

不同连接构造的装配式混凝土剪力墙 抗震性能试验研究*

朱张峰^{1†}, 郭正兴², 朱寅², 李亚坤²

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 试验研究了2种不同连接构造的装配式混凝土剪力墙抗震性能, 第一种为钢筋浆锚搭接干式连接节点, 第二种则在第一种基础上进行构造变化, 边缘构件局部现浇, 墙肢中部仍然采用钢筋浆锚搭接连接, 形成干、湿混合连接节点. 分别制作1片干式连接节点、1片混合连接节点足尺试件进行低周反复荷载加载试验, 并与同条件现浇试件进行对比. 试验结果表明, 在承载力、刚度、位移延性及耗能能力等方面, 2种装配式试件均与现浇试件相当, 其抗震能力可认为与现浇等同. 同时, 混合连接节点试件虽在耗能方面稍优于干式连接节点试件, 但优势并不明显, 且考虑到其施工工艺复杂, 现浇混凝土浇筑质量较难得到保障, 易对节点抗震性能产生明显不良影响, 故不建议采用.

关键词: 预制混凝土; 剪力墙; 抗震性能; 干式连接; 混合连接

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

Experimental Investigation on Seismic Performance of Precast Concrete Shear Walls with Different Connections

ZHU Zhangfeng^{1†}, GUO Zhengxing², ZHU Yin², LI Yakun²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Two different types of horizontal connections for precast concrete shear walls are proposed and tested to evaluate their seismic performance. One is dry connection with vertical reinforcing bars anchored into the grout-filled metal bellows embedded in the precast wall, while the other is hybrid connection where the boundary elements are formed by locally placing concrete with vertical reinforcing bars lapping in the cast-in-place concrete, and the reinforcing bars placement is the same that of the dry connection. Three full-scale specimens of the dry connection, hybrid connection, and cast-in-place connection were prefabricated and tested under the low-cycle reverse loading. The measured results showed that both the precast specimens performed similarly, such as the strength, stiffness, displacement ductility, and energy dissipation capacity, and they possessed comparable seismic performance when compared with the cast-in-place specimen. Meanwhile, the seismic behavior of the hybrid connection was obviously dependent on the pouring quality of the locally placing concrete. Because of the complexity in the construction technology for the concrete placing of hybrid connection, it is difficult to ensure the quality, and the seismic

* 收稿日期: 2016-01-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAJ10B03), 12th Five-year National Science and Technology Support Program(2011BAJ10B03)

作者简介: 朱张峰(1985-), 男, 江苏泰兴人, 南京工业大学讲师, 工学博士

† 通讯联系人, E-mail: zzfking2210@163.com

performance is considerably weakened. Therefore, it is not recommended to apply the hybrid connection in precast concrete shear walls.

Key words: precast concrete; shear walls; seismic performance; dry connection; hybrid connection

“等同现浇”是装配式混凝土结构设计的一个重要理念,其含义即通过合理的设计与构造使装配式混凝土结构性能等同于甚至优于传统现浇混凝土结构^[1].

国外对装配式混凝土结构的研究起步较早,已基本形成了成熟的“等同现浇”技术体系,除了文献[1]外,文献[2]同样给出了详细的设计与构造措施建议.以 Kurama 等^[3-4]为代表的学者,对“等同现浇”装配式混凝土剪力墙结构进行了相关试验研究.

在我国政府大力促进建筑工业化转型的政策引领下,装配式混凝土结构逐渐成为学术界、工程界的研究热点,尤其在住宅产业化的促进下,装配式混凝土剪力墙结构得到更多的关注.“等同现浇”是我国研发装配式混凝土结构的主要方向,并被反映到最新颁布的《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)^[5]中.以钢筋套筒灌浆连接、钢筋浆锚搭接连接等干式连接和叠合板式剪力墙为代表技术的装配式混凝土剪力墙结构抗震性能被大量学者深入研究^[6-13],取得了大量试验研究成果.

本文基于钢筋浆锚搭接连接技术,针对装配式剪力墙水平连接节点,提出一种混合连接技术(如图1所示),其技术特点包括:1)剪力墙边缘构件部位混凝土局部现浇;2)剪力墙竖向钢筋在现浇区内搭接连接,并在搭接钢筋外周设置螺旋箍筋;3)剪力墙中部分布区钢筋仍然采用浆锚搭接连接.

