

冻融环境作用下低矮 RC 剪力墙抗震性能试验研究*

张德义, 郑山锁, 杨威[†], 甘传磊

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:采用人工气候快速冻融试验方法,对4个实际剪跨比为1.14的低矮RC剪力墙试件进行冻融试验,进而对其进行低周反复加载试验,研究低矮RC剪力墙经不同冻融循环作用后其抗震性能的衰减规律.以承载力、延性系数、塑性转角、强度衰减、刚度退化和累积滞回耗能等指标为参数,探讨冻融循环次数对低矮RC剪力墙抗震性能的影响.结果表明:暗柱和墙体分布钢筋可以约束冻胀裂缝的开展,延缓冻融循环作用对墙体造成的破坏;冻融循环作用会引起低矮RC剪力墙的破坏模式由弯曲为主的弯剪破坏向剪切为主的弯剪破坏转变;冻融循环作用下低矮RC剪力墙抗震性能指标退化规律为:随着冻融循环次数的增加,水平抗剪承载力显著降低,位移延性系数和塑性转角显著增大,强度退化速率加快,耗能能力逐步变差.

关键词:拟静力试验;冻融循环;低矮RC剪力墙;抗震性能

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Experimental Study on the Seismic Behaviors of Squat RC Shear Walls under Action of Freeze-thaw Cycle

ZHANG Deyi, ZHENG Shansuo, YANG Wei[†], GAN Chuanlei

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

Abstract: Four RC shear wall specimens with a shear span ratio of 1.14 were subjected to rapid action of freeze-thaw cycles in artificial climate room, and then the quasi-static tests were carried out to study the deterioration of seismic behaviors of the shear walls under different action of freeze-thaw cycle. Six performance indicators, such as load carrying capacity, ductility, plastic rotation, strength degradation, stiffness degradation, and cumulative hysteretic energy dissipation, were used to evaluate the influence of the number of freeze-thaw cycles on the seismic behaviors of squat RC shear wall. The Results reveal that the embedded column and distributed reinforcement could restrain the growth and widening of frost heaving cracks and slow down the damage caused by freeze-thaw. With the increase of the number of freeze-thaw cycles, shear deformation is becoming more obvious in total deformation and the failure mechanism is changing from apparent flexure-shear dominated by flexural deformation to flexure-shear dominated by shear

* 收稿日期:2016-06-23

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2013BAJ08B03), National Key Technology R&D Program(2013BAJ08B03);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20136120110003), The Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education under Grant(20136120110003);陕西省科研项目资助项目(2012K12-03-01, 2011KTCQ03-05, 2013JC16), The Research Fund from Shaanxi Province under Grant(2012K12-03-01, 2011KTCQ03-05, 2013JC16);西安建筑科技大学博士后基金资助项目, Postdoctoral Research Fund from XAUAT

作者简介:张德义(1983-),男,陕西榆林人,西安建筑科技大学博士

[†] 通讯作者, E-mail: blueyang1987@163.com

deformation gradually. The deterioration laws of seismic behaviors of the shear walls under action of freeze-thaw cycle are as follows; with the increasing of the number of freeze-thaw cycles, the shear capacity is significantly reduced, but there is a significant increase in the ductility and plastic rotation; the degradation rate of strength is accelerated, and energy dissipation capacity is steadily deteriorated.

Key words: quasi-static test; freeze-thaw cycles; squat RC shear wall; seismic behavior

目前,国内外已有的研究多集中于探讨冻融循环作用对混凝土(RC)力学性能^[1-2]以及钢筋与混凝土粘结性能^[3-5]的影响.冻融循环作用会造成 RC 结构力学性能的严重劣化,降低混凝土与钢筋的粘结性能,从而使得 RC 结构抗震性能降低.刘旭峰^[6]通过钢筋混凝土短柱轴心受压冻融循环试验研究,认为冻融循环次数越多,短柱应变越大,承载力越低;设计强度越低,柱的承载力损失越大,应变也越大.曹大富等^[7-8]分别以普通 RC 梁和 RC 柱为研究对象,进行静力试验研究,认为随着冻融循环次数的增加,试验柱的开裂和极限荷载都逐渐减小,极限变形逐渐增大,部分试件由大偏心受压破坏转变为小偏心受压破坏;高强度等级混凝土可延缓冻融循环造成的破坏,部分设计适筋混凝土梁经历冻融循环作用后发生超筋破坏.杜晓雷^[9]、周禹^[10]实验研究了钢筋混凝土梁分别在冻融、锈蚀环境下以及在冻融和锈蚀共同作用下的受弯性能,总结了梁在不同环境下承载力、跨中截面混凝土应变、挠度、钢筋应变和裂缝开展情况的变化规律.

本试验采用人工气候环境模拟技术实现低矮 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试验研究,探讨冻融循环次数对低矮 RC 剪力墙抗震性能的影响.研究成果可为我国严寒地区以剪力墙为主要抗侧力构件的高层建筑的结构设计和耐久性评估提供理论依据.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验共设计了4个实际剪跨比为1.14的悬臂 RC 剪力墙,以冻融循环次数为变量.各试件的截面尺寸均为700 mm×100 mm,墙体高度为700 mm.墙体设置端部约束区,以模拟实际结构中纵筋集中配置于墙体两侧的情况.混凝土保护层厚度均为10 mm,纵筋采用 HRB335 级钢筋,分布钢筋及边缘配箍均为 HPB235 级钢筋,试件具体设计参数见表1,试件尺寸及配筋见图1.

