

装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验

陈云钢^{1,2}, 刘家彬¹, 郭正兴¹, 张建奎¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 210096 南京; 2. 安徽工业大学 建筑工程学院, 243002 安徽 马鞍山)

摘要:为综合评价水平拼缝采用竖向钢筋浆锚搭接的装配式混凝土剪力墙抗震性能,采用2个装配式和1个现浇的足尺试件进行低周反复荷载试验.试验结果表明:对于破坏形态,装配式混凝土剪力墙内墙试件与现浇试件基本相同,装配式混凝土剪力墙外墙试件与现浇试件有区别;各试件的滞回曲线均较饱满,骨架曲线走势基本一致,耗能能力接近;各试件极限位移角 $1/56 \sim 1/49$,位移延性系数均为4;装配式混凝土剪力墙试件较现浇试件初期刚度有所降低,外墙试件水平拼缝上移后,承载能力有所提高.

关键词:装配式剪力墙;水平拼缝;浆锚搭接;抗震性能

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)06-0083-07

Test on seismic performance of precast shear wall with reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections

CHEN Yungang^{1,2}, LIU Jiabin¹, GUO Zhengxing¹, ZHANG Jianxi¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, 210096 Nanjing, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, 243002 Ma'anshan, Anhui, China)

Abstract: To comprehensively evaluate the seismic performance of precast concrete shear wall with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections, two fabricated and a cast-in-place concrete shear wall with full scale specimens were tested under low cyclic loading. The test results show that the concrete interior shear wall specimens (JN) is basically the same as the cast-in-place specimen (XJ) in failure modes, but the concrete exterior shear wall specimen wall (JW) is different with the XJ. The hysteresis curve of the specimen is full, the trend of the skeleton curve is basically the same and the capacity of the energy dissipation is close. The ultimate displacement angle of each specimen is $1/56 - 1/49$ and the displacement ductility factor are 4. The initial stiffness of JW, JN are lower than the XJ, and the force behavior is improved in exterior wall specimens (JW) with the setting position of horizontal connections moved up.

Key words: precast shear wall; horizontal connections; grouted and splicing; seismic performance

随着我国“建筑工业化、住宅产业化”进程的加快,装配式混凝土剪力墙结构应用越来越广泛.近年来,国内众多高校科研院所及企业逐渐形成了各具特点的装配式剪力墙结构技术^[1-5].

装配式混凝土剪力墙是竖向分层预制墙板通

过水平拼缝连接形成整体.由于水平拼缝对受剪面的削弱,若连接措施处理不当,很容易成为剪力墙构件的薄弱部位,国外学者也曾做过类似研究^[6-9].合理的水平拼缝现浇连接带、竖向钢筋混合连接和拼缝混合处理方法,对装配式剪力墙抗震性能影响的研究就显得尤为必要.在已对装配式混凝土剪力墙的竖向连接节点进行了部分抗震性能试验的基础上^[10-11],本文对水平拼缝竖向钢筋浆锚搭接内外墙进行探讨,通过低周反复荷载加载试验,综合评价其抗震性能,为后续研究提供试验基础.

收稿日期: 2012-10-11.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ10B03):
装配式建筑混凝土剪力墙结构关键技术研究.

作者简介: 陈云钢(1975—),男,博士研究生;
郭正兴(1956—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 陈云钢, mascyg@163.com.

波纹管浆锚外墙拼缝的构造,见图1。拼缝处采用了“外高内低”的“Z”形拼缝,以达到外墙防水的目的。灌浆孔设置在墙体内侧,便于在结构内部灌浆施工,通过安装斜向支撑固定和校正垂直度,施工简便。

浆锚内墙水平拼缝设计在楼板处,施工时可将上下层预制内墙接头和板接头同时浇筑,位于叠合板上部的剪力墙两侧设置有两排用于注浆的注浆管,注浆管与预留插筋位置一一对应,如图2所示。剪力墙与预制叠合板通过钢筋搭接连接成为一个整体,能够承受竖直与水平方向外力。通过注浆管与预留插筋保证上下构件的连接及钢筋的连续性;通过灌浆,使水平施工缝填充密实;通过预留插筋与现浇节点整浇,保证钢筋的连续性和构件的可靠连接。

