

纤维再生细骨料混凝土复合墙拟静力试验研究

黄 炜,权文立,葛 培,郭余婷,杨树森

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要 目的 研究不同肋格材料装配式复合墙的抗震性能及聚丙烯纤维再生细骨料(PFRFA)取代率对复合墙抗震性能的影响规律。方法 对3组不同肋格材料复合墙进行拟静力试验,建立数值模型分析PFRFA取代率为0、30%、60%、100%时复合墙刚度、承载力及变形能力的变化规律。结果 相比天然骨料(NA)试件,PFRFA试件滞回性能较好,峰值荷载降低了2.62%,位移延性系数提高了27.39%;PFRFA试件滞回性能较聚丙烯纤维再生粗骨料(PFRCA)试件降低,峰值荷载降低了0.52%,位移延性系数降低了0.50%;PFRCA、PFRFA试件在各阶段的等效黏滞阻尼系数明显高于NA试件;复合墙的刚度、承载力及变形能力随PFRFA取代率增加出现不同程度下降。结论 PFRFA取代率为30%的复合墙试件与NA复合墙试件抗震性能差异不大,可用于实际工程。

关键词 装配式复合墙;聚丙烯纤维;再生细骨料;拟静力试验;取代率

中图分类号 TU755 文献标志码 A

Pseudo-static Tests Study of Fiber Recycled Fine Aggregate Concrete Composited Wall

HUANG Wei, QUAN Wenli, GE Pei, GUO Yuting, YANG Shusen

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

Abstract: The pseudo-static tests of three prefabricated composite walls were carried out to study the influence of different rib-grid materials on the seismic performance of the walls. And a numerical model was established to analyze the influence of polypropylene fiber recycled fine aggregate (PFRFA) replacement rate on the stiffness, load capacity and deformation capacity of the walls. The results showed that: compared with the natural aggregate (NA) specimens, the hysteretic behavior of PFRFA specimens was better, the peak load decreased by 2.62% and the displacement ductility coefficient increased by 27.39%. Compared with the polypropylene fiber recycled coarse aggregate (PFRCA) specimen, the hysteretic behavior of PFRFA specimen was inferior to it, the peak load decreased by 0.52% and the displacement ductility coefficient decreased by 0.50%.

收稿日期:2020-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51978566);陕西省重点研发计划项目-重点产业链项目(2020ZDLNY06-04)

作者简介:黄炜(1976—),男,教授,博士,主要从事新型材料及新型装配式结构技术等方面研究。

The equivalent viscous damping coefficients of PFRCA and PFRFA specimens were both higher than that of NA specimen. The stiffness, bearing capacity and deformation capacity of composite wall decrease with the increase of PFRFA replacement rate. The composite wall whose rib-grid concrete is 30% substituted by PFRFA concrete is similar to NA composite wall in seismic performance, which can be used in actual engineering.

Key words: fabricated composited wall; polypropylene fiber; recycled fine aggregate; pseudo-static experiment; replacement rate

我国每年产生的建筑垃圾高达 18 亿 t, 但对建筑垃圾的综合利用率不足 5%, 而欧美地区发达国家对再生混凝土的利用率可达到 98%^[1-3]。将废弃混凝土生产的再生骨料用于装配式建筑结构中, 既可解决废旧建筑拆除过程中带来的环境问题, 也顺应我国装配式结构发展的潮流。

用废弃混凝土制备再生粗骨料 (RCA) 时, 几乎会产生同体积的再生细骨料 (RFA)^[4]。相对 RCA, RFA 孔隙率更大、吸水率更高, 导致 RFA 混凝土力学性能差^[5-7]。聚丙烯纤维可有效改善再生混凝土的力学性能^[8-10]。谭艺帅^[11]对不同取代率的 RFA 混凝土试块及 100% 取代率的 PFRFA 混凝土试块进行单轴受压试验, 结果表明 RFA 取代率与试块抗压强度、刚度及弹性模量等呈负相关; 聚丙烯纤维可提高 RFA 混凝土的抗压强度及变形能力。装配式复合墙结构体系^[12]是由预制复合墙板、现浇边缘构件及楼板装配整浇而成的一种新型装配式结构体系, 具有耗能减震、建造迅速等特点。近年来装配式复合墙也在进行材料多元化选择。李斌等^[13]研究了 5 种不同砌块材料复合墙体的抗震性能, 结果表明复合墙的特征荷载及特征位移受砌块材料性能影响。

