

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.018

冻融环境作用下 RC 剪力墙抗震性能试验

秦 卿, 郑山锁, 甘传磊, 杨 威

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 710055 西安)

摘要: 为了解冻融环境作用下 RC 剪力墙的抗震性能, 采用人工气候实验室对 6 片剪跨比为 2.14 的 RC 剪力墙试件进行冻融循环模拟试验, 而后对其进行拟静力加载试验, 得到了不同混凝土强度等级和不同冻融循环次数下冻融试件的滞回曲线, 绘制出各个试件的骨架曲线, 分析了混凝土强度和冻融循环次数对冻融试件强度、刚度、延性、耗能能力等抗震性能指标的影响。结果表明: 相同混凝土强度的 RC 剪力墙随冻融循环次数的增加, 承载力、位移延性系数和塑性转角显著降低, 强度衰减和刚度退化幅度增大, 累积耗能不断减小, 抗震性能降低; 经相同次数冻融循环的 RC 剪力墙随混凝土强度等级的提高, 承载力和累积耗能增加, 强度衰减和刚度退化幅度降低, 而延性则先增加后减小, 说明提高混凝土强度等级可改善冻融后 RC 剪力墙的抗震性能。

关键词: 冻融环境; 人工气候试验; RC 剪力墙; 抗震性能; 拟静力试验

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)06-0111-08

Experimental study on the seismic behaviors of RC shear walls under the freeze-thaw environment action

QIN Qing, ZHENG Shansuo, GAN Chuanlei, YANG Wei

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

Abstract: The freeze-thaw cycling tests for 6 pieces of RC shear wall specimens with span ratio 2.14 were conducted by artificial climate laboratory, and quasi-static experiments were implemented. The hysteresis loops with different concrete strength grade and freeze-thaw cycles were obtained, and the skeleton curves were achieved. The effects on seismic performance indicators including the ultimate capacity, rigidity, ductility and energy dissipation capacity were analyzed. Results show that with freeze-thaw cycles increasing the bearing capacity of the RC shear wall, the displacement ductility coefficient and the plastic corner decrease significantly, while the strength attenuation and stiffness degradation rate increase, and the energy dissipation capacity decreases. Along with the enhancement of concrete strength grade by same freeze-thaw cycles, the bearing capacity and accumulated energy are improved, then the strength attenuation and stiffness degradation rate are reduced, but the ductility decreases after increasing at first. It indicates that with the concrete strength increasing the RC shear wall has better seismic performance after freezing and thawing.

Keywords: freeze-thaw environment; artificial climate experiment; RC shear wall; seismic behavior; quasi-static test

中国东北、华北和西北地区由于冬季持续时间长, 温度低, 昼夜温差大, 导致该地区的水工、港口、铁路、桥涵以及工业和民用建筑等混凝土结构都存在不同程度的冻融剥蚀破坏^[1], 严重影响了建筑物的长期使用和正常安全运行^[2]. 同时, 该地区时有地震发生, 而目前对冻融环境作用下 RC 构件的抗震

性能研究相对较少, 从而不能准确判断经冻融循环后各类 RC 构件的抗震性能。

近年来, 国内外学者通过大量试验对混凝土材料及构件在冻融循环作用下的静力力学性能进行研究^[2-9]. 文献[2-4]通过碟簧耗能装置得到了经冻融循环后完整的混凝土应力-应变全曲线, 并对冻融后的 RC 梁、柱构件进行了静力加载试验, 随冻融循环次数的增加, RC 柱由大偏心受压破坏转变为小偏心受压破坏, 而 RC 梁则由适筋破坏逐渐转变为超筋破坏; 文献[5]提出了无约束混凝土和约束混凝土经冻融作用后的应力-应变全曲线方程; 文献[6]认为孔

收稿日期: 2015-05-12.

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAJ08B03).

作者简介: 秦 卿(1989—), 男, 博士研究生;

郑山锁(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 郑山锁, zhengshansuo@263.net.

隙率影响混凝土的强度和抗冻性;文献[7]试验研究了冻融、锈蚀环境下以及在二者共同作用下 RC 梁的受弯性能,总结了在不同环境下 RC 梁的承载力、挠度、钢筋应变和裂缝开展情况等的变化规律;文献[8]通过试验研究了冻融深度和冻融位置对 RC 梁受力性能的影响,研究表明无论 RC 梁受压一侧还是受拉一侧随冻融深度的增加,承载力、初始刚度、变形都不断减小,且受压一侧受冻融影响较为显著。

