

新型模块化自保温混凝土剪力墙 抗震性能试验研究

龚祖平¹ 董年才¹ 芮明倬² 江晓峰² 刘明国² 龚徐华¹ 沈健超¹

(1. 南通联沅装配式建筑科技有限公司, 南通 226000; 2. 华东建筑设计研究总院, 上海 200002)

【摘要】为研究新型模块化装配式自保温混凝土剪力墙在不同轴压比作用下的抗震性能,设计并制作了4组共12个混凝土剪力墙试件,所有试件均为配筋相同的一字型剪力墙,两端设置暗柱,包括1组实心现浇对比剪力墙试件,1组预制空心后填充剪力墙试件和2组新型自保温预制混凝土剪力墙试件,对其进行低周反复加载试验。采用ABAQUS有限元软件建立自保温混凝土剪力墙精细化有限元分析模型。试验结果表明,在3种设计轴压比下,自保温预制剪力墙的平均屈服荷载和平均峰值荷载均与预制实心剪力墙近乎相等;自保温预制剪力墙的延性系数和累积耗能均低于预制实心剪力墙;自保温预制剪力墙的刚度退化规律与预制实心剪力墙相近。在三种设计轴压比下,当顶点水平位移在 $\pm 20\text{mm}$ 以内时,在相同顶点水平位移下自保温预制剪力墙和预制实心剪力墙的耗能系数接近;当顶点水平位移大于 $\pm 20\text{mm}$ 时,在相同顶点水平位移下自保温预制剪力墙的耗能系数略大于预制实心剪力墙。自保温预制剪力墙试件峰值荷载的数值模拟结果与试验结果的误差在5%以内,满足工程精度要求。

【关键词】自保温剪力墙;装配式;抗震性能;有限元分析

【中图分类号】TU17 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2019)03-0104-13

【DOI】10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2019.03.17

引言

随着环境压力和人工成本的不断增大,预制装配式混凝土剪力墙结构迎来了重要发展机遇。装配式剪力墙结构通常包括预制剪力墙结构、叠合剪力墙结构和预制夹心保温剪力墙结构三种形式^[1]。

目前,国内外针对预制实心剪力墙抗震性能的研究已经积累了一定的研究成果。姜洪斌等^[2]开展了3层足尺预制钢筋混凝土剪力墙结构弹性阶段拟静力试验研究,发现水平荷载作用后结构刚度退化明显。钱稼茹等^[3]开展了不同竖向钢筋连接形式的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究。试验结果表明:预制剪力墙试件的破坏模式与现浇剪力墙试件基本相同,但预制剪力墙试件的耗能能力低于现浇剪力墙构件。朱张峰等^[4-5]开展了新型

混合装配式混凝土剪力墙抗震性能的试验研究与数值模拟,考察了预应力筋面积、预应力筋张拉应力、浆锚钢筋无黏结长度和轴压比对剪力墙受力的影响。赵斌^[6]等开展了全装配水平接缝的预制混凝土剪力墙抗震性能研究,试验结果表明:套筒布置与搭接钢筋直径对剪力墙承载力具有重要影响。

预制夹心保温剪力墙兼顾结构性能和保温性能,具有良好的应用前景。蒋金梁^[7]开展了混凝土夹芯复合剪力墙热工和力学性能的有限元分析,计算结果表明:两侧混凝土厚度和斜向钢筋屈服强度对剪力墙的力学性能具有显著影响。薛伟辰等^[8]开展了预制混凝土夹心保温剪力墙的试验研究,结果表明:剪力墙的破坏模式为受弯破坏;保温层的位置和墙体厚度对剪力墙的抗震性能具有重要影

【基金项目】江苏省墙体材料革新科研项目“装配式自保温墙板结构体系房屋受力性能研究”(项目编号:201610)

【作者简介】龚祖平(1959-),男,高级工程师,董事长,主要从事混凝土装配式结构的抗震研究和建筑工业化自动化研究;董年才(1958-),男,研究员级高级工程师,副总裁,主要从事混凝土装配式结构的抗震研究;沈健超(1985-),男,工程师,结构设计师,主要从事混凝土装配式结构的抗震研究。

响。钱稼茹等^[9]开展了喷涂混凝土夹心剪力墙抗震性能试验研究的试验研究和有限元模拟,发现夹心剪力墙的破坏模式为压弯破坏和剪切破坏。钱稼茹等^[10]开展了套筒灌浆连接装配式剪力墙结构的拟动力试验研究,结果表明:预制夹心剪力墙的外叶墙不参与结构受力,结构设计时可不考虑外叶墙的作用。朱元吉等^[11]开展了不同连接形式 PC 挂板-剪力墙抗震性能研究,发现荷载作用下外叶墙会出现较多裂缝。Ma 等^[11-12]开展了新型环保石膏-混凝土复合墙板的抗震性能试验研究,结果表明:新型墙板的延性会优于传统混凝土墙板,但在潮湿环境下石膏会引入硫酸根离子从而降低耐久性。上述研究中内外叶墙体通过连接件连接,其长期安全性能和耐久性还有待工程实践的进一步检验;且外叶墙不能参与结构受力,仅作为保温材料的保护层。

鉴于此,南通联泷装配式建筑科技有限公司^[13-14]连同华东建筑设计研究总院、同济大学组成产学研联合课题组,基于前期高大内隔墙体的设计与施工经验,得到新的启发,认为该研究思路完全可以用于承重结构,用于预制装配式模块化自保温剪力墙结构。因此发明了一种新型自保温预制混凝土剪力墙结构体系^[9]。该体系采用内填保温芯材聚氨酯提升自保温剪力墙的节能保温性能;通过对保温芯孔与内外叶壁厚的分析与实验,得出当间距:跨厚比 $\leq 3:1$,内外叶连接桥间距 $\geq 250\text{mm}$ 和连接桥壁厚度是最小间距比的 $1/8$ (为了达到环保保温要求的热工性能要求,其间距比最大 $\geq 1/6$,才能满足传热系数),满足协同受力的要求,又能满足传热节能要求;通过适当提高混凝土强度提升剪力墙的承载力;通过适当布置连接钢筋提升剪力墙的整体性;通过倒插法灌浆套筒实现上下剪力墙之间方便可靠的连接。自保温剪力墙标准产品见图 1 所示。

课题小组通过低周反复加载试验和数值模拟研究了新型自保温预制混凝土剪力墙在不同轴压比作用下的抗震性能,为该新型剪力墙体系的推广应用提供科学依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计制作 4 组共 12 个剪力墙试件,每组 1 个预制实心剪力墙对比试件,1 个预制空心后填实剪力墙试件和 2 个完全相同的自保温预制剪力墙试件。

考虑到实际工程中的不同工况,4 组试件的设计轴压比分别取 0.30、0.45 和 0.60;自保温预制剪力墙试件和预制空心后填实剪力墙试件的轴压力按照预制实心剪力墙对比试件设计轴压比为 0.30、0.45 和 0.60 选取,对应的竖向荷载分别为 750 kN、1120 kN 和 1500 kN。所有试件的具体信息如表 1 所示。

