

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.01.001



预应力装配混凝土复合墙板抗震性能试验研究

秦士洪¹, 何登伟¹, 陈鹏¹, 张瀑²

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆, 400045;

2. 四川省建筑科学研究院, 成都 610081)

摘要:结合砌体结构的发展现状和住宅产业化发展趋势,提出一种“预应力装配混凝土复合墙板”,以期望在中小城镇低层建筑民用房屋中发展一种新的结构形式来对砌体结构进行补充。为了考察该复合墙板的抗震性能,对 2 块不同预应力度度的试件进行了拟静力试验。得到了相应试件的抗震性能指标,显示该墙板具有较好的承载能力和变形性能,分析认为所提出的墙板可以达到 8 度区低层民用房屋的应用要求,可以作为砌体承重墙的一种替代形式,并且对该墙板相关构造提出了改进建议。

关键词:预制装配结构;抗震性能;拟静力试验;混凝土复合墙板;住宅产业化

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0001-08

Experimental analysis on seismic behavior of prefabricated concrete composite walls

Qin Shihong¹, He Dengwei¹, Chen Peng¹, Zhang Pu²

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400045; 2. Sichuan Institute of building research, Chengdu, 610081)

Abstract: Based on the present situation of masonry structure and the development of housing industrialization, We proposed an innovative unbonded post-tensioned precast concrete composite wall to develop a new structure form in the low-rise civil construction. We studied two specimens with various levels of pre-stressing were studied experimentally by the quasi-static test system to investigate the seismic behavior of the composite wall and obtained the seismic behavior indexes of corresponding specimens. The results show that the walls have better bearing capacity and good ductility. They could meet the application requirements of the low-rise building in eight-intensity area and be used as an alternative of masonry load-bearing wall structure. We also presented some suggestions about the structure forms of the composite wall.

Keywords: prefabricated structure; seismic behavior; quasi-static test; concrete composite wall; housing industrialization

收稿日期: 2015-07-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费科研专项(106112014CDJZR200005)

作者简介: 秦士洪(1954-), 男, 教授, 主要从事预应力与砌体结构研究, (E-mail)qinshihong_126.com。

Received: 2015-07-28

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 106112014CDJZR200005)

Author brief: Qin Shihong(1954-), professor, main research interests: pre-stressed structure and masonry structure, (E-mail)qinshihong_126.com.

砌体材料由于其地方性、经济性和可操作性,使其具有广泛的应用范围,不论在民用还是工业建筑中都有其适用之处。根据 2011 年左右的统计,砌体仍然占有 70% 以上的建造面积^[1]。砌体基本上是手工方式砌筑,施工劳动量大,且由于粘土砖需要粘土制造,占用较多的农田,故国务院提出“限粘禁实”的政策,这使得砌体的发展受到了一定的影响。

另一方面,随着中国经济社会发展的城镇化和工业化的深入,作为国民经济支柱产业的建筑业迫切需要产业现代化转型升级。2006 年建设部颁布了《国家住宅产业化基地实施大纲》,2013 年国务院办公厅出台了《绿色建筑行动方案》等文件,这促进了近年来国内装配式住宅的研究开发。本文结合这种发展方向提出了一种“预应力装配混凝土复合墙板”。

预应力作为一种具有较好恢复性能的装配手段在装配式剪力墙结构体系中较常用,通常的连接方式有竖向和水平无粘结预应力筋连接。比如美日联合项目 PRESSS^[2-3]提出的一种竖向通过后张无粘结预应力装配式剪力墙结构,试验研究显示该体系具有较好的抗震性能和自恢复性能。Smith 等^[4-5]对竖向通过无粘结预应力筋装配的墙板进行了试验和数值分析,表明该连接方式墙板具有较好的抗震性能,并且 Smith 等^[6]对开洞剪力墙采用了同样的装配方式进行试验,取得了相似的成果。Kurama 等^[7]通过水平无粘结预应力筋将墙板连梁进行连接,进行了 11 个 1/2 缩尺试件的抗震试验,表明破坏主要发生在墙体与连梁的连接节点的破坏,墙体自恢复性能较好。孙巍巍等^[8-9]结合中国现状进行的相似的连梁和墙肢试验及数值分析研究,试件通过水平无粘结预应力来装配。表明在合理的设计下,可以使得破坏主要发生在连梁与墙肢的连接结合部位,同时,墙体具有较好的恢复性。

