



# 再生混凝土抗碳化性能试验研究及理论分析

肖文广, 郭樟根, 吴政鹏, 屠新亚, 彭 阳

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

**摘要:**通过快速碳化试验,以再生骨料掺量、水灰比、水泥用量、原始混凝土强度和矿物掺合料为影响因素,对再生混凝土的碳化性能进行研究。试验结果表明:再生混凝土的碳化深度随水灰比、再生骨料掺量的增加而减小,随原始混凝土强度的增大和水泥用量的增加而增大,适量添加矿物掺合料能降低再生混凝土的碳化深度,提升其抗碳化性能。在已有的普通混凝土碳化模型研究基础上,结合本试验和中国其他学者的试验数据,建立了再生混凝土碳化深度预测模型,模型预测结果与试验值吻合较好。

**关键词:**再生混凝土;碳化;水灰比;预测模型

**中图分类号:**TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)06-0047-07

## Experimental research and theoretical analysis on carbonation resistance behavior of recycled aggregate concrete

Xiao Wenguang, Guo Zhanggen, Wu Zhengpeng, Tu Xinya, Peng Yang

(College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, 210009, P. R. China)

**Abstract:** An accelerated carbonation experimental analysis on carbonation resistance behavior of recycled concrete was carried out. The influence of recycled coarse aggregate replacement ratios, water cement ratios, cement content, the strength of natural concrete and the kinds of mineral admixture on the carbonation resistance of recycled concrete was studied. The results show that the carbonation depth decreases with the increase of water cement ratios and recycled coarse aggregate replacement ratios, while it increases with the growth of strength of natural concrete and cement content. Moreover, the addition of mineral admixture replacing cement partially can also decrease the carbonation depth of recycled concrete. Based on the current prediction models of natural concrete carbonation depth, the prediction model of recycled concrete carbonation depth was established through regression analysis of experimental data from this paper and the results of the model agreed well with the experimental results from other researchers in China.

**Key words:** recycled concrete; carbonation; water cement ratio; prediction model

**收稿日期:**2015-07-11

**基金项目:**国家自然科学基金(50708045)

**作者简介:**肖文广(1991-),男,主要从事结构工程研究,(E-mail)xwg2013@njtech.edu.cn。

郭樟根(通信作者),男,副教授,(E-mail)zhgguo@163.com。

**Received:**2015-07-11

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 50708045)

**Author brief:**Xiao Wenguang(1991-), main research interest: research and application of structural engineering,(E-mail)xwg2013@njtech.edu.cn.

Guo Zhanggen(corresponding author), associate professor,(E-mail)zhgguo@163.com.

随着中国城市化规模的发展,每年新建和拆除的混凝土结构建筑数量巨大,既产生了庞大的建筑垃圾,又消耗了大量的砂、石,造成了自然资源的过度消耗和环境破坏。2014年,建筑垃圾已突破 20 亿吨,而且该增长趋势将随着中国的经济社会发展更加明显。混凝土这种粗放式生产方式带来的环境污染和资源消耗是国民经济和社会发展中迫切需要解决的问题。将废弃混凝土回收利用,制作再生混凝土(RAC)并用于新建建筑物,这种技术有效解决了建筑垃圾的处理,同时,也有利于自然资源的节约和环境的保护<sup>[1]</sup>。

已有研究表明再生混凝土的耐久性与天然混凝土相比仍有较大差别,而耐久性工程应用的基础,其中,碳化性能又是影响耐久性的重要因素。因此,学者们针对再生混凝土的碳化性能开展了研究。肖建庄等<sup>[2]</sup>的研究表明:同水平条件下的抗碳化性能,再生混凝土低于普通混凝土。Kou 等<sup>[3]</sup>的研究得出了同样的结论,且碳化深度随再生骨料掺量的增加而增大。Evangelista 等<sup>[4]</sup>的研究结果表明:当细骨料 30% 取代时,再生混凝土碳化深度比普通混凝土小 27%;当细骨料全部取代时,则要大 35%。Sagoe-Crentsil 等<sup>[5]</sup>的试验表明:粗骨料全部取代时,再生混凝土碳化速率加快 10%。Otsuki 等<sup>[6]</sup>认为,当水灰比增大时,再生混凝土碳化深度增加。Geng 等<sup>[7]</sup>的研究表明:减小再生细骨料的粒径能增强再生混凝土的抗碳化性能。Jongsung 等<sup>[8]</sup>的试验研究结果表明:控制再生细骨料掺量在 30% 以内时,掺粉煤灰将不再降低再生混凝土的抗碳化性能。

