

考虑应力状态的二维混凝土碳化过程数值模拟

阮欣, 刘翔, 陈艾荣

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 混凝土碳化过程的数值模拟为研究碳化机理、碳化影响因素、碳化过程与力的耦合作用等提供了新的定量分析工具. 为定量分析应力状态对混凝土截面角部碳化发展的影响, 建立了混凝土碳化过程的 2 维数值计算模型, 使得混凝土组分、应力状态等影响可以得到定量考虑, 并模拟应力状态下混凝土构件角部的碳化过程. 详细介绍了这一模型的数值计算实现过程, 研究了网格尺寸及时间步长对数值计算结果的影响. 该模型数值计算结果与快速碳化试验和长期暴露碳化试验结果的对比如验证了模型计算结果的准确性. 最后, 对某混凝土构件的角部混凝土碳化过程进行了数值分析. 结果表明, 混凝土截面角部双向碳化作用以及拉应力状态均会加速混凝土碳化, 角部是整个构件截面碳化发展最为迅速的部位, 其耐久性应当予以考虑.

关键词: 碳化过程; 2 维数值模拟; 混凝土截面角部; 应力状态

中图分类号: U448.34

文献标志码: A

Two-dimensional Numerical Simulation of Carbonation Process With a Consideration of Stress State

RUAN Xin, LIU Xu, CHEN Airon

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Numerical simulation provides a new way for concrete carbonation research, both for mechanism and engineering application. In order to quantitatively evaluate effect of carbonation process of concrete section corner under stress state, this paper presents a two-dimensional (2D) numerical model of carbonation process, which takes account of the effects of concrete composition and stress state. The process to develop the numerical program is also introduced, the effects of element size and time step are discussed. The numerical program is verified by comparing calculation results with some existing carbonation experiments results, which

turns out a good coincide. Finally, an example is used to illustrate the effect of stress state on the carbonation process of concrete section corner. The results show that the carbonation rate in the corner of concrete section is faster than others due to acceleration effects of the two-dimensional diffusion of carbon dioxide into concrete and tension stress state, and attention should be paid to the durability of concrete section corner.

Key words: concrete carbonation process; 2D numerical simulation; concrete section corner; stress state

混凝土碳化是大气环境下钢筋锈蚀的主要原因, 碳化机理和碳化深度的预测模型一直是混凝土结构耐久性领域研究的热点问题. 基于数值方法的碳化过程模拟是目前的发展趋势之一. Papadakis 根据碳化化学反应物质平衡建立预测碳化发展的数值计算模型^[1]; Meier 等人利用数值模拟讨论了混凝土碳化的主要特征以及孔隙率的变化、外界环境等对碳化发展的影响^[2]; Wang 等人建立了含低钙粉煤灰的混凝土碳化模型, 并讨论了低钙粉煤灰对混凝土碳化的影响^[3]; Saetta 等人将碳化数值计算模型扩展到 2 维, 讨论了混凝土构件角部双向碳化作用的耦合^[4]. 碳化的数值模拟为研究混凝土碳化机理、混凝土组成或添加剂的影响以及碳化影响因素的耦合作用提供了新方向.

实际工程调查发现, 构件角部往往最早出现钢筋锈蚀、保护层开裂的耐久性问题. 文献[5-6]的检测结果表明: 角部混凝土的碳化深度较非角部混凝土大, 且钢筋锈蚀引起混凝土胀裂首先发生在受拉区的角部; 并且认为这是角部混凝土受双向碳化作用及混凝土应力状态影响的结果. 然而, 目前关于应力状态下的混凝土的双向碳化发展的研究文献相对较少.

收稿日期: 2012-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(50878145); 贵州省交通科技基金(2010-122-018); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 阮欣(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁设计理论、风险评估及耐久性设计等.