剪力墙由于其良好的抗侧力能力被广泛应用于多、高层及核电站等建筑物中。文献[9]对纤维增强混凝土剪力墙的抗震性能进行了系统的试验研究;文献[10]通过 OpenSees 开源软件开发了可分别考虑钢筋和混凝土的非线性循环桁架模型对 RC 剪力墙进行了数值分析,充分考虑了 RC 剪力墙的剪切变形,与试验符合较好;文献[11]则通过电化学腐蚀方法对 2 片低矮 RC 剪力墙进行锈蚀,然后再对其进行拟静力试验,与完好试件进行对比。目前对冻融环境作用下 RC 剪力墙抗震性能的试验研究尚未发现。本文采用人工气候环境模拟技术实现 RC 剪力墙试件的快速冻融试验,进而对冻融循环后的试件进行拟静力加载试验,探讨在冻融环境作用下,冻融循环次数和混凝土强度等级对 RC 剪力墙抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验参考《高层建筑混凝土结构技术规程》^[12]按 1:2 缩尺比例共设计了 6 榀实际剪跨比为 2.14 的悬臂 RC 剪力墙,试件轴压比保持不变,以冻融循环次数和混凝土强度等级为变化参数。各试件的截面尺寸均为 700 mm × 100 mm,墙体高度为 1 400 mm。墙体采用边缘暗柱结构,以模拟实际结构中纵筋集中配置在墙体两侧的情况。暗柱纵筋采用 4 Φ 12,箍筋为 Φ 6@150 mm;墙体纵向分布钢筋采用 8 Φ 6,水平分布钢筋采用 16 Φ 6,试件保护层厚度取 10 mm。混凝土采用 C30、C40 和 C50 三种强度等级,冻融循环次数分别取为 100、200 和 300 次。试件具体设计参数见表 1,试件尺寸及配筋见图 1,混凝土和钢筋实测力学性能见表 2、3。

表 1 RC 剪力墙试件参数

| 试件编号 | 剪跨比 | 混凝土强度等级 | 轴压比 | 冻融循环次数 |
|------|------|---------|-----|--------|
| SW-1 | 2.14 | C30 | 0.2 | 100 |
| SW-2 | 2.14 | C40 | 0.2 | 100 |
| SW-3 | 2.14 | C50 | 0.2 | 0 |
| SW-4 | 2.14 | C50 | 0.2 | 100 |
| SW-5 | 2.14 | C50 | 0.2 | 200 |
| SW-6 | 2.14 | C50 | 0.2 | 300 |

注:表中及本文涉及的轴压比均为试验轴压比。

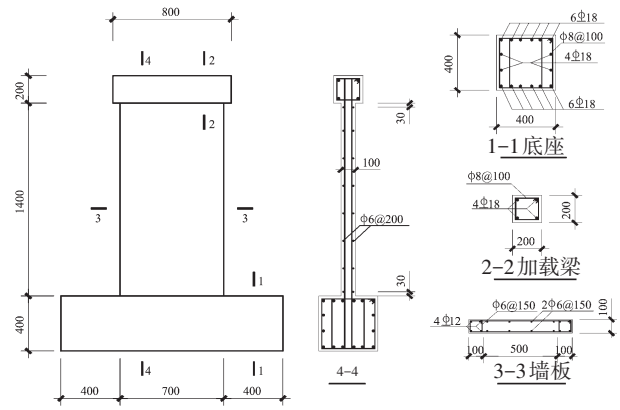


图 1 RC 剪力墙试件尺寸及配筋 (mm)

表 2 混凝土力学性能

| 混凝土强度等级 | 立方体抗压强度 f_{cu} | 轴心抗压强度 f_c | 弹性模量 E_c |
|---------|------------------|--------------|------------|
| C30 | 32.00 | 24.32 | 30 447.2 |
| C40 | 40.30 | 30.63 | 32 686.8 |
| C50 | 55.08 | 40.50 | 35 335.7 |

表 3 钢筋力学性能

| 钢筋型号 | 屈服强度 f_y | 极限强度 f_u | 弹性模量 $E_s/10^5$ |
|-----------|------------|------------|-----------------|
| Φ 6 | 270 | 470 | 2.1 |
| Φ 8 | 305 | 483 | 2.1 |
| Φ 12 | 409 | 578 | 2.0 |
| Φ 18 | 345 | 465 | 2.0 |

1.2 人工气候快速冻融试验方案

文献[3-4]采用“快冻法”^[13]对 RC 梁、柱试件进行了不同程度的冻融循环,然而实际环境中很少会出现完全水冻水融的状况,同时由于本文设计试件尺寸较大,冻融试验箱尺寸限制而无法采用冻融效果较好的“快冻法”,故采用人工气候实验室对 RC 构件进行冻融循环试验。

为了使试件在人工气候实验室能较好且快速实现冻融损伤,在试件 28 d 养护龄期后,置于水中浸泡 4 d 使试件处于饱水状态,然后将其放置于实验室内开始冻融循环,并且在每次冻融循环开始前将试件喷淋润湿,人工气候环境参数见图 2。

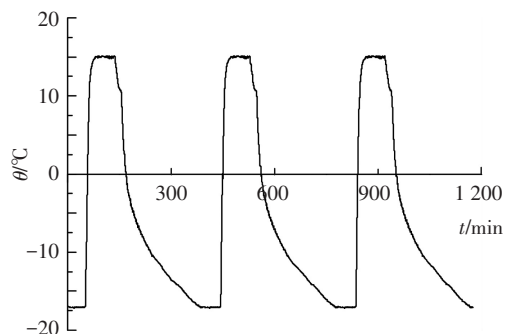


图 2 人工气候环境参数设定

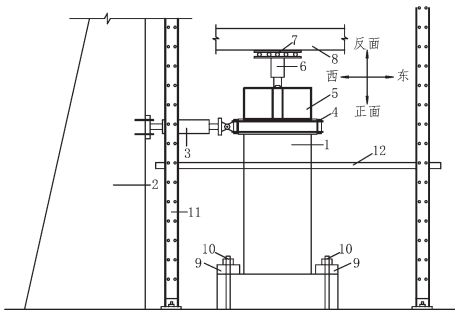
制作 C30、C40 和 C50 级混凝土棱柱体试件各一组(一组 3 个),用以测量不同冻融循环次数后混凝土质量和相对动弹模量的损失,试件尺寸为

100 mm×100 mm×400 mm. 另外, 每一种强度等级的混凝土制作 3 组 (一组 3 个) 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块, 用以测量不同冻融循环次数后混凝土的抗压强度. 同时, 为防止试件加载梁和基座因冻融循环作用而影响剪力墙的破坏形态, 试件采用墙体与基座分离二次浇注, 待冻融循环完成后, 再与基座进行浇注.

