

型钢再生混凝土框架抗震性能试验研究

薛建阳¹, 王 刚¹, 刘 辉², 任 瑞¹

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.中国新时代国际工程公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了研究型钢再生混凝土框架的抗震性能, 设计了一榀缩尺比为 1:2.5 的三层两跨型钢再生混凝土框架, 对其进行了低周反复水平荷载试验, 观察了框架的破坏过程和破坏形态, 获得了框架的滞回曲线、骨架曲线, 分析了框架的承载能力、刚度、延性、耗能等抗震性能。结果表明: 型钢再生混凝土框架结构的破坏属于“强柱弱梁”的破坏机制; 框架的荷载-位移滞回曲线呈饱满的梭形, 具有较好的耗能能力; 破坏时试件的整体最大位移角为 1/22, 正反向平均位移延性系数为 4.3, 表现出了较好的变形能力和抗倒塌能力。

关键词: 型钢再生混凝土; 框架; 抗震性能; 拟静力试验

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0629-06

随着我国基础设施建设步伐的加快, 现代建筑一方面在向更高更复杂的结构形式发展, 另一方面也对绿色节能环保提出了更高的要求。再生混凝土的提出有望解决建筑垃圾污染、生态环境破坏与土地资源紧缺的矛盾, 是一种可持续的绿色建筑材料。再生混凝土起初主要被美国、日本等国家用于道路建设方面, 后来国内外大批学者开始研究再生混凝土应用于建筑结构领域。

型钢再生混凝土 (Steel Reinforced Recycled Concrete 以下简称 SRRC) 结构是再生混凝土与钢结构相结合的一种结构体系。再生混凝土 (RRC) 结构较普通混凝土结构刚度小、抗震性能略差^[1-2], 而型钢混凝土 (SRC) 结构具有承载力高、刚度大、延性好等优点^[3-4]。SRRC 结构的出现, 既能充分利用 SRC 优越的结构性能, 又能充分发挥 RRC 可再生利用、节能环保的优势。目前, 国内外有关 SRRC 结构的研究鲜有报道, 已有研究主要集中在构件研究层面, 文献[5]对 SRRC 梁的受剪性能进行了试验研究, 文献[8]对 SRRC 柱的抗震性能进行了试验研究, 以上研究结果表明, SRRC 构件具有较好的抗震性能, 与普通型钢混凝土构件的力学性能差异不大, 可以用于实际工程。

本文主要研究型钢再生混凝土框架在拟静力阶段的破坏过程及破坏机制、承载力、延性、刚度、耗能及抗倒塌能力等性能, 为该结构的进一步推广应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试验模型

按 8 度抗震设防, 设计基本地震加速度为 0.20g, II 类场地, 设计地震分组为第一分组, 根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)、《型钢混凝土结构技术规程》(YB 9082-2006)、《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138-2001), 设计了一榀缩尺比为 1:2.5 的平面框架模型, 模型尺寸见图 1。框架底层层高 1.6 m, 其他层高 1.2 m, 跨度 2.4 m。框架梁、柱均为实腹式配钢, 部分考虑楼板作用, 梁采用 T 形截面, 截面尺寸及配筋见图 1。边柱纵筋采用 $\Phi 8$ 钢筋, 中柱纵筋采用 $\Phi 12$ 钢筋。为了保证节点不破坏, 节点核心区内箍筋采用了高强预应力钢筋, 极限抗拉强度约 1 000 MPa, 箍筋间距 40 mm; 在节点核心区外上下 240 mm 范围内柱箍筋加密区采用 $\Phi 6@40$, 非加密区采用 $\Phi 6@80$ 。梁纵筋采用 $\Phi 8$ 钢筋, 箍筋在距梁端 350 mm 范围内加密区采用 $\Phi 6@40$, 非加密区采用 $\Phi 6@80$ 。梁柱截面内置型钢为 Q235B 级钢材, 柱内置型钢为 I16, 其中底层中柱按计算在柱中部以下工字钢翼缘两侧贴焊 4 mm 厚钢板, 底层和中间层梁内置型钢为 I12, 顶层为 I10。试件骨料由废弃的空心混凝土预制板粉碎而成, 取代率 100%, 混凝土级配见表 1, 实测