混合连接节点中,中部分布区预制混凝土可作为预制墙板安装时的支腿,边缘构件部位混凝土局部现浇可在一定程度上避免干式连接节点中普遍存在的混凝土破坏集中于水平拼缝附近的现象.但由于混合节点涉及到混凝土湿作业,其施工工艺较干式节点复杂,为保证现浇混凝土的饱满、密实,在预制墙板内预留竖向孔道,作为混凝土高位灌注的浇筑孔.

为验证混合连接节点的抗震可靠性,并比较其与钢筋浆锚搭接连接的干式连接节点的优劣,开展相关模型抗震性能试验,并与对比现浇模型比较,从破坏形态、承载力、刚度、位移延性及耗能等方面评价2种节点的抗震能力.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验中共制作3个足尺试件,分别为1个现浇试件(XJ),1个钢筋浆锚搭接连接的干式节点试件(PW1),1个混合连接节点试件(PW2).为确保试验可比性,各试件尺寸、所用材料均相同.对于重要的配筋构造,保持各试件剪力墙自身配筋均相同.对于装配式节点,则根据连接技术需要,增设相应的浆锚钢筋、搭接钢筋或螺旋筋.

各试件均包括底座、剪力墙与加载梁3部分,其中,剪力墙尺寸为200 mm(墙厚)×1 700 mm(墙长)×3 400 mm(墙高),采用C35混凝土浇筑,所配钢筋均为HRB400钢筋.剪力墙边缘构件配置8Φ16竖向钢筋、Φ8@100箍筋,分布区配置6Φ10竖向钢筋、Φ10@200水平钢筋,详见图2(a).

PW1从底座伸出浆锚钢筋,长600 mm,钢筋规格与剪力墙相应位置竖向钢筋保持一致;在预制剪力墙板中预埋Φ40金属波纹管作为浆锚管,波纹管与所搭接钢筋通过扎丝绑扎在一起;采用高强度、无收缩水泥基灌浆料.PW1设计详图见图2(b).

PW2剪力墙钢筋分布区构造与PW1相同;边缘构件部位(墙端500 mm宽度范围)设置600 mm高度的局部现浇区,底座伸出竖向钢筋与剪力墙预埋竖向钢筋在现浇区域搭接,每对搭接钢筋外周设

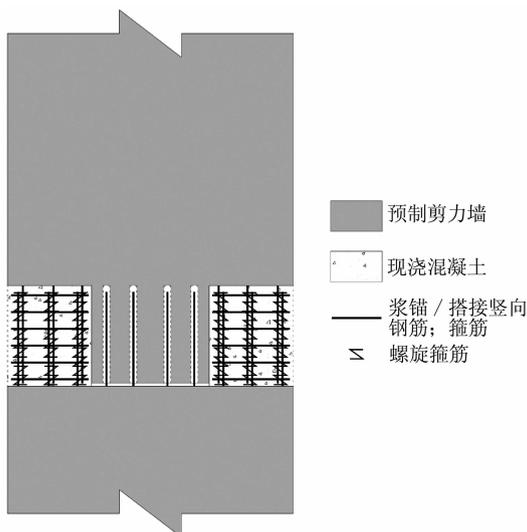


图1 混合连接技术简图

Fig. 1 Diagram of hybrid connection

置 $\Phi 4@50$ 螺旋筋 (HPB300 钢筋), 螺旋筋外径 55 mm; 现浇混凝土强度等级与剪力墙相同. PW2 设计详图见图 2(c).

1.2 试件加载

本次试验在东南大学九龙湖校区结构实验室进行, 加载简图如图 3 所示. 试件底座与实验室地板间设置 8 根 $\Phi 32$ 精轧螺纹钢, 施加预张力 300 kN. 试

件加载梁顶部设置十字形钢梁, 将通过试件两侧体外预应力钢绞线施加的竖向荷载传递给试件, 竖向荷载值为 795 kN. 水平低周反复荷载通过 1 000 kN 液压伺服控制系统 (MTS) 施加. 同时, 试件侧面设置了三角形桁架支撑 (图 2 中未示出), 防止试件扭转或失稳.