目前这两种构造已应用于工程实践^[12],能降低周转材料的损耗,预制构件在工厂内产业化生产,现场仅进行安装和注浆作业,能提高施工效率 and 经济效益。

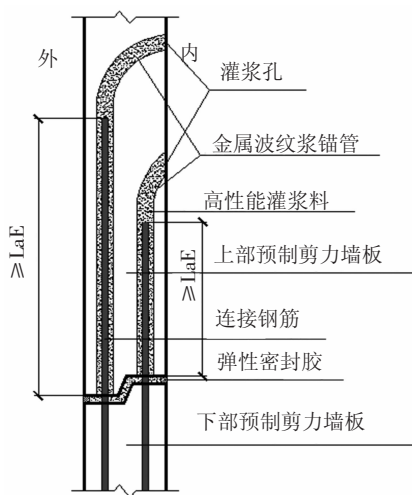


图1 波纹管浆锚外墙水平拼缝构造

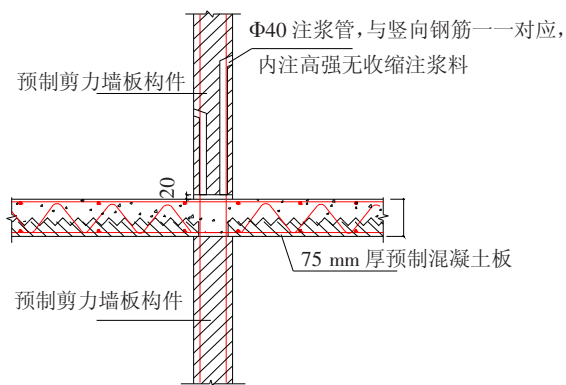


图2 波纹管浆锚内墙水平拼缝构造

1 试件设计

试件采用1:1足尺比例模型,共做3个试件,

其中现浇1个,记为XJ,浆锚内墙1个,记为JN,浆锚外墙1个,记为JW。为了与装配式剪力墙试件更好地对比,现浇试件在施工中设置水平施工缝,施工缝位置为试件底座与剪力墙接合面。现浇试件设计见图3。装配式浆锚外墙试件分为上下两段墙体,下段预制墙预留竖向插筋,上段预制墙与下段墙插筋对应位置处预留600、1 000 mm两种长度规格的Φ40镀锌金属波纹管,待上、下段墙体竖向插入拼装就位后,在波纹管管道内灌注高强无收缩灌浆料,实现两段墙体的浆锚连接。拼缝处采用了“外高内低”的“Z”形拼缝,以达到外墙防水的目的。设计见图4。装配式浆锚内墙拼缝位置设置在楼板标高处,设计见图5。

2 试验加载制度和加载装置

试验在东南大学结构试验室进行,水平荷载加载设备为1 000 kN作动器。试验时在水平方向设置钢梁夹紧试件底座,以防止实验试件出现水平滑移。轴压采用张拉预应力钢绞线方式施加,轴压比控制为0.10。钢绞线锚固端采用特制的可微转动锚具,以保证结构侧移时钢绞线不产生折角,保持轴压恒定。水平荷载采用力和位移混合控制加载模式,模型屈服前以力控制加载,每级循环1次,屈服后以屈服位移控制加载,每级循环3次^[13]。试验加载装置见图6。试验过程中规定MTS外推时为正,内拉时为负。