E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

以下将在现有碳化模型的基础上,以应力状态对碳化过程的影响进行理论修正,得到应力状态下 2 维混凝土碳化数值模型;并利用已有的快速碳化试验和长期暴露试验数据,验证这一数值模型的准确性,通过计算实例说明应力状态对构件角部碳化过程的影响。

1 2 维碳化过程模型

1.1 水泥水化模型

水泥水化过程是混凝土碳化计算的基础。根据水泥成分和混凝土配合比等资料,可以预测混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等可碳化物质的含量以及孔隙率等参数。

水化时间与碳化时间相比十分短暂,近似认为碳化开始时水泥水化完全。水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是维持混凝土孔隙溶液高碱性环境的主要物质,根据水化反应方程式的质量守恒关系,得到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的质量浓度 $\rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, 作为碳化反应的初始条件^[1]

$$\rho(\text{Ca}(\text{OH})_2) = (1.5c_{\text{C}_3\text{S}} + 0.5c_{\text{C}_2\text{S}} - 4c_{\text{C}_4\text{AF}} - c_{\text{C}_3\text{A}}) \cdot M_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \quad (1)$$

式中: C_3S , C_2S , C_4AF 和 C_3A 分别表示水泥的主要熟料硅酸三钙、硅酸二钙、铁铝酸四钙以及铝酸三钙; c_v 表示各物质的浓度, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$, $v \in \{\text{C}_3\text{S}, \text{C}_2\text{S}, \text{C}_4\text{AF}, \text{C}_3\text{A}, \text{Ca}(\text{OH})_2\}$; $M_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

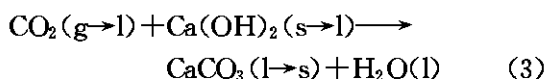
混凝土的孔隙率表征混凝土的密实程度,是计算 CO_2 在混凝土中扩散速率的重要参数,孔隙率 ϕ 可以通过 Powers' Model 计算^[7]

$$\phi = \left(\frac{m_{w_0}/m_c - 0.36\alpha}{m_{w_0}/m_c + 0.32} + \frac{0.68\alpha}{m_{w_0}/m_c + 0.32} \times 28\% \right) / \left(1 + \frac{m_{w_0} \rho_c}{m_c \rho_w} + \frac{m_s \rho_s}{m_c \rho_a} \right) \quad (2)$$

式中: α 为水化度; m_{w_0}/m_c 为初始水灰质量比; m_s/m_c 为砂灰比(单位混凝土体积内沙石与水泥质量比); ρ_w, ρ_c, ρ_a 分别为水、水泥及沙石的质量密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 控制方程

混凝土中可碳化物质主要有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化硅酸钙(CSH)。由于 CSH 含量低,其碳化反应不会导致混凝土孔隙溶液 pH 值变化,因此,碳化反应主要考虑 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 的反应^[2]



式中: g, l 和 s 分别表示物质处于气态、液态和固态。

考虑混凝土构件 2 维区域碳化: 边界由 Γ 表示, 其中, Γ_R 表示外表面, 其暴露于 CO_2 之中; Γ_N 表示内表面, 即不与 CO_2 接触的表面; Γ 表面的法向量用 \mathbf{n} 表示。

认为在任意时刻的混凝土孔隙溶液中, 消耗的液态 $\text{CO}_2(\text{l})$ 能从气态 $\text{CO}_2(\text{g})$ 得到补充, 两者保持动态平衡, 其质量浓度关系符合 Henry 定律

$$\rho(\text{CO}_2(\text{l})) = C_{\text{Henry}} \rho(\text{CO}_2(\text{g})) \quad (4)$$

式中: $\rho(\text{CO}_2(\text{l})), \rho(\text{CO}_2(\text{g}))$ 分别表示气态 $\text{CO}_2(\text{g})$ 和液态 $\text{CO}_2(\text{l})$ 在混凝土中的质量浓度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; C_{Henry} 为 Henry 系数。

