

文章编号: 1001-4888(2013)06-0770-07

改进的 Park-Ang 再生混凝土柱 地震破坏模型的试验研究^{*}

樊禹江¹, 王社良¹, 余滨杉¹, 张博²

(1. 西安建筑科技大学, 陕西西安 710055; 2. 西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过对不同配比的 6 根再生混凝土(RAC)柱进行低周反复加载试验。由于现有普通混凝土结构地震破坏损伤模型均为基于普通混凝土结构所构建的, 是否适用于 RAC 结构的地震损伤破坏计算仍不明确; 为能够有效考虑 RAC 中再生骨料取代率及混杂纤维掺量等因素所造成的普通混凝土结构地震破坏损伤模型中循环荷载系数 β 的不确定性及其对损伤指数计算结果的影响, 同时提高计算模型的预见性与可靠性, 本文提出了一种适用于 RAC 结构的改进的双参数损伤模型。通过模型的计算结果与实际结构各震害破坏度 D_c 的对比, 确定了适用于 RAC 结构的双参数损伤模型中循环荷载系数 β 的值。

关键词: 再生混凝土柱; 低周反复加载试验; 双参数损伤模型; 破坏度 D_c ; 循环荷载系数 β

中图分类号: TU528.58 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-12-143

0 引言

随着我国城镇化改造和城市群建设步伐的加快, 大量建筑垃圾应运而生。利用建筑垃圾制备新型再生混凝土(简称 RAC)的社会需求逐年增加^[1-2]。与此同时, 如废旧轮胎等存在大量可利用子午线钢纤维和尼龙纤维, 将其掺入普通 RAC 中能够有效地进行性能增强^[3-4]。目前国内外学者更偏重于 RAC 材料的基本力学性能^[5]及基本构件性能^[6]的研究, 而对于如何评价 RAC 结构在地震作用下的损伤程度研究较少。本文在 Park 和 Ang^[7]提出的规格化双参数地震损伤模型的基础上, 设计并制作了 6 根不同配比的再生混凝土柱, 基于其低周反复荷载作用下的试验结果, 同时为有效考虑 RAC 中再生骨料取代率及混杂纤维掺量等因素对于普通混凝土结构地震破坏损伤模型中循环荷载系数 β 的影响, 提出了一种改进的双参数地震损伤模型。最后通过模型的计算结果与实际结构各震害破坏度 D_c 的对比, 确定了适用于 RAC 柱双参数损伤模型中循环荷载系数 β 。

1 钢筋混凝土结构双参数损伤模型

1.1 Park-Ang 双参数损伤模型

1985 年 Park 和 Ang^[7]基于一大批美国和日本的钢筋混凝土梁柱试验结果, 提出了钢筋混凝土构件的双参数地震损伤模型, 采用了规格化最大位移和规格化滞回耗能线性组合的损伤评估表达式:

^{*} 收稿日期: 2012-10-23; 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51178388, 51008245, 51108035); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(11JS059, 12JS055), 陕西省重点实验室访问学者项目(12JS055)

通讯作者: 樊禹江(1987—), 男, 博士, 主要研究方向为混凝土结构基本理论, 新型材料及其在结构振动控制中的应用。E-mail: fanyujiangchd@163.com

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_f} + \beta \frac{E_h}{F_y \times \delta_f} \tag{1}$$

式中, δ_m 指构件或结构的最大变形; δ_f 是构件在单调加载下的极限变形; E_h 是构件实际的累积滞变耗能; F_y 是构件的屈服剪力; β 是构件的循环荷载系数。

但该模型在边界条件上存在一些缺陷, Kunnath 等人^[8]于 1990 年提出了修正的 Park-Ang 模型:

$$D = \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_f - \delta_y} + \beta \frac{E_h}{F_y \times \delta_f} \tag{2}$$

该模型在 Park-Ang 模型的基础上以超过屈服点的变形和滞回耗能双参数定义损伤指数, 不但纠正了原模型边界条件上的一些缺陷, 而且使其物理意义更加合理。

1.2 改进的双参数损伤模型

上述模型是基于普通混凝土结构获得的, 是否适合于 RAC 结构的地震损伤破坏仍不明确; 为能够有效降低 RAC 中再生骨料取代率及混杂纤维掺量所造成的循环荷载系数 β 的不确定性及其对损伤指数计算结果的影响, 使模型的可预见性与可靠性得到提高, 同时使模型的通用性及参数易于确定, 本文提出了如下改进的双参数损伤模型:

$$D = (1 - \beta) \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_f - \delta_y} + \beta \left(\frac{E_h}{F_y \times \delta_f} \right)^\beta \tag{3}$$

