

文章编号:1674-2974(2016)11-0068-10

性能增强再生混凝土框架中 节点抗震性能试验*

杨涛,王社良[†],刘伟

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:为提高再生混凝土框架结构中节点的抗震性能,利用微硅粉和混杂纤维对再生混凝土进行性能增强,对4根相同轴压比、配筋率和再生骨料取代率条件下,不同微硅粉和混杂纤维掺量的框架柱中节点进行低周反复荷载下的抗震性能试验,对比研究普通再生混凝土与性能增强再生混凝土的破坏形态、滞回特性、延性性能、耗能特性以及变形特点等问题.试验结果表明:性能增强再生混凝土节点破坏过程均经历了初裂、通裂、极限和破坏四个特征阶段;在破坏形态、滞回曲线、延性性能、节点变形及耗能特性方面,性能增强再生混凝土均优于普通再生混凝土,尤其在破坏形态和延性方面表现突出;微硅粉和混杂纤维含量的提高,性能增强效果有下降趋势;经微硅粉和混杂纤维性能增强再生混凝土节点抗震性能明显提高,可在有抗震设防要求地区的结构中使用.

关键词:性能增强再生混凝土;框架中节点;抗震性能;微硅粉;混杂纤维;低周反复荷载

中图分类号:TU375.3

文献标识码:A

Experimental Study on Seismic Behavior of Interior Joints in Enhancements Recycled Aggregate Concrete Frame

YANG Tao, WANG She-liang[†], LIU Wei

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to improve seismic performance of interior joints in the recycled concrete frame structures, silica powder and hybrid fiber were used to improve the seismic performance of recycled concrete. Under the same axial compression ratio, and with the same reinforcement ratio and recycled aggregate replacement ratio, four interior-joints of the frame columns were manufactured by different amount of silicon powder and hybrid fiber. Low cyclic lateral loading tests were performed to study and compare the failure mode, hysteretic behavior, ductility, energy dissipation, and deformation characteristics between the common recycled concrete and enhanced recycled concrete. The test results show that the recycled concrete interior-joints experienced four stages including initial crack, general crack, ultimate state, and damage. Meanwhile, the performance of enhanced recycled concrete is superior to that of common recycled

* 收稿日期:2015-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178388,51678480), National Natural Science Foundation of China(51178388,51678480);陕西省工业攻关项目(2014K06-34),陕西省教育厅专项科研项目(14JK1420)

作者简介:杨涛(1984-),男,河北邯郸人,西安建筑科技大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: sheliangw@163.com

concrete, such as the failure pattern, hysteresis curve, ductility performance, deformation, and energy dissipation, especially in terms of failure pattern and ductility. Additionally, with the increase of silicon powder and mixed fiber content, the improvement effect has a downward trend, while due to the application of silicon powder mixed with hybrid fiber, the seismic performance of the recycled concrete interior-joints is obviously improved. Therefore, this enhanced recycled concrete can be applied to the structures in the seismic fortification regions.

Key words: enhancements recycled aggregate concrete; interior-joints; seismic performance; microsili-ca; hybrid fiber; low cyclic loads

伴随着建筑业的蓬勃发展,建筑垃圾造成了严重的环境污染,大量宝贵的土地资源被占用,为了缓解这种资源与环境的矛盾,再生混凝土的开发利用成为了热点研究问题^[1].再生骨料(recycled aggregate, RA)是由废弃混凝土经过清洗、破碎、筛分等工序加工而成,将其部分或全部替换天然骨料制成再生混凝土^[2].目前,国内外学者对再生混凝土材料性能和构件力学性能做了大量研究,针对再生混凝土框架节点的研究报道较少^[3-5].Corinaldesi V 等^[6]进行了低周反复荷载下再生混凝土梁柱节点的抗震性能试验;周点龙等^[7]在 RAC 中掺入粉煤灰进行了两榀框架边节点试验,结果表明:粉煤灰对节点破坏形态、承载能力、延性指标和耗能能力影响较小,但可改善再生混凝土的抗碳化和抗冻融性等;柳炳康等^[8]研究表明:箍筋数量的增多可显著提高再生混凝土节点核心区受剪承载力;白国良等^[9]研究表明:再生混凝土节点抗震性能与骨料取代率无明显关系,但由于再生骨料初始损伤的存在,普通混凝土框架节点抗震性能优于再生混凝土框架节点;肖建庄^[10]研究了再生混凝土边节点的抗震性能,结果表明:随着取代率的提高,再生混凝土节点抗震性能逐渐降低,但其力学性能、破坏形式等特点与普通混凝土节点类似,当再生骨料取代率为 100% 时,仍能满足抗震需求.

总结现有研究成果发现:再生混凝土节点抗震性能试验研究较少^[11-12],而性能增强再生混凝土节点抗震性能更是鲜有研究.本文利用微硅粉和混杂纤维改善再生混凝土的抗震性能,促进再生混凝土的推广应用.混杂纤维(Hybrid Fiber)的防裂、抗冲击和抗折性能显著;微硅粉(Microsilica)拥有良好的填充和火山灰效应,可与水泥水化产物发生二次水化反应,填充混凝土孔隙,改善其微观结构;目前

二者在高性能混凝土的制备中应用较多^[13-15].本文进行了相同轴压比条件下,不同微硅粉和混杂纤维掺量情况下的再生混凝土框架结构中节点抗震性能试验研究,对比分析了性能增强再生混凝土与普通混凝土抗震能力,为实际工程应用提供试验依据.

