

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.007



再生粗骨料混凝土碳化分析的多场耦合模型及验证

余波¹, 刘才勇¹, 杨绿峰^{1,2}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 工程防灾与结构安全教育部重点实验室 南宁 530004;

2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 南宁 530028)

摘要:再生粗骨料混凝土的碳化是一个复杂的物理扩散和化学反应过程, 其分析和预测较为困难。鉴于此, 基于再生粗骨料混凝土的碳化机理, 结合再生粗骨料混凝土中 CO_2 的扩散定律和可碳化物质的质量守恒定律, 综合考虑再生粗骨料混凝土中 CO_2 的有效扩散系数、碳化反应速率系数、可碳化物质的量、再生粗骨料的表面附着砂浆等重要参数的影响, 建立了再生粗骨料混凝土碳化分析的多场耦合模型, 并通过试验数据验证了模型的有效性和适用性。

关键词:混凝土; 再生粗骨料; 碳化; 附着砂浆; 矿物掺合料

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0050-08

Multi-field coupled model and its verification for carbonation analysis of recycled coarse aggregate concrete

Yu Bo¹, Liu Caiyong¹, Yang Lufeng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering & Architecture Guangxi University, Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Nanning 530004, P. R. China; 2. Department of Housing and Urban-Rural Development of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530028, P. R. China)

Abstract: Carbonation of recycled coarse aggregate (RCA) concrete was a complicated physical diffusion and chemical reaction process, which was difficult to analyze and predict. According to the carbonation mechanism of the RCA concrete, a multi-field coupled model for carbonation analysis of the RCA concrete was developed by combining the diffusion rule of CO_2 within the RCA concrete with the conservation law of mass for the carbonatable substances. The proposed model adopted effective diffusion coefficient of CO_2 , coefficient of carbonation reaction rate, amount of carbonatable substances and adhesive mortar of the RCA as major control parameters. Efficiency and applicability of the proposed model were validated by comparing with experimental data.

Keywords: concrete; recycled coarse aggregate; carbonation; adhesive mortar; mineral admixture

收稿日期: 2016-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51368006, 51478125); 广西重点实验室系统性研究项目(2013ZDX06)

作者简介: 余波(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性和抗震分析研究, (E-mail) gxuyubo@gxu.edu.cn.

Received: 2016-06-03

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NSFC)(No. 51368006, 51478125); Systematic Project of Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety (No. 2013ZDX06)

Author brief: Yu Bo (1981-), associate professor, PhD, main research interests: durability and seismic analysis of concrete structures, (E-mail) gxuyubo@gxu.edu.cn.

与天然粗骨料相比,再生粗骨料表面附着的硬化水泥砂浆疏松多孔且棱角较多,导致再生粗骨料混凝土的孔隙率明显高于天然粗骨料混凝土。由于混凝土的孔隙率直接影响外部环境腐蚀性二氧化碳向混凝土内部的传输,所以,再生粗骨料混凝土更容易发生碳化^[1]。再生粗骨料混凝土的碳化是一个复杂的物理扩散和化学反应过程,不仅与混凝土的材料参数有关,而且与环境条件密切相关,导致再生粗骨料混凝土的碳化分析和预测较为困难。

目前,再生粗骨料混凝土的碳化分析主要包括经验模型和半经验模型两大类。经验模型主要基于试验数据的拟合分析,直接建立再生粗骨料混凝土的碳化深度与水灰比、水泥用量、再生粗骨料取代率、温度、相对湿度、环境 CO₂ 浓度等参数之间的经验关系。肖建庄等^[2]基于所收集的 28 组试验数据,以混凝土抗压强度作为控制参数,并考虑环境 CO₂ 浓度、工作应力、环境温度、相对湿度等因素的影响,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型;钟荣富等^[3]基于 32 组试验数据,综合考虑环境 CO₂ 浓度、温度、相对湿度和混凝土抗压强度等因素的影响,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型;耿欧等^[4]考虑水灰比、再生粗骨料取代率、水泥用量、温度、环境 CO₂ 浓度等因素的影响,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型。总的来说,上述经验模型的形式简单,便于工程应用,但是由于经验模型缺乏严密的理论推导,其适用性局限于特定的材料参数和环境条件。半经验模型基于混凝土的碳化机理,通过理论推导建立混凝土碳化深度与水灰比、环境 CO₂ 浓度、矿物掺合料等因素之间的关系,并结合试验数据和工程经验,引入温度、相对湿度、再生粗骨料、水泥品种等因素的修正系数。WANG 等^[5]在普通混凝土碳化分析的理论模型基础上,结合所收集的 28 组试验数据,通过引入再生粗骨料影响系数,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型;类似地,肖文广等^[6]通过引入混凝土强度、相对湿度、水灰比、水泥用量、水泥品种、水泥水化程度等因素的修正系数,建立了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型。总的来说,半经验模型具有一定的理论基础,但是仍然需要基于特定的试验数据来拟合分析确定温度、相对湿度、再生粗骨料、水泥品种等因素的经验修正系数,而无法定量分析上述因素的影响,导致适用性有限。综上所述,目前缺乏一种具有严密理论基础、而且能够综合考虑水灰比、矿物掺合料等材料参数以及温度、湿度、CO₂ 浓度等环境条件影响的再生粗骨料混凝土的碳