假定无应力状态下混凝土为均质材料, CO_2 在混凝土中的扩散遵循 Fick 定律, 不考虑物质微观形态的变化, 建立整个碳化反应过程中的 CO_2 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的宏观质量平衡方程^[1-2]

$$\begin{aligned} \partial_t \left(\phi \phi_a \left(1 + \frac{C_{\text{Henry}} \phi_w}{\phi_a} \right) \rho(\text{CO}_2(\text{g})) \right) - \\ \nabla (D_{e, \text{CO}_2} \nabla \rho(\text{CO}_2(\text{g}))) = -\phi \phi_w f_{r, \text{CO}_2}, \\ \partial_t (\phi \phi_w \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)) - \\ \nabla (D_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \phi \phi_w \nabla \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)) = -\phi \phi_w f_{r, \text{Ca}(\text{OH})_2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ϕ_a 表示空气填充孔隙比率; ϕ_w 为水填充孔隙比率; D_{e, CO_2} 为 CO_2 在混凝土中有效扩散速率, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; $\rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; $D_{\text{Ca}(\text{OH})_2}$ 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在混凝土中扩散速率, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; $f_{r, \text{CO}_2}, f_{r, \text{Ca}(\text{OH})_2}$ 分别为 $\text{CO}_2, \text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应速率。

化学反应方程中的 H_2O 和 CaCO_3 浓度变化不会造成孔隙溶液的 pH 值变化, 为简化计算模型, 不再考虑。

碳化模型中不考虑 CO_2 的形态变化, 以 D_{e, CO_2} 表征其在混凝土中的扩散速率, 实质上是综合考虑气体在多孔非均质饱和和材料中扩散、溶解以及离子在液体薄膜中扩散等一系列过程的有效扩散速率, 难以从理论上推导其数学表达式。目前尚无理想的测试气体扩散速率的方法, 文献[8]根据试验数据推导 CO_2 在混凝土内的有效扩散速率与混凝土孔隙率的关系

$$D_{e, \text{CO}_2} \approx 1.64 \times 10^{-6} \varepsilon_p^{1.8} (1 - R_H/100)^{2.2} \quad (6)$$

式中: ε_p 为混凝土孔隙率; R_H 为相对湿度。

当混凝土内部 pH 值降为 9 时, 认为该处完全碳化, 其与混凝土表面的距离为碳化深度^[1]

$$\text{pH} = -\lg K_w + \lg (2 \times 10^3 \times \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2) / 74) \quad (7)$$

式中: K_w 为水的电离常数, $K_w = 1 \times 10^{-14}$;

$\rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 为任意时刻的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度。

基于碳化反应方程式的化学动力学反应速率是在大体积溶液中测定的反应速率,并不完全适用于混凝土孔隙溶液这种小体积溶液,尤其在饱和度较低时,碳化反应仅能在孔隙壁上附着的水膜中进行,水膜尺寸远小于一般化学反应速率所要求的溶液尺寸,用混凝土饱和度对反应速率进行修正^[2,9]

$$f_{x,v} = M_v C_r f^n \rho(\text{CO}_2)^p \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)^q \quad (8)$$

式中: M_v 表示各物质的摩尔质量, $v \in \{\text{CO}_2, \text{Ca}(\text{OH})_2\}$; C_r 为化学反应常数; f 为混凝土孔隙水饱和度; n 为饱和度对碳化速率的幂次修正指数, $n = 3.7$; $\rho(\text{CO}_2)$ 表示任意时刻混凝土中 CO_2 的质量浓度; p, q 为 $\rho(\text{CO}_2), \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ 的幂次,均取为 1。

混凝土的孔隙水饱和度 f 随外部环境相对湿度变化,与相对湿度之间可以通过“吸附曲线”进行相互转化。

文献[10]根据试验结果,提出了一组拟合湿润过程中的吸附曲线的方程,该组方程考虑了水灰质量比、养护时间、水泥类别、养护温度等参数

$$f = \frac{Ck_s V_m R_H (1 + m_w/m_c)}{(1 - k_s R_H) [1 + (C - 1) k_s R_H] m_w/m_c} \quad (9)$$

