

文章编号: 1000-4750(2015)03-0073-09

型钢再生混凝土框架-空心砌块墙 抗侧刚度试验研究

薛建阳, 雷思维, 高 亮, 罗 峥, 刘 菲

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 为研究型钢再生混凝土结构(SRRC)的抗侧力性能, 进行了 3 榀不同填充程度的型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块墙体混合结构的低周反复荷载试验。通过测试试件在侧向力作用下的受力过程和破坏形态, 研究型钢再生混凝土框架结构的受力机理和抗震性能, 获得了再生混凝土空心砌块墙体对框架的承载力和抗侧刚度的影响; 分析结构在不同受力阶段的承载力和刚度变化情况, 以及结构在同级循环荷载作用下的刚度退化规律。结果表明: 型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙结构具有较高的承载力和抗侧刚度, 全高填充墙对型钢再生混凝土框架抗侧刚度的影响较大, 结构初始刚度大, 而刚度衰减快, 半高填充墙在结构受力初期可提高结构承载力和刚度, 而在受力后期具有与空框架相似的退化规律。

关键词: 型钢再生混凝土; 低周反复荷载; 填充墙; 水平承载力; 抗侧刚度

中图分类号: TU398

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0765

EXPERIMENTAL STUDY ON LATERAL STIFFNESS OF STEEL RECYCLED CONCRETE FRAME WITH RECYCLED CONCRETE HOLLOW BLOCK WALL

XUE Jian-yang, LEI Si-wei, GAO Liang, LUO Zheng, LIU Fei

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to study the lateral resistance of shaped steel-recycled concrete structures, low-cyclic reversed loading tests were carried out on 3 models of a shaped steel recycled concrete- recycled concrete hollow block wall hybrid structure. Based on the loading process and failure pattern of the specimens, the mechanical performance and seismic behavior of the shaped steel recycled concrete columns-reinforced recycled concrete beam structure were studied, and the influence of the recycled concrete hollow block wall on the bearing capacity and lateral stiffness of the frame was obtained. The changes in bearing capacity and stiffness of the structure under different loading phases and the rules governing structural stiffness degradation under circulating load at one level was analyzed. It was found that shaped steel recycled concrete frames with recycled concrete hollow block wall structure has high bearing capacity and lateral stiffness. A full-height wall has a great influence on the lateral stiffness. It has high initial stiffness, however that stiffness decreases rapidly. With a half-height wall, the structure has increased bearing capacity and stiffness at the initial loading stage, but displays degradation of

收稿日期: 2013-08-21; 修改日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178384); 陕西省留学人员科技活动择优项目(陕外专发[2010]26 号); 住房和城乡建设部科学技术项目(2012-K2-12); 教育部创新团队发展计划项目(RT13089); 西安建筑科技大学创新团队发展计划项目

通讯作者: 薛建阳(1970—), 河南洛阳人, 教授, 博士, 主要从事钢与混凝土组合结构及工程结构的抗震研究(E-mail: jianyang_xue@163.com).

作者简介: 雷思维(1987—), 湖北十堰人, 硕士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: 674493595@qq.com);

高 亮(1985—), 山东济南人, 博士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: 627341793@qq.com);

罗 峥(1988—), 陕西西安人, 硕士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: 80559849@qq.com);

刘 菲(1987—), 陕西渭南人, 硕士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: 348804233@qq.com).

bearing capacity and lateral stiffness similar to the bare frame's.

Key words: shaped steel recycled aggregate concrete; low-cyclic reversed loading; infilled wall; horizontal bearing capacity; lateral stiffness

再生骨料作为一种生态环保的再生资源已经引起国内外大量学者的研究兴趣^[1-4],并将其应用于再生混凝土结构和再生混凝土小型空心砌块砌体结构。研究表明再生混凝土的力学性能、变形指标等均低于普通混凝土^[1],为了弥补再生混凝土材料的不足,在再生混凝土中配置型钢,形成型钢再生混凝土结构。它兼具钢结构和混凝土结构的优点,具有广阔的发展和应用前景。填充墙多采用混凝土空心砌块或粉煤灰轻质砌块作为填充材料,与框架之间采用柔性连接,使其作为一种非结构构件填充于框架结构中,通常情况下不参与结构承载力计算,只是对其周期进行折减^[5]。然而,大量研究表明,填充墙除了起到围护和分隔作用外,还对结构的刚度有较大贡献,并承担一定的水平力^[6],因此在合理设计和考虑构造措施的情况下,它可提高结构的承载力,增强其变形能力^[2],故应考虑填充墙作为抗侧力构件参与抵抗水平荷载的作用。框架-填充墙结构的受力特征表现为初始刚度大而强度和刚度衰减快,墙体和框架均发生变形,但二者能够协同工作^[7],且其抗侧刚度随填充率和开洞口大小、位置变化较为明显^[8-9]。本文通过型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙结构进行低周反复荷载试验,对具有不同填充墙配置的框架的侧向刚度进行研究,得到结构刚度在不同受力阶段的退化过程以及循环加载时的退化规律,为理论分析和工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验试件模型为一榀按 1:2.5 缩尺的单层单跨型钢再生混凝土平面框架。框架柱配置 I14 型钢,梁柱纵筋为 HRB400 级钢筋,柱箍筋为 HRB335 级钢筋,梁箍筋为 HPB300 级钢筋。设计混凝土强度等级为 C50;采用水泥砂浆对再生混凝土空心砌块进行砌筑。试验轴压比均为 0.4,试件高跨比为 1:1.7。试件模型如图 1 所示。框架梁、柱的截面配钢、配筋以及节点构造如图 2 所示。