目前, 将 RFA 用于结构层面的研究较少, 对复合墙新材料的研究也限于寻求新型砌块。为探究 PFRFA 用于复合墙肋格部位时墙体的抗震性能及 PFRFA 取代率对墙体抗震性能的影响规律, 笔者通过拟静力试验研究 3 榀不同肋格材料复合墙试件的抗震性能, 建立数值模型分析不同 PFRFA 取代率下

复合墙承载力、刚度及变形性能的变化规律。研究表明, 相对于 NA 混凝土试件, 纤维再生混凝土试件承载力略有降低, 但滞回性能及变形能力较好; 复合墙的刚度、承载力及变形能力与 PFRFA 取代率呈负相关。

1 试 验

1.1 试件设计

依据《装配式复合墙结构技术规程》(DBJ61/T 94—2015) 设计 3 榀 1/2 缩尺装配式复合墙试件^[14], 肋格材料分别为 NA 混凝土、PFRCA 混凝土及 PFRFA 混凝土, 对应编号为 HECW-1、HECW-4、HECW-5。试件由底梁、预制复合墙板及现浇边缘构件组成, 水平连接方式为马牙槎连接, 竖向连接方式为焊板焊接。各组成部分尺寸及配筋如图 1 所示。除肋格材料外, 3 榀墙体的尺寸、配筋形式及填充砌块均相同。

1.2 材料性能

各类型混凝土设计强度等级均为 C30, 配合比见表 1。标养 28 d 后测得立方体抗压强度分别为 35.8 MPa、30.6 MPa、33.2 MPa; 加气混凝土砌块实测抗压强度为 1.75 MPa; 天然粗骨料为 5~25 mm 连续级配碎石, RFA 细度模数为 3.0, 级配属 2 区中砂堆积密度 1 544 kg/m³; RCA 堆积密度 1 336 kg/m³; 天然细骨料为河砂, RFA 细度模数为 3.0, 级配属 2 区中砂; 箍筋采用 HPB300、HPB400, 纵筋采用 HRB400, 对应实测极限抗拉强度分别为 407 MPa、569 MPa、555 MPa。天然细骨料及 RFA 性能见表 2。聚丙烯纤维直径 18~45 μm, 抗拉强度 400 MPa。

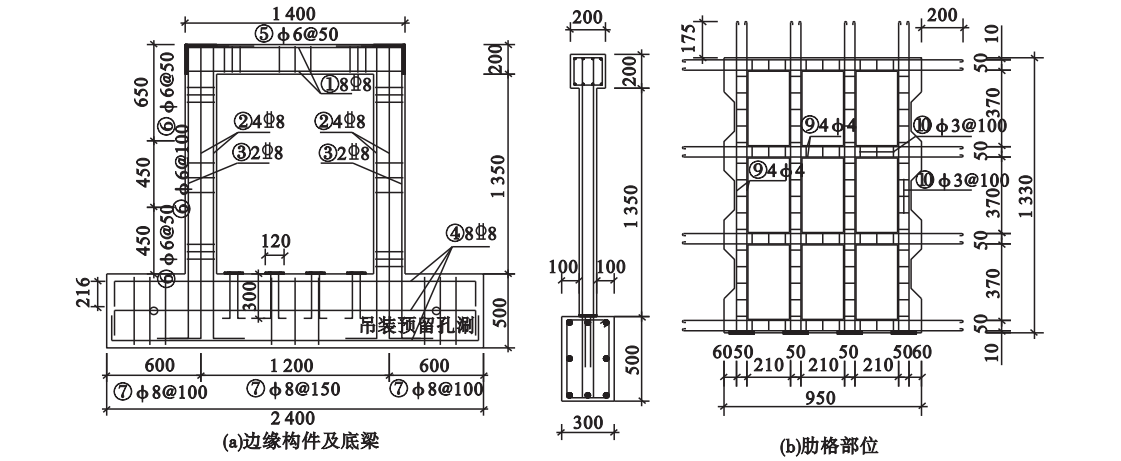


图1 设计尺寸及配筋图

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of specimens

表1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion design of concrete using in rib-frame								$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
材料	ρ (水)	ρ (水泥)	ρ (天然粗骨料)	ρ (RCA)	ρ (天然细骨料)	ρ (RFA)	ρ (纤维掺量)	ρ (减水剂)
NA 混凝土	180	400	1 165	0	600	0	0	6
PFRCA 混凝土	180	400	0	1 165	600	0	1.5	6
PFRFA 混凝土	180	400	1 165	0	420	180	1.5	6