1.3 试验加载装置与制度

RC 剪力墙试件在进行人工气候环境冻融循环后, 在西安建筑科技大学结构抗震试验室进行拟静力试验, 采用悬臂梁式加载方案, 加载装置见图 3. 试验时, 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 100 t 电液伺服作动器对试件施加往复水平荷载, 加载点位于加载梁的中心.

采用荷载-位移混合控制的加载制度. 即试件达到屈服荷载前, 采用荷载控制并分级加载, 各级荷载增量为±30 kN, 每级控制荷载往复循环一次; 试件加载至屈服荷载后, 以屈服位移的倍数为级差进行位移控制加载, 每级控制位移循环 3 次; 当 RC 剪力墙试件承载力下降到峰值荷载的 85% 之后或试件破坏明显时停止加载. 试验加载制度示意图 4.



1—试件; 2—反力墙; 3—往复作动器; 4—水平连接装置; 5—刚性垫梁; 6—千斤顶; 7—滑动支座; 8—反力梁; 9—压梁; 10—地锚螺栓; 11—钢框架柱; 12—平面外支撑

图 3 试验装置

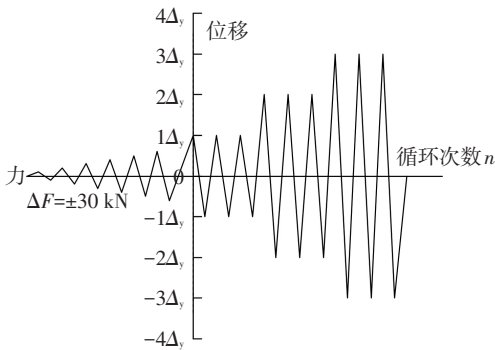


图 4 加载制度示意图

2 冻融试验结果与分析

2.1 冻融试验现象

经人工气候实验室冻融循环 100 次后, 沿暗柱

纵筋方向的混凝土保护层表面出现不同程度的冻胀裂缝, 裂缝主要集中于墙体边缘, 见图 5(a); 经冻融循环 200 后, 冻胀裂缝增多, 暗柱边缘裂缝开始变宽, 并向中间延伸, 裂缝主要集中于墙体的四周, 棱角处有少量骨料露出, 见图 5(b); 经冻融循环 300 次后, 原有裂缝继续变宽、延伸, 中间裂缝呈网状分布, 边、角处混凝土开始疏松, 部分骨料和砂浆发生剥落, 见图 5(c). 从裂缝出现在墙体不同部位的先后顺序来看, 暗柱和墙体分布钢筋对冻胀裂缝的开展有明显约束作用, 可延缓冻融循环作用对试件造成的破坏.



(a) 冻融 100 次 (b) 冻融 200 次 (c) 冻融 300 次

图 5 RC 剪力墙试件冻融后的表现现象

2.2 质量损失率和相对动弹性模量

图 6、7 给出经人工气候实验室冻融循环后棱柱体试块的质量损失率 Δ_m 和相对动弹性模量 ΔE_d 与冻融循环次数 n 的关系曲线. 从图 6 可看出, 与文献 [3-4] 得出的规律类似, 随着混凝土强度等级的增加, 冻融质量损失率相对减小; 同时, 经历 50 次冻融循环后, 混凝土质量略有增加, 主要是由于冻胀导致混凝土内部孔隙含水量的增加大于冻融损失的质量; 不同之处在于 C40 棱柱体试块经历 300 次冻融循环后质量损失仅为 2.35%, 并没有完全冻坏 (一般认为质量损失率达到 5% 即为冻坏^[14]), 说明人工气候实验室模拟冻融环境较水冻水融方法缓慢, 与实际环境较为相符. 从图 7 可看出, 随冻融循环次数增加, 相对动弹性模量逐渐减小, 且随混凝土强度等级提高减小的幅度不断降低.