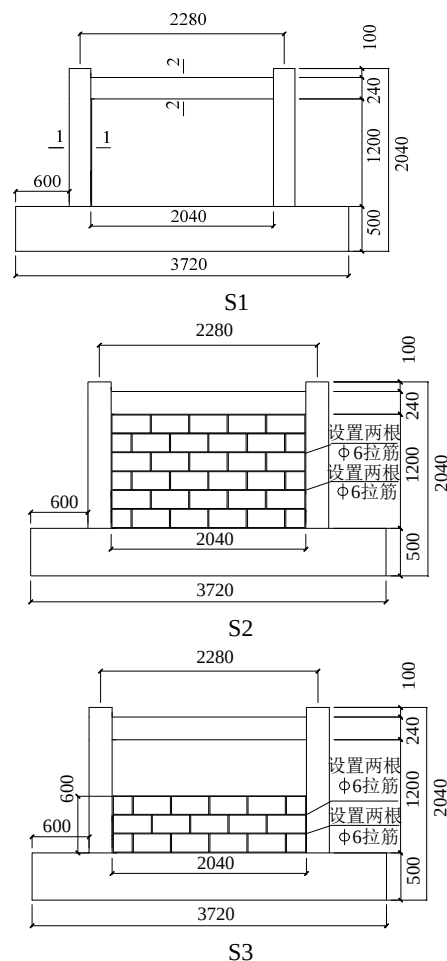


图 1 试件模型

Fig.1 Test specimen models

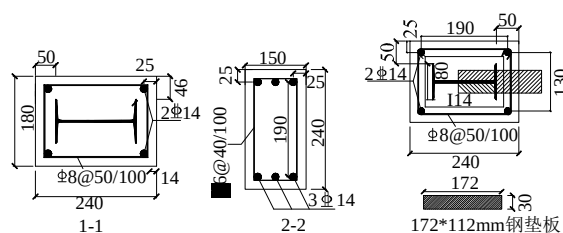


图 2 框架梁柱截面配钢、配筋及节点构造

Fig.2 Steel layout of frame section and details of joint

1.2 加载装置及加载程序

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点试验室进行,加载装置如图 3 所示。首先通过千斤顶以及荷载传感器在柱头施加竖向荷载到预定值,并在整个试验过程中保持恒定,然后通

过 MTS 电液伺服加载系统对试件施加往复水平荷载。采用力与位移混合控制加载^[10],当加载至层间位移角为 1/20 左右,试件已不适于继续承载,此时结束试验。

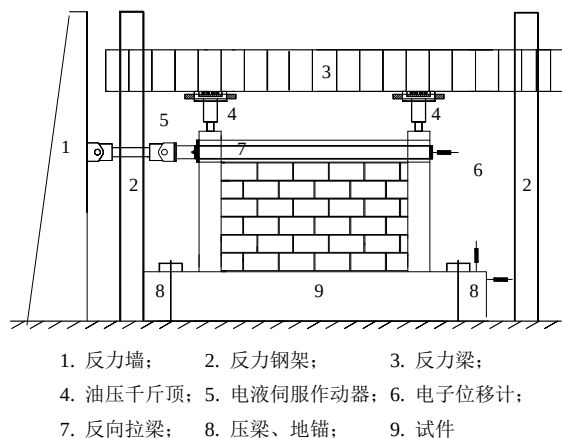


图3 试验加载装置

Fig.3 Test setup

1.3 主要试验材料力学性能

钢筋及型钢的材料力学性能试验方法参照《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228-2002),试验结果如表 1 所示。

本试验所用再生混凝土为自拌合,粗集料为再生骨料,细集料为天然河砂,级配良好,满足和易性要求。混凝土设计强度等级为 C50,砂率为 31%,水胶比为 0.43,标准用水量为 205kg,详细配合比如表 2 所示。

试验测得的再生混凝土立方体试块抗压强度平均值为 52.0MPa。再生混凝土空心砌块抗压和抗折试验参照《混凝土小型空心砌块试验方法》(GB/T4111-1997)。实测其抗拉强度为 2.7MPa,抗压强度为 5.6MPa。

