

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0048-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.011

含砖粒再生粗骨料混凝土损伤性能试验研究

安新正, 杨莹莹, 牛 薇, 张亚飞

(河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 用废弃砖部分取代废弃混凝土(取代率 $r=0\%、10\%、20\%、30\%$)作为再生粗骨料制成再生混凝土。采用超声波检测再生混凝土的损伤, 以超声波波速的衰减来衡量损伤, 对单轴受压持荷状态下再生混凝土试件进行超声试验。通过试验研究, 得出不同废弃砖取代率下单轴压应力系数对再生混凝土损伤的影响规律。试验结果表明废弃砖粗骨料取代率对单轴受压条件下再生混凝土的损伤影响很大。针对再生混凝土损伤的主要影响因素—单轴压应力系数, 建立了含砖粒再生粗骨料混凝土的损伤关系模型。

关键词: 全再生混凝土; 再生砖粒; 取代率; 抗压强度; 损伤分析

中图法分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental study on damage behavior of recycled coarse aggregate concrete containing brick

AN Xinzheng, YANG Yingying, NIU Wei, ZHANG Yafei

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: In this paper, the recycled coarse aggregate was prepared from waste concrete and brick, in which the waste concrete coarse aggregate was substitute for waste brick aggregate with 0%, 10%, 15% and 30%. The damage of recycled concrete was detected by ultrasonic wave, and it was measured by the decay of the ultrasonic wave velocity. The ultrasonic experiment was carried out on the recycled concrete specimen under uniaxial compression load condition. The effect of uniaxial compressive stress on the damage of recycled concrete under different replacement rates of waste bricks was obtained through experiments. The results present that the replacement rate of waste bricks has a great effect on the damage of recycled concrete under uniaxial compression. Finally, for the uniaxial compressive stress coefficient, which is the main factor affecting the damage of recycled concrete, the damage relation model of recycled coarse aggregate concrete containing brick is established.

Key words: Totally recycled concrete; Recycled brick grain; Replacement rate; Compressive strength; Damage analysis

有资料显示, 目前我国建筑垃圾中废弃砖达到了一半, 能够将其回收利用, 不但能满足工程上的部分需要, 还能解决建筑垃圾^[1]的处理问题。目前国内外学者对于复杂环境作用下再生混凝土损伤进行了试验研究与理论分析, 并取得了一定的成果^[2-8]。但对于应力作用下的再生混凝土损伤试验研究较少^[9-12]。再生混凝土内部损伤在应力作用下会随着服役时间的延长而不断累积, 最终形成不可逆的损伤,

进而使结构的可靠性降低。本试验以再生砖粒取代率为变量, 对不同砖骨料取代率下的再生混凝土试件进行单轴受压, 并利用超声波测试仪进行实时检测, 研究单轴受压状态下再生混凝土损伤与超声波波速的变化规律, 基于超声波检测试验结果利用Excel 回归分析得出再生混凝土损伤与再生混凝土单轴压应力系数的关系模型, 为含砖粒全再生混凝土结构设计与可靠度分析提供一定的参考。

收稿日期: 2017-12-26

特约专稿

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2015204111); 河北省科学技术研究与发展计划项目(15273609D)

作者简介: 安新正(1963-), 男, 河南镇平人, 博士, 副教授, 从事结构耐久性理论方面的研究。

1 试验过程

1.1 试验原材料的选用

水泥: 邯郸市武安某搅拌站送来的太行山牌强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥; 再生混凝土粗骨料: 采用河北工程大学结构实验室废弃的混凝土梁构件, 经人工破碎成 5~20 mm 粒径; 再生砖骨料: 采用邯郸市建筑垃圾, 经人工分拣筛分成 5~20 mm 粒径; 砂: 采用天然河砂, 细度模数为 1.69; 减水剂: 采用聚羧酸高效减水剂; 水: 采用邯郸市饮用自来水。再生粗骨料的基本特性指标见表 1。

1.2 试件的制备

基于普通混凝土配合比设计规范, 考虑再生粗骨料吸水率大的特点增加附加用水量, 以此进行试配。用 30% 的再生碎砖粗骨料部分取代再生混凝土粗骨料配制再生混凝土试块, 7 d 抗压强度已经达到 22 MPa, 根据经验公式推算 28 d 强度能达到设计强度 C35 的要求。经过多次试配, 确定最终的再生混凝土配合比见表 2 所示。再生砖粒取代率 r 分别为 0%、10%、20%、30%, 对应取代率下再生混凝土试件编号分别为 RC0、RC10、RC20、RC30。