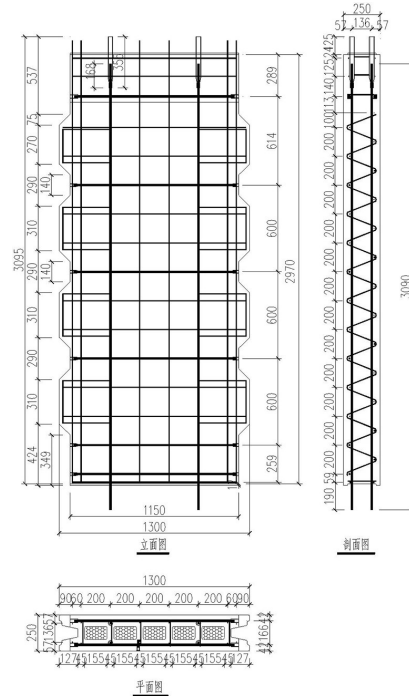


图 1 自保温预制剪力墙标准件产品图(单位:mm)

表 1 试件信息表

试件编号	设计轴压比	剪力墙类型
PSW-30	0.30	预制实心剪力墙
PSW-30-H	0.30	预制空心后填实剪力墙
PPW-30-1	0.30	自保温预制剪力墙
PPW-30-2	0.30	自保温预制剪力墙
PSW-45	0.45	预制实心剪力墙
PSW-45-H	0.45	预制空心后填实剪力墙
PPW-45-1	0.45	自保温预制剪力墙
PPW-45-2	0.45	自保温预制剪力墙
PSW-60	0.60	预制实心剪力墙
PSW-60-H	0.60	预制空心后填实剪力墙
PPW-60-1	0.60	自保温预制剪力墙
PPW-60-2	0.60	自保温预制剪力墙

注:试件命名规则为:第一个字母 P 代表预制 (precast), 第二个字母 S 代表实心 (solid)、P 代表自保温剪力墙中的聚氨酯 (polyurethane) 保温材料, 第三个字母 W 代表剪力墙 (wall), 编号中的 30/45/60 代表不同的轴压比, -H 代表预制空心 (hollow), 编号中的 1/2 代表两个相同自保温预制混凝土剪力墙试件的顺序号。

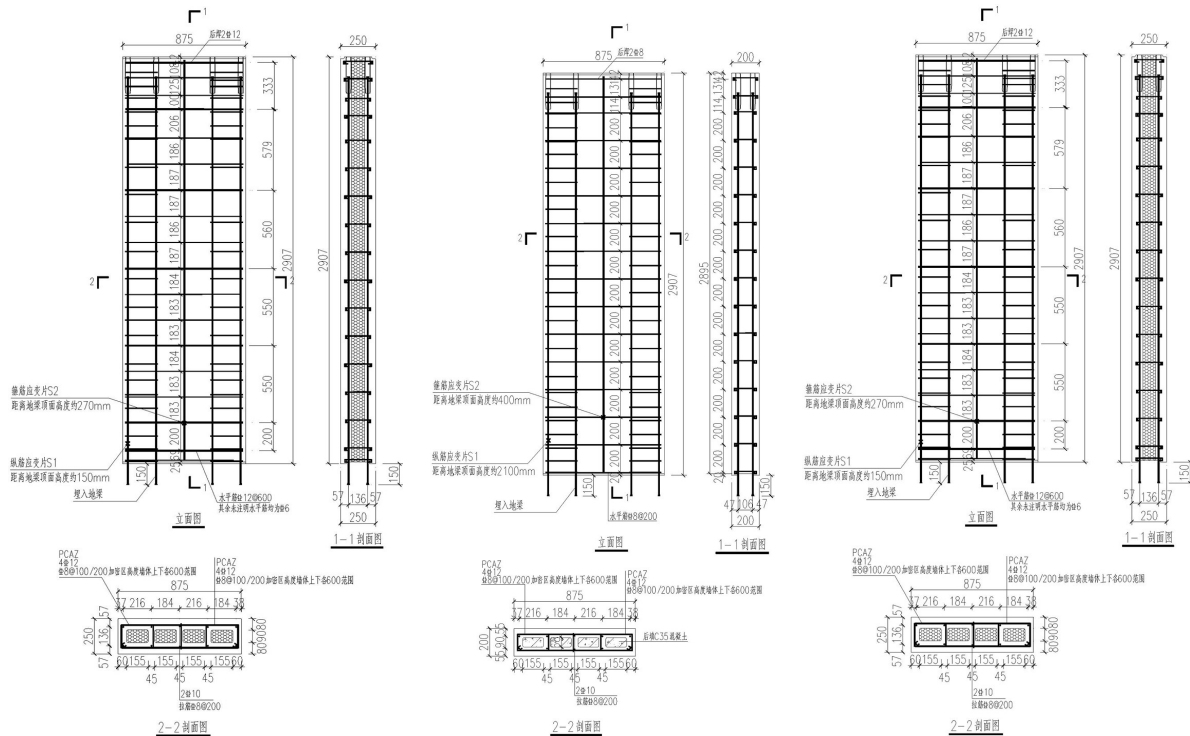
预制实心剪力墙对比试件和预制空心后填充剪力墙试件的高度为 2 907 mm,截面尺寸为 200 mm×875 mm,混凝土设计强度等级为 C35。自保温预制剪力墙试件高度为 2 907 mm,截面尺寸为 250 mm×875 mm;混凝土设计强度等级为 C50。剪力墙几何尺寸及配筋如图 2 所示。

1.2 材料性能

由于预留的部分混凝土立方体试块存在缺陷,所有试件均按照《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T 384-2016^[15],通过取芯确定混凝土实际抗

压强度。每个试件在试验后选取未受损区域制备 3~4 个直径和高度均为 75 mm 的混凝土芯样。所有试件的混凝土芯样平均抗压强度详见表 2 所示。

按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》GB/T 228.1-2010^[16],开展钢筋拉伸试验,确定试件中钢筋的强度。试件中所用钢筋等级均为 HRB400,直径共有 6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、14 mm 五种规格,同一种规格钢筋均为同一批次,每一种规格钢筋预留 3 根抗拉强度试验用试样。钢筋强度的测试结果见表 3。



(a) 现浇实心剪力墙试件

(b) 预制空心后填充剪力墙试件

(c) 自保温预制剪力墙试件

图 2 试件几何尺寸及配筋图(单位:mm)

表 2 混凝土芯样平均抗压强度

试件编号	芯样抗压强度/MPa	
PSW-30	42.5	
PSW-30-H	36.4(外层)	47.9(中部)
PPW-30-1	49.6	
PPW-30-2	48.8	
PSW-40	41.7	
PSW-40-H	39.5(外层)	50.7(中部)
PPW-45-1	50.4	
PPW-45-2	47.4	
PPW-60	40.6	
PSW-60-H	37.6(外层)	55.1(中部)

(续)

试件编号	芯样抗压强度/MPa
PPW-60-1	43.1
PPW-60-2	42.2

表 3 钢筋平均抗拉强度

强度等级	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	6	--	612.5
HRB400	8	--	646.1
HRB400	10	--	633.7
HRB400	12	453.0	616.3
HRB400	14	425.8	641.5

