doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.011

近海大气环境下低矮 RC 剪力墙抗震性能试验

郑山锁,秦 卿,杨 威,甘传磊,张艺欣,丁 莎

(西安建筑科技大学 土木工程学院,710055 西安)

摘 要:为了解近海大气环境下低矮 RC 剪力墙的抗震性能,采用人工气候实验室对6片剪跨比1.0的低矮 RC 剪力墙试件进行模拟近海大气环境腐蚀试验,进而对其进行拟静力试验,得到不同轴压比和不同锈胀裂缝宽度下腐蚀试件的滞回曲线,绘制出各个试件的骨架曲线,分析轴压比和锈胀裂缝宽度对腐蚀试件强度、刚度、延性、耗能能力等抗震性能指标的影响.结果表明:随轴压比增加,腐蚀试件的承载力和刚度不断提高,而延性和变形恢复能力却降低,表明在近海大气环境下对低矮 RC 剪力墙进行抗震设计时需要严格控制其轴压比;随锈胀裂缝宽度的增加,试件的开裂荷载和峰值荷载不断降低,刚度、延性和耗能能力均变差,当遭受腐蚀较为严重时,脆性破坏更为显著,说明在近海大气环境下低矮 RC 剪力墙内部钢筋锈蚀越来越严重,抗震性能越来越差.

关键词:近海大气环境;低矮 RC 剪力墙;锈胀裂缝宽度;拟静力试验;抗震性能

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2015)12-0064-06

Experimental research on theseismic behaviors of squat RC shear walls under offshore atmospheric environment

ZHENG Shansuo, QIN Qing, YANG Wei, GAN Chuanlei, ZHANG Yixin, DING Sha

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: The accelerated corrosion tests of six squat shear walls with span ratio of 1.0 were conducted by artificial climate laboratory to understand the seismic performance of squat RC shear walls under offshore atmospheric environment. Their quasi-static experiments were implemented. The hysteresis loops regarding the relation between horizontal load and displacement of specimens with different axial compression ratio and various degrees of corrosion crack width were obtained. The skeleton curves of specimens were further achieved. Based on the test results, some performance aspects, such as the ultimate capacity, rigidity, ductility and energy dissipation capacity, were analyzed. The result shows that with the increase of axial compression ratio the bearing capacity and stiffness of corrosion specimens continued to improve, while their ductility and the deformation recovery capability are reduced. These manifest that the axial compression ratio must be strictly controlled during seismic design under offshore atmospheric environment. In addition, the crack load and the ultimate load, rigidity, ductility, energy dissipation capacity decrease with the increase of corrosion crack width of specimens. Moreover, when the specimen subjected to serious corrosion, the brittle failure is more obvious without any warning. Above findings demonstrate that with concrete ages growing over time, the internal rebar under this condition suffers increasingly severe corrosion and behaves worse in seismic performance.

Keywords: offshore atmospheric environment; squat RC shear wall; corrosive crack width; quasi-static tests; seismic behavior

中国拥有漫长的海岸线,许多沿海建筑物饱受盐害影响,且随龄期的增长其结构安全性与使用性逐渐降低[1].而某些沿海城市同时处于高烈度地震区,这就要求经盐害腐蚀的建筑物具有良好的抗震能力.目前,剪力墙由于良好的抗侧力能力被广泛应用于多、高层建筑物中[2],而低矮 RC 剪力墙则广泛用于核电站等建筑物中[3],在近海大气环境下 RC 构件因盐害导致内部钢筋产生锈蚀现象在结构设计中并没有充分考虑,随龄期增长,如果对经盐害腐蚀的建筑物不

收稿日期:2014-11-04.

基金项目:国家科技支撑计划(2013BAJ08B03);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003).

作者简介:郑山锁(1960—),男,教授,博士生导师.

通信作者:秦 卿,qinqing.2007.qq@163.com.

及时进行补强措施将会造成不可预计的损失.