笔者通过加速碳化试验,考察了再生骨料掺量、水灰比、水泥用量、原始混凝土强度及矿物掺合料对再生混凝土碳化性能的影响。同时,在现有普通混凝土碳化模型研究基础上,结合中国其他学者的试验数据并进行了分析,通过对试验数据的非线性回归分析,提出了再生混凝土碳化深度预测模型。

## 1 试验概况

### 1.1 材料

水泥采用海螺牌 32.5 MPa 普通硅酸盐水泥;天然粗骨料为碎石;细骨料为河砂,经测试为中砂,表观密度为 2 572 kg/m<sup>3</sup>;再生粗骨料采用南京工业大学结构试验中心废弃混凝土试块经人工破碎而成,粒径为 5~31.5 mm,连续级配;矿物掺合料选用粉煤灰和矿渣。

### 1.2 试验方案

参照文献[9]进行了再生混凝土配合比设计,考察再生骨料掺量、水灰比、水泥用量、原始混凝土强度、矿物掺合料对再生混凝土抗碳化性能的影响,碳化试验试件及分组见表 1。

抗压强度试验按照文献[10]进行,采用标准立方体试件,标准条件养护 28 d;碳化试验按照文献[11]进行,采用 15 组 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱试件,每组 3 个,测试碳化时间分别为 3、7、14、28 d 时再生混凝土的碳化深度。对达到碳化时间的试件按文献[10]进行劈裂试验,将断面喷浓度为 1% 的酚酞酒精溶液来标识各碳化时间下试块的碳化深度,酚酞与未碳化的混凝土碱性孔溶液反应变成红色,测量靠近边缘不变色部分的深度即为碳化深度。测量时取 8~9 个测点进行测量,取各测点碳化深度的平均值作为试件的碳化深度测定值。当测定点的碳化分界线上刚好嵌有粗骨料颗粒,可取该颗粒两侧处碳化深度的算术平均值作为该点的深度值。

表 1 碳化试件一览表

Table 1 Carbonation specimens

| 试件编号 | 原始混凝土强度 | 再生骨料掺量/% | 水灰比  | 胶凝材料             | 水泥用量/(kg·m <sup>-3</sup> ) |
|------|---------|----------|------|------------------|----------------------------|
| RCA1 |         |          | 0.40 |                  |                            |
| RCA2 | C30     | 100      | 0.50 | 普通硅酸盐水泥          | 400                        |
| RCA3 |         |          | 0.60 |                  |                            |
| RCB1 | C30     | 100      | 0.5  | 普通硅酸盐水泥          | 300                        |
| RCB2 |         |          |      |                  | 500                        |
| RCC1 | C20     |          |      |                  |                            |
| RCC2 | C25     |          |      |                  |                            |
| RCC3 | C35     | 100      | 0.5  | 普通硅酸盐水泥          | 400                        |
| RCC4 | C40     |          |      |                  |                            |
| RCD1 |         | 0        |      |                  |                            |
| RCD2 |         | 30       |      |                  |                            |
| RCD3 | C30     | 50       | 0.5  | 普通硅酸盐水泥          | 400                        |
| RCD4 |         | 75       |      |                  |                            |
| RCE1 |         |          |      | 普硅 90% + 粉煤灰 10% |                            |
| RCE2 | C30     | 100      | 0.5  | 普硅 90% + 矿渣 10%  | 400                        |

注:试件编号中 RC 表示再生混凝土;A~E 组表示碳化试件分别研究水灰比、水泥用量、原始混凝土强度、再生粗骨料掺量、矿物掺合料对碳化深度的影响;后面的数字 1~4 表示各组试件编号。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验主要结果

图1为各棱柱体试件在不同碳化时间下的实测图。表2为各碳化时间的碳化深度测试值及28 d抗压强度实测值。从图1可以看出:碳化时间越长,再生混凝土碳化深度越大,且由于混凝土内部密实度的差异,致使各部位碳化深度不同。