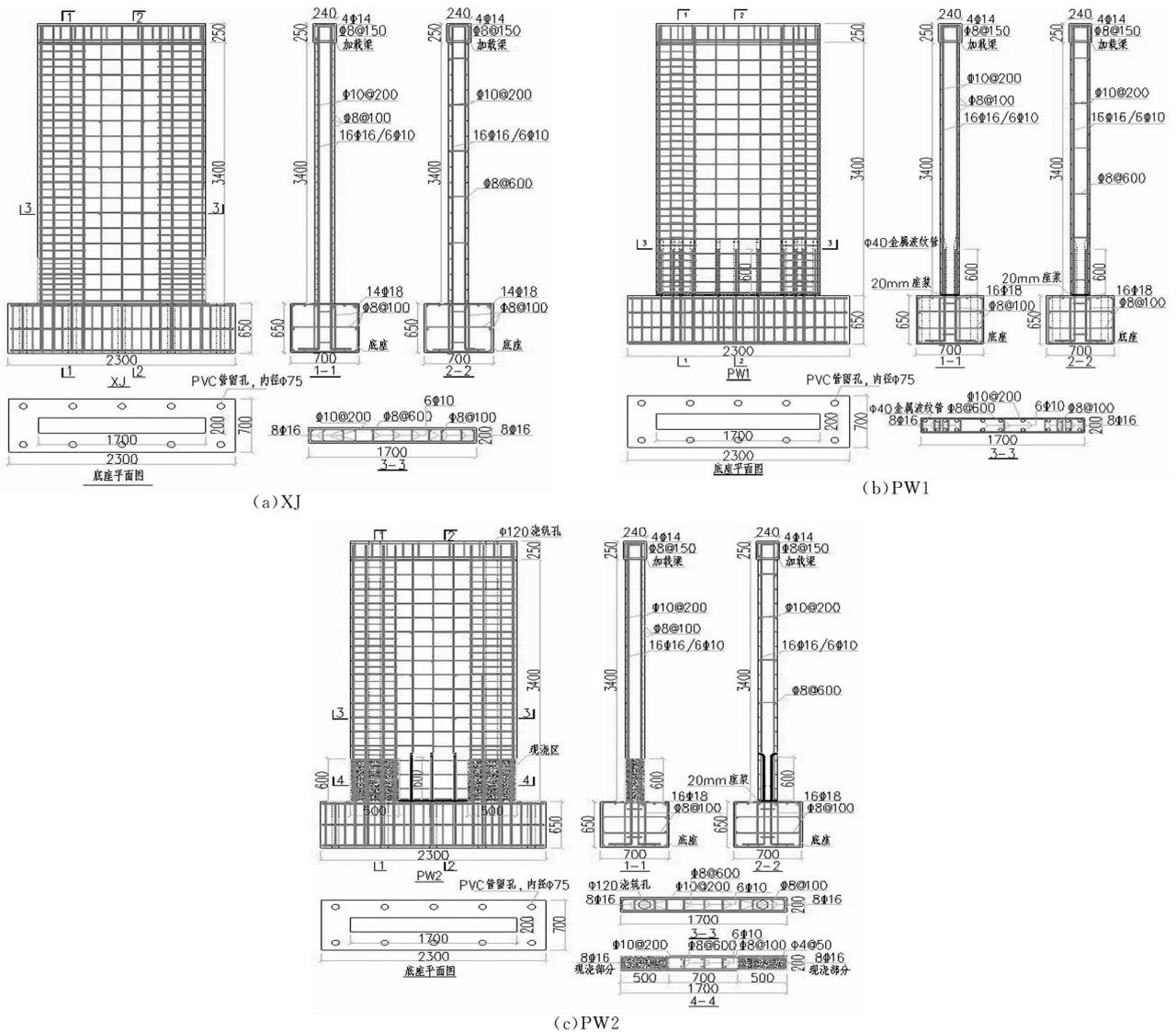


图 2 试件设计详图
Fig. 2 Design details of specimens

试验过程中, 首先张拉钢绞线施加轴压, 并保持稳定, 后施加水平荷载, 采用力和位移双控. 屈服前以力控制加载, 每级循环 1 次, 寻找开裂及屈服荷载; 屈服后以位移控制加载, 每级循环 3 次, 直至试件承载力下降到极限承载力的 85% 以下. 试验中规定 MTS 外推为正、内拉为负.