化分析模型。

本文基于再生粗骨料混凝土的碳化机理,结合 CO₂ 在再生粗骨料混凝土中的扩散定律和可碳化物质的质量守恒定律,以再生粗骨料混凝土中 CO₂ 的有效扩散系数、碳化反应速率系数和可碳化物质的量为主要参数,并考虑再生粗骨料表面附着砂浆的影响,建立了再生粗骨料混凝土碳化分析的多场耦合模型,并通过试验数据对比验证了该模型的有效性和适用性。

1 碳化分析的微分控制方程

基于混凝土碳化的物理扩散和化学反应过程,根据各反应物质的质量平衡条件,可以建立再生粗骨料混凝土碳化分析的多场耦合模型。以一维碳化为例,对应的微分控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{CO}_2}(x, t) \frac{\partial C_{\text{CO}_2}(x, t)}{\partial x} \right) = C_{\text{CO}_2}(x, t) (k_{\text{CH}} \cdot C_{\text{CH}}(x, t) + 3k_{\text{CSH}} \cdot C_{\text{CSH}}(x, t)) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_{\text{CH}}(x, t) = -k_{\text{CH}} \cdot C_{\text{CH}}(x, t) \cdot C_{\text{CO}_2}(x, t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C_{\text{CSH}}(x, t) = -k_{\text{CSH}} \cdot C_{\text{CSH}}(x, t) \cdot C_{\text{CO}_2}(x, t) \quad (3)$$

式中: x 为混凝土内部某点到暴露面的距离, m; t 为碳化时间, s; C_{CO_2} 、 C_{CH} 和 C_{CSH} 分别表示混凝土中 x 处 t 时刻的二氧化碳(CO₂)、氢氧化钙(CH)和水化硅酸钙(CSH)的体积摩尔浓度, mol/m³; $D_{\text{CO}_2}(x, t)$ 为混凝土中 x 处 t 时刻的 CO₂ 有效扩散系数, m²/s; k_{CH} 和 k_{CSH} 分别表示 CH 和 CSH 参与反应的速率系数, m³/mol/s。

与式(1)~(3)所定义的多场耦合模型所对应的初始条件为 $C_{\text{CO}_2}(x, t) \Big|_{t=0} = 0$ 、 $C_{\text{CH}}(x, t) \Big|_{t=0} = C_{\text{CH}}^0$ 和 $C_{\text{CSH}}(x, t) \Big|_{t=0} = C_{\text{CSH}}^0$, 边界条件为 $C_{\text{CO}_2}(x, t) \Big|_{x \in \Gamma} = C_{\text{CO}_2}^0$ 和 $\frac{\partial C_{\text{CO}_2}(x, t)}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0$ 。其中, C_{CH}^0 和 C_{CSH}^0 分别为初始时刻再生粗骨料混凝土中 CH 和 CSH 的体积摩尔浓度, mol/m³; $C_{\text{CO}_2}^0$ 为再生粗骨料混凝土表面的 CO₂ 摩尔浓度, mol/m³; Γ 表示混凝土的暴露面。

2 碳化分析的模型参数

2.1 再生粗骨料混凝土中可碳化物质的量

再生粗骨料混凝土中的可碳化物质有 CH 和

CSH,主要来源于再生粗骨料混凝土中的水泥、矿物掺合料以及再生粗骨料的表面附着砂浆。再生粗骨料混凝土经水泥水化和矿物掺合料二次水化后生成的 CH 和 CSH 的量(记为 C_{CH}^0 和 C_{CSH}^0)分别为^[7]

$$C_{CH}^0 = C_{CH}^c + \Delta C_{CH}^f + \Delta C_{CH}^{bs} + \Delta C_{CH}^s + C_{CH}^r \quad (4)$$

$$C_{CSH}^0 = C_{CSH}^c + \Delta C_{CSH}^f + \Delta C_{CSH}^{bs} + \Delta C_{CSH}^s + C_{CSH}^r \quad (5)$$

式中: C_{CH}^c 和 C_{CSH}^c 分别表示再生粗骨料混凝土中水泥水化生成的 CH 和 CSH; ΔC_{CH}^f 、 ΔC_{CH}^{bs} 和 ΔC_{CH}^s 分别表示再生粗骨料混凝土中粉煤灰、矿粉和硅灰发生二次水化生成的 CH; ΔC_{CSH}^f 、 ΔC_{CSH}^{bs} 和 ΔC_{CSH}^s 分别表示再生粗骨料混凝土中粉煤灰、矿粉和硅灰发生二次水化生成的 CSH; C_{CH}^r 和 C_{CSH}^r 分别表示再生粗骨料表面附着砂浆中的 CH 和 CSH。