2 实际结构的地震破坏度

破坏度指数用于评价结构或构件遭受地震作用后的破坏状态, 其取值在 0~1 之间变化并对应于结构或构件的破坏状态。根据《中国地震烈度表》(2008)^[9]中给出的平均震害指数及文献[10]中地震危险性 & 危害性分析可得各震害破坏度 D_c 的界限值^[11], 如表 1 所示。

表 1 实际震害破坏度

Tab. 1 Actual seismic damaged degrees

破坏程度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
破坏度 D_c	0~0.20	0.20~0.40	0.40~0.65	0.65~0.90	≥ 0.90

本文令试件在试验过程中的计算损伤指数 D 与按实际工程破坏度 D_c 相等, 利用 MATLAB 编程进行复杂指数方程的求解, 从而确定了适用于 RAC 柱的循环荷载系数 β , 使其能够对实际工程进行有效地指导。

3 试验概况

3.1 试件概况

对于 RAC 柱试件, 以后续三层再生混凝土框架为原型, 中柱为研究对象, 进行了缩尺比例为 1:2 的模型缩尺设计。制作完成了 6 根不同配比的再生混凝土柱, 并进行了低周反复作用下的抗震性能试验研究。

再生混凝土柱试件的工况组合如表 2 所示。6 根 RAC 柱试件均为 250mm×250mm 的方柱试件, 总高度 2.15m, 柱身高度 1.65m, 底梁起固定作用, 柱试件几何尺寸如图 1 所示。

对该 6 根柱试件在现场浇筑时, 分别留置相应 100mm×100mm×100mm、100mm×100mm×300mm 和 100mm×100mm×400mm 的立方体棱柱体和抗折试块, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[12]进行力学性能试验, 其中立方体抗压强度、棱柱体抗压强度和抗折强度如表 3 所示。

表 2 柱工况组合表
Tab. 2 Condition combination table for columns

因素	取代率 $R(\%)$	配筋率 $\rho_i(\%)$	轴压比 λ	体积配箍率 $\rho_w(\%)$	再生混杂纤维 $H_f(\%)$
C-1	30	1.624	0.22	0.628	0
C-2	50	1.624	0.22	0.628	0
C-3	100	1.624	0.22	0.628	0
C-9	30	1.624	0.22	0.628	0.3
C-10	30	1.624	0.22	0.628	0.5
C-11	30	1.624	0.22	0.628	1.0

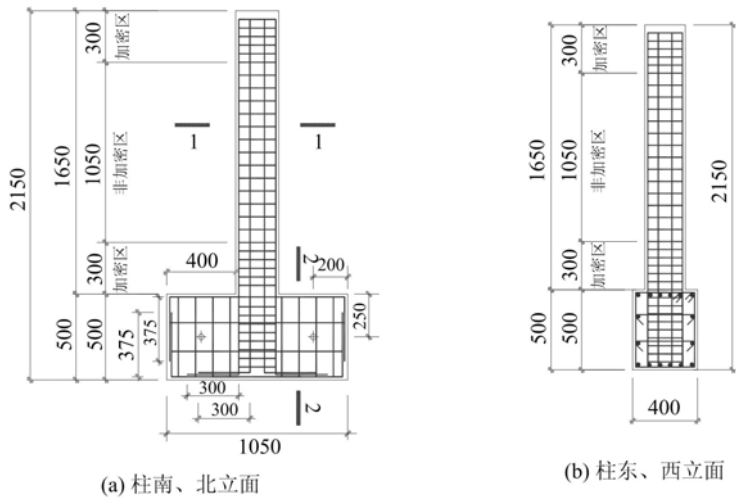


图 1 柱试件配筋
Fig. 1 Reinforcement of column specimens

表 3 再生混凝土力学性能指标
Tab. 3 Mechanical performance of recycled concrete

因素	立方体抗压强度 (MPa)	棱柱体抗压强度 (MPa)	弹性模量 ($\times 10^4$ MPa)
C-1	34.7	31.4	4.09
C-2	33.9	29.6	3.59
C-3	32.7	27.0	3.24
C-9	36.5	26.5	3.06
C-10	40.5	29.0	4.02
C-11	39.7	26.8	3.77

