DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612064

装配式轻型钢管框架-轻墙共同工作性能

曹万林,王如伟,刘文超,任乐乐,贾穗子

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学),北京100124)

摘 要:提出一种适用于低层或多层农房建筑的装配式轻型钢管再生混凝土框架-轻墙结构,框架由轻型钢管再生混凝土梁、 柱及连接节点螺栓连接而成,轻墙为单排配筋再生混凝土薄墙板,框架与轻墙之间通过构造钢板进行螺栓连接,形成共同工 作的受力体系.框架承担主要竖向荷载,同时与轻墙共同工作提供水平抗侧力.为研究钢筋间距、墙体厚度对装配式轻型钢管 再生混凝土框架-轻墙结构中框架与墙体共同工作性能的影响,进行了4个装配式轻型钢管再生混凝土框架-轻墙试件及1 个空框架试件的低周反复荷载试验,分析了配筋间距、墙体厚度对试件损伤演化过程、滞回特性、承载力、延性、刚度以及耗能 性能的影响.结果表明:轻型钢管再生混凝土框架-轻墙结构具有良好的共同工作性能,有明确的两道抗震防线;轻墙破坏形态 为剪切破坏,随后框架压弯破坏,装配式连接构造安全可靠,结构具有良好的延性;缩小配筋间距、增加墙体厚度可提高轻型 钢管再生混凝土框架-轻墙结构的延性和耗能能力.

关键词:农房;装配式;轻型钢管再生混凝土框架;再生混凝土;拟静力试验

中图分类号: TU375 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2017)12-0060-08

Experimental study of joint work characteristic of assembly light steel tube frame with recycled concrete-thin wall

CAO Wanlin, WANG Ruwei, LIU Wenchao, REN Lele, JIA Suizi

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: Assembly light steel tube frame with recycled concrete-thin wall was proposed, which was suited for lower or multilayer floors farmhouse. Assembly frame was assembled by recycled concrete filled light steel tube beams and columns, and light wall adopted single row of steel bars and recycled concrete. Frames and walls were connected by bolts. The frame bears the vertical load and resists the horizontal load with walls together. Pseudo-static tests on 4 assembly light steel frame-thin wall and 1 single frame were conducted to study the influence of reinforcement spacing and the wall thickness on the joint work performance of frames and walls. Failure modes, hysteresis property, load-carrying capacity, ductility, stiffness and energy dissipation capacity of specimens with different bar spacing and wall thickness were analyzed. The results indicate that light steel frame-thin wall distinctly has two seismic defensive lines and works together well. The failure modes of walls are the shear failure and the frame are the axial-flexural failure, respectively, which indicate that the assemble components are safe and reliable and the structure has adequate ductility. Reducing spacing of bars or increasing thickness of the wall can improve ductility and dissipation capacity of specimens.

Keywords: farmhouse; assembly; concrete filled steel tube frame; recycled concrete; Pseudo-static tests

随着国家经济的快速发展、住宅产业化的推进 和建筑节能减排的倡导,装配式混凝土结构及再生 混凝土应用在中国发展迅速.

范力^[1]通过对装配式预制混凝土框架结构抗 震性能的研究,提出了装配式节点的弯矩-转角恢 复力模型;胡文博^[2]对预制装配式钢筋混凝土一体 化剪力墙体进行了抗震性能研究,结果表明相比于 无填充墙试件和砌体填充试件,其刚度和水平抗剪 承载力有明显的提高;孙建等^[3]通过试验验证了全 装配式剪力墙结构体系的水平接缝的可行性;徐姝 亚等^[4]提出了新型装配式套筒连接钢管再生混凝 土柱-RC 梁节点;Baran 等^[5]采用装配式高强混凝 土墙板对混凝土框架结构进行改进,使其强度和刚 度得到了显著提高;Smith 等^[6]通过使用低碳钢筋 和无粘结后张法张拉高强钢绞线,提高了装配式混 凝土墙水平接缝抗侧力;Park 等^[7]对采用简单节点 设计的 15 层装配式组合框架结构进行动力分析,确 定了结构动力特性.多数学者对装配式混凝土结构 的构件和节点性能进行了研究,但对装配式框架与 墙板共同工作性能研究尚少.

