

阎慧群,王清远,熊峰.再生钢筋混凝土柱疲劳性能多尺度研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1488-1492.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.09.1488

YAN Huiqun, WANG Qingyuan, XIONG Feng. Multi-scale Analysis of the Fatigue Behavior of Recycled Aggregate-Reinforced Concrete Columns[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1488-1492. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.09.1488

再生钢筋混凝土柱疲劳性能多尺度研究

阎慧群^{1,2}, 王清远¹, 熊峰¹

(1. 四川大学建筑与环境学院深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 工业固态废弃物土木工程综合开发利用, 四川省高校重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 再生混凝土是一种绿色、可循环建筑材料。当其用于结构构件时,可能会因遭受荷载作用而发生疲劳现象。因此,针对不同再生骨料掺合比(0%, 50%, 100%)的再生钢筋混凝土试件进行疲劳强度试验,通过多尺度(微观和宏观)观察并分析试件,分析受轴心和偏心疲劳荷载作用下不同掺合比的再生钢筋混凝土试件疲劳性能差异。此试验方法和数据结果可为研究、分析其在工程中的运用提供基础依据。

关键词: 再生钢筋混凝土; 疲劳; 多尺度分析; 轴向受压; 偏心受压

中图分类号: TU375.1; TU317+.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1488-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1488

Multi-scale Analysis of the Fatigue Behavior of Recycled Aggregate-Reinforced Concrete Columns

YAN Huiqun^{1,2}, WANG Qingyuan¹, XIONG Feng¹

(1. MOE Key Laboratory of Deep Earth and Engineering, College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Higher Education Institutions for Comprehensive Development and Utilization of Industrial Solid Waste in Civil Engineering, Panzhihua 617000, China)

Abstract: In line with efforts to implement sustainable development, recycled concrete made from recycled concrete aggregates could be an ideal solution to preserve resources and the environment. The fatigue behavior of recycled concrete differs from that of other types of concrete on account of the different properties of recycled concrete aggregates. Therefore, using experimental research, the fatigue behavior and multi-scale analysis of recycled concrete are studied in this paper. The present paper investigates the fatigue behavior of the axial and eccentric compression performance of recycled aggregate-reinforced concrete specimens containing 0%, 50%, and 100% recycled aggregates. Then, multi-scale (micro-structural and macro-structural) observations of the specimens are obtained. Analysis of the experiment results reveals the feasibility of applying recycled concrete to practical engineering.

Keywords: recycled reinforced concrete; fatigue; multi-scale analysis; axial compression; eccentric compression

收稿日期: 2018-05-01

基金项目: “工业固态废弃物土木工程综合开发利用”四川省高校重点实验室基金项目(SC_FQWLY-2019-Z-04); 四川大学深地科学与工程教育部重点实验室 2017 年开放基金(DUSE 201703)

第一作者简介: 阎慧群(1976-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为装配式钢结构、再生混凝土材料性能。E-mail: yhq_aria@163.com。

0 引言

人类文明发展建设中,钢筋混凝土是不可缺少的物质基础,在人们的生活、工作及生产过程中起着非常重要的作用。然而随着人类文明的不断前进,每年有大量的建筑废弃物产生。特别是突如其来的“5·12 汶川地震”和“4·20 雅安地震”摧毁了大量的房屋,瞬间产生了巨量的建筑垃圾。如何能更有效地处理并利用这些废弃物,是我们面临的难题。为有效保护环境和资源,低碳的新型建筑材料——再生混凝土越来越受到关注。它是一种绿色材料,并可以循环再生使用,能有效的保护资源和环境。因此,再生混凝土的性能和技术研究是有可持续发展的重要意义。

建筑工程中,结构、构件除承受静力荷载作用外,还会受到很多种可能会引发结构、构件发生疲劳失效的反复荷载作用。所以,致使其除了受常规静态作用发生静态变形或失效外,还不可避免的受到疲劳作用而发生疲劳失效现象。为此,国内外的研究机构和研究学者^[1-6]针对混凝土材料疲劳特性这方面的问题进行了广泛的研究和探索。然而再生混凝土作为工程材料应用到实际工程时,亦有可能遭受到反复作用(疲劳作用)的影响。但目前对再生混凝土材料的疲劳性能研究还相对较少。本文以此为切入点进行研究,对不同再生骨料掺合比(0%,50%,100%)的再生钢筋混凝土短柱试件进行了正弦等幅荷载力的疲劳强度试验。考虑实际受荷时荷载加载位置(轴心、偏心)的不同,分析不同类型试件在轴向和偏心两种作用下表现出的不同疲劳性能,为日后再生骨料混凝土的工程应用提供参考依据。

