

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.011

钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙试验研究

赵伟^{1,4}, 童根树², 周观根³, 吴冲¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310027;
3. 浙江东南网架股份有限公司, 杭州 311209; 4. 浙江交通职业技术学院, 杭州 311112)

摘要:为改进钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙的抗震性能,将耳板装置引入钢框架与内填墙的连接中。通过2个2层单跨钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙1/3模型试件的循环荷载试验,考察耳板连接装置的可靠性和内填墙裂缝的开展与结构变形能力,分析结构的破坏机理、滞回性能、刚度退化、变形及延性等,并对钢框架内填预制混凝土剪力墙体系与现浇混凝土剪力墙体系和带竖缝混凝土剪力墙体系进行对比。研究表明:抗剪连接件(U形筋)在梁柱节点上下耳板的帮助下未发生破坏,耳板连接装置具有可靠的工作性能;合理设计的钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙结构具有良好的延性。

关键词:预制剪力墙;钢框架;滞回性能;试验研究

中图分类号:TU375.4 文献标志码: 文章编号:1674-4764(2013)01-0063-07

Experimental Investigation of Steel Frames with Infill Prefabricated Reinforce-Concrete Shear Walls

Zhao Wei^{1,4}, Tong Genshu², Zhou Guanggen³, Wu Chong¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;
2. College of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China;
3. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd., Hangzhou 311209, P. R. China;
4. Zhejiang Institute of Communications, Hangzhou 311112, P. R. China)

Abstract: In order to improve seismic performance of steel frame with prefabricated reinforce-concrete infill shear walls (SFCW), the ear bar device was used in the connection between the steel frame and the infill wall. Two one-bay, two story and one-third scaled models of SFCW were tested with low cyclic load. The working performance of ear bar connection, the cracks development in infill walls and deformation performance of SFCW were investigated. And the failure mode, hysteretic behavior, stiffness degradation, deformation and ductility and energy dissipation of composite structure were analyzed. The comparison study of steel frame with prefabricated, cast-in-place and silt reinforce-concrete infill shear walls was carried out. The results show that no failure occurs in the connection between the steel frame and the infill wall because ear plates below and up the beam-to-column connections are added in the specimens, and the connection device of ear plate presents good working performance. The properly designed SFCW has good ductility.

Key words: prefabricated shear walls; steel frames; hysteretic behavior; experimental study

收稿日期:2012-04-23

基金项目:住房和城乡建设部课题(2012-K2-19);浙江省教育厅课题(Y201225629)

作者简介:赵伟(1978-),男,副教授,博士后,主要从事结构工程研究,(E-mail)zhaowei7811@126.com。

钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙结构(简称 SFCW)是一种加工简单、可以进行工业化生产的抗侧力结构^[1-2]。但以往研究主要针对钢框架内填现浇钢筋混凝土剪力墙,还未见对钢框架内填预制钢筋混凝土剪力墙的实验研究。

文献[3-5]的研究表明:设置抗剪连接件可显著提高结构的抗侧刚度和承载力。文献[6-8]分别进行了1榀2层单跨1/3 SRCW结构的循环加载试验。梁柱采用刚接和半钢接两种连接方式,周边钢框架与内填墙界面设置了抗剪栓钉。试验结果表明:试件的破坏模式为底层内填剪力墙下部暗梁界面剪切破坏,梁端未形成明显的塑性铰。文献[9]对10榀两层、单跨1/3缩尺的半刚性 SRCW 试件进行了低周反复加载试验,研究了 SRCW 结构的破坏模式、滞回性能和耗能能力等。

本文对钢框架内填预制实体剪力墙结构的细部构造进行了改进,在柱底和柱顶设置了与实体剪力墙连接的耳板装置,该装置提供了剪力传递到剪力墙的另一条路径。通过对2榀单跨2层1/3缩尺比例 SFCW 试件的滞回性能试验,验证了耳板连接装置的可行性,明确了 SFCW 结构的抗震性能,并可对相关规范修订和工程应用提供借鉴。