收稿日期:2016-12-13

基金项目:国家自然科学基金(51508009)

作者简介:曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 曹万林, wlcao@ bjut.edu.cn

• 61 •

装配式混凝土结构中,混凝土作为主要建筑材 料用量巨大.一方面,混凝土骨料对天然石材的巨大 需求造成了资源枯竭,另一方面,大量旧建筑的拆除 废料中,废弃混凝土约占34%,造成了环境污染和 资源浪费^[8].很多学者^[9-11]对再生混凝土结构进行 了大量研究,明确了再生混凝土基本性能.再生混凝 土的运用,能很好解决废弃混凝土污染问题、降低天 然资源耗费、缩减建筑成本,实现建筑资源可持续发 展战略.

已有装配式混凝土结构多运用于工业建筑、城市多层及高层房屋建筑中,低层及多层农房运用较少,而中国低层及多层农房多位于地震区,且以自建为主,建造工艺不能满足抗震基本要求.本文在吸收了以往装配式钢框架结构优越性能的基础上,墙体采用单排配筋^[12-13],设计了装配式轻型钢管再生混凝土框架-轻墙结构,提高了建筑材料利用率,适应了建筑结构的产业化发展形势.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计了4个装配式轻型钢管再生混凝土

框架-轻墙试件以及1个空框架作为对比试件,试件编号分别为FSW60-1、FSW60-2、FSW60-3、 FSW40、FRA.框架由轻型钢管再生混凝土梁、柱及 连接节点螺栓连接而成,连接节点为2个焊有三角 形加劲肋的冷弯角钢在预留框架梁空间上下侧对称 布置,三面围焊在框架柱上,并与框架梁螺栓连接. 轻墙为单排配筋再生混凝土薄墙板,墙体内水平竖 向分布钢筋分别与带螺栓孔的钢板边框焊接,形成 带钢板边框的配筋网片.钢管再生混凝土梁柱分别 沿长度及高度方向焊接带螺栓孔的钢板条,与轻墙 钢板边框对应螺栓孔螺栓连接.试件主要参数见 表1.4个试件框架部分构造及几何尺寸相同,以试 件FSW60-1为例,试件几何尺寸及连接构造见图1.

表1 试件主要参数

Tab.1 Main parameters of specimens

试件编号	墙板厚度/mm	钢筋间距/mm	配筋率/%
FSW60-1	60	100	0.33
FSW60-2	60	150	0.22
FSW60-3	60	200	0.16
FSW40	40	150	0.33



(a) 试件几何尺寸

(b) 预装图

图1 试件几何尺寸及预装图(mm)

Fig.1 Dimension and pre-assembling of specimens (mm)

试件的钢结构部分委托北京佳诚利锋设备制造 有限公司加工制作,墙内钢板边框和梁柱焊接钢板 条采用 Q235 级钢材,方钢管采用冷弯钢板焊接而 成.再生混凝土的浇筑养护及试验加载在中国地震 局工程力学研究所恢先综合实验室完成,混凝土达 到规范^[14]要求后进行装配.钢管与墙板再生混凝土 相同,再生粗骨料粒径 5~10 mm,取代率为 100%, 细骨料采用天然商品砂.再生混凝土标准立方体抗 压强度实测均值为 43.8 MPa,再生混凝土配合比见 表 2,墙板配筋及框架钢管材性试验结果见表 3.

4

		Tab	o.2 Recycled	concrete mix design	s of per cubic	meter		
単位体积质量/(kg・m ⁻³)								
强反守级 —	水泥	粉煤灰	矿粉	再生粗骨料	砂	减水剂	缓凝剂	水
C40	369	79	79	841	841	3.50	0	181
Tab.3 Mechanical properties of steel bar and steel tube								
钢材	钢材	†规格/	屈服强度	极限强度	伸长率	弹	性模量	钢板厚度/
类型	1	mm	$f_{\rm y}/{ m MPa}$	$f_{\rm u}/{ m MPa}$	$\delta/\%$	E/	10 ⁵ MPa	mm
钢筋		$\Phi 5$	680	786	5.5		2.09	—
钢边框/钢板条			309	467	25.27		2.11	4

477

表 2 再生混凝土配合比

1.2 试验装置及加载方案

方钢管

试验采用拟静力试验方法,试件加载装置示意 见图 2(a).试验首先在分配梁顶面中心处施加竖向 荷载 600 kN,并在试验过程中保持恒定,竖向荷载通 过分配梁均匀施加到轻型钢管再生混凝土框架上, 然后在试件框架梁水平中心处施加低周反复荷载, 加载点距基础顶面 1 480 mm.试验轴压比为 0.35.由 于试件平面外刚度较弱,为防止加载过程中试件发 生整体的面外失稳,在与水平加载垂直方向设置侧 向支撑,用于约束其面外失稳,见图 2(b)现场照片. 试件模型柱脚与基础钢梁通过高强螺栓连接,并采 用地锚螺栓将基础钢梁固定于地面.