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

各试件均以受拉钢筋拉断、受压混凝土土压溃而最终破坏, 钢筋锚固失效现象均未发生, 说明浆锚搭

接连接或现浇混凝土区的钢筋搭接连接均能保证剪力墙竖向钢筋的充分受力. 试验结束时试件状态如图 4 所示. 从图中可以看出, 整体上各试件裂缝形态均为弯剪型, 且分布状态比较接近. PW1 混凝土破坏相对集中于水平拼缝附近; PW2 与其他试件相比, 比较明显的不同在于: 1) 沿现浇混凝土界面处产生裂缝, 这可能由于新、老混凝土的黏结性能较整体浇筑混凝土差所致, 但此形式裂缝对试件性能影响不大, 因为通过观察可以发现, 正向水平裂缝与反向斜裂缝均可连续跨越该裂缝; 2) 一侧现浇混凝土上部发生较严重的破坏, 而另一侧则相对完好, 这可能是由于混凝土浇筑质量不同引起的, 该部位混凝土由于混凝土骨料的沉积作用, 强度相对较低, 造成混凝土较大程度的损伤.

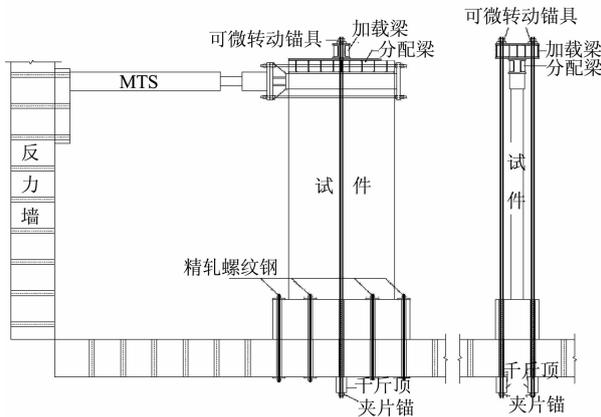
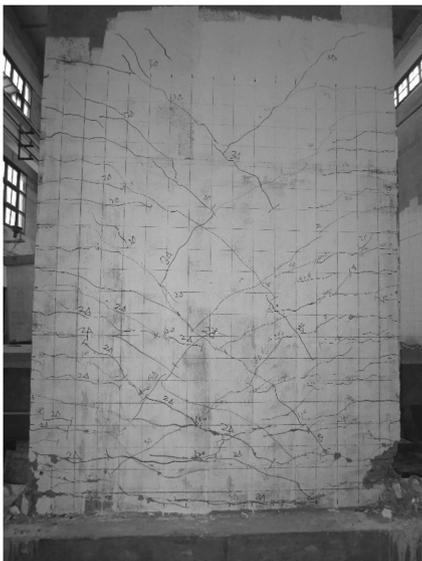


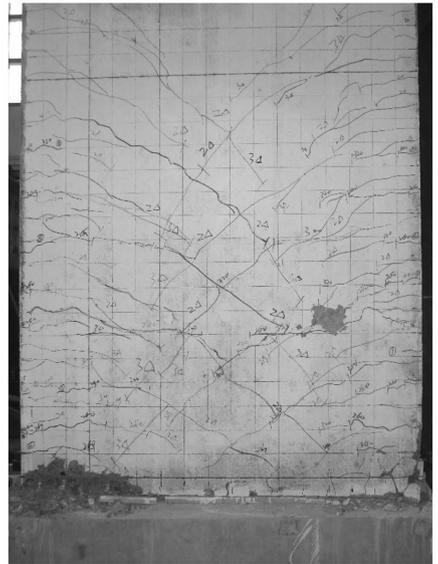
图 3 试验加载简图
Fig. 3 Diagram of test set-up