1 试验概况

1.1 试件

设计了2榀单跨2层1/3缩尺 SFCW 试件。2试件尺寸完全相同,试件的跨度和层高分别为1 900、1 200 mm;钢框架梁柱均为焊接 H 形截面,其中梁为窄翼缘截面,尺寸为 H150×150×6×8,柱为宽翼缘截面,尺寸为 H150×100×6×8;梁柱采用栓焊混合连接节点。钢材等级为 Q235B;内填墙为预制实体钢筋混凝土墙,混凝土设计强度等级分别为 C20 和 C15,钢筋等级为 HPB235。为叙述方便,将混凝土等级为 C20 和 C15 的试件分别命名为 SF-CW-1 和 SFCW-2。钢框架和剪力墙的细部构造分别如图 1 和图 2 所示。为避免抗剪件的拔出或混凝土的劈裂破坏,在剪力墙的周边设置了暗柱与暗梁。暗柱与暗梁的纵向钢筋相互搭接,增强了剪力墙的整体性。暗柱和暗梁纵筋配筋率为 2.1%,箍筋配筋率为 0.63%。抗剪件采用 U 形钢筋,在设计中考虑了轴向拉力和循环荷载对其承载力的折减^[9]。

表 1 和表 2 分别给出了钢材、钢筋和混凝土的实测力学性能。

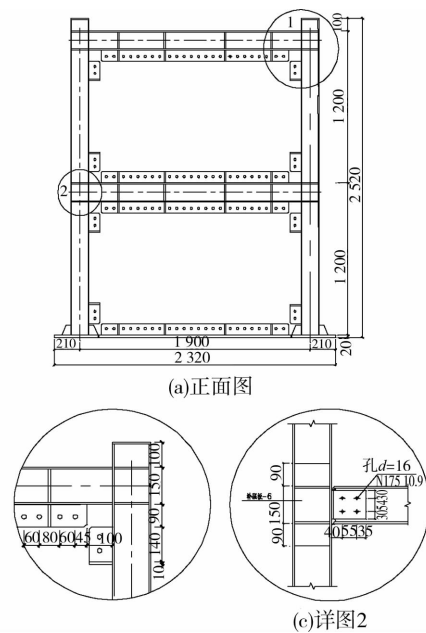


图 1 试件几何尺寸

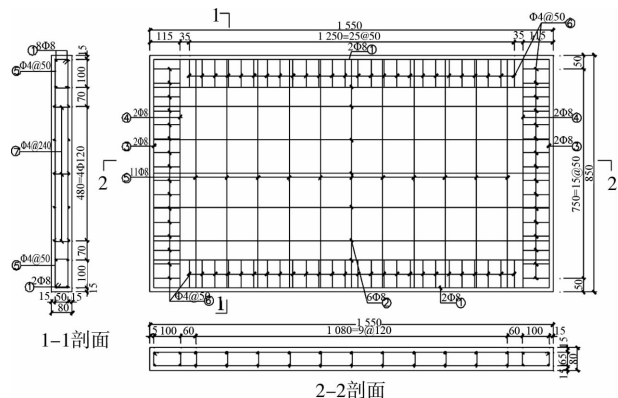


图 2 内填墙配筋图

表 1 钢板和钢筋力学性能

类型	厚度或直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
连接件翼缘和腹板	9.24	294.16	426.98
梁和柱翼缘	7.10	336.14	457.10
梁和柱腹板	5.22	295.44	430.54
Φ8 钢筋	7.89	402.32	516.30
Φ6 钢筋	6.42	410.03	499.45

表 2 混凝土力学性能

对应试件	所在位置	抗压强度/MPa	
		28 d	试验当天
SFCW-1	1 层	17.0	22.3
	2 层	17.2	21.6
SFCW-2	1 层	12.1	14.7
	2 层	10.4	13.2

1.2 试验装置

图 3 为试验加载装置图。图中,MTS 液压伺服加载装置用来施加水平荷载,水平荷载主要通过加载梁传给试件顶梁,加载梁与试件顶梁的上翼缘相连。试件的柱脚和剪力墙分别与地梁上翼缘采用高强螺栓连接;地梁两端设置了 2 个压梁,且地梁的两端分别设置了 200 t 的千斤顶和与反力墙相连的连梁,以阻止试件滑动。