注:6 mm、8 mm 和 10 mm 钢筋经过冷处理,未测得屈服强度。

1.3 加载方案

试验加载装置如图 3 所示。竖向荷载由量程为 2 000 kN 的千斤顶提供。在千斤顶和试件之间设置加载钢梁,使试件竖向受力均匀。为使试验过程中千斤顶与试件顶部的位移保持同步,在反力钢梁下设置滑动支座。水平荷载由量程为 500 kN 的 MTS 电液伺服系统提供,水平作动器前端与钢拉杆连接以实现反复推拉。为防止底座发生水平方向滑移,用地锚螺栓与实验室地槽进行固定。加载时,首先对试件施加恒定竖向荷载,过 15min 后逐级施加低周反复水平荷载。

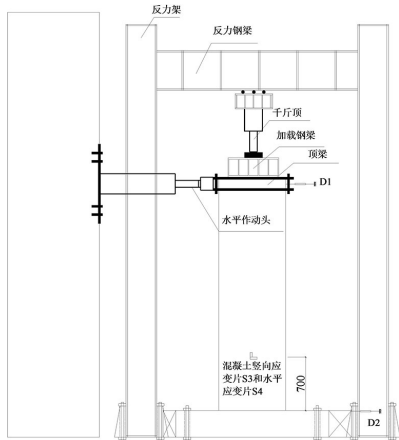


图 3 试验加载和量测装置图

竖向荷载采用荷载控制模式一次加载完成,并在试验过程中保持不变。水平荷载按照现行行业标准《建筑抗震试验规程》JGJ/T 101-2015^[17]采用荷载和位移联合控制模式加载。低周反复试验加载制度如图 4 所示。试件开裂前采用荷载控制并分级加载,每级荷载增量为 20 kN;试件屈服后采用位移控制(定义作动器推为正向、拉为负向),位移 Δ_y 取屈服时试件的最大位移值,并以该位移值的倍数为级差进行控制加载。每级位移循环 3 次,直至荷载降低到峰值荷载的 85% 以下停止加载。

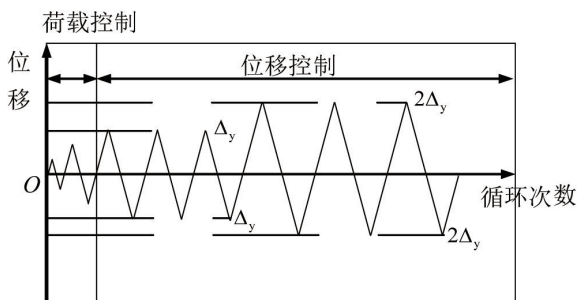


图 4 低周反复试验加载制度

1.4 量测方案

试验量测项目包括水平荷载、剪力墙顶点水平位移以及构件关键位置的应变,试件的测点布置如图 2 和图 3 所示。其中,水平荷载通过作动器内置的传感器获得,剪力墙顶梁和地梁的水平位移分别通过位移计 D1 和 D2 进行量测,剪力墙的顶部水平位移由 D1 减去 D2 得到。关键位置的应变通过布置于混凝土表面(位于距地梁顶面 700mm 高度处试件中心)的应变片 S3 和 S4、纵筋和箍筋表面的应变片 S1 和 S2 量测。由于本次试验中自保温预制剪力墙试件的应变片为试件浇筑并养护完成后粘贴,为降低粘贴应变片位置的墙体开洞对剪力墙性能的影响,每种轴压比相同的两片剪力墙试件,只在其中一个试件上(PPW-30-1、PPW-45-1 和 PPW-60-1)开洞粘贴钢筋应变片。

2 试验现象

所有试件均在墙体顶部水平位移达到 $\pm 4\text{mm}$ 附近出现刚度下降,之后转为位移控制。各试件破坏模式类似,故而以试件 PPW-45-1 为例介绍试验现象。加载初期,试件基本处于弹性工作阶段,低周反复加载的卸载过程中,在荷载降至 0 kN 时其残余变形很小。水平荷载达到 +100 kN 时,试件底部靠近作动器一侧出现第一条水平裂缝。水平位移达到 +8 mm 时,试件靠近作动器一侧出现多条水平裂缝;水平位移达到 -8 mm 时,试件远离作动器一侧同时出现多条水平裂缝。随着位移增加,原有水平裂缝逐渐延伸,裂缝宽度逐渐增大。水平位移达到 +16 mm 时,试件中部开始出现弯剪斜裂缝;水平位移达到 -16 mm 时,最大裂缝宽度达到 0.45 mm。水平位移达到 -20 mm 时,试件靠近作动器一侧出现竖向受压裂缝,试件中部的斜裂缝进一步贯通。水平位移达到 +28 mm 时,试件角部混凝土开始剥落;水平位移达到 -28 mm 时,最大裂缝宽度增加至 2.00 mm。水平位移达到 -32 mm 时,试件反向承载力降低到峰值荷载的 85% 以下。水平位移达到 +36 mm 时,试件正向承载力降低到峰值荷载的 85% 以下,停止试验。

所有试件的破坏形态见图 5 所示,典型试件 PPW-45-1 的裂缝开展如图 6 所示。



(a) PSW-30



(b) PSW-30-H



(c) PPW-30-1



(d) PPW-30-2



(e) PSW-30



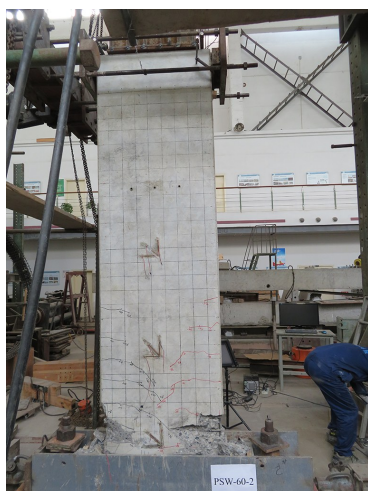
(f) PSW-45-H



(g) PPW-45-1



(h) PPW-45-2



(i) PSW-60



(j) PSW-60-H



(k) PPW-60-1



(l) PPW-60-2

图5 所有试件破坏形态

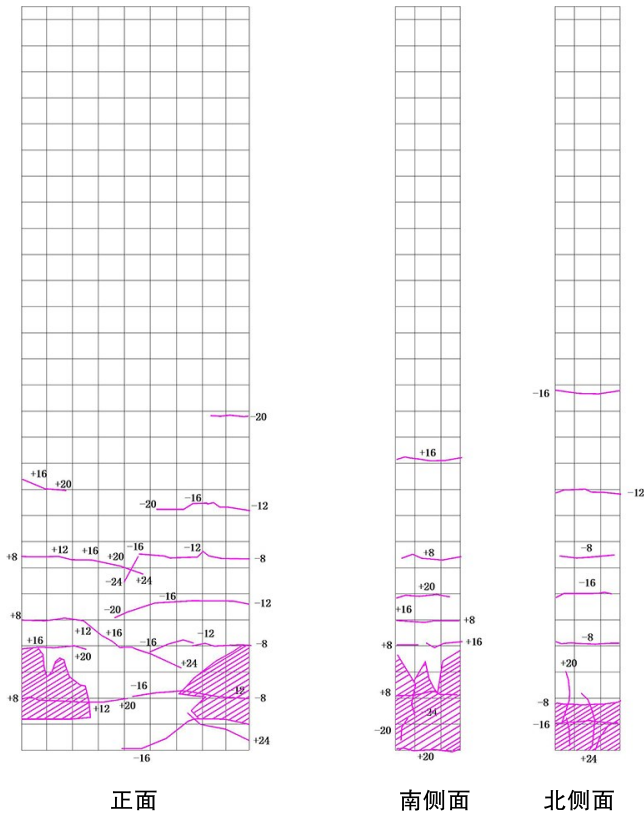
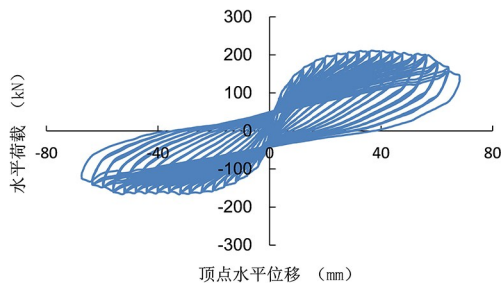