表2 细骨料性能

Table 2 Mechanical proprieties of fine aggregate

材料	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	细度模数	吸水率/%	压碎指标/%	含泥量/%
天然细骨料	2 657	1 544	2.8	0.8	14	1.1
RFA	2 419	1 342	3.0	8.0	29	8.3

1.3 加载制度

按轴压比 0.3 计算的竖向荷载为 350 kN;竖向荷载由 1 000 kN 液压千斤顶施加,并通过一根钢梁分配后均匀分布于加载梁。待竖向荷载稳定后,通过 MST 作动器并借助反力墙对墙体顶部施加水平荷载。试件屈服前采用力控制加载,荷载每级递增 20 kN、同时循环一次,加载过程中骨架曲线上位移发生突增时,判定试件屈服。试件屈服后采用位移控制加载,位移每级递增 3 mm、同时循环三次,至承载力下降至极限荷载的 85% 时视为试件破坏,试验结束。加载制度见图 2。

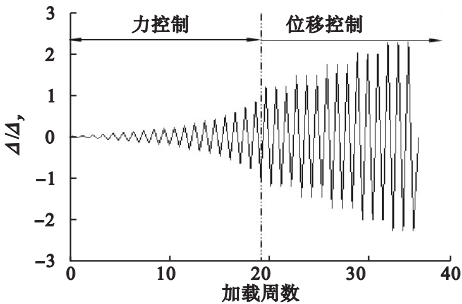


图2 加载制度

Fig. 2 Loading regime

1.4 试验现象

HECW-1:在整个竖向加载阶段及水平荷载达到 50 kN 之前,试件表面未出现可见裂缝。随着荷载增大,试件受拉一侧下部、上部

及中部砌块相继出现多道微裂缝并逐渐发展、延伸;水平荷载为 100.51 kN 时(水平位移 2.18 mm),试件上部砌块出现一道斜向长裂缝;此后受拉侧约束边缘构件、马牙槎处出现新的细微裂缝并逐渐发展、延伸、贯通;原砌块先出现多道斜向裂缝,继而延伸至肋梁,最终在各肋格内形成较明显的交叉裂缝。169.64 kN时(顶点位移 5.69 mm)砌块剥落明显,骨架曲线上位移发生突增,试件屈服,改用

水平位移控制加载;顶点位移为10.24 mm时水平力达到最大值,随位移加大,砌块剥落严重、受拉侧约束边缘构件出现多条水平裂缝并快速发展,肋梁、肋柱裂缝逐渐贯通;位移达到 19.91 mm 时,马牙槎裂缝贯通,柱脚混凝土破坏,肋格中形成交叉斜裂缝。HECW-1 破坏形态见图 3(a)。HECW-4、HECW-5 破坏过程与 HECW-1 相似,破坏形态见图 3(b)、图 3(c)。

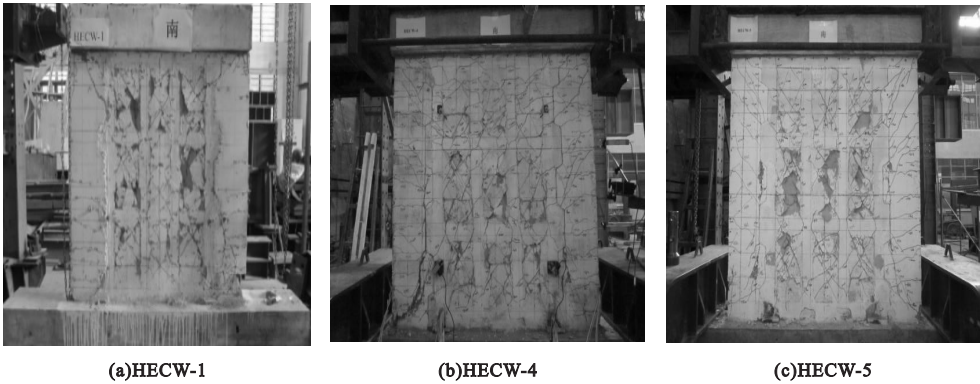


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Damage phenomenon of specimens