式中: m_w/m_c 表示水灰质量比; R_H 为环境相对湿度; k_s, C, V_m 是在非线性曲线拟合吸收试验数据时采用的三参数。

1.3 边界条件

与外界环境接触的边界 Γ_R , 由于扩散及反应消耗的 $\text{CO}_2(\text{g})$ 能迅速地从空气中得到补偿,物质浓度或含量保持不变,即边界上任意时刻 $\text{CO}_2(\text{g})$ 都能达到动态平衡,相当于定义了 Dirichlet 边界条件;不暴露于外界环境的边界 Γ_N , 对所有的物质都定义 Neumann 边界条件^[2]

$$\left. \begin{aligned} \rho(\text{CO}_2(\text{g})) &= \rho_{\text{ext}}(\text{CO}_2(\text{g})), \Gamma_R \\ -(D_{e,\text{CO}_2} \nabla \rho(\text{CO}_2(\text{g}))) \cdot \nu &= 0, \Gamma_N \\ -(D_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \nabla \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)) \cdot \nu &= 0, \Gamma \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

假定碳化初始时刻混凝土中不含 $\text{CO}_2(\text{g})$, 以水泥水化后的混凝土中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量浓度作为初始质量浓度^[2]

$$\left. \begin{aligned} \rho(\text{CO}_2(\text{g}))(t=0) &= 0 \\ \rho(\text{Ca}(\text{OH})_2)(t=0) &= \rho_0(\text{Ca}(\text{OH})_2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

1.4 应力状态影响模拟

实际结构中的混凝土构件处于受力状态,应力状态下混凝土将产生微裂缝而不再满足均质假定,也不再适用 Fick 定律. 在工程应用层面,可将微裂缝的影响平均化,即将微裂缝的影响耦合到 CO_2 在

混凝土的扩散系数中

$$D_{e,\text{CO}_2}(x, y) = f(\sigma_t(x, y)/f_{tk}, \sigma_c(x, y)/f_{dk}) D_{e,\text{CO}_2,0} \quad (12)$$

式中: $D_{e,\text{CO}_2,0}$ 表示无应力状态下 CO_2 的有效扩散系数; $f(\sigma_t(x, y)/f_{tk}, \sigma_c(x, y)/f_{dk})$ 表示应力状态对 CO_2 的有效扩散系数的修正函数; $\sigma_t(x, y), \sigma_c(x, y)$ 分别表示任意位置处的拉应力或压应力, MPa; f_{tk} 和 f_{dk} 表示混凝土的抗拉强度和抗压强度, MPa。

可以根据一些试验结果确定这一函数. 文献[11]给出了受力状态下 C50 混凝土试件碳化试验结果如表 1. 以该试验为例说明应力状态下 CO_2 有效扩散速率的修正函数的获取: 首先根据试验结果以验算法反推 CO_2 有效扩散系数 D_{e,CO_2} ; 然后通过数值拟合得到该应力状态下 CO_2 有效扩散速率的修正系数 $K_s = D_{e,\text{CO}_2}(x, y)/D_{e,\text{CO}_2}^0$, K_s 与混凝土相对应力状态 $(\sigma_t(x, y)/f_{tk}, \sigma_c(x, y)/f_{dk})$ 关系如图 1 所示. 应该注意到, 由于本试验中并未考虑水泥标号、混凝土配合比、添加剂等因素的影响, 因此, 该应力修正系数仅适用于与该试验混凝土组成相同的有限情况。