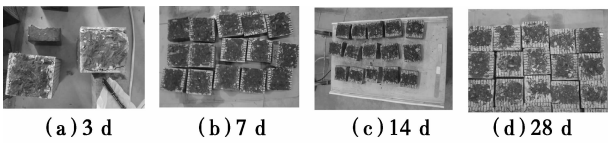


图1 各碳化时间下再生混凝土的碳化深度

Fig. 1 The carbonation depth of different time of recycled concrete

表2 再生混凝土碳化深度及28 d抗压强度

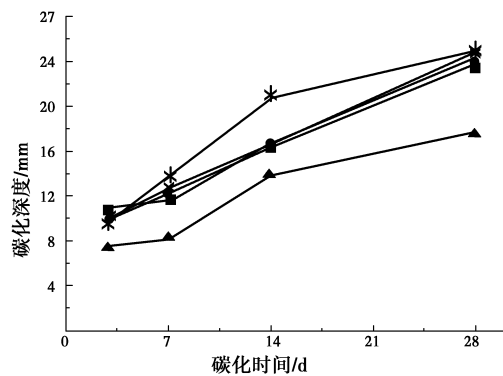
Table 2 The carbonation depth and 28 days compressive strength of recycled concrete

| 试件编号 | 碳化深度/mm |       |       |       | 28 d 强度/MPa |
|------|---------|-------|-------|-------|-------------|
|      | 3 d     | 7 d   | 14 d  | 28 d  |             |
| RCA1 | 8.30    | 9.90  | 14.10 | 16.50 | 25.50       |
| RCA2 | 9.60    | 13.70 | 21.00 | 25.00 | 22.80       |
| RCA3 | 10.00   | 10.50 | 20.90 | 24.20 | 18.80       |
| RCB1 | 8.10    | 12.40 | 19.20 | 24.00 | 19.90       |
| RCB2 | 5.70    | 6.90  | 10.00 | 13.30 | 26.70       |
| RCC1 | 8.10    | 8.70  | 14.10 | 20.90 | 23.30       |
| RCC2 | 9.30    | 9.90  | 16.70 | 21.90 | 24.60       |
| RCC3 | 9.00    | 10.60 | 16.20 | 23.20 | 20.70       |
| RCC4 | 8.10    | 8.30  | 12.90 | 16.80 | 23.20       |
| RCD1 | 10.90   | 11.70 | 16.50 | 23.50 | 21.70       |
| RCD2 | 10.10   | 12.20 | 16.60 | 24.00 | 24.20       |
| RCD3 | 7.40    | 8.40  | 13.80 | 17.40 | 21.30       |
| RCD4 | 10.40   | 12.90 | 16.40 | 24.70 | 25.10       |
| RCE1 | 7.80    | 11.10 | 14.00 | 17.90 | 24.70       |
| RCE2 | 8.70    | 9.50  | 12.80 | 17.60 | 26.60       |

### 2.2 试验结果分析

2.2.1 再生骨料掺量的影响 图2所示为再生骨料掺量对于碳化深度的影响规律。从图2中可以看出:当再生骨料掺量较小时( $<50\%$ ),再生混凝土碳化深度增加不大,当再生骨料掺量为 $50\%$ 时碳化深度甚至降低,这是因为当再生骨料掺量较小时,再

生骨料表面包裹的老旧砂浆增加了再生混凝土的水泥含量,增加了内部密实程度,有利于再生混凝土抗碳化;而当再生骨料掺量继续增大至 $100\%$ ,由于再生骨料本身孔隙率较大,且骨料破碎会产生微裂缝, $CO_2$ 在再生混凝土中扩散的通道增多、速度加快,这种不利效应比再生骨料表面老旧砂浆增加的水泥含量所带来的有益效应更显著,使得再生混凝土碳化深度增加,抗碳化能力降低。

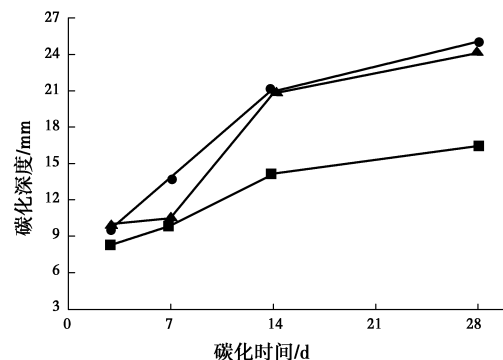


注: ■—RCD1 ●—RCD2 ▲—RCD3 ×—RCD4 \*—RCA2

图2 再生骨料掺量对碳化深度的影响

Fig. 2 Effects of recycled aggregate replacement ratios on carbonation depth

2.2.2 水灰比的影响 图3所示为水灰比对碳化深度的影响规律。从图3中可以看出:当碳化时间不超过7 d时,水灰比的影响不大;但随后至28 d时,随水灰比的增大,碳化深度明显增加,且水灰比大于0.5时,碳化深度的增加趋于平缓,总体上水灰比增大使得碳化深度增加。这是因为水灰比越大,单位体积内水泥用量越少,再生混凝土内部水泥石的密实度越小,空隙率将变大, $CO_2$ 将更容易扩散到内部。