表 1 再生混凝土配合比 (kg/m³)

Tab.1 Mix proportions of recycled concrete(kg/m³)

组分	再生骨料	水泥	砂	水	减水剂
质量	1 158	488	527	205	5

收稿日期: 2014-01-22

修改稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178384); 住房和城乡建设部科学技术项目 (2012-K2-12); 陕西省留学人员科技活动择优项目 (陕外专发[2010]26 号); 陕西省重点科技创新团队项目 (2014KCT-31); 陕西省教育厅科研计划项目 (12JK0902)

作者简介: 薛建阳 (1970-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构抗震研究。E-mail: jianyang_xue@163.com

混凝土立方体抗压强度为 52 MPa，钢材力学性能指标见表 2。

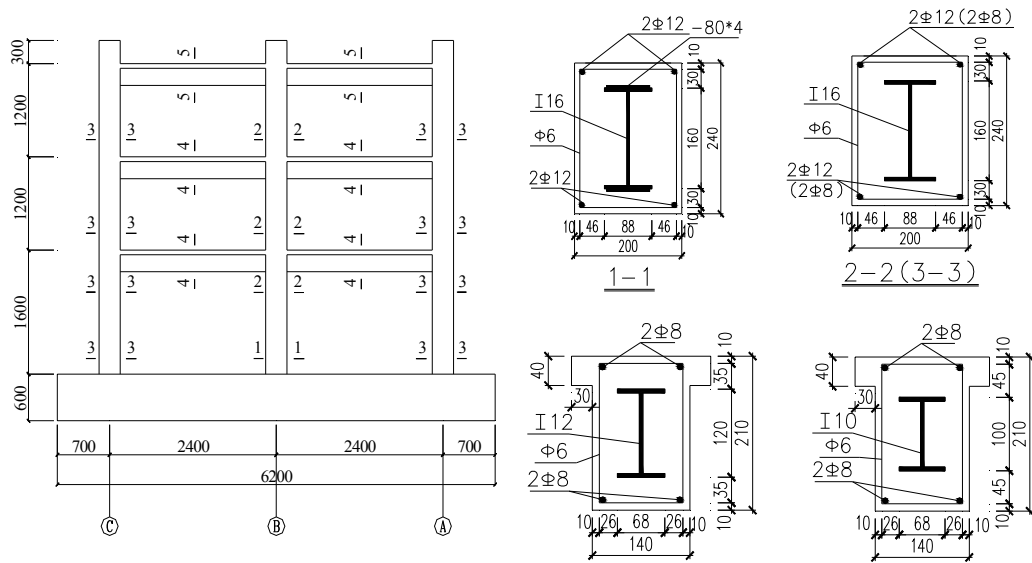


图 1 试件几何尺寸及配筋形式
Fig.1 Geometry size and steel layout of the specimen

1.2 加载制度及测试内容

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室进行。在对一榀三层两跨 SRRC 框架进行了 El Centro 波、Taft 波和人工波加速度峰值分别为 55 gal、70 gal、100 gal、150 gal、200 gal 以及 Taft 波加速度峰值为 300 gal、400 gal、500 gal 等系列拟动力工况加载后，由于试验设备能力的限制，后续拟动力工况无法继续，而此时试件的破坏形态还不明显，可能还未出现峰值荷载，于是改变了加载方式，改用侧向力大小成倒三角比例的低周反复水平加载方式。拟静力工况加载前试件损伤程度见图 2。加载前先在柱顶施加竖向荷载，边柱 400 kN，中柱 800 kN，加载过程中保持竖向荷载大小方向不变，然后在侧向每层梁形心处施加从上到下成 10:7:4 的倒三角比例荷载，加载装置如图 3。加载采用力-位移混合控制加载，屈服前采用力控制，每级荷载增量为 40 kN 并循环一次，屈服后采用位移控制，以屈服位移的倍数逐级递增并循环 3 次，直到荷载下降到峰值荷载的 85%左右。受作动器行程限制及考虑安全因素，顶层位移加载至 180 mm 时停止加载，此时正反向荷载分别下降至峰值荷载的 85%和 86.7%。

