

文章编号: 1000-5013(2010)02 0200-05

混凝土矩形截面氯离子二维扩散的影响分析

施养杭, 刘中辉, 罗晓勇

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 选择常规截面, 遵循二维扩散模型, 研究扩散系数、扩散时间、钢筋位置、氯离子边界质量分数及构件截面尺寸等对氯离子二维扩散的影响程度. 结果表明, 扩散系数和扩散时间既影响氯离子二维扩散区域, 又影响氯离子扩散程度, 两者值越大, 二维扩散区域越大, 氯离子质量分数越高; 钢筋位置是决定钢筋初锈时间的重要因素; 氯离子边界质量分数对氯离子二维扩散区域均无影响, 但对氯离子扩散程度影响明显.

关键词: 氯离子; 二维扩散模型; 耐久性; 砼构件; 截面

中图分类号: TU 528.01; TU 503

文献标识码: A

混凝土结构耐久性是当前工程领域备受关注的热点问题^[1], 而氯离子侵蚀是影响耐久性的关键因素^[2]. 氯离子具有半径小、活性大^[3]、穿透力和吸附力强的特点, 当钢筋保护层遭受破坏后, 氯离子穿透钝化膜, 直达钢筋表面, 引起钢筋坑蚀. 同时, 氯离子吸附于局部钝化膜处, 形成腐蚀电池, 促使钢筋大范围锈蚀, 及时运走阳极产物, 加速电池作用; 强化离子通路, 加速电化学腐蚀过程^[4], 致使材料性能显著退化, 严重影响结构耐久性. 目前, 对氯离子扩散模型分析大都集中于一维模型, 这相对于研究混凝土构件边缘中部的钢筋锈蚀较为合理^[5-10], 但对于边角处钢筋锈蚀则不合适. 因为, 该处受氯离子二维扩散的影响. 本文选择常规截面, 遵循二维扩散模型, 研究氯离子二维扩散的影响程度和规律.

1 研究对象

工程实际混凝土构件为矩形截面, 图 1 为截面周边氯离子的分布状况, 图 2 为钢筋位置图. 图 2 中: a_1, b_1 为混凝土保护层厚度, $w_{s_1} \sim w_{s_4}$ 分别为构件各表面氯离子的质量分数.

根据钢筋的位置及氯离子质量分数的不同, 按如下 4 种工况分别进行研究. (1) 工况 1. $a_1 = b_1$, $w_{s_1} = w_{s_2} = w_{s_3} = w_{s_4} = \text{const}$. (2) 工况 2. $a_1 \neq b_1$, $w_{s_1} = w_{s_2} = w_{s_3} = w_{s_4} = \text{const}$. (3) 工况 3. $a_1 = b_1$, $w_{s_1} = \text{const}$ 1, $w_{s_2} = \text{const}$ 2, $w_{s_3} = \text{const}$ 3, $w_{s_4} = \text{const}$ 4, $w_{s_1} \neq w_{s_2}, w_{s_3} \neq w_{s_4}$. (4) 工况 4. $a_1 \neq b_1$, $w_{s_1} = \text{const}$ 1, $w_{s_2} = \text{const}$ 2, $w_{s_3} = \text{const}$ 3, $w_{s_4} = \text{const}$ 4, $w_{s_1} \neq w_{s_2}, w_{s_3} \neq w_{s_4}$. 假定混凝土是各向同性均质材料, 则氯离子在混凝土中的二维扩散方程^[4-5]为