 100×100

375



图 2 加载装置示意 Fig.2 Loading device

试件水平加载采用位移控制的低周反复加载方式,将水平加载点实测位移值作为控制位移,位移加载幅值如图 3 所示.加载至 1/500 位移角之前,位移增量为 1/2 500,加载至 1/50 位移角之前,位移增量

为1/500,加载至1/50位移角之后,位移增量为 3/500,每级加载循环2次,直至钢框架丧失承载能力,结束试验.在试验过程中,加载速率保持一致.规 定千斤顶推出时水平力为正.

2.18

23.23



1.3 测点布置

荷载、位移以及应变通过 IMP 数据采集系统采 集,人工观测试件损伤演化过程,并手工绘制墙体裂 缝.图 4 为位移计布置及应变测点编号,其中位移 计1监测加载点位移,位移计3、4 监测基础滑移,位 移计5、6 监测墙体剪切变形,墙体平面中部放置位 移计7,用来测量墙体平面外位移;X1、X2 为应变 花,1~6 为竖向应变片;测点 P1~P5 测量墙板内水 平钢筋应变,测点 S1~S5 测量墙板内竖向钢筋应变.

2 试验破坏现象

2.1 破坏特征及损伤演化

2.1.1 试件 FSW60

当位移达到 1.78 mm 时,试件 FSW60-1、 FSW60-2、FSW60-3 墙体与框架柱连接处出现错动. 当试件 FSW60-1 位移达到 2.37 mm 及试件FSW60-2、 FSW60-3 位移达到 1.78 mm 时,墙体角部出现第一条 受拉斜裂缝.当位移为 8.88 mm 时,试件 FSW60-2、 FSW60-3 墙体主对角斜裂缝两侧混凝土开始压碎、掉 渣.当位移为 11.84 mm 时,试件 FSW60-2、FSW60-3 墙体主对角斜裂缝两侧混凝土压溃剥落明显,试件 FSW60-1 对角斜裂缝两侧混凝土开始剥落.当位移达 到 14.80 mm 时,试件 FSW60-3、FSW60-2、FSW60-1 墙体四周及主对角斜裂缝两侧混凝土压酥、溃落现象 依次显著,承载力下降,墙体作为第一道防线首先发 生破坏.随着混凝土脱落,边缘连接构造露出,未发生 明显破坏,框架未发生明显损伤.当位移为 17.76 mm 时,框架柱与框架下横梁连接板连接焊缝处漆皮起皱. 当位移达到 20.72 mm 时,试件 FSW 60-3 框架柱底部 外侧开始鼓凸.当位移达到 23.68 mm 时,试件 FSW60-1、FSW60-2 框架柱底部外侧开始鼓凸.当位移 达到 38.48 mm 时,受压侧框架柱底外侧、后侧、前侧均 出现鼓包,且柱底受拉侧出现残余应变.当位移达到 56.24 mm时,装配式框架柱柱底鼓包严重,此时钢管柱 受压屈曲,呈灯笼状,试件 FSW60-2、FSW60-3 框架柱 与框架下横梁连接板连接焊缝处钢管撕裂,此位移下认 为试件破坏,试验结束.图 5(a)(b)(c)为试件FSW60-1、 FSW60-2、FSW60-3 的破坏特征及裂缝分布图.



图 5 试件破坏特征及裂缝分布 Fig.5 Failure models and crack distribution of specimens

2.1.2 试件 FSW40

当位移达到 1.18 mm 时,墙体角部出现第一条 受拉斜裂缝.当位移达到 2.37 mm 时,墙体与框架柱 连接处出现错动.当位移达到 5.92 mm 时,正负加载 方向新增多条对角斜裂缝.位移达到 11.84 mm 时, 主对角斜裂缝两侧混凝土开始起皮、剥落.当位移达 到 14.80 mm 时,墙体混凝土压酥、溃落,承载力下