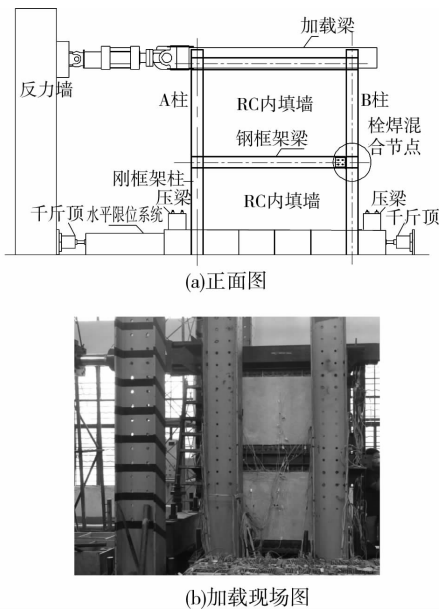


图 3 试验装置图

1.3 连接装置

剪力墙与钢框架梁及耳板与柱的连接方式如图 4 所示。由图 4(a)可知,鱼尾板的一块连接板与钢梁采用角焊缝焊接;另一块连接板与剪力墙同时浇筑。U 型筋(如图 4(b)所示)背面与连接板进行焊接,开口端插入剪力墙的暗梁中,并与暗梁浇筑为整体。剪力墙和框架梁间采用高强螺栓连接,且为防止 U 形钢筋发生连续剪断破坏,在框架柱底和柱顶均设置了耳板连接件(图 4(c)所示)。

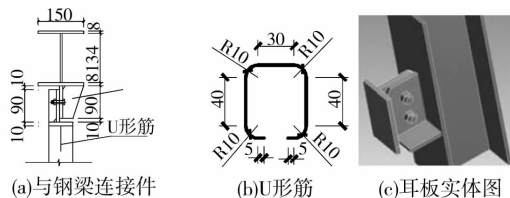


图 4 连接件

采用荷载和位移混合控制方法施加水平荷载^[10]。试件屈服前采用荷载控制加载,预加载 50 kN 循环 1 次,100、200、250 kN 各循环 3 次,试件屈服后改为位移控制加载,以试件高度的 0.25%

(6 mm)为增量加载,每级循环 3 次;峰值荷载后,每级循环 2 次;低于峰值荷载的 85%后,再加载 1 个循环后停止加载。

2 试验过程

由于试件 SFCW-1 和试件 SFCW-2 的试验现象相似,以试件 SFCW-1 为例叙述试验现象。

200 kN 时,1 层内填墙左下角出现 2 条 45° 细微裂缝,2 层内填墙与中梁连接处出现 1 条 45° 斜裂缝。荷载为 300 kN 时,高强螺栓开始滑移。1 层墙沿对角方向出现 3 条细小斜裂缝,而 2 层墙中部有 1 条明显 45° 斜裂缝(裂缝分布如图 5 所示)。试件非线性特征已经比较明显,转为位移加载。

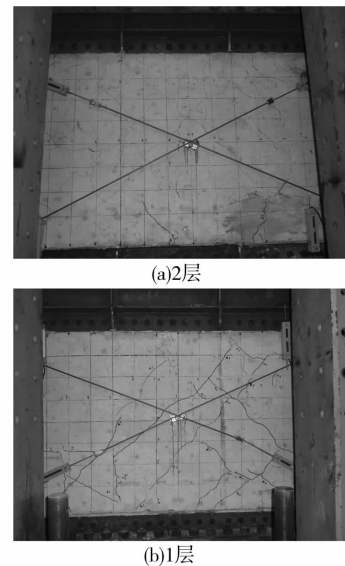


图 5 300 kN 时内填墙裂缝分布图

30 mm 时,SFCW-1 屈服。此时,中梁上下暗梁处细裂缝已经较为密集(如图 6 所示),这表明中梁上下暗梁内混凝土压碎较多。荷载为 42 mm 时,2 层内填墙暗梁混凝土已经完全压碎,开始掉大块混凝土,试件达极限承载力,且 2 个柱底外侧翼缘面外变形明显,已经开始屈曲。54 mm 时,2 层内填墙下部暗梁混凝土已经完全脱落。试件完成 60 mm 的 1 个循环后,试验结束。试验结束前,剪力墙最终裂缝分布和柱翼缘屈曲形式如图 7 所示。

从试验现象可知:

1) U 形钢筋做为抗剪连接件未发生断裂破坏,暗柱和暗梁中的钢筋笼同抗剪连接件组成可靠整体。

2) 在加载初期,剪力墙的裂缝均为 45° 剪切斜裂缝;随着加载的继续暗梁与内填墙连接界面处均出现较多细小裂缝,且最终的破坏模式为暗梁与剪力墙交界面的裂缝贯通。

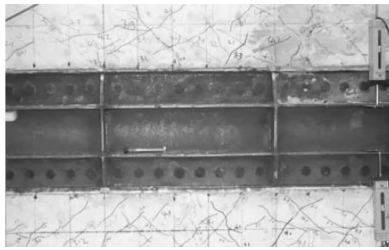


图 6 30 mm 时裂缝分布图

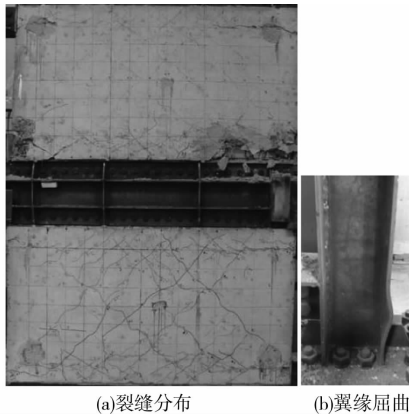


图 7 最终破坏形式

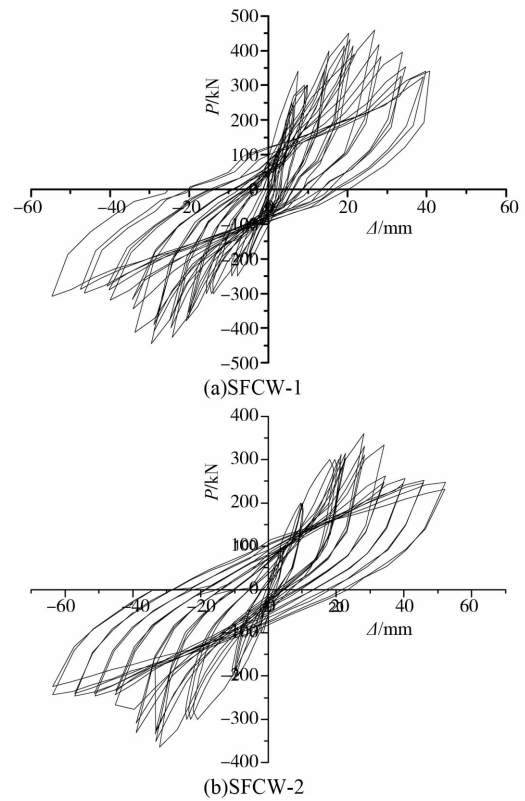


图 8 试件滞回曲线图

3 试验结果与分析

3.1 滞回曲线

试件的滞回曲线如图 8 所示。由图可知,加载初期 2 个试件的刚度均较大,而残余变形均较小;同级荷载下,滞回环基本重合。随着加载的继续,试件的滞回环逐渐趋于饱满,但曲线仍表现为反 S 形。这主要因为:1)剪力墙以剪切变形为主^[9];2)剪力墙与框架梁柱间的高强螺栓开始滑移。由图也可知,滞回曲线的斜率均随荷载等级的增大而减小;且同级荷载下,承载力和刚度随循环次数的增加而降低,变形则相反。这表明,随着加载的继续,内填墙中的混凝土不断被压碎,损伤不断加剧。

3.2 骨架曲线

试件的荷载-侧移骨架曲线可直观反映出试件的开裂、屈服、极限承载力和延性性能等结构的重要主要力学性能^[12]。骨架曲线上各实测特征点的数值如表 3 所示。

表 3 骨架曲线特征点实测结果

试件编号	加载方向	开裂荷载/ kN	屈服荷载/ kN	峰值荷载/ kN	破坏荷载/ kN
SFCW-1	正向	200	385.68	453.74	340.72
	负向	180	371.55	437.12	307.48
SFCW-2	正向	90	310.85	365.7	229.52
	负向	80	303.71	357.3	219.97

图 9 为试件的骨架曲线图,从图中可以看出:试件 SFCW-1 和 SFCW-2 的骨架曲线呈明显的 S 形;这表明,试件均经历了弹性、弹塑性和塑性破坏 3 个阶段。其中 SFCW-1 峰值荷载过后,水平承载力衰减稍慢,有一定的水平段;荷载下降至峰值荷载的 85% 后,试件仍具有一定的变形能力。而 SFCW-2 超过峰值荷载,承载力下降很快,延性不好。且 SFCW-1 的承载力较 SFCW-2 提高了 24.32%。这表明在一定范围内,内填墙混凝土强度等级的提高可以有效提高结构抗侧和抗震性能。