目前国内外对氯离子侵蚀下锈蚀 RC 构件抗震性能的研究，多采用人工通电方式控制 RC 构件中钢筋的锈蚀程度，文献[4-6]均采用通电锈蚀进行 RC 长柱的拟静力试验，并给出锈蚀 RC 柱弯曲破坏恢复力模型；文献[7]也采用通电方法对 2 片低矮 RC 剪力墙进行锈蚀，然后再对其进行拟静力试验；文献[8]研究了表面不同覆盖材料的低矮 RC 剪力墙经盐害腐蚀劣化后的抗震能力，并与文献[7]试验进行对比，验证了其理论模型的准确性，其结果为评估经盐害腐蚀劣化的建筑物抗震能力时对低矮剪力墙力学性质折减提供了理论依据；文献[9]建议采用概率退化预测模型和观察相结合的评估方法预测钢筋锈蚀的质量损失率，提出了锈蚀梁、柱和锈蚀率相关的弯曲和剪切能力模型，并通过经电化学腐蚀的足尺锈蚀梁试验对其进行验证，建立了基于 pushover 分析对腐蚀 RC 结构进行抗震性能评估的方法.然而通电锈蚀虽然在短时间内加速了钢筋锈蚀，但锈蚀产物与近海大气环境下的锈蚀产物差异明显.所以，文献[10]提出人工气候环境模拟技术，是发展 RC 结构构件耐久性试验方法的重要途径，文献[11]提出的沿海混凝土结构耐久性多重环境事件相似(METS)试验，亦为人工气候加速腐蚀与现场环境之间的时间关系转化提供了理论支撑，推动了人工气候试验模拟技术的应用.

采用人工气候环境模拟技术实现低矮 RC 剪力墙试件海大气环境下的加速腐蚀试验，进而对加速腐蚀后不同轴压比和不同锈胀裂缝宽度的试件进行拟静力试验研究，系统探讨近海大气环境下钢筋锈蚀对低矮 RC 剪力墙抗震性能的影响.为中国沿海地区以低矮 RC 剪力墙为主要抗侧力构件的建筑物抗震设计和耐久性评估提供理论依据.

1　试　验

1.1　试件设计

本试验共设计了 6 片剪跨比为 1.0 的低矮 RC 剪力墙试件，以锈胀裂缝宽度、轴压比为主要变化参数.试件截面尺寸 700 mm×100 mm，墙体高度700 mm，墙体采用边缘暗柱结构，暗柱纵筋采用 4 $\underline{\Phi}$ 12，配筋率 4.52%，箍筋为ϕ 6，间距 150 mm.墙体纵向分布钢筋采用 8 ϕ 6，配筋率 0.45%，水平分布钢筋采用 8 ϕ 6，配筋率 0.32%，混凝土保护层厚度为 10 mm.

采用 P.O 32.5R 水泥配制 C30 混凝土，其配合比为水泥：中砂：细石：水=320：879：870：135.材性试验结果：混凝土轴心抗压强度平均值为 18 MPa，弹性模量为 2.85×10^4 MPa，钢筋力学性能见表 1.试件尺寸与配筋见图 1，构件编号及基本信息见表 2.

表 1　钢筋力学性能　　MPa

型号	屈服强度	极限强度	弹性模量
ϕ 6	305	420	210 000
ϕ 8	310	430	210 000
$\underline{\Phi}$ 12	350	458	200 000
$\underline{\Phi}$ 18	345	465	200 000

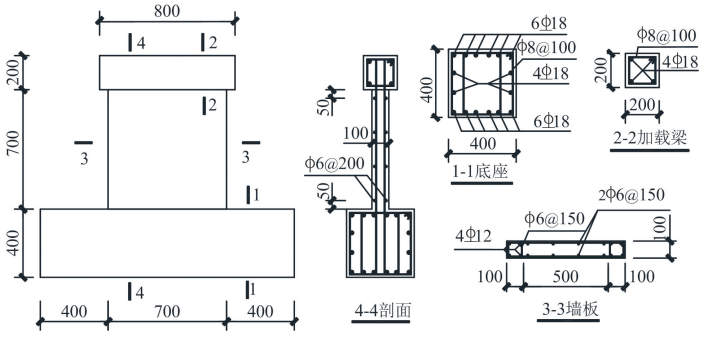


图 1　试件尺寸及配筋(mm)

