

钢筋混凝土空心剪力墙抗震性能试验研究*

彭占关¹, 秦鹏¹, 谈忠坤^{1,2}

(1 湖南大学土木工程学院, 长沙 410012; 2 湖南中大建设工程检测技术有限公司, 长沙 410205)

[摘要] 通过对3片不同形式剪力墙进行低周反复荷载试验,研究了普通配筋剪力墙、交叉斜向配筋空心剪力墙及交叉斜向配筋实体剪力墙在相同受力条件下破坏形态、承载能力和抗震性能。研究表明:3种墙体均呈现压弯破坏形态,受拉钢筋先屈服,然后混凝土压碎;与普通配筋剪力墙相比,交叉斜向配筋空心剪力墙能够减轻自重,且洞口不会削弱墙体的受力性能,试件表现出良好的延性和耗能性能;与交叉斜向配筋实体剪力墙相比,交叉斜向配筋空心剪力墙的刚度、延性、耗能性能略有下降,但下降幅度不大。提出了交叉斜向配筋实体剪力墙和交叉斜向配筋空心剪力墙的受弯承载力计算公式,计算结果与试验比较吻合。该研究为后继装配式建筑提供了一种新型墙体模型。

[关键词] 空心剪力墙; 低周反复荷载试验; 抗震性能; 受力性能

中图分类号: TU398, TU352.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2018)06-0005-07

Experimental study on seismic performance of hollow reinforcement concrete shear wall

Peng Zhanguan¹, Qin Peng¹, Tan Zhongkun^{1,2}

(1 School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410012, China; 2 Hunan Zhongda Construction Engineering Detection Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Three shear walls of different forms were tested under cyclic loading to study the failure modes, bearing capacity and seismic performance among traditional shear wall, cross diagonal reinforcement hollow shear wall and cross diagonal reinforcement solid shear wall. The study shows that the three walls present bending failure modes: tension reinforcements yield first and then the concrete crush. Compared with traditional shear wall, cross diagonal reinforcement hollow shear wall can reduce the weight, and the hollow holes will not weaken the mechanical performance of the wall. Specimen shows good ductility and energy dissipation performance. Compared with the cross diagonal reinforcement solid shear wall, the stiffness, ductility and energy dissipation performance of cross diagonal reinforcement hollow shear wall are decreased, but the decrease is not significant. The bending bearing capacity calculation formula of cross diagonal reinforcement solid shear wall and cross diagonal reinforcement hollow shear wall were put forward and the calculated results are quite consistent with the experimental results. The results provide a new type of wall model for the subsequent assembly building.

Keywords: hollow shear wall; cyclic loading test; seismic performance; mechanical performance

0 引言

剪力墙结构是现代高层建筑中重要的结构形式,具有自重、抗侧刚度大的特点。近年来对剪力墙的研究也越来越多,主要是对分为配筋形式和开洞形式的研究。曹万林^[1]在普通剪力墙配筋的基础上提出增设暗支撑剪力墙,当斜向暗支撑倾角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时可以有效增加剪力墙结构的承载力并改善结构的延性。Salonikios^[2]研究了高宽比为1和1.5剪力墙的剪切强度和变形模式,提出设置斜向钢筋可以提高剪力墙的剪切强度。孙建超等^[3]对不同配筋形式钢筋混凝土剪力墙的受剪性能进行了试验研究,结果表明:相比普通配筋墙体,如果在墙身中加配斜支撑纵筋和箍筋或加配型钢斜撑,其承载力能有较大提高。张鹤志^[4]利用GESO算法对承受水平和竖向荷载的剪力墙进行配筋优化,优化拓扑图中有大量斜向钢筋单元“存活”,研究指出,复杂应力构件的破坏通常是由斜裂缝控制,斜钢筋能

够有效抵抗斜裂缝的发展。王激扬等^[5]通过一系列拟静力试验研究了开洞形式对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响,结果表明:孔洞位置能够改变剪力墙应力传递路径,进而影响不同阶段裂缝开展形式及最终的破坏形态,试验指出居中洞口墙体比偏心洞口墙体的承载力和变形角都要大。张胜军^[6]通过有限元分析不同洞口尺寸及洞口位置对剪力墙性能的影响,并提出剪力墙的开洞率不宜超过30%。

目前对空心剪力墙的研究比较有限,许淑芳等^[7]进行了不同形式空心剪力墙的抗震性能试验研究,其配筋形式主要是水平钢筋和竖向钢筋,洞口为一系列竖向的柱形空洞,研究表明这种配筋形式的空心剪力墙能在一定程度上提高延性,但不能充分发挥钢筋的力学性能。熊红星^[8]对对角交叉斜