本文提出一种新型的水平无粘结预应力筋直接对墙板装配的剪力墙,并对两片拼装墙板进行抗震试验研究,其主要目的:1)研究所提出的拼装墙板的性能指标,以验证所提出的拼装方式的可靠性;2)观察该墙板在水平和垂直双向荷载作用下的裂缝开展部位、形态发展规律,以及墙体的破坏机制;3)考察该墙板的抗震性能,与类似高宽比的砌块砌体墙对比,评估该墙板可否作为砌体承重墙的一种替代形式。

1 试件设计制作及试验方法

1.1 试件设计制作

1.1.1 试件尺寸 考虑到构件的标准化生产和预制构件加工模板情况,以及试验场地的大小等因素,参考类似高宽比砌块砌体墙的试验研究文献,确定装配墙板单元及装配后试件的尺寸如图 1 及图 2 所示,图中单斜线图例表示加气混凝土,点及三角图例表示普通混凝土。

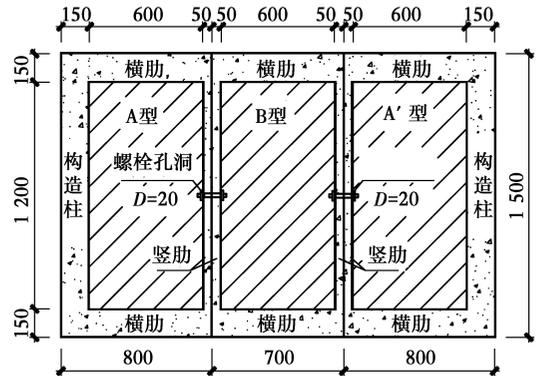


图 1 试件立面图

Fig.1. The elevation drawing of specimen

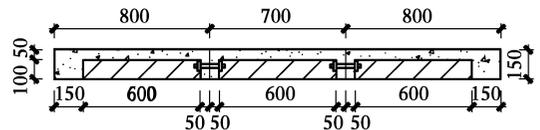


图 2 试件剖面图

Fig.2 The sectional drawing of specimen

1.1.2 墙板单元配筋 A 和 A'型墙板构造柱纵筋为 4 Φ 12,箍筋采用 ϕ 6@150,横肋纵筋采用 4 Φ 10,箍筋采用 ϕ 6@140;B 型墙板横肋纵筋采用 4 Φ 10,箍筋采用 ϕ 6@150;所有竖肋内均设置一根 Φ 12 纵筋;加气混凝土在浇筑时作为模板,内部不设置钢筋。墙板单元的配筋剖面图如下:

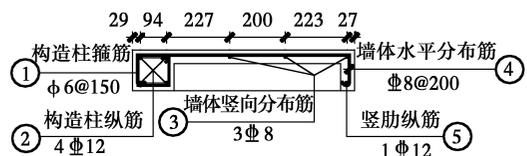


图 3 A/A'型墙板配筋图

Fig.3 The reinforcement drawing of A/A' wall

材料强度:混凝土的实测立方抗压强度为 44.6 MPa,试件所采用的钢筋实测性能如表 1。

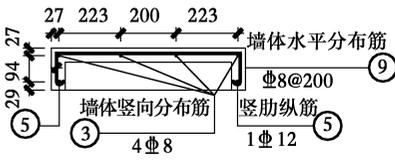


图 4 B 型墙板配筋图

Fig. 4 The reinforcement drawing of B wall

1.1.3 墙板装配 首先进行墙板的拼装,在 A、B 和 A'3 块板上下横肋相同位置预留孔道,然后上下横肋中各穿入一根无粘接钢绞线(φ15.2),通过预应力对墙板进行拼装,拼装张拉控制应力分别取 0.5 f_{ptk} (试件 1 号)和 0.6 f_{ptk} (试件 2 号)(其中 f_{ptk} 为钢绞线极限强度标准值 1 860 MPa)。拼装缝做成企口,采用干接缝。把拼装好的整体墙板与地梁进行连接,A 和 A'型墙板的构造柱底部以及地梁相应位置预埋有钢板,采用焊接连接。为保证整体墙板的垂直度,先在底部用水泥 砂浆调平。

