

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0041-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.009

基于检测方法的再生混凝土弹性模量试验研究

张亚飞, 安新正, 牛薇, 张冰

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 利用废弃混凝土加工制备为再生细集料, 以再生细集料取代率为变量参数配置3种水胶比的再生骨料混凝土, 通过混凝土标准弹性模量测试法、基于本构关系测试法以及超声波无损检测法, 研究再生细集料取代率对富含砖粒再生混凝土弹性模量的影响规律以及超声波波速与弹性模量之间关系。试验结果表明, 以应力-应变曲线上上升段的割线斜率作为再生混凝土弹性模量值, 该值随再生细集料取代率的变化规律与弹性模量试验测得的变化规律一致, 呈现先增大后减小的趋势, 且在取代率为30%时达到最佳状态。提出了以再生细骨料取代率为影响因素, 富含砖粒再生混凝土立方体抗压强度与弹性模量关系计算模型, 拟合出了超声波波速与再生混凝土弹性模量函数式。

关键词: 再生细集料取代率; 富含砖粒再生混凝土; 应力-应变曲线; 弹性模量; 超声波

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Experimental Study on Elastic Modulus of Recycled Concrete Based on Detection Method

ZHANG Yafei, AN Xinzheng, NIU Wei, ZHANG Bing

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

Abstract: Recycled aggregate concrete is prepared by using waste concrete processing as regenerated fine aggregate, and three kinds of water-to-binder ratio are arranged with variable rate of regeneration fine aggregate replacement. The influence of aggregate replacement rate on the elastic modulus of brick-rich recycled concrete and the relationship between ultrasonic wave velocity and elastic modulus are investigated through concrete standard elastic modulus test method, constitutive relationship test method and ultrasonic non-destructive testing. The results show the slope of the secant of the rising section of the stress-strain curve is the same as the variation of the elastic modulus of the recycled concrete with the change rate of the regenerated fine aggregate, which is consistent with the change of the elastic modulus test. When the replacement rate is 30%, the best condition is achieved. The calculation model of the relationship between compressive strength and elastic modulus of brick-recycled concrete cubes is proposed by taking the replacement rate of recycled fine aggregates as the influencing factors, and the ultrasonic wave velocity and the elastic modulus of recycled concrete are fitted.

Key words: recycled fine aggregate replacement rate; rich in brick recycled concrete; stress-strain curve; elastic modulus; ultrasonic wave

河砂的大量开采导致天然细骨料的资源匮乏, 建筑垃圾再利用已成为建筑业发展的主趋势^[1-3]。混凝土弹性模量是研究材料变形性能的重要指标, 也是混凝土结构力学性能分析的基础^[4-6]。对再生混凝土, 弹性模量的研究不可懈怠^[7-9]。研究的着重点几

乎都在再生粗骨料取代天然粗骨料, 而细骨料的取代问题研究相对较少。

本研究再生细集料取代率对富含砖粒再生混凝土弹性模量的影响规律, 提出考虑再生细集料取代率因素的抗压强度与弹性模量的计算模型, 利用超

收稿日期: 2018-09-27

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资助项目 (152736090)

作者简介: 张亚飞 (1993-), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向混凝土结构耐久性理论与设计。

声波检测法测试超声波通过再生细集料富含砖粒再生混凝土内部波速,建立以波速为自变量的弹性模量函数式,为超声波无损检测再生混凝土弹性模量提供理论参考依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料

再生细骨料富含砖粒再生混凝土(RFC)中粗骨料采用邯郸全有生态建材有限公司提供的富含砖粒建筑垃圾经破碎、清洗处理后制成富含砖粒再生粗骨料(粒径范围5 mm~25 mm,压碎指标为19.7%);细骨料采用两种材料根据一定比例掺加而成,一种为天然细骨料(采用河砂,细度模数为2.3,含泥量为1.1%),另一种则是再生细骨料采用废弃混凝土梁经破碎,筛分处理后得到的废弃混凝土再生细骨料(粒径范围0.075 mm~4.75 mm,压碎指标为24.1%);所采用的胶凝材料为太行山P.O 42.5级普通硅酸盐水泥和I级粉煤灰;减水剂采用高效聚羧酸液态减水剂,减水率为25%;水采用邯郸市供自来水。