* 国家自然科学基金资助项目(51308201),国家重点专项(2016YFC0701400)。

通讯作者:秦鹏,博士,讲师,Email: pengqin@hnu.edu.cn。

向配筋空心剪力墙进行了数值模拟分析,但并未做相关的试验研究。为了进一步减轻剪力墙自重,提高延性和抗震性能,充分利用材料的力学性能,本文结合剪力墙洞口形式及配筋形式的研究,在已有空心剪力墙研究的基础上提出了一种新型空心剪力墙,即去除普通剪力墙墙身的水平钢筋和竖向钢筋,沿墙身高度方向配置多道45°交叉钢筋笼,仍保留两侧暗柱钢筋,钢筋笼交叉区域填充聚苯乙烯泡沫块。本文对3片剪力墙进行低周反复荷载试验,对比研究交叉斜向配筋空心剪力墙破坏过程及破坏形态、承载能力、滞回性能及骨架曲线、延性系数、刚度退化、耗能能力等性能。

1 试验概况

1.1 试件制作与设计

试验共设计3片1:2缩尺的剪力墙试件,其中试件PT-1为普通配筋剪力墙,试件JW-1为交叉斜向配筋实体剪力墙,试件JW-2为交叉斜向配筋空心剪力墙。其中墙体混凝土强度等级为C30,地梁与加载梁的混凝土强度等级为C40。墙体截面尺寸为1300×120,墙高1800mm。试件PT-1按现行规范进行配筋,墙体两侧的暗柱为4Φ12,配筋率为1.9%,箍筋为Φ6,间距为100mm,墙体纵向和横向钢筋为Φ8,间距均为150mm,试件几何尺寸及配筋见图1(a);试件JW-1墙体两侧暗柱配筋与试件PT-1相同,中间墙体采用交叉斜向配筋为Φ8,其中交叉斜向配筋形成的钢筋笼箍筋为Φ6,间距为150mm。试件JW2,JW1配筋完全相同,试件几何尺寸及配筋见图1(b),黑色表示JW-2所开洞口,表1为实测钢筋力学性能,表2为实测混凝土28d立方体抗压强度平均值。

表1 实测钢筋力学性能

规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
Φ6	—	610
Φ8	549	615
Φ12	536	598

表2 实测混凝土28d立方体抗压强度

试件编号	PT-1	JW-1	JW-2
强度/MPa	33.1	30.9	31.3

1.2 加荷方式及测试内容

试验加载装置如图2所示,由竖向加载装置和水平加载装置组成。轴向压力通过墙顶液压千斤顶施加,千斤顶上部设置力传感器以控制轴力的大小,在分配梁下部设置钢板并在钢板与分配梁之间放置5个滚轴,将集中力转换成均布荷载,并控制轴压比为0.2。水平荷载由MTS作动器通过加载梁施加,

