箍筋锈蚀率

试件的箍筋锈蚀率取柱底塑性铰区范围内箍
筋锈蚀率的平均值,各构件的箍筋锈蚀率见表4.

表4 各试件箍筋锈蚀率

Tab. 4 Stirrups corrosion rate of all specimens

构件号	重量损失率 平均值/%	重量损失率 最大值/%
RC-1	0	0
RC-2	4.76	4.76
RC-3	12.90	30.65
RC-4	22.22	46.49
RC-5	9.23	36.53
RC-6	13.96	46.87
RC-7	15.55	34.49
RC-8	16.69	48.39

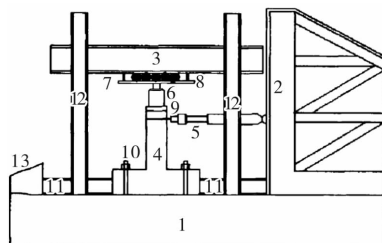
1.4 试验方法和加载制度

试验采用低周往复抗震试验方法^[13],反力施
加装置如图1所示.

(1)竖向荷载施加:采用千斤顶将竖向荷载施
加于钢筋混凝土柱顶部,竖向荷载始终保持
200 kN.

(2)水平荷载施加:采用水平作动器分级加
载,力一位移混合控制:屈服前采用载荷控制,
屈服后采用位移控制;正向加载与反向加载施
加的每级荷载增量和位移增量均相同,载荷增
量为10 kN(每级往复1次),位移增量为屈服位
移量

(每级往复3次)直至试件不能再承担竖向荷载时结束试验. 试验加载程序如图2所示.



1. 支座; 2. 反力架; 3. 反力梁; 4. 试件; 5. 力传感器; 6. 千斤顶; 7. 滚珠; 8. 钢板; 9. 加载垫板; 10. 小丝杠; 11. 支撑钢梁; 12. 支架; 13. 挡板

图1 反力施加装置

Fig. 1 Loading device applying

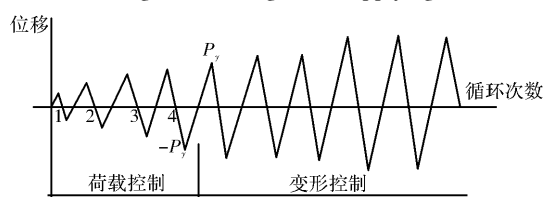


图2 试验加载程序

Fig. 2 The loading program of test

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态及破坏过程分析

各试件破坏过程均经历弹性、弹塑性、破坏三个阶段, 最终破坏均位于柱脚塑性铰区. 各试件的最终破坏形态如图3所示, 主要破坏过程概括如下: 水平荷载达到极限承载能力的40%之前, 各

试件均未开裂, 加载与卸载曲线均呈线性且重合, 试件受力处于弹性阶段; 荷载达到极限承载能力的40%~70%时, 试件根部开裂, 且裂缝随着水平荷载的增加而加宽且向上部延伸发展; 荷载达到极限承载能力的80%~90%时, 混凝土开裂程度加重, 保护层脱落; 最终, 试件根部纵筋外鼓, 核心区混凝土被压碎, 实验结束.

各试件主要破坏过程和破坏形态分别如表5、表6所示.

由表5可以看出: 试件RC-2与试件RC-1的破坏过程基本相同, 但最终破坏相对延迟, 说明箍筋轻微锈蚀使试件的极限承载能力提高、延性改善, 究其原因应是锈蚀产物堵塞钢筋与混凝土之间缝隙后使钢筋与混凝土间粘结性能加强所致; 其它试件箍筋锈蚀相对严重, 各破坏特征点和最终破坏的加载步较试件RC-1均提前, 说明箍筋锈蚀严重试件的承载能力下降、延性退化, 应是混凝土保护层损伤和箍筋性能退化使核心区混凝土受到的约束能力减弱.

由表6可以看出: 试件RC-1、RC-2的破坏形态以延性较好的弯曲破坏为主; 其它试件的破坏形态逐渐向剪切脆性破坏转变, 随着箍筋锈蚀率的增加, 试件根部塑性铰区的剪切破坏面逐渐明显, 构件破坏时箍筋的变形逐渐增大甚至拉断, 核心混凝土被压碎, 纵筋屈曲, 说明箍筋锈蚀严重试件的抗震性能明显退化.