1.2 试块设计

试验配制0.52, 0.44, 0.42三种水胶比的再生混凝土,每种水胶比下以再生细骨料的取代率 r 作为变化因子配制再生细骨料富含砖粒再生混凝土,采用等体积置换的方法分别取: $r=0\%$, $r=15\%$, $r=30\%$, $r=45\%$, $r=75\%$, $r=100\%$ 。按照文献[10]经计算后再根据改变附加用水量,控制坍落度为160~180 mm的方法,保证再生混凝土良好的和易性得出符合邯郸地区使用的优质再生混凝土配合比以

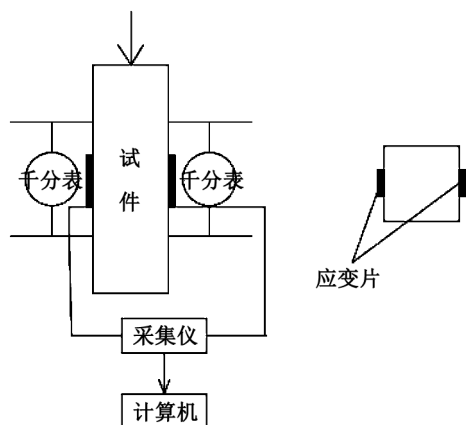


图1 弹性模量试验原理

Fig.1 Principle of elastic modulus test

$r=0\%$ 为基准如表1所示。

同水胶比每级取代率下制作3块100 mm×100 mm×100 mm立方体试块,用来测试其28 d立方体抗压强度 f_{cu} ;且有2组(共6块)100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试块,养护到28d龄期,首先对其进行超声波无损检测,之后其中一组用于再生混凝土的28 d轴心抗压强度(f_c)试验;另外一组用于弹性模量的测定。

1.3 试验方法

1.3.1 再生混凝土强度试验

依照文献[11]《普通混凝土力学性能测试方法标准》(GB/T 50081-2002)的相关要求进行。当试块养护达到28 d龄期时,分别进行立方体抗压强度试验及轴心抗压强度试验。

1.3.2 再生混凝土弹性模量与超声波检测

将要进行弹性模量测定的一组棱柱体试块测定前,在沿其高度方向非浇筑面的两个对称面中心位置上粘贴混凝土应变片,并用硅胶密封;试验原理如图1所示,在弹性模量及轴心抗压试验前,利用超声波无损检测法对试块进行超声测试,每个试块需在同一组对立面测试三个不同的对立面点,取测得三者的均值作为该试块最终的超声波波速值,并随时观察超声波波速的变化规律,建立超声波波速与再生细集料富含砖粒再生混凝土弹性模量的回归方程。超声波检测混凝土原理如图2所示。



图2 超声波检测混凝土

Fig.2 Ultrasonic testing of concrete

2 试验结果与分析

2.1 应力—应变曲线

图3给出了三种水胶比下再生细集料富含砖粒

表 1 再生细骨料富含砖粒再生混凝土的配合比
Tab.1 Recycled Fine Aggregate Brick-rich recycled concrete mix

分组编号	材料用量 /kg·m ⁻³							
	水泥	水	再生粗骨料	再生细骨料	砂子	减水剂	附加用水	粉煤灰
RFC1-0	283	163	978	0	631	3.77	108	31.39
RFC2-0	320	158	929	0	658	4.27	102	35.58
RFC3-0	350	163	967	0	569	4.66	107	38.87