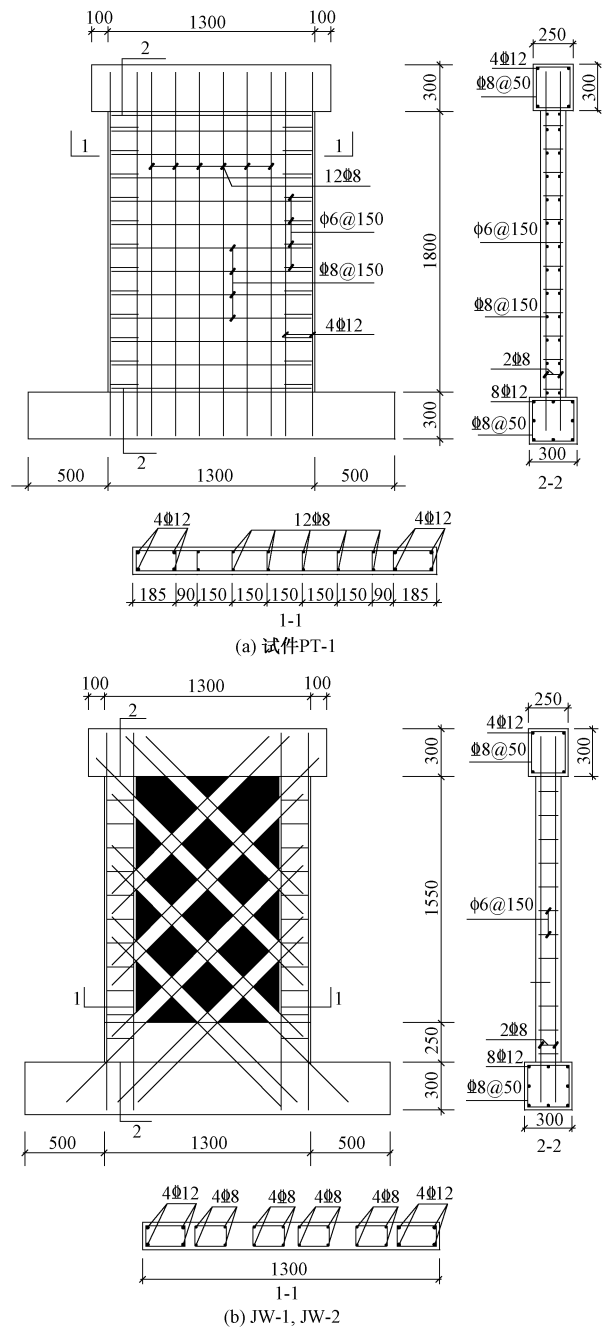


图1 试件几何尺寸及配筋

作动器最大荷载为600kN,试件通过竖向锚杆固定在地槽中并在试件两侧架设龙门架以防止试件出现侧向失稳。

水平加载依据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101—2015)^[9],选用荷载位移混合控制,屈服前采用荷载控制,每级加载一次,屈服后采用位移加载,每级反复加载三次。加载制度如图3所示,试验前先施加竖向荷载,保持构件稳定后施加水平荷载;试验以水平力下降到最大承载力85%以下或试件出现明显的破坏失稳为极限状态。

试验加载过程中通过MTS作动器采集水平荷

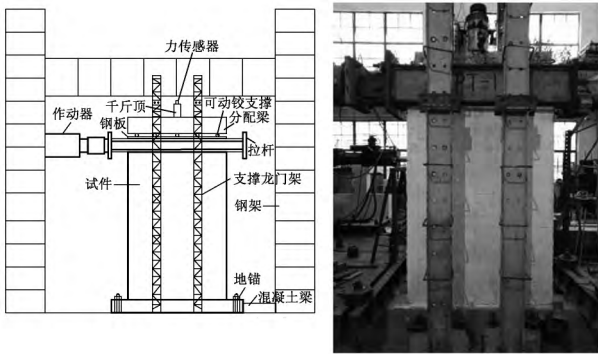


图 2 加载装置图及实景

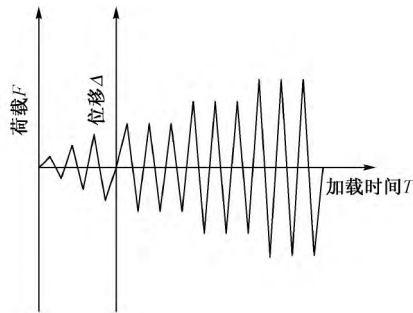


图 3 加载制度

载,由墙体顶部的力传感器控制轴力的大小,由设置在墙体各部分的位移计来量测位移,由 TDS530 静态电阻应变采集仪来采集钢筋应变,用裂缝观测仪观测裂缝宽度,人工观测裂缝开展程度并绘制其走向,测点布置见图 4。

2 试验结果及分析

2.1 试验过程及最终破坏形态

(1) 普通剪力墙 PT-1: 当水平力为推 130kN 时,约束边缘暗柱靠近地梁处约 110mm 及 600mm 高度处出现宽度约 0.1mm 的两条水平裂缝并沿 45° 方向延伸到墙身底部;随着荷载的不断增大,原有的裂缝宽度不断增加并且进一步沿墙身向墙底延伸,墙体出现多条水平裂缝,这些裂缝从暗柱延伸到墙体中部并开始沿 45° 方向倾斜;当水平力增加到推 225kN 时,约束边缘暗柱最外侧钢筋屈服,从此时起以 1 倍的屈服位移 ($1\Delta_y$) 为级数进行位移控制。此后,随着加载的进行,裂缝不断发展,约束边缘暗柱发生微小转动,暗柱柱角有些微压碎的现象,两边暗柱对墙体整体性的贡献逐渐降低;当水平力为推 386kN 和拉 345kN 时试件达到峰值荷载,暗柱发生明显的转动,墙身布满平行交叉的斜裂缝,随着顶点控制位移的增大,墙底水平裂缝继续增大,两侧暗柱底部保护层开始脱落,压溃区逐渐增大,约束边缘暗柱外侧钢筋向外突起,压溃区箍筋外露,墙身斜裂缝开始延伸至受压区且在推力方向形成两条主要的延伸到受压

区的斜裂缝及两条主要的延伸到地梁的斜裂缝。在拉力方向形成两条主要的延伸到受压区的斜裂缝;当水平推力下降到 335kN 时,试件达到极限位移,最终墙板底部混凝土在剪力和弯曲压力复合作用下压碎,试件底部出现滑移且混凝土压溃区距边缘约 350mm,破坏形态见图 5(a)。

(2) 交叉斜向配筋实体剪力墙 JW-1: 当水平力为推 135kN 和拉 151kN 时,暗柱底部约 50,150,280,550mm 高度处分别出现长度不等的水平裂缝,部分水平裂缝延伸至墙板处开始向下 45° 方向倾斜;随着荷载的增加,暗柱边缘出现许多平行的水平裂缝,墙板中已经出现的水平裂缝继续发展,至墙体中部开始向下 45° 方向倾斜,这些斜裂缝都逐渐向斜向支撑钢筋边缘靠近;当水平力为推 240kN 或拉 250kN 时,约束边缘暗柱最外侧钢筋屈服,此时试件形成宽度约为 0.26mm 的几条明显的裂缝,从此时