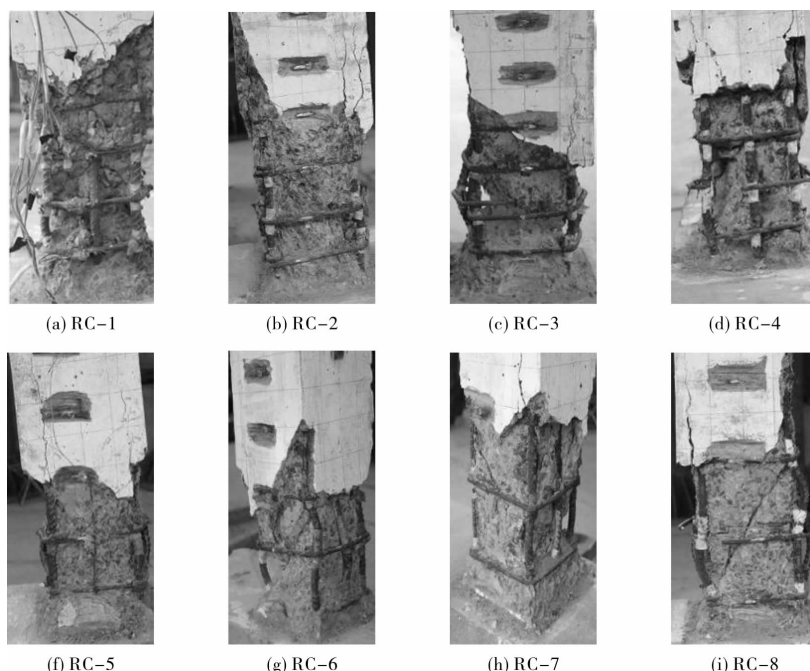


图3 各试件的破坏形态

Fig. 3 Failure pattern of specimens

表 5 各试件主要破坏过程
Tab. 5 The main failure process of all specimens

试件 编号	开裂时的 加载步	裂缝形态		裂缝出齐 时加载步	交叉斜裂 缝形成时 的加载步	保护层开 始脱落加 载步	破坏时的 加载步
		南、北侧面	东、西侧面				
RC-1	+5 t	水平裂缝为主，自转角部位裂 缝由水平逐渐斜向发展	水平裂缝	+20 mm ^①	-30 mm ^③	+30 mm ^③	-60 mm ^①
RC-2	-4 t	水平裂缝为主，自转角部位裂 缝由水平逐渐斜向发展	水平裂缝	+20 mm ^①	-30 mm ^③	+30 mm ^③	+60 mm ^③
RC-3	+4 t	水平裂缝和竖向裂缝	水平裂缝	-6 t	-6 t	-20 mm ^①	+60 mm ^①
RC-4	+4 t	水平裂缝和竖向裂缝	水平裂缝	+10 mm ^①	+10 mm ^①	+20 mm ^①	-50 mm ^①
RC-5	+4 t	斜向裂缝为主	水平裂缝	+10 mm ^①	+20 mm ^①	+20 mm ^③	-50 mm ^①
RC-6	-3 t	斜向裂缝为主	水平裂缝	+10 mm ^①	+20 mm ^①	+20 mm ^③	+50 mm ^③
RC-7	+4 t	角部竖向裂缝为主	水平裂缝和角部竖向裂缝	+10 mm ^①	-20 mm ^①	+20 mm ^③	-40 mm ^①
RC-8	+4 t	角部竖向裂缝为主	水平裂缝和角部竖向裂缝	+10 mm ^①	-20 mm ^①	-20 mm ^①	+40 mm ^②

注：“+”与“-”表示推载和拉载；①、②、③均表示位移加载步的循环次数。

表 6 各试件的破坏形态
Tab. 6 The failure pattern of all specimens

试件编号	破坏模式	剪切破坏面倾斜角/°	箍筋破坏形态	纵筋破坏形态
RC-1	弯曲破坏	—	轻微变形	底部第 1~2 根箍筋间压屈
RC-2	弯曲破坏	—	底部第 1 根箍筋外鼓	底部第 1~2 根箍筋间压屈
RC-3	弯剪破坏	约 60	底部第 1~3 根箍筋外鼓	底部第 1~3 根箍筋间压屈
RC-4	剪切破坏为主	约 60	底部第 1~2 根箍筋断裂	底部第 1~2 根箍筋间压屈
RC-5	剪切破坏	约 60	底部第 2 根箍筋明显变形	底部第 1~2 根箍筋间轻微压屈
RC-6	剪切破坏	约 55	底部第 1 根箍筋严重变形、弯钩处被拔出	底部第 1 根箍筋处压屈
RC-7	剪切破坏	约 65	箍筋轻微变形	底部第 1~2 根箍筋间轻微屈曲
RC-8	剪切破坏	约 70	底部第 2 根箍筋断裂	底部第 1~3 根箍筋间屈曲