2.1.1 再生粗骨料混凝土中水泥水化生成的 CH 和 CSH 再生粗骨料混凝土中水泥水化生成的 CH 和 CSH,可以由参与水泥水化的各反应物的物质的量来确定。根据 ASTM 150 中的鲍格公式^[8],可以确定单位体积硅酸盐水泥混凝土中水泥完全水化后的可碳化物质的量为

$$C_{CH}^c = \frac{3}{2}C_{C_3S}^0 + \frac{1}{2}C_{C_2S}^0 - C_{C_3A}^0 - 4C_{C_4AF}^0 + C_{CSH_2}^0 = 2.719 \times B \times (1 - \beta_f - \beta_{bs} - \beta_s) \quad (6)$$

$$C_{CSH}^c = \frac{1}{2}C_{C_3S}^0 + \frac{1}{2}C_{C_2S}^0 = 1.833 \times B \times (1 - \beta_f - \beta_{bs} - \beta_s) \quad (7)$$

式中: $C_{C_3S}^0$ 、 $C_{C_2S}^0$ 、 $C_{C_3A}^0$ 、 $C_{C_4AF}^0$ 和 $C_{CSH_2}^0$ 分别表示再生粗骨料混凝土水泥熟料中的硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙和二水硫酸钙的物质的量, mol; B 为再生粗骨料混凝土中胶凝材料用量, kg/m^3 ; β_f 、 β_{bs} 和 β_s 分别表示再生粗骨料混凝土中粉煤灰、矿粉和硅灰占胶凝材料的质量百分比, %。

普通硅酸盐水泥是在硅酸盐水泥中掺入 6%~20%的混合材料制成的,通常近似取 15%,则单位体积普通硅酸盐水泥混凝土中水泥完全水化后的可碳化物质的量为

$$C_{CH}^c = 2.311 \times B \times (1 - \beta_f - \beta_{bs} - \beta_s) \quad (8)$$

$$C_{CSH}^c = 1.558 \times B \times (1 - \beta_f - \beta_{bs} - \beta_s) \quad (9)$$

2.1.2 矿物掺合料发生二次水化生成 CH 和 CSH 的物质的量 粉煤灰中的活性成分 SiO_2 和 Al_2O_3 会与 CaO 水化生成的 CH 发生二次水化反应。根据粉煤灰的氧化物成分^[9],可以确定再生粗骨料混凝土中粉煤灰的二次水化反应引起的 CH 和 CSH 的改变量为

$$\Delta C_{CH}^f = \left(\frac{W_{CaO}}{56} - 1.5\gamma \frac{W_{SiO_2}}{60} - 4\gamma \frac{W_{Al_2O_3}}{102} \right) \times$$

$$\beta_f \times B \times 10^3 = -4.066\beta_f B \quad (10)$$

$$\Delta C_{CSH}^f = \beta_f \times B \times 0.5 \times \gamma \frac{W_{SiO_2}}{60} \times 10^3 = 0.820\beta_f B \quad (11)$$

式中: W_{CaO} 、 W_{SiO_2} 和 $W_{Al_2O_3}$ 分别表示粉煤灰组分中 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 的质量百分比; γ 为粉煤灰二次水化的反应程度系数,近似取 $\gamma = 0.2$ ^[9]。

矿粉中的活性成分 SiO_2 和 Al_2O_3 会与 CaO 水化生成的 CH 发生二次水化反应。根据矿粉的氧化物成分^[9],可以确定再生粗骨料混凝土中矿粉发生二次水化反应引起的 CH 和 CSH 的改变量为

$$\Delta C_{CH}^{bs} = \left(\frac{W_{CaO}}{56} - 1.5\eta \frac{W_{SiO_2}}{60} - 4\eta \frac{W_{Al_2O_3}}{102} \right) \times \beta_{bs} \times B \times 10^3 = 3.256\beta_{bs} B \quad (12)$$

$$\Delta C_{CSH}^{bs} = \beta_{bs} \times B \times 0.5\eta \frac{W_{SiO_2}}{60} \times 10^3 = 0.825\beta_{bs} B \quad (13)$$

式中: η 为矿粉二次水化的反应程度系数,近似取 $\eta = 0.3$ ^[9]。

硅灰中的活性成分 SiO_2 会与 CaO 水化生成的 CH 发生二次水化反应。当硅灰二次水化的反应程度系数近似取 $\lambda = 0.9$ 、 SiO_2 的质量分数近似取 90%时^[9],结合矿粉的氧化物成分,可以确定再生粗骨料混凝土中矿粉发生二次水化引起的 CH 和 CSH 的改变量为

$$\Delta C_{CH}^s = -\beta_s \times B \times 1.5 \times \lambda \frac{W_{SiO_2}}{60} \times 10^3 = -20.25\beta_s B \quad (14)$$

$$\Delta C_{CSH}^s = \beta_s \times B \times 0.5 \times \lambda \frac{W_{SiO_2}}{60} \times 10^3 = 6.75\beta_s B \quad (15)$$

根据上述分析,矿物掺合料发生二次水化生成的 CH 和 CSH 的物质的量为

$$\Delta C_{CH}^{ad} = B(-4.066\beta_f + 3.256\beta_{bs} - 20.25\beta_s) \quad (16)$$

$$\Delta C_{CSH}^{ad} = B(0.820\beta_f + 0.825\beta_{bs} + 6.75\beta_s) \quad (17)$$