3 试验结果

各试件的受力全过程基本相同,大致经历了未裂阶段、开裂阶段、屈服阶段以及破坏阶段。

1) 试件XJ:加载初期,试件基本上处于弹性状态,加、卸载后残余变形很小。力控制的第六级加载过程中,作动器水平推力为210 kN左右时,墙体受拉侧(左侧)距墙底250~440 mm位置出现水平裂缝,进入开裂阶段,水平推力为350 kN左右时,墙体右侧出现裂缝,随着荷载等级提高,水平弯曲裂缝转变为弯剪斜裂缝,并向对角延伸,400 kN时出现左右侧裂缝贯通现象,钢筋屈服,试件进入屈服阶段,屈服位移 $\Delta = 15$ mm,之后进入位移控制加载阶段,至 3Δ 后几乎不出现新裂缝,表明此时剪力墙底部塑性铰完全形成,水平力达到最大值601 kN,至60 mm位移时,墙体根部钢筋裸露,混凝土压碎,承载力下降至极限承载力85%以下,试件破坏,破坏形态表现为弯剪破坏。裂缝开展、底座与墙结合部位破坏见图7(a)、(d)。

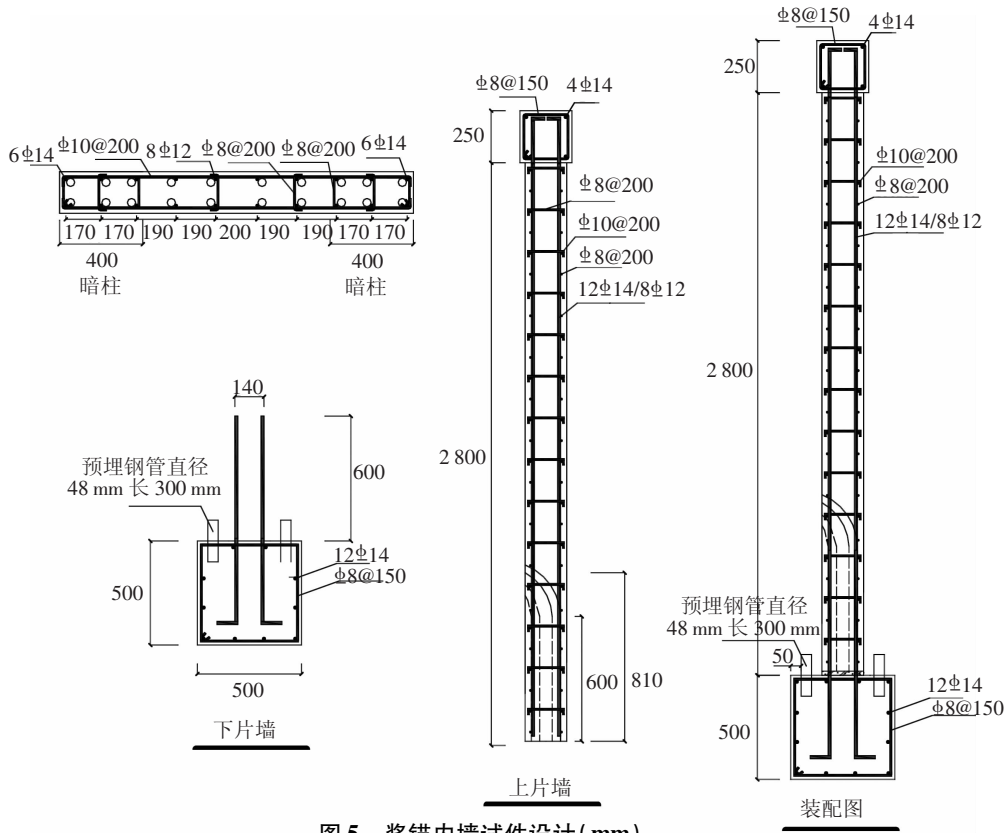


图 5 浆锚内墙试件设计 (mm)

