

文章编号:1673-9469(2024)06-0040-05

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.006

## 再生混凝土受压弹性模量研究

王李鑫,安新正\*,蒋毓晋,张龙娇,郭永民  
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为了研究再生细骨料取代天然河砂对再生混凝土受压弹性模量的影响规律,以及立方体抗压强度与静弹性模量之间的定量关系,并确定基于超声检测得到的再生混凝土动弹性模量与静弹性模量之间的函数计算公式,制作了不同再生细骨料掺量的再生混凝土棱柱体试件与立方体试件各6组,采用传统静力试验法与超声检测法对各组试件进行试验研究,并采用最小二乘法对所测得的各项试验数据进行拟合得到了静弹性模量与抗压强度、静弹性模量与动弹性模量的定量关系回归方程。基于超声参数建立了考虑再生细骨料掺量的再生混凝土静弹性模量计算公式,以及静弹性模量与抗压强度的函数关系式。研究表明:再生细骨料掺量对再生混凝土的动弹性模量、抗压强度和静弹性模量有显著的影响,且均随再生细骨料掺量的增加而减小。

**关键词:** 再生混凝土;超声检测;弹性模量;再生细骨料掺量;抗压强度

中图分类号:TU317+9

文献标识码:A

## Study on Compressive Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete

WANG Lixin, AN Xinzheng\*, JIANG Yujin, ZHANG Longjiao, GUO Yongmin  
(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** In order to study the influence of recycled fine aggregate substitution on the compressive elastic modulus of regenerated concrete, as well as the quantitative relationship between the cubic compressive strength and static elastic modulus, and to determine the function calculation formula of the dynamic elastic modulus of regenerated concrete based on ultrasonic detection, six groups of prismatic specimens and cubic specimens with different amounts of recycled fine aggregate were made, and the specimens were tested using traditional static test methods and ultrasonic detection methods. The regression equations of the static elastic modulus and compressive strength, as well as the static elastic modulus and dynamic elastic modulus, were obtained by fitting the measured data using the least squares method. A calculation formula for the static elastic modulus of regenerated concrete considering the addition of recycled fine aggregate was established based on ultrasonic parameters. A function relationship formula between the static elastic modulus and compressive strength was also developed. The research results show that the addition of recycled fine aggregate has a significant influence on the dynamic elastic modulus, compressive strength, and static elastic modulus of regenerated concrete, and all of them decrease as the amount of recycled fine aggregate increases.

**Key words:** recycled aggregate concrete; ultrasonic testing; elastic modulus; recycled fine aggregate content; compressive strength

土木建筑业正处于高速发展时期,资源紧张和环境破坏等问题也随之而来,建筑垃圾再生利

用成为解决当前问题的必要手段。建筑废弃混凝土块经破碎、筛分等程序处理后加工成再生骨料,

收稿日期:2021-07-22

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(15273609D)

作者简介:王李鑫(1997-),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为再生混凝土材料及其结构。

\* 通信作者:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,研究方向为结构耐久性理论与设计。

然后将其部分或全部替代天然骨料,再依照设计配合比配制成满足工程建设需求的再生混凝土。再生骨料被广泛应用于一般工业与民用建筑结构项目,可有效地减少相关工程对天然石料资源的开采,对实现节能减排和环境保护具有重要的现实意义<sup>[1-2]</sup>。

