

文章编号: 1001-4888(2020)01-0159-08

修正的 Park-Ang 性能增强再生混凝土 框架中节点地震损伤模型^{*}

樊禹江¹, 余滨杉², 鲁元龙³, 吴强峰³, 孙克清¹

(1. 长安大学 建筑学院, 陕西西安 710061; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西西安 710072;

3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西西安 710065)

摘要: 通过对 3 个足尺性能增强再生混凝土(EC-RAC)框架中节点进行低周反复加载试验, 分析其结构模型地震损伤演化过程, 确定其震后实际损伤状态与损伤指标。同时, 针对传统钢筋混凝土 Park-Ang 双参数损伤模型无法准确描述加载位移大于 100mm 后 EC-RAC 框架节点模型的损伤演化与累积行为的缺点, 本文提出了一种修正的 Park-Ang 双参数损伤模型, 并基于前述试验结果, 拟合了纤维项系数、位移项系数、能量项系数。最后, 利用所提出的损伤模型, 以 HF-RAC2 为例进行损伤指标误差分析, 结果表明: 平均误差在 6% 以内, 即所提出的双参数损伤模型能够适用于 EC-RAC 框架节点地震损伤与评估分析。

关键词: 性能增强再生混凝土(EC-RAC); 框架中节点; 损伤模型; 误差分析

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-146

0 引言

我国目前正处于城市化快速发展的阶段, 而对于所产生的建筑仍采用野蛮倾倒等方式进行粗放式处理。这种方式不但损毁了大量良田, 同时也破坏了城市环境, 因而研究利用建筑垃圾进行资源化利用就显得尤为迫切^[1]。其中再生混凝土(RAC)技术为其提供了一条切实可行的方法^[2], 但再生粗骨料普遍存在表面粗糙、孔隙率大、吸水性强等问题, 加之来源广泛(包含地域性差异、服役年限跨度大)等原因, 导致了普通再生混凝土材料性能具有离散性大、塌落度小、强度低、耐久性差、易开裂等特点^[3,4], 因而必须对其进行性能增强, 以期获得工作性能稳定、品质优良的性能增强再生混凝土(EC-RAC)。针对上述问题, 诸多学者采用外加纤维或外加剂等方法, 进行了大量基本材料与构件承载能力等研究^[5,6]。然而, 针对 EC-RAC 构件/结构地震损伤、损伤演化、损伤定量评估方法等的研究较少。本文基于课题组所做的 3 个足尺不同混杂纤维配比的 EC-RAC 框架中节点低周反复荷载试验结果, 考虑改进型 Park-Ang 双参数地震损伤模型^[7]无法准确描述 EC-RAC 框架节点地震损伤定量评估的问题, 提出了修正的 Park-Ang 双参数损伤模型。同时, 拟合了纤维项系数 α 、位移项系数 α 、能量项系数 k , 确定了可考虑混杂纤维影响的能量耗散因子 β , 使所提出的损伤模型能够更好地适用于 EC-RAC 框架节点地震损伤评估之中。

^{*} 收稿日期: 2018-06-17; 修回日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51808046); 陕西省自然科学基金(2017JQ5061); 中央高校基金科研业务费(310841171001); 陕西省博士后基金(SX2014120057)

通讯作者: 樊禹江(1987—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 再生混凝土基本理论、新型智能材料及其在结构振动控制中的应用。Email: fanyujiangchd@163.com

1 Park-Ang 双参数损伤模型

Park 和 Ang 通过线性组合构件最大位移与滞回累计耗能,首次提出了钢筋混凝土构件双参数地震损伤模型^[7]:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{Q_y \delta_u} \quad (1)$$

但该模型在边界条件上存在一些缺陷,无法较为精确地描述不同幅值荷载作用下结构的破坏差异,因而 Kunnath 等人^[8]对其进行了修正,提出了新的 Park-Ang 模型:

$$D = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} + \beta \frac{E_h}{Q_y \delta_u} \quad (2)$$

该模型纠正了原模型边界条件上的一些缺陷,同时对于结构变形中超过屈服点的位移进行重新定义,使计算结果更加合理。

式(1)、(2)中, δ_m 为构件在循环加载过程中的最大位移; δ_y 为构件在单调加载下的屈服位移; δ_u 为构件在单调加载下的极限变形; E_h 、 E 为构件在加载过程中的累积滞回耗能; Q_y 为节点屈服时对应的剪切力。