表 2　锈蚀低矮 RC 剪力墙试件设计参数

编号	高度×宽度×厚度/mm	轴压比	横向分布钢筋	纵向分布钢筋	暗柱纵筋	暗柱箍筋	设计锈胀裂缝宽度/mm
SW-1	700×700×100	0.1	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	0.8
SW-2	700×700×100	0.2	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	0
SW-3	700×700×100	0.2	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	0.3
SW-4	700×700×100	0.2	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	0.8
SW-5	700×700×100	0.2	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	1.2
SW-6	700×700×100	0.3	ϕ 6@200	ϕ 6@150	4 $\underline{\Phi}$ 12	ϕ 6@150	0.8

注：测量表面的锈胀裂缝时，按照最大、中等和最小的宽度值测量 3 个点，然后取平均值(不包括养护时表面产生的温度裂缝).

1.2　试验方案

文献[11]对人工气候环境下内掺氯盐与氯离子外侵两种加速腐蚀方案进行对比分析：认为内掺氯盐的加速腐蚀效果更佳，在高温、高湿、盐水喷淋、红外光照等途径下，可在较短期限内达到预期腐蚀效果，故本试验在浇注墙板混凝土时掺入 5%的氯盐(质量比)，达到钢筋表面钝化膜能快速脱钝破坏的目的.

采用中性盐雾试验(NSS)[12]模拟近海大气环

境,其盐溶液质量分数为(5±1%),试验表明溶液质量分数在 5%时,加速腐蚀效果最好;设定人工气候室内温度 45℃,湿度为 90%,其中温度采用水箱加热,通过人工气候室内的温、湿度传感器控制.为了加速钢筋混凝土试件的腐蚀速度,模拟干湿循环的实际环境,采用间歇式喷雾以保持盐雾箱内的盐雾质量分数恒定,人工气候实验室室内参数设置见图 2.

采用精度 0.01 mm,量程 0~10 mm 的裂缝观测仪对剪力墙表面的锈胀裂缝定期进入人工气候试验室内进行观察,试件锈胀裂缝达到表 2 设计宽度时,分批次将试件从人工气候室内取出.

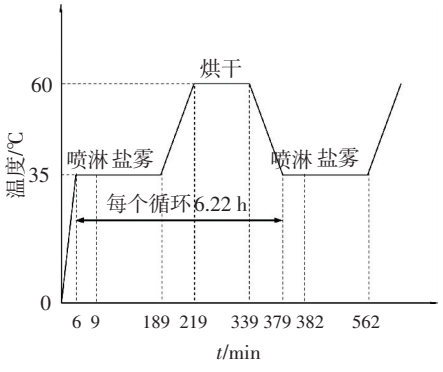


图 2 人工气候环境参数设定

1.3 试验加载装置与制度

低矮 RC 剪力墙试件经人工气候实验室盐雾腐蚀后,在西安建筑科技大学结构与抗震重点试验室进行拟静力试验,采用悬臂梁式加载方案、伪静力试验方法,加载装置见图 3.

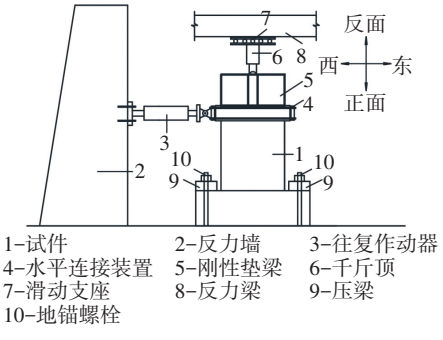


图 3 试验装置

首先施加竖向荷载,达到试件的设计轴压比,并在试验过程中保持不变.然后再由水平作动器对试件施加往复水平荷载.由于低矮 RC 剪力墙的破坏属于脆性破坏,没有明确的屈服点,故采用位移控制的变幅加载制度,加载速率为 0.1mm/s,见图 4.当试件承载力下降到峰值承载力的 85%或试件破坏明显时停止试验.