表 1 应力状态下试件碳化深度

Tab.1 Carbonation depth under stress state				
项目	工况	计算施加应力/MPa	28 d 平均碳化深度/mm	相对碳化深度
无应力状态	1	0	6.22	1.000
	2	0.30 f_{tk}	6.89	1.108
拉应力状态	3	0.50 f_{tk}	7.28	1.170
	4	0.70 f_{tk}	7.93	1.275
	5	0.05 f_{dk}	5.71	0.918
压应力状态	6	0.30 f_{dk}	2.75	0.442
	7	0.50 f_{dk}	1.35	0.217

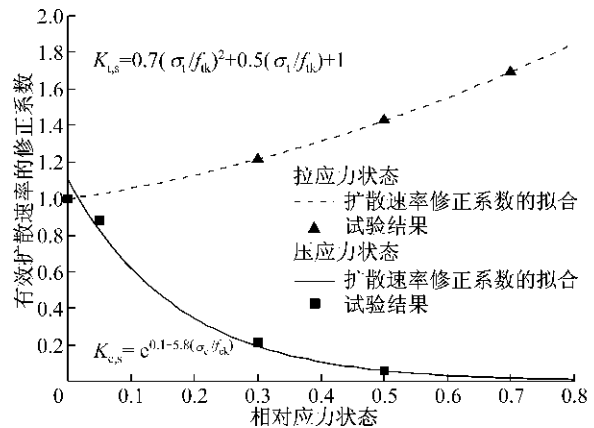


图 1 有效扩散速率与应力状态的关系

Fig.1 Relationship between stress state and effective diffusivity of CO_2

2 数值计算程序

2.1 基本分析过程

根据上述模型,编制了 2 维混凝土碳化过程的数值求解程序. 计算过程主要包括 3 个部分:水泥水化、混凝土碳化、数据输出. 流程如图 2 所示.

2.2 计算参数选取

计算网格的尺寸决定了网格数量,影响计算结果的精度和计算规模的大小. 混凝土碳化反应速率

远大于扩散速率, $-\phi_w f_{r,CO_2}$ 项使控制方程高度非线性, $Ca(OH)_2$ 以及 $CO_2(g)$ 物质浓度在碳化区急剧变化,差分方程所得单元内高斯点的值不能反映物质浓度在该单元内的急剧变化. 当网格过于粗糙时,不仅会导致计算精度降低,计算结果出现振荡,甚至错误. 图 3 给出了同一构件在不同的网格疏密程度下得到的碳化深度分布,当网格划分密集时,转角处碳化深度的分布能够平稳过渡,如图 3a 所示;而网格划分粗糙时,构件转角处碳化深度分布出现凹陷,转角处的碳化深度接近于零,与实际情况不符,如图

