

不同填充墙布置的型钢再生混凝土框架抗震性能试验分析

薛建阳¹, 高亮², 戚亮杰¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 四川省建筑科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要: 进行了 4 榀单层单跨型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙试件的拟静力加载试验, 对不同填充墙布置及墙体宽高比试件的破坏形态、承载力、层间位移角、耗能能力以及刚度退化等力学特性进行了分析。结果表明: 填充墙的存在提高了框架结构的承载力及抗侧刚度; 墙体半高填充的框架, 其峰值荷载、初始抗侧刚度均介于空框架与全高填充墙框架之间, 其极限层间位移角、延性及耗能能力与空框架试验结果较为接近; 墙体全高填充的框架, 其极限层间位移角及位移延性与空框架相比有所减小, 但等效黏滞阻尼系数较大; 随着墙体宽高比的增大, 结构承载力有所提高, 位移延性呈下降趋势, 耗能能力变化不明显; 填充墙框架的刚度退化率均高于空框架, 墙体全高填充框架的刚度退化率大于墙体半高填充框架, 且墙体宽高比越大, 刚度退化率越大。

关键词: 型钢再生混凝土框架; 空心砌块填充墙; 墙体形式; 拟静力试验

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0790-06

Experimental analysis on seismic performance of steel reinforced recycled aggregate concrete frame with different hollow-block infilled walls

XUE Jianyang¹, GAO Liang², QI Liangjie¹

(1.School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. &Tech., Xi'an 710055, China;

2.Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 610081, China)

Abstract: According to four one-bay and one-story steel reinforced recycled aggregate concrete frames which were tested under low cyclic reversed loading, the effects of hollow-block infilled wall with different infill configurations and width-height ratio on the failure mode of the structure, load bearing capacity, inter-story displacement angle, energy dissipation and stiffness degradation were analyzed. The results show that the infilled walls may enhance the load carrying capacity and lateral stiffness. The maximum load and initial lateral stiffness of the frame with half-height infilled wall are between those of bare frame and those of frame with all-height infilled wall, and its ultimate inter-story drift ratio, displacement ductility and energy dissipation are close to those of the bare frame. Compared to bare frame, the frame with all-height infilled wall has the smaller ultimate inter-story drift ratio and displacement ductility, and bigger equivalent viscous damping coefficient. The load carrying capacity increases with larger width-height ratio, while the displacement ductility decreases, but the energy dissipation keeps almost constant. The speed of stiffness degradation of frames with infilled wall is higher than that of bare frame; the speed of stiffness degradation of frame with all-height infilled wall is higher than that of frame with half-height infilled wall, and the stiffness degradation is more significant the width-height ratio of infilled wall increases.

Key words: steel reinforced recycled aggregate concrete frame; hollow-block infilled wall; infill configuration; quasi-static test

框架-填充墙结构是目前我国应用最为广泛的结构形式之一。在结构计算中, 通常认为填充墙为非结构构件, 对结构体系的贡献相对较小。实际工程中仅通过对纯框架部分的基本周期进行折减来考虑填充墙对整个结构抗侧刚度的影响。但近年来的实际震害情况及科研成果^[1-3]显示, 填充墙在地震中先于主体框架结构发生严重损坏, 对建筑的主要

使用功能已造成较大影响。国内如四川汶川、玉树等地接连发生的强震, 造成了城镇建筑中大量框架-填充墙结构的破坏甚至倒塌, 再次说明考虑填充墙与框架的相互作用是十分必要的。

近年来我国倡导节能减排, 落实低碳经济, 发展绿色建筑, 这使得结构领域对再生混凝土结构的研究越发重视。目前国内外对再生混凝土框架-再生

收稿日期: 2015-03-19

修改稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178384); 住房和城乡建设部科学技术基金资助项目(2012-K2-12); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(陕外专发[2010]26号); 陕西省教育厅科研计划资助项目(12JK0902)

作者简介: 薛建阳(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢与混凝土组合结构及古建筑结构的抗震研究。E-mail:jianyang_xue@163.com

空心砌块填充墙结构的研究尚处于起步阶段^[4], 且大多数研究只针对再生混凝土纯框架结构^[5-7], 而忽略填充墙对框架主体结构的影响. 同时, 为了提高整体结构的抗震性能, 在再生混凝土结构中加入型钢构件形成型钢再生混凝土结构^[8], 有效地推动了再生混凝土结构在高烈度抗震设防区应用及发展.