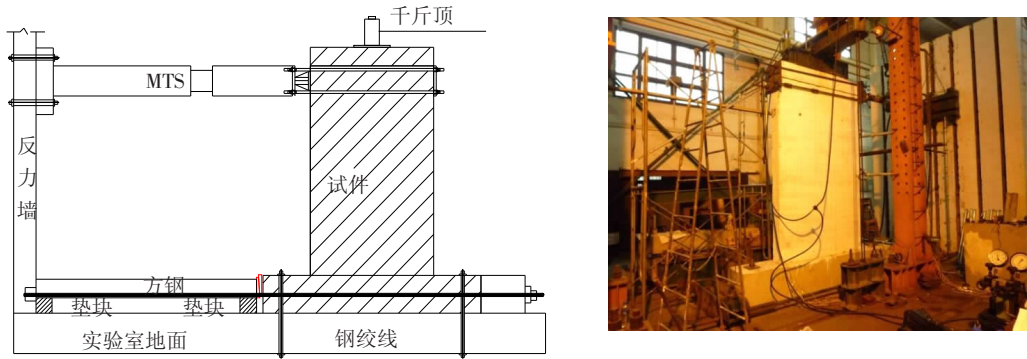


图 6 加载装置图

2) 试件 JW:加载初期试件处于未开裂弹性阶段,加、卸载位移曲线基本重合;荷载加至 170 kN时,剪力墙水平拼缝处出现裂缝,随着水平力的增加,拼缝处裂缝不断延伸,逐渐形成水平通缝,并且预制墙板开始出现水平裂缝.当荷载达到 350 kN 时,边缘构件拼缝处竖直分布钢筋屈服,试件进入屈服阶段,屈服位移为 13 mm,试验转为位移控制阶段.水平位移至四倍屈服位移,即 -52 mm时,水平力达到最大值 -613 kN,对 52 mm级水平位移施加第二次循环时,水平缝两端混凝土压溃,出现大面积剥落,钢筋裸露,试验终止.试件 JW 的破坏形态表现为上段墙肢的弯剪破坏及下段墙肢拼缝面角部混凝土的压碎,与试件 XJ 的破坏形态有所差异,其破坏照片见图 7(b)、(e).

3) 试件 JN:加载初期,试件基本上处于弹性状态,加、卸载后残余变形很小.荷载加至 210 kN 时,水平拼缝结合面处出现裂缝,随着水平力的增加,裂缝不断延伸,至 -290 kN 时水平拼缝处裂缝贯通,且预制墙体出现水平裂缝,荷载继续增加,裂缝向对角线延伸;当荷载达到 -330 kN 级时,边缘构件拼缝处竖直分布钢筋屈服,试件进入屈服阶段,屈服位移为 14 mm,试验转为位移控制阶段.水平位移达到 42 mm 时,水平荷载达到极限值 -581 kN,之后,随着位移的增加,荷载开始减少,水平位移达到 56 mm 时,水平缝两端混凝土压溃,出现大面积剥落,钢筋裸露,试验终止.试件 JN 的破坏形态表现为墙肢的弯剪破坏,与试件 XJ 基本相同.其整体和局部破坏形态照片见图 7(c)、(f).