表 1 钢筋及型钢力学性能

Table 1 Properties of steel bars and steel plates

钢筋 (钢材) 种类	弹性模量 $E_s/(\times 10^5 \text{MPa})$	屈服强度 f_y/MPa	屈服应变 $\varepsilon_y/(\times 10^{-6})$	极限强度 f_u/MPa	伸长率 $\delta/(\%)$	强屈比 f_u/f_y
$\phi 6$	2.38	415.7	1750	534.9	25.4	1.29
$\phi 8$	1.99	508.6	2555	659.7	25.9	1.30
$\Phi 14$	2.02	494.1	2440	665.7	34.2	1.35
114	2.08	286.9	1379	413.3	38.8	1.44

表 2 再生混凝土配合比 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$

Table 2 Mix proportion of recycled concrete

组分	再生骨料	水泥	砂	水	减水剂
质量	1158	488	527	205	5

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

3 榀试件的破坏形态分别如图 4 所示。空框架的破坏顺序为梁先破坏,然后柱底出现塑性铰,梁端塑性铰发展充分,属梁铰机制,符合“强柱弱梁”的抗震设防要求。框架填充墙的破坏顺序为墙体-梁端-柱底,主要破坏形式为剪切斜压破坏和砌块的剪切滑移破坏。

为叙述方便,规定以推为正,以拉为负。

S1 试件:在加载初期,荷载-位移呈线性关系,表明结构在弹性范围内工作。当正向加载至 60kN 时首先在梁端出现竖向斜裂缝,随荷载增大裂缝延伸,正向加载至 100kN 时梁端裂缝贯通;当加载至 140kN 时柱端出现多条水平裂缝,至 220kN 时裂缝基本贯通;负向加载至 240kN 时梁柱端开始出现混凝土起鼓、剥落;之后进入位移控制阶段,当负向加载至 28mm 时节点核心区出现若干斜裂缝,梁、柱端裂缝进一步加宽并伴随混凝土逐渐剥落;正向加载至 48mm 时梁柱端混凝土大面积脱落并有部分箍筋和纵筋外露。

S2 试件:当正向加载至 120kN 时墙体角部出现第一条竖向裂缝,随荷载增加斜裂缝逐渐增多并延伸;当正向加载至 180kN 时墙柱交界处竖向灰缝开裂,墙梁交界处水平灰缝局部开裂;当负向加载至 210kN 时,梁端出现水平裂缝,柱脚出现斜裂缝;正向加载至 300kN 时墙梁交界水平灰缝贯通,且墙面斜裂缝成“V”形,四角裂缝集中发展;负向加载至 390kN 时梁柱核心区出现第一条水平裂缝,负向加载至 450kN 时墙体形成数条水平通缝和阶梯型竖向通缝,梁端裂缝贯通;位移加载至 12mm 时砂浆开始脱落,拉筋上下皮砌块明显滑移,梁柱裂缝继续开展;正向加载至 18mm 时柱截面裂缝贯通,并沿柱高分布有大量水平裂缝;加载至 42mm 时墙柱交界处砌块大量压碎脱落。

S3 试件:当正向加载至 90kN 时墙柱交界处出现微裂缝,梁端出现第一条斜裂缝;加载至 120kN 时墙体开始出现水平裂缝,梁端裂缝增多并贯通截面,加载至 150kN 时墙柱竖向裂缝贯通,柱底开始出现水平裂缝,加载至 210kN 时墙柱交界竖向灰缝裂缝完全贯通,柱底水平缝贯通;位移加载至 28mm 时墙柱分离,水平灰缝贯通并有较大滑移,加载至 48mm 时梁柱端大量混凝土压碎脱落,拉筋翘起,但砌块压碎情况较少。