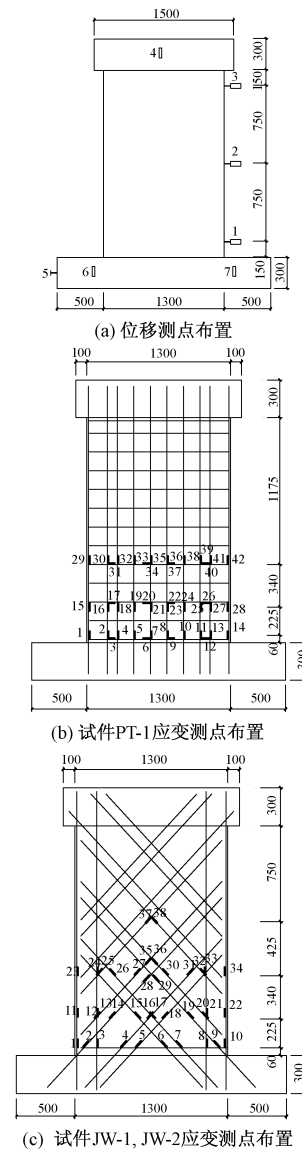


图 4 测点布置



图 5 试验破坏现象

起,以1倍的屈服位移($1\Delta_y$)为级数进行位移控制。当水平力为推415kN或拉395kN时,试件达到峰值荷载,在推力一侧水平裂缝从下至上布满暗柱,在拉力一侧水平裂缝分布到暗柱高度的2/3处,且在推力方向形成两条主要的延伸至受压区的斜裂缝,在拉力方向形成一条明显贯穿墙体的斜裂缝;当水平推力下降到347kN时,试件达到极限位移,最终墙板底部混凝土在剪力和弯曲压力复合作用下压碎,混凝土压溃区距边缘约为300mm,破坏形态见图5(b)。

(3)交叉斜向配筋空心剪力墙JW-2:当水平力为推126kN或拉132kN时,先在腹板中上部靠近洞口处形成几道斜向平行的离散裂缝,由于试件JW-2墙体底部250mm高度范围内并没有开设洞口,因此当水平力为拉160kN时,墙体底部250mm高度处出现一条长约500mm的水平裂缝;随着加载的循环,暗柱自下而上陆续出现水平裂缝,墙板中部出现更多细密裂缝,但这些裂缝并不连续;当水平力为推221kN时,暗柱柱底最外侧纵筋屈服,墙板裂缝出现得更加细密,从此时起加载方式改为位移控制,加载级数为 $1\Delta_y$;当位移控制达到 $-3\Delta_y$ 时,受压区开始出现竖向微裂缝;当水平力为推368kN或拉352kN时,试件达到峰值荷载,此时裂缝布满墙身;当水平拉力下降到349kN时,水平裂缝已遍布边柱,裂缝宽度不断增大,墙身布满密密麻麻的斜裂缝,底部斜裂缝延伸至受压区;当水平推力下降到303kN时,试件达到极限位移,裂缝最终墙板底部混凝土在剪力和弯曲压力复合作用下压碎,此时墙板布满断断续续的斜向裂缝,混凝土压溃区距边缘约为280mm,破坏形态见图5(c)。

从破坏形态来看,3个试件均为压弯破坏,但由于配筋方式及开洞情况的差异,试件各阶段的破坏形态具有以下特点:

(1)从钢筋与裂缝的捕捉情况来看,试件PT-1的裂缝在开裂过程中不断转移,最终出现多条沿 45° 方向的斜裂缝,这说明主应力的方向在与裂缝垂直的方向上,但是在 45° 方向上并未配置相应的钢筋,说明钢筋在受力的过程中并不是直接承受主应力,而混凝土是直接承受主应力的,这使得钢筋与混凝土工作的协同性下降;试件JW-1的裂缝几乎都被与之垂直的钢筋捕捉到,且在底部2/3范围内钢筋笼与钢筋笼交叉区域裂缝较多,在上部交叉钢筋形成的空白处裂缝较少,这说明应力的传递较为明确,传递过程中钢筋与混凝土协同工作性能较好;试件JW-2由于开设洞口,裂缝大多出现在洞口四周,

且分布较均匀,说明在加载过程中受力较好,没有出现明显的应力集中、局部屈曲的情况。

(2)从裂缝开展情况看,试件PT-1最大裂缝宽度为2mm左右,而试件JW-1破坏时最大裂缝宽度为4mm左右,且试件JW-1各主要裂缝宽度均比试件PT-1宽,说明在加载过程中,试件JW-1裂缝开展较为充分,斜向钢筋大多数能达到屈服,利用更加充分。