1 试验概况

1.1 试验材料

试件采用 P. O32. 5R 级水泥,中粗河砂;废弃混凝土取自于西安北郊建筑垃圾处理厂,其主要来源于城市拆迁,经鄂式破碎机粉碎、筛分、清洗等工序制成再生骨料,粒径范围为 4.74~31.5 mm,连续级配,其粒径级配情况如表 1 所示;微硅粉和纤维分别由霖源微硅粉有限公司和陕西万达纤维有限公司提供,材料性能如表 2 和表 3 所示,再生骨料的性能参数如表 4 所示.本文制作了 32 组 96 个硅粉含量为 0%,3%,6%和 8%取代率为 100%的再生混凝土试件,对其抗压性能、劈拉强度、抗折强度、变形性能进行了试验研究,如图 1 所示,力学性能试验结果平均值见表 5.由试验结果可知当微硅粉含量在 6%左右时其对再生混凝土力学性能增强效果最为明显,故再生混凝土框架柱中节点试验微硅粉掺量设定为 6%.

表 1 再生混凝土颗粒级配表
Tab. 1 Aggregate gradation of RAC

粒径/mm	4.75~9.5	9.5~19	10~26.5	26.5~31.5
比例/%	5	30	25	40

表 2 微硅粉性能参数
Tab. 2 Material properties of microsilica

外观	容重/(kg·m ⁻³)	细度/μm	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	w(SiO ₂)/%	耐火度/℃
粉末	200~250	0.1~0.3	20~28	90~95	1 600

表3 纤维性能参数
Tab.3 Material properties of hybrid fiber

类型	比重 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	当量直径	抗拉强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弹性模量 ($\text{MPa} \times 10^5$)	抗碱强度 保持率/%
Tank 纤维	0.91	0.9~1.1	>350	10~30	>0.04	≥ 94.4
钢纤维	7.85	0.8	648	23	2.1	>99.4

表4 骨料材性表
Tab.4 Material properties of aggregate

骨料种类	表观密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	紧密密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压碎指标 /%	吸水率 /%	微粉含量 /%
天然骨料	2 772.3	1 543.5	1 646.5	6.4	0.76	0.83
再生骨料	2 524.7	1 228.5	1 352.7	12.3	3.33	3.83

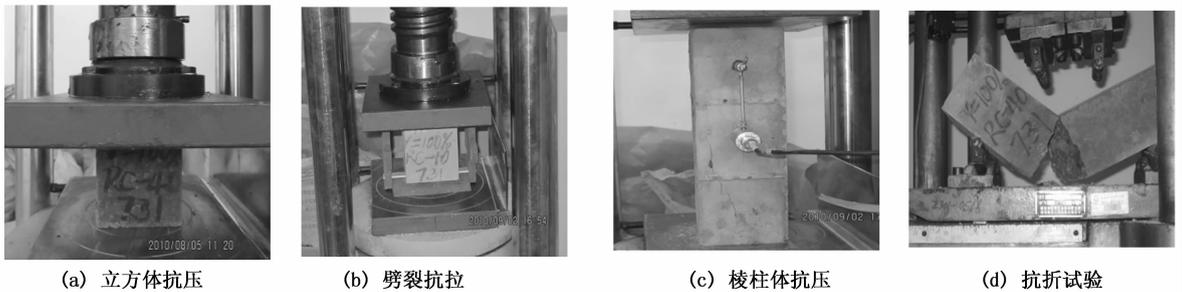


图1 力学性能试验
Fig.1 Mechanical property test

表5 力学性能试验结果均值表
Tab.5 The results of mechanical property test

硅粉含量 /%	立方体抗压 强度/MPa	劈裂抗拉强度 /MPa	轴心抗压 强度/MPa	抗折强度 /MPa
0	28.31	2.78	27.12	3.01
3	32.57	3.12	30.44	3.32
6	35.06	3.33	32.36	4.08
8	33.19	3.15	31.28	3.82

1.2 试件设计

试验设计了4榀框架中节点,节点两端梁长为1 500 mm,截面尺寸为200 mm×350 mm;柱总高为2 350 mm,截面尺寸为300 mm×300 mm,分别编号为JD-0,JD-1,JD-2和JD-3,试件再生骨料取代率、轴压比及配筋率相同.试验工况见表6,试件尺

表6 框架中节点工况组合
Tab.6 Load condition table of concrete joints

编号	再生骨料 取代率/%	轴压比	微硅粉 /%	混杂纤维 (体积率) /%	钢纤维: TANK 纤维 (体积比)
JD-0	100	0.20	—	—	—
JD-1	100	0.20	6	—	—
JD-2	100	0.20	6	0.5	7:3
JD-3	100	0.20	6	1.0	7:3

寸及配筋如图2所示.性能增强再生混凝土配合比及力学性能分别见表7和表8,钢筋力学性能见表9.试件在西安建筑科技大学结构实验室浇筑完成,再生混凝土采用机械搅拌,插入式振捣棒振捣密实,再用抹刀清理表面浮浆后收平,浇筑完成静置24 h后拆模,并用土工布覆盖,洒水养护.

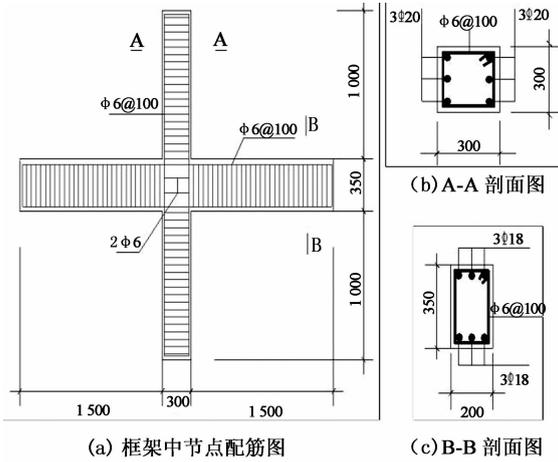
表7 混凝土配合比

Tab.7 Mass mixture ratio of RAC (kg/m^3)