1.1 实际结构的地震损伤指标

为了定量描述结构或构件地震损伤程度,首先必须对不同破坏状态进行定义,即损伤指标。本文综合《中国地震烈度表》(2008)^[9]中给出的建筑物平均震害指数以及文献[10,11]所提出的钢筋混凝土损伤评判准则,针对 EC-RAC 框架节点地震损伤定量化评估提出了相应损伤指标,见表 1。

表 1 破坏状态及对应损伤指标

Tab. 1 Test phenomena and corresponding damage indicators

损伤程度	损伤指标	破坏状态	修复状态
完好	$D < 0.2$	梁端出现微小裂缝,有向核心区开裂趋势,结构整体仍处于弹性状态。	微损伤,无需修复
轻度	$-0.20 \leq D < 0.40$	节点核心区混凝土出现开裂;既有裂缝宽度逐渐增大。	轻度损坏,可修复
中度	$0.40 \leq D < 0.65$	节点核心区混凝土出现贯通十字交叉裂缝,部分纵向受力钢筋屈服,整体结构处于弹塑性阶段。	中度损坏,可修复
重度	$0.65 \leq D < 0.90$	节点核心区混凝土交叉斜裂缝长度、宽度继续扩展,面层混凝土逐渐剥落,纵筋与箍筋屈服,整体结构破坏较为严重。	不可修复
失效	$D \geq 0.90$	整体结构承载力急剧下降,刚度明显退化,破坏严重,失去承载能力。	完全失效

1.2 修正的双参数损伤模型

公式(1)、(2)是基于大量普通混凝土梁、柱等试验统计分析所获得的一类损伤模型。若将其直接应用于文中所涉及的 EC-RAC 框架中节点的地震损伤评估分析之中,发现当加载位移超过 100mm 时,模型计算出的损伤指标与试验实际所观测的结构损伤有明显差别。特别的,当模型计算所得损伤已表明该结构失效、丧失承载能力时,模型实际情况则表现出仍能继续承受循环荷载,且具有一定的耗能能力。其主要原因在于混杂纤维掺量对于模型结构耗能能力具有显著影响,而公式(1)、(2)均未考虑其影响。

参考文献[12,13]等,本文在公式中引入位移项系数 α 用以考虑试验中较大的塑性变形对试件产生的损伤影响,引入能量项系数 k 用以减小能量项在计算后期占比过大的影响。由此,本文提出了修正的双参数损伤模型,如式(3)所示:

$$D = (1 - \beta) \times \left[\frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right]^\alpha + \beta \left[\frac{\int dE}{Q_y (\delta_u - \delta_y)} \right]^k \quad (3)$$

式中, α 为位移项系数; k 为能量项系数; β 为耗散因子; δ_m 为节点在循环加载过程中的最大位移; δ_u 为节点在单调加载下的屈服位移; δ_f 为节点在单调加载下的极限变形; E 为节点在加载过程中的累积滞回耗能; Q_y 为节点屈服时对应的剪力。

$$\beta = (-0.447 + 0.073\lambda + 0.24n_0 + 0.314\rho_t + a \times H_f)0.7^{\rho_w} \quad (4)$$

λ 为剪跨比(主应力与切应力之比); a 为纤维掺量影响系数; ρ_t 为受力钢筋配筋率; ρ_w 为体积配箍率。

2 试验概况

2.1 试件概况

本次试验采用的 EC-RAC 配合比与课题组前期所进行的材料性能试验相同,其结果能够获得稳定、良好的工作性能^[1],具体为水泥:水:沙:再生粗骨料=1:0.46:0.99:2.55,其中再生混杂纤维(聚丙烯纤维+钢纤维)体积掺量为 0%~1.0%,硅粉掺量为水泥掺量的 6%。基于此设计制作了 3 个足尺 EC-RAC 框架中节点,同时为研究混杂纤维掺量对于节点抗震性能和损伤模型参数的影响规律,对该框架中节点工况组合如表 2 所示,对应模型基本尺寸与配筋如图 1 所示。