试件制作方法: 在搅拌机中先加入再生粗骨料和砂干拌 50 s 后停止, 加入总用水量的 30%, 启动搅拌机搅拌 70 s 停止; 随后加入水泥和减水剂, 启动搅拌机搅拌 30 s, 然后将剩余的水加进去, 启动搅拌机搅拌 100 s 后停止。将拌合好的再生混凝土装入 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试模中, 用钢筋棍顺时针插捣多次, 然后用橡皮锤轻轻敲击

试模侧壁直到混凝土表面开始泛浆, 不再有气泡产生为止。静置 24 h 后拆模, 并将试件放置于结构实验室厂房内自然养护, 表面洒水后覆盖上塑料薄膜。试件制作数量: 每组立方体试件均制作 6 个试件。

1.3 试验方法

试验中用到的试验仪器设备有 TYA-2000 型数显压力试验机以及非金属超声波测试仪 (TICO)。超声测试仪使用前需要进行标定, 标定系数 $R_\alpha=0.97$ 。立方体抗压强度试验按照 GB/T50081-2002^[13] 进行; 超声检测是利用压力试验机对再生混凝土试件进行分级加载, 并在每级荷载下持荷的同时利用非金属超声波测试仪 (TICO) 对单轴受压状态下不同砖粒取代再生混凝土试件进行对测法超声试验并记录数据。具体操作步骤: 试验时将试件固定在压力试验机上并与试验机的上下压板几何对中; 用凡士林耦合剂将超声波发射头 A 与接收头 B 分别耦合在与试件应力方向相垂直的自由面上且每个自由面对称选取三个点 A_i 和 B_i ($i=1, 2, 3$), 三次测量结果求平均值。超声检测示意图如图 1 所示。

由于试验中分级加载, 为了方便, 在此定义一个变量压应力系数 Y_i 为每级荷载下单轴压应力与再生混凝土试件 28 d 抗压强度之比, 即:

$$Y_i = \frac{P_i}{f_{cu,0}} \quad (1)$$

式中: Y_i —每级荷载下单轴压应力系数; P_i —每级荷载下单轴压应力; $f_{cu,0}$ —再生混凝土试件 28 d 初始抗压强度。

压应力系数 Y_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) 取

表 1 再生粗骨料的基本性能指标

Tab.1 The basic performance index of recycled coarse aggregate

骨料类型	含水率 /%	吸水率 /%		表观密度 / (kg·m ⁻³)	压碎指标 /%	含泥量 /%
		30 min	24 h			
再生混凝土粗骨料	3.09	4.12	5.15	2 520	11.8	0.35
再生碎砖粗骨料	1.01	16.16	20.20	2 126	42.7	0.6

表 2 不同砖粒取代率下再生混凝土配合比

(单位: kg/m³)

Tab.2 The mix proportion of recycled concrete under different brick-particle replacement ratios

分组	水泥	再生粗骨料		天然砂	自由水	附加水	减水剂
		废弃混凝土	废弃砖				
RC0	412	930	0	658	158	100	4.94
RC10	412	837	93	658	158	62	4.94
RC20	412	744	186	658	158	76	4.94
RC30	412	651	279	658	158	89	4.94

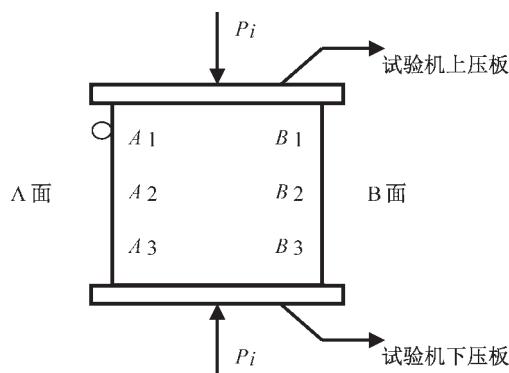


图 1 超声检测示意图

Fig.1 The sketch of ultrasonic testing

0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 八组，加载速率控制在 5 kN/s。单轴受压试验采用分级加载，并在每级荷载下持荷 1 ~ 1.5 min，并同时利用非金属超声波测试仪对再生混凝土试件进行实时超声，待完成超声波波速试验后便可进行下一级荷载，直到八组全部完成为止。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度试验结果与分析