编号	再生骨料 取代率 /%	水泥:水:砂:					
		再生骨料 (质量比)	微硅粉	钢纤维	Tank	减水剂	
JD-0	100	500 : 215 : 465 : 1 200	0	0	0	5	
JD-1	100	470 : 215 : 465 : 1 200	30	0	0	5	
JD-2	100	470 : 215 : 465 : 1 200	30	27.50	1.35	5	
JD-3	100	470 : 215 : 465 : 1 200	30	54.95	2.73	5	

表8 性能增强再生混凝土力学性能
Tab.8 The mechanical properties of EC-RAC

编号	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa	轴心抗压强度 f_c /MPa
JD-0	34.75	30.86
JD-1	36.96	32.63
JD-2	37.81	32.17
JD-3	39.79	33.65



(a) 框架中节点配筋图 (b) A-A 剖面图 (c) B-B 剖面图
图 2 节点尺寸与配筋图 (mm)

Fig. 2 Dimensions and reinforcement of specimens

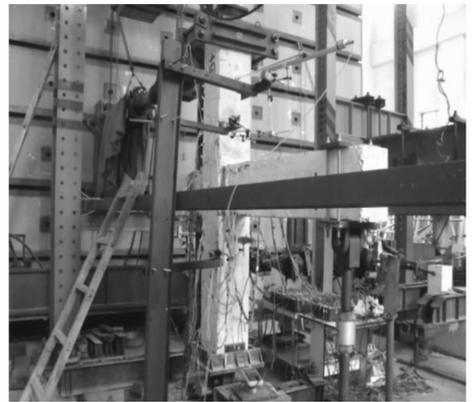
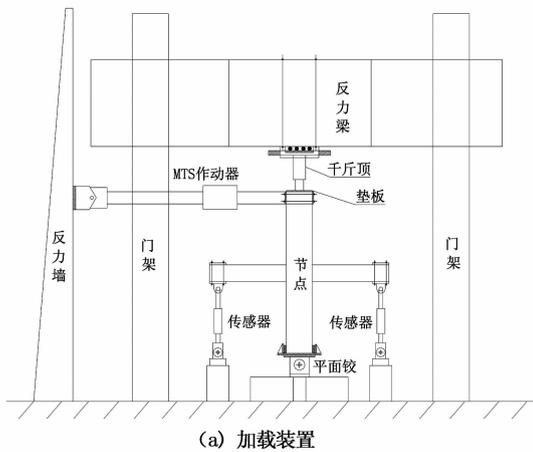
表 9 钢筋力学性能指标

Tab. 9 Material properties of reinforcement

钢筋级别	直径 /mm	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /10 ⁵ MPa
HPB235	6	336	512	2.12
HRB335	18	429	567	2.00
HRB335	20	463	628	2.02

1.3 加载设备与制度

节点试验采用柱端拟静力加载,反力梁和液压千斤顶提供竖向荷载,MTS 电液伺服作动器提供水平低周反复荷载,数据由 ASH-500 数据采集仪采集.试验设备如图 3 和图 4 所示.



(a) 加载装置

(b) 试验现场

图 3 加载装置及试验现场

Fig. 3 Load device



(a) 数据采集仪

(b) 数据采集系统

图 4 试验数据采集系统

Fig. 4 Test data acquisition system

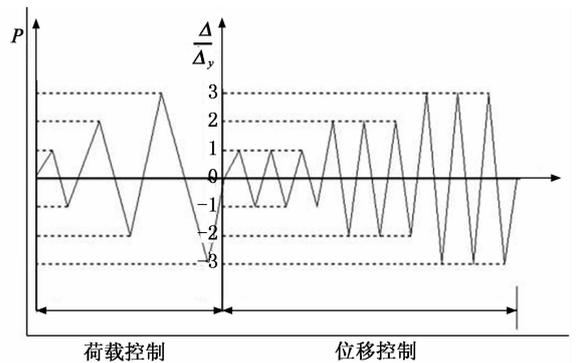


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading regimes

1.4 测点布置

本试验共设置 7 个位移量测点,其中 2 个竖直方向位移测量点,位移计架设于梁两端的底部,编号分别为 wy-1,wy-2,用来测量两端梁的竖向位移;3 个水平方向位移量测点,位移计架设于柱顶端、节点

试验采用荷载-位移混合控制的加载方式^[16],如图 5 所示.试验开始时,由液压千斤顶施加竖向荷载,达到轴压比后,保持竖向荷载不变;然后在柱顶施加水平反复荷载,试件屈服前采用荷载控制,屈服后(荷载-位移曲线出现明显转折为准)以位移控制加载,位移加载幅值以屈服位移的整数倍递增.当试件的承载力下降至最大承载力的 85% 时为破坏准则,试验结束.

相连柱端上部及下部,编号分别为 wy-3,wy-4,wy-5,用来测量柱顶的水平位移及柱端的曲率;2 个斜向的位移量测点,2 只百分表交叉布置在节点核心区,编号分别

为 wy-6,wy-7,以测量节点核心区的剪切变形.梁柱主筋和箍筋应变片主要布置在节点核心区内及梁柱塑性铰区域.各测点布置详见图 6 所示.