2.2 滞回曲线

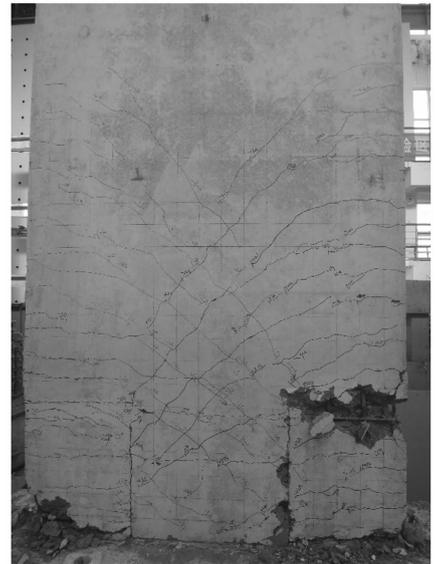
各试件滞回曲线如图 5 所示. 各试件滞回环形状基本接近, 屈服后滞回环基本呈反“S”形, 其中,



(a)XJ



(b)PW1



(c)PW2

图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of specimens

XJ 曲线最为丰满, 而 PW1 捏缩效应较其他试件较为明显. 分析认为, 该现象主要由于 PW1 塑性变形更多由水平拼缝的张开引起, 从而导致试件加、卸载初期刚度较低, 表现为滞回曲线的捏缩.

2.3 强度与刚度

各试件骨架曲线如图 6 所示, 各试件曲线走势基本接近, 屈服后直至试验结束荷载均未发生明显下降, 试件在大变形状态下仍能保持稳定的承载力.

各试件在加载过程中均经历了开裂、屈服及破坏等主要阶段, 各阶段荷载列于表 1. 与现浇试件相比, 装配式试件除开裂荷载较小外, 屈服荷载相当, 峰值荷载更高. 分析认为, 由于水平拼缝的存在, 混凝土抗裂强度不能发挥作用, 导致装配式试件开裂

较早,而 PW2 由于端部存在 2 道拼缝,因此,开裂荷载最低. 由于各试件钢筋强度均充分发挥,加载后期的屈服荷载、峰值荷载则未受水平拼缝的明显影响.