弹性模量是探究再生混凝土材料变形损伤性能的一个重要力学性能指标,也是再生混凝土工程设计、工程结构计算与分析的关键性基础指标之一。传统的服役结构混凝土受压弹性模量指标一般是通过标准混凝土钻芯取样和微变形量测仪器抗压试验获得的,但钻芯取样法对试验试件要求较高且会造成结构的破损,试验过程较为繁杂<sup>[3]</sup>。超声法是通过超声波在试件内部的传播来确定其损伤情况,这种方法可以弥补传统方法存在的不足,且实用性较强,已被广泛应用于普通混凝土服役结构弹性模量的评定<sup>[4-6]</sup>。李伟等<sup>[7]</sup>通过超声波法对卵石混凝土进行了弹性模量无损试验研究,建立了不同强度等级和不同粒径的卵石混凝土长期静弹性模量与动弹性模量之间的转换关系模型;欧阳雪等<sup>[8]</sup>以不同水胶比和玄武岩骨料掺量为试验变量,研究了其对超高性能混凝土受压力学性能的影响,结果表明,弹性模量随水胶比的增加而减小,随骨料掺量的增加而增大;吴晓刚<sup>[9]</sup>基于试验结果,给出了包含骨料级配特征的全轻页岩陶粒混凝土弹性模量预测模型;方志等<sup>[10]</sup>采用超声脉冲法及其他方法对活性粉末混凝土的弹性模量进行了研究,确定了活性粉末混凝土弹性模量间的定量函数关系。

基于此,本文采用传统方法和超声检测法对不同再生细骨料掺量的再生混凝土试件的弹性模量和超声参数进行相关测试,拟获得再生细骨料掺量对再生混凝土静弹性模量与动弹性模量的影响规律,在再生粗骨料完全取代天然粗骨料情况下,确定再生细骨料掺量对再生混凝土动、静弹性模量间以及抗压强度与静弹性模量的定量关系。

## 1 试件的制作与试验方法

### 1.1 原材料

①水泥:P·O42.5级普通硅酸盐水泥;②粗骨料:本文试验采用的粗骨料全部为再生粗骨料,来源于某建筑物拆除后的废弃混凝土柱(原设计强度C40),经破碎处理后得到粒径为5~25 mm连续级配的Ⅱ类再生粗骨料<sup>[11]</sup>;③细骨料:包括普通天然河砂与再生细骨料,天然河砂的细度模数为2.2,表观密度为2 582 kg/m<sup>3</sup>,再生细骨料与再生粗骨料来源一致,经破碎、筛分的细骨料粒径范围0.15~4.75 mm,细度模数为3.1,满足Ⅱ类再生细骨料标准<sup>[12]</sup>;④粉煤灰:等级为Ⅰ级粉煤灰,其掺量为5%;⑤减水剂:减水率为20%的聚羧酸高效减水剂;⑥水:邯郸市自来水。再生粗骨料、再生细骨料基本物理性能如表1所示。

### 1.2 再生混凝土配合比与试件制作

试验共设计6组不同配合比试件,记为RACL- $\beta$ ,再生细骨料掺量 $\beta$ 表示再生细骨料取代天然河砂的质量比, $\beta$ 取值分别为0%、10%、30%、50%、70%和100%,以 $\beta=0%$ 时的再生混凝土棱柱体试件作为基准试件。每组制作6个尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的再生混凝土棱柱体试件,以及3个尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的再生混凝土立方体试件以确定其立方体抗压强度。

考虑到再生骨料(再生细骨料、再生粗骨料)的吸水性较大,需要加入合适量的附加用水,附加用水量基于再生骨料的含水率与吸水性能计算得到<sup>[13]</sup>。该试验再生混凝土的配合比见表2。

按照表2的配合比依次将再生粗骨料、水泥、天然河砂、再生细骨料、粉煤灰加入搅拌机拌料斗内干拌一分钟后加入设计用水,搅拌一分钟后加入减水剂和附加用水,再搅拌两分钟,将再生混凝土浇筑到已备好的试模内,置于振动台上振捣密实,于室内环境下静置24 h后拆模、编写试件编号,然后放入养护室覆盖塑料薄膜养护7 d,除去覆盖的塑料薄膜再自然养护21 d备用。

表1 再生粗、细骨料基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of recycled coarse and fine aggregate

再生骨料名称	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	24 h吸水率/%	含泥量/%	压碎指标/%
再生粗骨料	2 594	1 435	4.53	1.02	16.31
再生细骨料	2 462	1 380	6.17	2.48	20.40