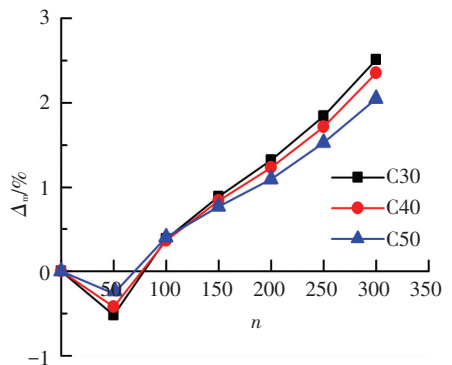


图 6 质量损失率与冻融循环次数关系曲线

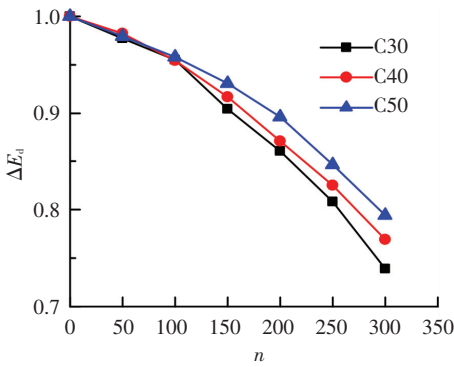


图 7 相对动弹性模量与冻融循环次数关系曲线

2.3 抗压强度

图 8 给出经人工气候实验室冻融循环后混凝土相对抗压强度 f'_c/f_c 与冻融循环次数 n 的关系曲线, 相对抗压强度是指冻融循环后的混凝土抗压强度与未冻融混凝土抗压强度的比值. 可看出, 随冻融循环次数增加, 混凝土相对抗压强度逐渐降低, 且随混凝土强度等级提高下降的幅度不断减小, 与文献 [3-4] 得出规律类似, 不同之处在于经 300 次冻融循环后 C40 混凝土抗压强度仅为初始强度的 63%, 相对水冻水融条件下冻融损伤较轻.

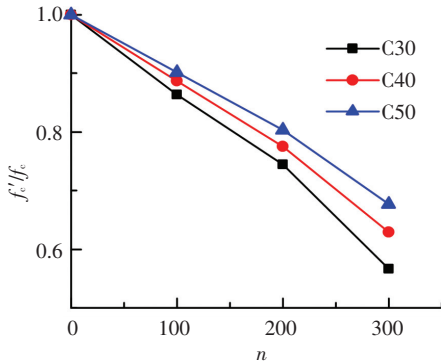


图 8 混凝土相对强度与冻融循环次数关系曲线

3 抗震性能试验结果与分析

3.1 试件破坏过程及破坏形态

对于完好试件 SW-3, 当水平推力达到 120.16 kN, 顶点位移为 2.64 mm (位移角 $\delta = 1/543$) 时, 试件西侧端部约束区下方出现第一条细微的水平裂缝; 随荷载继续增加, 暗柱边缘水平裂缝不断向上发展, 并且向腹板开展、延伸, 与水平方向呈 30° 夹角; 顶点位移达到 7.31 mm (位移角 $\delta = 1/205$, 记为 Δ_y) 时, $P-\Delta$ 曲线偏离直线, 墙体暗柱纵筋屈服, 构件开始屈服, 改为位移控制加载. 随着位移幅值的增大, 墙体中下部出现较多新的剪切斜裂缝, 原有斜裂缝继续延长、贯通并加宽; 顶点位移达到 19.22 mm (位移角 $\delta = 1/78$) 时, 与斜裂缝相交的横向分布钢筋屈服, 试件达到峰值荷载; 继续加载, 东侧端部约束区下方的纵筋受压屈曲, 脚部混凝土压碎、剥落, 试件破坏; 试件呈典型的弯剪破坏, 见图 9(c).

对于冻融循环次数不同的试件 SW-4、SW-5 和 SW-6, 破坏特征随冻融次数的增加不尽相同. 冻融 100 次的试件 SW-4, 最终破坏时墙体两侧端部约束区下方的纵筋均受压屈曲, 可听见明显的劈裂声, 混凝土被压碎, 见图 9(d); 冻融 200 次的试件 SW-5, 冻融损伤深度超过混凝土保护层厚度, 破坏时墙体分布钢筋约束区内的部分混凝土与保护层一起剥落, 塑性较高度达到 35 cm, 见图 9(e); 冻融 300 次的试件 SW-6, 试件屈服后, 墙体底部 50 cm 高的区段内出现大量交错的短裂缝, 见图 9(f), 且随着位移幅值的增加, 短裂缝相互贯通, 墙体沿横截面法线方向的钢筋全部受压屈曲, 墙体端部混凝土突然被压碎, 墙体高度骤然降低, 试件丧失承载力, 属于脆性破坏.