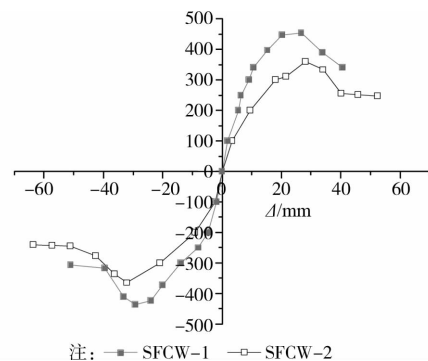


图 9 骨架曲线

3.3 刚度退化分析

图 10 为试件 SFCW-1 和试件 SFCW-2 的抗侧

刚度曲线,由图可知:在加载初期,试件的整体抗侧刚度退化均较快。随着加载的继续,内填墙中的裂缝不断扩展,且由于螺栓滑移的出现,SFCW结构的抗侧刚度的进一步退化。SFCW-1的整体刚度较SFCW-2提高的比率基本稳定在50%左右。这表明在一定范围内,提高混凝土强度等级可以有效提高SFCW结构的抗侧刚度。

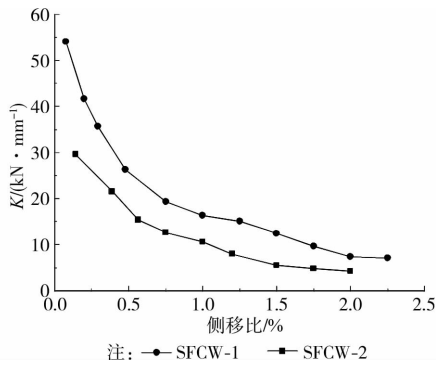


图 10 抗侧刚度退化曲线

3.4 延性系数分析

表 4 为试件实测各阶段位移及延性系数,由表 4 可知,SFCW-1 的峰值延性系数和极限位移延性系数平均为 2.58 和 3.22,而 SFCW-2 的峰值延性系数和极限位移延性系数平均为 1.95 和 2.41。SFCW-1 延性系数平均值大于 3,延性较好;SFCW-2 由于混凝土强度较低,承载力下降较快,混凝土破坏严重,延性未得到充分发挥。

表 4 试件位移和延性系数

类型	方向	屈服位移/mm	峰值位移/mm	极限位移/mm	峰点位移延性系数	极限位移延性系数
SFCW-1	正向	15.50	28.18	36.19	1.82	2.33
	负向	-15.49	-32.08	-38.51	2.07	2.49
SFCW-2	正向	10.79	26.86	34.41	2.49	3.19
	负向	-11.08	-29.56	-35.91	2.67	3.24

3.5 结构内力分配

3.5.1 水平剪力 图 11 为试件柱中截面分担的水平剪力比例图。由图可知,在裂缝出现前,内填墙承担的水平剪力达 90%以上。裂缝出现后,内填墙刚度降低;但钢框架的刚度会保持不变,所以内填墙分担的剪力比例会不断降低。在 300 kN 的荷载下,内填墙分担的剪力比例约为 85%。比较图 11(a)、(b)可知,SFCW-1 剪力墙分担的剪力比例基本与 SFCW-2 分担的剪力比例相等。这表明,混凝土强度等级对剪力墙分担的剪力比例影响较小。