不同砖粒取代率($r=0\%、10\%、20\%、30\%$)下再生混凝土 28 d 立方体抗压强度测试值如图 2 所示。由图 2 得出，随着再生混凝土中砖含量的增加，再生混凝土试件的立方体抗压强度逐渐降低。当 $r=10\%$ 时，再生混凝土抗压强度较基准再生混凝土降低约为 10.04%；当 $r=20\%$ 时，再生混凝土抗压强度较基准再生混凝土降低约 21.09%；当 $r=30\%$ 时，再生混凝土抗压强度较基准再生混凝土降低约 30.51%。产生强度降低的原因可能是废弃砖的压碎指标较废弃混凝土大，且废弃砖骨料与新砂浆之间粘结性差导致再生混凝土强度降低。由此可见，当 r 在 10% 以下时，取代率 r 对再生混凝土抗压强度作用不是很明显，而当 r 超过 10% 时，取代率 r 对再生混凝土抗压强度的降低作用显著增加。

2.2 损伤检测试验结果与分析

为研究单轴压应力作用下再生混凝土损伤变化规律，定义为每级荷载作用下基于超声波波速衰减的再生混凝土损伤，则有

$$D_i = 1 - \frac{V_i}{V_0} \quad (2)$$

式中： D_i —每级荷载下再生混凝土损伤； V_i —每级

荷载作用下超声波声速平均值，km/s； V_0 —再生混凝土试件 28 d 无压应力作用下初始超声波声速，km/s(表 3)。

基于不同压应力下的超声波波速试验测试结果，利用公式(2)计算出不同取代率、不同压应力下再生混凝土的损伤，计算结果列于表 3，并且图 2 在同一坐标轴下给出了不同取代率下再生混凝土损伤随单轴压应力系数的变化规律。

由图 2 可以很明显看出，再生混凝土损伤程度与单轴压应力系数紧密相连。当压应力系数在 0.4 以下时，损伤随压应力系数的增大而减小，出现这种情况的原因主要是混凝土内部存在微裂纹等初始缺陷导致的。在压应力系数超过 0.7 后，再生混凝土损伤的增长速率增加。

当 $r=0\%$ 时，试件在累积损伤作用下，其表现为：压应力系数在 0.8 以下时，试件基本上处于完好状态；当压应力系数介于 0.8 到 0.9 之间时，其表面略有一两条细微裂缝；当压应力系数超过 0.9 时，试件表面裂缝数量明显增多。当 $r=30\%$ 时，试件在累积损伤作用下，表现为：当压应力系数在 0.7 以下时，时间表面基本上处于无损伤状态；当压应力系数介于 0.7 到 0.8 之间时，试件表面出现几条细小的微裂纹；而当压应力系数介于 0.8 到 0.9 时，试件表面裂缝数量明显增加且裂缝宽度增大；当压应力系数在 0.9 以上时，试件表面裂缝出现贯穿裂纹。

由图 2 我们可以看出再生混凝土在持荷作用下的损伤随再生砖骨料取代率的增加而增大，且同一取代率再生混凝土损伤随压应力系数的增加呈非线性增大。而且当压应力系数达到 0.8 以后损伤随压应力系数的增加而加速增大。由此可以表明再生混凝土单轴受压损伤是不可逆的。

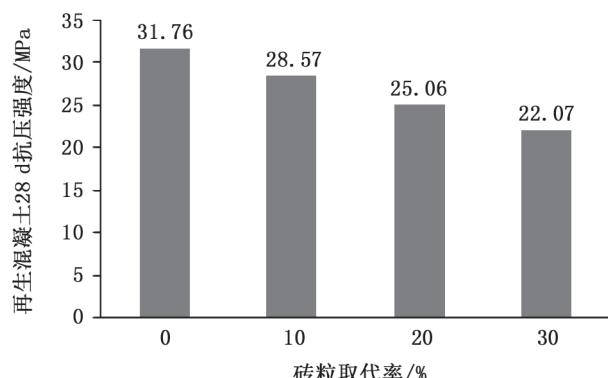


图 2 不同砖粒取代率下再生混凝土 28 d 抗压强度
Fig.2 28 d compressive strength of recycled concrete under different brick-particle replacement rates