表 1 钢筋强度实测值

Table 1. The measured value of steel bar strength

直径 d/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	$\epsilon_y/\mu\epsilon$
φ6	583	600	2 805
φ8	515	537	2 557
Φ10	432	606	2 148
Φ12	473	573	2 455

1.2 测量方案

测量内容包括变形测量和应变测量。应变测量主要测量关键点的水平和竖向钢筋应变,竖向钢筋应变片主要设置在构造柱底部和墙板相邻的竖肋内,水平钢筋上的应变片则沿试件斜对角布置。各单元墙板以及整体墙板的变形采用百分表测量,如图 5 所示。

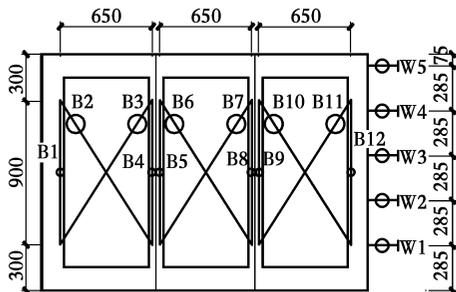


图 5 变形测点布置图

Fig. 5 The layout drawing of deformation measuring points

1.3 加载装置和加载制度

采用悬臂式加载方式,加载装置如图 6 所示。首先进行竖向力加载,其后在水平力加载的过程中竖向力保持不变,其值为 680 kN,其设计轴压比为 0.1(按照纯混凝土计算)。试验全程采用位移控制加载。水平力加载开始后,先在试件的开裂荷载下循环一次,然后以 3 mm 为级差,每级循环两次,直至试件破坏。水平荷载加载制度如图 7 所示。

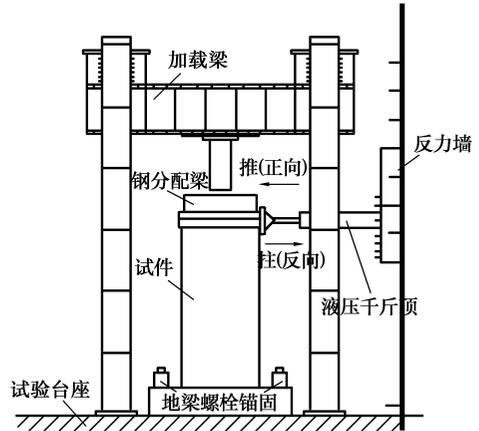


图 6 加载装置示意图

Fig. 6 The schematic drawing of loading device

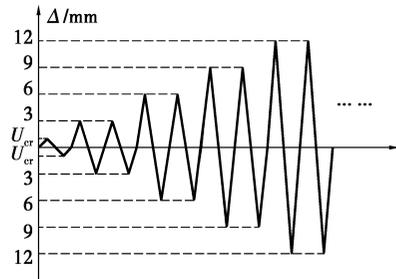


图 7 水平荷载加载制度图

Fig. 7 The loading system of horizontal load

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程和破坏形态

试件的开裂破坏特点:1)混凝土板面侧:两个试件都首先在 A 和 A'型墙板构造柱边缘产生水平裂缝。然后在水平位移加载至 6 mm 过程中出现较大的斜裂缝发展。其后基本只有斜裂缝发展,试件呈现明显的剪切破坏特征。加气混凝土板面侧:在位移加载至 9 mm 前基本没有明显的破坏,9 mm 后逐渐出现较明显的斜裂缝发展,裂缝的出现及发展滞后于混凝土板侧;从整体墙板来看,裂缝在三个单元间没有明显的连贯性。2)由于 1 号试件的地梁预埋