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right].$$

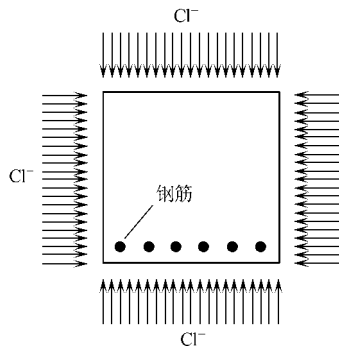


图 1 氯离子扩散示意图

Fig. 1 Schematic drawing of chloride ion diffusion

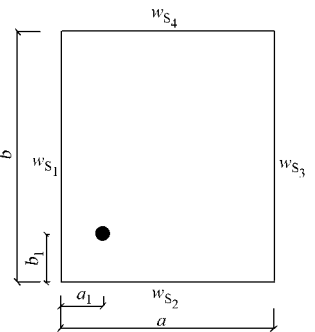


图 2 钢筋位置图

Fig. 2 Location of steel bar in concrete

应用 D' Yakonov 交替方向隐格式、Matlab 语言编制程序 ClCon, 求解时刻 t 混凝土内部氯离子质

收稿日期: 2008-07-17

通信作者: 施养杭 (1962-), 男, 教授, 主要从事结构耐久性的研究. E-mail: d.s666@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50478120); 建设部国家混凝土规范第 6 批科研项目 (GBK Y6001)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量分数分布情况. 其中: a, b 为构件截面尺寸, a_1, b_1 同前; D 为等效扩散系数; w_0 为方程的初始条件; t 为扩散时间; $w_{s_1} \sim w_{s_4}$ 为方程的边界条件; $f(x, y, t)$ 为方程右边函数项; τ 为时间步长; h 为空间步长.

2 影响因素分析

为方便起见, 统一按构件沿 x 方向的深度(mm) (图 2), 以及相应氯离子质量分数分布情况进行分析. 混凝土构件截面如图 3 所示.

2.1 扩散系数

扩散系数 D 是影响氯离子二维扩散最主要的因素, 与时间、环境温、湿度、水泥品种、掺和料的种类和数量等相关, 对 D 值采用等效氯离子扩散系数. 取构件截面 (图 3), 当其尺寸 $a \times b$ 为 250 mm \times 250 mm 时, 初始氯离子质量分数 w_0 为零, 边界氯离子的质量分数 $w_{s_1} = w_{s_2} = w_{s_3} = w_{s_4} = 0.625\%$ 时, 在 $t = 20$ a, $y = 20$ mm 处, 不同 D 值的氯离子质量分数分布情况, 如图 4(a) 所示.

由图 4(a) 可知, 曲线起点值和终点值相等, 该值对应于构件左右边界值 w_{s_1} 和 w_{s_3} . 曲线均呈盆状, 左右两端的曲线段对应于二维扩散区域, 氯离子质量分数为 w_{s_1} 和 w_{s_2} , 或 w_{s_2} 和 w_{s_3} 的扩散累加; 中间直线段对应于一维扩散区域, 氯离子质量分数为 w_{s_2} 的扩散值; 随着 D 值的不断提高, 二维扩散区域不断增大, 且氯离子质量分数不断上升.

2.2 扩散时间

在扩散系数 D 为 $0.050 \text{ mm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 其他条件不变的情况下, 扩散时间(t) 不同, 氯离子质量分数沿 x 方向的分布情况, 如图 4(b) 所示.

由图 4(b) 可知, 曲线的起点值和终点值相等, 对应于构件的左右边界值 w_{s_1} 和 w_{s_3} . 曲线均呈盆状, 左右两端曲线段对应于二维扩散区域, 中间直线段对应于一维扩散区域; 随着 t 值的不断增加, 二维扩散区域不断扩大, 且氯离子质量分数不断增加.

2.3 钢筋位置

钢筋位置 $a_1 \times b_1$ (图 2) 对二维扩散的影响, 实质为图 2 中 x 和 y 坐标大小的影响. 其他参数不变, 扩散系数 D 为 $0.050 \text{ mm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$, 当扩散时间 t 为 20 a 时, y 分别为 20, 30, 40, 50 mm 处的氯离子质量分数沿 x 方向的分布情况, 如图 4(c) 所示.

由图 4(c) 可知, 曲线的起点值和终点值相等, 对应于构件左右边界值 w_{s_1} 和 w_{s_3} . 各曲线均呈盆状, 左右两端曲线段对应着氯离子二维扩散区域; 中间直线段对应着一维扩散区域; 随着 y 值的不断增大, 氯离子扩散区域分布状况不变, 但氯离子质量分数不断下降.