(c) FSW60-3

降,墙体作为第一道防线首先发生破坏.随着混凝土 脱落,边缘连接构造露出,未发生明显破坏,框架未 发生明显损伤.当位移为17.76 mm时,框架柱与框 架下横梁连接板焊缝处漆皮起皱.当位移达到 20.72 mm时,框架柱底部外侧轻微鼓凸.当位移达到 26.64 mm时,框架柱底部外侧鼓凸明显.当位移达 到38.48 mm时,框架柱底部外侧、后侧、前侧均出现

(d) FSW40

鼓包,且出现残余鼓包.当位移达到 56.24 mm 时,框 架柱柱底鼓包严重,此时钢管柱柱脚部位受压屈曲, 呈灯笼状,框架柱与框架下横梁连接板连接焊缝处 钢管撕裂,试验结束.图 5(d)为试件 FWS40 的最终 破坏特征及裂缝分布图.

分析比较 4 个试件的损伤演化过程,随着墙体 钢筋间距的减小,墙体裂缝分布更密且更均匀,裂缝 宽度明显减小;随着墙体厚度减小,配筋率相对增 加,墙体斜裂缝数量明显增加,但因墙体厚度较小, 脆性破坏明显.墙体破坏之前,框架及连接构造未发 生明显损伤,连接安全可靠.

3 试验结果及分析

3.1 滞回性能和骨架曲线

图 6、7 分别为各试件的实测滞回曲线和骨架曲 线.其中 F 为水平荷载, Δ 为试件加载点处实测位移.



Fig.6 Hysteretic curves of specimens

从图 6 可看出:加载初期,各试件滞回环呈梭 形,加载时曲线斜率变化较小,同级加载的两个循环 基本重合,处于弹性工作状态.随着加载位移的增 大,试件刚度变小,卸载后试件残余变形逐渐增大, 同级加载的第二循环,承载力衰减、刚度退化明显, 但荷载不断增长.峰值荷载后,滞回环逐渐呈反 S 形,骨架曲线下降明显,墙体薄,破坏明显.位移达到 30 mm 后,试件滞回环开始呈弓型,轻型钢管再生混 凝土框架开始承担主要荷载,最终框架受弯破坏.加 载中前期,墙体与框架共同工作,试件承载力较高, 墙体退出工作之后,由框架承担荷载,承载力下降, 但具有良好的延性,滞回曲线呈蝴蝶形.由图7骨架 曲线可以看出:各试件的初始刚度基本一致,曲线相 近,承载能力和变形能力存在差别,墙体厚度的增 加、配筋间距的减小可以显著提高试件最大承载力.



Fig.7 Skeleton curves of specimens

3.2 承载力

表4为各试件特征点实测值, F_{er} 为开裂荷载, 为第一条可见裂缝出现时对应荷载; F_y 为屈服荷载, 由能量法^[15]确定; F_u 为峰值荷载; F_a 为破坏荷载,取 峰值荷载的85%;相应的, Δ_{er} 为开裂位移; Δ_y 为屈服 位移; Δ_u 为峰值位移; Δ_a 为有效破坏位移, θ_a 为对应 的弹塑性位移角, $\mu = \Delta_d / \Delta_y$ 为位移延性系数.表5为 4 个墙体试件达到峰值荷载时,相应峰值位移下对 应空框架承载力.

1)试件 FSW60-1 与试件 FSW60-3 相比,开裂 荷载、屈服荷载、峰值荷载分别提高 46.3%、18.0%、 19.2%,试件 FSW60-2 与试件 FSW60-3 相比,开裂 荷载、屈服荷载、峰值荷载分别提高 31.1%、6.6%、 7.9%.说明:钢筋间距的减小显著提高了试件的开裂 荷载、屈服荷载和峰值荷载.钢筋间距增大对开裂荷 载的影响最显著.

2)试件 FSW60-2 比试件 FSW40-2 开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载分别提高 89.3%、16.4%、21.4%,说明墙体厚度的增加提高了试件的开裂荷载、屈服荷载和峰值荷载,其中对开裂荷载的影响最为显著.

3)4个墙体试件达到峰值荷载时,相应峰值位 移下对应空框架承载力占墙体试件承载力的 6.70%~9.37%,此时框架承载力未达到峰值,仍可 继续上升,墙体破坏后,框架形成第二道防线.

4) 低多层建筑每平方米的质量约为 1.5 t, 对于 100 m²的房屋, 总质量约为 150 t, 在 8 度抗震设防 烈度情况下,取基本地震加速度最大值 0.3g^[16],此时产生的横向荷载为 450 kN,试验中墙体试件屈服

荷载平均值为736.35 kN,墙体在弹性工作范围内, 满足低多层建筑的要求.