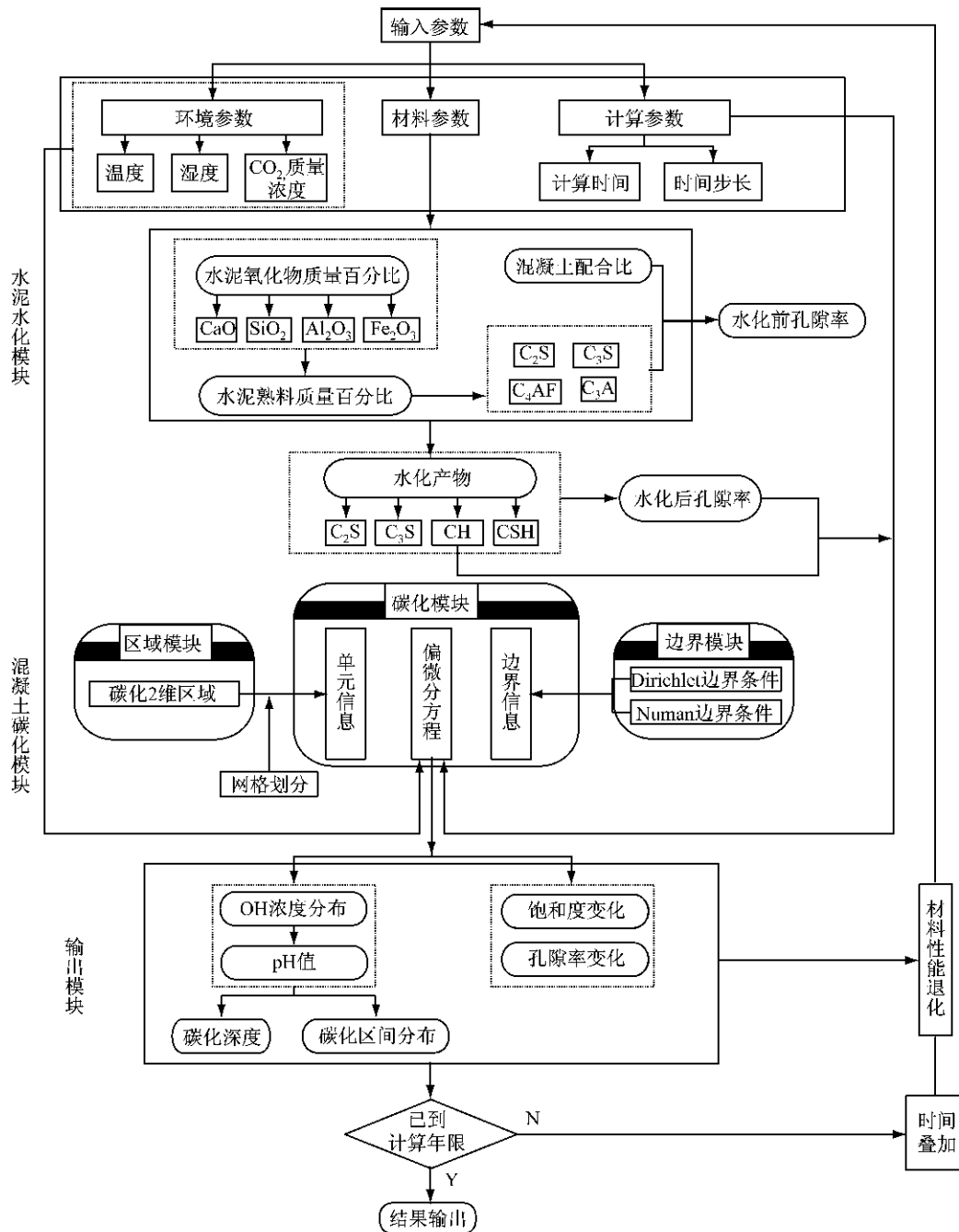


图 2 碳化过程分析流程

Fig. 2 Analysis procedure of carbonation process

3b所示.因此,在计算前,需根据计算时间粗略估计该时间段内的碳化发展深度,以其作为单元尺寸下限值.

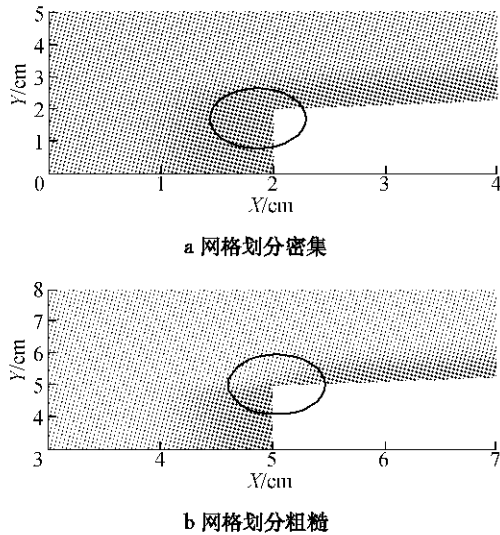


图3 网格大小对数值计算结果的影响

Fig.3 Effect of mesh size on numerical calculation

计算过程中采用了逐步积分法,即利用上一时间步的计算结果中混凝土内各物质的浓度作为下一时间步的初始条件.因此,时间步长取值越短,越接近真实情况,计算精度越高,计算规模也相应增大;时间步长的选择过大,计算规模减低,但计算精度较差,结果出现振荡,甚至错误,这也应引起注意.