(3)从底部剪切滑移情况来看,破坏时试件PT-1在底部约150mm高度处形成一条明显的几乎贯通的水平裂缝,且角部混凝土脱落比较严重,这是底部剪切滑移作用的结果,而试件JW-1、JW-2在底部并没有出现明显的水平裂缝,这说明斜向钢筋能够减小试件底部剪切滑移。

2.2 滞回特性及骨架曲线

滞回曲线反映了结构或构件在反复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量耗散等抗震性能指标。试验测得试件的滞回曲线如图6(a)~(c)所示,推向为负,拉向为正。从滞回曲线可以看出:试件JW-1和试件JW-2的滞回曲线相对比较饱满,且中部捏拢程度较轻。捏拢效应与加载和卸载过程中钢筋与混凝土协同工作的性能有关,在卸载条件相同时,钢筋与混凝土之间的变形(残余变形)越大,协同性越弱,捏拢效应越明显,耗能能力越差。这说明交叉斜向配筋与混凝土工作协同性强,能够提高墙体的耗能能力。

骨架曲线为荷载变形曲线的各加载级的第一循环的峰值点所连的包络线,反映了构件受力与变形的各个不同阶段及特性(强度、刚度、延性、耗能及抗倒塌能力等)。从骨架曲线图6(d)可知,在达到峰值荷载后,与试件PT-1相比,试件JW-1、JW-2的承载力下降较为平缓,且有一定的屈服平台,说明试件JW-1、JW-2后期弹塑性变形能力较强。

2.3 承载力实测结果

试件在不同受力阶段的荷载值见表3,其中 F_{cr} 为第一次肉眼观测开裂荷载, F_y 为暗柱最外侧钢筋屈服时荷载, F_p 为加载过程中的峰值荷载, F_u 为破坏荷载。

试件JW-1的开裂荷载要高于试件PT-1,试件JW-2的开裂荷载与试件PT-1开裂荷载基本一致;试件JW-2最大承载力(推拉平均值)比试件PT-1提高1.12%,试件JW-1最大承载力(推拉平均值)比试件PT-1提高13.76%;从各个试件受力特征点来看,在混凝土和钢筋用量基本相同的情况下,与试件PT-1相比,试件JW-1具有较高的承载力,这说明

试件不同受力阶段的结果

表 3

试件编号	加载方向	开裂点		屈服点		峰值点		破坏点		延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$
		F_{cr} / kN	Δ_{cr} / mm	F_y / kN	Δ_y / mm	F_p / kN	Δ_p / mm	F_u / kN	Δ_u / mm	
PT-1	推	130	1.69	225	6.64	386	21.57	335	27.34	4.07
	拉	119	1.52	223	6.42	345	22.96	285	25.75	
	平均值	125	1.61	224	6.53	356	22.27	310	26.55	
JW-1	推	135	1.72	240	4.23	415	23.82	347	30.53	6.32
	拉	151	1.68	250	5.54	395	24.18	378	31.19	
	平均值	143	1.70	245	4.88	405	24.00	363	30.86	
JW-2	推	126	1.46	221	5.31	368	28.81	303	35.18	6.05
	拉	132	1.74	213	5.96	352	26.83	349	33.01	
	平均值	129	1.60	217	5.64	360	27.82	326	34.10	

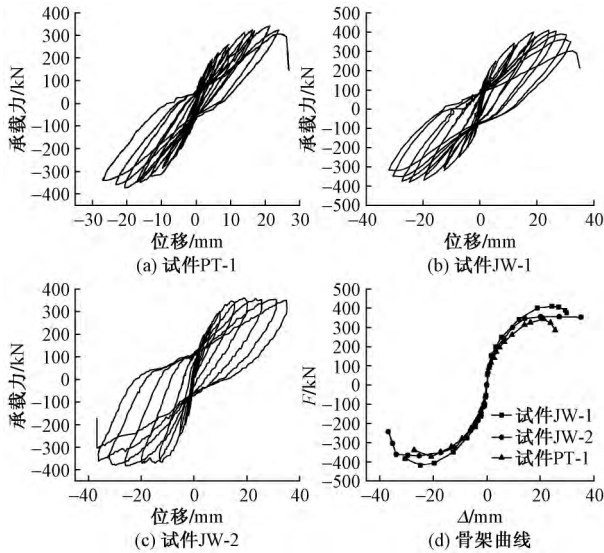


图 6 各试件顶点水平荷载-位移曲线及骨架曲线

交叉斜向配筋在一定程度上能够优化传力路径、提高承载力。从屈服比来看,与试件 PT-1 相比,试件 JW-2 和试件 JW-1 的屈服比要小,说明这种交叉斜向配筋墙体在屈服后,有较长的“屈服台阶”,即从试件屈服到最终破坏过程中塑性发展较为充分,这符合抗震设计要求中“大震不倒”的理念。