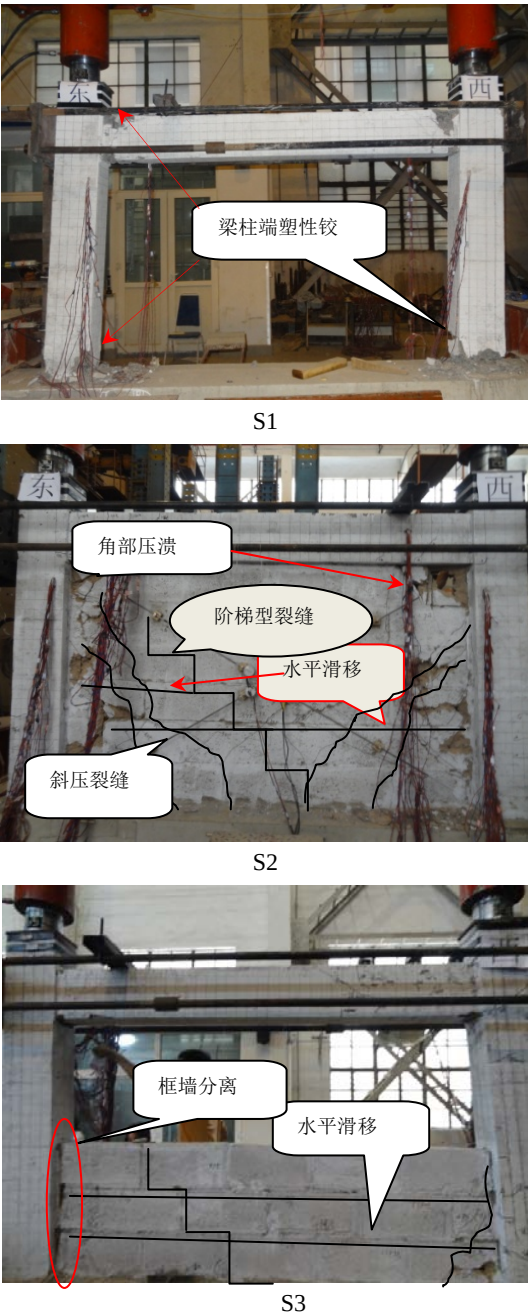


图 4 试件破坏形态

Fig.4 Specimen failure patterns

2.2 滞回曲线

试验测得的试件顶点荷载-位移滞回曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，每级加载下结构均有不同程度的刚度退化。当荷载较小时，荷载-位移曲线基本呈线性关系，试件处于弹性工作阶段，初始刚度大而侧移小，刚度退化不明显。随着荷载增大，梁端和墙体开始开裂、裂缝贯通直至墙体破坏并与框架脱离，结构变形增大，进入弹塑性工作阶段，刚度退化明显。墙体填充率对滞回曲线影响较大，空框架的滞回曲线呈饱满的梭形，承载力和刚度退

化慢；而半高填充墙和全高填充墙试件由于砌块的滑移，滞回曲线均有不同程度的捏缩，卸载曲线平缓；全高填充墙滞回曲线中的陡降段说明由于砌块的压碎导致结构的承载力和刚度突变，半高填充墙则由于砂浆的开裂导致墙体与框架脱离，砌体没有有效地发挥其耗能作用，其滞回曲线与空框架相比差别较小。

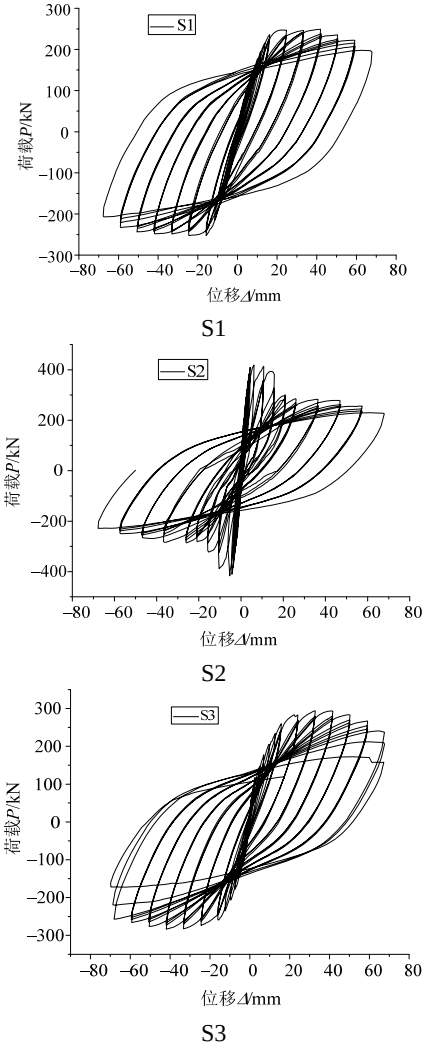


图 5 试件滞回曲线

Fig.5 Specimen hysteretic curves

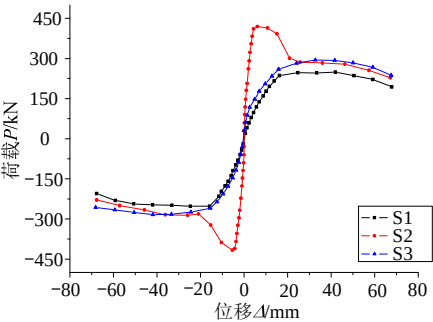


图 6 荷载-位移骨架曲线

Fig.6 $P-\Delta$ skeleton curves

试件的骨架曲线如图 6 所示, 由于墙体破坏后柱中型钢尚未屈服, 故 S2 试件在经历最大荷载之后, 表现出良好的屈服后变形能力。加载初期框架与墙体相互约束作用强, 协同工作性能好^[11], 墙体承担大部分剪力, 填充墙框架具有较高的初始刚度。S3 与 S1 试件相比, 初始刚度较大, 承载力明显高于空框架, 但由于墙体上部没有梁的约束, 结构刚度变化和退化规律与空框架相差不大。另外, 由于空心砌块材料脆性较大, 全高墙框架在最大荷载之后刚度和承载力陡然下降。通过骨架曲线对比可知结构承载力随墙体填充率的增加而提高, 刚度退化随填充率的增大而加快。综合试验现象及滞回