2 结果及分析

2.1 钢筋锈蚀现象

刮去截取钢筋表面粘附的混凝土,用 12%的稀盐酸溶液进行酸洗,锈蚀物被除干净经清水漂净后,用石灰水中和,最后再用清水洗净、擦干后在干燥器中存放 4~6 h,用分析天平称重,并测量其长度,计算出钢筋锈蚀后单位长度的重量,与制作试件之前预留的未锈钢筋样本的单位长度重量对比,按式(1)计算获得钢筋的实际锈蚀率(见表 3).

$$\rho_{sv}=\frac{g_0-g_1}{g_0}=\frac{\Delta g}{g_0}, \tag{1}$$

式中:ρ_{sv}为钢筋平均锈蚀率;g_0 为样本钢筋单位长度重量;g_1 为除锈后单位长度钢筋的重量.

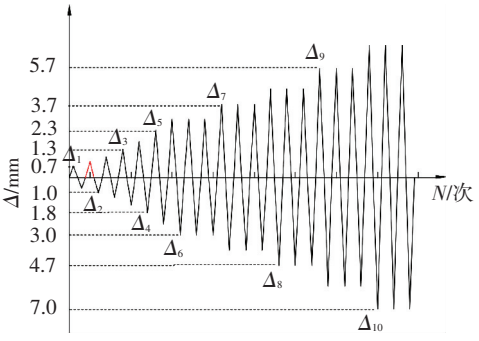


图 4 加载制度示意

表 3 锈蚀钢筋质量损失率

编号	轴压比	设计锈胀裂缝宽度/mm	纵筋锈蚀率/%	箍筋锈蚀率/%	分布筋锈蚀率/%
SW-1	0.1	0.8	2.10	7.83	9.21
SW-2	0.2	0	0	0	0
SW-3	0.2	0.3	1.12	3.29	3.88
SW-4	0.2	0.8	1.29	7.54	9.72
SW-5	0.2	1.2	2.53	9.88	12.32
SW-6	0.3	0.8	1.77	8.19	9.67

由表 3 可知,暗柱纵筋最大锈蚀率为 2.53%,相对暗柱箍筋和分布钢筋锈蚀程度较轻,主要是暗柱纵筋相对靠近里侧,其周围氯离子质量分数有限.

2.2 试件破坏过程

未经人工气候实验室盐雾腐蚀的试件 SW-2,轴压比 0.2,当水平位移加载至 4.7 mm 时,在墙体一侧暗柱底部出现了第一条水平微裂缝;继续加载,暗柱底部水平裂缝不断向上发展并斜向腹板延伸,同时暗柱中间部分出现若干条水平裂缝;随着位移不断增加及反复,原有裂缝不断沿对角 45°方向延伸并相互贯通,将腹板分割成块状,在这一阶段,试件总体变形不大,裂缝宽度尚小,反向加载时所产生的腹板斜压区尚能恢复到加载前的位置,再加载时斜压区还能有效传递压力,承载力还能继续提高;随着位移幅值的进一步增大,腹板对角斜裂缝不断变宽,混凝土在剪压应力共同作用下达到其极限强度,开始鼓包、剥落.破坏呈明显的脆性,属于剪切斜压破坏,没有明显的屈服点.

对于轴压比相同而锈胀裂缝宽度不同的试件 SW-3、SW-4 和 SW-5,其基本破坏特性与完好试件

SW-2 类似，只是随着锈胀裂缝宽度的增加开裂位移、开裂荷载、峰值位移和峰值荷载不断减小；而且斜裂缝发展速度随锈胀裂缝宽度的增加而变快，脆性破坏更为突然.

对于锈胀裂缝宽度相同而轴压比不同的试件 SW-1、SW-4 和 SW-6，其基本破坏特性与完好试件 SW-2 也基本相同，只是随着轴压比的增加其开裂位移和峰值位移不断减小，而开裂荷载和峰值荷载却不断提高，脆性破坏更无征兆.

2.3　滞回曲线

根据试验测得 6 片低矮 RC 剪力墙试件的 P-Δ 滞回曲线，见图 5.