注: ■—RCA1 ●—RCA2 ▲—RCA3

图3 水灰比对碳化深度的影响

Fig. 3 Effects of water cement ratios on carbonation depth

2.2.3 水泥用量对碳化深度的影响 图4所示为

水泥用量对碳化深度的影响规律。从图 4 中可以看出:控制水泥用量  $400 \text{ kg/m}^3$  以内时,再生混凝土的碳化深度的变化不明显,但当水泥用量继续增大至  $500 \text{ kg/m}^3$  时,碳化深度下降较大,抗碳化能力显著增强。其原因是在同水灰比条件下,单位体积内水泥的用量增加,提高了混凝土内部密实程度,使得  $\text{CO}_2$  进入的通道变少,减小了碳化深度,抗碳化能力增大。

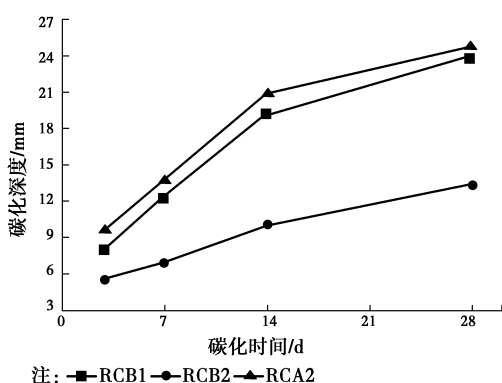


图 4 水泥用量对碳化深度的影响

Fig. 4 Effects of cement content on carbonation depth

2.2.4 原始混凝土强度的影响 图 5 所示为原始混凝土强度对碳化深度的影响规律。从图 5 中可以看出:基本上随着原始混凝土强度的增大,再生混凝土碳化深度减小,抗碳化能力增加。以原始强度 C30 作为分界线,强度小于 C30 时,碳化深度随强度增大而增加,强度大于 C30 时,碳化深度随强度增加而减小。特别是当强度为 C40 时,碳化深度减小非常明显。主要原因是由强度高的原始混凝土破碎的再生骨料表面老旧砂浆的强度较高,使得再生骨料与新砂浆间形成的界面更密实,这种影响在原始强度不超过 C30 时并不明显,而当强度超过 C30 后该影响显著,再生混凝土的抗碳化性能得以提高。

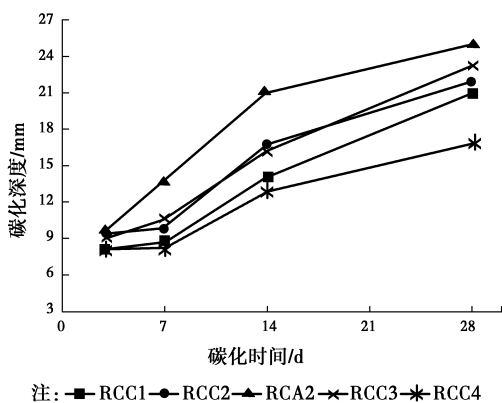


图 5 原始混凝土强度对碳化深度的影响

Fig. 5 Effects of original strength on carbonation depth

2.2.5 矿物掺合料的影响 图 6 所示为矿物掺和料对碳化深度的影响规律。从图 6 中可以看出:掺和料的加入明显降低了再生混凝土的碳化深度。这是由于矿物掺合料改善了再生骨料与新水泥浆体间的界面,此外也使得混凝土内部更为密实。同时,掺入粉煤灰既能增强混凝土密实度,也会导致内部碱性成分减少,但前者的效应要大于后者。