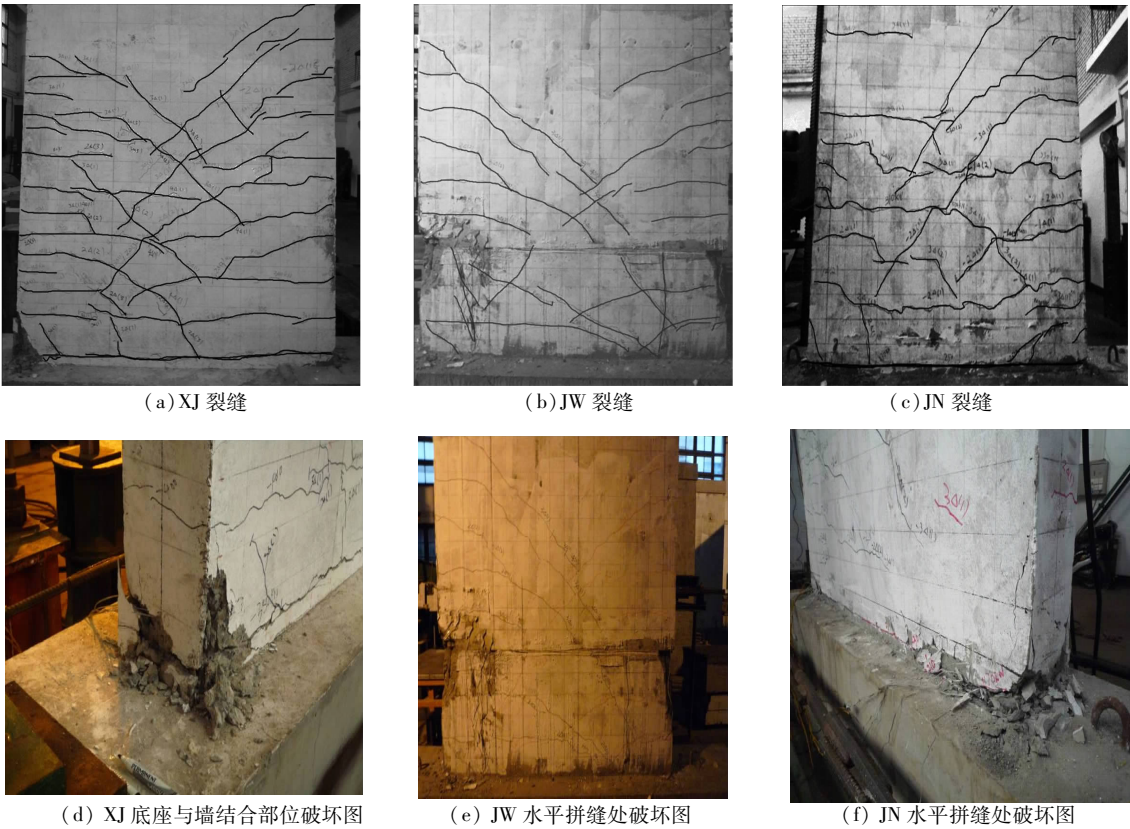


图 7 试件破坏形态

从裂缝图来看,现浇试件下部水平裂缝较多,上部还是以斜裂缝为主,表现为典型的弯剪破坏特征。

外墙试件 JW 水平拼缝以上部位交叉斜裂缝明显,表现为与现浇试件相同的弯剪破坏特征,但由于有水平拼缝的存在,斜裂缝发展被水平拼缝阻隔,下段墙肢拼缝面角部混凝土压碎,水平拼缝下部墙体斜裂缝明显减少。