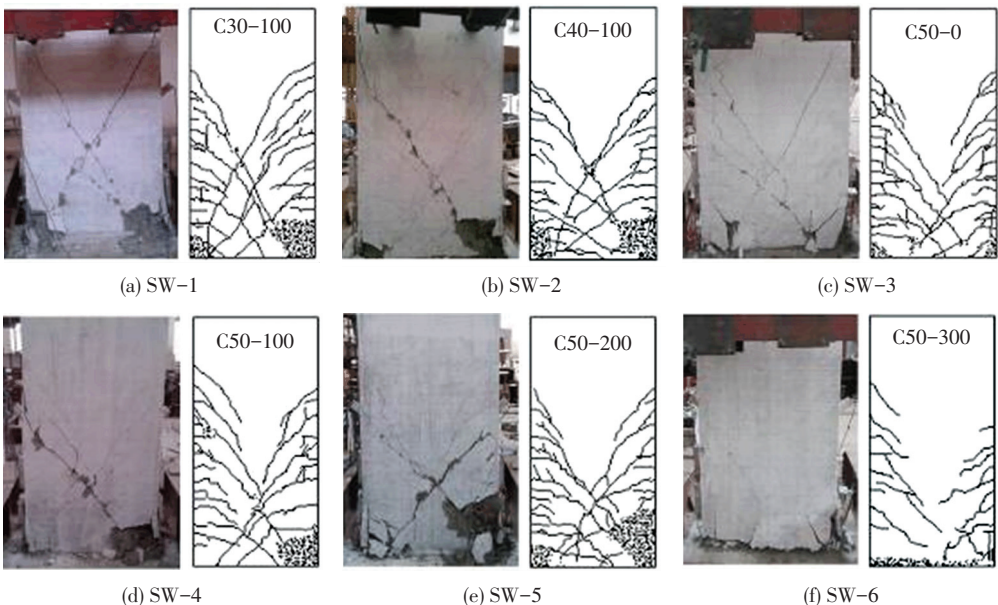


图 9 试件加载破坏后的照片

对于混凝土强度不同的试件 SW-1、SW-2 和 SW-4, 都经历了 100 次的冻融循环, 均发生了弯剪破坏。SW-1 的混凝土强度为 C30, 墙体开裂较早, 随着位移幅值的增大, 墙体较早出现了剪切斜裂缝, 墙体两侧端部约束区下方的纵筋均受压屈曲, 角部的混凝土被压碎、剥落, 剪切变形较为严重, 见图 9 (a); SW-2 的混凝土强度为 C40, 破坏时墙体东侧端部约束区下方的纵筋受压屈曲, 角部的混凝土被压碎、剥落, 剪切变形较 SW-1 相对减小, 见图 9 (b); SW-4 破坏过程已在上文叙述, 其剪切变形较 SW-2 也相对减小。

3.2 滞回曲线

根据试验测得 6 片 RC 剪力墙试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线, 见图 10。分析可知, 经人工气候实验室冻融环境作用下不同混凝土强度和不同冻融循环次数试件

的滞回曲线有如下特点:

1) 冻融 100 次的试件 SW-1、SW-2 和 SW-4, 开裂之前, 滞回曲线呈线性关系, 且随混凝土强度增加, 斜率不断增大; 开裂后, 滞回环的丰满程度和面积随混凝土强度的提高而不断增大, 峰值荷载也不断增大。说明提高混凝土强度可有效改善冻融环境作用下 RC 剪力墙的抗震性能。

2) 冻融 0、100、200 和 300 次的试件 SW-3、SW-4、SW-5 和 SW-6, 开裂之前, 滞回曲线也呈线性关系, 且随冻融循环次数的增加斜率不断降低; 开裂后, 随冻融次数的增加, 同级加载循环的刚度及强度退化显著, 峰值荷载、滞回环的丰满程度和面积都逐渐减小; 峰值荷载后, 随冻融次数的增加, 承载力下降更为突然, 脆性越来越明显。说明冻融环境作用下对 RC 剪力墙抗震性能影响较大。