曲线分析, 框架-填充墙共同工作可大致分为: 弹性工作阶段-试件周边初裂, 应力和侧移很小; 带裂缝工作阶段-裂缝发展直至形成主裂缝; 弹塑性工作阶段-墙体形成通缝, 填充墙与框架脱离并逐渐退出工作; 破坏阶段-框架梁端屈服, 柱脚和梁柱节点破坏。

2.3 层间位移角

为避免结构产生过大位移而影响结构的承载力、稳定性和使用要求, 应对结构的层间位移角做出限制。试验得到的结构各受力阶段特征点如表 3 所示。其中屈服点根据能量等效法^[12]确定, 破坏荷载取荷载下降到 85%极限荷载时对应的数值。

表 3 结构特征点

Table 3 Structure characteristic points

试件	开裂点			屈服点			峰值点			破坏点		
	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	θ_{cr}	P_y/kN	Δ_y/mm	θ_y	P_m/kN	Δ_m/mm	θ_m	P_u/kN	Δ_u/mm	θ_u
S1	58.39	2.26	1/584	175.19	9.94	1/133	246.62	24.72	1/53	209.63	62.97	1/21
	-58.97	1.80	1/733	-180.00	-9.06	1/146	-252.47	-24.64	1/54	-214.6	-64.83	1/20
S2	118.32	0.52	1/2533	286.82	2.32	1/569	419.09	6.10	1/216	356.23	16.84	1/78
	-118.46	0.43	1/3041	-280.45	-2.18	1/605	-416.71	-5.33	1/248	-354.2	-12.96	1/102
S3	87.45	1.50	1/880	210.90	10.31	1/128	294.12	32.69	1/40	250.00	60.25	1/22
	-87.94	2.25	1/587	-220.77	-10.94	1/121	-283.46	-33.35	1/40	-240.9	-59.00	1/22

注: P_{cr} 、 P_y 、 P_m 、 P_u 分别为开裂荷载、屈服荷载、极限荷载和破坏荷载; Δ_{cr} 、 Δ_y 、 Δ_m 、 Δ_u 分别为其对应的位移; $\theta = \Delta/H$ 表示层间位移角, θ_{cr} 、 θ_y 、 θ_m 、 θ_u 分别为其对应的层间位移角。

由骨架曲线及表 3 可看出, 型钢再生混凝土框架在达到峰值荷载后结构没有表现出明显的下降, 说明具有较好的延性, 破坏时层间位移角达到 1/21, 说明框架具有较强的屈服后变形能力和抗倒塌能力。而填充再生混凝土空心砌块墙体后, 与空框架相比, 全高填充墙结构具有较大的承载力, 峰值荷载对应的侧移较小; 之后由于砌体的压碎和逐渐退出工作, 结构承载力迅速下降, 当荷载下降至峰值荷载的 85%, 即达到破坏荷载时, 正负向平均层间位移角仅为 1/90, 但之后框架继续承担荷载, 承载力下降较慢, 后期变形能力较大。

2.4 刚度退化过程分析

1) 结构开裂时的刚度

在地震反应分析中, 结构刚度通常用割线刚度 K_i 来表示。取第一级加载的正负向割线刚度平均值

表示结构的初始刚度^[13]。当结构加载至结构开裂时, 层间刚度较初始刚度有所降低。正向加载时, 空框架刚度衰减到初始刚度的 79.26%, 负向加载时衰减到初始刚度的 64.69%, 均值为 71.98%, 此时刚度退化的原因是梁端出现少量弯曲裂缝; 全高墙框架刚度衰减较快, 平均降低到初始刚度的 48.91% 左右, 这主要是由于墙体角部空心砌块受压产生斜裂缝, 结构整体性降低, 刚度衰减较快; 半高墙框架结构正负向平均刚度衰减到初始刚度的 47.74%, 这主要是由于结构竖向灰缝的开裂, 填充墙和框架的协同工作能力开始下降。总体而言, 在结构初裂时, 随墙体填充率的增加, 结构的刚度退化增大, 半高墙和全高墙试件刚度退化率相似。实测数据如表 4 所示。

表 4 开裂时结构刚度

Table 4 Inter-story stiffness following structure cracking

试件	θ_{cr}		$K_{cr}/(\text{kN/mm})$		θ_{et}		$K_{et}/(\text{kN/mm})$		K_{cr}/K_{et}	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
S1	1/584	1/733	25.84	32.76	1/1347	1/1760	32.60	50.64	0.7926	0.6469

(续表)

试件	θ_{cr}		$K_{cr}/(\text{kN/mm})$		θ_{et}		$K_{et}/(\text{kN/mm})$		K_{cr}/K_{et}	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
S2	1/2534	1/3041	227.10	272.95	1/25335	1/21639	590.25	459.84	0.3848	0.5935
S3	1/880	1/587	58.30	39.08	1/4755	1/4182	106.32	96.13	0.5483	0.4065