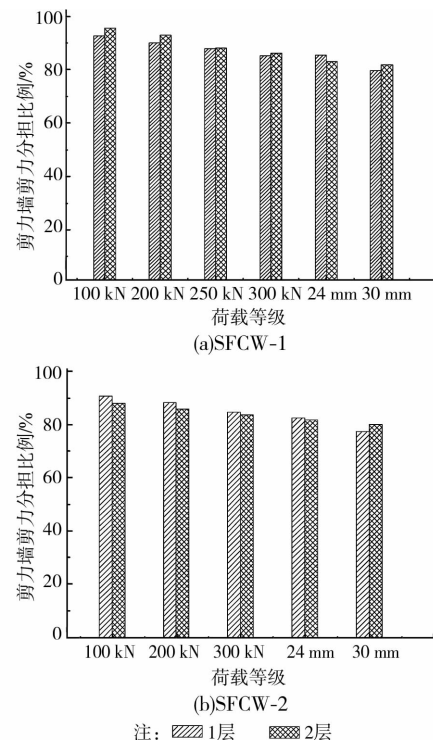


图 11 内填墙剪力分担比例

3.5.2 倾覆力矩 图 12 为试件钢框架分担倾覆力矩比例图。由图 12 可知:1)试件处钢框架柱底部截面分担倾覆力矩的比例均低于底层中部分担的比例,这由于 1 层底部约束较强,薄弱部位上移所致;2)框架柱倾覆力矩分担比例均随着水平荷载的增加而增大;3)在混凝土开裂前,SFCW-1 的 1 层底部框架承担约 55%的倾覆力矩,试件 1 达到最大承载力时,1 层底部分担 75%的倾覆力矩。比较图 12(a)、(b)可知,SFCW-1 分担的倾覆力矩较 SFCW-2 降低了 8%~15%,这表明提高混凝土强度可以降低钢框架分担的倾覆力矩的比例。

4 讨论

文献[9]和文献[12]分别对 10 个钢框架内填现浇实体钢筋混凝土剪力墙(现浇试件)和 2 个带竖缝钢筋混凝土剪力墙(带竖缝试件)进行了试验研究。其中文献[9]试件采用四边连接,混凝土强度介于 C21.5~C50;文献[12]的试件连接方式和钢框架均与本文试件相同,混凝土强度等级分为 C20.4 和 C25;且二者的配筋率和钢框架基本于与 SFCW-1 相同。

比较可知,SFCW-1 和现浇试件均以剪切斜裂缝为主,最终均为内填墙与暗梁界面处出现水平贯穿裂缝,暗梁压酥、内填墙角部压碎和柱脚外翼缘的屈曲破坏。而带竖缝试件则以墙肢弯曲裂缝为主,

往返荷载作用下,裂缝在两侧向墙肢形心轴开展直至左右裂缝贯通,竖缝墙的抗侧承载力由这一截面的剪切破坏控制。

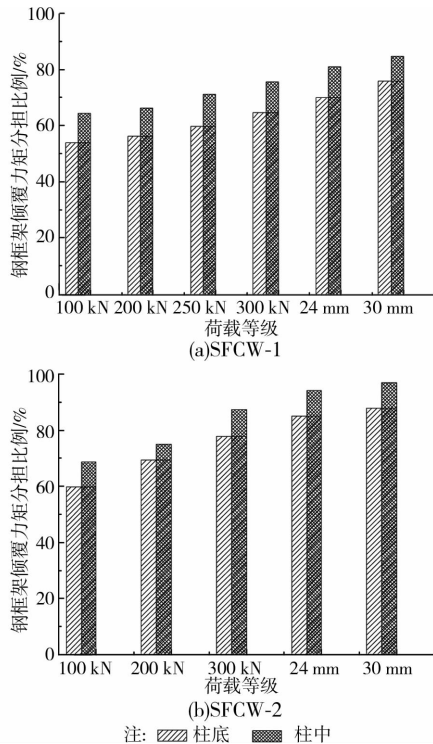


图 12 钢框架倾覆力矩分配比例

图 13 为预制试件、现浇试件和带竖缝试件的刚度退化曲线比较图。由图 13 可知,现浇试件的初始刚度远大于 SFCW-1 和带竖缝试件;而带竖缝试件的初始刚度略低于预制试件。但随着外加载荷的增加,现浇试件刚度退化很快。当侧移比为 2.25% 时,现浇试件的抗侧刚度已经与预制试件基本相等。对比预制带竖缝试件和 SFCW-1 可知,二者的刚度退化均较为平缓。这表明:1) 预制剪力墙的刚度退化更为平缓;2) 是否与柱连接,对钢筋混凝土剪力墙的初始抗侧刚度影响较大,而对后期刚度影响较小。