钢板在试验后期被拔出,故循环加载提前结束,这也说明了连接是预制装配的关键之一。各试件的破坏状况见图 8、图 9。



图 8 1号试件破坏状况图

Fig. 8 The failure features of No. 1 specimen



图 9 2号试件破坏状况图

Fig. 9 The failure features of No. 2 specimen

2.2 滞回曲线和骨架曲线

各试件的滞回曲线和骨架曲线如图 10、图 11 所示。

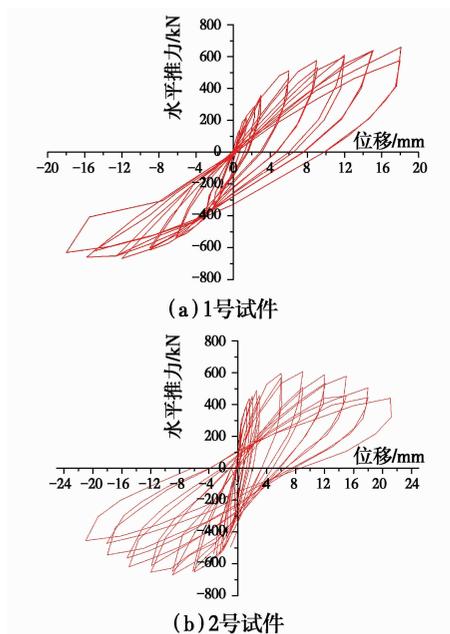


图 10 试件滞回曲线图

Fig. 10 The hysteretic curve of specimens

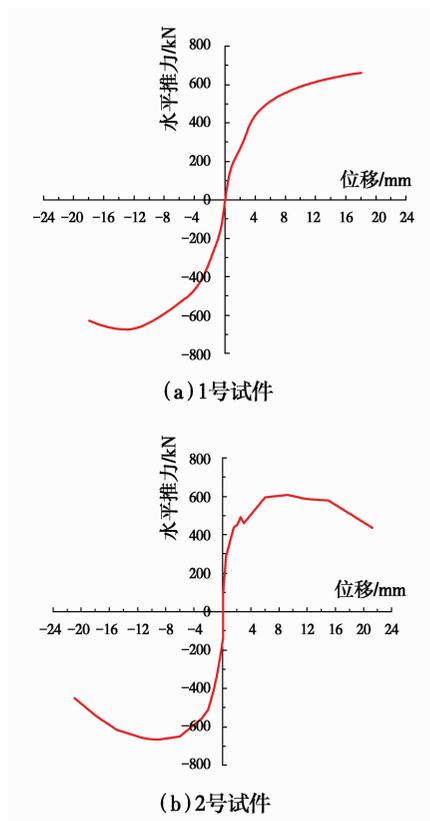


图 11 试件骨架曲线图

Fig. 11 The skeleton curve of specimens

图 10 所示滞回曲线的一个明显特点是,残余变形在正方向(推)的积累越来越大,而负向(拉)的残余变形一直很小,尤其是 1 号试件表现得非常明显。2 个试件的骨架曲线都没有明显的直线段。分析认为这是因为试件由预应力拼装而成,拼装缝之间存在摩擦,这导致了试件受力的非线性;同时,干拼装缝被越压越紧,导致墙板残余变形在推的方向积累越来越大。1 号试件由于地梁的预埋钢板拔出破坏,故其骨架曲线正方向没有出现下降段。

2.3 承载能力

试验全程采用位移控制加载,实际试件高宽比为 0.652,没有明显的屈服点出现,故无法测试到屈服位移。本文采用 Park 法求得试件的名义屈服荷载^[10]。表 2 列出了试件的各受力特征点的测试数据。为了与相近高宽比砌体墙的承载能力比较,表 3 列出了国内其他学者的试验测试数据。可以看出,装配式复合墙板的承载力比砌体墙的承载力大很多。

表 2 试件特征点数据

Table 2 The feature point datas of the specimens

试件	项目	1/1 000 位移角		开裂荷载		屈服荷载		峰值荷载	
		正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向
1 号	位移/mm	1.4	1.4	0.7	0.6	5.0	5.8	18	12
	水平力/kN	217.4	258.6	140.0	120.0	481.5	510.0	660	667
2 号	位移/mm	1.5	1.5	0.2	0.2	1.78	2.08	9	9
	水平力/kN	437.8	442.3	160.0	160.0	492.0	512.0	607	669