1 疲劳试验

1.1 试验材料

试件配制时粗骨料分别为碎石(图 1)和来自

“5·12”后都江堰的废弃建渣制成的再生骨料(图 2)。粗骨料粒径为 5~31.5 mm。试件的再生骨料掺合比分别为 0%、50%、100%。通过对再生骨料的物理性能分析发现,再生粗骨料粒径主要为 5~15 mm 和 15~31.5 mm,当 5~15 mm 和 15~31.5 mm 的用量比值为 3:2 时,可以达到最大堆积密度。所以,试验中采用了这个比值进行混凝土配置。水泥:砂:石=1:1.623:3.149, $W/C=0.51$ 。水泥采用 325# 普通硅酸盐水泥,细骨料采用中砂(最大粒径为 2.36 mm)。试件为钢筋混凝土短柱,横断面正方形,边长 250 mm,高 500 mm,内部配有 4 根直径 12 mm HRB335 级的纵筋,直径 6 mm 间距 150 mm 的 HPB235 级箍筋。混凝土等级 C20^[7]。依据试件再生骨料掺合比的不同,试件分别用 A、B、C 表示掺合比为 0%、50%、100% 的 3 类。表 1 为试件用量表。



图 1 天然粗骨料

Fig.1 Natural coarse aggregate

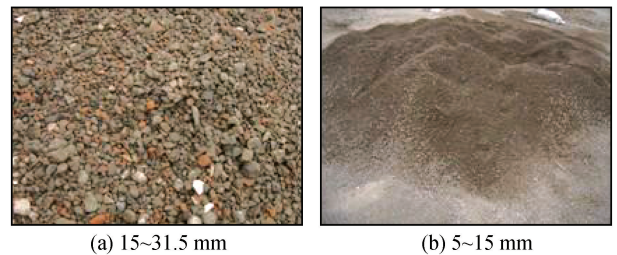


图 2 再生粗骨料

Fig.2 Recycled coarse aggregate

表 1 试件用量

Table 1 Content of specimens

试件 编号	再生骨料 掺合比/%	用量/(kg·m ⁻³)					
		水	水泥	中砂	碎石	再生骨料	
						5~15 mm	15~31.5 mm
A	0	195	382	620	1 203	0	0
B	50	195	382	620	602	362	241
C	100	195	382	620	0	722	482

为了在试验过程中观测试件的位移变化情况,本次试验选用型号为 D*120-5AA 的纸基应变片(具体数据为:电阻值 $119.8 \pm 0.1 \Omega$;灵敏度系数 $2.08 \pm$

0.1% ;栅长与栅宽为 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$)粘贴在纵向钢筋方向,分布在对侧纵筋上,具体位置在柱底和柱 1/4、1/2 和 3/4 处,一个试件共计 8 个测点,如图 3 所示。



图 3 实扎钢筋笼应变片示意

Fig.3 Strain gauges tied on the reinforcement cage

1.2 实验步骤和方法

本次试验设备采用日本岛津公司生产的 4890 疲劳试验机——EHF-UM/UV 系列电液伺服疲劳试验机 (EHF-UM/UV servo-fatigue experimental machine), 如图 4 示。试件标准养护后进行疲劳试验, 荷载的施加位置为轴心和偏心 ($e=65\text{ mm}$) 如图 5 所示。

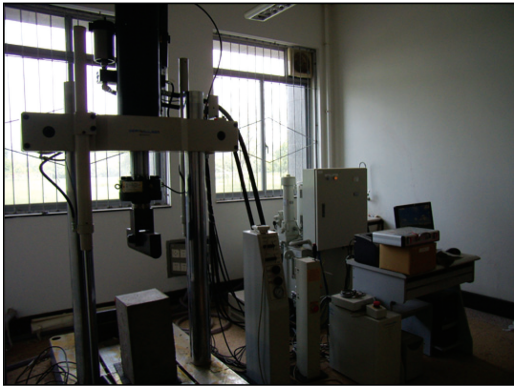
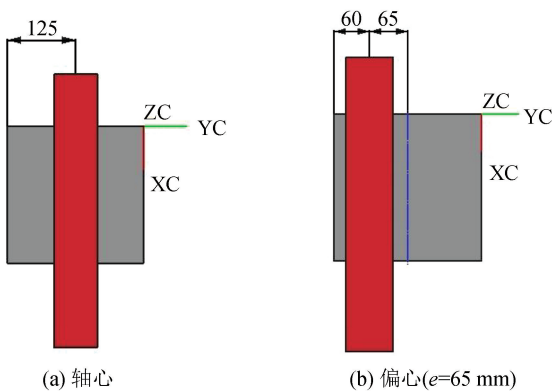