表 2 节点工况组合

Tab. 2 Condition combination table for joints

试件编号	再生粗骨 料取代率	核心区 箍筋	再生混杂 纤维(HF) (体积率)	混杂纤维各组份体积比
				聚丙烯纤维:钢纤维
HF-0%	100%	2 ϕ 6	—	—
HF-0.5%	100%	2 ϕ 6	0.5%	3:7
HF-1.0%	100%	2 ϕ 6	1.0%	3:7

试件进行现场浇筑时,分别留置 150mm × 150mm × 150mm、150mm × 150mm × 300mm 的立方体、棱柱体等标准 EC-RAC 试块,依据普通混凝土力学性能试验方法标准^[14]进行养护,并进行相应的基本力学性能试验,其中所得立方体抗压强度标准值、轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值如表 3 所示。

表 3 EC-RAC 基本力学性能(单位:MPa)

Tab. 3 The mechanical performance
of EC-RAC(unit: MPa)

试件编号	$f_{cu,k}$	f_{ck}	f_{tk}
HF-0%	36.21	24.22	2.43
HF-0.5%	37.32	24.96	2.59
HF-1.0%	39.54	26.44	2.73

注: $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值。

本文试验模型中所用钢筋采用 HPB235 和 HRB335 两种型号,其材料性能试验在长安大学材料学院的实验室进行,结果如表 4 所示。

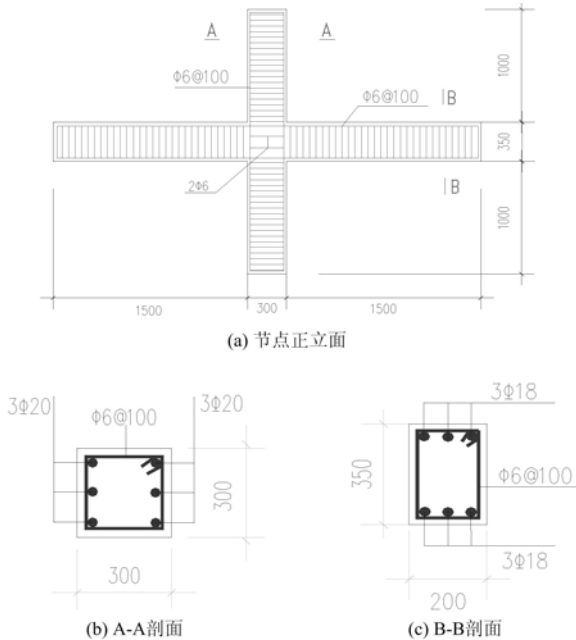


图 1 节点详图
Fig. 1 Detail of joints

表 4 钢筋力学性能(单位:MPa)

Tab. 4 The mechanical performance of steel bars(unit: MPa)

钢筋级别	型号	屈服强度	极限强度	弹性模量($\times 10^5$)
HPB235	$\Phi 6$	336	512	2.12
HRB335	$\Phi 18$	429	567	2.00
HRB335	$\Phi 20$	463	628	2.02

2.2 加载装置

本次低周反复加载试验于西安建筑科技大学教育部结构抗震重点实验室进行。竖向荷载通过带有水平滚轴的液压千斤顶施加,具体为:试件对中后,均按照轴压比 0.2 施加预定轴向力;水平荷载则通过作动器在柱端进行施加,其中加载装置与加载制度如图 2 所示。在试验过程中,为精确获得试件在各阶段的力与位移关系,应按照弹性阶段以荷载控制进行加载,级差为 10kN,每级循环一圈;当试件进行弹塑性阶段,改为位移控制加载,级差为屈服位移 Δ ,每级循环三圈,直至构件破坏。