3 计算实例

3.1 数值分析结果与试验数据的比较

选取 Papadakis 等人进行的快速碳化试验^[1]和 Wierig 等人进行的长期暴露碳化试验^[12]对本文的数值计算进行验证.长期暴露碳化试验中,外界环境并不稳定,温度、相对湿度以及 CO₂ 的浓度不断变化,具有一定的随机性,会引起 CO₂ 的扩散以及反应速率的波动;但其年平均值仍能保持稳定.因此,在数值计算过程中,选择当地的年平均温度、相对湿度以及 CO₂ 浓度作为计算参数,并在数值计算过程中作为常数处理.上述两个试验结果与本次数值计算的结果比较如图4所示,无论是快速碳化试验还是自然暴露试验,碳化深度基本在数值计算的曲线范围之内.长期暴露试验结果在碳化初期离散性较大,与数值计算的误差较大,这主要是由于在数值计算过程中没有考虑非扩散性物质传递^[2].

3.2 应力状态对构件角部碳化过程的影响

数值分析方法为碳化机理研究提供了新的手

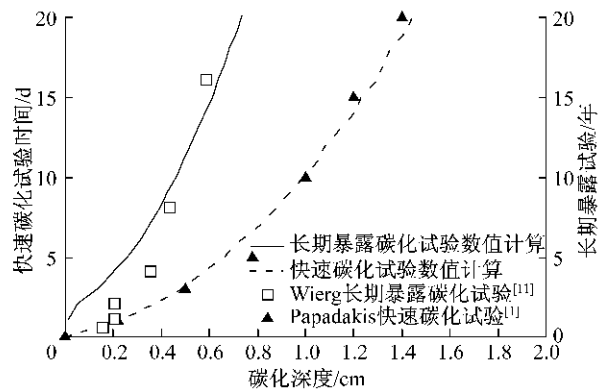


图4 数值计算与碳化试验结果的对比

Fig.4 The comparison between the simulation result and the experimental result

段,角部碳化过程较为显著已经得到公认,但试验研究应力状态对角部碳化作用的定量关系比较困难.以下以数值算例说明本文模型为这一问题提供的解决方案.

以文献[11]中的快速碳化试验作为研究对象,选取混凝土截面为 40 mm×40 mm,其中,混凝土标号为 C50,试件的水灰质量比为 0.37,试验环境的相对湿度为 0.70,温度为 20 °C,CO₂ 的体积分数为 20%.受拉区高度为 20 mm,截面底部承受 f_{tk} 拉应力,受拉区混凝土的应力为三角形分布.受压区高度为 20 mm,截面顶部承受 $0.2f_{dk}$ 压应力,受压区混凝土的应力为三角形分布.计算得到 28 d 后无应力状态下和应力状态下混凝土碳化深度的分布如图5和