表 3 相关文献特征点数据

Table 3 The feature point datas of relevant literature

作者	试件尺寸			高宽比	开裂荷载/kN	极限荷载/kN	说明
	宽	高	厚				
金伟良 ^[11]	3 800	2 800	190	0.736	180	280	构造柱混凝土空心砌块
李振威 ^[12]	1 800	1 200	95	0.667	90	121	芯柱混凝土空心砌块
邬瑞锋 ^[13]	5 000	2 800	240	0.560	310	429	构造柱砌体
刘锡荟 ^[14]	4 500	3 100	240	0.689	383	438	构造柱砌体
施楚贤 ^[15]	2 250	1 460	240	0.650		405.9	构造柱砌体
李利群 ^[16]	2 800	1 800	190	0.642	165	413.8	构造柱混凝土空心砌块

2.4 延性性能

延性系数 μ 定义为构件的极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,一般极限位移取为荷载下降到 0.85 倍峰值承载力 F_u 时的位移。由于 1 号试件发生地梁预埋钢板拔出而提前结束加载,其承载力还未进入下降段。此处作为比较,采用峰值荷载下的位移 Δ_p 与屈服位移 Δ_y 的比值 μ_p 来衡量,我们称其为名义延性系数,见表 4。显然,如无该意外,实际延性系数 μ 还要大一些。

表 4 名义延性系数

Table 4 The nominal ductility factor

试件 编号	Δ_p		Δ_y		μ_p	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
1 号	18	-12	5	-6	3.6	2.1
2 号	9	-9	1.8	-2.1	5.1	4.3

从表 4 中可以看出,1 号试件由于发生预埋件拔出破坏,导致其延性系数不大,但仍与文献[17](见表 5)中统计的试件的延性系数接近,由此可以预见,如果没有发生地梁预埋件拔出的情况,所具有的延性系数将会更大,将会超过该文献中更多的试件;而 2 号试件的延性系数则超出了文献统计的绝大多数试件的延性系数。通过比较可以认为本复合墙板的延性较好。另一方面,可以计算出 2 号试件

的实际延性系数 μ ,正向为 10.1,负向为 7.4。比名义延性系数大,这与推断一致。

表 5 参考文献延性系数

Table 5 The ductility factor of related literature

试件 编号	尺寸 宽高/m	高宽比	延性 系数	构造 措施
W0-3	2.81.8	0.643	4.83	芯柱
W0-4	2.81.8	0.643	6.79	芯柱
W0-2G	2.81.8	0.643	4.33	构造柱
W0-3G	2.81.8	0.643	6.49	构造柱

2.5 刚度退化

在循环反复荷载作用下,以及相同的加载位移下,滞回环峰值点荷载随循环次数的增加而不断减小,这种现象称为刚度退化。将同级加载位移下第一循环达到峰值位移的割线刚度定义为等效刚度 K 。表 5 为试件各阶段的等效刚度,其中 K_{cr} , K_y , K_u 分别代表开裂,屈服,峰值时的刚度。

由表 6 及图 12 可以看出,正向特征点的等效刚度比负向的等效刚度小,这反映了正向残余变形不断积累的现象;同时还可以看出,2 号试件各受力特征点的等效刚度都比 1 号试件的大,这正是由于 1 号试件的地梁预埋钢板在加载过程中逐渐被拔出,导致其等效刚度下降。同时也说明该墙板与地梁的连接对于整体墙性能有相当大的影响。

表 6 试件刚度退化表

Table 6 The stiffness degradation

试件 编号	正向			负向		
	K_{cr}	K_y	K_u	K_{cr}	K_y	K_u
1号	199	96	37	299	71	55.6
2号	800	220	67	1 600	246	74.3

2.6 变形分析

表 7 列出试件各主要阶段的位移角试验值。

表 7 试件各阶段位移角

Table 7 The displacement angle of different stages

试件 名称	加载 方向	屈服	峰值	极限
1号	正向	1/300	1/83	
	负向	1/259	1/125	
2号	正向	1/843	1/167	1/83
	负向	1/721	1/167	1/98

可以看出,试件的最大位移角值都超过了混凝土结构设计规范所规定的剪力墙结构在大震作用下的弹塑性位移角 1/120。但值得注意的是,该试件的高度仅为 1 500 mm,表现以剪切变形为主,仍然能在较大的层间位移下而不破坏,证明了该复合墙板的受力性能较好。