通过 4 榀 1: 2.5 比例单层单跨的型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙试件的低周反复加载试验^[9], 主要研究填充墙布置形式及墙体宽高比对该类结构抗震性能的影响, 为其工程设计和应用提供参考.

1 试件设计及制作

本次试验的各试件梁、柱截面尺寸分别为 240 mm×150 mm 和 240 mm×180 mm, 层高 1 440 mm, 跨度 2 280 mm, 试件具体几何尺寸如图 1 所示. 试件 BF 设计为纯框架, 作为对比试件; 试件 MWF 为墙体全高填砌框架; 试件 HWF 为墙体半高填砌框架; 试件 LWF 为宽高比 2.2 的墙体全高填砌框架. 具体的设计参数如表 1 所示.

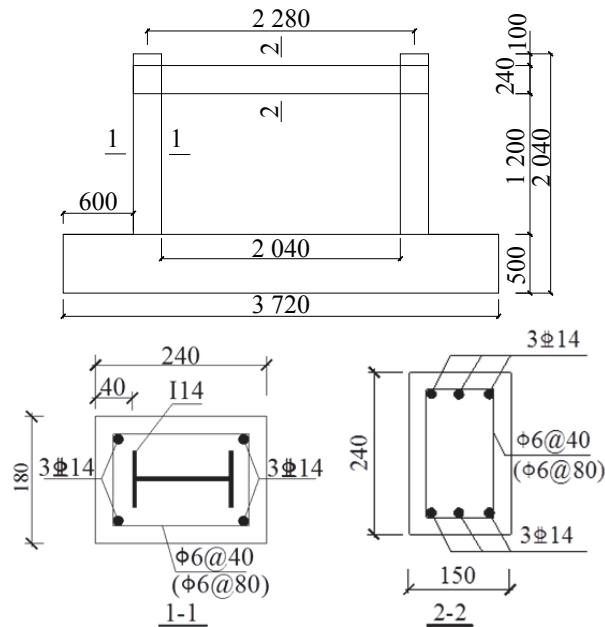


图 1 试件几何尺寸
Fig.1 Geometries of the specimen

表 1 试件设计参数
Tab.1 Design parameter

试件编号	墙体布置	墙体高度/mm	宽高比
BF	—	—	1.7
MWF	全高填砌	1 200	1.7
HWF	半高填砌	600	1.7
LWF	全高填砌	1 200	2.2

框架梁纵筋采用 $\Phi 14$ 级钢筋, 箍筋采用 $\phi 6$ 级钢筋, 在梁端 500 mm 范围内加密布置, 间距 40 mm, 其他位置间距 80 mm; 框架柱纵筋采用 $\Phi 14$ 变形钢筋, 箍筋采用 $\phi 8$ 变形钢筋, 核心区以及柱端 450 mm 内加密布置, 间距 50 mm, 其他位置间距 100 mm; 柱中型钢采用 Q235B 级 14 号薄壁工字钢, 配钢率为 4.98%. 梁中上、下侧中间纵筋通过角焊缝的形式与型钢翼缘处的连接板焊接, 在连接板相应高度处的型钢腹板上焊接水平加劲肋(图 2).

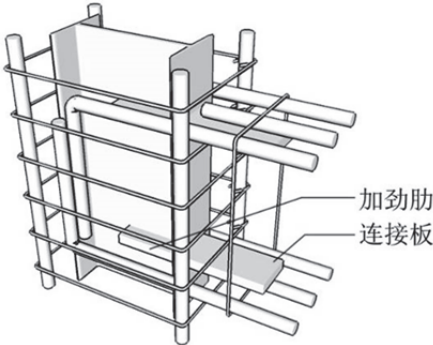


图 2 节点构造
Fig.2 Details of joints

本次试验采用的再生混凝土由 100%再生骨料配制, 混凝土配合比及钢材力学性能见文献[10]. 再生混凝土立方体试块的抗压强度平均值为 52.02 MPa, 砌块的设计强度等级为 MU5.0, 实测其抗压强度为 5.62 MPa, 抗拉强度为 2.7 MPa, 砌筑砂浆立方体抗压强度平均值为 10.11 MPa. 全高填充墙拉筋间距为 400 mm, 半高填充墙拉筋间距为 200 mm, 再生混凝土空心砌块细部构造示于图 3 中.