3.2 加载装置

RAC 柱低周反复试验于西安建筑科技大学教育部结构重点实验室进行,竖向荷载通过带有水平滚轴的液压千斤顶施加,水平荷载通过固定在反力墙上的 MTS 水平作动器进行水平加载。加载装置如图 2 所示。

3.3 试验现象

(1) 不同再生骨料取代率柱的破坏

如表 2 所示,柱 C-1、C-2 和 C-3 分别表示再生骨料取代率为 30%、50%和 100%。柱最终的破坏如

图 3 所示。

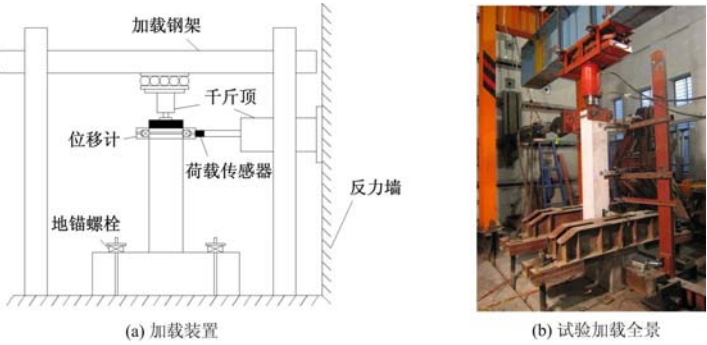


图 2 RAC 柱试件加载

Fig. 2 Loaded RAC column specimens

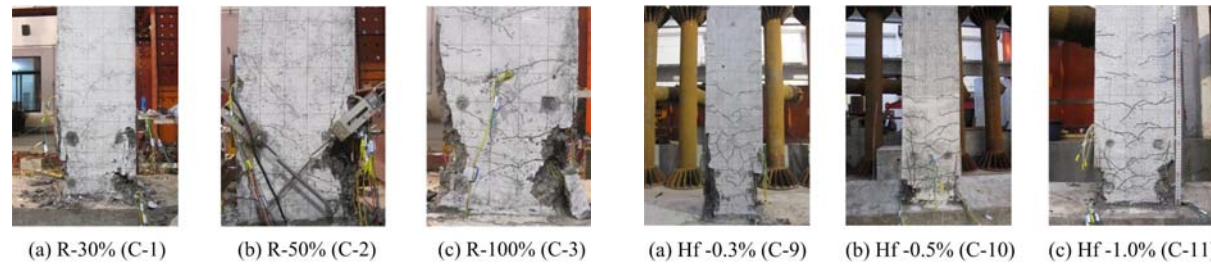


图 3 不同再生骨料取代率柱的破坏

Fig. 3 Destruction of the column with different recycled aggregate rate

图 4 不同混杂纤维掺量柱的破坏

Fig. 4 Destruction of the column with different mixed fiber contents

(2) 不同混杂纤维掺量柱的破坏

如表 2 所示,柱 C-9、C-10 和 C-11 分别表示混杂纤维掺量为 0.3%、0.5% 和 1.0%。柱最终的破坏如图 4 所示。

4 主要试验结果

(1) 滞回曲线

典型的试件荷载一位移滞回曲线如图 5 所示,图 5(a)为再生骨料取代率 50% C-2 柱,图 5(b)为混杂纤维掺量 0.5% C-10 柱。

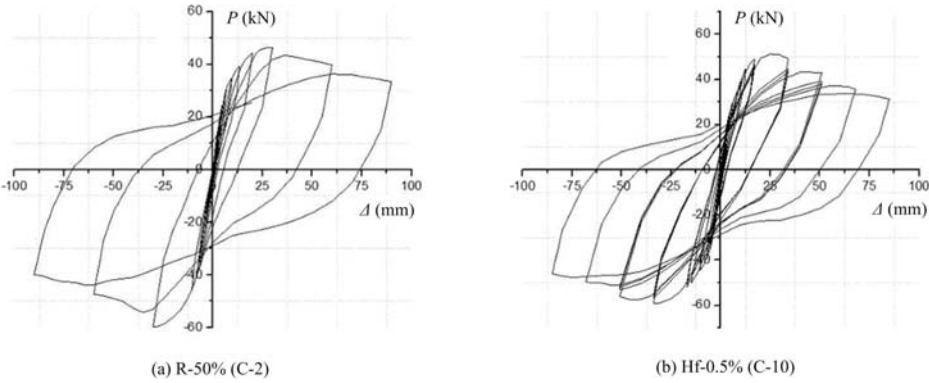


图 5 荷载一位移滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curve of load-displacement