2.2 滞回曲线

滞回曲线^[14-16]反映结构或构件在往复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗，是确定

恢复力模型和非线性地震反应分析的依据。各试件在低周往复荷载作用下的滞回曲线如图 4 所示。

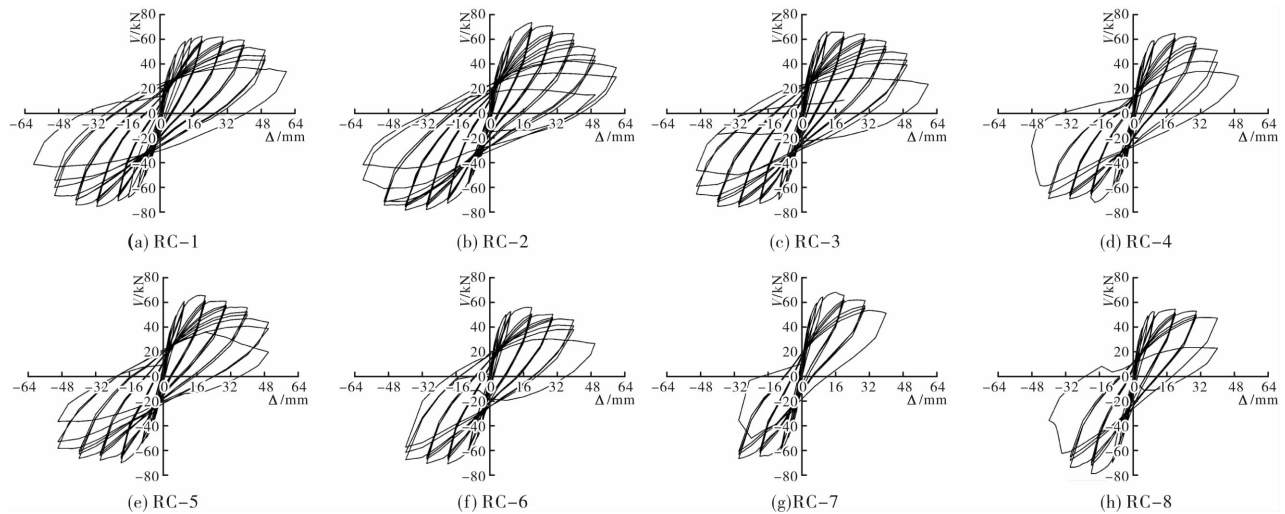


图 4 各柱滞回曲线
Fig. 4 Hysteretic curve of the corroded column

由图4可以看出:

(1)各试件的滞回曲线出现不同程度的“捏拢”现象,为典型的弯剪型滞回曲线,受剪切变形的影响较大.

(2)纵筋屈服前,各试件的滞回曲线狭窄细长、残余变形较小,滞回环面积较小,耗能较少,试件整体刚度变化不大,荷载值与位移值基本对称.

(3)纵筋屈服后,各试件的滞回曲线逐渐偏向位移轴,滞回环面积逐渐增大,耗能逐渐增加;同一位移往复时,后两次循环的承载力、刚度均比第一次循环降低,表明试件强度、刚度和耗能能力退化.能量耗散量随循环次数增加而增加,反映了箍筋锈蚀对累积损伤的影响.

(4)超过峰值荷载后,各试件承载力下降均较为平缓,滞回曲线面积继续增加,但箍筋间距相同试件的承载能力下降程度随箍筋锈蚀率增加而增大.

(5)试件破坏时,试件 RC-1、RC-2 的滞回曲线均比较饱满,捏拢现象不明显,表现出较好的塑性变形和耗能能力;试件 RC-3 的滞回曲线出现了轻微捏拢现象,其他箍筋锈蚀严重试件的滞回曲线出现明显捏拢现象,变形能力和耗能能力明显减弱.

(6)试件箍筋间距愈小,其滞回曲线愈饱满,捏拢现象愈不明显,说明试件延性随箍筋间距的减小而增大.

(7)箍筋间距为 70 mm 的试件:由于锈蚀产物的堆积使得箍筋与混凝土间的粘结性能增强,且未对混凝土保护层造成损伤,相对试件 RC-1,试件 RC-2 各个阶段承载力均提高、滞回曲线更加丰满;试件 RC-3,自开始加载至控制位移 20 mm 的循环加载阶段,试件刚度相对试件 RC-1 并未明显降低,反而有小幅提高,且加载阶段愈早,其提高程度愈明显,这与箍筋锈蚀产物在混凝土保护层与核心区混凝土界面的堆积有关;试件 RC-4 的混凝土保护层较早的退出工作,锈蚀箍筋对核心区混凝土的约束力减弱,试件承载能力和刚度明显降低,控制位移愈大其降低程度愈大;并且,各试件在同级控制位移循环下,构件承载力和刚度的降低程度均随箍筋锈蚀率的增加而增大.