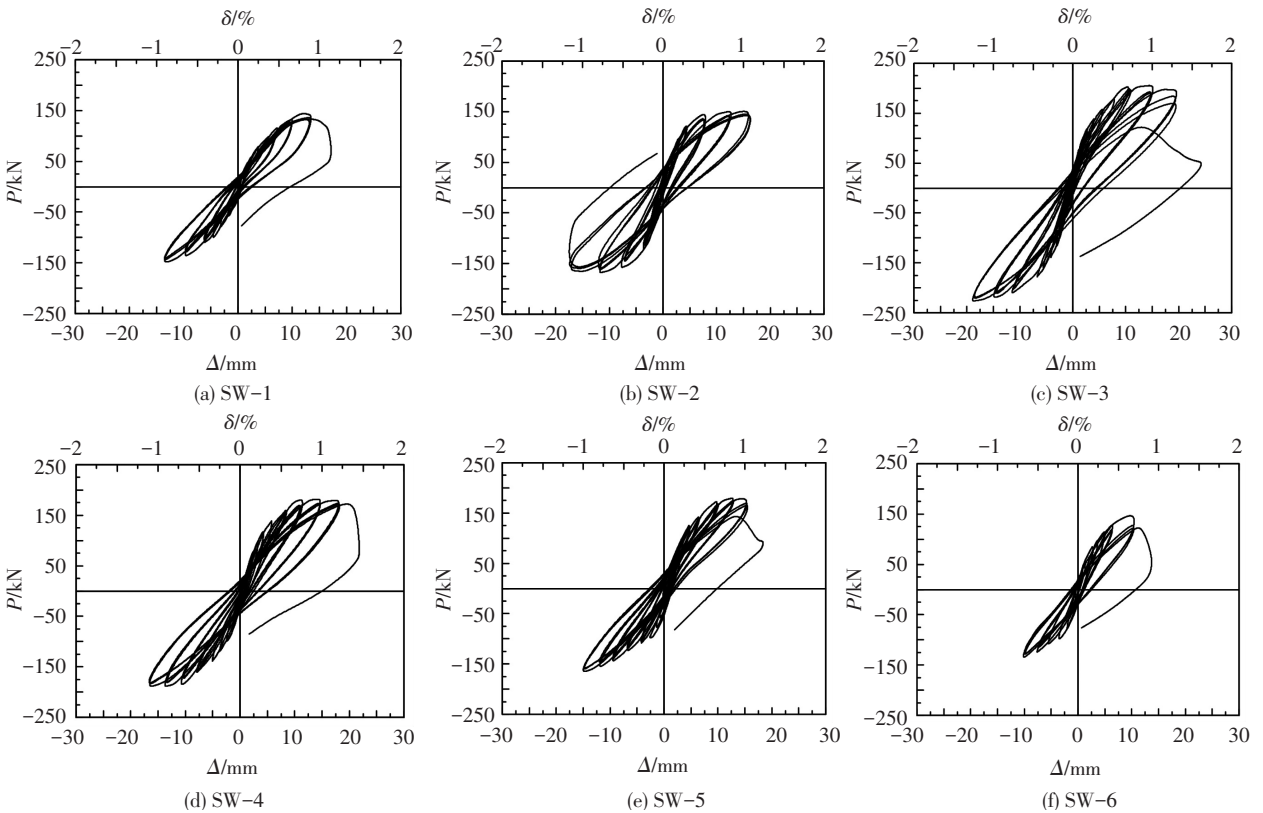


图 10 试件滞回曲线

3.3 骨架曲线及特征参数

基于试验滞回曲线, 绘制出 RC 剪力墙试件的骨架曲线, 见图 11。为了便于讨论试件变形能力, 采用“能量等值法”^[13] 确定骨架曲线的等效屈服点; 由于经冻融循环的 RC 剪力墙呈弯剪破坏, 脆性越来越明显, 取滞回曲线开始骤然下降的点对应的荷载为试件的极限荷载, 其对应的位移为极限位移。并通过延性系数 μ_{Δ} 和塑性转角 θ_p ^[15] 作为衡量 RC 剪力墙延性变化的指标, 计算公式为:

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y, \quad (1)$$

$$\theta_p = (\Delta_u - \Delta_y) / H. \quad (2)$$

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

各剪力墙试件的开裂荷载 P_c 、开裂位移 Δ_c 、屈服荷载 P_y 、屈服位移 Δ_y 、峰值荷载 P_p 、峰值位移 Δ_p 、极限位移 Δ_u 、延性系数 μ_{Δ} 和塑性转角 θ_p 计算结果见表 4。由图 11 和表 4 可得出以下规律:

1) 经冻融循环 100 次的试件随混凝土强度的提高, 试件的开裂、屈服和峰值荷载都呈增大趋势; 由于混凝土强度的提高会降低其延性, 试件的开裂位移不

断减小,屈服和峰值位移也呈减小的趋势;试件的延性系数和塑性转角随混凝土强度的提高先增大后减小。

2) 随冻融循环次数的增加,试件的开裂、屈服和峰值荷载不断降低,冻融 300 次时,试件的峰值荷载

仅为完好的 66%;同时,试件的开裂、屈服和峰值位移呈下降趋势,试件的延性系数和塑性转角不断减小,冻融 300 次时,延性系数仅为完好试件的 67%,说明冻融循环次数对试件的变形能力影响显著。

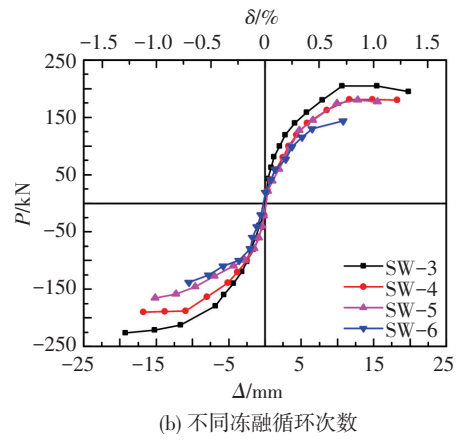
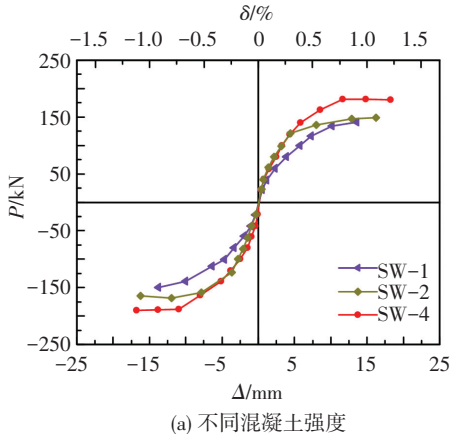


图 11 试件骨架曲线

表 4 骨架曲线特征参数

| 试件编号 | 开裂 | | 屈服 | | 峰值 | | 极限位移 Δ_u/mm | 延性系数 μ_Δ | 塑性转角 $\theta_p/\%$ |
|------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| | P_c/kN | Δ_c/mm | P_y/kN | Δ_y/mm | P_p/kN | Δ_p/mm | | | |
| SW-1 | 80.36 | 2.76 | 121.80 | 7.93 | 145.52 | 13.68 | 13.68 | 1.73 | 0.38 |
| SW-2 | 80.87 | 2.41 | 132.46 | 5.94 | 157.65 | 12.40 | 16.23 | 2.73 | 0.69 |
| SW-3 | 120.16 | 2.64 | 178.47 | 7.26 | 213.45 | 15.37 | 19.49 | 2.69 | 0.82 |
| SW-4 | 99.88 | 2.34 | 152.73 | 7.06 | 185.37 | 14.34 | 17.50 | 2.48 | 0.70 |
| SW-5 | 99.31 | 2.33 | 142.37 | 7.14 | 171.30 | 15.34 | 15.34 | 2.15 | 0.55 |
| SW-6 | 78.36 | 2.46 | 116.33 | 5.86 | 140.79 | 10.62 | 10.62 | 1.81 | 0.32 |