表 2 钢材力学性能指标
Tab.2 Mechanical properties of steel

钢材	直径(厚度)/ mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	屈服应变/ 10^{-6}	弹性模量/ 10^3 MPa
钢筋	Φ6	398.4	518.6	1 677	237.5
	Φ8	433.9	664.2	2 187	199.0
	Φ12	490.0	662.7	2 290	214.7
型钢	I10	312.9	441.3	1 560	204.0
	I12	300.8	438.2	1 482	203.0
	I16	283.4	440.7	1 402	202.0
钢板	-4	322.6	455.3	1 559	207.0

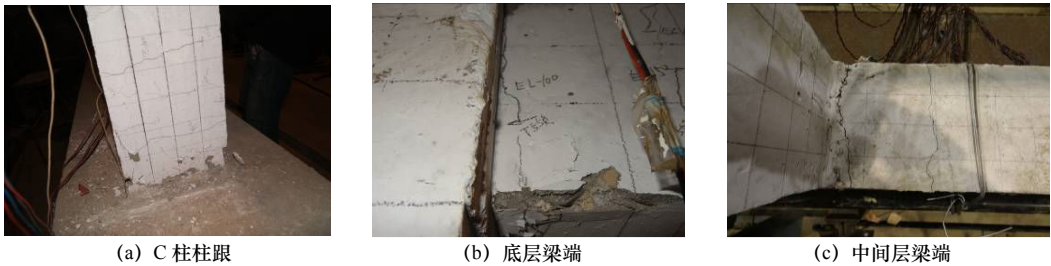


图 2 拟动力试验后试件的形态
Fig.2 Modes of the specimen after pseudo-dynamic test

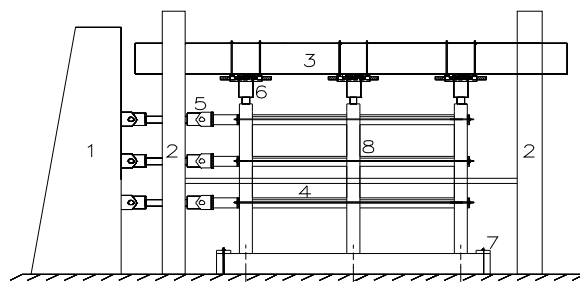
试验过程中测试的主要内容有:梁端、柱端的型钢与钢筋应变;节点区箍筋应变;各层梁的水平位移;伺服作动器的水平力;裂缝开展情况。

2 主要试验结果及分析

2.1 拟静力加载过程及破坏特征

由于在拟动力试验阶段试件已经发生了损伤,所以在拟静力工况一开始裂缝只是进一步向梁端或柱中扩展、裂缝宽度加深。当位移加载至 80 mm 时,柱根、底层和中间层梁端顶面和底面混凝土开始起皮;随着荷载的增加,三层梁端顶面和底面也开始起皮,底下两层梁端和柱根混凝土开始剥落;当位移加载至 120 mm 时,底层部分梁端混凝土压溃,纵筋鼓起,箍筋外露;当位移加载至 160 mm 时,B 柱及 C 柱柱根混凝土压溃,纵筋鼓起,箍筋外露,底层和中间层中节点出现少许微裂缝,其他节点基本完好;位移施加至 180 mm,侧向支撑滑动,试件平面外压溃,底层和中间层节点部分混凝土剥落,试验结束,最终破坏形态见图 4。