表2 再生混凝土配合比

Tab. 2 The mix proportion of RAC

棱柱体试件组 编号	掺量/%	材料用料/(kg·m <sup>-3</sup> )							
		水泥	设计用水	天然河砂	再生细骨料	再生粗骨料	减水剂	粉煤灰	附加用水
RACL-0	0	390	170	720	0	1 130	2	21	36
RACL-10	10	390	170	648	72	1 130	2	21	40
RACL-30	30	390	170	504	216	1 130	2	21	43
RACL-50	50	390	170	360	360	1 130	2	21	49
RACL-70	70	390	170	216	504	1 130	2	21	58
RACL-100	100	390	170	0	720	1 130	2	21	66

### 1.3 弹性模量测试方法及结果

#### 1.3.1 动弹性模量测试方法

①在28 d养护龄期完成时,对每组用于动弹性模量测试的3个再生混凝土棱柱体试件分别利用感量为5 g的高精度电子秤进行称重,并计算其密度平均值 $\rho$ ;②再生混凝土泊松比 $\mu$ 的取值,在用于轴心抗压强度 $f_c$ 试验的棱柱体试件中,每个试件的对称面的中间位置分别粘贴纵、横向应变片, $\mu$ 取应力为 $0.4 f_c$ 时的横向应变 $\mu_h$ 与纵向应变 $\mu_z$ 的比值<sup>[14-15]</sup>;③利用康科瑞NM-4B非金属超声检测分析仪,采用超声对测法(纵波接收与发射换能器的频率为50 kHz,发射电平取500 V)对28 d龄期再生混凝土棱柱体试件进行超声波波速检测,每个棱柱体试件取3对测点,分别为1-1'、2-2'和3-3',该试验具体的测点布置如图1(b)所示,超声波波速取每组试件测试结果的平均值;④基于式(1)计算再生混凝土试件动弹性模量<sup>[8]</sup>。

$$E_d = \rho V^2 (1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu) \quad (1)$$

式中: $E_d$ 为动弹性模量, GPa; $\rho$ 为平均密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$ 为泊松比;  $V$ 为超声波波速, m/s。

#### 1.3.2 静弹性模量测试方法

采用YES-2000型压力试验机对已完成超声检测的28 d龄期每组再生混凝土棱柱体试件进行轴心抗压强度 $f_c$ 和静弹性模量 $E_c$ 的测试<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.3 测试结果

不同再生细骨料掺量下28 d龄期再生混凝土的密度、泊松比、超声波波速、动弹性模量与静弹性模量测试结果如表3所示。

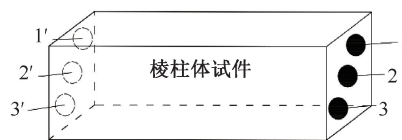
## 2 试验结果分析

### 2.1 再生混凝土泊松比试验结果分析

由表3可以看出,不同掺量 $\beta$ 情况下的再生混凝土泊松比在0.201~0.233之间,均值为0.217,



(a) 非金属超声检测分析仪



(b) 检测点布置示意图

图1 超声检测测点布置示意图

Fig. 1 Arrangement of measuring points of the ultrasonic testing

表3 超声检测与弹性模量测试结果

Tab. 3 Experimental results of ultrasonic testing and elastic modulus

棱柱体 试件组编号	再生细骨料掺量 /%	平均密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	超声波波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	动弹性模量 /GPa	静弹性模量 /GPa	动弹性模量与 静弹性模量之比
RACL-0	0	2 246	0.201	3 936	29.86	24.58	1.215
RACL-10	10	2 214	0.201	3 900	28.90	24.17	1.195
RACL-30	30	2 193	0.204	3 853	27.94	23.75	1.176
RACL-50	50	2 167	0.216	3 802	26.89	23.15	1.161
RACL-70	70	2 139	0.221	3 721	25.42	22.39	1.135
RACL-100	100	2 103	0.233	3 615	23.59	22.00	1.072