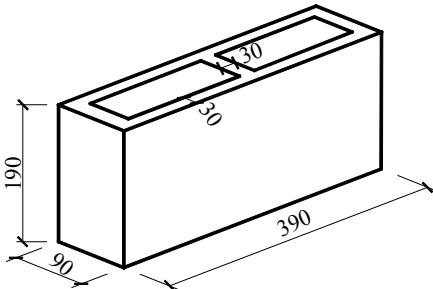


图 3 空心砌块几何尺寸
Fig.3 Geometry of hollow block

试验加载方案及测点布置情况详见文献[9].

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及形态

各试件最终破坏形态如图 4 所示.

(1) 空框架试件 BF 在水平力作用下, 框架梁端逐渐形成受弯主裂缝, 而柱底出现少许横向裂

缝.最后,梁端混凝土鼓起且大量剥落,拉筋外露,表现出明显的梁铰破坏机制.

(2) 半高墙体试件 HWF 由于墙体顶面与框架梁底不接触,填充墙的存在对整个结构的变形限制相对较小,梁端混凝土破坏现象较为严重.而全高墙体试件 MWF 表现出较好的填充墙与框架协同工作特性,在水平力作用下,墙体沿对角线方向开裂明显,灰缝出现错动滑移现象;随着加载的进行,墙体局部砌块压碎脱落并退出工作,框架结构损伤较小.说明在水平力作用下填充墙充当抗震设防第一道防线,起到了保护梁柱框架的作用.



(a) 试件 BF



(b) 试件 MWF



(c) 试件 HWF



(d) 试件 LWF

图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure modes of specimens

(3) 不同宽高比填充墙对于整体结构抗震性能

有一定的影响.对于试件 LWF,墙体角部砌块间的灰缝裂缝最先贯通,形成阶梯形开裂状;随着加载的继续,砌块上及梁端区域斜裂缝增多,框架与墙体逐渐脱开,墙体两端砌块脱落严重,拉筋压曲,墙体透光.

2.2 承载力及变形

表2所示为试件在各特征点处的荷载、层间位移角以及位移延性系数等特征参数^[9].其中, P_c 、 P_y 、 P_m 、 P_u 分别为结构的开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载和破坏荷载, Δ_c 、 Δ_y 、 Δ_m 、 Δ_u 为与各特征点荷载相对应的位移值, θ_c 、 θ_y 、 θ_m 、 θ_u 为与其相对应的层间位移角, μ 为位移延性系数,取 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$.图5给出了不同填充墙布置形式对该结构承载力及位移延性系数的影响.分析表2和图5可以看出:

(1) 填充墙构件提高了框架-填充墙结构的水平承载力,提高程度与填充墙布置形式及宽高比相关.全高填充墙框架 MWF 的峰值荷载是空框架 BF 的 1.67 倍,填充墙半高填充砌体框架 HWF 的峰值荷载是空框架 BF 的 1.16 倍,填充墙宽高比为 2.2 的试件 LWF,其峰值荷载是空框架 BF 的 1.76 倍.且在各加载阶段,带填充墙试件的承载力均高于空框架.试件的荷载-位移骨架曲线示于图6中.