梁端裂缝以弯曲裂缝为主,主要集中在距梁端 1/3 跨度内,个别梁端出现少量斜向裂缝,底下两层梁端塑性铰较顶层梁端发展充分,钢筋屈服先于型钢;柱端破坏也主要发生在柱脚,塑性铰发展充分,其他柱端基本没有出现裂缝;节点核心区在试件平面外失稳之前出现少量裂缝,箍筋未屈服;图 5 给出了框架模型在低周反复荷载作用下的塑性铰出现顺序,从图 5 中看出,底下两层梁铰先于柱铰,总体说明了模型符合“强柱弱梁,强剪弱弯”的抗震设防要求。



1.反力墙;2.反力钢架;3.反力大梁;4.侧向支撑;5.电液伺服作动器;6.油压千斤顶;7.地锚螺栓;8.SRRC 框架试件

图 3 SRRC 框架加载装置

Fig.3 Loading device of SRRC frame

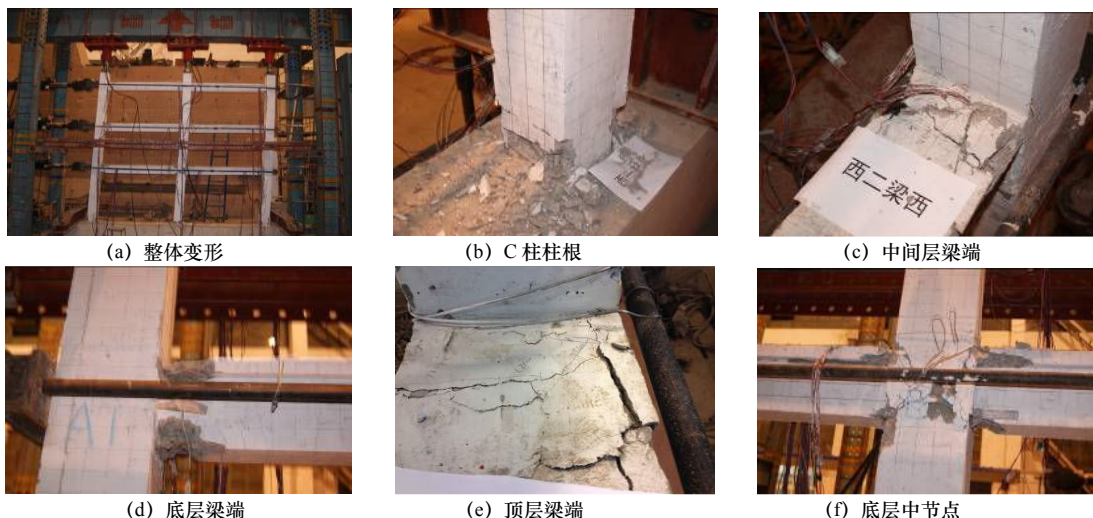


图 4 试件最终破坏形态

Fig.4 Final failure modes of specimen

2.2 拟静力滞回曲线

滞回曲线是结构抗震性能的综合体现,反映了试件在往复荷载作用下受力与变形的关系。图 6 为 SRRC 框架基底总剪力-顶点位移滞回曲线,图 7 为各层层剪力-层间位移。由图 6 和图 7 可见:

(1) 拟静力工况下框架基底总剪力-顶层位移滞回曲线与层间剪力-层间位移滞回曲线整体均呈现比较饱满的梭形,直至试件破坏也未出现明显的捏拢现象,表现出良好的耗能能力;

(2) 由于损伤的存在,在加载初期就出现了残余变形,卸载曲线不能原路返回,正反向加卸载第一次循环已经出现了滞回环,框架处于塑性阶段;

(3) 在位移控制阶段,随着位移的增加,滞回曲线愈加饱满;在同一位移量循环下,后两级循环的荷载和曲线斜率均比第一次有所减小,存在强度衰减和刚度退化现象;