2.4 刚度实测值

试件各阶段的刚度为水平力与位移的比值,往复加载取推拉向的平均值,刚度衰减曲线见图 7。

试件 JW-1 的初始刚度略高于试件 PT-1,由于试件 JW-2 开洞率为 24.94%,其刚度低于试件 JW-1,与试件 PT-1 相差不多,说明交叉斜向配筋能在一定程度上提高试件的刚度,开设洞口对交叉斜向配筋墙体刚度的影响有限;试件 JW-1 的屈服刚度要明显大于试件 PT-1,说明交叉斜向配筋能约束裂缝的开展,提高刚度,有效减缓刚度衰减。在试验加载后期,相比于试件 PT-1,试件 JW-1 的刚度和性能更加稳定,在实际工程中能够有效减小地震作用的影响;试件 JW-2 的屈服刚度小于试件 JW-1,但大于试件 PT-1,说明开洞后其性能有所下降但仍高于

试件 PT-1,屈服后,试件 JW-2 的刚度衰减曲线始终位于试件 PT-1 之上,且衰减较为平缓,这对于后期结构的稳定是有利的。

2.5 延性

加载过程记录了墙体各阶段推拉方向的荷载、位移等数据,见表 3。位移延性系数 μ 为破坏位移与屈服位移之比,在一定程度上反映了结构的弹塑性变形能力,延性系数越大,说明结构后期变形能力越强,在地震作用下能吸收较多的地震能。从表中可以看出普通剪力墙延性系数为 4.07,交叉斜向配筋实体剪力墙与交叉斜向配筋空心剪力墙位移延性系数均大于 6,具有良好的延性,说明墙体屈服后交叉斜向配筋能够更有效地参与受力,提高延性性能。

2.6 钢筋应变

剪力墙中钢筋应变发展速度及其变化规律直接反映墙体的受力状态,图 8 列出部分钢筋应变滞回曲线。试验表明:在剪力墙中同一水平位置处,试件 JW-1、JW-2 交叉斜向钢筋的应变发展速度要快于试件 PT-1 竖向钢筋及水平钢筋的应变发展速度,这说明在受力过程中斜向钢筋的利用较为充分;墙体底部交叉钢筋提前进入屈服阶段,能充分利用其弹塑性变形消耗能量,有效控制斜裂缝的开展与分布,提高墙的整体耗能能力。在达到最大承载力时交叉配筋底部斜向钢筋大部分都已屈服,这为提出交叉斜向配筋实体剪力墙和空心剪力墙的受弯承载力计算公式提供了依据。