表 4 各试件的主要试验阶段结果

Tab.4 Measured characteristic results of specimens at main phases

试件编号	$F_{\rm e}/{ m kN}$	F_y/kN	$F_{\rm u}/{ m kN}$	$F_{\rm d}/{ m kN}$	F_y/F_u	$\Delta_{ m cr}/ m mm$	$\Delta_{ m y}/ m mm$	$\varDelta_{\rm u}/{\rm mm}$	$\Delta_{ m d}/ m mm$	${m heta}_{ m d}$	μ
FSW60-1	386.74	835.16	982.89	835.46	0.850	2.37	8.05	11.31	14.86	1/99	1.85
FSW60-2	346.58	754.45	889.53	756.10	0.848	1.78	9.18	13.83	17.24	1/86	1.87
FSW60-3	264.35	707.86	824.48	700.81	0.859	1.78	8.91	11.62	14.60	1/101	1.64
FSW40	183.07	647.93	732.67	622.77	0.884	1.18	7.65	11.66	14.16	1/104	1.85
FRA	_	120.74	143.56	122.03	0.841	—	26.83	47.54	64.89	1/23	2.42

表 5 各墙体试件峰值荷载及其位移下空框架承载力

Tab.5 Bearing capacity of frame and frame with wall

试件 编号	$F_{\rm u}/{ m kN}$	框架承载力 F _{FRA} /kN	墙承载力 F _{SW} /kN	荷载比例 (F _{FRA} /F _{SW})/%
FSW60-1	982.890	56.79	926.10	5.78
FSW60-2	889.530	68.74	820.79	7.73
FSW60-3	824.483	58.27	766.21	7.08
FSW40	732.670	58.39	674.28	7.97

3.3 延性

由表4可知:

1)各试件平均有效破坏位移为 1/97,具有良好 的延性.

2) 试件 FSW60-1 的开裂位移大于试件 FSW60-2、FSW60-3 的开裂位移.试件 FSW60-1、 FSW60-2、FSW60-3 的开裂位移均大于试件 FSW40 的开裂位移.表明:钢筋间距的减小及墙体厚度的增加 在一定程度上推迟了墙体的开裂.试件 FSW60-1、 FSW60-2 的延性系数比试件 FSW60-3 的延性系数分 别提高了 12.8%、14.0%,表明配筋率的增加提高了试 件的延性.

3)试件 FSW60-2 与试件 FSW60-3 相比,屈服 位移、峰值位移、有效破坏位移均增大,表明配筋率 的增加,增大了试件的屈服位移、峰值位移、有效破 坏位移.但试件 FSW60-1 的屈服位移、峰值位移、有 效破坏位移小于试件 FSW60-2 的相应值,分析原因 为随着钢筋间距的减小,墙体被分割为较多单元,减 小了墙体的整体性,混凝土损伤较快,说明钢筋间距 减小到一定水平,对试件延性会产生不利影响.

4)试件 FSW60-2 的屈服位移、有效破坏位移及 θ_{d} 均大于 FSW40,说明增加墙体厚度能够有效提高 结构延性.

3.4 平面外位移

墙体平面外变形见表 6,墙体达到极限承载力时,平面外变形均值为 6.42 mm,挠度为4.58‰,变形较小,虽然为单排配筋,仍具有良好的平面外稳定性.

3.5 承载力退化

承载力降低系数 η 为同一位移幅值下最后一次

循环的峰值点荷载值与第一次循环的峰值点荷载值 之比,用以表征试件的承载力退化^[17-18].承载力退化 曲线见图 8,各试件承载力退化相似,墙体破坏阶段 承载力退化明显,随后位移增大,曲线波动变小,说 明墙体退出工作后,框架仍然具有良好的变形能力, 对防倒塌非常有利.

表 6 试件平面外位移及挠度

Tab.6 Displacement and deflection out-of-plane of specimens

试件编号	位移/mm	挠度/‰
FSW60-1	5.55	3.96
FSW60-2	5.69	4.06
FSW60-3	7.12	5.09
FSW40	7.30	5.21





3.6 刚度退化

由各循环实测峰值荷载及相应的位移得到各试 件割线刚度 *K*_i--位移 Δ 退化曲线, 见图 9.

$$K_i = \frac{\mid \boldsymbol{F}_i^+ \mid + \mid \boldsymbol{F}_i^- \mid}{\mid \boldsymbol{\Delta}_i^+ \mid + \mid \boldsymbol{\Delta}_i^- \mid}$$

式中:*i*为循环级数,*K_i*为第*i*级循环对应的割线刚度,*F_i*为第*i*级循环对应的峰值荷载,+、-代表水平力方向为正向、负向.