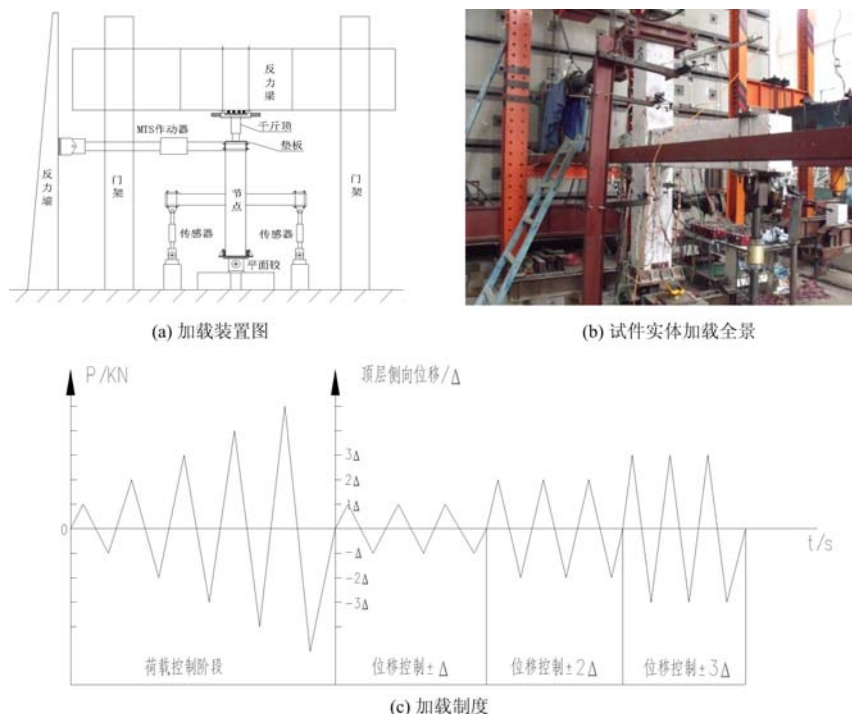


图 2 框架中节点抗震性能试验

Fig. 2 Test of seismic performance for frame joints

2.3 主要试验现象

对比分析试验中 3 个 EC-RAC 框架中节点所表现出的损伤演化过程与最终破坏模式,与普通混凝土框架节点基本一致。具体而言可分为 4 个阶段:初裂阶段、通裂阶段、极限阶段和破坏阶段。但由于再生混杂纤维的掺入,EC-RAC3 个试件在各阶段的损伤程度均有所减轻,且在遭受灾变性破坏时核心区混凝土仍可保持“碎而不掉”的状态(如图 3 所示),即:再生混杂纤维能够有效抑制、控制了试件核心区混凝土裂缝的产生与发展,从而提高了节点延性与结构承载能力。