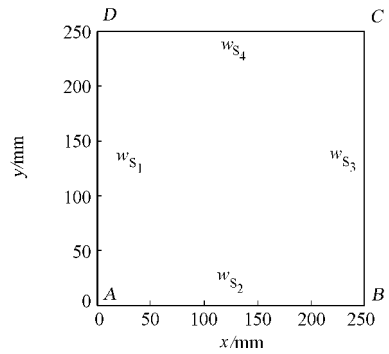


图 3 混凝土构件截面尺寸图

Fig. 3 Section dimension of concrete structure

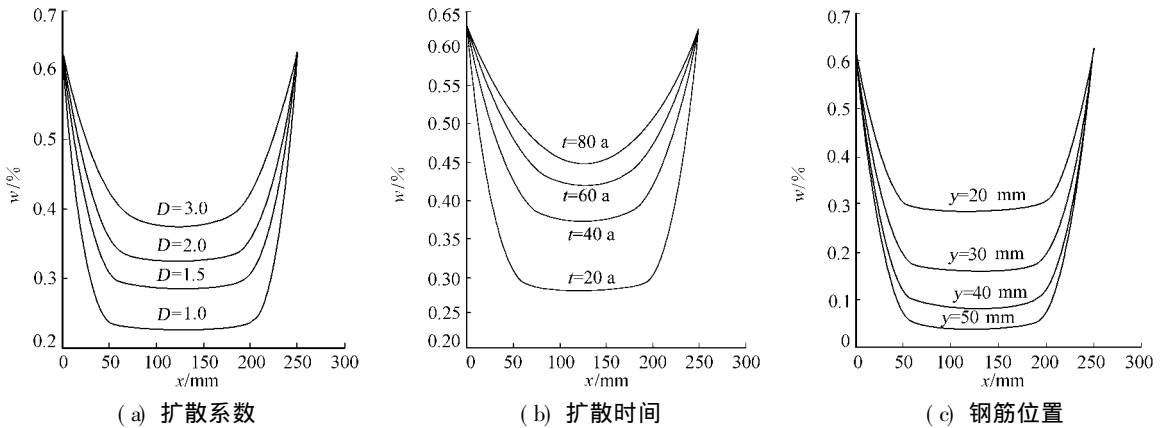


图 4 氯离子质量分数沿 x 方向的分布图

Fig. 4 Distribution of chloride ion concentration along the x direction

2.4 边界质量分数

边界质量分数 $w_{s_1} \sim w_{s_4}$ 对构件同一角部区域的影响程度不同. 以角 A 为例, 分别讨论 $w_{s_1} \sim w_{s_4}$ 对氯离子二维扩散的影响.

(1) w_{s_1} 情况. 当边界氯离子质量分数 $w_{s_2} = w_{s_3} = w_{s_4} = 0.6\%$, t 为 20 a 后, 在 $y = 20$ mm 处的 w_{s_1} 沿 x 方向分布情况, 如图 5(a) 所示. 由图 5(a) 可知, 各曲线的起点值不等, 分别对应构件的左边界值 w_{s_1} ; 终点值相等, 对应构件右边界值 w_{s_3} . 各曲线二维扩散区域的大小均相等, 左边区域内氯离子质量分数随 w_{s_1} 增大而增大, 而右边区域内氯离子质量分数不因 w_{s_1} 大小而变化. 各曲线的直线段重合, 表明上述工况一维扩散相同.

(2) w_{s_2} 情况. 当边界氯离子质量分数 $w_{s_1} = w_{s_3} = w_{s_4} = 0.6\%$, t 为 20 a 后, 在 $y = 20$ mm 处的 w_{s_2} 沿 x 方向分布情况, 如图 5(b) 所示.

由图 5(b) 可知, 所有曲线的起点值和终点值均相等, 对应着构件的左右边界值 w_{s_1} 和 w_{s_3} . 各曲线均呈盆状, 左右两端的曲线段对应二维扩散区域; 中间直线段对应一维扩散区域. 随着 w_{s_2} 值的不断增大, 氯离子扩散区域分布情况不变, 但氯离子质量分数不断增加.