表1 RC 剪力墙试件参数

Tab.1 Test parameters of corroded wall specimens

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	1.14	C50	0.2	0
SW-2	1.14	C50	0.2	100
SW-3	1.14	C50	0.2	200
SW-4	1.14	C50	0.2	300

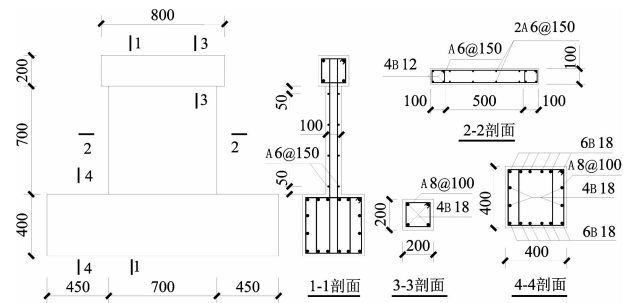


图1 RC 剪力墙试件尺寸及配筋

Fig.1 Dimensions and reinforcements of wall specimens

对于 RC 结构,引气剂的加入会大大增强混凝土的抗冻性,冬季施工需于混凝土中添加引气剂,而正常施工条件则不需要添加引气剂.鉴于此,本文并未进行引气剂的添加.采用 P.O 42.5R 水泥配制 C50 混凝土,其配合比为水泥:中砂:细石:水:粉煤灰=400:980:810:95:80.混凝土立方体抗压强度平均值为 55.08 MPa,弹性模量为 3.53×10^4 MPa,钢筋力学性能见表2.

表2 钢筋力学性能

Tab.2 Mechanical properties of reinforcements

钢筋型号	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	弹性模量 $E_s/10^5$ MPa
A6	270	470	2.1
A8	305	483	2.1
B12	409	578	2.0
B18	345	465	2.0

1.2 人工气候快速冻融试验方案

试件采用墙体与基座分离二次浇筑,首先浇筑墙体部分,放于自然环境下养护 24 d 时,将墙体从养护地点取出,置于水中浸泡 4 d.在 28 d 龄期时,将墙体置于人工气候实验室进行快速冻融循环试

验.人工气候环境参数设置如图2所示.待冻融循环完成后再将墙体与基座和加载梁浇筑为一体.

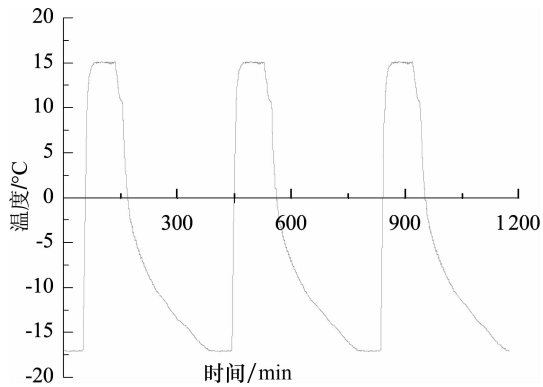


图2 人工气候环境参数设定
Fig.2 Environmental parameters in the artificial climate room

1.3 试验加载装置与制度

本试验在西安建筑科技大学结构试验室进行,采用悬臂梁式加载方案、拟静力试验方法,加载装置如图3所示.竖向荷载由液压千斤顶提供,在竖向千斤顶与试件之间设置刚性垫梁,以使剪力墙截面产生均匀的压应力.由100 t电液伺服作动器施加水平反复荷载,加载点位于加载梁的中心.

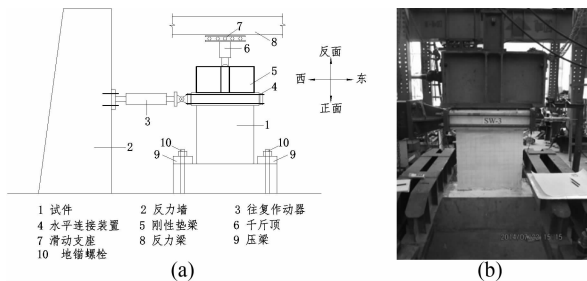


图3 试验装置

Fig.3 Experimental equipment

加载制度:试件达到屈服荷载以前,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,以该屈服荷载对应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试验.试验加载制度示意如图4所示.

2 试验现象

2.1 冻融试验现象

图5为经冻融循环后各试件的表现现象及局部放大照片.由图可见:

1)冻融循环100次试件SW-2,沿暗柱纵筋方向

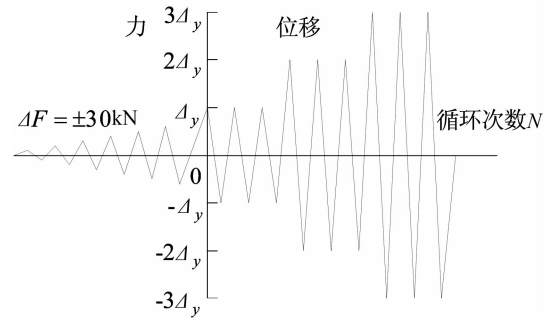


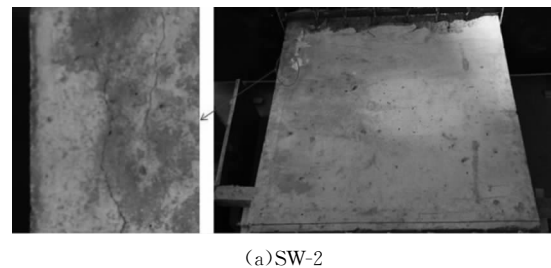
图4 加载制度示意图

Fig.4 Schematic diagram of loading process

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,主要原因是该部分混凝土缺少钢筋的约束.

2)冻融循环200次试件SW-3,冻胀裂缝数目增多,初始横向裂缝开始变宽、延伸,裂缝主要集中于墙体的四周,墙体中部也出现少量裂缝,剪力墙的棱角处有骨料露出.