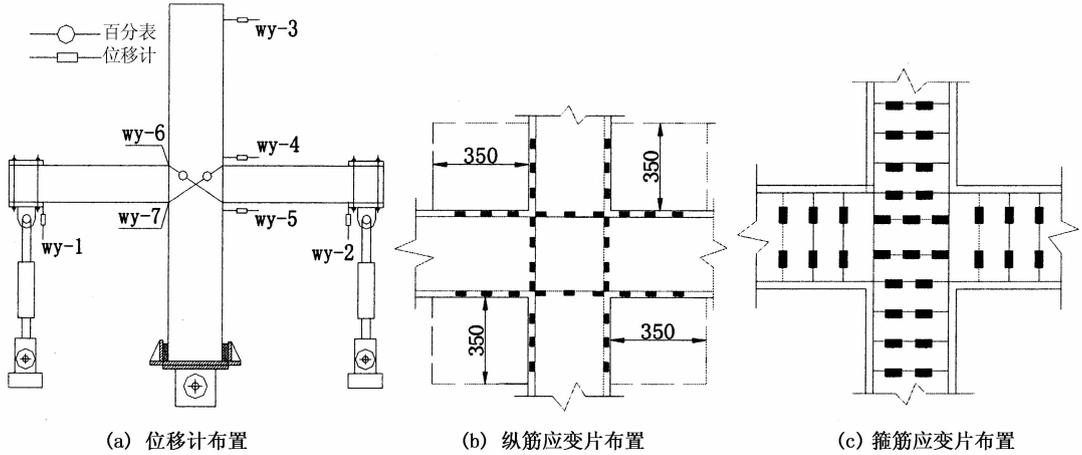


图 6 测点布置图
Fig. 6 Arrangement of measuring points

2 试验过程及破坏特征

2.1 试验过程

在低周反复荷载作用下,不同微硅粉和混杂纤维含量的性能增强再生混凝土节点都有相似的破坏过程,如图 7 所示,以试件 JD-1 为例描述试验加载和破坏过程. a) 初裂阶段:加载初期由于荷载很小,试件荷载-位移曲线为直线,此时若卸载,节点试件变形将完全恢复,此时节点处于弹性工作阶段;随着荷载的增大,微裂缝首先出现在梁端根部,而后微裂缝在节点核心区部位陆续出现,当荷载增加到 40 kN 时,节点核心区出现一条宽度约 0.1 mm 的斜裂缝,表明试件开裂;b) 通裂阶段:随着荷载的继续增

大,原有裂缝延伸并加宽,裂缝相互交叉将核心区划分为多个区域,同时裂缝不断开展、延伸,逐渐形成两条宽度约为 1~2 mm 的贯通核心区对角线的主斜裂缝;c) 极限阶段:核心区通裂后,水平荷载还可继续增大,此时核心区基本无新裂缝出现,原交叉斜裂缝持续发展宽度可达 5 mm 以上,试件的变形十分明显,核心区剪切变形成倍增大,核心区混凝土起皮现象严重、钢纤维蹦出,裂缝向柱上下延伸,节点核心区粗大裂缝密布,混凝土呈菱形块状掉落,节点核心区达极限状态. d) 破坏阶段:随着加载位移继续增大,试件的变形急剧增大,承载力逐渐下降,核心区裂缝宽度可达 1 cm,核心区混凝土酥碎严重,箍筋外露,最终破坏.

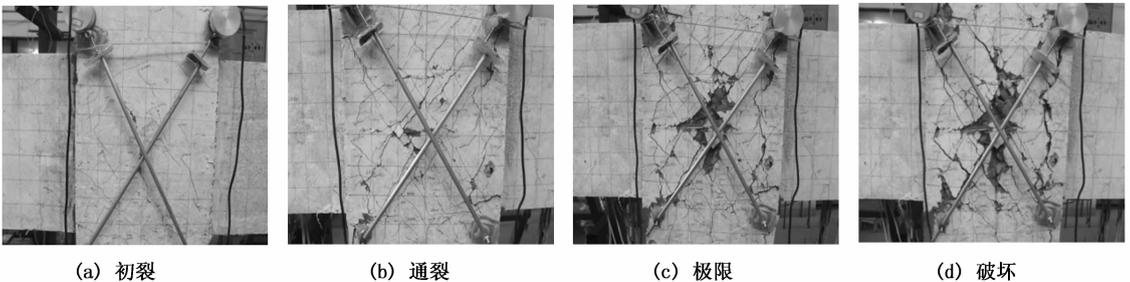


图 7 试验现象
Fig. 7 Experimental phenomena

各试件的破坏过程虽然相同,但破坏程度存在差异,由图 8 可以看出 JD-0 的破坏最严重,核心区

混凝土酥裂、脱落现象最为显著,且多呈碎小的颗粒状,开裂范围较大,裂缝出现密集.由于微硅粉的填

充效应,使核心区再生混凝土的承载力提高,从而推迟开裂时间,使得 JD-1 的破坏程度好于 JD-0. 图 8 显示 JD-2 和 JD-3 的破坏程度则明显优于 JD-0, 试件 JD-2 和 JD-3 核心区的混凝土剥落面积较小, 呈现碎而不落“藕断丝连”的现象. 这是因为在试件 JD-1 的基础上加入混杂纤维后,起到拉结骨料的效果,加强了基体内部的连续性,消除和减缓了初期节点试件中微裂缝的产生和发展,弱化了微裂缝处的应力集中,提高了试件的承载能力及延性,大大改善了再生混凝土框架节点的性能. 随着混杂纤维掺量的增加(0.5%~1.0%),试件 JD-3 核心区混凝土“碎而不落”的现象更加明显. 由此可见混杂纤维掺量的增加对再生混凝土节点性能的改善有所提升,但混杂纤维的最佳掺量有待进一步研究.