注： θ_{cr} 、 K_{cr} 分别为开裂时层间位移角和刚度； θ_{et} 、 K_{et} 分别为初始层间位移角和初始刚度。

2) 结构明显屈服时的刚度

随着荷载的增大，结构刚度进一步降低。当结构明显屈服时，S1、S2、S3试件刚度平均衰减为初始刚度的 46%，24%，20%。空框架梁端裂缝开始贯通，形成弯曲主裂缝；全高墙出现大量对角斜裂缝，并逐步向中间发展，对结构刚度贡献随着墙体

裂缝的增大而逐渐降低，框架梁端开始出现细小裂缝；半高墙竖向灰缝贯通，且水平灰缝开裂并伴有一定的水平滑移，协同工作能力大大降低，故刚度衰减较大。这时结构的刚度见表 5，通过比较可知结构带裂缝工作阶段空框架梁柱端裂缝对刚度衰减有较大影响，墙体的开裂使结构刚度急剧下降。

表 5 屈服时结构刚度

Table 5 Inter-story stiffness under yielding load

试件	θ_y		$K_y/(\text{kN/mm})$		θ_{et}		$K_{et}/(\text{kN/mm})$		K_y/K_{et}	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
S1	1/133	1/146	17.62	19.87	1/1347	1/1760	32.60	50.64	0.5405	0.3924
S2	1/569	1/605	123.63	128.65	1/25335	1/21639	590.25	459.84	0.2095	0.2798
S3	1/128	1/121	20.46	20.18	1/4755	1/4182	106.32	96.13	0.1924	0.2099

注： θ_y 、 K_y 分别为屈服时层间位移角和层间刚度。

3) 极限荷载时刚度

当结构进入塑性工作阶段，达到极限承载力时，空框架梁端裂缝加宽，并伴有少量混凝土压碎脱落，柱底端出现水平裂缝并开始贯通、加宽；全高墙部分砌块开始压碎脱落，墙体与框架逐渐分

离，框架梁裂缝加宽，框架柱沿外侧形成水平裂缝；半高墙形成错缝并伴有较大水平滑移，拉结筋外露，框、墙逐渐分离，梁端混凝土开始压碎剥落，柱底端水平缝贯通伴有少量混凝土压碎。以上现象均引起结构刚度逐步降低，具体数据见表 6。

表 6 极限荷载时结构刚度

Table 6 Inter-story stiffness under maximum load

试件	θ_m		$K_m/(\text{kN/mm})$		θ_{et}		$K_{et}/(\text{kN/mm})$		K_m / K_{et}	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
S1	1/53	1/54	9.98	10.25	1/1347	1/1760	32.60	50.64	0.3061	0.2024
S2	1/216	1/248	68.70	78.18	1/25335	1/21639	590.25	459.84	0.1164	0.1700
S3	1/40	1/40	8.99	8.50	1/4755	1/4182	106.32	96.13	0.0846	0.0882

注： θ_m 、 K_m 分别为极限荷载时层间位移角和层间刚度。

4) 结构破坏时刚度

当结构荷载下降至极限荷载的 85%时，空框架、全高墙框架和半高墙框架的弹塑性层间位移角分别为 1/21、1/90、1/22，此时结构刚度衰减达到最大，原因主要为：空框架梁端混凝土大面积剥落，梁钢筋大都屈服，有少量钢筋屈曲和拉断，框架柱底端型钢翼缘外围混凝土剥落；全高墙框架试件墙体退出工作，框架梁端有大量混凝土压碎，柱底端混凝土剥落并有箍筋外露；半高墙框架试件的墙体与框架完全分离，梁、柱端均有不同程度的混凝土剥落，致使其截面减小。S1、S2、S3试件后期的刚度衰减规律相似，这是由于在承载力后期，三种类

型的试件都主要由框架发挥作用的缘故。此时结构的刚度如表 7 所示。

5) 循环荷载作用下刚度退化规律

结构刚度随反复加载次数的增加而降低的特性即为刚度退化。结构层间刚度-位移关系曲线如图 7 所示，由图 7 可以看出，填筑再生混凝土空心砌块的全高墙框架初始刚度大大提高，是空框架初始刚度的 11 倍左右，这主要是因为砌体墙的初始刚度大而变形小，在墙体开裂乃至局部压碎后，结构整体刚度退化较快，而在破坏荷载之后下降趋于平缓。在循环荷载作用下，空框架的刚度降低相对较慢，说明梁、柱开裂，尤其是梁的破坏对结构刚

度的降低影响不大。半高墙框架试件的初始刚度是空框架初始刚度约 2 倍，刚度变化趋势介于全高墙框架和空框架之间。此外，由图 7 可知，结构在正负向刚度变化基本对称。