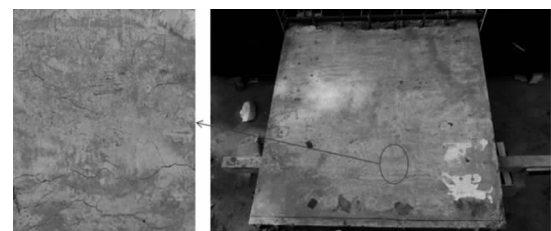
3)冻融循环300次试件SW-4,冻胀裂缝数目继续增多,横向裂缝继续变宽、延伸,裂缝开始向墙体中部蔓延.墙体边、角处混凝土开始疏松,部分骨料和砂浆也随冻融次数的增加而发生脱落.



(a)SW-2



(b)SW-3



(c)SW-4

图5 RC剪力墙试件冻融后的表现现象

Fig.5 Surface changes of wall specimens after the freeze-thaw cycles

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的约束作用,可延缓冻融循环作用对试件造成的破坏.试件经历的冻融循环次数越多,冻胀裂缝越多,表面破坏越严重.该现象可用静水压理论^[11]和渗透压理论^[12]来解释,当静水压和渗透压所产生的内应力超过混凝土抗拉强度时,混凝土内部孔隙及微裂缝增大,经过多次冻融循环后,孔隙和微裂缝扩展并互相连通.

2.2 试件破坏过程及破坏形态

图6为各试件加载破坏后的照片,图7为试件混凝土保护层剥落和内部混凝土分层的照片.各试件的裂缝发展过程及破坏形态描述如下:

对于完好试件 SW-1,当水平拉力达到 168.89 kN,顶点水平位移为 1.27 mm(位移角 $\delta=1/630$)时,试件端部约束区下方出现第一条细微的水平裂缝;试件屈服前,端部新生多条水平短裂缝,原有水平裂缝由端部斜向下开展、延伸.顶点位移达到 3.25 mm(位移角 $\delta=1/246$,记为 Δ_y)时,墙体出现多条 45° 方向延伸的剪切斜裂缝,裂缝明显延长; $P-\Delta$ 曲线偏离直线,墙体边缘受拉纵筋进入屈服阶段,试件开始屈服,改为位移控制加载.随着位移幅值的增大,原有裂缝延长、贯通并加宽,网状裂缝将墙体分割成块状.顶点位移达到 5.86 mm(位移角 $\delta=1/137$),第1次循环时,交叉剪切斜裂缝宽度达到 1 mm;第3次循环反向加载时,剪切斜裂缝突然加

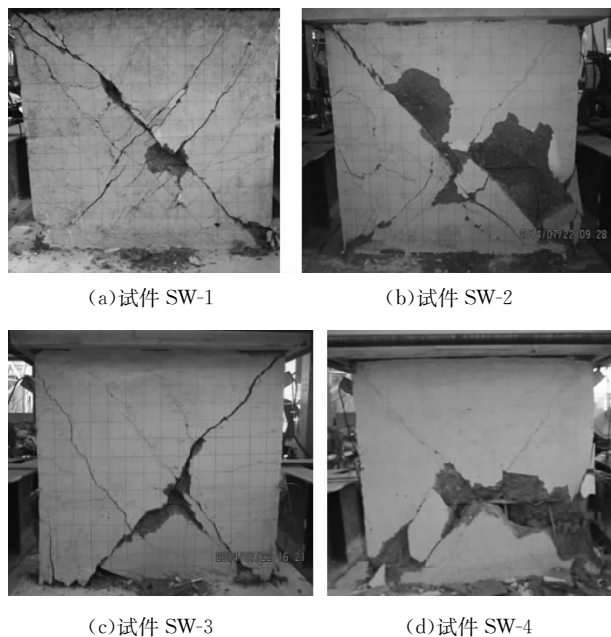


图6 试件加载破坏后的照片
Fig.6 Photographs of wall specimens after testing



图7 混凝土保护层剥落和内部混凝土分层的照片
Fig.7 Photographs of concrete crumbling and internal concrete layering after testing

宽,同时发出“啪”声,此时试件承载力急剧下降,破坏呈明显的脆性.

冻融循环 100 次试件 SW-2,在按位移控制加载后期,墙体受压区出现混凝土竖向粘结滑移裂缝,裂缝迅速延伸和扩展,随后混凝土保护层大面积剥落(图7(a)),分布钢筋裸露;墙体端部约束区下方的纵筋受压屈曲,混凝土被压碎.

冻融循环 200 次试件 SW-3,在按位移控制加载时,受压区的混凝土竖向粘结滑移裂缝和保护层外鼓现象出现较早,墙体分布钢筋约束区内的部分混凝土与保护层一起剥落.

冻融循环 300 次试件 SW-4,在位移控制加载阶段,墙体中下部出现多条纵向裂缝,墙脚出现塑性铰,混凝土沿墙体横截面法线方向发生错位,最终破坏时,两墙脚混凝土碎落,墙体端部约束区下方的纵筋和纵向分布钢筋全部受压屈曲,该试件属于弯剪破坏.将碎落的混凝土移除可发现,墙体内部混凝土出现明显的分层现象(图7(b)).

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

各试件的滞回曲线如图8所示.由图可见,各试件的滞回曲线有以下共同特征:试件开裂前,滞回环面积小,整体刚度变化不大,加载与卸载基本重合.随着荷载的增加,滞回环面积逐渐增大.由于试件顶部偏心弯矩作用,以及初始加载的方向性,使得滞回曲线的正、负向呈现出明显的不对称,向正向产生了偏移.