(2) 当加载至开裂荷载时,试件 BF 的正、负向层间位移角均值为 $1/659$,试件 MWF 为 $1/2804$,试件 HWF 为 $1/1185$,试件 LWF 为 $1/3618$,可见试件开裂时的层间位移角随墙体开洞率的增大(试件 HWF 和 BF)而增大,随墙体宽高比的增大(试件 LWF)而减小;屈服荷载时,空框架试件 BF 对应的正、负向层间位移角均值为 $1/140$,全高填充墙试件 MWF 为 $1/588$,试件 HWF 为 $1/125$,试件 LWF 为 $1/319$,其中填充墙半高填充砌体框架 HWF 的屈服层间位移角略大于空框架 BF,表明随加载的继续,半高填充的墙体对框架的约束作用减弱较快,但其在一定程度上仍然能够分担一部分水平地震作用.峰值荷载时试件 BF 对应的正、负向层间位移角均值为 $1/54$,试件 MWF 为 $1/232$,试件 HWF 为 $1/40$,试件 LWF 为 $1/117$.加载至破坏荷载时,试件 BF 对应的正、负向层间位移角均值为 $1/21$,试件 MWF 为 $1/90$,试件 HWF 为 $1/22$,试件 LWF 为 $1/83$,其中空框架与半高填充墙框架的破坏层间位移角均大于抗震规范中框架结构弹塑性层间位移角 $1/50$ 的限值,全高填充墙框架的破坏层间位移角

均大于规范中框架-剪力墙结构 1/100 的限值, 表明该种结构具有较强的变形及抗倒塌能力。

(3) 空框架 BF 在水平荷载下形成梁铰破坏机制, 其承载力下降较为平缓, 正、负向位移延性系数均值为 6.75, 延性较好; 全高填充墙框架结构 MWF 由于填充墙较早破坏, 屈服位移较小, 由于

填充墙的存在, 极限承载力较高, 延性系数均值为 6.6; 半高填充墙框架 HWF 的初始刚度略大于空框架 BF 结构, 正、负向位移延性系数均值为 5.6; 填充墙宽高比为 2.2 的试件 LWF 在加载后期由于墙体破坏严重, 逐渐退出工作, 承载力发生陡降现象, 位移延性系数相对较小, 为 3.85。

表 2 试验结果
Tab.2 Test results of characteristic points

试件 编号	加载 方向	开裂点			屈服点			峰值点			破坏点			μ
		P_c/kN	Δ_c/mm	θ_c	P_y/kN	Δ_y/mm	θ_y	P_m/kN	Δ_m/mm	θ_m	P_u/kN	Δ_u/mm	θ_u	
BF	正	60.0	2.26	1/584	175.2	9.94	1/133	246.6	24.72	1/53	209.6	62.97	1/21	6.3
	负	60.0	1.80	1/733	180.0	9.06	1/146	252.5	24.64	1/54	214.6	64.83	1/20	7.2
MWF	正	120.0	0.52	1/2 538	286.8	2.32	1/569	419.1	6.10	1/216	356.2	16.84	1/78	7.3
	负	120.0	0.43	1/3 070	280.5	2.18	1/606	416.7	5.33	1/248	354.2	12.96	1/102	5.9
HWF	正	60.0	0.97	1/1 361	210.9	10.31	1/128	294.1	32.69	1/40	250.0	60.25	1/22	5.8
	负	60.0	1.31	1/1 008	220.8	10.94	1/121	283.5	33.35	1/40	240.9	59.0	1/22	5.4
LWF	正	90.0	0.36	1/3 667	348.6	4.34	1/304	461.3	11.27	1/117	392.1	17.35	1/76	4.0
	负	90.0	0.37	1/3 568	328.7	3.95	1/334	420.6	11.25	1/117	357.5	14.7	1/90	3.7