(4) 除整体和底层外,其他层滞回曲线对称性较差,分析其原因可能是在拟动力试验阶段试件在正反两个方向下的损伤程度不同,每层的损伤程度也不同。

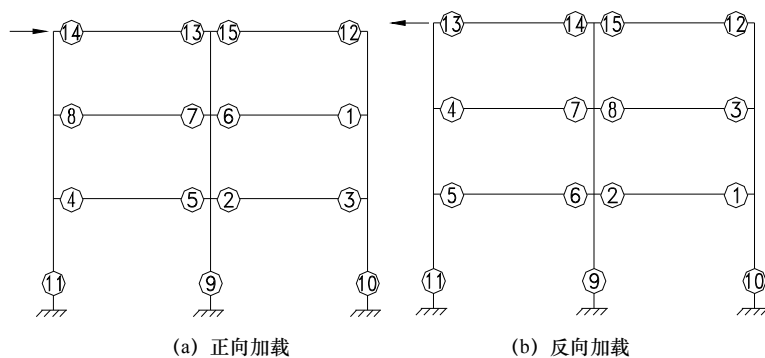


图5 框架塑性铰出铰次序

Fig.5 Sequence of plastic hinge of frame

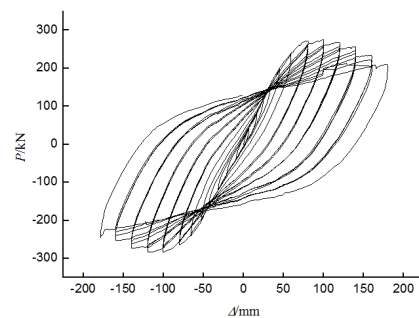


图6 框架基底总剪力-顶点位移滞回曲线

Fig.6 Base shear-top displacement hysteretic loops

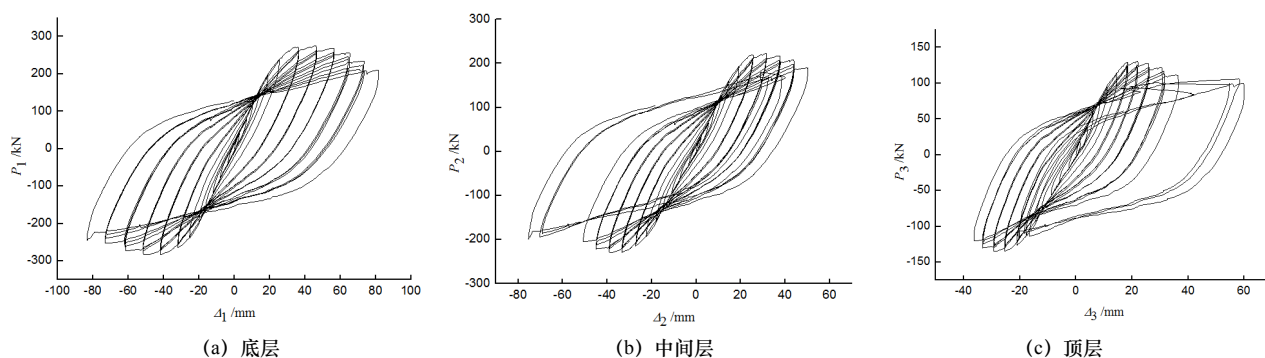


图7 框架层间剪力-层间位移滞回曲线

Fig.7 Story shear force-story displacement hysteretic loops

2.3 骨架曲线

图8中的骨架曲线为拟动力工况和拟静力工况每次位移循环时荷载-位移达到最大峰值点的轨迹.由图8可见,试件的初始刚度较大,过了峰值荷载以后,曲线下降比较平缓,表现出较好的延性.