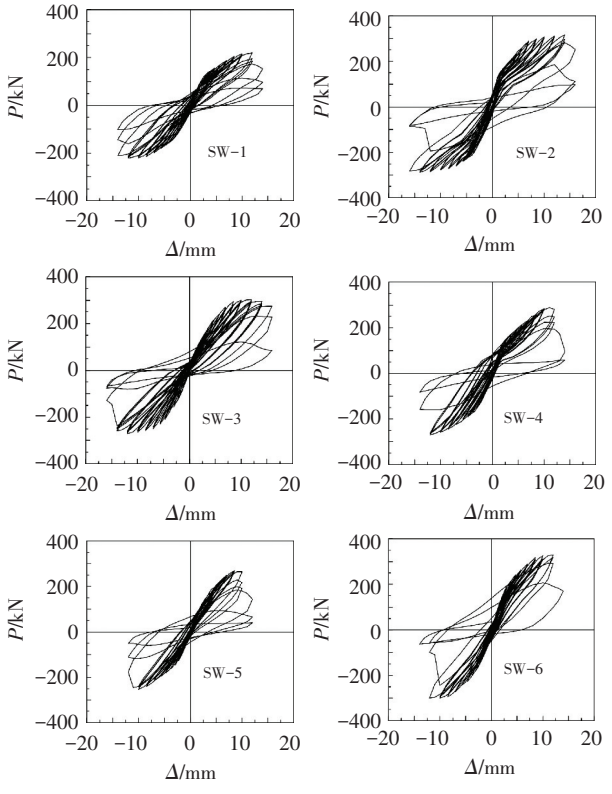


图 5　SW1~SW6 试件滞回曲线

1）锈胀裂缝宽度不同但轴压比相同的低矮 RC 剪力墙（SW-2、SW-3、SW-4 和 SW-5）在开裂之前滞回曲线基本呈线性关系，且随锈蚀程度的增加斜率不断减小，承载能力也不断减小；随着锈蚀程度的不断增长，滞回曲线的丰满程度和滞回环的面积逐渐减小，滞回循环次数也逐渐减少，说明试件的耗能能力和延性有所降低；超过极限荷载后，试件承载力和刚度的降低更趋明显，滞回环的形状也越来越不稳定.

2）轴压比不同但锈胀裂缝宽度相同的低矮 RC 剪力墙（SW-1、SW-4 和 SW-6）在开裂之前滞回曲线也呈线性关系，且随轴压比的增加斜率不断增加；开裂后，随着轴压比的增大，卸载后的残余变形越来越大，而且同级加载循环的退化更趋明显，强度退化和刚度退化也更显著；同时随着轴压比的增加，峰值荷载不断提升，但是加载循环次数却逐渐减少，说明变形能力越来越差，滞回环也越来越不稳定.

2.4　骨架曲线及其特征参数

基于试验滞回曲线，得出低矮 RC 剪力墙试件的骨架曲线，见图 6.按照“通用屈服弯矩法”[13] 确定试件的等效屈服点，由于低矮 RC 剪力墙均属于脆性破坏，达到峰值荷载后承载力突然下降，故本文规定峰值荷载即为试件的极限荷载，峰值荷载对应的位移即为极限位移.并通过延性系数 μ 和塑性转角 θ_p [14] 作为衡量低矮 RC 剪力墙延性变化的指标，计算公式：

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y , \tag{2}$$

$$\theta_p = (\Delta_u - \Delta_y)/H. \tag{3}$$

式中：Δ_u 为试件极限位移；Δ_y 为试件屈服位移，H 为低矮 RC 剪力墙的计算高度.

各剪力墙试件的屈服荷载（P_y）、屈服位移（Δ_y）、峰值荷载（P_m）、峰值位移（Δ_m）、极限荷载（P_u）、极限位移（Δ_u）、延性系数（μ）和塑性转角（θ_p）计算结果见表 4.