图 4 疲劳试验机

Fig.4 Fatigue test machine



(a) 轴心

(b) 偏心($e=65\text{ mm}$)

图 5 试件加载位置示意

Fig.5 Loading position of specimens

试验加载过程为: 首先进行静力试验, 静态荷载每次以同一荷载步 (30 kN) 完成 $0\sim 150\text{ kN}$ 施加并进行反向卸载的这样一个加卸载循环, 以加载速率 5 kN/s 控制, 每级加卸载稳载 30 s , 并进行应变片数据采集; 接着进行疲劳试验, 疲劳荷载采用常幅正弦波荷载, 试验机加载频率为 5 Hz , 疲劳荷载幅为 $110\sim 190\text{ kN}$ 。每 5 万次采集一次动荷载数据, 每隔 30 万次停机做一次静力试验, 测一次静力数据, 再进行疲劳加载直至破坏, 并记录疲劳破坏周期。

2 结果和分析

2.1 宏观

2.1.1 轴心荷载疲劳试验

试验初期, 静载加载过程中试件没有明显的变化, 试件保持原始形态, 整个静载环节试件完好。但当其受到疲劳荷载施加至 3×10^5 周次左右时产生裂缝, 试件裂缝始于试件底部、试件与试验机压头接触位置。试件底部角区有纵向和横向小裂缝但基本上不扩展, 并伴随着由于挤压造成的混凝土酥皮和破碎; 压头接触面出现纵向裂缝。在经历了第一次静载和疲劳加载后, 试件出现小裂缝, 在后期循环静载、疲劳加载过程期间, 裂缝发展很小, 试件没有大的破坏, 无论是底部角区还是压头接触面均只是少量的已有裂缝的扩展和延展 (图 6)。因此轴向疲劳抗压强度相对较好, 各类试件在经历了疲劳循环周次达到 10^7 后仍然未发生试件破坏。



图 6 轴心疲劳荷载作用下的裂缝

Fig.6 Cracks under axial fatigue load

2.1.2 偏心荷载疲劳试验

偏心的破坏过程比较明显。试验初期, 第一次静载加载过程中试件就已出现少量细裂缝, 但裂缝随着力的施加扩展很慢。试件裂缝主要始于试件与试验机压头的接触位置, 极个别在试件底部, 有少量混凝土剥落, 试件无破坏、完好。当其受到第一次疲劳荷载施加时, 前述位置处的细微裂缝逐渐

增多、扩展、汇集、贯通,特别是压头接触面处纵向裂缝表现明显。大致来说在相对比较低的周次下,试件因纵向裂缝的汇集、贯通而致使试件破坏,破坏时还伴随着“轰”的巨响,试件破坏比较突然,无预见性(图7)。破坏时,试件中纵向钢筋外偏和箍筋外扩

并且弯曲。

2.2 微观

采用扫描电镜(SEM)对偏心疲劳试验后的试件残余部分进行微观机理和形貌试验研究。图8显示了B类试件偏心疲劳试验中一些细小裂缝生成并逐渐扩展成相对宽度的主裂缝,最后试件的破坏就是沿着这条主裂缝破坏。裂缝的产生及扩展面基本上都集中在骨料表面及砂浆内部,骨料本身极少破坏。如图9(b)所示,破坏界面处骨料表面的微观晶型与(a)图所示砂浆的情况基本相似。