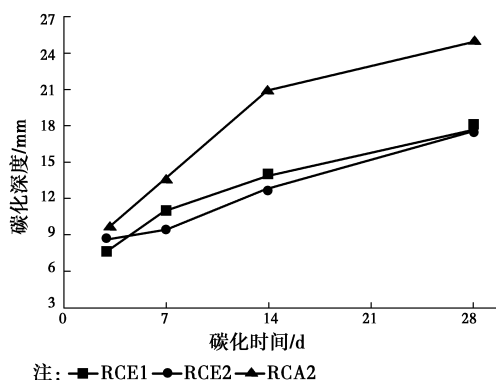


图 6 矿物掺和料对碳化深度的影响

Fig. 6 Effects of mineral admixture on carbonation depth

### 3 再生混凝土碳化深度预测模型

目前,普通混凝土碳化深度计算模型主要有 3 类:基于扩散理论的理论模型、基于碳化试验结果统计的经验模型、基于扩散理论与试验结果的模型。其中,理论模型中各物理量含义明确,但难以确定,不便应用于工程实际中;经验模型实际应用方便,但是,其适用条件有所限制,也缺乏足够的理论基础;基于扩散理论与试验结果模型,注重模型与试验数据的比对,是比较理想的预测模型。本文在现有普通混凝土基于扩散理论与试验结果的模型基础上,结合本试验和同济大学雷斌等<sup>[12]</sup>的数据共计 33 组,建立了再生混凝土碳化深度计算模型。

#### 3.1 现有普通混凝土基于扩散理论与试验结果的计算模型

在扩散理论和碳化机理基础上,张誉等<sup>[13]</sup>提出了混凝土碳化深度的数学模型

$$X_c = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/(\gamma_c C) - 0.34}{\gamma_{HD} \gamma_c C} C_0} \sqrt{t} \quad (1)$$

#### 3.2 再生混凝土碳化深度计算模型

3.2.1 再生混凝土碳化预测数学模型 在式(1)基础上,引入原始混凝土强度与再生混凝土强度的比值为影响因子,结合试验数据回归拟合得到再生混

凝土碳化深度的预测数学模型

$$X_c = 839(1 - RH)^{1.1} \ln\left(\frac{f_{cu}}{f_{cu}^{RC}} + 7.03\right) \cdot \sqrt{\frac{W/(\gamma_c C) - 0.34}{\gamma_{HD} \gamma_c C} C_0} \sqrt{t} \quad (2)$$

式中:  $X_c$  为碳化深度;  $RH$  为环境相对湿度;  $f_{cu}^{RC}$  为再生混凝土 28 d 抗压强度;  $f_{cu}$  为原始混凝土 28 d 抗压强度;  $W$  为单位体积混凝土的用水量;  $C$  为单位体积混凝土的水泥用量;  $\gamma_c$  为水泥品种修正系数, 波特兰水泥取 1, 其他品种水泥取  $= 1 - \text{掺合料含量}$ ;  $\gamma_{HD}$  为水泥水化程度修正系数, 超过 90 d 养护取 1, 28 d 养护取 0.85, 中间按线性插入取值;  $C_0$  为二氧化碳浓度;  $t$  为碳化时间。

3.2.2 再生混凝土碳化预测经验模型 在工程检测中, 水泥用量、水灰比等数据获取困难, 即使获取也难以保证其准确性, 而混凝土强度检测技术非常成熟。因此, 参考《混凝土结构耐久性评定标准》(CECS220:2007)<sup>[14]</sup> 并引入再生混凝土强度为影响因子, 结合试验数据回归拟合得到再生混凝土碳化深度的预测经验模型

$$X_c = K_{CO_2} K_{kl} K_{ks} T^{1/4} RH^{1.5} (1 - RH) \cdot \left(\frac{131}{f_{cu}^{RC}} + 8.7\right) \sqrt{t} \quad (3)$$

式中:  $K_{CO_2} = \sqrt{C_0/0.03}$ ,  $C_0$  为二氧化碳浓度;  $K_{kl}$  为位置影响系数, 构件角区取 1.4, 非角区取 1.0;  $K_{ks}$  为工作应力影响系数, 受压时取 1.0, 受拉时取 1.1;  $T$  为环境温度;  $RH$  为环境相对湿度;  $f_{cu}^{RC}$  为再生混凝土 28 d 抗压强度;  $t$  为碳化时间。

4 模型计算结果与试验结果对比分析

按照式(2)和(3)计算得到的再生混凝土 28 d 的碳化深度及与试验值的对比如表 3 所示。表 3 中  $E/T$  与  $E/M$  的均值分别是 0.91 和 0.94, 均方差分别是 0.35 和 0.19, 变异系数分别是 0.38 和 0.20, 说明总体上模型预测结果与试验值比较接近。