3.4 强度衰减

考虑试件滞回曲线的不对称性,取同一加载位移幅值下正反强度的平均值,计算得到各试件屈服后强度衰减与加载循环次数的关系曲线,见图 12。 j 为屈服位移的倍数 ($j=1,2,3,\dots$); P_{ij} 表示第 j 倍屈服位移幅值下第 i 次循环的荷载峰值 ($i=1,2,3$); $P_{j\max}$ 为第 j 倍屈服位移幅值下的最大荷载。经人工气候实验室冻融循环的试件强度衰减规律:

1) 随混凝土强度的降低,试件的强度衰减越剧烈,破坏越迅速;相反,混凝土材料的强度越高,试件的强度衰减越小。

2) 随着冻融循环次数的增加,试件的强度衰减更趋严重,加载后期,不断有混凝土退出工作,试件的有效受力面积减小,强度衰减加快,脆性特征表现明显。

3.5 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为^[16]

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

式中: $+P_i$ 、 $-P_i$ 分别为第 i 级循环加载时正、反向的荷载峰值, $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 分别是与荷载峰值对应的位移值。各试件的刚度退化关系曲线,见图 13,可知:

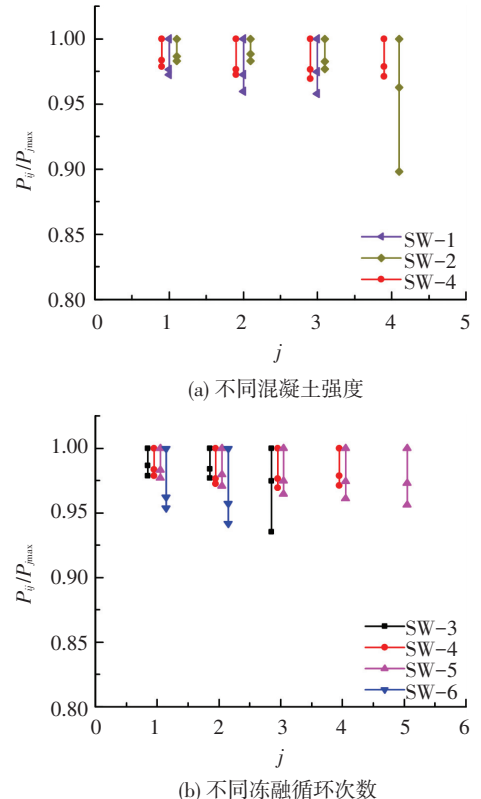
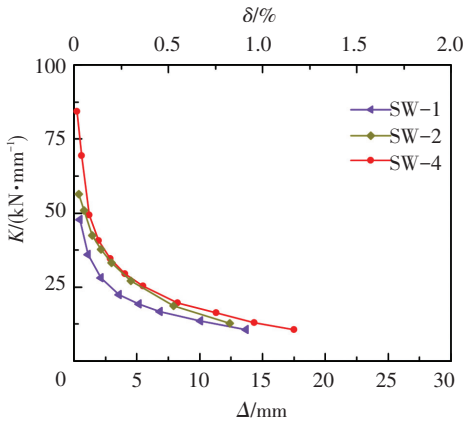


图 12 试件强度衰减退化规律

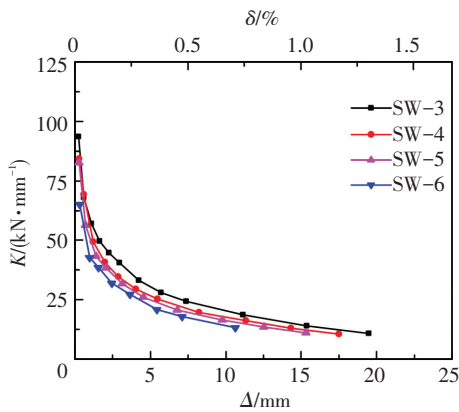
1) 混凝土强度等级对剪力墙试件初始刚度影响较大。虽然混凝土强度等级高的试件其初始刚度要大于混凝土强度等级低的试件,但由于强度高的混

凝土脆性大、延性差等缺点, 致使其裂缝发展快, 刚度的退化也随之加快。

2) 随着冻融循环次数的增加, 冻融损伤不断累积, 混凝土的劈裂抗拉强度降低, 使得试件的初始刚度有所减小, 曲线更为陡峭, 刚度退化也更趋严重; 相同位移幅值下, 冻融循环次数较多的试件, 剩余刚度更小。



(a) 不同混凝土强度



(b) 不同冻融循环次数

图 13 试件的刚度衰减曲线

3.6 耗能能力分析

采用能量耗散系数 $E^{[16]}$ 来评价试件的耗能能力, 能量耗散系数越大, 说明试件耗能能力越强. 其表达式为

$$E = \frac{S_{ABCD}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (4)$$

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 14。

经人工气候实验室冻融循环的 RC 剪力墙试件各阶段能量耗散系数见图 15, 各试件累积滞回耗能随位移幅值的变化曲线见图 16. 由图可见:

1) 由前文可知, 提高混凝土强度等级可以有效改善冻融试件的承载力, 但是会增加冻融试件的脆性, 故随混凝土强度的提高, 冻融试件各阶段的耗散系数表现出先增大后减小的趋势, 但是总耗能却不断增大。

2) 随着冻融循环次数的增加, 试件的开裂、屈服以及峰值阶段的能量耗散系数都呈增长趋势, 这主要是由于经冻融循环试件在各阶段的残余变形越来越大, 滞回曲线趋于饱满; 但是试件的总耗能却随冻融循环次数的增加而不断降低, 冻融 200 次的试件 SW-5 总耗能为完好试件的 61%, 而冻融 300 次的试件 SW-6 仅为 26%。