图 6 试件 PPW-45-1 裂缝开展图

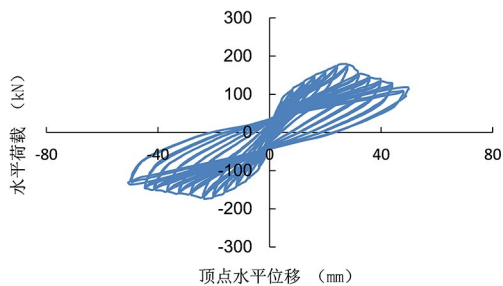
3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线

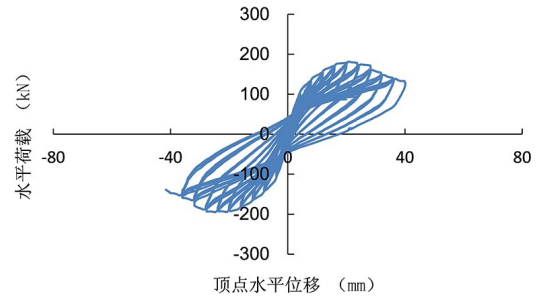
剪力墙水平荷载-顶点水平位移滞回曲线如图 7 所示。



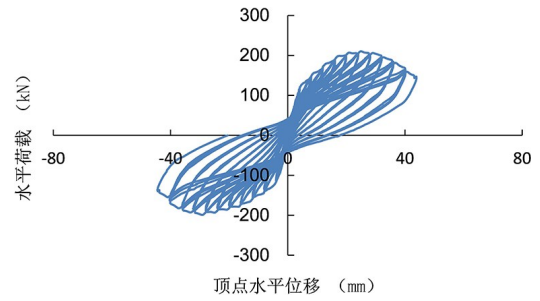
(a) 试件 PSW-30



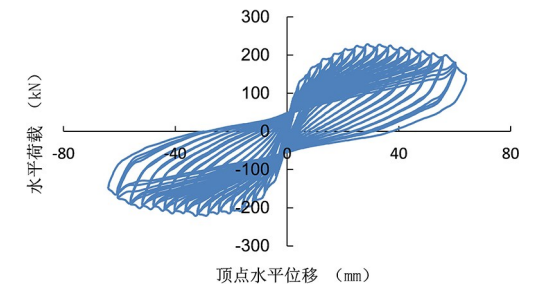
(b) 试件 PSW-30-H



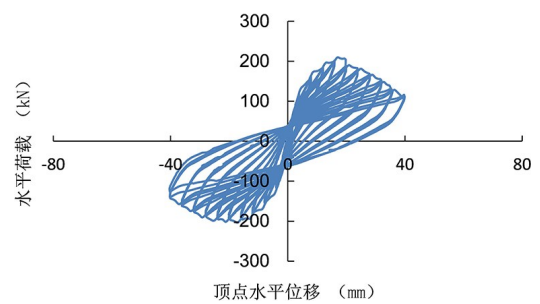
(c) 试件 PPW-30-1



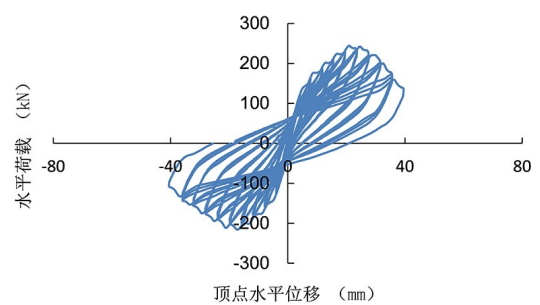
(d) 试件 PPW-30-2



(e) 试件 PSW-45



(f) 试件 PSW-45-H



(g) 试件 PPW-45-1

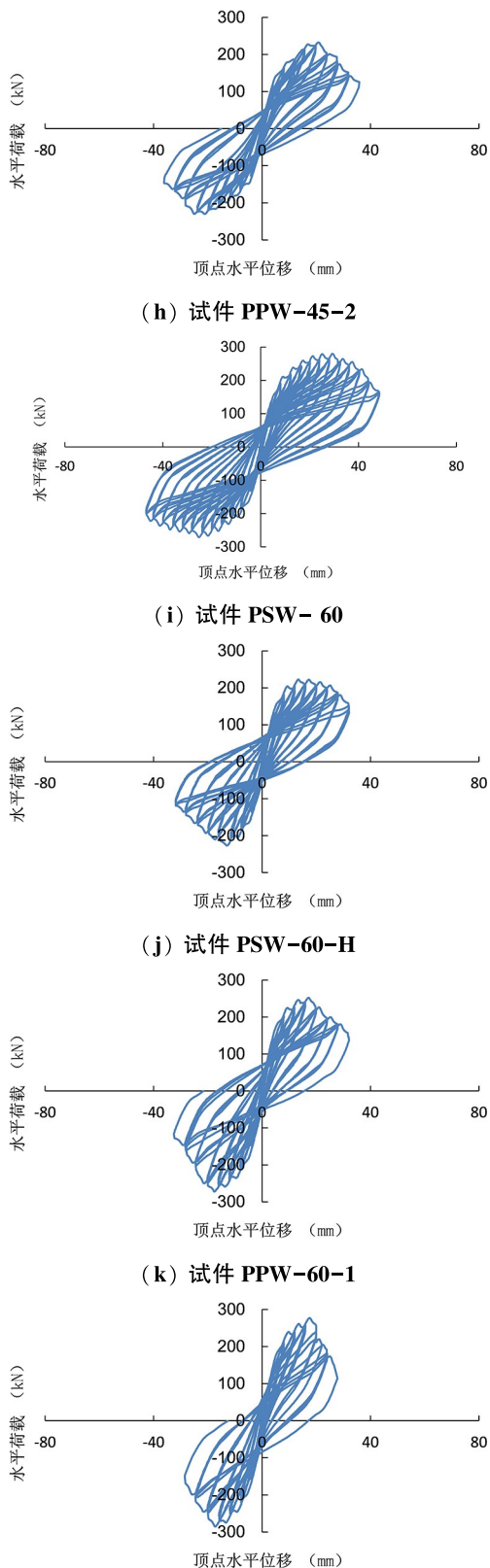


图7 水平荷载-顶点水平位移滞回曲线

由图7可知,加载初期,所有试件均处于弹性工作阶段,滞回环面积较小。随着荷载增加,试件逐

渐进入弹塑性工作阶段,滞回环面积逐渐增大。到达峰值荷载后,试件的刚度明显降低,滞回曲线出现“捏拢”现象。同一设计轴压比下,两个相同的自保温预制剪力墙试件(区别仅在于第一个开小洞粘贴钢筋应变片)的滞回曲线基本一致。