内墙试件裂缝表现形式与现浇试件相似,破

坏特征与现浇试件也基本相同。

4 试验分析

4.1 滞回曲线、骨架曲线

各试件的滞回曲线、骨架曲线见图 8。可以发现,现浇试件与装配式混凝土剪力墙试件的滞回曲线形状基本一致,各滞回环相对饱满,均呈反“S”型。

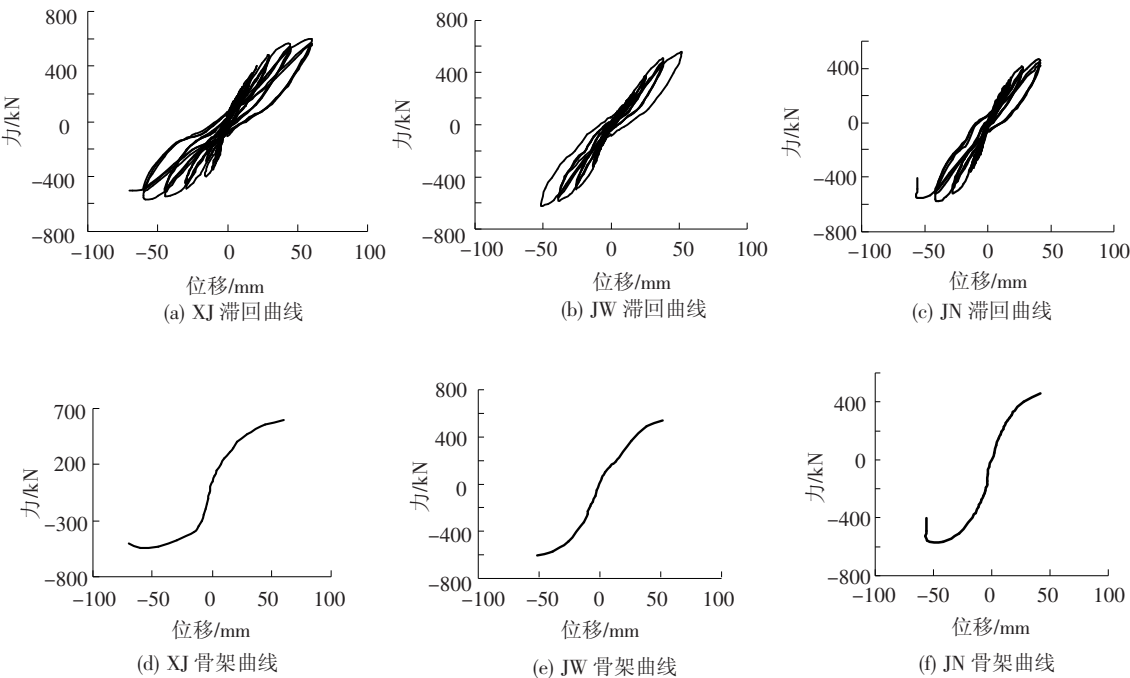


图 8 各试件滞回曲线、骨架曲线

对于滞回曲线,各试件具有如下共性:在开裂后至屈服前,滞回环处于稳定发展阶段,卸载后残余变形很小,滞回环面积也小,耗能较小;屈服后,滞回环面积明显增大,耗能也增加,在同一位移级别下,后面循环与第一次循环相比,强度和加载刚度均有明显退化,而卸载刚度的退化不明显,滞回环呈反“S”型,表明了较好的耗能能力;达到极限承载力后,承载力下降缓慢,滞回曲线平缓下降,表现出良好的延性,此时,滞回环出现较明显的捏缩,整体偏向于位移轴,滞回环有向“Z”型过渡的趋势.从滞回曲线上看,三者耗能能力相当.

从各个试件的骨架曲线看,装配式混凝土剪力墙试件与现浇试件曲线走势基本一致,表现出相近的发展规律.

4.2 承载能力

各试件的开裂水平力 F_{cr} 、屈服水平力 F_y 和峰值水平力 F_p 见表 1,对比 XJ、JW、JN 试件可以看出,峰值水平力中,JW 承载能力高于 XJ 和 JN,说明浆锚位置上移对提高抗弯承载力有一定作用.分析认为是由于水平拼缝位置的上移,使试件薄弱部位避开了受力最不利位置,进一步改善了试件受力状态.对装配式剪力墙的抗弯承载力有一定改善作用.

表 1 承载力试验结果对比

试件	F_{cr}/kN	F_y/kN	F_p/kN
XJ	210	400	601
JW	170	350	613
JN	210	330	581

4.3 变形能力

各个试件的屈服位移 Δ_y 、屈服位移角 θ_y 、极限位移 Δ_u 、极限位移角 θ_u 和位移延性系数 μ 见表 2.可以看出,3 个试件的极限位移角均大于 $1/120^{[14]}$,均具有较好的变形能力.各试件延性系数均为 4,具有较好的延性.

表 2 加载特征值、延性对比

试件	Δ_y/mm	θ_y	Δ_u/mm	θ_u	μ
XJ	15	1/195	60	1/49	4
JW	13	1/225	52	1/56	4
JN	14	1/209	56	1/52	4

4.4 刚度

根据文献[15]的定义,将往复水平力作用下每次循环最大位移的割线刚度定义为等效刚度 K ,图 9 为试件等效刚度退化曲线,各试验墙体刚度退化趋势大致相同.