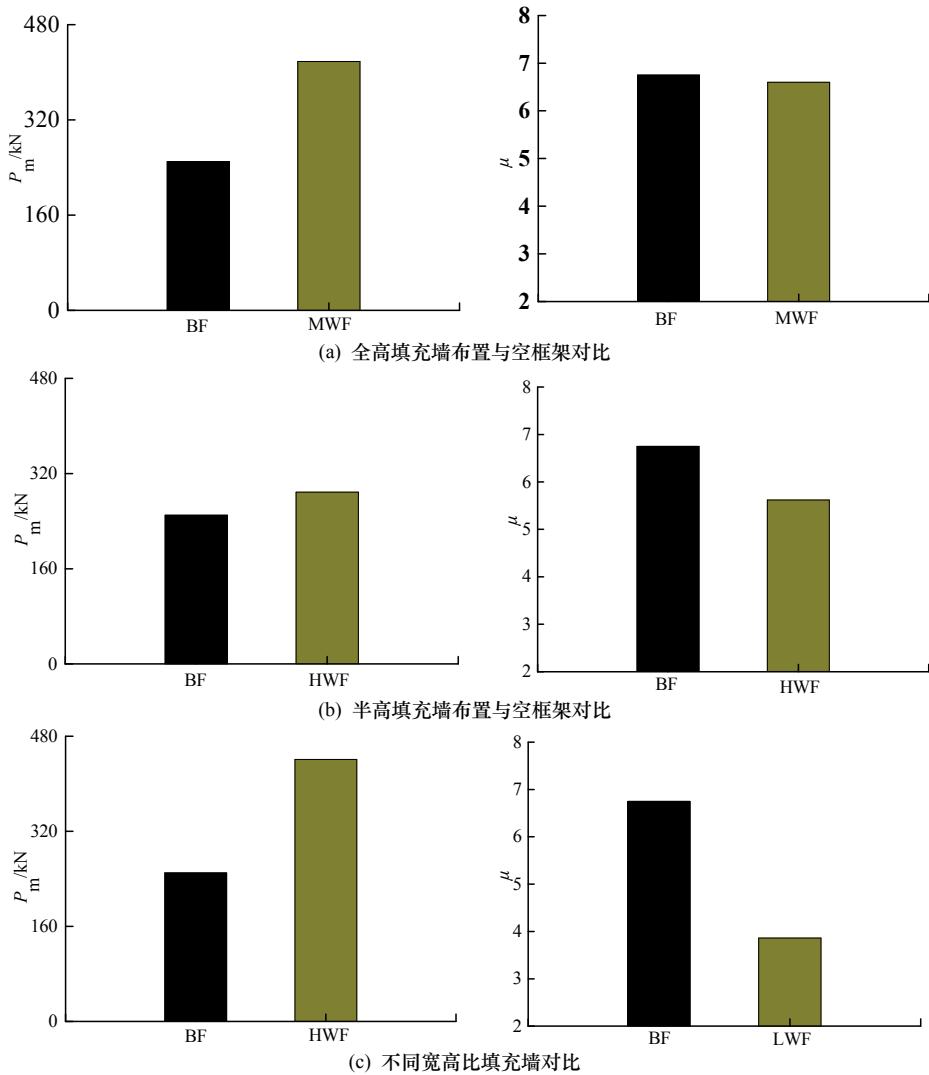


图 5 不同填充墙布置及墙体宽高比对试件承载力及位移延性的影响
Fig.5 The influence of different infilled walls and height-width ratio on loading capacity and displacement ductility

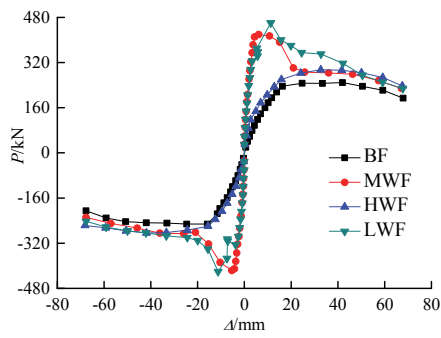


图 6 试件骨架曲线
Fig.6 Skeleton curves of specimens

2.3 耗能能力

表 3 所示为实测的各试件在不同特征点处的等效黏滞阻尼系数, 图 7 给出了各试件与空框架 BF 耗能的比值关系曲线。加载前期, 全高填充墙框架结构的等效黏滞阻尼系数较大, 试件 MWF 和试件 LWF 在屈服点处的等效黏滞阻尼系数分别为空框架 BF 的 1.94 倍和 2.02 倍; 随着加载的持续, 结构变形逐渐增大, 墙体破坏愈加严重并退出工作, 之后水平荷载主要由框架承担, 框架成为滞回耗能的主体, 在峰值点附近, 各个试件的等效黏滞阻尼系数差别不大。此时空框架和半高填充墙框架的梁端塑性铰的塑性发展更为充分, 耗能能力明显高于全高布置的填充墙框架结构。在破坏点时填充墙全高填砌试件 MWF 和 LWF 的等效黏滞阻尼系数分别为空框架 BF 的 0.40 倍和 0.41 倍。在试件屈服之后, 全高填充墙框架的等效黏滞阻尼系数比空框架和半高填充墙框架小, 且随着加载的继续, 等效黏滞阻尼系数的增长更为缓慢。说明宽高比处于 1.7~2.2 之间的框架结构, 结构耗能受宽高比的影响不大。