为了考察各墙板单元的变形成分,对各墙板单

元在每级加载下第一循环所达到最大位移进行了变形成分分析。其主要结果:1)各墙板单元的变形都以剪切变形为主,剪切变形成分大多数达到 85% 以上,并且在加载后期剪切变形成分的比重越来越大;2)同一试件中,B型墙板单元的剪切变形一般比 A 及 A'型的剪切变形大,分析认为这是由于加载装置导致的,即上部竖向力加载的钢垫梁长度完全覆盖了 B 板,而没有覆盖完 A 型板和 A'型板,B型板的顶部转动受到了钢垫梁的约束,其变形更趋向于纯剪切。

2.7 墙体的整体工作性能分析

本墙板是由 3 个墙板单元通过预应力拼装而成,故其整体工作性是一个重要的考察指标。图 13 分别为两个试件的百分表 4 所测数值与百分表 5 的差值随加载过程的变化。可以看出随着加载的进行,相邻墙板单元的竖向变形出现了差值,这说明相邻的拼装单元出现了相互的错动,并且越到后期差值越大,即墙板整体工作性能逐渐劣化,百分表 8 与 9 也有相似的情况。另一方面,从 A 型板与 B 型板、以及 A'型板与 B 型板相邻竖肋中同一高度处纵筋的应变变化上也可佐证这个观点。如图 14 所示,A 型板与 B 型板相邻竖肋中纵筋的应变变化出现了交叉现象,即应变出现了相反的变化,这也佐证了各墙板单元具有单独受力的特性。

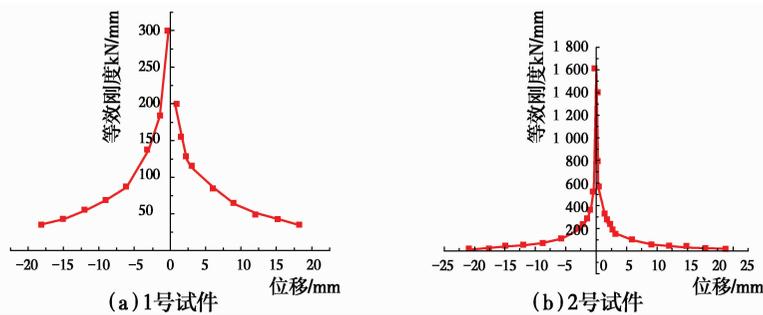


图 12 试件刚度退化曲线图

Fig. 12 The stiffness degradation curve of specimens

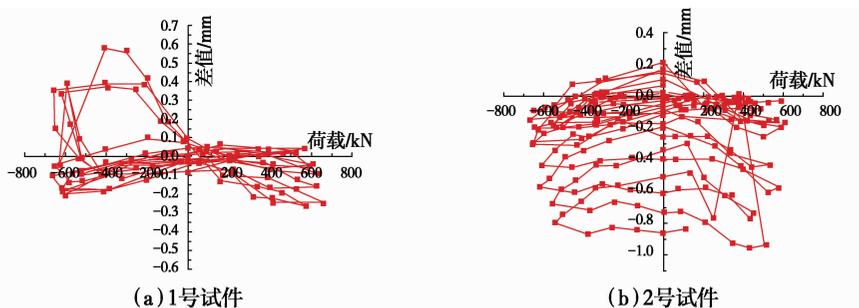


图 13 百分表 4 与 5 的变形差值图

Fig. 13 The deformation difference between 4 indicating gauge and 5 indicating gauge