3 主要试验结果

(1) 滞回曲线与骨架曲线

试验中 3 个框架中节点滞回曲线与骨架曲线结果如图 4、图 5 所示。

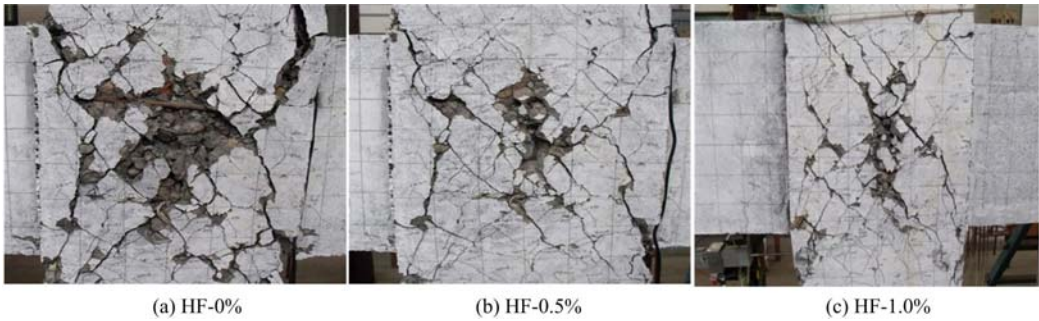


图 3 不同混杂纤维掺量框架中节点的破坏

Fig. 3 Destruction of the joints with different mixed fiber contents

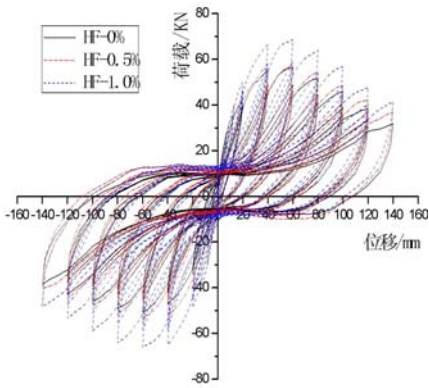


图 4 各节点试件滞回曲线对比

Fig. 4 Comparison of hysteresis curves for each joint

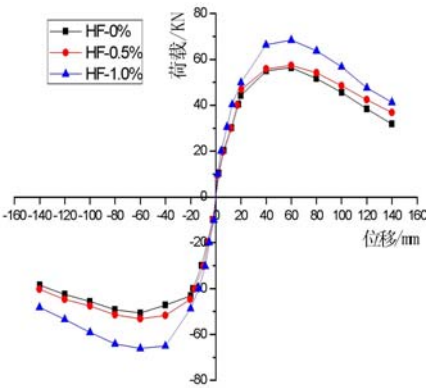


图 5 各节点试件骨架曲线对比

Fig. 5 Comparison of skeleton curves for each joint

(2) 荷载特征值

试验中 3 个框架中节点荷载特征值结果如表 5、表 6 所示。

表 5 各节点特征荷载值(单位:kN)

Tab. 5 Characteristics load of each joint(unit: kN)

试件编号	正向				负向			
	$P_{cr}+$	P'_y+	P_m+	P_u+	$P_{cr}-$	P'_y-	P_m-	P_u-
HF-0%	30.01	48.77	56.34	45.57	29.99	42.11	50.64	42.54
HF-0.5%	34.99	49.41	57.38	48.45	35.01	45.95	53.11	44.74
HF-1.0%	40.03	56.45	68.42	56.72	39.96	52.99	66.07	53.45

注： P_o 表示初裂荷载、 P'_y 表示通裂荷载、 P_m 表示极限荷载、 P_u 表示破坏荷载。

表 6 各节点特征位移及延性系数(单位:mm)

Tab. 6 Characteristics displacement and ductility coefficient of each joint (unit: mm)

试件编号	Δ_y		Δ_u		Δ_y	Δ_u	$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
	+	-	+	-			
HF-0%	27.58	26.20	100.23	101.20	26.89	100.72	3.75
HF-0.5%	25.37	25.59	105.08	104.27	25.48	104.68	4.11
HF-1.0%	23.19	22.47	98.69	106.69	22.83	102.69	4.50

注： $\Delta_y = \frac{|\Delta_y^+| + |\Delta_y^-|}{2}$ 表示屈服位移， $\Delta_u = \frac{|\Delta_u^+| + |\Delta_u^-|}{2}$ 表示极限位移、 μ_Δ 表示延性系数。

4 α 、 k 、 β 参数确定

本文的基本思想为系统观测 EC-RAC 框架中节点在加载各阶段的损伤程度 D , 结合表 1 对其量化。之后基于试验数据, 令公式(3)等于框架中节点实际损伤程度 D , 拟合回归参数 α 、 k 、 β , 最后确定适用于 EC-RAC 框架节点的修正 Park-Ang 双参数损伤模型。

4.1 EC-RAC 框架中节点损伤指标的建立

参考表 1, 结合试件试验过程中各阶段所表现出的试验现象, 确定了各试件不同特征位移时对应的损伤指标 D , 如表 7 所示。

表 7 各试件试验损伤指标
Tab. 7 Test damage indicators for each joint

试件编号	$\Delta=20$	$\Delta=40$	$\Delta=60$	$\Delta=80$	$\delta=100$	$\Delta=120$
HF-0%	0.15	0.30	0.60	0.75	0.95	1.00
HF-0.5%	0.05	0.20	0.55	0.70	0.90	1.00
HF-1.0%	0.05	0.20	0.50	0.65	0.80	1.00