(2) RAC 柱低周反复试验各特征值

表 4 为 RAC 柱特征位移,表 5 为柱特征荷载及滞回曲线累计耗能。

表 4 RAC 柱特征位移(单位:mm)

Tab. 4 Characteristics displacement of RAC column(unit: mm)

柱号	正向				负向				$\mu=\Delta u/\Delta y$
	Δ_{cr+}	Δ_{y+}	Δ_{m+}	Δ_{u+}	Δ_{cr-}	Δ_{y-}	Δ_{m-}	Δ_{u-}	
C-1	3.08	12.99	25.98	59.99	3.92	11.02	30.04	60.02	4.996
C-2	3.49	13.49	29.99	59.97	6.01	10.04	30.03	60.02	5.098
C-3	2.99	12.47	33.99	69.98	4.02	21.03	30.01	70.02	5.613
C-9	7.30	12.01	39.99	59.99	5.16	12.52	40.03	60.01	4.890
C-10	4.20	12.50	34.01	50.99	5.49	10.51	34.01	67.99	5.169
C-11	4.32	10.01	31.99	48.02	3.48	11.00	32.03	64.01	5.330

注: Δ_{cr} 、 Δ_y 、 Δ_m 、 Δ_u 分别为 RAC 柱开裂、屈服、最大、极限位移。

表 5 RAC 柱特征荷载(kN)及滞回曲线累计耗能(kN·mm)

Tab. 5 Characteristics load of RAC column (kN) and cumulative energy consumption of hysteresis curve (kN·mm)

柱号	正向				负向				滞回曲线 累计耗能
	P_{cr+}	P_{y+}	P_{m+}	P_{u+}	P_{cr-}	P_{y-}	P_{m-}	P_{u-}	
C-1	19.86	39.81	45.29	37.08	24.96	40.08	54.47	48.47	15995.6462
C-2	19.94	39.54	46.26	39.89	30.51	39.83	59.64	47.30	16893.6471
C-3	19.75	49.97	56.16	41.93	25.09	49.43	54.28	49.94	20444.7736
C-9	24.79	40.77	46.71	38.35	24.94	40.02	51.49	45.53	25894.4429
C-10	24.71	44.72	49.22	42.91	35.51	44.72	59.29	49.62	30931.9498
C-11	24.83	44.96	54.43	47.89	25.24	45.47	53.95	47.78	36415.7273

注: P_{cr} 、 P_y 、 P_m 、 P_u 分别为 RAC 柱开裂、屈服、最大、极限荷载。

5 循环荷载系数 β 的确定

令试件在试验过程中的计算损伤指数 D 与按实际工程破损度 D_c 相等,利用 Matlab 对该指数方程进行求解,所得循环荷载系数 β 如表 6 所示。

表 6 循环荷载系数 β

Tab. 6 Cyclic loading coefficient β

D_c 柱号	0.50	0.75	0.90
C-1	0.1622	0.2944	0.3511
C-2	0.1325	0.2769	0.3360
C-3	0.1913	0.3165	0.37240
C-9	0.1552	0.1786	0.2552
C-10	0.1474	0.2231	0.2820
C-11	0.1424	0.2140	0.2702

由表 6 可见,按本文提出的双线性损伤模型计算的循环荷载系数 β ,离散程度较小且便于计算,既能够有效地在损伤破坏模型中考虑再生骨料取代率及混杂纤维掺量对循环荷载系数的影响,又能为实际工程提供必要的参考。对上述数据进行分析可得循环荷载系数 $\beta=0.13298$ 。

故此,适用于 RAC 柱的改进双参数损伤模型为:

$$D = 0.86702 \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_f - \delta_y} + 0.13298 \left(\frac{E_h}{F_y \times \delta_f} \right)^{0.13298} \quad (4)$$

6 结论

本文在分析现有的几种双参数损伤模型的基础上,结合不同配比的 6 根再生混凝土(RAC)柱低周反复试验结果,提出了一种适合于 RAC 柱的双参数损伤模型。通过模型损伤破坏指数的计算结果与实际结构各震害破坏度 D_c 的对比,确定了适合的循环荷载系数 β ,为 RAC 结构震后评估与可靠性分析提供了较为有效的依据。主要结论如下:

(1) 随着再生粗骨料取代率的增加,框架柱滞回面积增大,即再生粗骨料的取代率越大,框架柱的耗能能力越强,延性越好。

(2) 混杂纤维的掺入使再生混凝土各组份间能够更加稳定的协同工作,使得结构耗能能力增强,同时具有良好的延性。

(3) 利用 Matlab 软件进行了考虑再生骨料取代率、混杂纤维掺量等因素的改进双参数损伤模型的求解,确定了循环荷载系数 $\beta=0.13298$,进而确定了适用于 RAC 柱的双参数地震损伤模型。

为 RAC 柱地震损伤评估提供了有效参考,但限于所制作 RAC 柱数量及试验条件的不足,文中所确定的循环荷载系数 β 仍需进一步改善。

参考文献:

- [1] 肖建庄,李佳彬,孙振平等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报, 2004(32):1558—1561(XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, SUN Zhen-ping, et al. Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Tongji University, 2004, (32)1558—1561(in Chinese))
- [2] 肖建庄,兰阳. 再生粗骨料混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 特种结构, 2006, 23(1):9—12 (XIAO Jian-zhuang, Lan Yang. Study on flexural behavior of Recycled Aggregate Concrete beam[J]. Special Structures, 2006, 23(1): 9—12(in Chinese))
- [3] 史宇. 钢纤维再生混凝土抗冲击性能的试验研究[J]. 科技资讯, 2012(07):39—42 (Shi Yu. Impact resistance test on Steel fiber recycled concret[J]. Science & Technology Information, 2012(07): 39—42(in Chinese))
- [4] 马石城,唐昭青,李晓全,刘小根. 聚丙烯纤维和硅粉对再生混凝土的强化试验研究[J]. 混凝土, 2006(11):36—38 (MA Shi-cheng, TANG Zhao-qing, LI Xiao-quan, LIU Xiao-gen. Intensified test research on the influence of polypropylene fiber & silica fume on recycled concrete[J]. Concrete, 2006(11):36—38(in Chinese))
- [5] 曹万林,张亚齐. 再生混凝土结构抗震性能研究进展[C]. 首届全国再生混凝土研究和应用学术交流会, 2008: 117—124 (CAO Wanlin, ZHANG Yaqi. Research Advances on seismic behavior of recycled concrete structure [C]. First national of recycled concrete research and application of academic exchange, 2008: 117—124 (in Chinese))
- [6] Yamasaki Jujji, Tatematsu, Kazuhiko. Strength and freeze-thaw resistance properties of concrete using high-quality recycled aggregate [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, 20:45—52.
- [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] 《中国地震烈度表》(GB/T17742—2008)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008 (《Chinese Seismic Intensity Scale》(GB/T17742—2008)[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008(in Chinese))
- [10] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 2006 (Hu Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006(in Chinese))
- [11] 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(4):44—54 (Niu Ditao, Ren Lijie. A Modified Seismic Damage Model with Double Variables for Reinforced Concrete Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(4):44—54(in Chinese))

- [12] GB/T 50081—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/T 50081—2002. Ordinary concrete mechanics performance test method standard[S]. Beijing:China Building Industry Press, 2003(in Chinese))

Experimental Study of Seismic Damage Model for Improved Park-Ang RAC Columns

FAN Yu-jiang¹, WANG She-liang¹, YU Binshan¹, ZHANG Bo²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Northwest A& F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Low-cyclic loading tests for six recycled aggregate concrete (RAC) columns with different proportions were carried out. Since the existing earthquake damage models are established based on ordinary concrete structure, so its applicability for RAC structure is still not clear. In this paper, an improved two-parameter damage model for RAC structures is proposed, which effectively takes into account the cyclic loading coefficient β uncertainty due to recycled aggregate replacement rate, hybrid fiber content and other factors. Meanwhile, the predictability and reliability for the calculation model is improved. Comparison between the calculated results of improved model and damaged degrees D_c for actual earthquake damage structures, the cyclic loading coefficient β suitable for RAC columns in above mentioned improved model is finally determined.

Keywords: recycled aggregate concrete (RAC) column; low-cyclic loading test; two-parameter damage model; damage degree D_c ; cyclic loading coefficient β