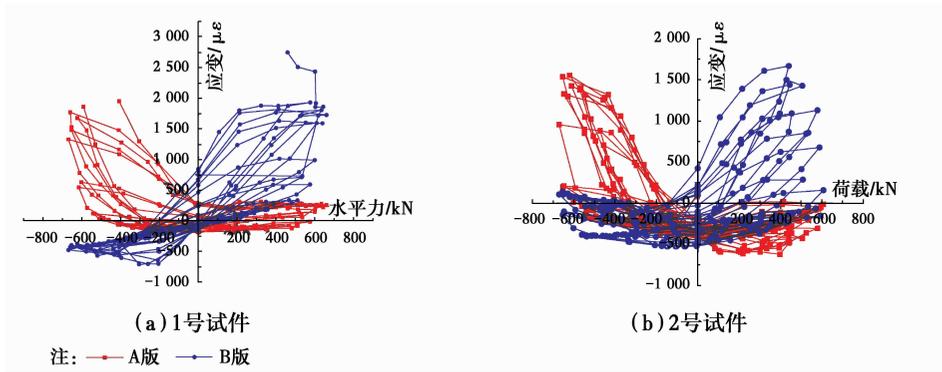


图 14 A 型板与 B 型板相邻竖筋纵筋的应变变化图

Fig. 14 The strain change of longitudinal reinforcement adjacent to A and B wall

2.8 拼装预应力变化

本复合墙板采用预应力作为装配手段,预应力在周期循环加载过程中的变化情况是较重要的考察指标。

从图 15 中可以看出,各试件预应力筋的预应力都在逐渐下降,越到加载后期上部预应力筋与下部预应力筋的预应力值越接近,且上部预应力的下降

幅度超过了下部。分析认为前者是由于墙板的构造所造成的,为了装配方便,在墙板单元的相接部位设置了企口,施工精度原因使得企口不能完全紧密契合,在加载过程中相邻企口不断错动,契合越来越紧密,导致预应力筋的长度变短,预应力变小;而后者原因是墙板的下部与地梁焊接连接,变形受到了地梁的约束。

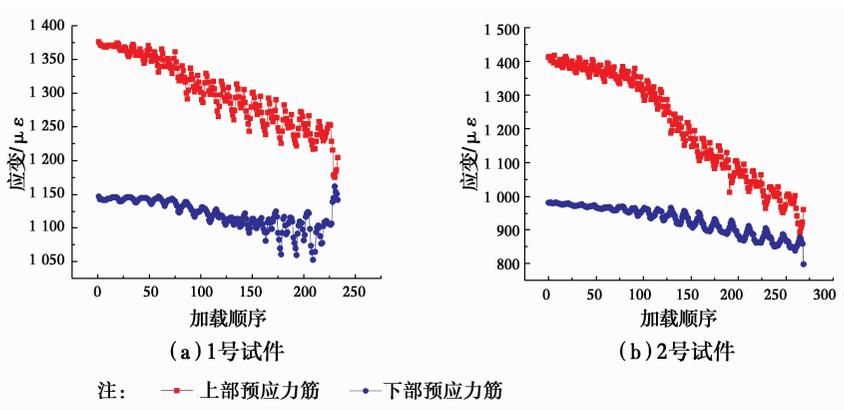


图 15 试件预应力筋力变化状况图

Fig. 15 The force variation in pre-stressed reinforcement

3 结 论

通过 2 个预应力装配混凝土复合墙板试件的拟静力试验及结果分析,得到如下主要结论:

1)与相近高宽比砌体墙体试验结果比较可知,预应力装配复合墙板的抗震性能较好,可以满足在 8 度区低层建筑中的性能要求,可以作为砌体承重墙的一种替代形式。

2)在反复荷载作用下预应力装配复合墙板的整体工作性能逐渐降低;装配预应力的对于墙板的承载力没有明显的影响。

3)预应力装配复合墙板与地梁连接可靠性直接

影响墙板的工作性能,实际工程中墙板与楼盖水平构件的连接属于同样的问题,需进行专门试验改进。

4)本试件所采用的墙板装配企口契合方式对预应力产生了较大的损失,相邻单元墙板之间的拼接缝构造还有待于改进。

参考文献:

[1] 周炳章. 我国砌体结构抗震的经验与展望[J]. 建筑结构, 2011(09):151-158.
 Zhou B Z. Experiences and future of earthquake-resisting of the masonry structure in China[J]. BuildingStructure, 2011(09):151-158. (in Chinese)