试件 SW-1 为完好试件,滞回曲线无明显的屈服点;在荷载控制加载阶段,其基本处于弹性工作阶段,随着位移幅值的增大,滞回环逐渐饱满;试件破坏较突然,为脆性破坏.试件 SW-2 和 SW-3 的滞回曲线出现了较为明显的屈服点;随着冻融循环次数的增加,试件的峰值荷载明显下降,卸载后的残

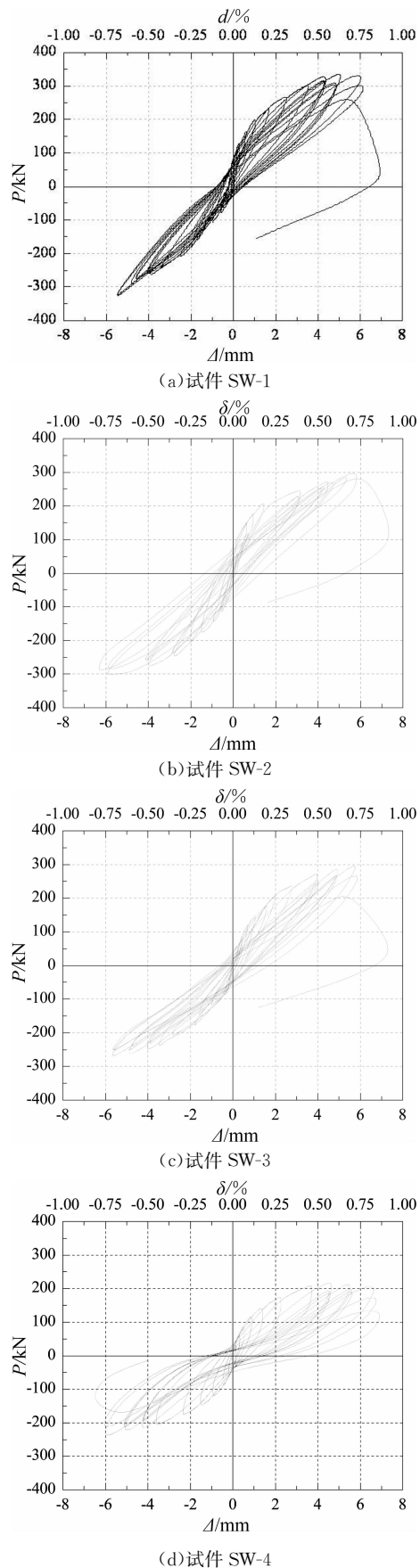


图8 试件滞回曲线

Fig.8 Hysteric curves of wall specimens

余变形略有增大.试件 SW-4 在加载过程中,滞回曲线出现了明显的屈服点和下降段;加载屈服后,残余变形明显增大,滑移效应愈加显著.

3.2 骨架曲线及特征参数

基于滞回曲线,绘制出低矮 RC 剪力墙试件的骨架曲线,如图 9 所示.为了便于讨论试件变形能力,采用“能量等值法”^[13]确定试验所得骨架曲线的假定屈服点.虽然个别试件的骨架曲线也具有下降段,但从总体上看,其破坏仍属于脆性破坏.本文取滞回曲线开始下降的点作为极限荷载点即为试件的极限荷载,其对应的位移即为极限位移.并通过延性系数 μ_{Δ} 和塑性转角 θ_D ^[14] 作为衡量低矮 RC 剪力墙延性变化的指标,计算公式如下:

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

$$\theta_D = (\Delta_u - \Delta_v) / H \quad (2)$$

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

各试件特征点、位移延性系数和塑性转角见表 3,由表 3 可见:

1)完好试件 SW-1 的开裂荷载略高于冻融剪力墙试件的开裂荷载;试件 SW-2, SW-3 和 SW-4 所经历的冻融循环次数不同,但开裂荷载基本相同.随着冻融循环次数的增加,冻融循环 300 次试件 SW-4 的屈服荷载和峰值荷载较完好试件 SW-1 分别下降了 31.80% 和 29.89%,试件的屈服荷载和峰值荷载显著下降.

2)冻融循环 300 次试件 SW-4 的屈服位移较完好试件 SW-1,下降了 14.77%.总的来说,随冻融循环次数的增加,各试件的屈服位移略有减小.但是,冻融循环次数对开裂位移和峰值位移的影响无规律可循.

3)低矮剪力墙试件的破坏模式属于脆性破坏,其位移延性系数均在 1.80~2.35 之间,延性差.总的来说,位移延性系数和塑性转角随冻融循环次数的增加而增大.试件 SW-4 产生明显的黏结滑移变形,其位移延性系数和塑性转角较完好试件 SW-1 分别增大了 30.56% 和 43.56%.