图7 偏心疲劳荷载作用下试件破坏

Fig.7 Failure of specimens under eccentric fatigue load

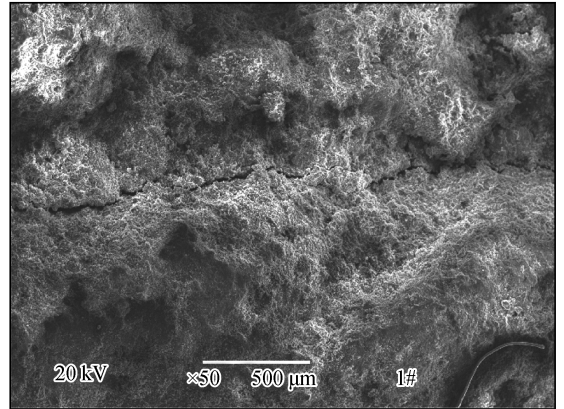
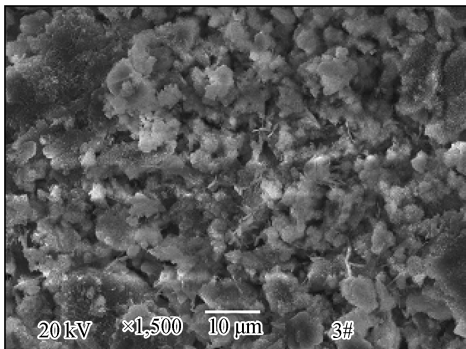
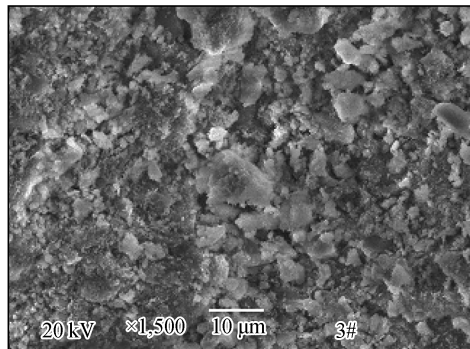


图8 微观显示主裂缝

Fig.8 Microscopic main crack



(a)



(b)

图9 为针对试件破坏面进行的微观分析

Fig.9 Microscopic analysis of failure surface of specimens

2.3 疲劳性能试验数据分析

2.3.1 轴心作用

图10为针对经历同一周次后,同一测点的实测应变与静载荷的图形示意。由图可知,A、B、C3种试件在静载作用下的应变变化有较明显的差异。同一测点的观察,B类的相对应变或变形较A、C两类较小,从而也说明B类的相对性能更优良。

2.3.2 偏心作用

试验中反映出偏心作用下,构件易发生突然的疲劳破坏现象。各类构件基本上在低周次就发生破

坏。那么,在静载作用下实测应变如图11所示,它以同一测点为研究点,比较各类在低周破坏的试件应变变化关系,可看出C类的应变相对最大,A类次之,B类最小,这也说明B类相对较好。

2.3.3 疲劳寿命

如前所述,已知在试验构件中,轴心作用的A、B、C3类再生构件,对于混凝土构件而言,轴向疲劳抗压强度相对较好,所以当3类试验构件疲劳循环周次达到 10^7 时均未发生破坏。

偏心作用的A、B、C3类再生构件各试样试验

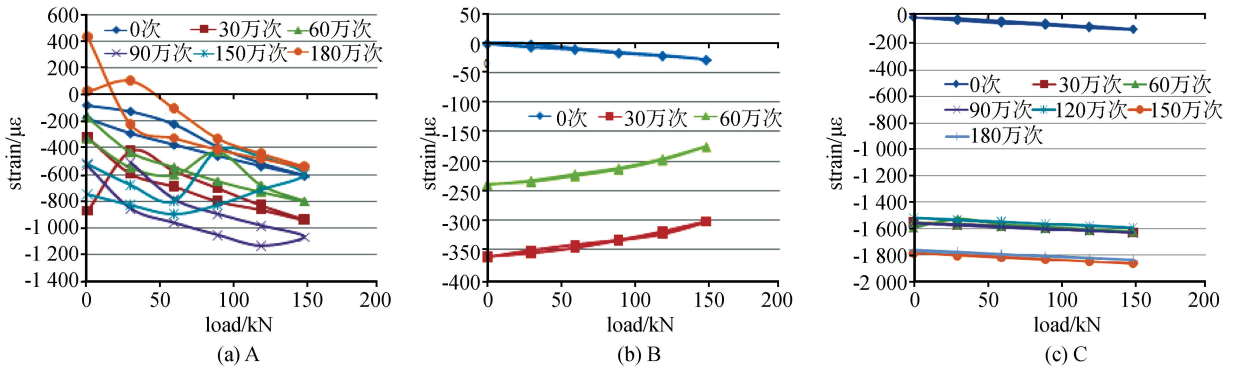


图10 轴心作用,实测应变与静载荷关系

Fig.10 Relationship between measured strain and static load under the axial action