表3 单轴受压下再生混凝土超声波波速及损伤结果

Tab.3 The ultrasonic wave velocity and damage results of recycled concrete under uniaxial pressure stress

$f_{cu,0}$ /MPa (V_o /km·s ⁻¹)	Y_i	V_i (km·s ⁻¹)	D_i	$f_{cu,0}$ /MPa (V_o /km·s ⁻¹)	Y_i	V_i (km·s ⁻¹)	D_i
31.76 (3.625)	0.2	3.498	0.069	28.57 (3.496)	0.2	3.352	0.075
	0.3	3.512	0.061		0.3	3.377	0.064
	0.4	3.544	0.044		0.4	3.405	0.046
	0.5	3.415	0.113		0.5	3.266	0.127
	0.6	3.382	0.130		0.6	3.255	0.133
	0.7	3.173	0.234		0.7	2.997	0.265
	0.8	2.897	0.361		0.8	2.616	0.440
	0.9	2.454	0.542		0.9	2.230	0.574
	0.2	2.925	0.078		0.2	2.612	0.083
	0.3	2.947	0.065		0.3	2.641	0.068
25.06 (3.047)	0.4	2.973	0.048		0.4	2.663	0.053
	0.5	2.835	0.134		0.5	2.530	0.123
	0.6	2.830	0.137		0.6	2.497	0.146
	0.7	2.601	0.271		0.7	2.301	0.275
	0.8	2.258	0.451		0.8	1.970	0.468
	0.9	1.898	0.612		0.9	1.558	0.668

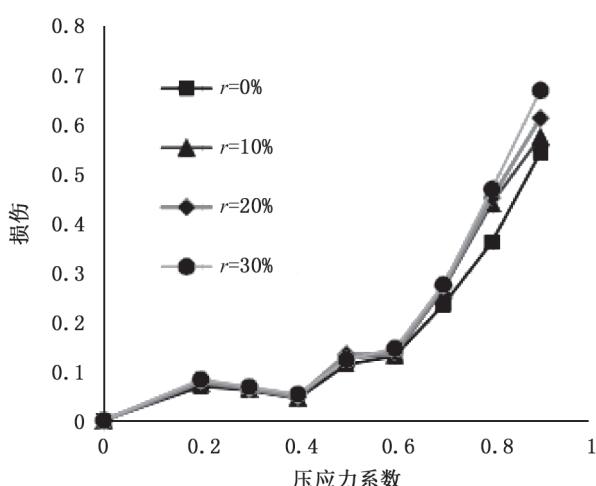


图3 再生混凝土损伤与单轴压应力系数的关系

Fig.3 The relationship between the damage of recycled concrete and pressure stress coefficient

2.3 损伤关系模型的建立

由图3我们不难发现再生混凝土损伤主要与单轴压应力系数有关, 所以建立以下损伤模型:

$$D = aY^2 + bY + c \quad (3)$$

其中, a 、 b 、 c 分别为试验参数, Y 为单轴压应力系数。

对于公式(3)中的三个参数, 本文基于已有的超声试验数据以及计算的损伤值, 利用Excel多项式拟合, 得到参数 $a=1.78$, $b=-1.23$, $c=0.26$ 。所以损伤与再生混凝土单轴压应力系数的关系模型具体是:

$$D = 1.78Y^2 - 1.23Y + 0.26 \quad (4)$$

公式(4)给出了再生混凝土损伤与再生混凝土单轴压应力系数的关系, 有了这个关系再生混凝土在实际工程应用中就可以根据含砖粒再生粗骨料混凝土单轴压应力系数得到再生混凝土结构相应的损伤程度。

3 结论

1) 再生混凝土试件的立方体抗压强度随着再生混凝土中再生砖含量的增加而逐渐降低, $r=10\%$ 及 $r=30\%$ 时的再生混凝土抗压强度较基准再生混凝土分别降低了10.04%和30.51%。