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

各试件滞回曲线如图 4 所示。由图 4 可知,各试件滞回特性相近。3 榀试件滞回曲线特性及差异原因如下。

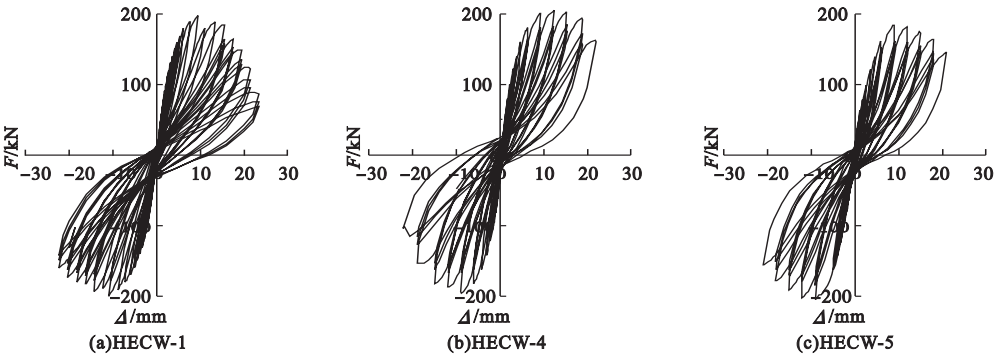


图 4 滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves of the specimens

(1) 3 榀试件在试件屈服前,随荷载增大,滞回曲线先近似呈线性,随后逐渐向梭形、弓形发展,包络面积逐渐增大,试件卸载后残余变形逐渐积累;荷载继续增大,试件进入弹塑性发展阶段,滞回环拱起;试件屈服

后,滞回曲线由弓形逐渐向反 S 形过渡并伴有较明显的捏拢现象;随着位移控制继续加载,试件达到其极限承载力。此后,试件刚度迅速衰减且滑移现象突出,滞回曲线出现明显的捏缩现象。

(2)再生混骨料内部缺陷及表面附着砂浆等不利因素导致再生骨料混凝土强度低。而聚丙烯纤维与混凝土骨料之间的摩擦及咬合作用有利于提高混凝土中各相材料介质的连续性,抑制混凝土裂缝的发展,从而提高混凝土的延性。由于聚丙烯纤维作用明显,因此相比 HECW-1,HECW-4 和 HECW-5 破坏现象较轻,峰值荷载后的承载力下降较慢,滞回曲线荷载下降更为平缓,滞回曲线更饱满,均表现出良好的滞回性能。而 RFA 比 RCA

的缺陷更大,不利因素更明显。相同聚丙烯纤维作用条件下,RFA 混凝土的延性不如 RCA 混凝土。因此,相比 HECW-5,HECW-4 在极限荷载后下降更慢,滞回性能更优。

2.2 骨架曲线及特征点

特征点处位移及荷载见表 3,各试件骨架曲线见图 5。各特征点定义同参考文献[15]。延性系数定义为 85% 的峰值荷载对应的位移值与屈服位移之比。

表 3 试件特征点的荷载及位移

Table 3 Load and placement of specimens at characteristic points

试件编号	开裂点		屈服点		峰值点		破坏点		位移延性系数 μ
	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
HECW-1	100.51	2.18	169.64	5.69	198.60	10.24	160.32	19.91	3.14
HECW-4	99.87	1.90	159.84	4.49	194.42	9.02	171.75	18.04	4.02
HECW-5	80.12	1.86	155.75	5.26	193.39	9.02	150.21	21.02	4.00

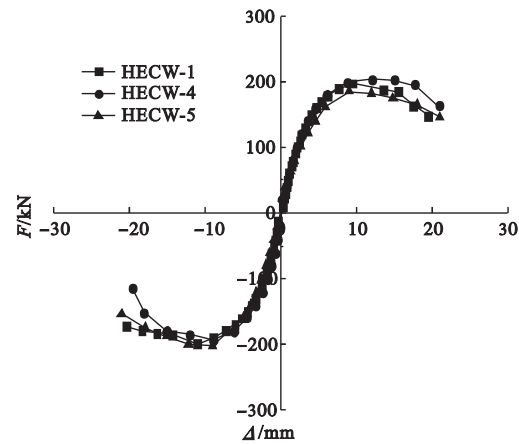


图 5 骨架曲线

28.03%;相比 HECW-1,HECW-5 的开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载及破坏荷载分别下降 20.29%、8.19%、2.62%、6.31%,位移延性系数提高 27.39%。