4.2 修正的 EC-RAC 框架节点双参数损伤模型的建立

利用 MATLAB 进行公式(3)的数据拟合与回归, 即可求得各系数值与相关系数 R^2 , 所得结果如表 8 所示。

表 8 拟合系数
Tab. 8 Fitting parameters

系数	纤维项系数 a	位移项系数 α	能量项系数 k	相关系数 R^2
数值	-0.144	0.583	0.645	0.992

表中位移项系数 α 与能量项系数 k 拟合曲线如图 6、图 7 所示。

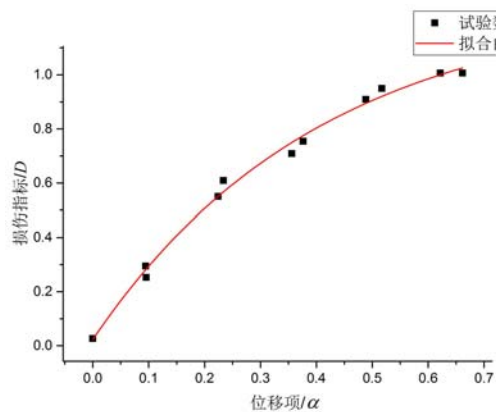


图 6 位移项系数与拟合曲线

Fig. 6 Coefficient of displacement and fitting curve

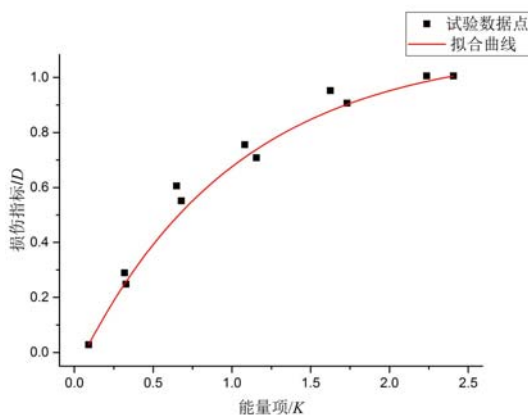


图 7 能量项系数与拟合曲线

Fig. 7 Coefficient of energy and fitting curve

将所得 a 、 α 、 k 分别带入公式(3)、(4), 即可得到适用于 EC-RAC 框架结构节点的修正的 Park-Ang 双参数损伤模型:

$$D = (1 - \beta) \times \left[\frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right]^{0.583} + \beta \left[\frac{\int dE}{Q_y(\delta_u - \delta_y)} \right]^{0.645} \quad (5)$$

$$\beta = (-0.447 + 0.073\lambda + 0.24n_0 + 0.314\rho_t - 0.144H_f)0.7^{P_w} \quad (6)$$

4.3 误差分析

以 HF-0.5% 试件为例, 按照公式(5)进行各特征位移下对应的损伤指标计算, 所得结果如表 9 所

示,平均误差在 6% 以内,即:计算所得损伤指标能够较为准确地描述 EC-RAC 框架节点在不同位移状态下的损伤累积与演化。

表 9 HF-0.5% 试件损伤指标误差分析
Tab. 9 Error analysis of damage indicators for HF-0.5% specimen

试件	$\Delta=20$	$\Delta=40$	$\Delta=60$	$\Delta=80$	$\Delta=100$	$\Delta=120$
公式(5)计算值	0.0992	0.2360	0.5246	0.6882	0.8394	0.9828
试验观测值	0.05	0.20	0.50	0.65	0.80	1.00

5 结论

本文基于 3 个足尺 EC-RAC 框架中节点低周反复荷载试验结果,结合常用的钢筋混凝土结构 Park-Ang 双参数损伤模型,提出了一种适用于 EC-RAC 框架节点的双参数损伤模型,并通过 MATLAB 编程的方法,进行 a 、 α 、 k 参数的拟合与回归,所得结论如下:

(1) EC-RAC 框架节点具有良好的抗震性能,其损伤演化过程与破坏模式与普通混凝土节点基本相同;但再生混杂纤维的加入能够有效抑制、控制试件裂缝的产生和发展,从而提高了延性与承载能力;同时模型在遭受灾变性破坏时其核心区混凝土仍可保持“碎而不掉”的状态。

(2) 拟合回归了纤维项系数 a 、位移项系数 α 、能量项系数 k ,最后确定了适用于 EC-RAC 框架节点的修正 Park-Ang 双参数损伤模型:

$$D = (1 - \beta) \times \left[\frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} \right]^{0.583} + \beta \left[\frac{\int dE}{Q_y(\delta_u - \delta_y)} \right]^{0.645}$$

(3) 针对所提出的双参数损伤模型,以 HF-RAC2 试件为例,计算了其在各特征位移状态下的损伤指标,并与实际结构震害损伤指标对比,结果表明平均误差在 6% 以内,即:该公式能够适用于 EC-RAC 框架节点的地震损伤评估与分析。