2.2 试验现象微观分析

由于再生骨料在制备过程中的剥离程度不一,

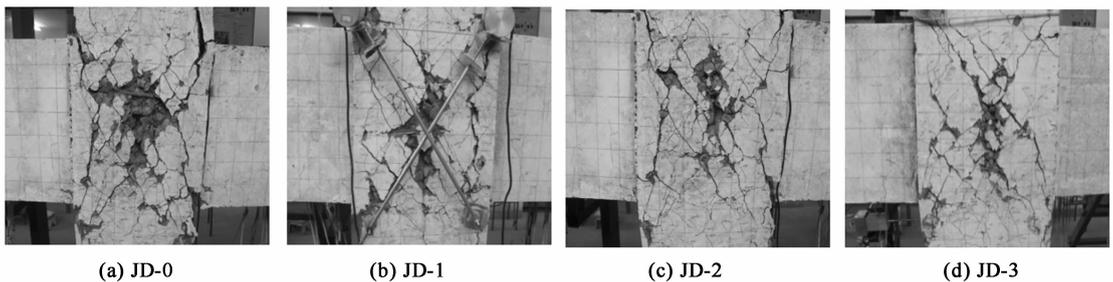


图 8 破坏形态

Fig. 8 Contrast diagram of failure mode

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

试验记录了各框架节点试件的荷载-位移曲线如图 9 所示. 由图 9 可以看出,4 个试件的滞回曲线具有相似的特征:加载初期,由于节点试件处于弹性工作阶段,滞回曲线呈直线循环,卸载时残余变形几乎为零. 随着荷载的增加,试件进入弹塑性工作阶段,卸载残余变形增大,滞回曲线也由直线过渡到“梭形”,同时,刚度衰减也愈发明显. 当试件核心区纵向钢筋屈服后,由加载制度变为位移控制,此时若保持水平荷载不变,而试件位移将显著增大,滞回曲线形状趋于丰满,说明各试件具有较好的变形能力和耗能能力. 当试件水平荷载达到峰值后,节点残余变形大,刚度衰减速率加快,加载后期,受钢筋和混凝土之间滑移的影响,滞回曲线呈现“捏拢”效应.

由图(9)可以看出与普通再生混凝土中节点滞

其表面存在着旧水泥包裹的现象. 因此,再生混凝土内部将形成新旧水泥的双层薄弱界面,界面结构非常复杂,易产生微裂缝. 同时再生骨料的空隙率比天然骨料大,骨料本身存在缺陷. 由上述试验可以看出,当再生混凝土中掺入适量的微硅粉时,节点核心区混凝土承载力明显提高,裂缝开裂较少,说明微硅粉可对再生混凝土起到“微孔细化”的超填充作用,弥补薄弱界面的缺陷,同时可促进再生骨料孔洞中水泥的水化反应,使其能与骨料外部水泥连接更密实. 混杂纤维的掺入可看作是再生混凝土中增加了许多“微筋”,当局部混凝土开裂后,这些“微筋”在再生混凝土骨料之间起到拉结的作用,承担部分应力,延缓混凝土的开裂,提高其延性. 从微观角度分析,微硅粉和混杂纤维的联合使用可有效改善再生混凝土框架中节点的承载能力和使用延性,从而提高抗震性能.

回曲线相比,性能增强再生混凝土的节点滞回曲线更为饱满,JD-1,JD-2 和 JD-3 滞回面积明显大于 JD-0,说明耗能能力明显提高. 硅粉的掺入延迟了峰值荷载出现,而混杂纤维的加入使再生混凝土试件中产生“微细筋”效果,减缓了核心区裂缝的产生与发展,使节点核心区的应力场更加均匀,减小了混凝土塑性变形的累积和损伤累积,改善了试件的工作性能. 在滞回曲线下降段,硅粉和纤维增强再生混凝土节点较普通 RAC 节点下降平缓,能有效改善节点承载力及刚度衰减.

3.2 各阶段荷载特征值

试验过程中记录了各节点试件在不同受力阶段的荷载特征值,如表 10 所示.

通过对试验现象和特征值的分析,可以看出单独掺加微硅粉对再生混凝土进行性能增强后各特征值均有提高. 其原因是:微硅粉颗粒直径极小,可填充在水泥颗粒孔隙之间,对再生骨料的初始损伤起到修复作用. 同时,微硅粉的火山灰效应可促使水泥