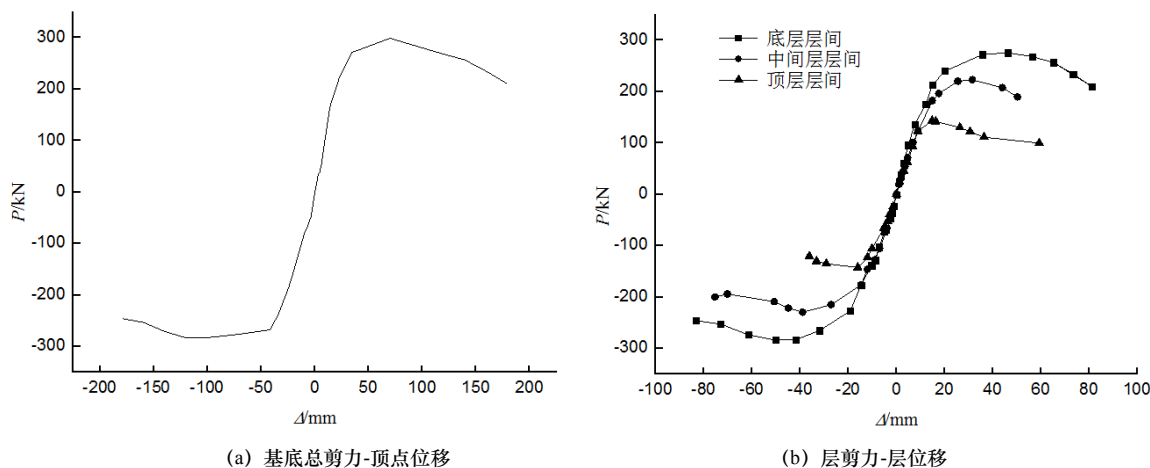


图8 骨架曲线

Fig.8 Skeleton curves

2.4 承载力及位移延性

表3为框架整体及各层的试验结果,其中整体框架和各层的特征值是综合了拟动力工况和拟静力工况后的试验结果.表3中 P_y 为屈服荷载、 P_m 为峰值荷载、 P_u 为破坏荷载; Δ_y 、 Δ_m 、 Δ_u 分别为与 P_y 、 P_m 、 P_u 相对应的位移; θ_y 、 θ_m 、 θ_u 为相对应层间位移角; K_y 、 K_m 、 K_u 为相对应的割线刚度; μ 为位移延性系数.其中屈服荷载 P_y 是按能量相等的原则确定;破坏荷载 P_u 取峰值荷载 P_m 的85%,反向加载时由于作动器行程的限制,框架底层和整体的破坏荷载未能下降至峰值荷载的85%,分别下降至86.7%和86.7%,故破坏荷载取最后一级加载位移对应的荷载; μ 按 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 计算;刚度 K 取荷载与对应位移的比值,即割线刚度.

由表 3 可知,试件的整体极限位移角最大达到 1/22,层间最大位移角为底层的 1/17,满足了我国《建筑抗震设计规范》规定的框架结构弹塑性位移角不大于 1/50 的要求,说明了 SRRC 框架具有较好的变形能力和抗倒塌能力。

表 3 试验结果
Tab.3 Test results of the frame

楼层	加载方向	屈服点				峰值点				破坏点				μ
		P_y/kN	Δ_y/mm	K_y	θ_y	P_m/kN	Δ_m/mm	K_m	θ_m	P_u/kN	Δ_u/mm	K_u	θ_u	
底层	正向	239.96	20.06	12.0	1/80	275.72	46.26	6.0	1/35	234.36	73.29	3.2	1/22	3.7
	反向	-237.31	-22.79	10.4	1/70	-283.67	-50.36	5.6	1/32	-245.88	-83.24	3.0	1/19	3.7
中间层	正向	196.47	17.53	11.2	1/68	227.82	25.10	9.1	1/48	193.65	48.87	4.0	1/24	2.8
	反向	-208.05	-19.60	10.6	1/61	-229.43	-38.94	5.9	1/31	-195.02	-69.18	2.8	1/17	3.5
顶层	正向	131.68	11.38	11.6	1/105	143.56	16.32	8.8	1/74	122.03	30.63	4.0	1/40	2.7
	反向	-124.41	-12.36	10.1	1/97	-142.35	-16.09	8.8	1/75	-121.00	-35.97	3.4	1/33	2.9
整体	正向	271.43	34.44	7.9	1/116	298.96	69.91	4.3	1/57	254.12	142.29	1.8	1/28	4.1
	反向	-259.07	-39.60	6.5	1/101	-283.57	-119.50	2.4	1/33	-245.88	-178.98	1.4	1/22	4.5