(2)RCA、RFA 强度低、缺陷大,相应混凝土强度较低,进而导致 HECW-4 和 HECW-5 在各阶段的荷载较 NA 混凝土有所降低。而 RFA 中的大量次生微裂纹、混杂杂质及 RFA 表面旧水泥浆等不利因素,导致 RFA 混凝土内部孔隙及微裂缝较多,在荷载作用下易出现应力集中,混凝土内部裂缝迅速扩展,HECW-5 开裂荷载明显下降。峰值荷载之后,由于聚丙烯纤维的抗拉作用,再生骨料混凝土韧性和变形能力较好,裂缝开展相对较晚,强度下降缓慢,HECW-4 及 HECW-5 表现出较好的延性。

2.3 刚度

分别以往复荷载作用下每级循环加载的平均刚度 K_i 和平均位移 Δ_i 为纵、横坐标,绘制各试件的刚度退化曲线(见图 6)。其中, $K_i = (|F_i| + |-F_i|) / (|\Delta_i| + |-\Delta_i|)$, F_i 、 Δ_i 分别为每级循环最大荷载及对应位移。

Fig. 5 Load-displacement curves of specimen

由图 5 及表 3 可知:

(1)峰值荷载前,各试件骨架曲线相似,刚度由大到小依次为 HCEW-4、HECW-1、HECW-5;峰值荷载后,各试件曲线略有差异,HECW-4 在拉方向骨架曲线突然下降,可能是由于试件 HECW-4 受拉一侧混凝土不密实导致;而 HECW-1、HECW-5 下降段则较平缓;相比 HECW-1,HECW-4 的开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载分别下降 0.64%、5.78%、2.10%;破坏荷载、位移延性系数分别提高 7.13%、

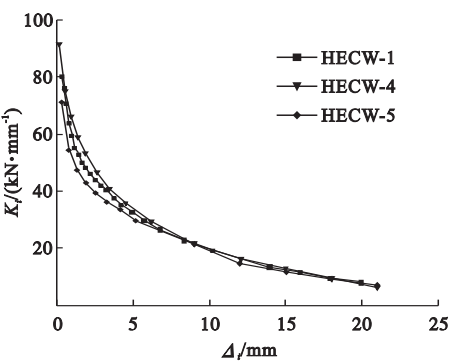


图 6 刚度曲线退化图

Fig. 6 Stiffness degradation curves of specimen

从图 6 可以得出:①加载初期各试件刚度退化曲线陡峭,刚度退化迅速,随后逐渐趋于平缓。②各试件初始刚度大小依次为 HECW-4、HECW-1、HECW-5。分析认为,相比 RCA,RFA 强度更低、内部微裂纹更多、RFA 混凝土的缺陷更大。在相同的聚丙烯纤维掺量下,聚丙烯纤维对 RFA 混凝土的增强作用不如 RCA 混凝土明显。因此 PFRCA 混凝土弹性模量较大,HECW-4 刚度较大;PFRFA 混凝土弹性模量较小,HECW-5 刚度较小。

2.4 耗能能力

计算试件在各阶段的等效黏滞阻尼系数 h_e ,并评价试件耗能能力。 h_e 按式(1)计算:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{\widehat{ACB} + \widehat{AEC}}}{S_{\Delta OBD} + S_{\Delta OEF}}. \tag{1}$$

式中: $S_{\widehat{ACB} + \widehat{AEC}}$ 为相应曲线与水平轴心围成图形的面积, $S_{\Delta OBD}$ 、 $S_{\Delta OEF}$ 分别为相应三角形面积,如图 7 所示。

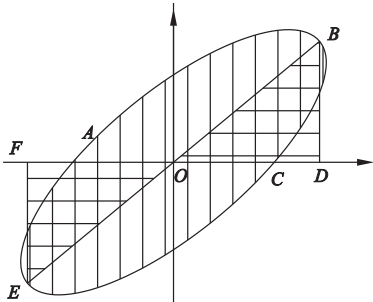


图 7 等效黏滞阻尼系数计算图

Fig. 7 Curve of equivalent viscous damping coefficient for calculation

3 个试件的等效黏滞阻尼系数见表 4。由表可知:①在各个阶段,HECW-4 和 HECW-5 等效黏滞阻尼系数相差较小,且均明显高于 HECW-1;除峰值阶段外,HECW-5 的等效黏滞阻尼系数均小于 HECW-4;可见聚丙烯纤维的掺入明显提高了再生骨料混凝土的耗能能力,但由于 RCA 和 RFA 的缺陷大小不同,聚丙烯纤维对 RCA 的耗能能力提高效果更明显。