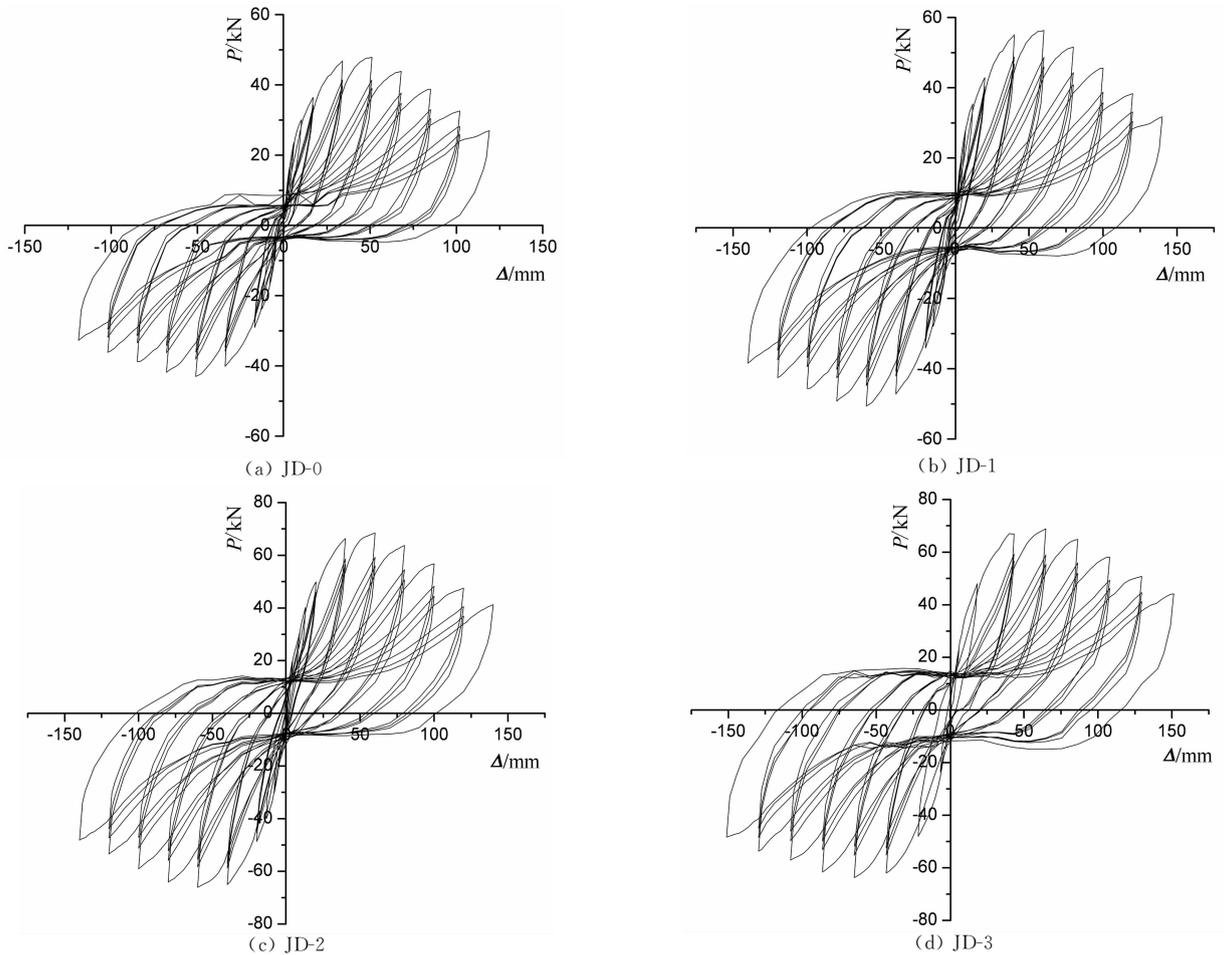


图9 各试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curve of each specimen

表 10 破坏过程特征值
Tab. 10 Eigenvalues of four stages kN

编号	方向	开裂	通裂	极限	破坏
JD-0	+	31.56	39.24	49.34	30.88
	-	24.39	30.53	41.63	31.17
JD-1	+	35.76	45.36	57.37	32.12
	-	32.31	40.04	51.68	41.23
JD-2	+	40.98	50.28	68.96	45.66
	-	37.29	48.84	64.81	51.20
JD-3	+	48.83	58.29	70.02	44.86
	-	44.73	55.06	63.11	48.33

水化物发生二次水化反应,形成改善再生混凝土微观结构的胶凝物,从而提高再生混凝土承载能力,推迟试件的开裂和屈服.而经微硅粉和混杂纤维共同增强的再生混凝土试件的特征值较单独掺加微硅粉的试件又有较大改善,但提高程度随着掺量的不同存在着差异.与试件 JD-0 相比,JD-2 和 JD-3 的开裂特征值分别提高了 29.8% 与 54.7%,而 JD-1 只提高了 13.3%.其原因是:纤维具有较高的韧性和一

定的强度,当节点受力时纤维可使再生混凝土内部的应力分布更加均匀合理.同时,混杂纤维的拉接作用可将再生混凝土各成份连接在一起,提高整体性的同时可增强承载能力.

3.3 骨架曲线

骨架曲线可以反映框架中节点受力与变形的各个不同阶段和特性,骨架曲线对比如图 10 所示.我们不难发现:再生混凝土中加入微硅粉和混杂纤维后其骨架曲线发生了明显的变化.单独加入微硅粉可提高峰值荷载,加入混杂纤维后不仅提高了节点试件的初始刚度和峰值荷载,同时使骨架曲线的下降段趋向平缓,结构的承载力和刚度衰减得到改善,变形能力得到增强,在宏观上表现出结构具有良好的延性和耗能能力.

3.4 延性系数

节点通常用延性系数 μ 来衡量试件的变形能力^[17],本文采用位移延性系数 $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$ 和转角延性系数 $\mu_{\theta} = \theta_u / \theta_y$ 作为衡量节点延性的参数,其中

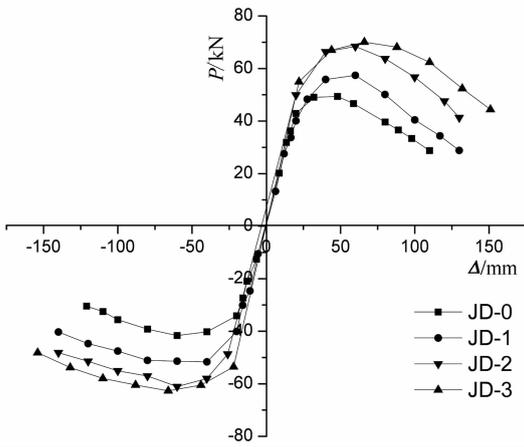


图 10 骨架曲线对比图

Fig. 10 Contrast diagram of skeleton curve

Δ_u, θ_u 取变形增加而荷载下降到峰值荷载的 85% 时所对应的位移和转角值; Δ_y, θ_y 为试件屈服时对应的梁端位移和转角. 试件的延性系数见表 11.

从表 11 中可看出:在设计形式完全相同的情况下,试件 JD-2 和 JD-3 的延性系数普遍大于普通再生混凝土节点,性能增强效果明显,梁端位移延性系数分别提高 22.7% 和 17.4%,核心区转角延性系数分别提高 41.9% 和 36.2%. 在混杂纤维掺量较低时,延性提高程度稍大,在混杂纤维掺量大于 0.5% 时,延性略有下降,说明混杂纤维拉结作用能够提高试件延性及其耗能能力,但过多的纤维在混凝土中不易分散,容易在纤维周围形成薄弱区破坏混凝土各成分间协同工作的整体性,产生不良效果.