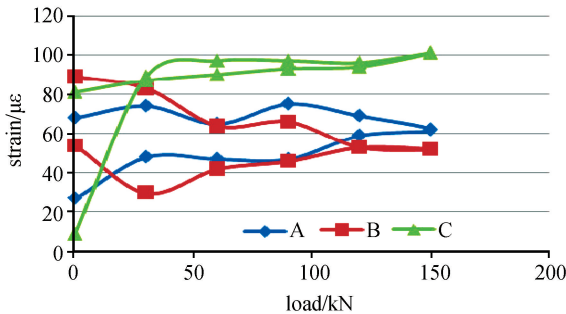


图11 偏心作用,实测应变与静载荷关系

Fig.11 Relationship between measured strain and static load under the eccentric action

研究,发现除极个别试样发生周次达 105 未发生破坏的现象外,其余各类试样均在低周次就发生了破坏。比如:A类大约在 91 周次,B类大约在 528 周次,C类大约在 51 周次破坏。分析后发现,B类试件的疲劳周期高于其他各类试件。即针对本实验样本,据试验结果分析可初步判断,当掺合比为 50% 的再生混凝土构件疲劳周期相对较长,那么其抗疲劳性能就相对优于其他掺合比的混凝土试件,甚至是天然混凝土试件。

3 结论

试验研究可知,对偏心和轴心的两种受力情况,A、B、C 3 类掺合比试件而言,疲劳破坏性能均发生类似的变化规律。不论是疲劳循环荷载还是静态荷载作用下,所有掺合比短柱试件的轴心受力性能优于同等情况下的偏心受力;

对于轴心作用下,疲劳循环作用周次均显著高于偏心作用;

对于相同荷载作用位置及加载方式,B类试件的性能均优于其他各类试件。因此说明,当掺合比为 50% 的再生混凝土构件的抗疲劳性能要优于其他掺合比的混凝土试件,甚至是天然混凝土试件。

由此可见,就试验研究结果分析,取代率为 50% 的再生混凝土试件的疲劳性能更为优良。

参考文献(References)

- [1] 肖建庄,袁彪,雷斌.再生粗集料性能试验与分析[J].粉煤灰,2007,19(1):14-16.
XIAO Jianzhuang, YUAN Biao, LEI Bin. Test and Analysis of Recycled Coarse Aggregate Performance[J]. Coal Ash China, 2007, 19(1): 14-16.
- [2] 邱慈长,王清远,赵晓,等.地震废弃混凝土再生粗骨料物理力学性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2011,37(2):187-191.
QIU Cichang, WANG Qingyuan, ZHAO Xiao, et al. Experiment Research on Physical and Mechanical Properties of Recycled Coarse Aggregate of Earthquake Waste Concrete[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(2): 187-191.
- [3] 肖建庄.再生混凝土材料与结构研究新进展[J].世界科学,2006,12:29-31.
XIAO Jianzhuang. Latest Research Progress of Recycled Concrete Materials and Structure[J]. World Science, 2006(12): 29-31.
- [4] 吴瑾,丁东方,张闻.再生骨料混凝土梁抗剪性能试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):83-86.
WU Jin, DING Dongfang, ZHANG Wen. Experimental Study on Shear Behaviour of Recycled Aggregate Concrete Beams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1): 83-86.
- [5] 林燕清,欧进萍.混凝土多级等幅疲劳的变形发展规律实验研究[J].哈尔滨建筑大学学报,1999,32(1):11-17.
LIN Yanqing, OU Jinping. Experimental Study on Fatigue Deformation of Plain Concrete under Multi-stage Constant Amplitude Loading[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(1): 11-17.
- [6] 李永强,车惠民.在等幅重复应力作用下混凝土弯曲疲劳性能研究[J].铁道学报,1999,21(2):76-79.
LI Yongqiang, CHE Huimin. Study on Fatigue of Plain Concrete under Constant Amplitude Flexural Cyclic Loading[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 76-79.
- [7] 阎慧群.建筑废弃物再生混凝土材料高温与疲劳性能研究[D].成都:四川大学,2011.
YAN Huiqun. High-temperature Fatigue Property of Recycled Concrete Materials of Construction Waste [D]. Chengdu: Sichuan University, 2011.