2.1.3 再生粗骨料表面附着砂浆中 CH 和 CSH 的物质的量 基于文献[10]中的试验数据,可以建立再生粗骨料表面砂浆附着率的计算公式

$$\beta = 10 \times (W_a - 1.33) \quad (18)$$

式中: β 为再生粗骨料的表面砂浆附着率,%; W_a 为再生粗骨料的吸水率, %。结合再生粗骨料表面的附着砂浆率,可以确定单方再生粗骨料表面附着砂浆的质量为

$$m_s^r = G \times \beta \times 10^{-2} = 0.1 \times G \times (W_a - 1.33) \quad (19)$$

式中: m_s^r 为单方再生粗骨料表面附着砂浆的质量, kg/m^3 ; G 为单方再生粗骨料混凝土的再生粗骨料用量, kg/m^3 。进而可以确定单方再生粗骨料表面附着砂浆中水泥的质量为

$$m_c^r = R_C \times m_s^r = 0.1 \times R_C \times G \times (W_a - 1.33) \quad (20)$$

式中: m_s^r 为单方再生粗骨料表面附着砂浆中水泥的质量, kg/m^3 ; R_C 为普通混凝土中的水泥与水泥砂浆的质量比, 根据试验数据统计分析, 近似取 $R_C = 0.39$ 。

结合式(8)、(9)和(20), 可以确定单方再生粗骨料表面附着砂浆中的 CH 和 CSH 的物质的量为

$$C_{\text{CH}}^r = 2.311 \times m_c^r = 9.013 \times 10^{-2} \times G \times (W_a - 1.33) \quad (21)$$

$$C_{\text{CSH}}^r = 1.558 \times m_c^r = 6.076 \times 10^{-2} \times G \times (W_a - 1.33) \quad (22)$$

结合式(8)、(9)、(16)、(17)、(21)和(22), 再生粗骨料混凝土经水泥水化和矿物掺合料二次水化后的可碳化物质的量为

$$C_{\text{CH}}^0 = B \times (2.311 - 6.377\beta_f + 0.945\beta_{\text{bs}} - 22.561\beta_s) + 9.013 \times 10^{-2} \times G \times (W_a - 1.33) \quad (23)$$

$$C_{\text{CSH}}^0 = B \times (1.558 - 0.738\beta_f - 0.733\beta_{\text{bs}} + 5.192\beta_s) + 6.076 \times 10^{-2} \times G \times (W_a - 1.33) \quad (24)$$

2.2 再生粗骨料混凝土内 CO_2 的有效扩散系数

再生粗骨料混凝土中的 CO_2 扩散过程主要受到材料因素和外界环境条件的影响。其中, 再生粗骨料混凝土的孔隙率是影响 CO_2 扩散的主要材料因素, 而温度和相对湿度是影响 CO_2 扩散的主要环境因素。综合考虑上述因素的影响, 可以建立再生粗骨料混凝土中 CO_2 的有效扩散系数。

$$D_{\text{CO}_2}(x, t) = \eta \cdot [\epsilon_p^r(x, t)]^\mu \cdot f_D(T) \cdot f_D(R_{\text{RH}}) \quad (25)$$

式中: $\epsilon_p^r(x, t)$ 为 t 时刻再生粗骨料混凝土中 x 处的孔隙率, %; η 和 μ 分别为试验拟合参数, 根据文献[11-14]中的 17 组碳化试验数据, 通过拟合分析可以确定 η 和 μ 分别为 1.335 和 4.82; $f_D(T)$ 和 $f_D(R_{\text{RH}})$ 分别为温度和相对湿度的影响函数^[15]

$$f_D(T) = \frac{T}{T_r} \cdot \exp\left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (26)$$

$$f_D(R_{\text{RH}}) = (1 - R_{\text{RH}})^{2.2} \quad (27)$$

式中: T 为绝对温度, K; R_{RH} 为环境相对湿度, %; E 为 CO_2 扩散过程的活化能, 取 $E = 39\,000 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; R 为摩尔气体常数, 取 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T_r 为参考温度, 取 $T_r = 293 \text{ K}$ 。

2.3 再生粗骨料混凝土中可碳化物质的反应速率

再生粗骨料混凝土中可碳化物质 CH 和 CSH 与 CO_2 的反应速率与环境温度和相对湿度有关。根据气体动力学理论, 温度越高, 分子的热运动越快, 碳化反应速率越快; 随着相对湿度的增加, 碳化反应速率呈现先增大后减小趋势^[16]。当环境相对湿度低于 50% 左右时, 由于再生粗骨料混凝土孔隙中的水分较少, 溶解的 CO_2 的量相对较少, 导致碳化反应很难进行; 相反, 当环境相对湿度过大时, 再生粗骨料混凝土孔隙水接近饱和, CO_2 气体很难扩散进入孔隙内部, 从而降低碳化反应速率; 当环境相对湿度在 60% 左右时, 碳化反应速率达到峰值。CH 参与碳化反应的速率系数为^[17]

$$k_{\text{CH}} = \beta \cdot \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \cdot f_k(R_{\text{RH}}) \quad (28)$$