表 11 延性系数

Tab. 11 Ductility coefficient of specimens

编号	方向	屈服位移 Δ_y/mm	极限位移 Δ_u/mm	位移延性系数 Δ_u/Δ_y	位移延性系数均值	屈服转角 $\theta_y/10^{-3} rad$	极限转角 $\theta_u/10^{-3} rad$	转角延性系数 θ_u/θ_y	转角延性系数均值
J-0	+	20.40	67.88	3.33	3.68	14.73	37.95	2.58	2.79
	-	18.31	73.11	4.03		13.36	40.12	3.00	
J-1	+	23.43	81.20	3.47	3.92	15.61	53.94	3.46	3.63
	-	21.37	93.44	4.37		14.29	54.28	3.80	
J-2	+	23.88	101.26	4.24	4.48	15.95	59.70	3.74	3.96
	-	24.14	113.58	4.71		13.26	55.33	4.17	
J-3	+	24.66	97.86	3.97	4.32	15.88	58.84	3.71	3.80
	-	25.54	119.48	4.68		14.19	55.11	3.88	

3.5 耗能能力

通常情况下,结构的耗能能力用等效粘滞阻尼系数 h_e 来衡量,等效粘滞阻尼系数越大表示结构的耗能能力越强,计算原理如图 11 所示,计算公式如下^[18]:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC}}{S_{AOD}} \quad (1)$$

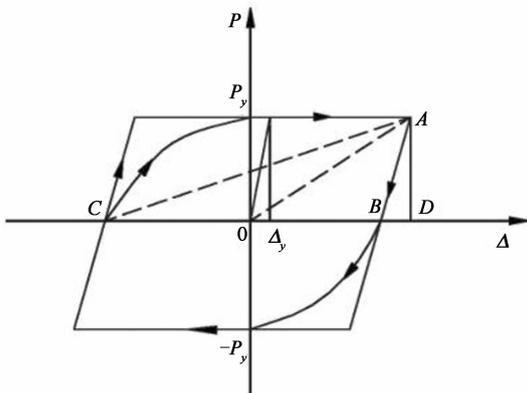


图 11 等效黏滞阻尼系数计算

Fig. 11 Calculation drawing for h_e

由表 12 中计算的等效黏滞阻尼系数可以看出,各个节点试件的等效黏滞阻尼系数计算值存在差异,性能增强再生混凝土框架节点比普通再生混凝土框架节点的等效粘滞阻尼系数高.具体表现为:单掺硅粉再生混凝土节点 JD-1 比普通再生混凝土节点 JD-0 的计算值高出 18.7%,说明经微硅粉性能增强的节点的抗震性能优于普通再生混凝土;JD-2 和 JD-3 节点的等效黏滞阻尼系数则分别高出 JD-0 节点 31.2% 和 56.3%,说明混杂纤维对提高再生混凝土节点的耗能性能起主导作用.

表 12 最大荷载循环对应的等效黏滞阻尼系数

Tab. 12 The maximum load corresponding h_e

试件编号	JD-0	JD-1	JD-2	JD-3
等效粘滞阻尼系数	0.16	0.19	0.21	0.25

3.6 核心区的剪切变形

纵观框架节点试验的整个过程,试件在水平剪力的作用下主要发生剪切变形,而梁柱核心区的矩形区域将发生变形,改变呈平行四边形,试验中通过

百分表量测并记录核心区对角线长度的变化,量测方法如图12所示,利用公式(2)计算核心区的剪切变形^[19].

$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (\delta_1 + \delta'_1 + \delta_2 + \delta'_2) \quad (2)$$

式中: γ 为节剪切变形; a, b 分别为两相邻百分表间的水平距离和垂直距离; $\delta_1, \delta'_1, \delta_2, \delta'_2$ 分别为节点核心区对角线的伸长或缩短量。

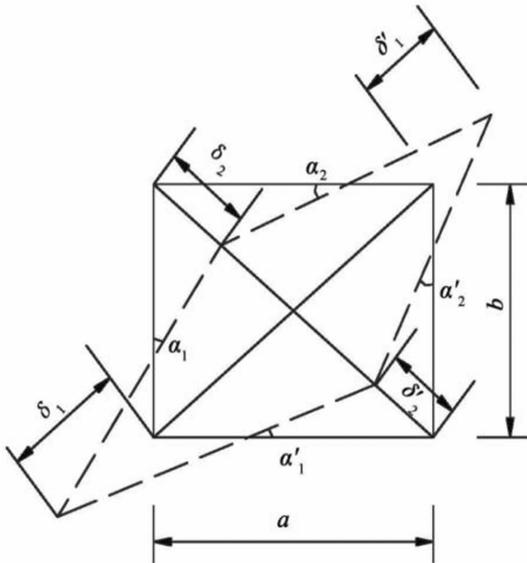


图12 核心区剪切变形计算图
Fig. 12 Calculation drawing for shear deformation at the core area

图13为各试件在不同受力阶段其核心区剪切变形结果。从图中可以看出,各个节点试件在开裂阶段核心区剪切变形都很小,各试件差别不大;当节点屈服后,逐渐产生差异,普通再生混凝土节点核心区剪切变形发展较快,曲线上升最陡;当节点达到极限

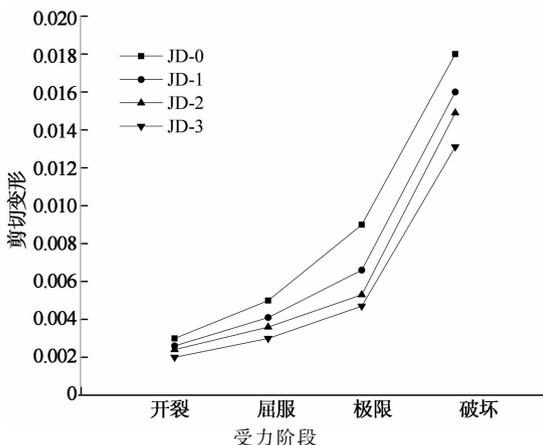


图13 试验各阶段剪切变形
Fig. 13 Share deformation of each stage

荷载时破坏阶段核心区剪切变形急剧增大;在屈服

和极限阶段,单掺硅粉的试件JD-1剪切变形略优于JD-0,而JD-2和JD-3的剪切变形都明显要小于JD-1和JD-0,且随混杂纤维含量的提高剪切变形减小;在破坏阶段,各试件的剪切变形增大较快,这说明经硅粉和混杂纤维性能增强后,再生混凝土能够减小节点的剪切变形。