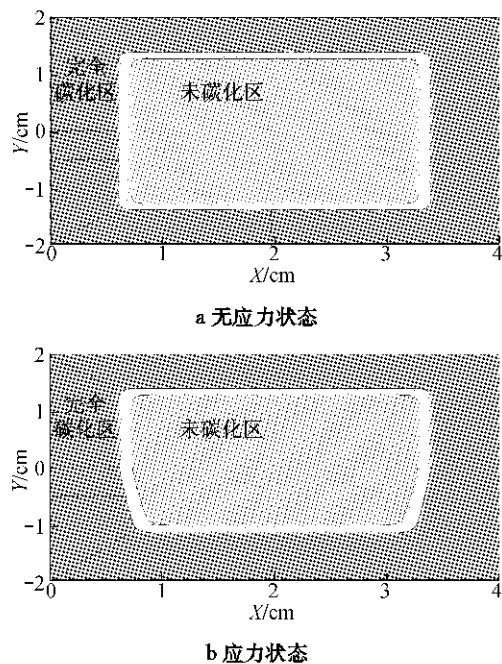


图5 应力状态下混凝土碳化深度分布

Fig.5 The distribution of carbonation depth under stress state

表2所示. 计算表明: 双向混凝土碳化作用和拉应力状态均会促进混凝土碳化发展, 而压应力状态会抑制混凝土碳化发展, 对于受拉角部混凝土, 双向碳化作用以及拉应力状态作用耦合, 其碳化深度是无应力状态下单向碳化深度的2.16倍, 因此, 拉应力状态下的混凝土构件角部的碳化发展是整个构件截面最为迅速的部位, 其耐久性应当予以考虑.

表2 应力状态下混凝土碳化深度计算结果
Tab.2 Calculation results of carbonation depth under stress state

侵蚀类型	碳化深度		
	无应力	拉应力	压应力
单向	6	8	3
双向	9	13	5

4 结语

(1) 本文建立了考虑应力状态影响的混凝土碳化过程2维数值计算模型, 通过数值计算结果与现有的快速碳化试验和长期暴露试验结果对比验证程序的准确性, 将应力状态对混凝土碳化的影响耦合到 CO_2 在混凝土的扩散系数中, 为定量分析实际工程中复杂应力状态下混凝土桥梁构件的碳化发展提供了研究思路.

(2) 考虑应力状态影响的2维混凝土截面碳化深度计算分析结果表明, 双向碳化侵蚀和拉应力状态作用耦合下的受拉角部混凝土的碳化深度大于2倍的无应力状态下单向碳化深度, 在实际工程中, 混凝土构件角部耐久性应当予以重视.

(3) 本文推导的应力状态对 CO_2 有效扩散速率的修正系数仅适用于有限情况, 其作用机理以及工程应用尚待深入研究.

参考文献:

[1] Papadakis V G, Vayens C G, Fardis M N. A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation

- [J]. *AIChE Journal*, 1989, 35(10):1639.
- [2] Meier S A, Peter M A, Muntean A. Dynamics of the internal reaction layer arising during carbonation of concrete [J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62:1125.
- [3] Wang X Y, Lee H S. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23: 725.
- [4] Saetta A V, Schrefler B A, Vitaliani R V. 2D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(8): 1703.
- [5] 屈文俊, 郭猛. 混凝土截面角区双向碳化的计算模型与试验研究[J]. *工业建筑*, 2005, 35: 687.
QU Wenjun, GUO Meng. Calculation model and experimental study of two-way carbonization of concrete section corner[J]. *Industrial Construction*, 2005, 35:687.
- [6] 刘亚芹. 混凝土碳化引起的钢筋锈蚀实用计算模式[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 1997.
LIU Yaqin. A practical calculating model of reinforcement corrosion induced by concrete carbonation [D]. Shanghai: Department of Building Engineering of Tongji University, 1997.
- [7] Powers T C. Physical properties of cement paste [C] // *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*. Washington D C: Cement and Concrete Association, 1960:577-613.
- [8] Papadakis V G, Vayens C G., Fardis M N. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 8(2):186.
- [9] Papadakis V G, Vayens C G, Fardis M N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem[J]. *Chemical Engineering Science*, 1991, 46(5/6):1333.
- [10] Xi Y. A model for moisture capacities of composite materials Part II: application to concrete [J]. *Computational Materials Science*, 1995, 4:78.
- [11] 田浩, 李国平, 刘杰, 等. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(2):200.
TIAN Hao, LI Guoping, LIU Jie, et al. Experimental research on carbonation of forced concrete specimens [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010, 38(2):200.
- [12] Wierig H J. Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure[C]//*Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure*. Hannover: Hannover University, 1984: 239-249.