与普通混凝土相比,再生混凝土的泊松比略有增加<sup>[17]</sup>。与基准组再生混凝土试件相比,当 $\beta$ 的取值在30%及以下时,泊松比的最大差值仅为0.003,变化较小;当 $\beta$ 的取值在50%~100%时,泊松比的最大差值在0.015~0.032,变化较明显。因此,当 $\beta$ 的取值在30%及以下时,建议泊松比取0.200;当 $\beta$ 的取值在50%~100%时,建议泊松比在0.216~0.233这一范围内取值。

## 2.2 再生混凝土弹性模量试验结果分析

### 2.2.1 再生细骨料掺量 $\beta$ 对弹性模量的影响

从表3可以看出,未掺入再生细骨料的再生混凝土,动弹性模量和静弹性模量分别为29.86、24.58 GPa。动弹性模量和静弹性模量均随 $\beta$ 的增加而呈减小的趋势。随 $\beta$ 的增加,动弹性模量减小幅度依次为3.22%、6.43%、9.95%、14.87%和21.00%,静弹性模量减小幅度依次为1.67%、3.38%、5.86%、8.98%和10.50%。当 $\beta$ 由0%增至100%时,相对弹性模量 $E_d/E_c$ 的减小率在1.65%~11.77%这一范围内变化。 $E_d/E_c$ 随 $\beta$ 的变化趋势如图2所示。

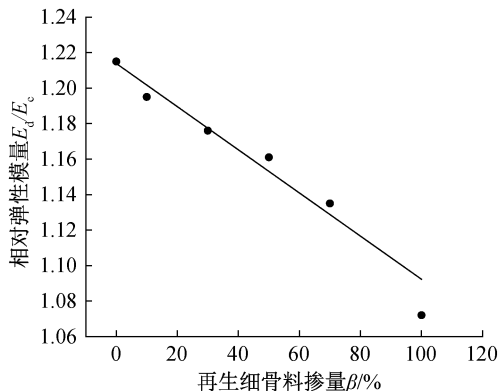


图2  $E_d/E_c$  随 $\beta$ 变化的关系曲线

Fig. 2 Variarion curve of  $E_d/E_c$  with  $\beta$

### 2.2.2 静弹性模量与动弹性模量的关系

从各组的静弹性模量 $E_c$ 与动弹性模量 $E_d$ 试验结果可以看出, $E_d/E_c > 1$ 。在此采用考虑 $\beta$ 变化的一次函数关系的线性回归方法对 $E_d/E_c$ 与 $\beta$ 的关系进行拟合,见式(2)。

$$E_d/E_c = \alpha_1 + \alpha_2\beta \quad (2)$$

式中: $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 为试验参数。

基于式(2)运用最小二乘法进行拟合分析,可得 $\alpha_1 = 1.2162$ , $\alpha_2 = -0.0013$ ,相关系数 $r = -0.9821$ ,决定系数 $R^2 = 0.9645$ ,可见再生混凝土 $E_d/E_c$ 与再生细骨料掺量 $\beta$ 具有较好的线性相关性,于是

$E_c$ 与 $E_d$ 的换算关系可表示为式(3)。

$$E_c = E_d / (1.2162 - 0.0013\beta) \quad (3)$$

因此,可用超声检测法得到不同 $\beta$ 情况下再生混凝土的动弹性模量,并基于式(3)计算得到其静弹性模量值。

### 2.2.3 静弹性模量与立方体抗压强度的关系

参照《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010—2010)<sup>[17]</sup>给出的普通混凝土静弹性模量与抗压强度的计算模型,结合文献[18]和本文的试验成果,得到的抗压强度与静弹性模量关系曲线图,如图3所示。将试验数据用最小二乘法进行拟合分析,得到了再生混凝土静弹性模量 $E_c$ 与其立方体抗压强度 $f_{cu}$ 间的函数关系方程(4)。因此,在由其他检测方法获得再生混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}$ 的条件下,可基于式(4)计算得到再生混凝土的静弹性模量。