(3) w_{s_3} 情况. 当边界氯离子质量分数 $w_{s_1} = w_{s_2} = w_{s_4} = 0.6\%$, t 为 20 a 后, 在 $y = 20$ mm 处的 w_{s_3} 沿 x 方向分布情况, 如图 5(c) 所示.

由图 5(c) 可知, 各曲线的起点值相等、对应构件左边界值 w_{s_1} , 终点值不等, 对应构件右边界值 w_{s_3} . 各曲线二维扩散区域大小相等, 左区域内氯离子质量分数值不受 w_{s_3} 大小影响, 右区域内氯离子质量分数值随 w_{s_3} 的增大而增大; 各曲线的直线段重合, 表明一维扩散情况相同.

(4) w_{s_4} 情况. 当边界氯离子质量分数 $w_{s_1} = w_{s_3} = w_{s_4} = 0.6\%$, t 为 20 a 后, 在 $y = 20$ mm 处的 w_{s_4} 沿 x 方向分布情况, 如图 5(d) 所示.

由图 5(d) 可知, 各曲线均重合, 说明在历时 20 a 后, w_{s_4} 对角 A 处氯离子二维扩散的影响尚未体现, 主要原因是 w_{s_4} 距离构件底边较远.

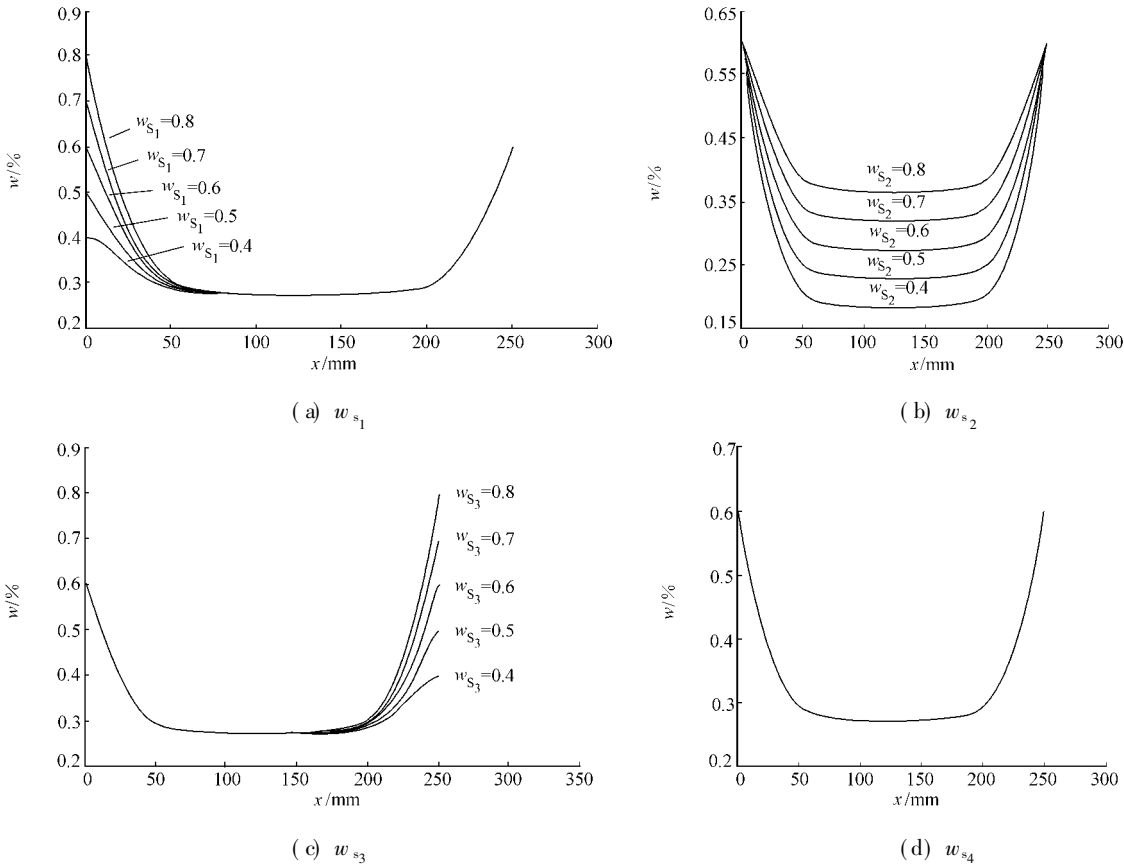


图 5 边界氯离子质量分数沿 x 方向的分布图

2.5 截面尺寸

实验条件: 在初始氯离子质量分数 $w_0=0$, 边界氯离子质量分数 $w_{s_1}=w_{s_2}=w_{s_3}=w_{s_4}=0.625\%$, 扩散系数 $D=0.054\text{ mm}^2\cdot\text{d}^{-1}$. 考察截面尺寸对氯离子二维扩散的影响规律.

当扩散时间在 10~100 a 时, 计算钢筋所在位置 $a_1\times b_1=40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$, 即分析点 (40, 40) 处氯离子质量分数值, 并以截面尺寸 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的计算结果为基准分别进行比较, 如表 1 所示.