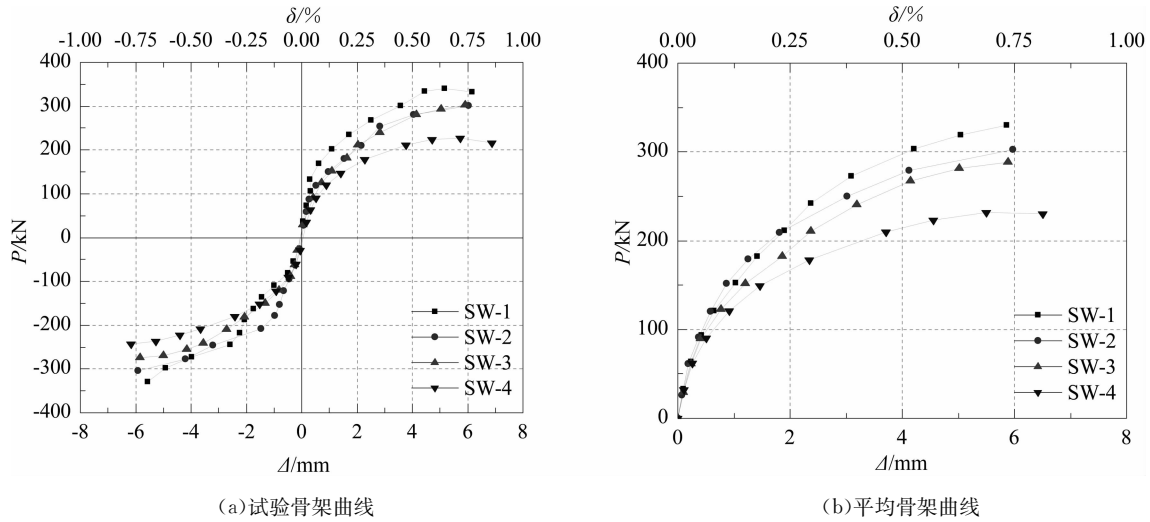


图 9 试件骨架曲线

Fig.9 Skeleton curves of wall specimens

表 3 骨架曲线特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of skeleton curves

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 θ_p
	P_c/kN	Δ_c/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_p/kN	Δ_p/mm			
SW-1	168.89	1.27	276.77	3.25	330.35	5.86	5.86	1.80	0.326
SW-2	179.41	1.25	248.41	2.97	302.92	5.97	5.97	2.01	0.375
SW-3	151.37	1.38	238.63	3.15	288.50	5.89	5.89	1.87	0.343
SW-4	149.31	1.47	188.75	2.77	231.60	5.51	6.51	2.35	0.468

3.3 变形分析

低矮 RC 剪力墙试件剪切变形由布置于试件对角线的位移计测量.根据两个对角线布置的位移计测量值,绘制出 4 个试件剪切变形滞回曲线如图 10 所示.

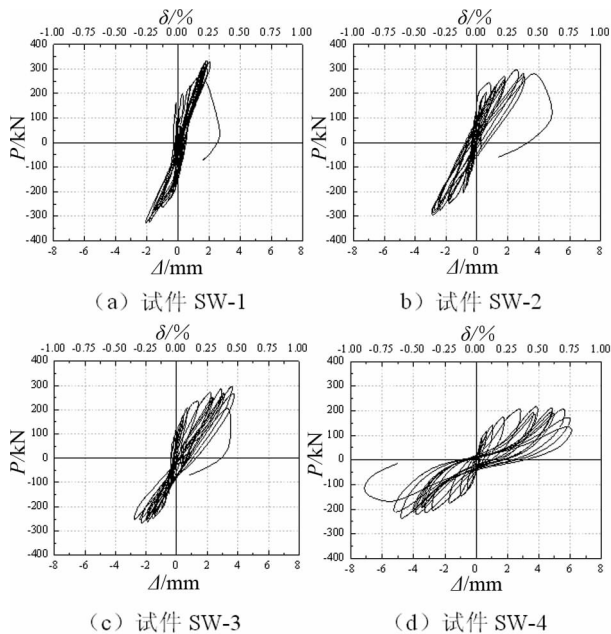


图 10 剪切变形滞回曲线

Fig.10 Hysteretic curve of the shear deformation

图 11 为剪切变形计算示意图,根据几何关系可得:

对角线方向的平均变位为:

$$\bar{X} = \frac{|\delta_1| + |\delta_2|}{2} \tag{3}$$

剪切角为:

$$\gamma = \frac{\bar{X}}{h' \cos\theta} \tag{4}$$

式中: b 为试件截面长度; h' 为布置于试件对角线的位移计高度; $\cos\theta = \frac{b}{\sqrt{b^2+h'^2}}$.

由式(3)和式(4)计算得各试件特征点处的剪切角如表 4 所示, Δ_s/Δ 为试件剪切变形占总变形的比值,其中总变形包括剪切变形、弯曲变形和黏结滑移变形.

1)各试件从开裂发展峰值,剪切变形所占的比值逐渐增大.

2)未冻融试件 SW-1 的剪切变形占总变形的比值介于 0.187~0.344,由此可见剪跨比为 1.14 的剪力墙试件主要发生弯剪破坏.

3)随着冻融循环次数的增加,剪切变形占总变形的比值显著增大.在骨架曲线特征点处,冻融循环

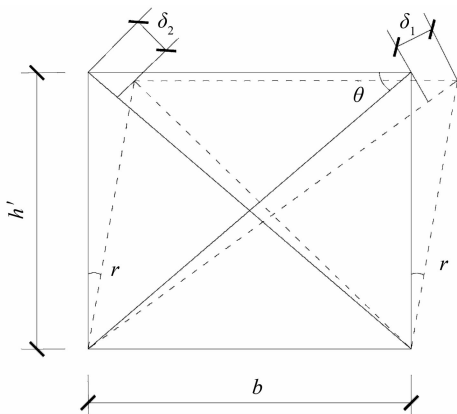


图 11 剪切变形示意图

Fig.11 Schematic diagram of shear deformation

300 次试件 SW-4 的剪切变形占总变形的比值介于 0.731~0.861, 是未冻融试件 SW-1 的 3.91 倍, 2.34 倍和 2.50 倍. 可见, 冻融循环作用会引起低矮 RC 剪力墙的破坏模式由弯曲为主的弯剪破坏逐渐向弯切为主的弯剪破坏转变.

表 4 剪切变形分析

Tab.4 Shear deformation analysis

试件 编号	开裂		屈服		峰值	
	$\gamma/10^{-3}$ rad	Δ_s/Δ	$\gamma/10^{-3}$ rad	Δ_s/Δ	$\gamma/10^{-3}$ rad	Δ_s/Δ
SW-1	0.297	0.187	1.353	0.333	2.521	0.344
SW-2	0.449	0.287	1.451	0.391	3.123	0.418
SW-3	0.698	0.404	2.038	0.518	4.375	0.594
SW-4	1.343	0.731	2.696	0.779	5.932	0.861

3.4 强度衰减

强度衰减描述中取同一加载位移幅值下正反强度平均值, 依据试验数据得到了各试件强度衰减与加载循环次数的关系曲线, 如图 12 所示. 其中, j 为屈服位移的倍数 ($j=1, 2, 3, \dots$); P_{ij} 表示第 j 倍屈服位移幅值下的第 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. 由图可见, 各试件强度衰减规律如下:

1) 各位移幅值下, 第 2 次循环时强度衰减幅度较大, 第 3 次循环时强度衰减幅度较第 2 次循环略有增大.