2) 再生砖骨料的掺加降低了再生混凝土的抗损伤能力。

3) 当单轴压应力系数达到0.9时, $r=0\%$ 的基准再生混凝土的损伤达到0.542; 而 $r=30\%$ 的再生砖骨料再生混凝土的损伤达到0.668, 且此时的表面损伤已经很明显了, 因此极限承载力之前的累积损伤是不容忽视的。

4) 基于单轴受压下不同再生砖骨料取代率以不同压应力系数的超声试验数据及公式计算出的损伤数据, 本文建立了损伤与取代率以及压应力系数的关系模型, $D=1.78Y^2-1.23Y+0.26$, (下转第56页)

4 结论

1) 随着矿渣代砂率的增加, 混凝土的流动性逐渐降低。在相同的水胶比下, 矿渣代砂混凝土在达到与普通混凝土相同程度的坍落度时需水量增加。

2) 用粒化高炉矿渣部分代替特细砂, 能够明显改善混凝土细骨料的颗粒级配。随着矿渣代砂率的增加, 矿渣代砂混凝土的抗压强度先增大后减少, 矿渣的最优代砂率为 60%。

3) 粒化高炉矿渣作为细骨料对混凝土后期强度的增长起到促进作用。矿渣代砂率为 80% 时, 混凝土 7~60 d 强度增长率最高达到了 47%。

4) 建立出了适合于矿渣代砂混凝土抗压强度的预测模型, $f_{c, cu}=265.1+0.223X_1-14.772X_2+30.345X_3$ 。

参考文献:

- [1] 贾青. 水淬粒化高炉矿渣拌制混凝土抗压强度性能的试验研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2009.
- [2] 朱蓓蓉, 於林峰, 张树青, 等. 矿渣代砂水泥砂浆及混

凝土物理力学性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2008(4): 386-391.

- [3] 石东升, 王安. 矿渣细骨料混凝土孔隙结构对抗压强度的影响 [J]. 混凝土, 2016(3): 80-83.
- [4] 於林峰, 杨全兵, 朱蓓蓉, 等. 矿渣代砂对混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2008(6): 14-17.
- [5] 石东升, 王安. 粒化高炉矿渣代砂混凝土力学性能试验 [J]. 混凝土, 2015(7): 92-96.
- [6] FLORA Faleschini, ALEJANDRO M. High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties[J]. Construction and Building Materials, 2015(101): 113-121.
- [7] SAVERIA Monosi, MARIA Letizia Ruello. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production [J]. Cement and Concrete Composites, 2016(66): 66-72.
- [8] 石东升, 丁晓宇. 粒化高炉矿渣代砂混凝土冻融试验 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015(5): 7-10.

(责任编辑 王利君)

(上接第 51 页) 此关系模型为含砖粒再生混凝土的可靠度分析提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 左祥祥. 再生砖骨料混杂纤维混凝土剪切性能 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [2] 安新正, 易成, 赵长彪, 等. 硫酸盐环境下再生混凝土的损伤演化研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(2): 1-6.
- [3] 王倩, 崔启兵, 徐海群. 海水侵蚀环境下再生混凝土的损伤劣化研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(4): 49-53.
- [4] 安新正, 易成, 姜新佩, 等. 海水环境下再生混凝土的腐蚀研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2011, 28(1): 5-9.
- [5] 汪振双, 苏昊林. 冻融条件下再生橡胶混凝土损伤演变与强度相关性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4286-4291.
- [6] GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F, EIRAS-LOPEZ, et al. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete[J]. Mater Struct, 2011,

44: 1759.

- [7] LIU Yixiang. Study on Recycled-Concrete-Filled Steel Tube and recycled concrete based on damage mechanics[J]. Journal of constructional steel research, 2012 (71): 143-148.
- [8] 安新正. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2012.
- [9] 陈爱玖, 章青, 王静, 等. 再生混凝土冻融循环试验与损伤模型研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(11): 102-107.
- [10] 安新正, 王小学, 姜新佩, 等. 单轴受压下再生混凝土的损伤特性研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(4): 1-4.
- [11] 陈宗平, 陈宇良. 三向受压状态下再生混凝土的变形性能及损伤分析 [J]. 应用力学学报, 2016, 33(5): 799-805.
- [12] 张磊. 再生混凝土单轴受压力学性能及其损伤模型研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [13] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].

(责任编辑 王利君)