表 1 分析点氯离子质量分数的相对误差
Tab. 1 Relative error of chloride ion concentration at analytical points %

t	$a\times b/\text{mm}\times\text{mm}$				
	350×350	300×300	250×250	200×200	150×150
10	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0.046
30	0	0	0	0.003	0.443
40	0	0	0	0.012	1.348
50	0	0	0	0.059	2.606
60	0	0	0.002	0.163	3.997
70	0	0	0.006	0.334	5.355
80	0	0.002	0.024	0.579	6.597
90	0	0.002	0.049	0.880	7.672
100	0	0.002	0.089	1.223	8.566

由表 1 可知, 与截面 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 相比, 随着扩散时间的增加, 截面 $350\text{ mm}\times 350\text{ mm}$ 的氯离子质量分数在分析点处的相对误差始终为零, 而其他截面的氯离子质量分数在该点处的相对误差呈现增加趋势. 以尺寸为 200×200 为例, 其趋势如图 6 所示; 在同一扩散时间内, 随着截面尺寸逐渐减小, 氯离子质量分数在分析点处的相对误差呈增加趋势, 如图 7 所示.

在其他因素保持不变的情况下, 当构件截面尺寸 ($a\times b$) 是保护层厚度尺寸 ($a_1\times b_1$) 的 n 倍, 离钢筋较远的两边的表面氯离子, 对钢筋附近氯离子质量分数的影响是近似相等的. 因此, 对截面尺寸 ($a\times b$) 较大, 求解氯离子对边角处钢筋的影响, 可用简化截面尺寸 $n(a_1\times b_1)$ 来代替, 既满足精度要求, 又节省计算时间.