表 3 也给出了 SRRC 整体框架的位移延性系数,正反向整体位移延性系数分别为 4.1 和 4.5,平均值为 4.3,表明 SRRC 框架具有较好的延性;顶层位移延性较小于其他层,可能是因为顶层梁配筋形式及破坏程度不同于其他楼层的缘故。

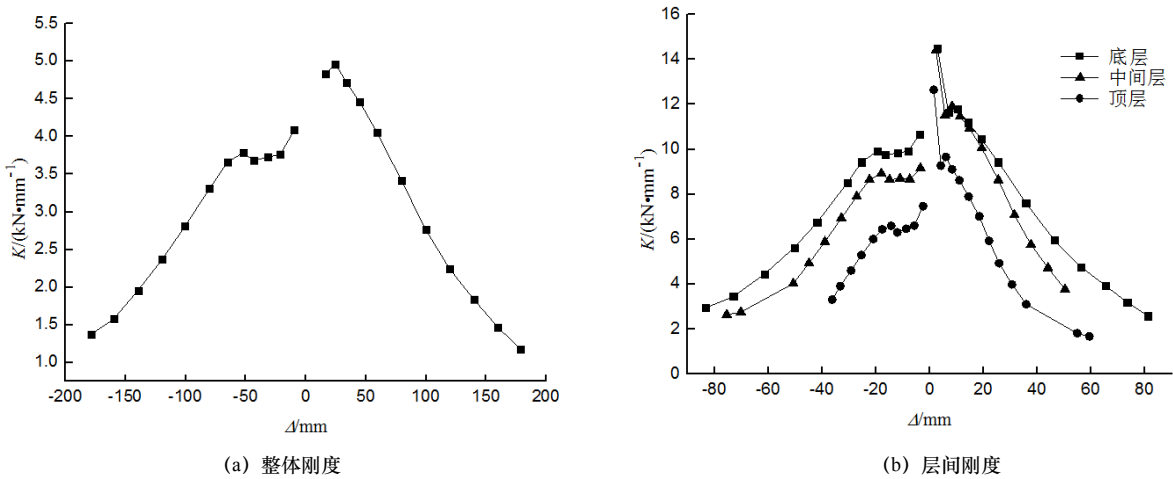


图 9 刚度退化曲线
Fig. 9 Curves of stiffness degradation

2.5 刚度退化

图 9 绘出了试件拟静力工况下整体刚度退化曲线和层间刚度退化曲线,由图 9 可见,试件随着位移的增大,整体刚度和层间刚度均越来越低,即出现了刚度退化;刚度退化速率比较平缓;试件初始刚度在正向略大于反向,可能是由于制作偏差,或者前期加载正反向试件损伤程度不同的缘故;试件在拟静力加载过程中刚度下降速度比较平缓;底层刚度大于中间层,中间层大于顶层,沿竖向的刚度自下向上逐渐减小,变化比较均匀,没有出现薄弱层。

2.6 耗能能力

采用粘滞阻尼系数 h_e 作为试件抗震耗能能力的评估指标,计算结果如表 4,文献^[9]给出了再生混凝土框架的粘滞阻尼系数,在峰值点附近 h_e 介于 0.16~0.18,在破坏点附近 h_e 介于 0.22~0.30。对比可见 SRRC 框架具有有较好的耗能能力。