表 3 模型预测结果与试验值对比

Table 3 Comparison between model predictions and test results

| 试件编号 | 试验值 $E$ | 数学模型      | 经验模型      | $E/T$ | $E/M$ |
|------|---------|-----------|-----------|-------|-------|
|      |         | 公式计算值 $T$ | 公式计算值 $M$ |       |       |
| RCA1 | 16.50   | 14.32     | 23.17     | 1.15  | 0.71  |
| RCA2 | 23.70   | 23.24     | 22.17     | 1.02  | 1.07  |
| RCA3 | 24.20   | 30.27     | 25.10     | 0.80  | 0.96  |
| RCB1 | 24.00   | 27.27     | 24.48     | 0.88  | 0.98  |

续表 3

| 试件编号 | 试验值 $E$ | 数学模型      | 经验模型      | $E/T$ | $E/M$ |
|------|---------|-----------|-----------|-------|-------|
|      |         | 公式计算值 $T$ | 公式计算值 $M$ |       |       |
| RCB2 | 13.30   | 20.71     | 21.82     | 0.64  | 0.61  |
| RCC1 | 20.90   | 22.80     | 22.96     | 0.91  | 0.91  |
| RCC2 | 21.90   | 23.02     | 22.48     | 0.95  | 0.97  |
| RCC3 | 23.20   | 23.91     | 24.10     | 0.97  | 0.96  |
| RCC4 | 16.80   | 23.95     | 23.02     | 0.70  | 0.73  |
| RCD1 | 23.50   | 23.52     | 23.65     | 1.00  | 0.99  |
| RCD2 | 24.00   | 23.32     | 22.64     | 1.03  | 1.06  |
| RCD3 | 17.40   | 23.55     | 23.81     | 0.74  | 0.73  |
| RCD4 | 24.70   | 23.27     | 22.33     | 1.06  | 1.11  |
| RCE1 | 17.90   | 28.48     | 22.45     | 0.63  | 0.80  |
| RCE2 | 17.60   | 28.34     | 21.85     | 0.62  | 0.81  |
| A1   | 14.70   | 5.64      | 18.84     | 2.61  | 0.78  |
| A2   | 16.80   | 13.86     | 19.20     | 1.21  | 0.88  |
| A3   | 17.10   | 22.91     | 20.57     | 0.75  | 0.83  |
| A4   | 23.50   | 29.51     | 21.79     | 0.80  | 1.08  |
| A5   | 28.50   | 35.68     | 25.18     | 0.80  | 1.13  |
| B1   | 19.60   | 32.72     | 21.73     | 0.60  | 0.90  |
| B2   | 18.20   | 26.69     | 21.61     | 0.68  | 0.84  |
| B3   | 20.90   | 20.50     | 20.64     | 1.02  | 1.01  |
| C1   | 21.20   | 22.87     | 23.45     | 0.93  | 0.90  |
| C2   | 14.30   | 24.34     | 22.52     | 0.59  | 0.63  |
| C3   | 17.10   | 23.10     | 21.45     | 0.74  | 0.80  |
| D1   | 23.10   | 28.29     | 21.67     | 0.82  | 1.07  |
| D2   | 29.20   | 28.02     | 20.51     | 1.04  | 1.42  |
| D3   | 25.80   | 28.01     | 20.47     | 0.92  | 1.26  |
| E1   | 16.50   | 23.09     | 21.50     | 0.71  | 0.77  |
| E2   | 17.00   | 22.82     | 20.13     | 0.74  | 0.84  |
| E3   | 22.00   | 22.89     | 20.47     | 0.96  | 1.07  |
| E4   | 26.00   | 22.83     | 20.14     | 1.14  | 1.29  |
| 均值   |         |           |           | 0.91  | 0.94  |
| 均方差  |         |           |           | 0.35  | 0.19  |
| 变异系数 |         |           |           | 0.38  | 0.20  |

注: 表中 A1~E4 为节选自同济大学雷斌等<sup>[12]</sup>的试验数据。

按式(2)和式(3)分别绘制了再生混凝土预测数学模型和经验模型的拟合曲线及与试验数据对比如图 7 和 8 所示。图 7 中  $f_1/f_2$  表示原始混凝土强度与再生混凝土强度的比值。从图 7 和图 8 可以看出: 大部分试验值均匀分布在拟合曲线周围, 说明本文模型具有较好的可靠性。