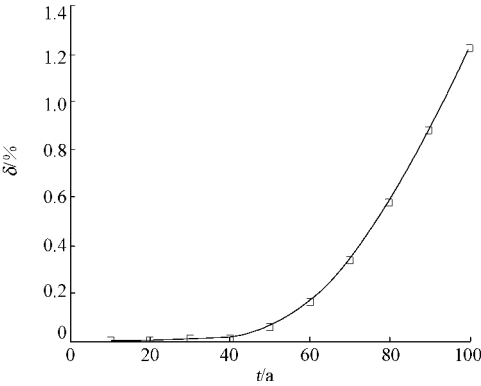


图 6 截面的相对误差
Fig. 6 Relative error of cross section

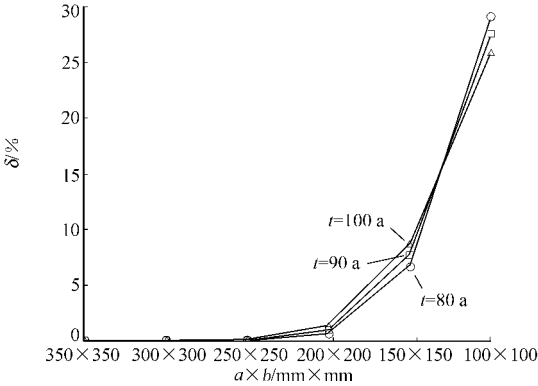


图 7 氯离子质量分数的相对误差
Fig. 7 Relative error of chloride ion concentration

3 结论

(1) 扩散系数 D 和扩散时间 t , 既影响氯离子二维扩散区域, 又影响氯离子扩散程度. 两者值越大, 二维扩散区域越大, 氯离子质量分数越高.

(2) 钢筋位置 $a_1\times b_1$, 严格讲不是影响氯离子二维扩散的因素, 但却是决定钢筋初锈时间的重要因素. $a_1\times b_1$ 大小对氯离子二维扩散区域没有影响, 随着 $a_1\times b_1$ 的不断增大, 氯离子质量分数不断下降.

(3) 边界质量分数 $w_{s_1}\sim w_{s_4}$, 对氯离子二维扩散区域均无影响, 但对氯离子扩散程度影响明显; 对

不同的边角处,影响程度不同,以图 4 角 A 处为例, w_{s_1} 和 w_{s_2} 的影响较大, w_{s_3} 和 w_{s_4} 影响较小甚至没有影响,只有在一定时间后才产生影响。

(4) 截面尺寸 $a \times b$ 对二维扩散的影响主要体现在,当 $a \times b \geq n(a_1 \times b_1)$ 时($n=5\sim 7$),完全可以采用 $n(a_1 \times b_1)$ 来代替 $a \times b$ 此时,计算氯离子质量分数在混凝土内部分布情况和钢筋初锈时间,既节省计算时间,又可满足精度要求。

参考文献:

- [1] 袁双喜,施养杭. 混凝土耐久性的影响因素及其对策与展望[J]. 建筑技术开发, 2007(1): 45-46
- [2] 张璐,施养杭. 海砂对混凝土结构耐久性的影响[J]. 基建优化, 2006, 27(3): 76-77, 82
- [3] 施养杭, 罗刚. 含多种因素的氯离子侵入混凝土的有限差分计算模型[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 7-10
- [4] 杨建森, 崔自治. 氯离子对混凝土中钢筋的催化机理与防腐技术[J]. 工业建筑, 2002, 32(2): 1-4
- [5] 王东方. 钢筋砼构件氯离子侵蚀下钢筋初始锈蚀时间的计算方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [6] 王仁超, 朱琳, 李振富. 混凝土氯离子综合机制扩散模型及敏感性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(6): 824-828
- [7] STEPHEN L A. Predicting the service life of concrete marine structure: An environmental methodology[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(2): 102-107.
- [8] BOULFIZA M. Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(1): 35-39.
- [9] RASHEEDUZZAFAR, AI-SAAD AUM S S, AI-GAHTANI A S. Corrosion cracking in relation to bar diameter, cover, and concrete quality[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 1992, 4(4): 327-342
- [10] 张璐,施养杭. 钢筋锈蚀后砼耐久性的模糊可靠度分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 71-74

Analysis of Two-Dimensional Diffusion of Chloride Ion in RC Rectangular Members

SHI Yang-hang, LIU Zhong-hui, LUO Xiao-yong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: According to two-dimensional diffusion model, the influence of various factors on two-dimensional diffusion of the chloride ion in conventional cross section is studied, including as diffusion coefficient, diffusion time, reinforcement location, boundary concentration of chloride ion and cross section dimension. It is shown: diffusion coefficient and diffusion time influence both the diffusion area and the extent of chloride ion; with increasing diffusion coefficient and diffusion time, the diffusion area and the concentration of chloride ion increase; the reinforcement location is the primary factor in determining its rusty time; the boundary concentration of chloride ion has no impact on its diffusion area, but obviously influences its diffusion extent.

Keywords: chloride ion; two-dimensional diffusion model; durability; concrete element; cross-section

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)