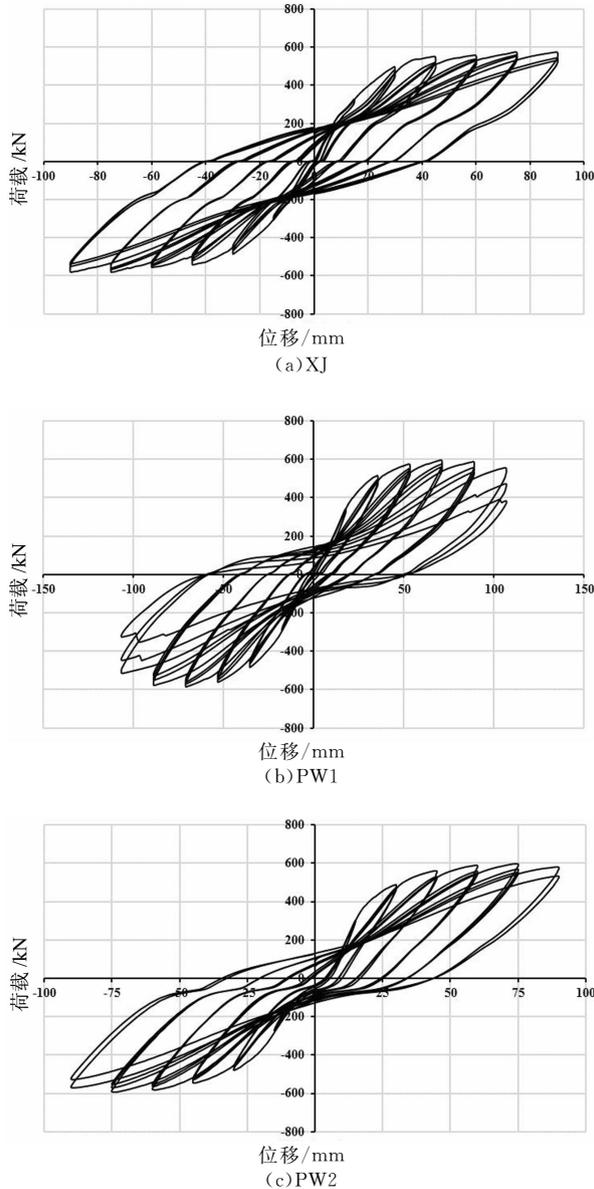


图 5 试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

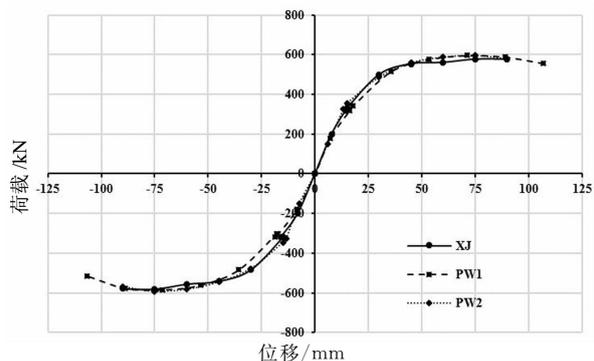


图 6 试件骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of specimens

表 1 试件荷载

Tab. 1 Observed strength of specimens

试件	开裂荷载 /kN	屈服荷载 /kN	峰值荷载 /kN
XJ	200	325	576
PW1	180	350	596
PW2	150	350	597

以加载过程中第 1 次循环的峰点割线刚度表征试件刚度,具体计算方法参考文献[12]. 各试件在整个加载过程中刚度变化如图 7 所示. 装配式试件初期由于水平拼缝的影响,试件刚度偏低,加载后期,与现浇试件基本接近,具有良好的刚度特性.

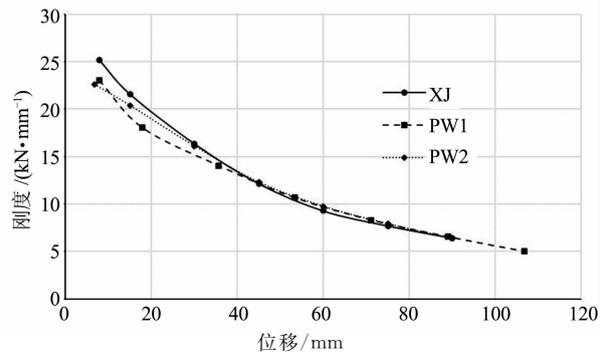


图 7 刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves of specimens

2.4 位移延性

以试件破坏时的位移与试件屈服时的位移的比值计算试件的位移延性系数. 本次试验中,试件屈服位移按受拉钢筋首次屈服时对应的位移确定. 各试件的位移延性计算结果见表 2. 装配式试件的极限变形甚至优于现浇试件,位移延性性能相同,表现出良好的变形能力和延性.

表 2 试件位移延性系数

Tab. 2 Displacement ductility of specimens

试件	屈服位移 /mm	极限位移 /mm	位移延性系数
XJ	15	90	6
PW1	17.8	106.8	6
PW2	15	90	6

2.5 耗能能力

试件能量耗散能力一般用等效黏滞阻尼系数来表征,计算方法同样见文献[14]. 各试件在加载过程中的等效黏滞阻尼系数变化曲线如图 8 所示. 各试件耗能能力均随水平位移的增大稳定提高,装配式试件具有与现浇试件基本相当的等效黏滞阻尼系数. 而由于混凝土破坏的相对集中,混凝土塑性耗能能力未充分发挥, PW1 耗能能力相对最低.

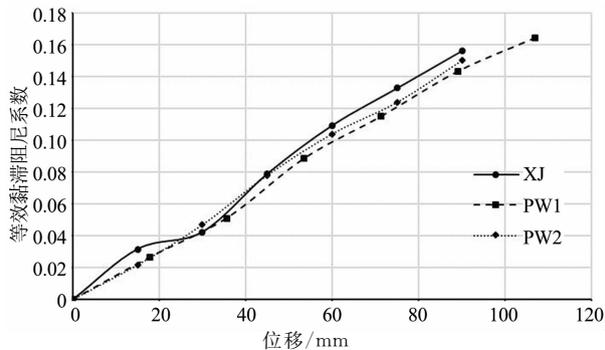


图8 试件等效黏滞阻尼系数

Fig. 8 Equivalent viscous coefficients of specimens

2.6 试件抗震性能比较

从前述数据比较可看出, PW1 和 PW2 试件在强度、刚度、延性、耗能等各方面的表现均基本接近, 且与 XJ 试件基本相当, 均表现了良好的抗震性能。

与 PW1 试件对比, PW2 试件由于边缘构件混凝土局部现浇, 一定程度上降低了水平拼缝对构件整体性能, 尤其是耗能能力的影响, 表现为滞回曲线捏缩效应减弱(比较图 5(b)(c)), 耗能能力有所提高(见图 8), 但效果并不十分明显。同时, 由于 PW2 试件的构造与工艺特点, 造成其抗裂荷载较低, 且施工工艺复杂, 混凝土的浇筑质量较难得到保障, 现浇区顶部混凝土尤其容易发生混凝土不密实问题, 该部分混凝土更易破坏(见图 4(c)), 因此, 不建议 PW2 试件采用的干、湿混合连接技术应用于实际工程。