注：RFCi-r 表示水胶比为 i(i=1, 2, 3 分别表示水胶比 0.52, 0.44, 0.42)，取代率为 r 的再生细集料富含砖粒再生混凝土。

表 2 抗压强度、弹性模量和超声波波速试验结果
Tab.2 Compressive strength, elastic modulus and ultrasonic wave velocity test results

分组编号	立方体抗压强度 f_{cu}/MPa	棱柱体抗压强度 f_c/MPa	弹性模量 $E_c/10^3\text{MPa}$	超声波波速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
RFC1-0	33.1	26.4	23.375	3872
RFC2-0	35.6	27.4	24.194	4026
RFC3-0	40.8	32.6	27.095	4191

再生混凝土随再生细集料取代率不同的应力 - 应变 (δ - ε) 曲线变化。从图 3(a)(b)(c) 中可看出, 不同再生细骨料取代率对再生混凝土的应力应变曲线有较大影响, 与普通混凝土类似, 再生混凝土应力应变曲线分为上升阶段和下降阶段, 随着再生细集料取代率的增大上升阶段的割线斜率整体表现为先增大后减小的状态, 说明再生混凝土弹性模量呈现先增大后降低的变化趋势, 分析得出 $r=30\%$ 时弹性模量取最佳值; 下降阶段坡度随取代率增大变得越来越陡, 说明再生混凝土材质变脆, 当掺量过多时会影响混凝土的力学性能。

2.2 抗压强度与弹性模量

再生细集料富含砖粒再生混凝土抗压强度、弹性模量和超声波波速试验实测结果见表 2。

2.2.1 f_{cu} 与 f_c 相关关系分析

根据表 2 中实验结果, 经整理后考虑再生细集料取代率的影响, 得出如图 4 所示 f_c/f_{cu} 与 r 之间的关系曲线。

由图 4 中可知 $f_c/f_{cu}=0.77 \sim 0.85$ 且随再生细集料取代率的增长, f_c/f_{cu} 呈增长趋势。根据文献 [12] 的关系模型 $f_c/f_{cu}=0.76$, 由于再生细骨料取代率的影响, f_c/f_{cu} 为确定常数偏于保守, 与试验结果拟合程度较差, 因此考虑 r 的影响提出修正参数 k_1 和 k_2 , 建立式 (1) 的计算模型。

$$f_c = k_1 + k_2 f_{cu} \quad (1)$$

利用最小二乘法对试验数据进行拟合, 所得结果 $k_1=-1.253r^2+0.716r-0.303$, $k_2=0.801+0.072r$ 因此得

出修正后轴心抗压强度与立方体抗压强度计算模型式 (2)。

$$f_c = -1.253r^2 + 0.716r - 0.303 + (0.801 + 0.072r)f_{cu} \quad (2)$$

将试验结果代入修正后式 2 可知试验数据与拟合式所得结果较吻合, 相关系数 $R^2=0.99$, 能够在一定程度上反应出 f_c 与 f_{cu} 之间关系的实际情况。

2.2.2 基于再生细集料取代率的再生混凝土 E_c 发展规律

由表 2 和图 5 可知, 不同水胶比的再生细集料富含砖粒再生混凝土的静力弹性模量介于 20.1 ~ 28.5 GPa 之间, 且随着水胶比的增大, 弹性模量减小, 但并未随着水胶比的增大成比例减小, $r=0\%$ 时, 水胶比为 0.44 比水胶比为 0.52 的弹性模量值增加了 3.5%, 水胶比为 0.42 比水胶比为 0.44 的弹性模量值增加了 11.99%, 这是由于胶凝材料的用量控制着混凝土中砂浆强度的发展, 进而影响混凝土力学性能, 水胶比越小, 抗压强度越大。 $r \leq 30\%$ 时, 弹性模量整体呈增长趋势, $r=30\%$ 比 $r=0\%$ 增长 4.0% ~ 16.3%。一方面, 由于再生细集料由大量的水泥砂浆颗粒组成, 其中含有未水化充分的水泥可以充当胶凝材料提高混凝土的粘结力, 这对再生混凝土弹性模量起有利的作用。另一方面, 再生粗骨料中含有大量砖粒, 砖粒的孔隙很大, 再生细骨料中的水泥砂浆微粒可以起到填充作用, 增强水泥砂浆对再生粗骨料的握裹力, 保证再生混凝土的整体性, 从而掺入适量的再生细集料可以提高再生混凝土的弹性模量。