式中: k_{CH} 为 CH 参与碳化反应的速率系数, $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$; U 为碳化反应的活化能, 取 $U = 40\,000 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; R 为摩尔气体常数, 取 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为环境温度, K; β 为修正系数, 取 $1\,390 \text{ m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s}^{-1})$; $f_k(R_{\text{RH}})$ 为环境相对湿度的影响函数^[18]。

$$f_k(R_{\text{RH}}) = \begin{cases} 0 & R_{\text{RH}} < R_{\text{RH}}^{\min} \\ 2.5(R_{\text{RH}} - R_{\text{RH}}^{\min}) & R_{\text{RH}}^{\min} \leq R_{\text{RH}} \leq 0.9 \\ 1 & 0.9 < R_{\text{RH}} < 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中: R_{RH}^{\min} 为满足混凝土碳化反应液相环境条件的最小值, 通常近似取 $R_{\text{RH}}^{\min} = 50\%$ ^[7]。

此外, CSH 的反应速率系数 k_{CSH} 与 CH 的反应速率系数 k_{CH} 之间的关系为^[7]

$$k_{\text{CSH}} = 7.8 \times 10^{-3} k_{\text{CH}} \quad (30)$$

基于上述模型参数的计算公式, 结合初始条件和边界条件, 采用迭代算法可以求解式(1)~(3)所定义的微分控制方程, 从而确定 t 时刻再生粗骨料混凝土中 x 处的 CO_2 、CH 和 CSH 的体积摩尔浓度, 进而可以确定对应的 pH 值

$$\text{pH} = 14 + \lg\left(4.32 \times 10^{-2} \times \frac{C_{\text{CH}}(x, t)}{C_{\text{CH}}^0}\right) \quad (31)$$

通常将再生粗骨料混凝土内 $\text{pH} < 9$ 的区域确定为混凝土碳化区, 据此可以确定再生粗骨料混凝土的碳化深度。

3 验证分析与讨论

3.1 模型的对比验证

选用文献[11-14]中的 17 组再生粗骨料混凝土

的加速碳化试验数据(见表 1),结合文献[2,4-6]中的经验模型,对比验证本文模型的有效性和适用性。其中,文献[2]基于 28 组试验数据,考虑环境 CO_2 浓度、温度、相对湿度和混凝土抗压强度等因素的影响,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型

$$X_c = k_{\text{CO}_2} k_j k_s T^{0.25} R_{\text{RH}}^{1.5} (1 - R_{\text{RH}}) \left(\frac{230}{f_{\text{cu}}^{\text{R}}} + 2.5 \right) \sqrt{t} \quad (32)$$

式中: X_c 为再生粗骨料混凝土的碳化深度,mm;

k_{CO_2} 为 CO_2 浓度影响系数, $k_{\text{CO}_2} = \sqrt{\frac{C_0}{0.2}}$; C_0 为环境 CO_2 的体积分数,%; k_j 为构件位置影响系数,角区 $k_j = 1.4$,非角区 $k_j = 1.0$; k_s 为工作应力影响系数,受压时 $k_s = 1.0$,受拉时 $k_s = 1.7$; f_{cu}^{R} 为再生粗骨料混凝土的抗压强度, N/mm^2 。

文献[4]基于 16 组试验数据,考虑水灰比、再生粗骨料取代率、水泥用量和温度等因素的影响,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型

$$X_c = k_{\text{W/C}} k_{\text{R}} k_{\text{T}} k_{\text{C}} \sqrt{C_0 t} \quad (33)$$

式中: $k_{\text{W/C}}$ 为水灰比影响系数; k_{R} 为再生粗骨料取代率系数; k_{C} 为水泥用量影响系数; k_{T} 为温度影响系数。

文献[5]基于 28 组试验数据,通过引入再生粗骨料影响系数,提出了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型

$$X_c = 839 g_{\text{RC}} (1 - R_{\text{RH}})^{1.1} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{W/C}}/\gamma_c - 0.34}{\gamma_{\text{HD}} \gamma_c} \cdot 8.03 C_{\text{CO}_2}} \sqrt{t} \quad (34)$$

式中: g_{RC} 为再生粗骨料影响系数,再生粗骨料取代

率为 0 时,取 $g_{\text{RC}} = 1.0$,再生粗骨料取代率为 100% 时,取 $g_{\text{RC}} = 1.5$,其他情况按线性内插法取值; $R_{\text{W/C}}$ 为水灰比; γ_c 为水泥品种修正系数; γ_{HD} 为水泥水化程度修正系数,养护 28 d 时取 $\gamma_{\text{HD}} = 0.85$,养护 90 d 时取 $\gamma_{\text{HD}} = 1.0$; C 为水泥用量, kg/m^3 ; C_{CO_2} 为 CO_2 的浓度, mol/m^3 。

文献[6]基于 33 组试验数据,考虑环境 CO_2 浓度、温度、相对湿度和混凝土抗压强度等因素的影响,建立了再生粗骨料混凝土的碳化深度预测模型:

$$X_c = k_{\text{CO}_2} k_j k_s T^{0.25} R_{\text{RH}}^{1.5} (1 - R_{\text{RH}}) \left(\frac{131}{f_{\text{cu}}^{\text{R}}} + 8.7 \right) \sqrt{t} \quad (35)$$