3 结论

对 1 个现浇试件、1 个钢筋浆锚搭接连接的干式节点试件与 1 个局部现浇的混合连接节点试件开展了抗震性能试验, 试验结果表明:

1) 干式节点与混合连接节点在强度、刚度、延性及耗能能力等方面均可达到与现浇试件相当, 2 种不同连接构造的装配式剪力墙具有良好的整体性与抗震能力, 可认为达到“等同现浇”性能。

2) 干式连接中钢筋浆锚搭接连接与混合连接中钢筋在局部现浇混凝土内搭接, 均能保证剪力墙竖向钢筋强度的充分发挥。

3) 混合连接试件由于边缘构件部位局部混凝土现浇, 一定程度上消除了干式连接试件水平拼缝对试件性能的显著影响, 表现为滞回曲线捏缩效应减弱, 耗能能力提高, 但同时也带来了试件抗裂性能的降低。

4) 由于施工工艺复杂, 混合连接试件现浇区域顶部混凝土容易受到浇筑质量的影响而发生较严重的破坏, 将显著影响试件抗震性能, 因此, 不建议将

其应用于实际工程。

参考文献

- [1] ACI. Guide to emulating cast-in-place detailing for seismic design of precast concrete structures[R]. Farmington Hills; MI, 2009; 2.
- [2] PCI. PCI design handbook[M]. 7th ed. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2010; 6-1-6-116.
- [3] 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.
- [4] SMITH B J, KURAMA Y C, MCGINNIS M J. Behavior of precast concrete shear walls for seismic regions; comparison of hybrid and emulative specimens [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(11): 1917-1927.
- [5] JGJ 1—2014 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014; 85-86.
JGJ 1—2014 Technical specification for precast concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014; 85-86. (In Chinese)
- [6] 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.
QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, ZHANG Jingming, et al. Tests on seismic behavior of precast shear walls with vertical reinforcements spliced by grout sleeves [J]. Building Structures, 2011, 41(2): 1-6. (In Chinese)
- [7] 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.
QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of precast shear walls with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly [J]. Building Structures, 2011, 41(2): 7-11. (In Chinese)
- [8] 姜洪斌, 张海顺, 刘文清, 等. 预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 18-23.
JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar lapping of precast concrete structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(10): 18-23. (In Chinese)
- [9] 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.
JIANG Hongbin, ZHANG Haishun, LIU Wenqing, et al. Experimental study on plug-in filling hole for steel bar anchorage of the PC structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(4): 28-31. (In Chinese)
- [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.
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Test research on seismic performance of plane model of new precast concrete short-limbed shear wall [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(4): 94-99. (In Chinese)
- [11] 朱张峰, 郭正兴. 装配式短肢剪力墙低周反复荷载试验 [J]. 工程力学, 2013, 30(5): 125-130.
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Low-cyclic reversed load test on new precast concrete short-leg shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 125-130. (In Chinese)
- [12] 刘家彬, 陈云钢, 郭正兴, 等. 竖向新型连接装配式剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 16-24.
LIU Jiabin, CHEN Yungang, GUO Zhengxing, et al. Test on the seismic performance of precast shear wall with vertical reinforcement lapping in pore-forming on steel plate [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 16-24. (In Chinese)
- [13] 肖全东, 郭正兴. 预制双板剪力墙的耗能能力 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(9): 35-41.
XIAO Quandong, GUO Zhengxing. Energy dissipation of double-wall precast concrete shear walls [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(9): 35-41. (In Chinese)
- [14] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1989; 316.
TANG Jiuru. Seismic performance of RC frame joint [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989; 316. (In Chinese)