图 9 可得出:加载初期,试件刚度较大,随着位 移增加,试件刚度快速降低,刚度变化率较大,这是 因为墙体开裂,框架-墙连接界面出现错动.加载至 位移区间 2.96~11.84 mm 时,刚度位移曲线变化率 减小.随后,刚度衰减率增大,墙体发生破坏,至位移 为 20.72 mm 时,曲线缓慢下降,此时墙体基本退出 工作,框架承受荷载,各试件刚度趋于一致,墙体破 坏后,框架仍具有稳定的工作性能,能够有效防止建 筑倒塌.

各试件刚度退化呈现出明显的"快速-减缓-快速-减缓"4个阶段,在试件屈服后,达到极限荷载前,刚度退化明显减缓,此时框架对墙板产生约束作用,减缓墙体损伤,提高了试件的承载力以及延性.



3.7 耗能能力

用 Δ_{a} 所在加载循环及之前加载循环滞回环的累 计面积 E_{p} 及 Δ_{a} 对应的等效粘滞阻尼系数 h_{e} 作为耗 能代表值.4个试件的累计耗能及等效黏滞阻尼系数 见表 7,试件累计耗能与水平位移关系见图 10.

由图 10 和表 7 可知:试件 FSW60-1、FSW60-2 较试件 FSW60-3 的等效粘滞阻尼系数分别提高了 77.8%、44.4%,累积耗能分别提高了30.7%、20.2%,



图 11 装配式框架柱脚应变滞回曲线



Fig.12 Load-strain hysteresis loops of reinforcement measuring point P3

由图 11、12 可知:

表明配筋率的增大可以显著提高试件耗能能力.由 图 10 可以看出,墙体厚度的增大可以增加试件的累 积耗能,但位移较小时,墙体厚度及配筋对试件的累 积耗能的影响较小.

表 7 试件耗能代表值

Tab.7 Experimental results of energy dissipation





3.8 应变分析

框架构造相同,应变规律类似.取试件 FSW60-2 作出应变测点 1、6 的应变滞回曲线,及各试件框架 柱柱脚测点 1 滞回曲线对比见图 11.另外,试件 FSW60-2及 FSW40 钢筋测点 P3 滞回曲线见图 12.



1)各试件柱脚应变滞回特性明显,与试件 *F*-Δ 滞回曲线基本保持一致,框架最终破坏形式为弯曲破坏.

2)试件承载力未达到峰值荷载之前,柱脚应变 较小,承载力达到峰值荷载之后,墙体突然破坏,柱 脚应变有突变,但仍保持良好的滞回特性,框架工作 性能稳定.

3)峰值荷载时,各试件柱脚应变均达到屈服应 变,试件FSW60-1 应变较小,说明墙体损伤较小,对 框架支撑作用较强. 4)墙体破坏形式为剪切破坏,主裂缝开展处横 向钢筋在荷载未达到峰值荷载之前,应变较小,未达 到屈服,说明钢筋与墙体粘结界面未出现滑移,变形 基本保持一致,达到极限荷载之后,墙体主裂缝完全 开展,混凝土逐渐退出工作,横向钢筋因水平剪力作 用屈服.

4 结 论

1)装配式轻型钢管再生混凝土框架-轻墙结构 弹塑性位移角均值为 1/97,具有良好的承载力,延 性以及耗能能力,可以应用于实际工程;

2)装配式轻型钢管再生混凝土框架-轻墙结构,框架对墙体起到约束作用,减缓墙体的损伤,提高结构承载力以及延性,具有良好的共同工作性能;

3)达到极限承载力之前,剪力主要由墙体承 担,装配连接构件没有发生明显破坏,连接安全可 靠,框架没有明显损伤,达到极限承载力之后,墙体 逐渐退出工作,连接条板能够起到加劲肋的作用,提 高框架的刚度以及延性,框架仍然具有良好的变形 能力,对抗倒塌是有利的;

4) 增加墙板厚度能够有效提高结构承载力、延 性、耗能能力;减小钢筋间距能够有效提高试件承载 力、延性和耗能能力,但是钢筋间距减小到一定程 度,反而会导致结构延性的降低,结构设计时,应采 用合适的钢筋间距.