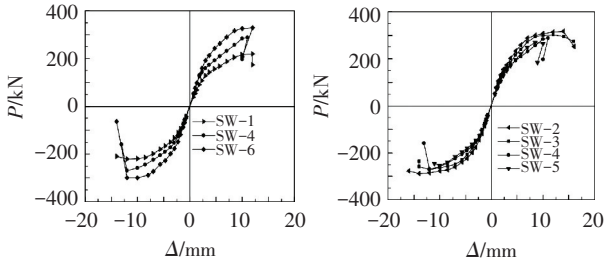


图 6　试件骨架曲线

表 4　骨架曲线特征参数

编号	开裂		屈服		峰值		Δ_u/mm	μ	θ_p/%
	P_c/kN	Δ_c/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm			
SW-1	119.09	2.65	175.40	5.83	220.08	11.99	11.99	2.06	0.88
SW-2	241.93	5.20	256.30	6.02	302.09	14.00	14.00	2.33	1.14
SW-3	196.17	4.20	242.75	6.04	286.97	12.02	12.02	1.99	0.85
SW-4	163.82	3.35	216.77	5.96	278.66	11.49	11.49	1.93	0.79
SW-5	159.04	3.35	209.81	5.73	261.68	9.50	9.50	1.66	0.54
SW-6	195.02	3.34	259.27	6.00	314.84	11.00	11.00	1.83	0.71

由图 6 和表 4 可知：

1）随着轴压比的增加，经腐蚀的低矮 RC 剪力墙的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载都不断提高；相反，试件的延性系数、塑性转角则不断减小.说明在近海大气环境下轴压比直接影响锈蚀 RC 剪力墙的抗震性能，在进行结构抗震设计时需要严格控制轴压比.

2)随着锈胀裂缝宽度的增加,低矮 RC 剪力墙的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载都不断降低,试件的延性系数、塑性转角也不断减小.锈胀裂缝宽度为 1.2 mm 时,峰值荷载下降至完好试件的 86%,延性系数减小为 71%.说明在近海大气环境下钢筋锈蚀对试件的承载力和延性影响均较显著.

2.5 刚度退化

采用割线刚度来表示试件的刚度,试件每级循环的平均刚度用下式计算[15]:

$$K_i = \frac{|+P_i|+|-P_i|}{|+\Delta_i|+|-\Delta_i|}. \tag{4}$$

式中:$+P_i$、$-P_i$ 分别为正反向第 i 次峰点荷载值,$+\Delta_i$、$-\Delta_i$ 分别为正反向第 i 次峰点位移值.开裂后的割线刚度与循环次数的关系曲线见图 7.

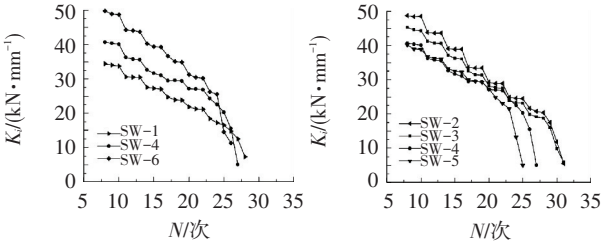


图 7 试件的刚度衰减曲线

1)随着轴压比的增大,试件的"嵌固效应"使得初始刚度明显提高,且同级循环刚度退化的趋势基本一致;峰值荷载后,轴压比大的 SW-6 刚度退化越严重,曲线越陡峭,相反轴压比较小的 SW-1 刚度退化较平缓.

2)随着锈胀裂缝宽度的增大,各个试件初始刚度的退化趋势基本保持一致;当达到峰值荷载后,SW-2、SW-3 刚度退化较平缓,趋势基本一致,而 SW-4、SW-5 的退化较为严重,曲线也相对陡峭,随着循环次数的增加,SW-5 的同级位移下刚度退化加快.

2.6 强度衰减

经人工气候实验室盐雾腐蚀的试件内部钢筋截面削弱,且其表面的锈蚀物减小了钢筋截面与混凝土的粘结力,从而使试件的力学性能发生一定的退化,其中强度衰减是反映这种退化的重要宏观物理量之一[16],可以充分体现钢筋锈蚀对试件抗震性能的影响.不同轴压比和不同锈蚀程度试件在开裂后的强度与循环次数的关系曲线见图 8.

1)随着轴压比的增加,加载初期,试件同级强度退化基本一致;但是在加载后期,高轴压比 SW-6 同级强度衰减更为严重.这主要是因为轴压比增加可以提高试件的承载力,但是降低了试件的延性,促使试件在破坏阶段强度衰减加快,脆性相应增加.