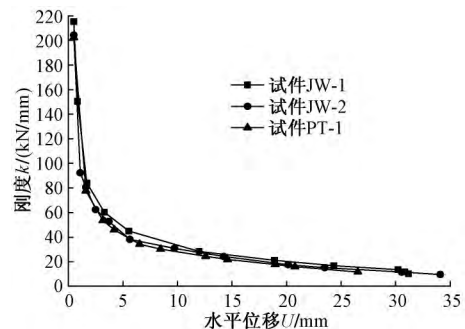


图 7 刚度衰减曲线

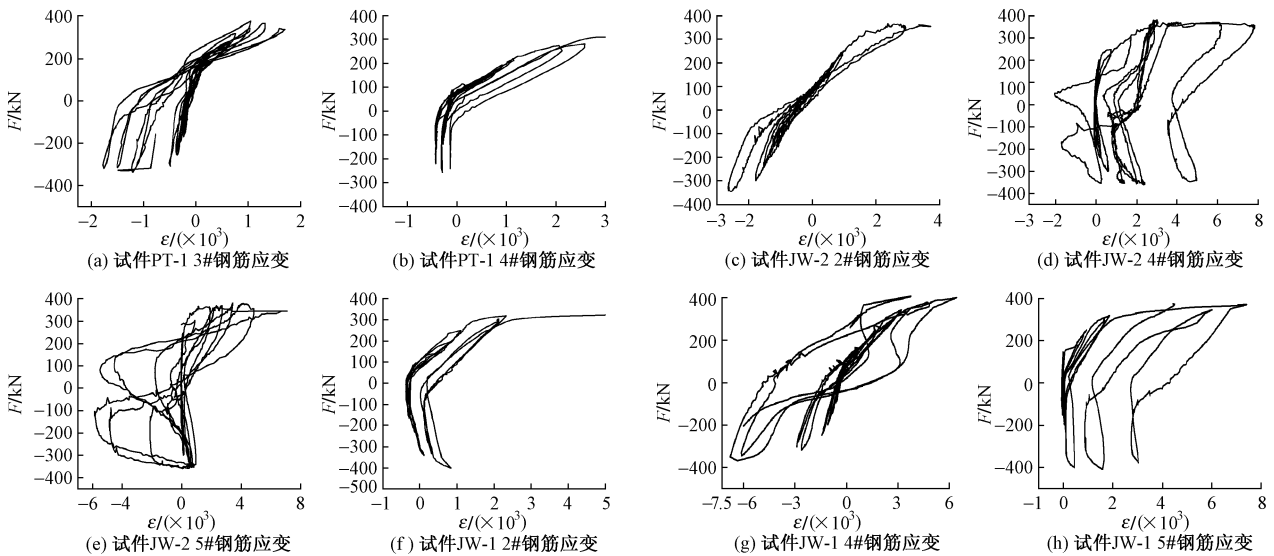


图8 钢筋应变滞回曲线

2.7 耗能能力试验结果

实测3个试件的耗能情况见表4。试件JW-1和试件JW-2的耗能都比试件PT-1高出许多,说明交叉斜向配筋能够有效提高墙体的耗能能力;试件JW-2与试件JW-1相比,耗能能力下降不多,说明所开洞口对耗能影响不大,因开洞去除的混凝土对结构耗能效用影响不大。

表4 各剪力墙的钢筋用量及耗能

试件编号	钢筋用量/kg	耗能 E_p / (N·mm)	钢筋增加/%	耗能增加/%
PT-1	40.7	27 276.8	0	0
JW-1	41.0	57 696.1	0.78	111.5
JW-2	41.0	56 034.5	0.78	105.4

3 承载能力计算分析

由试验结果可知3个试件均为弯曲型破坏,墙体底部的弯矩起控制作用,因此可以按弯曲模式对承载力进行计算,试件PT-1的承载力按《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[10]的规定进行计算;试件JW-1、JW-2的力学模型见图9,水平承载力由两侧暗柱、墙身交叉斜支撑、混凝土3部分构成,假定水平截面混凝土的应变按线性变化,在墙体达到最大承载力时,由应变分析可知,底部斜支撑大部分都已屈服。由力学模型图9得:

$$N = f_y A_s + \kappa f_{y1} A_{s1} \sin \alpha + \kappa f_{y2} A_{s2} \sin \alpha + \kappa \lambda f_{y1} A_{s1} \sin \alpha + f_c b_w x - f_y A_s' - \kappa f_{y2} A_{s2}' \sin \alpha \quad (1)$$

$$M = N \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s \left(h_{w0} - \frac{x}{2} \right) + \kappa f_{y1} A_{s1} h_1 \sin \alpha + \kappa f_{y2} A_{s2} h_2 \sin \alpha + \kappa \lambda f_{y1} A_{s1} h_3 \sin \alpha - f_y A_s' \left(\frac{x}{2} - a_s' \right) - \kappa f_{y2} A_{s2}' h_4 \sin \alpha \quad (2)$$

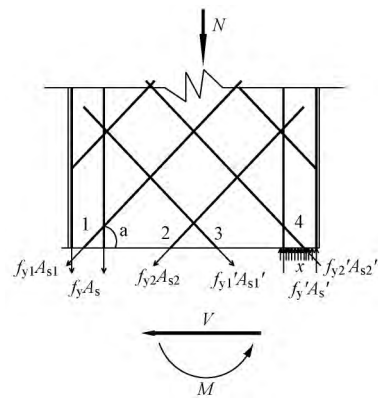


图9 试件JW-1、JW-2力学模型

$$F = M/H \quad (3)$$

式中: f_{y1} f_{y2} f_{y1}' f_{y2}' A_{s1} A_{s2} A_{s1}' A_{s2}' 分别为图9中编号为1、2、3、4斜支撑钢筋屈服强度与截面面积; f_y A_s f_y' A_s' 分别为两边暗柱受拉钢筋与受压钢筋的屈服强度与截面面积; f_c 为混凝土的抗压强度; b_w 为试件的宽度; x 为受压区高度; κ 为混凝土对墙体斜支撑约束程度的调整系数(对于试件JW-1 κ 取1.0,对于试件JW-2由于开设洞口的缘故,墙体对斜支撑的约束降低, κ 建议取0.75); h_{w0} 为剪力墙截面有效高度 $h_{w0} = h - a_s'$,其中 h 为剪力墙截面高度, a_s' 为受压钢筋合力点到墙边的距离; λ 为3号斜支撑钢筋屈服系数,由于达到最大承载力时3号斜支撑钢筋并未完全屈服, λ 取0.5; α 为斜支撑与水平线的夹角; h_1 h_2 h_3 h_4 分别为1、2、3、4号斜支撑在水平向的投影的中线到受压区中线的距离; M 为墙体承受的弯矩; H 为墙体水平力作用点至加载地梁顶部的距离; F 为墙体所能承受的水平承载力。