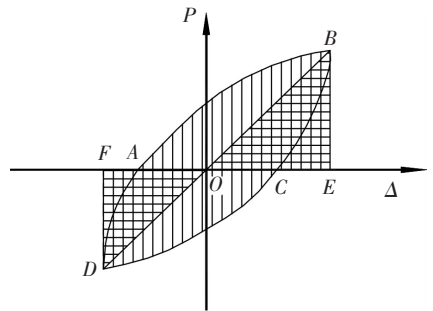


图 14 能量耗散系数计算简图

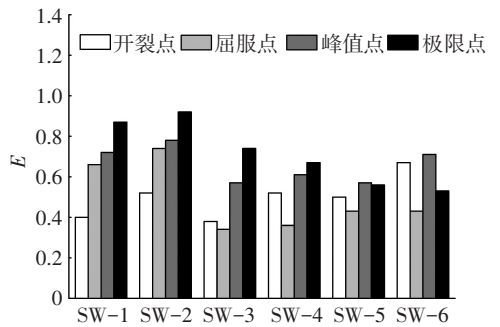
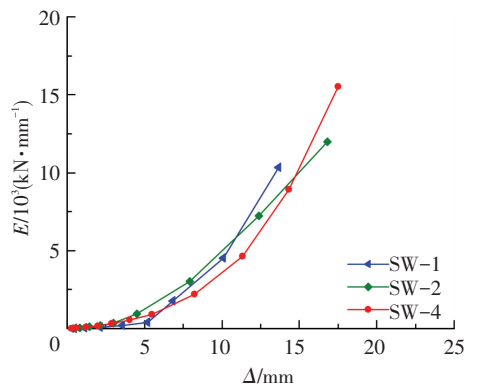
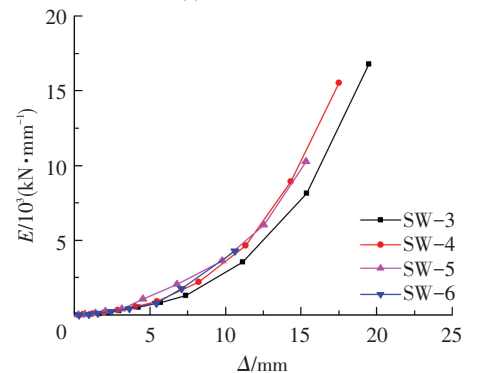


图 15 能量耗散系数



(a) 不同混凝土强度



(b) 不同冻融循环次数

图 16 累积耗能与水平位移关系曲线

4 结 论

1) 经人工气候实验室冻融方法与“快冻法”相比较,冻融效果类似,但较为缓慢,与实际冻融环境较为符合。

2) 经人工气候实验室冻融循环的 RC 剪力墙均发生弯剪破坏,且随冻融循环次数的增加剪切变形不断增大,脆性加重,破坏更为突然;而随混凝土强度的提高,试件骨架曲线特征点值均有一定提高。

3) 混凝土强度为 C50 时,随冻融循环次数的增加,试件承载力、位移延性系数和塑性转角均显著降低,强度衰减和刚度退化幅度增大,累积耗能变小,抗震性能降低。

4) 冻融循环 100 次时,随混凝土强度等级的提高,承载力和累积耗能增加,强度衰减和刚度退化幅度降低,而延性则先增加后减小,说明提高混凝土强度等级可以改善冻融后 RC 剪力墙的抗震性能。

参考文献

- [1] 李平先, 赵国藩, 张雷顺. 受冻融损伤混凝土与新混凝土的粘结剪切性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 111-117.
- [2] 曹大富, 富立志, 杨忠伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 17-23.
- [3] 曹大富, 葛文杰, 郭容邑, 等. 冻融循环作用后钢筋混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 137-144.
- [4] 曹大富, 马钊, 葛文杰, 等. 冻融循环作用后钢筋混凝土柱的偏心受压性能[J]. 东南大学学报, 2014, 44(1): 188-193.
- [5] DUAN A, JIN W, QIAN J. Effect of freeze-thaw cycles on the stress-strain curves of unconfined and confined concrete [J]. Materials and Structures, 2011, 44(7): 1309-1324.
- [6] HAZAREE C, CEYLAN H, WANG K. Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 313-319.
- [7] 杜晓雷. 钢筋混凝土梁在冻融循环和锈蚀下的受弯性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- [8] HAYASHIDA H, SATO Y, UEDA T. Failure behavior of RC beams in relation to the extent and location of frost damage [C]//In 3rd International Conference on the Durability of Concrete Structures. [S.l.]: ICDCS, 2012: 1-7.
- [9] 党争, 梁兴文, 邓明科, 等. 纤维增强混凝土剪力墙抗震性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 12-22.
- [10] PANAGIOTOU M, RESTREPO J I, SCHOETTLER M, et al. Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(2): 205-214.
- [11] 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.
- [12] 高层建筑混凝土结构技术规: JGJ3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [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] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [15] FEMA-267b Interim Guidelines: Advisory No. 2, Supplement to FEMA 267[R]. Rep. SAC-99-01. Sacramento, California: SAC Joint Venture, 1999.
- [16] 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—96[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.

(编辑 赵丽莹)