表 4 墙体等效黏滞阻尼系数

Table 4 Equivalent viscous damping coefficient of specimens

荷载	h_e		
	HECW-1	HECW-4	HECW-5
开裂荷载	3.27	7.66	7.33
屈服荷载	4.88	8.37	7.75
峰值荷载	7.23	9.64	10.64
极限荷载	7.77	9.92	9.21

3 有限元分析

试验中,试件 HEGW-5 肋格部位 RFRFA 的取代率为 30%。为研究 RFRFA 取代率对复合墙体刚度、承载力及位移延性系数的影响规律,采用 Abaqus 软件建立复合墙体数值模型进行模拟分析。

3.1 模型建立

分别选用 T3D2 和 C3D8R 单元模拟钢筋和混凝土、砌块。钢筋及普通混凝土本构分别采用三折线强化模型和《混凝土本构关系》(GB 50010—2010)^[16]。PFRFA 混凝土及砌块本构引自课题组前期研究成果。接触面采用面-面接触,预制墙板与竖向边缘构件及暗梁间的法向关系为硬接触,切向关系则采用摩擦系数 0.8 的罚函数摩擦公式。砌块与肋格之间的切向关系采用库伦摩擦模型,摩擦系数取值 0.7^[17],同时设置肋格及砌块的接触面为主控面、从属面;不考虑墙板平面外位移,侧边框柱和底梁之间采用绑定连接;墙板底部竖向焊板采用固结。最终模

型如图8所示。

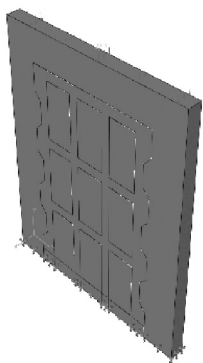


图8 有限元模型
Fig. 8 Finite element model

3.2 模型验证

试验曲线与模拟得到的荷载-位移曲线见图9,钢筋骨架应力云图见图10。由图9可知,弹性阶段模拟分析结果与试验结果相近;弹性阶段之后,试验曲线下降段更陡。分析认为造成偏差的原因是材料存在缺陷,以及模型中引用的摩擦系数与实际情况存在偏差等。由图10可知,钢筋外框梁两侧分别受拉、压,左右外框柱底分别受最大拉应力、最大压应力;应力云图与试件破坏现象基本相符。所建立的数值模型较为准确,可用于不同参数下的数值拓展分析。