3.2 骨架曲线

剪力墙水平荷载-顶点水平位移骨架曲线如图8所示。

由图8可知,随着轴压比的不断增大,试件荷载峰值有所增加,而荷载峰值点对应的顶点水平位移有所降低。

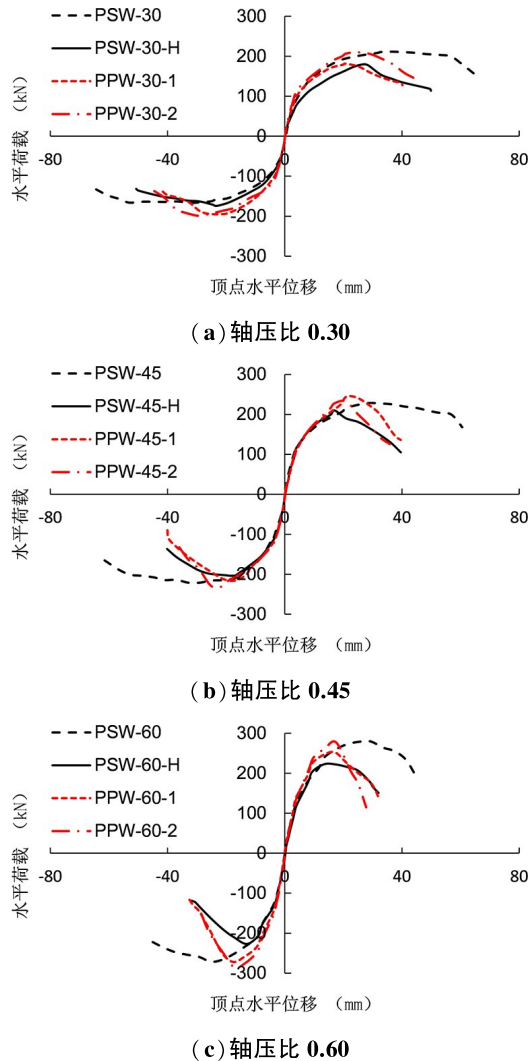


图8 水平荷载-顶点水平位移骨架曲线

根据滞回曲线和骨架曲线可进一步确定各剪力墙试件的屈服荷载、峰值荷载以及延性系数等。其中,屈服荷载根据能量法确定,破坏位移取荷载下降到85%峰值荷载对应的位移。延性系数取破坏位移和屈服位移的比值。试验结果如表4所示。

表 4 剪力墙试验结果

试件编号	加载方向	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	峰值荷载 /kN	破坏位移 /mm	延性系数	累积耗能 /kN·m
PSW-30	正向	178.78	15.69	211.44	60.56	3.86	254.86
	负向	-135.94	-13.33	-166.52	-62.09	4.66	
	均值	157.36	14.51	188.98	61.32	4.26	
PSW-30-H	正向	148.11	15.87	179.77	33.26	2.10	103.21
	负向	-141.20	-12.19	-174.30	-43.33	3.55	
	均值	144.66	14.03	177.04	38.30	2.82	
PPW-30-1	正向	150.41	11.00	181.44	22.41	2.04	67.18
	负向	-159.99	-11.13	-194.90	-32.00	2.87	
	均值	155.20	11.07	188.17	27.21	2.46	
PPW-30-2	正向	171.01	12.74	210.25	37.14	2.92	91.36
	负向	-158.90	-12.94	-199.06	-38.93	3.01	
	均值	164.95	12.84	204.66	38.03	2.96	
PSW-45	正向	185.62	14.00	228.59	57.48	4.10	249.58
	负向	-184.51	-12.51	-221.12	-56.77	4.54	
	均值	185.06	13.26	224.86	57.12	4.32	
PSW-45-H	正向	175.34	10.70	209.93	25.65	2.40	93.14
	负向	-165.98	-10.02	-203.66	-33.45	3.34	
	均值	170.66	10.36	206.80	29.55	2.87	
PPW-45-1	正向	199.09	14.40	244.14	31.27	2.17	83.73
	负向	-173.13	-10.25	-215.89	-27.38	2.67	
	均值	186.11	12.32	230.02	29.33	2.42	
PPW-45-2	正向	191.82	12.22	232.47	25.34	2.07	66.58
	负向	-187.49	-12.32	-230.01	-28.46	2.31	
	均值	189.65	12.27	231.24	26.90	2.19	
PSW-60	正向	240.91	13.73	279.94	40.60	2.96	177.90
	负向	-228.63	-12.66	-271.20	-42.81	3.38	
	均值	234.77	13.20	275.57	41.70	3.17	
PSW-60-H	正向	199.99	9.19	222.71	27.53	3.00	68.60
	负向	-188.24	-8.14	-226.84	-20.68	2.54	
	均值	194.12	8.66	224.78	24.11	2.77	
PPW-60-1	正向	222.27	9.19	252.40	22.87	2.49	59.31
	负向	-236.86	-9.89	-272.08	-22.76	2.30	
	均值	229.56	9.54	262.24	22.82	2.40	
PPW-60-2	正向	244.56	10.73	277.08	20.42	1.90	46.93
	负向	-247.07	-9.47	-285.33	-21.66	2.29	
	均值	245.81	10.10	281.21	21.04	2.10	

由表 4 可知,设计轴压比为 0.30 的自保温预制剪力墙试件(PPW-30-1 和 PPW-30-2)的平均屈服荷载、平均峰值荷载比预制实心剪力墙对比试件(PSW-30)分别提高了 1.7% 和 3.9%,延性系数和累积耗能分别降低了 36.4% 和 68.9%。设计轴压比为 0.30 的预制空心后填实剪力墙试件(PSW-30-H)的平均屈服荷载、平均峰值荷载、延性系数和累

积耗能比预制实心剪力墙对比试件(PSW-30)分别降低了 8.1%、6.3%、33.8% 和 59.5%。

设计轴压比为 0.45 的自保温预制剪力墙试件(PPW-45-1 和 PPW-45-2)的平均屈服荷载、平均峰值荷载比预制实心剪力墙对比试件(PSW-45)分别提高了 1.5% 和 2.6%,延性系数和累积耗能分别降低了 46.6% 和 69.9%。设计轴压比为 0.45 的预制

空心后填实剪力墙试件(PSW-45-H)的平均屈服荷载、平均峰值荷载、延性系数和累积耗能比预制实心剪力墙对比试件(PSW-45)分别降低了7.8%、8.0%、33.6%和62.7%。

设计轴压比为0.60的自保温预制剪力墙试件(PPW-60-1和PPW-60-2)的平均屈服荷载比预制实心剪力墙对比试件(PSW-60)提高了1.2%,平均峰值荷载、延性系数和累积耗能分别降低了1.4%、29.0%和70.1%。设计轴压比为0.60的预制空心后填实剪力墙试件(PSW-60-H)的平均屈服荷载、平均峰值荷载、延性系数和累积耗能比预制实心剪力墙对比试件(PSW-60)分别降低了17.3%、18.4%、12.6%和61.4%。