(8)箍筋间距为 90 mm、120 mm 的试件:各试件箍筋锈蚀程度均较严重,在循环加载的各个阶段,其承载力和刚度均表现为逐渐退化,且退化程度随控制位移增大、箍筋锈蚀率增加而提高.

2.3 骨架曲线

骨架曲线是滞回曲线所有循环峰值点依次相连的包络线,能确切地反映试件强度、变形和延性等抗震性能,是确定恢复力模型特征点的重要依据.各试件的骨架曲线见图5.

由图5可以看出:

(1)各钢筋混凝土柱受力全过程均经历了弹性、弹塑性和破坏阶段.

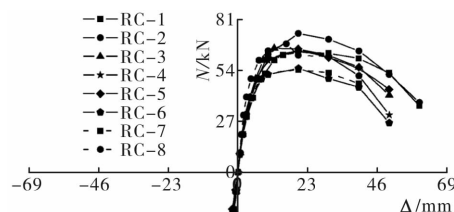


图5 各柱骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curve of the corroded column

(2)箍筋间距为 70 mm 的试件:①水平荷载小于 20 kN 时,各试件的侧向位移均较小,骨架曲线基本重合,说明锈蚀箍筋及其造成的混凝土保护层损伤对混凝土约束性能的退化未对试件弹性阶段性能造成明显影响;水平荷载超过 20 kN 后,各试件纵筋屈服前骨架曲线的差异逐渐显现,说明混凝土保护层损伤对试件受力性能的影响逐渐明显.②控制位移小于 50 mm 时,试件 RC-2 的水平荷载均大于试件 RC-1,说明锈蚀产物的堆积使得粘结性能加强,箍筋轻微锈蚀对试件的抗剪承载能力有利;当试件接近破坏时,混凝土保护层完全退出工作,钢筋与混凝土间产生粘结滑移,上述有利作用丧失,试件 RC-2 的水平荷载与试件 RC-1 基本相同.③控制位移小于 30 mm 时,试件 RC-3、RC-4 的水平荷载均大于 RC-1 试件,说明在箍筋对混凝土的约束作用较小时,试件的抗剪承载能力未因为混凝土保护层的开裂而退化,反而因为往复加载过程中裂缝两侧混凝土的相对运动而提高.④控制位移超过 30 mm 后,试件 RC-3、RC-4 的水平荷载均小于 RC-1 试件,且箍筋锈蚀程度愈大,水平荷载减小的程度愈明显;说明箍筋锈蚀严重时,锈蚀箍筋对混凝土的约束性能明显减弱,从而造成试件抵抗水平荷载的能力明显降低.

(3)箍筋间距为 90 mm、120 mm 的试件:

①水平荷载小于 10 kN 时,各试件的侧向位移均较小,各试件骨架曲线基本重合;水平荷载超过

10 kN 后, 各试件纵筋屈服前骨架曲线的差异逐渐显现. ②低周反复荷载过程中, 箍筋锈蚀严重试件的水平荷载均小于箍筋锈蚀相对较轻试件, 且纵筋屈服后差异性更加明显.

2.4 强度衰减

在低周往复荷载下, 结构和构件的力学性能将逐步退化, 强度衰减是反映这种退化的重要宏观物理量之一. 为研究不同参数对钢筋混凝土柱强度衰减的影响, 准确评估试件抵抗外部荷载的能力, 依据试验数据绘制箍筋锈蚀量、箍筋间距与构件强度衰减的关系曲线分别如图 6、7 所示.