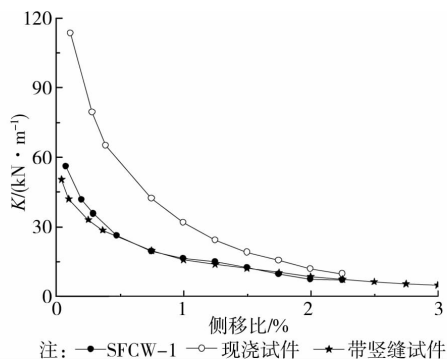


图 13 刚度退化比较

由本文、文献[9]和文献[12]可知,SFCW-1 和

现浇试件的延性系数均大于 3,而带竖缝试件的延性接近 5。这表明合理设计的钢框架内填剪力墙体系均具有较好的延性,但带竖缝剪力墙的延性最好。

5 结论

1) 钢框架梁、柱与内填剪力墙间的抗剪件和螺栓连接均未发生破坏,这表明耳板连接装置提供了另一条可靠的剪力传递路径。

2) 在加载初期,内填墙以 45° 剪切斜裂缝为主;但最终的破坏模式为暗梁与剪力墙交界面的裂缝贯通。

3) 在一定范围内,剪力墙混凝土强度等级的提高,能有效提高 SFCW 结构的抗侧性能、抗震性能和结构的中后期耗能能力。

4) 在裂缝出现前,剪力墙承担超过 90% 的水平剪力,而钢框架承担超过 55% 的倾覆力矩,且提高混凝土强度等级能降低钢框架承担的倾覆弯矩。

5) 综合文献[11]中混凝土强度不宜过高的建议,建议混凝土强度应介于 C20~C25 之间。

参考文献:

- [1] 童根树. 钢结构设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 方有珍, 顾强, 申林. 半刚接钢框架(柱弱轴)-内填剪力墙结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 512-62.
Fang Y Z, Gu Q, Shen L. Hysteretic behavior of semi-rigid composite steel frame with reinforced concrete infill wall in column weak axis [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 512-62.
- [3] Liauw T C, Kwan K H. Static and cyclic behavior of multistory infilled frames with different interface conditions [J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 99(2): 275-283.
- [4] 夏敬谦, Kwan K H, 罗学海, 等. 剪力墙结构、框架填充墙结构模型模拟地震试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1996, 16(2): 55-66.
Xia J Q, Kwan K H, Luo X H, et al. Simulated earthquake tests of shear wall and infilled frame models [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 55-66.
- [5] Tong X D, Hajjar J F, Schultz A E, et al. Cyclic behavior of steel frame structures with composite reinforced concrete infill walls and partially-restrained connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(1): 531-552.
- [6] 彭晓彤, 顾强. 钢框架内填钢筋混凝土剪力墙混合结构破坏机理及塑性分析[J]. 工程力学, 2011, 28(8): 56-

60.
Peng X T, Gu Q. The failure mechanism and plastic analysis of composite steel frame-reinforced concrete infill wall structures [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(8):56-60.
- [7] 方有珍,蔡益燕,顾强,等.半刚接钢框架(柱弱轴)内填剪力墙结构塑性机构分析[J].工程力学,2010,27(2):46-52.
Fang Y Z, Cai Y Y, Gu Q, et al. Analysis of the plastic mechanism on composite steel frame (Weak axis of column) with PR connection-reinforced concrete infill wall structural system [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2):46-52.
- [8] 颜鹏.刚性连接钢框架-内填钢筋混凝土剪力墙结构体系的滞回性能及抗震设计对策[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [9] 孙国华.半刚接钢框架内填 RC 墙结构滞回性能研究 [D].北京:北京工业大学 2009.
- [10] JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [11] Zhao Q H, Abolhassan A A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2):271-284.
- [12] 赵伟,童根树,杨强跃.钢框架内填预制带竖缝钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构学报,2012,33(7):140-146.
Zhao W, Tong G S, Yang Q Y. Experimental study seismic behavior of steel frame with prefabricated reinforce-concrete infill slit shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7):140-146.

(编辑 王秀玲)

(上接第 62 页)

- [11] Gardner L. A new approach to stainless steel structural design [D]. Department of Civil Engineering, Imperial College, London. 2002.
- [12] Quach W M, Teng J G, Chung K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(9):1518-1527.
- [13] Greiner R, Kettler M. Interaction of bending and axial compression of stainless steel members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11):1217-1224.
- [14] Gardner L, Cruise R B. Modeling of residual stresses in structural stainless steel sections [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(1):42-53.
- [15] 王元清,高博,戴国欣,等.双轴对称不锈钢受弯构件残余变形的影响因素分析[J].山东大学学报:工学版,2011,41(1):95-100.
Wang Y Q, Gao B, Dai G X, et al. Influencing factors analysis of residual deformation of doubly symmetric stainless steel flexural members [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(1):95-100.
- [16] Wang Y Q, Gao B, Dai G X. Numerical analysis of overall stability of unbraced stainless steel simply-supported beams with fabricated I-section [C]//Processing on international conference on electric information and control engineering, Wuhan: IEEE, 2011:6059-6062.

(编辑 胡 玲)