3.3 耗能性能

试件的耗能性能通常可根据能量耗散系数^[17]来表征,表达式为

$$E = \frac{S_{(ABCDE)}}{S_{(\Delta OCG+\Delta OEF)}} \quad (1)$$

式中, $S_{(ABCDE)}$ 为每级循环的第一个滞回环面积(图9), $S_{(\Delta OCG+\Delta OEF)}$ 为滞回环峰值点对应的三角形面积之和。

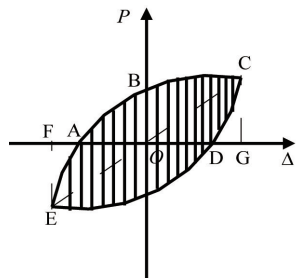
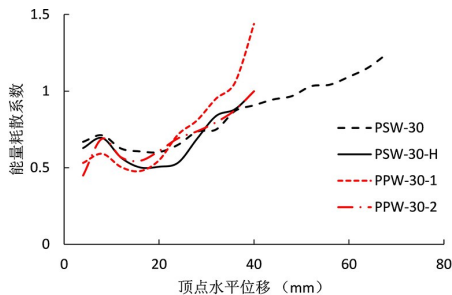


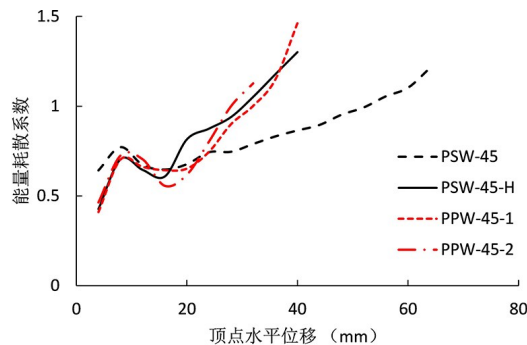
图9 典型滞回曲线

剪力墙能量耗散系数曲线如图10所示。

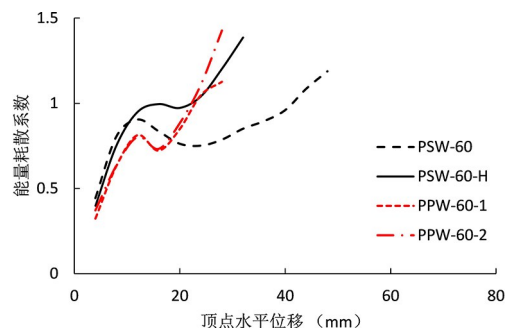
由图10可知,顶点水平位移在±20mm以内时,相同轴压力作用下4个试件的能量耗散系数接近。当顶点水平位移超过±20mm时,除试件PSW-30-H外,相同轴压力作用下自保温预制剪力墙和预制空心后填实剪力墙的能量耗散系数相对于预制实心剪力墙增加较快。



(a) 轴压比 0.30



(b) 轴压比 0.45



(c) 轴压比 0.60

图10 能量耗散系数曲线

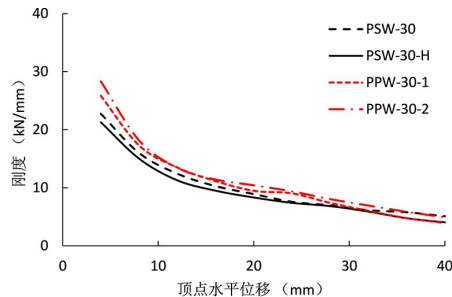
3.4 刚度退化

根据《建筑抗震试验规程》JGJ/T 101-2015^[17],采用每级循环的第一个滞回环的正负荷载峰值点之间连线的斜率来衡量刚度退化程度,具体计算公式为:

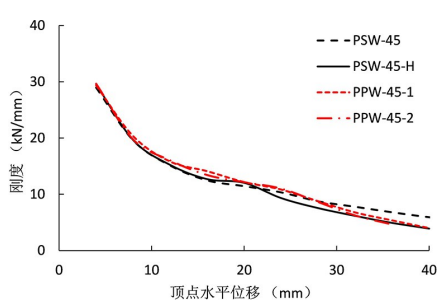
$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中, $+F_i$ 和 $-F_i$ 分别为第*i*级循环加载下第一个滞回环的正、负最大荷载; $+\Delta_i$ 和 $-\Delta_i$ 分别为 $+F_i$ 和 $-F_i$ 对应的位移。

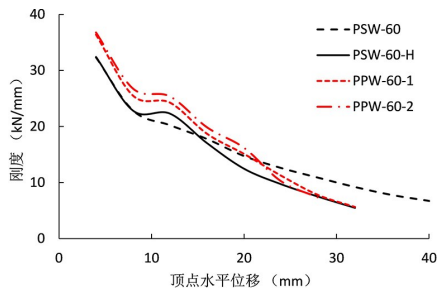
考虑到各试件均在4mm转为位移加载,因而试件的刚度变化规律主要基于4mm以后的水平荷载-顶点位移骨架曲线确定。各试件的刚度退化曲线如图11所示。



(a) 轴压比 0.30



(b) 轴压比 0.45



(c) 轴压比 0.60

图 11 刚度退化曲线

由图 11 可知,自保温预制剪力墙试件的初始刚度略高于预制实心剪力墙试件,预制空心后填实剪力墙试件的初始刚度与预制实心剪力墙相近。加载后期,自保温预制剪力墙试件和预制空心后填实剪力墙试件的刚度退化速率略高于预制实心剪力墙试件。

3.5 钢筋应变

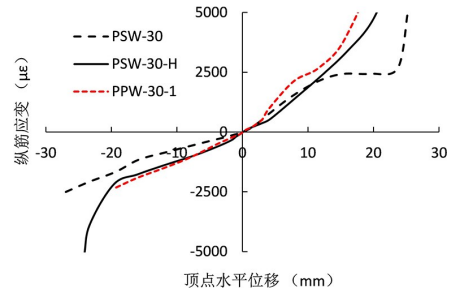
试验中量测了墙体底部外侧纵筋的应变变化规律(位置详见图 2 应变片 S1),各典型试件纵筋应变-顶点水平位移曲线如图 12 所示。从图 12 中可知,自保温预制剪力墙试件和预制空心后填实剪力墙试件的最外侧纵筋会先于预制实心剪力墙试件屈服。

试验中还测量了墙体底部中间位置箍筋的应变变化规律(位置详见图 2 应变片 S2),各典型试件箍筋应变-顶点水平位移曲线如图 13 所示。从图 13 中可知,顶点水平位移在 ± 20 mm 之前,箍筋应变发展十分缓慢,当顶点水平位移超过 ± 20 mm 后,随着弯剪斜裂缝的开展,箍筋应变随水平位移明显增大。