参考文献:

- [1] 樊禹江,余滨杉,王社良.再生混凝土框架结构地震作用下随机损伤与评估分析[J].建筑结构学报,2015,36(5):97-102 (FAN Yujiang, YU Binshan, WANG Sheliang. Random damage and evaluation analysis of recycled aggregate concrete frame structure under seismic load[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5):97-102 (in Chinese))
- [2] Gomez S, Jose M V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(8):1301-1311.
- [3] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008 (XIAO Jianzhuang. Recycled concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))
- [4] 马辉,孙书伟,刘云贺,等.圆钢管型钢再生混凝土短柱轴心受压试验及有限元分析[J].实验力学,2017,32(6):789-799 (MA Hui, SUN Shuwei, LIU Yunhe, et al. Experiment study and finite element analysis of compression behavior of circular tube steel reinforced recycled concrete short column[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):789-799 (in Chinese))
- [5] 樊禹江,王社良,于洋,等.性能增强再生混凝土梁受弯性能试验研究[J].实验力学,2013,28(3):390-402 (FAN Yujiang, WANG Sheliang, YU Yang, et al. Flexural performance experimental study on the enhanced performance recycled concrete beams [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):390-402 (in Chinese))
- [6] 樊禹江,余滨杉,苗晓瑜,等.T形RAC短肢剪力墙抗震性能试验与极限承载力分析[J].实验力学,2016,31(3):332-340 (FAN Yujiang, YU Binshan, MIAO Xiaoyu, et al. Experimental study on seismic performance test and ultimate bearing capacity analysis for T-shaped RAC short-leg shear wall [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(3):332-340 (in Chinese))
- [7] Park Y J, Ang H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structure

- Engineering, ASCE, 1985, 111(4):722—739.
- [8] Kunnath S K, Reinhorn A M, Park Y J. Analytical modeling of inelastic seismic response of RC structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(4):996—1017.
- [9] GB/T17742—2008. 中国地震烈度表[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008 (GB/T17742—2008. China earthquake intensity table[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese))
- [10] Reinhorn A M, Kunnath S K, Mander J B. Seismic design of structures for damage control, nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings[M]. Elsevier Applied Science, 1992:63—76.
- [11] 樊禹江, 王社良, 杜园芳, 等. 改进的 Park-Ang 再生混凝土柱地震破坏模型的试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(6):770—776 (FAN Yujiang, WANG Sheliang, YU Yang, et al. Experimental study of seismic damage with an improved Park-Ang model for RAC columns[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(6):770—776 (in Chinese))
- [12] 牛荻涛, 任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 1996(16):44—54 (NIU Ditao, REN Lijie. A modified seismic damage model with double variables for reinforced concrete structures [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996(16):44—54 (in Chinese))
- [13] 傅剑平, 王敏, 白绍良. 对于钢筋混凝土结构的 Park-Ang 双参数破坏准则的识别和修正[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5):75—81 (FU Jianping, WANG Min, BAI Shaoliang. Identification and modification of the Park-Ang criterion for failure of RC structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(5):75—81 (in Chinese))
- [14] GB/T50081—2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T50081—2002. Standard test method for mechanical properties of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese))

Study on Modified Park-Ang seismic damage model for interior joints of enhanced recycled aggregate concrete frame

FAN Yu-jiang¹, YU Bin-shan², LU Yuan-long³, WU Qiang-feng³, SUN Ke-qing¹

(1. Chang'an University, School of Architecture, Xi'an 710061, Shannxi, China; 2. Northwestern Polytechnical University School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Xi'an 710072, Shannxi, China; 3. Xi'an University of Architecture and Technology, School of Civil Engineering, Xi'an 710065, Shannxi, China)

Abstract: Three full-featured reinforced interior joints of enhanced recycled aggregate concrete (EC-RAC) frame were considered in the low-cyclic loading test. The evolution process of seismic damage was studied, in which actual damage state and damage index were also determined. Meanwhile, a modified Park-Ang dual-parameter damage model was proposed, since the traditional model could not accurately describe the damage evolution and cumulative behavior of the EC-RAC frame joints after loading displacement greater than 100mm. The coefficients of fiber term, displacement term and energy term were fitted based on the above test results. Finally, taking HF-RAC2 as an example, the error of the damage index was analyzed based on the developed model. The results show that the average error is within 6%, which means the damage model can be applied to the EC-RAC frame joints for seismic damage and evaluation analysis.