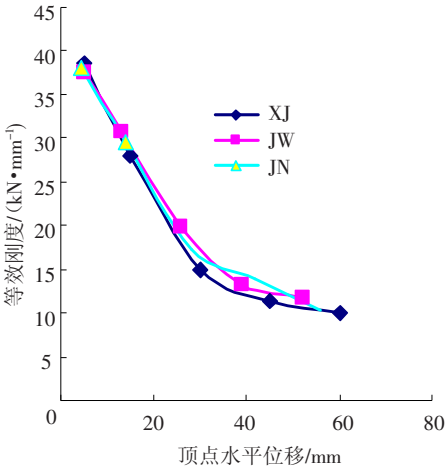


图 9 刚度退化

与现浇混凝土剪力墙试件 XJ 相比,JW、JN 试件开裂刚度较 XJ 小,XJ 刚度退化曲线前期较 JW、JN 试件要陡,但后期 JW、JN 试件的屈服刚度和极限刚度均比 XJ 试件大,且 JW、JN 试件刚度退化曲线较 XJ 曲线陡,说明 JW、JN 试件后期刚度退化快.其中,JW 外墙试件,虽然开裂较早、初期刚度较小,但与内墙试件比较,其表现更加接近于现浇试件.

4.5 耗能能力

结构耗散能量的能力以一周滞回环所包围的面积来衡量^[13].各试件的等效粘滞阻尼系数见表 3.可以看出,JW、JN 试件与现浇试件 XJ 基本接近.

表 3 各试件的等效粘滞阻尼系数

加载特征阶段	XJ	JW	JN
开裂荷载阶段	0.040 830	0.038 002	0.033 490
屈服荷载阶段	0.052 764	0.048 348	0.047 514
极限荷载阶段	0.098 894	0.093 559	0.092 742

5 结 论

- 1)对于破坏形态,装配式混凝土剪力墙内墙试件(JN)与现浇试件(XJ)基本相同,均为墙肢的弯剪破坏,而装配式混凝土剪力墙外墙试件(JW)则有所区别,其破坏形态表现为上段墙肢的弯剪破坏及下段墙肢拼缝面角部混凝土的压碎.
- 2)各试件的滞回曲线均较饱满,呈反“S”型,三者耗能能力基本接近;各试件的骨架曲线走势基本一致,表现出相近的发展规律.
- 3)与现浇试件相比,由于水平拼缝的存在,装配式内外墙试件的开裂较早,初期刚度有所降低,JW 外墙试件水平拼缝位置上移,对装配式剪力墙的承载能力有一定改善作用.

4)各试件的变形能力均满足规范要求的层间位移角要求,且各试件的位移延性系数均为4,满足延性要求。

参考文献

- [1] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等. 预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):28-31,36.
- [2] 刘文清,姜洪斌,耿永常,等. 插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接构件:中国,ZL 200820090150.6 [P]. 2009-4-8.
- [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] 钱稼茹,彭媛媛,秦珩,等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):7-11.
- [5] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等. 竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):1-6.
- [6] SOUDKI K A. Behavior of horizontal connections for precast concrete load bearing shear wall panels subjected to large reversed cyclic deformations [D]. Winnipeg, Manitoba: University of Manitoba,1994.
- [7] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, LEBLANC B. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections[J]. PCI Journal,1995,40(4):78-96.
- [8] SOUDKI K A, RIZKALLA S H, DAIKIW R W. Horizontal connections for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 2: prestressed connections[J]. PCI Journal, 1995, 40(5): 82-96.
- [9] SOUDKI K A, WEST J S. RIZKALLA S H, *et al.* Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading [J]. PCI Journal, 1996, 41(3): 64-80.
- [10] 朱张峰,郭正兴. 装配式短肢剪力墙平面模型抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(4):94-99.
- [11] 朱张峰,郭正兴. 预制装配式剪力墙结构节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(1):69-76.
- [12] 张军,侯海泉,董年才,等. 全预制装配整体式剪力墙结构住宅施工技术[J]. 施工技术,2010,39(7):96-98.
- [13] 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.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [15] 连星. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析及理论研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.

(编辑 赵丽莹)