再生粗骨料混凝土的碳化深度的试验测试值与各模型的计算值见表 1,模型计算值与试验测试值散点分布见图 1,模型计算值与试验测试值的比值图 2。结合表 1、图 1 和图 2 可知,文献[5]模型的计算值与试验测试值的比值的均值和标准差分别为 0.39 和 0.14,说明该模型的计算结果总体偏小;文献[2]和[6]模型主要以再生粗骨料混凝土的抗压强度为控制参数,模型的计算值与试验值的比值的均值分别为 1.64 和 2.36,标准差分别为 0.43 和 0.76,说明这两个模型的计算结果总体偏大,且离散性较大;文献[4]模型主要以水灰比、再生粗骨料取代率、水泥用量和温度等影响因素作为控制参数,计算值与试验值的均值和标准差分别为 1.97 和 0.49,计算值也明显偏大;在不同的配合比设计参数情况下,模型计算值与试验测试值均比较接近,二者的比值的均值和标准差分别为 1.19 和 0.18,说明模型的计算值与试验值总体比较吻合,且离散性较小。

表 1 再生粗骨料混凝土的配合比设计参数和碳化深度

Table 1 Mix design parameters and carbonation depth of recycled coarse aggregate concrete

编号	配合比设计参数					碳化深度/mm						
	$W_a/\%$	$B/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{RCA}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{NCA}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	R_{WB}	β_t	试验测试值	文献[5]模型	文献[2]模型	文献[6]模型	文献[4]模型	本文模型
1	3.2	390.5	0	1 058	0.48	0.241	10.2	4.6	17.2	24.1	20.9	11.3
2	3.2	390.5	238	793	0.48	0.241	12.3	5.6	18.1	24.6	21.1	13.0
3	3.2	390.5	476	529	0.48	0.241	11.8	6.7	18.1	24.6	21.2	14.6
4	3.2	390.5	714	264	0.48	0.241	13.5	7.9	18.3	24.7	21.4	16.0
5	3.2	390.5	951	0	0.48	0.241	13.8	9.2	18.8	25.0	21.5	17.3
6	6.5	394	0	1128	0.52	0	10.9	2.2	14.9	22.8	20.4	10.0
7	6.5	394	302	790	0.52	0	11.0	2.8	15.3	23.0	20.6	13.3
8	6.5	436	0	1100	0.47	0	8.3	1.8	13.6	22.0	21.4	8.0
9	6.5	436	295	770	0.47	0	8.7	2.2	14.2	22.4	21.5	10.9
10	5.0	317	543	543	0.60	0	13.4	4.3	16.8	24.6	22.3	16.8

续表 1

编号	配合比设计参数					碳化深度/mm						
	$W_a/\%$	$B/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{RCA}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\text{NCA}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	R_{WB}	β_t	试验测试值	文献[5]模型	文献[2]模型	文献[6]模型	文献[4]模型	本文模型
11	5.0	336	542	542	0.55	0	12.4	3.8	17.8	24.4	20.6	14.2
12	5.0	370	535	535	0.50	0	10.4	3.2	16.9	24.0	19.3	12.1
13	5.0	400	530	530	0.45	0	8.1	3.0	16.0	23.4	17.6	9.6
14	5.0	450	519	519	0.40	0	6.3	2.9	15.1	22.9	16.2	7.4
15	4.5	425	926	0	0.40	0	5.0	2.4	14.7	22.7	16.0	8.9
16	4.5	318	926	0	0.55	0	13.1	5.2	19.2	25.3	20.4	15.8
17	4.5	257	926	0	0.70	0	19.1	7.6	24.7	28.4	24.7	22.0

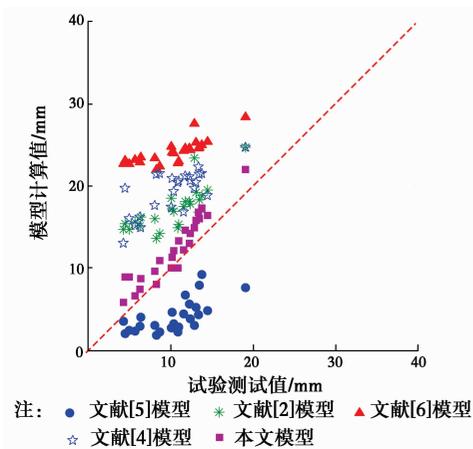


图 1 模型计算值与试验测试值的对比
Fig. 1 Comparison between calculated and tested results

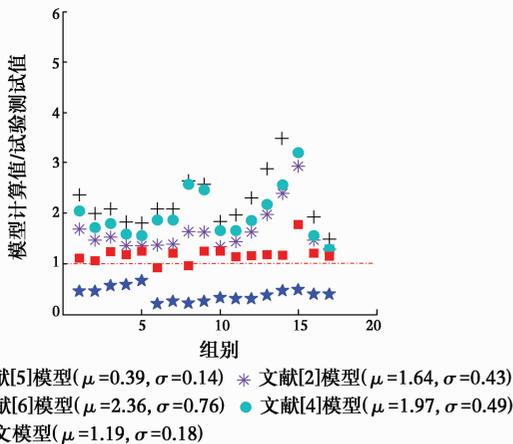


图 2 模型计算值与试验测试值的比值
Fig. 2 Ratio of calculated and tested results

3.2 再生粗骨料取代率的影响规律分析

假定单位体积再生粗骨料混凝土中胶凝材料用量为 400 kg/m^3 , 水胶比为 0.45, 粗骨料的总用量为 1000 kg/m^3 , 再生粗骨料的吸水率为 5%, 天然粗骨