$r > 30\%$ 时, 弹性模量开始下降, 当再生细集料

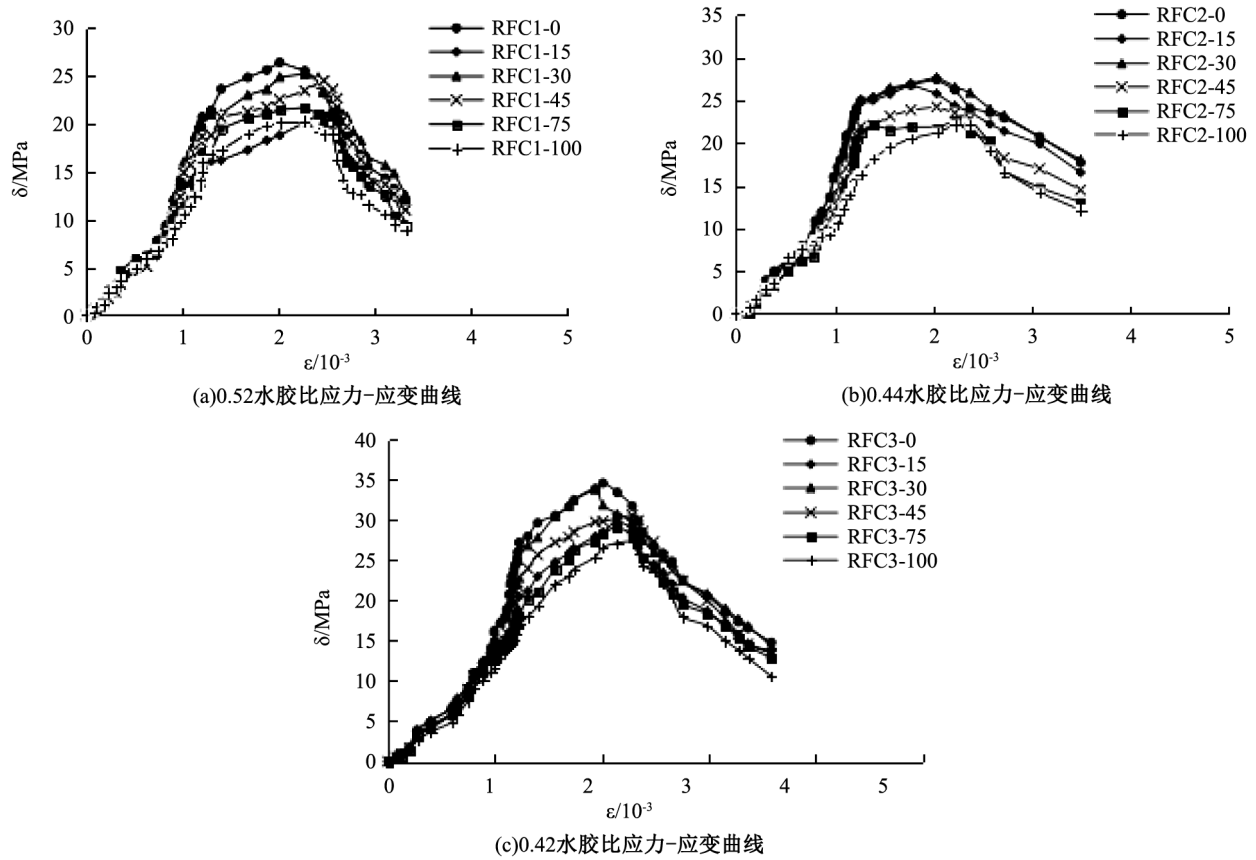


图3 再生细集料富含砖粒再生混凝土应力-应变全曲线

Fig.3 Recycled fine aggregate is rich in bricks - Recycled concrete stress - strain full curve