[2] Nakaki S D, Stanton J F, Sritharan S. An overview of the

- press five-story precast test building[J]. PCI Journal, 1999,44(2):26-39.
- [3] Priestley M J N, Sritharan S, Conley J R, et al. Preliminary results and conclusions from the press five-story precast concrete test building[J]. PCI Journal, 1999, 44(6):42-67.
- [4] Smith B J. Design of hybrid precast concrete walls for seismic regions[J]. American Society of Civil Engineers, 2014;1-10.
- [5] Smith B J, Kurama Y C. Analytical model validation of a hybrid precast concrete wall for seismic regions [C]// ASCE Structures Congress 2010, 2010.
- [6] Smith B J, Kurama Y C. Comparison of solid and perforated hybrid precast concrete shear walls for seismic regions [C]// ASCE Structures Congress 2012, 2012.
- [7] Kurama Y C, Weldon B D, Shen Q. Experimental evaluation of posttensioned hybrid coupled wall subassemblages[J]. Journal of Structural Engineering, 2014,132(7):1017-1029.
- [8] 孙巍巍, 孟少平, 蔡小宁. 后张无粘结预应力装配式短肢剪力墙拟静力试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2011 (3):422-426.
Sun W W, Meng S P, Cai X N. Quasi-static test research of unbonded post-tensioned assembly short limb shear wall [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011(3):422-426. (in Chinese)
- [9] 孙巍巍, 孟少平. 后张无粘结预应力装配混凝土联肢抗震墙的连梁组合体抗侧性能[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2007(2):190-194.
Sun W W, Meng S P. Lateral lload behavior of unbonded post-tensioned coupled concrete wall subassemblages[J]. Journal of Southeast University : Natural Science Edition, 2007(2):190-194. (in Chinese)
- [10] 华川. 带暗支撑型钢高强混凝土低矮剪力墙抗震性能的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
Hua C. Experimental study on seismic behavior of steel reinforcement high-strength concrete low shear wall with concealed bracings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [11] 金伟良, 徐铨彪, 潘金龙, 等. 不同构造措施混凝土空心小型砌块墙体的抗侧力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001(6):64-72.
Jin W L, Xu Q B, Pan J L, et al. Experimental study on lateral resistance behavior of small concrete hollow block wall with different constructional measures[J]. Journal of Building Structures, 2001(6):64-72. (in Chinese)
- [12] 李振威, 刘伟庆, 蓝宗建, 等. 设置芯柱的混凝土小型空心砌块墙体抗震性能研究[J]. 工程抗震, 1999(2):8-11.
Li Z W, Liu W Q, Lan Z J, et al. Experimental study on seismic behavior of masonry walls made up of small-sized hollow concrete blocks with core columns[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1992(2):8-11. (in Chinese)
- [13] 邬瑞锋, 贾阿兴, 奚肖凤, 等. 外加钢筋混凝土构造柱提高砖墙抗震性能的试验和分析[J]. 大连工学院学报, 1983(4):17-24.
Wu R F, Jia A X, Xi X F, et al. Test and analysis of the earthquake-resistant behaviour of the brick-walls with reinforced concrete columns [J]. Journal of Dalian University of Technology, 1983(4):17-24. (in Chinese)
- [14] 刘锡荟, 张鸿熙, 刘经纬, 等. 用钢筋混凝土构造柱加强砖房抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报, 1981(6):47-55.
Liu X H, Zhang H X, Liu J W, et al. A study of seismic characteristics of masonry building with reinforced concrete tie-columns[J]. Journal of Building Structures, 1981(6):47-55. (in Chinese)
- [15] 施楚贤, 梁建国. 设置砼构造柱的网状配筋砖墙的抗震性能[J]. 建筑结构, 1996(9):9-14.
Shi C X, Lian J G. The seismic behavior of the brick masonry wall with rc constructional columns and steel networks in bed joints[J]. Building structure, 1996(9):9-14. (in Chinese)
- [16] 李利群, 刘伟庆. 设置构造柱的混凝土小型空心砌块砌体抗震性能的研究[J]. 工程抗震, 2001(4):16-20.
Li L Q, Liu W Q. The seismic behavior of the small size concrete hollow block walls established with reinforced concrete constructional columns [J]. Earthquake Resistant Engineering, 2001(4):16-20. (in Chinese)
- [17] 左淑红, 熊立红, 田志敏. 约束混凝土小砌块墙片低周反复荷载下的抗震性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2012(1):22-27.
Zuo S H, Xiong L H, Tian Z M. Study on seismic characters of small concrete block restrained masonry walls on low cycle loading[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2012(1):22-27. (in Chinese)