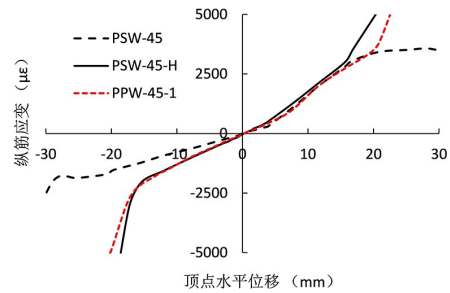
4 有限元分析

4.1 有限元模型的建立

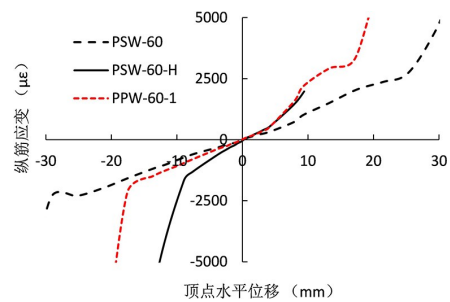
采用 ABAQUS 有限元软件建立剪力墙试件精细化有限元分析模型,混凝土采用三维 8 节点六面体实体单元、钢筋采用杆单元。由于预制空心后填实剪力墙中分批浇筑混凝土界面难以模拟,本次未考虑。有限元分析模型如图 14 所示。



(a) 轴压比 0.30

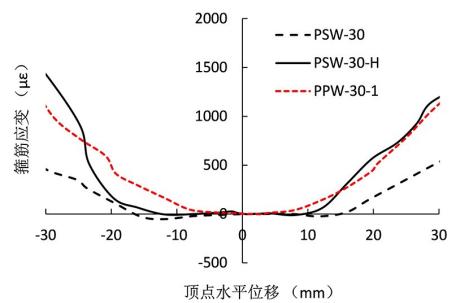


(b) 轴压比 0.45

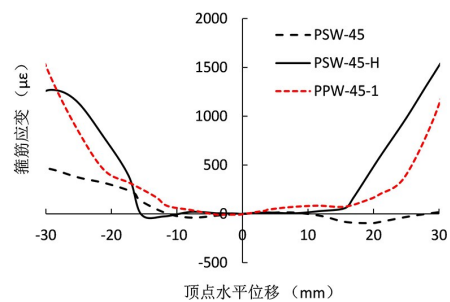


(c) 轴压比 0.60

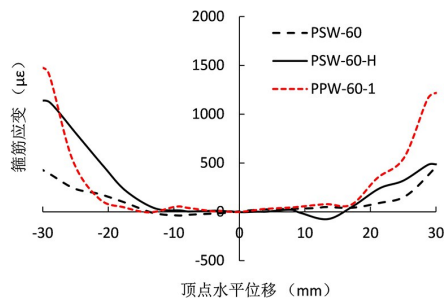
图 12 纵筋应变变化规律



(a) 轴压比 0.30

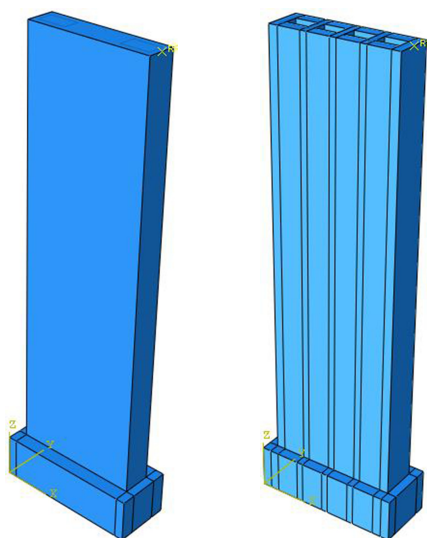


(b) 轴压比 0.45



(c) 轴压比 0.60

图 13 箍筋应变变化规律



(a) 预制实心剪力墙

(b) 自保温预制剪力墙

图 14 有限元模型

采用 ABAQUS 提供的弹塑性损伤模型 (CDP 模型) 模拟混凝土的力学性能。其中, 混凝土的单轴受拉和受压应力-应变关系曲线参考现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 (2015 年版)^[18] 进行设定。该模型假定混凝土的破坏主要为拉裂和压碎。屈服和破坏面的演化由拉伸等效塑性应变和压缩等效塑性应变控制, 同时该模型还有较好的收敛性。预制实心剪力墙中混凝土单轴抗压强度根据实测立方体抗压强度平均值 (41.6 MPa) 转换得到, 取为 31.6 MPa; 单轴抗拉强度取为 1.57 MPa。自保温预制剪力墙中混凝土单轴抗压强度根据钻芯法实测平均抗压强度 (47.1 MPa) 转换得到, 取为 35.7 MPa; 单轴抗拉强度取为 1.89 MPa。现浇实心连梁中混凝土单轴抗压强度根据钻芯法实测平均抗压强度 (35.1 MPa) 转换得到, 取为 26.7 MPa; 单轴抗拉强度取为 1.57 MPa。自保温预制连梁中混凝土单轴抗压强度根据钻芯法实测平均抗

压强度 (53.7 MPa) 转换得到, 取为 40.8 MPa; 单轴抗拉强度取为 1.89 MPa。

采用各向同性理想弹塑性模型模拟钢材的力学性能, 钢材的屈服强度根据材性试验结果进行设定, 取为 439.4 MPa。

采用嵌入命令描述钢筋和混凝土之间的相互作用, 不考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移。数值模拟时, 采用全模型计算, 首先对试件底部混凝土进行约束, 然后按照设计轴压比在剪力墙顶部施加竖向荷载; 在各试件有限元模型加载位置设置参考点, 将参考点和混凝土顶面进行绑定, 通过对参考点施加位移实现加载模拟。

4.2 有限元模型的验证

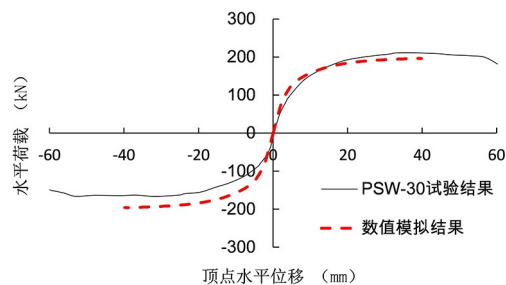
预制实心剪力墙试件和自保温预制剪力墙试件有限元模型的计算结果分别如图 15 所示。

由图 15 可知, 有限元模型针对各试件水平荷载-顶点水平位移曲线的弹性阶段和弹塑性阶段的模拟十分吻合。有限元模型针对破坏阶段的模拟与试验结果存在一定的差异, 这可能是由于试验中反复荷载作用下混凝土的损伤累积与数值模拟时单调荷载作用存在差异所致。

基于水平荷载-顶点水平位移曲线可确定试件的峰值荷载, 如表 5 所示。由表 5 可知, 剪力墙峰值荷载的数值模拟结果与试验结果的误差在 5% 以内, 满足工程精度要求。

表 5 峰值荷载试验结果与有限元模拟结果对比

试件组编号	试验均值/kN	数值模拟/kN	误差/%
PSW-30	188.98	196.28	3.9
PSW-45	224.86	232.51	3.4
PSW-60	275.57	263.18	-4.5
PPW-30	196.41	205.36	4.6
PPW-45	230.63	241.12	4.5
PPW-60	271.72	273.07	0.5