2) 随着冻融循环次数的增加, 混凝土内部的微裂缝数目增多, 冻融损伤不断累积, 试件强度衰减幅度逐渐增大, 因此冻融循环 300 次试件 SW-4 的强度衰减最为明显.

3.5 耗能能力分析

采用能量耗散系数 $E^{[15]}$ 、功比指数和累积滞回耗能来评价试件的耗能能力. 能量耗散系数表达

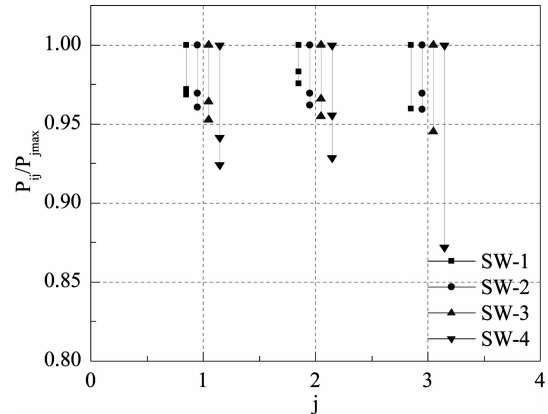


图 12 试件强度衰减退化规律

Fig.12 Strength degradation law of wall specimens

式为:

$$E = \frac{S_{ABCD}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (5)$$

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, 如图 13 所示.

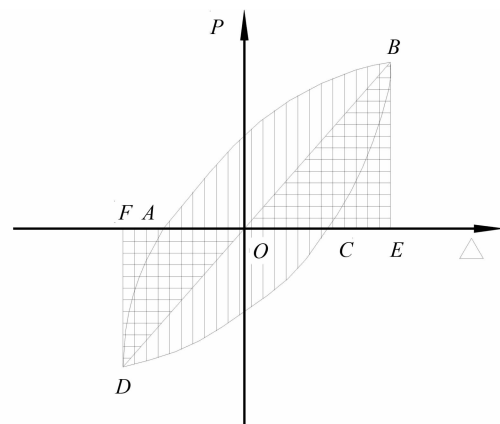


图 13 能量耗散系数计算简图

Fig.13 Calculation of energy dissipation coefficient

功比指数计算公式如下^[13]:

$$I_w = \sum_{i=1}^n (P_i \Delta_i / P_y \Delta_y) \quad (6)$$

式中: P_i, Δ_i 分别为第 i 次循环时卸载点的荷载和位移值; P_y, Δ_y 分别为屈服荷载和屈服位移值.

各试件的平均能量耗散系数、功比指数和累积滞回耗能计算结果见表 5. 可见随着冻融循环次数从 0 次增加至 200 次, 试件的平均能量耗散系数、功比指数和累积滞回耗能显著减小, 耗能能力总体趋势变差. 在加载过程中, 冻融循环 300 次试件 SW-4 产生明显的黏结滑移变形, 因此平均能量耗散系数、功比指数和累积滞回耗能有较大幅度的增长.

表 5 试件的耗能特性

Tab.5 Hysteretic energy dissipation indicators of wall specimens

试件编号	平均能量耗散系数 E	功比指数 I_w	累积滞回耗能 / (kN · mm)
SW-1	0.4 782	16.50	7 100.3
SW-2	0.4 438	16.03	5 307.5
SW-3	0.4 073	14.93	5 134.2
SW-4	0.5 554	21.18	6 420.9

4 冻融对剪力墙承载力与变形的影响规律分析

芯样试件的混凝土抗压强度换算值按式(7)计算^[16]:

$$f_{cu}^c = \frac{4\beta F}{\pi d^2} \quad (7)$$

式中: f_{cu}^c 为芯样试件混凝土强度换算值; F 为芯样试件的抗压试验测得的最大压力; d 为芯样试件的平均直径; β 为不同高径比的芯样试件混凝土强度换算系数, 高径比为 1.0 时, $\beta=1.0$.

混凝土芯样试件的相对抗压强度与冻融循环次数的关系见表 6 和图 14, 混凝土芯样抗压强度随冻融循环次数的增加而下降.

表 6 冻融循环后混凝土相对强度

Tab.6 Concrete relative strength after freeze-thaw cycles

混凝土强度等级	冻融循环次数	f_{cu}^c /MPa	f_{cu} /MPa	f_{cu}^c/f_{cu}
C50	0	53.73		0.975
	100	49.64	55.08	0.901
	200	44.25		0.803
	300	28.86		0.524

根据芯样的抗压强度, 计算混凝土的抗拉强度和弹性模量^[17]; 根据试验中构件的实际竖向荷载, 计算相应冻融循环下 SW-1~SW-4 试件的实际轴压比, 具体参数见表 7.

表 7 RC 剪力墙试件参数

Tab.7 Test parameters of corroded wall specimens

试件编号	混凝土抗压强度/MPa	混凝土抗拉强度/MPa	弹性模量 / 10^4 MPa	轴压比
SW-1	34.39	2.94	3.514	0.205
SW-2	31.77	2.94	3.449	0.222
SW-3	28.32	2.76	3.351	0.249
SW-4	18.47	2.18	2.939	0.382

根据已有承载力计算公式, 预测受冻剪力墙试件的开裂、屈服和极限点的承载力和位移.