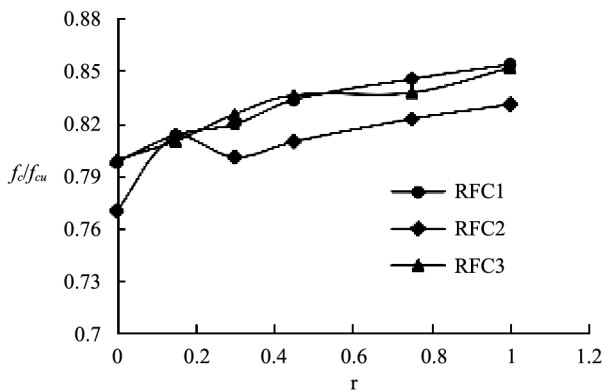


图4 f_c/f_{cu} 与 r 的关系曲线

Fig.4 the relation curve between f_c/f_{cu} and r

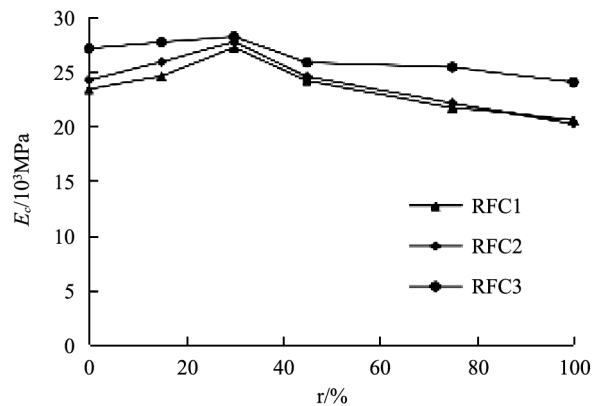


图5 E_c 随 r 的变化曲线

Fig.4 change curve of E_c with r

取代率达到 100% 时相对 $r=0\%$ 降低幅度在 11.4% ~ 16.5% 之间。这是由于再生细集料自身构造主要是破碎后针片状的碎石和砂浆颗粒构成,整体性差,它的强度低于天然细骨料,过量掺入会降低混凝土弹性模量。弹性模量随着再生细集料取代率的增大呈现先增大后减小的变化与应力-应变曲线上段的割线斜率作为混凝土弹性模量显现规律一致。

2.3.2 E_c 与 f_{cu} 模型预测

本文基于肖建庄^[13]建议公式,提出修正系数 a

和 b , 表示为式 (3); 基于 ACI318-77 的公式, 提出修正系数 a_1 和 b_1 , 表示为式 (4)。

$$E_c = \frac{10^5}{a + (b/f_c)} \tag{3}$$

$$E_c = a_1 f_c^{b_1} \tag{4}$$

根据表 2 中数据经整理后, 利用 Matlab 进行拟合得出 $a=2.01$, $b=57.63$, $a_1=4271$, $b_1=0.52$, 因此, 弹性模量与轴心抗压强度关系可采用修正后的式 (5)、式 (6) 表示, 且拟合后的式子相关系数 R^2 均

表 3 弹性模量理论值与弹性模量实际值对比结果
Tab. 3 Comparison of theoretical and actual values of elastic modulus

分组编号	弹性模量理论值 $E_c/103\text{MPa}$	弹性模量实测值 $E_c/103\text{MPa}$	误差 /%
RFC1-0	21.093	23.375	9.76
RFC2-0	23.024	24.194	4.84
RFC3-0	24.930	27.095	7.99