料的吸水率为 0.5%, 标准碳化试验条件下的 CO_2 体积分数为 20%, 温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 70%, 碳化时间为 28 d, 再生粗骨料的掺量分别为 0%、30%、50%、70% 和 100% 这 5 种情况。

再生粗骨料取代率对混凝土内部 CO_2 浓度分布的影响规律如图 3 所示。由图 3 可知, 在与混凝土表面距离相同的条件下, 随着再生粗骨料取代率的增加, CO_2 的浓度逐渐增大, 原因在于随着再生粗骨料取代率的增大, 再生粗骨料的表面附着砂浆含量增多, 导致再生粗骨料混凝土的孔隙率增大, 从而有利于 CO_2 气体的扩散。

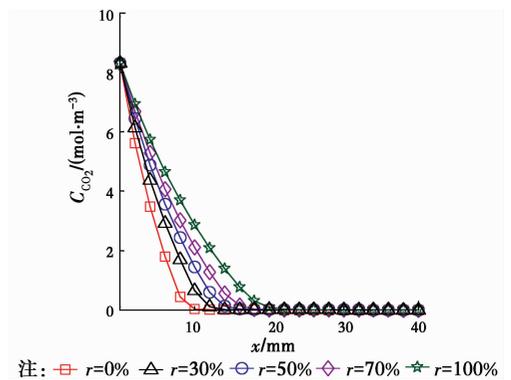


图 3 CO_2 浓度分布
Fig. 3 Concentration distribution of CO_2

再生粗骨料取代率对再生粗骨料混凝土内部 CH 浓度分布的影响规律如图 4 所示。由图 4 可知, 在与混凝土表面距离相同的条件下, 随着再生粗骨料取代率的增大, 再生粗骨料混凝土部分碳化区内 CH 浓度降低, 而未碳化区内的 CH 浓度增大, 主要原因在于两方面: 一方面, 当粗骨料总量一定时, 再生粗骨料的取代率越大, 再生粗骨料的表面附着砂浆的含量越高, 可碳化物质的量越多, 所以未碳化区内的 CH 浓度越大; 另一方面, 随着再生粗骨料取

代率的增加,再生粗骨料混凝土的孔隙率增大,碳化反应消耗的 CH 增多,所以部分碳化区内混凝土中的 CH 浓度减小。

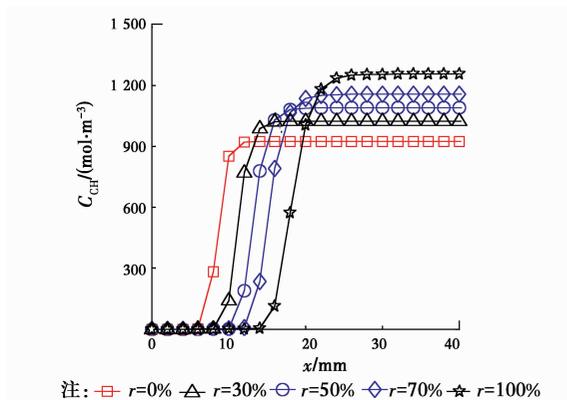


图 4 CH 浓度分布

Fig. 4 Concentration distribution of CH

再生粗骨料的取代率对再生粗骨料混凝土内部 CSH 浓度分布的影响规律如图 5 所示。由图 5 可知,随着再生粗骨料取代率的增加,再生粗骨料混凝土未碳化区内的 CSH 浓度增大,主要原因在于:当粗骨料的总量一定时,随着再生粗骨料取代率的增加,再生粗骨料的表面附着砂浆含量增加,导致可碳化物质的量增多,所以未碳化区内的 CSH 浓度增大。

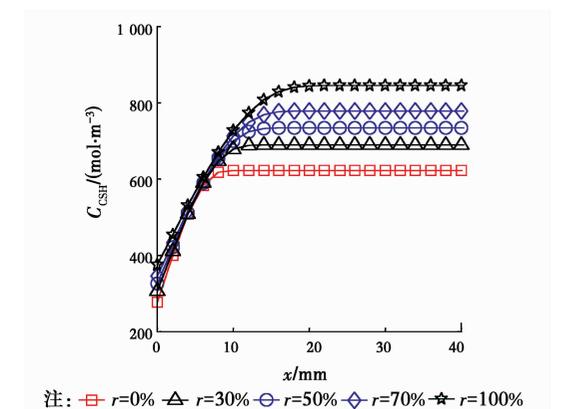


图 5 CSH 浓度分布

Fig. 5 Concentration distribution of CSH

再生粗骨料取代率对再生粗骨料混凝土内部 pH 值分布的影响规律如图 6 所示。由图 6 可知,在再生粗骨料取代率一定的条件下,随着与混凝土表面距离的增加,pH 值逐渐升高;在距混凝土表面距离一定的条件下,随着再生粗骨料取代率的增大,pH 值逐渐减小,原因在于再生粗骨料的取代率越高,再生粗骨料混凝土的孔隙率越大,导致碳化反应消耗的 CH 越多,所以 pH 值越低。