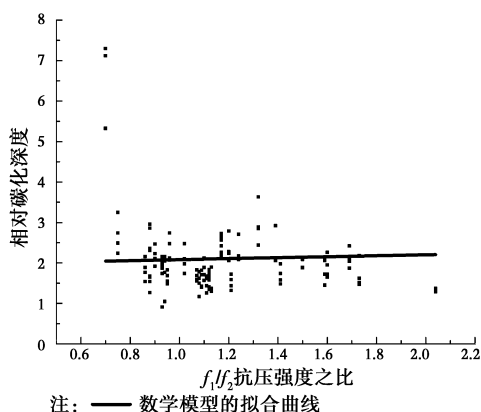


图 7 数学模型与试验结果对比

Fig. 7 Comparison between mathematical model and test results

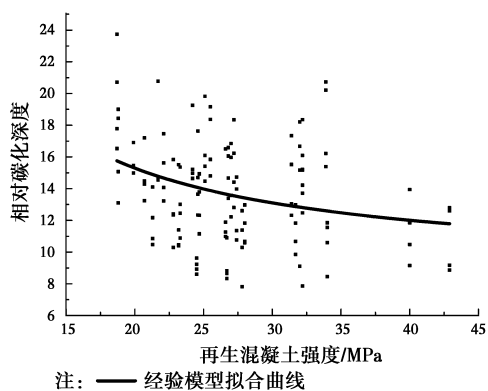


图 8 经验模型与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between empirical model and test results

## 5 结 论

1) 再生骨料掺量对碳化深度有一定的影响, 总体上再生混凝土的碳化深度随着再生骨料掺量的增大而稍有增大。

2) 与普通混凝土相比, 再生混凝土碳化性能略有降低, 碳化深度稍有增加。本试验中, 再生混凝土在 28 d (相当于室外大气环境 50 a) 的碳化深度均不超过 25 mm。

3) 随着水灰比的增大, 再生混凝土的碳化深度逐渐增大; 同水灰比下, 当水泥用量低于  $400 \text{ kg/m}^3$  时, 再生混凝土的碳化深度随水泥用量增加略有增大, 但当水泥用量高于  $400 \text{ kg/m}^3$  时, 再生混凝土的碳化深度随水泥用量增加而显著减少。

4) 原始混凝土强度对再生混凝土碳化性的影响与普通混凝土相类似, 其碳化深度基本上随着原始混凝土强度增大而减小。

5) 矿物掺合料 (粉煤灰、矿渣) 对于再生混凝土碳化深度有影响, 试验得出的结论是: 矿物掺合料的加入使得再生混凝土的碳化性能得到提升。

6) 参考普通混凝土碳化深度的预测模型, 通过试验数据的回归分析, 得出了关于再生混凝土碳化深度的预测数学模型与预测经验模型。

### 参考文献:

- [1] 彭阳. 再生混凝土抗碳化性能试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2012.  
Peng Y. Experimental research on carbonation resistance behavior of recycled concrete [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2012. (in Chinese)
- [2] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土, 2008(5): 83-89.  
Xiao J Z, Lei B. Research on durability of recycled concrete [J]. Concrete, 2008(5): 83-89. (in Chinese)
- [3] Kou S C, Poon C S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 69-76.
- [4] Evangelista L, de Brito J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(1): 9-14.
- [5] Sagoe-Crentsil K K, Brown T, Taylor A H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate [J]. Cement Concrete Research, 2001, 31(5): 707-712.
- [6] Otsuki N, Miyazato S, Yodsudjai W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5): 443-451.
- [7] Geng J, Sun J Y. Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 814-820.
- [8] Sim J S, Park C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate [J]. Waste Management, 2011, 31(11): 2352-2360.
- [9] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
JGJ 55—2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture &

- Building Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 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,2002.
- GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [11] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- GB/T 50082—2009 Standard for test method of long-term performance and durability on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 雷斌,肖建庄. 再生混凝土抗碳化性能的研究[J]. 建筑材料学报,2008,11(5):605-611.
- Lei B, Xiao J Z. Research on carbonation resistance of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2008,11(5):605-611. (in Chinese)
- [13] 张誉,蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑,1998,28(1):16-19.
- Zhang Y, Jiang L X. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. Industrial Construction, 1998, 28(1): 16-19. (in Chinese)
- [14] CECS220:2007 混凝土结构耐久性评定标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- CECS220:2007 Standard for durability assessment of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2007. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)