表 7 破坏荷载时结构刚度

Table 7 Inter-story stiffness under failure load

试件	θ_u		K_u (kN/mm)		θ_{et}		K_{et} (kN/mm)		K_u/K_{et}	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
S1	1/21	1/20	3.33	3.31	1/1347	1/1760	32.60	50.64	0.1021	0.0654
S2	1/78	1/102	21.15	27.33	1/25335	1/21639	590.25	459.84	0.0358	0.0594
S3	1/22	1/22	4.15	4.08	1/4755	1/4182	106.32	96.13	0.0390	0.0424

注： θ_u ， K_u 分别为破坏荷载时层间位移角和层间刚度。

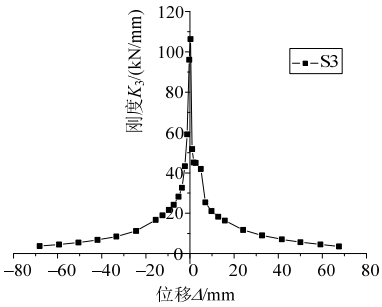
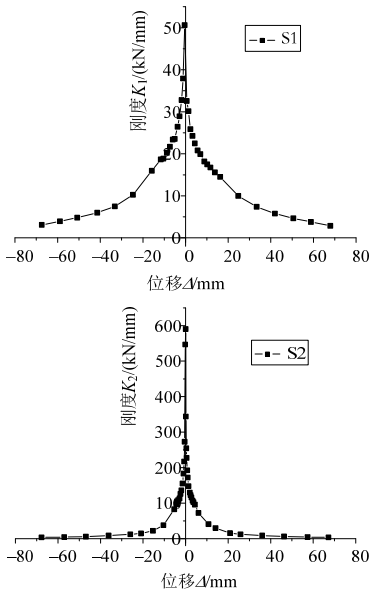


图 7 整体刚度退化

Fig.7 Curves of stiffness degradation

试验所得框架层刚度在各加载阶段的降低系数 λ_i ，即等位移循环下第 i 次循环的刚度与第 1 次循环的刚度之比。前 3 次循环下各试件在不同受力阶段的刚度降低系数分别如表 8、表 9、表 10 所示。

表 8 S1 刚度退化系数

Table 8 Coefficient of stiffness cyclic degradation: Frame 1

位移角	1/90		1/55		1/40		1/30		1/25		1/22	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.975	0.965	0.957	0.970	0.991	0.975	0.949	0.954	0.956	0.979	0.969	0.944
3	0.963	0.956	0.949	0.964	0.987	0.972	0.930	0.941	0.938	0.957	0.925	0.907

表 9 S2 刚度退化系数

Table 9 Coefficient of stiffness cyclic degradation: Frame 2

位移角	1/90		1/65		1/50		1/40		1/30		1/23	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.812	0.866	0.979	0.919	0.942	0.958	0.895	0.864	0.922	0.929	0.960	0.949
3	0.675	0.761	0.948	0.907	0.913	0.926	0.876	0.839	0.909	0.906	0.933	0.921

表 10 S3 刚度退化系数

Table 10 Coefficient of stiffness cyclic degradation: Frame 3

位移角	1/90		1/55		1/40		1/30		1/25		1/22		1/20	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.956	0.921	0.945	0.956	0.947	0.954	0.957	0.960	0.951	0.954	0.955	0.968	0.860	0.860
3	0.944	0.914	0.932	0.943	0.938	0.943	0.939	0.939	0.925	0.931	0.921	0.945	0.667	0.664

从表 8~表 10 中所示同级位移下结构的刚度退化情况可以看出, 由于结构在循环荷载作用下的损伤累积, 每级荷载作用下结构刚度均有不同程度退化, 第 1 次与第 2 次循环刚度相差较大, 而第 2 次与第 3 次循环刚度相差较小, 且均随位移的增大, 刚度退化程度逐渐增大。空框架的刚度退化率较小, 平均为 0.012~0.044, 且正负向退化率基本相同。全高墙框架由于砌体开裂和逐渐退出工作, 在等位移循环下刚度退化较大, 在破坏位移处刚度退化达到最大, 正负向刚度退化率的均值约为 0.14; 墙体完全退出工作后结构刚度退化程度较空框架等位移下刚度退化大, 表明结构前期损伤不可忽视。半高墙框架在循环加载初期刚度退化不大, 与空框架接近, 但其退化系数逐渐减小, 在结构接近倒塌时刚度退化达到最大, 约为 0.2。图 8 所示结构刚度比与侧移角的关系也表明随着墙体填充率的增加, 结构刚度退化速度和退化率加快, 填充墙的存在对结构的抗侧刚度退化有较显著的影响。

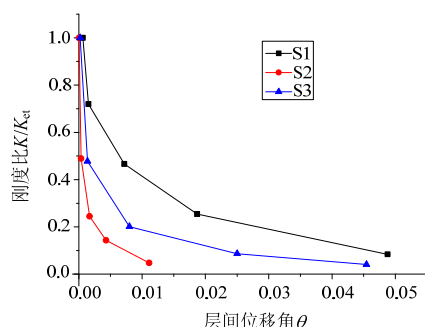


图 8 结构层间位移角与刚度退化关系

Fig.8 Story drift compared to ratio of stiffness degradation

3 结论

(1) 经过合理设计的型钢再生混凝土框架的破坏模式为梁铰机制, 表现出良好的抗震性能, 水平承载力较高, 结构的屈服后变形能力较强, 延性好。型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙在水平地震作用下易产生对角压溃破坏和滑移错动。