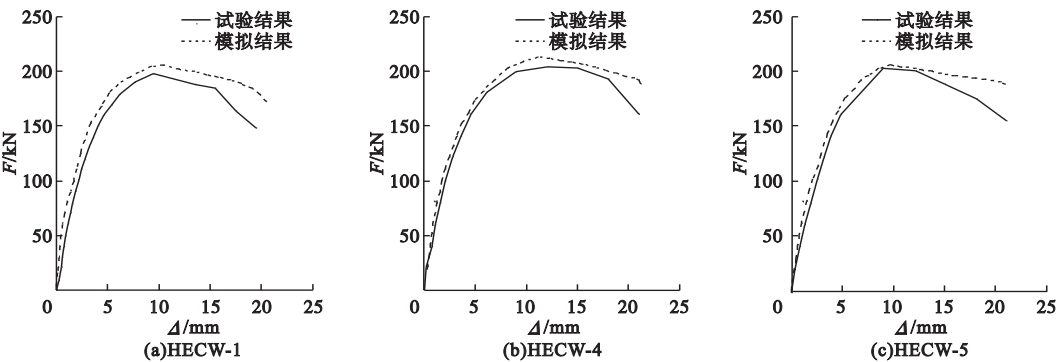


图9 荷载-位移曲线对比
Fig. 9 Comparison of load-displacement curves

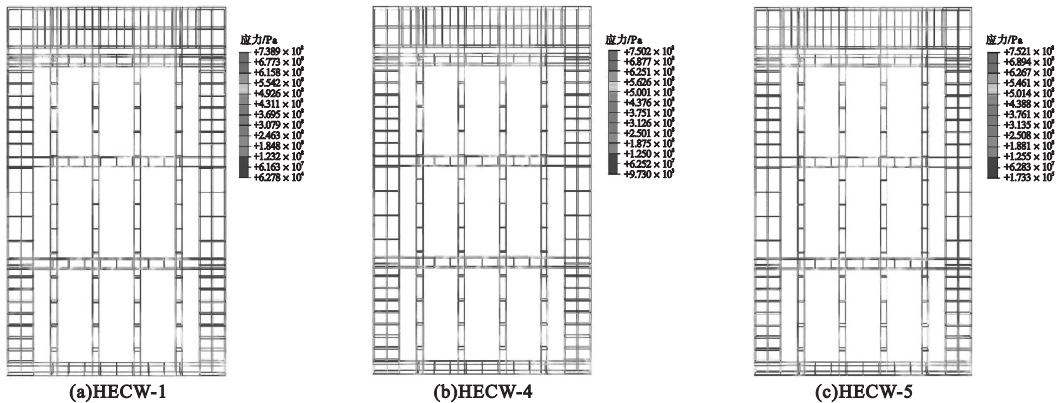


图10 钢筋骨架应力云图
Fig. 10 Stress contour plots of steel-skeleton

3.3 基于数值模型的参数分析

基于建立的数值模型,研究肋格部位混凝土 PFRFA 取代率为 0%、30%、60%、100% (对应试件编号分别为 HECW-R1、

HECW-R2、HECW-R3 及 HECW-R4) 时装配式复合墙体抗震性能的变化规律。特征荷载与位移延性系数见表5,不同取代率下墙体的骨架曲线见图11。

表 5 试件特征点的荷载及位移

Table 5 Load and placement at characteristic points

试件编号	PFRFA 取代率/%	屈服荷载 F_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	峰值荷载 F_p/kN	峰值位移 Δ_p/mm	破坏荷载 F_u/kN	破坏位移 Δ_u/mm	位移延性 系数 μ
HECW-R1	0	173.08	4.80	205.78	10.37	189.59	20.46	4.26
HECW-R2	30	171.19	5.36	201.78	8.52	187.92	20.89	3.89
HECW-R3	60	170.75	5.76	195.18	9.60	183.34	20.81	3.61
HECW-R4	100	162.68	6.07	192.32	10.51	170.36	19.50	3.21

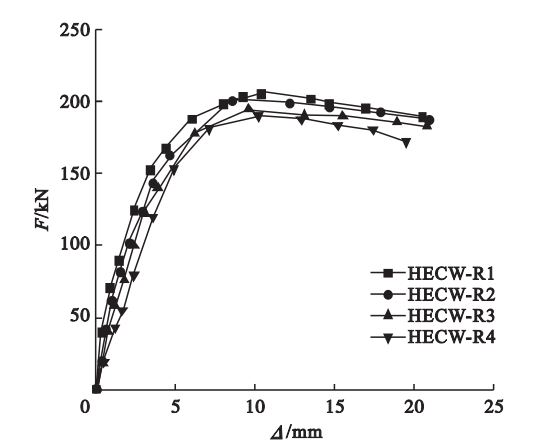


图 11 骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves

由图 11 及表 5 可知：

- (1) 随PFRFA取代率的增加,曲线上升段及下降段斜率减小,即刚度不断衰减。
- (2) 相比 HECW-R1,取代率为 30%、60%、100% 的 PFRFA 复合墙试件峰值荷载分别下降 1.94%、5.15%、6.54%,位移延性系数分别降低 8.69%、15.26%、24.65%。
- (3) 总体上 RFA 取代率与 PFRFA 混凝土的强度、弹性模量呈负相关,进而导致相应试件刚度衰减,各阶段荷载及位移延性系数降低。这与文献[11]的研究结果一致。

4 结 论

- (1) 用 PFRCA 混凝土、PFRFA 混凝土代替 NA 混凝土用于装配式复合墙肋格部位时,墙体屈服荷载及峰值荷载略有降低,但变形能力及滞回性能更优。
- (2) NA 混凝土试件、聚丙烯纤维再生混凝土试件刚度退化规律基本一致,但 PFRFA

混凝土试件初始刚度最小;NA 混凝土试件在各阶段等效黏滞阻尼系数均明显低于聚丙烯纤维再生混凝土试件;除峰值阶段外,PFRCA 混凝土试件的等效黏滞阻尼系数均大于 PFRFA 混凝土试件。

(3) PFRFA 用于装配式复合墙肋格时,墙体刚度、承载力及位移延性系数与取代率呈负相关。

参考文献

[1] 鲍玖文. 再生粗骨料混凝土及其构件抗冻性能研究进展[J/OL]. 建筑结构学报;1 – 17 [2020 – 11 – 29]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0347>.

(BAO Jiuwen. Review on the frost resistance property of recycled coarse aggregate concrete and its structural components[J/OL]. Journal of building structures;1 – 17[2020 – 11 – 29]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0347>.)

[2] 刘琼,肖建庄,潘智生,等. 废混凝土骨料和废砖骨料再生混凝土的模型化研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(12):133 – 140.