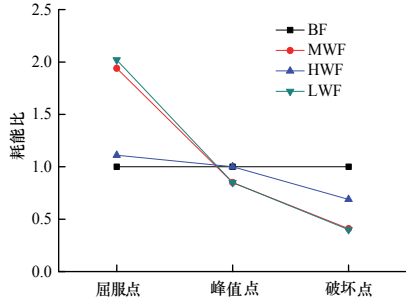


图 7 耗能比曲线
Fig.7 Curves of energy dissipation ratio

表 3 等效黏滞阻尼系数
Tab.3 Equivalent viscous damping coefficients

试件编号	屈服点	峰值点	破坏点
BF	0.06	0.17	0.36
MWF	0.12	0.14	0.15
HWF	0.07	0.17	0.25
LWF	0.13	0.14	0.15

2.4 刚度退化

图 8 所示为各试件的刚度退化曲线。

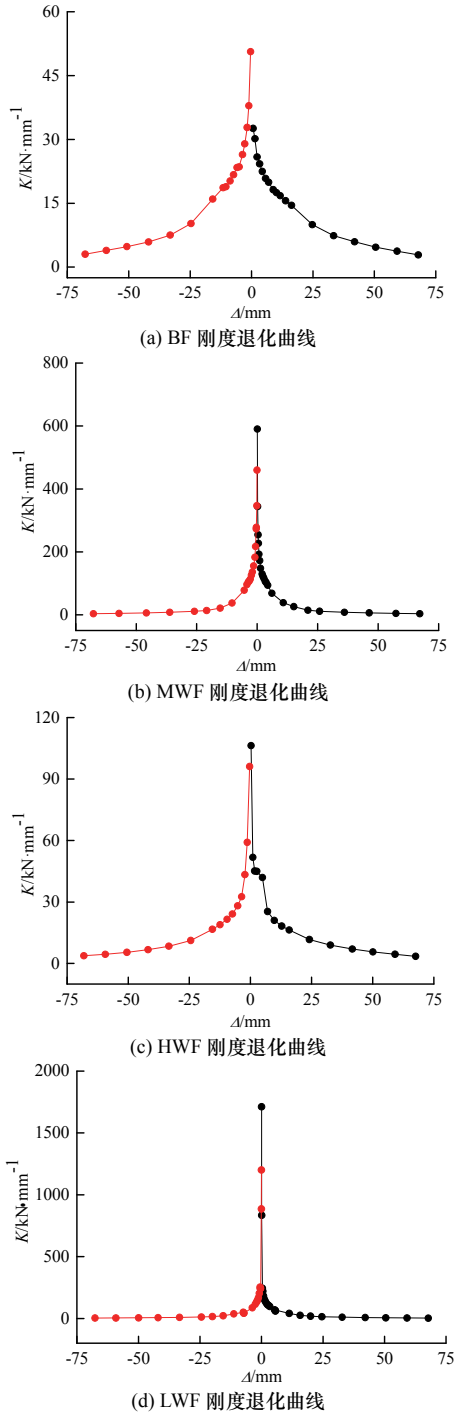


图 8 刚度退化曲线
Fig.8 Curves of stiffness degradation

可以看出, 所有试件在加载初期刚度退化速率较快, 随后刚度退化逐渐变缓, 表现出由快到慢的趋势。同时, 全高填充墙结构的初始刚度远远高于空框架和半高填充墙结构的初始刚度, 试件 BF 和 HWF 的正、负向初始刚度均值分别为 $41.6 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $101.2 \text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, 而全高填充墙试件 MWF 为 523.4

$\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, LWF 为 $1\,455.8\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$, 表明当其他参数不变时, 填充墙全高布置的试件 MWF, 其初始刚度是空框架 BF 的 12.6 倍; 填充墙宽高比为 2.2 的试件 LWF, 其初始刚度是空框架 BF 的 35 倍, 说明填充墙布置及墙体宽高比对结构刚度的影响很大. 填充墙框架试件的刚度退化速率均高于空框架, 且墙体宽高比越大, 其刚度退化速率越快, 全高填充墙框架的刚度退化速率大于半高填充墙框架. 另外, 各试件在加载后期的割线刚度相近, 表明加载后期墙体部分已基本退出工作, 主要由型钢再生混凝土框架承担水平荷载.