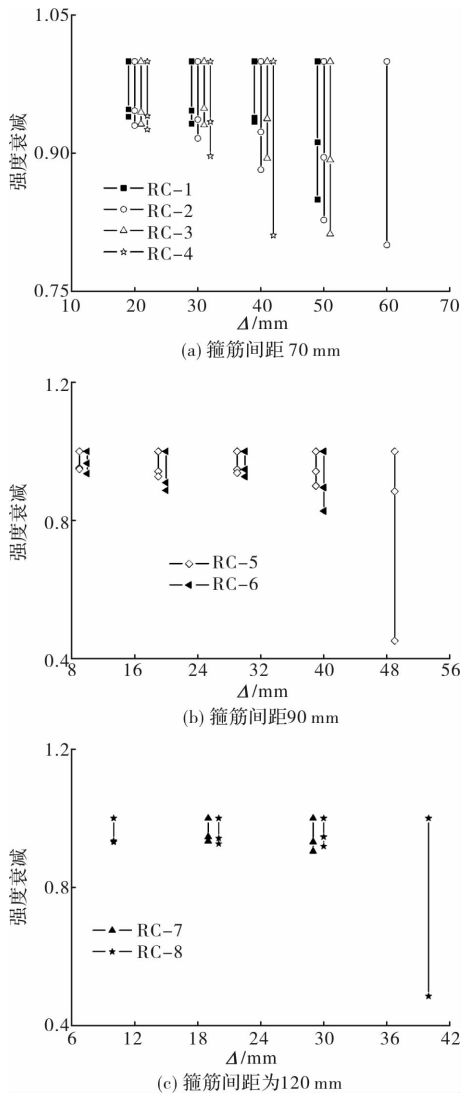


图 6 箍筋锈蚀量对试件强度衰减影响对比

Fig. 6 The influence on intensity attenuation of stirrup corrosion rate

由图 6、图 7 可以看出, 试件的强度衰减存在以下规律:

(1) 各试件的强度衰减趋势随箍筋重量损失率的增加而增大, 并且强度衰减程度随位移的增大而增大, 说明试件横向位移较大时箍筋对核心混

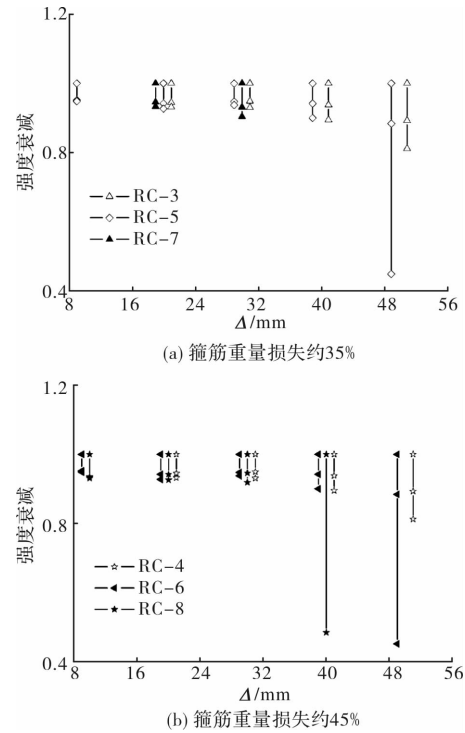


图 7 箍筋间距对试件强度衰减影响对比

Fig. 7 The influence on intensity attenuation of stirrup spacing

凝土的约束作用才得以充分发挥; (2) 箍筋重量损失率较小的试件: 强度和变形能力有所提高, 但试件强度衰减程度较未锈蚀试件大; (3) 箍筋重量损失率相同时, 箍筋间距越大强度衰减的越快.

2.5 刚度衰减

为研究低周反复荷载作用下钢筋混凝土柱的刚度衰减规律, 取每级循环加载的平均刚度 K_i 分析, 表示如下:

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|}$$

图 8 绘出了各试件的平均刚度退化曲线.

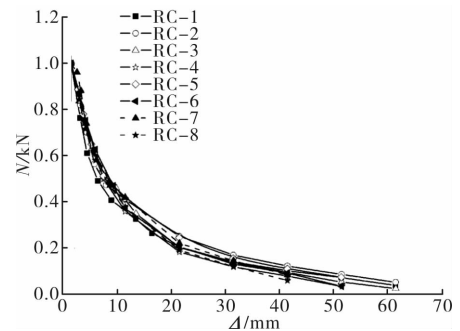


图 8 各柱刚度衰减曲线

Fig. 8 Stiffness decay curve of the corroded column

由图 8 可知, 各试件的刚度退化规律如下:

(1) 各试件的刚度退化规律、退化速度基本相同; 试验早期刚度退化速度较快, 试验后期试件的塑性变形随水平位移的增加而发展, 刚度衰减

速度变缓，最后趋于平缓；刚度衰减均匀，未出现刚度突变。

(2)试件 RC-2 各位移的刚度衰减幅度均小于试件 RC-1，说明箍筋轻微锈蚀对试件的抗震性能有利。

(3)箍筋间距不同，试件的刚度衰减规律存在差异。箍筋间距为 70 mm 试件纵筋屈服前，箍筋锈蚀严重试件的刚度衰减幅度均小于箍筋未锈蚀试件；纵筋屈服后，混凝土保护层开裂并退出工作，混凝土释放的内力由钢筋承担，锈蚀箍筋对核心区混凝土的约束作用逐渐加强，其锈蚀后对混凝土约束作用的减弱效应逐渐显现，箍筋锈蚀严重试件的刚度衰减幅度均大于箍筋未锈蚀试件，且随着箍筋锈蚀率的增加而加大。箍筋间距为