参考文献

[1] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 上海:同 济大学, 2007.

FAN Li. Investigation on seismic behavior of jointed precast concrete frame structures[D]. Shanghai:Tongji University, 2007.

[2] 胡文博. 预制装配式钢筋混凝土一体化剪力墙体抗震性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015:37-52.

HU Wenbo. Experimental and numerical study on seismic performance of precast fabricated integration shear wall [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2015:37-52.

- [3] SUN Jian, QIU Hongxing, LU Bo. Experimental validation of horizontal joints in an innovative totally precast shear wall system
 [J]. Journal of Southeast University, 2015, 31(1):124-129.
- [4] 徐妹亚,李正良,刘红军,等. 装配式套筒连接钢管再生混凝土 柱-RC梁节点抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48 (6):124-131.

XU Shuya, LI Zhengliang, LIU Hongjun, et al. Seismic behavior of precast sleeve-connected column to RC beam connection [J]. Journal of harbin institute of technology, 2016, 48(6):124-131.

- [5] BARAN M, TANKUT T. Retrofit of non-ductile RC frames with precast concrete (PC) wall panels [J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(6):1149-1166.
- [6] SMITH B J, KURAMA Y C. Seismic design guidelines for solid and perforated hybrid precast concrete shear walls [J]. Pci Journal, 2014, 59(59): 43-59.
- [7] PARK S C, HONG W K, KIM S, et al. Mathematical model of

hybrid precast gravity frames for smart construction and engineering [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(6):1-14.

- [8] 邓寿昌,张学兵,罗迎社. 废弃混凝土再生利用的现状分析与研究展望[J]. 混凝土,2006(11):20-24.
 DENG Shouchang, ZHANG Xuebing, LUO Yingshe. Abandon the concrete present condit ion of the reborn exploitat ion analys is and the research outlook [J]. Concrete, 2006(11):20-24.
- [9] 肖建庄,杨洁,黄一杰,等. 钢管约束再生混凝土轴压试验研究
 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6):92-98.
 XIAO Jianzhuang, YANG Jie, HUANG Yijie, et al. Experimental study on recycled concrete confined by steel tube under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 92-98.
- [10]曹万林,牛海成,周中一,等.圆钢管高强再生混凝土柱重复加载 偏压试验[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):31-37.
 CAO Wanlin, NIU Haicheng, ZHOU Zhongyi, et al. Experimental study on high strength recycled concrete-filled circular steel tube columns under repeated eccentric loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12):31-37.
- [11]吕西林,张翠强,周颖,等.全再生混凝土框架抗震性能[J].中南 大学学报(自然科学版), 2014, 45(6):1932-1942.
 LU Xilin, ZHANG Cuiqiang, ZHOU Ying, et al. Seismic performance of reinforced totally-recycled concrete frame[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (6):1932-1942.
- [12]张建伟,吴蒙捷,曹万林,等. 配置斜筋单排配筋混凝土双肢剪力 墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5):201-207.
 ZHANG Jianwei, WU Mengjie, CAO Wanlin, et al. Experimental study on seismic behavior of RC coupled shear walls with single row of steel bars and inclined reinforcement [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5):201-207.
- [13]张建伟,杨兴民,曹万林,等.带斜筋单排配筋低矮剪力墙的抗 震性能[J].工程力学, 2016, 33(增刊1):125-132.
 ZHANG Jianwei, YANG Xingmin, CAO Wanlin, et al. Seismic performance of low-rise shear wall with single layer of web reinforcement and inclined steel bars[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(Sl):125-132.
- [14]混凝土结构工程施工质量验收规范:GB 50204—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
 Code for acceptance of constructional quality of concrete structures: GB 50204—2002[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [15] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003:336-337.
 GUO Zhenhai, SHI Xudong.Reinforced concrete theory and analyse

[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 336–337.

[16] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

Code forseismic of design buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[17] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京:东南大学出版 社, 1989:312-316.

TANG Jiuru. Seismic resistance of joints in reinforced comcrete frames[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989:312-316.

[18] 秦凯.方钢管再生混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D].北京:清华大学,2006:55-59.
 QIN Kai. Research on the performance of connections composed of concrete-filled square steel tubular columns and steel-concrete composite beams[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006;55-59.

(编辑 赵丽莹)