3 结论

(1) 填充墙的存在提高了框架结构的承载力及抗侧刚度, 墙体全高填砌的框架 MWF, 其峰值荷载和初始刚度分别是空框架 BF 的 1.67 倍和 12.6 倍, 墙体半高填砌的框架 HWF, 其峰值荷载和初始刚度分别是空框架 BF 的 1.16 倍和 2.4 倍, 墙体宽高比为 2.2 的框架 LWF, 其峰值荷载和初始刚度分别是空框架 BF 的 1.76 倍和 35 倍.

(2) 随着荷载的增大, 再生混凝土空心砌体填充墙逐渐开裂, 型钢再生混凝土框架的塑性变形不断发展, 刚度退化显著.

(3) 再生砌块填充墙框架的位移延性与填充墙布置及墙体宽高比有关, 与空框架 BF 相比, 墙体全高填砌的框架 MWF 和半高填砌的框架 HWF, 其位移延性略有降低, 墙体宽高比为 2.2 的框架 LWF, 其位移延性降低明显.

(4) 空框架 BF 与墙体半高填砌的框架 HWF, 结构破坏时的层间位移角均接近 $1/20$, 明显大于墙体全高填砌框架 MWF 的 $1/90$ 和 LWF 的 $1/83$.

(5) 填充墙布置形式对结构的耗能性能有一定影响. 与空框架相比, 墙体全高填砌框架的耗能在加载的后期降低; 而墙体宽高比对结构耗能的影响不大.

参考文献 References

- [1] 吴绮芸, 田家骅, 徐显毅. 砖填充墙框架在单向及反复水平荷载作用下的性能研究[J]. 建筑结构学报, 1980, 1(4): 38-44.
WU Qiyun, TIAN Jiahua, XU Xianyi. A study of the behavior of brick infilled frame structures under monotonic and reversed cyclic horizontal loads[J]. Journal of Building Structures, 1980, 1(4): 38-44.
- [2] PUJOL S, FICK D. The test of a full-scale three-story RC

structure with masonry infill walls[J]. Engineering Structures, 2010, 79(12): 3112-3121.

- [3] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹, 等. 混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 110-118.
HUANG Qunxian, GUO Zixiong, ZHU Yanru, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frames infilled with concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 110-118.
- [4] 孙跃东, 肖建庄, 周德源, 等. 再生轻质砌块填充墙再生混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 124-131.
SUN Yuedong, XIAO Jianzhuang, ZHOU Deyuan. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frames filled with recycled lightweight masonry blocks[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(5): 124-131.
- [5] 曹万林, 尹海鹏, 张建伟, 等. 再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(2): 191-198.
CAO Wanlin, YIN Haipeng, ZHANG Jianwei, et al. Seismic behavior experiment of recycled concrete frame structures[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(2): 191-198.
- [6] 孙跃东, 肖建庄, 周德源, 等. 再生混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 9-15.
SUN Yuedong, XIAO Jianzhuang, ZHOU Deyuan, et al. An experimental study on the seismic behavior of recycled concrete frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 9-15.
- [7] 闵珍, 孙伟民, 郭樟根. 再生混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 22-27.
MIN Zhen, SUN Weimin, GUO Zhanggen. Experimental research on the seismic behavior of recycled concrete frames[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 22-27.
- [8] 薛建阳, 马辉. 低周反复荷载下型钢再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 123-131.
XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete short column under low-cyclic reversed loading[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(12): 123-131.
- [9] 高亮. 型钢再生混凝土框架-再生砌块填充墙结构抗震性能试验及理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
GAO Liang. Experimental and Theoretical Study on Seismic Behavior of Steel Reinforced Recycled Concrete Frame Infilled with Recycled Concrete Blocks[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2014.
- [10] 薛建阳, 高亮, 罗峥, 等. 再生混凝土空心砌块填充墙-型钢再生混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 77-84.
XUE Jianyang, GAO Liang, LUO Zheng, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete frame in filled with recycled aggregate concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 77-84.

(编辑 吴海西)