90 mm、120 mm 试件的刚度衰减规律基本一致，刚度衰减幅度随箍筋锈蚀率的增加而增加。

2.6 延性分析

延性是表征变形能力的重要参数，通常用延性系数来表示。位移延性系数通常是指骨架曲线下降至 0.85F_{Max} 对应的位移与屈服位移的比值，其表达式为 $\mu=\Delta u/\Delta y$ ，式中 μ 为结构的破坏位移延性系数， Δu 与 Δy 分别为极限位移和屈服位移，屈服点位置按面积互等法^[17,18]确定。

定义相对变形值为 Δ/H ，其中： Δ 为柱水平荷载加载点的侧向位移， H 为水平荷载加载点至底部基座的高度。各试件开裂、屈服和极限状态相应的荷载值、位移、延性系数及极限侧移角等如表 7 所示。

表 7 特征点参数和延性系数

Tab. 6 Characteristic parameters and ductility coefficient

试件 编号	开裂		屈服		极限		延性系数	相对变形
	V_K/kN	$\Delta K/\text{mm}$	V_y/kN	Δ_y/mm	V_w/kN	Δ_w/mm		
RC-1	53.92	9.21	63.81	19.95	56.43	40.62	3.92	1/21.9
	-63.55	-12.68	-74.04	-30.06	-66.63	-45.12		
RC-2	63.39	9.35	73.76	19.98	66.38	38.20	4.08	1/20.7
	-65.48	-12.91	-78.32	-40.01	-70.49	-52.63		
RC-3	56.95	9.62	65.97	12.01	59.37	36.66	3.88	1/22.3
	-68.44	-12.11	-75.91	-30.03	-68.32	-46.58		
RC-4	56.61	9.52	65.15	20.03	58.63	32.81	3.84	1/25.2
	-41.86	-60.85	-9.95	-68.27	-19.98	-61.44		
RC-5	56.37	6.69	65.56	19.97	59.01	32.87	3.59	1/23.9
	-55.85	-14.24	-68.05	-30.04	-61.24	-45.82		
RC-6	46.58	9.11	55.16	20.01	49.64	30.36	3.33	1/31.0
	—	-60.75	-13.53	-71.15	-20.02	-64.04		
RC-7	56.11	8.65	65.68	20.01	59.11	32.82	3.21	1/29.4
	-56.26	-11.28	-66.72	-30.01	-60.05	-31.22		
RC-8	46.53	9.13	54.52	20.00	49.07	36.54	3.05	1/26.9
	-69.69	-12.96	-78.82	-20.01	-70.94	-30.74		

注：(1)“+”表示推载，“-”表示拉载。

(2)延性系数、相对变形采用两个方向的平均值。

由表 6 可得：

(1)本试验试件的位移延性系数在 3.05~4.08 之间，都具有良好的延性，其延性由大到小依次为 RC-2、RC-1、RC-3、RC-4、RC-5、RC-6、RC-7、RC-8。

(2)相对试件 RC-1，试件 RC-2 的延性有所增加，这与箍筋轻微锈蚀对滞回曲线和骨架曲线的

影响原因相同。

(3)箍筋锈蚀量相当试件，箍筋间距愈小，试件的延性愈大，极限位移角愈大，这说明箍筋间距的减小对试件延性的贡献。

(4)相同箍筋间距试件，试件的延性随箍筋锈蚀率增加而减小，极限侧移角随箍筋锈蚀率增大而增大。

2.7 耗能能力

耗能能力是衡量结构构件抗震性能的重要指标之一。本试验采用不同阶段试件总耗能能力评价其耗能性能,各试件各级控制位移下累积耗能的对比分析如图9所示。

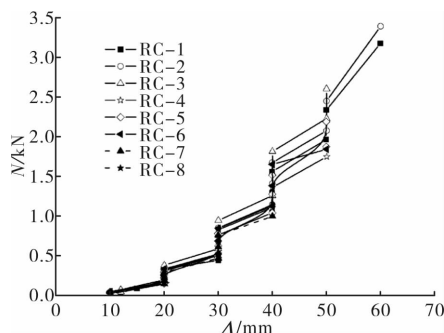


图9 试件的累计耗能

Fig. 9 Total energy consumption of the corroded column

通过对比分析可知:

(1)试件屈服后的耗能面积随着荷载循环次数的增加逐渐增大;相同控制位移循环下,第二、三次循环所消耗的能量远小于第一次循环。

(2)箍筋间距相同、箍筋锈蚀严重试件破坏前的总耗能能力明显低于箍筋未锈蚀试件,且总耗能量随着箍筋锈蚀量的增加而逐渐减小,这说明箍筋锈蚀后试件的耗能能力明显降低;箍筋锈蚀轻微试件的总耗能量大于箍筋未锈蚀试件。

(3)箍筋间距不同的试件,箍筋锈蚀后总耗能能力随箍筋锈蚀量增加而降低的程度不同;试件的箍筋间距越小,总耗能能力随箍筋锈蚀量增加而降低的幅度越大。

(4)试件 RC-2 在达到某级控制位移时的累计耗能量均大于试件 RC-1,说明箍筋轻微锈蚀对试件的耗能能力有利;试件在弹塑性阶段,箍筋锈蚀严重试件在相同控制位移下的耗能量以及达到相同控制位移时的累计耗能量也大于箍筋未锈蚀试件,说明锈蚀产物对低周往复荷载作用下混凝土试件钢筋与混凝土间粘结增强效应明显。

3 结论

通过低周往复荷载作用下各试件的破坏过程、破坏形态、滞回性能和耗能能力对比分析,可以得到以下结论:

(1)箍筋锈蚀轻微时,混凝土柱的抗震性能未发生退化,反而有所提高。

(2)锈蚀严重箍筋对混凝土的约束性能减弱,混凝土柱的抗震性能退化,试件破坏过程中的各

破坏特征点提前,破坏形式由延性破坏向脆性破坏转变。

(3)钢筋混凝土柱的延性和总耗能能力随箍筋锈蚀量的增加而减小,且其减小程度与混凝土柱受箍筋约束的程度有关;混凝土柱受约束的程度愈大,箍筋锈蚀后延性系数和总耗能能力退化程度愈大。

(4)在弹塑性阶段,箍筋严重锈蚀约束混凝土柱在相同控制位移下的累计耗能量随箍筋锈蚀量的增大而增大。

参考文献 References

- [1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:北京科学出版社,2003.
NIU Ditao. The concrete structure durability and life prediction[M]. Beijing :Beijing Science Press, 2003.
- [2] KONG J S, FRANGOPOL D M. Life cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges[J]. Journal of Structural Engineering. 2003, 129(6): 818-828.
- [3] FRANGOPOL D M, LIN K Y, ESTES A C. Life cycle cost design of deteriorating structures[J]. Journal of Structural Engineering. 1997,123(10): 1390-1401.
- [4] MAYDL P. Sustainable engineering: state-of-the-art and prospects[J]. Structural Engineering International 2004, 14(3): 176-180.
- [5] 金伟良,牛荻涛. 工程结构耐久性与全寿命设计理论[J]. 工程力学,2011,28(S): 31~37.
JIN Weiliang, NIU Ditao. The state of the art on durability and life-cycle design theory of engineering structures[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S): 31-37.
- [6] 周新刚. 混凝土结构的耐久性与损伤防治[M]. 北京:中国建材工业出版社,1999.
ZHOU Xingang. Durability and damage control of concrete structure[M]. China Building Materials Industry Press, 1999.
- [7] SETZER M, AUGBERG R, KECK H J. Frost resistance of concrete. Essen[M]. Germany: RILEM Publications, 2002.
- [8] 史庆轩,牛荻涛,颜桂云. 反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2000(4):44-50.
SHI Qingxuan, NIU Ditao, Yang Guiyun. Experimental research on hysteretic characteristics of corroded R. C. members with flexural and compressive axial loads under repeated horizontal loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000 (4):44-50.
- [9] 牛荻涛,陈新孝,王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构,2004(10):36-38,45.
NIU Ditao, CHEN Xinxiao, WANG Xuemin. Experimental study on seismic performance of corroded R. C. members[J]. Building Structure, 2004(10):36-38,45.
- [10] 贡金鑫,仲伟秋,赵国藩. 受腐蚀钢筋混凝土偏心受压构件低周反复性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004(5): 92-97,104.