大于 0.9，在一定程度上可以反映实际情况。

$$E_c = \frac{10^5}{2.01 + (57.63/f_c)} \quad (5)$$

$$E_c = 4271 f_c^{0.52} \quad (6)$$

将式 (2) 代入式 (5)、式 (6)，得出随再生细集料取代率变化的再生细集料富含砖粒再生混凝土弹性模量与立方体抗压强度之间的关系，见式 (7)、式 (8)。

$$E_c = \frac{1}{2.01 + \{57.63[-1.253r^2 + 0.176r - 0.303 + (0.072r + 0.801)f_{cu}]\}} \times 10^5 \quad (7)$$

$$E_c = 4271 \times [-1.253r^2 + 0.176r - 0.303 + (0.072r + 0.801)f_{cu}]^{0.52} \quad (8)$$

基于式 (7)、式 (8) 得出的弹性模量理论值与再生细集料富含砖粒再生混凝土的弹性模量实际值相比较，误差在 0.09% ~ 13% 范围内，在一定程度上可以体现再生细集料富含砖粒再生混凝土的弹性模量实际情况。

2.4 超声波波速与再生混凝土弹性模量关系

由表 2 中超声波波速值与弹性模量试验结果，考虑 r 的影响，并对其进行回归分析，得出以超声波波速 v 和 r 为变量的再生混凝土弹性模量函数式，见式 (9)。

$$E_c = -75.74 + 0.037v - 2.802r - 3.097 \times 10^{-6} v^2 + 0.73 \times 10^{-3} vr \quad (9)$$

基于式 (9) 得出如表 3 所示弹性模量理论值与弹性模量实际值对比结果，从表 3 中可知，弹性模量理论值与弹性模量实际值误差范围 4.70% ~ 11.2%。

3 结论

1) $r=30\%$ 时，再生细集料富含砖粒再生混凝土弹性模量达到峰值， $r=30\%$ 比 $r=0\%$ 、 $r=100\%$ 分别增长 4.0% ~ 16.3% 和 17.4% ~ 37.2%，为最佳取代率。

2) 考虑再生细集料取代率的影响，提出适合再生细集料富含砖粒再生混凝土立方体抗压强度与弹性模量之间的关系模型，且理论值与实际值拟合程度较高，可在一定程度上对再生混凝土弹性模量研究提供理论依据。

3) 回归方程与标准弹性模量测试法所得关系模

型相比精确度略低，适合简单测定和对精度要求不太严格的弹性模量测定，但仍可为超声波检测混凝土弹性模量提供科学依据。

参考文献：

- [1] ZHAO S, HUANG B, SHU X, et al. Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012(2294): 98-105.
- [2] 李旭平, 赵滇生. 再生混凝土的早期抗压强度与弹性模量研究[J]. 施工技术, 2008, 36(6): 63-66.
- [3] PURUSHOTHAMAN R, AMIRTHAVALLI R, KARAN L. Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete[J]. J.Mater.Civ.Eng. 2015, 27(5): 1-7.
- [4] 郝恩海, 刘杰, 王忠海, 等. 混凝土超声声速与强度和弹性模量的关系研究[J]. 天津大学学报, 2002, 35(3): 380-383.
- [5] 刘宏伟, 吴胜兴. 无损检测方法推定混凝土早龄期静弹性模量试验研究[J]. 混凝土, 2007, (9): 39-41.
- [6] 郭远臣, 王雪. 再生骨料混凝土弹性模量实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(3): 467-471.
- [7] 王庆贺, 王玉银, 耿悦, 等. 配制方法对再生混凝土基本力学性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S2): 79-87.
- [8] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 16-22.
- [9] 安新正, 牛薇, 张亚飞, 等. 含砖粒再生混凝土基本性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2017, 34(1): 30-33.
- [10] JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [11] GB/T 50081-2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [12] 过镇海. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(责任编辑 李新)