根据式(1)~(3),按钢筋与混凝土的实测强度计算的各墙体承载力值与试验实测值如表5所示。

水平承载力 F 计算值与实测值比较 表 5

项目	PT-1	JW-1	JW-2
试验值/kN	356	405	360
计算值/kN	348	394	369
误差/%	-2.2	-2.7	2.5

4 结论

(1) 交叉斜向配筋改变了墙体在荷载作用下的传力路径,使得构件在不同阶段表现出不同的裂缝开展情况,但3种墙体的破坏形式一样,均为受拉钢筋先屈服,随后混凝土被压碎而破坏。

(2) 交叉斜向配筋剪力墙的耗能性能较普通配筋剪力墙均有大幅度提高,其中实体剪力墙提高111.5%,空心剪力墙提高105.4%。

(3) 与交叉斜向配筋实体剪力墙相比,交叉斜向配筋开洞剪力墙的承载力和刚度有所下降,但与普通配筋剪力墙相比承载力仍略有提高,且加载过程中刚度衰减速度慢于普通配筋剪力墙,后期刚度衰减较为平稳。

(4) 从延性、滞回性能、耗能等性能来看,交叉斜向配筋空心剪力墙略低于交叉斜向配筋实体剪力墙,但下降幅度不明显,说明因开洞口去除的混凝土对构件性能影响不大,此开洞方法有效可行。

(5) 在用钢量基本相同的情况下,交叉斜向配筋空心剪力墙(开洞率24.94%)与普通配筋剪力墙相比,能减轻自重,保证墙体的承载能力和刚度,且耗能能力明显提高,能够满足抗震设计要求。

(6) 提出了交叉斜向配筋实体剪力墙与空心剪力墙的抗弯承载力建议公式,与试验结果吻合较好。

参 考 文 献

- [1] 曹万林,庞国新,董宏英,等.带暗支撑剪力墙中暗支撑形式及其合理设计研究[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):73-79.
- [2] SALONIKIOST N. Shear strength and deformation patterns of R/C walls with aspect ratio 1.0 and 1.5 designed to Eurocode 8 (EC8) [J]. Engineering Structures 2002(24):39-49.
- [3] 孙建超,徐培福,肖从真,等.不同配筋形式混凝土剪力墙受剪性能试验研究[J].建筑结构,2008,38(6):6-10.
- [4] 张鹤志.钢筋混凝土复杂应力构件的配筋优化研究[D].长沙:湖南大学,2014:42-48.
- [5] 王激扬,楼文娟,田中仁史.开洞形式对混凝土剪力墙抗震性能的影响[J].建筑结构学报,2009,30(S2):41-46.
- [6] 张胜军.剪力墙受力性能研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [7] 许淑芳,冯瑞玉,张兴虎,等.空心钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2002,34(2):133-136.
- [8] 熊红星.交叉斜向配筋空心剪力墙力学性能研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [9] 建筑抗震试验方法规程:JGJ/T 101-2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [10] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [11] 胡超,易伟建.锈蚀钢筋混凝土梁低周疲劳试验研究[D].长沙:湖南大学,2010.
- [12] 李士彬,朱慈勉,汤红卫.由刚度衰减规律预测混凝土梁疲劳寿命的试验研究[J].建筑结构,2006,36(2):51-54.
- [13] 李进洲.两种不同环境下预应力混凝土梁疲劳破坏试验对比分析[J].铁道标准设计,2015,59(9):76-82.
- [14] 朱红兵,赵耀,李秀,等.疲劳荷载作用下钢筋混凝土梁的刚度退化规律及计算公式[J].土木建筑与环境工程,2014,36(2):1-6.
- [15] 孙彬,牛荻涛,王庆霖.锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度分析与计算[J].建筑结构,2004,34(10):42-45.
- [16] 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.
- [17] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].2版.北京:科学出版社,2014.
- [18] 吴瑾,王晨霞,徐贾,等.疲劳荷载下锈蚀钢筋混凝土梁弯曲性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(10):118-124.

(上接第16页)

- [2] 孙晓东,易伟建.主筋锈蚀钢筋混凝土梁疲劳试验研究[D].长沙:湖南大学,2006.
- [3] AHN W, REDDY D V. Galvanostatic testing for the durability of marine concrete under fatigue loading [J]. Cement and Concrete Research 2001,31(1):343-349.
- [4] OYADO M, HASEGAWA M, SATO T. Characteristics of fatigue and evaluation of RC beam damaged by accelerated corrosion [J]. Quarterly Report of RTRI, 2003,44(2):72-77.
- [5] MASOUD S, SOUDKI K, TOPPER T. Post repair fatigue performance of FRP-repaired corroded RC beams: experimental and analytical investigation [J]. Journal of Composites for Construction 2005,9(5):441-449.
- [6] CHANG STINE, CLYDE E KESLER. Fatigue behavior of reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 1958,55(8):245-254.