(a) PSW-30

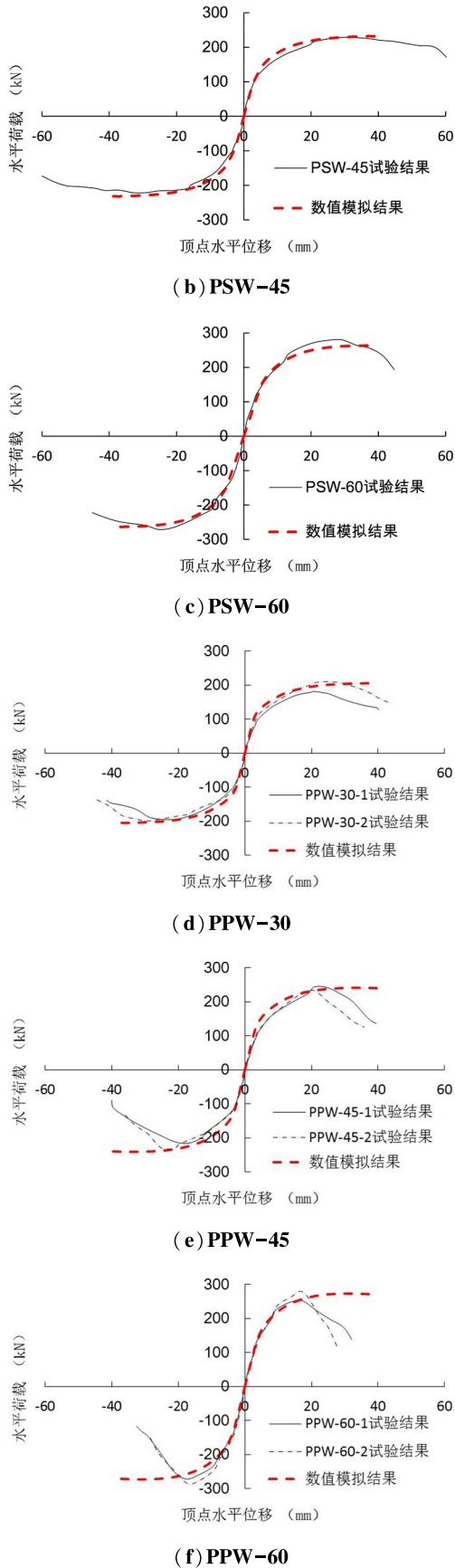


图 15 有限元模型的计算结果

5 结论

(1)在三种设计轴压比下,自保温预制剪力墙的平均屈服荷载和平均峰值荷载均与预制实心剪力墙近乎相等,但明显优于预制空心后填实剪力墙;自保温预制剪力墙的延性系数和累积耗能均低于预制实心剪力墙;自保温预制剪力墙的刚度退化规律与预制实心剪力墙相近。

(2)自保温预制剪力墙的初始刚度略高于预制实心剪力墙;加载后期,自保温预制剪力墙的刚度退化速率略高于预制实心剪力墙。

(3)在三种设计轴压比下,当顶点水平位移在 $\pm 20\text{mm}$ 以内时,在相同顶点水平位移下自保温预制剪力墙和预制实心剪力墙的耗能系数接近;当顶点水平位移大于 $\pm 20\text{mm}$ 时,在相同顶点水平位移下自保温预制剪力墙的耗能系数略大于预制实心剪力墙。

(4)数值模拟结果表明,自保温预制剪力墙试件低周反复峰值荷载的数值模拟结果与试验结果的误差分别在5%以内,满足工程精度要求。

(5)经多次传热检测,结果表明与计算分析相近,能满足节能传热要求。

综上所述,自保温预制剪力墙承载力与实心剪力墙近乎相等,延性与耗能与实心剪力墙相当,破坏模式为延性受弯破坏,符合强剪弱弯的设计理念,满足剪力墙的抗震性能要求。适当降低轴压比和降低楼层总高的情况下,可适用于多层及高层建筑。

参考文献

- [1] 薛伟辰,胡翔. 预制混凝土剪力墙结构体系研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 44-55.
- [2] 姜洪斌,陈再现,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 34-40.
- [3] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 51-59.
- [4] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 不同无粘结长度新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 工程力学, 2016, 33(8): 52-57.
- [5] 朱张峰,郭正兴,汤磊. 新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 36-43.
- [6] 赵斌,王庆杨,吕西林. 采用全装配水平接缝的预制混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,

- 2018, 39(12): 48-55.
- [7] 蒋金梁. 混凝土夹芯复合墙板热工和力学性能研究 [D]. 浙江大学, 2008.
- [8] 薛伟辰, 杨佳林, 董年才, 等. 低周反复荷载下预制混凝土夹心保温剪力墙的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(5): 1104-1110.
- [9] 钱稼茹, 宋晓璐, 冯葆纯, 等. 喷涂混凝土夹心剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 12-23.
- [10] 钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验 [J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 26-38.
- [11] 朱元吉, 谢剑. 不同连接形式 PC 挂板-剪力墙抗震性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(B06): 122-128.
- [12] Ma S, Jiang N. Experimental investigation on the seismic behavior of a new-type composite interior wallboard [J]. Materials and Structures, 2016, 49(12): 5085-5095.
- [13] 南通联泷建筑材料有限公司. 一种装配式单排孔自保温承重墙板: 中国, CN201610970178.8[P]. 2017-01-25.
- [14] 南通联泷建筑材料有限公司. 一种建筑装配式三排孔自保温非承重墙板: 中国, CN201610898908.8 [P]. 2017-01-04.
- [15] JGJ/T 384-2016 钻芯法检测混凝土强度技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [16] GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [17] JGJ/T 101-2015 建筑抗震试验规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [18] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

Experimental Study on Seismic Behavior of Innovative Modularized Precast Self-Insulation Reinforced Concrete Shear Walls

Gong Zuping¹, Dong Niancai¹, Rui Mingzhuo², Jiang Xiaofeng²,
Liu Mingguo², Gong Xuhua¹, Shen Jianchao¹

(1. Nantong Lianlong Prefabricated Construction Technology Co., Ltd., Nantong 226000, China;
2. East China Architectural Design and Research Institute, Shanghai 200002, China)

Abstract: To investigate the seismic behavior of innovative precast self-insulation reinforced concrete shear walls under different axial compression ratios, the authors conducted reversed cyclic loading test through designing and manufacturing 4 groups of 12 RC shear wall specimens, which are all angle-shaped shear walls with the same reinforcement, and with hidden columns at both ends. All specimens include one group of solid cast-in-situ shear wall specimens for contrast, one group of post-filled hollow precast shear wall specimens, and two group of innovative precast self-insulation precast RC shear wall specimens. A refined finite element analysis model of self-insulating concrete shear wall is established by using ABAQUS finite element software. Results indicate that the self-insulation precast shear walls perform equally well in averaged yielding load and peak load in comparison with the precast solid shear walls under the three design axial compression ratios. While the ductility ratios and accumulated dissipated energy of precast self-insulation shear walls are lower than those of precast solid shear walls, the stiffness degradation curves of the two kinds of shear walls are similar with each other. When the horizontal displacement at the top of shear walls is within ± 20 mm, the energy dissipation ratios of the two kinds of shear walls are similar under the three designed axial compression ratios, but when the horizontal displacement is over ± 20 mm, the energy dissipation ratio of the precast self-insulation shear walls will be somehow higher than that of solid shear walls. The error between the numerical simulation results and the test results of the peak load test of the self-insulation precast shear wall specimens are within 5%, which satisfies the engineering accuracy.

Key Words: Self-Insulation Shear Wall; Precast; Seismic Behavior; Finite Element Analysis