Keywords: enhanced recycled aggregate concrete (EC-RAC); frame interior joint; damage model; error analysis

文章编号: 1001-4888(2020)01-0167-07

微型无人机和鸟体撞击飞机风挡玻璃对比实验^{*}

郭亚周, 刘小川, 郭军, 王亚锋, 王计真

(中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室, 陕西西安 710065)

摘要: 微型无人机呈现爆炸式增长, 对民航飞机造成了极大的安全威胁。为探索微型无人机与鸟体对飞机结构碰撞损伤的差异性, 本文开展市场上常见的消费级微小型无人机和等重鸟体对飞机风挡撞击的对比性实验。实验采用空气炮法, 利用高速摄像观察两者撞击过程并测算撞击速度, 对比实验后风挡损伤面积。研究表明, 等质量鸟体和微型无人机在同等冲击速度下, 由于无人机和鸟体组织构成不同, 微型无人机的穿透力大于鸟体穿透力, 速度衰减小于鸟体速度衰减, 对风挡造成的损伤面积小于鸟体的损伤面积。所以微型无人机更容易穿透风挡对舱内人员和内部设施造成损伤, 具备更大的破坏力。

关键词: 微型无人机; 鸟体; 飞机风挡; 撞击实验; 剩余速度; 损伤面积

中图分类号: V215.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-111

0 引言

随着无人机在工业领域的加速推广及消费领域的需求爆发, 近年来相关产业得到迅猛发展, 据预测, 2025 年全球无人机产品销售和服务市场规模将达到 821 亿美元^[1,2]。无人机数量的急剧增加对现有航空业构成了潜在安全威胁。2016 年 4 月 17 日, 英航一架空客 A320 客机在降落前遭到无人机撞击, 成为全球首例客机与无人机相撞事件, 这次事件引起了人们对无人机安全问题的广泛关注^[3]。

微型无人机重量、飞行高度与鸟类类似, 但是飞行速度和材料硬度却远超鸟类, 因此从理论上来看, 微型无人机极有可能对适航飞机造成比鸟类更严重的撞击危害。过去几十年来, 鸟体撞击飞机的实验和计算备受关注, 针对鸟撞威胁, 国内外在适航条例中都做出了相关规定^[4-6], 其中有不少学者基于空气炮法相继开展了飞机风挡的鸟撞实验与评估^[7-9]。针对无人机可能造成的严重威胁, 虽然各航空强国都在相关条例中做出了规定: FAA 出台了关于小型无人机法规(第 107 部分), 对无人机的重量、速度、最大飞行高度、飞行员操作飞行条件进行明确的规定; 我国民用航空局制定的《轻小无人机运行规定》(试行)中也有类似规定^[10,11], 但是站在力学角度对微型无人机碰撞安全性能研究仍然较少。

无人机安全问题越来越受到各国政府和学者的重视。2017 年 11 月 28 日, FAA 在其官网上发布了“无人机系统空中撞击严重性评估最终报告”^[12], 该报告对无人机和民航客机的碰撞场景进行了数值模拟和部分部件实验, 并基于数值模拟结果给出了无人机对客机撞击的损伤等级评估, 结果表明同等质量和速度情况下, 无人机撞击破坏力显著高于鸟体。美国 Virginia Tech 大学研究团队^[13,14]通过数值模拟方法对发动机吸入无人机过程进行研究, 结果表明, 发动机叶片受到无人机撞击与同等重量的鸟撞相比会产生更严重的损伤。目前国内对无人机的研究多集中于适航规定剪裁和无人机自主安全控制上^[15-17], 而针对无人机无法闪避的硬性碰撞安全性问题研究较少, 刘继军^[18]等对无人机撞击飞机风挡

^{*} 收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-06-24

基金项目: 航空科学基金(2016ZA23005)资助

通讯作者: 刘小川(1983-), 男, 博士, 副总工程师, 主要研究领域: 航空结构冲击动力学。Email: 48950166@qq.com