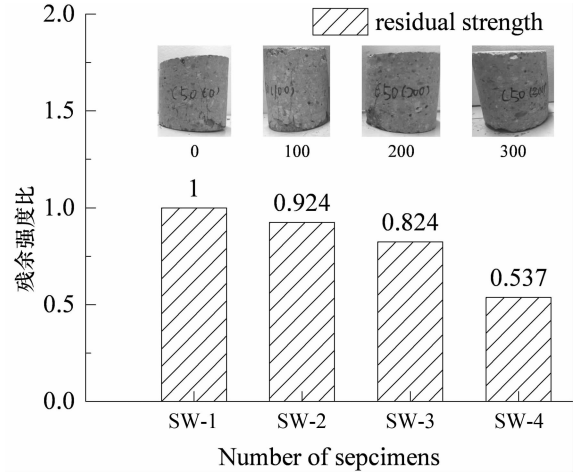


图 14 抗压强度与冻融循环次数的关系

Fig.14 The residual strength measured for core drilling samples

根据文献[18-21], 剪力墙的开裂荷载处于 0.53~0.70 倍峰值荷载之间, 本文中完好试件 SW-1 开裂荷载与峰值荷载的比值为 0.51, SW-2~SW-4 处于 0.52~0.64 之间, 见表 8, 取值基本处于 0.53~0.70 之间, 与完好试件相比冻融循环次数并未改变开裂与峰值荷载间的比值. 鉴于目前剪力墙开裂荷载计算公式^[18,21]的预测结果较差, 本文对于剪力墙骨架曲线的建立, 采用仅考虑屈服与极限荷载的两折线形式, 如图 15 所示.

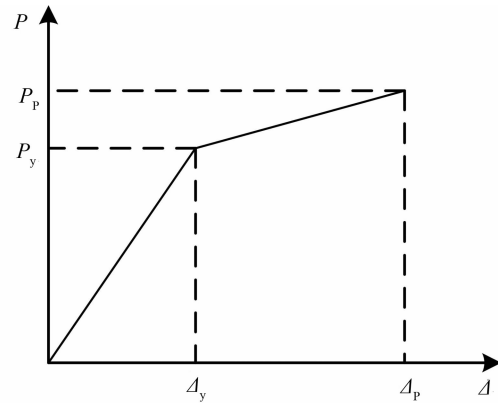


图 15 剪力墙的两折线骨架曲线

Fig.15 Bilinear skeleton curve of RC shear wall

本文对于剪力墙屈服和峰值荷载的计算, 分别采用 Hirosawa(广泽公式)^[21]屈服荷载和 Cevdet Kerem Gulec(2009)^[22]提出的适用于剪跨比为 1.0 的剪切控制的带暗柱剪力墙峰值荷载的计算公式, 理论值与试验值的相对误差计算结果见表 8. 根据文献[23]计算各试件的开裂、屈服和极限点位移的相对误差.

表8 骨架曲线特征参数理论公式

Tab.8 Characteristic parameters of skeleton curves

试件 编号	开裂		屈服		峰值	
	P_c/P_p 试验值	位移相 对误差 /%	荷载相 对误差 /%	位移相 对误差 /%	荷载相 对误差 /%	位移相 对误差 /%
SW-1	0.51	5.51	1.90	0.92	4.61	4.27
SW-2	0.59	4.00	4.70	7.07	13.33	6.37
SW-3	0.52	13.04	3.38	1.59	17.90	6.11
SW-4	0.64	18.37	10.40	18.77	42.42	4.90

注:相对误差=|理论值-试验值|/试验值

诸多学者^[24-29]经试验研究均认为:混凝土强度随着冻融循环次数的增加而减小,混凝土峰值压应变随冻融循环次数的增加而增大。

文献[21]屈服荷载和[22]峰值荷载公式中仅涉及混凝土抗压强度,因而上述 SW-2~SW-4 试件屈服荷载的计算值仅考虑了混凝土抗压强度的变化,而并未考虑混凝土的峰值压应变。

采用文献[23]进行3个特征点位移的计算公式中涉及到混凝土的峰值压应变,而本文在进行 SW-2, SW-3 特征点的计算中并未考虑混凝土峰值压应变随冻融循环的变化。

因而对于未冻融的 SW-1 试件,采用现有理论计算公式可较好地预测剪力墙开裂、屈服和极限点处的荷载与位移,相对误差小于 5.5%,而 SW-2~SW-4 试件的计算值与试验值偏差则较大,相对误差已达到 18.7%,表明仅考虑受冻后混凝土抗压强度的减小并采用现有理论公式,并不适用于冻融 RC 剪力墙的承载力与位移预测。

文献[29]对冻融循环作用下箍筋约束棱柱体的单轴受压应力-应变曲线进行了试验研究,认为在混凝土抗压强度超过 45 MPa 时(本文混凝土强度为 53.73 MPa),冻融循环并未显著减小箍筋与混凝土间的粘结强度,而因混凝土抗压强度降低所导致的配箍特征值的增大,使得混凝土应力-应变曲线下降段随冻融循环次数的增大而趋于平缓,与表 3 中 SW-1~SW-4 试件延性系数随冻融循环次数逐渐增大的反常规律相一致。此外,根据配箍特征值的计算公式 $\lambda f_{yh}/f_c$ 可知:随混凝土抗压强度的降低,配箍特征值增加,即冻融后混凝土强度的降低,导致了剪力墙暗柱配箍特征值的增加,但仍应考虑试件破坏模式的改变等其他因素的影响。

5 结论

1)暗柱和墙体分布钢筋对冻胀裂缝的开展有

明显的约束作用,可延缓冻融循环作用对试件造成的破坏。

2)剪力墙构件设计参数不变,轴压比为 0.2,随着冻融循环次数的增加,剪切变形比重逐渐增大。表明冻融循环作用会引起低矮 RC 剪力墙的破坏模式由弯曲为主的弯剪破坏向剪切为主的弯剪破坏转变。