(2) 型钢再生混凝土框架-再生混凝土砌块填充墙结构的整体刚度随位移的增加而降低, 刚度退化由快到慢; 在同级位移循环加载过程中, 随循环次数的增加刚度降低幅度增大; 结构承载力和刚度随墙体填充率的增加而增大, 同时其刚度降低系数随墙体填充率的增加而减小。

(3) 全高填充墙可显著提高结构的承载力, 在

墙体破坏时结构刚度和强度退化达到最大; 半高填充墙在结构受力初期可提高结构的强度和刚度, 但受力后期由于框架对墙体的约束减弱, 承载力和刚度退化与空框架具有相似的规律和趋势。

参考文献:

- [1] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 56—63.
Xiao Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002: 56—63. (in Chinese)
- [2] 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]. 地震工程与工程震动, 2005, 10(5): 124—131.
Sun Yuedong, Xiao Jianzhuang, Zhou Deyuan, et al. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame filled with recycled light weight masonry blocks [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 10(5): 124—131. (in Chinese)
- [3] Fathifazl G, Razaqpur A G, Isgor O B, et al. Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams [J]. Materials Journal, 2009, 106(6): 858—867.
- [4] 薛建阳, 马辉, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土柱保护层厚度力学分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 202—206.
Xue Jianyang, Ma Hui, Chen Zongping, et al. Mechanical analysis on the cover thickness of steel reinforced recycled concrete column [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 202—206. (in Chinese)
- [5] 蒋利学. 砖填充墙加固前后钢筋混凝土框架的刚度与承载力[J]. 工业建筑, 2009, 39(增刊): 181—185.
Jiang Lixue. Stiffness and load carrying capacity of reinforced concrete with infilled wall or strengthened infilled wall [J]. Industrial Construction, 2009, 39(Suppl): 181—185. (in Chinese)
- [6] 刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78—84.
Liu Yushu, Li Guoqiang. Experimental and theoretic research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 78—84. (in Chinese)
- [7] 童岳生, 钱国芳. 砖填充墙钢筋混凝土框架的变形性能及承载能力[J]. 西安冶金建筑学院学报(自然科学版), 1985, 42(2): 1—10.
Tong Yuesheng, Qian Guofang. Deformation behavior and load capacity of reinforced concrete frames with brick filler walls [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 1985, 42(2): 1—10. (in Chinese)
- [8] Asteris P G. Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(8): 1071—1079.

- [9] Mondal G, Jain S K. Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening [J]. *Earthquake Spectra*: August, 2008, 24(3): 701—723.
- [10] 薛建阳, 刘祖强, 葛鸿鹏, 等. 实腹式型钢混凝土异形柱中框架抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(11): 82—88.
Xue Jianyang, Liu Zuqiang, Ge Hongpeng, et al. Seismic behavior of solid steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(11): 82—88. (in Chinese)
- [11] 曹万林, 王光远, 吴建有, 等. 轻质填充墙异形柱框架结构层刚度及其衰减过程的研究[J]. *建筑结构学报*, 1995, 16(5): 20—31.
Cao Wanlin, Wang Guangyuan, Wu Jianyou, et al. Study on the story stiffness and its degeneration of frame with light weight infilling and special shape columns [J]. *Journal of Building Structures*, 1995, 16(5): 20—31. (in Chinese)
- [12] 姚谦峰, 陈平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 219—220.
Yao Qianfeng, Chen Ping, Civil engineering structural experiment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 219—220. (in Chinese)
- [13] 薛建阳, 高亮, 刘祖强, 等. 空腹式型钢混凝土异形柱中框架抗侧刚度试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(9): 34—46.
Xue Jianyang, Gao Liang, Liu Zuqiang, et al. Experimental study on lateral stiffness of lattice steel reinforced concrete middle frame with special-shaped columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(9): 34—46. (in Chinese)

(上接第 65 页)

- [18] 沃国纬, 王元淳. 弹性力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998: 291—296.
Wo Guowei, Wang Yuanchun. Elastic mechanics [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1998: 291—296. (in Chinese)
- [19] 肖林, 强士中, 李小珍, 等. 考虑开孔钢板厚度的 PBL 剪力键力学性能研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(8): 282—288.
Xiao Lin, Qiang Shizhong, Li Xiaozhen, et al. Research on mechanical performance of PBL shear connectors considering the perforated plate's thickness [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 282—288. (in Chinese)
- [20] 沙定国. 实用误差理论与数据处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 28—36.
Sha Dingguo. Applied error theory and data processing [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 28—36. (in Chinese)