$$E_c = 100f_{cu} / (39 + 2.9f_{cu}) \quad (4)$$

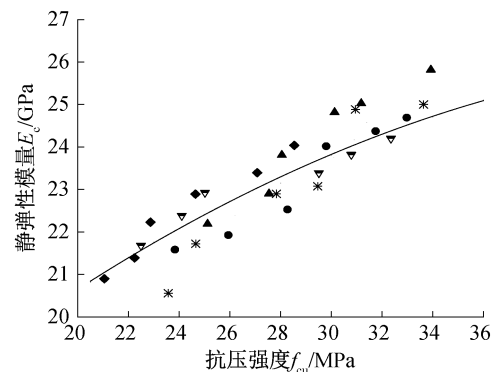


图3 抗压强度与静弹性模量关系曲线图

Fig. 3 Relationship between compressive strength and static elastic modulus

## 3 结论

基于全再生粗骨料条件下,通过对不同再生细骨料掺量下再生混凝土立方体抗压强度,以及再生混凝土棱柱体试件的超声波波速及其静弹性模量试验结果的分析研究,得到的相关结论如下:

1) 随再生细骨料掺量的增加,再生混凝土泊松比在0.201~0.233这一范围变化,且变化幅度较小。

2) 再生混凝土的动、静弹性模量均随再生细骨料取代率的增加而逐渐减小。根据试验测得的不同再生细骨料掺量下再生混凝土动弹性模量和静弹性模量的试验数据,提出了考虑再生细骨料



取代率的再生混凝土动、静弹性模量转换关系式,可为服役结构再生混凝土静弹性模量的超声测试与计算提供基础参考。

3)随着再生细骨料掺量的增加,再生混凝土立方体抗压强度及静弹性模量均呈逐渐减小趋势。给出了再生混凝土静弹性模量与其立方体抗压强度函数关系式,可为基于抗压强度检测成果的服役结构再生混凝土静弹性模量计算提供参考。

4)与天然骨料相比,再生骨料表面附着有旧砂浆,且在制备时会产生不同程度的损伤,这些因素均会导致再生混凝土抗压强度和弹性模量会有一些的波动,在今后的研究中还有待进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011)[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 364-383.
- [2] XIAO J Z. *Recycled aggregate concrete structures*[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [3] 杨成学, 杨文礼, 杨露. 现场测试混凝土弹性模量的方法研究[J]. *四川理工学院学报(自然科学版)*, 2010, 23(5): 504-507.
- [4] LU X B, SUN Q C, FENG W. Evaluation of modulus of elasticity of concrete using impact-echo method[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47(5): 231-239.
- [5] LUO Q X, BUNUEY J H. Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 1996, 10(4): 237-242.
- [6] 吴新漩. *混凝土无损检测技术手册*[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [7] 李伟, 陈刚, 吕毅刚. 卵石混凝土长期弹性模量无损测试试验研究[J]. *公路工程*, 2017, 42(3): 215-220.
- [8] 欧阳雪, 史才军, 史金华, 等. 超高性能混凝土受压力学性能及其弹性模量预测[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 296-304.
- [9] 吴晓刚. 页岩陶粒混凝土损伤演化及本构关系研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- [10] 方志, 周传波. 活性粉末混凝土动静弹性模量试验研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(9): 128-134.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *混凝土用再生粗骨料:GB/T 25177—2010*[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *混凝土和砂浆用再生细骨料:GB/T 25176—2010*[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [13] 远新. 基于再生骨料品质和取代率的再生混凝土配合比设计方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [14] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳. 再生混凝土的物理与力学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(6): 1684-1689.
- [15] 王玉清, 孙亮, 刘曙光, 等. PVA-ECC 受压弹性模量及泊松比试验研究[J]. *混凝土*, 2018(10): 17-21.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019*[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. *混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010*[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [18] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C H. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview[J]. *Materials and Structures*, 2006, 39: 655-664.

(责任编辑 张爱丽)