表 4 等效粘滞阻尼系数 h_e
Tab.4 equivalent viscous damping coefficient

试件	屈服点/ h_{ey}	峰值点/ h_{em}	破坏点/ h_{eu}
SRRC 框架	0.10	0.18	0.28

3 结论

(1)经过合理设计的型钢再生混凝土框架能够实现梁的破坏先于柱的破坏,节点最终不发生破坏,即能

够满足“强柱弱梁,强剪弱弯,强节点弱构件”的要求;

(2) SRRC 框架具有较高的承载力,滞回曲线比较饱满,没有明显的捏缩现象.同时具有较好的变形能力,整体位移角达到 1/22,层间位移角介于 1/17~1/40 之间,位移延性系数平均值为 4.3,破坏荷载时粘滞阻尼系数达 0.28,表现出良好的变形能力、抗倒塌能力和耗能能力;

(3)SRRC 框架刚度随位移的增大而减小,但刚度退化速度较平缓,楼层自下而上没有明显的刚度突变.

参考文献 References

- [1] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报:自然科学版, 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin, SUN Zhenping, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2004,32(12):1558-1561.
- [2] 王军强, 陈年和, 蒲琪, 等.再生混凝土和耐久性能试验[J].混凝土, 2007(5): 53-56.
WANG Junqiang, Chen Nianhe, Pu Qi, et al. Experimental study of behavior of strength and durability of recycled aggregate concrete[J]. Concrete, 2007 (5):53-56.
- [3] 戴国亮, 蒋永生, 傅传国, 等.高层型钢混凝土底部大空间转换层结构性能研究[J].土木工程学报, 2003, 26(4): 24-32.
DAI Guoliang, JIANG Yongsheng, FU Chuanguo, et al. Experimental study on seismic behaviors of transfer story with steel reinforced concrete in low stories of large space[J]. China Civil Engineering Journal, 2003,26(4): 24-32.
- [4] 徐培福, 薛彦涛, 肖从真, 等.高层型钢混凝土框筒混合结构抗震性能试验研究[J].建筑结构, 2005,35(5):3-8.
XU Peifu, XU Yantao, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on seismic performance of High-rise SRC hybrid structures[J]. Building Structure, 2005,35(5):3-8.
- [5] 薛建阳, 王秀振, 马辉, 等.型钢再生混凝土梁受剪性能试验研究[J].建筑结构, 2013, 43(7): 69-72.
XUE Jianyang, WANG Xiuzhen, MA Hui, et al. Experimental study on shear behavior of steel reinforced recycled concrete beams[J]. Building Structure, 2013,43(7):69-72.
- [6] 王妮, 陈宗平, 李启良, 等.型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J].工程力学, 2013, 30(6):133-141.
WANG Ni, CHEN Zongping, LI Qiliang, et al. Experimental study on the behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns under axial compression loading[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(6):133-141.
- [7] 薛建阳, 马辉.不同剪跨比下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动, 2013, 33(4):228-234.
XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced recycled concrete column under different shear-span ratios[J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2013,33(4):228-234.
- [8] YANG Youfu, HAN Linhai. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62: 1310-1324.
- [9] 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.

Experimental research on seismic behaviors of steel reinforced recycled concrete frame structure

XUE Jianyang¹, WANG Gang¹, LIU Hui², REN Rui¹

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

2. China New Era International Engineering Corporation, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the seismic behaviors of steel reinforced recycled concrete (SRRC) frame structure, a 1:2.5 scale model of three-story and two-bay SRRC frame was designed. The low cyclic reversed loading test on this model was carried out, its failure process and pattern were observed, its load-displacement hysteretic loops and skeleton curves were acquired, and its seismic behaviors, such as load carrying capacity, stiffness, ductility, energy dissipation capacity were analyzed. The result of test shows that, the failure mode of the SRRC frame belongs to 'strong column weak beam' failure mechanism, its maximum displacement angle is 1/22, and the average displacement ductility coefficient of the frame is 4.3. All these show the good deformation capacity and collapse resistance capacity.

Key words: steel reinforced recycled concrete(SRRC); frame; seismic behavior; quasi-static test

(本文编辑 吴海西)