4 结论

通过性能增强再生混凝土框架中节点的低周反复加载抗震性能试验研究,可以得出以下结论:

1)性能增强再生混凝土框架中节点的破坏经历了初裂—通裂—极限—破坏4个阶段,它的破坏过程与普通再生混凝土框架中节点基本一致;各节点试件破坏时核心区发生剪切破坏,剪切变形显著,但经过微硅粉和混杂纤维共同增强的再生混凝土中节点破坏时核心区混凝土“碎而不落”,破坏程度明显小于普通再生混凝土中节点。

2)性能增强再生混凝土中节点抗震性能优于普通再生混凝土中节点,尤其是滞回曲线、延性性能、构件耗能、节点区变形优势非常明显,特别是当微硅粉和混杂纤维共同增强时,延性系数和等效粘滞阻尼系数能提高50%以上,效果显著,且满足抗震要求,可应用于实际工程结构中。

3)单掺硅粉对再生混凝土进行性能增强可提高节点各阶段的特征值,但对节点延性和耗能改善有限;混杂纤维可在再生混凝土内部产生“微细筋”效果,发挥其拉结作用减缓核心区裂缝的产生与发展,因此,当硅粉与混杂纤维共同作用时可明显提高再生混凝土中节点的延性和耗能能力。

4)由于过多的混杂纤维在混凝土中不易分散,纤维周围易形成薄弱区,破坏混凝土各成分间协同工作的整体性,从而导致混杂纤维掺量较低时,节点延性提高程度较大,当混杂纤维掺量大于0.5%时,延性提高程度略有下降的现象。

5)从细观角度分析,硅粉的超填充性可改善再生骨料初始损伤裂纹对再生混凝土构件初始损伤积累的影响,同时可使再生骨料新旧砂浆间界面过渡区更加稳定;而纤维的拉结作用可使再生混凝土裂缝处应力场更加均匀,减小混凝土塑性变形的累积和损伤累积;但硅粉和混杂纤维的最优配比,以及各混杂纤维的用量仍需进行更进一步的理论与试验研究。

参考文献

[1] KATZ A. Properties of concrete made with recycled aggregate

- from partially hydrated old concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(5): 703—711.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 10—11.
XIAO Jian-zhuang. *Recycled concrete*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 10—11. (In Chinese)
- [3] ETXEBERRIA M, VAZQUEZ E, MARI A, *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 735—742.
- [4] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(5): 397—401.
- [5] CHOI W C, YUN H D. Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate[J]. *Materials & Design*, 2013, 51(5): 742—750.
- [6] CORINALDESI V, MORICONI G. Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(5): 650—658.
- [7] 周点龙, 付佳丽, 姚峰, 等. 改性再生混凝土框架边节点抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报, 2015, 38(4): 513—516.
ZHOU Dian-long, FU Jia-li, YAO Feng, *et al.* Experimental study of seismic behavior of modified recycled aggregate concrete exterior beam-column joints[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2015, 38(4): 513—516. (In Chinese)
- [8] 柳炳康, 陈丽华, 周安, 等. 再生混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(11): 109—115.
LIU Bing-kang, CHEN Li-hua, ZHOU An, *et al.* Experimental study on seismic behavior of recycled aggregate concrete beam-column interior-joints[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(11): 109—115. (In Chinese)
- [9] 刘超, 白国良, 贾胜伟, 等. 不同轴压比再生混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 21—28.
LIU Chao, BAI Guo-liang, JIA Sheng-wei, *et al.* Experimental study on seismic behavior of recycled concrete frame joints with different axial compression ratios[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(6): 21—28. (In Chinese)
- [10] 肖建庄, 朱晓晖. 再生混凝土框架节点抗震性能研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 47—50.
XIAO Jian-zhuang, ZHU Xiao-hui. Study on seismic behavior of recycled concrete frame joints[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2005, 33(4): 47—50. (In Chinese)
- [11] CORINALDWSI V, MORICONI G. Behavior of beam-column joints made of sustainable concrete under cyclic loading [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(5): 650—658.
- [12] CORINALDWSI V, LETELIER V, MORICOBBI G. Behavior of beam-column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4): 1877—1882.
- [13] BANTHIN A, NANDAKUMAR N. Crack growth resistant of hybrid fiber reinforced cement composite [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(1): 3—9.
- [14] 朱海堂, 高丹盈, 王占桥. 混杂纤维高强混凝土断裂性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 41—46.
ZHU Hai-tang, GAO Dan-ying, WANG Zhan-qiao. Experimental study on fracture properties of hybrid fiber reinforced high-strength concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(1): 41—46. (In Chinese)
- [15] HILLERBORG A. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy of concrete [J]. *Materials and Structures*, 1985, 18(4): 291—296.
- [16] JGJ/T101—2015 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 12—16.
JGJ/101—2015 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 12—16. (In Chinese)
- [17] 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: 335—340.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. *Reinforced concrete theory and analyses*[M]. Tsinghua University Press, 2003: 335—340. (In Chinese)
- [18] CHOPRA Anil K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall Inc, 2006: 99—105.
- [19] PARRA-MONTESIONS G J, LIANG X, WEGHT J K. Towards deformation based capacity design of RCS beam-column connections [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(5): 681—690.