(LIU Qiong, XIAO Jianzhuang, PAN Zhisheng, et al. Investigation on modeled recycled concrete prepared with recycled concrete aggregate and recycled brick aggregate [J]. Journal of building structures, 2020, 41 (12) : 133 – 140.)

[3] 葛培,黄炜,权文立,等. 混杂再生骨料混凝土抗压计算研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(5):86 – 91.

(GE Pei, HUANG Wei, QUAN Wenli, et al. Experimental study on recycled brick aggregate concrete frame model [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2021, 49 (5) : 86 – 91.)

[4] 段珍华,侯少丹,潘智生,等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. 建筑结构学报,2020,41(增刊2):420 – 426.

(DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, PAN

- Zhisheng, et al. Rheology of recycled fine aggregate concrete and its effect on strength and durability [J]. Journal of building structures, 2020, 41 (S2): 420–426.)
- [5] 索伦, 彭鹏, 赵燕茹. 再生粗集料强化试验研究[J]. 材料导报, 2015, 29 (增刊1): 362–365.
(SUO Lun, PENG Peng, ZHAO Yanru. Research on intensified recycled coarse aggregate [J]. Materials reports, 2015, 29 (S1): 362–365.)
- [6] 常洪雷, 陈繁育, 金祖权, 等. 再生骨料混凝土在护岸工程应用的可行性[J]. 材料导报, 2020, 34 (增刊2): 1206–1211.
(CHANG Honglei, CHEN Fanyu, JIN Zuquan, et al. Feasibility of utilizing recycled aggregate concrete for revetment engineering [J]. Materials reports, 2020, 34 (S2): 1206–1211.)
- [7] 曹万林, 肖建庄, 叶涛萍, 等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2020, 41 (12): 1–16.
(CAO Wanlin, XIAO Jianzhuang, YE Taoping, et al. Research progress and engineering application of reinforced recycled aggregate concrete structure [J]. Journal of building structures, 2020, 41 (12): 1–16.)
- [8] 周静海, 康天禧, 王凤池, 等. 废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34 (6): 1036–1044.
(ZHOU Jinghai, KANG Tianbei, WANG Fengchi, et al. Experimental study on size effect of splitting tensile strength of waste fiber recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34 (6): 1036–1044.)
- [9] 侯莉娜, 何梦迪, 黄炜, 等. 纤维增强再生混凝土力学性能研究现状及展望[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37 (3): 403–413.
(HOU Li'na, HE Mengdi, HUANG Wei, et al. Research status and prospect of mechanical properties of fiber-reinforced recycled concrete [J]. Journal of Xi'an university of technology, 2021, 37 (3): 403–413.)
- [10] 元成方, 魏逸然, 李爽. 聚丙烯纤维混合再生骨料混凝土力学性能研究[J/OL]. 郑州大学学报(工学版): 1–5 [2021–04–28]. <https://doi.org/10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.011>.
(YUAN Chengfang, WEI Yiran, LI Shuang. Study on mechanical properties of polypropylene fiber mixed recycled aggregate concrete [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science): 1–5 [2021–04–28]. <https://doi.org/10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.011>.)
- [11] 谭艺帅. 再生混凝土单轴受压本构关系及损伤模型研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
(TAN Yishuai. Research on uniaxial compression constitutive relationship and damage model of recycled concrete [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)
- [12] 黄炜, 张敏, 宋林, 等. 中高层装配式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44 (12): 56–63.
(HUANG Wei, ZHANG Min, SONG Lin, et al. Experimental studies on seismic behavior of mid-highrise prefabricated composite walls [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2016, 44 (12): 56–63.)
- [13] LI B, HUANG W, LUO B, et al. Cycle behavior of precast composite wall with different ecological filled blocks [J]. Advances in structural engineering, 2019, 22 (2): 297–310.
- [14] 陕西省住房和城乡建设厅. 装配式复合墙结构技术规程: DBJ61/T 94—2015 [S]. 西安: 中国建材工业出版社, 2015.
(Shaanxi Provincial Department of Urban-Rural Development. Technical specification for precast composite wall structure: DBJ61/T 94—2015 [S]. Xi'an: China Building Materials Press, 2015.)
- [15] 郑云汉. 新型装配式混凝土墙体抗震性能试验及计算模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
(ZHENG Yunhan. Study on seismic behavior and resilience model of a new precast concrete wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构设计规范: GB50003—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of masonry structures: GB50003—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)