2)随着锈胀裂缝宽度的增大,加载初期,各个试件同级强度退化趋于一致;但是在加载后期,锈蚀程度严重的 SW-4 和 SW-5 强度退化较为显著.这主要是因为盐雾腐蚀对钢筋的影响更为严重,加载初期,试件主要通过钢筋与混凝土共同受力,故对其同级循环强度退化影响不大;而到加载后期,混凝土破碎,试件则主要靠钢筋承受荷载,故强度退化会越来越严重.

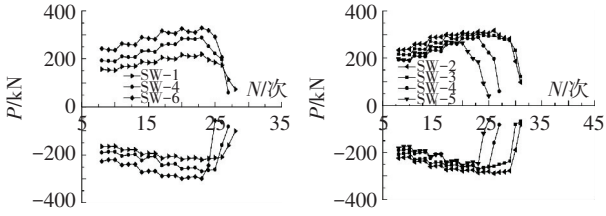


图 8 试件强度衰减退化规律

2.7 耗能特性

采用等效粘滞阻尼系数来描述钢筋锈蚀对低矮 RC 剪力墙滞回耗能特性的影响,等效粘滞阻尼系数 h_e[13]计算公式为

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABCD}}{S_{OBE} + S_{ODF}}. \tag{5}$$

式中:面积 S_{ABCD} 为荷载正反交变一周时结构所耗散的能量;S_{OBE} 和 S_{ODF} 为理想弹性结构在达到相同位移时所吸收的能量,见图 9.

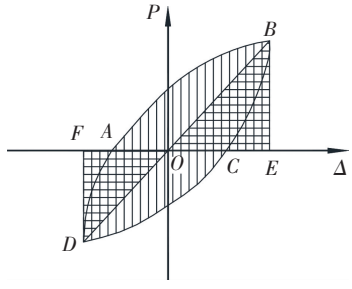


图 9 粘滞阻尼系数计算简图

结构变形恢复能力直接影响结构震后的使用性能、可修复程度和修复费用[13].锈蚀低矮 RC 剪力墙的变形恢复能力可用残余变形率 η 来表示,其表达式为

$$\eta = \Delta_e/\Delta_u. \tag{6}$$

式中:Δ_e 为试件的最大残余变形,Δ_u 为试件的极限变形.低矮 RC 剪力墙试件在峰值点处的残余变形 Δ_r、等效粘滞阻尼系数计算结果见表 5.

表 5 锈蚀低矮 RC 剪力墙的变形恢复能力与耗能特性

编号	Δ_r/mm	Δ_u/mm	η/%	h_e
SW-1	2.44	11.99	20.35	0.094
SW-2	1.00	14.00	7.12	0.049
SW-3	1.46	12.02	12.15	0.068
SW-4	1.79	11.49	15.59	0.089
SW-5	1.48	9.50	15.58	0.075
SW-6	1.89	11.00	17.19	0.083

此外,本文给出了不同轴压比和不同锈蚀程度低矮 RC 剪力墙试件累积滞回耗能随位移幅值的变

化曲线，见图 10.

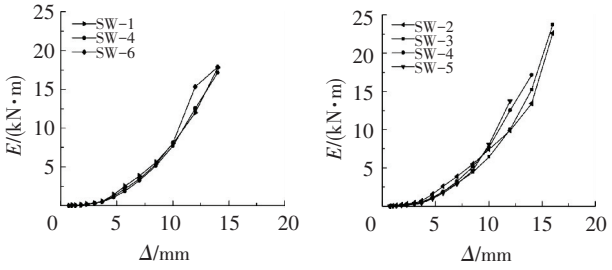


图 10　累积耗能与水平位移关系曲线

由表 5 和图 10 可知：

1）随着试件轴压比的不断增大，残余变形率先减小后增大，即试件的变形恢复能力先减小后增大，整体呈下降趋势；试件等效粘滞阻尼系数却逐渐减小，表明试件的耗能能力不断降低；而最终试件的累积耗能基本趋于一致. 总体上，随轴压比的增加，锈蚀试件的耗能能力不断减小，同样说明近海大气环境下在进行结构抗震设计时需严格控制低矮 RC 剪力墙轴压比.