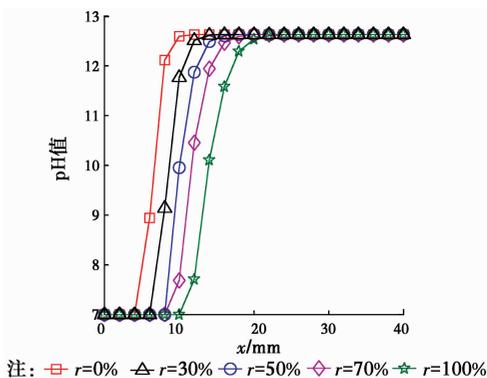


图 6 pH 值分布

Fig. 6 pH value distribution

4 结论

建立了再生粗骨料混凝土碳化分析的多场耦合模型,通过试验数据验证了该模型的有效性和适用性,并分析了再生粗骨料取代率对混凝土内各物质浓度分布的影响规律。分析结果表明:

1)所建立的再生粗骨料混凝土碳化分析模型,不仅可以综合考虑材料参数(如水胶比、矿物掺合料、再生粗骨料表面附着砂浆等)和环境条件(如温度、相对湿度和二氧化碳浓度)的影响,而且可以定量分析再生粗骨料取代率对混凝土中各物质浓度分布的影响,计算精度和适用性较好。

2)在其他条件相同的情况下,随着再生粗骨料取代率的增加,CO₂ 的浓度逐渐增大,部分碳化区内的 CH 浓度和 pH 值降低,而未碳化区内的 CH 和 CSH 浓度增大,总体说明随着再生粗骨料取代率的增加,再生粗骨料混凝土的抗碳化性能降低。

参考文献:

- [1] SILVA R V, NEVES R, DE B J, et al. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 22-32.
- [2] 肖建庄, 雷斌. 再生混凝土碳化模型与结构耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 66-72.
XIAO J Z, LEI B. Carbonation model and structural durability design for recycled concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 66-72. (in Chinese)
- [3] 钟荣富. 人工砂再生混凝土抗压强度及碳化性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
ZHONG R F. Experimental study on compressive strength and carbonation resistance of recycled concrete with artificial sand [D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)

- [4] 耿欧, 张鑫, 张铖铠. 再生混凝土碳化深度预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 54-58.
GENG O, ZHANG X, ZHANG C K. Prediction models of the carbonization depth of recycled concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 54-58. (in Chinese)
- [5] WANG C, XIAO J, ZHANG G, et al. Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation [J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 307-320.
- [6] 肖文广, 郭樟根, 吴政鹏, 等. 再生混凝土抗碳化性能试验研究及理论分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(6): 47-53.
XIAO W G, GUO Z G, WU Z P, et al. Experimental research and theoretical analysis on carbonation resistance Behavior of synthetic aggregate concrete [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(6): 47-53. (in Chinese)
- [7] 余波, 成荻, 杨绿峰. 矿物掺合料混凝土碳化分析的非线性多场耦合模型[J]. 混凝土, 2014(10): 20-25.
YU B, CHENG D, YANG L F. Multi-field coupled model for concrete carbonat ion with mineral admixtures [J]. Concrete, 2014 (10): 20-25. (in Chinese)
- [8] 郭成举. 混凝土的物理和化学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
GUO C J. Physics and chemistry of concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [9] 牛荻涛, 李春晖, 宋华. 复掺矿物掺合料混凝土碳化深度预测模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(4): 464-467.
NIU D T, LI C H, SONG H. New method for the generation of belief function [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(4): 464-467. (in Chinese)
- [10] 李爽. 再生水泥混凝土粗骨料性能及其分级方法的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
LI S. Experimental study on the performance and class FICA tion systems of recycled concrete coarse aggregate [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] 吴祖达. 再生骨料混凝土性能研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2014.
WU Z D. Study on performance of recycled aggregate concrete [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2009. (in Chinese)
- [12] 毛添钊. 再生粗骨料混凝土耐久性试验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
MAO T X. Experimental study on durability of the recycled coarse aggregate concrete [D]. Nanchang: Nanchang University, 2009. (in Chinese)
- [13] 孙亚丽. 水灰比对再生混凝土碳化和护筋能力影响研究[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(6): 20-22.
SUN Y L. Study on effect of carbonation and reinforcement protection capability of gluing aggregate concrete with water layer ement ratio [J]. New Building Materials, 2013, 40(6): 20-22. (in Chinese)
- [14] OTSUTSUKI 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.
- [15] SAETTA A V, SCHREFLER B A, VITALIANI R V. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials [J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(4): 761-772.
- [16] LOO Y, CHIN M, TAM C, et al. A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 168(46): 191-200.
- [17] TALUKDAR S, BANTHIA N, GRACE J. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change-Part 1: Experimental results and model development [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(8): 924-930.
- [18] STEFFENS A, DINKLER D, AHRENS H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(6): 935-941.

(编辑 王秀玲)