3)冻融循环作用下低矮 RC 剪力墙抗震性能指标退化规律为:随着冻融循环次数的增加,抗剪承载力显著降低,位移延性系数、塑性转角和强度衰减幅度略有增大,耗能能力逐步变差,冻融循环 300 次试件 SW-4 因破坏模式发生转变使得其耗能能力有较大幅度的增长。

4)不可仅考虑混凝土抗压强度的降低,而直接采用现有剪力墙承载力和位移的计算公式预测冻融 RC 剪力墙试件的承载力与位移。

参考文献

- [1] 洪锦祥, 缪昌文, 刘加平, 等. 冻融损伤混凝土力学性能衰减规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 173-178.
HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Material, 2012, 15(2): 173-178. (In Chinese)
- [2] MEDINA C, Maria isabel sánchez de rojas, moisés frías. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40(1): 151-160.
- [3] 袁杰, 刁波, 沈宇, 等. 冻融与初始裂缝对钢筋混凝土黏结强度的影响[J]. 混凝土, 2014(7): 16-19.
XI Jie, DIAO Bo, SHEN Bei, et al. Effect of freeze-thaw and initial cracks on bond strengths between reinforcement bars and concrete[J]. Concrete, 2014(7): 16-19. (In Chinese)
- [4] 冀晓东, 宋玉普. 冻融循环后光圆钢筋与混凝土粘结性能退化机理研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 70-74.
JI Xiaodong, SONG Yupu. Mechanism of bond degradation between concrete and plain steel bar after freezing and thawing[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 70-74. (In Chinese)
- [5] HADDAD R H, NUMAYR K S. Effect of alkali-silica reaction and freezing and thawing action on concrete-steel bond[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2): 428-435.
- [6] 刘旭峰. 冻融循环后混凝土抗压性能与短柱轴压性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学土木工程学院, 2012.
LIU Xufeng. Experimental research on compressive strength of concrete and axially loaded concrete short column after freeze-thaw cycle[D]. Shenyang: College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, 2012. (In Chinese)
- [7] 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.
CAO Dafu, GE Wenjie, GUO Rongyi, *et al.* Experimental study on flexural behaviors of RC beams after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 137-144. (In Chinese)
- [8] 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.
CAO Dafu, MA Zhao, GE Wenjie, *et al.* Eccentric compressive behaviors of RC columns after freeze-thaw cycle[J]. Journal of Southersity, 2014, 44(1): 188-193. (In Chinese)
- [9] 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: 吉林大学建筑工程学院, 2011.
DU Xiaolei. Research on the bending performance of reinforced concrete beam under the freeze-thaw cycles and corrosion[D]. Jilin: Construction Engineering Lottege Jilin University, 2011. (In Chinese)
- [10] 周禹. 钢筋锈蚀与冻融作用下钢筋混凝土梁的抗弯性能[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学土木工程学院, 2012.
ZHOU Yu. Bending behavior of RC beam under the action of steel corrosion and freeze-thaw cycles[D]. Shenyang: School Gvit Engineering Shenyang Jian Zhu University, 2012. (In Chinese)
- [11] POWERS T C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete [J]. ACI Journal, Proceedings, 1945, 16(4): 245-272.
- [12] POWERS T C, SCHOLER C F. Durability of concrete[M]. Detroit: American Concrete Institute, 1975: 1-11.
- [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.
YAO Qianfeng, CHEN Ping. Civil engineering structural experiment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (In Chinese)
- [14] FEMA-267b Interimguidelines, advisory No. 2, supplement to FEMA 267 Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, U.S.A., 1999.
- [15] JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ101-96 Industry standard of the people's republic of china. specification of testing methods for earthquake resistant Building[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1997. (In Chinese)
- [16] CECS03 2007 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for testing concrete strength with drilled core. CECS 03: 2007. China Planning Press, Beijing, 2007. (In Chinese)
- [17] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB 50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011. (In Chinese)
- [18] WALLANCE J W. Modeling issues for tall reinforced concrete core wall buildings [J]. Structural Design of Tall and Special Buildings, 2010, 16(5): 615-632.
- [19] 李宏男, 李兵. 钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 35-42.
LI Hongnan, LI Bing. Experimental study on seismic restoring performance of reinforced concrete shear wall [J]. Journal of Buildings Structures, 2004, 25(5): 35-42. (In Chinese)
- [20] 藏登科. 纤维模型中考虑剪切效应的 RC 结构非线性特征研究[D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2008.
ZANG Dengke. A study on the nonlinear characteristic of RC structure with shear effect in fiber mode [D]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing University, 2008. (In Chinese)
- [21] HIROSAWA M. Past experimental results on reinforced concrete shear walls and analysis on them[R]. Tokyo, Japan: No 6 Building Research Institute, Ministry of Construction, 1975.
- [22] GULEC C K. Performance-based assessment and design of squat reinforced concrete shear wall[D]. Buffalo: The State University of New York, 2009.
- [23] 张松, 吕西林, 章红梅. 钢筋混凝土剪力墙构件恢复力模型[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(4): 645-649.
ZHANG Song, LU Xilin, ZHANG Hongmei. Experimental and analytical studies on resilience models of RC shear wall [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(4): 645-649. (In Chinese)
- [24] HASAN M. Modeling of stress-strain relationships for concrete damaged by freezing and thawing cycles[D]. Sapporo Dissertation, Hokkaido University, 2003.
- [25] HASQAN M, OKUYAMA H, SATO Y, *et al.* Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(1): 89-99.
- [26] MARZOUK H, JIANG Kajiu. Effects of freezing and thawing on the tension properties of high-strength concrete [J]. ACI Material Journal, 1995, 91(6): 577-586.
- [27] SUN W, ZHANG Y M, YAN H D, *et al.* Damage and damage resistant of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9): 1519-1523.
- [28] DUAN An, QIAO Jiaru. Stress-strain relationship of stirrup-confined concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 3016-3022.
- [29] 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.