2）随锈胀裂缝宽度不断增加，残余变形率整体呈增加趋势，表明试件变形恢复能力越来越差；而试件的等效粘滞阻尼系数先增加后减小，主要是由于锈蚀试件随锈蚀率增加残余变形不断增大，致使滞回环趋于饱满，表现出具有良好的耗能能力，但是由于锈蚀严重的试件 SW-5 后期脆性加重，试件较早破坏，其残余变形率、粘滞阻尼系数和累积滞回耗能都降低.

3　结　论

1）近海大气环境主要导致了低矮 RC 剪力墙内部钢筋锈蚀，通过观察试件表面和加载后取出的钢筋表面，以及测量截取钢筋的质量损失率，可知分布钢筋和暗柱箍筋的腐蚀相对严重，暗柱纵筋腐蚀较轻.

2）锈蚀程度基本相同的低矮 RC 剪力墙试件，随着轴压比的增加，试件的屈服荷载、极限荷载、刚度不断增大，相反，试件的延性、塑性转角、等效粘滞阻尼系数却不断减小，残余变形率随轴压比增加整体呈下降趋势，但是由于高轴压比的试件后期脆性增加，致使不同轴压比试件累积滞回耗能基本相同. 综合考虑各项参数，在近海大气环境下进行结构抗震设计时需严格控制低矮 RC 剪力墙的轴压比.

3）轴压比相同的低矮 RC 剪力墙试件，随试件锈胀裂缝宽度的增加，试件的屈服荷载、极限荷载、刚度、延性、塑性转角、累积滞回耗能都不断减小，而试件的残余变形率和等效粘滞阻尼系数先增后减，主要是由于锈蚀严重的试件后期脆性加重所致，试验现象表现为：斜裂缝发展速度随锈胀裂缝宽度的增加而变快，且锈蚀率的增大导致试件破坏时脆性更为显著. 近海大气环境下，建筑物随龄期增长，内部钢筋锈蚀愈发严重，锈胀裂缝宽度增大，低矮 RC 剪力墙试件抗震性能越差.

参考文献

[1] 邱建國，蕭輔沛，涂豐鈞. 考慮鹽害腐蝕影響之鋼筋混凝土校舍耐震能力評估研究[J]. 結構工程，2013，28(1)：43-60.

[2] JI Xiaodong，SUN Ya，QIAN Jiaru，et al. Seismic behavior and modeling of steel reinforced concrete (SRC) walls[J]. EArthquake Engineering & Structural Dynamics，2015，44：955-972.

[3] PARULEKAR Y M，REDDY G R，VAZE K K，et al. Simulation of reinforced concrete short shear wall subjected to cyclic loading[J]. Nuclear Engineering and Design，2014，270：344-350.

[4] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京：科学出版社，2003.

[5] 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，2004，25(5)：92-97.

[6] 袁迎曙，贾福萍，蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报，2001，34(3)：47-52.

[7] 山川哲雄，伊良波繁雄，玉城康哉，等. 亜熱帯の塩害環境下における耐力壁の耐震性能に関する実験的研究[J]. 琉球大学工学部紀要，1993(46)：115-130.

[8] 莊育泰. 劣化 RC 墙生命週期耐震能力研究[D]. 臺灣：國立台灣科技大學，2012.

[9] CHIU C K，TU F J，HSIAO F P. Lifetime seismic performance assessment for chloride-corroded reinforced concrete buildings [J]. Structure and Infrastructure Engineering，2015，3(11)：345-362.

[10] 袁迎曙，章鑫森，姬永生. 人工气候与恒电流通电法加速锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能比较研究[J]. 土木工程学报，2006，39(3)：42-46.

[11] 金伟良，袁迎曙，卫军，等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京：科学出版社，2011.

[12] GB/T10125—1997 人造气氛腐蚀试验盐雾试验[S]. 北京：中国标准出版社，1997.

[13] 姚谦峰，陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2007.

[14] FEMA-267b. Interim Guidelines，Advisory No. 2，Supplement to FEMA 267[S]. Washington，DC：Federal Emergency Management Agency，1999.

[15] JGJ101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京：中国建筑科学研究院，1997.

[16] 郑山锁，侯丕吉，李磊，等. RC 剪力墙地震损伤试验研究[J]. 土木工程学报，2012，45(2)：51-59.

（编辑　赵丽莹）