- GONG Jinxin, ZHONG Weiqiu, ZHAO Guofan. Experimental study on low behavior of corroded reinforced concrete member under eccentric compression [J]. Journal of Building Structures, 2004(5): 92-97, 104.
- [11] 李金波, 贡金鑫. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土圆柱抗震性能的影响[J]. 中国公路学报, 2008(4): 55-60.
LI Jinbo, GONG Jinxin. Influences of rebar corrosion on seismic behavior of circular RC columns[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008(4): 55-60.
- [12] 蒋连接, 袁迎曙. 反复荷载下锈蚀钢筋混凝土柱力学性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2012(2): 66-69, 13.
JIANG Lianjie, YUAN Yingshu. Experimental study on mechanical behavior of corroded reinforced concrete column under cyclic loading [J]. Industrial Construction, 2012(2): 66-69, 13.
- [13] 刁波, 李淑春, 叶英华. 钢筋混凝土 L 形截面柱框架低周反复加载试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 67-70.
DIAO Bo, LI Shuchun, YE Yinghua. Experimental study on RC frame with L-shaped columns subjected to low cyclical loading[J]. Building Structure, 2010, 40(6): 67-70.
- [14] 李琪, 吴佳杰. 低周反复荷载作用下钢骨混凝土 L 形柱受力性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(1): 11-13.
LI Qi, WU Jiajie. Experimental study of L-shaped section steel reinforced concrete column under low reversed cyclic loading[J]. Building Structure, 2011, 41(1): 11-13.
- [15] CHRISTIAN G, PIERINO L. Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls[J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1703-1712.
- [16] 郑山锁, 王斌, 于飞, 等. 低周反复荷载作用下型钢高强高性能混凝土框架梁损伤试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 37-44.
ZHENG Shansuo, WANG Bin, YU Fei. Experimental study on damage of srhshpc frame beams under low cycle reversed loading [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 37-44.
- [17] SALONIKIOS T N, KAPPOS A J, TEGOS I A. Cyclic load behavior of low-slenderness reinforced concrete walls: Design basis and test results [J]. ACI Structure Journal, 1999, 96(4): 649-660.
- [18] 傅秀岱, 马峰, 杨永哲. 新型钢筋混凝土复合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 天津大学学报, 2000, 33(3): 336-340.
FU Xiudai, MA Feng, YANG Yongzhe. Experimental study on seismic performance of new reinforced concrete composite shear wall[J]. Journal of Tianjin University, 2000, 33(3): 336-340.

(编辑 沈 波)

(上接第 645 页)

- [5] 王先铁, 周绪红, 王东石, 等. 方钢管混凝土框架-十字加劲薄钢板剪力墙结构水平承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 1-9.
WANG Xiantie, ZHOU Xuhong, WANG Dongshi, et al. Research on horizontal load bearing capacity of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls structure with cross stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 1-9.
- [6] 郭宏超, 郝际平, 虎奇, 等. 半刚接钢框架-十字加劲钢板剪力墙结构滞回性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 35-44.
GUO Hongchao, HAO Jiping, HU Qi, et al. Hysteretic behavior of semi-rigid composite steel frames with cross-stiffened steel plate shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 35-44.
- [7] 聂建国, 黄远, 樊建生. 钢板剪力墙结构竖向防屈曲简化设计方法[J]. 建筑结构, 2010, 40(4): 1-4.
NIE Jianguo, HUANG Yuan, FAN Jiansheng. Vertical buckling-resistant design of steel plate shear wall structure[J]. Building Structure, 2010, 40(4): 1-4.
- [8] 童根树, 陶文登. 竖向槽钢加劲钢板剪力墙剪切屈曲[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 1-9.
TONG Genshu, TAO Wendeng. Elastic shear buckling of steel shear walls strengthened vertically by closed section stiffeners[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 1-9.
- [9] 赵伟, 周观根, 吴冲, 等. 竖向加劲钢板剪力墙门槛刚度研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 104-107.
ZHAO Wei, ZHOU Guangen, WU Chong, et al. Elastic buckling property of steel plate shear wall with vertical stiffeners[J]. Industrial Construction, 2013, 43(1): 104-107.
- [10] 马尤苏夫, 王先铁, 杨航东, 等. 槽钢加劲钢板剪力墙受力性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(10): 152-157.
MA Yousufu, WANG Xiantie, YANG Hangdong, et al. Mechanical behavior study on steel plate shear walls with channel stiffeners[J]. Industrial Construction, 2014, 44(10): 152-157.
- [11] Rak Choi In, Gun Park Hong. Steel plate shear walls with various infill plate designs[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(7): 785-796.
- [12] 马尤苏夫. 方钢管混凝土框架-开洞钢板剪力墙抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
MA Yousufu. Study on seismic behavior of concrete-filled rectangular steel tubular frame-steel plate shear wall with opening[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & technology, 2015.
- [13] 王先铁, 马尤苏夫, 郝际平, 等. 钢板剪力墙边缘构件的计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 175-182.
WANG Xiantie, MA Yousufu, HAO Jiping, et al. Calculation methods for boundary elements in steel plate shear walls[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 175-182.
- [14] 建筑抗震试验方法规程: JGJ101-96 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [15] 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [16] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.10 [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010.

(编辑 沈 波)